

LRB를 이용한 병렬전단벽 구조물의 지진응답제어

Seismic Responses Control of Coupled Shear Wall Structures Using LRBs

박용구¹⁾ · 김현수²⁾ · 고 현³⁾ · 김민균⁴⁾ · 이동근⁵⁾

Park, Yong Koo · Kim, Hyun Su · Ko, Hyun · Kim, Min Gyun · Lee, Dong Guen

국문 요약 >> 대부분의 전단벽 구조물은 통로의 목적으로 개구부를 필요로 하게 되고 전단벽들 사이가 슬래브나 연결보로 연결된 병렬 전단벽의 형태를 띠게 된다. 이러한 구조물에 지진하중이 작용할 때 연결보에 과도한 전단력이 작용하여 연결보가 취성적으로 파괴되거나 전단벽이 먼저 항복하는 문제점이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위하여 연결보에 감쇠장치를 설치하게 되면 구조물의 진동제어효과와 더불어 연결보의 응력집중 및 취성적 파괴를 막을 수 있어서 내진성능 향상을 기대할 수 있다. 본 논문에서는 병렬전단벽 연결보 중앙부에 LRB (Lead Rubber Bearing)가 설치된 구조물의 지진응답제어효과 및 응력의 분포를 평가하여 구조적 효율성을 확인하고자 한다. 이를 위하여 병렬전단벽의 거동을 비교적 정확하게 모사할 수 있는 모형화 방법을 제안하였고, 제안된 모형화 방법을 통하여 지진하중을 받는 예제 병렬구조물에 대한 시간이력해석을 수행한 후 지진응답제어성능을 검토하였다.

주요어 병렬전단벽 구조, LRB, 연결보, 휨변형

ABSTRACT >> Most of shear wall structures require openings in shear walls and thus shear walls are linked by floor slabs or coupling beams resulting in the coupled shear wall structures. When these structures are subjected to seismic excitations, excessive shear forces are induced in coupling beams. Accordingly, brittle failure of coupling beams may occur or shear walls may yield first. To avoid this problem, damping devices can be installed in coupling beams. It can increase the vibration control effect and improve the seismic resistance performance of the coupled shear wall structure by avoiding stress concentration and the brittle failure of coupling beams. Based on this background research, an LRB (lead rubber bearing) was introduced in the middle of the coupling beam in this study and the authors investigated the seismic response control effect and stress distribution of the proposed system. To this end, a modeling technique that can effectively predict the structural behavior of coupled shear wall structures has been proposed. With this proposed technique, time history analyses of the example coupled shear wall structure subjected to seismic excitation were performed and the vibration control effects of the seismic responses were investigated.

Key words Coupled shear wall structure, LRB, Coupling beam, Bending deformation

1. 서론

최근 건축물이 고층화되는 추세에 따라 횡하중에 의한 진동문제가 크게 대두되고 있다. 이러한 고층건축물의 설계에 있어 지진과 같은 횡하중에 의한 구조물의 응답 제어는 구조물의 안정성을 확보에 있어서 매우 중요한 요소가 된다.

구조물의 횡방향 진동제어를 위하여 사용되는 TMD(Tuned Mass Damper)나 TLD(Tuned Liquid Damper)와 같은 관성력을 이용한 감쇠기는 특정한 진동수 성분을 가지는 동적 하중에 대하여 특히 뛰어난 성능을 발휘하지만 진동제어 장치의 큰 부피와 질량으로 인하여 건축계획이나 구조계획상에 어려움이 있게 된다. 또한, 다양한 진동수 성분을 가지는 동적하중에 대하여 효과적인 진동제어성능을 발휘하기 위하여 별도의 가력장치(Actuator)를 설치하고 이를 제어하기 위한 복잡한 제어알고리즘을 작성하여야 하는 등 적용하기에 복잡하고 제약이 많다. 이러한 질량감쇠기와는 다른 특성을 가진 에너지 소산형 감쇠기기도 널리 사용되고 있는데 에너지 소산형 감쇠기는 구조물에서 충분한 상대변위를 발생시키는 두 점 사이에 연결함으로써 큰 효과를 발휘 할 수 있다.^{(1),(2)} 지금까지 프레임구조에서 전단변형의 영향으로

¹⁾ 정회원·성균관대학교 건설환경시스템공학과, 박사과정

²⁾ 정회원·선문대학교 건축학부, 조교수
(교신저자: hskim72@sunmoon.ac.kr)

³⁾ 정회원(주)아이스트, 공학박사

⁴⁾ 삼성엔지니어링 발전기술팀 사원, 공학석사

⁵⁾ 정회원·성균관대학교 건축공학과, 교수

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

(논문접수일 : 2010 5. 7 / 수정일 : 2010. 7. 22 / 게재확정일 : 2010. 7. 22)

발생하는 상대변위를 이용하는 진동제어에 대한 연구가 다수 이루어져 왔다. 이러한 연구에서는 점탄성감쇠기와 같은 에너지 소산형 감쇠기가 구조물의 전단변형에 의해 발생하는 상대변위를 충분히 이용할 수 있도록 가새(Brace)에 감쇠기를 설치하는 방법이 많이 적용되어왔다. 그러나 가새의 설치로 인하여 통행의 제한 등 건축적인 어려움이 발생하고, 고층 전단벽 구조물에서는 구조물의 휨변형이 크게 발생하여 전단변형에 의한 상대변위를 이용하는 형태의 감쇠장치 효율성이 떨어지는 문제점이 있다. 따라서 최근에는 구조물의 휨변형을 이용하여 에너지 소산형 감쇠기를 설치하는 방식에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 구조물의 휨변형을 이용하는 경우 기존의 가새를 설치하는 방식과는 다르게 구조물의 천정부에 있는 보 부재와 같은 수평부재 사이에 감쇠장치를 설치함으로써 감쇠장치 설치를 위한 별도의 공간을 마련할 필요가 없으므로 건축계획상 매우 유리하다.

이와 같은 에너지 소산형 감쇠기의 설치방식으로는 크게 아웃리저에 설치하는 방식⁽³⁾, 코어 벽체와 외부기둥사이에 설치하는 방식⁽⁴⁾, 그리고 병렬전단벽 구조물의 연결보에 설치하는 방식^{(5),(6)}으로 나누어진다. 특히 병렬전단벽 구조물의 연결보에 감쇠기를 설치하는 방식은 진동제어에 효과적이면서도 횡하중에 의한 연결보의 응력집중을 해결할 수 있는 장점이 있다.

일반적으로 전단벽 사이가 슬래브 또는 연결보로 연결된 병렬전단벽 구조물은 연결보에 작용하는 전단력이 과다하여 지진하중이 작용할 때 연결보가 취성적으로 파괴되거나 전단벽이 먼저 항복하는 문제점이 발생할 수 있다. 그러나 연결보에 감쇠장치를 설치한다면 구조물의 진동제어효과와 더불어 연결보의 연성능력 향상으로 인한 내진성능을 향상을 기대할 수 있을 것이다. 병렬전단벽 구조물 연결보에 감쇠기를 설치하는 방식에 대한 연구는 주로 내진성능 향상에 초점이 맞추어져 있고 진동제어 효과에 대해서는 아직 연구가 미미한 상태이다. 또한 연결보에 설치되는 에너지 소산형 감쇠기의 적절한 형태, 크기, 종류 및 설치 방법에 대한 연구도 충분히 이루어지지 못하였다고 판단된다.

이러한 기존 연구에 대한 검토를 바탕으로 본 연구에서는 진동제어를 위하여 병렬전단벽의 연결보에 지진격리장치로 널리 사용되는 LRB(Lead Rubber Bearing)를 설치함으로써 구조물의 휨변형에 의한 에너지소산을 이용하고자 한다. LRB의 경우 다른 에너지 소산형 감쇠기에 비하여 원형 또는 사각단면을 가지는 등 다양한 연결보의 형태에 유기적으로 대응할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 LRB를 활용한 병렬전단벽 구조물의 진동

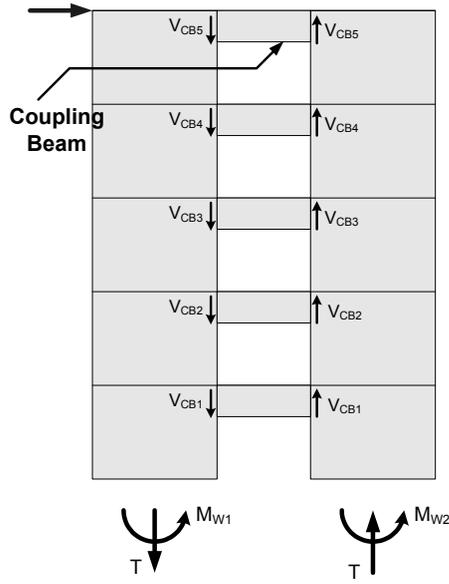
제어 효과를 분석하기 위하여 병렬전단벽 구조물의 거동특징을 효과적으로 나타낼 수 있는 병렬전단벽 모형화 방법을 적용한 예제모델을 사용하여 지진해석을 수행하였다. 두 벽체가 콘크리트 보요소로 연결된 경우, LRB로 연결된 경우 그리고, 별도의 보강없이 바닥판으로만 연결된 경우로 구분하여 El Centro(1943) 및 Taft(1954)지진을 대상으로 시간 이력해석을 수행한 후 지진응답제어성능을 검토하였다.

2. 병렬전단벽 구조시스템

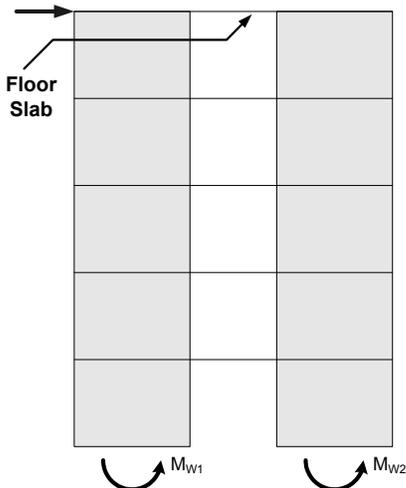
2.1 병렬전단벽 시스템의 구성 및 구조적 특징

근래 들어 구조물이 고층화 되면서 철근콘크리트 전단벽이 횡력저항에 중요한 요소로써 많이 활용되고 있다. 이 경우에 전단벽은 한 개의 일체화된 벽요소로 사용되지 않고, 사람들의 통행로, 각종 설비운송 등의 공간구획 목적으로 일부 열린 부분을 연결보나 슬래브를 이용하여 연결하게 된다. 이와 같이 두 벽체가 연결된 구조를 병렬전단벽(Coupled Shear Wall; CSW)구조라고 한다. 병렬전단벽은 2개의 전단벽이 개구부를 중심으로 양쪽에 존재하고 두 벽체사이를 연결하는 연결보로 구성된다. 이런 병렬전단벽 구조물에 횡력이 작용할 때 두 벽체만 횡력에 저항하는 것이 아니라 2가지 메커니즘을 통하여 횡력에 저항하게 되어 지진 또는 바람에 매우 효율적으로 저항하는 구조물이다⁽⁶⁾. 병렬전단벽이 횡력에 저항하는 첫 번째 요소는 두 벽체의 휨모멘트에 의하여 저항하는 부분이다. 그리고 다른 하나는 연결보의 전단력이 각 벽체에 축력으로 작용하는데 따른 전체 구조물의 우력모멘트에 의하여 저항하는 부분이다. 따라서 연결보가 하나의 횡력저항 요소로써 작용하여 연결보의 강성 및 강도에 따라 두 벽체가 일체로 거동하거나(그림 1(a)) 각각 독립적으로 거동하여(그림 1(b)) 전체 구조물의 거동에 큰 영향을 미치게 된다.

간단하게 보면 연결보의 강성과 강도를 높게 설계할수록 구조물의 횡력 저항성능은 크게 향상되지만, 실제 연결보에는 과다한 응력이 집중되고 취성적 파괴가 일어나 설계상에 많은 어려움이 있게 된다. 또한, 연결보를 너무 강하게 설계한다면 전단벽의 하부에서 먼저 소성힌지가 발생하는 항복 기구가 발생할 수 있기 때문에 병렬전단벽의 설계에서는 반드시 연결보에서 먼저 항복기구가 발생하도록 해야 한다. 따라서 병렬전단벽의 설계시에 연결보에서 먼저 소성힌지가 발생하도록 적정한 강도를 확보하여야 하고, 연결보에서 충분한 연성 및 에너지소산 능력을 확보하여야 한다.



(a) 연결보로 연결된 병렬전단벽 구조



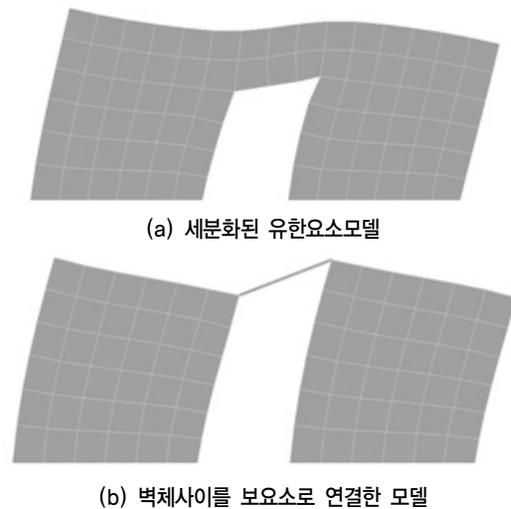
(b) 슬래브로 연결된 병렬전단벽 구조

〈그림 1〉 연결방식에 따른 병렬전단벽 구조물의 횡력저항 특성

- V_{CBi} : i 층 연결보에 작용하는 전단력
- M_{W1} : 1번 벽체의 오버터닝모멘트(over turning moment; OTM)
- M_{W2} : 2번 벽체의 오버터닝모멘트
- T : 연결보의 전단벽에 의하여 벽체에 작용하는 축력($\sum_{i=1}^N V_{CBi}$)
- L : 두 벽체의 중심사이거리

2.2 병렬전단벽 구조물의 모형화 방법

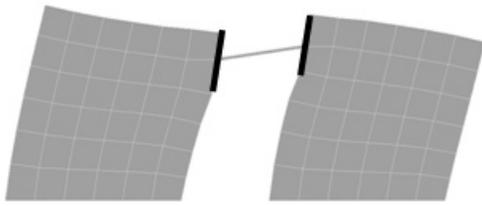
병렬전단벽 구조물은 연결보의 특성이 구조물 전체의 거동을 크게 좌우한다. 따라서 연결보의 역할을 정확하게 구현하지 못한다면 정확한 병렬전단벽 구조물의 해석을 수행하기 어렵다. 현재 대부분의 병렬전단벽 구조물의 모형화를 위한 유한요소모델링 방법은 두 전단벽을 plane stress와 같



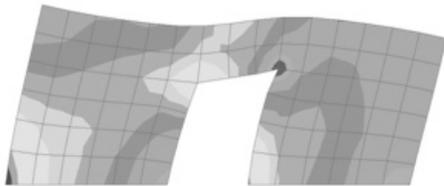
〈그림 2〉 병렬전단벽 구조물의 변형형상

은 요소를 사용하여 모형화하고 두 벽체 사이의 연결보를 보요소를 사용하여 연결하는 방식이다. 그러나 이와 같은 해석모델은 병렬전단벽 구조물의 거동을 정확하게 구현하지 못하는 문제가 있다. 이를 살펴보기 위하여 세분화 시킨 병렬전단벽 유한요소 모델과 벽체사이를 보요소로 연결한 경우의 구조물 변형형상을 그림 2에 비교하여 보았다.

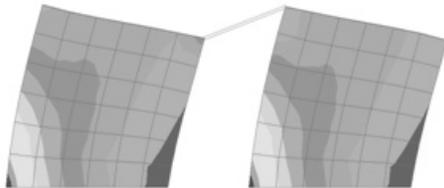
두 해석모델의 변형형상을 비교하여 본 결과 벽체 사이를 보요소로 연결한 경우에는 벽체 전체에서 휨변형이 발생하고 있는 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 세분화된 유한요소 모델의 경우에는 벽체 전체에서 휨변형이 발생하지 않고 연결보로 연결되지 않은 부분에서만 휨변형이 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 연결보가 벽체의 휨변형을 억제시키기 때문이다. 따라서 보통 많이 사용하고 있는 벽체사이를 보요소로 연결한 모델의 경우에는 이와 같은 연결보에 의한 변형 구속효과를 고려하지 못하므로 실제 병렬전단벽 구조물의 경우보다 횡력에 의한 수평변위를 과대평가하게 된다는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 전단벽과 연결보가 접합되는 부분을 휨변형이 발생하지 않도록 강체로 구속하고 그 중심을 보요소로 연결하는 방식을 제안하였다. 제안된 방식으로 해석모델을 구성하여 변형형상을 검토해본 결과 그림 3과 같이 세분화된 유한요소모델과 매우 유사한 결과를 보이고 있는 것을 확인할 수 있다. 그리고 제안된 방법의 타당성을 검토하기 위하여 모형화 방식에 따른 응력분포를 비교하여 그림 4에 나타내었다. 보요소로 연결된 모델의 응력분포는 세분화된 유한요소 모델과 비교하여 보았을 때 매우 다른 경향을 보이고 있는 반면, 제안된 모델은 벽사이가 보요소로 모형화된 모델에 비하여 세분화된 유한요소모델과 비교적 유사한 분포



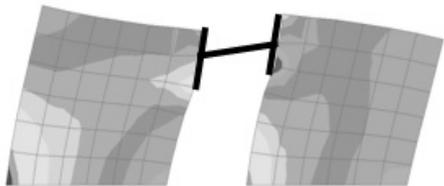
〈그림 3〉 제안모델의 변형형상



(a) 세분화된 유한요소모델



(b) 벽체사이가 보요소로 연결된 모델



(c) 제안모델

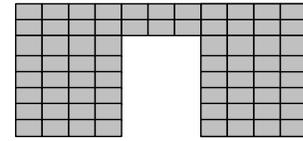
〈그림 4〉 모형화 방법에 따른 응력분포

형상을 보이고 있음을 확인 할 수 있다.

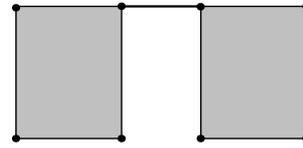
제안한 모형화 방법의 정확성을 검토하기 위하여 10층 병렬전단벽 구조물을 그림 5에 나타난 각 모형화 방식으로 구성하여 수평변위를 검토하였다. 하중은 최상층에 점점하중을 가하고 그 때 발생하는 수평변위를 비교하여 보았다. 그림 6에 나타난 해석결과를 보면 수평변위 또한 제안모델이 Model A와 매우 유사한 결과를 보이고 있음을 확인 할 수 있다. 벽체사이를 보요소로 연결한 Model B의 경우에는 앞서 변형형상을 통해 예상한대로 Model A에 비하여 수평변위를 과대평가하고 있음을 확인 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 제안된 방법(Model C)를 사용하여 해석모델을 구성하였고 이를 이용하여 수치해석을 수행하였다.

2.3 병렬전단벽 연결보에 LRB의 활용

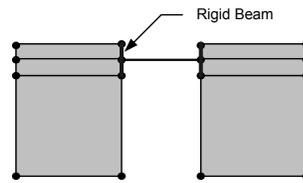
본 논문에서는 병렬전단벽 구조물을 구성하는데 있어서 연결보 설계의 어려움을 해결하고 또한 진동제어효과를 증



(a) 세분화된 유한요소모델(Model A)

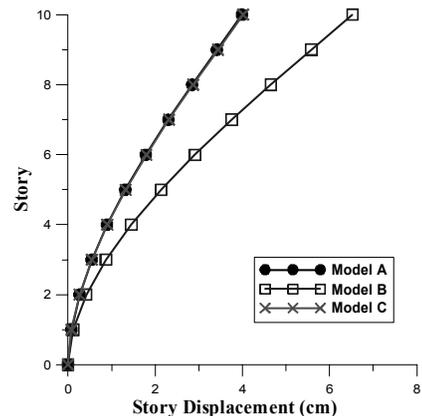


(b) 벽체사이가 보요소로 연결된 모델(Model B)

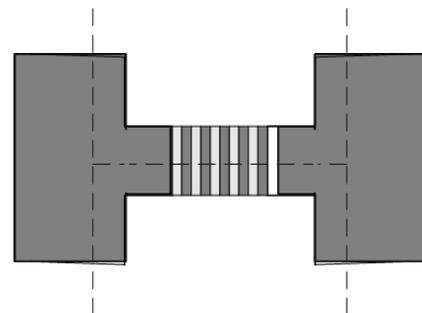


(c) 제안모델(Model C)

〈그림 5〉 수평변위 비교를 위한 모형화 방법



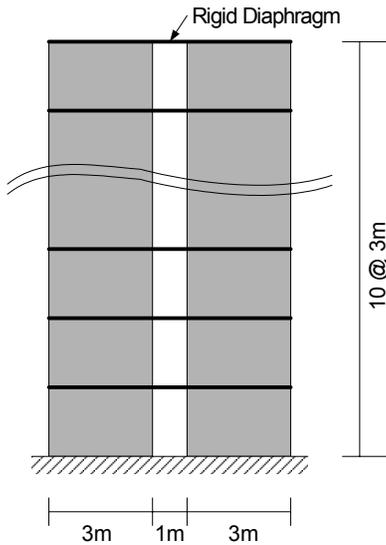
〈그림 6〉 모형화 방법에 따른 수평변위



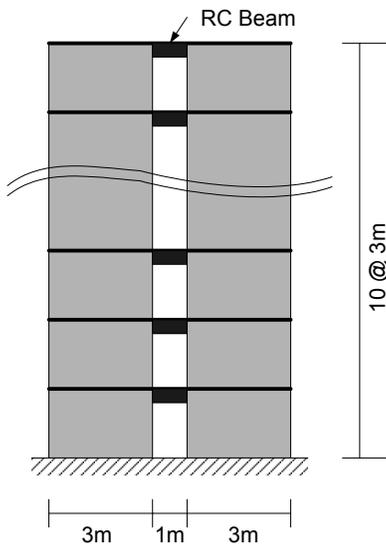
〈그림 7〉 병렬전단벽 연결보에 설치된 LRB

대시키기 위하여 그림 7과 같이 연결보에 LRB를 활용하는 방법을 제안하였다.

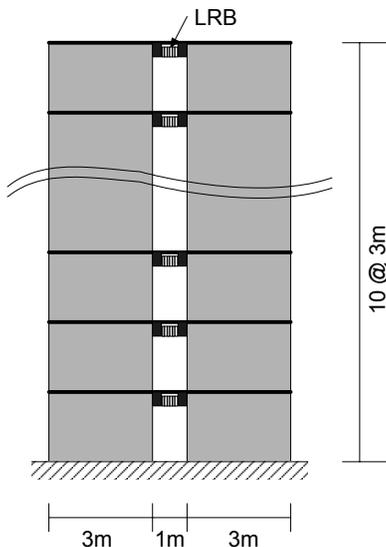
제안된 방법은 병렬전단벽 구조물의 휨변형모드를 이용하여 설치된 LRB의 이력거동에 의한 감쇠효과를 이용함으로써 전체 구조물의 동적응답을 저감시키고자 한다. 특히



(a) 바닥판의 강막효과만 고려된 경우



(b) 두 벽체 사이가 RC Beam으로 연결된 경우



(c) 두 벽체사이가 LRB로 연결된 경우

〈그림 8〉 병렬전단벽 예제구조물

건축물이 고층화 되는 추세에서 가속도 응답의 저감은 구조물의 사용성능을 개선하는데 있어서 큰 효과가 있다. 그리고 연결보에서 발생하는 과도한 부재력을 감소시켜서 연결보 설계 시에 복잡한 철근배근과 같은 어려움을 줄일 수 있을 것으로 기대된다. LRB를 사용하여 연결보를 연결하면 연결보의 강성저하로 병렬전단벽 구조물의 횡력저항성능이 줄어들 수 있다. 이렇게 줄어든 지진하중 저항능력을 추가된 LRB의 감쇠 능력으로 충분히 확보할 수 있는지 본 논문을 통하여 검토해 보고자 한다.

3. 예제구조물 및 지진하중

3.1 병렬전단벽 예제구조물

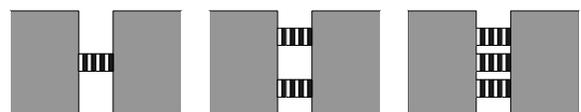
해석에 사용한 모델은 그림 8과 같이 두 벽체 사이를 RC 보로 연결한 경우, LRB로 연결한 경우, 그리고 별도의 보 없이 바닥판에 의한 강막효과(Rigid Diaphragm)만을 고려한 경우로 나누어 구성하였다. 전단벽의 길이와 두께는 각각 3m, 0.2m로 하였고, 층고는 전 층에 대하여 균일하게 3m로 하였다. 병렬전단벽의 벽체 사이거리는 실제 출입문의 용도로 많이 사용되는 특성을 고려하여 출입문의 너비인 1m를 적용하였고, 두 벽체사이에 연결된 RC보의 높이는 0.9m 폭은 벽체 두께와 맞추어 0.2m로 하였다. 예제구조물의 층수는 10층과 30층의 2가지로 고려하여 구성하였다.

3.2 LRB의 특성

본 연구에서는 널리 사용되고 있는 원형 LRB를 사용하여 병렬전단벽을 연결하였고 사용한 LRB의 특성치는 표 1과 같다. 단, 여기서 LRB가 설치되는 연결보의 크기가 높이에 비하여 폭이 좁기 때문에 폭의 크기를 고려하여 작은 크기의 LRB가 사용되었다. 따라서 그림 9에 나타난 바와 같이 하나의 연결보에 3개의 LRB까지 사용할 수 있으므로

〈표 1〉 해석모델에 적용된 LRB의 특성

	초기 수평강성 (kN/cm)	항복하중 (kN)	항복 후 수평강성 (kN/cm)	등가강성 (kN/cm)
LRB	163	17.3	16.3	12.6



(a) LRB 1개 연결 (b) LRB 2개 연결 (c) LRB 3개 연결

〈그림 9〉 병렬전단벽 연결부재에 설치된 LRB

LRB 개수의 변화에 따른 감쇠능력의 변화를 검토하였다. 본 연구에서는 MIDAS/GEN 프로그램을 사용하여 구조해석을 수행하였으며 표 1에 나타난 LRB의 특성치를 입력한 비선형 연결요소를 사용하여 LRB를 모델링 하였다.

4. 지진하중에 대한 예제구조물의 응답비교

4.1 지진하중 및 해석모델

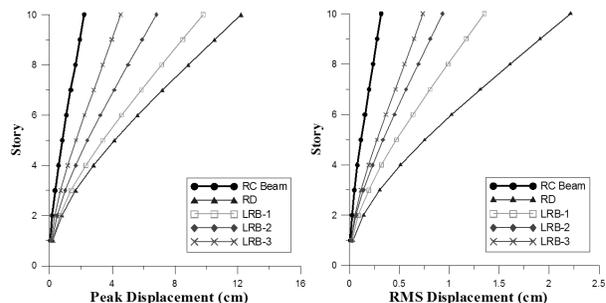
본 논문에서는 진동제어성능을 확인하기 위하여 그림 10에 나타난 El Centro N00E (1940)지진과 Taft N69E (1952)지진을 사용하여 시간이력해석을 수행하였다. 해석결과는 모든 경우에 대하여 시간이력해석의 최대응답과 RMS (Root Mean Square)응답을 바탕으로 비교하였다. 해석결과에서 두 벽체가 RC Beam으로 연결된 경우는 ‘RC Beam’으로 표현하였고, 별도의 보강없이 슬래브로 연결(rigid diaphragm)된 경우는 ‘RD’로 표현하였다. 본 연구에서 제안하는 LRB로 연결된 모델은 ‘LRB-1’과 같이 표현하였고 이때, 뒤에 있는 숫자는 연결부재에 설치된 LRB의 개수를 나타낸다.

4.2 10층 예제구조물의 응답

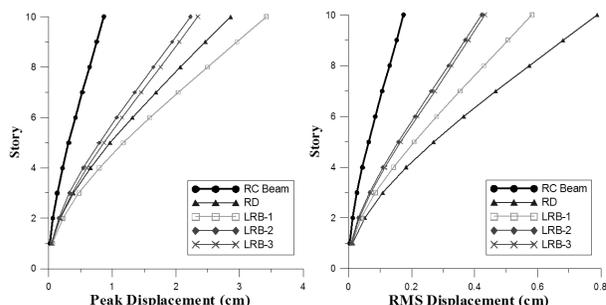
먼저 10층 예제구조물의 변위응답을 살펴보면 그림 11과 같다. 모든 경우에 있어서 두 벽체가 RC Beam으로 연결된 모델이 가장 우수한 변위 제어성능을 보여준다. 반면 RD모델은 모든 경우에 RC Beam 모델보다 큰 횡변위응답을 나타낸다. RD모델은 RC Beam 모델보다 강성이 작아서 구조

물의 고유주기가 길어지므로 입력되는 지진하중이 작아질 수 있으나 횡변위응답은 더 커지는 것을 알 수 있다.

반면 그림 12에 나타난 가속도 응답을 비교해 보면 가장 불리했던 RD모델이 RC Beam모델과 유사하거나 오히려 더 작은 응답을 나타내는 경우도 있었다. 이는 RC Beam으로 연결된 경우에 횡력에 대한 변위제어능력은 뛰어나지만

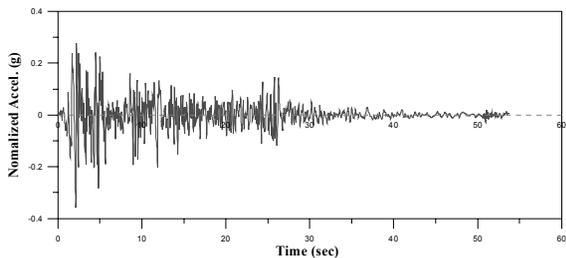


(a) El Centro 지진하중

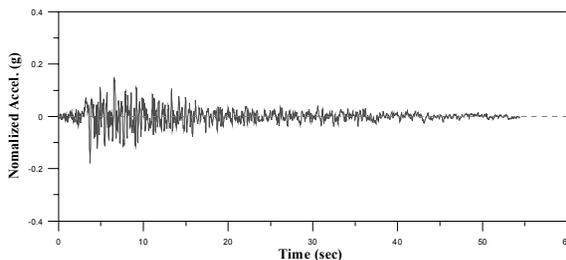


(b) Taft 지진하중

〈그림 11〉 10층 예제구조물의 변위응답

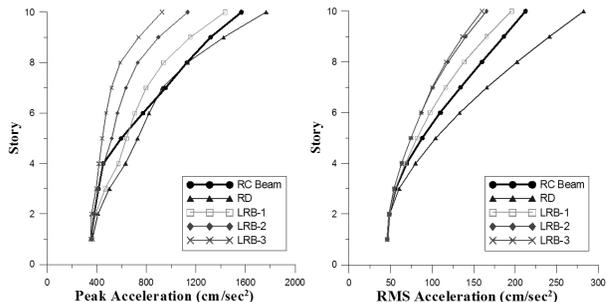


(a) El Centro N00E (1940)

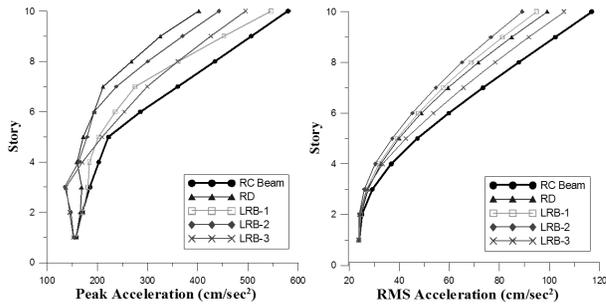


(b) Taft N69E (1952)

〈그림 10〉 입력 지진하중



(a) El Centro 지진하중



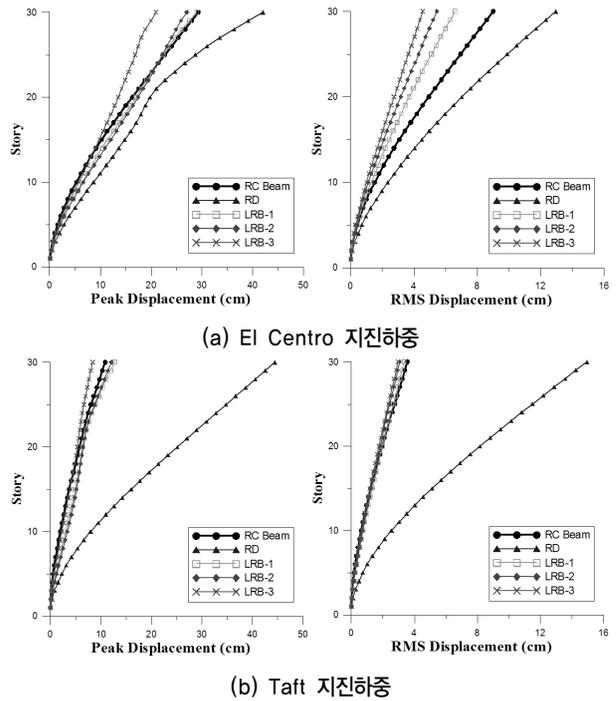
(b) Taft 지진하중

〈그림 12〉 10층 예제구조물의 가속도응답

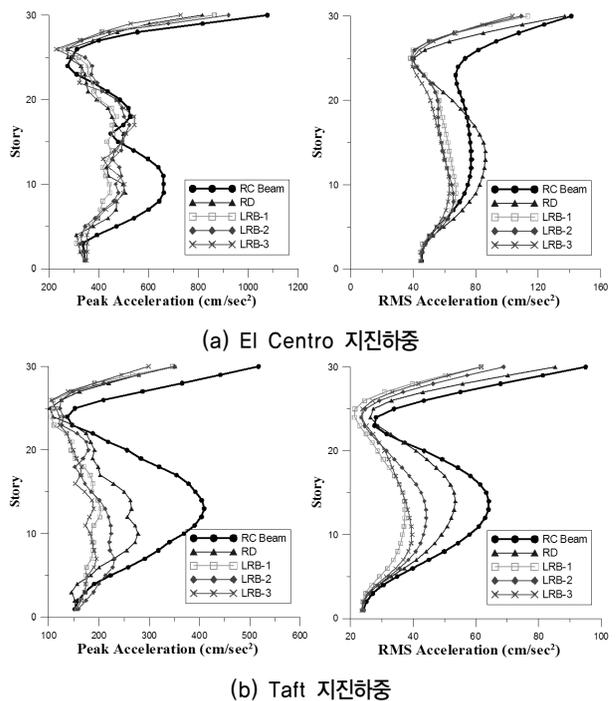
오히려 가속도응답은 불리해질 수 있음을 나타낸다. 따라서 연결보의 강성을 증가시켜 병렬전단벽 구조물의 횡강성을 증가시키면 구조물의 횡변위 제어능력은 증가하지만 가속도응답은 더 커질 수도 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 제안한 LRB를 사용한 모델의 경우에는 횡변위응답에서 RD 모델보다는 적은 응답을 나타내고 있었지만, RC Beam 모델에 비하면 더 큰 응답을 보인다. 이것은 저층 구조물이 고층 구조물에 비하여 휨변형의 영향이 그리 크게 나타나지 않기 때문이라고 판단된다. 또한 저층 구조물에서는 감쇠의 영향보다 구조물 강성의 영향이 구조물의 응답에 더 크게 작용하기 때문이다. 그러나 가속도응답을 살펴보면 RD 모델에 비하여 작은 값을 나타내고 있고 가속도응답에서 불리한 경향을 보였던 RC Beam 모델에 비하면 매우 뛰어난 응답제어 효과를 나타내는 것을 확인 할 수 있다. El Centro 지진하중이 가해진 경우의 RC Beam 모델과 Taft 지진하중이 가해진 경우의 몇 가지 모델의 최대가속도를 보면 3-5층에서 급격하게 변하는 것을 볼 수 있다. 이것은 예제구조물의 구조적 특성은 전 층에 걸쳐서 동일하므로 지진하중의 특성과 예제구조물의 모드형상 등의 동적특성간의 상관관계에 의해서 이러한 결과가 나오는 것으로 판단된다. 설치된 LRB의 개수에 따른 제어효과는 지진하중에 따라서 차이가 나는 것을 알 수 있다. 즉, El Centro 지진하중의 경우에는 LRB를 많이 설치할수록 제어능력이 좋지만 Taft 지진의 경우에는 LRB-3보다 LRB-2가 더 우수한 제어능력을 발휘하였다. 항복강도 등의 LRB 특성 및 LRB의 수는 진동제어 효과에 가장 큰 영향을 주는 인자이므로 이것들과 진동제어효과와의 상관관계는 심도 있는 분석이 추가적으로 필요할 것이다.

4.3 30층 예제구조물의 응답

30층 예제구조물의 경우에는 10층 예제구조물의 경우와는 다르게 LRB를 설치한 모델이 RC Beam 모델에 비하여 매우 우수한 횡변위제어능력을 나타내는 것을 그림 13을 통하여 확인할 수 있다. 입력지진에 따라 약간의 차이는 있지만 El Centro 지진의 경우는 RC Beam 모델과 비교하였을 때 LRB-3 모델의 응답이 거의 50% 가까이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이를 통해서 구조물이 고층화됨에 따라 휨 변형의 영향이 커져 LRB에서의 상대변위가 증가하고 감쇠영향이 더 크게 작용함을 알 수 있다. 그림 14에 나타난 가속도 응답도 모든 경우에 LRB를 설치한 모델이 RC Beam이 적용된 모델에 비하여 응답이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 병렬전단벽 구조물의 연결보에 LRB를 설치하는 방식이 고층건물의 변위제어 뿐만 아니라 가속도응답의



〈그림 13〉 30층 예제구조물의 변위응답



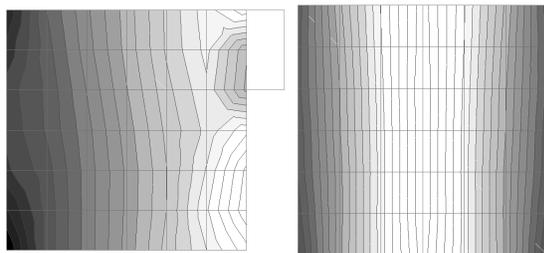
〈그림 14〉 30층 예제구조물의 가속도응답

제어에도 큰 효과를 발휘하고 있는 것을 확인할 수 있다. 특히, RC Beam 모델의 경우에는 해석모델을 구성할 때 연결보에 발생하는 균열 등에 의한 강성저하효과를 고려하지 않았다. 연결보가 강성저하가 발생하는 경우에도 실제로 철근배근이 되어 있어 안정적인 소성힌지로서 거동한다면 진동제어효과를 가져올 수 있을 것이며, 이는 특히 가속도 제어에 있어 두드러질 것으로 판단된다. 위의 해석결과를

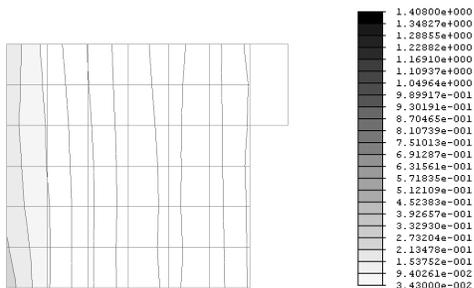
통해서 병렬전단벽 구조물의 연결보에 LRB를 사용하면 변위응답의 제어뿐만 아니라 가속도응답을 크게 저감시켜서 고층구조물에서 자주 발생하는 진동에 의한 사용성문제를 해결할 수 있는 좋은 방법이 될 수 있을 것으로 기대된다. 반면 연결보 없이 슬래브만으로 연결된 경우에는 변위제어 측면에서 매우 불리할 뿐 아니라 가속도응답 크게 발생하여 병렬전단벽 구조물에서 가장 불리한 시스템으로 판단된다.

4.4 연결방식에 따른 구조물의 응력비교

본 연구에서는 제안된 LRB를 사용한 연결보의 적용성을 검토하기 위하여 각 모델별 병렬전단벽 벽체 및 연결보에 작용하는 응력의 분포를 비교하여 보았다. 벽체에 작용하는 응력분포를 보다 보기 쉽게 비교하기 위하여 병렬전단벽의 벽체를 세분화시켜 시간이력해석을 수행하였다. 응력분포는 시간이력해석결과 벽체에서 발생하는 최대 주응력을 바탕으로 검토하여 벽체 간 연결방식에 따라 어떤 응력분포를 가지는지 확인하였다. 또한 LRB가 설치되는 경우에는 LRB의 개수가 늘어남에 따라 감쇠능력의 증가로 인하여 진동제어에 더욱 효과적임을 앞서 확인하였기 때문에 본 절에서는 LRB가 3개 설치된 경우만 고려를 하였다. 해석결과를 보면 10층 및 30층 예제구조물이 전체적으로 유사한 응력 분포를 나타내므로 30층 예제구조물에서 5층 부분 벽체에 대한 응력분포를 그림 15에 나타내었다.



(a) RC Beam 연결모델 (b) Rigid Diaphragm 연결모델



(c) LRB 연결모델

〈그림 15〉 연결방식에 따라 벽체에 작용하는 응력분포(kN/cm²)

〈표 2〉 벽체 간 연결방식에 따라 연결보에 작용하는 최대 부재응력

층수	해석모델	El Centro 지진하중		Taft 지진하중	
		전단응력 (kN/cm ²)	휨응력 (kN/cm ²)	전단응력 (kN/cm ²)	휨응력 (kN/cm ²)
10	RC Beam	0.2580	0.5170	0.0989	0.1980
	LRB	0.0134	0.0254	0.0068	0.0129
30	RC Beam	0.2570	0.6170	0.1720	0.4470
	LRB	0.0184	0.0417	0.0075	0.0202

그림 15에서 나타낸 바와 같이 벽체사이가 슬래브로만 연결된 RD모델의 경우에는 휨력을 모두 벽체가 부담하게 되므로 벽체에 큰 응력이 발생하는 것을 확인 할 수 있다. RC Beam으로 연결된 경우에는 연결보와 벽체가 연결되는 부분에 응력이 집중되는 현상을 확인할 수 있다. 따라서 연결보나 연결부분의 전단벽에서 취성 파괴가 발생할 위험이 있음을 예상할 수 있다. 본 연구에서 제안하는 LRB설치 모델의 경우에는 그림 15(c)에서 볼 수 있듯이 연결보와 벽체의 연결부분에서 큰 응력이 발생하지 않았다. 또한 LRB에 의하여 입력되는 지진에너지의 소산이 이루어지므로 벽체에 작용하는 응력도 다른 모델에 비하여 매우 작게 나타났다. 이것은 LRB를 설치함으로써 진동제어 효과를 가짐과 동시에 연결보의 손상없이 효과적으로 병렬전단벽 구조물의 내진성능을 향상시킬 수 있음을 나타낸다.

표 2는 지진하중에 의하여 연결보에 발생하는 최대부재응력을 나타낸 것이다. LRB가 설치된 모델의 경우는 역시 LRB가 3개 설치된 경우만을 고려를 하였다. 해석결과를 살펴보면 앞서 벽체의 응력분포 경향과 비슷하게 모든 경우에 있어 RC Beam으로 연결된 모델에 비하여 LRB로 연결된 모델에서 확연하게 부재응력이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 병렬전단벽의 두 벽체를 LRB로 연결하는 경우에는 RC Beam으로 연결하는 경우에 비하여 연결보에 작용하는 부재력을 크게 줄여 주어서 연결보나 연결보와 벽체의 접합부에서 구조적 피해를 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 병렬전단벽 구조물의 지진응답제어를 위하여 구조물의 횡변형 모드를 이용한 LRB의 활용방법을 제안하고 제안된 방법의 지진응답제어효과를 살펴보았다. 이를 위하여 병렬전단벽 구조물의 거동을 정확하게 표현할 수 있는 해석모델을 제안하였다. 또한, 10층 및 30층 예제구조물을 구성하여 지진해석을 수행하였고, 병렬전단벽 구조물

의 벽체 간 연결방식에 따른 구조물의 응답을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 연구에서 제안한 병렬전단벽 구조물의 해석모델은 병렬전단벽 구조물의 변형형상 및 횡변위를 비교적 정확하게 표현할 수 있다. 또한 벽체에 발생하는 응력분포도 매우 정확하게 표현할 수 있으므로 병렬전단벽 구조물의 동적거동을 분석하는데 매우 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.
2. 10층 예제구조물에서 변위응답은 RC Beam으로 연결된 모델에 비하여 LRB가 설치된 모델이 더 불리한 응답을 보였다. 가속도응답은 RC Beam으로 연결된 모델과 비슷하거나 약간 감소하였다. 따라서 병렬전단벽을 가지는 10층 구조물에서는 RC Beam을 사용하여 강성을 증가시키는 방법에 비하여 LRB를 설치하는 방식이 큰 이점이 없는 것을 알 수 있다.
3. 30층 예제구조물에서는 RC Beam으로 연결된 모델에 비하여 LRB가 설치된 경우에 상당한 동적응답 저감을 확인할 수 있었다. 따라서 30층 건물에서는 제안된 방법이 지진응답제어에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.
4. 병렬전단벽 구조물의 벽체에 작용하는 응력분포를 비교하여 본 결과 슬래브로만 연결된 RD모델에서는 벽체에 응력이 크게 나타나 지진하중에 대하여 벽체의 부담이 크다는 것을 확인 하였다. RC Beam모델의 경우는 연결보와 벽체의 접합부에서 큰 응력집중이 나타나 국부적인 파괴가 예상된다. LRB 설치모델의 경우에는 작은 응력분포와 연결보의 접합부에 응력집중이 발생하지 않아 가장 효과적인 모델이라고 판단된다. 또한, 연결보에서 작용하는 부재응력을 검토하여 본 결과 LRB가 설치된 경

우에는 RC Beam으로 연결된 경우에 비하여 매우 작은 부재응력을 가져 연결보설계에 있어 발생하는 큰 어려움을 해결할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-313-D01137)을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Soong, T.T., and Dargush, G.F., "Passive Energy Dissipation Systems In Structural Engineering," John Wiley & Sons, 1997.
2. 박지형, 김태호, 김옥중, 이도범, "제진장치를 적용한 초고층 주거형 건축물의 횡변위 제어 성능 평가," 한국전산구조공학 회 논문집, 제21권 제3호, 265-273, 2008.
3. Rob, J. S., and Michael R. W., "The damped outrigger concept for tall buildings," *Struct. Design Tall Spec. Build*, 16, 501-517, 2007.
4. Ahn, S.K., Min, K.W., Park, J.H., Lee, S.H., Lee, D.G., Oh, J.K. Kim, K.S., and Lee, S.K., "Practical issues and solutions on installation of viscoelastic dampers in a 46-story reinforced concrete building structure," *Struct. Design Tall Spec. Build*, 17, 231-243, 2008.
5. Chung, H.S. Moon, B.W., Lee, S.K., Park, J.H., and Min, K.W., "Seismic performance of friction dampers using flexure of rc shear wall system," *Struct. Design Tall Spec. Build*, 18 807-822, 2009.
6. Paulay, T., Binney J.R., "Diagonally reinforced coupling beams of shear walls, shear in reinforced concrete," *American Concrete Institute*, ACI Publication SP-42, Detroit, 579-598, 1974.