

## 제 출 문

국토교통부 장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘레질리언트 도시/사회기반시설기술 국제공동세미나’(연구개발 기간 : 2015.12.10 ~ 2016.08.09) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2016. 10. 13.

주관연구기관명 : 연세대학교 산학협력단      최 문 근      (인)

협동연구기관명 : Professor David Sinton      (인)  
Vice Dean, Research (Acting)  
Faculty of Applied Science and Engineering,  
University of Toronto

주관연구기관책임자: 박 경 수

협동연구기관책임자: Kown, Oh-Sung

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에  
동의합니다.

## 보고서 요약서

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                       |                           |                                |                                     |                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 과제 고유 번호                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 15CTAP<br>-C105790-01 | 해당 단계<br>연구 기간            | 2015.12.10 ~<br>2016.08.09     | 단계구분                                | (해당단계)/<br>(총단계)                                         |
| 연구사업명                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 중사업명                  | 국토교통기술촉진연구사업              |                                |                                     |                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 세부사업명                 | 국제협력기반구축                  |                                |                                     |                                                          |
| 연구과제명                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 대과제명                  |                           |                                |                                     |                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 세부과제명                 | 레질리언트 도시/사회기반시설기술 국제공동세미나 |                                |                                     |                                                          |
| 연구책임자                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 박경수                   | 해당단계<br>참여<br>연구원 수       | 총: 19 명<br>내부: 5 명<br>외부: 14 명 | 해당단계<br>연구개발비                       | 정부: 32,000천원<br>기업: 0천원<br>정부 외: 2,000 천원<br>계: 34,000천원 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                       | 총 연구기간<br>참여<br>연구원 수     | 총: 19 명<br>내부: 5 명<br>외부: 14 명 | 총 연구개발<br>비                         | 정부: 32,000천원<br>기업: 0천원<br>정부 외: 2,000 천원<br>계: 34,000천원 |
| 연구기관명 및<br>소속 부서명                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 연세대학교 토목환경공학과         |                           |                                | 참여기업명 (없음)                          |                                                          |
| 국제공동연구                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 상대국명: 캐나다             |                           |                                | 상대국 연구기관명: University of<br>Toronto |                                                          |
| 위탁연구                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 해당사항 없음               |                           |                                | 연구책임자: Oh-Sung Kwon                 |                                                          |
| 요약                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                       |                           |                                | 보고서 면수: 89                          |                                                          |
| <div>■ 연세대학교와 University of Toronto간에 레질리언트 도시/사회기반시설 기술관련 국제 공동 세미나를 개최하고 양국 간의 기술 교류 및 향후 공동연구 기반을 구축하는데 있음.</div> <div>■ 해당 워크숍은 연세대학교와 University of Toronto 뿐만 아니라, 서울대학교, 서울시립대학교, 한국원자력연구원, 한양대학교 이상 6개 기관이 참여하여 그 범위를 확대 하였음.</div> <div>■ 사회기반시설의 레질리언스 (resilience)를 평가하기 위한 다양한 기술 중 콘크리트구조거동분석, 극한환경에서 구조거동, 내진성능 평가로 나누어 기술 교류를 실시하였으며, 향후 공동연구 기반을 구축하였음.</div> <div>■ 연세대학교, 한국원자력연구원, University of Toronto 간에 원전구조물의 레질리언스라는 주제로 공동연구 주제를 개발하였으며, 공동연구제안서 집필을 하였음.</div> |                       |                           |                                |                                     |                                                          |

|                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |        |      |      |      |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|------|------|------|
| 연구의<br>목적 및 내용            | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 연세대학교와 University of Toronto간에 레질리언트 도시/사회기반시설 기술 관련 국제 공동 세미나를 개최하고 양국 간의 기술 교류 및 향후 공동연구 기반을 구축하는데 있음.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                |        |      |      |      |
| 연구개발성과                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 해당 워크숍은 연세대학교와 University of Toronto 뿐만 아니라, 서울대학교, 서울시립대학교, 한국원자력연구원, 한양대학교 이상 6개 기관이 참여하여 그 범위를 확대 하였음.</li> <li>■ 사회기반시설의 레질리언스 (resilience)를 평가하기 위한 다양한 기술 중 콘크리트구조거동분석, 극한환경에서 구조거동, 내진성능 평가로 나누어 기술 교류를 실시하였으며, 향후 공동연구 기반을 구축하였음.</li> <li>■ 연세대학교, 한국원자력연구원, University of Toronto 간에 원전구조물의 레질리언스라는 주제로 공동연구 주제를 개발하였으며, 공동연구제안서 집필을 하였음.</li> </ul>                     |        |      |      |      |
| 연구개발성과의<br>활용계획<br>(기대효과) | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 사회기반시설의 구조거동 분석에서 세계적인 기술력을 가지고 있는 University of Toronto와 지속적인 교류를 통해, 사회기반시설물의 레질리언스를 평가하는 분야에서 선도적인 역할을 할 수 있음.</li> <li>■ 현재 국내 연세대학교에서 수행 중인 레질리언트 사회기반시설 창의인재양성 사업단과, 서울대학교의 극한상태 구조특성 실험시설 및 도시재난재해복원력 융합연구센터 등과의 교류를 통해 보다 활발한 국제공동연구를 추진하여 레질리언트 사회기반시설 원천기술을 선점함.</li> <li>■ 레질리언트 사회기반시설 원천 기술개발로 국내 기술력을 증진에 활용할 수 있으며, 새로운 기술에 대한 국내 및 해외 시장창출 기회를 가질 수 있음.</li> </ul> |        |      |      |      |
| 핵심어<br>(5개 이내)            | 레질리언스                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 사회기반시설 | 구조공학 | 콘크리트 | 전산해석 |

## 〈 SUMMARY 〉

|                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Purpose & Contents    | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ An international workshop related to resilient of urban infrastructures was organized by Yonsei University and University of Toronto. It aimed to build a joint research and technology exchanges between the two countries.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Results               | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ In the workshop, six institutions are participated, i.e., Hanyang University, Korea Atomic Energy Research Institute, Seoul National University, University of Toronto, and Yonsei University.</li> <li>■ The main topics of the workshop are divided into three categories, which include behavior of concrete structures analysis, structural behavior in extreme environments, and Seismic performance evaluation. The workshop is aiming to promote technology exchange and develop joint research in the future.</li> <li>■ Furthermore, three participated institutions (Korea Atomic Energy Research, University of Toronto, and Yonsei University) develop a potential joint research proposal related to the resilience of nuclear power plants.</li> </ul>                                                      |
| Expected Contribution | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Because University of Toronto has the state-of-art technologies on infrastructure, collaborations and exchanging technologies can result in leading research area associated with the assesment of infrastructure resilience.</li> <li>■ Especially, three research center in Korea, i.e., Creative Human Resources Center for Resilient Infrastructure in the Yonsei University, Extreme Performance Testing Center in Seoul Nationa University, and Convergence Research Center for Disaster-Hazard Resilience in Seoul National University in order to develop original technology, can facilitate the collaboration between Canada and Korea.</li> <li>■ The Resilience of Infrastructure workshop promotes a source of technology development and also brings new national and international opportunity.</li> </ul> |
| Keywords              | <div>Resilience</div> <div>Infrastructure</div> <div>Structural Engineering</div> <div>Concrete</div> <div>Computational analysis</div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

## < Contents >

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| 1. Organization of Workshop .....        | 7  |
| 2. Previous Research .....               | 11 |
| 3. Workshop Contents and Outcome .....   | 14 |
| 4. Achievement and Impact .....          | 26 |
| 5. Further Application of Research ..... | 28 |
| 6. Technical Information from .....      | 31 |
| 7. Security Level .....                  | 82 |
| 8. Research Facility Statistics .....    | 82 |
| 9. Evaluation of Workshop .....          | 83 |
| 10. Safeguard system .....               | 85 |
| 11. Other Detail .....                   | 86 |
| 12. Reference .....                      | 89 |

## 〈 목 차 〉

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
| 1. 행사 개요 .....                         | 7  |
| 2. 국내외 기술 개발 현황 .....                  | 11 |
| 3. 행사 수행 내용 및 성과 .....                 | 14 |
| 4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 .....            | 26 |
| 5. 행사 성과의 활용 계획 .....                  | 28 |
| 6. 행사 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 .....        | 31 |
| 7. 연구개발성과의 보안등급 .....                  | 82 |
| 8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황 ..... | 82 |
| 9. 행사에 대한 주관연구기관 및 상대국 참여기관 의견서 .....  | 83 |
| 10. 행사 수행 과정에서의 안전 조치 이행 실적 .....      | 85 |
| 11. 기타 사항 .....                        | 86 |
| 12. 참고 문헌 .....                        | 89 |

## 제1장 행사 개요

가. 행사명: 레질리언트 도시/사회기반시설 기술 국제 공동 세미나 (Resilience on Urban Infrastructure)

나. 행사 주제

- 1) 도시/사회기반시설의 Resilience를 평가하기 위한 최신 실험과 해석 방법
- 2) 사회기반시설 재료 단계부터 구조부재, 전체 구조물과, 도시 시스템의 까지 다중 스케일에서의 Resilience 평가
- 3) 외부 변화하는 환경 (기후변화, 극한환경, 재난재해)에 적응/대응 (Resilience) 하는 사회기반시설 관련 기술

다. 행사 일시 및 장소

- 1) 일시 : 2016.04.24 ~ 2016.04.26 (3 days)
- 2) 장소(국가) : University of Toronto (캐나다)

라. 주최자

| 구분      | 한국                  | 캐나다                                                |
|---------|---------------------|----------------------------------------------------|
| 성명      | 박경수                 | Oh-Sung Kwon (권오성)                                 |
| 생년월일    | 78년 2월 24일          | 76년 2월 20일                                         |
| 소속      | 연세대학교               | University of Toronto                              |
| 직위      | 부교수                 | 부교수                                                |
| 직장주소    | 서울, 서대문구, 연세로 50    | 35 St. George St., Toronto, ON.<br>CANADA M5S 1A4  |
| 전화      | 02-2123-5806        | +1-416-978-5908                                    |
| H.P     | 010-7241-0926       | +1-647-919-2505                                    |
| E-mail  | k-park@yonsei.ac.kr | kwon.os@gmail.com                                  |
| 주요 연구분야 | 콘크리트 구조 및 재료        | Earthquake engineering<br>/ Structural engineering |

마. 참석대상 및 참석인원

| 참석 대상 |                                                                           | 참석 인원  |      |
|-------|---------------------------------------------------------------------------|--------|------|
| 전공분야  | 사회기반시설 분야                                                                 | 한국     | 11 명 |
| 소속기관  | 연세대학교, 서울대학교,<br>서울시립대학교,<br>한양대학교,<br>한국원자력연구원,<br>University of Toronto | 상대국    | 8 명  |
| 직업    | 교수, 연구원, 학생                                                               | 그 외 국가 | 0 명  |

바. 주요 참석자(발표자, 좌장, 주요 참석자 등)

|     | 성명              | 소속                    | 부서         | 직위    | 전공분야                     | 참석형태   |
|-----|-----------------|-----------------------|------------|-------|--------------------------|--------|
| 한국  | 권태현             | 원자력연구원                | 신형원자로개발연구소 | 선임연구원 | 원전구조물                    | 발표자    |
|     | 김강수             | 서울시립대학교               | 건축공학과      | 부교수   | PS 콘크리트                  | 발표자    |
|     | 김장호             | 연세대학교                 | 토목공학과      | 교수    | 콘크리트 구조                  | 발표자    |
|     | 김준희             | 연세대학교                 | 건축공학과      | 조교수   | 내진설계                     | 발표자    |
|     | 김호경             | 서울대학교                 | 토목공학과      | 교수    | 교량구조                     | 발표자    |
|     | 박경수             | 연세대학교                 | 토목공학과      | 부교수   | 콘크리트 구조                  | 발표자/좌장 |
|     | 박두희             | 한양대학교                 | 토목공학과      | 부교수   | 지반동역학                    | 발표자    |
|     | 송준호             | 서울대학교                 | 토목공학과      | 부교수   | 신뢰성이론                    | 발표자    |
|     | 조재열             | 서울대학교                 | 토목공학과      | 부교수   | 콘크리트 구조                  | 발표자    |
|     | 한동석             | 연세대학교                 | 토목공학과      | 부교수   | 콘크리트 구조                  | 발표자    |
| 상대국 | Michael Collins | University of Toronto | 토목공학과      | 부교수   | 콘크리트 구조                  | 발표자    |
|     | Evan Bentz      | University of Toronto | 토목공학과      | 부교수   | 철근콘크리트구조                 | 발표자    |
|     | Paul Gauvreau   | University of Toronto | 토목공학과      | 교수    | 교량구조                     | 발표자    |
|     | Oh-sung Kwon    | University of Toronto | 토목공학과      | 부교수   | 구조동역학                    | 발표자/좌장 |
|     | Oya Mercan      | University of Toronto | 토목공학과      | 부교수   | 구조동역학 /hybrid simulation | 발표자    |
|     | Jeffrey Packer  | University of Toronto | 토목공학과      | 교수    | 극한하중                     | 발표자    |
|     | Shamim Sheikh   | University of Toronto | 토목공학과      | 교수    | 철근콘크리트구조                 | 발표자    |
|     | Frank Vecchio   | University of Toronto | 토목공학과      | 교수    | 철근콘크리트구조                 | 발표자    |

## 사. 프로그램

| April 25, Monday  |                                                                                                            |                                                                                                                                         |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 09:00 ~ 09:30     | Welcome greetings<br>Introduction of participants and background of the workshop                           |                                                                                                                                         |
| 09:30 ~ 10:00     | <b>[Keynote presentation]</b><br><i>Michael P. Collins</i> - The shear strength of very deep one-way slabs |                                                                                                                                         |
| 10:00 ~ 12:00     | <i>Kang Su Kim</i>                                                                                         | Nonlinear flexural analysis model for reinforced concrete members with corroded steel bars                                              |
|                   | <i>Shamim A. Sheikh</i>                                                                                    | Recent Research on Sustainable Infrastructure                                                                                           |
|                   | / Break /                                                                                                  |                                                                                                                                         |
|                   | <i>Tae-Hyun Kwon</i>                                                                                       | Evaluation of neutron irradiation on reinforced concrete materials in aging NPPs                                                        |
|                   | <i>Evan C. Bentz</i>                                                                                       | The new version of response for sectional analysis of concrete members                                                                  |
|                   | <i>Tong-Seok Han</i>                                                                                       | Construction of virtual cement paste specimen with gradient void distribution                                                           |
| 12:00 ~ 14:00     | Lunch & Laboratory Tour ( <i>Evan C. Bentz</i> )                                                           |                                                                                                                                         |
| 14:00 ~ 17:30     | <i>Jang-Ho Jay Kim</i>                                                                                     | Analytical evaluation of bi-directionally prestressed concrete panel behavior under impact-fire combined loading using parametric study |
|                   | <i>Frank J. Vecchio</i>                                                                                    | A simplified analytical tool for analysis of reinforced concrete slabs subjected to hard missile impacts in axisymmetric geometry       |
|                   | <i>Jae-Yeol Cho</i>                                                                                        | Establishment of extreme performance testing center                                                                                     |
|                   | / Break /                                                                                                  |                                                                                                                                         |
|                   | <i>Junho Song</i>                                                                                          | Reliability analysis of complex infrastructure systems using cross-entropy-based adaptive importance sampling                           |
|                   | <i>Jeffrey Packer</i>                                                                                      | Recent research on blast and impact loading of elements and materials                                                                   |
|                   | <i>Kyoungsoo Park</i>                                                                                      | Prediction of concrete fracture using cohesive zone modeling                                                                            |
| 18:30 ~ 21:00     | Workshop dinner                                                                                            |                                                                                                                                         |
| April 26, Tuesday |                                                                                                            |                                                                                                                                         |
| 09:00 ~ 11:30     | <i>Duhee Park</i>                                                                                          | Damage analysis of cut-and-cover box structures                                                                                         |
|                   | <i>Oya Mercan</i>                                                                                          | Recent research on real-time hybrid simulation                                                                                          |
|                   | <i>Junhee Kim</i>                                                                                          | Seismic assessment of a damaged building subjected to successive earthquakes                                                            |
|                   | / Break /                                                                                                  |                                                                                                                                         |
|                   | <i>Ho-Kyung Kim</i>                                                                                        | Safety assessment of vehicles on bridges to crosswind                                                                                   |
|                   | <i>Paul Gauvreau</i>                                                                                       | Novel composite structural systems                                                                                                      |
|                   | <i>Oh-Sung Kwon</i>                                                                                        | Recent developments in multi-platform hybrid simulation in the University of Toronto                                                    |
| 11:30 ~ 13:00     | Discussions for future collaborations<br>Workshop closing                                                  |                                                                                                                                         |

## 제2장 국내외 기술 개발 현황

### 가. 레질리언트 도시/사회기반시설 관련 연구 배경

- 1) 최근 기후변화를 포함한 사회 환경적 변화에 따른 사회기반시설의 건전성 및 안전성 평가가 절실히 필요한 연구 분야이다. 특히, 인구가 밀집되어 있는 도시에서 도로, 교량, 지하철, 전력, 상하수도 등의 사회기반시설물은 상호 의존적이기 때문에 자연 및 인공적인 재해에 의해 일부 시설이 파괴될 경우 그 도시의 경제활동에 막대한 영향을 미친다.
- 2) 이러한 다양한 극한 환경에 의한 사회기반시설물은 대부분 비선형 거동을 나타내며, 지반조건, 지하구조물, 지하 공동구, 인근의 구조물 등과 같이 서로 상호작용하는 도시 시스템의 일부분이라도 제대로 모델링하고 이해가 필요하며, 이를 바탕으로, 도시의 재난 발생 후 복원력 (resilience)을 이해하는 것에 이용할 수 있다.
- 3) 사회기반시설의 복원력을 이해하고 평가하기 위해, 다양한 연구가 진행되어 왔으며, 특히 철근콘크리트 거동, 극한환경에서의 거동, 구조물의 내진성능에 초점을 맞추어 국내외 기술 개발 현황을 분석하였다.
- 4) 이러한 관련 기술을 바탕으로, ‘레질리언트 도시/사회기반시설’ 워크숍에서 최신 관련 기술을 소개하며, 이 내용은 3장과 6장에 요약하였다.

### 나. 철근콘크리트 구조

- 1) 캐나다의 토론토 대학은 전통적으로 사회기반구조물 관련 분야에 전문화된 세계적인 기술력 및 실험시설을 보유하고 있음. 예를 들어 철근콘크리트 구조의 전단거동의 연구결과물로 수정압축장이론 (modified compression field theory)를 제안하여 현재 전 세계 여러 국가의 설계 규정에 들어가 있다.
- 2) 철근의 부식으로 인해 발생하는 내부 응력이 발생하며, 철근에 발생하는 부식의 정도에 따라서 철근의 부피가 2배에서 6배까지 증가하며, 이는 구조물의 복원력에 막대한 영향을 미침
- 3) 철근 콘크리트 단면 Thick-wall Cylinder model (Han et al, 2014)에 의하면, 부식으로 인해 철근과 콘크리트 사이에 층이 생기고 방사형 균열 이 발생하며, 균열과 부피 팽창에 따라 발생하는 내부 응력이 발생함.
- 4) 원자력 발전소에 대한 군사적 위협이 증가함하고, 강한 미사일 충격에 대비한 설계 기준이 필요하기에, RC Slab의 충격 하중 해석이 전 세계적으로 널리 진행되고 있음.

- 5) 경험적 방식에 의한 철근콘크리트 구조물의 설계기준이 존재하지만 복잡한 구조물에 적용이 어려움. 따라서 다양한 비선형 해석기법이 제시되고 있음.
- 6) 원자력 발전소 내부의 철근 콘크리트 구조물들 그중에서 특히 방사선 차폐막, 반응로 기초와 지지대의 경우 반응로 주변에서 위치하기에 장기간에 걸쳐서 많은 양의 중성자를 조사받게 된다. 철근 콘크리트에 가해진 중성자의 조사량이  $1.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$  이하인 경우에는 재료거동의 변화가 적지만, 그 이상일 경우 중성자조사에 의해 콘크리트 재료의 물성값은 변화하며, 이는 구조거동의 변화를 나타낸다 (Le Pape et al, 2015).
- 7) 상대적으로 넓은 균열 과정 영역을 가지는 콘크리트의 특성상 균열을 예측하는 것이 어려움이 있기 때문에, 철근콘크리트 부재의 전단거동을 예측하는데 많은 어려움이 있음.
- 8) 토론토 대학은 철근 콘크리트 구조물의 파괴 거동 뿐만 아니라 균열 위치, 균열 폭 등을 거시적인 관점에서 예측할 수 있는 해석 프로그램 (VecTor suite, Response2000)등을 개발하여 세계의 연구자들에 공개하고 있음.

## 다. 극한하중 거동

- 1) 폭발, 충돌 및 지진과 같은 극한 환경에서의 구조물의 비선형 거동을 해석하고 분석하는 기법을 개발하였으며, 실험과 해석결과의 비교검증을 실시하고 있음.
- 2) 극한하중 하 콘크리트 재료의 비선형 균열진행 과정을 정확하고 효과적으로 해석할 수 있는 구성방정식을 최근 개발하였으며, 해당 구성방정식은 현재 상용 구조해석 프로그램인 ABAQUS에 모듈로 들어갈 계획임.
- 3) 지진과 같은 극한하중에 의하여 손상된 구조물의 해석방법 및 손상구조물을 보수/보강한 구조물의 거동분석 기법에 관한 연구를 진행하고 있음.
- 4) 새로운 내진 구조 시스템, 방폭 구조 시스템등을 발명하여 실제 구조물에 적용하고 있다. 예를 들면 구조물의 접합부 설계를 간단히 하고, 내진 성능을 확보하기 위하여 접합부를 주물 제작할 수 있는 기술력을 개발하여, 벤처 기업을 설립하였다.
- 5) 다양한 응력조건을 가하기 위한 60개의 유압가력기로 구성된 Shell Element Tester를 제작하여 사용 중에 있음. 이밖에도 360 GPM 용량의 유압펌프, 수십 기의 가압장치, 특화된 실험 장비 (panel element tester, column testing frame, multi-axial shake table, uni-axial shake table, blast generator) 등을 7명의 정규 테크니션이 운영하고 있다.

## 라. 구조물의 내진성능 및 복원력 평가

- 1) 지진에 의해 손상된 구조물은 단기간 내로 여진 및 다른 종류의 위험에 노출될 가능성이 크며, 인명 피해를 방지하기 위해 1차 지진이 발생 한 후 구조물에 즉각적인 보강이 필요함. 이를 위해 연속적인 지진하에서 손상된 필로티형 콘크리트 빌딩의 내진 성능 보강 효과에 대해 확률적으로 평가한 사례가 있음 (Shin et al., 2014).
- 2) 현대사회의 사회기반시설이 가지는 복잡성이 증가하고 있으며, 사회의 복원력을 신뢰성있는 평가가 필요함. 이에 따라 샘플링 기반의 신뢰성 분석이 찾아지는 추세이며, 최근 Kullback-Leibler cross entropy를 최소화 하는 적응적 중요도 샘플링 기법이 제시됨 (CE-AIS) (Kurtz and Song, 2013). 고차원의 신뢰성 분석을 위하여 von Mises-Fisher mixture model을 사용한 CE-AIS가 제시됨 (Wang and Song, 2016).

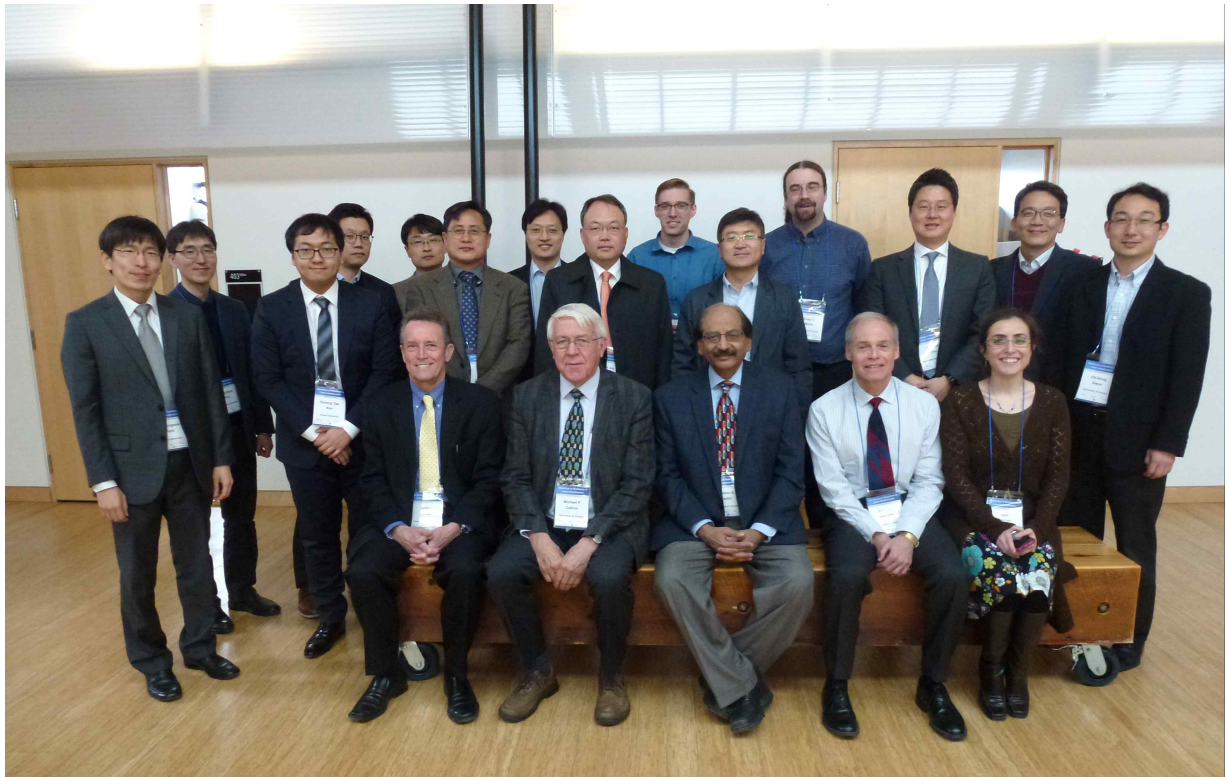
## 마. University of Toronto의 연구 동향

- 1) 캐나다의 토론토 대학은 전통적으로 사회기반구조물 관련 분야에 전문화된 세계적인 기술력 및 실험시설을 보유하고 있음. 예를 들어 철근콘크리트 구조의 전단거동의 연구결과물로 수정압축장이론 (modified compression field theory)를 제안하여 현재 전 세계 여러 국가의 설계 규정에 들어가 있다.
- 2) Center for Resilience of Critical Infrastructure를 설립하여 Structural Resilience, Infrastructure Resilience, and Control System의 3가지 분야에 대한 연구를 진행하고 있음.
- 3) 철근 콘크리트 구조물의 파괴 거동 뿐만 아니라 균열 위치, 균열 폭 등을 거시적인 관점에서 예측할 수 있는 해석 프로그램 (VecTor suite, Response2000) 등을 개발하여 세계의 연구자들에 공개하고 있다.
- 4) 새로운 내진 구조 시스템, 방폭 구조 시스템등을 발명하여 실제 구조물에 적용하고 있다. 예를 들면 구조물의 접합부 설계를 간단히 하고, 내진 성능을 확보하기 위하여 접합부를 주물 제작할 수 있는 기술력을 개발하여, 벤처 기업을 설립하였다.
- 5) 주요 실험 장치로 다양한 응력조건을 가하기 위한 60개의 유압가력기로 구성된 Shell Element Tester를 제작하여 사용 중에 있음. 이밖에도 360 GPM 용량의 유압펌프, 수집기의 가압장치, 특화된 실험 장비 (panel element tester, column testing frame, multi-axial shake table, uni-axial shake table, blast generator) 등을 7명의 정규 테크니션이 운영하고 있다.

## 제3장 행사 수행 내용 및 성과

### 가. 행사 수행 내용

- 1) 연세대학교와 University of Toronto를 비롯하여, 서울대학교, 서울시립대학교, 한국원자력연구원, 한양대학교 이상 6개 기관이 참여하였음.
- 2) 국제공동 워크숍에 총 19명이 참석하여, 18개의 연구 성과 발표를 통하여 연구 교류를 수행하였음.



- 3) 특히, 철근콘크리트 분야의 대가인 Collinns교수가 키노트발표로 워크숍기간 동안 참여하였음.
- 4) 워크숍 참여교수들이 모두모여 향후 공동연구 방향에 관하여 논의하였으며, 인적/물적 교류의 의사를 상호 확인 하였음.

- 5) University of Totronto대학의 실험시설을 방문하여, 구조물의 휨/전단시험, 하이브리드실험기법 등 우수한 실험시설을 방문하여 견학하였음.



그림 2 철근콘크리트 부재의 전단실험 장비

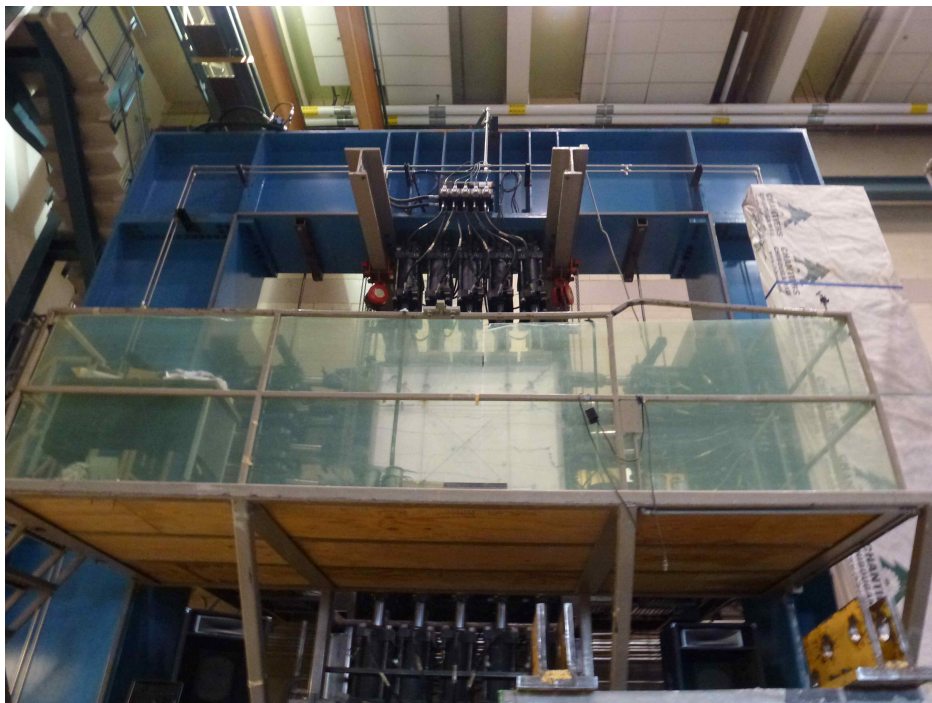


그림 3 철근콘크리트 부재의 6축 하이브리드 시험장치

## 나. 연구 성과

- 1) 기후 및 환경변화, 극한 환경에 의한 사회기반시설물은 대부분 비선형 거동을 나타내며, 극한환경 조건에 따라 구조물의 사용성 및 안전성 문제를 야기한다.
- 2) 지반조건 및 인근구조물 등과의 상호작용으로 도시 시스템 전체에 영향을 줄 수 있으며, 도시 재난 발생 후 구조물의 복원력 (resilience)를 평가가 필요하다.
- 3) 사회기반시설의 복원력을 이해하고 평가하기 위해, 본 과제를 통하여 국내에서 수행된 연구결과를 ㉠ 콘크리트 부재거동, ㉡ 콘크리트 재료해석, ㉢ 극한하중, ㉣ 신뢰성 해석분야로 나누어 결과를 다음과 같이 요약하였다.

### 4) 콘크리트 부재거동

- 가) 철근의 부식에 따른 철근 콘크리트 부착력 변화를 살펴보았으며, 균열사이에서 발생하는 내부 응력을 다음과 같이 구하고 평균화 할 수 있다.

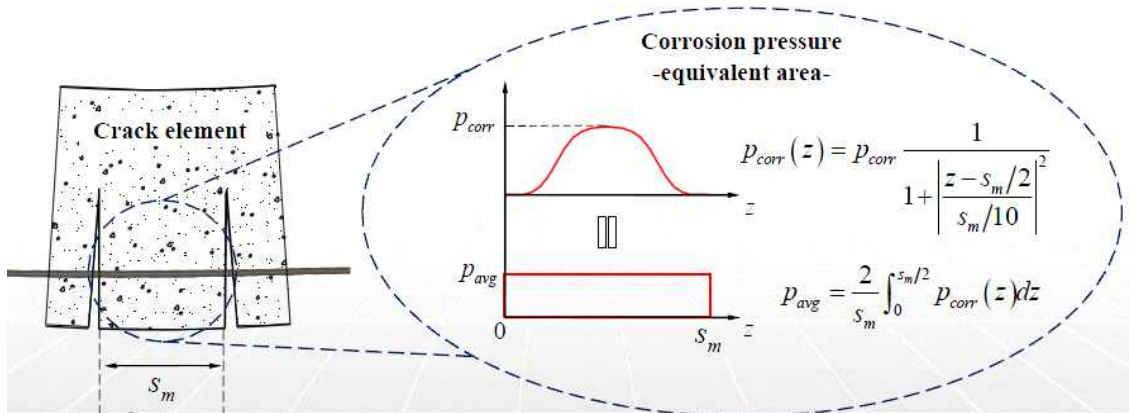


그림 4 부식으로 인한 휨 부재에 발생한 균열과 내부 응력

- 나) 제시한 식을 바탕으로 철근의 부식 정도에 따라서 철근과 콘크리트의 부착력이 변화를 계산하였으며, 실험데이터와 계산식과의 관계를 아래 그림으로 요약하였다. 부식이 2~3% 진행되면 부착력이 다소 증가하지만 그 이후에는 급격히 감소함을 알 수 있다.

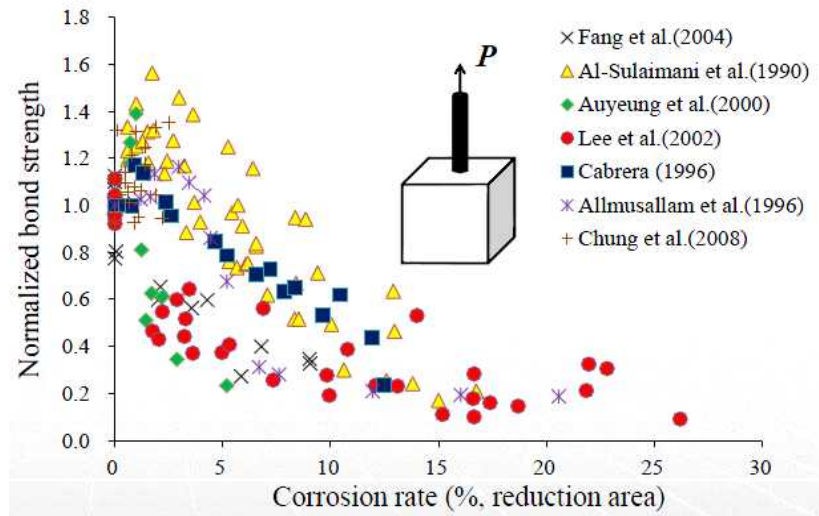


그림 5 부식률에 따른 철근-콘크리트 부착력 실험 데이터

다) 중성자 조사에 따른 철근 콘크리트 부재 거동의 변화를 살펴보았으며, 중성자 조사에 의해 구조물의 ductility 및 toughness가 감소함을 알 수 있다. 이는 기둥부재의 반복하중 발생 시 하중 변위곡선을 통해 명확히 알 수 있다.

그림 6 중성자 조사에 따른 기둥부재의 반복하중 하에서의  
거동변화

라) 충격 후 큰 화재로부터 콘크리트 부재의 손상 및 파손 메커니즘을 규명하기 위하여 양방향 PSC 구조의 화재로 손상 및 파손 패턴의 해석 평가를 목적해석과 실험을 병행하였다.

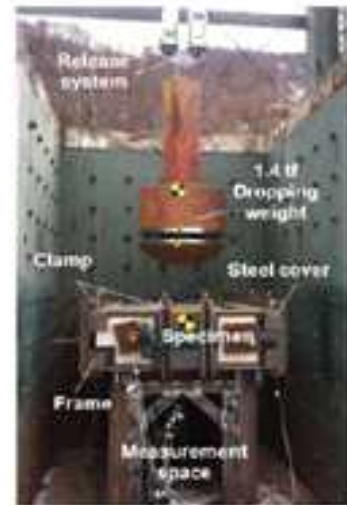
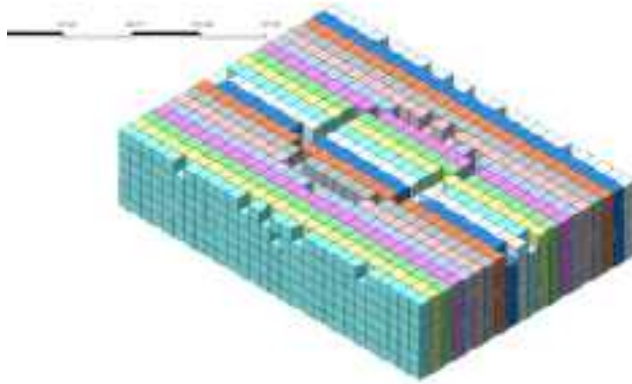


그림 7 충격 실험에 대한 해석 모델과 실험 모델

마) 해석 결과와 실험 결과를 비교하면 충격에 의한 콘크리트의 표면 파단의 적용이 가능한 것으로 간주되며, 콘크리트 강도와 PS의 인장력 변화는 분석 평가에 따른 보강 비율의 변화보다 내화 성능에 대한 영향에 대해 더 큰 영향을 주는 것을 확인하였음.

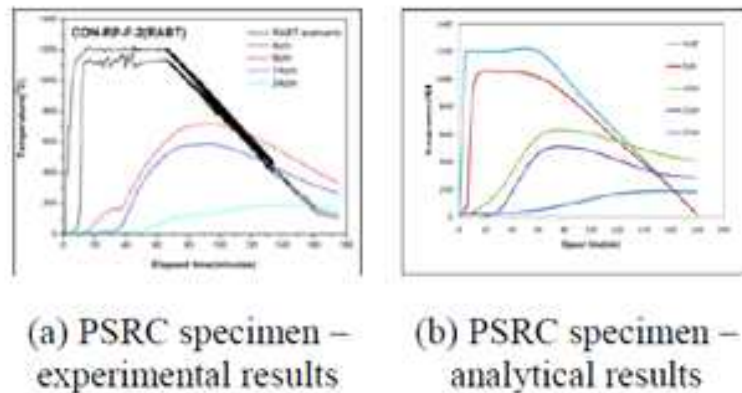


그림 8 RC와 PSRC 시편의 온도 변화

## 5) 콘크리트 재료 해석

가) 무작위 공극 분포를 가지는 가상 시멘트 시편을 표현하기 위해 추상 최적화 처리 과정과 저차 확률 함수 방법 도입하여 재료의 불확실성을 보완할 수 있었음. 이를 통해 재료의 미세구조를 고려한 재료 물성치를 도출할 수 있음.

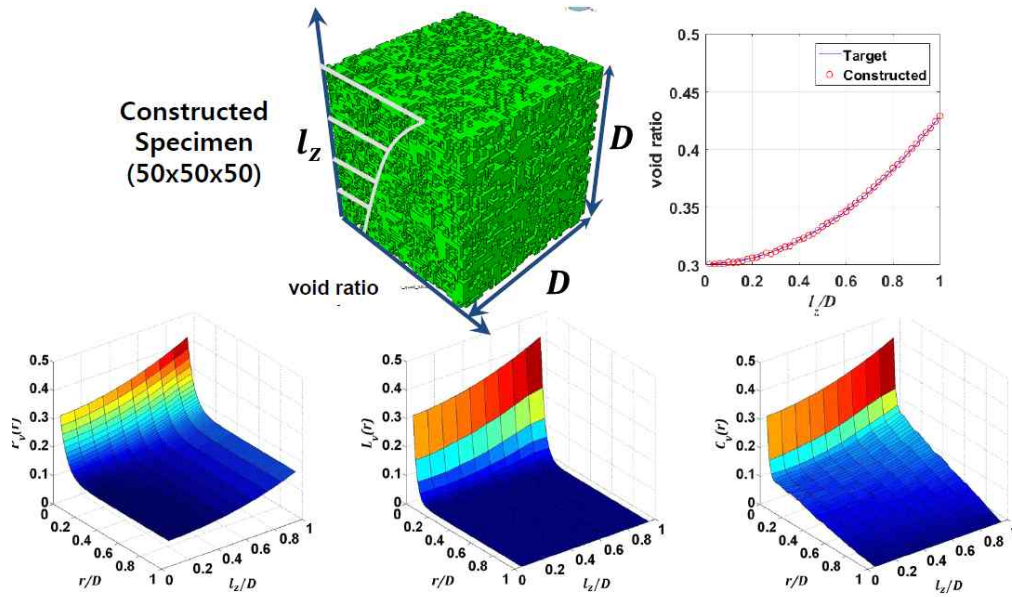


그림 9 2차 곡률 분포에 따른 가상 샘플

- 나) 콘크리트 균열 거동을 분석하기 위해 접착 영역 모델을 도입하였으며, 이는 일반적으로 4가지 단계 (탄성영역, 균열시작, 균열진행, 균열생성)로 구성 됨 (Roesler et al., 2007).
- 다) 균열해석 기법을 이용하여 콘크리트재료의 균열해석을 실시하여 실험 결과 (Schlangen, 1933)와 비교 분석하였다. 이중 선형 연화 모델 사용 (Bilinear Softening Model)하여 해석을 수행한 결과와 실험 결과의 균열 경로 및 하중-CMOD 곡선이 거의 일치하는 것을 확인하였음.

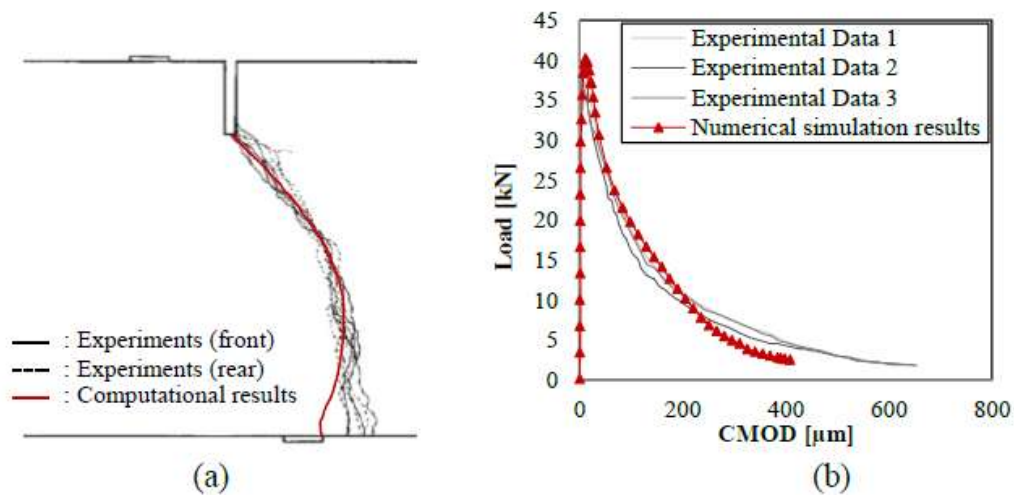


그림 10 (a) 균열 경로, (b) 하중-CMOD 곡선

- 라) 검증된 모델을 사용하여 골재가 콘크리트의 동적 균열에 미치는 영향을 조사하였으며, 균열 선단 근처 영역에서는 골재를 적응적으로 삽입하였다. 골재와 모르타르 사이의 부착강도가 강한 경우와 약한 경우에 대한 해석 수행하였다. 강한 경계면을

가지는 경우 더 많은 미세균열이 관찰되었으며, 더 많은 에너지가 소산되는 것을 확인하였음.

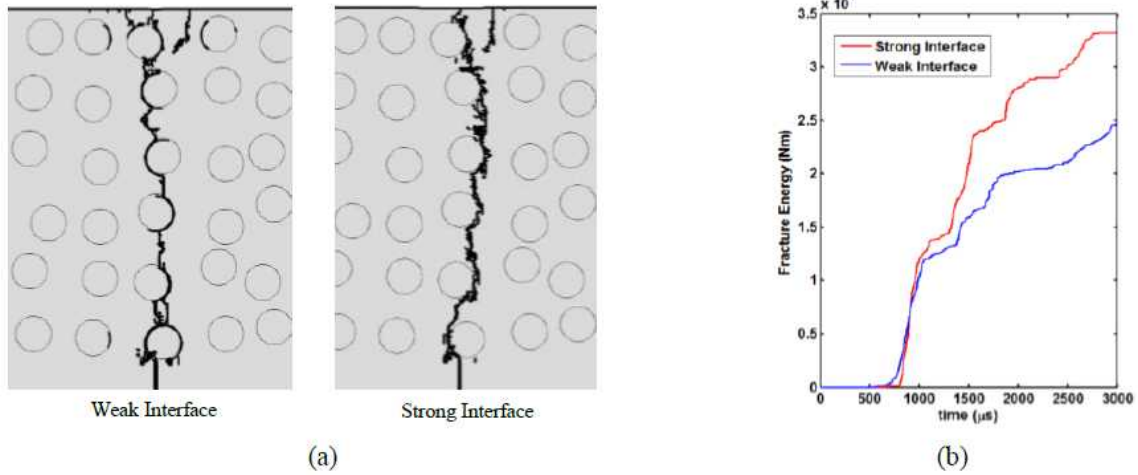


그림 11 (a) 균열 경로; (b) 소산된 에너지

#### 6) 극한 하중

가) 대표적인 극한하중 중의 하나인 지진 하중에 의한 터널의 붕괴 과정을 식별하게 위해 2D 비탄성 프레임 해석을 하여, 철근 콘크리트에 소성 hinge가 발생하는 패턴을 관측하였다.

나) 비탄성 해석 결과를 근거로 손상 지수에 따른 세 가지 파괴 단계를 제안하였으며, 파괴 단계는 소성 hinge의 개수로 정의 하였다. 손상 지수는 공칭 모멘트 분에 탄성 모멘트의 비율로 파괴 단계에서의 손상 지수는 1.0 ~ 2.5로 기존의 연구보다 값이 낮음을 확인하였다.

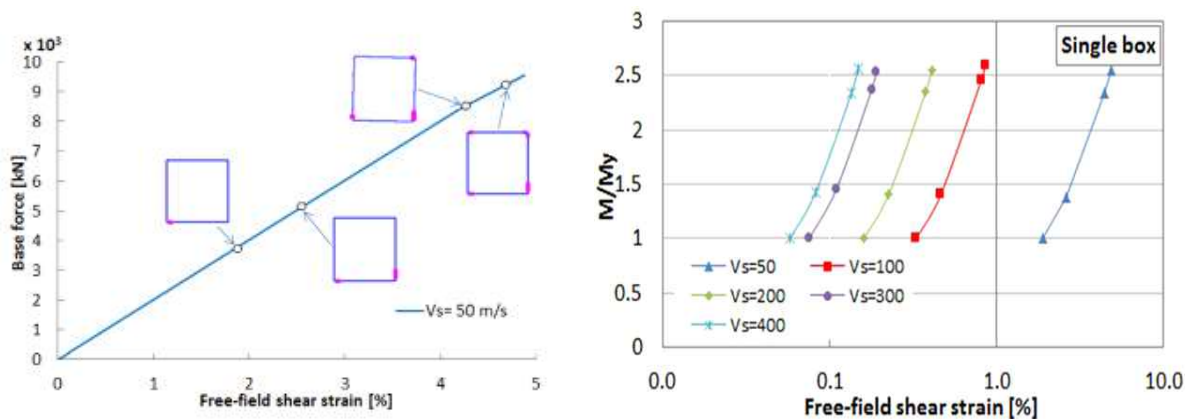


그림 12 (a) 소성 hinges 발생 분포( $V_s = 50$ m/s) (b) 자유계의 전단 변형률에 따른 손상 지수

다) 연속적인 지진하에서 손상된 필로티형 콘크리트 빌딩의 내진 성능 보강 효과에 대해 확률적으로 평가하기 위해, 수치해석 기법을 도입하였음. 시간 종속적인 요소를

사용하여, 1차 지진시에는 요소가 활성화되지 않다가 1차 지진 후 보강되는 것으로 가정하였음.

라) 연속적인 지진의 영향을 정량화하였으며, 필로티 타입의 콘크리트 빌딩 보강 개선 효과 확인하였다. 제시된 기법을 사용하여 손상 조건에 따른 효과적인 보강 전략 제시 가능함을 확인하였음.

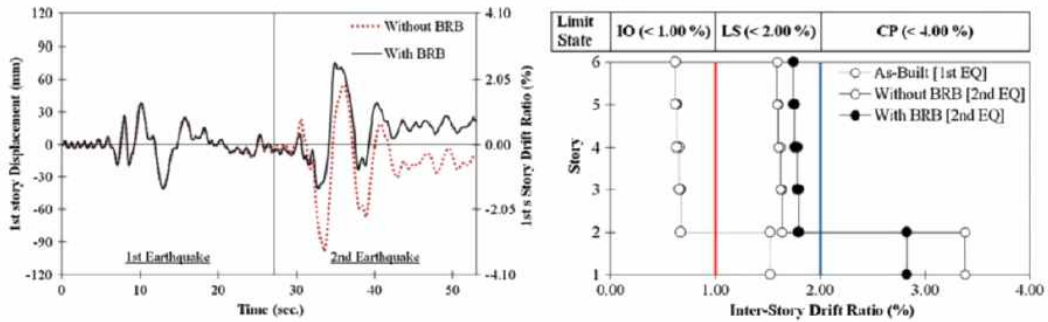


그림 13 부재의 변위-시간 이력 및 1차 지진과 2차 지진 사이의 층간 변위 비율

마) 바람에 의한 교량에서의 차량 안전성 평가를 위해, 16 방향의 풍향과 차량과 교량의 특성등 여러 가지 세밀한 요인들을 고려하여 확률적 절차의 제안하였음.

바) 최종적으로 교통량 통제가 필요한 날짜의 수, 한계 풍속을 넘어서는 최대 풍속이 발생하는 날짜의 수를 트윈 강 갑판 거더와 사장교에 실질적으로 적용하여 평가하였음.

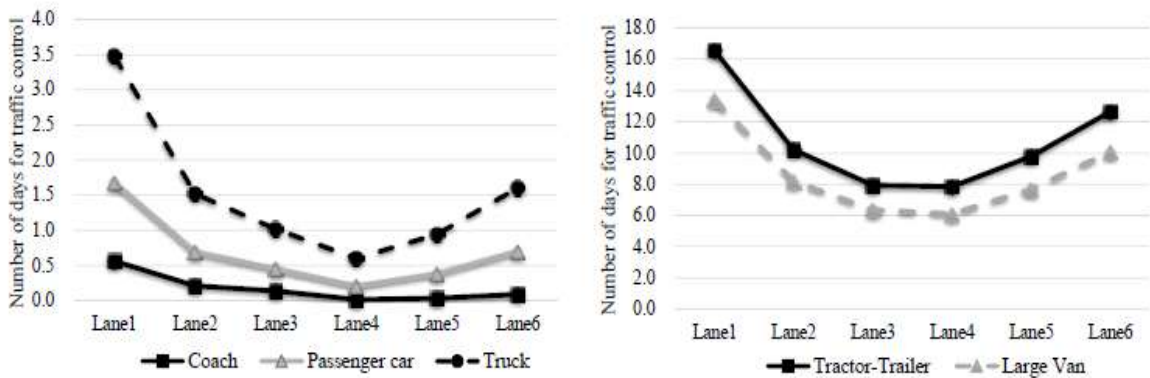


그림 14 5가지 차량 종류에 대해서 차선에 따른 교통량 통제 날짜 일수  
(차량 속도 = 50km/h)

## 7) 사회기반시설 신뢰성 분석

가) Cross-entropy-based 적응적 중요도 샘플링을 하였으며, 밀도함수  $f(x;u)$ 를 가지는 함수  $H(x)$ 의 적분과 대체 가능한 밀도 함수  $h(x;v)$ 를 사용한 효율적인 몬테 카를로 시뮬레이션을 수행하였다.

나) 이를 바탕으로 교통 신뢰성분석에서 CE-AIS의 활용이 가능하며, 복잡한 사회기반

시설 교통망의 정확한 신뢰성분석은 매우 중요한 연구 분야임.

다) 시뮬레이션 기반의 접근방법은 복잡한 문제를 풀 때 광범위하게 이용되지만, 계산 비용 감소를 위해 효율적인 샘플링 기법이 필요하기 때문에, CE-AIS를 사용하면 185,207개의 샘플이 47,896개로 효과적으로 감소하는 것을 확인하였음.

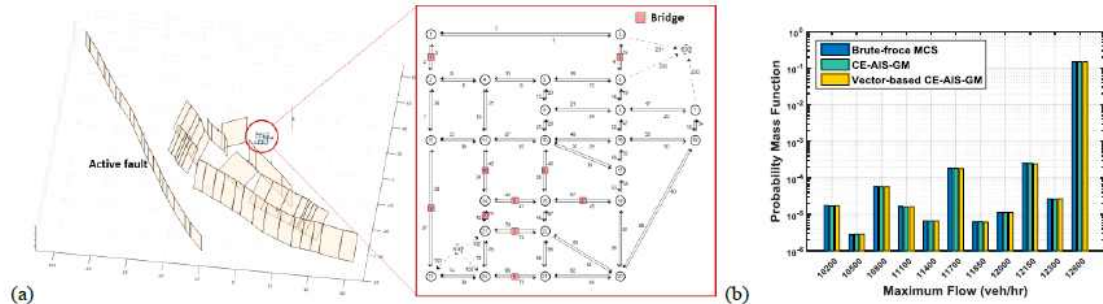


그림 15 교통망 예제: (a) 네트워크 구조와 지진에 의한 결함; (b) 3가지 샘플링 기법에 의한 지진 후 최대 통행량 분포

## 다. 전문가 활용실적 및 향후 연구방향

1) 외부전문가를 초빙하여 레질리언트 사회기반시설 관련 강연 및 자문을 구하였으며, 그 실적은 다음과 같다.

가) Enabling smart city resilience, 윤형철 교수 (Michigan State University)

나) Aftershock Vulnerability Assessment of Damaged Reinforced Concrete Buildings in California, 전종수 박사 (한양대학교)

다) Dynamic Response of Corrugated Sandwich Plates under Shock-Tube Loading, 김정호 교수 (University of Connecticut)

라) The Next Generation of Structural Engineering, 최명성 교수 (동국대학교)

마) 형상기억합금을 이용하여 효과적으로 손상된 철근콘크리트 구조 부재보강 기법 (Seismic Retrofit and Repair of Reinforced Concrete Bridge Columns Using Shape Memory Alloy Spirals), 신무철 교수 (Western New England University)

바) Resilience of Urban Infrastructure, 신명수 교수 (UNIST)

2) 현재 진행된 연구 분야에서 나아가, 전문가의 자문을 바탕으로 추가적으로 수행할 수 있는 연구방향은 아래와 같다.

가) 사회기반시설의 복원력을 평가를 위해 구조물의 보수/보강 및 유지관리에서 나아가, 복원력을 향상시키기 위한 대책 또는 도시 전체 시스템에 대한 분야로 확대할 수 있음.

나) 기후변화 등의 환경변화에 대한 건전도/안정성 평가 또한 향후 필요한 연구 분야라 판단함.

## 라. 관련 주요 회의록 내용

### 1) 워크숍 준비: 2016.02.18 (박경수, 권오성, 김형태) 연세대학교

- 가) 국제공동 세미나의 일정은 2016년 4월 24일 ~ 26일 으로 계획한다.
- 나) 세미나 장소는 캐나다 토론토 대학내부에서 진행하기로 하고 장소에 대해서 권오성 교수가 사전준비를 담당한다.
- 다) ‘레질리언스’에 대한 전문가들의 에게 참석여부를 타진한다.
- 라)

### 2) 워크숍 준비: 2016.03.13 (박경수, 권오성, 김형태) 연세대학교

- 가) 한국에서 11명 토론토 대학에서 8명이 세미나에 참석하여 이에 대한 세부적인 일정과 순서, 준비사항을 결정하였다.
- 나) 숙박장소는 토론토 대학 근처의 다운타운에 있는 코트야드 바이 메리어트로 하였다.
- 다) 한국측 인원의 이동에 대해서는 박경수 교수가 동행하며, 개별적인인원에 대해서는 숙박장소와 이동 경로에 대한 안내 메일을 보내고 국외로 이동 중에 발생 가능한 위험에 대한 안전대책으로 여행자 보험을 가입한다.
- 라) 캐나다 토론토에서 숙소와 세미나 장소에 대한 안내는 권오성 교수가 담당하고, 세미나가 진행되는 장소의 행사 날짜동안의 기상예보에 대해서 미리 안내를 하여 불편사항과 위험에 대해 대처한다.
- 마) 논문에 대한 책자와 세미나 내용에 대한 안내 소책자의 제작은 박경수 교수와 김형태 연구원이 담당하여 세미나 당일 안내한다.

### 3) 워크숍 회의: 2016.04.25. (박경수 외 10인, 권오성 외 7인)

- 가) 토론토 대학의 구조물의 휨/전단시험, 하이브리드실험기법 등 우수한 실험시설에서 진행되는 실험과 최신기법을 이용한 수치해석모델의 해석의 상호 공동연구의 방안에 대해서 논의를 진행함
- 나) 폭발실험의 경우 실험 장소의 마련과 협의에 많은 어려움이 있어서 실제 실험을 진행하기에는 어려움이 있다. Jeff Packer 교수가 진행한 Blast and Impact Loading에 대한 실험기법과 장소에 대한 실험 연구 협약 가능성에 대해서 논의를 하였다.
- 다) 한국에서 진행되는 여러 장학프로그램 (ex : brain pool)등을 활용한 전문가들의 연구 교류방안과 대학원생의 scholar ship 프로그램과 박사과정생의 진학을 통한 새로운 신진 연구인력의 유입과 공동연구의 파이프라인을 구축하는 방법들에 대해서 논의를 하였다.
- 라) 한국에서 2017년 완공 예정인 Extreme Performance Testing Center 에 대한 소개

와 향후 연구 시스템의 구축에 대해서 이야기를 하였다.

4) 워크숍 회의: 2016.04.26. (박경수 외 10인, 권오성 외 7인)

- 가) 지진이나 강풍과 같은 자연재해로 인해서 발생하는 극한 상황에서의 구조물의 해석에 대한 최신 연구 경향과 방법에 대해서 이야기를 하였다.
- 나) 최신 해석 기법의 경우 기존에 방법들에 실험적인 데이터를 사용하거나 상호 연결을 통한 hybrid 기법을 적용하는 사례가 늘어나고 있다. 이에 대한 최신 연구 내용과 국제적인 경향성에 대해서 논의를 진행하였다.
- 다) 새로운 연구의 방향성으로 제시된 '레질리언트'에 대해서 이야기를 나누고 이를 위해서는 여러 분야에서의 복합적인 hybrid 연구의 필요성과 늘어날 것으로 생각된다. 이에 따라 상호 협력과 공동 연구의 기반을 늘리는 방법에 대해서 이야기를 하였다.
- 라) 전문연구인력으로써 순수연구뿐만 아니라 기술발전과 다양화를 통한 사회기여 방안에 대해서 논의를 하였다.
- 마) 이번 세미나에 참석한 6개 기관(연세대학교, 서울대학교, 서울시립대학교, 한양대학교, 한국원자력연구원, University of Toronto)간의 최신 연구의 뿐만 아니라 최근 진행하는 연구의 방향성에 대해서 개별적으로 이야기를 나누면서 국제 공동연구 협약에 대해서 이야기를 나누었다.

바)

5) 공동연구 회의: 2016.05.23. (박경수, 권태현, 김형태, 김대진, 권오성)

- 가) 국제 공동 세미나 과정에서 진행된 최신 기술과 연구의 교류에 의한 연구 진행 상황에 대해서 이야기를 나누었다.
- 나) 구조물이 극한상태에서 내부에 발생하는 국부적인 소성을 해석하기 위한 방법으로 GFEM 모델을 적용였다. 철근 콘크리트 구조물은 소성의 발생지점의 특징과 발생지점에서 변형률이 gradation이 크다. 이를 해결하기 위한 enrichment function의 제한에 대해서 연구가 진행되었다.
- 다) 구조물의 전체에 대한 해석을 진행하기 위해서 높은 cost가 요구되어진다. 또한 joint 부분에서의 해석에서는 아직까지 연구되어야 할 부분이 많다. 이를 보완하기 위해서 전체 구조물의 일부분에 대한 실험 결과를 통해서 얻은 데이터를 이용해서 수채해석 모델의 보완하는 hybrid 기법에 대해서 연구가 진행되었다.
- 라) 연세대학교와 토론토 대학간에 독자적으로 구축된 레질리언스 관련 센터의 연구 협력에 대해서 이야기를 나누었다.

6) 공동연구 회의: 2016.07.08. (박경수, 권태현, 김형태, 권오성)

- 가) 국제 공동 세미나 과정에서 진행된 최신 기술과 연구의 교류에 의한 연구 진행 상황에 대해서 이야기를 나누었다.
- 나) 원전구조물의 경우에는 높은 방사선에 노출된다는 점에 있어서 실험이 어렵고 제

한적이다. 원자력 연구소에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 실험 방법과 계측방법에 대해서 연구를 진행하고 있으며, 이미지를 이용한 변위 측정 방법에 대한 연구를 진행하고 있다. 원자력 연구소에서 진행되는 실험 결과를 이용한 수치해석 방법에 대해서 이야기를 나누었다.

다) 원전구조물은 일반적인 구조물과는 다르게 구조물이 장기간 동안 높은 방사선에 노출되며, 또한 구조물의 안전성에 대해서 높은 주의가 요구된다. 이에 원전구조물은 다른 구조물들 보다 레질리언스에 따른 평가가 시급한 상태에 있다. 이에 따라서 장기간에 걸쳐 높은 방사선에 노출이 되었을 때의 영향에 대한 연구를 진행하였고 이를 통해 얻은 결과를 토대로 원전구조물에 대한 새로운 관리지침에 대한 해석의 필요성에 대해서 이야기를 하였다.

라) 연세대학교, 한국원자력연구원, 토론토 대학간에 원전구조물의 레질리언스에 대한 공동연구 개발에 대해서 이야기를 나누었다.

## 제4장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

### 가. 목표달성도

- 1) 연세대학교와 University of Toronto를 비롯하여, 서울대학교, 서울시립대학교, 한국원자력연구원, 한양대학교 이상 6개 기관이 참여하여 당초 계획인 5개 기관에서 그 범위를 확대하였음.
- 2) 국제공동 워크숍에 총 19명이 참석하여, 18개의 연구 성과 발표를 통하여 연구 교류를 수행하였음.
- 3) 이는 당초 계획인 14명 참석, 13개 발표보다 더 많은 연구자가 참여하여 교류를 확대하였음. 특히, 철콘콘크리트 분야의 대가인 Collinns교수가 키노트발표로 워크숍기간 동안 참여하였음.

|                            | 계 획                                                                 | 수 행 내 용                                                                      |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 참여기관                       | 6개 (연세대학교, 서울대학교, 한국원자력연구원, 한양대학교, 한국원자력연구원, University of Toronto) | 7개 (연세대학교, 서울대학교, 서울시립대학교, 한국원자력연구원, 한양대학교, 한국원자력연구원, University of Toronto) |
| 대한민국 참석인원                  | 8명                                                                  | 11 명                                                                         |
| University of Toronto 참석인원 | 6명                                                                  | 8명                                                                           |
| 발표 개수                      | 13개                                                                 | 18개                                                                          |

### 나. 관련 분야 기여도

- 1) 도시/사회기반시설의 레질리언스를 평가하기 위한 최신 기술 교류
  - 가) 연세대학교와 University of Toronto는 독자적으로 레질리언스 관련 센터를 구축하여 연구를 수행 중에 있었으며, 이번 세미나를 통해 사회기반시설 레질리언스 평가에 관한 최신 기술을 공유하였다.
  - 나) 재료단계부터 구조물을 거쳐 도시 시스템에 이르는 레질리언스를 평가하기 위한 최신 실험과 해석방법들을 공유하였다.

다) 지진, 기후변화, 중성자조사 등 극한상황에서의 사회기반시설 레질리언스 평가에 관한 최근의 연구 성과들에 대해 공유하였다.

## 2) 국제 협력이 필요한 기술 수요 및 관련 정보를 파악하여 향후 공동 연구기반을 구축

가) 향후 공동연구를 수행할 수 있는 양국 레질리언스 관련 전문가들의 인적 네트워크를 구축하였다.

나) 극한상태 구조특성 실험시설

- (1) 일반적으로 지진, 폭발 등 극한상태에 있는 구조물에 대한 실험을 수행하는 것은 매우 어렵다.
- (2) 본 실험 시설은 극한상태에 노출된 구조물에 특화된 시설로써 양국의 높은 수준의 실험 수요를 충족해줄 수 있다.
- (3) 다양한 실험장비를 하나의 시설에 구축하여 연구 집중효과를 기대할 수 있다.

다) 도시 재난재해복원력 융합연구센터

- (1) 재난재해를 예측, 대비, 감시, 대응 그리고 복구에 이르는 넓은 범위에 대한 사회기반시설 레질리언스 관련 연구를 수행한다.
- (2) 건설환경/IT/인문/사회에 이르는 복합적인 연구를 수행하여 사회기반시설의 레질리언스를 극대화 하는 것을 목표로 한다.
- (3) 레질리언스 관련 다양한 전문가들 사이의 인적 네트워크를 구축함으로써 차세대 융합고급인력을 양성할 수 있다.

## 3) 기대효과

가) 세미나를 통해 획득한 최신 해석 기법 및 실험 방법을 바탕으로 사회기반시설의 레질리언스를 극대화하여 인적, 물적 피해를 사전에 예방하고 대응하는 능력을 증진시킬 수 있다.

나) 국제 공동세미나를 통해 획득한 최신 기술 동향을 바탕으로 국제 협력 연구프로젝트를 통해 원천기술을 확보할 수 있다.

다) 원천기술을 바탕으로 레질리언스 관련 시장을 선점하여 해외 시장 진출의 기반을 마련할 수 있다.

라) 양국간의 공동 연구기반을 구축함으로써 멀티 스케일 융합연구에 대한 기회를 얻을 수 있다.

## 제5장 행사 성과의 활용계획

### 가. 협동 연구

- 1) 각자의 연구 분야를 융합함으로써 새로운 연구 분야를 확장한다.
- 2) 최신 기술, 모델 그리고 해석 방법을 공유하여 새로운 발견이 보다 용이하게 한다.
- 3) 기술발전과 다양화를 통해서 일반대중에게의 기여도를 넓힌다.



그림 16 Resilience of Urban Infrastructure 세미나 관련 기관

### 나. Partnership Program을 통한 연구 정보의 교류

- 1) 이번 세미나에 참석한 전문가들의 국제적 공동연구의 시스템화를 구축한다.
- 2) 최신 기술과 해석방법의 공유를 넘어서 연구의 방향성과 목표에 대한 공유를 추구 하고자 한다.
- 3) 적극적인 상호 협력과 교류를 통해서 연세대학교와 University of Toronto 양국 간의 공동연구의 기회를 늘리고 상호 발전을 위한 동력원을 얻는다.
- 4) 정보의 교류와 협력이 보다 자유롭게 이루어 질수 있는 상황을 통해 세미나를 통해서 구성된 양국의 레질리언스 관련 전문가들의 인적 네트워크를 보다 유기적으로 강화하여 네트워크를 넓혀나간다.
- 5) 공동 연구 기반의 확대를 통한 멀티 스케일 융합연구에 대한 가능성을 늘린다.

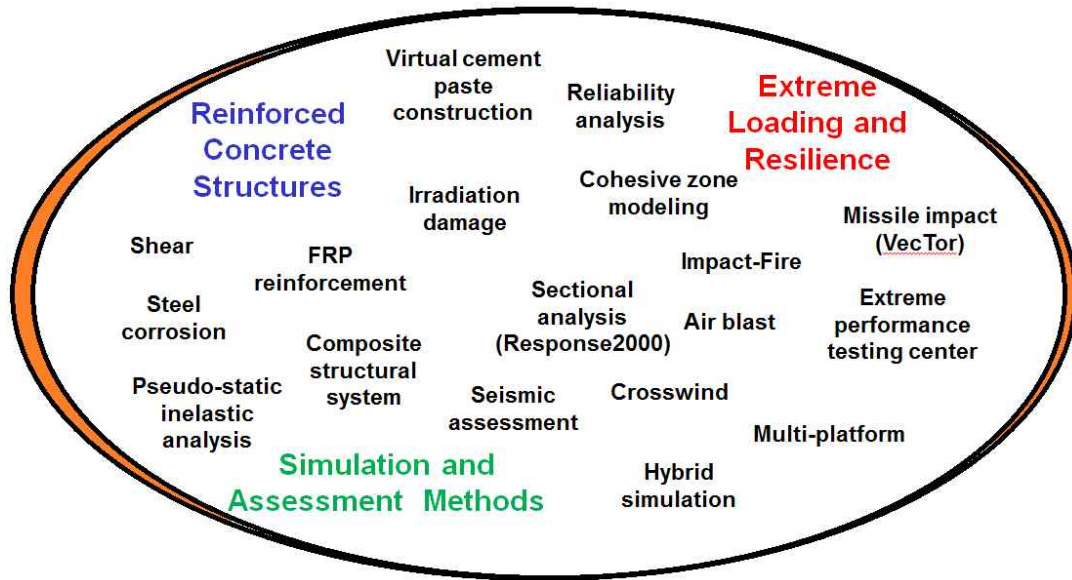


그림 17 공유되는 최신 기술과 실험 그리고 모델링 방법 등에 관한 연구 주제들

#### 다. 인적 자원의 교류 방안

- 1) Brain pool program(korea)을 통한 교수의 연구 교류.
- 2) 문화 교류를 통한 인적 네트워크의 강화와 교류의 확대.
- 3) 공동 연구를 통한 새로운 아이디어의 확보를 통한 상호 발전
- 4) 자유로운 교류를 통한 새로운 연구 분야와 관계의 개척
- 5) MITACS Globalink (Canada)을 통한 학부생 장학 프로그램
- 6) 장학 프로그램을 통해 학생들에게 새로운 기회를 부여.
- 7) 상호 졸업생들을 통한 미래 교류의 발판을 확대.
- 8) 학생을 통한 보다 유기적인 상호 연구에 대한 교류를 모색한다.



## 라. 국제적 자금 투자

- 1) 캐나다와 한국의 자금기관의 공동 투자 프로젝트를 통한 새로운 연구 가능성의 확보
- 2) 기술 교류를 통해 사회와 일반 대중에 대한 기여도를 넓히고, 연구에 대한 투자를 활성화 한다.
- 3) 국경을 넘은 국제 연구 투자에 대한 가능성을 확보

## 마. 신진연구자 및 학생간 교류 확대

- 1) 현재 연세대학교 BK21 Plus사업단에서 수행하고 있는 ‘레질리언트 창의인재 양성 사업단’과 연계하여 대학원생 및 신진연구자의 장기연수를 활성화 할 예정이다.
- 2) 연세대학교 토목환경공학과 차원에서 Resilient Infrastructure Technology (RIT) 포럼을 구성하여 일반 대학원생 및 신진연구자들에게 레질리언트 관련 기술을 확산할 예정이다.

## 바. 구체적 계획 및 실적

- 1) 연세대학교, 한국원자력연구원, University of Toronto가 국제공동연구과제를 발굴하여 국제공동연구 제안서를 한국에너지기술평가원에 제출하였음. (2016년 5월 24일)
- 2) University of Toronto 대학의 주관연구책임자가 한국을 방문하여 공동연구를 위한 학술 교류를 실시하였음. (2016년 6월 ~ 8월)
- 3) 연세대학교, 한국원자력연구원, University of Toronto이 함께 추가적인 학술 교류 발표회를 한국에서 가졌음. (2016년 7월 8일)
- 4) 국제연구 교류프로그램인 Brain Pool에 University of Toronto 대학의 주관연구책임자인 권오성 교수가 선정되어 2017년 1월에 한국 방문예정임.
- 5) 지속적인 연구교류를 위하여 한국에서 주최하는 학회에서 학술교류를 실시할 예정이다.

## 제6장 행사 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

### 가. FRP를 이용한 지속 가능한 사회기반 시설

- 1) 유리 보강 섬유나 탄소 보강 섬유를 부착한 콘크리트를 원조구조물에 적용시키기 위한 연구를 수행하였다.
- 2) FRP 보강구조물의 적용가능성을 보기 위해, ㉠ 내부 FRP 부착 콘크리트의 하중실험, ㉡ 외부 FRP 부착 콘크리트의 하중실험, ㉢ FRP 부착한 빔, 슬래브, 기둥 시편 실험, ㉣ 원전 구조물 대상 콘크리트의 알칼리-실리카 반응 실험의 실험을 수행하였다.
- 3) 내부 FRP 부착 콘크리트 구조물 실험을 하기위해, FRP, 스테럽 등을 빔, 슬래브, 기둥에 각각 내부 부착하였음.
- 4) 실물 크기 콘크리트 부재 사용하여 다양한 하중 조합 실험을 실시하였고, FRP 부착 콘크리트 대상 해석 모델 개발 하였음. (Johnson and Sheikh, 2013; Vint and Sheikh, 2015; Tavassoli et al., 2015)
- 5) GFRP가 부착된 콘크리트 시편이 철근 콘크리트 시편보다 낮은 강성을 갖음. 즉, 연성거동을 나타내고, GFRP가 부착된 기둥 시편의 경우 높은 연성과 에너지 소산용량을 가짐.

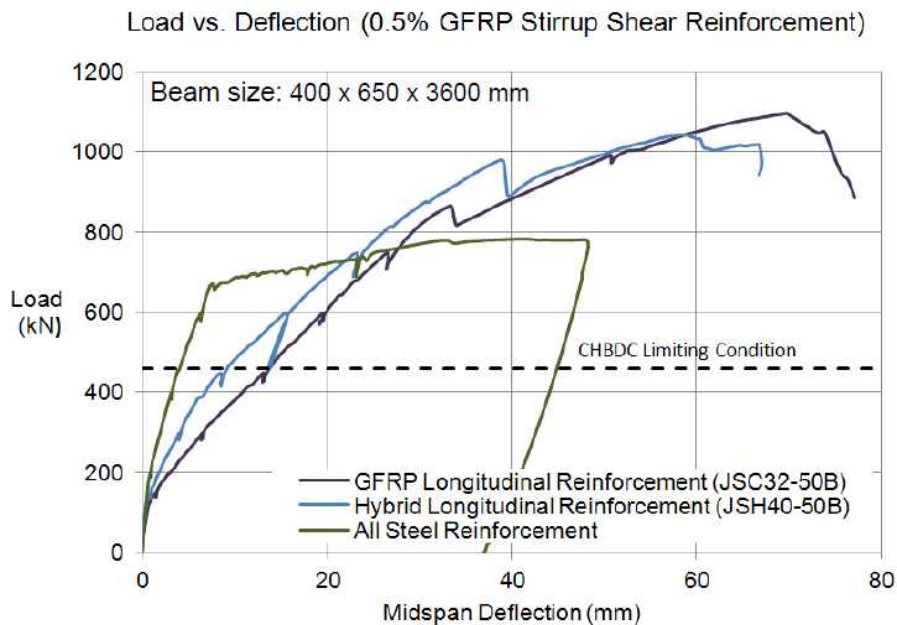


그림 19 철근콘크리트와 GFRP 부착 콘크리트의 거동 비교

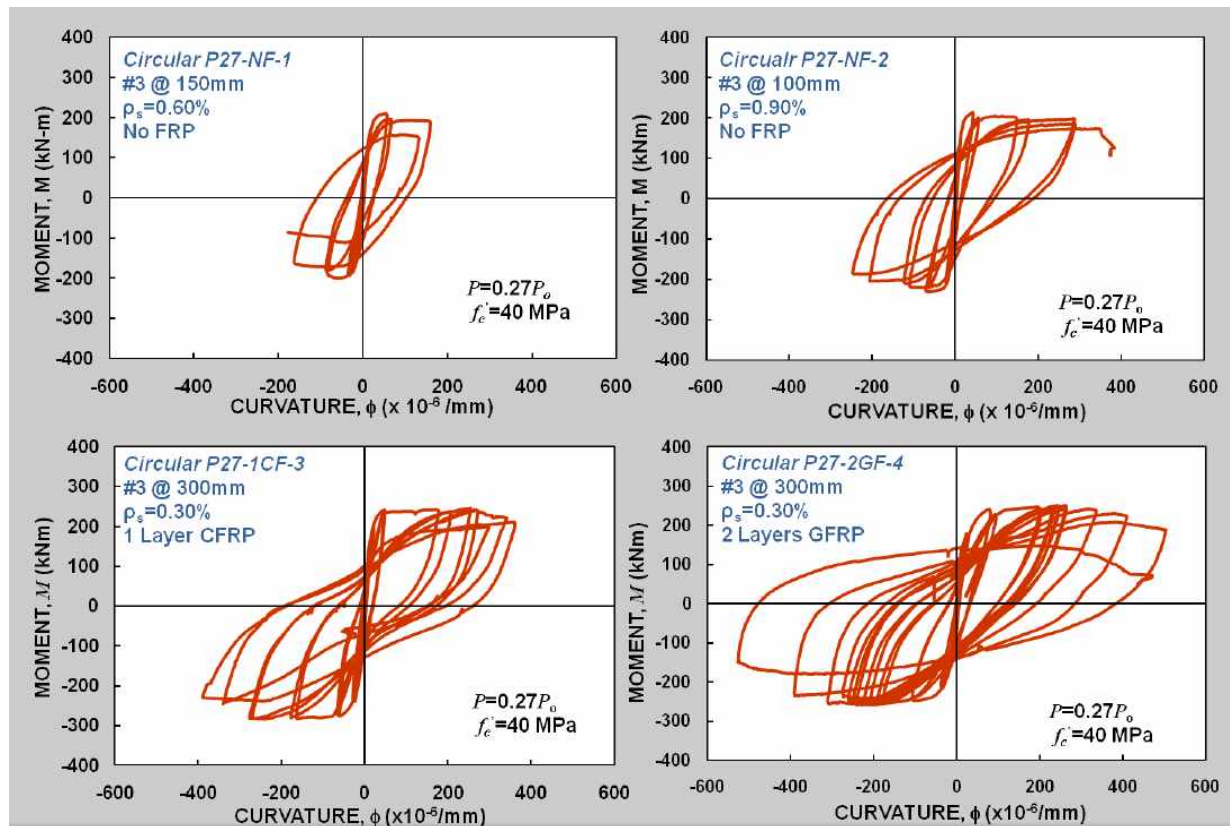


그림 20 GFRP 부착 기둥 시편의 거동 비교

- 6) 이러한 연구결과를 바탕으로, 콘크리트에 FRP 부착 시, 철근콘크리트보다 부식을 감소 및 부식년수를 6년 이하로 줄일 수 있음을 확인하였음.
- 7) FRP 부착 콘크리트의 경우 일반 철근콘크리트에 비하여 높은 에너지 소산 용량을 가짐.

## Recent Research on Sustainable Infrastructure

Workshop on Resilience of Urban Infrastructure  
April 24 ~ 26, 2016

Shamim A. Sheikh  
Professor



Leslie Street Bridge  
on Highway 401

## Structures Retrofitted with External FRP



## Specimens Tested



Emaco  
Repaired

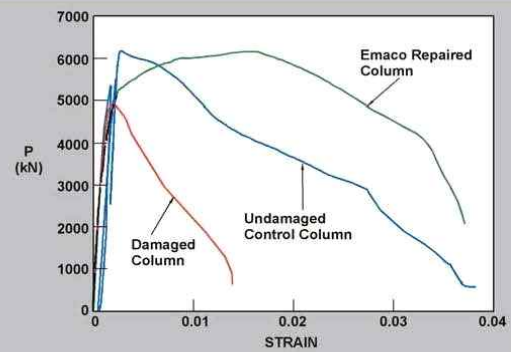
K  
Repaired

Expansive  
Repaired

Damaged  
Control

Undamaged  
Control

## Behaviour of Column Specimens Under Axial Load



## Catastrophes in Severe Earthquakes

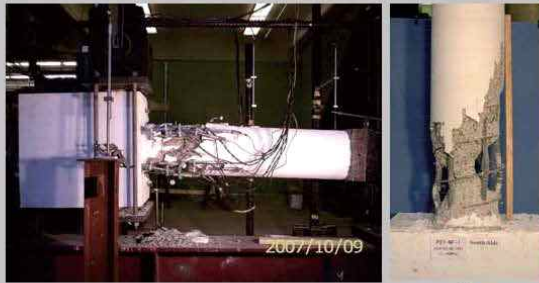


## Column and Test Frame

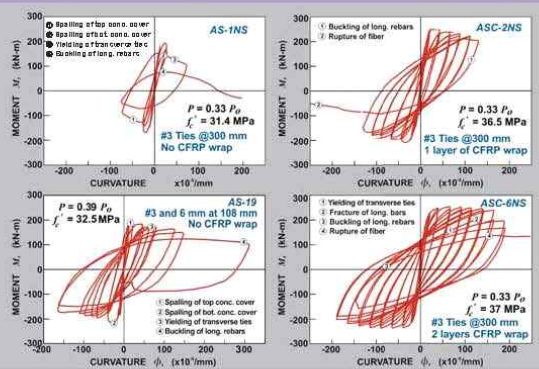


## Columns Tested under Simulated Earthquake Load

### Steel-Confining Specimen

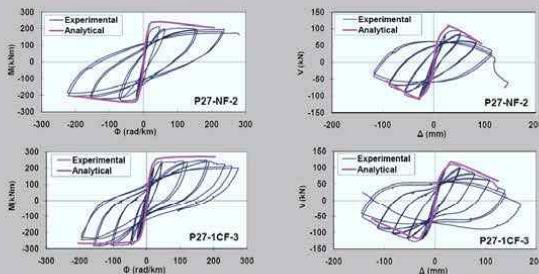


### Response of Square Columns under $P \approx 0.33 P_o$



### Analytical Prediction to Seismic Behavior of Columns

#### Specimens subjected to $P/P_o = 0.27$



### Proposed Design Equations for Lateral FRP Confinement in Columns

- Factor  $Y_p$  reflects the influence of axial load of column:

$$Y_p = 1 + 13 \left( \frac{P}{P_o} \right)^5$$

where:

$P$  = specified axial load on column;

$P_o = 0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}$ , nominal axial load capacity of columns.

- Factor  $Y_\phi$  accounts for the effect of section ductility demand

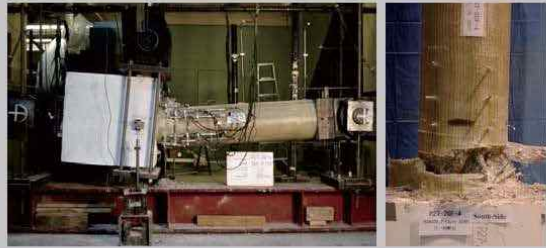
$$Y_\phi = \frac{\mu_{\phi, in}^{1.13}}{29}$$

where:

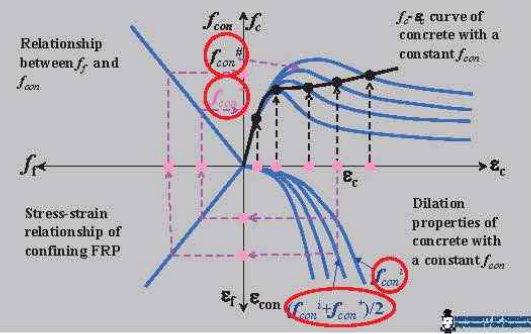
$\mu_{\phi, in} = \mu_{\phi} \cdot \mu_{\phi, org}$ , increase in curvature ductility due to lateral FRP-confinement;

## Columns Tested under Simulated Earthquake Load

### FRP-Retrofitted Specimen



### Constitutive Model for FRP-Confined Concrete



### Relationship between FRP confinement and Seismic Performance of Columns

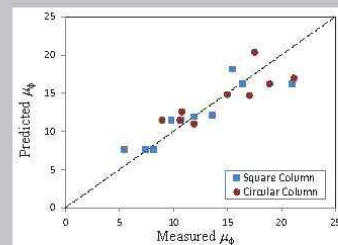
$$t_j \cdot f_{Fu} = \alpha \cdot f'_c \cdot D \cdot Y_p \cdot Y_\phi \quad (1)$$

where:

- $t_j$  = thickness of one layer of FRP jacket (mm)
- $f_{Fu}$  = specified ultimate tensile strength of FRP jacket (MPa)
- $\alpha$  = constant to account for columns cross-section, taken as 0.21 for circular columns and 0.10 for square columns
- $f'_c$  = specified compressive strength of concrete (MPa)
- $D$  = diameter of circular columns or dimension in the loading direction of rectangular columns (mm)

### Design for Lateral FRP Confinement

#### Verification of Proposed Equation (1)



## CSA S806-12 Design Equations for Lateral FRP Confinement

- Required thickness,  $t_j$ , of FRP jackets to confine columns:

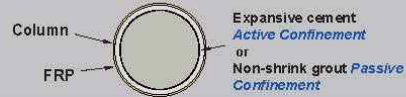
$$t_j = \beta \cdot Y_p \cdot D \cdot \frac{f'_c}{f_{Fu}} \quad (12-2)$$

where:

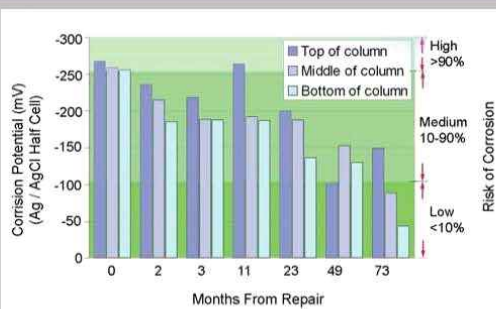
- $\beta$  = constant for different columns cross-section, taken as:  
0.05 for circular columns in ductile moment resisting frames, MRF;  
0.025 for circular columns in moderately-ductile MRF;  
0.12 for rectangular columns in ductile MRF;  
0.06 for rectangular columns in moderately-ductile MRF.



## Sustainability of Repair of Highway 401 Bridge



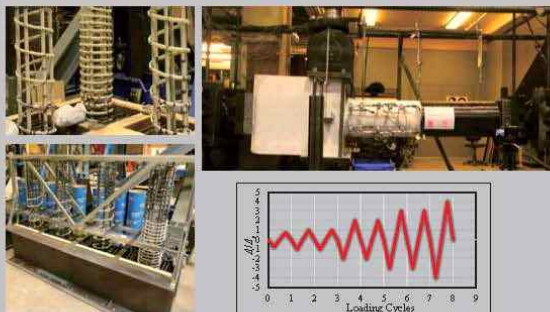
## Corrosion Potential of GFRP Repaired Column: Leslie St. Bridge, Toronto



## Structures Internally Reinforced with FRP

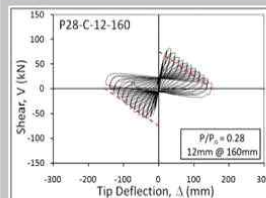


## Columns Internally reinforced with GFRP

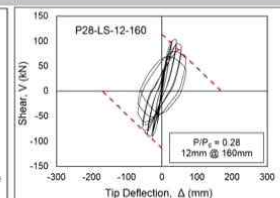


## GFRP- and steel-reinforced Columns

### GFRP Longitudinal Bars and GFRP spirals



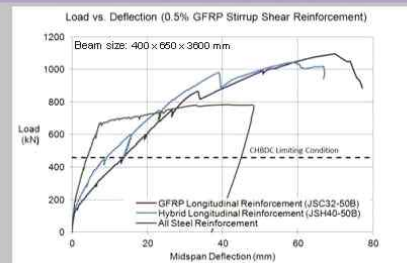
### Steel Longitudinal Bars and GFRP spirals



## Beams Internally reinforced with GFRP



## Beams Internally reinforced with GFRP



| Beam                                        | Steel Reinforcement | GFRP Only | Hybrid Steel + GFRP |
|---------------------------------------------|---------------------|-----------|---------------------|
| Deflection (mm) at CHBDC Limiting Condition | 3.73                | 13.20     | 8.02                |



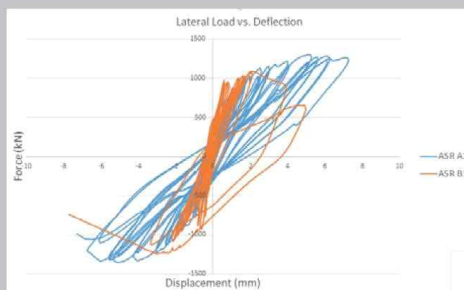
## Response of Concrete Structures damaged by Alkali Silica Reaction



## Shear Walls damaged by ASR



## Effect of Age on the Performance of walls affected by ASR

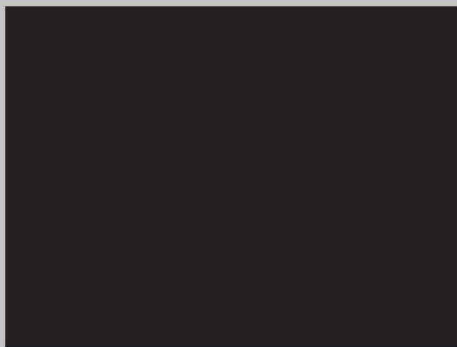


## The Question being pursued for an answer

Can better durability and sustainability of reinforced concrete structures be achieved with FRP without sacrificing performance



## The Question being pursued for an answer?



## Retrofit of Shear-Critical Frames with FRP



## Frame During Phase A Testing



Phase A: Initial Condition

Phase A: Final Condition



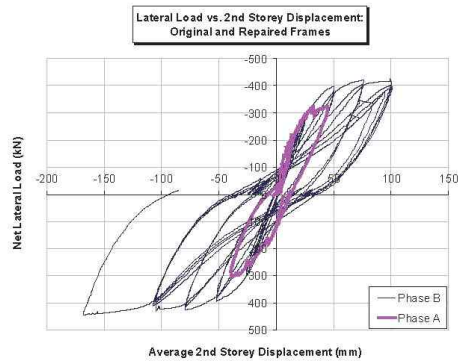
## Phase A: Frame at Peak Reverse Load Stage



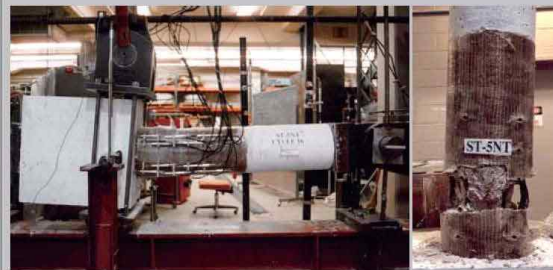
Phase B: Initial Condition

Phase B: Final Condition

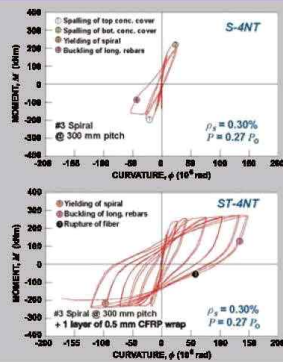




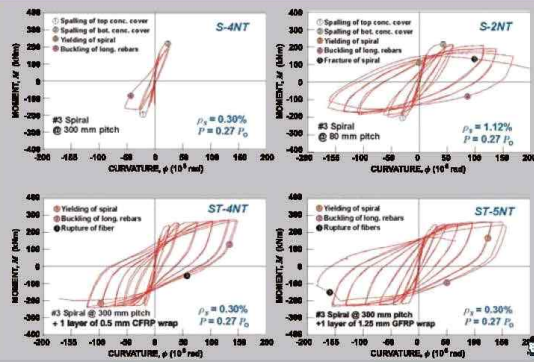
### Columns Tested under Combined Loading



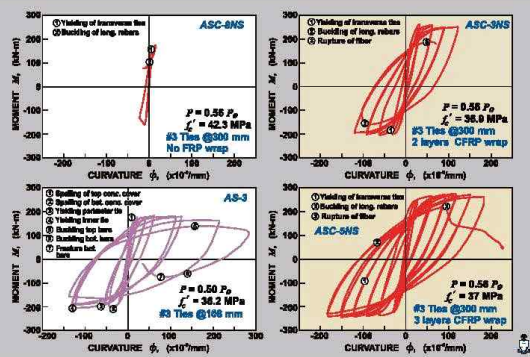
### Columns Tested under Combined Loading



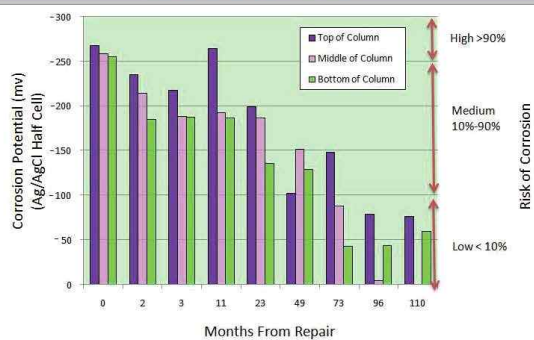
### Columns Tested under Combined Loading (cont'd)



### Columns Tested under Combined Loading (cont'd)

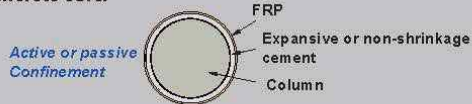


### Corrosion Potential of GFRP Repaired Column: Leslie St. Bridge, Toronto



### Concluding Remarks

- The system consisting of concrete core, expansive cement cover and GFRP wrap worked successfully as expected, providing active confinement to the entire concrete core.



- Corrosion rate in columns decreased with the addition of FRP wraps. The risk of corrosion dropped from high to intermediate or low over six years.



### Concluding Remarks

- Condition Monitoring of structures provides the most valuable information about their safety and performance, and for the selection of retrofitting schemes.
- Transportation (as well as urban structures) retrofitted with FRP have performed flawlessly over the past twelve years.
- Data from the field is insufficient for the corroboration of analytical models and design procedures.



### Concluding Remarks

- Information on durability and long-term performance of structures is severely limited. Innovations are needed to turn the field structures into affordable laboratories that would provide the much-needed information in areas such as
  - behaviour under various environmental exposures while subjected to service loads;
  - effects of impact loads and high strain rates; and
  - fatigue behaviour under various environmental conditions.



### Repair Options

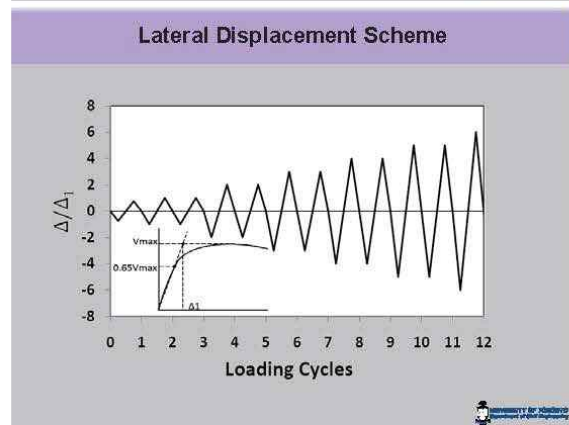
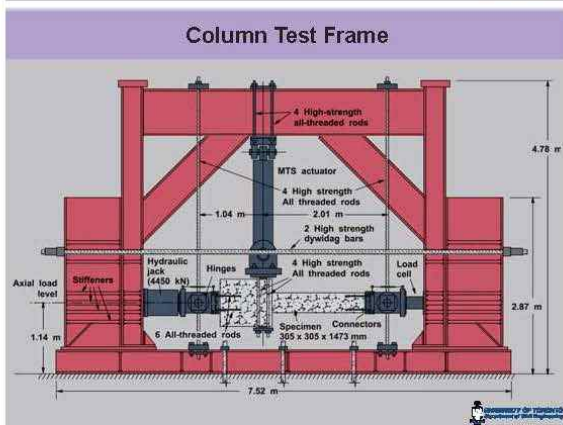
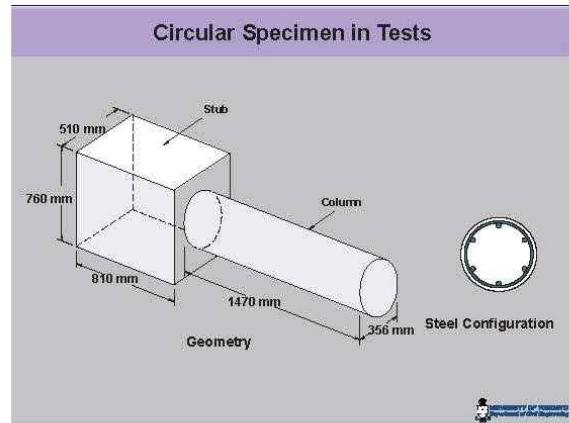
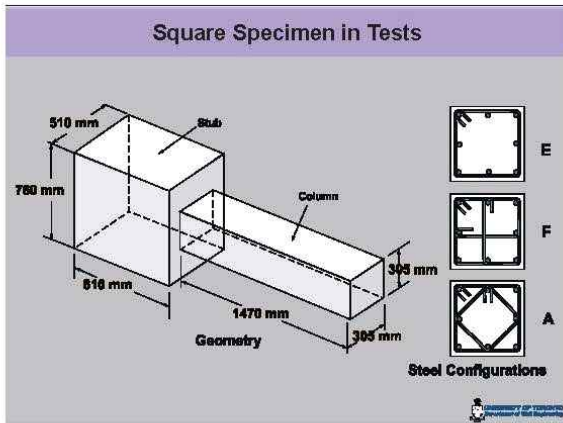
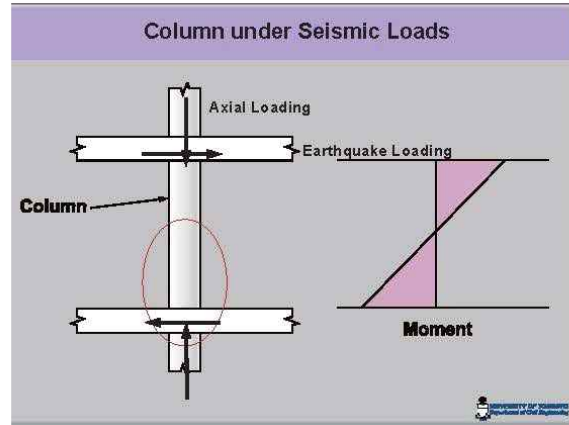
- Traditional Repair
  - Provide temporary support for the bridge
  - Remove contaminated concrete
  - Replace corroded steel
  - Rebuild columns



### Repair Options

- Non-traditional Repair
  - Remove loose concrete
  - Rebuild columns to their original shape using special grouting materials
  - Wrap columns with GFRP to provide required lateral reinforcement

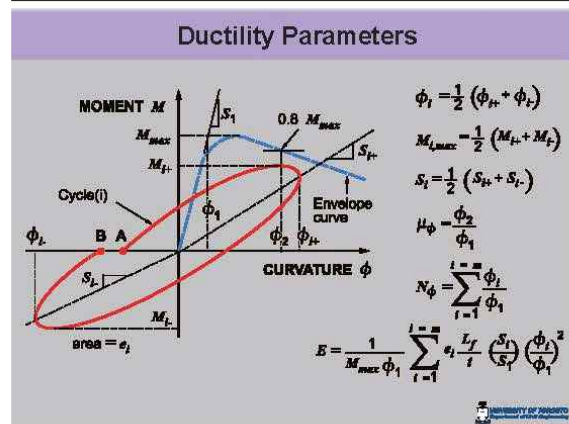




### Summary of Column Seismic Tests in U of T

Under Cyclic Lateral Loading and Constant Axial Loading

| No.   | Researcher                     | Specimen Number | Column Shape | Cross-Section Size (mm) | Column Height (mm) | Concrete $f'_c$ (MPa) | Lateral Confinement |
|-------|--------------------------------|-----------------|--------------|-------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|
| 1     | Sheikh and Khourey (1993)      | 6               | Square       | 305 x 305               | 1473               | 31.3-33.2             | Steel               |
| 2     | Sheikh et al. (1994)           | 4               | Square       | 305 x 305               | 1473-2438          | 53.6-59.1             | Steel               |
| 3     | Bayrak and Sheikh (1995, 1998) | 8               | Square       | 305 x 305               | 1473               | 56.0-112.0            | Steel               |
| 4     | Yan and Sheikh (1998)          | 16              | Rectangular  | 250 x 350               | 1473               | 39.2-44.8             | FRP, Steel          |
| 5     | Memon and Sheikh (2001)        | 12              | Circular     | 356                     | 1473               | 42.5-44.2             | CFRP, Steel         |
| 6     | Jacobucci and Sheikh (2002)    | 8               | Square       | 305 x 305               | 1473               | 26.8-27.2             | CFRP, Steel         |
| 7     | Ghosh and Sheikh (2002)        | 6               | Square       | 305 x 305               | 1473               | 28.5                  | GFRP, Steel         |
| 8     | Jaraid and Sheikh (2002)       | 6               | Square       | 305 x 305               | 1473               | 40                    | FRP, Steel          |
| 9     | Lin (2013)                     | 15              | Circular     | 356                     | 1473               | 40                    | FRP, Steel          |
| Total |                                | 101             |              |                         |                    |                       |                     |



## Seismic Tests of FRP-Confined Columns

### Experimental Results of FRP-confined Square

| Columns                 | Researcher | Specimen | $f'_c$ (MPa) | Layers & type of FRP | Actual load level $P/P_u$ | $f_{l,exp}$ (MPa) | $f_{l,conf}$ (MPa) | $\mu$ | $\mu_s$ | $\delta$ (%) | $M_{max}$ (kNm) | $V_{max}$ (kN) |
|-------------------------|------------|----------|--------------|----------------------|---------------------------|-------------------|--------------------|-------|---------|--------------|-----------------|----------------|
| Iacobucci et al. (2003) |            | AS-1NS*  | 31.4         | 0                    | 0.33                      | 0                 | 0                  | 3.2   | 2.5     | 1.9          | 181             | 97             |
|                         |            | ASC-2NS  | 36.5         | 1CFRP                | 0.33                      | 1.21              | 0.033              | 10.7  | 4.8     | 3.5          | 229             | 109            |
|                         |            | ASC-3NS  | 36.9         | 2CFRP                | 0.56                      | 2.42              | 0.066              | 13.6  | 5.7     | 3.2          | 230             | 108            |
|                         |            | ASC-4NS  | 36.9         | 1CFRP                | 0.56                      | 1.21              | 0.033              | 7.4   | 5.0     | 2.7          | 217             | 104            |
|                         |            | ASC-5NS  | 37.0         | 3CFRP                | 0.56                      | 3.63              | 0.098              | 21.0  | 8.3     | 3.9          | 258             | 110            |
|                         |            | ASC-6NS  | 37.0         | 2CFRP                | 0.33                      | 2.42              | 0.065              | 15.4  | 6.0     | 4.6          | 244             | 110            |
| Mamon and Sheikh (2005) |            | AS-1NSS* | 42.4         | 0                    | 0.57                      | 0                 | 0                  | 2.3   | 2.1     | 1.1          | 160             | 88             |
|                         |            | ASG-2NSS | 42.5         | 20FRP                | 0.34                      | 1.42              | 0.033              | 9.8   | 4.0     | 2.7          | 214             | 103            |
|                         |            | ASG-3NSS | 42.7         | 40FRP                | 0.57                      | 2.83              | 0.066              | 11.9  | 5.1     | 2.7          | 220             | 92             |
|                         |            | ASG-4NSS | 43.3         | 20FRP                | 0.56                      | 1.42              | 0.033              | 5.4   | 3.2     | 1.8          | 196             | 91             |
|                         |            | ASG-5NSS | 43.7         | 10FRP                | 0.33                      | 0.71              | 0.016              | 8.2   | 3.4     | 2.8          | 218             | 105            |
|                         |            | ASG-6NSS | 44.2         | 60FRP                | 0.55                      | 4.25              | 0.096              | 16.4  | 6.3     | 3.4          | 272             | 107            |

University of Manitoba  
Department of Civil Engineering

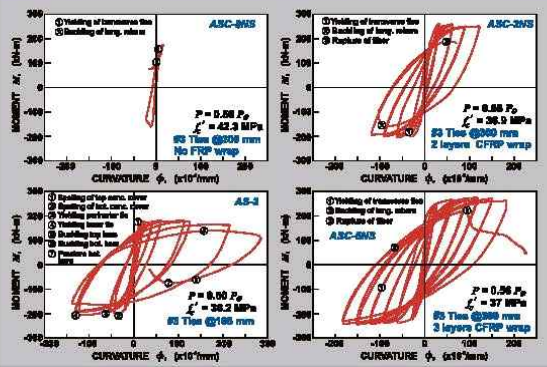
## Seismic Tests of FRP-Confined Columns

### Experimental Results of FRP-confined Circular

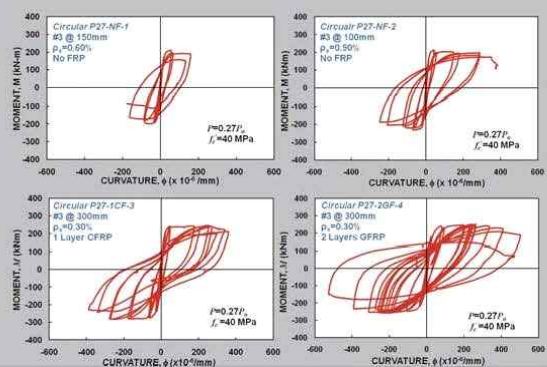
| Columns               | Researcher | Specimen   | $f'_c$ (MPa) | Layers & type of FRP | Actual load level $P/P_u$ | $f_{l,exp}$ (MPa) | $f_{l,conf}$ (MPa) | $\mu$ | $\mu_s$ | $\delta$ (%) | $M_{max}$ (kNm) | $V_{max}$ (kN) |
|-----------------------|------------|------------|--------------|----------------------|---------------------------|-------------------|--------------------|-------|---------|--------------|-----------------|----------------|
| Sheikh and Yan (2002) |            | S-3NT*     | 39.2         | 0                    | 0.51                      | 0                 | 0                  | 2.1   | 2.4     | 2.0          | 212             | 97             |
|                       |            | S-4NT*     | 39.2         | 0                    | 0.25                      | 0                 | 0                  | 3.4   | 2.1     | 3.0          | 215             | 100            |
|                       |            | ST-2NT     | 40.4         | 2GFRP                | 0.50                      | 3.49              | 0.086              | 10.8  | 5.5     | 4.3          | 283             | 106            |
|                       |            | ST-3NT     | 40.4         | 1CFRP                | 0.50                      | 3.07              | 0.076              | 8.9   | 3.9     | 4.2          | 279             | 97             |
|                       |            | ST-4NT     | 44.8         | 1CFRP                | 0.23                      | 3.07              | 0.069              | 15.0  | 4.3     | 5.7          | 259             | 115            |
|                       |            | ST-5NT     | 40.8         | 1GFRP                | 0.25                      | 1.75              | 0.043              | 11.9  | 4.1     | 5.5          | 256             | 111            |
| Liu (2013)            |            | P27-1CF-3  | 40.0         | 1CFRP                | 0.27                      | 3.17              | 0.079              | 18.9  | 5.2     | 4.8          | 264             | 119            |
|                       |            | P27-2GF-4  | 40.0         | 2GFRP                | 0.27                      | 4.37              | 0.109              | 17.5  | 4.9     | 4.5          | 251             | 105            |
|                       |            | P40-NF-5*  | 40.0         | 0                    | 0.40                      | 0                 | 0                  | 4.1   | 2.2     | 1.7          | 180             | 93             |
|                       |            | P40-1CF-8  | 40.0         | 1CFRP                | 0.40                      | 3.17              | 0.079              | 17.2  | 6.9     | 4.3          | 261             | 99             |
|                       |            | P40-1GF-9  | 40.0         | 1GFRP                | 0.40                      | 2.18              | 0.055              | 10.7  | 6.3     | 3.9          | 238             | 116            |
|                       |            | P56-NF-10* | 40.0         | 0                    | 0.56                      | 0                 | 0                  | 1.8   | 2.1     | 1.3          | 188             | 91             |
|                       |            | P56-2CF-13 | 40.0         | 2CFRP                | 0.56                      | 6.33              | 0.158              | 21.0  | 7.5     | 4.9          | 331             | 98             |
|                       |            | P56-3GF-14 | 40.0         | 3GFRP                | 0.56                      | 6.55              | 0.164              | 26.6  | 7.2     | 4.7          | 337             | 110            |
|                       |            | P56-4GF-15 | 40.0         | 4GFRP                | 0.56                      | 8.74              | 0.218              | 29.0  | 7.7     | 5.1          | 364             | 119            |
|                       |            |            |              |                      |                           |                   |                    |       |         |              |                 |                |

University of Manitoba  
Department of Civil Engineering

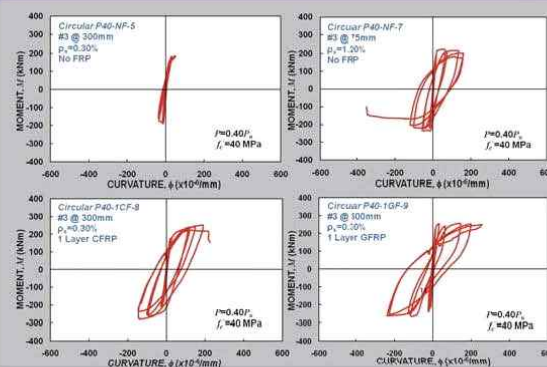
### Response of Square Columns under $P = 0.56 P_u$



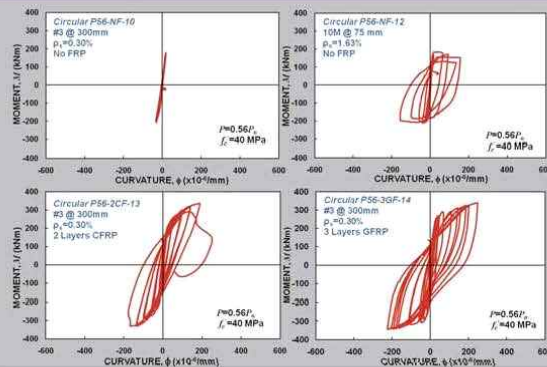
### Response of Circular Columns under $P = 0.27 P_u$



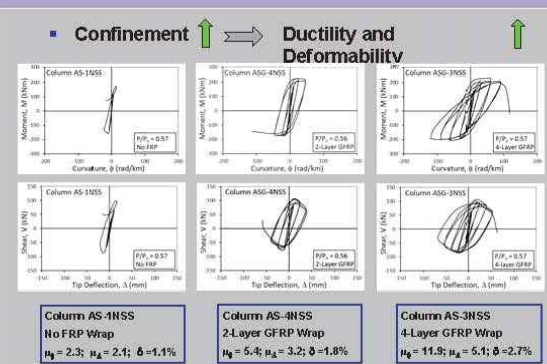
### Response of Circular Columns under $P = 0.40 P_u$



### Response of Circular Columns under $P = 0.56 P_u$



### Effect of Amount of Lateral FRP Reinforcement

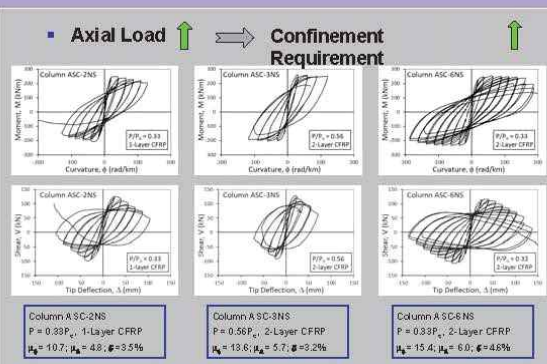


Column AS-1NSS  
No FRP Wrap  
 $\mu_y = 2.3$ ;  $\mu_x = 2.1$ ;  $\delta = 1.1\%$

Column ASG-2NSS  
2-Layer GFRP Wrap  
 $\mu_y = 5.4$ ;  $\mu_x = 3.2$ ;  $\delta = 1.8\%$

Column ASG-3NSS  
4-Layer GFRP Wrap  
 $\mu_y = 11.3$ ;  $\mu_x = 5.1$ ;  $\delta = 2.7\%$

### Effect of Level of Axial Load



Column ASC-2NS  
 $P = 0.33 P_u$ , 1-Layer CFRP  
 $\mu_y = 10.7$ ;  $\mu_x = 4.8$ ;  $\delta = 5.5\%$

Column ASC-3NS  
 $P = 0.56 P_u$ , 2-Layer CFRP  
 $\mu_y = 13.6$ ;  $\mu_x = 5.7$ ;  $\delta = 9.2\%$

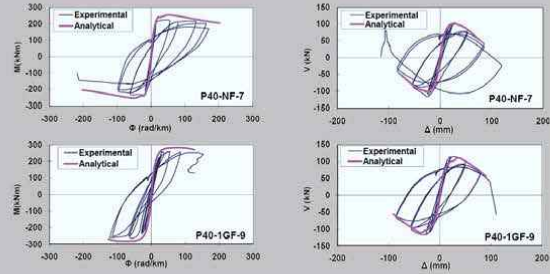
Column ASC-4NS  
 $P = 0.33 P_u$ , 2-Layer CFRP  
 $\mu_y = 15.4$ ;  $\mu_x = 6.0$ ;  $\delta = 4.5\%$

## Analytical Procedure for Seismic Behaviors of Column



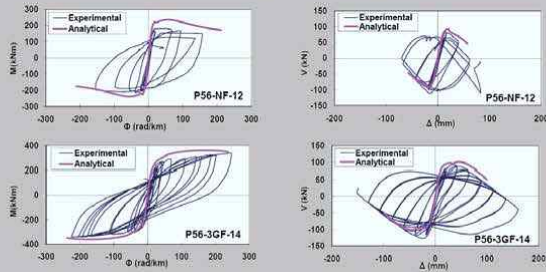
## Analytical Prediction to Seismic Behavior of Columns

### Specimens subjected to $P/P_0=0.40$



## Analytical Prediction to Seismic Behavior of Columns

### Specimens subjected to $P/P_0=0.56$



## Performance-Based Seismic Design of FRP

In addition to the Pushover Analysis using Cui-Sheikh model (2010) for confinement and its validation against the test data, a parametric study was carried out.

This study involved 13824 combinations of variables such as concrete strength, amount of longitudinal reinforcement, axial load level, amount of lateral FRP, section configuration, and type of FRP



## FRP Design Considerations

### DUCTILITY REQUIREMENTS

➤ Suggested performance criteria for FRP-confined columns in seismic design:

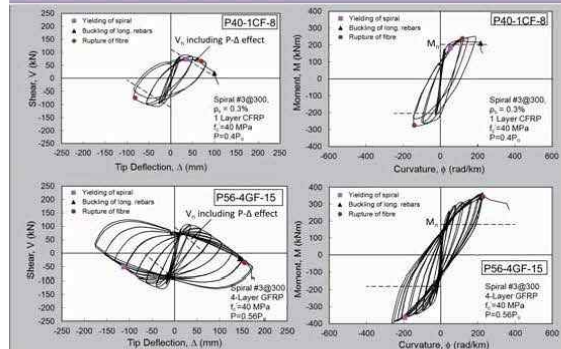
High ductility:  $\mu_\phi \geq 13$

Moderate ductility:  $13 > \mu_\phi \geq 8$

Low ductility:  $\mu_\phi < 8$



## Axial Load Effect on Moment Capacity



## Moment Enhancement due to Lateral FRP-Confinement

### Flexural Strength Enhancement:

$$\frac{M_{max}}{M_n} = 1 + 8 \cdot \left( \frac{f_{ln}}{f'_c} \right) \cdot \left( \frac{P}{P_0} \right)^{1.5} \quad (3)$$

where:

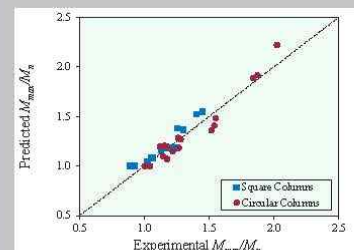
$f'_c$  = compressive strength of unconfined concrete;

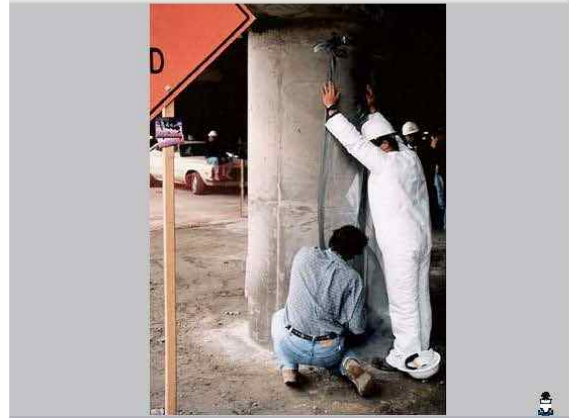
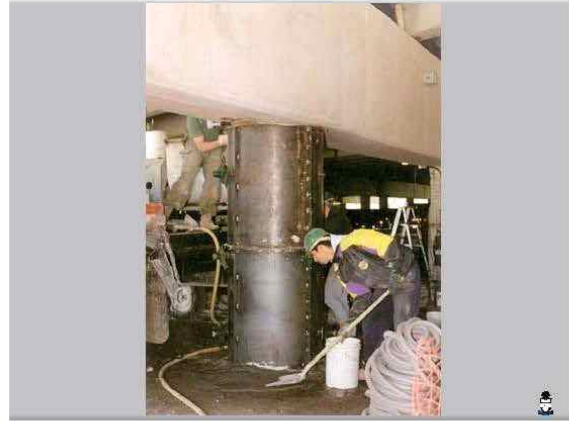
$f_{ln}$  = nominal lateral confining pressure in concrete by FRP jackets, based on the ultimate tensile strength  $f_{Fu}$  of FRP.



## Strength Enhancement due to Lateral FRP-Confinement

### Verification of Proposed Equation (3)

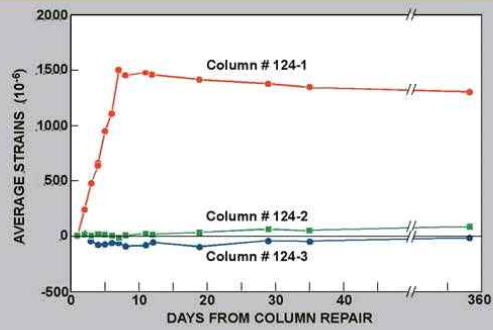




### *Post-Repair Monitoring*

- *Visual Inspection*
- *Strain gauge measurement for lateral expansion of columns*
- *Half cell measurement for corrosion potential*

### Strain Data from the Repaired Columns



### Economic Diagnosis

- Cost of FRP repair was comparable to traditional repair
- No re-repair needed in 15 years
- Traditional repair need to be repeated every 5 to 6 years

## 나. 복합 구조 재료 시스템 개발

- 1) 초 고성능 섬유 콘크리트에 대한 배합비 및 목재-콘크리트 합성 구조물의 거동 특성에 관한 연구를 수행 하였음.
- 2) 초 고성능 섬유 콘크리트 (UHPFRC)는 일반 콘크리트에 비하여 높은 압축강도 및 우수한 내구성을 가지며, 토론토 대학에서 제시하고 있는 배합비로 UHPFRC를 제작할 경우, 압축강도 125MPa, 인장강도 10MPa를 가지며 기존 연구에서 제안된 방법들에 비하여, 높은 비용 절감과 환경 문제를 줄일 수 있을 확인하였음.
- 3) 목재-콘크리트 합성 구조물의 거동 특성에 관한 연구는 목재가 가지고 있는 장점인 가볍고 강하면서 경제적인 점을 극대화 하고, 불, 습도, 마모에 취약한 단점을 보완하고자 콘크리트 합성 모델을 개발하였음.
- 4) 목재-콘크리트 재료를 합성한 시편을 직접 전단 테스트를 통해 거동 분석결과 선형-플라스틱 반응을 보였으며, UHPFRC와 CLT 패널이 복합된 패널을 실험한 결과, 정적하중 하에서 패널의 강도와 강성이 크게 향상된 것을 확인 하였음.
- 5) 낮은 진폭의 자유 진동 응답 실험에서는 두 재료 면에서 탄성 슬립을 나타내었다.



그림 32 목재 콘크리트 합성 판넬

## NOVEL COMPOSITE STRUCTURAL SYSTEMS

Research Led By Prof. Paul Gauvreau

### Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete



### Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete



### Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete



### Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete

#### Challenges

- Cost  
*Currently only proprietary mixes are commercially available*
- Fabrication  
*Highly self-consolidating mix leads to difficulties with forms other than flat slabs*
- Robustness  
*Economically designed members are very slender, to the point of being at risk from accidental impact loadings during transportation & erection*

### UHPFRC+Timber Composites

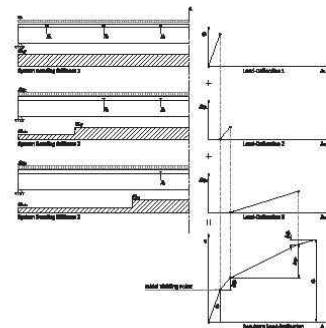


### UHPFRC+Timber Composites

#### Cross-Laminated Timber



### UHPFRC+Timber Composites



Ductile load-deflection response due to yielding shear connectors

### UHPFRC+GFRP Composites



Glass-  
Fibre-  
Reinforced  
Polymer  
(Epoxy)

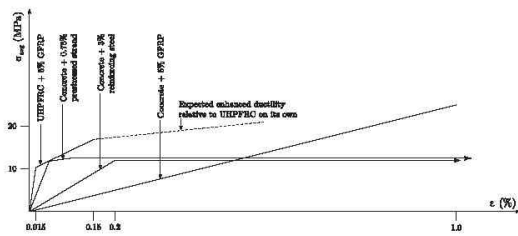
UHPFRC

### UHPFRC+GFRP Composites

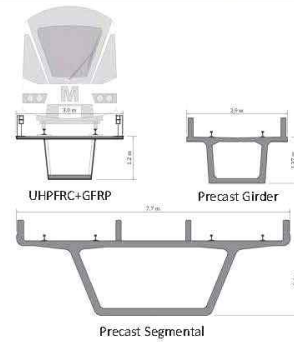


### UHPFRC+GFRP Composites

Tensile Stress-Strain Behaviour of Concrete Composites



### UHPFRC+GFRP Composites



### UHPFRC+GFRP Composites



Cast-in-place Deck on Precast Girders

## 다. 깊은 보의 전단거동 및 예측

- 1) 대형 구조물의 경우 일반적인 구조물에 비해서 보다 깊고 넓은 벽이 요구된다. 이전에는 일반적으로 기둥의 하중을 전달하기 위해 깊은 격자 보를 사용하였지만 최근에는 경제적으로 슬래브를 사용하는 것이 보편화 되었다.
- 2) ACI code(ACI 2014) 뿐만 아니라 많은 기준들이 요구한 보의 전단 강도는 실제 필요한 강도 보다 부족하다. 슬래브의 경우 만약 필요한 전단력이 계산된 저항력과 같으면 전단철근이 필요없다. 현재 로스 앤젤레스에서 진행중인 월셔 그랜드 프로젝트에서는 5.3m 두께의 전단철근이 사용되지 않는 슬래브가 설계되었다. 이 부분은 넓은 구역을 지탱하기에 어떠한 작은 파단도 커다란 재난을 초래할 수가 있다.
- 3) 2015년도 여름 케나다 토론토 대학에서 수치해석을 통해 4m 두께의 매우 깊은 슬래브의 전단강도를 예측하는 대회가 있었다. 재원은 다음과 [그림 35]과 같으며, 하중은 중심에서 벗어난 지점에 집중하중으로 가하여 실험을 수행하였다.
- 4) 장단의 길이는 부재 내부에 충분한 크기의 전단강도를 가지기에 충분히 길다. 전단 철근의 간격은 ACI code를 만족하지만 의도적으로 최대한도인 600mm를 넘긴다.
- 5) 실험결과는 다음과 같이 하중지점의 처짐에 대한 하중 그래프와 균열 패턴을 얻었다.
- 6) 대회에 제출된 모든 예측과 국제 예측 경연 대회를 통해 얻은 모든 데이터를 비교하였다.
- 7) 굵은 검은선이 실험 결과이고 나머지가 하중-처짐 예측선이며 많은 경우에 깊은 보에 대해서 매우 나쁜 예측을 보이고 있다.
- 8) 노란색 영역은 실험 결과에서 플러스 또는 마이너스 20 % 영역으로, 이 범위 내에서 토론토 (Bentz), 이탈리아의 (Conforti and Facconi)에 그리고 가장 정확한 예측을 한 체코 공화국의 (Červenka 및 Sajdlova) 가 있다.

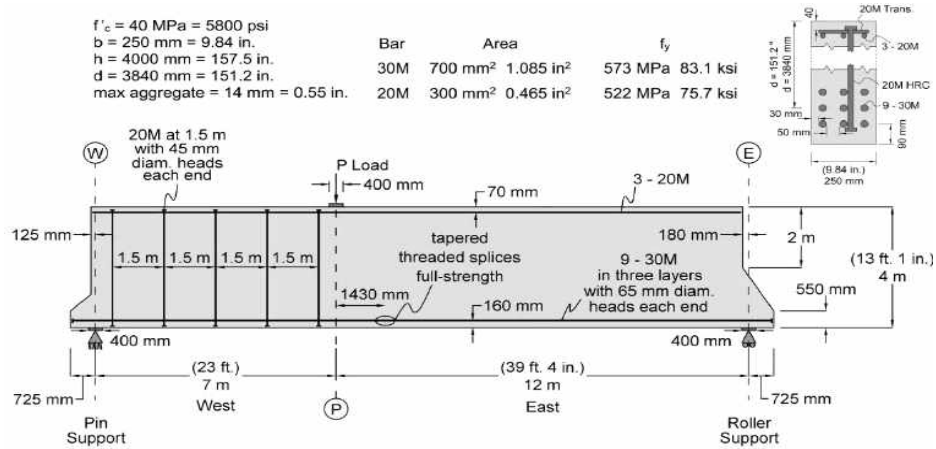


그림 35 깊은 보 실험 모델



그림 36 (a) 하중 - 처짐 실험 결과 (b) 균열 발생 모습

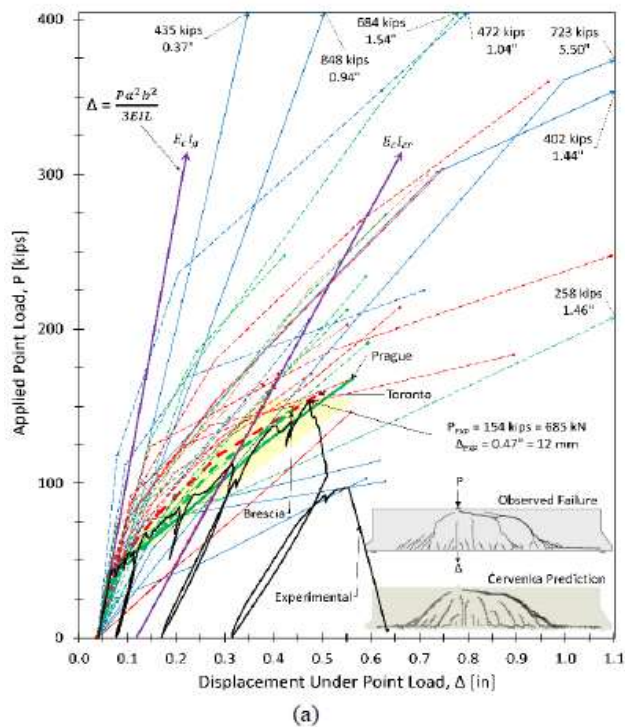
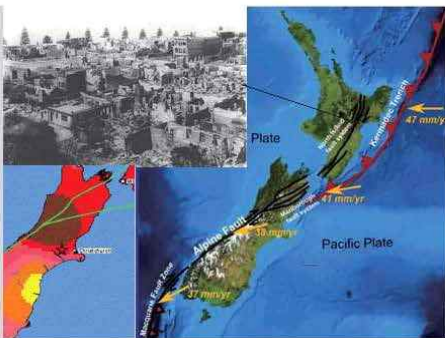
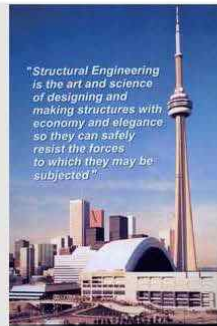


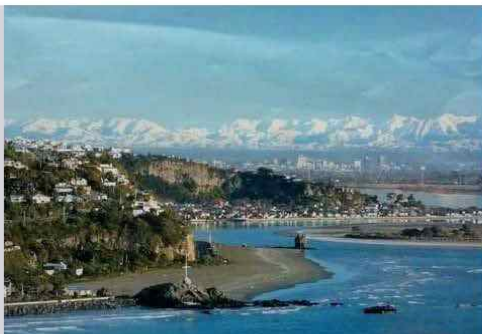
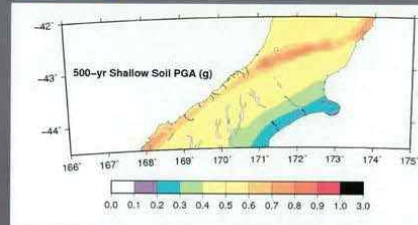
그림 37 (a) 깊은 보에 대한 하중-처짐 예측 (b) 파괴 후의 시편 모습

## Resilience of Urban Infrastructure

Michael P. Collins

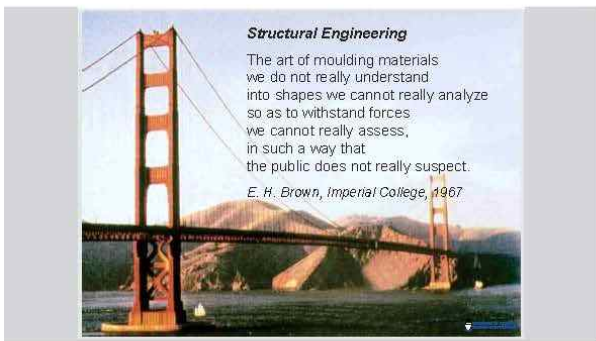
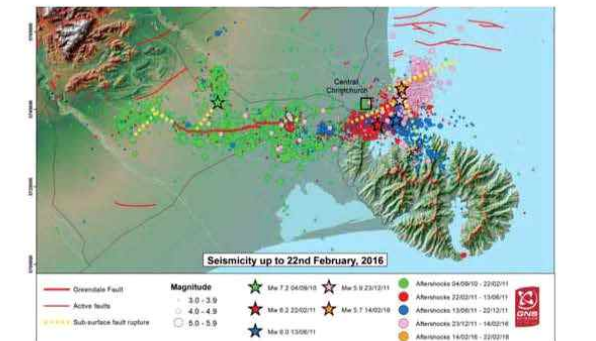
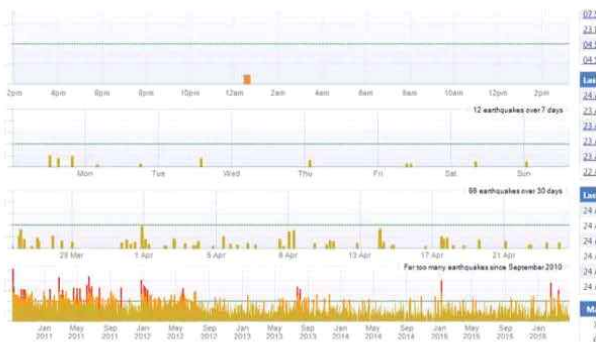
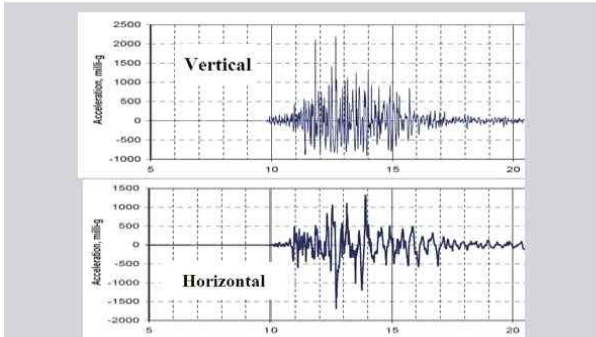
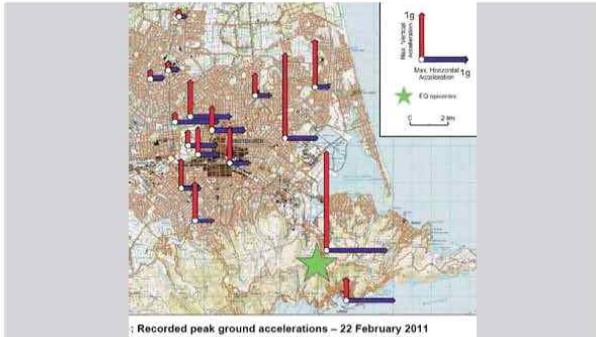


### NSHM 2010



### Devastation of Christchurch 12:51pm Feb. 22<sup>nd</sup> 2011



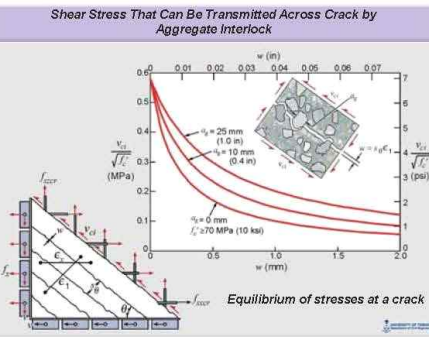
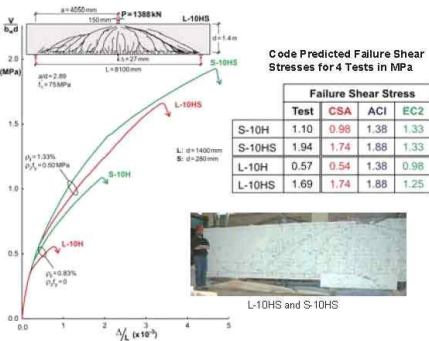
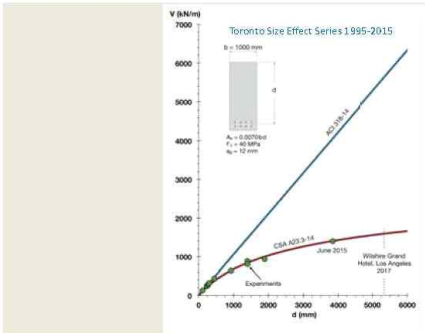
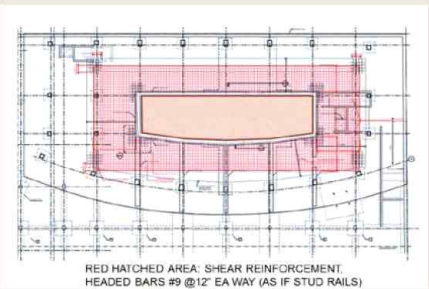
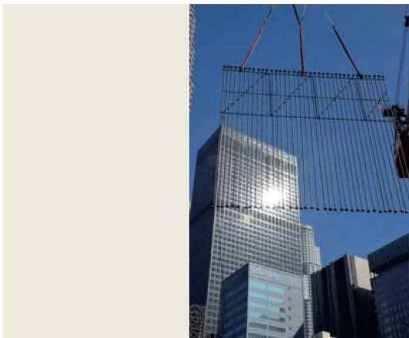




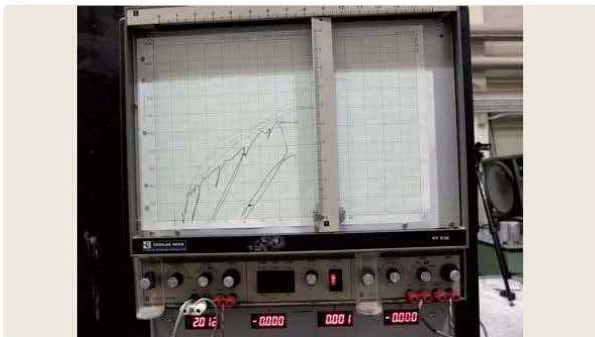
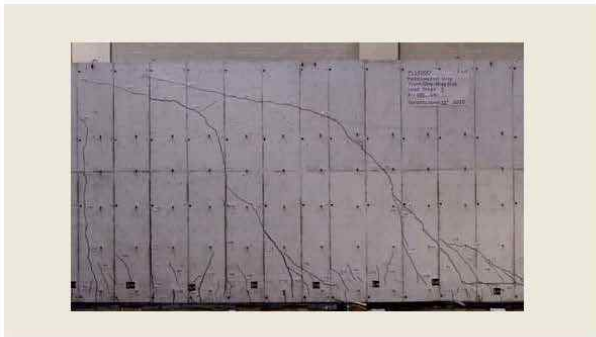
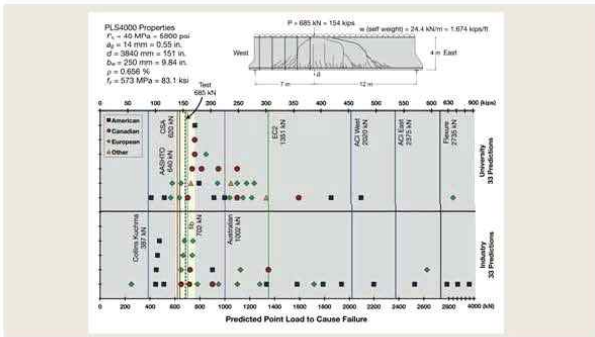
Wilshire Grand  
Los Angeles  
1000 feet tall  
Completion 2017

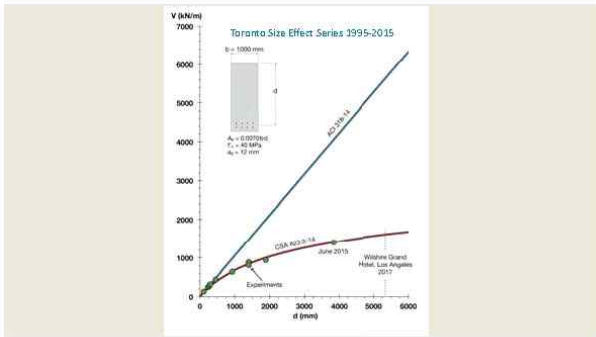
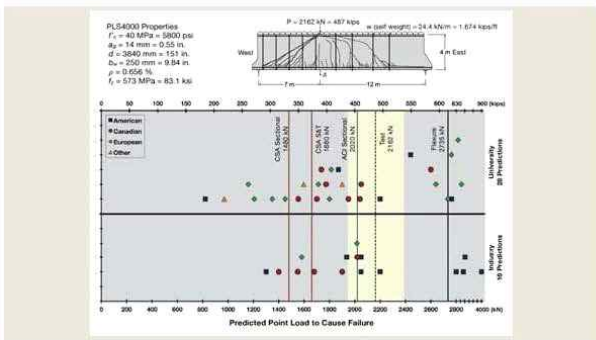
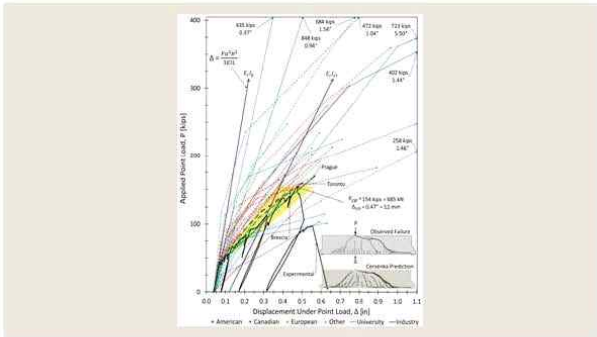


Rebar Placement Mat Foundation Wilshire Grand









## 라. 폭발 및 충격하중하의 부재의 거동

- 1) 지난 6년간 구조물의 폭발 및 충격하중에 관한 연구를 University of Toronto 에서 수행하였음.
- 2) 실험은 ㉠ 소다석회 강화 유리로 구성된 단일 유리창 및 적층 유리창, ㉡ 냉간 성형 사각 중공 단면을 가진 휨 부재 (콘크리트 충전 및 부분적 충전) 및 ㉢ 에너지 소산 커넥터를 대상으로 실시하였음.
- 3) 원거리 폭발 테스트 (1000 kg TNT)와서보 유압 발생장치를 이용한 전체 규모의 실험실 테스트이다.
- 4) 또한 스플릿 홉킨스 압력바를 사용한 재료 동적 테스트를 수행하였으며, 실험 결과를 바탕으로 단자유도 해석 및 동적 유한요소 해석을 수행하였다.
- 5) 단일 및 적층 유리창 실험의 경우 총 34개의 유리창이 실험에 사용되었으며 ( $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 12\text{ mm}$ ), 각 유리창은 알루미늄 프레임과 콘크리트 박스로 고정하였다. 다양한 실험과정 및 결과는 다음 해당 참고문헌에서 찾을 수 있다. (Walker et al., 2012; Walker et al., 2013; Spiller et al., 2014; Seika et al., 2011; Spiller et al., 2016; Parratt et al., 2016)
- 6) 사각 중공 단면 부재 실험의 경우 사각 중공 단면을 가진 단순보에 대해 실험을 수행 ( $120\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 3.26\text{ m}$ ) 하였음. 콘크리트를 완전히 충전시킨 것과 충전되지 않은 것으로 나누어서 실험 수행하였고 (Ritchie et al., 2014; Ritchie et al., 2014; Ritchie et al., 2015) 최근 진행된 실험에선 콘크리트가 충전된 이중 스킨 튜브 부재를 사용하여 실험을 수행 (Ritchie et al., 2016)함.
- 7) 에너지 소산 커넥터는 부재에 폭발 및 충격하중이 가해졌을 때 부재의 소성변형을 방지하기 위한 시스템이다. 부재에 에너지 소산 커넥터를 연결하고 커넥터의 소성 변형에 의해 에너지를 소산시켜 구조물이 탄성 상태로 남아있도록 하는 특징을 나타낸다. 에너지 소산 커넥터가 연결된 유리창에 대해 원거리 폭발 테스트 수행하였고, 에너지 소산 커넥터의 정적, 동적 특성을 알아보기 위한 실험실 테스트 수행하였다.



그림 44 유리창 폭발 실험 : (a) 강화 유리창에 대한 야외 실험;  
(b) 8단 적층 유리창



**Recent Research  
on  
Blast and Impact Loading of Elements and Materials**

**Jeff Packer**  
Bahen/Tanenbaum Professor of Civil Engineering  
University of Toronto





**Field Blast Testing of Cold-formed Square Hollow Section Columns**



Typical set-up for testing of cold-formed square hollow section (SHS) "columns" – vertical beams behind steel cladding. (SHS and CFDST are ideal for blast-resistant columns – they have no weak axis in bending & core can be filled)

Test 2 (T2): 5CF has two concrete-filled, 5mm thick, SHS behind  
8CF has two concrete-filled, 8mm thick, SHS behind  
5H has two unfilled, 5mm thick, SHS behind  
8H has two unfilled, 8mm thick, SHS behind

Department of Civil Engineering, University of Toronto



Over 15 km of cables

Extensive instrumentation includes:

- Free field pressure gauges
- Reflected pressure gauges
- High-speed video cameras
- Strain gauges
- Displacement transducers
- Accelerometers
- Very high-speed data acquisition, at > 10<sup>6</sup> readings/sec

Department of Civil Engineering, University of Toronto

Typical explosion – viewed from a safe distance



Heavy site equipment needed



Team UoT



Post-test condition of target



Department of Civil Engineering, University of Toronto

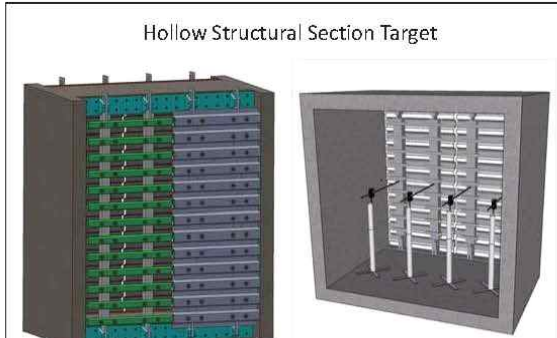
**Scope of Work on Blast & Impact Loading  
2012 – 2016**

- Cold-Formed (steel) square Hollow Structural Sections (HSS) under Blast Loading (in Field)
- Concrete-Filled (steel) HSS under Blast Loading (in Field)
- Concrete-Filled Double Skin Tubes (CFDST) under Blast Loading (in Field)
- Neo-Classical (concrete) Columns under Blast Loading (in Field)
- Energy-Dissipating (steel) Connectors under Blast Loading (in Field)
- Energy-Dissipating (steel) Connectors under Simulated Blast Loading (in Laboratory)
- Annealed Glass and Laminated Multi-Layer Glass under Blast Loading (in Field)
- Annealed Glass under Static & Dynamic Loading (in Laboratory)
- High Strain Rate Loading Effect on cold-formed HSS Material (in Laboratory)
- Impact Resistance of cold-formed HSS Material (in Laboratory)
- Analysis using Single Degree of Freedom (SDOF) models
- Analysis using Explicit Finite Element (FE) models: LS-Dyna + In-house (CWBlast)





**Hollow Structural Section Target**



crci | The Centre for Resilience of Critical Infrastructure




Large craters produced by TNT explosions



Air-blast loading of structure obtained from 1,000 kg TNT hemispherical charge

Department of Civil Engineering, University of Toronto

**Interior of HSS "Targets": Before and After Testing**




Department of Civil Engineering, University of Toronto

## Blast Arena Testing



crci | The Centre for Resilience of Critical Infrastructure



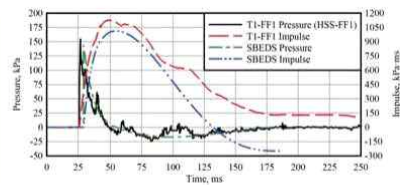
## Blast Arena Testing



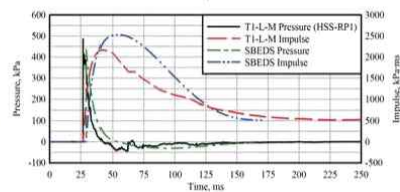
crci | The Centre for Resilience of Critical Infrastructure



SHS Test1 – Free field pressure and impulse (Predictive curves use SDOF model with UFC 3-340-02 criteria)

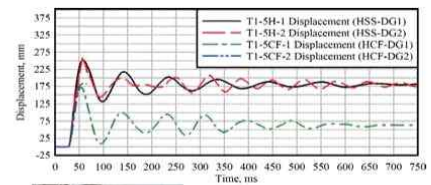


SHS Test1 – Reflected pressure and impulse



Department of Civil Engineering, University of Toronto

HSS Test1 – Displacement of HSS

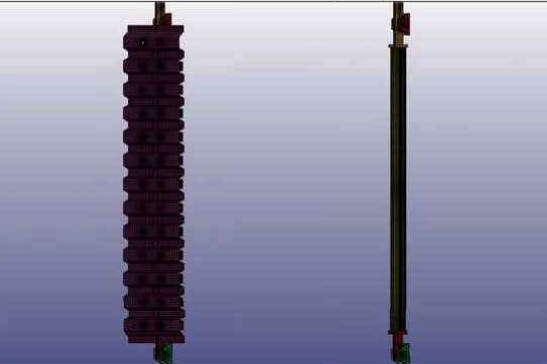


HSS – Post-blast deformations



Department of Civil Engineering, University of Toronto

## Explicit Finite Element Analysis of Member and all attachments using LS-Dyna



## von Mises Stress Distribution vs. Time for hollow HSS column



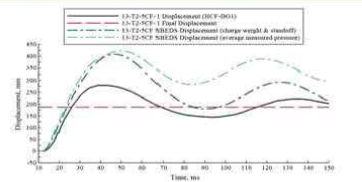
crci | The Centre for Resilience of Critical Infrastructure



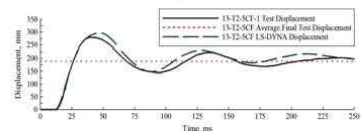
## Numerical Modelling

Mid-Span displacement vs. Time (measured and predicted) for a Concrete-Filled HSS 120 x 120 x 5

Predicted by SBEDS:

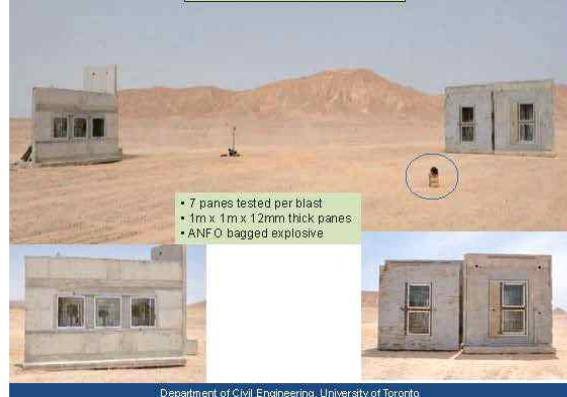


Predicted by LS-Dyna:



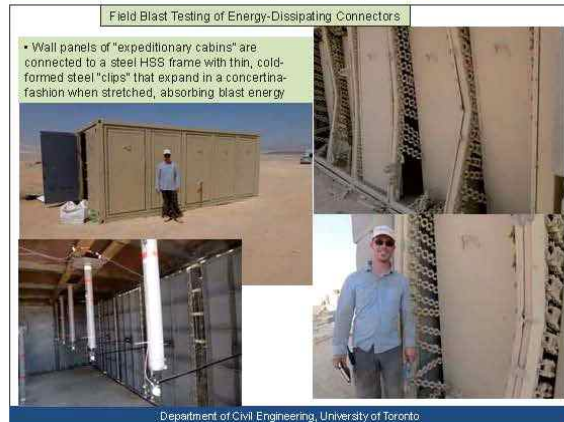
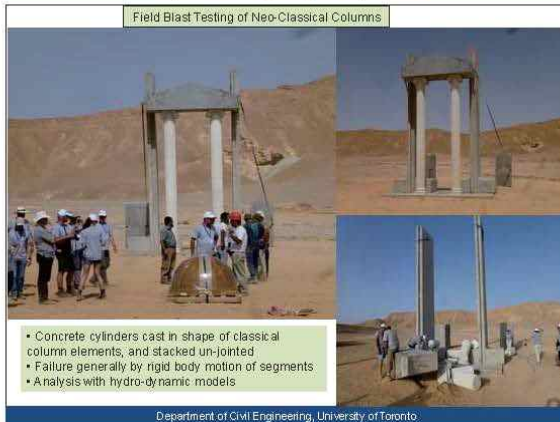
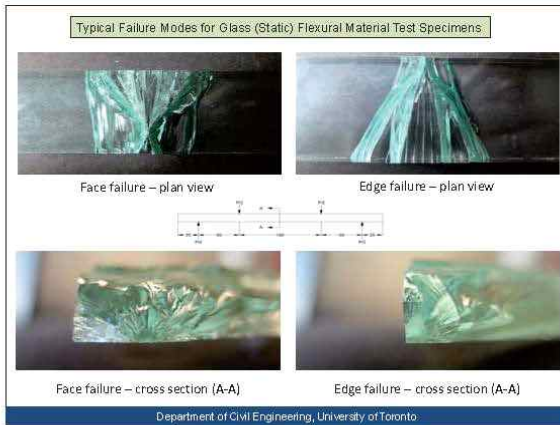
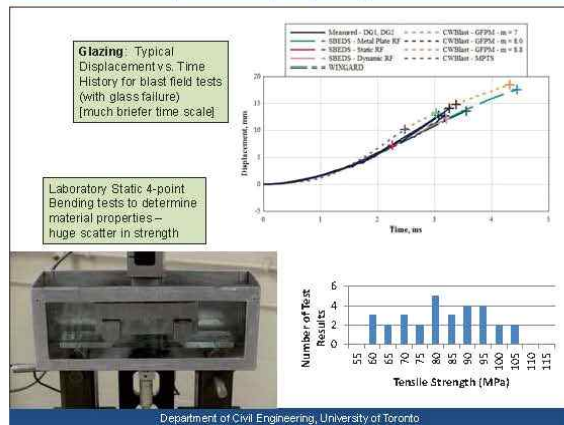
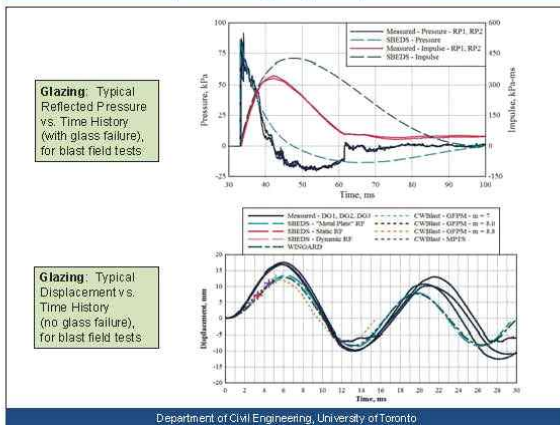
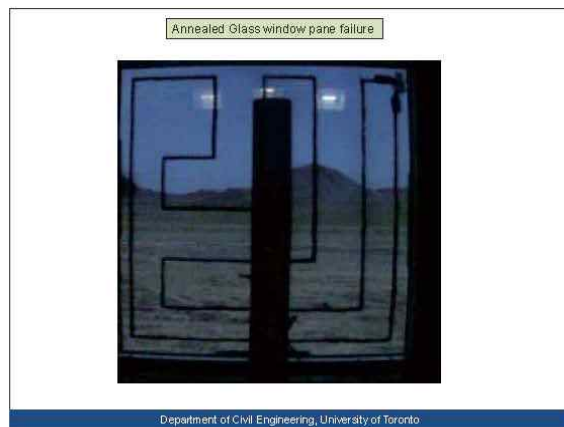
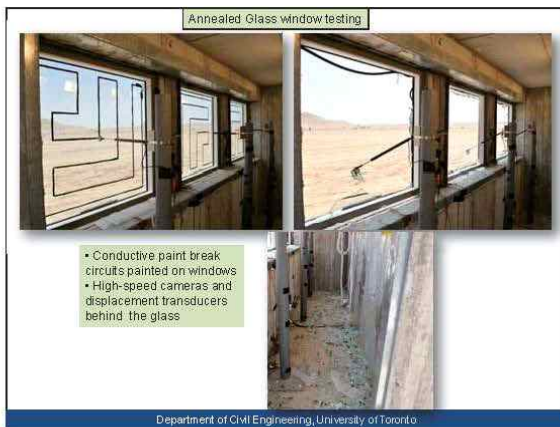
Department of Civil Engineering, University of Toronto

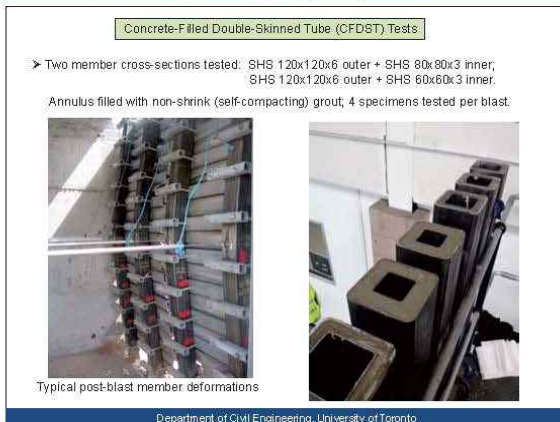
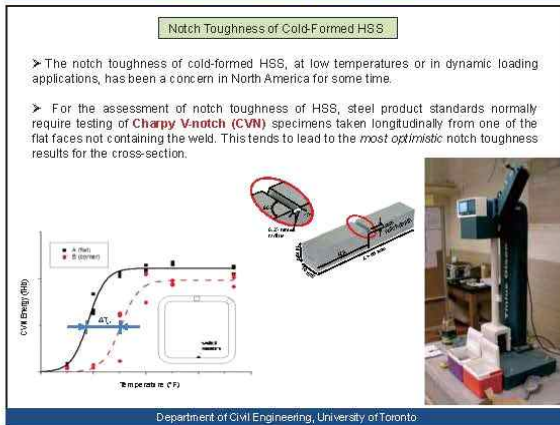
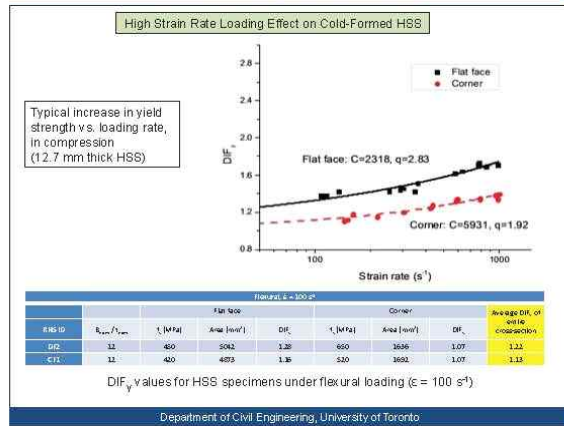
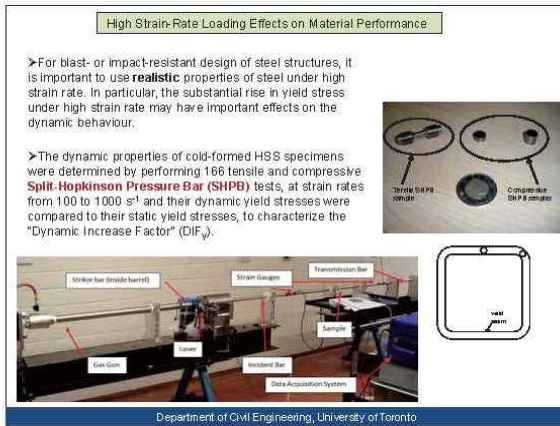
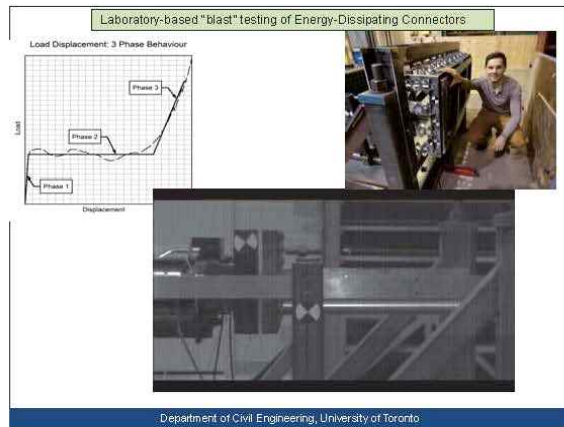
## Annealed Glass window testing arena

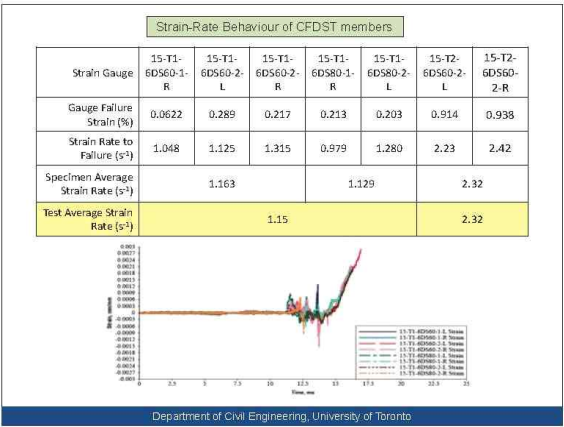


- 7 panes tested per blast
- 1m x 1m x 12mm thick panes
- ANFO bagged explosive

Department of Civil Engineering, University of Toronto







## 마. 콘크리트 부재 단면 해석 모델

- 1) 콘크리트 부재 단면 해석을 위해, Response2000라는 프로그램이 널리 이용되며, MS-DOS용으로 1990년대에 개발되었다.
- 2) 새 버전의 Response 프로그램은 여러 재료 모델을 고려할 수 있고, 화재해석과 반복하중 계산 및 전단 변형, 전단 구배를 고려하여 해석을 진행할 수 있다.
- 3) 단면 설정 시, 콘크리트와 철근에 대한 구성방정식과 재료 정보를 입력하면, 그에 따른 균열 형상, 휨, 전단 거동에 대한 정보들을 얻을 수 있다.
- 4) 철근콘크리트 부재의 균열 진행 패턴 및 형상 변화를 예측 가능하며, 균열 폭 또한 측정 가능함.
- 5) 휨 모멘트 다이어그램, 전단력 다이어그램, 전단 변형률 분포 등도 측정 가능함.

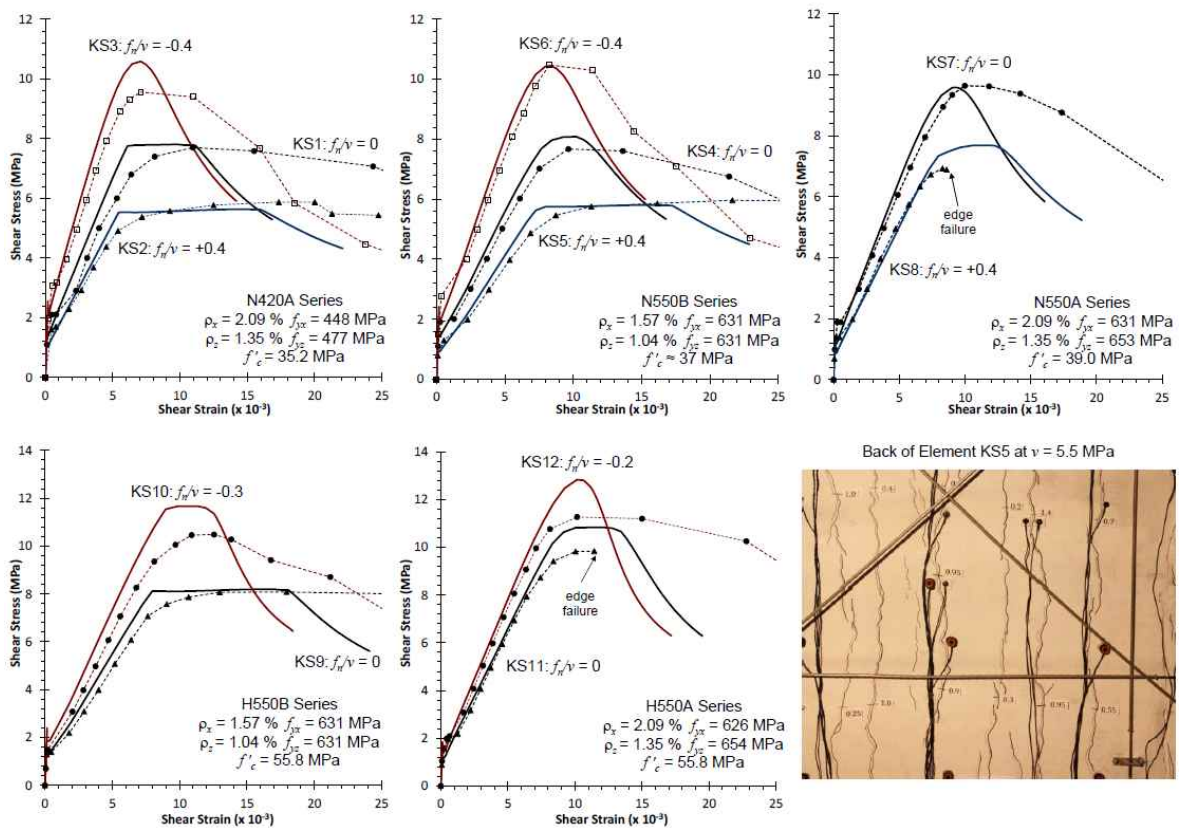


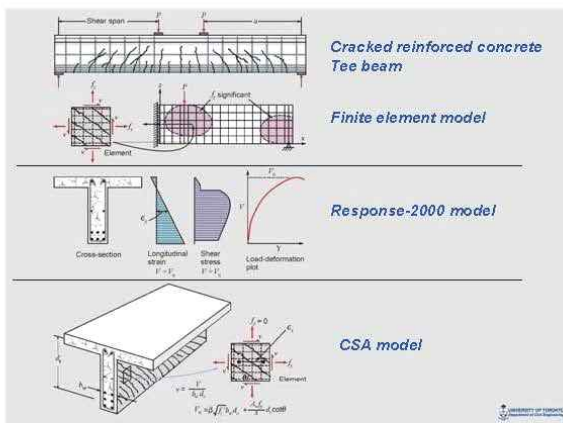
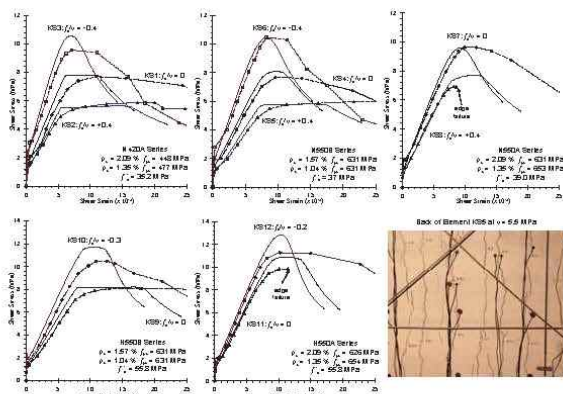
그림 50 단면 설정에 따른 전단 및 휨 거동 해석 결과

Workshop on  
Resilience of  
Urban Infrastructure

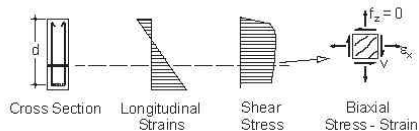
April 25<sup>th</sup> 2016

New Response

Evan C. Bentz  
Department of  
Civil Engineering  
University of Toronto

## Add Shear



$$v_{xy} = \frac{VQ}{Ib}$$

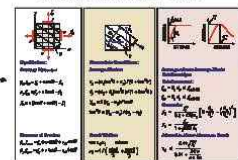
## Numerical Analyses

Starting from experiments:



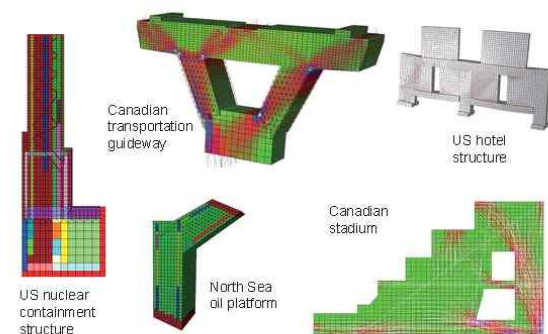
U of T Shell Element Tester. First test after upgrade, Summer 2010

Develop numerical models

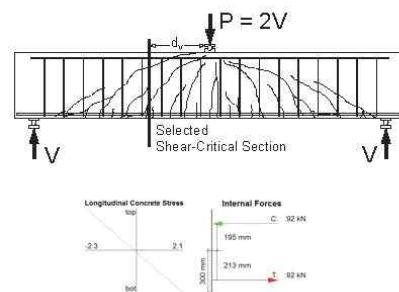


Apply to Finite Element Analyses of structures too complex or expensive to test

## Finite Element Analyses

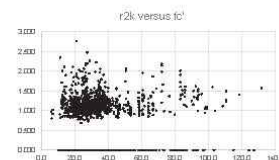


## Sectional Analysis



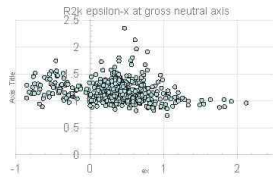
## Statistics

- No shear reinforcement ( $n = 1172$ )
  - R2k Avg. Test/Pred = 1.19, C.o.V. = 21%
  - CSA Code: Avg = 1.28, C.o.V. = 23%
  - Bottom Half: Avg = 1.13, C.o.V. = 12.7%



## Statistics

- With shear reinforcement ( $n = 775$ )
  - R2k Avg. Test/Pred = 1.18, C.o.V. = 17.6%
  - CSA Code: Avg = 1.31, C.o.V. = 19%
  - Bottom Half: Avg = 1.13, C.o.V. = 12.3%



## Availability

- It is available at:
- <http://www.ecf.utoronto.ca/~bentz/r2k.htm>

## 바. 철근콘크리트 비선형 해석 기법, VecTor6

- 1) 토론토 대학에서 수정된 압축장 이론과 분산 응력장 모델을 기반으로 한 비선형 유한요소 해석 프로그램을 개발하였음 (VecTor6) (Vecchio and Collins, 1986), (Vecchio, 2000).
- 2) 축 대칭성 구조물에 대해 전문화된 프로그램이며, Hydrocode에 비해 적은 양의 자유도와 콘크리트 물성치로 정확한 해석이 가능함.
- 3) 전단 파괴가 지배하는 강한 미사일 충격에 대해 신뢰성 높은 결과를 제공함을 확인하였음. (Lulec and Vecchio, 2015).

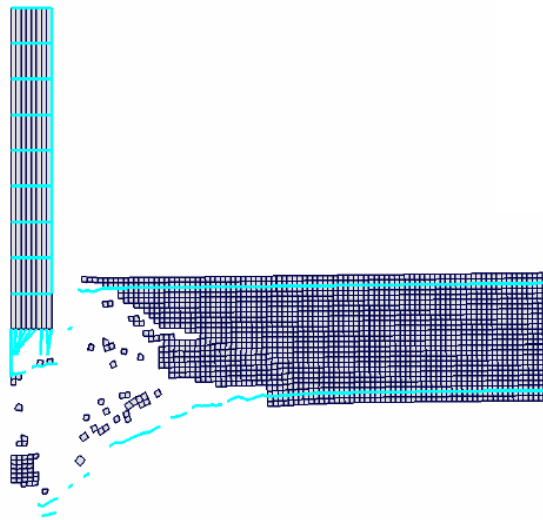


그림 53 VTTP1 시편의 변형된 요소망  
(IRIS2010 workshop)



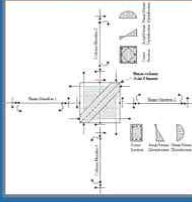
그림 54 실제 충격이 가해진 후의 시편

UNIVERSITY OF TORONTO  
VECTOR ANALYSIS GROUP  
http://www.civ.utoronto.ca/vector

### Macro-modeling of Beam-Column Joints for Frame Analyses

**Modeling of Beam-Column Joints for RC Frame Structures in Vector5**

- Vector5 enables nonlinear sectional analyses of 2D frames consisting of beams, columns and shear walls.
- Currently, the modeling of RC frame structures uses the "rigid joint" assumption. The assumption usually translates to an over-prediction of strength and stiffness of the frame structures.
- Local joint models are available in the literature for the investigation of single, isolated joints but there is a lack of frame analysis procedures simulating the joint behavior in addition to other important global failure modes.
- Work is underway to improve the modeling of beam-column joints in Vector5 using existing models.



Implemented Joint Element in a Global Frame Analysis Procedure

PROJECTS

UNIVERSITY OF TORONTO  
VECTOR ANALYSIS GROUP  
http://www.civ.utoronto.ca/vector

### Modeling of Deteriorated or Damaged Structures

Simulate corrosion along length of bar as a random field:



- Use predicted corrosion to simulate resulting deterioration in concrete
- Develop a spatially variable model that can capture localized deterioration in corroded reinforced concrete structures
- Consider influence on: bond, concrete cover, steel stress-strain response

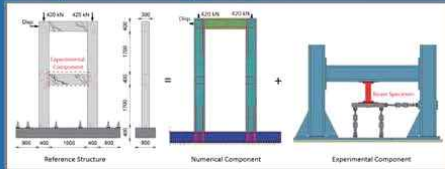
UNIVERSITY OF TORONTO  
VECTOR ANALYSIS GROUP  
http://www.civ.utoronto.ca/vector

### Integrated Software for Hybrid Simulations

Hybrid Simulation: Physical Substructure + Numerical Substructure

**Phase 1) Verification:**  
Compare the hybrid simulation results against similar quasi-static tests.

**Phase 2) Application:**  
Hybrid simulation analysis of a real structure with a damaged critical element under earthquake load.  
Tests will be performed on a structure repaired with FRP materials.



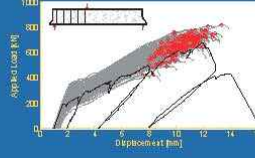
Reference Structure      Numerical Component      Experimental Component

UNIVERSITY OF TORONTO  
VECTOR ANALYSIS GROUP  
http://www.civ.utoronto.ca/vector

### SHERLOCK - Field Assessment of Structures

**Stochastic Simulation**

- Material properties, loads are **stochastic**!
- Use statistics to **generate** input values and **simulate** for each generation
- Use field measurements to determine best fit  $\Rightarrow$  stochastic assessment of expected response




### A Simplified Analytical Tool for Analysis of RC Slabs Subjected to Hard Missile Impacts in Axisymmetric Geometry

Andac Lulec, Frank J. Vecchio  
University of Toronto, Canada



UNIVERSITY OF TORONTO  
VECTOR ANALYSIS GROUP

### Outline

- Introduction
  - IRIS2010 Workshop and Blind Competition
  - IRIS2010 and IRIS2012 Predictions
- Objectives
- Methodology
- Analysis Results
- Conclusion

14

UNIVERSITY OF TORONTO  
VECTOR ANALYSIS GROUP

### Introduction

- Analysis of structures under impact and impulsive loading
  - Natural hazards
  - Human-made hazards
- Current methods are based on:
  - Simplified Single DOF Models
    - Widely used for design purposes
    - Hard to implement to complicated geometries
    - Lack of detailed results
  - Hydrocodes
    - Overcome most of the limitations of SDOF methods
    - Large number of input parameters for material models (concrete)
    - Detailed models with hundreds thousands of DOFs

15

UNIVERSITY OF TORONTO  
VECTOR ANALYSIS GROUP

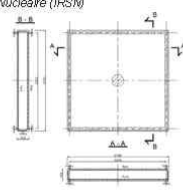
### IRIS2010 – Punching Specimen

Improving Robustness Assessment Methodologies for Structures Impacted by Missiles (IRIS)

- VTT Technical Research Center of Finland
- Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN)

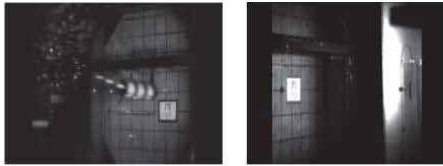
**PUNCHING SPECIMEN**

- 2100 mm x 2100 mm x 250 mm
- $f_c = 67.1$  MPa
- Reinforcement Ratio,  $\rho = 0.72$  %
- No Shear Reinforcement
- 47 kg missile 136 m/sec



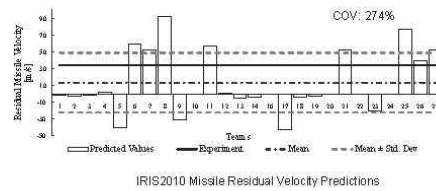
16

## IRIS2010 – Punching Specimen



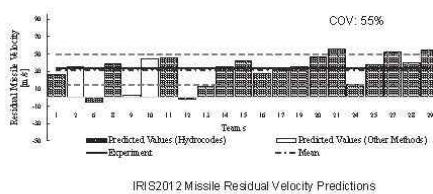
17

## IRIS2010 Predictions



18

## IRIS2012 Predictions



19

## Objectives

The main objective is to develop a method:

- Accurate
- Simplified
  - Less modeling time
  - Less analysis time
  - Less input parameters

20

## Methodology

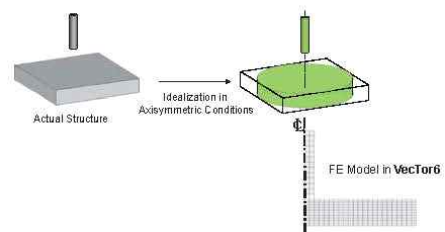
- Disturbed Stress Field Model (DSFM)
  - Developed in University of Toronto (Vecchio, 2000)
  - Based on Modified Compression-Field Theory (Vecchio and Collins, 1986)
  - Smeared rotating crack approach
  - Accurate in predicting shear failure mechanisms
- VecTor Suite Programs
  - Nonlinear FE Analysis Software based on DSFM
  - VecTor6 – Axisymmetric Modeling

Vecchio, F.J. and Collins, M.P. (1986) "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear", Journal of Bridge Engineering, ASCE, Vol. 1, No. 2, 215-231.

Vecchio, F.J. (2000) "Disturbed Stress Field Model for Reinforced Concrete", ASCE Journal of Structural Engineering, 126(2):1010-1011.

21

## Methodology



22

## VecTor6 Model

| CONCRETE          |                       | STEEL                   |                         |
|-------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| $f_c$ (MPa) (cyl) | 60                    | $d_s$ (mm)              | 10                      |
| $f_t$ (MPa)       | 2.56                  | $\Delta_s$ (mm)         | 78.5                    |
| $E$ (MPa)         | 29429                 | $\rho$ (% out of plane) | 0.72                    |
| $\epsilon_s$      | $2.24 \times 10^{-3}$ | $E$ (MPa)               | 200000                  |
|                   |                       | $f_y$ (MPa)             | 540                     |
|                   |                       | $f_u$ (MPa)             | 605                     |
|                   |                       | $\epsilon_s$            | $186.37 \times 10^{-3}$ |

• 2697 4-Node Rect. Axisymmetric Elements  
 • 290 Truss Elements  
 • 9 Compression only Truss elements  
 • Smeared reinforcement (out of plane)

23

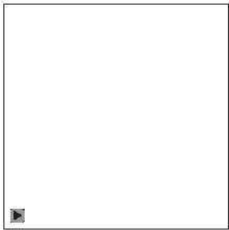
## VecTor6 Model

| CONCRETE          |                       | STEEL                   |                         |
|-------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| $f_c$ (MPa) (cyl) | 60                    | $d_s$ (mm)              | 10                      |
| $f_t$ (MPa)       | 2.56                  | $\Delta_s$ (mm)         | 78.5                    |
| $E$ (MPa)         | 29429                 | $\rho$ (% out of plane) | 0.72                    |
| $\epsilon_s$      | $2.24 \times 10^{-3}$ | $E$ (MPa)               | 200000                  |
|                   |                       | $f_y$ (MPa)             | 540                     |
|                   |                       | $f_u$ (MPa)             | 605                     |
|                   |                       | $\epsilon_s$            | $186.37 \times 10^{-3}$ |

• 0.01 ms time step  
 •  $[C] = \alpha [K] + \beta [M]$ , updated each load step  
 $\alpha = 36.5 \times 10^{-4}$ ,  $\beta = 3.0$  ( $\zeta_1 = 2.1\%$ ,  $\zeta_2 = 10.1\%$ )  
 • Element Erosion limit:  
 Shear strain,  $\gamma_s \leq 0.2$   
 Principal Tensile strain,  $\epsilon_1 \leq 0.2$

24

VecTor6 Analysis



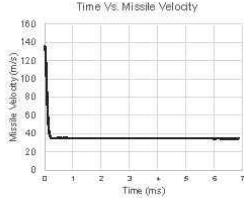
25

VecTor6 Analysis Results

Missile Residual Velocity

Experiment : 33.8 m/s

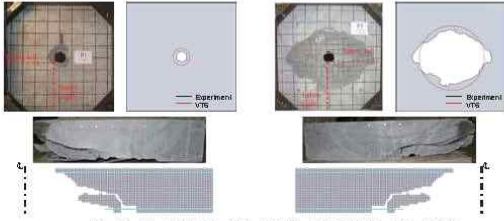
Analysis : 34.5 m/s



Deformed Mesh at t = 6.93 ms

26

VecTor6 Analysis Results



27

Conclusion

- A simplified macro modeling approach for missile impact analysis
  - Moderate number of DOFs and Elements
  - Commonly used material input parameters
  - Good agreement with experimental results

28

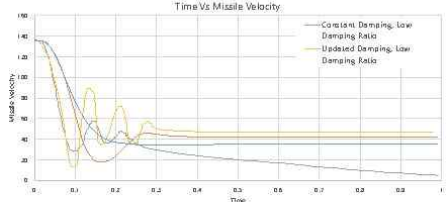
QUESTIONS??

29

QUESTIONS??

30

Damping Ratio and Element Erosion



31

## 사. 실시간 하이브리드 시뮬레이션

- 1) 실시간으로 물리적 실험과 동시에 전산 시뮬레이션을 결합한 새로운 실시간 하이브리드 실험 기법을 개발하였으며, 세부 내용은 다음과 같다.
- 2) 상태의 변화에 대해서 피드백을 선형화하여 이용하는 새로운 비선형 제어기를 제시하였음.
- 3) 제어기 디자인에 Ramberg-Osgood 공식을 사용하여 탄성 변형 범위를 초과할 때 구조물 변화하는 강성을 적용하였음. (Moosavi et al., 2015)
- 4) 사용자의 적응적 매개변수를 필요하지 않은 자동 유압 시스템을 사용한 새로운 제어기를 개발.

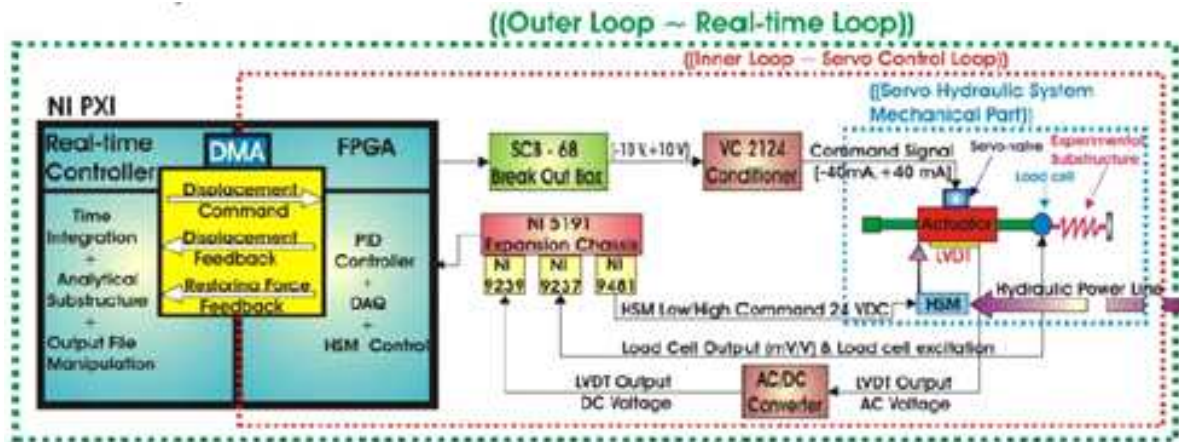


그림 58 실시간 하이브리드 시뮬레이션의 개요

## Recent Research on Real-time Hybrid Simulation



Oya Mercan

Associate Professor  
Department of Civil Engineering  
e-mail address: oya.mercan@utoronto.ca

## Seismic Hazard Mitigation

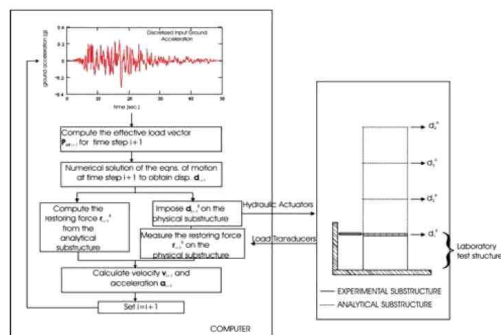
Torre Mayor Office Building in Mexico City



- Knowledge of structural performance from real-time tests of large scale structures equipped with these devices is required for developing performance-based design codes.

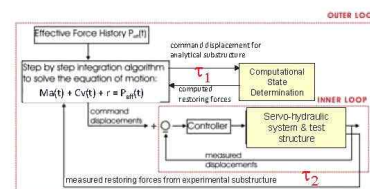
2

## Hybrid Simulation



3

## Real-time Hybrid Simulation Types & Sources of Error



4

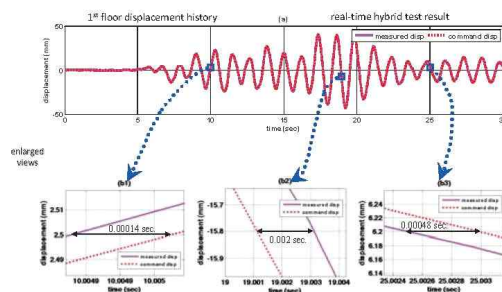
## Delay Dependent Stability Analysis of Outer Loop Dynamics

- Aim is to find the critical time delay that destabilizes the outer loop dynamics
- Prior research (Wallace et al., 2005; Wu et al., 2006)
  - linearization, numerical bifurcation studies, SDOF systems
- Our contribution
  - employs Pseudodelay technique (Gu et al., 2003) with an exact mapping, without any approximation and linearization
  - yields closed form expressions for critical time delay for real-time PSD testing of SDOF systems
  - extensible to MDOF systems for PSD or hybrid PSD testing

Earthquake Engineering Structural Dynamics  
• 36:1523-1543 (2007)  
• 37:1269-1293 (2008)

5

## Tracking Performance Evaluation



6

## Tracking Performance Evaluation

- Tracking and Amplitude Indicators:** Can qualitatively identify the amplitude and phase errors between command and measured signals  
Smart Structures and Systems  
4 (5):667-684 (2008)

- Phase and Amplitude Error Indices:** Can uncouple the amplitude and phase errors between the command and measured signals; and can accurately quantify them.

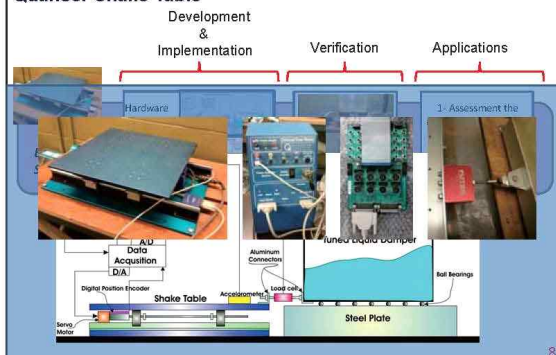
Earthquake Engineering Structural Dynamics  
4(10): 1347-1364 (2012)

- Frequency Domain Based Indicators:** Can uncouple the amplitude and phase errors between the command and measured signals; and can accurately quantify them. Can be implemented and executed in real-time.

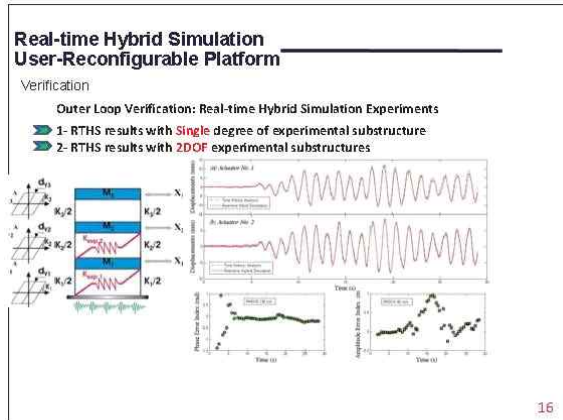
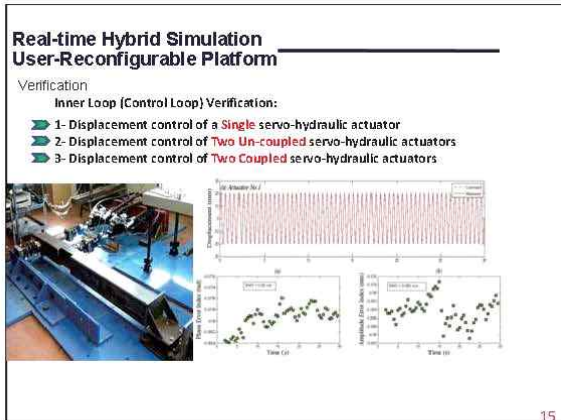
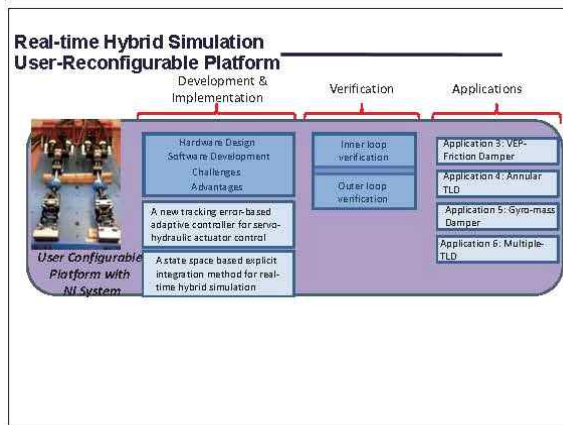
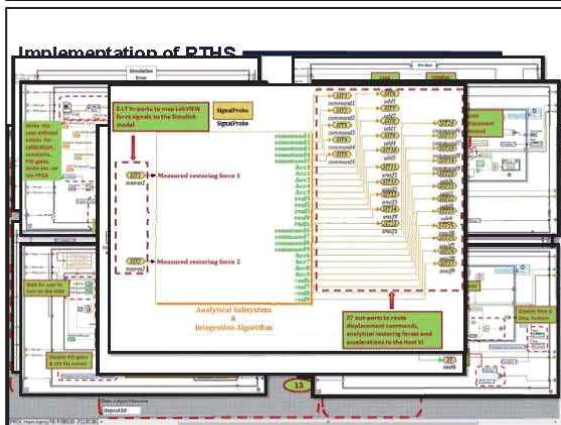
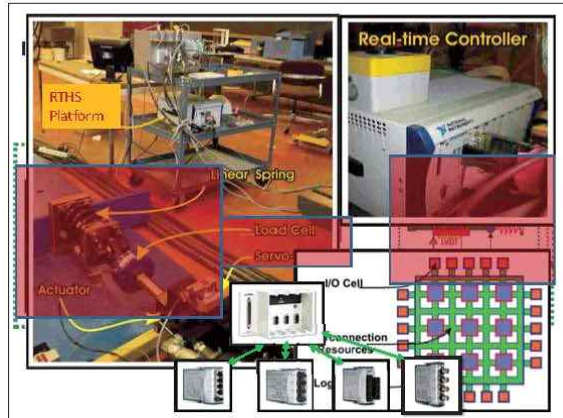
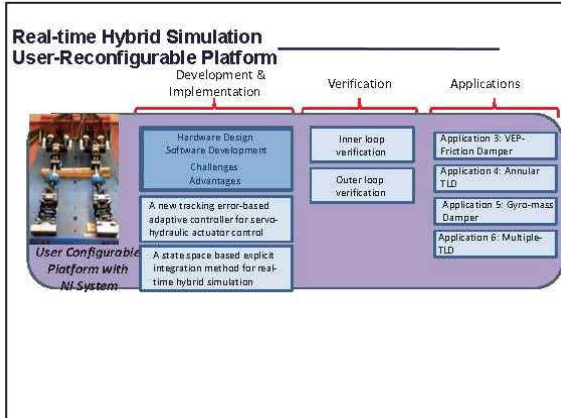
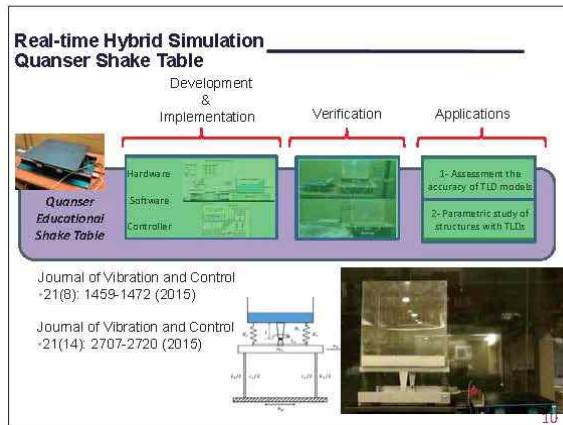
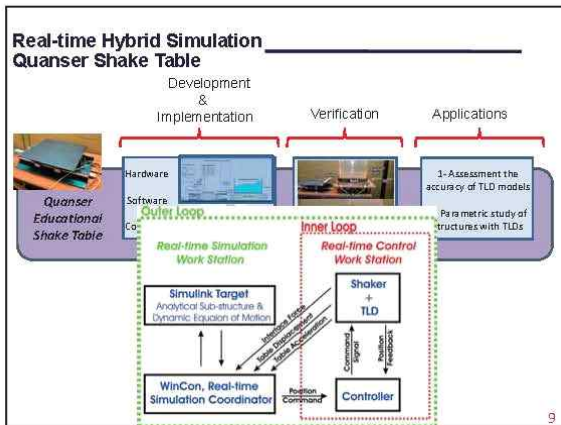
Journal of Vibration and Control  
DOI: 10.1177/1077546314548205. (2014)

7

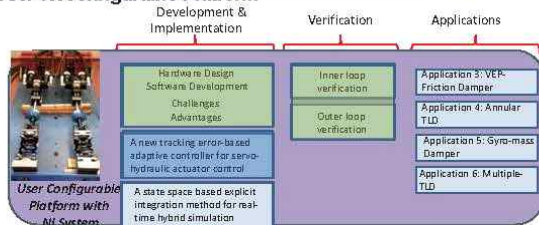
## Real-time Hybrid Simulation Quanser Shake Table



8



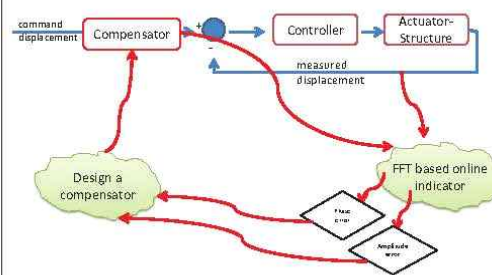
## Real-time Hybrid Simulation User-Reconfigurable Platform



• Smart Structures and Systems  
14(6): 1151-1172 (2014)

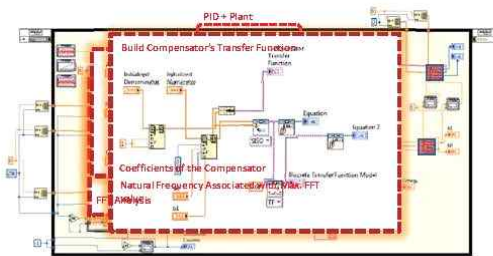
## Adaptive Control

Inner loop of RTHS



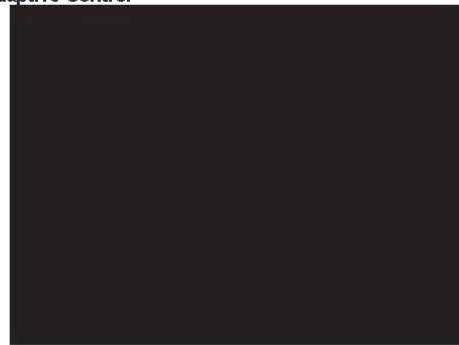
19

## Adaptive Control

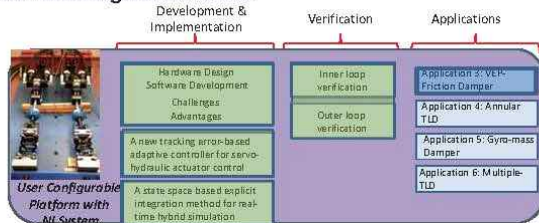


19

## Adaptive Control



## Real-time Hybrid Simulation User-Reconfigurable Platform



• Smart Structures and Systems  
14(6): 1151-1172 (2014)

• Structural Control and Health Monitoring  
DOI:10.1002/stc.179 (2015)

• Journal of Vibration and Control  
DOI: 10.1177/1077546314548205 (2014)

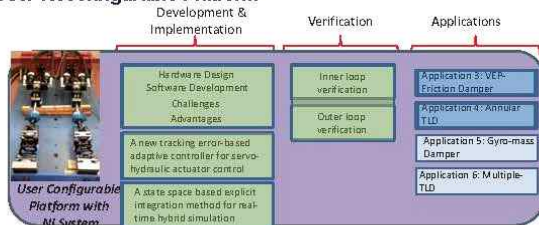
## Application 3

Visco-elastic damper + Friction fuse

- SDOF tests  
Nonlinear SDOF + VE+Friction damper (analytical) + (experimental)
- 2DOF tests  
Nonlinear 2DOF + 2 VE+Friction dampers (analytical) + (experimental)



## Real-time Hybrid Simulation User-Reconfigurable Platform



• Smart Structures and Systems  
14(6): 1151-1172 (2014)

• Structural Control and Health Monitoring  
DOI:10.1002/stc.179 (2015)

• Journal of Vibration and Control  
DOI: 10.1177/1077546314548205 (2014)

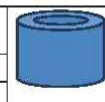
## Application 4

Real-time hybrid simulation of Annular Tuned Liquid Damper structure interaction

Wind Turbine Tower  
Analytically Modeled in Computer

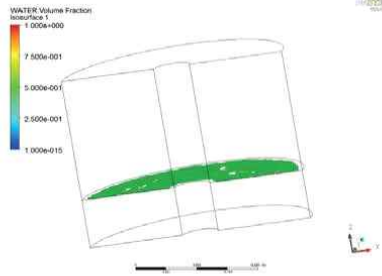
Annular Tuned Liquid Damper  
Physically Tested in Lab

| Inner radius (r) | Outer radius (R) | Height (h) |
|------------------|------------------|------------|
| mm               | mm               | mm         |
| 101.6            | 463.55           | 762        |

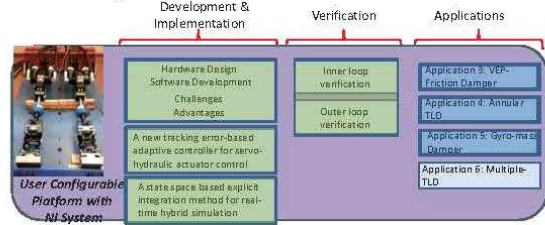


24

#### Application 4



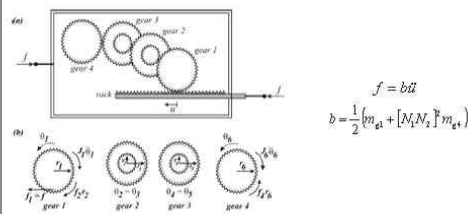
#### Real-time Hybrid Simulation User-Reconfigurable Platform



- Smart Structures and Systems 14(6): 1151-1172 (2014)
- Structural Control and Health Monitoring DOI: 10.1002/stc.179 (2015)
- Journal of Vibration and Control DOI: 10.1177/1077546314548205 (2014)

#### Application 5

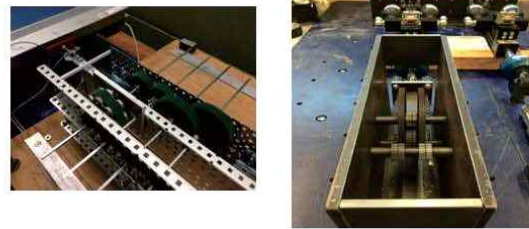
##### Gyro Mass Damper



27

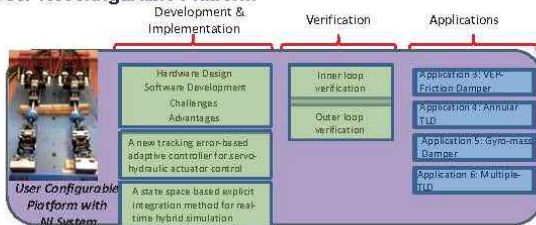
#### Application 5

Real-time hybrid simulation of Gyro Mass Damper + Structure interaction (experimental) + (analytical)



28

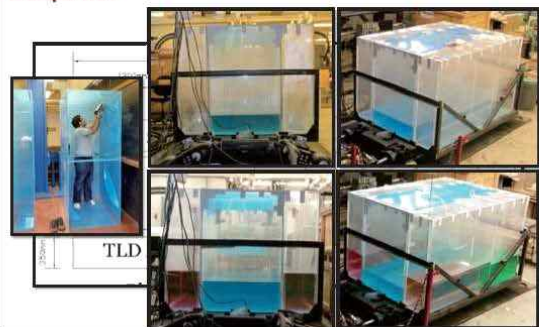
#### Real-time Hybrid Simulation User-Reconfigurable Platform



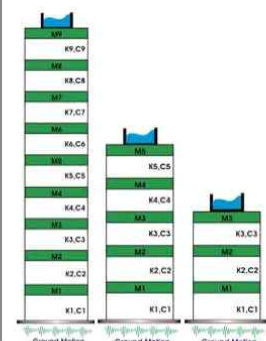
- Smart Structures and Systems 14(6): 1151-1172 (2014)
- Structural Control and Health Monitoring DOI: 10.1002/stc.179 (2015)
- Journal of Vibration and Control DOI: 10.1177/1077546314548205 (2014)

#### Application 6

##### Multiple TLDs



#### Application 6



- 3 Case studies:**
  - RTHS of a 3-story building
  - RTHS of a 5-story building
  - RTHS of a 9-story building
- 3 Control scenarios:**
  - Structure with no TLD
  - Structure with 1-TLD
  - Structure with 3-TLDs
- Seismic Input:**
  - 12 ground motions



Thank you!  
Questions?

## 아. 멀티 플랫폼 하이브리드 시뮬레이션

### 1) UT-SIM : University of Toronto Hybrid Simulation Framework

- 가) 많은 모델링 기법이 개발되고 계산 능력이 증가함에도 불구하고 아직 복잡한 구조물의 거동을 완전히 묘사할 수는 없음
- 나) 지진, 쓰나미, 태풍 폭발 등 극한 하중하에서의 성능을 평가하기 위해서 물리적인 실험이 필요
- 다) UT-SIM은 통신 모듈, 통합 모듈, 하부 모듈로 구성 (Huang and Kwon, 2015)
- 라) 통신 모듈은 서로다른 소프트웨어간의 통신을 가능하게 하고, 통합 모듈은 시간 적분 해석을 수행하며, 하부 모듈은 대상 부재의 거동을 수치해석적 또는 실험적으로 파악

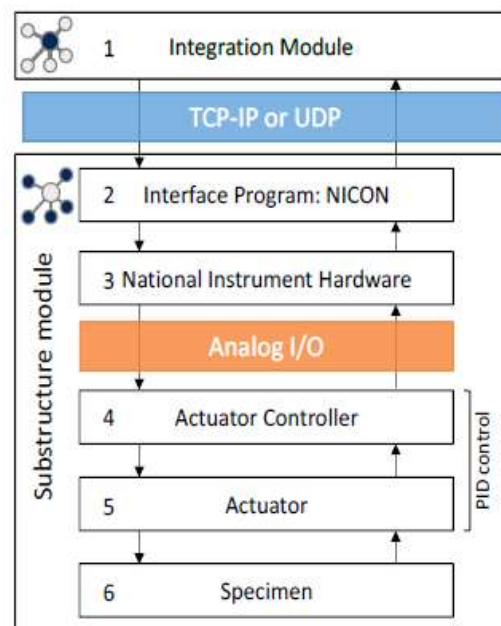


그림 64 UT-SIM 통신 체계 개요

### 2) UT10 하이브리드 실험 장치

- 가) 기존 준동적 하이브리드 시뮬레이션 방법은 실제 실험 시편의 크기 및 여러 제한 사항들 때문에 실제 실험에 쓰이는데 제약이 많음
- 나) 이를 보완하고자 기존 실험 크기의 10배에 달하는 사재 및 감쇠 요소를 수용할 수 있는 UT10 하이브리드 실험장치를 개발 (Mojiri and Kwon, 2015)
- 다) 본 실험 장치는 10개의 요소로 총 800 kN에 해당하는 하중을 가할 수 있고, 5개 이하의 요소를 사용할 경우 1600 kN을 수용
- 라) 본 실험 장치의 성능을 검증하고자 3,5,10개의 요소로 이루어진 실제 복층 건물을 대상으로 실험을 진행 중

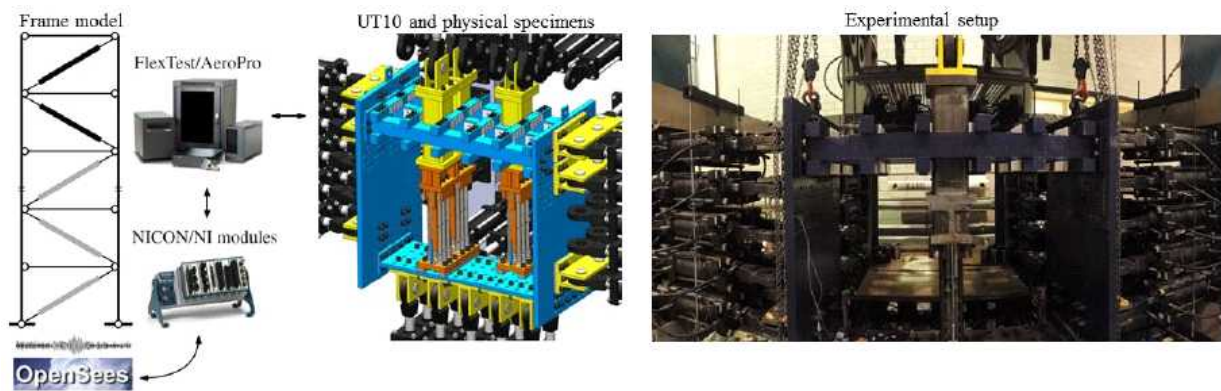


그림 65 하이브리드 실험 장치

### 3) 토질-터널 상호작용 멀티 플랫폼 시뮬레이션

- 가) 기존 토질-터널 상호작용 해석 프로그램들은 선형탄성구간을 대상으로 한 프로그램이 대부분이기에 실제 변형, 균열 진행 및 구조물 파괴 등을 측정이 어려움
- 나) 본 연구에서는 기존 연구들의 단점을 보완하고 비선형 해석툴을 개발하고자, 비선형 해석 프로그램인 OpenSees에 철근 콘크리트 터널 해석 모델인 VecTor2를 통합하여 해석을 수행

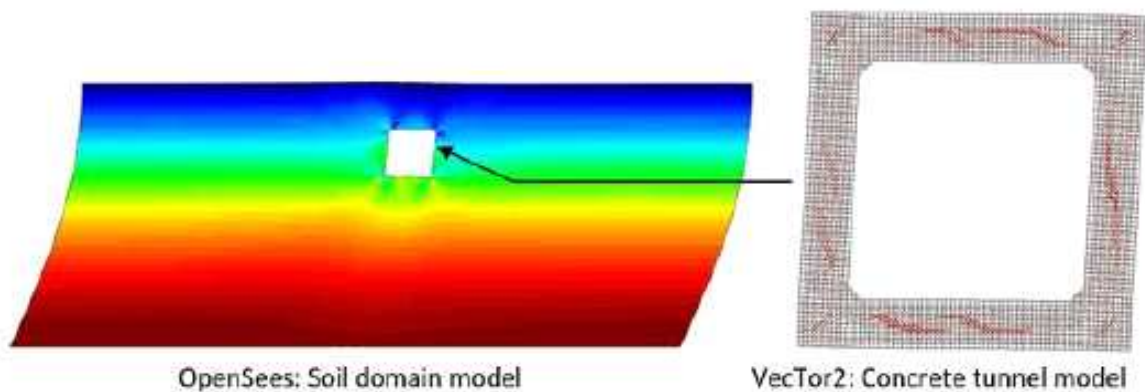


그림 66 UT-SIM 기반 지반-터널 상호작용

## Recent Developments on Multi-platform Hybrid Simulation at the University of Toronto

Oh-Sung Kwon, Ph.D.

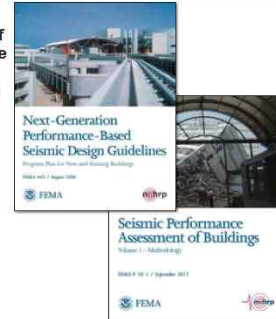
Associate Professor  
Department of Civil Engineering  
University of Toronto



April 26, 2016

## Introduction – Seismic Performance Assessment

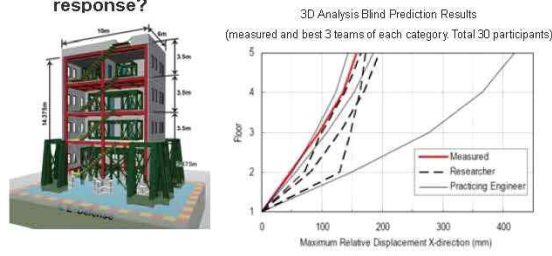
- Realistic assessment of seismic performance: One of the important elements in the “Next Generation of Performance Based Seismic Design Guidelines”
- Challenges with the modelling and prediction of inelastic dynamic response of structures



Introduction Model Updating Sim. Framework UT10 Simulator Summary 2

## Introduction – Seismic Performance Assessment

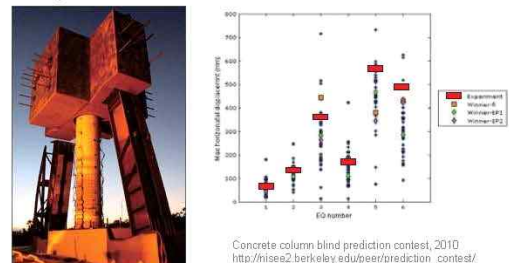
- How accurately can we predict the structural response?



Introduction Model Updating Sim. Framework UT10 Simulator Summary 3

## Introduction – Seismic Performance Assessment

- How accurately can we predict the structural response?

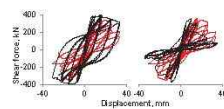


Introduction Model Updating Sim. Framework UT10 Simulator Summary 4

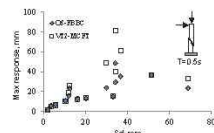
## Introduction – Seismic Performance Assessment

- Numerical Methods

- Challenges in the numerical prediction of inelastic dynamic response of a structure



- Difficulties in numerical model development from component tests



Introduction Model Updating Sim. Framework UT10 Simulator Summary 5

## Introduction – Seismic Performance Assessment

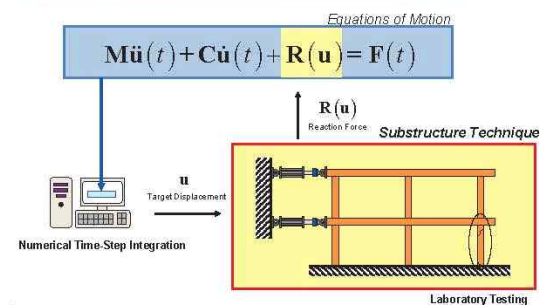
- Experimental Methods

- Static cyclic test of components
  - Predefined loading history
  - Performance of structural elements under cyclic load reversals
- Shaking table test
  - Most complete and accurate method
  - Limitation in scale of the specimen
  - Depends on selection of input excitation
  - Expensive
- Pseudo-dynamic or real time hybrid simulation
  - Dynamic behaviour modeled computationally
  - Whole or part of the structures tested physically
  - Allows geographically distributed testing or testing of large scale specimens



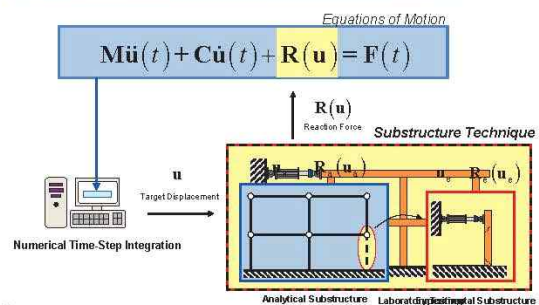
Introduction Model Updating Sim. Framework UT10 Simulator Summary 6

## Introduction – Hybrid Simulation



Introduction Model Updating Sim. Framework UT10 Simulator Summary 9

## Introduction – Hybrid Simulation



Introduction Model Updating Sim. Framework UT10 Simulator Summary 10



## Research Needs

- Maximize the use of data from experimental specimen during the hybrid simulation through model updating method

Rosen, D. and Karamulla, V. (2010) "Model updating method for substructure pseudo-dynamic hybrid simulation." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(13), 1971-1984.

- Develop a standardized framework to couple diverse experimental / analytical resources



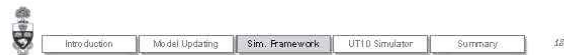
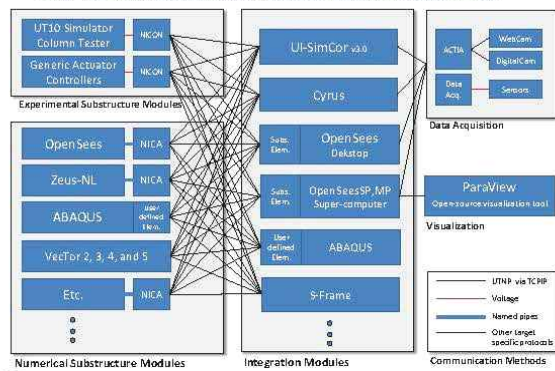
- Develop an experimental apparatus for hybrid simulation with multiple specimens

## Hybrid Simulation Frameworks

- UI-SimCor** University of Illinois at Urbana Champaign
- OpenSees-OpenFresco** University of California, Berkeley
- Mercury** University of Colorado, Boulder
- HybridFEM** Lehigh University
- NCREE-ISEEDb** National Center for Research on Earthquake Engineering, Taiwan



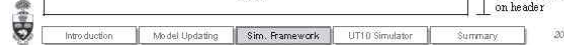
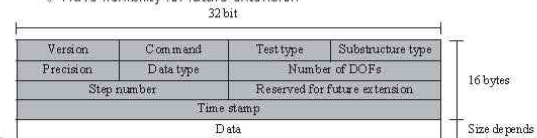
### UT-SIM: University of Toronto Simulation Framework



### UT-SIM: University of Toronto Simulation Framework

- Standardized data exchange format and communication protocol**

- Structure of data to be transmitted between an integration module and substructure modules
- Cover all parameters and indicators needed for various simulation purposes (e.g. hybrid thermal simulation, real-time simulation, etc.)
- Have flexibility for future extension



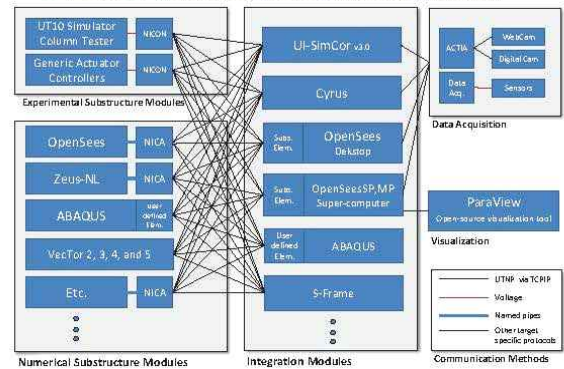
### UT-SIM: University of Toronto Simulation Framework

- Encapsulate data exchange format and communication related functions**

- Shared library or shared object file (*DataExchange.dll* or *DataExchange.out*)
- Compile all functions as a DLL or Object, and then use the same code in all applications
- Designed in such a way that it is compatible with different languages:
  - C++ (OpenSees, NICA)
  - Fortran (VecTor programs, Abaqus, ANSYS)
  - LabVIEW (NICON)
  - MATLAB (UI-SimCor)

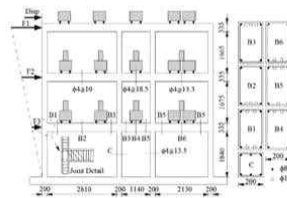


### UT-SIM: University of Toronto Simulation Framework



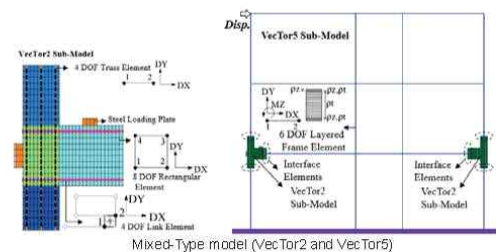
### UT-SIM: University of Toronto Simulation Framework

- Example - Three Story RC Frame (Calvi et al. 2002)**



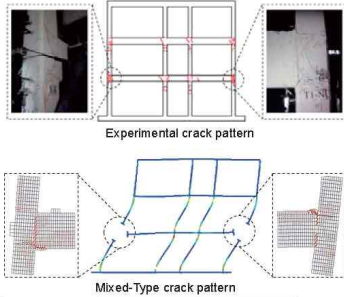
### UT-SIM: University of Toronto Simulation Framework

- Example - Three Story RC Frame (Calvi et al. 2002)**



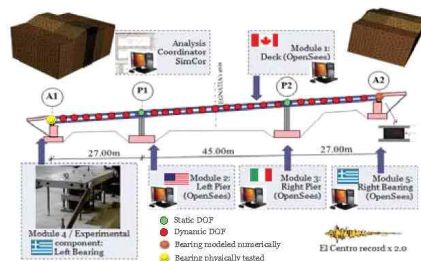
## UT-SIM: University of Toronto Simulation Framework

### □ Example - Three Story RC Frame (Calvi et al. 2002)



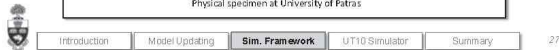
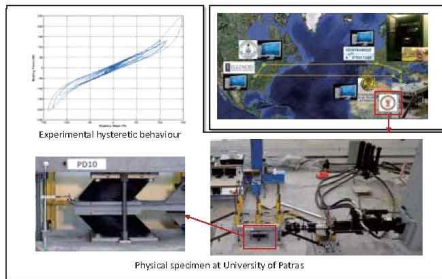
## UT-SIM: University of Toronto Simulation Framework

### □ Example – Inter-continental Hybrid Simulation



## UT-SIM: University of Toronto Simulation Framework

### □ Example – Inter-continental Hybrid Simulation



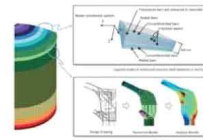
## UT-SIM: University of Toronto Simulation Framework

### □ Challenges

- ◆ Mainly explicit integration scheme
- ◆ Algorithm development to integrate dynamic substructure modules
- ◆ Improvement in the communication protocol

### □ Application examples (research in-progress)

- ◆ Performance assessment of underground structures
- ◆ Simulation of nuclear containment structure subjected to earthquakes and internal pressure increase
- ◆ Simulation of a structure under thermal load



<http://www.ut-sim.ca/>



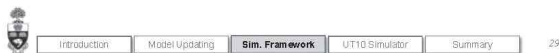
## UT-SIM: University of Toronto Simulation Framework

### □ Hybrid fire simulation

- ◆ Collaboration with Korean Institute of Construction Technology and Colorado State University



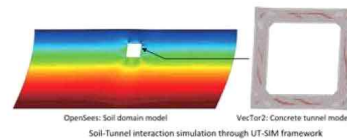
Fire testing facility in KICT (left) and CSU (right)



## UT-SIM: University of Toronto Simulation Framework

### □ Soil-Tunnel Interaction Analysis

- ◆ Collaboration with Prof. Park in Hanyang University



Soil-Tunnel interaction simulation through UT-SIM framework



## UT-SIM: University of Toronto Simulation Framework

### □ Column Testing Machine to Hybrid Simulator for Columns

- ◆ Collaboration with Prof. Sheikh



## UT-SIM: University of Toronto Simulation Framework

### □ Seismic Performance of Link Beams in High-rise Buildings

- ◆ Collaboration with S-Frame and SOM



## Research Needs

- Maximize the use of data from experimental specimen during the hybrid simulation through model updating method

Islam, D. and Karmali, V. (2013) "Model updating method for substructure pseudo dynamic hybrid simulation," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(12), 1971-1984.

- Develop a standardized framework to couple diverse experimental / analytical resources

- Develop an experimental apparatus for hybrid simulation with multiple specimens



Introduction Model Updating Sim. Framework **UT10 Simulator** Summary 33

## UT10 Hybrid Simulator

- Hybrid simulation with up-to ten physical brace specimens

- Friction damper
- Self-centering dampers (SCED)
- Buckling Restrained Brace (BRB)
- Hysteretic yielding damper (YBS)

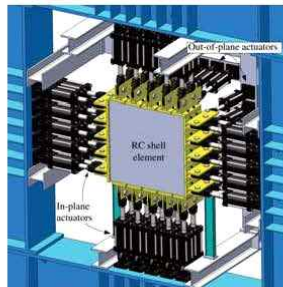


Introduction Model Updating Sim. Framework **UT10 Simulator** Summary 34

## UT10 Hybrid Simulator

- Shell Element Tester

- 40, 1000 kN,  $\pm 150$  mm in-plane actuators
- 20, 500 kN,  $\pm 150$  mm out-of-plane actuators



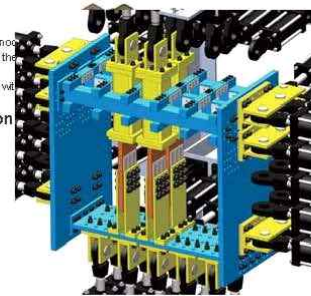
Introduction Model Updating Sim. Framework **UT10 Simulator** Summary 35

## UT10 Hybrid Simulator

- Specimen support frame

- Lateral stability of the system
- Testing elements in an uncoupled mode
- Friction between the specimen and the lateral support
- Adjustable configuration for braces with different sizes and load capacities

- Control and communication platform



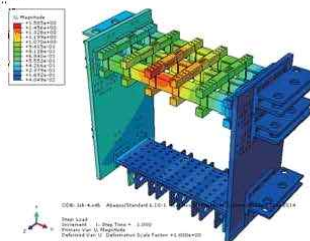
Introduction Model Updating Sim. Framework **UT10 Simulator** Summary 36

## UT10 Hybrid Simulator

- Specimen support frame

- Lateral stability of the system
- Testing elements in an uncoupled mode
- Friction between the specimen and the lateral support
- Adjustable configuration for braces with different sizes and load capacities

- Control and communication platform



Introduction Model Updating Sim. Framework **UT10 Simulator** Summary 37

## UT10 Hybrid Simulator

- Specimen support frame

- Lateral stability of the system
- Testing elements in an uncoupled mode
- Friction between the specimen and the lateral support
- Adjustable configuration for braces with different sizes and load capacities

- Control and communication platform



Introduction Model Updating Sim. Framework **UT10 Simulator** Summary 38

## UT10 Hybrid Simulator

- Specimen support frame

- Lateral stability of the system
- Testing elements in an uncoupled mode
- Friction between the specimen and the lateral support
- Adjustable configuration for braces with different sizes and load capacities

- Control and communication platform

| Quantity | Shaft box Size (inches) | Load capacity (kN) |
|----------|-------------------------|--------------------|
| 10       | 8x8                     | 800                |
| 6+4      | 6-8x6 + 4-10x8          | 800                |
| 5        | 12x8                    | 800                |
| 3+2      | 3-12x6 + 2-12x10        | 800                |
| 5        | 20x8                    | 1600               |
| 5        | 16x8                    | 1600               |
| 3+2      | 3-20x6 + 2-20x10        | 1600               |
| 3+2      | 3-16x6 + 2-16x10        | 1600               |

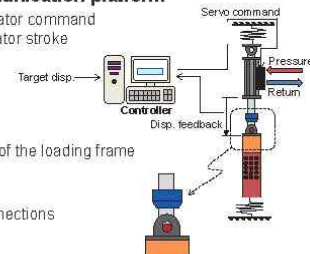


Introduction Model Updating Sim. Framework **UT10 Simulator** Summary 39

## UT10 Hybrid Simulator

- Control and communication platform

- Tracking error, actuator command and measured actuator stroke



- Elastic deformation of the loading frame and supports

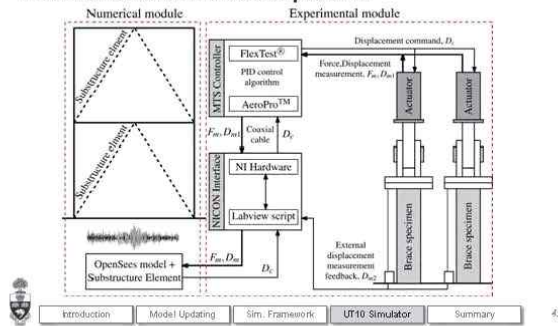
- Backlash in the connections



Introduction Model Updating Sim. Framework **UT10 Simulator** Summary 40

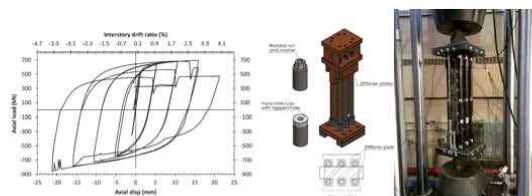
## UT10 Hybrid Simulator

### Control and communication platform



## UT10 Hybrid Simulator

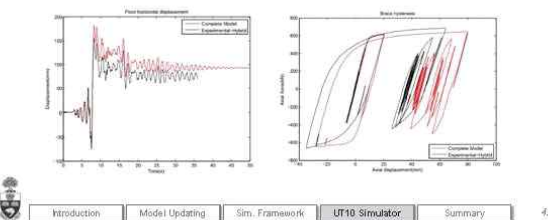
### Assessment of a five-storey Steel Frame with BRBs



## UT10 Hybrid Simulator

### Assessment of a five-storey Steel Frame with BRBs

- Location: Los Angeles, Soil: C, Period: 1.2 sec
- Design based on real-scale adjustable BRB specimen
- First story BRB tested physically, the rest modeled in OpenSees
- The rest of BRB models calibrated based on cyclic test results

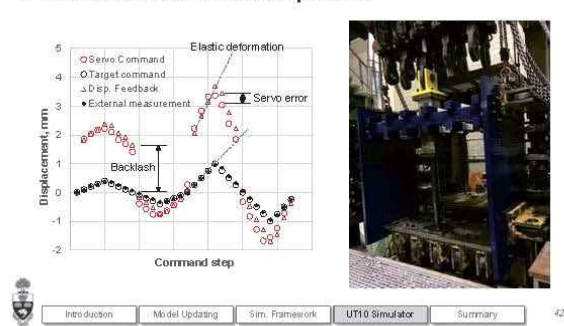


## Summary

- The UT-SIM framework aims to accurately assess the performance a structural system based on the integration of realistic numerical or physical component models.
  - The PSD hybrid simulation method, which was originated from seismic applications, is being expanded for broader applications.
  - The integrated simulation approach facilitates the reuse of computer codes and share of experimental facilities. ([www.ut-sim.ca](http://www.ut-sim.ca))
- 47

## UT10 Hybrid Simulator

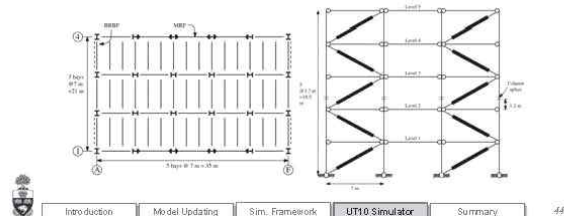
### Control and communication platform



## UT10 Hybrid Simulator

### Assessment of a five-storey Steel Frame with BRBs

- Location: Los Angeles, Soil: C, Period: 1.2 sec
- Design based on real-scale adjustable BRB specimen
- First story BRB tested physically, the rest modeled in OpenSees
- The rest of BRB models calibrated based on cyclic test results



## UT10 Hybrid Simulator

### Assessment of a five-storey Steel Frame with BRBs

- Current research in progress:
  - Three-BRB hybrid simulation
  - Ten-BRB hybrid simulations
  - Ten-yielding braces



Thank you for your attention.  
Questions?

## 제7장 연구개발성과의 보안등급

해당사항 없음.

## 제8장 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 여구시설 장비 현황

해당사항 없음.

## 제9장 행사에 대한 주관연구기관 및 상대국 참여기관 의견서

- 1) 글로벌기술협력과제로 2016년 4월 연세대학교와 캐나다 토론토 대학교의 공동 주최로 국제공동세미나를 성공적으로 개최하였다.
- 2) 국제공동워크숍을 기회로 공동연구를 진행하기 위해 필요한 기본적인 교류를 실시하였다. 예를 들어, 상호 기관의 연구 경험, 연구를 수행할 수 있는 실험 시설, 연구 인력 등에 대한 전반적인 이해를 하였다. 또한 연구자들이 직접 만나 대화를 나누면서 어떠한 주제의 공동연구가 필요한지, 공동연구를 통해 어떠한 시너지 효과가 있을지 등에 대한 심도 있는 논의를 실시하였다.
- 3) 연구분야에 대한 기술적인 이해뿐만 아니라 연구원간 네트워크를 형성할 수 있는 기회를 만드는 데 큰 기여를 했다고 사료된다. 워크샵에는 토론토대학교에서 8명, 한국의 토목/건축 분야에서 10명의 연구진이 참여하여 각자의 연구 분야/최근 연구 동향 등에 대하여 연구결과를 발표하였다.
- 4) 발표 내용들은 크게 철근/콘크리트 구조, 내진 해석 및 실험방법론, 극한하중 등으로 구분하였으며, 각 주제에 대한 연구를 진행하는 분야가 한국과 캐나다에 모두 있었기에 공동의 연구 관심사가 있음을 확인할 수 있었다.
- 5) 워크샵을 마치면서 향후에 어떠한 식으로 공동연구를 원활히 진행할 수 있을지에 대한 논의를 하였다. 그 회의에서 제안한 내용들은 1) 대학원생의 교환을 통한 수업 수강 및 공동연구, 2) 석박사과정 교환학생 프로그램을 원활히 할 수 있도록 학교간 MOU 체결, 3) 석박사과정 교환학생을 위한 연구비 지원 프로그램 모색 (캐나다의 MITACS 글로벌링크 프로그램), 4) 국토교통부 및 NSERC (Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada) 내의 국제공동연구를 위한 과제제안 등이 있었다.
- 6) 워크샵 후 한국과의 국제공동연구를 활성화하기 위하여, 토론토 대학교에서는 캐나다의 MITACS에 연락을 취하여 한국학생들도 Global Link프로그램에 지원할 수 있는 프로그램을 만들어 달라고 요청하였다. 이 요청에 대한 구체적인 논의를 위해 MITACS의 Global Link담당자가 지난 8월에 개최된 CKC2016 (Canada-Korea Conference on Science Engineering)에 참여하여 한국연구재단의 담당자와 논의를 한 것으로 알고 있다.

- 7) 토론토 대학교의 권오성 교수는 2016년 6, 7월 중 워크샵에 참여한 한국 기관 (서울대학교, 서울시립대학교, 연세대학교, 원자력기술 연구원, 한양대학교)을 모두 방문하여 세미나 및 공동연구 방안에 대한 논의를 수행하였다.
- 8) 결론적으로, 4월의 국제공동연구를 통하여 상호 기관등에 대한 이해가 매우 많이 증진하였고, 향후 공동연구를 수행할 수 있는 기초를 마련하였다고 사료된다.

## 제10장 행사 수행 과정에서의 안전 조치 이행 실적

- 1) 국제공동 워크숍 참가를 위해서 캐나다를 방문하는 주관연구기관의 참석자는 여행자 보험을 통해 불의의 재난에 대한 안전 조치를 실행하였다.

## 제11장 기타사항

### 가. 연구비 집행실적 (연세대학교)

(단위: 천원)

| 예산 항목 |         |              | 현금                        | 예산<br>총액    | 실집행액     | 합계       | 집행<br>잔액 | 집행율%     |        |  |
|-------|---------|--------------|---------------------------|-------------|----------|----------|----------|----------|--------|--|
| 총예산   | 직접비     | 인건비          | 외부 인건비                    | 0           | 0        | 0        | 0        | 0%       |        |  |
|       |         |              | 외부 인건비<br>(학생)            | 0           | 0        | 0        | 0        | 0%       |        |  |
|       |         |              | 소계                        | 0           | 0        | 0        | 0        | 0%       |        |  |
|       |         | 학생 인건비 (통합)  |                           | 0           | 0        | 0        | 0        | 0%       |        |  |
|       |         | 연구 장비<br>재료비 |                           | 0           | 0        | 0        | 0        | 0%       |        |  |
|       |         | 연구활동비        | 국외여비                      |             |          |          | 8,001.1  | 8,001.1  |        |  |
|       |         |              | 기술정보 활동비                  |             |          |          | 150      | 150      |        |  |
|       |         |              | 도서 구입비                    |             |          |          | 427.6    | 427.6    |        |  |
|       |         |              | 수용비 및 수수료                 |             |          |          | 679.9    | 679.9    |        |  |
|       |         |              | 인건비<br>성수당<br>(외부참<br>여자) | 운임 및<br>숙박비 |          |          | 15,024.4 | 15,024.4 |        |  |
|       | 강연료     |              |                           |             |          | 2,000    | 2,000    |          |        |  |
|       | 강연료     |              |                           |             | 2,200    | 2,200    |          |          |        |  |
|       | 소계      |              | 28,520                    | 28,520      | 28,483.0 | 28,483.0 | 36.965   | 99.87%   |        |  |
|       | 연구과제추진비 | 국내여비         |                           |             |          | 698.5    | 698.5    |          |        |  |
|       |         | 연구환경 유지비     |                           |             |          | 1,241.6  | 1,241.6  |          |        |  |
|       |         | 회의비          |                           |             |          | 1,135.3  | 1,135.3  |          |        |  |
|       |         | 소계           |                           | 3,480       | 3,480    | 3,075.4  | 3,075.4  | 404.6    | 88.37% |  |

|  |     |             |        |        |          |          |         |        |
|--|-----|-------------|--------|--------|----------|----------|---------|--------|
|  |     | 연구수당        | 0      | 0      | 0        | 0        | 0       | 0%     |
|  |     | 위탁연구<br>개발비 | 0      | 0      | 0        | 0        | 0       | 0%     |
|  |     | 소계          | 32,000 | 32,000 | 31,558.4 | 31,558.4 | 441.565 | 98.62% |
|  | 간접비 |             | 0      | 0      | 0        | 0        | 0       | 0%     |
|  | 소계  |             | 32,000 | 32,000 | 31,558.4 | 31,558.4 | 441.565 | 98.62% |

- 1) 당초 계획보다 추가적인 참여인원에 대한 재원 마련은 상대적으로 저렴한 항공권 및 숙박시설을 이용하였음.
- 2) 집행 잔액 441,565원은 과제마감 이후 보고서 작성 및 출력과, 보고서 보안 후 인쇄비용으로 집행 예정이며, 이는 국토교통과학기술진흥원을 통하여 승인을 득하였음.

## 나. 연구비 집행실적 (University of Toronto)

(단위: 천원)

| 예산 항목 |     | 현금          | 예산총액  | 실집행액  | 합계        | 집행잔액      | 집행율%    |
|-------|-----|-------------|-------|-------|-----------|-----------|---------|
| 총예산   | 직접비 | 외부 인건비      | 0     | 0     | 0         | 0         | 0%      |
|       |     | 외부 인건비 (학생) | 0     | 0     | 0         | 0         | 0%      |
|       |     | 소계          | 0     | 0     | 0         | 0         | 0%      |
|       |     | 학생 인건비 (통합) | 0     | 0     | 0         | 0         | 0%      |
|       |     | 연구 장비 재료비   | 0     | 0     | 0         | 0         | 0%      |
|       |     | 연구 활동비      | 0     | 0     | 0         | 0         | 0%      |
|       |     | 연구과제추진비     |       |       |           |           |         |
|       |     | 국내여비        |       |       | 0         | 0         |         |
|       |     | 연구환경유지비     |       |       | 159.698   | 159.698   |         |
|       |     | 회의비         |       |       | 2,724.104 | 2,724.104 |         |
|       |     | 소계          | 2,000 | 2,000 | 2,883.802 | -883.802  | 144.19% |
|       |     | 연구수당        | 0     | 0     | 0         | 0         | 0%      |
|       |     | 위탁연구개발비     | 0     | 0     | 0         | 0         | 0%      |
|       |     | 소계          | 2,000 | 2,000 | 2,883.802 | -883.802  | 144.19% |
|       |     | 간접비         | 0     | 0     | 0         | 0         | 0%      |
|       |     | 소계          | 2,000 | 2,000 | 2,883.802 | -883.802  | 144.19% |

- 1) 워크숍 개최를 Univeristy of Toronto에서 하였기에, 상대적으로 상대국 부담금이 작음. 하지만, 참여인원의 확대로 캐나다 측에서 당초 계획된 예산보다 초과집행 하였음.

## 제12장 참고문헌

- A. Vepsa. A, Saarenheimo. F, Tarallo. J. M. Rambach, N. Orbovic, 2012, Impact tests for IRIS 2010 benchmark exercise, *Journal of Disaster Research* 7(5), 619–628.
- ACI Committee 318, 2014, *Building Code and Commentary*.
- Argyroudis S Pitilakis. 2012, Seismic fragility curves of shallow tunnels in alluvial deposits *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 35, 1–12
- Ashasi-Sorkhabi A. Mercan O. 2014, Development, Implementation and Verification of a User Configurable Platform for Real-time Hybrid Simulation. *Smart Structures and Systems* 14(6), 1151–1172.
- Azad. A.K, Ahmad. S, and Azher. S. A, 2007, Residual Strength of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams, *ACI Materials Journal* 104, 40–47.
- Baek, H. Park, K. Multi-scale dynamic fracture simulation by using cohesive zone modeling (in preparation).
- Baker, C.J, 1987, Measures to control vehicle movement at exposed sites during windy periods. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 25, 151–161.
- Batista, M. Perkovic, M. A, 2014, simple static analysis of moving road vehicle under crosswind. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn* 128, 105–113.
- Bentz, E.C, Sectional Design of Concrete Structures, PhD Thesis, Dept of Civil Eng. Univ. of Toronto, 310.
- Canadian Standards Association, 2014, *Design of Concrete Structures*.
- Canadian Standards Association, *Design and Construction of Building Structures with Fibre-Reinforced Polymers*. CSA S806-12, Mississauga, ON, Canada.
- Chen, M. 2016, UHPFRC/CLT Composite Systems for Building Construction. MASc thesis, University of Toronto,
- Chiang, W.-S. Fratini, E. Baglioni, P. Liu, D. Chen, S.-H. 2012, Microstructure determination of calcium-silicate-hydrate globules by small-angle neutron scattering. *The Journal of Physical Chemistry C* 116, 5055
- Choi, H. Park, K. Crack growth within elements using element splitting for quasi-static (in preparation)
- Chung, S.-Y. Han, T.-S. Kim, S.-Y, Lee, T.-H. 2014, Investigation of the permeability of porous concrete reconstructed using probabilistic description methods. *Construction and Building Material* 66, 760–770.
- Chung, S.-Y. Han, T.-S. Kim, S.-Y. 2015, Reconstruction and evaluation of the air permeability of a cement paste specimen with a void distribution gradient using CT

images and numerical methods. *Construction and*

Colalillo, M. and Sheikh, S. A. 2012, Seismic retrofit of shear-critical reinforced concrete beams using CFRP. *Journal of Construction and Building Materials*, 99–109.

Colalillo, M. and Sheikh, S. A. 2014, Behavior of Shear-Critical Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fiber-Reinforced Polymer – Experimentation. *ACI Structural Journal*. 111(6), 1373–1384.

Cui, C. and Sheikh, S. A. 2010, Analytical Model for Circular Normal- and High-Strength Concrete Columns Confined with FRP. *ASCE Journal of Composites for Construction* 14(5), 562–572.

Cui, C. and Sheikh, S. A. 2010, Experimental Study of Normal- and High-Strength Concrete Confined with Fiber-Reinforced Polymers. *ASCE Journal of Composites for Construction* 14(5), 553–561.

Ellingwood B.R., Celik O, Kinali K, 2007 Fragility assessment of building structural systems in Mid-America. *Earthquake Engineering Structural Dynamics* 36(13), 1935–1952.

Elnashai A.S, Papanikolaou V, Lee D.H, 2001, ZeusNL-A program for inelastic dynamic analysis of structures. MAE Center, University of Illinois: Urbana-Champaign, USA.

Ghosh, Kumar K. and Sheikh. Shamim A. 2007, Seismic Upgrade with CFRP of Columns Containing Lap Spliced Rebars. *ACI Structural Journal*, 227–236.

Habel, K, Charron, J.-P. Braike, S. 2008, Douglas Hooton, R., Gauvreau, P., & Massicotte, B. Ultra-high performance fibre reinforced concrete mix design in central Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering* 3

Habibi. F, Sheikh, S. A., Orbovic, N., P., Panesar, D. K., and Vecchio, F. J. 2015, Alkali Aggregate Reaction in Nuclear Concrete Structures Part 3: Structural Shear Wall Elements, SMIRT23, Manchester, UK 10–14.

Han. S.J, Lee. D.H, Kim. K.S, Seo. S.Y, Moon. J.H, and Monteiro. P. J. M, 2014. Degradation of Flexural Strength in Reinforced Concrete Members Caused by Steel Corrosion. *Construction and Building Materials* 54,

Hashash Y.M.; Hook J.J. Schmidt, B. Yao, J.I-C. 2001, Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology* 16, 247–293

Hilsdorf, H.K. Kropp, J. Koch, H.J. 1978, The effects of nuclear radiation on the mechanical properties of concrete. *ACI Special Publication* 55, 223–54.

Huang X, Kwon OS. 2015, Development of integrated framework for distributed multi-platform simulation. *Proceedings of 6AESE/11ANCRiSST*, Champaign, IL.

Johnson, D. T. C. and Sheikh, S. A. 2013, Performance of bent stirrups and headed bars in concrete structures, *Canadian Journal of Civil Engineering* 40(1), 1082–1090.

Korean Society of Civil Engineers, 2006, Design guidelines for steel cable-supported

bridge, Korea.

Kurtz, N. Song, J. 2013, Cross-entropy-based adaptive importance sampling using Gaussian mixture. *Structural Safety* 42, 35-44.

Le Pape, Y. Field, K. G. Remec, 2015, I. Radiation effects in concrete for nuclear power plants, Part II: Perspective from micromechanical modeling. *Nuclear Engineering and Design* 282, 144-157.

Liu Y. Goorts K. Ashasi-Sorkhabi A. Mercan O. Narasimhan S. 2016, A State-Space Based Explicit Integration Method for Real-time Hybrid Simulation. *Structural Control and Health Monitoring* 23, 641-658.

Liu, J. and Sheikh, S. A. 2013, FRP-confined circular columns under simulated seismic loads. *ACI Structural Journal* 110(6), 941-952.

Lulec, A. Vecchio, F.J. 2015. Development of Simplified Analytical Tools for Impact and Impulsive Loading Analysis of Reinforced Concrete Slabs. *Proc, Fifth International Workshop on Performance, Protection & St*

Marshall, J, 1985, Experimental Comparison of the Simplified and the General Shear Design Methods of CSA Standard CAN3-A23.3-M84, M.A.Sc. Thesis supervised by Michael Collins, 103.

Mirza Hessabi R, Mercan O. 2015, Assessment Measures for Hybrid Simulation: A Discussion of Recent Developments,

Mirza Hessabi R. and Mercan O. 2013, A Practical Approach to the Phase and Amplitude Error Estimation for Pseudodynamic (PSD) Testing. *ASCE Structures Congress*, Pittsburgh, Pennsylvania.

Mirza Hessabi R., Ashasi-Sorkhabi A, Mercan O. 2014, A New Tracking Error-based Adaptive Controller for Servo-hydraulic Actuator Control. *Journal of Vibration and Control*. DOI: 10.1177/1077546314548205. Publishe

Mirza Hessabi R., Mercan O. 2010, Phase and Amplitude Indices (PAEI) to Assess the Success of Displacement Based Real-time Testing. *ASCE Structures Congress/AISC (NASCC)*. Orlando, Florida.

Mirza Hessabi, R., Mercan O. 2012, Phase and Amplitude Error Indices (PAEI) for Error Quantification in Pseudodynamic Testing. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 4(10), 1347-1364.

MLTM, 2009, Earthquake resistance design regulations for subway structures. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.

Mojiri S, Kwon OS, Christopoulos C. 2015, Development of 10-Element Hybrid Simulator and its Application to Seismic Performance Assessment of Structures with Hysteretic Energy Dissipative Braces. *Proceedings of*

Montoya, E. 2003. Behaviour and analysis of confined concrete. Ph.D. Thesis, University

of Toronto, Toronto, ON, Canada.

Moosavi S.H, Mirza-Hessabi R., Mercan O, 2015, Numerical Simulation and Analysis of Nonlinear State-Space Control Design for Hydraulic Actuator Control. *Structural Control and Health Monitoring* 22(8), 1068-1085.

Moosavi S.H., Mercan O. 2010, Modifications of Integration Algorithms to Account for Load Discontinuity in Pseudodynamic Testing. 9th US National/10th Canadian Conf. on Earthquake Eng. Toronto, Ontario.

Parratt, M.K. Packer, J.A. Seica, M.V. Yankelevsky, D.Z. 2016, Field blast testing of multi-layered laminated windows. 4th International Conference on Protective Structures (ICPS4), Beijing, China, Proc. Paper.

Ritchie, C. Packer, J.A. Seica, M. Yankelevsky, D. 2014, Field blast testing and SDOF analysis of unfilled and concrete-filled RHS members. 23rd International Symposium on Military Aspects of Blast and Shock (MA

Ritchie, C. Packer, J.A. Seica, M. Zhao, X.L. 2015, Field blast testing and FE modelling of RHS members. 15th International Symposium on Tubular Structures (ISTS15), Rio de Janeiro, Brazil, Proc. 211-218.

Ritchie, C. Packer, J.A. Seica, M.V. Zhao, X.L. 2015, Field blast testing and FE modelling of concrete-filled RHS members. 3rd International Conference on Protective Structures (ICPS3), Newcastle, Australia, Pro

Ritchie, C. Packer, J.A. Seica, M.V. Zhao, X.L. 2016, Field blast testing of concrete-filled double-skin tube members. 4th International Conference on Protective Structures (ICPS4) 2016, Beijing, China, Proc. Pa

Roesler, J. Paulino, G. Park, K, 2007, Gaedicke, C. Concrete fracture prediction using bilinear softening. *Cement and Concrete Composites* 29, 300-312.

Rubinstein, R. 1981, *Simulation and the Monte Carlo methods*; John Wiley and Sons, Inc. Hoboken (NJ), USA.,

Rubinstein, R.; Kroese, D. 2004, *The Cross Entropy Method: a Unified Approach to Combinatorial Optimization, Monte-Carlo Simulation, and Machine learning*; Springer, Inc.: New York (NY), USA.

Schlangen, H.E.J.G. 1993, *Experimental and numerical analysis of fracture processes in concrete*, Delft University of Technology.

Seica, M.V. Krynski, M. Walker, M. Packer, J.A. 2011, Analysis of the dynamic response of architectural glazing subject to blast loading. *ASCE Journal of Architectural Engineering* 17(2), 59-74.

Shao, B., & Gauvreau, P. 2015, Mix Design and Basic Properties of a New UHPFRC Featuring Portland-Limestone Cement. 7th RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, 37-44.

- Sheikh, S. A. 2007, Field and Lab performance of Bridge Columns Repaired with Wrapped GFRP. Canadian Journal of Civil Engineering, National Research Council, Canada, 34(2).
- Shin J, Kim J. Lee K, 2014, Seismic assessment of damaged piloti-type RC building subjected to successive earthquakes. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 43(11), 1603–1619
- Spiller, K. Packer, J.A. Seica, M.V. Yankelevsky, 2016, D.Z. Prediction of annealed glass window response to blast loading. International Journal of Impact Engineering 88, 189–200.
- Spiller, K. Seica, M. Packer, J.A. Yankelevsky, D. 2014, Blast testing of annealed glass windows. 23rd International Symposium on Military Aspects of Blast and Shock (MABS23, Oxford, UK, Proc. paper 32.
- Stanish, K. Gooton, R.D. and Pantazopoulou, S.J. 1999. Corrosion Effects on Bond Strength in Reinforced Concrete. ACI Structural Journal 96. 915–921.
- Sun, M.; Packer, J.A. 2014, High strain rate behaviour of cold-formed rectangular hollow sections. Engineering Structures 62–63, 181–192.
- Tavassoli, Arjang, Liu, Jingtao and Sheikh, Shamim A, 2015, Glass Fiber-Reinforced Polymer-Reinforced Circular Columns under Simulated Seismic Loads, ACI Structural Journal 112(1), 103–114.
- Torquato, S. 2002, Random heterogeneous materials: microstructure and macroscopic properties 16. Springer-Verlag: New York, 23–58.
- Vecchio, F.J, 1990, Reinforced Concrete Membrane Element Formulations, ASCE J. of Struct. Eng. 116(3), 730–750.
- Vecchio, F.J. 2000, Disturbed Stress Field Model for Reinforced Concrete: Formulation. Journal of Structural Engineering, ASCE 126(9), 1070–1077.
- Vecchio, F.J. Collins, M.P. 1986, The Modified Compression-Field Theory for reinforced concrete elements subjected to shear. Journal of the American Concrete Institute 83(2), 219–231.
- Vint, L. and Sheikh, S. A. 2015, Investigation of Bond Properties of Alternate Anchorage Schemes for Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars, ACI Structural Journal 112(1), 59–68.
- Walker, M. Ritchie, C. Spiller, K. Seica, M.V. Packer, J.A. Eytan, A, 2013, Challenges and outcome of full-scale blast experimentation on structural steel members and glass elements. 15th International Symposium
- Walker, M. Seica, M.V. Eytan, A. Packer, J.A, 2012, Standards and strategies for blast testing of structures and devices. 22nd International Symposium on Military Aspects of Blast and Shock (MABS22), Bourges, Fr

- Wang, Z, Zhang, Z, 2013, Seismic damage classification and risk assessment of mountain tunnels with a validation for the 2008 Wenchuan earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 45, 45-55
- Wang, Z. Song, J. 2016, Cross-entropy-based adaptive importance sampling using von Mises-Fisher mixture for high dimensional reliability analysis. *Structural Safety* 59, 42-52.
- Yi, N. H, Lee, S. W, and Kim, J. H. 2012, Experimental study on fire-resistant characteristics of bi-directionally prestressed concrete panel under RABT fire scenario. *Journal of the Korea Concrete Institute* 24(
- Yi, N. H, Lee, S. W, Lee, S. J, and Kim, J. H. J, 2013, Experimental evaluation of Bi-directionally unbonded prestressed concrete panel impact-resistance behavior under impact loading.
- Zhan H, Kwon OS. 2015, Actuator controller interface program for pseudo- dynamic hybrid simulation. 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics, Songdo, Korea:
- Zhang, C, & Gauvreau. P, 2015, Timber-Concrete Composite Systems with Ductile Connections. *Journal of Structural Engineering* 141(7).