

강제로 구속된 프리스트레스트 콘크리트 거더를 이용한 철도교의 적용성 고찰

A Study on the Applicability of Railway Bridge Using Steel-Confined Prestressed Concrete Girder

김정호* 황윤국** 박경훈*** 최인윤**** 이상윤*****
Kim, Jung-Ho Hwang, Yoon-Gook Park, Kyung-Hoon Chli, Il-Yoon Lee, Sang-Yoon

ABSTRACT

A new type of girder named as Steel-Confined Prestressed Concrete Girder(SCP Girder) has been developed, which is composed of concrete, steel plate, and prestressing tendon. This girder may maximize structural advantages of these components, therefore it can be used to construct the middle or long span bridge with low-height girder. To verify the propriety of design, structural safety, and applicability of this girder, static load test was carried out.

In this study, a design program was developed for practical design of railway bridge using SCP girder. And to verify the applicability of SCP girder to railway bridge, structural performance and economic efficiency based on the construction cost were compared with conventional railway bridges.

1. 서론

최근 국내에서 김정호 등(2002)은 콘크리트와 강판, PS강재의 구조적 장점을 극대화하여 중장정간 교량형식으로 주로 사용되는 강합성거더교, PSC I형거더교, 프리플렉스교 등에서 취약점으로 거론되는 처짐 및 진동, 큰 고정하중, 강재 단면의 저효율성 등의 약점을 개선하고 경간을 장대화할 수 있는 새로운 개념의 합성거더인 '강제로 구속된 프리스트레스트 콘크리트 합성거더(Steel-Confined Prestressed Concrete Girder: SCP Girder)'를 개발하였다. 또한, 개발된 SCP 합성거더를 도로교에 적용하기 위해 국내·외 설계기준을 준용하여 해석 및 설계를 위한 설계프로그램을 개발하였으며, SCP 합성거더를 선블록기로 제작하여 시공성을 확인하고 정적하중 제하에 의한 파괴실험을 통해 SCP 합성거더 설계의 타당성과 공용중 안전성에 대한 실험적 검증을 수행하였다.

본 연구에서는 기존 도로교에 적용되었던 SCP 합성거더를 철도교로 확대하여 적용하기 위해, 국내 설계기준(철도설계기준(철도교 편), 1999; 콘크리트구조설계기준, 2003)을 준용한 철도교

* 한국건설기술연구원 수석연구원, 비회원
** 한국건설기술연구원 수석연구원, 비회원
*** 한국건설기술연구원 연구원, 비회원
**** 한국철도기술연구원 실업연구원, 정회원
***** 한국건설기술연구원 연구원, 비회원

용 SCP 합성거더 설계프로그램을 개발하였으며, 개발된 프로그램으로부터 설계기준을 만족하는 철도교 표준단면을 제안하였다. 또한, 제안된 표준단면을 기준으로 타 교량 형식과의 구조성능 및 경제성을 비교하여 철도교의 적용성을 검토하였다. 마지막으로, 실제 열차하중에 대해 동적해석을 수행하였으며, 국내·외 관련시방 기준과 비교하였다.

2. SCP 합성거더의 개요

SCP 합성거더는 그림 1과 같이 I형단면의 외부는 강관으로 이루어져있으며, PS강재가 배치된 내부는 무단콘크리트로 채워지고 외부의 강관은 전단 연결재에 의해 내부콘크리트와 합성된 형식이다. SCP 합성거더의 제작은 그림 2와 같이 크게 강제거더 제작, 거더 콘크리트 타설, PS강재 긴장 및 바닥 콘크리트 타설로 나눌 수 있다. 강제 거더 제작의 대부분의 공정은 공장에서 자동화 제작으로 이루어지며, 현장에서는 운반되어온 세그먼트(segment)와 용접연결로 강제 거더가 완성된다. 거더 콘크리트 타설시 강제거더는 거푸집의 역할을 하게 되며, 거더 콘크리트가 경화된 후 PS강선을 긴장하여 거더를 완성하게 된다. 제작된 거더는 가설위치로 옮겨져 바닥 콘크리트가 타설되며, 경화 후 포장 등 부가적인 고정하중과 활하중을 지지하게 된다.

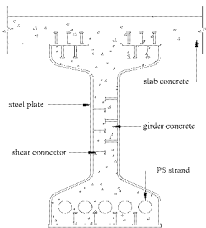


그림 1. SCP 합성거더의 단면형상

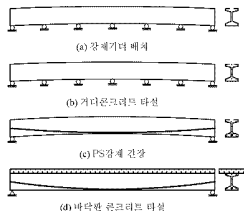


그림 2. SCP거더의 제작단계

SCP 합성거더에서 강재는 거더의 최하단에 배치됨으로써 PS강재와 더불어 인장력에 저항하게 되며, 압축을 받게 되는 거더 상단부의 경우 콘크리트가 대부분의 용력을 분담하게 되지만 형고의 제약이 있는 경우 강재를 추가적으로 배치하여 형고를 낮출 수 있다. 강제거더 중 측면매치 강재는 절곡가공되고 상·하부 수평방향 강재와의 연결을 위해서만 용접이 사용되므로 일반 강교에 비해 용접부위가 대폭 감소하게 되며, 거더 콘크리트는 전체 거더의 강성을 높여 강거더형식 교량에 비하여 처짐 및 진동을 감소시키는 효과가 있다. PS 강선에 의해 거더에 도입된 프리스트레스트력은 콘크리트에 발생하는 인장응력을 최소화하며, 외부강재의 사용 비율을 높이고 거더 콘크리트의 강성 분담비율을 낮추게 되어 거더의 자중을 감소시켜 상대적으로 장경간의 교량시공이 가능하게 된다(김정호 등, 2002).

3. SCP 합성거더의 설계

SCP 합성거더를 철도교에 적용하기 위해 철도설계기준(철도청, 1999)의 강교 및 콘크리트교의

설계기준과 콘크리트구조설계기준(한국콘크리트학회, 2003)을 준용하여 설계프로그램을 작성하였으며, 설계프로그램 내 구조해석 프로그램으로 상용프로그램 MIDAS를 이용하였다. 설계프로그램에 의한 시공단계별 해석 및 설계과정은 그림 3과 같다.

SCP 합성거더는 콘크리트의 크리프, 건조수축변형이 강형에 의해 구속되기 때문에 단면내에서 응력이 재분배된다. 따라서 시공순서와 공정을 충분히 고려하여 시간의존적 변형인 크리프와 건조수축을 반영한 시공단계별 강성을 계산하고 응력에 대하여 검토하였다. 또한 콘크리트에 대해서는 모든 단계에서 균열응력이 발생하지 않도록 설계하여 균열에 대한 안전성을 확보하도록 하였다. 철도교의 경우 활하중에 의해 강교의 과도한 진동을 방지하기 위해 활하중에 의한 처짐을 도로교 보다 엄격하게 규정하고 있다. 따라서 처짐에 대한 안전성을 확보하기 위해 충격을 포함하지 않는 활하중에 의한 처짐은 강교의 규정을 따라 $L/1,100$, 충격을 포함하는 활하중에 의한 처짐은 콘크리트교의 규정을 따라 $L/800$ 으로 적용하여, 강교 및 콘크리트교의 처짐 규정을 만족하도록 하였다.

개발된 설계프로그램을 이용하여 설계기준을 만족하는 SCP 합성거더가 적용된 철도교 표준단면을 제안하였으며, 지간 40m 4주형에 대한 표준 단면의 예를 그림 4에 나타내었다. 지간 및 주형의 갯수에 따라 거더의 폭은 일정하게 적용하고 형고 및 강재의 두께를 조정하여 단면을 결정하였다.

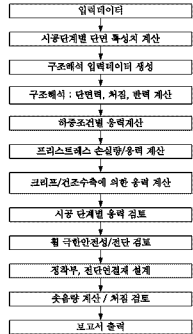
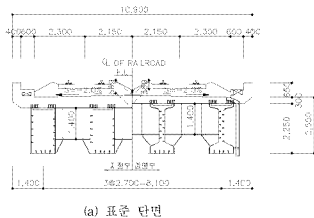
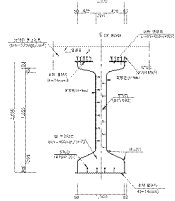


그림 3. 설계프로그램 흐름도



(a) 표준 단면



(b) 거더 지강중양부 단면도

그림 4. SCP 합성거더 철도교 표준단면의 예 (지간:40m, 4주형)

4. SCP 합성거더 철도교의 동적해석 및 관련기준 비교

철도교의 활하중에 의한 동적성능을 검증하기 위해서, 지간 40m 4주형에 대해서 일반철도 노선의 실제 운행열차에 대한 동적해석을 수행하여 관련기준과 비교·분석하였다. 일반철도의 경우, 국내 관련 기준으로 국유철도건설규칙(2000)과 철도설계기준(1999), 국외의 관련 기준으로는 UIC

CODE, EURO CODE 및 ERII(European Rail Research Institute) 보고서의 내용을 사용하여, SCP 합성거터 철도교의 동적해석 결과를 국내 기준과 비교하는 것을 원칙으로 하였다. 또한 국내 규정에 언급되어 있지 않은 부분은 국외 기준을 참고하여 이를 규정과 SCP 철도교 동적해석 결과를 비교하였다. 철도교의 동적해석은 새마을호 및 화물열차에 대해 구조해석 상용프로그램인 ABAQUS 6.2-1을 사용하여 이동하중 해석을 수행하였으며, 표 1에 동적해석 수행결과와 비교 기준치를 제시하였다.

표 1. SCP 합성거터 철도교의 동적해석 및 관련기준 비교

구 분	성능 검증 비교		해석결과	
	기준치	관련기준	여객(PMC)	화물(Diescl)
충격계수	0.318	철도설계기준	0.085	0.263
고유진동수	상한 : 6.002 Hz 하한 : 2.655 Hz	UIC 776-1	2.8129 Hz	
Deck 연직가속도	유도상 궤도 : 0.35g 무도상 궤도 : 0.50g	BRDM 프랑스규정	0.09684g	0.12531g
단부 꺾임각	인접 성토구간에 접해있는 경우 $\theta_{max}(rad) \leq 6.50 \times 10^{-3}$ 연속된 2개상관사이 에 있는 경우 $(\theta_1 + \theta_2)_{max}(rad) \leq 10.0 \times 10^{-3}$	프랑스규정	0.32063×10^{-3}	0.648175×10^{-3}
	연직하중에 의한 deck 상부 끝단과 성토부 그리고 deck 상부사이의 교축방향변위 허용치 : 8mm	UIC 774-3 EUROCODE	0.58244	1.1785
	다양한 하중에 의해 인접 교대 또는 deck와 deck 상부표면의 연직방향 상대변위의 차 : 2mm	EUROCODE	0.161268	0.321923
상관의 변틀림	3.0mm/m/3m	프랑스규정	0.1249mm	0.1738mm
경간중앙부 수직치침	36.36mm 50.00mm 26.70mm	철도설계기준 UIC 776-3 ERRI	3.951mm	8.166mm

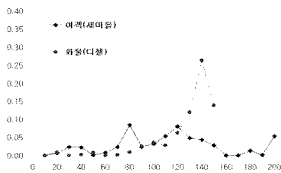


그림 5. 열차동행 시 충격계수

SCP 합성거터 철도교의 동적거동에 대한 해석결과, 충격계수는 그림 5에 나타난 바와 같이, 여객(새마을) 열차 주행시 0.085, 화물열차 주행시 기준치 대비 0.263으로 26.7%, 82.7% 수준으로 나타났다. 상관의 연직가속도, 단부꺾임각 및 상관의 변틀림도 제시한 기준치에 크게 미치지 못하는 것을 알 수 있다. 또한 철도교의 모드해석 결과 고유진동수는 그림 6에서 보듯이 1차 모드에서 2.813Hz로 제시한 기준의 상한치(6.002Hz)와 하한치(2.655Hz) 사이의 값을 가지고 있어서 관련 UIC 기준을 만족하고 있다. 경간중앙부의 수직치침도 그림 7에서 보는바와 같이, 여객열차(새마을 PMC)가 200km/h로

주행할 경우와 화물열차(디젤+화차)가 140km/h로 주행할 경우에 동적응답의 증폭효과가 발생하고 있으나, 제시한 기준치보다 훨씬 작은 값을 나타내고 있다.

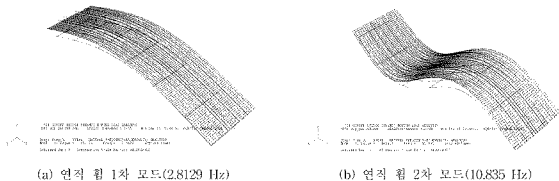
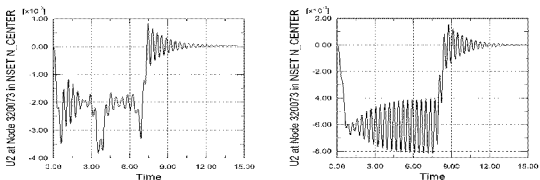


그림 6. SCP 합성거터 철도교의 모드해석 결과



(a) 여객(PMc 2연), 200km/h

(b) 화물(디젤+화차), 140km/h

그림 7. SCP 합성거터 철도교 경간중양부 수직처결(배측거터)

5. 타 교량 형식 비교

SCP 합성거터를 이용한 지간 30~40m의 철도교 표준단면을 바탕으로 철도교에 적용되는 타 거터교량 형식과 형고 및 상부공 공사비를 기준으로 SCP 합성거터의 적용성을 검토하였다.

표 2. 철도교 상부 형식별 형고

(단위 : m)

거터형식 \ 경간장(m)	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	형고에 대한 경간장비
PSC 빔 (6주형)	2.05	2.30	-	-	-	1/9.756 ~ 1/10.869
Preflex 빔 (6주형)	1.30	1.60	1.90	2.20	-	1/15.385 ~ 1/15.909
Steel Box 거터 (2주형)	-	-	-	2.30	3.00	1/15.217 ~ 1/13.333
SCP 합성거터 (5주형)	-	-	1.65	1.95	2.25	1/18.188 ~ 1/17.777
SCP 합성거터 (4주형)	-	-	1.95	2.25	2.60	1/15.385 ~ 1/15.555

표 2는 SCP 합성거터와 타 거터형식 교량의 일반적인 형고를 비교한 것이다. 표 2로부터 SCP

합성거더는 강재의 효율적인 사용으로 높은 강성을 보유함으로써 타 교량 형식에 비해 대체로 낮은 형고의 시공이 가능한 것으로 나타났다. 특히 5주형 SCP 합성거더의 경우 Preflex 빔의 약 86%, Steel Box 거더의 약 75%의 낮은 형고의 시공이 가능하여 도심에 통과하는 철도교와 같이 형고의 제약이 있는 경우 유리한 교량 형식이 될 것으로 판단된다.

SCP 합성거더의 경제성을 비교·검토 하기 위해 표 3와 그림 8과 같이 지간 35, 40m의 SCP 합성거더 및 타 거더형식 교량별 상부공 공사비를 비교하여 나타내었다. 그림 8(a)에서 알 수 있듯이, 지간 35m의 경우 4주형의 SCP 합성거더 및 Preflex 빔은 비슷한 수준의 공사비를 나타내고 있지만, Steel Box 거더와 비교할 경우 약 25%의 절감효과가 있는 것으로 나타났으며, 5주형 SCP 합성거더의 경우 Preflex 빔과 Steel Box 거더와 비교하여 각각 약 12%와 33% 정도의 절감효과가 있는 것으로 나타났다. 특히 Preflex 빔으로는 시공이 어려운 지간 40m의 경우, 그림 8(b)에서와 같이 Steel Box 거더와 비교하여 최대 약 24.5%의 상부공 공사비 절감효과가 있는 것으로 나타나 중·장경간의 철도교량 건설에 있어서 경제적인 대안이 될 것으로 판단된다.

표 3. 철도교 상부 형식별 공사비(2003년 11월 기준)

(단위: 원/원)

지간(m) \ 형식	Preflex 빔 (6주형)	Steel Box 거더	SCP 합성거더 (4주형)	SCP 합성거더 (5주형)
35	745,284	975,470	737,213	655,799
40	-	1,062,597	889,022	802,236

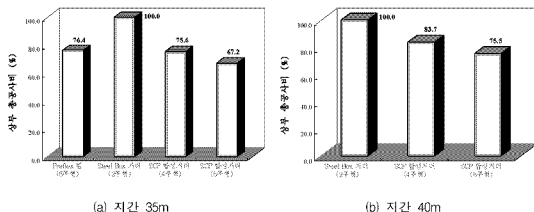


그림 8. 철도교 상부 형식별 공사비(백분율)

6. 결론

본 연구에서는 기존 도로교에 적용되었던 SCP 합성거더를 철도교에 확대 적용하기 위해 설계 프로그램 개발하고 철도교 표준단면을 제안하였으며, 교량 형식별 형고 및 상부 공사비를 기준으로 적용을 검토하였다. SCP 합성거더를 중·장경간의 철도교량에 적용하면, 강재의 효율적인 사용으로 타형식의 강교량에 비해 적은 량의 강재사용이 가능하고, 단순화·합리화된 제작공정에 따른 공기의 단축으로 타형식의 교량에 비해 최대 약 30%의 경제적인 비용으로 높은 강성의 교량을 건설할 수 있게 된다. 즉 SCP 합성거더를 철도교에 적용할 경우 30~40m내외에서 시공성과 경제성을 확보할 수 있으며, 40m 이상의 경우에도 외부강재의 사용 비율을 낮고 내부 콘크리트

의 강성 분담비율을 낮춰 고정하중을 감소시킴에 따라 경제적이면서도 용이한 시공이 가능한 것으로 판단된다.

한편, 철도교의 특성상 활하중에 의한 동적거동이 매우 중요한 문제가 되므로 SCP 합성거더의 동적 특성에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다. 따라서, 본 연구에서는 새마을호와 화물열차 주행에 따른 동적해석을 수행하였으며, 수치해석 결과에 의하면 관련 국내·외 기준을 만족하고 있음을 알 수 있다. 또한 본 연구에서는 초기 공사비를 기준으로 SCP 합성거더의 경제성을 비교하였으나, SCP 합성거더의 경제적인 시공 및 유지관리를 위해 Life Cycle을 고려한 비용분석이 수행되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김성호, 박경훈, 황윤국, 최영빈, 조효남 (2002), "강재로 구축된 프리스트레스트 콘크리트 합성 거더의 개발을 위한 실험연구", 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제14권, 제5호, pp. 593-602.
2. 철도청(2000), "보선업무자료(규정) - 국유철도건설규칙", 철도청
3. 철도청 (1999), "철도설계기준(철도편)", 철도청
4. 한국콘크리트학회 (2003), "콘크리트구조설계기준", 건설교통부
5. 한국건설기술연구원 (2002), "S.C.P 합성거더 개발 연구 보고서"
6. 한국건설기술연구원 (2004), "S.C.P 단순합성철도교 중간 보고서"
7. SYSTRA(1995), "Bridge Design Manual (BRDM) Final Report", Korea High Speed Rail Construction Authority(KHRC)
8. UIC Code 774-1R(1984), "Recommendations for the design of railway bridges in reinforced and prestressed concrete", 2nd edition, International Union of Railway
9. UIC Code 776-1R(1994), "Loads to be considered in railway bridge design", 4th edition, International Union of Railway
10. UIC Code 776-3R(1989), "Deformation of bridges", 1st edition, International Union of Railway