

# 개구부 설치를 위한 인위적 손상을 입은 전단벽에 관한 비선형 유한요소해석

## A Nonlinear Finite Element Analysis to Study the Behavior on Artificially Damaged R/C Shear Walls with Opening Configuration

한민기<sup>\*</sup> 박완신<sup>\*\*</sup> 김효진<sup>\*\*\*</sup> 최기봉<sup>\*\*\*\*</sup> 최창식<sup>\*\*\*\*\*</sup> 윤현도<sup>\*\*\*\*\*</sup>  
Han, Min Ki Park, Wan Shin Kim, Hyo-Jin Choi, Gi-Bong Choi, Chang Sik Yun, Hyun Do

### ABSTRACT

This paper discussed finite element method(FEM) models of the reinforced concrete rectangular shear walls with opening configuration and analysed under constant axial and monotonic lateral load using ABAQUS. The research comprises constitutive models to represent behavior of the materials that compose a wall on the basis of experimental data, development of techniques that are appropriate for analysis of reinforced concrete structures, verification, and calibration of the global model for reinforced concrete shear walls of increasing complexity. Results from the analyses of these FEM models offers significant insight into the flexural behavior of benchmark data.

### 1. 서론

철근콘크리트 벽체 중 형상비( $h/l$ )가 2 이하인 전단벽은 전단거동이 지배적이며 응력 전달 및 변형 메카니즘이 형상비가 2를 초과하는 휨이 지배적인 벽체와는 다르며, 개구부를 갖는 전단벽의 경우 벽체의 전반적인 거동 및 항복 이후 비탄성 거동에 대한 개구부의 효과에 미치는 영향이 클 것으로 판단된다. 또한 리모델링을 위해 벽체에 부분적인 손상을 주는 경우 철근과 콘크리트 사이의 부착을 위한 최소 정착길이를 확보하기 어려우므로 손상 단면의 강도 및 강성이 현저히 저하할 것으로 판단되며 이를 고려한 해석기법의 구축이 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 범용 비선형 유한요소 해석프로그램인 ABAQUS 6.3<sup>1)</sup>을 이용하여 이러한 개구부를 위해 인위적 손상을 입은 전단벽의 거동 및 내력평가에 대한 유한요소 해석기법을 적용하고 이를 실험 자료를 통해 검증함으로써 이러한 부재의 해석기법을 구축하는데 기초 자료를 제시하는 한편, 실험 결과 값과 비교·분석하여 검토함으로써 제안된 해석기법의 타당성을 검증하고자 한다.

\* 정회원, 충남대학교 대학원, 석사과정

\*\* 정회원, 충남대학교 대학원, 박사과정

\*\*\* 정회원, (주) 동양구조 대표이사, 건축구조기술사

\*\*\*\* 정회원, 경원대학교 건축공학과 교수, 공학박사

\*\*\*\*\* 정회원, 대전대학교 건축공학과 교수, 공학박사

\*\*\*\*\* 정회원, 충남대학교 건축학부 교수, 공학박사

본 연구는 2003년 건설핵심연구개발사업 연구비 지원(과제번호는 A07-09)에 의한 연구의 일부임.

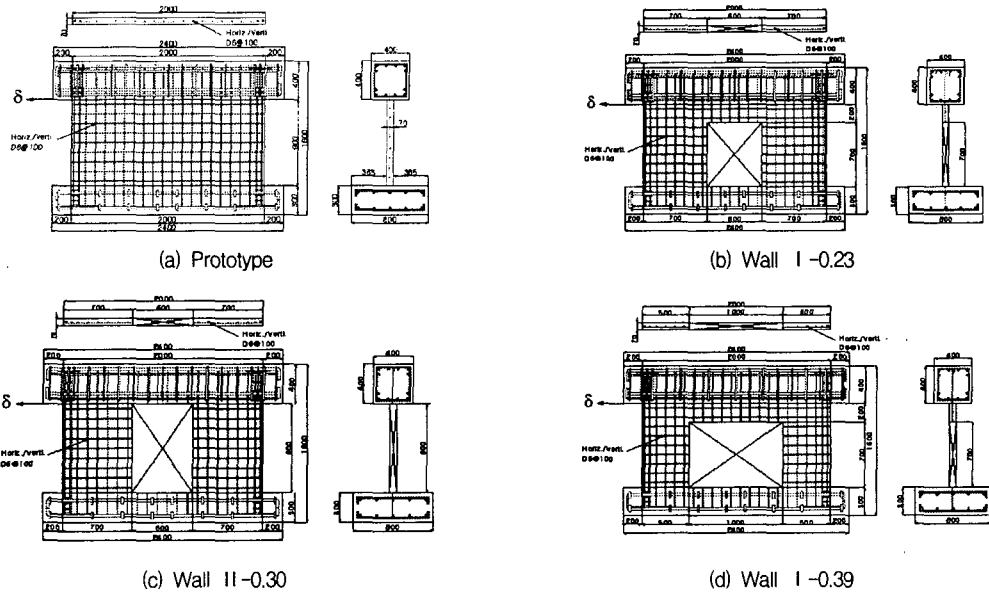


그림 1. 단면 형상과 배근 상황 및 변형계 설치 위치

## 2. 선정 시험체

### 2.1. 개요

본 연구에서는 개구부를 위해 인위적인 손상을 입은 철근콘크리트 전단벽의 전단거동에 대한 해석 기법을 구축하기 위해 기존의 실험된 시험체를 선정하였다. 선정된 시험체는 직방형 단면의 단조제하된 형상비가 0.45인 전단이 지배적인 벽체로써 개구부의 크기에 따라 선정하였다. 그림 1은 단면 형상과 배근 상황 및 변형계 설치 위치이고 선정대상 시험체 일람표는 표 1이다.

### 2.2. 이상화

철근콘크리트 벽체 중 콘크리트는 2차원 셸 요소를 사용하여 모델링하였고, 요소는 4절점의 평면응력 요소(CPS4R)를 선택하였다. 철근은 콘크리트 요소와 분리시켜 트러스 요소로서 모델링하고 부착-슬립을 고려하기 위하여 연결 요소(Connector element)를 사용하였다. 지점은 회전단으로 가정하였으며, 하중 가력은 최대강도 이후의 변위를 표시하기 위해 변위제어를 택하였다.

## 3. 재료 모델

### 3.1 콘크리트의 1축 응력-변형률 관계

콘크리트의 최대 강도 이후의 거동을 표현할 수 있는 "Concrete damaged plasticity" 모델을 이용하였다. 이 모델에서는 압축과 인장에 대한 "Concrete compression hardening", "Concrete compression damage", "Concrete tension stiffening", "Concrete tension damage"를 고려하고 있다. 여기서 식 (1)은 Concrete compression hardening으로 압축시 탄성구간 이후의 응력 변화를 나타내고, 식 (2)는 Concrete tension stiffening으로 인장시 탄성구간 이후의 응력 변화를 나타내는데 이때, "Concrete

표 1. 시험체 일람표

| 시험체          | 콘크리트<br>압축강도<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 축하중<br>(kN) | 횡하중<br>(kN) | 벽두께<br>(mm) | 개구부<br>면적비 | 벽체                                |              |              |
|--------------|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|-----------------------------------|--------------|--------------|
|              |                                      |             |             |             |            | $l_w \times h_w \times t$<br>(mm) | 수평철근<br>(mm) | 수직철근<br>(mm) |
| Prototype    | 21.23                                | 323.62      | 737.80      | 70          | 0.00       | 2,000 × 900 × 700                 | D6@100       | D6@100       |
| Wall I-0.23  | 21.23                                | 323.62      | 433.82      | 70          | 0.23       | 2,000 × 900 × 700                 | D6@100       | D6@100       |
| Wall II-0.30 | 21.23                                | 323.62      | 368.83      | 70          | 0.30       | 2,000 × 900 × 700                 | D6@100       | D6@100       |
| Wall I-0.39  | 21.23                                | 323.62      | 211.59      | 70          | 0.39       | 2,000 × 900 × 700                 | D6@100       | D6@100       |

compression damage"는 압축시의 소성구간을, "Concrete tension damage"는 인장시의 소성구간에 대하여 0~1의 값으로 응력-변형률 곡선의 기울기를 가정하였다.

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\epsilon_c - \epsilon_c^p) \quad (1)$$

$$d_c = d_c(\epsilon_c^p, \theta, f_i); 0 \leq d_c \leq 1$$

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0 (\epsilon_t - \epsilon_t^p) \quad (2)$$

$$d_t = d_t(\epsilon_t^p, \theta, f_i); 0 \leq d_t \leq 1$$

여기서  $E_0$ 는 재료의 초기 탄성계수,  $d_c$ 는 압축시 손상 변수,  $d_t$ 는 인장시 손상 변수,  $\epsilon_c^p$ 는 압축 등가 소성 변형률,  $\epsilon_t^p$ 는 인장 등가 소성 변형률이다.

### 3.2 철근과 콘크리트의 부착 모델

철근 콘크리트 구조물의 부착 응력은 균열 발생 우의 콘크리트와 철근의 응력 재분배 현상에 의한 것으로 특정 재료의 특성이라고 정의하기 어려우므로 여러 가지 경우의 통계적인 평균 곡선으로 이상화될 수 있다. 본 연구에서는 CEB-FIP model code 1990<sup>2)</sup>(이하 CEB)에서 채택하고 있는 재료 구성 모델을 사용하였으며, 식 (3)과 같다.

$$\tau = \tau_{max} (s/s_1)^a \quad (3)$$

여기서  $\tau$ 는 부착응력,  $s$ 는 슬립량,  $\tau_{max}$ 는 최대 부착응력,  $s_1$ 은 최대 부착응력에서의 슬립량이다.

### 3.3 철근 정착을 위한 매립길이

철근콘크리트 부재 각 단면의 철근에 작용하는 인장력 또는 압축력이 단면의 양측에서 발휘될 수 있도록 묻힘길이, 갈고리, 기계적 정착 또는 이들의 조합에 의하여 철근을 정착하여야 하는데, 본 연구에서는 콘크리트구조설계기준 8.2<sup>3)</sup>에 명시되어 있는 인장 이형철근 및 이형철선의 정착식을 사용하였으며, 식 (4)와 같다.

$$l_{db} = \frac{0.6 d_b f_y}{\sqrt{f_{ck}}} \quad (4)$$

여기서  $l_{db}$ 는 정착길이,  $d_b$ 는 철근의 지름이며, D19 이하의 보통 콘크리트의 경우 0.8을 곱한다.

## 4. 해석결과와 실험결과와의 비교·분석

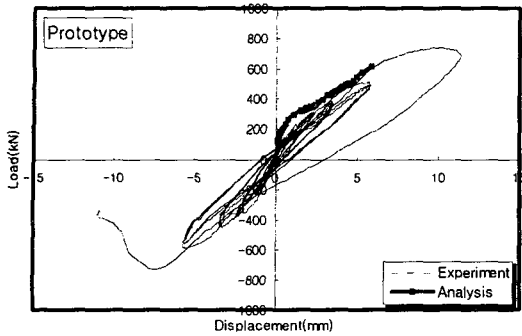
표 2는 유한요소해석에 의한 극한내력, 최대변위, 초기강성 및 에너지 소산능력에 대한 해석결과를 나타낸 것이다. 표에서 나타난 바와 같이 벽체에 손상이 없는 prototype의 경우 극한내력, 최대변위, 초기강성, 에너지소산능력은 각각 620.00kN, 5.88mm, 215.49kN/mm, 2,433.32kN·mm로 극한내력 19.00%, 최대변위 92.86%, 초기강성 24.99%, 에너지소산능력 95.46%의 오차를 보였다.

개구부를 위해 벽체에 인위적인 손상을 가한 wall I -0.23, wall II -0.30, wall III -0.39의 경우 극한내력, 최대변위, 초기강성, 에너지소산능력은 각각 213.40~359.07kN, 6.91~8.88mm, 156.41~158.94kN/mm, 1,291.13~2,535.47kN·mm로 극한내력 0.85~20.82%, 최대변위 28.60~60.49%, 초기강성 3.71~28.85%, 에너지소산능력 25.09~56.77%의 오차를 보였다.

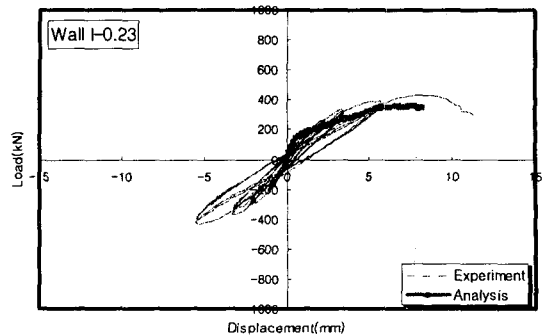
그림 2는 해석결과와 실험결과와의 하중-변위 곡선을 비교하였으며, 가는 실선은 실험값이고 굵은 점

표 2. 시험체별 해석결과

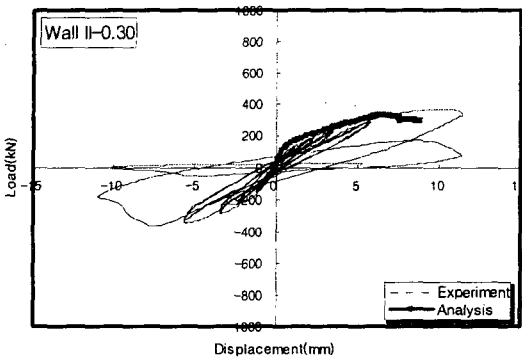
| 결과<br>시험체     | 극한내력        |             |           | 최대변위        |             |           | 초기강성           |                |           | 에너지소산능력        |                |           |
|---------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|-----------|----------------|----------------|-----------|----------------|----------------|-----------|
|               | 실험값<br>(kN) | 해석값<br>(kN) | 오차<br>(%) | 실험값<br>(mm) | 해석값<br>(mm) | 오차<br>(%) | 실험값<br>(kN/mm) | 해석값<br>(kN/mm) | 오차<br>(%) | 실험값<br>(kN·mm) | 해석값<br>(kN·mm) | 오차<br>(%) |
| Prototype     | 737.80      | 620.00      | 19.00     | 11.34       | 5.88        | 92.86     | 161.64         | 215.49         | 24.99     | 4,756.08       | 2,433.32       | 95.46     |
| Wall I -0.23  | 433.82      | 359.07      | 20.82     | 11.17       | 8.24        | 35.56     | 153.03         | 158.92         | 3.71      | 3,945.08       | 2,516.52       | 56.77     |
| Wall II -0.30 | 368.83      | 337.87      | 9.16      | 11.42       | 8.88        | 28.60     | 124.75         | 156.41         | 20.24     | 3,171.72       | 2,535.47       | 25.09     |
| Wall I -0.39  | 211.59      | 213.40      | 0.85      | 11.09       | 6.91        | 60.49     | 113.08         | 158.94         | 28.85     | 1,757.80       | 1,291.13       | 36.14     |



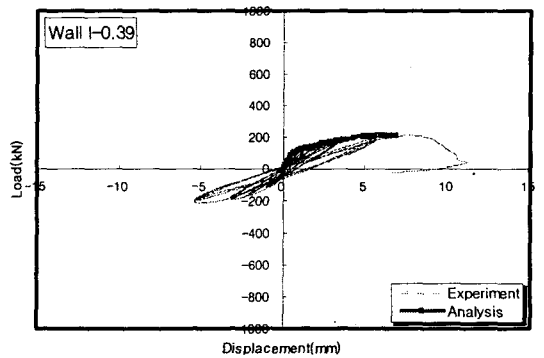
(a) Prototype



(b) Wall I-0.23



(c) Wall II-0.30



(d) Wall I-0.39

그림 2. 해석결과와 실험결과와의 비교

선은 해석값을 나타낸 것으로 거의 정확히 예측함을 알 수 있다.

이상의 실험결과에 대한 해석결과의 분석을 통하여 본 연구에서 제시된 개구부를 위해 인위적 손상을 입은 전단벽의 유한요소 해석 모델은 일정 축력과 횡력을 동시에 받는 경우 부재의 거동을 예측하는데 있어 유의성이 있는 것으로 분석되었다.

## 5. 결론

본 연구는 개구부를 위해 인위적 손상을 입은 전단벽의 거동에 관한 비선형 유한요소해석을 하기 위한 연구로 다음과 같은 결론 및 향후 연구방향을 얻었다.

- 1) 본 연구에서는 콘크리트의 경우 “Concrete damaged plasticity” 모델을 이용하였고, 철근은 트러스 요소로서 모델링하고 부착-슬립을 고려하기 위하여 연결 요소(Connector element)를 사용하였으며, 철근과 콘크리트의 부착-슬립 모델은 CEB-FIP model code 1990을 사용하여 실제 거동을 보다 근접하게 예측할 수 있었다.
- 2) 철근의 정착 길이 확보를 위해 콘크리트설계기준 8.2를 사용하여 실험결과를 효과적으로 묘사할 수 있었다.
- 3) 해석결과 극한내력 0.85~20.82%, 최대변위 28.60~92.86%, 초기강성 3.71~28.85%, 에너지소산능력 25.09~95.46%의 오차를 보여 비교적 정확한 부재의 거동을 예측할 수 있었다.
- 4) 향후 반복하중을 받는 벽체, 개구부의 위치 및 2개 이상의 개구부를 갖는 벽체에 대한 해석 연구도 필요하다고 판단된다.

## 참고문헌

1. ABAQUS Theory Manual, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.
2. CEB-FIP model code 1990, design code.(1993), Thomas Telford, Lausanne, Switzerland.
3. 건설교통부 제정 콘크리트구조설계기준(2003), 한국콘크리트학회