

철근콘크리트 구조물의 강재를 이용한 내진성능 보강효과

Retrofitting Effects of Seismic Resistance Capacity of Reinforced Concrete Framed Structure

정 란* 박현수** 박태원*** 백인관***
Chung. Lan Park, Hyun Soo Park. Tae Won Back. In Kwan

Abstract

This paper studied the efficiency of retrofitting of reinforced concrete structure which was not designed to endure an earthquake. The earthquake in Kobe, Japan showed that there was a great possibility of having an earthquake even in big city and the damages were concentrated on mid or low story buildings which were not considered to be protected from an earthquake. This experiment used reinforced concrete structure which restrained side-by-side displacement to test durability against an earthquake.

This study deals with the structural performance of reinforced concrete frame structures strengthened with steel materials.

Key words : *Earthquake, Retrofit, Block-filling, Wire bracing, X-bracing, K-bracing, End hunch.*

1. 서론

우리나라에서는 1978년 홍성지진이후 지진에 대하여 관심을 갖게 되었으나 후속조치의 부족으로 별다른 결과를 내어 놓지 못하였다. 이에 건설부에서는 대한건축학회에서 수행한 "건축물의 내진구조 및 방재에 관한 연구"를 기초로 내진설계를 위한 시행령을 제정하여 1988년 7월 1일부터 일정규모 이상의 건축물에 대하여 내진설계를 의무화 하도록 하였다. 그러나 우리나라의 경우 지진에 대한 경험이 많지 않았고 그간의 지진관련 연구도 미미하여 구조설계 실무자들이 실제 설계에 내진설계 개념을 도입하는데에는 적지 않은 어려움이 있었다. 또한 1988년 7월 이전에 설계된 건축물은 지진에 대한 대책이 거의 이루어지지 않았으며 따라서 대도시 근방에 지진이 발생할 경우, 큰 피해를 입을 것으로 우려된다. 실제로 1995년 일본의 고베에서 일어났던 지진피해를 살펴보면 이러한 문제점이 심각하게 드러난다. 지진이후 수행된 일본 건축학회의 조사에 의하면 고베지진으로 피해를 입은 대부분의 구조물들은 일본 내진기준이 제정되기 이전에 설계된 구조물로서 철근콘크리트 구조물의 경우, 1971년 이전 건축된 건물의 경우 70%정도가 피해를 입은 것으로 드러났으며, 71년~81년 사이에 설계된 건물은 35%정도, 81년 이후의 건물은 약 15%만이 피

* 정회원, 단국대학교 공학부 교수
** 정회원, 신홍대학 건축설계과 조교수
*** 학생회원, 단국대학교 대학원 건축공학과 석사과정

해를 입은 것으로 나타나, 그 피해의 정도는 다르지만, 새로운 내진규정을 적용한 81년 이후의 피해가 가장 작은 것으로 나타났다. 또한 저층의 일본 전통가옥들은 거의가 피해를 입었던 것으로 보아, 우리나라 저층건물에 주로 쓰이는 구법인 단순frame구조 또한 지진에 대한 위험성을 갖고 있을 것으로 판단된다. 따라서 우리나라에서도 내진에 대한 규정이 도입되기 전에 설계 및 시공된 구조물과 내진설계가 의무화되지 않은 구조시스템에 대해서는 이와 같은 지진이 발생할 경우 가 공할만한 피해가 우려된다.

이 연구의 목적은 우리 나라에서 내진규정이 적용되기 이전에 설계된 구조물이나 88년 이후 설계되었던 구조물중 내진설계 의무 규정에서 제외된 저층 구조물과 골조 구조물에 대하여 저렴하고 시공이 용이한 내진성능 보강방법을 강구하고자 하는데 있다.

2. 시험체의 계획과 제작

본 실험에 이용된 시험체는 내진설계가 되지 않은 현존하는 경찰청청사로서, 경찰청청사 표준설계도(건설부 공고 제 17호, 1987년 2월 28일 작성도면)를 대상으로 1개조의 frame만을 대상으로 하였다. 모델링된 시험체는 1998년 건설교통부 연구개발사업의 일환으로 진동대 실험과 접합부분의 지진거동에 대한 연구가 진행되었던 구조물이다. 대상 구조물을 상사법칙에 의거하여 1/2로 축소하여 제작하였다. 제작된 기준 시험체의 배근도와 치수를 그림 1에 나타내었다.

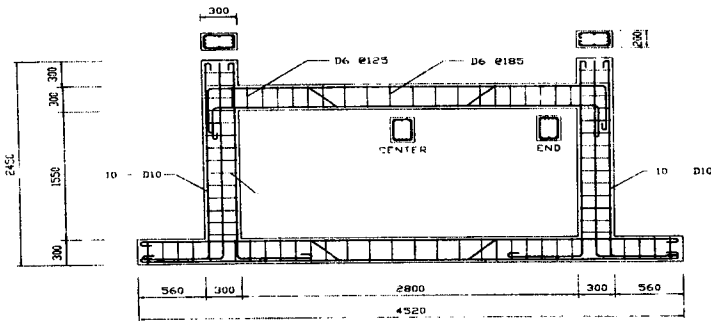


그림 1 시험체의 배근도

시험체는 기준시험체 1개(E-N)와 횡변위를 구속할수 있도록 frame내부에 보강한 시험체 3개(E-X, E-K, E-H)등 총 4개의 시험체를 제작하였다. 시험체의 변수는 표 1에 나타난 바와 같다.

표 1 각 시험체별 보강방법

시험체명	보강재료	비고
E-N	-	기준시험체
E-X	□-100×50×5×7.5	강재보강시험체
E-K	□-100×50×5×7.5	
E-H	2×6t철판	

시험체는 단국대학교 노천실험장에서 제작하였으며 철근은 인천제철에서 제작하여 일반 현장에 공급하는 D10 철근을 구입하여 사용하였고 별도제작된 D6철근을 사용하였다. 콘크리트는 기존 건축물이 시공될 당시의 상황을 고려하여 설계기준강도 210kg/cm², 최대골재지름 13mm, 슬럼프는 12cm로 하였다. 콘크리트 타설시 KS규준에 따라 슬럼프 테스트를 실시하여 품질을 확인하였고, 추후 강도측정을 위한 15개의 공시체를 실린더 몰드로 제작하였다. 공시체는 1일 양생후 캐핑을 실시하고 수중양생후 7일, 14일, 28일강도를 측정한 결과 각각 평균 184kg/cm², 219kg/cm², 225kg/cm²정

도로 설계기준강도를 만족하였다. 시험체를 28일동안 대기 양생시킨후 공시체가 설계강도 이상의 조건을 만족한 후에 내부 보강작업을 실시하였다.

내부보강방법으로는 첫째로 X형 브레이싱 공법으로 횡하중 보강에 가장 많이 적용되는 방법이다. 이 방법은 프레임 내부에 X형의 강재들을 제작하여 횡하중을 강재에 부담시키는 방법으로 양기둥단부를 확실하게 구속할수 있으며 접합부 상호간에 강재를 연결시켜 최대한의 횡변위를 구속시킬수 있다. 따라서 지진하중의 많은 부분을 강재에 부담시킬 수 있어 내진성능 향상에 적절한 것으로 판단된다. 실제로 일본에서 적용된 예를 살펴보면 브레이스 보강에 의하여 약 2배 이상의 내력증대 효과를 나타내었다. 하지만 개구부의 이용이 적절하지 못함으로 내부 프레임보다는 외부 프레임에 적용되는 것이 적절할 것으로 판단된다. 시험체의 상세는 그림2와 같다.

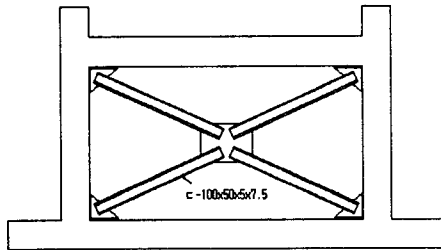


그림 2 E-X시험체

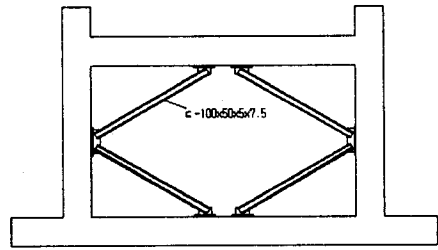


그림 3 E-K시험체

두번째로 K형 브레이싱 공법은 프레임 내부에 K형의 강재들을 제작하여 부착시키는 방법으로 X형 브레이싱보다는 보강효과가 뒤지지만 내부에 개구부를 확보할 수 있어 내부 프레임에 적용되기 쉬운 공법이다. 일반적으로 강도증진형의 내진성능 보강법의 단점으로 지적된 개구부의 폐쇄를 해결한 방법이므로 브레이싱을 적절한 형태로 계획한다면 기존건물의 사용성에 상관없이 우수한 내진성능 향상 방법으로 생각된다. 시험체의 상세는 그림3과 같다.

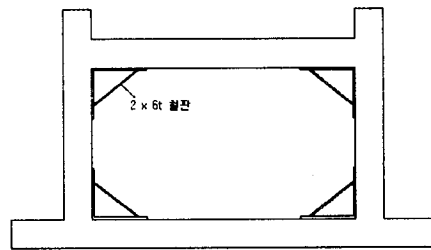


그림 4 E-H시험체

마지막으로 단부헌치 보강공법은 프레임 내부중 접합부 부분에 강재들을 부착시키는 방법이다. 부착된 강재는 비내진 상세를 갖는 철근콘크리트 구조의 약점인 접합부 부분의 전단근을 보강시켜 주는 역할을 한다. 고베지진의 피해 상황을 살펴보면 전단철근이 부족한 부분에서 집중적인 파괴 형태를 보여 주고 있으며 내진 상세를 갖지 않은 구조물 중에 대부분이 기둥의 접합부 부근에서 파괴되는 형태를 보여 주고 있다. 따라서 이 부분만 보강을 해 주어도 상당한 보강효과를 기대할 수 있을 것이다. 더욱이 이 방법은 내부에 개구부를 상당히 확보할 수 있어, 구조물의 사용성을 최대한 보장할 수 있을 것으로 판단된다. 시험체의 상세는 그림4와 같다.

3. 실험장치 및 실험방법

실험은 경기도 용인에 위치한 현대건설기술연구소 구조실험동에서 실시하였다. 가력장치로는 MTS 50kN용량의 유압식 Actuator를 사용하였으며 이 가력장치의 측정범위는 하중 ± 50 kN, 변위 ± 125 mm까지 가력할 수 있는 장비이다. 변위는 0.01mm까지 측정되는 ± 100 mm용량의 L.V.D.T. (Linear Variable Displacement Transducer) 1대와 ± 50 mm용량의 LVDT 4대, ± 25 mm용량의 LVD T 3대를 사용하였다. 가력은 변위제어(Displacement Control) 방식으로 수행하였다. 변위의 증분은 3단계까지는 초기항복변위(Δy)인 3.22mm의 1/2인 1.61mm씩, 4단계부터는 Δy 인 3.22mm씩 증가시키며 가력하였고, 또 5단계까지는 1단계당 2cycle씩 수행하였고, 6단계이후부터는 1cycle씩 수행하였으며 균열체크는 수시로 실시하였다. 변위제어는 Actuator의 변위로 제어하지 않고 실험체의 변위로 제어하는 관계로, 약1mm정도의 오차범위내에서 변위를 제어하였다. 시험체의 가력은 그림 5와 같이 시험체 상부보 중앙에 구멍을 뚫어, 이 홀과 Actuator를 연결하는 보조철물을 제작하여 가력하였고 먼저 +방향(Actuator에서 미는 방향)으로 가력하고, 다시 Actuator의 변위를 0점으로 정지시킨후에 -방향(Actuator에서 당기는 방향)으로 가력하였다. 이때 가력점에 하중이 집중되어 파손되는 것을 방지하기 위하여 구멍주위로 나선근과 스티럽근으로 보강해 주었다. 실험의 종료시점은 시험체의 변위가 100mm이상이 되거나, 시험체의 내력이 최대내력의 70%가 되는 점을 종료시점으로 계획하였다.

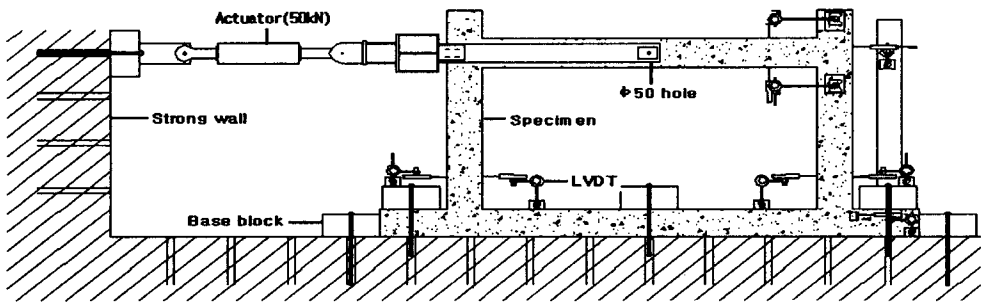


그림 5 시험체 SET-UP

시험체의 횡변위와 각 부재의 curvature를 측정하기 위하여 그림 5와 같이 7개의 LVDT를 각 개소에 설치하였으며, 가력시 시험체의 수평이동을 관찰하기 위하여 시험체 하부에 1개의 LVDT를 설치하였으나 그 크기는 1mm 이내로 미미하였다.

4. 실험 결과

4.1 E-N시험체

E-N시험체의 경우 기둥 하단부에서 먼저 균열이 발생하였고 다음 기둥상단부에서 균열이 발생하였으며, 다음 보의 단부에서 균열이 발생하였고 마지막으로 보의 중앙부와 기둥의 중앙부에서 균열이 발생하였다. 초기 균열은 1단계에서 발생하였으며 균열의 폭은 약 2mm까지 진전되었다. 실험 전반기에는 기둥하부에서 균열이 많이 발생하였으나 후반기에는 상부 보-기둥 접합부 부근에서 많이 발생하였다. 22단계에서 변위가 100mm에 근접하였고 기둥하단부의 콘크리트가 완전히 박리되어 실험을 중지하였다. 11단계이후로 미소하나마 내력이 감소하는 상태로 실험이 종료되었다. 최대하중은 9단계(변위 22.54mm)에서 6.97ton, -8.51ton을 나타내었다. 시험체의 하중-변위이력곡선

을 그림 6에 나타내었다.

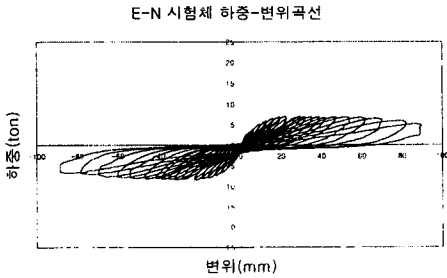


그림 6 E-N시험체의 하중-변위 곡선

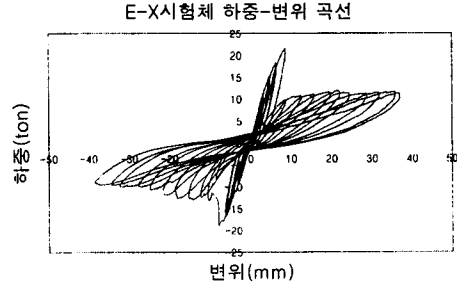


그림 7 E-X시험체의 하중-변위곡선

4. 2 E-X시험체

E-X시험체의 경우 E-N시험체와 소성힌지의 구성순서가 동일하였다. 초기균열은 1단계에서 하부 보-기둥접합부 부근에서 발생하였으며 균열의 폭은 약 4mm까지 진전되었다. 3단계에서 파열음과 함께 보강재를 접합시킨 앵커볼트가 탈락되기 시작하였다. 4단계부터는 용접부위가 탈락되기 시작하였으며, 7단계부터는 보강재 상호간 연결판인 중앙판이 변형을 일으켰다. 따라서 보강재는 소성구역으로 가지 못하고 연결판이 소성변형을 일으킨 것으로 판단된다. 5단계(9.66mm)에서 양 방향으로 최대내력 20.4 ton, -18.9 ton을 보였으며 6단계부터는 일부 보강재가 탈락되어 내력이 감소한 상태로 실험이 진행되었다. 14단계에서 앵커볼트 분리와 연결판이 완전히 탈락되어 실험을 종료하였다. 이 시험체는 내력이 높아서 실험체에 많은 균열을 발생시켰으며 그 패턴은 접합부에 집중되어 발생하였다. 시험체의 하중-변위이력곡선을 그림 7에 나타내었다.

4. 3 E-K시험체

E-K시험체의 경우 균열이 접합부에서 보다 기둥에 먼저 발생하였으며 곧이어 접합부에도 균열이 발생하였다. 초기 균열은 1단계에서 발생하였으며 2단계에서 앵커볼트가 밀려나기 시작하였다. 5단계에서 보 부근에 장착된 보강재가 탈락되기 시작하여 콘크리트의 피복을 물고 탈락되었다. 최대 내력은 10.57ton, -12.43ton을 나타내었다. 이 시험체의 경우 보강재가 장착된 기둥 중앙부와 보 중앙부에 손상이 집중되었다. 또한 실험이 후반부로 진행되면서 접합부에도 많은 균열을 발생시켰다. 그림8의 하중-변위곡선을 보면 보강재가 탈락하면서 내력곡선이 주춤하였으나 다시 강성이 증가하는 결과를 보여주고 있다. 18단계에서 보강재가 완전히 탈락되어 실험을 종료하였다.

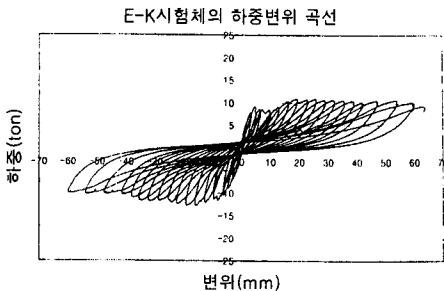


그림 8 E-K시험체의 하중-변위곡선

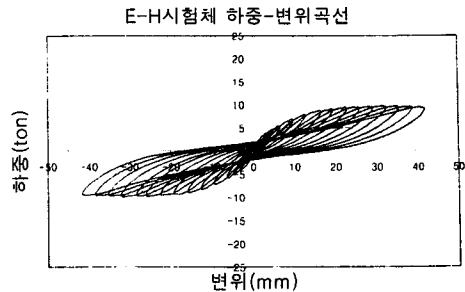


그림 9 E-H시험체의 하중-변위곡선

4. 6 E-H시험체

E-H시험체의 경우 E-N시험체와 소성현지의 형성순서가 동일하였다. 초기균열은 1단계에서 접합부부근에서 발생하였으며 5단계에서부터 보강재가 탈락하기 시작하였고 7단계에서는 앵커볼트가 탈락되기 시작하였다. 10단계까지 새로운 균열이 발생하였으며 11단계부터는 기존의 균열이 균열폭만 증가하는 형태로 진행되었다. 실험이 진행될수록 보강재의탈락이 진행되었으며 실험 중반부에는 보강재 끝부분에서 시험체에 관통균열이 발생하였다. 시험체의 최대내력은 9.48ton, -9.57ton을 나타내었다. 실험은 16단계에서 시험체가 뒤틀리는 현상이 발생하여 종료하였다. 시험체의 하중-변위곡선을 그림 9에 나타내었다.

5. 결과 분석

5. 1 하중-변위 이력곡선

각 시험체의 하중-변위 이력곡선을 비교(표2참조)하여보면 E-X시험체가 E-N시험체보다 약 122%정도 높은 내력을 유지하고 있었으며, E-K시험체는 46%, E-H시험체는 12 %정도 더 높은 내력을 유지하고 있었다. 결과적으로 E-X시험체, E-K시험체, E-H시험체순으로 높은 내력을 유지하였다. 각 보강시험체 모두 보강재가 훼손된 이후에도 E-N시험체보다 높은 내력을 유지하고 있었으며 연성의 정도도 더 우수한 것으로 나타났다.

표 2. 각 시험체별 최대 내력 비교

	최대내력(ton)		최대내력비	
	-방향	+방향	-방향	+방향
E-N	-8.51	6.97	1	1
E-X	-18.9	20.4	2.22	2.92
E-K	-12.43	10.57	1.46	1.52
E-H	-9.57	9.48	1.12	1.36

5. 2 각 시험체의 강성비교

그림10은 각 시험체의 단계별 하중을 그때의 변위로 나눈값을 보여주고 있다. 그림10에서 나타

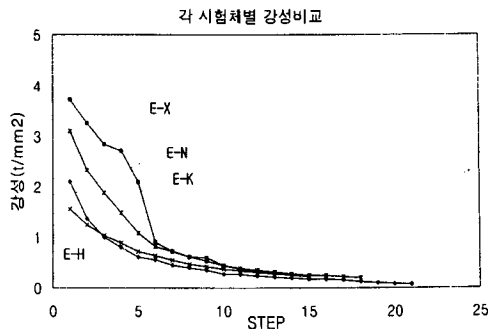


그림 10 각 시험체별 강성비교

난 바와 같이 각 시험체의 강성은 단계가 증가할수록 강성이 저하되는데 초기강성은 시험체의 보

강방법에 따라 E-X시험체의 경우 E-N시험체보다 약 4배정도 강성이 크게 나타났으며 5단계까지는 높은강성을 유지하였고, 균열직후인 3단계이후에는 강성이 감소하였다. E-K시험체의 경우 기준시험체와 비교하여 초기강성은 우수한 것으로 나타났으며 종반에는 E-N시험체와 큰차이를 나타내지는 않았다. E-H시험체의 경우 초기에는 E-N시험체와 거의 비슷한 강성을 가졌으나 강성의 감소가 E-N시험체보다 완만하게 감소하였으며 시험종료시까지 E-N시험체보다 높은 강성을 유지하였다. 전체적으로 강성의 정도를 비교하여 보면 E-X, E-H, E-N시험체의 순으로 높은 강성을 갖고 있는 것으로 나타났다.

5. 3 각 시험체의 보강 효과

각 시험체의 하중-변위 이력곡선의 추세선의 면적을 이용하여 각 시험체별 보강 효과를 비교해 보면 표3과 같다. 보강효과는 E-X 시험체가 가장 효과적인 것으로 나타났으며, 다음으로 E-K, E-H시험체 순으로 보강효과가 우수한 것으로 나타났다. E-K시험체의 경우 보강효과는 E-X시험체보다 다소 떨어지나 내부 개구부를 확보할 수 있다는 점에서 우수한 보강법으로 사료된다.

표3. 각시험체의 보강효과

시험체	소산에너지(t · mm)	보강효과(%)	비고
E-N	486	-	
E-X	1061	118	
E-K	884	82	
E-H	629	29	

5. 4. 각시험체의 에너지 소산능력

시험체의 에너지 소산능력은 하중-변위 곡선으로부터 알 수 있다. 하중-변위 곡선의 면적을 에너지 소산능력으로 계산하였다. 실험은 14단계까지 진행되었으나 시험체 별로 소성거동이 다른관계로 초기에너지 소산력(5단계까지)과 실험종료시까지 에너지 소산력을 나누어서 비교해 보았다.

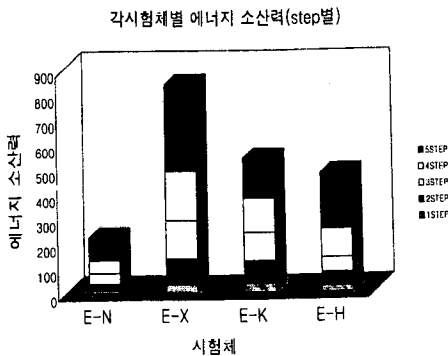


그림 11 각시험체별 에너지 소산력(1-5단계)

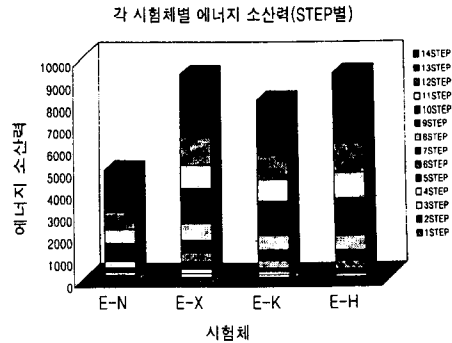


그림 12 각 시험체별 에너지 소산력(1-14단계)

초기거동에 의한 에너지 소산력은 그림 11에 나타난 것과 같이 E-X, E-K, E-H시험체의 순으로 나타났다. 이는 하중-변위이력곡선에 의해 나타나는 보강효과의 우수성과 비례하였다. 하지만 실험종료(14단계)시까지 비교하여 보면 그림 12에 나타난 것과 같이 E-H, E-X, E-K시험체의 순

으로 에너지 소산능력이 우수한 것으로 나타났다. 이 결과는 E-H시험체의 경우 시험체의 거동이 완전히 항복하여 소성거동을 하고 있고 E-X시험체의 경우 하중을 제거하면 복원되는 탄성적인 거동을 하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

6. 결론

위와 같이 비내진 상세를 갖는 구조물에 대하여 횡방향 변위를 구속하는 조건으로, 보강한 실험체의 거동을 비교하여 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 횡변위의 구속이 없는 기준시험체보다 X형 브레이싱 보강한 시험체는 122%, K형브레이싱 보강한 시험체는 46%, 단부현치보강한 시험체는 12%의 최대내력의 증대를 나타내었다. 그러나 X형 보강 시험체는 앵커볼트 탈락후 압축부재에 좌굴이 발생하여 급격한 내력감소를 보였다.
2. 기준시험체와 보강시험체의 강성을 비교하여 보면 모든 보강시험체가 기준시험체보다 높은 강성을 유지하고 있는 것으로 나타났다.
3. 각 시험체의 보강성능을 비교하여 보면 횡변위의 구속이 없는 기준시험체보다 X형 브레이싱 보강한 시험체는 118%, K형브레이싱 보강한 시험체는 82%, 단부현치보강한 시험체는 29%의 보강효과가 나타났다.
4. 에너지 소산능력을 비교하여 보면 초기거동에 의한 에너지 소산력은 E-X, E-K, E-H시험체의 순으로 나타났으며, 실험종료(14단계)시까지 비교하여 보면 E-H, E-X, E-K시험체의 순으로 에너지 소산능력이 우수한 것으로 나타났다.

참고문헌

- 1) 김상대의, “우리나라 중저층 철근콘크리트 구조물의 지진피해예측 및 보수보강법 연구”, 건설교통부 연구개발사업 연차보고서
- 2) 정영수, 신영수, “고베지진의 교훈” 한국콘크리트 학회지 제7권 3호, 4-11.
- 3) Michael P. Schuller “Expermental Evaluation of Masonry Infilled RC Frames journal of the Structure Division” - journal of structural engineering 1996-3
- 4) 이한선 “ 합리적 내진설계를 위한 실험기법 - 한국콘크리트 학회지 제5권 2호 p20-31

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단의 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

본 실험을 진행하여준 현대건설기술연구소와 관계자 여러분께 감사드립니다.