

지점부 하부플랜지에 고강도 콘크리트를 합성한 강 박스거더교의 정적 특성 분석

Analysis of Static Characteristics of Steel Box Girder Bridge being composited High Strength Concrete at the Lower Flange of the Support

차태권* · 장일영**

Cha, Taegweon*, and Jang, Ilyoung**

Abstract

The steel box girder bridge has excellent applicability to curved bridges owing to its large torsional rigidity. In addition, because the weight of the segments is smaller than that of concrete bridges, it also has many applications for medium-range bridges. However, when a bridge with a span greater than 70 m is constructed, the height of the steel box girder increases, which is disadvantageous for the manufacture and transportation of girders and for bridge construction. Therefore, improvements in the construction methods are required to facilitate construction. Therefore, a structural system of a double composite box girder bridge with an upper slab and composite high-strength concrete at the lower flange of the support of continuous span was proposed, and the structural performance was verified by finite element analysis and a static loading test of an actual specimen. It was confirmed that such a structure minimizes the height of the girder of continuous support by optimizing the sectional efficiency and also improves usability.

Key words : Double Composite Box Girder Bridge, Finite Element Analysis, Static Loading Test of Actual Specimen

요 지

강 박스거더 교량은 비틀림 강성이 크므로 곡선교에 대한 적용성이 우수하며 가설시 세그먼트의 중량이 콘크리트 교량 대비 작아서 중경간 교량에 대한 적용사례가 많다. 그러나 70 m 이상의 장경간 교량 적용시에는 강 박스거더의 지점부 형고가 커지므로 거더 제작 및 운반과 가설시에 불리해진다. 따라서 대블럭의 크레인 가설 등 시공을 용이하게 하기 위해서는 공법 개량이 필요하다. 이에 연속경간 지점부의 하부플랜지에 고강도 콘크리트를 합성하여 상부슬래브와 이중합성되는 박스거더 교의 구조계를 제안하고 구조적 성능을 유한요소해석과 실물시험체의 정적재하실험을 통해 비교 검증하였다. 이러한 구조계는 단면효율 최적화로 연속지점부 형고를 최소화하며, 사용성 측면에서도 개선된 구조임을 확인하였다.

핵심용어 : 이중합성 박스거더교, 유한요소해석, 실물시험체 정적재하실험

1. 서 론

토목설계 및 시공기술의 발달과 건설재료의 품질향상으로 교량의 장경간화는 세계적인 추세이다. 국내 도로교량 분야에서도 경간장 50 m 이하에서는 PSC 개량형 거더 및 강합성 거더 등 다양한 복합구조 형식의 교량이 적용되고

있고, 70 m 이하의 교량에서는 강상자형 거더를 주로 사용하고 있다. 그 이상의 경간장에서는 특수 가설공법을 반영한 PSC 박스거더교나 트러스 및 아치교 등과 같은 교량형식이 많이 적용되고 있다. 또한, 경간장 200 m 이상의 교량은 사장교, 현수교 등 장대 특수교량이 적용되고 있으며, 주로 케이블을 이용한 교량으로 지속적인 연구진행 및 적용이

*정회원, 금오공과대학교 토목공학과 박사수료(E-mail: ctgkmh@naver.com)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology

**교신저자, 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-54-478-7617, Fax: +82-54-478-7859, E-mail: jbond@kumoh.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology

이루어지고 있으며 많은 발전이 진행되었다.

따라서 상대적으로 공법 개발에 관심이 적은 경간장 50-100 m 정도의 중장경간 교량에 대한 개발이 시급하다고 할 수 있다(Nakamura et al., 2002). 장경간의 교량을 일반 강상자형 강박스로 구성하게 되면 거더의 높이가 운반에 필요한 제한기준을 초과하게 되므로 사용에 제약조건이 발생하게 되며, PSC 박스구조로 적용할 경우 거더의 중량이 증가하여 시공성이 저하되고, 이로 인해 공사비 및 공사기간이 증가하는 단점이 생긴다.

이러한 문제점을 극복하기 위해 본 연구에서는 강재박스 단면의 효율을 최적화하고자 개구단면을 적용하고, 지점부 상부플랜지는 일부구간을 폐합단면 적용하였다(AASHTO, 2003, 2004). 또한, 거더 운반 시 높이의 제한 기준을 최소화하고자 연속지점부 하부플랜지에 고강도 콘크리트를 타설하여 이중합성을 통한 단면효율 최적화로 지점부 형고를 최소화하였다(Saul, 1996). 이를 바탕으로 대상 구조물의 유한요소해석과 실험시행체의 정적재하실험을 수행하여 구조적 성능을 비교 검증하였다.

2. 구조해석에 의한 이중합성 효과 분석

2.1 구조해석 모델

본 연구는 기존의 폐합단면 강박스 거더를 개량하여 개구단면+폐합단면을 적용하고 지점부 하부플랜지에 고강도 콘크리트를 합성하여 이중합성 효과에 의한 형고 축소 및 강성 증가로 사용성을 향상시켰다.

일반부(중양부)의 경우 압축응력을 받는 상부플랜지는 개구단면을 적용하고 하부플랜지는 인장응력을 받도록 U형의 단면을 적용하였다.

연속지점부의 경우 인장응력을 받는 상부플랜지는 개구단면을 폐합시켜 상부플랜지 두께 증가를 최소화하였으며 하부플랜지에는 고강도 콘크리트를 합성하여 이중합성 단면으로 구성하였다(Saul, 1996). 콘크리트의 합성효과로 장기 공용에 문제가 없도록 전단연결재를 하부플랜지 및 웹 하단부의 콘크리트 합성 부위에도 설치하여 완전합성 거동하도록 하였다. 이중합성 단면 및 현장적용 사진은 Fig. 1과 같다.

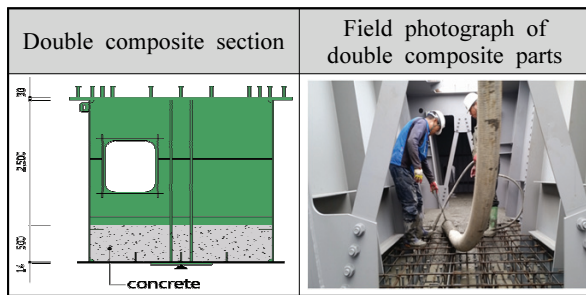
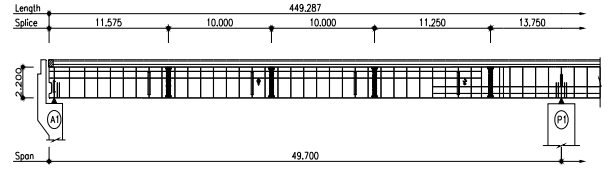
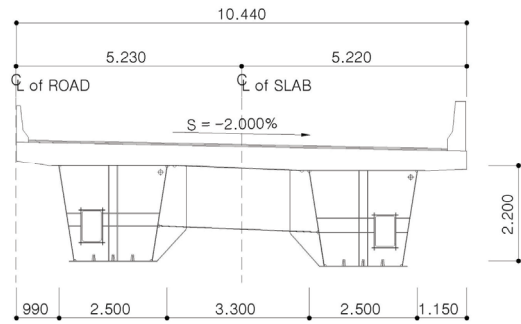


Fig. 1. Double Composite of Concrete at the Intermediate Support

연속지점부 하부플랜지에 콘크리트 합성효과를 확인하기 위하여 FEM해석을 수행하였다. 검토 교량은 2@50 m 연속교로 슬래브 폭원은 10.44 m, 슬래브 두께는 0.24 m이며, 2주형으로 거더 형고는 2.2 m이다. 단면두께를 갖는 강박스는 판요소(plate element)로, 하부플랜지에 합성되는 고강도 콘크리트는 솔리드요소(solid element)로 하였으며, plate와 solid가 만나는 경계부분은 질점을 공유하였다. 시공단계는 하부플랜지에 콘크리트 합성단계로 하부콘크리트는 변단면으로 모델링하고, 상부슬래브는 하중 10.99 kN/m²로 산정하여 상부플랜지에 등분포하중으로 재하 하였다. 단면제원은 Fig. 2 및 Table 1에 정리하였다.



(a) Longitudinal section of bridge (2@50 m)



(b) Cross section of bridge

Fig. 2. Design Section of Existing Case

Table 1. Geometric Properties

Items	Steel thickness (mm)		Steel width (mm)	
	Pier~5 m	5~10 m	Pier~5 m	5~10 m
Upper flange	20	18	2,850	500
Web	12	10	2,200	2,200
Lower flange	14	14	1,800	1,800

Locations	Lower concrete specifications	
	Thickness (mm)	Strength (MPa)
Pier~5 m	400	40
5 m~10 m	200	40

상부플랜지의 폭원은 연속지점부를 기준으로 하여 0-5 m 구간은 폐합단면으로 하고, 5-10 m 구간은 변화단면으로 2,850 mm → 500 mm로 하였으며, 나머지 구간은

500 mm를 적용하였다. 하부플랜지 폭원은 전구간 1,800 mm로 하여 U형의 개구제형 단면을 적용하였다. Fig. 3은 본 연구교량인 2@50 m에 대한 구조모델링으로 강재만의 단면이며, Fig. 4는 Fig. 3과 동일 단면제원에서 하부 콘크리트를 합성한 모델링으로 지점부 부분만을 활성화시켜 보여주고 있다. 범용구조해석 프로그램인 MIDAS/CIVIL을 사용하여 강재는 판요소, 콘크리트는 솔리드요소로 하였다. 두 요소의 경계면은 절점공유하여 각 요소의 변위가 같이 거동하도록 하였다(MIDAS Civil, 2006). 사용된 재료모델은 Table 2와 같다.

Table 2. Materials of Modelling

Span	Materials		Height
2@50 m	Steel	HSB380, SM275 Ess : 210,000 MPa	2.2 m
	Con'c (bottom)	40MPa (design strength) Ec : 30,008 MPa	

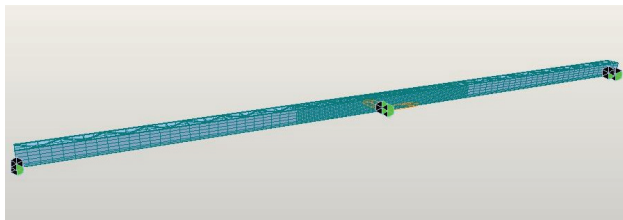


Fig. 3. Modelling (2@50 m, Steel Only)

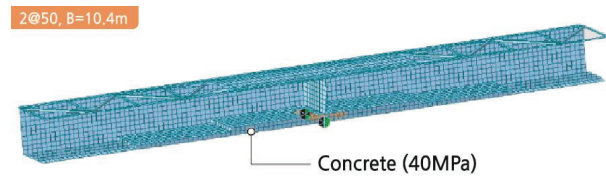


Fig. 4. Modelling (2@50 m, Steel + Concrete)

2.2 이중합성 효과에 대한 구조해석 결과

연속지점부 내측 하부플랜지의 비합성 단면(강재단면)과 고강도 콘크리트를 합성한 이중합성 단면(강재+콘크리트)에 대한 응력효과를 비교하였으며, 구조해석 결과는 Figs. 5 및 6과 같다.

연속지점부 상, 하부플랜지에 대한 응력 결과는 Table 3에 정리하였다. 하부플랜지의 압축응력은 비합성 단면(강재단면)에서 143.6 MPa이고, 합성 단면(강재+하부콘크리트)에서는 70.9 MPa로 대략 50% 정도 감소하였다. 이는 하부플랜지에 콘크리트 합성으로 인해 단면강성이 커지고 중립축 하향에 의한 영향으로 하부플랜지의 응력이 감소된 것으로 판단하였다. 이때, 상부플랜지 응력은 52.9 MPa에서 56.9 MPa로 약 7% 정도 증가하여 인장응력 증가에 의한 영향은 작은 것으로 판단하였다.

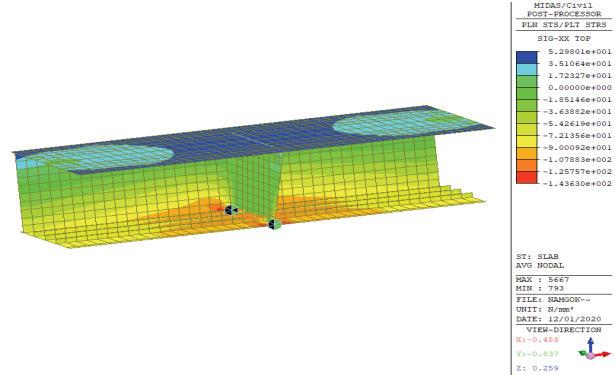


Fig. 5. Bending Stress at Pier (Steel Only)

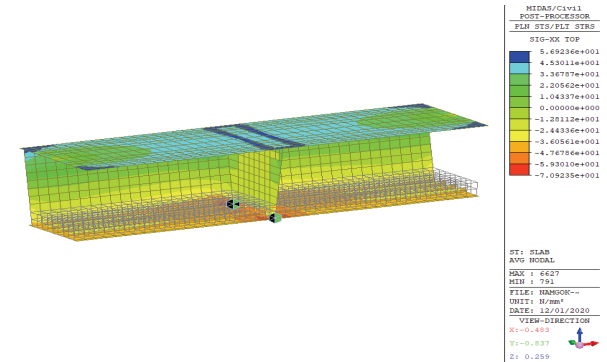


Fig. 6. Bending Stress at Pier (Steel + Concrete)

Table 3. Bending Stress at Pier

	Steel only	Steel+con'c	Remark
Upper flange	+52.9	+56.9	7% up
Lower flange	-143.6	-70.9	50% down

+ : tensile, - : compressive, unit : MPa

Fig. 7 및 Table 4에서 합성 단면 모델링의 경간 중앙부 하부플랜지의 인장응력은 비합성 단면에 비하여 5.1 MPa 작게 발생하므로 11% 정도 감소하였으며, 처짐은 비합성 단면에 비해서 9 mm 작게 발생하므로 14% 정도 감소하였다. 이는 지점부의 하부콘크리트 합성에 따른 효과로 중앙부에서 처짐이 감소하여 사용능성이 향상된 것으로 판단하였다.

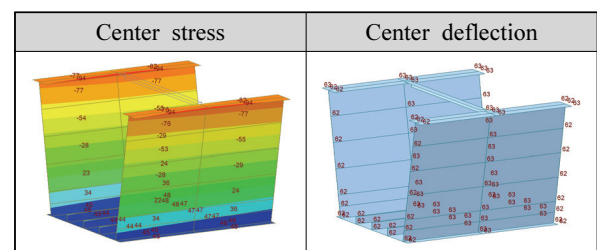


Fig. 7. Stress and Deflection at Midpoint (Steel Only)

Table 4. Stress and Deflection at Midpoint

	Steel only	Steel+con'c	Remark
Stress (MPa)	+46.2	+41.1	11% down
Deflection (mm)	-62.9	-53.9	14% down
+ : tensile, - : compressive			

3. 정적재하실험과 구조해석 결과 비교

3.1 시험체 제원

앞에서 연속지점부 하부플랜지의 콘크리트 합성에 따른 응력의 효과를 구조해석으로 확인하였다. 이에 본 연구 교량에 대한 실험시험체의 품질을 확인하기 위하여 명지대 하이브리드 구조시험센터에서 시험체 제작 및 정적재하실험을 수행하였다. 하부콘크리트는 활하중 작용시 변곡점인 L/4 지점의 내측으로 0.2 L 구간에 설치하며, 시험센터 규모를 고려하여 시험체를 전장 20 m의 지점부 모델로 하였다. 시험체 중앙부에는 지점부 받침부를 설치하고 좌, 우 10 m 길이의 캔틸레버 구조로 하였다. 하중재하는 좌, 우 끝단에서 1.5 m 내측에 작용시키며 Actuator 2기를 사용하여 슬래브 합성전 시험체에서 하부콘크리트 합성 효과를 확인하였다. Fig. 8은 슬래브 합성전 실험전경이며, 하중재하불력을 위치시키고 하중재하를 위해 Actuator를 설치하는 과정이다. 시험체 제원과 계측센서의 위치는 Table 5, Fig. 9와 같다.



Fig. 8. Experiment View (Before Slab Composition)

Table 5. Specifications (Before Slab Composition)

Span	Materials		Height
20 m	Steel	HSB380, SM275 Ess : 210,000 MPa rebar (Es) : 205,000 MPa	2.5 m
	Con'c (bottom)	50 MPa (specimen strength) Ec : 32,325 MPa	
	n=Ess/Ec=6.5		

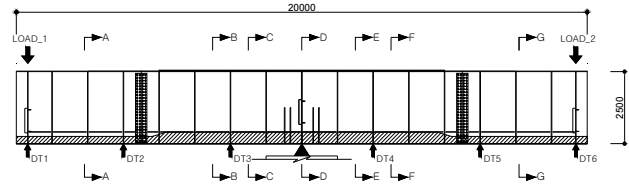


Fig. 9. Load and Measuring Sensor Location

슬래브 합성전 시험체의 하중재하 실험은 용량 5,000 kN의 Actuator 2기를 사용하여 2점 재하 하였으며, 정적재하 실험은 좌우의 Actuator 각각 1,500 kN(합력 3,000 kN)까지 재하 후 실험을 종료하였다. 위 시험체는 슬래브 합성후 실험을 추가하므로, 탄성범위 내에서 하중 3,000 kN까지 재하 후 합성효과를 확인하였다. 하중 증가시 좌, 우 끝단의 처짐량 및 하부콘크리트 합성에 따른 변형률을 측정하였다. 이에 시험체와 동일조건으로 구조해석 수행하여 결과값을 비교하였다.

3.2 구조해석 모델

정적 재하하중에 따른 실제측치와 비교 검토하기 위하여 유한요소해석 프로그램을 통한 구조해석을 실시하였다. 해석 프로그램은 MIDAS/CIVIL을 사용하였고 모델링은 Fig. 10과 같다(MIDAS Civil, 2006).

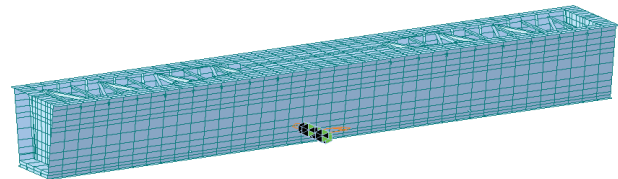


Fig. 10. Structural Modeling (Before Slab Composition)

3.3 정적재하시험의 결과 분석

3.3.1 정적 처짐 측정 결과

정적 재하시험 결과 시험체 처짐량은 하중 증가에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보였고 좌우의 처짐량은 대칭성을 보였다. 처짐량에 대해서 구조해석 결과와 시험체 실험 결과를 Fig. 11과 Table 6에 정리하였다. 계측값은 좌우의 대칭관계를 고려하여 평균값을 적용하였으며, 구조해석 결과와 처짐값 비교시 85% 정도로 실험결과가 다소 작은 경향을 보였다. 하중 증가별 처짐량 증가 비율은 유사한 선형관계로 판단하였다. Fig. 12는 구조해석 결과로 재하하중 3,000 kN에서 처짐량이 17.15 mm임을 보여주고 있다. 절대값으로 비교시 약간의 차이는 있으나 유사한 경향을 보이므로 실험치와 구조해석 결과의 변형률 값을 비교·분석하는 것이 타당한 것으로 판단하였다.

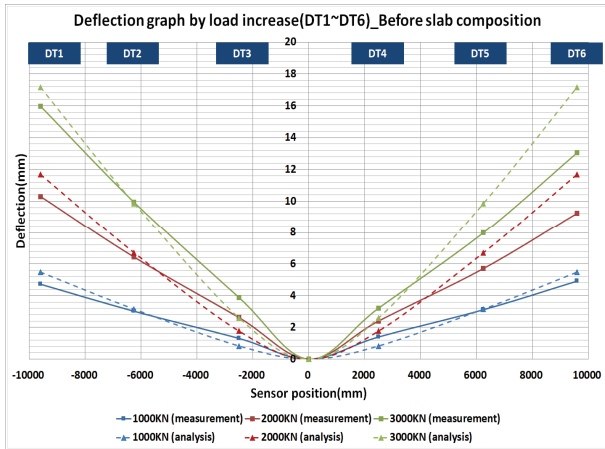


Fig. 11. Deflection of the Load Test Specimen

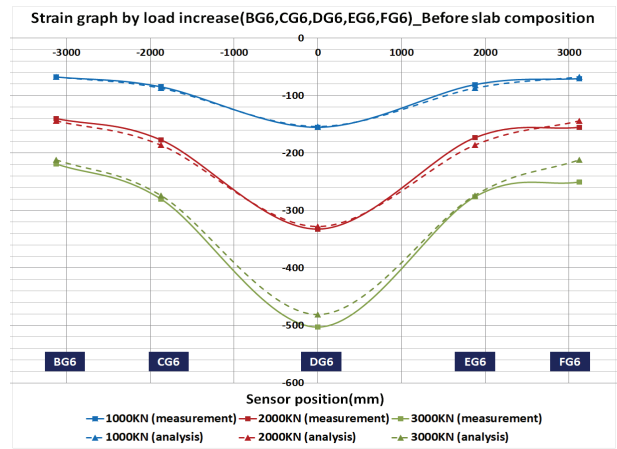


Fig. 13. Strain of the Lower Flange Steel at Pier

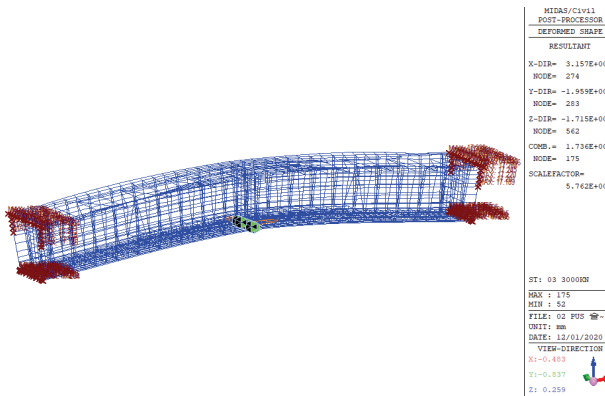


Fig. 12. Deflection as a Result of Structural Analysis (Load 3,000 kN)

Table 6. Deflection as a Result of the Test Specimen and Structural Analysis

Load (kN)	Measurement value			Structural analysis	Note
	Left	Right	Average		
1,000	-4.72	-4.92	-4.82	-5.47	0.88
2,000	-10.30	-9.23	-9.77	-11.68	0.84
3,000	-15.98	-13.05	-14.52	-17.15	0.85

3.3.2 강재 및 콘크리트 변형률 측정 결과

정적 재하에 따른 변형률 측정 게이지 위치는 종단면도상 5개소이며, 하중재하시 강재 변형률은 하부플랜지 하부에서 측정하고, 하부콘크리트의 철근 변형률은 미리 설치된 콘크리트 내부의 철근에서 측정하였다. 측정된 결과는 Figs. 13 및 14에서 그래프로 도시하였다. 지점부 하부플랜지 강재 변형률과 하부콘크리트의 철근 변형률 측정 위치는 횡단면 도상 유사한 위치이며 변형률 값도 500 μ 정도로 유사한 경향임을 확인하였다. 또한, 지점부 위치에서 변형률이 가장 크게 발생하였다.

지점부 하부플랜지 강재 변형률과 하부콘크리트의 철근 변형률을 응력으로 환산하여 이중합성 효과를 확인하였으

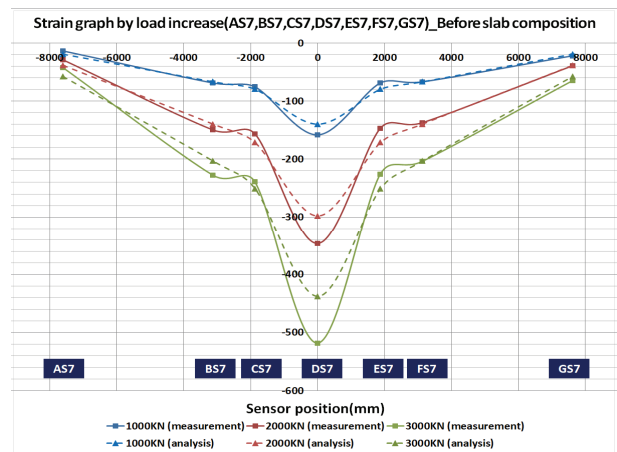


Fig. 14. Strain of Lower Concrete Rebar at Pier

며 그 결과는 Table 7에 정리하였다. 하중 재하시 하부플랜지의 강재 응력과 하부콘크리트의 철근 응력이 하중 3,000 kN 재하시 105.6 MPa과 106.2 MPa로 유사함을 확인하였다. 이는 콘크리트 합성거동에 의해서 변형률이 유사하게 나오는 것으로 판단하였다. 측정된 변형률을 응력으로 환산 시 $\sigma=E\epsilon$ 에서 Table 5의 강재($E_{ss}=210,000$ MPa) 및 철근($E_s=205,000$ MPa)의 탄성계수 값을 적용하였다. 하부플랜지 강재단면과 하부콘크리트의 철근에 발생하는 응력은 유사한 것으로 판단하였다.

Table 7. Stress (Lower Flange and Lower Concrete Rebar)

Load (kN)	Lower flange		Lower reinforcement	
	Strain (μ)	Stress (E ϵ)	Strain (μ)	Stress (E ϵ)
1,000	-155	-32.6	-158	-32.4
2,000	-332	-69.7	-347	-71.1
3,000	-503	-105.6	-518	-106.2

Table 8에서 측정된 하부플랜지의 응력과 구조해석 결과를 비교하였다. 여건상 강재만의 실물시험은 실시하지 못했

기 때문에 강재만의 실험실 시험 결과는 구조해석 결과로 대체하였고, 경향만을 비교하였다. Fig. 15는 구조해석 결과로 재하하중 3,000 kN에서 압축응력이 101.1 MPa임을 보여주고 있다. 검토결과 Table 7에서 하부콘크리트 합성단면은 비합성단면 대비하여 하부플랜지의 응력이 약 50% 정도 감소되는 것으로 판단하였다.

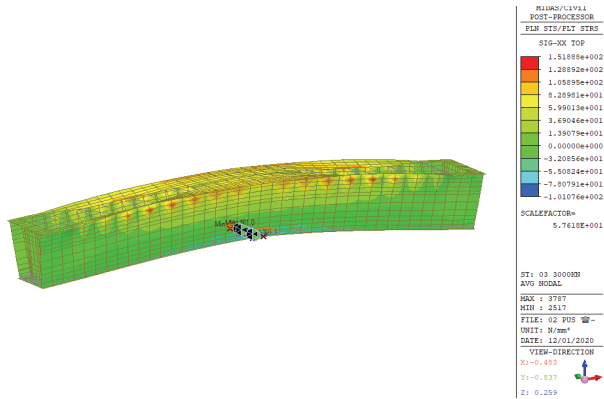


Fig. 15. Stress of Lower Flange in Structural Analysis (Load 3,000 kN)

Table 8. Stress of Lower Flange (Experiment & Structural Analysis)

Load (kN)	Stress during measurement	Stress in structural analysis	
	Steel+Con'c	Steel+Con'c	Steel (Noncomposite)
1,000	-32.6	-32.3	-69.8
2,000	-69.7	-68.8	-149.1
3,000	-105.6	-101.1	-218.9

4. 결론

본 연구 교량은 강재 재료인 강박스 하부플랜지에 고강도 콘크리트를 합성한 구조로 현장 적용 전에 교량에 대한 수치해석을 통하여 구조적 거동 특성의 합리성과 사용성을 확인하고자 하였으며, 실험 정적재하시험을 수행하여 수치해석 결과와 비교 연구를 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 교량 연속지점부 하부플랜지에 비합성 및 합성시의 구조적 강성을 변화시켜서 구조해석을 수행한 결과, 본 연구가 추구하고 있는 연속지점부 하부플랜지에 고강도 콘크리트를 합성하여 이중합성 단면을 적용한

경우가 기존의 폐합단면 강박스거더에 비해 하부플랜지의 압축응력이 50% 정도 감소하였고, 하부콘크리트 합성으로 인한 연속지점부 강성의 증가로 경간 중앙부 하부플랜지의 인장응력은 11% 감소, 처짐은 14%의 감소 효과가 있었다.

- (2) 정적 처짐에 대한 계측값은 좌우의 대칭관계를 고려하여 평균값을 적용하였으며, 구조해석 결과와 비교시 85% 정도로 실험결과가 다소 작은 경향을 보였다.
- (3) 정적 재하에 따른 변형률 측정 결과인 지점부 하부플랜지 강제 변형률과 하부콘크리트의 철근 변형률을 응력으로 환산했을 때, 하중 재하시 하부플랜지의 강제 응력과 하부콘크리트의 철근의 응력이 하중 3,000 kN 재하시 105.6 MPa과 106.2 MPa로 유사함을 확인하였다.
- (4) 여건상 강재만의 실험실 시험 결과는 구조해석 결과를 대체하였고, 정적재하시험에 의해 측정된 하부플랜지의 응력과 구조해석 결과의 경향만을 비교했을 때, 하부콘크리트 합성 단면에서 하부플랜지 응력이 약 50% 정도 감소되는 것으로 판단하였다.

References

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2003). *Guide specifications for horizontally curved steel girder highway bridges*. Washington, DC, USA: American Association of State Highway and Transportation Officials.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2004). *AASHTO LRFD bridge design specifications: dual units* (3rd ed). Washington, DC, USA: American Association of State Highway and Transportation Officials.

MIDAS Civil. (2006). *Standard user's manual, Ver.2.0.0*. MIDAS Information Technology Co., Ltd.

Nakamura, S., Momiyama, Y., Hosaka, T., and Homma, K. (2002). New technologies of steel/concrete composite bridges. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 58, No. 1, pp. 99-130.

Saul, R. (1996). Bridges with double composite action. *Structural Engineering International*, Vol. 6, No. 1, pp. 32-36.

Received	October 19, 2020
Revised	October 19, 2020
Accepted	November 23, 2020