

PSC 부재의 성능개선기법에 관한 정적 실험 연구

- 유리섬유 부착 공법과 외부 후긴장 보강 공법 -

A Study on Strengthening of PSC Beam by Static Experiment

- Glass fiber sheeting and External post-tensioning methods -

김 현 호* 송 재 필** 김 기 봉*** 정 영 수***
Kim, Hyun-Ho Song, Jae-Pil Kim, Ki-Bong Chung, Young-Soo

Abstract

Recently, the number of Prestressed Concrete(PSC) bridges needed repair and retrofit because of the increase of heavy traffic loads and aging of concrete materials. But there are a few related researches about strengthening PSC bridges. In this study, the practicability of strengthening methods for PSC beam were studied by the static experimental method. PSC beams in length of 6m were made with concrete slabs. Glass fiber sheeting and external post-tensioning methods were used for strengthening PSC beams. Some beams were strengthened after cracks to investigate the applicability for cracked bridges. As a result, there strengthening methods were efficient at increasing the cracking loads and the failure load, to decrease deflection and prevent cracks. In the case of using glass fiber retrofit methods, it should be careful in the anchorage problems for preventing the bonding failure.

Keywords : PSC, Strengthening, Glass fiber, External post-tensioning, Static test

1. 서 론

1970년대부터 기존의 철근콘크리트 T형 교량을 대신하여 다수 시공된⁽¹⁾ 프리스트레스트 콘크리트(Prestressed Concrete, PSC) 교량의 경우 대부분 차량 통과 하중이 DB18인 2등급 교량으로 설계되었

으나, 차량이 대형화되고 교통량이 늘어나면서 과도한 하중 부담에 시달리고 있으며 노후로 인해 내하력이 부족하여 보수·보강을 필요로 하는 교량이 많이 있다. 따라서 이들 PSC 교량의 유지 관리는 국도상의 교량 관리에 있어서 중요한 부분을 차지하고 있다고 할 수 있다.

* 학생회원, 중앙대학교 토목공학과 박사과정

** 정회원, 중앙대학교 건설환경연구소 연구원

*** 정회원, 중앙대학교 토목공학과 교수

E-mail : kimhh@ms.cau.ac.kr 031-670-3337

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 2003년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

본 연구에서는 PSC 보에 유리섬유 부착 공법과 외부 후긴장 공법을 보강 방법으로 적용시킨 후 정적 파괴 실험을 수행하여 내하력 증가정도와 보강공법의 적용성을 평가하였다. 즉, 2등급 기준으로 설계된 PSC 교량에 대하여 보강을 실시하여 1등급 수준에 해당하는 하중에 대해서도 충분한 안전율을 확보할 수 있는지를 실험을 통하여 검증하였다. 국내에서 유리섬유 부착과 외부 후긴장 보강공법을 강합성형 및 콘크리트 교량에 적용한 사례와 연구는 있으나^{(2),(3)} PSC 교량에 대한 실험 및 이론적 검증은 아직 미흡한 실정이다.

2. 실험 내용 및 방법

2.1 실험체 제작

실험체는 경간 30m의 건설교통부 2등급 PSC 교량 표준도면과 도로교 표준시방서에⁽⁴⁾ 의거하여 1/5 축소 모델인 경간 6m의 단순보로 제작하였다. Fig. 1은 1/5 축소 모델 실험체의 단면도를 나타낸 것이다.

하중의 재하는 Photo 1에서와 같이 경간의 1/3 지점에 2개의 하중을 재하하였다. 실험체의 보강은 유리섬유 부착 공법과 외부 후긴장 공법을 사용하였는데 DB24의 하중에 해당하는 휨강도를 가질 수 있도록 보강하였다. 유리섬유의 보강은 하부 플랜지 전 경간에 길이 540 cm의 유리섬유를 접착하였고 유리섬유의 양단은 폭 1m의 유리섬유를 사용하여 플랜지 하부

를 횡방향으로 둘러싸서 보강하였다.

실험체명 PWGS와 CWGS는 유리섬유 부착 공법을 적용한 실험체로 PWGS는 실험체 제작 직후 유리섬유 공법으로 보강한 것이고 CWGS는 균열을 발생시킨 후 보강을 실시한 실험체이다. 즉, 실험체 제작 후 사용하중을 약간 초과하는 휨모멘트를 작용시켜 균열(제한 균열폭 0.3 mm이내)을 발생시킨 다음 유리섬유 부착을 실시하여 실제 교량에서 과하중이 작용하여 균열이 이미 발생하였을 때 유리섬유 부착 공법의 효과를 검증하였다.

외부 후긴장 보강 실험체는 실험체 단부에 정착단을 설치하고 경간의 각 1/3점에 편향부(deviator)를 설치하여 강선의 방향을 변화시켜서 배치하고 이를 단부에서 긴장하였다. 긴장재는 총 6개의 $\phi 2.9$ mm 3연선을 배치하였으며 각 강선은 2 tonf로 긴장하였다. 1/3점에 설치된 편향부(deviator)는 긴장 강선의 허용 곡률반경을 고려하여 R=3,000mm의 곡선관을 설치하고, 관 내부에 폴리에틸렌(PDE)파이프를 설치하고 방향 전환부의 마찰 손실을 최대한 감소시켰다.

편향부(deviator)는 케미칼 앵커(chemical anchor)로 실험체의 측면에 고정시켰다. 실험체명 PWES와 CWES는 유리 섬유 부착 실험체와 같이 균열 발생전 그리고 균열발생 후 외부 후긴장 보강을 실시한 실험체를 나타낸다.^{(5),(6)} 유리섬유 부착 공법과 외부 후긴장 강선 공법의 보강상세는 Fig. 2와 3에 나타내었으며 실험체별 특성을 Table 1에 나타내었다.

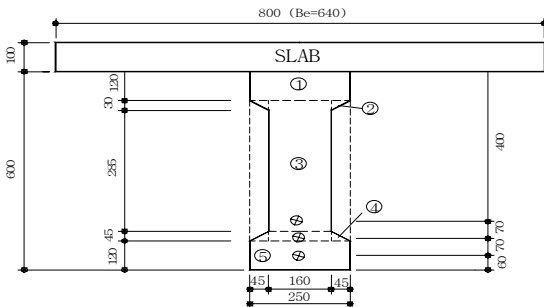


Fig. 1 실험체의 단면상세 (unit : mm)



Photo 1 실험체의 재하

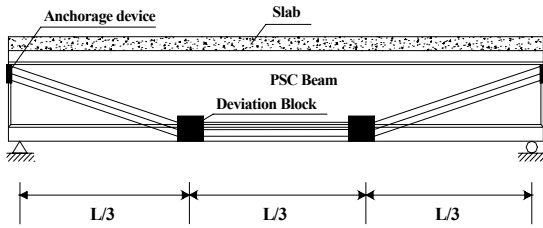


Fig. 2 외부 후긴장 보강 상세

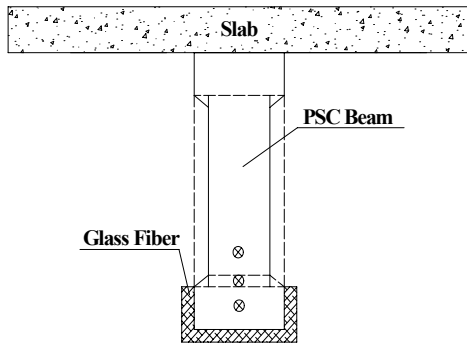


Fig. 3 유리섬유 부착 보강 상세

2.2 사용재료

본 실험체 제작에 사용된 재료는 다음과 같다. PSC 부재의 콘크리트 설계 압축강도는 $f_{ck} = 370\text{kgf/cm}^2$, 슬래브 콘크리트의 설계 압축강도는 $f_{ck} = 240\text{kgf/cm}^2$ 로 하였다. 제작 후 실측한 실험체의 압축 강도는 계산값보다 약간 높아서 PSC 부재의 콘크리트 압축강도가 $f_{ck} = 393\text{kgf/cm}^2$ 이고 슬래브 콘크리트의 압축강도

Table 1 실험체별 특성

Series	실험체명	보강여부	비고
WO	PWOS	무보강	-
WG	PWGS	GF	폭 23cm 1겹
WE	PWES	EP	강선 수 : 6개 상중하 3단
CW (균열 발생 후 보강)	CWES	EP	강선 수 : 6개 상중하 3단
	CWGS	GF (접이음 정착)	폭 23cm 1겹
	CWGS2	GF (Plate anchor)	폭 50cm 2겹
	CWGS3	GF(Fiber anchor + 접이음 정착)	폭 50cm 2겹

* GF : 유리섬유보강, EP : 외부후긴장보강

Table 2 긴장재 재료특성

재료명	물성치	단면적 (mm ²)	인장강도 (kgf/cm ²)	항복점 (kgf/cm ²)
내부강선 12.7mm 7연선		99.5	19,280	17,947
외부강선 2.9mm 3연선		19.82	19,667	17,402

는 $f_{ck} = 262\text{kgf/cm}^2$ 이었다.

실험체 내부의 강선은 $f_{pu} = 19,280\text{kgf/cm}^2$, $\phi 12.7$ mm, 7연선을 사용하였다. 보강재료는 인장강도가 $f_{pu} = 19,667\text{kgf/cm}^2$ 인 $\phi 2.9$ mm 3연선의 외부 긴장 강선과 유리섬유를 사용하였다. 긴장재 재료 성질은 Table 2에 표시된 것과 같으며, Table 3(a)와 Table 3(b)는 실험체 제작에 사용된 콘크리트 시방배합을 표시한 것이다.

Table 3(a) 슬래브 콘크리트 배합 설계

항 목 구 분	설계 기준 강도 (kgf/cm ²)	굵은 골재 최대 치수 (mm)	공기량의 범위 (%)	물 시멘트 비 W/C (%)	잔골재율 S/a (%)
시방 배합	240	25	4.5 ± 1.5	50.0	42.0

Table 3(b) PSC 콘크리트 배합설계

항 목 구 분	설계 기준 강도 (kgf/cm ²)	굵은 골재 최대 치수 (mm)	공기량의 범위 (%)	물 시멘트 비 W/C (%)	잔골재율 S/a (%)
시방 배합	370	25	4.5 ± 1.5	36.8	31.5

2.3 하중재하 및 측정방법

하중의 재하는 Photo 1에 보이는 것과 같이 경간 1/3 지점에 2점으로 재하하였다. 하중은 계산상 설계 항복 휨모멘트(M_y)에 이르기까지 단조 증가하였으며, 이후는 변위 증가로 극한 상태의 연성의 증가를 관찰하였다.

Fig. 4에서와 같이 실험체 중앙 및 1/4지점의 상·하부 주철근, 슬래브 철근, 스티럽 철근에 변형을 게이지를 부착하여 하중변화에 따른 변형률을 측정하였으며 경간 중앙과 1/3 지점에 변위계를 설치하여 변위량을 측정하였다. 그리고 실험체 제작시에 플랜지 상·하부 및 복부에 50cm 간격으로 균열 게이지(Demec gage)를 부착하여 시간에 따른 균열 발생 여부 및 균열폭 증가를 측정하였다. 아울러 균열폭 증가를 측정하기 위해서 최초 균열 발견 시에는 광학 게이지(Optical gage)로 균열폭을 측정하고, 그 이후에는 균열 발생 위치에 균열 게이지(Demec gage)를 부착하고 하중의 증가에 따른 균열폭의 증가를 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 파괴양상과 파괴하중

실험체는 대체로 균열하중 발생 이후 순수 휨 구간

의 전 영역에 걸쳐서 균열이 고루 발달하고, 계속되는 하중의 증가에 대하여 큰 변형의 증가를 보이는 전형적인 저보강보의 연성파괴 양상을 보였다. 특히 유리 섬유 부착 실험체인 PWGS, CWGS3 실험체는 모두 뚜렷한 연성파괴 양상을 보였다. 다만 보강기준을 유리섬유의 인장강도로 하여 1점 보강한 CWGS 실험체는 부착파괴의 양상을 나타냈다.

Table 4는 실험체의 계산상 공칭 휨강도와 실험 파괴하중을 나타낸 것으로 실험체에서 파괴하중이 큰 값을 보이는 것은 계산 시에 고려하지 않은 강재 항복 이후의 응력 경화에 따른 강도 증가에 기인하는 것으로 판단된다.

3.2 하중-변위 관계

Fig. 5는 중앙점의 처짐을 나타낸 것으로 무보강 실험체인 PWOS 실험체에 비하여 모든 실험체에서 초기 강성이 증가하여 사용 상태의 거동이 개선됨을 확인할 수 있다.

무보강 실험체인 PWOS 실험체는 16 tonf에서 최초 균열이 발생하는데 비하여 보강 실험체는 20 tonf 이상의 값에서 균열 발생이 시작되어 본 연구에 적용된 보강 방법이 뚜렷한 균열 억제 효과를 발휘하는 것을 확인할 수 있었다.

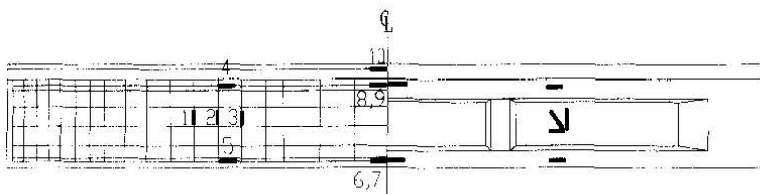


Fig. 4 변형 측정 위치

번호	게이지 위치
1,2,3	스티럽
4	하중재하점 압축 철근
5	하중재하점 인장 철근
6,7	중앙점 인장 철근
8,9	중앙점 압축 철근
10	중앙점 슬래브 철근

Table 4 정적 실험 결과

실험체명	실험 파괴하중 (tonf)	계산 공칭 휨강도 (tonf)	파괴하중/공칭 휨강도	보강 실험체/무보강 실험체의 비교
PWOS	58	40.27	1.44	1
PWES	69	55.66	1.24	1.19
CWGS	58	42.72	1.36	1
CWGS2	69	52.32	1.31	1.19
CWGS3	69	52.32	1.31	1.19
CWES	72	55.66	1.29	1.24

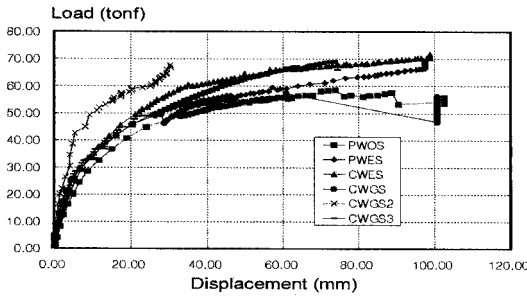


Fig. 5 중양점의 하중-변위 곡선

보강에 의한 초기 강성의 증가로 하중이 공칭 강도에 도달할 때까지 모든 보강 실험체의 처짐이 무보강 실험체인 PWOS의 처짐보다 작았다. Fig. 5에서 균열 후 외부 후긴장 보강 실험체인 CWES의 경우 균열 전 외부 후긴장 보강 실험체인 PWES보다 강성이 크게 나타났는데, 이는 실험 시 재령의 차이로 초기 균열 하중이 크지 않아서 균열의 영향은 거의 없었던 때문인 것으로 생각된다.

모든 실험체가 공칭 강도 이후에도 파괴에 이르기까지 변형이 계속되어 저보강에 따른 충분한 연성을 가지고 있음을 확인할 수 있었으나, 균열 후 유리섬유 보강 실험체인 CWGS는 처짐이 60 mm에 도달한 이후에는 정착부의 활동으로 보강의 효과가 사라져서 무보강 실험체와 같은 거동을 보이게 되었다.

유리섬유 부착 방법을 달리한 CWGS2 및 CWGS3 실험체도 최종 파괴에 이르기까지 유리섬유 박리에 의한 파괴는 발생하지 않았으며 충분한 연성도 확보하고 있는 것으로 확인되었다. Fig. 6에 하중상태에 따른 처

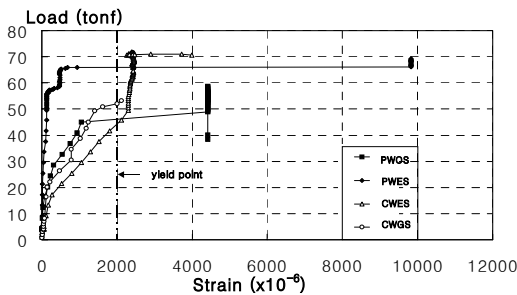


Fig. 7 중양점의 주인장 철근 하중-변형도

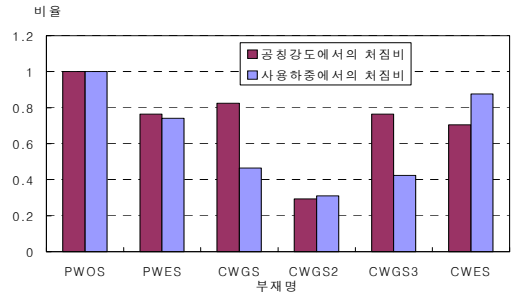


Fig. 6 실험체의 처짐비

짐의 크기를 무보강 실험체에 대한 처짐비로 나타내었다.

3.3 하중-변형 관계

Fig. 7에서 Fig. 10까지의 그림은 하중에 따른 실험체의 변형률을 나타낸 것이다. 무보강 실험체인 PWOS의 인장축 철근 변형률이 계산된 공칭 강도를 약간 초과하는 하중인 45 tonf에서 변형이 급격히 증가하여 항복하였음을 Fig. 7에서 볼 수 있다. 그리고 균열 후 외부 후긴장 보강 실험체인 CWES의 경우 45 tonf까지 탄성거동을 보이고 50 tonf에서 항복하였고, 균열 후 유리섬유 부착 보강 실험체인 CWGS 실험체는 55 tonf에서 중앙 단면의 인장철근이 항복하였다.

Fig. 8은 하중에 대한 압축 축 철근의 변형률을 나타낸 것으로, 무보강 실험체인 PWOS의 경우 변형률이 압축값에서 인장값으로 변화하기 시작하는 변곡점이 40 tonf에서 나타났다. 이것으로 중립축이 슬래브 쪽으로 상승하고 있다는 것을 판단할 수 있었다.

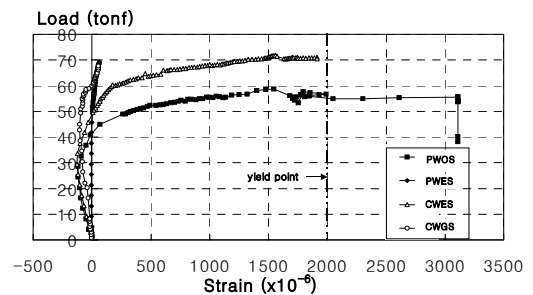


Fig. 8 중양점의 압축 철근 하중-변형도

한편, 균열 후 외부 후긴장 보강 실험체인 CWES와 균열 후 유리섬유로 보강한 CWGS 실험체는 각각 50 tonf과 60 tonf에서 변형률의 변곡점이 발생하였다. 상부 슬래브 철근의 하중에 대한 변형률을 Fig. 9에 나타내었다. 무보강 실험체와 보강 실험체 모두 변형률이 하중 증가에 따라 일정하게 증가하였으며 항복 변형률까지 도달하지는 않았다.

무보강 실험체인 PWOS의 스티럽 변형률은 30 tonf에서 급격하게 증가하는 것을 Fig. 10에서 볼 수 있다. 이것은 전단 영역에서도 경사 균열이 발생하여 스티럽의 하중 부담이 증가하는 것으로 판단할 수 있다. 그리고 균열 후 유리섬유 보강 실험체인 CWGS의 경우에는 45 tonf에서부터 전단 영역의 경사 균열로 인하여 스티럽 변형률이 급격하게 증가하는 현상이 나타났다.

3.4 균열양상 및 하중-균열 관계

모든 실험체에서의 균열양상은 인장측 중앙부에서 초기균열이 발생하기 시작하여 점차적으로 양 지점으로 확대되어 가는 일반적인 휨 균열 형태로 나타났으며 최종 균열간격도 비슷하게 발생하였다. Table 5에 보인 것과 같이 무보강 실험체인 PWOS에서는 초기 균열이 16 tonf에서 발생하였으나 보강 실험체인 CWES와 CWGS에서는 각각 24 tonf와 28 tonf에서 초기 균열이 발생하여 본 실험에서 사용한 보강 방법이 균열 억제 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 11은 하중 단계별로 휨 균열의 간격을 나타낸 그림으로 하중-균열간격 관계는 순수 휨 구간에 발생한 균열에 대하여 해석하였으며 휨 구간의 폭을 각 하중 단계에서의 균열의 개수로 나눈 값으로 나타내었다.

Table 5 균열 발생 하중 크기

실험체명	균열 발생하중(tonf)	제한균열에서의 하중 (0.3 mm)
PWOS	16	40
PWES	16	53
CWGS	28	45
CWGS2	28	44
CWGS3	28	53
CWES	24	49

일반적으로 하중을 받는 실험체에서의 균열은 발생, 불안정 균열 형성기 그리고 안정기로 나누어 생각할 수 있다. 균열 안정기 이전에 하중을 받는 실험체는 초기 균열 발생 이후 하중 증가에 따라 새로운 균열이 형성되며, 변형 증가의 원인은 새로운 균열에 의한 것이다.

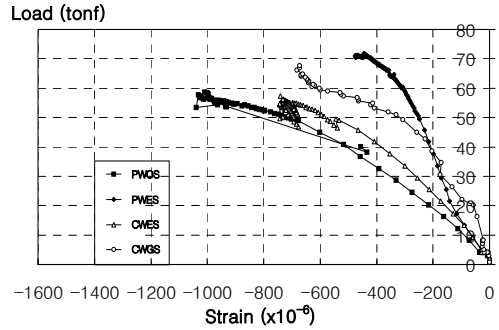


Fig. 9 중앙점의 슬래브 철근 하중-변형도

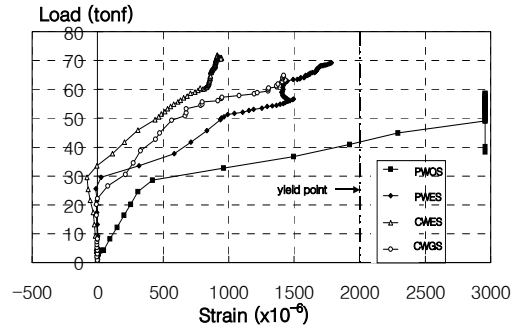


Fig. 10 스티럽의 하중-변형도

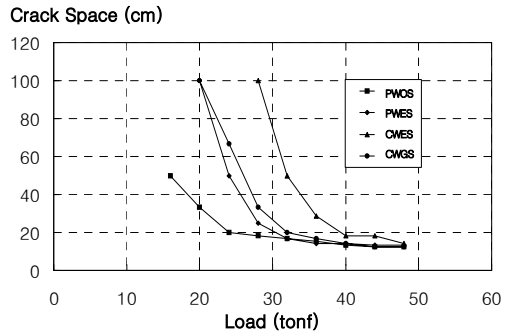


Fig. 11 하중 단계별 균열간격

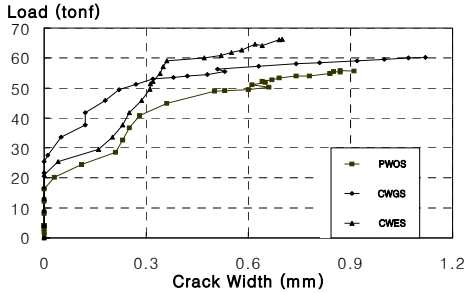


Fig. 12 하중과 주 균열폭의 관계

한편 균열 안정기 이후의 변형의 증가의 원인은 새로운 균열이 아닌 이미 발생한 균열 단면에서의 변형이며, 평균 철근 응력과 균열 단면에서의 철근 응력이 거의 일정한 비율이 되는 인장-경화(tension-stiffening)효과는 균열 안정기에서는 크게 줄어들었다.

Fig. 11을 통해 무보강 실험체인 PWOS는 대략 25 tonf정도에서 균열 안정기에 접어들었음을 볼 수 있고 최종 균열간격은 12.5 cm이었다.

한편 외부 후긴장 실험체인 PWES는 31 tonf에서 균열 안정기에 접어들며 균열간격은 무보강 실험체와 같은 값으로 나타났다. 균열 발생에서 안정기에 접어들기까지의 하중 간격은 보강 실험체가 무보강 실험체보다 작은 값을 보였으며 이것으로 균열 발생 후 보강 실험체의 강성 저하가 무보강 실험체보다 큰 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 12는 하중 증가에 따른 실험체의 중앙부 하단의 균열폭의 크기를 나타낸 것이다. 유리섬유 보강 실험체의 경우 무보강 실험체보다 균열폭이 작게 제한되며, 균열폭의 증가추세도 완만하여 사용상태에서의 균열 제한 능력이 있음을 확인할 수 있었다. 외부 후긴장 보강 실험체의 경우도 균열 발생 억제능력은 유리섬유 보강 실험체와 유사한 경향을 띠었으나 균열단면의 보강이 이루어진 유리섬유 보강 실험체보다는 사용상태에서의 균열제한 능력이 다소 떨어지는 경향을 띠었다.

4. 결 론

본 연구에서는 PSC 교량에 대해 유리섬유 부착 및 외부 후긴장 보강 공법을 적용시킨 후에 정적 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 유리섬유 부착 및 외부 후긴장 보강 공법을 적용하여 PSC 교량의 항복강도 및 극한강도를 증가시킬 수 있음을 확인하였다.
- 2) 보강 실험체는 무보강 실험체에 비하여 초기 휨강성의 증가가 현저하게 나타나며 처짐 방지에도 효과가 있었다.
- 3) 균열 발생 억제효과도 무보강 실험체에 비해 보강 실험체가 뛰어났으며, 특히 유리섬유 보강 실험체의 경우가 우수하였다.

감사의 글

본 연구는 '96 건설교통 기술연구 개발사업(과제번호:960038)에 의해 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국 건설기술 연구원, 건설교통부, "교량 현황 조사", 1996. 5.
2. 건설교통부, 원주 지방국도 관리청, "문막 교 보강공사에 따른 보강 효과 및 내하력 조사 보고서", 1996. 9.
3. 최혁주, 김기봉, "외부 후긴장으로 보강한 합성보에 대한 실험적 연구", 한국강구조 학회논문집, 제10권 4호, 1998. 12., pp. 70 1~708.
4. 건설교통부, "도로교 표준시방서", 1999.
5. 한국 건설기술 연구원, "외부프리스트레스 를 도입하는 구조물의 설계 및 시공에 관 한 연구", 1995. 12.
6. Saadatmanesh H, "Experimental Study of Prestressed Composite Beams", J. Struct. Engrg., ASCE, Vol. 115., No. 9, 1989., pp. 2348~2363.

(접수일자 : 2002년 9월 2일)