

고강도 콘크리트 강합성 거더의 극한휨강도 실험 평가

Evaluation for Ultimate Flexural Strength of Steel Composite Girder with High Strength Concrete

김운학^{1*} · 이주원² · 이석민³Woon Hak Kim^{1*}, Juwon Lee², Seokmin Lee³¹Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Hankyong National University, An Seong, Republic of Korea²Researcher, Technical Institute, SAMHYUN P.F Co.,Ltd, Hanam, Republic of Korea³Professor, College of Engineering, Department of Civil Engineering, Dong-eui University, Busan, Republic of Korea

*Corresponding author: Woonhak Kim, whkim@hknu.ac.kr

ABSTRACT

Purpose: A static loading test was performed to evaluate the ultimate flexural strength of a girder in which 80MPa high-strength concrete was synthesized on the compressive flange of the I-shape steel girder. **Method:** This test is designed and fabricated two types of specimens with different shear-connection specifications, and evaluated their ultimate flexural behavior until reaching the extreme event limit states. In addition, the ultimate strength was evaluated by comparing the test results and the results of the strain compatibility method. **Result:** By confirming the displacement within 0.02mm as a result of the relative slip measurement, it was verified that the two specimens secured perfect bonding. Therefore, the difference in the shear specification does not have a great effect on the stiffness, and if the specimens are completely synthesized, there is no difference in the behavior until it reaches the extreme-event limit states. **Conclusion:** The girder to be tested has a working load within the elastic range and meets the usability requirements for allowable deflection. Therefore, even if a part of the casing is subjected to the tensile force at the level of cracking, the deck will first reach the compression failure due to the role of the reinforcing bar.

Keywords: Steel Composite Girder, Ultimate Flexural Strength, Flexural Behavior, Static Loading Test, Strain Compatibility Method

요약

연구목적: I형 강거더의 압축플랜지에 80MPa급의 고강도 콘크리트가 합성된 거더의 극한휨강도 평가를 위하여 정적재하시험을 수행하였다. **연구방법:** 본 실험은 전단연결 상세가 다른 2종류의 실험체를 설계 및 제작하여 극한한계상태 도달까지 극한휨거동을 평가하였다. 또 실험 결과와 변형률적합법 결과 비교를 통해 극한강도를 평가하였다. **연구결과:** 상대슬립 측정 결과 0.02mm 이내 변위를 확인함으로써 두 실험체가 완전결합을 담보한다는 것을 검증하였다. 따라서 전단상세의 차이는 강성에 큰 영향을 미치지 않으며 완전합성 된다면 극한한계상태까지의 거동에도 차이가 없다. **결론:** 실험 대상이 되는 거더는 사용하중이 탄성범위 내 있고, 허용처짐에 대한 사용성 요구조건을 충족시킨다. 따라서 케이싱 일부가 균열이 발생하는 수준의 인장력을 받더라도 철근의 역할로 인해 바닥판이 압축 파괴에 먼저 도달한다.

핵심용어: 강합성거더, 극한휨강도, 휨거동, 정적재하시험, 변형률 적합법

Received | 11 November, 2020

Revised | 18 November, 2020

Accepted | 19 November, 2020

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

서론

현행 설계기준에서 규정하는 강합성거더는 인장을 부담하는 I형 강거더와 압축을 부담하는 콘크리트 바닥판, 이 둘을 연결하는 전단연결재로 구성된 것이 전형적이다. 이러한 단면은 강거더가 바닥판 콘크리트와 합성되고 나면 압축플랜지와 압축플랜지에 인접한 복부판 이하는 모두 인장 영역에 있어 국부좌굴 발생 가능성이 크게 줄고 대부분 조밀단면(compact section)으로 간주할 수 있다는 장점이 있다.

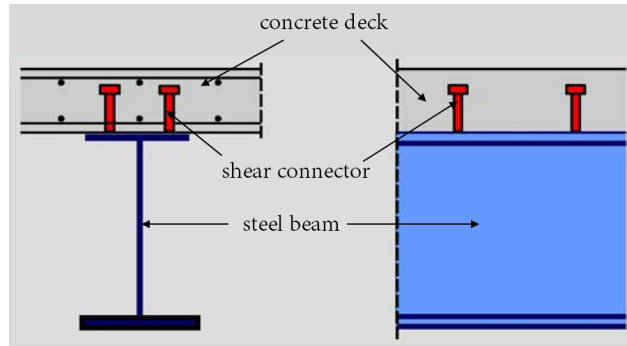
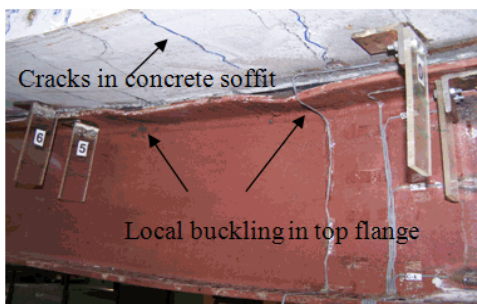


Fig. 1. Typical composite girder

그러나 세장한 강재 단면을 적용함으로써 국부좌굴이나 횡비틀좌굴과 같은 구조적 취약점이 있고, 이로 인해 합성거더의 극한한계상태가 강거더의 극한강도로 결정된다는 단점이 있다. 특히 해외에서는 바닥판이 합성되기 전, 즉 바닥판 제작 중 횡비틀 좌굴에 의한 사고사례가 여러 차례 보고된 바 있다.



(a) Local buckling of composite section



(b) Lateral torsional buckling

Fig. 2. Buckling of the steel girder

본 실험 대상이 되는 거더(Steel Composite Girder, SC거더)는 압축플랜지에 80MPa급의 고강도 콘크리트가 보강하고 있기 때문에 바닥판과 I형 강거더로 구성된 일반적인 합성거더보다 좌굴안정성과 비틀림저항력이 상대적으로 크다. 도심이 유사하더라도 SC거더는 압축플랜지에 미소한 압축응력만 발생하고 큰 압축은 압축강도가 큰 콘크리트 단면이 받는다. 또 비틀림상수가 일반 합성거더의 20배가 크기 때문에 비틀림에 대한 저항성이 크다.

실험 및 평가 방법

실험 목적

본 논문은 합성거더의 실교량 제작을 통해 제작성을 평가하고 정적재하실험을 통해 휨거동 특성을 평가하여 단면의 적절성을 검증하는 것을 목적으로 한다. 수평 전단상세가 다른 SC거더 2본에 대한 단면 극한휨강도를 평가하는 것으로 실험치와 계산값을 비교하고 실험체 단면의 극한한계상태에서의 휨강도 및 완전합성에 대해 평가하였다.

실험 부재

실험체 설계 대상교량은 교폭 10m, 설계경간 18m의 도로교이고 총 5본으로 구성된다. 설계법은 도로교설계기준(한계상태설계법)을 따르고, 표준트럭하중 KL-510으로 2차선 재하하여 가장 불리한 응력이 발생하는 경우에 대해서 설계하였다. 극한한계상태와 사용한계상태에 충족하도록 단면과 재료를 결정하였고 충격하중 계수 15%를 포함한 피로하중으로 전단연결부를 설계하였다.

실험체는 총길이 18.8m이고, 바닥판 폭원은 2m로 빔 간격과 동일하다. 조밀 단면이고, 바닥판 포함 형고는 1.0m이며 강재빔 높이는 580mm, 케이싱 규격은 600×200mm이다. 상부는 고강도 콘크리트가 상부플랜지를 구속하고 있어 응력 수준이 낮아 전단연결재가 수용 가능한 정도로 폭을 결정하였다. 복부판은 비보강 복부판의 전단강도 검토를 통해 두께를 산정하고, 하부플랜지는 상대적으로 응력 수준이 높다는 점과 도심 위치 및 전도에 대한 안전을 고려해 단면을 산정하였다. 보강재는 지점이 되는 양 단부와 L/3 위치에 두고, 가력 중 국부좌굴이 발생하지 않도록 극한하중에 대해서 보강재를 설계하였다.

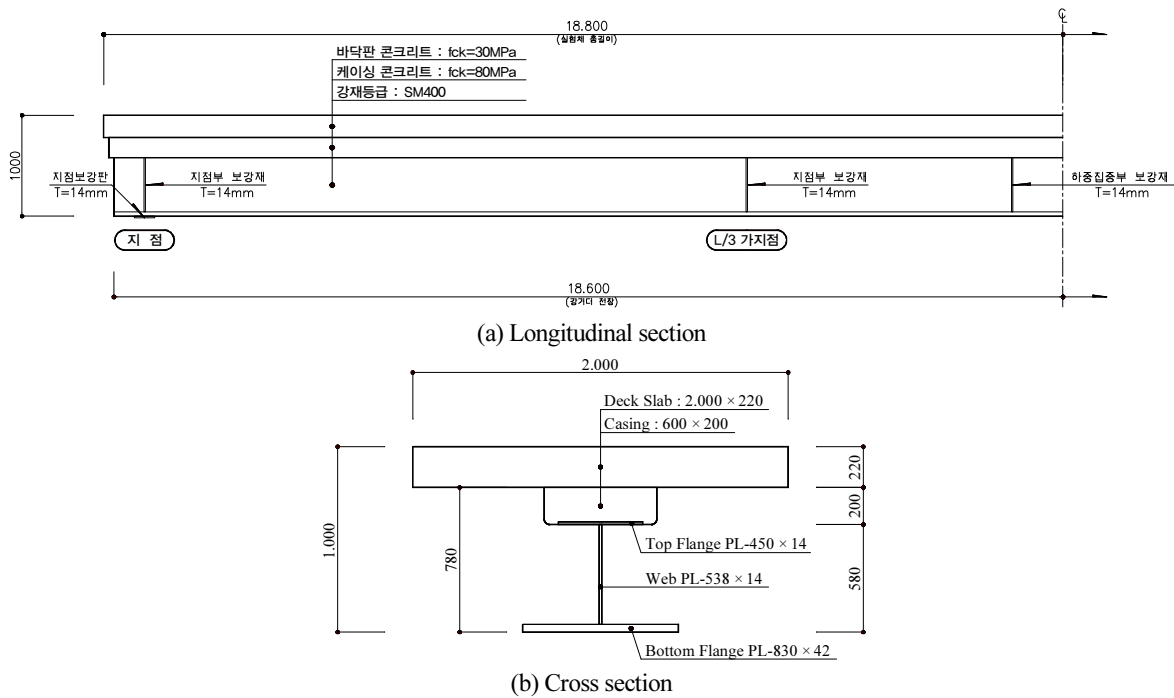


Fig. 3. General drawing of the specimen

전단연결재 설계

실험체는 단면이 극한상태에 도달할 때까지 전단연결재가 충분히 합성거동을 이룰 수 있도록 충분한 강성과 강도를 발휘해야 한다. 본 실험은 전단연결 방식이 다른 2종류의 상재로 극한 단면성능을 검증하기 위해 상부플랜지에 접합된 스티드가 케이싱을 관통해서 바닥판까지 연결되는 스티드 일체 방식과 강재빔-케이싱은 스티드로, 케이싱-바닥판은 PSC빔에 흔히 사용되는 수평전단철근을 사용하는 분리 방식으로 제작하였다. 편의상 전자를 SG(Stud-connected)라 하고, 후자를 RG(Reinforcement-connected)라 하였다.



Fig. 4. Detail of the specimen

하중재하 및 측정 방법

실험체 둘 다 단순지지 상태로 L/2 위치에서 하중을 받도록 세팅하였다. 가력 위치에는 폭 25cm, 길이 1.5m의 프레임을 바닥판 폭 방향으로 두고 그 중앙에 300톤급 액츄에이터를 설치하였다. 실험은 SG실험체 다음 RG실험체 순으로 진행하였다. 실험 초반에는 변위제어로 0.050mm/sec 속도로 가력하고, Table 1의 3단계부터 실험 종료까지 구간은 0.075mm/sec로 가력 하였다. 강재 항복이 예상되는 1,500kN 이후부터는 50kN 씩 증가시키면서 가력을 멈춘 다음 케이싱 콘크리트 균열, 압축 플랜지 국부좌굴, 상대 변위 여부를 점검했다.

Table 1. Stage of the load

Stage	Load(kN)		Loading Speed	Description
1	0	→ 500	0.050 mm/sec	Service Load
2	0	→ 1,000		
3	0	→ 1,500		
4	1,500	→ 1,600	0.075 mm/sec	Holding & Check
5	1,600	→ 1,650		Holding & Check
6	1,650	→ 1,700		Holding & Check
7	1,700	→ 1,750		Holding & Check
8	1,750	→ 1,800		Holding & Check
9	1,800	→ End		Destruction of the deck

파괴모드

강거더의 인장플랜지가 항복변형률에 도달한 뒤 케이싱 콘크리트 하연에서 균열이 나타났다. 최종적으로 바닥판이 압축 파괴되면서 실험을 종료하였다.



Fig. 5. Flexural strain of specimen

실험체 해석

변형률 적합법에 의한 휨강도 예측

단면을 총 602개 층으로 나누고, 시험을 통해 직접 재료모형을 얻은 경우가 아니기 때문에 콘크리트는 도로교설계기준의 비선형해석을 위한 응력-변형률 관계식을 이용해 재료모형을 구성했다.

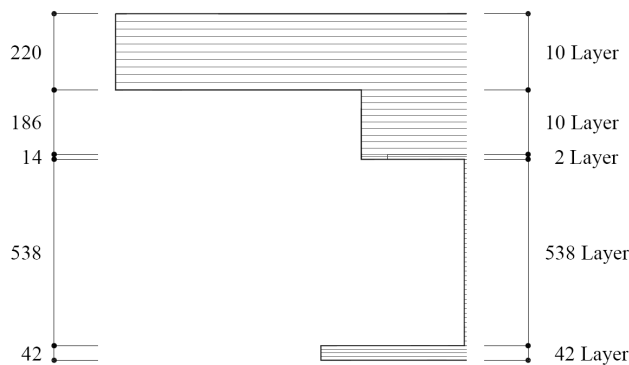


Fig. 6. Layer element division for the analysis

아래는 콘크리트 재료모형 구성을 위해 극한한계변형률 $\epsilon_{co,r}$ 을 이용한 관계식이다.

$$f_c = f_{cm} \left[\frac{\kappa \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co,r}} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co,r}} \right)^2}{1 + (\kappa - 2) \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co,r}} \right)} \right] \quad \text{여기서, } \kappa = \frac{1.1 E_c \epsilon_{co,r}}{f_{cm}} \text{ 이고 } f_{cm} \text{ 은 콘크리트 압축강도의 평균값이다.}$$

위의 식에서 얻은 바닥판과 케이싱 콘크리트의 재료모델과 강재 SM400B의 재료모델이 Fig. 7이다. 여기서 강재는 Tri-linear model을 적용하였고, SM400B의 재료모델은 “부분안전계수를 고려한 Hybrid 합성거더의 공칭휨강도 평가, 임채훈 외(2013)” 논문의 재료모델을 채용했다.

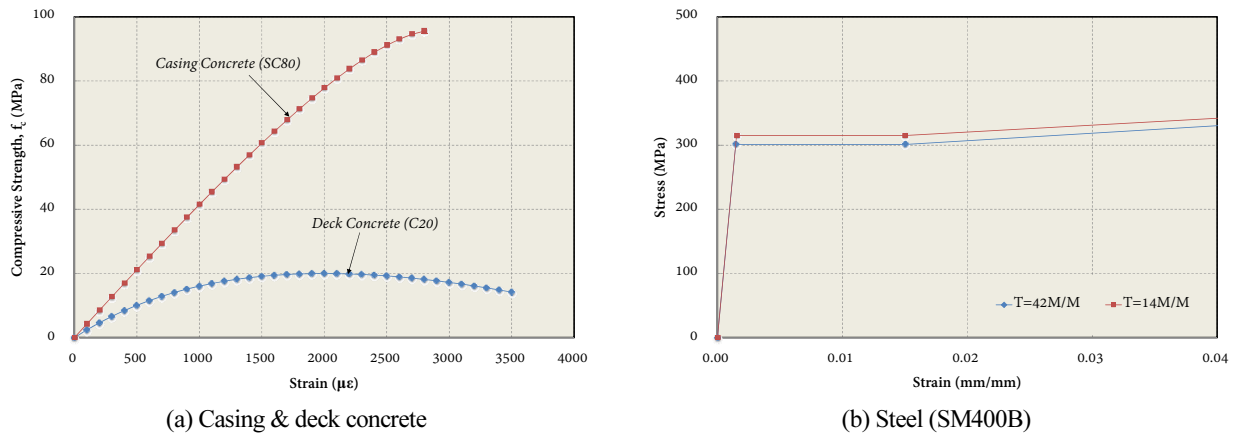


Fig. 7. Material properties

변형률 적합법을 이용한 실험체 극한휨강도는 8,820kN.m이다. 이 하중에서 바닥판은 극한한계변형률에 도달하고 복부 판 중심의 아래 강재 단면은 항복하였다. 하중재하 초기에 복부 상단에 위치한 중립축은 최종 단계에서 케이싱 단면 안으로 이동하였고 그 위치는 케이싱 하연에서 93mm 떨어진 위치다.

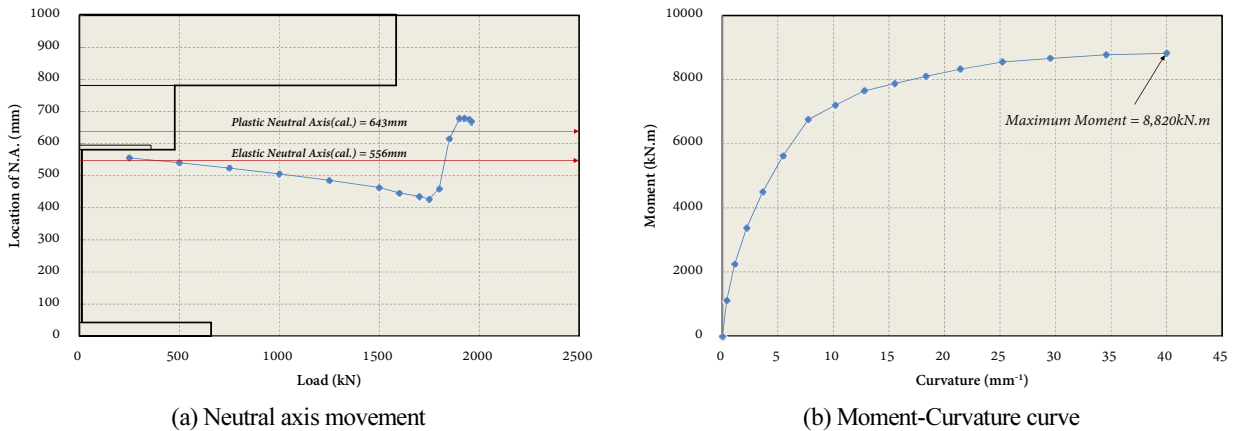


Fig. 8. Result of analysis

소성해석법에 의한 휨강도 예측

실험체는 비조밀단면이나 세장단면에 해당되지 않기 때문에 다음과 같은 가정을 통해 소성해석법으로 휨강도를 예측할 수 있다.

- (1) 전단연결재는 강재와 콘크리트의 파괴가 일어날 때까지 충분한 축방향 전단력을 전달할 수 있어야 한다.
- (2) 강재와 콘크리트 사이에는 상대변위가 생기지 않는다.
- (3) 콘크리트 단면의 인장은 무시한다.
- (4) 파괴시까지 변형 전 평면인 단면은 변형 후에도 평면이다.
- (5) 두 재료의 성질은 완전소성(perfect plastic)이다.

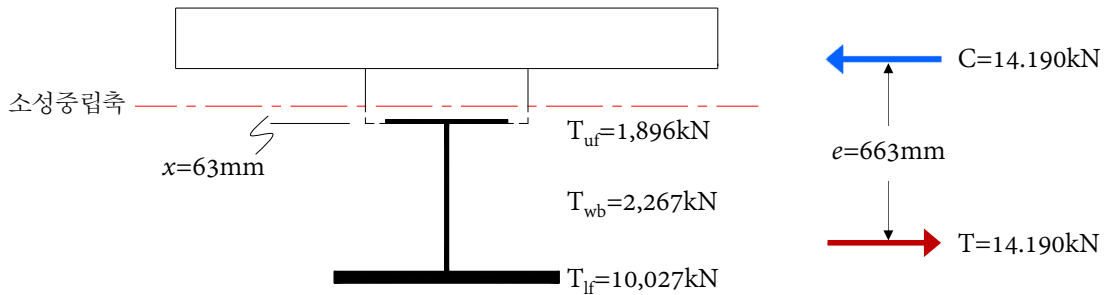


Fig. 9. Plastic neutral axis

소성중립축은 케이싱 하연으로 부터 위로 63mm 떨어진 위치에 있다. Fig. 9로 부터 휨강도를 다음과 같이 산정하였다.

$$M_p = C e = T e = 14,190 \times 0.663 = 9,408 \text{ kN.m}$$

해석값의 비교

변형률 적합법과 소성해석법에 의한 해석한 결과를 Table 2에 비교하였다.

Table 2. Comparison of analysis values

Category	Plastic analysis method	Strain Compatibility Method
Maximum flexural strength (kN.m)	9,408	8,820
Maximum load (kN)	2,091	1,960
Centroid at maximum load (mm)	643	673

실험결과 분석

하중-처짐 관계

Fig. 10은 하중-처짐 관계이다. 실험체의 사용하중은 455kN이고 탄성구간 내 위치해 있다. 사용하중 하에서 활하중 KL-510에 대한 처짐은 12mm로 계측 되었는데 이 값은 도로교설계기준의 처짐 기준인 $L/800(=22.5\text{mm})$ 의 53% 수준으로, SC거더가 사용성 요구 조건을 충족한다는 것을 확인하였다.

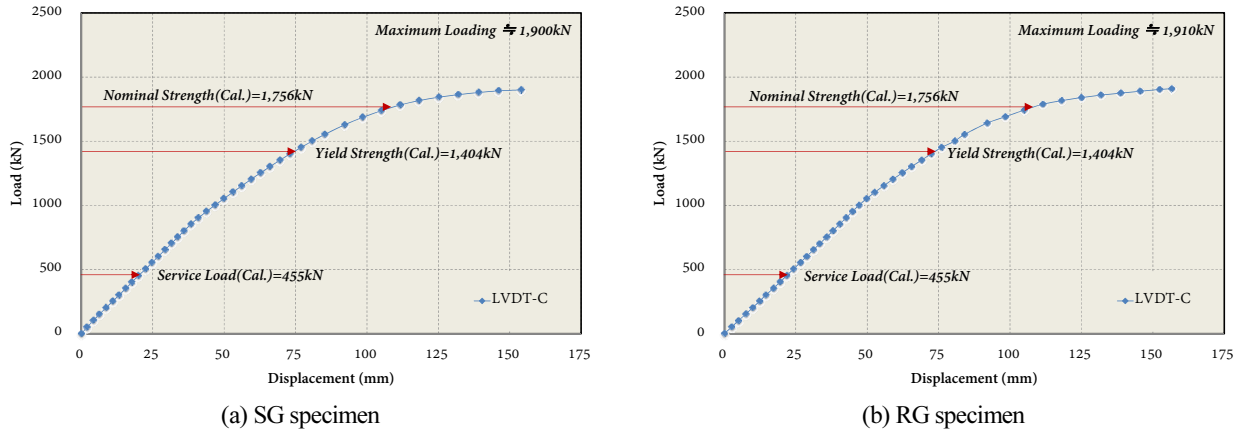


Fig. 10. load-deflection curve

Table 3. Test results

Item		Yield Load		Maximum Load	
Calculation		1,404 kN		1,756 kN	
Test Result	SG	1,630 kN	(1.161)	1,900 kN	(1.082)
	RG	1,475 kN	(1.051)	1,910 kN	(1.088)

설계기준에서 제시하는 하중조합을 고려한 공칭강도는 1,756kN이고, 실험체 둘 다 이론에 의한 극한휨강도의 8.2~8.8%를 상회한다. 이론식에 의한 항복강도는 1,404kN이다. 그래프에서 항복이 뚜렷하게 나타나지 않았지만 변형률 결과를 통해 SG실험체는 약 1,630kN, RG실험체는 약 1,475kN 부근에서 항복했음을 알 수 있었다. 이는 계산값 보다 7~16% 크고, 사용하중 보다 3.2~3.6배 큰 값으로서 SC거더가 구조 안전성을 충분히 확보하는 것으로 평가하였다.

하중-변형률 관계

변형률 측정을 위해 바닥판 콘크리트, 케이싱 콘크리트 및 강재거더 등 3개 단면에 스틸게이지와 콘크리트게이지를 부착하였으며, 게이지의 각 위치는 Fig. 11와 같다.

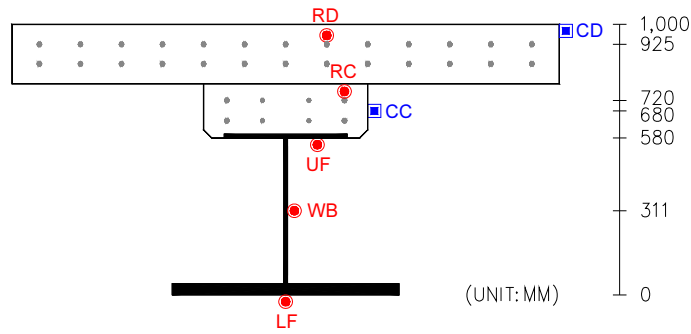


Fig. 11. Load-strain curve

하중 증가에 따른 SG실험체의 변형률 분포는 Fig. 12(a)와 같다. 실험체는 사용하중 하에서 선형적인 거동을 하다가 인장 플랜지의 항복변형률인 $1,470\mu\epsilon$ 이후 급격히 변형이 증가했다. 이 때 하중은 $1,630\text{kN}$ 이었다. 도심은 상부플랜지 내에 위치한 것으로 확인되는데 인장플랜지 항복 이후 도심이 상향 이동하기 시작했고, $1,780\text{kN}$ 부근에서 케이싱 하연에 균열이 발생하였다. 최종적으로 바닥판 상연의 변형률이 0.0033 에 이르면서 실험이 종료되었다.

RG실험체의 변형률 분포도 SG실험체와 유사하고 Fig. 12(b)와 같다. 사용하중 455kN 에서도 선형 거동을 확인하였고 인장플랜지 항복변형률 도달 후 변형이 급격히 증가했다. 하중은 $1,475\text{kN}$ 이었다. 도심은 상부플랜지 내에 위치하다가 인장플랜지 항복 이후 서서히 인장측으로 이동하기 시작했고, $1,787\text{kN}$ 부근에서 케이싱 하연 균열이 발생하였다. 최종적으로 바닥판 극한변형률인 0.0033 에 이르면서 실험을 종료하였다.

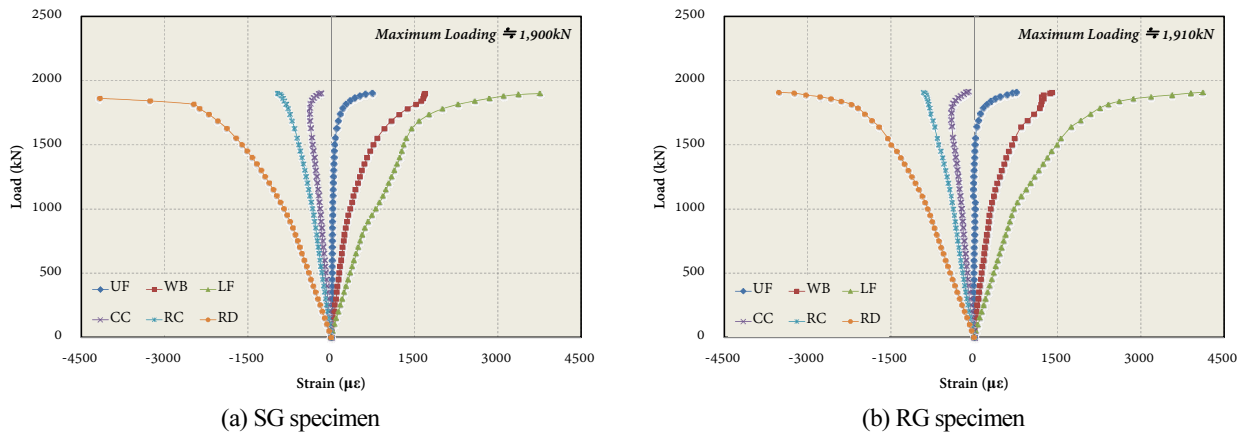


Fig. 12. Load-strain curve

실험과 해석 결과 비교

실험체 바닥판 콘크리트의 28일 강도가 설계값 보다 60% 낮게 발현되면서 실제료값에 근거한 해석을 수행하였고, 이를 실험값과 비교하였다. 사용하중 단계에서 강성은 계산 보다 크게 나타났다. 항복하중 단계는 다소 차이가 보이지만 바닥판 압축 파괴 시점의 강도는 약 2.6~3.1% 오차로 변형률적합법이 극한강도를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

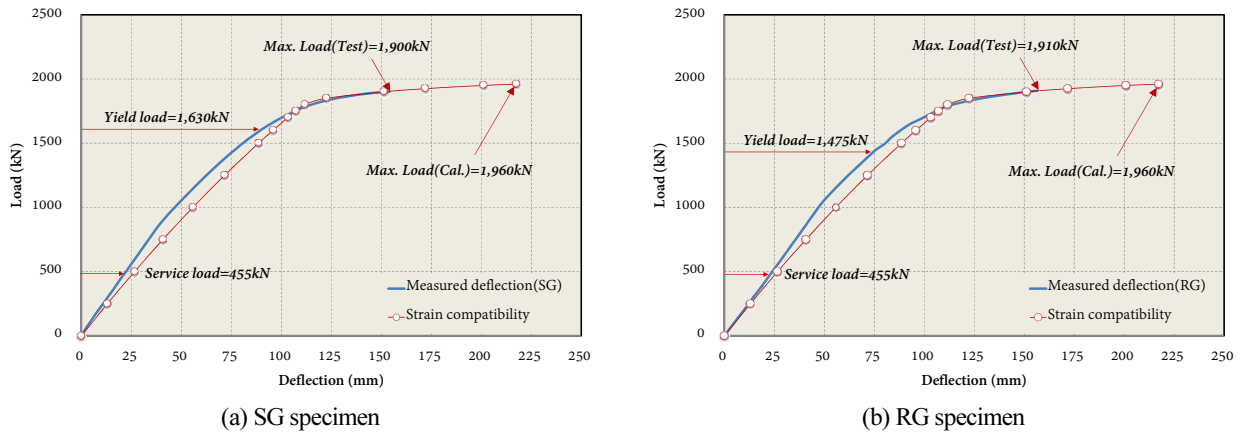


Fig. 13. Comparison of load-deflection curve

결론

본 실험은 전단연결 상세가 다른 2종류의 실험체를 설계 및 제작하여 극한한계상태에 도달까지 휨거동을 평가하였다. 또 실험 결과와 변형률적합법에 의한 해석결과와의 결과 비교를 통해 극한강도를 평가하였고 결론은 다음과 같다.

- (1) 제작단계에서 계측결과와 설계값은 비교적 잘 일치하여 설계가 적절히 이루어 졌음을 확인하였다.
- (2) SC거더는 사용하중이 탄성범위 이내에 있고, 허용처짐에 대한 사용성 요구조건을 충족시킨다.
- (3) 상대슬립 측정 결과 0.02mm 이내 변위를 확인함으로써 두 실험체가 완전결합을 담보한다는 것을 검증하였다.
- (4) 전단상세의 차이는 강성에 큰 영향을 미치지 않으며 완전합성이 담보된다면 극한한계상태까지의 거동도 차이가 없다.
- (5) 설계가 적절히 이루어진다면, 케이싱 일부가 균열이 발생하는 수준의 인장력을 받더라도 철근의 역할로 인해 바닥판이 압축 파괴에 먼저 도달한다.
- (6) 사용하중의 3.2~3.6배에서 단면이 항복함으로써 충분한 구조안전성을 확보하고, 극한하중은 변형률적합법을 통해 예측이 가능하다.

References

- [1] AASHTO (2010). AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications(3rd), US.
- [2] ACI Committee 318 (2000). Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318M-14) and Commentary (ACI 318RM-14), US.
- [3] Lee, J.W., Yang, I.W., Ha, T.Y., Lim, E., Lee, K.J. (2017). "Characteristics of flexural behavior of composite section consisting of steel girder with 80MPa high strength concrete on compressive flange." Journal of Society of Disaster, Vol. 13, No. 4, pp. 455-464.
- [4] Lim, C.H. (2014). Evaluation for the Nominal Moment Capacity of Composite Girder Considering the Partial Safety Factor, Seoul National University of Science and Technology.
- [5] Yang, I.W., Lim, E., Ha, T.Y. (2016). "Experimental study on structural behavior of interfaces of double composite girder using the 80 MPa concrete." Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 17, No. 4, pp. 400-413.