

시간종속요소를 이용한 5층 RC건축물의 비좌굴가새 보강에 대한 내진거동

Seismic Behavior of a Five-story RC Structure Retrofitted with Buckling-Restrained Braces Using Time-dependent Elements

신지욱¹⁾ · 이기학²⁾ · 이도형³⁾ · 정성훈⁴⁾

Shin, Ji Uk · Lee, Ki Hak · Lee, Do Hyung · Jeong, Seong Hoon

국문 요약 >> 본 연구에서는 시간종속요소를 이용하여 상부벽식-하부골조구조가 고려된 중-저층 철근콘크리트 구조물의 동적응답을 조사하였다. 시간종속요소란 사용자가 원하는 시간간격에서 부재를 활성화할 수 있는 진보된 요소로써 기존의 수행되었던 실험을 통해 가장 우수한 성능을 보인 채널형 비좌굴가새가 해석에서 보강요소로 고려되었다. 시간종속요소로 고려된 비좌굴가새는 1차 지진하중에 의해 구조물이 손상된 후에 2차 지진하중이 발생하기 전에 모멘트골조에 설치, 보강된 것으로 가정되었다. 이러한 가정을 바탕으로 내진설계가 고려되지 않은 5층 콘크리트 건물에 연속지진하중의 적용을 통하여 시간종속요소의 영향에 따라 구조물의 동적응답을 비교하였다. 2차 지진파가 발생했을 때 비좌굴가새를 활성화시키는 것은 1차 지진하중에 의해 손상이 집중된 모멘트골조의 변형을 크게 감소시키는 것으로 조사되었다. 그러나 전단벽시스템은 BRB시스템이 활성화된 이후에도 손상이 증가하는 것으로 나타났다. 모멘트골조의 보강효과에 비해 전단벽시스템의 누적손상이 매우 미세하기 때문에 연속지진하중에 대한 BRB시스템은 효과적인 보강방법으로 조사되었다.

주요어 시간종속요소, 비좌굴가새, 연속지진하중, 보강효과, 누적손상

ABSTRACT >> This study presents seismic responses of 5-story reinforced concrete structures retrofitted with the buckling-restrained braces using a time-dependent element. The time-dependent element having birth and death times can freely be activated within the user defined time intervals during the time history analysis. The buckling-restrained brace that showed the largest energy dissipation capacity among the test specimens in previous research was used for retrofitting the RC buildings in this study. It was assumed that the first story of the damaged building under the first earthquake was retrofitted with the buckling-restrained braces considered as the time-dependent element before the second of the successive earthquakes occurs. Under this assumption, this paper compares seismic responses of the RC structures with the time-dependent element subjected to the successive earthquake. Subjected to the second earthquake, it was observed that activation of the BRB systems largely decreases deformation of the moment frame where the damage was concentrated under the first earthquake. However, damages to the shear wall systems were increased after activation of the BRB systems. Since the cumulative damages of the shear wall systems were infinitesimal compared with the retrofit effect of the moment frame, the BRB system was effective under the successive earthquake.

Key words Time-Dependent element, Buckling-restrained brace, Successive earthquake, Retrofit effect, Cumulative damage

1. 서론

1999년 8월 17일 Turkey의 Kocaeli지역에서 발생한 지

진이후 약 3개월 후인 1999년 11월 12일에 Kocaeli지역과 매우 인접한 지역인 Duzee와 Bolu에서 다시 한 번 지진이 발생하였다. 이러한 연속지진하중은 첫 번째 지진하중에 의해 손상된 부재에 심각한 누적손상을 발생시킬 수 있다. 특히, 주요 구조부재에 대하여 구조물의 손상이 계속해서 집중되면 누적손상에 의해 구조물의 안정성의 위험과 함께 더 나아가 구조물의 붕괴로 이어질 수 있다.

따라서, 구조물의 누적손상을 최소화시키기 위해서 지진 피해를 입은 구조물의 효율적인 보수 및 보강이 이루어져야

¹⁾ 정회원-세종대학교 건축공학과, 석사과정

²⁾ 정회원-세종대학교 건축공학과, 부교수

(교신저자: kihaklee@sejong.ac.kr)

³⁾ 정회원-배재대학교 건설환경철도공학과 부교수, 공학박사

⁴⁾ 정회원-인하대학교 건축학부, 조교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2011년 2월 28일까지 학회로 보내 주시기 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 2. 3 / 수정일 : 2010. 9. 24 / 게재확정일 : 2010. 9. 28)

한다. 그러나 거의 대부분의 보수 및 보강 후의 지진해석 기법은 보수/보강을 하기 전에 구조물의 손상상태를 직접적으로 고려하지 않고 가정에 의존하기 때문에 정확한 내진성능을 파악할 수 없다.^{(1),(2)} Aschheim과 Black(1999)⁽³⁾의 연구는 연속지진하중에 대한 누적손상의 영향을 고려하였지만 실제 강성의 감소상태를 고려하지 않고 초기강성의 감소만 가정하였다는 단점이 있다. 따라서, 첫 번째 지진하중에 대하여 손상된 상태를 가진 구조물에 보수 및 보강을 수행하고 연속적인 해석을 할 수 있는 기법이 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 시간종속요소(Time-Dependent Element)를 고려할 수 있다. 시간종속요소란 컴퓨터 해석모델에서 사용자가 원하는 시간간격 내에서 부재를 활성화(Activation) 또는 비활성화(Deactivation)시킬 수 있는 진보된 비탄성 요소로서 연속지진하중에 대하여 구조물의 보강 전/후의 누적손상을 보다 정확하게 검토할 수 있다.^{(1),(2)}

본 연구에서는 연속지진하중에 대하여 구조물의 누적손상을 최소화시키기 위해서 기존 연구에서 개발된 비좌굴가새(Buckling-Restrained Brace, 이하 BRB)를 구조물의 내진보강공법으로 해석에 적용하였다. BRB시스템은 일반 철골가새와 다르게 지진하중과 같은 극한하중의 압축력에 대하여 좌굴없이 인장력과 같은 거동을 하는 것으로 구조물의 내진성능을 효과적으로 향상시킬 수 있는 방법이다.⁽⁴⁾ 기존 연구에서는 BRB시스템을 보강한 구조물의 내진성능평가는 다양한 방법으로 진행되었지만 손상된 구조물에 대하여 보강 전과 후 그리고 연속적인 지진하중을 통하여 수행되지 않았다.⁽⁵⁾

따라서, 본 연구에서는 기존에 수행된 실험을 통해 가장 우수한 성능을 보인 BRB시스템을 시간종속요소로 고려하여 연속지진하중에 대하여 시간종속요소를 적용하지 않은 구조물의 동적응답과 시간종속요소가 고려된 구조물의 응답을 비교하였다. 이에 따라 기존에 개발된 BRB시스템의 누적손상계어 및 보강효과를 조사하였으며 BRB시스템의 보강 위치나 방향에 따른 영향을 조사하였다.

2. 시간종속요소(Time-dependent element)

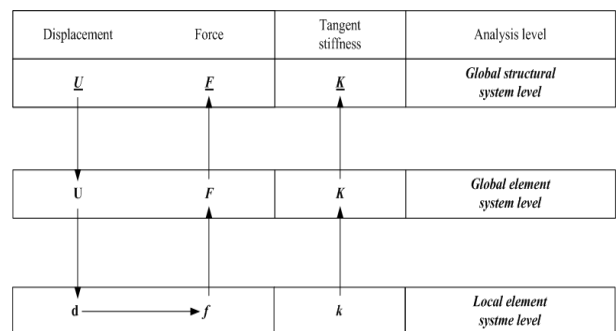
본 연구에서는 연속지진하중에 대하여 구조물의 누적손상에 의한 이력응답의 거동을 조사하기 위해서 Izzuddin and Elnashai(1993a, b)^{(6),(7)}에 의해서 개발된 대변위(large displacement) 효과를 고려한 3차원 비탄성 요소에 활성시작 및 활성끝 시간을 갖는 비탄성 시간종속요소를 고려하였다. 시간종속요소는 연속적인 지진하중에 대하여 보수 및 보강후의 철근 콘크리트 부재의 내진 거동 성능을 평가하기

위해서 개발되었으며 개발된 요소는 비선형 구조해석 프로그램인 ZeusNL⁽⁸⁾에 적용되었다.

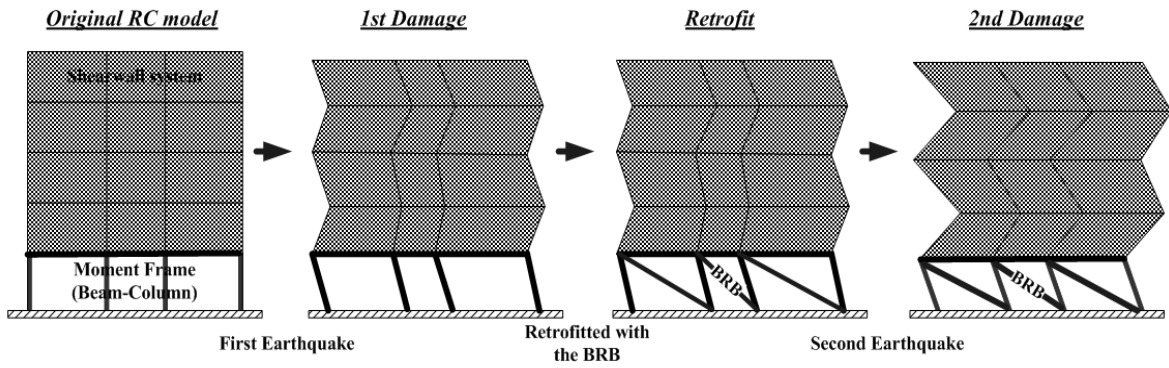
시간종속요소의 기본적인 유도절차는 입력데이터에서 사용자가 원하는 활성시작 시간과 활성끝 시간을 지정하여 정의하고 단면의 형태와 재료모델의 구성방정식을 고려한다. 이와 함께 재료의 비선형 효과를 모델링할 수 있는 비탄성 큐빅 정식화 과정을 적용하여 활성 시간내에서 요소의 힘과 접선강성을 계산한다. 여기서 나타난 시간종속요소에 대한 힘과 접선강성을 해석모델에 고려된 다른 모든 요소의 힘과 접선강성에 적용하여 전체 구조물의 해석과정을 따르게 된다. 시간종속요소를 적용한 전체 구조물에 대한 해석을 수행하기 위해서는 아래의 세가지 기본 변환과정이 필요하다.

- 1) 해석단계의 구조변위(U)의 증가량에 대응되는 요소인 국부변위(d)를 계산하기 위한 변환
- 2) 단계 1)에서 계산된 국부변위(d)로부터 국부요소력(f)을 계산한 이후 요소단계의 국부력(f)에서 전체구조단계(F)의 힘에 대한 행렬로의 변환
- 3) 반복해석절차를 위해 요소단계에서 계산된 국부접선강성(k)으로부터 전체구조단계 접선강성(K)에 대한 변환

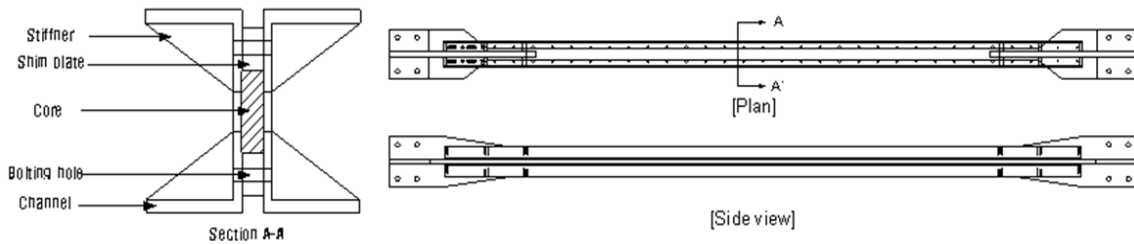
본 연구에서 언급된 요소의 변환과정은 그림 1에 나타냈다. 그림 1에 제시된 d, f, k는 각각 국부요소단계(Local Element System Level)의 변위, 힘 그리고 접선의 강성을 나타낸 것이며 U, F, K는 전체요소단계(Global Element System Level)에 대한 변위, 힘 그리고 접선강성으로 표시하였다. 또한, U, F, K는 전체구조단계(Global Structure System Level)에 대한 변위, 힘 그리고 접선의 강성을 나타낸 것이다. 전체구조해석에서 요구되는 변환과정등에 대한 자세한 언급은 다음 논문들을 참고할 수 있다.^{(6),(7)} 또한, 시간종속요소의 유도과정과 이를 검증하기 위한 실험에 대한



〈그림 1〉 시간종속요소에 따른 구조물의 해석에서의 변환과정



〈그림 2〉 본 연구에서 고려된 시간종속요소의 적용 과정

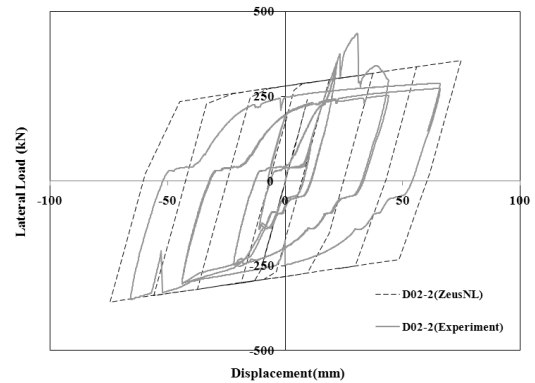


〈그림 3〉 D02-2실험체의 평면과 입면

내용은 다음 논문을 참고할 수 있다.^{(1),(2)} 그림 2는 본 연구에서 고려된 시간종속요소의 적용 과정을 이해하기 쉽게 간단하게 나타낸 것이다. 그림 2에 나타낸 것과 같이 두 번째 지진하중이 발생하기 전에 첫 번째 지진하중에 의해 손상된 구조물에 BRB시스템을 보강한 것을 볼 수 있다.

3. 실험 요약

기존 연구⁽⁴⁾에서는 현장에서 간단하게 제작할 수 있도록 철판으로 만든 중심 코어의 양면을 채널형 강재(외부보강재)로 보강하고 두 개의 외부보강재를 용접이나 볼트로 결합할 수 있는 BRB시스템을 개발하였다. 또한, 1층 1경간 골조 프레임에 개발된 BRB시스템을 설치하여 반복하중에 대한 성능 실험을 수행하였다. BRB시스템의 에너지소산능력은 구조물의 내진 성능에 큰 영향을 미치는 변수이기 때문에 누적 이력에너지가 가장 큰 것으로 조사된 D02-2실험체가 가장 우수한 성능을 갖는 것으로 평가되었다. 자세한 실험 계획과 결과에 대한 내용은 다른 논문⁽⁴⁾을 참고할 수 있으며 그림 3은 가장 우수한 성능을 보인 D02-2실험체의 상세 도면을 나타낸 것이다. D02-2실험체의 이력거동과 컴퓨터 해석프로그램인 ZeusNL로 수행된 해석결과는 그림 4에 나타났다. 전체적으로 최대 강도, 초기 강성 및 최대 변위등이 적절한 범위내에서 일치하는 것을 볼 수 있다.



〈그림 4〉 D02-2실험체의 이력곡선(실험과 해석결과의 비교)

4. 해석 모델

본 연구에서는 대도시에 위치한 상부벽식-하부골조구조로 구성된 5층 철근콘크리트건물을 고려하였다. 그림 5는 이러한 구조물의 대표적인 예를 보여주고 있다. 예제모델의 1층은 보-기둥 모멘트골조로 구성되었으며 주차장용으로 사용되고 있으며 전단벽시스템이 고려된 2층부터 지붕층까지는 주거공간으로 활용하고 있다. 또한, 본 연구에서 고려된 그림 5의 실제 건물은 1980년대 후반에 지어진 것으로 시공 당시 내진설계가 적용되지 않았다. 철근 콘크리트 벽식구조나 골조구조의 비탄성 거동에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되어왔지만 복합구조물과 같이 수직 방향의 비정형성을 갖는 구조물에 대한 구조물의 동적응답특성을 조사

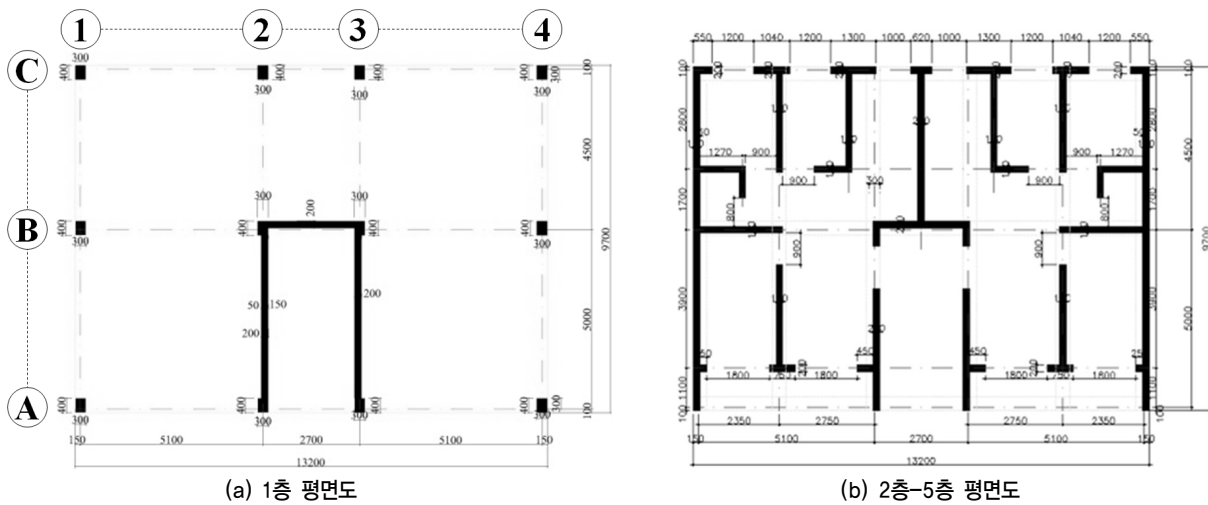
하는 연구는 많이 수행되지 않았다.^{(9),(10)} 이러한 복합구조물은 전이층을 기준으로 하여 강성과 질량의 불규칙성이 상존하기 때문에 지진발생시 동적 응답을 크게 증폭시켜 하부 골조의 기동에 손상이 집중될 수 있으며 이는 구조물의 불안정성을 초래할 가능성이 크다. 따라서, 본 연구에서는 연

속지진하중에 대한 보강 전/후의 동적거동을 조사하기 위해서 기존의 실험을 통해서 나타난 내진성능이 우수한 BRB 시스템을 시간중속요소로 고려하여 1층 모멘트골조에 보강하였다.

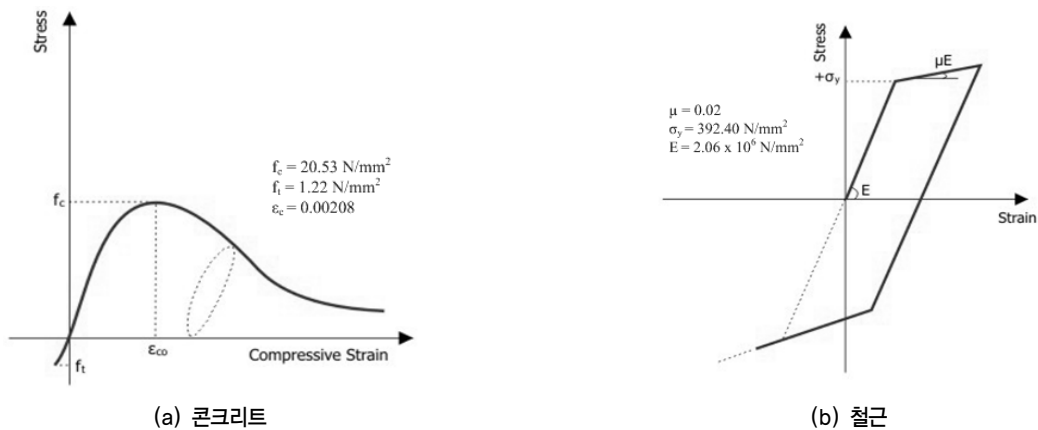
그림 6의 (a)와 (b)는 본 연구에서 고려된 5층 철근콘크리트건물에 대한 평면도를 나타낸 것이며 건물의 사용성에 영향을 주지 않는 C-①에서 C-④의 부분을 컴퓨터 해석 모델로써 적용하였다. 그 이유는 A-①에서 A-②는 건물의 주차장 출입구이며 A-②에서 A-③은 사용자의 출입구로 사용되어서 BRB를 A-①에서 A-④의 구조물에 보강하는 것은 구조물의 사용성을 제한시킬 수 있기 때문이다. 콘크리트와 철근의 재료적 비선형 거동을 묘사하기 위해서 그림 7의 (a)와 (b)에 나타낸 것과 같이 모델링하였다. 본 연구에서 고려된 해석모델의 중량 및 질량은 표 1에 자세히 나타냈으며 구조물의 질량을 계산할 때 고정하중(Dead Load, DL)외에 활 하중(Live Load, LL)의 30%만을 고려하였다.⁽¹¹⁾



〈그림 5〉 서울에 위치한 5층 콘크리트 구조물



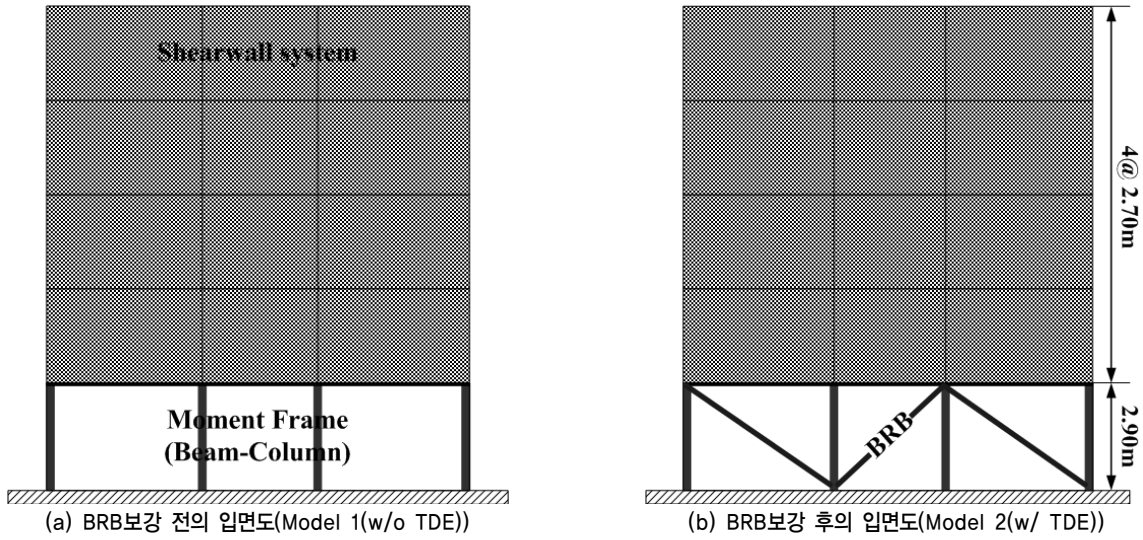
〈그림 6〉 본 연구에서 고려된 철근 콘크리트 5층 구조물의 평면도



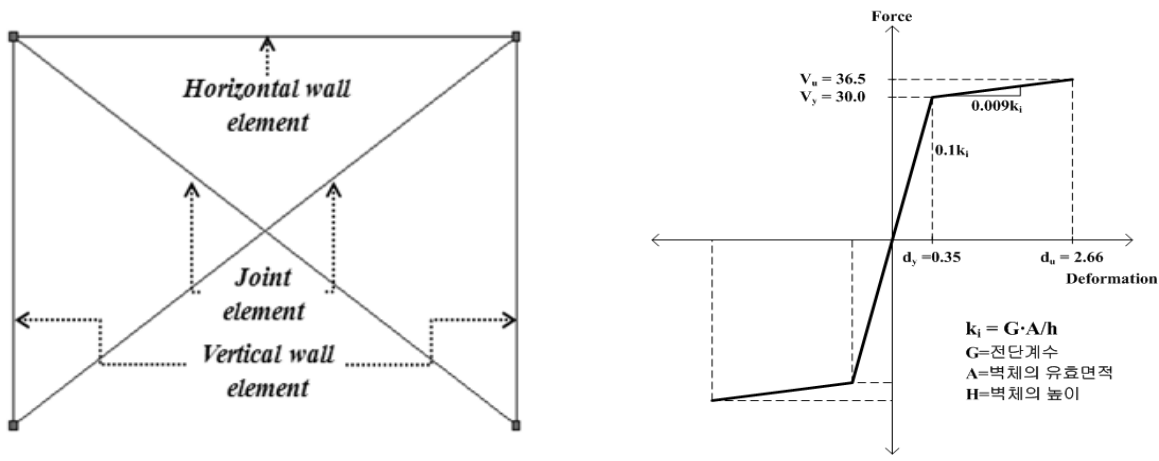
〈그림 7〉 콘크리트와 철근의 응력변형률 관계

〈표 1〉 하중 및 질량 계산

story		Dead Load(DL) (kN/m ²)	Live Load(LL) (kN/m ²)	Mass(kN/m ²) (DL+0.3LL)
지붕층	지붕	6.04	2.00	6.04 + 2.00 × 0.3
2층~5층	침실, 거실, 주방	5.70	2.00	5.70 + 2.00 × 0.3
	발코니	4.80	2.00	4.80 + 2.00 × 0.3
	계단실	5.40	3.00	5.40 + 3.00 × 0.3
	욕실	4.90	3.00	4.90 + 3.00 × 0.3
	벽체	640.00		640.00
1층	기둥	64.00		64.00



〈그림 8〉 본 연구에서 고려된 철근콘크리트 5층 구조물의 입면도



(a) ZeusNL로 모델링된 전단벽

(b) 해석모델에 적용된 전단벽의 이력거동(실험과 해석결과의 비교)

〈그림 9〉 해석모델에 적용된 전단벽

BRB보강 전과 후에 대한 해석모델의 입면도는 그림 8의 (a)와 (b)에 각각 제시하였으며 해석모델의 단순화를 위해서 전단벽의 개구부는 구조물에 고려하지 않았다. 전단벽은 그림 8의 입면도에 나타난 것과 같이 2.70m × 2.70m와 5.10m × 2.70m으로 구성하였다. 일반적으로 컴퓨터 해석 프로그램을 이용한 전단벽의 모델링 방법은 Kabeyasawa⁽¹²⁾가 제안한 TVLEM(Three Vertical Line Element Model)

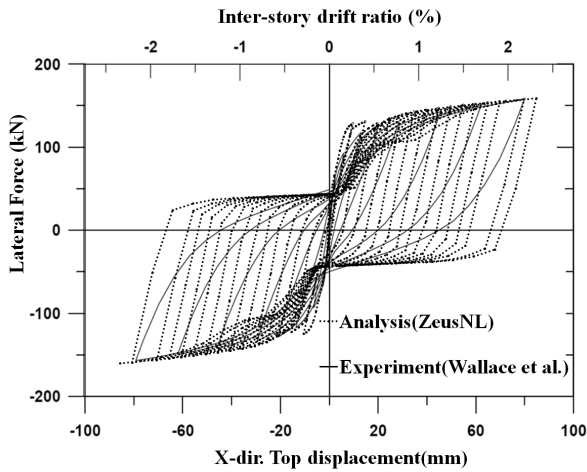
과 MVLM⁽¹³⁾(Multi Vertical Line Model), 기둥부재치환 모델⁽¹⁴⁾(Column Model, CM)등이 널리 쓰이고 있다. 본 연구에서 고려된 전단벽시스템은 ZeusNL에서 제시하는 벽부재를 사용하여 수직방향과 수평방향의 벽체에 각각 철근을 배근하여 두 개의 부재가 함께 거동할 수 있도록 연결 요소(Joint Element)를 이용하여 모델링 하였으며 그림 9(a)에 간단하게 나타냈다. 그림 9(b)는 본 연구에서 고려한 벽체

부재의 전단강성과 전단변형의 관계를 보여준다. 여기서 나타난 벽체의 항복 전과 후의 전단강성, 강도 그리고 연성등은 기존 실험연구⁽¹⁵⁾에서 나타난 관계로부터 추정하여 계산되었다. 그림 10은 기존 연구자⁽¹⁶⁾에 의해 수행된 전단벽 실험체의 이력거동과 실험과 같은 조건으로 ZeusNL로 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. 그림 11은 본 연구에서 고려된 해석모델의 모멘트 골조와 전단벽의 포락선(Skeleton Curve)을 간단하게 나타낸 것으로 전단벽의 경우 지붕층에 대해서만 제시하였다. 그림 11에 제시된 포락선은 양방향 반복하중에 의해 산정된 이력곡선을 하중-층간 변위비 관계로 간단하게 나타낸 것이다. 지진하중과 같은 횡 하중이 발생했을 때 모멘트 골조는 전단벽에 비해 강성 및 강도 등이 작은 것을 볼 수 있으며 모멘트 골조에 손상이 집중되는 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 BRB시스템을 보강할 때

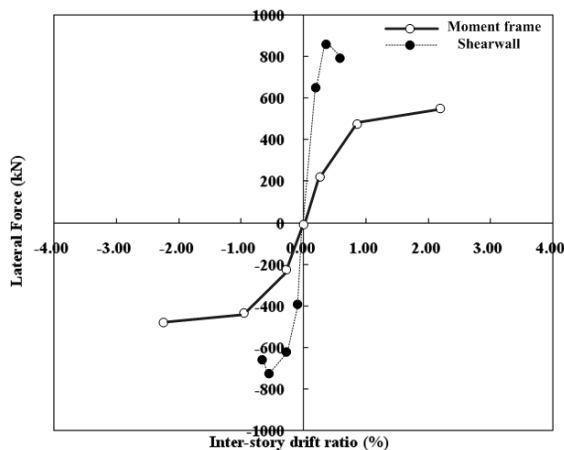
기존연구⁽¹⁷⁾와 마찬가지로 가새와 모멘트골조사이의 접합부를 강체요소(Rigid Element)로 고려하였다. 이를 통해 1층 기둥에서 나타날 수 있는 취성적 전단파괴의 가능성을 보강이 이루어진 것으로 가정하여 연구를 수행하였다. 기둥과 가새의 접합부에 대한 모델링을 통한 건축물의 보강에 따른 거동 연구는 Micro해석모델을 통해 수행 중이다.

5. 연속지진하중을 받는 철근콘크리트 구조물의 비선형 시간이력해석

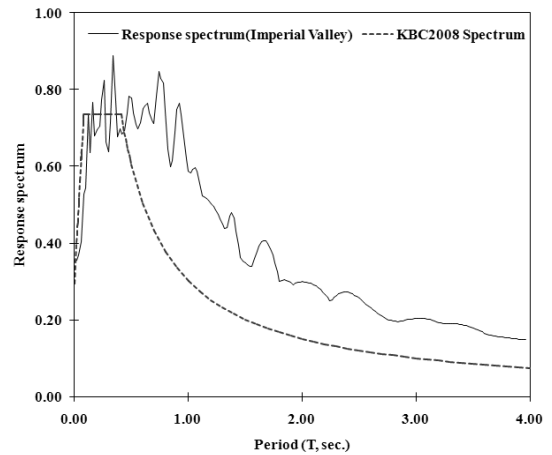
본 연구에서는 BRB시스템을 시간중속요소로 적용하였을 때 구조물의 동적응답과 누적손상등을 조사하기 위해서 그림 12에 나타난 지반운동을 고려하였다. 그림 12(a)의 점선은 KBC 2008⁽¹⁸⁾에 의해 산정된 탄성 스펙트럼을 나타낸 것이며 실선은 이에 상응하는 인공지진파에 대한 반응 스펙트럼 곡선을 나타낸 것이다. 여기서 인공지진파를 사용한 이유는 우리나라의 경우 특정 지진규모 및 진앙거리에 상응하는 지진하중에 대한 관측기록이 부족하기 때문이다. 본



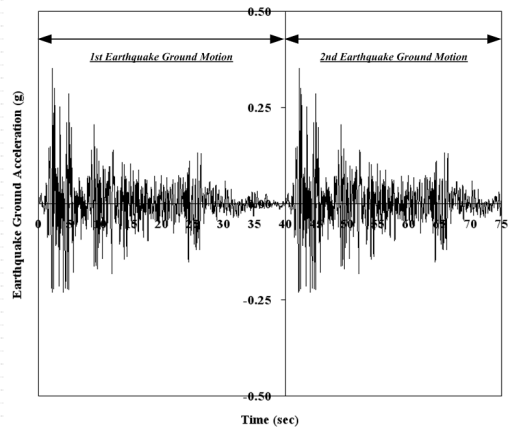
〈그림 10〉 전단벽의 이력거동(실험과 해석결과의 비교)



〈그림 11〉 모멘트 골조와 전단벽(지붕층)의 포락선(Skeleton Curve)



(a) 본 연구에서 고려된 지반운동의 스펙트럼과 KBC2008 탄성 스펙트럼

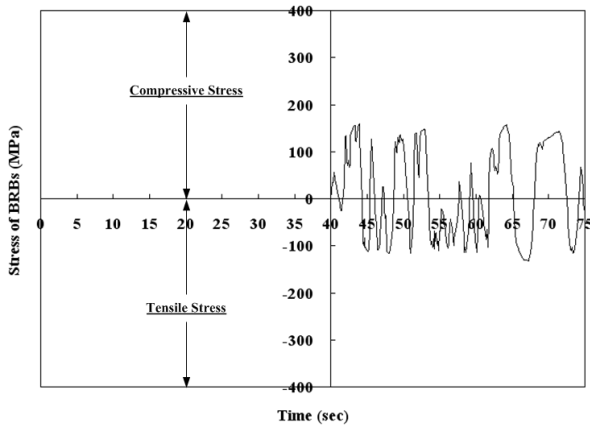


(b) 본 연구에서 고려된 연속지진하중

〈그림 12〉 해석모델에 적용된 연속지진하중

연구에서는 실제 지진파(Imperial Valley, 1940년)를 바탕으로 WAVGEN⁽¹⁹⁾을 이용하여 주어진 PSA(Pseudo Spectral Acceleration) 스펙트럼에 가까운 인공지진파를 생성하였다. 그림 12의 (b)는 본 연구에서 고려된 연속지진하중을 나타낸 것이다. 첫 번째 지진파와 두 번째 지진파를 쉽게 구별하기 위해서 Y축과 X축의 교점을 두 번째 지진파가 시작하는 40.01초에 나타냈다. Model 1(w/o TDE)은 시간종속속요소를 고려하지 않고 연속지진하중에 대한 기존 구조물의 거동을 조사한 것이고 Model 2(w/ TDE)는 BRB시스템을 시간종속속요소로써 고려하여 첫 번째 지진파에 의해 구조물의 손상이 발생한 이후에 두 번째 지진파가 발생되기 전에 활성화되도록 설정하였다. 이는 첫 번째 지진에 의해 건물이 손상을 받은 이후에 BRB시스템이 건물에 설치되어 구조물의 보강이 이루어진 후 두 번째 지진이 발생한 것을 가정한 계획이다.

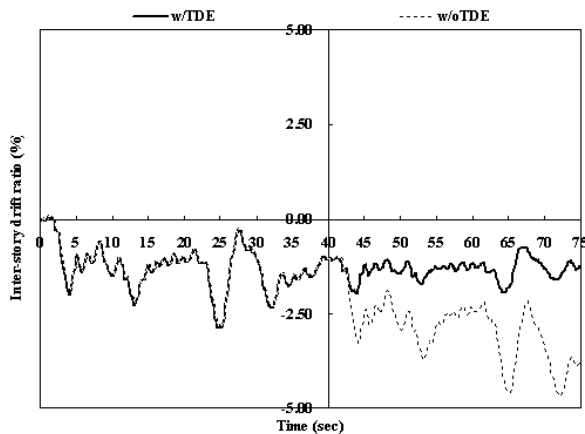
그림 13은 시간종속속요소로써 고려된 BRB시스템의 시간



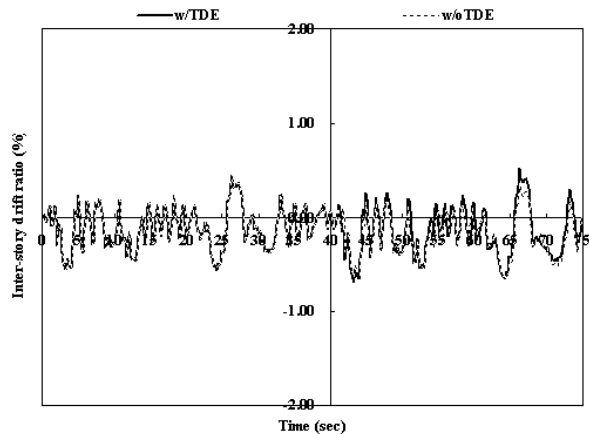
〈그림 13〉 연속지진하중에 대한 시간종속속요소로 고려된 BRB시스템의 거동

에 따른 응력을 나타낸 것으로 첫 번째 지진하중에 대해서는 BRB시스템의 응답은 발생하지 않았고 두 번째 지진하중이 발생하면서부터 외력에 저항하는 것을 보여준다. 앞에서 언급한 것과 같이 BRB시스템은 인장과 압축하중에 대하여 동일한 거동을 보이는데 본 연구에서 적용된 BRB시스템 또한 두 번째 지진하중에 대하여 인장응력과 압축응력이 비슷한 거동을 갖는 것을 볼 수 있다. 그림 14는 연속지진하중에 대한 Model 1(w/o TDE)과 Model 2(w/ TDE)의 시간이력응답을 나타낸 것으로 보기동 모멘트골조로 구성된 1층과 최상층 전단벽시스템의응답을 나타낸 것이다. 시간종속속요소가 고려되지 않은 Model 1(w/o TDE)의 응답은 점선으로 나타냈으며 첫 번째 지진이후 시간종속속요소가 활성화된 이력응답은 실선으로 표시하였다. 그림 14의 (a)에 나타난 모멘트골조 시스템이 적용된 1층의 이력응답은 Model 1(w/o TDE)은 2차 지진하중이 발생하면서 구조물의 손상이 증가하는 것으로 조사되었으며 Model 2(w/o TDE)는 BRB시스템 보강이후 구조물의 손상을 감소시키는 것으로 나타났다. 또한, 극한 변위가 발생한 이후 이력응답의 반응주기가 Model 1(w/o TDE)이 Model 2(w/ TDE)에 비해 길어지는 것을 볼 수 있는데 이는 구조물이 2차 지진하중에 의해 손상이 누적됨에 따라 Model 1(w/o TDE)의 강성이 감소하였기 때문이다. 그림 14(b)에 나타난 전단벽 시스템이 고려된 최상층의 이력변위비를 살펴보면 BRB시스템이 활성화된 이후에도 큰 변위비의 차이를 보이지 않는 것을 볼 수 있다.

그림 15는 본 연구에서 고려된 1차 지진하중과 2차 지진하중에 대한 Model 1(w/o TDE)과 Model 2(w/ TDE)의 층간변위비를 조사한 것이며 1차 지진하중과 2차 지진하중에 의해 생긴 층간변위비의 차이(2차 지진하중의 층간변위

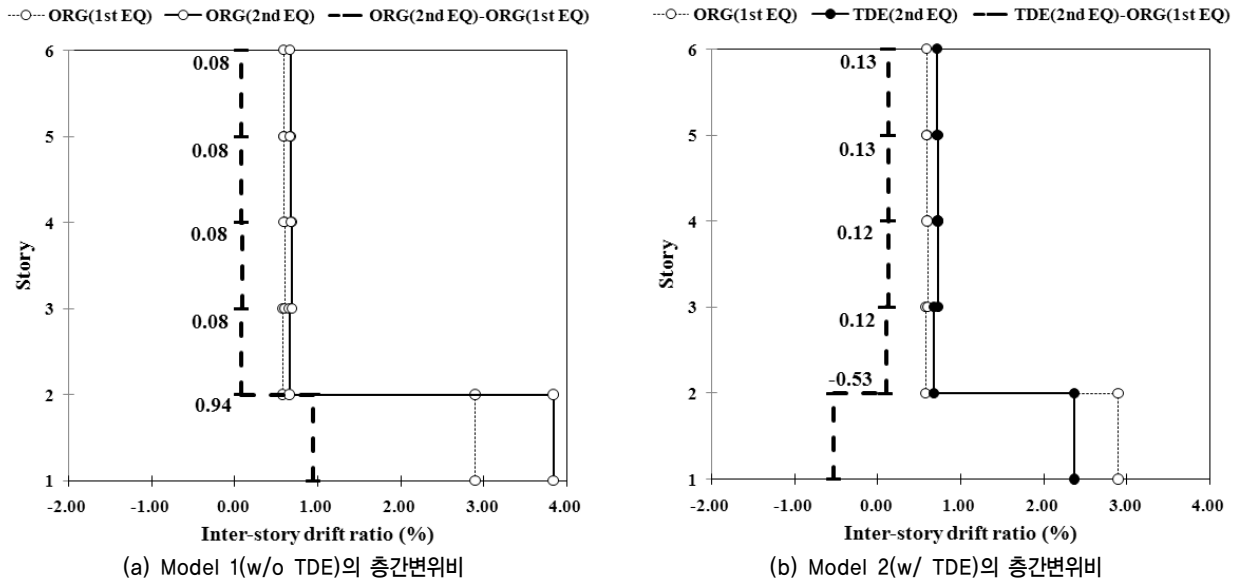


(a) 1층 모멘트골조 시스템의 변위비에 대한 시간이력



(b) 최상층 전단벽 시스템의 변위비에 대한 시간이력

〈그림 14〉 연속지진하중에 대한 변위의 이력거동



〈그림 15〉 연속지진하중에 대한 Model 1(w/o TDE)과 Model 2(w/ TDE)의 층간변위비

비-1차 지진하중의 층간변위비)를 함께 나타냈다. 1차 지진하중과 2차 지진하중의 층간변위비의 차이가 양의 값을 갖는 경우 구조물의 손상이 2차 지진하중에 의해 누적손상이 증가하는 것을 의미하며 누적손상정도가 음의 값을 갖게 되면 BRB시스템에 의해 1차 지진파에 의해 발생된 구조물의 손상이 감소하는 것을 나타낸다. 그림 15에서 가는 점선으로 나타낸 결과는 1차 지진하중에 의해 발생된 구조물의 변위를 층간변위비(1차 층간변위비)로 나타낸 것이며 연속지진하중에 대한 층간변위비(2차 층간변위비)는 진한 실선으로 표시하였다. 또한, 1차 지진하중과 2차 지진하중에 대한 층간변위비의 차이는 진한 점선으로 나타냈으며 그 값을 함께 제시하였다.

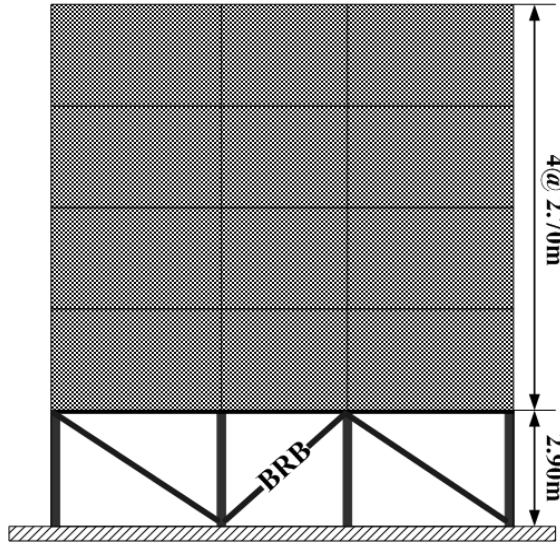
그림 15(a)의 Model 1(w/o TDE)은 첫 번째 지진하중이 발생했을 때 1층에서 2.89%의 최대 층간변위비가 나타났으며 2차 지진하중이 발생한 이후 1층 모멘트 골조의 2차 층간변위비는 3.84%로 1차 층간변위비에 비해 0.94%의 누적손상이 발생하였다. 연속지진하중에 대하여 전단벽시스템의 경우 손상이 집중된 모멘트골조에 비해 누적손상이 크게 증가하지 않는 것으로 나타났다.

그림 15(b)에서 Model 2(w/ TDE)의 층간변위비는 그림 15(a)와 마찬가지로 1층에 손상이 집중된 것으로 나타났다. 첫 번째 지진하중에 의해 나타난 최대 층간변위비는 2.89%로 Model 1(w/o TDE)와 같으며 두 번째 지진하중이 발생했을 때 2차 층간변위비의 최대값은 2.37%로 조사되었다. 이는 보강이 이루어지지 않은 1차 지진하중의 최대 층간변위비 2.89%보다 BRB시스템이 활성화 된 이후 2차 층간변위비는 0.53%감소한 것이다. 이를 통해 시간종속요소로 고

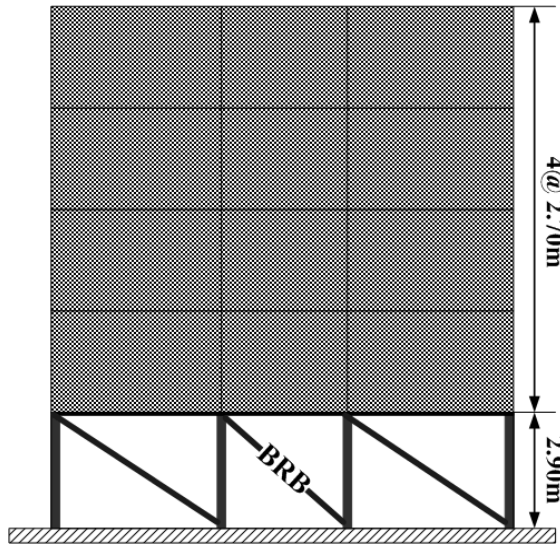
려된 BRB시스템은 2차 지진하중이 발생했을 때 구조물의 추가적인 손상을 방지하였을 뿐만 아니라 추가로 변위가 발생하는 것을 저감시킨 것을 알 수 있다. 또한, 전단벽시스템으로 구성된 2층에서 지붕층까지의 2차 층간변위비를 살펴봤을 때 BRB시스템 보강이후에 누적손상이 발생하는 것을 볼 수 있으며 Model 1(w/o TDE)에 비해 누적손상이 미세하게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 BRB시스템의 강성 및 강도는 전단벽의 강성 및 강도에 비해 매우 작아서 구조물에 효과적으로 영향을 주지 못했기 때문이다. 전체적으로 연속지진하중에 대해서 BRB시스템을 시간종속요소로 고려했을 때 손상이 집중된 1층 모멘트 골조의 변위는 크게 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 BRB시스템의 활성화 이후에도 전단벽 시스템의 누적손상은 미세하게 증가하는 것으로 조사되었다.

6. 보강형태 및 위치에 따른 구조물의 동적거동

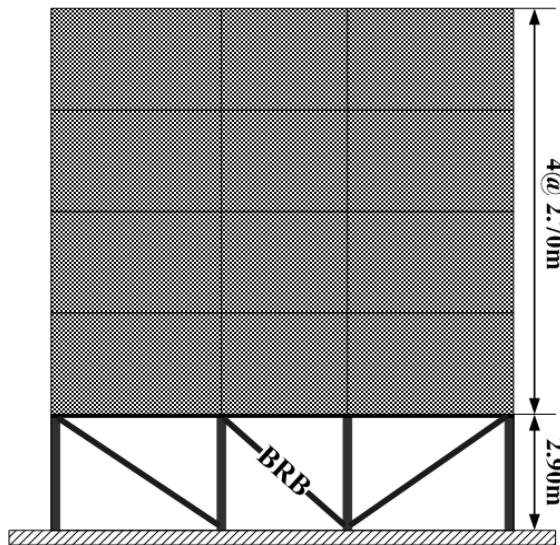
본 절에서는 BRB시스템의 보강 위치 및 방향을 본 연구에서 고려된 콘크리트 해석모델에 다양하게 고려하여 연속지진하중에 대하여 누적손상이 가장 효과적으로 제어되는 보강방법을 조사하였다. 그림 16은 본 연구에서 고려된 해석모델의 보강 위치 및 방향을 제시한 것이다. 앞 절에서 언급된 보강 형태를 포함하여 3개가 고려되었다. 그림 17은 시간종속요소를 고려하지 않았을 때와 고려했을 때의 2차 층간변위비를 각각 제시하였으며 시간종속요소가 고려된 구조물의 2차 층간변위비에서 시간종속요소를 고려하지 않은 구조물의 2차 층간 변위비의 차이를 함께 나타냈다. 그



(a) Type 1 해석모델(w/ TDE)

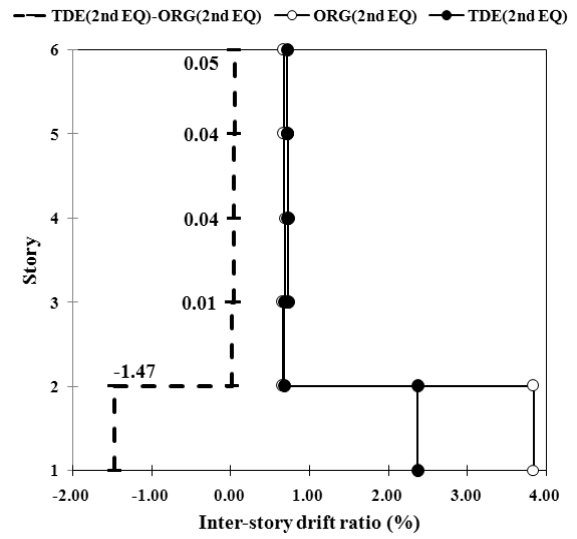


(b) Type 2 해석모델(w/ TDE)

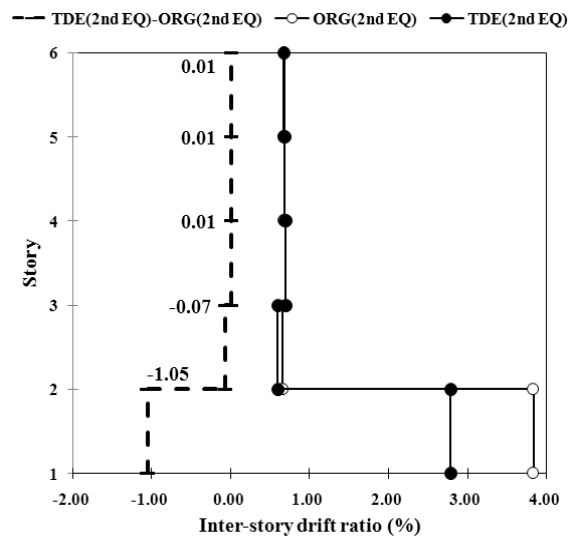


(c) Type 3 해석모델(w/ TDE)

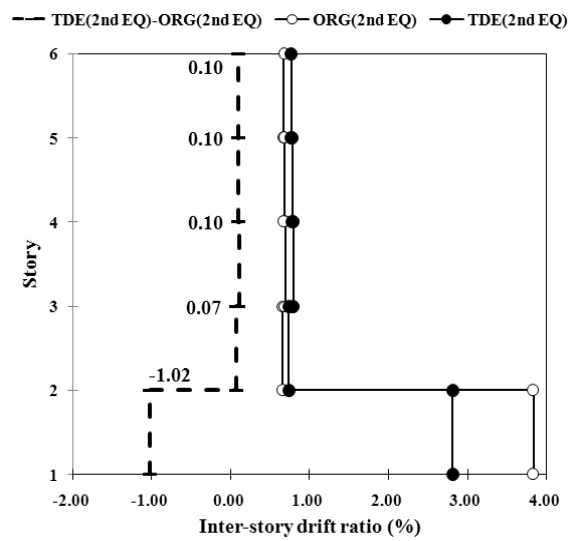
〈그림 16〉 보강방향과 위치에 따른 해석모델



(a) Type 1 해석결과



(b) Type 2 해석결과



(c) Type 3 해석결과

〈그림 17〉 각 해석모델에 대한 최종 층간변위비

차이가 양의 값을 갖는 것은 BRB시스템의 보강을 통한 손상의 증가를 의미하고 음의 값을 갖는 것은 BRB시스템의 보강효과를 의미한다.

그림 17에서 BRB시스템의 보강 위치 및 방향이 다르게 고려됨에 따라 BRB시스템의 보강효과(각 Type별 시간중속요소 유무에 따른 2차 층간변이비의 차이)가 가장 우수한 형태는 Type 1로써 최대 1.47%의 보강효과를 갖는 것으로 조사되었다(그림 17(a)). 두 번째로 우수한 보강효과를 나타낸 모델은 Type 2이며 보강효과는 최대 1.05%로 나타났다(그림 17(b)). 최적의 보강형태와 가새의 방향을 파악하기 위해서 다수의 지진기록을 통해 해석이 추후에 이루어져야 하지만 제한적인 결과를 통해 BRB시스템을 보강할 때 가새의 재료적 항복응력 및 강성 뿐만 아니라 구조물에 보강되는 형태 또한 중요한 것으로 나타났다. 이에 대한 비슷한 연구결과는 다음 문헌에서 찾을 수 있다.⁽²⁰⁾ 각 보강형태 및 위치에 따라 전단벽시스템의 손상정도는 차이를 갖는 것으로 조사되었지만 그 차이가 매우 미세하기 때문에 최적의 보강형태를 선정할 때 중요하게 고려되지 않았다. 전체적으로 비보강된 전단벽 시스템의 경우 BRB시스템을 보강한 이후에도 구조물의 손상이 미세하게 증가하였지만 BRB시스템을 보강한 1층 구조물의 변위는 연속지진하중에 대하여 BRB를 보강한 이후에 크게 감소하는 것을 볼 수 있었다. 전단벽의 누적손상 증가에 비해 모멘트골조의 보강효과가 매우 우수하기 때문에 본 연구에서 고려한 BRB시스템은 연속지진하중에 대하여 효과적인 보강방법으로 고려할 수 있다.

7. 결론

본 연구에서는 ZeusNL 컴퓨터해석 프로그램을 사용하여 연속지진하중이 발생했을 때 BRB보강에 의한 중저층 콘크리트 구조물의 내진거동특성을 조사하였다. 본 연구에 대한 결과는 다음과 같다.

1. 다양한 지진 위험도를 가진 연속지진하중에 대한 연구가 추후에 반영되어야 하지만 실험을 통해 가장 우수한 성능을 보인 채널 보강형 BRB시스템을 시간중속요소로써 적용했을 때 연속지진하중에 대하여 구조물에서 발생하는 누적손상을 효과적으로 제어할 수 있는 것으로 조사되었다.
2. 시간중속요소를 고려한 해석모델과 시간중속요소를 고려하지 않은 구조물의 변위이력을 통해 전단벽 시스템의

응답은 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 손상이 집중된 1층 모멘트 골조의 응답은 두 번째 지진하중에 대하여 시간중속요소를 고려한 구조물이 시간중속요소를 고려하지 않은 구조물보다 안정적인 거동을 하는 것으로 나타났다.

3. 연속지진하중에 대하여 BRB시스템을 시간중속요소로 고려하여 보강했을 때 1차 지진하중에 의해 발생한 1층 모멘트골조의 손상을 최대 1.47%까지 감소시키는 것으로 조사되었다. 그러나 전단벽시스템의 경우 시간중속요소가 활성화된 이후에 미세하게 손상이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 전단벽시스템에 비해 매우 작은 강성 및 강도를 갖는 BRB시스템이 전단벽의 거동에 효과적으로 영향을 주지 못했기 때문이다. 전단벽시스템의 누적손상 정도에 비해 BRB시스템의 보강효과가 매우 우수하기 때문에 BRB시스템은 연속지진하중에 대하여 효과적인 보강방법으로 사료된다.
4. 추후에 최적의 보강형태와 가새의 방향을 파악하기 위한 다수의 지진기록을 고려해야하지만 제한적인 해석결과를 바탕으로 BRB시스템의 보강 위치 및 방향을 비교했을 때 보강 형태에 따라 BRB시스템의 보강효과가 달라지는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 구조물에 가새의 보강을 고려할 때 가새의 항복응력 및 강성외에 보강 형태도 구조물의 동적특성에 영향을 미치는 것으로 조사되었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단 도시개발사업의 연구비 지원(과제번호#06 건설핵심 B03)과 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(2009-0086384)이며 이에 대해 감사드립니다.

참고 문헌

1. Lee, D., Kim, D., and Lee, K., "Analytical Approach for the Earthquake Performance Evaluation of Repaired/Retrofitted RC Bridge Piers Using Time-Dependent Element," *Nonlinear dynamics*, Vol. 56, No. 4, 463-482, 2009.
2. 이도형, 전중수, 박대효, "연속지진하중에 의한 철근콘크리트 교량 교각의 응답해석," 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 16, No. 3, 357-367, 2004.
3. Aschheim, M., and Black, E., "Effects of Prior Earthquake Damage on Response of Siple Stiffness-degrading Structures," *Earthquake Spectra*, Vol. 15, No. 1, 1-23, 1999.
4. 김진구, 박준희, 이기학, 이진, "철판과 π -형강을 이용한 좌굴 구속가새의 내진성능," 대한건축학회논문집, Vol. 23, No. 10, 19-26, 2007.

5. 최현훈, C. Christopoulos, 김진구, “다중 가진에 대한 구조물의 지진응답 평가,” 한국지진공학회 논문집, Vol. 12, No. 6, 35-45, 2008.
6. Izzuddin, B.A., and Elnashai, A.S., “Adaptive Space Frame Analysis Part I: A Plastic Hinge Approach,” *Proceeding of Institution of Civil Engineers Structures & Buildings*, Vol. 99, 303-316, 1993.
7. Izzuddin, B.A., and Elnashai, A.S., “Adaptive Space Frame Analysis Part II: A Distributed Plasticity Approach,” *Proceeding of Institution of Civil Engineers Structures & Buildings*, Vol. 99, 317-326, 1993.
8. Elnashai, A.S., Papanikolaou, V., and Lee, D.H., “ZeusNL-A program for inelastic dynamic analysis of structures,” MAE Center, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, 2001.
9. 김병두, 전대한, 김재웅, “복합구조물의 상부층수 변화에 따른 탄소성 정적 및 동적 응답특성,” 한국지진공학회 논문집, Vol. 5, No. 5, 73-83, 2001.
10. 고동우, 이한선, “필로티형 고층 RC건물의 비선형시간이력해석,” 한국지진공학회 논문집, Vol. 13, No. 1, 35-43, 2009.
11. Jeong, S.H., and Elnashai, A.S., “Analytical Assessment of An Irregular RC Frame for Full-Scale 3D Pseudo-Dynamic Testing Part I: Analytical Model Verification,” *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 9, No. 1, 95-128, 2005.
12. Kabeyasawa, T., Otani, S., and Aoyama, H., “Nonlinear Earthquake Response Analysis of RC Wall Frame Structure,” *Transactions, Japan Concrete institute*, 1983.
13. Charney, F.A., “Correlation of the Analytical and Experimental Inelastic Response of 1/5 Scale Seven-Story Reinforced Concrete Frame-Wall Structure,” *Earthquake-Resistant Concrete Structures inelastic Response and Design*, ACI Sp-127, American Concrete Institute, Detroit, 1991.
14. Kim, J., Choi, H., and Yu, J., “Seismic Capacity and Construction Cost of Apartment Buildings with Various Spatial Flexibility,” *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 25(1), 65-72, 2009.
15. Illita, R., and Bertero, V.V., “Effects of amount and arrangement of wall-panel reinforcement on hysteretic behavior of reinforced concrete walls,” *Earthquake Engineering Research Center Report No. UCB/EEERC-80-04*, 1980.
16. Orakcal, K., Massone, L.M., and Wallace, W.J., “Analytical Modeling of Reinforced Concrete Walls for Predicting Flexural and Coupled-Shear-Flectural Response,” *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, University of California, 2006.
17. Maheri, M.R., and Akbari, R., “Seismic behaviour factor, R, for steel X-braced and knee-braced RC buildings,” *Engineering structures*, 25(12), 1505-1513, 2003.
18. Korean Building Code (Structural), 대한건축학회, 2008.
19. Mukherjee, S., and Gupta, V.K., “Wavelet-Based Generation of Spectrum-Compatible Time-Histories,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 22, No. 9, 799-804, 2002.
20. Di Sarno, L., and Elnashai, A.S., “Bracing Systems for Seismic Retrofitting of Steel Frames,” *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65, No. 2, 452-465, 2009.