

# 내진 보강된 철골모멘트골조의 취약성 등고선을 통한 성능 평가

## Performance Evaluation of Steel Moment Resisting Frames with Seismic Retrofit Using Fragility Contour Method

김수동<sup>1)</sup> · 이기학<sup>1)\*</sup> · 정성훈<sup>2)</sup> · 김도현<sup>3)</sup>

Kim, Su Dong<sup>1)</sup>, Lee, Kihak<sup>1)\*</sup>, Jeong, Seong-Hoon<sup>2)</sup>, Kim, Do Hyun<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>세종대학교 건축공학과, <sup>2)</sup>인하대학교 건축공학과, <sup>3)</sup>대우건설기술연구원

<sup>1)</sup>Department of Architectural Engineering, Sejong University, <sup>2)</sup>Department of Architectural Engineering, Inha University, <sup>3)</sup>Disaster Prevention Research Team, Daewoo E&C Co. Ltd.

### / A B S T R A C T /

Due to a high level of system ductility, steel moment resisting frames have been widely used for lateral force resisting structural systems in high seismic zones. Earthquake field investigations after Northridge earthquake in 1994 and Kobe earthquake in 1995 have reported that many steel moment resisting frames designed before 1990's had suffered significant damages and structural collapse. In this research, seismic performance assessment of steel moment resisting frames designed in accordance with the previous seismic provisions before 1990's was performed. Buckling-restrained braces and shear walls are considered for seismic retrofit of the reference buildings. Increasing stiffness and strength of the buildings using buckling-restrained braces and shear walls are considered as options to rehabilitate the damaged buildings. Probabilistic seismic performance assessment using fragility analysis results is used for the criteria for determining an appropriate seismic retrofit strategy. The fragility contour method can be used to provide an initial guideline to structural engineers when various structural retrofit options for the damaged buildings are available.

**Key words:** Steel Moment Resisting Frames, Seismic Retrofit, Probabilistic Performance Target, Buckling Restrained Bracing, shearwall, Fragility analysis

## 1. 서론

내진설계는 지진재해 발생 후 구조물의 피해에 대한 자료의 축적과 이를 바탕으로 한 학문적 연구를 바탕으로 발전되어 왔다. 최신의 내진설계기준에 따라서 설계된 건축물들은 과거의 건축물들에 비해서 내진성능이 우수하고 그에 따른 성능을 보인 것으로 관련 전문가들에게 인정되어 왔다. 하지만 현재에도 전체 건축물의 상당한 비율을 차지하는 대부분의 건축물들은 지진공학에서 많은 연구결과와 그동안의 지진 피해의 경험이 반영되지 못한 과거 설계기준에 의해서 대부분 지어진 건축물들이라는 사실을 고려할 때, 기존 건축물들의 내진성능 평가와 내진보강 방안에 관한 연구는 매우 중요한 과제라고 할 수 있다. 이에 따라 과거기준에 의해 설계된 구조물의 내

진성능을 개선하기 위해서 다양한 보수 및 보강방법에 대한 연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 있다[1,2].

철골모멘트 저항골조는 우수한 연성능력으로 인하여 지진위험이 높은 지역을 중심으로 내진구조시스템에 널리 채택되어 왔다. 그러나 노스리지 지진(Northridge, U.S.A, 1994)과 고베 지진(Kobe, Japan, 1995)에서 철골구조물 접합부의 취성적 파괴에 따라 막대한 경제적/사회적 손실이 발생하였고 이에 따라 지금까지 많은 연구와 실험이 수행되어 여러 가지 내진 성능을 높일 수 있는 대안이 제시되었다.

본 연구는 기존 건축 구조물의 내진성능평가와 보강전략에 관한 연구의 예제로서 내진설계기준 즉 1973, 1985, 1994 UBC[3] 기준에 의해 설계되어 지어졌다고 가정된 구조물들의 내진성능향상을 목적으로 기존연구[1,2]에서 개발된 채널 보강형 비좌굴가새(Buckling Restrained Brace, 이하 BRB)시스템과 전단벽 시스템을 적용하였다. 기존 연구에서 개발된 BRB 시스템 중에서 가장 우수한 성능을 보여준 BRB와 기존 연구자에 의해 수행된 전단벽 실험체의 이력거동 모델링된 전단벽을 통해 기존 3개의 UBC

\*Corresponding author: Lee, Kihak

E-mail: kihaklee@sejong.ac.kr

(Received 22 June 2012; Accepted 5 December 2012)

기준에 의해 설계된 해석모델을 내진보강을 실행한 후 이에 따른 내진성능을 비교, 평가하였다. 성능평가를 위해 지진에 의한 구조물의 응답 예측에서 수반되는 여러 가지 불확실성을 고려하기 위해서 확률론적 취약성 분석 방법을 고려하였다. 본 논문에서는 단순화된 단자유도 모델에 대해 다양한 주기와 강성에 따른 광범위한 응답 데이터베이스를 구축하고 이를 바탕으로 구조물의 보강 전후 취약성 분석을 수행하는 시간을 획기적으로 절약할 수 있는 취약성 등고선을 도출하고 이를 구조물의 내진보강 전략수립에 활용하는 방법을 제시하였다.

## 2. 기존 건축물과 내진보강에 대한 컴퓨터 해석 모델

### 2.1 철골모멘트저항골조와 지반운동

BRB와 전단벽 구조시스템의 보강에 따른 보강 전/후의 철골 모멘트저항골조의 내진성능을 비교하기 위해서 다음과 같이 고려되었다. 과거 UBC 기준에 의해 설계된 건물의 해석모델은 Northridge 지진에서의 경험을 바탕으로 취성적 접합부 특성을 가진 모델을 고려하였다. 취성접합부 모델은 보-기둥 모멘트접합부에서 기둥의 플랜지와 보의 웨브가 만나는 용접부에서 정 모멘트에 대한 반응 시 플랜지에서의 갑작스런 균열 현상에 의해 보-기둥 접합부에서 갑작스런 큰 강도와 강성의 손실을 갖는 것으로 가정하였다. 이에 대한 자세한 내용은 다음 논문을 참고할 수 있다[4,21].

Fig. 1은 본 연구에서 고려한 UBC기준으로 설계된 3층 철골 모멘트저항골조 건물에 대한 평면과 입면을 보여주고 있다. 해석에 고려된 건물은 캘리포니아주 LA 지역에 위치한 것으로 가정되어 설계되었다. 건물 외곽부에 굽은 선으로 표시된 골조시스템이 횡력에 저항하는 특수모멘트골조로 설계되었다.

### 2.2 연구에 고려한 지반 운동

본 연구에서는 각 해석모델의 동적해석을 위해서 미국 연방 재난국 (FEMA, Federal Emergency Management Agency)의 지진피해 저감연구의 일환으로 Somerville (1997)에 의해 제안된 20개의 지반운동이 고려되었다. 이 지반운동은 미국 캘리포니아주의 LA 지역에 대해서 50년 동안 2%의 초과확률을 갖는 20개의 지반운동 가속도이다[5]. 예상되는 위험수준에 대한 지반운동가속도의 평균 스펙트럼과 목표 반응스펙트럼(Target

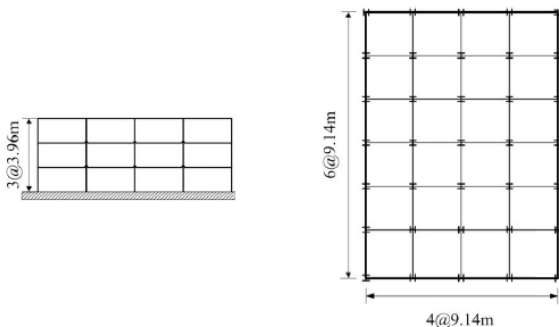


Fig. 1. Plan and elevation views of the 3-story building

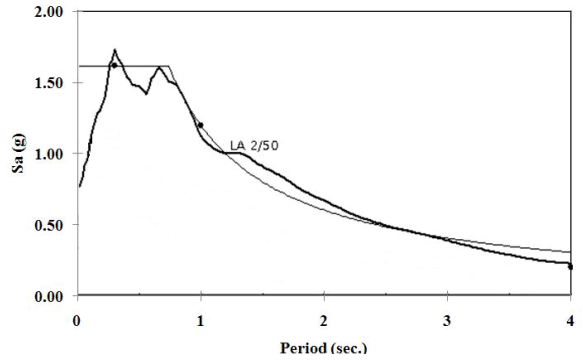


Fig. 2. Mean and target spectrum of 20 LA ground motions (2%/50years hazard level)

Response Spectrum)을 Fig. 2에 나타냈다. 구조물의 동적해석을 수행할 때 고려되는 LA 지역의 2%/50년의 지진위험도를 가진 지반운동의 가속도는 목표 반응스펙트럼에 비교적 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

### 2.3 BRB시스템의 해석 모델

본 연구에서는 기존에 수행되었던 실험을 통해서 가장 우수한 에너지소산능력을 보인 채널 보강형 BRB시스템을 선택하여 Drain-2DX로 모델링하여 BRB시스템의 보강성능을 해석모델에 반영하였다.

기존 연구에서는 현장에서 간단하게 제작할 수 있도록 철판으로 만든 중심코어의 양면을 두 개의 C-형 외부 보강재로 보강한 BRB시스템을 개발하고 1층 1경간골조 프레임에 설치하여 반복하중(Cyclic loading)에 대한 성능 실험을 수행하였다. BRB시스템의 에너지소산능력은 구조물의 내진 성능에 큰 영향을 미치는 변수이기 때문에 누적된 이력에너지 값이 가장 큰 것으로 조사된 D02-2 실험체를 본 연구의 보강 구조 시스템으로 선택하였다. 자세한 실험계획과 결과 등은 다음 논문을 참고할 수 있다[1,2,6,7].

Drain-2DX에서 트러스에서는 압축력에 대한 좌굴현상을 고려할 것인가를 해석모델에 따라 결정할 수 있기 때문에 BRB의 거동을 적절하게 반영할 수 있다. Fig. 3은 기존연구에서 가장 우수한 성능을 보인 BRB시스템의 실험결과(D02-2)와 Drain-2DX로 나타난 BRB시스템의 해석결과를 비교한 것이다. 실험 결과와 해석 모델을 거동을 비교하기 위해 D02-2

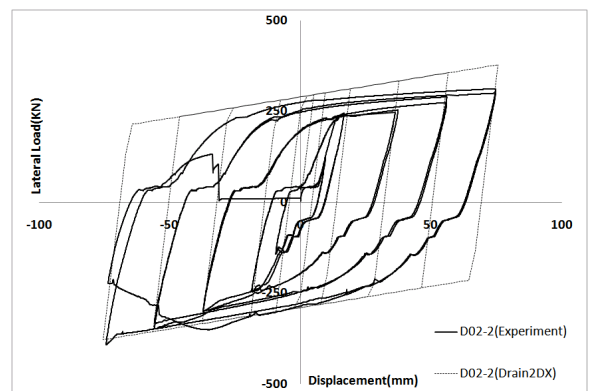


Fig. 3. Comparison of BRB hysteresis behaviors from the analytical and experimental works

(Drain-2DX)모델의 힘-변위에 대한 결과를 산출하기 위해서 실험에서 사용된 가력 프로토콜을 Drain-2DX 모델에 고려하였다. 해석결과와 실험 결과를 표현한 Fig. 3에서 해석결과는 점선으로 표시하였고 실험에 대한 결과는 실선으로 나타냈다. BRB 거동의 장점인 압축영역에서도 좌굴이 일어나지 않고 인장력 발생시와 동일하게 하중에 저항하는 거동을 해석 모델에서도 잘 반영하고 있으며 전체적으로 해석모델과 D02-2 실험체에 대한 힘-변위 이력곡선의 초기 기울기와 최대 강도 그리고 최대 변위 등이 비교적 잘 부합하는 것으로 판단되어 보수/보강의 해석모델에 적용하였다.

### 2.4 전단벽시스템의 해석 모델

철근콘크리트 전단벽의 해석을 위해서 다양한 해석 모델이 제안되어 왔으며, 이들은 크게 미시적(Micro)모델과 거시적(Macro)모델로 분류될 수 있다. 미시적 모델은 역학적 이론으로부터 유도되며 세밀화된 메쉬로 나누는 유한요소방법을 사용하여 적용된다. 이와 반대로 거시적모델은 절점과 스프링 등의 일차원적인 부재를 통해 전단벽의 거동을 모델링하는 방법이다.

전단벽 시스템의 거시적 모델의 개발에 대한 연구는 Kabeyasawa et al.[8]에 의해 처음 제안되었다. 이 모델링은 2개의 축방향 스프링을 양쪽 끝에 배치하고 회전 스프링을 가운데 설치하여 벽체의 휨 거동을 표현하고 중앙에 수평 스프링을 설치하여 모델의 전단거동을 나타낸다. 이후 Vulcano et al.[9]에서 보다 정확한 휨 거동을 반영하기 위해 다수의 축방향 스프링을 설치하고 중앙의 회전스프링을 제거하여 휨거동을 더욱 정밀하게 예측할 수 있도록 하였다. Linde[10]에서는 Kebeyasawa et al.의 모델에서 회전스프링을 생략하여 상-하 강체 보에 3개의 수직스프링과 하나의 수평스프링을 사용하여 더욱 단순한 모델링과 명확한 운동방정식을 개발하였다.

본 연구에서는 전단벽 모델을 Drain2DX로 모델링 하여 벽의 경계 영역에 위치한 두 개의 수직 스프링을 통해 전단벽의 휨 거동을 반영 하였으며 전단벽의 중앙에 위치한 한 개의 수평 스프링(전단 스프링)을 이용하여 전단 거동을 반영하였다. 보다 자세한 정보는 기존 연구[11]에서 참고할 수 있다. 본 연구에서는 전단벽 시스템을 Fig. 4와 같이 모델링 하였다. Fig. 4의 강제보와 강제기둥은 단면과 모멘트를 무한으로 가정한 Drain-2DX의 2번 Element를 사용하였으며 비선형 축변형 스프링과 비선형 전단 스프링은

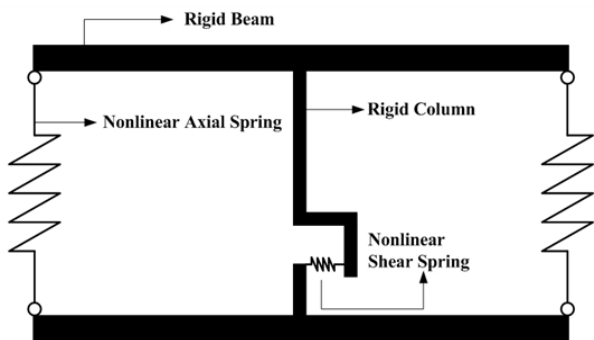


Fig. 4. Analytical models of shearwall systems using the Drain-2DX program

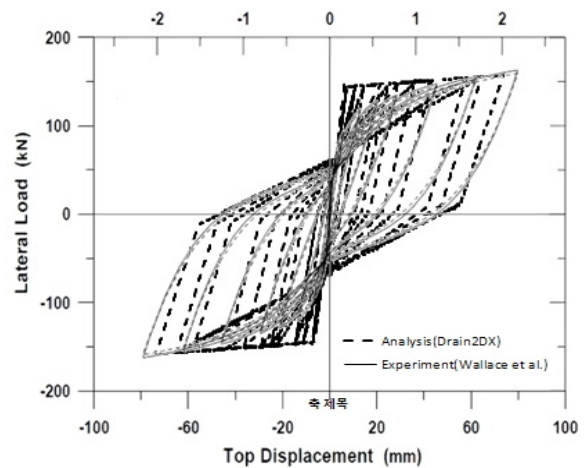


Fig. 5. Comparison of hysteresis behavior of shearwall systems

Drain-2DX의 수정된 10번 Element를 사용하여 모델링 하였다.

Fig. 5는 기존 연구자[12]에 의해 수행된 실제 전단벽 실험체의 이력거동 실험과 같은 조건으로 Drain2DX로 모델링된 전단벽의 이력거동을 비교한 것이다. 여기서 점선은 해석결과를 나타낸 것이고 실선은 전단벽의 실험결과를 표시한 것으로 최대 변위, 최대 강도 및 이력거동이 전체적으로 잘 부합하는 것을 볼 수 있다.

### 3. 지진 취약성 등고선

구조물의 내진성능을 평가하기 위해서 지반운동의 임의성과 구조물의 해석모델링에 관한 불확실성을 명확히 고려하기 위해서 확률론적 취약성 분석 방법이 많이 이용되어 왔으나 이를 수행하기 위해서는 해석모델링의 완성과 비선형 시간이력해석에 따른 노력과 시간 등을 투자하여 충분한 수의 구조물 응답 자료들이 필요하다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 본 연구에서는 단순화된 모델과 이에 따른 응답 데이터베이스를 바탕으로 취약성 분석을 신속히 수행할 수 있는 취약성 등고선을 도출하고 이를 구조물의 내진 보강 전략 수립에 확용 하는 방법을 제시하였다.

#### 3.1 효율적인 지진 취약성 분석

취약성 분석을 해석적 방법으로 수행하는 경우에는 무엇보다도 응답 데이터의 통계 분포를 얻기 위한 비선형 해석을 수행하여야 하며 이 과정에서 상당한 시간과 노력이 요구된다. 또한 구조물이 바뀌거나 보수 보강으로 인하여 구조물의 특성이 변경될 때마다 해석 시뮬레이션을 처음부터 다시 반복해야 하는 것도 문제라고 할 수 있다. 이러한 문제점에 대응하기 위해 구조물의 비선형 동적응답 특성을 효율적으로 나타내는 응답 특성 변수( $T, SR, \alpha, \xi$ )로부터 즉각적으로 최대응답을 도출할 수 있는 응답 데이터베이스 기법을 활용하였다. 응답 데이터베이스는 취약성 분석 과정에서 비선형 동적 해석을 보완하기 위해 도입되었으며 주어진 구조물의 응답특성변수에 해당하는 비선형 해석결과를 저장해 두었다가 필요할 때 읽어서 사용하도록 고안되었다.

응답 데이터베이스를 활용한 취약성 분석 방법은 다음과 같이 세 단계를

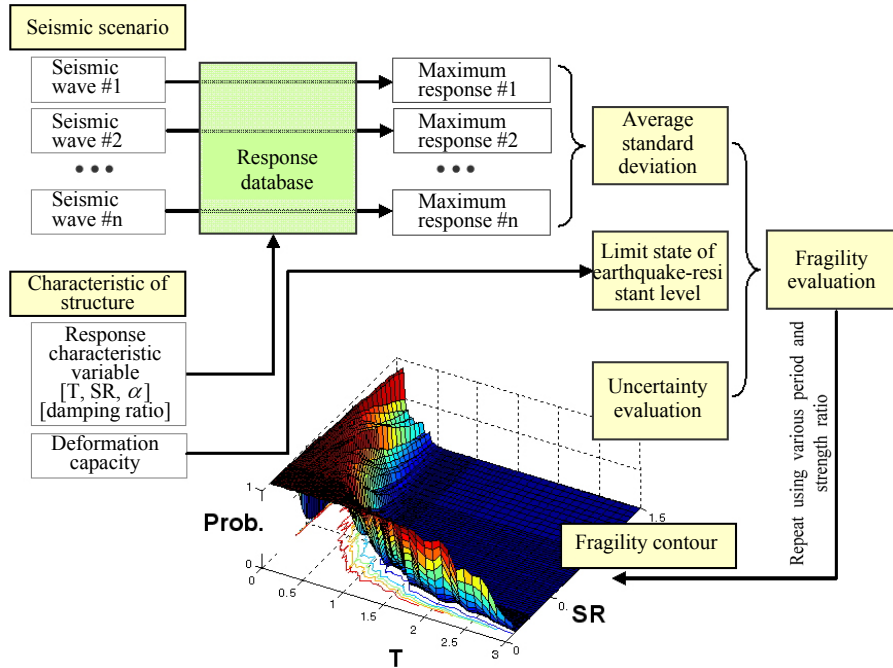


Fig. 6. Flowchart of fragility contour method using the response database

거쳐 진행된다: (1) 데이터베이스 입력 정보인 구조물의 응답특성변수와 지진파 결정 (2) 응답 데이터베이스를 이용한 응답예측, (3) 응답의 평균과 표준편차 및 내진성능 수준에 해당하는 변형 한계상태를 기준으로 취약성 분석. 이상의 절차를 Fig. 6과 같이 광범위한 주기와 강도비에 대해 반복함으로써 취약성 등고선을 도출할 수 있다. 구조물의 변형능력은 최대응답과는 직접적인 상관관계가 없으나 한계상태를 결정하므로 취약성 분석결과에 큰 영향을 준다. 취약성 등고선은 주어진 지진 시나리오에 대하여 현실적으로 가능한 모든 구조물의 주기와 강도비에 해당하는 취약성 값을 한눈에 파악할 수 있으므로 구조물의 내진설계와 내진보강의 목표를 내진성능수준에 따른 한계상태확률로 설정하는데 유용하다.

### 3.2 구조물의 응답 예측과 취약성 분석

본 연구에서 응답 데이터베이스는 취약성 분석 과정에서 구조물의 응답을 즉각적으로 구하기 위한 기법으로 도입되었다. 즉, 구조물의 특성을 나타내는 변수가 결정되면 데이터베이스로부터 최대응답을 바로 읽어들이는 방식이 채택되었는데, 이를 위해서 구조물의 응답 특성 변수( $T$ ,  $SR$ ,  $\alpha$ ,  $\xi$ )를 기준으로 응답 데이터베이스를 구축한다. 또한, 지진 응답에 영향을 미치는 지진시나리오(지진파 및 지진의 세기)도 데이터베이스를 정리하는 변수로 사용된다. 따라서 응답 데이터베이스의 입력 변수는 지진 시나리오, 주기( $T$ ), 강도비( $SR$ ), 항복전후 강성비( $\alpha$ ), 감쇠비( $\xi$ )이며 출력 변수는 구조물의 최대 응답이 된다.

응답 데이터베이스에 대한 보다 자세한 설명은 다른 논문을 [13,20] 참조할 수 있으며 데이터베이스를 구축하는 과정은 다음과 같이 요약할 수 있다.

본 연구에서 구조물의 동적응답특성 변수는 이선형(bi-linear) 하중-변위 곡선을 가진 단자유도 시스템을 바탕으로 정의되었다. Fig. 7에 나타나는 하중-변위 관계는 기본적으로 강성( $k$ ), 강도( $P$ ), 항복 후 강성( $k_p$ )에

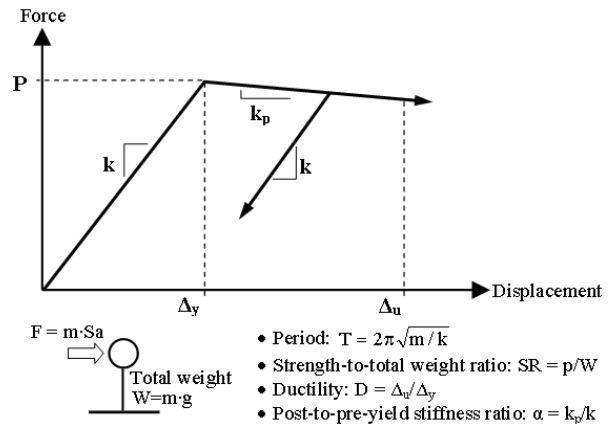


Fig. 7. Response characteristics and force-displacement relationship obtained from the SDOF system

의해서 결정된다. 이 변수들에 각각 대응되는 주기( $T$ ), 강도비( $SR$ ), 및 항복후 강성비( $\alpha$ )를 감쇠비( $\xi$ )와 더불어 구조물의 응답특성변수로 사용하였다. 여기서 강도비는 전체 중량에 대한 수평강도의 비를 나타낸다. 상기의 변수들은 주어진 지진하중에 대하여 구조물의 동적 응답을 결정하게 되며 응답데이터베이스의 구축과 활용에 있어서 기준이 된다. 이들은 단위변환이 필요하지 않아 다양한 경우에 편리하게 적용될 수 있다.

비선형 정적 해석법(Nonlinear Static Procedure)을 바탕으로 하중-변위 관계를 파악하고 이를 단자유도 시스템으로 단순화하여 구조물의 응답을 예측하는 방법은 지진공학 분야에서 널리 이용되어 왔다. 단자유도 모델을 이용한 단순화 해석 방법은 형상이 규칙적이고 고차모드의 영향을 적게 받는 구조물에 적용했을 때, 응답의 예측이 비교적 정확하고 그 과정이 효율적이라고 할 수 있다. 따라서, ATC-40[14] 와 FEMA 273[15]과 같은 현대적인 지진설계 및 평가지침에서도 비선형 정적 해석방법과 단자유도 응



답해석을 이용하여 다양한 구조물의 최대 변위를 예측하는 방법을 제시한다. 다자유도 시스템을 단순화하는 등가단자유도시스템 (Equivalent Single-Degree-of-Freedom System)과 그 적용에 대한 자세한 사항은 여러 연구문헌[16,17]에 나타나있다.

### 3.3 취약성 등고선

지진하중과 구조물에 내재되어 있는 불확실성을 고려할 때 구조물의 설계와 보강을 위한 내진성능의 목표는 신뢰성 이론에 바탕을 두고 설정되는 것이 타당하다. 하지만 성능목표가 신뢰성 이론에 바탕을 두고 확률로 설정이 되어있으면 특성이 변경될 때마다 취약성 분석과정이 다시 수반되어야 한다. 따라서 취약성 분석에서 많은 시간이 소요되므로 확률론적 내진성능 목표를 만족하는 구조 설계를 수행하는 것은 현실적으로 불가능하다.

이러한 단점에 대해 응답 데이터베이스를 이용하면 광범위한 응답특성 변수에 대해 최대응답을 즉각적으로 구할 수 있다. 이를 바탕으로 현실적으로 가능한 모든 구조물의 주기와 강도비에 해당하는 취약성 분포를 동시에 도출할 수 있다. 이 취약성 분포를 주어진 지진 시나리오에 대해서 그래프로 표현한 것이 취약성 등고선이다. 취약성 등고선은 구조물의 단순화 모델(단자유도계)을 이용하고 미리 구축된 해석결과(응답데이터베이스)로 동적 해석을 대체한다는 점에서 지진 응답 스펙트럼[18]과 매우 유사한 개념이라고 할 수 있다. 신뢰성 이론에 바탕을 둔 성능기반 내진설계와 내진보강의 방향 설정에 취약성 등고선이 유용하게 사용될 수 있다.

본 연구에서 취약성 분석을 위해 사용한 지진파의 재해 위험도는 미국 캘리포니아주의 LA 지역에 대해서 50년 동안 2%의 불교에 대해 초과확률을 갖는 20개의 지반운동으로 가정하였다. Fig. 8은 광범위한주기(T)와 강도비(SR)의 조합에 대한 최대응답을 연성도 요구치의 등고선으로 나타낸 것이다. 이 등고선의 기본 자료는 Fig. 2의 지진 시나리오에 해당하는 20개의 지진파에 대한 최대응답의 평균값이다. 이 연구에서 고려한 구조물과 부합되도록 감쇠비와 항복후 강성비를 가정하고 주기와 강도를 변수로 하여 응답 데이터베이스를 이용하였다. 즉, 79개의 주기(0.01~3초)와 68개의 강도비(0.08~1.5)에 해당하는 5372개 구조물의 20개 지진파에 대한 최대응답 107,440개를 응답 데이터베이스로부터 불러들여서 사용하였다. 20개 지진파에 대한 최대응답의 평균값을 항복변위로 나누어 연성도 요구치를 구하고 이를 등고선으로 나타내면 Fig. 8과 같이 일정한 연성도를 가진

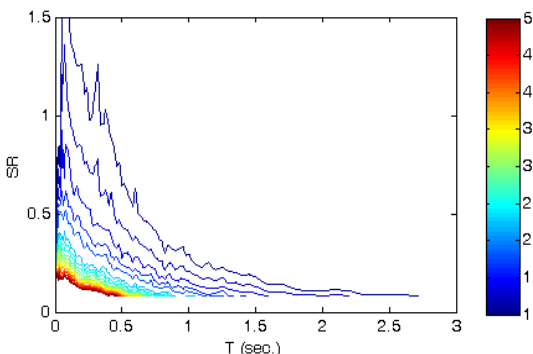


Fig. 8. Maximum response contours calculated from 20 ground motions

비선형 응답스펙트럼(constant-ductility inelastic spectrum)과 매우 유사한 결과를 얻게 된다. Fig. 8로부터 구조물의 응답특성계수인 주기(T)와 강도비(SR)가 최대응답에 미치는 영향을 분석할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 취약성 그래프를 이용하여 구조물의 내진 성능평가와 내진 보강전략을 평가하였다.

## 4. 내진성능 보강 및 평가

### 4.1 취약성 평가

본 절에서는 취약성 등고선을 활용하여 과거 UBC 기준으로 설계된 3층 건축물의 내진성능을 평가하였다. 과거 기준으로 설계된 구조물의 내진 성능을 확률론적으로 평가하고 이를 바탕으로 목표 성능에 이르기 위한 강성과 강도의 증가치를 파악하는 과정에 취약성 등고선을 활용하였다. 확률론적 내진성능 목표를 “구조물이 재현주기 2475년 (50년에 2%초과 확률)인 지진에 대하여 붕괴방지 (Collapse Prevention) 수준에 만족하기 위해서 철골모멘트골조의 붕괴방지수준의 한계상태인 최대 층간변위비 5%에 이를 확률이 30%이하가 되도록 한다.”로 설정하였고 이를 만족시키는 내진 보강 전략을 제시하기 위하여 취약성 등고선을 활용하였다. 취약성 분석과정에서 식 (1)을 이용하는데, 구조물 최대응답 ( $D_{max}$ )의 분포와 한계 변형능력 (DLS)이 우선적으로 정해져야 한다. 본 연구에서는 응답 데이터베이스를 이용하여 Fig. 8에서와 같이 광범위한 주기(T)와 강도비(SR)에 대한 최대응답을 즉각적으로 얻어낼 수 있다.

$$P(LS|s) = P(D_{LS} \leq D_{max} | s) = 1 - F(D_{LS})|s \tag{1}$$

본 논문에서 고려하고 있는 과거기준으로 설계된 구조물의 응답특성 계수는 해석모델들의 정적해석결과를 Fig. 9와 같이 이선형으로 단순화하여 구할 수 있으며 이로부터 Table 1과 같이 각각의 기준으로 설계된 구조물에 대한 강성, 강도, 항복후 강성비를 파악할 수 있으며 이 값들에 건물의 고정 하중에 해당하는 질량 8.42kips-sec<sup>2</sup>/in를 반영하여 주기(T)와 강도비(SR)을 구할 수 있다.

인명보전(Life Safety)성능목표나 붕괴방지 (Collapse Prevention) 수준의 손상에 부합하는 한계 변형능력은 구조물의 종류에 따라서 여러 가지

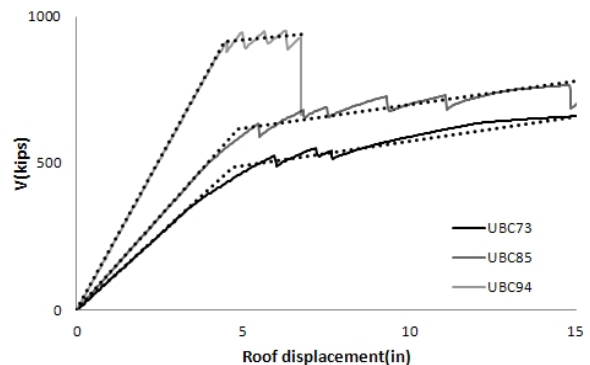
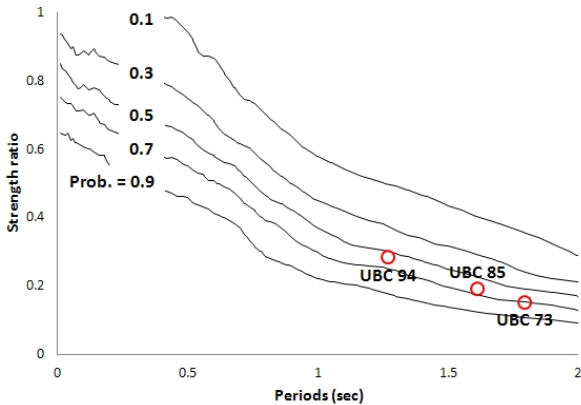


Fig. 9. Analytical results calculated from the static pushover analysis and bilinear curves

**Table 1.** Dynamic response characteristics of the original model(before retrofit)

	Stiffness, K (kips/in)	Strength, P (kips)	Yielding Stiffness Ratio, $\alpha$ (-)	Period, T (sec)	Strength Ratio, SR (-)
UBC73	103	485	0.05	1.80	0.15
UBC85	127	618	0.13	1.62	0.19
UBC94	206	915	0.05	1.27	0.28



**Fig. 10.** Fragility contours of the original building model subjected to 20 ground motions

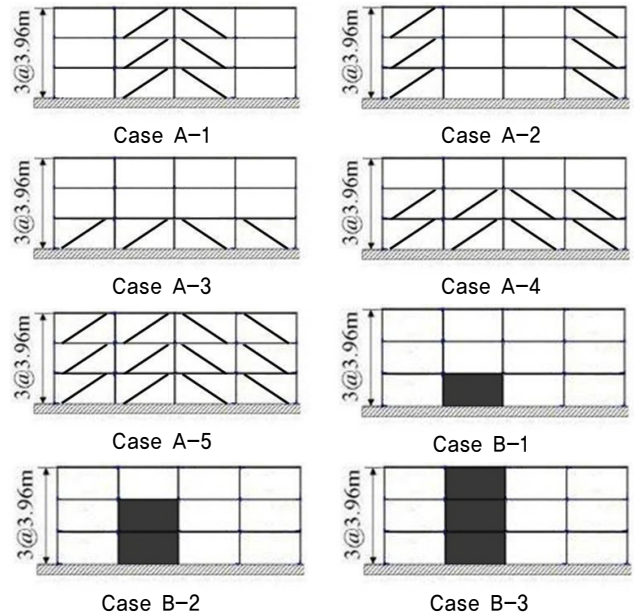
내진설계 기준에 제시되어 있다. 예를 들면 FEMA273[15]과 ASCE/SEI 41-06[19]와 같은 내진설계 기준에서는 철근콘크리트 골조를 비롯한 다양한 구조물의 한계 변형능력을 층간변위비(interstory drift ratio)로 제시하고 있다. 층간변위비( $\delta$ )를 연성도 능력( $\mu_c$ )으로 전환하기 위해서는 다음의 식 (2)를 이용할 수 있다.

$$\mu_c = \frac{\delta \times H}{\alpha \times \Delta_y} \quad (2)$$

여기서, H는 건물의 전체 높이,  $\Delta_y$ 는 항복 최상층 변위이다.  $\alpha$ 는 층간변위비 환산계수로서 최상층 변위비에 대한 층간변위비의 비율로 정의된다. 이상에서 논의된 지진시나리오에 대한 취약성 등고선이 Fig. 10에 나타났다. 이 취약성 등고선으로부터 주어진 지진시나리오에서 건물의 보강 전 (As-built)의 한계상태에 도달할 확률을 UBC 94기준은 54%, UBC 85기준은 63%, UBC 73기준은 72%로 바로 파악할 수 있다. 또한, 본 연구에서 고려하고 있는 과거 기준으로 설계된 구조물이 50년동안 2%의 발생확률을 가지는 지진파에 대하여 붕괴방지구준(Collapse Prevention)에 도달할 확률이 30%를 초과하므로 구조물에 대한 내진보강이 필요한 것을 알 수 있다.

#### 4.2 내진 보강전략 수립 및 평가

과거 기준으로 설계된 구조물의 내진 성능을 보강하기 위한 방법으로 BRB시스템과 전단벽 시스템을 이용하여 Fig. 11과 같이 두 가지의 보강시스템과 각각의 보강위치에 따른 변수로 각각의 과거 기준으로 설계된 구조물의 내진 성능을 보강하였다. 두 가지의 보강시스템(BRB와 전단벽)이 고려되었고 Case A-1과 A-2는 3층 건물에서 일부 골조에만 BRB가 전체 3



**Fig. 11.** Retrofit plan of the 3-story building model using BRB and shearwall systems

층에만 내진보강 되었고 Case A-3, A-4 및 A-5는 각각 1층에만 BRB시스템보강, 1층과 2층에 보강 그리고 전 층에 BRB시스템을 보강한 것이다. 또한 전단벽시스템의 보강 경우에는 B-1, B-2 및 B-3은 한 공간에 대해서 각각 1층, 1층과 2층 및 전 층에 전단벽 구조시스템을 보강한 것이다. 또한 보강 후 해석모델의 정적해석 결과를 Fig. 9와 같이 이산화하여 동적응답 특성을 도출한 것과 같이 보강 후 모델도 정적해석결과를 이산화하여 동적응답특성을 계산하였고 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

이상에서 구해진 UBC 94, UBC 85, UBC 73으로 설계된 기존 건축물 모델의 내진 보강후 동적응답특성으로 본 논문에서 고려하는 20개의 지진 시나리오에 대한 응답데이터 베이스를 구하고 취약성 등고선에서의 결과를 Fig. 12를 통해서 산정하였고 Table 3에 최종결과를 정리하였다.

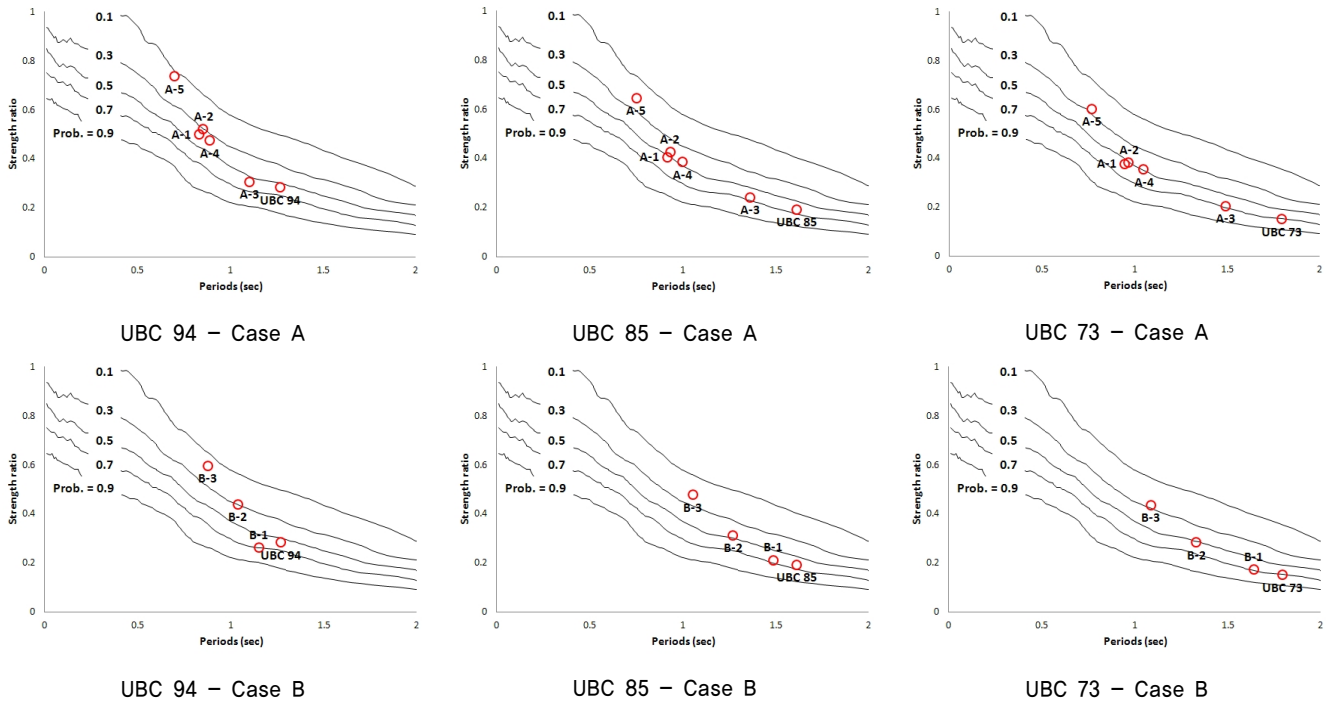
취약성 등고선을 이용하여 과거 기준으로 설계된 구조물의 BRB시스템과 전단벽 시스템을 이용한 다양한 보강방법에 대한 확률론적 취약성 평가를 수행한 결과 BRB시스템의 경우 보강제인 BRB가 좌굴 없이 하중에 계속 저항하며 전단벽에 비해 상대적으로 경량이기 때문에 취약성 그래프에서 비슷한 성능을 보이는 경우라도 상대적으로 항복 후 강성비가 크게 증가하며 주기 또한 상대적으로 크게 감소하는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한 보강 전략에 대해서는 BRB시스템 보강인 Case A-5와 전단벽 시스템의 Case B-3의 보강 전략이 가장 우수한 보강효과를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이는 다른 보강 방법들에 비해 위의 두 가지 보강 방법이 하부 층에서 상부 층까지 전체적으로 보강을 하였기 때문에 큰 보강 효과를 보이

**Table 2.** Dynamic response characteristics of the retrofitted model

		K	P	$\alpha$	T	SR
U B C 73	Case A-1	370	1220	0.06	0.95	0.38
	Case A-2	355	1241	0.05	0.97	0.38
	Case A-3	149	656	0.15	1.49	0.20
	Case A-4	302	1149	0.12	1.05	0.35
	Case A-5	558	1953	0.05	0.77	0.60
	Case B-1	123	554	0.24	1.64	0.17
	Case B-2	187	916	0.26	1.33	0.28
	Case B-3	281	1406	0.35	1.09	0.43
	U B C 85	Case A-1	394	1309	0.06	0.92
Case A-2		379	1383	0.05	0.94	0.43
Case A-3		179	776	0.11	1.37	0.24
Case A-4		333	1250	0.11	1.00	0.38
Case A-5		583	2098	0.04	0.76	0.64
Case B-1		150	675	0.20	1.49	0.21
Case B-2		206	1011	0.27	1.27	0.31
Case B-3		299	1553	0.34	1.06	0.48
U B C 94		Case A-1	476	1620	0.01	0.84
	Case A-2	457	1690	0.00	0.85	0.52
	Case A-3	272	991	0.11	1.11	0.30
	Case A-4	417	1545	0.09	0.89	0.48
	Case A-5	673	2390	0.01	0.70	0.73
	Case B-1	249	846	0.31	1.16	0.26
	Case B-2	308	1417	0.15	1.04	0.44
	Case B-3	428	1928	0.04	0.88	0.59

**Table 3.** Fragility evaluation of the UBC building models after retrofit

		Fragility evaluation (%)	Retrofit effect (%)	Target performance
U B C 73	Case A-1	39	15	Dissatisfy
	Case A-2	30	24	Satisfy
	Case A-3	56	-	Dissatisfy
	Case A-4	36	18	Dissatisfy
	Case A-5	15	39	Satisfy
	Case B-1	70	-	Dissatisfy
	Case B-2	30	24	Dissatisfy
	Case B-3	19	35	Satisfy
	U B C 85	Case A-1	52	11
Case A-2		47	16	Dissatisfy
Case A-3		64	-	Dissatisfy
Case A-4		47	16	Dissatisfy
Case A-5		22	41	Satisfy
Case B-1		64	-	Dissatisfy
Case B-2		47	16	Dissatisfy
Case B-3		22	41	Satisfy
U B C 94		Case A-1	56	16
	Case A-2	52	20	Dissatisfy
	Case A-3	68	4	Dissatisfy
	Case A-4	49	23	Dissatisfy
	Case A-5	27	45	Satisfy
	Case B-1	69	3	Dissatisfy
	Case B-2	51	21	Dissatisfy
	Case B-3	27	45	Satisfy



**Fig. 12.** Fragility contours of the UBC building models after seismic retrofit

는 것으로 사료되며 보강 결과 또한 초기의 목표성능을 만족하는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 이는 실무엔지니어가 이러한 형태의 구조물에 대해 다양한 보강 방법과 위치 선정에 따른 선택의 순간이 필요할 때 본 연구에서 취약성 평가법을 이용하여 기본 자료로 활용하여 효율적으로 내진보강전략을 수립할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 보강 후의 내진 성능평가에서 과거 기준의 구조물일수록 내진성능이 부족하고 이에 따라서 내진성능 보강 요소의 보강효과가 더 크게 발생하는 것을 확인 할 수 있었다.

본 논문에서 고려한 예제 건물에서 Case A-5와 Case B-3이 3가지 과거 기준 모두에 대해서 우수한 보강 효과를 보이고 있다. 그러나 보강 효과뿐만 아니라 실제 보강 시스템을 도입하기 위해서는 전단벽 보강 시스템을 고려한 Case B-3의 경우가 시공적인 측면에서 볼 때 구조물의 자중이 크게 증가함에 따라 기초보강이 필요할 수 있다. 반면에 시공의 편리성과 비용 면에서 장점을 가진 Case A-5의 보강 전략이 유사한 보강효과를 보이고 있다면 A-5의 내진보강전략이 유리할 수 있다. 따라서 향후 연구에서는 보강에 소요되는 시공성과 경제성을 계량화하여 전체 내진보강에서의 성능 평가에 사용하는 기법이 추후 필요한 것으로 사료된다.

## 5. 요약 및 결론

확률론적 내진성능평가 결과를 바탕으로 내진보강방법을 결정하기 위하여 취약성 등고선을 작성하여 3층 4-6스팬의 구조물이 고려되었다. 이에 대해서 과거 70년대, 80년대, 및 90년대 기준에 따라 설계를 달리 하여 해석을 수행하기 위해 과거 기준으로 설계된 모멘트저항골조의 내진성능을 평가하였다. 향후 연구에서는 철골모멘트골조의 합리적인 성능 파악을 위해 좀 더 다양한 변수(예를 들어 층고의 변화, 평면의 변화, 비정형성 등)의 고려가 필요하다. 보강 시스템으로는 BRB 시스템과 전단벽 시스템을 도입하였으며 다양한 동적응답특성을 변수로 가지는 응답데이터베이스를 작성하고 이를 이용하여 확률론적 취약성 분석을 신속하게 수행할 수 있는 시스템을 도입하였다.

취약성 등고선을 이용하여 과거 기준으로 설계된 구조물의 BRB 시스템과 전단벽 시스템을 이용한 다양한 보강방법에 대한 확률론적 취약성 평가 결과 BRB 시스템은 전단벽 보강에 비하여 특성 및 보강 후 추가되는 중량의 차이로 인해 BRB 시스템 보강의 경우가 전단벽 보강 시스템에 비해 같은 보강 성능을 보인다고 하여도 상대적으로 강성비의 증가폭 및 주기의 감소폭이 크게 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. BRB 시스템의 Case A-5와 전단벽 시스템의 Case B-3의 보강 전략이 가장 우수한 보강효과를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이는 두 가지 보강 방법이 하부 층에서 상부 층 까지 전체적으로 보강을 하였기 때문에 큰 보강 효과를 보이는 것으로 사료 된다.

본 논문에서 제안하고 있는 신속한 확률론적 취약성 분석 방법은 다양한 내진 보강 전략에 대해 구조기술자가 다양한 보강 방법과 계획 위치 등을 고려하여 효율적으로 보강효과에 대한 내진성능 예측을 신속히 확인할 수 있어 내진 보강 전략 수립에 기초적인 자료로 활용할 수 있음을 확인하였다. 보강 후의 성능을 신속하게 평가 할 수 있는 시스템으로 구조물의 내진 보수/보강 전략을 수립할 때 효율적인 기법으로 이용될 수 있을 것으로 기대 된다.

## / 감사의 글 /

본 논문은 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0010384 & 2012R1A2A2A06045129).

## / REFERENCES /

1. Lee J, Experimental and Analytical Study for Buckling Restrained Bracing Systems using Channel Sections, Sejong University Master's Degree Thesis, 2009.
2. Kim JG, Park JH, Lee K, Lee J, Seismic performance of Buckling Restrained Braces Using Steel Plates and Channel Sections, Journal of Architectural Institute of Korea, 2007;Vol(10):19-26.
3. UBC, Uniform Building Code, International Conference of Building Officials, Whittier, CA, 1997.
4. Lee K, Foutch DA, Performance evaluation of new steel frame buildings for seismic load, Earthquake Eng. Struct. Dyn., 2002;31(3):653-670.
5. Somerville P, Smith N, Puntamurthula S, Sun J, Development of ground motion time histories for phase 2 of the FEMA/SAC steel project, SAC Background Document SAC/BD-97/04, SAC Joint Venture, Richmond, CA, 1997.
6. Shin JW, Evaluation of Seismic Performance and R-Factor of Steel MRF Building Before and After Repair, Sejong University Master's Degree Thesis, 2010.
7. Park DJ, Joo YG, Kim MH, Kim DH, Kim SD, Evaluation of Hysteretic Behaviors of the Buckling Restrained Braces According to the Unconstrained Length, Journal of Architectural Institute of Korea, 2006;22(12):37-46.
8. Kebeyasawa T, Shiohara H, Otani, S, US-Japan Cooperative research on R/C Full-scale building test, Part 5:Discussion on dynamic response system, 8<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 6, San Francisco, California, 1984:627-634.
9. Vulcano A, Bertero V.V, Colotti V, Analytical modeling of R/C structural walls, Report No. UCB, EERC-88/17, EERC, University of California, Berkeley, California, 1988.
10. Linde P, Numerical modeling and capacity design of earthquake-resistant reinforced concrete walls, Report No. 200, Institute of Structural Engineering, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, Birkhauser, Basel, 1993.
11. Kim TW, Foutch DA, LaFave JM, A Practical Model for Seismic Analysis of Reinforced Concrete Shear Wall Buildings, Journal of Earthquake Engineering, 2005;9(3):393-417.
12. Kutay Orakcal and John W. Wallace, Flexural Modeling of Reinforced Concrete Walls-Experimental Verification, ACI, 196-205.
13. Jeong SH, Elnashai AS, Probabilistic Fragility Analysis Parameterized by Fundamental Response Quantities, Engineering Structures, 2007;29(6):1238-1251.
14. ATC-40, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.



15. FEMA-273, NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington, DC, 1997.
16. Saiidi M, Sozen MA, Simple nonlinear seismic analysis of RC structures Journal of Structural Engineering, ASCE, 1981;107(5): 937-953.
17. Fajfar P, Fischinger M, N2 - A method for non-linear seismic analysis of regular structures, Proceedings from the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, 1988;111-116.
18. Qi X, Moehle JP, Displacement design approach for reinforced concrete structures subjected to earthquakes, EERC Report 91/02, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California, 1991.
19. ASCE, Seismic Rehabilitation of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-06), American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2007.
20. Jeong SH, Lee K, Lee DH, Fragility Contour Method for the Seismic Performance Assessment of Generic Structures, Journal of Earthquake Engineering Society of Korea, 2011;15(3):65-72.
21. Shin JW, Lee K, Jeong SH, Seismic Performance Evaluation of Steel moment Resisting Frame with Various Hysteresis Connection Models, Journal of Architectural Institute of Korea, 2009;25(11):19-27.