



앵글을 전단연결재로 사용하는 합성보의 휨성능

김영주^{1*} · 배재훈² · 안태상³ · 최종권⁴

¹수석연구원, DRB동일, 건설기술연구소, ²선임연구원, DRB동일, 건설기술연구소,
³소장, DRB동일, 건설기술연구소, ⁴차장, GS건설, 건축CE팀

Flexural Capacity of the Composite Beam using Angle as a Shear Connector

Kim, Young Ju^{1*}, Bae, Jae Hoon², Ahn, Tae Sang³, Choi, Jong Gwon⁴

¹Senior Researcher, Construction Engineering Center, DRB Holding Co., Ltd., Seoul, 150-903, Korea

²Senior Researcher, Construction Engineering Center, DRB Holding Co., Ltd., Seoul, 150-903, Korea

³Director, Construction Engineering Center, DRB Holding Co., Ltd., Seoul, 150-903, Korea

⁴Manager, Architectural Construction Engineering Team, GS E&C, Seoul, 110-130, Korea

Abstract - In this study, Composite beam flexural capacity was investigated experimentally using angle as a shear connector. The main experimental parameters are the size and the spacing of the angle and the overall behavior of before and after composite. Also, the composite beam bending performance when it used with hollow PC slab and the general RC slab was compared. When determining that it synthetically, the flexural capacity of the composite beam with angle shear connector estimated 25% to 55% more strength than the nominal strength. Effects of strength parameters of composite beam by angles shear connector are size and spacing of the angle. As expected, the larger and the narrower spacing of the angles, the more strength the composite beam have. In addition, the performance of the composite beam with a hollow slab was well demonstrated by the test.

Keywords - Composite beam, Angle shear connector, Flexural capacity, Hollow PC slab

1. 서론

최근 국제적인 FTA체결과 같은 활발한 국제간의 무역교류 증대로 인하여 규모가 큰 건물에 대한 요구가 증대되어 가고 있으며, 이에 따라 점차 밀집되어 가는 국토에 용적률을 높이기 위한 방안으로 건물의 고층화 및 장스팬화 되는 경향이 있다. 이러한 고하중, 장스팬을 현실적으로 구현하기 위해서는 단일재료의 활용으로는 비용의 증대가 불가피하다. 따라서 다양한 재료의 합성을 이용하여 재료절감을 할 필요성이 대두되고 있다. 또한 점차적으로 증가하고 있는 거푸집

과 인건비의 증가, 습식공법으로 인한 공사기간의 증가는 비용으로 연결되고 자연스레 습식공법보다는 건식공법인 강재에 대한 수요가 증가되고 있는 실정이다.

현재 국내외에서는 다양한 합성구조가 연구 개발되고 있으며, 이러한 노력은 합성보에서도 마찬가지로의 경향을 보이고 있다. 먼저 국내에서 진행된 연구를 살펴보면 다음과 같다. 신형상U형 하이브리드 합성보의 휨성능에 대한 연구^[1]에서 U형 합성보에 대한 휨성능을 실험을 통해 평가하였다. 또한 GFRP(Glass fiber reinforced plastic)를 이용한 경량합성바닥의 휨성능에 대한 실험적 평가^[2]에서는 장스팬 구조에 적합한 경량합성바닥에 대한 연구를 진행하였다. 이외에도 다양한 합성보의 휨거동에 관한 실험을 진행하였다^{[3],[4]}. 해외에서도 다양한 합성보에 휨 거동에 대한 연구가 진행되었다. Slutter 등은 일반적인 철골과 콘크리트의 합성보에 대한 연구를 진행하였고^[5], Viest 등은 전단연결재로 채널을 사용한 합성보의 실험에 대한 연구를 진행하였다^[6].

Note.-Discussion open until August 31, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 25, 2014; revised November 3, 2014; approved on December 29, 2014.

Copyright © 2015 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-2168-9141 Fax. +82-2-2672-6423

E-mail. kim.young.ju@drbworld.com

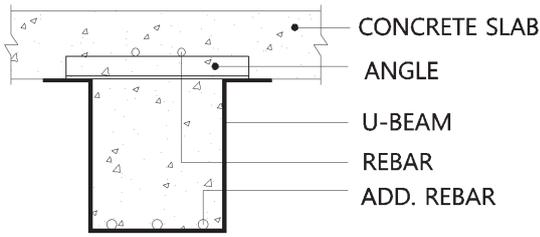


Fig. 1. Composite section with angle

합성보에 있어서 가장 중요한 특징 중 하나는 두 이질재와의 결합이다. 이질재의 결합에 있어서 중요한 요소는 두 부재 사이의 미끄럼을 방지하고 일체로서 거동을 하게 하는 것이다. 일반적인 합성보에서는 이러한 미끄럼을 방지하기 위해 스티드를 전단연결재로 사용한다. 합성보에 대한 연구는 앞에서 언급된 연구 이외에 다양하게 진행이 되었으나^{[7],[8],[9]}, 대부분이 전단연결재로써 스티드를 사용하는데 집중하였다. 유럽에서 앵글을 전단연결재로 활용하도록 기준으로 제시하였고^[10] 연구를 진행한 사례가 다소 있었지만, 국내에는 아직까지 앵글을 전단연결재로 사용한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구의 목적은 앵글을 전단연결재로 사용하는 합성보의 휨성능을 조사하는 것이다. Fig. 1은 전단연결재로서 앵글을 사용한 합성보의 형상이며, U타입의 강재단면의 내부에는 콘크리트가 충전되어 있다. 앵글을 전단연결재로 활용하면 간격유지재의 역할뿐만 아니라 전단연결재의 역할을 동시에 기대할 수 있다. 따라서 앵글을 전단연결재로 사용한 합성보의 실험대형 실험을 통해 합성 후의 보의 거동 및 앵글에 변수에 따른 영향 등을 살펴보았다.

2. 합성보의 설계

2.1 합성 전 보의 설계

U-BEAM의 판폭두께비는 압축판 요소의 판폭두께비 제한값에 의해 플랜지 부분은 휨을 받는 ㄱ형강의 다리요소에 따라 b/t 를 $0.54\sqrt{E/F_y}$ $0.91\sqrt{E/F_y}$ 을 기준으로 조밀단면과 비조밀 단면으로 구분하였고, 웹부분은 ㄷ형강의 웹요소로, $3.76\sqrt{E/F_y}$ 과 $5.70\sqrt{E/F_y}$ 을 각각 조밀단면과 비조밀단면의 판폭두께비 제한값으로 산정하였다. 또한 비지지길이는 인장과 압축이 변경되는 변곡점을 기준으로 비지지길이라고 고려해야 하지만 좀 더 보수적으로 전체 보의 길이

를 비지지길이라고 고려하였다. 합성 전에 국부좌굴과 비지지길이에 대해 보 전체의 횡비틀림좌굴을 고려하여 작은 값을 강재의 공칭강도로 산정하였다.

해당 실험체의 합성 전 단계에서 국부좌굴강도는 Fig. 2의 비탄성 영역에 해당하여 식(1)에 의해 산정하였다.

$$M_n = [M_p - (M_p - 0.7F_y S_x) \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right)] \leq M_p \quad (1)$$

다음으로 횡비틀림 좌굴에 대해서는 Fig. 3의 비탄성 영역에 해당 하여 아래 식(2)를 통해 산정하였다.

$$M_n = C_b [M_p - (M_p - 0.7F_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right)] \leq M_p \quad (2)$$

2.2 합성 후 보의 설계

2.2.1 앵글 전단연결재의 설계

합성 후 합성의 효과를 극대화하기 위해서는 합성율이 완전합성이 되도록 앵글의 타입과 간격을 결정하는 것이다. 합

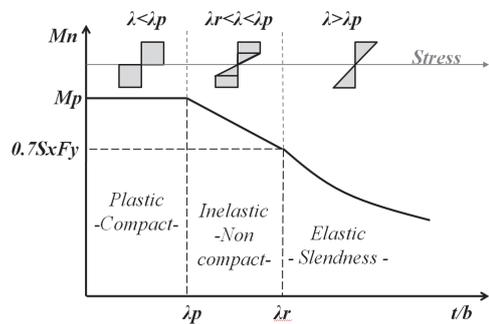


Fig. 2. Nominal flexural strength and plate width ratio relation

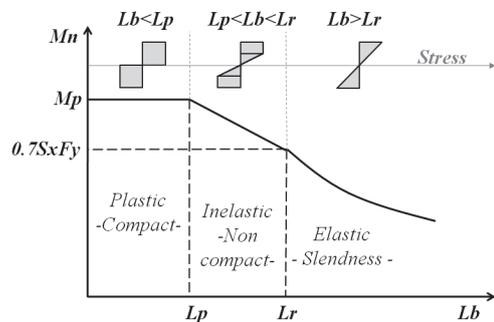


Fig. 3. Nominal strength M_n of "compact" sections as affected by lateral-torsional buckling.

성율은 인장측의 강재가 항복했을 때의 내력 ($A_s F_y$)과 유효 폭을 고려한 압축을 받는 콘크리트의 등가응력($0.85 f_{ck} A_c$) 중 작은 값을 기준으로 전단력의 배치구간 ($L/2$) 사이에 배치된 앵글의 타입과 개수에 의해 결정된다. 앵글에 대한 전단연결재의 설계과정은 앵글을 전단연결재로 사용한 합성보 [11],[12],[13]에 대한 Push-out 실험의 연구결과를 참조하였다. 앵글의 전단력은 수식(3)에 의해 계산된다.

$$Q_{Pro} = \frac{\left\{ \frac{10h^{\frac{2}{3}} f_{ck}^{\frac{2}{3}}}{(0.0012l_w^2 - 0.057l_w + 1.9)^{\frac{2}{3}}} \right\}}{\gamma_v} \quad (3)$$

여기서, l_w : Weld length(mm) 
 h : Angle height
 f_{ck} : Compressive stress of concrete(MPa)
 γ_v : Safety factor(1.25)

Fig. 4는 앵글변수와 합성율의 관계를 나타낸 그래프이다. 이때 사용된 합성보의 길이와 단면은 3장에 나오는 실험체를 대상으로 하였다(Fig. 8 참조). 원으로 표현된 부분은 실험체별로 사용된 앵글의 종류와 간격에 따른 합성보의 합성율을 보여주고 있다. Table 1은 실험체와 동일한 단면

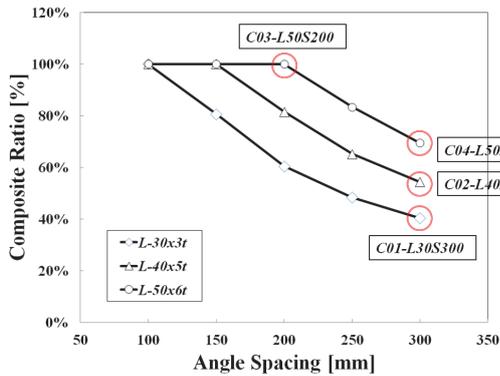


Fig. 4. Composite ratio affected by angle type & spacings

Table 1. Angle Spacing required for full composite

Angle	Spacing(mm)	COMPOSITE
L-30X3	100	fully Composite(100%)
L-40x5	150	
L-50x6	200	

(U-460×400×6)와 길이(6.6m)를 사용하였을 때 완전합성이 되기 위해서 요구되는 최대 간격을 앵글의 종류별로 표시한 것이다.

Fig. 4와 Table 1을 참조하면, 실험에 사용된 합성보 조건에서 완전합성효과를 발휘하기 위해서는 L-30, L-40, L-50의 간격이 각각 100mm, 150mm 및 200mm를 확보해야 하며, 간격이 증가할수록 보의 합성율은 다소 저하하는 경향을 보였다. 합성율과 휨강도의 관계는 실험결과를 바탕으로 논문의 『5.3 변수의 영향』절에 기술되어 있다.

2.2.2 합성단면의 내력 산정

합성율이 정해지면 다음으로 합성단면의 내력을 산정하는데, 하중저항계수설계법(Load and resistance factor design)에 따라서 설계를 진행하였다[14],[15],[16],[17]. 설계는 소성 중립축의 위치를 정하고 중립축에서의 각 부분의 응력의 거리를 모멘트로 산정하여 계산을 하게 된다.

Fig. 5는 합성보의 소성중립축의 위치를 나타내며, 합성보의 소성중립축이 슬래브 내에 위치한 경우(CASE1), 소성중립축이 상부 플랜지에 위치한 경우(CASE2) 및 소성중립축이 합성보 강재 단면의 웨브에 위치한 경우(CASE3)로 구분하여 설계를 진행한다. Fig. 6은 소성중립축이 슬래브 내

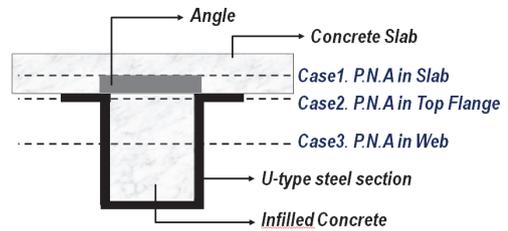


Fig. 5. Plastic neutral axis

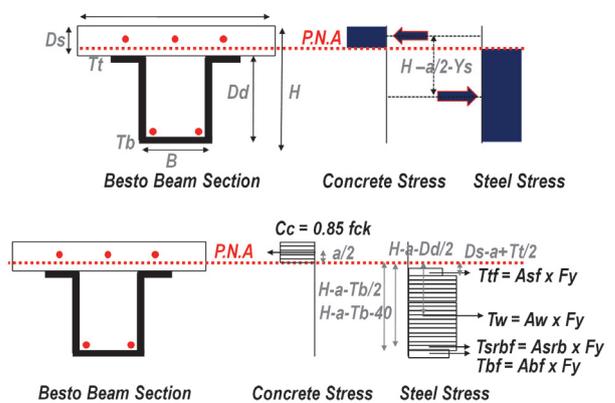


Fig. 6. Ideal concrete & steel stress

에 위치하는 경우의 응력을 이상화 한 것이다. 보의 공칭 모멘트는 소성중립축을 기준으로 상부의 압축을 받는 부분과 하부의 인장을 받는 부분으로 나눈 후 각 부분의 응력과 소성중립축과의 거리를 곱하여 산정하게 된다. 대부분의 경우, 슬래브의 유효폭이 크기 때문에 소성중립축은 슬래브 내에 위치하는 경향이 있으며, 이 경우 공칭모멘트는 식(4)에 의해 산정된다.

$$M_n = C_c \times \frac{a}{2} + T_{tf} \times (D_s - a + \frac{T_t}{2}) + T_w \times (H - a - \frac{D_d}{2}) + T_{bf} \times (H - a - \frac{T_b}{2}) + T_{srb} \times (H - a - T_b - 40) \quad (4)$$

- 여기서, D_s : Slab depth
- D_d : Steel depth
- H : Specimen height
- T_b : Bottom flange thickness
- T_t : Top flange thickness,
- T_w : web thickness
- P, N, A : Plastic neutral axis
- C_c : Equivalent stress of concrete,
- T_{tf} : Top flange stress of beam section
- T_{srb} : Web stress of beam
- T_{srb} : Bottom rebar stress
- T_{tb} : Bottom flange stress of beam section

3. 실험 프로그램

3.1 실험체

Table 2는 실험체 일람을 나타내며, Fig. 7과 Fig. 8은 실험체의 셋업 및 측정방법과 실험체 상세일부를 각각 나타낸 것이다. 실험체의 전체 길이는 6,600mm이고 슬래브 유효 폭은 1000mm이다. 실험체는 높이 460mm, 폭 400mm, 두께 6mm인 U-460x400x6인 강재단면이 사용되었다. 실험체의 변수는 앵글 타입과 간격, 슬래브의 유무 및 중공PC슬래브의 영향 등이다. Fig. 4에서 살펴보았듯이, 합성보에서 앵글의 크기 및 간격에 따라 전단연결재에 의한 합성율은 40%에서 100%로 계획되었다.

실험체는 총7개로 구성되어 있다. S01-L40S300 실험체와 C02-L40S300실험체는 각각 합성 전의 순수 철골단면과 합성 후 합성단면으로 설계되어 휨성능에 미치는 합성효과의 영향을 평가할 수 있다. C01-L30S300~C04-L50S300 실험체는 앵글의 크기와 간격을 변수로 하여, 합성율에 따른 합성보의 휨성능을 평가하도록 계획되었다. 앵글 용접량은 앵글의 전단연결재로 충분한 성능을 발휘하도록 앵글의 내력 이상의 용접량을 산정하였고 차후에 시공성을 고려하여 앵글의 길이방향으로 용접방향을 통일시켰다. 앵글은 U형 단면의 플랜지부분의 양쪽 50mm에 걸쳐서 용접되도록 하였고, 용접량은 전단력의 내력에 부합되도록 설계되었다. 또한 PC01-L50S200와 PC02-L50S300은 중공PC슬래브로 설계된 실험체로 휨성능에 미치는 중공PC슬래브 효과를 조사하도록 계획되었다. 데크플레이트는 일반 현장에서 많이 사용 중인 일반적인 트러스데크를 설치하였다. 중공슬래

Table 2. Test specimen list

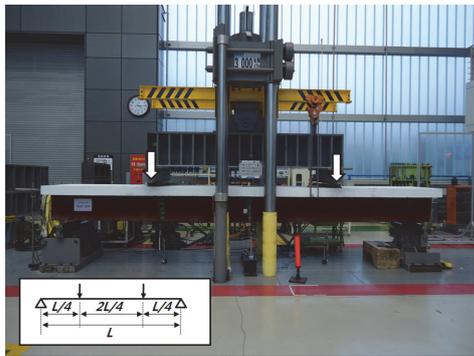
Specimen	Composite (mm)	U-section (mm)	Angle size (mm)	Angle pitch (mm)	Slab thickness (mm)	Composite ratio (%)
S01-L40S300	No	U-460×400×6	L-40×5	300	-	-
C01-L30S300	Yes	U-460×400×6	L-30×3	300	150	40
C02-L40S300	Yes	U-460×400×6	L-40×5	300	150	54
C03-L50S200	Yes	U-460×400×6	L-50×6	200	150	100
C04-L50S300	Yes	U-460×400×6	L-50×6	300	150	70
PC01-L50S200	Yes	U-460×400×6	L-50×6	200	210	100
PC02-L50S300	Yes	U-460×400×6	L-50×6	300	(PC:160, Topping:50)	70



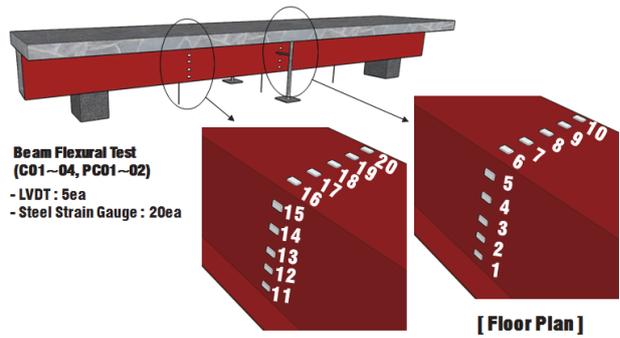
브의 경우에는 기성품인 중공PC슬래브의 두께가 160mm인 제품을 사용하였으며, 토폰크리트는 50mm의 두께로 제작되었다. 데크플레이트와 중공슬래브는 U형단면 플랜지에서 앵글이 용접되고 남은 50mm길이에 걸쳐서 설치되도록 하였으며, 데크플레이트는 테그용접으로 고정시켜 콘크리트를 타설하였다. 중공PC슬래브의 경우 유효폭을 고려하면

실험체보다 더 넓은 폭으로 설계되어야 하지만, 가력설비 상황에 맞춰 300mm의 폭의 넓이로 제작되었다.

Table 3는 사용된 강재 및 철근(시험방법: KS B 0802)과 콘크리트(시험방법: KS F 2405)의 재료시험결과를 표로 정리하여 나타내었다.



(a) Test setup



(b) Measuring plan

Fig. 7. Test specimen list

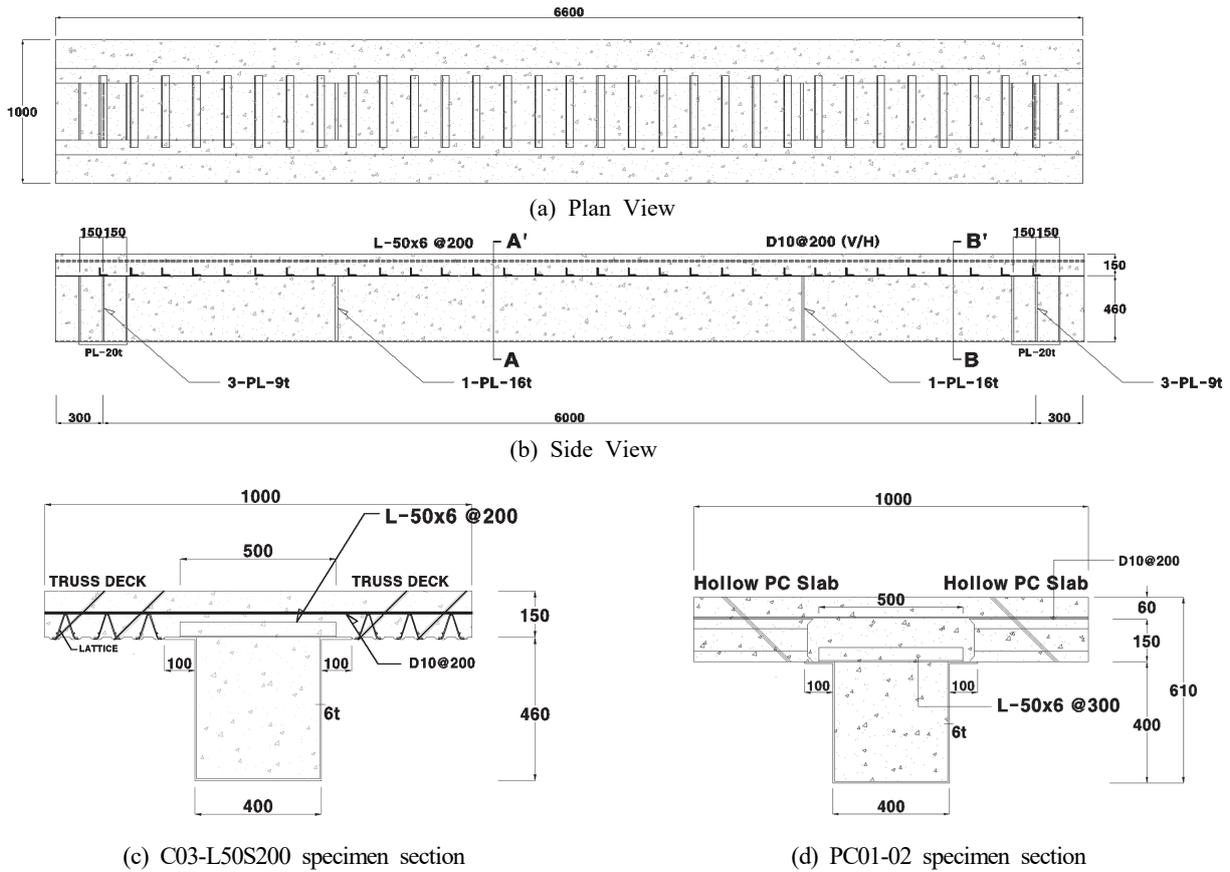


Fig. 8. Detail example of test specimens

Table 3. Test material result

Specimen		Y.S. (MPa)	T.S. (MPa)	Y.R.	Elo. (%)
U-section	PL-6 SM490	488	552	0.88	22
Angle	PL-3 SS400	338	421	0.80	39
	PL-5 SS400	279	456	0.61	38
	PL-6 SS400	400	454	0.88	39
Rebar	D10 HD400	501	636	0.79	18
Concrete		24MPa	Fck=28.5MPa		

3.2 실험체 가력 및 계측계획

실험체 가력방법은 Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이 3,000kN의 가력기(Actuator)를 사용하여 가력은 0.05m/sec의 속도로 가력을 진행하였다. 실험체의 파괴는 최대하중을 경험한 이후에 최대 하중의 80%로 내력이 저하될 때까지 실험을 진행하였다. 실험은 등분포 하중과 가깝게 구현하기 위하여 2점 집중가력을 진행을 하였다. 계측계획은 Fig. 7(b)와 같이 중앙부의 최대 처짐과 지점부의 처짐을 확인할 수 있도록 중앙부와 지점부에 각각 변위계를 설치하였다. 변형도를 측정하기 위해서 총 25개의 변형도게이지가 사용되었다. 단순보의 중앙부에 최대 모멘트가 발생하기 때문에 중앙부 하부

플랜지에 5개의 변형도게이지를 설치하였고 중앙부 측면의 웹에 5개의 게이지를 설치하였다. 또한 가력부위인 L/4 지점에 10개의 변형도게이지를 추가로 설치하였고, 압축을 받는 콘크리트 슬래브 중앙부에 5개의 변형도게이지를 설치하여 인장 및 압축변형도 분포를 관찰하고자 하였다

4. 실험결과

4.1 하중 - 변위 관계

Fig. 9는 각 실험체별로 하중-변위관계곡선과 최대 하중 이후의 실험체의 파괴형상을 보여주고 있다. 그래프에는 이론적으로 예측된 휨내력(P_e)을 실선으로 나타내었고, 최대 하중을 표시하였다. 모든 실험체는 공통적으로 하중-변위 곡선이 선형적으로 급격히 증가하다가 항복 이후에는 강성이 저하하면서 하중이 서서히 증가하는 경향을 나타냈으며, 최대내력 이후에는 파괴모드에 따라 다소 차이는 있지만 하중이 저하하는 경향을 보였다. 실험결과, 실험체 중에서 C03 실험체가 가장 큰 휨내력을 발휘하였다.

하중-변위 관계의 성상이 합성 전(순철골보), 합성 후(합성보) 및 중공PC슬래브를 사용하였을 때 그 차이를 확인할

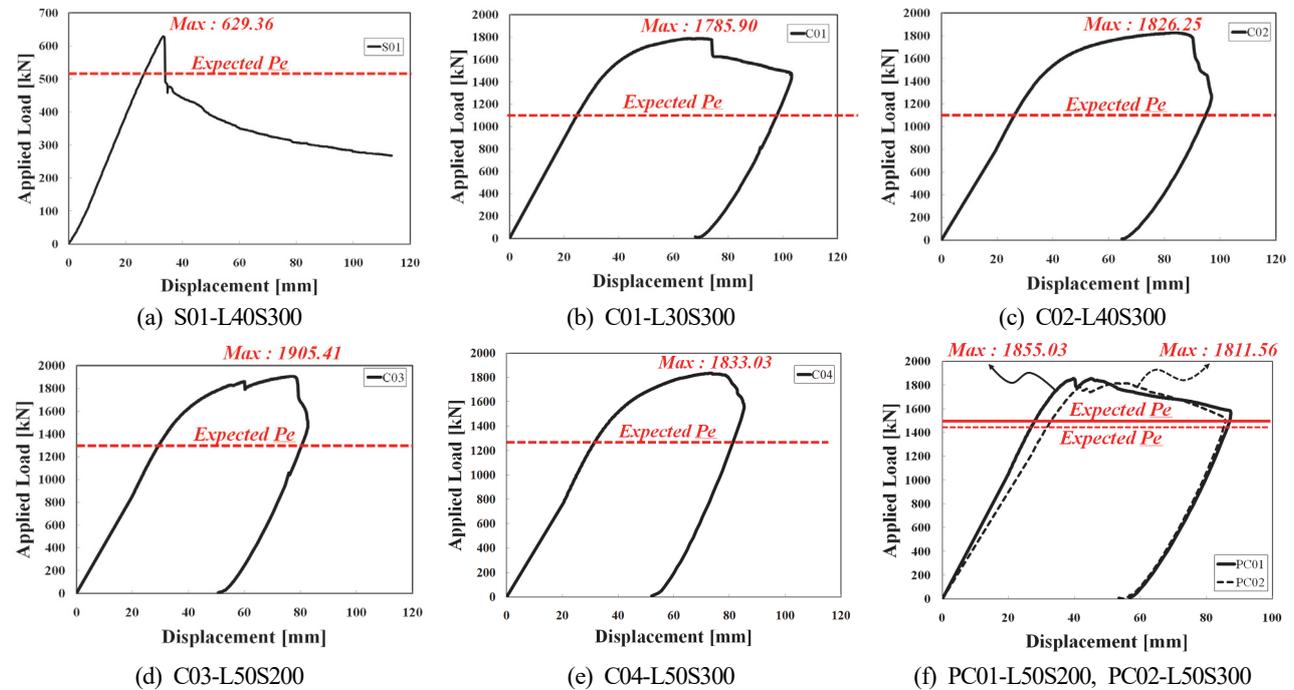


Fig. 9. Load-displacement relationship curve

수 있다. 순철골보(S01) 실험체의 경우, 하중-변위관계가 선형적으로 증가하다가 국부좌굴 발생 후 하중이 급격하게 떨어졌고 이후 횡비틀림좌굴을 동반하면서 하중이 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. 그러나 합성 후에는 콘크리트의 영향으로 국부좌굴은 관찰되지 않았고, 대부분 콘크리트 슬래브의 압축파괴 후 내력이 점진적으로 감소하였다. 이에 반해 중공PC슬래브가 사용된 실험체는 최대내력 이후 전단파괴 되기 전까지 합성보의 내력이 일정구간 지속적으로 떨어지는 경향을 나타내었다. Fig. 9를 참조하면, 모든 실험체는 이론적으로 예측된 강도, P_c 값보다 큰 내력을 발휘하였음을 확인할 수 있었다.

4.2 실험체 파괴모드

S01실험체의 파괴모드는 Fig. 10에 나타내었다. S01실험체는 점진적으로 내력이 상승하다가 실험체의 상부 플랜지(Fig. 10(b))와 웨브(Fig. 10(a))에서 국부좌굴이 발생되었으며 이후 내력은 급격히 저하되었다. 국부 좌굴 후 웨브부분에서 측면으로 접혀지면서 횡 비틀림 좌굴(Fig. 10(c))에 의해서 내력이 서서히 감소하는 경향을 보였으며, 최대하중의 80%로 하중이 저하한 시점에서 실험을 종료하였다. 실험체는 예상 파괴하중보다 더 높은 최대내력을 경험한 뒤에 국부좌굴이 발생하였다. 이는 앵글을 일정간격으로 배치시킴으로써 플랜지의 일부를 구속하는 효과가 발휘되었기 때문이라고 판단된다. 이 파괴모드는 콘크리트가 굳지 않았을 때의 파괴모드를 반영한다고 할 수 있으며 설계 시 주의가 요망된다.

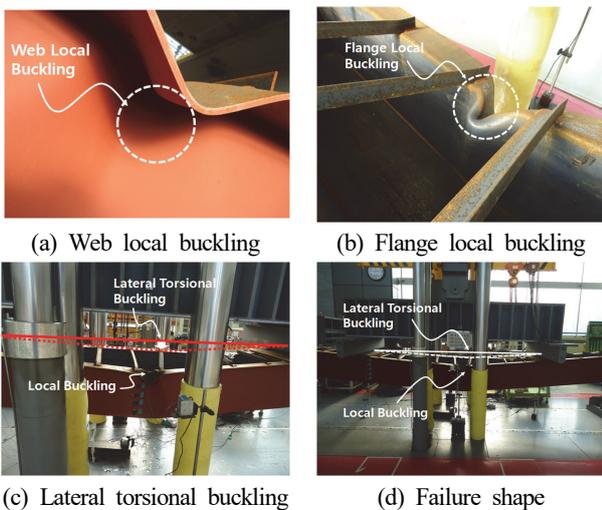
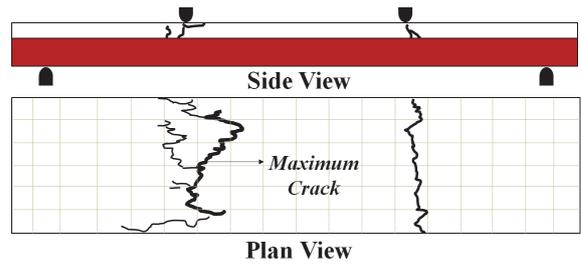


Fig. 10. S01-L40S300 failure mode

C01~C04의 실험체의 경우, 파괴모드는 거의 비슷한 것으로 관찰되었다. 하중가력 초기에 순철골 실험체인 S01에 비해서는 강성이 급격히 증가하였으며, 하중이 지속적으로 증가하다가 가력지점인 1/4 지점에서 콘크리트 슬래브에 압축파괴가 발생하기 시작하였다. 최대하중 경험 후 슬래브 균열이 지속적으로 증가하다가 Fig. 11과 같이 최종적으로는 슬래브 전반에 걸쳐 균열이 심화되면서 하중이 저하하여 실험을 종료하였다.

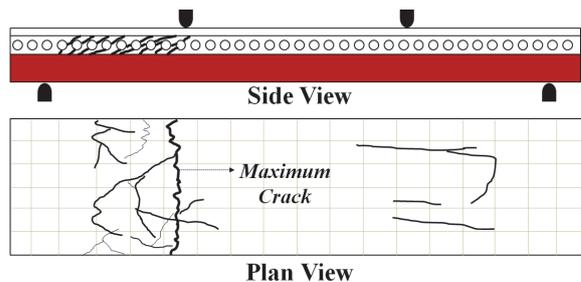


(a) Concrete crack pattern(CO₂)



(b) Failure mode(CO₂)

Fig. 11. Example of failure mode with RC slab



(a) Concrete crack pattern(PC01)



(b) Failure mode(PC01)

Fig. 12. Example of failure mode with hollow PC slab

중공PC슬래브 실험체인 PC01~02실험체의 경우도 C01~04실험체와 마찬가지로 콘크리트 슬래브의 압축파괴에 의해 내력이 저하되었다. 그러나 일반 슬래브를 사용한 실험체와는 달리 전단에 영향을 많이 받는 구간에서 전단파단이 Fig. 12와 같이 발생되었다. 균열은 가력지점 주위의 중공부분에서 발생하기 시작하여 합성보가 최대내력을 발휘한 이후에는 점차 지점부까지 확대되었으며, 이 후 PC슬래브와 토핑콘크리트 간의 균열도 추가로 발생 및 확대되어 내력도 점차적으로 저하하였다.

5. 분석 및 고찰

5.1 내력평가

Table 4에는 실험결과를 나타내었고, Fig. 13은 실험결과로부터 얻은 실험체의 최대내력과 예상내력을 비교하여 나타낸 것이다. 실험결과는 예상내력에 대한 최대내력의 비율이 1.22~1.55의 분포를 나타내고 있으며, 이는 합성보가

Table 4. Test result summary

Specimen	Ultimate load		Expected load		Pu/Pe
	Pu (kN)	Ratio	Pe (kN)	Ratio	
S01-L40S300	629	-	513	-	1.23
C01-L30S300	1786	0.94	1150	0.87	1.55
C02-L40S300	1826	0.96	1189	0.90	1.54
C03-L50S200	1905	1.00	1318	1.00	1.45
C04-L50S300	1833	0.96	1232	0.93	1.49
PC01-L50S200	1855	-	1514	-	1.22
PC02-L50S300	1812	-	1428	-	1.27

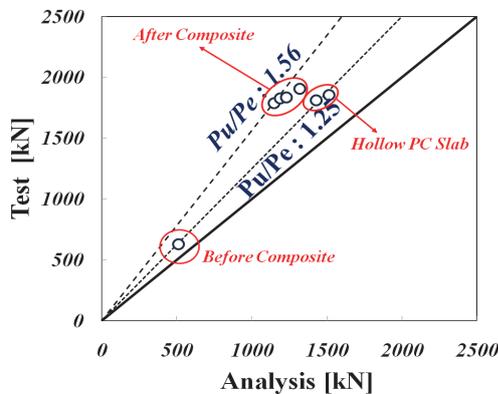


Fig. 13. Comparison of test and analysis result

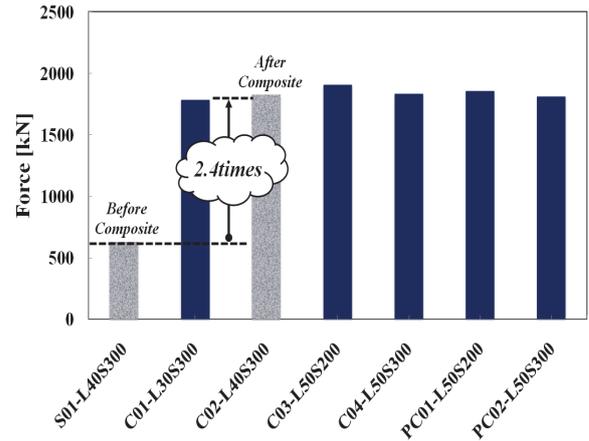


Fig. 14. Bar chart for maximum strength

휨내력을 잘 발휘하고 있음을 보여준다. 실험체의 내력은 전단연결재에 의한 합성율이 증가하면 할수록 내력도 증가하는 결과를 보여주었으나, 합성율이 감소하는 비율대비 휨성능의 저하는 그렇게 크지 않음을 알 수 있다. 중공PC슬래브 실험체는 전단파괴의 영향으로 일반슬래브의 내력상승율에 비해서 낮은 경향을 보였다. Fig. 14는 순철골보 대비 합성보의 내력은 약 2.4배 정도로 증가하는 결과를 또한 보여주고 있다.

5.2 변형도 분포

Fig. 15는 압축을 받는 상부의 콘크리트 슬래브에서의 변형도 곡선과 인장을 강재 하부플랜지에서의 변형도 곡선을 비교한 그래프이다. 압축을 받는 콘크리트의 최대 변형률이 0.3%이라고 가정할 때, 콘크리트가 최대 변형도를 넘어설 때의 강재의 변형도는 대략 0.4%에 해당되기 때문에 이후에

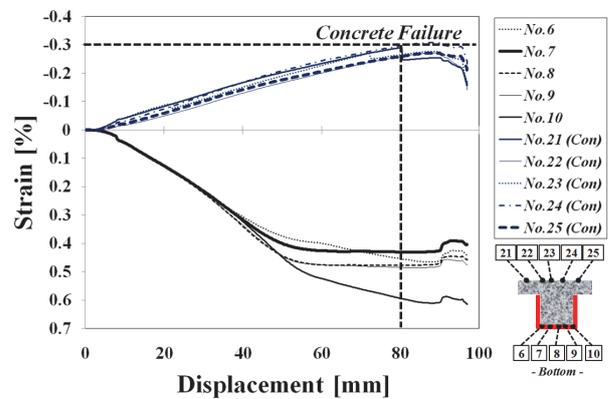


Fig. 15. Strain curve vs. flexural displacement

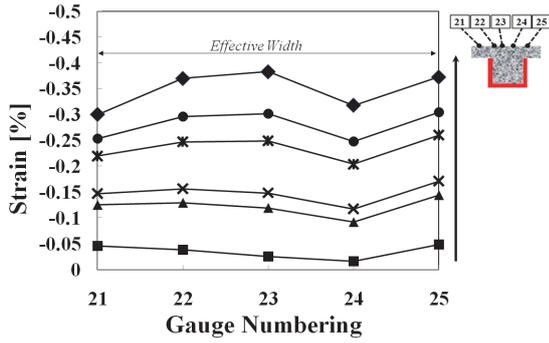


Fig. 16. Strain profile in slab effective width

도 강재는 충분히 추가적인 하중을 저항할 수 있는 보유내력을 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 실험실 가력기 크기의 제한에 의해 콘크리트 슬래브의 유효폭 길이를 기존의 1,500 mm에서 1,000mm로 조정함에 따라 실험체의 최대내력을 발휘하기 이전에 콘크리트의 압축파괴로 인해서 실험이 종결되었기 때문이라고 판단된다. 따라서 실제적인 유효폭을 사용하게 된다면, 추가적인 합성보 휨성능의 향상이 기대된다. Fig. 16은 하중이 증가에 따른 콘크리트 슬래브의 압축 변형도의 변화를 보여주고 있다. 계측 위치에 따라서 변형도의 값이 일부 차이가 나는 부분도 있지만, 대체적으로 거의 비슷한 압축변형도 분포를 관찰할 수 있다. 이는 슬래브 전체가 골고루 압축응력을 전달하고 있음을 보여 준다.

5.3 변수의 영향

다양한 변수의 영향을 분석하기 위해서, 실험변수에 의한 비교군을 Table 5에 나타내었다. 먼저 합성효과를 조사하기 위해서 동일한 앵글을 사용한 합성 전의 순철골 실험체 S01-L40S30와 합성보 실험체 C02-L40S300를 비교하였다. C01-L30S300, C02-L40S300, C04-L50S300 실험체

Table 5. Parameters for comparison of test results

Specimen	Composite	Angle Size	Angle Spacing	Hollow or Typ. Slab
S01-L40S300	○	-	-	-
C01-L30S300	-	○	-	-
C02-L40S300	○	○	-	-
C03-L50S200	-	-	○	○
C04-L50S300	-	○	○	△
PC01-L50S200	-	-	△	○
PC02-L50S300	-	-	△	△

의 경우에는 앵글 사이즈의 영향이 합성보 내력에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 또한, 앵글 간격의 영향은 C03-L50S200와 C04-L50S300의 비교를 통해 관찰할 수 있었고, 중공PC슬래브와 일반슬래브를 사용하였을 때의 차이점을 비교하기 위해 동일한 앵글이 사용된 C03-L50S200과 PC01-L50S200 및 C04-L50S300과 PC02-L50S300을 각각 비교대상으로 선정하였다.

5.3.1 합성 전후의 영향

Fig. 17은 합성 전후의 하중-변위곡선 그래프이다. 합성 전에는 국부좌굴 발생 후에 내력이 1차적으로 급격히 떨어지고, 이후에 횡비틀림 좌굴이 발생하면서 점진적으로 하중이 떨어지는 현상을 보였다. 이에 반하여, 합성 후에는 슬래브와의 합성효과로 인하여 강성이 합성 전에 비하여 증가하였으며, 이에 따른 합성보의 내력도 크게 증가하였다. 또한, 연성율은 개략적으로 최대내력에 상응하는 변위 대비 항복내력에 상응하는 변위의 비로 정의할 수 있으며, 합성 전의 연성율은 1.4(=35mm/25mm)에 비해, 합성 후 연성율은 2.25(=90mm/40mm)로 나타난 것을 볼 때 연성능력이 크게 증가되었고 합성 전에 비해 안정적인 거동을 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 합성효과에 의해서 최대 휨내력은 약 2.4배 증가한 결과를 보여주었다.

5.3.2 전단연결재의 영향

Fig. 18은 기존의 스테드 볼트 하나의 전단력과 본 실험에서 사용된 앵글 하나의 전단내력을 비교하고 있다. 스테드의 일반적인 공칭강도 계산식인 $V_{sn} = 0.5R_u A_{sc} \sqrt{f_{ck} E_c} \leq A_{sc} F_u$ 식을 사용하면 L-50×6의 앵글의 전단강도가 stud-Ø16과 stud-Ø19 일때의 공칭 전단강도보다 40%, 55%이상 크기

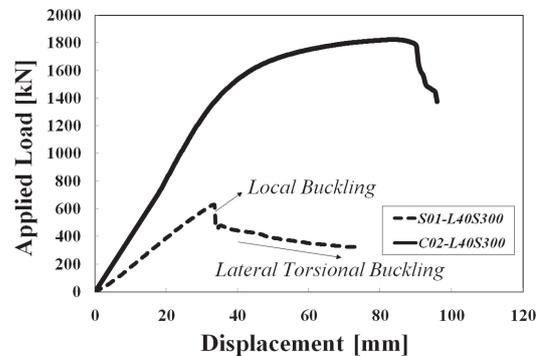


Fig. 17. Pure steel vs. composite beam

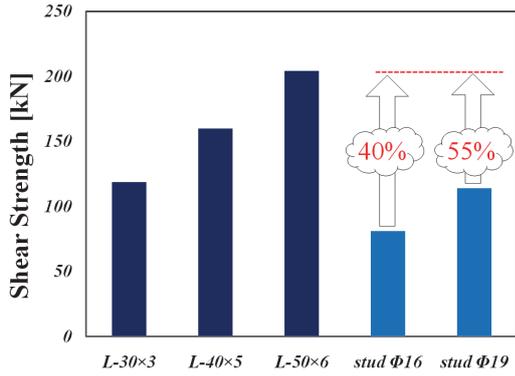
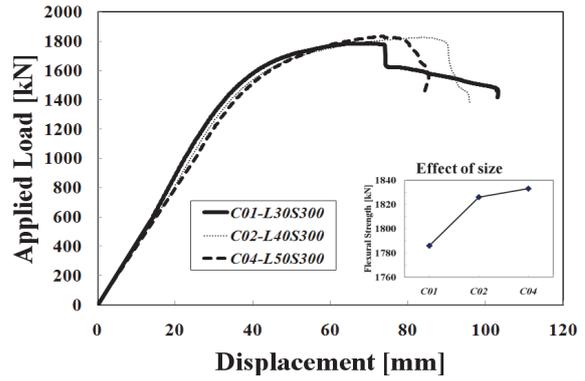


Fig. 18. Normal shear strength

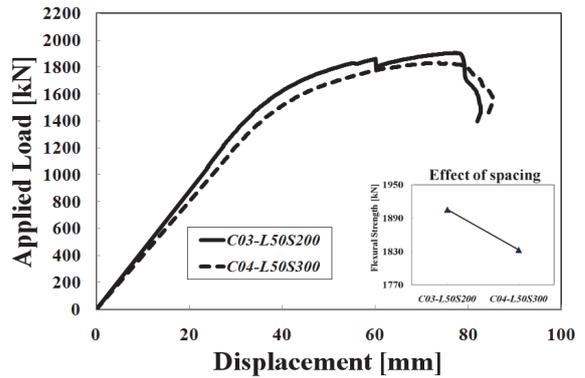
때문에 기존 스티드 대비해서 배치간격을 좀 더 넓힐수가 있었다. 여기서 사용된 앵글의 전단강도 계산식은 수식(3)에 의해 계산하였고 추가적으로 앵글의 전단연결성능에 관한 검증부분에 대해서는 앵글을 전단연결재로 사용한 합성보에 대한 Push-out 실험의 연구결과^[11]를 참조하였다.

앵글을 사용한 전단연결재의 영향을 알아보기 위하여 Fig. 19에서 하중-변위 곡선을 비교하였다. Fig. 19(a)~(b)의 그래프는 앵글의 크기와 간격을 변수로 하였을 때의 합성보의 하중-변위곡선을 각각 나타내었다. Fig. 19(a)에서 L-40x5 이상의 앵글을 사용된 실험체의 내력은 L-50x6 앵글을 사용된 실험체의 내력과 차이는 매우 미미하였지만, 앵글의 크기가 증가할수록 실험체의 최대내력은 증가하는 현상을 보여주고 있다. 또한 Fig. 19(b)에서와 같이 앵글의 간격이 늘어남에 따라 합성보의 최대내력이 감소함을 확인할 수 있었다. 앵글의 간격에 따른 영향은 일반슬래브와 중공슬래브에서도 이와 같은 현상을 확인할 수 있었다. 결국 전단연결재로 사용되는 앵글의 크기가 클수록, 앵글의 배치를 전단력이 필요한 구간 내에 많이 배치시킬수록 합성보가 휨내력을 발휘하는데 중요한 역할을 하게 된다.

전단연결재의 종류와 배치는 합성보의 휨내력 뿐만 아니라, 합성율에 영향을 주게 된다. 합성율의 영향은 Fig. 20와 같이 합성율의 증가에 따라서 소폭이지만 합성보의 내력이 증가하는 결과를 보이는 것을 알 수 있다. Fig. 21은 합성율과 휨내력의 관계를 나타낸 것이다. 이때의 합성률 100% 값은 상부측의 압축을 받는 콘크리트의 내력 $0.85f_{ck}A_c$ 값과 하부측의 인장을 받는 BESTOBEAM 내력 A_sF_y 값중 적은값을 기준으로 $\text{Min}(0.85f_{ck}A_c, A_sF_y) L/2$ 구간에 앵글을 배치시켰을때의 전단 내력이 이값보다 큰 상태를 합성률을 100%로 보았고, 각 실험체의 앵글 내력 / $\text{Min}(0.85f_{ck}A_c, A_sF_y)$ 의



(a) Angle size



(b) Angle spacing

Fig. 19. Effect of angle variables

내력을 비교하여 합성율을 산정하였다. Fig. 21 그래프는 합성율의 증가에 따른 휨내력의 증가율은 이론값이나 실험값 모두 비슷하게 증가하는 경향을 보였다. Table 4를 참조하면, 이론값의 경우, 합성효과가 100%인 실험체의 휨내력을 기준으로 할 때, 휨내력은 0.87~1.00의 분포를, 실험값의 경우 휨내력은 0.94~1.00의 분포를 보였다. 이러한 휨내력 분포의 결과는 합성율의 분포가 40%~100%인 것과 비교하면 그 변화율이 크기 없다는 것을 추정할 수 있다. 이러한 결과는, 건축구조기준 및 해설^[18]의 [해그림 0709.3.3.]을 통해서 전단연결재 강도비의 증가율에 비해서 휨강도비의 증가율이 크기 없다는 것을 기술하고 있는 것에서 동일한 결과임을 확인할 수 있다. 따라서 합성율이 감소하더라도 휨내력의 저하비율은 상대적으로 줄어드는 것을 추정할 수 있다.

5.3.3 중공슬래브의 영향

Fig. 22은 동일한 앵글 크기와 간격을 갖는 일반슬래브와 중공PC슬래브의 하중-변위곡선을 나타낸 그래프이다. 그 그래프에서 확인할 수 있듯이 일반슬래브에 비해서 중공슬래

브의 두께가 60mm 더 크기 때문에 휨강성에 의해서 최대내력 도달시점의 변위가 훨씬 작지만, 그만큼 하중저하의 시점도 빨라지는 것을 알 수 있다. 이는 중공PC슬래브 실험체가 전단력을 크게 받는 부분에서 조기에 전단 파단한 결과에 따른 것이다. 그림에도 불구하고, 중공PC슬래브 실험체 대비 일반슬래브 실험체의 최대내력은 약 1.01~1.03의 분포로

최대내력은 큰 차이가 관찰되지 않았다. 본 실험체는 실험실 여건상 슬래브 유효폭이 1,000mm로 제한되어 PC슬래브의 정착이 충분하지 않은 상황을 고려하면, 비록 조기전단파단의 결과를 보였지만 중공PC슬래브를 적용해도 휨성능을 잘 발휘할 수 있음을 보였다.

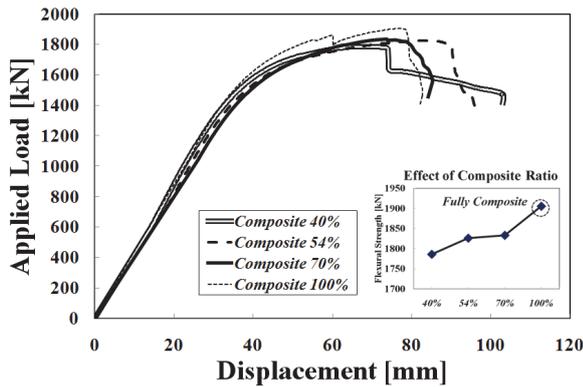


Fig. 20. Effect of composite ratio

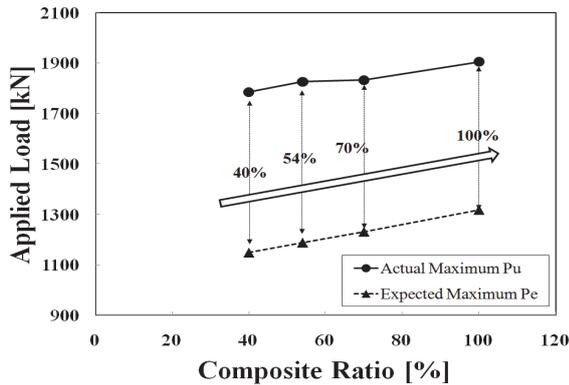


Fig. 21. Actual maximum Pu and expected Pe by composite ratio

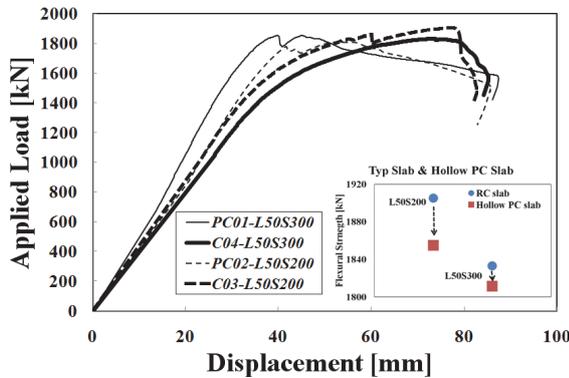


Fig. 22. Applied load displacement graph with hollow slab

6. 결론

본 연구에서는 앵글을 전단연결재로 사용한 합성보의 휨성능을 실험적으로 검증하였다. 다양한 변수를 바탕으로 실험결과를 분석하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 합성 전의 순철골보의 휨거동을 살펴보면 실험체는 예상 파괴하중보다 더 높은 최대내력을 보였다. 이는 전단연결재로 사용되는 앵글이 일정간격 배치되어 상부플랜지 부분을 일부 구속하는 효과로 인해 국부좌굴 및 횡비틀림좌굴의 발생을 지연시켰기 때문이다. 그러나 실제 시공 시에는 굳지 않은 콘크리트 등의 고정하중과 시공하중을 모두 강재단면의 휨내력으로 저항해야 하므로 설계 시 매우 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다.
- (2) 앵글을 전단연결재로 사용한 합성보의 휨성능은 앵글의 크기가 클수록 앵글의 간격이 좁을수록 합성보의 내력이 상승하는 결과를 보였는데, 이는 상대적으로 합성율이 증가한데 따른 결과이다. 실험결과, 예상 휨내력 대비 실제 휨내력은 1.22~1.55의 분포를 보이는 것으로 보아 제안된 합성보는 안정된 휨내력을 발휘한다고 할 수 있다. 또한 순철골 보에 비해서 합성보의 내력은 약 2.4배 상승하는 결과를 보였다.
- (3) 합성보의 합성율에 따른 휨성능을 평가한 결과, 합성율의 변화율에 비해서 휨성능의 변화율은 크기 않았다. 실험결과, 합성율이 40%~100%의 큰 변화로 설계된 실험체의 휨내력이 이론적으로는 0.87~1.00의 분포를, 실험적으로는 0.94~1.00의 분포를 보였다. 따라서 합성율의 감소가 크더라도 합성보 휨내력의 저하현상은 상대적으로 작았다고 할 수 있다.
- (4) 기존 데크플레이트를 사용한 RC슬래브의 경우에는 슬래브의 압축파단으로 휨내력이 결정되었다. 이는 원래 계획된 슬래브 유효폭 1,500mm가 실험실 여건상 1,000mm로 줄어든 것이 그 원인으로 보이며, 적절한 슬래브의 유효폭을 확보할 경우에는 보다 큰 휨내력 및

연성능력을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

- (5) 중공PC슬래브를 사용한 합성보는 일반 슬래브에 비해서 슬래브 두께로 인해서 초기 강성은 증가하였지만 초기에 전단파괴의 모드를 보였다. 그럼에도 불구하고, 예상하중을 충분히 상회한 결과를 참조하면 중공PC슬래브를 사용하더라도 합성보의 내력을 충분히 발휘한다고 볼 수 있다.

참고문헌(References)

- [1] 김성배, 김상섭, 이원록, 김정연, 이승배, 유덕수, 김대희 (2012) 신형상U형 하이브리드 합성보의 휨성능에 대한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제5호, pp.521-534.
Kim, S.B., Kim, S.S., Lee, W.R., Kim, J.Y., Lee, S.B., Ryu, D.S., and Kim, D.H. (2012) Study on the Flexible Strength of U-Shape Hybrid Composite Beam, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.5, pp.521-534 (in Korean).
- [2] 류재호, 박세호, 주영규, 김상대(2011) GFRP를 이용한 경량합성바닥의 휨성능에 대한 실험적 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제1호, pp.125-135.
Ryu, J.H., Park, S.H., Ju, Y.K., and Kim, S.D. (2011) An Experimental Evaluation on Flexural Performance of Light-Weight Void Composite Floor Using GFRP, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 23, No.1, pp.125-135 (in Korean).
- [3] 허병욱, 배규웅, 문태섭(2004) 매입형(슬림플로어) 합성보의 휨성능 평가: 층이 깊은 데크 플레이트와 비대칭 H형강 첩골보, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제16권, 제2호, pp.235-245.
Heo, B.W., Bae, K.W., and Moon, T.S. (2004) Flexural Capacity of the Encased (Slim Floor) Composite Beam with Deep Deck Plate, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.16, No.2, pp.235-245 (in Korean).
- [4] 김상섭, 박동수, 부윤섭(2012) 자중저감 철선일체형 중공 데크플레이트 슬래브를 사용한 합성보의 휨내력 및 CO₂ 감소량 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제3호, pp.313-323.
Kim, S.S., Park, D.S., and Boo, Y.S. (2012) Flexural Capacity and CO₂ Reduction Evaluation for Composite Beam with Weight Reducing Steel Wire-Integrated Void Deck Plate Slab, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.3, pp.313-323 (in Korean).
- [5] Slutter, R.G., and Driscoll, G.C. (1965) Flexural Strength of Steel-Concrete Composite Beams, *Journal of the Structural Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 91, No.2, pp.71-99.
- [6] Viest, I.M., Siess, C.P., Appleton, J.H., and Newmark, N.M. (1952) *Full-Scale Tests of Channel Shear Connectors and Composite T-Beams (Studies of Slab and Beam Highway Bridges, Part IV)*, University of Illinois Bulletin No. 405, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
- [7] 이은택, 이상훈, 장보라(2008) 층고절감을 위한 반슬림플로어 합성보 휨성능 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제1호, pp.165-173.
Lee, E.T., Lee, S.H., and Jang, B.R. (2008) Flexural Performance Evaluation of Semi-Slim Floor Composite Beams for Reduction of Story Height, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.20, No.1, pp. 165-173 (in Korean).
- [8] Siess, C.P., Viest, I.M., and Newmark, N.M. (1952) *Small Scale Tests of Shear Connectors and Composite T-Beams (Studies of Slab and Beam Highway Bridges, Part III)*, University of Illinois Bulletin No. 396, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
- [9] Thürlimann, B. (1958) *Composite Beams with Stud Shear Connectors*, *Highway Research Board Bulletin*, National Research Council (National Academy of Sciences), No. 174, pp.18-38.
- [10] European Committee for Standardization (2001) *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Building, Draft No. 2* (prEN 1994-1-1: 2001), Belgium.
- [11] 김영주, 배재훈, 안태상, 장동운(2014) 합성보에 적용된 앵글 전단연결재의 Push-out 실험, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제3호, pp.155-167.
Kim, Y.J., Bae, J.H., Ahn, T.S., and Jang, D.W. (2014) Push-out Test on Welded Angle Shear Connectors Used in Composite Beams, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.3, pp.155-167 (in Korean).
- [12] 김영주, 배재훈, 안태상, 김진원, 유홍식(2014) SRC기둥-H형단면과 U형단면으로 구성된 합성보 접합부의 반복가력실험, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제4호, pp.263-275.
Kim, Y.J., Bae, J.H., Ahn, T.S., Kim, J.W., and Ryu, H.S. (2014) Cyclic Loading Test on Composite of SRC Column-Composite Beam Consisting of H-Section and U-Section

- Members, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.4, pp.263-275 (in Korean).
- [13] 김영주, 배재훈, 안태상, 장성훈(2014) 중력하중을 받는 SRC기둥-합성보 접합부 실험, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제5호, pp.441-452.
Kim, Y.J., Bae, J.H., Ahn, T.S., and Jang, S.H. (2014) Test of SRC Column-to-Composite Beam Connection Under Gravity Loading, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.5, pp.441-452 (in Korean).
- [14] 한국강구조학회(2011) 하중저항계수설계법에 의한 강구조설계기준 해설, 구미서관.
KSSC (2011) *Korean Steel Structure Design Code and Commentary: Load and Resistance Factored Design*, Goomiseogwan, Korea (in Korean).
- [15] American Institute of Steel Construction (2005) *Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design* (3rd Ed.), AISC, USA.
- [16] Leon, R.T., Hoffman, J.J., and Staeger, T. (1996) *Partially Restrained Composite Connections : Load and Resistance Factor Design (Steel Design Guide Series 8)*, American Institute of Steel Construction, USA.
- [17] American Society of Civil Engineers (1985) *Specifications for the Design and Construction of Composite Slabs and Commentary on Specifications for Design and Construction of Composite Slabs* (ASCE 0-84), USA, p.56.
- [18] 대한건축학회(2009) 건축구조기준 (KBC 2009) 및 해설, 기문당.
Architectural Institute of Korea (2009) *Korea Building Code (KBC 2009) and Commentary*, Kimmoondang, Korea (in Korean).

요 약 : 본 연구에서는 앵글을 전단연결재로 사용하여 합성보의 휨성능을 실험적으로 조사하였다. 실험의 주요변수는 앵글의 크기와 간격 및 콘크리트가 합성 전과 합성 후의 휨에 대한 전체적인 거동을 실험적으로 검증하였다. 또한 중공PC슬래브와 일반RC슬래브와 같이 사용하였을 때의 휨성능을 비교하였다. 이를 종합적으로 판단하면, 앵글을 전단연결재로 사용한 합성보의 휨성능은 앵글의 간격을 적절하게 배치시키면 예상내력보다 25-55% 이상의 공칭내력을 보유하고 있음을 확인할 수 있었다. 예상한 바와 같이, 합성보의 내력에 미치는 앵글의 변수를 살펴보면 앵글의 크기가 클수록 앵글의 간격이 좁을수록 합성보의 내력이 상승함을 확인할 수 있었다. 또한 중공PC슬래브에서도 앵글을 사용한 합성보의 성능이 잘 발휘됨을 실험적으로 검증하였다.

핵심용어 : 합성보, 앵글 전단연결재, 휨성능, 중공PC슬래브
