

비보강 조적벽체의 면내거동에 대한 FEM 해석 FE Analysis on In-Plane Behavior of Unreinforced Masonry Walls

김 장 훈¹⁾ 권 기 혁²⁾
Kim, Jang Hoon Kwon, Ki Hyuk

ABSTRACT

A series of unreinforced masonry (URM) walls were analytically investigated for a limited version of seismic in-plane performance. For this URM walls were assumed to be an elastic continuum and modeled as isotropic plane stress elements within which the nature of cracking was propagated. Accordingly, cracking mode of behavior in URM was modeled by smeared-crack approach. Total of 70 cases were considered for various parameters such as axial load ratio, aspect ratio and effective section area ratio due to the existence of opening, etc. The analysis results indicated a general tendency in base shear coefficient and deformability of URM walls for these variables.

1. 서 론

비보강 조적조 건물은 재료를 구하기 쉽고 건립에 특별한 기술을 요하지 않기 때문에 우리나라뿐 아니라 세계 여러 나라 곳곳에 저층건물을 위한 가장 전형적인 건물형태로 간주되어 왔다. 하지만 1933년 발생한 미국 캘리포니아 롱비치 지진의 결과 캘리포니아주의 학교건물을 비롯하여 공공건물의 건립에 비보강 조적조의 사용이 금지된 이래로 지금까지 지진에 의한 피해가 발생할 때마다 지진피해 지역에 위치한 조적조 건물들의 심각한 피해상황이 부각되곤 하였다.^{(1),(2),(3)} 이러한 여파로 우리나라를 비롯한 여러 나라에서 비보강 조적조 건물의 건립이 눈에 띄게 줄어들고 있지만 아직도 도처에 존재하며 사용되고 있는 기존의 비보강 조적조 건물이 적지 않기 때문에 비보강 조적조 건물의 지진에 대한 거동예측은 엔지니어들이나 관련 부서 공무원들에게 중요한 관심의 대상이 된다. 특히 조적조 건물은 벽돌이나 블록 또는 돌 및 mortar 등과 같이 취성적인 재료들로 구성되어 있으므로 비탄성 구간의 거동까지 고려하여야 하는 내진성능평가에 어려움을 더하고 있다.

지진피해지역에서 빈번하게 관찰되는 비보강 조적조 건물의 파괴형태(failure mode)로는 정착(anchorage)과 관련된 파괴, 면내파괴(in-plane failure), 면외파괴(out-of-plane failure), 면내 및 면외파괴의 복합형태 그리고 바닥횡격막(diaphragm)과 관련된 파괴가 있다.⁽³⁾ 이러한 파괴유형은 조적벽체의 형상비, 즉 길이에 대한 높이의 비, 경계조건, 작용하는 중력방향 하중의 크기, 정착강도 (우리나라에서 많이 사용되는 조적조의 경우 벽돌과 mortar와 RC 바닥면간의 부착력), 재료의 강도, 시공의 질(workmanship), 그리고 무엇보다도

1) 정회원 · 아주대학교 환경도시공학부 조교수
2) 서울시립대학교 건축과 조교수

지진의 세기 등에 의하여 결정되므로 파괴모드 및 그 거동의 정확한 예측이 대단히 어려운 현실이다. 또한 파괴모드간 주고받는 영향 및 지진에 의한 지반운동의 다(多)방향성을 고려하면 문제는 더욱 복잡해진다. 그러므로 본 논문에서는 비보강 조적벽체의 면내거동만을 고려하되 비선형 비탄성 유한요소(FE)해석에 대하여 논하고자 한다. 본 논문에서 다루는 유한요소 해석은 실험에 의하여 그 결과가 입증되지 않았으므로 횡방향력은 벽체에 작용하는 중력방향의 힘에 대하여 무차원화(normalized) 하였고, 횡변위는 조적벽체의 높이에 대하여 무차원화 하였다. 해석결과는 축력비, 형상비 및 개구부 폭을 제외한 벽체 유효 단면적비에 대하여 비교·정리하였다.

2. 비보강 조적조 구조물의 FE 해석모델

선형탄성 FE 해석은 역사적 가치를 지닌 복잡한 비보강 석조 건축물의 응력상태를 추정하는데 주로 사용되고 있다. 선형탄성 해석은 균열전 조적조 구조물의 파괴형태, 탄성구간의 범위, 조적조 구조물의 기본주기 및 이에 따른 모드형태 그리고 모드기여도 등을 결정하는데 유용하다. 실제로 선형탄성 FE 해석을 통하여 고대 로마 콜로세움의 부분적 파괴를 유발하였던 역사지진에 대하여 연구한 사례가 보고되어 있다.⁽⁴⁾ 그러나 이러한 해석은 조적조 건물이 극한강도 및 지진에 의한 극한거동을 예측하는데 있어서 충분치 않을 뿐만 아니라 필연적으로 국부응력집중을 수반하게 되므로 제한적일 수밖에 없다. 이러한 선형탄성 해석의 제한성을 극복하고 동시에 지진에 의한 구조물의 극한거동을 추정하고자 재료의 비선형성 및 균열효과를 고려할 수 있는 FE 모델이 사용되는데 이에 Discrete-crack 모델과 Smeared-crack 모델이 있다.

Discrete-crack 모델에서는 interface element (또는 gap element)를 사용하여 접촉면에서의 응력이 재료의 인장강도를 초과하게 되면 접촉면을 중심으로 한 element들이 접촉면으로부터 서로 미끄러지거나 분리된다. 즉 조적벽(masonry layers)는 등방성 탄성 element로, mortar는 interface element로 놓고 해석하게 되어 조적조의 손상은 mortar에 집중하게 된다. 미끄러진 후 접촉면에는 Coulomb의 마찰메카니즘에 의한 압축응력과 전단응력만이 전달된다. 그러므로 적절한 인장강도와 마찰계수의 선정은 조적벽의 거동예측에 중요한 parameter가 된다. 그러나 이러한 모델링기법은 interface element의 적절한 위치를 선정하기 위한 조적조 극한거동에 대한 사전지식이 필요하고, 경우에 따라서는 모든 조적벽과 mortar층을 일일이 모델링하여야 하기 때문에 실용적이지 못하므로 사용하기에 편리한 모델은 아니다. 다만 분명한 균열면의 위치가 확실할 경우에는 해석치가 실험결과에 매우 근사하게 예측될 수 있다.⁽⁵⁾

Discrete-crack 모델의 대안으로 Smeared-crack 모델이 사용될 수 있는데 균열의 벌어짐과 닫힘에 의한 비선형효과를 element에 포함시킨 해석방법이다. 이 모델에서는 element내 응력이 재료의 인장강도를 초과하게 되면 주인장응력에 따라 균열이 발전되는 것으로 간주하며, 이때 균열성분은 element내에 고르게 분포된 것으로 간주한다. 따라서 element의 mesh 크기가 작을수록 조적조내 균열의 분포를 더욱 자세히 묘사할 수 있게 된다.

그러나 취성재료로 구성된 구조물의 FE 해석은 항상 신빙성 있는 결과를 낼 수 있을 정도로 충분히 개발된 것이 아님을 염두에 두는 것이 중요하다고 하겠다.⁽⁶⁾ 또한 균열발생을 고려하기 위하여 Discrete-crack 모델이나 Smeared-crack 모델을 사용할 때 수치적인 불안정성(numerical instability)이 발생할 수도 있다. 무엇보다도 비보강 조적조의 예측하기 어려운 복잡하고 다양한 파괴모드를 포괄적으로 고려할 수 있는 FE 해석법은 적어도 현재로서는 존재하지 않는다고 할 수 있다.

3. 비보강 조적조 벽체의 해석

3.1 비보강 조적벽체의 해석모델

면내거동연구를 위하여 고려한 비보강 조적벽은 그림 1과 같이 2.4m 높이의 1.0B 시멘트 벽돌벽 1개 층이며, 1000mm×450mm RC 보-slab 시스템에 의하여 위·아래에서 받쳐지고 있다. 하부 RC 보-slab 밑면은 수평·수직변위에 대하여 구속되어 있으며 상부 RC 보-slab은 중력방향 하중과 수평력을 전달하도록 하였다. 해석에 고려된 변수는 축력비($P/f_m'A_g$), 개구부의 유무 및 크기(A_e/A_g) 및 형상비(H/L)로 모두 35 가지 경우이다. 여기서 P 는 벽체의 자중을 제외한 벽체상부로부터 전달되는 총 수직하중, f_m' 은 조적벽의 압축강도, A_g 는 수평단면적, A_e 는 개구부의 폭을 제외한 벽체의 수평단면적, H 와 L 은 각각 조적벽의 순높이와 길이이다. 기준이 되는 벽체는 $H=2.4$ m, $L=3.6$ m로서 개구부가 없는 벽체는 형상비 0.67, 0.89, 1.33 및 2.67 등이 고려되었으며, 개구부가 있는 경우에는 0.75, 0.5 및 0.25 등의 유효단면적비(A_e/A_g)가 고려되었다. 개구부가 없는 벽체의 형상비를 위하여 조적벽체의 높이는 $H=2.4$ m로 일정하게 두고 길이를 변화시켜 얻었으며, 개구부가 있는 벽체의 경우 ($L=3.6$ m로 일정), 개구부의 높이는 1.05m로 일정하게 두고 개구부의 폭을 변화시켜 얻었다.

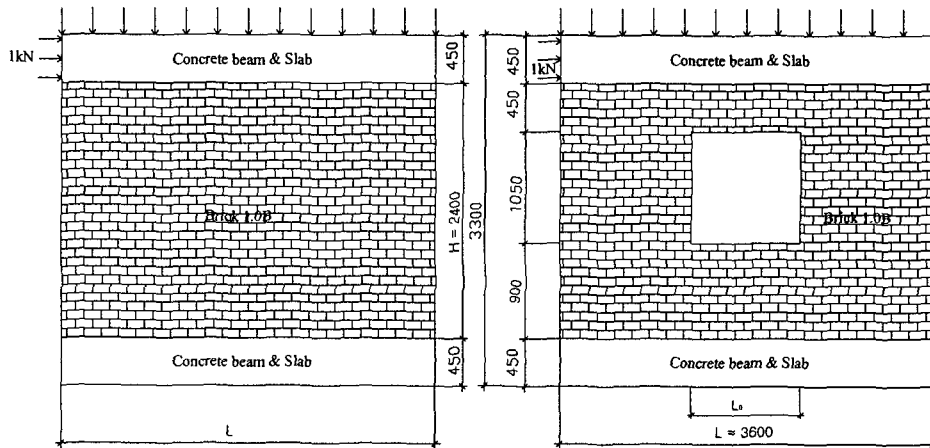


그림 1 비보강 조적조 벽체 모델

사용된 FE 해석프로그램은 DIANA⁽⁷⁾(DISplacement method ANALyser)이며 RC 보-slab 시스템 및 조적벽체를 모델링하기 위하여 공히 8절점 사각형 (8 noded quadrilateral) plane stress element CQ16M을 사용하였다. 본 논문에서는 조적벽체의 극한거동에 대한 사전지식이 필요치 않은 Smeared-crack 모델을 사용하였다. 사용한 mesh의 크기는 150mm×150mm이며, 벽체모델의 grid는 굳이 조적벽체 줄눈의 형상을 따르지 않고 통줄눈의 형태로 그림 2와 같이 나누었다. 이는 벽체를 plane stress element를 사용하여 연속체로 간주하였기 때문에 grid 간격이 충분히 작을 때에는 해석결과에 크게 영향을 주지 않을뿐더러 통줄눈 형태의 grid가 편리하기 때문이다.

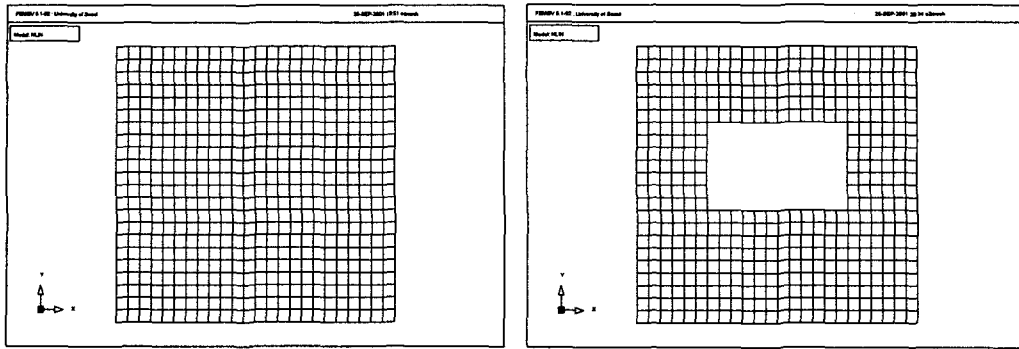


그림 2 비보강 조적조 벽체의 FE 모델 Grid Generation

3.2 재료의 성질

조적벽체 상·하단의 RC 보-slab 시스템은 해석 전과정을 통하여 탄성영역내에 남아있을 것이므로 탄성계수 $E_c = 28000 \text{ MPa}$, Poisson ratio $\nu = 0.15$ 로 가정하였다. 조적벽체의 균열 후 성상을 위하여는 Rankine/Von Mises 모델 및 Total strain-based 모델을 고려하였다. Rankine/Von Mises 모델은 콘크리트와 같은 취성재료의 모델링을 위하여 두가지 yield surface가 합쳐진 것으로 그림 3(a)와 같이 압축영역은 Von Mises criteria를, 인장영역은 Rankine criteria를 적용하는데 본 연구에서는 취성재료로 구성된 비보강 조적조 벽체 재료의 성질에 사용하였다. 조적벽체의 소성 인장영역의 거동은 그림 3(b)와 같이 exponential softening을 가정하였으며, 소성 압축영역의 거동은 그림 3(c)와 같이 포물선형 hardening/softening을 가정하였다. Total strain-based 모델의 인장 및 압축영역은 각각 그림 4(a) 및 (b)와 같은 거동을 가정하였으며 fixed stress-strain 모델을 사용하였다. 그러므로 35가지 경우에 대하여 각각 두가지씩의 재료모델을 적용하였으므로 모두 70가지 해석모델을 고려한 셈이 된다.

해석에 사용한 조적조의 기계적 성질은 압축강도 $f'_m = 12 \text{ MPa}$, 탄성계수 $E_m = 12000 \text{ MPa}$, Poisson ratio $\nu = 0.15$ 로 가정하였다. 조적조의 인장강도는 압축강도의 $0.03f'_m \sim 0.09f'_m$ 정도라는 실험보고⁽⁸⁾로부터 $f'_t \approx 0.06f'_m = 0.72 \text{ MPa}$ 로 가정하였다. 조적벽의 인장 fracture energy는 $G_f = 0.015 \text{ N} \cdot$

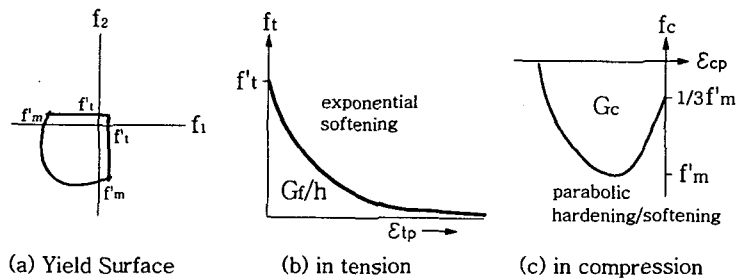


그림 3 Rankine/Von Mises 모델

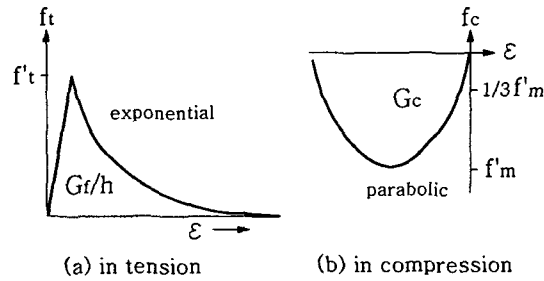


그림 4 Total strain-based 모델

mm/mm²로 가정하였으며, 압축 fracture energy는 인장값의 100배라고 가정하여 $G_c \approx 1.5 \text{ N} \cdot \text{mm}/\text{mm}^2$ 로 가정하였다. 균열 후에는 constant shear retention을 사용하였으며 retention 계수는 $\beta = 0.05$ 로 가정하였다.

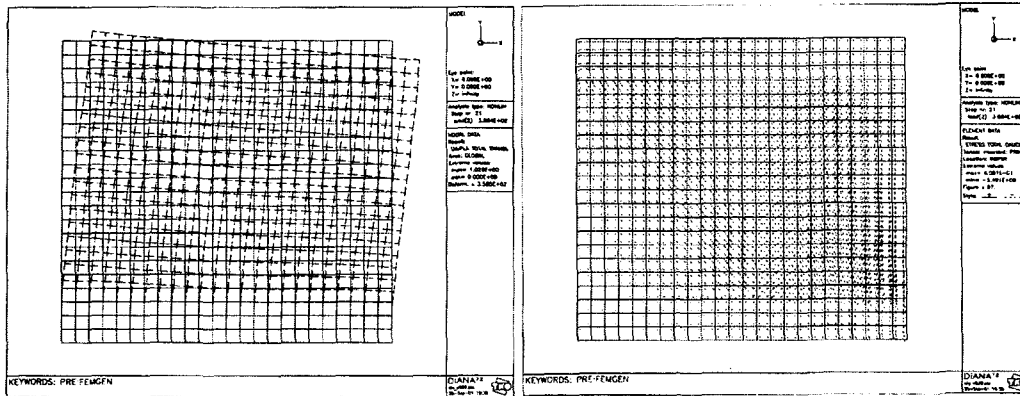
3.3 해석

컴퓨터 프로그램을 사용하여 비선형 해석을 수행하는데 있어서 주의할 점은 하중제어 방법이라고 하겠다. 이는 대개의 비선형 해석시 부딪히는 문제로서 해석이 끝나기 전에는 해석모델의 강도(strength)를 알 수 없을뿐만 아니라 극한강도에 도달 후 강도감소모드(descending branch mode)를 정확히 알 수 없기 때문이다. 특히 FE 해석에서는 조적벽체를 많은 수의 유한요소로 나누어 해석하게 되므로 균열발생이 시작되면서부터는 고차의 비선형성(high nonlinearity)이 나타나게 된다. 그러므로 조적벽체의 비선형 거동특성을 동역학해석으로 해결하기에는 컴퓨터용량의 한계상 적절치 않으므로 일반적으로 정적 밀기 해석(static push-over analysis)에 의하여 strength envelope를 구하게 된다.

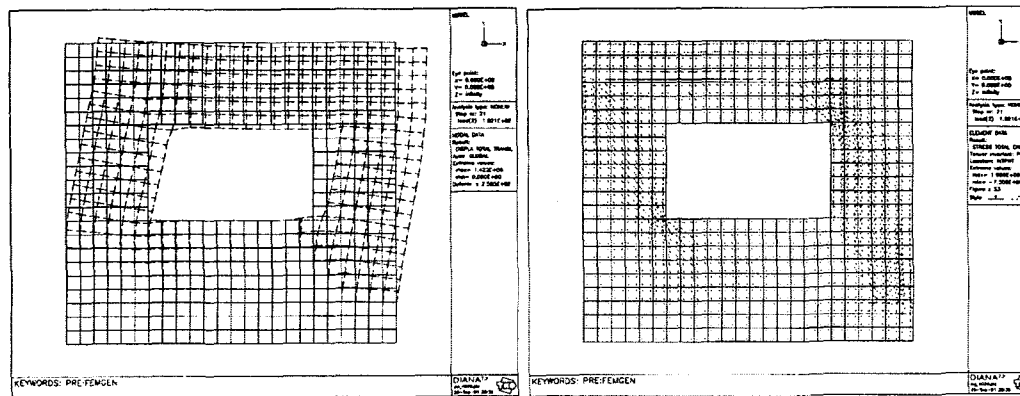
본 논문에서는 DIANA⁽⁷⁾에 내장된 변위제어법(arc-length control)에 의한 automatic loading step sizing option을 사용하여 하중의 증감 step이 자동적으로 조절되도록 하는 방법으로 해석을 수행하였다. 중력방향 하중을 먼저 가하여 정적 해석을 마친 상태에서 횡방향으로 비선형 하중을 가하였다. 이를 위하여 그림 1과 같이 초기 횡방향 하중은 1kN이 조적벽 상단 RC 보-slab의 좌측으로부터 우측으로 작용하도록 하였다. 이렇게 함으로써 step loading이 증가함에 따라 증감되는 하중계수(load factor) 자체를 별도의 계산과정 없이 횡방향 하중으로 간주할 수 있는 편리함이 있다.

4. 해석 결과

본 논문에서 사용한 조적조 벽체의 해석모델은 그 결과가 실험에 의하여 입증되지 않은 것이므로 숫자 자체로는 큰 의미를 갖지 못한다. 다만 각 조적벽체의 축하중비, 형상비 및 개구부를 제외한 벽체의 유효단면적비 등에 대하여 각 모델의 응답을 비교함으로써 이들 변수가 비보강 조적벽체의 내진성능에 미치는 상대적인 영향을 조사하는 것에 의미를 두고자 한다. 이를 위하여 해석결과 조적벽체의 횡방향 강도는 중력방향 하중에 대하여 무차원화 하였으며, 횡변위 또한 조적벽체의 순높이에 대하여 무차원화 하였다. 여러 가지 해석 모델 중 개구부가 없는 경우와 개구부가 있는 경우의 일반적인 횡변위와 조적벽체내 주응력 분포를 그림 5에 정리하였다. 개구부의 유무로 인하여 두 조적벽체간 주응력의 분포가 상이하게 됨을 볼 수 있다. 개구부 양측 조적조 pier내의 응력분포는 마치 철근콘크리트 단주의 그것과 흡사함을 알 수 있다.



(a) 개구부 없는 벽체의 변위 및 주응력 분포도



(b) 개구부 있는 벽체의 변위 및 주응력 분포도

그림 5 비보강 벽체 모델의 FE 해석결과

조적벽체 해석모델의 힘-변위 관계곡선은 논문의 제한된 지면 때문에 몇가지 경우만을 골라서 그림 6에 정리하였다. 이를 위하여 개구부의 유무에 따라 각각 $H/L=2.67$ 벽체 및 $A_g/A_g=0.5$ 인 벽체의 거동을 축력비에 따라 정리하였으며, 또한 $P/f_m' A_g=0.1$ 일 때 벽체의 거동을 형상비 및 유효단면적에 따라 정리하였다. 다른 경우의 벽체모델들도 밀면전단력계수(V/W) 및 변위각(drift angle)의 크기만 다를뿐 앞의 변수들에 대한 거동의 경향은 유사하였다. 그림에서 보이듯이 Rankine/Von Mises 모델과 Total strain-based 모델간에는 큰 차이없이 비슷한 응답을 보이고 있다. 그림에서 보여진 바와 유사한 형상의 벽체 해석결과가 보고되어 있지만,⁽⁹⁾ 이는 2개층의 비보강 조적조 벽체를 다루었으며 개구부 크기의 영향을 고려함에 있어서 벽체평면 면적에 대한 개구부의 면적을 고려하였고, 벽체 형상비의 영향을 고려하지 않았으므로 본 논문과의 직접적인 비교는 적절치 않다고 생각된다.

그림에서 보이듯이 개구부 없는 벽체의 경우 축력비가 커짐에 따라 밀면전단력계수는 감소하였지만 변형

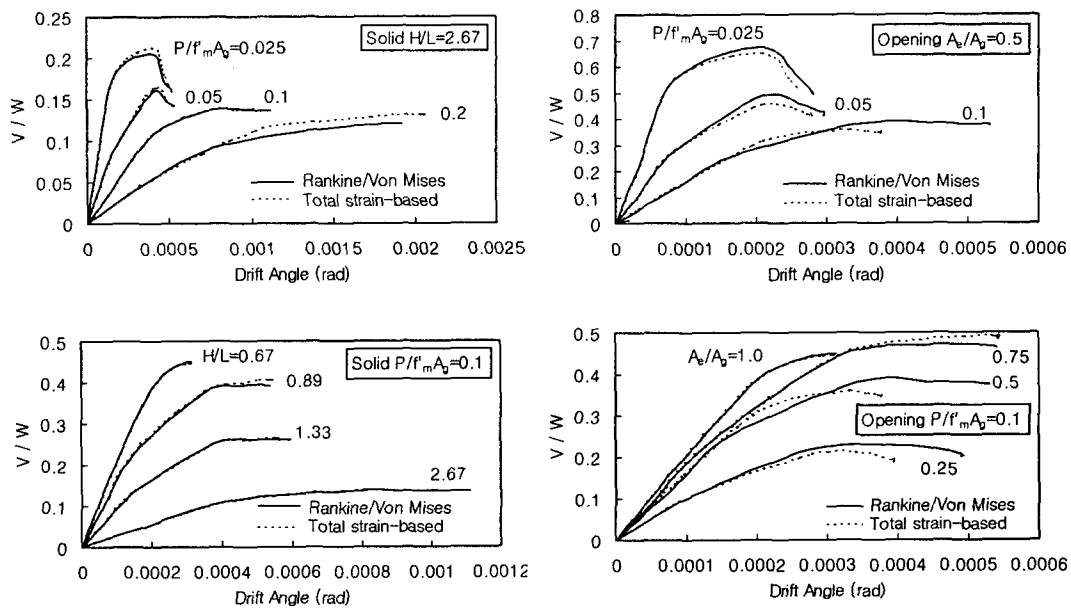


그림 6비보강 조적조 벽체모델의 횡하중-변위 관계

능력은 증가함을 알 수 있다. 여기서 유의할 점은 밀면전단력계수를 밀면전단력의 크기로 오해하지 말아야 한다는 것이다. 즉 축력비가 커질수록 밀면전단력계수가 작아진다고 하여 밀면전단력의 크기가 작아지는 것이 아니라 부담하고 있는 중력방향 하중의 크기에 비하여 횡저항 효율성이 떨어지는 것으로 이해하여야 할 것이다. 이러한 경향은 다른 형상비의 벽체나 개구부의 유무 또는 크기에 상관없는 일반적인 경향인 것으로 나타났다. 또한 개구부가 커질수록, 즉 유효단면적비가 작아질수록 밀면전단력계수는 감소하지만 변형능력은 크게 차이 나지 않았다. 개구부 없는 벽체의 경우 형상비가 커질수록, 즉 벽체가 면내방향으로 세장해질수록 밀면전단력계수는 감소하였지만 변형능력은 증가하였다. 개구부 있는 벽체의 경우 개구부를 제외한 벽체의 유효단면적이 줄어들 때, 즉 유효단면적비가 75%까지는 탄성구간의 강성(stiffness)이나 밀면전단력계수가 큰 감소 없이 유지됨을 볼 수 있었다. 그러나 유효단면적비가 50% 이하로 줄어들기 시작해서부터 강성과 밀면전단력계수가 큰 폭으로 감소함을 볼 수 있다. 특히 개구부 있는 벽체의 유효단면적비가 75%이하로 떨어지고 높은 축하중($P/f_m A_g = 0.2$)이 작용할 때에는 무시할 정도의 적은 밀면전단력 및 변위를 보여주었는데, 이는 이러한 조건하에서는 조적벽체가 횡하중에 대하여 저항할 수 없음을 암시하는 것이라고 하겠다.

5. 결론 및 추후연구

본 연구에서는 비탄성 비선형 유한요소법 해석을 이용하여 횡방향 정적 단조하중에 대한 70가지 비보강 조적벽체 모델의 거동을 조사하였다. 이를 위하여 고려된 설계변수로는 축력비, 형상비, 개구부의 유무 및 개구부에 의한 벽체의 유효단면적비 등이 고려되었으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 축력비가 커질수록 비보강 조적벽체의 밀면전단력계수는 감소하였지만 변형능력은 향상되었다. 이는 개구부의 유무나 형상비 및 유효단면적비에 관계없이 볼 수 있는 일반적인 경향이었다.

(2) 개구부 없는 벽체의 형상비가 커질수록 밀면전단력계수는 줄어들었지만 변형능력은 향상되었다.

(3) 개구부가 있는 벽체의 유효단면적비에 대한 거동은 유효단면적이 75%로 줄어들 때까지는 개구부 없는 벽체의 그것과 다를 바 없었지만 유효단면적비 50% 이하부터는 밀면전단력계수가 급격히 감소하였다. 특히 높은 축하중이 작용하는 비보강 조적벽체의 유효단면적비가 75% 이하가 될 때에는 횡하중에 대하여 저항할 수 없음을 암시하고 있다.

(4) 추후연구로는 비보강 조적벽의 설계변수들에 따른 실험결과와 해석결과를 비교하여 신빙성 있는 재료의 성질 및 거동모델을 파악하는 것이다. 또한 비보강 조적벽에 있어서 발생 가능한 다양한 파괴모드들을 포괄하는 해석법의 출현이 기대된다.

감사의 글

본 연구는 서울시의 '조적조 건축물에 대한 내진보강 방안'을 위한 연구의 일환으로 수행되었음을 밝히며, 연구지원에 대하여 감사 드린다.

참고 문헌

1. Mehrain, M., "A Reconnaissance Report on the Iran Earthquake", NCEER Bulletin, Vol. 5, No. 1, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, 1991, pp. 1-4.
2. Khater, M., "Reconnaissance Report on the Cairo, Egypt, Earthquake of October 12, 1992", NCEER Bulletin, Vol. 7, No. 1, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, 1993, pp. 1-6.
3. Bruneau, M., "State-of-The-Art Report on Seismic Performance of Unreinforced Masonry Buildings", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 1, Jan., 1994, pp. 230-251.
4. Croci, G. and D'Ayala, D., "Recent Developments in the Safety Assessment of the Colosseum", IABSE Symposium—Structural Preservation of the Architectural Heritage, Rome, 1993, pp. 425-432.
5. Mosalam, K., "Seismic Behavior of Infilled Frames", MCEER Bulletin, Vol. 12, No. 2, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, 1998, pp. 4-7.
6. Bruneau, M., "Seismic evaluation of unreinforced masonry buildings—a state-of-the-art report", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 21, No. 3, 1994, pp. 512-539.
7. DIANA, *User's Manual—Nonlinear Analysis*, Release 7, TNO Building and Construction Research, 2000, pp.566.
8. Tomazevic, M., *Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings*, Series on Innovation in Structures and Construction—Vol. I, Imperial College Press, 1999, pp. 268.
9. 정상훈, 김관중, 김희철, "비보강 조적조 건물의 등가 정적 해석에 관한 연구", 한국지진공학회 논문집, 제4권 제3호, 2000년 9월, pp. 1-10.