

고강도 PSC BEAM 교량의 휨거동

Flexural Behavior of PSC Beam Using High Strength Concrete

정 원 기 *	이 형 준 **	이 규 정 ***
Chung, Won Ki	Lee, Hyung Jun	Lee, Kyu Jung
윤 석 구 ****	한 승 환 *****	김 기 수 *****
Yoon, Suk Koo	Han, Seong Hwan	Kim, Ki Soo

ABSTRACT

Structural tests of the PSC Beam bridge using high strength concrete, concrete compressive strength 700kg/cm^2 , are conducted for the application including durability and serviceability of the bridge. Current design safety factors with respect to the jacking force and the service design load DB-24 are applied to the design of the bridge. Concrete compressive strength 700kg/cm^2 , girder depth 2.3m, girder space 3.2m, span length 20m, and slab thickness 27cm are selected for the bridge test. The Bulb-Tee section of the girders is applied instead of I section because it is well known more stable to the longer span(40m). Static load test(4 beams) with composite and non-composite section, and fatigue load test(1 beams) with composite section are conducted. Crack moment, ultimate load, deflections with load steps, and strains of the beam section for those bridges are investigated. The structural test results of the bridges showed a good performance for a safety and a serviceability.

1. 서론

선진외국에서는 이미 고강도콘크리트의 교량적용이 일반화되었으며 특히 장대교량에 많이 적용되고 있다. 특히 미국의 경우 장대교량에 고강도콘크리트를 적용하기도 하지만 PSC beam교량에 많은 관심을 보여주고 있다. 연방도로국(FHWA: Federal Highway Administration)의 적극적인 지원하에 미국내 여러 주 도로국(DOT: Department Of Transportation)에서 고강도콘크리트를 적용한 교량건설에 관한 프로젝트를 활발히 수행중에 있으며, 이들 교량에 타설된 고강도콘크리트의 물리적 특성치 규명뿐만이 아니라 실제 교량의 부재까지도 시험대상으로 조사되었으며 시공된 교량에 대해서는 사용하중하에서 장기적인 계측을 수행하고 있다.

현재 국내에서는 PSC beam 표준설계단면으로 설계압축강도 400kg/cm^2 의 콘크리트를 적용한 지

* 정희원, 동아건설산업(주) 기술연구소, 수석연구원, 공학박사

** 정희원, 한국도로공사 도로연구소, 선임연구원, 공학박사

*** 정희원, 동아건설산업(주) 기술연구소, 선임연구원

**** 정희원, 한국도로공사 도로연구소, 선임연구원, 공학박사

***** 정희원, 쌍용양회공업(주) 중앙연구소, 책임연구원, 공학박사

간길이 25m와 30m 거더단면이 제시되고 있으나, 본 연구에서는 거더의 압축강도 $700\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상, 40m 이상의 지간장을 갖는 장지간 PSC beam교량을 실용화하는 연구를 수행 중에 있다. 이를 위해서 본 연구에서는 고강도콘크리트를 이용한 PSC beam 교량의 구조거동 특성을 규명하기 위하여 지간이 20m인 PSC beam 교량에 대한 실물 구조실험을 수행하였다.

2. 실험변수 및 부재제작

2.1. 실험개요

본 연구에서는 작업성과 내구성을 확보한 고강도콘크리트의 토목구조물예의 적용을 위해 콘크리트 압축강도가 $700\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상인 고강도콘크리트를 이용하여 장지간의 PSC beam 거더교량의 실용화를 위한 연구를 목적으로 수행하였다. 이를 위해 본 연구의 궁극적 목표인 교량의 장지간화를 위해 지간이 40m인 PSC beam 교량을 여러 변수 해석을 통하여 최적설계하였고, 본 실험에서는 고강도콘크리트를 사용한 PSC beam교량의 구조 거동을 규명하기 위해 DB-24 하중으로 지간이 20m인 2차로 교량을 설계하여 이에 대한 구조실험을 수행하였다.

2.2. 실험변수

실험부재의 단면은 고강도콘크리트를 적용한 장지간의 보의 적합한 것으로 알려진 Bulb-Tee 형으로 하였으며, 그림 1과 같이 비합성보, 바닥판을 합성한 2가지 형태에 대하여 실험을 수행하였다

표 1 구조실험 부재의 종류

실험체명	슬래브 합성 유무	실험의 종류
PCS1	비합성	정적 구조실험
PCS2	합성	정적 구조실험
PCS3	합성	정적 구조실험
PCF1	합성	피로시험 후 정적 구조실험
PCS4	합성	장기거동 실험

실험방법으로는 정적실험, 피로실험 및 장기거동 실험을 수행하였으며, 정적실험은 비합성보 1개와 바닥판을 합성한 부재 2개 등 3개이고, 피로실험 및 장기거동 실험을 바닥판을 합성한 부재로 각각 1개에 대하여 실시하였다. 또한 피로시험후 정적시험을 추가하였다(표 1).

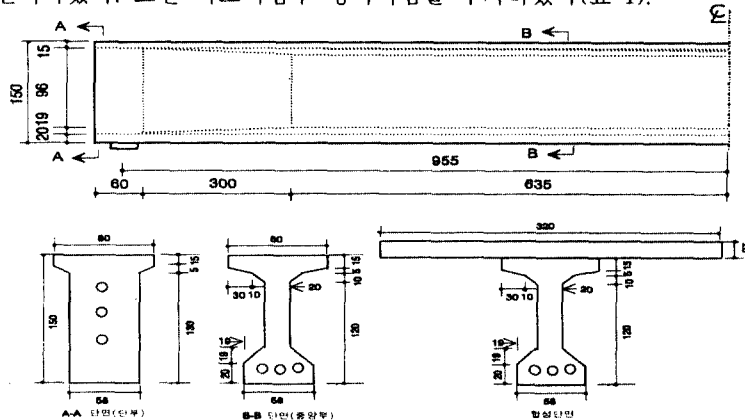


그림 1 PSC Beam 실험부재의 단면

2.3. 실험부재의 설계

실험대상인 지간 20m인 교량의 설계시 적용하였던 긴장시 및 사용하중 작용시의 안전율은 기존의 PSC beam 교량을 설계 및 고강도콘크리트를 이용한 지간 40m인 교량의 설계시 적용하였던 것과 같

은 방법으로 하였다. PSC beam의 단면은 기존의 I형 단면대신에 장지간에 적합한 것으로 알려진 Bulb-T형 단면을 사용하였으며, 고강도콘크리트의 장점을 최대한으로 활용하기 위하여 거더간격을 기존 (2.1m 또는 2.5m)에 비해 큰 3.2m, 거더높이 1.5m로 설계하였으며, 바닥판은 콘크리트의 설계기준강도를 270kg/cm²으로하여 시방규정에 맞게 두께를 27cm로 설계하였다. 실험에 적용하였던 PSC beam 교량의 설계조건은 다음과 같다.

- 지간 : 20m(단순지지)
- 거더간격 : 3.2m
- 설계하중 : DB-24
- 콘크리트 압축강도 : 700kg/cm²
- 긴장재 : $\sigma_{pu} = 19,600\text{kg/cm}^2$, 7연선 27가닥(3텐던, 9@7연선/텐던)
- 바닥판의 콘크리트 강도 및 두께 : 콘크리트 설계압축강도 = 270kg/cm², 두께 = 27cm

2.4. 실험부재의 제작

실험부재의 제작에 사용된 고강도콘크리트는 설계기준강도 700kg/cm², 타설시 슬럼프 18±2cm, 공기량 2±1%를 기준으로하여 배합하였다. 시멘트는 1종 보통포틀랜드 시멘트와 플라이애쉬를 5% 대체한 경우와 3종 보통포틀랜드 시멘트를 사용한 경우 등 2가지로 하였으며, 골재는 최대치수 19mm인 쇄석을 사용하였으며, 유동성을 확보하기 위하여 고성능유동화제를 결합재의 1.3%를 사용하였다.

표 2 콘크리트의 강도특성

구분	슬럼프(cm)	공기량, %	재령별 콘크리트 강도, kg/cm ²				비 고
			3일	7일	긴장시	28일	
정적 실험	Bulb-T빔	15.5	495	605	670(20일)	710	1종시멘트+ 플라이애쉬 5%
	합성	17.0	510	615	678(23일)	740	
	합성	16.5	2.4	611	694	798(31)	798
피로시험체	20.5	2.3	553	624	760(33)	755	조강시멘트
장기거동시험체	21.0	2.1	568	653	768(29)	768	

콘크리트는 배치플랜트에서 배합하여 레미콘 트럭으로 운반하여 타설하였다. 콘크리트 타설 후 초결이 시작되는 시점부터 증기를 주입하여 최고온도를 45℃로 하여 12시간 등온기간으로 하는 증기양생을 실시하였다. 프리스트레스의 도입은 콘크리트 타설후 3주 이상 경과한 후에 실시하였다. 프리스트레스의 도입시 자중이 포함된 보의 캠버는 12mm내외로서 계산 값과 비슷한 결과를 나타냈다. 바닥판의 합성은 실험부재를 설치한 후 현장에서 타설하여 제작하였다. 각 실험부재에 사용된 콘크리트의 슬럼프, 공기량 및 재령별 강도는 표 2와 같다.

3. 구조실험

교량부재에 대한 구조실험은 정적실험, 피로시험 및 장기거동 실험을 수행하였다. 정적실험 및 피로실험을 단순지지조건으로 그림 2와 같이 4점-재하 방법으로 수행하였다. 순 지간길이를 19.1 m로 하여 부재 중앙부 2 m 구간에 순수 휨을 받는 영역이 되도록 하였다.

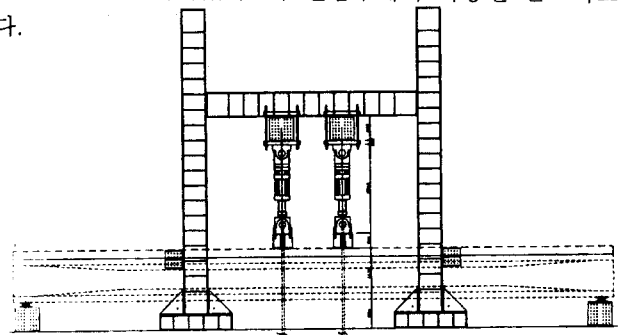


그림 2 PCS Beam 교량 재하장치도

정적실험의 경우 200 ton 용량의 actuator 두 대로 재하였으며, 피로시험의 경우에는 50 ton 용량의 dynamic actuator 두 대로 피로하중을 재하하였다.

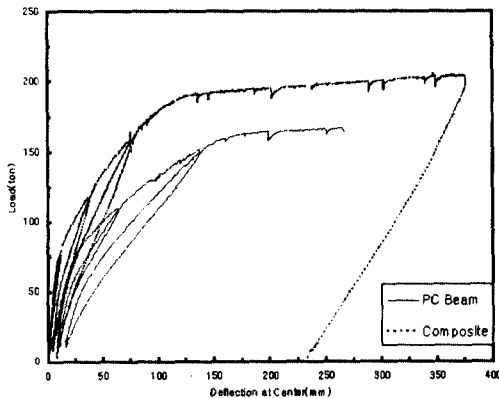
정적실험에서는 극한하중의 85%까지는 하중제어방법으로 하중을 증가시켰고, 그 이후에는 변위제어 방법에 의해 실험을 수행하였다. 피로하중의 크기는 교량의 설계시 사용하였던 활하중에 의한 최대모멘트(충격하중 포함) 190t-m와 같은 등가모멘트를 발생시키도록 4 ton에서 46 ton의 하중진폭을 유지시키고 이와같은 반복하중에 대하여 3.5Hz의 주파수로 2,000,000회 가력하였다.

4. 실험결과

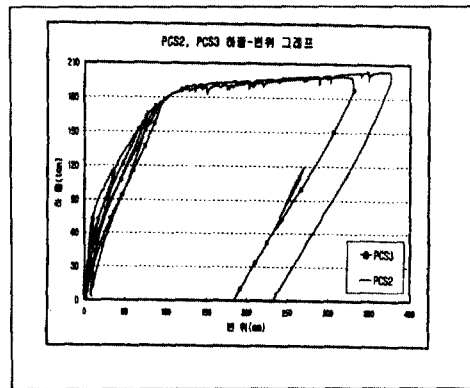
4.1. 정적실험 결과

고강도콘크리트를 적용한 PSC beam 및 바닥판을 합성한 합성부재의 하중-처짐 곡선은 그림 3과 같다. 초기균열이 발생하는 균열하중(표 3)은 비합성부재인 경우에는 $P_{cr}=70$ ton, 합성단면의 경우 최대 $P_{cr}=77$ ton으로 콘크리트의 휨인장강도로부터 계산된 비합성 및 합성단면의 균열모멘트보다 PCS3부재를 제외하고 조금 크게 나타났다. 합성부재의 균열모멘트는 최대 설계활하중(충격하중 포함)에 의한 모멘트(190t-m)보다 약 1.7배 큰 것으로 나타났다.

또한, 극한하중은 비합성단면의 경우, 167 ton, 합성단면의 경우 약 200 ton으로 각각 나타났다. 이는 설계 극한모멘트보다 각각 약 19, 30% 큰 것으로 나타났다. 부재가 극한모멘트에 도달한 후에도 충분한 연성을 확보하고 있어 합성부재의 경우 처짐이 37cm이상 발생하여도 같은 극한모멘트를 유지하고 있는 것으로 나타났으며, 비합성단면인 경우에는 처짐이 27cm 발생했을 때 보의 상부플랜지에서 압축파괴가 발생하였다. 이는 PSC beam 교량의 극한설계는 합성단면을 기준으로 하기 때문에 고강도 콘크리트를 사용하여도 파괴시 연성을 충분히 확보하고 있음을 나타내고 있다.



a) 비합성부재(PCS1)와 합성부재(PCS2)의 거동



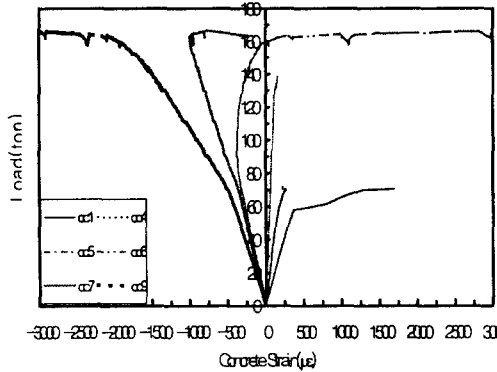
b) 합성부재(PCS2와 PCS3)의 거동

그림 3 정적실험에 의한 하중-처짐 곡선

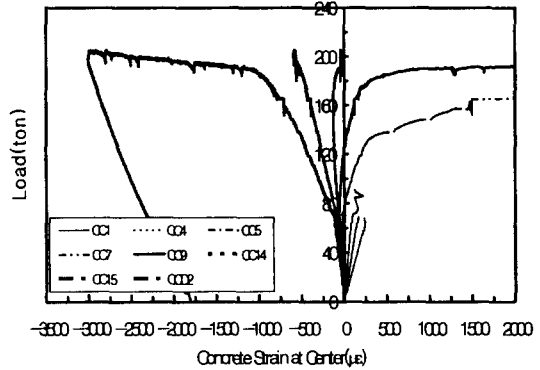
그림 4는 비합성 및 합성부재의 하중에 따른 변형도를 나타낸 것이다. CC1은 보의 하면에서의 변형도이고, 압축연단에서의 콘크리트 변형도는 비합성단면의 경우 CC9, 합성단면의 경우 CCD2이다. 두 경우 모두 극한 상태에 도달할 때는 콘크리트의 압축변형도가 0.003에 도달하는 것을 보여주고 있다.

표 3 정적구조실험 결과

실험체 명	균열하중(ton)		극한하중(ton)		최대변위(mm)
	실험	설계값	실험	설계	
PCS1(비합성)	70	60	167	140	257
PCS2(합성)	77	65	205	154	364
PCS3(합성)	61	65	199	154	320
PCSF1(합성,피로)	73	65	202	154	402



(a) 비합성부재의 경우(PCS1)



(b) 합성부재의 경우(PCS2)

그림 4 콘크리트 변형도-하중 관계

4.2. 피로실험 결과

피로실험은 4 ton에서 46 ton의 하중진폭으로 3.5Hz의 주파수로 200만회를 가력하였다. 각각의 지수별(1, 10, 10², ..., 10⁶) 반복하중 후 하중진폭만큼 정적실험을 실시하였다. 반복회수에 따라 잔류 변형은 다소 발생하나 강성의 저하 및 균열이 발생하지 않았다(그림 5). 이로부터 차량의 설계하중에 대한 피로실험 결과 부재는 균열단면 이전의 단계에서 탄성적으로 거동하며 사용성에 문제가 없는 것으로 판단된다. 피로실험후 정적실험을 실시하였다(그림 6). 실험결과 피로하중 없이 실시한 PCS1, PCS2부재와 거의 유사한 거동을 보여주고 있다. 또한 정적실험에서 부재의 강성변화와 손상의 정도를 측정하기 위해 표 4와 같이 각 하중단계 별 고유진동수를 측정하였다. 초기 휨 균열이 발생시까지 고유진동수(8.85 Hz)가 거의 변화가 없었으며 극한하중이 도달 후 고유진동수가 5.5 Hz로 38%의 감소를 보였다. 따라서 unloading후 강선에 의한 휨강성 회복률이 양호하여 균열의 초기단계까지는 초기의 강성을 그대로 유지되는 것으로 나타났다.

표 4 하중단계별 고유진동수

5. 결론

본 연구에서는 작업성과 내구성을 확보한 고강도콘크리트의 토목구조물에의 적용을 위해 콘크리트 압축강도가 700kg/cm²이상인 고강도콘크리트를 이용하였다. 장지간의 고강도 PSC beam 거더교량의 실용화의 일환으로 PSC beam 교량의 휨거동 특성을 규명하기 위한 구조실험을 수행하였다. 장지간에 유리한 Bulb-Tee형 단면으로 지간

측정단계	0 ton	74 ton	120 ton	156 ton	202 ton
고유진동수	8.85	8.85	8.80	8.55	5.5
고유진동수 감쇄비	1.00	1.00	0.99	0.97	0.62

20m, 거더높이 1.5m, 거더간격 3.2m 및 바닥판 두께 27cm인 고강도콘크리트 PSCbeam 교량을 DB-24 하중에 대해 설계하여 PSC beam 자체 즉, 비합성부재에 대한 정적실험, 바닥판을 합성한 합성부재에 대한 정적실험, 합성부재에 대한 피로시험 및 장기거동실험을 수행하며, 이를 통해 고강도콘크리트를 적용한 PSC beam 교량의 안정성과 사용성을 규명하고자 하였다.

고강도콘크리트를 사용한 PSC beam 교량의 실 부재에 대한 구조실험 결과 균열모멘트는 계산된 값과 유사하게 나타났고, 설계하중(DB-24하중)의 약 1.7배로 충분한 안정성을 확보하고 있는 것으로 나타났으며, 극한모멘트는 계산 값보다 비합성의 경우 14%, 합성의 경우 약 30% 각각 크게 나타났다. 또한, 최대 40cm의 처짐이 발생할 때까지 극한하중을 유지하고 있어 파괴시 충분한 연성(ductility)을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 차량의 설계하중에 대한 피로실험(200만회) 결과 부재는 균열단면 이전의 단계에서 탄성적으로 거동하며 사용성에 문제가 없는 것으로 판단된다.

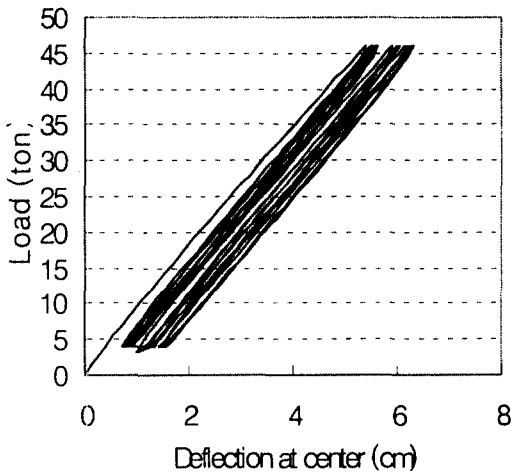


그림 5 피로실험의 하중-변위 거동

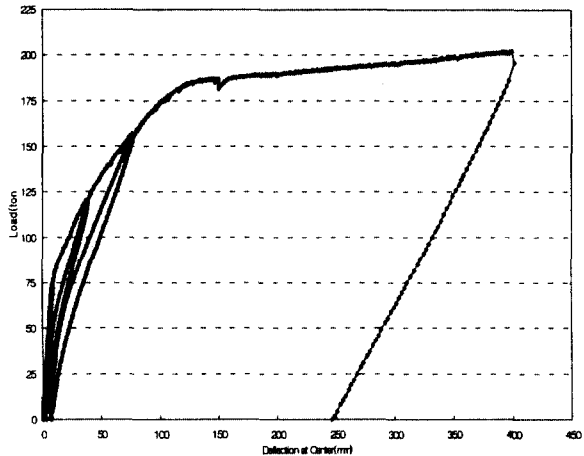


그림 6 피로실험후의 정적 하중-변위 거동

참고문헌

1. 한국도로공사, 동아건설산업(주), 쌍용양회공업(주), “콘크리트 장경간보 개발에 대한 연구(I)”, 1997. 12
2. 정원기, 윤석구, 이형준, 이규정, “고강도콘크리트를 적용한 장경간 PC빔 교량의 개발”, 대한토목학회 학술발표회, 10, 1998
3. M. L. Ralls, R. L. Carrasquillo, N. H. Burns (1996) “Texas High Performance Concrete Bridges”, 4th International Symposium on Utilization of High-Strength / High-Performance Concrete, Paris, 1996
4. B. W. Russell, “Impact of High Strength Concrete on the Design and Construction of Prestressed Girder Bridges”, PCI Journal Jul.- Aug., 1994, pp.76-89
5. T. A. Durning and K. B. Rear, “Braker Lane Bridge - High Strength Concrete in Prestressed Bridge Girders”, PCI Journal.
6. R. N. Bruce, B. T. Martin and H. G. Russell, “Feasibility Evaluation of Utilizing High Strength Concrete in Design and Construction of Highway Bridge Structures”, Louisiana Transportation Research Center, Jan., 1994