

## 외부 강재 보강으로 구성된 합성 부재의 휨 성능에 대한 실험

황병훈<sup>1</sup>, 신진원<sup>1</sup>, 전재호<sup>2</sup>, 김윤용<sup>3\*</sup>

### Experiments on Flexural Performance of Composite Members Strengthened by External Steel Plates

Byung-Hun Hwang<sup>1</sup>, Jin-Won Shin<sup>1</sup>, Jae-Ho Jeon<sup>2</sup>, Yun-Yong Kim<sup>3\*</sup>

**Abstract:** This paper presents an experimental study on the flexural performance of concrete members strengthened with external steel plates for the purpose of improving seismic performance. In order to strengthen the structure, a strengthening method was applied that wraps the walls and columns with steel members. The partial section of the wall with the longest span in the structure was manufactured in real size and the strengthening effect was confirmed by performing a static load test. As a result of the experiment, it was confirmed that the strengthened section exhibited sufficient flexural performance satisfied to the seismic requirements, but the behavior until failure was not obtained because of actuator capacity. It was confirmed that the strengthened member resists the out-of-plane moment with a composite behavior. It was verified that the stiffness and load carrying capacity of the strengthened member were improved compared to the non-strengthened member by displacement and strain measurements.

**Keywords:** Composite members, Seismic strengthening, Flexural performance, Static loading test

## 1. 서 론

지형적으로 판 경계 지역에 위치한 국가에서는 높은 빈도로 지진이 발생하며, 그것에 대비하기 위하여 많은 연구가 진행되어 있다. 한국은 지형적으로 판 내륙 지역에 위치하고 있으며, 상대적으로 사회기반시설의 내진성능에 대한 관심이 높지 않았었다. 하지만 2011년 3월 발생한 동일본 대지진 이후 한국에서도 사회기반시설의 내진성능에 대한 관심이 높아졌고, 발생 가능한 지진에 의한 피해를 최소화하기 위하여 많은 조치들이 수행되었다. 일반 건축물에 대하여 내진설계가 의무화 되었으며, 기존에 내진설계가 이루어지지 않은 시설에 대한 평가와 보강이 이루어졌다. 또한 내진설계가 진행된 구조물의 경우에도 주요 시설물은 내진성능 재평가가 진행되었고 필요시 보강이 이루어졌다.

기존 시설물의 내진 보강을 위해 다양한 보강 재료 및 공법에 대한 선행연구가 있었다. SHCC(Strain Hardening Cementitious Composites), ECC(Engineered Cementitious Composites), UHPC

(Ultra High Performance Concrete) 등과 같은 특수콘크리트와 강재로 구조 강성을 증가시키는 방법이나(Kim et al., 2014; Sawab et al., 2016; Hyun et al., 2021) 프리스트레스트 도입을 통해 보강하는 방법(Kim et al., 2021; Hwang et al., 2021; Ha, 2019; Lim et al., 2009), FRP 시트를 감싸는 보강 방법(Ha, 2018) 등 다양한 조합을 통해 구조물의 강성을 증가시킬 수 있음을 확인하였다. 모든 구조물은 설계목적 또는 용도 등에 따라 다양한 현장조건을 가지고 있으며, 이로 인해 일률적인 내진보강 방법 적용은 제한적인 경우가 많다. 현장조건이 불리한 경우 적용 사례가 많지 않은 보강 방법을 적용할 수 있으며, 설계 단계에서 많은 고민이 요구된다. 보다 정확한 해석 모델과 해석 방법을 통하여 실제 성능에 가까운 결과를 얻을 수 있게 되었으나, 흔히 사용하지 않는 구조 형식에 대한 해석 결과는 실험을 통해 보다 면밀한 검증을 거친 후에 설계를 진행하게 된다. 실험은 진동대 실험, 정적 방법, 준정적 방법, 유사 동적 방법 등 실험 환경에 따라 계획하여 진행할 수 있다(Kim et al., 2021; Han et al., 2007; Shim et al., 2007; Kwak et al., 2008; Kwon et al., 2018).

본 연구는 내진성능 평가를 통해 일부 요소에서 내진 성능이 부족한 것으로 판단된 특수 형식의 구조물을 대상으로 하며, 외부 보강재 설치를 통한 내진보강을 적용하는 과정에서 해석과 실험적 방법을 통해 보강 성능을 확인하고자 수행되었다.

<sup>1</sup>정회원, 한국원자력연구원

<sup>2</sup>정회원, 제이스코리아

<sup>3</sup>정회원, 충남대학교 토목공학과 교수

\*Corresponding author: yunkim@cnu.ac.kr

Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34113, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2022년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2022년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 2. 내진 보강방법 적용 배경

보강단면이 적용되는 구조물은 기초판 위에 800×1000 mm~1500×1500 mm의 단면을 갖는 기둥이 지하층에서 6층까지 존재한다. 기둥과 기둥 사이에는 400 mm의 벽이 시공되어 있으며, 지붕은 강재 트러스로 구성되어 있다. 구조물의 동측은 사무실 등으로 사용할 수 있도록 벽과 바닥슬래브가 시공되어 있으며, 나머지 구역의 남측 절반은 지하층에서 3층까지 벽과 바닥이 시공되어 있다. 이러한 구조적 비등방성으로 인하여 내진성능 평가 결과, 일부 구역에서 해당 구조물에 요구되는 내진성능을 만족시키지 못하는 것으로 확인되었다. 보강대상 구조물의 형상은 Fig. 1과 같다.

내진성능 평가 결과, 보강이 요구되는 부분은 대부분 구조 형상이 급격하게 변하는 서측벽체와 북측벽체에 존재하였다. 보강이 필요한 방향성분은 벽체의 면외방향 수평 휨 강성이었다. 구조물의 보강을 위해 다양한 보강 방법을 검토하였다. 보강이 요구되지 않는 동측을 제외한 모든 방향에 인접 구조물이 있고, 지하에는 공동구 형태의 구조물이 있어 제한된 형

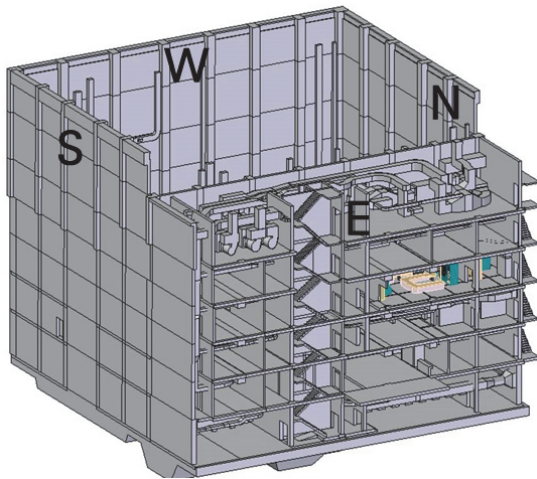


Fig. 1 Overall view of structures

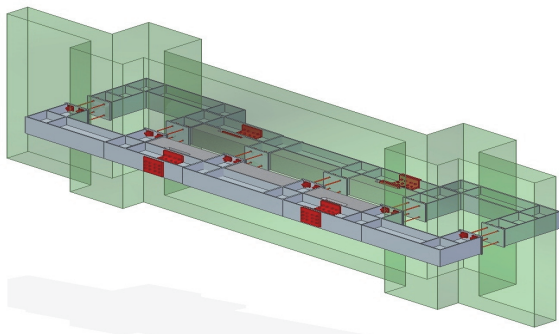


Fig. 2 Conceptual drawing of strengthening plan for wall and column of the structure

태의 보강 방법만 허용되었다. 또한 대상 구조물은 지진시에도 탄성 영역에 있어야 하는 요구사항이 있어 소성 설계를 통한 내진성능 향상은 고려하지 않았다.

사전 검토를 통해 현장조건을 고려한 보강개념을 Fig. 2와 같이 결정하였다. 연속된 기둥과 벽으로 구성된 구조물 외벽을 중심으로 안쪽과 바깥쪽에 대칭되는 형태의 보강 단면을 전체 벽체에 적용하였다. 충분한 강성 확보를 위해 H-Beam에 강판을 T-Beam 형태로 결합한 단면을 구성하였다. 합성단면 적용을 통한 보강 설계를 위하여 상용해석 프로그램(SAP 2000, V17)을 이용하여 탄성 해석을 수행하였다. 합성단면의 거동은 매우 복잡하기 때문에 비선형 해석을 통하여 보강효과를 검증하는 것이 바람직하나, 지진 시에도 탄성 영역에 있도록 하는 보강 목적이 있으므로 탄성 해석으로 구조물 보강 설계를 하고, 보강 이후의 안전성을 검증하였다. 축소 부재를 실험할 경우, 발생 가능한 불확실성을 예측하기 어렵기 때문에 실험 부재는 대상 구조물에서 가장 긴 지간을 갖는 벽체 일부 단면을 실험 크기로 제작하였다.

## 3. 실험 계획

면외방향 휨모멘트에 대한 내력이 부족한 외벽 구조물에 대한 합성단면의 보강성능을 알아보기 위하여, 실제 보강될 단면 중 일부를 선택하여 실험 대상으로 결정하였다. 기존 구조물에서 실험대상 부위를 모사한 실험체과 보강재가 적용된 실험체를 각각 한 개씩 제작하여 단면보강의 효과를 확인하였다. 지진 발생시의 면외방향 휨모멘트를 유발하는 면외방향 하중을 모사하기 위하여 정적 하중을 재하하고 실험체의 내력을 측정하였다.

### 3.1 실험체 제작

실험체의 크기는 길이 9 m, 폭 3 m이며, 보강설계에 적용된 것과 같은 단면으로 제작하였다. 기존 구조물 외벽 중 가장 긴

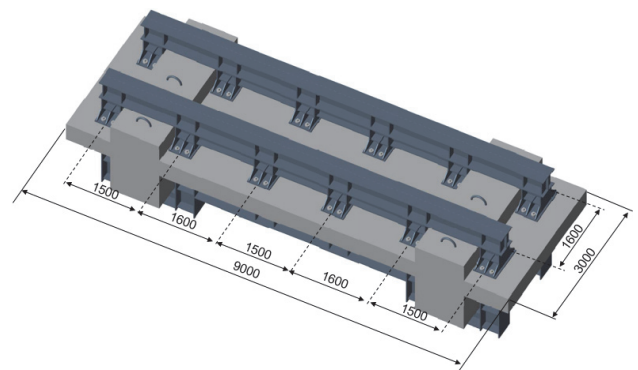


Fig. 3 Drawing of specimen geometry

시간을 갖는 기둥과 기둥 사이를 기준 모델로 설정하였다. 실제 구조물과 같이 벽 두께는 400 mm로 설정하였으며, 벽체와 기둥에 배근되는 철근량도 같게 제작하였다. 실험체의 형상과 치수를 Fig. 3과 Table 1에 나타내었다.

자재는 보강대상 구조물과 보강재 시공에 사용된 자재와 동일한 자재를 사용하는 것을 기본으로 하였다. 그러나 현장 사정으로 인하여 압축강도 28MPa에서 27MPa로 변경하였고, 강재도 ASTM 표준의 자재를 소량 구입하는 것이 불가하여 동일 성능의 KS 표준 자재로 실험체를 제작하였다. 자재 변경으로 인한 기계적 특성 차이는 미소하여 실험 결과에 미치는 영향은 미미할 것으로 판단하였다. 그 외의 자재는 대상 구조물과 같은 자재를 사용하여 실험체를 제작하였으며, Table 2에 기재하였다.

실험체의 제작 방법도 실제 보강공사에 적용될 시공시방서 요건을 준수하여 진행하는 것을 원칙으로 하였다. 실제 구조물의 실험대상이 벽체인 점을 고려하여 거푸집 시공과 콘크리트 타설은 세워서 진행하였다. 보강 실험체 제작을 위해 코어드릴 시방서에 따라 벽체가 관통되도록 천공하고, 관통볼트가 설계한 위치에 설치될 수 있도록 사전에 제작한 거푸집을 양면에 설치하여 관통볼트를 고정시켰다. 무수축 그라우트 시방서에 따라 무수축 그라우트를 시공하였으며, 충분히

양생된 후에 보강재를 설치하였다. 모든 과정은 실제 공정과 같이 벽체를 세운 상태에서 진행하였다. 야외에서 제작 완료된 실험체를 실험센터로 반입하기 위하여 본 구조물에는 없는 후크를 설계하여 시공하였으나, 후크로 인해 실제 구조물의 보강단면 성능 평가에 주는 영향은 크지 않을 것으로 판단하였다. 실험체 제작 후, 성능평가를 위한 재하시험을 수행하였고, 이때 벽 형태의 실험체를 놓혀서 가력하였다.

### 3.2 가력 방법

이 실험은 합성단면을 적용했을 때의 효과를 확인하는 목적의 실험이다. 실험을 통해 지진시 벽체에 가해지는 수평면 외방향 휨모멘트에 대한 강성 보강효과를 정량적으로 확인할 수 있어야 한다. 따라서 보강실험체에 대한 가력은 지진시 벽체에서 발생하는 수평방향 하중을 모사할 수 있어야 한다. 실제 지진력은 구조물의 질량 중 대부분을 차지하는 콘크리트 벽체의 질량에 대한 등분포 하중 형태로 가력될 것이다. 하지만 실험규모 실험에서 이러한 등분포하중을 구현하는 것은 쉽지 않다. 따라서 Fig. 4와 같이 벽체 형태의 실험체를 놓히고, 3점을 동시 가력하여 수평방향 지진 하중을 모사하고, 이때 보강단면의 내력을 확인하고자 한다.

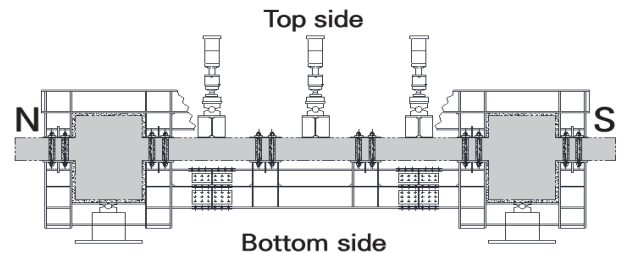
3개의 가력점에 대한 가력은 폭방향으로 동일하게 주어져야 하지만, 보강 실험체의 보강재로 인하여 폭방향으로 가력하는 방법은 불가능한 것으로 판단하였다. 보강재를 감싸는 방법과, 보강재와 벽체 사이를 통과하는 가력 지그도 검토하였으나, 지그의 높이로 인하여 실험 중 전도사고가 우려되어 적용하지 않았다. 최종 선택된 가력 방법은 Fig. 5와 같이 실험체의 기둥과 보강재 사이에 가력하는 방법이다.

**Table 1** Geometrical dimension of specimen

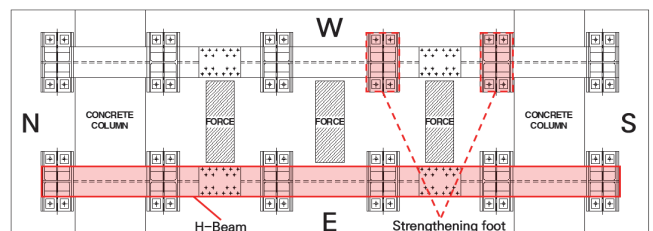
Type	Original structure	Test specimen
Thickness of concrete wall	400mm	400mm
Spacing of concrete column	6.2 m	6.2 m
H-Beam	-	400 x 408
Through bolt	-	M36
Height of strengthening from wall surface	-	850mm

**Table 2** Material in original structure and in specimens

Material	Standard	Original structure	Test specimen
Concrete	Compressive strength (28d)	28 MPa	27 MPa
Rebar	Technical Standards	ASTM A615 Grade 60	KS D 3504 SD400
	Yield Strength	420 MPa	400 MPa
H-beam	Technical Standards	ASTM A36	KS D3503
	Yield Strength	250 MPa	235 MPa
Through bolt	Technical Standards	ASTM A193 Grade B7	
Nonshrink grout	Technical Specification	Comotec 250, Masterflow 870GK	



**Fig. 4** Experimental setup (Front view of loading plan)



**Fig. 5** Experimental setup (Plan view of loading plan)

### 3.3 계측 방법

실험의 결과 측정을 위해 가력을 수행할 actuator에 load cell을 부착하였다. 또한 실험체의 콘크리트 벽체 중앙부 하단과 보강재의 양쪽 중앙부 하단 그리고 실험체 측면에 LVDT (변위계)를 설치하여 실험체의 처짐량과 항복시점을 측정할 수 있도록 하였다. 콘크리트 벽체 각 가력부위의 상하부 철근과 콘크리트 면 및 보강재의 상하부에 1축 변형률 게이지를 부착하여 콘크리트 벽체와 보강재에 분배되는 하중 및 2방향 거동에 대한 변형률을 측정하고, 콘크리트 벽체 철근의 항복시점을 관찰할 수 있도록 하였다. 비보강 실험체의 계측기는 보강재에 설치되는 계측기를 제외하고 보강 실험체와 동일하게 설치하였다. 보강 실험체에 대한 각 계측기의 설치위치는

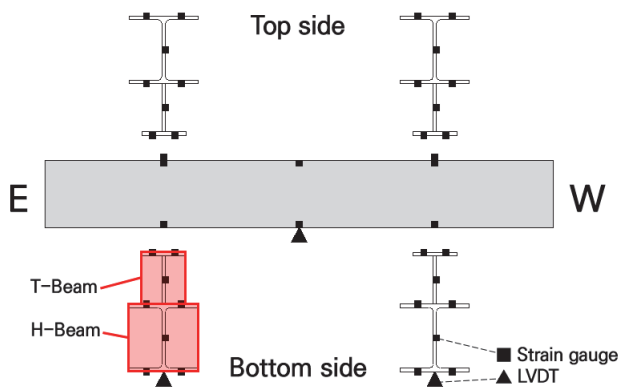


Fig. 6 Installation of measuring instruments (Section view, short side, column is hidden)

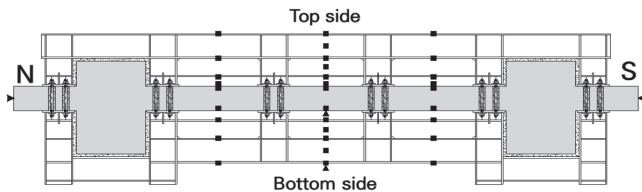


Fig. 7 Installation of measuring instruments (Section view, long side)

Fig. 6 그리고 Fig. 7과 같다.

실험체의 상부에서 지면 방향으로 가력하기 때문에 대부분의 균열은 실험체의 하부에서 발생할 것으로 예상된다. 육안으로 직접 관찰하는 것은 안전 문제가 있기 때문에 100 mm × 100 mm 격자 패턴을 그리고 실험 전·후의 균열을 확인하는 것으로 계획하였다.

### 3.4 목표하중 설정

보강으로 목표 강성을 확보하였는지 알아보기 위해 전체 구조물의 내진성능 평가에서 확인한 지진하중을 참고하였다. 설계기준 지진에 대하여 벽체에 작용하는 최대 가속도는 보강 전 벽체에서 1.85 g, 보강단면은 1.86 g이다. 설계기준 초과지진에 대한 최대 가속도는 보강 전 벽체에서 2.78 g, 보강단면은 2.79 g이다. 또한 보강대상 구조물의 특성을 반영하여 설계기준에서 요구하는 별도의 하중조합계수를 적용한 설계기준지진에 대하여 검토하였다. 검토결과 보강단면에서 발생하는 최대 가속도는 2.17 g로 최후 검토한 설계기준 지진에서 발생하는 최대 가속도보다 큰 것을 확인하였다.

검토 결과를 바탕으로 각 실험체의 지점부인 기둥 안쪽 벽체와 보강재 자중에 대하여 최대 가속도를 적용하여 목표하중을 계산하였다. 실험체는 벽체이나, 실험시 누혀놓고 가력하므로 벽체의 자중 1g를 제외하고 목표 하중을 계산하였다. 각 실험체에서 측정된 총 가력하중이 Table 3의 목표하중을 초과하는 경우 벽체가 설계기준 지진 및 설계기준 초과지진에 대한 안전성을 확보한다고 판단할 수 있다.

실제 구조물에서 발생할 것으로 예상되는 면내인장력의 영향을 목표 하중에 추가 반영하였다. 구조물 해석 결과에서 얻은 면내 인장력이 실험체 전체 폭 3m에 작용하고, 가력점에 집중되는 것으로 가정하여 보수성을 확보하였다. 면내인장력의 영향을 고려하여 수정한 목표하중은 Table 4와 같다.

Table 3 Loading capacity required for seismic safety

Load	Non-strengthened specimen	Strengthened specimen	Description
Maximum acceleration on out of plane direction of wall	1.85 g	1.86 g	Design basis earthquake (DBE)
	-	2.17 g	Earthquake loading with load combination factor
	2.78 g	2.79 g	Beyond design basis earthquake (1.5×DBE)
Self weight of specimen	153 kN	252 kN	Self weight of the wall between columns
	130 kN	217 kN	(DBE - self weight 1g)×self weight
Total loadings (summation of 3P loading)	-	295 kN	(Earthquake loading with load combination factor- self weight 1g)×self weight
	272 kN	451 kN	(Beyond DBE - self weight 1g)×self weight

**Table 4** Experimental loading target

Type of Structures	Non-strengthened specimen	Strengthened specimen
① Load for design basis earthquake (kN)	130	295
② Load for beyond design basis earthquake (kN)	272	451
③ Load considering in-plane tensile stress (kN)	68	68
①+③ Load	198	363
②+③ Load	340	519

e.g) The load written above is summation of loads for 3 loading points.

- ① (Maximum acceleration for design basis earthquake or load combination applied earthquake at the wall – Self weight 1g) × Self weight
- ② (Maximum acceleration for beyond design basis earthquake at the wall – Self weight 1g) × Self weight

## 4. 실험 결과 및 분석

### 4.1 하중-변위 곡선

비보강 실험체를 Fig. 8과 같이 가력하였다. Fig. 9의 비보강 실험체 하중-변위 곡선을 바탕으로 추정된 항복하중은 약 165 kN(하중 지점별 180/3=60 kN)으로 설계기준지진에 대한 목표하중 198 kN(Table 4의 ①+③)을 만족하지 못하여 보강이 필요한 상태임을 확인할 수 있었다.

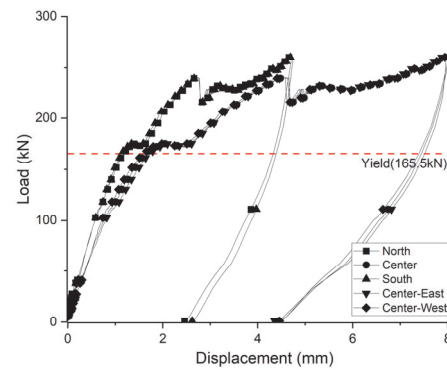
보강 실험체를 Fig. 10과 같이 가력하였다. Fig. 11의 보강 실험체의 하중-변위 곡선으로부터 항복하중은 약 2,100 kN 이상(하중 지점별 700 kN 이상)으로 설계기준초과지진에 대한 목표하중 519 kN(Table 4의 ②+③)을 만족하는 것을 확인하였다. 보강 실험체의 경우는 예상하중을 초과하여 가력하였음에도 철근의 항복이 발생되지 않았으며 actuator의 가력 용량과 실험 안전 때문에 더 이상의 하중을 가력하지 않고 실험을 종료하였다. 파괴하중까지 가력하지는 못하였으나, 지진 시에 탄성 영역에 있도록 계획한 보강 설계의 요구사항을 만족한 것을 확인하였다.

### 4.2 철근 변형률

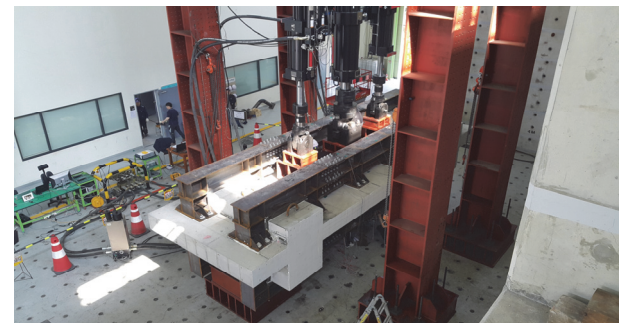
각 실험체 철근에는 실험체의 북측, 중앙, 남측 가력점 위치에 폭 방향으로 상부 3개와 하부 7개의 변형률 게이지가 설치되었다. 실험체 하부에 설치된 7개의 변형률 게이지는 3개가 중앙부에 설치된 3분의 철근에 각각 설치되었고, 동측과 서측 보강재 아래에 위치한 각 2분의 철근에 변형률 게이지가 설치되었다. 하부 철근의 각 변형률은 중앙부(C) 3분, 동측(E) 2분, 서측(W) 2분에 대하여 평균값을 적용하였다.



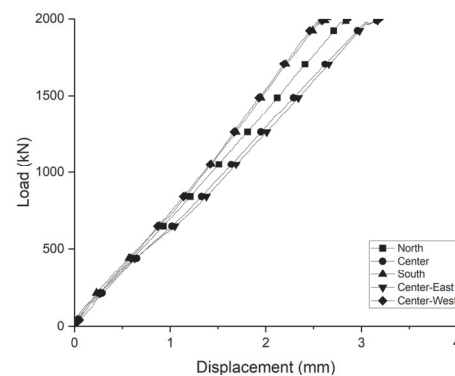
**Fig. 8** Static load test for non-strengthened specimen



**Fig. 9** Load vs displacement curves of non-strengthened specimen



**Fig. 10** Static load test for strengthened specimen



**Fig. 11** Load-displacement curves for strengthened specimen

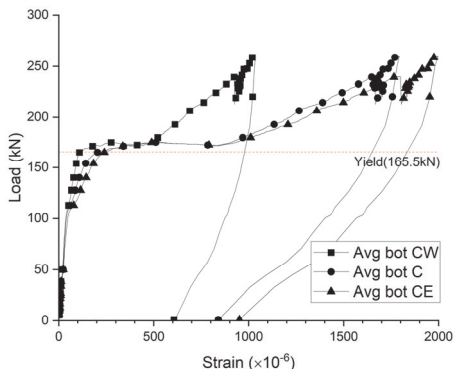


Fig. 12 Load vs strain relations at central lower side rebar of non-strengthened specimen

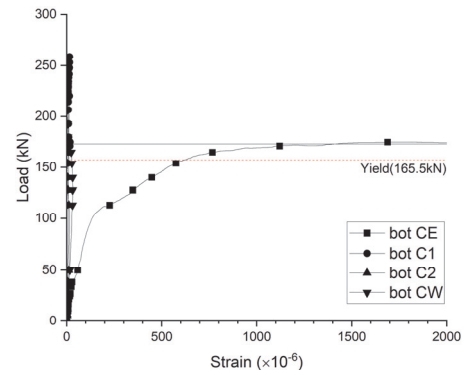


Fig. 14 Load vs strain relations at central lower side concrete of non-strengthened specimen

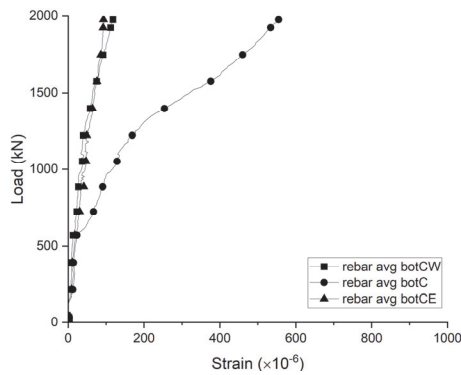


Fig. 13 Load vs strain relations at central lower side rebar of strengthened specimen

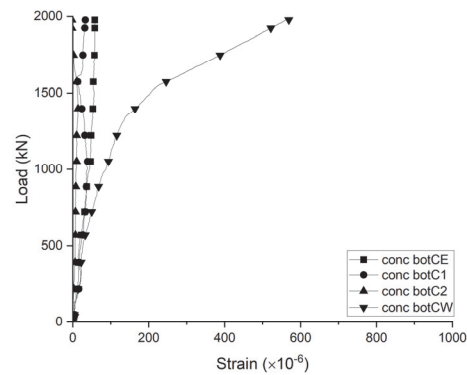


Fig. 15 Load strain relations at central lower side concrete of strengthened specimen

비보강 실험체는 실험체 북측과 남측에 위치한 철근에서 미소한 변형률이 측정되었으며, 실험체 중앙가력점의 상, 하부 철근의 항복을 확인하였다. Fig. 12와 같이 총 가력하중 104.83 kN에서 콘크리트 균열에 의한 것으로 추정되는 변곡점이 발생했고, 이후 165.5 kN에서 모든 철근이 항복했음을 확인하였다.

보강 실험체의 경우, 실험체 북측가력점에 위치한 철근에서는 미소한 변형률이 측정되었지만, 실험체 중앙가력점의 하부철근과 남측가력점의 하부철근에서 Fig. 13과 같이 콘크리트 균열에 의한 것으로 추정되는 변곡점이 관측되었다. 이때의 가력하중은 각각 1353 kN, 1335 kN이며, 변곡점 이후 다시 일정한 강성을 갖는 선형거동을 보였다. 최종 가력하중인 1980 kN에서도 비보강 실험체와 같은 철근의 항복거동은 확인할 수 없었다.

### 4.3 콘크리트 벽체 변형률

각 실험체 상, 하부 콘크리트 면에는 실험체의 북측, 중앙, 남측 가력점 위치에 폭방향으로 각 4개의 변형률 게이지를 설치하였다. 4개의 변형률 게이지는 동측과 서측 각 1개, 중앙에

실험체 길이방향과 폭방향으로 각 1개씩 설치하였다. 단, 콘크리트 면 상부에 설치된 변형률 게이지는 가력용 지그를 피하기 위해 지그 옆에 설치되었다.

비보강 실험체의 중앙 가력점 하부 콘크리트면의 하중-변형률을 나타낸 Fig. 14 그래프에서는 철근의 하중-변형률 그래프에서 확인한 바와 같이, 총 가력하중 104.83 kN에서 콘크리트 균열이 시작되었고, 이후 165.5 kN에서 모든 철근이 항복하여 더 이상 하중을 부담하지 못하는 상태임을 추정할 수 있다. 중앙가력점의 상, 하부를 제외한 북측과 남측 가력점에서는 철근과 같이 미소한 변형률을 보이며 탄성에 가까운 거동을 보였다.

보강 실험체의 경우, Fig. 15와 같이 중앙가력점 하부 1353.13 kN, 남측가력점 하부 1335.29 kN에서 콘크리트 균열로 추정되는 변형률 증가가 관측되었다. 중앙가력점 하부의 균열은 실험 후 새로 발생한 균열이며, 남측가력점 하부의 균열은 실험 전 파악하고 있던 미세한 균열이 실험 후에 확장된 것임을 확인하였다. 실험의 가력이 3개 가력점에 대하여 수동으로 수행되어 일부 편심이 작용할 수 있고, 균질하지 못한 콘크리트 재료의 특성 상 시공 시의 재료분리 또는 골재의 영향으로, 균

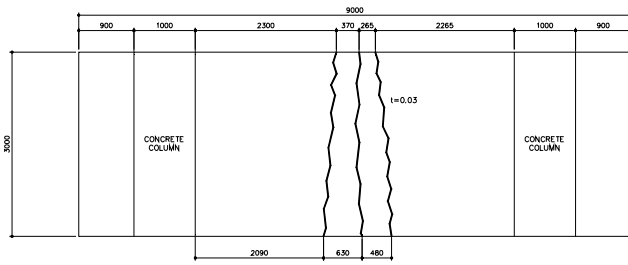


Fig. 16 Cracks observed on non-strengthened specimen

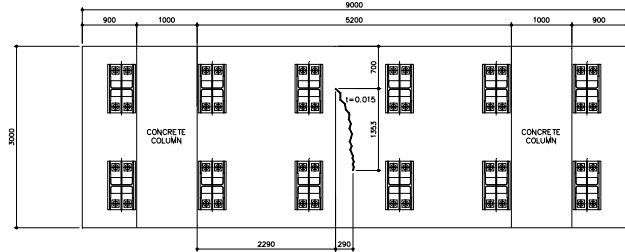


Fig. 17 Cracks observed on strengthened specimen

열의 발생은 무작위성을 갖는다. 중앙가력점과 남측가력점의 콘크리트 균열 후에 콘크리트 및 철근은 하중-변형률 기울기가 낮아지지만, 실제 벽체의 휨내력을 결정하는 철근이 아직 탄성상태이므로 벽체는 여전히 일정한 하중-변형률 기울기를 보이며 하중을 부담하고 있다.

각 실험체의 실험 종료 후 관측된 균열위치는 Fig. 16과 Fig. 17에 나타내었다. 균열은 모두 실험체 하부에서 관측되었으며, 비보강 실험체의 경우 측면까지 균열이 진행되어 실험체가 완전히 항복했음을 확인하였다.

#### 4.4 보강재 변형률

보강 실험체 상, 하부 보강재에는 실험체의 북측, 중앙, 남측 가력점 위치에 변형률 게이지를 설치하였다. 보강 실험체 단면의 상, 하부 보강재의 H-Beam 상, 하부 플랜지에 각 2개, 북부에 1개의 변형률 게이지가 설치되었고, H-beam에 붙어 있는 T-Beam의 북부에 1개, 플랜지에 2개의 변형률 게이지가 설치되었다. 총 가력하중과 보강재의 변형률의 관계는 Fig. 18과 Fig. 19에 나타낸 바와 같으며, 각 플랜지에 설치된 2개의 변형률 게이지에서 측정된 평균값을 사용하였다.

각 그래프의 변형률이 양수를 보이는 곳은 인장, 음수를 보이는 곳은 압축 변형이며, 각 그래프에서 보이는 바와 같이 보강재 상, 하부는 거의 동일한 인장-압축 변형률을 보이고 있다. 이는 실험체의 상, 하부 보강재에 작용하는 인장력과 압축력이 동일함을 의미한다. 이것을 통해 모멘트에 대한 보강 실험체의 중립축이 실험체 중앙에 위치함을 알 수 있다. 또한 보강단면 상, 하부 끝단의 H-beam 플랜지가 가장 많은 인장, 압

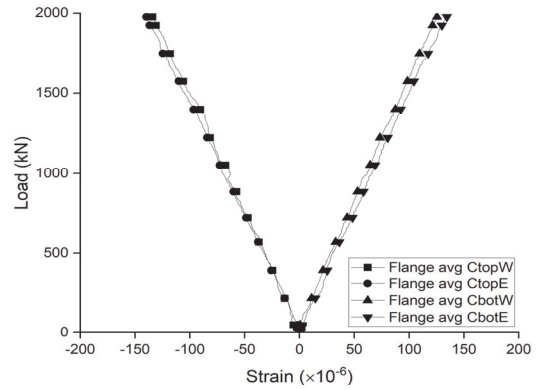


Fig. 18 Strain obtained from outer flange of top and bottom H-beam at central loading point

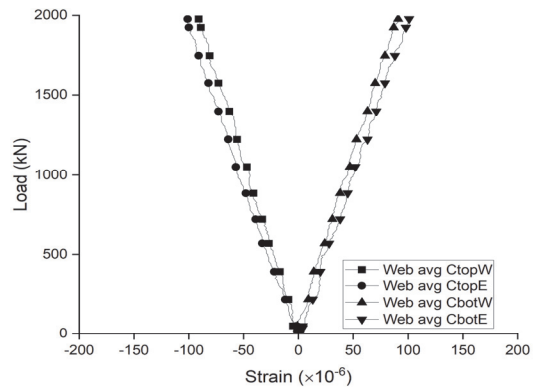


Fig. 19 Strain obtained from outer web of top and bottom H-beam at central loading point

축력을 부담하고 실험체 중앙에 가까울수록 낮은 변형률을 보이고 있다. 이것을 통해 보강단면은 합성 거동을 하고 있으며, 벽체는 면외방향 휨모멘트에 대하여 콘크리트 벽체와 보강재가 함께 저항하고 있음을 확인하였다.

## 5. 결론

철근콘크리트 벽체가 지진 시에도 탄성 영역에 있도록 하기 위하여 내진 보강을 계획하고, 보강 이후의 안전성을 평가하기 위하여 실물 크기로 제작된 실험체에 대한 정적인 재하 방식으로 실험하여 부재의 휨 성능을 검증하였다. 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 비보강 실험체는 설계기준 지진을 근거로 결정된 가력 하중에 도달하여 철근의 항복과 비선형 하중-변위 이력 거동을 보이는 반면, 보강 실험체는 설계기준 초과지진에 대한 가력하중에서도 콘크리트와 철근 모두 낮은 수준의 변형률을 나타내어 지진 시에도 탄성 영역에 있도록 보강한 내진 보강 설계의 목적을 달성하였다.

- 2) 보강 실험체의 단면 상하부의 H-beam 플랜지에서 가장 높은 변형률이 측정되었고, 단면의 중앙에 가까울수록 낮은 변형률을 보이고 있다. 이를 통하여 보강 단면의 합성 거동을 확인할 수 있으며, 콘크리트 벽체와 보강재가 일체로 휨모멘트를 저항하고 있음을 알 수 있다.
- 3) 이 연구에서는 실험 가력기 용량의 한계로 인하여 보강 실험체를 파괴까지 가력하지 못하였다. 추후에는 축소 모델 실험 혹은 대용량 가력기를 이용한 보강 구조의 파괴 거동 연구가 필요하다.

5. Sang-Su Ha (2019), Flexural Strengthening Effects of RC Beam Reinforced with Pre-stressing Plate, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 23(1), 171-178.
6. Jae-Hyung Lim, Jeong-Ho Moon, Jae-Yeon Lee (2009), Flexural Capacity of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Bow System, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 13(3), 181-187.
7. Sang-Su Ha (2018), Theoretical Analysis for Strengthening Effects of RC Beam with Reinforced FRP Sheet, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 22(4), 100-107.
8. Jin-Seon Kim, Kang-Seok Lee (2021), Seismic Capacity Evaluation of Existing Medium-and low-rise R/C Frame Retrofitted by H-section Steel Frame with Elastic Pad Based on Pseudo-dynamic testing, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 25(4), 83-91.
9. Taek-Hee Han, Sung-Nam Kim, Young-jong Kang (2007), Evaluation of Seismic Performance for an Internally Confined Hollow CFT Column, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 19(1), 53-65.
10. Chang-Su Shim, Young-Soo Chung, Ji-Ho Park, Chang-Young Park (2007), Seismic performance evaluation of circular composite columns by shaking table test, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 11(5), 77-81.
11. Kae-Hwan Kwak, Hwa-Sup Jang, Woo-Jong Kim, Hoi-Ok Kim (2008), A Study on Shear Strength Test for FRP Girder of Filled Concrete, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 21(4), 365-373.
12. Hyuck-Jin Kwon, Keun-Hyeok Yang, Hang-Yong Byun (2018), Evaluation of Seismic Strengthening Approach at the Boundary Elements of RC Walls using Prestressed Wire Rope Units, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 22(1), 56-63.

## References

1. Yun Yong Kim, Bang Yeon Lee, Jin Wook Bang, Byung-Chan Han, Luciano Feo, Chang-Geun Cho, (2014), Flexural Performance of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Strain-Hardening Cementitious Composite and High Strength Reinforcing Steel Bar, *Composites Part B: Engineering*, 56, Jan., 2014, 512-519.
2. Jamshaid Sawab, C. H. Luu, Xin Nie, Ing Lim, Y. L. Mo, and Mo Li. (2016), Structural integrity of steel plate ultra high-performance concrete modules, *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 1(3), 95-106
3. Jung-Hwan Hyun, Jin-Wook Bang, Bang-Yeon Lee, Yun-Yong Kim. (2021), Effects of the Replacement Length of Concrete with ECC on the Cyclic Behavior of Reinforced Concrete Columns, *Materials*, 2021, 14, 3542.
3. Sang-Hyun Kim, Woo-Tai Jung, Jae-Yoon Kang, Hee-Beom Park, Jong-Sup Park. (2021), Experimental Study on the Strengthening Effect of External Prestressing Method Considering Deterioration, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 25(1), 1-6.
4. Seung-Hyeon Hwang, Keun-Hyeok Yang, Sanghee Kim (2021), In-plane and Out-of-plane Seismic Performances of Masonry Walls Strengthened with Steel-Bar Truss Systems, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 25(1), 16-24.

Received : 09/26/2022

Revised : 09/28/2022

Accepted : 09/30/2022

**요 지 :** 이 논문은 내진 성능 향상 목적으로 외부 강재로 보강한 콘크리트 부재의 휨 성능에 대한 실험적 연구이다. 구조물을 보강하기 위하여 벽과 기둥을 보강재로 감싸는 형식의 보강 방법을 적용하였는데, 이 구조물에서 가장 긴 시간을 갖는 벽체 일부 단면을 실험 크기로 제작하여 정적 재하 실험을 수행하는 방법으로 강성 보강효과를 확인하였다. 실험 결과, 보강 단면은 충분한 보강 성능을 발휘하는 것을 확인하였으나, 가력기의 용량 부족과 안전상의 문제로 파괴까지의 거동을 확인하지는 못하였다. 보강재가 벽체에 작용하는 면외방향 모멘트를 효과적으로 부담하고 있는 것을 확인하였고, 측정된 변위와 철근 변형률 등의 분석을 통하여 보강 전 부재에 비하여 부재 강성과 휨모멘트 저항능력이 향상되었음을 검증하였다.

**핵심용어 :** 합성부재, 내진 보강, 휨 성능, 정적 재하 실험