제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘복합재료 구조물의 내진성능평가를 위한 비선형 상사법칙과 하이브리드시뮬레이션을 적용한 축소모형실험기법 개발’(연구개발 기간 : 2014.07.11 ~ 2016.07.10)과제의 최종보고서 12부를 제출합니다.

2016. 08. 22.

주관연구기관명 : 서울대학교 산학협력단 김 성 철 (인)

주관연구기관책임자: 조 재 열

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>1615007157</td><td>해당 단계
연구 기간</td><td>2014.07.11.
~ 2016.07.10.</td><td>단계구분</td><td>1/1</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">국토교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">기초원천</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4">복합재료 구조물의 내진성능평가를 위한 비선형 상사법칙과 하이브리드시뮬레이션을 적용한 축소모형 실험기법 개발</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">조 재 열</td><td>해당단계
참여
연구원 수</td><td>총: 10명
내부: 10명
외부: 명</td><td>해당단계
연구개발비</td><td>정부:400,000천원
기업: 천원
정부 외: 천원
계: 400,000천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간
참여
연구원 수</td><td>총: 10명
내부: 10명
외부: 명</td><td>총 연구개발비</td><td>정부:400,000천원
기업: 천원
정부 외: 천원
계: 400,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속 부서명</td><td colspan="3">서울대학교 산학협력단</td><td colspan="2">참여기업명:</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명:</td><td colspan="2">상대국 연구기관명:</td></tr>
<tr><td rowspan="2">위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명: 부산대학교 산학협력단</td><td colspan="2">연구책임자: 김 남 식</td></tr>
<tr><td colspan="3">연구기관명: 명지대학교 산학협력단</td><td colspan="2">연구책임자: 김 철 영</td></tr>
<tr><td colspan="4">본 연구에서는 철근콘크리트 구조물과 같은 복합재료 구조물의 내진성능평가를 위한 상사법칙의 개발을 주목적으로 하였다.
이를 위하여 총 2년의 연구기간 중 1차년도에서는 복합재료 구조물의 특성을 고려한 상사법칙을 개발하고 유한요소해석 프로그램을 통한 해석적인 검증을 수행하였으며 2차년도에서는 진동대실험과 하이브리드시뮬레이션을 이용한 프로토타입(=원형구조물)과 축소모형 실험을 실제로 수행함으로써 이론적으로 정립된 상사법칙의 실험적인 검증을 통하여 그 타당성을 검증하고 이를 위한 실험기법을 개발하였다.</td><td colspan="2">보고서 면수: 92 면</td></tr>
</table>

연구의 목적 및 내용	■ 본 연구는 크게 1)이론개발과 2)실험 수행 및 검증의 두 단계의 연구를 통하여 설정한 최종목표 달성을 위해 노력할 것이다. 1. 합리적인 상사법칙을 정립하기 위하여 본 연구에서는 먼저 관련 분야의 기존 문헌을 철저히 조사하여 현재 사용되고 있는 상사법칙의 문제점을 철저히 파악하고 이를 해결할 수 있는 새로운 상사법칙을 개발할 것이다. 개발된 상사법칙은 실제 실험에 앞서 유한요소해석 등을 통한 이론적인 해석과정을 통하여 그 타당성 및 적용가능성을 확인할 것이다. 2. 해석적으로 검증이 완료된 상사법칙을 실제 축소모형에 적용하는 실험적 검증 단계를 거칠 것이다. 축소모형실험은 진동대 실험과 하이브리드 시뮬레이션 실험의 두 실험에 각각 적용할 것이며 각 실험 시 축소모형의 재료, 제원, 상사특성 등을 결정하고 실제 실험 수행 과정을 면밀히 분석/정리하여 향후 연구에서도 곧바로 적용할 수 있도록 실험기법을 최종적으로 정립할 것이다.
연구개발성과	1. 복합재료의 특성을 합리적으로 고려할 수 있는 상사법칙과 이에 대한 학술적 성과 (국내논문 1건 게재, 국외논문 3건 투고, 국·내외 학술발표 3건) 2. 진동대 실험 및 하이브리드 시뮬레이션을 적용한 축소모형실험기법과 매뉴얼
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	■ 개발된 상사법칙과 하이브리드시뮬레이션을 활용한 축소모형실험기법은 철근콘크리트 구조물의 축소모형실험의 사용 활성화에 크게 기여할 것이다. 특히 많은 실험 수행 및 광범위한 데이터베이스 확보가 요구되는 내진성능평가 분야에 있어 종래의 축소모형실험에 비하여 더욱 정확하고 효율적으로 실험을 가능케 할 것이다. ■ 축소모형실험을 통한 철근콘크리트 구조물의 성능 실험을 수행함으로써 향후 성능기반설계를 적용한 설계기준의 수립을 위한 작업에 적극적으로 기여할 수 있으며 실제 시공현장에서의 성능실험에도 손쉽게 적용하여 보다 안전하고 효율적인 설계가 가능할 것이다. ■ 축소모형실험기법의 확립을 통하여 이전까지 미진하였던 철근콘크리트를 위한 상사법칙과 관련된 연구를 선도할 수 있는 여건이 마련될 것이다. 따라서 이를 바탕으로 최근 연구되고 있는 고강도콘크리트, 섬유보강콘크리트와 같은 재료로의 확장을 통한 후속 연구를 계속적으로 진행함으로써 기술적인 우위를 계속해서 유지할 수 있을 것이다. ■ 개발된 축소모형실험을 향후연구 및 사회기반설계의 성능 실험, 설계에 적용함으로써 지속적인 이익의 창출 및 전반적인 국내 건설기술 수준의 발전과 생산성의 증가를 통하여 우리사회의 지속적인 발전에 기여할 수 있을 것이라 사료된다. ■ 축소모형실험 및 진동대실험, 하이브리드시뮬레이션에 대한 기술이 확보되고 연구 기반이 조성됨에 따라 자연스럽게 사회기반시설의 실험을 담당하게 되는 고급인력의 배출에 기여함으로써 현재 침체되어 있는 상황에서 나아가 건설 기술 강국으로의 도약을 이룰 수 있을 것이다.

핵심어 (5개 이내)	상사법칙	하이브리드 시뮬레이션	동적해석	진동대실험	철근콘크리트 교각

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	Main objectives of this study is achieved by two stages of research which are 1)Theoretical developments and 2)Experimental verifications 1. To develop the reasonable similitude law, the limitations of similitude laws of previous studies are analyzed by surveying researches papers and reports of related area. Improved similitude law which overcomes the limitations of the previous similitude law is developed and verified by analysis using finite element analysis techniques 2. Experimental verification of developed similitude law are conducted after the analytic verifications. Both shaking table test and hybrid simulation test are included in experimental verifications.
Results	1. Developed similitude law considering the characteristics of composite material and its related academic achievement including: 1 Published paper for domestic journal, 3 Submission for SCI journal and 3 Published papers for conference proceeding 2. Manual for scaled model test techniques applying shaking table test and hybrid simulation
Expected Contribution	■ Developed similitude law and scaled model test techniques can be contributed to the broad applications of scaled model test for reinforced concrete structures in the variety of research and practical areas. ■ Results of this study which are obtained by performing scaled model test of reinforced concrete can be applied to the revision of design code and its related activities. And more safe and effective design become available by applying scaled model test technique to the performance test of social infrastructures. ■ It is possible to preoccupying leading position in the related research area for scaled model test by establishing the similitude law and its test technique which is in undeveloped and primitive stage now. By applying the results of this study to the related research which uses new kings of material such as high strength concrete or fiber reinforced concrete, the leading position can be continuously occupied. ■ By applying the developed similitude law and scaled model test techniques to the performance test of social infrastructures and design, the sustaining creation of profit, development of domestic construction level and increasing of productivity are achieved. All of these can be contributed to the sustainable development of the entire society. ■ This study can be contribute to secure the essential skills and techniques for performing shaking table test and hybrid simulation test.

Keywords	Similitude Law	Hybrid Simulation	Dynamic Analysis	Shaking Table Test	RC Column

〈 Table of Contents 〉

1. Introduction ····· 1
2. Research background ····· 10
3. Contents and results of the research ····· 11
4. Achievements and contributions ····· 80
5. Future applications ····· 83
6. Related information and articles ····· 85
7. Security level for contents of the research ····· 86
8. Registrated test equipments in NTIS ····· 86
9. Efforts for maintaining safety during research ····· 89
10. Main results of the research ····· 90
11. Others ····· 91
12. References ····· 92

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1
2. 국내외 기술 개발 현황 ····· 10
3. 연구 수행 내용 및 성과 ····· 11
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 80
5. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 83
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 85
7. 연구개발성과의 보안등급 ····· 86
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황 ····· 86
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ····· 89
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 ····· 90
11. 기타 사항 ····· 91
12. 참고 문헌 ····· 92

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

□ 사회기반시설의 안전하고 최적화된 설계를 거시적인 목표로 설정하였다.

- 본 연구에서는 합리적인 축소모형실험기법을 정립하는 것을 궁극적인 목표로 설정하였다. 이를 통해 축소모형실험으로도 실구조물의 거동을 정확히 예측할 수 있게 됨으로써 실험결과의 신뢰성을 높이고 축소모형실험의 활성화를 통한 효율적이고 경제적인 실험연구가 가능하게 될 것이다.

- 축소모형실험기법을 활용을 통해 사회기반시설의 안전성을 보다 효율적이고 경제적인 실험을 통하여 분석할 수 있게 된다. 이는 일차적으로 안전하고 신뢰도가 높은 효율적인 설계를 가능하게 하고 종래에 사용되던 구조물 설계를 한층 혁신할 수 있게 될 뿐만 아니라 나아가 계속적으로 그 중요성이 커지고 있는 지진 및 극한하중에 의한 사회기반시설의 손상 및 파괴를 방지함으로써 인적/물적 피해를 최소화함으로써 우리사회의 경제/사회적인 발전과 지속적인 성장에 큰 밑거름이 될 것이라 확신한다.

□ 복합재료 구조물의 동특성을 반영하는 비선형 상사법칙 개발과 이를 적용한 축소모형실험기법의 정립을 목표로 하였다.

- 본 연구의 최종목표는 (1)철근콘크리트 구조물과 같은 복합재료로 구성된 구조물의 동적해석에 적합한 새로운 상사법칙을 정립하고 (2)진동대실험 및 하이브리드시뮬레이션을 적용한 축소모형실험의 실제 수행을 통해 개발된 상사법칙의 타당성을 검증하고 궁극적으로 축소모형실험기법을 정립하는 것이다.

□ 1차년도: 새로운 상사법칙을 개발하고 추후의 검증을 위한 실험을 준비한다.

- 본 연구의 시작과 더불어 철근콘크리트의 특성을 합리적으로 고려할 수 있는 새로운 상사법칙의 개발을 최우선적인 목표로 설정하였고 기존 축소모형실험에서 문제가 되었던 콘크리트의 비선형성 및 변형률 왜곡현상에서 기인하는 문제점을 해결함으로써 정확하고 합리적으로 원형구조물의 거동을 예측할 수 있는 이론적인 틀을 제시할 것이다.

- 기본적인 상사법칙의 정립이 완료된 이후 유한요소해석 등의 이론적인 해석방법을 적용하여 본격적인 실험에 앞서 1차적으로 제안된 상사법칙의 타당성과 적용가능성을 평가할 것이다.

- 해석적인 검증까지 완료 후에는 개발된 상사법칙을 적용하여 축소모형을 설계,제작하고 연구의 2차년도에 계획된 축소모형실험을 준비할 것이다. 진동대실험과 하이브리드시뮬레이

션의 경우 실험 시 유압가력기의 제어를 위한 알고리즘과 각종 측정기기에 대한 세팅작업이 선행되어야 하기 때문에 소수의 실험체를 통한 예비실험을 수행함으로써 원활한 본 실험의 진행을 위한 모든 준비를 마칠 것이다.

□ 2차년도: 축소모형실험을 통해 상사법칙을 검증하고 실험기법을 확립한다.

- 본 연구의 다음 단계에서는 앞서 제작된 축소모형 실험체를 이용한 본 실험을 수행하여 개발된 상사법칙을 적용하였을 때 실구조물의 거동을 정확히 예측하는지 여부를 실험적으로 확인함으로써 개발된 상사법칙에 대해 최종적인 타당성 검증을 완료할 것이다. 더불어 기존 연구들에서 제시된 상사법칙들을 적용한 예측결과와의 비교를 최대응답 변위이력차 및 최대누적이력에너지차 등의 정량적인 척도를 사용하여 수행함으로써 개발된 상사법칙이 목표로 한 더욱 향상된 예측정확성을 보여주는지 여부를 점검할 것이다.

- 실험의 종료 후 축소모형 실험체 제작 시의 상사비의 결정 및 재료 제작 방법, 진동대실험과 하이브리드시뮬레이션에서 사용되는 각 실험장비, 유압가력기, 측정기기 등의 구성 및 세팅방법, 실험 수행 도중 발생하였던 문제점 및 이에 대한 개선방안 면밀히 분석하고 매뉴얼을 제작함으로써 향후 연구에서 즉각적인 적용이 가능하도록 실험기법을 정립할 것이다

2. 연구개발의 필요성

가. 학문적·기술적 필요성

□ 축소모형실험에 대한 필요성과 그 중요도는 나날이 증가하고 있다.

- 사회기반시설을 구성하는 토목/건축구조물의 안전성을 평가하기 위한 연구는 일반적으로 전체구조물 혹은 부재단위를 대상으로 한 실험연구를 수반한다. 그러나 특수한 경우를 제외하면 실구조물을 모사한 실험체의 크기가 실내 실험으로 수행하기에는 턱없이 크기 때문에 비용 절감과 실험 시설의 용량을 고려하여 실구조물을 일정 비율로 축소한 실험체를 사용하는 축소모형실험을 통해 실구조물의 거동을 예측하는 방법이 사용되고 있다.

- 특히 국가적 문제로 부각되어오고 있는 지진사고에 대비하기 위한 구조물의 내진성능평가를 위해 필수적인 진동대실험(Shaking table test) 및 유사동적실험(Pseudo dynamic test) 등의 수행에 있어 가용 실험장비의 성능 및 규모가 제한적인 국내의 현 상황을 고려하면 축소모형실험기법을 적용하여 실험체의 크기를 소규모로 구성함으로써 제한된 실험 비용 및 자원을 더욱 효율적이고 경제적으로 사용하는 것이 가능하다.

□ 합리적인 축소모형실험이 가능하려면 축소모형실험기법의 정립이 절실하다.

- 그러나 많은 경우 축소모형실험기법을 적용 시 실험체의 크기만 축소할 뿐 상사법칙을 고려한 재료의 형상 및 물성변화가 실험 결과에 미치는 영향에 대해서는 엄밀한 논의가 이루어지지 않고 있는 실정이며 이 경우 축소모형의 거동을 통하여 실물구조의 거동을 정확히 예측하는데 명백한 한계가 존재하게 된다. 이는 축소모형실험이 가지고 있는 많은 이점에도 불구하고 많은 연구자들이 실물실험을 선호하는 주된 이유이기도 하다.

- 이러한 현상은 사회기반시설을 이루는 토목/건축구조물들이 점차 장대화 및 초고층화 되어감에 따라 지진하중이 발생하였을 때의 구조물의 안전성에 대한 세심한 고려가 필수적으로 요구되는 현 시점에서 더욱 큰 문제로 부각되고 있다. 따라서 합리적인 상사법칙을 정립하고 이의 실적용을 위한 축소모형 제작 재료 및 실험기법의 정립을 포함하는 축소모형실험기법의 정립에 대한 연구가 아주 절실하다.

□ 기존 축소모형실험은 철근콘크리트 구조물의 해석에 적합하지 않다.

- 축소모형실험에 대해 계속적으로 증대되는 필요성을 감안하여 이를 철근콘크리트(Reinforced concrete) 구조물의 해석 및 실험에 적용하기 위한 연구가 국내외로 진행되고 있다. 철근콘크리트 구조물은 재료의 물성 및 거동이 상이한 철근과 콘크리트의 두 재료로 이루어진 복합재료로 구성된 구조물로 강구조물과 같은 단일재료로 구성된 구조물의 거동과는 상이한 형태의 거동을 보인다. 이 같은 특성을 감안한 적절한 해석을 위해서는 두 재료 간의 상호작용이 전체 구조물에 미치는 영향을 파악하는 것이 중요하다. 더불어 콘크리트는 작용하는 응력이 증가함에 따라 탄성영역에서 소성영역으로 넘어가면서 비선형 거동을 보이기 때문에 강구조물에 비하여 올바른 거동의 해석을 위한 노력이 더욱 요구된다.

- 하지만 기존에 사용되고 있는 상사법칙은 강구조물과 같은 단일재료로 이루어진 구조물의 선형 해석에 적합하도록 구성이 되어 있어 복합재료로 이루어져 있고 비선형 거동을 보이는 철근콘크리트 구조물의 거동을 해석하는데 있어서 분명한 한계(Harris, 1999)를 보인다.

□ 기 수행된 상사법칙의 개발에 대한 연구 성과는 미미하다.

- 결론적으로, 철근과 콘크리트 간의 상호작용과 콘크리트의 비선형성에 의한 영향이 축소모형실험 결과에 미치는 영향을 기존 상사법칙에서는 제대로 고려하는 것이 불가능하다. 이에 따라 이러한 효과를 합리적으로 반영하여 실구조물의 거동을 제대로 모사하기 위한 상사법칙의 개발에 대한 몇몇 연구가 선행적으로 진행되었다. 해외에서는 현재까지 이와 관련된 연구를 수행한 실적이 전무한 상황이며 국내에서 진행된 연구로는 김남식(2009)과 본 제안의 연구책임자가 주도하여 수행된 조남소(2008), 이도근(2012)의 연구가 있다.

- 상기 연구들은 단일재료로 구성된 구조물의 선형해석에 국한되어 있는 기존의 상사법칙을 수정·보완하여 철근콘크리트 구조물과 같은 복합재료로 구성된 구조물의 비선형해석에도 적용할 수 있도록 하는 것을 목적으로 하고 있다.

- 일반적인 철근콘크리트 축소모형의 설계에서는 실구조물과 축소모형에 사용되는 철근의 재료특성은 거의 동일한데 반해 콘크리트의 재료특성에서는 큰 차이가 발생한다. 이 경우 두 재료의 응력-변형률 관계를 이상화하면 그림 1과 같으며 이에 따라 (1)동일 응력에서 실구조물과 축소모형의 변형률 간의 비가 두 재료 간에 서로 일치하지 않게 되는 변형률 왜곡(Strain distortion) 현상과 (2)두 재료의 탄성계수 상사비가 서로 상이한 현상이 발생한다. 상기 연구들은 모두 변형률비(Strain ratio, εr) 개념을 도입하여 이를 해결하고자 노력하였다(표 1 참조).

- 철근콘크리트 구조물에 적합한 상사법칙 자체에 대한 연구 자체가 미진한 현 상황에서 상기 연구들은 상당히 선구적인 시도로 평가할 수 있다. 그러나 (1)실제 축소모형실험을 수행하지 않고 수치해석만을 적용하여 철근의 항복이 발생하지 않아 변형률왜곡의 정도가 미미한 경우에 대해서만 검증을 수행하였거나(이도근 2012) (2)실험을 통한 검증을 수행하였어도 일반적인 경우가 아닌 콘크리트의 변형률비가 1.0에 가까워 역시 변형률왜곡의 정도가 크지 않은 제한적인 경우에 국한하여 검증을 수행(김남식 2009, 조남소 2008)하였기 때문에 각 연구에서 제안한 상사법칙의 타당성에 대해서는 확신할 수가 없다.

표 1. 기존 상사법칙과 변형률비를 이용한 상사법칙 간 상사비 비교

Quantities	Dimension	Scale Factor			
		기존 상사법칙	김남식 (2009)	조남소 (2008)	이도근 (2010)
Force	F	$S_L^2 S_E$	$S_L^2 S_E \varepsilon_r$	$S_L^2 S_E \varepsilon_r$	$S_L^2 S_E \varepsilon_r$
Pressure	FL^{-2}	S_E	$S_E \varepsilon_r$	$S_E \varepsilon_r$	$S_E \varepsilon_r$
Moment	FL	$S_L^3 S_E$	$S_L^3 S_E$	$S_L^3 S_E$	$S_L^3 S_E$
Acceleration	LT^{-2}	1.0	1.0	1.0	1.0
Gravity	LT^{-2}	1.0	1.0	1.0	1.0
Velocity	LT^{-1}	$S_L^{1/2}$	$S_L^{1/2} \varepsilon_r^{1/2}$	$S_L^{1/2} \varepsilon_r^{1/2}$	$S_L^{1/2} \varepsilon_r^{1/2}$
Time	T	$S_L^{1/2}$	$S_L^{1/2}$	$S_L^{1/2}$	$S_L^{1/2} \varepsilon_r$
Linear Dimension	L	S_L	S_L	S_L	S_L
Displacement	T^{-1}	S_L	$S_L \varepsilon_r$	$S_L \varepsilon_r$	$S_L \varepsilon_r$
Frequency	FL^{-2}	$S_L^{-1/2}$	$S_L^{-1/2}$	$S_L^{-1/2}$	$S_L^{-1/2}$
Modulus	FL^{-2}	S_E	S_E	S_E	S_E
Stress	-	S_E	S_E	S_E	S_E
Strain	-	1.0	1.0	1.0	1.0
Poisson's ratio	$FL^{-4}T^2$	1.0	1.0	1.0	1.0
Stiffness	FL^{-1}	$S_L^{-1} S_E$	$S_L^{-1} S_E \varepsilon_r$	$S_L^{-1} S_E \varepsilon_r$	$S_L^{-1} S_E$
Energy	FL	$S_L^3 S_E$	$S_L^3 S_E \varepsilon_r$	$S_L^3 S_E \varepsilon_r$	$S_L^3 S_E$

(F:힘, L:길이, T:시간, sL:길이 상사비, sE:탄성계수 상사비, εr:변형률비)

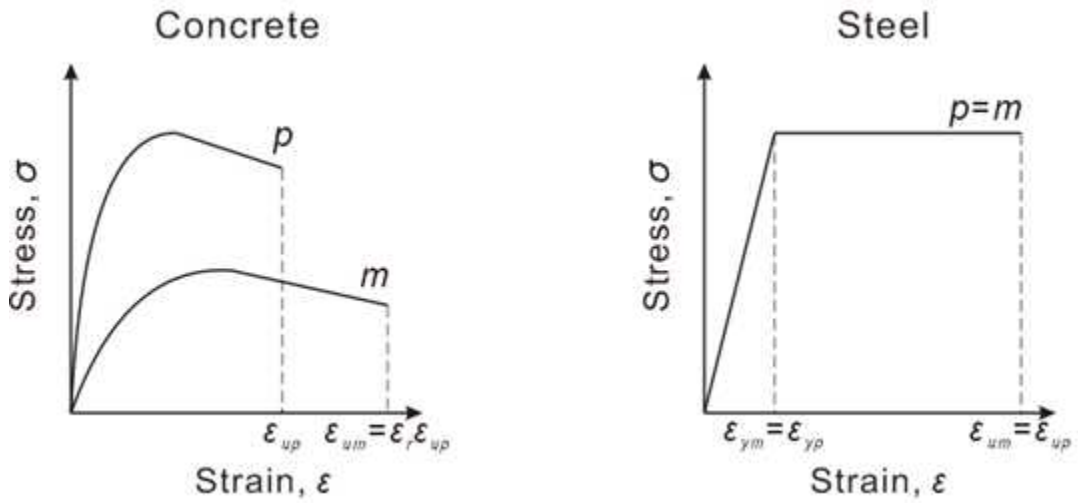


그림 1. 축소모형실험 시 철근과 콘크리트의 응력 변형률 관계

(p: 실구조물, m: 축소모형)

□ 축소모형 제작 재료의 개량을 통한 연구는 한계가 있다.

- 앞서 서술한 상사법칙의 개발을 통한 접근과는 별개로 축소모형 제작 재료를 개량하여 문제를 해결하기 위한 연구 또한 수행되었으며 중국의 IME(Institute of Mechanics Engineering)에서 수행된 Meng(2001)의 연구가 대표적이다. 이러한 연구는 축소모형의 철근과 콘크리트를 기계적·화학적으로 변환하여 콘크리트의 비선형성 및 변형률 왜곡에 의한 영향을 최소화하도록 하는 것에 그 목적을 두고 있다.

- 해당 연구(M. Qing 2012)에서는 철근콘크리트 구조물 상사실험 수행 시 축소모형에 사용되는 철근의 단면적이 실구조물에 비하여 축소됨에 따라서 발생하게 되는 철근과 콘크리트의 부착 매커니즘의 변화를 고려하기 위하여 먼저 축소모형에 사용되는 철근을 물리적으로 가공하여 표면에 나사선을 생성한 Threaded rod를 사용하여 부착 매커니즘의 변화에 따른 거동의 차이를 최소화하였다(그림 2 참조). 이와 더불어 축소모형 콘크리트로는 골재의 크기를 실구조물 콘크리트의 것보다 작은 것을 사용하고 배합비를 변화시켜 변형률 왜곡을 최소화한 마이크로 콘크리트(Micro concrete)를 이용하였다. 이러한 시도는 상사법칙 자체의 수정에 초점을 맞추었던 국내의 연구와는 달리 기존의 상사법칙을 그대로 사용하면서도 축소모형 재료의 개발을 통하여 실구조물의 거동을 제대로 예측할 수 있도록 하는 것에 초점을 맞춘 것이라 할 수 있다.



(a) 이형철근 (b) Threaded rod

그림 2. 이형철근과 Threaded rod 비교

- 하지만 이들 연구는 기존 상사법칙이 가지는 한계로 인한 실구조물의 거동 예측 시 발생하는 기본적인 문제점에 대한 연구를 등한시 한 것으로 본질적으로 축소모형 재료를 조절하는 것으로는 보정할 수 없는 해석의 정확도 측면에서의 한계를 가지게 된다.

- 특히 철근콘크리트는 동일한 배합비를 적용하여 배합을 하더라도 양생 기간 중의 외부 환경, 양생 시 사용한 재료의 품질에 따라 상이한 재료특성을 가지게 되는 경우가 많다. 상기 연구(M. Qing 2012)에서도 최적의 배합비를 결정하였으나 실제 축소모형의 제작과정에서는 목표로 한 콘크리트 재료특성을 완벽히 충족시킬 수 없었다. 결과적으로, 축소모형 재료의 개량만을 통해서는 철근콘크리트 축소모형실험을 효과적으로 수행하는 것은 사실상 불가능하며 축소모형 재료의 개량은 필연적으로 상사법칙 개발의 부수적인 과정으로 진행되어야 한다는 결론을 도출할 수 있다.

□ 정확한 축소모형실험을 위한 동적실험기법의 정립 또한 필요하다.

- 구조물의 내진성능평가를 위하여 가장 일반적으로 사용되는 진동대실험에 축소모형실험기법을 적용하기 위해서는 (1)축소모형을 사용함에 따른 시간압축 현상(Time contraction effect)과 (2)교각에서의 상부구조를 모사하기 위해 설치되는 부가질량의 두 가지 요인에 의한 영향을 충분히 고려할 수 있어야 한다.

- 시간압축현상은 시간 상사비가 1.0이하가 되는 현상으로 축소모형실험 시 진동대의 가진(Excitation) 속도는 실구조물에 실제로 가해지는 가진 속도보다 더 커야 한다는 것을 의미한다. 이는 축소모형에는 동일한 가진을 더욱 짧은 시간 내에 수행해야 한다는 것을 의미하므로 이를 위해서는 빠른 가진 속도를 구현하기 위한 고성능의 진동대가 필수적이다.

- 일반적인 진동대실험에서는 진동대용량의 한계로 인하여 실구조물 전체에 대한 실험을 수행하지 못하고 부재단위의 실험체를 대상으로 하여 실험이 수행된다. 이 경우 부재에 재하되는 하중에 의한 정확한 모사를 위하여 실험체 상부에 거대한 규모의 부가질량을 설치하여야 한다(그림 3 참조).

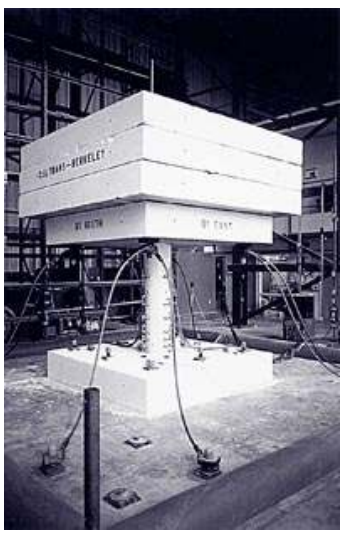


그림 3. 진동대실험 시 축소모형 상단에 설치된 부가질량

- 문제는 필요한 부가질량의 크기가 구조물이 비선형 거동이 발생함에 따라 실시간으로 변화해야 한다는 것이다. 이는 진동실험 도중 실시간으로 부가질량의 무게를 변경해야 한다는 것을 의미하나 진동실험 도중 실험을 중지하는 것은 불가능하다. 그러므로 진동대실험에 축소모형실험기법을 적용할 경우 실구조물의 거동을 정확히 모사하는 것이 어려우며 부가질량의 크기를 바꿀 수 없음에 따라 근사적인 모사만이 가능하게 된다.

□ 상사법칙 및 축소모형실험기법에 대한 연구가 시급하다.

- 앞서 서술한 내용을 종합하면 정확하고 합리적인 축소모형실험기법의 정립을 위해서는 이론적인 측면과 실험적인 측면 모두에 대한 연구가 필요하다는 결론을 얻을 수 있다.

- 먼저 이론적인 측면에서 상사법칙의 개발과 같은 이론적인 연구보다는 및 축소모형 재료의 개발에 치중한 연구가 많이 수행되었다는 것과 선행된 연구들의 성과는 그다지 만족스러운 결과를 주지 못하고 있는 확인하였다. 이는 축소모형실험에서 가장 근간이 되는 연구는 미진하다는 것을 의미하므로 상사법칙을 개발하기 위한 연구의 시급한 선행이 요구된다.

- 적절한 상사법칙의 개발 후에도 진동대실험으로는 정확한 실구조물 거동의 예측이 이론적으로 불가능하다는 것을 확인하였다. 그러므로 상사법칙의 개발에 대한 연구를 수행하는 것과 더불어 개발된 상사법칙을 적용하여 실구조물의 거동을 정확히 예측하게 할 수 있도록 하는 축소모형실험기법을 정립하는 것 또한 필수적이라 할 수 있다.

나. 경제/산업적 중요성

□ 성능기반설계로의 전환에 대비한 구조물 실험에 대한 수요가 증가하고 있다.

- 9.11테러, 동일본 대지진의 예에서 확인할 수 있었던 것은 재해 및 극한 하중에 의하여 사회기반시설의 붕괴함에 따라 국가에 초래되는 막대한 인적/경제적 손실이다. 이를 계기로 하여 현행 절차기반설계(Procedure based design)에 대한 반성이 촉구됨과 더불어 구조물의 파괴 매커니즘에 대한 심도 깊은 이해를 필요로 하는 성능기반설계(Performance based design)로의 전환이 이루어지고 있다.

- 성능기반설계의 도입을 위해 실구조물의 거동에 대한 이해가 선행되어야 함에 따라 이를 위해서는 구조실험의 수행이 필수적이다. 축소모형실험의 성공적인 개발을 통해 주어진 비용으로 최대한 많은 실험 데이터를 확보함으로써 성능기반설계기준으로의 변화에 효과적인 대처가 가능할 것이다.

□ 해외 건설시장에서의 경쟁력 확보를 위한 기술개발이 필요하다.

- 세계적인 수준과 비교하여 국내 건설교통기술의 수준은 평균 61.8%(최고수준 100)에 지나지 않으며 최고기술 보유국과의 기술격차는 평균 4.8년으로 특히 하드웨어적인 시공기술에 비해 설계와 관련된 소프트웨어 기술 등에 대한 원천기술이 부족한 상황이다.

- 최근 미국, 유럽 등 선진국들은 건설산업을 전략적으로 육성하여 미래 핵심기술투자를 강화하고 있으며 미국의 경우 건설통합, 자동화, 재난·재해 연구, 지속가능한 인프라 재료 기술개발 분야에 집중적으로 투자를 하고 있다.

- 국내 건설기술의 국제적 경쟁력을 갖추기 위해서는 기술수준의 향상이 필수적으로 요구되며 이를 위해서는 관련 연구를 뒷받침 할 효율적인 실험연구를 가능하게 하는 축소모형실험에 대한 연구가 필요하다.

다. 사회/문화적 중요성

□ 고령화 사회에 대비한 지속가능한 사회기반시설을 구축하여야 한다.

- 전 세계 각국에서 고령화 사회로의 급속한 진입에 따른 현존 사회기반시설의 유지 및 보수 관리가 매우 중요한 문제로 부상하고 있다. 특히 미국의 경우 이미 과도한 유지 관리 비용으로 인한 사회적인 문제가 빈번히 발생하고 있으며 적절한유지 관리가 이루어지지 않아 2007년 실제 교량의 붕괴 사고가 발생하였다.

- 특히 현대의 교통 시스템은 차량, 선박, 항공기의 유기적인 결합을 통하여 물류 및 통행의 효율을 극대화 하도록 구성된다는 점을 감안하면 이러한 시스템 내에서 특히 교량과 같은 중추적인 사회기반시설의 파손은 전체 시스템의 효율에 영향을 미치고 사회에 막대한 경제적인 손실을 초래할 수 있다.

- 축소모형실험기법의 정립을 통해 사회기반시설을 합리적으로 분석하고 이를 기반으로한 설계기술의 향상을 통하여 고령화 시대를 대비하여 유지보수비용을 최소화 할 수 있는 구조물의 설계가 가능해지며 사회의 항구적인 발전에 기여할 수 있을 것이다.

3. 연구개발 범위

- 본 연구는 상사법칙의 개발이라는 이론적인 연구에 초점을 맞추고 진행되었으며 개발된 이론적인 성과물의 타당성을 입증하기 위하여 해석적인 방법(상용유한요소해석 프로그램을 이용한 해석)과 실험적인 방법(진동대와 유사동적실험기법을 각각 적용한 프로토타입 및 축소모형 실험 수행)을 통한 검증을 수행하였다.

- 연구의 목적인 축소모형 실험을 위한 상사법칙의 개발은 이론 정립의 단계에 있고 학술적인 내용에 중점을 두고 있기에 별도의 시제품의 제작과 신기술의 적용을 통한 기존 기술

에서의 진보를 평가하기에는 시기상조라고 할 수 있다. 다만 본 연구는 구조물의 내진성능평가와 같은 실용적인 연구를 위한 기초를 정립하는 연구라 할 수 있으며 추후 후속과제 등을 통해서 좀 더 실용적인 결과를 이끌어 낼 수 있을 것으로 기대된다.

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내외 관련 연구 동향

□ 상사법칙 자체에 대한 연구 성과는 상당히 미흡하다.

- 철근콘크리트 구조물을 대상으로 한 상사법칙에 대한 연구는 앞서 밝힌 바와 같이 그 필요성에 대한 논의가 상당함에도 불구하고 연구의 진척정도는 현재까지는 미흡하다.

- 국내의 경우 김남식(2009), 이도근(2012) 등에 의하여 상사법칙 자체의 개량에 대한 연구가 진행이 된 바 있으나 제한적인 경우에 대해서만 검증이 되어 좀 더 보완이 필요한 것으로 생각된다.

- 해외의 경우에는 철근콘크리트 축소모형의 콘크리트 및 철근의 개량을 통하여 기존 상사법칙의 단점을 보완하고자 하였으나 실구조물 거동 예측에 있어 크게 향상된 결과를 주지는 못하고 있다(Meng 2001).

□ 하이브리드시뮬레이션의 기존 연구 성과를 활용해 즉각적인 적용이 가능하다.

- 하이브리드시뮬레이션의 초기 단계라 할 수 있는 유사동적실험에 대한 기본 개념이 Hakuno(1969)에 의해 제기된 이후로 이에 대한 꾸준한 많은 연구가 진행되어 왔다. 특히 해석에 적용되는 수치적분법에서 Nakashima(1990), Shing(1991)등의 연구를 통하여 실시간적으로 하중을 제어하더라도 만족할 만한 해석결과를 줄 수 있게 되었다.

- 하이브리드시뮬레이션의 직접적인 적용을 위한 기본연구는 상당히 진척되어 있어 본 연구에서 이를 곧바로 축소모형실험에 적용하더라도 무리가 없을 정도의 이론적인 기반이 이미 마련되어 있다고 볼 수 있다

2. 국내외 관련 기술 특허 동향

- 현재 국내외 모두 상사법칙을 제안하고 이를 이용한 축소모형실험기법을 적용하여 철근콘크리트 구조물의 거동을 예측하는 것과 관련된 특허는 전무한 상황이다.

- 이는 철근콘크리트 자체가 갖는 재료적인 비선형성으로 인하여 정확한 축소모형을 정립하는 것 자체에서 어려움이 있을 뿐만 아니라 정확한 거동 예측을 위해 적용이 필요한 하이브리드시뮬레이션 또한 실험의 해석 프로그램과 장비 구동 알고리즘을 구축하는데 있어 상당한 비용과 노력 그리고 전문적인 지식이 필요하다는 점에서 기인하는 것이라 사료된다.

- 따라서 본 연구의 성공적인 수행을 통하여 복합재료의 축소모형실험 분야의 원천기술을 확보함으로써 향후 실용화에 있어 선도적인 위치를 선점할 수 있을 것으로 생각된다.

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 복합재료 구조물의 동적해석에 적합한 상사법칙의 개발

가. 기존 연구 분석 및 한계점

- 축소모형실험 시 철근콘크리트 구조물과 같은 복합재료로 구성된 구조물을 대상으로 하는 경우 사용된 재료의 물성에서 차이가 날 수가 있다. 특히 콘크리트의 경우 실험 전에 여러 가지 배합비를 이용하여 축소모형 설계에 적용할 배합비를 찾아내어 모형을 설계하더라도 모형 콘크리트의 타설 및 양생 과정을 완벽히 동일하게 유지시키는 것은 불가능하여 많은 경우 설계 시 고려하였던 물성과 실제로 제작된 모형 콘크리트의 물성에서 차이가 발생하게 된다.

- 이러한 경우 프로토타입과 모형 재료 물성에 대한 상사특성을 고려하기 위하여 사용되는 것이 응력상사비(s_σ)와 변형률비(ε_r)이다. 두 값은 프로토타입과 모형의 응력-변형률 관계를 비교하여 계산할 수 있으며 일반적으로 식 (1)을 통해서 계산할 수 있다. 식 (1)에서 과 는 프로토타입과 모형 재료의 최대 응력을 나타내며 과 는 프로토타입과 모형의 최대 응력에서의 변형률을 나타낸다. 이는 그림 4와 같다.

$$s_\sigma = \frac{\sigma_m}{\sigma_p},\ \varepsilon_r = \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p} \tag{1}$$

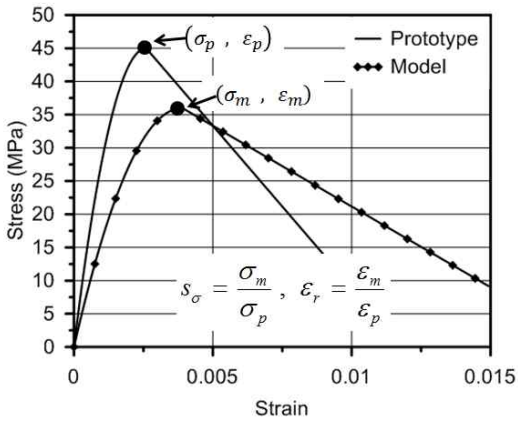


그림 4. 재료의 응력상사비와 변형률비 간 관계

- 복합재료 구조물에서의 사용을 위한 상사법칙에서 가장 중요한 점은 모형 제작 시 사용되는 재료 간의 변형률비가 다름에 의하여 발생하는 변형률비 왜곡현상(Strain distortion)을 어떻게 고려하느냐에 대한 것이다. 기존에 RC 구조물의 변형률비(Strain ratio) 산정에 대한 연구는 구조물 단면에 대한 단면해석(Sectional Analysis)을 수행하여 단면에 작용하는 모멘트의 크기에 따라 각 재료가 부담하게 되는 휨 강성(Flexural Stiffness)의 상대적인 비율을 구하고 이 비율에 따라서 구조물의 변형률비가 달라진다는 가정을 이용하였다. 이에 따르면 변형률비는 단면에 발생하는 모멘트의 크기가 커짐에 따라서 작아지며 철근 항복 이후 그 값은 철근의 변형률비인 1.0과 같은 값이 된다. 이와 관련된 연구로는 김남식 외(2009), 조남소(2008), 이도근 외(2010)가 대표적이다.

- 이들 연구에서 공통적으로 나타나는 문제점은 먼저 상사법칙 내 시간상사비가 변형률비와 무관하다고 본 것에 있다. 이들 연구는 모두 Krawinkler(1982)에 의해서 제안된 아래 표 2와 같은 상사법칙을 이용하였으며 Krawinkler(1982)에서는 시간상사비가 변형률비와 연관이 되어 있음에도 불구하고 기존 연구에서는 이를 무시하였다.

표 2. Krawinkler(1982) 및 기존 연구에서 사용한 상사법칙의 상사비 비교

Quantities	Dimension	Scale factors			
		Krawinkler	N. S. Kim	N. S. Cho	D. G. Lee
Force, P	F	$s_\sigma s_L^2$	$s_L^2 E_r(\epsilon)\epsilon_{ur}$	$s_L^2 E_r(\epsilon)\epsilon_r$	$s_\sigma s_L^2$
mass, m	$FL^{-1}T^2$	$s_\sigma s_L^2$	$s_L^2 E_r(\epsilon)\epsilon_{ur}$	$s_L^2 E_r(\epsilon)\epsilon_r$	$s_\sigma s_L^2$
Length, L	L	s_L	s_L	s_L	s_L
Displacement, u	L	$s_L\epsilon_r$	s_L	s_L	$s_L\epsilon_r$
Velocity, v	LT^{-1}	$s_L^{1/2}\epsilon_r^{1/2}$	$s_L^{1/2}$	$s_L^{1/2}$	$s_L^{1/2}\epsilon_r^{1/2}$
Acceleration, a	LT^{-2}	1	1	1	1
Gravitational Acceleration, g	LT^{-2}	1	1	1	1
Time, t	T	$s_L^{1/2}\epsilon_r^{1/2}$	$s_L^{1/2}$	$s_L^{1/2}$	$s_L^{1/2}\epsilon_r^{1/2}$
Frequency, ω	T^{-1}	$s_L^{-1/2}\epsilon_r^{-1/2}$	$s_L^{-1/2}$	$s_L^{-1/2}$	$s_L^{-1/2}\epsilon_r^{-1/2}$
Stress, σ	FL^{-2}	s_σ	$E_r(\epsilon)\epsilon_{ur}$	$E_r(\epsilon)\epsilon_r$	$E_r(\epsilon)\epsilon_r$
Strain, ϵ	-	ϵ_r	ϵ_r	ϵ_r	ϵ_r
Modulus, E	F	s_σ/ϵ_r	$E_r(\epsilon)$	$E_r(\epsilon)$	$E_r(\epsilon)$
Stiffness, K	F	$s_\sigma s_L/\epsilon_r$	$s_L E_r(\epsilon)\epsilon_{ur}$	$s_L E_r(\epsilon)\epsilon_r$	$s_L E_r(\epsilon)$

- 기존 연구에서 시간상사비와 변형률비 간의 상관관계를 무시하였기 때문에 먼저 이의 적용에 가능 여부에 대한 타당성을 해석적으로 확인하는 작업을 먼저 수행하였다. 해석 대상 구조물로 단자유도 시스템(Single degree of freedom system)을 가정하고 변형률비를 2.0으로 고정하였을 경우 Krawinkler(1982)와 기존 연구에서 사용한 상사법칙 모두를 적용하여 원형구조물의 거동과 비교하였다. 그 결과 아래 그림 5, 6에서 확인할 수 있는 것과 같이 시간상사비와 변형률비 간의 상관관계를 무시함에 따라 간단한 경우에 대해서도 기존 상사법칙은 원형구조물 거동에 대한 정확한 예측을 하지 못함을 확인하였다.

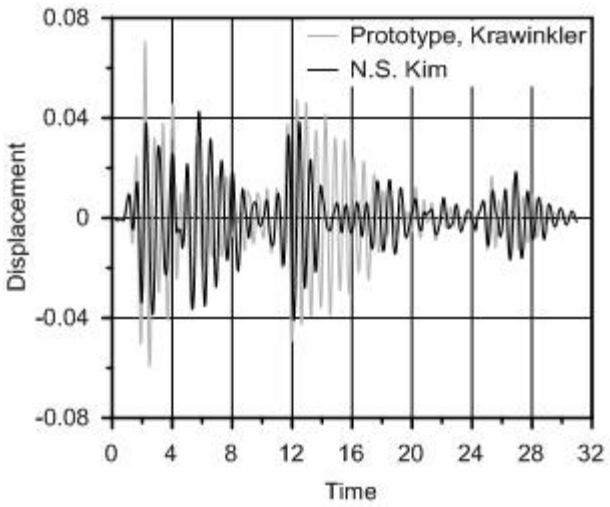


그림 5. 원형구조물과 각 상사법칙을 적용한 예측 값 간 비교
(시간에 따른 구조물 변위 응답 비교)

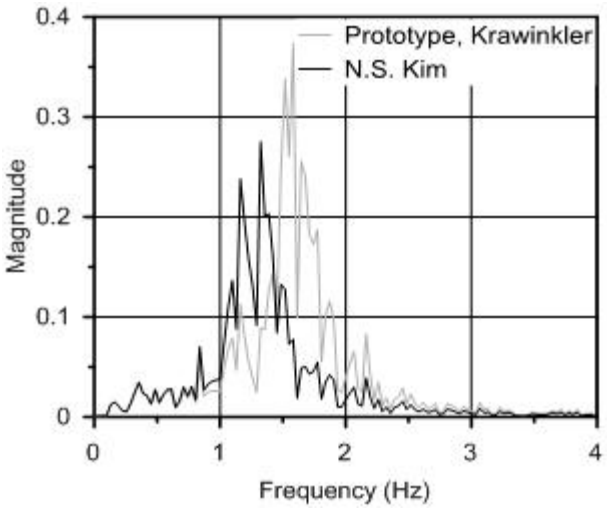


그림 6. 원형구조물과 각 상사법칙을 적용한 예측 값 간 비교
(변위 응답의 FFT 해석결과 비교)

- 두 번째로 Krawinkler(1982)의 상사법칙에서 정의된 변형률비는 사실 상 구조물 전체가 동일한 재료로 만들어져있다고 가정하였을 때의 변형률비로써 구조물 전체를 대표하는 값임에 반하여 기존 연구에서는 단면해석 결과를 토대로 특정 단면에서의 변형률비를 산정하고 이를 전체 변형률비로 간주한다는 것이다. 구조물 각 지점에 가해지는 하중은 서로 상이하고 단면해석을 통해서 구해지는 특정 단면의 변형률비는 단면에 가해지는 하중에 따라 달라진다는 점을 고려하면 구조물 각 지점의 단면에서의 변형률비는 서로 상이하다. 기존 연구에서는 기둥 하부 모멘트가 가장 크게 발생하는 지점을 기준으로 하였는데 이 경우 기둥 전체의 변형률비를 기둥 하부의 변형률비와 동일하게 간주하는 것으로 필연적으로 오류가 발생하게 된다.

- 마지막으로 기존 연구결과에 따르면 구조물의 변형률비는 구조물에 가해지는 하중과 이에 따른 파괴정도에 따라 달라지게 되는 값임에 비하여 기존 연구에서 사용한 Krawinkler(1982)의 상사법칙은 변형률비가 일정한 경우에 유효한 상사법칙이기 때문에 변형률비가 변동하는 경우에 적용하기 위해서는 상사법칙 내 상사비의 수정이 필요하게 된다.

나. 변형률비 변동을 고려한 상사법칙의 개발

- 기존 연구 결과가 내포하고 있는 앞서 언급한 세 가지의 문제점을 반영하여 본 연구에서는 이들 문제점을 해결할 수 있는 새로운 상사법칙을 우선적으로 개발하였다. 먼저 변형률비가 변동함에 따른 특성을 고려할 수 있도록 상사비를 수정하였다. Krawinkler(1982)의 상사법칙은 본질적으로 변형률비가 일정한 경우에 유도된 것으로 변형률비가 변동하는 경우에 대한 정확한 거동 예측의 여부에 대해서는 검증이 이루어진 바가 없고 이를 적용한 다른 연구에서도 이에 대한 분석이 시도된 바는 없다.

- 변형률비의 변동에 따른 영향은 먼저 구조물의 강성 상사비와 변형률비 간의 관계로부터 확인할 수 있다. 대상 구조물이 캔틸레버 기둥인 경우 Krawinkler(1982)에서 구조물의 강성상사비와 변형률비 간 관계는 식(2)와 같이 표현된다.

$$s_k = \frac{k_m}{k_p} = \frac{s_\sigma s_L}{\varepsilon_r} \rightarrow \varepsilon_r = \frac{s_\sigma s_L k_p}{k_m} \tag{2}$$

- 위에서 k_p와 k_m은 각각 프로토타입과 모형의 강성을 의미하며 s_σ은 응력상사비, s_L은 길이상사비(=축소율)이다. 기둥의 변위 u와 이에 의한 구조물의 반력 R이 주어질 때, 기둥의 강성은 아래 식(3)과 같은 두 종류의 강성으로 표현된다.

$$k_t = \frac{dR}{du}\,,\; k_s = \frac{R}{u} \tag{3}$$

- 위에서 k_s는 할선(secant) 강성, k_t는 접선(tangent) 강성을 의미한다. 두 종류의 강성 각각을 식(2)에 적용하여 k_s를 이용한 변형률비를 $\varepsilon_{r,kt}$, k_t를 이용한 변형률비를 $\varepsilon_{r,ks}$라 할 때 각각은 식(4)와 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{r,kt} &= s_\sigma s_L \left(\frac{dR_p}{du_p}\right) / \left(\frac{dR_m}{du_m}\right) \\ \varepsilon_{r,ks} &= s_\sigma s_L \left(\frac{R_p}{u_p}\right) / \left(\frac{R_m}{u_m}\right) \end{aligned} \tag{4}$$

- 에서 u_p와 R_p는 프로토타입의 변위와 반력, u_m와 R_m는 모형의 변위와 반력을 의미한다. 변형률비가 일정한 값을 가지는 경우 식(4)에서 정의한 두 변형률비는 서로 동일한 값을 가지게 되나 변형률비가 변동하는 경우 두 변형률비는 서로 다른 값을 가지게 된다. Krawinkler(1982)에서는 변형률비가 일정한 경우만을 대상으로 하였으므로 하나의 변형률비 를 이용하여 상사비를 구성할 수 있으나 변형률비가 변동하는 경우에는 두 변형률비 중에서 어떤 값을 변형률비로 사용해야 하는지에 대한 검증이 필요하다.

- 종합하면 기존 연구 중 김남식(2009)과 조남소(2008)에서는 시간상사비와 변형률비의 관계를 고려하지 않았고 이 경우 변형률비가 일정한 단자유도 시스템과 같은 비교적 간단한 구조물을 대상으로 하더라도 프로토타입의 정확한 거동 예측에 있어 한계가 있다. 또한 구조물의 강성에 대한 상사비의 정의에서 두 종류의 상이한 변형률비가 정의될 수 있고 변형률비가 변동하는 경우 두 값은 서로 다른 값을 가지게 되므로 하나의 변형률비만 사용이 되는 기존의 상사법칙에 대한 검증이 요구된다. 이러한 점들을 고려할 때, 시간상사비와 변형률비 간의 관계와 더불어 변형률비 변동에 따른 영향을 고려할 수 있는 상사법칙의 개발이 필요하다는 결론을 얻을 수 있다.

- 위에서 정의한 두 종류의 변형률비를 고려하여 본 연구에서는 Krawinkler의 상사법칙에 기반한 상사법칙을 제안하였다. 표 3은 기존 연구에서 사용된 상사법칙과 제안된 상사법칙의 상사비를 비교한 것이다. 변형률비가 일정한 경우 제안된 상사법칙은 Krawinkler의 상사법칙과 동일하도록 설정하였고 변형률비가 변동하는 경우 식(4)에서 정의된 두 종류의 변형률비가 각각의 물리량에 적용되도록 변경하였다.

표 3 제안된 상사법칙과 기존 상사법칙 간 비교

Quantities	Dimension	Scale factors				
		Krawinkler	N. S. Kim	N. S. Cho	D. G. Lee	This study
Force, F	F	$s_\sigma s_L^2$	$s_L^2 E_r(\epsilon)\epsilon_{ur}$	$s_L^2 E_r(\epsilon)\epsilon_r$	$s_\sigma s_L^2$	$s_\sigma s_L^2$
Mass, m	$FL^{-1}T^2$	$s_\sigma s_L^2$	$s_L^2 E_r(\epsilon)\epsilon_{ur}$	$s_L^2 E_r(\epsilon)\epsilon_r$	$s_\sigma s_L^2$	$s_\sigma s_L^2$
Length, L	L	s_L	s_L	s_L	s_L	s_L
Displacement, u	L	$s_L\epsilon_r$	s_L	s_L	$s_L\epsilon_r$	$s_L\epsilon_{rs}$
Variation of displacement du	L	$s_L\epsilon_r$	s_L	s_L	$s_L\epsilon_r$	$s_L\epsilon_{rt}$
Velocity, v	LT^{-1}	$s_L^{1/2}\epsilon_r^{1/2}$	$s_L^{1/2}$	$s_L^{1/2}$	$s_L^{1/2}\epsilon_r^{1/2}$	$s_L^{1/2}\epsilon_{rt}^{1/2}$
Acceleration, a	LT^{-2}	1	1	1	1	1
Gravitational Acceleration, g	LT^{-2}	1	1	1	1	1
Variation of Time, dt	T	$s_L^{1/2}\epsilon_r^{1/2}$	$s_L^{1/2}$	$s_L^{1/2}$	$s_L^{1/2}\epsilon_r^{1/2}$	$s_L^{1/2}\epsilon_{rt}^{1/2}$
Frequency, ω	T^{-1}	$s_L^{-1/2}\epsilon_r^{-1/2}$	$s_L^{-1/2}$	$s_L^{-1/2}$	$s_L^{-1/2}\epsilon_r^{-1/2}$	$s_L^{-1/2}\epsilon_{rt}^{-1/2}$
Stress, σ	FL^{-2}	s_σ	$E_r(\epsilon)\epsilon_{ur}$	$E_r(\epsilon)\epsilon_r$	$E_r(\epsilon)\epsilon_r$	s_σ
Secant stiffness, K_s	F	$s_\sigma s_L/\epsilon_r$	$s_L E_r(\epsilon)\epsilon_{ur}$	$s_L E_r(\epsilon)\epsilon_r$	$s_L E_r(\epsilon)$	$s_\sigma s_L/\epsilon_{rs}$
Tangent stiffness, K_t	F	$s_\sigma s_L/\epsilon_r$	$s_L E_r(\epsilon)\epsilon_{ur}$	$s_L E_r(\epsilon)\epsilon_r$	$s_L E_r(\epsilon)$	$s_\sigma s_L/\epsilon_{rt}$

- 기존 연구에서 사용한 상사법칙과의 가장 큰 차이점은 기존에는 변위 u와 변위 변화량에 적용되는 변형률비가 동일한데 반해 제안된 상사법칙에서는 이를 서로 구분하여 변위 변화량에는 $\varepsilon_{r,kt}$가 적용되고 변위에는 $\varepsilon_{r,ks}$가 적용된다는 점에 있다. 즉, 특정 시점에서의 변위의 변화량은 그 시점에서의 프로토타입과 모형 강성의 비로부터 정의되는 $\varepsilon_{r,kt}$와 관계가 있어야 하고 변위 자체는 그 시점까지의 변위의 변화량의 합으로 구성이 되므로 가 아닌 $\varepsilon_{r,ks}$를 적용한 것이다. 각 변형률비와 변위 및 변위 변화량과의 관계는 힘 및 하중상사비와 변형률비는 무관하다는 것을 적용하여 식(5)와 같이 유도할 수 있다. 식(5)에서 변위의 변화량은 와 연관되어 있으므로 속도상사비는 와 연관이 되며 가속도 상사비는 1.0이므로 시간상사비는 의 제곱근과 비례하도록 설정하였고 역시 시간 자체가 아닌 시간의 변화량에 $\varepsilon_{r,kt}$가 적용된다.

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{r,kt} &= s_\sigma s_L \left(\frac{dR_p}{du_p}\right)/\left(\frac{dR_m}{du_m}\right) = s_\sigma s_L \left(\frac{dR_p}{du_p}\right)/\left(\frac{s_\sigma s_L^2 dR_p}{du_m}\right) = \frac{du_m}{s_L du_p} \\
\varepsilon_{r,ks} &= s_\sigma s_L \left(\frac{R_p}{u_p}\right)/\left(\frac{R_m}{u_m}\right) = s_\sigma s_L \left(\frac{R_p}{u_p}\right)/\left(\frac{s_\sigma s_L^2 R_p}{u_m}\right) = \frac{u_m}{s_L u_p} \\
&\rightarrow \frac{u_m}{u_p} = s_L\varepsilon_{r,ks}\ ,\ \frac{du_m}{du_p} = s_L\varepsilon_{r,kt}
\end{aligned} \tag{5}$$

- 식(5)에서 변위의 변화량은 $\varepsilon_{r,kt}$와 연관되어 있으므로 속도상사비는 $\varepsilon_{r,kt}$와 연관이 되며 가속도 상사비는 1.0이므로 시간상사비는 $\varepsilon_{r,kt}$의 제곱근과 비례하도록 설정하였고 역시 시간 자체가 아닌 시간의 변화량에 $\varepsilon_{r,kt}$가 적용된다. 식(4)에서 $\varepsilon_{r,ks}$는 시간에 따른 구조물의 강성의 변화를 의미하는 $\varepsilon_{r,kt}$을 적분하여 계산되므로 가 변동하는 경우 두 변형률비는 서

로 다른 값을 가지게 된다.

$$\varepsilon_{r,ks} = \frac{\int_0^t du_m}{\int_0^t \frac{s_L}{\varepsilon_{r,kt}} du_m} \tag{6}$$

- 변위와 변위 변화량 간에 서로 다른 변형률비가 적용이 됨에 따라 두 값과 각 변형률비 간의 관계는 식(6)과 같다.

다. 상사법칙의 실적용을 위한 변형률비 산정방법 개발

- 변형률비 변동을 고려한 상사법칙을 제안한 다음으로 이의 적용을 위한 변형률비의 산정방법을 제안하였다. 그림. 5, 6의 해석결과를 통해 시간상사비와 변형률비 간 관계를 고려하지 않는 경우 정확한 예측이 불가능함을 확인하였으므로 시간상사비와 변형률비 간의 관계를 고려해야 하여 축소모형실험을 수행하여야 함이 명백하나 이는 변동하는 변형률비에 따라 시간상사비 또한 계속적으로 변하게 되므로 축소모형에 가해지는 지진파의 시간과 변형률비의 관계를 고려한 계속적인 보정이 이루어져야 한다는 것을 의미한다. 구조물의 동적 해석 시 Newmark 방법 등의 수치적분법(Numerical integration)이 널리 이용되므로 이 경우 지진파의 시간에 대한 보정은 수치적분법 상의 각 Step에서의 시간증분 Δt 의 값을 조정하는 것이 된다.

- 여기서 시간증분의 보정은 수치적분을 통한 모형 응답의 계산 전에 이루어져야 하나 보정을 위해 필요한 변형률비의 값은 모형의 응답이 주어져야 계산할 수 있다는 문제가 발생한다. 따라서 변형률비의 산정에는 반복계산이 요구된다고 할 수 있다.

- 따라서 본 연구에서는 제안된 상사법칙의 특성을 고려하여 반복계산을 통한 변형률비의 산정방법을 제시하였으며 이는 그림 7과 같다. 먼저 축소모형의 해석 시 각 Step에서 임의로 $\varepsilon_{r,kt}$ 를 가정하고 시간증분을 보정한 후 축소모형에 작용하는 하중과 축소모형의 변위를 수치적분을 통해 계산한다. 이와 동시에 하중상사비를 고려하여 프로토타입에 작용하는 하중을 계산한 후 이 값을 프로토타입에 가하였을 때의 변위를 정적해석을 통해 계산한다. 계산된 프로토타입과 모형의 변위를 식(5)에 적용하면 변형률비를 계산할 수 있는데 여기서 계산된 변형률비와 앞서 가정한 변형률비가 서로 동일한 값을 가질 때까지 반복적으로 해석을 수행하고 두 값이 동일한 경우 다음 Step의 해석을 진행하도록 하였다.

- 제안된 방법에서 모형 해석 시 각 Step 마다 프로토타입에 대한 정적해석을 수행하는 것은 모형의 강성이 변함에 따른 프로토타입의 강성을 해석적으로 예측하여 변형률비를 산정하기 위함이다. 이 때 프로토타입 해석 시 하중은 모형에 가해지는 하중에 하중상사비를 적용한 것으로 모형에 가해지는 것과 동일한 정도로 프로토타입에 하중이 가해짐에 따른 프로토타입의 강성을 산정할 수 있게 된다.

- $\varepsilon_{r,ks}$ 는 모든 step에 대한 해석이 완료된 이후 식(6)을 통해 계산할 수 있으며 계산된 와를 제안된 상사법칙에 적용하면 모형의 응답으로부터 프로토타입의 응답을 예측하는데 적

용할 수 있다.

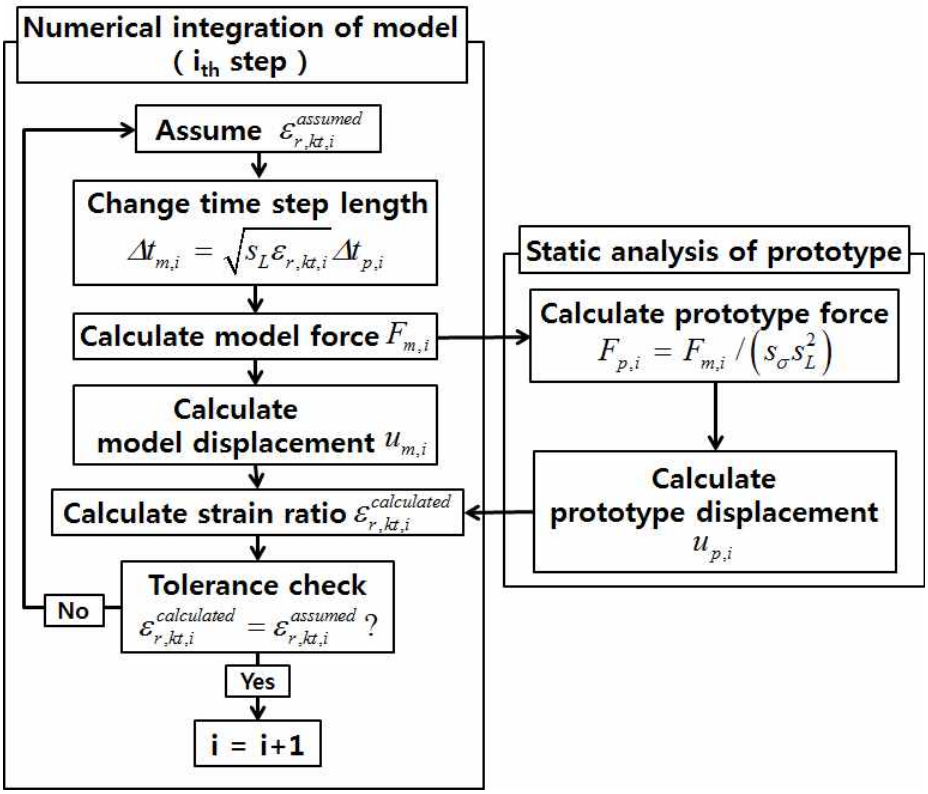


그림 7 반복계산을 통한 변형률비 산정방법

라. 해석을 통한 개발된 상사법칙과 변형률비 산정방법의 검증

- 앞서 개발된 상사법칙의 검증을 위하여 구조물 지진해석에 널리 사용되는 유한요소해석 프로그램인 OpenSees를 적용하여 이론적인 검증과정을 수행하였다. 해석 대상구조물은 사각형 단면을 가지는 철근콘크리트 기둥으로 원형구조물과 축소모형의 단면 제원은 아래 그림 8과 같다. 두 구조물은 단자유도 시스템으로 구조물 상부의 영향을 고려하기 위하여 프로토타입(=원형구조물) 상부의 질량을 20,000kg으로 가정하였다. 축소모형의 축소율(=길이상사비)은 1/4로 설정하였다.

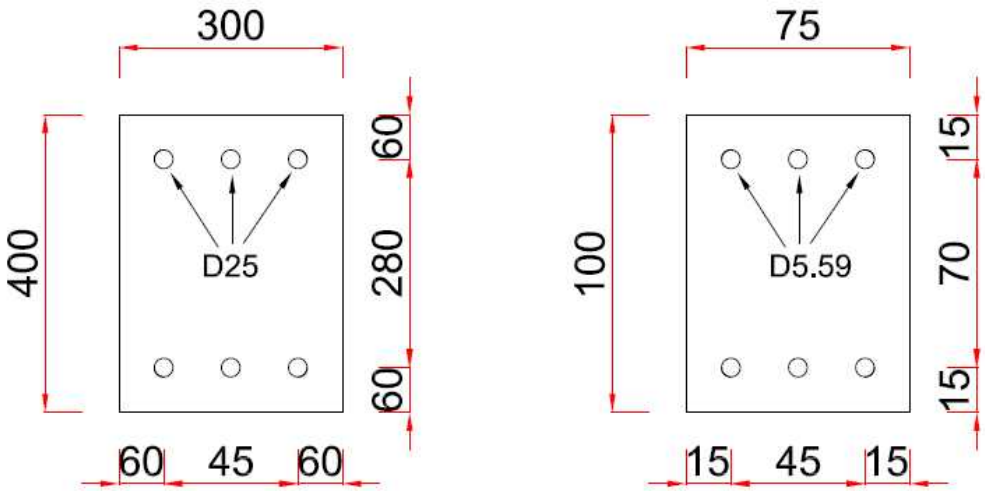


그림 8. 해석 대상 구조물의 단면 제원

- 철근의 변형률비는 1.0, 콘크리트의 변형률비는 1.5로 하여 변형률 왜곡에 의한 영향을 고

려하였으며 철근의 응력상사비는 1.0, 콘크리트의 응력상사비는 0.8로 하였다. 철근의 재료 모델은 철근콘크리트 기둥의 비선형 해석 시 널리 사용되는 Popovics model을 이용하였고 콘크리트 재료 모델은 기둥의 Hoop 철근에 의한 구속효과를 고려하기 위하여 Mander Model을 이용하였다. 상기한 모델의 사용에 따른 콘크리트의 응력-변형률 관계는 아래 그림 9와 같다.

- 모형철근의 단면적이 길이상사비의 제곱을 만족하지 않는데 이는 철근과 콘크리트의 응력상사비가 다름을 고려하여 모형철근의 면적을 추가적으로 조정하였기 때문이다(Harris 1999).

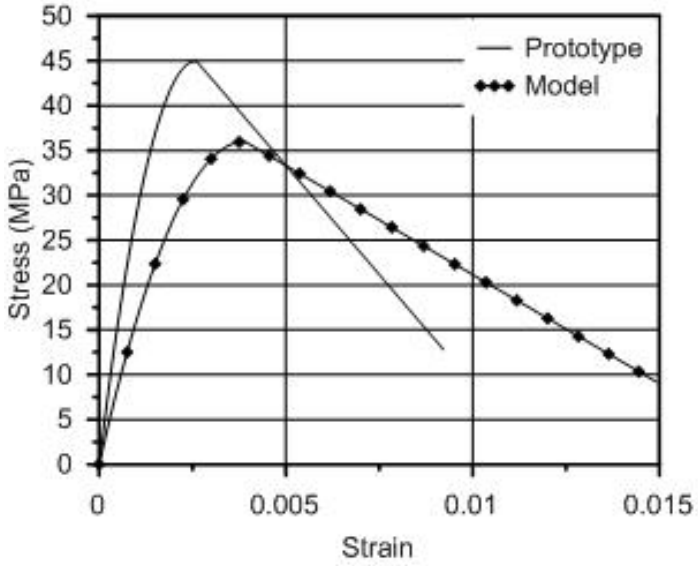


그림 9. 해석 시 사용한 프로토타입과 모형 콘크리트의 응력-변형률 관계 비교

- 입력지진파로는 El-centro 지진의 남북방향(NS) 성분을 사용하였으며 해당 지진파의 시간에 따른 가속도 성분의 변화는 그림 10과 같다. 지진파의 시간증분(Time step length)는 0.02초이며 철근 항복 유무에 따른 영향을 모두 고려하기 위하여 철근 항복이 발생하지 않은 경우에는 기존 입력지진파의 가속도 성분을 각각 0.3, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0배만큼 변화시켜 가며 해석을 수행하였다. 수치적분 알고리즘으로는 Newmark 방법(Constant acceleration)을 이용하였다.

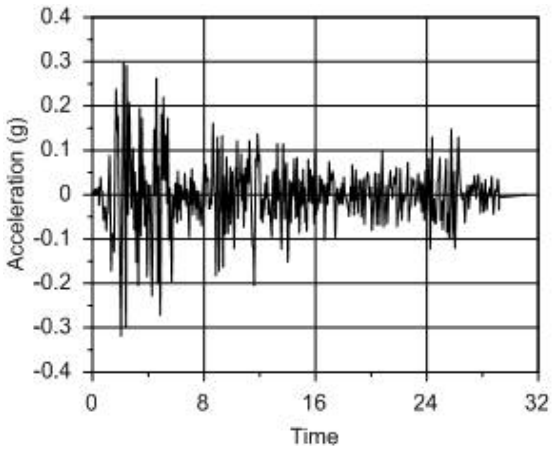


그림 10 검증에서 사용한 El-Centro 지진파의 시간에 따른 가속도

- 그림 11~75는 프로토타입의 응답과 김남식(2009), 조남소(2008) 및 본 연구에서 제안한 상사법칙과 변형률비 산정방법을 통해 예측된 프로토타입의 응답(=예측결과)을 비교하여 나타낸 것으로 그림 11~25은 변위응답, 그림 26~40은 변위 응답의 FFT 해석결과, 그림 41~55은 하중-변위 관계, 그림 56~70은 하중 및 변위 응답을 이용하여 구한 누적에너지이력을 나타낸 것이다. 그림 71~75는 제안 상사법칙의 적용 시 각 Step 별로 적용한 변형률비의 변동을 가진파의 증폭비에 따라 나타낸 것이다.

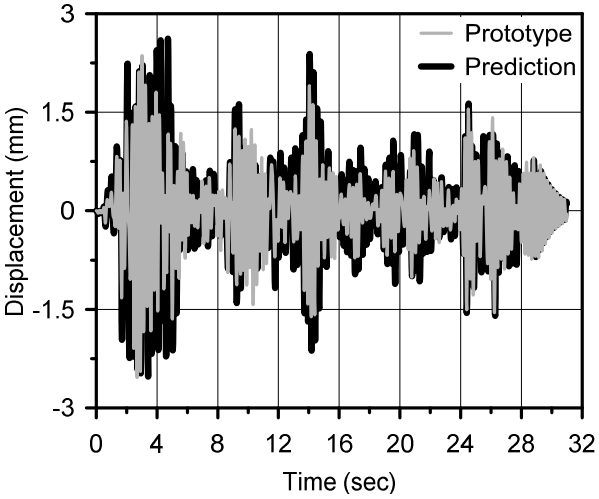


그림 11 프로토타입과 예측결과 비교
(증폭비 0.3, 철근항복 X,
김남식(2009) 상사법칙 적용)

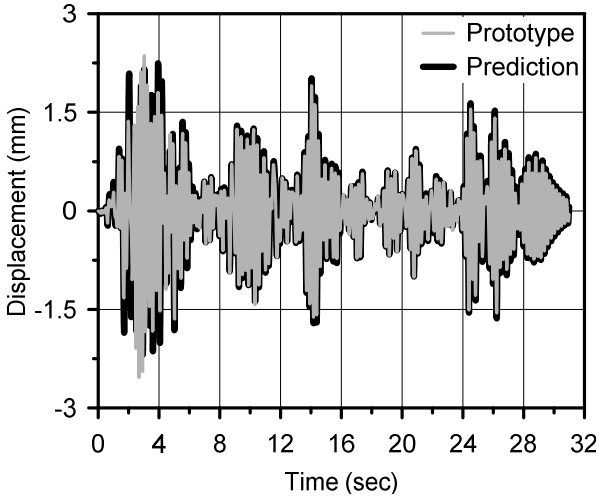


그림 12 프로토타입과 예측결과 비교
(증폭비 0.3, 철근항복 X,
조남소(2008) 상사법칙 적용)

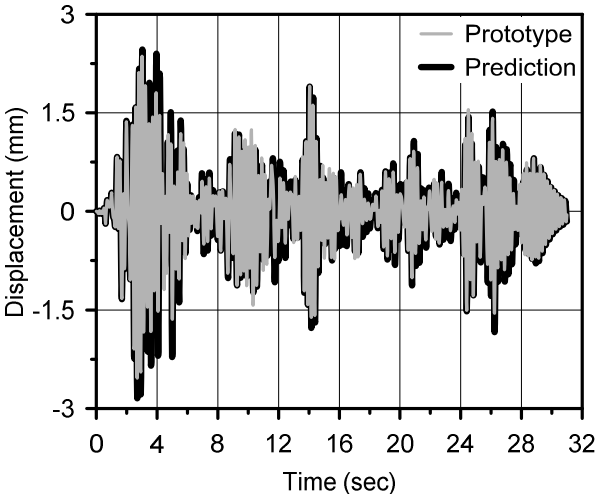


그림 13 프로토타입과 예측결과 간
비교(증폭비 0.3, 철근항복 X, 제안
상사법칙 적용)

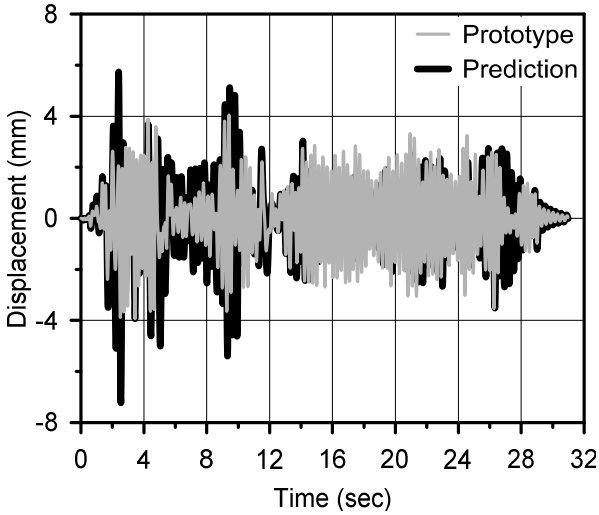


그림 14 프로토타입과 예측결과 간
비교(증폭비 0.5, 철근항복 X,
김남식(2009) 적용)

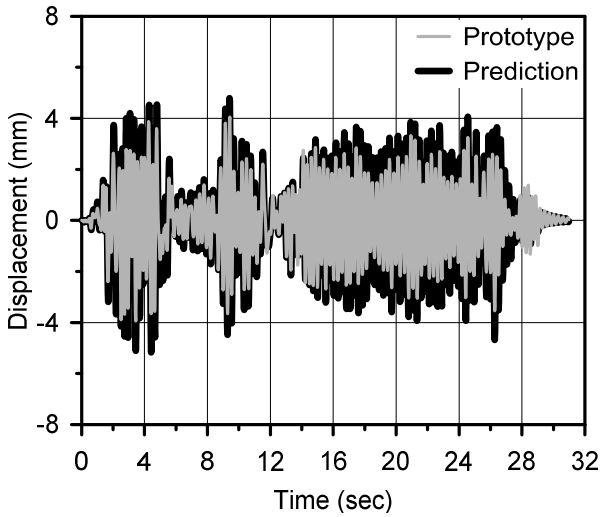


그림 15 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 0.5, 철근항복 X, 조남소(2008) 적용)

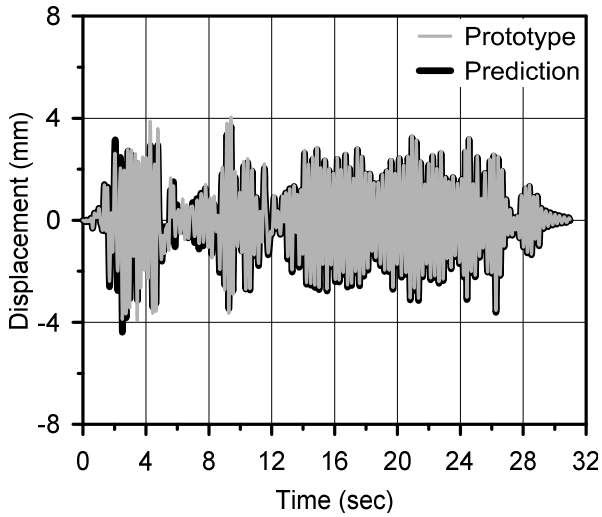


그림 16 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 0.5, 철근항복 X, 제안 상사법칙 적용)

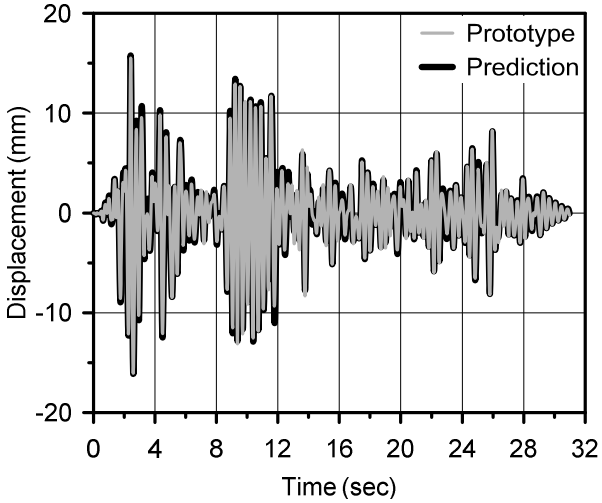


그림 17 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.0, 철근항복 O, 김남식(2009) 적용)

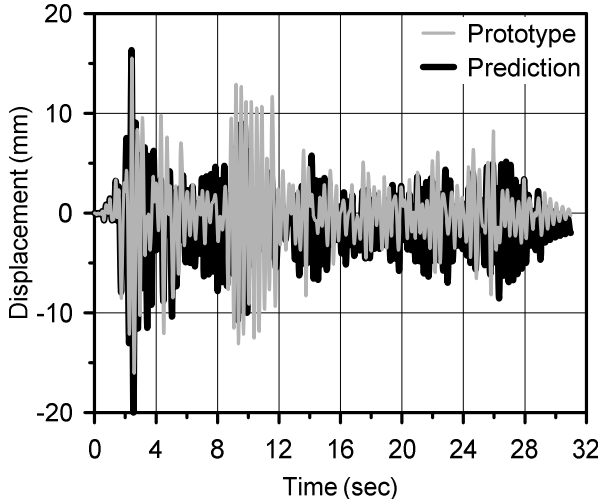


그림 18 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.0, 철근항복 O, 조남소(2008) 적용)

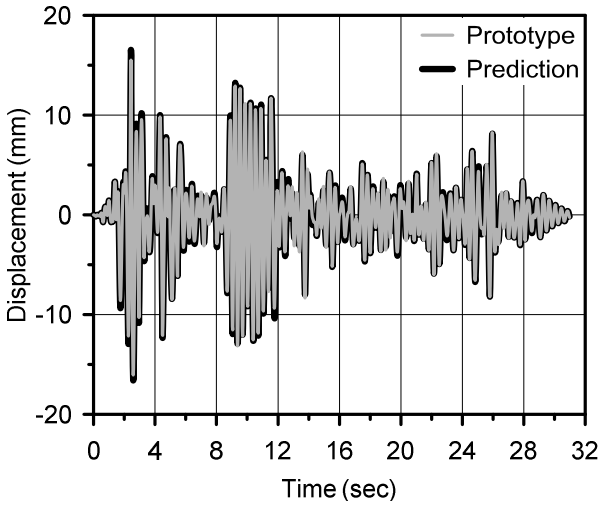


그림 19 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.0, 철근항복 O, 제안 상사법칙 적용)

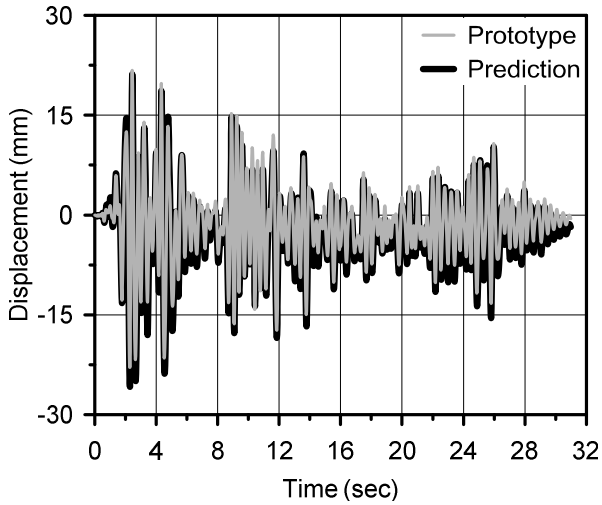


그림 20 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.5, 철근항복 O, 김남식(2009) 적용)

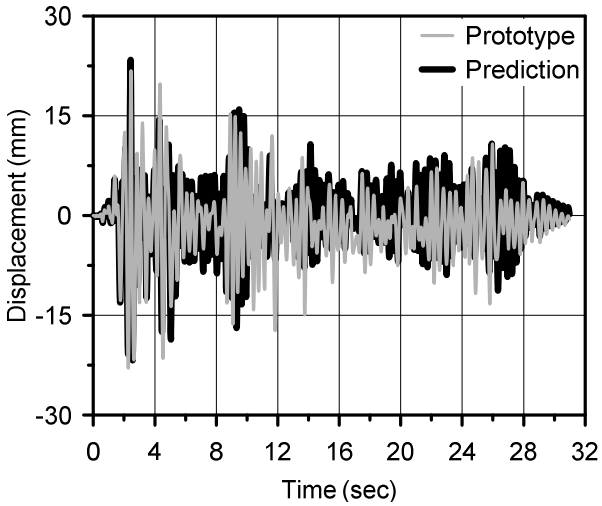


그림 21 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.5, 철근항복 O, 조남소(2008) 적용)

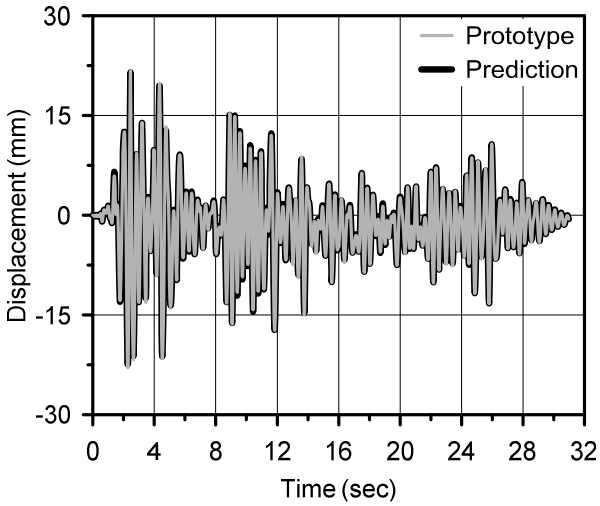


그림 22 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.5, 철근항복 O, 제안 상사법칙 적용)

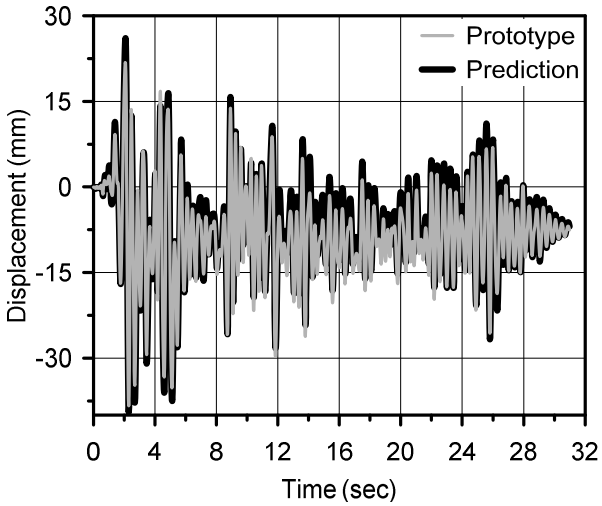


그림 23 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 2.0, 철근항복 O, 김남식(2009) 적용)

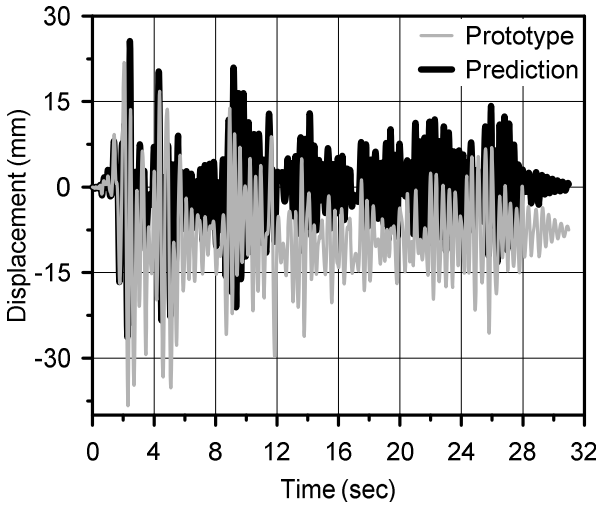


그림 24 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 2.0, 철근항복 O, 조남소(2008) 적용)

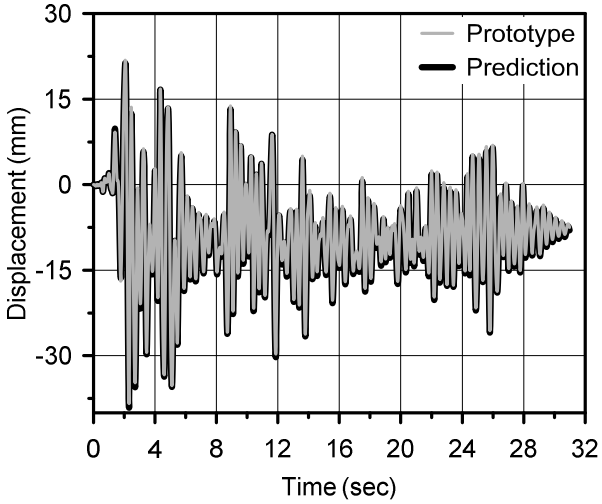


그림 25 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 2.0, 철근항복 O, 제안 상사법칙 적용)

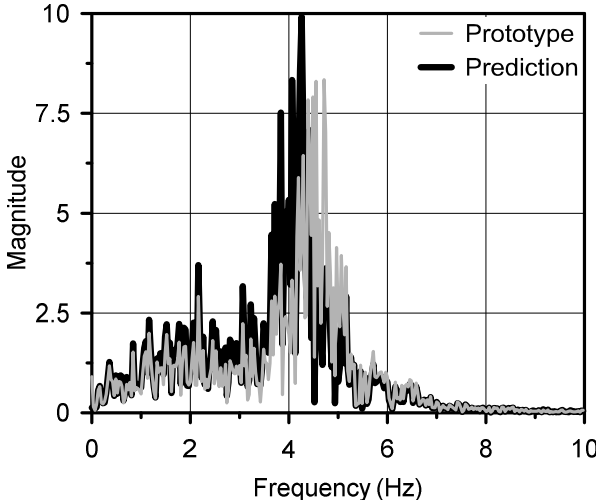


그림 26 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 0.3, 철근항복 O, 김남식(2009) 적용)

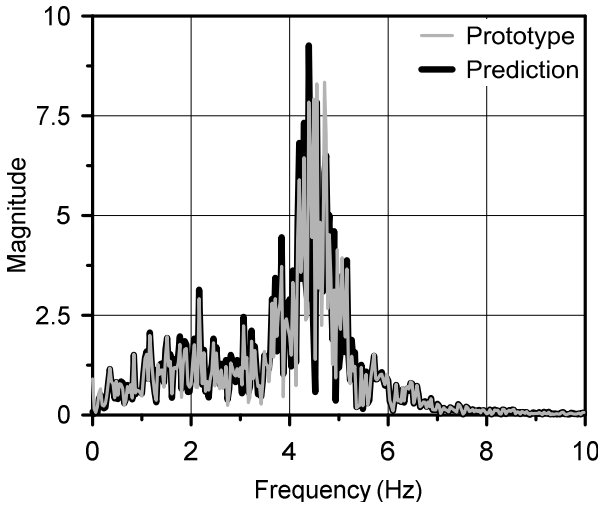


그림 27 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 0.3, 철근항복 X, 조남소(2008) 적용)

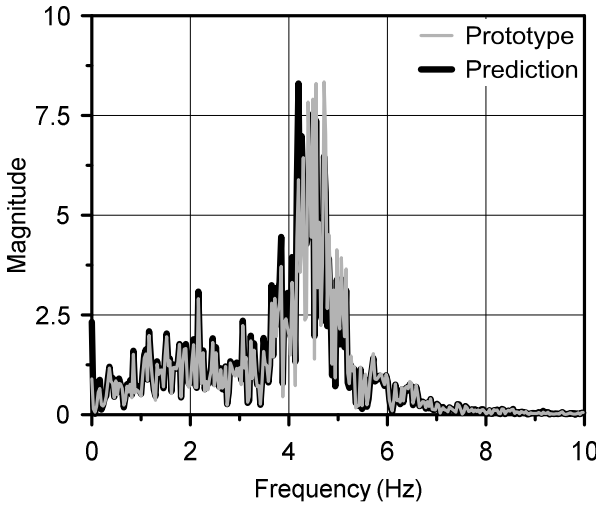


그림 28 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 0.3, 철근항복 X, 제안 상사법칙 적용)

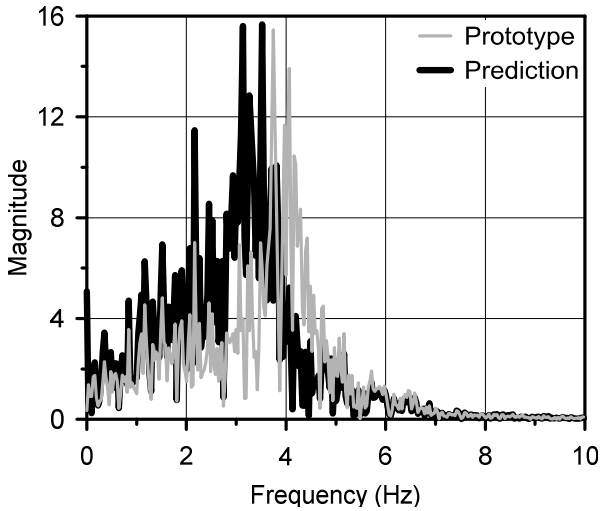


그림 29 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 0.5, 철근항복 X, 김남식(2009) 적용)

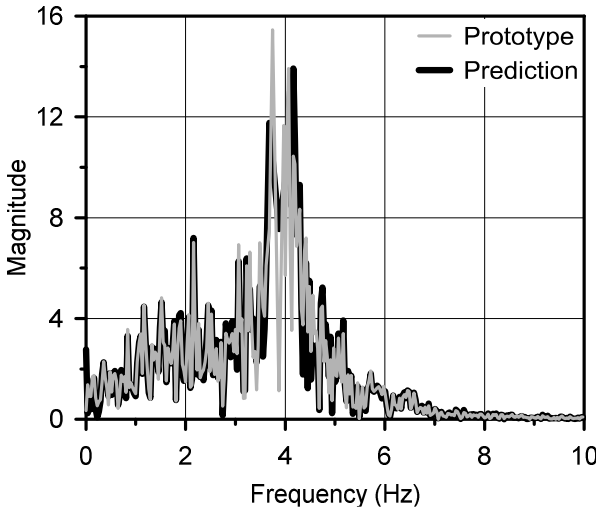


그림 30 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 0.5, 철근항복 X, 조남소(2008) 적용)

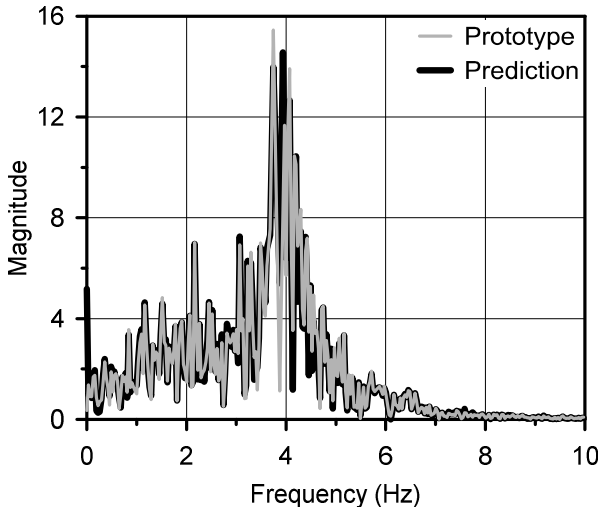


그림 31 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 0.5, 철근항복 X, 제안 상사법칙 적용)

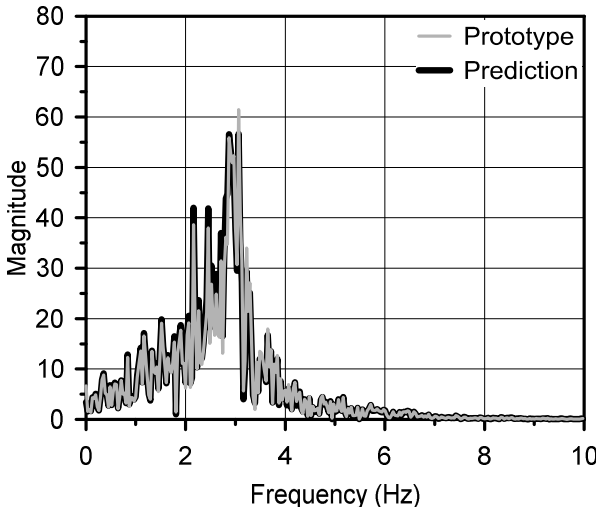


그림 32 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.0, 철근항복 O, 김남식(2009) 적용)

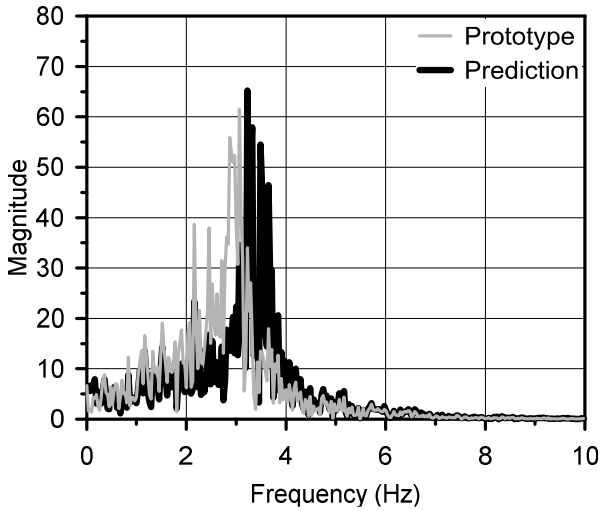


그림 33 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.0, 철근항복 O, 조남소(2008) 적용)

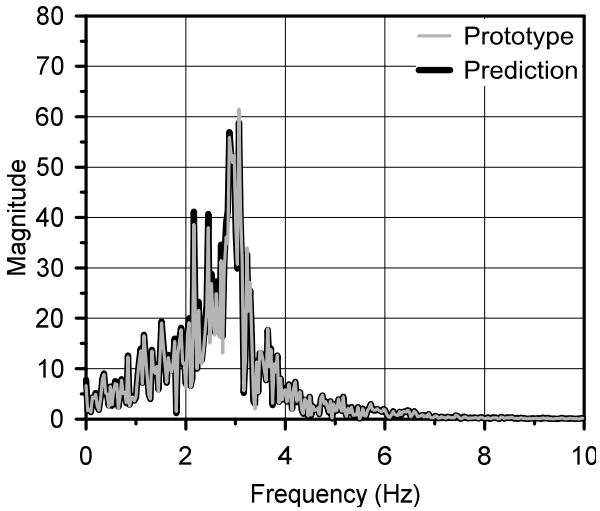


그림 34 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.0, 철근항복 O, 제안 상사법칙 적용)

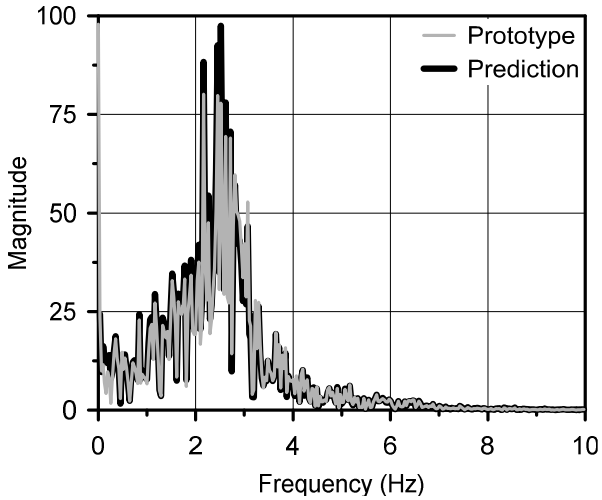


그림 35 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.5, 철근항복 O, 김남식(2009) 적용)

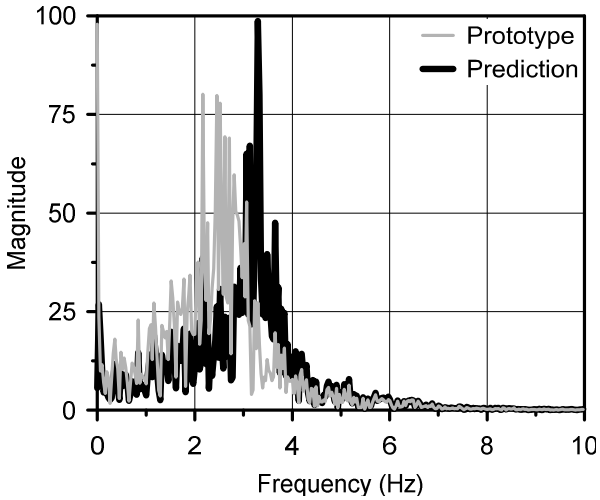


그림 36 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.5, 철근항복 O, 조남소(2008) 적용)

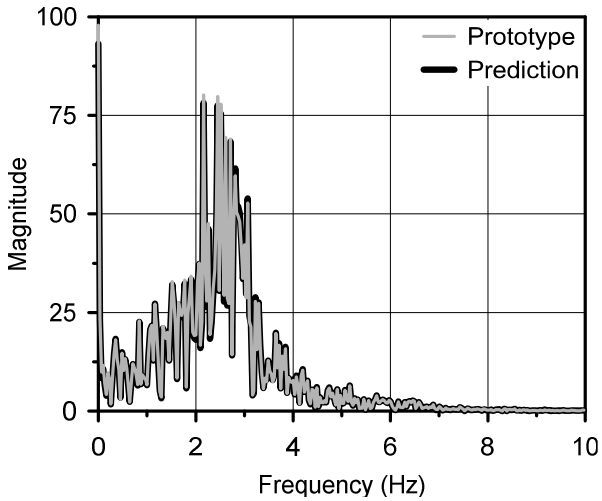


그림 37 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.5, 철근항복 O, 제안 상사법칙 적용)

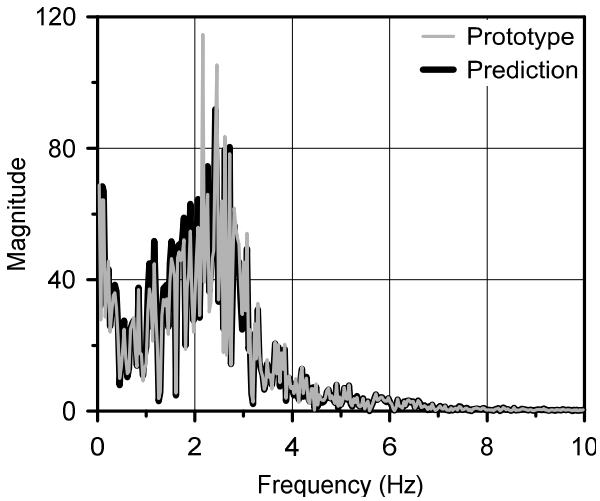


그림 38 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 2.0, 철근항복 O, 김남식(2009) 적용)

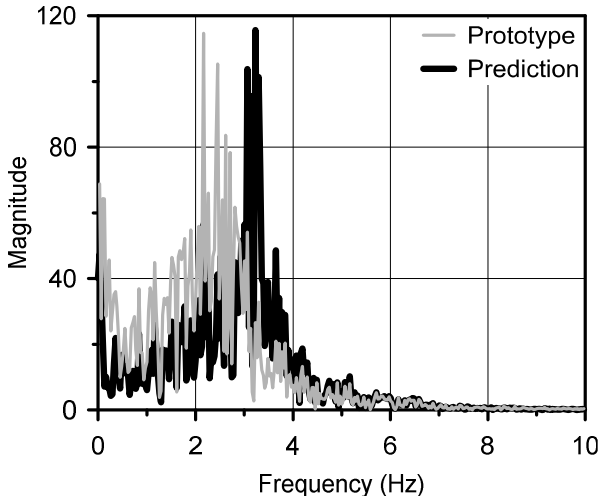


그림 39 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 2.0, 철근항복 O, 조남소(2008) 적용)

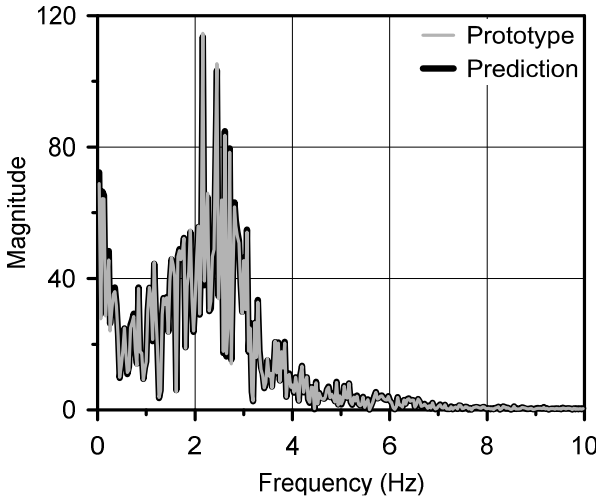


그림 40 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 2.0, 철근항복 O, 제안 상사법칙 적용)

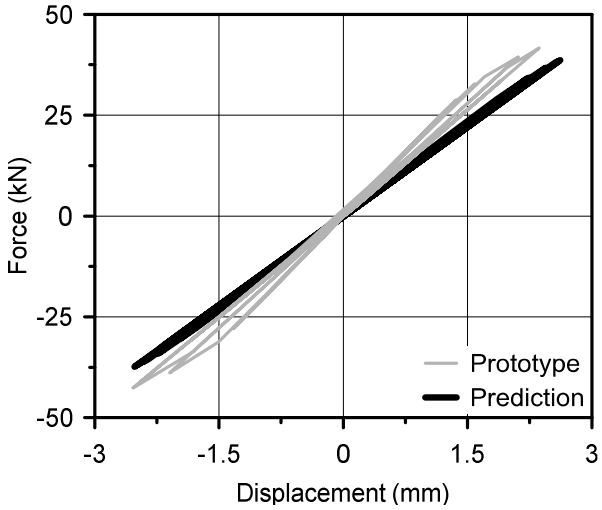


그림 41 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 0.3, 철근항복 X, 김남식(2009) 적용)

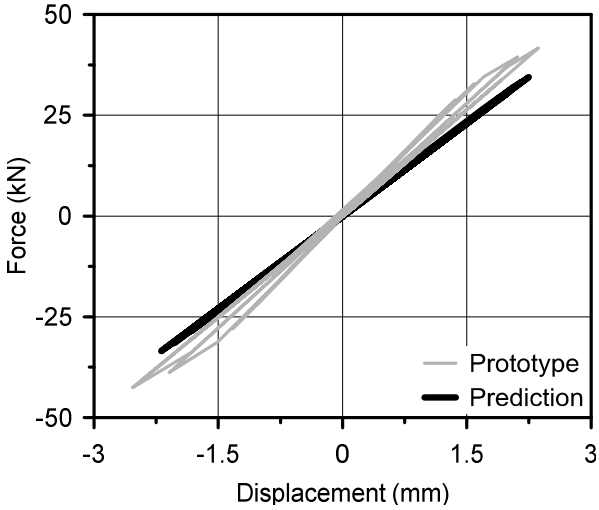


그림 42 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 0.3, 철근항복 X, 조남소(2008) 적용)

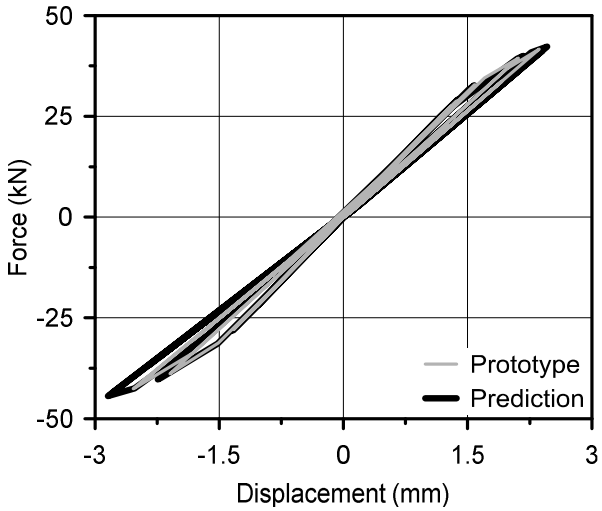


그림 43 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 0.3, 철근항복 X, 제안 상사법칙 적용)

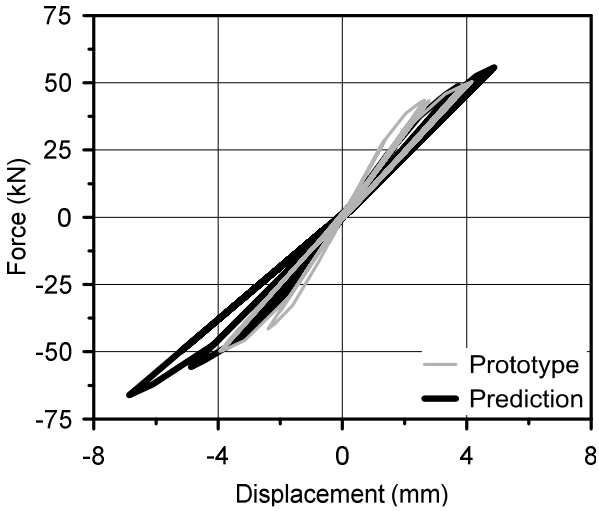


그림 44 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 0.5, 철근항복 X, 김남식(2009) 적용)

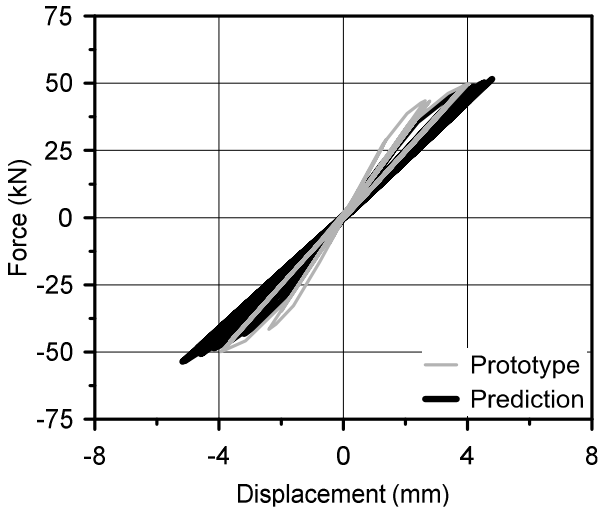


그림 45 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 0.5, 철근항복 X, 조남소(2008) 적용)

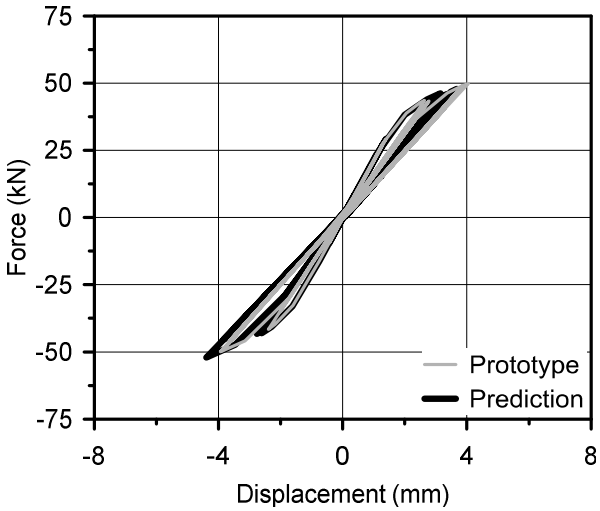


그림 46 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 0.5, 철근항복 X, 제안 상사법칙 적용)

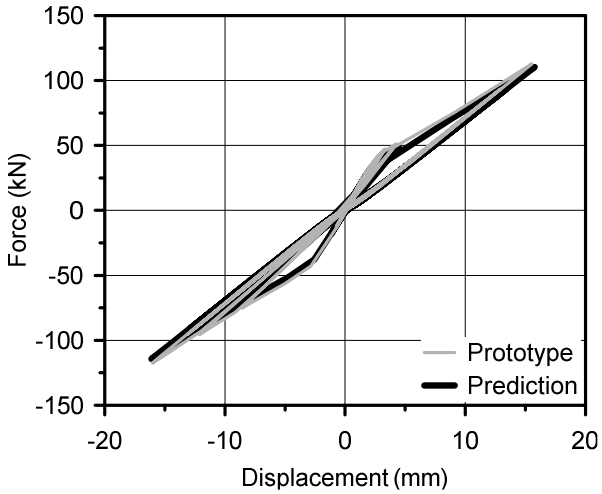


그림 47 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.0, 철근항복 O, 김남식(2009) 적용)

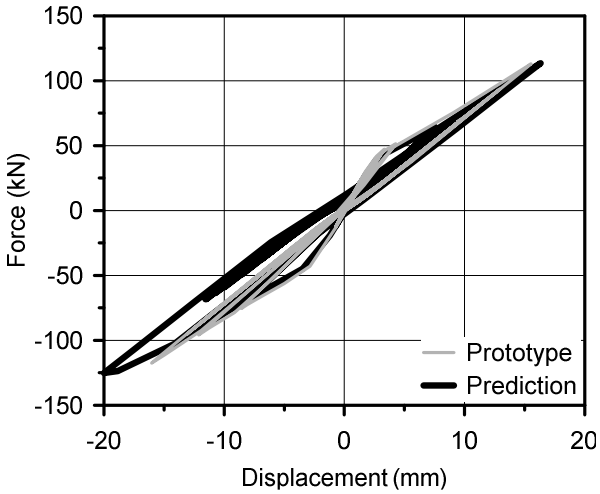


그림 48 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.0, 철근항복 O, 조남소(2008) 적용)

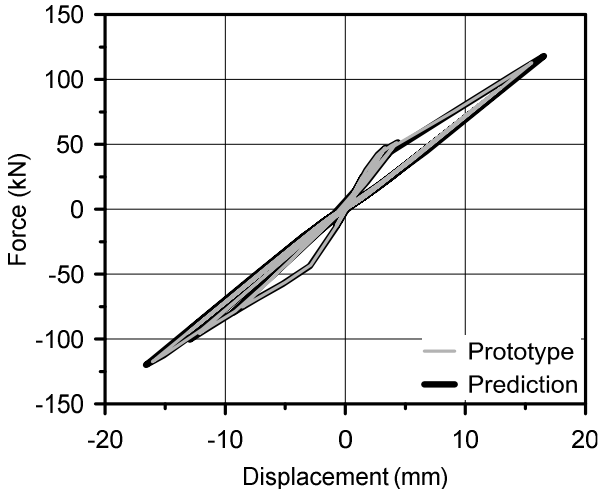


그림 49 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.0, 철근항복 O, 제안 상사법칙 적용)

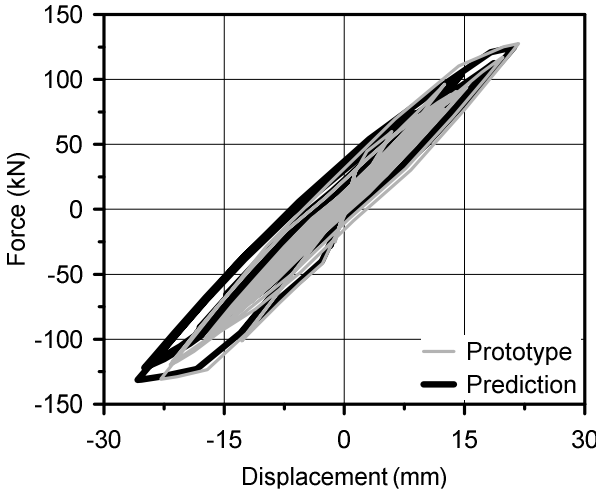


그림 50 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.5, 철근항복 O, 김남식(2009) 적용

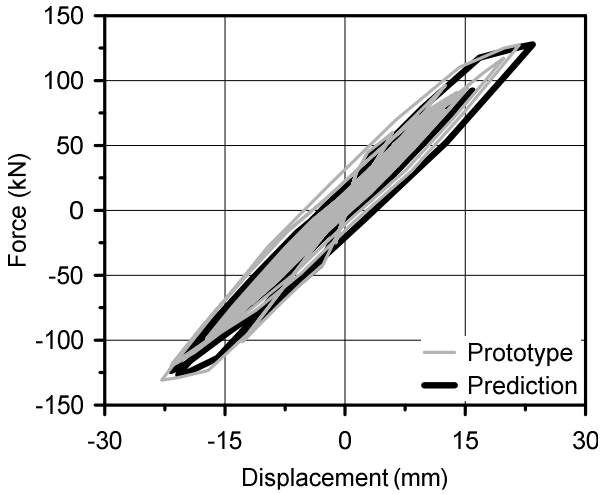


그림 51 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.5, 철근항복 O, 조남소(2008) 적용)

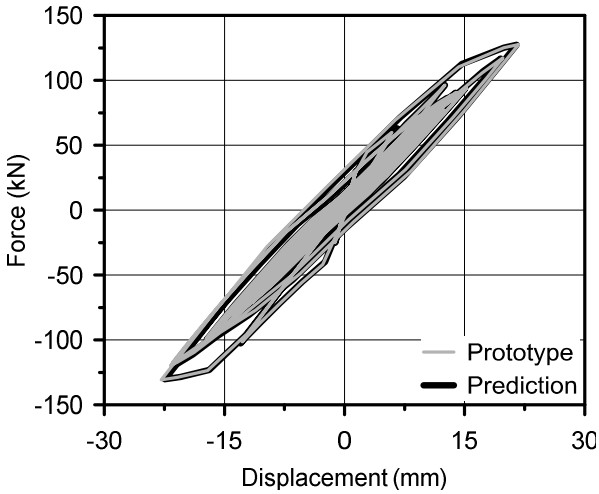


그림 52 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.5, 철근항복 O, 제안 상사법칙 적용)

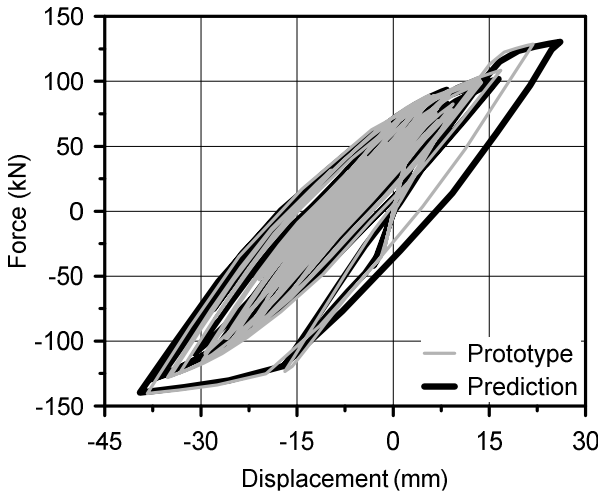


그림 53 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 2.0, 철근항복 O, 김남식(2009) 적용)

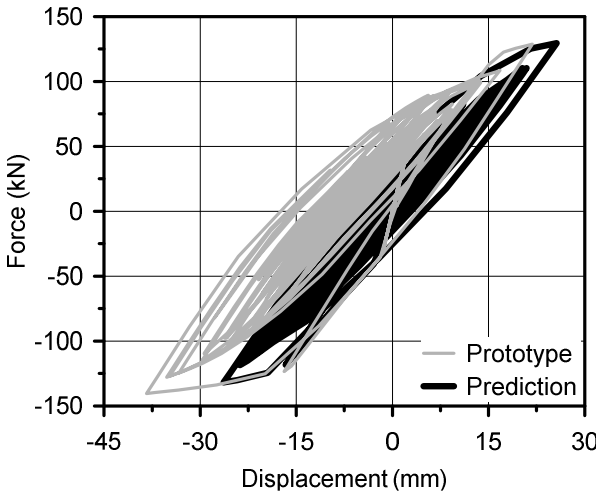


그림 54 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 2.0, 철근항복 O, 조남소(2008) 적용)

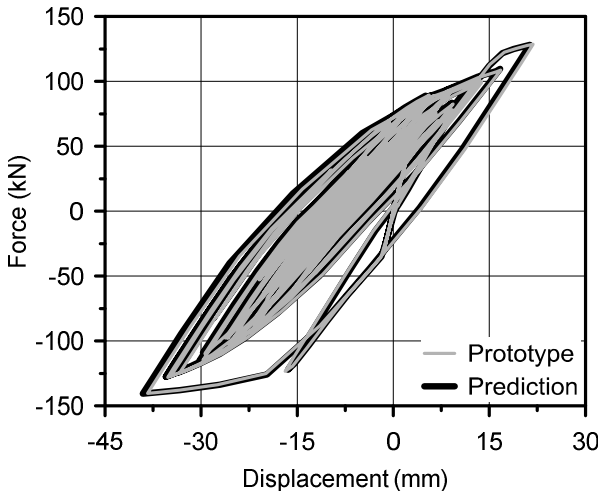


그림 55 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 2.0, 철근항복 O, 제안 상사법칙 적용)

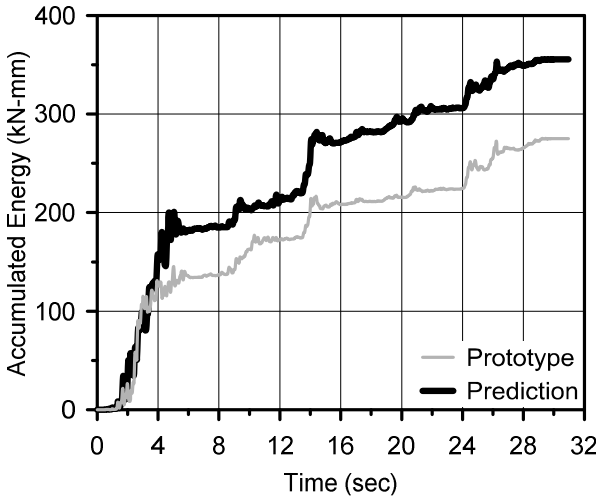


그림 56 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 0.3, 철근항복 X, 김남식(2009) 적용)

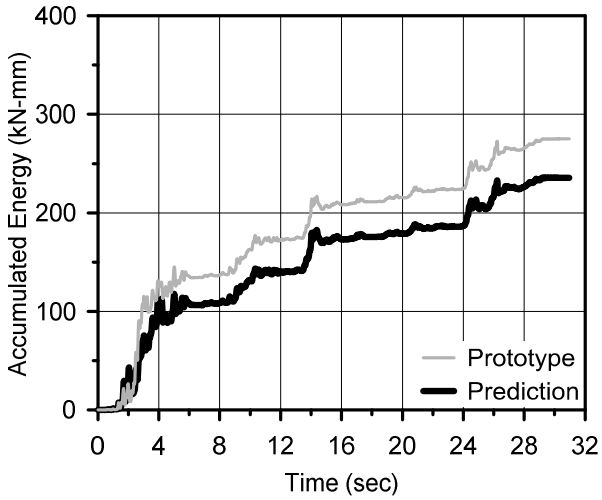


그림 57 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 0.3, 철근항복 X, 조남소(2008) 적용)

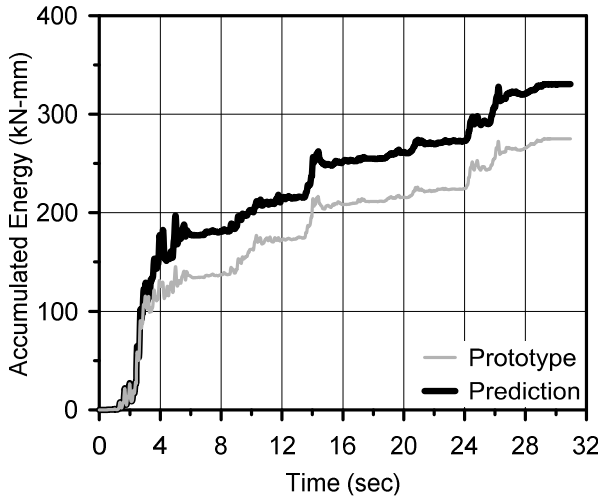


그림 58 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 0.3, 철근항복 X, 제안 상사법칙 적용)

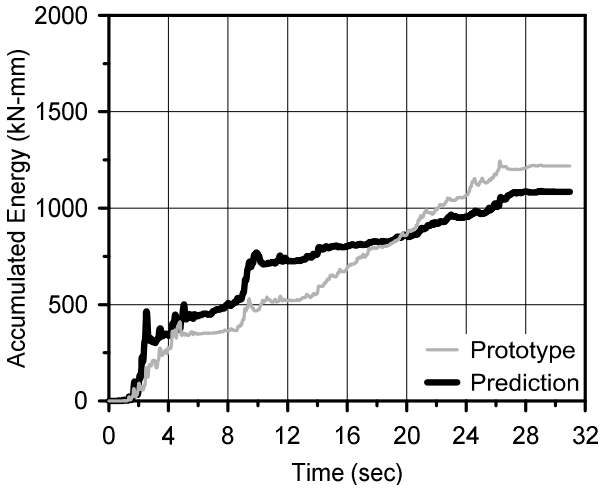


그림 59 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 0.5, 철근항복 X, 김남식(20089) 적용)

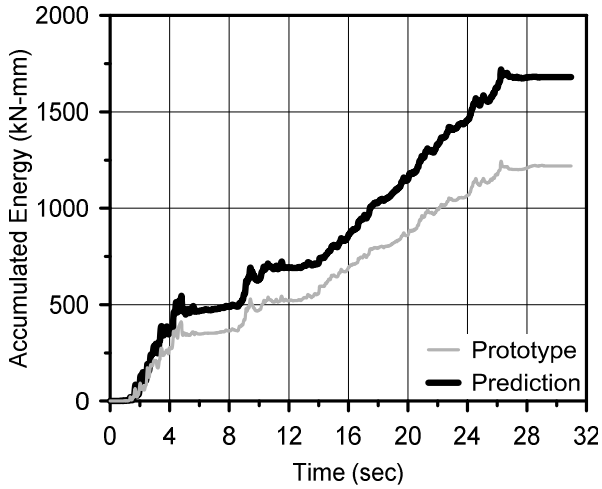


그림 60 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 0.5, 철근항복 X, 조남소(2008) 적용)

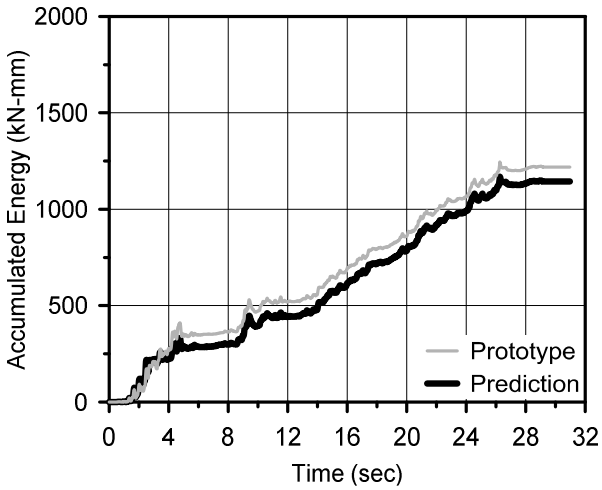


그림 61 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 0.5, 철근항복 X, 제안 상사법칙 적용)

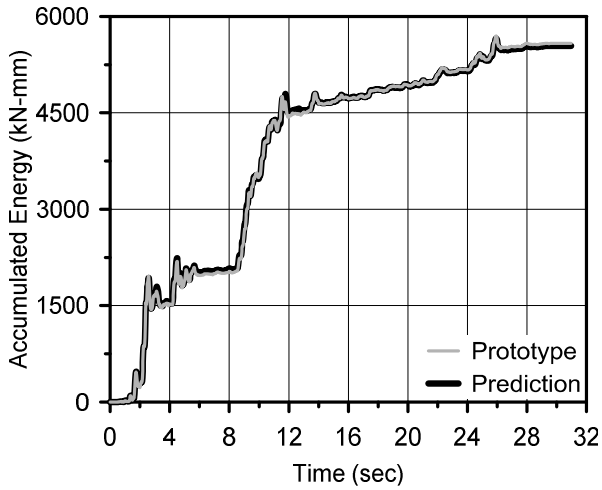


그림 62 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.0, 철근항복 O, 김남식(2009) 적용)

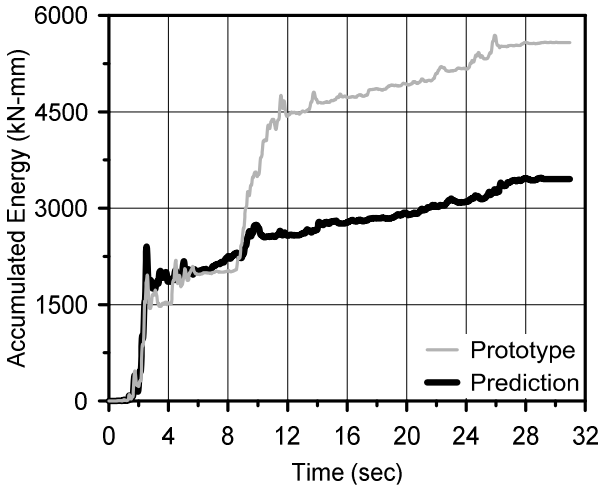


그림 63 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.0, 철근항복 O, 조남소(2008) 적용)

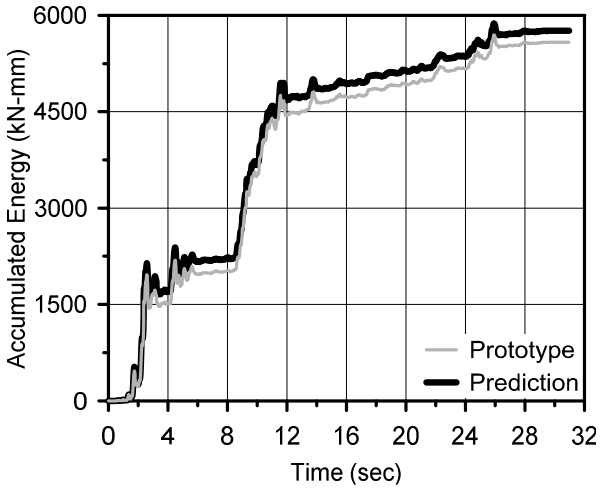


그림 64 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.0, 철근항복 O, 제안 상사법칙 적용)

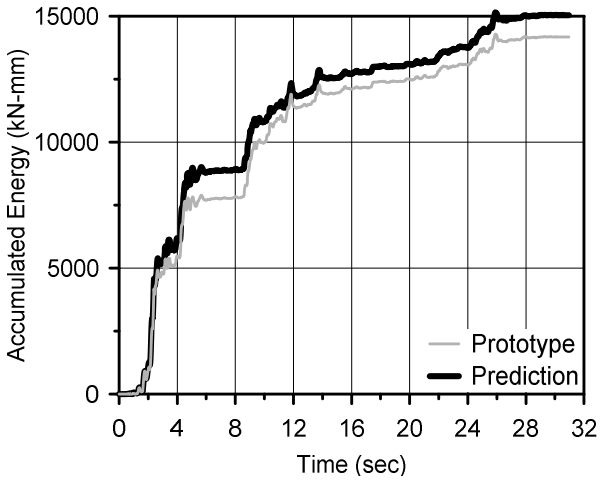


그림 65 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.5, 철근항복 O, 김남식(2009) 적용)

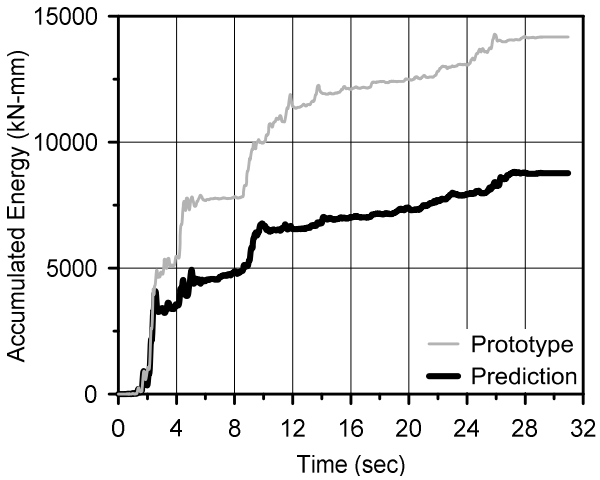


그림 66 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.5, 철근항복 O, 조남소(2008) 적용)

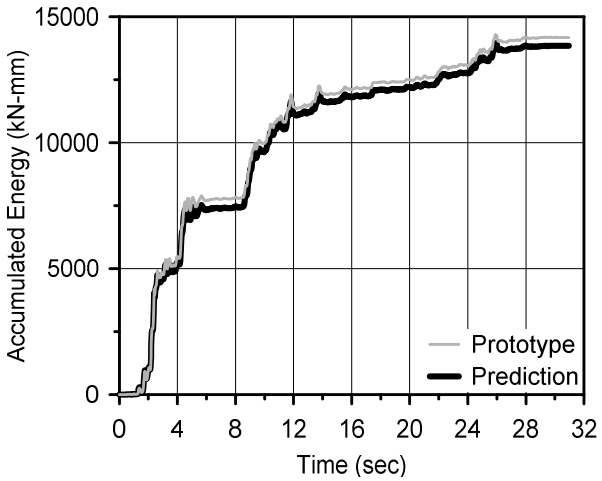


그림 67 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 1.5, 철근항복 O, 제안 상사법칙 적용)

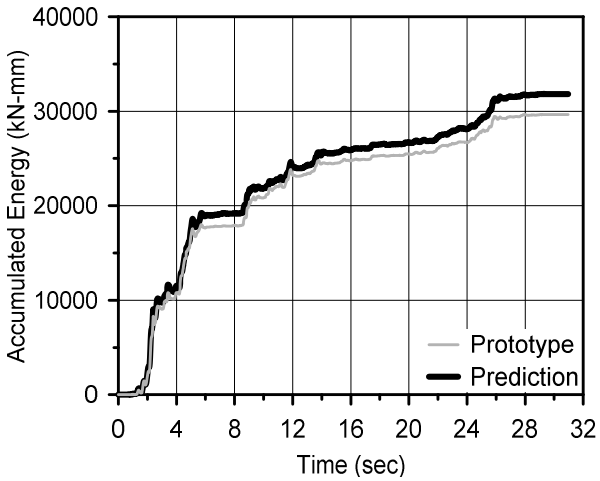


그림 68 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 2.0, 철근항복 O, 김남식(2009) 적용)

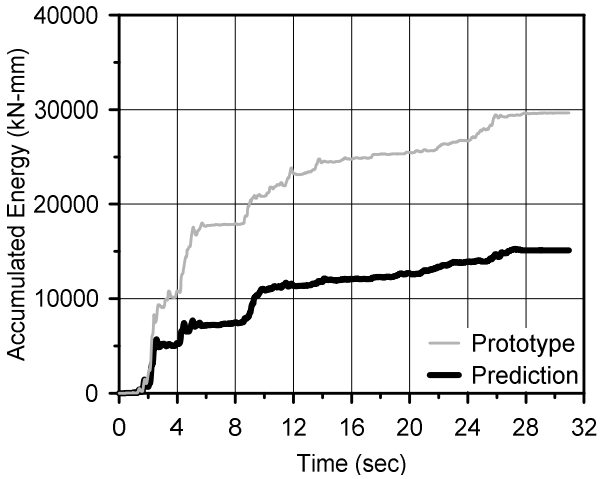


그림 69 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 2.0, 철근항복 O, 조남소(2008) 적용)

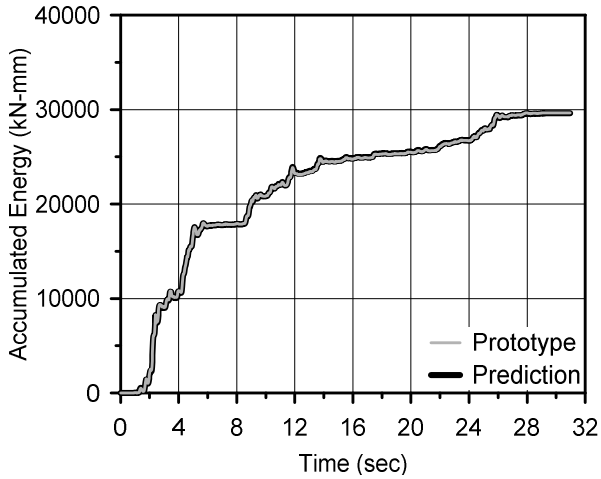


그림 70 프로토타입과 예측결과 간 비교(증폭비 2.0, 철근항복 O, 제안 상사법칙 적용)

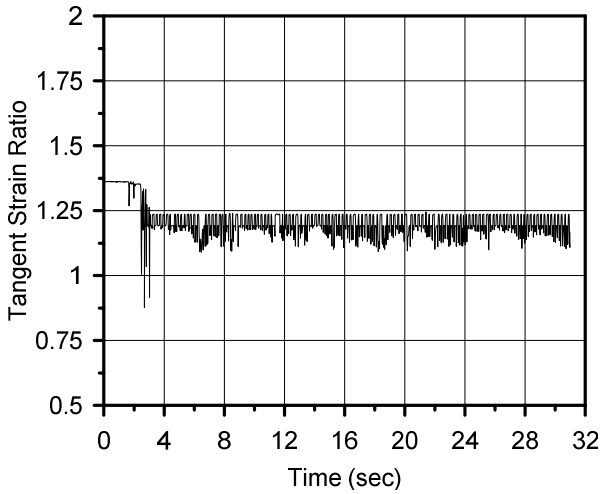


그림 71 제안 상사법칙 이용 시 접선변형률비 계산결과(증폭비 0.3)

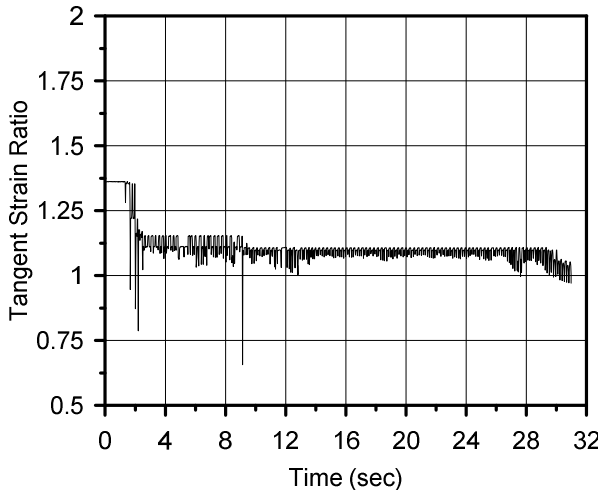


그림 72 제안 상사법칙 이용 시 접선변형률비 계산결과(증폭비 0.5)

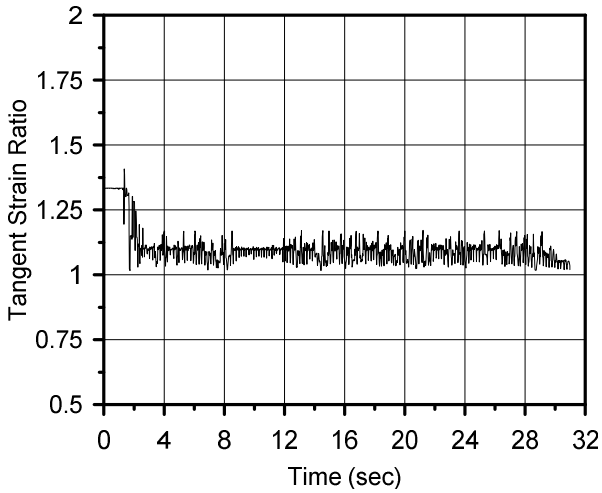


그림 73 제안 상사법칙 이용 시 접선변형률비 계산결과(증폭비 1.0)

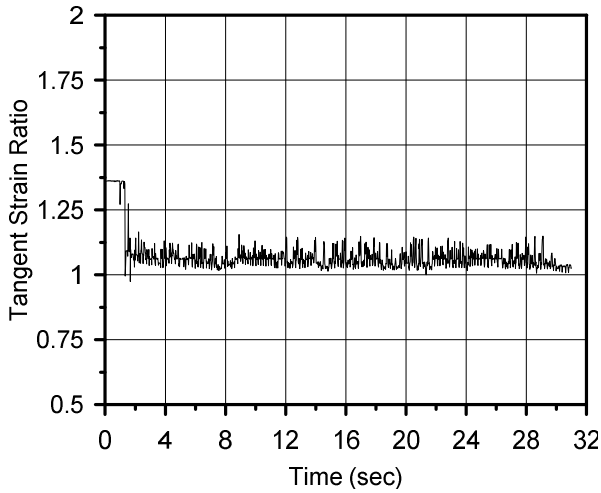


그림 74 제안 상사법칙 이용 시 접선변형률비 계산결과(증폭비 1.5)

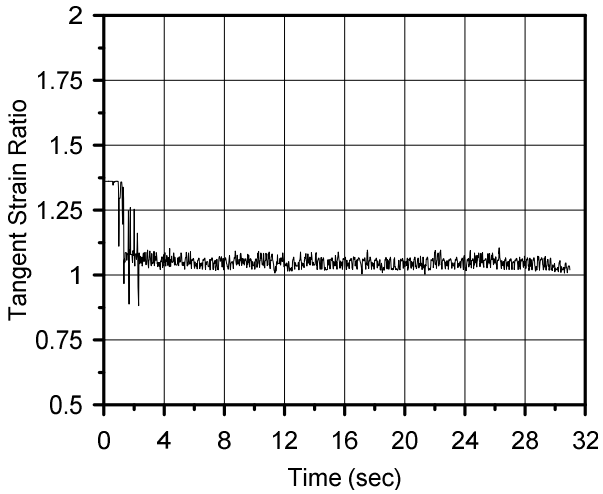


그림 75 제안 상사법칙 이용 시
접선변형률비 계산결과(증폭비 2.0)

- 가진파의 증폭비에 따른 변위응답을 비교한 것에서 볼 때, 항복 발생 여부와 관계없이 제안된 방법에 의한 응답의 예측정확성이 향상된 것을 확인할 수 있다. 김남식(2009)의 경우 항복이 발생하지 않은 경우(0.3, 0.5) 예측정확성이 저하된 것을 확인할 수 있고 조남소의 경우 반대로 항복이 발생한 이후(1.0~2.0) 예측정확성이 저하된 것을 확인할 수 있다.

- 예측정확성의 향상 정도를 정량적으로 분석하기 위해 각 변위 응답을 이용하여 프로토타입 응답과 예측된 응답 간 상관계수(Correlation coefficient)를 계산하면 표 4와 같다. 제안된 상사법칙을 이용하여 예측된 결과와 모든 증폭비에 대해서 1.0에 가까운 값을 가지는 것을 볼 때 예측정확성이 향상된 것을 볼 수 있다. 김남식(2009)의 경우 철근항복이 발생하기 전의 구간에서 예측정확성이 저하됨을 확인할 수 있고 조남소(2008)의 경우 철근 항복 후 예측정확성이 상당히 저하되나 제안된 방법의 경우 모두에 대해 정확성이 향상된 것을 볼 수 있다.

표 4 프로토타입의 응답과 예측 응답 간 Correlation coefficient 계산 결과 비교

적용 상사법칙	가진파의 증폭비	철근 항복 여부	프로토타입 응답과 예측결과 간 Cross correlation
김남식(2009)	0.3	X	0.7029
	0.5	X	0.4948
	1.0	O	0.9792
	1.5	O	0.9789
	2.0	O	0.9730
조남소(2008)	0.3	X	0.9398
	0.5	X	0.9489
	1.0	O	0.5426
	1.5	O	0.5580
	2.0	O	0.6098
제안 상사법칙	0.3	X	0.9297
	0.5	X	0.9783
	1.0	O	0.9916
	1.5	O	0.9980
	2.0	O	0.9989

- 그림 26~40는 변위 응답에 FFT를 적용하여 계산된 주파수영역 응답을 나타낸 것이다. 조남소의 경우 철근 항복 후 비선형 거동이 심화됨에 따라 주파수영역에서 응답의 크기가 최대가 되는 주파수의 크기가 오히려 증가하게 되는데 이는 조남소에서는 철근 항복 후 변형률비를 일괄적으로 1.0으로 간주하고 질량상사비가 변형률비에 비례하고 콘크리트의 재료 변형률비의 역수에 비례함에 따라 모형의 상부질량이 본 연구에서 보다 작게 평가되므로(본 연구의 질량에 콘크리트의 재료 변형률비인 1.5를 나눈 값과 동일하게 됨) 모형의 고유진동수를 크게 평가하게 됨에 의한 결과로 볼 수 있다.

- 그림 41~55는 하중-변위 관계를 나타낸 것이다. 변위 응답에서 나타난 경향과 마찬가지로 김남식(2009)의 경우 철근 항복 전 예측정확성이 저하되는 것을 볼 수 있으며 철근 항복 후에는 프로토타입의 거동을 잘 예측하는 것을 볼 수 있으며 조남소의 경우 철근의 항복 후 비탄성거동이 심화됨에 따라 특히 변위 예측정확성이 저하된 것을 볼 수 있으나 본 연구의 경우 비탄성 거동의 발현 여부에 관계없이 예측정확성이 향상된 것을 볼 수 있다.

- 그림 56~70은 시간에 따른 누적에너지의 변화를 나타낸 것이다. 누적에너지 이력 또한 본 연구에서 제안한 상사법칙의 경우 철근 여부에 상관 없이 모든 경우에 대해서 일정한 예측정확성을 확보하였다고 볼 수 있다. 증폭비 0.3의 경우 다른 경우에 비하여 정확성이 약간 저하되는데 이는 해석 상 콘크리트의 균열 발생에 따른 강성의 저하가 작지만 급격히 발생함에 따른 결과에 의한 것이다. 실제 실험 시에는 균열 발생에 따른 강성의 변화가 급격히 발생하지는 않으므로 실적용 시에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

- 그림 71~75는 제안된 방법을 사용하였을 때 변형률비 계산결과를 나타낸 것이다. 변형률비는 초기에 약 1.33의 값을 가지다가 급격히 감소하게 되는데 이는 콘크리트 균열의 발생에 따라 구조물의 강성에서 콘크리트의 비중이 감소함에 따른 것이다. 균열 발생 이후 철근에 의한 강성 기여가 증가하게 되는데 기존 조남소(2008), 이도근(2012)와 같이 철근의 항복이 발생한 경우 변형률비의 값이 1.0에 근접하게 됨을 확인할 수 있다. 균열 발생은 거동의 초기단계에 일어나게 되고 그 이후 구간에서의 변형률비의 값은 대체적으로 일정한 값을 가지게 되는데 이 값은 가진파 가속도의 증폭비가 커짐에 따라 계속적으로 철근의 변형률비인 1.0으로 수렴하는 것을 볼 수 있다.

마. 소결

- 본 연구에서 변형률비 변동을 고려할 수 있는 상사법칙을 개발하였으며 이의 타당성을 검증하기 위하여 철근콘크리트 캔틸레버 기둥을 대상으로 유한요소해석을 통한 El-centro 지진에 의한 동적 거동을 해석하여 해석적인 검증을 수행하였다.

- 해석적인 검증 시 주어진 가진파의 가속도 크기를 다양하게 조정(증폭비 0.3~2.0)하여 철근 항복 여부에 따른 제안된 상사법칙의 예측정확성을 분석하였으며 그 결과 철근 항복 여부에 관계 없이 프로토타입의 거동 예측에 있어 기존 연구에서 사용한 상사법칙과 비교하여 정확성이 향상된 것을 확인할 수 있었다.

- 김남식(2009)의 경우 항복이 발생하지 않은 경우 예측정확성이 저하되며 조남소의 경우 반대로 항복이 발생한 이후 예측정확성이 저하되게 된다. 이에 반해 본 연구에서 제안한 상

사법칙은 철근 항복 발생 여부와 관계 없이 일정한 예측정확성을 보여주는 것으로 나타났다.

- 철근이 항복한 이후 변형률비의 값은 1.0에 근접하는 것을 볼 수 있다. 이는 기존 연구인 조남소(2008), 이도근(2012)의 결과와 일치하는 것으로 구조물 전체 강성에서 콘크리트가 차지하는 비중이 철근 항복 후 철근이 차지하는 비중에 비하여 감소하기 때문에 결과적으로 구조물의 변형률비가 철근의 변형률비와 비슷한 값을 가지는 것이기 때문으로 생각할 수 있다.

- 본 연구의 시작단계에서 상사법칙의 개발과 이의 해석적인 검증의 성과점검에 대한 기준으로 3가지 질적성과지표(최대변위응답차, 주파수영역응답에서 최대스펙트럼에 해당하는 진동수의 차=고유진동수의 차, 최대누적에너지차)를 제시한 바 있으며 각각에 대하여 프로토타입의 응답과 축소모형의 응답 간의 차가 10% 이내가 되도록 하는 것을 목표로 하였다. 해석결과 증폭비 0.3을 제외한 모든 경우에 대해서 그 차이가 10% 이내가 됨을 확인하여 연구의 시작 시 설정한 목표를 대부분 충족하는 것으로 나타났다. 증폭비가 0.3인 경우에도 그 차이가 그리 크지 않았으며 기존 연구와 비교하여서도 변위 응답, FFT 해석결과 그리고 누적에너지이력 모두에 대해서 일정한 예측정확성을 확보하였다고 판단된다.

- 제안상사법칙의 타당성이 해석적으로 입증되었으나 실제 축소모형실험에 이를 적용하기 위해서는 직접 프로토타입과 축소모형을 설계/제작 한 후 해석적인 검증과 마찬가지로 제안된 상사법칙 및 기존 연구의 상사법칙을 적용하여 프로토타입과 축소모형실험을 수행하여 그 결과를 비교함으로써 최종적으로 제안 상사법칙의 타당성을 확인할 필요가 있어 연구의 2단계(2차년도)에는 이를 위한 연구가 수행되었다.

2. 제안 상사법칙의 실험적 검증과 이를 통한 축소모형실험기법 정립

가. 제안된 변형률비 산정방법의 실제 실험에서의 적용 방법

- 제안된 상사법칙의 축소모형실험에의 실적용을 위해 상사법칙 내에서 정의된 두 변형률비 ($\varepsilon_{r,ks}$, $\varepsilon_{r,kt}$)를 계산하기 위하여 반복계산 과정을 도입한 변형률비 산정방법을 개발하였고 해석적인 검증을 통해서 그 타당성을 확인하였다. 그러나 해석적으로는 검증이 완료되었다 하더라도 실제 축소모형실험에 적용하기 위해서는 추가적인 고려사항이 필요하다. 이는 개발된 변형률비 산정방법의 한계라고 간주하기 보다는 철근콘크리트 구조물과 같은 복합재료 구조물의 축소모형실험 시 필연적으로 발생하는 변형률비의 변동에 따라 실험 중 특정 시점에서 변형률비의 값을 곧바로 알지 못하게 되는 특성에 의한 현상으로 볼 수 있다.

- 진동대실험의 경우 실험의 특성 상 한 번 실험이 시작이 되면 도중에 멈추는 것이 불가능하며 또한 질량, 감쇠, 시간증분에 대한 실시간적인 변경이 불가능하다. 이는 특히 변형률비와 연관되어 있는 시간증분의 경우(=시간상사비에 변형률비가 포함이 되어 있으므로) 변형률비의 변동에 따라 필요한 보정 과정이 실험 중에는 불가능하다는 것을 의미한다.

- 유사동적실험의 경우 진동대실험과는 달리 실험이 시작된 이후에도 실험을 잠시 중단하고 질량, 감쇠, 시간증분과 같은 해석적인 파라미터들을 수정한 이후 실험을 시작하는 것이 자유롭게 가능하다. 그러나 제안된 변형률비 산정방법을 그대로 적용하게 되는 경우 한 해석 Step 내에서 변형률비의 값을 특정 값으로 가정하고 이를 통해 계산된 변형률비의 값을 다시 가정된 값과 비교하는 과정에서 실험체에 연결된 유압가력기(Actuator)에 계속적인 반복 변위가 발생하게 된다. 이러한 반복변위는 결과적으로 구조물의 강성에 변화를 줄 수 있게 되어 제안된 변형률비 산정방법의 적용을 어렵게 한다.

- 결론적으로 제안된 변형률비 산정방법을 실제 실험에 그대로 적용하는 것은 합리적이지 않다고 볼 수 있다. 두 실험 모두 반복계산 과정을 도입하여 정확한 변형률비 산정은 불가능하기 때문에 반복계산 과정을 도입하지 않고 변형률비의 값을 알 수 있도록 하는 방법이 필요하다는 결론을 얻을 수 있다. 이에 본 연구에서는 실험적인 검증에 앞서 반복계산 과정을 도입하지 않고 변형률비의 계산이 가능하도록 산정방법을 수정하였다.

- 앞서 해석적인 검증 결과를 통해 철근이 항복한 이후에는 변형률비가 철근의 변형률비인 1.0에 가까운 값을 가진다는 것을 확인하였으며 이는 기존 연구결과와도 일치한다. 또한 철근의 항복이 발생하지 않은 경우에는 변형률비의 값은 1.0이 아닌 값을 가지게 되며 철근 항복 전후로 각 구간 내에서 변형률비의 변화는 그리 크지 않고 일정한 값을 가지는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 철근의 항복 전과 후의 두 단계로 변형률비의 값을 구분하였으며 각 단계에서는 변형률비의 세부적인 변동을 무시하고 일정한 값을 가지는 것으로 가정하였으며 철근 항복 후에는 변형률비는 1.0으로 가정하였다.

- 변형률비의 변화를 두 단계로 철근 항복 전 구간에서의 변형률비의 값은 해석과 실험을 통해서 결정하는 방법을 사용하였다. 이를 위해서 해석적인 검증 이후 수행한 진동대실험과 하이브리드시뮬레이션을 적용한 프로토타입과 축소모형 실험에서 사용한 실험체와 동일한 제원을 가지는 실험체를 이용하여 반복하중의 작용을 통한 Cyclic pushover 실험을 수행하였다.

- Cyclic pushover 실험 결과에 맞게 상용 유한요소해석 프로그램의 해석 모델을 프로토타입과 축소모형 각각에 대하여 정립을 하였다. 그림 76, 77은 프로토타입과 축소모형의 실험결과와 정립된 해석 모델을 통하여 계산된 해석 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

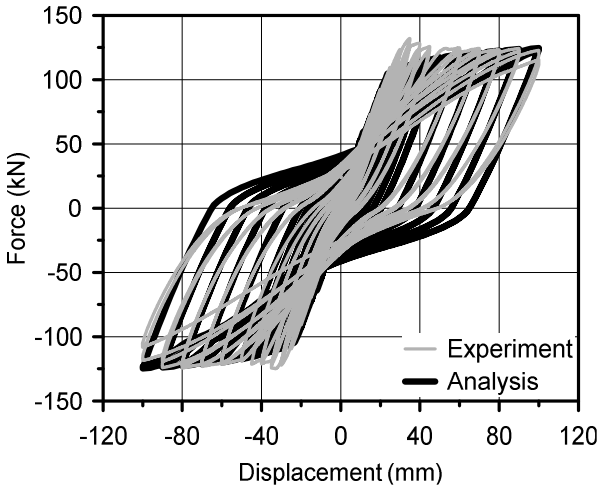


그림 76 프로토타입 Cyclic pushover 실험결과와 해석결과 간 비교

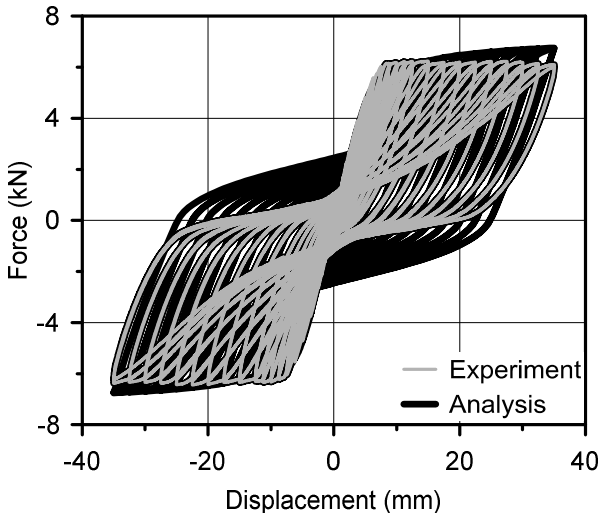


그림 77 축소모형 Cyclic pushover 실험결과와 해석결과 간 비교

- 해석 모델이 정립된 이후에는 이 모델을 이용한 유한요소해석 결과를 이용하여 프로토타입과 축소모형의 응답을 해석적으로 구할 수 있으며 이에 따라 변형률비가 어떻게 변화하는지를 알 수 있다. 실험적 검증에서 실시할 진동대 실험과 하이브리드시뮬레이션 실험 각각의 특성을 고려하여 변형률비의 변동을 다음과 같이 실험적으로 고려하였다.

(1) 진동대실험 시 변형률비 변동 고려 방법

- 진동대실험의 경우 실험의 특성 상 변형률비의 변동이 불가능하므로 실험 전 변형률비의 변동이 어떻게 변할 것인가를 예측하여 이에 따른 영향을 미리 수정해주어야 한다. 본 연구에서는 앞서 해석적인 검증을 통해 철근 항복 이후 변형률비가 1.0에 가까운 값을 가지며 철근 항복 전에는 일정한 값을 가지는 것을 확인하였다. 따라서 이러한 점을 반영하여 변형률비 변동에 따른 영향을 고려하였다.

- 제안된 상사법칙에서 변형률비에 변동에 따라 보정해주어야 할 것은 가진파의 시간이다. 진동대실험이 수행될 부산대학교 지진방재연구센터의 진동대의 경우 가진파의 시간증분을 1/512초로 하여 각 시간에서의 가속도의 값을 입력하는 방식을 사용하고 있다. 축소모형 실험 시 가진파의 시간 보정을 위해서는 먼저 항복 전 변형률비의 값을 예측해야 한다. 이는 축소모형실험 전 수행된 Cyclic pushover 실험 결과로부터 정립된 해석 모델에 의한 유한요소해석을 통하여 구할 수 있다.

- 해석을 통하여 프로토타입과 모형의 하중-변위 관계를 계산할 수 있으며 이 때 철근 항복이 발생하기 전의 프로토타입과 모형의 평균적인 강성을 계산할 수 있다. 계산된 강성을 이용하면 철근 항복이 발생하기 전 변형률비 $\varepsilon_{r,uy}$ 를 아래 식 (7)과 같이 계산할 수 있다. 식 (7)에서 $k_{p,avg}$ 는 프로토타입의 항복 전 평균 강성, $k_{m,avg}$ 는 축소모형의 항복 전 평균 강성을 의미한다.

$$\varepsilon_{r,uy} = s_\sigma s_L \frac{k_{p,avg}}{k_{m,avg}} \tag{7}$$

- 항복 전 변형률비의 값을 해석적으로 계산하더라도 실제 실험을 수행하는 실험체에 따른 실제 변형률비와의 차이가 있을 수 있다. Cyclic pushover 실험 시 사용한 실험체가 비록 이후 진동대실험에서 사용할 실험체와 동일한 제원을 가지고 철근 및 콘크리트의 배합비가 동일하더라도 재료에 대한 불확실성이 큰 콘크리트의 특성 상 양생조건 등의 차이로 인하여 각 실험체의 변형률비에는 다소 차이가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 차이에 따른 예측정확성의 차이를 분석하기 위하여 정립된 해석모델과 식 (7)을 통해 계산된 변형률비 이외에도 다양한 변형률비 값을 적용하여 실험을 수행하였다.

- 가진파의 시간보정에 적용한 변형률비가 축소모형 실험체의 변형률비와 동일한지 여부를 판단하기 위한 각 실험체의 실제 변형률비의 값은 실험을 통해 얻은 응답에서 역산이 가능하다. 진동대실험 시 본 실험 즉, 변형률비의 변동을 고려하여 보정된 가진파를 이용하기 전 최대 가속도가 아주 작은(0.05g) 백색잡음(White noise)로 이루어진 가진파를 이용하여 진동실험을 먼저 수행하면 가진파의 크기가 작으므로 구조물의 손상이나 강성의 저하를 유발시키지 않고 구조물의 고유진동수를 예측할 수 있다. 고유진동수의 예측은 백색잡음파로 가진한 실험체의 변위 응답에 대하여 FFT 해석을 수행하면 알 수 있다. 이 작업을 프로토타입과 모형에서 각각 실행한 후 계산된 구조물의 고유진동수를 각각 $\omega_{n,p}$, $\omega_{n,m}$라 할 때, 이로부터 해당 축소모형실험체의 변형률비는 대략적으로 아래 식 (8)을 통해서 계산할 수 있다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \rightarrow k = m\omega_n^2 \rightarrow s_k = \frac{k_m}{k_p} = \frac{m_m}{m_p}\frac{\omega_{n,m}^2}{\omega_{n,p}^2} = s_\sigma s_L^2 \frac{\omega_{n,m}^2}{\omega_{n,p}^2}$$

$$\therefore \varepsilon_{r,Kt} = \frac{s_\sigma s_L}{s_\sigma s_L^2 \dfrac{\omega_{n,m}^2}{\omega_{n,p}^2}} = \frac{1}{s_L}\frac{\omega_{n,p}^2}{\omega_{n,m}^2} \tag{8}$$

- 백색잡음에 의한 응답이 아니더라도 실험에 의한 응답을 식 (8)에 적용하여도 변형률비를 계산하는 것은 가능하다. 식 (8)에서 계산된 변형률비와 앞서 정립된 해석모델을 이용한 해석결과로부터 계산된 변형률비에는 차이가 있을 수 있다. 두 변형률비의 차이가 어떤 영향을 미치는지 여부의 판별은 축소모형실험 결과 그 차이가 커질수록 예측정확성이 저하되는 결과를 얻을 수 있었다.

(2) 유사동적실험 시 변형률비 변동 고려 방법

- 유사동적실험의 경우 진동대실험과는 달리 실험 중 해석도중 시간증분을 자유롭게 변화시킬 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 본 연구에서는 실험체에 설치된 계측장비로부터 계측된 데이터에 따른 변형률비의 변동을 고려하여 실험을 수행하였다.

- 먼저 유사동적 축소모형실험에 사용된 실험체는 기둥부 하단에 매설된 철근에 변형률게이지를 부착하여 제작을 하였으며 별도로 동일한 높이에 해당하는 기둥부 콘크리트 표면에 콘크리트 게이지를 부착하였다. 부착된 게이지는 실험 중 계속적으로 그 값을 측정하도록 하였으며 측정된 값은 유사동적실험 시 수치적분 및 실험체와 연결된 액츄에이터를 작동

시키는 컴퓨터의 DAQ(Data acquisition) 장비와 연결하여 측정된 값이 곧바로 수치적분 상에서 사용이 될 수 있도록 하였다.

- 축소모형실험 전 Cyclic pushover 실험 결과로 정립된 해석 모델을 이용하여 Monotonic pushover 해석을 수행하면 하중에 따른 프로토타입과 축소모형에 발생하는 변위를 해석적으로 구할 수 있으며 또한 특정 하중에서 기둥 하단부에서의 철근의 변형률을 구할 수 있다. 이를 통해서 변형률비와 철근변형률 간 관계를 해석적으로 구할 수 있다.

- 계산된 변형률비-철근변형률 간의 관계를 유사동적실험 상의 수치적분 과정에 적용하여 이전 Step에서 계산된 철근의 변형률 중 최대값에 해당하는 변형률비를 얻을 수 있고 이 값을 이용하여 시간증분을 보정한 이후 현재 Step에서의 해석을 수행하는 방식으로 유사동적실험을 수행하였다.

- 앞서 해석적인 검증결과를 통해 변형률비의 변동은 철근 항복 전후의 두 단계로 구분할 수 있다는 것을 보았다. 본 연구에서는 유사동적실험 시 계측된 변형률 데이터를 이용하여 해석을 통해 구한 변형률비-철근변형률 관계에서 변형률비를 구하는 방법을 사용하였으나 시험 결과 사실 상 항복 전후 두 단계로 단순히 구분하는 것과 큰 차이는 없는 것으로 나타났다.

나. 프로토타입 및 축소모형 실험을 위한 실험체 설계 및 제작

- 본 연구의 개발된 상사법칙의 실제적인 검증을 위해서는 구조물 동적 실험에서 널리 사용되는 방법인 진동대실험과 하이브리드시뮬레이션 방법에의 실적용을 통한 타당성 검토가 필요하며 개발된 상사법칙의 이론적 검증이 종료됨에 따라 이를 위한 실험체의 설계/제작 및 실험을 수행하였다.

- 프로토타입 실험체는 해석적인 검증과 마찬가지로 단자유도 철근콘크리트 캔틸레버 기둥을 실험 대상으로 삼았으며 기존 연구와의 효율적인 비교 및 기구축된 데이터의 사용을 통한 효과적인 연구 진행을 위하여 김남식(2009), 조남소(2008)의 연구에서 사용한 실험체와 유사하도록 설계하였다.

- 축소모형의 축소율은 프로토타입 실험체의 1/4 크기가 되도록 하였다(길이상사비=1/4). 제작된 모형실험체의 경우 설계 및 실험 시 적용한 상사법칙과 관계 없이 모두 일정한 단면 제원을 가지도록 하였다. 다만 실험 시 적용하는 질량의 경우 상사법칙에서 정의된 상사비에 따른 차이가 있어 다르게 설정을 하였으며 진동대 실험체와 하이브리드시뮬레이션 실험체의 경우 상부질량의 거치 및 진동대 및 반력상과 실험체의 연결을 위하여 기둥 상하부의 설계에서는 약간의 차이가 있다. 프로토타입 실험체와 축소모형 실험체의 기둥 단면 제원은 아래 그림 78과 같다.

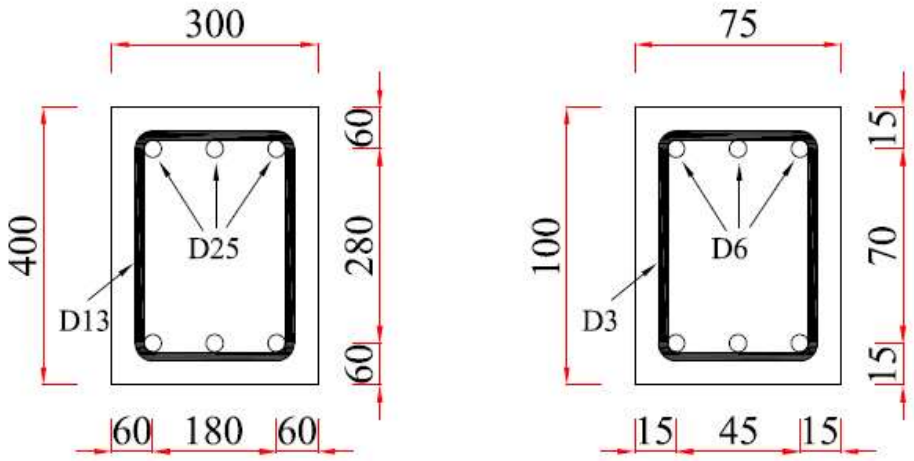


그림 78. 프로토타입과 축소모형 실험체의 기둥 단면 비교

프로토타입(좌), 축소모형(우), 단위 mm

(1) 진동대 프로토타입 실험체 설계/제작 및 실험 수행

- 프로토타입 진동대 실험체는 단면 크기, 높이 2m의 철근콘크리트 기둥으로 아래 그림 79, 80과 같다. 기둥의 상부는 상부질량을 거치를 위하여 단면보다 크게 설계하였고 하부는 불필요한 변형의 발생 및 진동 시 수직방향 변위의 억제를 위하여 D32 철근을 이용하여 보강하였다. 실험체 상부에 상부질량을 재하하기 위한 철제 지그 구조물을 설치하고 실험 시 이 구조물의 상부에 다시 상부질량을 거치하였다. 프로토타입 실험체는 총 2개가 제작되었는데 각 실험체의 설계 제원은 모두 동일하다. 상부질량, 지그, 기둥 상단부의 총 무게는 약 20ton이 되도록 하였다.

- 프로토타입은 2015년 4월 24일에 철근 조립 및 철근게이지 부착을 완료하였고 동년 4월 30일에 타설 작업을 완료하여 약 한달 간 양생 기간을 거친 후 부산대학교 지진방재연구센터에서 동년 6월 1일~6월 4일 동안 진동실험을 실시하였다(그림 81 참조).

- 각 실험체에 대한 실험은 가해지는 지진파의 크기를 달리하여 철근 항복 전후 구조물의 거동이 어떻게 발생하는지에 초점을 맞추어 진행되었다. 가진 시 사용한 지진파는 El-centro 지진파의 N-S성분을 사용하였으며 철근 항복이 발생하지 않은 경우에 대해서는 주어진 지진파의 최대 가속도를 0.139g로 축소한 지진파를 사용하였고 철근 항복이 발생한 경우에 대해서는 주어진 지진파의 가속도 성분은 0.830g로 확대한 지진파를 사용하여 각 경우에 대한 철근 항복 여부를 조절하였다.

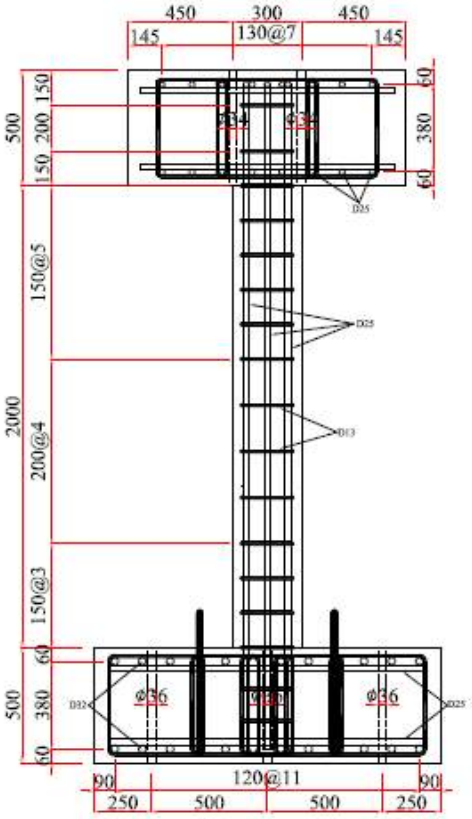


그림 79. 프로토타입 진동대 실험체 정면도

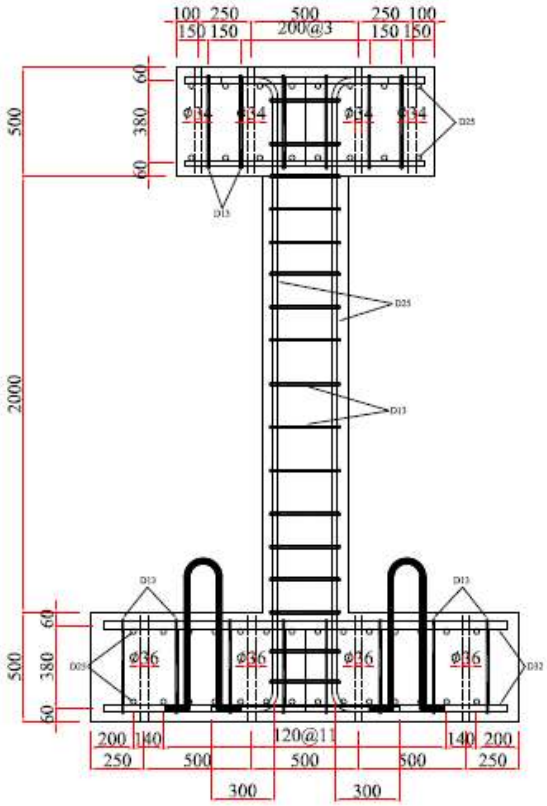


그림 80. 프로토타입 진동대 실험체 측면도

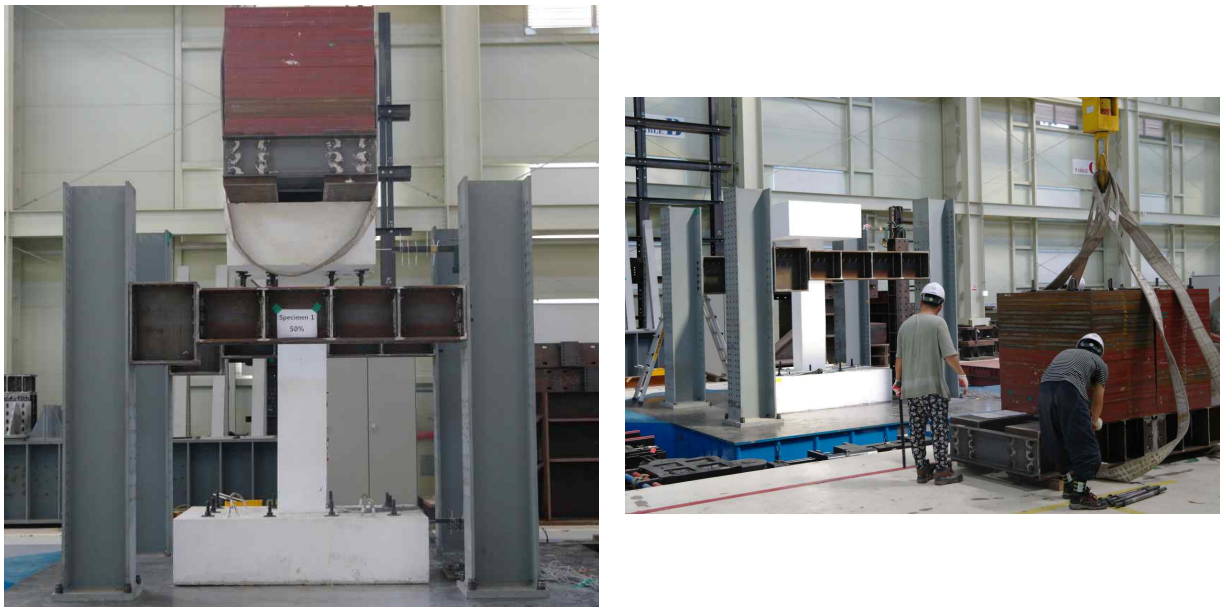


그림 81. 프로토타입 진동대실험 장면

(2) 진동대 축소모형 실험체 설계/제작 및 실험 수행

- 프로토타입 진동대실험을 실시한 이후 개발된 상사법칙의 적용을 위한 축소모형의 응답을 얻기 위한 실험체의 설계/제작 및 실험을 수행하였다.

- 축소모형 실험체는 기제작한 프로토타입 실험체에 축소율 1/4를 적용하여 설계하였다. 설계된 축소모형 실험체는 단면 50mmX75mm크기, 높이 0.5m의 RC 기둥으로 기하학적인 형상에서의 비율은 프로토타입 실험체와 동일하며 아래 그림 82, 83과 같다. 프로토타입

실험체와 마찬가지로 기둥의 상부는 상부질량을 거치를 위하여 기둥 단면보다 크게 설계하였고 하부는 불필요한 변형의 발생 및 진동 시 수직방향 변위의 억제를 위하여 D10 철근을 이용하여 보강하였다. 기둥 단면의 주철근은 D6 철근을 사용하였고 모형의 경우 D3 Wire를 사용하였다. 축소모형 실험체는 총 11개가 제작되었는데 각 실험체의 설계 제원은 모두 동일하다.

- 축소모형 실험체는 2016년 2월 25일부터 3월 6일까지 철근조립, 게이지부탁 및 타설 작업을 완료하여 약 한 달 간 양생 기간을 거친 후 부산대학교 지진방재연구센터에서 동년 3월 28일부터 4월 7일까지 총 9일에 걸쳐 진동실험을 실시하였다. 실험은 실험체의 양생기간이 28일이 지난 이후 실행을 하기 위하여 타설 순서대로 실험을 수행하였다.(그림 84 참조)

- 프로토타입 진동대실험과 마찬가지로 각 실험체에 대한 실험은 가해지는 지진파의 크기를 달리하여 철근 항복 전후 구조물의 거동이 어떻게 발생하는지에 초점을 맞추어 진행되었다. 가진 시 사용한 지진파는 프로토타입 실험체의 실험 시 시험체 하부에 설치한 가속도계에서 측정된 가속도 데이터를 이용하여 동일한 가진파에 대한 프로토타입과 모형 실험체의 응답을 비교할 수 있도록 하였다. 총 2 종류의 지진파가 사용되었으며 각 지진파의 최대 가속도는 각각 0.139g와 0.830g이다.

- 실험 시 최대 가속도가 크지 않은 지진파(0.139g)의 경우 실험 수행 후에도 균열과 같은 실험체 강성의 저하요인이 관찰되지 않았다. 이에 따라 변형률비의 변화에 따른 가진파의 시간보정을 달리하여 동일한 실험체에 여러 번의 실험을 수행함으로써 제한된 실험체를 가지고 최대한 많은 실험 결과를 확보할 수 있도록 하였으며 구조물의 실제 변형률비와 가진파의 시간 보정시 적용한 변형률비간의 차이에 따른 예측정확성의 저하 정도를 분석하는 작업에도 이용하였다. 각 실험체 별로 실험 시 적용한 가진파의 종류 및 적용한 상사법칙을 정리하면 아래 표 5와 같다.

표 5 축소모형 진동대 실험체 별 실험 수행 내역

실험체 번호	가진파 최대 가속도 및 가진파 보정시 적용한 변형률비(괄호)	적용 상사법칙	실험 목적
1	White noise 0.05g(1.0) 0.139g(1.0) 0.139g(1.0) 0.830g(1.0)	김남식(2009)	예비 실험 + 항복 발생 전
2	White noise 0.05g(1.0) 0.139g(1.0) 0.139g(1.0) 0.830g(1.0)	김남식(2009)	항복 발생 전
3	White noise 0.05g(1.0) 0.139g(1.0) 0.830g(1.0)	조남소(2008)	예비 실험 + 항복 발생 후
4	White noise 0.05g(1.0) 0.139g(1.0)	조남소(2008)	항복 발생 전

	0.830g(1.0)		
5	White noise 0.05g(1.0) 0.139g(1.0) 0.830g(1.0)	김남식(2009)	항복 발생 후
6	White noise 0.05g(1.0) 0.139g(1.0) 0.830g(1.0)	조남소(2008)	항복 발생 후
7	White noise 0.05g(1.0) 0.139g(1.6) 0.139g(1.4) 0.139g(1.5) 0.139g(1.7) 0.139g(1.8) 0.830g(1.6)	제안 상사법칙	항복 발생 전
8	White noise 0.05g(1.0) 0.139g(1.6) 0.139g(1.4) 0.139g(1.5) 0.139g(1.7) 0.139g(1.8) 0.830g(1.6)	제안 상사법칙	항복 발생 전
9	White noise 0.05g(1.0) 0.139g(1.4) 0.139g(1.5) 0.830g(1.4)	제안 상사법칙	항복 발생 후
10	White noise 0.05g(1.0) 0.139g(1.4) 0.139g(1.5) 0.830g(1.4)	제안 상사법칙	항복 발생 후
11	White noise 0.05g(1.0) 0.139g(1.3) 0.139g(1.4) 0.830g(1.3)	제안 상사법칙	항복 발생 후

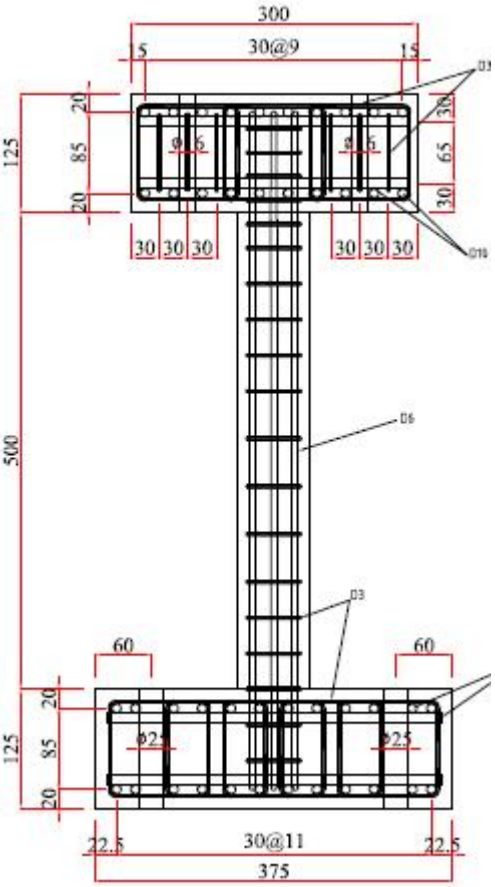


그림 82 축소모형 진동대 실험체 정면도

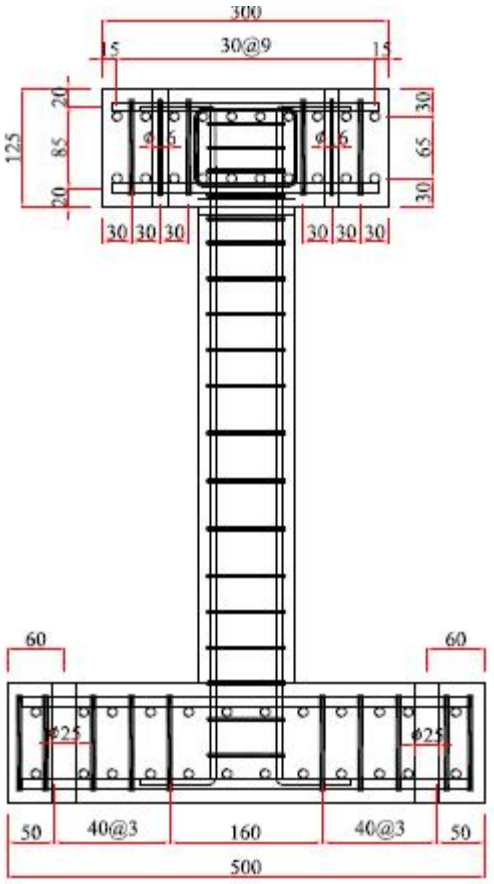


그림 83 축소모형 진동대 실험체 측면도



그림 84 축소모형 진동대 실험 장면

- 모형 실험은 한 번 가진 시 진동대 위에 2개의 실험체는 동시에 올려놓고 진행하였다. 이는 부산대학교 지진방재연구센터의 진동대 실험 대여일정이 길지 않아 정해진 기간 내에 실험을 완료하기 위함도 있었으나 주된 목적은 시간보정시 적용한 변형률비와 실제 구조물의 변형률비의 차이를 의도적으로 유도하여 이에 따른 예측정확성의 차이를 분석하기 위함이며 또한 동일한 실험체에 대해서도 응답을 통해 예측된 변형률비가 어떻게 달라지는지를 알아보기 위함이다.

- 축소모형 실험체의 상부질량은 프로토타입과는 다르게 두 개의 철판을 강봉과 연결하는 방식으로 설치를 하였으며 다만 질량중심의 위치는 프로토타입의 질량중심의 위치를 고려하여 길이상사비를 적용하였을 때 비례적으로 서로 동일한 위치에 있도록 하였다. 모형 실험체의 상부질량을 프로토타입과 같이 한 덩어리가 되도록 하지 않은 것은 상사법칙의 특

성을 고려하였기 때문이다. 기존 연구에서 적용한 상사법칙과 본 연구에서 제안한 상사법칙은 공통적으로 가속도상사비를 1.0으로 하는데 이는 구조물의 동적실험 시 가속도상사비가 1.0이 아닌 경우 중력 또한 가속도에 해당하여 중력에 대한 효과를 상사비에 맞게 보정해주어야 하나 현실적으로 중력에 의한 영향을 변경하는 것이 힘들기 때문이다. 이 경우 질량상사비가 길이상사비의 세제곱이 아닌 제곱에 비례하게 되는데 부피에 대한 상사비는 길이상사비의 세제곱에 비례한다는 것을 고려하면 축소모형의 상부질량의 크기를 프로토타입의 상부질량의 크기에 축소율을 적용한 크기로 제작하기 위해서는 축소모형 질량의 재료의 단위중량을 프로토타입 질량의 재료의 단위중량 보다 길이상사비의 역수만큼 크도록 제작해야 한다. 본 연구에서 축소모형의 길이상사비는 1/4이고 프로토타입 상부질량의 재료는 철이므로 이론적으로는 축소모형의 상부질량 제작에 사용되어야 할 재료는 그 단위중량을 철의 단위중량의 4배 만큼 무거운 재료가 되어야 하나 현실적으로 이러한 재료를 제작하는 것이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 차선책으로 질량에 대한 상사비는 만족하도록 하면서 질량이 차지하는 부피에 대한 상사비는 만족하지 않도록 하였다. 다만 프로토타입과 축소모형 모두 질량 자체는 강체로 볼 수 있으므로 각 상부질량의 질량중심이 실험체 상부로부터의 위치는 길이상사비를 만족하도록 설계/제작하였다.

(3) 하이브리드시뮬레이션 프로토타입 실험체 설계/제작 및 실험 수행

- 하이브리드시뮬레이션 프로토타입 실험체는 진동대실험에서의 프로토타입 실험체와 마찬가지로 기존 연구와의 효율적인 비교 및 기구축된 데이터의 사용을 통한 효과적인 연구진행을 위하여 김남식(2007), 조남소(2003)의 연구에서 사용한 실험체와 유사하도록 설계하였다.

- 설계된 프로토타입 실험체는 단면 크기, 높이 2m의 철근콘크리트 기둥으로 아래 그림 85~86와 같다. 기둥의 상부는 상부질량을 거치를 위하여 단면보다 크게 설계하였고 하부는 불필요한 변형의 발생 및 진동 시 수직방향 변위의 억제를 위하여 D32 철근을 이용하여 보강하였다. 원형구조물은 총 3개가 제작되었는데 각 실험체의 설계 제원은 모두 동일하다.

- 프로토타입 실험체는 2015년 11월 1일에 철근 조립 및 철근게이지 부착을 완료하였고 동년 11월 6일에 타설 작업을 완료하여 약 한달 간 양생 기간을 거친 후 명지대학교 하이브리드 구조실험센터에서 동년 2월 12일 하루 동안 실험을 실시하였다(그림 87 참조). 각 실험체에 대한 실험은 가해지는 지진파의 크기를 달리하여 철근 항복 전후 구조물의 거동이 어떻게 발생하는지에 초점을 맞추어 진행되었다.

- 프로토타입 하이브리드시뮬레이션 실험은 프로토타입 진동대실험의 이후 실시하였는데 이는 진동대실험에서 계측된 지진가속도를 그대로 하이브리드시뮬레이션 실험에 사용하여 동일한 조건하에서 실험을 진행하기 위함이었다.

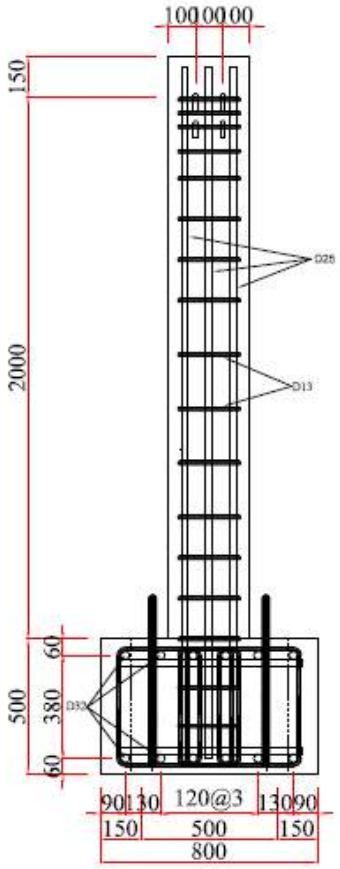


그림 85 프로토타입 하이브리드 시뮬레이션 실험체 정면도

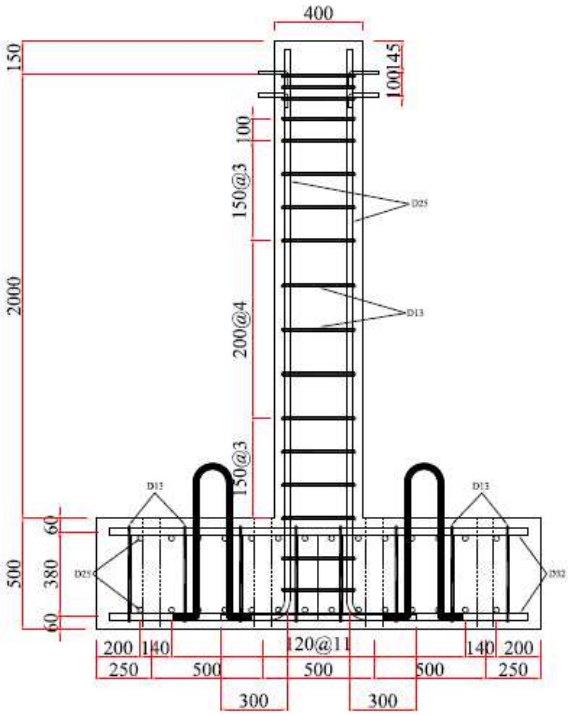


그림 86 프로토타입 하이브리드시뮬레이션 실험체 측면도



그림 87 프로토타입 하이브리드시뮬레이션 실험 장면

(4) 하이브리드시뮬레이션 축소모형 실험체 설계/제작 및 실험 수행

- 프로토타입 하이브리드시뮬레이션 실험을 실시한 이후 개발된 상사법칙의 적용을 위한 축소모형의 응답을 얻기 위한 실험체의 설계/제작 및 실험을 수행하였다.

- 축소모형 실험체는 기제작한 프로토타입 실험체에 축소율 1/4를 적용하여 설계하였다. 설계된 축소모형 실험체는 단면 50mmX75mm크기, 높이 0.5m의 RC 기둥으로 기하학적인 형상에서의 비율은 프로토타입 실험체와 동일하며 아래 그림 88~89과 같다. 프로토타입 실

험체와 마찬가지로 기둥의 상부는 상부질량을 거치를 위하여 기둥 단면보다 크게 설계하였고 하부는 불필요한 변형의 발생 및 진동 시 수직방향 변위의 억제를 위하여 D10 철근을 이용하여 보강하였다. 기둥 단면의 주철근은 D6 철근을 사용하였고 모형의 경우 D3 Wire를 사용하였다. 축소모형 실험체는 총 18개가 제작되었는데 각 실험체의 설계 제원은 모두 동일하다.

- 축소모형 실험체는 2016년 3월 6일부터 3월 15일까지 철근 조립, 철근게이지 부착, 그리고 타설 작업을 완료하여 약 한 달 간 양생 기간을 거친 후 명지대학교 하이브리드구조실험센터에서 동년 4월 26일~5월 4일의 7일 동안 실험을 실시하였다(그림 90 참조). 각 실험체에 대한 실험은 가해지는 지진파의 크기를 달리하여 철근 항복 전후 구조물의 거동이 어떻게 발생하는지에 초점을 맞추어 진행되었다. 가진 시 사용한 지진파는 프로토타입 실험체의 실험 시 실험체 하부에 설치한 가속도계에서 측정된 가속도 데이터를 이용하여 동일한 가진파에 대한 프로토타입과 모형 실험체의 응답을 비교할 수 있도록 하였다.

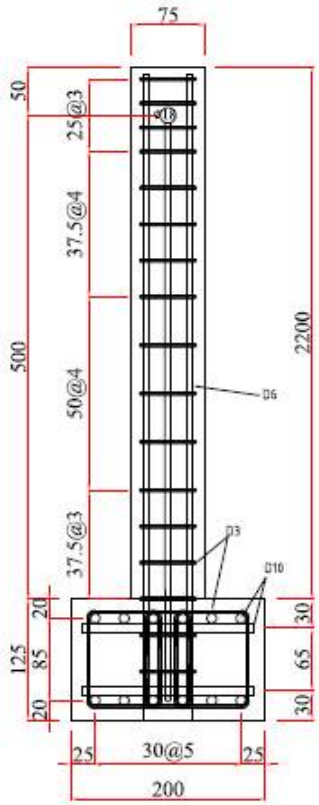


그림 88 축소모형 진동대 실험체 정면도

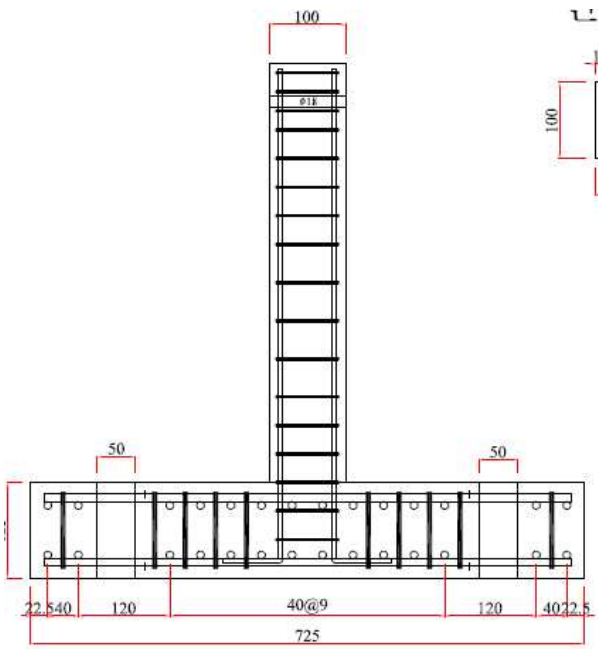


그림 89 축소모형 진동대 실험체 측면도

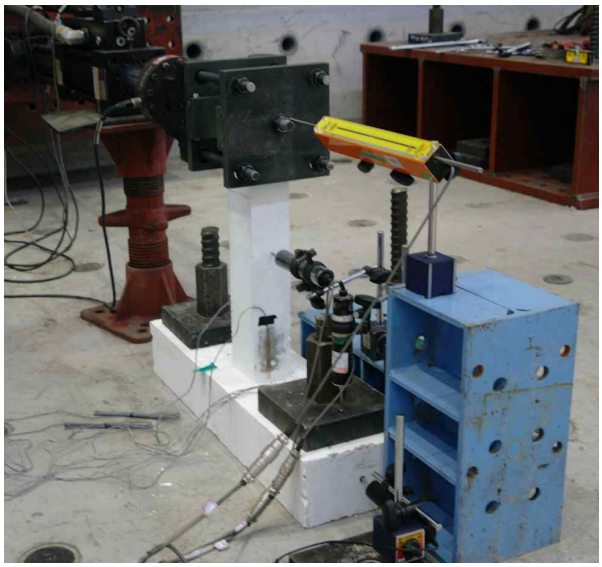



그림 90 축소모형 하이브리드시뮬레이션 실험 장면

- 진동대 축소모형 실험과 마찬가지로 실험 시 최대 가속도가 크지 않은 지진파(0.139g)의 경우 실험 수행 후에도 균열과 같은 실험체 강성의 저하요인이 관찰되지 않았다. 이에 따라 변형률비의 변화에 따른 가진파의 시간보정을 달리하여 동일한 실험체에 여러 번의 실험을 수행함으로써 제한된 실험체를 가지고 최대한 많은 실험 결과를 확보할 수 있도록 하였으며 구조물의 실제 변형률비와 가진파의 시간 보정시 적용한 변형률비간의 차이에 따른 예측정확성의 저하 정도를 분석하는 작업에도 이용하였다. 각 실험체 별로 실험 시 적용한 가진파의 종류 및 적용한 상사법칙을 정리하면 아래 표 6와 같다.

표 6 축소모형 하이브리드시뮬레이션 실험체 별 실험 수행 내역

실험체 번호	가진파 최대 가속도(g)	적용 상사법칙	실험 목적
1	-	-	Cyclic pushover 실험
2	-	-	Cyclic pushover 실험
3	0.139g	김남식(2009)	예비실험 + 김남식(2009) 검증
	0.139g	김남식(2009)	
	0.830g	김남식(2009)	
4	0.139g	조남소(2008)	예비실험 + 조남소(2009) 검증
	0.139g	조남소(2008)	
	0.830g	조남소(2008)	
5	0.139g	김남식(2009)	
	0.830g	김남식(2009)	
6	0.139g	조남소(2008)	
	0.830g	조남소(2008)	
7	0.139g	제안 상사법칙	
	0.830g	제안 상사법칙	
8	0.139g	제안 상사법칙	
	0.830g	제안 상사법칙	
15	0.139g	김남식(2009)	
	0.830g	김남식(2009)	
16	0.139g	조남소(2008)	
	0.830g	조남소(2008)	
11	0.139g	제안 상사법칙	
	0.830g	제안 상사법칙	
12	0.139g	제안 상사법칙	
	0.139g	제안 상사법칙	

	0.830g	제안 상사법칙	
9	0.139g	제안 상사법칙	
	0.139g	제안 상사법칙	
	0.830g	제안 상사법칙	
10	0.139g	제안 상사법칙	
	0.139g	제안 상사법칙	
	0.830g	제안 상사법칙	
13	0.139g	제안 상사법칙	
	0.139g	제안 상사법칙	
	0.830g	제안 상사법칙	
14	0.830g	제안 상사법칙	0.830g 단독실험
17	0.139g	제안 상사법칙	
	0.139g	제안 상사법칙	
	0.830g	제안 상사법칙	
18	0.830g	제안 상사법칙	0.830g 단독실험

다. 실험 결과 분석을 통한 제안된 상사법칙과 변형률비 산정방법의 타당성 검증

- 프로토타입과 모형 진동대 및 하이브리드시뮬레이션 실험에서 각각 계측된 실험 결과를 분석하여 제안된 상사법칙과 변형률비 산정방법의 타당성을 검증하였다. 본 연구에서 제안한 상사법칙과 변형률비 산정방법의 타당성을 비교하기 위하여 기존의 관련 연구에서 사용하였던 상사법칙(김남식 2009, 조남소 2008)를 적용하여 별도로 실험을 수행하였으며 이로부터 예측된 응답 또한 프로토타입의 응답과 비교하였다. 이도근(2012)상사법칙의 경우 실제 실험에 적용을 위한 변형률비의 산정방법을 논문에서 제시하고 있지 않아 부득이하게 비교 대상에서 제외하였다.

- 각 상사법칙의 예측정확성에 대한 비교를 위하여 프로토타입의 응답과 모형의 응답에 상사법칙을 적용하여 예측된 응답을 비교하였으며 시간에 따른 변위, 하중-변위 관계, 변위 응답의 FFT 해석결과를 그래프로 비교하였다. 이와 더불어 좀 더 정량적인 분석을 위하여 아래의 두 가지 척도(Similarity criteria)를 도입하였다.

- 첫 번째로는 프로토타입과 예측결과의 변위 응답을 이용하여 계산된 Cross correlation으로 이는 아래 식 (9)을 통해서 계산된다. 이 값은 프로토타입의 변위 응답과 예측 결과의 변위 응답 간 선형적인 상관관계를 나타내며 두 값이 1.0에 가까울수록 선형성이 강하다는 것을 뜻한다. 식 (9)에서 u_p는 프로토타입의 변위 응답, $\tilde{u}_p$는 상사법칙을 적용하여 예측된 변위 응답, σ_p와 $\tilde{\sigma}_p$는 각각 u_p와 $\tilde{u}_p$의 표준편차, cov는 Cross covariance를 의미한다.

$$\rho = \frac{\mathrm{cov}\left(u_p, \tilde{u}_p\right)}{\sigma_p \tilde{\sigma}_p} \ , \ 0 \le \rho \le 1 \tag{9}$$

- 두 번째 척도는 FRAC(Frequency response assurance criterion)으로 이는 프로토타입과 예측 결과의 변위 응답 각각에 대한 FFT(Fast Fourier transform) 해석 결과를 이용하여 계산되며 아래 식 (10)과 같다. 이 값은 앞서 제시한 Cross correlation의 주파수영역응답에

적용한 것으로 FFT 해석결과의 선형적인 상관관계를 나타내는 것으로 그 값이 1.0에 가까울수록 모든 주파수에서의 응답의 선형성이 강하다는 것을 의미한다. 식 (10)에서 $X_p(f)$는 프로토타입의 변위 응답으로부터 계산된 FFT 해석결과를 의미하며 $\tilde{X}_p(f)$는 상사법칙을 적용하여 예측된 변위 응답으로부터 계산된 FFT 해석결과이다. 일반적으로 FFT 해석결과는 복소수가 되며 *는 켤레복소수를 의미한다.

$$FRAC = \frac{\left|\sum_{f=f_1}^{f_2} X_p(f)\tilde{X}_p{}^*(f)\right|}{\sum_{f=f_1}^{f_2} X(f)X^*(f)\sum_{f=f_1}^{f_2}\tilde{X}_p(f)\tilde{X}_p{}^*(f)} \qquad (10)$$

(1) 진동대 프로토타입 및 축소모형 실험 결과 비교/분석

- 그림 91~123은 진동대실험의 결과를 나타낸 것으로 프로토타입의 응답과 축소모형의 응답으로부터 상사법칙을 적용하여 예측된 예측결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그림 91~104는 김남식(2009) 및 조남소(2008)의 상사법칙을 적용하였을 때의 실험 결과이며 그림 92~123은 본 연구에서 제시한 상사법칙과 앞서 진동대실험에 적용하는 변형률비의 변화(철근 항복 전후 2단계로 구분)를 고려하여 시간보정을 수행한 가진파를 이용한 결과이다. 그림에서 회색으로 표시된 결과는 프로토타입 실험의 결과를 의미하며 검은색으로 표시된 결과가 각 상사법칙에 의한 예측결과이다.

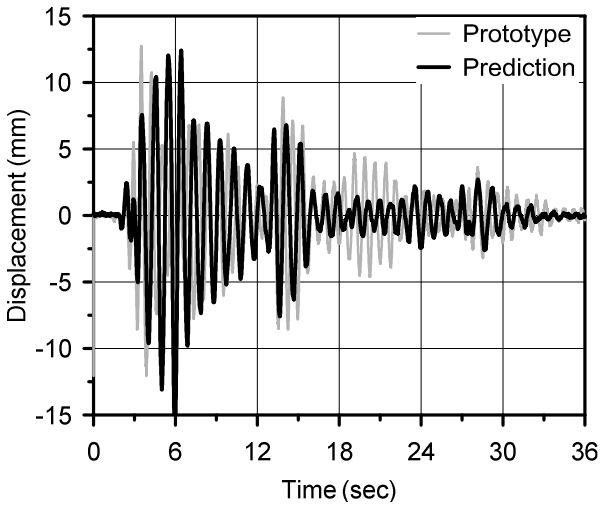


그림 91 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 김남식(2009) 상사법칙 적용)

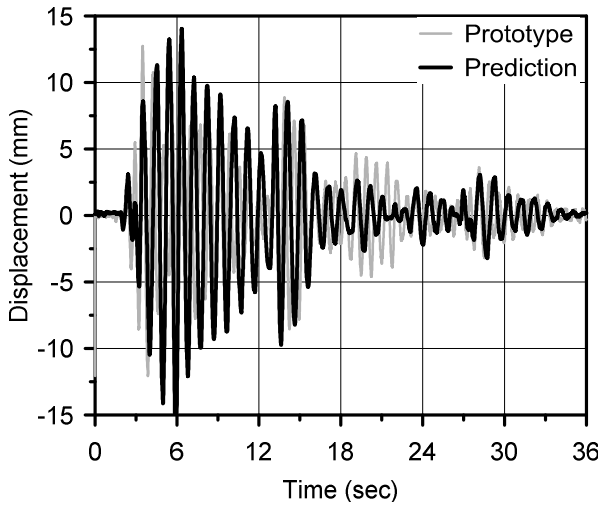


그림 92 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 김남식(2009) 상사법칙 적용)

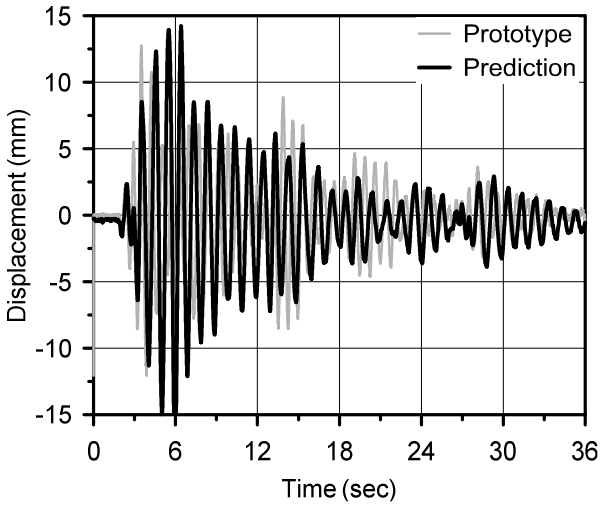


그림 93 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 조남소(2009) 상사법칙 적용)

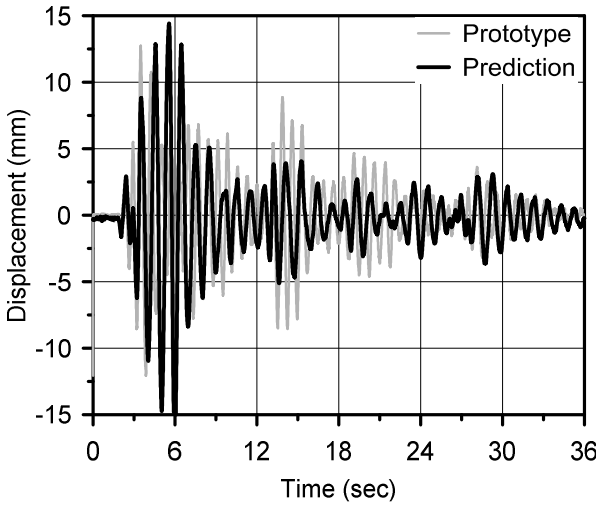


그림 94 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 조남소(2009) 상사법칙 적용)

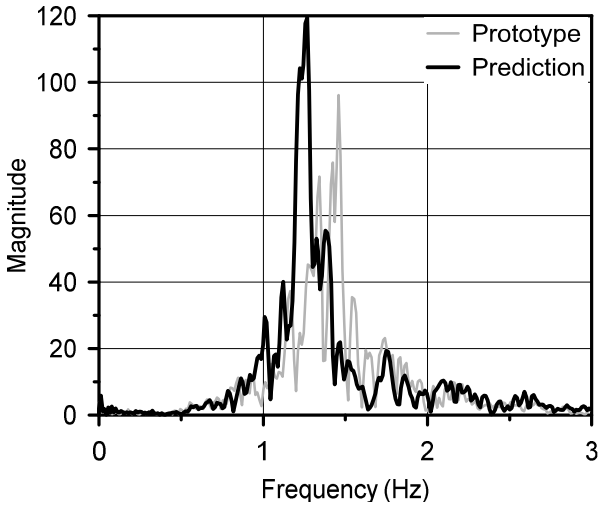


그림 95 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 김남식(2009) 상사법칙 적용)

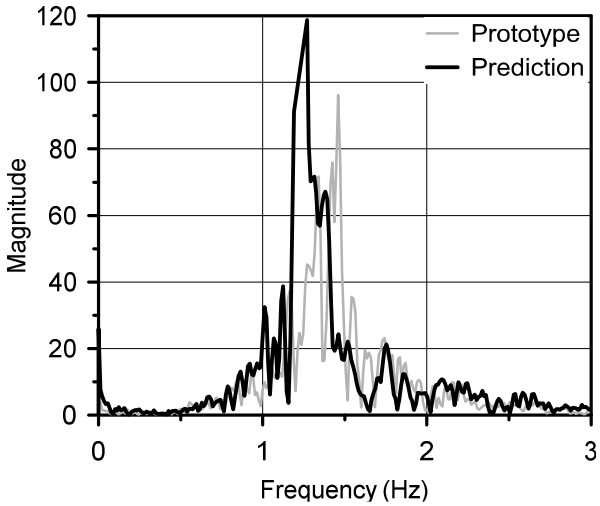


그림 96 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 김남식(2009) 상사법칙 적용)

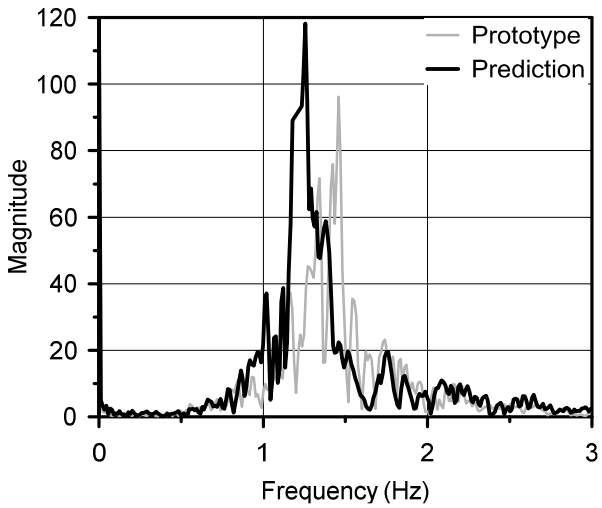


그림 97 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 조남소(2009) 상사법칙 적용)

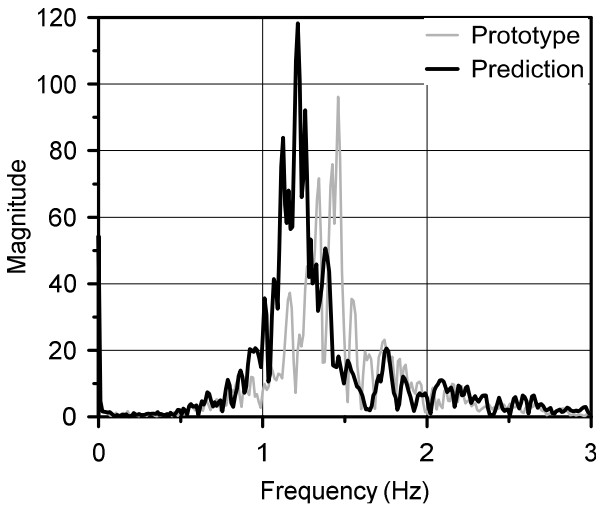


그림 98 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 조남소(2009) 상사법칙 적용)

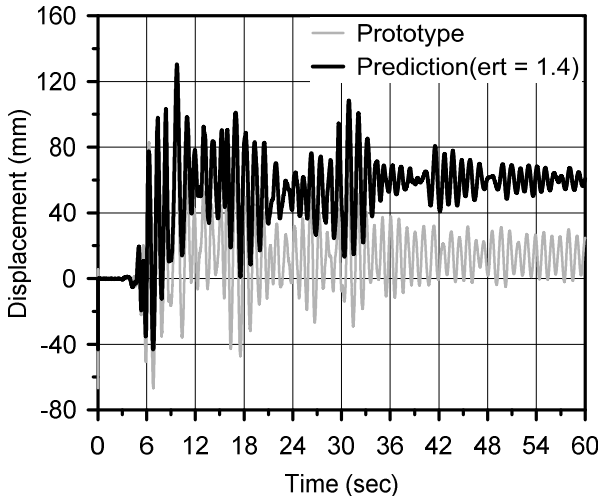


그림 99 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.830g, 김남식(2009) 상사법칙 적용)

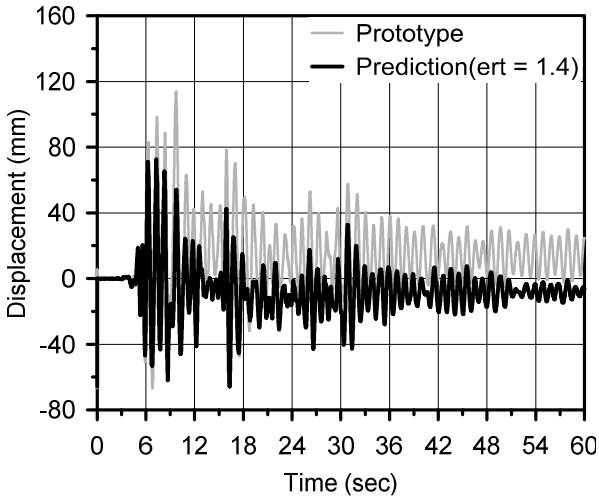


그림 100 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.830g, 조남소(2008) 상사법칙 적용)

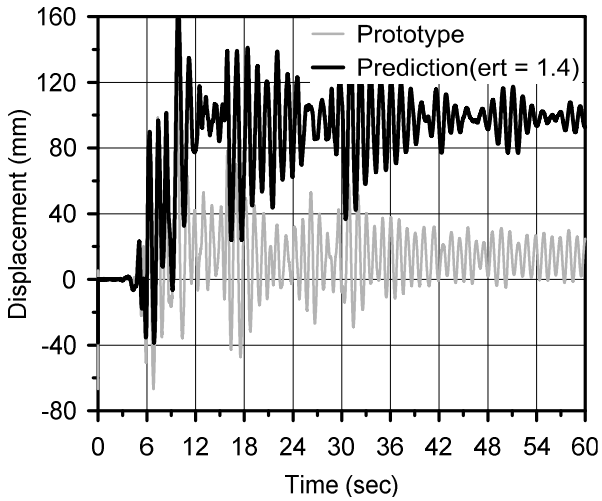


그림 101 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.830g, 조남소(2008) 상사법칙 적용)

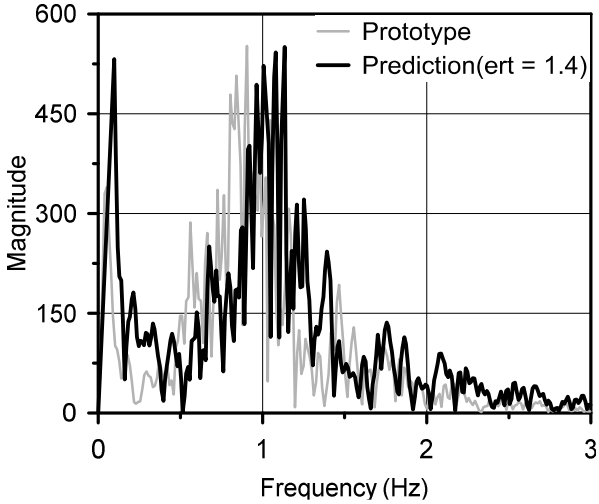


그림 102 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 김남식(2009) 상사법칙 적용)

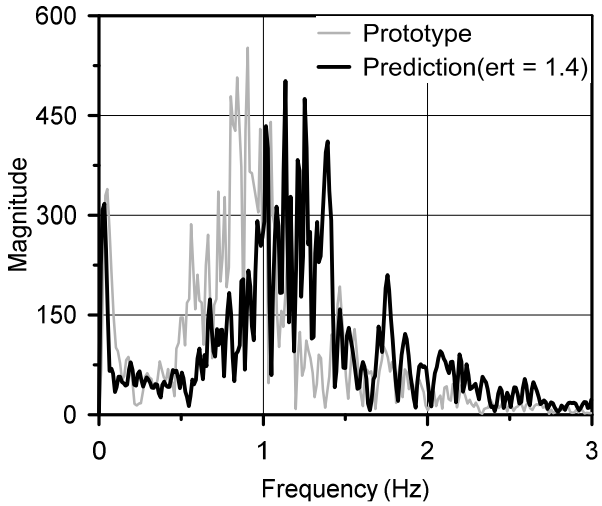


그림 103 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 조남소(2008) 상사법칙 적용)

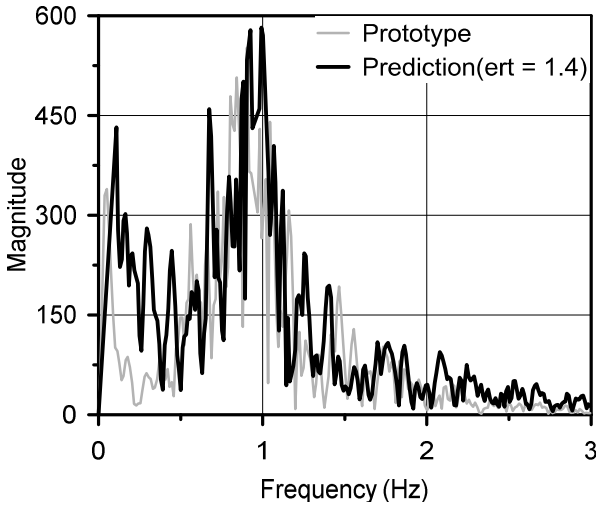


그림 104 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 조남소(2008) 상사법칙 적용)

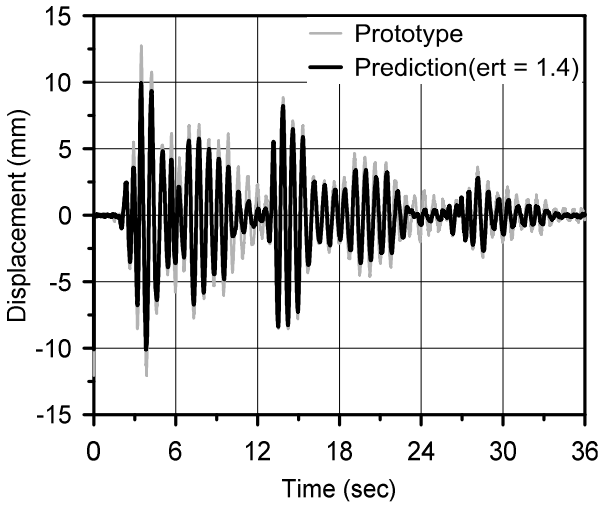


그림 105 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

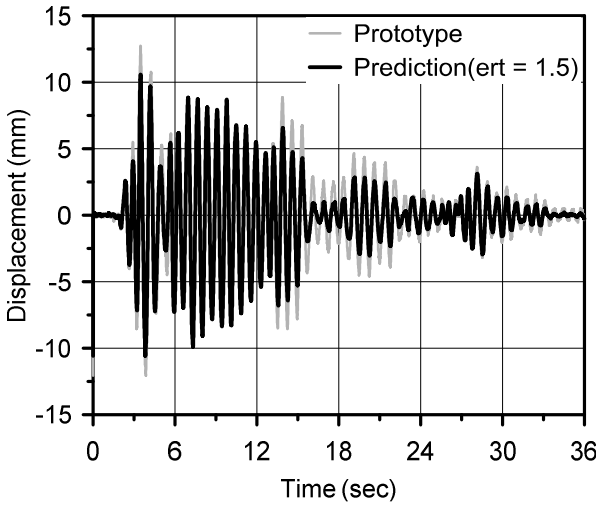


그림 106 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

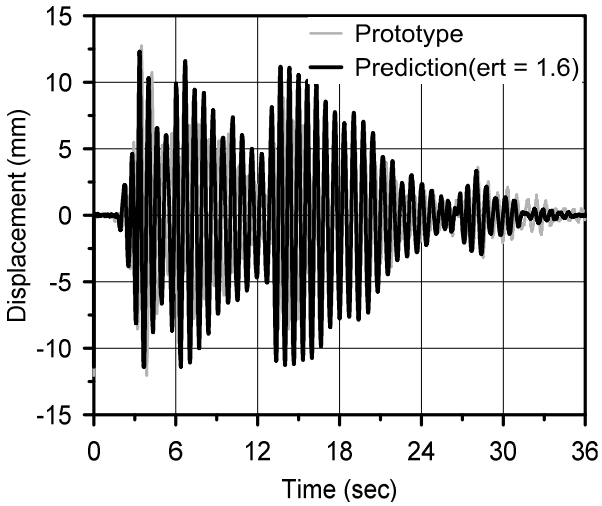


그림 107 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

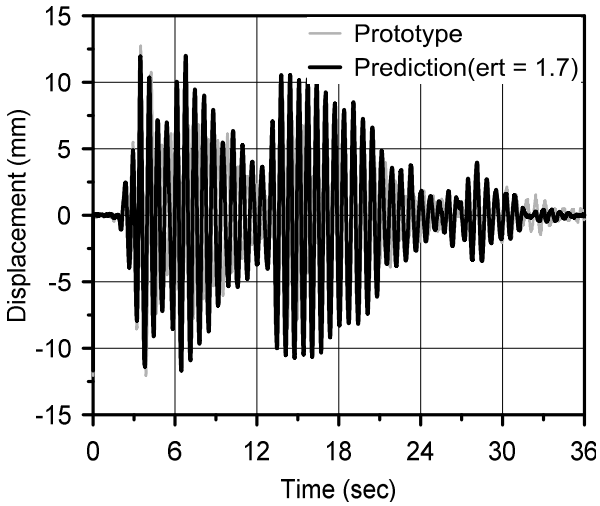


그림 108 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

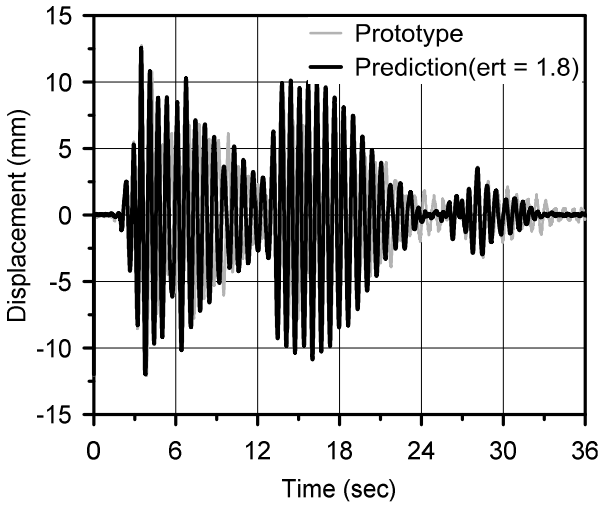


그림 109 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

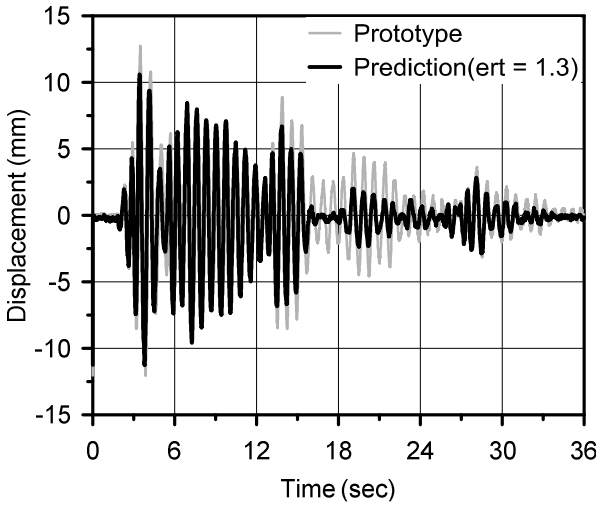


그림 110 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

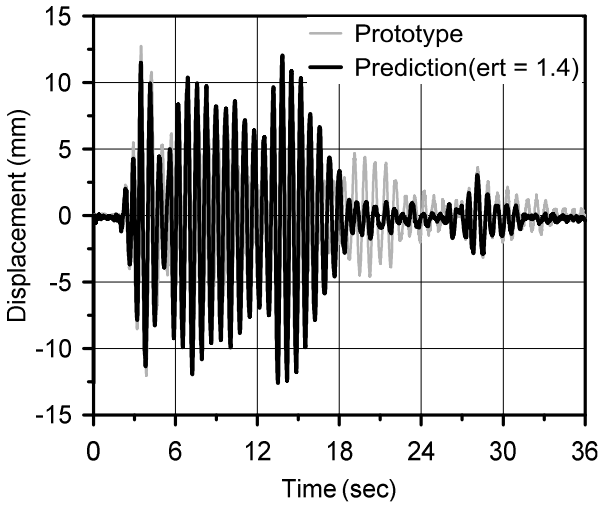


그림 111 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

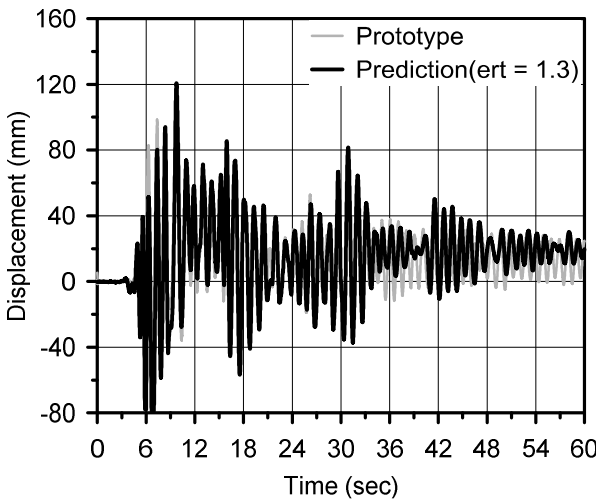


그림 112 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

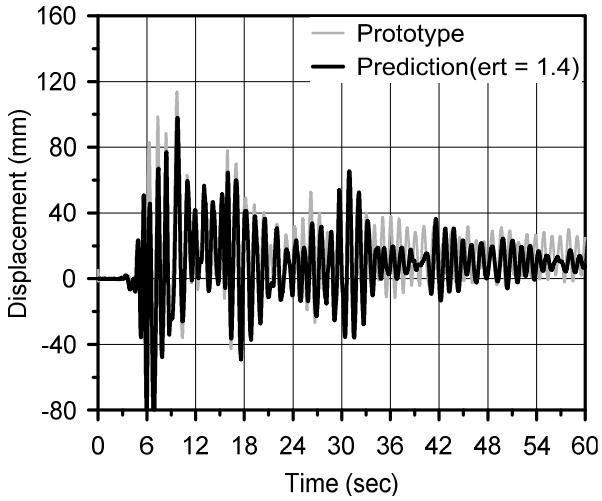


그림 113 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

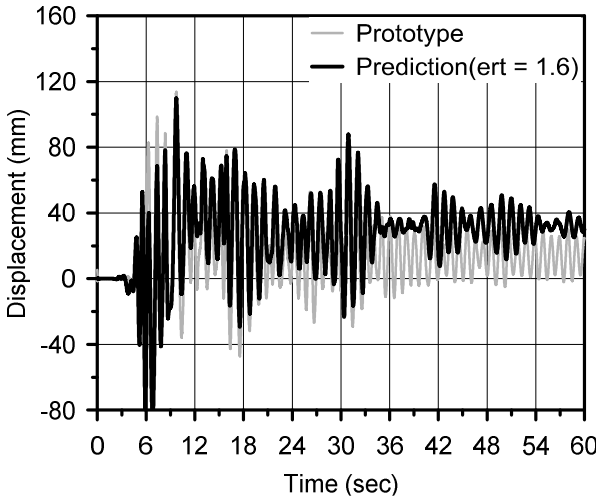


그림 114 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

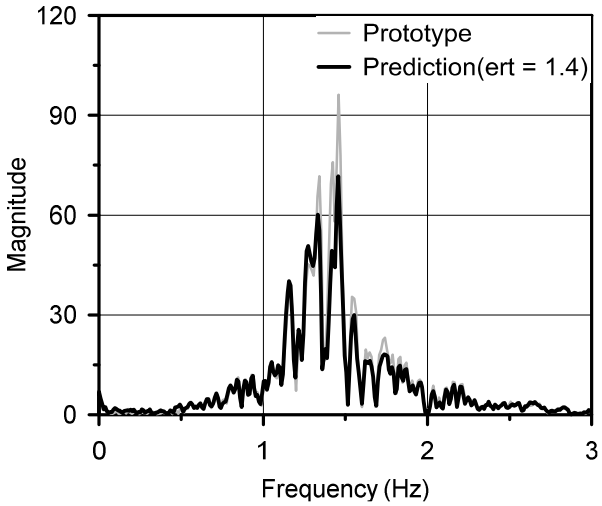


그림 115 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

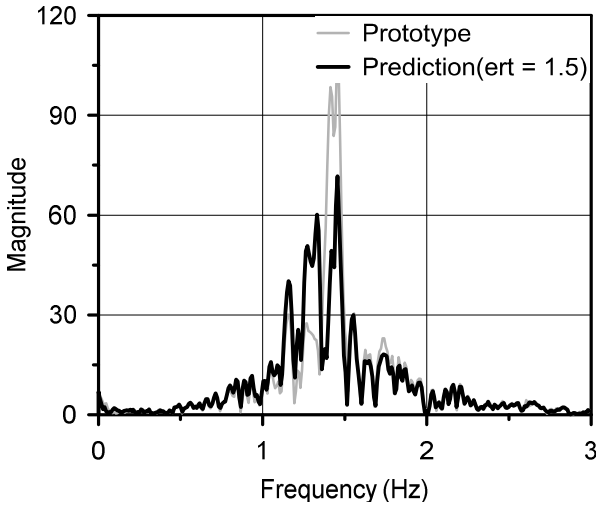


그림 116 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

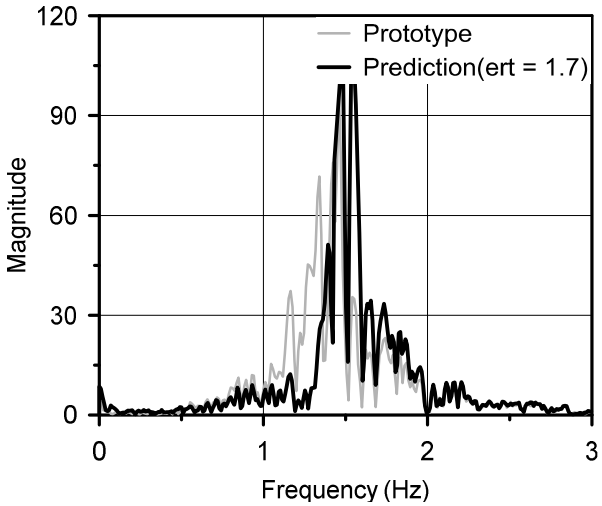


그림 117 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

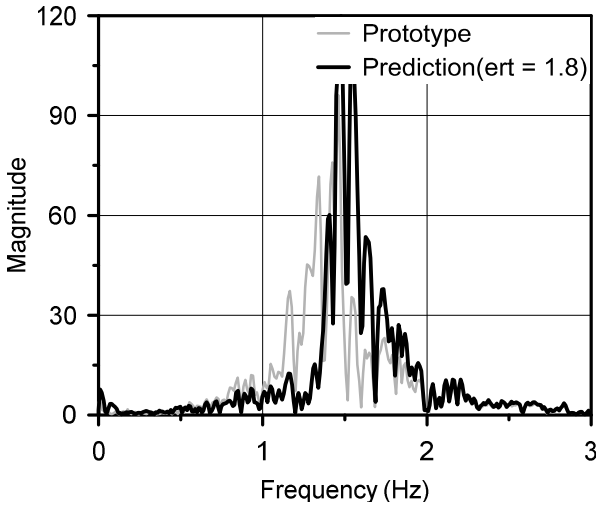


그림 118 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

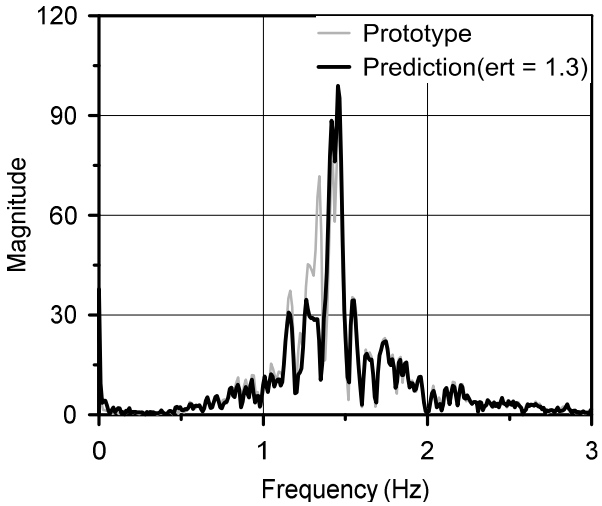


그림 119 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

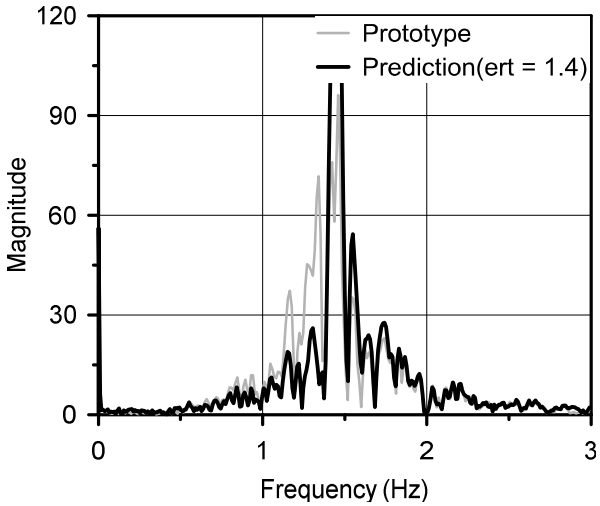


그림 120 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

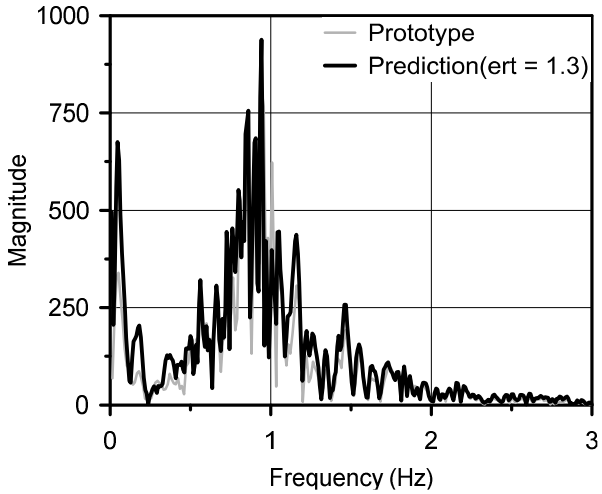


그림 121 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

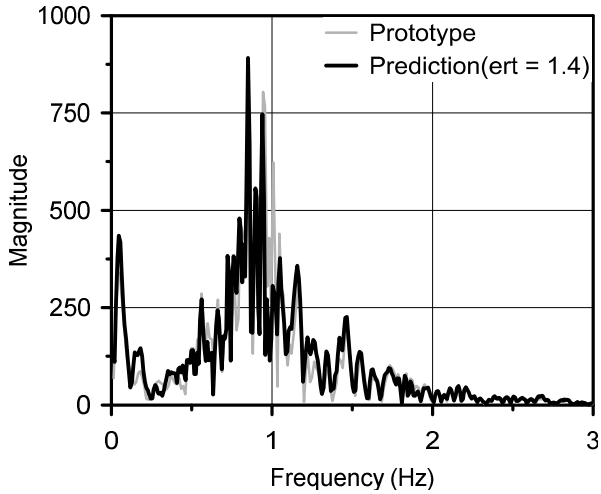


그림 122 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

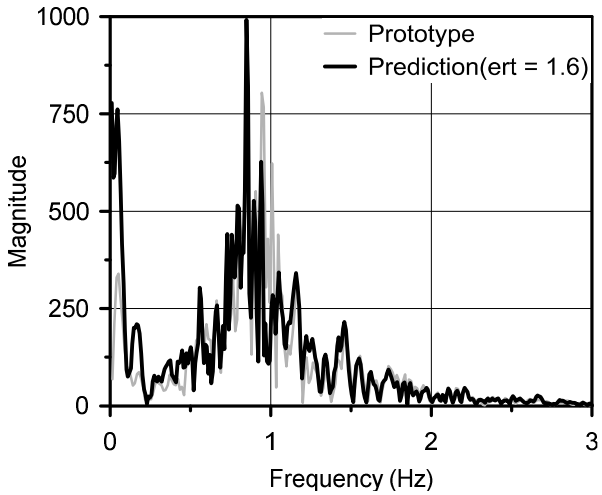


그림 123 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

- 김남식(2009), 조남소(2008)의 상사법칙을 적용한 경우 가진파의 최대 가속도가 0.139g일 때, 공통적으로 FFT 해석결과에서 확인할 수 있는 기둥의 고유진동수 예측값이 실제보다 작게 나오는 것을 확인할 수 있다. 이는 두 상사법칙 모두 시간상사비와 변형률비 간 관계를 무시하고 가진파의 시간에 대한 보정을 하지 않은 결과로 볼 수 있다. 주파수에 대한 상사비는 시간 상사비의 역수와 동일하므로 결국 주파수에 대한 상사비는 변형률비의 제곱근의 역수에 비례하게 되며 결과적으로 변형률비가 1.0보다 큰 경우 프로토타입 응답으로부터 구한 고유진동수를 모형 응답으로부터 구한 고유진동수로부터 예측하기 위해서는 계산된 모형의 고유진동수보다 큰 값이 되게 된다. 진동대 실험 시 사용한 실험체의 경우 변형률비가 1.0보다 큰 값을 가지는 것으로 나타났으며(표 7, 8 참조) 제안된 상사법칙을 적용할 경우 모형의 응답으로부터 계산된 진동수를 변형률비와 주파수상사비간 관계를 고려하여 더욱 큰 값으로 보정을 하여야 프로토타입의 진동수가 예측이 되나 김남식(2009)과 조남소(2008)에서는 사실 상 구조물의 변형률비를 1.0으로 본 것과 다름이 없기 때문에 결과적으로 모형의 고유진동수를 더욱 큰 값으로 보정하는 과정을 생략한 것이나 다름이 없

다. 이에 따라 예측된 프로토타입의 고유진동수가 실제 프로토타입의 고유진동수보다 작게 나오는 것으로 볼 수 있다.

- 또한 그림 99-101에서와 같이 가진파의 최대가속도가 0.830g인 경우 철근항복에 의해 발생하는 비선형 거동과 이에 따른 영구변형의 크기가 프로토타입의 실험결과와 비교하여 상당히 크기 발생하는 것을 볼 수 있다.

- 그림 105-123의 제안된 상사법칙에 따른 시간보정을 수행한 실험결과의 경우 그림 105, 110과 같이 프로토타입의 거동을 김남식(2009), 조남소(2008)과 비교하여 상당히 잘 예측하는 것을 볼 수 있다. 이외의 경우에도 김남식(2009), 조남소(2008)의 결과에 비하여 변위응답 및 FFT 해석결과를 통한 고유진동수 해석 값의 정확성이 향상된 것을 볼 수 있으나 전반적으로 만족할 만한 정확성을 보여주지 못하는데 이는 시간보정시 사용한 변형률비와 실제 구조물의 변형률비의 차이에 따른 예측정확성의 차이를 보기 위하여 의도적으로 시간 보정 시 사용한 변형률비를 다양하게 적용한 해석결과이기 때문이다.

- 표 7, 8은 각 실험체 별로 백색잡음(White noise)파를 이용하여 식 (8)을 통해 역산된 변형률비, 가진파의 최대 가속도, 가진파의 시간보정에 사용된 변형률비에 따른 Cross correlation과 FRAC의 계산결과를 정리하여 나타낸 것이다.

표 7 실험체 별 가진 내용에 따른 실험결과 정리(김남식, 조남소)

적용 상사법칙	실험체 번호	가진파 최대 가속도(g)	가진파 보정 시 사용한 변형률비	응답으로부터 역산된 변형률비	Cross correlation	FRAC
-	프로토 타입	0.139	-	-	-	-
-	프로토 타입	0.830	-	-	-	-
김남식	1	0.139	1.0	1.659	0.238	0.172
	1	0.139	1.0	1.659	0.228	0.164
	1	0.830	1.0	-	0.466	0.664
조남소	2	0.139	1.0	1.764	0.214	0.136
	2	0.139	1.0	1.764	0.210	0.134
	2	0.830	1.0	-	0.494	0.490
김남식	3	0.139	1.0	1.710	0.223	0.149
	3	0.139	1.0	1.710	0.222	0.150
	3	0.830	1.0	-	0.528	0.648
조남소	4	0.139	1.0	1.764	0.230	0.169
	4	0.139	1.0	1.710	0.230	0.169
	4	0.830	1.0	-	0.497	0.526
김남식	5	0.139	1.0	1.433	0.317	0.234
	5	0.830	1.0	-	0.766	0.886
조남소	6	0.139	1.0	1.129	0.507	0.501
	6	0.830	1.0	-	0.778	0.860

표 8 실험체 별 가진 내용에 따른 실험결과 정리(제안 상사법칙 적용)

적용 상사법칙	실험체 번호	가진파 최대 가속도(g)	가진파 보정 시 사용한 변형률비	응답으로부터 역산된 변형률비	Cross correlation	FRAC
-	프로토	0.139	-	-	-	-

	타입					
-	프로토 타입	0.830	-	-	-	-
제안 상사법칙	7	0.139	1.6	1.337	0.548	0.630
	7	0.139	1.4	1.394	0.947	0.952
	7	0.139	1.5	1.394	0.862	0.829
	7	0.139	1.7	1.413	0.560	0.591
	7	0.139	1.8	1.454	0.581	0.563
	7	0.830	1.6	-	0.761	0.827
	8	0.139	1.6	1.167	0.457	0.428
	8	0.139	1.4	1.219	0.551	0.592
	8	0.139	1.5	1.225	0.552	0.583
	8	0.139	1.7	1.229	0.437	0.394
	8	0.139	1.8	1.273	0.389	0.310
	8	0.830	1.6	-	0.837	0.893
	9	0.139	1.4	1.158	0.574	0.608
	9	0.139	1.5	1.129	0.558	0.573
	9	0.830	1.4	-	0.840	0.869
	10	0.139	1.4	1.175	0.554	0.579
	10	0.139	1.5	1.129	0.560	0.563
	10	0.830	1.4	-	0.780	0.844
	11	0.139	1.3	1.188	0.905	0.883
	11	0.139	1.4	1.219	0.716	0.731
	11	0.830	1.3	-	0.850	0.885

- 김남식(2009), 조남소(2008)의 경우 실험체의 변형률비와 실제로 가진파의 시간보정시 사용한 변형률비인 1.0(시간보정을 하지 않은 것과 동일함)의 차이가 제안 상사법칙에 비해서 전반적으로 크며 이에 따라 예측정확성이 저하되는 것으로 생각 할 수 있다. 시간보정시 적용한 변형률비와 응답으로부터 역산된 변형률비간의 차이와 두 가지 척도를 비교하면 그림 124, 225와 같다. 그림 124는 철근 항복이 발생하지 않은 경우 즉 최대 가속도가 0.139g인 경우이며 그림 125는 철근 항복이 발생한 경우 즉, 최대 가속도가 0.830g인 경우를 나타낸 것으로 두 그림에서의 X 축은 시간보정 시 적용한 변형률비와 응답으로부터 역산된 변형률비의 차이를 역산된 변형률비로 나눈 값을 % 단위로 나타낸 것이다. 그림 1에서 확인할 수 있는 것과 같이 모두 시간 보정 시 적용한 변형률비와 실험 응답의 분석을 통해 역산된 축소모형의 변형률비가 일치할수록 Cross correlation과 FRAC 또한 1에 가까워지는 것을 알 수 있다. 그림 125의 경우에는 시간보정 시 적용한 변형률비와 역산된 변형률비의 차이에 따른 두 가지 척도의 계산 값의 차이가 분명치 않고 전반적으로 그 값이 1.0에 가까운데 이는 실험 시 사용한 El-centro 파의 특성 상 응답의 초반부에 이미 철근의 항복이 발생하게 되고 철근 항복 후에는 시간 보정 시 변형률비가 1.0이 되며 철근 항복 후에는 구조물의 변형률비 또한 1.0에 가까워 짐에 따른 결과로 볼 수 있다.

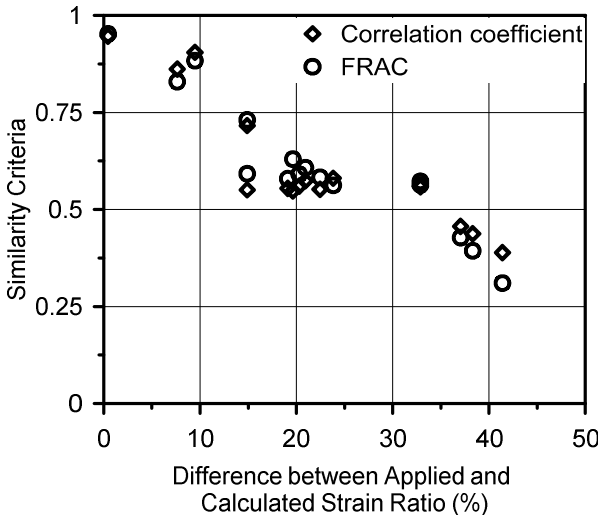


그림 124 가진파 시간증분 보정시 적용한 변형률비와 응답으로부터 역산된 변형률비의 차이에 따른 Cross correlation 계산 결과(철근 항복 미발생, 0.139g)

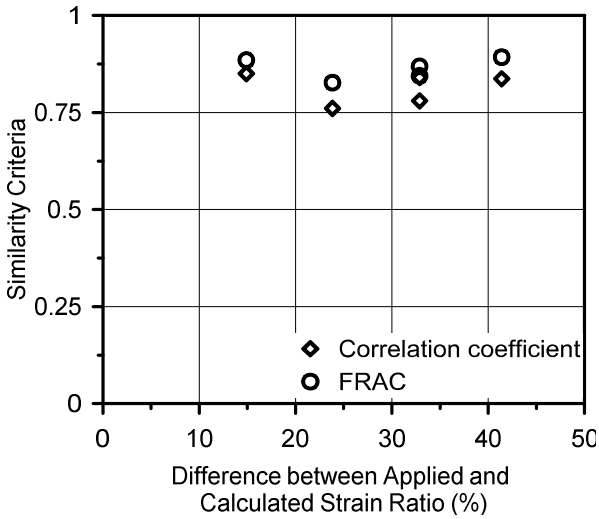


그림 125 가진파 시간증분 보정시 적용한 변형률비와 응답으로부터 역산된 변형률비의 차이에 따른 Cross correlation 계산 결과(철근 항복 발생, 0.830g)

(2) 하이브리드시뮬레이션 프로토타입 및 축소모형 실험 결과 비교/분석

- 그림 126~203은 하이브리드시뮬레이션 실험결과를 나타낸 것으로 프로토타입의 응답과 축소모형의 응답으로부터 상사법칙을 적용하여 예측된 예측결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그림 126~152는 김남식(2009) 및 조남소(2008)의 상사법칙을 적용하였을 때의 실험 결과이며 그림 153~203은 본 연구에서 제시한 상사법칙과 해석을 통하여 철근변형률과 변형률비 간 관계를 이용하여 계측된 철근변형률에 따른 변형률비를 계산하여 이에 따른 시간보정을 수행하여 실험을 진행한 결과이다. 그림에서 회색으로 표시된 결과는 프로토타입 실험의 결과를 의미하며 검은색으로 표시된 결과가 각 상사법칙에 의한 예측결과이다.

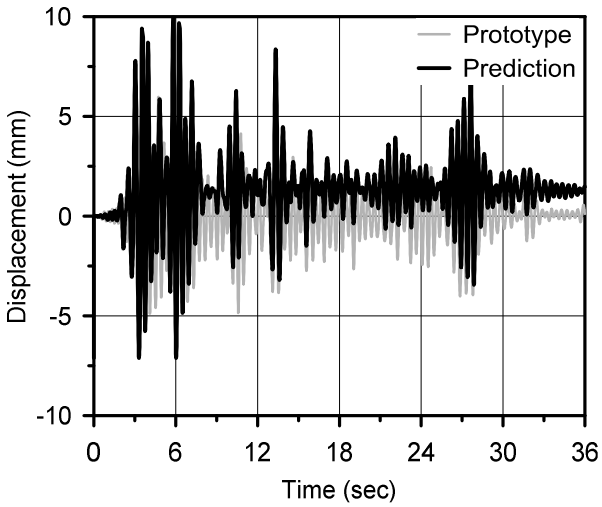


그림 126 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 김남식(2009) 상사법칙 적용)

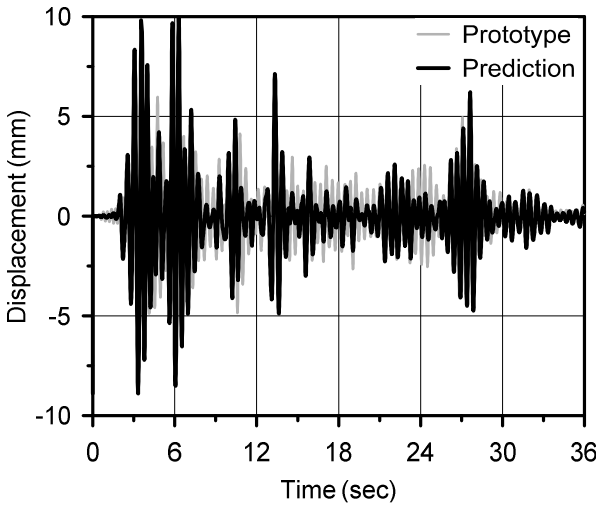


그림 127 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 김남식(2009) 상사법칙 적용)

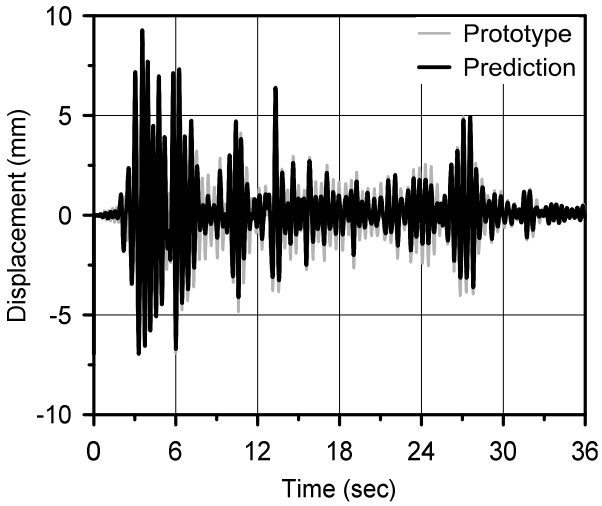


그림 128 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 조남소(2008) 상사법칙 적용)

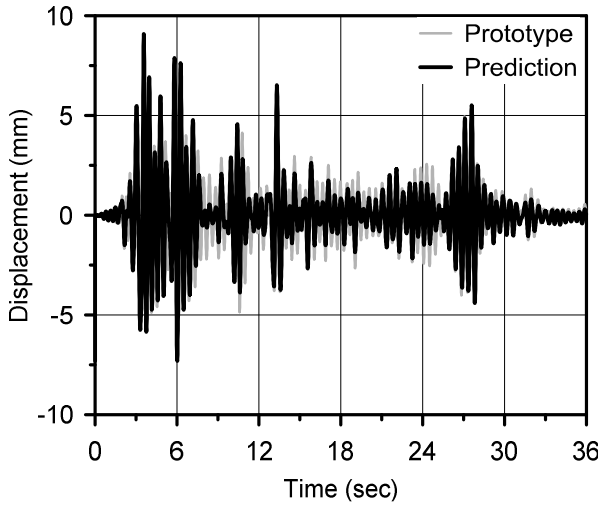


그림 129 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 조남소(2008) 상사법칙 적용)

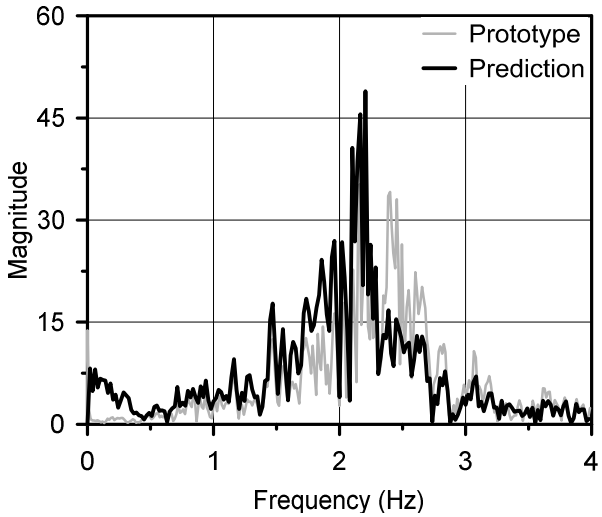


그림 130 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 김남식(2009) 상사법칙 적용)

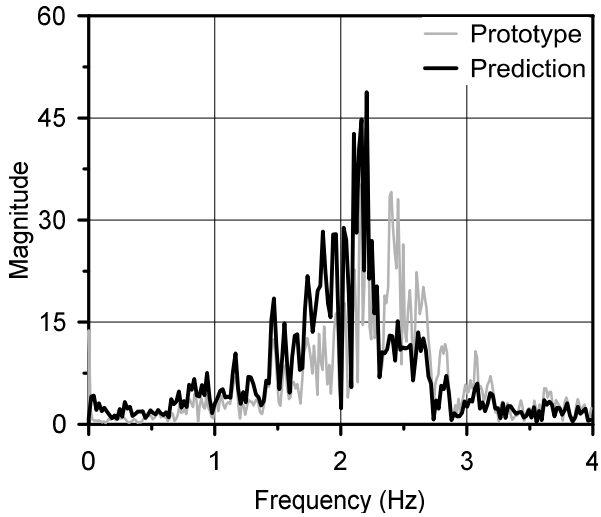


그림 131 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 김남식(2009) 상사법칙 적용)

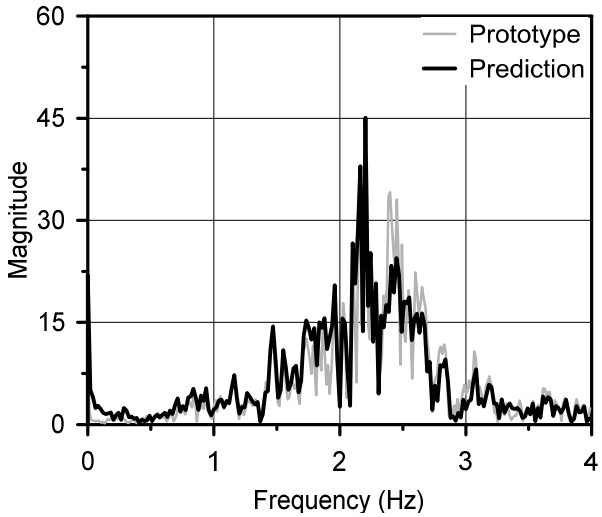


그림 132 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 조남소 (2008) 상사법칙 적용)

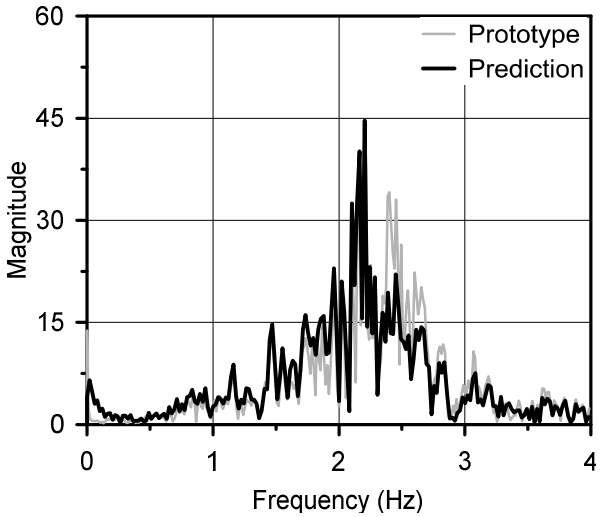


그림 133 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 조남소 (2008) 상사법칙 적용)

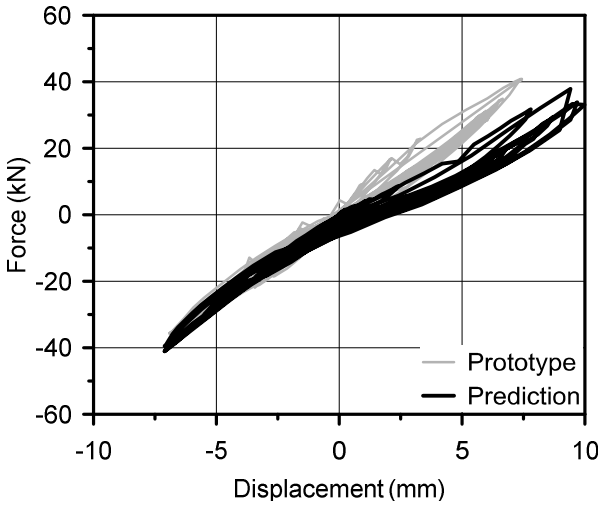


그림 134 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.139g, 김남식(2009) 상사법칙 적용)

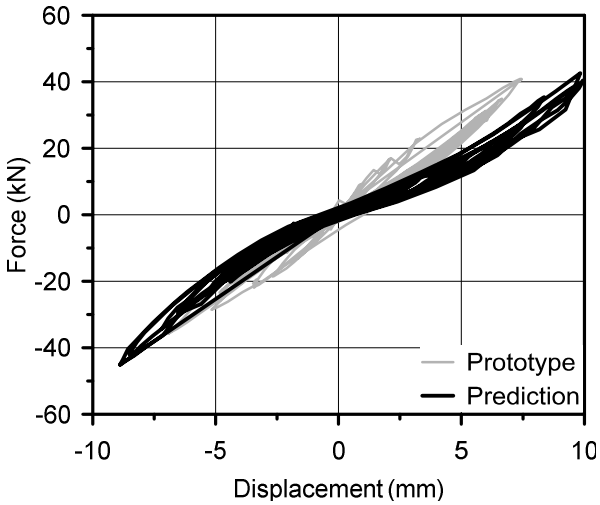


그림 135 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.139g, 김남식(2009) 상사법칙 적용)

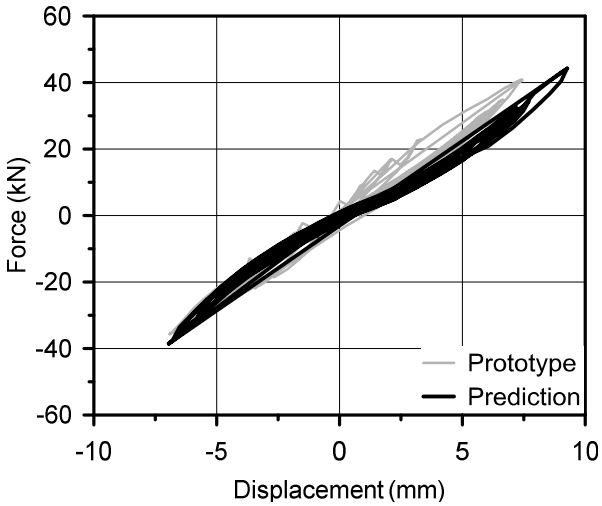


그림 136 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.139g, 조남소(2008) 상사법칙 적용)

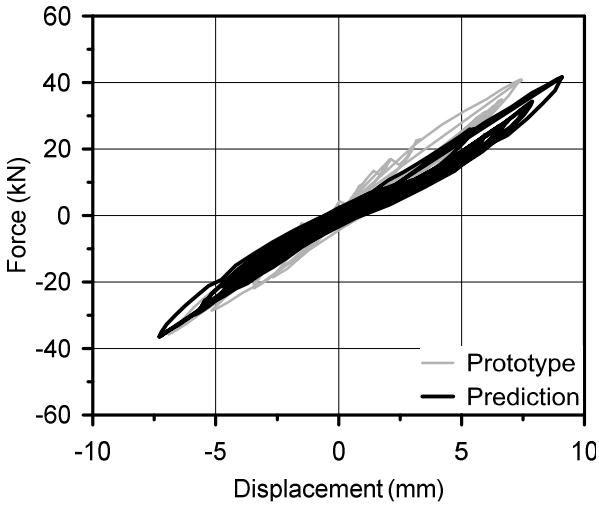


그림 137 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.139g, 조남소(2008) 상사법칙 적용)

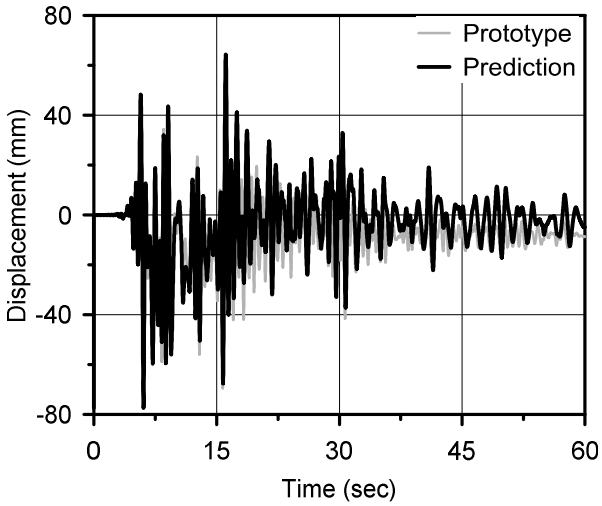


그림 138 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.830g, 김남식(2009) 상사법칙 적용)

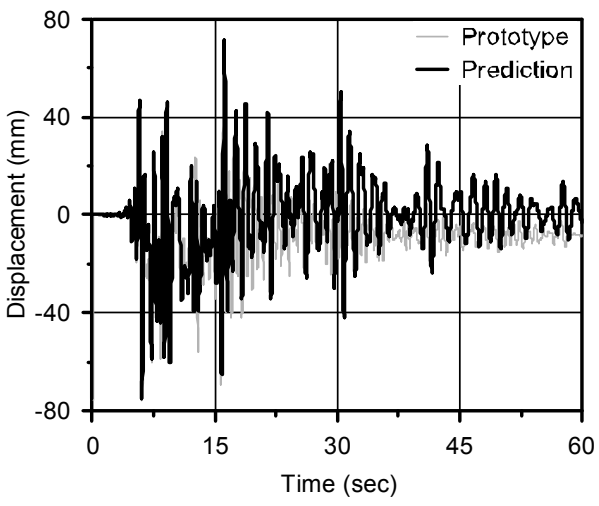


그림 139 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.830g, 김남식(2009) 상사법칙 적용)

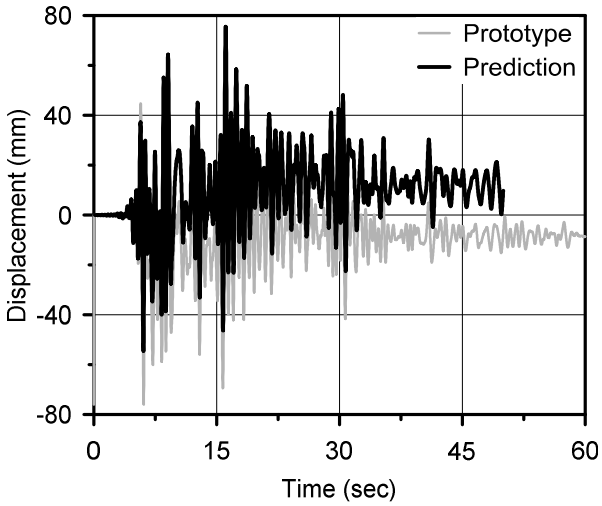


그림 140 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.830g, 조남소(2009) 상사법칙 적용)

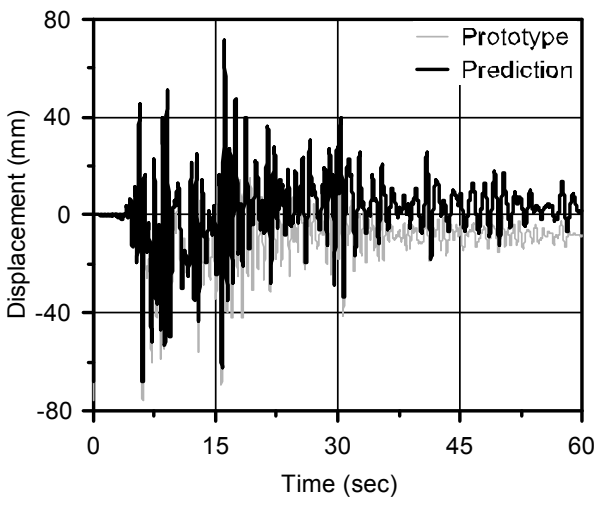


그림 141 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.830g, 조남소(2009) 상사법칙 적용)

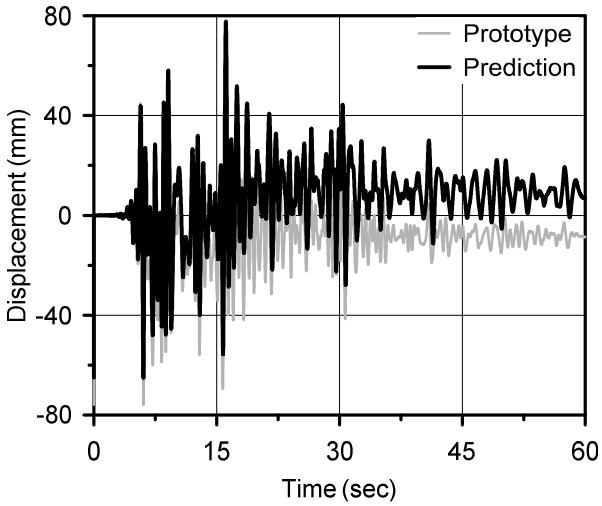


그림 142 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.830g, 조남소(2009) 상사법칙 적용)

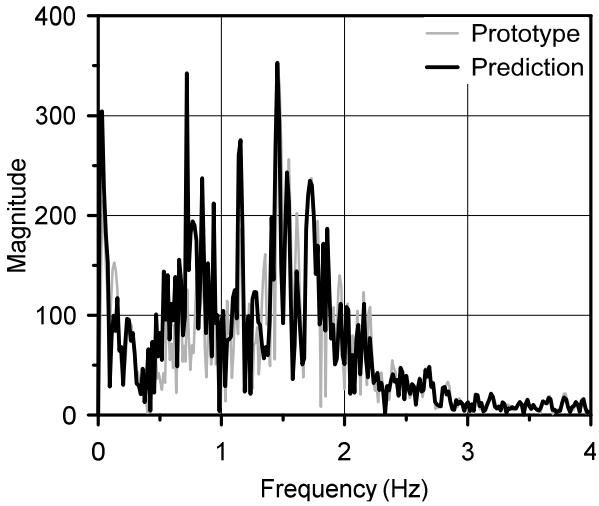


그림 143 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.830g, 김남식(2009) 상사법칙 적용)

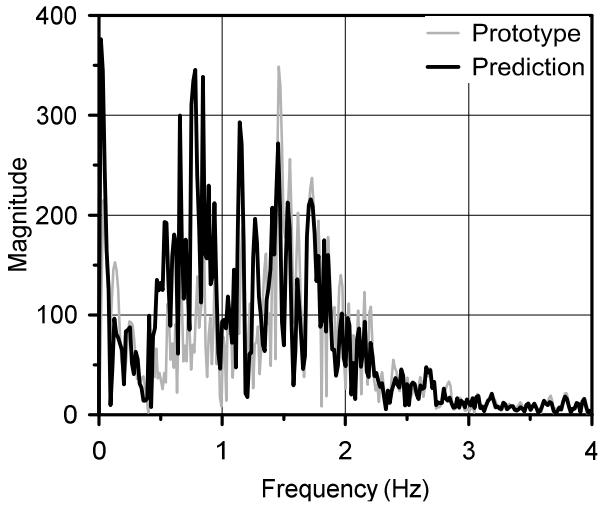


그림 144 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.830g, 김남식(2009) 상사법칙 적용)

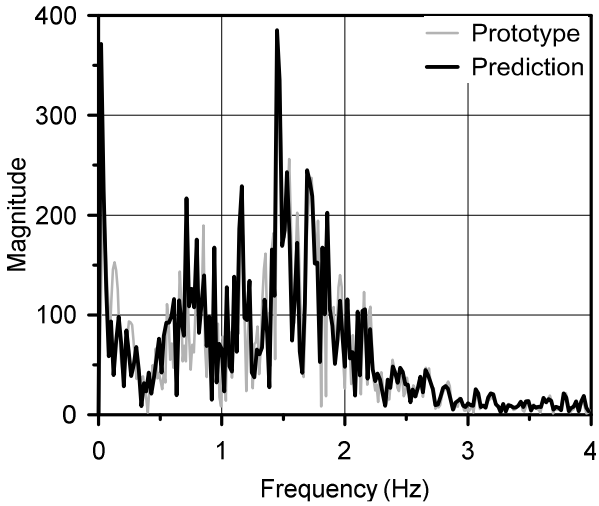


그림 145 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.830g, 조남소(2008) 상사법칙 적용)

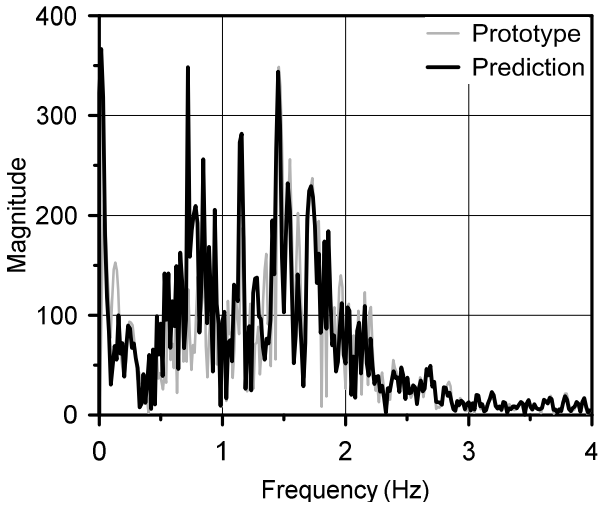


그림 146 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.830g, 조남소 (2008) 상사법칙 적용)

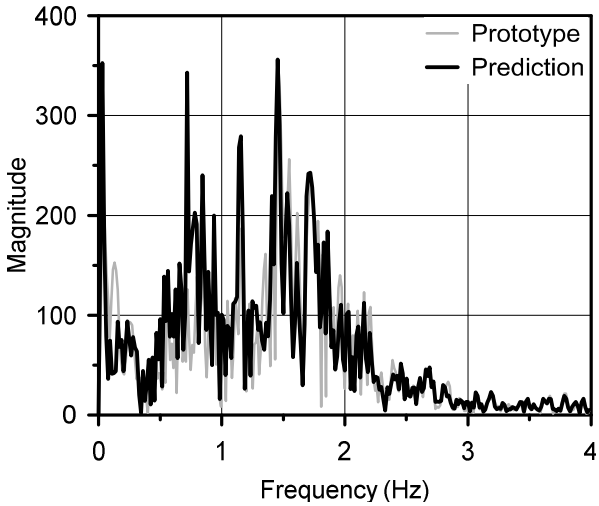


그림 147 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.830g, 조남소 (2008) 상사법칙 적용)

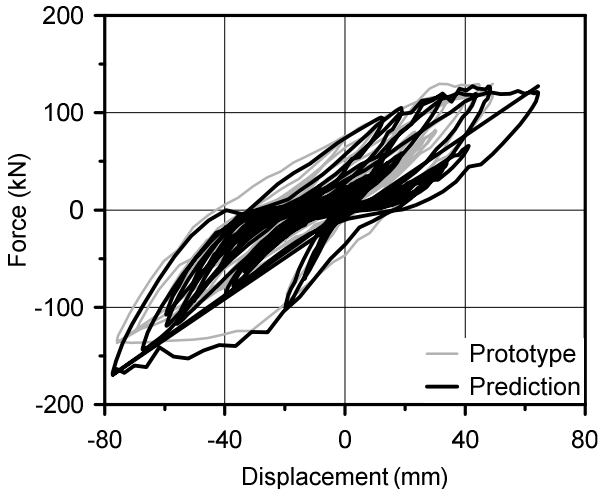


그림 148 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.830g, 김남식(2009) 상사법칙 적용)

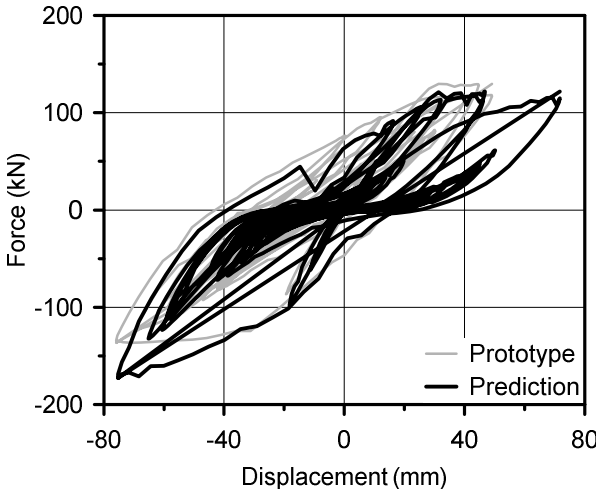


그림 149 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.830g, 김남식(2009) 상사법칙 적용)

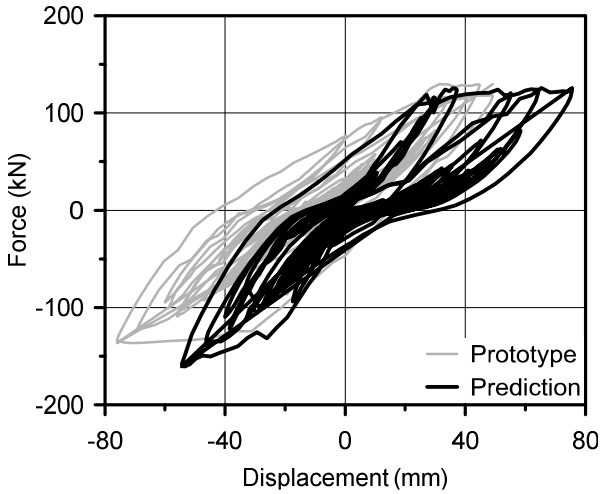


그림 150 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.830g, 조남소(2008) 상사법칙 적용)

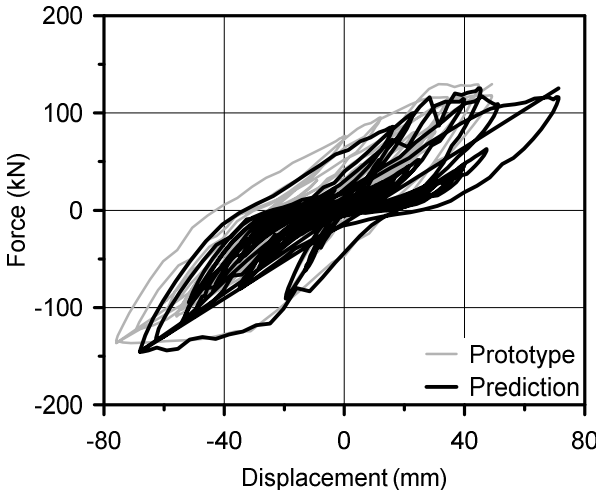


그림 151 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.830g, 조남소(2008) 상사법칙 적용)

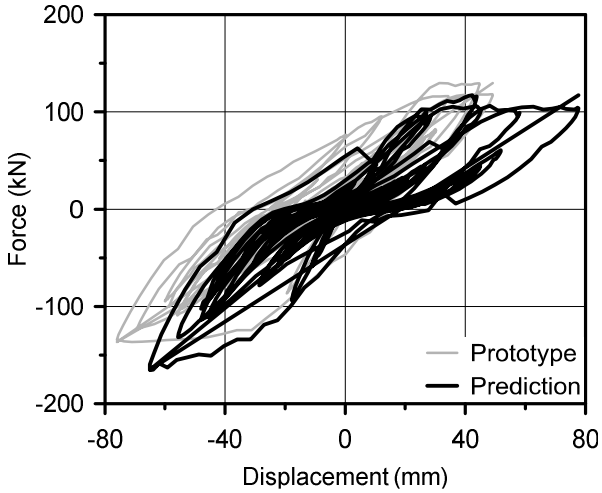


그림 152 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.830g, 조남소(2008) 상사법칙 적용)

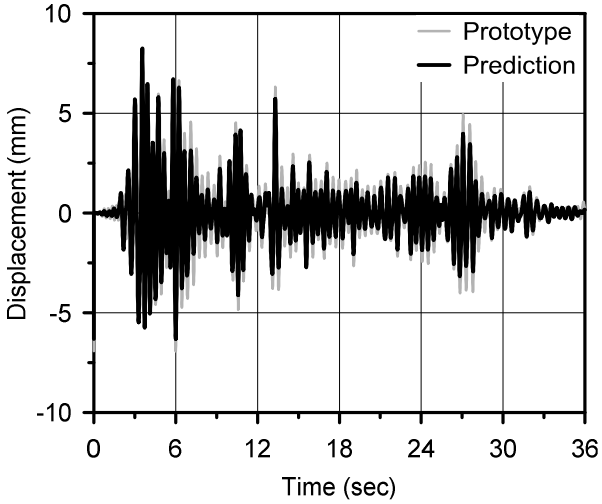


그림 153 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

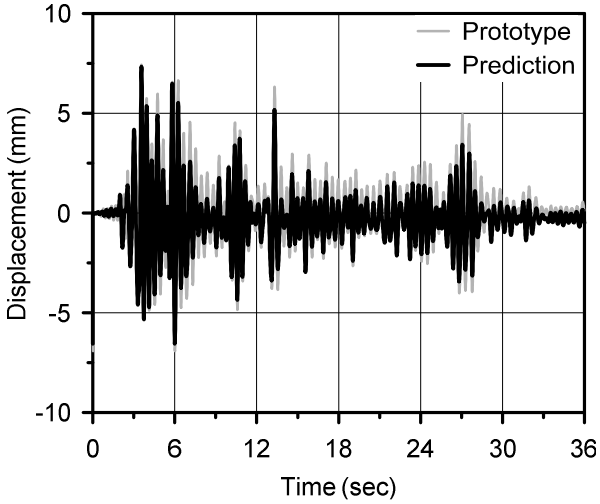


그림 154 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

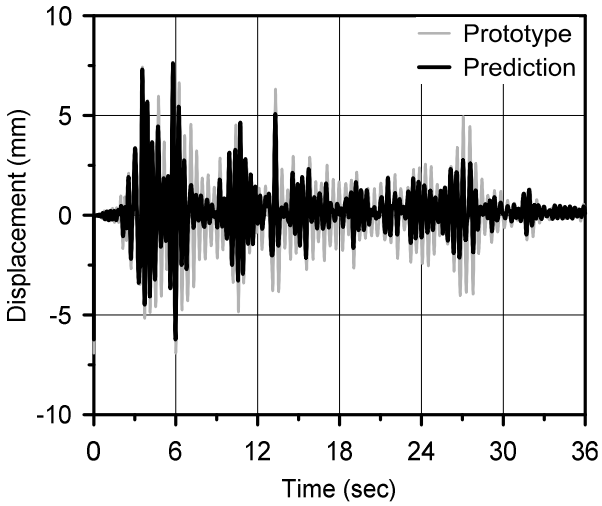


그림 155 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

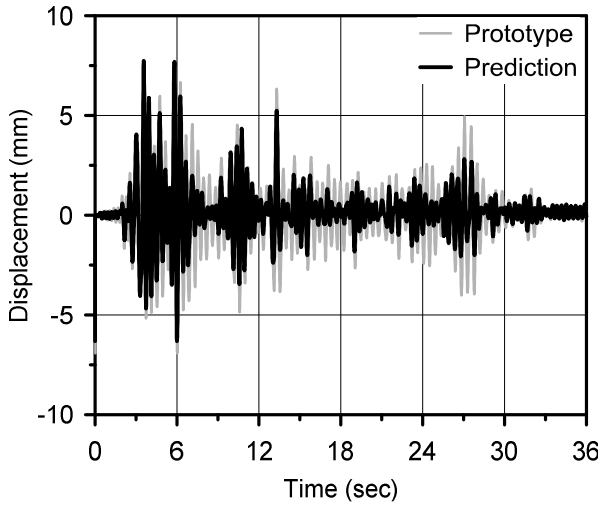


그림 156 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

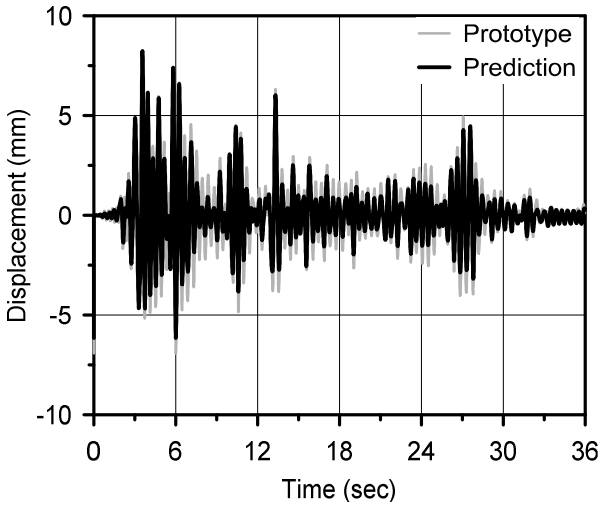


그림 157 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

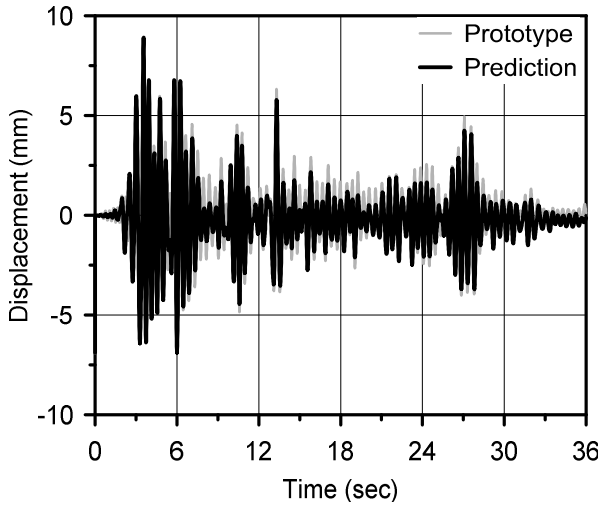


그림 158 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

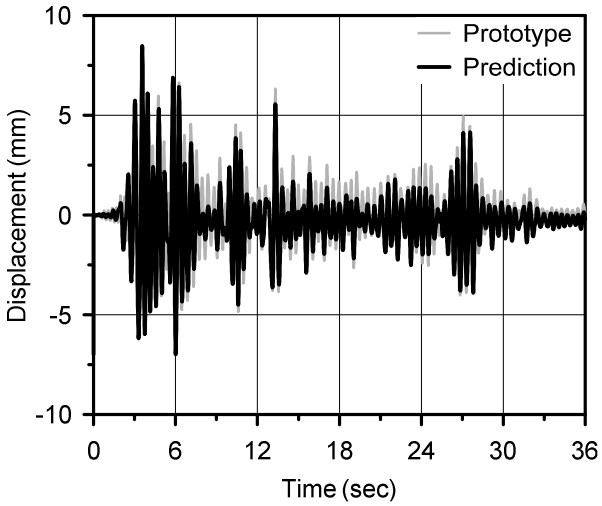


그림 159 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

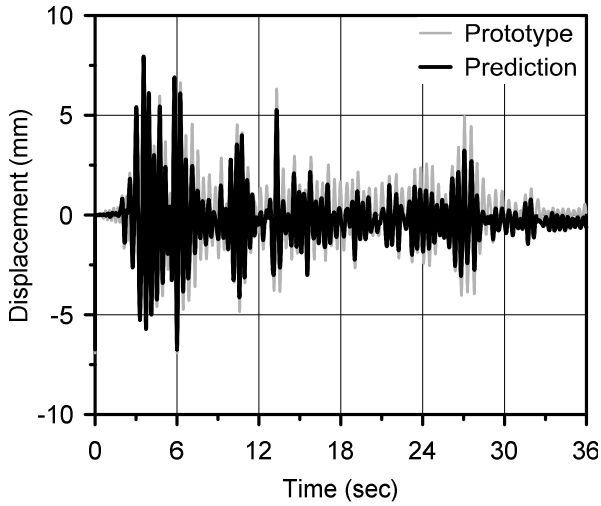


그림 160 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

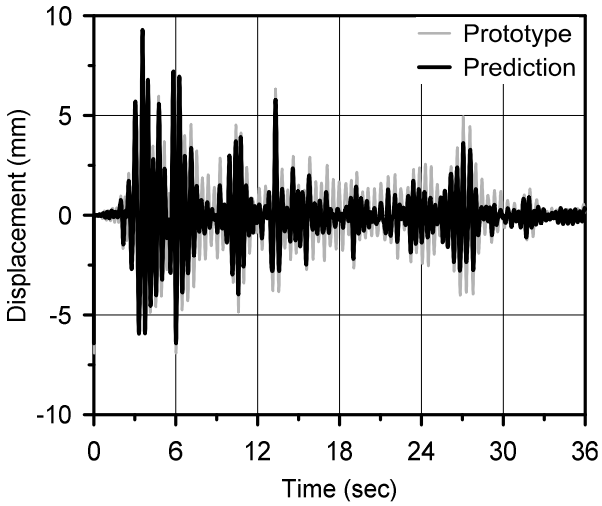


그림 161 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

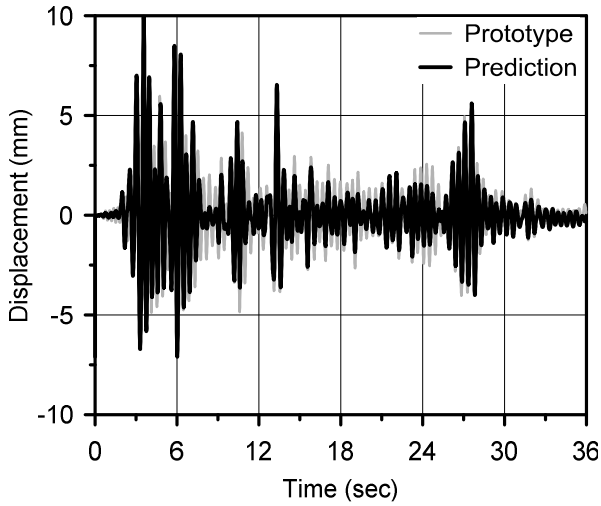


그림 162 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

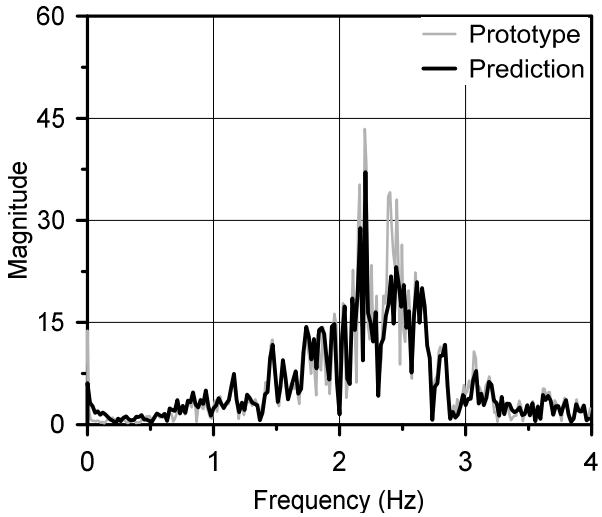


그림 163 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

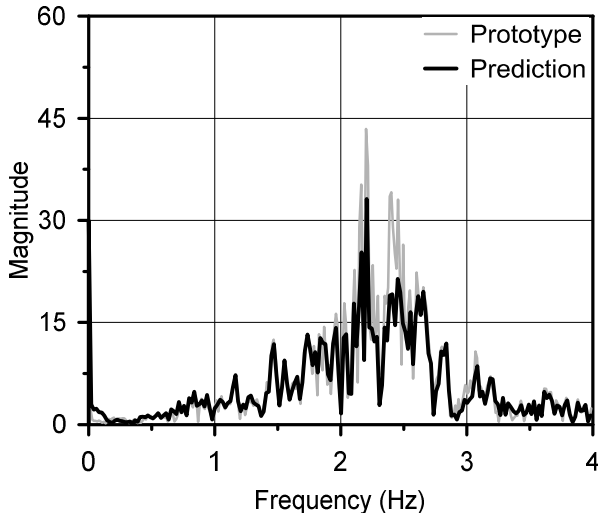


그림 164 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

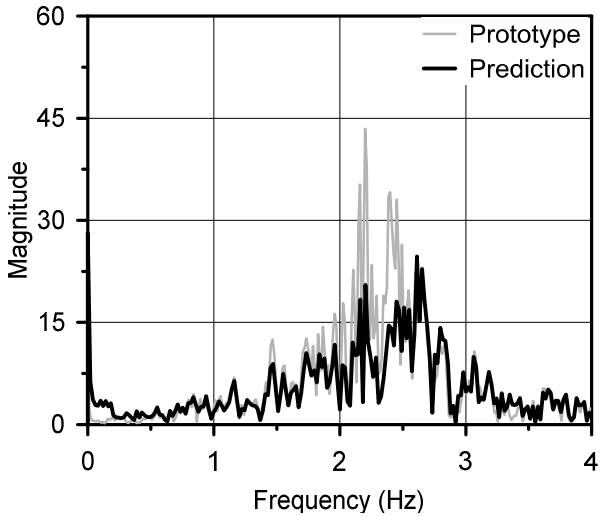


그림 165 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

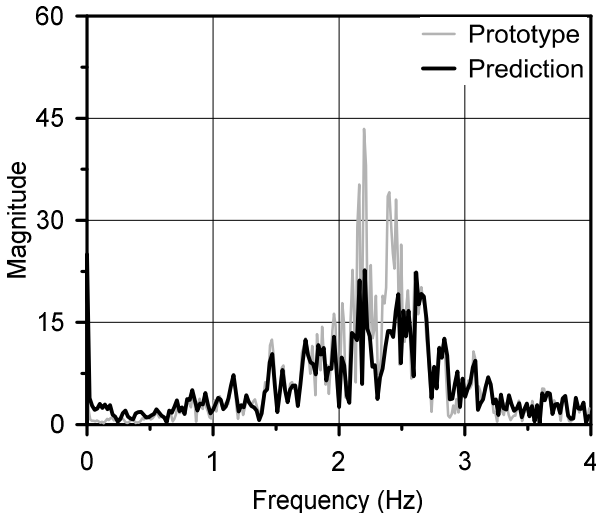


그림 166 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

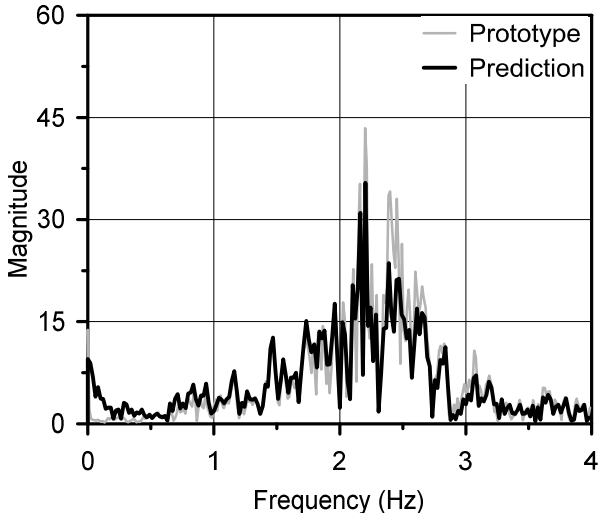


그림 167 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

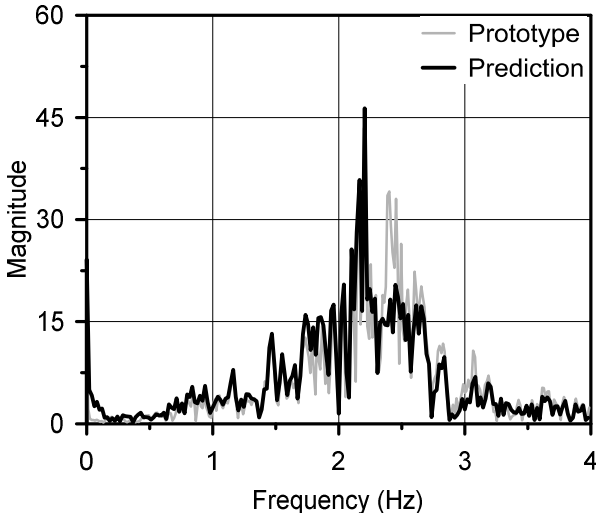


그림 168 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

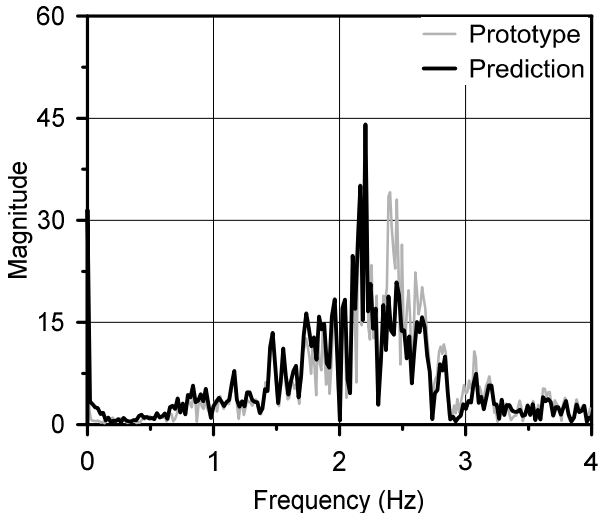


그림 169 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

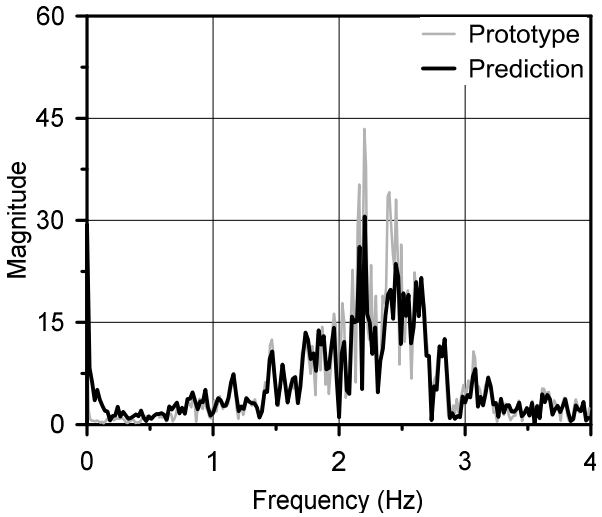


그림 170프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

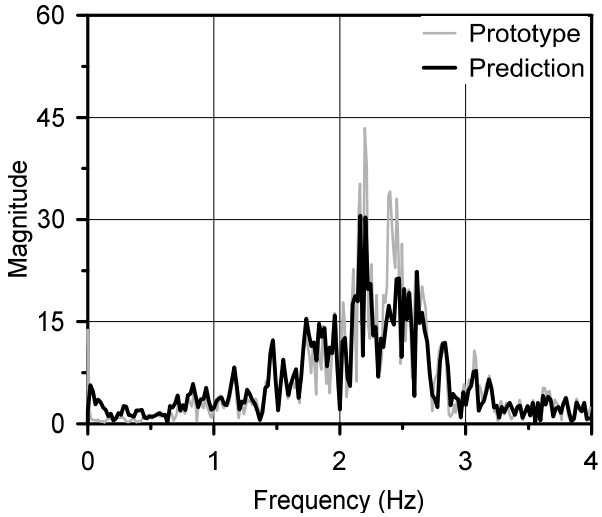


그림 171 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

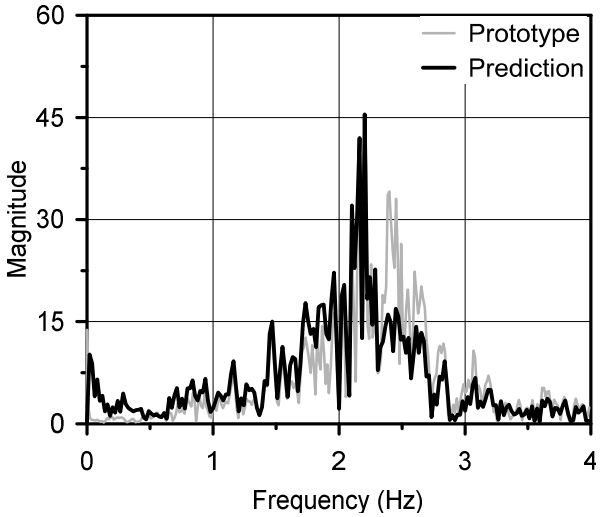


그림 172 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석 결과, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

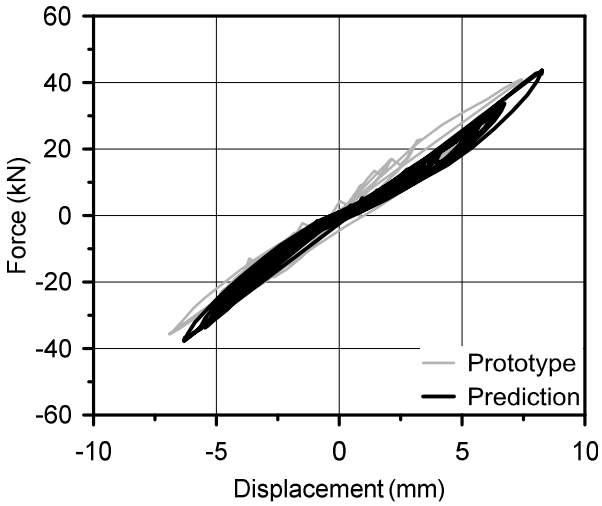


그림 173 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

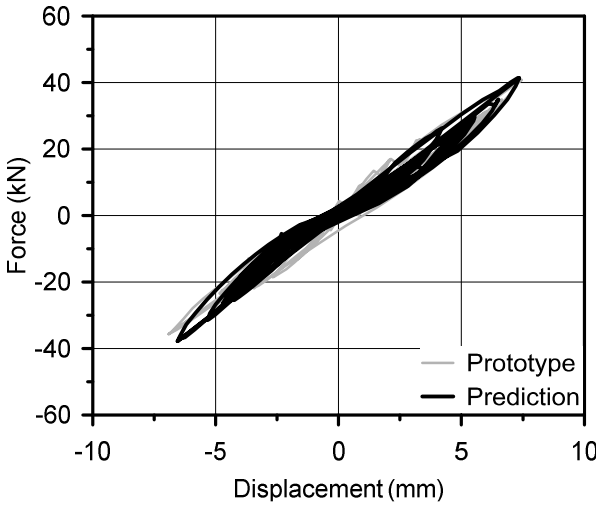


그림 174 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

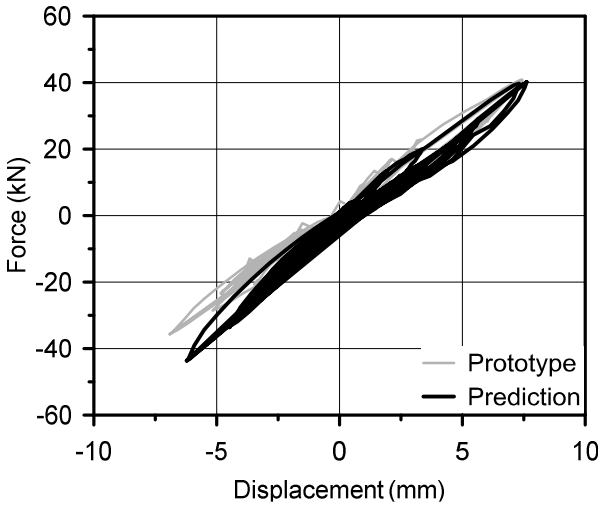


그림 175 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

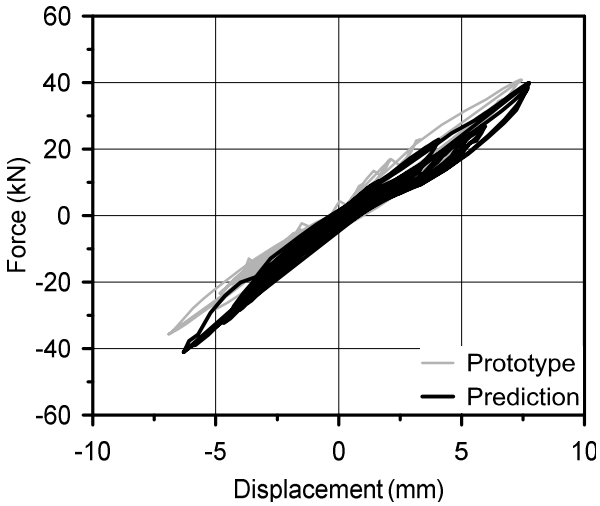


그림 176 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

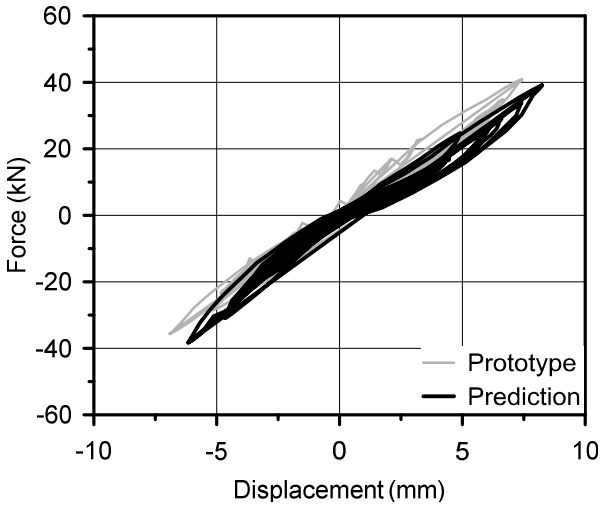


그림 177 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

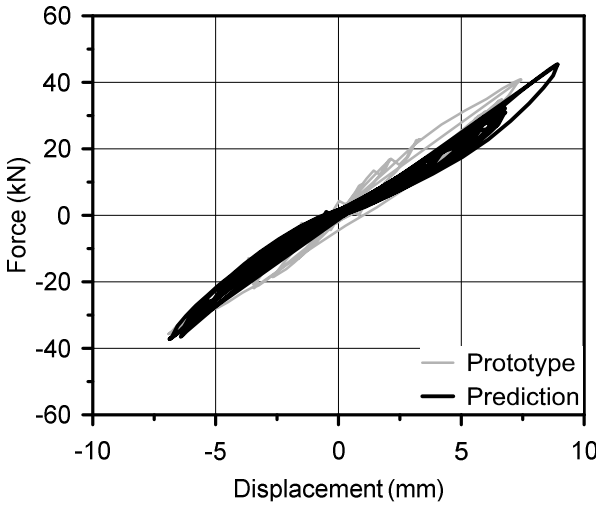


그림 178 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

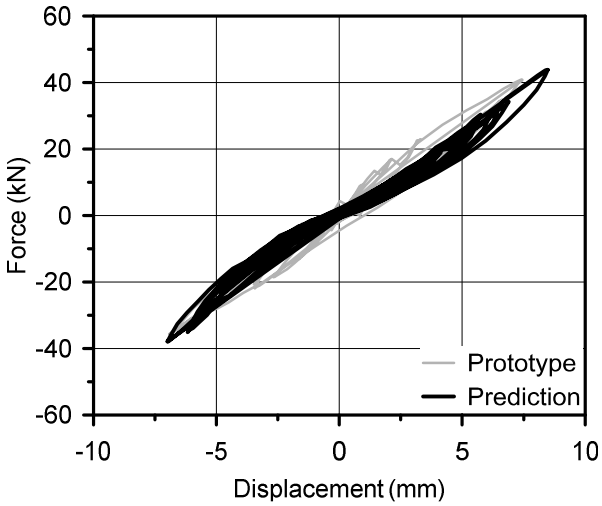


그림 179 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

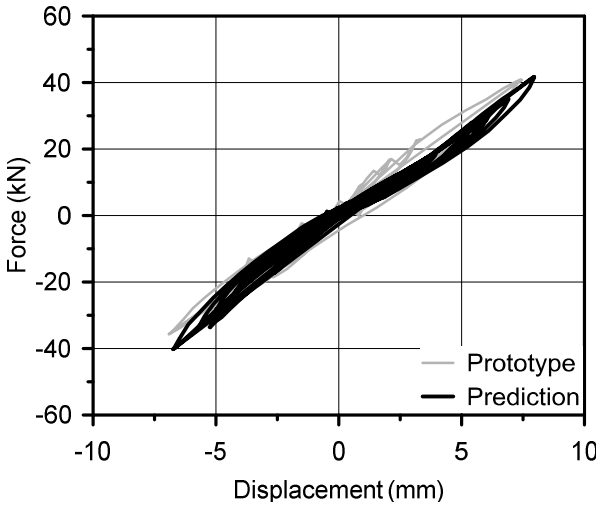


그림 180 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

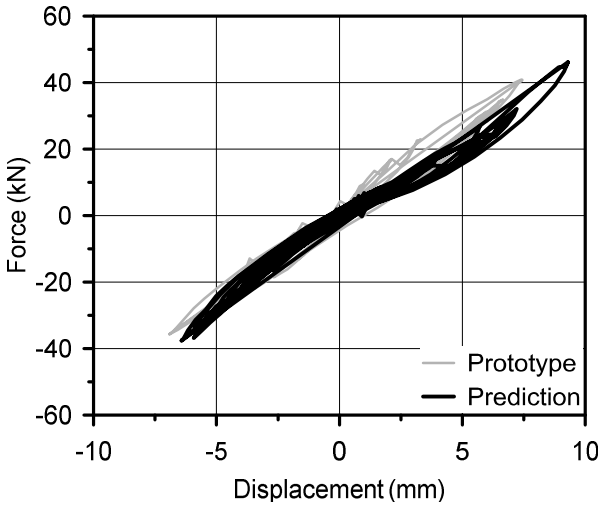


그림 181 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

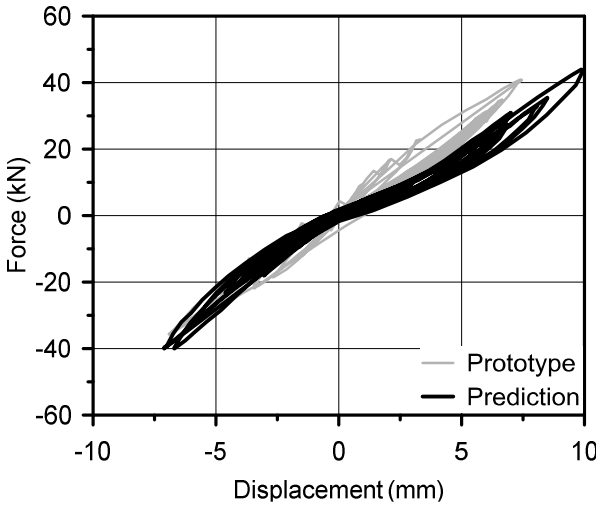


그림 182 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.139g, 제안 상사법칙 적용)

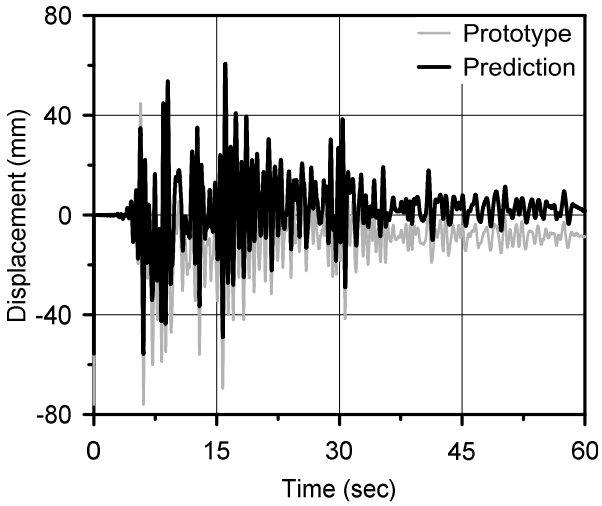


그림 183 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

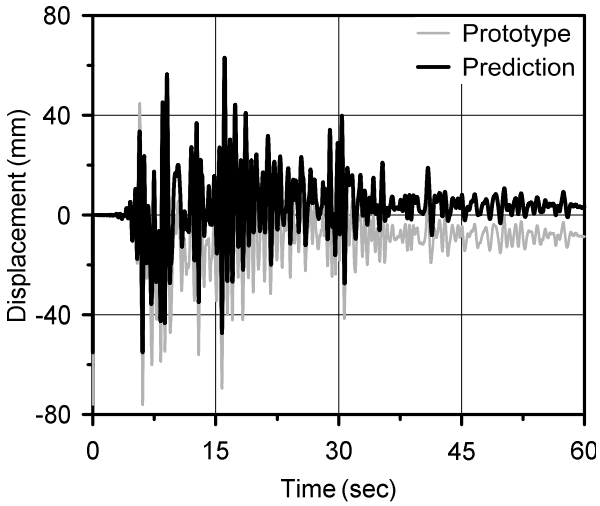


그림 184 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

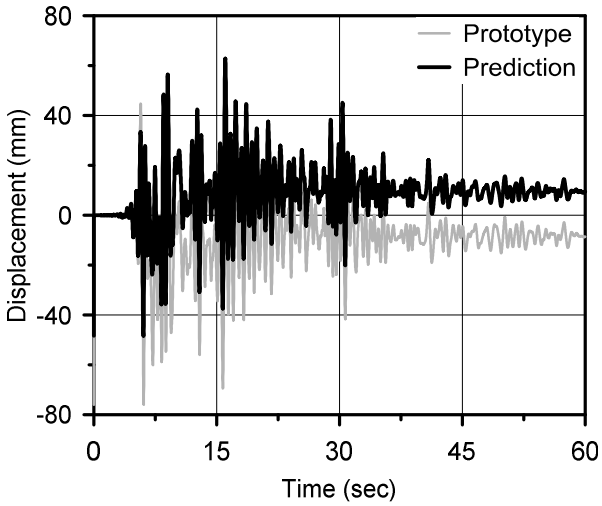


그림 185 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

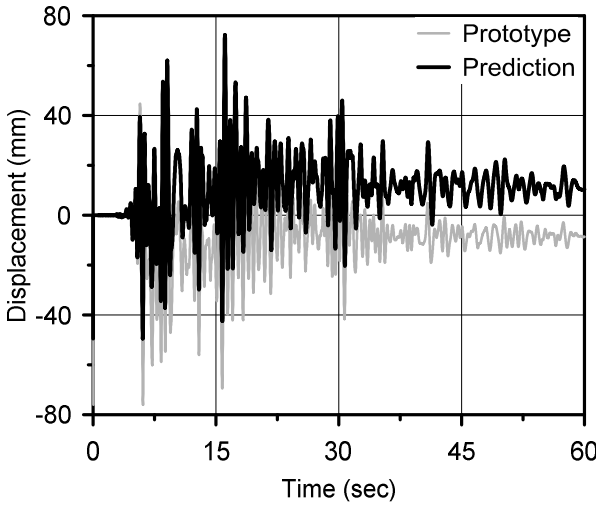


그림 186 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

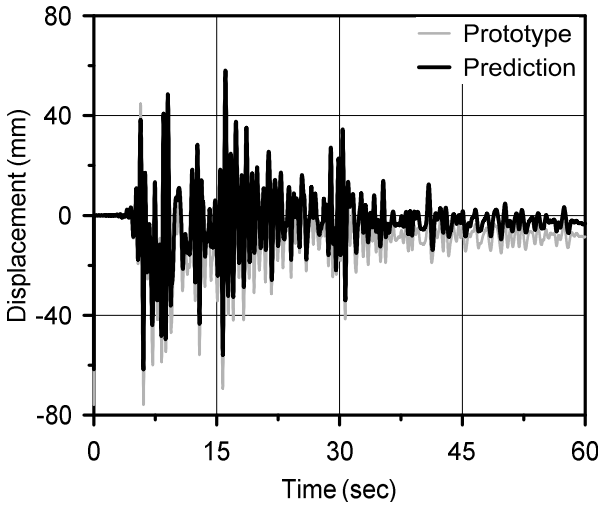


그림 187 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

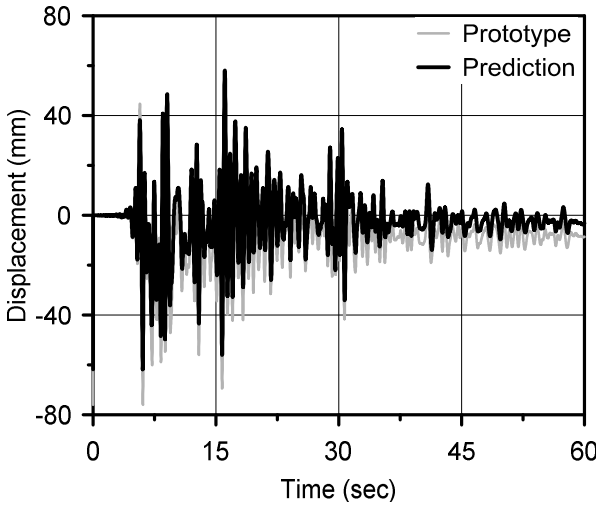


그림 188 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

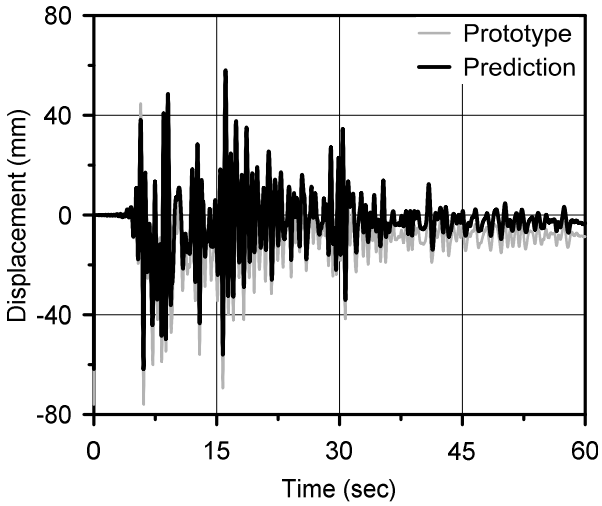


그림 189 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

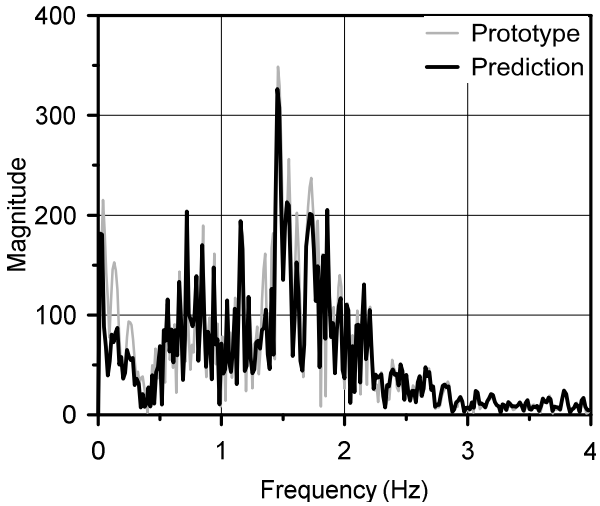


그림 190프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석결과, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

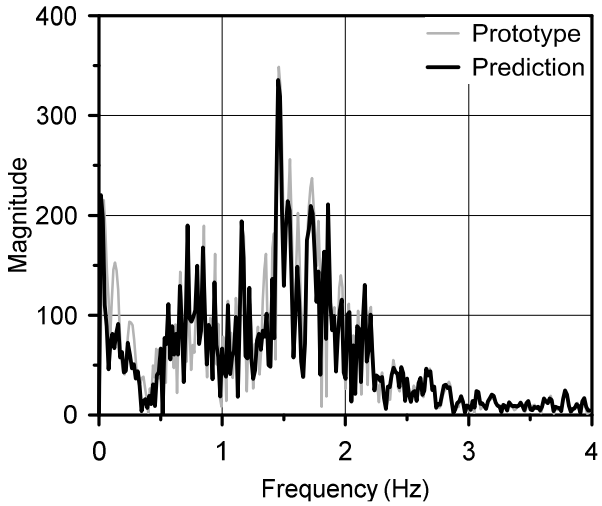


그림 191 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석결과, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

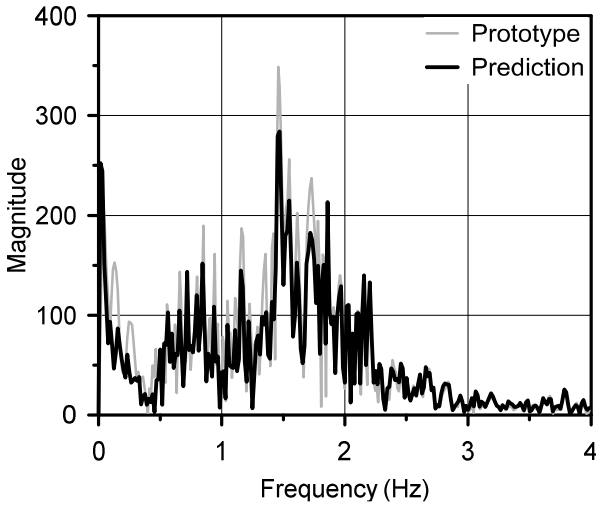


그림 192 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석결과, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

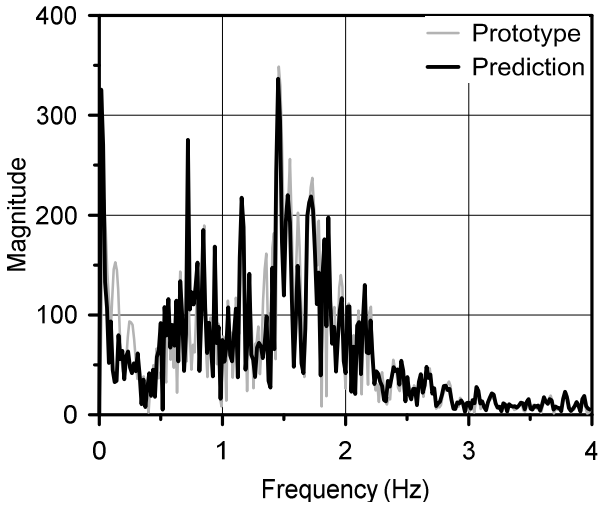


그림 193 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석결과, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

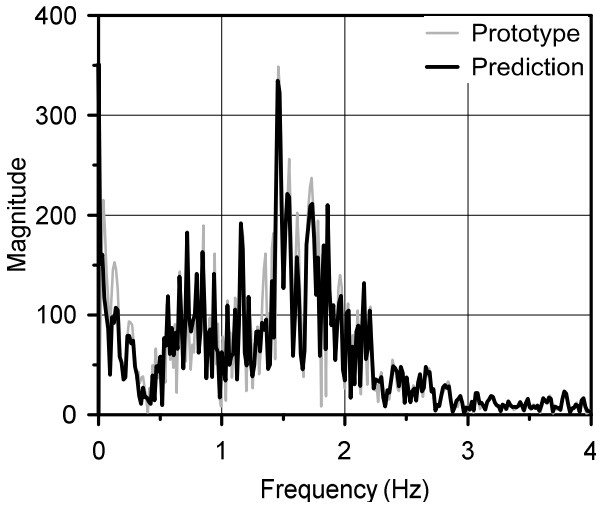


그림 194 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석결과, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

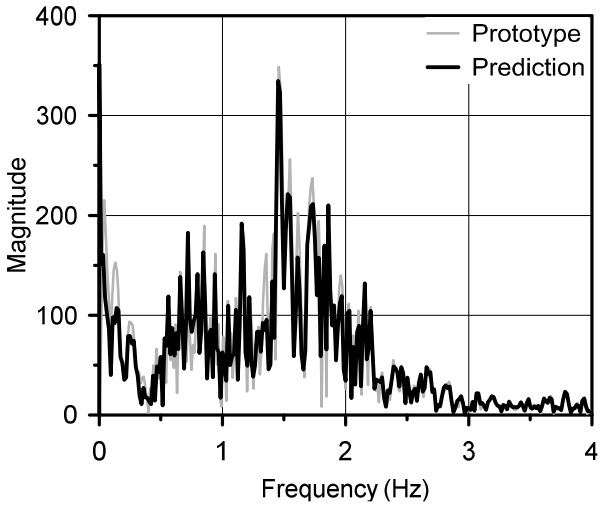


그림 195 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석결과, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

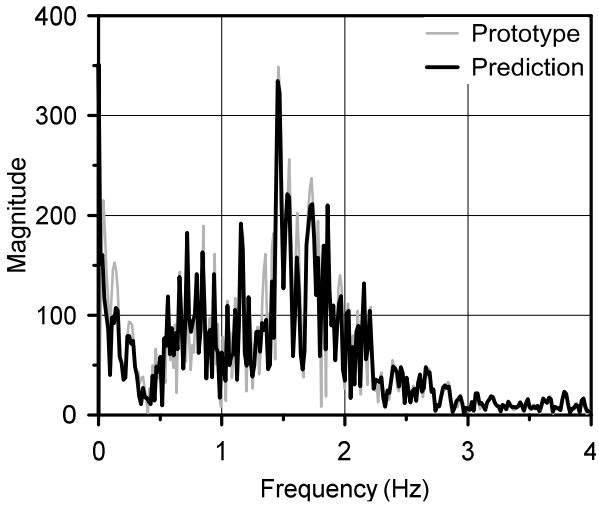


그림 196 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(변위 응답의 FFT 해석결과, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

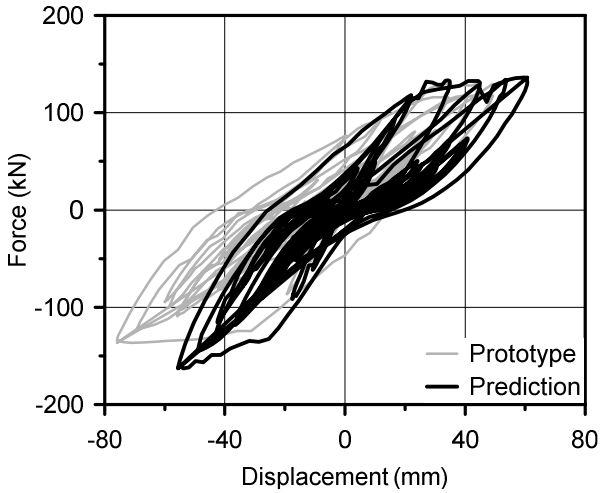


그림 197 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

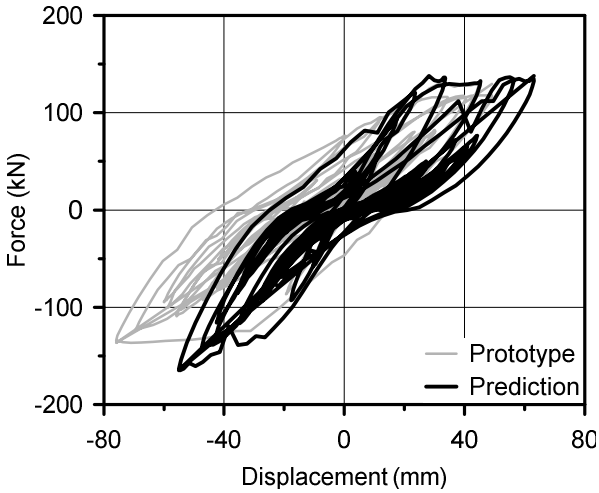


그림 198 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

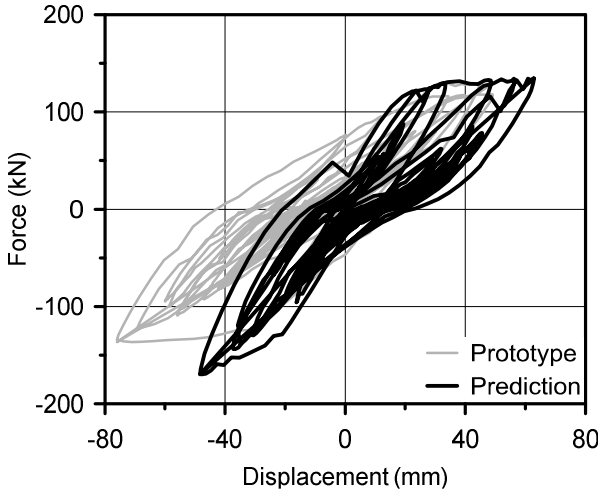


그림 199 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

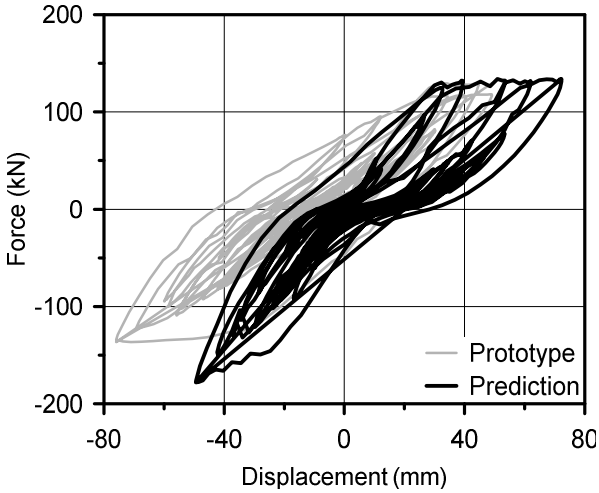


그림 200 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

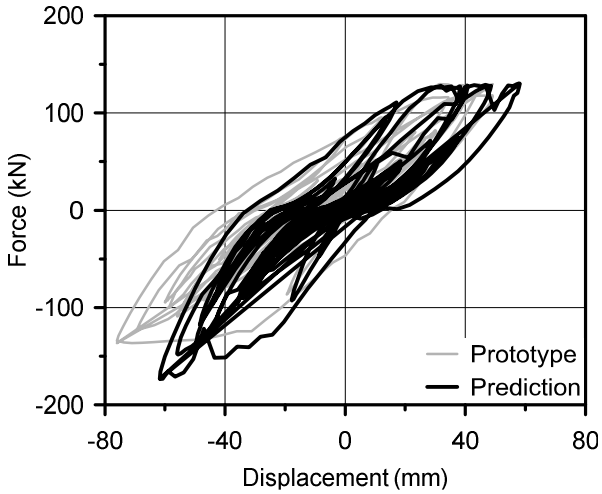


그림 201 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

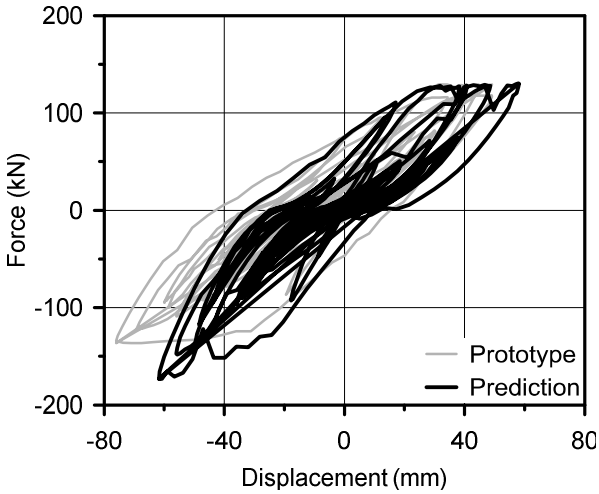


그림 202 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

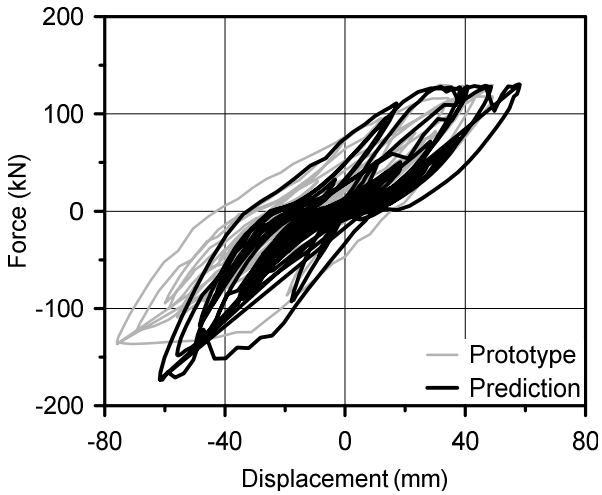


그림 203 프로토타입의 응답과 예측결과 간 비교(하중-변위 관계, 가진파 최대 가속도 0.830g, 제안 상사법칙 적용)

- 김남식(2009) 상사법칙을 적용한 경우 진동대실험과 마찬가지의 결과로 가진파의 최대 가속도가 0.139g인 경우 공통적으로 FFT 해석결과에서 확인할 수 있는 기둥의 고유진동수 예측값이 실제보다 작게 나오는 것을 확인할 수 있다. 이는 시간상사비와 변형률비 간 관계를 무시하고 가진파의 시간에 대한 보정을 하지 않은 결과로 볼 수 있다.

- 또한 그림 99-101에서와 같이 가진파의 최대가속도가 0.830g인 경우 철근항복에 의해 발생하는 비선형 거동과 이에 따른 영구변형의 크기가 프로토타입의 실험결과와 비교하여 상당히 크기 발생하는 것을 볼 수 있다. FFT 해석결과 또한 주파수가 작은 영역대에서의 크기가 프로토타입의 FFT 해석결과와 달리 상당히 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 철근 항복 이후 비선형 거동이 발현된 이후 응답이 프로토타입의 응답의 개형과 비교하여 상당한 차이가 나는 것을 통해 확인할 수 있다.

- 그림 153-203의 제안된 상사법칙에 따른 시간보정을 수행한 실험결과의 경우 프로토타입의 거동을 김남식(2009), 조남소(2008)과 비교하여 상당히 잘 예측하는 것을 볼 수 있다. 진동대실험 결과와 마찬가지로 예측정확성에서 차이가 있기는 하나 이는 모형실험 중 변

형률비 산정 시 사용한 철근변형률-변형률비 관계를 얻은 Cyclic pushover 실험에서 사용한 실험체와 실제 하이브리드시뮬레이션 실험 시 사용한 실험체의 재료적인 불확실성에 따라 해석 시 적용한 변형률비와 실제 변형률비 간에 차이가 발생할 수 있음에 따른 결과로 볼 수 있다. 하지만 이러한 점을 고려하더라도 김남식(2009), 조남소(2008)과 비교하여 전반적으로 변위 응답 및 FFT 해석결과에서 예측정확성이 향상된 것을 볼 수 있다.

- 표 9, 10은 각 실험체 별로 실험 후 변위 응답을 식 1)에 적용하여 역산된 변형률비, 가진파의 최대 가속도, 실험 중 적용한 변형률비의 평균 값에 따른 Cross correlation과 FRAC의 계산결과를 정리하여 나타낸 것이다. 1, 2번 실험체의 경우 예비실험 시 사용한 실험체로 결과를 반영하지 않았다.

표 9 실험체 별 가진 내용에 따른 실험결과(김남식, 조남소)

적용 상사법칙	실험체 번호	가진파 최대 가속도(g)	실험 중 적용한 변형률비의 평균 값	응답으로부터 역산된 변형률비	Cross correlation	FRAC
-	프로토타입	0.139	-	-	-	-
-	프로토타입	0.830	-	-	-	-
김남식	3	0.139	1.0	1.211538	0.86	0.87
	3	0.139	1.0	1.622225	0.77	0.74
	3	0.830	1.0	-	0.81	0.85
조남소	4	0.139	1.0	1.376195	0.87	0.89
	4	0.139	1.0	1.491631	0.92	0.94
	4	0.830	1.0	-	0.80	0.91
김남식	5	0.139	1.0	1.669587	0.76	0.79
	5	0.830	1.0	-	0.84	0.84
조남소	6	0.139	1.0	1.622225	0.89	0.90
	6	0.830	1.0	-	0.81	0.83
김남식	15	0.830	1.0	-	0.70	0.68
조남소	16	0.139	1.0	1.376195	0.95	0.97
	16	0.830	1.0		0.79	0.85

표 10 실험체 별 가진 내용에 따른 실험결과(제안 상사법칙 적용)

적용 상사법칙	실험체 번호	가진파 최대 가속도(g)	실험 중 적용한 변형률비의 평균 값	응답으로부터 역산된 변형률비	Cross correlation	FRAC
-	프로토타입	0.139	-	-	-	-
-	프로토타입	0.830	-	-	-	-
제안 상사법칙	7	0.139	1.0	1.211538	0.71	0.76
	7	0.139	1.0	-	0.77	0.84
	8	0.139	-	1.100194	0.68	0.72
	8	0.830	1.0	-	0.72	0.76
	11	0.139	1.0	1.340682	0.96	0.96
	11	0.139	1.0	1.451589	0.88	0.88
	11	0.830	-	-	0.89	0.94
	12	0.139	1.273659	1.273659	0.95	0.96
	12	0.139	1.413138	1.413138	0.93	0.93
	12	0.830	-	-	0.89	0.95
	9	0.139	1.242016	1.242016	0.95	0.96

	9	0.139	1.376195	1.376195	0.92	0.93
	9	0.830	-	-	0.87	0.94
	10	0.139	1.011082	1.011082	0.84	0.88
	10	0.139	1.100194	1.100194	0.90	0.95
	10	0.830	-	-	0.87	0.96
	13	0.139	1.100194	1.100194	0.83	0.88
	13	0.139	1.211538	1.211538	0.85	0.91
	13	0.830	-	-	0.78	0.90
	14	0.830	-	-	0.93	0.96
	17	0.139	1.340682	1.340682	0.94	0.95
	17	0.139	1.451589	1.451589	0.86	0.86
	17	0.830	-	-	0.79	0.86
	18	0.830	-	-	0.79	0.93

- 김남식(2009), 조남소(2008)의 경우 실험체의 변형률비와 실제로 가진파의 시간보정시 사용한 변형률비인 1.0(시간보정을 하지 않은 것과 동일함)의 차이가 제안 상사법칙에 비해서 전반적으로 크며 이에 따라 예측정확성이 저하되는 것으로 생각 할 수 있다.

- 제안된 방법의 경우 시간보정시 적용한 변형률비의 평균값(=진동대실험과는 달리 변형률비의 값이 변동하므로 그 평균값을 대신 비교)과 응답으로부터 역산된 변형률비간의 차이가 작을수록 전반적으로 Cross correlation과 FRAC의 값이 1.0에 가까운 값을 가지므로 예측정확성이 향상됨을 확인할 수 있다. 이와 관련하여 시간보정시 적용한 변형률비와 응답으로부터 역산된 변형률비 간 차이에 대한 두 가지 척도의 계산 결과를 비교하면 그림 204, 205와 같다. 그림 204은 철근 항복이 발생하지 않은 경우 즉 최대 가속도가 0.139g인 경우이며 그림 205는 철근 항복이 발생한 경우 즉, 최대 가속도가 0.830g인 경우를 나타낸 것으로 두 그림에서의 X 축은 시간보정 시 적용한 변형률비와 응답으로부터 역산된 변형률비의 차이를 역산된 변형률비로 나눈 값을 % 단위로 나타낸 것이다.

- 그림 204, 205에서 나타난 결과는 진동대실험의 결과로부터 구한 그림 124, 125와 동일한 경향을 보여주고 있다.

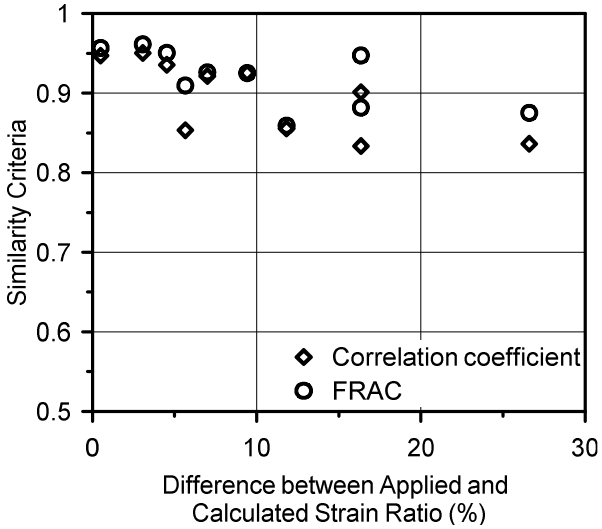


그림 204 가진파 시간증분 보정시 적용한 변형률비와 응답으로부터 역산된 변형률비의 차이에 따른 Cross correlation 계산 결과(철근 항복

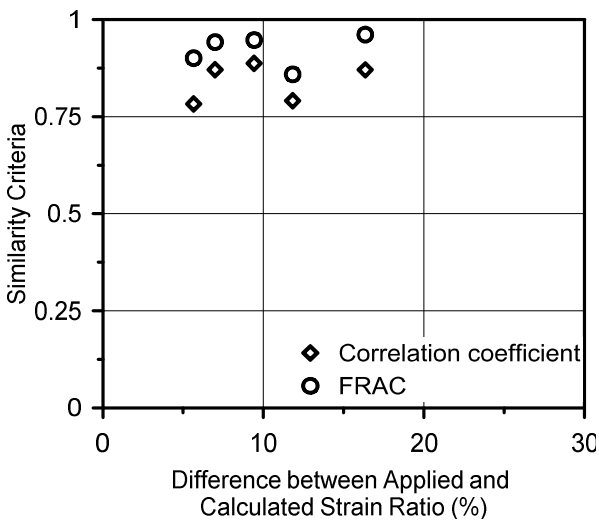


그림 205 가진파 시간증분 보정시 적용한 변형률비와 응답으로부터 역산된 변형률비의 차이에 따른 Cross correlation 계산 결과(철근 항복

미발생, 0.139g)　　발생, 0.830g)

마. 소결

- 제안된 상사법칙과 변형률비 산정방법의 해석적 검증의 종료 후 이의 실적용을 위한 실험적인 검증을 위하여 진동대실험과 하이브리드시뮬레이션 실험에 적용할 프로토타입 실험체와 모형 실험체를 각각 설계/제작하여 실험을 수행하였고 그 실험결과를 분석한 결과 기존 상사법칙(김남식 2009, 조남소 2008)과 비교하여 본 연구에서 제안한 상사법칙의 예측정확성이 향상되었음을 확인하였다.

- 해석적인 검증 결과와 마찬가지로 김남식(2009)와 조남소(2008)의 상사법칙을 적용한 경우 실제 프로토타입의 고유진동수를 변형률비가 1.0 보다 큰 경우 과소평가하는 경향을 보였는데 이는 두 상사법칙 모두 시간상사비와 변형률비 간 관계를 고려하지 않았기 때문이다.

- 시간상사비와 변형률비 간 관계 고려 여부 등을 확인하기 위하여 시간보정에 적용한 변형률비와 구조물의 응답으로부터 역산한 실제 변형률비 간 차이에 따른 Cross correlation과 FRAC의 계산 결과를 비교한 결과 그 차이가 클수록 예측정확성이 저하되는 것으로 나타났다.

- 해석적인 검증에서와 마찬가지로 본 연구의 시작단계에서 상사법칙의 개발과 이의 실험적인 검증의 성과점검에 대한 기준으로 3가지 질적성과지표(최대변위응답차, 주파수영역응답에서 최대스펙트럼에 해당하는 진동수의 차=고유진동수의 차, 최대누적에너지차)를 제시한 바 있으며 각각에 대하여 프로토타입의 응답과 축소모형의 응답 간의 차가 10% 이내가 되도록 하는 것을 목표로 하였다. 다만 해석에서와는 달리 실험에서는 실험 조건(실험체와 실험 장비 간 연결 및 경계조건, 진동대의 입력가진파와 실제로 가진된 가진파의 동일여부) 및 계측과정에서 발생하는 오차 등을 감안하여 특정 값(고유진동수) 또는 응답의 최대값을 이용한 직접적인 비교 대신 응답의 전체적인 정확도를 대표할 수 있는 두 가지 보정척도(Cross correlation, FRAC)을 이용한 방법을 대신 적용하였다. 물론 실험결과를 나타낸 그림 126~203을 통한 직접적인 비교과정에서도 기존 방법과 비교하여 제시된 방법에서 프로토타입의 응답에 대한 예측정확성이 향상된 것을 알 수 있었으며 또한 제시한 두 가지 척도를 이용하여 비교를 할 경우에도 그 예측정확성의 향상을 확인할 수 있었다.

- 실험적인 검증을 통해 최종적으로 제안된 상사법칙과 변형률비 산정방법을 각 실험 별로 적용한 축소모형실험기법을 이용할 경우 기존 연구에서 제시한 방법에 비하여 프로토타입의 응답을 좀 더 정확히 예측할 수 있는 것으로 나타났다.

3. 철근콘크리트 구조물의 축소모형실험 매뉴얼

- 본 연구에서 제안한 상사법칙과 변형률비산정방법을 철근콘크리트 구조물의 진동대실험과 하이브리드시뮬레이션 실험에 실제로 적용하여 축소모형실험을 실시할 수 있도록 실험 시 필요한 절차를 간략히 정리하였다.

가. 축소모형 설계/제작 및 변형률비 해석

- 축소모형 실험을 위한 실험체의 설계/제작, 변형률비와 응력상사비의 산정 방법을 정리하였다.

(1) 축소모형 실험체 설계

- 실험의 목적 및 사용 가능한 실험장비(진동대 및 액츄에이터)의 용량에 맞추어 축소율(=길이상사비)이 결정이 되면 이에 맞추어 축소모형의 제원을 결정할 수 있다. 기본적으로 실험체의 치수는 실험 대상으로 설정한 프로토타입의 치수에 축소율을 곱하여 결정할 수 있다.

- 모형의 철근은 가능한 프로토타입의 철근과 동일한 재료를 사용하며 이 때 철근의 단면적은 프로토타입 철근의 단면적에 축소율의 제곱을 곱하여 결정한다. 여기서 철근과 콘크리트의 재료 응력상사비가 서로 다른 경우 이에 따라 철근 단면적에 아래 식 (1)을 이용하여 추가적인 보정을 실시할 수 있다. 식 (1)에서 $A_{s,p}$, $A_{s,m}$는 각각 프로토타입과 축소모형의 철근면적이며 s_L은 길이상사비 $s_{\sigma c}$, $s_{\sigma s}$는 각각 콘크리트와 철근의 재료 응력상사비를 의미한다.

$$A_{s,m} = s_L^2 \frac{s_{\sigma c}}{s_{\sigma s}} A_{s,p} \tag{1}$$

- 식(1)을 통해 모형철근의 단면적을 결정할 경우 구조물의 응력상사비는 콘크리트의 재료 응력상사비와 동일하게 된다. 식 (1)을 사용하지 않을 경우 철근의 단면적은 단순히 프로토타입 철근의 단면적에 길이상사비의 제곱을 곱한 값으로 결정하고 구조물의 응력상사비는 다른 방법을 통해 계산하여야 한다.

- 축소모형의 상부질량의 경우 하이브리드시뮬레이션 실험에서는 해석과정에서 수치적으로 질량을 고려할 수 있으므로 설치를 하지 않아도 된다. 진동대실험의 경우 상부질량을 강체로 가정할 수 있을 경우 상부질량의 질량중심의 위치는 프로토타입의 질량중심의 위치에 축소율을 곱한 위치가 되게 설정하며 그 무게는 프로토타입 상부질량의 그 무게에 질량상사비를 곱한 값이 되도록 한다.

- 하이브리드시뮬레이션 실험체의 경우 변형률비의 결정에 참고할 수 있는 위치에 적절한 계측장비(변형률 게이지, LVDT 등)을 설치하여 실험 중 계측이 가능하도록 제작 하여야 한다.

(2) 응력상사비 결정

- 식(1)을 통해 모형철근의 단면적을 결정할 경우 구조물의 응력상사비는 콘크리트의 재료 응력상사비와 동일하게 된다. 식 (1)을 이용하지 않을 경우 구조물의 응력상사비는 프로토타입과 모형의 Cyclic Pushover 해석을 통해 결정할 수 있다. 해석을 통하여 계산된 프로

토타입과 모형의 철근항복에 도달하는 하중을 각각 $F_{y,m}$, $F_{y,p}$라 할 때 응력상사비는 아래 식 (2)를 통해 계산할 수 있다.

$$s_\sigma = \frac{1}{s_L^2}\frac{F_{y,m}}{F_{y,p}} \tag{2}$$

(3) 변형률비($\varepsilon_{r,kt}$) 산정

- 실험 시 가진파의 감쇠 및 시간증분(Δt)의 보정 시 사용할 변형률비의 산정을 위해서는 가능한 경우 프로토타입 실험체와 축소모형의 Cyclic pushover 해석 결과를 이용하여 아래 식 (3)을 통해 산정할 수 있다. 식 (3)에서 $k_{t,p}$, $k_{t,m}$는 각각 프로토타입과 축소모형의 접선 강성을 의미한다.

$$\varepsilon_{r,kt} = \frac{1}{s_\sigma s_L}\frac{k_{t,p}}{k_{t,m}} \tag{3}$$

나. 축소모형 진동대실험 기법

(1) 실험 방법

- 축소모형 진동대실험은 1)가진파 보정, 2)실험 수행, 3)상사법칙을 적용한 응답 예측의 3단계로 진행이 된다.

- 먼저 해석 및 실험을 통하여 철근 항복 전 변형률비가 결정이 되면 이에 따른 가진파의 시간을 보정하여야 한다. 이 작업이 완료된 후 보정된 가진파를 이용하여 진동대실험을 수행하고 계측된 응답에 제안된 상사법칙을 적용하면 프로토타입의 응답에 대한 예측 결과를 얻을 수 있게 된다.

- 진동대 장비의 경우 입력한 지진파에 따라 정확한 진동을 시키기 위해서는 진동대 위에 예비실험체를 설치하고 입력 가진파 및 백색잡음파(White noise)를 이용하여 실제로 진동을 시켜주는 모델 업데이트 과정을 거쳐야 한다. 따라서 본 실험에 앞서 1~2개의 실험체를 이용하여 이 작업을 먼저 수행함으로써 보정된 가진파를 정확히 실험체에 가할 수 있다. 사용할 백색잡음파의 최대 가속도는 구조물의 강성 저하를 유발시키지 않는 범위 내에서 결정하여야 한다.

(2) 가진파의 시간보정 방법

- 철근 항복 전 변형률비를 $\varepsilon_{r,uy}$라 할 때, 모형 실험체의 철근 항복이 예상되는 시점을 $t_{m,y}$라 할 때 프로토타입에 작용되는 가진파의 시간증분 Δt_p으로부터 축소모형에 작용시킬 가진파의 시간증분 Δt_m에 대한 보정은 아래 식 (4)와 같다. 철근항복이 발생한 시점 이후에는 변형률비를 철근의 변형률비인 1.0으로 보고 시간증분에 대한 보정은 길이상사비에 의한 보정만을 고려한다.

$$\Delta t_m = \begin{cases} \sqrt{s_L \varepsilon_{r,uy}} \Delta t_p & if\ t_m \le t_{m,y} \\ \sqrt{s_L} \Delta t_p & if\ t_m > t_{m,y} \end{cases} \quad (4)$$

- 철근 항복이 예상되는 시점은 동적해석을 통하여 예측 할 수 있다. 실험 결과 해석으로 예측한 시간과 실제 실험 상에서 항복이 발생한 시간에 약간의 차이가 발생할 수 있으나 실험 결과에 큰 영향은 미치지 않는 것으로 파악되었다.

3. 축소모형 하이브리드시뮬레이션 실험 기법

(1) 실험 방법

- 축소모형 하이브리드시뮬레이션 실험은 1)실험장비 설치 및 구동 프로그램 설정, 2)실험 수행, 3)상사법칙을 적용한 응답 예측의 3단계로 진행이 된다.

- 하이브리드시뮬레이션 실험은 해석적으로 수치적분을 계속적으로 수행하면서 계산된 변위를 실험체와 연결된 액츄에이터에 재하하는 방식으로 진행이 되므로 이러한 모든 작업이 가능하도록 실험 장비가 구축되어 있는 실험 시설에서 수행이 되어야 한다. 명지대학교 하이브리드구조실험센터의 경우 이를 위한 시설이 전부 갖추어져 있고 실험을 구동하는 프로그램으로 오픈소스웨어인 OpenSees와 OpenFresco를 사용하고 있어 이를 이용하는 것을 권장한다.

- 실험 중 해석 파라미터(질량, 감쇠, 시간증분) 등을 변경하기 위해서는 실험체의 계측장비로부터 계측된 데이터를 OpenSees 상의 변수로 변환하여 이를 통해 OpenSees 상의 액츄에이터 구동을 위한 설정 변경에 사용할 수 있도록 해야 한다.

(2) 실험 장비 구성

- 실험을 수행하기 위해서는 기본적으로 1)실험체에 설치되는 액츄에이터, 2)계측장비(변형률게이지, LVDT 등), 3)액츄에이터의 제어에 사용되는 CPU, 4)계측장비로부터 데이터 수집을 위한 데이터로거, 5)데이터로거와 액츄에이터 제어에 사용되는 CPU간 데이터 전송을 위한 DAQ(Data Acquisition) 시스템으로 구성이 된다.

(3) 변형률비에 따른 해석 파라미터 보정 방법

- 하이브리드시뮬레이션 실험은 실험 중 해석 파라미터(질량, 감쇠, 시간증분)을 변경할 수 있다. 이중 상사법칙에서 변형률비와 연관이 되어 있는 것으로는 감쇠와 시간증분이 있으며 변형률비의 값이 변할 경우 이에 따른 보정이 필요하다. 현재 Step에서의 변형률비가 일 때, 감쇠와 시간증분은 아래 식 (5)를 통해서 변경할 수 있다. 식 (5)에서 Δt_p, Δt_m는 각각 프로토타입과 축소모형의 시간증분 c_p, c_m는 각각 프로토타입과 축소모형의 감쇠를

의미한다.

$$\Delta t_m = \sqrt{s_L \varepsilon_{r,kt}} \Delta t_p$$
$$c_m = \frac{s_\sigma \sqrt{s_L}}{\sqrt{\varepsilon_{r,kt}}} \sqrt{\varepsilon_{r,kt}} c_p \quad (5)$$

- 질량은 변형률비와 무관하므로 실험 중 변경하지 않아도 된다.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

□ 과제 시작 시 목표로 하였던 과업들의 수행을 모두 완료하였다.

- 본 연구의 최종적인 목적은 철근콘크리트 구조물과 같은 복합재료로 구성된 구조물의 축소모형 실험에 적용할 수 있는 상사법칙을 개발하고 개발된 상사법칙에 대해 유한요소해석을 통한 해석적인 검증과 실제 프로토타입 및 축소모형실험을 통한 실험적인 검증을 모두 수행한 실험적인 검증을 실시하여 최종적으로 그 타당성을 입증하는 것이었다.

- 실험적인 검증을 위하여 많은 수의 실험체(프로토타입 실험체 총 3개와 모형 실험체 총 30개)를 이용하여 총 4번의 실험(프로토타입 진동대실험, 축소모형 진동대실험, 프로토타입 하이브리드시뮬레이션 실험, 축소모형 하이브리드시뮬레이션 실험)을 수행하였으며 그 결과를 분석하여 제안된 상사법칙이 기존 연구에서 제시하였던 상사법칙과 비교하여 프로토타입의 거동을 좀 더 정확히 예측하고 있음을 확인하였다.

- 축소모형 실험 시 이론적으로 제안하였던 상사법칙 및 변형률비산정방법의 실적용을 위하여 각 실험의 특성에 맞게 실험기법을 제안하였으며 실험결과를 통해 각각의 실험기법의 적용이 타당한 실험결과를 준다는 것을 확인하였다.

□ 과제 시작 시 정량적인 목표 또한 대부분 달성하였다.

- 본 연구는 정량적인 목표 성과로 아래 표 10과 같은 성과들을 제시하였고 이의 달성을 위하여 과제 기간인 2년 동안 노력하였다. 정량적인 목표 중 논문과 관련된 실적으로 SCI급 논문 게재 3건, 국내 학술지 논문 게재 1건 및 국내외 학술발표회 3건이 있으며 이외 특허 출원 1건 및 소프트웨어 등록 2건을 목표로 설정하였다.

표 10 본 과제의 정량적인 성과 목표

연차 (단계)	연차별 성과목표	성과지표	측정방법	목표치	가중치
1차 (1단계)	복합재료의 동적해석에 적합한 상사법칙	국내외 학술지 논문 게재 건수 및 국내외 학술발표회 발표 건수	(국내외 학술지게재 논문건수×0.4) + (국내외 학술발표회 발표 건수 ×0.3)	3건	100%
	소 계				100%
2차 (2단계)	진동대실험을 적용한 축소모형 실험기법 개발	국내외 학술지 논문 게재 건수 및 국내외 학술발표회 발표 건수	(국내외 학술지게재 논문건수 ×0.25) + (국내외 학술발표회 발표 건수 ×0.15)	2건	40%
	험기법 개발	국내외 지적재산권 확보 건수	(프로그램 출원 및 등록건수×0.1)	1건	10%
	하이브리드 시뮬레이션	국내외 학술지 논문 게재 건수 및 국내외 학술발표회	(국내외 학술지게재 논문건수 ×0.25) + (국내외 학술발표회 발표 건수	2건	40%

	을 적용한 축소모형실험기법 개발	발표 건수	×0.15)		
		국내외 지적재산권 확보 건수	(특허 출원 및 등록건수×0.05) + (프로그램 출원 및 등록건수×0.05)	2건	10%
	소 계				100%

- 과제가 종료된 후 최종보고서를 제출한 현재(2016.08.25) 국내외 학술발표회에 9건의 발표를 진행하여 기존 목표로 잡았던 3건을 초과달성하였고 특허 출원 1건 및 소프트웨어 등록 2건 또한 모두 완료하였다.

- 다만 국내 학술지 논문의 1건의 경우 현재 한국지진공학회에 제출된 논문의 심사가 진행중이며 SCI급 논문 게재 3건의 경우 아직 완료가 되지 못하였다. 이는 본 과제의 특성 상 과제의 2차년도에 실험적 검증을 위한 4회의 실험(프로토타입 진동대 실험, 프로토타입 하이브리드시뮬레이션 실험, 축소모형 진동대 실험, 축소모형 하이브리드시뮬레이션 실험)을 1년여의 길지 않은 시간동안 모두 완료하여야 하는 촉박한 상황에 따른 것이다. 본 연구에서 제안된 이론적인 연구성과의 타당성에 대한 철저한 검증을 위하여 많은 횟수 실험을 수행하였고 그 중 특히 2회의 진동대실험의 경우 실험을 진행하기로 한 부산대학교 지진방재연구센터의 실험 스케쥴이 현재 포화상태에 도달하여 실험시설 예약에 시일이 소요됨에 따라 실험의 종료가 예상보다 늦어지게 됨에 따라 논문의 작성을 과제의 종료까지 완료하지 못하였다. 하지만 실험결과에 대한 분석은 이미 완료되었기 때문에 빠른 시일 내에 성과로 설정한 3건의 SCI급 논문의 투고를 진행할 예정이다.

2. 관련 분야 기여도

□ 사회기반 구조물의 내진성능평가를 위한 기초적인 연구 성과를 제시하였다.

- 본 연구에서는 철근콘크리트 구조물과 같은 복합재료로 구성된 구조물의 축소모형실험을 통하여 프로토타입의 응답을 기존에 사용되었던 상사법칙과 비교하여 좀 더 정확히 예측할 수 있는 새로운 상사법칙을 개발하였고 이를 진동대실험 및 하이브리드시뮬레이션 실험 시 실제로 적용할 수 있도록 하는 실험기법을 개발하였다. 이를 통해서 실험 장비의 성능상과 같은 기술적인 제약과 더불어 큰 규모의 프로토타입 실험체의 제작에 소요되는 적지 않은 비용으로부터의 경제적인 제약을 해소하기 위한 축소모형실험을 통하여 좀 더 경제적이고 주어진 조건에서 많은 실험을 통한 내진성능평가가 가능할 것으로 생각된다.
- 특히 기존에 사용되던 상사법칙의 경우 시간상사비와 변형률비를 고려하지 않았고 실제 실험결과 구조물의 고유진동수를 변형률비가 1.0보다 큰 경우 과소평가하는 것으로 나타났으며 변위 응답의 예측에서도 만족할만한 정확성을 확보하지는 못하는 것으로 나타났다. 구조물의 내진성능평가에 있어 변위 응답과 고유진동수의 정확한 예측이 필수적이라는 점을 감안하면 본 연구의 성과를 통하여 축소모형실험을 통한 좀 더 효율적이고 정확한 내진성능평가가 가능할 것이라 생각된다.

□ 하이브리드시뮬레이션을 통한 구조실험에 대표적인 사례를 제시하였다.
- 하이브리드시뮬레이션을 통한 동적 실험 분야는 최근까지 연구가 활발히 진행되고 있는

분야로 사회기반시설 및 구조물의 내진성능평가에 대한 중요성이 높아지고 있는 현재의 추세에 비추어 볼 때 향후 이에 대한 필요성이 더욱 커질 것이라 전망할 수 있다. 본 연구에서는 프로토타입 및 축소모형 철근 콘크리트 기둥 실험체를 이용한 하이브리드시뮬레이션실험을 국가의 분산공유형 건설연구 인프라구축사업'을 통하여 구축된 명지대학교의 하이브리드구조실험센터에서 수행하였다. 해당 실험시설은 국내 최고 성능의 구조실험 시설장비를 갖추었으며 특히 본 연구에서 수행한 축소모형 실험은 해당 시설에서 처음 시도된 것으로 향후 축소모형 하이브리드 시뮬레이션 실험을 위한 기초를 마련하였다.

- 또한 프로토타입 및 축소모형 실험을 거치면서 하이브리드시뮬레이션 실험 진행을 위해 명지대학교에 설치된 구동 컴퓨터를 이용하여 실험을 손쉽게 실행할 수 있도록 실행 프로그램을 작성하는 것을 본 연구의 성과 중 소프트웨어로 등록을 하였으며 이를 통해 하이브리드시뮬레이션 실험을 수행하는 연구자들이 좀 더 손쉽게 실험을 실시할 수 있도록 하였다.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

가. 연구결과의 활용방안

- 본 연구에서 개발된 상사법칙과 하이브리드시뮬레이션을 활용한 축소모형실험기법은 철근콘크리트 구조물의 축소모형실험의 사용 활성화에 크게 기여할 것이다. 특히 많은 실험수행 및 광범위한 데이터베이스 확보가 요구되는 내진성능평가 분야에 있어 종래의 축소모형실험에 비하여 더욱 정확하고 효율적으로 실험을 가능케 할 것이다.

- 또한 축소모형실험을 통한 철근콘크리트 구조물의 성능 실험을 수행함으로써 향후 성능기반설계를 적용한 설계기준의 수립을 위한 작업에 적극적으로 기여할 수 있으며 실제 시공현장에서의 성능실험에도 손쉽게 적용하여 보다 안전하고 효율적인 설계가 가능할 것이다.

- 축소모형실험기법의 확립을 통하여 이전까지 미진하였던 철근콘크리트를 위한 상사법칙과 관련된 연구를 선도할 수 있는 여건이 마련될 것이다. 따라서 이를 바탕으로 최근 연구되고 있는 고강도콘크리트, 섬유보강콘크리트와 같은 재료로의 확장을 통한 후속 연구를 계속적으로 진행함으로써 기술적인 우위를 계속해서 유지할 수 있을 것이다.

나. 기대성과 및 파급효과

□ 지속적인 성과도출 및 사회안전에 대한 기여를 지향한다.

- 본 연구의 1-2차년도에는 상사법칙의 이론적인 개발 및 검증실험을 중점적으로 수행하였으므로 연구의 종료 후 즉각적인 경제적인 성과는 기대할 수 없다. 그러나 본 연구의 목적은 사회기반시설의 안전하고 최적화된 설계를 가능하게 하는 것이며 개발된 축소모형실험을 향후연구 및 사회기반설계의 성능 실험, 설계에 적용함으로써 지속적인 이익의 창출 및 전반적인 국내 건설기술 수준의 발전과 생산성의 증가를 통하여 우리사회의 지속적인 발전에 기여할 수 있을 것이라 사료된다.

□ 하이브리드시뮬레이션 실험기법은 여러 분야로의 큰 파급효과를 줄 수 있다.

- 하이브리드 시뮬레이션은 실험 도중에 해석을 통하여 실시간으로 유압가력기를 제어하여야 하고 이를 위한 실험체와 제어 컴퓨터 사이의 데이터 송수신 프로세스를 구축하는 작업이 필수적으로 선행되어야 하기 때문에 진동대실험에 비하여 실험 프로세스가 대단히 복잡할 뿐만 아니라 필요한 실험 장비 비용 크고 실험 준비에 소요되는 시간이 적지 않다.

- 본 연구에서는 하이브리드시뮬레이션을 진동대실험이 가지는 한계를 극복하기 위한 용도로 축소모형실험에 적용을 하였으나 본래 하이브리드시뮬레이션은 구조물의 동적실험 일반에 적용하기 위한 목적으로 개발된 것이므로 실물 실험체의 동적실험에도 동일하게 적용할 수 있다. 그러므로 본 연구에서 축소모형실험기법의 정립·구축과정에서 작성한 하이브리드시뮬레이션 알고리즘과 매뉴얼은 향후 이를 이용한 실험에 있어 연구자들에게 하나의 지침이 될 수 있을 것으로 사료되며 궁극적으로 내진성능평가에 있어 하이브리드시뮬

레이션의 사용과 이를 통한 관련 연구의 활성화에 크게 이바지 할 것으로 확신한다.

□ 고급전문인력의 배출에 기여하여 건설기술의 발전에 기여할 수 있다.

- 본 연구와 같은 실험연구의 성과를 통하여 축소모형실험 및 진동대실험, 하이브리드시뮬레이션에 대한 기술이 확보되고 연구 기반이 조성됨에 따라 자연스럽게 사회기반시설의 실험을 담당하게 되는 고급인력의 배출에 기여함으로써 현재 침체되어 있는 상황에서 나아가 건설 기술 강국으로의 도약을 이룰 수 있을 것이다.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

- 본 연구는 상사법칙의 개발이라는 이론적인 작업을 초점으로 연구를 진행하였으며 이와 관련하여 수집한 해외 연구자들의 복합재료(주로 철근콘크리트)의 상사법칙 및 축소모형 실험과 관련된 저술과 논문 중에서 본 연구 진행과 직접적으로 연관이 있고 많은 도움이 되었던 자료들의 제목을 따로 정리하였다.

□ 상사법칙 관련 책(교재) 및 보고서

- Harris, H. G. and Sabnis, G. M., Structural Modeling and Experimental Techniques, CRC Press, 1999.
- J, Ferritto, "Dynamic Tests of Model Concrete", ACI SP 73-2, pp. 23~33.
- Krawinkler, H. and Moncarz, P. D., "Similitude Requirements for Dynamic Models", ACI SP 73, 1982, pp. 1~22.
- Moncarz, P. D., and Krawinkler, H., " Theory and Applications of Experimental Model Analysis in Earthquake Engineering", Report No. 50, Department of Civil and Environmental Engineering Stanford University, 1981.
- Naval Facility Engineering Command, "Mix Design for Small Scale Models of Concrete Structures", 1968.
- Zia, P., White, R. N., and Vanhorn, D. a.. "Principles of Model Analysis", ACI SP-24, 1970, pp. 19~39.

□ 상사법칙 관련 학위논문 및 학술지 논문

- C. R. Farrar, W. E. Baker, and R. C. Dove, "Dynamic Parameter Similitude for Concrete Models", ACI Structural Journal, Vol. 91, No. 1, 1994, pp. 90~99.
- C. S. Li, S. E. Lam, M. Z. Zhang, and Y. L. Wong, "Shaking Table Test of a 1:20 Scale High-Rise Building with a Transfer Plate System". Journal of Structural Engineering ASCE, Vol. 123 No. 11, 2006, pp. 1732~1744.
- Kumar, S., Itoh, Y., Saizuka, K., and Usami, T., "Pseudo-dynamic Testing of Scaled Models", Journal of Structural Engineering ASCE, Vol. 123, No. 4, 1997, pp. 524~526.
- M. Ramu, V. P. Raja, and P. R. Thyla, "Establishment of Structural Similitude for Elastic Models and Validation of Scaling Laws", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 17 No. 1, 2013, pp. 139~144.
- Meng, Q. L., "The Dynamic Simulation of Nonlinear Performance of R/C Structures in the Earthquake Simulation Shaking Table Test", Master dissertation of Instituteof Engineering Mechanics, China Seismological Bureau, Harbin, 2001
- N. S. Kim, J. H. Lee and S. P. Chang., "Equivalent Multi-Phase Similitude Law for Pseudodynamic Test on Small Scale Reinforced Concrete Models", Engineering Structures Vol. 31, 2004, pp. 834~846.
- V. Caccese and H. G. Harris, "Earthquake Simulation Testing of Small Scale Reinforced Concrete Structures", ACI Structural Journal, Vol 87, No. 1, 1990, pp. 72~80.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

- 최종 성과물과 공동활용 대상 자료들에 대해서는 별도의 보안이 필요하지 않다.
- 기술적 가치와 노하우가 포함된 자료에 한해서는 비공개가 필요하다.

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

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

주관연구기관(서울대학교)의 연구실 및 실험실 안전 관리 체계

- 본 연구에 참여하는 연구원들이 소속된 서울대학교에서는 교내 환경안전원 주관으로 다음과 같은 연구실 안전조치를 상시 실시하고 있다.

가. 연구활동종사자 환경안전교육 실시

- 환경안전교육은 정기교육, 온라인교육, 수시교육으로 나뉜다. 정기교육은 대학원 신입생을 대상으로 매년 2회 집체교육을 실시하는 것으로 환경안전관리 외 17과목으로 구성되어 있으며 전공별로 12과목을 수강하도록 되어있다. 온라인교육은 정기교육을 수강하지 못한 사람을 대상으로 온라인 안전교육을 실시하는 것으로 환경안전관리 외 14과목으로 구성되어 있으며 전공별로 12과목을 수강하도록 되어있다. 수시교육은 실험실 사고 발생, 신입 연구원 채용 등 실험실 안전교육이 필요한 경우 요청에 의해 수시로 진행되는 안전교육이다.

- 정기교육 후에는 시험을 통하여 소정의 자격을 취득하도록 하고 있으며 시험에 불합격하여 자격을 취득하지 못할 경우에는 해당 연구실에 소속된 모든 실험실의 출입과 실험 수행을 금지하도록 하고 있다. 본 연구에 참여하는 연구원은 모두 정기교육 후 시험에 우수한 성적으로 합격하여 자격을 취득하였다.

나. 실험실 안전점검

- 연구실 안전환경 조성에 관한 법률"에 의거 실험실 특성에 따라 아래 표와 같이 분류하여 일상점검, 정기점검, 특별안전점검, 정밀안전진단을 실시하고 있다.

<서울대학교 내 안전점검 실험 실 수>

A유형 실험실	B유형 실험실	C유형 실험실	D유형 실험실	합계
314	284	296	257	1,151

* 실험실 분류 기준 :

A형: 미생물 및 동물(LMO), 방사성동위원소 물질 등을 사용하는 실험실

B형: 화학약품 등을 사용하는 실험실

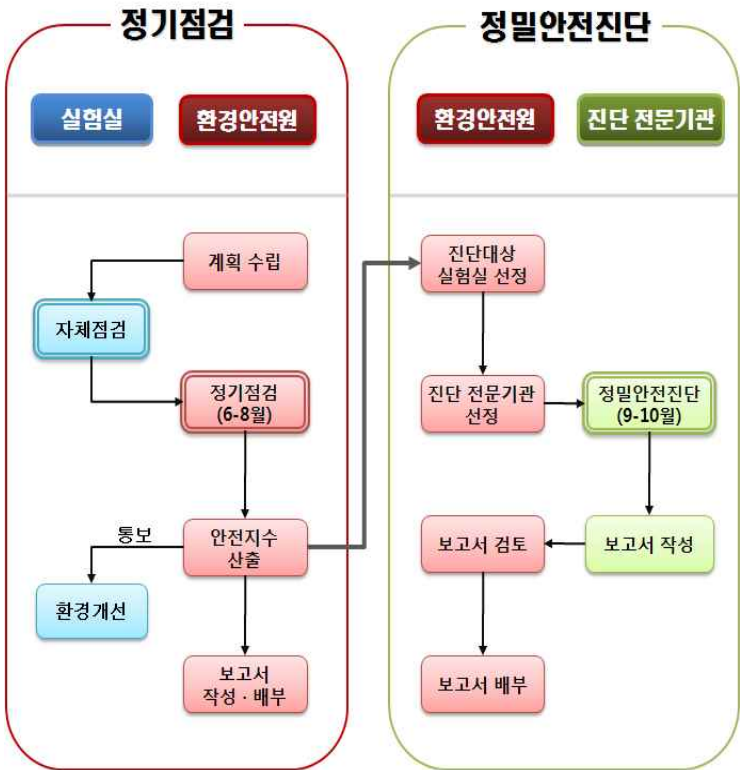
C형: 기계·전기 설비 등을 사용하는 실험실

D형: 실험·실습을 수행하지 않는 설계·컴퓨터 관련 등의 실험실

- 본 연구의 연구원들이 소속된 연구실은 C유형 실험실에 해당하는 곳으로 연구개발활동 전 연구개발활동에 사용되는 실험 장비의 이상 유무를 점검하는 일상점검을 실시하고 있다. 그리고 서울대학교 환경안전원 주관으로 매년 정기점검을 실시하고 서울대학교 실험실안전 백서를 배포하고 있다. 정기점검 실시 후 위해요인이 발견될 경우 외부 전문기관에 진단을 의뢰하여 위해요인의 개선방향 및 안전관리방안을 수립하도록 되어있다.

다. 실험실 안전사고 대응 및 예방

- 실험실 안전사고 대응 및 처리 매뉴얼에 따라 사고 전파, 조치하며 실험실 안전사고 대응 훈련을 실시하여 유사사고 발생시 대응능력을 향상시키고 있다. 그리고 실험실 안전사고에 대한 경각심을 높이고 유사사고를 예방하기 위하여 국내외 대학과 연구기관에서 발생하는 사고를 수집하여 연구활동 종사자에게 이메일을 통해 전파하고 있으며 실험실 사고 발생시 신속하고 정확하게 처리할 수 있도록 일련의 사고처리 흐름도 및 비상연락 스티커를 제작하여 배포하고 있다. 또한 모든 실험실에는 소화기가 비치되어 있어 유사시 발생할 수 있는 화재사고에도 철저하게 대비하고 있다.



서울대학교 실험실 안전점검 체계

라. 공기오염도 조사 실시

- 미세먼지, 이산화탄소 등에 대하여 실험실내 공기오염도를 조사하여 부적합 판정을 받을 경우, 환경개선을 기관에 요청하여 안전하고 쾌적한 실험실 환경을 구축할 수 있도록 하였다.

마. 연구활동종사자 보험가입

- 교육시설재난공제회에 연구원을 대상으로 매년 정기적으로 보험가입 및 갱신처리를 지속적으로 이행하고 있다.

2. 연구개발과제 진행에 따른 실험실 안전점검 실시와 관련된 이행 실적

- 본 연구의 주관기관인 서울대학교에 소속된 모든 연구원들 및 연구원들은 서울대학교 환경안전원에서 주관하는 안전교육을 모두 수료하였으며 연구원들이 소속된 연구실의 경우 주기적으로 행해지는 안전점검 기준을 모두 만족하였다.

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	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	학술 발표회 논문	RC 교각의 축소모형실험을 위한 상사법칙에서의 변형률비 산정방법 연구	서울대	주관	한국 콘크리트학회 2014년 가을 학술대회		발표일 (14.10.15)	단독 사사	
2	학술 발표회 논문	RC 축소모형 실험을 위한 변형률비 변동을 고려한 상사법칙 연구	서울대	주관	한국 콘크리트학회 2015년 봄 학술대회		발표일 (15.05.13)	단독 사사	
3	학술 발표회 논문	Seismic Analysis of RC Column with Similitude Law Considering Strain Distortion Effect	서울대	주관	fib 2015 Symposium		발표일 (15.05.20)	중복 사사	
4	학술 발표회 논문	콘크리트의 변형률 왜곡을 고려한 상사법칙의 개발과 RC 기둥의 동적해석을 통한 검증	서울대	주관	한국 콘크리트학회 2015년 가을 학술대회		발표일 (15.10.22)	단독 사사	
5	학술 발표회 논문	변형률비 변동을 고려한 상사법칙에서의 평균 변형률비 사용에 대한 타당성 분석	서울대	주관	한국 콘크리트학회 2016년 봄 학술대회		발표일 (16.05.12)	단독 사사	
6	학술 발표회 논문	콘크리트 변형률 왜곡을 고려한 상사법칙의 개발	서울대	주관	한국지진공학회 추계워크샵		발표일 (15.09.11)	단독 사사	
7	학술 발표회 논문	Seismic Analysis of RC Column with Similitude Law Considering Strain Distortion	서울대	주관	7th Asis Pacific Young Researchers and Graduates Symposium (YRGS 2015)		발표일 (15.08.21)	단독 사사	
8	학술 발표회 논문	Scaled Model Test of RC Column Considering Strain Distortion of Model Concrete	서울대	주관	IABSE Conference 2016		발표일 (16.05.10)	단독 사사	
9	학술 발표회 논문	Seismic Analysis of RC Column Scaled Model Considering Strain Distortion	서울대	주관	8th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2016)		발표일 (16.06.27)	단독 사사	

10	특허 출원	변형률비의 변동을 고려한 상사법칙을 이용한 철근콘크리트 구조물의 축소모형 유사동적실험방법	서울대 학교	주관			출원일 (16.08.16)		
11	소프트 웨어 등록	상사법칙을 적용한 철근콘크리트 기둥 프로토타입 및 축소모형 동적해석 프로그램	서울대 학교	주관			등록일 (16.08.05)		
12	소프트 웨어 등록	단자유도 철근콘크리트 기둥의 유사동적실험 실행을 위한 OpenSees(오픈시즈) 구동 파일 생성 프로그램	서울대 학교	주관			등록일 (16.08.05)		

제11장. 기타 사항

제12장. 참고 문헌

- 김남식, 이지호, 장승필, Guo. X., “RC 축소모형의 유사동적실험을 위한 Equivalent Multi-Phase Similitude Law“, 한국지진공학회 논문집, 7권, 6호, 2003, pp. 101~108
- 김남식, 이지호, 장승필, Guo. X., “RC 축소모형의 유사동적실험을 위한 Equivalent Multi-Phase Similitude Law : 검증실험“, 한국지진공학회 논문집, 8권, 5호, 2004, pp. 35~43.
- 배성용, 이한선, 신영식, “철근콘크리트구조물의 축소모델 재료의 역학적 특성에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 가을학발표회 논문집, 6월, 2호, 1994, pp. 249~254
- 이도근, 조재열, “RC 기둥의 내진성능평가를 위한 재료비선형 상사법칙”, 콘크리트학회 논문집, Vol 22, No. 3, 2010, pp. 409~417.
- 조남소, “콘크리트 교각의 내진성능평가를 위한 재료비선형 상사법칙”, 박사학위논문, 서울대학교, 2008.
- Hakuno, M., Shidawara, M. & hara, T. (1969),“Dynamic destructive test of a cantilever beam, controlled by an analog-computer,″ Transactions of the Japan Society of Civil Engineers, Vol 171, pp 1-9, (in Japanese).
- Harris, H. G. and Sabnis, G. M., Structural Modeling and Experimental Techniques, CRC Press, 1999.
- Meng, Q. L., “The Dynamic Simulation of Nonlinear Performance of R/C Structures in the Earthquake Simulation Shaking Table Test”, Master dissertation of Instituteof Engineering Mechanics, China Seismological Bureau, Harbin, 2001
- Nakashima, M., et al. (1990),“Integration techniques for substructure pseudodynamic test,″ Proc. of the 4th U.S. National Conference on Earthquake Engineering. Palm Springs, California, pp 515-524.
- N. S. Kim, J. H. Lee and S. P. Chang., “Equivalent Multi-Phase Similitude Law for Pseudodynamic Test on Small Scale Reinforced Concrete Models“, Engineering Structures Vol. 31, 2004, pp. 834~846
- Krawinkler, H. and Moncarz, P. D., “Similitude Requirements for Dynamic Models“, ACI SP-73, 1982, pp. 1~22.
- Kumar, S., Itoh, Y., Saizuka, K., and Usami, T., “Pseudo-dynamic Testing of Scaled Models“, Journal of Structural Engineering ASCE, Vol. 123, No. 4, 1997, pp. 524~526
- Shing, P.B., et al. (1991),“Implicit time integration for pseudodynamic tests,″ Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 20, pp 551-576.
- Zia, P., White, R. N., and Vanhorn, D. a.. “Principles of Model Analysis“, ACI SP-24, 1970, pp. 19~39.

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.