

H형강 프레임으로 보강한 철근 콘크리트 골조의 내진성능 평가

Seismic Capacity of Reinforced Concrete Frames Retrofitted with H-beam Frame

김민숙¹⁾ · 최호순¹⁾ · 송승언²⁾ · 이영학^{1)*}

Kim, Min Sook¹⁾ · Choi, Hosoon¹⁾ · Song, Seung Eon²⁾ · Lee, Young Hak^{1)*}

¹⁾경희대학교 건축공학과, ²⁾비코비엔(주)

¹⁾Department of Architectural Engineering, Kyung Hee University, ²⁾BCOBEN(주)

/ A B S T R A C T /

This study proposed proposes a retrofitting method using an H-beam frame to improve the seismic performance of non-seismic designed reinforced concrete frames. To evaluate the seismic performance with the H-beam frames, a cyclic lateral load test was performed and the experimental result was compared with the bared frame, and a masonry infilled RC frame. The results was were analyzed regarding aspects of the load-displacement hysteresis behavior, effective stiffness, displacement ductility, and cumulative energy dissipation. Also in addition, it was possible to prove both an increase of in the maximum load capacity, effective stiffness, and energy dissipation capacity using the H-beam frame.

Key words: Reinforced concrete frame, Masonry Infilled RC Frame, Retrofitting, H-beam Frame, Seismic performance

1. 서론

내진설계가 적용되지 않은 기존 철근 콘크리트 건물은 주로 중력하중에 대해 설계되어 지진에 대한 강도, 강성, 연성 등의 부족으로 지진 발생 시, 심각한 손상 또는 붕괴의 위험이 있기 때문에 기존 철근 콘크리트 건물의 내진 성능 향상을 위한 연구는 지속적으로 이루어지고 있다. 내진성능 향상을 위한 기존 철근 콘크리트 건물의 내진 보강은 지진하중에 대한 강도, 강성, 연성 등을 증진시키고자 함이며 현재까지 적용 또는 연구되는 방법으로는 조적 채움벽, 프리캐스트 패널벽(Precast Panel Wall), 철골 브레이싱(Steel Bracing), 콘크리트 자켓(Concrete Jacket), FRP Sheet 등이 있다[1]. 이 중 채움벽은 중 저층 건물에서는 칸막이벽 형식을 위해 많은 구조물에 적용되었다. Hashemi and Mossllam의 연구에 따르면 채움벽은 철근 콘크리트 골조의 강성을 약 4배 정도 증가시키고 댐핑 계수(Damping Coefficient)를 최소 4-6%, 최대 12%까지 증가시킨다고 하였다[2]. 그러나 이는 골조와 조적조가 일체로 거동했을 때의 효과이며 지진하중이 증가하여 조적조에 균열이 발생할 경우에는 취성적인 파괴가 발생할 수 있다. 이에 대해 이

원호 등(2005)은 비보강 조적벽체의 형상비, 축응력, 쌓기 방법 등을 변수로 한 실험을 통해 비보강 조적벽체의 전단거동과 전단거동에 영향을 미치는 인자들에 대해 평가하였다[3]. 박지훈 등(2012)은 중심 스트럿 모델과 편심 스트럿 모델에 따른 차이 분석과 기둥의 전단파괴를 고려하여 조적 채움벽의 내진성능을 평가하였다[4]. 조원선 등(2012)은 1/2 스케일의 조적 채움벽을 가지는 골조에 대해 횡방향 실험을 수행하여 조적 채움벽의 거동과 이를 예측할 수 있는 해석기법을 제안하였다[5].

본 연구에서는 내진보강 되지 않은 기존 철근 콘크리트 골조의 내진 보강법을 개발하여 이에 대한 내진성능을 평가하는 것을 목표로 두었다. 이를 위해 보강되지 않은 철근 콘크리트 골조, 허리벽을 가지는 철근 콘크리트 골조, 개발된 내진 보강법을 적용한 철근 콘크리트 골조에 대해 반복 횡하중 실험을 수행하였으며 최대하중, 변위 연성도, 에너지 소산 능력 등의 측면에서 그 결과를 분석하여 개발한 내진보강재를 사용한 보강기법의 내진성능 및 그 적용 가능성을 평가하고자 하였다.

2. 실험

2.1 보강방법

본 연구에서 개발한 철근 콘크리트 골조의 보강기법은 철근 콘크리트 골

*Corresponding author: Lee, Young Hak

E-mail: leeyh@khu.ac.kr

(Received 4 February 2013; Accepted 12 March 2013)

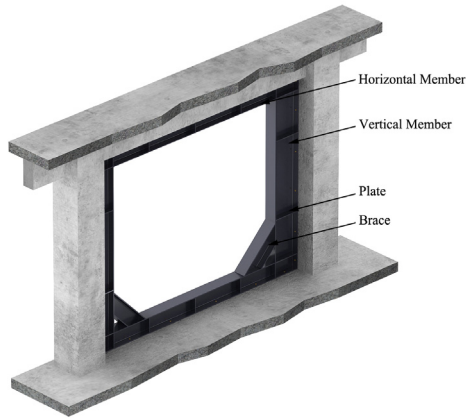


Fig. 1. H-beam frame



(a) Drilling of holes in concrete



(b) Insert of anchor



(c) Injection of sealant



(d) Application of epoxy

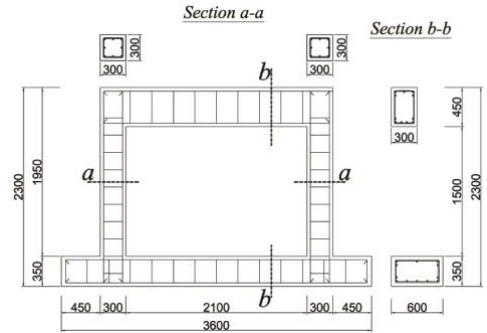
Fig. 2. Application of H-beam frame

조 면내에 H형강으로 제작된 프레임 설치하여 보-기둥 접합부, 기둥의 강도 및 강성을 증가시켜 구조물의 강도 및 연성, 에너지 소산능력의 향상을 기대할 수 있다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 H형강 프레임은 수평재와 수직재, 보-기둥 접합부의 횡방향 성능 증대를 위한 가새, 프레임의 좌굴 방지를 위한 플레이트로 구성된다.

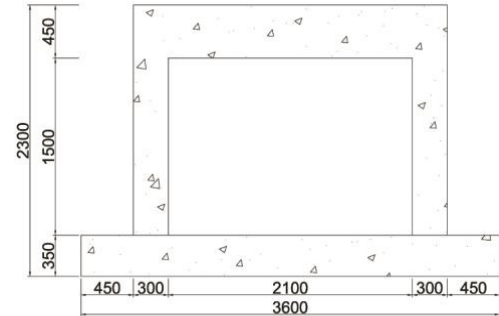
H형강 프레임 설치 과정은 Fig. 2에 나타났다. 철근 콘크리트 골조에 H형강 프레임 설치를 위한 천공작업을 실시한다. 천공 후 케미컬 앵커를 통해 H형강 프레임을 철근 콘크리트 골조에 부착하고 실링제로 앵커 부분을 마감한다. 이후 H형강 프레임을 따라 에폭시를 도포한다.

2.2 시험체 설계

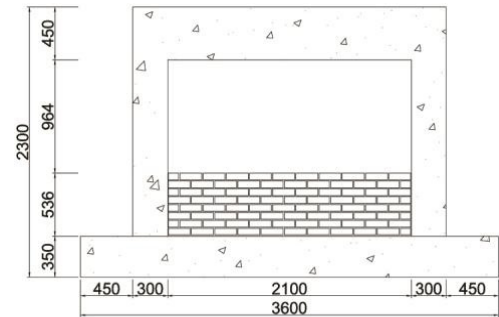
본 연구에서는 강원도 소재 초등학교의 1층 1경간을 대상 구조물로 선정하였으며 실험 여건을 고려하여 시험체 크기는 실제 크기의 1/2 scale로 하였다. 보강기법에 따른 내진성능 향상정도를 평가하기 위하여 보강되지 않은 철근 콘크리트 골조, 허리벽으로 보강된 철근 콘크리트 골조, H형강 프레임으로 보강한 철근 콘크리트 골조, 3개의 시험체를 대상으로 실험을



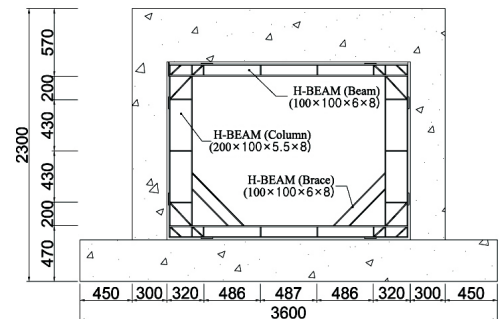
(a) Reinforcement details of RC frame



(b) Bare frame



(c) Infilled frame



(d) H-beam frame

Fig. 3. Geometry of specimens

수행하였다.

Fig. 3(a)와 같이 기둥은 단면 300mm × 300mm, 길이 1,950mm, 상부 보는 단면 300mm × 450mm, 길이 2700mm이며 하부 보는 단면 600mm × 350mm, 길이 2,700mm이다. 콘크리트 압축강도는 양생 28일 기준으로 45.2MPa이며 기둥 및 보의 주근은 모두 지름 13mm 철근을, 띠철근은 지름 10mm를 사용하였다. 조적은 압축강도 8 MPa, 흡수율 10 이하의 C급 2

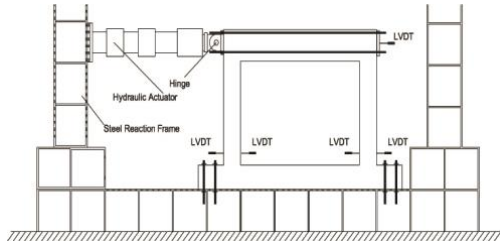


Fig. 4. Test set-up

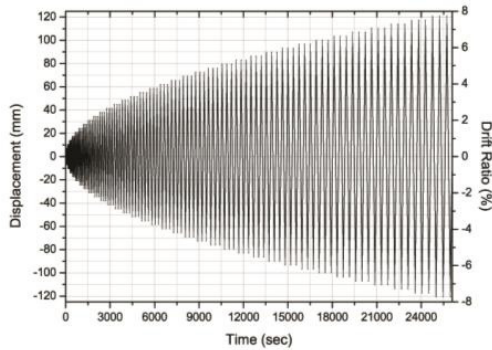


Fig. 5. The incremental drift

중 일반 시멘트 벽돌을 사용하였으며 내측으로 0.5B 쌓기 하였다. H형강 프레임에 사용된 강재는 SS400이다.

2.3 계측 및 가력계획

Fig. 4에서 보는 바와 같이 시험체는 하부 보 양쪽에 시험체 제작 시 미리 설치해둔 구멍을 통해 고장력 볼트를 이용하여 강구조 프레임(rigid frame)에 고정하였다. 가력을 위해 4개의 강봉 및 철판을 이용하여 볼트체결로써 Actuator와 시험체 상부 보를 고정하였다. 1000 kN 용량의 동적 Actuator를 변위제어 방법으로 초당 0.5mm의 속도로 반복 횡하중을 가하였다. 가력 패턴은 Fig. 5와 같이 각 변위별로 3 cycle씩 반복하도록 하였으며 기동 높이에 대한 횡변위비인 Drift ratio 8% 까지 변위를 가하는 것으로 계획하였다. 정(+), 부(-)의 변위를 반복하여 가하였으며 로드셀을 부착하여 재하 하중을 계측하였다. 실험은 Actuator의 횡변위가 그 한계인 100mm 이상 되거나 시험체의 하중이 최대하중의 70% 이하가 되는 시점에서 종료하는 것으로 계획하였다. 시험체의 횡변위를 측정하기 위해 LVDT(Linear Variable Differential Transducer)를 Fig. 4와 같이 설치하였다.

3. 실험 결과

3.1 균열 및 파괴양상

Fig. 6에 각 시험체의 균열 및 파괴양상을 나타내었다. 무보강 시험체의 경우 drift ratio 0.2%에서 하부 보-기둥 접합부에서 초기 균열이 발생하였으며 이후 시험체 상부의 보-기둥 접합부에서도 균열이 발생하였다. 하중이 증가하면서 기둥 중앙부에서 균열이 발생하였으며 상부 보-기둥 접합부에

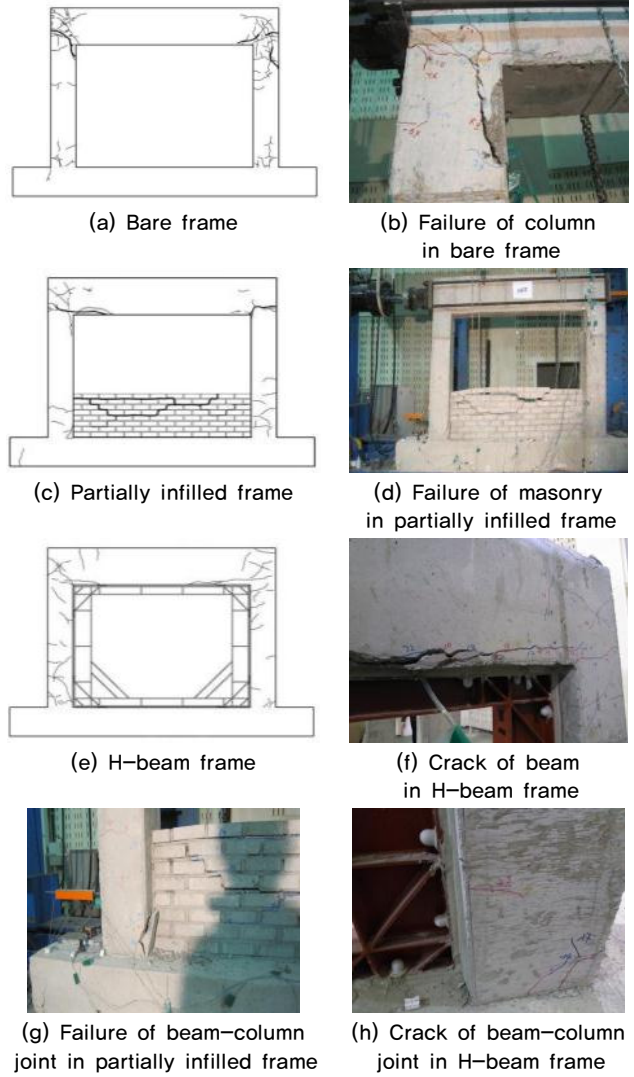


Fig. 6. Test set-up

발생한 균열 폭이 증가하기 시작하였다. 균열 폭이 증가하면서 콘크리트 박리가 발생하였고 상부 보-기둥 접합부에서 파괴가 발생하여 실험을 종료하였다.

허리벽으로 보강한 시험체의 경우 역시 초기 균열은 상부 보-기둥 접합부에서 발생하였으나 drift ratio는 무보강 시험체보다 다소 큰 0.4%에서 발생하였다. 이후 drift ratio 0.7%에서 조적 줄음을 따라 슬라이딩 파괴가 발생하였다. 허리벽 파괴가 발생하기 전까지 무보강 시험체에 비해 균열의 진전은 관찰되지 않았다. 그러나 허리벽 파괴 이후 허리벽과 인접한 기둥에서 균열이 발생하기 시작했으며 하중이 증가함에 따라 균열 폭이 증가하였다. 무보강 시험체와 마찬가지로 상부 보-기둥 접합부의 균열이 콘크리트 박리로 이어지면서 최종 파괴에 도달하였다. 골조와 허리벽의 경계 접합부에서의 파괴는 발생하지 않았다.

H형강 프레임으로 보강한 시험체의 경우 또한 나머지 시험체와 마찬가지로 상부 보-기둥 접합부에서 초기 균열이 발생하였으나 drift ratio 0.6%으로 다른 시험체에 비해 초기 균열이 다소 늦게 발생하였다. 이후 하중이 증가하면서 하부 보-기둥 접합부에서 균열이 발생하였으며 기둥에도 균열이 발생되기 시작하였다. 그러나 다른 시험체에 비해 큰 폭의 균열 또는 박

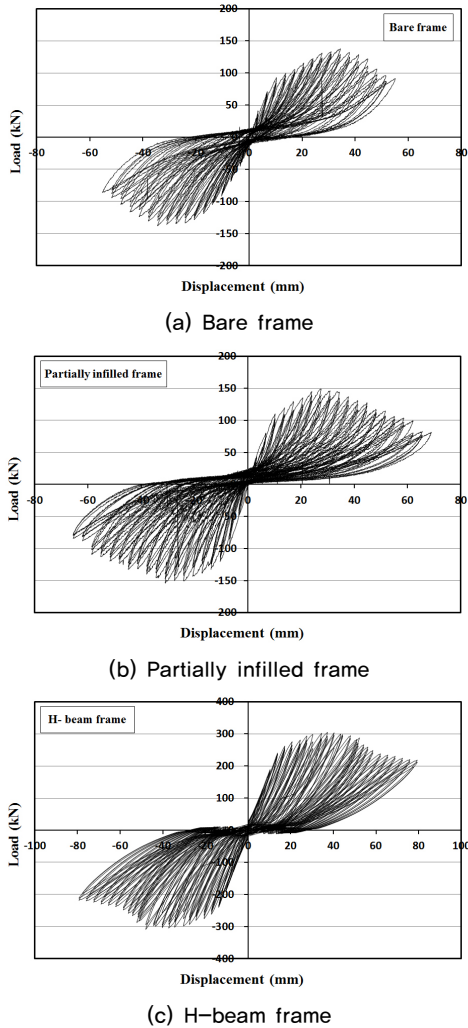


Fig. 7. Test set-up

리는 관찰되지 않았으며 시험체 전체에 걸쳐 균열이 발생하였다. 또한 무보강 시험체 및 허리벽 보강 시험체에 비해 상부 및 하부 보-기둥 접합부에 발생한 균열 및 균열 폭이 크지 않았다. 하중이 증가함에 따라 H형강 프레임의 상부 수평재와 접합되는 상부 보에 균열이 발생하였다. H형강 프레임과 접합되는 상부 보의 균열은 큰 균열이나 콘크리트 박리로 진전되지 않았으며 H형강 프레임과 시험체의 분리 역시 육안으로 확인되지 않았다. H형강 프레임을 보강한 시험체는 최대하중 도달 후 하중이 최대하중의 약 70% 시점에서 실험을 종료하였으나 다른 시험체에 비해 시험체의 큰 균열이나 박리 없이 안정적인 거동을 보였다.

3.2 하중-변위 이력곡선

시험체에 반복 횡하중을 가하였을 때의 이력거동을 Fig. 7에 나타내었으며 Fig. 8에 모든 시험체의 Envelop curve를 나타내었다. 무보강 시험체의 경우 상부 보-기둥 접합부의 균열 폭이 진전되어 콘크리트 박리가 일어나는 시점에서 최대하중이 감소하기 시작하였다. 이후 drift ratio가 증가하면서 하중 감소가 지속되었다.

허리벽 보강 시험체의 경우 무보강 시험체에 비해 다소 큰 최대하중을 나

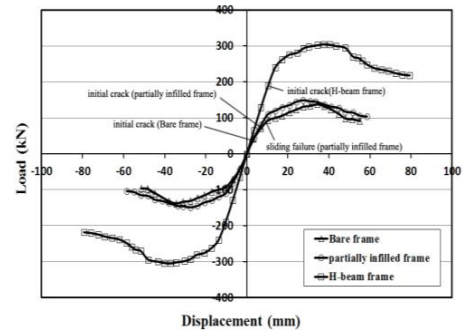


Fig. 8. Envelope Curve

Table 1. Maximum load

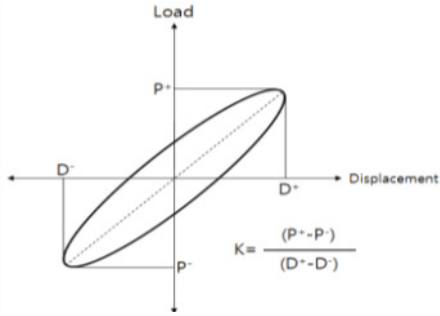
Specimen	Maximum Load (kN)		Ratio
	Push	Pull	
Bare frame	137.80	-134.68	1.00
Partially infilled frame	149.04	-146.06	1.08
H-beam frame	305.76	-304.83	2.22

타냈다. 허리벽에서 파괴가 발생하는 시점에서는 하중 감소가 발생하지 않았으나 허리벽에서 파괴가 발생한 이후 보-기둥 접합부의 균열이 진전되면서 하중이 감소하는 이력 거동을 보였다. 그러나 무보강 시험체와 달리 하중 감소 폭이 크지 않았다. 상부 보-기둥 접합부에서 콘크리트 박리가 일어나면서 파괴되는 시점까지 무보강 시험체에 비해 하중이 완만히 감소하였다.

H형강 프레임으로 보강한 시험체의 경우 다른 시험체와 달리 매우 큰 최대하중을 나타냈다. 무보강 시험체 및 허리벽 보강 시험체의 경우 균열 및 박리가 일어나는 시점과 하중이 저하되는 시점이 비교적 일치함을 보였으나 H형강 프레임으로 보강한 시험체의 경우 큰 균열이나 박리가 발생하지 않아 이를 확인할 수 없었다. 다만 균열이 시험체 전체에 분포되면서 서서히 하중이 증가하는 추세를 보였다.

각 시험체의 이력 거동을 바탕으로 정리한 실험결과를 Table 1에 나타내었다. 각 시험체 별 최대하중을 보면, 정가력 시의 최대 하중에 비해 부가력 시의 최대하중이 다소 작게 나타난 것을 알 수 있다. 이는 시험체에 정가력이 부가력보다 먼저 이루어지므로 정가력으로 인한 변위가 부가력으로 인한 변위보다 먼저 시험체에 가해진다. 따라서 정가력시 시험체에 발생한 균열 또는 변형으로 인한 강도 및 강성 저하가 부가력 시, 시험체의 내력에 영향을 미친 것으로 판단된다.

Table 1에서 보는 바와 같이 허리벽으로 보강한 시험체의 경우 무보강 시험체보다 최대강도가 약 2% 정도 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 가력 초기에는 허리벽으로 인해 골조의 횡강성이 다소 증가하지만 허리벽에서 균열 및 파괴가 발생하여 골조와의 일체 거동이 불가능해지면서 골조의 횡구속력이 감소하여 강도가 감소하였기 때문인 것으로 판단된다. 또한 골조에 고강도 콘크리트 사용으로 인한 허리벽과 골조의 큰 강도 차이로 허리벽의 균열 및 파괴가 다소 낮은 하중에서 발생하여 보강 효과가 미미하게 나타났다고 판단된다. 반면, H형강 프레임으로 보강한 시험체는 무보강 시험체에 비해 최대강도가 두 배 이상 증가한 것을 알 수 있다. H형강 프레임을 보강한 시험체의 경우, H형강의 높은 강도 및 강성으로 보강재의 변형 없이 골조의 횡구속력을 유지시켜주기 때문인 것으로 판단된다.



P+: Maximum load in positive loading
 P-: Maximum load in negative loading
 D+: Maximum displacement in positive loading
 D-: Maximum displacement in negative loading

Fig. 9. Calculation of effective stiffness

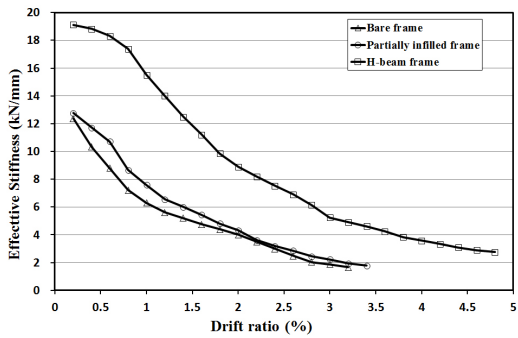


Fig. 10. Effective stiffness

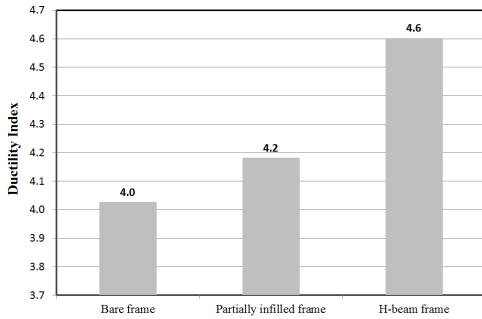


Fig. 11. Ductility ratio

3.3 유효강성

시험체의 유효강성은 각 cycle의 정가력시의 최대하중과 변위, 부가력시의 최대하중과 변위의 기울기로 정의되며 Fig. 9와 같다[6]. Fig. 10과 Table 2에 각 시험체별 유효강성을 나타내었다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 무보강 시험체의 경우 허리벽 시험체에 비해 drift ratio 1%까지 급격한 유효강성의 저하를 보이는 것을 알 수 있다. 허리벽 시험체의 경우에는 drift ratio 0.7%까지는 유효강성의 저하가 크지 않으나 drift ratio 0.7% 이후 급격한 유효강성 저하를 나타냈다. 이는 drift ratio 0.7%에서 허리벽의 균열 및 파괴가 발생하여 그 이후의 거동에는 허리벽이 골조의 강성 확보에는 기여하지 못한 것으로 판단된다. 또한 drift ratio 2% 이후 무보강 시험체와

Table 2. Effective stiffness

Drift ratio	Effective stiffness (kN/mm)		
	Bare frame	Partially infilled frame	H-beam frame
0.2	12.4	12.8	19.1
0.6	9.0	10.7	18.3
1.0	6.2	7.6	15.2
1.4	5.1	6.0	11.5
1.8	4.3	4.7	9.8
2.2	3.5	3.6	8.2
2.6	2.5	2.8	6.9
3.0	1.9	2.2	5.2
3.4	-	1.8	4.6
3.8	-	-	3.8
4.2	-	-	3.3
4.6	-	-	2.9

Table 3. Ductility

Specimen	Yield displacement Δ_y (mm)	Maximum displacement $\Delta_{0.8max}$ (mm)	$\Delta_{0.8max}/\Delta_y$	Ratio*
Bare frame	11.2	45.1	4.0	1.00
Partially infilled frame	11.5	48.1	4.2	1.04
H-beam frame	15.6	71.8	4.6	1.14

*Ratio : Ductility ratio of bare frame to each specimen

허리벽 보강 시험체의 유효강성에 큰 차이가 없는 것으로 보아 허리벽에서의 파괴 발생 후에는 골조의 횡강성(lateral resistance) 증대에 더 이상 영향을 미치지 못하고 무보강 시험체와 유사한 거동을 나타낸 것으로 판단된다. H형강 프레임 보강 시험체의 경우 drift ratio 0.8%까지 큰 강성의 저하가 없는 것으로 나타났다. 이후 강성 저하가 발생하였으나 다른 시험체에 비해 2배 이상 큰 유효강성을 보이는 것으로 나타났다.

3.4 연성

구조물의 연성 능력을 나타내는 변위 연성도는 항복변위 대 극한 변위의 비로 정의된다. 그러나 하중-변위 관계에서 뚜렷한 항복점을 알 수 없기 때문에 초기강성이 최대하중에 도달하였을 때의 변위를 항복변위로, 식 (1)과 같이 최대하중 도달 후 하중이 최대하중의 80%에 도달하였을 때의 변위를 극한변위로 정의하였다[7].

$$\mu = \frac{\Delta_{0.8max}}{\Delta_y} \quad (1)$$

여기서 μ 는 변위연성지수, $\Delta_{0.8max}$ 는 극한변위, Δ_y 는 항복변위이다. Fig. 11과 Table 3에 각 시험체의 연성을 나타내었다. 허리벽 보강 시험체는 무보강 시험체에 비해 약 4% 증가된 연성지수를 보였다. 이를 통해 허리벽 보강이 초기에는 골조의 횡구속 효과로 인해 구조물의 강성 및 강도를 증

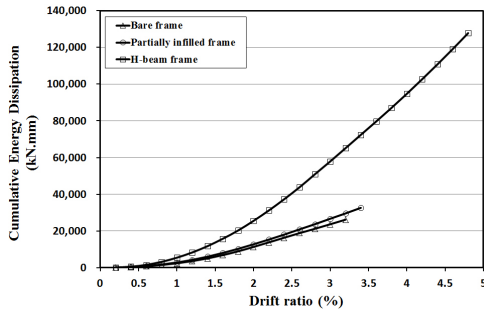


Fig. 12. Energy dissipation

가시킬 수 있으나 낮은 강도를 가지고 있는 조적조의 특성상 가력 하중이 증가함에 따라 조적조에서 파괴가 발생하여 구조물의 연성을 증가시킬 수 있는 효과는 기대하기 어려운 것으로 판단된다. H형강 프레임을 보강한 시험체는 가장 높은 변위 연성지수를 가지는 것으로 나타났다. 그러나 무보강 시험체에 비해 약 14% 증가된 연성지수를 보여 허리벽을 보강한 시험체에 비해 연성능력이 향상됨을 보였다. 그러나 최대하중의 증가와 달리 그 증가의 폭이 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 H형강 프레임이 철근 콘크리트 골조 면내에 설치됨으로써 횡구속 효과는 증진시킬 수 있으나 하중이 증가함에 따라 H형강 프레임과 골조가 부착되는 앵커 부분에 응력이 집중되면서 원활한 응력전달이 이루어지지 않았기 때문으로 판단된다.

3.5 에너지 소산 능력

지진 하중을 받는 구조물이 비탄성 범위에서 구조물의 강도와 강성을 유지하면서 안정적인 이력거동을 하는 것은 내진성능에 있어 매우 중요한 사항이다. 이를 평가하기 위해 에너지 소산 능력을 적용하는데 에너지 소산 능력은 각 시험체의 하중-변위 곡선으로 둘러싸인 면적의 합으로 평가한다. 본 연구에서는 에너지 소산을 각 첫 번째 cycle의 에너지 소산량을 기준으로 최대하중의 70%까지 내력이 저하된 사이클의 누적 에너지 소산량으로 평가하였다. 이를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12를 보면 drift ratio 0.7%까지는 모든 시험체가 유사한 에너지 소산량을 보였으나 이후 H형강 프레임 보강 시험체는 무보강 시험체 및 허리벽 보강 시험체보다 두 배 이상 큰 에너지 소산량을 보였다. 허리벽 보강 시험체는 무보강 시험체와 거의 유사한 에너지 소산량을 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 철근 콘크리트 골조의 내진성능 향상을 위한 보강법으로 H형강 프레임을 적용하여 반복 횡가력 실험을 수행하였으며 보강되지 않은 철근 콘크리트 골조 시험체와 허리벽으로 보강한 철근 콘크리트 골조 시험체의 실험결과와 비교하여 내진성능을 평가하였으며 다음의 결론을 얻었다.

- 1) H형강 프레임으로 보강한 시험체는 무보강 및 허리벽으로 보강한 시험체와 달리 보-기둥 접합부 또는 기둥에서의 심각한 균열 및 파괴가 발생하지 않았으며 최대하중을 비교하였을 때 최대하중이 2배 이상 증가됨을 보였다. 또한 각 시험체의 유효강성은 H형강으로 보강한 시험체, 허리벽으로 보강한 시험체, 무보강 시험체 순으로 나타났으나 H형강으로 보강한 시험체가 나머지 시험체에 비해 2배 이상 큰 유효강성을 나타냈다.
- 2) 각 시험체의 연성은 H형강으로 보강한 시험체, 무보강 시험체, 허리벽으로 보강한 시험체 순으로 나타났으나 최대하중 및 유효강성의 증가와 달리 그 차이가 미미하였다. 이는 각 시험체의 에너지흡수량은 H형강으로 보강한 시험체가 나머지 두 시험체에 비해 두 배 이상 큰 값을 보였으며 무보강 시험체와 허리벽으로 보강한 시험체는 유사한 값을 보였다.
- 3) 최대하중, 유효강성, 에너지흡수능력의 측면에서 평가했을 때 본 연구에서 제안한 H형강 프레임을 적용한 보강기법은 내진성능 향상 증진에 효과적인 방법으로 판단된다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 BCOBEN (주)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사의 말씀을 드립니다.

/ REFERENCES /

1. Altin S, Anil Q, Kara ME, Kaya M. An Experimental Study on Strengthening of Masonry Infilled RC Frames Using Diagonal CFRP Strips. Composite Part B. 2008 Jun;39(4):680-693.
2. Hashemi A, Mosallam KM. Shake-Table Experiment on Reinforced Concrete Structure Containing Masonry Infill Wall. Earthquake Engineering Structural Dynamics. 2006 Aug;35:1827-1852.
3. Yi WH, Lee JH, Oh SH, Yang WJ, Kang DE. A Study on Evaluation of Shear Capacity of Unreinforced Masonry Wall. Journal of Architectural Institute of Korea. 2005 Oct;21(10):3-10.
4. Park JH, Jeon SH, Kang KS. Seismic Performance Evaluation of Masonry-Infilled Frame Structures using Equivalent Strut Models. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2012 Feb;16(1):47-59.
5. Cho WS, Lee SH, C L, Kim HJ, Kim SJ, Yu EJ. Seismic Performance Evaluation of Reinforced Concrete Frame with Unreinforced Masonry Infill. Journal of Architectural Institute of Korea. 2012 Mar;28(3):31-41.
6. Tonos AG. Lateral Load Response of Strengthened Reinforced Concrete Beam-to-Column Joints. ACI Structural Journal. 1999 Jan;96(1):46-56.
7. Sheikh SA, Khoury SS. A Performance Based Approach for the Design of Confining in Tie Columns. ACI Structural Journal. 1997 Jul;49(4):421-431.