

2024년 춘계학술발표대회 : 일반부문

## 개구부 면적 및 형상과 위치에 따른 등가 압축 대각 스트럿 모델에 대한 연구

### A Study on the Behavior of RC Frames and Comparisons of Equivalent Diagonal Struts by Openign Area, Shape and Locaiton

○정 지 윤  
Jung, Ji-Yoon

#### Abstract

In this study, the Area (50%, 35%, 25%), Shape (2:1, 3:2, 1:1) and Location (Center, Force side, Force opposite side) of the Opening were set as variables, and FEM and PUSHOVER analysis were conducted using the ETABS program to analyze the behavior of RC frames according to changes in the opening. As a result of PUSHOVER analysis, both research models showed quite advantageous behavior due to increased bottom shear force and decreased displacement compared to Bare Frame. It is judged that the presence of the masonry wall has improved the behavioral ability of the frame. As a result of wall FEM analysis, the stress distribution was relatively even in the order of the research model by Shape - Area - Location. It is judged that this is the result of the change in the Partial Masonry Infill walll and Side wall.

키워드 : 개구부, 조적 채움벽, 등가압축대각스트럿, 유한요소해석, 비선형정적해석

Keywords : Opening, Masonry Infill Wall, Equivalent Diagonal Strut, Finte Element Method (FEM), Pushover Analysis

#### 1. 서론

##### 1.1 연구의 목적

현재 우리나라 대부분의 건축물은 내진 설계를 필수로 한다. 일반적인 건축물의 내진 설계 시에는 보·기둥·내력벽과 같은 주요 구조 요소만을 고려하며, 주로 조적 채움벽은 비구조적 요소로 분류되어 해석에 반영되지 않는다. 즉, 신축 구조 설계에 있어 조적 채움벽의 영향은 미미하다고 간주되어 바닥 하중으로 치환하여 작용시키거나 조적 채움벽의 영향을 무시한 채 설계를 진행한다.

그러나 2008년 쓰촨성 대지진, 2010년 아이티 대지진 및 2017년 포항 지진에 따른 피해를 조사한 결과, 조적 채움벽을 가지고 있는 주택 및 학교가 가장 큰 피해를 입은 건축물이었음이 드러났다. 이외에도 국민안전처의 실험 결과, 국내에 규모 6.0의 지진이 날 경우 조적 벽체를 가지고 있는 건축물이 철근콘크리트 건축물보다 붕괴될 위험이 약 3배 더 높다는 결과가 나타나기도 하였다. 이처럼 조적 채움벽은 인접한 골조와 상호작용하여 다양한 파괴 형상을 나타낼 수 있기에 존재만으로도 구조물의 거동에 상당히 큰 영향을 미친다고 할 수 있다.

이에 따라 국내대부분의 연구에서는 MIDAS Gen 프로그램을 사용하여 조적 채움벽을 등가 압축 대각 스트럿으로 치환한다. 그러나 이러한 치환법에서는 개구부 또는 출입

구를 고려하기에는 어려움이 존재한다는 한계점이 있다. 따라서 본 연구는 개구부의 면적, 형상 및 위치를 변수로 설정하고 ETABS 프로그램을 활용한 유한요소해석 및 PUSHOVER 해석을 진행한다. 이후, 조적 벽체가 존재하는 철근콘크리트 프레임의 거동을 분석하고, 현재까지 제시된 등가 압축 대각 스트럿의 제안식 중 5가지의 식을 대조하여 연구 모델과 가장 적합한 등가 압축 대각 스트럿의 제안식을 찾는다.

##### 1.2 연구의 방법 및 절차

본 연구에서는 조적 채움벽이 존재하는 철근콘크리트 프레임을 기본 모델로 선정하고, 개구부의 면적비(50%, 35%, 25%), 형상비(2:1, 3:2, 1:1, 가로:세로의 비 기준), 위치(가력측, 중앙, 가력 반대측)에 따라 연구 모델을 구분한다. 모델링 기준은 국토교통부에서 발간한 『기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령 (KIESTEC 2021)』을 기초로 하며, 조적 채움벽을 보다 정확하게 해석할 수 있는 ETABS를 사용하여 조적 채움벽을 유한요소로 모델링한다. 이후, 비선형정적해석(PUSHOVER 해석)을 진행하여 변수에 따른 각 모델링의 거동을 평가한다.

#### 2. 이론적 고찰

##### 2.1 등가 압축 대각 스트럿 모델

내진성능평가 단계에서 조적 채움벽을 모델링하는 방법은 크게 거시적(Macro) 모델링과 미시적(Micro) 모델링의

이 연구는 2021학년도 경북대학교 국립대학육성사업 지원에 의한 결과의 일부임.

2가지로 나눌 수 있다. 거시적 모델링은 조적 채움벽을 등가 압축 대각 스트럿으로 치환하며, 미시적 모델링은 조적 채움벽을 분할하여 유한요소로 해석한다. 미시적 모델링이 거시적 모델링에 비해 비교적 정확한 결과를 도출해낼 수 있지만, 계산 과정이 다소 복잡하여 해석 과정에서 시간이 많이 소요되기에 단일 프레임이 아닌 실제 구조물에 미시적 모델링을 적용하기는 불가하다. 따라서 주로 실제 구조물의 해석 과정에서는 조적 채움벽을 등가 스트럿으로 치환하여 반영한다.

## 2.2 등가 압축 대각 스트럿 모델의 제안 식

조적 채움벽을 등가 스트럿으로 치환하는 연구는 Holmes, Paulay&Priesty 또는 Kappos 등의 학자들에 의해 진행되어져왔다. 이들은 주로 조적 채움벽 자체 형태에 기반하여 등가 스트럿의 넓이에 관한 식들을 제안하였다. 이러한 식들은 등가 스트럿의 강성 및 강도를 고려하지 않고, 등가 스트럿의 폭에만 집중한 결과이기에 채움벽 하나만의 거동을 예측할 때는 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 조적 채움벽은 프레임과 맞닿아 있기 때문에 프레임과의 상호작용을 고려하는 것은 필수적이며, 상호작용에 따라 여러 파괴 형상이 나타나기 때문에 사실상 조적 채움벽 하나만의 거동을 예측하는 것은 불가하다. 이에 Stafford Smith & Carter, Mainstone, Liauw & Kwan, FEMA 356 등은 채움벽과 프레임의 강성 및 강도를 모두 고려한 모델을 제안하였다. 이와 관련된 등가 압축 대각 스트럿 모델의 폭에 관한 제안식은 다음과 같다.

- Holmes의 제안식 (1961)

$$W = \frac{1}{3}D \quad (1)$$

- Paulay & Priestly의 제안식 (1992)

$$W = 0.25D \quad (2)$$

- Mainstone의 제안식 (1971)

$$W = 0.16d_{\infty} (\lambda_h H_{inf})^{-0.3} \quad (3)$$

- Liauw & Kwan의 제안식 (1984)

$$W = \frac{0.958 H_{inf} \cos \theta}{\sqrt{\lambda_h H_{inf}}} \quad (4)$$

- FEMA 356에서의 제안식 (2009)

$$W = 0.175 (\lambda_h H_{inf})^{-0.4} d_{inf} \quad (5)$$

$$\lambda_h = \left[ \frac{E_{inf} t_{inf} \sin 2\theta}{4 E_c I_c H_{inf}} \right]^{0.25} \quad (6)$$

여기서,  $D$ ,  $d_{inf}$  : 조적 채움벽의 대각선 길이

$E_{inf}$  : 조적 채움벽 재료의 탄성계수

$E_c$  : 프레임 재료의 탄성계수

$I_c$  : 기둥의 단면 2차 모멘트

$H$  : 조적 채움벽과 맞닿아 있는 기둥의 높이

$L_{inf}$  : 조적 채움벽의 순너비

$H_{inf}$  : 조적 채움벽의 순높이

$t_{inf}$  : 조적 채움벽의 두께

$$\theta : \tan^{-1} \left( \frac{H_{inf}}{L_{inf}} \right)$$

『기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령 (KISTEC 2021)』에서 제시하고 있는 식은 다음과 같다.

$$W = 0.175 (\lambda_h H_{inf})^{-0.4} d_{inf} \quad (7)$$

이를 참조하였을 때, 현재 우리나라에서 조적 채움벽을 등가 압축 대각 스트럿으로 치환할 때의 유효폭은 FEMA 356에서 제안한 식을 차용하였음을 알 수 있다.

## 3. 3D Modeling 개요

### 3.1 연구 모델 재료 상세

본 연구에서는 『기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령』에 근거하여 대상 모델의 콘크리트 압축강도  $f_{ck}$ 는 21MPa로 산정하였으며, 조적 채움벽 재료의 압축강도  $f_m$ 는 2.1MPa로 산정하였다. 이의 탄성계수  $E_m$  및 전단탄성계수  $G_m$ 은 다음의 식에 따라 산정한다.

$$E_m = 200f_m \quad (8)$$

$$G_m = 0.4E_m \quad (9)$$

### 3.2 연구 모델 부재 상세

연구 대상 프레임에 사용된 기둥 및 보 부재에 대한 정보는 다음 Table 1과 같다.

Table 1. Details of Column & Beam Section

	Column	Beam
Size (mm)	350×500	300×450
Main Reinf.	8-D16	6-D13
Hoop Reinf.	D10@300	D10@300

### 3.3 연구 모델 하중 상세

연구 모델에 적용하는 고정하중 및 기본등분포활하중은 『KDS 41 12 00 (건축구조기준 설계하중) : 2022』을 참조하였으며, 해당 모델은 일반 사무실로 가정하여 하중을 적용하였으며, 지진 하중은 『KDS 41 17 00 (건축물 내진설계기준) : 2022』에 따라 지반을  $S_4$ 로 설정하였다. 이외 자세한 지진 하중에 관한 내용은 다음 Table 2 및 Table 3과 같다.

Table 2. Details of Seismic Load

$Z$	$S$	$F_a$	$F_v$	$S_{DS}$	$S_{DI}$
I	0.22g	1.360	1.568	0.4987	0.2300

Table 3. Seismic Performance Factors

Seismic Force-Resisting System	$R$	$\Omega_o$	$C_d$
Ordinary Reinforced Concrete Moment Frame	3.0	3.0	2.5

### 3.4 최종 3D Modeling 상세

본 연구에서는 개구부의 면적비, 형상비, 위치에 따라 연구 모델을 구분하였다. Table 6은 연구 모델의 최종 3D Modeling 모형을 나타낸 것이다.

## 4. 결과 분석

### 4.1 PUSHOVER 해석 결과

Table 7은 연구 모델 별 성능점에서의 PUSHOVER 해석 결과 상세를 나타내었다.

### 4.2 벽체 유한요소해석 결과

유한요소해석 결과에 따른 벽체의 응력 분포는 Table 7과 같다.

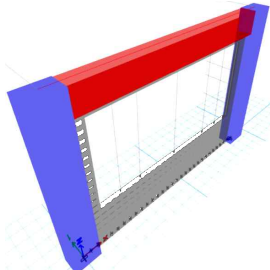
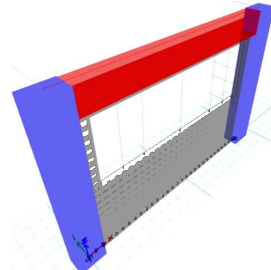
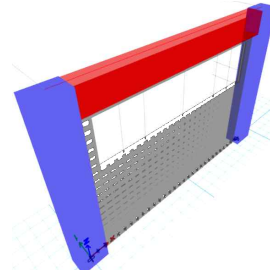
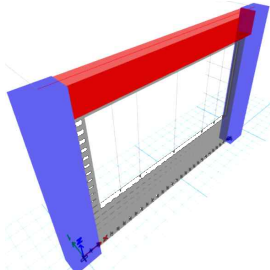
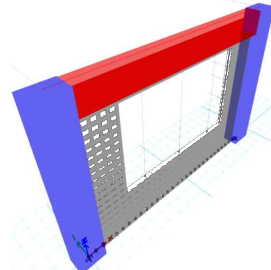
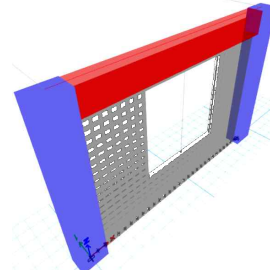
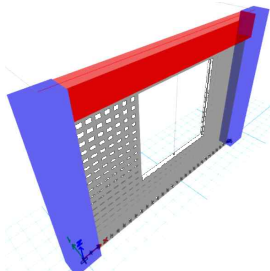
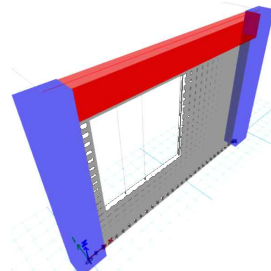
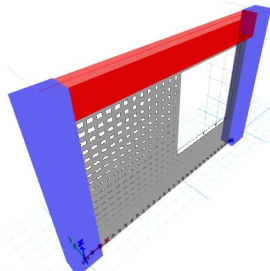
Table 7. Results of PUSHOVER Analysis at Performance Point by Research Case

	Base Shear (kN)	Displacement (mm)	$T_{eff}$ (sec)	$B_{eff}$ (%)
Bare Frame	111.663	12.724	0.077	0.0547
Case 1-1	136.847	11.354	0.094	0.0779
Case 1-2	138.746	10.942	0.095	0.0781
Case 1-3	142.787	10.651	0.097	0.0783
Case 2-1	136.847	11.354	0.094	0.0779
Case 2-2	142.969	10.677	0.096	0.0814
Case 2-3	150.129	10.362	0.098	0.0837
Case 3-1	150.129	10.362	0.098	0.0837
Case 3-2	152.162	10.054	0.100	0.0882
Case 3-3	151.720	10.186	0.099	0.0852

## 5. 결론

본 연구에서는 ETABS 프로그램을 활용하여 조적 채움벽이 존재하는 철근콘크리트 프레임의 유한요소해석 및 PUSHOVER 해석을 진행하여 이에 따른 거동을 분석하였다. 이후, 이를 기반으로 과거 Holes, Paulay&Priesty, Mainstone, Liauw&Kwan 및 FEMA 356에 의하여 제안된

Table 6. 3D Modeling of Reserch Models

Opening Area Ratio	 Case 1-1 : 50%	 Case 1-2 : 35%	 Case 1-3 : 25%
Opening Shape Ratio (Width: Height)	 Case 2-1 : 2:1	 Case 2-2 : 3:2	 Case 2-3 : 1:1
Opening Location	 Case 3-1 : Central	 Case 3-2 : Force Side	 Case 3-3 : Force Opposite Side

등가 압축 대각 스트럿의 식을 비교하였다. 해당 연구를 통하여 얻은 결과 및 결론은 다음과 같다.

[1] PUSHOVER 해석 결과를 Bare Frame과 비교하였을 때, 개구부의 면적비(50%, 35%, 25%)에 따른 연구 모델은 개구부가 차지하는 면적이 감소함에 따라 밀면 전단력은 약 22.55% ~ 27.87% 증가하며 변위는 10.77% ~ 16.29% 감소하였다. 개구부 형상비(2:1, 3:2, 1:1)에 따른 연구 모델은 개구부의 형상비가 정방향으로 변화함에 따라 밀면 전단력은 약 22.55% ~ 34.45% 증가하고 변위는 약 10.77% ~ 18.56% 감소하는 결과를 나타내었다. 개구부의 위치(중앙측, 가력측, 가력 반대측)에 따른 연구 모델의 분석 결과, 밀면 전단력은 약 34.45% ~ 36.27% 증가하고 변위는 약 18.56% ~ 20.98% 감소하였다. 이를 바탕으로 지진은 횡력에 해당하기에 개구부 상·하단부 조적 허리벽의 넓이 변화에 비하여 개구부 양측 개구부 양측 조적 날개벽의 넓이 변화가 구조물의 거동 능력 및 지진 저항 능력에 더 큰 영향을 미친다는 결과를 도출하였다.

[2] 벽체 유한요소해석 결과, 개구부 형상비 - 개구부 면적비 - 개구부 위치 별 연구 모델의 순서로 비교적으로 고른 응력 분포를 보였다. 개구부 면적비에 따른 연구 모델은 개구부 하단 조적 허리벽의 높이가 높아질수록 뚜렷한 응력 변화가 나타났다. 개구부 형상비에 따른 연구 모델은 다른 연구 모델에 비하여 상대적으로 균등하게 응력이 분포하였는데, 이는 저항 기구가 개구부를 기준으로 상하 및 좌우로 균등히 분포하고 있기 때문이라고 판단된다. 또한 개구부 위치에 따른 연구 모델에서는 응력 분포에

다소 편차가 존재하였다. 이는 개구부의 변화에 따라 조적 허리벽 및 날개벽이 변화하여 도출된 결과라고 판단된다.

REFERENCES

1. Korea Infrastructue Safety and Technology Corporation (KIESTEC 2021). (2021). Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM)
2. Holmes. (1961). Steel Frames With Brickwork and Concrete Infilling, Proceedings of the Institution of Civil Engineers 19(4), 473-478
3. Thomas Paulay, M. J. M. Priestley. (1992). Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings.
4. R. J. Mainstone. (1971). On the stiffnesses and strengths of infilled frames, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, London.
5. Te-Chang Liaw, Kwok-Hung Kwan. (1984). Nonlinear behaviour of non-integral infilled frames, Computers& Structures 18(3), 551-560
6. FEMA 356. (2009). Seismic Rehabilitation Pre-standard.
7. Building Design Load and Commentary (KDS 41 12 00 : 2022). (2022). Architectural Institute of Korea.
8. Seismic Building Design Code and Commentary (KDS 41 17 00 : 2022). (2022). Architectural Institute of Korea.

Table 8. Wall Stress Diagram of Reserch Models

