

조적 채움벽의 내진성

Earthquake Resistance of Masonry Infilled Wall

이 한선*
Lee, Han-Seon

우 성우**
Woo, Sung-Woo

유 은진***
Yoo, Eun-Jin

ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the results of researches which have been conducted throughout the world and in Korea concerning the behavior modes of masonry infill panels and frames. The influence of masonry infill panels on the seismic behavior of RC frames must be considered in the design and evaluation procedure though current code provisions do not generally require explicitly this consideration. However, since the level of the earthquake intensity in Korea is assumed to be moderate, the masonry infill panels may cause the different effect to the structure from those in high seismicity region and this difference should be studied in depth in the future.

1. 서언

전세계적으로 조적채움벽이 있는 골조는 약 200년 이상 동안 사용되어 왔다 [1]. 주로 고층빌딩이 시공됨에 따라 골조가 중력하중을 지지하는 역할을 하고 조적채움벽은 골조의 내외부 칸막이벽으로서 사용되어 왔으며 실제 지진규준이 발전하기 전부터 구조물의 일부분으로서 시공되어 왔다. 보통 건축상의 이유로 사용되기 때문에 대체로 엔지니어들이 조적채움벽의 존재를 무시하고 있다. 그러나 비록 조적채움벽을 초기 구조설계시 구조요소로 취급하고 있지 않으나, 구조물이 횡하중을 받을 때 골조와 상호작용을 하는 것은 틀림이 없다. 그러한 상호작용은 많은 연구자들에 의해 조적채움 골조의 지진거동에 상당히 큰 영향을 끼친다는 것이 밝혀졌다. 특히 우리나라의 경우 조적채움벽은 일반적인 골조에서 많이 사용되고 있어, 조적채움벽과 골조의 상호작용에 대한 연구는 매우 중요하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 국내·외의 여러 연구 사례를 살펴보아, 조적채움벽과 RC 골조의 거동모드에 대해 정리해봄으로써 향후 조적채움벽의 연구에 대한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 조적채움골조의 일반적 거동 유형

골조에 대한 조적채움벽의 영향은 크게 세 가지 정도로 나누어서 이야기 할 수 있다. 첫째, 조적채움벽이 완전하게 채워진 경우, 조적채움벽이 심각하게 손상받기 전에는 구조물의 전체적인 강성과 강도를 증가시킬 수 있다는 점과, 골조에 손상을 줄 정도의 큰 전단력이 일어나기 전에 조적채움벽이 손상을 받는다면 에너지를 소산시키고 골조의 과도한 변형을 막을 수 있다는 점에서 긍정적인 점으로 작용할 수 있다.

* 정회원, 고려대학교 건축공학과 부교수

** 정회원, 고려대학교 건축공학과 박사과정

*** 정회원, 고려대학교 건축공학과 석사과정

Mehrabi 등 (1996)은 현재의 규준에 따라 설계된 1층 1경간 RC 골조의 지진성능에 대한 조적채움벽의 영향을 골조의 강도에 대한 조적채움벽의 강도, 조적채움벽의 종횡비, 수직하중의 분포, 횡하중 이력 등의 변수에 따라 조사하였다. 실험결과 조적채움벽이 RC 골조의 성능을 크게 개선시키며, 조적채움벽을 가진 골조에 의한 횡하중 능력이 순수골조의 횡하중 능력보다 항상 더 크다는 것을 보여주었다. 또, 그림 1와 표 1에서 나타난 바와 같이 강한 골조와 강한 조적채움벽을 가진 구조물의 성능이 약한 골조와 약한 벽을 가진 골조의 성능보다 더 좋다는 사실을 보여주었다.

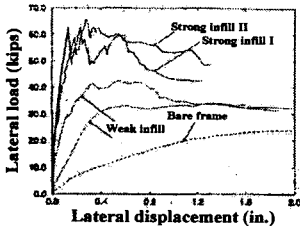
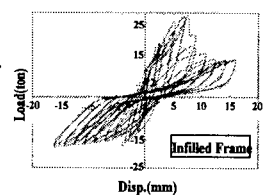
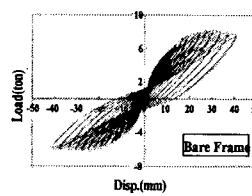
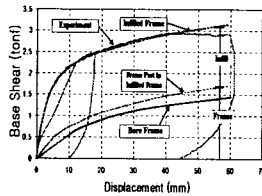
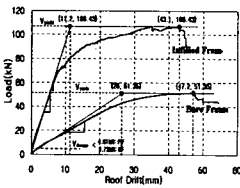


그림 1 하중-변위 관계 [5]

표 1 실험결과

구분	순수골조	약한 벽체	강한 벽체 I	강한 벽체 II
최대 횡하중 (kips)	23.89	42.7	62.4	65.8
최대 하중에서의 변위 (in.)	2.57	0.55	0.13	0.29
파괴모드	휨 파괴	대각균열 + 코너파쇄	대각균열	대각균열

이 한선 등 (1999)은 중력하중에 대해 설계된 3층 조적채움 골조의 일방향 횡가력 실험을 통해 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 최대 강도 및 강성이 순수골조에 비해 각각 2배, 5배정도 크게 나타나며, 변위 능력의 경우는 순수골조에 비해 조적채움 골조가 작으나 변위 연성비는 오히려 2.5배정도 더 크다는 것을 보여주었다. 그리고, 그림 2(b)에서 보는 것처럼 1:12 축소 10층 조적채움 RC골조의 일방향 가력 실험 [10]을 통해 조적채움골조의 강도와 강성이 각각 순수골조의 2배, 4배정도 라는 것을 보여주었다. 또, 김 영문 등(1999)은 조적채움벽을 가진 1층 1경간 골조의 반복횡하중 실험을 통해 순수골조에 비해 조적채움골조의 강도와 강성이 각각 3배 및 10배정도 크게 나타나고 있음을 보여주었다 (그림 2(c)).



(a) 1/5 축소 3층 RC 골조 [4] (b) 1/12 축소 10층 RC 골조 [10] (c) 1/2 축소 1층 1경간 RC 골조 [9]

그림 2 횡하중-옥상층 변위

둘째, 조적채움벽의 평면 및 입면상의 비정형적인 분포는 비틀림 현상에 의한 골조의 손상 집중현상이나 연약층 파괴를 야기시켜 결과적으로 골조에 높은 연성 수요를 가져오게 한다.

그림 3에서 나타난 바와 같이 블록의 코너에 있는 건물의 두 접한 면은 유리 등에 의해 벽면이 완전히 채워져 있지 않고 보이지 않는 다른 두 면은 조적채움벽에 의해 완전히 채워져 있어, 질량과 강성의 중심이 다르게 나타나 비틀림에 의한 손상을 일으킬 수 있다.

Negro 등 (1996)은 그림 5, 6과 같은 RC 골조의 유사동적실험에 의한 조적채움벽의 효과 연구를 통해 표 2와 같은 결과를 얻었으며, 조적채움벽의 불규칙적인 비정형성은 골조의 손상을 더 크게 하는 결과를 초래하며, 비구조 조적채움벽이 설계상에서 무시되어서는 안된다는 것을 보여주었다.

그러나, Fardis 등 (1995) 지진에 대한 손상 분석을 통해 평면 비정형인 조적채움골조의 거동이 매우

큰 정도까지 변형되지 않는다는 것을 입증하였고, 그림 4와 같은 두 인접한 면에 조적채움벽을 가진 평면 비정형 2층 RC 골조의 지진모의실험 [2]을 통해 가로방향의 조적채움벽이 일축 혹은 이축 방향 운동에서의 지진 응답 및 성능에 이롭게 작용한다는 것을 보여주었다. 이것은 구조물의 지진거동에 대한 평면 비정형성의 영향이 어느 정도 제한된다는 것을 보여주며, 평면에서 비정형인 경우 3차원 해석을 통해 조적채움벽의 영향을 고려해야 하는 EC 8의 요구를 오히려 완화시킬 수도 있다는 것을 의미한다.



그림 3 1976 Philippine Earthquake (Cotobato City)

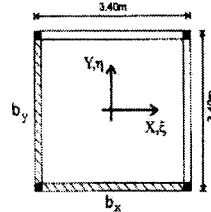


그림 4 2층 RC 골조의 평면

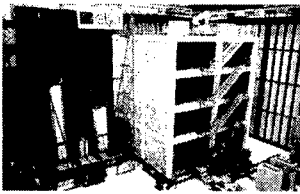


그림 5 완전채움골조

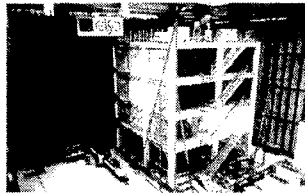
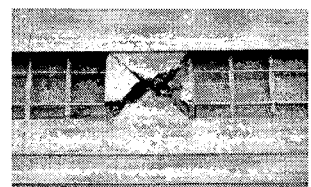
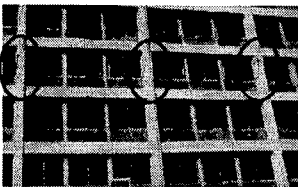


그림 6 부분채움골조

표 2 조적채움벽의 효과

구분	순수 골조	완전채움 골조	부분채움 골조
옥상층 변위 (mm)	210	80	180
V/W	0.40	0.62	0.47
최대 층간변위 (%)	2.4	1.1	3.5

셋째, 조적채움벽에 개구부가 있음으로 인해 조적채움벽에 의해 지지되지 않은 기둥과 창문사이의 벽, 보에서 높은 전단수요를 발생시켜 심각한 손상이나 전단파괴가 일어나는 부정적인 점으로도 작용한다. (그림 7(a), (b), (c))



(a) Holiday Inn in Van Nuys (b) Champaign Tower in Santa Monica (c) St. John's Hospital in Santa Monica
그림 7 비연성 상세를 가진 RC 골조의 전단파괴 (Northridge earthquake)

3. 조적채움벽과 골조의 거동모드

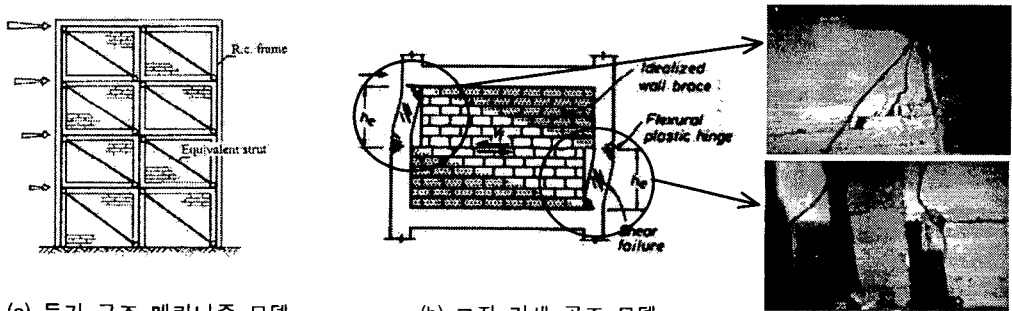
조적채움벽의 거동모드는 항상 골조요소와의 상호작용에 의해 크게 영향을 받기 때문에 조적채움벽만의 독립적인 거동모드만을 생각할 수 없다. 따라서, 거동모드는 크게 조적채움벽 자체의 거동모드와 골조의 거동모드로 나눌 수 있으며, 아래에서 나타낸 내용은 FEMA-306 [1]을 참조하여 정리하였다.

3.1 조적채움벽의 거동모드

조적채움벽에 의해 나타날 수 있는 거동모드는 1) 줄눈 미끄러짐 (줄눈 미끄러짐에 의한 전단파괴), 2)

대각 인장, 3) 코너 파쇄, 4) 면의 파괴의 네 가지 경우이다. 많은 경우에 이들 거동모드가 섞여서 함께 일어나며, 작은 변형 아래에서는 강성과 거동은 조적채움벽의 강성 특성에 의해 지배되며 변형이 증가함에 따라 주변 부재 특성의 일부분이 될 것이다. 조적채움벽이 모르타르에 비해 상대적으로 강할 때 줄눈을 통한 대각 인장에 의해 계단식 균열 패턴이 일어나며, 모르타르가 조적채움벽에 비해 상대적으로 강할 때 모르타르뿐만 아니라 벽돌 유닛을 통해서도 주응력 방향의 수직방향으로 균열이 발생한다. 계단식 균열에도 불구하고 줄눈에 대해 수직인 압축응력(압축스트럿)에 의해 균열 이후에도 전단에 대해 계속 유지될 수 있다. 이러한 균열모드는 낮은 전단력에서 일어나며, 전체적인 거동은 골조 거동이 지배하기 때문에 좀 더 큰 비탄성 변형 능력을 가질 것이다. 그러나, 조적채움벽이 전단에 충분히 강할 때는 코너에서의 압축응력이 파쇄 파괴를 일으킬 것이다. 이러한 모드는 파쇄가 갑작스럽게 일어나기 때문에 제한된 변형능력을 가지며, 이 모드에서 유발된 큰 힘은 보와 기둥 부재에 영향을 끼치고 보나 기둥에서의 전단파괴를 일으킬 수도 있다. 기대되는 파괴모드 특성은 아래와 같다.

- (1) 줄눈 미끄러짐 (줄눈 미끄러짐에 의한 전단파괴): 이 거동모드는 골조가 강하고 휨 연성이 있을 때 일어나기 쉬우며, 다른 파괴모드와 함께 일어난다. 조적채움벽의 높이에 대한 길이의 비가 클 때 일어나기 쉬우며, 모르타르 줄눈이 상대적으로 주변 벽돌 유닛에 비해 약하다면 조적채움벽의 가운데 부분 가까이에서 약한 수평면을 형성한다. 줄눈 미끄러짐이 일어나면 구조물의 등가 구조 메카니즘 (equivalent structural mechanism)은 그림 8(a)의 가새 핀접합 골조 (braced pin-jointed frame)로부터 (b)의 ㄱ자 가새 골조 (knee-braced frame)로 변하게 되며, 골조 기둥의 중앙부와 상하부에 소성힌지를 형성하여 기둥에서의 전단파괴를 일으키게 된다. (3.2의 (4) 전단파괴 참조)



(a) 등가 구조 메카니즘 모델 (b) ㄱ자 가새 골조 모델
그림 8 조적채움벽의 등가 버팀 작용 (Equivalent bracing action)

- (2) 대각 인장 균열: 조적채움벽이 있는 골조의 면내 횡하중 가력시, 조적채움벽의 대각선을 가로지르는 높은 압축응력이 형성된다. 이 주압축응력과 변형률에 대한 가로방향은 인장 변형률이다. 이 인장 변형률이 조적채움벽의 균열 변형률을 초과할 때, 대각 균열이 발생한다. 이런 균열의 형태는 그림 9처럼 높은 횡하중을 받는 대부분의 조적채움벽에 일반적인 형태이며, 때때로 줄눈 미끄러짐과 함께 일어난다.

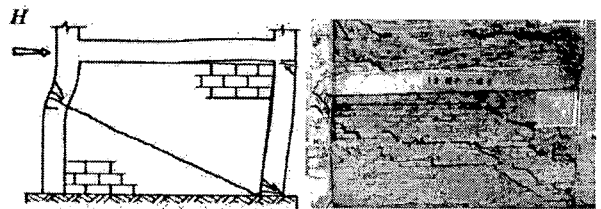


그림 9 대각 인장 균열

- (3) 코너 압축: 횡하중하에서 어떤 형태의 코너 압축이 불가피하게 일어난다. 이것은 각 코너에서의 높은 응력집중 때문이다. 강한 기둥과 보에 대해서 코너 파쇄가 상대적으로 작은 지역에 걸치고,

반면에 약한 골조에 대해서 좀 더 넓게 걸치며 손상이 골조 자체에까지 퍼진다 (그림 10). 이 파괴모드는 상대적으로 연성파괴모드이다.

- (4) 면의 파괴: 벽체의 면의 방향으로 발생하는 지진동은 면의 거동모드를 일으킬 수 있다 (그림 11). 일반적인 높이-두께의 비를 가지는 조적채움벽이 파괴되기 위해서는 큰 진동이 있어야 하고, 고층 건물에서는 상부층에서 지진동의 증폭에 의해 하부층에서는 높은 면내 층전단력에 의해 면의 파괴가 발생할 수 있다.

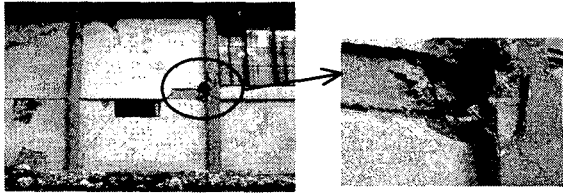


그림 10 골조와 조적채움벽의 상호작용에 의한 골조의 손상



그림 11 면의 파괴에 의한 조적채움벽의 붕괴

3.2 콘크리트 골조의 거동모드

콘크리트 골조의 거동모드는 크게 다섯 가지 정도로 나눌 수 있다.

- (1) 휨 항복: 층간변위비가 대략 0.005를 초과할 때 조적채움벽을 가진 콘크리트 골조에서 일어나며 휨 항복거동은 모멘트가 가장 큰 보와 기둥의 단부에서 일어난다 [1].
- (2) 이음부분의 미끄러짐: 대부분의 오래된 조적채움골조는 비연성 상세를 가지기 때문에 잠재적인 소성힌지 영역에 기둥철근 이음이 존재하며 이 길이방향 이음 철근과 평행한 균열이 발생하게 된다.
- (3) 기둥 인장 항복: 조적채움의 효과가 클 경우, 골조는 모멘트 골조보다 가새 골조에 가깝게 거동하여 기둥이 인장과 압축에서 횡력과 전단력에 저항하게 된다. 이때 기둥의 인장 능력보다 압축 능력이 더 크기 때문에 인장 항복 상태가 발생한다. 상대적으로 연성모드이며 이러한 모드에서 변형의 제한은 조적채움벽의 변형 능력이다.
- (4) 전단파괴: 강한 조적채움벽을 가진 골조는 횡하중아래 조적채움벽에 큰 전단력을 일으키고 이러한 전단력은 조적채움벽에서 골조로 전달된다. 만약 조적채움벽의 코너 파쇄에 의한 손상이 발생하면 대각 스트럿이 벽체의 코너에서 대략 깊이만큼 떨어진 골조로 이동하여 횡력을 전달하게 되어, 짧아진 기둥 (혹은 보)에 높은 전단 수요를 발생시킨다. 골조 부재의 손상 형태는 큰 대각 X-균열과 콘크리트 피복의 파쇄이며, 골조가 약하고 조적채움벽이 강한 경우 피복 콘크리트가 완전히 손상되고 코어가 부풀 것이 예상된다.
- (5) 접합부 파괴: 횡하중이 작용할 경우 보-기둥 접합부는 높은 전단력을 받는다. 이러한 전단력은 조적채움벽이 있을 경우 커지게 된다. 비연성 상세를 가진 콘크리트 골조에서, 일반적으로 보-기둥 접합부 내에 횡방향 철근이 부족하거나 존재하지 않는다. 그러므로, 이 부분의 전단강도능력은 보통 일어날 수 있는 층간 변위에 대한 수요보다 작아서 큰 X-균열을 일으킬 수 있다. 반전칭하중 하에서 피복 콘크리트는 떨어져 나가고, 접합부의 콘크리트는 팽창하며, 기둥의 길이방향 철근은 좌굴되는 경향이 있다. 이러한 거동은 인접한 보와 기둥의 소성힌지 영역을 심각한 손상으로부터 보호하나 골조 시스템이 손상된 접합부를 통해 축력을 제대로 전달할 수 있는가는 의심스러우며 특히 인접한 조적채움벽의 손상이 매우 클 경우 더욱 그렇다고 할 수 있다.

4. 결론

조적채움벽이 있는 골조에서 구조물의 전반적인 거동에 대한 비구조 조적채움벽의 기여도의 중요성이 충분히 예시되었다. 구조물에 이롭던지 그렇지 못하던지 어떤 식으로든 조적채움벽은 골조의 지진거동에 상당히 크게 영향을 끼치고 있기 때문에 현재의 내진설계에서 전체적인 지진응답에 대한 조적채움벽의 영향을 고려하는 것이 바람직할 것이다.

우리나라의 대부분의 골조가 조적채움벽을 사용하고 있으나 내진설계시 조적채움벽의 영향을 고려하지 않고 있다. 이때 순수골조에서 예상되던 연성파괴가, 조적채움벽의 영향을 고려할 경우, 예기치 못한 취성파괴로 변경될 수도 있다. 중요한 파괴 현상으로는 평면 및 입면상의 비정형적인 분포에 의한 골조의 손상 집중현상이나 연약층 파괴현상이 있을 수 있으며, 조적채움벽에 개구부가 있음으로 인해 기둥과 보에 높은 전단수요를 발생시키는 전단파괴 등이 발생할 수 있다. 대부분의 연구에서 조적채움벽을 가진 골조의 거동이 강진의 경우에 대한 것이기 때문에 우리나라와 같은 중·약진 지역에서의 조적채움벽의 구조물에 대한 영향은 좀 더 체계적으로 연구할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부의 자연재해방재 기술개발사업의 소과제 "차세대 내진설계 개념과 지진응답 제어기법 연구"의 일부로 수행되었으며, 이 연구지원에 대해서 감사드립니다.

참고문헌

1. "Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Building" (1999). *FEMA-306*, Building Seismic Safety Council, Washington, D.C.
2. Fardis, M. N., Bousias, S. N., and others (1999). "Seismic Response and Design of RC Structures with Plan-Eccentric Masonry Infills." *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 28, pp. 173-191.
3. Fardis, M. N., and Calvi, M. G. (1995). "Effects of Infills on the Global Response of Reinforced Concrete Frames." *Proc. 10th Eur. Conf. Earthquake Engineering*, Rotterdam, Balkema.
4. Lee, H. S., Woo, S. W., and others (1999). "Pushover Tests of 1:5 Scale 3-Story Reinforced Concrete Frames." *Journal of the Korea concrete institute*, 11(3), pp. 165-174.
5. Mehrabi, A. B., Shing, P. B., Schuller, M. P., and Noland, J. L. (1996). "Experimental Evaluation of Masonry-Infilled RC Frames." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 122(3), pp. 228-237.
6. Negro, P. and Verzeletti, G. (1996). "Effect of Infills on the Global Behavior of R/C Frames: Energy Consideration from Pseudodynamic Tests." *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 25, pp. 753-773.
7. Paulay, T., and Priestley, M. M. N. (1992). *Seismic design of Reinforced Concrete and Masonry Building*. Wiley, New York.
8. Tomazevic, M. (1999). *Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings*. Imperial College Press, London.
9. 김 영문, 김 석균, 김 정한 (1999). "메움벽에 의한 R/C 골조의 내진성능 평가에 관한 연구", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집 제11권 2호.
10. 이 한선, 김 정우 (2000). "1:12 축소 10층 조적채움 RC 골조의 비선형 거동에 대한 실험과 해석의 상관성", 한국콘크리트학회 논문집 제12권 1호.