

피로 실험에 의한 PSC 부재의 성능개선기법에 관한 연구

A Study on Strengthening of PSC Beam by Fatigue Experiment

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

The fatigue problem of Prestressed Concrete(PSC) bridges are more serious than the other type of concrete bridges, because the cross sectional area and self weight of PSC bridges are smaller. The endurance of strengthening methods for PSC bridges are tested in this study. Glass fiber sheeting and external post-tensioning methods were applied. 1/5 scale PSC beams were made for fatigue test, same as static test. The range of repeated load is from 10% to 80% of yielding load with sine curve. The experimental results show that the failure cycle of strengthened members are increased compare to non-strengthened members. The members strengthened with glass fiber show better enhancement in fatigue problem than the members strengthened with external post-tensioning method, though the adhesion of glass fiber and concrete is failed, as increase of crack. With these experimental results, it can be said that the strengthening methods used in this study are efficient at extending the life time of aged PSC bridges.

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

1. 서 론

국내의 교량 중 약 70% 정도가 2등급 이하로 설계 되었으며 1960년대에서 1970년대에 건설된 교량 중 약 87.4%가 차량 통과 하중이 DB18 또는 DB13.5로 설계되었는데⁽¹⁾ 최근 교통량의 증가 및 운

송차량의 대형화로 교량의 노후화가 한층 가속화되고 있다.

1970년대 부터 국도상에 다수 시공된 프리스트레스트 콘크리트(Prestressed Concrete, PSC) 교량은 긴장재를 이용하여 인장축 콘크리트 단면의 크기가 줄어들면서 자중의 감소가 발생한다.

* 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.

따라서 고정하중에 대한 활하중의 비가 커지므로 피로하중의 영향이 더욱 중요한 문제로 떠오르고 있다. 그러나 현재까지 피로와 관련한 PSC 교량에 대한 실험 및 이론적 연구가 매우 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기존 교량의 손상을 최소화하며 보강할 수 있는 보강 공법으로 유리섬유 부착 공법 및 외부 후긴장 보강 공법을 사용하여 PSC 교량의 피로에 대한 내구성의 증대와 교량의 성능개선에 대한 효과를 고찰하였다.

2. 실험 내용 및 방법

2.1 실험체 제작

실험체는 지간 30 m의 건설교통부 2등급 PSC 교량 표준도면과 도로교 표준시방서에⁽²⁾ 의거하여 1/5 축소 모델인 지간 6m의 단순보로 제작하였다. 실험체의 형상비는 표준도면과 유사하게 하였으나 PSC 보의 복부폭과 슬래브 두께는 축소 비율에 의한 제작이 어려워 제작 가능한 적절한 치수로 변경하였다.⁽²⁾

실험체의 보강은 유리섬유 부착 공법과 외부 후긴장 공법을 사용하여 DB24의 하중에 해당하는 휨 강도를 가질 수 있도록 보강하였다.

유리섬유의 보강은 하부 플랜지 전 지간에 길이 540cm의 유리섬유를 접착하였고 유리섬유의 양단은 폭 1 m의 유리섬유를 사용하여 플랜지 하부를 횡방향으로 둘러싸서 박리에 대한 보강을 하였다.

외부 후긴장 보강 실험체는 실험체 단부에 정착단을 설치하고 deviator로 강선의 방향을 변화시켜서 배치하고 이를 단부에서 긴장하였다. 총 6개의 ϕ 2.9mm 3연선을 배치하였으며 강선은 2 tonf로 긴장하였다. 지간의 1/3점에 설치된 deviator부는 chemical anchor로 실험체의 측면에 고정시켰으

며 외부 긴장 강선의 허용 곡률 반경을 고려하여 R=3,000mm의 곡선관을 설치하고, 관 내부에 PDE파이프를 설치하여 방향 전환부의 마찰 손실을 최대한 감소시켰다.

Table 1에 실험체 이름에 대한 설명을 나타내었다.

2.2 사용재료

본 실험에 사용된 재료는 다음과 같다. PSC 부재의 콘크리트 설계 압축강도는 $f_{ck} = 370\text{kgf/cm}^2$, 슬래브 콘크리트의 설계압축강도는 $f_{ck} = 240\text{kgf/cm}^2$ 로 하였다. 제작 후의 실측한 실험체의 압축 강도는 계산값 보다 약간 높아서 PSC 부재의 압축강도가 $f_{ck} = 393\text{kgf/cm}^2$ 이고 슬래브 콘크리트의 압축강도는 $f_{ck} = 262\text{kgf/cm}^2$ 이었다.

PSC 실험체의 내부 강선은 $f_{pu} = 19,280\text{kgf/cm}^2$, $\phi 12.7\text{mm}$, 7연선을 사용하였다. 보강재료는 인장강도가 $f_{pu} = 19,667\text{kgf/cm}^2$ 인 $\phi 2.9\text{mm}$ 3연선의 외부 긴장 강선과 유리섬유를 사용하였다.⁽³⁾ 보강유리섬유의 물리적특성과 Deviator부에 대한 설명을 Table 2 와 3에 나타내었으며, Photo 1과 2에 유리섬유 부착 공법 및 외부 후긴장 보강공법 실험체를 나타내었다.

Table 1 실험체 명

Series	실험체명	보강여부	비고
WO	PWOD 0.8 PWOD 0.7 PWOD 0.6	무보강	-
WG	PWGD 0.8 PWGD 0.7 PWGD 0.6	GF	폭 23cm 1겹
WE	PWED 0.8 PWED 0.7 PWED 0.6	EP	강선 수 : 6개 상중하 3단

* GF : 유리섬유보강, EP : 외부후긴장보강

Table 2 보강유리섬유의 물리적 특성

인장응력 (kgf/cm^2)	인장계수 (kgf/cm^2)	연신율 (%)	두께 (mm)	밀도
5,390	252,000	4.2	1.3	2.54

Table 3 Deviator부 Chemical Anchor의 제원

구 성	직 경 (mm)	길 이 (mm)	휩 토크 (Nm)	인장강도 (N/mm ²)	항복강도 (N/mm ²)	인발력 (kN)	전단력 (kN)
Anchor	14	160	40	700	450	39.6	19.8
Capsule	Epoxy acrylate resin, hardener , quartz granules and glass						



Photo 1 외부 후긴장 보강 실험체

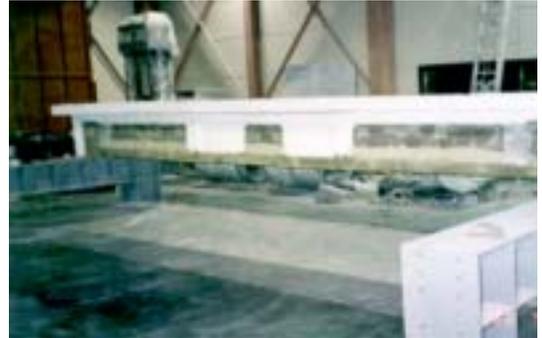


Photo 2 유리 섬유 부착 보강 실험체

2.3 하중재하 및 측정방법

하중의 재하는 정적 실험과 같이 컴퓨터로 제어되는 가력장치를 시간 1/3지점에 2개 설치하여 재하하였다. 재하하는 하중의 mode는 정현(sine)파로 하였으며 초당 2회의 재하 cycle(2Hz)로 하였다. 재하 하중의 범위는 최소하중이 설계 항복 하중 (M_y)의 10%가 되도록 하였고 최대하중은 설계 항복 하중의 60%, 70% 그리고 80%가 되도록 하여 반복하중으로 재하하였다. 재하 초기에는 동적 하중에 의한 충격을 방지하기 위하여 3단계에 걸쳐서 점진적으로 하중을 증가시켰다.⁽⁴⁾

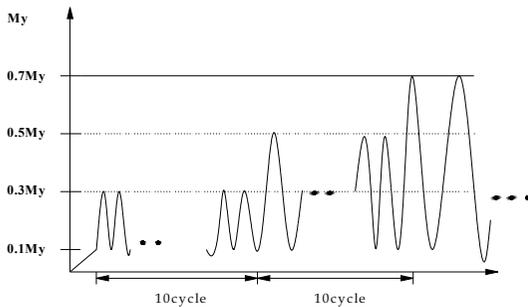


Fig. 1 피로 실험의 재하과정

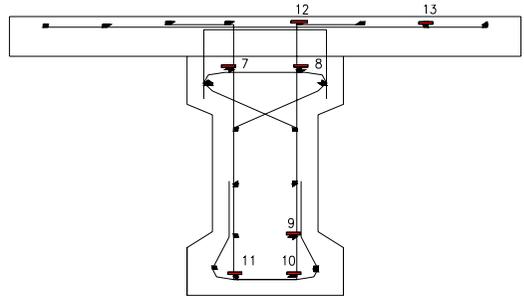


Fig. 2 변형 측정 위치

Fig. 1은 동적 하중의 재하 과정을 보인 것이다. 실험체의 거동을 측정하기 위하여 Fig. 2에 보이는 것과 같이 실험체 중앙 및 1/4지점의 상·하부 주철근, 슬래브 철근, 스티럽 철근에 변형률계를 부착하여 반복하중에 따른 변형률을 측정하였으며 시간 중앙과 1/3 지점에 변위계를 설치하여 변위량을 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 파괴반복횟수와 파괴양상

모든 실험체는 동적 반복 하중 하에서 초기에는 전

영역에 걸쳐서 균열이 고루 발달하는 휨 거동을 보였고, 반복횟수가 증가하면서 이 중 하나의 균열이 다른 균열에 비하여 그 폭과 길이가 뚜렷이 커지면서 처짐이 빠른 속도로 증가하였다. 최종의 파괴상태에 이른 모든 실험체에서 내부 강선의 파괴시 발생하는 것으로 판단되는 파단음과 함께 강선이 절단되었다.

절단된 강선의 단면은 전형적인 cup-and-cone 형태로 피로 파괴의 양상이 뚜렷하였다. 유리섬유로 보강한 실험체는 최종 파괴에 근접하여 균열이 크게 진전된 후 유리섬유의 부착이 파괴되어 최종 파괴시에는 무보강 실험체와 같은 상태가 되었다.

외부 후긴장 보강 실험체는 내부 강선의 최종 파괴에 이르기까지 외부 강선의 파괴가 일어나는 경우는 없었다. 이것은 내부 강선이 파괴되기 이전에는 외부 강선의 응력 증가가 크지 않은 것으로 판단된다. 일반적으로 PSC 보는 콘크리트와 내부 강선이 완전히 부착되어 거동되므로 최대 모멘트 발생구간에서 강선의 응력 증가량이 가장 크게 발생되며, 그 외의 구간에서는 강선의 응력 증가량이 작게 발생된다. 반면에 외부 강선의 경우는 강선을 정착하는 정착부나 강선의 힘을 부재에 전달하고 강선의 방향을 바꾸는 역할을 하는 편향부(deviator)에서만 부재와 일체거동을 하고, 그 이외의 부분에서는 부재의 변형과는 상관없이 직선거동을 보이므로 강선의 응력 증가량은 부재의 전체적인 거동 즉, 전체 변형의 평균값이 강선 전체 길이에 거의 동일하게 작용한다고 할 수 있다.⁵⁾ 따라서, 최대 모멘트 구간에서 강선의 응력 부담량을 보면 내부 강

선에 비해서 외부 강선이 상당히 작게 발생된다고 할 수 있다.

Table 4에 피로실험에 대한 결과를 정리하였다. 모든 보강 실험체가 반복횟수의 증가를 보이며, 대체로 반복하중의 수준이 낮을수록 반복횟수의 증가가 크게 나타났다.

유리섬유 부착 실험체에서는 반복하중에 의한 균열이 실험체의 중간 높이에서 가장 큰 형태를 나타내었다. 이것은 유리섬유가 하부 플랜지의 밑면과 측면에만 보강되었기 때문이다. 일반적으로 피로균열은 허용 응력 이하의 낮은 응력 상태에서 반복하중에 의해 발생하는 현상으로 대부분의 수명을 균열의 발생 및 안정 균열 성장(subcritical crack growth) 영역에서 소모한다. 따라서, 구조물의 안정성을 고려한다면 피로균열을 발견, 감시해야 하는 시점은 바로 이 안정 균열 성장 영역에서 이루어져야 한다. 피로균열의 성장과정은 피로균열 성장속도인 da/dN 변화에 의해서 3단계로 전개된다. 안정 균열 성장 단계인 제 2단계에서는 균열길이의 증가에 따라 균열 성장 속도는 빨라지며, 응력확대계수(K)와 균열성장 속도가 선형적인 비례관계를 가지는데 이는 Paris의 식으로 널리 알려진 다음과 같이 표현된다.

$$da/dN = C (\Delta K)^m \quad (1)$$

여기서, C와 m은 실험상수이다. 응력확대계수는 균열선단 특이성의 진폭으로 정의된다.

Table 4 피로 실험 결과

부재명	동적하중 (tonf)	파괴하중 반복횟수	변형의 급격한 변화시의 반복횟수	반복횟수의 비
PWOD 0.8	33.6	16,186	14,386	1
PWOD 0.7	29.4	32,383	27,582	1
PWOD 0.6	25.2	185,384	131,384	1
PWGD 0.8	33.6	26,386	21,586	1.63
PWGD 0.7	29.4	105,583	77,984	3.26
PWGD 0.6	25.2	581,388	550,788	3.14
PWED 0.8	33.6	23,986	23,386	1.48
PWED 0.7	29.4	63,587	56,386	1.96
PWED 0.6	25.2	541,792	524,384	2.92

본 실험결과를 보면 유리섬유 부착 실험체의 경우에는 주 균열면이 유리섬유로 보강되었기 때문에 실험체의 하단부에 균열이 크게 발생하는 무보강 실험체와 외부 후긴장 실험체에 비하여 균열폭이나 길이가 작게 나타난다. 그러므로 균열선단의 응력확대계수가 작아져서 피로에 대하여 유리한 것으로 판단되었다. 다만 부착이 먼저 파괴되므로 유리섬유 자체의 피로강도와는 무관하다고 판단된다.

Table 4에서 급격한 변형이 발생하는 횟수는 주 균열이 형성되는 시기로 판단할 수 있으며, 보강실험체의 경우 급격한 변형이 발생하는 횟수가 무보강 실험체에 비하여 크고 특히 유리섬유 부착 실험체의 반복 횟수가 뚜렷하게 크게 나타났다. 이것은 유리섬유가 부착 파괴 이전의 피로 균열에 대한 억제능력이 뛰어나 있음을 보여주는 것이다. 외부 후긴장 보강 실험체의 경우에도 보강에 따른 반복횟수의 증가는 뚜렷하나, 유리섬유 부착의 경우에 비하여 그 증가량이 작게 나타나는 것을 알 수 있다. PWED0.8 실험체의 경우는 작은 반복하중 단계의 실험체와는 달리 deviator부분에서 주 균열이 형성되어 반복횟수의 증가가 무보강 실험체인 PWOD 0.8에 비하여 1.48배에 불과하게 나타났다. 이것은 deviator 부분의 chemical anchor의 간격이 철근 배치의 조건으로 인해서 규정보다 작게 배치되었기 때문이며, 외부 강선이 배치된 PSC 보는 외부 하중에 의한 처짐이 발생하는 경우 정착부와 편향부에서만 강선의 변위와 부재의 변위가 일치하며, 부재와 일치되지 않는 강선의 나머지 부위는 직선으로 존재하기 때문에 결과적으로 부재 변위가 발생할수록 편심량이 변화한다.⁽⁶⁾ 또한, 편향부는 낮은 하중 효과

에서는 고정단처럼 거동하나 하중 효과가 증가하면 편향부에서 슬립현상이 발생하여 강선의 이동 및 프리스트레스 효과가 감소하는 현상이 유발된다. 편심량의 변화나 편향부의 슬립현상은 극한 휨강도를 저하시키게 되어 구조성능이 다소 저하하는 현상이 발생한다. 따라서 반복하중의 크기가 큰 경우에는 deviator의 부착 정도가 피로강도에 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

3.2 하중-변위 관계

Fig. 3은 실험체의 중앙점에 대한 처짐의 변화를 보인 것이다. 일부 처짐계는 반복하중에 대하여 부하가 불충분하여 결과를 읽는데 어려움이 있었으나, 처짐은 최종 파괴 단계 이전에는 비교적 일정한 값으로 계속되며, 최종파괴 단계 직전에 빠르게 증가하였다.

Table 5에서 보듯이 Log Scale로 0.97이상으로 최종단계에서 주 균열이 크게 증가하여 파괴의 징후를 예측하기 힘든 취성파괴의 양상을 보였다. 따라서 적절한 보강 방법을 강구해야 할 것이다.

Table 5 변형증가에 대한 반복횟수의 비

실험체명	변형증가시 횟수/ 파괴반복 횟수	Log 변형/ Log 파괴
PWOD0.8	0.889	0.988
PWOD0.7	0.852	0.985
PWOD0.6	0.709	0.972
PWGD0.8	0.818	0.980
PWGD0.7	0.739	0.974
PWGD0.6	0.947	0.996
PWED0.8	0.975	0.997
PWED0.7	0.889	0.989
PWED0.6	0.968	0.998

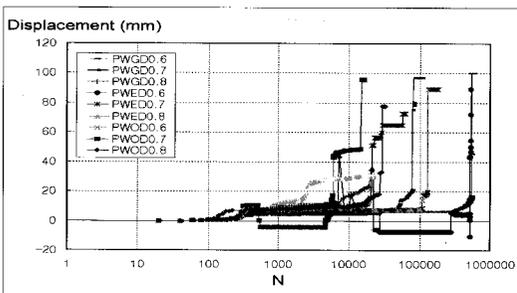


Fig. 3 중앙점 변위 곡선

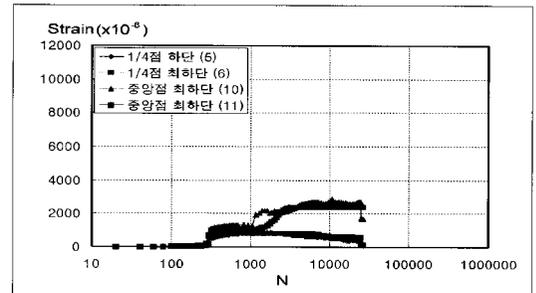


Fig. 4 PWOD실험체의 인장철근 변형도

3.3 하중-변형 관계

Fig. 4에서 Fig. 9까지의 그림은 실험체의 변형률을 반복횟수에 따라 나타낸 것이다. 하중 반복이 시작된 초기에는 철근의 변형이 비교적 일정한 값을 보였다. 주 균열이 형성되어 그 폭과 길이가 뚜렷하게 증가하면서부터 실험체의 변형률이 일부는 증가하고 일부는 거의 변화가 없거나 오히려 약간 감소하였다. 이러한 현상은 하중 저항 기구의 변화에 기인하는 것으로 볼 수 있다.

즉, 순수 휨 구간의 변형이 비교적 일정한 휨 변형 단계에 있다가, 주 균열의 발달에 따라서 소성 힌지를 가지는 강제 변형 단계에 접어들기 때문인 것이다. 이때 주 균열 단면에서는 변형이 크게 증가하지만 그 외의 단면에서는 거의 일정하거나 약간 감소한다.

Fig. 4에서 Fig. 6까지는 반복횟수에 따른 인장 측 철근의 변형률을 나타내었다. 동일한 응력 수준하에서 무보강 실험체보다 보강 실험체의 경우 같은 반복횟수에서 변형률의 크기가 작게 나타났으며 특히 유리섬유

보강 실험체의 경우가 피로성능이 우수한 것으로 나타났다.

한편, 슬래브 철근의 반복횟수에 따른 변형률의 변화는 인장측 철근과 비슷한 경향이며 주 균열의 본격적인 발달 이전에 변형이 느리게 증가하는 것을 Fig. 7에서 Fig. 9까지 관찰할 수 있었다.

3.4 균열양상

모든 실험체에서 주 균열이 크게 증가하여 파괴에 도달하였음을 알 수 있었다.

외부 후긴장 보강 실험체는 대부분 순수 휨 구간에서 주 균열이 발달하였으나, PWED 0.8 실험체는 deviator 부의 균열이 주 균열로 발달하였다. 파괴시의 균열 전개 상황을 유리섬유 보강 실험체와 비교하면 외부 후긴장 보강 실험체의 균열이 작게 발달하는 것을 알 수 있었다. 이는 외부 후긴장 보강 실험체가 상대적으로 균열 분포가 충분히 이루어지지 않은 상태에서 주 균열이 빨리 발달했기 때문으로 판단된다.

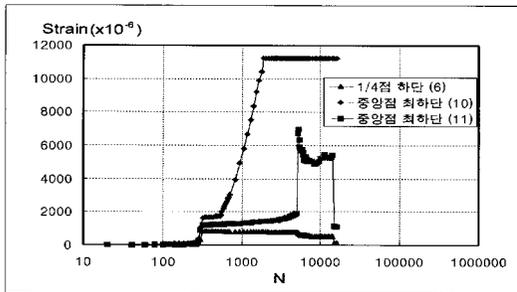


Fig. 5 PWED실험체의 인장철근 변형도

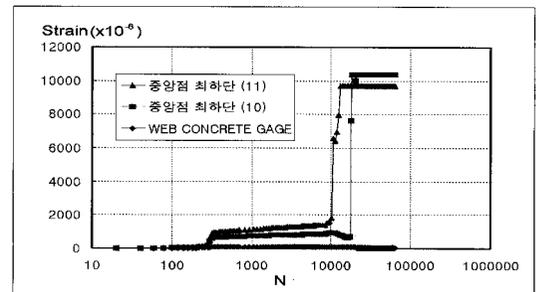


Fig. 6 PWGD실험체의 인장철근 변형도

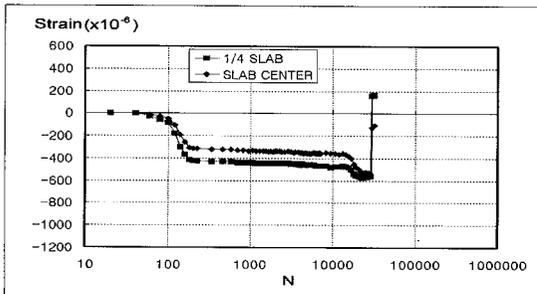


Fig. 7 PWOD실험체의 슬래브철근 변형도

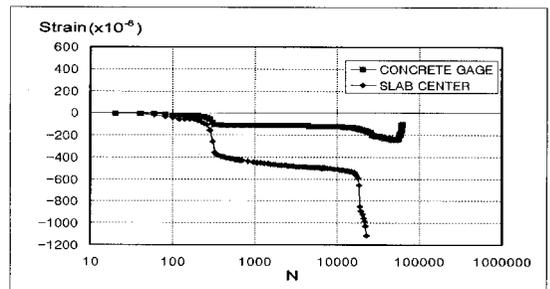


Fig. 8 PWED실험체의 슬래브철근 변형도

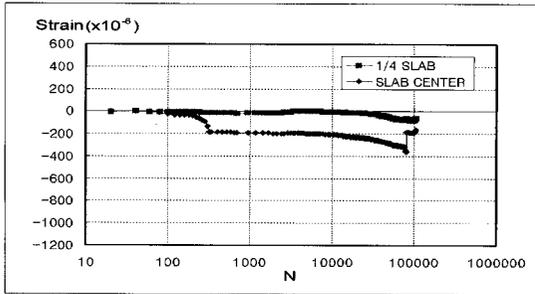


Fig. 9 PWGD실험체의 슬래브철근 변형도

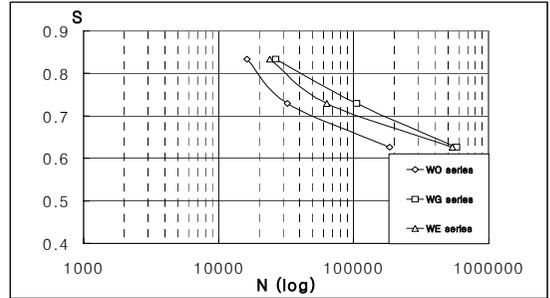


Fig. 10 S-N Curve



Photo 3 외부 후긴장 실험체의 휨변형



Photo 4 유리 섬유 부착 실험체의 균열

유리 섬유 부착 실험체의 경우 Fig. 10에 나타난 S-N 곡선을 살펴보면 외부 후긴장 보강 실험체에 비해 강도에 대한 반복횟수의 크기가 크며, 균열양상은 비교적 전구간에 균열이 충분히 발달한 뒤 주 균열이 발달하는 것으로 관찰할 수 있었다. 외부 후긴장 보강 실험체와 유리섬유 부착 실험체의 휨 변형과 균열형상을 Photo 3과 4에 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 PSC 교량의 보강공법으로 유리섬유 및 외부 후긴장 공법을 적용하여 피로실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 모든 보강 실험체의 파괴시의 반복횟수는 무보강 실험체에 비하여 1.5~3.3배정도 크게 증가한다.
- 2) 실험체의 파괴는 내부 강선의 피로 파괴로 인한 급

작스런 취성파괴의 양상을 보인다.

- 3) 유리섬유 부착 실험체는 하단부의 변형을 제한하여 실험체 내의 균열발달이 억제된다.
- 4) 외부 후긴장 보강 실험체는 내부 강선이 피로 파괴에 도달하기까지 외부 후긴장 강선의 파괴는 없다.
- 5) 외부 후긴장 보강 실험체에서 반복하중 수준이 큰 실험체는 Deviator부의 균열이 주 균열로 성장한다.
- 6) 유리섬유 부착 보강 공법이 피로 성능이 우수하며 외부 후긴장 보강 공법에서는 긴장력의 크기 및 deviator 부분에서의 부착성능 증가에 대한 연구가 필요하다.

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, “도로교 표준시방서”, 1999.
3. 한국 건설기술 연구원, “외부프리스트레스를 도입하는 구조물의 설계 및 시공에 관한 연구”, 1995. 12.
4. American Concrete Institute, “Consideration for Design of Concrete Structure Subjected to Fatigue Loading, ACI Manual of Concrete Practice”, 1996.
5. G. Ramos., “Flexural Strength of Externally Prestressed Concrete Bridge”, Structural Journal, ACI, Vol. 93., No. 5.
6. Kiang-Hwee Tan, Chee-Khoo Ng, “Effects of deviators and Tendon Configuration on Behavior of Externally Prestressed Beams”, Structural Journal, ACI, Vol. 94., No. 1.

(접수일자 : 2002년 9월 2일)