

PSC 바닥판의 정적거동특성에 관한 연구

A Study on the Static Behavior of PSC Bridge Decks.

주봉철*** 김영진** 이정우*** 김병석* 박성용*** 이필구****

Joo, Bong Chul Kim, Yung Jin Lee, Jung Woo Kim, Byung Suk Park, Sung Yong Lee, Pil Goo

ABSTRACT

The long span PSC deck of composite girder bridge should be needed in order to improve the endurance and to simplify the structure of the steel bridge. However, there have been few domestic research activities about long-span PSC decks for the steel bridges with a small number of girders.

In this study, a literature survey is performed to develop a new deck system for the steel bridge with a small number of girders. By considering the characteristics of a small number of girders bridge system, a cast-in-place long span PSC deck is proposed for a small number of girders bridges. To examine structural behavior and safety of the proposed PSC deck, the real scale partial models of the deck(12m×3.2m) are tested under the static loading. In the test, the failure mode and behavior of each specimen, and ultimate load carrying capacity of the proposed PSC deck are identified.

1. 서론

최근 내구성 향상과 교량 구조의 간략화, 현장작업의 감소등을 목표로, 강합성교에서 장시간 프리스트레스트 콘크리트(PSC) 바닥판이 필요하게 되었다. 기존 철근콘크리트(RC) 바닥판에 대하여 극한내력과 전단내력을 연구한 문헌자료는 일부 있지만, 2·3거더교와 같은 소수거더교량의 적용에 필요한 광폭의 횡방향 프리스트레스트 콘크리트(PSC) 바닥판에 대한 국내 연구 실적은 빈약하다. 그리고 안전성 검토를 위한 재하 실험은 거의 실시된 적이 없다. 따라서 본 연구에서는 PSC 바닥판의 설계 및 시공기술의 기초 데이터를 제공하고자 PSC 바닥판의 실물 부분 모델을 제작하고, 정적 재하실험을 수행하였다. 실험공간과 장비의 제약으로 실험대상교량을 교축방향으로 절단한 부분모델을 제작하였으며, 단부는 유한요소 해석을 통해 강성을 보강하여 연속성을 모사하였다. PS 강연선의 배치 간격을 실험 변수로 40cm, 80cm 간격의 실험체 2개를 제작하였다. 정적하중 재하실험은 포항산업과학기술연구원 강구조연구소(RIST)에서 실시되었으며, 각 실험체의 거동특성과 파괴형태 및 극한강도를 파악하고 서로 비교하였다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 구조시스템그룹 수석연구원
** 정회원, 한국건설기술연구원 구조시스템그룹 선임연구원
*** 정회원, 한국건설기술연구원 구조시스템그룹 연구원
**** 정회원, 포항산업과학기술연구원 강구조연구소 토목구조연구팀 선임연구원

2. 실험체의 설계 및 실험방법

본 연구의 실험대상 교량은 경간길이가 50m인 강합성 2거더교로서 1등급교이다. 두께는 바닥판 지간 중앙부는 35cm이고, 거더 지점부가 45cm, 캔틸레버 단부가 25cm이다. 거더사이 거리는 6m이며 캔틸레버 길이는 2.915m로서, 전체 교폭은 11.83m이다. 텐더는 횡방향으로만 배치되어 있으며, 바닥판 중앙부에서는 바닥판 상면으로부터 22.5cm이고 지점부에서는 12.5cm인 포물선형태로 배치된다. 바닥판을 모델링하여 실험하고자 할 때, 정상적인 판 거동을 파악하기 위해서는 단변과 장변의 길이비가 1:2이상 필요하다. 그러나 운반과 설치시 실험공간상의 제약으로 그림 1과 같이 교축방향으로 길이 3.2m만을 선택하였다.

또한, 거더와 합성된 형태로 실험하는 것이 원칙이지만 거더를 포함하면 운반과 설치가 곤란하다. 그래서 거더를 생략하고, 거더를 생략한 지점위를 단순지지가 되도록 롤러와 힌지의 선받침 형태로 지지하였다. 도로교설계기준에 따르면, 거더 수가 3개이상인 경우에는 연속 바닥판으로 취급하지만 2개인 경우에는 단순 바닥판으로 설계하도록 규정하고 있다. 캔틸레버가 길고 거더와 합성된 바닥판은 중앙부의 최대 정모멘트가 단순지지에 비해 작아지므로 실험체에서는 실제 교량에서보다 휨모멘트측면에서 훨씬 불리한 조건이 된다. 또한 거더의 구속이 없으므로 바닥판에서 일반적으로 발생하는 아치효과(면내 압축력)가 미약할 것으로 생각된다. 그러므로, 실험을 통해 획득된 최대하중은 실제 극한강도보다 작을 것으로 예상된다. 따라서, 실험체에서 도출된 최대 하중은 실제 바닥판 극한 하중의 하한 값(lower bound value)이 될 것으로 생각된다.

교축방향(배력철근방향)의 양변(단변)은 교축방향의 연속성을 재현하기 위해 강성보강을 실시하였다. FEM해석을 통해 바닥판 중앙 교축과 교축직각방향 모멘트가 실무모델과 부분모델이 거의 일치하도록 강성을 결정하였다. 결정된 강성에 맞는 H형강을 단변 방향으로 설치하였다. 하중 재하면적은 도로교설계기준의 차륜접지면적에 관한 규정에 따라 DB24의 후륜하중을 기준으로 교축방향 23.1cm, 교축직각방향 57.7cm로 하였다.

재하방법은 바닥판 시험체의 중앙에 60tonf의 집중하중을 재하하고 균열을 관측한 후 하중을 제거한다. 그리고 잔류변형을 측정하고 균열 게이지(Crack Gauge)를 설치하였다. 다시 하중을 재하하여 바닥판 주철근이 항복할 것으로 추정되는 시점까지 2차 하중을 하중제어 방법(load control)으로 가력하였다. 그 후 하중을 다시 제거하고 잔류변형을 조사한 다음, 하중제어 방식을 변위제어(deflection control)로 변경하여 최종파괴될 때까지 재하하였다. PS 강연선의 배치간격을 40cm와 80cm로 구분하여 다음과 같이 실험체명을 구분하였다.

- (1) PSC40 : PSC바닥판, PS강연선 배치 간격 C.T.C. 40cm
- (2) PSC80 : PSC바닥판, PS강연선 배치 간격 C.T.C. 80cm

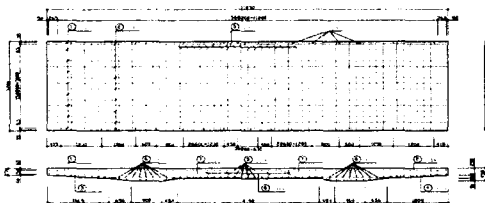


그림 1 실험체 단면



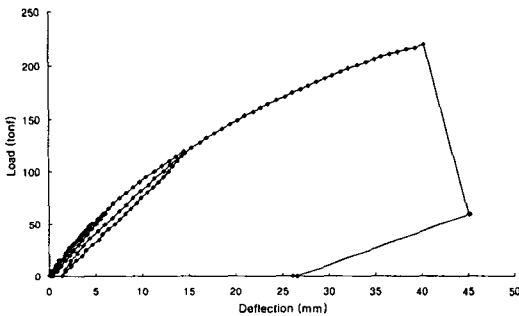
그림 2 정적재하 실험장면

3. 시험 결과 분석

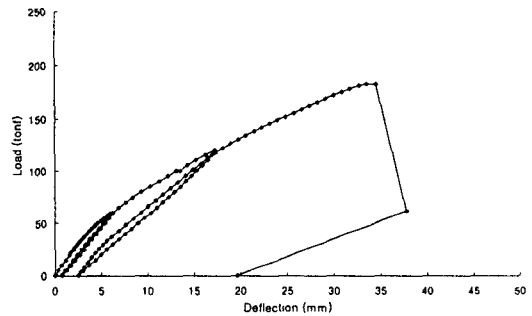
3.1 처짐 특성

그림 3은 각 실험체 하면 중앙점에서 처짐계(L.V.D.T.)로 측정한 변위와 하중에 대한 관계곡선을 나타낸 것이다. 두 시험체 모두 하중이 제거되면 선형구간에서는 잔류변형이 거의 남지 않는 PSC부재의 특징을 잘 보여주고 있다. 또한 철근항복직전에 하중을 제거한 후 다시 가력하여도 전체적인 하중-처짐 곡선에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

전체적인 하중-처짐곡선은 전형적인 취성파괴의 모습을 나타내고 있으며, 파괴직전까지 뚜렷한 강성의 변화는 나타나지 않고 있다. 초기 하중단계인 약 60tonf이하에서는 두 시험체 모두 기울기가 0.1mm/tonf로 하중에 대한 처짐이 거의 일치하고 있으나, 60tonf 이후 두 시험체는 기울기의 변화가 나타나는데, PSC40은 0.14mm/tonf, PSC80은 0.18mm/tonf로 긴장재 간격이 넓은 PSC80이 PSC40보다 같은 하중하에서 큰 변위를 나타낸다. 그러나, 인장철근이 항복한 이후 두시험체 모두 기울기는 약 0.25mm/tonf으로 하중에 대한 처짐증가량이 비슷해 지는 것을 알 수 있다.



(a) PSC40

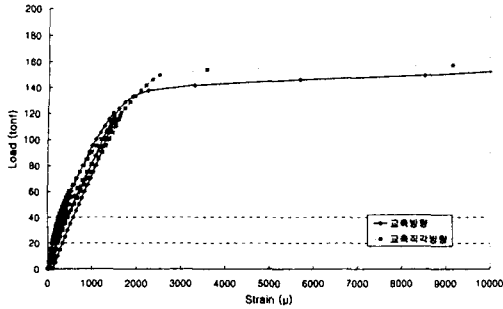


(b) PSC80

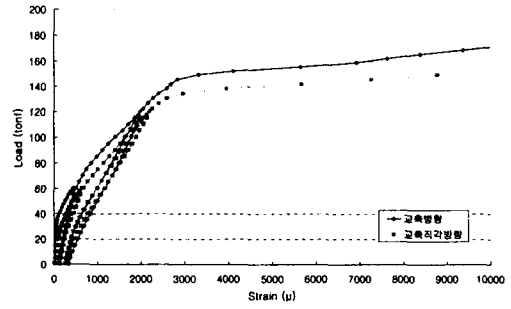
그림 3 하중-처짐 관계곡선

3.2 인장철근 변형률 특성

그림 4는 최대모멘트 지점으로 예상되는 지점에서의 교축방향과 교축직각방향 인장철근에 설치한 strain gauge의 변형률을 실험체별로 나타낸 그림이다. PSC40은 약 137tonf에서, PSC80은 약 135tonf에서 인장철근이 항복하는 것으로 나타났다. 그리고, PSC40은 교축방향의 인장철근이 먼저항복을 하고 이어서 교축직각방향의 인장철근이 항복하였으나, PSC80은 이와는 반대로 교축직각방향의 인장철근이 항복한 이후, 교축방향의 인장철근이 항복하였다. 그러나, 인장철근에 가해지는 응력은 교축방향과 교축직각방향이 비슷하며, 시공상 손상이나 하중의 편심과 같은 실험오차로 인하여 어느 한쪽이라도 먼저 항복하게 되면 힘의 균형을 잃게되어 나머지도 항복하게 되므로, PS강연선의 배치간격이 실험체 중앙부의 인장철근의 변형에 큰 영향이 없는 것으로 판단된다.



(a) PSC40 중앙부



(b) PSC80 중앙부

그림 4 인장철근의 하중-변형률 관계곡선

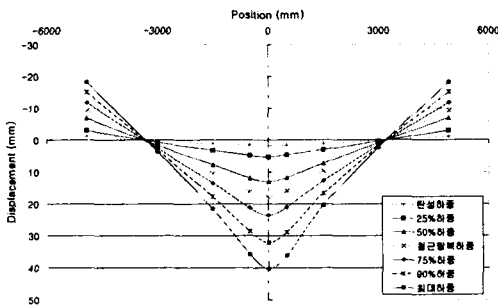
3.3 하중단계별 처짐 특성

본 연구에서는 모든 하중단계에서의 거동특성을 언급하는 것은 불가능하여 최대하중의 25%, 50%, 75%, 90%, 100%, 그리고 탄성하중과 인장철근의 항복하중으로 구분하여 하중단계를 구분하였으며, 각 시험체별 하중단계를 표 1에 나타내었다. 또한, 그림 5와 그림 6은 각 하중단계별로 시험체 중앙에서 교축 및 교축직각방향 처짐곡선을 나타낸 것으로, 각 하중단계에서의 실험체의 곡률을 시각적으로 알아볼 수 있으며, 이를 통해 전체적인 거동 양상을 알 수 있다.

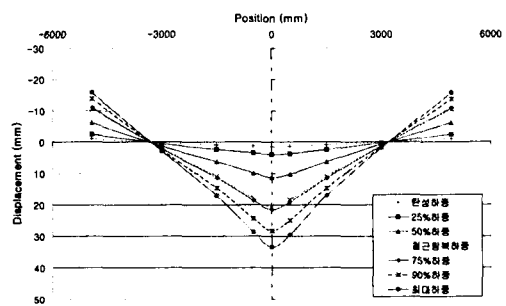
표 1 하중단계별 각 시험체별 측정하중 (단위:tonf)

	PSC40	PSC80
탄성하중	22	20
25%하중 [*])	55	45
50%하중 [*])	110	90
철근항복하중	137	135
75%하중 [*])	165	139
90%하중 [*])	200	166
최대하중	220	183

*) 최대하중에 대한 백분율 비례하중을 나타낸 것임.



(a) PSC40



(b) PSC80

그림 5 하중단계별 교축직각방향의 변위곡선

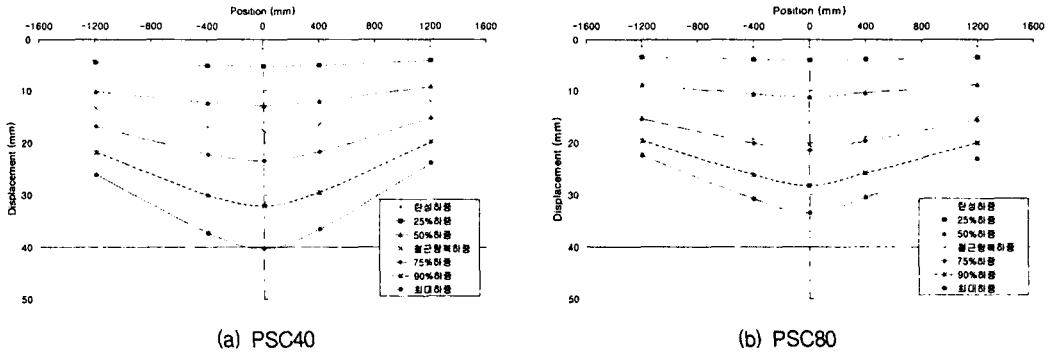


그림 6 하중단계별 교축방향의 변위곡선

그림을 통해서 알 수 있듯이 하중이 증가할수록 휨곡률이 커지고 있다. 그리고, PSC40의 경우, 교축직각방향과 교축방향의 중앙 1m의 휨곡률을 비교하였을 때, 최대 하중까지 휨곡률이 차이가 거의 없었다. 그러나, PSC80의 경우, 최대 하중의 50%이후 교축직각방향의 곡률이 교축방향의 곡률보다 상대적으로 크게 나타났다. 이것은 교축 직각방향으로 응력이 보다 크게 작용하고 있음을 나타내며, 앞서 언급한 인장철근의 변형률 특성에서 PSC80의 경우 PSC40과 달리 교축직각방향의 인장철근이 먼저 항복한 것과 동일한 결과이다. 그러나, PSC40과 PSC80의 교축 직각방향의 휨곡률은 동일 하중단계에서는 PSC40이 상대적으로 크게 나타나고 있지만, 동일하중에서는 서로 유사한 휨곡률을 나타내고 있어, PS강연선의 배치간격이 교축직각방향의 휨모멘트에는 직접적인 영향은 없는 것으로 사료된다.

지점의 처짐을 측정한 결과 본 연구의 경우 최대하중에서 약 3mm의 처짐이 발생하였으며, 전체적인 교축직각방향의 처짐곡선은 실험체 자중의 영향으로 3차곡선을 이루고 있다. 따라서, 하중이 증가할수록 지점부의 부모멘트도 증가하는 것을 알 수 있다.

3.4 파괴양상

최종 파괴형태는 휨파괴가 아닌 편칭전단형 파괴가 발생하였다. 최종 파괴하중이 PSC40은 220tonf, PSC80은 183tonf로 PSC40의 편칭전단강도는 PSC80의 약 120%의 수준으로 나타났다. 따라서, PS강연선을 좁게 배치할수록 편칭전단강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 한편 파괴시 처짐량은 PSC40이 크지만, 동일하중에서의 처짐은 PSC80이 약 20%정도 크게 나타났다. 또한, 이론적인 PSC 바닥판의 편칭전단내하력은 도로교 설계기준(2000)으로 검토한 결과 161.6tonf, 일본 마쓰이제안식은 191.6tonf로 두 시험체 모두 이론적인 값과 근접한 편칭전단강도를 나타내고 있다.

그림 7은 최종 파괴된 균열형상을 나타낸 것으로 그림을 통한 전체적인 균열양상은 유사하게 나타났다. 또한, 두 시험체 모두 하중재하면에서 성장한 편칭전단균열이 최종 파괴의 원인인 것으로 파악된다. 그러나, PSC40은 PSC80보다 전체적인 균열간격이 좁고, 보다 직각사각형의 모양을 이루고 있어, 응력이 잘 분산된 형태를 나타내고 있다. 따라서, PS강연선의 간격이 상대적으로 가까운 PSC40의 응력분산 능력이 PSC80보다 우수한 것으로 판단된다.

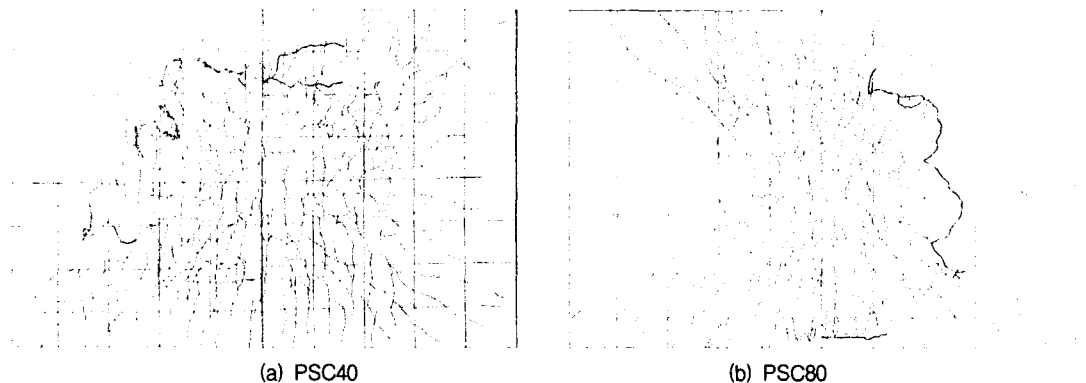


그림 7 최종파괴시 균열형상

4. 결론

본 연구에서는 횡방향 PSC 바닥판의 거동특성과 극한내력을 파악하고 PS강연선의 배치간격이 바닥판에 미치는 영향을 알아보기 위해 총폭원 11.83m이고, 총경간이 50m인 강합성 2거더교를 대상으로 교축방향 3.2m를 절단한 실물크기의 시험체를 제작하여 정적재하실험을 실시하여 파괴양상과 거동특성을 분석하므로써, 다음과 같은 결론을 얻었다.

본 연구에 대상으로 한 바닥판 시험체의 최종 파괴형태는 휨파괴가 아닌 편칭전단 파괴형태를 나타내었다. 또한, PS강연선의 배치간격에 따라 최대 파괴하중이 PSC40은 220tonf, PSC80은 183tonf로 약 20%정도의 차이가 발생하였다. 따라서, PS강연선의 배치간격이 좁아질수록 편칭전단강도가 증가하고 있어, PS강연선의 배치간격이 편칭전단강도에 영향이 있음을 알 수 있다.

전반적인 하중-처짐곡선은 전형적인 취성파괴의 모습을 나타내고 있으며, 파괴직전까지 뚜렷한 강성의 변화는 나타나지 않고 있다. 그러나, 두 시험체 모두 인장철근이 항복하기 전에 하중을 제거하면 잔류변형이 거의 발생하지 않고 있다. 본 연구에서 검토한 PS강연선의 배치간격은 실험대상 교량의 안전성에는 큰 영향은 없고, 실험체의 최대 극한강도가 소정의 편칭전단강도 이상을 나타내고 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 포항산업과학연구원 강구조연구소의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원, 합리화 2주형교용 바닥판 개발에 관한 연구(II), 포항산업과학연구원, 2002. 1
2. 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 건설교통부, 2000
3. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준, 건설교통부, 2000
4. 要田章光, 江頭慶三, 長井義則, 恩知俊一, “ヨーロッパ規準 4 : 鋼・コンクリート合成構造物の設計”, 橋梁と基礎, 2000
5. 木村宏, 内田修平, 塩田圭三, 田中一夫, 小西哲司, 太田哲, “PC床版2主桁橋「ホロナイ川橋」の設計, 工場製作, 現場施工”, 川田技報, Vol. 16, pp. 38~45, 1997.