

I 형상의 강재로 구속된 프리스트레스트 콘크리트 충전 합성거더 시공기술 (SCP 합성거더)

Development of Steel Confined Prestressed Concrete Girder

엄 영 호* 황 윤 국** 김 정 호*** 권 췌**** 이 우 중*****
Eom, Young Ho Hwang, Yoon koog Kim, Jung Ho Kown, Chek Lee, Wco Jong

ABSTRACT

A new type of bridge superstructures referred to as Steel-Confined Prestressed Concrete Girder (SCP Girder) was developed, which is composed of concrete, steel plate, and prestressing tendon. The girder may maximize structural advantages of these components : thus, long span bridges with low height girder may be constructed. For the effective design and fabrication of the girder, the design software program was developed and the process of fabrication established.

The experimental girder designed using the program was manufactured in actual size to confirm the fabric ability of the girder. Propriety of design, structural safety, and applicability of the girder were verified through the load test.

1. 서 론

교량건설에 있어 최근에는 새로운 복합재료의 도입을 위한 다양한 연구개발이 진행되고 있으며 일부에서는 복합재료를 이용한 실교량의 제작 및 시공사례 또한 보고되고 있다. 그러나 아직까지는 실제 교량에 있어 콘크리트와 강재(강판, 철근, PS강재 등)는 가장 보편적인 재료로서 활용되고 있으며, 이 두가지 주재료의 효과적인 조합을 통해 새로운 형태의 교량이 개발되어 왔다.

본 기술에서는 콘크리트와 강판, PS강재의 구조적 장점을 극대화하여 중장경간 교량형식으로 주로 사용되는 강합성거더교, PSC I형 거더교, 프리플렉스교 등에서 취약점으로 거론 되는 처짐 및 진동, 큰 고정하중, 강재 단면의 저효율성 등과 같은 문제점들을 개선하고 경간을 장대화할 수 있는 새로운 교량 상부구조형식을 개발하고자 하였다.

개발된 새로운 개념의 합성거더는 "I형상의 강재로 구속된 프리스트레스트 콘크리트 충전 합성거더(Steel-Confined Prestressed Concrete Girder : SCP Girder)"라 하고, 그 해석 및 설계를 위하여 국내설계기준을 만족하는 설계프로그램을 개발하였다. 개발된 설계프로그램에 의해 설계된 SCP 합성거더를 실험크기로 제작하여 시공성을 확인하였으며, 2002년 3월에 각계의 전문가를 모시고 공개 재하실험을 통해 안전성 및 실적용 가능성에 대하여 검증하였다.

* 정회원, (주)용마엔지니어링 상무이사

** 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원 공학박사

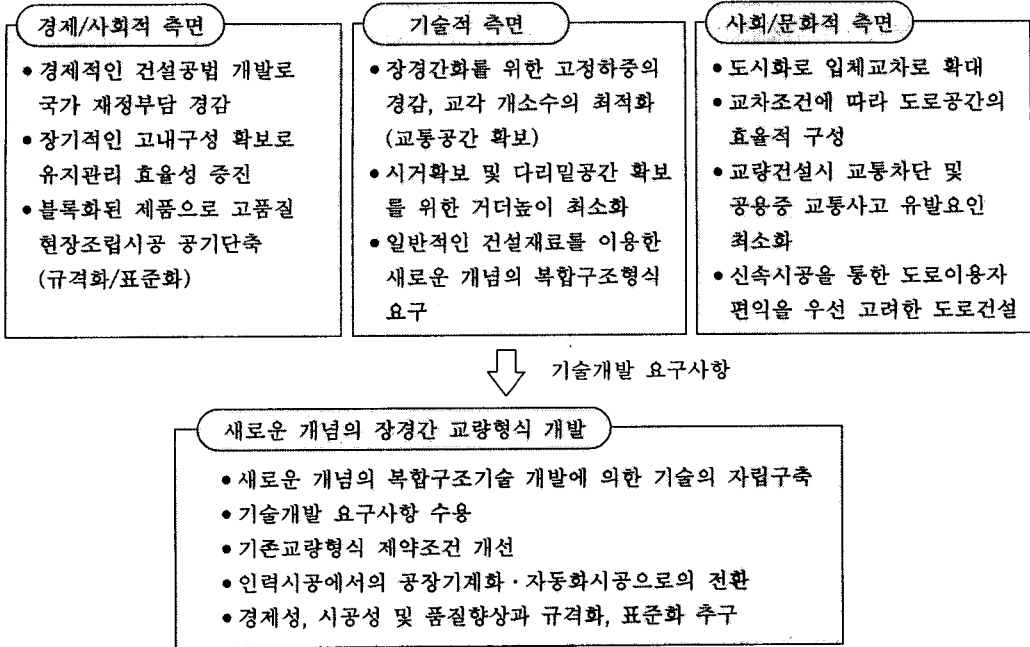
*** 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원

**** 신성건설주식회사 상무이사

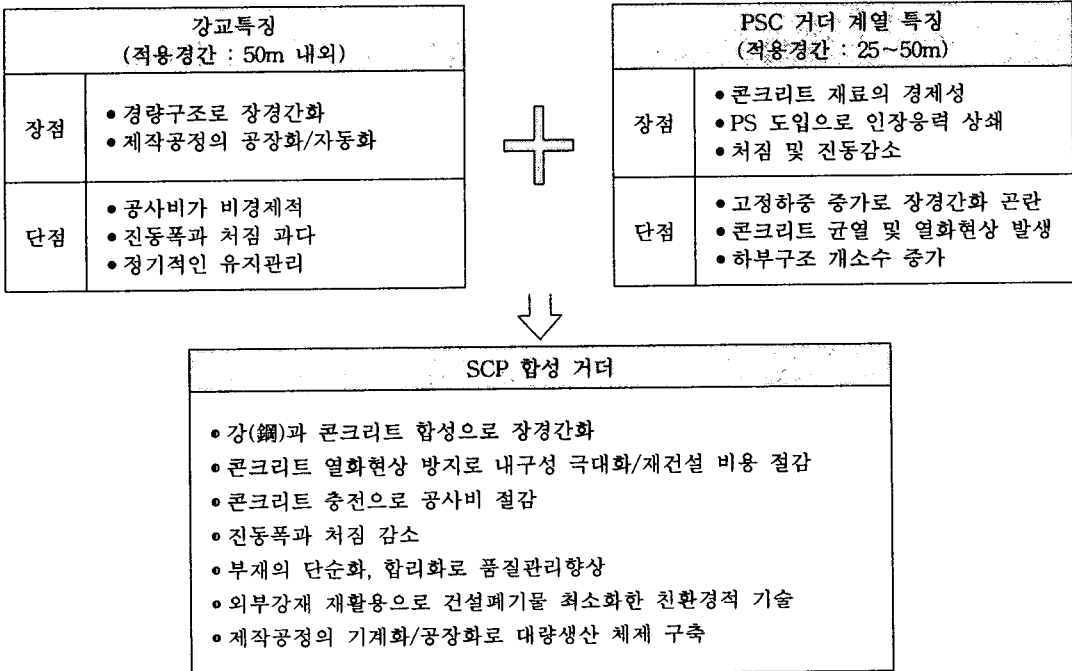
***** 신성건설주식회사 평택철구 공장장

2. SCP 합성거더 특성

2.1 개발배경 및 목적



2.2 기술적 특성



2.2.1 신규성 측면

외부강재 거푸집을 이용하여 거더를 제작하는 기존의 PSC 계열의 I형 거더 형태와는 달리 I-거더 형상으로 강재를 제작하여 내부 중공부에 PS강재를 배치하고 콘크리트를 타설하여, 일체화시킨 복합구조 교량으로 외부강재가 내부콘크리트와 합성작용을 통해 단면효율을 극대화시키고 강성을 높여주므로서 효율적으로 처짐과 진동을 감소시켜 교량경간장을 경제적으로 장경간화 할 수 있는 새로운 개념의 합성거더 공법임.

2.2.2 진보성 측면

- (1) 외부강재를 거푸집 용도로만 사용하였던 기존의 관념에서 탈피한 새로운 개념의 복합구조형식으로 철근 가공조립 생략 및 부재를 단순화(합리화)하여, 시공성 및 경제성을 향상시켰으며, 강과 콘크리트의 장점을 최대한 살려줄 수 있는 합성거더 공법으로 비틀림과 전단에도 효율적으로 저항할 수 있는 구조임.
- (2) 쉬스관의 정확한 위치 고정을 위해 평철을 이용한 고정간격재 제작 설치로 쉬스관 설치기술 개선, 작업 효율성 향상으로 콘크리트 타설시 쉬스관 위치 변형(유동성) 사전방지, 주형 대조립 작업시 주형자립 역할로 시공시 안전관리 향상도모 및 정확한 긴장력 도입으로 구조안전성 확보에 기여
- (3) U형 클램프를 이용하여 쉬스관을 간격재에 고정시키므로서 작업공정이 단순화(용접 불필요)되며, 쉬스관 유동성이 적어 제작정밀도를 획기적으로 향상시켰음.

2.2.3 현장 적용성(보급성) 측면

PSC 교량을 포함한 콘크리트 교량은 강도에 비해 중량이 큰 것이 단점이며, 강교는 경제성 극복이 최대 과제이나 본 기술은 강과 콘크리트의 장·단점을 상호 보완하여 일체화시킨 복합구조 형식으로 한정된 지간에만 적용되는 것으로 인식되고 있는 기존 교량형식의 단점을 개량한 새로운 개념의 교량형식이며, 45~70m의 대체교량 보급으로 교량 계획시 선택의 폭을 넓혀줄 것으로 판단됨.

2.2.4 안정성 측면

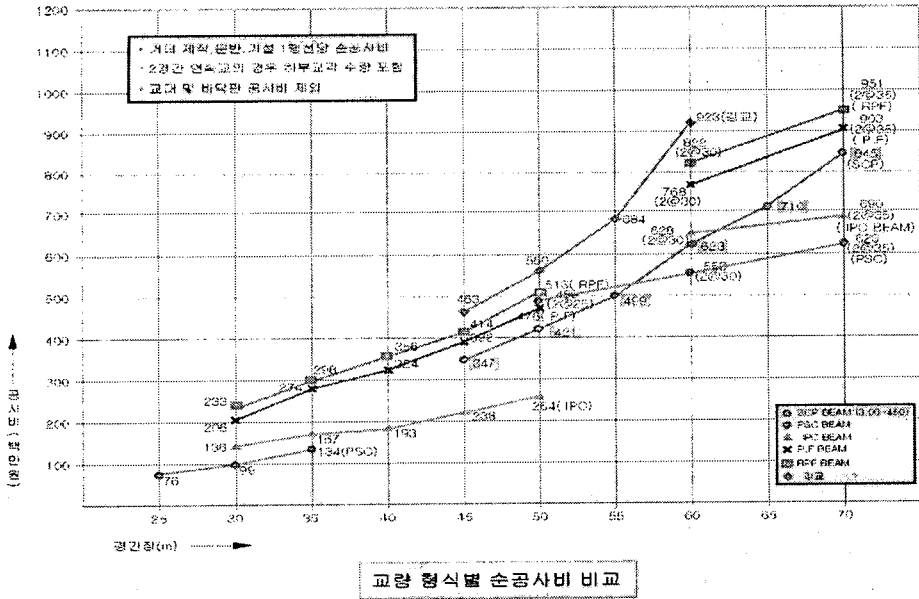
교량 구조물은 사회간접 자본시설로서 많은 사람들이 이용하므로 붕괴사고시 대형 참사를 불러올 수 있는 중요한 구조물로 본 신청기술인 SCP 합성거더 시공기술은 교량의 안전성을 최대한 보장시킨 공법이다. 외부강재와 콘크리트를 합성시켜 강성을 극대화하여 극한 하중작용시 거더 외부 강재가 충전된 내부 콘크리트를 구속(Confine 효과)시켜 거더 좌굴에 의한 붕괴를 방지하며, 거더 내부 콘크리트가 균열 또는 파괴되어도 외부강재와 내부 강연선이 저항하고 있어 안전성이 우수하고 붕괴에 안전한 것이 본 기술의 특징이다.

2.2.5 환경친화성 및 유지관리 편리성 측면

외부 강재가 염해 및 중성화 피해로부터 거더내부 콘크리트를 보호하고 있어 내구성 증진에 따라 교량 수명을 극대화하여 주므로서 유지관리 및 재건설 비용을 절감시켜주고, 교량 해체시에도 외부강재는 재활용이 가능하므로 건설산업폐기물을 최소화 할 수 친환경적 기술임.

2.3 경제적 특성

교량건설 비용을 비교하기 위하여 각 상부구조 형식별 적용경간장에 따른 공사비를 통해 경제성 분석을 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.



2.4 SCP 합성거더의 설계개념 및 적용범위

콘크리트를 둘러싸고 있는 외부의 강판이 전단 연결재에 의해 내부콘크리트와 합성됨에 따라 콘크리트 내부에는 철근 배근이 필요하지 않게 된다. 인장을 받게되는 거더의 최하단에 강재를 배치함으로써 PS 강재와 더불어 인장력에 저항하며, 콘크리트의 인장균열로 인한 철근의 부식 등 균열 발생 메카니즘의 형성으로 인한 내구성저하의 가능성을 근본적으로 차단할 수 있는 새로운 개념의 복합구조 교량형식으로 45~70m의 장경간과 낮은 형고를 실현시켜주므로써 지금까지의 교량형식에서 경간장 제한으로 인해 기술적으로 채택이 용이하지 않았던 구간에 대체교량형식으로 효과적으로 사용할 수 있어 교량 건설공사에 폭넓게 활용될 것으로 판단된다.

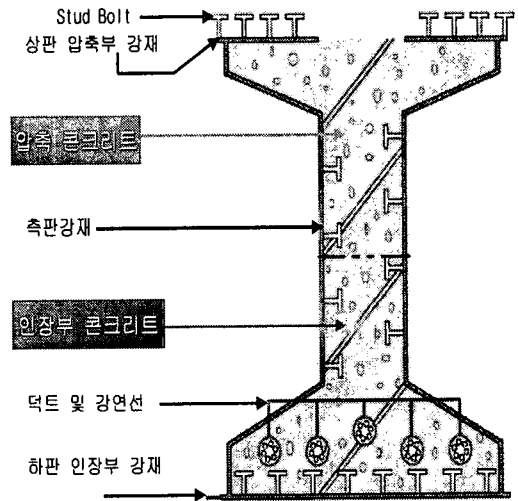


그림 1 SCP 합성거더의 단면형상

2.5 SCP 합성거더의 시공방법

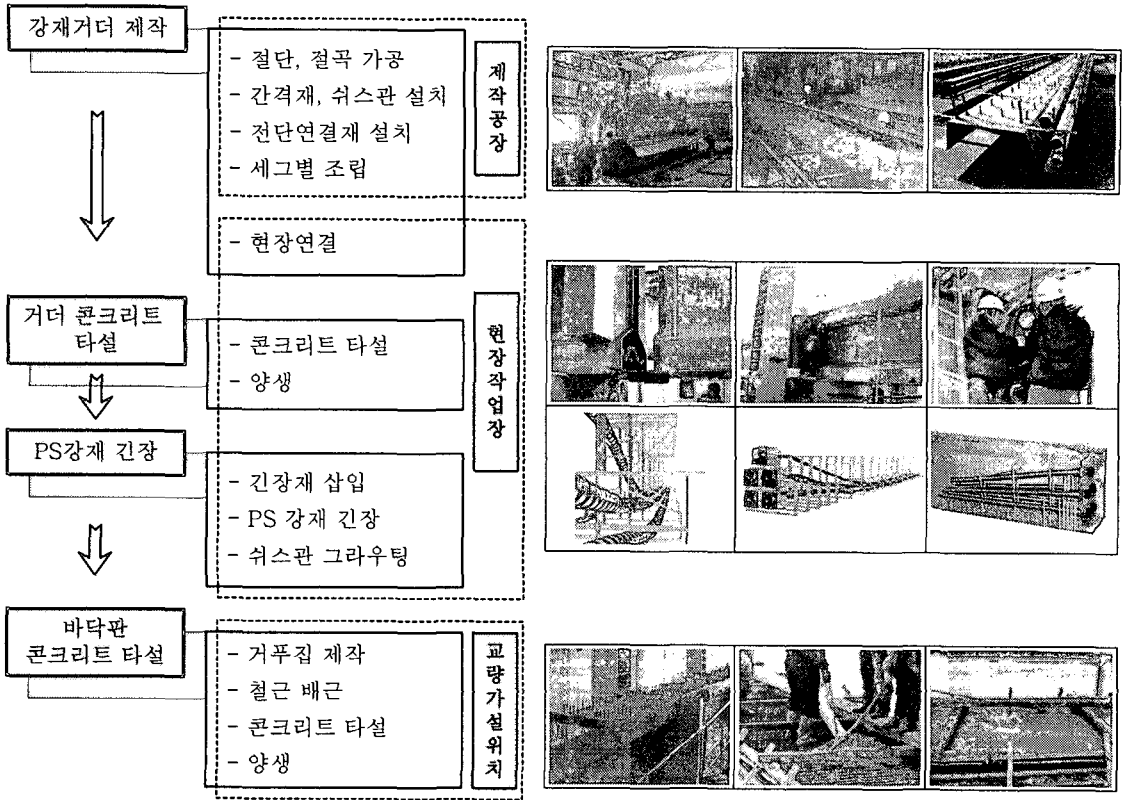


그림 2 SCP 합성거더 시공절차

3. SCP 합성거더 실물 재하실험

SCP 합성거더는 전례를 찾기 어려운 구조형태로서 발생가능한 문제점의 발견과 해결을 위한 이론적 접근에 앞서 실물모형의 제작 및 실험을 통해 실제 교량에 적용가능성을 우선 검증하고자 하였다. 본 실험에서는 1등급 교량에 기준하여 지간 49.0m(교장 50.0m)의 거더를 실물크기로 제작하여 설계하중과 극한하중에 따른 처짐과 변형률 등의 구조적 거동을 측정, 분석하였다. 이러한 실험결과는 이론적인 계산값과 비교, 분석함으로써 SCP 합성거더의 해석 및 설계이론의 타당성을 검증하고 실거동 양상의 분석을 통해 구조적 안전성과 실적용 가능성을 확인하였다.

3.1 하중의 재하

사용하중 상태에서 SCP 합성거더의 거동을 파악하기 위하여 거더 중앙부에 설계활하중(DB-24, DL-24)과 동일한 내력을 발생시키는 집중하중 40 tonf을 재하하였다.

극한하중 상태에서 SCP 합성거더는 외부에 둘러싸인 강재의 구속효과로 인해 거더보다는 바닥판 콘크리트의 파괴가 우선 발생할 것으로 예측되나 파괴메카니즘을 관측하기 위하여 실험시설의 여건과 용량이 허락하는 최대하중인 300 tonf을 지간중앙부에 재하하여 거더내의 파괴상태를 관측하고, 합성작용에 따른 잠재적인 안전여유치를 추정하고자 하였다.

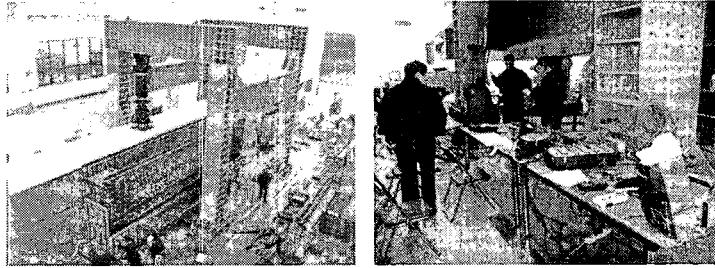


그림 3 하중재하 전경

하중의 제어는 MTS 장비를 이용하여 사용하중(40 tonf)까지는 5 tonf씩, 이후부터는 매 10 tonf씩 증가시켜 재하하였으며, 시험체의 가속도를 측정하기 위해서는 중앙경간의 가력기를 이용하여 약 5 tonf의 하중을 가한 상태에서 하중을 급속히 제거하여 구조물의 자유진동이 발생되도록 하였다.

3.2 계측방법

SCP 합성거더의 정적거동 계측을 위해서 정적변위계와 변형률 게이지를 설치하였다. 변위계는 하중 재하점인 중앙점과 중앙점에서 8.0m 떨어진 위치에 설치하였다. 또한 L/4 지점과 단부에서 거더의 축방향 변위를 계측하기 위하여 양단부에도 각각 변위계를 설치하였으며, 시험체의 동적거동 특성파악을 위하여 거더 중앙부에 가속도계를 설치하여 구조물이 자유진동하도록 한 후 동적데이터 로거(Megadac 3415)를 이용하여 동적계측을 수행하였다.

3.3 정적실험결과

SCP 합성거더의 사용상태에서 최대설계활하중에 대응하는 40 tonf의 집중하중을 5 tonf씩 증가시켜 재하한 결과 거더는 사용하중 상태에서 선형거동을 하며, 수차레의 재하 및 제하를 통해 거더의 탄성회복을 확인할 수 있었으며, 거더의 파괴거동양상 및 파괴메카니즘의 관측을 위해 시간중앙부에 300 tonf을 재하하였으나, 바닥판의 균열만이 관측되고 파괴상태에 이르지 않아 추가적으로 260 tonf을 재하하였으나 역시 거더는 파괴되지 않았으며, 거더의 거동분석은 중앙점에 재하된 300 tonf에 대해서 실시하였다.

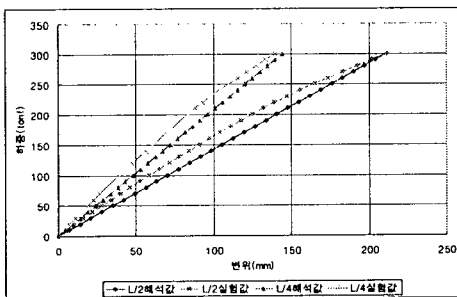


그림 4. 하중-변위선도

표1 거더콘크리트 응력의 설계값과 실험값의 비교
(단위 : kgf/cm²)

구분	0 tonf	40 tonf (설계하중)	200tonf	300tonf	560tonf (최대하중)
상단	설계	-105.47	-133.26 (-244.38)	-	-
	실험	-	-133.22	-224.26	-330.03
하단	설계	-76.62	-32.60 (143.5)	-	-
	실험	-	-40.35	133.36	314.80

*()안의 값은 허용값을 초과한 탄성해석에 의한 가정값임.

*거더콘크리트의 허용휨압축응력=186.3 kgf/cm², 허용인장응력=0

약 200 tonf의 하중이 작용할때까지 하중-변위 곡선은 선형거동을 하고 있으며, 200 tonf이 초과하면서 처짐의 큰 변화를 나타낸다. 그러나 200 tonf의 하중이 작용할 때까지 바닥판 콘크리트를 포함하여 거더의 외관상으로는 어떠한 균열이나 국부적인 손상도 관측되지 않았다.

3.4 동적실험결과

SCP 합성거더의 동적거동 특성을 확인하기 위하여 진동실험을 실시하였다. 측정된 가속도를 분석한 결과 고유진동수는 약 2.0Hz로 나타났으며, 50m 내외의 경간을 갖는 박스형태 교량의 고유진동수가 2.0~3.0Hz인 것에 비추어 I형단면의 SCP 합성거더의 고유진동수는 기존교량형태의 공용 수준과 유사한 것으로 판단된다.

3.5 하중재하에 따른 구조물의 형태

거더 중앙점의 300tonf과 8.0m 떨어져 260tonf의 하중을 재하하였을 때의 중앙부 처짐은 578.6mm로 측정되었다. 하중증가에 따른 구조물의 육안관찰결과 최초의 손상은 중앙점에 위치한 가력기의 하중이 약 300tonf에 도달했을때 가력지점부인 지간 중앙부 바닥판 콘크리트의 균열이 관측되었으며, 560 tonf의 최고 재하하중 상태까지 바닥판의 압축파괴 양상 이외에는 어떠한 손상도 관찰할 수 없었다. 하중을 제거하자 약 99.0mm의 잔류변형을 남기고 하중재하시 발생되었던 처짐은 회복하였다. 이러한 결과는 본 거더가 항복에 도달할 때까지 상당한 처짐을 나타내므로 충분한 연성을 확보하고 있으며 하중재하로 발생되었던 처짐의 대부분이 하중이 제거되면 회복되므로 안전성 면에서도 유리한 특성을 나타내고 있어 SCP 합성거더는 충분한 안전성과 강성, 연성을 갖고 있는 것으로 결론을 내릴 수 있었다.

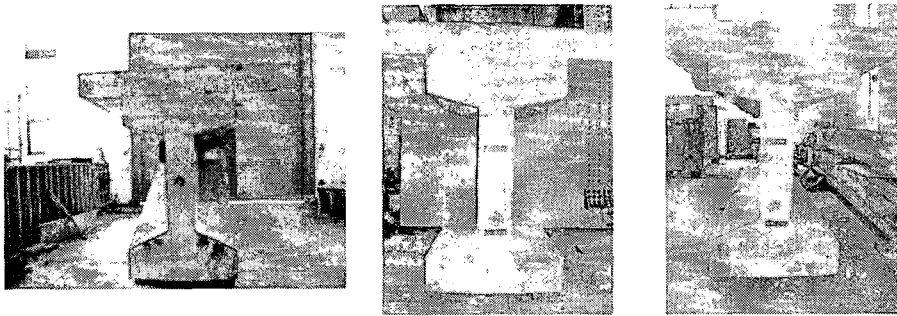


그림 5 SCP 합성거더의 절단면

실험종료후 시험체를 10등분(5cm)하여 단면상태를 관찰한 결과 거더 콘크리트가 강재내부에 채워짐으로서 육안관찰할 수 없었던 수분의 잔류, 공극의 생성, 재료의 분리, 균열의 발생 등 제작전 우려했던 문제들은 관찰되지 않았다.

4. 결 론

강재와 콘크리트의 합성을 통해 새로운 개념의 교량 상부구조형식인 SCP 합성거더의 구조설계 및 제작과정에 대한 연구와 실적용성 확보를 위한 실물모형의 제작과 재하실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

첫째, SCP 합성거더는 외부 강재와 내부 콘크리트를 합성시켜 강성을 키움으로서 효율적으로 처짐 및 진동을 감소시키고, 콘크리트의 인장응력에 대응하기 위하여 PS강선을 도입함으로써 낮은 형고의 장경간 교량에 적용이 가능하다.

둘째, 실물모형실험을 통해 처짐, 응력 등 사용하중 상태에서의 구조적 안전성은 매우 높은 것으로 나타났으며, 실 교량에 부합할 수 있는 보다 유연한 설계가 가능할 것으로 판단된다. 또한 극한하중에 대해서도 외부강재의 구속작용에 의해 구조물의 안전성이 매우 높은 것으로 나타났다.

셋째, 합성거더의 내부콘크리트가 강재에 둘러싸여 육안관찰이 불가능함으로 제작시 우려되는 공극 발생, 수분잔류, 재료분리 등의 문제는 발생되지 않았으며, 사용하중 상태에서 콘크리트는 전단면 압축 상태이므로 균열은 발생되지 않으며 콘크리트가 대기중에 노출되지 않으므로 균열진전 메카니즘 또한 형성되지 않을 것으로 판단된다.

넷째, SCP 합성거더는 설계자동화, 공장자동화 제작에 의한 대량생산과 강재보강재, 철근배근, 주형 거푸집 등에 소요되는 재료 및 노무비의 절감을 통해 새로운 교량 대안형식으로서 경제성을 확보할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원, “도로설계편람(III)”, 건설교통부, 2000.
2. 한국도로교통협회, “도로교설계기준”, 건설교통부, 2000.
3. 한국콘크리트학회, “콘크리트구조설계기준”, 건설교통부, 1999.
4. AASHTO, “Standard Specifications for Highway Bridges (16th Edition)”, 1996.
5. Lei Zhao, Rigoberto Burgueño, Henriette La Rovere, Frieder Seible, and Vistasp Karbhari, “Preliminary Evaluation of the Hybrid Tube Bridge System”, University of California, San Diego, Report No. TR-2000/04, 2000.
6. William Weaver, Jr. and James M. Gere, “Matrix Analysis of Framed Structures (3rd Edition)”, Chapman & Hall, 1990.
7. NCB研究會編, “合成構造と橋”, 山海堂, 1996.
8. 保坂鐵矢, 杉本一郎, “鐵道における最近の鋼・コンクリート複合橋梁”, 橋梁と基礎, pp.31~40, 2000. 7.
9. 野村國勝, 梶川靖治, “複合構造橋梁”, 技報堂出版, 1994.
10. 園田惠一郎, “複合構造”, 橋梁と基礎, pp.23~29, 1997. 8.
11. 日本道路協會, “道路橋 示方書・同解説”, 1997.
12. 日本土木學會, “鋼・コンクリート 合成構造の 設計ガイドライン”, 1994.