

비보강 조적식 구조의 형상에 따른 내진성능 평가 해석

Effect of Physical Shape on Seismic Performance of URM Structures

박주남^{1)*}

Park, Joonam^{1)*}

¹⁾원광대학교 토목환경공학과 교수

¹⁾Department of Civil and Environmental Engineering, Wonkwang University

/ A B S T R A C T /

Unreinforced masonry (URM) buildings are known to be highly vulnerable to seismic loadings. Although significant physical variation may exist for URM buildings that fall into a same structural category, a single set of fragility curves is typically used as a representation of the seismic vulnerability of the URM structures. This study investigates the effect of physical variation of URM structures on their seismic performance level. Variables that describe the physical variation of the structure are defined based on the inventory analysis. Seismic behavior of the structures is then monitored by changing the variables to investigate the effect of each variable. The analysis results show that among the variables considered the seismic performance of URM building depends on the variation of the width, the aspect ratio, and the number of story. The need for further research on the modeling of the connections between the walls and diaphragms and the torsional effect is also addressed.

Key words: Unreinforced masonry, Physical shape, Seismic behavior, Seismic performance

1. 서론

인구 밀집지역에 발생하는 대형지진은 심각한 경제적, 사회적 손실을 야기한다. 특히 Fig. 1과 같은 비보강 조적식(Unreinforced Masonry, URM) 건물의 경우 주거용 구조물로 많이 쓰여 왔지만 횡강성 및 연성의 부족으로 인해 지진하중에 매우 취약한 것으로 알려져 있어 도심 지역에 발생하는 대형 지진에 의해 많은 인명 손실을 일으키는 주요 원인 중의 하나로 여겨지고 있다.

조적조 구조물의 손상 또는 붕괴로 인한 지진피해를 줄이기 위해서는 취약도 해석을 통해 취약 구조물을 선별하고 내진보강 및 재건축이 이루어져야 하는데, 제한된 리소스를 이용해서 최대 내진보강 효과를 거두기 위해서는 해당 구조물군에 대한 위험도 평가가 필수적으로 이루어져야 할 것이다. 미국 FEMA에서 만든 지진손실평가도구인 HAZUS [1]에서는 특정 시나리오를 가진 지진에 대한 사회, 경제적 손실을 평가하기 위해 미국 내 시설물의 구조적 종류에 따른 지진취약도 곡선을 제공하고 있는데, 비보강 조적식 구조물에 대해서는 구조 형식에 따라 저층(low-rise)과 중층(mid-rise) 등 두 종류로 분류한 뒤 각 카테고리에 대해 대표 취약도 곡선을 제공하고

있다. 그러나 한 카테고리 내에 존재하는 구조물들 중에서도 다양한 크기와 형상이 존재하며 이로 인해 구조물 간 내진성능의 분포 또한 그 변화폭이 클 수 있기 때문에 HAZUS에서 제공되는 취약도는 구조물군 전체에 대한 손실 산정에는 적합할 수 있으나 개별 구조물 또는 특정 일부의 구조물에 대한 위험도 평가에 적용하기에는 무리가 있다 [2, 3]. 따라서 URM 구조물을 대상으로 한 위험도 평가를 위해서는 한 카테고리 내에 속하는 구조물들의 지진성능이 구조물의 크기 및 형상에 따라 어떻게 변화되는지에 대한 고찰이 반드시 선행되어야 할 것이다. 이와 같은 부분을 고려하여 해당 구조물의 형상에 따른 내진성능의 경향을 분석한다면 추후 취약도의 개선 시 유용한 자



Fig. 1. Typical URM building

*Corresponding author: Park, Joonam

E-mail: joonam.park@gmail.com

(Received November 22, 2015; Revised January 7, 2016; Accepted April 18, 2016)

료로 이용될 수 있을 것이다. 본 연구에서는 중층 비보강 조적식 구조물의 크기와 형상의 변화에 따른 지진 응답 및 손상의 변화를 조사하였다. 중미 지역에 분포된 비보강 조적식 빌딩의 형상 분포 자료를 분석해 형상 표현 변수를 정의한 후 2차원 복합 스프링 모델을 이용하여 비보강 조적식 구조물을 모델링 하였다. 그 후 구조물의 크기와 형상과 관련된 변수의 값을 바꾸어 가며 비선형 시간이력 해석을 수행하였으며 그 결과를 비교 분석하여 비보강 조적식 구조의 크기와 형상에 따른 지진응답의 경향을 분석하였다.

2. 형상 분포 분석

HAZUS의 분류법에 의하면 저층 비보강 조적식이란 1층과 2층짜리 비보강 조적식 빌딩 구조물을 일컫는다. 비보강 조적식 구조물의 특성상 대부분의 비보강 조적식 구조는 저층에 속하는데, 특히 중미 지역에 위치한 주요 시설(학교, 소방서, 경찰서) 중 비보강 조적식 건물의 분포 자료[4]에 따르면 전체 구조물의 90% 정도가 1층 또는 2층인 저층 비보강 조적식에 속하는 것을 알 수 있다. 또한 비보강 조적식 빌딩의 치수 별 분포를 살펴보면, 먼저 건물의 가로 세로 길이 중 긴 변의 길이의 분포를 보면, 전체 저층 비보강 조적식 건물 중 75%의 건물에 대해 긴 변의 길이가 40 m 이하인 것으로 나타났다. 면 외 벽체(Out-of-plane Wall, OPW)와 다이어프램의 약한 강성 및 과도한 변형에 의해 비보강 조적식 빌딩의 파괴가 대부분 초래된다는 점에 있어서 [5] 벽체의 길이는 빌딩의 지진 성능에 영향을 줄 것으로 판단된다. 또한 건물의 80% 정도가 긴 변과 작은 변의 비, 즉 종횡비(aspect ratio)가 1.5 이하인 것으로 나타났는데, 비보강 조적식 빌딩의 지진에 대한 저항능력은 대부분 면 내 벽체(In-Plane Wall, IPW)의 횡강성에서 온다는 사실[5-7]을 고려할 때 지진의 발생 방향에 따라 종횡비에 따른 빌딩의 지진손상의 차이가 발생할 수 있다고 예상할 수 있다.

비보강 조적식 빌딩의 내진성능에 영향을 줄 수 있는 또 하나의 형상 관련 변수는 벽체의 천공률(perforation ratio)일 것이다. 즉, 문과 창문 등의 천공 면적이 클수록 벽체의 횡강성은 줄어들 것이며 이는 빌딩의 내진성능에 영향을 줄 것이다. 실제 Fig. 2에서 보는 바와 같이 창문 사이의 벽체 교각(pier)의 파손은 비보강 조적식 빌딩의 흔한 지진 손상 모드 중 하나이다 [5, 6].

언급한 바와 같이 HAZUS의 분류에 따르면 저층 비보강 조적식 건물은 1층 및 2층 건물을 나타낸다. 1층 건물과 2층 건물의 지진 거동을 예상한다



Fig. 2. Seismic failure of masonry pier

면, 2층 건물의 1층 부분은 2층에 의해 작용하는 수직하중에 의해 면 내 벽체의 횡하중, 즉 전단력에 대한 강도가 커져서 1층 건물과 비교할 때 이론적으로 적은 지진 손실을 기대할 수 있지만 2층 부분의 경우 1층의 응답이 지반 응답에 비해 증폭되는 현상에 의해 상대적으로 더 큰 손실을 예상할 수 있다. 또한 1층 비보강 조적식 건물은 횡전단력에 대한 거동이 지배한다고 할 수 있지만 2층 이상의 건물은 휨에 의한 거동의 기여도가 커지는 점도 고려되어야 할 것이다.

위에서 언급한 바와 같이 기존에 수행되었던 비보강 조적식 빌딩에 대한 취약도 해석은 이러한 형상의 변동에 대한 깊은 고려 없이 행해졌다. 하지만 그 전에 이러한 형상의 변화가 실제 구조물의 내진성능에 얼마만큼의 영향을 주는지 정성적인 평가가 필요하다는 가정이 본 연구의 수행 동기가 되었으며 실제 형상의 변화에 따른 지진 거동 및 손상 해석을 수행함으로써 이러한 가정의 유효성을 고찰하고자 한다.

3. 해석모델

비보강 조적조 구조물은 취성 재료인 벽돌을 모르타르로 결합하여 만든 구조물이기 때문에 철근콘크리트나 강재 등 여타 구조재료에 비해 지진과 같은 횡하중에 대해 높은 비선형 거동을 보인다. 비보강 조적조 구조물의 지진 거동을 예측하기 위해서는 벽돌 하나하나를 솔리드 요소로 모델링을 한 뒤 비선형 인터페이스 요소를 이용해 모르타르의 거동을 모사하는 정밀 모델링을 하는 것이 그 정확도를 높이는 방법이 되겠지만 이 경우 해석을 위한 많은 리소스를 필요로 하기 때문에 비선형 시간이력 해석을 반복적으로 여러 번 수행해야 하는 시뮬레이션 해석이 반드시 필요한 위험도 평가에 적용하기에는 어려움이 있다. 본 연구에서는 반복 해석의 효율성을 높이기 위해 개발한 2D 복합 스프링 모델[7]을 적용하였으며 본 모델에 대한 간단한 소개를 하고자 한다.

일반적으로 이상적인 단부 조건(고정단 또는 자유단)을 가진, 문과 창문 등이 없는 직사각형 비보강 조적식 벽체의 횡변위는 [6]에서 제공하는 아래 식에 의해 결정할 수 있다. 먼저 한 쪽 단부가 완벽하게 고정단이고 나머지 한 쪽 단부는 완벽한 자유단, 즉 내미보 형태의 벽체의 횡강성은

$$k = \frac{1}{\frac{h^3}{3E_m I_g} + \frac{h}{A_v G_m}} \quad (1)$$

그리고 양 쪽 단부가 모두 완벽하게 고정단인 경우에 벽체의 횡강성은

$$k = \frac{1}{\frac{h^3}{12E_m I_g} + \frac{h}{A_v G_m}} \quad (2)$$

여기서 E_m 은 조적조의 탄성계수, h 는 벽체의 높이, I_g 는 단면2차 모멘트, A_v 는 전단을 받는 면적, G_m 은 전단탄성계수이다.

벽체의 강도 역시 예측할 수 있는데, 벽체의 종횡비, 벽돌 강성, 수직하중 등의 조건에 따라 전도, 활동, 사인장 파괴, 모서리 파괴 중 하나의 파괴모드가 정해지며 그에 따른 강도와 항복 후 히스테리시스 특성도 정의할 수 있

다. 미국의 재난안전청(Federal Emergency Mitigation Agency, FEMA) [8]에서는 횡하중을 받는 URM 벽체에 대해서 위 네 가지의 파괴모드에 해당하는 강도를 예측할 수 있는 식을 제공하고 있다. 이 중 대부분의 경우 전도 및 활동에 의해 강도가 결정되는데 [5] 먼저 전도에 대한 횡하중 강도 Q 는 아래와 같다.

$$Q = 0.9 \alpha P_{CE} \left(\frac{L_w}{h_{eff}} \right) \quad (3)$$

여기서, P_{CE} 는 벽체에 작용하는 수직하중, L_w 는 벽체의 폭, h_{eff} 는 벽체의 하부에서 횡하중이 작용하는 곳까지의 높이, 그리고 α 는 단부조건에 대한 계수로써 하단 완전고정 - 상단 자유단일 경우에 0.5, 그리고 양단 완전 고정인 경우에 1.0이다. 두 번째로 활동에 대한 횡하중 강도는 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$Q = \frac{0.75 A_n \left(0.75 v_{te} + \frac{P_{CE}}{A_n} \right)}{1.5} \quad (4)$$

여기서, A_n 는 벽체와 바닥 접점의 유효 면적, 그리고 v_{te} 는 응력으로 나타난 URM의 전단강도이다. 해석에 필요한 물성치로는 FEMA에서 제공하는 "Fair" 상태의 URM 물성치를 이용해 단위하중은 18.84 kN/m^3 , 탄성계수는 2955 MPa , 그리고 전단강도 v_{te} 는 0.18 MPa 를 사용하였다.

2D 복합 스프링 모델에서는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 일반적으로 창문 등의 천공 부분이 존재하는 비보강 조적식 빌딩의 유공 벽체를 여러 부분의 직사각형 단일 벽체로 분할하여 각 부분이 직렬과 병렬 형식의 스프링으로 서로 연결하는 식으로 구조물을 구성한다. 여기서 벽체의 각 요소는 비선형 스프링 요소로 표시되는데 하나의 요소는 해당 부분의 비보강 조적식 피어(pier)의 지진거동을 모사할 수 있도록 모델링된다. 즉, 각 비선형 스프링은 해당 요소의 강성과 정해진 파괴모드에 해당하는 히스테리시스 거동을 모사할 수 있도록 구성되어야 한다. 특히 Fig. 4와 같은 유공 벽체의 중간 기둥 역할을 하는 조적식 피어(pier)의 강성 및 강도의 모델링이 중요한데, 여기서 각 피어의 단부는 완전 고정단 또는 자유단으로 가정할 수는 없고 Fig. 5(a)와 같이 일정 수준의 회전강성을 가진다고 볼 수 있으며 이는 피어에 인접한 요소의 구성, 즉 단부조건에 따라 그 크기가 달라질 것이다. 이러한 단부 강성을 예측하기 위해 해당 피어 요소를 그림과 같이 변곡점을 기준으로 상하로 분리한 후 고정단 또는 자유단의 이상적 단부조건을 가지면서 등가의 길이를 가진 요소로 치환하여 그 강성을 예측하는 유효길이법 개념을 도입하였다(Fig. 5(b)). 즉, 식 (1)과 (2)에서 원래 피어의 높이 h_p 대신에 유효

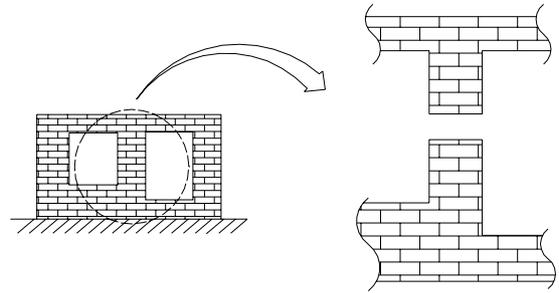


Fig. 4. Asymmetric end conditions for a URM pier

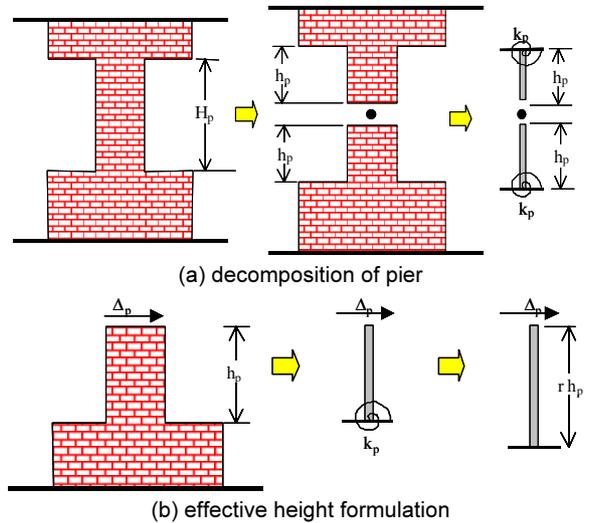


Fig. 5. Schematic view of effective length method [7]

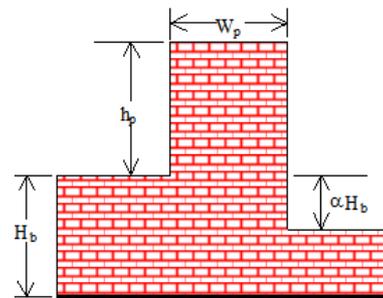


Fig. 6. Definition of control variables

길이계수 r 을 곱한 $r \cdot h_p$ 를 대입하는 방법이다. 임의의 피어에 대한 유효 길이는 주어진 피어의 단부 조건에 따라 결정되는데, 단부의 형상을 나타내는 변수와 피어의 유효길이와의 관계를 정량적으로 수립하기 위해 경향분석을 실시하였다. 먼저 단부 조건 표현을 위해 피어의 종횡비, 단부 두께와 폭과의 비, 그리고 비대칭 효과를 나타내는 세 가지 변수를 Fig. 6과 같이 정의하였다. 그 후 각 변수를 변화시켜 가면서 각 조합에 해당하는 구성을 가진 피어에 대해 유한요소 해석을 수행해 횡강성을 구한 후 구해진 횡강성 값에 해당하는 유효길이를 결정하였다. 유한요소해석을 위해서 범용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS[9]를 활용했으며 평면응력해석(plane stress analysis)를 실시하여 횡강성을 구한 후 그에 해당하는 유효길이계수 r 값

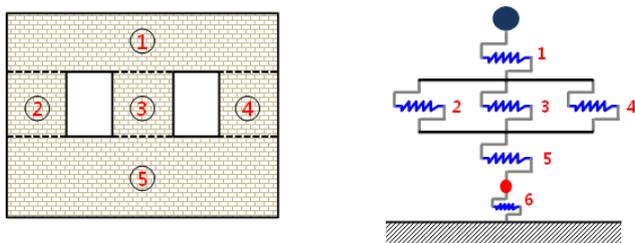


Fig. 3. Construction of 2D spring model

을 계산하였다. 상부와 하부로 분리된 각 부분의 유효길이를 구하게 되면 이를 직렬로 합성하여 최종적으로 피어의 유효길이를 구할 수 있다. 보다 정확한 회귀분석을 위해서는 세 가지 변수를 조합하여 총 아홉 가지의 경우에 대해 경향분석을 해야 하지만 해석의 편의를 위해 한 번에 한 가지의 변수만을 변화시켜 가면서 경향분석을 한 후 결과로 나오는 세 가지의 식을 곱하여 최종 r 값을 구하는 방법을 사용했는데, 그 결과 위에서 정의된 세 변수와 유효길이계수 r과의 관계는 아래 Eq.(5)와 같이 나타난다. 유효길이법에 대한 보다 자세한 설명은 Craig et al[7]에 나와 있다.

$$r = \left[1.005 + 0.19 \left(\frac{H_b}{W_p} \right)^{\frac{1}{5}} \right] \times \left[1 + 0.1\alpha^{\frac{1}{4}} \right] \times \left[0.803 + 0.281 \left(\frac{W_p}{h_p} \right) \right] \quad (5)$$

이와 같은 유효길이법은 기본적으로 벽체의 전단변위만을 생각한 것이다. 폭이 넓은 단층 빌딩의 경우 전단변위가 지배하겠지만 2층 이상 빌딩과 같이 세장비가 비교적 큰 건물의 경우에는 전체적인 휨변위를 고려해야만 한다. Fig. 3에서의 6번 요소는 이러한 휨변위를 고려한 요소이다. 높이 H, 밑면의 단면 2차 모멘트 I를 가진 벽체의 휨에 의한 횡방향 유연도 f_{tran} 은 아래와 같이 산정할 수 있다.

$$f_{tran} = \eta \frac{H^3}{3EI} \quad (6)$$

여기서, η 는 벽체의 천공률 ρ 에 따른 계수로서 다음과 같이 계산한다.

$$\eta = 1 + 0.0035\rho + 0.0004\rho^2 \quad (7)$$

유효길이법에 대한 보다 자세한 추가 사항과 각 구조 요소의 강성 및 비보강 조적식 빌딩 복합스프링모델에 대해서는 Craig et al[7]에 보다 자세히 기록되어 있다.

4. 형상에 따른 내진성능 평가 해석

위에서 언급한 비보강 조적식 빌딩의 형상의 분포 및 구조적 특성을 고려해서 형상 변화를 묘사할 수 있는 변수 및 각 변수의 범위를 설정하였다. Table 1은 형상 변화에 의한 내진성능 변화 고찰을 위해 정의된 변수들의 조합을 나타내는데, Case1부터 Case4은 벽체의 길이, Case5부터 Case7은 빌딩의 한 변과 다른 한 변의 길이의 비인 종횡비, Case8부터 Case10은 벽체에서 천공된 면적의 비율(천공률), 그리고 Case11부터 Case13은 층고의 변화에 대한 경향분석을 위해 구성된 조합을 나타낸다. 여기서 볼드체로 표시된 Case2, Case6, Case9, Case12는 각 분석군의 기준이 되는 기본 구성으로 baseline 모델과 같은 구성을 나타낸다. 이 중 Case13은 3층 건물로서 이는 저층이 아닌 중층 범주에 속하지만 경향 분석을 위한 참고자료로 사용하기 위해 포함되었다는 점을 알려 둔다. 또한 Table 1에는 해당 구조물의 1차 고유주기 T도 표기되어 있다. 여기서 L은 비보강 조적식 벽체의 면내 벽체의 폭을 나타내고 W는 면외 벽체의 폭을 나타낸다.

빌딩 전체에 대한 구조모델링은 Park et al[6] 및 Craig et al[7]에서 사

Table 1. Properties of the in-plane walls for baseline case

spring no.	Governing behavior	Elastic Stiffness (kN/m)	Strength (kN)
1	Sliding	4.66×10^6	329.8
2	Sliding	2.69×10^5	69.5
3	Sliding	2.81×10^5	69.5
4	Sliding	2.69×10^5	69.5
5	Sliding	2.75×10^6	329.8
7	Sliding	4.66×10^6	385.2
8	Sliding	2.69×10^5	124.9
9	Sliding	2.81×10^5	124.9
10	Sliding	2.69×10^5	124.9
11	Sliding	2.75×10^6	385.2

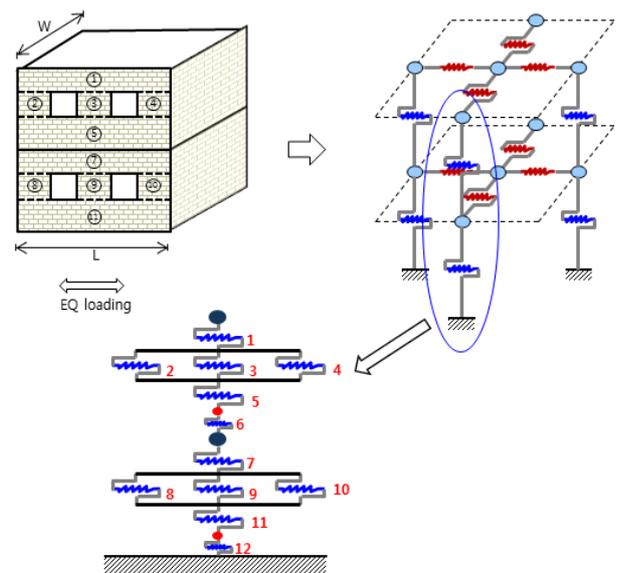


Fig. 7. Baseline configuration of URM building

용된 복합스프링모델법을 이용하여 수립하였으며 Fig. 7은 기본구성 빌딩 (Case2, Case6, Case9, Case12)에 대한 모델링을 나타낸다. 보이는 바와 같이 면내 벽체를 나타내는 스프링은 벽체의 각 부분을 비선형 스프링으로 나타내고 이를 조합한 복합스프링 요소로 모델링하였다. 기본구성에 해당하는 각 스프링의 강도와 강성 등의 구조적 특성은 유효길이법을 이용해 산정하였으며 Table 1에 그 값이 나타나 있다. 면내 벽체와 면외 벽체는 각각 다이어프램에 연결되어 있고 다이어프램은 축방향 및 전단 강성을 갖도록 모델링 하였다. 각 층의 바닥 또는 지붕에 해당하는 다이어프램은 설계된 지 오래된 대부분의 비보강조적식 건물의 경우 수직하중만을 지지하도록 설계/시공 되었기 때문에 지진 시 횡하중에 대한 강성이 부족한 것이 사실이다. 특히 중미 지역에 분포된 건물들은 대부분이 목재로 만든 격자보 위에 목재 바닥판을 깔 형태이며 벽체와의 연결부는 경우마다 달라 정확한 모델링이 힘든 경우가 많으며 대체로 축방향 강성보다 전단 강성이 약해 전단에 대한 거동이 지배하는 경우가 많다 [7]. 본 연구에서는 실험값과 다이어프램의 노후도를 동시에 고려해 산정된 이전 관련 연구의 결과[5]를 참조해 기본 모델에 대한 다이어프램의 축방향 스프링 강성을 2.2×10^5 kN/m으로,

전단 강성을 1.0×10^3 kN/m²로 산정하였으며 타 모델에 대해서는 크기에 따라 이를 보정하였다.

URM 빌딩의 지진 손상 및 파괴를 살펴보면 많은 경우 면 외 벽체의 파괴가 발생하는 것을 볼 수 있으며 이는 면 외 벽체와 면 내 벽체의 이음 강성 불충분으로 기인한 경우가 많다. 면 외 벽체의 경우 역시 이전 연구[5]를 참조해 면 내 벽체와의 접합부의 강성은 없다고 보수적으로 가정하였으며 이에 따라 보이론에 의해 면 외 벽체의 횡방향 휨강성 값을 계산하였는데, 그 결과 기본 구성에 대해서는 휨강성을 2.36×10^4 kN/m²으로 적용했으며 타 모델에 대해서도 크기에 따른 보정을 하였다. 휨강도 역시 FEMA[6]에서 제공하는 URM의 인장강도를 사용하여 산정하였는데 기본 구성에 대해서는 10.9 kN으로 적용하였고 타 모델에 대해서도 구성에 맞게 보정하였다.

위와 같이 정의된 총 13가지 조합(기본 구성 조합이 4번 반복되는 것을 감안하면 10가지 조합)에 대해 내진성능평가 해석을 수행하였다. 내진해석을 위한 입력 지진으로는 중미지역 멤피스(Memphis) 지역에 대해 개발된 인공지진파[10] 10개를 선정하였다. 입력지진파에 대한 응답스펙트럼은 Fig. 8과 같다. 각 조합에 해당되는 대해서 해당 구조물의 고유주기에 해당되는 스펙트럼가속도가 0.1 g에서 3.0 g까지 0.1 g씩 순차적으로 증가되도록 입력 지진파를 스케일링하여 비선형시간이력해석을 수행한 후 지진 손상의 경향을 모니터링하였다. 비보강 조적식 빌딩의 지진 손상을 정량적으로 나타내는 손상지수로는 이전 연구[5]를 참조하여 최대층간변위를 사용하였으며 비선형시간해석도구로는 DRAIN-2DX[11]를 사용하였다.

Fig. 9는 Table 1에서 정의된 조합 중 Case2, Case4, Case11 등 선별된 세 가지 조합에 대해 해석 결과로 나온 손상분포를 나타낸다. 그래프에 나타나 있는 점선은 HAZUS에서 정의하고 있는 비보강 조적식 건물에 대한 4단계의 손상 한계상태 중 경미한 손상(slight damage)을 뺀 나머지 3단계의 손상을 가리키는데 작은 값부터 각각 중간 손상(moderate damage), 광범위 손상(extensive damage), 전체 손상(complete damage)을 나타낸다. Case2를 기준으로 볼 때 벽체의 치수가 큰 Case4는 높은 손상 수준을 보이고 있으며 손상의 변동폭도 큰 것으로 나타났다. 이는 치수의 증가에 따른 면 외 벽체와 다이어프램의 강성 저하로 인한 것으로 판단된다. 반면 단층 건물인 Case11은 Case2와 비교해서 상대적으로 적은 손상 수준을 보이고 있는데, 이는 층수의 증가에 따른 층 응답(story response)의 증폭 현상 때문에 고층 건물의 손상 경향이 더 크기 때문이다. 이와 같은 지진응답해석의

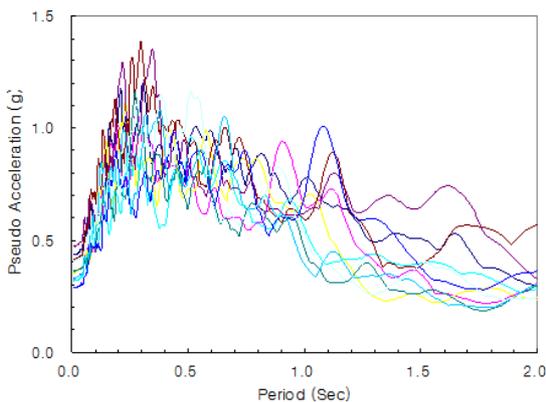
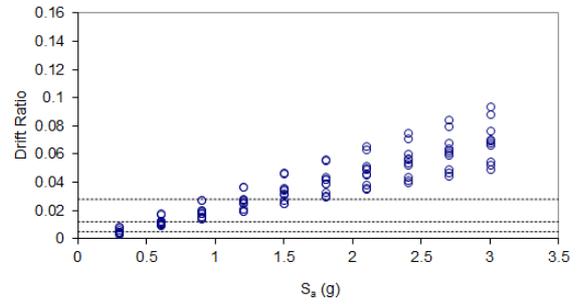
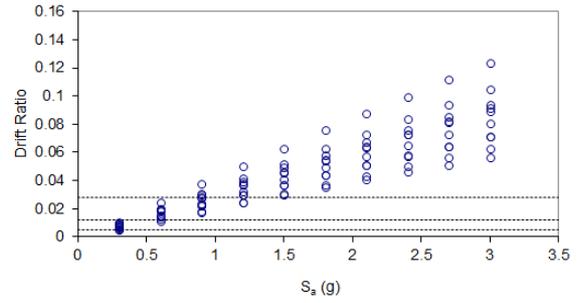


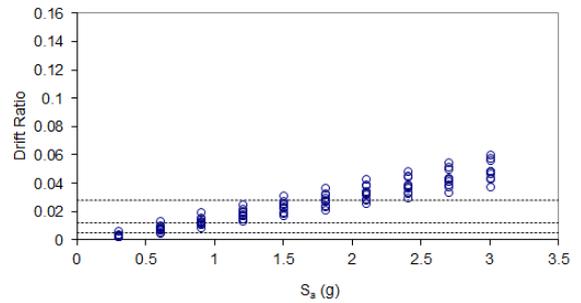
Fig. 8. Response spectrum of input ground accelerations



(a) Case2



(b) Case4



(c) Case11

Fig. 9. Damage trends for selected cases

결과를 분석할 때 같은 지진하중 하에서 무시하지 못할 수준의 응답의 차이가 발생하는 것을 보면 비록 이들 모두가 HAZUS에서 정의하는 저층 비보강 조적식 빌딩 범주에 속한다 하더라도 하나의 취약도로 개별 또는 일부분의 비보강 조적식 빌딩에 대한 내진성능을 정의하는 것은 적합하지 않다고 판단된다.

위에 기술한 바와 같은 방법을 통해 만들어진 지진 응답 분포를 구성 변화 별로 비교함으로써 형상 변화에 따른 내진성능을 비교해 보았다. 각 지진 강도 수준에 따른 지진 손상의 분포 자료는 추후 취약도 해석에 사용될 수 있는 자료로서 그 분포의 중간값을 비교함으로써 취약도 비교가 가능하다 [5]. Fig. 10은 각 변수값의 변화에 따른 지진 손상 분포의 중간값을 스펙트럼 가속도로 표현해 비교한 것을 나타낸다. 먼저 Fig.10(a)는 정사각형 평면 구조를 가진 빌딩의 면 내 벽체의 길이(L) 변화에 따른 손상도의 변화를 나타내고 있는데, 길이가 증가함에 따라 빌딩의 지진손상도가 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이는 위에서 언급한 바와 같이 벽체의 길이가 증가함에 따라 각 층에 집중되는 질량이 증가되기 때문인 것으로 분석된다. 질량이 증가되면 그에 따라서 구조물의 주기가 증가되며 Fig. 8에서 보는 바와 같이 더 높은 응답이 예상되기 때문이다. 이와 더불어 면 외 벽체의 길이가 증가하면 그에 따라서 다이어프램의 횡강성 역시 감소하기 때문에 지진 손상

Table 2. Physical configuration of analysis cases

Control Variable	Physical Configuration
Baseline Model	L=15m, H=3.7m, L/W=1.0, $\rho=0.1$, 2-story (T=0.287sec)
Length	Case1: L=7m (T=0.265sec), Case2: L=15m (T=0.287sec), Case3: L=25m (T=0.307sec), Case4: L=35m (T=0.335sec)
Aspect ratio	Case5: L/W=0.5 (T=0.33sec), Case6: L/W=1.0 (T=0.287sec), Case7: L/W=1.5 (T=0.272sec)
Perforation ratio (ρ)	Case8: $\rho=0.05$ (T=0.289sec), Case9: $\rho=0.1$ (T=0.287sec), Case10: $\rho=0.15$ (T=0.282sec)
Number of story	Case11: 1-story (T=0.166sec), Case12: 2-story (T=0.287sec), Case13: 3-story (T=0.40sec)

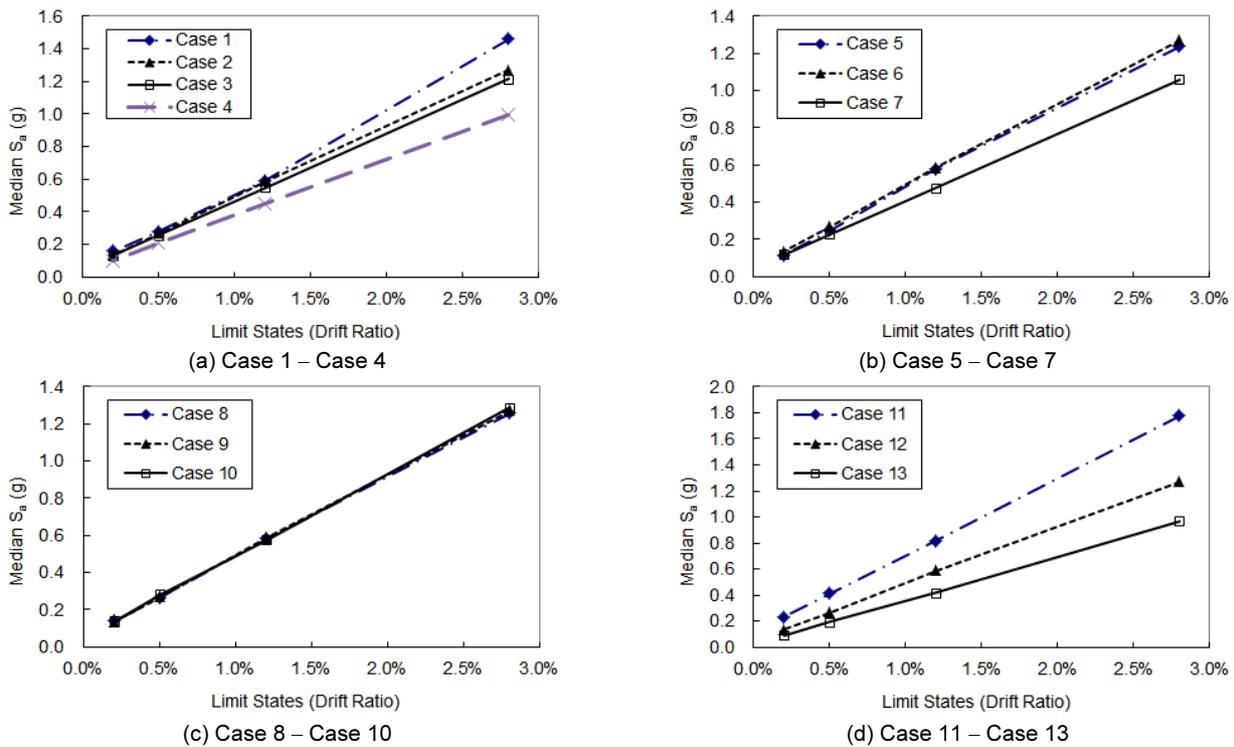


Fig. 10. Comparisons of median S_a

은 더욱 커질 것으로 파악된다. Fig. 10(b)는 빌딩의 긴 변과 작은 변의 비, 즉 종횡비의 변화에 따른 지진 손상의 경향을 나타내는데, 지진 작용방향의 면 내 벽체의 길이(L)를 고정시키고 면 외 벽체의 길이(W)를 변화시키면서 종횡비(W/L)를 조절하였다. 이 경우에도 역시 종횡비가 증가함에 따라, 즉 면 내 벽체에 비해 면 외 벽체의 길이가 증가함에 따라 취약도가 증가하는 경향을 보이는데 이 역시 마찬가지로 다이어프램의 횡강성이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 다만, 2D 해석을 수행한 본 연구에서는 임의 방향의 지진하중이 작용할 경우에 발생할 수 있는 종횡비의 변화에 따른 비틀림 효과를 고려하지 않았다는 것을 밝혀 둔다. 비틀림 효과를 고려할 경우 보다 정확한 손상 경향 해석이 가능할 것이며 이와 관련한 추가 연구가 필요하다고 판단된다. Fig. 10(c)는 면 내 벽체의 천공률의 증가에 따른 민감도를 나타내고 있는데, 천공률이 높을수록 면 내 벽체의 강성이 감소하기 때문에 이로 인한 지진 손상도의 증가가 예상되었으나 그림에서 보듯이 세 경우의 손상도가 모두 비슷하게 나와 천공률은 구조물의 내진성능에 큰 영향을 끼치지 못한다는 것을 알 수 있다. Park et al[5]에 따르면 비보강 조적식 구조의 횡강성의 대부분은 면 내 벽체가 맡게 되지만 구조물의 파괴는 면 내 벽체의 응답에 비해 매우 큰 응답을 가지는 다이어프램과 면 외 벽체의 손상에서 오

는 경우가 대부분이다. 따라서 빌딩의 형상이 비슷할 때 대부분의 경우 그 내진성능은 면 외 벽체와 다이어프램의 강성, 그리고 면 외 벽체와 면 내 벽체의 연결부 상태에 따라 좌우되는 경향이 있다. Fig. 10(c)의 결과는 이와 같은 이전 연구의 결과와도 일치한다고 볼 수 있다. 실제로 세 경우의 고유 주기를 보면 거의 동일한 것을 볼 수 있는데 이로부터 구조물의 진동모드가 면 내 벽체보다는 면 외 벽체 및 다이어프램의 응답에 더 큰 지배를 받는다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실로 미루어 볼 때 보다 정확한 비보강 조적식 빌딩의 내진성능 평가를 위해서는 면 외 벽체 및 다이어프램의 거동과 그 연결부의 정확한 모델링이 중요하다는 것을 알 수 있으며 향후 연구의 방향은 이 부분을 고려해야 할 것이다. 마지막으로 Fig. 10(d)는 층수에 따른 내진성능의 변화를 보여 주는데, 예상할 수 있듯이 층수가 높을수록 지진에 대한 손상도가 증가하는 것을 알 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 3층 빌딩은 저층 빌딩 범주에 속하지는 않지만 층수에 따른 경향을 보다 명확히 이해하기 위해 해석에 포함시켰다. 따라서 3층 건물의 내진성능이 다른 경우에 비해 떨어지는 것은 당연한 결과라 할 수 있다. 여기서 주목할 만한 것은 단층 비보강 조적식 건물과 2층 비보강 조적식 건물의 내진성능인데, Fig. 10(d)에 나타난 바에 의하면 단층 비보강 조적식 건물과 2층 비보강 조적식 건물의 내

진성능 차이는 2층과 3층 건물의 내진성능 차이보다 오히려 크게 나타났다. 이러한 결과를 고려해 볼 때 단층과 2층 건물 모두 하나의 취약도를 공유하는 HAZUS의 저층 비보강 조적식 건물의 범주에 들어가는 것은 적절치 않다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 저층 비보강 조적구조물의 크기와 형상의 변화에 따른 구조물의 지진취약도의 변화를 조사하였다. 중미 지역에 분포된 저층 비보강 조적식 빌딩에 대해 구조물의 크기와 형상과 관련된 변수의 값을 바꾸어 가며 지진취약도 해석을 수행한 후 비보강 조적식 구조의 크기와 형상에 따른 지진응답의 경향을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 다른 조건이 동일할 경우, 벽체의 길이가 증가함에 따라 빌딩의 지진 손상도가 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 벽체의 길이가 증가함에 따라 증가되는 층 질량에 의해 구조물의 응답이 커지고 이와 더불어 다이어프램의 횡강성이 저하되기 때문인 것으로 판단된다.
- 2) 종횡비(W/L)가 증가함에 따라 역시 지진 손상도가 증가하는 경향을 보였는데, 이는 1번과 마찬가지로 종횡비가 증가하면 면 외 벽체의 길이가 증가하고, 그에 따라 다이어프램의 횡강성이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서 고려하지 않은 비틀림 효과를 고려할 경우 보다 정확한 손상 경향 해석이 가능할 것이며 이와 관련한 추가 연구가 필요하다고 판단된다.
- 3) 면 내 벽체의 천공률이 높을수록 면 내 벽체의 강성이 감소하기 때문에 이로 인한 지진 손상도의 증가가 예상되었으나 실제 구조물의 내진성능에 큰 영향을 끼치지 못하는 것으로 나타났다. 이는 면 내 벽체의 응답에 비해 매우 큰 응답을 가지는 다이어프램과 면 외 벽체에 의해 손상이 결정되는 사실 때문이며 보다 정확한 비보강 조적식 빌딩의 내진성능 평가를 위해서는 향후 면 외 벽체 및 다이어프램의 거동과 그 연결부의 정확한 모델링에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.
- 4) 층수가 높을수록 층 응답(story response)의 증폭 현상 때문에 고층 건물의 손상 경향이 더 크기 때문에 지진 손상도 역시 증가하는 것으로 나타났다. 단층 비보강 조적식 건물과 2층 비보강 조적식 건물의 내진성능 차이는 2층 비보강 조적식과 3층 비보강 조적식의 내진성능 차이보다 크게 나타났다.

이와 같은 결과를 종합해 볼 때 저층 비보강 조적식 빌딩의 위험도 평가를 할 때 저층 빌딩을 하나의 범주로 두고 해석을 하는 것은 적절치 않다고 판단된다. 특히 개별 또는 일부분의 빌딩에 대해 위험도 평가를 시행할 때에는 구조물 형상 변화에 따른 내진성능을 고려해 내진성능을 평가하고 이

에 따라 보다 세분화된 취약도를 사용하는 것이 필수적이며 이를 위해 가변적으로 주어지는 특수성을 고려해서 내진성능 평가 및 취약도를 작성할 수 있는 효율적인 방안이 수립되어야 할 것이다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2014R1A2A2A01007654)

/ REFERENCES /

1. NIBS – National Institute of Building Science, HAZUS–MH MR3 Multi–Hazard Loss Estimation Methodology: Earthquake Model, Technical Manual, Washington DC; c2003.
2. Park J, Towashiraporn P. Rapid seismic damage assessment of railway bridges using the response–surface statistical model. *Structural Safety*. 2014;47(2):1–12.
3. Seo J, Linzell DG. Use of response surface metamodels to generate systems level fragilities for existing curved steel bridges. *Engineering Structures*. 2013;52:642–653.
4. French S, Olshansky R. Inventory of Essential Facilities in Mid–America. Mid–America Earthquake Center Project SE–1 Final Report, c2000.
5. Park J, Towashiraporn P, Craig JI, Goodno BJ. Seismic fragility analysis of low–rise unreinforced masonry structures. *Engineering Structures*. 2009;31(1):125–137.
6. ASCE, FEMA 356. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. Publication No. 356. Federal Emergency Management Agency, Washington DC; c2000.
7. Craig JI, Goodno BJ, Towashiraporn P, Park J. Response modification applications for essential facilities, Mid–America Earthquake Center Project ST–4 Final Report, 2002.
8. Federal Emergency Management Agency – FEMA. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Report 356. Washington, DC; c2000.
9. ABAQUS. ABAQUS documentation, Dassault Systemes, Providence, RI, USA; c2011.
10. Wen YK, Wu CL. Uniform hazard ground motions for Mid–America cities. *Earthquake Spectra*. 2001; 17(2): 359–384.
11. Prakash V, Powell GH, Campbell S. DRAIN–2DX base program description and user guide, Ver. 1.10. Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, CA; c1993.