

# PSC 바닥판의 피로 안전성 평가

## Estimation of Fatigue safety for PSC Bridge Decks

김영진\*\* 이정우\*\*\* 주봉철\*\*\* 김병석\* 박성용\*\*\* 이필구\*\*\*\*  
Kim, Yung Jin Lee, Jung Woo Joo, Bong Chul Kim, Byung Suk Park, Sung Yong Lee, Pil Goo

### ABSTRACT

This study is performed to propose the slab deck for the composite bridge with two girders. Considering the characteristics of the long span and the construction conditions in Korea, a cast-in-place PSC deck was proposed for that bridge. To examine structural behaviors and safety of the proposed PSC deck, two real scale partitions of deck(12m×3.2m) were tested under the fatigue loading. In the test, the failure mode and behaviors of each specimen, and the ultimate load carrying capacity of the two-girder-bridge deck were identified.

Generally, the failure of concrete bridge deck is caused by the local punching shear stress resulting from the moving wheel load. Even though its ultimate flexural capacity is sufficiently larger than the demand, it could be failed by the punching shear fatigue. Therefore, the fatigue safety of the proposed PSC deck should be checked.

### 1. 서론

최근 통행량 및 중차량의 증가로, 직접하중을 받는 교량바닥판의 손상은 심각한 문제에 이르고 있다. 이러한 손상에 대응하기 위하여 기존의 RC 바닥판에 비하여 유지관리가 거의 필요하지 않은 PSC 바닥판으로 대체하려는 경향이 증가하고 있다. 바닥판 손상의 주된 원인은 전단피로 현상에 기인한다. 정적인 내력을 만족하더라도 피로강도가 확보되지 않으면 바닥판은 제 구실을 다 할 수 없다. 현재 일본과 미국, 캐나다 등에서는 PSC 바닥판의 피로거동에 대한 연구가 어느 정도 진행되어 왔으나, 아직까지 연구 단계에 있으며 명확한 설계 검토 기준으로 정립되지 않은 상황이다. 또한, 국내의 경우도 PSC 바닥판의 피로거동에 대한 연구결과가 많지 않아, 이에 대한 적절한 설계 검토가 어려운 실정으로 이를 국내에 차용하여 적용하기에는 무리가 따른다. PSC 바닥판의 정적하중에 의한 사용성 및 안전성은 기 연구에서 검증되었으므로, 본 연구에서는 반복하중에 의한 피로실험을 수행하였으며, 실험결과를 통해 PSC 바닥판의 피로안전성에 대한 검토를 하였다.

\* 정회원, 한국건설기술연구원 구조시스템그룹장  
\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 구조시스템 선임연구원  
\*\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 구조시스템 연구원  
\*\*\*\* 정회원, 포항산업과학기술원 강구조연구실 선임연구원

## 2. 시험체 설계 및 실험방법

실험대상 원형 교량은 경간길이가 50m인 강합성 2주형 거더교로서, 1등교이다. 두께는 바닥판 중간 중앙부는 35cm이고, 거더 지점부가 45cm, 캔틸레버 단부가 25cm이다. 거더사이 거리는 6m이며 캔틸레버 길이는 2.915m로서, 전체 교폭은 11.83m이다. 텐던은 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 설치 시 실험공간상의 제약으로 거더를 생략하였고, 그림 1과 같이 교축방향으로 길이 3.2m만을 선택하였다.

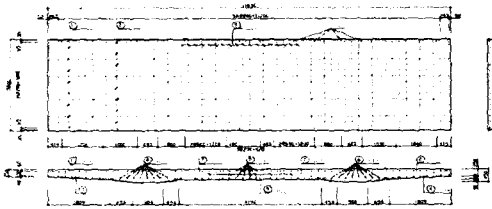


그림 1 시험체 단면

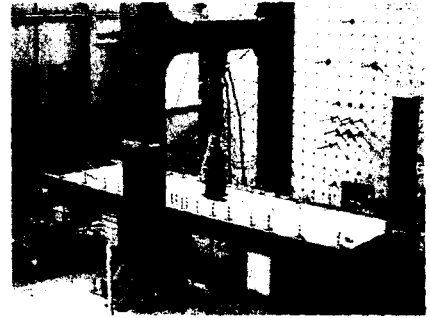


그림 2 피로실험 전경

거더와 합성되어 있으면 바닥판 중앙부의 최대 정모멘트는 단순지지에 비해 작아진다. 그러므로 실험체에서는 실제 원형 교량에서보다 휨모멘트 측면에서 훨씬 불리한 조건이 될 것으로 보인다. 또한 거더의 구속이 없으므로 바닥판에서 일반적으로 발생하는 아치효과(면내 압축력)를 기대할 수 없다. 따라서, 실제보다 극한 강도가 약간 감소할 것으로 생각된다.

교축방향의 양변은 교축방향의 연속성을 재현하기 위해 강성보강을 실시하였다. FEM 해석을 통해 바닥판 중앙 교축과 교축직각방향 모멘트가 3차원모델과 부분모델이 거의 일치하도록 강성을 결정하였다. 결정된 강성에 맞는 H형강(594×302×14×23mm)을 교축방향으로 설치하였고, 표 1은 강성보강된 부재와 실모델의 해석 결과이다.

표 1 교축 및 교축직각방향 모멘트(tf · m)

구 분	실제 바닥판	실험체 모델	비교
교축방향 모멘트	2.269	2.332	1.028
교축직각방향 모멘트	1.702	1.563	0.918

PSC 바닥판의 실험부재는 강연선의 배치간격(40cm, 80cm)에 따라 PSC40F, PSC80F로 구분하여 제작하였다. 하중 재하면적은 도로교설계기준(2000)의 차륜접지면적에 대한 규정에 따라 DB24하중에 대한 후륜하중(9600kgf)을 기준으로 재하폭을 57.7cm×23.1cm(교축직각방향×교축방향)으로 결정하였다.

표 2 시험체 재료 물성치

재 료	콘크리트	철 근	강연선(SWPC 7B)
특 성	압축강도 : 400 kgf/cm <sup>2</sup>	항복강도 : 4000 kgf/cm <sup>2</sup> 탄성계수 : 2.0×10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup>	인장하중 : 18300 kgf 이상 연신율 : 3.5% 이상 직경 : 12.7mm

피로실험시 2단계의 하중상태에 대해 실험을 수행하였으며, 먼저 1단계는 바닥판 사용하중 설계모멘트 조건으로 하중진폭은 32.5tonf, 재하속도 2Hz로 총 300만회의 피로수명을 평가하였으며, 온도, 풍하중 등을 상시하중으로 취급하여 최저하중수준을 4tonf으로 결정하였다. 2단계는 하중계수를 고려한 바닥판 극한 설계모멘트 조건으로 하중진폭은 69.9tonf, 재하속도 1.5Hz로 100만회의 피로수명을 평가하였다. 피로실험시 반복하중의 회수가 100, 1000, 10000, 10만, 100만, 200만, 300만회 일 때 정하중험을 수행하여, 반복회수에 따른 부재의 거동 변화를 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

피로실험 수행결과 나타난 각 부재의 균열양상은 그림 3과 같다. 그림 3에서 보는 바와 같이 전체적인 균열양상은 두 부재가 서로 유사하지만 PSC40F는 PSC80F 부재 보다 전체적인 균열간격이 좁고, 텐던 배치의 영향으로 횡방향 균열이 더 많아, 균열 분산성이 우수한 것으로 나타난다. 따라서 PSC40F 부재가 PSC80F 부재보다 하중의 횡방향 분배능력이 우수함을 알 수 있다.

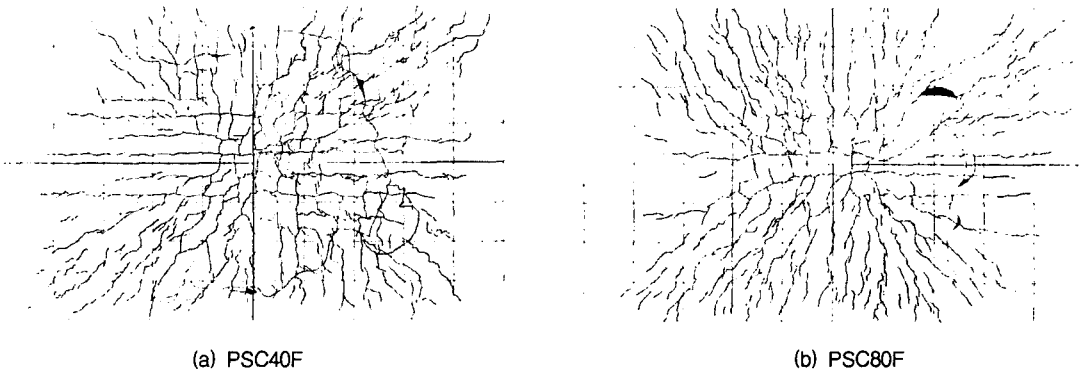
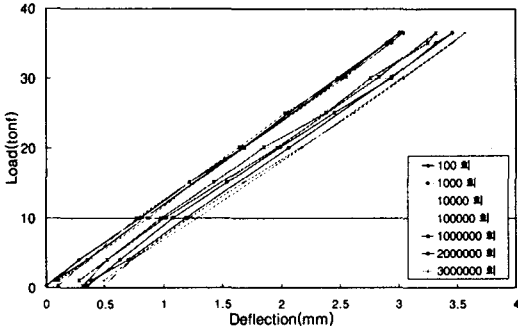


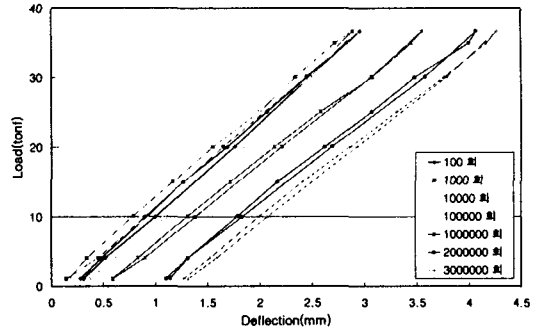
그림 3 피로실험 완료 후 균열양상

설계하중하에서 피로실험결과 측정된 결과는 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 그림 4(a)는 텐던 간격이 40cm인 PSC40F 부재로 하중반복회수의 증가에 따른 휨강성의 변화가 미미하지만, 그림 4(b)에 나타난 PSC80F 부재의 경우는 하중반복회수가 100만회를 초과하면서 뚜렷한 휨강성의 저하를 보여 처짐이 증가하고 있다. 그림 5(a)는 시간중양의 최대처짐을 나타낸 것으로 PSC40F 부재는 하중반복회수의 증가에도 변위가 미세하게 증가하지만, PSC80F 부재는 10만회를 기준으로 기울기가 급격히 증가함을 알 수 있고, 그림 5(b)는 시간중양의 잔류처짐을 나

타낸 것으로 그림 5(a)와 마찬가지로 PSC80F 부재는 10만회를 기준으로 잔류처짐량도 급격히 증가함을 알 수 있다.

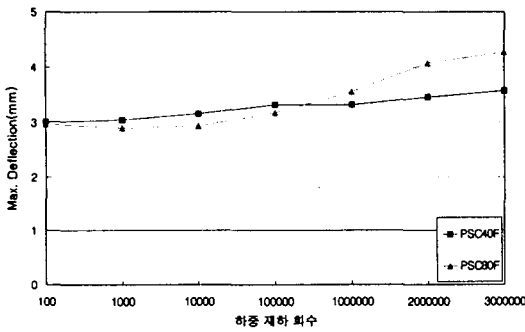


(a) PSC40F

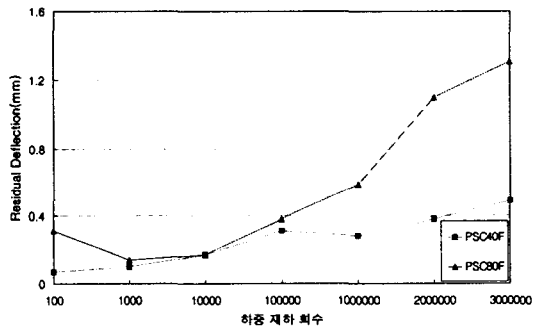


(b) PSC80F

그림 4 하중반복회수별 지간중앙의 변위



(a) 하중반복회수에 따른 최대처짐

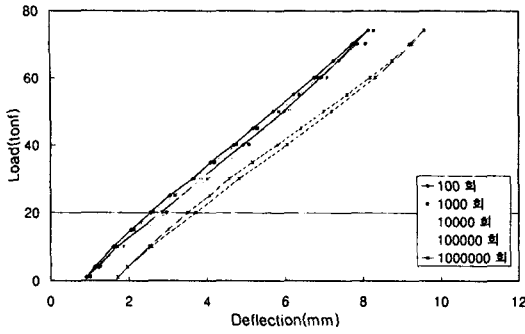


(b) 하중반복회수에 따른 잔류처짐

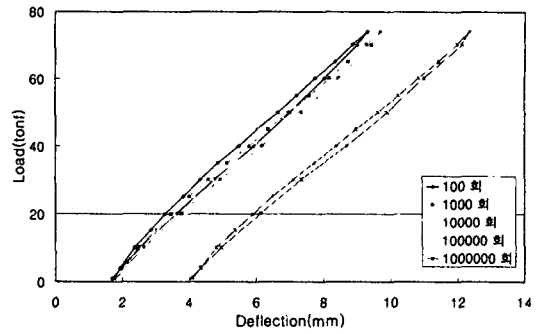
그림 5 하중반복회수별 지간중앙 변위

사용하중에 의한 300만회의 피로실험을 수행한 후, 하중계수를 고려한 하중을 재하한 피로실험에 의해 측정된 결과는 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 그림 6(a)에 나타난 PSC40F 부재의 경우는 그림 4(a)의 경우와 마찬가지로 하중반복회수의 증가에 따른 휨강성의 변화가 거의 없지만, 그림 6(b)에 나타난 PSC80F 부재는 휨강성의 변화가 뚜렷하게 나타난다.

그림 7(a)는 지간중앙의 최대처짐을 나타낸 것으로 PSC40F 부재가 PSC80F 부재보다 기울기가 완만하여 휨강성의 감소가 적은 것을 알 수 있다. 또한 그림 7(b)는 지간중앙의 잔류처짐을 나타낸 것으로 그림 5(b)와 같이 하중반복회수 10만회를 기준으로 잔류처짐량이 급속히 증가함을 알 수 있다. 변위를 최대처짐과 잔류처짐으로 나타낸 것으로 그림 5와 마찬가지로 하중반복회수 10만회를 기준으로 PSC80F 부재의 기울기가 급격히 증가함을 알 수 있다.

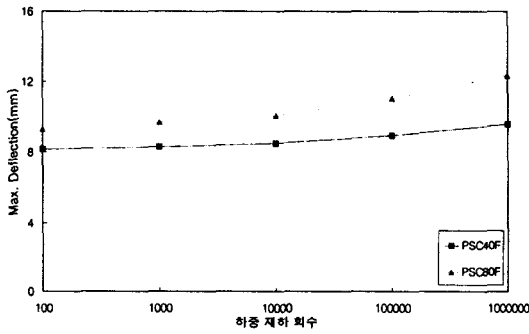


(a) PSC40F

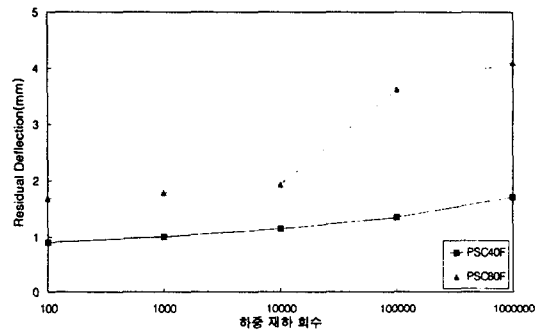


(b) PSC80F

그림 6 하중반복회수별 지간중량의 변위



(a) 하중반복회수에 따른 최대처짐



(b) 하중반복회수에 따른 잔류처짐

그림 7 하중반복회수별 지간중량 변위

위 결과를 종합해 보면 PSC80F 부재가 PSC40F 부재보다 휨강성의 저하가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 이는 텐던의 배치간격이 좁을수록 휨강성의 감소가 작고, 하중분배 효과도 좋아 사용성이 향상되는 것으로 판단된다. 표 3은 피로실험을 수행 한 후 내하력 저하를 평가하기 위하여 잔류강도를 정적재하 실험을 통해 얻은 결과를 나타 낸 것이다.

표 3 정적재하시험 결과

	PSC40F	PSC80F
최대 하중(tonf)	207.3	199.57
최대변위(mm)	37.13	35.35

잔류강도 측정시 편칭전단형 파괴모드를 보였으며 최대파괴하중을 사용하중과 극한하중과의 비를 나타내면 표 4 와 같다.

표 4 정적재하시험 결과

시 험 체	사용하중과의 비 <sup>*)</sup>	극한하중과의 비 <sup>**)</sup>
PSC40F	6.38	2.97
PSC80F	6.14	2.86

\*) 설계활하중모멘트( $M_{L,s}$ )를 집중하중으로 치환한 값(32.5tonf)

\*\*\*) 하중계수를 고려한 설계극한 모멘트( $M_u$ )를 집중하중으로 치환한 값(69.9tonf)

위와 같이, 총 400만회의 반복하중 재하 실험 후 시험체의 잔류강도가 사용하중에 대해서는 6배 이상, 극한하중에 대해서는 2.5배 이상으로 측정되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 횡방향 PSC 바닥판의 피로안전성에 대해 검증하고, 강연선의 배치간격에 따른 PSC 바닥판에 대해 피로거동 특성을 파악하였으며, 결론은 다음과 같다.

(1) 사용하중하에서 피로실험결과 텐던의 배치간격이 좁은 것이 휨강성의 감소가 작았으며, 하중계수를 고려한 하중하에서도 텐던 배치간격이 좁은 것이 더 우수하다.

(2) PSC 바닥판의 초기 휨강성은 텐던 배치간격에 따라 큰 차이가 없지만, 10만회 이상의 반복하중에서는 휨강성이 텐던의 배치간격에 따라 차이가 발행하므로, 텐던의 배치간격은 좁은 것이 휨강성의 감소가 적어 안전성이 우수할 것으로 판단된다.

(3) 횡방향 PSC 바닥판의 경우 텐던 배치간격이 좁을수록 하중의 분배효과가 우수한 것으로 나타났다.

(4) 총 400만회 반복하중 재하시험 후 잔류강도가 사용하중보다 6배 이상, 극한하중보다 2.5배 크게 측정되어, 본 실험대상 교량의 PSC 바닥판은 소정의 안정성을 확보하고 있음을 알 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 포항산업과학연구원 강구조연구소의 연구비 지원으로 수행되었으며, 실험체 제작에 협조해 준 육산건설에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 한국건설기술연구원, 합리화 2주형교용 바닥판 개발에 관한 연구, 포항산업과학연구원, 2000. 10.
2. 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 건설교통부, 2000.
3. 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.
4. 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.