

## 조적벽의 전단강도를 고려한 철근콘크리트골조의 비탄성 거동

윤태호<sup>1</sup>, 강경수<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>창원대학교 건축공학과, <sup>2</sup>동명대학교 건축공학과

### Inelastic Behavior of Reinforced Concrete Frame Structure with Shear Strength of Masonry Wall

Tae-Ho Yoon<sup>1</sup> and Kyung-Soo Kang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Architectural Engineering, Changwon University

<sup>2</sup>Department of Architectural Engineering, Dongmyung University

**요약** 본 연구는 조적 끼움벽을 고려하지 않은 기존 학교건물의 비탄성 거동과 조적 끼움벽을 고려한 기존 학교 건물의 거동특성을 비교 검토하였다. 해석 결과와 실험 결과를 비교했을 때 하중-변위 곡선과 소성힌지 분포상태에서 유사함을 확인할 수 있었다. 따라서 조적 끼움벽을 고려한 비선형 정적해석의 유효성을 검증하였다.

골조내부가 전부 조적벽으로 채워진 경우 조적벽체의 영향에 의하여 초기 강성과 강도가 증가하고 항복 전까지는 근사한 거동을 보여주며 항복이후에는 변형이 커질수록 오차가 증가하며, 골조높이의 2/3 높이가 조적벽으로 채워진 경우 초기 강성과 항복강도가 단순골조에 비하여 약간 크게 나타나고 있으며, 조적벽체의 균열이 발생한 이후에는 급격히 강도가 저하되고 있다. 골조높이의 1/3 높이가 조적벽으로 채워진 경우 초기 강성과 항복강도가 단순골조와 비슷하며 항복점은 오히려 단순 골조의 항복점보다 저하되나, 최대강도는 단순 골조와 유사하다. Pushover 해석에 의한 하중-변위 관계곡선과 실제 실험에 의한 하중-변위 관계곡선을 비교해 보면 항복 전까지는 근사한 거동을 보여주며 항복이후에는 변형이 커질수록 오차가 증가하나 실제 구조물에서는 변형의 한계가 존재하므로 해석모델로서 유용하게 사용할 수 있다.

**Abstract** In this study the inelastic behavior of the existing school buildings with infilled masonry walls is analysed by pushover method. The shear stiffness and strength of masonry wall is calculated from the prior experiments and verified by inelastic analysis.

The height of infilled masonry wall affects the structural behavior. The higher the masonry wall height, the higher the initial shear stiffness and strength of masonry wall. As the cracks are developed, the strength of masonry wall is much decreased. The proposed inelastic analysis method shows similar results with the experiments and can be used as inelastic analysis model of reinforced concrete buildings with infilled masonry walls.

**Key Words** : Infilled masonry wall, Pushover method, Inelastic behavior, Standard school building

#### 1. 서론

우리나라의 내진설계기준은 1988년을 시작으로 시행되었으며 현행 건축구조설계기준인 KBC 2009[1]에서 내진설계의 적용대상 건축물의 범위가 확대되고 있다. 따라

서 기존의 내진설계가 이뤄지지 않은 대다수 건축물에 대해서는 지진발생시 예상되는 피해정도에 대한 이론 및 실험적 연구가 필요하다. 특히 지진발생시 피난 구조물로서 중요한 학교건물은 3층 내지 4층이 대부분으로 KBC 2005에 의해 내진설계의 적용대상에 포함되었다. 그러므

\*교신저자 : 강경수(koosin@tu.ac.kr)

접수일 11년 06월 03일

수정일 11년 08월 17일

게재확정일 11년 09월 08일

로 2005년 이전에 설계 및 시공된 학교건물은 내진설계가 이루어지지 않았으며[2], 기존 학교건물이 지진피해 후 대피 또는 피난구조물로서의 기능을 확보할 수 있는가에 대한 내진성능평가는 매우 중요한 부분이지만 내진규준에서조차 간과되고 있는 것이 사실이다. 특히 학교건물의 내진성능평가 시 조적 끼움벽체는 비구조적 요소이지만 실질적으로 구조물의 거동에 있어서 중요한 영향을 미친다는 것은 이전의 외국 사례를 살펴보면 알 수 있다[3]. 그러나 국내 내진설계기준에서는 이 조적 끼움벽체에 의한 영향은 고려되지 않고 있는데 이는 내진성능평가에 의한 정확한 보수보강을 저해할 수 있는 부분이다.

따라서, 본 연구에서는 조적끼움벽을 포함한 철근콘크리트골조의 비탄성해석법[4]을 제안하고 이를 실험결과와 비교하여 검증하고자 한다. 비탄성해석은 내진성능평가방법으로 널리 쓰이는 능력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method, CSM)에 이용되는 비선형정적해석인 Pushover 해석을 사용하고 조적 끼움벽을 고려한 비선형정적해석 시 실제 거동과 가장 유사한 거동을 보이는 조적 끼움벽의 전단강도를 사용하여 조적 끼움벽체의 높이에 따른 비탄성 거동을 비교·검토하고자 한다.

## 2. 조적끼움벽 모델

### 2.1 조적끼움벽 모델

조적끼움벽 모델의 유효성을 평가하기 위하여 신중학[5] 등의 연구자에 의해 기준에 이루어진 실제 실험과 동일 조건에서 Pushover 해석을 이용하여 그 결과와 비교·분석하였다.

실험방법은 다음과 같다.

- (1) 시험체는 실물대의 약 1/3 정도로 그림 2와 같이 제작하였다. 시험체 제작 순서는 기둥에서 높이의 2/3까지 콘크리트를 타설하고 일정기간 동안 양생한 후 벽돌을 쌓고 나머지 부분의 기둥 및 보를 콘크리트 타설 하였다. 그리고 사용 재료의 물성치는 표 1과 같다.
- (2) 가력방법은 그림 2와 같이 주각의 고정도를 확보하기 위하여 스트롱-프레임(strong-frame)에 시험체를 볼트로 고정시키고 기둥좌굴의 영향이 미치지 않는 허용하중의 범위 내인 수직하중(19.2/2 tonf)을 지속적 작용시킨 다음 수평하중을 약 30초 간격으로 1.0 tonf 씩 증가시키면서 정적하중을 작

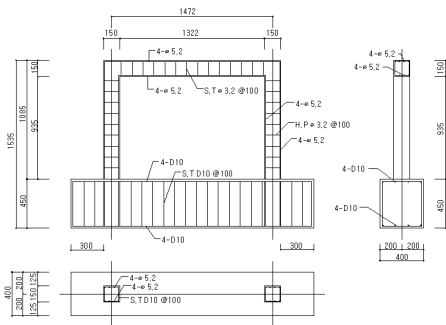
용시켰다.

### (3) 측정방법

- ① 하중의 측정은 오일-잭(30ton, 50ton), 로드셀(20ton, 50ton)로 가력측정 하였다.
- ② 변형의 측정은 그림 1과 같이 프레임의 대각선 방향, 주두, 기둥 중간부분에 압축 및 인장의 주된 방향으로 예측되는 위치에 변형률표시기에 연결하여 자동측정 하였다.

[표 1] 재료의 기계적 특성  
[Table 1] Properties of materials

철 선	항복강도 $\sigma_y$ (MPa)	인장강도 $\sigma_y$ (MPa)	탄성계수 $E_c$ (MPa)	연신률 $\epsilon_{max}$ (%)
$\phi 5.2$	0.24	0.33	1.43e+5	16.4
$\phi 3.2$	0.28	0.38	1.86e+5	36.8
콘크리트 (1:2:4)	압축강도( $F_c$ =MPa) 15.69		탄성계수( $E_c$ =MPa) 1.86e+5	
시멘트 벽돌(1:7)	압축강도 ( $F_c$ =MPa) 8.13	탄성계수 ( $E_c$ =MPa) 1.17e+5	포와송 비 ( $\nu$ ) 0.142	
사춤 몰탈 (1:3)	압축강도 ( $F_c$ =MPa) 14.51	탄성계수 ( $E_c$ =MPa) 1.46×105	포와송 비 ( $\nu$ ) 0.193	



[그림 1] 실험장치 구성  
[Fig. 1] Experiment setup

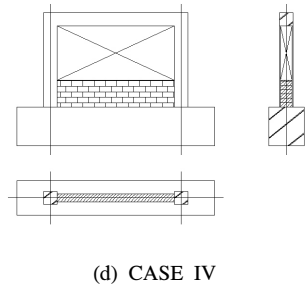
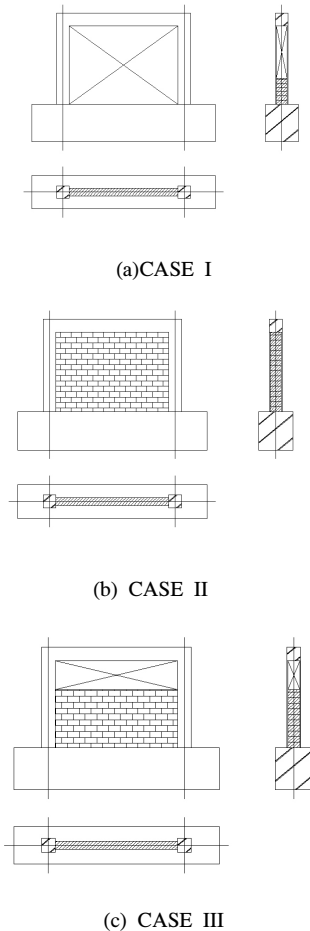
### 2.2 대상구조물의 비선형 해석모델

해석 프로그램은 MIDAS-GEN을 사용하였으며, Load Control 방식으로 하중을 증가하여 Pushover 해석을 수행하였다. 조적 끼움벽의 모델링은 wall 요소를 사용하였고 Hinge Type은 Shear-y,z 를 사용하여 조적 끼움벽은 전단력에만 저항할 수 있도록 하였다. 기둥의 경우 Hinge Type은 P-My-Mz 를 사용하였으며, 보의 경우 Hinge Type은 My-Mz 를 사용하였다. 조적 끼움벽의 이력곡선은 Bilinear을 사용하였고 전단강도는 실제 거동과 가장

유사한 거동을 보인  $0.21N/mm^2$ 으로 가정하였고, 항복 전강성에 대한 항복 후 강성 비는 0%로 하여 항복 후에는 힘을 받을 수 없는 것으로 가정하였다.

### 3. 조적끼움벽 골조의 비선형 해석

신중학 등[5]의 연구자에 의해 이루어진 실제 실험에서는 조적 끼움벽의 형태에 따라 6가지 CASE를 가정하여 실험이 이루어졌다. 본 논문에서는 그 중 기존 학교건물의 조적 끼움벽의 모델링 형태와 유사한 CASE별로 4가지를 선정하여 Pushover 해석 수행 후의 결과와 비교·검토하였다. 먼저 각 CASE 별로 분류해 보면 그림 2와 같다.



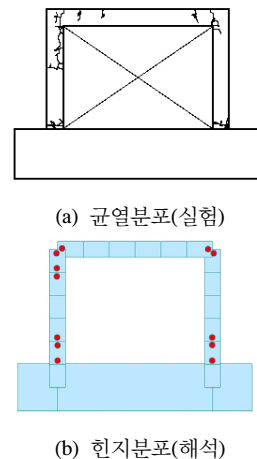
[그림 2] 실험체의 종류  
[Fig. 2] Specimen types

CASE I의 경우 조적 끼움벽이 고려되지 않은 기본 골조만 있는 형태이고, CASE II의 경우 조적 끼움벽이 프레임 면내에 완전 메움벽의 경우이다. CASE III의 경우 조적 끼움벽이 프레임 면내에 높이의 2/3 만큼 메워진 경우이며 CASE IV의 경우 조적 끼움벽이 프레임 면내에 높이의 1/3 만큼 메워진 경우이다.

[표 2] 실험체별 끼움벽의 높이  
[Table 2] Height of masonry wall

끼움벽의 높이	0	1.0h	2h/3	h/3
CASE	I	II	III	IV

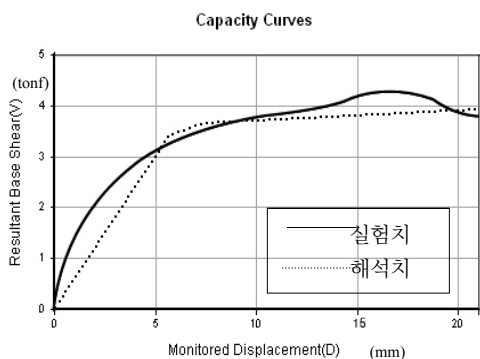
#### 3.1 CASE I 모델의 해석



[그림 3] CASE I의 결과 비교  
[Fig. 3] Results of CASE I

그림 3(a)은 실제 실험에 의해 발생된 균열 분포형상이며 그림 3(b)는 MIDAS-GEN을 이용하여 모델링 한 후 Pushover 해석을 수행한 결과 소성힌지의 발생 분포를 나

타낸 것이다. 실험에 의하면 조적벽이 없는 단순 골조의 균열발생은 기둥의 하단, 기둥과 보의 접합부에 집중하여 발생하였다. 이는 휨모멘트가 가장 크게 작용하는 위치로서 역학적으로 설명된다. 해석에 의한 소성힌지의 발생위치도 실험과 유사하게 나타났다. 기둥과 기초의 접합부, 기둥과 보의 접합부에 집중하여 힌지가 발생하여 부재의 중앙으로 확대되어 가는 양상을 보였다. 이러한 해석결과로부터 비탄성 유한요소해석에 의한 단순 골조의 힌지 분포는 실제 실험에 의한 크랙 발생분포를 잘 묘사하는 것으로 판단할 수 있다.



[그림 4] 하중-변위 곡선(CASE I)  
[Fig. 4] Load-displacement curve(CASE I)

그림 4는 실제 실험과 MIDAS-GEN을 이용하여 모델링 한 후 Pushover 해석을 수행한 결과 하중-변위 곡선을 한 그래프에 나타내어 비교해 보았다. 실험치는 탄성구간이 매우 짧고 곡선으로 이어지는데, 이는 콘크리트의 균열 등 비탄성의 영향에 의한 것으로 판단되며 명확한 항복점을 보이지 않는다.

실제 실험과 Pushover 해석의 모델링상의 물성치의 차이와 실험 오차 등의 차이로 인해 하중-변위 곡선이 정확히 일치 하지는 않지만 거의 유사한 거동을 함을 알 수 있으며 종국강도의 예측에 있어서는 큰 오차가 없음을 알 수 있다.

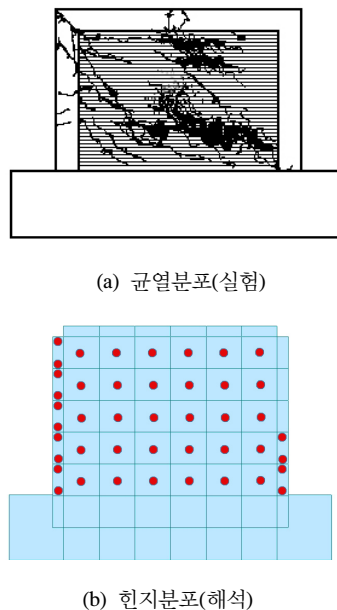
### 3.2 CASE II 모델의 해석

본 모델은 조적벽이 골조 내부를 완전히 채우고 있으며 학교건물에서 단변방향으로 배치되어 교실과 교실을 분리하는 골조에 주로 사용되는 모델이다.

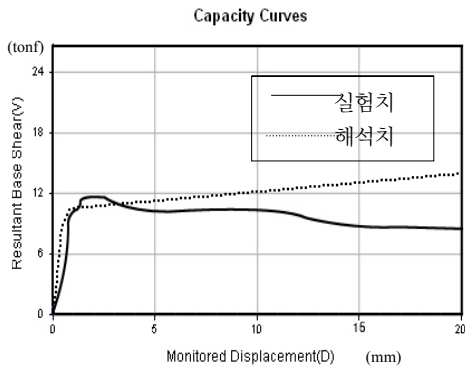
그림 5는 실험과 해석에 의한 균열과 소성힌지 분포로서 균열은 강도가 약한 조적벽의 전반부에 걸쳐서 발생하였으며, 골조에서는 좌측기둥의 중앙과 상단, 보의 중앙부, 그리고 우측기둥의 하단에 집중하여 발생하였다.

이는 CASE I과는 달리 조적벽이 있으므로 해서 골조의 응력분포 및 비탄성거동에 영향을 미친다는 것을 보여준다. 조적벽에 생긴 균열의 방향이 45도의 경사를 이루는 것은 힘의 전달방향과 일치하는 것으로 이때 조적벽은 대각가새와 같은 역할을 한다고 볼 수 있다. 해석에 의한 소성힌지의 발생위치도 실험과 유사하게 나타났다. 조적벽체 전체에 항복이 발생하였고, 좌측기둥에는 전체적으로, 우측기둥에는 하단부에 집중하여 항복이 발생하였다. 다만, 보의 중앙에는 항복이 발생하지 않았는데, 이는 실험과는 달리 보의 하단과 조적벽체의 상단이 일체화되어 모델링되었기 때문으로 사료된다. 전반적으로는 해석에 의한 힌지 분포는 실험에 의한 균열 발생분포를 잘 묘사한다고 판단할 수 있다.

그림 6은 실험과 해석의 하중-변위 곡선을 한 그래프에 나타내어 비교해 보았다. 실험치에서 알 수 있듯이 초기 강성과 항복강도가 단순골조에 비하여 매우 크게 나타나고 있으며, 조적벽체의 균열이 발생한 이후에는 급격히 강도가 저하되고 있다. 즉, 조적벽체의 영향에 의하여 초기 강성과 강도가 증가함을 알 수 있다. Pushover 해석에 의한 하중-변위 관계곡선과 실제 실험에 의한 하중-변위 관계곡선을 비교해 보면 항복 전까지는 근사한 거동을 보여주며 항복이후에는 변형이 커질수록 오차가 증가하나 실제 구조물에서는 변형의 한계가 존재하므로 해석 모델로서 유용하게 사용할 수 있다고 판단된다.



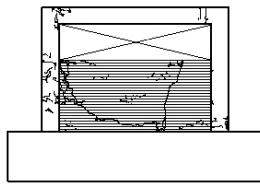
[그림 5] CASE II의 결과 비교  
[Fig. 5] Results of CASE II



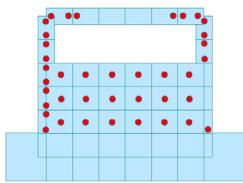
[그림 6] 하중-변위 곡선(CASE II)  
[Fig. 6] Load-displacement curve(CASE II)

### 3.3 CASE III 모델의 해석

CASE III 모델은 조적벽체가 전체 높이의 2/3만 채워져 있는 모델로 학교건물에서 교실과 복도를 가로지르는 골조의 형상이다.



(a) 균열분포(실험)

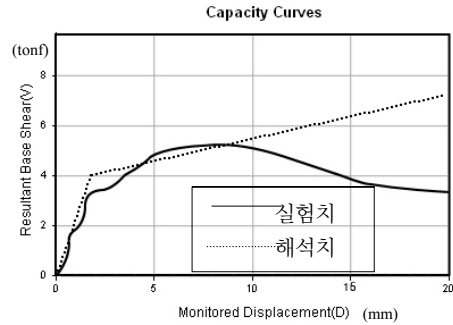


(b) 힌지분포(해석)

[그림 7] CASE III의 결과 비교  
[Fig. 7] Results of CASE III

그림 7(a)은 실험의 균열분포형상으로 균열은 조적벽 전체와 보의 양단부, 좌측기둥의 중하단부, 우측기둥의 하단부에 집중되어있다. 본 모델에서 특이한 점은 좌측기둥의 균열분포인데, 조적벽이 기둥의 중간부분까지만 존재하여 조적벽높이의 기둥부위에 균열이 발생하는 점이다. 이 부분은 휨모멘트가 극대인 위치로서 역학적으로 설명된다. 그림 7(b)는 소성힌지의 발생 분포로 실험과 유사하게 조적벽체 전체와 보의 양단부에 항복이 발생하였고, 좌측기둥에는 전체적으로, 우측기둥에는 하단부와

상단부에 집중하여 항복이 발생하였다. 다만, 기둥의 상부에는 실험과 달리 항복이 발생하였는데, 이는 실험과는 달리 기둥과 조적벽체가 일체화되어 모델링되었기 때문으로 사료된다. 전반적으로는 비탄성 유한요소해석에 의한 힌지 분포는 실제 실험에 의한 크랙 발생분포를 잘 묘사한다.



[그림 8] 하중-변위 곡선(CASE III)  
[Fig. 8] Load-displacement curve(CASE III)

그림 8은 실제 실험과 MIDAS-GEN을 이용하여 모델링 한 후 Pushover 해석을 수행한 결과 하중-변위 곡선을 한 그래프에 나타나어 비교해 보았다.

실험치에서 알 수 있듯이 초기 강성과 항복강도가 단순골조에 비하여 약간 크게 나타나고 있으며, 조적벽체의 균열이 발생한 이후에는 급격히 강도가 저하되고 있다. 또한, CASE II 모델에 비해서는 조적벽체에 의한 강도와 강성의 증가가 매우 저하되는 것을 알 수 있다. Pushover 해석에 의한 하중-변위 관계곡선과 실제 실험에 의한 하중-변위 관계곡선을 비교해 보면 항복 전까지는 근사한 거동을 보여주며 항복이후에는 변형이 커질수록 오차가 증가하나 실제 구조물에서는 변형의 한계가 존재하므로 해석모델로서 유용하게 사용할 수 있다고 판단된다.

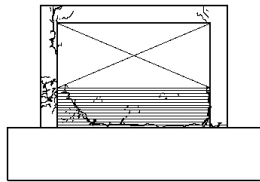
### 3.4 CASE IV 모델의 해석

CASE IV 모델은 조적벽체가 전체 높이의 1/3만 채워져 있는 모델로 학교건물에서 교실 외벽을 가로지르는 골조의 형상이다.

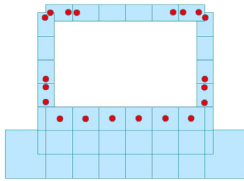
그림 9(a)는 실제 실험에 의해 발생된 균열분포형상이다. 균열은 조적벽체와 보의 양단부, 좌측기둥의 상하단부, 우측기둥의 하단부에 집중되어있다. 조적벽체의 균열은 벽체의 좌상단에서 45°방향의 사선을 이루며 바닥에 이르러 바닥을 따라 진행되는데, 이는 전단균열의 형태로 보이며, 우측기둥과의 균열은 기둥과 벽체의 박리에서 발생하는 것으로 판단된다. 균열에서 특이한 점은 좌측기둥의 균열분포인데, 조적벽의 좌측에 균열이 집중하여 발생

하여 응력이 집중되는 부위임을 보여준다. 이 부분은 휨 모멘트가 극대인 위치로서 역학이론과 합치된다.

그림 9(b)는 MIDAS-GEN을 이용하여 모델링 한 후 Pushover 해석을 수행한 결과 소성힌지의 발생 분포를 나타낸 것이다. 실험에 의한 균열분포와 해석의 소성힌지 분포는 유사하게 나타났다. 조적벽체 전체와 보의 양단부에 항복이 발생하였고, 기둥에는 상하단부에 집중하여 항복이 발생하였다. 다만, 우측기둥의 하부에는 실험과 달리 항복이 발생하였는데, 이는 실험과는 달리 기둥과 조적벽체가 일체화되어 모델링되었기 때문으로 사료된다. 전반적으로는 비탄성 유한요소해석에 의한 힌지 분포는 실제 실험에 의한 크랙 발생분포를 잘 묘사한다.



(a) 균열분포(실험)



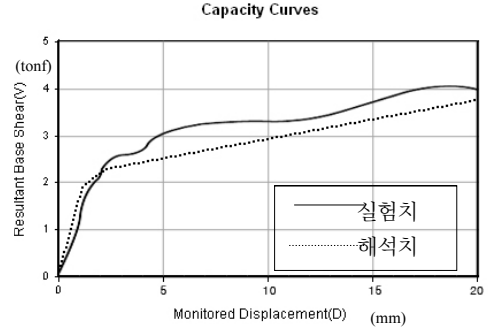
(b) 힌지분포(해석)

[그림 9] CASE IV의 결과 비교  
[Fig. 9] Results of CASE IV

그림 10은 실제 실험과 MIDAS-GEN을 이용하여 모델링 한 후 Pushover 해석을 수행한 결과 하중-변위 곡선을 한 그래프에 나타내어 비교해 보았다.

실험치에서 알 수 있듯이 초기 강성과 항복강도가 단순골조와 비슷하게 나타나고 있어 조적벽에 의한 초기 강성의 증대효과는 무시할 수 있는 것으로 판단된다. 해석치의 항복점은 단순 골조의 항복점보다 낮아진 것을 알 수 있는데, 이는 조적벽에 의하여 기둥의 하단 1/3지점에 응력이 집중하여 항복이 발생하므로 초기 항복강도가 낮아진 것으로 판단된다. 즉, 조적벽이 구조물 전체의 항복강도를 저하시키는 원인으로 작용한다고 볼 수 있다. 그러나, 최대강도는 단순 골조와 비슷한 값을 보이는데, 이는 조적벽의 항복이후 거동은 단순골조와 유사하다고 이해할 수 있다. Pushover 해석에 의한 하중-변위 관계곡선과 실제 실험에 의한 하중-변위 관계곡선을 비교해 보

면 항복 전까지는 근사한 거동을 보여주며 항복이후에는 변형이 커질수록 오차가 증가하나 실제 구조물에서는 변형의 한계가 존재하므로 해석모델로서 유용하게 사용할 수 있다고 판단된다.



[그림 10] 하중-변위 곡선(CASE IV)  
[Fig. 10] Load-displacement curve(CASE IV)

## 5. 결론

본 연구는 조적 기움벽을 고려한 기존 학교건물의 비탄성 거동특성을 파악하기 위하여 비선형 정적해석인 Pushover 해석을 이용하여 조적 기움벽을 고려하지 않은 기존 학교건물의 비탄성 거동과 조적 기움벽을 고려한 기존 학교건물의 거동특성을 비교 검토해 보았다. 그 결론은 다음과 같다.

- 1) 해석 결과와 실험 결과를 비교했을 때 하중-변위 곡선과 소성힌지 분포상태에서 유사함을 확인할 수 있었다. 따라서 조적 기움벽을 고려한 비선형 정적 해석의 유효성을 검증하였다.
- 2) 골조내부가 전부 조적벽으로 채워진 경우(CASE II) 조적벽체의 영향에 의하여 초기 강성과 강도가 증가하고 항복 전까지는 근사한 거동을 보이며 항복 이후에는 변형이 커질수록 오차가 증가한다.
- 3) 골조높이의 2/3 높이가 조적벽으로 채워진 경우(CASE III) 초기 강성과 항복강도가 단순골조에 비하여 약간 크게 나타나고 있으며, 조적벽체의 균열이 발생한 이후에는 급격히 강도가 저하되고 있다. 또한, CASE II 모델에 비해서는 조적벽체에 의한 강도와 강성의 증가가 매우 저하됨을 알 수 있다.
- 4) 골조높이의 1/3 높이가 조적벽으로 채워진 경우(CASE IV) 초기 강성과 항복강도가 단순골조와 비슷하며 항복점은 오히려 단순 골조의 항복점보다

다 저하되나, 최대강도는 단순 골조와 유사하다.

- 5) Pushover 해석에 의한 하중-변위 관계곡선과 실제 실험에 의한 하중-변위 관계곡선을 비교해 보면 항복 전까지는 근사한 거동을 보여주며 항복이후에는 변형이 커질수록 오차가 증가하나 실제 구조물에서는 변형의 한계가 존재하므로 해석모델로서 유용하게 사용할 수 있다고 판단된다.

## References

- [1] Korea Building Code 2009, Architectural Institute of Korea, 2009
- [2] Song, Byung-Hun, et al., "Seismic performance evaluation of existing school buildings using nonlinear static procedure", Architectural Institute of Korea, Vol.17 No.9, pp. 89-96, 2001.09
- [3] Choi Ho, "Cyclic loading test of reinforced concrete frame with unreinforced concrete block infill", Architectural Institute of Korea, Vol.23 No.4, pp. 71-78, 2007.04
- [4] Yoon Tae-Ho et al., "Inelastic Behavior ; Existing School Buildings", Architectural Institute of Korea Regional Association, Vol.10 No.4, pp. 191-198, 2008.12
- [5] Shin Jong-Hak et al., "An experimental study on the bearing force and efficiency of masonry infilled frame", Architectural Institute of Korea, Vol.5 No.6, pp. 307-317, 1989.12

## 강 경 수(Kyung-Soo Kang)

[정회원]



- 1992년 2월 : 서울대학교 대학원 건축학과 (공학석사)
- 1997년 8월 : 서울대학교 대학원 건축학과 (공학박사)
- 1997년 10월 ~ 2000년 2월 : 삼성물산건설부문 기술연구소
- 2000년 2월 ~ 현재 : 동명대학교 건축공학과 부교수

<관심분야>

구조물진동, 철근콘크리트구조

## 윤 태 호(Tae-Ho Yoon)

[정회원]



- 1991년 2월 : 서울대학교 대학원 건축학과 (공학석사)
- 1996년 2월 : 서울대학교 대학원 건축학과 (공학박사)
- 1996년 5월 ~ 1998년 2월 : 삼성물산건설부문 기술연구소
- 1998년 3월 ~ 현재 : 창원대학교 건축공학과 교수

<관심분야>

내진설계, 철근콘크리트구조