

면외하중에 대한 비보강 조적벽의 내진성능 평가

Seismic Evaluation of Face-Loaded Unreinforced Masonry Walls (URM)

유은진*

Yoo, Eun-Jin

이한선**

Lee, Han-Seon

ABSTRACT

Unreinforced masonry is widely used as a structural material in residential constructions and known to have poor seismic performance in the out-of-plane rather than in-plane behavior. In countries of lower seismicity such as Korea, it is necessary to check the possibility of the mode of the out-of-plane failure. Though face loading is a major cause of the failure of masonry walls, Korean Seismic Code does not include provisions for face-loaded unreinforced masonry walls. This paper briefly reviews the concept of analysis for unreinforced masonry walls subjected to face-load excitation proposed by Priestley, and its applicability to Korean case.

1. 연구 배경

비보강 조적조는 큰 자중 및 작은 인장력과 연성으로 인해 지진에 대해 취약한 구조물이므로 올바른 설계 및 상세, 시공이 요구된다. 그러나 우리나라의 경우 5층 미만 소규모 건물에 대한 내진설계가 의무화되어 있지 않기 때문에, 대부분 2~3층의 저층인 비보강 조적조 건물의 경우 지진에 대해 고려하지 않는다. 비보강 조적조가 우리나라 저층 주택의 일반적인 형태인 현실에 비추어 볼 때, 지진 발생시 피해를 줄이기 위해서는 내진성능을 고려한 조적조의 설계기준이 요구된다.

건설교통부 조적조 구조설계 기준(안)⁽¹⁾의 비보강 조적조에 대한 기준은 허용응력 설계에 기반을 두고 있다. 이 기준은 비보강 조적벽의 압축, 인장, 휨, 전단응력에 대한 허용한계를 제시하고 있는데, 조적벽이 받는 면외하중은 고려하지 않았다. 호주의 Newcastle에 발생한 지진⁽²⁾에서 알 수 있듯이 면외하중은 비보강 조적조 파괴의 주요 요소 중 하나이므로, 면외하중에 대한 적절한

* 고려대학교 건축공학과 석사과정

** 고려대학교 건축공학과 부교수, 정회원

기준 및 평가가 필요하다.

이 논문에서는 Priestley가 제시한 방법^{(3), (4)}을 소개하고, 이를 우리나라에서 일반적으로 사용되는 규모의 조적조에 적용하여 우리나라 조적조 건물의 면외파괴에 대한 안전성을 검토하여 보았다.

2. Priestley의 비보강 조적조의 면외하중에 대한 평가

2.1 면외하중을 받는 벽체의 응답 가속도

지진력과 수직 방향으로 배열된 벽체는 강성이 작기 때문에 지진력을 직접 받진 않으나, 벽체 상하부의 바닥판의 응답에 의한 관성력이 벽체의 면외하중으로 작용한다. Priestley가 제시한 비보강 조적조의 면외하중에 대한 평가는 표 1의 에너지 경로를 바탕으로 한다.

표 1. 면외하중을 받는 비보강 조적조의 평가

에너지 경로	면외하중을 받는 벽체의 응답가속도 계산 과정
<p>Ground Acceleration</p> <p>① ↓ (Wall stiffness)</p> <p>In-Plane Wall Response</p> <p>② ↓ (Floor stiffness)</p> <p>Floor Diaphragm Response</p> <p>③ ↓ (Wall stiffness)</p> <p>Face Load Wall Response</p> <p style="text-align: right;">Floor and Wall Mass</p> <p style="text-align: right;">Wall Mass</p>	<p>① (SDOF) 고유주기 T에 대한 탄성 응답 스펙트럼 \ddot{a}_r 계산. \ddot{a}_r은 구조물 유효높이 h_e에서의 값이므로 이를 이용하여 i층에서의 응답가속도를 구한다. (그림 1 (a), (b))</p> <p>② ①의 응답가속도는 면내하중을 받는 벽체에 대한 값이므로, 이를 이용하여 바닥판의 탄성 응답 가속도를 구한다. 이는 T_f / T_r 값 및 감쇠율을 이용하여 결정되며, 바닥판이 완전 강성인 경우 $T_f = 0$이므로 그 값이 벽체 응답 가속도와 같다. (그림 1 (c))</p> <p>③ 면외하중을 받는 벽체의 응답(inertial response)은 벽체 상하부 바닥판의 가속도 \ddot{a}_i와 \ddot{a}_{i+1}을 이용하여 구한다. (그림 2)</p>

표 1의 ①, ②, ③ 과정을 거쳐 구한 면외하중을 받는 벽체의 응답 가속도 \ddot{a}_{in} 은 식 (1)과 같다. 이 때 바닥판은 완전한 강성으로 가정된다.

$$\ddot{a}_{in} = \frac{\ddot{a}_i + \ddot{a}_{i+1}}{2} \quad (1)$$

상층으로 올라갈수록 벽체가 받는 응답가속도는 커지는 반면, 축력은 작아진다. 그로 인해 상층부의 벽체는 면외하중으로 인해 파괴될 확률이 높아진다.

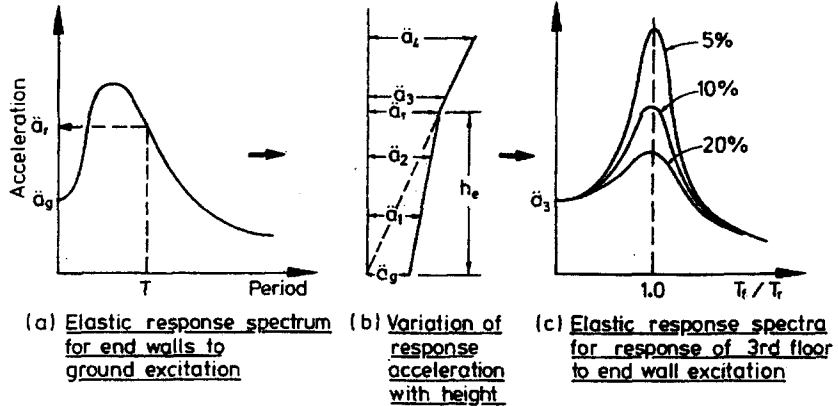


그림 1. 지반가속도에 대한 바닥판(floor)의 응답 가속도

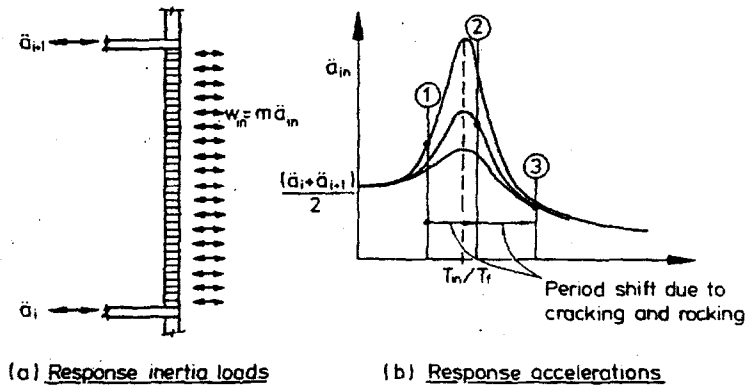


그림 2. 면외하중을 받는 벽체의 응답 가속도

2.2 극한 한계에서의 벽체의 응답 가속도 - 벽체의 능력

면외하중을 받는 벽체는 벽체 높이의 중간에서 균열이 발생한다. 그림 3은 면외하중을 받는 벽체의 하중 상관관계를 나타낸 것이다.

그림 3의 (b)에서 모멘트 평형을 이용하면 변위 Δ 와 응답 가속도 \ddot{a}_{in} 사이의 상관식 (2)를 구할 수 있다.

$$\ddot{a}_{in} = \frac{8}{mh_c^2} R(x - \Delta) \quad (2)$$

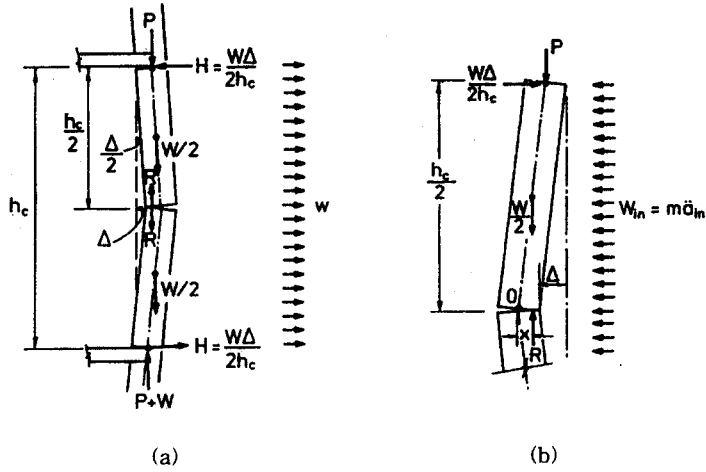


그림 3. 면외하중을 받는 벽체의 하중 관계

그림 4는 면외하중을 받는 벽체의 균열의 시작에서 극한 한계상태에 이르기까지 벽체의 모멘트 및 곡률을 보여준다.

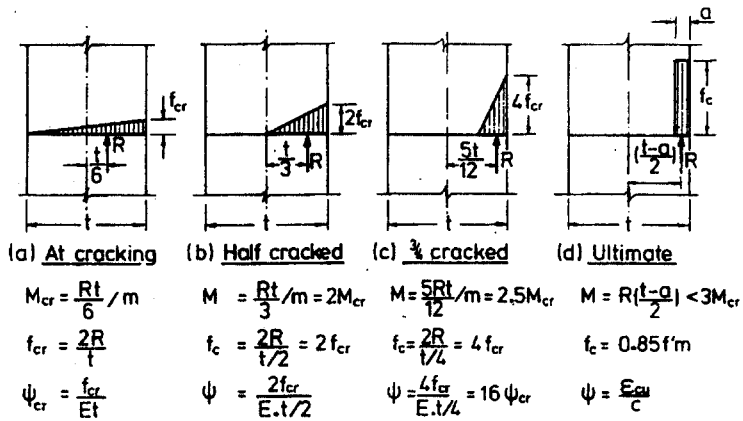


그림 4. 면외하중을 받는 벽체의 중앙에서의 모멘트 및 곡률

그림 4 (a)는 균열이 시작되는 때이며 이 때 변위 Δ 는 식 (3)과 같다.

$$\Delta_{cr} = \frac{5 w_{in} h_c^4}{384 EI} \quad (3)$$

변위 Δ 와 곡률은 비례한다고 가정하면, Δ 와 x 의 상관관계를 구할 수 있으며 식 (2)를 이용하여 그림 5와 같은 변위-응답가속도의 그래프를 구할 수 있다. 이 때 식 (2)에 의해 구한 그래프는

3.2 예시 - 3층 건물 최상층 내력벽체의 응답가속도 및 능력

Priestley가 제시한 방법을 사용하여 예제 건물 중 0.11g의 지반가속도에 대한 3층 건물 최상층 내력벽체의 응답가속도 및 벽체의 능력을 구한다.

(1) 0.11g의 지반가속도에 대한 구조물의 응답 가속도

구조물의 유효높이 h_e 에 대한 탄성응답 스펙트럼 $\ddot{a}_r = 0.234g$ 이며 이를 이용하여 그림 1 (b)과 같은 방식으로 2, 3층의 응답가속도를 구하면 $\ddot{a}_2 = 0.223g$, $\ddot{a}_3 = 0.320g$ 이다. 바닥판을 완전 강체로 가정할 경우 바닥판의 고유주기 $T_f = 0$ 이므로 그림 1 (c)에서 알 수 있는 것과 같이 각 층의 응답가속도 = 바닥판의 응답가속도이다. 관성력에 의해 벽체가 받는 면외하중은 2층 바닥판과 3층 바닥판의 중간값으로 추론할 수 있다.

$$\ddot{a}_{in} = \frac{\ddot{a}_2 + \ddot{a}_3}{2} = 0.272g$$

(2) 벽체의 능력

벽체의 $R = 7.73 \text{ kN/m}$ 이다 (구조물 자중 계산). $t = 90\text{mm}$, 탄성계수 $E = 1 \text{ GPa}$ 인 비보강 조적벽체의 Δ 및 \ddot{a}_{in} 는 다음과 같이 구할 수 있다. 벽체에 균열이 시작되는 순간 (그림 4(a))의 작용 모멘트 (M_{cr}), 벽체의 단위면적에 작용하는 관성력 (w_{in}), 최대 휨처짐 (Δ_{cr}) 및 가속도 (\ddot{a}_{in})는 다음과 같다.

$$M_{cr} = \frac{Rt}{6} = \frac{7.73 \times 0.09}{6} = 0.116 \text{ kN/m}$$

$$w_{in} = \frac{8M_{cr}}{h_c^2} = \frac{8 \times 0.116}{2.38^2} = 163 \text{ N/m}$$

$$\Delta_{cr} = \frac{5 w_{in} h_c^4}{384 EI} = 1.126 \text{ mm}$$

$$x = \frac{t}{6} = 15 \text{ mm}$$

$$\ddot{a}_{in} = \frac{8}{mh_c^2} R(x - \Delta) = 0.0814g$$

즉, $\Delta = 1.126 \text{ mm}$ 이며 $\ddot{a}_{in} = 0.0814g$ 이다.

곡률과 변위 Δ 는 비례한다는 가정을 이용하여 그림 4와 같이 균열의 진행에 따른 변위 Δ 및

x 의 상관관계를 구할 수 있으며 이를 식 (2)에 대입, 변위 Δ 에 상응하는 응답가속도 \ddot{a}_{in} 을 구할 수 있다. 그림 7은 3층 건물의 최상층 벽체의 변위 Δ 와 \ddot{a}_{in} 의 그래프 및 초기 기울기가 동일한 선형 그래프를 이용하여 구한 \ddot{a}_e 를 보여준다. 이렇게 구한 3층 건물의 최상층 벽체에 대해 $\ddot{a}_e = 0.727g$ 이다.

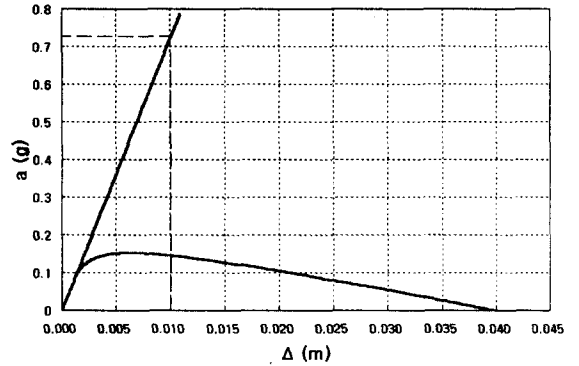


그림 7. 3층 건물 최상층의 응답가속도 및 능력

3.3 계산 결과

0.11g, 0.30g의 지반가속도에 대해 벽체가 받는 응답가속도 및 면외하중에 대한 내력벽체와 치장벽체의 능력을 계산한 결과는 표 2와 같다.

표 2. 각 층 벽체의 주어진 지반가속도에 대한 응답 및 능력 (단위 : g)

	3층				5층			
	\ddot{a}_e (supply)		\ddot{a}_{in} (demand)		\ddot{a}_e (supply)		\ddot{a}_{in} (demand)	
	내력벽체	치장벽체	0.11g	0.30g	내력벽체	치장벽체	0.11g	0.30g
5층	/	/	/	/	0.727	0.462	0.249	0.679
4층	/	/	/	/	0.895	0.703	0.201	0.548
3층	0.727	0.462	0.272	0.742	0.895	0.816	0.169	0.461
2층	0.895	0.703	0.195	0.532	0.818	0.879	0.146	0.398
1층	0.895	0.816	0.138	0.376	0.694	0.903	0.122	0.333

- ① 지반가속도 0.11g인 경우 3층, 5층 건물의 내력벽체, 치장벽체 모두 면외하중에 의한 벽체의 파괴는 발생하지 않는다 ($\ddot{a}_{in} < \ddot{a}_e$).
- ② 지반가속도 0.30g인 경우 3층 건물 최상층의 내력벽체, 치장벽체 및 5층 건물의 치장벽체 모두 면외하중에 의해 파괴되며, 5층 건물의 내력벽체 또한 파괴시의 탄성 응답스펙트럼에 근접한 값을 가진다. 2.5m (현재 가정값) 이상의 층고를 가질 경우 파괴의 위험은 더욱 커진다.
- ③ 상층부의 치장벽체는 내력벽체보다 면외하중에 의해 파괴될 위험이 크다.
- ④ 축력 R 의 영향으로 인한 기울기 k 의 값의 변화에 의해 5층 건물 1, 2층에서는 내력벽체의 면외하중에 대한 능력은 치장벽체에 비해 작은 값을 가진다. 그러나 하층부의 지반가속도에 대한 벽체의 응답가속도의 값이 작기 때문에 실제로 하층부에서 면외하중에 의한 벽체의 파괴 발생 가능성은 작다.

4. 요약 및 결론

Priestley의 평가 방법을 이용하여 우리나라의 비보강 조적조의 면외하중에 의한 파괴 여부를 평가하였다. 평가 결과 0.30g의 지반가속도에서 조적조 최상층의 벽체는 면외하중에 의해 파괴될 위험이 높다는 것을 확인하였다. 단, 평가의 신뢰성을 높이기 위해서는 시공상태를 고려한 조적조의 압축강도 및 탄성계수에 대한 조사가 필요할 것으로 생각된다.

이러한 평가방법의 도입은 비보강 조적조의 설계 및 평가의 구체적인 방법을 제시해줄 것이다.

감사의 글

이 논문은 서울시의 조적조 건축물에 대한 내진보강 방안 연구의 일부로 수행되었으며, 이 연구 지원에 대해서 감사드립니다.

참고문헌

1. 사단법인 대한건축학회, 건설교통부, 2000. "조적조 구조설계 기준(안)"
2. A.W. Page, 1996. "Unreinforced Masonry Structures - An Australian Overview", Bulletin of New Zealand Society for Earthquake Engineering, 29(4) : 242 - 255
3. M.J.N. Priestley, 1985. "Seismic Behaviour of Unreinforced Masonry Walls", Bulletin of New Zealand Society for Earthquake Engineering, 18(2) : 191 - 205
4. L.M. Robinson, 1986. "Discussion - Seismic Behaviour of Unreinforced Masonry Walls, M.J.N. Priestley", Bulletin of New Zealand Society for Earthquake Engineering, 19(1) : 65 - 75
5. 서울시립대학교부설 지진·방재연구소, 2000. "조적조 건물에 대한 내진 보강방안"
6. 사단법인 대한건축학회, 2000. "건축물 하중기준 및 해설"