

요철단면 SC보의 휨 내력에 관한 연구

A Study on Flexural Strength of Prominent Section of SC Beams

류 수 현*
Ryu, Soo-Hyun

안 형 준**
Ahn, Hyung-Joon

Abstract

This experimental study of prominent section bending behavior beam without shear connector provides bond capacity between concrete profile and initial stiffness of SC beam by comparing the test result with a theoretical analysis result and an ANSYS(common structural analysis program) analysis result. The compared result provides a fundamental study for practical use of efficient SC beam. Test result indicates 88%-98% rate of theoretical result in moment capacity and composition ratio shows 30%-70%. In other words, the results are insufficient to make a complete composite action. Therefore, it is need to make pull shear connection of connection method.

요 지

본 연구는 전단연결재 없이 부착면적을 확대한 요철 단면SC보의 휨 거동을 실험하여 이론 해석 및 상용 구조해석 프로그램인 ANSYS해석 결과와 비교 강관과 콘크리트의 부착성능과 초기강성 등을 분석하였고 이를 통해 효율적인 SC보의 실용화를 위한 기초 연구 자료를 제공하고자 한다. 실험결과는 이론값의 88%-98% 정도의 내력을 발휘한 것으로 나타났으며, 합성율은 분석결과 30-70%로 완전합성에 이르지 못한 것으로 나타나 완전합성을 발휘할 수 있는 접합방법의 필요성을 확인할 수 있었다.

Keywords : SC Beams, Composite Structure, Flexural Strength, Prominent Section

핵심 용어 : SC보, 합성구조, 휨내력, 요철

* 정희원, 삼육의명대학 건축설계과 교수

** 정희원, 건국대학교 건축공학부 교수, 공학박사

E-mail : ryu129@hanmail.net 02-3399-1093

•본 논문에 대한 토의를 2006년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 2006년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

강재와 콘크리트의 합성구조는 서로 재질이 다른 강재와 콘크리트가 결합하여 거동하는 구조형태로서 기존의 철골구조와 철근콘크리트구조에 비하여 단면 성능의 향상으로 종국 휨 내력 및 강성이 증가된다. 따라서 이러한 합성구조의 장점은 재료절감 및 이에 따른 자중감소 그리고 보의 춤 줄일 수 있게 하며, 건축물의 초고층화, 대형화, 장스팬 등을 가능하게 한다.

따라서, 국내에서는 바닥판에 합성구조인 deck plate의 사용이 증가 추세에 있다. 또한, 건축물에서 층고를 줄이고자 슬림플로어(Slim Floor)시스템의 연구가 활발히 진행되고 있으며, 구조 및 시공성의 우수성 때문에 H형단면의 합성보와 합성기둥 뿐만 아니라 각형강관을 이용한 충전각형강관(CFT) 기둥에 대한 연구가 상당한 수준까지 이루어지고 있다. 하지만, 비틀림 강성이 크고, 굴부좌굴 및 횡 좌굴 변형이 적은 각형강관을 이용한 각형강관 보⁽⁵⁾ 및 강재콘크리트보(이하 SC보)에 대한 연구는 상대적으로 미약한 실정이다.

기존의 연구들을 살펴보면 김규석(2003)^{(2),(3)} 등이 강재를 이용한 T형 합성보의 거동에 대한 연구를 진행하였으며 슬래브와 전단연결재의 합성거동을 중점으로 규명하였다. 그러나 본 연구는 전단연결재 없이 부착면적을 확대한 요철 단면보의 휨 거동을 측정하여 이론 해석 결과와 비교하였으며 강재와 콘크리트의 부착성능을 분석하여 SC보에 관한 연구의 기초자료로 제공하고자 한다.

2. SC보의 이론해석

SC보의 휨 내력은 Oehlers의⁽⁷⁾⁽⁸⁾ 이론전개를 참조하여 강재의 전단면에 항복강도를 적용하고 콘크리트의 압축단면에 $0.85f_{ck}$ 를 적용한 소성설계이론에 의하여 산정하였으며 산정된 이론값을 실험 결과와 비교하였다. 소성모멘트를 내력을 계산하기 위한 기본가정은 다음과 같이 가정한다.

2.1 소성응력 분포 및 변형

콘크리트의 압축응력은 압축영역에서 $0.85f_{ck}$ 응력

이 Fig. 1과 같이 균등하게 분포하는 것으로 가정한다. 압축영역의 높이는 부착응력의 비율에 따라 산정하며 콘크리트의 인장력은 무시한다. 강재는 소성중립축을 중심으로 상부는 압축으로 하부는 인장으로 균등한 항복응력(f_y)으로 분포하는 것으로 가정한다.

SC보의 단면은 Fig. 1(a)와 같으며 Fig. 1(c)와 Fig. 1(d)는 각각 완전부착일 경우와 부분 부착일 경우의 변형도 곡선과 그때의 콘크리트와 강재의 중립축을 나타내고 있다. 부착력의 개념은 Fig. 1(b)처럼 부착응력이 부착면적 SL에 작용하여 발생하도록 하는 것이다.

$$P_b = f_b SL \quad (1)$$

여기서 P_b = 콘크리트와 강재의 부착력

f_b = 부착응력

S = 강재의 둘레길이

L = 보 단부로부터 측정위치까지의 거리

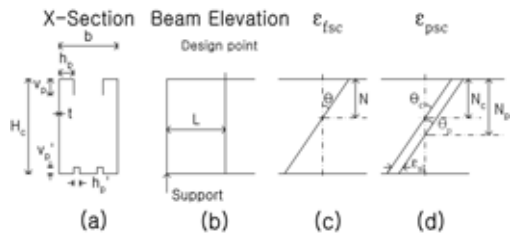


Fig. 1 SC보의 변형분배

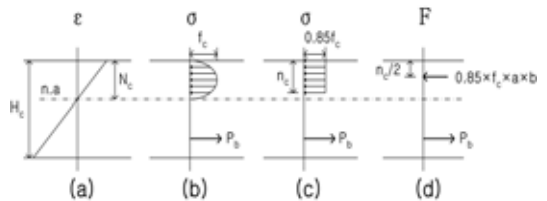


Fig. 2 콘크리트 요소의 거동

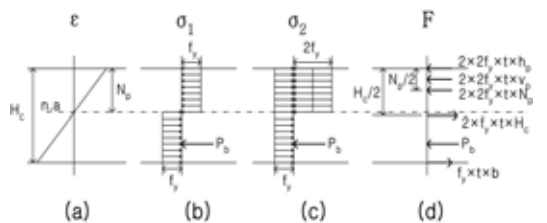


Fig. 3 강재 요소의 거동

강재 요소와 콘크리트가 슬립이 발생하지 않고 서로 완전 전단연결이 되어 거동한다면 콘크리트의 중립축과 강재 요소가 Fig. 1(c)처럼 일치할 것이다. 휨모멘트의 증가에 따라 곡률 κ 가 증가하면 부착력은 증가할 것이며 슬립이 발생하지 않고 최대모멘트에 도달하게 되면 단면은 완전 상호작용을 하게 된다. Fig. 1(d)처럼 슬립 변형도 δ_s 이 발생하면 부분 상호작용을 하게 되고 SC보의 휨 내력은 각 단면 요소(강재요소, 콘크리트요소)에 대한 힘의 분배를 고려하여 결정한다.

Fig. 2는 콘크리트 요소의 거동을 나타내며 중립축은 N_c 로 나타내고 n_c 는 사각형 콘크리트 압축응력 블록의 춤을 나타내며

$$N_c = \frac{n_c}{\gamma} \text{이다. 여기서 } \gamma = 0.85 - 0.007(f_{ck} - 28)$$

콘크리트 요소가 휨을 받아 압축력을 발휘한다면 콘크리트 요소와 부착력이 각각 압축과 인장축 요소가 되어 모멘트를 발생시킨 것이며 이때 힘의 평형을 생각하면 콘크리트의 압축력과 부착력에 의한 인장력을 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_c = 0.85f_{ck} b \gamma N_c = P_b \quad (2)$$

여기서 C_c 는 콘크리트의 압축력 이며 중립축 N_c 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$N_c = \frac{P_b}{0.85f_{ck}\gamma b} \quad (3)$$

Fig. 3은 강재 요소의 거동을 나타내며 N_p 는 중립축을 나타낸다. 콘크리트와 강재의 종합적인 힘의 평형을 생각하면 콘크리트의 인장축에 작용한 부착응력은 강재 요소에서는 압축축에 작용하여야만 힘의 평형이 성립한다. 따라서 힘의 평형을 식으로 나타내면

$$P_c + P_b = P_t \quad (4)$$

여기서 P_c = 압축축 강재의 압축력
 P_t = 인장축 강재의 인장력

Fig. 3(c)는 Fig. 3(b)를 변형하여 강재의 압축축에 각각 압축응력 f_y 와 인장응력 f_y 를 더하여 변형한 것이며 힘의 평형에는 변함이 없다. 식(4)를 Fig. 3(c)와 같이 변형된 응력분포에 적용하면 다음 식과 같다.

$$2f_y t(2N_p + 2h_c + 2v_c) + P_b = P_p \quad (5)$$

여기서

$$P_p = f_y t_e b + f_y t(2h_c + 2v_p + 2h_p)$$

$$t_e : \text{하부판의 유효두께} = \frac{t(b + 4v_p')}{b}$$

식(5)를 다음과 같이 변형하고

$$P_{pc} = P_p - P_{vh}$$

$$\text{여기서 } P_{vh} = (2h_c + 2v_c) t 2f_y$$

상부의 절곡된 T형단면의내력

N_p 에 대하여 정리하면

$$N_p = \frac{P_{pc} - P_b}{4t f_y} \quad (6)$$

SC보의 모멘트 용량은 M_p 이며 Fig. 2(d)와 Fig. 3(d)와 같이 단면의 상단부에 대한 휨 모멘트를 취하면 구할 수 있다. 부착력은 반대방향으로 작용하고 두 단면의 동일 위치에 있기 때문에 모멘트에 대한 기여는 0이된다.

$$M_p = t f_y b h_c + t f_y (h_c^2 - 2N_p^2 - 2v_p^2 - 2h_p t) - \frac{0.85f_{ck} b \gamma^2 N_c^2}{2} \quad (7)$$

① 완전전단연결일 경우(Full Shear Connection)

완전 전단연결일 경우 슬립변형은 0이며 따라서 $N_p = N_c$ 이다. 그러므로 완전 전단연결을 얻기 위해 요구

되는 부착력 $(P_b)_{fsc}$ 는 식(3)과 식(6)을 등치시켜 구하면 다음과 같다.

$$(P_b)_{fsc} = \frac{0.85f_{ck}\gamma b P_{bc}}{0.85\gamma b f_{ck} + 4t f_y} \quad (8)$$

식(8)의 $(P_b)_{fsc}$ 를 식(3),(6)에 대입하여 N_c , N_p 를 구하면 완전 전단 연결일 경우의 휨모멘트를 구할 수 있다.

② 부분 전단연결일 경우(Partial Shear Connection)

전단연결의 정도에 따라 $(P_b)_{fsc}$ 를 변형하여 N_p 와 N_c 를 각각 산정하고 식(7)에 대입하여 구한다.

예를 들면 전단 연결도가 50%일 경우

$$(P_b)_{50\%} = 0.5 \times (P_b)_{fsc}$$

③ 전단연결이 없을 경우(No Shear Connection)

$P_b=0$ 인 경우이며 식(3)에서 $N_c=0$ 이 되고 식(6)

에서 $N_p = \frac{P_{bc}}{4t f_y}$ 이 된다. 콘크리트의 내력에 대한 기여는 없고 강재의 좌굴방지 역할만 하게 되며 강재에 의해서만 내력을 발휘하게 된다.

3. 실험계획

3.1 실험체

장방형 SC보의 콘크리트와 강재의 부착에 의한 내력을 조사하기 위하여 본 연구에서 제안된 실험체의 단면형상은 Fig. 4와 같다. 강재의 두께는 1.6mm와

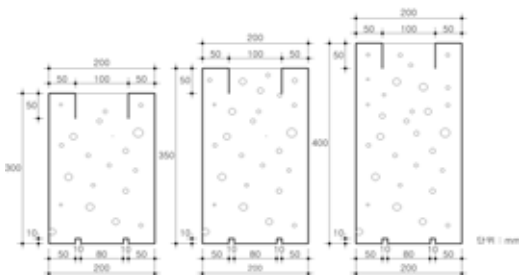
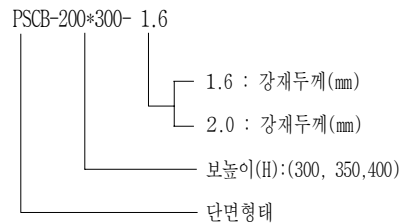


Fig. 4 실험체 형상

Table 1 실험체 일람표

실험체명	H(mm)	두께(mm)
PSCB-200*300-1.6	300	1.6
PSCB-200*350-1.6	350	
PSCB-200*400-1.6	400	
PSCB-200*300-2.0	300	2.0
PSCB-200*350-2.0	350	
PSCB-200*400-2.0	400	



2.0mm의 두 종류로 하였고 보의 폭은 일정하게 하였으며 높이는 30cm, 35cm, 40cm로 하였다.

3.2 가력 및 측정 방법

실험에 사용된 가력기구에는 H형강을 사용하여 490kN의 하중에 안정하도록 설계되었고, 실험체의 지지점은 단순보 상태를 유지하기 위하여 한쪽은 회전지점, 다른 한쪽은 이동지점으로 만들었으며, 유압잭의 두부에 하중계(Load Cell)를 부착하여 자동변형도 측정기(TDS-601A)로 측정값을 기록하였다.

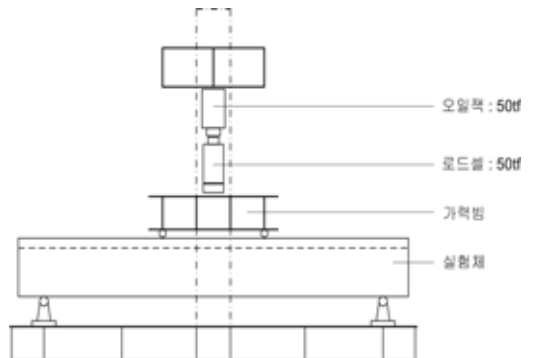


Fig. 5 실험체 설치도

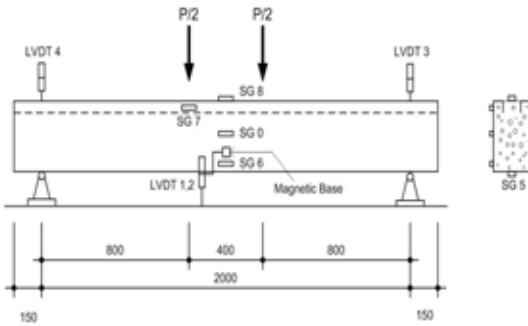


Fig. 6 측정 위치



Fig. 7 실험체 SET-UP

3.3 소재 실험

① 콘크리트의 압축강도 실험

본 실험체에 사용된 콘크리트는 설계기준강도가 23.52MPa이며 현장타설 후 양생하였다. KS F 2403에 따라 제작한 공시체는 실험과 동일한 조건에서 양생하였으며, 콘크리트 압축강도 시험결과는 압축강도 22.54MPa를 얻었다

② 강재의 인장강도 실험

본 실험에 사용된 시험편은 KS D 3503의 압연강재인 SS400으로 두께에 따라 1.6mm와 2.0mm로

Table 2 콘크리트의 배합비

설계 강도 (MPa)	W/C (%)	슬럼프 (mm)	단위 골재량 (N/m ³)			
			W	C	S	G
23.52	52	120	1715	2871	7800	9379

W : 물 C : 시멘트 S : 잔골재량 G : 굵은골재량

Table 3 강재의 인장강도 시험결과

시험편	f_y	f_{max}	E	ϵ_y	f_y/f_{max}	연신율(%)
1.6mm	372.4	423	2.04×10^5	1830	0.88	27.4
2.0mm	351.8	429	2.06×10^5	1680	0.81	27.2

f_y : 항복강도(MPa), f_{max} : 인장강도(MPa),
 ϵ_y : 항복변형도($\times 10^{-6}$), E : 탄성계수(MPa),
 f_y/f_{max} : 항복비

나뉘며, 각각 2개씩 실험체에서 절취하여 시험편을 제작하였고, 변형도는 각 시험편에 스트레인 게이지를 부착하여 측정하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 하중-변위 곡선

Fig. 8, 9는 각 실험체의 하중 변위 곡선이다. 층이 클수록 강재가 두꺼울수록 내력이 크고 강성이 크게

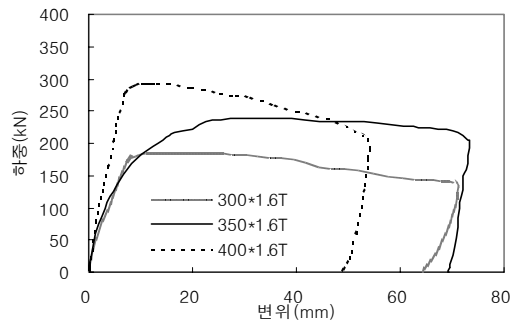


Fig. 8 두께 1.6mm 실험체 하중-변위 곡선

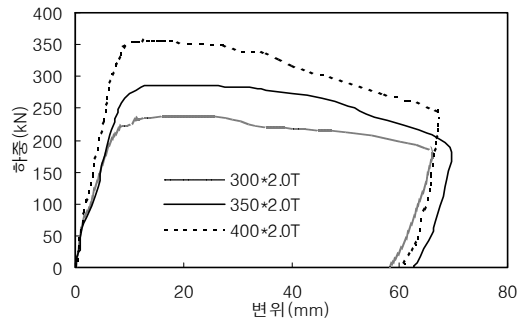


Fig. 9 두께 2.0mm 실험체 하중-변위 곡선

나타났다. 각각의 실험체의 변위는 PSCB-200*400-1.6를 제외하면 60mm정도에 분포하고 있다. PSCB-200*400-1.6실험체는 부착 탈락 현상에 의해 콘크리트와 강재가 박리되어 강재가 국부좌굴됨으로 충분한 변형 능력을 보이지 못한 것으로 판단된다.

PSCB-200*350-1.6실험체는 하중이 증가하며 강성의 저하가 다른 실험체에 비하여 크게 나타났고 이는 콘크리트와 강재의 조기 부착 탈락 현상에 의한 것으로 판단된다.

4.2 파괴 성상

실험결과 일부의 실험체에서 항복하중 전에 일시적인 하중감소 현상을 보이다가 재상승하는 현상이 있었다. 상부 절곡부분의 콘크리트 미충진이 원인으로 판단된다.

또한, 대부분의 실험체는 항복하중을 지나 최대하중에 도달하기 전 실험체 상부 가력점을 중심으로 강재의 절곡 부분에서 1차적인 국부좌굴이 발생하였으며 이는 집중하중에 의한 응력 집중현상에 의한 것으로 판단된다. 이후 계속해서 하중증가와 함께 소성거동을 하게 되고, 최대하중(P_{max})를 지났다. 이때 변위

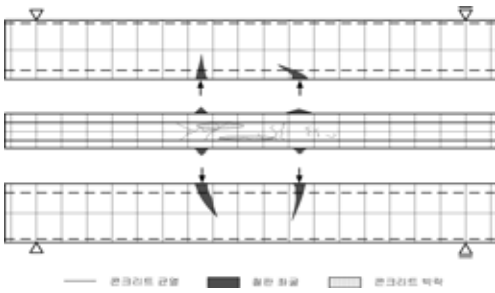


Fig. 10 PSCB-200*300-2.0 실험체 균열도



Fig. 11 PSCB-200*300-2.0 실험체 파괴성상

도 계속 증가되었으며, 보 중앙점에서 국부좌굴을 일으켰다. 또한 이때 콘크리트를 감싸고 있는 강재의 슬립현상이 발생했으며 하중의 감소현상과 함께 압축측 콘크리트가 압괴되어 파괴되었다.

실험체에서 내부 콘크리트가 상당한 균열과 큰 처짐으로 파괴된 후에도 강재는 훨씬 큰 변형률까지 파괴되지 않는 연성파괴(ductile failure)형태를 보였다.

스트레인 게이지를 통하여 실험체의 변형도를 측정 한 결과 일부 실험체는 보의 휨 변형과 국부좌굴이 동시에 발생했는데 이로 인해 상부 절곡 부위의 강재와 콘크리트가 분리되는 현상을 보였다. 이는 강재 내부 콘크리트의 미충진 상태를 보여주는 것으로 콘크리트 타설시 적절한 대책이 필요한 것으로 판단된다.

4.3 실험결과 분석

실험과 해석을 통해서 얻어진 값들을 비교. 분석하기 위하여 항복모멘트(M_y)은 초기강성구배의 직선과 초기강성구배의 1/3되는 직선을 평행 이동시킨 접선이 교차하는 점으로 구하고, 이때의 회전각을 항복 모멘트에 대한 회전각(θ_y)로 정하였다. 또한 최대 모멘트(M_{max})시의 회전각을(θ_{max})로 정하였다.⁽⁴⁾

Fig. 13과 Table 4에는 실험과 소성해석에 의한 이론내력(100%완전 부착거동일 경우)을 비교하였다. 최대내력은 실험값이 이론값을 초과하지 않았으며 비교 결과 최대내력의 실험값과 이론값의 비는 0.89~0.98의 사이에 분포하였다.

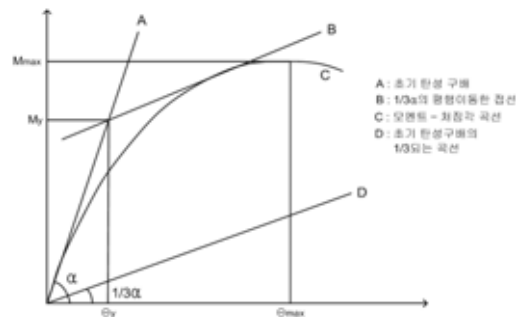


Fig. 12 항복내력 산정방법

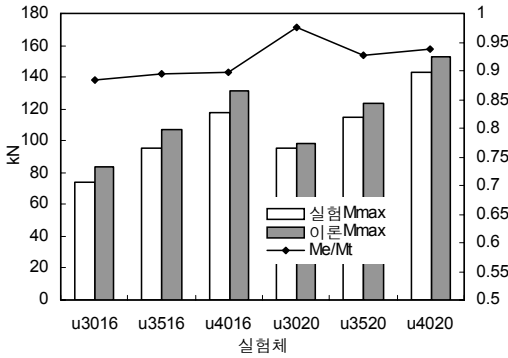


Fig. 13 이론 및 실험 M_{max} 과 실험값 대 이론값의 비

이론상으로 항복내력은 최대내력의 0.63~0.65사이에 분포하였고 실험분석결과 PSCB-200.350-1.6 실험체를 제외하면 0.74~0.88사이에 분포하였고 PSCB-200.350-1.6 실험체는 초기에 부착 탈락현상이 나타난 것으로 판단된다.

Patrick⁽¹²⁾은 실험결과 콘크리트와 강재사이에 단면적당 요철이 있는 단면의 경우 0.2~0.5N/mm²의 부착력이 존재하고 평평한 단면일 경우 0.1N/mm²의 부착력이 존재하는 것을 확인했으며 본 실험에 적용한 결과 1.6mm실험체와 2.0mm실험체 모두 합성거동을 위한 필요이상의 부착면적 확보하고 있다.

이론식에 따른 분석결과 강재와 콘크리트의 합성율은 30%~70%사이에 분포하였고, 단면의 증감에 따른 일정한 양상을 보이지는 않았다. 이는 전단 연결재 없을 경우 강재와 콘크리트표면의 단순 부착력에 의해서 100% 합성이 되지 않음을 나타내며 충분한 부

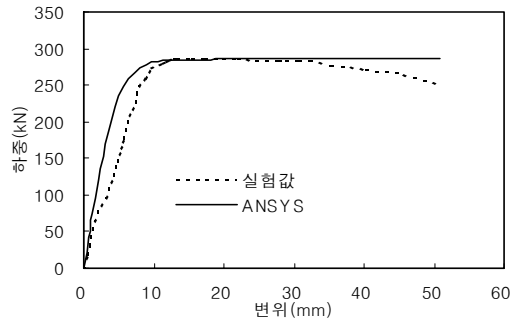


Fig. 14 PSCB-200x350-2.0 실험과 해석의 하중 변위 비교

착력을 확보할 수 있는 효과적인 강재와 콘크리트의 합성방법이 필요함을 알 수 있다.

또한 합성율의 분포를 분석하면 합성율은 단면의 증가에 따라 일정한 증감 양상을 보이지 않았으며 이는 여러 가지 조건 예를 들면 양생조건 양생방법등에 따라 강재와 콘크리트의 부착력이 좌우된 것으로 판단되며 따라서 그 신뢰성이 높지 않다고 할 수 있다.

Fig. 14는 구조해석프로그램인 ANSYS를 이용한 해석결과와 실험결과를 비교한 그림이다. ANSYS해석에서 콘크리트는 8개의 절점으로 이루어지고 각 절점마다 3개의 자유도를 가진 45변 요소를 사용하였고 강판은 대변형을 고려할 수 있는 4개의 절점을 가진 181변 요소를 사용하였다. 실험에서 초기강성은 해석결과와 일치하지만 하중이 증가하면 초기강성을 상실하고 강성이 감소하여 변형이 증가됨을 보이고 있다. 이런 현상은 부착탈락에 따른 결과로 분석할 수 있으며 비교결과 모든 실험체에 유사한 양상이 나타남을 확인할 수 있다.

Table 4 실험결과 및 휨 내력에 대한 비교 분석

실험체명	실험 값(kN.m)			이론 값(kN.m)				휨내력비	P _b ' (kN)	P _b (kN)	합성율 (%)
	M _y	M _{max}	$\frac{M_y}{M_{max}}$	M _y '	M _{max} '	$\frac{M_y'}{M_{max}'}$	$\frac{M_{max}}{M_{max}'}$				
PSCB-200x300-1.6	60.40	74.38	0.81	54.59	84.06	0.65	0.88	66.06	220.21	30	
PSCB-200x350-1.6	61.09	95.30	0.64	67.91	106.60	0.64	0.89	91.66	254.60	36	
PSCB-200x400-1.6	99.44	118.09	0.84	82.52	131.58	0.63	0.90	109.82	289.00	38	
PSCB-200x300-2.0	70.84	95.45	0.74	63.67	97.80	0.65	0.98	169.10	241.57	70	
PSCB-200x350-2.0	91.00	114.86	0.79	79.17	124.03	0.64	0.93	125.69	279.30	45	
PSCB-200x400-2.0	126.42	143.28	0.88	96.10	152.89	0.63	0.94	164.86	317.03	52	

M_y : 항복 휨내력, M_{max} : 최대 휨내력, M_{max}' : 강재와 콘크리트의 합성이 100%인 경우 최대 휨내력
P_b' : 실험결과에 의한 부착력, P_b : 100% 전단연결을 위한 이론 부착력, 합성율(%) = P_b'/P_b×100

최대하중 이후 내력의 감소현상 또한 콘크리트와 강재의 부착력이 감소하면서 발생한 것으로 판단된다.

4. 결 론

요철단면 SC보의 실험 및 이론해석을 통한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실험결과 SC보는 이론값의 88%~98% 정도의 내력을 발휘한 것으로 나타났고 이는 강재와 콘크리트가 완전부착이 되지 않았음을 나타낸다.
- 2) 실험결과를 이론식에 의해 분석한 결과 강재와 콘크리트의 합성율은 30~70%로 나타났고 단면의 증감에 따른 일정한 양상을 나타내지 않았다. 따라서 충분한 부착력을 확보할 수 있는 적절한 합성방법이 필요하다고 판단된다.
- 3) 실험결과와 ANSYS를 이용한 해석결과를 비교하면 실험에서 초기강성은 해석결과와 일치하지만 하중이 증가하면 초기강성을 상실하고 강성이 감소하여 변형이 증가됨 보이고 있다. 이런 현상은 부착탈락 현상에 따른 결과로 판단된다.

참고문헌

1. 한국강구조학회, 강구조설계, 2000.
2. 김상모, 김규석 T형 합성보의 내력 평가에 관한 연구 한국강구조학회 논문집 15권 4호 2003.8 pp. 467-474.

3. 김상섭, 김상모, 김성배, 서동기, 김규석, 단순지지 T형 합성보의 휨거동에 관한 실험적 연구 한국강구조학회 논문집 16권 2호 2004.4 pp. 225-233.
4. 안형준, 문태섭, 각형강관기둥-H형강보 접합부에 관한 실험적연구 한국강구조학회 논문집 4권 3호 1992.4 pp. 149-153.
5. 이수연(1996), 각형강관을 사용한 합성보에 관한 기초적 연구, 석사학위 논문 중앙대학교.
6. 장희성(2000), 웨브를 매입한 강재 역T형 합성보의 휨 내력에 관한 연구, 석사학위 논문 건국대학교.
7. Oehlers, D. J, Flexural Strength of Profile Beams, Journal of Structure Engineering, ASCE, Vol120, No2, 1994, pp. 378-393.
8. Oehlers, D. J, Composite Profile Beams, Journal of Structure Engineering, ASCE, Vol119, No4, 1993, pp. 1085-1100.
9. Brian Uy, Andrew Bradford, Ductility of Profile Beams, Part I: Experimental Study, Journal of Structure Engineering ASCE, 1995 pp. 876-882.
10. Brian Uy, Andrew Bradford(1995). Ductility of Profile Beams, Part II: Analytical Study, Journal of Structure Engineering ASCE, 1995, pp.883-889.
11. Oehlers, D. J, Mark A Bradford, Composite Steel and Concrete Structural Members, Pergamon, 1995.
12. Patrick M, A new partial shear connection strength model for composite slab, J. Aust. Inst. Steel Res, Vol24, No3 1990, pp.2-17.

(접수일자 : 2005년 5월 16일)