

조적식 구조물의 부분 매입식 격자철근 보강기법의 내진 성능 평가

Seismic Performance Evaluation of Masonry Walls Retrofitted with Semi-buried Lattice Reinforcement

김 상 호¹⁾ 최 문 석²⁾ 박 세 준³⁾ 안 진 희^{4)*}
Kim, Sang Hyo Choi, Moon Seock Park, Se Jun Ahn, Jin Hee

Abstract

Masonry structure is a style of building which has been widely applied as residential facilities of low and middle stories, commercial and public facilities etc. But it is possible to destroy by loss of adhesive strength or sliding when lateral forces, such as earthquake, occurs. This study proposes a seismic retrofit method for masonry structure and its seismic performance is demonstrated by shaking table test. Two specimens per each shaking direction were made, having out-of-plane(weak axis) and in-plane(strong axis) direction. External load of 1 ton was also applied for each specimen during the test, to model the behavior of reinforced masonry wall. As a result of shaking table tests, it is shown that the specimen applying the proposed seismic retrofit method showed acceptable behaviors in both of Korea building design criteria(0.14g) and USA seismic criteria suggested by IBC(0.4g). However, it was observed that stiffness of the specimen toward out-of-plane was rapidly decreasing when seismic excitations over 0.14g were loaded. In comparison of relative displacements, maximum relative displacement of specimens which were accelerated toward out-of-plane with 0.4g at once was 29~31% of maximum relative displacement when specimens were gradually accelerated from 0.08g to 0.4g, while the maximum relative displacement of specimens accelerated toward in-plane has similar value in both cases. Therefore, it is concluded that the wall accelerated toward out-of-plane is more affected by hair crack or possible fatigues caused by seismic excitation.

Keywords : Masonry structure, Seismic retrofit method, Shaking table test, Seismic performance

1. 서론

조적식 구조는 오래된 구조방식의 하나로써 평면과 입면구성이 용이하다는 장점으로 세계 각지에서 오래전부터 사용이 되고 있다. 우리나라에서도 저층 조적식 건축물은 주택 부족현상과 더불어 건설 시장에서 저자본의 영세건설업자에 의해 비교적 공사비가 적게 들고 시공이 용이한 조적식 공동주택, 일명 연립주택과 조적식 단독주택이 대규모로 건설되었고 현재에도 우리나라 저층 주거형태의 많은 부분을 차지하고 있다.

조적식 구조는 구조체의 역할에 따라 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 내력벽(bearing wall)은 건물의 모든 하중을 벽체가 받는 것으로 지붕이나 상부에는 콘크리트 슬래브 또는 목조로 구성되어 있는 것을 말하며, 장막벽(비 내력

벽: curtain wall)은 구조체의 하중은 벽돌의 벽체가 아닌 다른 구조방식이 받고 벽체는 단지 칸막이와 내·외부의 치장성의 의미만을 갖고 있는 구조체로 이루어진 것을 말한다. 우리나라에서는 구조 및 충전을 목적으로 할 때는 콘크리트 벽돌이 주로 사용이 되고 있으며 외부나 내부의 치장용으로는 구운 점토 벽돌이 주로 사용되고 있다. 전자와 같이 구조물 자체의 하중이나 부하를 받도록 축조된 조적식 내력 벽체의 경우에는 수평 하중에 대한 내하력이 특히 취약한 구조적 특징이 있으며, 지진이 발생하여 수평 방향으로 구조물이 흔들리게 될 경우 벽체에 균열이 생기거나 붕괴에 이르는 심각한 문제가 발생하게 된다. 또한 벽체 자체가 구조물의 하중을 대부분 받기 때문에 시간이 경과함에 따라 벽체의 노후화로 인해 내하력이 점층적으로 저하되는 문제가 발생한다. 따라서 지진 발생

1) 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수, 공학박사
2) 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정
3) 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정
4) 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 연구교수, 공학박사

* Corresponding author : palanorange@yonsei.ac.kr 02-2123-2804

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 7월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

시, 벽체에 균열 및 손상 등이 발생할 수 있는 가능성이 높아져 구조물 자체의 안전성이 문제되고 이로 인한 인명 피해의 위험성과 경제적 손실로부터 자유로울 수 없다는 문제가 있다(장태희, 2002).

따라서 본 연구에서는 비보강 조적식 구조물의 내진성능 향상을 위해 조적식 구조물 벽체의 내외벽면에 보강부재를 도입하여 내진력을 향상시키고 벽체의 노후화로 인한 내하력 저감 방지와 내하력을 증대시킬 수 있는 내진보강공법을 제안하였다. 제안된 내진보강공법의 적용성 검증을 위해 본 연구에서는 진동대 실험을 수행하고, 거동을 평가하였다. 이러한 연구를 통하여 향후 실제 조적식 구조물에 쉽게 적용할 수 있도록 하고자 하였다.

2. 조적식 벽체의 거동과 내진보강기법

2.1 일반적인 거동 및 파괴모드

비보강 조적식 벽체의 파괴 메카니즘에는 크게 면내(in-plane) 횡력에 의한 파괴 메카니즘과 면외(out-of-plane) 횡력에 의한 파괴 메카니즘으로 구분할 수가 있다. 면내 횡력에 의한 파괴 메카니즘은 Fig. 1과 같이 휨, 전단, 미끄러짐 및 회전의 4가지 또는 이들의 혼합된 형태로 생각할 수 있다. 또한 파괴는 주로 슬래브와 조적벽체의 접합부와 조적줄눈을 따라 이루어지게 된다. 휨과 전단에 의한 파괴는 주로 조적재와 모르타르의 기계적 성

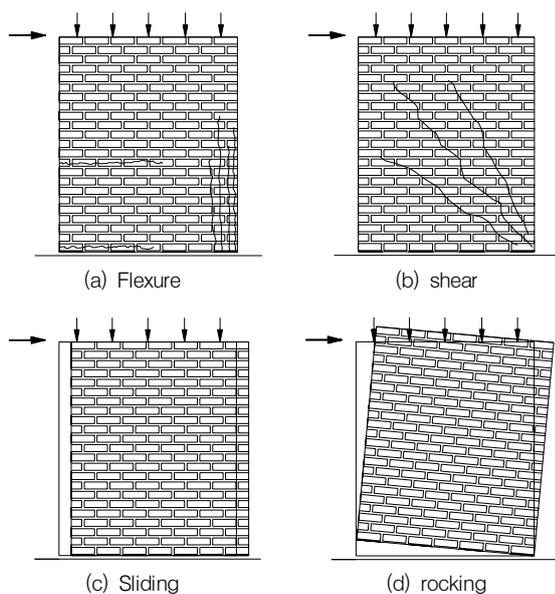


Fig. 1 In-plane failure of the non-reinforced masonry structure

질 및 벽체의 형상비에 의하여 결정되며 균열이 나기까지는 탄성이론에 의하여 해석이 가능하다. 균열이 발생하고 나면 유효단면의 감소 및 재료에 따른 비탄성 거동이 시작되어 복잡한 해석이론이 필요하게 된다. 그러나 인장응력에 저항할 수 있는 보강재가 없으므로 벽돌이나 모르타르의 인장거동과 함께 휨 저항력의 감소가 불가피하다. 휨이나 전단 메카니즘에 의한 저항력이 충분할 때에는 조적벽체가 마치 강체(rigid body)와 같이 거동하게 되어 미끄러짐이나 회전이 일어나게 되며 벽체의 형상비 및 작용하는 수직력에 의하여 영향을 받게 된다. 미끄러짐은 면내 횡력에 대하여 모르타르를 사이에 둔 벽돌과 벽돌, 벽돌과 슬래브(또는 기초) 사이에서 일어나게 되며 coulomb friction model을 사용하여 해석할 수 있다. 즉 다음 식 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = C + \mu N \quad (1)$$

여기서 V, C, N 은 각각 전단력, 점착력 및 수직력이며 μ 는 마찰계수이다. C 와 μ 는 조적재 및 모르타르에 따라 다르므로 실험에 의하여 결정되는 값들이다. 회전은 마찰 저항이 충분할 때 나타나는 거동이며 벽체의 강체회전에 따라 수직하중의 중심과 회전중심간의 거리가 변화하게 되고 이에 따라 비선형 거동을 하게 된다.

면외 횡력에 의한 파괴 메카니즘은 면내의 저항력이 충분할 경우에 발생하게 된다. 면외의 파괴는 아파트와 같이 벽의 두께에 비해 너비가 상당히 긴 전단벽에서 관찰할 수가 있고, 벽체에 횡하중이 작용하게 되면 마치 슬래브의 처짐과 같은 거동을 하게 되는 것을 말한다. Fig. 2에 그 형상을 나타내었다.

2.2 부분 매입식 격자철근 내진보강기법

비보강 순수조적식 구조물에 대한 내진보강기법의 경

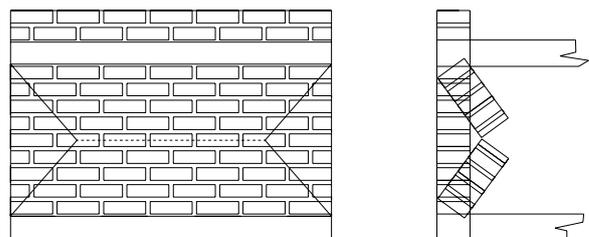


Fig. 2 Out-of-plane failure of the non-reinforced masonry structure

우 국내에서는 유리섬유 보강기법을 사용한 기존 연구가 있지만 보강 비용 및 보강 시공 상에 있어 아직까지 실제 적용이 이루어지지 않은 상황이다. 이외에도, Steel tie 보강, 벽체 전면 보강, 외부 버팀벽 보강, 철골 골조의 설치, 벽체·슬래브 연결부위 보강 등 여러 가지 내진보강 기법들이 있다(이정환, 2004).

본 연구에서는 조적식 벽체 구조물의 내진성능 향상 및 내하력 증진을 위해 조적식 벽체의 내외벽면에 홈을 파고 철근을 도입하는 기법을 제안한다. 본 내진 보강기법은 먼저 비 보강 조적식 내력벽체의 내외벽면에 일정 크기의 홈을 파고, 보강철근을 삽입한 뒤, 무수축 모르타르(압축강도 50MPa 이상)를 이용하여 보강철근을 매입하는 구조이다. 이 때, 보강철근은 수평 보강철근과 수직 보강철근으로 구성되며, 두 보강철근이 교차하는 점에서는 적절한 이음 조치를 취하도록 한다. 벽돌의 홈은 시공 중 안전

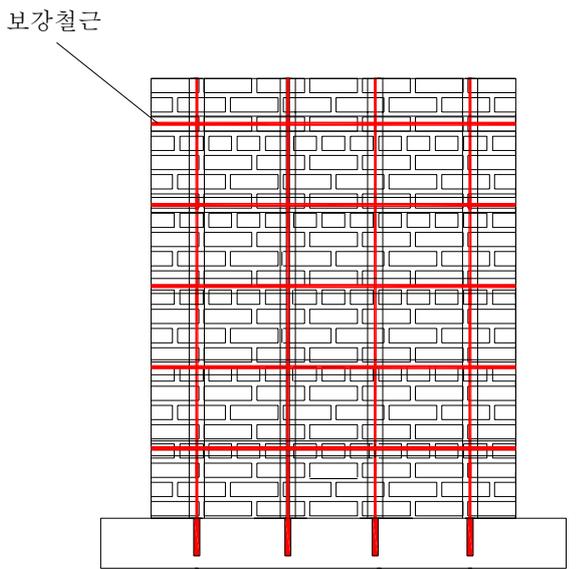
성 향상과 불필요한 응력집중을 피하기 위하여 벽체의 내·외벽면에 위치가 겹치지 않도록 지그재그로 배치한다. 특히, 수직 보강철근의 경우에는 내진성능 향상을 위해 조적벽 하부에 앵커 등을 이용하여 조적벽 기초에 고정된다. 또한, 벽돌과 무수축 모르타르 간의 접착력을 향상시키기 위하여 벽돌의 홈 절단면에 그라인더 등을 이용하여 표면을 거칠게 처리한다. 시공 중 발생하는 분진에 의한 영향을 최소화하기 위하여 작업장 주위에 가림막을 설치하였으며 필요한 경우 환풍장치의 사용을 고려할 수 있다.

위 기법을 이용하면, 보강 조적식 벽체에서 요구하는 줄눈 보강철근을 수평 보강철근으로의 대체 효과를 볼 수 있으며, 수직 보강철근을 통해 벽체의 지진 거동을 효과적으로 구속시킬 수 있을 것으로 예상된다. 특히, 벽체 구조물의 요구 성능에 따라 관통철근 등을 이용하여 벽체의 내·외벽을 구속시킬 수 있으므로, 본 기법의 도입에 따른 높은 내하력 향상과 내진 성능의 향상이 기대된다. 또한 벽체의 휨 강성과 연성을 향상시키고, 기존 벽체와 보강 부재의 일체성을 높이는 효과를 얻을 수 있다. Fig. 3에 제안된 기법의 기본 개념을 도시하였다.

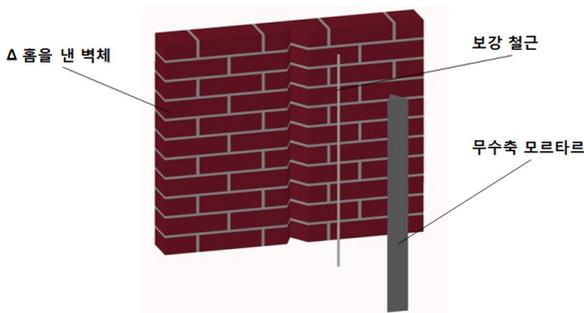
2.3 홈 크기 결정을 위한 부착강도시험

조적식 벽체 실험체 내외벽에 도입되는 보강철근은 철근을 고정시키기 위해 충전되는 모르타르와의 일체성이 매우 중요하다. 따라서 보강철근의 부착시험을 통해 조적식 벽면에 배근되는 철근의 부착성능을 검토하고 최적의 부착성능을 발휘하는 홈 크기를 결정한다. 시험체는 다음 Fig. 4(a)와 같이 보강벽체에 사용되는 벽돌 4개를 정사각형 모양으로 배치하고 보강철근을 아래로 돌출시켜 가력판을 설치한 형상이다. 가력판과 보강철근은 볼트로 체결하였다. 시험체의 제원은 Fig. 4(b)에 나타내었다. 본 시험체는 벽돌에 난 홈의 크기에 따라 각각 3개씩 3개 시험체로 구분되며, Table 1에 정리하였다. 각각의 시험체명은 홈의 폭과 벽돌-보강철근 간의 거리를 명시하여 나타내었다. 예를 들어, $\Delta 50-4$ 의 경우 홈의 폭은 50mm이며, 보강철근과 홈이 파인 벽돌 간의 거리가 약 4mm 떨어져 있음을 나타낸다.

위 실험을 통하여 얻은 결과는 Table 2에 나타내었다. 실험으로부터 홈의 폭이 크더라도 부착강도에 큰 영향을 미치지 않으며 무수축 모르타르를 벽돌 밖으로 좀 더 타

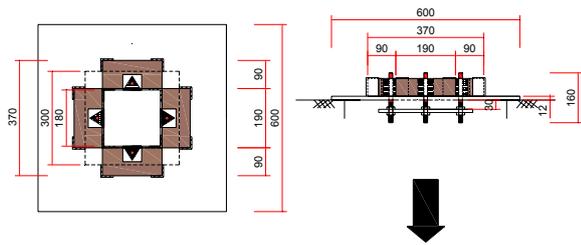


(a) Masonry structure applying proposed reinforcement system

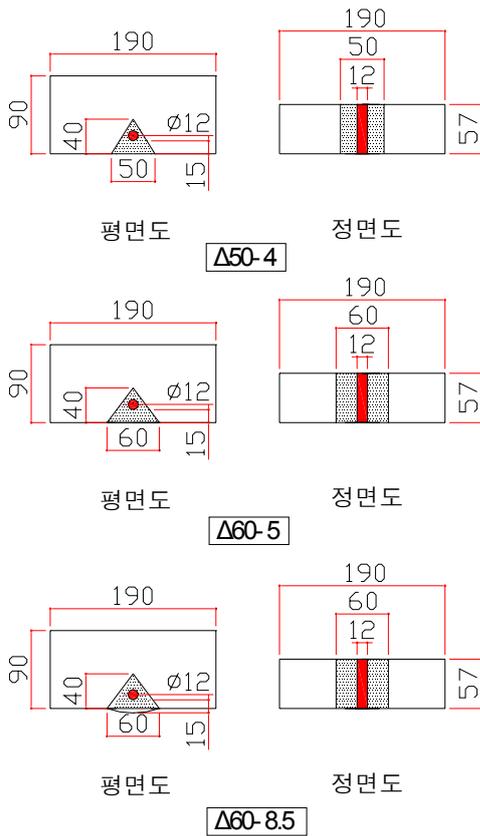


(b) Basic concepts

Fig. 3 Proposed seismic retrofit method for masonry structure



(a) Specimen dimensions



(b) Cutting size by specimens

Fig. 4 Specimen dimensions and shape (unit: mm)

설한 $\Delta 60-8.5$ 시험체가 부착강도가 더 크게 나온 것을 알 수 있다. 따라서 조적식 벽면에 배근되는 철근에 충전되는 모르타르는 $\Delta 60-8.5$ 시험체 형상으로 충전하는 형식을 채택하였다.

3. 진동대를 이용한 조적식 구조물의 동적거동 실험

3.1 실험체 제작

조적식 보강 벽체의 내진성능을 평가하기 위한 실험 항목은 형상비, 축응력, 쌓기 방법, 개체 종류 등 다양한 실

Table 1 Bond strength specimens (unit: mm)

Specimen	Cutting size (W×D)	Depth of the reinforcing	Distance between reinforcing and brick
$\Delta 50-4$	50×40	15	4
$\Delta 60-5$	60×40	15	5
$\Delta 60-8.5$	60×40	10(+outside 5)	8.5

Table 2 Results of bond strength test (unit: kN)

Specimen	Max. load	Avg. load
$\Delta 50-4$	5.13	4.75
$\Delta 60-5$	4.50	3.85
$\Delta 60-8.5$	6.10	5.15

Table 3 Specimens

Specimen	PGA	Direction	Thickness (mm)
RM-A-I	0.08g~0.4g	In-plane	190
RM-A-O	0.08g~0.4g	Out-of-plane	190
RM-D-I	0.4g~0.6g	In-plane	190
RM-D-O	0.4g~0.5g	Out-of-plane	190

험 변수가 있으나, 본 연구에서는 내외벽 보강 철근을 이용한 보강 벽체의 초기 연구로 현장에서 이루어지고 있는 시공 방법에 따라 기본적인 변수를 대상으로 실험을 수행하였다. 즉 형상비, 축응력, 쌓기 방법, 개체 종류, 모르타르 강도 등은 변수로 하지 않고, 외부에 흠을 파고 보강 철근을 도입한 보강 벽체를 면내 및 면외 하중 방향에 대하여 각각 2개 씩 4개를 제작하였다.

실험체는 200mm 두께의 철근 콘크리트 슬래브와 높이 1,761mm, 두께 190mm의 조적식 벽체(1.0B쌓기)로 구성되며, 이들 크기는 진동대 용량과 크기에 따라 결정되었다. 또한 벽체에 수직 하중 효과를 주기 위해, 조적식 2층 주택의 1층 외벽을 기준으로 고정하중을 산정하여 10kN을 수직 하중으로 고려하였고 이를 위해 벽체 상부에 H형강을 설치하고 단면 540mm×400mm 와 길이 1,750mm를 갖는 콘크리트를 타설하였다(최창순, 2001). 조적식 벽체를 고정하며 진동 하중을 직접 전달받는 철근 콘크리트 슬래브는 지진에 의한 전단력을 지탱하여야 하므로 조적식 벽체보다 먼저 파괴되지 않도록 설계되었다.

본 실험에서는 건축구조설계기준 및 IBC-2000에서 제시하는 극한설계지반가속도에서의 내진 성능을 평가하고자 하였으며, 데이터 계측에는 가속도, 변위, 보강 철근의 변형률을 측정하여 비교하였다. 실험체의 일반 사항은 Table 3에 정리하였으며, 실험체 배치와 도면, 그리고 수

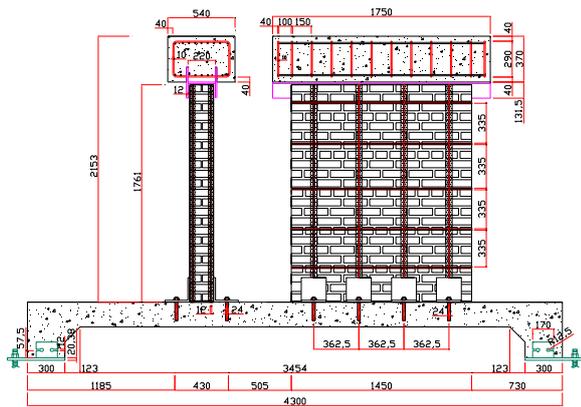


Fig. 5 Specimen dimensions (unit : mm)

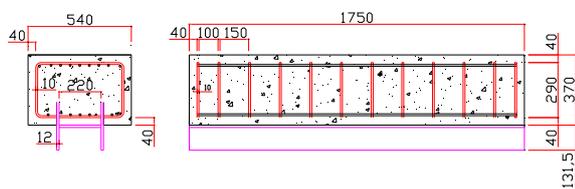


Fig. 6 Weight for vertical load effect (unit : mm)

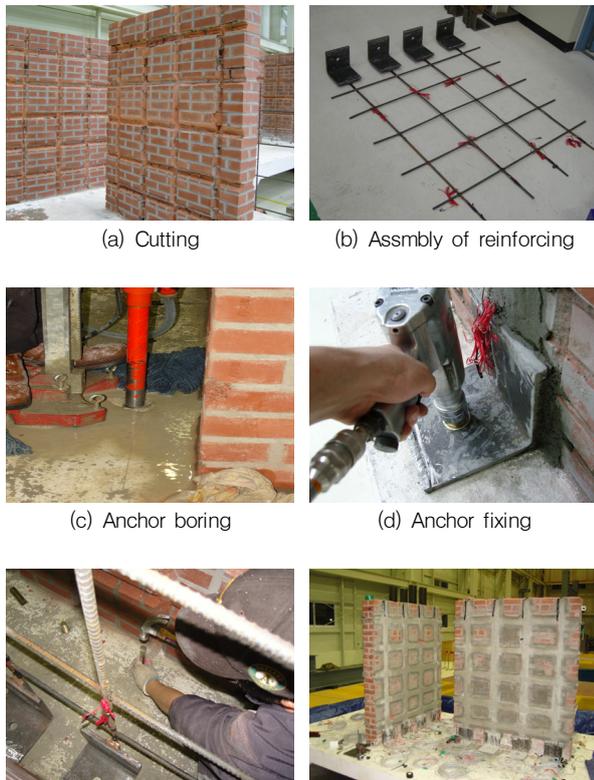


Fig. 7 Reinforcement work for masonry structure

직하중효과를 위한 추는 Fig. 5, 6에 각각 나타내었다.

Table 4 Results of material test

(a) Compressive test of unit brick (unit: MPa)

Specimen No.					Avg.
1	2	3	4	5	
22.0	22.2	22.6	21.0	21.9	21.9

Satisfy the standard of KS L 4201 (KSIC, 2008)

(b) Compressive test of prism (unit: MPa)

Specimen No.					Avg.
1	2	3	4	5	
12.4	15.9	12.4	13.2	14.5	13.7

Satisfy the standard of IBC 2009 (over 10.6MPa)

(c) Compressive test of mortar for masonry wall (unit: MPa)

Specimen No.					Avg.
1	2	3	4	5	
11.2	11.4	12.1	11.5	11.5	11.5

Satisfy the standard of KS L 5220 (over 11MPa)

Fig. 7은 각각 실험체의 벽체 보강작업을 보여준다. 조적 벽체에 보강 철근이 배근될 수 있도록 벽돌의 일부를 그라인더로 파내었다(a). 수직 보강철근과 수평 보강철근이 교차하는 지점의 경우 원직적으로는 각 철근을 교차시켜, 덧댐판 등을 이용하여 강결시켜야 하나, 실험체 제작의 여건 상 조적 벽체에 깊은 구멍을 파기가 어려워 수평 보강철근을 해당 위치에서 자른 뒤 수직 보강철근에 용접시키는 기법을 취하였다(b). 보강철근 상단부와 하단부에 각각 스트레인 게이지가 설치되었다. 이 때, 본 실험체에서는 수직 및 수평 보강철근으로 현재 미국 등에서 조적 조 보강철근으로 많이 사용되는 이형봉강 SD300을 사용하였다. 다음으로는 (c)에서 보는 바와 같이 실험체가 설치되어 있는 콘크리트 슬래브에 습식 코어드릴을 이용하여 $\phi 32\text{mm}$ 로 천공하였으며, (d)와 같이 앵커볼트를 설치, 체결하였다. 이 때, 실험체 하단부의 앵글과 콘크리트 슬래브 간의 체결을 위해 설치가 쉽고 높은 성능을 갖는 24mm 세트 앵커를 이용하였다(e). 마지막으로 보강철근을 위해 파 둔 벽돌 홈을 무수축 모르타르로 충전시켰으며, 이 때 보강철근의 묻힘깊이와 무수축 모르타르의 배합비에 유의하였다(f). 실험체의 하단부에는 수직 보강철근의 정착을 위해 24mm 앵커를 볼트 체결한 SS400 재질의 L-200mm×200mm×16mm 앵글을 설치하고 수직 보강철근을 앵글의 뒷면에 용접시켰다.

다음 Table 4는 본 실험체에 사용된 재료에 대한 재료 시험결과이며, 각 시험에서 모두 규정을 만족하는 것으로

나타났다.

3.2 실험체 설치 및 지진하중 가력 방법

본 실험은 부산대학교 양산캠퍼스 다지점 가진 대용량 지진모사 실험센터에서 수행하였다. 실험체는 0.2m 두께의 철근콘크리트 슬래브를 기초 대응으로 하여 조적하였다. 이 때, 철근콘크리트 슬래브를 진동대에 고정할 수 있도록 양 끝단에 철판을 붙여 볼트로 체결하였다. 190mm×90mm×57mm의 일반 조적용 표준벽돌(KS L 4201: 기술표준원, 2008)을 이용하였으며, 2개 실험체씩 각각 면내, 면외 방향의 지진 하중에 대응하도록 설치되었다(Fig. 8).

실험체의 상부에는 통상적인 건물의 외벽이 받고 있는 하중을 모사하기 위해 H형강(H-242mm×252mm×12mm



Fig. 8 Shaking table test

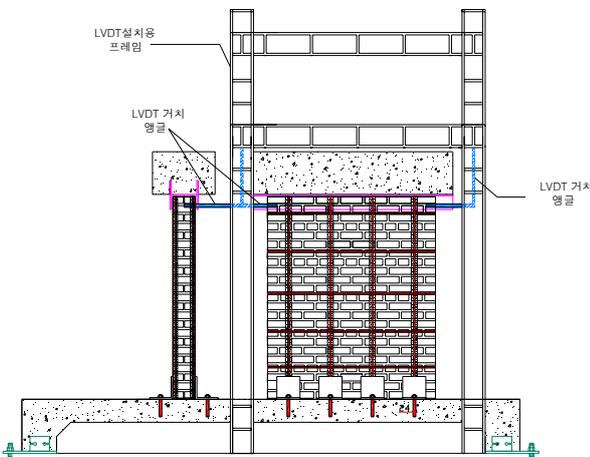


Fig. 9 Disposition of specimen

×12mm)과 철근콘크리트(540mm×370mm)로 이루어진 질량 약 10kN의 부가질량이 적재되었다. 이 부가질량은 실험실 상부에 설치되어 있는 크레인에 의해 와이어 로프로 연결되어 실험체가 급속히 파괴될 경우 부가질량의 추락에 의해 인접 실험체에 손상을 일으키지 않도록 배치하였다. 실험체 배치 상세는 Fig. 9에 나타내었다.

본 논문에서 제안한 내진 보강기법에 의해 보강된 조적 내력 벽체의 내진 성능을 평가하기 위해 실험체에 가하는 지진하중은 엘-센트로(EI Centro) 지진파를 사용하였다. 엘-센트로 지진파는 가속도그램의 FFT 변환에서 1~4Hz의 범위 내에서 에너지가 집중되어 있으며, 약 1.5Hz의 지배주파수와 최대 PGA(Peak Ground Acceleration) 약 0.35g를 가지고 있다. 이는 대부분의 지진 기록에서 볼 수 있는 일반적인 에너지 분포이다(도학용 외, 2003). 본 연구에서는 엘-센트로(EI Centro) 지진파를 진동대 실험에 이용하였으며, 진동대 시설의 최소 가진 가속도 및 최대 가력변위 등을 고려하여 원 지진파를 0.08g~0.6g로 스케일하여 실험체에 가력하였다.

진동대 실험을 위해 면내, 면외방향 각각 1개 벽체씩 총 2개의 실험체를 준비하였으며, 각 실험체별 가력방법은 Table 5에 정리하였다. 본 연구는 제안한 조적벽체의 내진보강 기법으로 보강된 벽체가 미국 및 한국의 건축기준인 0.4g 및 0.14g에서 충분한 내진성능을 보이는 것을 검토하고자 하는데 그 목표가 있으므로, 두 실험체의 가력계획을 Table 2와 같이 결정하였다.

표에서 보는 바와 같이, RM-A-I, RM-A-O 실험체는 엘-센트로(EI Centro) 지진파를 0.08g~0.4g로 스케일하여 실험체에 가력하였다. 이 때, 여진이나 2차 지진에 의한 벽체의 거동을 분석하기 위하여 0.08g부터 0.4g까지 한 사이클에 대한 가력이 종료되면, 0.08g~0.4g의 사이클을 2회 더 가력하였다.

Table 5 Loading condition

RM-A-I, RM-A-O			RM-D-I, RM-D-O		
Stage (3 times)	PGA	Remark	Stage (No repeat)	PGA	Remark
1	0.08g	-	1	0.4g	USA (IBC 2009)
2	0.1g	-			
3	0.14g	KBC			
4	0.2g	-	2	0.5g	-
5	0.3g	-			
6	0.4g	USA (IBC 2009)			

이와 반대로, RM-D-I, RM-D-O 실험체는 미국 내진기준에서 제시하고 있는 0.4g를 직접 가력하였으며, 이어서 0.5g, 0.6g를 순차적으로 가력하여 본 실험에서 제안한 보강벽체가 0.4g 이상의 지진에서도 충분한 내진성능을 가진다는 것을 확인하고자 하였다. 이 때, RM-A-I, -O 실험체와 달리 0.4g를 직접 가력한 이유는, 0.08g로부터 단계별로 가력하여 0.4g에 도달할 경우, 낮은 단계에서의 가진으로 인한 미세균열 등에 의해 실험체가 원래의 성능에 미치지 못하는 결과를 나타낼 수 있기 때문이다.

4. 진동대 실험 결과

4.1 실험체 균열 및 파괴상황

진동대 실험 시, 본 연구에서 제작한 실험체는 회전, 전단, 미끄러짐 등 일반적인 벽체의 파괴거동을 보이지는 않았으며 보강 철근으로 인한 강체거동을 보였다. 이러한 거동으로 인해 벽체 전체를 구성하고 있는 조적 벽돌 사이의 rocking 등의 균열 보다는 하부 앵글 주변에서 많은 균열이 발생하였다(Fig. 10). 실험체 RM-A-O는 0.3g에서 처음으로 미세한 균열이 관찰되었으며, 하부 앵글의 상단부와 벽체가 접합되어있는 부분에 많은 균열이 발생하였다. 실험체 RM-D-O에서는 0.5g로 가력 하였을 때 처음 균열이 발생하였으며, RM-A-I, -O 실험체와 유사한 거동을 보여 하부 앵글 주변을 중심으로 균열이 관찰되었다(Fig. 11). 또한, 두 실험체 모두 수직 보강철근의 휨 거동으로 인하여 보강철근을 고정하고 있는 무수축 모르타르 주변에서 세로방향으로 균열이 발생하였다. 특히, 수평 보강철근 주변에는 균열이 발생하지 않고 수직 보강철근 주변부에만 균열이 발생하였는데, 이는 실험체가 내진 거동 시, 수평 보강철근 보다는 수직 보강철근의 휨 거동에 지배된다는 것을 알 수 있다.

면내방향으로 지진을 가력한 RM-A-I, RM-D-I 벽체의 경우 실험 종료단계인 0.4g와 0.5g에서 균열이 발생하지 않았으며, 이는 본 연구에서 제안한 내진보강기법이 면내방향 지진력에 대해서는 충분한 내진성능을 확보하고 있다는 것을 알 수 있다. RM-A, RM-D 두 실험체 모두 실험의 종료 단계인 0.4g, 0.5g에서까지 최종파괴는 일어나지 않았다. 이러한 결과는 벽체를 보강한 격자형 보강 철근과 벽체와 슬래브를 연결하는 앵커의 큰 인장능력에 따른 것으로 판단된다.

4.2 단계별 시간이력에 따른 실험체의 절대가속도응답

진동대 실험체가 실제로 받게 되는 힘은 관성력인데, 이는 상대가속도와 관련이 있는 것이 아니라 절대가속도와 관련이 있다. 그러므로 조적 벽체의 강축(In-plane: 면내 방향), 약축(Out-of-plane: 면외 방향)의 각각 상부에 설치된 가속도계에서 기록된 절대가속도를 각 단계별 시간이력에 따라 비교하였다. 이 결과는 다음 Table 6에 나타내었다.

우리나라 내진기준에서 만족되어야 하는 0.14g에서와 미국 내진기준에서 만족되어야 하는 0.4g에서의 각 실험체의 절대가속도응답을 다음 Fig. 12, 13에 나타내었다.

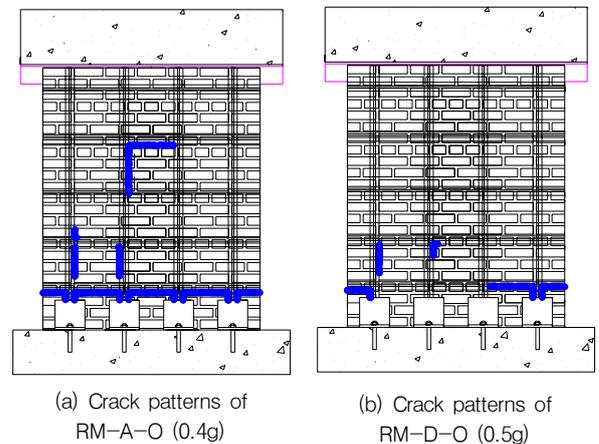


Fig. 10 Crack patterns

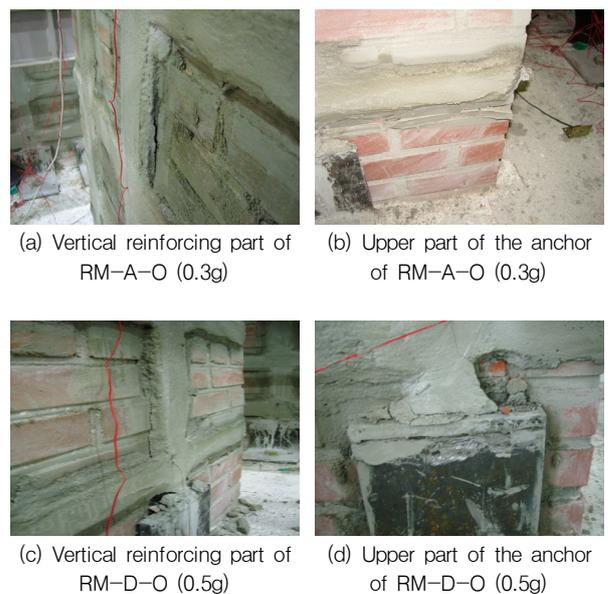


Fig. 11 Cracks of the specimens

Table 6 Max. absolute acceleration by PGA (unit: m/s^2)

Acc. (g)		Out-of-plane		In-plane
		Upper left corner (2B)	Upper right corner (2D)	Upper part (1B)
RM-A	0.08	1.31	1.36	1.20
	0.1	1.63	1.68	1.33
	0.14	2.16	2.33	1.74
	0.2	2.63	3.32	2.77
	0.3	4.56	3.57	3.09
	0.4	4.94	4.31	3.98
RM-D	0.4	5.47	6.48	5.18
	0.5	9.18	7.79	5.97

Table 7 Relative displacement response of RM-D by PGA (unit : mm)

	0.4g	0.5g
Upper left corner (2B)	20.1	29.5
Upper right corner (2D)	18.5	25.2
Upper part (1B)	25.7	33.9

이 때, 절대가속도 측정결과는 계측기로부터 생긴 계측 오차를 제거하기 위해 40Hz에서 lowpass filtering하였다. 분석결과, 실험체의 강축, 약축 모두 각각의 내진규모의 가속도 수준에서 최종파괴에 이르지 않았으며, 이는 본 연구에서 제안하는 내진보강기법이 충분한 내진성능을 확보한다는 것을 알 수 있다. 또한, 엘-센트로(El Centro) 지진파를 0.08g부터 0.4g까지 스케일하여 가력한 RM-A 실험체보다 직접 0.4g를 가력한 RM-D 실험체로부터 얻어진 절대가속도값이 더 큰 응답을 보였다.

4.3 단계별 시간이력에 따른 실험체의 상대변위응답

RM-A-O,-I 실험체와 RM-D-I,-O 실험체의 상부 및 하부에 설치된 변위계를 통해 가속도 스케일별 상대변위를 측정하였으며, 각 측정 위치별 최대 상대변위는 Table 7에 나타내었다. RM-A 실험체의 경우 가속도를 0.08g부터 0.4g 까지 반복 가력하였을 때, 가력 횟수가 늘어날수록 점점 상대변위가 증가하는 추세를 보이며 이는 더 강한 지진이 올 경우 확연히 나타난다. 즉, 한번 이상 지진을 경험한 벽체는 차후 비슷한 강도의 지진을 경험할 경우, 보다 취약한 거동을 할 것으로 예측된다. 특히, 0.4g와 같은 비교적 강한 지진을 경험했던 벽체는 이후 비교적 강도가 낮은 지진을 경험하더라도 한 번도 지진을 경험하지 않았던 벽체에 비해 대체적으로 큰 응답을

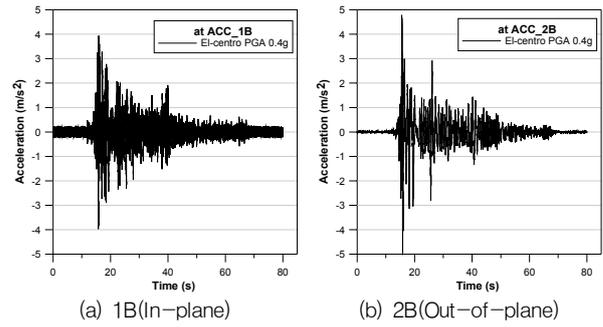


Fig. 12 Absolute acceleration response in PGA 0.4g

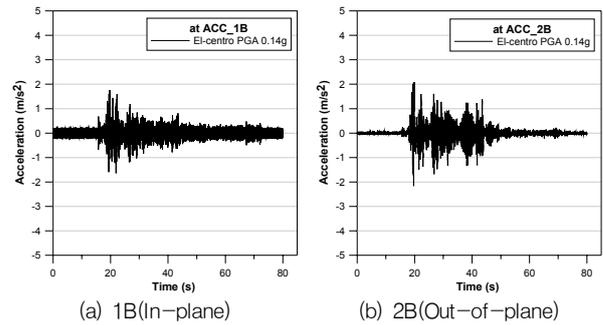


Fig. 13 Absolute acceleration response in PGA 0.14g

보이는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 면의 방향으로 가력된 RM-A-O 벽체의 응답에서 보다 확연히 드러났다. 0.4g를 직접 가력한 RM-D-O-I 실험체의 경우 0.5g의 가속도로 가력 하였을 때 최대 상대변위가 약 40% 증가하는 것으로 나타났다.

미국의 내진규모인 PGA 0.4g 수준에서 가속도 단계를 점차 크게 변화시킨 실험체와 0.4g를 한 번에 가력한 실험체의 최대 상대변위를 비교하기 위하여 RM-A-O,-I 실험체와 RM-D-O,-I 실험체의 각 측정 위치별 최대 상대변위를 Table 8에 나타내었다.

약축방향 벽체의 경우 직접 0.4g를 가력한 RM-D-O 실험체의 최대 상대변위가 0.08g부터 0.4g까지 단계적으로 가력한 RM-A-O 실험체의 첫 번째 0.4g 가력 후의 최대 상대변위의 약 29~31%로 나타났다. 또한 RM-A-O 실험체의 세 번째 0.4g 가력 후의 변위와 비교하였을 때에는 24~26%로 나타났다. 이러한 결과는, 지진의 크기에 상관 없이 기존에 지진을 경험했던 벽체가 경험하지 못했던 벽체에 비하여 상당히 큰 응답을 보인다는 것을 알 수 있으며, 본 연구에서 제안하는 조적벽체의 내진보강 기법으로 보강된 벽체 역시 지진, 특히 규모가 큰 지진을 경험한 후에는 적절한 보수 및 보강이 필요하다는 것을 나타내고 있다.

이와 반대로 강축방향 벽체의 경우 0.4g에서 RM-A-I

Table 8 Comparison of max. relative displacement of RM-A and RM-D (unit : mm)

(a) Upper left corner (2B)		
	RM-A	RM-D
1st trial	64.50	20.09
2nd trial	65.24	
3rd trial	76.76	

(b) Upper right corner (2D)		
	RM-A	RM-D
1st trial	63.63	18.49
2nd trial	63.15	
3rd trial	76.32	

(c) Upper part (1B)		
	RM-A	RM-D
1st trial	20.20	25.73
2nd trial	21.70	
3rd trial	22.36	

와 RM-D-I의 최대 상대변위 값이 유사하게 나타나, 벽체의 반복적인 지진 경험에 의한 미세균열 등의 영향이 상대적으로 적다는 것을 알 수 있다.

4.4 단계별 시간이력에 따른 변위비

본 연구에서 실험 대상으로 하고 있는 철근보강 조적벽은 내진설계 시 변위조건을 만족하여야 한다. 따라서 본 실험에서 측정된 변위비와 한국 건축구조설계기준(대한건축학회, 2009)에서 제시하고 있는 변위비를 비교하였다. Table 9는 한국 건축구조설계기준에서 제시하고 있는 허용 층간변위를 나타내었으며, Table 10은 실험 결과에 따라 계산된 층간 변위비를 나타내었다. Table 9에서 보이는 바와 같이 약축방향 벽체(RM-A-O)의 경우 우리나라 건축구조설계기준의 내진규준인 0.14g에서는 첫 번째 가력 시 내진등급(특)을 모두 만족하는 결과가 나왔다. 그러나 한번 이상의 지진을 경험한 벽체의 경우에는 내진등급(II)는 만족하나, 내진등급(특)에는 미치지 못하는 결과가 나왔으며, 이는 본 연구에서 제안한 조적벽체의 내진보강기법을 적용 시 지진을 경험한 뒤에는 추가적인 보수 및 보강이 필요할 수도 있다는 것을 알 수 있으며, 특히 진동대 실험을 통해 많은 균열이 발생했던 하부 앵글의 상단부 및 수직보강철근 주변부에 적절한 보강이 필요할 것으로 판단된다. 이에 반해 강축방향 벽체(RM-A-I)의 경우, 0.14g 가력 시 모든 경우에서 내진

Table 9 Allowable story drift ratio (KBC, 2009)

	Seismic rating		
	Special	I	II
Story drift ^{*)}	0.010	0.015	0.020

^{*)} Story drift : story drift ratio × story height

Table 10 Story drift ratio by PGA

	In-plane			Out-of-plane						
	Upper part			Upper left corner			Upper right corner			
	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	
PGA	0.08g	0.0014	0.0011	0.0011	0.0008	0.0082	0.0092	0.0009	0.0080	0.0092
	0.1g	0.0015	0.0012	0.0013	0.0011	0.0129	0.0147	0.0015	0.0130	0.0142
	0.14g	0.0021	0.0019	0.0019	0.0017	0.0172	0.0170	0.0019	0.0163	0.0168
	0.2g	0.0032	0.0037	0.0039	0.0048	0.0203	0.0301	0.0044	0.0191	0.0198
	0.3g	0.0061	0.0069	0.0070	0.0161	0.0286	0.0266	0.0155	0.0266	0.0277
	0.4g	0.0088	0.0098	0.0101	0.0315	0.0369	0.0324	0.0317	0.0347	0.0312

등급(특)을 만족하는 결과가 나타나 안정적인 내진 성능을 발휘하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 무공벽돌을 이용하여 조적된 조적벽체의 내진성능 향상을 위한 보강방안을 제안하였다. 이 방안은 조적벽체 외부에 홈을 파고, 수직 및 수평 보강철근을 배근한 뒤, 무수축 모르타르로 마감하는 기법으로, 본 연구에서는 진동대 동적시험을 통하여 그 성능을 평가하였다. 시험 결과, 한국 건축구조설계기준에서 제시하는 0.14g와 미국 IBC 코드에서 제시하는 0.4g에서 모두 양호한 성능을 나타냈으며, 최종 파괴가 일어나지 않았다. 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 제안한 보강방안을 적용하여 보강된 조적벽체의 진동대 실험결과 회전, 전단, 미끄러짐 등 일반적인 벽체의 파괴거동을 보이지는 않았으며 보강철근으로 인한 강체거동을 보였다. 이러한 거동으로 인해 실험체의 하부 앵글 주변에서 많은 균열이 발생하였다. 또한, 수직 보강철근의 휨거동으로 인하여 보강철근을 고정하고 있는 무수축 모르타르 주변에서 세로방향으로 균열이 발생하였다. 반면, 수평 보강철근 주변에는 균열이 발생하지 않았는데, 이는 실험체의 내진 거동 시, 수평 보강철근 보다는 수직 보강철근의 휨 거동에 지배된다는 것을 알 수 있었다.

- (2) 진동대 시험의 상대변위 계측 결과 약축방향으로 설치된 실험체의 경우 0.4g를 바로 가력한 실험체의 최대 상대변위가, 0.08g부터 0.4g까지 단계적으로 가력한 실험체의 최대 상대변위의 절반 이하 수준으로 나타났다. 따라서 지진의 크기에 상관없이 기존에 지진을 경험했던 벽체가 경험하지 못했던 벽체에 비하여 상당히 큰 응답을 보인다는 것을 알 수 있었다. 반면, 면내방향으로 가력한 실험체의 경우에는 최대 상대변위 값이 유사하게 나와, 면외방향 벽체의 경우 지진 경험에 의한 미세균열 등의 영향이 크다는 것을 알 수 있었다.
- (3) 본 실험에서 측정된 변위비와 한국 건축구조설계기준(대한건축학회, 2005)에서 제시하고 있는 변위비를 비교하였다. 약축방향 벽체(RM-A-O)의 경우 우리나라 건축구조설계기준의 내진규준인 0.14g에서는 첫 번째 가력 시 내진등급(특)을 모두 만족하는 결과가 나왔다. 그러나 한번 이상의 지진을 경험한 벽체의 경우에는 내진등급(II)는 만족하나, 내진등급(특)에는 미치지 못하는 결과가 나왔으며, 이는 본 연구에서 제안한 조적벽체의 내진보강기법을 적용 시 지진을 경험한 뒤에는 추가적인 보수 및 보강이 필요할 수도 있다는 것을 알 수 있다. 이에 반해 강축방향 벽체(RM-A-I)의 경우, 0.14g 가력 시 모든 경우에서 내진등급(특)을 만족하는 결과가 나타나 안정적인 내진 성능을 발휘하는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 위와 같이 조적 벽체의 내진보강 기법을 제안하고, 진동대 실험을 통하여 성능을 평가하였다. 평가 결과 미국 내진 기준인 0.4g에서도 적절한 안전 수준을 확보하고 있음을 확인하였으며, 수평 보강철근보다는 수직 보강철근의 거동이 조적 벽체의 거동에 많은 영향을

미친다는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안한 내진보강 기법을 응용하여 수평 보강철근 및 수직 보강철근의 최적 간격 산정, 내·외벽 벽체간 관통철근의 삽입 등 추가적인 연구가 가능할 것으로 판단된다. 이를 통하여 본 내진 보강기법의 실질적인 현장 적용과 보강 상세 결정이 이루어지리라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 교육인적자원부 BK21사업의 일환인 연세대학교 사회환경시스템공학부 미래사회기반시설 산학연공동사업단의 지원으로 이루어진 것으로, 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. 대한건축학회, 건축공사표준시방서, 대한건축학회, 2006.
2. 대한건축학회, 한국건축구조설계기준(KBC), 대한건축학회, 2009.
3. 도학용, 이종세, “기초격리된 구조물에서 자기유동성 유체감쇠기의 면진성능”, 대한토목학회논문집A, 제23권, 2호, 2003, pp.363-374.
4. 이정환, “중저층 건축물의 내진성능 및 내진보강-순수조적조, 조적채움벽 철근콘크리트 골조 및 강재 슬릿댐퍼 보강 철근콘크리트 골조”, 박사학위 논문, 광운대학교, 2004.
5. 장태희, “비보강 시멘트벽돌 건물의 내진성능 실험연구”, 석사학위 논문, 아주대학교, 2002.
6. 최창순, 정창용, 권기혁, “저층 조적조 건축물의 내진성능 향상에 관한 실험적 연구”, 서울시립대학교 도시과학연구원, 도시과학논총, 제 27권, 2001.
7. International code council, International building code, USA, 2009.

(접수일자 : 2010년 7월 30일)

(수정일자 : 2010년 12월 7일)

(심사완료일자 : 2010년 12월 23일)

요 지

조적조 구조물은 전 세계적으로 중·저층 주거시설, 상업시설, 종교용 건축물, 학교, 관공서 등의 용도로 폭넓게 사용되어 왔다. 그러나 조적벽체는 조적개체와 모르타르의 이질재료를 접착하여 쌓는 방식의 구조벽체로 지진과 같은 횡력 발생 시 접착력을 잃거나 미끄러지면서 파괴될 수 있다. 본 연구는 이러한 문제점을 해결하고자 조적식 구조물의 내진보강 기법을 제안하였으며, 진동대 실험을 통하여 내진 성능을 검증하였다. 진동대 실험 결과, 본 연구에서 제안한 내진보강 기법을 이용한 벽체는 한국 건축설계 기준이 제시하는 내진 기준인 0.14g와 미국 IBC에서 제시하는 내진 기준인 0.4g에서 모두 최종 파괴에 도달하지 않았다. 그러나, 0.14g 이상의 지진을 경험한 면외방향 실험체의 경우 급격한 강성저하가 관찰되어, 적절한 보수·보강이 필요할 것으로 예측된다.

핵심 용어 : 조적조 구조물, 내진보강기법, 진동대 실험, 내진 성능
