거시적 모델을 다르게 고려한 철근콘크리트 벽체의 비선형 해석 연구

Research on the Non-linear Analysis of Reinforced Concrete Walls Considering Different Macroscopic Models

신지욱¹⁾ · 김준희²⁾ · 유영찬³⁾ · 최기선⁴⁾ · 김호룡⁵⁾

Shin, Jiuk · Kim, JunHee · You, Young-Chan · Choi, Ki-Sun · Kim, Ho-Ryong

국문 요약 >> 본 연구에서는 주기하중에 대하여 거시적 모델링 방법을 다르게 적용하여 철근콘크리트 벽체의 비선형 해석을 수행하고 기존에 나타난 실험 연구와 비교/분석하였다. ASCE41-06에서 제시하는 높이-길이 비에 따른 벽체의 파괴유형을 참고하여 기존에 수행된 실험연구 중에서 높이-길이비가 3.0을 초과하는 세장한 벽체와 높이-길이비가 1.5인 낮은 벽체를 선택하였다. 각 실험체에 대하여 거시적 모델을 다르게 고려하여 비선형 해석을 수행하였다. 본 연구에서 적용한 거시적 모델은 휨에 대한 거동을 정확히 묘사할 수 있는 방법과 벽체의 복부에서 발생하는 대각 전단을 고려할 수 있는 방법이다. 세장한 벽체는 거시적 모델에 따른 실험과 해석의 결과 차이가 거의 없는 것으로 나타났지만 낮은 벽체는 모델링 방법에서 고려할 수 있는 요소에 의해 이력 거동이 크게 달라지는 것으로 조사되었다. 또한, 높이-길이 비가 1.5인 철근콘크리트 벽체가 건축물에 적용된 경우 정확한 횡 저항능력을 평가하기 위해서 복부의 대각 압축 전단을 고려할 수 있는 모델을 사용하는 것이 타당하다.

주요어 철근콘크리트 벽체, 높이-길이 비, 비선형 해석, 거시적 모델

ABSTRACT >> In this paper, non-linear analysis was performed for Reinforced Concrete (RC) walls using different macroscopic models subjected to cyclic loading, and the analytical results were compared with previous experimental studies of RC walls. ASCE41-06 (American Society of Civil Engineers) specifies that the hysteresis behaviors of RC walls are different due to the aspect ratio of the walls. For a comparison between analytical and experimental results, a slender wall with an aspect ratio exceeding 3.0 and a squat wall with an aspect ratio of 1.0 were selected among previous research works. For the non-linear analysis, each test specimen was modeled using two different macroscopic methods: the first representing the flexural behavior of the RC wall, and the second considering the diagonal shear in the web of the wall. Through nonlinear analysis of the considered RC walls, the analytical difference of a slender wall was negligible due to the different macroscopic modeling methods. However, the squat wall was significantly affected by the considered components of the modeling method. For an accurate performance evaluation of the RC building with squat walls, it would be reasonable to use a macroscopic model considering diagonal shear.

Key words Reinforced Concrete (RC) Wall, Aspect Ratio (Height-Length), Nonlinear Analysis, Macroscopic Model

1. 서론

철근콘크리트 벽체는 높은 강성, 강도 그리고 변형 능력

을 보유하고 있기 때문에 강한 지진하중에도 우수한 저항능력을 보여주는 구조 시스템으로 알려져 있다. 이러한 철근콘크리트 벽체의 횡력에 대한 거동을 분석하기 위해 국내외 상당수의 실험적/해석적 연구가 수행되어왔으며 철근콘크리트 벽체의 거동을 정확히 나타낼 수 있는 다양한 비선형 해석 모델을 제시하였다.

철근콘크리트 벽체의 비선형 거동을 예측하기 위한 대표적인 해석 모델은 미시적(Microscopic) 그리고 거시적(Macroscopic) 모델링 방법으로 나눌 수 있다. 미시적 접근방법은 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하기 때문에 철근콘크리트 벽체에서 나타나는 휨과 전단에 대한 정확한

¹⁾ 정회원·한국건설기술연구원, 전임연구원
(교신저자: shinjiuk@kict.re.kr)

²⁾ 정회원·한국건설기술연구원, 수석연구원, 공학박사

³⁾ 정회원·한국건설기술연구원, 연구위원, 공학박사

⁴⁾ 한국건설기술연구원, 수석연구원

⁵⁾ 한국건설기술연구원, 전임연구원

본 논문에 대한 토의를 2012년 12월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2012. 4. 25 / 수정일 1차: 2012. 6. 12, 2차: 2012. 7. 16 / 게재확정일 : 2012. 7. 16)

© 2012EESK www.eesk.or.kr

모사가 가능하다. 특히, 미시적 접근 방법을 이용하여 낮은 벽체(Squat Wall)의 거동을 예측하는 경우 실제 벽체에서 나타나는 국부적인 거동을 거시적 방법에 비해 상대적으로 정확하게 고려할 수 있는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 그러나, 많은 수의 유한 요소가 고려되기 때문에 모델링 과정이 복잡하고 해석 시간이 많이 소요되기 때문에 효율성이 떨어진다. 거시적 접근 방법은 건물의 층수가 높거나 평면이 복잡한 경우에 유한요소해석 방법에 비해 상대적으로 쉽게 적용이 가능하지만 제한된 조건에서만 해석결과가 유효하다는 단점이 있다.⁽²⁾ 이러한 한계를 극복하기 위해서 많은 연구자들에 의해 다양한 철근콘크리트 벽체의 거시적 모델이 제안되었다. 그러나, 거시적 모델은 모델링 방법에 따라 벽체의 거동을 나타내는 요소들이 상이하기 때문에 정확한 예측을 하기 어렵다.

기존에 수행된 실험을 바탕으로 ASCE41-06[3]은 철근콘크리트 벽체의 거동을 높이-길이 비로 구분하여 정의하였다. 높이-길이비가 3.0을 초과하는 세장한 벽체(Slender Wall)는 휨에 의해 지배되며 높이-길이 비가 1.5미만인 낮은 벽체(Squat Wall 또는 Short Wall)는 전단 거동을 보이는 것으로 정의한다. 또한, 1.5와 3.0사이의 높이-길이 비를 갖는 철근콘크리트 벽체는 휨과 전단에 모두 영향을 받는다고 언급하고 있다. 본 연구에서는 컴퓨터 해석과 실험 결과를 비교하기 위해서 ASCE41-06에서 언급하고 있는 높이-길이 비를 기준으로 세장한 벽체와 낮은 벽체의 실험 연구를 고려하였다.

본 연구의 목적은 높이-길이 비가 다른 철근콘크리트 벽체의 실험 결과와 거시적 모델링 방법을 다르게 적용하여 나타난 해석결과를 비교/분석하는 것이다. 또한, 이를 바탕으로 전단벽식 건축물에 대한 비선형 구조해석의 가이드라인을 제시하는 것이다. 본 연구에서는 벽체의 휨에 대한 거동을 정확히 묘사할 수 있는 모델과 벽체의 복부에서 발생

하는 대각 균열 특성 및 수평 방향의 전단을 모두 고려할 수 있는 거시적 모델을 이용하였다.

2. 기존에 수행된 RC벽체에 대한 해석 및 실험 연구

표 1은 기존에 수행된 콘크리트 벽체의 파괴 유형을 구분한 것이며 철근콘크리트 벽체의 비선형 거동을 묘사하기 위한 거시적 해석모델을 함께 제시하였다. 표 1을 살펴보면 앞에서 언급한 것과 같이 철근콘크리트의 거동은 높이-길이 비에 따라 휨, 휨-전단 그리고 전단 파괴 유형을 갖는 것으로 알려져 있다. 휨 파괴는 철근콘크리트 벽체의 경계부에서 수평방향으로 균열이 나타난다. 벽체의 복부에서 대각 방향으로 발생하는 전단파괴는 표 1에 나타난 것과 같이 대각 인장(Diagonal Tension), 대각 압축(Diagonal Compression) 그리고 Sliding 전단(Sliding Shear)으로 구분된다. 대각 인장 파괴는 벽체의 횡 변형이 증가함에 따라 횡 방향 철근이 항복하고 벽체의 복부에 넓은 대각 균열이 발생한다. 이러한 파괴 유형은 벽체의 복부에 횡 방향 철근이 적게 배근된 낮은 벽체에서 주로 나타난다. 대각 인장 파괴를 사전에 방지하기 위해서 벽체에 횡 방향 철근을 적절하게 배근하면 대각 압축 파괴가 발생된다. 대각 압축 파괴는 대각 인장 파괴 유형과 달리 보강근의 항복보다 콘크리트의 압축 파괴와 밀접한 관련이 있기 때문에 상대적으로 취성적인 거동을 보인다. 마지막으로, Sliding 전단은 철근콘크리트 벽체에 많은 수의 반복 가력을 했을 때 대각 압축 파괴와 마찬가지로 콘크리트 압축파괴에 의해 발생한다.⁽¹⁾ 세장한 철근콘크리트 벽체(높이-길이 비>3.0)는 벽체 복부의 하부에서 수평방향으로 넓은 휨 균열과 대각 방향의 미세한 전단 균열이 나타난다. 이러한 벽체에서 발생하는 전단 균열은 벽체의 전

〈표 1〉 콘크리트 벽체의 파괴 형상과 Macro. 해석 모델

형상비 (높이-길이 비)	높이-길이 비 > 3.0	1.5 ≤ 높이-길이 비 ≤ 3.0	높이-길이 비 < 1.5
Failure Modes	Flexural Failure Mode	Mixed Failure Mode - Flexural-Diagonal Tension - Flexural-Diagonal Compression - Flexural-Sliding Shear	Shear Failure Mode - Diagonal Tension - Diagonal Compression - Sliding Shear
Analytical Models	MVLEM (Multiple Vertical Line Element Model)	Modified MVLEM	LDLEM (Longitudinal and Diagonal Line Element Model)

체 거동에 거의 영향을 미치지 않는다. 높이-길이 비가 1.5와 3.0사이의 철근콘크리트 벽체는 경계 요소에서 휨에 의한 균열을 보인 후에 복부에서 전단 균열이 발생한다. 이러한 벽체는 표 1에 나타난 것과 같이 휨과 전단이 혼합된 거동을 보인다. 앞에 언급한 횡력에 대한 철근콘크리트 벽체의 실제 거동을 반영하기 위해 거시적 해석 모델이 개발되었으며 표 1에 기존 연구에서 개발된 대표적인 비선형 해석 모델을 보여준다. 1984년 Kabeyasawa 등⁽⁵⁾은 휨 거동을 나타내기 위해서 2개의 축방향 스프링을 양단에 배치하고 가운데의 회전 스프링과 부재의 중심에 수평 방향 스프링을 적용하여 전단 거동을 반영하였다. 또한, 표 1에 제시된 MVLEM(Multiple-Vertical-Line-Element Model)은 Vulcano 등⁽³⁾에 의해 1988년에 개발되었다. 이 거시적 해석 모델은 중앙의 회전 스프링을 제거하고 다수의 축 방향 스프링을 배치한 모델이다. 이는 중앙의 회전 스프링을 제거하더라도 다수의 축 방향 스프링이 휨에 대한 거동을 충분히 정확하게 반영할 수 있기 때문이다. 또한, 전단에 대한 거동은 해석 모델의 중앙부에 설치한 수평 방향 스프링을 통해 고려하였다. 그 이후에 Linde⁽⁶⁾(1993)등은 MVLEM 모델을 간소화시켜서 양단과 중앙에 축 스프링을 설치하여 휨 거동을 나타냈고 수평 방향과 축 방향 스프링을 중앙에 설치하여 전단거동을 반영하였다. 앞에 언급한 거시적 모델링 방법은 실험을 통해서 나타난 것과 같이 휨에 대한 거동은 정확한 묘사가 가능하지만 전단거동에 대한 영향은 제한적으로 반영하는 것으로 알려져 있다. 그 이유는 철근콘크리트 벽체는 높이-길이 비가 낮은 벽체는 복부에서 발생하는 대각 방향의 전단 균열이 전체 거동에 상당히 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 따라서, 전단 거동을 보다 정확히 묘사할 수 있는 방법이 개발되었다. 표 1에 제시된 수정된 MVLEM은 Milve⁽⁷⁾(1996)등에 의해 개발된 것으로 휨 거동을 나타내기 위한 축 방향 스프링과 함께 2차원 패널을 사용하여 전단 거동을 반영하였다. 또한, Park⁽⁸⁾(2007)등은 표 1에 나타난 대각 방향으로 콘크리트 스트럿 요소를 적용한 거시 모델을 개발하였다. 이 거시 모델들은 철근콘크리트 벽체의 복부에서 발생할 수 있는 대각 균열 특성을 고려할 수 있으며 기존에 수행된 실험 결과와 비교했을 때 높이-길이 비가 낮은 철근콘크리트 벽체의 거동을 비교적 정확히 예측하였다.

본 연구에서는 철근콘크리트 벽체의 비선형 거동을 조사하기 위해서 두개의 거시적 모델링 방법을 고려하여 비선형 해석을 수행하였다. 철근콘크리트 벽체의 비선형 해석은 현재 널리 적용되고 있는 Perform3D 구조 해석 프로그램을 이용하였다. Perform3D프로그램은 비탄성 섬유요소(Inelastic

Fiber Element)를 바탕으로 모델링하기 때문에 철근과 콘크리트에서 발생할 수 있는 복합적인 거동을 보다 정확히 묘사할 수 있다. 또한, Perform3D프로그램은 두 가지 방법을 이용하여 모델링된 철근콘크리트 벽체에 대한 구조 해석을 수행할 수 있다. 벽체의 모델링 방법은 Shear Wall Element와 General Wall Element방법으로 구분되며 이에 대한 자세한 내용은 다음을 참고할 수 있다.⁽⁹⁾ 그림 1은 본 연구에서 고려한 거시적 모델링 방법과 적용 가능한 벽체 요소들을 간략하게 도식화한 것이다. 그림 1의 Shear Wall Element 방법은 휨에 저항하는 수직 방향 철근과 수평 전단(Conventional Shear)을 고려할 수 있는 방법으로 앞 절의 표 1에 제시된 MVLEM과 유사함을 알 수 있다. 본 연구에서는 벽체를 횡 방향으로 가력 했을 때 나타나는 전단 거동을 편의상 수평 전단으로 정의하였다. 그림 1에 제시된 General Wall Element방법은 Shear Wall Element모델링 방법보다 다양한 요소를 고려하기 때문에 보다 상세하게 모델링할 수 있다. 이 모델링 방법은 수직/수평 방향 철근을 배치하여 휨 거동을 나타내고 수평 전단과 대각 압축 전단(Diagonal Compression Shear)을 동시에 고려한다. 여기서, 대각 압축 전단이란 벽체의 복부에서 발생할 수 있는 대각 방향의 콘크리트 압축 파괴에 저항하는 거동을 의미한다.⁽¹⁰⁾ 따라서, Shear Wall Element방법과 같이 대각 압축 전단에 대한 영향을 고려하지 않는 모델의 경우 복부의 대각 방향의 균열에 의한 거동을 고려하지 못한다. 표 1에 제시된 LDLEM은 대각 방향의 전단 거동을 반영하기 위해서 대각 방향의 스트럿 요소를 추가한 점과 수정된 MVLEM의 경우 2차원 패널을 적용하여 대각 방향의 전단 영향을 고려했다는 것을 감안하면 그림 1의 General Wall Element방법과 유사하다.

앞에 언급한 Perform3D에서 허용하고 있는 두 개의 거시적 모델링 방법을 적용하여 실험과 해석 결과를 비교하기 위해서 다양한 철근콘크리트 벽체의 실험 연구 중에 높이-

〈그림 1〉 Perform3D의 RC벽체의 해석 요소⁽⁹⁾

〈그림 2〉 Thomsen and Wallace^{(11),(12)}와 Salonikios등^{(13),(14)}에 의해 수행된 실험 연구 요약

길이 비가 1.5 미만 그리고 3.0을 초과하는 2개의 벽체를 선택하였다. 그림 2는 철근콘크리트 벽체의 실험 연구를 간략하게 나타낸 것이다. 그림 2의 (a)와 (b)는 Thomsen과 Wallace^{(11),(12)}와 Salonikios등^{(13),(14)}에 의해 실시된 RW2와 LSW3실험체의 입면과 평면의 단면 상세(A-A' Section)와, 하중 프로토콜(Load Protocol) 그리고 파괴 양상(Failure Mode)을 보여준다. 그림 2의 (a)에 제시된 RW2실험체는 ACI 318-02⁽¹⁷⁾에 의해 설계되었으며 실제 고려된 벽체의 약 1/4 수준의 크기를 갖는다. RW2는 높이-길이 비 (3,658/1219mm)가 3.13인 세장한 벽체이며 전체의 25% 이상이 구속 영역으로 구성되어 있다. 콘크리트 압축 강도와 철근의 항복 강도는 각각 27.4MPa 그리고 414MPa로 고려하였다. RW2의 실험체는 축력($N=0.10 A_g f'_c \approx 340\text{kN}$)과 그림 2의 (a)에 제시한 하중 프로토콜을 바탕으로 횡 변위 비를 동시에 적용하여 실험을 실시되었다. 0.75%의 횡 변위 비에 도달했을 때 구속 영역의 철근이 항복하는 것으로 나타났다. 그 이후에 경계 영역에서 휨 균열이 관찰되었으며 최종 변위비인 2.5%에 도달했을 때 파괴 양상은 그림 2의 (a)에 제시한 것과 같이 휨 파괴(Flexural Failure)가 발생하는 것으로 조사되었다. 그림 2의 (b)에 간략하게 나타낸 LSW3은 EC8⁽¹⁰⁾에 따라 설계되었으며 실제 벽체의 1/2.5배의 크기를

갖는다. LSW3은 높이-길이 비가 1.0인 낮은 벽체로 구속 영역이 전체의 40%를 차지하는 실험체이다. 콘크리트는 약 24MPa 그리고 철근은 500MPa를 고려하여 설계되었다. LSW3실험체는 축력($N=0.07 A_g f'_c \approx 210\text{kN}$)과 그림 2의 (b)에 제시한 하중 프로토콜을 동시에 적용하여 실험이 수행되었다. 간략하게 주요 실험 결과를 살펴보면 실험체 하부에 미세한 휨 균열이 발생하고 이후에 벽체의 복부에서 대각 방향의 전단 균열이 관찰되었다. 횡 변위비가 증가하면서 이 실험체는 벽체 복부의 전단 균열이 심각하게 발생하였으며 철근콘크리트 벽체의 하중이 크게 감소하는 것으로 조사되었다. LSW3은 그림 2의 (b)에 나타난 것과 같이 대각 방향의 전단 균열이 전체 거동에 대하여 지배적인 것을 볼 수 있다. 다음 절에서는 본 절에서 언급한 해석모델링 방법을 이용하여 RW2와 LSW3실험체에 대한 모델링 과정을 자세히 언급하였다.

3. 철근콘크리트 벽체의 비선형 해석모델

본 연구에서는 콘크리트와 철근의 이력거동 특성을 반영하기 위해서 그림 3에 제시된 재료의 비선형 응력-변형률 관계를 고려하였다. 그림 3의 (a)는 Y-U-L-R-X구간으로 구

성된 콘크리트 재료 모델은 비선형 콘크리트 재료의 이력 특성을 자세히 묘사할 수 있다. Y점은 항복 변형률과 응력 그리고 Y-U구간은 사용된 재료의 변형 경화율(Strain hardening ratio) 고려할 수 있다. U-L점은 변형 경화율이 0인 연성 한계(Ductile Limit)에 대한 변형률과 응력을 나타낸 것으로 U와 L점은 극한 응력과 변형률을 의미한다. L-R구간은 사용된 재료에 대한 응력의 감소를 나타낸 것으로 R점은 재료의 잔류 응력을 고려한다. X점은 컴퓨터 해석에 반영할 수 있는 재료의 최대 변형률을 나타낸다. 그림 3의 (b)에 제시된 철근의 재료 특성은 그림 3의 (a)에 나타난 콘크리트의 재료 특성보다 단순하게 고려된 Y-U-X구간으로 구성되었다. 콘크리트 재료 특성과 달리 철근의 재료 특성을 고려하여 재료의 응력이 감소되는 L-R구간을 생략하였다. 본 연구에서 고려된 실험체는 수평 방향의 단면에 대하여 비구속 영역과 구속영역으로 구분하여 설계되었으며 각 영역에 대한 철근의 단면적과 배치등을 다르게 고려하였다. 기존에 수행된 콘크리트의 응력-변형률 관계에 대한 연구를 살펴보면 보강근으로 둘러싸인 구속 영역의 콘크리트는 강도와 연성이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 비구속 영역의 콘크리트는 극한 응력에 도달한 후에 취성적 파단이 발생하는 것으로 조사되었다. 표 2에 제시된 RW2에 대한 구속 영역의 철근은 D9.53 그리고 비구속 영역의 철근은 D6.35의 변형률과 응력을 보여주며 LSW3은 구속 영역

과 비구속 영역은 각각 D8.0과 D4.2철근에 대한 변형률과 응력의 값을 제시한 것이다. 해석시 실험과 보다 동일한 조건을 고려하기 위해서 표 2에 제시된 콘크리트 등의 강도는 설계 강도가 아닌 실제 실험에서 나타난 콘크리트의 압축 강도를 적용하였다. 표 2의 콘크리트의 응력-변형률의 관계는 Mander 등⁽¹⁵⁾에 의해 제시된 모델을 사용하여 계산하였다. 계산된 결과는 그림 3의 응력-변형률 곡선을 고려하여 표 2에 자세히 나타냈다. 여기서, 콘크리트 이력 특성의 인장 거동은 고려하지 않았다. 또한, 벽체에 사용된 철근은 기존 실험 연구⁽¹¹⁻¹⁴⁾에서 나타난 실험 결과와 그림 3의 (b)에 제시된 철근의 이력 특성을 비교하여 Y-U-X지점을 결정(표 2 참고)하였으며 인장과 압축은 동일하게 고려하였다. 그림 4는 표 2에 제시된 RW2의 구속 영역과 비구속 영역의 콘크리트에 대한 Y-U-L-R-X값을 그림 3의 (a)에 적용했을 때 나타난 이력 특성을 보여준다.

그림 5는 본 연구에서 고려된 실험체에 대한 거시적 해석 모델(Shear Wall Element와 General Wall Element모델)을 나타낸 것이다. RW2와 LSW3실험체의 수평 방향 단면은 그림 5에 나타난 것과 같이 비탄성 섬유요소를 이용하여 구속 영역과 비구속 영역으로 구분하여 모델링하였다. General Wall Element모델은 수직 방향 단면에 대하여 추가로 고려하였다. RW2와 LSW3실험체는 그림 5의 (a)와 (b)에 나타난 것과 같이 한 개의 비탄성 콘크리트 섬유요소와 콘크리트

〈그림 3〉 콘크리트와 철근의 비선형 이력 모델

〈표 2〉 본 연구에서 사용된 콘크리트와 철근 재료의 압축 응력 및 변형률

Point	RW2 (Slender Wall)								LSW3 (Squat Wall)							
	비구속 영역				구속 영역				비구속 영역				구속 영역			
	ϵ_c	f_c (MPa)	ϵ_s	f_s (MPa)	ϵ_c	f_c (MPa)	ϵ_s	f_s (MPa)	ϵ_c	f_c (MPa)	ϵ_s	f_s (MPa)	ϵ_c	f_c (MPa)	ϵ_s	f_s (MPa)
Y	0.0017	39.92	0.0021	448	0.0018	40.25	0.0022	414	0.0025	17.90	0.0031	610	0.0043	29.38	0.0029	585
U	0.0018	43.45	0.02	460	0.0025	47.65	0.02	426	0.003	19.89	0.05	640	0.0052	32.65	0.05	615
L	0.002	43.45	-	-	0.004	47.65	-	-	0.0034	19.89	-	-	0.0057	32.65	-	-
R	0.0135	0.43	-	-	0.015	32.97	-	-	0.0087	0.20	-	-	0.04	10.65	-	-
X	0.02	0.43	0.03	460	0.02	32.97	0.03	426	0.05	0.20	0.06	640	0.05	10.65	0.06	615

면적에 대한 철근의 비율(Area of Rebars/Area of Concrete)로써 비탄성 철근 섬유 요소를 적용하였다. RW2와 LSW3 실험체에 대하여 공통적으로 Shear Wall Element 모델은 수평 전단만을 고려하였고 General Wall Element 방법으로 모델링된 벽체는 복부(비구속 영역)에 대각 압축 전단과 수평 전단을 동시에 적용하였다. 본 연구에서는 고려된 각 전단은 이선형 거동을 하는 것으로 가정하였다. 수평 전단에 대한 항복 전단 강도는 항복 모멘트 강도에 벽체의 높이를 나누어 산정하였으며 대각 압축 전단은 KBC 2009⁽¹⁶⁾와 ACI

318-08⁽¹⁷⁾에서 제시한 스트럿의 유효 압축강도 산정식인 $f_{cm} = 0.85\beta_s f_{ck}$ ($\beta_s = 0.6$)을 적용하였다. 그림 6은 Perform 3D에서 제시하는 대각 압축 전단의 이력 거동을 나타낸 것이다.

또한, 반복 하중에 대하여 실제 벽체의 이력거동에서 나타나는 강성의 감소를 반영하기 위해서 철근에 대하여 그림 3의 Y-U-X구간에 강성 감소계수를 적용하였다. 이는 이전 연구에서 조사된 것과 같이 반복하중에 대한 철근콘크리트 부재의 경우 에너지 소산은 취성적 특성을 갖는 콘크리트에 비해 소성 재료인 철근에서 주로 발생하기 때문이다.^{(18),(19)}

Perform3D에서는 에너지 소산 계수(Energy Dissipation Factor, EDF)를 이용하여 각 구간(Y-U-X)에 따라 강성 감소를 적용한다. 그림 7은 Perform3D에서 제시하고 있는 에너지 소산 계수 적용 전/후의 이력 거동을 간략히 제시한 것이다. 여기서, 에너지 소산 계수는 강성이 감소된 강성 감소 발생 이전의 이력곡선의 면적으로 나누어 계산하며 변위가 증가할수록 각 구간의 에너지 소산 계수는 작은 값을 갖는다. 본 연구에서는 강성 감소를 반영하기 위해서 에너지 소산 계수를 시행-착오(Trial and Error)의 과정을 통해 실험 결과와 비교하여 철근의 이력 모델의 각 구간에 적용하였다. 이는 실험에서 관찰되는 주기 거동에 따라 미세하게 변하는

〈그림 4〉 RW2실험체에 대한 콘크리트의 응력-변형률 관계

〈그림 5〉 본 연구에서 고려한 콘크리트 벽체 실험체(RW2 & LSW3)의 컴퓨터 해석 모델

〈그림 6〉 대각 압축 전단의 이력 거동⁽⁹⁾

〈그림 7〉 에너지 소산 계수 적용 전/후의 이력 거동

(a) Shear Wall Element 모델

(b) General Wall Element 모델

〈그림 8〉 RW2 철근콘크리트 벽체의 하중-변위 이력곡선

강성을 Perform3D에서 제시하는 재료의 이력모델의 3개 (Y-U-X) 혹은 4개(Y-U-R-X)구간에 모두 고려하기 어렵기 때문이다.

4. 철근콘크리트 벽체의 비선형 해석 결과

4.1 하중-변위 이력 곡선

본 절은 높아-길이 비가 다른 철근콘크리트 벽체(RW2와 LSW3)의 비선형 해석 결과를 언급하였다. 앞 절에서 제시한 모델링 방법을 통한 거시적 모델과 과거에 수행된 철근콘크리트 벽체의 이력거동 특성(하중-변위 곡선)의 비교를 위해서 실험에서 사용된 하중 프로토콜(그림 2 참고)을 해석 모델에 동일하게 적용하였다. 또한, 비선형 해석을 통해 나타난 변위-하중 이력곡선을 바탕으로 각 모델링 방법에 따른 철근콘크리트 벽체의 횡 저항능력을 비교하기 위해서 에너지소산면적을 계산하였다.

그림 8은 Shear Wall Element와 General Wall Element를 이용한 RW2해석모델의 하중-변위에 대한 결과(점선)를 제시하였으며 비교를 위해서 RW2의 실험결과(실선)를 함

〈그림 9〉 RW2벽체에 대한 횡 하중의 실험/해석 결과 비교

게 제시하였다. 그림 8에 나타난 것과 같이 실험과 해석 결과는 모델링 방법과 관계없이 대체적으로 잘 부합하는 것으로 조사되었다. 전체적인 하중-변위 이력거동은 RW2에 대한 General Wall Element모델의 해석결과가 Shear Wall Element모델보다 실제 실험에서 나타난 거동과 더 유사한 것을 볼 수 있다. 그림 9는 각 하중 프로토콜에 대하여 RW2의 실험과 비선형 해석에서 나타난 최대 횡력을 비교한 것이다.

(a) Shear Wall Element

(b) General Wall Element

〈그림 10〉 LSW3 철근콘크리트 벽체의 하중-변위 이력곡선

또한, 모델링 방법에 따른 차이를 살펴보기 위해서 Shear Wall Element와 General Wall Element방법에 대한 결과를 함께 제시하였다. 여기서, 제시된 값은 해석을 통해 얻어진 횡력의 최대 값을 실험에서 나타난 최대값으로 나눈 값이다. 그림 9에 나타난 것과 같이 각 하중 프로토콜에 따른 최대 값을 비교했을 때 0.5%의 층간 변위비에서 General Wall Element와 Shear Wall Element를 이용한 해석모델은 각각 22% 그리고 24%의 차이를 보였다. 그 외의 하중 프로토콜에서는 General Wall Element의 해석과 실험 결과의 차이는 9% 이하로 나타났다. 그러나, 0.5%의 층간 변위비에 대한 실험과 해석결과를 제외한 나머지 하중 프로토콜에서는 Shear Wall Element와 실험 결과의 차이는 16%이하로 조사되었다. 전체적으로 각 하중 프로토콜에 대하여 RW2 General Wall Element모델은 Shear Wall Element모델보다 RW2의 실험 결과와 유사한 것으로 조사되었다. RW2 해석모델은 모델링 방법에 따른 결과의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 그 이유는 RW2실험에서 나타난 것과 같이 힘 거동이 지배되는 세장한 벽체의 경우 전단 거동이 벽체의 전체적인 거동에 크게 영향을 주지 않기 때문이다.

그림 10은 비선형 해석을 통해 나타난 Shear Wall Element와 General Wall Element방법에 의한 LSW3의 하중-변위 이력곡선(점선)을 나타낸 것으로 Salonikios 등^{(13),(14)}에 의해 수행된 실험결과(실선)를 함께 제시하였다. 또한, 그림 11은 그림 9와 같은 방법으로 각 하중 프로토콜에 따른 실험과 해석의 최대값을 비교한 것이다. 그림 10의 (a)에 제시된 비선형 해석결과를 살펴보면 반복하중에 대하여 강도 및 강성의 감소등은 관찰되었지만 콘크리트 벽체의 전단 거동에 의한 편칭 현상등을 정확히 고려하지 못하는 것을 볼 수 있다. 그러나, General Wall Element방법으로 모델링된

〈그림 11〉 LSW3벽체에 대한 횡 하중의 실험/해석 결과 비교

LSW3해석모델은 그림 10의 (b)에 나타난 것과 같이 반복 하중에 대한 이력거동을 Shear Wall Element 해석모델보다 상대적으로 정확하게 반영하는 것으로 조사되었다. 그림 11에 제시된 하중 프로토콜에 대한 실험과 해석을 통해 나타난 횡력의 최대값을 비교했을 때 Shear Wall Element에 의한 LSW3해석모델은 첫 번째, 두 번째 그리고 마지막 하중 프로토콜에서 실험과 해석 결과는 약 30%에서 약 50%의 차이가 발생하는 것으로 조사되었다. 그 외의 하중 프로토콜은 대체적으로 잘 부합하는 것으로 나타났다. 그림 11을 통해 General Wall Element방법으로 모델링된 LSW3의 하중 프로토콜에 대한 실험과 해석에 의해 나타난 횡 력의 최대값은 10%이내의 미세한 차이를 갖는 것을 볼 수 있다. 또한, LSW3해석모델은 모델링 방법에 따라 하중 프로토콜에 대하여 횡력은 최대 40%의 차이를 보였다. 전체적으로 LSW3과 같은 낮은 벽체는 General Wall Element방법을 이용한 해석모델이 실제 실험과 유사한 거동을 나타내는 것으로 조사되었다. 이는 수평 전단만 고려할 수 있는 Shear

(a) RW2 철근콘크리트 벽체

(b) LSW3 철근콘크리트 벽체

〈그림 12〉 하중 프로토콜에 대한 RW2와 LSW3 철근콘크리트 벽체의 누적소산에너지

Wall Element모델과 달리 General Wall Element모델은 실제 낮은 벽체에서 관찰되는 복부의 대각 전단 균열을 반영할 수 있는 대각 압축 전단을 고려할 수 있기 때문이다.

4.2 누적 이력소산 에너지

본 연구에서는 높이-길이비가 다르게 고려된 철근콘크리트 벽체에 대하여 모델링 방법을 다르게 적용했을 때 나타난 하중-변위 이력곡선을 바탕으로 하중 프로토콜에 대한 누적이력소산에너지를 계산하였다. 그림 12는 Shear Wall Element와 General Wall Element방법에 의해 모델링된 RW2(그림 12의 (a))와 LSW3(그림 12의 (b))의 누적소산에너지를 보여준다. 비교를 위해서 실험을 통해 나타난 누적소산에너지를 함께 제시하였다. 이력소산에너지는 각 하중 프로토콜에 대하여 하중-변위 이력곡선이 차지하는 면적을 계산하였다. 이를 바탕으로 고려된 하중 프로토콜까지 각 사이클의 이력소산에너지를 합산하여 누적소산에너지를 산정하였다. 그림 12의 (a)에 나타난 것과 같이 RW2해석모델은 최종 하중 프로토콜인 20번째 사이클에서 Shear Wall Element와 General Wall Element모델은 각각 107.0kN-m 그리고 102.2kN-m로 조사되었으며 약 5%의 미세한 차이를 보였다. 실제 실험에서 나타난 RW2의 누적소산에너지는 약 94kN-m로 약 9~14%의 차이를 보였다. 그림 12의 (b)에 제시된 LSW3의 경우 18번째 하중 프로토콜에서 General Wall Element를 이용한 해석모델은 Shear Wall Element모델보다 약 76% (44.45kN-m/25.32kN-m)정도 큰 것으로 조사되었다. 또한, 실제 실험 결과와 비교했을 때 General Wall Element 모델은 5% (46.2kN-m/44.45kN-m) 이내의 차이를 보였지만 Shear Wall Element모델은 80% (46.2kN-m/25.32kN-m)이상 작은 것으로 조사되었다. 모델링 방법에 따른 해석모델의 누적소산에너지를 비교했을 때 세장한 벽

체(RW2)는 무시할 만한 정도의 차이를 보였지만 LSW3과 같이 낮은 벽체는 Shear Wall Element방법을 이용한 해석 모델이 General Wall Element모델보다 상당히 과소평가된 것을 볼 수 있다. 이는 전단벽식 건축물에 대한 구조해석을 수행했을 때 모델링 방법에 따라 건축물의 내진 성능의 예측에 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다. 특히, LSW3벽체의 경우 횡 변위비가 증가하면서 모델링 방법에 의한 차이가 점차 증가하는 것을 볼 수 있다.

본 연구를 통해 힘에 의한 거동이 지배적인 세장한 벽체는 모델링 방법에 따른 이력거동 및 에너지 소산능력은 큰 차이를 보이지 않았지만 General Wall Element모델이 Shear Wall Element모델보다 낮은 벽체의 이력거동을 상당히 정확하게 묘사할 수 있는 것을 볼 수 있다. 높이-길이 비가 1.0인 벽체의 경우 정확한 건축물의 내진성능을 예측하기 위해서 General Wall Element 또는 이와 유사한 방법인 표 1에 제시한 수정된 MVLEM, LDLEM등과 같이 대각 전단을 고려할 수 있는 것으로 알려져 있는 방법을 이용하여 모델링하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 두개의 거시적 모델을 이용하여 높이-길이비가 다르게 고려된 철근콘크리트 벽체의 비선형 해석을 수행하고 이를 바탕으로 기존의 실험 연구결과와 비교하였다. 여기서 나타난 결과는 다음과 같다.

1. 세장한 철근콘크리트 벽체는 본 연구에서 이용된 두 가지 거시적 모델과 모두 유사한 이력 거동을 갖는 것으로 나타났다. 그 이유는 힘에 의해 지배되는 거동을 보이는 세장한 벽체는 이전 실험연구에서 나타난 것과 같이 전단 거동이 벽체의 전체적인 이력거동에 크게 영향을 미

치지 않기 때문이다. 낮은 철근콘크리트 벽체의 경우 모델링 방법을 다르게 적용했을 때 각 하중 프로토콜에 따라 최대 변위 및 강도는 크게 다르지 않지만 대각 압축 전단을 고려할 수 있는 General Wall Element 모델과 Shear Wall Element를 이용한 해석모델의 이력거동은 큰 차이를 갖는 것으로 나타났다. 이는 실제 낮은 벽체에서 발생하는 대각 전단 균열에 의한 핀칭 현상을 Shear Wall Element 모델로는 반영할 수 없기 때문이다. 이를 통해 횡강성 및 강도는 유사한 결과를 나타낼 수 있지만 대각 압축 전단에 대한 고려없이 낮은 벽의 정확한 이력거동을 예측하기 어려운 것으로 조사되었다.

2. 주기하중에 대한 고려된 철근콘크리트 벽체의 하중-변위 이력거동을 바탕으로 누적소산에너지를 계산하여 모델링 방법에 따른 벽체의 횡 저항능력을 비교하였다. 본 연구에서 고려된 세장한 벽체는 모델링 방법에 따른 누적소산에너지가 5%이내의 차이를 갖는 것으로 나타났지만 낮은 벽체의 경우 비교적 정확한 이력거동을 예측한 General Wall Element 모델과 수평 전단만을 고려할 수 있는 Shear Wall Element 해석모델은 80% 이상 과소평가 된 것을 볼 수 있다. 이를 통해 낮은 벽체가 적용되는 건축물은 모델링 방법에 따라 횡 저항능력의 예측에 상당히 영향을 줄 것으로 사료된다.
3. 본 연구에서 수행된 비선형 해석결과를 바탕으로 휨 거동이 지배적인 세장한 벽체는 앞에 언급된 거시적 모델 (Shear Wall Element, General Wall Element)과 관계없이 벽체의 성능을 정확하게 묘사할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나, 전단 거동에 의해 지배되는 낮은 벽체는 대각 균열(대각 압축 전단 또는 콘크리트 스트럿)을 반영할 수 있는 모델 (General Wall Element, Milve 등⁽⁷⁾)에 의해 개발된 수정된 MVLEM 그리고 Park 등⁽⁸⁾에 의해 제시된 LDLEM을 적용했을 때 보다 정확한 예측이 가능하다. 따라서, 철근콘크리트 벽체가 횡력에 대하여 주요 저항 부재로 거동하는 건축물의 내진성능을 평가하기 위해서 구조해석을 수행할 때 높이-길이 비에 따라 해당 벽체에 대한 모델링 방법을 다르게 고려하는 것이 합리적인 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2007년 첨단도시개발사업(과제번호 : 07도시재생B04)의 연구비 지원에 의해 수행된 것으로서, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Gulec C.K. and Whittaker, A.S., Performance-Based Assessment and Design of Squat Reinforced Concrete Shear Walls, *Technical Report* No. MCEER-09-0010, MCEER, University at Buffalo, State University of New York, 2009.
2. Kim, T.W., Foutch, D.A., LaFave, J.M., and Wilcoski, J., Performance Assessment of Reinforced Concrete Structural Walls for Seismic Loads, *Structural Research Series* - No. 634, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana Illinois, 2004.
3. Vulcano, A. and Bertero, V.V., Analytical Models for Predicting the Lateral Response of RC Shear Walls: Evaluation of Their Reliability, *Report* No. UCB/EERC-87/19, EERC, University of California, Berkeley, California, 1987.
4. ASCE, Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, ASCE/SEI 41-06, American Society of Civil Engineers, 2007.
5. Kabeyasawa, T., Otani, S. and Aoyama, H., "Nonlinear Earthquake Response Analysis of RC Wall Frame Structure," Transactions, Japan Concrete institute, 1983.
6. Linde, P., "Numerical Modeling and Capacity Design of Earthquake-Resistant Reinforced Concrete Walls," *Report* No. 200, Institute of Structural Engineering, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, Birkhauser, Basel, 1993.
7. Milev, J. "Two-Dimensional Analytical Model of Reinforced Concrete Shear Walls," Proc. 11th of WCEE, Paper No. 320, 1996.
8. Park, H.G. and Eom, T.S., "Truss Model for Nonlinear Analysis of RC Members Subjected to Cyclic Loading," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 133, No. 10, 1351-1363, 2007.
9. Computer and Structures Inc., Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures, Berkeley, CA, 2006.
10. CEN Technical Committee 250/SC8, Eurocode 8: Earthquake Resistant Design of Structures - Part 1: General Rules (ENV 1998 1-1, 1-2 and 1-3), CEN, Brussels, 1995.
11. Thomsen, J.H. and Wallace, J.W., "Displacement-Based Design of Slender Reinforced Concrete Structural Walls - Experimental Verification," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 130, No. 4, 618-630, 2004.
12. Orakcal, K., Massone, L.M., and Wallace, W.J., Analytical Modeling of Reinforced Concrete Walls for Predicting Flexural and Coupled-Shear-Flectural Response, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, 2006.
13. Salonikios, T.N., Kappos, A.J., Tegos, I.A., and Penelis, G.G., "Cyclic Load Behavior of Low-Slenderness Reinforced Concrete Walls: Design Basis and Test Results," *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 4, 649-660, 1999.
14. Salonikios, T.N., Kappos, A.J., Tegos, I.A., and Penelis, G.G., "Cyclic Load Behavior of Low-Slenderness Reinforced Concrete Walls: Design Basis and Test Results," *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 4, 649-660, 1999.

- Concrete Walls: Failure Modes, Strength Analysis, and Design Implications,” ACI Structural Journal, Vol. 97, No. 1, 132-141, 2000.
15. Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park, R., “Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete,” Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 8, 1804-1826, 1988.
16. 대한건축학회, 건축구조설계기준 - KBC 2009, 2009.
17. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318-08, American Concrete Institute, Detroit, Mich., 2008.
18. 임태성, 박홍근, “에너지소산능력에 기초한 철근콘크리트 부재의 이력모델,” 한국지진공학회, 제8권 제5호, 45-54, 2004.
19. 김민숙, 윤소희, 이영학, 김희철, “FRP시트와 비좌굴가새를 적용한 저층 필로티 구조물의 보-기둥 연결부 거동 해석에 관한 연구,” 한국지진공학회, 제13권 제2호, 69-77, 2009.