

교체 가능한 강재 브레이스 시스템의 슬라이딩 슬롯 길이에 따른 내진성능에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Seismic Performance of Replaceable Steel Brace System with Sliding Slot

김 윤 성*
Kim Yoon Sung

노 경 민**
Ro Kyong Min

김 민 숙***
Kim Min Sook

이 영 학****
Lee Young Hak

Abstract

The purpose of this study is to experimentally analyze the seismic performance of column with RSB (Replaceable Steel Brace), a steel brace system with slot length as a variable. To evaluate the seismic performance of the RSB, three specimens were manufactured and subjected to cyclic loading tests. The length of the sliding slots were considered to be 5 mm and 10mm to enable the brace to resist the load from the initiation of flexural crack and shear crack. As a result of the test, the specimen reinforced with the RSB showed improved maximum load and effective stiffness, and energy dissipation capacity compared to the non-reinforced specimens. The specimens with 5mm sliding slot showed little difference in test result compared to the specimen with a 10mm sliding slot, indicating that the length of sliding slot has little influence on the effectiveness of RSB.

Keywords : *Seismic retrofit, Reinforced concrete column, Brace*

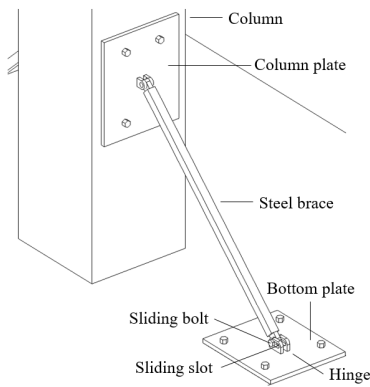
1. 서론

Federal Emergency Management Agency (FEMA)에서는 철근콘크리트 구조물의 강도, 강성 또는 연성을 증진시킬 수 있는 적절한 내진보강 공법으로 전단벽, 브레이스 골조 신설, FRP 자켓팅 공법, 댐퍼설치 등을 제시하고 있다¹⁾. 이 중 브레이스를 사용한 보강기법은 철근콘크리트 기둥과 같은 수직부재의 강도 및 강성을 효과적으로 증진시킬 수 있어 보편적으로 사용되고 있다. 브레이스는 철근콘크리트 기둥에 작용하는 횡력을 축방향으로 저항하는 횡력저항시스템으로 하중이 좌굴하중

이내인 탄성범위 내에서는 매우 효과적이거나, 좌굴이 발생하면 급격한 성능저하가 발생한다. 브레이스에서의 조기 좌굴 문제를 개선하기 위하여 비좌굴가새 (Buckling-restrain brace, 이하 BRB)에 대한 연구가 수행되어 왔다. 기존 BRB는 큰 지진하중이 발생할 경우에는 우수한 구조성능을 발휘하지만, 탄성거동을 하는 약진이나 풍하중 작용시에는 에너지 소산능력이 미흡하다는 특성을 가지고 있다²⁾. 최근에는 단계적으로 횡하중에 저항할 수 있는 내진보강공법에 대한 연구들이 수행되고 있다^{3,4)}. 이러한 내진보강공법은 주로 마찰 댐퍼와 슬릿 댐퍼가 결합된 하이브리드형 댐퍼로 각각의 댐퍼가 다른 수준의 횡하중에 저항한다. Zhao et al.(2022)는 knee 브레이스에 댐퍼를 추가하고 보와 브레이스를 연결하여 단계적으로 강성을 향상시키는 보강법에 관한 연구가 수행했다⁵⁾. Shakiba & Mortazavi (2022)는 knee 브레이스에 형상기억합금으로 구성된 댐퍼를 추가하여 구조물의 거동에 미치는 영향을 실험적으로 분석하는 연구를 수행했다⁶⁾. 본 연구의 선행연구 Lee et al.(2022)에서는 기존 가새공법의 좌굴로 인한 성능저하를 개선하기 위해서 간단한 상세의 내진보강 공법을 제

* 경희대학교 건축공학과, 석사과정
Department of Architectural Engineering, Kyung Hee University
** 경희대학교 건축공학과 박사후연구원, 공학박사
Department of Architectural Engineering, Kyung Hee University
*** 경희대학교 건축공학과 학술연구교수, 공학박사
Department of Architectural Engineering, Kyung Hee University
**** 교신저자, 경희대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Department of Architectural Engineering, Kyung Hee University

시하였다⁷⁾. 선행 연구에서는 새로운 보강공법이 기존 브레이스 공법에서 제기된 조기 좌굴로 인한 구조성능 저하 문제를 개선할 수 있으며, 횡하중의 크기에 따라 단계적으로 대응이 가능하여 풍하중과 중약진, 강진에 모두 효과적으로 저항할 수 있음을 증명하였다⁷⁾. 본 연구의 선행연구에서 제안된 새로운 브레이스 공법인 교체 가능한 강재 브레이스 시스템(Replaceable steel brace, 이하 RSB)은 <Fig. 1>과 같이 수직부재와 수평부재에 부착되는 두 개의 강판과 브레이스로 구성된다. 강판은 구조부재에 케미컬 앵커로 고정되며, 수평부재에 부착되는 강판에는 슬라이딩 슬롯이 있는 힌지가 용접되어 있다. 브레이스는 기존 브레이스와 동일하게 횡력에 대해 압축력으로 저항하는 부재이며, 볼트를 통해 슬라이딩 슬롯과 체결된다. RSB 보강기법은 등의 소성흔지 구간 내에서만 설치 가능하여 필로티와 같이 공간이 협소하여 보강공법의 적용이 어려운 구조물에도 사용이 가능하며, 강성보강에 용이하여 전단파괴가 발생할 가능성이 커 강도/강성 증진형 내진공법이 적합한 비내진상세를 가진 중저층 철근콘크리트 건축물에 적용이 적합하다⁸⁾. 강판은 볼트로 체결되기 때문에 브레이스의 손상 시 새로운 부재로의 교체가 용이하다는 장점이 있다.



<Fig. 1> Replaceable steel brace system

슬라이딩 슬롯은 브레이스가 대응할 수 있는 횡변위 만큼 가로방향으로 여유가 있는 형태로 브레이스는 슬롯을 따라서 횡방향으로 움직일 수 있다. RSB 시스템은 슬라이딩 슬롯의 길이보다 횡변위가 작을 경우에는 슬라이딩 슬롯과 볼트의 마찰력 및 RSB 보강공법의 구속력만으로 하중에 저항한

다. 이후 기둥의 횡변위가 증가하여 슬라이딩 슬롯의 길이보다 커지면 강재 브레이스가 슬라이딩 슬롯 단부에 닿는 시점부터 일반적인 브레이스와 같이 압축력 및 인장력으로 저항한다. 이와 같은 특징으로 인해 RSB 보강공법의 내진성능은 슬롯의 길이에 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 선행연구에서 제안된 RSB 시스템을 슬라이딩 슬롯 길이를 변수로 하여 철근 콘크리트 기둥의 내진성능을 실험적으로 평가하는 것을 목표로 하였다.

2. 실험개요

본 연구에서는 RSB 시스템으로 보강된 철근콘크리트 기둥에서 슬라이딩 슬롯 길이에 따른 기둥의 동적거동을 평가하기 위하여 무보강 시험체 한 개와 RSB 시스템으로 보강된 시험체 두 개, 총 세 개의 시험체를 제작하고 이에 대해 반복 횡가력 실험을 수행하였다. RSB 시스템의 슬라이딩 슬롯의 길이는 슬라이딩 슬롯이 하중에 저항하는 시점을 바탕으로 설계하였다. 본 연구는 선행연구를 통해 무보강 철근콘크리트 기둥의 휨균열 발생시점 (층간변위비 0.75%, 횡변위 2.8mm)과 전단균열 발생시점 (층간변위비 1.4%, 횡변위 5.25mm)을 확인하였다. 이에 따라 철근 콘크리트 기둥에 휨균열 또는 전단균열 발생 직후부터 브레이스가 하중에 저항하도록 하기 위하여 슬라이딩 슬롯의 길이 l 을 5mm와 10mm로 결정하였고 <Fig. 2>의 그림 (c)에 표기하였다. 무보강 시험체, RSB 시스템의 슬롯의 길이가 5mm인 시험체, 10mm인 시험체를 각각 C-E0, B5-E0, B10-E0로 명명하였다.

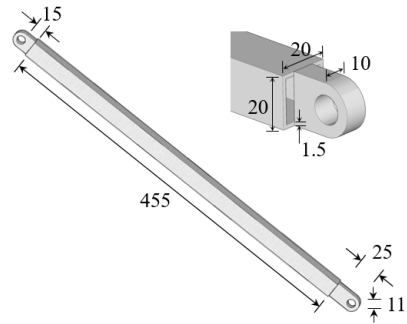
시험체와 RSB 시스템의 상세는 <Fig. 2>와 같다. 철근콘크리트 기둥의 단면은 폭과 깊이가 250mm로 동일한 정사각형이고 높이는 1800mm이다. 기초는 폭 1400mm, 길이 1270mm, 높이 425mm로 RSB 보강기법 시공 및 시험체 고정을 위해 제작하였으며 시험체를 바닥에 고정시키기 위해서 6개의 구멍을 천공하였다. 주근은 지름 22mm인 이형철근을 4개를 배근하였으며 띠철근은 10mm의 이형철근을 125mm 간격을 두어 배근하였다. 브레

이스는 단면의 폭과 높이가 20mm 동일하고, 두께가 1.5mm, 길이가 455mm인 각형강관의 형태이며, 시험체에 고정되는 강관의 폭은 200mm, 길이는 250mm, 두께는 10mm, 강관과 브레이스를 고정하는 힌지의 두께는 8mm이다. RSB의 보강길이는 반복하중을 받는 기둥의 실험 결과로 제안된 Paulay & Priestley(1992)의 소성힌지 산정식을 통해 375mm로 결정하였다⁹⁾. 이는 식(1)과 같다. 강관과 구조 부재간 접합은 직경 16mm의 콘크리트 앵커를 사용하였다.

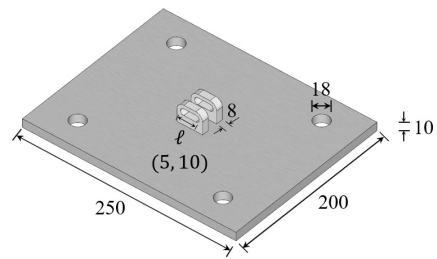
$$\ell_p = 0.08\ell + 0.022d_b f_y \quad (1)$$

여기서, ℓ_p 는 소성힌지 길이, ℓ 은 기둥의 높이, d_b 는 주근의 지름, f_y 는 주근의 항복강도이다.

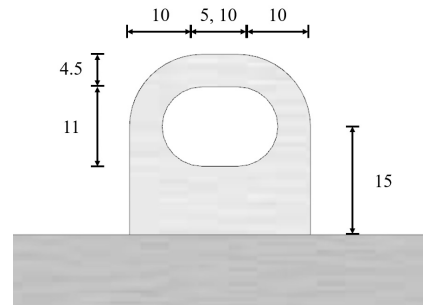
시험체 제작에 사용된 콘크리트 압축강도의 경우 기둥은 24MPa, 기초는 기둥보다 먼저 파괴되는 것을 방지하기 위하여 30MPa를 사용하였다. 주근 및 띠철근은 모두 400MPa의 철근을 사용하였다. RSB 시스템은 항복강도 275MPa인 강재를 사용하였다.



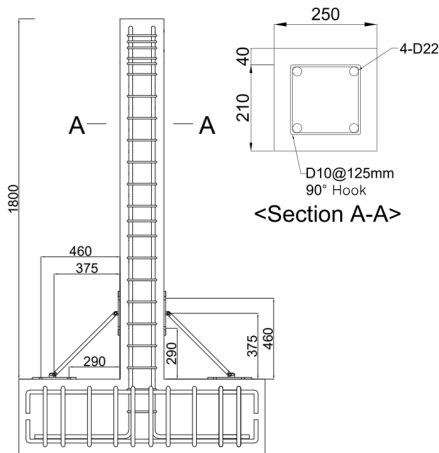
(b) detail of RSB system brace (mm)



(c) detail of RSB system steel plate (mm)

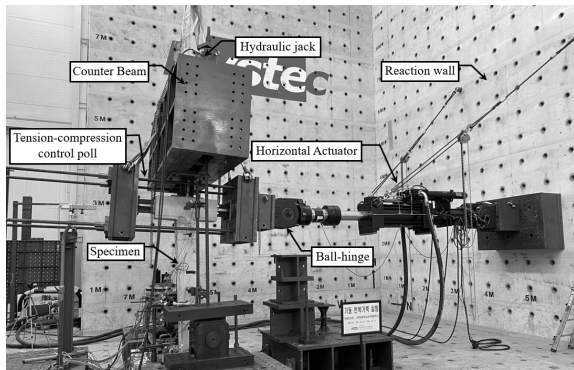


(d) detail of sliding slot (mm)
〈Fig. 2〉 Detail of specimens

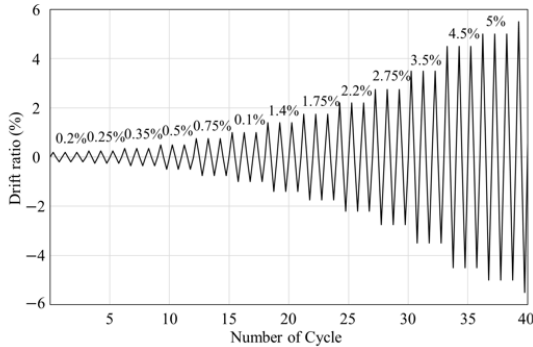


(a) retrofitted column with RSB system (mm)

본 연구에서는 〈Fig. 3〉과 같이 시험체를 세팅하여 반복가력실험을 수행하였다. 축력비 0.17에 해당하는 255kN을 상시하중으로 가력하였다. 횡력은 각 층간변위비 별로 3 cycle 씩 반복가력하였다. 초기 층간변위비는 0.2%, 후속 층간변위비는 0.25%이며 시험체의 하중이 최대하중에 도달한 이후 최대하중의 80% 이하로 감소할 때 실험을 종료하는 것으로 계획하였다.



(a) view of the actual test setup



(b) Loading protocol
 <Fig. 3> Experimental setup

3. 실험 결과 및 분석

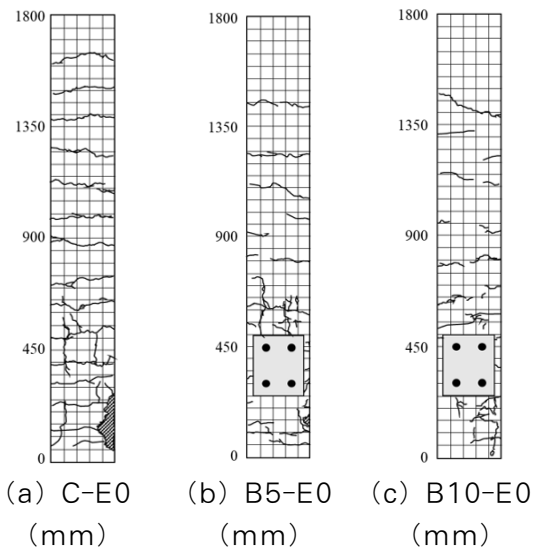
3.1 균열 및 파괴양상

<Fig. 4>에 각 시험체의 실험종료시 확인한 균열 양상을 나타내었다. 이는 RSB 시스템이 부착되어 있으며 액추에이터가 설치된 면에서 관찰된 균열양상이다. 무보강 시험체와 보강시험체 모두 층간 변위비 0.75%에서부터 기둥의 하단부에서 휨균열이 발생하기 시작하였으며 전단균열의 발생 시점은 슬라이딩 슬롯의 길이에 따라 상이하게 나타났다.

무보강 시험체 C-E0는 층간변위비 1.4%에 하단부에 전단균열이 발생하였다. 층간변위비가 증가함에 따라 기둥 전체에 휨균열이 발생하였고, 기둥 하단부의 전단균열이 진전되며 층간변위비 2.2%에서 콘크리트 박리가 발생하였다. 이후 하중이 최대하중의 80%로 감소하는 시점인 층간변위비 2.75%에서 실험을 종료하였다. 슬라이딩 슬롯 길이가 5mm인 시험체 B5-E0는 초기 휨균열 발생 이후 층간변위비가 증가함에 따라 휨균열이 기둥 전체에 고르게 분포하는 경향을 보였다. 층간변위비 2.2%에서 전

단균열이 발생하였고 층간변위비 4.5%에서 콘크리트 박리가 발생하였다. 슬라이딩 슬롯 길이가 10mm인 시험체 B10-E0는 층간변위비 2.2%에서 전단균열이 발생하였고, 층간변위비 4.5%에서 콘크리트 박리가 발생하였다. 시험체 B5-E0와 B10-E0는 동일하게 층간변위비 4.5%에서 하중이 최대하중의 80%로 감소하여 실험을 종료하였다.

무보강 시험체에 비하여 RSB 시스템으로 보강된 시험체 B5-E0와 B10-E0는 기둥 하단부에서의 전단균열의 수가 현저히 감소하였다. 슬라이딩 슬롯 길이가 5mm인 B5-E0는 휨균열 발생 시점인 층간 변위비 0.75%를 초과한 층간변위비 1%부터 스틸 링크가 슬라이딩 슬롯에 닿아 하중을 받기 시작하여 무보강 시험체에 비하여 전단균열 발생 시점이 지연되었다. 슬라이딩 슬롯 길이가 10mm인 B10-E0는 무보강 시험체의 전단균열 발생시점인 층간변위비 1.4%에서 강제 브레이스가 슬라이딩 슬롯 단부에 닿는 것을 확인하였다. 이에 따라 전단 균열 발생시점은 무보강 시험체에 비하여 지연되지 않았으나, 콘크리트 박리가 발생한 시점이 2.2%에서 4.5%로 지연됨을 확인할 수 있었다.

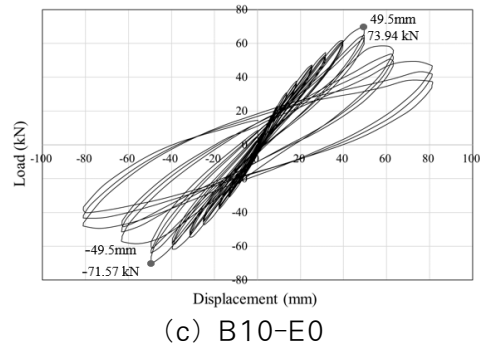
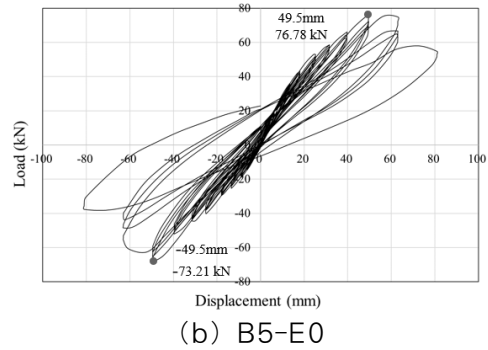
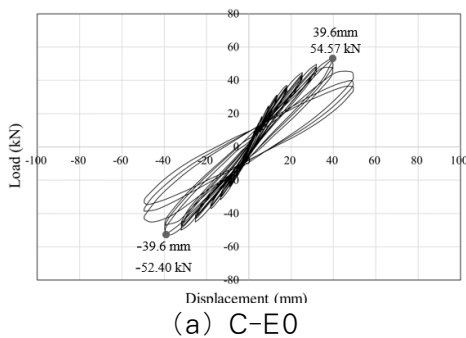


<Fig. 4> Cracking pattern

3.2 하중-변위 관계

각 시험체별 하중-변위 관계를 <Fig. 5>에 나타내었다. 보강 시험체 B5-E0와 B10-E0의 최대

하중은 각각 76.78kN, 73.94kN으로 무보강 시험체인 C-E0의 최대하중 54.57 kN보다 각각 약 40.7%, 35.5% 더 높게 측정되어 RSB 시스템이 기둥의 강도 및 강성을 증진시키는데 기여한 것으로 판단된다. 무보강 시험체 C-E0는 층간변위비 2.2%에서 최대하중에 도달하였고 B5-E0와 B10-E0는 층간변위비 2.75%에서 동일하게 최대하중에 도달하였다. 시험체 B5-E0의 최대하중과 비교하여 B10-E0의 최대하중이 약 1.038배로 미미하게 높게 측정되었다. 이를 통해 슬롯의 길이는 시험체의 최대하중에 크게 영향을 미치지 않음을 확인하였다. C-E0는 층간변위비 2.75%에서 하중이 최대하중의 80%이하에 도달하여 실험이 종료되었다. B5-E0와 B10-E0는 층간변위비 4.5%에서 하중이 최대하중의 80% 이하에 도달하여 실험이 종료되었다. Han(2005)의 연구에 따르면, 보통모멘트 골조로 설계된 구조물은 층간변위비 3.5%에서 최대하중의 80%에 도달하였고 중간모멘트골조로 설계된 구조물은 층간변위비 4.5%에서 최대하중의 80%에 도달하였다⁹⁾. Lee et al.(2023)의 연구에 따르면 특수모멘트 골조로 설계된 구조물은 층간변위비 4.5% 이상에서 최대하중의 85%에 도달하였다¹⁰⁾. 이를 통해 보강 시험체 B5-E0와 B10-E0는 층간변위비 4.5%에서 최대하중의 80%에 도달하였으므로 보강에 따른 내진성능이 중간모멘트골조 수준인 것으로 판단된다.



〈Fig. 5〉 Load against Displacement Curve

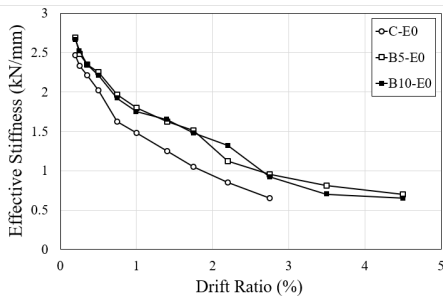
3.3 유효강성

유효강성은 Tsonos(1999)에서 제시한 각 cycle의 최대하중을 변위로 나눈 기울기를 구하는 방법으로 산정하여 〈Fig. 6〉에 나타내었다¹²⁾.

C-E0의 초기 유효강성은 2.464kN/mm에서 시작하여, 휨균열의 발생시점인 층간변위비 0.75%에서 감소하여 초기 유효강성의 약 1.64배인 1.627kN/mm에 도달하였다. 이후 지속적으로 감소하다가 층간변위비 2.75%에서 초기 유효강성의 약 0.26배인 0.65kN/mm에 도달하며 실험을 종료하였다. B5-E0와 B10-E0의 초기 유효강성은 각각 2.687kN/mm, 2.664kN/mm에서 시작하였다. 휨균열 발생 이전에서 B5-E0와 B10-E0의 유효강성의 변화 양상은 C-E0와 유사하였지만 휨균열이 발생하기 시작하는 층간변위비부터 변화 양상의 형태에 차이가 발생하였다. 층간변위비 0.75%에서 B5-E0와 B10-E0는 각각 초기 유효강성의 약 1.73배, 1.72배 수준에 도달하였다. B5-E0는 이후 브레이스가 항복한 시점인 층간변위비 2.2%에서 유효강성이 다시 급격히 감소하고 실험종료 층간변위비인 4.5%에서 초기 유효강성의 약 1.26배인

0.712kN/mm에 도달하였다. B10-E0는 브레이스가 항복한 시점인 층간변위비 2.75%에서 유효강성이 다시 급격히 감소하여 초기 유효강성의 1.34배의 수준에 도달하였으며 층간변위비 4.5%에서 초기 유효강성의 1.24배의 수준에 도달하며 실험이 종료되었다.

B5-E0와 B10-E0는 C-E0 대비 초기 유효강성에는 차이가 없었으나 각각 휨균열과 전단균열 이후 RSB 시스템의 브레이스가 하중을 부담하면서 실험을 종료할 때 까지 더 큰 유효강성 값을 보였다. C-E0의 실험 종료 시점인 층간변위비 2.75%에서 B5-E0와 B10-E0의 유효강성은 0.952kN/mm, 0.920kN/mm으로 무보강 시험체보다 약 46%, 41%, 더 높은 수준으로 RSB 보강공법은 철근콘크리트 기둥의 강성을 효과적으로 보강했음을 확인했다. 층간변위비가 0.75, 1.0, 4.5일 때 시험체 B5-E0와 B10-E0의 유효강성은 각각 1.967kN/mm, 1.800kN/mm, 0.700kN/mm와 1.920kN/mm, 1.750kN/mm, 0.652kN/mm로 슬롯의 길이가 길어질수록 층간변위비가 증가함에 따라 유효강성 값이 작게 나타나는 경향을 보였다.



〈Fig. 6〉 Effective Stiffness

〈Table 1〉 Effective Stiffness

drift ratio (%)	C-E0 (kN/mm)	B5-E0 (kN/mm)	B10-E0 (kN/mm)
0.2	2.464	2.687	2.664
0.25	2.333	2.481	2.521
0.35	2.215	2.350	2.347
0.5	2.025	2.250	2.210
0.75	1.627	1.967	1.920
1	1.480	1.800	1.750

1.4	1.250	1.620	1.650
1.75	1.050	1.510	1.480
2.2	0.850	1.124	1.320
2.75	0.650	0.952	0.920
3.5	-	0.810	0.702
4.5	-	0.700	0.652

3.4 에너지 소산 능력

층간변위비에 따른 시험체별 누적 에너지 소산량을 〈Table 2〉에 나타내었다.

슬롯의 길이가 각각 5mm, 10mm인 시험체 B5-E0, B10-E0의 누적 에너지 소산량은 약 9143kN·mm, 9236kN·mm로 무보강 시험체인 C-E0의 누적 에너지 소산량이 약 2363kN인것에 비해 약 3.87배, 3.9배였다. B10-E0는 B5-E0보다 지속적으로 높은 누적 에너지 소산량을 보였다. 실험 종료 시점에서 B10-E0가 약 1.01배로 미미하게 높은 값을 보였다. 이를 통해 RSB 시스템이 황하중에 효과적으로 대응하여 철근콘크리트 기둥의 내진성능을 향상시키는 것과 슬롯의 길이는 에너지 소산 능력에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

〈Table 2〉 Accumulated energy dissipation capacity

drift ratio (%)	C-E0 (kN·mm)	B5-E0 (kN·mm)	B10-E0 (kN·mm)
0.2	9.69	8.97	10.85
0.25	21.43	22.19	23.84
0.35	40.93	49.95	51.15
0.5	88.90	101.25	107.42
0.75	175.49	214.23	221.99
1	316.22	379.40	404.05
1.4	571.61	701.68	740.02
1.75	916.05	1109.05	1180.06
2.2	1460.26	1728.61	1893.61
2.75	2362.98	3078.49	3153.34
3.5	-	5520.39	5723.44
4.5	-	9143.08	9236.06

4. 결론

본 연구에서는 황하중 크기에 따라 효과적으로 대응할 수 있는 RSB 시스템의 슬라이딩 슬롯 길이에 따른 내진성능을 실험적으로 평가하기 위해 무보강 시험체 1개, RSB로 보강된 철근콘크리트 시험체 2개

를 제작하여 반복가력 실험을 수행하였다. 본 논문의 주요 결론은 다음과 같다.

1) 모든 시험체는 층간변위비 0.75%에서 휨균열이 발생하기 시작하였다. 보강 시험체는 무보강 시험체에 비하여 휨균열이 전체적으로 고르게 발생하였고 전단균열의 폭과 개수가 적었다. 시험체 B5-E0와 B10-E0의 휨균열과 전단균열의 발생시점과 균열의 폭과 개수가 비슷하였다.

2) RSB 시스템을 사용하여 보강한 시험체는 무보강 시험체에 비하여 최대하중이 약 1.54배로 측정되어 하중을 효과적으로 부담했음을 확인하였다. 반면 슬라이딩 슬롯의 길이가 5mm인 시험체가 10mm인 시험체보다 최대하중이 약 1.038배로 미미하게 높아 슬롯의 길이는 시험체의 최대하중에 크게 영향을 미치지 않음을 확인하였다. C-E0는 층간변위비 2.75%에서 최대하중의 80%에 도달하였고, B5-E0와 B10-E0는 층간변위비 4.5%에 최대하중의 80%에 도달하였다. 이를 통해 RSB 시스템으로 보강된 철근콘크리트 기둥 구조물은 중간모멘트골조 수준으로 판단된다.

3) RSB 시스템으로 보강한 시험체는 브레이스가 하중을 부담하는 시점부터 최대하중의 80%에 도달하여 실험을 종료할 때 까지 무보강 시험체에 비하여 더 큰 유효강성 값이 측정되었다. 무보강 시험체의 실험 종료 시점과 동일한 층간변위비의 보강 시험체의 유효강성 값이 더 크게 나타났다. 층간변위비 1.0, 4.5에서 시험체 B5-E0가 B10-E0의 유효강성 값의 약 1.03배, 1.07배로 슬롯의 길이가 클수록 유효강성 값이 실험 진행에 있어 지속적으로 낮게 측정되었다. 이를 통해 RSB시스템이 강성을 효과적으로 증진시켰으나 슬롯의 길이가 길수록 강성 측면에서 내진성능을 감소시키는 것으로 판단된다.

4) RSB 시스템으로 보강한 시험체는 무보강 시험체에 비하여 에너지 소산 능력이 평균적으로 약 3.88배 더 높았다. B10-E0의 에너지 소산 능력은 B5-E0에 비해 약 1.01배로 그 효과가 크지 않았다. 이를 통해 RSB 시스템이 에너지소산능력 측면에서 내진성능 향상에 기여하였으나 슬롯의 길이는 내진성능에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2020R1A2C2009351 and No.2019R1A2C1090033).

References

1. FEMA 547, Techniques For The Seismic Rehabilitation Of Existing Buildings
2. Kim, D. "Experimental study on the seismic performance of hybrid buckling-restrained braces". Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 13, No.4, pp.23-29, 2013
DOI:<https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2013.13.4.023>
3. Kim, J., Shin, H. "Seismic loss assessment of a structure retrofitted with slit-friction hybrid dampers", Engineering Structures, Vol. 130, pp.336-350, 2017
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.10.052>
4. Xu, G., Ou, J. "Seismic performance of combined rotational friction and flexural yielding metallic dampers", Journal of Building Engineering, Vol. 49, 104059, 2022
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104059>
5. Zhao, J., Sun, J. & Qiu, H., "Experimental study on seismic upgrading of RC frames using innovative brace system with two-stage characteristic", Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 22, No.128, 2022
DOI:<https://doi.org/10.1007/s43452-022-00447-z>
6. Shakiba, M., Mortazavi, S.M.R., "Analytical and numerical investigation of knee brace equipped with a shape memory alloy damper", Shock and Vibration, Vol.2022, 2022
DOI:<https://doi.org/10.1155/2022/6797938>
7. Lee, J., Lim, J. & Lee, Y., "The structural performance of reinforced concrete column

- retrofitted with replaceable steel link subjected to eccentric load”, Jo, Vol.38, No.5, pp.195-203, 2022
DOI:<https://doi.org/10.5659/JAIK.2022.38.5.195>
8. Kim, K., Jung, J., Lee, B., & Lee, K. Seismic Performance Evaluation of Full-size Two-story R/C Frame Strengthened with Concrete Wingwall with Embedded Kagome Truss by Pseudo-dynamic Test. Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 32, No.2, pp.173-183, 2020
DOI:<https://doi.org/10.4334/JKCI.2020.32.2.173>
9. Paulay, T., & Priestley, M. N., “Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings” Vol. 768. Wiley, 1992
DOI:<https://doi.org/10.1002/9780470172841>
10. Han, S., "Seismic Behavior of Columns in Ordinary and Intermediate Moment Frames." Journal of the Korea Concrete Institute Vol. 17, No.1, pp.51-58, 2005
DOI:<https://doi.org/10.1002/9780470172841>
11. Lee, J., Kim, K., Heo, J., Lee, Y., & Shin, D., “Relative and Absolute Emulation Criteria of Precast Concrete Structures. Journal of the Korea Concrete Institute”, Vol. 35, No.2, pp.147-156, 2023
DOI:<https://doi.org/10.4334/JKCI.2023.35.2.147>
12. Tsonos, A. G., “Lateral load response of strengthened reinforced concrete beam-to-column joints”, ACI Structural Journal, Vol. 96, pp.46-56, 1999
DOI:<https://doi.org/10.14359/595>
- Received : August 7, 2023
 - Revised : August 29, 2023
 - Accepted : August 29, 2023