

2층 조적조 건축물의 지진 응답에 대한 실험연구

An Experimental Study on Dynamic Response of Two Story Masonry Buildings

최성모* 권기혁** 노현섭***
Choi, Sung-Mo Kwon, Ki-Hyuk Noh, Hyun-Sup

ABSTRACT

Most unreinforced masonry buildings have a lot of structural faults under the lateral load. Therefore, considering the heavy damage of URM buildings caused by the earthquakes, it may be necessary for the effective seismic code and reinforcing method.

This paper describes the research-in-progress on an experiment program for the investigation of the relatively simple and reliable analytical model to estimate dynamic response of URM buildings and briefly reviews the concept of the reinforcement for damaged URM buildings.

1. 서론

조적조 건축물은 일부 개구부의 인방을 제외하고는 기둥과 보가 없는 벽식구조로서 어느 정도의 강성을 보유하고 있기 때문에 대부분 3층이하인 우리나라 조적조 건축물의 경우 수직하중과 풍하중과 같은 정적인 하중에 대해서는 상당한 저항력을 가지지만, 지진하중과 같은 동적하중에 대한 연성능력은 매우 취약한 단점을 가지고 있다. 또한, 외국의 경우 대부분 목재(timber)등을 사용한 바닥구조로서 조적벽체와의 연결재를 필요로 하게되는 반면 온돌문화를 가진 우리나라의 조적조 건물은 대부분 철근 콘크리트 슬래브를 사용하고 있으며, 따라서 외국과 달리 특별한 연결재 없이 단순히 몰탈에 의해 벽체와 슬래브가 접합되어있는 상황이고, 지진과 같은 횡하중에 대해서 더욱 취약한 구조를 가지게 된다.

-
- * 서울시립대학교 건축공학과 조교수
 - ** 서울시립대학교 건축공학과 조교수
 - *** 서울시립대학교 건축공학과 석사과정

위와같은 조적조 건축물의 구조적 단점으로 인해 지진발생시 상당한 피해가 예상되며, 이러한 피해를 줄이기 위해서 두가지 측면에서 연구의 방향을 제시하도록 하겠다.

첫째, 기본설계시 건축법규에는 조적조 건축물에 대한 일반적인 규준만 제정되어 있다. 그리고 현재 지어지고 있는 조적조 건축물의 대부분이 현장 조적조 기술자들의 경험에 의존되고 있는 실정이다. 따라서 내진성능을 고려한 조적조 건축물의 효율적인 해석방법과 함께 보다 합리적인 설계기준이 요구된다.

벽체를 평면응력 요소로 분할하여 내진벽을 연속체로 취급하는 유한요소해석법은 현재 조적구조물을 해석하는데 있어 가장 정밀하게 사용될 수 있다. 그러나 이러한 유한요소 해석법은 분할 요소수의 증가로인해 해석시간이 많이 걸리고, 조적벽체의 재료적 특성의 불확실성을 고려한다면 상당히 비경제적일 수 있다. 이에 우리나라 조적조 구조물의 동적 거동 특성을 실험을 통해 보다 정밀하고 효율적으로 파악하여 조적조 구조물의 모델화 방법을 검토하고, 능률적이고 경제적인 구조설계 방법을 제시할 수 있는 기초자료를 얻고자 한다.

둘째, 현재 우리나라의 조적조 건축물은 3층이하의 다세대 주택과 연립주택, 그리고 1층에 상가를 둔 주상복합주택이 대부분을 차지하고 있다. 이러한 주택들은 거의 90년대이전에 지어진 건축물로서, 조적조 재료의 단점과 구조적 취약성, 노후화라는 문제를 간직한채 서민주택의 대부분을 형성하고 있다. 이러한 조적조 건축물의 구조적 특징으로 인한 지진시 파괴유형을 예상하여 보강된 실험체의 보강효과를 비보강 실험체와 비교하고, 노후화된 조적조 건축물의 보강의 방향을 제시한다.

2. 실험

2.1 실험체의 결정

조적조 건축물의 현황조사결과 가장 일반적인 규모 10~20평형(20평이하)에대한 표준도면과 벽량을 기준으로 선정하였다. 모델의 규모는 1개층바다면적이 3m×4m, 층고 2.4m의 2층건물을 기본으로하되 1층상가, 2층주택인 상가형을 A형, 1,2층 모두 주택인 주거형을 B형으로 정하였다.

축소모델은 위의사항을 근거로 우리나라의 건축법시행령 제38조~58조와 표준시방서 조적조편에서 정한 일반적 규준을 만족하는 실측척 모델을 진동대 용량제한에 벗어나지 않는 범위에서 1/2 Scale 로 축소하여 제작하였다.(그림 1) 단, 현황조사결과 일반적 규준에서 벗어나는 다음과 같은 특징에 대해서도 축소모델에 반영하여 실제 건물의 지진하중에 대한 정확한 응답결과를 얻고자 하였다.

- (1) 치장벽체는 구조체로서의 역할을 하지 못하며, 주요구조체의 벽두께는 0.5B이다.
- (2) 대부분의 조적조 건축물은 인방보를 설치하지 않는다.
- (3) 슬래브와 조적벽체간의 연결부는 단순 몰탈접합에 의존한다.

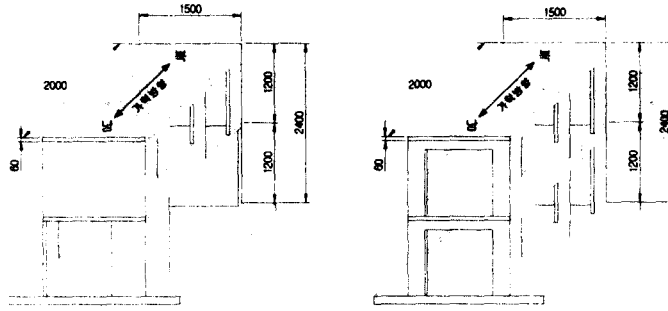


그림 1 A형(좌) 및 B형(우) 축소실험체 (1/2 Scale)

2.2 재료실험

축소된 조적조 실험체의 기본적인 특성을 예측하기 위해 원형벽돌과 축소벽돌에 대해 압축강도 및 접착강도 실험을 실시하였다. 물탈배합비 1:3에서 각 4개의 시편에 대한 평균값을 표 1에 나타내었으며, 원형벽돌에 비해 축소된 벽돌의 강도가 약간 작게 나타났다. 표에서 처럼 벽돌개체의 압축강도는 상당히 우수하지만 조적벽체의 성능을 평가할 수 있는 프리즘개체에 대해서는 압축강도에 비해, 횡하중시 중요하게 작용하는 접착강도는 현저히 떨어짐을 알 수 있다.

표 1 재료실험 결과

	개체 압축강도	프리즘 압축강도	접착강도
축소벽돌	223 kgf/cm ²	114 kgf/cm ²	1.06 kgf/cm ²
원형벽돌	280 kgf/cm ²	139 kgf/cm ²	1.72 kgf/cm ²

2.3 실험 방법

2.3.1 실험체 설치

원형실험체와 축소실험체간의 상사성을 만족시키기위한 부가질량은 진동대(10ton)와 크레인(5ton)의 용량한계로 인하여 실험체 설치후 Steel Block을 각층의 바닥에 고정하는 방법을 선택하였다. 변위계 9개와 가속도계 7개의 모든 계측기는 북쪽벽에 설치하여 각 층의 층변위 및 층가속도와 벽체에서의 가속도를 측정할 수 있도록 하였다.

2.3.2 지진하중

실험에 사용되는 입력지진파는 Taft N21E를 사용하였으며, 원형지진파의 시간축을 $1/\sqrt{2}$ 로 축소한 아래와 같은 지진파(그림 2)를 축소실험체에 가력하였다. 입력지진파와 출력 지진파는 거의 유사한 결과가 나타나 원하는 지진파대로 진동대가 거동함을 알 수 있다.

두 번의 예비실험을 통해 진동대의 거동을 예측하고, 단계별로 본실험을 실시하였으며, 작은 크기의 amplitude를 가지는 random파를 각 단계별로 가력하여 지진동 가력시의 구조물의 고유진동수의 변화를 비교하였다.

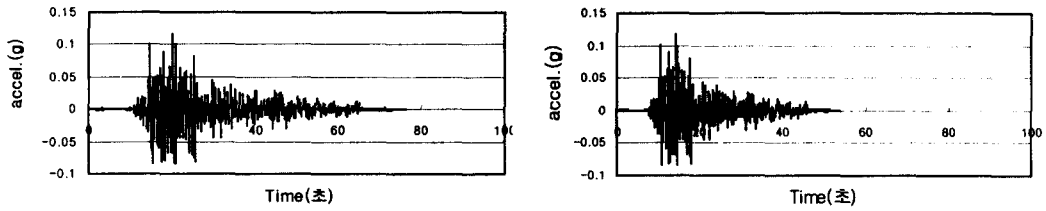


그림 2 실험에 사용된 Taft 지진파 (원형(좌), 축소(우))

표 2 하중단계

단계	지반가속도	진도	내용
예비실험			Taft 지진파의 10%
예비실험			Taft 지진파의 20%
1단계	0.08g	7	A형, B형, RA형, RB형 모두 가력 (RA형과 RB형은 보강 실험체)
2단계	0.1g	7	
3단계	0.15g	7	
4단계	0.2g	8	
5단계	0.3g	8	
6단계	0.35g	9	RA형, RB형에 가력
7단계	0.5g	9	
8단계	0.55g	9	

3. 실험결과

3.1 관찰에 의한 결과

A. 비보강 실험체 (A형, B형)

실험전 자중에 의해 개구부주위와 슬래브와 벽체접합부에 약간의 초기균열이 있었지만 구조물의 거동에 큰 영향을 미치지 않았다.

두 실험체 모두 2단계까지는 아무런 반응을 보이지 않았다. 그리고 3단계부터 면외벽체가 줄눈을 따라서 균열이 진전되고 면내벽체에 균열이 발생하기 시작하던 4단계에는 더 이상 하중에 저항할 수 없을 정도로 파괴된 것으로 보여진다. 5단계에서는 두 실험체 모두 1층벽체의 Pier Rocking으로 비선형 거동을 하면서, Pier의 상하부가 완전균열되어 변형이 전 단계에 비해 상당히 증가하였다. 2층에는 거의 균열이 발생하지 않았던 B형과는 달리 A형의 2층에는 약간의 균열이 있었지만, 전체적으로 1층벽체의 Rocking 거동으로 2층은 강체로 움직이는 모습이였다.

B. 보강 실험체 (RA형, RB형)

면내벽체에는 개구부주위에 일부 균열이 발생하고 면외벽체에는 전체적으로 하중을 받을 수 없을 정도의 균열이 발생한 4단계(0.2g)의 하중을 받은 비보강 조적조 실험체를 대상으로 면내벽체

를 유리섬유로 보강한후 각 단계별로 동적인 거동을 관찰하였다.

4단계까지는 아무런 반응이 없었으며, RA형의 경우 7단계, RB형은 8단계에서 비선형 현상이 보일 정도로 실험체의 연성능력이 향상되었다. 면외벽체는 실험체가 비선형거동을 보이기 전단계부터 실험체에서 무너져 내린 상태이므로 4단계의 지진하중 이후에는 구조적 역할을 전혀 하지 못하는 것으로 보인다. 이상의 관찰된 실험결과를 실험체 종류와 각 단계별로 요약하면 다음과 같다.

표 3 관찰된 실험결과

	A형	B형	RA형	RB형
1단계	반응없음	반응없음	반응없음	반응없음
2단계	반응없음	반응없음	반응없음	반응없음
3단계	면외벽체 균열	면외벽체 균열	반응없음	반응없음
4단계	면내벽체 균열	면내벽체 균열	반응없음	반응없음
5단계	Rocking거동	Rocking 거동	면내벽체 균열	반응없음
6단계			비보강벽체 파괴	면내벽체 균열
7단계			Rocking 거동	비보강벽체 파괴
8단계				Rocking 거동



a) A형 면외벽체 균열 b) B형 Pier상부 균열 c) RA형 Pier하부균열 d) RB형 면외벽체 파괴

그림 3 균열 형상

3.2 실험값에 의한 힘과 변위 관계

각 단계별로 2층바닥에서 층고에대한 변형의 비를 Drift(%)로 나타내고, 밀면 전단력을 실험체의 전체 중량으로 나누어 비교하였다. (그림 4) 비보강 조적조의 경우 2층바닥 Diaphragm의 Drift가 0.4%까지 거의 선형 거동을 보이고 섬유로 보강된 조적조는 RA형의 경우 1.0%, RB형의 경우 1.5%까지 선형거동을 하며 그 이후는 비선형 거동을 하고 있다. 그

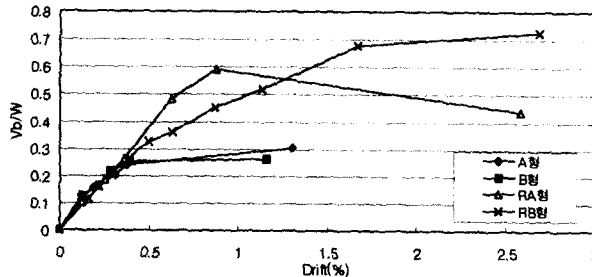


그림 4 Drift(%)에 대한 밀면전단력 관계

리고 이러한 비선형거동은 A형과 B형이 4단계이후, RA형은 6단계이후, RB형은 7단계이후에 나타나고 있어 관찰된 결과의 Rocking거동이 확연히 드러나는 단계와 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림에서 알 수 있듯이 최대 밀면전단력은 비보강 조적조(A형, B형)의 경우 실험체 중량의 25%정도, RA의 경우 중량의 60%, RB의 경우 70%정도임을 알 수 있다. 이러한 것을 고려해 볼 때 보강

의 효과는 상당하며, 중요한 것은 그림의 형태로 보아서 벽체에 균열이 발생하고 구조물의 변형이 매우 크게 발생하더라도 실험체는 계속 하중에 저항하고 있으며, 조적조가 아주 취성적인 거동을 보인다는 일반적인 견해와 달리 상당한 연성을 보유하고 있음을 알 수 있다.

3.4 변형 형태

각 단계별 2층바닥과 지붕층에서의 최대 상대변위를 비교하면 2층바닥의 Drift에 비해 지붕층의 Drift는 매우 작게 나타난다. 즉 바닥에 대한 상대변위만을 비교하였을 때 2층바닥과 지붕층은 10%이내의 변위차를 가지게 되는데 이것은 벽체의 균열이 1층에 집중하므로 손상을 거의 입지 않은 2층 조적벽체에 의한 지붕층에서의 변형은 거의 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다.

각 실험체의 단계별 모드형태를 나타내기 위해 지붕층의 좌, 우 평균변위를 1로 정하고, 그때의 2층바닥 변위를 구하여 표 4에 나타내었다. 이러한 지붕층과 2층바닥과의 관계에서 슬래브가 강체인 2자유도의 모드형태를 가정하고 다음식에 의해 각 단계별 참여계수값(Γ)을 산정하였다.

$$\Gamma = \frac{m_1\phi_1 + m_2\phi_2 + \dots + m_n\phi_n}{m_1\phi_1^2 + m_2\phi_2^2 + \dots + m_n\phi_n^2}$$

여기서, m 은 각층의 질량이고, ϕ 는 각층의 변형을 나타내는 좌표이다.

표 4 단계별 모드형태 및 참여계수 산정

실험체	단계	모드 형태				참여계수(Γ)
		2층바닥 상대변위 (mm)	지붕층 상대변위 (mm)	2층바닥 좌표 (ϕ_1)	지붕층 좌표 (ϕ_2)	
A형	1단계	1.84	1.76	1.05	1	0.97
	2단계	3.04	2.99	1.01	1	0.99
	3단계	4.86	4.98	0.97	1	1.01
	4단계	5.36	5.55	0.97	1	1.02
	5단계	17.36	26.76	0.65	1	1.21
B형	1단계	1.95	1.75	1.11	1	0.94
	2단계	3.35	3.05	1.09	1	0.94
	3단계	4.47	4.15	1.07	1	0.96
	4단계	6.18	6.21	1	1	1
	5단계	15.91	16.83	0.95	1	1.03

3.3 층하중 분포

지진하중 작용시 횡하중의 분포는 질량이 상대적으로 큰 각층의 바닥에 집중하게 된다. 각단계별로 밀면전단력이 최대가 되는 시점에서 각층의 층하중분포는 그림 5 과 같으며, A형을 제외한 나머지 실험체에서 2층바닥과 지붕층의 층하중은 거의 같은 것으로 나타난다. A형의 경우 실험에서 관찰되었듯이 2층의 경우도 1층만큼의 손상을 입었으며, 상대적으로 2층의 손상이 매우 적었던 나머지 실험체와는 약간 다른 하중의 분포를 보여주고 있다. 하지만 이런 현상은 1층이 상가형인 부정형의 조적조 건축물에서 나타난 특별한 경우이며, 2층 조적조 건축물의 일반적인 형태에서는 각층의 바닥이 같은 크기의 하중을 받으면서 비슷한 거동을 할 것으로 기대된다. 즉, 2층 조적조 건축물이 지진하중을 받게되면 2층에 비해 1층에 상대적으로 많은 하중이 집중하게 되고 일반적으로 지진하중을 등가정적하중으로 치환할 경우 가정하는 역삼각형의 하중분포를 따르지 않고, 2층바닥과 지붕층의 하중분포가 거의 일정한 형태를 가지게 됨을 알 수 있다.

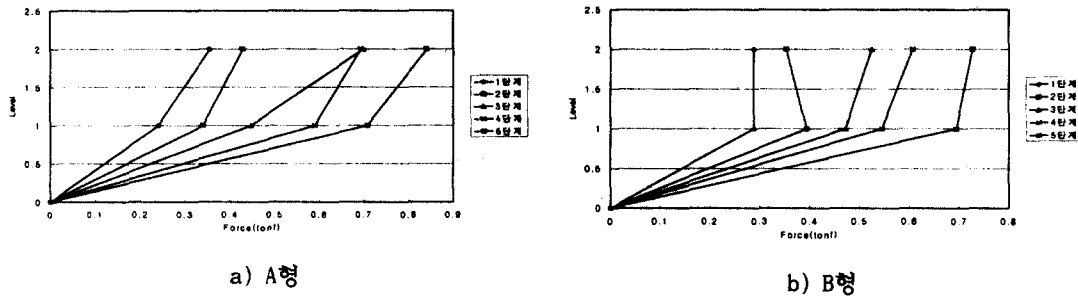


그림 5 실험체의 단계별 층하중 분포

4. 실험결과를 바탕으로한 분석모델의 가정 및 보강의 방향제시

4.1 분석모델의 가정

비보강 조적조 건축물의 지진하중에 대한 최대응답을 결정하기위한 분석모델은 다음과같은 실험결과를 바탕으로 가정할 수 있다.

- (1) 개구부가 있는 비보강 조적조 구조물은 1층조적벽체의 Pier Rocking에 의한 비선형 거동을 하며, 분석모델은 이러한 비선형 응답을 중요하게 표현할 수 있어야 한다.
- (2) 1층의 조적조 면내 벽체가 Pier Rocking 거동을 하며, 균열되는 형상과 2층바닥과 지붕층의 변형이 일치하는 Rigid 바닥구조를 가정했을 때, 그림6과 같은 모델로 치환할 수 있다.
- (3) 그림 8에서의 모델은 그림 7과 같이 가정된 Bilinear Rocking 거동을 한다.
- (4) 벽체가 Pier Rocking 거동을 시작하기 전 단계에서는 각 Pier의 강성의 합으로 계산하고, Rocking 거동을 나타내는 부분에서는 $0.25 \times W$ 으로 계산할 수 있다. 여기서, W 는 1층 Pier가 받는 축하중을 나타내며, 0.25는 A형과 B형의 실험값에 의한 것으로 축하중에 대한 밀면전단력의 비를 나타낸다. 단, $K_{pier} = \frac{tE_m}{(H/D)[(H/D)^2 + 3]}$ 이고, 측면비를 고려했을 때는 0.25 대신 $0.7 \times D/H$ 를 사용한다. (참고로 UCBC코드에서는 0.5, FEMA178에서는 0.9값을 사용한다.)
- (5) 1층의 모든 Pier는 동시에 거동하는 것으로 가정하고, 바닥의 비틀림은 무시한다.

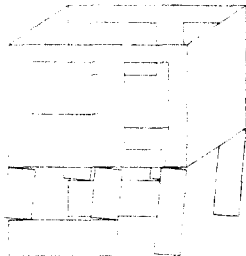


그림 6 Rocking 모델

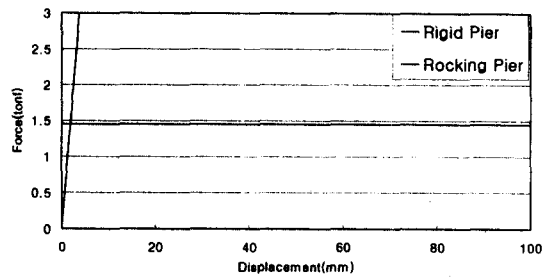


그림 7 가정된 Bilinear 힘-변위 관계

4.2 보강의 방향제시

- (1) 지진하중시 조적조 건축물은 균열이후에도 Pier Rocking거동을 하면서 상당한 변위와 하중에 저항을 계속한다. 보강은 이러한 Pier부분의 강성과 Pier 상하부의 약한 접착 몰탈강도를 증가시킬 수 있는 방향으로 진행되어야 할 것이다.
- (2) 개구부가 있는 조적벽체의 1층의 Rocking에 의한 Pier상하부의 조적조 전단파괴가 지배적이므로 보강은 2층보다 1층의 Pier에 집중하며, 보강체의 바닥과의 접합문제가 중요하다.

5. 향후과제

우리나라 조적조 구조물의 정확한 강성값을 구할 수 있는 합리적인 산정식의 유도를 위해서라도 개구부가 없는 조적벽체 혹은 Stocky Pier를 가지는 조적조 건축물등 더욱 다양한 변수들을 가진 구조물에 대한 연구가 필요하며 그 결과는 분석모델을 해석하는데 용이하게 사용될 수 있을 것이다. 그리고, 가장 중요한 것은 지금까지 우리나라에서 발생했던 지진들에 대한 철저한 분석을 통해 우리나라의 지형과 환경에서 발생할 확률이 가장 높은 인공파를 개발하고, 기존에 지어진 실재의 조적조 건물들을 직접 실험해봄으로써, 노후화된 비보강 조적조 건축물에 대한 가장 효율적인 보강의 방향도 제시할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 서울시의 "조적조 건축물의 내진 보강방안"의 연구내용의 일부로 실시되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김재관, 김남희, 류혁, 채운병 (1999), "비보강 주거용 조적조의 지진거동실험" 한국지진공학회
2. 김희철, 김관중, 박진호, 홍원기 (2001), "지진하중을 고려한 비보강 조적조의 재료특성 평가에 관한 실험연구" 한국지진공학회 논문집, 제5권 제2호, pp93-101.
3. 전대한, 강호근, 조한욱, 정명채, 윤태호 (1998), "벽식 건물의 탄성해석에서 벽체의 모델화 방법 검토" 한국지진공학회 1998년도 춘계학술대회 논문집
4. 국립건설연구소, "조적조 비내력벽 구조설계기준 연구", 건설부, 1982. 12. 20.
5. D.Benedetti, P.Carydis, and P.Pezzoli, "Shaking Table Tests on 24 Simple Masonry Building" Earthquake Engineering and Structural Dynamic, Vol.27, pp67-90.
6. Mohammed Qamaruddin, Rasheeduzzafar, Anand S.Arya and Brijesh Chandra (1986), "Seismic Response of Masonry Buildings with Sliding Substructure" ASCE, Vol.112, No.9
7. Parviz Soroushian, Kien-ua Obaseki, and Ki-Bong Choi (1988), "Nonlinear Modeling and Seismic Analysis of Masonry Shear Walls" ASCE, Vol.114, No.4-6
8. A.C.Costley and D.P.Abrams (1995), "Dynamic Response of Unreinforced Masonry Buildings with Flexible Diaphragms" NCEER-96-0001