Journal of the Korea Concrete Institute
Vol. 19, No. 5, pp. 557~567, October, 2007

층고 절감을 위한 하이브리드 보의 휨 거동에 관한 실험적 연구

홍성걸[1)*] · 양동현[2)] · 정종현[3)] · 임병호[4)]

[1)]서울대학교 건축학과 [2)](주) 대우건설 기술연구원 [3)]경남대학교 건축학부 [4)](주)GS건설

Flexural Behavior of Hybrid Beam of Reduced Story Height

Sung-Gul Hong[1)*], Dong-Hyun Yang[2)], Jong-Hyun Jung[3)], and Byung-Ho Yim[4)]

[1)]Dept. of Architecture, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
[2)]Daewoo Institute of Construction Technology, Suwon 440-210, Korea
[3)]Dept. of Architecture, Kyungnam University, Masan 631-701, Korea
[4)]GS Construction Co. Ltd., Seoul 138-834, Korea

ABSTRACT In underground parking lots of apartment housing, the story height is increased by 300~400 mm because of various ducts for HVAC. In order to reduce this story height, this study proposed the 'hybrid beam', which is composed of PC beam with embedded steel beam and insitu concrete. The depth of the hybrid beam is reduced by 300 mm and then the steel beam is embedded over the length of reduced depth to compensate for the loss of strength. Then, we performed the large-scale structural tests on 9 specimens and investigated the flexural behavior of the specimens. The parameters of tests were the shape of steel beam section, the length of the reduced depth, the stage of construction, the effects of slab and shear connectors. The test results showed that the specimens, after the insitu concrete has cured, has the flexural capacity which exceeds the required design capacity regardless of other parameters. On the other hand, the specimens of construction stage do not have sufficient strength. Based on these results, it is thought that the proposed hybrid beam with reduced depth is applicable to the underground parking lots of apartment housing as long as the support is placed at construction stage.

Keywords : story heights of underground parking lots, hybrid beam, flexural behavior, PC beam, embedded steel beam

1. 서 론

건축 구조물에서 층고를 감소시키면 물량의 감소는 물론 공기의 단축과 비용의 절감도 기대할 수 있다. 이에 따라 최근 유럽에서는 슬래브를 강재 보의 깊이 내에 배치하여 층고를 줄인 슬림플로어 (slim floor) 공법을 개발하여 사용하고 있다[1)]. 국내에서는 깊이가 깊은 데크나 속 빈 프리캐스트 콘크리트 슬래브 (hollow core PC slab)를 사용한 슬림플로어[2,3)], CT 형강과 PC 보, RC 슬래브를 결합한 i-TECH beam[4,5)]을 개발하여 실제 공사에 적용하고 있다.

층고의 절감에 따른 여러 장점은 아파트 지하주차장의 경우에도 마찬가지이다. 아파트 지하주차장은 지하 구조물이기 때문에 터파기나 흙막이 공사 등의 토공사 감소를 통하여 공사 기간 및 공사 비용을 상당히 절감할 수 있다.

아파트 지하주차장의 층고를 줄이기 위한 방법으로 넓은 보 (wide beam)를 적용할 수 있지만, 이는 층고 절감 효과가 크지 않고 철근의 물량이 현저하게 증가하는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 강재 보, 프리캐스트 보 (precast beam, 이하 PC 보), 현장 타설 콘크리트를 조합하여 깊이를 줄인 '아파트 지하주차장 층고 절감용 복합 보 (hybrid beam)'를 제안하였다. 본 연구에서는 이 보를 기술의 편의상 '하이브리드 보'라는 용어로 지칭한다.

아파트의 지하주차장은 주차 공간일 뿐 아니라 각종 설비 배관의 수용처이기도 하므로, 지하주차장 보의 하부에 설비 배관을 배치하기 위한 300~400 mm 정도의 높이가 필요하다. 이에 따라 지하주차장의 층고가 300~400 mm 정도 증가한다. 이러한 지하주차장의 특성을 반영하여 본 연구의 하이브리드 보에는 PC 보 중앙 부분의 보 깊이를 줄여 설비 배관을 배치하는 공간을 확보하되 깊이가 줄어든 구간에 강재 보를 매입하여 PC 보 깊이의 감소에 따른 구조적 성능의 저하를 방지하는 방식을 적용하였다.

본 연구에서는 하이브리드 보 개발의 첫 단계로서 실물크기 구조 실험을 수행하고 콘크리트의 양생 전과 후의 휨 성능, 철근콘크리트와 강재의 일체화 및 합성거동,

*Corresponding author E-mail : sglhong@snu.ac.kr
Received October 23, 2006, Accepted August 20, 2007
©2007 by Korea Concrete Institute

매입하는 강재 보의 형상에 따른 휨 거동의 차이 등을 분석하여 하이브리드 보가 실제 현장에 적용할 수 있는 안전한 휨 거동을 보여주는지 검토하고자 한다.

2. 하이브리드 보

2.1 하이브리드 보의 구성

본 연구에서 제안한 하이브리드 보는 Fig. 1과 같이 하부의 PC 보, 중간의 강재 보, 상부의 현장 타설 콘크리트로 구성된다. 강재 보는 필요에 따라서 H-형강이나 허니컴 (honeycomb)보를 사용할 수 있다. 보 내부에는 주근과 전단철근이 배근된다.

본 연구에서는 기술의 편의상 별도의 언급이 없다면 중앙부는 보의 춤이 줄어든 부분을, 단부는 철근과 콘크리트만으로 이루어진 양쪽 끝 부분을, 연결부는 중앙부와 단부의 사이를 의미한다.

2.2 하이브리드 보의 시공

하이브리드 보는 강재 보를 부분적으로 매입하여 제작한 PC 보를 기둥 위에 설치하고 하프-슬래브 (half-slab)를 얹은 다음 현장 콘크리트를 타설하는 순서로 시공을 진행한다. 따라서 현장 콘크리트의 양생이 완료된 이후의 합성 단계에서는 하이브리드 보를 구성하는 모든 부분이 고정하중과 활하중을 지지하지만, 현장 콘크리트를 타설하여 양생이 완료되기 전까지의 시공 단계에서는 강재 보가 매입된 PC 보가 자중과 시공하중을 지지해야 한다.

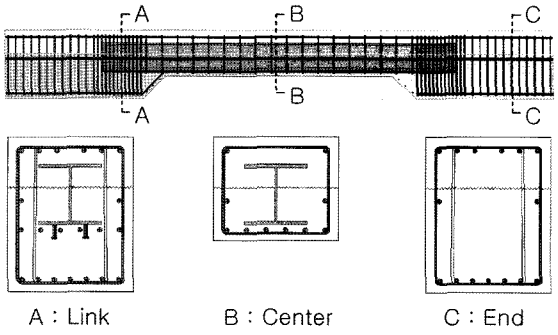


Fig. 1 Hybrid beam

3. 실험 계획

3.1 개요

본 연구에서는 하이브리드 보의 휨 거동과 관련하여 다음 사항들을 검토하고자 한다. 첫째는 일반적인 강재 보로 H-형강 보 (이하 H형)와 허니컴 보 (이하 역T형)를 매입했을 경우 휨 거동의 차이이다. 둘째는 PC 보와 현장에서 타설한 콘크리트와의 일체화 정도이다. 셋째는 합성 단계 뿐 아니라 시공 단계에서의 휨 거동이다. 넷째는 설비 배관이 많은 경우에 대비하여 보의 깊이가 줄어드는 중앙부의 길이 변화에 따른 휨 거동의 차이이다. 다섯째는 슬래브가 어느 정도나 하이브리드 보의 휨 거동을 향상시키는지의 여부이다. 여섯째는 시공 단계에서 강재 보와 PC 보 사이의 전단 연결재 (shear connector)가 휨 거동에 미치는 영향이다. 이상을 검토하기 위해서 Table 1과 같이 총 9개의 실험체를 제작하였다. 중앙부의 길이는 보 전체 길이의 1/2, 2/3와 유사한 3,750 mm와 5,000 mm로 하였다.

3.2 실험체 설계

본 연구에서는 아파트 지하주차장 지붕 층을 대상으로 Table 2와 같이 하중을 산정하였고, 실험체가 이 하중을 지지할 수 있도록 단면을 설계하였다. 실험체의 경간은 6,500 mm이며 실험체의 단부는 일반적인 철근콘크리트와 같기 때문에 콘크리트설계기준[6]에 따라 설계하였으며, 중앙부는 강구조 한계상태 설계기준[7]에 따라 철근 및 콘크리트 효과를 포함하여 소성 응력분포 상태의 매입형 합성보로 설계하였다. 콘크리트의 설계강도는 24 MPa이고, 주근과 전단철근은 각각 D-25와 D-13을, 강재 보는 SM490 강재를 사용하였다.

연결부에 매입되는 강재 보의 길이는 Fig. 2의 응력 전달 모델과 콘크리트의 지압 파괴를 일으키는 수직하중 V_n을 계산하는 식 (1)을 제안한 Mattock과 Gaafar[8]의 연

Table 1 Specification of specimens

Specimen	Stage	Steel type	Slab	End section (mm)	Center section (mm)	Shear studs	Center span (mm)
S1	Construction	Inverted T-type	Excluded	700 × 600	700 × 300	Φ19-12EA	3,750
S2		H-type	Excluded	700 × 600	700 × 300	Φ19-12EA	3,750
S3			Excluded	700 × 600	700 × 300	-	3,750
S4	Composite	Inverted T-type	Excluded	700 × 900	700 × 600	Φ19-12EA	3,750
S5			Excluded	700 × 900	700 × 600	Φ19-12EA	5,000
S6			Included	700 × 900	700 × 600	Φ19-12EA	3,750
S7		H-type	Excluded	700 × 900	700 × 600	Φ19-12EA	3,750
S8			Excluded	700 × 900	700 × 600	Φ19-12EA	5,000
S9			Included	700 × 900	700 × 600	Φ19-12EA	3,750

Table 2 Specification of load

Load type	Items	Load (Pa)
Dead load	Soil (Thk. = 800 mm)	14,121.6
	Concrete (Thk. = 100 mm)	2,255.5
	Mortar topping	196.1
	Concrete slab (Thk. = 300 mm)	7,060.8
	Ascon finish (Thk. = 50 mm)	980.7
	Ceiling	294.2
	Self weight	14,811.9
	Sum	39,720.8
Live load	-	15,690.6

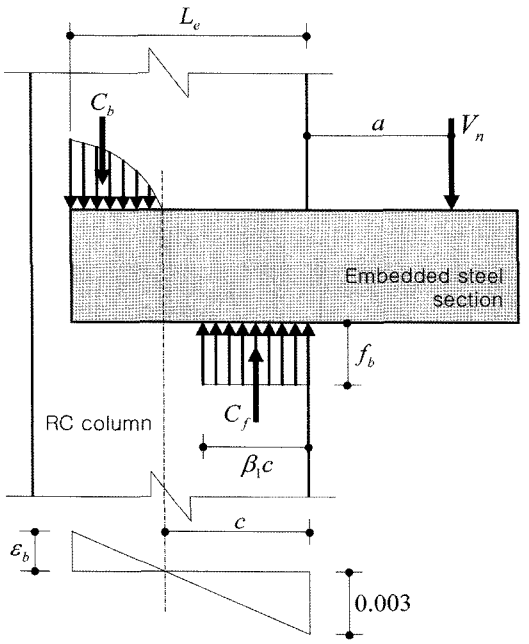


Fig. 2 Assumed stresses and strains in concrete adjacent to embedded steel section

구 결과를 이용하여 지하주차장 프로토타입 (prototype)에 가해지는 하중을 실험체에 가하는 등가의 집중하중 1,251,250 N으로 변환하고, 이 집중하중을 강재 보에 작용하는 수직하중 V_n으로 하여 식 (2)와 같이 하이브리드 보 연결부의 지압 파괴에 의한 선행 파괴를 방지할 수 있는 강재 보의 매입길이를 결정하였고 이러한 결과를 바탕으로 각 실험체의 강재 보의 매입길이를 450 mm로 산정하였다.

$$V_n = 4.5\sqrt{f_{ck}}\left(\frac{t_b}{b_f}\right)^{0.66} \times \beta_1 L_e\left[\frac{0.58 - 0.22\beta_1}{0.88 + a/L_e}\right] \quad (1)$$

여기서, f_{ck}: 콘크리트의 압축강도 (MPa)
t_b: 보의 깊이 (m)
b_f: 보 플랜지의 폭 (m)
β_1: 0.85
a : 가력점으로부터의 거리 (m)
L_e: 매입길이 (m)

$$1{,}251{,}250N = 4.5\sqrt{27}\left(\frac{0.7}{0.35}\right)^{0.66} \times 0.85 \cdot L_e \cdot \left[\frac{0.393}{0.88 + 0.775/L_e}\right] \quad (2)$$

$$\therefore\ L_e = 0.328\ m$$

3.3 실험체 제작

시공 단계의 실험체는 강재 보 가공, 철근 조립, 변형률 게이지 (strain gauge) 부착, 거푸집 설치, 콘크리트 타설 및 양생의 순서로 제작하였다. 이때 완성된 실험체는 강재 보가 매입된 PC 보이다. 합성 단계의 실험체는 시공 단계의 실험체를 제작한 후 그 상부에 거푸집을 이용하여 콘크리트를 2차로 타설하여 완성하였다. 이때의 실험체는 강재 보가 매입된 PC 보의 상부에 현장 타설 콘크리트까지 완성된 하이브리드 보이다. Fig. 3의 위와 아래는 제작이 완료된 시공 단계 실험체와 합성 단계 실험체이다.

3.4 재료 시험

콘크리트는 타설시 마다 6개씩 Φ100 mm × 200 mm의 원통형 공시체로 제작하여 실험체와 동일한 조건으로 양생하였다. 강도 시험은 구조 실험 직후 실시하여 평균값을 구한 후 KS 규준의 표준형인 Φ150 mm × 300 mm 공시체에 맞도록 보정계수 0.97을 곱하여 보정하였다. 시험의 결과는 Table 3과 같다.

강재 보는 웨브 (web) 부분과 플랜지 (flange) 부분을 가공하여 시험편을 각각 3개씩 KS B0801 (금속재료 인장시험편)의 1호 규정에 따라 제작하였으며 시험 결과는 Table 4와 같다. 철근 역시 D-13과 D-25 2가지 종류에 대하여 KS B0801 (금속재료 인장시험편)의 규정에 따라

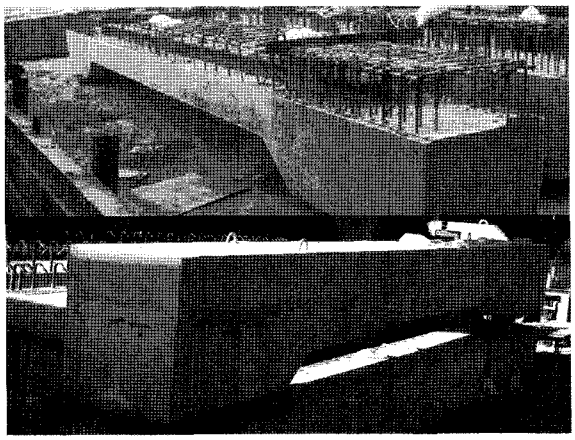


Fig. 3 Specimens for construction stage and composite stage

Table 3 Material properties of concrete

Specified concrete compressive strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
24.0	26.7	24.3

Table 4 Material properties of steel and rebar

Type	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Elongation (%)
Web	394	580	2.03×10^5	22.9
Flange	356	537	1.78×10^5	20.6
D-13	420	622.8	1.68×10^5	8.33
D-25	402	605.5	1.91×10^5	10.85

제작하였으며 시험 결과는 Table 4와 같다.

3.5 가력 계획 및 계측 계획

본 연구에서는 하리브리드 보의 휨 거동을 검토하기 위해서 Fig. 4와 같이 4점 가력 방식을 적용하였다. 먼저 실험체 양 단부 끝에서 350 mm씩 떨어진 곳의 반력 힌지 위에 실험체를 설치하고 실험체 상부의 중앙에서 양쪽으로 1,100 mm씩 떨어진 곳에 가력 힌지를 위치시키고 다시 그 위에 만능재료시험기 (UTM)에 연결시킨 가력 프레임을 설치하였다.

실험체의 계측을 위해서 처짐, PC와 현장 타설 콘크리트의 미끄러짐 (slip)을 파악할 수 있는 위치에 전기식 변위계 (LVDT)를 설치하였다. Fig. 4에서 전기식 변위계의 설치 위치를 확인할 수 있다. 그리고 실험체의 중앙부에서 강재 보와 콘크리트의 변형률 선도 (strain contour)를 파악하기 위해 강재 보, 주근, 콘크리트에 변형률 게이지를 부착하였다. Fig. 5는 S7 실험체의 변형률 게이지 부착 위치를 나타낸 것이다. 모든 실험체에는 콘크리트 표면에 균열 발생과 그 진행 상황을 명확하게 관찰하기 위해서, 먼저 백색 수성페인트를 칠하고 200 mm × 200 mm의 격자선을 표시한 후에 하중의 단계별로 균열을 선으로 기록하였다.

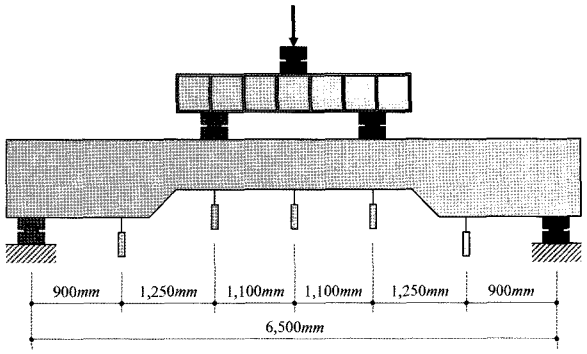


Fig. 4 Setting of specimen

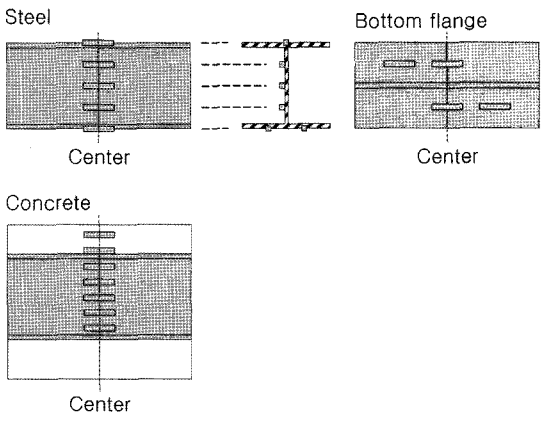


Fig. 5 Arrangement of strain gauges

4. 실험 결과

4.1 시공 단계 실험체

4.1.1 파괴 양상

시공 단계의 역T형 실험체 S1은 하중 70 kN에서 중앙부 하단에 초기 휨 균열이, 150 kN에서 연결부에 균열이 발생하였다. 최대 하중은 186 kN이며, 노출된 강재의 웨브 주위에서 콘크리트의 파괴가 발생하였다. 시공 단계의 H형 실험체 S2는 하중 100 kN에서 연결부에 초기균열이 발생하였고, 130 kN에서 중앙부에서도 휨균열이 발생하였다. 최대 하중인 359.5 kN에서 왼쪽 가력 부위에서 전단 파괴로 전단 균열이 일어났다. 실험체 S3은 실험체 S2에서 전단연결재를 부착하지 않은 것이다. 파괴양상은 실험체 S2와 유사하며 최대 하중은 379.1 kN이다. Fig. 6은 실험체 S1, S2, S3의 최종 균열 상태를 나타낸 것이다.

4.1.2 하중-변위 관계

시공 단계의 실험체 S1, S2, S3의 하중-변위 곡선은 Fig.

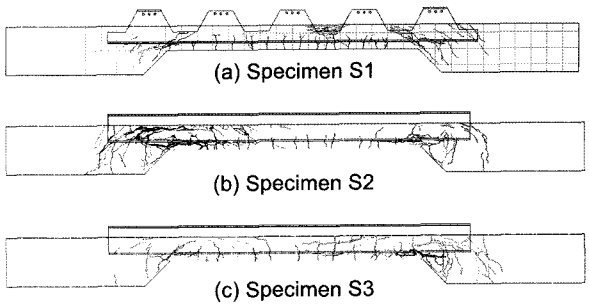


Fig. 6 Final crack patterns of specimen S1, S2, S3

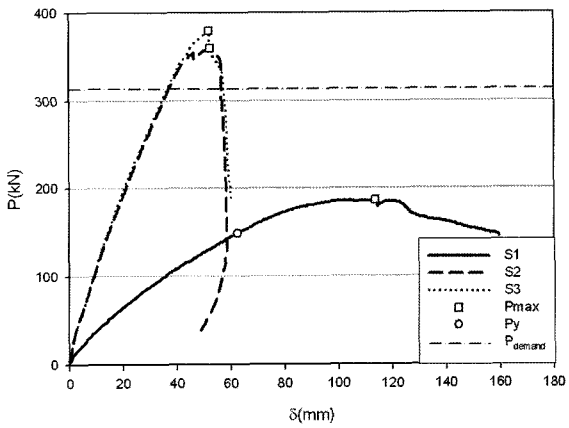


Fig. 7 Load-displacement curves of specimens for construction stage

7과 같다. 실험체가 지지해야 하는 요구 하중 (P_{demand})은 Table 2의 하중 상세에서 시공 단계에서 가해지는 하중만을 실험체의 가력 조건에 따라 변환한 하중으로서 그 값은 약 217 kN이다. Table 5는 실험체 S1, S2, S3의 초기 강성, 균열 하중, 최대 하중 및 최대 변위 등을 나타낸 것이다.

초기 강성은 실험체 S2, S3이 실험체 S1보다 상당히 컸다. 균열 하중의 경우에는 실험체 S2, S3이 실험체 S1보다 컸지만 모두 시공단계의 요구 하중보다 작았다. 최대 하중에 있어서 H형의 실험체 S2, S3은 요구 하중을 60%이상 초과했으나 역T형 실험체 S1은 요구 하중보다 14% 작았다. 실험체 S1의 최대 변위는 약 114 mm이다. 실험체 S2, S3의 경우에는 약 53 mm, 52 mm로 상당히 작은데, 이는 실험체 S2, S3의 가력부에서 지압 파괴가 발생했기 때문이다.

4.1.3 변형률

Fig. 8은 실험체 S1에서 콘크리트와 강재의 하중 단계별 변형률 선도이다. 변형률 선도를 보면 외부로 노출된 강재 보 부분에는 거의 변형률이 발생하지 않아 보 전체의 휨 거동에 기여하지 못한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 실험체 S2에서 콘크리트와 강재의 하중 단계별 변형률 선도를 나타낸 것이다. 변형률 선도에서 보면 실험체 S1과 마찬가지로 외부로 노출된 강재 보가 휨 거동에 거의 기여하지 못한 것을 확인할 수 있다. 그리고 실험체가 파괴될 때까지 하부의 철근과 강재 보가 항복하지 않았다.

Fig. 10은 실험체 S3의 콘크리트와 강재보의 하중 단계별 변형률 선도를 나타낸 것이다. 역시 실험체가 파괴될 때가지 하부의 철근과 강재보는 항복하지 않았다.

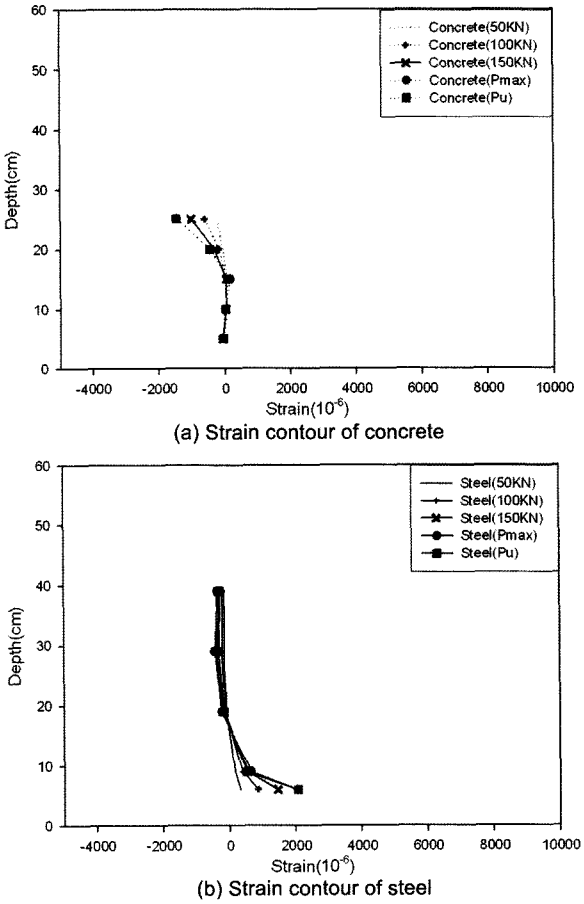
이상의 결과를 통해서 강재 보로 H-형강 보를 이용한 경우가 허니컴 보를 사용한 경우보다 좋은 휨 거동을 보여주는 것을 확인하였다. 이는 허니컴 보의 경우 상부 플랜지가 없어 단면의 휨 거동 향상에 기여하지 못하기 때문인데, 예상한 결과가 실험을 통해서도 확인되었다. 하지만 H-형강 보를 사용해도 균열과 최대 변위에 있어서 시공 단계에서 만족할만한 휨 거동을 보여주지 못하였으며, 이에 따라 하이브리드 보의 처짐 및 시공 품질 확보를 위해서는 현장 콘크리트를 타설할 때 보의 하부에 가설지지대 (support)를 설치하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

실험체 S2와 S3을 비교해 보면 그 결과가 거의 유사

Table 5 Test results of specimens for construction stage

Specimen	K_i (kN/mm)	P_{cr} (kN)	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	$\frac{P_{max}}{P_{demand}}$
S1	3.32	70.0	186.0	113.6	0.86
S2	10.54	100.0	359.5	52.4	1.66
S3	10.75	100.0	379.1	51.8	1.75

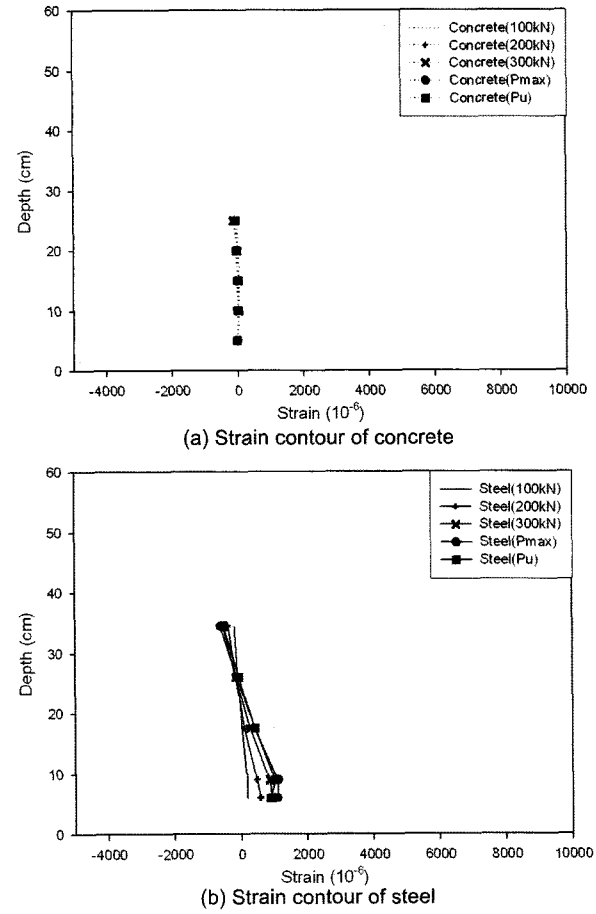
K_i: early riqidity, P_{max}: maximum load, δ_{max}: maximum displacement



(a) Strain contour of concrete

(b) Strain contour of steel

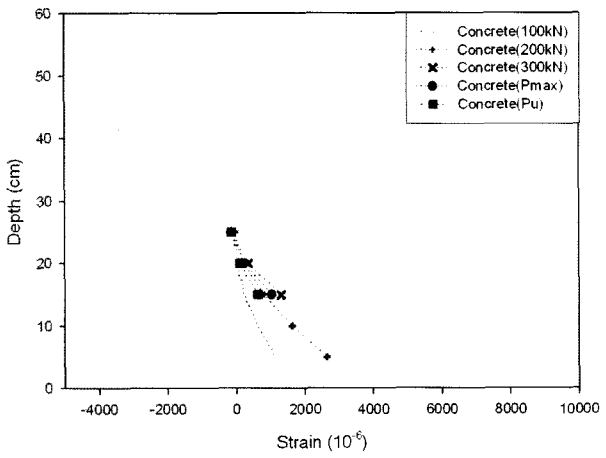
Fig. 8 Strain contour of specimen S1



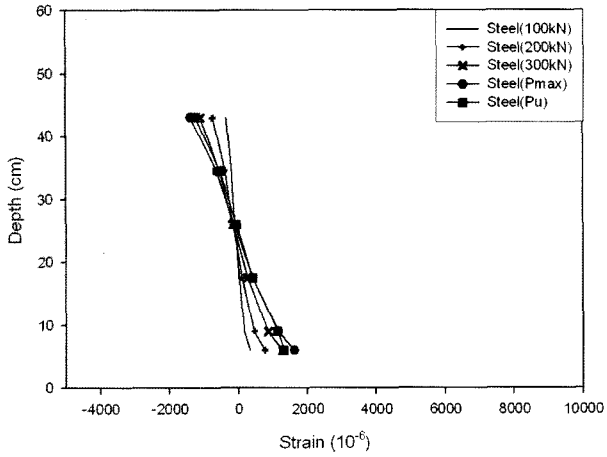
(a) Strain contour of concrete

(b) Strain contour of steel

Fig. 9 Strain contour of specimen S2



(a) Strain contour of concrete



(c) Strain contour of steel

Fig. 10 Strain contour of specimen S3

한데, 이러한 점으로 미루어 강재 보의 연결부 하부 플랜지에 부착한 전단연결재는 실험체의 휨 거동에 거의 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다.

4.2 합성 단계 실험체

4.2.1 파괴 양상

합성 단계의 역T형 실험체 S4는 하중 172 kN에서 연결부에 초기균열이 발생하였고 이후 하중의 증가에 따라 중앙부에도 휨 균열이 발생하였다. 하지만 주로 연결부에서 많이 발생하였다. 최대 하중은 835.6 kN이며 가력부 주변에서 전단 균열 형태로 파괴가 진행되었다. 양단부에서 PC 부분과 현장 콘크리트 사이의 미끄러짐은 없었으며 연결부 주변에서 약 10 mm 정도의 미끄러짐이 부분적으로 발생하였다. Fig. 11의 (a)는 실험체 S4의 최종 균열 상태이다. 실험체 S5는 실험체 S4의 중앙부 길이를 3,750 mm에서 5,000 mm로 증가시킨 것이다. 실험체 S5는 74 kN의 하중에서 중앙부에 초기균열이 발생하였으며 270 kN부터 연결부의 균열이 발생하였다. 하중 465 kN부터 Fig. 12에 나타난 바와 같이 연결부에서 PC 부분과 현장 타설 콘크리트 사이에 약 10 mm의 미끄러짐이 발생하였다. 하중 710 kN에서는 휨 균열이 조금씩 진

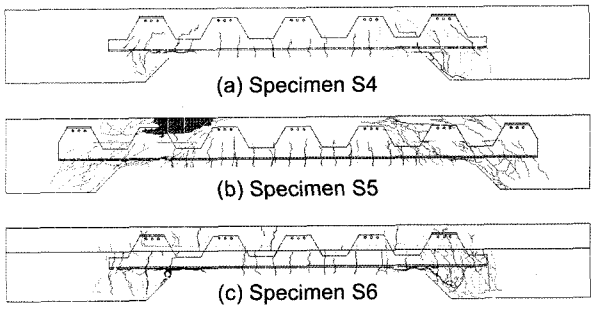


Fig. 11 Final crack patterns of specimen S4, S5, S6

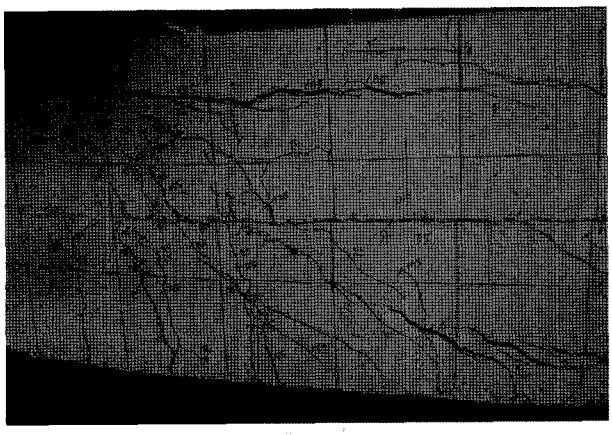


Fig. 12 Slip between PC and in situ concrete of specimen S5

전되면서 동시에 가력 부위를 중심으로 전단 균열이 발생하였다. 최대 하중은 914 kN이며 그 이후로 가력부를 중심으로 양쪽 연결부 방향으로 전단 균열이 많이 발생하였다. Fig. 11 (b)는 실험체 S5의 최종 균열 상태이다. 실험체 S6은 실험체 S4의 양단에 하프-슬래브를 얹어 T형 보로 제작한 것으로 하중 200 kN에서 중앙부와 슬래브의 하단에서 초기균열이 발생하였고 하중 415 kN까지 중앙부와 연결부에서 휨 균열 형태로 발전하였다. 연결부의 균열은 하중 882 kN부터 활발하게 진행되며 그 폭이 점차 커졌다. 최대 하중은 986.1 kN이며 그 이후에는 강재의 매입이 끝나는 연결부 근처에서 균열이 계속 발생하였다. Fig. 11의 (c)는 실험체 S6의 최종 균열 상태이다.

실험체 S7은 합성단계의 H형 실험체로서, 하중 100 kN에서 중앙부 하단에 초기균열이 발생하여 하중이 증가할수록 위쪽으로 진행하였다. 하중 320 kN에서는 연결부 하단에서 균열이 시작되었다. 최대 하중은 911.4 kN이며 중앙부 상부의 콘크리트 부분이 압축파괴 되었다. 보의 모든 부분에서 PC 부분과 현장 타설 콘크리트 사이의 미끄러짐은 발생하지 않았다. Fig. 13 (a)는 실험체 S7의 최종 균열 상태이다. 실험체 S8은 실험체 S7에서 중앙부의 길이를 3,750 mm에서 5,000 mm로 증가시킨 것이다. 실험체 S8은 170 kN의 하중에서 중앙부 하단에 초기균열이 발생하였다. 최대 하중은 971.8 kN이며, 초기균열이 휨 균열로 중앙부와 연결부를 중심으로 진행되었다. 중앙부의 상부 콘크리트가 파괴되어 실험체가 파괴되었다. 보의 전체 구간에서 PC 부분과 현장 타설 콘크리트 사이의 미끄러짐은 발생하지 않았다. Fig. 13 (b)는 실험체

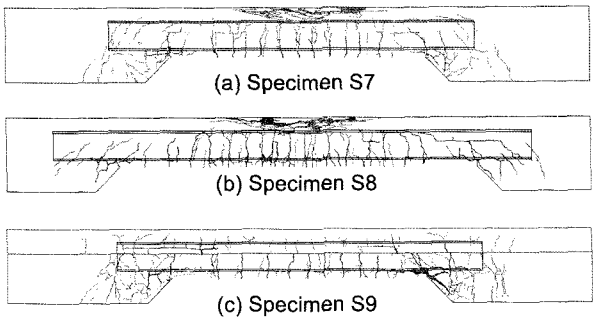


Fig. 13 Final crack patterns of specimen S7, S8, S9

S8의 최종 균형 상태이다. 실험체 S9는 실험체 S7의 양쪽에 하프-슬래브를 얹어 T형 보로 제작한 것이다. 실험체 S9는 하중 180 kN에서 중앙부 하단에서 초기균열이 발생하였다. 하중 400 kN에서 슬래브 하단에서 휨균열이 발생하였다. 전체적으로 휨균열이 중앙부와 연결부에서 발생하였다. 980 kN의 하중에서 연결부의 균열 간격이 점차 커졌으며 1,044.9 kN의 최대 하중에서는 균열 폭이 약 20 mm 가까이 되었고 철근이 노출되었다. 보 구간 전체에 걸쳐서 PC 부분과 현장 타설 콘크리트 사이의 미끄러짐은 발생하지 않았다. Fig. 13의 (c)는 실험체 S9의 최종 균열 상태이다.

4.2.2 하중-변위 관계

합성 단계의 실험체 S4, S5, S6, S7, S8, S9의 하중-변위 곡선은 Fig. 14와 같다. 실험체가 지지해야 하는 요구

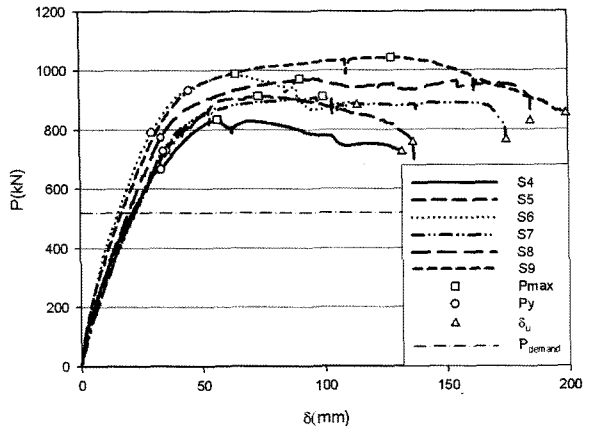


Table 14 Load-displacement curves of specimens for composite stage

하중 (P_{demand})은 Table 2의 합성 단계의 하중을 실험체의 가력 조건에 따라 변환한 하중으로서 그 값은 약 520 kN이다. Table 6은 합성 단계 실험체의 초기 강성, 항복 하중, 항복 변위 등을 표로 나타낸 것이다. 여기에서 초기 강성과 항복점은 다음과 같이 정의하였다. 먼저 원점과 최대 내력의 1/3되는 점을 연결한 선분을 초기 강성의 기울기로 하였고, 이 선분과 변위축이 이루는 각의 1/3되는 선분을 원점에서 그은 후, 실험값과 외접하도록 평행이동한 선분이 처음에 그은 선분과 만나는 점을 항복점으로 하였다.

합성 단계 실험체의 초기 강성은 모두 시공 단계의 실험체보다 2~3배 이상 상회하였다. 항복 하중은 681.0 kN에서 860.0 kN으로 합성 단계의 요구하중 보다 컸으며, 최대 하중도 835.6 kN부터 1,044.9 kN까지 요구 하중을 크게 상회하였다. 항복변위와 최대변위의 비를 이용한 연성지수는 2.57에서 3.93으로 적절한 연성을 보여주고 있다. 그리고 콘크리트와 강재보 사이에는 완전히 합성 작용이 일어났으며 PC 부분과 현장 타설 콘크리트의 사이에도 전혀 미끄러짐이 발생하지 않거나 연결부에 일부 나타나더라도 특별한 하중의 저하나 변위의 증가는 나타나지 않았다.

4.2.3 변형률

Fig. 15는 실험체 S4의 콘크리트와 강재보의 하중 단계별 변형률 선도이다. 콘크리트에는 압축변형률이, 강재보에는 인장변형률이 발생하여 콘크리트와 강재 모두 휨거동에 기여하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 콘크리트와 강재의 중립축이 보 하단으로부터 300 mm 정도로 일치하고 실험체가 파괴될 때까지 변화가 없으므로 콘크리트와 강재보가 합성 작용을 하고 탄성 상태에서 실험체가 파괴된 것을 알 수 있다.

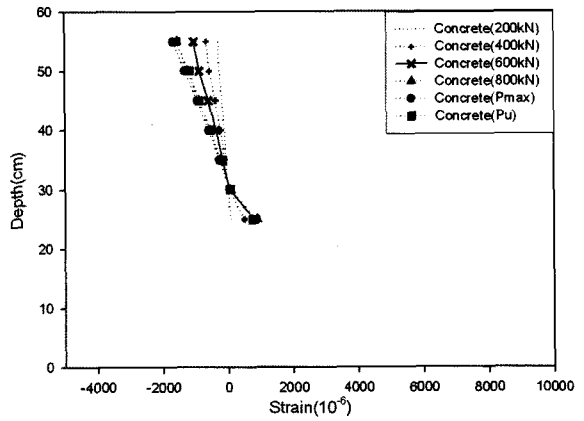
Fig. 16은 실험체 S5의 콘크리트와 강재의 하중 단계별 변형률 선도이다. 변형률과 관련된 거동은 실험체 S4와 거의 유사하다.

Fig. 17은 실험체 S6의 콘크리트와 강재의 하중 단계별 변형률 선도이다. 변형률과 관련된 거동은 탄성 상태에서 실험체가 파괴되었고 전체적으로 실험체 S5와 유사하였다.

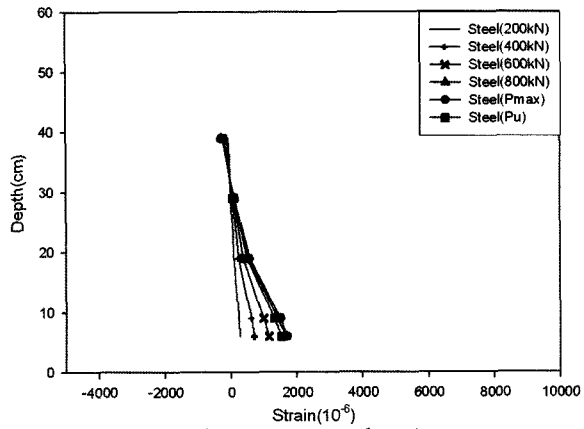
Fig. 18은 실험체 S7의 콘크리트와 강재의 하중 단계별 변형률 선도이다. 변형률 선도에서 보면 탄성 범위에

Table 6 Test results of specimens for composite stage

Specimen	K_i (kN/mm)	P_y (kN)	δ_y (mm)	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	$\frac{P_{max}}{P_{demand}}$	$\frac{\delta_{max}}{\delta_y}$
S4	32.19	681.0	22.0	835.6	56.7	1.61	2.57
S5	27.25	780.0	28.5	914.0	73.5	1.76	2.58
S6	42.16	815.0	19.0	986.1	64.1	1.90	3.37
S7	27.59	748.0	26.0	911.4	100.0	1.75	3.84
S8	30.57	842.0	28.0	971.8	90.4	1.87	3.23
S9	36.79	860.0	32.5	1044.9	127.8	2.01	3.93

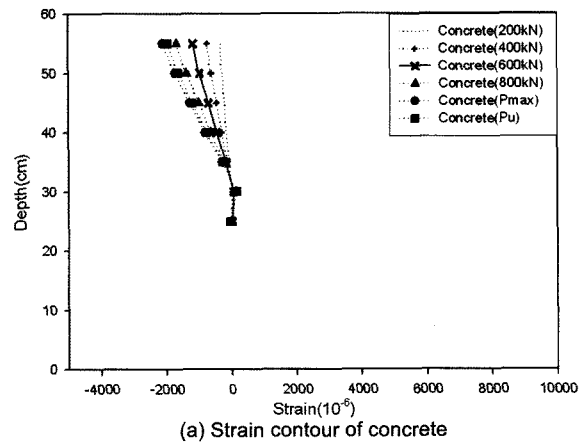


(a) Strain contour of concrete

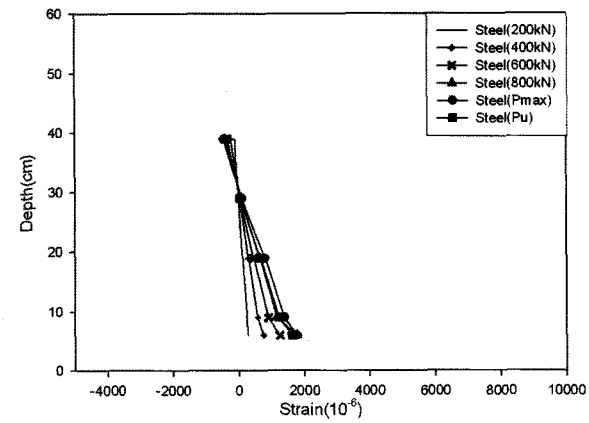


(b) Strain contour of steel

Fig. 15 Strain contour of specimen S4

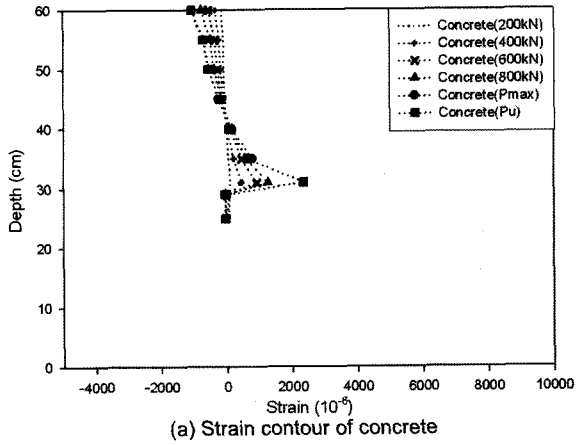


(a) Strain contour of concrete

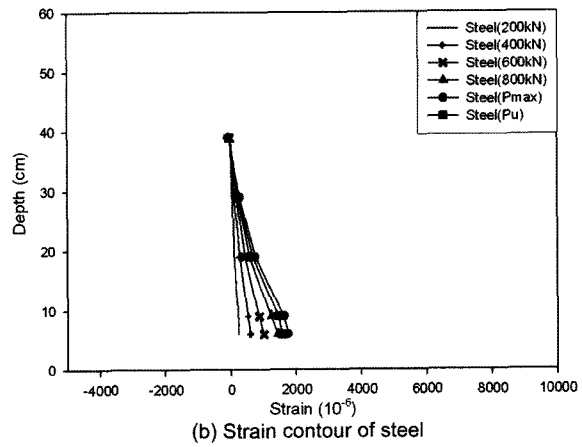


(b) Strain contour of steel

Fig. 16 Strain contour of specimen S5



(a) Strain contour of concrete



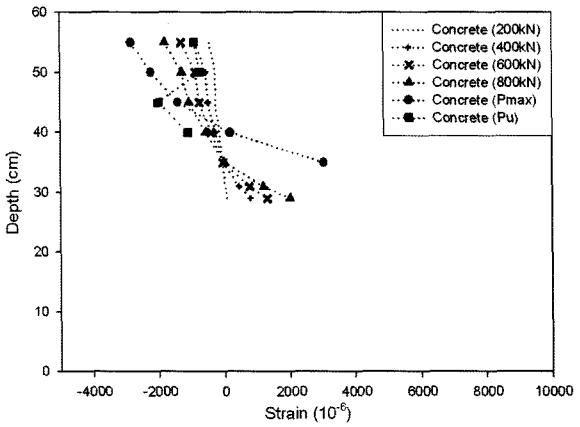
(b) Strain contour of steel

Fig. 17 Strain contour of specimen S6

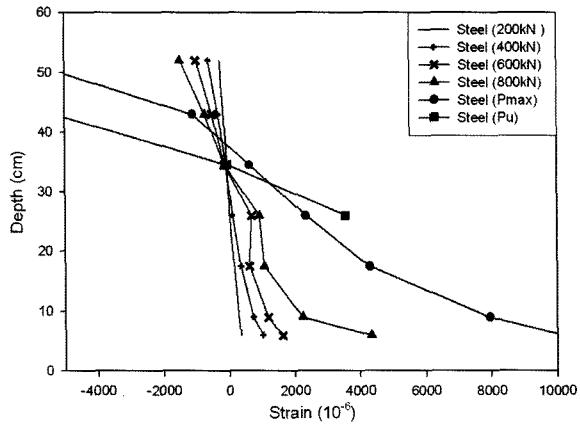
서는 강재와 콘크리트 모두 중립축이 하단으로부터 340 mm 부근에서 형성되었다. 하부 철근은 600 kN~700 kN 사이에서 항복하였고 그 후 800 kN에서 911.4 kN의 최대 하중 사이에서 강재보가 항복하였다. 800 kN 이후에는 중립축이 상승하여 하단으로부터 약 400 mm 부근에서 형성되었다. 탄성 상태와 소성 상태 모두에서 강재보와 콘크리트의 중립축이 일치하는 것으로 보아 완전합성 거동을 하는 것으로 간주할 수 있다.

Fig. 19는 실험체 S8의 콘크리트와 강재보의 하중 단계별 변형률 선도이다. 변형률 선도를 보면 하부 철근과 하부 플랜지의 항복은 명확하지 않지만, 웨브가 항복한 것으로 미루어 800 kN을 전후하여 강재 보가 항복한 것으로 판단된다. 중립축은 콘크리트와 강재보 모두 탄성 상태에서는 350 mm에서 형성되었으며 소성 상태에서는 400 mm에서 동일하게 형성되었으므로 보의 전 구간에서 완전 합성 거동을 하는 것으로 판단된다. 또한 최대 하중에서 강재보 단면의 거의 전 구간이 소성 상태에 도달하였다. 이는 최대 하중 상태까지 강재보와 콘크리트의 합성 작용이 원활히 이루어 졌기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 20은 실험체 S9의 최종 균열 상태, 콘크리트와 강재보의 하중 단계별 변형률 선도이다. 탄성 범위에서 중립축은 콘크리트와 철근 모두 하단으로부터 350 mm 부근에서 형성되며 약 900 kN에서는 하부 철근과 강재보

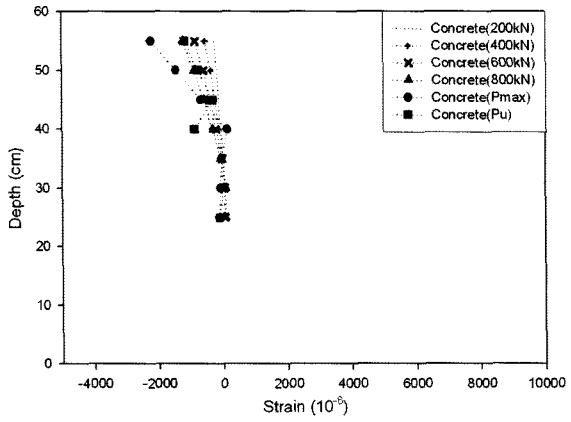


(a) Strain contour of concrete

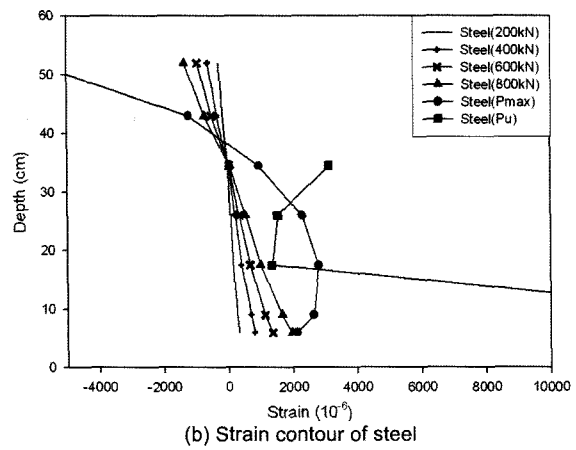


(b) Strain contour of steel

Fig. 18 Strain contour of specimen S7

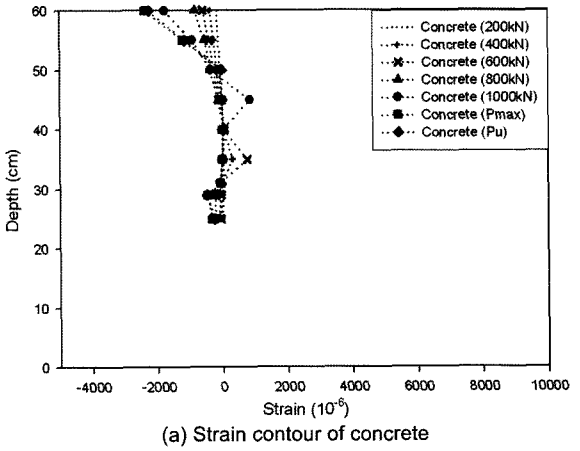


(a) Strain contour of concrete

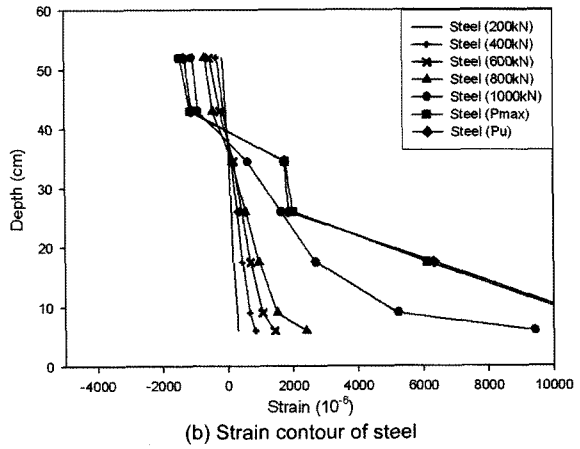


(b) Strain contour of steel

Fig. 19 Strain contour of specimen S8



(a) Strain contour of concrete



(b) Strain contour of steel

Fig. 20 Strain contour of specimen S9

가 항복하여 중립축이 400 mm 정도로 이동하였다. 보의 전체 구간에서 완전 합성 거동을 하는 것으로 판단된다. 또한 최대 하중에서 철근이 항복하였고 강재보 단면의 거의 전 구간이 소성 상태에 도달하였다. 이는 최대 하중 상태까지 강재보와 콘크리트의 합성 작용이 원활히 이루어 졌기 때문인 것으로 판단된다.

이상의 결과를 통해서 보면 합성 단계의 실험체는 모두 합성 단계의 요구 하중을 충분히 지지할 수 있는 우수한 휨 거동을 보여주는 것으로 판단된다.

4.3 강재 보 형태

합성 단계에서 역T형 실험체 S4, S5, S6의 초기 강성은 27.25~42.16 kN/mm로 H형 실험체 S7, S8, S9의 27.59~36.79 kN/mm와 유사하거나 약간 크게 나타났다. 하지만 항복 하중과 최대 하중은 H형 실험체가 역T형 실험체 보다 약간 더 큰 결과의 값을 보였다. 또한 연성지수에 있어서도 H형 실험체가 3.23~3.93으로 역T형 실험체의 2.57~3.37보다 좀 더 크게 나타났다.

그리고 H형 실험체의 경우 단면이 소성 상태가 되고 최대 하중에 도달할 때까지 철근과 콘크리트의 중립축이 동일하게 이동하여 완전 합성 작용이 일어났음을 알 수 있다. 역T형 실험체의 경우에는 철근과 콘크리트의 중립축이 계속 동일하여 합성거동이 일어났지만 단면이 소성

상태가 되기 전에 최대 하중에 도달하였다. PC와 현장 타설 콘크리트의 미끄러짐에 있어서도 H형 실험체에서는 전혀 발생하지 않았지만 역T형 실험체의 경우에는 하중이나 변위에는 거의 영향을 미치지 못하는 경미한 미끄러짐이 부분적으로 발생하였다.

이로 미루어 초기 강성, 하중, 합성 거동, 연성지수, 합성 작용 등을 종합적으로 고려할 때 시공 단계에서와 마찬가지로 합성 단계에서도 허니컴 보를 이용한 경우보다 H-형강 보를 이용한 경우가 더 우수한 휨 거동을 보여주는 것으로 판단된다. 이는 역시 허니컴 보의 경우 상부 플랜지가 없는 것에서 기인하는 것으로 판단되지만, 앞서 기술한 바와 같이, 허니컴 보를 이용한 경우에도 합성 단계의 요구 하중을 충분히 지지할 수 있는 휨 거동을 보여주었다.

4.4 중앙부의 길이 및 슬래브

역T형 중에서 중앙부의 길이가 보 길이의 1/2과 유사한 3,750 mm인 실험체 S4와 보 길이의 2/3와 유사한 5,000 mm인 실험체 S5를 비교하면 초기 강성은 실험체 S4가 약간 크지만 항복하중, 최대 하중, 연성 등은 실험체 S5가 약간 더 크다. H형의 경우에 중앙부의 길이가 3,750 mm인 실험체 S7과 5,000 mm인 실험체 S8을 비교하면 초기 강성, 항복하중, 최대 하중, 연성 등의 모든 면에서 실험체 S8이 더 크다. 균열과 합성 작용 등에 있어서 역T형 실험체들 사이에, 그리고 H형 실험체들 사이에서도 중앙부의 길이 변화에 따른 의미 있는 차이는 없었다.

이러한 분석 결과를 종합하면 역T형과 H형 실험체 모두에서 보의 깊이가 줄어드는 중앙부의 길이가 길어지면 보의 휨 거동이 향상되는 것을 알 수 있는데, 이는 중앙부의 길이가 증가하면 그만큼 강재 보의 길이가 증가하기 때문인 것으로 추정된다.

슬래브의 효과를 고려하여 제작한 역T형의 실험체 S6, H형의 실험체 S9를 각각 실험체 S4, 실험체 S7과 비교하면 실험체 S6과 실험체 S9가 초기 강성, 항복하중, 최대 하중, 최대 변위, 연성지수 등 거의 모든 면에서 휨 거동이 약간 향상된 것을 알 수 있다. 균열과 합성 작용 등에 있어서는 역T형이나 H형 실험체 모두에서 특별한 차이가 없었다. 이러한 점으로 미루어 슬래브는 실험체의 휨 거동 향상에 약간 기여하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 아파트 지하주차장 층고 절감을 위해서 강재 보, PC 보, 현장 타설 콘크리트를 조합하여 깊이를 줄인 하이브리드 보의 휨 성능을 실험적으로 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구에서 제안한 하이브리드 보는 층고를 절감하면서도 요구 하중을 충분히 지지할 수 있는 우수한 휨 성능을 보유하고 있어, 실제 현장에 안전하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.
2) 하이브리드 보의 처짐 및 시공 품질 확보를 위해서는 현장 콘크리트를 타설할 때 보의 하부에 가설지지대 설치가 필요하다.
3) 하이브리드 보의 강재 보로서 허니컴 보 보다는 H-형강 보를 사용하는 것이 보다 안전하다. 하지만 허니컴 보를 사용해도 합성 단계에서는 충분한 휨 성능을 확보할 수 있다.
4) 하이브리드 보에서 설비 배관의 양에 따라 보의 깊이를 줄인 부분을 보 길이의 1/2에서 2/3 정도까지 조절할 수 있다. 그리고 슬래브는 하이브리드 보의 휨 거동을 약간 향상시킬 것으로 예측할 수 있다.
5) 하이브리드 보에서 콘크리트와 강재 보가 합성 작용 부족, PC 부분과 현장 타설 콘크리트 사이의 미끄러짐 발생으로 인한 휨 성능의 약화는 발생하지 않을 것이다. 그리고 강재 보의 하부 플랜지에 아래쪽으로 전단연결재를 부착하는 것은 시공 단계에서도 필요하지 않다.

감사의 글

이 연구는 GS건설 지원 "지하주차장 층고 절감을 위한 하이브리드 보의 개발"로 수행된 연구 결과의 일부이며, 재정 지원 및 실험체 제작을 지원한 GS건설, 현대제철, 동서PC에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Mullett, D. L., *Composite Floor Systems*, Balckwell Science Ltd., 1998, 311pp.
2. 허병욱, 배규웅, 문태섭, "매입형(슬림플로어) 합성보의 휨성능 평가", 한국강구조학회논문집, 16권, 2호, 2004, pp.235~245.
3. 허병욱, 배규웅, 문태섭, "매입형 합성보의 휨성능 평가", 한국강구조학회논문집, 16권, 4호, 2004, pp.587~598.
4. 주영규, 김대영, 정광량, 김상대, "비대칭 철골 단면을 이용한 A-TEC Beam의 합성 거동", 대한건축학회논문집, 17권, 9호, 2001, pp.49~56.
5. 천성철, 주영규, 정광량, 김상대, "비대칭 유공 합성보 I-TECH Beam의 휨성능 평가", 대한건축학회논문집, 18권, 4호, 2002, pp.67~74.
6. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준 해설, 한국콘크리트학회, 2003, 405pp.
7. 대한건축학회, 강구조 한계상태 설계기준 및 해설, 대한건축학회, 1998, 249pp.
8. Mattock, A. H. and Gaafar, G. H., "Strength of Embedded Steel Sections as Brackets", *ACI Journal*, Vol.79, No.2, 1982, pp.83~93.

요 약 아파트의 지하주차장은 보 아래로 각종 설비 배관이 배치되기 때문에 층고가 300~400 mm 정도 추가로 필요하다. 본 연구에서는 설비 배관에 의한 층고 증가를 방지할 수 있도록 설비 배관이 배치되는 부분의 깊이를 줄이고 대신 강재 보를 매입하여 보강한 PC 보의 상부를 현장콘크리트로 타설하여 마무리하는 하이브리드 보 (hybrid beam)를 제안하였다. 그리고 이 하이브리드 보의 휨 거동을 검토하기 위해서 강재 보의 형상, 보의 깊이를 줄인 부분의 길이, 시공 단계 및 콘크리트 양생 후인 합성 단계, 슬래브 및 전단연결재 포함 여부 등을 주요 실험 변수로 실물 실험체 9개를 제작하고 휨 실험을 수행하였다. 그 결과, 본 연구에서 제안한 하이브리드 보는 합성 단계인 경우 강재 보의 형상, 보의 깊이를 줄인 부분의 길이, 슬래브 및 전단연결재의 포함 여부에 관계없이 설계 내력을 상회하는 우수한 휨 거동을 보여주는 것을 확인하였다. 시공 단계에서는 구조적 안정성 및 시공 품질의 확보를 위하여 가설 지지대 (support)가 필요한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 지하주차장 층고, 하이브리드 보, 휨 거동, PC 보, 매입된 강재 보