

(건고덕31p)

지반응답스펙트럼 추정기법 개발 및 해석모델DB 구축을 통한 교량의 지진재해 대응 피해예측 시스템 구축기술 개발 최종보고서

2019

2020.02.21.

주관연구기관 / 국토교통연구인프라운영원
공동연구기관 / 한국시설안전공단

지반응답스펙트럼 추정기법 개발 및 해석모델DB 구축을
통한 교량의 지진재해 대응 피해예측 시스템 구축기술 개발

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

< 공 란 >

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘지반응답스펙트럼 추정기법 개발 및 해석모델DB 구축을 통한 교량의 지진재해 대응 피해예측 시스템 구축기술 개발’(연구개발 기간 : 2017. 04. 01. ~ 2019. 12. 31.) 과제의 최종보고서 1부를 제출합니다.

2020. 02. 21.

주관연구기관명 : 국토교통연구인프라운영원 유해운 (인)

공동연구기관명 : 한국시설안전공단 박영수 (인)

주관연구기관책임자: 최형석

공동연구기관책임자: 박재봉

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	19CTAP -C130227-03	해당 단계 연구 기간	2017.04.01. ~2019.12.31	단계구분	3차년도 / 3차년도
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	-			
연구과제명	대과제명	-			
	세부과제명	지반응답스펙트럼 추정기법 개발 및 해석모델DB 구축을 통한 교량의 지진재해 대응 피해예측 시스템 구축기술 개발			
연구책임자	최형석	해당단계 참여연구원 수	총: 15명 내부: 15명 외부: 명	해당단계 연구비	정부:220,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:220,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 41명 내부: 41명 외부: 명	총 연구비	정부:600,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:600,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	국토교통연구인프라운영원(기술연구소) 한국시설안전공단(시설성능연구원)			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:해당없음			상대국 연구기관명:해당없음	
위탁연구	연구기관명:안동대학교			연구책임자:이상열	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반과제
-------------------------	------

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호	6	2	3	-	-	7	-	-	-	-	-

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

지진 가속도 관측 데이터를 이용한 지반응답스펙트럼의 추정기술 개발과 교량의 유한요소 해석모델 DB 구축 및 지진피해 추정 방안 개발을 통한 개별 교량의 지진재해 대응용 피해예측 시스템 구축기술. 기상청의 지진 가속도 정보 제공 시스템과 연계하여 임의 교량 위치의 지진력 산정 및 유한요소 해석모델을 이용한 교량의 동적해석이 자동으로 가능한 지진재해 피해추정 프로그램의 개발

보고서 면수

총 146 페이지

〈국문요약문〉

연구의 목적 및 내용	○ (최종연구목표) 지진 가속도 관측 데이터의 지반응답스펙트럼 추정기법 개발, 구조물 구조해석모델 DB 구축 및 지진피해 추정 방안 개발을 통한 시설물별 지진재해 대응용 피해예측 시스템 구축기술 개발 ○ (연구내용1) 지반응답스펙트럼 작성 시스템 개발 - 지진정보 수집 및 활용을 위한 기초기술 개발 - 시스템 운영을 위한 DB 구축 및 발생 지진력 추정 기술 개발 - 지반응답스펙트럼 작성 시스템 개발 ○ (연구내용2) 구조해석모델 DB구축 - 구조해석모델 DB 구축을 위한 기반구축 - 시설물 관리 DB 연동을 통한 구조해석모델 DB 고도화 - 교량 구조해석모델 DB 운영 매뉴얼 개발 ○ (연구내용3) 지진피해 추정 시스템 개발 - 교량 구조해석을 위한 기초 모듈 개발 - 지진피해 추정 모듈 개발 및 관련 자료 DB 구축 - 지진피해 추정 시스템 고도화				
연구개발성과	○ (최종성과물) 기상청에서 제공하는 지진 가속도 계측 정보와 연계하여 지진 안전성을 평가하고자 하는 시설물 위치의 지진력 산정, 응답스펙트럼해석법 또는 시간이력해석법을 이용한 교량의 동적해석이 가능한 지진재해 피해추정 프로그램				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ (기술수요처) 국내에서는 「지진·화산재해대책법」 제14조 및 동법 시행령에 의거 시설물 관리 주체별로 다양한 구조물을 관리하고 있는 상황으로 지진 발생 시 구조물의 긴급점검 실시 등 효율적인 유지관리에 본 연구결과 활용 ○ (상시 유지관리 활동 활용) 교량의 안전점검 및 정밀안전진단 시 본 연구개발에서 구축한 DB를 활용하여 상세 구조물 손상 원인 분석 등을 지원 가능하며, 각 교량 구조물의 내진성능 목표 설정, 설계기준 개발 및 관련 정책수립 등에도 활용 ○ (지진재해 대응 시설물 안전성 확보) 기존 국내 지진재해대응 체계에서 부재한 각 시설물별 안전성 분석 및 피해예측 방안을 마련함으로써 사회적으로 지진재난에 대응하는 능력을 강화하고 구조물 손상에 즉각적으로 대응이 가능하여 국민의 안전을 확보하고 기반시설의 운영 중단에 따른 경제적 손실을 최소화				
핵심어 (5개 이내)	지진	교량	응답스펙트럼	해석모델	피해예측

＜ SUMMARY ＞

Purpose & Contents	Development of structural damage prediction method under earthquake by using acceleration response spectral estimation of seismic ground motion data ,construction of structural analysis model DB and bridge damage estimation techniques				
	○ Development of ground acceleration response spectrum module – Basic technology for seismic information collection and utilization – Database construction for the system operation and seismic force estimation – Development of Ground Response Spectrum Estimation System ○ Construction of structural analysis model DB – Establishment of structural analysis system – Enhancement of structural analysis model DB – Development of operation manual for bridge analysis model DB ○ Development of earthquake damage estimation system – Basic module for bridge analysis – Establishment of earthquake damage estimation module and related DB – Advanced earthquake damage estimation system				
Results	Establishment of earthquake disaster damage estimation system capable of dynamic analysis of bridges using earthquake force estimation and response spectrum analysis method in relation to the National Earthquake Comprehensive Information System				
Expected Contribution	○ Under the Article 14 of the "Earthquake and Asbestos Countermeasures Act" and the Enforcement Decree of the same Act, various structures are managed by each facility management entity, and the results of this study are applied to efficient maintenance such as emergency inspection of structures in case of an earthquake ○ In the safety check and precision safety diagnosis of bridges, it is possible to support the analysis of the detailed damage cause of structure by using the DB constructed in this research, and also to establish the seismic performance goal of each bridge structure ○ By providing safety analysis and damage prediction methods for each facility that is not available in the existing domestic earthquake disaster response system, it is possible to strengthen the ability to cope with earthquake disasters socially and to cope with structure damage immediately, minimize economic losses due to shutdown				
Keywords	earthquake	bridge structure	response spectrum	analysis model	damage prediction

< CONTENTS >

1. Introduction	1
2. Current Status of Related Research	2
3. Research Contents	5
4. Research Results and Contributions	31
5. Future Plan	32
6. Technology Information Collected during Research	34
7. Security Level	34
8. Registered Research facility and equipments	34
9. Laboratory Safety	34
10. Representative Research Results	34
11. References	35

Appendix 1. MATLAB Progrma Code

Appendix 2. OpenSees Bridge Model DB

Appendix 3. Earthquake Station List

Appendix 4. Evaluation of Seismic Acceleration Estimation Method

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	2
3. 연구수행내용 및 성과	5
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	31
5. 연구개발성과의 활용 계획	32
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	34
7. 연구개발성과의 보안등급	34
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	34
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	34
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	34
11. 참고 문헌	35

부록 1. 교량용 동적해석개발 지진피해 추정 프로그램 코드

부록 2. 교량 유한요소 해석모델 데이터베이스

부록 3. 기상청 관측자료 데이터베이스

부록 4. 지진가속도 시간이력 추정방법 검증

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

- (최종연구목표) 지진 가속도 관측 데이터의 지반응답스펙트럼 추정기법 개발, 구조물 유한요소 해석 모델 DB 구축 및 지진피해 추정 방안 개발을 통한 시설물별 지진재해 대응용 피해예측 시스템 구축기술 개발
- (최종성과물) 국가지진종합정보시스템과 연계하여 해당 시설물 위치의 지진력 산정 및 응답스펙트럼 해석법을 이용한 교량의 동적해석이 가능한 지진재해 피해추정 시스템 구축기술

2. 연구개발의 필요성

- (개발 필요성) 지진발생 후 대응의 관점에서 행정안전부의 지진재해대응시스템과 각 시설물 관리주체에서 운영중인 지진대응시스템은 지진의 특성 중 최대 지진가속도 정보만을 활용함으로써 구조물의 손상 매커니즘에 미치는 실제 영향을 정확히 분석하기 어려우며, 특히 개별 시설물에 직접적인 피해 및 경제적 손실을 정량적으로 평가하기 어려운 실정으로 지진재해 발생 시 효율적인 시설물 유지관리 활동을 지원할 수 있는 방안 마련 필요

3. 연구개발 범위

- (핵심연구내용) 기상청에서 운영하는 신뢰성 있는 관측소에서 계측된 시추공 가속도 시간이력으로부터 피해예상 시설물 위치의 지반응답스펙트럼을 추정하고 이를 해당 구조물의 동적해석모델에 적용하여 지진피해를 예측한 후 관리자에게 통보하는 시스템으로 그림 1.1의 지반응답스펙트럼 작성 시스템과 지진피해 추정 시스템으로 구성되는 프로그램의 개발
- (지진가속도) 국내에서 활용 가능한 지진 가속도 관측 자료는 국가지진종합정보시스템(기상청) 및 국가지진통합관측망(지질자원연구원), 지진가속도 측정자료 통합관리시스템(행정안전부) 및 각 시설물별 계측자료가 있으나 실시간 API(Application Programming Interface)를 지원하는 국가지진종합정보시스템의 관측자료 활용



그림 1.1 연구개발 프로그램의 개요 (연구개발계획서)

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 지진재해대응시스템

- (지진재해대응시스템) 행정안전부는 정부차원에서 지진발생 후 인명 및 시설물 피해를 계략적으로 신속히 예측하기 위한 시스템을 운영하고 있으나 소관부서 실무자, 지자체 등 시설물 관리자가 담당하고 있는 개별 구조물에 대한 지진 안전성 확인을 지원하기 위한 방안 부재
- 지진재해대응시스템은 지진진도분포도를 생성하고 지진피해 손실을 추정하는 시스템으로 국립재난안전연구원에서 운영하고 있음. 지진발생 지역 인근의 건축물 및 인명피해를 추정을 주요한 기능으로 하나 재해발생 지역의 전반적인 피해정도만 예측가능(그림 2.1 및 그림 2.2 참조)
- 해당 기술의 이론적 기초는 미국, 일본 등 지진발생이 빈번한 국가에서 개발된 것(HAZUS)으로 발생한 지진의 규모 및 진도분포 추정을 바탕으로 건축물 등 시설물과, 인명 피해를 확률론적으로 예측하는 시스템임. 그러므로 추정된 피해는 실제 발생한 피해와 상이할 수 있으며, 시설물별 손상발생의 여부, 손상의 위치 등을 제공하기 어려움
- ※ 9.12지진 시 행정안전부 지진재해대응시스템에 의해 건축물 212동의 부분손실이 예측되었으나, 실제 5,664동의 주택파손과 23명의 인명피해(부상) 발생
- 전 세계적으로 지진재해대응시스템의 구축 및 피해추정 기술의 향상을 위한 연구가 활발하며, 기존 연구들은 지질(지반)조사를 바탕으로 한 지진진도분포의 추정 정확도 향상과 지진피해 손실추정 정확도 향상을 위한 다양한 시설물의 지진취약도 및 재해도 개발에 집중하고 있음

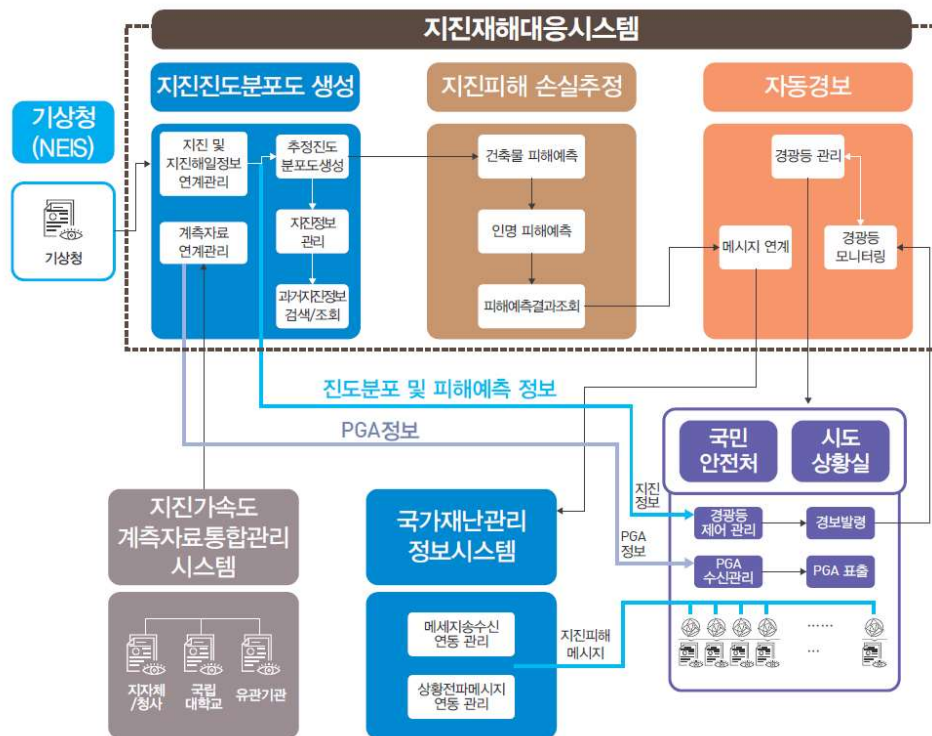


그림 2.1 지진재해대응시스템(행정안전부) 구성도(포항지진백서, 2019)

2. 국내 시설물별 지진재해 대응기술

- 사회적으로 중요도가 높은 시설물은 관련 법령에 의해서 지진가속도계를 설치하도록 하고 있으며, 유지관리시스템을 운영하는 등 지진재해에 대응할 수 있는 방안을 마련하고 있으나, 이외의 국내 대부분의 구조물은 지진발생 후 안전성을 확인할 수 있는 방안 부재
- 「지진·화산재해대책법」 및 「지진가속도계측기 설치 및 운영규정」에 의거 사장교, 현수교 등 주요 시설물에 대해서는 지진가속도계를 설치, 운영하도록 규정. 전국적으로 총 691개 지진가속도계가 운영되고 있으나 대부분이 단순 모니터링 용도로만 활용되고 있음

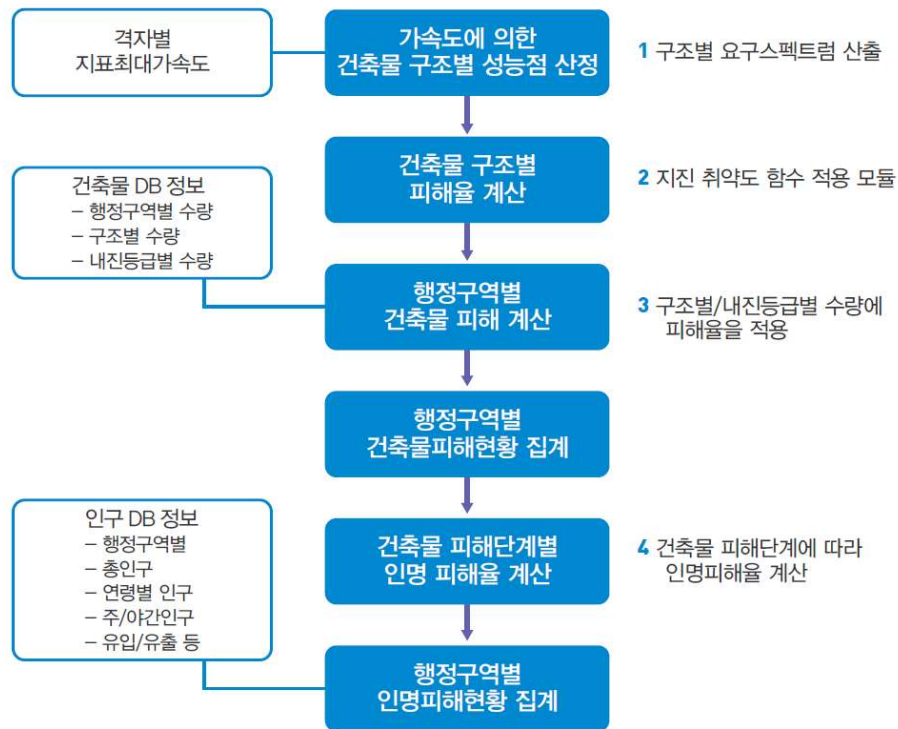


그림 2.2 지진재해대응시스템(행정안전부) 건축물 및 인명피해 추정흐름도

- 대형 교량과 고층 건축물 등 구조물의 경우에는 별도의 SHM(Structural Health Monitoring, 그림2.3 참조)과 같은 유지관리시스템을 갖고 있어 지진대응이 가능하나 지자체 등이 관리하는 중·소형 시설물, 특히 교량은 대응체계 부재

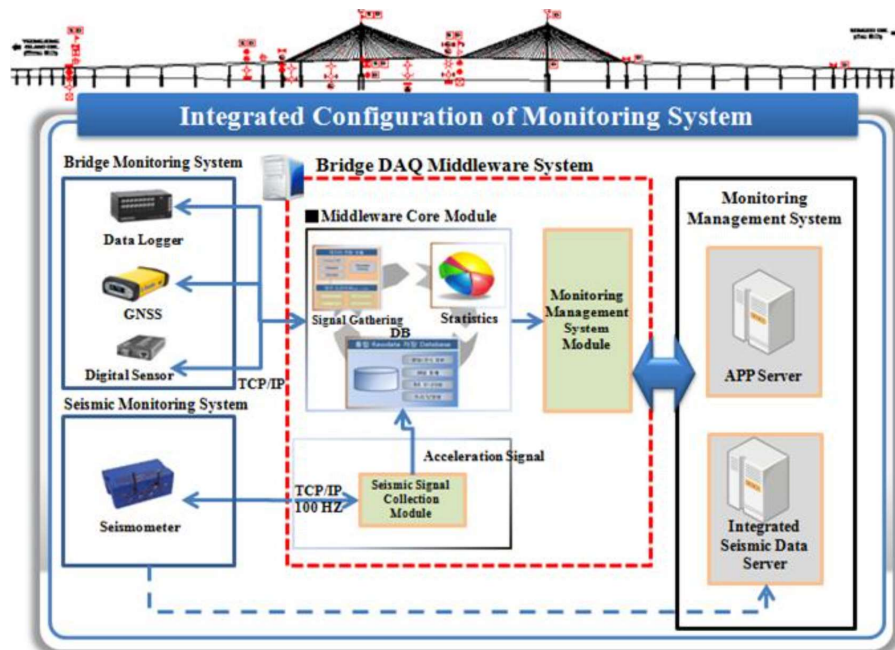


그림 2.3 교량 유지관리시스템 구축의 예(토목신문, 2015.03)

- (시설물관리현황) 시설물의 유지관리를 위한 정보는 다양하게 보유하고 있으나 정보 관리시스템이 체계적으로 구축되어 있지 않아 재해 발생 시 기존 자료가 효과적으로 활용되지 못함
- 지진발생 후 구조물의 안전성 평가를 위한 도면, 구조설계서와 같은 설계도서, 안전점검 및 정밀안전진단 등 기존 유지관리 활동 자료 등 시설물 정보는 지진재해 발생 시 효과적으로 활용되지 못함
 - ※ 한국시설안전공단에서 시설물통합정보관리시스템¹⁾을 운영하고 있으며, 설계도서 및 이들 정보를 실무자가 연계할 수 있는 방안 부재
- 재해 발생 후 인력에 의한 수동 검토만 가능하며, 다수의 시설물의 긴급점검 시 활용도 저하

1) FMS, Facility Management System

- (긴급현장점검현황) 지진은 광범위한 지역에 동시다발적으로 피해를 발생시키기 때문에 재해발생 후 점검이 요구되는 개별 시설물의 개소가 많아 구조물의 계속적 사용성 확인 등 안전성을 정확히 판단하기 위해서는 다수의 점검인력 및 장기간의 점검기간 요구
 - 포항지진(2017) 시 2차 피해 방지를 위해 1개월간 지진피해 시설물 위험도 평가지원반(1,880명)을 운영하여 3,330개소 건축물의 긴급위험도 평가(포항지진백서, 2019)
 - ※ 국토교통부는 포항지진 후 8,325명의 전문가, 관리자를 지진 발생지역 인근에 투입하여 약 7주 동안 총 37,058개소의 댐, 교량, 터널 등 시설물에 대한 긴급 점검 실시
 - 경주지진(2016) 이후 국토교통부는 1,174명을 투입하여 시설물 6,209개소에 대하여 특별점검을 실시
 - ※ 도로, 철도, 수자원, 항공, 건축 등 관리주체, 학회 등 민, 관 30여개 기관 참여
 - 강진 발생 이후뿐만 아니라 여진이 계속적으로 발생하는 경우에는 대규모의 인력, 장비 투입이 반복적으로 요구되는 기존 긴급 현장점검 기술은 신속한 안전성 판단이 불가능할 뿐만 아니라 시간적, 비용적으로 비효율적임
 - 지진발생 후 시설물 관리자 입장에서는 손상여부 등 현황 확인이 신속히 이루어져야 하며, 만약 손상이 발생한 경우에는 유지관리활동 의사결정을 위한 체계적 피해조사가 요구되나, 현재는 다수의 구조물에 대해서 제한된 인력을 이용한 조사가 수행되게 되므로 단순 육안조사 및 기존 계측기의 변화량 정도만 확인하는 수준으로 긴급점검 운영
 - ※ 교량과 같은 대형 시설물의 구조 안전성, 특히 지진피해를 소수 시설물 관리 인력이 육안조사만으로 평가하는 것은 정확성과 신뢰성 문제가 발생할 우려 높음



그림 2.4 포항지진(2017) 후 건축물 및 교량의 현장점검 현황

- (관리전문성) 지진에 의한 구조물의 피해조사를 위해서는 일반적으로 구조역학, 동역학과 같은 학문에 기초한 전문성이 요구되나 지자체 등 시설물 관리자는 관련 지식이 부족한 경우가 대부분
 - 시설물의 설계, 점검 및 정밀안전진단 등 유지관리 활동의 대부분을 외부 전문가, 전문기관에 의존함에 따라 재난발생 시 신속한 대응 불가
- (관측체계) 주요 시설물은 지진 가속도 계측을 수행하고 있으나 해당 데이터의 활용도가 낮으며, 실제 지진피해 분석과 연계되지 못하는 실정으로 계측결과 활용도 제고를 위한 방안 마련 필요
 - 「지진가속도계측기 설치 및 운영규정」에 의거 전국적으로 총 691개 지진가속도계가 운영되고 있으나 단순 모니터링 용도로만 활용되고 있으며, 활용도 제고를 위하여 다양한 연구과제들이 제안, 수행되고 있으나 기존 계측기의 안전성을 확보하기 위한 연구, 또는 가속도계가 설치된 구조물에 국한하여 활용할 수 있는 지진대응 기술개발이 대부분

국내외 기술 개발 현황분석에 따른 시사점

현재의 우리나라 지진재해대응시스템은 개별 시설물의 지진발생 후 안전성 평가에 활용될 수 없으며, 이에 따라 각 종 시설물 관리주체, 지자체 등 소관의 개별 중·소형 구조물에 대한 긴급대응의 필요성 결정 및 현장조사의 우선순위 선정을 지원할 수 있는 지진대응시스템 마련 필요

제3장. 연구수행내용 및 성과

1. 연구내용

- (핵심연구내용) 지진가속도 계측시스템 및 자동화된 유지관리시스템이 설치, 운영되지 않는 중·소형 교량에 대해서 지진발생 후 손상유무 및 손상이 발생한 부재(개소) 정보를 제공하여 관리자의 긴급대응 필요유무와 현장점검의 우선순위 선정을 지원할 수 있도록 하는 「동적해석기반 지진재해 피해추정 시스템 구축기술」 개발(그림 3.1 참조)
 - (핵심1) 지반응답스펙트럼 작성 시스템 개발 (지반입력 가속도 추정기술)
 - (핵심2) 지진대비 구조해석모델 DB 구축 (교량해석모델 DB 구축기술)
 - (핵심3) 지진피해 추정 시스템 개발 (동적해석 자동화 기술)
- (운영원리) 본 연구에서 개발한 교량의 지진피해 추정방법은 임의 교량 위치에서 발생하였을 것으로 예상되는 지진의 세기(지진파의 주파수 및 시간이력 특성)를 지반 정보를 활용하지 않으면서도 높은 정도의 정확성으로 추정하고, 추정된 지진특성(가속도 응답스펙트럼 및 시간이력)을 사전에 구축된 교량 유한요소 해석모델 DB와 연계하여 해석을 수행. 해석결과는 해당 교량의 각 부재 손상한계와 비교함으로써 지진피해 발생 유무와 및 손상 위치 정보 제공
 - ※ 각 모듈은 MATLAB으로 작성되었으며, 유한요소해석은 OpenSEES 활용

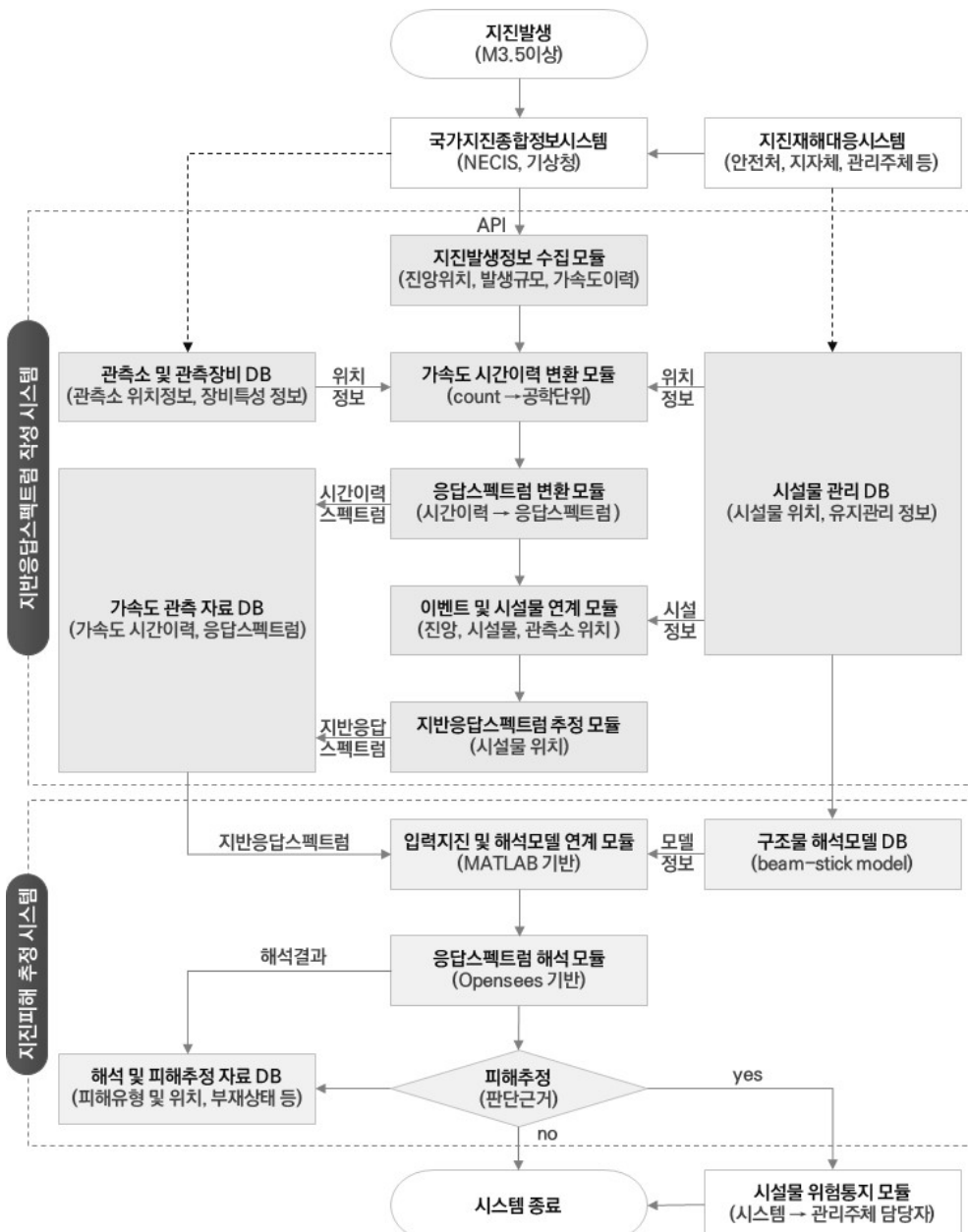


그림 3.1 교량 지진재해 피해추정 시스템 개요도 (연구개발계획서)

1.1 지반응답스펙트럼 작성 시스템 개발 (핵심1)

- (개요) 임의 위치에서 교량의 동적해석 시 입력지진에 대한 정보를 생성하는 방안을 개발하는 것으로 일반적인 구조물의 동적해석에서 널리 활용되는 지반가속도 응답스펙트럼(Response Spectrum) 및 시간이력(Time History)을 생성하는 시스템 개발이 주요한 연구내용
 - 지진가속도계가 설치되지 않은 국내 중·소형 교량이 피해 추정 주요 대상. 진앙과 교량의 상대적 거리 등에 따라 실제 교량에 전달된 지진력의 세기 및 주파수 특성이 다르므로 이를 고려하여 임의 위치에서 지진력을 추정할 수 있는 기술을 개발
- (단위성과 1-1) 지진가속도 응답스펙트럼 변환모듈 개발
 - (지진가속도 데이터 수집) 개발된 기술은 지진가속도 관측정보를 기초로 하므로 기상청에서 운영하는 국가지진종합정보시스템(NECIS)의 API(Application Programming Interface)를 통하여 가속도 계측자료를 확보, 연계하는 방안 개발 및 입력모듈 개발

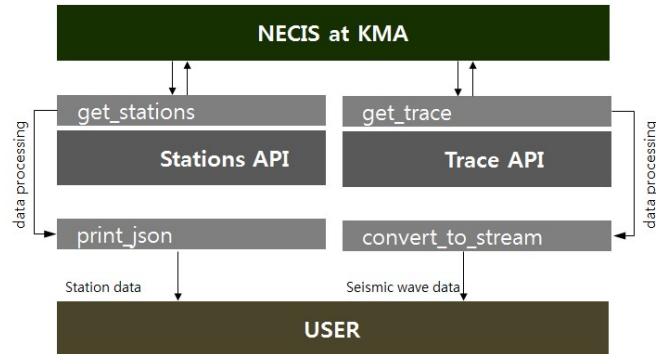


그림 3.2 NECIS Trace API 구조

- 관측 장비의 규격, 사양 등 설치현황 자료 확보를 위하여 공동기관은 1차년도에 해당 정보를 기상청(기상청 지진화산센터 지진정보기술팀)에 관련 자료를 요청하였으며, 265개소의 관측소 지진가속도계 현황자료를 확보하였음. 또한, 경주지진 및 포항지진 이후 지진관측소 설치가 대폭 확대됨에 따라 3차년도에도 DB 고도화를 위하여 추가적으로 기상청에 자료를 요청, 데이터를 확충하였으며, 프로그램 상 자동 적용이 가능하도록 DB로 구성
- (가속도 단위 변환) 기상청에서 제공하는 지진가속도 관측 데이터는 진앙의 위치 및 규모 등 분석을 위하여 COUNT 단위로 저장되고 있으므로 이를 구조해석에서 활용할 수 있는 공학단위로 환산하기 위한 모듈을 작성. 적용된 변환계수(Sensitivity)는 기존 한국지진공학회에서 발표된 논문 및 한국지질자원연구원 등에서 제시한 지진 가속도 데이터와 비교하여 검증을 완료함

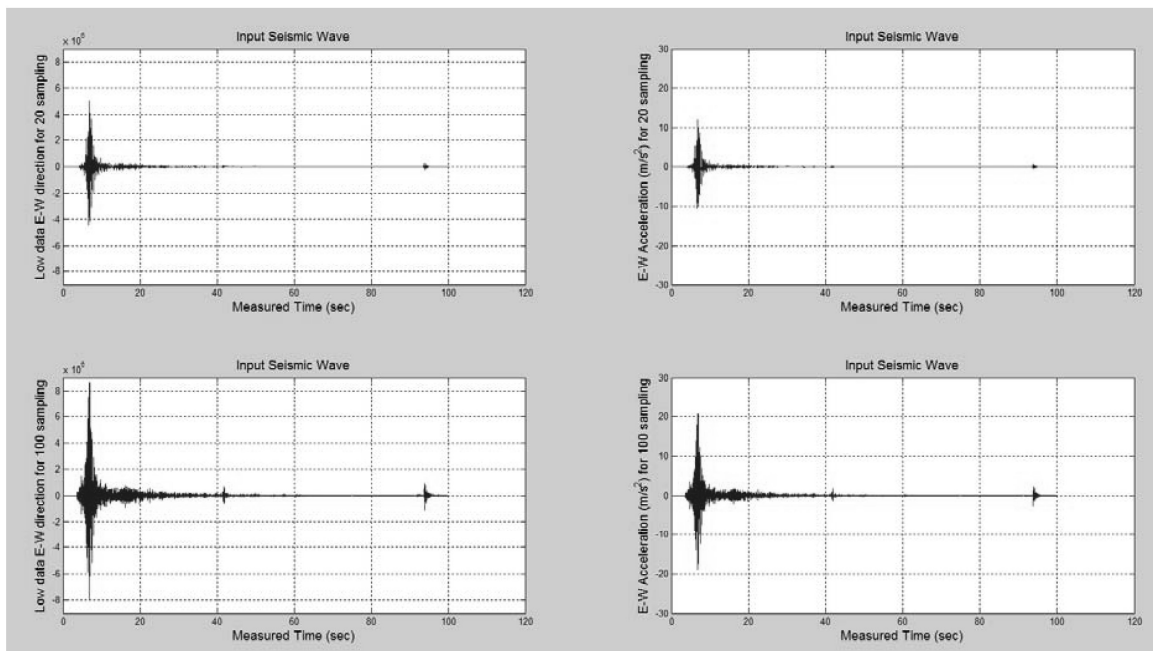


그림 3.3 지진가속도 시간이력 변환모듈을 통한 경주지진 지진파 변환(USN)

○ (단위성과 1-2) 지반응답스펙트럼 산정모듈 개발

- (관측소 선정 알고리즘) 임의 교량 위치에서의 지진력을 추정하기 위하여 해당 교량 인근의 3개 또는 3개 이상의 관측소에서 계측된 가속도 시간이력을 활용하는 방법을 적용. 그림 3.4에서와 같이 기상청 관측소DB 내의 각 관측소 위치정보로부터 해석 수행이 요구되는 교량 인근의 최적 관측소를 자동으로 선정하는 알고리즘을 개발함. 교량 인근 관측소의 경계가 무한한 경우(교량이 내륙에 위치하는 경우) 및 유한한 경우(교량이 해안에 위치하는 경우)로 나누어, 육상뿐만 아니라 관측소가 위치하지 않는 해상에서 발생하는 지진에 대해서도 관측소 선정을 자동화할 수 있도록 구성
- (관측자료 선별) 경주지진 및 포항지진 시 기상청에서 제공하는 지진 가속도 관측자료 중 일부는 배경 잡음 수준이 높거나 응답이 비정상적으로 높은 관측소가 존재하는 것이 확인되었으며, 이에 따라 개발 프로그램의 신뢰도를 높이기 위하여 각 관측소 인근의 가속도와 비교하여 비정상적인 신호가 수신되면, 해당 관측소 데이터를 제외한 후 활용 관측소를 재선정하는 알고리즘 개발 및 적용

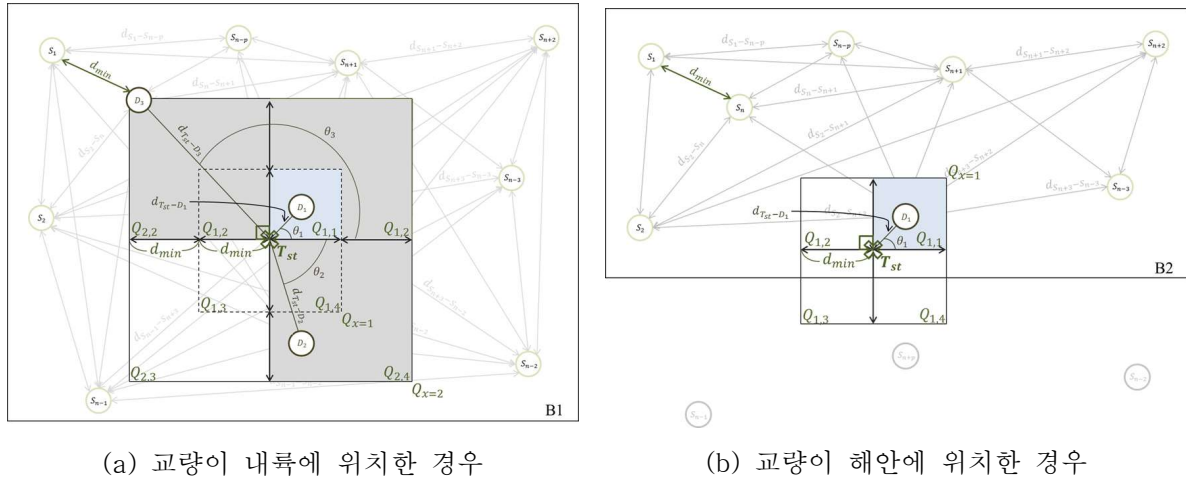


그림 3.4 관측소 선정 알고리즘

- (응답스펙트럼 생성) 선정된 각 관측소에서 계측된 가속도 시간이력을 응답스펙트럼(Shock Response Spectrum)으로 변환하는 모듈을 개발한 것으로 응답스펙트럼 정의에 따라 단자유도계 시스템의 최대 가속도 응답을 주파수 대역에서 산정할 수 있도록 개발 (그림 3.5 참조)

※ (감쇠비) 응답스펙트럼 작성에 적용한 감쇠비는 기존 국내 교량의 하부구조가 철근콘크리트로 시공되는 점을 고려하여 5% (Critical)를 일괄 적용

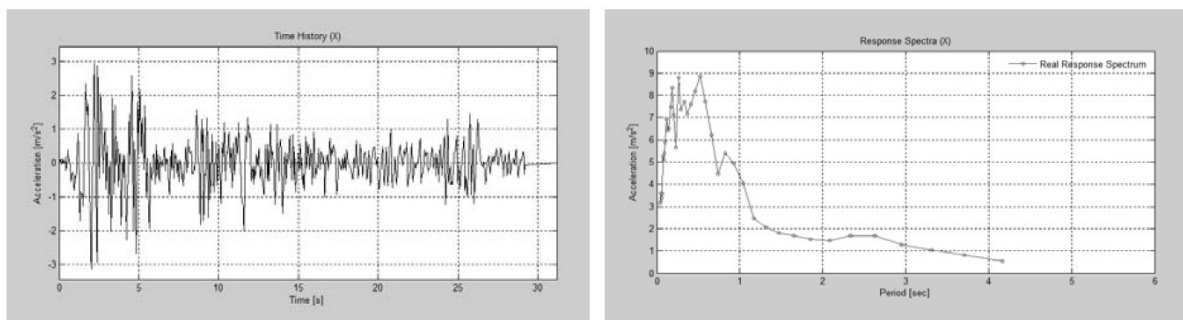
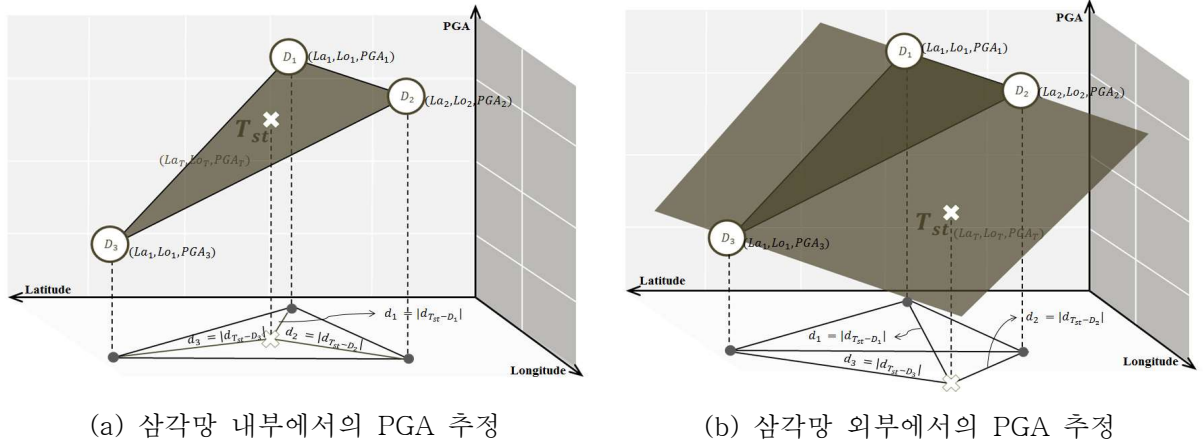


그림 3.5 El Centro EW(1940) 가속도 시간이력 및 개발된 모듈에 의해 변환된 응답스펙트럼

- (지진력 추정 원리) 현재, 기상청에서 운영하고 있는 지진관측소의 설치 조밀도는 약 20km 수준으로 지진 발생 시 각 관측소 간에 지진 주파수 성분의 분포가 인접한 관측소들에서는 큰 차이를 갖지 않을 것으로 가정함. 또한 각 주파수에서의 응답의 크기 변화는 진앙으로부터 거리에 선형적으로 비례할 것으로 가정함. 상기 두 가지 가정으로부터 종래의 기술과 달리 지반정보를 이용하지 않고서도 신속하게 임의 구조물 위치에서의 지진의 세기를 추정할 수 있는 방안을 제시

- (교량위치 응답스펙트럼 작성) 임의 위치에서의 응답스펙트럼은 해당 위치 인근에서 선정된 각 지진관측소의 위치 정보와 계측한 최대지반가속도(PGA, Peak Ground Acceleration)를 이용하여, 그림 3.6에

서와 같이 대상 교량 위치에서의 PGA 수준을 선형적으로 추정하고, 해당 비율을 그림 3.7에 나타난 것과 같이 인접한 관측소 지진가속도 응답스펙트럼 각 주파수의 가중치로 적용한 후 최종적으로 교량 위치에서의 응답스펙트럼을 생성할 수 있도록 응답스펙트럼 추정 모듈을 개발함



(a) 삼각망 내부에서의 PGA 추정

(b) 삼각망 외부에서의 PGA 추정

그림 3.6 임의 구조물 위치에서의 PGA 수준 추정의 원리

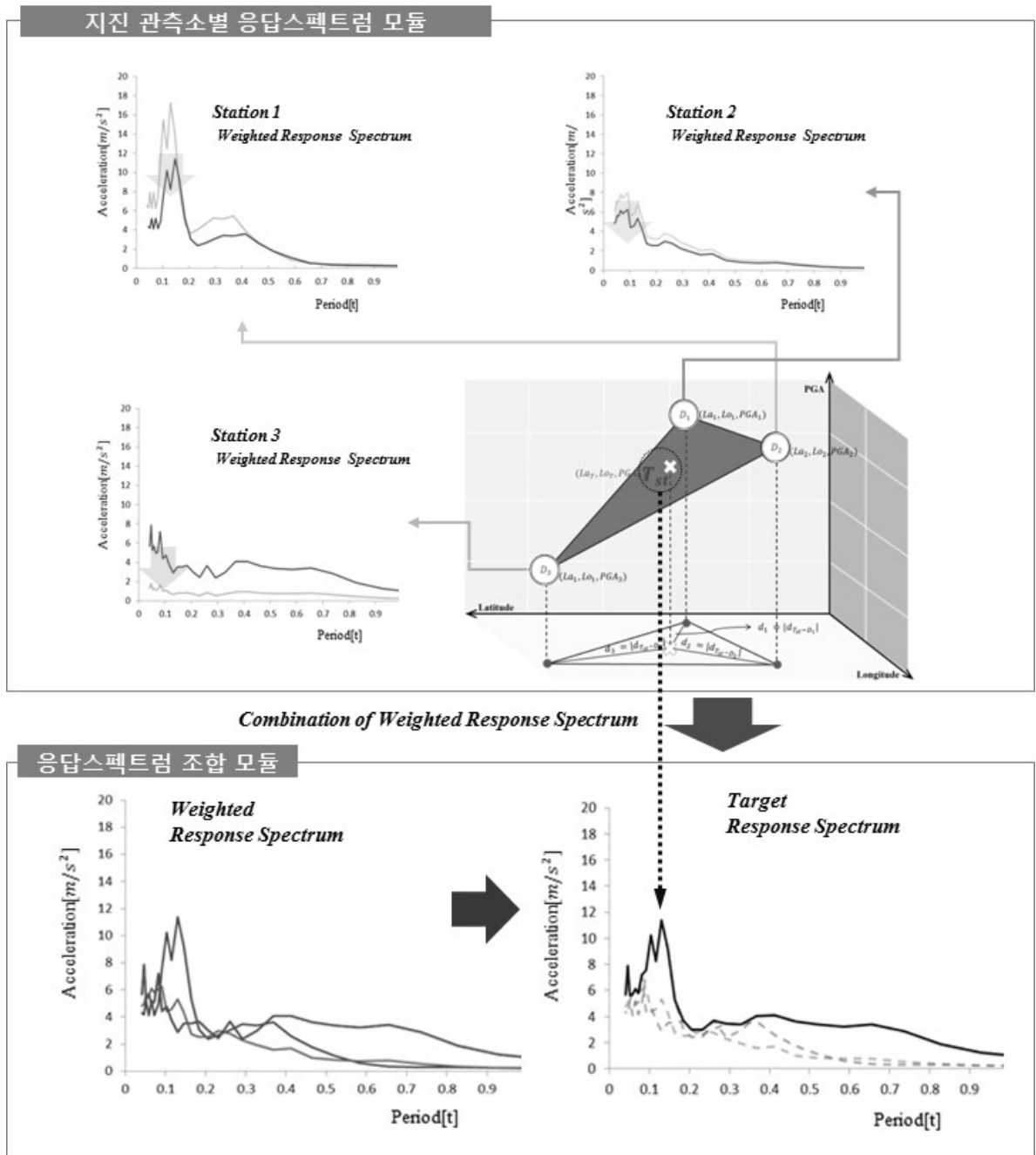
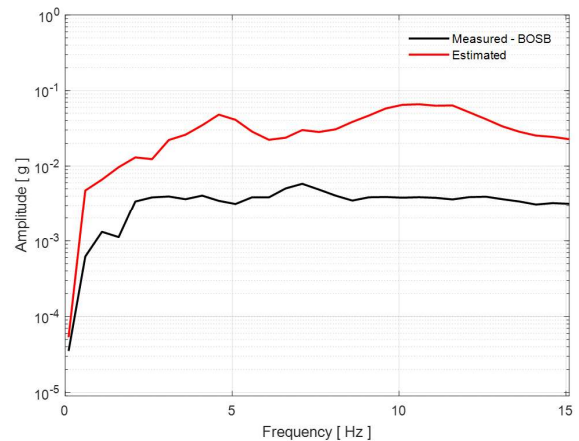
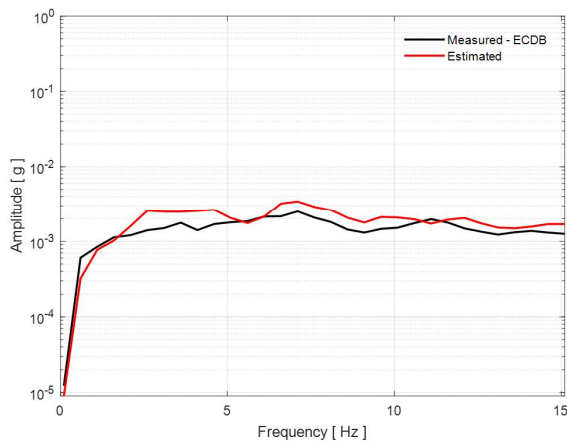
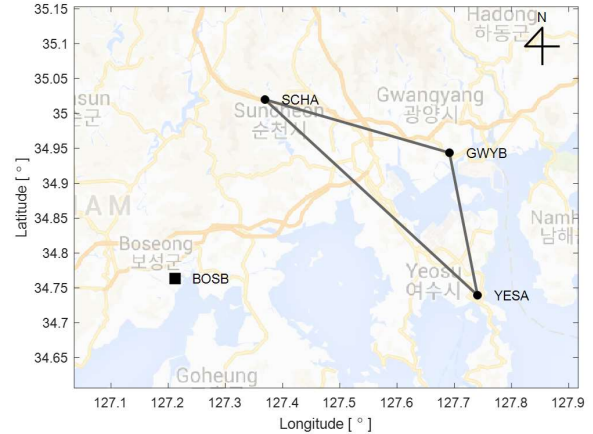
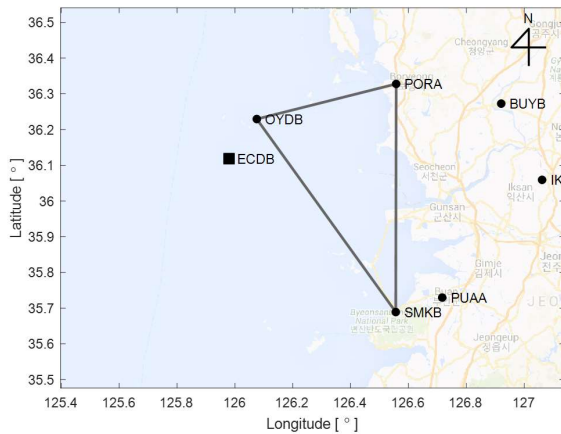


그림 3.7 임의 구조물 위치에서의 응답스펙트럼 산정 알고리즘

- 제안한 응답스펙트럼 추정기법의 적용성을 확인하기 위하여 해석하고자 하는 교량 위치를 임의 관측소로 가정하여 추정된 결과를 비교하는 방법으로 검증을 수행함. 경주지진(2016), 포항지진(2017) 및 상주지진(2019)을 대상으로 비교하였으며, 포항지진의 경우 표 3.1에서와 같은 총 65개의 관측소의 산정 결과에서 일반적인 교량의 설계 유효가속도(0.154g) 대비 응답스펙트럼의 주파수 대역 상대 오차비가 최대 15.9% 이내로 비교적 잘 일치하는 것으로 나타나 제안 방법은 유효한 것으로 판단함

표 3.1 제안 응답스펙트럼 추정기법 결과비교 (포항지진)

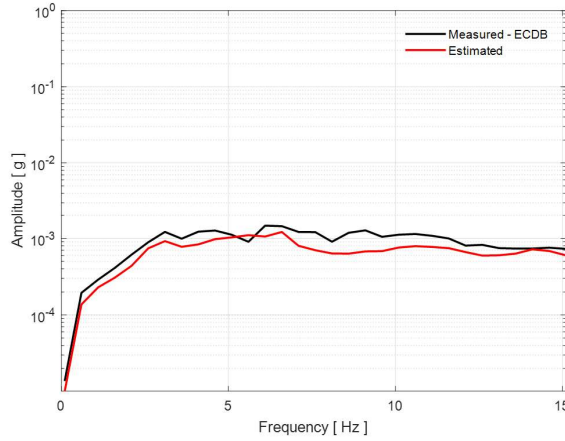
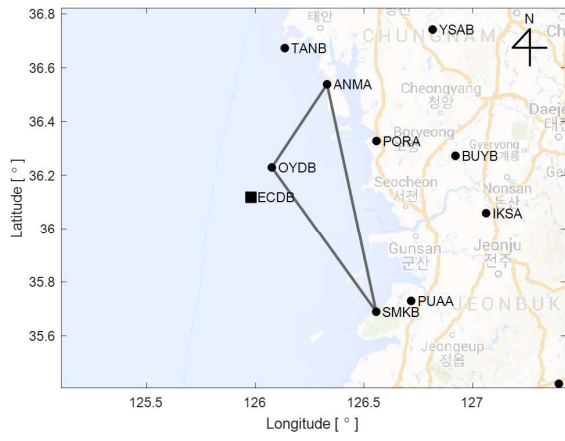
순위	관측소	경도	위도	진앙거리(km)	실측 PGA(g)	예측 PGA(g)	평균오차(g)	상대분산(g)	상대 오차비
1	OYDB	126.076	36.229	299	0.0004	0.0004	1.46E-04	1.90E-08	0.1%
2	TANB	126.135	36.673	300	0.0003	0.0004	2.36E-04	4.43E-08	0.2%
3	ECDB	125.980	36.118	308	0.0004	0.0003	2.59E-04	2.47E-08	0.2%
4	ANMA	126.330	36.539	280	0.0006	0.0005	3.96E-04	7.47E-08	0.3%
5	GGDB	125.126	34.052	447	0.0002	0.0014	4.15E-04	1.15E-07	0.3%
6	DACB	124.707	37.832	463	0.0003	0.0000	4.54E-04	5.05E-08	0.3%
7	PORA	126.558	36.328	256	0.0007	0.0009	5.32E-04	2.18E-07	0.3%
8	YAPA	127.494	37.489	227	0.0012	0.0017	6.63E-04	5.60E-07	0.4%
9	SHHB	126.704	37.349	277	0.0006	0.0011	8.50E-04	3.57E-07	0.6%
10	BURB	127.749	37.232	191	0.0023	0.0024	1.00E-03	1.00E-06	0.6%
56	CEJA	127.441	36.640	184	0.0165	0.0082	1.50E-02	6.31E-05	9.8%
57	BOSB	127.212	34.764	246	0.0012	0.0080	1.54E-02	5.91E-05	10.0%
58	YOCB	128.951	35.977	40	0.0111	0.0042	1.58E-02	1.22E-04	10.3%
59	HCNA	128.170	35.565	124	0.0204	0.0090	1.62E-02	1.56E-04	10.5%
60	JNPA	127.562	36.796	180	0.0111	0.0088	1.64E-02	1.07E-04	10.6%
61	SCHA	127.369	35.020	218	0.0108	0.0021	1.86E-02	9.02E-05	12.1%
62	OKCB	127.796	36.348	145	0.0028	0.0109	1.93E-02	1.05E-04	12.5%
63	JEJB	129.441	35.638	54	0.0039	0.0160	2.09E-02	1.79E-04	13.6%
64	JINA	128.040	35.164	160	0.0116	0.0000	2.39E-02	7.85E-05	15.5%
65	EURB	128.288	35.323	131	0.0028	0.0184	2.44E-02	1.45E-04	15.9%



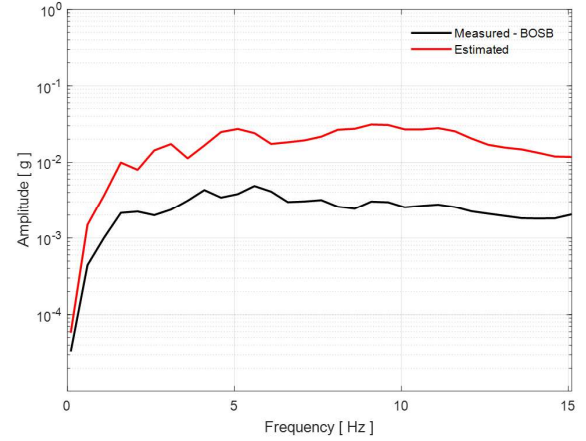
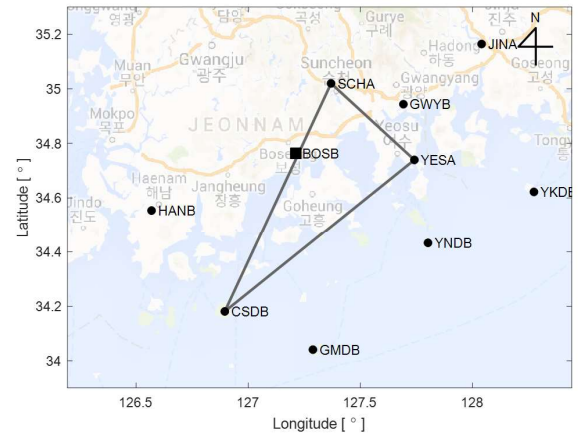
(a) ECDB 관측소 위치 추정

(b) BOSB 관측소 위치 추정

그림 3.8 제안 응답스펙트럼 추정기법 결과비교(경주지진)

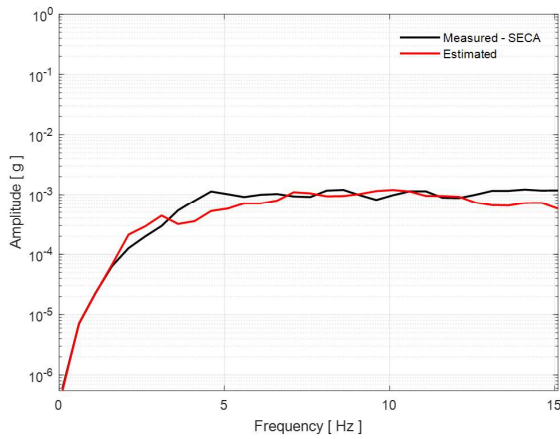
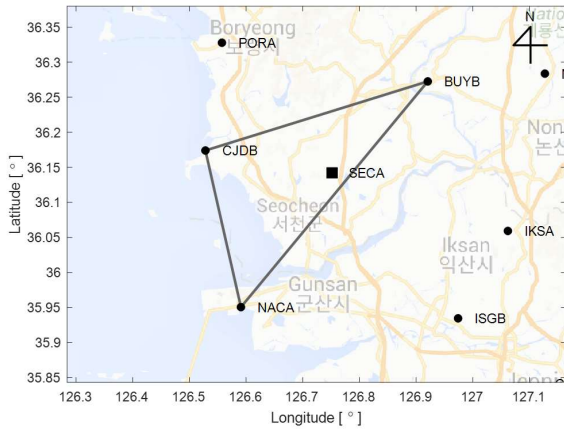


(a) ECDB 관측소 위치 추정

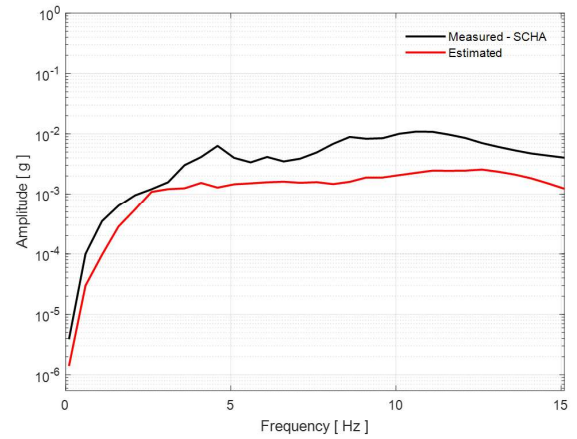
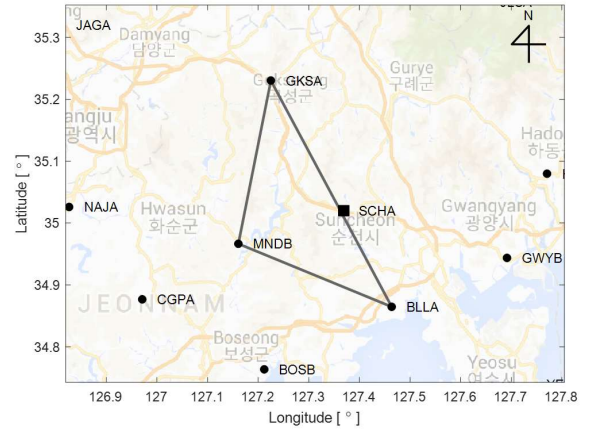


(b) BOSB 관측소 위치 추정

그림 3.9 제안 응답스펙트럼 추정기법 결과비교(포항지진)



(a) SECA 관측소 위치 추정



(b) SCHA 관측소 위치 추정

그림 3.10 제안 응답스펙트럼 추정기법 결과비교(상주지진)

○ (단위성과 1-3) 지진피해 추정시스템 개발

- (피해추정개요) 구조해석 결과로부터 교량의 피해발생 유무 및 피해발생 위치 정보를 획득하기 위하여 그림 3.11과 같이 지진피해에 대해 자동 추정이 가능한 모듈을 구성. 해석모델 DB 내에 구축 단계에서 설정한 각 교량별 주요 부재에 대한 손상판정기준(Seismic capacity)과 해석결과 계산된 발생 하중 및 변위 등 성능요건(Seismic Demand)을 비교하여 손상발생 여부를 검토하고 손상부재 위치 정보와 함께 출력하도록 프로그램을 구성함

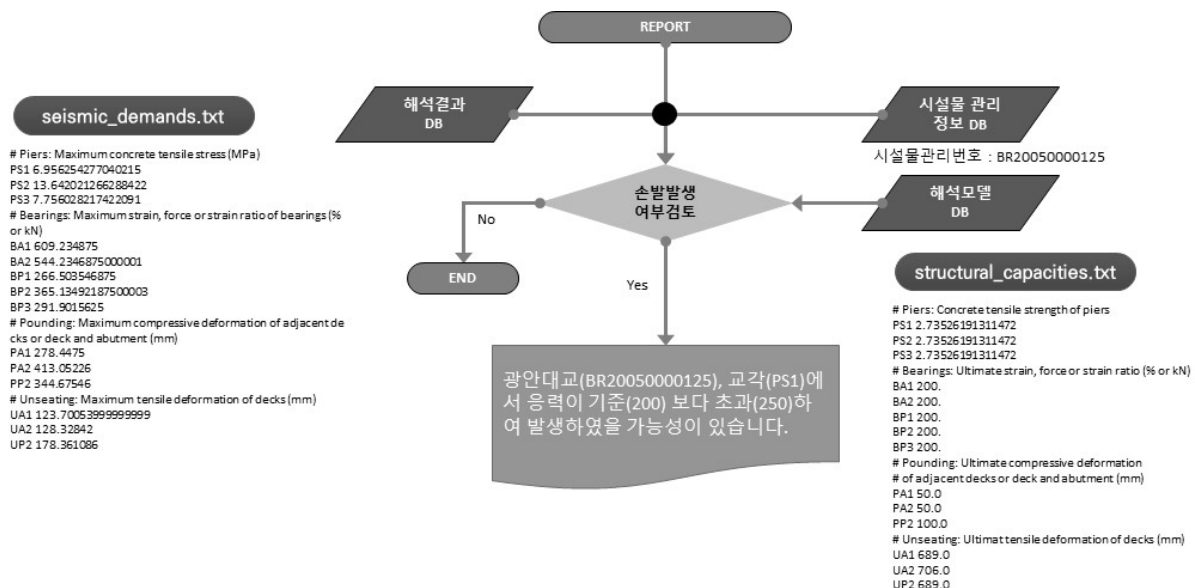


그림 3.11 지진피해 추정부 모듈 프로그램 순서도

- (판정기준 수립) 교량의 손상 판정기준은 「도로교설계기준」의 내진해석부분, 「기존 시설물(교량) 내진성능 평가요령」 및 「교량 받침부 설계지침」, 「Seismic Design Criteria(CALTRANS)」를 참조하여 선정하였음. 국외 지진피해 사례 및 포항지진에서 실제 발생한 피해를 고려하여 손상평가 대상을 (1)교각, (2)받침장치, (3)낙교 및 (4)상부구조 총돌로 설정하였으며, 검토 방안은 아래와 같이 설정

(1) 교각 : 기둥요소 하부에서 발생하는 인장응력을 추정하고 콘크리트의 인장강도와 비교하여 이를 초과하는 경우 균열이 발생하는 것으로 가정하고 판정함. 기존 교량의 내진성능 평가요령 등에 의하면 교각 및 교대의 손상은 표면의 균열 발생시점이 아닌 균열발생 후 인장축 최연단 축방향 철근이 처음 항복하는 초기항복상태로 정의되나, 지진발생이 빈번하지 않는 국내 실정과 국민의 정서를 고려하여 개발하는 교량의 지진 안전성 평가 방법의 개발 목표는 해당 교량의 관리기준 이상의 균열을 확인할 수 있도록 설정함

(2) 받침장치

- ① 포트받침 : 포트받침은 교각 및 상부구조에 대한 연결요소(고정단의 경우 강성이 매우 큰 받침 스프링요소)로 모델링하고 이에 발생하는 수평력을 추정하도록 하였으며, 설계도서 상 받침장치의 성능한계와 비교하여 이를 초과하는 경우 손상이 발생한 것으로 추정하도록 설정
- ② 탄성받침 : 선형적으로 작동하는 받침 요소(spring element)의 수평변위를 추정한 후 받침장치의 고무 높이에 기준한 전단변형률을 산정함. 산정된 결과는 설치되어 있는 탄성받침의 최대 전단변형률을 초과하는 경우 영구적 손상이 발생한 것으로 판단
- ③ 스펀리컬받침 : 받침장치 곡면의 슬라이딩(sliding) 면을 가진 받침장치(원동형 및 스펀리컬 받침장치류)는 포트받침과 동일하게 연결요소의 수평력을 산정하고 받침장치 저항력과 비교하여 이를 초과하는 경우 손상으로 판정토록 함
- ④ 적층고무받침 : 적층고무를 사용하는 면진받침은 지진 시 최대 전단변형률 한계를 200%로 가정하고 해석모델 연결 받침요소에서 발생한 전단변형률(=수평변위/고무높이)을 조사하여 비교, 검토. 기존 연구결과에 의하면 면진받침장치는 최대 300%까지의 전단변형률에도 문제가 발생하지 않는다는 보고도 있으나 해석모델의 불확실성 등을 고려하여 200%로 설정

⑤ 받침장치 고정부 : 받침장치에 콘크리트 앵커가 설치된 경우에는 이를 검토하도록 하고 있으나, 대부분의 앵커는 기존 설계에서 받침장치의 저항력 보다 충분한 안전성을 확보하도록 하는 것이 일반적이므로 본 연구에서 개발한 프로그램에서는 별도의 검토를 생략함. 또한, 포항지진 시 다수 교량에서 받침장치 몰탈의 손상(그림 3.15 참조)으로 인한 피해가 확인 되었으나 이론적으로 이러한 손상은 발생 원인이 알려지지 않았으며, 현재로서는 본 연구에서 개발된 해석방법으로는 구현하는 것이 어렵기 때문에 고려하지 않음

(3) 낙교 : 도로교설계기준에서 제시하고 있는 내진설계 항목 중 하나이며, 교량 해석결과에서 상부구조와 하부구조 간의 발생 상대변위를 추정하고 받침지지길이(받침중앙부에서 교대 및 교각 연단까지의 거리)와 비교하여 상대변위가 더 큰 경우 낙교가 발생한 것으로 판단.

(4) 충돌 : 인접한 상부구조 간 또는 교대부 및 상부구조 간의 상대변위를 조사하여 설치된 신축이음의 여유간격 이상인 경우 충돌이 발생되었을 것으로 추정. 기존 시설물 내진성능 평가요령 등에서는 제시되어 있지 않으나 도로교설계기준에 의한 설계검토 항목이며, 포항지진 시 피해사례가 보고됨에 따라 적용. 충돌현상은 상부구조 및 하부구조의 동특성, 인접구조물 간의 상관관계에 의해 발생하므로 시간이력해석법에 의해서 추정

- (판정결과 출력) 교량 해석이 완료되면 상기 수립된 판정기준에 따라 그림 3.12에서와 같이 피해발생 교량과 발생 개소를 표시하여 관리자가 확인할 수 있도록 프로그램을 개발. 그림 3.12의 지진피해 추정결과 출력 화면 예에 의하면 시설물번호(교량 관리번호)가 출력되며, 손상이 발생한 경우 결과 행에 'NG'로 표시되어 구분이 가능하고 PS(교각), BA(교대 받침), BP(교각위치 받침) 등으로 손상의 원인 및 위치 정보도 제공 가능

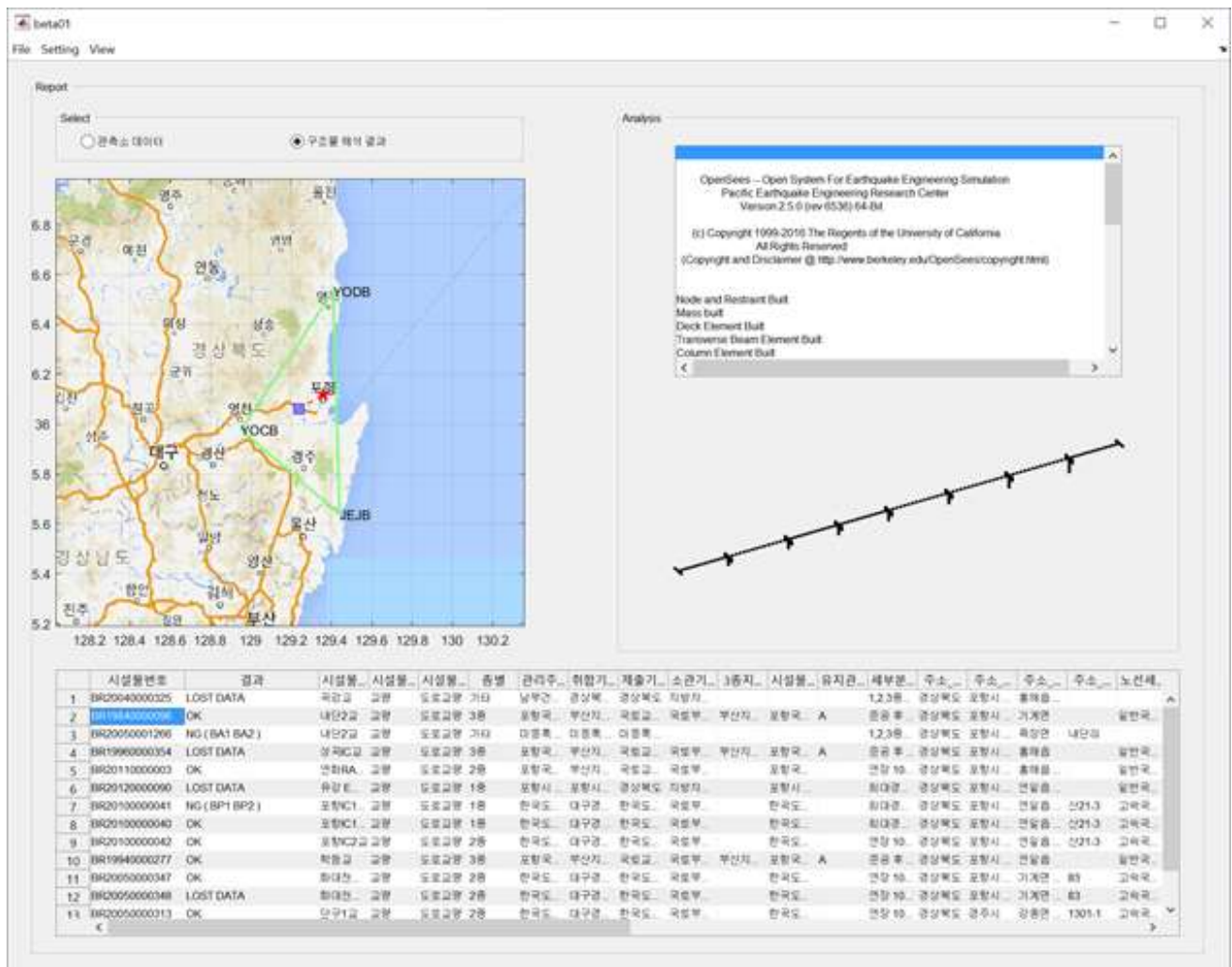


그림 3.12 개발 프로그램에 의한 지진피해 추정결과 출력 화면 예시

1.2 지진대비 구조해석모델 DB 구축(핵심2)

- (개요) 본 연구에서 제안한 방법론을 시험적으로 운영(TEST-BED)하기 위한 교량해석모델DB를 구축하고, 국내 교량 설계 엔지니어들에게 익숙하지 않은 OpenSEES를 이용하여 지속적으로 해석모델DB 업데이트를 수행할 수 있도록 해석모델 작성 매뉴얼 및 시각화 도구를 개발함
- (단위성과 2-1) 구조해석모델 관리도구 개발
 - (DB서버구축) 전체 연구개발 기간 동안 활용할 수 있도록 워크스테이션급 DB서버를 1차 연도 중 구축 완료함. 성능 및 사양은 구축 DB의 용량과 교량 해석모델에 대한 처리 속도를 고려하여 결정하였으며, 제안서 상 연구결과물이 Stand alone 형식임을 고려하고 현장적용 시 유연성과 개발 기간 중 시연이 가능하도록 구축을 추진함. 또한, 개발 프로그램인 MATLAB을 함께 설치 완료함

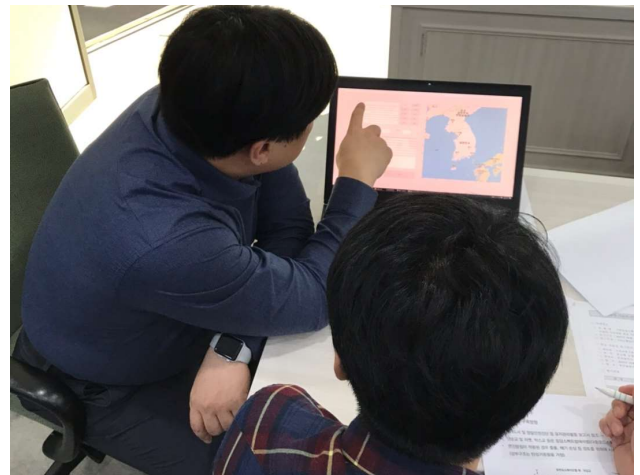


그림 3.13 DB서버, 워크스테이션 구축 현황

그림 3.14 구축 서버를 활용한 현장 시연(부산시)

- (해석모델 시각화) 해석에 적용된 OpenSEES는 미국 U.C. Berkeley에서 개발된 오픈소스 프로그램이나, 해석모델을 확인하기 위한 UI가 지원되지 않는 단점이 있음. 그러므로 다양한 요소로 구성된 교량 해석모델이 정확하게 구축되었는지 확인하는데 어려움이 있으며 또한, 고유치 해석결과에 따른 모드형상을 확인하는데도 어려움이 있음. 이에 본 연구에서는 해석모델의 3차원 형상(그림 3.15 참조) 및 모드형상을 확인(그림 3.16 참조) 할 수 있는 시각화 도구를 MATLAB을 이용하여 구현함

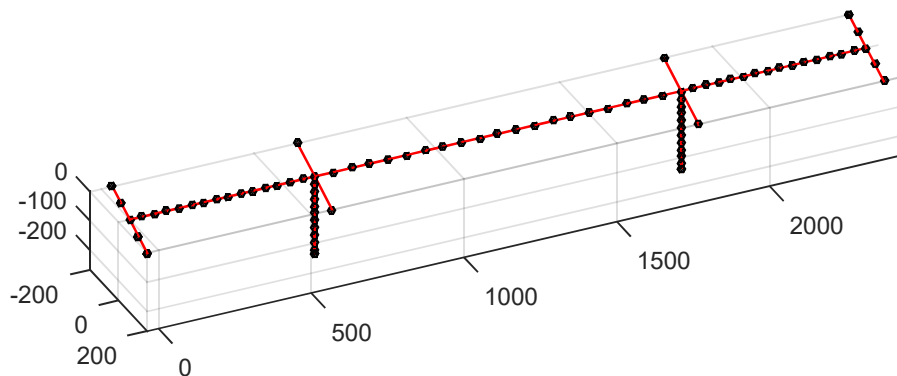


그림 3.15 교량 해석모델 3차원 형상 시각화 예

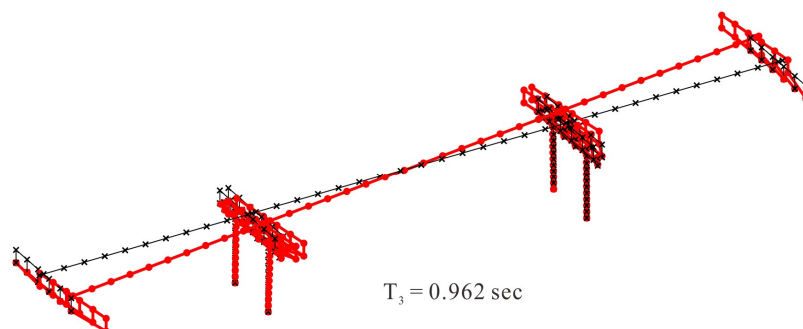


그림 3.16 개발 프로그램에 의한 모드형상 시각화 예

○ (단위성과 2-2) 해석모델DB 고도화

- (해석모델 구축대상) 과제 제안 단계에서 경주지진(2016)이 발생함에 따라 교량 유한요소 해석모델 구축 지역을 경주 인근으로 한정하였으나, 연구기간 중 포항지진(2017)이 발생하고 다수 교량에서 실제적인 지진피해가 발생함에 따라 해석모델 구축 대상지역을 포항 및 동남권역으로 확대함

※ 교량해석모델DB는 한국시설안전공단에서 관리하고 있는 시설물정보관리종합시스템(FMS)에 등재된 설계 및 유지관리 자료를 활용함

- 포항지진(2017)에 의해 피해가 발생한 교량의 관리기관인 한국도로공사 영천지사, 포항국토관리청, 포항시청을 방문하여 면담조사를 수행하였으며, 교량 지진피해 현황을 조사(표 3.2, 그림 3.17 참조)하고 주요한 손상 유형으로 (1)받침장치 몰탈 파손과 (2)받침장치 자체가 파손된 경우, 면진장치 설치에 따른 (3)받침장치 썬기 손상과 (4)신축이음부 파손, 그리고 상부구조 변위 발생에 의한 충돌발생으로 인한 (5)PC Beam의 단부 콘크리트가 박락 등이 조사되어 개발 프로그램의 손상판정 항목(단위성과 1-3 참조)으로 반영
- 피해교량에 대한 도면 및 구조계산서 등 해석모델 구축 기초자료를 확보하였으며, 관리기관 담당자와 시설물 자료의 연구용도 활용에 대한 협의를 완료하여 논문 등 작성에 문제가 없도록 하였음

표 3.2 포항지진 피해발생 교량 현황

구분	교량명	위치	구조형식	종별	등급	준공일	손상
1	포항C1교	연일읍 학전리	STB	1종	B	2009	받침장치 몰탈 파손
2	포항C2교	연일읍 학전리	STB	1종	B	2009	받침장치 몰탈 파손
3	학전3교	흥해읍 대련리	STB	1종	A	2009	받침장치 몰탈 파손
4	화대천교	기계면 현내리	PSCI	2종	B	2004	받침장치 썬기 손상
5	서포항C2교	기계면 현내리	STB	2종	B	2004	받침장치 몰탈 파손
6	곡강교	흥해읍 곡강면	PSCI	2종	B	1992	받침장치 몰탈 파손 받침장치 파손 PC빔 단부콘크리트 박락
7	연화RAMP-F교	흥해읍 대련리	STB	2종	B	2010	받침장치 파손
8	학림교	연일읍 학전리	RCS	기타	B	1994	받침장치 썬기 손상
9	성곡IC교	흥해읍 성곡리	STB	기타	B	1996	받침장치 파손 받침장치 몰탈 파손
10	이인IC교	흥해읍 이인리	PSCI	기타	B	2010	받침장치 썬기 손상
11	유강E램프교	연일읍 유강리	STB	1종	B	2006	신축이음 파손
12	남송IC교	흥해읍 남송리	STB	1종	B	2009	신축이음 파손 받침장치 파손



(1) 받침장치 몰탈 파손 1



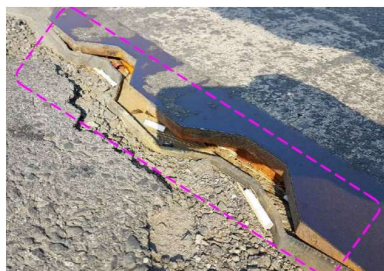
(2) 받침장치 몰탈 파손 2



(3) 받침장치 파손 (하중초과)



(4) 받침장치 영구변위 발생 및 썬기 파손



(5) 신축이음부 파손



(6) PC빔 단부 콘크리트 박락

그림 3.17 포항지진에 의한 교량의 손상유형별 피해사례

- (교량 해석모델DB) 2,3종 교량을 주요 대상으로 하여 연구기간 중에 표 3.3과 같이 총 40개의 교량 해석모델DB를 구축함. FMS 제공 자료 중 중요도, 활용도를 고려하고 개발 프로그램 내에서 제공이 요구되는 데이터를 선정(교량명, 위치, 구조형식 등)하여 엑셀파일 형태로 구성
- (OpenSEES 해석모델 구축) 구조물의 강성 및 관성효과를 고려하여 절점과 요소, 경계조건 등을 설정한 3차원 뼈대구조(그림 3.18 참조)로 해석모델 작성을 수행. 기 확보된 설계 도서를 기반으로 해석모델을 구성하고 정밀안전진단 등 유지관리활동 보고서가 존재하는 경우에는 이를 고려하여 실제 교량의 설치 현황을 최대한 반영할 수 있도록 하였음. 교량의 내진성능평가 실무에 활용되고 있는 「기존 시설물(교량) 내진성능 평가요령」을 참조하여 교량의 상부구조는 지진 시 일반적으로 탄성 거동함을 가정하였으며, 받침장치는 교축 및 교축직각방향에 대하여 받침종류에 따라 유효한 강성을 계산하여 스프링 요소로 모델링하였음. LRB 등 면진장치는 설계서 또는 각 제조사 등에서 제시하는 전단강성을 적용하여 모델링함. 다만, 노후 교량 등과 같이 상세한 설계내용을 확인하기 어려운 경우에는 유사 구조물의 설계현황을 참조, 가정하여 반영함

표 3.3 교량 해석모델DB 구축 현황

구분	교량명	위치(좌표)		교량설치 위치(주소)		
		X좌표	Y좌표	시도	군구	읍면동
1	축암교	129.390264	35.797253	경상북도	경주시	양북면 장항리
2	안동교	129.424471	35.803328	경상북도	경주시	양북면 안동리
3	와읍교	129.432469	35.799841	경상북도	경주시	양북면 와읍리
4	감나무교	129.346732	35.629517	경상북도	경주시	양북면 장항리
5	중기교	129.455067	35.343167	경상북도	청송군	부남면
6	서촌교	129.485148	35.904707	경상북도	포항시 남구	장기면 서촌리
7	섬비교	129.474025	35.783107	경상북도	경주시	감포읍 팔조리
8	탑동교	127.985466	36.842145	충청북도	충주시	수안보면 온천리
9	탄지교	128.078632	36.913344	충청북도	제천시	한수면 탄지리
10	주정교	127.984793	36.84419	충청북도	충주시	수안보면 온천리
11	신당교	128.057061	36.919766	충청북도	충주시	살미면
12	우수교	128.034956	35.215191	경상남도	진주시	명석면
13	아호교	128.039966	36.64175	경상북도	문경시	가은읍 직천리
14	갈전교	128.079998	36.627148	경상북도	문경시	가은읍 갈전리
15	왕릉교	128.073919	36.641147	경상북도	문경시	가은읍
16	곡강교	129.346029	36.121978	경상북도	포항시 북구	홍해읍 곡강리
17	내단2교	129.239052	36.05972	경상북도	포항시 북구	기계면
18	내단2교	129.239052	36.05972	경상북도	포항시 북구	죽장면
19	성곡IC교	129.340825	36.086815	경상북도	포항시 북구	홍해읍
20	연화RAMP-F교	129.330241	36.049721	경상북도	포항시 북구	홍해읍 대련리
21	유강 E램프교	129.319537	36.0042	경상북도	포항시 남구	연일읍 유강리
22	포항IC1교(대구)	129.313688	36.042463	경상북도	포항시 남구	연일읍 학전리
23	포항IC1교(포항)	129.313688	36.042463	경상북도	포항시 남구	연일읍 학전리
24	포항IC2교	129.313688	36.042463	경상북도	포항시 남구	연일읍 학전리
25	학림교	129.313688	36.042463	경상북도	포항시 남구	연일읍
26	화대천교(대구)	129.216651	36.072192	경상북도	포항시 북구	기계면 현내리
27	화대천교(포항)	129.216651	36.072192	경상북도	포항시 북구	기계면 현내리
28	단구1교	129.242078	36.056536	경상북도	경주시	강동면 단구리
29	단구2교	129.243359	36.055683	경상북도	경주시	강동면 단구리
30	이인교	129.335272	36.061411	경상북도	포항시 북구	홍해읍
31	현내1교	129.199331	36.080996	경상북도	포항시 북구	기계면 현내리
32	벽계천교	129.244745	36.0547063	경상북도	경주시	강동면 단구리
33	전곡천교	129.246588	36.053452	경상북도	경주시	강동면 단구리
34	다산1교	129.256527	36.049412	경상북도	경주시	강동면 다산리
35	다산2교	129.262558	36.048573	경상북도	경주시	강동면 다산리
36	학전2교	129.305318	36.045004	경상북도	포항시 남구	연일읍 학전리
37	동경주IC1교(진입)	129.428249	35.781348	경상북도	경주시	양북면 지저남동길
38	동경주IC1교(진출)	129.428249	35.781348	경상북도	경주시	양북면 지저남동길
39	기구교	129.42139	35.699755	경상북도	경주시	양남면 기구리
40	연안철교	129.310959	35.729586	경상북도	경주시	연안1길 91

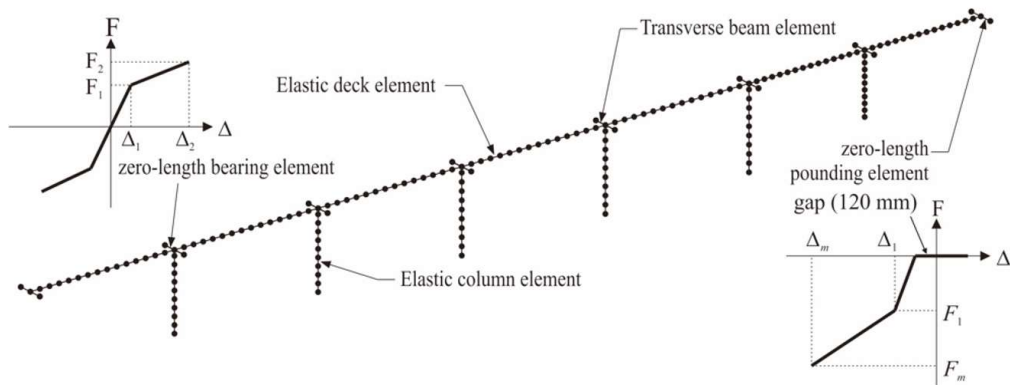
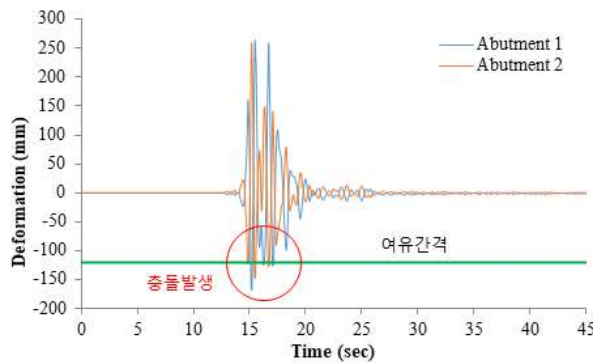
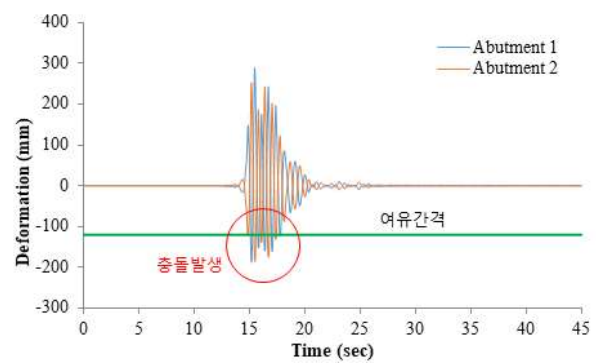


그림 3.18 곡강교 3주형 및 5주형 유한요소해석모델 구축 예

- (해석모델 유효성 검증) 구축된 해석모델이 실제 지진피해에 대한 추정 가능성을 확인하기 위하여 포항 지진에서 받침장치 몰탈 파손, 받침장치 파손, PC빔 단부콘크리트 박락 등 심각한 손상이 발생한 곡강교를 대상으로 해석결과와 비교하였음. 그림 3.19는 곡강교 해석에 의한 상부구조 변위를 산정한 것으로 여유간격 이상으로 변위가 발생하여 상부구조 간 충돌 발생이 추정되는 것이 확인됨.



(a) 3주형 모델 해석결과



(b) 5주형 모델 해석결과

그림 3.19 곡강교 해석에 의한 교량충돌 발생 확인

○ (단위성과 2-3) 해석모델DB 운영매뉴얼 개발

- (해석모델 구축절차 매뉴얼화) 타 내진해석 프로그램과 동일하게 OpenSEES를 이용한 유한요소해석모델 구축 절차는 다음 각 항의 순서와 같으며, 각 항에 대한 상세 내용을 매뉴얼로 개발 완료함

- (1) 절점(node) 입력
- (2) 집중질량(lumped mass) 입력
- (3) 경계조건(boundary condition) 입력
- (4) 요소 입력(두 절점 연결 연결된 부재에 단면 물성치 또는 재료 모델 부여)
 - ① 상부구조(탄성 보-기둥요소)
 - ② 교각(탄성 보-기둥요소 또는 비탄성 파이버 기반 보-기둥 요소)
 - ③ 교량받침(탄성 스프링 요소 또는 비탄성 스프링 요소)
 - ④ 상부구조간의 충돌 또는 상부구조-교대 충돌(비탄성 스프링 요소)
 - ⑤ 상부구조-교량받침 연결부, 코핑-교각 연결부(강성이 큰 탄성 보-기둥요소)
- (5) 중력하중(gravity load) 입력
- (6) 중력하중에 대한 정해석(gravity analysis) 수행
- (7) 고유치 해석(eigenvalue analysis) 수행
- (8) 동해석(dynamic or transient analysis) 수행

1.3 지진피해 추정 시스템 개발 (핵심3)

- (개요) 본 연구에서 개발한 임의 교량 위치에서 발생하였을 것으로 추정되는 지진력과 교량의 유한요소해석모델 DB를 연계하여 다수 교량에 대해서 일괄적으로 해석을 수행하고 손상한계에 따라 피해부를 조사한 후 추정된 피해 결과를 최종 도출하는 동적해석기반 지진재해 피해추정 프로그램 시제품 개발 내용
- (단위성과 3-1) 교량 지진응답스펙트럼 해석모델 개발
 - 교량 유한요소해석에 사용한 OpenSEES 프로그램은 구축 환경이 시간이력해석법만을 적용할 수 있도록 제작되어 있으므로 OpenSEES의 구동 환경인 TCL 언어를 이용하여 응답스펙트럼해석법을 적용할 수 있도록 외부 응용프로그램 환경 구성
 - (운영원리) OpenSEES에서 교량해석모델을 작성한 후 고유치해석을 수행하고 각 모드에서의 지진력을 추정된 지진가속도 응답스펙트럼으로부터 산정, 각 모드별 질량 참여율을 고려하여 점점하중으로 변환 (외부 응용프로그램, 그림 3.20 참조)하여 해석모델에 적용한 후 정적 해석하여 각 모드별 결과를 합산하여 출력

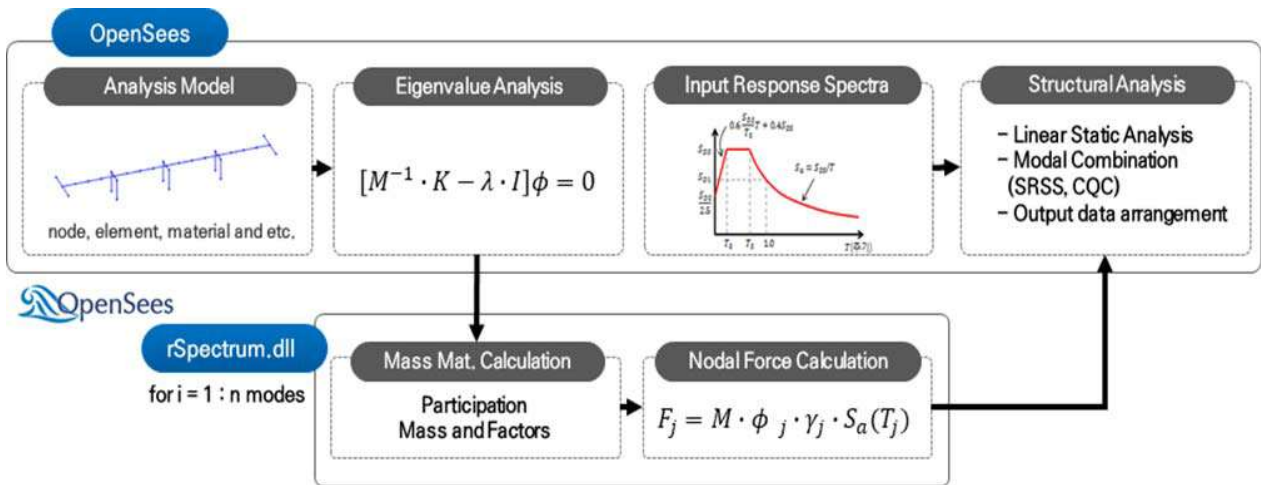
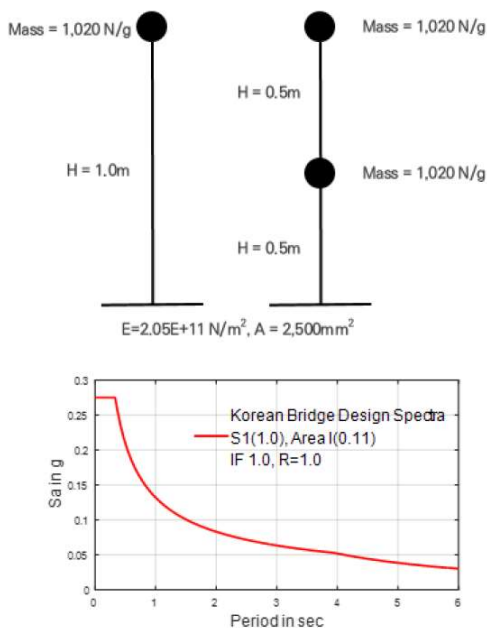


그림 3.20 외부 응용프로그램을 활용한 OpenSEES 응답스펙트럼 해석모델 구성

- (이론적 검증) 개발된 응답스펙트럼 해석모델의 신뢰성을 이론적으로 확인하기 위하여 1자유도 및 2자유도 구조모델에 대해서 국내에서 널리 활용되고 있는 MIDAS Civil(2017) 범용 유한요소해석프로그램을 이용하여 비교하였으며, 고유치해석(고유주파수) 및 반력, 변위 산정 결과와 비교하여 검증함



Comparing Values		Midas Civil 2017	OpenSees
1 DOF	Frequency, Hz (Period, sec)	7.977228 (0.125357)	7.9772 (0.1254)
	Reaction Force at base, N	2.7517E+03	2.7517E+03
	Displacement at Top, m	1.074E-03	1.074E-03
2 DOF	1st Frequency, Hz (Period, sec)	2.688945 (0.371893)	2.6889 (0.3719)
	2nd Frequency, Hz (Period, sec)	17.889697 (0.055898)	17.8897 (0.0559)
	Reaction Force at base, N	4.2080E+03	4.2076E+03
	Displacement at Top, m	1.0530E-02	1.0529E-02

Output values : node displacement and reaction force, element forces

그림 3.21 개발된 응답스펙트럼 해석모델 검증 결과

- (응용예제 검증) 다자유도계의 복잡한 구조물에 대한 개발된 응답스펙트럼해석 모듈의 적용성을 분석하기 위하여 그림 3.22와 같은 5층 건축물 구조모형에 대해서 상용 유한요소해석 프로그램인 SAP2000의 해석결과와 비교하였으며, 구조물 기초에서의 반력 추정 결과와 비교하여 모듈의 신뢰성 검증

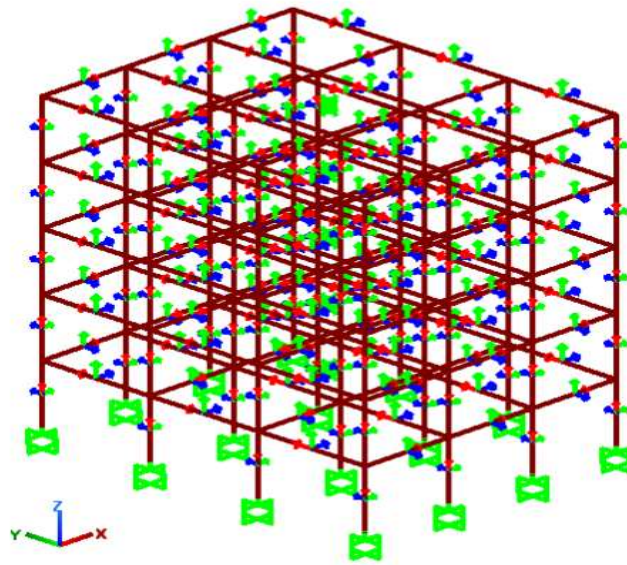


그림 3.22 다자유도 구조해석 모델(SAP2000)

표 3.4 SAP200 및 OpenSEES 응답스펙트럼 해석 결과 반력 비교

Node no.	SPA2000						OpenSEES					
	Rx[kN]	Ry[kN]	Rz[kN]	Rx[kNm]	Ry[kNm]	Rz[kNm]	Rx[kN]	Ry[kN]	Rz[kN]	Rx[kNm]	Ry[kNm]	Rz[kNm]
1	61.12	0.05	251.1	0.07	101.90	0.59	63.68	0.30	218.3	0.32	104.60	0.90
2	67.72	0.03	231.4	0.04	112.63	0.46	72.12	0.22	234.9	0.23	117.30	0.72
3	67.74	0.03	231.4	0.04	112.63	0.46	72.12	0.22	234.9	0.23	117.30	0.72
4	61.12	0.05	215.1	0.07	101.90	0.59	63.68	0.30	218.3	0.32	104.60	0.90
5	72.26	0.01	43.13	0.02	112.91	0.31	73.03	0.47	44.02	0.48	114.00	0.47
6	79.73	0.01	46.04	0.01	124.50	0.29	80.79	0.36	46.96	0.36	126.00	0.44
7	79.73	0.01	46.04	0.01	124.50	0.29	80.79	0.36	46.96	0.36	126.00	0.44
8	72.26	0.01	43.13	0.02	112.91	0.31	73.03	0.47	44.02	0.48	114.00	0.47
9	72.26	0.01	43.13	0.02	112.91	0.31	73.22	0.49	44.02	0.50	114.10	0.47
10	79.73	0.01	46.04	0.01	124.50	0.29	81.10	0.37	46.96	0.37	126.30	0.44
11	79.73	0.01	46.04	0.01	124.50	0.29	81.10	0.37	46.96	0.37	126.30	0.44
12	72.26	0.0	43.13	0.02	112.91	0.31	73.22	0.49	44.02	0.50	114.10	0.47
13	61.12	0.05	215.1	0.07	101.90	0.59	59.78	0.21	218.3	0.21	100.70	0.90
14	67.72	0.03	231.4	0.04	112.63	0.46	65.27	0.15	234.9	0.15	110.40	0.71
15	67.75	0.03	231.4	0.04	112.63	0.46	65.27	0.15	234.9	0.15	110.40	0.71
16	61.12	0.05	215.1	0.07	101.90	0.59	59.78	0.21	218.3	0.21	100.70	0.90

○ (단위성과 3-2) 응답스펙트럼 해석모델 자동화

- (개요) 개발된 교량 지진 안전성 평가 방법의 실무 적용성 확인을 위한 운영프로그램(GUI)의 개발. 기상청에서 제공되는 지진발생 정보를 입력하고, NECIS API로부터 획득한 각 관측소 지진가속도 계측자료를 로딩, 이를 지진발생정보DB, 관측 가속도DB로 저장하고 사전에 구축한 시설물 관리정보 DB(교량 유한요소해석 모델DB)와 연계하여 지진 안전성을 자동으로 분석할 수 있도록 프로그램화
- (구성) 그림 3.23과 같이 기상청 홈페이지에서 발생한 지진의 규모 및 진앙의 위치 정보 그리고 국가 지진종합정보시스템에서 각 관측소의 100샘플 지진가속도 시간이력 데이터를 확보한 후 수동으로 입력하면, 지진발생 정보DB 및 관측 가속도 DB에 입력되며, FMS 자료 등에 의해 사전에 구축된 시설물 관리 정보DB에서 분석이 요구되는 구조물 정보와 연계하여 해석모델을 재구성하고 분석하고자 하는 개별 교량에 대한 유한요소해석 수행을 연속적으로 자동 수행하도록 구성

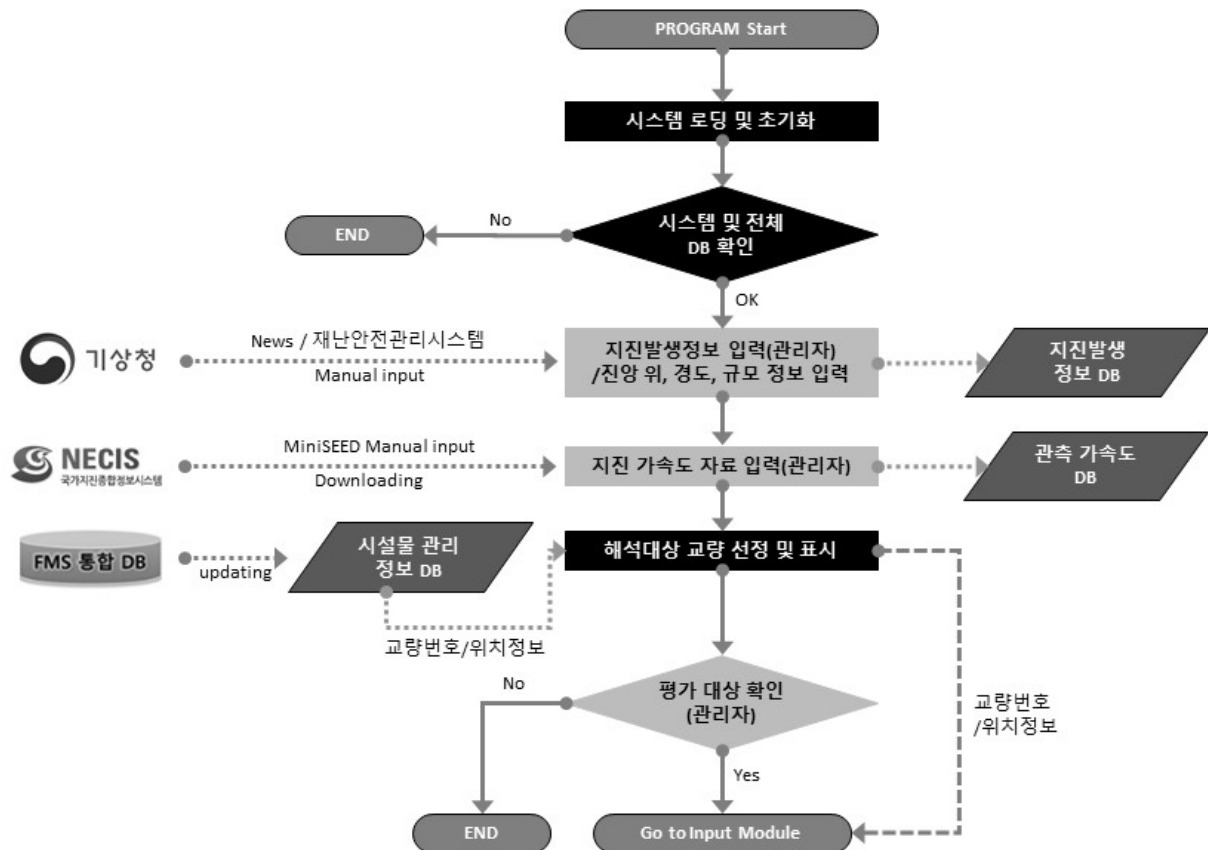


그림 3.23 교량 지진안전성 평가 프로그램 FLOW CHART

- (지진가속도 정보 처리) 사전에 구축한 기상청의 지진 관측소별 위치정보와 관측 장비 특성이 기록된 데이터베이스로부터 각 관측소 지진가속도계의 가속도 변환계수를 NECIS API로부터 수집된 지진가속도(원시 가속도 관측자료DB)에 적용하여 공학적으로 활용할 수 있는 가속도로 변환(가속도 변환모델)하며, 가속도 시간이력 및 응답스펙트럼으로 관측 가속도 DB에 저장하여 추후 유한요소 해석모델에 적용이 가능하도록 저장 처리(그림 3.24 참조)

※ 2차년도 중간평가 결과, 상기 기상청의 자료를 실시간으로 적용할 수 있는 방안을 강구할 필요성이 있다는 지적사항이 있어 3차년도 중 기상청 기술정보기술팀과 지속적으로 협의를 수행하였으나, 현재 정책적으로 NECIS의 API를 통하여 보안을 유지(기상청 정보 활용 지침에 동의한 사용자에게 한하여 제한적으로 접근가능)하여 지진데이터를 제공하고 있어 별도의 데이터 제공 기반을 구축하기 어렵고, 본 연구가 관련한 기초기술 개발 단계로 활용 부처 또는 지자체가 확정되지 않은 상태이므로 체계적인 지원이 어려움을 확인. 또한, 3차년도 중에는 NECIS API의 개선 및 기상청의 지진가속도 데이터 활용 정책이 변경되어 원활한 지진 데이터 확보가 어려웠음. 다만, 기상청에서는 관측된 지진 가속도 데이터의 활용도 제고를 위해 조기경보 및 기타 지진 관련 연구 목적으로 지진 가속도를 활용하는 것을 제한하고 있지 않으므로 향후 본 기술(프로그램)의 활용 기관이 확정되면, 자동화 처리가 가능할 것으로 판단됨

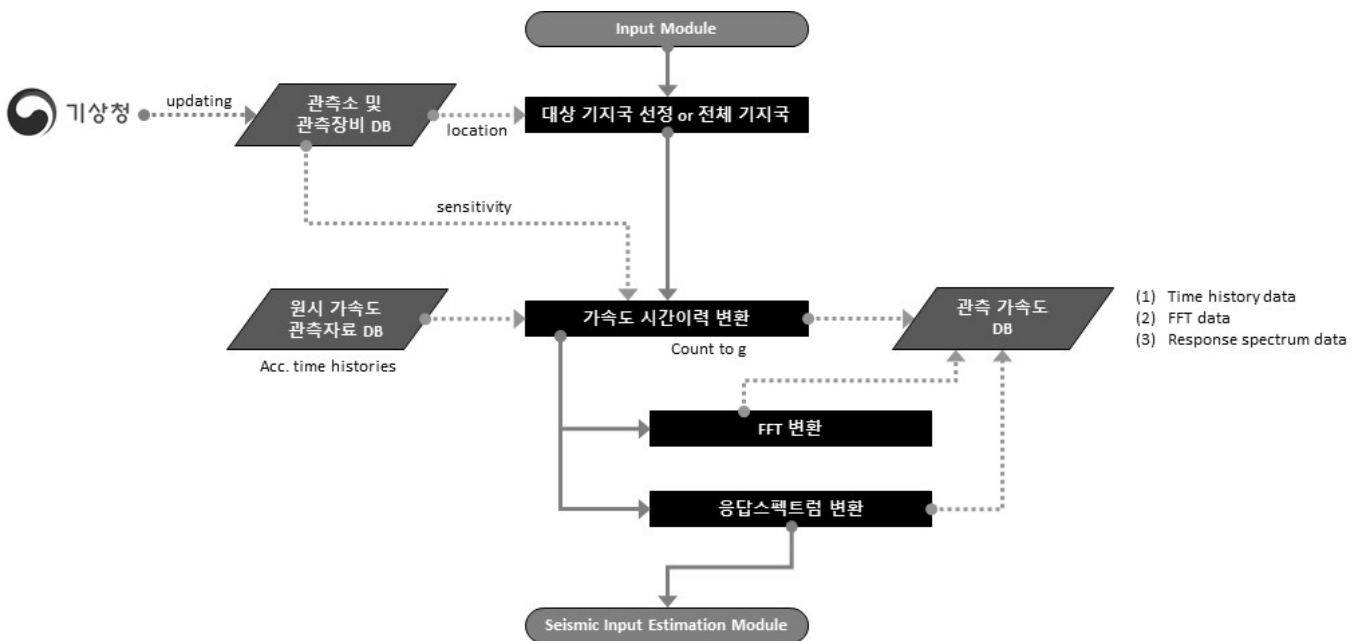


그림 3.24 지진가속도 시간이력 및 응답스펙트럼 처리 FLOW CHART

- (유한요소해석 연계) 전체 관측소별 지진 가속도 데이터를 전달받아 임의 위치에 설치된 교량 위치에서의 지진력을 추정하는 단계와 유한요소해석을 수행하는 단계로 구성(그림 3.25 참조). 지진력의 추정은 지반 가속도 응답스펙트럼을 추정하는 모듈과 시간이력을 작성하는 모듈로 구분. 유한요소해석은 라멘교, 박스교 등 단경간인 경우 응답스펙트럼해석을 수행하고 다경간 연속교량인 경우 시간이력해석이 수행되도록 구성. 해석방법의 결정은 사용자가 임의로 결정하지 않고 사전에 작성된 교량 유한요소해석모델에서 해석방법론을 결정하고 지진력만 구분하여 적용할 수 있도록 프로그램화 함

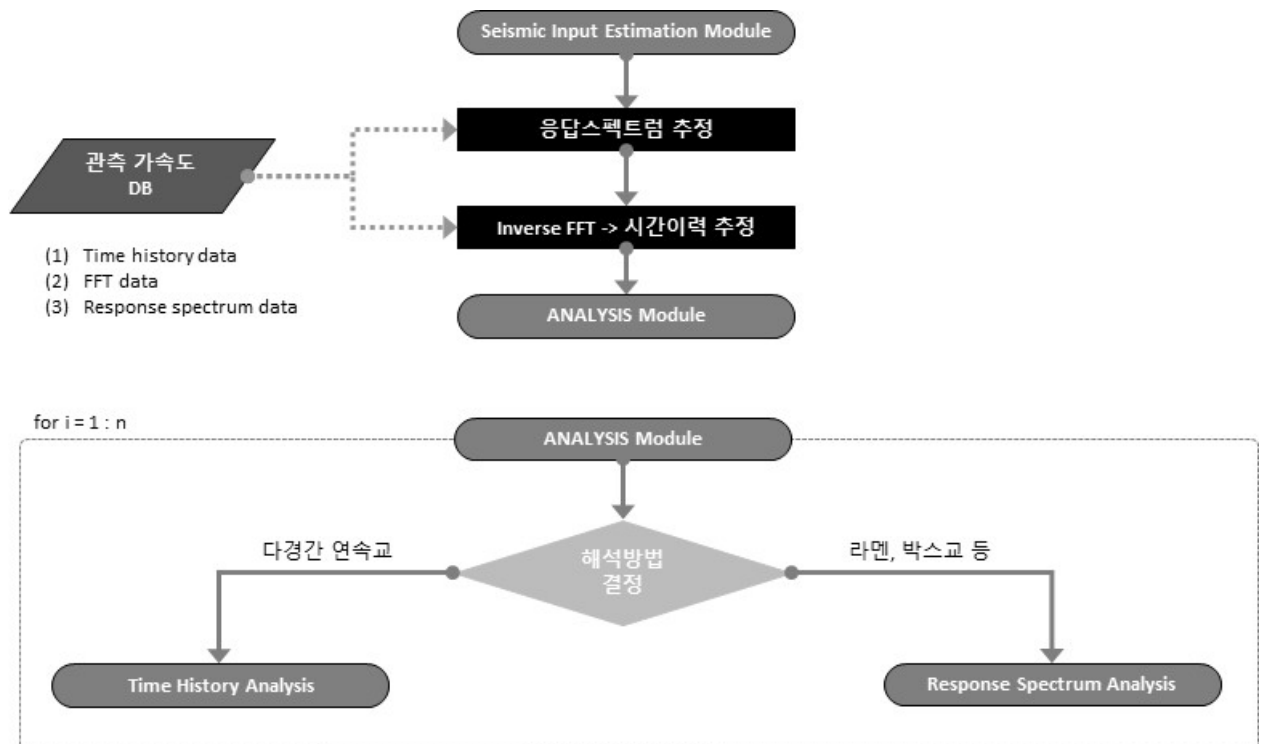


그림 3.25 지진 가속도 데이터 처리 및 유한요소해석 처리 FLOW CHART

- (시간이력 생성방법) 지진 가속도 시간이력의 생성은 교량이 설치된 위치에서 추정된 지반응답 응답스펙트럼과 상기 교량과 가장 인접한 관측소에서 계측된 가속도의 시간이력의 형상 정보로부터 통상적인 응답스펙트럼(Shock Response Spectrum)을 이용하여 가속도를 생성하는 방법에 의해 임의 교량 위치에서 시간이력을 추정하는 알고리즘 적용. 기존 연구에 의한 응답스펙트럼을 이용한 시간이력 추정방법

은 다음의 식 (1)의 파동방정식을 이용하여 n 개의 정현파형을 조합하여 지진가속도 시간이력을 생성하는 방법으로 임의 위치에서 지진 가속도의 각 주파수 대역 크기 정보 및 시간이력의 형상 정보 필요

$$W_m(t) = A_m \sin\left(\frac{2\pi f_m}{N_m}(t-t_{dm})\right) \sin(2\pi f_m(t-t_m)) \quad (1)$$

여기서, $t_{dm} \leq t \leq \left(t_{dm} + \frac{N_m}{2f_m}\right)$ 인 시간에 대해서,

$w_m(t)$ 는 t 시간에서의 가속도 파동의 방정식으로 연속한 정현파의 집합

A_m 은 가속도의 크기(amplitude), f_m 는 정현파형의 주파수

t_{dm} 은 지연시간(time delay), N_m 은 정현파형(반파형)의 수

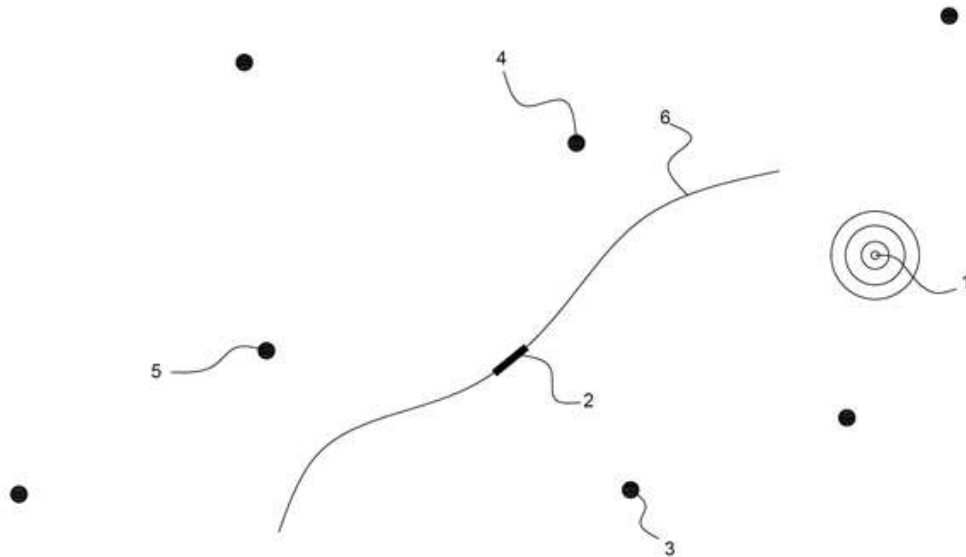


그림 3.26 지진 가속도 시간이력 생성 개념도(평면도)

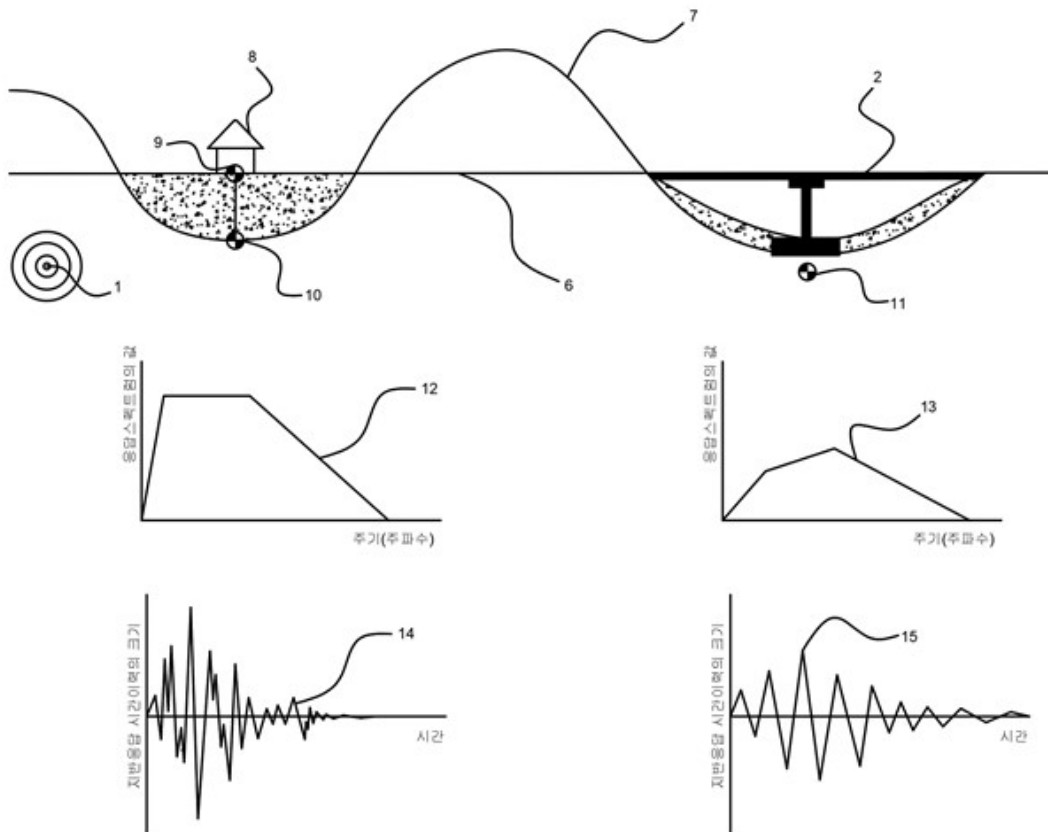


그림 3.27 지진 가속도 시간이력 생성 개념도(단면도)

- (이론적 특성) 본 연구에서 제안한 지진 가속도 생성방법은 관측된 기록 지진의 특성을 반영한 것으로 지진 가속도를 생성하고자 하는 위치(그림 3.26의 2)에서 발생한 지진가속도의 시간이력이 인근 지진 관측소에서 계측된 지진 가속도의 시간이력(그림 3.26의 3 또는 4)과 형상이 유사하다고 가정(그림 3.27의 14 및 15 참조)하고, 시간이력의 생성 시 임의 위치에서 추정된 응답스펙트럼과 상기 임의 위치 인근에서 계측된 가속도 시간이력 형상 정보를 바탕으로 임의 위치에서의 시간이력을 재구성함 (Acceleration Time History Synthesis)을 특징으로 함
- 본 연구에서 제안한 가정이 이론적으로 성립하는지 여부를 확인하기 위하여, 포항지진 시 관측된 기록을 이용하여 다수의 임의 관측소에서 계측된 지진가속도 자료를 대상으로 인근의 지진가속도 시간이력 형상을 적용하여 응답스펙트럼을 추정하여 분석하였고 그림 3.28에서와 같이 일반적으로 교량의 구조적인 영향을 미치는 지지파형의 주파수(15 Hz) 내에서 일치성을 확인

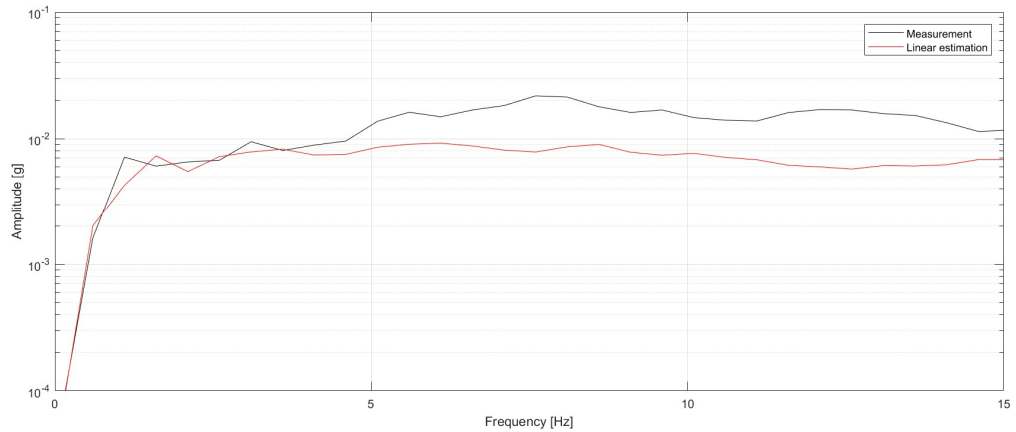
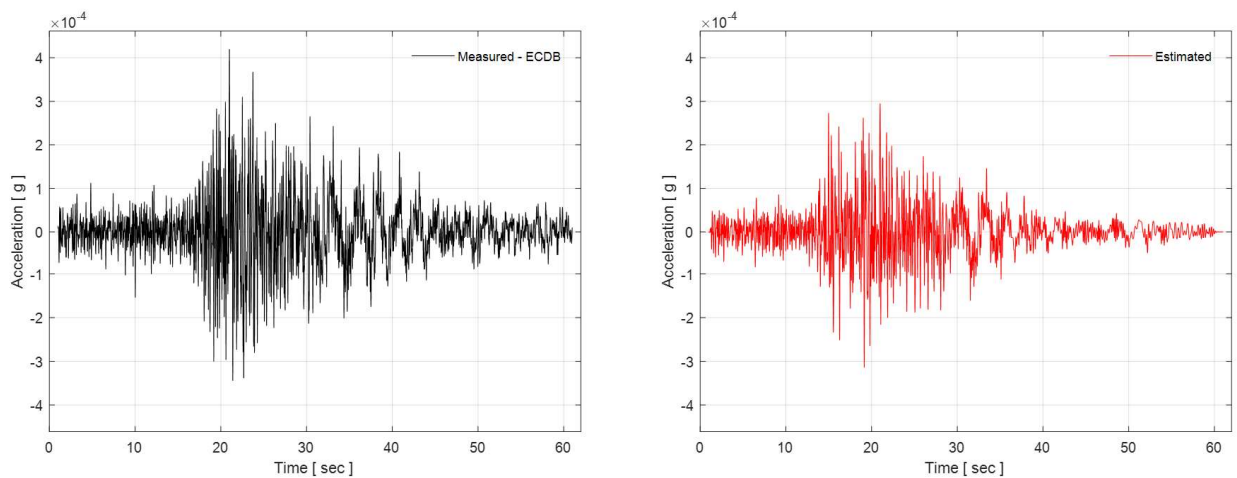


그림 3.28 본 연구에서 제안한 시간이력 추정방법의 적용성(응답스펙트럼 비교)

- 제안된 가속도 시간이력 생성방법의 적용성을 분석하기 위하여 기상청의 NECIS를 통하여 제공하고 있는 국내 지진관측소 시추공 가속도계 66개소 데이터를 이용, 각 관측소를 임의 교량 위치로 가정하여 지진가속도 시간이력의 추정 정확도를 평가하였으며 그림 3.29에 나타난 것과 같이 관측소 계측 가속도(임의 교량 위치 가속도)를 비교적 유사하게 추정할 수 있는 것을 확인함(상세 결과는 부록 4 참조)

※ 기상청에서는 자유장 가속도계와 시추공가속도계를 운영하고 있으며, 지진 후 관련 데이터를 제공하고 있으나 자유장 가속도계의 경우에는 운영되고 있는 관측소의 수가 극히 적고, 지반 증폭현상이 반영되어 주변 노이즈의 영향이 크기 때문에 본 연구에서는 시추공가속도계만을 활용하도록 함



(a) 관측소 계측 가속도 시간이력

(b) 추정된 가속도 시간이력

그림 3.29 관측소(ECDB) 지진 가속도 추정 결과

- 지진 가속도를 생성하는 방법(NUREG/CR-6922, BNL-NUREG-77338-2006 참조)은 생성된 시간이력의 주파수 특성이 교량 위치에서 추정된 가속도 응답스펙트럼의 각 주파수 대역 크기와 일치하도록 다수의 반복적 계산 작업(iteration)이 요구됨. 각 반복계산 단계의 변수는 상기 식 (1)에서의 정현파형의

수와 반복계산의 수에 직접적인 영향을 받음. 본 연구에서는 신속한 계산을 위한 최적의 변수조건을 분석하여 설정하였으며, 지진가속도 추정은 1개 관측소 당(임의 위치 교량 1개 당) 약 1분 정도의 시간이 소요됨을 확인함

- (유한요소해석 및 결과처리) 구조물 해석모델 DB(단위성과 2-2)에 구축된 모델 중 지진 안전성 평가가 요구되는 교량의 모델과 입력가속도 DB의 지진 가속도 응답스펙트럼(단위성과 2-1) 또는 시간이력(단위성과 3-2) 정보를 하나의 해석모델 파일로 결합하여 OpenSEES를 이용하여 해석 수행. 해석결과는 손상기준(단위성과 1-3)과 비교하여 손상 여부를 판정(그림 3.30 참조)

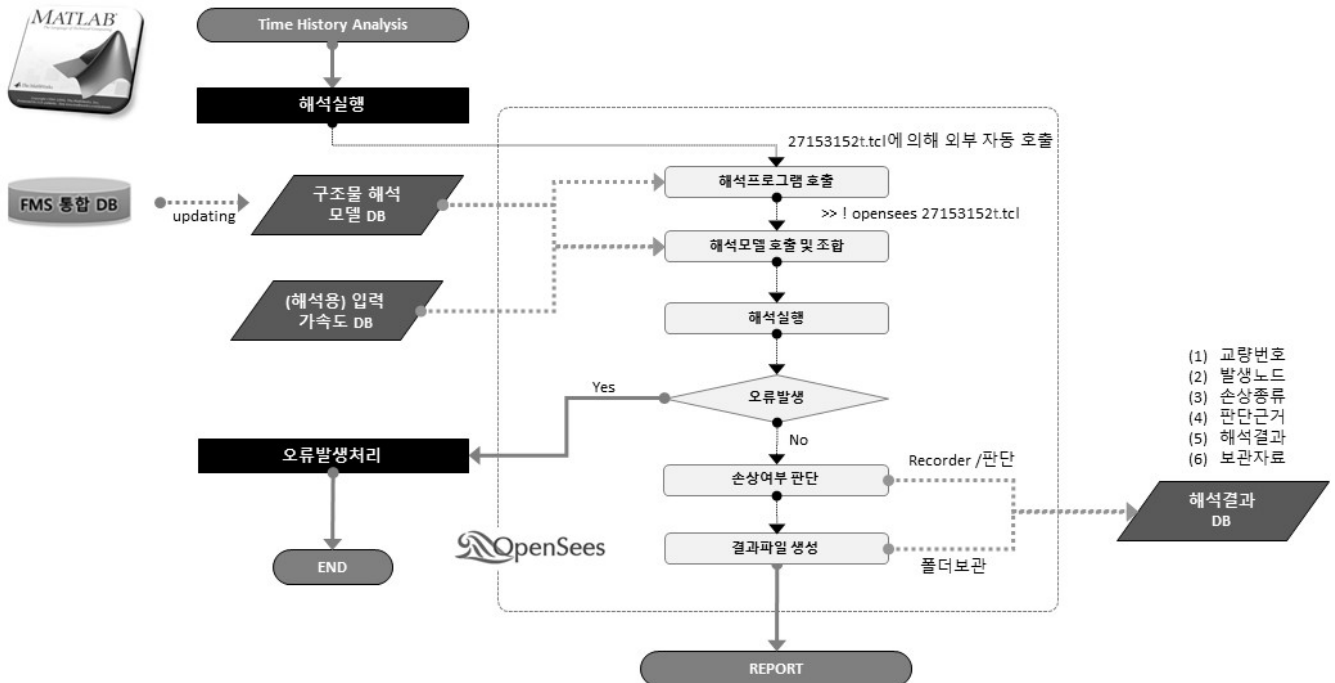


그림 3.30 시간이력해석 FLOW CHAR

- (처리속도 향상) 개발된 프로그램은 사용자(관리자)가 다수의 교량을 관리하는데 활용될 수 있음. 이 경우 개별 교량 해석에 소요되는 시간이 증가하여 전체 결과를 도출하는데 상당한 시간이 소요될 우려가 있음. 이에 본 연구에서는 윈도우 환경에서 multi-core processing을 통하여 교량 모델 해석 시간을 단축하는 방법을 적용하였음. 개발 환경은 오픈소스 MPICH(메시지 패싱 환경)를 이용하고 U.C. Berkeley에서 제공하는 OpenSeesMP에서 실행이 되도록 하였으며, 8개 교량에 대해서 동시에 해석한 결과에서 사용되는 프로세서의 수를 1개에서 4개까지 증가시킴에 따라 처리 시간이 4.3분에서 1분으로, 약 23% 수준으로 감소함을 확인함(그림 3.31 참조)

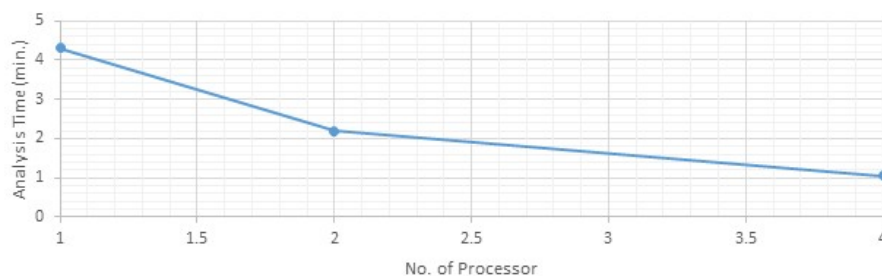


그림 3.31 Processor 수에 따른 처리시간

○ (단위성과 3-3) 지진피해예측 시스템 운영 매뉴얼 개발

- (운영절차서) 개발된 프로그램을 내진설계 및 지진 후 구조안전성 평가에 대한 전문적인 지식이 없는 사용자(관리자)도 운영이 가능하도록 프로그램의 작동 원리를 설명하고 필수적으로 구비가 필요한 기본 정보(지진발생정보 및 지진가속도 데이터 확보 방법)와 운영 과정 설명을 포함한 절차서 개발
- (유한요소 해석모델 작성 매뉴얼) 유한요소해석에 대한 기본적 지식을 갖고 있는 기술자들이 OpenSEES를 이용하여 교량의 해석모델 DB구축을 할 수 있도록 OpenSEES에 대한 기본 명령어, 모델링 절차와 예시를 포함하여 개발

2. 연구개발 추진전략 및 방법

○ (추진전략) 본 연구에서 개발하고자 하는 핵심 기초 개념들은 연구과제 제안단계 이전에 도출(연구기간 전 특허 출원 완료) 되었음. 이에 따라 연구기간 중에는 (1) 제안된 개념을 정립하고 이론적 기초 자료를 확보하며, (2) 개발 기술이 활용될 수 있는 방안에 대한 연구와 홍보, (3) 지적재산권 확보에 주력함. 또한, TRL 7 단계를 목표로 하였으나 실제 현장에서도 적용될 수 있는 수준으로 개발하기 위하여 (4) 프로그램 완성도 향상에 노력함

- (이론적 확립) 본 연구에서 개발한 기술 중 임의 위치에서의 지진력을 추정하는 방법은 기존 자연과학 및 공학에서는 개념이 제시되지 않은 것으로, 본 연구진에 의해 최초로 제안, 개발이 시도된 기술임. 그러므로 해당 기술에 대한 타당성을 확보하고 이론적으로 입증하기 위하여 노력하였으며, 다양한 학회에 참가하여 전문가 의견을 청취, 반영하였음

표 3.5 지진력 추정방법에 대한 지진관련 학회발표 현황

구분	학회명	발표 논문명
1	한국방재학회	현장계측 PGA를 활용한 기존 거리감쇄식의 적용성에 관한 연구
2	한국구조물진단유지관리공학회	지진 관측데이터 기반 지반응답스펙트럼 추정 알고리즘 제안 및 평가
3	한국소음진동공학회	OpenSEES를 이용한 교량 구조물의 응답스펙트럼 해석
4	한국지진공학회	지반응답스펙트럼 추정에 의한 교량의 지진 안전성 평가 방법
5	한국구조물진단유지관리공학회	관측소 지진계측 데이터를 이용한 지반응답스펙트럼 추정
6	한국지진공학회	국내발생 지진에 의한 교량의 피해사태
7	대한토목학회	공공시설물 지진 안전성 평가 및 유지관리활동 의사결정 지원시스템 개발
8	한국구조물진단유지관리공학회	지진발생 후 교량의 유지관리활동 의사결정 지원방안 개발
9	한국소음진동공학회	가속도 관측 자료를 활용한 임의 교량위치 지진 가속도 추정방법 개발

- (활용방안 연구) 연구개발 결과의 실용화 가능성을 높이기 위하여 주요 연구내용에 대한 다양한 전문가 및 실제 활용이 예상되는 지자체 시설물 관리자 등을 대상으로 현장 적용성 평가를 수행. 2차년도 중 한국시설안전공단의 국가내진센터의 활용 가능성을 협의하였으며, 한국토지주택공사 단지기술처(교량설계 담당부서)에 적용 가능성을 협의함. 또한, 3차년도에는 경상남도 및 부산광역시 재난대응과 현장적용 평가를 실시하여 개발된 기술에 대해서 지자체 차원의 활용 가능성을 검증 받음



(a) 한국시설안전공단 현장적용검토



(b) 한국토지주택공사 전문가평가



(c) 경상남도 재난대응과 현장적용 평가



(d) 부산광역시 재난대응과 현장적용 평가

그림 3.30 전문가 검토 및 현장적용 수행 현황

- (정책제안 및 기술이전) 연구 초기단계에서는 국토교통부(한국시설안전공단 국가내진센터)에서 활용할 수 있는 다양한 정책적 방향을 제시하였으며, 관련 전문가와 협의를 추진함. 2차년도 이후에는 부산광역시, 울산시, 경상남도 등 지진 발생이 활발한 동남권 지역 지자체 재해 담당자들에게 기술 내용을 홍보하여 적용 가능성을 협의하였음. 또한, 3차년도에는 국립재난안전연구원 지진방재센터, 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 도로관리통합센터와 지진력 추정방법 활용에 대한 협의를 하는 등 기술이 활용될 수 있는 방안을 다각도로 모색함
- (지적재산권) 1차년도 출원 특허는 응답스펙트럼해석법에 의해 임의 위치 교량에 대한 지진 안전성을 평가하는 기술에 국한된 것이었으나 연구중 시간이력해석 적용에 대한 필요성이 높아짐에 따라 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용하여 지진가속도 시간이력을 추정하는 방법에 대한 특허도 출원함. 또한, 3차년도 연구개발 중 응답스펙트럼(Shock Response spectrum)을 이용해 지진력을 추정하는 새로운 방법을 고안하였으며, 최종 프로그램에 반영됨에 따라 추가적인 특허를 출원함. 총 3건의 특허가 등록, 출원되었으며, 관련 프로그램에 대한 지적재산권 등록 완료

표 3.5 지진력 추정방법에 대한 지진관련 학회발표 현황

구분	저적재산권의 종류	명칭
1	특허(등록)	교량의 지진 안전성 평가를 위한 해석모델 구축방법 및 해석모델 구축 시스템
2	특허(등록)	교량의 안전성 평가 장치 및 방법
3	특허(출원)	지진가속도 시간이력 생성방법
4	소프트웨어	지진 로우데이터 수집 및 지진가속도 시간이력 변환 프로그램 모듈
5	소프트웨어	지진가속도 응답스펙트럼 변환 프로그램 모듈
6	소프트웨어	삼각망 관측치 기반 지반응답스펙트럼 산정 모듈
7	소프트웨어	오픈시용 교량 구조 모델링 확인 프로그램
8	소프트웨어	교량용 지진피해 추정프로그램
9	소프트웨어	교량 지진 안전성 평가 프로그램
10	소프트웨어	시간이력해석을 통한 중소형 교량 지진 안전성 평가 프로그램

- (프로그램 완성도 향상) 본 연구의 연구진은 교량 등 시설물의 구조해석 및 안전성 평가, 각 종 재난에 대한 대응방안 연구 등 분야의 전문가로 구성되어 있어 이론적 연구역량은 우수하나 관련 S/W 및 DB 등의 실무적인 분야의 전문성이 부족하였음. 이에 관련 S/W 분야 전문가와의 회의 등을 통해 개발방향에 대한 자문을 받고 3차 연도에는 MATLAB, PYTHON, C (TCL) 언어 사용에 능통한 전문인력을 주관 기관에서 고용하여 연구를 수행함

국 로 계 약 서

사 용 자 (당)	성 명	유 체 순	사업의 종류
	기 관 명		계약의 계단일련
	소 재 지		국토교통연구원지하공간연구실
근 로 자 (총)	성 명	이 령 적	주인등록번호
	주 소		941121-1923715

제 1 조 (교용계약) (당)은 (총)을 “지반응답스펙트럼 추정기법 개발 및 해석모델DB 구축을 통한 교량의 지진피해 대응 피해예측 시스템 구축기술 개발” 및 “건축물 비구조요소 내진성능 확보기술 개발” 연구과제의 연구원(기간제 계약직)으로 고용하며, (총)은 (당)에게 사업 및 연구개발 업무에 관하여 노동부 제정할 것을 약속하고, (당)은 (총)에게 합당한 보수를 지급할 것을 약속하며 상호 대등한 지위에서 자유의사에 따라 다음과 같이 근로계약을 체결한다.

제 2 조 (소속 및 직급) (총)의 소속은 국토교통연구원지하공간연구실(이하 운영원)의 기술연구소로 하고 직급은 연구원으로 한다. 다만, 운영원의 관제변경 또는 필요할 경우 소속을 변경할 수 있다.

제 3 조 (근로자의 성실의무) (총)은 (당)의 명명·지시에 따라 정당한 업무를 성실히 수행한다.

제 4 조 (임 금)

(1) 계약연봉은 일급 상정액(₩30,000,000)으로 한다.

(2) 제원은 “지반응답스펙트럼 추정기법 개발 및 해석모델DB 구축을 통한 교량의 지진피해 대응 피해예측 시스템 구축기술 개발(62.65%)”과 “건축물 비구조요소 내진성능 확보기술 개발(37.35%)”로 분할한다.

(3) 임금소득에 대한 원천세 및 4대 보험료(국민연금, 건강보험료, 고용보험료 등) 중 근로자 부담금은 “총”이 부담하며, 사업자 부담금과 퇴직금은 계약연봉에서 별도이며, 연구과제 참여시 해당 과제에서 이를 부담 할 수 있다.

(4) 퇴직금은 총 계약연봉과 별도로 제 6조에 의해 지급한다.

제 5 조 (복합임금 및 기타수당)

(1) 통상임금(기본 월봉)은 총 계약연봉에서 상여금을 뺀 금액의 12분의 1에 해당하는 금액으로 한다. 단, 해당 지급되는 기본 월봉은 통상임금의 산정기준이 되는 임금으로 하고 기본 월봉 및 기타수당을 합한 금액을 평균 임금 산정기준으로 하는 임금으로 한다.

(2) 기타수당은 근로자의 비정기 부가급으로서 운영원의 사업실적에 따라 성과급, 사건의 근무수당 등을 지급할 수 있으며, 지급기준과 지급액 등 필요한 사항은 사용자가 따로 정한다.

제 6 조 (퇴직금)

(1) 퇴직금은 귀속기간제직을 통해 정해진 일자에 퇴직연금 형태로 지급한다.

(2) 해당 지급되는 퇴직연금은 제5조 (1)항의 기본 월봉에 12분의 1을 곱하여 계산한다.

제 7 조 (지급방법 및 시기) 기본 월봉은 매월 25일에 지급하고 성과급 등의 기타수당은 그 지급사유가 발생한 때에 지급한다.

제 8 조 (기밀유지) 급여명세서는 절대 기밀을 유지하며 위반 시는 이로 인한 모든 불이익을 감수한다.

제 9 조 (근로시간) 근로시간은 주 40시간으로 한다.

제 10 조 (휴급휴일) 휴급유일과 관련된 사항은 별도 규정에서 정한 바에 따른다.

제 11 조 (근태사항) 휴직, 경근, 감봉 및 정직 등의 사유가 있는 경우에는 본 근무규정을 적용하여 임금을 지급한다.

제 12 조 (계약기간 및 재계약)

(1) 계약기간은 2019년 2월 1일부터 2021년 1월 31일(24개월)까지로 한다.

(2) 재계약은 계약만료 1개월 전에 하지, 상대방에게 통지가 없을 때에는 본 근로계약은 1년 간 자동 연장 된 것으로 간주한다. 이 때 자기 연장은 별도의 연장합의를 통해 갱신하는 것으로 한다.

제 13 조 (퇴직, 이직 등) (총)은 개인 신변상의 불가피한 경우를 제외하고, 퇴직 또는 이직 등의 사유가 있을 때에는 1개월 전에 (당)에게 통보하여 업무의 인수인계를 위해 최대한 노력하여야 한다.

제 14 조 (권리양도) 본 계약서에 명시되지 아니한 사항은 운영원의 규정 및 근로기준법의 관련규정을 준용한다.

제 15 조 (특약사항) 없음.

위와 같이 인봉 근로계약을 체결함.

2019년 1월 31일

사용자(당) : 국토교통연구원지하공간연구실 유 체 순

근로자(총) : 이 경 석

그림 3.31 3차년도 소프트웨어 전문가 근로계약서

- (추진체계) 주관기관에서는 교량 구조물 해석방법 및 전체 프로그램의 운용방안 개발을 담당하고 공동연구기관에서 임의 위치 지진력 추정 기술 개발을 담당함. 2차 연도 이후 안동대학교를 위탁연구기관으로 편입하여 교량 해석모델 작성에 대한 전문성 보강

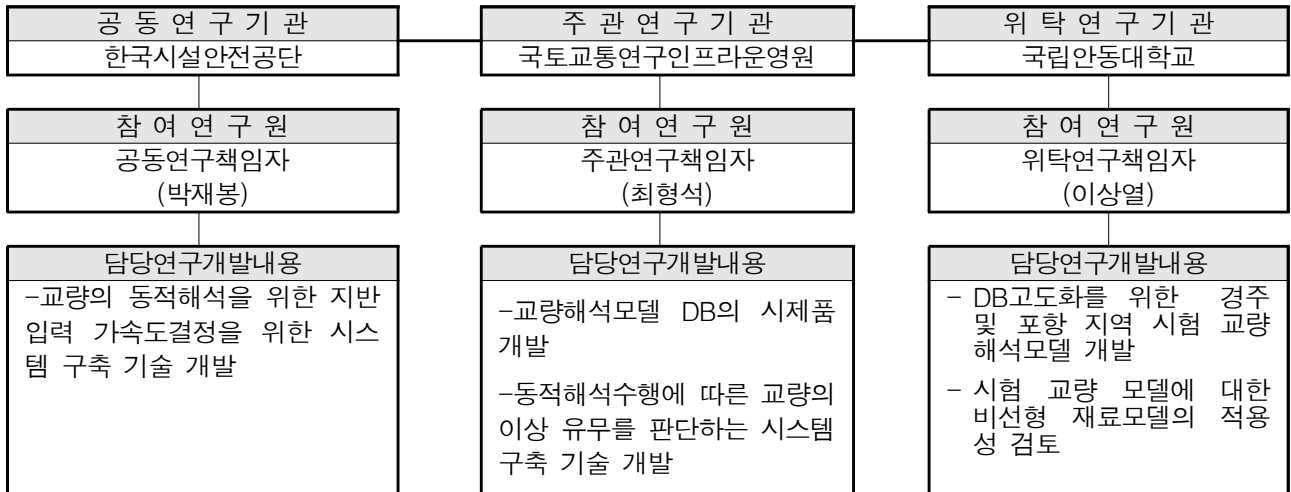


그림 3.32 연구개발 추진체계

- 연구추진경과

표 3.6 연구개발 추진경과

구분	관련 성과목표/지표			연구내용	1차년도				2차년도				3차년도			
	핵심성과	단위성과	질적 성과지표		1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
주관 (KOCED)	2	2-1	2-1-①	기반구축(해석용 서버)												
			2-1-②	TEST-BED 모델 작성(5)												
			2-1-③	프로그램 운영방안 개발												
		2-2	2-2-①	TEST-BED 모델 작성(10)												
			2-2-②	해석결과처리방안												
		2-3	2-3-①	TEST-BED 모델 작성(15)												
			2-3-②	해석모델 작성 매뉴얼 개발												
	3	3-1	3-1-①	지진파 및 해석모델 연계모델												
			3-1-②	응답스펙트럼 해석모델												
			3-1-③	시각화 도구												
		3-2	3-2-①	1차 프로그램(시제품) 구성												
			3-2-②	지진피해 추정 방안 개발												
		3-3	3-3-①	시간이력해석모델												
			3-3-②	전체 시스템 운영 절차서 개발												
공동 (KISTEC)	1	1-1	1-1-①	관측소, 관측장비 정보 확보 기상청 지진가속도 수집 모듈												
			1-1-②	지진가속도 변환 및 응답스펙트럼 생성 모듈												
			1-1-③	임의 위치 응답스펙트럼 추정												
		1-2	1-2-①	가속도변환, 응답스펙트럼 생성												
			1-2-②	관측자료 DB 구성												
			1-2-③	시설물(교량) DB 구축												
		1-3	1-3-①	관측자료 및 시설물 DB 고도화												
			1-3-②	지진력 추정방법 고도화												

3. 연구개발성과

○ 핵심연구성과 (연구개발계획서 기준)

표 3.7 연구개발 핵심성과

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과유형	연구기관	해당 연차	TRL
1	지반입력 가속도 추정기술	교량의 동적해석용 지반입력 가속도결정을 위한 시스템 구축 기술	시스템	KISTEC	3	7
2	교량해석모델 DB 구축기술	교량해석모델 DB의 시제품 개발	프로그램	KOCED	3	7
3	동적해석 자동화 모듈	추정된 지반응답스펙트럼 및 구조해석모델DB 자료를 이용하여 동적해석을 수행하고 교량의 이상 유무를 판단하는 시스템 구축 기술	시스템	KOCED	3	7

○ (핵심성과 #1) 임의 교량 위치에서의 지진가속도 응답스펙트럼 및 시간이력 추정 기술

핵심성과 1		
정의	교량의 동적해석용 지반입력 가속도 결정을 위한 시스템 구축 기술	
목적	기존 최대 가속도만을 이용하는 지진대응시스템의 한계를 극복하기 위하여 지진의 주파수 특성을 고려할 수 있도록 지반입력 가속도 결정	
성능목표	(기존기술 수준) 지진 특성 중 최대 가속도성분만 활용 (개발기술 수준) 주파수 특성 및 가속도 시간이력 특성 활용	
성과달성 책임자 (소속기관)	박재봉(한국시설안전공단)	
소요기간	'17.04 ~ '19.12(2년9개월, 3년차)	
성과달성 확인방법	MATLAB 또는 C언어 기반의 UI를 갖는 지반응답스펙트럼 작성시스템 개발 여부	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 0건, 등록 : 0건
	논문	SCI(E) : 0건, 학술지 : 2건
	저작	0건
	S/W	3건 (응답스펙트럼 선형추정, DB운영 S/W)
	신기술	0건
	기타	2건 (현장적용, 정책제안)

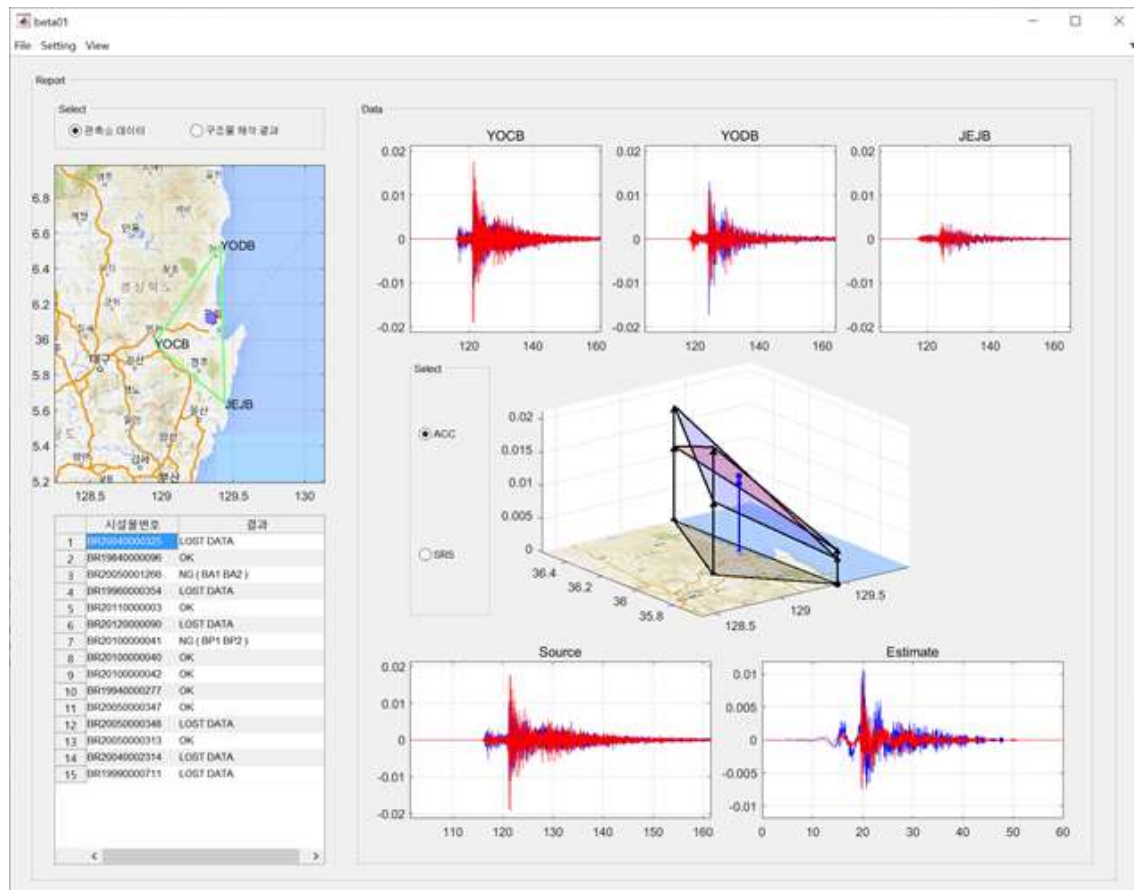


그림 3.31 임의 교량 위치 지진가속도 추정

○ (핵심성과 #2) TEST-BED 교량해석모델DB 구축

핵심성과 2		
정의	교량해석모델 DB의 시제품 개발	
목적	전체 시설물을 대표할 수 있는 취약도를 통하여 확률적으로 구조물을 평가하는 방식을 상세 구조모델을 도입하여 해석하는 방법으로 전환	
성능목표	(기존기술 수준) 취약도 곡선에 따른 위험평가 (개발기술 수준) 정밀 해석모델에 의한 위험평가(30개 교량 구조물 대상)	
성과달성 책임자 (소속기관)	최형석(국토교통연구인프라운영원)	
소요기간	'17.04 ~ '19.12(2년9개월, 3년차)	
성과달성 확인방법	TEST Bed DB 구축(30개 교량) 및 DB 운영관리 매뉴얼의 개발	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 0건, 등록 : 0건
	논문	SCI(E) : 2건, 학술지 : 0건
	저작	0건 (40개 교량해석모델 DB)
	S/W	2건 (TEST-BED DB 관리 S/W)
	신기술	0건
	기타	1건 (DB운영관리 매뉴얼)

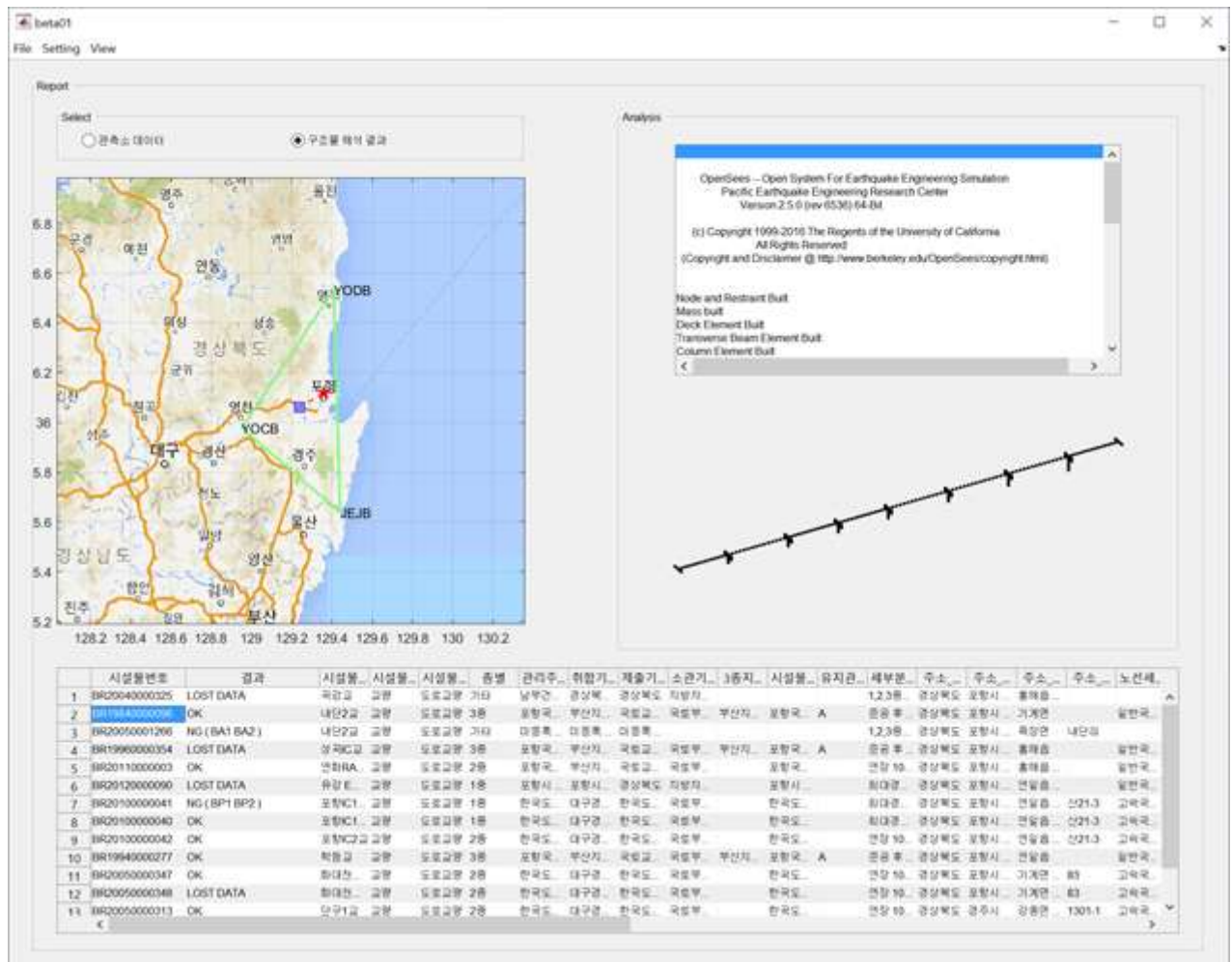


그림 3.31 TEST-BED 교량해석모델 DB

○ (핵심성과 #3) 교량 지진 안전성 평가 프로그램 개발

핵심성과 3		
정의	동적해석수행에 따른 교량의 이상 유무를 판단하는 시스템 구축 기술	
목적	개별 구조물의 지진시 안전성을 신속, 정확히 평가하기 위하여 실제 구조물을 반영한 해석모델 및 설치 위치를 고려한 응답스펙트럼 해석방법 개발	
성능목표	(기존기술 수준) 지진발생 인근 지역 시설물 피해분포 확인 (개발기술 수준) 개별 시설물의 피해현황 분석 가능	
성과달성 책임자 (소속기관)	최형석(국토교통연구인프라운영원)	
소요기간	'17.04 ~ '19.12(2년9개월, 3년차)	
성과달성 확인방법	MATLAB 또는 C언어 기반의 UI를 갖는 지진피해 예측시스템 개발 여부	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 3건, 등록 : 2건
	논문	SCI(E) : 0건, 학술지 : 0건
	저작	0건
	S/W	4건 (지진피해 예측시스템, DB운영 S/W)
	신기술	0건
	기타	0건

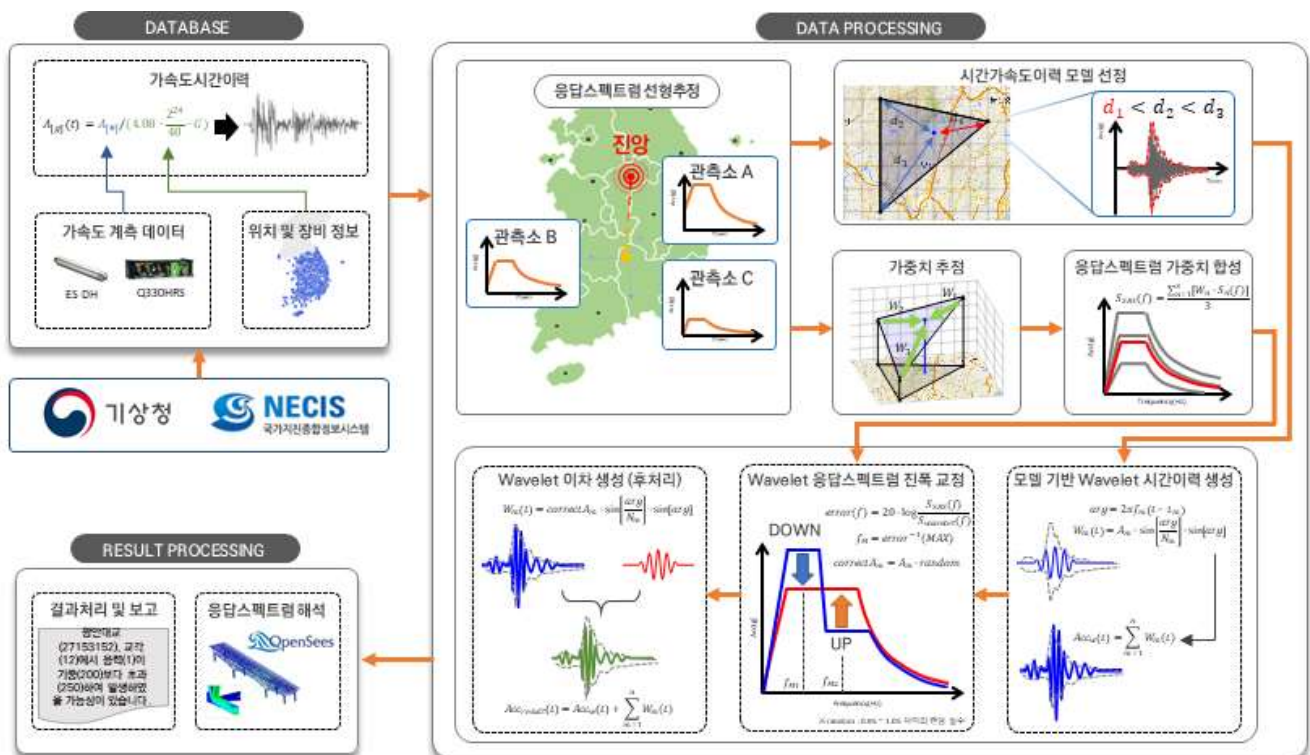


그림 3.31 교량 지진 안전성 평가 프로그램

표 3.8 정량적 연구성과 목록

구분	성과종류	성과명
01_01	[특허출원]	교량의 지진 안정성 평가를 위한 해석모델 구축 방법 및 해석모델 구축 시스템
01_02	[특허출원]	교량의 지진 안정성 평가 장치 및 방법
01_03	[특허출원]	지진가속도 시간이력 생성 방법
02_01	[특허등록]	교량의 지진 안정성 평가 장치 및 방법
02_02	[특허등록]	교량의 지진 안정성 평가를 위한 해석모델 구축 방법 및 해석모델 구축 시스템
03_01	[논문]	Component fragility assessment of a long, curved multi-frame bridge
03_02	[논문]	Seismic fragility curves for California concrete bridges with flared twocolumn
03_03	[논문]	Probabilistic seismic vulnerability assessment
03_04	[논문]	현장계측 PGA를 활용한 기존 거리감쇄식의 적용성에 관한 연구
03_05	[논문]	지진 관측데이터 기반 지반응답스펙트럼 추정 알고리즘 제안 및 평가
03_06	[논문]	관측 자료를 활용한 지진가속도 시간이력 추정방법 제안
04_01	[시제품]	교량용 동적해석개발 지진피해 추정 프로그램
05_01	[소프트웨어]	오픈시스(OpenSees)용 교량 구조 모델링 확인 프로그램
05_02	[소프트웨어]	지진 로우데이터 수집 및 지진가속도 시간이력 변환 프로그램 모듈
05_03	[소프트웨어]	지진가속도 응답스펙트럼 변환 프로그램 모듈
05_04	[소프트웨어]	교량용 지진피해 추정 프로그램
05_05	[소프트웨어]	교량 지진 안전성 평가 프로그램
05_06	[소프트웨어]	삼각망 관측치 기반 지반응답스펙트럼 산정 모듈
05_07	[소프트웨어]	시간이력해석을 통한 중소형 교량 지진 안전성 평가 프로그램
06_01	[매뉴얼]	교량용 동적해석기반 지진재해 피해추정 프로그램 매뉴얼
06_02	[매뉴얼]	교량용 동적해석기반 지진재해 피해추정 해석모델 작성 매뉴얼
07_01	[현장적용]	부산광역시 재난대응과 현장적용
07_02	[현장적용]	(국립재난안전연구원) 국토교통기술촉구 연구사업 현장 적용성 평가
08_01	[정책제안]	(부산시)지진시 시설물 긴급점검 및 유지관리활동 의사결정 지원 시스템 과제 제안
09_01	[학술발표]	OpenSees를 이용한 교량 구조물의 응답스펙트럼해석
09_02	[학술발표]	(한국지진공학회) 지반응답스펙트럼 추정에 의한 교량의 지진 안전성 평가방법
09_03	[학술발표]	(한국구조물진단유지관리공학회) 관측소 지진계측 데이터를 이용한 지반응답스펙트럼 추정
09_04	[학술발표]	(한국지진공학회) 국내발생 지진에 의한 교량의 피해사례
09_05	[학술발표]	(한국콘크리트학회) 콘크리트 박스거더 곡선교의 수치해석 모델링 가정 및 내진응답 예측
09_06	[학술발표]	(CODE2018) DEVELOPMENT OF SEISMIC DAMAGE PREDICTION SYSTEM FOR BRIDGE STRUCTURES
09_07	[학술발표]	(대한토목학회) 공공시설물 지진 안전성 평가 및 유지관리활동 의사결정 지원 시스템 개발
09_08	[학술발표]	(한국구조물진단유지관리공학회) 지진방생 후 교량의 유지관리활동 의사결정 지원방안 개발
09_09	[학술발표]	(한국소음진동공학회) 가속도 관측자료를 활용한 임의 교량 위치 지진 가속도 추정방법 개발
09_10	[학술발표]	(한중일세미나) DEVELOPMENT OF DECISION-MAKING SUPPORT METHOD FOR MAINTENANCE OF BRIDGES AFTER EARTHQUAKE
10_01	[홍보]	(건설기술신문기사) 시설물별 지진재해 대응 피해측 시스템개발 ‘눈길’
10_02	[홍보]	(한국전산구조공학회 기획기사) 지진재해대응 교량 구조물 피해예측 시스템 구축기술 개발
11_01	[보고서 및 기타]	관측자료DB
11_02	[보고서 및 기타]	시설관리DB
11_03	[보고서 및 기타]	해석모델 DB서버구축 보고서
11_04	[보고서 및 기타]	전문가 자문 및 평가

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

- (기술적 성과) 지진재해에 대비하여 중, 약진 지역인 우리나라에 적합한 교량의 지진 안전성 긴급 평가 방안을 개발한 것으로, 기존 지진재해대응시스템이 고가의 지진 관측설비 및 지반 정보를 요구하고 개별 교량의 지진 안전성을 평가할 수 없는데 반하여, 기상청에서 제공하는 지진 가속도 데이터만으로 보다 신속하고 효율적으로 개별 구조물의 안전성을 평가하는 것이 가능한 기술을 개발함
- (사회, 경제적 성과) 기존 지진 가속도계가 설치되지 않았던 2, 3종 및 종외 교량들에 대한 지진 안전성 평가를 가능하게 하며, 특히 가속도계 등의 설치가 필요하지 않아 재난대응 비용을 절감 가능

표 4.1 연구개발계획서 상 제시된 성과점검 기준

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준							양적 성과 건수	
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치			
공동	1	지반입력 가속도 추정기술	1-1 지진가속도 응답스펙트럼 변환모듈개발	①	지진정보 수집모듈	1	-	개발여부	보고서	5	특허: 출원 1 건 등록 1 건 논문: 1 건 시제품: 1 건 SW: 1 건		
				②	가속도변환 모듈	1	-	개발여부	보고서	3			
				③	응답스펙트 럼변환모듈	1	-	개발여부	보고서	2			
			1-2 지반응답스펙 트럼 산정 모듈 개발	①	지반응답 추정모듈	1	-	개발여부	전문가 평가	10		특허: 출원 1 건 등록 1 건 논문: 1 건 시제품: 1 건 SW: 1 건 한정적용: 1 건	
				②	관측자료 DB구축	1	-	구축여부	보고서	3			
				③	시설관리 DB구축	1	-	구축여부	보고서	5			
		1-3 지진피해 추정시스템 개발	①	DB 업데이트	1	-	성능향상 여부	전문가 평가	5	특허: 출원 1 건 등록 1 건 논문: 2 건 시제품: 1 건 정책제안: 1 건			
			②	시스템 고도화	1	-	성능향상 여부	전문가 평가	5				
		주관	2	교량해석 모델DB 구축기술	2-1 구조해석모델 관리도구 개발	①	해석모델 DB서버구축	1	-	구축여부	보고서	2	특허: 출원 1 건 등록 1 건 논문: 1 건 시제품: 1 건 SW: 1 건
②	시험용 모델작성					5	-	작성여부	보고서	5			
③	해석모델 운영방안					1	-	개발여부	보고서	3			
2-2 해석모델DB 고도화	①				시험용 모델작성	10	-	작성여부	보고서	5	특허: 출원 1 건 등록 1 건 논문: 1 건 시제품: 1 건 저작권: 1 건		
	②				해석결과 자료DB	1	-	구축여부	보고서	3			
2-3 해석모델DB 운영매뉴얼 개발	①				시험용 모델작성	15	-	작성여부	보고서	7	특허: 출원 1 건 등록 1 건 논문: 1 건 시제품: 1 건 매뉴얼: 1 건		
	②			운영방안 개발	1	-	개발여부	전문가 평가	2				
3	동적해석 자동화 기술			3-1 교량지진 응답스펙트럼 해석모듈개발	①	입력/모델 연계모듈	1	-	개발여부	보고서	2	특허: 출원 1 건 등록 1 건 논문: 1 건 시제품: 1 건 SW: 1 건	
					②	응답스펙트 럼해석모듈	1	-	개발여부	보고서	10		
					③	시각화 도구개발	1	-	개발여부	보고서	5		
				3-2 응답스펙트럼 해석 모듈 자동화	①	해석방법 자동화	1	-	자동화 여부	보고서	3	특허: 출원 1 건 등록 1 건 논문: 2 건 시제품: 1 건 SW: 1 건	
					②	피해추정 모듈개발	1	-	개발여부	전문가 평가	7		
			3-3 지진피해예측 시스템운영 매뉴얼 개발	①	시간이력해 석모듈개발	1	-	개발여부	보고서	5	특허: 출원 1 건 등록 1 건 논문: 1 건 시제품: 1 건 SW: 1 건		
②	전체시스템 운영절차서			1	-	작성여부	전문가 평가	3					

2. 관련 분야 기여도

- (지진재해대응) 기존 국내 지진재해대응 시스템에서 부재한 각 시설물별 안전성 분석 및 피해예측 방안을 마련함으로써 사회적으로 지진재해에 대응하는 능력을 강화하고 구조물 손상에 즉각적으로 대응이 가능하여 국민의 안전을 확보하고 기반시설의 운영 중단에 따른 경제적 손실을 최소화 하는데 기여 가능
- (국가신뢰도 제고) 지진재해에 대응하는 능력을 향상하여 기반시설의 안전성을 도모함으로써 국제적으로 다양한 산업을 유치하는데 기여가능
- (가속도계 활용도 제고) 「지진·화산재해대책법」 제6조 및 동법시행령, 「시설물의 안전관리에 관한 특별법」 등에 따라 중요 시설물의 관리주체는 구조물별 가속도 관측을 수행하고 있으나 설치된 장비의 성능 및 설치비용에 비하여 그 활용도가 낮은 상황으로 본 기술은 기존 설치된 고가의 지진 가속도계 관측 장비 활용도를 제고하는데 기여 가능

제5장. 연구개발성과의 활용계획

- (기술수요처) 국내에서는 「지진·화산재해대책법」 제14조 및 동법 시행령에 의거 시설물 관리 주체별로 다양한 구조물을 관리하고 있는 상황으로, 해당 시설물의 담당자가 지진 발생 시 직접 결정하여야 하는 구조물의 긴급점검 실시 등 효율적인 유지관리에 본 연구결과 활용 가능
 - 기존 행정안전부의 지진재해대응시스템 및 각 관리주체별로 운영하고 있는 지진대응시스템의 개별 시설물에 대한 안전성 확인이 불가능한 점을 보완 가능
 - 「도로법」, 「도시철도법」, 「철도산업발전 기본법」, 「철도건설법」 등에 의한 교량 구조물의 관리에 활용(각 지자체, 한국시설안전공단, 한국도로공사, 한국철도공사 등 주요 교량 유지관리기관)이 가능하며, 국외 강진발생 지역을 대상으로 기술 수출도 가능
- ※ 최대 가속도 측정치에 의존하고 취약도 분석에 의한 확률론적 평가방법을 적용하는 행정안전부의 지진재해대응시스템은 경주지진 발생 시 인명피해 및 재산피해를 정확하게 예측하기 어려웠으며, 특히 교량과 같은 대형 구조물의 피해를 예측하는데 적합하지 않았으나 본 연구개발 결과는 이에 대한 대응이 가능함
- ※ 경주지진과 같이 가속도는 높았으나 주파수(주기) 특성이 구조물 안전에 영향이 적은 지진 등 긴급점검 활동이 불필요한 경우에 대해서 관리자에게 유지관리 활동 미실시 판단 근거자료를 제공함으로써 유지관리 체계의 효율성 도모



그림 4.1 지진재해 상황에서 대응 실무담당자의 업무현황

- (상시 유지관리 활동에 활용) 교량의 안전점검 및 정밀안전진단 시 본 연구개발에서 구축한 DB를 활용하여 상세 구조물 손상 원인 분석 등을 지원 가능하며, 각 교량 구조물의 내진성능 목표 설정, 설계기준 개발 및 관련 정책수립 등에도 활용 가능
- 구조물 해석모델 DB의 구축 충실도 및 각 중 유지관리 활동을 통한 지속적인 업데이트가 가능한 경우 교량의 상시 유지관리 활동에 활용 가능
- ※ (해석모델DB 구축방안) 현재, 국내에는 총 30,983개소의 교량이 설치(도로 교량 및 터널 현황 조사, '15)되어 있으며, 1년에서 5년 주기로 점검 및 안전진단 활동을 수행하도록 하고 있으므로(시설물의 안전관리에 관한 특별법 시행령) 각 유지관리 활동 시 성과물로 교량의 해석모델을 제출토록 하는 경우 단기간 내에 DB구축이 가능하다고 판단됨
- (기술개발 및 교육) 본 연구에 의한 시설물 피해예측 시스템은 다양한 형식, 규모의 실험교량 현황 및 정밀 해석모델 DB를 보유하게 되므로 관련 연구 및 교육 등 지원에 활용 가능
- (다양한 시설물 적용) 본 연구는 사회기반시설물 중 교량에 한정하여 연구개발 되었으나, 시스템 내 '시설물 관리 DB' 및 '구조물 해석모델 DB'를 타 구조물에 확장하는 경우, 다양한 시설물의 개별 지진 안전성 평가에 활용 가능. 「시설물안전법」에 의거 1종 및 2종 시설물은 주기적 점검 및 정밀 안전진단을 실시하고 있으며, 이 과정에서 유한요소해석모델이 생성되므로 이를 활용할 수 있는 방안 (법령 및 조례 제정 등)을 마련하면, 다양한 시설물에 대한 해석모델DB 확보가 가능함
- (발전방향) 본 연구에서 개발된 교량 지진 안전성 평가 프로그램의 비전은 지자체 또는 시설물 관리 기관에서 운영이 가능한 중,소형 시설물의 지진재해대응시스템으로 활용되는 것이다. 이를 위해서는 다음과 같은 추가연구 및 보완이 필요할 것으로 판단된다.
 - ① 「지진대책법」에 따라 설치된 지진가속도계의 활용방안 연구
 - ② 지반증폭 현상을 고려하기 위해 딥러닝 등 기술을 기반으로 한 지진력 추정기술의 향상방안 연구
 - ③ 기존 국내 활용도가 높은 유한요소해석 프로그램을 이용하는 방안 연구
 - ④ 다양한 시설물에 대한 유한요소해석모델 DB 확장 및 노후화 등 운영현황 고려방안 연구
 - ⑤ 지진재해대응시스템 유지관리, 업그레이드, 타 시설물에 대한 적용

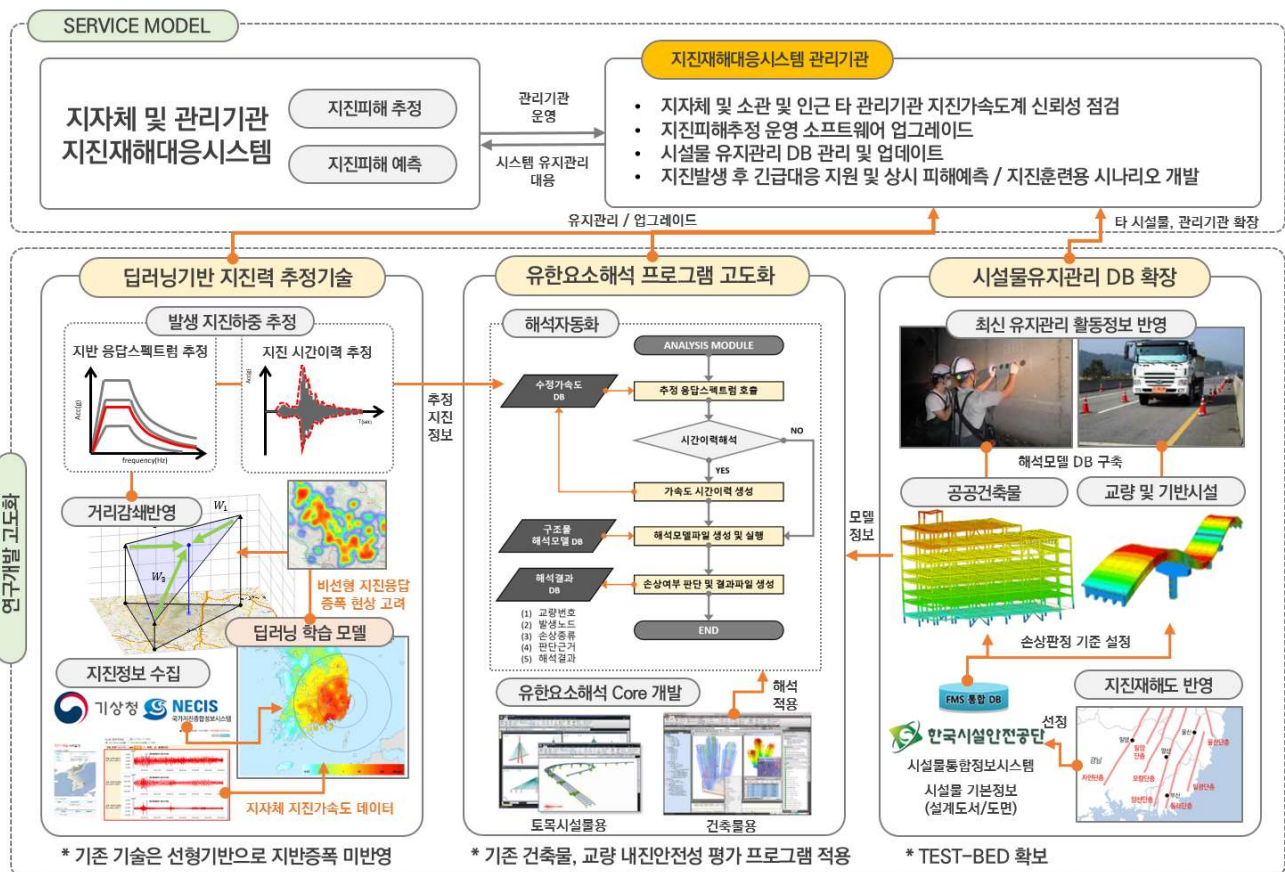


그림 4.2 중, 소형 시설물 지진 안전성 평가프로그램 발전방향

- (후속연구) 개발 기술의 활용도를 증대시키기 위하여 다음과 같은 후속연구수행 필요
 - 교량의 받침교체 등 보수·보강 현황이 해석모델DB에 반영될 수 있는 방안 연구
 - 일본, 대만 등 지진발생이 활발한 국가의 지진파, 지진피해상황 데이터 확보 및 이를 활용한 검증
 - 실용화 제고를 위하여 공공건축물 등으로 대상 구조물 확대
 - 지진력 추정 및 교량 지진 안전성 평가 방법의 실무자 교육방안
 - 개발 기술이 체계화되어 실무에 활용되기 위한 관련 법령 및 규정 제정 방안

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

- 본 연구에서 개발한 기술은 국내에서 처음 제안, 연구된 것으로서 수집된 관련 해외 과학기술 정보는 없음

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		○
결정 사유	해당없음	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황 (해당 없음)

구입 기관	연구시설/연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

- 수행한 모든 연구는 실내에서 수행되었으므로 별도의 기술력 위험요소는 분석되지 않았음
 - 안전관리대책으로 국토교통부 연구개발사업 운영규정 제21조 2항에 의거한 「연구실 안전환경 조성에 관한 법률」 및 「산업안전보건법」 등에 관련 법령에 따라 사업장에 화재 등을 대비 하여 소화기, 방독면을 비치하였으며, 안전관리에 문제가 없도록 지속적인 관리를 수행하였음
 - (연구실 안전점검 및 정밀안전진단 실시) 주요 연구공간인 지진방재연구센터에서는 각 유치기관의 실험실 안전 점검 체계에 따라 안전조치 이행계획을 수립하고 시행함
 - 각 유치기관별 안전관리규정을 비치하고 과제참여자들에게 규정을 숙지·준수할 수 있도록 정기적 교육을 실시하였음
 - 안전관리담당자를 지정하여 실험실 자체 점검체계를 관리할 수 있도록 하였음
 - 참여연구원 교육훈련 및 건강검진, 보험가입 현황
 - 신규 연구 참여자는 전문기관 의뢰를 통해 위탁교육을 실시하였으며, 기존 연구 참여자는 기관 자체적으로 집체교육 및 온라인교육을 활용하여 교육 훈련 완료(교육내용 : 연구실 안전 환경 조성에 대한 법률, 유해·위험요소 진단 등)

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일/특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	특허	교량의 안전성 평가 장치 및 방법	국토교통연구원 인프라 운영원	주관 책임	대한민국	-	2019.06.22	단독	

제11장. 참고 문헌

- [1] Silvia Mazzoni, Frank McKenna, Michael H. Scott, Gregory L. Fenves, et al. OpenSees Command Language Manual, 2006
- [2] Frank McKenna, Gregory L. Fenves, Using the OpenSees Interpreter on Parallel Computers, 2007
- [3] 한국지질자원연구원, 통합 지진관측 인프라를 활용한 지진원 평가 및 지진재해 대응 기술 개발, 2015
- [4] 오상훈, 신승훈, 화산성지진의 거리감쇠식 도출에 관한 해석적 연구, 대한건축학회논문집, 제15권, 6호, 2013
- [5] 국립재난안전연구원, 진동자료기반 시설물 위험관리방안 및 동특성 분석, 2014
- [6] 국토교통부, 도로 교량 및 터널 현황조서, 2017
- [7] 허태민, 김정한, 이진호, 김재관, 2017년 포항지진 스펙트럼과 한국표준설계스펙트럼의 비교, 한국지진공학회논문집, 제22권 3호, 2018
- [8] 지현우, 한상환, 2017년 포항지진으로 인하여 발생된 최대지반가속도(PGA) 예측, 한국지진공학회논문집, 제22권 3호, 2018
- [9] 국립재난안전연구원, 공공시설 지진가속도 응답신호 통합관리 및 정보제공 체계 개발, 2013
- [10] U.S. Nuclear Regulatory Commission, P-CARES: Probabilistic Computer Analysis for Rapid Evaluation of Structures, NUREG/CR-6922, BNL-NUREG-77338-2006, 2006
- [11] 국립재난안전연구원, 센서 모니터링 기반의 시설물 위험거동 실측 분석, 2016
- [12] 국립재난안전연구원, 재난안전 사각지대시설물의 위험징후 검측 기술개발, 2016
- [13] 권기봉, 박남률, 이석태, 지진으로 인한 건축물의 경제적 피해예측을 위한 지진재해대응시스템 구축, 한국구조물진단유지관리공학회, 제19권 2호, 2015
- [14] Boore, D.M. (2003). Simulation of ground motion using the stochastic method. Pure Appl. Geophys., Vol. 160, No. 3-4, pp. 635-676.
- [15] Chang, S.W., Bray, J.D., and Seed, R.B. (1996). Engineering implications of ground motions from the Northridge earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 86, No. 1B, pp. S270-S288.
- [16] Dobry, R., Borchardt, R.D., Crouse, C.B., Idriss, I.M., Joyner, W.B., Martin, G.R., et al. (2000). New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions. Earthquake Spectra, Vol. 16, No. 1, pp. 41-67.
- [17] Molas, G.L., and Yamazaki, F. (1995). Attenuation of earthquake ground motion in Japan including deep focus events. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 85, No. 3, pp. 1343-1358.
- [18] Seed, H.B., Romo, M.P., Sun, J., Jaime, A., and Lysmer, J. (1987). Relationships between soil conditions and earthquake ground motions in Mexico City in the earthquake of September 19, 1985. Report No. UCB/EERC-87/15, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- [19] Sugito, M., Oka, F., Yashima, A., Furumoto, Y., and Yamada, K. (2000). Time-dependent ground motion amplification characteristics at reclaimed land after the 1995 Hyogoken Nambu earthquake. Engineering Geology, Vol. 56, No. 1-2, pp. 137-150.
- [20] Tokimatsu, K., Arai, H., and Asaka, Y. (1998). Two-dimensional shear wave structure and ground motion characteristics in Kobe based on microtremor measurements. In P. Dakoulas, M. Yegian, and R.D. Holtz (Eds.), Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III (pp. 703-713), Geotechnical Special Publication No. 75, ASCE.

부록 1. 교량용 동적해석개발 지진피해 추정 프로그램 코드

○ CODE LIST

명칭	기능
api_key.mat	구글맵 API 애플리케이션에 호출되는 액세스 권한을 부여받는 사용자를 인증하는 고유 텍스트 문자열
arbit_engine.m	응답스펙트럼 댐핑 필터
Calculate.m	지진파 해석, 선형가중치 환산, 외부프로그램 호출 라이브러리
calculate_slopes.m	응답스펙트럼 미분 함수
calculate_srs.m	시간가속도이력 지진파 응답스펙트럼 생성 함수
decomposition_wgen_q_nw.m	wavelet 랜덤 생성 함수
Draw_googlemap.m	구글맵 api key 인증, 구글맵 로딩 함수 호출, 마커 삽입 라이브러리
find_max.m	2열 매트릭스 배열 변수의 최댓값 출력 함수
fix_size.m	세로 매트릭스 전치 함수
full_FFT_core.m	시간가속도이력 푸리에 변환 함수
generate_time_history_wavelet_table_q. m	wavelet 정보 배열을 시간이력으로 합성 함수
integrate_function.m	가속도이력을 속도이력으로 적분 함수
New_Adjacent_Station.m	교량의 좌표를 입력으로 인근 관측소를 3각망을 생성하는 함수
octave_interpolation.m	응답스펙트럼 주파수축 생성 함수
OpenSees.exe	유한요소해석 프로그램 외부파일
plot_google_map.m	구글맵 API 연동하여 URL 생성 및 지도 출력 모듈
Progressing.m	진행바 렌더링 모듈
quake_srs_calculate.m	지진파 추정 알고리즘 모듈
quake_srs_synth_phase_1.m	추정 지진파 1차 진폭, 주파수 보정 iteration 함수
quake_srs_synth_phase_3.m	추정 지진파 2차 진폭, 주파수 보정 iteration 함수
rspect2p2.m	시간이력을 입력으로 응답스펙트럼 변환 함수
srs_coefficients.m	응답스펙트럼 댐핑 계수 생성 함수
SRS_specification_interpolation_edit.m	응답스펙트럼 주파수 대역 보간 함수
vibrationdata_wavelet_decomposition_e ngine_q.m	시간이력 모델 기반 wavelets 생성 모듈
wavelet_integrate_q.m	1차 보정 시간이력, wavelet 합성 함수

```

% -----
% --- ver 1.01
function varargout = Main(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Main_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Main_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function Main_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
uiposition = [.02 .02 .96 .96];
set(handles.prog_uipanel, 'Position', uiposition)
set(handles.Preset_uipanel, 'Position', uiposition)
set(handles.Data_uipanel, 'Position', uiposition)
set(handles.Report_uipanel, 'Position', uiposition)

% --- progress uipanel object position ---
set(handles.prog_text, 'Position', [.05 .15 .9 .10])
set(handles.prog_calculate_uipanel, 'Position', [.05 .30 .9 .65])
set(handles.prog_cal_acc_axes, 'Position', [.05 .55 .175 .4])
set(handles.prog_cal_srs_axes, 'Position', [.275 .55 .175 .4])
set(handles.prog_cal_wavelet_axes, 'Position', [.05 .05 .4 .4])
set(handles.prog_cal_opensees_axes, 'Position', [.55 .05 .4 .4])
set(handles.prog_cal_result_list, 'Position', [.55 .55 .4 .4])
set(handles.prog_cal_backdraw_axes, 'Position', [.05 .05 .9 .9])

% --- preset panel object position ---
set(handles.preset_axes, 'Position', [.5, .12, .45, .82], 'Box', 'on')

set(handles.eq_path_text, 'Position', [.08 .9 .05 .04])
set(handles.str_path_text, 'Position', [.08 .85 .05 .04])
set(handles.acc_path_text, 'Position', [.08 .8 .05 .04])
set(handles.mdl_path_text, 'Position', [.08 .75 .05 .04])
set(handles.inst_path_text, 'Position', [.08 .7 .05 .04])

set(handles.eq_path_edit, 'Position', [.14 .9 .20 .04])
set(handles.str_path_edit, 'Position', [.14 .85 .20 .04])
set(handles.acc_path_edit, 'Position', [.14 .8 .20 .04])
set(handles.mdl_path_edit, 'Position', [.14 .75 .20 .04])
set(handles.inst_path_edit, 'Position', [.14 .7 .20 .04])

set(handles.eq_path_pushbutton, 'Position', [.35 .9 .05 .04])
set(handles.str_path_pushbutton, 'Position', [.35 .85 .05 .04])
set(handles.acc_path_pushbutton, 'Position', [.35 .8 .05 .04])
set(handles.mdl_path_pushbutton, 'Position', [.35 .75 .05 .04])

```

```

set(handles.inst_path_pushbutton, 'Position', [.35 .7 .05 .04])

set(handles.eq_open_pushbutton, 'Position', [.41 .9 .05 .04])
set(handles.str_open_pushbutton, 'Position', [.41 .85 .05 .04])
set(handles.acc_open_pushbutton, 'Position', [.41 .8 .05 .04])
set(handles.mdl_open_pushbutton, 'Position', [.41 .75 .05 .04])
set(handles.inst_open_pushbutton, 'Position', [.41 .7 .05 .04])

set(handles.latitude_text, 'Position', [.08 .6 .05 .04])
set(handles.longitude_text, 'Position', [.2 .6 .05 .04])
set(handles.magnitude_text, 'Position', [.32 .6 .05 .04])

set(handles.latitude_edit, 'Position', [.13 .6 .05 .04])
set(handles.longitude_edit, 'Position', [.25 .6 .05 .04])
set(handles.magnitude_edit, 'Position', [.37 .6 .05 .04])

set(handles.structural_uitable, 'Position', [.08 .2 .38 .36])

set(handles.stop_pushbutton, 'Position', [.08 .1 .18 .08])
set(handles.calculate_pushbutton, 'Position', [.28 .1 .18 .08])

set(handles.prog_axes, 'Position', [.08 .05 .87 .025])

% --- datapanel object position ---
set(handles.data_step1_axes, 'Position', [.05 .58 .1875 .392])
set(handles.data_step2_axes, 'Position', [.2875 .42 .1875 .392])
set(handles.data_step3_axes, 'Position', [.525 .26 .1875 .392])
set(handles.data_step4_axes, 'Position', [.7625 .1 .1875 .392])

set(handles.data_step1_axes, 'XColor', 'none', 'YColor', 'none');
set(handles.data_step2_axes, 'XColor', 'none', 'YColor', 'none');
set(handles.data_step3_axes, 'XColor', 'none', 'YColor', 'none');
set(handles.data_step4_axes, 'XColor', 'none', 'YColor', 'none');

% --- report panel object position ---
set(handles.report_data_uipanel, 'Position', [.3 .02 .68 .96])
set(handles.report_wavelets_uipanel, 'Position', [.3 .26 .68 .24])
set(handles.report_analysis_uipanel, 'Position', rf(.5, .35, .98, .98))

% object position
set(handles.report_uitable, 'Position', rf(.02, .02, .27, .46))
set(handles.report_uitable, 'Visible', 'On')
set(handles.report_uibuttongroup, 'Position', rf(.02, .92, .27, .98))
set(handles.report_axes, 'Position', [.02 .50 .25 .40], 'Box', 'on')

set(handles.data_radiobutton, 'Position', [.05 .05 .5 .9])
set(handles.analysis_radiobutton, 'Position', [.5 .05 .5 .9])

set(handles.report_data_uipanel, 'Visible', 'On')
set(handles.report_wavelets_uipanel, 'Visible', 'Off')
set(handles.report_analysis_uipanel, 'Visible', 'Off')
set(handles.report_data_uibuttongroup, 'Visible', 'On')

% data panel
set(handles.report_data_uibuttongroup, 'Position', rf(.07, .33, .18, .67))
set(handles.report_srs_radiobutton, 'Position', [.10 .05 .9 .4])
set(handles.report_acc_radiobutton, 'Position', [.10 .55 .9 .4])
set(handles.report_data_trig_axes, 'Position', rf(.25, .33, .75, .67), 'Box',
'on')

```

```

set(handles.report_data_g1_axes, 'Position', [.07 .71 .26 .25], 'Box', 'on')
set(handles.report_data_g2_axes, 'Position', [.39 .71 .26 .25], 'Box', 'on')
set(handles.report_data_g3_axes, 'Position', [.71 .71 .26 .25], 'Box', 'on')
set(handles.report_data_gm_axes, 'Position', rf(.07, .06, .48, .27), 'Box', 'on')
set(handles.report_wavelet_g_axes, 'Position', rf(.55, .06, .96, .27), 'Box',
'on')

% analysis
set(handles.report_analysis_axes, 'Position', rf(.1, .04, .9, .48))
set(handles.report_analysis_listbox, 'Position', rf(.1, .52, .9, .96))

set(handles.report_analysis_uitable, 'Position', rf(.02, .02, .98, .33))
set(handles.report_analysis_uitable, 'Visible', 'Off')

% Render_uipanel(handles, 1)
Render_uipanel(handles, 2)

handles.calculated = [];
handles.report_select = 1;
handles.ver = 'ver.1.00';

handles.output = hObject;

guidata(hObject, handles);

function varargout = Main_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% --- Draw in uipanel object ---
set(handles.prog_axes, 'Visible', 'off')

init_preset_axes(handles.preset_axes)

title(handles.report_data_gm_axes, 'Source')
title(handles.report_wavelet_g_axes, 'Estimate')

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

function init_preset_axes(h)
mapHandle = Draw_googlemap;
mapHandle = mapping_init(mapHandle, h);
map_axis(mapHandle, [123.5 132 32 41])
draw_google(mapHandle, h)

function form = rf(x1,y1,x2,y2)
form = [x1, y1, x2-x1, y2-y1];

% -----
% -----
% --- CORE ---
% -----

function calculate_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.calculate_pushbutton, 'Enable', 'off')
pause(0.1)

global stop_controll
stop_controll = false;

data_struct.eq_path = get(handles.eq_path_edit, 'String');

```

```

data_struct.str_path = get(handles.str_path_edit, 'String');
data_struct.acc_path = get(handles.acc_path_edit, 'String');
data_struct.mdl_path = get(handles.mdl_path_edit, 'String');
data_struct.inst_path = get(handles.inst_path_edit, 'String');

data_struct.latitude = str2double(get(handles.latitude_edit, 'String'));
data_struct.longitude = str2double(get(handles.longitude_edit, 'String'));
data_struct.M = str2double(get(handles.magnitude_edit, 'String'));

main = Calculate;
main = Calculate_defind(main, data_struct);
main = Calculate_targetscale(main);
main = Calculate_wavelet_setup(main);

input = {main, []};
output = {[], []];

prog = Progressing;
prog = Prog_render_init(prog, handles.prog_axes);
Prog_render(prog, 0)
set(handles.prog_axes, 'Visible', 'on')
pause(0.1)

poolobj = parpool(2);

n = size(main.str_code);
n = n(1);
for t = 1:(n+1)
    if stop_controll
        break
    end
    if t ~= 1
        log_file = ['openseesLog\ ', char(main.str_code(t-1,2)), '.txt'];
        if exist(log_file, 'file')
            fid = fopen(log_file, 'w+');
            fprintf(fid, '');
            fclose(fid);
        end
        diary(log_file)
    end
    pause(0.1)
    parfor p = 1:2
        switch p
            case 1
                if t ~= n+1
                    output{p} = Calculate_wavelet_progress(input{p}, t);
                end
            case 2
                if ~isempty(input{p})
                    output{p} = Calculate_opensees(input{p}, t-1);
                end
            end
        end
    end
    if t ~= 1
        diary off
    end
    input{2} = output{1};
    main_par{t} = output{2};
    if t <= n

```

```

        Prog_render(prog, t/n)
    end
end

delete(poolobj)

main = Calculate_reassemble(main, main_par);

handles.calculated = main;
handles.inputs = data_struct;
guidata(hObject, handles);

set(handles.prog_axes, 'Visible', 'off')
Render_uipanel(handles, 4)
t = 1;
draw_report_init(t, handles)
set(handles.calculate_pushbutton, 'Enable', 'on')

function stop_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
global stop_controll
stop_controll = true;
disp("push stop")

% -----
function render_report_panel_fnc(handles, selector)
switch selector
    case 1
        set(handles.report_data_uipanel, 'Visible', 'On')
        set(handles.report_analysis_uipanel, 'Visible', 'Off')
        set(handles.report_wavelets_uipanel, 'Visible', 'Off')
        set(handles.report_uitable, 'Visible', 'On')
        set(handles.report_analysis_uitable, 'Visible', 'Off')
        set(handles.report_axes, 'Position', [.02 .50 .25 .40])
        set(handles.report_uibuttongroup, 'Position', rf(.02, .92, .27, .98))
    case 2
        set(handles.report_data_uipanel, 'Visible', 'Off')
        set(handles.report_analysis_uipanel, 'Visible', 'On')
        set(handles.report_wavelets_uipanel, 'Visible', 'Off')
        set(handles.report_uitable, 'Visible', 'Off')
        set(handles.report_analysis_uitable, 'Visible', 'On')
        set(handles.report_axes, 'Position', [.02 .38 .4 .52])
        set(handles.report_uibuttongroup, 'Position', rf(.02, .92, .42, .98))
end

function report_uitable_CellSelectionCallback(hObject, eventdata, handles)
if isempty(eventdata.Indices(1))
    row = 1;
else
    row = eventdata.Indices(1);
end
t = row;
handles.report_select = t;
guidata(hObject, handles);
draw_report(t, handles)

function report_analysis_uitable_CellSelectionCallback(hObject, eventdata,
handles)
if isempty(eventdata.Indices(1))
    row = 1;

```

```

else
    row = eventdata.Indices(1);
end
t = row;
handles.report_select = t;
guidata(hObject, handles);
draw_report(t, handles)

% ---- Report data type render ----
function report_data_uibuttongroup_SelectionChangedFcn(hObject, eventdata, handles)
persistent mapHandle
if isempty(mapHandle)
    mapHandle = Draw_googlemap;
    mapHandle = mapping_init(mapHandle, handles.report_data_trig_axes);
end
select = handles.report_select;
if exist('select')
    t = handles.report_select;
else
    t = 1;
end
draw_data(t, handles)
draw_wavelets(t, handles)
draw_google(mapHandle, handles.report_data_trig_axes)

% ---- Report uipanel visible selector ----
function report_uibuttongroup_SelectionChangedFcn(hObject, eventdata, handles)
switch hObject
case handles.data_radiobutton
    selector = 1;
case handles.analysis_radiobutton
    selector = 2;
end
render_report_panel_fnc(handles, selector)

% -----
function draw_report_init(t, handles)
Report_pack = handles.calculated;

set(handles.report_uitable, 'ColumnName', {'시설물번호', '결과'})
set(handles.report_uitable, 'Data', cellstr(Report_pack.str_code_result(:,1:2)))

column = Report_pack.str_column;
column(1) = column(2);
column(2) = "결과";

set(handles.report_analysis_uitable, 'ColumnName', column)
set(handles.report_analysis_uitable, 'Data', cellstr(Report_pack.str_code_result))

title(handles.report_data_gm_axes, 'Source')
title(handles.report_wavelet_g_axes, 'Estimate')

draw_report(t, handles)

function draw_report(t, handles)
persistent mapHandle
if isempty(mapHandle)

```

```

    mapHandle = Draw_googlemap;
    mapHandle = mapping_init(mapHandle, handles.report_axes);
end
draw_trig(t, handles)
draw_data(t, handles)
draw_wavelets(t, handles)
draw_analysis(t, handles)

draw_google(mapHandle, handles.report_axes)
draw_google(mapHandle, handles.report_data_trig_axes)

function draw_trig(t, handles)
persistent draw_flag
if isempty(draw_flag)
    draw_flag = true;
else
    cla(handles.report_axes)
end
Report_pack = handles.calculated;
t_xy = Report_pack.str_data(t,[3 2]);
eq_xy = Report_pack.eq_coordinate([2 1]);
plot(handles.report_axes,...
    [t_xy(1) eq_xy(1)], [t_xy(2) eq_xy(2)], '--r', 'LineWidth', 1);
plot(handles.report_axes,...
    eq_xy(1), eq_xy(2), 'p', 'MarkerEdgeColor', 'r', 'MarkerFaceColor', 'r',
'Markersize', 10);

index_array = Report_pack.report(t).trig_index;
codes_array = Report_pack.report(t).trig_codes;
data_f = Report_pack.data_f;
size_index = size(index_array);
for p = 1:size_index(1)
    index = index_array(p,:);
    codes = codes_array(:,p);
    co_x = [data_f(index,2); data_f(index(1),2)];
    co_y = [data_f(index,1); data_f(index(1),1)];
    plot(handles.report_axes,...
        co_x, co_y, 'color', [.5 1 .5], 'LineWidth', 2);
    text(handles.report_axes,...
        co_x(1:3), co_y(1:3), codes)
end
minx = min([co_x; eq_xy(1)]); maxx = max([co_x; eq_xy(1)]);
miny = min([co_y; eq_xy(2)]); maxy = max([co_y; eq_xy(2)]);
var_lim = [minx, maxx, miny, maxy] + [-(maxx-minx)/2, (maxx-minx)/2,
-(maxy-miny)/2, (maxy-miny)/2];
axis(handles.report_axes,var_lim)
plot(handles.report_axes,...
    t_xy(1), t_xy(2), 's', 'MarkerEdgeColor','b' , 'MarkerfaceColor', [0.5 0.5 1],
'Markersize', 10);

function draw_data(t, handles)
persistent draw_flag
if isempty(draw_flag)
    draw_flag = true;
else
    cla(handles.report_data_trig_axes)
    cla(handles.report_data_g1_axes)
    cla(handles.report_data_g2_axes)
    cla(handles.report_data_g3_axes)

```

```

        cla(handles.report_data_gm_axes)
    end
    Report_pack = handles.calculated;
    t_xy = Report_pack.str_data(t,2:3);
    index_array = Report_pack.report(t).trig_index;
    codes_array = Report_pack.report(t).trig_codes;
    data_f = Report_pack.data_f;
    codes_f = Report_pack.codes_f;
    size_index = size(index_array);

    color_array = [0 0 1; 1 0 0];

    plot3(handles.report_data_trig_axes,...
        t_xy(2), t_xy(1), 0.00001, 's', 'Color', [.5 .5 1], 'markersize', 7,
        'markerface', [.5 .5 1])
    grid(handles.report_data_trig_axes,'on')
    hold(handles.report_data_trig_axes,'on')
    for p = 1:size_index(1)
        index = index_array(p,:);
        co_x = data_f(index,2);
        co_y = data_f(index,1);

        op_coor = [co_x(1), co_y(1), 0.00001;
                   co_x(2), co_y(2), 0.00001;
                   co_x(3), co_y(3), 0.00001 ];
        patch(handles.report_data_trig_axes,...
            'Faces' ,[1 2 3] , 'Vertices', op_coor, 'Facecolor', [.1 .1 .1],
            'linewidth', 1.5);
        view(handles.report_data_trig_axes,3);
        alpha(handles.report_data_trig_axes,0.2);

        for d = 1:2
            pga{d} = [ Report_pack.data_struct(index(1)).PGA{d};...
                      Report_pack.data_struct(index(2)).PGA{d};...
                      Report_pack.data_struct(index(3)).PGA{d} ];
            coor_PGA = [co_x co_y pga{d}];
            plane(1,:) = cross((coor_PGA(1,:)-coor_PGA(2,:)),
            (coor_PGA(1,:)-coor_PGA(3,:)));
            PGA_PM = -( plane(1,1)*t_xy(2) + plane(1,2)*t_xy(1) - dot(plane(1,:) ,
            coor_PGA(1,:)) )/plane(1,3);
            plot3(handles.report_data_trig_axes,...
                [t_xy(2), t_xy(2)], [t_xy(1) t_xy(1)], [0.00001 PGA_PM], 'b',
                'linewidth', 1.5)
            plot3(handles.report_data_trig_axes,...
                [co_x(1), co_x(1)], [co_y(1) co_y(1)], [0.00001 pga{d}(1)], 'k',
                'linewidth', 1.5)
            plot3(handles.report_data_trig_axes,...
                [co_x(2), co_x(2)], [co_y(2) co_y(2)], [0.00001 pga{d}(2)], 'k',
                'linewidth', 1.5)
            plot3(handles.report_data_trig_axes,...
                [co_x(3), co_x(3)], [co_y(3) co_y(3)], [0.00001 pga{d}(3)], 'k',
                'linewidth', 1.5)

            color = color_array(d,:);
            patch(handles.report_data_trig_axes,...
                'Faces' ,[1 2 3] , 'Vertices', coor_PGA, 'Facecolor', color,
                'linewidth', 1.5);
            view(handles.report_data_trig_axes,3);
            alpha(handles.report_data_trig_axes,0.2);
        end
    end
end

```

```

        plot3(handles.report_data_trig_axes,...
            t_xy(2), t_xy(1), PGA_PM, 'ob', 'markersize', 5, 'markerface', 'b')
        plot3(handles.report_data_trig_axes,...
            co_x, co_y, pga{d}*.96, '^k', 'markersize', 5, 'markerface', 'k')

        PGA_PM_d(d,1) = PGA_PM;
    end
    plot3(handles.report_data_trig_axes,...
        co_x, co_y, [0.00001 0.00001 0.00001], 'ok', 'markersize', 5, 'markerface',
        'k')

    x_array(:,p) = [co_x; t_xy(2)];
    y_array(:,p) = [co_y; t_xy(1)];
end
x_lim = [min(x_array(:)) max(x_array(:))];
y_lim = [min(y_array(:)) max(y_array(:))];
z_lim = [0 max([pga{1}; pga{2}; PGA_PM_d])*1.1];
axis(handles.report_data_trig_axes, [x_lim y_lim z_lim])

h_data{1} = handles.report_data_g1_axes;
h_data{2} = handles.report_data_g2_axes;
h_data{3} = handles.report_data_g3_axes;
if get(handles.report_acc_radiobutton, 'Value')
    lim_y = max([pga{1}; pga{2}])*1.1;
    for i = 1:3
        for d = 1:2
            color = color_array(d,:);
            acc = Report_pack.data_struct(index(i)).ag{d};
            plot(h_data{i},...
                acc(:,1), acc(:,2), 'Color', color)
            hold(h_data{i}, 'on')
        end
        set(h_data{i}, 'Yscale', 'linear')
        ylim(h_data{i}, [-lim_y lim_y])
        xlim(h_data{i}, [acc(1,1) acc(end,1)])
        title(h_data{i}, codes_array(i))
        legend(h_data{i}, {"EW", "NS"}, 'Box', 'off')
        grid(h_data{i}, 'on')
    end
    for d = 1:2
        color = color_array(d,:);
        acc_model = Report_pack.report(t).acc_model{d};
        plot(handles.report_data_gm_axes,...
            acc_model(:,1), acc_model(:,2), 'Color', color)
        hold(handles.report_data_gm_axes, 'on')
    end
    set(handles.report_data_gm_axes, 'Yscale', 'linear')
    xlim(handles.report_data_gm_axes, [acc_model(1,1) acc_model(end,1)])
    ylim(handles.report_data_gm_axes, [-lim_y lim_y])
    legend(handles.report_data_gm_axes, {"EW", "NS"}, 'Box', 'off')
    grid(handles.report_data_gm_axes, 'on')
else
    for i = 1:3
        for d = 1:2
            srs = Report_pack.data_struct(index(i)).SRS{d};
            max_srs(i,d) = max(srs(:,2));
        end
    end
end

```

```

lim_y = max( max_srs(:) ) * 2;
for i = 1:3
    for d = 1:2
        color = color_array(d,:);
        srs = Report_pack.data_struct(index(i)).SRS{d};
        plot(h_data{i},...
            srs(:,1), srs(:,2), 'Color', color)
        hold(h_data{i}, 'on')
    end
    ylim(h_data{i}, [0 lim_y])
    xlim(h_data{i}, [0 15.1])
    title(h_data{i}, codes_array(i))
    set(h_data{i}, 'Yscale', 'log')
    legend(h_data{i}, {'EW', 'NS'}, 'Box', 'off')
    grid(h_data{i}, 'on')
end
for d = 1:2
    color = color_array(d,:);
    srs_compose = Report_pack.report(t).srs_compose{d};
    plot(handles.report_data_gm_axes,...
        srs_compose(:,1), srs_compose(:,2), 'Color', color)
    hold(handles.report_data_gm_axes, 'on')
end
ylim(handles.report_data_gm_axes, [0 lim_y])
xlim(handles.report_data_gm_axes, [0 15.1])
set(handles.report_data_gm_axes, 'Yscale', 'log')
legend(handles.report_data_gm_axes, {'EW', 'NS'}, 'Box', 'off')
grid(handles.report_data_gm_axes, 'on')
end

function draw_wavelets(t, handles)
persistent draw_flag
if isempty(draw_flag)
    draw_flag = true;
else
    cla(handles.report_wavelet_g_axes)
end
Report_pack = handles.calculated;
color_array = [0 0 1; 1 0 0];
hold(handles.report_wavelet_g_axes, 'on')
if get(handles.report_acc_radiobutton, 'Value')
    for d = 1:2
        color = color_array(d,:);
        acc_p = Report_pack.report(t).acc_p{d};
        acc_lim(d) = max(abs(acc_p(:,2))));
        plot(handles.report_wavelet_g_axes,...
            acc_p(:,1), acc_p(:,2), 'Color', color)
    end
    lim_y = max(acc_lim) * 1.1;
    xlim(handles.report_wavelet_g_axes, [0 60])
    ylim(handles.report_wavelet_g_axes, [-lim_y lim_y])
    set(handles.report_wavelet_g_axes, 'Yscale', 'linear')
    legend(handles.report_wavelet_g_axes, {'EW', 'NS'}, 'Box', 'off')
    grid(handles.report_wavelet_g_axes, 'on')
else
    for d = 1:2
        color = color_array(d,:);
        srs_p = Report_pack.report(t).srs_p{d};
        srs_lim(d) = max(srs_p(:,2));

```

```

        plot(handles.report_wavelet_g_axes,...
            srs_p(:,1),srs_p(:,2), 'Color', color)
    end
    lim_y = max(srs_lim)*2;
    ylim(handles.report_wavelet_g_axes, [0 lim_y])
    xlim(handles.report_wavelet_g_axes, [0 15.1])
    set(handles.report_wavelet_g_axes, 'Yscale', 'log')
    legend(handles.report_wavelet_g_axes, {"EW", "NS"}, 'Box', 'off')
    grid(handles.report_wavelet_g_axes, 'on')
end

function draw_analysis(t, handles)
persistent draw_flag
if isempty(draw_flag)
    draw_flag = true;
else
    cla(handles.report_analysis_axes)
    set(handles.report_analysis_listbox, 'Value', 1)
end
Report_pack = handles.calculated;
plot_model(t, Report_pack, handles)

function plot_model(t, Report_pack, handles)
name = char(Report_pack.str_code(t,2));
mdl_path = Report_pack.mdl_path;

dirtytype = exist( [mdl_path '\\' name '\\' name, '\Node.node'], 'file' );

if dirtytype
    modeling(handles.report_analysis_axes, mdl_path, name)

    f = fopen(['openseesLog\\', name, '.txt'], 'r');
    command_log = fscanf(f, '%c');
    set(handles.report_analysis_listbox, 'String', command_log)
else
    plot(handles.report_analysis_axes, [0 0; 1 1], [1 0; 0 1], 'k')
    set(handles.report_analysis_axes, 'XColor', 'none', 'YColor', 'none')

    f = fopen(['openseesLog\\', name, '.txt'], 'r');
    command_log = fscanf(f, '%c');
    set(handles.report_analysis_listbox, 'String', command_log)
end

function modeling(h, mdl_path, name)

temp_dir = [mdl_path '\\' name '\\' name];

nd=load(strcat([temp_dir '\Node.node']));
el=load(strcat([temp_dir '\Element.elem']));

p      1      o      t      3      (      h      ,
nd(:,2),nd(:,4),nd(:,3), 'ok', 'LineWidth', 0.5, 'MarkerSize', 2, 'MarkerFaceColor', 'k'
')
axis(h, [-100 2500 -350 100 -500 500])
hold(h, 'on')

for i=1:length(el)
    for j=1:length(nd)

```

```

        if nd(j,1)==el(i,2)
            x(1)=nd(j,2);
            y(1)=nd(j,4);
            z(1)=nd(j,3);
        elseif nd(j,1)== el(i,3)
            x(2)=nd(j,2);
            y(2)=nd(j,4);
            z(2)=nd(j,3);
        end
    end
    plot3(h, x,y,z, '-k', 'LineWidth',0.5)
end

[node(:,1), in]=sort(nd(:,1));

for i=1:length(nd)
    node(i,2)=nd(in(i),2);
    node(i,3)=nd(in(i),3);
    node(i,4)=nd(in(i),4);
end

axis(h, 'equal', 'tight')
axis(h, 'off')
view(h, [30 -30])

hold(h, 'off')

% -----
function data_step1_axes_ButtonDownFcn(hObject, eventdata, handles)

function data_step2_axes_ButtonDownFcn(hObject, eventdata, handles)

function data_step3_axes_ButtonDownFcn(hObject, eventdata, handles)

function data_step4_axes_ButtonDownFcn(hObject, eventdata, handles)

% -----
function Render_uipanel(handles, select)
switch select
    case 1
        set(handles.prog_uipanel, 'Visible', 'On')
        set(handles.Preset_uipanel, 'Visible', 'Off')
        set(handles.Data_uipanel, 'Visible', 'Off')
        set(handles.Report_uipanel, 'Visible', 'Off')
    case 2
        set(handles.prog_uipanel, 'Visible', 'Off')
        set(handles.Preset_uipanel, 'Visible', 'On')
        set(handles.Data_uipanel, 'Visible', 'Off')
        set(handles.Report_uipanel, 'Visible', 'Off')
        init_preset_axes(handles.preset_axes)
    case 3
        set(handles.prog_uipanel, 'Visible', 'Off')
        set(handles.Preset_uipanel, 'Visible', 'Off')
        set(handles.Data_uipanel, 'Visible', 'On')
        set(handles.Report_uipanel, 'Visible', 'Off')
    case 4
        set(handles.prog_uipanel, 'Visible', 'Off')
        set(handles.Preset_uipanel, 'Visible', 'Off')
        set(handles.Data_uipanel, 'Visible', 'Off')

```

```

        set(handles.Report_uipanel, 'Visible', 'On')
    otherwise
        set(handles.prog_uipanel, 'Visible', 'Off')
        set(handles.Preset_uipanel, 'Visible', 'Off')
        set(handles.Data_uipanel, 'Visible', 'Off')
        set(handles.Report_uipanel, 'Visible', 'Off')
    end

% -----
function File_Menu_Callback(hObject, eventdata, handles)

% -----
function setting_Menu_Callback(hObject, eventdata, handles)

% -----
function View_Menu_Callback(hObject, eventdata, handles)

% -----
function Preset_View_Menu_Callback(hObject, eventdata, handles)
Render_uipanel(handles, 2)

% -----
function Data_View_Menu_Callback(hObject, eventdata, handles)
Render_uipanel(handles, 3)

% -----
function Report_View_Menu_Callback(hObject, eventdata, handles)
Render_uipanel(handles, 4)

% -----
function Data_Setting_Menu_Callback(hObject, eventdata, handles)
mkdir([pwd '\DB'])
mkdir([pwd '\DB\eq'])
mkdir([pwd '\DB\str'])
mkdir([pwd '\DB\acc'])
mkdir([pwd '\DB\mdl'])
mkdir([pwd '\DB\inst'])

% -----
function Conf_Setting_Menu_Callback(hObject, eventdata, handles)

% -----
function New_File_Menu_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.calculate_pushbutton, 'Enable', 'on')

% -----
function Open_File_Menu_Callback(hObject, eventdata, handles)
[file,path] = uigetfile({'*.mat','Matlab Files (*.mat)'}, ...
    'Select a File', pwd);

load([path file])
handles.calculated = Report_pack;
handles.inputs = inputs;

set(handles.eq_path_edit, 'String', handles.inputs.eq_path)
set(handles.str_path_edit, 'String', handles.inputs.str_path)
set(handles.acc_path_edit, 'String', handles.inputs.acc_path)
set(handles.mdl_path_edit, 'String', handles.inputs.mdl_path)

```

```

set(handles.inst_path_edit, 'String', handles.inputs.inst_path)
set(handles.latitude_edit, 'String', handles.inputs.latitude)
set(handles.longitude_edit, 'String', handles.inputs.longitude)
set(handles.magnitude_edit, 'String', handles.inputs.M)

str_loader(handles, handles.inputs.str_path)
render_eq(handles)

Render_uipanel(handles, 4)
t = 1;
draw_report_init(t, handles)
guidata(hObject, handles);

% -----
function Save_File_Menu_Callback(hObject, eventdata, handles)
Report_pack = handles.calculated;
inputs = handles.inputs;
[file,path] = uiputfile({'*.mat','Matlab Files (*.mat)'}, ...
    'Save file', pwd);
save([path file], 'Report_pack', 'inputs')

% -----
function Print_File_Menu_Callback(hObject, eventdata, handles)
Report_pack = handles.calculated;

[file,path] = uiputfile({'*.xlsx;*.xls;', 'Excel Files (*.xlsx,*.xls)';
    '*.*', 'All Files (*.*)'}, ...
    'Select a File', pwd);

column = Report_pack.str_column;
data = Report_pack.str_code_result;
code = Report_pack.str_code(:,2);
len = length(code);

id = '지정한 워크시트가 추가되었습니다.';
warning('off', id)

h = waitbar(0, 'Process . . . ');

for s = 1:len
    waitbar(s/len,h)
    xlswrite([path file], ["time", "acc_x", "time", "acc_y", "freq", "amp_x",
"freq", "amp_y"], code(s), 'A1')
    xlsdata_data = [Report_pack.report(s).acc_p{1}
Report_pack.report(s).acc_p{2}];
    xlswrite([path file], xlsdata_data, code(s), 'A2')
    xlsdata_data = [Report_pack.report(s).srs_p{1}
Report_pack.report(s).srs_p{2}];
    xlswrite([path file], xlsdata_data, code(s), 'E2')
end
xlsdata_list = [column; data];
xlswrite([path file], xlsdata_list, 'sheet1')

close(h); clear h;

function str_loader(handles, path)
[~,~,str_cell] = xlsread(path);
str_size = size(rmmissing(string(str_cell(:,2)))));
str_str = string(str_cell(2:str_size(1)+1,:));

```

```

str_column = cellstr(str_str(1,:));
str_table = cellstr(str_str(2:end,:));
set(handles.structural_uitable, 'ColumnName', str_column);
set(handles.structural_uitable, 'Data', str_table);

% --- inst plot ---
function render_inst(handles, path)
persistent p
persistent path_temp
persistent data
if ~isempty(p)
    delete(p)
end
if ~strcmp(path_temp, path)
    if ~strcmp(path, '')
        [data, codes, ~] = xlsread(path);
        data = data(:, [7, 8, 9, 14, 44, 45, 46, 58, 64]);
        codes = string(codes(7:end, [4, 36, 56, 62]));
        sensortype = data(:, 4) == 1;
        data(~sensortype, :) = [];
        codes(~sensortype, :) = [];
        path_temp = path;
    end
end
if ~isempty(data)
    p = plot(handles.preset_axes, data(1:end, 2), data(1:end, 1), '.', 'markersize',
4, 'color', 'm');
end

function render_eq(handles)
persistent p
if ~isempty(p)
    delete(p)
end
x = str2double(get(handles.longitude_edit, 'String'));
y = str2double(get(handles.latitude_edit, 'String'));
if ~isnan(x) && ~isnan(y)
    p = plot(x, y, 'pk', 'markerfacecolor', [1 0 0], 'markersize', 9);
end

% -----
% --- PATH 버튼 구현 ---
% -----
function acc_path_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
editstr = get(handles.acc_path_edit, 'String');
if isempty(editstr)
    path = uigetdir(pwd);
else
    path = uigetdir(editstr);
end
set(handles.acc_path_edit, 'String', path)
function str_path_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
editstr = get(handles.str_path_edit, 'String');
if isempty(editstr)
    [file, path] = uigetfile({'*.xlsx;*.xls;', 'Excel Files (*.xlsx,*.xls)';
    '*.*', 'All Files (*.*)'}, ...
    'Select a File', pwd);
else
    [file, path] = uigetfile({'*.xlsx;*.xls;', 'Excel Files (*.xlsx,*.xls)';

```

```

        '*.*', 'All Files (*.*)'}, ...
        'Select a File', editstr);
end
set(handles.str_path_edit, 'String', [path '\\' file])
str_loader(handles, [path '\\' file])
function eq_path_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
editstr = get(handles.eq_path_edit, 'String');
if isempty(editstr)
    path = uigetdir(pwd);
else
    path = uigetdir(editstr);
end
set(handles.eq_path_edit, 'String', path)
function mdl_path_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
editstr = get(handles.mdl_path_edit, 'String');
if isempty(editstr)
    path = uigetdir(pwd);
else
    path = uigetdir(editstr);
end
set(handles.mdl_path_edit, 'String', path)
function inst_path_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
editstr = get(handles.inst_path_edit, 'String');
if isempty(editstr)
    [file,path] = uigetfile({'*.xlsx;*.xls;', 'Excel Files (*.xlsx,*.xls)';
        '*.*', 'All Files (*.*)'}, ...
        'Select a File', pwd);
else
    [file,path] = uigetfile({'*.xlsx;*.xls;', 'Excel Files (*.xlsx,*.xls)';
        '*.*', 'All Files (*.*)'}, ...
        'Select a File', editstr);
end
set(handles.inst_path_edit, 'String', [path '\\' file])
render_inst(handles, [path '\\' file])

% -----
% --- OPEN 버튼 구현 ---
% -----
function acc_open_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
editstr = get(handles.acc_path_edit, 'String');
if isempty(editstr)
    winopen(pwd);
else
    winopen(editstr);
end
function str_open_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
editstr = get(handles.str_path_edit, 'String');
if isempty(editstr)
    winopen(pwd);
else
    splitdot = split(string(editstr), ".");
    if length(splitdot) > 1
        splitback = split(splitdot(1), "\\");
        splitback(end) = [];
        editstr = splitback(1);
        for i = 2:length(splitback)
            editstr = editstr+"\"+splitback(i);
        end
    end
end

```

```

        editstr = char(editstr);
    end
    winopen(editstr);
end
function eq_open_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
editstr = get(handles.eq_path_edit, 'String');
if isempty(editstr)
    winopen(pwd);
else
    winopen(editstr);
end
function mdl_open_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
editstr = get(handles.mdl_path_edit, 'String');
if isempty(editstr)
    winopen(pwd);
else
    winopen(editstr);
end
function inst_open_pushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)
editstr = get(handles.inst_path_edit, 'String');
if isempty(editstr)
    winopen(pwd);
else
    splitdot = split(string(editstr), ".");
    if length(splitdot) > 1
        splitback = split(splitdot(1), "\\");
        splitback(end) = [];
        editstr = splitback(1);
        for i = 2:length(splitback)
            editstr = editstr+"\\ "+splitback(i);
        end
        editstr = char(editstr);
    end
    winopen(editstr);
end

% -----
function preset_axes_menu_Callback(hObject, eventdata, handles)

% -----
function preset_axes_refresh_menu_Callback(hObject, eventdata, handles)
render_inst(handles, "")
render_eq(handles)

function data_radiobutton_Callback(hObject, eventdata, handles)

function wavelets_radiobutton_Callback(hObject, eventdata, handles)

function analysis_radiobutton_Callback(hObject, eventdata, handles)

function report_acc_radiobutton_Callback(hObject, eventdata, handles)

function report_srs_radiobutton_Callback(hObject, eventdata, handles)

function report_analysis_listbox_Callback(hObject, eventdata, handles)

function report_analysis_listbox_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),

```

```

get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% -----
function prog_cal_result_list_Callback(hObject, eventdata, handles)

function prog_cal_result_list_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function latitude_edit_Callback(hObject, eventdata, handles)
function longitude_edit_Callback(hObject, eventdata, handles)
function magnitude_edit_Callback(hObject, eventdata, handles)
function latitude_edit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function longitude_edit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function magnitude_edit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function preset_axes_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

function acc_path_edit_Callback(hObject, eventdata, handles)
function str_path_edit_Callback(hObject, eventdata, handles)
function eq_path_edit_Callback(hObject, eventdata, handles)
function mdl_path_edit_Callback(hObject, eventdata, handles)
function inst_path_edit_Callback(hObject, eventdata, handles)
function acc_path_edit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function str_path_edit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function eq_path_edit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function mdl_path_edit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

```

```
        set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
    end
    function inst_path_edit_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
    if      ispc      &&      isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
    get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
        set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
    end
```

- arbit_engine.m

```
function[a_resp,a_pos,a_neg]=arbit_engine(a1,a2,b1,b2,b3,yy)

    forward=[ b1,  b2,  b3 ];
    back   =[  1, -a1, -a2 ];
%
    a_resp=filter(forward,back,yy);
    a_pos= abs(max(a_resp));
    a_neg= abs(min(a_resp));
```

- Calculate.m

```
classdef Calculate

    properties
        eq_path
        str_path
        acc_path
        inst_path
        mdl_path

        eq_coordinate
        M
        eq_direction

        w1
        iter
        w2
        dura
        ssr
        fspace

        data_f
        codes_f

        str_data
        str_column
        str_cell
        str_code
        str_code_result

        report
        data_struct
    end
    methods
        %
        function obj = Calculate_defind(obj, data_struct)
            obj.eq_path = data_struct.eq_path;
            obj.str_path = data_struct.str_path;
            obj.acc_path = data_struct.acc_path;
            obj.inst_path = data_struct.inst_path;
            obj.mdl_path = data_struct.mdl_path;
            obj.eq_coordinate = [data_struct.latitude data_struct.longitude];
            obj.M = data_struct.M;
            obj.eq_direction = ["HGE", "HGN"];
            obj.w1 = 250;
            obj.iter = 1000;
            obj.w2 = 1;
```

```

obj.dura = 60;
obj.ssr = 300;
obj.fspace = 4;

% load inst
[data, codes, ~] = xlsread(obj.inst_path);
data = data(:, [7, 8, 9, 14, 44, 45, 46, 58, 64]);
codes = string(codes(7:end, [4, 36, 56, 62]));
sensortype = data(:, 4) == 1;
data(~sensortype, :) = [];
codes(~sensortype, :) = [];
data = inst_gain_arrangement(data, codes);
% load eq
[data_flt, codes_flt] = scanning_station(data, codes(:, 1),
obj.eq_path);
obj.data_f = data_flt;
obj.codes_f = codes_flt;
% load str
[str_num, str_str, str_cell] = xlsread(obj.str_path);
obj.str_cell = str_cell;
obj.str_data = str_num(:, [1, 39, 40]);
obj.str_column = string(str_str(2, :));
obj.str_code = string(str_str(3:end, :));
end
%
function obj = Calculate_targetscale(obj)
size_str = size(obj.str_code);
num_str = size_str(1);
index_chunk = [];
for t = 1:num_str
    str_coordinate = obj.str_data(t, [2 3]);
    output = New_Adjacent_Station(str_coordinate, obj.eq_coordinate,
obj.data_f, obj.codes_f);
    trig_code = output{1};
    trig_index = find_str_index(obj.codes_f(:, 1), trig_code);
    size_p = size(trig_index);
    for p = 1:size_p(1)
        one_index = trig_index(p, :);
        index_chunk = [index_chunk, one_index'];
    end
    obj.report(t).trig_codes = trig_code;
    obj.report(t).trig_index = trig_index;
end
index_chunk_unique = unique(index_chunk);

[ag_history, pga_array, Rspect] = mseed_reader(...
    obj.codes_f(index_chunk_unique, 1), ...
    obj.data_f(index_chunk_unique, :), ...
    obj.eq_direction, obj.eq_path, obj.dura);

for d = 1:2 % direction
    for i = 1:length(index_chunk_unique)
        data_struct_temp(index_chunk_unique(i)).ag{d} =
ag_history{i, d};
        data_struct_temp(index_chunk_unique(i)).PGA{d} =
pga_array{i, d};
        data_struct_temp(index_chunk_unique(i)).RESP{d} = Rspect{i, d};
        % SRS 계산
        data_struct_temp(index_chunk_unique(i)).SRS{d} =

```

```

calculate_srs(ag_history{i,d}, obj.fspace);
    end
end
obj.data_struct = data_struct_temp;
end
%
function obj = Calculate_wavelet_setup(obj)
    size_str = size(obj.str_code);
    num_str = size_str(1);
    for t = 1:num_str
        trig_index = obj.report(t).trig_index;
        size_trig = size(trig_index);
        for p = 1:size_trig(1)
            index = trig_index(p,:);
            co_x = obj.data_f(index,2);
            co_y = obj.data_f(index,1);

            for d = 1:2
                pga = [ obj.data_struct(index(1)).PGA{d};...
                        obj.data_struct(index(2)).PGA{d};...
                        obj.data_struct(index(3)).PGA{d} ];

                PGA_PM(p,d) = calculate_trig(obj.str_data(t,[2;3]), co_x,
co_y, pga);
            end
        end
        PGA_PM(PGA_PM<0) = 0.00001;
        PGA_PM_mean = mean(PGA_PM,1);

        SRS_array = cell(2);
        all_index = unique(trig_index);
        for a = 1:length(all_index)
            index = all_index(a);
            for d = 1:2
                SRS = obj.data_struct(index).SRS{d}(:,2);
                weighted_SRS = SRS * (
PGA_PM_mean(d)/obj.data_struct(index).PGA{d} );
                SRS_array{d} = [SRS_array{d}, weighted_SRS];
            end
        end
        for d = 1:2
            SRS_mean = mean(SRS_array{d}, 2);
            SRS_mean = [obj.data_struct(index).SRS{d}(:,1), SRS_mean];
            obj.report(t).srs_compose{d} = SRS_mean;

            [neared_dist,        neared_index]        =        near_detect_func(
obj.data_f(all_index, 1:2), obj.str_data(t,2:3) );
            input_eq_index = all_index( neared_index );
            obj.report(t).acc_model{d} =
obj.data_struct(input_eq_index).ag{d};
        end
    end
end
%
function obj = Calculate_wavelet_progress(obj, t)
    w1_i = obj.w1;
    iter_i = obj.iter;
    w2_i = obj.w2;
    dura_i = obj.dura;

```

```

ssr_i = obj.ssr;
fspace_i = obj.fspace;
for d = 1:2
    ACC = obj.report(t).acc_model{d};
    SRS = obj.report(t).srs_compose{d};
    a = tic;
    [fn_pred, srs_max_pred, srs_min_pred, accel_pred] = ...
        quake_srs_calculate(SRS, ACC, iter_i, w1_i, w2_i, dura_i,
ssr_i, fspace_i);
    run_time = toc(a);
    obj.report(t).runtime{d} = run_time;
    srs_pred_temp = max([srs_max_pred, srs_min_pred], [], 2);
    srs_pred = [fn_pred', srs_pred_temp];

    obj.report(t).acc_p{d} = accel_pred;
    obj.report(t).srs_p{d} = srs_pred;
end
end
%
function obj = Calculate_opensees(obj, t)
    openseesDir = obj.mdl_path+"\\"+obj.str_code(t,2);
    dirtype = exist(openseesDir, 'dir');

    if dirtype==7
        dir_accX = openseesDir+"\EQ\\"+obj.str_code(t,2)+".EQx.txt";
        dir_accY = openseesDir+"\EQ\\"+obj.str_code(t,2)+".EQy.txt";

        fid = fopen(dir_accX, 'w');
        fprintf(fid, '%f\r\n', obj.report(t).acc_p{1}(:,2));
        fclose(fid);
        fid = fopen(dir_accY, 'w');
        fprintf(fid, '%f\r\n', obj.report(t).acc_p{2}(:,2));
        fclose(fid);

        program = dir([char(openseesDir), '\OpenSees.exe']);
        if isempty(program)
            copyfile('OpenSees.exe', char(openseesDir))
        end
        cr_dir = cd;
        cd(char(openseesDir))
        filename = "00Run.tcl";
        system("Opensees.exe<" + filename);
        cd(cr_dir)
        % Get result
        fid = fopen(openseesDir+"\CHECK\seismic_demands.txt");
        demands = textscan(fid, '%s');
        fclose(fid);
        fid = fopen(openseesDir+"\CHECK\structural_capacities.txt");
        capacities = textscan(fid, '%s');
        fclose(fid);

        value_demands = [];
        names_demands = [];
        len_demands = length(demands{1});
        for i = 1:len_demands
            temp_val = str2double(char(demands{1}(i)));
            if ~isnan(temp_val)
                value_demands = [value_demands temp_val];
                names_demands = [names_demands demands{1}(i-1)];
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end

    value_capacities = [];
    len_capacities = length(capacities{1});
    for i = 1:len_capacities
        temp_val = str2double(char(capacities{1}(i)));
        if ~isnan(temp_val)
            value_capacities = [value_capacities temp_val];
        end
    end

    result_temp = value_capacities < value_demands;
    for i = length(result_temp):-1:1
        if ~result_temp(i)
            names_demands(i) = [];
        end
    end
    output = {names_demands};
else
    disp(openseesDir)
    disp('Please check the DB directories')
    output = {"LOST DATA"};
end
% diary off
obj.report(t).report = output;
end
%
function obj = Calculate_reassemble(obj, par_temp)
    par = par_temp(2:end);
    n = length(par);
    for t = 1:n
        for d = 1:2
            obj.report(t).runtime{d} = par{t}.report(t).runtime{d};
            obj.report(t).acc_p{d} = par{t}.report(t).acc_p{d};
            obj.report(t).srs_p{d} = par{t}.report(t).srs_p{d};
        end
        obj.report(t).report = par{t}.report(t).report;
    end
    data = strings(n,2);
    for tl = 1:n
        if isempty(obj.report(tl).report{1})
            data(tl,2) = "OK";
        else
            if strcmp(obj.report(tl).report{1}{1}, "LOST DATA")
                data(tl,2) = "LOST DATA";
            else
                str = "NG :";
                for s = 1:length(obj.report(tl).report{1})
                    str = str + " " + obj.report(tl).report{1}{s};
                end
                data(tl,2) = str;
            end
        end
    end
    data(:,1) = obj.str_code(:,2);
    adata = obj.str_code;
    adata(:,1:2) = data;
    ndata = obj.str_data;
end

```

```

        for r = 1:n
            for c = 1:2
                ndata_str(r,c) = string(num2str(ndata(r,1+c)));
            end
        end
        adata(:,39:40) = ndata_str;
        obj.str_code_result = adata;
    end
end
end

% ---- function section ----
function PGA_PM = calculate_trig(co_target, co_x, co_y, pga)
coordinate_X = co_x;
coordinate_Y = co_y;
target_X = co_target(2);
target_Y = co_target(1);

PGA = pga;
%
coor_PGA = [coordinate_Y coordinate_X PGA];
plane(1,:) = cross((coor_PGA(1,:)-coor_PGA(2,:)),
(coor_PGA(1,:)-coor_PGA(3,:)));
PGA_PM = -( plane(1,1)*target_Y + plane(1,2)*target_X - dot(plane(1,:),
coor_PGA(1,:)) )/plane(1,3);
end

function data = inst_gain_arrangement(data,codes)
size_data = size(data);
record_gain = zeros(size_data(1),1);
record2 = strcmp(codes(:,3),"속도");
record_gain(record2) = data(record2,9);
record_gain(~record2) = data(~record2,8);
data(:,10) = record_gain;
end

function [ag_history, pga_array, Rspect] = mseed_reader(codes, data,
direction_array, eq_Directory, dura)
len_codes = length(codes);
recode = cell(len_codes,2);
pga = cell(len_codes,2);
recode_spect = cell(len_codes,2);
for d = 1:length(direction_array)
    direction = direction_array(d);
    switch direction
        case 'HGE'
            dic = 5;
        case 'HGN'
            dic = 6;
        case 'HGZ'
            dic = 7;
    end
    for i = 1:len_codes
        code = codes{i};
        name = "\KS." + code + "." + direction;
        file = dir([eq_Directory, char(name), '*']);
        f = file(1).name;
        file_name = [eq_Directory, '\', f];
        %

```

```

mfile = rdmseed(file_name);
%
time = [];
acceleration = [];
for k=1:length(mfile)
    acceleration = [acceleration; mfile(k).d];
end
time = (0:length(acceleration)-1)*0.01;
time = time';
acceleration = acceleration - mean(acceleration(1:20));
acceleration = detrend(acceleration, 'linear');
acceleration = acceleration ./ (data(i,dic)*data(i,10)) ./ 9.8;
%
[pga{i,d}, pga_index] = max(abs(acceleration));
% cutting duration
Ts = time(2) - time(1);
first_len = 20 / Ts;
second_len = dura / Ts;
go_index = pga_index - first_len;
end_index = go_index + second_len - 1;
if end_index > length(time)
    time = time(end-second_len+1:end);
    acceleration = acceleration(end-second_len+1:end);
elseif go_index < 1
    time = time(1:second_len);
    acceleration = acceleration(1:second_len);
else
    time = time(go_index:end_index);
    acceleration = acceleration(go_index:end_index);
end

recode{i,d} = [time, acceleration];
% Responce Spectra
[freqs, spect] = rspect2p2(acceleration, time(2)-time(1), 0.05, 0.24,
24,6);
avrg_spect = mean(spect);
recode_spect{i,d} = avrg_spect;
end
end
ag_history = recode;
pga_array = pga;
Rspect = recode_spect;
end

function [data, codes] = scanning_station(data_f, codes_f, eq_Directory)
data_filtered = data_f;
codes_filtered = codes_f;

size_codes = size(codes_f);
checking_station = zeros(size_codes(1),1);

files = dir([eq_Directory '\KS*']);

for id=1:length(files)
    % file name sorting
    [~, f] = fileparts(files(id).name);

    words = strsplit(f, '.');
    direction = string(words(3));

```

```

station_name = string(words(2));

switch direction
case 'HGE'
    v = 1;
case 'HGN'
    v = 2;
case 'HGZ'
    v = 3;
otherwise
    continue
end

% DB searching and reading
rownum = strmatch(station_name, codes_f);
if isempty(rownum)
    continue
end

checking_station(rownum) = 1;
end

Except_Index = find(checking_station==0);
data_filtered(Except_Index, :) = [];
codes_filtered(Except_Index, :) = [];

data = data_filtered;
codes = codes_filtered;
end

function result = find_str_index(database, codes)
    n = length(codes);
    num = zeros(1,n);
    for k=1:n
        num(k) = find(strcmp(database, codes(k)),1);
    end
    result = num;
end

function [result_dist, result_index] = near_detect_func(points_coordinates,
structure_coordinates)
distant = dt_between(flip(structure_coordinates, 2),
flip(points_coordinates, 2));

[dist, index] = min(distant);
result_dist = dist;
result_index = index;
end

function out = Search_file(directory, filename)
dir_ok = false;
files = dir(directory);
for id=1:length(files)
    f = files(id).name;
    if strcmp(filename,f)
        dir_ok = true;
        break
    end
end
end

```

```

out = dir_ok;
end

function output = dt_between(a, b)
% row array
% [x1, y1;
%  x2, y2;
%  x3, y3;
%   ; ]
output = sqrt(sum((((a-b).*[ 91.0154, 110 ])).^2, 2));
end

```

- calculate_slopes.m

```

function[s,num]=calculate_slopes(fr,r)

num=length(fr);
%
s=zeros(num-1,1);
%
for i=1:(num-1)
    a=(log(r(i+1))-log(r(i)));
    b=(log(fr(i+1))-log(fr(i)));
    s(i)=a/b;
end

```

- calculate_srs.m

```

function output = calculate_srs(ag_for_srs, fspace)
y=double(ag_for_srs(:,2));
yy=y;
n=length(y);
dur=ag_for_srs(n,1)-ag_for_srs(1,1);
dt=dur/(n-1);
sr=1/dt;
Q=10;
fstart=0.1;
fend=50;
damp=1/(2*Q);
fn(1)=fstart;
fmax=15;
num=1;
if(fspace==0)
    oct=2^(1/24);
    while(1)
        num=num+1;
        fn(num)=fn(num-1)*oct;
        if(fn(num)>fmax)
            break;
        end
    end
end
if(fspace==1)
    oct=2^(1/12);
    while(1)
        num=num+1;
        fn(num)=fn(num-1)*oct;
        if(fn(num)>fmax)

```

```

        break;
    end
end
end
if(fspace==2)
    oct=2^(1/6);
    while(1)
        num=num+1;
        fn(num)=fn(num-1)*oct;
        if(fn(num)>fmax)
            break;
        end
    end
end
if(fspace==3)
    oct=2^(1/3);
    while(1)
        num=num+1;
        fn(num)=fn(num-1)*oct;
        if(fn(num)>fmax)
            break;
        end
    end
end
if(fspace==4)
    while(1)
        num=num+1;
        fn(num)=fn(num-1)+0.5;
        if(fn(num)>fmax)
            break;
        end
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Initialize coefficients
%
[a1,a2,b1,b2,b3,rd_a1,rd_a2,rd_b1,rd_b2,rd_b3]=...
    srs_coefficients(fn,damp,dt);
%
% SRS engine
%
a_pos=zeros(num,1);
a_neg=zeros(num,1);
NL=length(yy);
% edit residual
res = 1;
for j=1:num
    if(res==1)
        ML=NL+round((1/fn(j))/dt);
        ys=zeros(ML,1);
        ys(1:NL)=yy;
    else
        ys=yy;
    end
    [~,a_pos(j),a_neg(j)]=arbit_engine(a1(j),a2(j),b1(j),b2(j),b3(j),ys);
end
a_neg=abs(a_neg);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%
fn=fix_size(fn);
a_pos=fix_size(a_pos);
a_neg=fix_size(a_neg);
accel_data=[fn a_pos a_neg];
n=length(accel_data(:,1));
data = [fn, max([a_pos a_neg], [], 2)];
output = data;
end

```

- decomposition_wgen_q_nw.m

```

function[x1r,x2r,x3r,x4r,alpha,betar,wlr,wur]=...
decomposition_wgen_q_nw(num2,t,residual,duration,fl,fu,nt,ffmax,first,sr,start_time)
tp=2*pi;
dt=1/sr;
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
m_choice=1; % mean removal
h_choice=1; % rectangular window
n=length(residual);
N=2^floor(log(n)/log(2));
[ freq,full,phase,complex_FFT]=full_FFT_core(m_choice,h_choice,residual,N,dt)
;
magnitude_FFT=[freq full];
[~,fft_freq]=find_max(magnitude_FFT);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
min_delay=start_time;
ave=mean(residual);
sd=std(residual);
asd=zeros(num2,1);
for i=1:num2
    asd(i)=(residual(i)^2);
end
am=2.*sd;
errormax=1.0e+53;
fl=(1.5/duration);
fu=sr/3;
noct=log(fu/fl)/log(2);
ntt=ceil(nt/4);
for j=1:nt
    ran1=rand;
    ran2=rand;
    ran3=rand;
    x1=rand;
    x33=rand;
    x4=rand;
    x1=2.*am*(x1-0.5); % amplitude
    if(rand()<0.4)
        x2=fft_freq*(0.98+0.04*rand);
    else
        if(rand()<0.5)
            x2=((fu-fl)*rand+fl); % freq
        else
            x2=fl*2^(noct*rand);

```

```

        end
    end
    x2=x2*tp;
    x3= 9+(2*round(x33*16));    % nhs
    x4=x4*0.9*duration + min_delay;    % delay
    if(rand() $<$ 0.15)
        x4=x4*0.2*duration + min_delay;
    end
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
    if(ran1>0.4 && ran1<=0.5 && j>ntt)
        x2=x2r*(0.99+0.02*rand);
        x4=x4r*(0.99+0.02*rand);
        if(ran2<=0.25)
            x3=x3r-4;
        end
        if(ran2>0.25 && ran2<=0.5)
            x3=x3r-2;
        end
        if(ran2>0.50 && ran2<=0.75)
            x3=x3r+2;
        end
        if(ran2>0.75 && ran2<=1.0)
            x3=x3r+4;
        end
        %
        x1=x1r*(0.95+0.10*rand);
        %
        if(ran3>0.5)
            x1=-x1;
        end
        %
        if(x3<3)
            x3=3;
        end
    end
%%    itype=2; % mainly NHS
end
    if(ran1>0.5 && ran1<=0.6 && j>ntt)
        x1=x1r*(0.98+0.04*rand);
        x2=x2r;
        x3=x3r;
        x4=x4r;
        %                itype=3; % amp
    end
    if(ran1>0.6 && ran1<=0.7 && j>ntt)
        %
        x1=x1r;
        x2=x2r*(0.99+0.02*rand);
        x3=x3r;
        x4=x4r;
        %                itype=4; % freq
    end
    if(ran1>0.8 && ran1<=0.9 && j>ntt)
        x1=x1r;
        x2=x2r;
        x3=x3r;
        x4=x4r*(0.99+0.02*rand);
        %                itype=5; % delay
    end
end

```

```

end
if(ran1>0.9 && ran1<=1. && j>ntt)
    %
    x1=x1r*(0.999+0.002*rand);
    x2=x2r*(0.999+0.002*rand);
    x3=x3r;
    x4=x4r*(0.999+0.002*rand);
    %               itype=6; % all but NHS
end
%
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
    iflag=0;
    ddx=0.99*duration;
    while(1)
        for ij=1:100
            if( tp*x3/(2.*x2) + x4 < ddx )
                iflag=1;
                break;
            else
                iflag=2;
                x2=x2*1.01;
                x4=0.95*x4;
            end
        end
        if(iflag==1)
            break;
        else
            x3=x3-2;
        end
    end
    if(x3==1 || iflag==2)
        x1=0;
        x2=fu*tp;
        x3=3;
        x4=0;
    end
    if(j==1 || x3 < 3 || x4<min_delay)
        x1=0.;
        x2=fu*tp;
        x3=3;
        x4=0.;
    end
    error=0.;
    t1=x4 + t(1);
    t2=t1 + tp*x3/(2.*x2);
    if(j==1)
        x1=0.;
    end
    ia=floor(t1/dt);
    if(ia<=0)
        ia=1;
    end
    ib=ia+round((t2-t1)/dt);
    if(ib>num2)
        ib=num2;
    end
    beta=x2;

```

```

alpha=beta/double(x3);
for i=1:num2
    y=0.;
    if(i>=ia && i<=ib)
        arg=x2*(t(i)-t1);
        y=x1*sin(arg/double(x3))*sin(arg);
    end
    error=error+((residual(i)-y)^2.);
end
error=sqrt(error);
if(error<errormax || j==1)
%
        x1r=x1;
        x2r=x2;
        x3r=x3;
        x4r=x4;
%
        alphas=alpha;
        betas=beta;
        wlr=ia;
        wur=ib;
        errormax=error;
end
end

```

- Draw_googlemap.m

```

classdef Draw_googlemap
properties
    google_api_keyflag
    ko_lim
    handle
end
methods
    function obj = mapping_init(obj, axHandle)
        obj.handle = axHandle;
        obj.ko_lim = [124 130.5 33 40];
        plot_google_map('axis', obj.handle, 'apiKey',
            'AIzaSyD0iLtiWihCDRXmhFNyBCiIntgd2MS5pgA')
        obj.google_api_keyflag = 0;
    end
    function draw_google(obj, axHandle)
        obj.handle = axHandle;
        plot_google_map('axis', obj.handle, 'maptype','roadmap','language',
            'ko', 'showLabels', 1)
    end
    function map_axis(obj, value)
        if ~isempty(value)
            obj.ko_lim = value;
        end
        axis(obj.handle, obj.ko_lim)
    end
end
end
end

```

- find_max.m

```

function [xmax,ymax]=find_max(a)

```

```
[C,I]=max(a);
xmax=a(I(2),2);
ymax=a(I(2),1);
```

- fix_size.m

```
function[a]=fix_size(a)
sz=size(a);
if(sz(2)>sz(1))
    a=transpose(a);
end
```

- full_FFT.m

```
function[freq,full,phase,complex_FFT]=...
    full_FFT_core(m_choice,h_choice,amp,N,dt)

if(h_choice==2)
    m_choice=1;
end
if(m_choice==1)
    mu=mean(amp);
    amp=amp-mu;
end
if(h_choice==2)
    ae=sqrt(8/3);
    for i=1:N
        amp(i)=amp(i)*(ae*(sin(i*pi/N))^2);
    end
end
Y = fft(amp,N);
clear complex_FFT;
complex_FFT=zeros(N,3);
clear FF;
df=1/(N*dt);
FF=linspace(0,df*(N-1),N);
complex_FFT(:,1)=FF';
complex_FFT(:,2)=real(Y)/N;
complex_FFT(:,3)=imag(Y)/N;
try
    Nd2=floor(N/2);
catch

end
Mag=abs(Y(1:Nd2));
phase=zeros(Nd2,1);
freq=zeros(Nd2,1);
freq(1)=0;
for i=2:Nd2
    aa=real(Y(i));
    bb=imag(Y(i));
    phase(i)=atan2(bb,aa);
    freq(i)=(i-1)*df;
end
full=2.*Mag/N;
full(1)=0.;
phase = phase*180/pi;
freq=fix_size(freq);
full=fix_size(full);
```

```
phase=fix_size(phase);
```

- generate_time_history_wavelet_table_q.m

```
function[accel]=generate_time_history_wavelet_table_q(f,amp,NHS,td,t,...
                                                    wavelet_low,wavelet_up,alpha,beta)
nt=length(t);
last_wavelet=length(f);
accel=zeros(nt,1);
for i=1:last_wavelet
    sa=zeros(nt,1);
    sb=zeros(nt,1);
    ia=wavelet_low(i);
    ib=wavelet_up(i);

    sa(ia:ib)=sin( alpha(i)*( t(ia:ib)-td(i) ) );
    sb(ia:ib)=sin( beta(i)*( t(ia:ib)-td(i) ) );
    sc=amp(i)*sa.*sb;
    accel(ia:ib)=accel(ia:ib)+sc(ia:ib);
end
```

- integrate_function.m

```
function[v]=integrate_function(y,dt)
v=dt*cumtrapz(y);
v=fix_size(v);
```

- New_Adjacent_Station.m

```
function[a_resp,a_pos,a_neg]=arbit_engine(a1,a2,b1,b2,b3,yy)
forward=[ b1, b2, b3 ];
back    =[ 1, -a1, -a2 ];
%
a_resp=filter(forward,back,yy);
a_pos= abs(max(a_resp));
a_neg= abs(min(a_resp));
```

- octave_interpolation.m

```
function[a_resp,a_pos,a_neg]=arbit_engine(a1,a2,b1,b2,b3,yy)
forward=[ b1, b2, b3 ];
back    =[ 1, -a1, -a2 ];
%
a_resp=filter(forward,back,yy);
a_pos= abs(max(a_resp));
a_neg= abs(min(a_resp));
```

- plot_google_map.m

```
function[a_resp,a_pos,a_neg]=arbit_engine(a1,a2,b1,b2,b3,yy)

forward=[ b1, b2, b3 ];
back    =[ 1, -a1, -a2 ];
%
a_resp=filter(forward,back,yy);
a_pos= abs(max(a_resp));
```

```
a_neg= abs(min(a_resp));
```

- progressing.m

```
function[a_resp,a_pos,a_neg]=arbit_engine(a1,a2,b1,b2,b3,yy)

    forward=[ b1, b2, b3 ];
    back    =[ 1, -a1, -a2 ];
%
    a_resp=filter(forward,back,yy);
    a_pos= abs(max(a_resp));
    a_neg= abs(min(a_resp));
```

- quake_srs_calculate.m

```
function[a_resp,a_pos,a_neg]=arbit_engine(a1,a2,b1,b2,b3,yy)
    forward=[ b1, b2, b3 ];
    back    =[ 1, -a1, -a2 ];

    a_resp=filter(forward,back,yy);
    a_pos= abs(max(a_resp));
    a_neg= abs(min(a_resp));
```

- quake_srs_synth_phase_1.m

```
function[ramp,error_i,wavelet_low,wavelet_up,alpha,beta,t]=...
    quake_srs_synth_phase_1(f,dt,damp,amp,NHS,td,last_wavelet,iter,...
        fn,srs_spec,dlimit,error_limit,iu,uwf,dur)

tpi=2*pi;
%%
% Need to do this here. Input data may have different dt than output
nt=round(dur/dt);
t=linspace(0,nt*dt,nt+1);
alpha=zeros(last_wavelet,1);
wavelet_low=zeros(last_wavelet,1);
wavelet_up =zeros(last_wavelet,1);
beta=tpi*f;
for i=1:last_wavelet
    alpha(i)=beta(i)/double(NHS(i));
    ud=NHS(i)/(2*f(i));
    wavelet_low(i)=floor(td(i)/dt);
    if(wavelet_low(i)<=0)
        wavelet_low(i)=1;
    end
    wavelet_up(i)=wavelet_low(i)+floor(ud/dt);
    if(wavelet_up(i)>nt)
        wavelet_up(i)=nt;
    end
end
%%
ic=0;
ramp=amp;
nfn=length(fn);
ih=round(iter/3);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Initialize coefficients
%
[a1,a2,b1,b2,b3,rd_a1,rd_a2,rd_b1,rd_b2,rd_b3]=...
    srs_coefficients(fn,damp,dt);

drec=1.0e+90;
error_max=1.0e+90;
```

```

for i=1:length(f)
    if (f(i)>max(fn))
        amp(i)=0;
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for i=1:iter
    [accel]=generate_time_history_wavelet_table_q(f,amp,NHS,td,t,...
        wavelet_low,wavelet_up,alpha,beta);

    xabs=zeros(nfn,1);
    xmax=zeros(nfn,1);
    xmin=zeros(nfn,1);

    for j=1:nfn
        forward=[ b1(j), b2(j), b3(j) ];
        back    =[      1, -a1(j), -a2(j) ];
        resp=filter(forward,back,accel);
        xmax(j)=max(resp);
        xmin(j)=abs(min(resp));
        xabs(j)= max([xmax(j) xmin(j)]);
    end
    error=0;
    error_i=0;
    e2=0;
    fmin=0.;
    for j=1:length(srs_spec)
        if (srs_spec(j)>0)
            errora=abs(20*log10(srs_spec(j)/xmin(j)));
            errorb=abs(20*log10(srs_spec(j)/xmax(j)));
            if (xmin(j)>srs_spec(j))
                errora=uelf*errora;
            end
            if (xmax(j)>srs_spec(j))
                errorb=uelf*errorb;
            end
            if (errora>error)
                error=errora;
                fmax=fn(j);
            end
            if (errorb>error)
                error=errorb;
                fmin=fn(j);
            end
            error_i=error;
            e2=e2+errora+errorb;
        end
    end
    error=error*e2;

    [v]=integrate_function(accel,dt);
    [d]=integrate_function(v,dt);

    dmin=abs(min(d));
    dmax=abs(max(d));

    dratio=max([dmax dmin]);

```

```

if(iu==1)
    dratio=dratio*386;
else
    dratio=dratio*9.81*1000;
end

if(error<error_max && (dratio<dlimit || dratio <drec))
    if(dratio<drec)
        drec=dratio;
    end
    error_max=error;
    ramp=amp;
    raccel=accel;
    rxmax=xmax;
    rxmin=xmin;

    if(error_i<error_limit)
        break;
    end
end
if(i<iter)
    if(i> round(iter*0.03) || i>100)

        if(rand()<0.5)
            if(rand()<0.6 || i > ih)
                amp=ramp;
                jk=1+floor(last_wavelet*rand());
                amp(jk)=ramp(jk)*(0.95+0.1*rand());
                ic=1;
            else
                if(rand()<0.7)
                    for j=1:last_wavelet
                        amp(j)=ramp(j)*(0.99+0.02*rand());
                    end
                    ic=2;
                else
                    for j=1:last_wavelet
                        amp(j)=ramp(j)*(0.95+0.10*rand());
                    end
                    ic=3;
                end
            end
        else
            if(rand()<0.5)
                ferr=1.0e+20;
                for jj=1:length(f)
                    diff=abs(f(jj)-fmax);
                    if(diff<ferr)
                        jk=jj;
                        ferr=diff;
                    end
                end
                amp(jk)=ramp(jk)*(0.95+0.1*rand());
                ic=4;
            else
                ferr=1.0e+20;
                for jj=1:length(f)

```

```

        diff=abs(f(jj)-fmin);
        if(diff<ferr)
            jk=jj;
            ferr=diff;
        end
    end
    amp(jk)=ramp(jk)*(0.95+0.1*rand());
    ic=5;
end
end
else
    scale=0.5+1.0*rand();
    amp=ramp*scale;
end
end
end
end

```

- quake_srs_synth_phase_3.m

```

function[raccel,ramp,last_wavelet,f,amp,NHS,td,...
    wavelet_low,wavelet_up,alpha,beta]=...
    quake_srs_synth_phase_3(f,dt,amp,NHS,td,t,last_wavelet,...
        srs_spec_12,dlimit,fn,raccel,a1,a2,b1,b2,b3,nsec,...
        error_limit,wavelet_low,wavelet_up,alpha,beta)

num=length(fn);
tpi=2*pi;
num2=length(t);
duration=t(num2)-t(1);
sr=1/dt;
fl=3/duration;
fu=sr/10;
if(fu>max(fn))
    fu=max(fn);
end
fh=(fu+fl)/2;
omegah=fh*tpi;
omegau=fu*tpi;
x1r=zeros(num2,1);
x2r=zeros(num2,1);
x3r=zeros(num2,1);
x4r=zeros(num2,1);
A=max(amp)*0.3;
fm1=(fu-fl)*rand()+fl;
fm2=(fu-fl)*rand()+fl;
error_max=1.0e+90;
error_peaks=1.0e+90;
for ie=1:nsec
    iar=1;
    ibr=2;
    ferr1=fm1;
    ferr2=fm2;
    for ij=1:3000
        x1=A*(-0.5+1*rand());
        if(rand()<0.5 || ij<10)
            x2=(fu-fl)*rand()+fl;
        end
        x3=3 + 2*round(50.*rand()*rand());
        x4=duration*0.5*rand();
    end
end

```

```

x2=x2*tpi;
if(rand()>0.7 && ij>20)
    x1=x1r(ie)*(0.98+0.04*rand());
    x2=x2r(ie)*(0.98+0.04*rand());
    x3=x3r(ie);
    x4=x4r(ie)*(0.98+0.04*rand());
end
if(rand()<0.15)
    if(rand()<0.5)
        x2=tpi*ferr1*(0.98+0.04*rand());
    else
        x2=tpi*ferr2*(0.98+0.04*rand());
    end
end
while( x2 > omegau)
    x2=tpi*((fu-fl)*rand()+fl);
end
iflag=0;
while(1)
    for iv=1:100
        if( tpi*x3/(2.*x2) + x4 < duration )
            iflag=1;
            break;
        else
            iflag=2;
            x2=x2*1.01;
            x4=0.95*x4;
        end
    end
    if(iflag==1)
        break;
    else
        x3=x3-2;
    end
end
if(x3<3)
    x2=omegau;
    x3=3;
    x4=0;
end
if( x2 > omegau)
    x2=tpi*((fu-fl)*rand()+fl);
end
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%

if(ij==1)
    x1=0;
end
aa=raccel;
t1=x4 + t(1);
t2=t1 + tpi*x3/(2.*x2);
ia=ceil(t1/dt);
ib=ia+floor((t2-t1)/dt);
if(ia==0)
    ia=1;
end
if(ib>num2)
    ib=num2;

```

```

end
for iq=ia:ib
    arg=x2*(t(iq)-t1);
    aa(iq)=aa(iq)+x1*sin(arg/double(x3))*sin(arg);
end
error=0;
lerr=0;
merr=0;
ierr=0;

for j=1:num
    forward=[ b1(j), b2(j), b3(j) ];
    back    =[      1, -a1(j), -a2(j) ];
    resp=filter(forward,back,aa);
    xmax=max(resp);
    xmin=abs(min(resp));
    e1=(20*log10(xmax/srs_spec_12(j)));
    e2=(20*log10(xmin/srs_spec_12(j)));
    e1a=abs(e1);
    e2a=abs(e2);
    if(e1a>merr)
        merr=e1a;
        fm1=fn(j);
    end
    if(e2a>merr)
        merr=e2a;
        fm2=fn(j);
    end
    if(e1<lerr)
        lerr=e1;
    end
    if(e2<lerr)
        lerr=e2;
    end
    if(abs(e1)>ierr)
        ierr=e1a;
    end
    if(abs(e2)>ierr)
        ierr=e2a;
    end
    error=error+e1a;
    error=error+e2a;
end
error=error+num*(abs(lerr)+abs(merr));
error_p=abs(lerr)+abs(merr);
if( (error<error_max || error_p<error_peaks) && x2<omegau)
    x1r(ie)=x1;
    x2r(ie)=x2;
    x3r(ie)=x3;
    x4r(ie)=x4;
    iar=ia;
    ibr=ib;

    if(error<error_max)
        error_max=error;
    end
    if(error_p<error_peaks)
        error_peaks=error_p;
    end
end

```

```

        if(merr<error_limit && abs(lerr)<error_limit)
            break;
        end
    end
end
% [primary + secondary]
last_wavelet=last_wavelet+1;
f(last_wavelet)=x2r(ie)/tpi;
amp(last_wavelet)=x1r(ie);
NHS(last_wavelet)=x3r(ie);
td(last_wavelet)=x4r(ie);
beta(last_wavelet)=tpi*f(last_wavelet);
alpha(last_wavelet)=beta(last_wavelet)/double(NHS(last_wavelet));
wavelet_low(last_wavelet)=iar;
wavelet_up(last_wavelet)=ibr;
[racel]=generate_time_history_wavelet_table_q(f,amp,NHS,td,t,...
        wavelet_low,wavelet_up,alpha,beta);
if(merr<error_limit && abs(lerr)<error_limit)
    break;
end
end
ramp=amp;

```

- rspect2p2.m

```

function [freqs, spect] = rspect1(timehist, tsamp, damp, fmin, fmax, otc)
% Calculate the response spectrum of a time history.
% [freqs, spect] = rspect(timehist, tsamp, damp, fmin, fmax, ptsdec)
%   freqs      : array of evaluation frequencies (Hz)
%   spect      : response spectrum data at evaluation frequencies
%   timehist   : time history
%   tsamp      : sampling period of the time history (sec)
%   damp       : damping ratio (0 <= damp <= 1)
%   fmin       : low frequency limit of analysis (Hz)
%   fmax       : high frequency limit of analysis (Hz)
%   ptsdec     : number of data points per frequency decade
%   otc        : level Octave(6=1/6octave)
%
% initialize first decade
fsamp = 1.0 / tsamp;
freq  = fmin;
% decade = floor(log10(fmin));
N1=ceil(log2(fmax)*otc);
N2=ceil(abs(log2(fmin)*otc));
if fmin>1
    N=N1-N2-1;
else if fmin<1
    N=N1+N2;
    else N=N1;
end
end

%CoeffFre=(fmax/fmin)^(1/N);
CoeffFre=2^(1/otc);

% fend    = 10^(decade+1) + 0.5*deltaf;

```

```

% iterate
i = 1;
while freq <= fmax*2^(1/otc)
    %%disp(strcat('freq:', num2str(freq)));

    % design a second-order digital filter
    % (b0 + b1 z^-1 + b2 z^-2) / (1 + a1 z^-1 + a2 z^-2)
    % with frequency response equivalent to the analog system
    %  $\omega_n^2 / (s^2 + 2 \text{damp } \omega_n s + \omega_n^2)$ 
    % with corrections to the analog system so that peak
    % response occurs exactly at  $\omega_n$  regardless of damping
    % (from Dorf (1974), eqn 7-37, p. 208))
    rfreq = freq / sqrt(1.0 - 2.0 * damp^2);
    omega = 2.0 * fsamp * tan(pi * rfreq / fsamp); % prewarp
    a0s = 1.0;
    a1s = 2.0 * damp * omega;
    a2s = omega^2;
    b0s = 0.0;
    b1s = 0.0;
    b2s = a2s;
    as = [a0s a1s a2s]; % laplace denominator polynomial
    bs = [b0s b1s b2s]; % laplace numerator polynomial

    % transform to z domain using bilinear transformation
    % Note: Could also use Matlab's functions as follows, but
    % they are slightly slower:
    % [zeroes, poles, gain] = tf2zp(bs, as);
    % [zeroes, poles, gain] = bilinear(zeroes, poles, gain, fsamp);
    % [b a] = zp2tf(zeroes, poles, gain);

    c = 2.0 * fsamp;
    d = a2s + a1s*c + a0s*c*c;
    a0 = 1.0;
    a1 = 2.0*(a2s-a0s*c*c)/d;
    a2 = (a2s-a1s*c+a0s*c*c)/d;
    b0 = (b2s+b1s*c+b0s*c*c)/d;
    b1 = 2.0*(b2s-b0s*c*c)/d;
    b2 = (b2s-b1s*c+b0s*c*c)/d;
    a = [a0 a1 a2];
    b = [b0 b1 b2];

    % filter the time history and determine max response
    y = filter(b, a, timehist);
    spect(i) = max(abs(y));
    freqs(i) = freq;

    % advance frequency and determine whether to advance
    % to the next decade
    % f = freq + deltaf;
    % if f >= fend
    %     deltaf = 10.0 * deltaf;
    %     decade = decade + 1;
    %     f = freq + deltaf;
    %     fend = 10^(decade+1) + 0.5*deltaf;
    % end
    freq = freq*CoeffFre;
    i = i + 1;
end

```

```

if fmin>=1
    freq=fmax;
    disp(strcat('freq:', num2str(freq)));

    % design a second-order digital filter
    % (b0 + b1 z^-1 + b2 z^-2) / (1 + a1 z^-1 + a2 z^-2)
    % with frequency response equivalent to the analog system
    %  $\omega_n^2 / (s^2 + 2 \text{damp} \omega_n s + \omega_n^2)$ 
    % with corrections to the analog system so that peak
    % response occurs exactly at  $\omega_n$  regardless of damping
    % (from Dorf (1974), eqn 7-37, p. 208))
    rfreq = freq / sqrt(1.0 - 2.0 * damp^2);
    omega = 2.0 * fsamp * tan(pi * rfreq / fsamp); % prewarp
    a0s = 1.0;
    a1s = 2.0 * damp * omega;
    a2s = omega^2;
    b0s = 0.0;
    b1s = 0.0;
    b2s = a2s;
    as = [a0s a1s a2s]; % laplace denominator polynomial
    bs = [b0s b1s b2s]; % laplace numerator polynomial

    % transform to z domain using bilinear transformation
    % Note: Could also use Matlab's functions as follows, but
    % they are slightly slower:
    % [zeroes, poles, gain] = tf2zp(bs, as);
    % [zeroes, poles, gain] = bilinear(zeroes, poles, gain, fsamp);
    % [b a] = zp2tf(zeroes, poles, gain);

    c = 2.0 * fsamp;
    d = a2s + a1s*c + a0s*c*c;
    a0 = 1.0;
    a1 = 2.0*(a2s-a0s*c*c)/d;
    a2 = (a2s-a1s*c+a0s*c*c)/d;
    b0 = (b2s+b1s*c+b0s*c*c)/d;
    b1 = 2.0*(b2s-b0s*c*c)/d;
    b2 = (b2s-b1s*c+b0s*c*c)/d;
    a = [a0 a1 a2];
    b = [b0 b1 b2];

    % filter the time history and determine max response
    y = filter(b, a, timehist);
    spect(i) = max(abs(y));
    freqs(i) = freq;
end

```

- srs_coefficients.m

```

function[a1,a2,b1,b2,b3,rd_a1,rd_a2,rd_b1,rd_b2,rd_b3]=...
    srs_coefficients(f,damp,dt)

%
% Set to Smallwood for sake of MDOF programs which use this function
%
ialgorithm=2;
tpi=2*pi;
num_fn=max(size(f));
a1=zeros(num_fn,1);
a2=zeros(num_fn,1);

```

```

b1=zeros(num_fn,1);
b2=zeros(num_fn,1);
b3=zeros(num_fn,1);
rd_a1=zeros(num_fn,1);
rd_a2=zeros(num_fn,1);
rd_b1=zeros(num_fn,1);
rd_b2=zeros(num_fn,1);
rd_b3=zeros(num_fn,1);
num_damp=length(damp);
for j=1:num_fn
    omega=(tpi*f(j));
    if(num_damp==1)
        ddd=damp;
    else
        ddd=damp(j);
    end
    omegad=(omega*sqrt(1.-ddd^2));
    cosd=(cos(omegad*dt));
    sind=(sin(omegad*dt));
    domegadt=(ddd*omega*dt);
    rd_a1(j)=2.*exp(-domegadt)*cosd;
    rd_a2(j)=-exp(-2.*domegadt);
    rd_b1(j)=0.;
    rd_b2(j)=-(dt/omegad)*exp(-domegadt)*sind;
    rd_b3(j)=0;
    if(ialgorithm==1)
        a1(j)=(2.*exp(-domegadt)*cosd);
        a2(j)=(-exp(-2.*domegadt));
        b1(j)=(2.*domegadt);
        b2(j)=(omega*dt*exp(-domegadt));
        b2(j)=b2(j)*((omega/omegad)*(1-2*(ddd^2))*sind-2*ddd*cosd);
        b3(j)=0.;
    else
        E=0;
        K=0;
        C=0;
        S=0;
        Sp=0;
        E=(exp(-ddd*omega*dt));
        K=(omegad*dt);
        C=(E*cos(K));
        S=(E*sin(K));
        Sp=S/K;
        a1(j)=(2*C);
        a2(j)=(-(E^2));
        b1(j)=(1.-Sp);
        b2(j)=(2.*(Sp-C));
        b3(j)=((E^2)-Sp);
    end
end

```

- SRS_specification.m

```

function[a1,a2,b1,b2,b3,rd_a1,rd_a2,rd_b1,rd_b2,rd_b3]=...
    srs_coefficients(f,damp,dt)

%
% Set to Smallwood for sake of MDOF programs which use this function
%
ialgorithm=2;

```

```

%
tpi=2*pi;
%
num_fn=max(size(f));
%
a1=zeros(num_fn,1);
a2=zeros(num_fn,1);
b1=zeros(num_fn,1);
b2=zeros(num_fn,1);
b3=zeros(num_fn,1);
%
rd_a1=zeros(num_fn,1);
rd_a2=zeros(num_fn,1);
rd_b1=zeros(num_fn,1);
rd_b2=zeros(num_fn,1);
rd_b3=zeros(num_fn,1);
num_damp=length(damp);
for j=1:num_fn
    omega=(tpi*f(j));
    if(num_damp==1)
        ddd=damp;
    else
        ddd=damp(j);
    end
    omegad=(omega*sqrt(1.-ddd^2));
    cosd=(cos(omegad*dt));
    sind=(sin(omegad*dt));
    domegadt=(ddd*omega*dt);
    rd_a1(j)=2.*exp(-domegadt)*cosd;
    rd_a2(j)=-exp(-2.*domegadt);
    rd_b1(j)=0.;
    rd_b2(j)=-(dt/omegad)*exp(-domegadt)*sind;
    rd_b3(j)=0;
    if(ialgorithm==1)
        a1(j)=(2.*exp(-domegadt)*cosd);
        a2(j)=(-exp(-2.*domegadt));
        b1(j)=(2.*domegadt);
        b2(j)=(omega*dt*exp(-domegadt));
        b2(j)=b2(j)*((omega/omegad)*(1-2*(ddd^2))*sind-2*ddd*cosd);
        b3(j)=0.;
    else
        E=0;
        K=0;
        C=0;
        S=0;
        Sp=0;
        E=(exp(-ddd*omega*dt));
        K=(omegad*dt);
        C=(E*cos(K));
        S=(E*sin(K));
        Sp=S/K;
        a1(j)=(2*C);
        a2(j)=(-(E^2));
        b1(j)=(1.-Sp);
        b2(j)=(2.*(Sp-C));
        b3(j)=(E^2-Sp);
    end
end
end

```

- SRS_specification_interpolation_edit.m

```
function[f,spec]=SRS_specification_interpolation_edit(fr,r,ioct)
nn=length(fr);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Calculate slopes between input points
[s,num]=calculate_slopes(fr,r);
clear f;
clear spec;
%% Interpolate
octave=(1./12.);
if ioct==0
    octave=(1./24.);
end
if ioct==1
    octave=(1./12.);
end
if ioct==2
    octave=(1./6.);
end
if ioct==3
    octave=(1./3.);
end
if ioct==4
    octave=0.5;
end
[f,spec]=octave_interpolation(octave,fr,r,s,num);
```

- vibrationdata_wavelet_decomposition_engine_q.m

```
function[acceleration,velocity,displacement,wavelet_table,...
        wavelet_low,wavelet_up,alpha,beta]=...
    vibrationdata_wavelet_decomposition_engine_q(t,accel,dt,first,...
        fmax,nt,nfr,start_time)

tp=2*pi;
residual=accel;
num2=max(size(accel));
duration=t(num2)-t(1);
sr=1/dt;
fl=3/duration;
fu=sr/10;
clear y;
x1r=zeros(nfr,1);
x2r=zeros(nfr,1);
x3r=zeros(nfr,1);
x4r=zeros(nfr,1);
alpha=zeros(nfr,1);
beta=zeros(nfr,1);
wavelet_up=zeros(nfr,1);
wavelet_low=zeros(nfr,1);
for ie=1:nfr
    [ax1r,ax2r,ax3r,ax4r,alphar,betar,wlr,wur]=...

decomposition_wgen_q_nw(num2,t,residual,duration,fl,fu,nt,fmax,first,sr,sta
rt_time);
    x1r(ie)=ax1r;
    x2r(ie)=ax2r;
    x3r(ie)=ax3r;
```

```

x4r(ie)=ax4r;
alpha(ie)=alphar;
beta(ie)=betar;
wavelet_low(ie)=wlr;
wavelet_up(ie)=wur;

for i=1:num2
    tt=t(i);
    t1=x4r(ie) + t(1);
    t2=t1 + tp*x3r(ie)/(2.*x2r(ie));
    if( tt>= t1 && tt <= t2)
        arg=x2r(ie)*(tt-t1);
        y=x1r(ie)*sin(arg/double(x3r(ie)))*sin(arg);
        residual(i)=residual(i)-y;
    end
end
ave=mean(residual);
sd=std(residual);
end
clear aaa;
clear vvv;
clear ddd;
clear mm;
aaa=zeros(num2,1);
vvv=zeros(num2,1);
ddd=zeros(num2,1);
for i=1:nfr
    % nhs:number half sines
    wavelet_table(i,1)=i;
    wavelet_table(i,2)=x2r(i)/tp;
    wavelet_table(i,3)=x1r(i);
    wavelet_table(i,4)=x3r(i);
    wavelet_table(i,5)=x4r(i);
end
vlast=zeros(num2,1);
iscale=1;
for k=1:num2
    tt=t(k);
    for j=1:nfr
        w=0.;
        v=0.;
        d=0.;
        t1=x4r(j)+t(1);
        if(x2r(j)>=1.0e-10)
        else
            x2r(j)=f1*tp;
            x1r(j)=1.0e-20;
            x3r(j)=3;
            x4r(j)=0;
            t1=x4r(j)+t(1);
        end
        t2=tp*x3r(j)/(2.*x2r(j))+t1;
        if( tt>=t1 && tt <=t2 )
            arg=x2r(j)*(tt-t1);
            w= x1r(j)*sin(arg/double(x3r(j)))*sin(arg);
            aa=x2r(j)/double(x3r(j));
            bb=x2r(j);
            te=tt-t1;
            alpha1=aa+bb;

```

```

        alpha2=aa-bb;
        alpha1te=alpha1*te;
        alpha2te=alpha2*te;
        v1= -sin(alpha1te)/(2.*alpha1);
        v2= +sin(alpha2te)/(2.*alpha2);
        d1= +(cos(alpha1te)-1)/(2.*(alpha1^2));
        d2= -(cos(alpha2te)-1)/(2.*(alpha2^2));
        v=(v2+v1)*iscale*x1r(j);
        d=(d2+d1)*iscale*x1r(j);
        vlast(j)=v;
    end
    aaa(k)=aaa(k)+w;
    vvv(k)=vvv(k)+v;
    ddd(k)=ddd(k)+d;
    if(x3r(j)<1)
        printf(' error x3r ');
        break;
    end
end
end
t=fix_size(t);
aaa=fix_size(aaa);
vvv=fix_size(vvv);
ddd=fix_size(ddd);
acceleration=[t aaa];
velocity=[t vvv];
displacement=[t ddd];

```

- wavelet_integrate_q.m

```

function[dispx,vel,acc]=wavelet_integrate_q(f,ramp,NHS,td,dt,dur,t,...
        wavelet_low,wavelet_up,alpha,beta)

accel=ramp;
freq=f;
delay=td;
num=length(t);
nw=length(f);
te=zeros(nw,1);
for i=1:nw
    te(i)=delay(i) + (double(NHS(i))/(2*freq(i)));
    if(te(i)>dur)
        dur=te(i);
    end
end
max_wf=max(freq);
tt=zeros(num,1);
acc=zeros(num,1);
vel=zeros(num,1);
dispx=zeros(num,1);
for i=1:num
    tt(i)=(i-1)*dt;
end
omega=2*pi*freq;
for j=1:nw
    om=omega(j);
    om2=om^2;
    ia=wavelet_low(j);
    ib=wavelet_up(j);

```

```

for i=1:num
    if (i>=ia && i<=ib)
        tx=tt(i)-delay(j);
        arg=om*tx;
        dnhs=double(NHS(j));
        alpha=om/dnhs;
        beta=om;
        apb=alpha+beta;
        amb=alpha-beta;
        apbtx=apb*tx;
        ambtx=amb*tx;
        tapb=2*apb;
        tamb=2*amb;
        tapb2=2*apb^2;
        tamb2=2*amb^2;
        acc(i)= acc(i)+accel(j)*sin(arg)*sin(arg/dnhs);
        vel(i)=          vel(i)+accel(j)*(          -(sin(apbtx)/tapb)      +
(sin(ambtx)/tamb) );
        disp(i)=disp(i)+accel(j)*(          ((cos(apbtx)-1)/tapb2)      -
((cos(ambtx)-1)/tamb2) );
    end
    if (tt(i)>te(j))
        break;
    end
end
end
end

```

부록 2. 교량 유한요소 해석모델 데이터베이스

○ 교량해석모델 DB 리스트

구분	교량명	관리번호	위치(좌표)		주소_시도	주소_군구	주소_읍면동
			X좌표	Y좌표			
1	축암교	BR2014-0000663	129.390264	35.797253	경상북도	경주시	양북면 장항리
2	안동교	BR2014-0000664	129.424471	35.803328	경상북도	경주시	양북면 안동리
3	와읍교	BR2014-0000665	129.432469	35.799841	경상북도	경주시	양북면 와읍리
4	감나무교	FMS-00001	129.346732	35.629517	경상북도	경주시	양북면 장항리
5	중기교	BR1994-0000471	129.455067	35.343167	경상북도	청송군	부남면
6	서촌교	BR2004-0002601	129.485148	35.904707	경상북도	포항시 남구	장기면 서촌리
7	섬비교	FMS-00002	129.474025	35.783107	경상북도	경주시	감포읍 팔조리
8	탑동교	BR1997-0000309	127.985466	36.842145	충청북도	충주시	수안보면 온천리
9	탄지교	BR1983-0000071	128.078632	36.913344	충청북도	제천시	한수면 탄지리
10	주정교	BR1997-0000305	127.984793	36.84419	충청북도	충주시	수안보면 온천리
11	신당교	BR1983-0000073	128.057061	36.919766	충청북도	충주시	살미면
12	우수교	BR1998-0000377	128.034956	35.215191	경상남도	진주시	명석면
13	아호교	BR2009-0000603	128.039966	36.64175	경상북도	문경시	가은읍 직천리
14	갈전교	BR2009-0000604	128.079998	36.627148	경상북도	문경시	가은읍 갈전리
15	왕릉교	BR1989-0000374	128.073919	36.641147	경상북도	문경시	가은읍
16	곡강교	BR2004-0000323	129.346029	36.121978	경상북도	포항시 북구	흥해읍 곡강리
17	내단2교	BR1984-0000096	129.239052	36.05972	경상북도	포항시 북구	기계면
18	내단2교	BR2005-0001266	129.239052	36.05972	경상북도	포항시 북구	죽장면
19	성곡C교	BR1996-0000354	129.340825	36.086815	경상북도	포항시 북구	흥해읍
20	연화RAMP-F교	BR2011-0000003	129.330241	36.049721	경상북도	포항시 북구	흥해읍 대련리
21	유강 E램프교	BR2012-0000090	129.319537	36.0042	경상북도	포항시 남구	연일읍 유강리
22	포항C1교(대구)	BR2010-0000041	129.313688	36.042463	경상북도	포항시 남구	연일읍 학전리
23	포항C1교(포항)	BR2010-0000040	129.313688	36.042463	경상북도	포항시 남구	연일읍 학전리
24	포항C2교	BR2010-0000042	129.313688	36.042463	경상북도	포항시 남구	연일읍 학전리
25	학림교	BR1994-0000277	129.313688	36.042463	경상북도	포항시 남구	연일읍
26	화대천교(대구)	BR2005-0000347	129.216651	36.072192	경상북도	포항시 북구	기계면 현내리
27	화대천교(포항)	BR2005-0000348	129.216651	36.072192	경상북도	포항시 북구	기계면 현내리
28	단구1교	BR2005-0000313	129.242078	36.056536	경상북도	경주시	강동면 단구리
29	단구2교	BR2004-0002314	129.243359	36.055683	경상북도	경주시	강동면 단구리
30	이인교	BR1999-0000711	129.335272	36.061411	경상북도	포항시 북구	흥해읍
31	현내1교	BR2005-0000363	129.199331	36.080996	경상북도	포항시 북구	기계면 현내리
32	벽계천교	BR2004-0002325	129.244745	36.0547063	경상북도	경주시	강동면 단구리
33	전곡천교	BR2004-0002329	129.246588	36.053452	경상북도	경주시	강동면 단구리
34	다산1교	BR2005-0000299	129.256527	36.049412	경상북도	경주시	강동면 다산리
35	다산2교	BR2005-0000304	129.262558	36.048573	경상북도	경주시	강동면 다산리
36	학전2교	BR2004-0002348	129.305318	36.045004	경상북도	포항시 남구	연일읍 학전리
37	동경주C1교(진입)	BR2015-0000295	129.428249	35.781348	경상북도	경주시	양북면 지저남동길
38	동경주C1교(진출)	BR2005-0000548	129.428249	35.781348	경상북도	경주시	양북면 지저남동길
39	기구교	BR2001-0000486	129.42139	35.699755	경상북도	경주시	양남면 기구리
40	연안철교	BR2015-0000279	129.310959	35.729586	경상북도	경주시	연안길 91

- run.tcl

```
#=====
#                               DEFINE PARAMETRIC VALUES
#=====

source 01BridgeInformation.tcl

set name BR20150000295:# [concat Bridge_ $number];
file mkdir $name;                                # create data directory

set nameout CHECK
file mkdir $nameout

model BasicBuilder -ndm 3 -ndf 6;                  # Define the model builder, ndm=#dimension,
ndf=#dofs
set begin [clock clicks -milliseconds]

set analysisType "DynamicAnalysis"; # DynamicAnalysis GravityAnalysis

set fileIDN [open [concat $name/Node.node] w]
set fileIDE [open [concat $name/Element.elem] w]

#=====
#                               DEFINE UNITS
#=====

set in 1; set kip 1; set sec 1;

set ft [expr 12.*$in];      set ksi [expr $kip/pow($in,2)];      set psi [expr $ksi/1000.]
set lbf [expr $psi*$in*$in]; set pcf [expr $lbf/pow($ft,3)];      set psf [expr $lbf/pow($ft,2)]
set pi [expr 2.*asin(1.0)]; set g [expr 32.174*$ft/pow($sec,2)]; set in2 [expr pow($in,2)]

#=====
#                               MATERIAL UNCERTAINTIES
#=====

set nu 0.2
set Gc [expr $Ec/(2.*(1.+ $nu))]
set Gd [expr $Ed/(2.*(1.+ $nu))]
set Gcc [expr $Ecc/(2.*(1.+ $nu))]

set Es [expr 29000.*$ksi]

#=====
#                               DEFINE GEOMETRY
#=====

set rhoc [expr $masscoef*0.15/pow($ft,3)]; # kip/in^3 150 lb/ft3

set theta $skewangle ; # if clockwise (right turn), theta should be (+) sign. Otherwise theta
should be (-) sign.

set costh [expr cos($theta*$pi/180)]
set sinh [expr sin($theta*$pi/180)]
set tanth [expr $sinh/$costh]

#===== Deck information =====
#####

set WDeckbot [expr $DeckCTC*($numGirder-1)]

set IyDeck [expr $StiffnessReduction*$Idkyy]
set IzDeck [expr $StiffnessReduction*$Idkxx]

set nD 15
set Npounding 5

set dLD1 [expr $LDeck1/$nD]
set dLD2 [expr $LDeck2/$nD]
```

```

set dLD3 [expr $LDeck3/$nD]
set dLD4 [expr $LDeck4/$nD]

set DWeight1 [expr $wd*$dLD1]; # Weight for one element
set DWeight2 [expr $wd*$dLD2]
set DWeight3 [expr $wd*$dLD3]
set DWeight4 [expr $wd*$dLD4]

set ExtraWeight 0.:[expr $rhoc*$DiffADeck*$LBentDeck]

set DWeightB1 [expr ($DWeight1 + $DWeight2)/2. + $ExtraWeight]; # Weight at Interior support
set DWeightB2 [expr ($DWeight2 + $DWeight3)/2. + $ExtraWeight]
set DWeightB3 [expr ($DWeight3 + $DWeight4)/2. + $ExtraWeight]

set DWeightA1 [expr $DWeight1/2.]
set DWeightA2 [expr $DWeight4/2.]

set DMass1 [expr $DWeight1/$g]; # Mass for one element
set DMass2 [expr $DWeight2/$g]
set DMass3 [expr $DWeight3/$g]
set DMass4 [expr $DWeight4/$g]

set DMassB1 [expr $DWeightB1/$g]; # Mass at Interior support
set DMassB2 [expr $DWeightB2/$g]
set DMassB3 [expr $DWeightB3/$g]

set DMassA1 [expr $DWeightA1/$g]
set DMassA2 [expr $DWeightA2/$g]

set DRXMassDis $rotmass

set DRXMass1 [expr $DRXMassDis*$dLD1]
set DRXMass2 [expr $DRXMassDis*$dLD2]
set DRXMass3 [expr $DRXMassDis*$dLD3]
set DRXMass4 [expr $DRXMassDis*$dLD4]

set DRXMassB1 [expr $DRXMassDis*($dLD1/2. + $dLD2/2.)]
set DRXMassB2 [expr $DRXMassDis*($dLD2/2. + $dLD3/2.)]
set DRXMassB3 [expr $DRXMassDis*($dLD3/2. + $dLD4/2.)]

set DRXMassA1 [expr $DRXMassDis*($dLD1/2.)]
set DRXMassA2 [expr $DRXMassDis*($dLD4/2.)]

set BDeck [expr 0.5*($WDeckbot + $WDeck)]

set DRYMass1 [expr $DMass1* (1/12.*pow($BDeck,2) + 1/12.*pow($dLD1,2))]
set DRYMass2 [expr $DMass2* (1/12.*pow($BDeck,2) + 1/12.*pow($dLD2,2))]
set DRYMass3 [expr $DMass3* (1/12.*pow($BDeck,2) + 1/12.*pow($dLD3,2))]
set DRYMass4 [expr $DMass4* (1/12.*pow($BDeck,2) + 1/12.*pow($dLD4,2))]

set DRYMassB1 [expr $DMassB1* (1/12.*pow($BDeck,2) + 0.5*1/3.*pow($dLD1*0.5,2) +
0.5*1/3.*pow($dLD2*0.5,2))]
set DRYMassB2 [expr $DMassB2* (1/12.*pow($BDeck,2) + 0.5*1/3.*pow($dLD2*0.5,2) +
0.5*1/3.*pow($dLD3*0.5,2))]
set DRYMassB3 [expr $DMassB3* (1/12.*pow($BDeck,2) + 0.5*1/3.*pow($dLD3*0.5,2) +
0.5*1/3.*pow($dLD4*0.5,2))]

set DRYMassA1 [expr $DMassA1* (1/12.*pow($BDeck,2) + 1/3.*pow($dLD1*0.5,2))]
set DRYMassA2 [expr $DMassA2* (1/12.*pow($BDeck,2) + 1/3.*pow($dLD4*0.5,2))]

set DRZMass1 [expr $DMass1* (1/12.*pow($HDeck,2) + 1/12.*pow($dLD1,2))]
set DRZMass2 [expr $DMass2* (1/12.*pow($HDeck,2) + 1/12.*pow($dLD2,2))]
set DRZMass3 [expr $DMass3* (1/12.*pow($HDeck,2) + 1/12.*pow($dLD3,2))]
set DRZMass4 [expr $DMass4* (1/12.*pow($HDeck,2) + 1/12.*pow($dLD4,2))]

set DRZMassB1 [expr $DMassB1* (1/12.*pow($HDeck,2) + 0.5*1/3.*pow($dLD1*0.5,2) +
0.5*1/3.*pow($dLD2*0.5,2))]
set DRZMassB2 [expr $DMassB2* (1/12.*pow($HDeck,2) + 0.5*1/3.*pow($dLD2*0.5,2) +
0.5*1/3.*pow($dLD3*0.5,2))]
set DRZMassB3 [expr $DMassB3* (1/12.*pow($HDeck,2) + 0.5*1/3.*pow($dLD3*0.5,2) +
0.5*1/3.*pow($dLD4*0.5,2))]

set DRZMassA1 [expr $DMassA1* (1/12.*pow($HDeck,2) + 1/3.*pow($dLD1*0.5,2))]
set DRZMassA2 [expr $DMassA2* (1/12.*pow($HDeck,2) + 1/3.*pow($dLD4*0.5,2))]

#===== Pier information =====

set ACol [expr $pi/4*pow($DCol,2)]

```

```

set IzCol [expr $pi/64.*pow($DCol,4)]; # with respect to birdg transverse axis
set IyCol [expr $pi/64.*pow($DCol,4)]; # with respect to birdg longitudinal axis
set JCol [expr $pi/32.*pow($DCol,4)]

```

```

set SzCol [expr $IzCol/(0.5*$DCol)]
set SyCol [expr $IyCol/(0.5*$DCol)]

```

```

# Two-column bents (center to one column)
=====
SINGLE-COLUMN BENT VS MULTI-COLUMN BENT
=====

```

```

if {$numColBent == 1} {
    set numCol 1
    set DistCol2Col 0.0
} elseif {$numColBent == 2 || $numColBent == 3} {
    set numCol 2
    set DistCol2Col [expr $DeckCTC*1.]; #
}

```

```

set nC 9

```

```

set dLC1 [expr $LCol1/$nC]
set dLC2 [expr $LCol2/$nC]
set dLC3 [expr $LCol3/$nC]

```

```

set CWeight1 [expr $masscoefCol1*$rho*$ACol*$dLC1]; # Weight for one element
set CWeight2 [expr $masscoefCol2*$rho*$ACol*$dLC2]
set CWeight3 [expr $masscoefCol3*$rho*$ACol*$dLC3]

```

```

set CMass1 [expr $CWeight1/$g]; # Mass for one element
set CMass2 [expr $CWeight2/$g]
set CMass3 [expr $CWeight3/$g]

```

```

set CRYMass1 [expr 0.5*$CMass1*pow(0.5*$DCol,2)]
set CRYMass2 [expr 0.5*$CMass2*pow(0.5*$DCol,2)]
set CRYMass3 [expr 0.5*$CMass3*pow(0.5*$DCol,2)]

```

```

set CRXMass1 [expr $CMass1*(0.25*pow(0.5*$DCol,2) + 1/12.*pow($dLC1,2))]
set CRXMass2 [expr $CMass2*(0.25*pow(0.5*$DCol,2) + 1/12.*pow($dLC2,2))]
set CRXMass3 [expr $CMass3*(0.25*pow(0.5*$DCol,2) + 1/12.*pow($dLC3,2))]

```

```

set CRZMass1 $CRXMass1
set CRZMass2 $CRXMass2
set CRZMass3 $CRXMass3

```

```

set CMassE1 [expr $CMass1/2.]
set CMassE2 [expr $CMass2/2.]
set CMassE3 [expr $CMass3/2.]

```

```

set CRYMassE1 [expr 0.5*$CMassE1*pow(0.5*$DCol,2)]
set CRYMassE2 [expr 0.5*$CMassE2*pow(0.5*$DCol,2)]
set CRYMassE3 [expr 0.5*$CMassE3*pow(0.5*$DCol,2)]

```

```

set CRXMassE1 [expr $CMassE1*(0.25*pow(0.5*$DCol,2) + 1/3.*pow($dLC1*0.5,2))]
set CRXMassE2 [expr $CMassE2*(0.25*pow(0.5*$DCol,2) + 1/3.*pow($dLC2*0.5,2))]
set CRXMassE3 [expr $CMassE3*(0.25*pow(0.5*$DCol,2) + 1/3.*pow($dLC3*0.5,2))]

```

```

set CRZMassE1 $CRXMassE1
set CRZMassE2 $CRXMassE2
set CRZMassE3 $CRXMassE3

```

```

#===== Copping information =====

```

```

set ACop [expr $BCop*$HCop]
set IzCop [expr 1/12.*$BCop*pow($HCop,3)]; # with respect to birdg transverse axis
set IyCop [expr 1/12.*$HCop*pow($BCop,3)]; # with respect to birdg longitudinal axis

```

```

set two_a [expr min($HCop,$BCop)]
set two_b [expr max($HCop,$BCop)]
set b2a [expr $two_b/$two_a]
if {$b2a >= 1.0 && $b2a < 1.2} {
    set lower1 0.14; set upper1 0.16;
    set slope1 [expr ($upper1 - $lower1)/(1.2-1.0)]
    set sig1 [expr $slope1*($b2a-1.0)+$lower1]
} elseif {$b2a >= 1.2 && $b2a < 1.5} {
    set lower1 0.16; set upper1 0.19;
    set slope1 [expr ($upper1 - $lower1)/(1.5-1.2)]
    set sig1 [expr $slope1*($b2a-1.2)+$lower1]
}

```

```

} elseif {$b2a >= 1.5 && $b2a < 2.0} {
    set lower1 0.19; set upper1 0.23;
    set slope1 [expr ($upper1 - $lower1)/(2.0-1.5)]
    set sig1 [expr $slope1*($b2a-1.5)+$lower1]
} elseif {$b2a >= 2.0 && $b2a < 2.5} {
    set lower1 0.23; set upper1 0.25;
    set slope1 [expr ($upper1 - $lower1)/(2.5-2.0)]
    set sig1 [expr $slope1*($b2a-2.0)+$lower1]
} elseif {$b2a >= 2.5 && $b2a < 3.0} {
    set lower1 0.25; set upper1 0.26;
    set slope1 [expr ($upper1 - $lower1)/(3.0-2.5)]
    set sig1 [expr $slope1*($b2a-2.5)+$lower1]
} elseif {$b2a >= 3.0 && $b2a < 5.0} {
    set lower1 0.26; set upper1 0.29;
    set slope1 [expr ($upper1 - $lower1)/(5.0-3.0)]
    set sig1 [expr $slope1*($b2a-3.0)+$lower1]
} else {
    set sig1 0.333
}

set JCop [expr $sig1*pow($two_a,3)*$two_b]

set nCop [expr $Npounding]

set dLCop [expr $LCop/$nCop]

set CopWeight [expr $rho*$ACop*$dLCop]; # Weight for one element

set CopMass [expr $CopWeight/$g]; # Mass for one element

set CopRXMass [expr $CopMass*(1/12.*pow($dLCop,2) + 1/12.*pow($HCop,2))]
set CopRYMass [expr $CopMass*(1/12.*pow($dLCop,2) + 1/12.*pow($BCop,2))]
set CopRZMass [expr $CopMass*(1/12.*pow($BCop,2) + 1/12.*pow($HCop,2))]

#===== Foundation information =====
set FWeight [expr $rho*$HFnd*$BFnd*$DFnd]
set FMass [expr $FWeight/$g]

set FRXMass [expr 1/12.*$FMass*( pow($DFnd,2) + pow($HFnd,2))]
set FRYMass [expr 1/12.*$FMass*( pow($BFnd,2) + pow($DFnd,2))]
set FRZMass [expr 1/12.*$FMass*( pow($BFnd,2) + pow($HFnd,2))]

#===== Abutment information (Abutments 1 and 6) =====

set numSpring 7

# set Fpile [expr $KpileSeat*$WDeck/$costh]

set AWeight [expr 2.0*$rho*$LAb*$BAb*$DAb]; # Note the factor 2.0 accounts for the total mass of
the abutment roughly since we are estimating that of the backwall portion here alone
set AWeight [expr 2.0*$WAbut]
set AMass [expr $AWeight/$g]

set ARXMass [expr $AMass*( 1/12.*pow($DAb,2) + 1/12.*pow($LAb,2))]
set ARYMass [expr $AMass*( 1/12.*pow($DAb,2) + 1/12.*pow($BAb,2))]
set ARZMass [expr $AMass*( 1/12.*pow($LAb,2) + 1/12.*pow($BAb,2))]

#===== Bearing information =====

set Npad 5

set WA1 [expr ($DWeight1*$nD)/2.]
set WA2 [expr ($DWeight4*$nD)/2.]

set WP1 [expr $DWeight1*$nD/2. + $DWeight2*$nD/2. ]
set WP2 [expr $DWeight2*$nD/2. + $DWeight3*$nD/2. ]
set WP3 [expr $DWeight3*$nD/2. + $DWeight4*$nD/2. ]

set WB1 [expr $WA1/$Npad]
set WB2 [expr $WA2/$Npad]

set WB3 [expr $WP1/$Npad]
set WB4 [expr $WP2/$Npad]
set WB5 [expr $WP3/$Npad]

set smallmass 0.001; # small rotational mass

```

```

#===== Pounding =====

set Esegment      $Ed
set EsegmentA     $Ecc
set massdensity   [expr $rho/$g]; # gamma = rho*g

set WeightSegmentD [expr $DWeight1*$nD + $DWeight2*$nD]
set MassSegmentD   [expr $WeightSegmentD/$g]
set HsegmentD      [expr (1-$nu*$nu)/($pi*$Esegment)]
set RsegmentD      [expr pow(3.*$MassSegmentD/(4*$pi*$massdensity),1/3.)]

set MassSegmentA   $AMass
set HsegmentA      [expr (1-$nu*$nu)/($pi*$EsegmentA)]
set RsegmentA      [expr pow(3.*$MassSegmentA/(4*$pi*$massdensity),1/3.)]

set                KhPoundingA                                [expr
4./((3*$pi*($HsegmentA+ $HsegmentD))*sqrt($RsegmentA*$RsegmentD/($RsegmentA+ $RsegmentD)))]
set                KhPoundingP                                [expr
4./((3*$pi*($HsegmentD+ $HsegmentD))*sqrt($RsegmentD*$RsegmentD/($RsegmentD+ $RsegmentD)))]

puts "OK"

#=====
#                                IMPORT SUBROUTINES
#=====

source 10Node.tcl
source 20Mass.tcl
source 30Element.tcl

close $fileIDN
close $fileIDE

puts "=====
puts "===== Model built =====
puts "=====

source 41Analysis_Gravity.tcl
source 42Analysis_Eigenvalue.tcl

if {$analysisType == "GravityAnalysis"} {
} else {
source 50Recorders.tcl
source 43Analysis_Dynamic.tcl
# }

source OutputSummary.tcl

wipe

- BridgeInformation.tcl

#=====
#                                BRIDGE INFORMATOIN
#=====

set EQ            1; # EQ number
set DT            0.01; # EQ time step

set number $EQ

#===== Material Information =====#

set Ec [expr 25454.*0.145038]; # Concrete elastic modulus (slab)
set Ed [expr 29315.*0.145038]; #[expr 57.*sqrt(-$fc*1000.)]; # Concrete elastic modulus (Girder)
set Ecc [expr 23998.*0.145038]; # Concrete elastic modulus (column)

#===== Deck Information =====#

set skewangle [expr -25.0]; # Skew angle (Degree)

set LDeck1 [expr 30000.0/25.4]; # Span 1 (mm to in)

```

```

set LDeck2      [expr 30000.0/25.4];   # Span 2
set LDeck3      [expr 30000.0/25.4];   # Span 3
set LDeck4      [expr 30000.0/25.4];   # Span 4

set WDeck       [expr 15740.0/25.4];   # deck width (mm to in)
set HDeck       [expr 2000.0/25.4];    # girder depth (mm to in)

set numGirder    7
set DeckCTC      [expr 2300.0/25.4]

set SlabThick    [expr 250./25.4];     # Slab thickness (mm to in)

set StiffnessReduction 1.0;            # Icr = Ig for PC

# Deck properties from Cad
set ADeck        [expr 8.63480e6/pow(25.4,2)];   # Gross deck area (mm2 to in2)
set Idkxx        [expr 5.2443188770e12/pow(25.4,4)]; # Ixx (mm4 to in4)
set Idkyy        [expr 176.7426353e12/pow(25.4,4)]; # Iyy (mm4 to in4)
set JDeck        [expr 1.39922e11/pow(25.4,4)];   # J (mm4 to in4) (torsional constant)
set ybot         [expr 1490.0/25.4];             # distance from deck bottom to centroid (in)

set masscoefGir 1.05

set wd           [expr 24.7311*9.81/4.448222*0.3048/12.]; # Distributed weight (t/m to kip/in)

# Deck properties from Matlab
set rotmass      86.86;                  # Im (rotational mass)
=====
=====

#===== Pier Information =====#

set numColBent 3

set LCol1        [expr 6500.0/25.4];      # Column height (mm to in)
set LCol2        [expr 8500.0/25.4]
set LCol3        [expr 7500.0/25.4]

set DCol         [expr 2000.0/25.4];      # column diameter (in)
set ctcCol       [expr 5500./25.4 + $DCol]; # Distance between column center (mm to in)

set masscoefCol1 1.000; # Increase mass for tapered column
set masscoefCol2 1.000
set masscoefCol3 1.000

#===== Copping Information =====#

set LCop         [expr 17000.0/25.4];     # copping length (in)
set BCop         [expr 2400.0/25.4];     # copping width (in)
set HCop         [expr 2000.0/25.4];     # copping height (in)

#===== Bearing Information =====#

set KhA1         [expr 184.0*9.81/4.448222*0.3048/12.]; # kN/m to kip/in
set KvA1         [expr 33342.0*9.81/4.448222*0.3048/12.]; # kN/m to kip/in

set KhA2         [expr 184.0*9.81/4.448222*0.3048/12.]
set KvA2         [expr 33342.0*9.81/4.448222*0.3048/12.]

set KhP1         [expr 2.*184.0*9.81/4.448222*0.3048/12.]
set KvP1         [expr 2.*33342.0*9.81/4.448222*0.3048/12.]

set KhP21        [expr 184.0*9.81/4.448222*0.3048/12.]
set KvP21        [expr 33342.0*9.81/4.448222*0.3048/12.]

set KhP22        [expr 184.0*9.81/4.448222*0.3048/12.]
set KvP22        [expr 33342.0*9.81/4.448222*0.3048/12.]

set KhP3         [expr 2.*184.0*9.81/4.448222*0.3048/12.]
set KvP3         [expr 2.*33342.0*9.81/4.448222*0.3048/12.]

#===== Foundation Information =====#

```

```

set HFnd      [expr 2000./25.4]
set BFnd      [expr 6500./25.4]; # along longitudinal axis
set DFnd      [expr 14900./25.4]; # along transverse axis

#===== Abutment Information =====#

set LAb        [expr 8000.0/25.4]; # abutment height
set          BAb                                [expr 158.0/25.4]; #
=====
set DAb        [expr 12145.0/25.4]; # abutment width
set WAbut      [expr 72.524*17.373*9.81/4.448222]; # abutment weight (t to kip)

#===== Other Information =====#

set damp        0.050;          # damping ratio
set masscoef    1.050;          # mass coefficient
set GapLA1      [expr 50./25.4]; # abutment gap (in to mm)
set GapLA2      [expr 50./25.4]
set GapLP1      [expr 100./25.4]; # pier gap (in to mm)

#===== Limit States =====#
set fr          [expr 0.558333*sqrt(24)]; # MPa

set HpadA1      [expr 128./25.4]
set HpadA2      [expr 128./25.4]
set HpadP1      [expr 128./25.4]
set HpadP21     [expr 128./25.4]
set HpadP22     [expr 128./25.4]
set HpadP3      [expr 128./25.4]

set gammab      200.; # %

set SeatWidthA1 [expr 689./25.4]
set SeatWidthA2 [expr 706./25.4]
set SeatWidthP1 [expr 689./25.4]

- Node.tcl

#####
#                                     #
#          BUILD THE GENERATION OF NODES          #
#                                     #
#####

set LDeckA1 0.0
set LDeckB2 [expr $LDeck1]
set LDeckB3 [expr $LDeck1+$LDeck2]
set LDeckB4 [expr $LDeck1+$LDeck2+$LDeck3]
set LDeckA2 [expr $LDeck1+$LDeck2+$LDeck3+$LDeck4]

#===== DECK NODE =====#

# Support Nodes =====#

set Y 0.0

set nodeIDB1 1; # Abutment 1
set X [expr $LDeckA1]; set Z 0.0
node $nodeIDB1 $X $Y $Z
# puts "node $nodeIDB1 $X $Y $Z"
puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeIDB1 $X $Y $Z]

set nodeIDB2 [expr $nodeIDB1+$nD]; # Bent 2
set X [expr $LDeckB2]; set Z 0.0
node $nodeIDB2 $X $Y $Z
# puts "node $nodeIDB2 $X $Y $Z"
puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeIDB2 $X $Y $Z]

set nodeIDB3 [expr $nodeIDB2+$nD]; # Bent 3
set X [expr $LDeckB3]; set Z 0.0
node $nodeIDB3 $X $Y $Z
puts "node $nodeIDB3 $X $Y $Z"

```

```

puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeIDB3 $X $Y $Z]

#####
#####
set nodeIDB31 [expr 10000+$nodeIDB3]; # Bent 3
node $nodeIDB31 $X $Y $Z
# puts "node $nodeIDB31 $X $Y $Z"
puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeIDB31 $X $Y $Z]
#####
#####

set nodeIDB4 [expr $nodeIDB3+$nD]; # Bent 4
set X [expr $LDeckB4]; set Z 0.0
node $nodeIDB4 $X $Y $Z
# puts "node $nodeIDB4 $X $Y $Z"
puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeIDB4 $X $Y $Z]

set nodeIDB5 [expr $nodeIDB4+$nD]; # Abutment 2
set X [expr $LDeckA2]; set Z 0.0
node $nodeIDB5 $X $Y $Z
# puts "node $nodeIDB5 $X $Y $Z"
puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeIDB5 $X $Y $Z]

# Span Nodes =====

for {set i 2} {$i <= $nD} {incr i 1} {; # Span 1
    set nodeID $i
    set XX [expr $LDeckA1+($i - 1)*$dLD1]
    set X [expr $XX]; set Z 0.0
    node $nodeID $X $Y $Z
#    puts "node $nodeID $X $Y $Z"
puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

for {set i 2} {$i <= $nD} {incr i 1} {; # Span 2
    set nodeID [expr $nodeIDB2 + $i - 1]
    set XX [expr $LDeckB2+($i - 1)*$dLD2]
    set X [expr $XX]; set Z 0.0
    node $nodeID $X $Y $Z
#    puts "node $nodeID $X $Y $Z"
puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

for {set i 2} {$i <= $nD} {incr i 1} {; # Span 3
    set nodeID [expr $nodeIDB3 + $i - 1]
    set XX [expr $LDeckB3+($i - 1)*$dLD3]
    set X [expr $XX]; set Z 0.0
    node $nodeID $X $Y $Z
#    puts "node $nodeID $X $Y $Z"
puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

for {set i 2} {$i <= $nD} {incr i 1} {; # Span 4
    set nodeID [expr $nodeIDB4 + $i - 1]
    set XX [expr $LDeckB4+($i - 1)*$dLD4]
    set X [expr $XX]; set Z 0.0
    node $nodeID $X $Y $Z
#    puts "node $nodeID $X $Y $Z"
puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

#===== BENT NODE =====

set dZ [expr 2.*$DistCol2Col]

# Bent 2 (column 1) =====

set X [expr $LDeckB2+$dZ*$tanh]; set Z [expr -$dZ]
set Y [expr -$ybot-$HCop-$LCol1-$HFnd*0.5]
set Y1 [expr -$ybot-$HCop-$LCol1]
set nodeIDC 4100
for {set i 1} {$i <= [expr $nC+1]} {incr i 1} {
    set nodeID [expr $nodeIDC+$i]
    set Y [expr $Y1 + ($i - 1)*$dLC1]
    node $nodeID $X $Y $Z
puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

```

```

set X [expr $LDeckB3+$dZ*$stanth]; set Z [expr -$dZ]
set Y [expr -$ybot-$HCop-$LCol2-$HFnd*0.5]
set Y1 [expr -$ybot-$HCop-$LCol2]
set nodeIDC 4200
for {set i 1} {$i <= [expr $nC+1]} {incr i 1} {
    set nodeID [expr $nodeIDC+$i]
    set Y [expr $Y1 + ($i - 1)*$dLC2]
    node $nodeID $X $Y $Z
puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

set X [expr $LDeckB4+$dZ*$stanth]; set Z [expr -$dZ]
set Y [expr -$ybot-$HCop-$LCol3-$HFnd*0.5]
set Y1 [expr -$ybot-$HCop-$LCol3]
set nodeIDC 4300
for {set i 1} {$i <= [expr $nC+1]} {incr i 1} {
    set nodeID [expr $nodeIDC+$i]
    set Y [expr $Y1 + ($i - 1)*$dLC3]
    node $nodeID $X $Y $Z
# puts "node $nodeID $X $Y $Z"
puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

set X [expr $LDeckB2-$dZ*$stanth]; set Z [expr $dZ]
set Y [expr -$ybot-$HCop-$LCol1-$HFnd*0.5]
set Y1 [expr -$ybot-$HCop-$LCol1]
set nodeIDC 6100
for {set i 1} {$i <= [expr $nC+1]} {incr i 1} {
    set nodeID [expr $nodeIDC+$i]
    set Y [expr $Y1 + ($i - 1)*$dLC1]
    node $nodeID $X $Y $Z
    puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

set X [expr $LDeckB3-$dZ*$stanth]; set Z [expr $dZ]
set Y [expr -$ybot-$HCop-$LCol2-$HFnd*0.5]
set Y1 [expr -$ybot-$HCop-$LCol2]
set nodeIDC 6200
for {set i 1} {$i <= [expr $nC+1]} {incr i 1} {
    set nodeID [expr $nodeIDC+$i]
    set Y [expr $Y1 + ($i - 1)*$dLC2]
    node $nodeID $X $Y $Z
    puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

set X [expr $LDeckB4-$dZ*$stanth]; set Z [expr $dZ]
set Y [expr -$ybot-$HCop-$LCol3-$HFnd*0.5]
set Y1 [expr -$ybot-$HCop-$LCol3]
set nodeIDC 6300
for {set i 1} {$i <= [expr $nC+1]} {incr i 1} {
    set nodeID [expr $nodeIDC+$i]
    set Y [expr $Y1 + ($i - 1)*$dLC3]
    node $nodeID $X $Y $Z
# puts "node $nodeID $X $Y $Z"
puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

set dZ 0.
set X [expr $LDeckB2-$dZ*$stanth]; set Z [expr $dZ]
set Y [expr -$ybot-$HCop-$LCol1-$HFnd*0.5]
set Y1 [expr -$ybot-$HCop-$LCol1]
set nodeIDC 5100
for {set i 1} {$i <= [expr $nC+1]} {incr i 1} {
    set nodeID [expr $nodeIDC+$i]
    set Y [expr $Y1 + ($i - 1)*$dLC1]
    node $nodeID $X $Y $Z
# puts "node $nodeID $X $Y $Z"
puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

set X [expr $LDeckB3-$dZ*$stanth]; set Z [expr $dZ]
set Y [expr -$ybot-$HCop-$LCol2-$HFnd*0.5]
set Y1 [expr -$ybot-$HCop-$LCol2]
set nodeIDC 5200
for {set i 1} {$i <= [expr $nC+1]} {incr i 1} {
    set nodeID [expr $nodeIDC+$i]
    set Y [expr $Y1 + ($i - 1)*$dLC2]
    node $nodeID $X $Y $Z
# puts "node $nodeID $X $Y $Z"
puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

set X [expr $LDeckB4-$dZ*$stanth]; set Z [expr $dZ]
set Y [expr -$ybot-$HCop-$LCol3-$HFnd*0.5]

```

```

set Y1 [expr -$ybot-$HCop-$LCol3]
set nodeIDC 5300
for {set i 1} {$i <= [expr $nC+1]} {incr i 1} {
    set nodeID [expr $nodeIDC+$i]
    set Y [expr $Y1 + ($i - 1)*$dLC3]
    node $nodeID $X $Y $Z
    puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

#===== TRANSVERSE BEAM NODE =====

set Y 0.0

set X0 $LDeckA1

for {set i 1} {$i <= 3} {incr i 1} { ; # Abutment 1
    set nodeID [expr 1100+$i]
    set X [expr $X0+$WDeckbot/($numSpring-1)*(4-$i)*$tanth]
    set Z [expr -$WDeckbot/($numSpring-1)*(4-$i)]
    node $nodeID $X $Y $Z
    puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

for {set i 4} {$i <= 6} {incr i 1} {
    set nodeID [expr 1100+$i+1]
    set X [expr $X0-$WDeckbot/($numSpring-1)*($i-3)*$tanth]
    set Z [expr $WDeckbot/($numSpring-1)*($i-3)]
    node $nodeID $X $Y $Z
    puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

set X0 $LDeckA2

for {set i 1} {$i <= 3} {incr i 1} { ; # Abutment 2
    set nodeID [expr 1120+$i]
    set X [expr $X0+$WDeckbot/($numSpring-1)*(4-$i)*$tanth]
    set Z [expr -$WDeckbot/($numSpring-1)*(4-$i)]
    node $nodeID $X $Y $Z
    puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

for {set i 4} {$i <= 6} {incr i 1} {
    set nodeID [expr 1120+$i+1]
    set X [expr $X0-$WDeckbot/($numSpring-1)*($i-3)*$tanth]
    set Z [expr $WDeckbot/($numSpring-1)*($i-3)]
    node $nodeID $X $Y $Z
    puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

set X0 $LDeckB2

for {set i 1} {$i <= 3} {incr i 1} { ; # Bent 2 (DECK)
    set nodeID [expr 2020+$i]
    set X [expr $X0+$WDeckbot/($numSpring-1)*(4-$i)*$tanth]
    set Z [expr -$WDeckbot/($numSpring-1)*(4-$i)]
    node $nodeID $X $Y $Z
    puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

for {set i 4} {$i <= 6} {incr i 1} {
    set nodeID [expr 2020+$i+1]
    set X [expr $X0-$WDeckbot/($numSpring-1)*($i-3)*$tanth]
    set Z [expr $WDeckbot/($numSpring-1)*($i-3)]
    node $nodeID $X $Y $Z
    puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

for {set i 1} {$i <= 7} {incr i 1} { ; # Bent 2 (Bearing Location)
    set nodeID [expr 2120+$i]
    set X [expr $X0-(-0.5*$WDeckbot+$WDeckbot/($numSpring-1)*($i-1))*$tanth]
    set Z [expr -0.5*$WDeckbot+$WDeckbot/($numSpring-1)*($i-1)]
    node $nodeID $X $Y $Z
    puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

for {set i 1} {$i <= 7} {incr i 1} { ; # Bent 2 (Copping Centroid)
    set Y00 [expr -$ybot-$HCop/2.]

```

```

        set nodeID [expr 2520+$i]
        set X [expr $X0-(-0.5*$WDeckbot+$WDeckbot/($numSpring-1)*($i-1))*$tanH]
        set Z [expr -0.5*$WDeckbot+$WDeckbot/($numSpring-1)*($i-1)]
        node $nodeID $X $Y00 $Z
        puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y00 $Z]
    }

```

```
set X0 $LDeckB3
```

```

for {set i 1} {$i <= 3} {incr i 1} { ; # Bent 3 (DECK)
    set nodeID [expr 2030+$i]
    set X [expr $X0+$WDeckbot/($numSpring-1)*(4-$i)*$tanH]
    set Z [expr -$WDeckbot/($numSpring-1)*(4-$i)]
    node $nodeID $X $Y $Z
    puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

```

```

for {set i 4} {$i <= 6} {incr i 1} {
    set nodeID [expr 2030+$i+1]
    set X [expr $X0-$WDeckbot/($numSpring-1)*($i-3)*$tanH]
    set Z [expr $WDeckbot/($numSpring-1)*($i-3)]
    node $nodeID $X $Y $Z
    puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

```

```

for {set i 1} {$i <= 7} {incr i 1} { ; # Bent 3 (Bearing Location)
    set nodeID [expr 2130+$i]
    set X [expr $X0-(-0.5*$WDeckbot+$WDeckbot/($numSpring-1)*($i-1))*$tanH]
    set Z [expr -0.5*$WDeckbot+$WDeckbot/($numSpring-1)*($i-1)]
    node $nodeID $X $Y $Z
    puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

```

```

for {set i 1} {$i <= 7} {incr i 1} { ; # Bent 3 (Copping Centroid)
    set Y00 [expr -$ybot-$HCop/2.]
    set nodeID [expr 2530+$i]
    set X [expr $X0-(-0.5*$WDeckbot+$WDeckbot/($numSpring-1)*($i-1))*$tanH]
    set Z [expr -0.5*$WDeckbot+$WDeckbot/($numSpring-1)*($i-1)]
    node $nodeID $X $Y00 $Z
    puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y00 $Z]
}

```

```

#####
#####

```

```

for {set i 1} {$i <= 3} {incr i 1} { ; # Bent 3 (DECK)
    set nodeID [expr 12030+$i]
    set X [expr $X0+$WDeckbot/($numSpring-1)*(4-$i)*$tanH]
    set Z [expr -$WDeckbot/($numSpring-1)*(4-$i)]
    node $nodeID $X $Y $Z
#    puts "node $nodeID $X $Y $Z"
    puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

```

```

for {set i 4} {$i <= 6} {incr i 1} {
    set nodeID [expr 12030+$i+1]
    set X [expr $X0-$WDeckbot/($numSpring-1)*($i-3)*$tanH]
    set Z [expr $WDeckbot/($numSpring-1)*($i-3)]
    node $nodeID $X $Y $Z
#    puts "node $nodeID $X $Y $Z"
    puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

```

```

#####
#####

```

```
set X0 $LDeckB4
```

```

for {set i 1} {$i <= 3} {incr i 1} { ; # Bent 4 (DECK)
    set nodeID [expr 2040+$i]
    set X [expr $X0+$WDeckbot/($numSpring-1)*(4-$i)*$tanH]
    set Z [expr -$WDeckbot/($numSpring-1)*(4-$i)]
    node $nodeID $X $Y $Z
    puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

```

```

for {set i 4} {$i <= 6} {incr i 1} {
    set nodeID [expr 2040+$i+1]
    set X [expr $X0-$WDeckbot/($numSpring-1)*($i-3)*$tanH]
    set Z [expr $WDeckbot/($numSpring-1)*($i-3)]
    node $nodeID $X $Y $Z
    puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

for {set i 1} {$i <= 7} {incr i 1} { ; # Bent 4 (Bearing Location)
    set nodeID [expr 2140+$i]
    set X [expr $X0-(-0.5*$WDeckbot+$WDeckbot/($numSpring-1)*($i-1))*$tanH]
    set Z [expr -0.5*$WDeckbot+$WDeckbot/($numSpring-1)*($i-1)]
    node $nodeID $X $Y $Z
    puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

for {set i 1} {$i <= 7} {incr i 1} { ; # Bent 4 (Copping Centroid)
    set Y00 [expr -$ybot-$HCop/2.]
    set nodeID [expr 2540+$i]
    set X [expr $X0-(-0.5*$WDeckbot+$WDeckbot/($numSpring-1)*($i-1))*$tanH]
    set Z [expr -0.5*$WDeckbot+$WDeckbot/($numSpring-1)*($i-1)]
    node $nodeID $X $Y00 $Z
    puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y00 $Z]
}

#===== BEARING NODE =====

set X0 $LDeckA1

for {set i 1} {$i <= 7} {incr i 1} { ; # Abutment 1
    set nodeID [expr 3000+$i]
    set X [expr $X0-(-0.5*$WDeckbot+$WDeckbot/($numSpring-1)*($i-1))*$tanH]
    set Z [expr -0.5*$WDeckbot+$WDeckbot/($numSpring-1)*($i-1)]
    node $nodeID $X $Y $Z
    # puts "node $nodeID $X $Y $Z"
    puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

set X0 $LDeckA2

for {set i 1} {$i <= 7} {incr i 1} { ; # Abutment 1
    set nodeID [expr 3020+$i]
    set X [expr $X0-(-0.5*$WDeckbot+$WDeckbot/($numSpring-1)*($i-1))*$tanH]
    set Z [expr -0.5*$WDeckbot+$WDeckbot/($numSpring-1)*($i-1)]
    node $nodeID $X $Y $Z
    # puts "node $nodeID $X $Y $Z"
    puts $fileIDN [format "%3d %9.4f %9.4f %9.4f" $nodeID $X $Y $Z]
}

#####
#
# BUILD NODE CONSTRAINTS (BC CONDITION)
#
#####

# nodeTag X Y Z RX RY RZ
# ABUTMENT - LEFT FIXITY
fix 3001 1 1 1 1 1 1
fix 3002 1 1 1 1 1 1
fix 3003 1 1 1 1 1 1
fix 3004 1 1 1 1 1 1
fix 3005 1 1 1 1 1 1
fix 3006 1 1 1 1 1 1
fix 3007 1 1 1 1 1 1

# ABUTMENT - RIGHT FIXITY
fix 3021 1 1 1 1 1 1
fix 3022 1 1 1 1 1 1
fix 3023 1 1 1 1 1 1
fix 3024 1 1 1 1 1 1
fix 3025 1 1 1 1 1 1
fix 3026 1 1 1 1 1 1
fix 3027 1 1 1 1 1 1

# FOUNDATIONS: BENTS 2~5
fix 4101 1 1 1 1 1 1
fix 4201 1 1 1 1 1 1

```

```

fix      4301    1    1    1    1    1    1
fix      5101    1    1    1    1    1    1
fix      5201    1    1    1    1    1    1
fix      5301    1    1    1    1    1    1

fix      6101    1    1    1    1    1    1
fix      6201    1    1    1    1    1    1
fix      6301    1    1    1    1    1    1

# if {$numCol == 2} {
# fix      601    1    1    1    1    1    1
# fix      701    1    1    1    1    1    1
# }

```

puts "Node and Restraint Built"

- Mass.tcl

```

#####
#                                     #
#          BUILD THE GENERATION OF NODAL MASSES          #
#                                     #
#####

```

```

set DRXMassA1 0.
set DRXMassA2 0.
set DRXMass1  0.
set DRXMass2  0.
set DRXMass3  0.
set DRXMass4  0.
set DRXMassB1 0.
set DRXMassB2 0.
set DRXMassB3 0.

```

```

# =====
#                                     DECK MASSES
# =====

```

mass	1	\$DMassA1	\$DMassA1	\$DMassA1	\$DRXMassA1	0	0
mass	2	\$DMass1	\$DMass1	\$DMass1	\$DRXMass1	0	0
mass	3	\$DMass1	\$DMass1	\$DMass1	\$DRXMass1	0	0
mass	4	\$DMass1	\$DMass1	\$DMass1	\$DRXMass1	0	0
mass	5	\$DMass1	\$DMass1	\$DMass1	\$DRXMass1	0	0
mass	6	\$DMass1	\$DMass1	\$DMass1	\$DRXMass1	0	0
mass	7	\$DMass1	\$DMass1	\$DMass1	\$DRXMass1	0	0
mass	8	\$DMass1	\$DMass1	\$DMass1	\$DRXMass1	0	0
mass	9	\$DMass1	\$DMass1	\$DMass1	\$DRXMass1	0	0
mass	10	\$DMass1	\$DMass1	\$DMass1	\$DRXMass1	0	0
mass	11	\$DMass1	\$DMass1	\$DMass1	\$DRXMass1	0	0
mass	12	\$DMass1	\$DMass1	\$DMass1	\$DRXMass1	0	0
mass	13	\$DMass1	\$DMass1	\$DMass1	\$DRXMass1	0	0
mass	14	\$DMass1	\$DMass1	\$DMass1	\$DRXMass1	0	0
mass	15	\$DMass1	\$DMass1	\$DMass1	\$DRXMass1	0	0
mass	16	\$DMassB1	\$DMassB1	\$DMassB1	\$DRXMassB1	0	0
mass	17	\$DMass2	\$DMass2	\$DMass2	\$DRXMass2	0	0
mass	18	\$DMass2	\$DMass2	\$DMass2	\$DRXMass2	0	0
mass	19	\$DMass2	\$DMass2	\$DMass2	\$DRXMass2	0	0
mass	20	\$DMass2	\$DMass2	\$DMass2	\$DRXMass2	0	0
mass	21	\$DMass2	\$DMass2	\$DMass2	\$DRXMass2	0	0
mass	22	\$DMass2	\$DMass2	\$DMass2	\$DRXMass2	0	0
mass	23	\$DMass2	\$DMass2	\$DMass2	\$DRXMass2	0	0
mass	24	\$DMass2	\$DMass2	\$DMass2	\$DRXMass2	0	0
mass	25	\$DMass2	\$DMass2	\$DMass2	\$DRXMass2	0	0
mass	26	\$DMass2	\$DMass2	\$DMass2	\$DRXMass2	0	0
mass	27	\$DMass2	\$DMass2	\$DMass2	\$DRXMass2	0	0
mass	28	\$DMass2	\$DMass2	\$DMass2	\$DRXMass2	0	0
mass	29	\$DMass2	\$DMass2	\$DMass2	\$DRXMass2	0	0
mass	30	\$DMass2	\$DMass2	\$DMass2	\$DRXMass2	0	0

```

mass      31      [expr $DMassB2/2.]  [expr $DMassB2/2.]  [expr $DMassB2/2.]  [expr

```

\$DRXMassB2/2.]	0	0					
mass 10031			[expr \$DMassB2/2.]	[expr \$DMassB2/2.]	[expr \$DMassB2/2.]	[expr	
\$DRXMassB2/2.]	0	0					

mass	32	\$DMass3	\$DMass3	\$DMass3	\$DRXMass3	0	0
mass	33	\$DMass3	\$DMass3	\$DMass3	\$DRXMass3	0	0
mass	34	\$DMass3	\$DMass3	\$DMass3	\$DRXMass3	0	0
mass	35	\$DMass3	\$DMass3	\$DMass3	\$DRXMass3	0	0
mass	36	\$DMass3	\$DMass3	\$DMass3	\$DRXMass3	0	0
mass	37	\$DMass3	\$DMass3	\$DMass3	\$DRXMass3	0	0
mass	38	\$DMass3	\$DMass3	\$DMass3	\$DRXMass3	0	0
mass	39	\$DMass3	\$DMass3	\$DMass3	\$DRXMass3	0	0
mass	40	\$DMass3	\$DMass3	\$DMass3	\$DRXMass3	0	0
mass	41	\$DMass3	\$DMass3	\$DMass3	\$DRXMass3	0	0
mass	42	\$DMass3	\$DMass3	\$DMass3	\$DRXMass3	0	0
mass	43	\$DMass3	\$DMass3	\$DMass3	\$DRXMass3	0	0
mass	44	\$DMass3	\$DMass3	\$DMass3	\$DRXMass3	0	0
mass	45	\$DMass3	\$DMass3	\$DMass3	\$DRXMass3	0	0

mass	46	\$DMassB3	\$DMassB3	\$DMassB3	\$DRXMassB3	0	0
------	----	-----------	-----------	-----------	-------------	---	---

mass	47	\$DMass4	\$DMass4	\$DMass4	\$DRXMass4	0	0
mass	48	\$DMass4	\$DMass4	\$DMass4	\$DRXMass4	0	0
mass	49	\$DMass4	\$DMass4	\$DMass4	\$DRXMass4	0	0
mass	50	\$DMass4	\$DMass4	\$DMass4	\$DRXMass4	0	0
mass	51	\$DMass4	\$DMass4	\$DMass4	\$DRXMass4	0	0
mass	52	\$DMass4	\$DMass4	\$DMass4	\$DRXMass4	0	0
mass	53	\$DMass4	\$DMass4	\$DMass4	\$DRXMass4	0	0
mass	54	\$DMass4	\$DMass4	\$DMass4	\$DRXMass4	0	0
mass	55	\$DMass4	\$DMass4	\$DMass4	\$DRXMass4	0	0
mass	56	\$DMass4	\$DMass4	\$DMass4	\$DRXMass4	0	0
mass	57	\$DMass4	\$DMass4	\$DMass4	\$DRXMass4	0	0
mass	58	\$DMass4	\$DMass4	\$DMass4	\$DRXMass4	0	0
mass	59	\$DMass4	\$DMass4	\$DMass4	\$DRXMass4	0	0
mass	60	\$DMass4	\$DMass4	\$DMass4	\$DRXMass4	0	0

mass	61	\$DMassA2	\$DMassA2	\$DMassA2	\$DRXMassA2	0	0
------	----	-----------	-----------	-----------	-------------	---	---

```
# =====
#                               COPPING MASSES
# =====
```

```
set CopRXMass 0.
set CopRYMass 0.
set CopRZMass 0.
```

#	nodeTag	X	Y	Z	RX	RY	RZ
mass	2521	\$CopMass	\$CopMass	\$CopMass	\$CopRXMass	\$CopRYMass	\$CopRZMass
mass	2522	\$CopMass	\$CopMass	\$CopMass	\$CopRXMass	\$CopRYMass	\$CopRZMass
mass	2523	\$CopMass	\$CopMass	\$CopMass	\$CopRXMass	\$CopRYMass	\$CopRZMass
mass	2524	\$CopMass	\$CopMass	\$CopMass	\$CopRXMass	\$CopRYMass	\$CopRZMass
mass	2525	\$CopMass	\$CopMass	\$CopMass	\$CopRXMass	\$CopRYMass	\$CopRZMass
mass	2526	\$CopMass	\$CopMass	\$CopMass	\$CopRXMass	\$CopRYMass	\$CopRZMass
mass	2527	\$CopMass	\$CopMass	\$CopMass	\$CopRXMass	\$CopRYMass	\$CopRZMass
mass	2531	\$CopMass	\$CopMass	\$CopMass	\$CopRXMass	\$CopRYMass	\$CopRZMass
mass	2532	\$CopMass	\$CopMass	\$CopMass	\$CopRXMass	\$CopRYMass	\$CopRZMass
mass	2533	\$CopMass	\$CopMass	\$CopMass	\$CopRXMass	\$CopRYMass	\$CopRZMass
mass	2534	\$CopMass	\$CopMass	\$CopMass	\$CopRXMass	\$CopRYMass	\$CopRZMass
mass	2535	\$CopMass	\$CopMass	\$CopMass	\$CopRXMass	\$CopRYMass	\$CopRZMass
mass	2536	\$CopMass	\$CopMass	\$CopMass	\$CopRXMass	\$CopRYMass	\$CopRZMass
mass	2537	\$CopMass	\$CopMass	\$CopMass	\$CopRXMass	\$CopRYMass	\$CopRZMass
mass	2541	\$CopMass	\$CopMass	\$CopMass	\$CopRXMass	\$CopRYMass	\$CopRZMass
mass	2542	\$CopMass	\$CopMass	\$CopMass	\$CopRXMass	\$CopRYMass	\$CopRZMass
mass	2543	\$CopMass	\$CopMass	\$CopMass	\$CopRXMass	\$CopRYMass	\$CopRZMass
mass	2544	\$CopMass	\$CopMass	\$CopMass	\$CopRXMass	\$CopRYMass	\$CopRZMass
mass	2545	\$CopMass	\$CopMass	\$CopMass	\$CopRXMass	\$CopRYMass	\$CopRZMass
mass	2546	\$CopMass	\$CopMass	\$CopMass	\$CopRXMass	\$CopRYMass	\$CopRZMass
mass	2547	\$CopMass	\$CopMass	\$CopMass	\$CopRXMass	\$CopRYMass	\$CopRZMass

```
# =====
#                               COLUMN AND FOUNDATION MASSES
# =====
```



```

mass 6109 $CMass1 $CMass1 $CMass1 0 $CRYMass1 0
mass 6110 $CMassE1 $CMassE1 $CMassE1 0 $CRYMassE1 0

mass 6201 $CMassE2 $CMassE2 $CMassE2 0 $CRYMassE2 0
mass 6202 $CMass2 $CMass2 $CMass2 0 $CRYMass2 0
mass 6203 $CMass2 $CMass2 $CMass2 0 $CRYMass2 0
mass 6204 $CMass2 $CMass2 $CMass2 0 $CRYMass2 0
mass 6205 $CMass2 $CMass2 $CMass2 0 $CRYMass2 0
mass 6206 $CMass2 $CMass2 $CMass2 0 $CRYMass2 0
mass 6207 $CMass2 $CMass2 $CMass2 0 $CRYMass2 0
mass 6208 $CMass2 $CMass2 $CMass2 0 $CRYMass2 0
mass 6209 $CMass2 $CMass2 $CMass2 0 $CRYMass2 0
mass 6210 $CMassE2 $CMassE2 $CMassE2 0 $CRYMassE2 0

mass 6301 $CMassE3 $CMassE3 $CMassE3 0 $CRYMassE3 0
mass 6302 $CMass3 $CMass3 $CMass3 0 $CRYMass3 0
mass 6303 $CMass3 $CMass3 $CMass3 0 $CRYMass3 0
mass 6304 $CMass3 $CMass3 $CMass3 0 $CRYMass3 0
mass 6305 $CMass3 $CMass3 $CMass3 0 $CRYMass3 0
mass 6306 $CMass3 $CMass3 $CMass3 0 $CRYMass3 0
mass 6307 $CMass3 $CMass3 $CMass3 0 $CRYMass3 0
mass 6308 $CMass3 $CMass3 $CMass3 0 $CRYMass3 0
mass 6309 $CMass3 $CMass3 $CMass3 0 $CRYMass3 0
mass 6310 $CMassE3 $CMassE3 $CMassE3 0 $CRYMassE3 0

```

puts "Mass built"

31Element

```

#####
#                                     #
#          BUILD THE GENERATION OF ELEMENTS          #
#                                     #
#####

```

```

set IDDeckTransf 1
set IDTrBeamTransf 2
set IDColTransf 3
set IDRgdTransf 4

```

```

#          transfTag          vecxzX          vecxzY          vecxzZ
geomTransf Linear $IDDeckTransf 0 0 1
geomTransf Linear $IDTrBeamTransf [expr -$costh] 0 [expr -$sinth]
geomTransf PDelta $IDColTransf [expr -$sinth] 0 [expr $costh]
geomTransf Linear $IDRgdTransf [expr -$sinth] 0 [expr $costh]

```

```

set MatRGD 20
set KRGD 1.e10
uniaxialMaterial Elastic $MatRGD $KRGD

```

```
# =====
```

```

source 31Element_Deck.tcl
source 32Element_Column.tcl
source 34Element_Expansion.tcl

```

```
# =====
```

31Element_Deck

```

# =====
#          DECK ELEMENTS
# =====

```

```

#          eleTag  iNode  jNode  A      E      G      J      Iy      Iz
#          transfTag
#          # Span 1
element elasticBeamColumn 1 1 2 $ADeck $Ed $Gd $JDeck $IyDeck $IzDeck
$IDDeckTransf
element elasticBeamColumn 2 2 3 $ADeck $Ed $Gd $JDeck $IyDeck $IzDeck
$IDDeckTransf
element elasticBeamColumn 3 3 4 $ADeck $Ed $Gd $JDeck $IyDeck $IzDeck
$IDDeckTransf

```


element elasticBeamColumn	42	42	43	\$ADeck	\$Ed	\$Gd	\$JDeck	\$IyDeck	\$IzDeck
\$IDDeckTransf									
element elasticBeamColumn	43	43	44	\$ADeck	\$Ed	\$Gd	\$JDeck	\$IyDeck	\$IzDeck
\$IDDeckTransf									
element elasticBeamColumn	44	44	45	\$ADeck	\$Ed	\$Gd	\$JDeck	\$IyDeck	\$IzDeck
\$IDDeckTransf									
element elasticBeamColumn	45	45	46	\$ADeck	\$Ed	\$Gd	\$JDeck	\$IyDeck	\$IzDeck
\$IDDeckTransf									
# Span 4									
element elasticBeamColumn	46	46	47	\$ADeck	\$Ed	\$Gd	\$JDeck	\$IyDeck	\$IzDeck
\$IDDeckTransf									
element elasticBeamColumn	47	47	48	\$ADeck	\$Ed	\$Gd	\$JDeck	\$IyDeck	\$IzDeck
\$IDDeckTransf									
element elasticBeamColumn	48	48	49	\$ADeck	\$Ed	\$Gd	\$JDeck	\$IyDeck	\$IzDeck
\$IDDeckTransf									
element elasticBeamColumn	49	49	50	\$ADeck	\$Ed	\$Gd	\$JDeck	\$IyDeck	\$IzDeck
\$IDDeckTransf									
element elasticBeamColumn	50	50	51	\$ADeck	\$Ed	\$Gd	\$JDeck	\$IyDeck	\$IzDeck
\$IDDeckTransf									
element elasticBeamColumn	51	51	52	\$ADeck	\$Ed	\$Gd	\$JDeck	\$IyDeck	\$IzDeck
\$IDDeckTransf									
element elasticBeamColumn	52	52	53	\$ADeck	\$Ed	\$Gd	\$JDeck	\$IyDeck	\$IzDeck
\$IDDeckTransf									
element elasticBeamColumn	53	53	54	\$ADeck	\$Ed	\$Gd	\$JDeck	\$IyDeck	\$IzDeck
\$IDDeckTransf									
element elasticBeamColumn	54	54	55	\$ADeck	\$Ed	\$Gd	\$JDeck	\$IyDeck	\$IzDeck
\$IDDeckTransf									
element elasticBeamColumn	55	55	56	\$ADeck	\$Ed	\$Gd	\$JDeck	\$IyDeck	\$IzDeck
\$IDDeckTransf									
element elasticBeamColumn	56	56	57	\$ADeck	\$Ed	\$Gd	\$JDeck	\$IyDeck	\$IzDeck
\$IDDeckTransf									
element elasticBeamColumn	57	57	58	\$ADeck	\$Ed	\$Gd	\$JDeck	\$IyDeck	\$IzDeck
\$IDDeckTransf									
element elasticBeamColumn	58	58	59	\$ADeck	\$Ed	\$Gd	\$JDeck	\$IyDeck	\$IzDeck
\$IDDeckTransf									
element elasticBeamColumn	59	59	60	\$ADeck	\$Ed	\$Gd	\$JDeck	\$IyDeck	\$IzDeck
\$IDDeckTransf									
element elasticBeamColumn	60	60	61	\$ADeck	\$Ed	\$Gd	\$JDeck	\$IyDeck	\$IzDeck
\$IDDeckTransf									

puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	1	1	2]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	2	2	3]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	3	3	4]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	4	4	5]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	5	5	6]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	6	6	7]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	7	7	8]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	8	8	9]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	9	9	10]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	10	10	11]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	11	11	12]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	12	12	13]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	13	13	14]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	14	14	15]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	15	15	16]

puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	16	16	17]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	17	17	18]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	18	18	19]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	19	19	20]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	20	20	21]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	21	21	22]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	22	22	23]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	23	23	24]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	24	24	25]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	25	25	26]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	26	26	27]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	27	27	28]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	28	28	29]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	29	29	30]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	30	30	31]

puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	31	10031	32]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	32	32	33]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	33	33	34]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	34	34	35]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	35	35	36]
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	36	36	37]

```

puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 37 37 38]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 38 38 39]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 39 39 40]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 40 40 41]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 41 41 42]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 42 42 43]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 43 43 44]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 44 44 45]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 45 45 46]

```

```

puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 46 46 47]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 47 47 48]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 48 48 49]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 49 49 50]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 50 50 51]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 51 51 52]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 52 52 53]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 53 53 54]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 54 54 55]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 55 55 56]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 56 56 57]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 57 57 58]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 58 58 59]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 59 59 60]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 60 60 61]

```

puts "Deck Element Built"

```

# =====
#                               TRANSVERSE DECK ELEMENTS (RIGID LINK)
# =====

```

```

set AT 1.e8 ; # Sectional area (in^2)
set IT 1.e9 ; # Moment of Inertia (in^4)
set JT 1.e8 ; # Torsional Moment of Inertia (in^4)
set ET 1.e9 ; # Elastic Modulus (ksi)
set GT 1.e8 ; # Shear Modulus (ksi)

```

#	element	elasticBeamColumn	eleTag	iNode	jNode	A	E	G	J	Iy	Iz	transfTag	\$JT	\$IT	\$IT
	\$IDTrBeamTransf			2101	1101	1102		\$AT		\$ET	\$GT		\$JT	\$IT	\$IT
	element elasticBeamColumn		2102		1102	1103		\$AT		\$ET	\$GT		\$JT	\$IT	\$IT
	\$IDTrBeamTransf														
	element elasticBeamColumn		2103	1103	1	\$AT	\$ET	\$GT	\$JT	\$IT	\$IT	\$IDTrBeamTransf			
	element elasticBeamColumn		2104	1	1105	\$AT	\$ET	\$GT	\$JT	\$IT	\$IT	\$IDTrBeamTransf			
	element elasticBeamColumn		2105		1105	1106		\$AT		\$ET	\$GT		\$JT	\$IT	\$IT
	\$IDTrBeamTransf														
	element elasticBeamColumn		2106		1106	1107		\$AT		\$ET	\$GT		\$JT	\$IT	\$IT
	\$IDTrBeamTransf														
	element elasticBeamColumn		2107		2021	2022		\$AT		\$ET	\$GT		\$JT	\$IT	\$IT
	\$IDTrBeamTransf														
	element elasticBeamColumn		2108		2022	2023		\$AT		\$ET	\$GT		\$JT	\$IT	\$IT
	\$IDTrBeamTransf														
	element elasticBeamColumn		2109	2023	16	\$AT	\$ET	\$GT	\$JT	\$IT	\$IT	\$IDTrBeamTransf			
	element elasticBeamColumn		2110	16	2025	\$AT	\$ET	\$GT	\$JT	\$IT	\$IT	\$IDTrBeamTransf			
	element elasticBeamColumn		2111		2025	2026		\$AT		\$ET	\$GT		\$JT	\$IT	\$IT
	\$IDTrBeamTransf														
	element elasticBeamColumn		2112		2026	2027		\$AT		\$ET	\$GT		\$JT	\$IT	\$IT
	\$IDTrBeamTransf														
	element elasticBeamColumn		2113		2031	2032		\$AT		\$ET	\$GT		\$JT	\$IT	\$IT
	\$IDTrBeamTransf														
	element elasticBeamColumn		2114		2032	2033		\$AT		\$ET	\$GT		\$JT	\$IT	\$IT
	\$IDTrBeamTransf														
	element elasticBeamColumn		2115	2033	31	\$AT	\$ET	\$GT	\$JT	\$IT	\$IT	\$IDTrBeamTransf			
	element elasticBeamColumn		2116	31	2035	\$AT	\$ET	\$GT	\$JT	\$IT	\$IT	\$IDTrBeamTransf			
	element elasticBeamColumn		2117		2035	2036		\$AT		\$ET	\$GT		\$JT	\$IT	\$IT
	\$IDTrBeamTransf														
	element elasticBeamColumn		2118		2036	2037		\$AT		\$ET	\$GT		\$JT	\$IT	\$IT
	\$IDTrBeamTransf														
	element elasticBeamColumn		2119		2041	2042		\$AT		\$ET	\$GT		\$JT	\$IT	\$IT
	\$IDTrBeamTransf														
	element elasticBeamColumn		2120		2042	2043		\$AT		\$ET	\$GT		\$JT	\$IT	\$IT
	\$IDTrBeamTransf														
	element elasticBeamColumn		2121	2043	46	\$AT	\$ET	\$GT	\$JT	\$IT	\$IT	\$IDTrBeamTransf			
	element elasticBeamColumn		2122	46	2045	\$AT	\$ET	\$GT	\$JT	\$IT	\$IT	\$IDTrBeamTransf			

element elasticBeamColumn	2123	2045	2046	\$AT	\$ET	\$GT	\$JT	\$IT	\$IT
\$IDTrBeamTransf									
element elasticBeamColumn	2124	2046	2047	\$AT	\$ET	\$GT	\$JT	\$IT	\$IT
\$IDTrBeamTransf									
element elasticBeamColumn	2125	1121	1122	\$AT	\$ET	\$GT	\$JT	\$IT	\$IT
\$IDTrBeamTransf									
element elasticBeamColumn	2126	1122	1123	\$AT	\$ET	\$GT	\$JT	\$IT	\$IT
\$IDTrBeamTransf									
element elasticBeamColumn	2127	1123	61	\$AT	\$ET	\$GT	\$JT	\$IT	\$IT
\$IDTrBeamTransf									
element elasticBeamColumn	2128	61	1125	\$AT	\$ET	\$GT	\$JT	\$IT	\$IT
\$IDTrBeamTransf									
element elasticBeamColumn	2129	1125	1126	\$AT	\$ET	\$GT	\$JT	\$IT	\$IT
\$IDTrBeamTransf									
element elasticBeamColumn	2130	1126	1127	\$AT	\$ET	\$GT	\$JT	\$IT	\$IT
\$IDTrBeamTransf									

```
#####
#####
element elasticBeamColumn      2131      12031  12032      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf
element elasticBeamColumn      2132      12032  12033      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf
element elasticBeamColumn      2133      12033  10031      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf
element elasticBeamColumn      2134      10031  12035      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf
element elasticBeamColumn      2135      12035  12036      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf
element elasticBeamColumn      2136      12036  12037      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf
#####
#####
```

```
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2101      1101  1102]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2102      1102  1103]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2103      1103      1]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2104      1      1105]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2105      1105  1106]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2106      1106  1107]

puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2107      2021  2022]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2108      2022  2023]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2109      2023      16]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2110      16      2025]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2111      2025  2026]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2112      2026  2027]

puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2113      2031  2032]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2114      2032  2033]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2115      2033      31]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2116      31      2035]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2117      2035  2036]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2118      2036  2037]

puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2119      2041  2042]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2120      2042  2043]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2121      2043      46]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2122      46      2045]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2123      2045  2046]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2124      2046  2047]

puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2125      1121  1122]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2126      1122  1123]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2127      1123      61]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2128      61      1125]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2129      1125  1126]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2130      1126  1127]
```

```
#####
#####
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2131      12031  12032]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2132      12032  12033]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2133      12033  10031]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2134      10031  12035]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2135      12035  12036]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 2136      12036  12037]
#####
#####
```

```

# =====
#                               TRANSVERSE BEARING ELEMENTS (RIGID LINK)
# =====

element elasticBeamColumn      1311      2121      2122      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf
element elasticBeamColumn      1312      2122      2123      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf
element elasticBeamColumn      1313      2123      2124      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf
element elasticBeamColumn      1314      2124      2125      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf
element elasticBeamColumn      1315      2125      2126      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf
element elasticBeamColumn      1316      2126      2127      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf

element elasticBeamColumn      1317      2131      2132      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf
element elasticBeamColumn      1318      2132      2133      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf
element elasticBeamColumn      1319      2133      2134      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf
element elasticBeamColumn      1320      2134      2135      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf
element elasticBeamColumn      1321      2135      2136      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf
element elasticBeamColumn      1322      2136      2137      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf

element elasticBeamColumn      1323      2141      2142      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf
element elasticBeamColumn      1324      2142      2143      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf
element elasticBeamColumn      1325      2143      2144      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf
element elasticBeamColumn      1326      2144      2145      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf
element elasticBeamColumn      1327      2145      2146      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf
element elasticBeamColumn      1328      2146      2147      $AT      $ET      $GT      $JT      $IT      $IT
$IDTrBeamTransf

puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1311 2121 2122]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1312 2122 2123]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1313 2123 2124]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1314 2124 2125]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1315 2125 2126]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1316 2126 2127]

puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1317 2131 2132]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1318 2132 2133]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1319 2133 2134]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1320 2134 2135]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1321 2135 2136]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1322 2136 2137]

puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1323 2141 2142]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1324 2142 2143]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1325 2143 2144]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1326 2144 2145]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1327 2145 2146]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1328 2146 2147]

puts "Transverse Beam Element Built"

32Element_Column.tcl

# =====
#                               COPPING ELEMENTS
# =====

element elasticBeamColumn      1211      2521      2522      $ACop     $Ecc     $Gcc     $JCop     $IyCop     $IzCop
$IDTrBeamTransf
element elasticBeamColumn      1212      2522      2523      $ACop     $Ecc     $Gcc     $JCop     $IyCop     $IzCop

```

\$IDTrBeamTransf										
element elasticBeamColumn	1213	2523	2524	\$ACop	\$Ecc	\$Gcc	\$JCop	\$IyCop	\$IzCop	
\$IDTrBeamTransf										
element elasticBeamColumn	1214	2524	2525	\$ACop	\$Ecc	\$Gcc	\$JCop	\$IyCop	\$IzCop	
\$IDTrBeamTransf										
element elasticBeamColumn	1215	2525	2526	\$ACop	\$Ecc	\$Gcc	\$JCop	\$IyCop	\$IzCop	
\$IDTrBeamTransf										
element elasticBeamColumn	1216	2526	2527	\$ACop	\$Ecc	\$Gcc	\$JCop	\$IyCop	\$IzCop	
\$IDTrBeamTransf										
element elasticBeamColumn	1217	2531	2532	\$ACop	\$Ecc	\$Gcc	\$JCop	\$IyCop	\$IzCop	
\$IDTrBeamTransf										
element elasticBeamColumn	1218	2532	2533	\$ACop	\$Ecc	\$Gcc	\$JCop	\$IyCop	\$IzCop	
\$IDTrBeamTransf										
element elasticBeamColumn	1219	2533	2534	\$ACop	\$Ecc	\$Gcc	\$JCop	\$IyCop	\$IzCop	
\$IDTrBeamTransf										
element elasticBeamColumn	1220	2534	2535	\$ACop	\$Ecc	\$Gcc	\$JCop	\$IyCop	\$IzCop	
\$IDTrBeamTransf										
element elasticBeamColumn	1221	2535	2536	\$ACop	\$Ecc	\$Gcc	\$JCop	\$IyCop	\$IzCop	
\$IDTrBeamTransf										
element elasticBeamColumn	1222	2536	2537	\$ACop	\$Ecc	\$Gcc	\$JCop	\$IyCop	\$IzCop	
\$IDTrBeamTransf										
element elasticBeamColumn	1223	2541	2542	\$ACop	\$Ecc	\$Gcc	\$JCop	\$IyCop	\$IzCop	
\$IDTrBeamTransf										
element elasticBeamColumn	1224	2542	2543	\$ACop	\$Ecc	\$Gcc	\$JCop	\$IyCop	\$IzCop	
\$IDTrBeamTransf										
element elasticBeamColumn	1225	2543	2544	\$ACop	\$Ecc	\$Gcc	\$JCop	\$IyCop	\$IzCop	
\$IDTrBeamTransf										
element elasticBeamColumn	1226	2544	2545	\$ACop	\$Ecc	\$Gcc	\$JCop	\$IyCop	\$IzCop	
\$IDTrBeamTransf										
element elasticBeamColumn	1227	2545	2546	\$ACop	\$Ecc	\$Gcc	\$JCop	\$IyCop	\$IzCop	
\$IDTrBeamTransf										
element elasticBeamColumn	1228	2546	2547	\$ACop	\$Ecc	\$Gcc	\$JCop	\$IyCop	\$IzCop	
\$IDTrBeamTransf										
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	1211	2521	2522]							
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	1212	2522	2523]							
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	1213	2523	2524]							
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	1214	2524	2525]							
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	1215	2525	2526]							
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	1216	2526	2527]							
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	1217	2531	2532]							
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	1218	2532	2533]							
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	1219	2533	2534]							
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	1220	2534	2535]							
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	1221	2535	2536]							
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	1222	2536	2537]							
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	1223	2541	2542]							
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	1224	2542	2543]							
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	1225	2543	2544]							
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	1226	2544	2545]							
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	1227	2545	2546]							
puts \$fileIDE [format "%4d %4d %4d"	1228	2546	2547]							
# =====										
#										
# COLUMN ELEMENTS										
# =====										
element elasticBeamColumn	4101	4101	4102	\$ACol	\$Ecc	\$Gcc	[expr 0.2*\$JCol]	[expr		
0.5*\$IyCol] [expr 0.5*\$IzCol]	\$IDColTransf									
element elasticBeamColumn	4102	4102	4103	\$ACol	\$Ecc	\$Gcc	[expr 0.2*\$JCol]	[expr		
0.5*\$IyCol] [expr 0.5*\$IzCol]	\$IDColTransf									
element elasticBeamColumn	4103	4103	4104	\$ACol	\$Ecc	\$Gcc	[expr 0.2*\$JCol]	[expr		
0.5*\$IyCol] [expr 0.5*\$IzCol]	\$IDColTransf									
element elasticBeamColumn	4104	4104	4105	\$ACol	\$Ecc	\$Gcc	[expr 0.2*\$JCol]	[expr		
0.5*\$IyCol] [expr 0.5*\$IzCol]	\$IDColTransf									
element elasticBeamColumn	4105	4105	4106	\$ACol	\$Ecc	\$Gcc	[expr 0.2*\$JCol]	[expr		
0.5*\$IyCol] [expr 0.5*\$IzCol]	\$IDColTransf									
element elasticBeamColumn	4106	4106	4107	\$ACol	\$Ecc	\$Gcc	[expr 0.2*\$JCol]	[expr		
0.5*\$IyCol] [expr 0.5*\$IzCol]	\$IDColTransf									
element elasticBeamColumn	4107	4107	4108	\$ACol	\$Ecc	\$Gcc	[expr 0.2*\$JCol]	[expr		
0.5*\$IyCol] [expr 0.5*\$IzCol]	\$IDColTransf									
element elasticBeamColumn	4108	4108	4109	\$ACol	\$Ecc	\$Gcc	[expr 0.2*\$JCol]	[expr		


```

puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 6206 6206 6207]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 6207 6207 6208]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 6208 6208 6209]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 6209 6209 6210]

```

```

puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 6301 6301 6302]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 6302 6302 6303]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 6303 6303 6304]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 6304 6304 6305]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 6305 6305 6306]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 6306 6306 6307]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 6307 6307 6308]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 6308 6308 6309]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 6309 6309 6310]

```

```

#=====
#                               TOP COLUMN (RIGID) ELEMENTS
#=====

```

```

set Er    [expr 100.*$Es]
set Gr    [expr 100.*$Gc]

```

```

element elasticBeamColumn      4110      4110      2522      $ACol $Er $Gr $JCol $IyCol $IzCol
$IDRgdTransf
element elasticBeamColumn      4210      4210      2532      $ACol $Er $Gr $JCol $IyCol $IzCol
$IDRgdTransf
element elasticBeamColumn      4310      4310      2542      $ACol $Er $Gr $JCol $IyCol $IzCol
$IDRgdTransf

```

```

puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 4110 4110 2522]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 4210 4210 2532]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 4310 4310 2542]

```

```

element elasticBeamColumn      5110      5110      2524      $ACol $Er $Gr $JCol $IyCol $IzCol
$IDRgdTransf
element elasticBeamColumn      5210      5210      2534      $ACol $Er $Gr $JCol $IyCol $IzCol
$IDRgdTransf
element elasticBeamColumn      5310      5310      2544      $ACol $Er $Gr $JCol $IyCol $IzCol
$IDRgdTransf

```

```

puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 5110 5110 2524]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 5210 5210 2534]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 5310 5310 2544]

```

```

element elasticBeamColumn      6110      6110      2526      $ACol $Er $Gr $JCol $IyCol $IzCol
$IDRgdTransf
element elasticBeamColumn      6210      6210      2536      $ACol $Er $Gr $JCol $IyCol $IzCol
$IDRgdTransf
element elasticBeamColumn      6310      6310      2546      $ACol $Er $Gr $JCol $IyCol $IzCol
$IDRgdTransf

```

```

puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 6110 6110 2526]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 6210 6210 2536]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 6310 6310 2546]

```

```

#####
element elasticBeamColumn      4111      2524      2124      $ACol $Er $Gr $JCol $IyCol $IzCol
$IDRgdTransf
element elasticBeamColumn      4211      2534      2134      $ACol $Er $Gr $JCol $IyCol $IzCol
$IDRgdTransf
element elasticBeamColumn      4311      2544      2144      $ACol $Er $Gr $JCol $IyCol $IzCol
$IDRgdTransf

```

```

puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 4111 2524 2124]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 4211 2534 2134]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 4311 2544 2144]

```

```

puts "Column Element Built"

```

```

-Element_Expansion.tcl

```

```

#=====
#                               EXPANSION JOINT ELEMENTS
#=====

```

[illegible]


```

element zeroLength 1072 2035 2135 -mat $MatPadP21 $MatRGD $MatPadP21 $MatPadRX
$MatPadRY $MatPadRZ -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0
element zeroLength 1073 2036 2136 -mat $MatPadP21 $MatRGD $MatPadP21 $MatPadRX
$MatPadRY $MatPadRZ -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0
element zeroLength 1074 2037 2137 -mat $MatPadP21 $MatRGD $MatPadP21 $MatPadRX
$MatPadRY $MatPadRZ -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0
#####
#####
#####
element zeroLength 11068 2131 12031 -mat $MatPadP22 $MatRGD $MatPadP22 $MatPadRX
$MatPadRY $MatPadRZ -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0
element zeroLength 11069 2132 12032 -mat $MatPadP22 $MatRGD $MatPadP22 $MatPadRX
$MatPadRY $MatPadRZ -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0
element zeroLength 11070 2133 12033 -mat $MatPadP22 $MatRGD $MatPadP22 $MatPadRX
$MatPadRY $MatPadRZ -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0
element zeroLength 11071 2134 10031 -mat $MatPadP22 $MatRGD $MatPadP22 $MatPadRX
$MatPadRY $MatPadRZ -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0
element zeroLength 11072 2135 12035 -mat $MatPadP22 $MatRGD $MatPadP22 $MatPadRX
$MatPadRY $MatPadRZ -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0
element zeroLength 11073 2136 12036 -mat $MatPadP22 $MatRGD $MatPadP22 $MatPadRX
$MatPadRY $MatPadRZ -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0
element zeroLength 11074 2137 12037 -mat $MatPadP22 $MatRGD $MatPadP22 $MatPadRX
$MatPadRY $MatPadRZ -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0
#####
#####
#####
element zeroLength 1075 2141 2041 -mat $MatPadP3 $MatRGD $MatPadP3 $MatPadRX
$MatPadRY $MatPadRZ -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0
element zeroLength 1076 2142 2042 -mat $MatPadP3 $MatRGD $MatPadP3 $MatPadRX
$MatPadRY $MatPadRZ -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0
element zeroLength 1077 2143 2043 -mat $MatPadP3 $MatRGD $MatPadP3 $MatPadRX
$MatPadRY $MatPadRZ -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0
element zeroLength 1078 2144 46 -mat $MatPadP3 $MatRGD $MatPadP3 $MatPadRX
$MatPadRY $MatPadRZ -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0
element zeroLength 1079 2145 2045 -mat $MatPadP3 $MatRGD $MatPadP3 $MatPadRX
$MatPadRY $MatPadRZ -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0
element zeroLength 1080 2146 2046 -mat $MatPadP3 $MatRGD $MatPadP3 $MatPadRX
$MatPadRY $MatPadRZ -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0
element zeroLength 1081 2147 2047 -mat $MatPadP3 $MatRGD $MatPadP3 $MatPadRX
$MatPadRY $MatPadRZ -dir 1 2 3 4 5 6 -orient 1 0 0 0 1 0

}

puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1021 3001 1101]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1022 3002 1102]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1023 3003 1103]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1024 3004 1]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1025 3005 1105]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1026 3006 1106]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1027 3007 1107]

puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1028 1121 3021]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1029 1122 3022]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1030 1123 3023]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1031 61 3024]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1032 1125 3025]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1033 1126 3026]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1034 1127 3027]

puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1061 2121 2021]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1062 2122 2022]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1063 2123 2023]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1064 2124 16]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1065 2125 2025]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1066 2126 2026]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1067 2127 2027]

puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1068 2031 2131]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1069 2032 2132]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1070 2033 2133]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1071 31 2134]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1072 2035 2135]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1073 2036 2136]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1074 2037 2137]
#####
#####

```

#####

```
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 11068 2131 12031]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 11069 2132 12032]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 11070 2133 12033]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 11071 2134 10031]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 11072 2135 12035]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 11073 2136 12036]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 11074 2137 12037]
```


#####

```
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1075 2141 2041]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1076 2142 2042]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1077 2143 2043]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1078 2144 46]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1079 2145 2045]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1080 2146 2046]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1081 2147 2047]
```

```
element zeroLength 1101 3001 1101 -mat $MatPNDA1 -dir 1 -orient $costh 0 $sinth 0
1 0
element zeroLength 1102 3002 1102 -mat $MatPNDA1 -dir 1 -orient $costh 0 $sinth 0
1 0
element zeroLength 1103 3003 1103 -mat $MatPNDA1 -dir 1 -orient $costh 0 $sinth 0
1 0
element zeroLength 1104 3004 1 -mat $MatPNDA1 -dir 1 -orient $costh 0 $sinth 0
1 0
element zeroLength 1105 3005 1105 -mat $MatPNDA1 -dir 1 -orient $costh 0 $sinth 0
1 0
element zeroLength 1106 3006 1106 -mat $MatPNDA1 -dir 1 -orient $costh 0 $sinth 0
1 0
element zeroLength 1107 3007 1107 -mat $MatPNDA1 -dir 1 -orient $costh 0 $sinth 0
1 0
```

```
element zeroLength 1108 1121 3021 -mat $MatPNDA2 -dir 1 -orient $costh 0 $sinth 0
1 0
element zeroLength 1109 1122 3022 -mat $MatPNDA2 -dir 1 -orient $costh 0 $sinth 0
1 0
element zeroLength 1110 1123 3023 -mat $MatPNDA2 -dir 1 -orient $costh 0 $sinth 0
1 0
element zeroLength 1111 61 3024 -mat $MatPNDA2 -dir 1 -orient $costh 0 $sinth 0
1 0
element zeroLength 1112 1125 3025 -mat $MatPNDA2 -dir 1 -orient $costh 0 $sinth 0
1 0
element zeroLength 1113 1126 3026 -mat $MatPNDA2 -dir 1 -orient $costh 0 $sinth 0
1 0
element zeroLength 1114 1127 3027 -mat $MatPNDA2 -dir 1 -orient $costh 0 $sinth 0
1 0
```

```
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1101 3001 1101]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1102 3002 1102]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1103 3003 1103]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1104 3004 1]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1105 3005 1105]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1106 3006 1106]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1107 3007 1107]
```

```
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1108 1121 3021]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1109 1122 3022]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1110 1123 3023]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1111 61 3024]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1112 1125 3025]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1113 1126 3026]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1114 1127 3027]
```


#####

```
element zeroLength 1121 2031 12031 -mat $MatPNDP -dir 1 -orient $costh 0 $sinth 0
1 0
element zeroLength 1122 2032 12032 -mat $MatPNDP -dir 1 -orient $costh 0 $sinth 0
1 0
element zeroLength 1123 2033 12033 -mat $MatPNDP -dir 1 -orient $costh 0 $sinth 0
1 0
element zeroLength 1124 31 10031 -mat $MatPNDP -dir 1 -orient $costh 0 $sinth 0
1 0
element zeroLength 1125 2035 12035 -mat $MatPNDP -dir 1 -orient $costh 0 $sinth 0
```

```

1 0
element zeroLength 1126 2036 12036 -mat $MatPNDP -dir 1 -orient $costh 0 $sinth 0
1 0
element zeroLength 1127 2037 12037 -mat $MatPNDP -dir 1 -orient $costh 0 $sinth 0
1 0

puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1121 2031 12031]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1122 2032 12032]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1123 2033 12033]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1124 31 10031]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1125 2035 12035]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1126 2036 12036]
puts $fileIDE [format "%4d %4d %4d" 1127 2037 12037]

#####
#####

puts "Bearing, Pounding, ShearKey Element Built"

# =====

- Analysis_Gravity.tcl

#####
# #
# GRAVITY ANALYSIS #
# #
#####

# =====
# DEFINE GRAVITY LOAD
# =====

pattern Plain 1 "Linear" {
# nodeTag FX FY FZ MX MY MZ

load 1 0.0 -$DWeightA1 0.0 0.0 0.0 0.0
load 2 0.0 -$DWeight1 0.0 0.0 0.0 0.0
load 3 0.0 -$DWeight1 0.0 0.0 0.0 0.0
load 4 0.0 -$DWeight1 0.0 0.0 0.0 0.0
load 5 0.0 -$DWeight1 0.0 0.0 0.0 0.0
load 6 0.0 -$DWeight1 0.0 0.0 0.0 0.0
load 7 0.0 -$DWeight1 0.0 0.0 0.0 0.0
load 8 0.0 -$DWeight1 0.0 0.0 0.0 0.0
load 9 0.0 -$DWeight1 0.0 0.0 0.0 0.0
load 10 0.0 -$DWeight1 0.0 0.0 0.0 0.0
load 11 0.0 -$DWeight1 0.0 0.0 0.0 0.0
load 12 0.0 -$DWeight1 0.0 0.0 0.0 0.0
load 13 0.0 -$DWeight1 0.0 0.0 0.0 0.0
load 14 0.0 -$DWeight1 0.0 0.0 0.0 0.0
load 15 0.0 -$DWeight1 0.0 0.0 0.0 0.0
load 16 0.0 -$DWeightB1 0.0 0.0 0.0 0.0
load 17 0.0 -$DWeight2 0.0 0.0 0.0 0.0
load 18 0.0 -$DWeight2 0.0 0.0 0.0 0.0
load 19 0.0 -$DWeight2 0.0 0.0 0.0 0.0
load 20 0.0 -$DWeight2 0.0 0.0 0.0 0.0
load 21 0.0 -$DWeight2 0.0 0.0 0.0 0.0
load 22 0.0 -$DWeight2 0.0 0.0 0.0 0.0
load 23 0.0 -$DWeight2 0.0 0.0 0.0 0.0
load 24 0.0 -$DWeight2 0.0 0.0 0.0 0.0
load 25 0.0 -$DWeight2 0.0 0.0 0.0 0.0
load 26 0.0 -$DWeight2 0.0 0.0 0.0 0.0
load 27 0.0 -$DWeight2 0.0 0.0 0.0 0.0
load 28 0.0 -$DWeight2 0.0 0.0 0.0 0.0
load 29 0.0 -$DWeight2 0.0 0.0 0.0 0.0
load 30 0.0 -$DWeight2 0.0 0.0 0.0 0.0
load 31 0.0 [expr -$DWeightB2/2.] 0.0 0.0 0.0 0.0
load 10031 0.0 [expr -$DWeightB2/2.] 0.0 0.0 0.0 0.0
load 32 0.0 -$DWeight3 0.0 0.0 0.0 0.0
load 33 0.0 -$DWeight3 0.0 0.0 0.0 0.0
load 34 0.0 -$DWeight3 0.0 0.0 0.0 0.0
load 35 0.0 -$DWeight3 0.0 0.0 0.0 0.0
load 36 0.0 -$DWeight3 0.0 0.0 0.0 0.0
load 37 0.0 -$DWeight3 0.0 0.0 0.0 0.0
load 38 0.0 -$DWeight3 0.0 0.0 0.0 0.0
load 39 0.0 -$DWeight3 0.0 0.0 0.0 0.0
load 40 0.0 -$DWeight3 0.0 0.0 0.0 0.0
load 41 0.0 -$DWeight3 0.0 0.0 0.0 0.0

```

```

load 42 0.0 -$DWeight3 0.0 0.0 0.0 0.0
load 43 0.0 -$DWeight3 0.0 0.0 0.0 0.0
load 44 0.0 -$DWeight3 0.0 0.0 0.0 0.0
load 45 0.0 -$DWeight3 0.0 0.0 0.0 0.0
load 46 0.0 -$DWeightB3 0.0 0.0 0.0 0.0
load 47 0.0 -$DWeight4 0.0 0.0 0.0 0.0
load 48 0.0 -$DWeight4 0.0 0.0 0.0 0.0
load 49 0.0 -$DWeight4 0.0 0.0 0.0 0.0
load 50 0.0 -$DWeight4 0.0 0.0 0.0 0.0
load 51 0.0 -$DWeight4 0.0 0.0 0.0 0.0
load 52 0.0 -$DWeight4 0.0 0.0 0.0 0.0
load 53 0.0 -$DWeight4 0.0 0.0 0.0 0.0
load 54 0.0 -$DWeight4 0.0 0.0 0.0 0.0
load 55 0.0 -$DWeight4 0.0 0.0 0.0 0.0
load 56 0.0 -$DWeight4 0.0 0.0 0.0 0.0
load 57 0.0 -$DWeight4 0.0 0.0 0.0 0.0
load 58 0.0 -$DWeight4 0.0 0.0 0.0 0.0
load 59 0.0 -$DWeight4 0.0 0.0 0.0 0.0
load 60 0.0 -$DWeight4 0.0 0.0 0.0 0.0
load 61 0.0 -$DWeightA2 0.0 0.0 0.0 0.0
}

```

```

# =====
# APPLY GRAVITY LOAD : LOAD CONTROLLED STATIC ANALYSIS
# =====

```

```

# Greate the convergence test
constraints Transformation;          # how to handles boundary condtions
numberer RCM;                      # renumber dof's to minimize band-width
system UmfPack;                    # how to store and solve the system of equations in the
analysis
#                               $tol $maxNumIter
test NormDisplncr 1.0e-8 200;      # determine if convergence has been achieved at the end
of an iteration step
algorithm KrylovNewton;            # use Newton's solution algorithm: updates tangent stiffenss
at every iteration
set NstepGravity 10;               # apply gravity in 10 steps
set DGravity [expr 1./$NstepGravity]; # first load increment

integrator LoadControl $DGravity;  # determine the next time step for an analysis
analysis Static;
set ok [analyze $NstepGravity];
loadConst -time 0.0               # maintain constant gravity loads and reset time to zero

puts "Gravity Load Built"

```

Analysis_Eigenvalue.tcl

```

# =====
# EIGENVALUE ANALYSIS
# =====

```

```

set LastNodeID 20000

source procModal.tcl
set N 10
ModalAnalysis $N $name $LastNodeID
loadConst -time 0.0

puts "Eigenvalue Analysis Built"

```

- Analysis_Dynamic.tcl

```

#####
#                               #
# DYNAMIC ANALYSIS             #
#                               #
#####

```

```

wipeAnalysis

set dt_gm $DT
set record_length 4500
# ----- set up analysis parameters
constraints Transformation ;

```

```

numberer RCM
system UmfPack
set Tol 1.e-6; # Convergence Test: tolerance
set maxNumIter 1000; # Convergence Test: maximum number of iterations that will be
performed before "failure to converge" is returned
set printFlag 0; # Convergence Test: flag used to print information on
convergence (optional) # 1: print information on each step;
set TestType NormDispIncr; # Convergence-test type: EnergyIncr,
NormDispIncr, NormUnbalance
test $TestType $Tol $maxNumIter $printFlag;

set algorithmType KrylovNewton
algorithm $algorithmType;

set NewmarkGamma 0.50; # Newmark-integrator gamma parameter (also HHT)
set NewmarkBeta 0.25; # Newmark-integrator beta parameter
integrator Newmark $NewmarkGamma $NewmarkBeta

analysis Transient

set xDamp $damp; # damping ratio
set MpropSwitch 1.0
set KcurrSwitch 0.0
set KcommSwitch 0.0
set KinitSwitch 1.0
set nEigenI 1; # mode 1
set nEigenJ 3; # mode 3
set lambdaN [eigen [expr $nEigenJ]]; # eigenvalue analysis for nEigenJ modes
set lambdaI [lindex $lambdaN [expr $nEigenI-1]]; # eigenvalue mode i
set lambda2 [lindex $lambdaN [expr $nEigenI]]
set lambda3 [lindex $lambdaN [expr $nEigenI+1]]

set omegaI [expr pow($lambdaI,0.5)]
set omega2 [expr pow($lambda2,0.5)]
set omega3 [expr pow($lambda3,0.5)]

set Ti [expr 2.0*$pi/$omegaI]
set T2 [expr 2.0*$pi/$omega2]
set T3 [expr 2.0*$pi/$omega3]

set omegaI $omegaI
set omegaJ $omegaJ
set alphaM [expr $MpropSwitch*$xDamp*(2*$omegaI*$omegaJ)/($omegaI+$omegaJ)]; # M-prop.
damping; D = alphaM*M
set betaKcurr [expr $KcurrSwitch*2.*$xDamp/($omegaI+$omegaJ)]; #
current-K; + beatKcurr*KCurrent
set betaKcomm [expr $KcommSwitch*2.*$xDamp/($omegaI+$omegaJ)]; #
last-committed K; + betaKcomm*KlastCommitt
set betaKinit [expr $KinitSwitch*2.*$xDamp/($omegaI+$omegaJ)]; # initial-K;
+ beatKinit*Kini
rayleigh $alphaM $betaKcurr $betaKinit $betaKcomm; #
RAYLEIGH damping

# Perform Dynamic Ground-Motion Analysis the following commands are unique to the Uniform
Earthquake excitation
set AccelSeriesX "Series -dt $dt_gm -filePath [concat EQ/$name.EQx.txt] -factor [expr 1.*$g]"; #
time series information
set AccelSeriesZ "Series -dt $dt_gm -filePath [concat EQ/$name.EQy.txt] -factor [expr 1.*$g]";
# time series information

#
pattern UniformExcitation 2 1 -accel $AccelSeriesX ; # create Uniform excitation
pattern UniformExcitation 4 3 -accel $AccelSeriesZ ; # create Uniform excitation

set dtanalysis [expr 0.5*$dt_gm]

puts "dtanalysis = $dtanalysis"

set tFinal [expr $record_length*$dt_gm];

set tCurrent [getTime];
set ok 0;

while {$ok == 0 && $tCurrent < $tFinal} {
    set ok [analyze 1 $dtanalysis]
    #puts [getTime]
    set t1 [expr $tFinal/4.];
    set t2 [expr 2.*$t1];

```

```

set t3 [expr 3.*$t1];

if {$tCurrent == $t1} {
    puts "One fourth of the analysis time done"
    puts "Time: $t1"
}
if {$tCurrent == $t2} {
    puts "Half of the analysis time done"
    puts "Time: $t2"
}
if {$tCurrent == $t3} {
    puts "Three fourth of the analysis time done"
    puts "Time: $t3"
}

if {$ok != 0} {
    puts "Lets see if Newton with Initial tangent works"
    test NormDisplncr 1.0e-6 2000 0
    algorithm Newton -initial
    set ok [analyze 1 $dtanalysis]
    if {$ok == 0} {
        puts "Newton with Initial Tangent works out"
    }
    test NormDisplncr 1.0e-8 500 0
    algorithm KrylovNewton
}

if {$ok != 0} {
    puts "Lets see if Newton with Line search works"
    algorithm NewtonLineSearch .8
    set ok [analyze 1 $dtanalysis]
    if {$ok == 0} {
        puts "Newton with Line Search works out"
    }
    algorithm KrylovNewton
}

if {$ok != 0} {
    puts "Regular time step failed .. Lets try a smaller step and a less stringent test"
    test NormDisplncr 1.0e-5 500 0
    set ok [analyze 1 [expr $dtanalysis*.05]]

    if {$ok == 0} {puts "That worked .. back to regular time step and test criteria"}
    test NormDisplncr 1.0e-5 500 0
}

set tCurrent [getTime]

}

if {$ok == 0} {
    puts "#####"
    puts "Transient analysis completed SUCCESSFULLY";
    puts "#####"
} else {
    puts "#####"
    puts "Transient analysis FAILED";
    puts "#####"
    set fail_file [open [concat $name.fail] w]
    puts $fail_file "The time at which we failed is $tCurrent seconds."
    close $fail_file
}

set endt [clock clicks -milliseconds]
set totaltime [expr ($endt-$begin)]
set totaltimem [expr ($endt-$begin)/60000.0]

puts "Time in hours: [expr $totaltimem/60.]"
puts "$totaltimem is the total time in minutes"

set time_file [open [concat $name/$name.txt] w]
puts $time_file "The total time for analysis in hours: [expr $totaltimem/60.>";
puts $time_file "The total time for analysis in minutes: $totaltimem";
close $time_file

```

```
#####
#
#           Nodes and element member reactions           #
#
#####
recorder EnvelopeElement -file [concat $name/P1_force.out] -ele 4101 localForce
recorder EnvelopeElement -file [concat $name/P2_force.out] -ele 4201 localForce
recorder EnvelopeElement -file [concat $name/P3_force.out] -ele 4301 localForce

recorder EnvelopeElement -file [concat $name/A1_Bearing.defor.env.out] -ele 1021 1027 deformation
recorder EnvelopeElement -file [concat $name/A2_Bearing.defor.env.out] -ele 1028 1034 deformation

recorder EnvelopeElement -file [concat $name/P1_Bearing.defor.env.out] -ele 1061 1067 deformation
recorder EnvelopeElement -file [concat $name/P21_Bearing.defor.env.out] -ele 1068 1074 deformation
recorder EnvelopeElement -file [concat $name/P22_Bearing.defor.env.out] -ele 11068 11074
deformation
recorder EnvelopeElement -file [concat $name/P3_Bearing.defor.env.out] -ele 1075 1081 deformation

recorder EnvelopeElement -file [concat $name/A1_Pounding.defor.env.out] -ele 1101 1107 deformation
recorder EnvelopeElement -file [concat $name/A2_Pounding.defor.env.out] -ele 1108 1114 deformation

recorder EnvelopeElement -file [concat $name/P2_Pounding.defor.env.out] -ele 1121 1127 deformation

puts "Bridge Recorders done"
```

- Material_ExpansionJoint.tcl

```
#=====
#           ELASTOMERIC BEARING PADS
#=====
```

```
set MatPadA1 41
set MatPadA2 42
set MatPadP1 43
set MatPadP21 44
set MatPadP22 45
set MatPadP3 46

uniaxialMaterial Elastic $MatPadA1 $KhA1
uniaxialMaterial Elastic $MatPadA2 $KhA2

uniaxialMaterial Elastic $MatPadP1 $KhP1
uniaxialMaterial Elastic $MatPadP21 $KhP21
uniaxialMaterial Elastic $MatPadP22 $KhP22
uniaxialMaterial Elastic $MatPadP3 $KhP3

# ROTATIONAL STIFFNESS
set MatPadRX 58
set MatPadRY 59
set MatPadRZ 60
```

```
uniaxialMaterial Elastic $MatPadRX 0.1;#$KrotX
uniaxialMaterial Elastic $MatPadRY 0.1;#$KrotY
uniaxialMaterial Elastic $MatPadRZ 0.1;#$KrotZ
```

```
# =====
#           POUNDING
# =====
```

```
# Abutment
set MatPND1 61
set MatPND2 62
set MatPND A1 63

set gap [expr -$GapLA1]
set dy -0.1

set a_p 0.1
set dm_p 1.0
set e_p 0.65
set kh_p $KhPoundingA
set n_p 1.5
set dy_p 0.1
```

```

set DE_p      [expr $kh_p*pow($dm_p,$n_p+1)*(1-pow($e_p,2))/($n_p+1)]
set keff_p    [expr $kh_p*pow($a_p*$dm_p,0.5)]
set Kt1_p     [expr $keff_p+$DE_p/($a_p*pow($dm_p,2))]
set Kt2_p     [expr $keff_p-$DE_p/((1-$a_p)*pow($dm_p,2))]
set KL        [expr $kh_p*sqrt($dm_p)/(1+sqrt($a_p))]

set Kimp1     [expr $Kt1_p/$Npounding]
set Kimp2     [expr $Kt2_p/$Npounding]
set KimpT     [expr $KL/$Npounding]

set Fyimp     [expr $Kimp1*$dy]
set aK2toK1   [expr $Kimp2/$Kimp1]

set Fyhigh    -1.e10
set alpha_imp [expr $aK2toK1/(2.-$aK2toK1)]; # for series element

#
uniaxialMaterial ElasticPPGap $MatPND1 $Kimp1 $Fyimp $gap
uniaxialMaterial ElasticPPGap $MatPND2 $Kimp2 $Fyhigh [expr $gap+$dy]
uniaxialMaterial Parallel $MatPND1 $MatPND2

set MatPND5 67
set MatPND6 68
set MatPND2 69

set gap      [expr -$GapLA2]
set dy       -0.1

set a_p      0.1
set dm_p     1.0
set e_p      0.65
set kh_p     $KhPoundingA
set n_p      1.5
set dy_p     0.1

set DE_p      [expr $kh_p*pow($dm_p,$n_p+1)*(1-pow($e_p,2))/($n_p+1)]
set keff_p    [expr $kh_p*pow($a_p*$dm_p,0.5)]
set Kt1_p     [expr $keff_p+$DE_p/($a_p*pow($dm_p,2))]
set Kt2_p     [expr $keff_p-$DE_p/((1-$a_p)*pow($dm_p,2))]
set KL        [expr $kh_p*sqrt($dm_p)/(1+sqrt($a_p))]

set Kimp1     [expr $Kt1_p/$Npounding]
set Kimp2     [expr $Kt2_p/$Npounding]
set KimpT     [expr $KL/$Npounding]

set Fyimp     [expr $Kimp1*$dy]
set aK2toK1   [expr $Kimp2/$Kimp1]

set Fyhigh    -1.e10
set alpha_imp [expr $aK2toK1/(2.-$aK2toK1)]; # for series element

#
uniaxialMaterial ElasticPPGap $MatPND5 $Kimp1 $Fyimp $gap
uniaxialMaterial ElasticPPGap $MatPND6 $Kimp2 $Fyhigh [expr $gap+$dy]
uniaxialMaterial Parallel $MatPND5 $MatPND6

# Pier
set MatPND3 64
set MatPND4 65
set MatPNDP 66

set gap      [expr -$GapLP1]
set dy       -0.1

set a_p      0.1
set dm_p     1.0
set e_p      0.65
set kh_p     $KhPoundingP
set n_p      1.5
set dy_p     0.1

set DE_p      [expr $kh_p*pow($dm_p,$n_p+1)*(1-pow($e_p,2))/($n_p+1)]
set keff_p    [expr $kh_p*pow($a_p*$dm_p,0.5)]
set Kt1_p     [expr $keff_p+$DE_p/($a_p*pow($dm_p,2))]
set Kt2_p     [expr $keff_p-$DE_p/((1-$a_p)*pow($dm_p,2))]
set KL        [expr $kh_p*sqrt($dm_p)/(1+sqrt($a_p))]

```

```

set Kimp1      [expr $Kt1_p/$Npounding]
set Kimp2      [expr $Kt2_p/$Npounding]
set KimpT      [expr $KL/$Npounding]

set Fyimp      [expr $Kimp1*$dy]
set aK2toK1    [expr $Kimp2/$Kimp1]

set Fyhigh     -1.e10
set alpha_imp  [expr $aK2toK1/(2.-$aK2toK1)]; # for series element

#
uniaxialMaterial ElasticPPGap $MatPND3 $Kimp1 $Fyimp $gap
uniaxialMaterial ElasticPPGap $MatPND4 $Kimp2 $Fyhigh [expr $gap+$dy]
uniaxialMaterial Parallel $MatPNDP $MatPND3 $MatPND4

-OutputSummary.tcl

##### COLUMN #####

wipe

source procCOLmax.tcl

set fname1 [concat $name/P1_force.out]
set fname2 [concat $name/P2_force.out]
set fname3 [concat $name/P3_force.out]

procCOLmax $fname1 $ACol $SzCol $SyCol $fr
set stressmax1 [lindex $fmax 0]
set stressreq1 $fr

procCOLmax $fname2 $ACol $SzCol $SyCol $fr
set stressmax2 [lindex $fmax 0]
set stressreq2 $fr

procCOLmax $fname3 $ACol $SzCol $SyCol $fr
set stressmax3 [lindex $fmax 0]
set stressreq3 $fr

##### BEARING #####

source procEBmax.tcl

set fname1 [concat $name/A1_Bearing.defor.env.out]
set fname2 [concat $name/A2_Bearing.defor.env.out]
set fname3 [concat $name/P1_Bearing.defor.env.out]
set fname4 [concat $name/P21_Bearing.defor.env.out]
set fname5 [concat $name/P22_Bearing.defor.env.out]
set fname6 [concat $name/P3_Bearing.defor.env.out]

procEBmax $fname1 $HpadA1 $gammab
set dbmax1 [lindex $dmax 0]
set dbreq1 $gammab

procEBmax $fname2 $HpadA2 $gammab
set dbmax2 [lindex $dmax 0]
set dbreq2 $gammab

procEBmax $fname3 $HpadP1 $gammab
set dbmax3 [lindex $dmax 0]
set dbreq3 $gammab

procEBmax $fname4 $HpadP21 $gammab
set dbmax41 [lindex $dmax 0]
procEBmax $fname5 $HpadP22 $gammab
set dbmax42 [lindex $dmax 0]
set dbmax4 [expr max($dbmax41,$dbmax42)]
set dbreq4 $gammab

procEBmax $fname6 $HpadP3 $gammab
set dbmax5 [lindex $dmax 0]
set dbreq5 $gammab

##### POUNDING & UNSEATING #####

```

```

source procPNDmax.tcl

set fname1 [concat $name/A1_Pounding.defor.env.out]
set fname2 [concat $name/A2_Pounding.defor.env.out]
set fname3 [concat $name/P2_Pounding.defor.env.out]

procPNDmax $fname1 $SeatWidthA1 $GapLA1
set dpmax1 [lindex $dmax 0]
set dpreq1 [expr 25.4*$GapLA1]

set dumax1 [lindex $dmax 1]
set dureq1 [expr 25.4*$SeatWidthA1]

procPNDmax $fname2 $SeatWidthA2 $GapLA2
set dpmax2 [lindex $dmax 0]
set dpreq2 [expr 25.4*$GapLA2]

set dumax2 [lindex $dmax 1]
set dureq2 [expr 25.4*$SeatWidthA2]

procPNDmax $fname3 $SeatWidthP1 $GapLP1
set dpmax3 [lindex $dmax 0]
set dpreq3 [expr 25.4*$GapLP1]

set dumax3 [lindex $dmax 1]
set dureq3 [expr 25.4*$SeatWidthP1]

# ##### Summary #####

# Seismic Demand

set file_max [open [concat $nameout/seismic_demands.txt] "w"]
puts $file_max "# Piers: Maximum concrete tensile stress (MPa)"
puts $file_max "PS1 $stressmax1"
puts $file_max "PS2 $stressmax2"
puts $file_max "PS3 $stressmax3"

puts $file_max "# Bearings: Maximum strain, force or strain ratio of bearings (% or kN)"
puts $file_max "BA1 $dbmax1"
puts $file_max "BA2 $dbmax2"
puts $file_max "BP1 $dbmax3"
puts $file_max "BP2 $dbmax4"
puts $file_max "BP3 $dbmax5"

puts $file_max "# Pounding: Maximum compressive deformation of adjacent decks or deck and abutment (mm)"
puts $file_max "PA1 $dpmax1"
puts $file_max "PA2 $dpmax2"
puts $file_max "PP2 $dpmax3"

puts $file_max "# Unseating: Maximum tensile deformation of decks (mm)"
puts $file_max "UA1 $dumax1"
puts $file_max "UA2 $dumax2"
puts $file_max "UP2 $dumax3"

close $file_max

# Structural Capacity

set file_req [open [concat $nameout/structural_capacities.txt] "w"]

puts $file_req "# Piers: Concrete tensile strength of piers"
puts $file_req "PS1 $stressreq1"
puts $file_req "PS2 $stressreq2"
puts $file_req "PS3 $stressreq3"

puts $file_req "# Bearings: Ultimate strain, force or strain ratio (% or kN)"
puts $file_req "BA1 $dbreq1"
puts $file_req "BA2 $dbreq2"
puts $file_req "BP1 $dbreq3"
puts $file_req "BP2 $dbreq4"
puts $file_req "BP3 $dbreq5"

puts $file_req "# Pounding: Ultimate compressive deformation of adjacent decks or deck and abutment (mm)"
puts $file_req "PA1 $dpreq1"

```

```

puts $file_req "PA2 $dpreq2"
puts $file_req "PP2 $dpreq3"

puts $file_req "# Unseating: Ultimat tensile deformation of decks (mm)"
puts $file_req "UA1 $dureq1"
puts $file_req "UA2 $dureq2"
puts $file_req "UP2 $dureq3"

close $file_req

procCOLmax.tcl

proc procCOLmax {fname Ac Sz Sy LS} {
    set f [open $fname "r"]

    for {set i 1} {$i < 4} {incr i 1} {
        gets $f line
        scan $line "%f %f %f %f %f %f" value($i,0) value($i,1) value($i,2) value($i,3) value($i,4) value($i,5)
    }
    close $f

    set fmax1 [expr (-$value(3,0)/$Ac + $value(3,4)/$Sy)*6.895]; # ksi to MPa
    set fmax2 [expr (-$value(3,0)/$Ac + $value(3,4)/$Sz)*6.895]

    set Fmax [expr max($fmax1,$fmax2)]

    #      close $fmax

    global fmax;
    set fmax [list $Fmax]

    return $fmax
}

procEBmax.tcl

proc procEBmax {fname Hpad LS} {
    set f [open $fname "r"]

    for {set i 1} {$i < 4} {incr i 1} {
        gets $f line
        scan $line "%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f" value($i,0) value($i,1) value($i,2) value($i,3)
        value($i,4) value($i,5) value($i,6) value($i,7) value($i,8) value($i,9) value($i,10) value($i,11)
    }
    close $f

    set DLenv1 [expr $value(3,0)/$Hpad*100.]
    set DLenv2 [expr $value(3,6)/$Hpad*100.]

    set DTenv1 [expr $value(3,2)/$Hpad*100.]
    set DTenv2 [expr $value(3,8)/$Hpad*100.]

    set Denv [expr max($DLenv1,$DLenv2,$DTenv1,$DTenv2)]

    global dmax;
    set dmax [list $Denv]

    return $dmax;
}

~procModal.tcl

# Procedure to calculate the periods and eigen vectors of a bridge
proc ModalAnalysis { nModes name LastNode} {

```

```

wipeAnalysis

set eigenvalues [eigen $nModes]

set jjj 0
for {set jjj 0} {$jjj < $nModes} {incr jjj 1} {
    recorder Node -file tempFile[expr {$jjj}].tmp -nodeRange 1 $LastNode -dof 1 2 3 "eigen [expr
$jjj + 1]"
}

#Run a one step gravity load with no loading.
test EnergyIncr 1e-6 20 0
algorithm Newton
system SparseGeneral
integrator LoadControl 1 1 .0000001 1
numberer Plain
constraints Transformation
analysis Static
analyze 1

#Wipe the analysis
wipeAnalysis

#Remove the recorders
remove recorders

#Create .eig file
set _fID [open $name/Eigensolution.eig w]

#Open the temp files
for {set jjj 0} {$jjj < $nModes} {incr jjj 1} {
    set _fIDt [open tempFile[expr {$jjj}].tmp]
    set tempPeriod [expr 2*3.1416/sqrt([lindex $eigenvalues $jjj])]
    set tempValues [read -nonewline $_fIDt]
    puts $tempPeriod; # $tempValues
    puts $_fID "$tempPeriod $tempValues"
    close $_fIDt
    file delete tempFile[expr {$jjj}].tmp
}

#Close the .eig File
close $_fID
}

procPNDmax.tcl

proc procPNDmax {fname LSu LSp} {
    set f [open $fname "r"]

    for {set i 1} {$i < 4} {incr i 1} {
        gets $f line
        scan $line "%f %f" value($i,0) value($i,1)
    }
    close $f

    set DLmax1 [expr $value(2,0)*25.4]
    set DLmax2 [expr $value(2,1)*25.4]

    set DLmin1 [expr -$value(1,0)*25.4]
    set DLmin2 [expr -$value(1,1)*25.4]

    set Duns [expr max($DLmax1,$DLmax2)]
    set Dpnd [expr max($DLmin1,$DLmin2)]

    # puts "Duns = [expr double(round(10*$Duns))/10] mm Limit = [expr
double(round(10*$LSu*25.4))/10] mm"
    # puts "Dpnd = [expr double(round(10*$Dpnd))/10] mm Limit = [expr
double(round(10*$LSp*25.4))/10] mm"

    global dmax;

    set dmax [list $Duns $Dpnd]

    return $dmax;
}

```

부록 3. 기상청 관측자료 데이터베이스

○ 관측자료 DB 리스트

No.	지점코드	위치(주소)	위도	경도	가속도계 모델명	형태	EW방향 민감도	NS방향 민감도	UD방향 민감도	기 록 계 민감도
1	ADO2	경상북도 안동시 길안면 고란리 산11-1	36.4121	128.9488	ES-T	지표형	4.07044	4.05729	4.07462	419430.4
2	ADOA	경상북도 안동시 송현동 209	36.5727	128.7009	ES-DH	시추형	4.08461	4.08532	4.09103	1677721.6
3	AGSA	충청북도 충주시 앙성면 능암리 250	37.0917	127.8081	ES-DH	시추형	4.06402	4.0634	4.07319	419430.4
4	AMD	전라남도 영광군 낙월면 월촌리 산 175-4	35.3437	126.03	ES-T	지표형	4.06911	4.07156	4.07401	419430.4
5	ANMA	충청남도 태안군 안면읍 송언리 1764-6(기후변화감시센터)	36.5386	126.33	ES-DH	시추형	4.07951	4.07584	4.07421	419430.4
6	ASNA	충청남도 아산시 염치읍 동정리 3-44	36.8277	127.0123	ES-DH	시추형	4.08471	4.08461	4.10255	419430.4
7	BAR2	인천광역시 옹진군 백령면 진촌리 산1042-15	37.9771	124.7142	ES-T	지표형	4.07584	4.07166	4.07696	419430.4
8	BAU	전라남도 광양시 옥룡면 동곡리 1124	35.1027	127.5968	ES-T	지표형	4.06544	4.06656	4.06137	419430.4
9	BGDB	전라남도 신안군 비금면 지당리 1007-1	34.7726	125.9469	ES-DH	시추형	4.06626	4.07472	4.07248	419430.4
10	BKWA	충청북도 제천시 백운면 화당리 84-1	37.1681	127.9875	ES-DH	시추형	4.05535	4.05953	4.09235	419430.4
11	BLGA	충청남도 논산시 벌곡면 수락리 95-12(대둔산 오토캠핑장)	36.1392	127.3032	ES-DH	시추형	4.07727	4.0683	4.06799	419430.4
12	BLLA	전라남도 순천시 별량면 마산리 249-1(별량초등학교마산분교-폐교)	34.8646	127.4638	ES-DH	시추형	4.07136	4.0631	4.06901	419430.4
13	BOGA	경기도 안성시 보개면 양복리 210	37.0132	127.3294	ES-DH	시추형	4.06983	4.01448	4.09215	419430.4
14	BON2	충청북도 보은군 속리산면 북암리 산20-1	36.5482	127.7981	ES-T	지표형	4.07859	4.06677	4.07625	419430.4
15	BOSB	전라남도 보성군 득량면 예당리 3046-1(보성관측소)	34.7635	127.212	ES-DH	시추형	4.0789	4.0789	4.0789	419430.4
16	BSAA	부산 영도구 동삼동 792-2(제53보병사단)	35.0662	129.0741	ES-DH	시추형	4.07156	4.07676	4.08002	419430.4
17	BURB	강원도 원주시 부론면 흥호리 936	37.2317	127.7486	ES-DH	시추형	4.0789	4.0789	4.0789	419430.4
18	BUS2	부산광역시 금정구 오륜동 산130	35.2486	129.1125	ES-T	지표형	4.06972	4.05576	4.08053	419430.4
19	BUSA	경상북도 영주시 부석면 소백로 3790(AWS)	36.9792	128.661	ES-DH	시추형	4.06881	4.07441	4.06901	419430.4
20	BUYB	충청남도 부여군 부여읍 가담리 395-1(부여관측소)	36.2726	126.9206	ES-DH	시추형	4.07941	4.07584	4.06626	419430.4
21	CEA2	충청남도 천안시 북면 명덕리 산80-1	36.823	127.2574	ES-T	지표형	4.07044	4.0634	4.0633	419430.4
22	CEJA	충청북도 청주시 흥덕구 복대동 265-14(청주시청)	36.6399	127.4406	ES-DH	시추형	4.07288	4.06809	4.08002	1677721.6
23	CGAA	충청북도 괴산군 청안면 부흥리 428	36.7069	127.7262	ES-DH	시추형	4.0682	4.05943	4.10122	419430.4
24	CGDA	경상북도 청도군 이서면 학산리 167-1(이서면사무소)	35.6627	128.6704	ES-DH	시추형	4.07146	4.07023	4.06932	419430.4
25	CGIA	강원도 횡성군 청일면 유동리 1374-17(AWS)	37.5822	128.1527	ES-DH	시추형	4.063	4.07217	4.0682	419430.4
26	CGPA	전라남도 화순군 청풍면 차리 74-1	34.8768	126.971	ES-DH	시추형	4.07329	4.07319	4.08512	419430.4
27	CGUB	경기도 양평군 청운면 용두리 595(청운 AWS)	37.5583	127.7136	ES-DH	시추형	4.0841	4.06167	4.06993	419430.4
28	CGWB	경상남도 창원시 마산합포구 가포동 산 1-117(창원기상대)	35.1705	128.5724	ES-DH	시추형	4.06769	4.06728	4.07849	419430.4
29	CGYA	충청남도 청양군 청양읍 정차리 455(AWS) - 청양농업기술센터	36.4233	126.7786	ES-DH	시추형	4.07462	4.07523	4.07044	419430.4
30	CHC2	강원도 춘천시 동산면 봉명리 산60	37.7776	127.8145	ES-T	지표형	4.0735	4.07299	4.08287	419430.4
31	CHDA	전라남도 여수시 삼산면 초도리 산 159	34.2368	127.2496	ES-DH	시추형	4.06809	4.09348	4.11417	419430.4
32	CHJ2	충청북도 충주시 상모면 수회리 산58-1	36.873	127.9748	ES-T	지표형	4.058	4.0633	4.07513	419430.4
33	CHOA	전라북도 전주시 덕진구 덕진동2가 산29-3	35.8407	127.1171	ES-DH	시추형	4.05953	4.08461	4.07238	1677721.6
34	CHRB	경상남도 창원군 대지면 구미리 1	35.5342	128.4779	ES-DH	시추형	4.08145	4.07676	4.09684	419430.4
35	CHYB	경상북도 봉화군 춘양면 의양리 218-3(봉화관측소)	36.944	128.9145	ES-DH	시추형	4.08247	4.07604	4.0738	419430.4
36	CIGB	경상북도 칠곡군 약목면 동안리 831(칠곡군농업기술센터)	36.0399	128.3813	ES-DH	시추형	4.06993	4.0683	4.07604	419430.4
37	CJD	제주도 제주시 추자면 영흥리 328-1	33.9594	126.2934	ES-T	지표형	4.07278	4.06687	4.07462	419430.4
38	CJDB	충청남도 서천군 서면 도동리 480-120(AWS)	36.174	126.5284	ES-DH	시추형	4.05708	4.0686	4.07258	419430.4
39	CLSA	경상남도 함안군 칠서면 대치리 183	35.3629	128.4098	ES-DH	시추형	4.07309	4.07584	4.09093	419430.4
40	CPR2	충청북도 영동군 추풍령면 사부리 산 42-3	36.221	127.9719	ES-T	지표형	4.07706	4.0685	4.07686	419430.4
41	CSDB	전라남도 완도군 청산면 양중리 372(느린섬여행학교)	34.1808	126.8953	ES-DH	시추형	4.07727	4.08186	4.08094	419430.4

42	CSOA	경상북도 청송읍 청송읍 송생리 720(청송농업기술센터)	36.3878	129.0854	ES-DH	시추형	4.07136	4.06799	4.07411	419430.4
43	CWO2	강원도 화천군 사내면 사창리 587-1	38.0834	127.5205	ES-T	지표형	4.06952	4.06351	4.07115	419430.4
44	DACB	인천광역시 옹진군 대청면 대청리 918-1	37.8318	124.7068	ES-DH	시추형	4.07339	4.06402	4.08135	419430.4
45	DAG2	경상북도 경산시 용성면 대종리 산10-48	35.7685	128.897	ES-T	지표형	4.07401	4.06422	4.07604	419430.4
46	DAGA	대구광역시 동구 효목동 1264-4	35.87889 833	128.6527 733	ES-DH	시추형	4.08145	4.07676	4.10622	419430.4
47	DDCA	경기도 동두천시 생연동 산51-1 (동두천기상대)	37.9021	127.061	ES-DH	시추형	4.07584	4.06728	4.06565	1677721.6
48	DEI2	인천광역시 옹진군 덕적면 복리 산54-4	37.2558	126.1409	ES-T	지표형	4.07604	4.0631	4.06748	419430.4
49	DGHA	전라북도 진안군 동향면 대량리 184-1(AWS)	35.8352	127.5711	ES-DH	시추형	4.08206	4.0893	4.07768	419430.4
50	DGJA	충청남도 당진시 채운동 363-23	36.8894	126.6174	ES-DH	시추형	4.07288	4.06269	4.10265	419430.4
51	DGLA	경상북도 문경시 동로면 생달리 108-2(AWS)	36.7906	128.2705	ES-DH	시추형	4.07635	4.05984	4.08552	419430.4
52	DGY2	강원도 평창군 대관령면 차항리596(한우시험장)	37.6904	128.6742	ES-T	지표형	4.05902	4.06361	4.07095	419430.4
53	DKSA	충청북도 제천시 덕산면 도전리 1350-2(덕산AWS)	36.9044	128.1455	ES-DH	시추형	4.07013	4.07411	4.07523	419430.4
54	DNBA	경상북도 의성군 단북면 노연리 380-1 (의성국민체육센터)	36.3906	128.4284	ES-DH	시추형	4.07533	4.06922	4.0685	419430.4
55	DNYA	충청북도 단양군 단양읍 별곡리 산 21-7	36.9877	128.3559	ES-DH	시추형	4.06055	4.07095	4.0842	419430.4
56	DUSB	전라북도 무주군 설천면 삼공리 483-1(덕유대야영장내)	35.8943	127.7731	ES-DH	시추형	4.0841	4.09276	4.07982	419430.4
57	ECDB	전라북도 군산시 옥도면 여청도리 356-6	36.1184	125.9797	ES-DH	시추형	4.06616	4.07492	4.0735	419430.4
58	EMSB	충청북도 음성군 음성을 사정리 1139-1	36.9737	127.6237	ES-DH	시추형	4.0738	4.07747	4.07859	419430.4
59	EURB	경상남도 의령군 의령읍 무전리 78(의령종합환경관리사업소내, 의령공동관측소)	35.3227	128.288	ES-DH	시추형	4.07227	4.0789	4.07971	419430.4
60	EUSB	경상북도 의성군 의성읍 원당리 6-4(의성기상관측소)	36.3561	128.6887	ES-DH	시추형	4.07441	4.08226	4.07329	419430.4
61	GACA	경상남도 고성군 개천면 청광리 418-1(AWS)	35.1136	128.3071	ES-DH	시추형	4.06351	4.07176	4.07594	419430.4
62	GAGA	삼척시 가곡면 오저리 613-4	37.1307	129.1697	ES-DH	시추형	4.06779	4.07564	4.0895	419430.4
63	GAPB	경기도 가평군 가평읍 승안리 85	37.8441	127.495	ES-DH	시추형	4.07564	4.07482	4.08033	419430.4
64	GBI2	충청남도 태안군 근흥면 가의도리 511-1(북적열비도)	36.6256	125.5595 15	ES-T	지표형	4.06259	4.06442	4.07054	419430.4
65	Gddb	부산광역시 강서구 가덕해안로 1237	34.993	128.8263	ES-DH	시추형	4.07727	4.06728	4.08196	419430.4
66	GEJB	강원도 고성군 거진읍 냉천리 산1-7(예비군훈련소)	38.4165	128.3858	ES-DH	시추형	4.06677	4.06473	4.07727	419430.4
67	GGDA	경상북도 경주시 강동면 모서리 529(모아초등학교교사본교장)	35.9498	129.253	ES-DH	시추형	4.06218	4.06279	4.06922	419430.4
68	GGDB	전라남도 신안군 흑산면 가거도리 584-11	34.0523	125.1264	ES-DH	시추형	4.07625	4.06728	4.08196	419430.4
69	GGGA	경상북도 영덕군 강구면 강구리 211(강구대계측구장 옆)	36.3637	129.3907	ES-DH	시추형	4.08328	4.07166	4.08236	419430.4
70	GGSA	경상북도 울진군 금강송면 광회리 산1-6임	36.9296	129.1518	ES-DH	시추형	4.14771	4.11876	4.10805	419430.4
71	GGTA	경기도 파주시 광탄면 기산로 207-160	37.7686	126.8991	ES-DH	시추형	4.07737	4.08593	4.09297	419430.4
72	GH2B	인천광역시 강화군 불은면 삼성리 811-1(강화기상관측소)	37.7077	126.4464 35	ES-DH	시추형	4.07686	4.07676	4.08084	419430.4
73	GICA	경상북도 김천시 구성면 하강리 56(김천농업기술센터)	36.0813	128.1016	ES-DH	시추형	4.08726	4.09602	4.10449	419430.4
74	GIGA	경상북도 포항시 북구 기계면 현내리 685-15(AWS)	36.0689	129.1995	ES-DH	시추형	4.0787	4.08124	4.09205	419430.4
75	GKSA	전라남도 곡성군 삼기면 괴소리 291	35.2304	127.2251	ES-DH	시추형	4.09154	4.07961	4.10041	419430.4
76	GLCA	강원도 양양군 서면 갈천리37-2	37.9049	128.5207	ES-DH	시추형	4.07788	4.11131	4.09409	419430.4
77	GLSA	충청남도 홍성군 결성면 읍내리 459-1	36.5256	126.545	ES-DH	시추형	4.07401	4.08287	4.11539	419430.4
78	GMDB	전라남도 여수시 삼산면 서도리 1330	34.0409	127.2883	ES-DH	시추형	4.08257	4.07564	4.07054	419430.4
79	GMHB	강원도 철원군 김화읍 호국로 6510(김화읍사무소)	38.25	127.4209	ES-DH	시추형	4.07645	4.07421	4.08665	419430.4
80	GMNA	경상남도 하동군 금남면 경충로 493-9(하동군청소년수련원)	34.9832	127.8946	ES-DH	시추형	4.07615	4.06891	4.07278	419430.4
81	GMPB	경기도 김포시 장기동 2001-1(한강중앙공원)	37.642	126.6755	ES-DH	시추형	4.06626	4.06585	4.08308	419430.4
82	GOCB	전라북도 고창군 대산면 매산리 399-13 (고창기상대)	35.3485	126.5982	ES-DH	시추형	4.07778	4.09684	4.09348	419430.4
83	GODA	인천광역시 강화군 교동면 고구리 480-1(AWS)	37.7895	126.2916	ES-DH	시추형	4.07523	4.0735	4.0739	419430.4
84	GOS2	제주도 북제주군 한경면 고산리 158	33.3002	126.2061	ES-T	지표형	4.07808	4.06952	4.08236	419430.4
85	GSGA	서울특별시 강서구 우장산로 72	37.55157 5	126.8443 917	ES-DH	시추형	4.08349	4.0685	4.09551	419430.4
86	GSNA	경상북도 경주시 산내면 외칠리 981-2(AWS)	35.7576	129.0109	ES-DH	시추형	4.06463	4.07013	4.07258	419430.4

87	GUJA	제주특별자치도 제주시 김녕리 1892번지	33.5504	126.7504	ES-DH	시추형	4.08084	4.08043	4.09949	419430.4
88	GUMA	경상북도 구미시 선산을 이문리 531	36.23470 833	128.2902 55	ES-DH	시추형	4.07146	4.06769	4.06881	419430.4
89	GUWB	경상북도 군위군 효령면 성리 111 (군위농업기술센터)	36.1813	128.5927	ES-DH	시추형	4.06626	4.06493	4.07961	419430.4
90	GWLA	강원도 정선군 사북읍 사북리 산155-94	37.21960 667	128.8212 517	ES-DH	시추형	4.07492	4.08022	4.09011	419430.4
91	GWYB	전라남도 광양시 중동 산70	34.9437	127.6915	ES-DH	시추형	4.08379	4.07635	4.0789	419430.4
92	HACA	경상남도 함천군 삼가면 두모리 192-1(삼가AWS)	35.4137	128.1018	ES-DH	시추형	4.08165	4.0788	4.07727	1677721.6
93	HADA	경상남도 하동군 적량면 동산리1694(하동농업기술센터)	35.0798	127.7706	ES-DH	시추형	4.07013	4.0631	4.08155	419430.4
94	HAIA	경상남도 고성군 하일면 학림리 735-1(하일복지관)	34.9444	128.1928	ES-DH	시추형	4.07655	4.08695	4.08451	419430.4
95	HALB	제주도 제주시 한림읍 동명리 620	33.4021	126.273	ES-DH	시추형	4.07625	4.06524	4.07615	419430.4
96	HAMB	경상남도 함양군 함양읍 용평리 915-207(함양 공동관측소)	35.5116	127.7455	ES-DH	시추형	4.07401	4.07227	4.08685	419430.4
97	HANB	전라남도 해남군 해남읍 남천리 175-1(해남관측소)	34.5539	126.5689	ES-DH	시추형	4.07615	4.0789	4.08104	419430.4
98	HAWA	전라남도 해남군 화원면 금평리 215-4(화원면사무소)	34.671	126.3283	ES-DH	시추형	4.06432	4.06575	4.08196	419430.4
99	HAWB	경기도 화성시 우정읍 운평리 601-6	37.0844	126.774	ES-DH	시추형	4.07339	4.07808	4.07492	419430.4
100	HCNA	경상남도 함천군 함천읍 함천리 129-4(함천관측소)	35.5652	128.17	ES-DH	시추형	4.07727	4.0788	4.07472	1677721.6
101	HEDA	전라남도 신안군 하의면 응곡리 220-9	34.6064	126.0365	ES-DH	시추형	4.07309	4.07992	4.09898	419430.4
102	HESA	강원도 횡성군 공근면 학답리 311-4	37.5407	127.9564	ES-DH	시추형	4.08869	4.0789	4.09755	419430.4
103	HGDB	전라남도 신안군 흑산면 홍도리 80-16	34.7068	125.2012	ES-DH	시추형	4.06422	4.06422	4.07645	419430.4
104	HGSA	충청북도 홍성군 홍북읍 홍예로 350	36.658	126.6879	ES-DH	시추형	4.0684	4.07085	4.08858	419430.4
105	HMGA	경상북도 포항시 남구 호미곶면 대보리 287-1(국립등대박물관)	36.0761	129.5666	ES-DH	시추형	4.06555	4.07829	4.07594	419430.4
106	HMPA	전라남도 함평군 나산면 이문리 884-6(함평생활유물전시관)	35.1413	126.6176	ES-DH	시추형	4.07819	4.06871	4.07971	419430.4
107	HOCA	강원도 홍천군 홍천읍 연봉리466-9(홍천관측소)	37.6837	127.8802	ES-DH	시추형	4.07788	4.07166	4.079	419430.4
108	HONA	충청북도 보은군 회남면거교리251	36.4456	127.5792	ES-DH	시추형	4.08981	4.08196	4.09755	419430.4
109	HTDA	전라남도 신안군 흑산면 태도리 산 307-1	34.391	125.2986	ES-DH	시추형	4.06911	4.07421	4.08298	419430.4
110	HUK2	전라남도 신안군 흑산면 예리 산 72-2(흑산도기상대)	34.6872	125.4504	ES-T	지표형	4.06432	4.07829	4.07666	419430.4
111	HWCA	강원도 화천군 간동면 용호리 1254 (1330)	38.065	127.7746	ES-DH	시추형	4.07523	4.07727	4.07666	1677721.6
112	HWCB	강원도 화천군 상서면 산양리 307-1	38.2215	127.6707	ES-DH	시추형	4.07003	4.08379	4.079	419430.4
113	HWDB	경기도 남양주 시화도읍 금남리 산47-10	37.6322	127.3404	ES-DH	시추형	4.07676	4.08308	4.06779	419430.4
114	HWSA	경상북도 상주시 화서면 달천리 350-5	36.4413	127.9441	ES-DH	시추형	4.07115	4.07604	4.09154	419430.4
115	ICN2	경기도 이천시 사음동 산23	37.2908	127.4167	ES-T	지표형	4.07768	4.07054	4.07615	419430.4
116	IJA2	강원도 인제군 남면 부평리 81	37.9865	128.1111	ES-T	지표형	4.07156	4.07074	4.06993	419430.4
117	IJAA	강원도 인제군 기린면 현리 181	37.9471	128.3247	ES-DH	시추형	4.06983	4.06769	4.07839	1677721.6
118	IJBA	강원도 인제군 북면 한계리 산 1-86	38.1208	128.3173	ES-DH	시추형	4.07166	4.07095	4.06993	419430.4
119	IJDB	전라남도 신안군 임자면 광산리 407-21	35.1028	126.0651	ES-DH	시추형	4.08012	4.08053	4.08216	419430.4
120	IKSA	전라북도 익산시 남산면 석천리 60	36.0592	127.0619	ES-DH	시추형	4.079	4.0685	4.0791	1677721.6
121	IMSB	전라북도 임실군 임실읍 이도리 265-3 (임실관측소)	35.61250 833	127.2855	ES-DH	시추형	4.08094	4.07462	4.08552	419430.4
122	IMWB	강원도 삼척시 원덕읍 임원리 757-1	37.238	129.3419	ES-DH	시추형	4.07156	4.0736	4.07492	419430.4
123	INCA	인천광역시 중구 전동 전동 25 (인천기상대)	37.4778	126.624	ES-DH	시추형	4.06789	4.06177	4.0632	1677721.6
124	ISGB	전라북도 익산시 금강동 535(수호산재육공원)	35.9345	126.9741	ES-DH	시추형	4.07136	4.0789	4.07034	419430.4
125	IAEA	경상북도 봉화군 재산면 동면리 1647-4	36.8001	128.9903	ES-DH	시추형	4.08797	4.08736	4.10683	419430.4
126	JAGA	전라남도 장성군 장성읍 성산리 800	35.3198	126.8107	ES-DH	시추형	4.07604	4.09103	4.09134	419430.4
127	JAHA	전라남도 장흥군 장흥읍 축내리 271-11	34.6887	126.9195	ES-DH	시추형	4.07645	4.07513	4.07768	419430.4
128	JASA	전라북도 장수군 장수읍 선창리 373-3 (장수관측소)	35.657	127.5204	ES-DH	시추형	4.07462	4.06687	4.08563	419430.4
129	JCUA	강원도 영월군 주천면 주천리 1376-19	37.2753	128.2694	ES-DH	시추형	4.09205	4.08756	4.10275	419430.4
130	JDO2	전라남도 진도군 의신면 산천리 산1-6	34.47299	126.3238 333	ES-T	지표형	4.07044	4.06086	4.0634	419430.4
131	JECB	충청북도 제천시 신월동 348 (제천관측소)	37.1595	128.1945	ES-DH	시추형	4.07635	4.07768	4.0792	419430.4
132	JEJB	울산광역시 북구 산하동 958-2(정자AWS 근방)	35.6379	129.4408	ES-DH	시추형	4.05505	4.06116	4.07543	419430.4

133	JEO2	전라북도 완주군 동상면 신월리 산125-1 (동상면민운동장 근처)	35.9379	127.2928	ES-T	지표형	4.06728	4.06473	4.07238	419430.4
134	JESA	강원도 정선군 북평면 남평리 412-1(정선군 농업기술센터)	37.4027	128.6654	ES-DH	시추형	4.0632	4.06697	4.07574	419430.4
135	JEU2	전라북도 정읍시 내장동 12-1	35.4933	126.9296	ES-T	지표형	4.07013	4.0737	4.07299	419430.4
136	JGNA	경상북도 김천시 증산면 금곡리 1326-33	35.8754	128.0485	ES-DH	시추형	4.07554	4.08135	4.09327	419430.4
137	JINA	경상남도 진주시 내동면 삼계리 산182-34	35.1642	128.0402	ES-DH	시추형	4.08053	4.0792	4.07085	1677721.6
138	JJU2	제주도 제주시 오등동 산175 (제주농업시험장)	33.4294	126.5463	ES-T	지표형	4.07452	4.07666	4.07176	419430.4
139	JKJA	경상북도 포항시 북구 죽장면 상옥리 822-7	36.2421	129.2151	ES-DH	시추형	4.00316	4.0054	4.08603	419430.4
140	JLSA	경상남도 함양군 마천면 삼정리 산77-8~9	35.3575	127.648	ES-DH	시추형	4.0788	4.08012	4.11876	419430.4
141	JMJ2	강원도 강릉시 주문진읍 삼교리 산167	37.88159 167	128.7560 667	ES-T	지표형	4.07115	4.06473	4.06677	419430.4
142	JNHA	경상남도 창원시 진해구 웅천로 218(AWS)	35.1122	128.7536	ES-DH	시추형	4.06218	4.06738	4.08124	419430.4
143	JNPA	충청북도 증평군 증평읍 연탄리 602-1	36.7956	127.562	ES-DH	시추형	4.07462	4.0844	4.08135	1677721.6
144	JNUA	세종특별자치시 전의면 읍내리 5-1	36.6908	127.2005	ES-DH	시추형	4.06962	4.07492	4.0949	419430.4
145	JNYA	경상남도 김해시 진영읍 하계로 138번길 30(AWS)	35.2822	128.7174	ES-DH	시추형	4.06453	4.07136	4.07666	419430.4
146	JODB	전라남도 진도군 조도면 창유리 1025-4(조도고등학교)	34.3115	126.0437	ES-DH	시추형	4.0738	4.07339	4.07441	419430.4
147	JUCA	경상남도 김해시 주촌면 천곡리 208번지	35.2422	128.828	ES-DH	시추형	4.07931	4.06626	4.07676	419430.4
148	JURA	서울특별시 중랑구 신내동 653(신내동근린공원)	37.6147	127.0868	ES-DH	시추형	4.07054	4.07278	4.06524	419430.4
149	KAWA	강원도 강릉시 사천면 과학단지로 130(강원지방기상청)	37.8043	128.8547	ES-DH	시추형	4.07788	4.08583	4.0844	419430.4
150	KCH2	경상남도 거창군 남상면 무촌리 산 295	35.614	127.9188	ES-T	지표형	4.07288	4.07319	4.0736	419430.4
151	KH2B	전라남도 고흥읍 고흥읍 행정리 483-1(고흥관측소)	34.6186	127.2758	ES-DH	시추형	4.08379	4.06748	4.08022	419430.4
152	KKDA	전라남도 고흥군 금산면 어전리 1413-1	34.4557	127.1223	ES-DH	시추형	4.08716	4.10214	4.11131	419430.4
153	KMSB	충청남도 금산군 금산읍 아인리 134-5(금산관측소)	36.10584 833	127.4815 767	ES-DH	시추형	4.06524	4.08073	4.09297	419430.4
154	KOJ2	충청남도 공주시 신관동 182(공주대학교 내)	36.4708	127.1447	ES-T	지표형	4.06045	4.05647	4.06911	419430.4
155	KOSB	강원도 고성군 현내면 송도진리 산 1	38.6028	128.3596	ES-DH	시추형	4.0683	4.07543	4.08002	419430.4
156	KUJA	경상남도 거제시 신현읍 장평리 770-27(거제관측소)	34.8885	128.6047	ES-DH	시추형	4.07788	4.08593	4.07747	419430.4
157	KWJ2	광주광역시 북구 금곡동 산182	35.1599	126.9911	ES-T	지표형	4.0685	4.07482	4.0791	419430.4
158	LIWA	충청북도 옥천군 이원면 건진 3길 16	36.2482	127.6137	ES-DH	시추형	4.06228	4.05698	4.09195	419430.4
159	LMGA	강원도 정선군 임계면 봉산리 302-2	37.4918	128.8638	ES-DH	시추형	4.06922	4.08675	4.10938	419430.4
160	MALA	전라북도 진안군 마령면 강정리 629(마령제련공원)	35.7445	127.3478	ES-DH	시추형	4.07339	4.07849	4.07543	419430.4
161	MANA	전라남도 무안군 해제면 광산리 242-2 (무안레이더센터)	35.0942	126.285	ES-DH	시추형	4.07808	4.08349	4.08828	419430.4
162	MGY2	경상북도 문경시 가은읍 왕릉리 423-5(석탄박물관)	36.6538	128.0608	ES-T	지표형	4.06911	4.07156	4.06891	419430.4
163	MIYA	경상남도 밀양시 내이동 1073-3 (밀양관측소)	35.4916	128.7444	ES-DH	시추형	4.07594	4.06626	4.08104	419430.4
164	MJDB	전라남도 신안군 흑산면 만재도길 88-1 (만재도 보건지소)	34.2074	125.4691	ES-DH	시추형	4.07604	4.06707	4.08257	419430.4
165	MLGA	경상남도 양산시 물금읍 가촌리 1278-4(양산진도시정수장)	35.3113	128.9969	ES-DH	시추형	4.05556	4.06809	4.06871	419430.4
166	MMD	경상남도 통영시 한산면 매죽리 39-9	34.6488	128.5769	ES-T	지표형	4.0579	4.06228	4.05637	419430.4
167	MND	전라북도 군산시 옥도면 무녀도리 산 108(무녀도초등학교)	35.8043	126.4242	ES-T	지표형	4.07187	4.06279	4.07421	419430.4
168	MNDB	전라남도 보성군 문덕면 죽산리 466번지	34.9665	127.1609	ES-DH	시추형	4.06779	4.06758	4.08359	419430.4
169	MOGA	강원도 홍천군 서면 모곡리 1434	37.6962	127.5825	ES-DH	시추형	4.07971	4.08481	4.09674	419430.4
170	MOPB	전라남도 목포시 고하대로 815 (목포기상대)	34.8169	126.3809	ES-DH	시추형	4.07136	4.06901	4.07543	419430.4
171	MSNA	경상남도 밀양시 산내면 남평리 1109-1(산내남평초등학교)	35.5884	128.9538	ES-DH	시추형	4.06932	4.0632	4.07645	419430.4
172	MUS2	경기도 파주시 문산읍 마정로 46-29 (파주시상대)	37.8855	126.7656	ES-T	지표형	4.07013	4.07125	4.08369	419430.4
173	NACA	전라북도 군산시 내초동 231 내초공원(AWS)	35.9505	126.591	ES-DH	시추형	4.07136	4.07411	4.08797	419430.4
174	NAHA	경상남도 남해군 이동면 다정리 797-2 (남해관측소)	34.8167	127.9261	ES-DH	시추형	4.07482	4.07156	4.07513	419430.4
175	NAJA	전남 나주시 산포면 등수리 72-1(나주농업기술시험원)	35.026	126.8265	ES-DH	시추형	4.07982	4.07768	4.07859	419430.4
176	NAMB	강원도 홍천군 내면 창촌리 1616-3(홍천국유림사무소 윤두령출장소)	37.7711	128.3863	ES-DH	시추형	4.06942	4.07197	4.07768	419430.4
177	NAWB	전라북도 남원시 도통동 산3번지	35.4213	127.3964	ES-DH	시추형	4.0842	4.07931	4.08175	419430.4

178	NCNA	강원도 홍천군 내촌면 도관리 383-1(내촌죽구장)	37.8197	128.0919	ES-DH	시추형	4.0632	4.06371	4.06901	419430.4
179	NJDA	충청남도 당진군 당진읍 석문면 남지도리 600	37.0503	126.4221	ES-DH	시추형	4.08073	4.07503	4.07329	419430.4
180	NLDA	전라남도 고흥군 덕흥양쪽길 200(AWS)	34.5325	127.4672	ES-DH	시추형	4.07095	4.07788	4.07472	419430.4
181	NOSA	충청남도 논산시 노성면 교촌리 346-10	36.2837	127.1273	ES-DH	시추형	4.06707	4.06188	4.09276	419430.4
182	OKCB	충청남도 옥천군 청산면 지전길 36-19 (청산초등학교)	36.3479	127.7957	ES-DH	시추형	4.0788	4.07666	4.08196	419430.4
183	OKEB	강원도 강릉시 옥계면 북동리 142-4	37.6209	128.9802	ES-DH	시추형	4.06911	4.07931	4.0683	419430.4
184	OYDB	충청남도 보령시 오천면 외연도리 325	36.2294	126.0757	ES-DH	시추형	4.06779	4.08705	4.08073	419430.4
185	PGEA	경상북도 영주시 평은면 평은리 766	36.756	128.6921	ES-DH	시추형	4.05494	4.063	4.09827	419430.4
186	PHA2	경상북도 포항시 청하면 용두리 산21	36.193	129.3708	ES-T	지표형	4.06799	4.07768	4.07808	419430.4
187	PORA	충청남도 보령시 요암동 132-1(보령기상대)	36.3278	126.5575	ES-DH	시추형	4.07584	4.07543	4.07778	419430.4
188	PTKA	경기도 평택시 용이동 441-1	36.997	127.1354	ES-DH	시추형	4.06096	4.08114	4.07859	419430.4
189	PUAA	전라북도 부안군 행안면 역리 315-1 (부안관측소)	35.7296	126.7168	ES-DH	시추형	4.0527	4.06626	4.05821	1677721.6
190	PYCA	강원도 평창군 봉평면 면은리 65-1	37.562	128.3778	ES-DH	시추형	4.06932	4.07717	4.07034	1677721.6
191	PYCB	강원도 평창군 평창읍 여만리 261-15	37.37746 5	128.3946 883	ES-DH	시추형	4.08135	4.07645	4.08991	419430.4
192	PYSB	제주특별자치도 서귀포시 하천리 1832-1	33.3536	126.8167	ES-DH	시추형	4.07492	4.08552	4.08654	419430.4
193	SACA	경상남도 산청군 산청읍 지리 311 (산청관측소)	35.4131	127.879	ES-DH	시추형	4.07166	4.08236	4.07859	419430.4
194	SAJB	경상북도 상주시 신봉동 1-5(상주기상대)	36.4079	128.1575	ES-DH	시추형	4.08277	4.07819	4.10316	419430.4
195	SCHA	전남 순천시 승주읍 평중리 230	35.0199	127.3691	ES-DH	시추형	4.06769	4.07645	4.06993	1677721.6
196	SECA	충청남도 서천군 문산면 신농리 34-1	36.1421	126.7518	ES-DH	시추형	4.07187	4.06595	4.07655	419430.4
197	SEO2	서울특별시 동작구 신대방동 460-18	37.4939	126.9171	ES-T	지표형	4.06565	4.06595	4.06993	419430.4
198	SES2	충청남도 서산시 동문동 산38-1	36.7893	126.4531	ES-T	지표형	4.07666	4.06758	4.06473	419430.4
199	SESA	강원도 홍천군 서석면 풍암리 1074-11	37.72	128.1735	ES-DH	시추형	4.0791	4.07961	4.08787	419430.4
200	SGMA	경기도 가평군 삼면 울길리 454-1(울갈초등학교)	37.828	127.288	ES-DH	시추형	4.06351	4.06758	4.0577	419430.4
201	SGNA	성남시 중원구 상대원동 27	37.4462	127.1831	ES-DH	시추형	4.07635	4.08716	4.09419	419430.4
202	SGP2	제주도 서귀포시 강정동 1474	33.2587	126.4983	ES-T	지표형	4.07562	4.08135	4.07299	419430.4
203	SH2B	강원도 인제군 서화면 서화리 94	38.26855 333	128.2524 633	ES-DH	시추형	4.07666	4.08216	4.09134	419430.4
204	SHHB	경기도 시흥시 정왕동 1350	37.3488	126.7039	ES-DH	시추형	4.08247	4.08359	4.08206	419430.4
205	SIJA	전라남도 영암군 시종면 옥야리 542	34.8954	126.5881	ES-DH	시추형	4.08328	4.07543	4.08879	419430.4
206	SKBA	경상북도 영양군 석보면 화매리 732	36.5212	129.1791	ES-DH	시추형	4.0684	4.07523	4.08186	419430.4
207	SKC2	강원도 고성군 토성면 운봉리 산95	38.2899	128.5219	ES-T	지표형	4.0682	4.06758	4.07248	419430.4
208	SLSA	경기도 이천시 설성면 금당리 175	37.1349	127.5196	ES-DH	시추형	4.0791	4.07819	4.08165	419430.4
209	SMKB	전라북도 부안군 변산면 대항리 112-39	35.6891	126.5561	ES-DH	시추형	4.06891	4.08236	4.08267	419430.4
210	SMWA	전라북도 고창군 심원면 월산리 774(심원초등학교)	35.5259	126.5524	ES-DH	시추형	4.06463	4.06167	4.0739	419430.4
211	SNDA	강원도 정선군 신동읍 고성리 849-1	37.2617	128.5956	ES-DH	시추형	4.06687	4.07778	4.09358	419430.4
212	SNGB	강원도 삼척시 신기면 신기리 78(AWS)	37.3465	129.0862	ES-DH	시추형	4.06809	4.07523	4.06137	419430.4
213	SNNA	경상북도 영천시 신녕면 치산리 1585-1	36.0502	128.7111	ES-DH	시추형	4.07288	4.08196	4.09602	419430.4
214	SODA	서울시 종로구 송월동 1	37.5714	126.9559	ES-DH	시추형	4.08257	4.08532	4.08369	419430.4
215	SUBA	경상북도 영양군 수비면 수하리 산107-18(AWS)	36.7826	129.2211	ES-DH	시추형	4.06259	4.07737	4.06626	419430.4
216	SUCA	전라북도 순창군 순창읍 순화리 289-1	35.3737	127.1386	ES-DH	시추형	4.06422	4.07136	4.084	419430.4
217	SWO2	경기도 수원시 권선구 서둔동 256-2 (여기산공원내)	37.2808	126.9823	ES-T	지표형	4.06269	4.06381	4.0634	419430.4
218	TAHA	경상북도 울릉군 서면 태하리 218-1(AWS)	37.515	130.8118	ES-DH	시추형	4.0792	4.07941	4.07717	419430.4
219	TAIA	전라북도 정읍시 태인면 태창리 409-3(AWS)	35.6507	126.9318	ES-DH	시추형	4.0685	4.06228	4.07543	419430.4
220	TANB	충청남도 태안군 근흥면 신진도리 75-13	36.6731	126.1353	ES-DH	시추형	4.07492	4.08104	4.07339	419430.4
221	TBA2	강원도 태백시 문곡 소도동 681-1	37.1182	128.9153	ES-T	지표형	4.06993	4.07207	4.0737	419430.4
222	TEJ2	대전광역시 유성구 구성동 22	36.3721	127.3714	ES-T	지표형	4.07319	4.07013	4.06952	419430.4
223	TOHA	강원도 동해시 용정동 227-3 (동해기상대)	37.507	129.1238	ES-DH	시추형	4.0788	4.07686	4.06779	1677721.6

224	TOY2	경상남도 통영시 정량동 844 (통영기상대)	34.8452	128.4361	ES-T	지표형	4.07095	4.07513	4.0787	419430.4
225	UDO	제주도 제주시 우도면 연평리 772	33.5228	126.954	ES-T	지표형	4.0736	4.07686	4.07594	419430.4
226	UJBA	경기도 의정부시 송산2동 391-2	37.7548	127.1063 883	ES-DH	시추형	4.08491	4.08481	4.0946	419430.4
227	UJNA	경상북도 울진군 울진읍 연지리 산143-16 (울진기상대)	36.99261 17	129.4136 133	ES-DH	시추형	4.05708	4.08705	4.09185	419430.4
228	ULDR	경상북도 울릉군 울릉읍 도동리 589-2 (울릉도기상대)	37.4809	130.8987	ES-DH	시추형	4.06606	4.07105	4.07696	419430.4
229	ULJ2	경상북도 울진군 온정면 덕안리 산13	36.7021	129.4083	ES-T	지표형	4.06126	4.06606	4.07248	419430.4
230	UNCA	울산광역시 울주군 웅촌면 통천리 800(수연복지재단 앞)	35.4695	129.2395	ES-DH	시추형	4.06116	4.07635	4.08135	419430.4
231	USN2	울산광역시 울주군 두서면 내와리 산46-1	35.7024	129.1232	ES-T	지표형	4.07044	4.07635	4.06707	419430.4
232	WAN2	전라남도 완도군 군외면 불목리 26 (완도기상대)	34.3959	126.7019	ES-T	지표형	4.07278	4.07472	4.08114	419430.4
233	WICA	경상남도 거창군 위천면 위천면 상천리 산 32	35.7312	127.8016	ES-DH	시추형	4.08889	4.09256	4.08675	419430.4
234	WJU2	강원도 원주시 소초면 학곡리 1001	37.4034	128.0527	ES-T	지표형	4.06075	4.06463	4.06208	419430.4
235	WNBA	충청남도 태안군 원북면 반계리 171	36.8238	126.2572	ES-DH	시추형	4.07696	4.08073	4.09551	419430.4
236	YAGA	경기도 양평군 양동면 쌍학리 891	37.407	127.7568	ES-DH	시추형	4.05953	4.06249	4.09246	419430.4
237	YALB	경상남도 합천군 약로면 하빈리 (3합천종합야영수련원)	35.7279	128.1934	ES-DH	시추형	4.07686	4.05831	4.07819	419430.4
238	YAPA	경기도 양평군 양평읍 양근리 192-25(양평관측소)	37.489	127.4942	ES-DH	시추형	4.10092	4.08583	4.09052	419430.4
239	YAYA	강원도 양양군 강현면 정암리 679	38.1438	128.6025	ES-DH	시추형	4.07696	4.07044	4.07982	1677721.6
240	YAYB	강원도 양양군 현북면 하광정리 602	38.0194	128.7231	ES-DH	시추형	4.06962	4.06402	4.07829	419430.4
241	YC2B	경기도 연천군 백학면 두일리 산53	38.03986 667	126.9258 133	ES-DH	시추형	4.08756	4.079	4.09358	419430.4
242	YCHB	경상북도 예천군 호명면 내신리 374	36.62229	128.4373 05	ES-DH	시추형	4.08104	4.07543	4.08919	419430.4
243	YDGA	충청북도 영동군 양강면 산막리 192	36.0925	127.7943	ES-DH	시추형	4.07136	4.07645	4.09511	419430.4
244	YEAB	경상북도 안동시 예안면 임예로 1896	36.6611	128.8873	ES-DH	시추형	4.05749	4.07482	4.09164	419430.4
245	YEGA	전라남도 영광군 군서면 만곡리 3-38	35.2838	126.4777 367	ES-DH	시추형	4.09083	4.07564	4.09551	419430.4
246	YESA	전라남도 여수시 고소동 304(여수기상대)	34.7396	127.7405	ES-DH	시추형	4.07788	4.06758	4.07971	1677721.6
247	YEYB	경상북도 영양군 영양읍 감천리 646-2	36.6251	129.088	ES-DH	시추형	4.06789	4.07564	4.0632	419430.4
248	YGAA	경상북도 성주군 용암면 동락리 산43-1	35.8532	128.3657	ES-DH	시추형	4.07594	4.06728	4.0737	419430.4
249	YGBA	경상북도 경주시 양북면 장항리 624번지	35.7955	129.3865	ES-DH	시추형	4.07299	4.08389	4.09399	419430.4
250	YGGA	강원도 양구군 양구읍 정립리 160-10	38.098	127.9852	ES-DH	시추형	4.08002	4.07676	4.09276	419430.4
251	YGJA	경상남도 고성군 동해면 용정리 299-5(부두-국유재산)	35.0278	128.4834	ES-DH	시추형	4.08369	4.06748	4.08012	419430.4
252	YINB	경기도 용인시 둔전리 사서함 1호	37.271	127.2265	ES-DH	시추형	4.07533	4.07013	4.07472	419430.4
253	YJD2	인천광역시 중구 운서동 2172-1	37.4802	126.4395	ES-T	지표형	4.06962	4.07085	4.07013	419430.4
254	YKDB	경상남도 통영시 목지면 동항리 376-3(목지도AWS)	34.6224	128.2734	ES-DH	시추형	4.07543	4.07339	4.0792	419430.4
255	YNDB	전라남도 여수시 남면 연도리 424	34.4323	127.8011	ES-DH	시추형	4.08135	4.06422	4.06626	419430.4
256	YOA	전라남도 영암군 영암읍 학송리 산 225-1	34.7655	126.7379	ES-T	지표형	4.07452	4.07584	4.07635	419430.4
257	YOCB	경상북도 영천시 망정동 216-2(영천관측소)	35.9771	128.9511	ES-DH	시추형	4.08542	4.08563	4.07931	419430.4
258	YODB	경상북도 영덕군 영해면 성내리 233 (영덕관측소)	36.5333	129.4095	ES-DH	시추형	4.0738	4.07645	4.07666	419430.4
259	YOGA	경기도 포천시 영북면 문천리 385-1	38.0942	127.2765	ES-DH	시추형	4.06779	4.07339	4.08471	419430.4
260	YOJB	경상북도 영주시 풍기읍 성내리 240-55(영주관측소)	36.872	128.5166	ES-DH	시추형	4.08502	4.07523	4.06993	419430.4
261	YOW2	강원도 영월군 영월읍 하송리 322(영월기상대)	37.1812	128.4569	ES-T	지표형	4.06575	4.07227	4.06942	419430.4
262	YPDB	인천광역시 옹진군 연평면 연평리1031	37.608	125.7102	ES-DH	시추형	4.06728	4.07074	4.07339	419430.4
263	YSAB	충청남도 예산군 신암면 종경리 281-22	36.7421	126.8156	ES-DH	시추형	4.06993	4.06432	4.08318	419430.4
264	YSDA	전라남도 완도군 청산면 여서리 367	33.9866	126.9205	ES-DH	시추형	4.06606	4.08175	4.08909	419430.4
265	YUGA	충청남도 공주시 유구읍 만천리 500(AWS)	36.5406	126.9473	ES-DH	시추형	4.08002	4.08053	4.07238	419430.4

부록 4. 지진가속도 시간이력 추정방법 검증

○ 지진가속도 시간이력 추정방법

본 연구에서 제안하고자 하는 임의 위치 가속도 시간이력 추정방법은 기상청에서 제공하는 3개소 이상의 지진가속도 관측 결과를 활용하며, (1) 지진관측소들로부터 획득된 지진가속도의 각 주파수 성분의 크기가 진앙으로부터 해당 관측소의 거리에 비례하여 선형적으로 감소(감쇄)하고 (2) 인접한 각 지진 관측소에서 계측된 지진가속도는 상호간 유사한 최대가속도 및 형상(time shape function)을 갖는 것을 가정한다.

제시한 가정은 국내 지진관측망의 조밀도가 20 km 정도인 실정을 반영한 것으로, 각 관측소 위치에서의 지반 증폭의 효과는 상호간 유사하거나 그 차이가 크지 않으며, 또한 각 관측소 간 거리가 멀지 않아 지진의 감쇄도 선형적으로 추정이 가능할 것이라고 가정한 것이다. 위에서 설명한 것과 같은 가정으로 인해 지반에 대한 정보를 확보하지 않고서도 임의 자유장 또는 시추공 가속도계 위치에서의 지진 가속도의 크기를 선형적으로 추정할 수 있다.

지진가속도 시간이력을 생성하는 방법은 직접적분법에 의한 시간해석을 위한 인공지진 생성기법 연구에서 다양하게 제시되고 있다(Shin and Song, 2016). 일반적으로 지진의 각 주파수별 에너지의 크기 정보를 갖고 있는 기준 응답스펙트럼 및 시간이력의 형상을 결정하고 초기 가속도 시간이력을 생성한 후 기준 응답스펙트럼과 부합성을 비교하며, 오차를 줄이기 위한 다수의 반복계산 작업을 수행하여 최종 지진가속도 시간이력을 생성한다.

그림 A4.1은 제안하는 지진가속도 추정 알고리즘을 나타낸 것으로, 지진가속도 생성을 위해서는 앞서 언급한 것과 같이 응답스펙트럼 및 시간이력의 형상이 결정되어야 한다. 본 연구에서 응답스펙트럼의 각 주파수 대역 크기는 기존 연구(Ahn et al., 2019)에서 제안된 방법과 같이 3개 이상의 지진관측소 각 위치에서의 응답스펙트럼을 산정하고 진앙으로부터 거리에 따른 가중치(최대가속도의 비)를 반영하여 추정하고자 하는 위치에서의 응답스펙트럼을 식 (A4.1)과 같이 결정하였다.

$$S_T(f) = \frac{\sum_{k=1}^n [W_k \cdot S_k(f)]}{n} \quad (\text{A4.1})$$

여기서, S_T 는 추정하고자 하는 임의 위치 각 주파수 대역에서의 응답스펙트럼의 크기이고 f 는 주파수, W_k 는 각 관측소별 가중치, S_k 는 인접한 관측소에서의 응답스펙트럼의 크기, n 는 관측소의 수이다.

작성된 응답스펙트럼은 본 연구의 첫 번째 가정에 의해서 추정하고자 하는 위치에서의 지진의 에너지 특성을 나타내는 것으로 주파수별 가속도의 크기 정보만을 갖고 있어 수학적으로 정의가 용이하다. 하지만 지진가속도 시간이력의 형상은 응답스펙트럼에 비하여 비선형적인 형상의 변화, 최대 및 최소 가속도의 발생 위치, 위상의 변화 등 다양하고 복잡한 변수를 갖고 있어, 임의 위치에서 수학적으로 정의하기 어렵다. 따라서, 추정하고자 하는 지진파의 가속도 시간이력의 형상은 본 연구에서 고려한 두 번째 가정에 따라 해당 위치와 가장 인접한 관측소에서 계측된 가속도의 시간이력 형상과 유사한 형상을 가정하였다. 이상과 같은 방법으로 결정된 추정하고자하는 위치에서의 응답스펙트럼(SRS, Shock Response Spectrum)과 시간이력의 형상 정보를 이용하여 기존 지진 가속도 생성방법(Ferebee and Irvine, 2008)에 따라 지진가속도를 추정하게 된다.

추정하고자 하는 가속도 시간이력은 식 (A4.2)와 같은 다수 정현파형의 합(wavelet equation)으로 가정하고 통계를 기반으로 앞서 결정된 시간이력 형상 및 응답스펙트럼의 각 주파수에서의 가속도 크기를 유사하게 생성한다.

$$w_m(t) = A_m \sin\left(\frac{2\pi f_m}{N_m}(t-t_{dm})\right) \sin(2\pi f_m(t-t_m)) \quad (\text{A4.2})$$

여기서, $t_{dm} \leq t \leq \left(t_{dm} + \frac{N_m}{2f_m}\right)$ 인 시간에 대해서, $w_m(t)$ 는 t 시간에서 가속도의 연속한 정현파의 집합, A_m 은 가속도의 크기, f_m 는 정현파형의 주파수, t_{dm} 은 지연시간, N_m 은 정현파형의 수이다.

앞에서 설명한 단계에서 정현파형의 합으로 생성된 시간이력은 응답스펙트럼으로 다시 변환하여 추정하고자 하는 위치의 응답스펙트럼과 비교하게 되며, 주파수 대역의 오차를 수정하는 과정을 반복(iteration)한다. 이렇게 생성된 지진가속도 시간이력은 추정하고자 하는 위치에서의 응답스펙트럼 각 주파수에서 응답과 크기가 유사하고 시간이력의 모양은 최단 거리의 관측소에서 계측된 가속도 시간이력의 위상과 강진지속구간의 길이, 최대가속도의 위치 등 특성이 유사한 형상을 갖게 된다.

본 연구에서 제안한 임의 위치 지진가속도 시간이력 추정방법은 지반정보 등 관측소 특성치를 반영하지 않고 평면상 각 관측소들과 추정위치 사이의 거리에 비례한 선형추정방법을 사용하므로 지진의 감쇄효과 및 지반증폭에 따른 영향이 반영되지 않는 단점이 있다. 하지만 지진발생 후 구조물의 안전성을 확인하는 등 용도로 지진가속도 시간이력의 확보가 요구되는 경우에는 신속히 활용할 수 있는 장점이 있다.

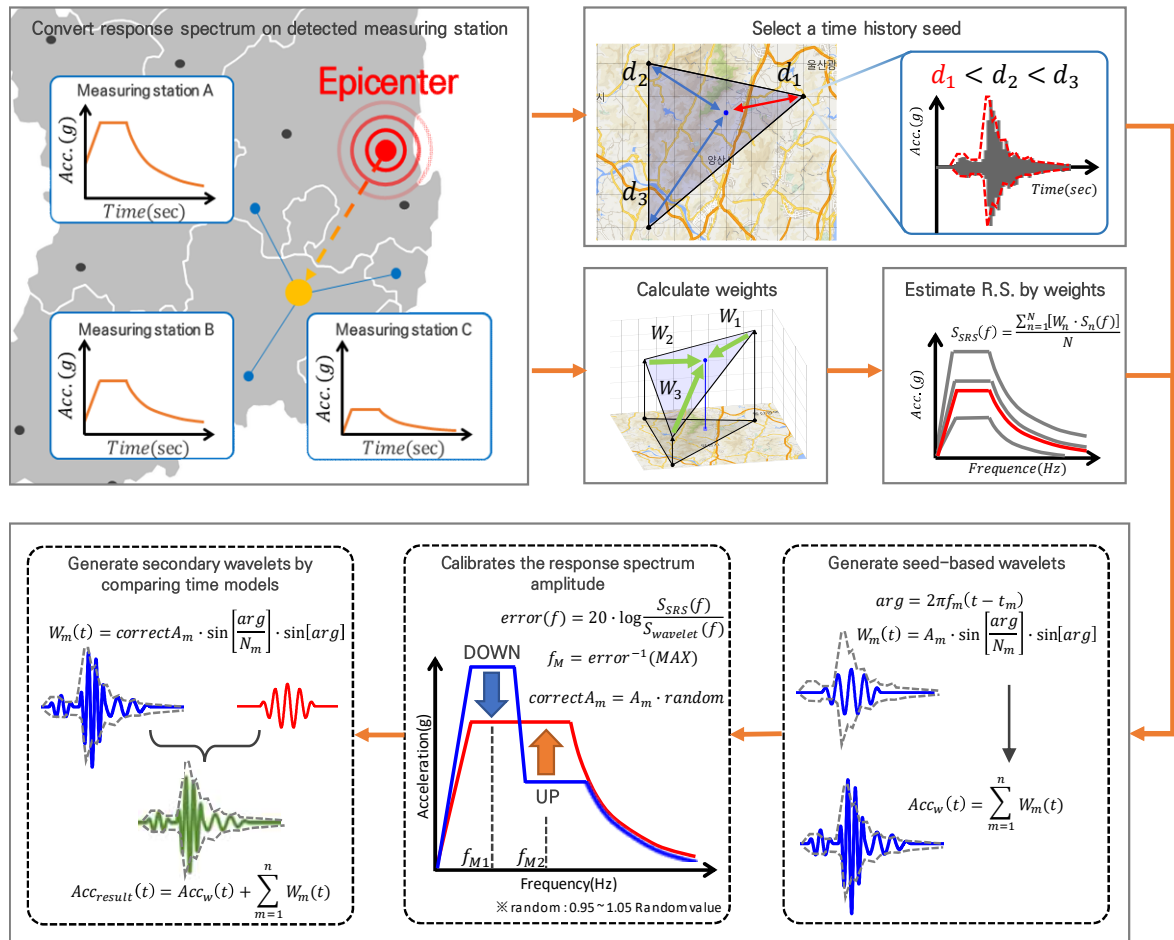


그림 A4.1 지진가속도 추정 알고리즘

○ 제안된 지진가속도 추정방법의 적용성 평가

본 연구에서 제안한 방법은 기상청에서 운영하고 있는 제한된 수의 지진가속도 관측소 계측자료만을 활용하고 지진의 감쇄 및 지반증폭 영향을 고려하지 못하므로 추정의 정확성이 부족할 수 있다. 이에 국내에서 발생한 기록지진을 활용하여 제안한 지진가속도 시간이력 추정방법의 적용성을 평가하였다.

지진가속도 추정방법 적용성 평가는 경주지진(2016), 포항지진(2017) 및 상주지진(2019) 계측자료를 활용하였으며, 임의 관측소를 추정하고자 하는 위치로 가정하고 인근 관측소 계측결과로부터 추정 위치 지진가속도 응답스펙트럼 및 시간이력을 산정하여 관측소 계측결과와 비교하여 수행하였다.

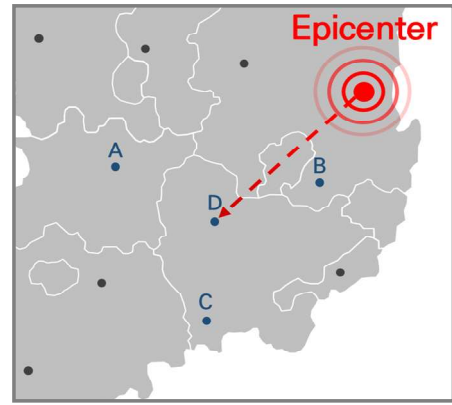


그림 A4.2 진앙 및 지진관측소의 위치 예

적용성 평가방법을 예를 들어 설명하기 위하여 그림 A4.2에 지진관측소 및 진앙의 위치를 나타내었다. 관측소 D의 위치가 지진가속도를 추정하고자 하는 위치라고 가정하고 추정위치 인근 관측소 검색 알고리즘(Ahn et al, 2019)에 의해 선정된 관측소를 A, B, C라고 하면, 관측소 A, B, C의 계측된 결과를 이용한 지진가속도 추정 결과와 관측소 D에서 실제 계측된 지진가속도를 비교하는 방식으로 평가되었다.

추정위치로 고려된 관측소는 국가지진종합정보시스템 (<http://necis.kma.go.kr>) 상 265개 관측소(2019.09.04.기준) 중 가속도 시간이력이 공개되어 활용이 가능한 관측소를 대상으로 하였으며, 가속도계는 설치 조밀도가 상대적으로 높은 시추공가속도계를 대상으로 하였다.

국내 지진가속도계는 지속적으로 증가되고 있으나 경주지진(2016.9.12., M5.8)이 발생할 당시에는 국가지진종합정보시스템에서 획득 가능한 전국의 지진가속도계 정보는 60개소이었으며, 포항지진(2017.11.15. M5.4) 시에는 69개소만이 활용 가능하였다. 최근 발생한 상주지진(2019.7.21. M3.9)은 211개소의 지진가속도 자료를 활용하였다.

본 연구에서 제안한 방법에 의해 임의 위치 응답스펙트럼을 추정한 결과를 그림 A4.3에 나타내었다. 응답스펙트럼은 0.1 Hz에서 15.1 Hz까지 0.5 Hz 간격으로 감쇠는 5%를 적용하여 계산되었으며, 설계유효지반가속도(s)에 대한 각 주파수별 계측값 및 추정값의 절대평균오차를 식 (3)과 같이 산정하여 비교하였다.

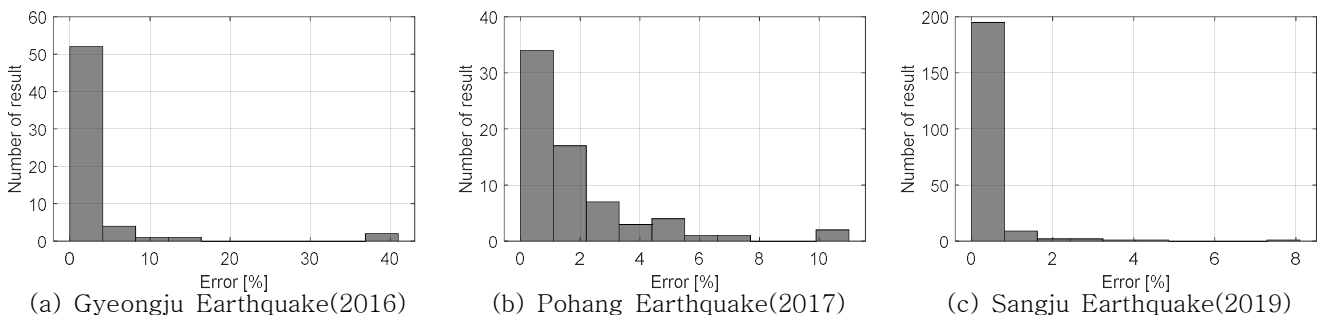
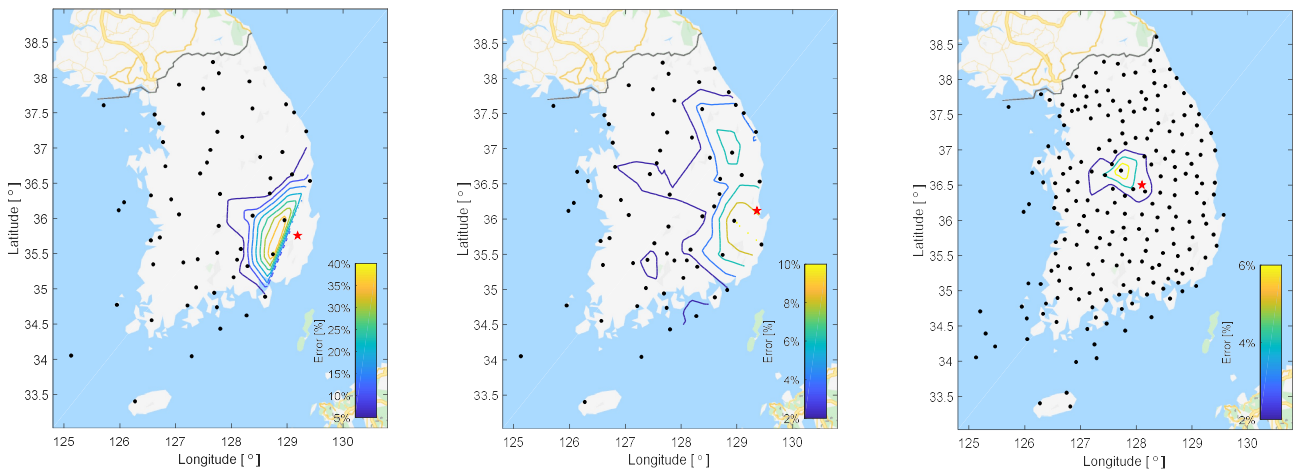


그림 A4.3 지진가속도 응답스펙트럼 오차

$$E_{abs.res} = \frac{\sum |R_a(f) - R_b(f)|}{S \cdot N_{freq}} \quad (A4.3)$$

여기서, $E_{abs.res}$ 는 가속도 응답스펙트럼의 절대평균오차(이하 오차라 함)로 관심 주파수대역에서의 계측값과 추정값의 정량적 오차를 의미한다. $R_a(f)$ 와 $R_b(f)$ 는 각 주파수에서 계측 및 추정 응답스펙트럼의 크기이고, 설계유효지반가속도 S 는 0.154 g를 적용하였으며, N_{freq} 는 응답스펙트럼 산정 주파수 간격의 수이다.

경주지진 시 응답스펙트럼 추정 결과는 최대 28.7%의 오차가 발생하였으며, 포항지진 시에는 10.1%의 오차가 발생하는 것으로 나타났으나 지진의 규모가 작았던 상주지진에서는 8.10%의 오차만이 확인되었다. 오차는 진앙과 가까운 경우에 크게 나타났으며, 진앙에서 멀어질수록 감소하였다. 특히 이러한 양상은 경주지진과 포항지진의 경우 보다 확연하게 나타났는데, 이는 실제 지진이 거리에 따라 본 연구에서 적용한 것과 같이 선형적으로 감소하지 않고 log 감소하는 경향을 나타내기(Park et al., 2018) 때문인 것으로 판단된다. 또한, 시추공가속도계만이 사용됨에 따라 기상청에서 운영하고 있는 전체 지진관측소에 비하여 본 연구에서 활용할 수 있었던 지진관측소의 조밀도가 매우 낮았으며, 그림 A4.4에서와 같이 진앙 인근의 관측 자료를 국가지진종합정보시스템에서 제공하지 않는 등 관측소 간 거리가 30 km에서 40 km 수준으로 멀었기 때문에 오차가 다소간 크게 발생한 것으로 판단된다.



(a) Gyeongju Earthquake(2016)

(b) Pohang Earthquake(2017)

(c) Sangju Earthquake(2019)

그림 A4.4 지진가속도 응답스펙트럼 추정 절대평균오차

앞에서 설명한 것과 동일한 조건에서도 경주지진의 경우 총 60개 관측소 중 51개소(전체의 85%)에 대한 추정결과의 오차는 5% 미만으로 확인되었으며, 포항지진과 상주지진에서도 각각 전체의 88% 및 99% 관측소가 5% 미만의 오차를 나타내어 임의의 위치 응답스펙트럼 추정방법이 유효한 것으로 판단된다. 향후, 국내 관측소의 수가 증가하여 지진가속도 관측 조밀도가 향상되는 경우에는 진앙에서의 거리에 따른 오차가 감소하고 응답스펙트럼 추정의 정확도가 향상될 수 있을 것으로 판단된다.

그림 A4.5 ~ 그림 A4.7은 각각 부론(BURB), 장수(JASA) 및 태인(TAIA) 관측소 위치 지진가속도 응답스펙트럼 및 시간이력을 경주지진, 포항지진 및 상주지진 시 계측된 자료를 이용하여 추정한 결과로, 산정된 응답스펙트럼 오차가 작은 경우의 사례를 나타낸 것이다. 관측소의 조밀도가 비교적 높지 않은 내륙 지역임에도 불구하고 추정된 가속도 시간이력은 계측된 시간이력과 유사한 형상을 갖고 있으며, 위상의 변화에도 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 다만, 세 경우에서 모두 최대 가속도의 위치는 동일 또는 유사한 시간에서 발생하지 않은 것으로 나타났다. 이것은 제안하는 시간이력 생성방법이 지진의 각 주파수별 에너지 성분을 갖고 있는 다수 정현파형의 합으로 지진파(랜덤파형)를 표현하며, 최대 가속도의 발생 시간 및 주기 특성에 대한 어떠한 정보도 제공하지 못하기 때문이다.

본 연구에서 검토된 가속도 시간이력은 생성에 소요되는 시간을 최소화하기 위하여 정현파형을 250개로 한정하고 반복계산을 2,000회로 제한하여 수행된 결과로, 보다 많은 파형 및 반복계산을 수행 시

추정결과의 정확성이 향상될 수 있을 것으로 판단된다.

그림 A4.8과 그림 A4.9는 각각 경주지진과 포항지진 시 밀양(MIYA) 관측소에서 계측된 자료를 이용하여 추정한 결과이고, 그림 A4.10은 상주지진 시 청주(CEJA) 관측소에서 계측된 자료를 이용하여 추정한 결과이다. 앞에서 설명한 사례와 달리 이 결과는 추정된 응답스펙트럼의 오차가 큰 경우로, 추정된 응답스펙트럼은 전 주파수 대역에서 계측결과와 큰 차이가 발생하였고 시간이력의 형상 역시 계측된 결과와 상이하였다.

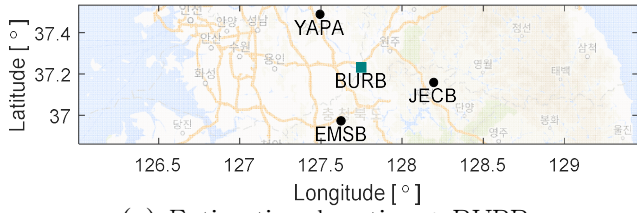
가장 큰 오차가 발생한 경주지진 시 밀양 관측소의 경우에는 진앙과 가까움에도 불구하고 인근 관측소의 수가 작았고 이에 따라 삼각망(Ahn et al, 2019)이 부적절하게 생성되어 응답스펙트럼의 추정에 오차가 많이 발생한 것으로 판단된다. 또한, 포항지진 시에도 밀양 관측소에서 계측된 값이 추정치 보다 높게 나타났는데 이것은 상기 원인 외에 지반증폭 현상에 의해 영향을 받은 것으로 추정된다. 청주 관측소의 경우에는 주변 관측소 설치 조밀도가 타 관측소에 비하여 비교적 높았음에도 불구하고 비교적 큰 오차가 발생한 것으로 상대적으로 1개 관측소(HONA)가 진앙에 인접하여 위치하였기 때문인 것으로 판단된다.

○ 적용성 평가결과

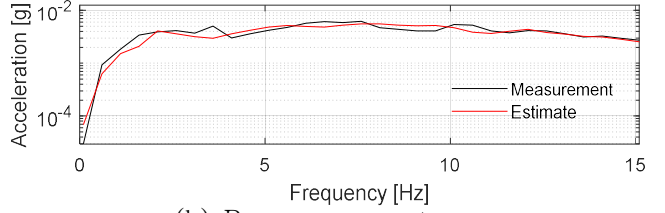
본 연구에서는 지진발생 후 임의 위치에서 발생한 지진가속도 시간이력을 추정하기 위하여 기상청 지진관측소 계측자료를 활용하는 방법을 제안하였으며, 국내에서 발생한지진기록을 이용하여 제안한 응답스펙트럼 및 시간이력 추정 방법을 검증하였다.

임의 관측소에서 계측된 결과를 인근 관측소 계측자료를 이용하여 추정하는 방법으로 제안방법을 검증한 결과, 응답스펙트럼 추정에 있어서는 경주지진 시 최대 28.7%의 오차가 발생하기도 하였으나 전체 관측소의 85% 이상이 5% 미만의 오차를 나타내었고 포항지진과 상주지진에서도 유사한 결과를 나타내었다. 추정된 시간이력은 응답스펙트럼 추정의 오차가 작은 경우 계측된 시간이력의 시간이력과 유사한 형상을 갖고 있었으며, 위상의 변화에도 큰 차이가 없음을 확인할 수 있는 등 제안된 방법이 임의 위치에서의 지진가속도 시간이력을 추정하는데 유효함을 확인할 수 있었다.

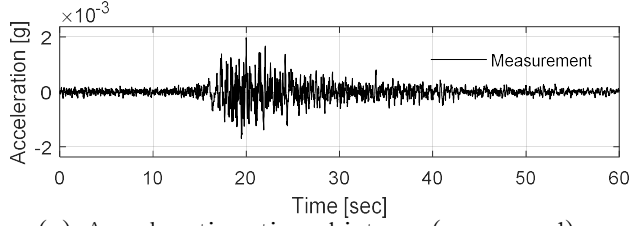
본 연구에서 활용한 지진가속도 관측소의 설치 조밀도가 낮기 때문에 추정되는 위치가 진앙에 인접하거나 지반증폭 현상이 현저한 곳에서는 제안된 지진가속도 시간이력 추정 방법의 정확성이 다소 부족한 점이 확인되었다. 국내에서는 지진 계측정보 확대를 위하여 지진관측소의 수가 지속적으로 증가하고 있으며, 향후 주요 시설물에 설치되는 가속도계 등을 연계 활용하게 될 경우 임의 위치에서 보다 높은 수준의 지진가속도 시간이력을 추정하는 것이 가능할 것으로 판단된다.



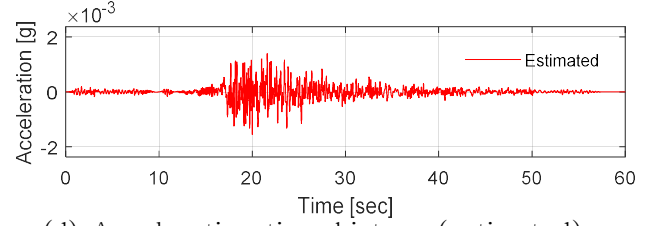
(a) Estimation location : BURB



(b) Response spectrum

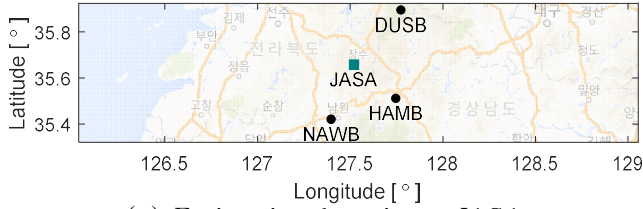


(c) Acceleration time history (measured)

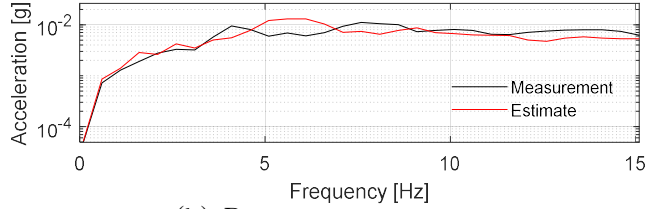


(d) Acceleration time history (estimated)

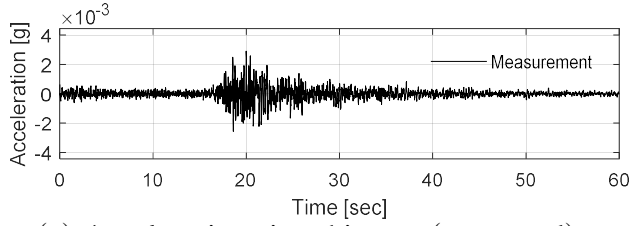
Fig. 5. Acceleration time history estimation results at BURB - Gyeongju Earthquake(2016)



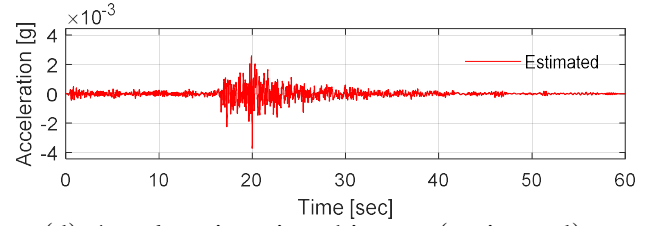
(a) Estimation location : JASA



(b) Response spectrum

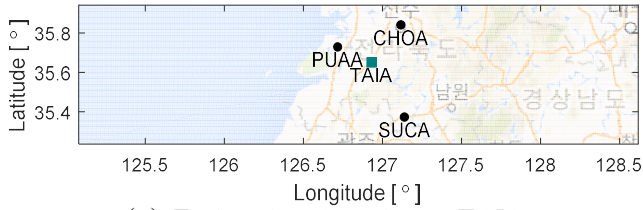


(c) Acceleration time history (measured)

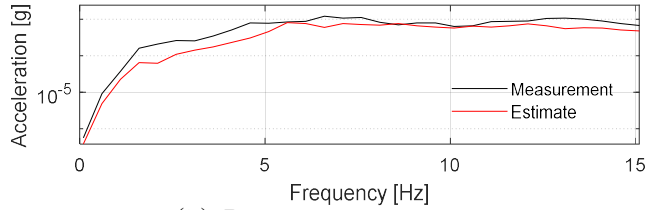


(d) Acceleration time history (estimated)

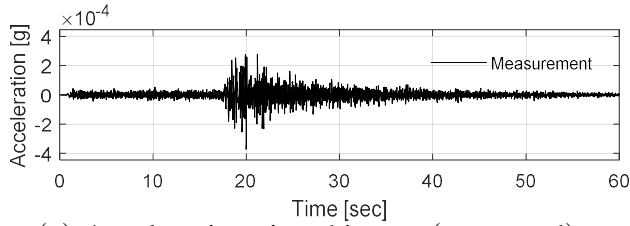
Fig. 6. Acceleration time history estimation results at JASA - Pohang Earthquake(2017)



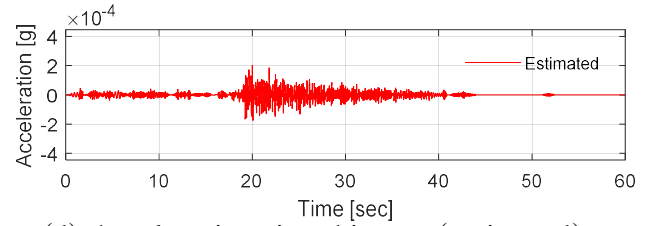
(a) Estimation location : TAIA



(b) Response spectrum

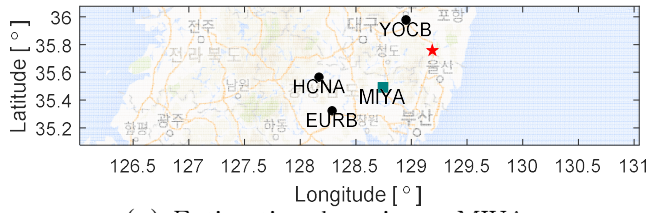


(c) Acceleration time history (measured)

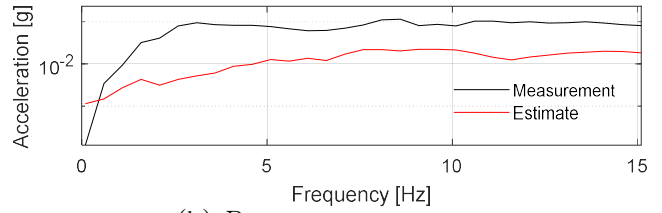


(d) Acceleration time history (estimated)

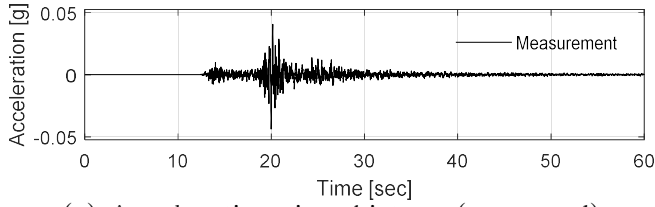
Fig. 7. Acceleration time history estimation results at TAIA - Sangju Earthquake(2019)



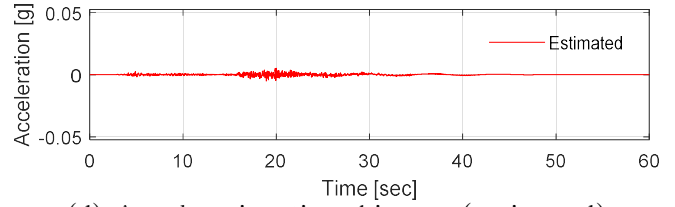
(a) Estimation location : MIYA



(b) Response spectrum

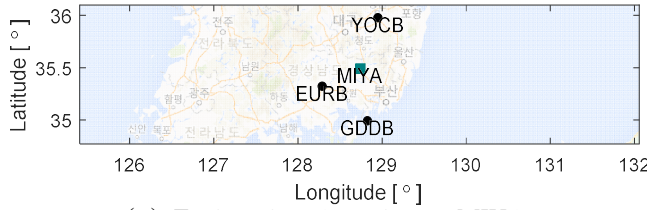


(c) Acceleration time history (measured)

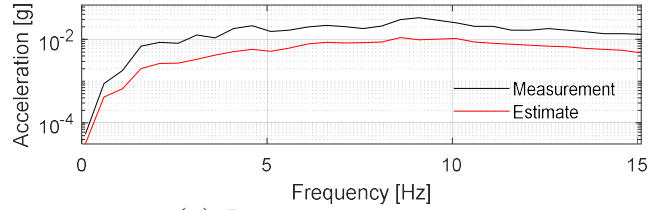


(d) Acceleration time history (estimated)

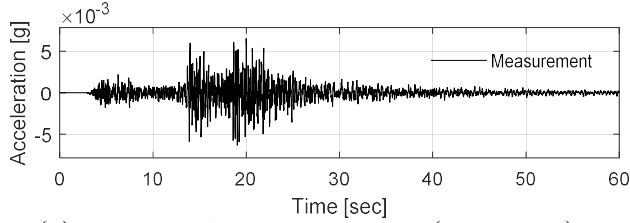
Fig. 8. Acceleration time history estimation results at MIYA - Gyeongju Earthquake(2016)



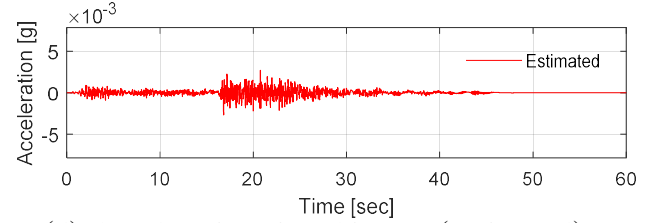
(a) Estimation location : MIYA



(b) Response spectrum

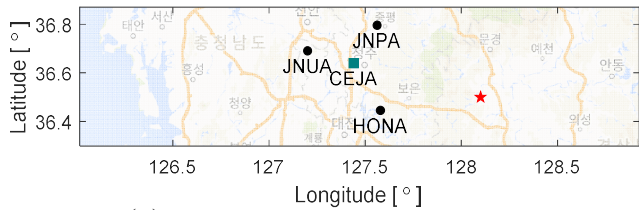


(c) Acceleration time history (measured)

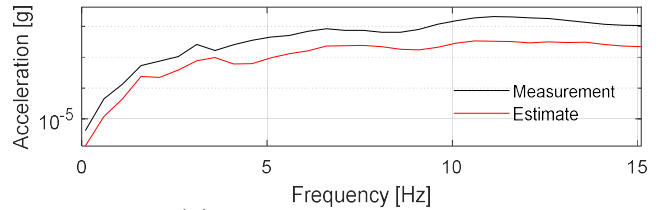


(d) Acceleration time history (estimated)

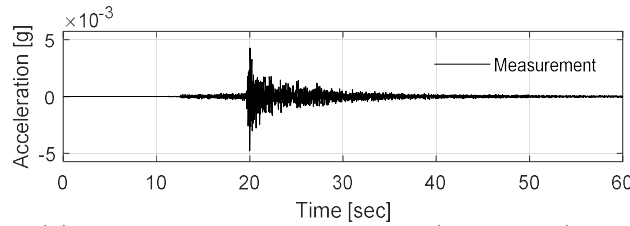
Fig. 9. Acceleration time history estimation results at MIYA - Pohang Earthquake(2017)



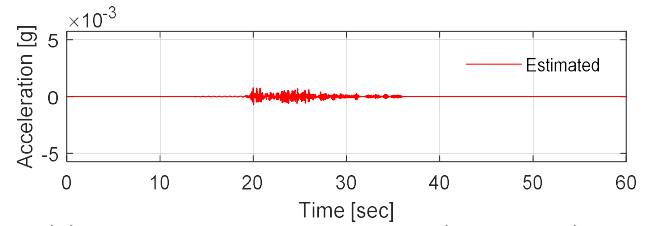
(a) Estimation location : CEJA



(b) Response spectrum



(c) Acceleration time history (measured)



(d) Acceleration time history (estimated)

Fig. 10. Acceleration time history estimation results at CEJA- Sangju Earthquake(2019)

○ 지진가속도 응답스펙트럼 추정오차(경주지진)

Measuring station code	location	location	Distance from Epicenter	error [%]
ADOA	36.5727	128.7009	99.98919775	2.29%
BGDB	34.7726	125.9469	314.2620129	0.38%
BOSB	34.7635	127.212	210.4906751	2.60%
BURB	37.2317	127.7486	208.4294696	0.38%
BUYB	36.2726	126.9206	213.9850717	2.01%
CEJA	36.6399	127.4406	186.2895747	1.77%
CHYB	36.944	128.9145	132.8227236	4.80%
CIGB	36.0399	128.3813	79.69762949	15.35%
DACB	37.8318	124.7068	467.3154569	0.30%
DDCA	37.9021	127.061	305.1300587	0.28%
DUSB	35.8943	127.7731	129.6397672	2.07%
ECDB	36.1184	125.9797	294.6760138	0.60%
EMSB	36.9737	127.6237	195.3305219	0.88%
EURB	35.3227	128.288	94.86895089	28.74%
EUSB	36.3561	128.6887	79.96394327	7.34%
GAPB	37.8441	127.495	276.4102489	0.65%
GGDB	34.0523	125.1264	414.5450211	1.51%
GMDB	34.0409	127.2883	256.054322	2.64%
GOCB	35.3485	126.5982	239.966181	5.31%
GWYB	34.9437	127.6915	163.0047575	1.66%
HACA	35.4137	128.1018	105.8546859	3.01%
HALB	33.4021	126.273	370.8598279	1.01%
HAMB	35.5116	127.7455	134.0471185	0.82%
HANB	34.5539	126.5689	272.6908365	0.90%
HAWB	37.0844	126.774	263.742656	1.25%
HCNA	35.5652	128.17	95.03857221	1.45%
HWCA	38.065	127.7746	284.5188993	0.55%
HWCB	38.2215	127.6707	304.1501007	0.28%
IJAA	37.9471	128.3247	253.3037681	0.69%
IKSA	36.0592	127.0619	196.3166345	3.39%
IMWB	37.238	129.3419	163.4132198	6.41%
INCA	37.4778	126.624	300.4109623	0.77%
JECB	37.1595	128.1945	178.7318009	2.60%
JINA	35.1642	128.0402	123.1931665	2.30%
JNPA	36.7956	127.562	186.8908554	0.89%
KUJA	34.8885	128.6047	109.3771804	3.02%
MIYA	35.4916	128.7444	49.87423891	12.38%
NAWB	35.4213	127.3964	167.2051454	2.04%
OKCB	36.3479	127.7957	142.3651983	1.94%
OKEB	37.6209	128.9802	205.8000541	3.49%
OYDB	36.2294	126.0757	287.9672642	0.30%
PORA	36.3278	126.5575	247.4784403	0.80%
PUAA	35.7296	126.7168	224.9296977	2.18%
PYCA	37.562	128.3778	211.705325	2.99%
SCHA	35.0199	127.3691	184.3726928	1.78%
SHHB	37.3488	126.7039	285.8982955	0.41%
SMKB	35.6891	126.5561	239.653854	5.21%
SUCA	35.3737	127.1386	191.2458848	1.19%
TOHA	37.507	129.1238	192.4894318	1.98%
YAPA	37.489	127.4942	244.9964035	0.66%
YAYA	38.1438	128.6025	267.802689	0.99%
YESA	34.7396	127.7405	172.9196466	1.77%
YEYB	36.6251	129.088	95.82435025	1.97%
YKDB	34.6224	128.2734	150.0969301	3.96%
YNDB	34.4323	127.8011	192.8570295	1.76%
YOCB	35.9771	128.9511	32.34032318	18.23%
YODB	36.5333	129.4095	87.64619505	11.94%
YOJB	36.872	128.5166	136.9371796	2.68%
YPDB	37.608	125.7102	376.3035106	0.29%
YSAB	36.7421	126.8156	241.5373838	1.82%

○ 지진가속도 응답스펙트럼 추정오차(포함지진)

Measuring station code	location	location	Distance from Epicenter	error [%]
ADOA	36.5727	128.7009	99.98919775	4.29%
ANMA	36.5386	126.33	273.9225911	0.26%
BGDB	34.7726	125.9469	314.2620129	0.69%
BOSB	34.7635	127.212	210.4906751	0.61%
BURB	37.2317	127.7486	208.4294696	0.69%
BUYB	36.2726	126.9206	213.9850717	0.89%
CEJA	36.6399	127.4406	186.2895747	2.74%
CHYB	36.944	128.9145	132.8227236	7.21%
CIGB	36.0399	128.3813	79.69762949	1.37%
DACB	37.8318	124.7068	467.3154569	0.30%
DDCA	37.9021	127.061	305.1300587	0.33%
DUSB	35.8943	127.7731	129.6397672	0.97%
ECDB	36.1184	125.9797	294.6760138	0.17%
EMSB	36.9737	127.6237	195.3305219	1.89%
EURB	35.3227	128.288	94.86895089	1.29%
EUSB	36.3561	128.6887	79.96394327	3.16%
GAPB	37.8441	127.495	276.4102489	0.72%
GDDB	34.993	128.8263	90.34664544	1.63%
GGDB	34.0523	125.1264	414.5450211	0.22%
GMDB	34.0409	127.2883	256.054322	0.12%
GOCB	35.3485	126.5982	239.966181	1.09%
GUMB	36.1813	128.5927	71.44076373	3.00%
GWYB	34.9437	127.6915	163.0047575	1.23%
HACA	35.4137	128.1018	105.8546859	1.10%
HALB	33.4021	126.273	370.8598279	0.45%
HAMB	35.5116	127.7455	134.0471185	0.85%
HANB	34.5539	126.5689	272.6908365	1.12%
HAWB	37.0844	126.774	263.742656	0.89%
HCNA	35.5652	128.17	95.03857221	2.64%
HOCA	37.6837	127.8802	242.9841523	0.93%
HWCA	38.065	127.7746	284.5188993	1.01%
HWCB	38.2215	127.6707	304.1501007	1.12%
IJAA	37.9471	128.3247	253.3037681	0.96%
IKSA	36.0592	127.0619	196.3166345	0.90%
IMWB	37.238	129.3419	163.4132198	3.74%
INCA	37.4778	126.624	300.4109623	0.32%
JASA	35.657	127.5204	152.1734803	1.31%
JECB	37.1595	128.1945	178.7318009	0.85%
JEJB	35.6379	129.4408	26.53410769	10.01%
JINA	35.1642	128.0402	123.1931665	1.01%
JNPA	36.7956	127.562	186.8908554	1.90%
KAWA	37.8043	128.8547	227.1376173	1.18%
KUJA	34.8885	128.6047	109.3771804	1.51%
MIYA	35.4916	128.7444	49.87423891	6.59%
NAWB	35.4213	127.3964	167.2051454	3.07%
OKCB	36.3479	127.7957	142.3651983	2.14%
OKEB	37.6209	128.9802	205.8000541	4.46%
OYDB	36.2294	126.0757	287.9672642	0.09%
PORA	36.3278	126.5575	247.4784403	0.30%
PUAA	35.7296	126.7168	224.9296977	1.17%
PYCA	37.562	128.3778	211.705325	4.94%
SACA	35.4131	127.879	125.0220128	1.08%
SCHA	35.0199	127.3691	184.3726928	1.16%
SHHB	37.3488	126.7039	285.8982955	0.52%
SMKB	35.6891	126.5561	239.653854	1.23%
SUCA	35.3737	127.1386	191.2458848	0.98%
TANB	36.6731	126.1353	295.5103491	0.12%
TOHA	37.507	129.1238	192.4894318	3.74%
YAPA	37.489	127.4942	244.9964035	1.03%
YAYA	38.1438	128.6025	267.802689	0.85%
YESA	34.7396	127.7405	172.9196466	1.14%
YEYB	36.6251	129.088	95.82435025	4.88%
YKDB	34.6224	128.2734	150.0969301	2.72%
YNDB	34.4323	127.8011	192.8570295	0.93%
YOCB	35.9771	128.9511	32.34032318	10.08%
YODB	36.5333	129.4095	87.64619505	5.46%
YOJB	36.872	128.5166	136.9371796	3.06%
YPDB	37.608	125.7102	376.3035106	0.14%
YSAB	36.7421	126.8156	241.5373838	2.00%

○ 지진가속도 응답스펙트럼 추정오차(상주지진)

Measuring station code	location	location	Distance from Epicenter	error [%]
ADOA	36.5727	128.7009	99.98919775	0.06%
AGSA	37.0917	127.8081	193.1250209	0.20%
ANMA	36.5386	126.33	273.9225911	0.10%
ASNA	36.8277	127.0123	230.3417052	0.15%
BGDB	34.7726	125.9469	314.2620129	0.06%
BKWA	37.1681	127.9875	189.7352498	0.10%
BLGA	36.1392	127.3032	176.590099	0.80%
BLLA	34.8646	127.4638	185.1469527	0.74%
BOGA	37.0132	127.3294	218.3560278	0.85%
BOSB	34.7635	127.212	210.4906751	0.34%
BSAA	35.0662	129.0741	76.78873917	0.06%
BURB	37.2317	127.7486	208.4294696	0.30%
BUSA	36.9792	128.661	142.6457884	0.32%
BUYB	36.2726	126.9206	213.9850717	0.67%
CEJA	36.6399	127.4406	186.2895747	4.33%
CGAA	36.7069	127.7262	169.1040254	8.09%
CGDA	35.6627	128.6704	48.25056488	0.15%
CGIA	37.5822	128.1527	221.6910004	0.27%
CGPA	34.8768	126.971	223.8428835	0.14%
CGUB	37.5583	127.7136	239.2211799	0.07%
CGWB	35.170521	128.572485	85.51047762	0.10%
CGYA	36.4233	126.7786	231.1764966	0.27%
CHDA	34.2368	127.2496	243.1432132	0.03%
CHOA	35.8407	127.1171	188.6946331	0.24%
CHRB	35.53421833	128.4779	69.14673035	0.14%
CHYB	36.944	128.9145	132.8227236	0.10%
CIGB	36.0399	128.3813	79.69762949	0.93%
CJDB	36.174	126.5284	246.3449378	0.36%
CLSA	35.3629	128.4098	83.08576882	0.18%
CSOA	36.3878	129.0854	69.91421334	0.27%
DACB	37.8318	124.7068	467.3154569	0.09%
DAGA	35.87889833	128.6527733	50.49065155	0.11%
DDCA	37.9021	127.061	305.1300587	0.04%
DGHA	35.8352	127.5711	147.3991589	0.32%
DGJA	36.8894	126.6174	265.0028648	0.32%
DGLA	36.7906	128.2705	140.9826783	1.32%
DKSA	36.9044	128.1455	157.8168402	2.22%
DNBA	36.3906	128.4284	98.09267773	0.69%
DNYA	36.9877	128.3559	155.0302698	0.82%
DUSB	35.8943	127.7731	129.6397672	0.19%
ECDB	36.1184	125.9797	294.6760138	0.05%
EMSB	36.9737	127.6237	195.3305219	0.25%
EURB	35.3227	128.288	94.86895089	0.17%
EUSB	36.3561	128.6887	79.96394327	0.98%
GACA	35.1136	128.3071	107.002935	0.04%
GAGA	37.1307	129.1697	151.0170851	0.09%
GAPB	37.8441	127.495	276.4102489	0.11%
GDDB	34.993	128.8263	90.34664544	0.05%
GEJB	38.4165	128.3858	301.4202498	0.05%
GGDA	35.9498	129.253	21.92479695	0.09%
GGDB	34.0523	125.1264	414.5450211	0.02%
GGGA	36.3637	129.3907	69.14707492	0.31%
GGSA	36.9296	129.1518	128.928873	0.07%
GGTA	37.7686	126.8991	303.8335745	0.07%
GH2B	37.7077	126.446435	329.0270718	0.11%
GICA	36.0813	128.1016	105.0751736	0.31%
GIGA	36.0689	129.1995	34.22628768	0.16%
GKSA	35.2304	127.2251	187.8322292	0.28%
GLCA	37.9049	128.5207	243.8521113	0.15%
GLSA	36.5256	126.545	254.9372486	0.21%
GMDB	34.0409	127.2883	256.054322	0.04%
GMMB	38.25	127.4209	317.824216	0.10%
GMNA	34.9832	127.8946	145.3190704	0.24%
GMPB	37.642	126.6755	308.6124033	0.06%
GOCB	35.3485	126.5982	239.966181	0.04%
GODA	37.7895	126.2916	345.5873972	0.11%
GSGA	37.551575	126.8443917	290.5578646	0.11%
GSNA	35.7576	129.0109	16.1097596	0.14%
GUJA	33.5504	126.7504	328.9094401	0.01%
GUMA	36.23470833	128.290255	97.08604543	0.75%

GUMB	36.1813	128.5927	71.44076373	0.24%
GWLA	37.21960667	128.8212517	164.2141746	0.37%
GWYB	34.9437	127.6915	163.0047575	0.18%
HACA	35.4137	128.1018	105.8546859	0.09%
HADA	35.0798	127.7706	149.0094558	0.21%
HAIA	34.9444	128.1928	127.3200137	0.06%
HALB	33.4021	126.273	370.8598279	0.03%
HAMB	35.5116	127.7455	134.0471185	0.26%
HANB	34.5539	126.5689	272.6908365	0.03%
HAWA	34.671	126.3283	286.4150795	0.04%
HAWB	37.0844	126.774	263.742656	0.26%
HCNA	35.5652	128.17	95.03857221	0.13%
HEDA	34.6064	126.0365	313.5492581	0.06%
HESA	37.5407	127.9564	225.8793907	0.11%
HGDB	34.7068	125.2012	380.8269068	0.01%
HGSA	36.658	126.6879	248.1470272	0.59%
HMGA	36.0761	129.5666	49.12383093	0.12%
HMPA	35.1413	126.6176	243.5709985	0.04%
HOCA	37.6837	127.8802	242.9841523	0.11%
HONA	36.4456	127.5792	164.8036785	0.69%
HTDA	34.391	125.2986	384.5959637	0.01%
HWCA	38.065	127.7746	284.5188993	0.10%
HWCB	38.2215	127.6707	304.1501007	0.08%
HWDB	37.6322	127.3404	266.0489587	0.13%
HWSA	36.4413	127.9441	135.8914714	3.87%
IJAA	37.9471	128.3247	253.3037681	0.15%
IJBA	38.1208	128.3173	271.728814	0.08%
IJDB	35.1028	126.0651	293.2156878	0.04%
IKSA	36.0592	127.0619	196.3166345	0.13%
IMSB	35.61250833	127.2855	173.8847425	0.17%
IMWB	37.238	129.3419	163.4132198	0.09%
INCA	37.4778	126.624	300.4109623	0.14%
ISGB	35.9345	126.9741	202.4241741	0.11%
JAEA	36.8001	128.9903	116.0441104	0.16%
JAGA	35.3198	126.8107	221.6637201	0.05%
JASA	35.657	127.5204	152.1734803	0.60%
JCUA	37.2753	128.2694	186.6784659	0.31%
JECB	37.1595	128.1945	178.7318009	0.31%
JEJB	35.6379	129.4408	26.53410769	0.02%
JESA	37.4027	128.6654	187.073438	0.48%
JGNA	35.8754	128.0485	104.5052955	0.66%
JINA	35.1642	128.0402	123.1931665	0.24%
JKJA	36.2421	129.2151	53.31950237	0.76%
JLSA	35.3575	127.648	146.9121843	0.23%
JNHA	35.1122	128.7536	81.285279	0.15%
JNPA	36.7956	127.562	186.8908554	1.98%
JNUA	36.6908	127.2005	207.9655807	2.48%
JNYA	35.2822	128.7174	67.61584488	0.05%
JODB	34.3115	126.0437	327.4258801	0.12%
JUCA	35.2422	128.828	65.50524446	0.06%
JURA	37.6147	127.0868	279.7983168	0.09%
KAWA	37.8043	128.8547	227.1376173	0.16%
KH2B	34.6186	127.2758	214.4585867	0.44%
KKDA	34.4557	127.1223	236.3531274	0.09%
KMSB	36.10584833	127.4815767	159.9485591	0.79%
KOSB	38.6028	128.3596	321.8915604	0.06%
KUJA	34.8885	128.6047	109.3771804	0.06%
LIWA	36.2482	127.6137	153.0911739	0.32%
LMGA	37.4918	128.8638	192.9966031	0.08%
MALA	35.7445	127.3478	167.4839239	0.23%
MANA	35.0942	126.285	274.1098481	0.04%
MIYA	35.4916	128.7444	49.87423891	0.11%
MJDB	34.2074	125.4691	379.011401	0.01%
MLGA	35.3113	128.9969	52.1110861	0.05%
MNDB	34.9665	127.1609	203.995835	0.43%
MOGA	37.6962	127.5825	258.4757335	0.10%
MOPB	34.8169	126.3809	275.6528014	0.04%
MSNA	35.5884	128.9538	28.31274817	0.12%
NACA	35.9505	126.591	237.3054989	0.07%
NAHA	34.8167	127.9261	154.621612	0.09%
NAJA	35.026	126.8265	229.5080044	0.06%
NAMB	37.7711	128.3863	233.160567	0.11%

NAWB	35.4213	127.3964	167.2051454	0.09%
NCNA	37.8197	128.0919	247.7659572	0.21%
NJDA	37.0503	126.4221	289.099972	0.12%
NLDA	34.5325	127.4672	206.6305321	0.11%
NOSA	36.2837	127.1273	196.262226	1.53%
OKCB	36.3479	127.7957	142.3651983	1.39%
OKEB	37.6209	128.9802	205.8000541	0.07%
OYDB	36.2294	126.0757	287.9672642	0.04%
PGEA	36.756	128.6921	118.7028584	0.70%
PORA	36.3278	126.5575	247.4784403	0.36%
PUAA	35.7296	126.7168	224.9296977	0.19%
PYCA	37.562	128.3778	211.705325	0.52%
PYCB	37.377465	128.3946883	192.2244289	0.14%
PYSB	33.3536	126.8167	341.3537626	0.02%
SACA	35.4131	127.879	125.0220128	0.12%
SAJB	36.4079	128.1575	117.9294866	3.00%
SCHA	35.0199	127.3691	184.3726928	0.30%
SECA	36.1421	126.7518	225.7144104	0.15%
SESA	37.72	128.1735	234.7490465	0.22%
SGMA	37.828	127.288	285.9260057	0.03%
SGNA	37.4462	127.1831	260.3531647	0.14%
SH2B	38.26855333	128.2524633	288.997532	0.08%
SHHB	37.3488	126.7039	285.8982955	0.13%
SIJA	34.8954	126.5881	254.9336371	0.02%
SKBA	36.5212	129.1791	83.96682003	0.11%
SLSA	37.1349	127.5196	214.4734196	0.23%
SMKB	35.6891	126.5561	239.653854	0.28%
SMWA	35.5259	126.5524	241.2248093	0.36%
SNDA	37.2617	128.5956	173.9805524	0.41%
SNGB	37.3465	129.0862	174.9909797	0.07%
SNNA	36.0502	128.7111	54.00963444	0.28%
SODA	37.5714	126.9559	284.7151454	0.10%
SUCA	35.3737	127.1386	191.2458848	0.23%
TAHA	37.515	130.8118	243.3153464	0.03%
TAIA	35.6507	126.9318	205.6781534	0.14%
TANB	36.6731	126.1353	295.5103491	0.06%
TOHA	37.507	129.1238	192.4894318	0.07%
UJBA	37.7548	127.1063883	290.0710838	0.05%
UJNA	36.9926117	129.4136133	137.3631603	0.11%
ULDR	37.4809	130.8987	245.2895415	0.05%
UNCA	35.4695	129.2395	32.06974117	0.08%
WICA	35.7312	127.8016	126.208827	0.20%
WNBA	36.8238	126.2572	291.3707825	0.13%
YAGA	37.407	127.7568	223.3202689	0.15%
YALB	35.7279	128.1934	90.57495122	0.52%
YAPA	37.489	127.4942	244.9964035	0.15%
YAYA	38.1438	128.6025	267.802689	0.35%
YAYB	38.0194	128.7231	252.3363828	0.36%
YC2B	38.03986667	126.9258133	324.6501482	0.07%
YCHB	36.62229	128.437305	117.0802857	0.65%
YDGA	36.0925	127.7943	132.0713033	0.46%
YEAB	36.6611	128.8873	103.0502175	0.17%
YEGA	35.2838	126.4777367	252.1192937	0.04%
YESA	34.7396	127.7405	172.9196466	0.15%
YEYB	36.6251	129.088	95.82435025	0.32%
YGAA	35.8532	128.3657	75.56355276	0.92%
YGBA	35.7955	129.3865	18.54281327	0.04%
YGGA	38.098	127.9852	279.7192141	0.11%
YGJA	35.0278	128.4834	102.7680686	0.04%
YKDB	34.6224	128.2734	150.0969301	0.08%
YNDB	34.4323	127.8011	192.8570295	0.11%
YOCB	35.9771	128.9511	32.34032318	0.60%
YODB	36.5333	129.4095	87.64619505	0.26%
YOGA	38.0942	127.2765	310.3383024	0.10%
YOJB	36.872	128.5166	136.9371796	0.47%
YPDB	37.608	125.7102	376.3035106	0.10%
YSAB	36.7421	126.8156	241.5373838	0.96%
YSDA	33.9866	126.9205	283.8162739	0.04%
YUGA	36.5406	126.9473	221.3589243	0.45%

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.