

최종보고서(일반과제용)										보안등급	
										일반[✓], 보안[]	
중앙행정기관명	국토교통부				사업명	사업명		국토교통기술촉진연구사업			
전문기관명	국토교통과학기술진흥원					내역사업명		국토교통기술혁신연구 (사회이슈해결 유형)			
공고번호	공고-제00호				연구개발과제번호		21CTAP-C152100-03				
국가과학기술 표준분류	EI1105		70%	EI1101		20%	EI1102		10%		
연구주제	(대분류) 건설 교통			(중분류) 시설물 안전 유지관리 기술			(소분류) 자연재해 저감기술				
연구개발과제명	국문	인공지능을 활용한 지반-구조물 상호작용 기반 노후구조물 내진성능평가 기법 개발									
	영문	Seismic Performance Evaluation using Soil-Structure interaction with Artificial Intelligence									
주관연구개발기관	기관명	충북대학교 산학협력단				사업자등록번호		301-82-16304			
	주소	(우)28644				법인등록번호		150171-0001816			
주관연구책임자	성명		정종원		직위		부교수				
	연락처	직장전화	043-261-2405		휴대전화		010-2088-5546				
		전자우편	jjung@chungbuk.ac.kr		국가연구자번호		1100 4716				
연구개발기간	전체	2019. 04. 19 - 2021. 12. 31(2년 9개월)									
	1년차	2019. 04. 19 - 2019. 12. 31(9개월)									
	2년차	2020. 01. 01 - 2020. 12. 31(1년)									
	3년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31(1년)									
연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계	599,000	20,00	180,000	-	-	-	-	619,00	180,000	799,000	-
1년차	134,000	4,500	40,500	-	-	-	-	138,500	40,500	179,000	-
2년차	155,000	5,167	46,500	-	-	-	-	160,167	46,500	206,667	-
3년차	310,000	10,333	93,000	-	-	-	-	320,334	93,000	413,333	-
공동연구개발기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화		전자우편		비고			
								역할	기관유형		
공동연구개발기관	부산대학교	안재훈	교수	010-9978-5449		jahn@pusan.ac.kr				대학	
	(주)본이앤씨	이주공	대표이사	010-3227-8541		jowhb@daum.net				비영리기관	
위탁연구개발기관											
연구개발기관 외 기관											
연구개발담당자 실무담당자	성명		유재은		직위		박사과정				
	연락처	직장전화	010-6776-3865		휴대전화		010-6776-3865				
		전자우편	jaeeunyou@chungbuk.ac.kr		국가연구자번호		1181 1519				

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2021 년 3 월 18 일

연구책임자 :

정 종 원

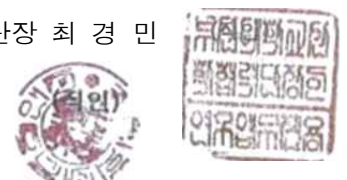


주관연구개발기관의 장 : 충북대학교 산학협력단장 이 영 성



공동연구개발기관의 장 : 부산대학교 산학협력단장 최 경 민

공동연구개발기관의 장 : (주)본이앤씨 이 주 공



국토교통과학기술진흥원장 귀하

< 요약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성

사업명		국토교통기술촉진연구사업		연구개발과제번호		21CTAP-C152100-03	
내역사업명		국토교통기술혁신연구					
국가과학기술표준분류		EI1105	70%	EI1101	20%	EI1102	10%
연구주제		(대분류) 건설 교통		(중분류) 시설물 안전 유지관리 기술		(소분류) 자연재해 저감기술	
연구개발과제명		인공지능을 활용한 지반-구조물 상호작용 기반 노후구조물 내진성능평가 기법 개발					
전체 연구개발기간		2019. 04. 19 - 2021. 12. 31(33개월)					
총 연구개발비		총 799,001 천원 (정부지원연구개발비 : 599,000천원, 기관부담연구개발비 : 200,001천원, 지방자치단체 : 천원, 그 외 지원금 : 천원)					
연구개발단계		기초[] 응용[] 개발[✓] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]		기술성숙도		착수시점 기준(2) 종료시점 목표(6)	
연구개발과제 유형		지정공모 [] 자유공모 [✓]					
연구개발과제 특성		사회이슈 해결					
연구 개발 목표 및 내용	최종 목표		인공지능을 활용한 지반-구조물 상호작용 기반 노후구조물 내진성능평가 기법 개발 ○ 노후도평가를 위한 지반 & 구조물 모니터링 기술 개발 ○ 인공지능 기반 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석 기술 개발 ○ 지반-구조물 상호작용을 고려한 내진성능 분석 기술 개발 ○ 인공지능 기반 인공지능 기반 지진지반응답 예측모형 개발				
	전체 내용		○ 노후도평가를 위한 지반 & 구조물 모니터링 기술 개발 - 영상기반 구조물 & 지반 변위 측정 기술 개발 ○ 인공지능 기반 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석 기술 개발 - 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석을 위한 수치해석 모델 개발 - 인공지능기반 구조물 동적 특성 자동 추출 기술 개발 - 지반-구조물 상호작용을 고려한 모델업데이팅 기술 개발 - 진동대 실험 검증 및 현장 수집 데이터 적용 ○ 지반-구조물 상호작용을 고려한 내진성능 분석 기술 개발 - 지반-구조물 상호작용을 고려한 시스템 식별 기술 개발 - 대형 진동대 모형 실험 검증 ○ 인공지능 기반 지진지반응답 예측모형 개발 - 인공신경망 모형에 기반한 지진 지반응답 예측모형 기술 개발				
	1년차	목표	○ 노후도 평가를 위한 지반 & 구조물 모니터링 기술 개발 ○ 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석을 위한 수치해석 모델 개발 ○ 내진성능 평가 기법 자료 수집				
		내용	○ 노후도 평가를 위한 지반 & 구조물 모니터링 기술 개발 - Optical Flow기반 추적기술을 응용하여 구조물 변위 측정기술 개발 - 장기측정 또는 드론을 사용 시 생기는 카메라 움직임을 보정하여 정확도 향상 ○ 인공지능 기반 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석 기술 개발 - 지반-구조물 상호작용 기반 노후도 분석을 위한 수치해석 모델 개발 ○ 내진성능 평가 기법 자료 수집 - 국내외 노후화 및 내진성능 평가 방법 및 사례 조사 및 분석 - 현장 측정 데이터 수집 및 분석 (실험 자료 일부 사전 수집 완료)				
	2년차	목표	○ 인공지능 기반 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석 기술 개발 ○ 지반응답해석을 위한 현장 자료 수집 ○ 인공지능 기반 지진지반응답 예측모형 개발				
		내용	○ 인공지능 기반 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석 기술 개발 - 인공지능기반 구조물 동적 특성 자동 추출 기술 개발 - 지반-구조물 상호작용을 고려한 모델업데이팅 기술 개발 - 소형 진동대 실험을 통한 기술 검증 ○ 지반응답해석을 위한 현장 자료 수집 - 지반응답해석과 인공신경망 기반 예측모형 학습에 필요한 현장 자료 수집				

			○ 인공지능 기반 지진지반응답 예측모형 개발 - 다층퍼셉트론(MLP)에 기반한 지진 지반응답 예측모형 개발 - 기존 해석프로그램의 물리적 지반응답해석 결과와의 비교를 통한 정확도 검증									
	3년차	목표	○ 인공지능 기반 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석 기술 고도화 ○ 지반-구조물 상호작용을 고려한 내진성능 분석 기술 개발 ○ 인공지능 기반 지진응답 예측 모형 개발									
		내용	○ 인공지능 기반 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석 기술 고도화 - 인공지능 기반 구조물 동적 특성 자동 추출 기술 고도화 - 현장 실험 데이터(대만의 광저우 TV타워)를 활용한 노후도 평가 기술 검증 ○ 지반-구조물 상호작용을 고려한 내진성능 분석 기술 개발 - 지반-구조물 상호작용을 고려한 시스템 식별 기술 개발 - 대형 진동대 모형 실험을 통한 기술 검증 - 노후도 및 내진성능 평가 기법의 소프트웨어의 제품화 및 사용 매뉴얼 작성 ○ 인공지능 기반 지진응답 예측 모형 개발 - 합성곱 신경망(CNN)에 기반한 지진 지반응답 예측모형 개발 - 기존 해석프로그램의 물리적 지반응답해석 결과와의 비교를 통한 정확도 검증									
연구개발성과			○기술적 기대성과 - 지반공학, 구조공학, 대형 모형실험, 수치모델링 해석, 지진방재라는 성격이 다른 학문분야를 융합하는 연구방법의 좋은 사례가 될 것으로 기대됨. 선진국과 비교해 다소 격차가 있는 국내의 진동대 모형실험 기법을 한단계 발전 심화시키는 계기가 될 것으로 기대되며 이를 통해 진동대 모형실험 기법에 대해 지진공학 선진국과 학술적, 기술적 교류와 연구 협약을 기대할 수 있고, 연구기술 수출이 기대됨. ○사회 경제적 파급효과 - 경제적·산업적 측면 : 구조물의 노후화 및 내진성능 평가를 통하여 기존 구조물의 내진 보강에 대한 수요는 전세계적으로 막대하며, 해외 건설시장에서 몇몇 선진국들만 점유하고 있는 내진설계 및 시공 시장으로 진출이 가능하고 기술이전을 통해 새로운 부가가치의 창출을 기대함. 연구기술 분야에서도 대형 특수형태의 토조(Lamjnar Shear Box)의 개발 및 생산과 같은 연구 인프라의 수출도 기대됨. - 사회적 측면 : 이상기후 발생 등으로 인하여 지진 발생의 위험성이 증대되고 있으며 이를 극복하기 위한 대책이 요구되고 있음. 구조물 노후화를 판단하여 정확한 내진성능의 안전성 평가는 도시의 지속적인 성장을 위해 필수적이며, 대부분의 선진국에서 제시하고 있는 국가발전을 위한 패러다임과도 일치함. 구조물의 노후화 및 내진성능 평가 기법의 개발을 통해 지진 등에 대한 인명 및 재산피해를 예측 및 경감할 수 있을 것으로 예상됨. 지진으로 인한 구조물의 손상을 예상하여 사전에 위험성을 파악하고, 전체 시스템의 안전성을 평가하여 사회 기반시스템의 재난 후 복구 능력을 향상시킬 수 있음.									
연구개발성과 활용방안 및 기대효과			○ 실무 현장에서의 적용 - 대만의 광저우 TV타워에 적용 시험을 함으로써, 현장 적용 가능성을 검증하였음. 향후, 다른 구조물에도 본 연구의 결과 적용이 기대되며, 실무 및 기타 현장에 적용 가능한 내진 건축 지침서 마련 및 제안 시 본 연구개발 성과를 참고자료로 활용이 가능할 것으로 기대됨 ○ 실용화 및 제품화 - 공동연구기관인 (주)본이앤씨는 구조물 노후화 및 내진성능 평가 기술의 실용화/제품화를 위한 연구의 수행을 계획하며, 사물인터넷(IoT)을 활용한 실시간 데이터 수집 및 활용이 기대됨. ○ 미래원천기술 확보 - 진동대를 사용한 대형 모형실험기법은 선진국과 비교해 다소 격차가 있으나, 본 연구개발의 통해 국내의 모형제작 기술, 지진파선택기법, 시스템 특성 확인방법, 진동대 실험 수행 프로그램, 그리고 계측 및 데이터 후처리 기술을 한 단계 발전 심화시키는 계기가 될 것이며, 데이터베이스 구축 및 관련 연구 분야에서 활용이 가능할 것으로 기대됨 ○ 신산업 창출 - 진동대 모형실험 기법에 대해 지진공학 선진국과 학술적, 기술적 교류와 연구 협약을 기대할 수 있고, 연구기술 수출 및 노후구조물의 내진설계 검토 및 내진보강 산업의 확대가 가능할 것으로 기대됨.									
연구개발성과의 비공개여부 및 사유			해당없음									
연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술 요약 정보	소프트웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
	17	4				2						

연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관	연구시설· 장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장 소)	ZEUS 등록번호
국문핵심어 (5개 이내)	내진성능평가		노후도평가		모니터링		인공지능		지반-구조물 상호작용
영문핵심어 (5개 이내)	Seismic Performance Evaluation		Structural Deterioration Assessment		Structural Health Monitoring		Artificial Intelligence		Soil-Structure Interaction

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	01
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	05
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	06
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)	18
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	19
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	20
7. 참고 문헌	21

별첨자료(성과 증빙자료 등)

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

인공지능을 활용한 지반-구조물 상호작용 기반 노후구조물 내진성능평가 기법 개발

- 노후도평가를 위한 지반 & 구조물 모니터링 기술 개발
 - 영상기반 구조물 & 지반 변위 측정 기술 개발
- 인공지능 기반 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석 기술 개발
 - 지반-구조물 상호작용을 기반 노후도 분석을 위한 수치해석 모델 개발
 - 인공지능기반 구조물 동적 특성 자동 추출 기술 개발
 - 지반-구조물 상호작용을 고려한 모델업데이팅 기술 개발
 - 진동대 실험 검증 및 현장 수집 데이터 적용
- 지반-구조물 상호작용을 고려한 내진성능 분석 기술 개발
 - 지반-구조물 상호작용을 고려한 시스템 식별 기술 개발
 - 대형 진동대 모형 실험 검증
- 인공지능 기반 지진지반응답 예측모형 개발
 - 현장데이터를 활용하여 인공지능 기반 지진지반응답 예측모형 기술 개발

가. 연구 개발의 최종 목표 및 최종성과물

구분	내용 및 설정근거
최종 목표	인공지능을 활용한 지반-구조물 상호작용 기반 노후구조물 내진성능평가 기법 개발
세부 목표	노후도평가를 위한 지반 & 구조물 모니터링 기술 개발 지반-구조물 상호작용 기반 노후도 평가 기법 개발 인공지능을 활용한 내진 성능 평가 기법 개발 인공지능 기반 지진지반응답 예측모형 개발

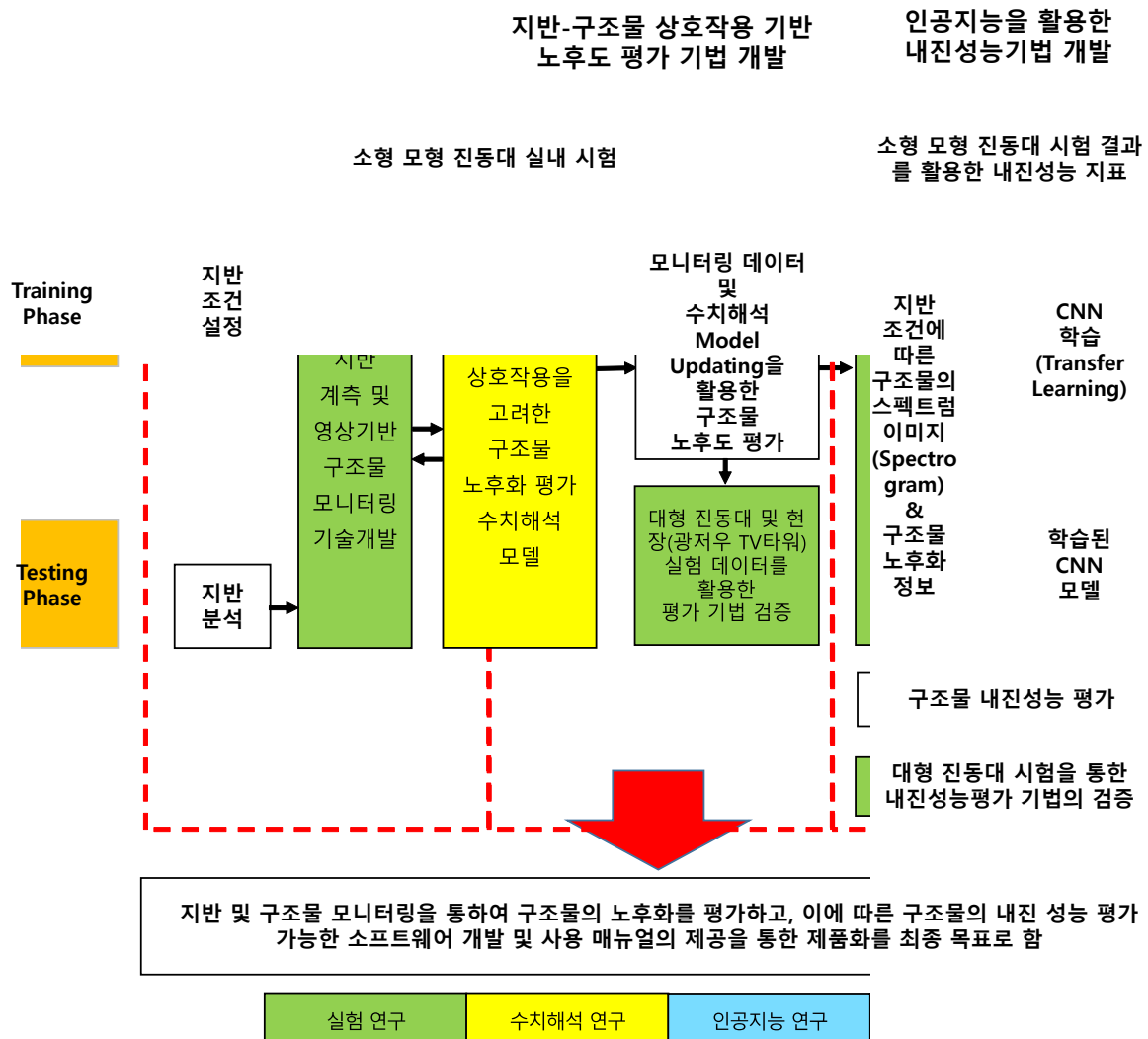
나. 최종성과물의 기술성숙도 설정근거

해당 연구 과제의 최종 목표는 인공지능을 활용한 저층건물 또는 교량의 지반-구조물 상호작용 기반 노후 구조물 내진성능평가 기법 개발이고, 이를 위한 세부 목표는 지반-구조물 상호작용 기반의 구조물 노후도 및 인공지능을 활용한 내진 성능 평가 기법 개발임. 본 연구 과제에서 개발된 기술을 활용하여 현장 구조물 인 대만지역의 광저우 TV타워의 노후도 평가를 수행함. 이는 유사환경 기술시험 단계인 TRL 6에 해당함.

구분	연구착수	연구종료	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1	☐	이론적 연구단계
	TRL 2	☒	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☐	실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☒	유사환경 기술시험 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	현장적용/사업화 단계

최종성과물	기술성숙도(TRL)		설정근거
	연구시작시	연구종료시	
노후 구조물 내진성능 평가 기술	TRL 2	TRL 6	-(연구시작시): 구조물 모니터링 및 딥러닝을 활용한 균열 및 부식 검출 기술은 현재 많은 연구가 이루어지고 있으나, 인공지능을 기반으로 하며 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후화 및 내진 성능 평가기술은 아직 기초연구 단계임. 따라서 TRL 1 또는 2에 해당함. -(연구종료시): 본 연구의 최종 성과물인 노후 구조물의 내진성능 평가 기술을 활용하여 대만지역 광저우 TV타워의 노후화 평가를 수행을 계획함. 따라서, 유사환경 기술시범 단계인 TRL 6에 해당함.

다. 연차별 연구 개발 목표 및 내용



2) 연구개발과제의 연차별 목표

1차년도

○ 노후도 평가를 위한 지반 & 구조물 모니터링 기술 개발

- Optical Flow기반 추적기술을 응용하여 구조물 변위 측정기술 개발
- 장기측정 또는 드론을 사용 시 생기는 카메라 움직임을 보정하여 정확도 향상

○ 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석을 위한 수치해석 모델 개발

- 지반-구조물 동적상호작용 해석적 해와 수치모형을 비교·분석하고, 최적 모형 후보군 도출
- 강진 시 지반의 비선형성을 고려하기 위한 모형을 분석하여, 비선형 거동 고려 방안 결정
- 국내 장주기, 단주기 지진파의 특성과 지반조건을 고려한, 노후 구조물 거동의 해석에 적합한 지반-구조물 상호작용 모형 제시

○ 내진성능 평가 기법 자료 수집

- 국내외 노후화 및 내진성능 평가 방법 및 사례 조사 및 분석
- 현장 측정 데이터 수집 및 분석

2차년도

○ 인공지능 기반 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석 기술 개발

- LSTM을 활용하여 고유진동수, 모드형상 등의 구조물의 동적 특성 자동 추출 기술 개발
- 기존의 지반-구조물 동적상호작용 수치모형을 노후화가 진행된 모형으로 업데이트 및 업데이트된 수치모형을 기반으로 구조물 노후도 평가기술 개발
- 실내 진동대 실험을 통해 노후 부재의 위치와 강성 예측 정확도 도출
- 대형 진동대 실험을 위한 기초 모형 제작

○ 지반응답해석을 위한 현장 자료 수집

- 지반응답해석과 인공지능망 모형학습을 위하여 지진파 데이터베이스에서 제공하는 지면 하부 계층 지진파와 지표면 계층 지진파를 수집
- Siesmosoft사의 프로그램 Seismosignal 2016을 통해 지진파 데이터를 보정 및 구조화
- 파이썬 프로그래밍을 통해 지진파 데이터를 보정 및 구조화

○ 인공지능 기반 지진지반응답 예측모형 개발

- 다층퍼셉트론(MLP)을 활용하여 지진 지반응답 예측모형 학습 기술 개발
- 개발된 기술로 학습된 다층퍼셉트론 기반 지반응답 예측모형을 통한 예측결과와 기존 프로그램을 통한 물리적 지반 응답해석 모형을 통한 예측결과를 비교

3차년도

○ 인공지능 기반 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석 기술 고도화

- 딥러닝 네트워크의 하이퍼 파라미터 최적화
- 지반-구조물 동적 상호작용을 고려한 노후도 평가 기술 적용
- 광주 TV타워 현장 데이터에 개발한 기술 적용

○ 지반-구조물 상호작용을 고려한 내진성능 분석 기술 개발

- 지반-구조물 동적 상호작용을 고려한 내진성능 평가 기술 개발
- 딥러닝 기반 시스템 식별기술을 적용
- 대형 진동대 실험을 통해 구조물의 지진응답의 예측 정확도 비교

○ 인공지능 기반 지진지반응답 예측모형 개발

- 합성곱 신경망(CNN)을 활용하여 지진지반응답 예측모형 학습 기술 개발
- 기존 해석프로그램의 물리적 지반응답해석 결과와의 비교를 통한 정확도 검증

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내·외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2019)	노후도 평가를 위한 지반 & 구조물 모니터 링 기술	지반 모니터링 기술 (1-1)	오차 1픽셀 내외	오차 0.5픽셀 내 외	기존 기술보다 정 확도 향상 기대	15
		구조물 모니터링 기술 (1-2)	오차 1픽셀 내외	오차 0.5픽셀 내 외	기존 기술보다 정 확도 향상 기대	
	인공지능 기반 지반- 구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석 기술	지반-구조물 동적상호작 용을 고려한 노후도 분 석을 위한 수치해석 모 델 (2-1)	지반-구조물 상호 작용 노후도 분석 을 위한 수치해석 모델	-노후도 분석을 위한 수치해석 모델의 정확도 : 90% - 지진 응답 해석 수치모형의 해석 치와 예측치가 90% 이상 일치 하는 모델링 개 발	노후도 분석을 위 한 수치해석 을 통 한 예측을 개선 기 대	0
2년차 (2020)	인공지능 기반 지반- 구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석 기술 개발	지반-구조물 상호작용 기반 노후도 분석 기술 개발 (2-2)	노후 부재의 위치 와 강성저하 예측 85%	노후 부재의 위 치와 강성저하 예측 90% 이상	기존 기술보다 정 확도 향상 기대	14
		인공지능 기반 지진지반 응답 예측모형개발 (2-3)	지반응답 예측을 위해 물리적 해석 프로그램을 사용하 나 물성 산정 및 calibration이 어려 움	기존 프로그램 대비 예측 정확 도가 10% 개선 된 인공지능 기 반 지반응답 예 측모형 개발	인공신경망 모형이 지진파 데이터 특 성을 효과적으로 학습하여 예측이 가능한지 확인할 수 있는 개선도	13.5
		지반응답해석을 위한 현 장 자료 수집 (2-4)	지표면 지진파 예 측이 물리적 지반 응답해석에 국한됨	인공신경망 지반 응답 예측모형 학습을 위한 지 진파 현장데이터 100개 수집	인공신경망이 충분 히 지진파 데이터 의 특성을 학습할 수 있는 지진파 데 이터의 수	0
3년차 (2021)	내진성능 평가기법 요약서	내진성능 평가 검증을 위한 실험 계획 요약서 (3-1)	지반-구조물 상호 작용을 고려한 내 진 성능 평가를 위 한 대형 진동대 실험 없음	요약서 1건	성공적인 검증실험 을 위한 상세한 계 획	0
	구조물 노후도 평가 기술 고도화 및 현장 데이터 적용	- 지반-구조물 동적 상 호작용을 고려한 노후도 평가 기술의 고도화 - 광저우 TV타워 현장 데이터에 개발된 기술적 용 (2-2)	동적 특성 예측 정 확도 80% 수준	MAC value 0.9 이상 현장 데이터	노후도 평가가 가 능할 정도의 정확 도	15
	내진성능 평가 기술 개발 및 대형 진동대 실험 수행	지반-구조물 상호작용을 고려한 내진성능 분석 기술 개발 대형 진동대 실험 및 현장 데이터 검증 수행 (3-2)	구조물 응답 예측 의 정확도 80% 수 준	기존 기술 대비 10% 이상 향상	시간이력 해석과 실제 거동의 유사 성	29
	지진응답 예측 모형 개발	인공신경망에 기반한 지 진 지반응답 예측모형 개발(3-3)	지표면 지진파 예 측이 물리적 지반 응답해석에 국한되 어 물성 산정 및 calibration이 어려 움	기존 프로그램 대비 예측 정확 도가 20% 개선 된 인공지능 기 반 지반응답 예 측모형 개발	인공신경망 모형의 지진파 데이터 특 성 학습을 더욱 효 과적으로 학습하여 예측이 가능한지 확인할 수 있는 개 선도	13.5

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

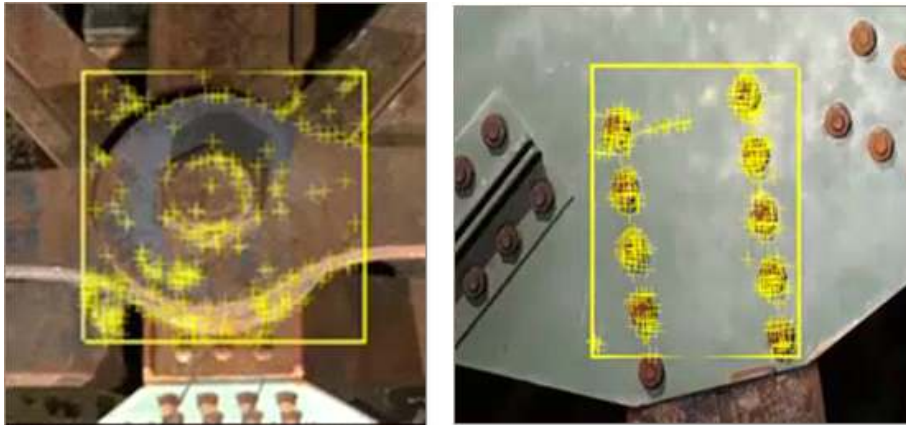
○ 노후도평가를 위한 지반 & 구조물 모니터링 기술

- 영상기반 구조물 & 지반 변위 측정 기술 개발을 수행함
- 상세 수행 과정 및 내용은 [별첨 1]에 첨부하였음

- 본 기술은 (1) 카메라 보정, (2) 특징점 추출, (3) Optical Flow, (4) 변위 측정의 4단계로 이루어짐

(1) 카메라 보정 단계에서는 디지털 카메라의 방사형 왜곡 보정과 카메라의 위치에 따른 Extrinsic Matrix를 구하기 위하여 체커보드를 사용하여 보정함

(2) 특징점 추출 단계에서는 Harris Corner Detector를 사용하여 구조물의 특징점을 자동으로 추출함으로써 별도의 타겟 설치 없이 추적이 가능토록 함

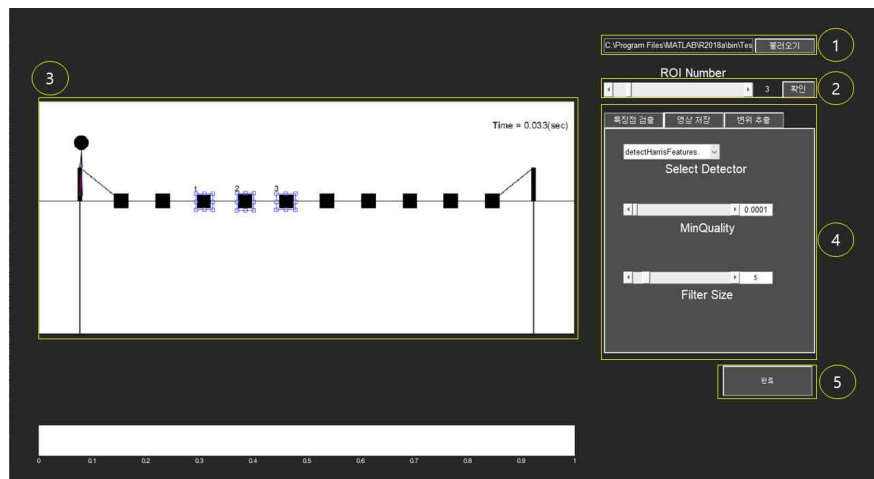


구조물에서의 특징점 추출 예시

(3) Optical Flow 기반의 Tracker를 사용하여 Template Matching 알고리즘에 비하여 더 빠르고 정확한 추적이 가능토록 함

(4) 카메라 움직임에 의한 오차 보정을 통해 변위 측정의 정확도를 높임

- 본 연구에서 개발한 변위측정 기술을 소프트웨어로 개발하여 GUI를 통해 사용자 편의성을 확장 시켰음



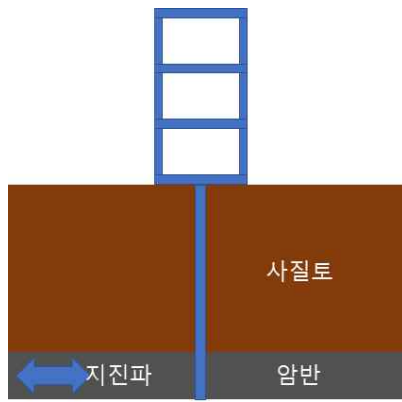
개발한 변위측정 소프트웨어의 스크린샷

○ 인공지능 기반 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석 기술 개발

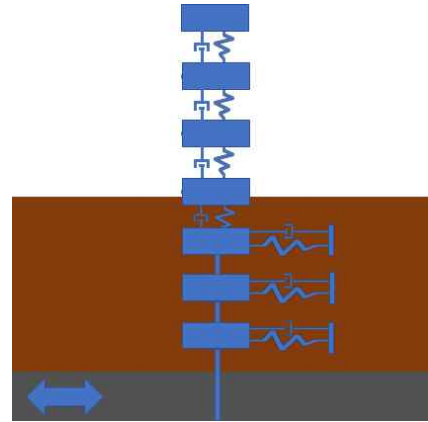
- 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석을 위한 수치해석 모델 개발을 수행함

- 상세 수행 과정 및 내용은 [별첨 2]에 첨부하였음

- 기존의 지반-구조물 상호작용 모델은 대부분 구조물을 단자유도로 설정하여 단순화시켰으나, 본 연구에서는 다자유도의 구조물을 고려한 지반-구조물 상호작용 모델을 노후도 분석에 활용할 수 있도록 MATLAB 기반의 코드로 개발함.

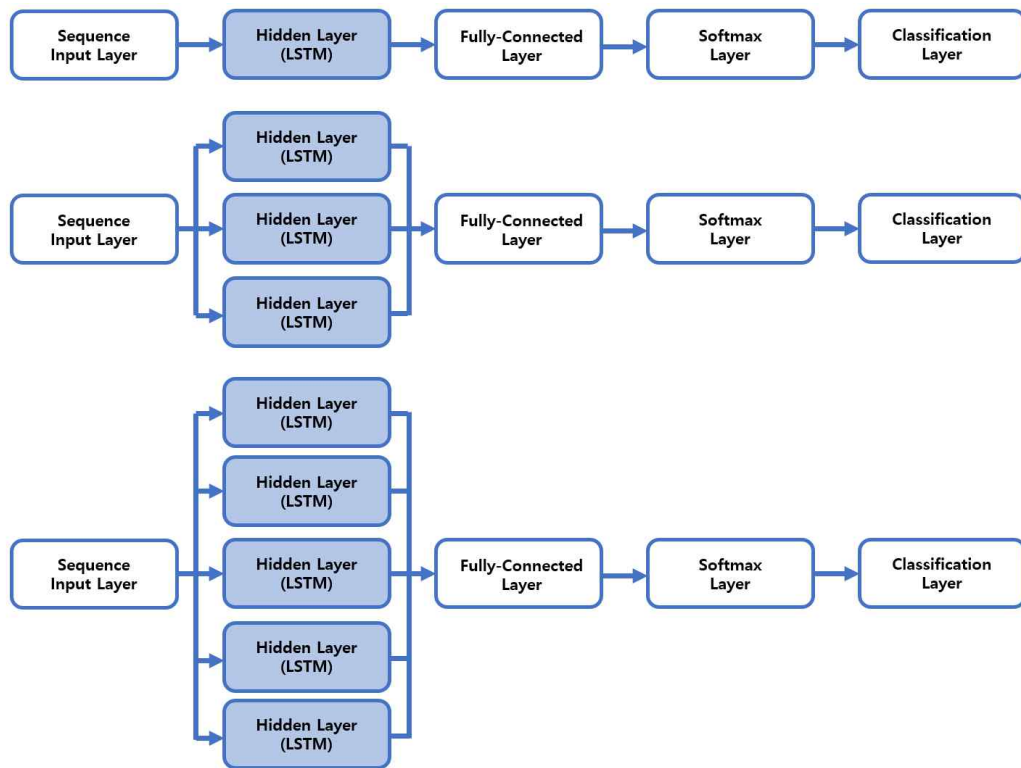


단말뚝기초를 갖는 3층 건물



Lumped Mass Model

- 인공지능기반 구조물 동적 특성 자동 추출 기술, 노후도 분석 기술 개발 및 진동대 실험 검증을 수행함.
- 상세 수행 과정 및 내용은 [별첨 3]에 첨부하였음
- 2차년도 중간평가의 조치계획으로 제시한 CNN 기반 인공지능 관련 연구를 참고하여, 기존 CNN 기반 동적 특성 추출 기술보다 다양한 환경에서도 활용 될 수 있는 LSTM기반의 동적 특성 추출 기술을 개발 하였음
- AI 모델 개발을 위한 데이터의 양적 질적 제고를 위하여 데이터에 양을 늘려가며 검증실험을 수행함
- 다양한 네트워크 구성을 통해 검증하여 최적의 네트워크 형태 고안함



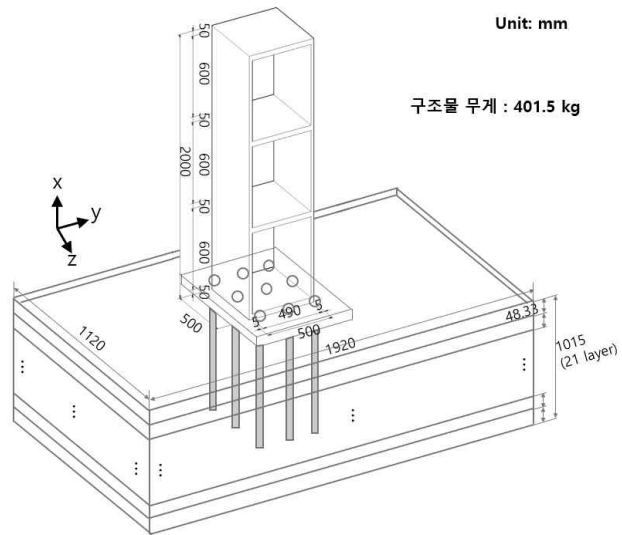
- 최종적으로 약 42,000개의 주파수응답함수를 학습데이터로 사용하였으며, 교차검증 수행을 통해 과적합을 최소화 하였음

○ 내진성능 평가기법 자료

- 기존 내진성능 평가기법 자료를 수집하고 요약서를 작성을 수행함
- 상세 수행 과정 및 내용은 [별첨 4]에 첨부하였음

○ 지반-구조물 상호작용을 고려한 내진성능 분석 기술 개발

- 지반-구조물 상호작용을 고려한 시스템 식별 기술 개발 및 대형 진동대 모형 실험 검증을 수행함
- 상세 수행 과정 및 내용은 [별첨 5]에 첨부하였음
- 기존 내진성능 분석 연구에는 지반-구조물 상호작용을 고려하지 못하였으나, 본 연구에서는 지반-구조물 상호작용을 고려한 시스템 식별기술로 지진 시 구조물의 응답을 예측하였음
- 부산대 양산지진센터의 대형진동대를 활용하여 제작된 구조물에 백색소음 가진을 하였고, 이를 통하여 구조물의 노후도를 반영한 시스템 행렬을 취득하였음
- 시스템 식별 기술을 통해 예측한 시스템 행렬을 사용하여 구조물에 지진이 가해졌을 때의 응답을 예측하였고, 이를 상용소프트웨어인 ABAQUS의 결과, 그리고 대형진동대 실험 결과와 함께 비교하였음



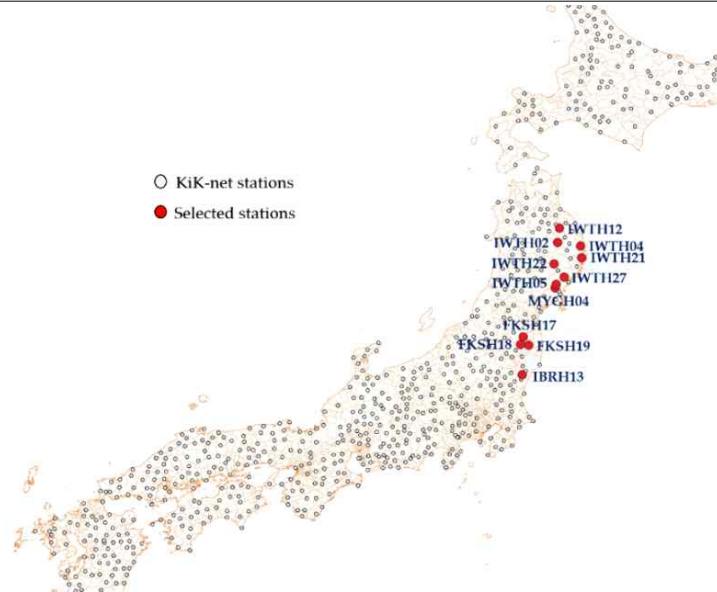
- 대형 진동대에서 실험한 구조물의 형상은 위 그림과 같으며, 실험체는 3개의 케이스 (무손상, 1층만 손상, 1,2층 손상)으로 구분하여 실험을 진행하였음
- 시스템 식별 기술은 노후도 분석 기술에서 개발한 인공지능기반 Automatic Peak Picking 기법을 적용하였음

○ 평가기법 검증 시나리오 작성

- 노후도 분석 기술 및 내진성능 분석 기술 검증을 위한 시나리오 작성을 수행함
- 상세 수행 과정 및 내용은 [별첨 6]에 첨부하였음

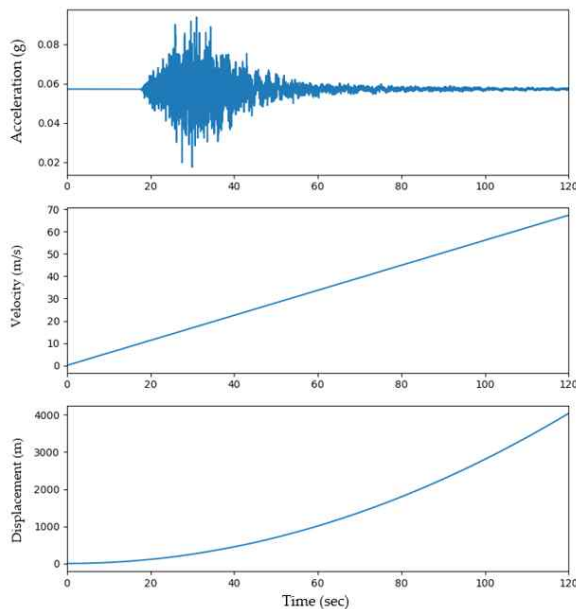
○ 지진 지반응답해석을 위한 현장자료 수집

- 지진파 데이터베이스 KiK-net을 통하여 지면 하부와 지표면 계측 현장자료 수집을 수행함
- 상세 수행 과정 및 내용은 [별첨 7]에 첨부하였음
- 현장 지진파 데이터를 인공지능망 기반 지반응답 예측모델에 학습시키기 위하여, 지진파 데이터베이스를 통해 현장자료를 수집하고, 이를 보정하여 데이터를 확보하였음. 일본의 지진파 데이터베이스인 KiK-net을 통해 지표면 계측 지진파와 기반암 계측 지진파를 데이터셋으로 수집하였음. 그 결과, 12지역에 대해 지역별 100세트의 지진파 데이터셋을 수집하여, 총 1200세트의 현장 지진파 데이터셋을 확보하였음. 아래 그림은 지진파 데이터 수집 관측소 코드를 나타냄.

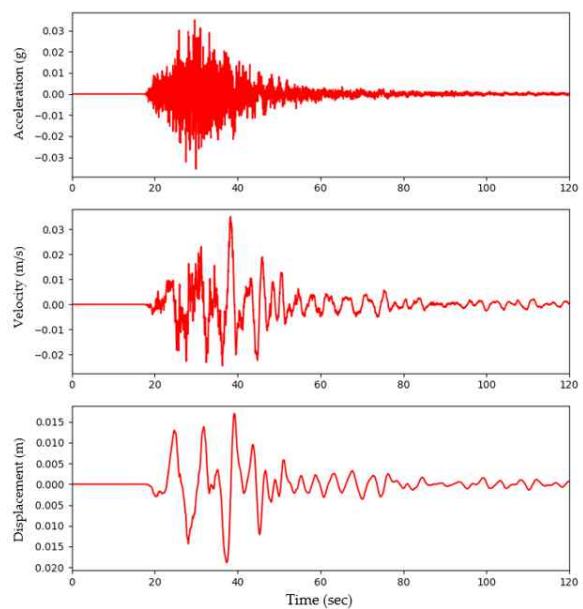


<지진파 데이터 수집 관측소>

- 수집한 데이터셋을 인공지능망 기반 지반응답 예측모델에 학습시키기 위하여, Seismo signal 2016 프로그램과 파이썬 프로그램을 사용하여 보정하였음. 각 프로그램을 활용하여 Baseline Correction과 Bandpass Filtering을 진행하여, 인공지능망 모델에 학습가능한 지진파 데이터를 확보하였음. 아래 그림은 보정 여부에 따른 지진파 데이터 예시를 나타냄



(a) 원데이터



(b) 보정데이터

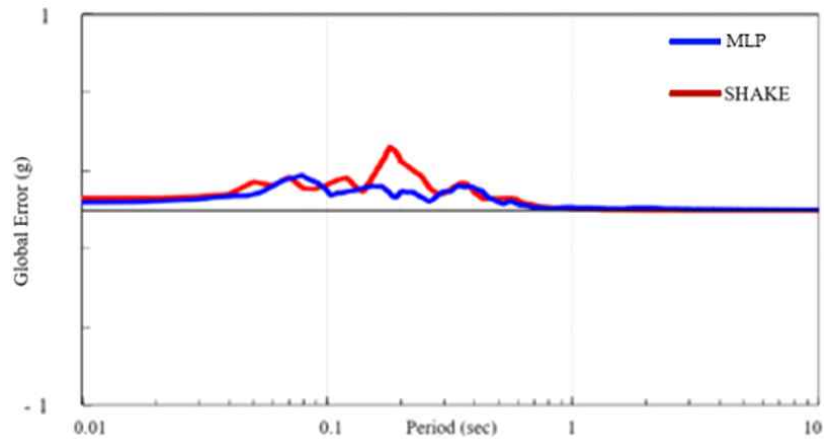
<보정 여부에 따른 지진파 데이터 예시>

○ 인공지능 기반 지진지반응답 예측모델 개발

- 지진지반응답해석을 위한 현장자료 수집 및 인공지능을 활용한 인공지능 기반 지진지반응답 예측모델 개발을 수행함.
- 상세 수행 과정 및 내용은 [별첨 8]에 첨부하였음.
- KiK-net 데이터베이스를 통해 수집 및 보정한 지진파 데이터를 구성한 인공지능망 기반 지반응답 예측모델에 학습하여 지반응답 예측모델을 개발하여, 기존 물리적 지반응답해석 대비 예측 성능을 개선하였음. 다층퍼셉트론(Multilayer Perceptron, MLP)을 기반으로 하는 지반응답 예측모델과 합성곱 신경망(Convolutional Neural Networks, CNN)을 기반으로 하는 예측모델을 구성하여, 각각 지진파를 학습하여 예측모델을 생성하였고, 생성된 모형의 지표면 지진파 예측결과를 기존 물리적 지반응답해석에 의한 지

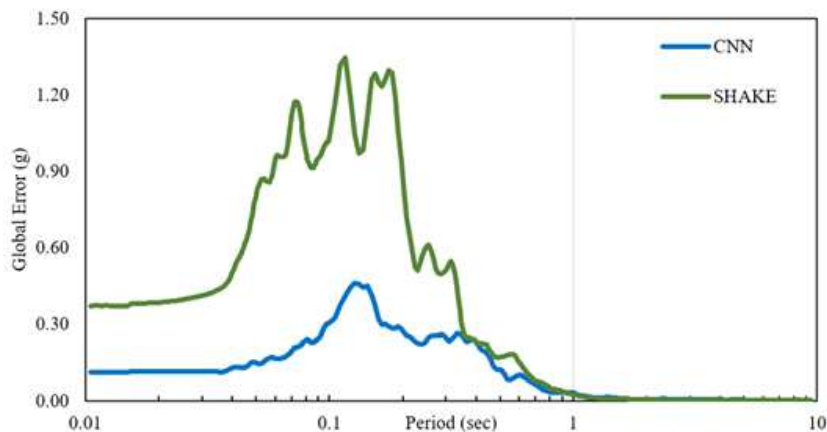
진파 예측결과와 비교하였음.

- 다층퍼셉트론 기반 지반응답 예측모델의 경우, 기반암의 지진파 가속도, 속도, 변위 시간이력을 입력데이터로, 지표면의 지진파 가속도 시간이력을 출력데이터로 학습하여 지역별 지반응답 예측모형을 생성하였음. 생성된 지역별 예측모형을 통해 지표면 지진파를 예측하고, 실제 계측 지진파와의 전체 평균오차를 산정하여 지반응답해석 결과와 비교하였음. 그 결과, 다층퍼셉트론 기반 지반응답 예측모형의 예측결과가 물리적 지반응답해석의 예측결과 대비 약 10% 이상 낮은 오차를 보임.



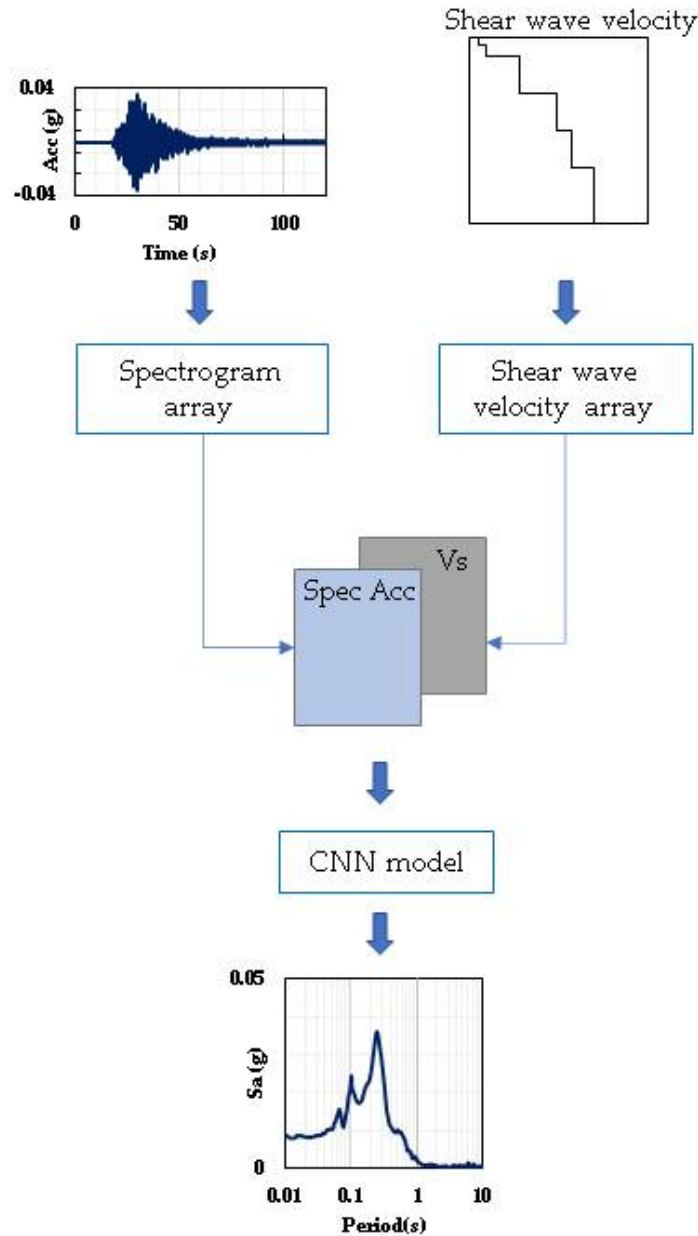
<다층퍼셉트론 기반 예측모형 전체 평균오차 비교>

- 합성곱신경망 기반 지반응답 예측모델의 경우, 기반암의 지진파 가속도, 속도, 변위 응답 스펙트럼을 입력데이터로, 지표면의 지진파 가속도 응답스펙트럼을 출력데이터로 학습하여 지역별 지반응답 예측모형을 생성하였음. 생성된 지역별 예측모형을 통해 지표면 지진파를 예측하고, 실제 계측 지진파와의 전체 평균오차를 산정하여 지반응답해석 결과와 비교하였음. 그 결과, 합성곱신경망 기반 지반응답 예측모형의 예측결과가 물리적 지반응답해석의 예측결과 대비 약 50% 낮은 오차를 보임.



<합성곱신경망 기반 예측모형 전체 평균오차 비교>

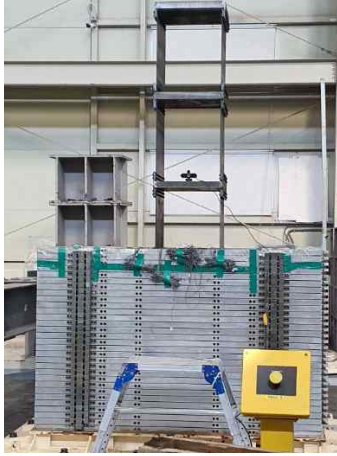
- 본 연구를 통해 제안된 인공지능망 기반 지반응답 예측모형은 기반암 지진파 데이터를 학습하여, 지표면 지진파를 예측하고, 물리적 해석 대비 높은 정확도를 보임. 해당 분야의 후속 연구에서 아래 그림과 같이 전단파속도 등의 지반 물성을 반영하는 데이터를 입력치에 포함시켜, 제안 딥러닝 모델의 적용성을 증대하는 것을 제안함. 본 모델의 국내 적용을 위해서는 앞서 언급한 바대로 국내 지질 조건을 고려한, 그리고 공학적 활용을 반영한, 지진 계측 및 데이터베이스의 구축과 활용이 중요함.



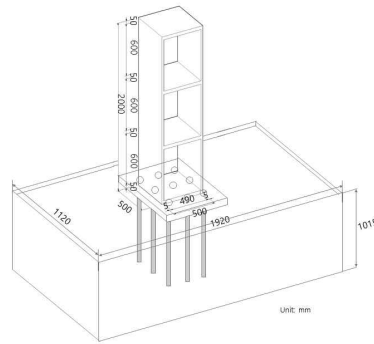
<인공지능(AI) 지반예측 모델의 적용성 증대 방안>

○ 지반-구조물 상호작용 기반 노후 구조물이 말뚝 거동에 끼치는 영향 분석

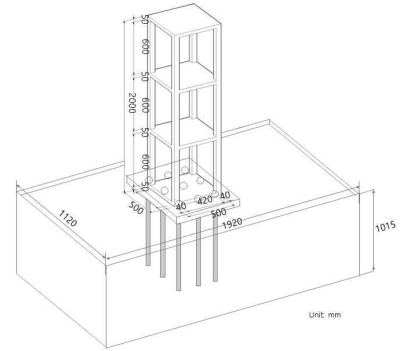
- 대형 진동대 실험을 통해 노후 구조물이 말뚝 거동에 끼치는 영향의 분석을 수행함.
- 상세 수행 과정 및 내용은 [별첨 9]에 첨부하였음.
- 실제 벽체 및 기둥 형태의 다자유도(MDOF, Multi Degree of Freedom) 구조물에 대해 상부 구조물의 존재 유무, 구조물의 종류 및 구조물의 손상범위에 따른 말뚝기초의 거동을 파악하여 합리적인 지반-구조물 상호작용 모델을 구축하였음.
- 사질토 지반에 동적하중(정현파 및 포항 지진파)을 적용한 대형 진동대 실험장치를 이용하였으며 벽체, 기둥 구조물 및 모형말뚝에 가속도계, 변형률계 및 LVDT를 적용하여 데이터를 수집하였음.



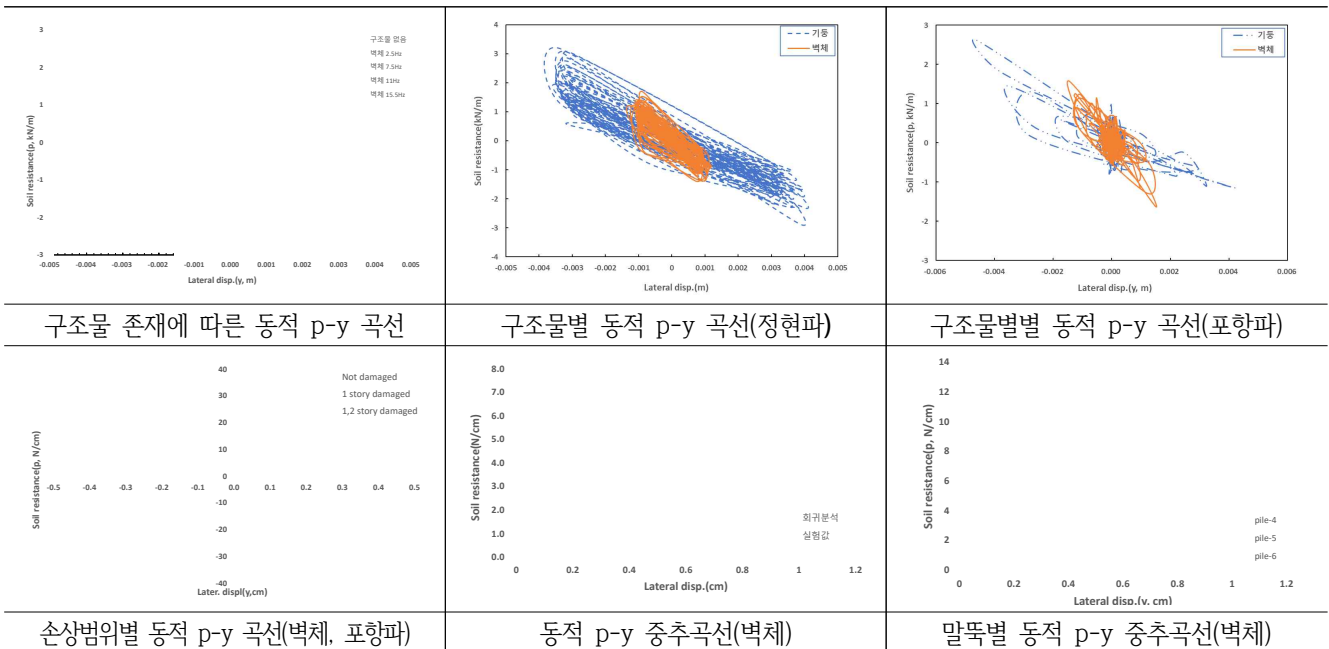
(a) 대형 진동대 실험장치



(b) 벽체 구조물



(c) 기둥 구조물



- 동일한 조건에서 상부 구조물을 벽체로 구성할 경우 말뚝기초의 관점에서 지진하중에 대해 상대적으로 안전성을 확보할 수 있으며, 상부 구조물의 손상은 말뚝기초의 거동에 영향을 미치는 것으로 판단됨.

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

- 노후도평가를 위한 지반 & 구조물 모니터링 기술 [별첨 1]
 - 영상기반 지반 & 구조물의 동적 변위 측정 기술 개발
 - 시뮬레이션 실험 및 현장 실험을 통해 개발된 기술 검증
 - 검증 결과 약 2mm(0.5픽셀)의 RMSE를 나타냄
 - 기존 연구 대비 별도의 타겟을 부착할 필요 없어 경제성을 향상시켰으며, 성능도 0.5픽셀 RMSE 이하로 향상시켰음

- 노후도 분석을 위한 수치해석 모델 개발 [별첨 2]
 - 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석을 위한 수치해석 모델 개발
 - 수치해석 모델의 정확도는 약 93.5%를 나타냄
 - 기존 연구 대비 구조물의 동적 특성을 자동으로 찾을 수 있으며 (경제성 확보), 지반-구조물 상호작용을 고려한 구조물 유한요소 모델 업데이트를 통해 구조물의 손상위치 검출의 정확도를 향상시켰음.

- 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석 기술 개발 [별첨 3]
 - 인공지능을 알고리즘인 LSTM을 활용한 구조물 동적 특성 자동 추출 기술 개발
 - 지반-구조물 상호작용을 고려한 유한요소모델 업데이트 기술 개발
 - 진동대 실험을 통한 개발 기술 검증결과 노후부재의 강성을 약 93%로 예측하여, 기존 기술 (83.5%) 대비 약 11.4% 향상
 - 현장데이터(광저우 TV타워)를 활용한 현장적용 가능성 검증
 - 기존 연구 대비 구조물의 동적 특성을 자동으로 찾을 수 있으며 (경제성 확보), 지반-구조물 상호작용을 고려한 구조물 유한요소 모델 업데이트를 통해 구조물의 손상위치 검출의 정확도를 향상시켰음.

- 내진성능 평가기법 자료 [별첨 4]
 - 기존 내진성능 평가기법 자료를 수집하고 요약서를 작성을 수행함

- 내진성능 분석 기술 개발 [별첨 5]
 - LSTM을 활용한 구조물 동적 특성 자동 추출 기술 적용
 - 지반-구조물 상호작용을 고려한 시스템식별 기술 개발
 - 대형 진동대 실험을 통한 개발 기술 검증결과 0.9 mm의 RMSE를 나타내어, 기존 상용소프트웨어 (ABAQUS)의 1.4mm RSME에 비해 약 오차율 35% 감소시킴
 - 지반-구조물 상호작용을 고려하여 기존 시스템보다 정확하게 구조물의 지진응답을 예측할 수 있음

- 평가기법 검증 시나리오 [별첨 6]
 - 대형 진동대 실험 기반 지반-구조물 상호작용을 고려한 구조물의 노후도 및 내진성능 분석 기술의 검증 시나리오 작성을 수행함

- 지진 지반응답해석을 위한 현장자료 수집 [별첨 7]
 - 지진파 데이터베이스 KiK-net을 통하여 지면 하부와 지표면 계측 지진파 데이터 수집
 - Seismosoft사의 Seismosignal 프로그램을 통한 지진파 보정
 - Python 프로그램을 통한 지진파 보정 및 구조화
 - 총 12지역에 대해 지역별 지진파 데이터세트 총 1200세트를 수집 및 구조화하여 (당초 현장 자료 100개 수집 목표 초과 달성)

○ 지진 지반응답 예측모형 개발 [별첨 8]

- 인공지능 알고리즘 MLP를 활용한 인공지능 기반 지진지반응답 예측모형 기술 개발
- 인공지능 알고리즘 CNN을 활용한 인공지능 기반 지진지반응답 예측모형 기술 개발
- 기존 물리적 해석 프로그램에 의한 지반응답해석 대비 예측 정확도 20% 초과 달성

○ 지반-구조물 상호작용 기반 노후 구조물이 말뚝 거동에 끼치는 영향 분석 [별첨 9]

- 대형 진동대 실험을 통해 노후 구조물이 말뚝 거동에 끼치는 영향의 분석을 수행
-

(2) 정량적 연구개발성과

○ 학술논문 성과

- 7편의 SCIE 논문과 10편의 한국연구재단등재 논문을 게재하여 총 17편의 연구성과물을 등록함
- 당초 연구 목표였던 SCIE 6편 및 한국연구재단등재 8편 논문 게재를 초과 달성함

○ 학술대회 성과

- 2건의 국제학술대회 발표와 19건의 국내학술대회 발표 등 총 21번의 국내외 학술대회에서 본 연구의 성과를 발표함

○ 지식재산권 성과

- 4건의 특허출원과 2건의 소프트웨어 등록으로 목표하였던 지식재산권 성과 모두 달성
-

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	영상기반 모션센싱을 이용한 실시간 동적 보행하중의 위치인식	한국방재학 회 논문집	임정혁, 윤형철	19권 6호	대한민국	한국방재학회	비SCI	2019년 12월	NO.19-164	100%
2	노후저수지 강도정수 및 수위 변화를 고려한 붕괴확률평가	한국방재학 회 논문집	이현우	19권 5호	대한민국	한국방재학회	비SCI	2019년 10월	1738-2424	100%
3	반복삼축압축시험 을 통한 40 mm 개립도 골재의 회복탄성계수와 영구변형	한국방재학 회 논문집	최용진	19권 6호	대한민국	한국방재학회	비SCI	2019년 12월	NO.19-176	100%
4	Automated Bridge Design Parameter Extraction for Scan-to-BIM	Applied Sciences	이재혁, 윤형철	10(20)	스위스	MDPI	SCIE	2020년 10월	2076-3417 Vol. 10 NO.20-7346	50%
5	지반-구조물 상호작용을 고려한 구조물의 유한요소모델 업데이팅 기법 개발	방재학회 논문집	박건, 윤형철	20권 6호	대한민국	한국방재학회	비 SCI	2020년 12월	NO.20-127	100%
6	3차원 수치해석을 통한 사질토 물성에 따른 무리말뚝 p-y 곡선과 p-multiplier 평가	한국방재학 회 논문집	최용진, 안재훈	20권 4호	대한민국	한국방재학회	비 SCI	2020년 8월	pISSN 1738-2424 eISSN 2287-6723 Vol.20, No.4, pp.207-217	100%
7	시멘트 및 바이오폴리머 혼합 지반의 동적 특성 및 지반응답해석평가	한국방재학 회 논문집	안성노, 정종원	20권 5호	대한민국	한국방재학회	비 SCI	2020년 10월	1738-2424	100%
8	저수지 제체 및 지반 물성치의 공간적 불균질성을 고려한 사면 안정성 평가	한국방재학 회 논문집	신승원, 정종원	20권 6호	대한민국	한국방재학회	비 SCI	2020년 12월	1738-2424	100%
9	Seismic Ground Response Prediction Based on Multilayer Perceptron	Sustainabilit y	유재원, 안재훈	11(5)	스위스	MDPI	SCI	2021년 2월	EISSN 2076-3417	100%
10	Proposed Equations for Calculating Dynamic Hydraulic Pressure in a Rectangular Structure	Applied Sciences	박건, 홍기남	10(23)	스위스	MDPI	SCIE	2020년 11월	ISSN 2076-3417	100%
11	진동대 시험을 활용한 구조물의 모드 형상에 따른 동적 p-y 곡선 특성 분석	한국방재학 회 논문집	한재혁, 정종원	21권 5호	대한민국	한국방재학회	비 SCI	21년 10월	1738-2424	100%

12	GRU를 활용한 인공지능기반 구조물 시계열 응답 예측	한국방재학 회 논문집	전건열, 윤형철	21권 3호	대한민국	한국방재학회	비 SCI	21년 6월	pISSN 1738-2424	100%
13	Evaluation of Dynamic Properties of Sodium-Alginate- Reinforced Soil Using A Resonant-Column Test	Materials	안성노, 정종원	14(11)	스위스	MDPI	SCIE	21년 5월	1996-1944	100%
14	Evaluation of Soil-Structure Interaction in Structure Models via Shaking Table Test	Sustainabilit y	안성노, 정종원	13(9)	스위스	MDPI	SCI	21년 4월	2071-1050	100%
15	Vision-Based Structural FE Model Updating Using Genetic Algorithm	Applied Sciences	박건, 홍기남, 윤형철	11(4)	스위스	MDPI	SCIE	21년 1월	EISSN 2076-3417	100%
16	Seismic Ground Response Estimation Based on Convolutional Neural Networks (CNN)	applied sciences	홍석경, 안재훈	11(22)	스위스	MDPI	SCIE	21년 11월	EISSN 2076-3417	100%
17	3차원 수치해석을 통한 점성토 지반의 균열 p-y 곡선 산정	한국방재학 회 논문집	정재우, 안재훈	21(6)	대한민국	한국방재학회	비 SCI	21년 12월	ISSN 2287-6723	100%

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2019 한국비파괴검사학회 춘계학술대회	드론과 영상기법을 활용한 교량 모니터링	윤형철	2019.05.23	경남 창원	대한민국
2	2019 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM19)	Pedestrian Suspension Bridge Monitoring using Computer Vision and Deep Learning	윤형철	2019.09.17	제주도	대한민국
3	2019 대한토목학회 컨벤션	영상 기반 객체 검출 및 추적을 이용한 구조물의 동적하중 분석	임정혁	2019.10.18	강원도 평창	대한민국
4	2019 대한토목학회 컨벤션	딥러닝 기반 교량 구성요소 자동인식	이재혁	2019.10.18	강원도 평창	대한민국
5	2019 대한토목학회 컨벤션	지반-구조물 상호작용을 고려한 모델링과 지진응답해석	박재형	2019.10.17	강원도 평창	대한민국
6	2019 대한토목학회 컨벤션	영상 처리를 이용한 구조물의 동적거동 측정	전건열	2019.10.17	강원도 평창	대한민국
7	2019 한국지반환경공학회 학술발표회	진동대 실험을 통한 흙-구조물 상호작용을 고려한 내진성능평가기법 개발	안성노	2019.09.06	서울 건설회관	대한민국
8	2019 대한토목학회 컨벤션	지반강도정수의 변동성을 고려한 노후저수지 안정성 평가	이현우	2019.10.18	강원도 평창	대한민국
9	대한토목학회 2020 컨벤션	딥러닝 기반 구조물의 동적 특성 분석	박재형	2020.10.23	제주(오프라인)	대한민국
10	대한토목학회 2020 컨벤션	CCTV 영상을 이용한 지진의 진도 예측	전건열	2020.10.23	제주(온라인)	대한민국
11	대한토목학회 2020 컨벤션	A study on Development of Artificial Neural Networks Model for Predicting Seismic Response analysis	홍석경	2020.10.23	제주(온라인)	대한민국
12	EGU 2020	Evaluation of dynamic properties and seismic performance of reinforced ground using renewable materials	안성노	2020.05.06	Vienna(온라인)	오스트리아
13	2020 한국지반환경공학회 온라인 학술발표회	지반의 동적특성 및 두께 변화에 따른 지진파 증폭영향 연구	안성노	2020.09.04	서울(온라인)	대한민국
14	2020 한국지반환경공학회 온라인 학술발표회	인공신경망 성능 향상을 통한 사질토 지반 말뚝의 극한지지력 산정	한재혁	2020.09.04	서울(온라인)	대한민국
15	2020 한국지반환경공학회 온라인 학술발표회	지반강도정수의 공간적 변동성을 고려한 저수지 사면의 안정성 평가	신승원	2020.09.04	서울(온라인)	대한민국
16	대한토목학회 2020 컨벤션	시멘트 보강지반의 고유주파수 및 감쇠비 변동에 따른 최대지반 가속도 평가	안성노	2020.10.23	제주(온라인)	대한민국
17	대한토목학회 2020 컨벤션	강말뚝 극한지지력 추정을 위한 머신러닝 성능 향상 연구	한재혁	2020.10.23	제주(온라인)	대한민국
18	대한토목학회 2020 컨벤션	저수지 제체 물성치의 공간적 변동성 및 지진을 고려한 안정성 평가	신승원	2020.10.23	제주(온라인)	대한민국
19	대한토목학회 2020 컨벤션	지반강도정수의 공간적 변동성을 고려한 사면 안정성 평가	이상빈	2020.10.23	제주(온라인)	대한민국
20	2021 한국방재학회 학술발표대회	LSTM 기반 동적 특성 분석 자동화	박재형	2021.09.09	온라인	대한민국
21	2021 한국방재학회 학술발표대회	딥러닝을 활용한 영상기반 케이블 진동 측정 자동화	전건열	2021.09.09	온라인	대한민국

□ 기술 요약 정보

번호	연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호	활용 여부	미활용사유	연구개발기관 외 활용 여부	허용방식
1	2020	LSTM기반 구조물의 동적 특성 자동 추출방법 및 이를 수행하는 시스템	인공지능 기반 구조물 노후도 평가 기술	80%	10-2020-0147933	활용	-	미활용	-
2	2020	영상 기반 변위 추출 프로그램	영상기반 변위 추출 프로그램	80%	C-2020-038027	활용	-	미활용	-
3	2021	GRU 기반 구조물 시계열 응답 예측 소프트웨어	인공지능 기반 변위 예측 프로그램	80%	C-2021-031469	활용	-	미활용	-
4	2021	GRU 기반 구조물 시계열 응답 예측 방법	인공지능 기반 변위 예측 기술	80%	10-2021-0113316	활용	-	미활용	-

□ 보고서 원문

번호	연도	보고서 명	발간일	등록 번호
1	2019	연차 실적보고서	2019.11.20	-
2	2020	연차 실적보고서	2020.11.05	-

□ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

번호	생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도
	해당없음			

[기술적 성과]

☐ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	특허	LSTM기반 구조물 동적 특성 자동 추출기술	대한민국	윤형철 박재형	2020.11.0 6	10-2020- 0147933				100	미활용
2	특허	GRU 기반 구조물 시계열 응답 예측 방법	대한민국	충북대학 교 산학협력 단	2021.08.2 6	10-2021- 0113316				100	미활용
3	특허	딥러닝 기반의 지반응답해석 장치 및 방법	대한민국	안재훈, 유재원, 홍석경	2020.08.0 4	10-2020- 0097339				100	미활용
4	특허	지반 탄성계수 측정을 위한 동적 및 정적 재하시험 시스템	대한민국	안재훈, 이윤제, 강상욱	2021.07.1 3	10-2021- 0091532				100	미활용

☐ 지식재산권 활용 유형

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	활용 예정	기타
1	해당없음									√	
2										√	
3										√	
4										√	

☐ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율
1	영상 기반 범위 추출 프로그램	2020.10.21	충북대학교 산학협력단	2020.10.21	C-2020-03802 7	충북대학교 산학협력단	100%
2	GRU 기반 구조물 시계열 응답 예측 소프트웨어	2021.07.21	충북대학교 산학협력단	2021.08.06	C-2021-03146 9	충북대학교 산학협력단	100%

☐ 신기술 지정

번호	명칭	고시일	보호기간	지정번호
	해당없음			

☐ 기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증번호		
	해당없음					

☐ 표준화

○ 국내표준

번호	인증구분	인증여부	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류	제안/인증일자
	해당없음						

○ 국제표준

번호	표준화단계 구분	표준명	표준기구명	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식	제안자	표준화 번호	제안일자
	해당없음									

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)
	해당없음							

□ 현장적용

번호	적용기술명	적용일	발주기관명	적용 연구개발기관명	적용현장명(장소)
	해당없음				

□ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료	
					발생 연도	발생액(천원)
	해당없음					

□ 사업화 투자실적

번호	연도	투자 자금 성격*	추가 연구개발 투자(천원)	설비 투자(천원)	기타 투자(천원)	합계(천원)
	해당없음					

□ 사업화 현황

번호	사업화 방식	사업화 형태	지역	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		
	해당없음									

□ 매출 실적(누적)

번호	사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
			국내(천원)	국외(달러)		
	해당없음					
합계						

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과			해당없음		
사업화 계획	사업화 소요기간(년)				
	소요예산(천원)				
	예상 매출규모(천원)		현재까지	3년 후	5년 후
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
		국내			
		국외			
향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획					
무역 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)	현재	3년 후	5년 후	
	수 출				

□ 고용 창출

번호	사업화명	사업화 업체명	고용창출 인원(명)		합계(명)
			yyyy년	yyyy년	
	해당없음				
합계					

□ 고용 효과

구분			고용 효과(명)
고용 효과	개발 전	연구인력	해당없음
		생산인력	
	개발 후	연구인력	
		생산인력	

□ 비용 절감(누적)

번호	사업화명	발생 연도	산정방법	비용 절감액(천원)
	해당없음			
합계				

□ 경제적 파급 효과

(단위 : 천원/년)

구분	사업화명	수입 대체	수출 증대	매출 증대	생산성 향상	고용 창출 (인력 양성 수, 명)	기타
해당 연도	해당없음						
기대 목표							

☐ 산업 지원(기술지도)

번호	내용	기간	참석 대상	장소	인원(명)
	해당없음				

☐ 기술 무역

(단위 : 천원)

번호	계약 연월	계약 기술명	계약 업체명	계약업체 국가	총 계약액	기 징수액	해당 연도	징수액	향후 예정액	수출/수입
		해당없음								

[사회적 성과]

☐ 법령 반영

번호	구분 (법률/시행령)	활용 구분 (제정/개정)	명 칭	해당 조항	시행일	관리 부처	제정/개정 내용
	해당없음						

☐ 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용
	해당없음				

☐ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구 분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/ 지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용
	해당없음				

☐ 신진연구자 채용

번호	채용 연구개발기관명	채용일	근로기간	채용인원(명)	채용인원 중 청년인력(명)
	해당없음				

☐ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	연도	현황(명)										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
		2019	-	2	-	-	2	-	-	1	1	-	-
		2020	1	4	3	-	8	-	-	4	4	-	-
		2021	-	5	-	-	5	-	-	4	1	-	-

☐ 산업 기술 인력 양성

번호	연도	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원
		해당없음					

☐ 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	연도	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비(천원)
		해당없음				

☐ 국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용
						해당없음

☐ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
	해당없음			

☐ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관
	해당없음					

[인프라 성과]

☐ 연구시설·장비

번호	구축 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	개발여부 (○/×)	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자 (YY.MM.DD)	구축비용 (천원)	비고 (설치 장소)
		해당없음							

[그 밖의 성과](해당 시 작성)

해당없음

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성)

해당없음

2) 목표 달성 수준

연구 개발 목표	달 성 내 용	달성도(%)
1. 노후도 평가를 위한 지반 구조물 모니터링 기술 개발 - 변위 측정 오차 1픽셀 이내	1. 노후도 평가를 위한 지반 구조물 모니터링 기술 개발 - 영상기반 구조물 & 지반 변위 측정 기술 개발 - 옵티컬 플로우 기반의 자동 추적 기술 적용 - 오차 약 0.5 픽셀 (목표치 1픽셀 이내 달성)	100%
2. 인공지능 기반 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석 기술 개발 - 노후 부재의 위치와 강성 저하 예측 정확도 90% 이상	2. 인공지능 기반 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석 기술 개발 - 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석을 위한 수치해석 모델의 정확도 93%달성 (목표치 90%이상 달성) - 지반-구조물 상호작용 기반 노후도 분석 기술 (유한요소 모델 업데이트 기술) 개발로 노후 부재의 위치와 강성저하를 약 93%의 정확도로 예측 (목표치 90% 이상) - 현장 데이터(광저우 TV타워) 적용	100%
3. 지반-구조물 상호작용을 고려한 내진성능 분석 기술 개발 - 기존 프로그램 대비 변위 예측 정확도 10% 이상 개선	3. 지반-구조물 동적상호작용을 고려한 내진 성능 평가기법 개발 - 지반-구조물 상호작용을 고려한 시스템식별 기술의 대형 진동대 실험 결과 0.9 mm의 RMSE를 나타내어, 기존 상용소프트웨어 (ABAQUS)의 1.4mm RSME에 비해 약 오차율 35% 감소 (목표치 10% 이상 개선)	100%
4. 인공지능 기반 지진지반응답 예측 모형 개발 - 기존 물리적 지반응답해석 대비 예측정확도 20% 이상 개선	4. 지진지반응답 예측모형 개발 - 지진파 데이터베이스를 통해 지진파 및 지반정보를 수집, 가공 및 구조화하여 인공신경망 모형에 학습시켜, 기반암 계층 지진파를 통해 지표면 지진파를 예측하는 지반응답 예측모형 생성기술 개발 - 기존 물리적 지반응답해석(SHAKE2000 프로그램)대비 예측 정확도 50% 개선 초과달성	100%

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

해당없음

2) 자체 보완활동

해당없음

3) 연구개발 과정의 성실성

해당없음

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

○ 노후도 평가를 위한 지반 & 구조물 모니터링 기술

- 영상처리 기술을 활용한 지반 및 구조물 변위 측정 기술을 개발함.
- 해당 기술은 드론 등 움직이는 물체에 설치된 경우에도 움직임을 보정하여 변위 측정 가능.
- 정면에서 촬영이 어려운 경우에는 측면에서 촬영한 영상으로부터도 변위 측정 가능.
- 이러한 영상기반 측정 관련 기술의 활용성은 국내외를 통틀어 최고 수준의 기술임.
- 변위 측정의 정확도는 약 0.3 픽셀 RMSE의 정확도로, 국내 최고 수준이나, 해외에서는 RMSE 0.3 픽셀 이하의 더 정확한 기술이 개발되고 있음.

○ 인공지능 기반 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석 기술

- 인공지능 기반 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석 기술을 개발함.
- 인공지능을 적용한 구조물 노후도 분석 기술은 국내외를 통틀어 현재 SCI(E) 저널에 게재된 논문이 5건 이내임.
- CNN이 아닌 LSTM기반의 구조물 노후도 분석 기술은 국내외를 통틀어 최초 기술임.
- 노후도 분석 기술의 정확도는 국내외에서도 최고 수준임.
- 인공지능 기반의 노후도 분석 기술 중, 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석 기술은 현재까지 국내외에서 유일함.

○ 지반-구조물 상호작용을 고려한 내진성능 분석 기술

- 지반-구조물 상호작용을 고려한 내진성능 분석 기술을 개발함.
- 구조물의 내진성능 분석 기술은 국내외 논문이 다수 있고 상용 소프트웨어도 존재하지만, 지반-구조물 상호작용을 고려하지 못함.
- 지반-구조물 상호작용을 고려한 내진성능 분석 기술은 국내외를 통틀어 관련 SCI(E) 논문이 5건 이내임.
- 본 연구에서 활용한 지반-구조물 상호작용을 고려한 내진성능 분석 기술은 지반-구조물 상호작용을 고려하지 못한 기존 상용 소프트웨어에 비해 월등히 높은 정확도를 보임.

○ 지진 지반응답 예측모형 개발

- 개발된 인공신경망 기반 지반응답 예측모형은 지반하부 지진파로부터 지표면으로 전파된 지진파를 예측 할 수 있음.
 - 인공신경망 기반 예측모형의 지표면 지진파 예측결과를 물리적 지반응답해석에 의한 예측결과와 비교하였을 때, 실제 계측 지진파와의 오차가 더 적은 것을 확인하였음.
 - 지진파 데이터를 제공하는 지역에서 인공신경망 모형을 훈련시켜, 본 모형을 통해 입력지진파에 따른 지표면 지진파를 예측이 가능하게 하여, 지진파 데이터를 인공신경망 모형이 효과적으로 학습하는 것을 확인하였음.
-

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

○ 노후도 평가를 위한 지반 & 구조물 모니터링 기술

- 본 연구에서 개발한 변위 측정 기술은 MATLAB 기반으로한 소프트웨어로 개발되어 일반 사용자들이 편리하게 사용할 수 있도록 하였음.
- 본 연구에서 개발한 변위 측정 기술은, 지반 상호작용을 고려한 노후도 및 내진성능 분석 기술뿐만 아니라, 구조물 장기 모니터링 등 시설물의 유지관리를 위해 다양한 분야에 적용 가능.
- 기술개발 완료 시점에서 교량, 빌딩 등 구조물의 안전진단을 위한 변위 측정에 사용 가능할 것으로 생각되며, 국토안전관리원과 지자체에서 추후 활용할 수 있음

○ 인공지능 기반 지반-구조물 상호작용을 고려한 노후도 분석 기술

- 본 연구에서 개발한 노후도 분석기술은 MATLAB을 기반으로한 소프트웨어로 개발되어 일반 사용자들이 편리하게 사용할 수 있도록 하였음.
- 본 연구에서 개발한 노후도 분석 기술은 딥러닝 네트워크의 한 종류인 LSTM을 기반으로 개발되어, 많은 데이터를 활용하여 구조물의 노후도를 분석이 가능한 기술임.
- 본 연구에서 개발한 LSTM기반의 노후도 분석 기술은 지반-구조물 상호작용 뿐만이 아니라, 물리적인 현상에 대한 직접적인 모델링이 어려운 현상에 적용하여 노후도를 예측하는데 활용이 가능할 것으로 예상됨.
- 기술개발 완료 시점에서 교량, 빌딩 등 구조물의 노후도 측정을 위한 정량적 지표로 국토안전관리원 또는 지자체에서 활용 가능함

○ 지반-구조물 상호작용을 고려한 내진성능 분석 기술

- 본 연구에서 개발한 내진성능 분석 기술은 MATLAB을 기반으로한 소프트웨어로 개발되어 일반 사용자들이 편리하게 사용할 수 있도록 하였음.
- 지반-구조물 상호작용을 고려하고 유한요소모델 업데이트 기술을 접목하여 구조물의 내진성능을 보다 정확하게 예측할 수 있었음.
- 본 연구에서 개발한 지반-구조물 상호작용을 고려한 내진성능 분석 기술은 재난 대비 시뮬레이션, 재난 피해 상황 예측 등 다양한 목적으로 활용이 가능할 것으로 예상됨.
- 기술개발 완료 시점에서 교량, 빌딩 등 구조물의 지진 응답 예측의 정확성을 향상시키기 위해 행안부, 국토안전관리원 또는 지자체에서 활용 가능함

○ 지진 지반응답 예측모형 개발

- 지진파 계측 데이터를 바탕으로 향후 지진 발생 시 기반암 지진으로부터 지표면의 진동을 예측하기 위한 딥러닝 예측 모형을 개발하였음.
 - 제안된 딥러닝 예측 모형을 바탕으로 실기록 지진파 데이터를 업데이트하여 내진설계의 필수적인 과정 중 하나인 지진 지반응답 예측에 활용을 계획함.
-

7. 참고 문헌

-
- American Petroleum Institute (API). (2002), Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms—Working stress design Washington, DC, United States: API
 - Al-abboodi, Ihsan & Sabbagh, Tahsin. (2019). Numerical Modelling of Passively Loaded Pile Groups. *Geotechnical and Geological Engineering*. 37. 2747–2761. 10.1007/s10706-018-00791-z.
 - Bengio, Y., Simard, P., & Frasconi, P. (1994). Learning long-term dependencies with gradient descent is difficult. *IEEE transactions on neural networks*, 5(2), 157–166.
 - Brincker, R.; Zhang, L.; Andersen, P. (2001). "Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition" (PDF). *Smart Materials and Structures*. 10 (3): 441. Bibcode:2001SMaS...10..441B. doi:10.1088/0964-1726/10/3/303
 - Broms B.B.(1964), Lateral resistance of piles in cohesive soils, *J Soil Mech Found Div ASCE* 1964;90(SM2):27-63.
 - Cho, K., Van Merriënboer, B., Gulcehre, C., Bahdanau, D., Bougares, F., Schwenk, H., & Bengio, Y. (2014). Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation. *arXiv preprint arXiv:1406.1078*.
 - Cho, S.H. (2017), "Natural Excitation Test and FE Analysis Model Updating for a Tall Building", *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea*, Vol. 19, No. 1, pp.265–272.
 - Choi, Y.G. and Ahn, J.H. (2020), Evaluation of p-y curves and p-multiplier of pile groups corresponding to sand properties change based on 3D numerical analysis, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.* 2020;20(4):207–217
 - Christiano, L. J., & Fitzgerald, T. J. (2003). The band pass filter. *international economic review*, 44(2), 435–465.
 - Cole Jr, H. A. (1973). On-line failure detection and damping measurement of aerospace structures by random decrement signatures.
 - Davisson, M. (1970). LATERAL LOAD CAPACITY OF PILES. *Highway Research Record*.
 - Durante, Maria & Di Sarno, Luigi & Mylonakis, George & Taylor, Colin & Simonelli, A.L.. (2015). Soil-pile-structure interaction: Experimental outcomes from shaking table tests. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 10.1002/eqe.2694.
 - Dwarampudi M. Reddy, N. V. (2019). Effects of padding on LSTMs and CNNs. *arXiv preprint arXiv:1903.07288*.
 - Geffroy N., Brunetti L., Bolzon B. and Jeremie A. (2007). "Creation of a State-Space Model from a Finite Element Model for the active control algorithm efficiency tests", Report 2007-054, European Design Study Towards a Global TeV Linear Collider.
 - Hochreiter, S. (1998). The vanishing gradient problem during learning recurrent neural nets and problem solutions. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 6(02), 107–116.
 - Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural computation*, 9(8), 1735–1780.
 - Ibrahim, S. R., & Pappa, R. S. (1982). Large modal survey testing using the Ibrahim time domain identification technique. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 19(5), 459–465.
 - Iai, S. (1989), Similitude for Shaking Table Tests on Soil-structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field, *Soils and Foundations*, Vol.29, No.1, pp.105–118.
 - Idriss, I.M., Seed, H.B. (1968), Seismic response of horizontal soil layers. *Soil mechanics and foundations*, Vol. 94, No. 4, pp.1003–1029.
-

-
- Juang, J.-N.; Pappa, R. S. (1985). "An Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction". *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 8 (5): 620-627. Bibcode:1985JGCD....8..620J. doi:10.2514/3.20031
 - Kang, H.S. (2018), Dynamic behavior of pile group considering superstructure in sand ground, Unpublished PhD diss, Chungbuk National University, Cheongju.
 - Kim, B.I and Kwon, J.H. (2007). "Optimum Design of Two-Dimensional Steel Structures Using Genetic Algorithms", *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 21, No. 2, pp. 75-80.
 - Kim J. System Identification of Civil Engineering Structures Through Wireless Structural Monitoring and Subspace System Identification Methods. Ph.D. thesis, University of Michigan: Ann Arbor, MI, 2011.
 - Kim, W.H. (2006). "Evaluation of a Simplified Criterion for SSI Analysis", Master's Thesis, Chonnam National University, Gwangju, Korea.
 - Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*; Prentice Hall: Hoboken, NJ, USA.
 - Kim, W.H. (2006). "Evaluation of a Simplified Criterion for SSI Analysis", Master's Thesis, Chonnam National University, Gwangju, Korea.
 - Kwon, S. Y., Kim, S. J., and Yoo, M. T. (2016), "Numerical Simulation of Dynamic Soil-Pile Interaction for Dry Condition Observed in Centrifuge Test", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.4, pp.5-14.
 - LeCun, Y.; Bengio, Y.; Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521, 436-444.
 - Lee, S. H., Sun, C. G., Yoon, J. K., Kim, D. S. (2012). Development and verification of a new site classification system and site coefficients for regions of shallow bedrock in Korea. *Journal of Earthquake Engineering*, 16(6), 795-819.
 - Lynch JP, Loh KJ. A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring. *Shock and Vibration Digest* 2006; 38(2):91-130.
 - Matlock, H. (1962), Correlations for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay, Rpt. To Shell Oil Co., Engineering Science Consultants, September.
 - Nair, V., Hinton, G. E. (2010). Rectified linear units improve restricted boltzmann machines. In *ICML*.
 - National Cooperative Highway Research Program (2001), Static and Dynamic Lateral Loading of Pile Groups, NCHRP Report 461, Transportation Research Board - National Research Council.
 - NIED. (2019). K-NET, KiK-net; National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience: Ibaraki, Japan.
 - Ordonez, G.A. (2012). SHAKE2000-A Computer Program for the 1-D Analysis of Geotechnical Earthquake Engineering Problems; University of California: Berkeley, CA, USA.
 - Park, J. S and Ryu, S. K. (1999), "Optimal Design by Genetic Algorithm", *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 27, No.4, pp.155-161.
 - Peter Van Overschee and Bart De Moor. (1996). "Subspace identification for linear systems : Theory, Implementation, Applications", Kluwer academic publishers, Belgium.
 - Pinkus, A. (1999). Approximation theory of the MLP model in neural networks. *Acta numerica*, 8, 143-195.
 - Polam. I. K., Chaundhuri. D. (1998), Modeling of Pile Footings and Drilled Shafts for Seismic Design, Technical Report MCEER-98-0018, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research
 - Schnabel, P.B. (1973). Effects of Local Geology and Distance from Source on Earthquake Ground Motions; University of California: Berkeley, CA, USA.
 - Seed, H.B., Idriss, I.M., Shannon, W., Agabian-Jacobsen, A. (1970). Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses; EERC: Grand Forks, ND, USA.
-

-
- Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I., Tokimatsu, K. (1986). Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *J. Geotech. Eng.*, 112, 1016–1032.
 - Seismosoft. (2016). Seismo signal [Computer software]. Retrieved from <https://seismosoft.com/products/seismosignal>
 - Sibi, P., Jones, S. A., Siddarth, P. (2013). Analysis of different activation functions using back propagation neural networks. *Journal of theoretical and applied information technology*, 47(3), 1264–1268.
 - Spencer BF, Ruiz Sandoval ME, Kurata N. Smart sensing technology: opportunities and challenges. *Structural Control and Health Monitoring* 2004; 11(4):349–368.
 - Ting, J. M., Kauffman, C. R., Lovicsedk, M.(1987), Centrifuge Static and Dynamic Lateral Pile Behavior, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 24, pp.198–207
 - Tolia, G., Sicre, R., Jégou, H. (2015). Particular object retrieval with integral max–pooling of CNN activations. *arXiv preprint arXiv:1511.05879*.
 - Van Overschee, P., & De Moor, B. (1996). Continuous–time frequency domain subspace system identification. *Signal Processing*, 52(2), 179–194.
 - Yang. E. K., Choi. J. I., Han. J. T., Kim. M. M.(2010), Evaluation of Dynamic Group Pile Effect in Sand by 1g Shaking Table Tests”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, The Korean Geotechnical Society, Vol. 26, No.8, pp.77–88
 - Yoon, H., Elanwar, H., Choi, H., Golparvar Fard, M., and Spencer, B. F. (2016) Target-free approach for vision-based structural system identification using consumer-grade cameras. *Struct. Control Health Monit.*, 23: 1405–1416. doi: 10.1002/stc.1850.
 - Zhang, Z. M., Chen, S., & Liang, Y. Z. (2010). Baseline correction using adaptive iteratively reweighted penalized least squares. *Analyst*, 135(5), 1138–1146.
-

< 별첨 >

별첨 자료

1. 총 연구개발기간 성과점검기준표 및 증빙자료 - 서식 3에 첨부 [별첨 10]

2. 세부 정량적 연구개발성과 증빙자료(총 연구개발기간 성과점검기준표 실적 증빙자료에 기 포함되어 있는 증빙자료 제외) - 서식 3에 첨부 [별첨 10]

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 ‘국토교통기술촉진연구사업’ 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.