

외부 프리스트레싱과 CFRP 쉬트로 보강된 PSC 보의 실험적 연구

Experimental Study on PSC beams Strengthened by Externally Prestressed Tendons and CFRP Sheets

유 영 준* 박 영 환*** 박 종 섭** 정 우 태*
You, Young Jun Park, Young Hwan Park, Jong Sup Jung, Woo Tai

Abstract

Bridges are deteriorating over service life due to over weight vehicles, environmental conditions and so on. In addition to that, those could be classified into low level bridges which are not fit for highway because of upgrade of the design load. Consequently, such reasons impel the bridges to be repaired or strengthened. Among the rehabilitating methods, FRP sheets and externally prestressing methods are preferred recently.

This paper presents experimental results about the behavior of PSC beams strengthened by external tendons and CFRP sheets.

1. 연구 배경 및 목적

교량은 공용시간 증대, 과적차량의 통행, 환경적 요인 등에 의해 성능 저하가 발생할 뿐만 아니라, 교통하중 증량화에 따른 설계하중이 상향됨에 따라 도로용도에 적합하지 않은 저등급 교량으로 분류되기도 한다. 실제로 국내의 교량 중 약 70%정도가 2등급 이하의 교량이며, 특히 1960년대에서 1970년대에 건설된 교량 중 87.4%가 DB18 혹은 DB 13.5로 설계된 교량으로 최근 급증하는 교통량 및 수송차량의 대형화로 인한 교량의 노후화 현상이 한층 가속화되고 있는 실정이다. (건설교통부, 1996). 이와 같이, 현존하는 많은 교량이 통과 차량하중에 적합하지 않거나 노후되어 교량의 개축 또는 보수, 보강을 필요로 하고 있다.

본 연구에서는 최근 국내에서 그 사용이 빈번한 섬유 부착공법과 외부 프리스트레싱 보강공법을 PSC 보에 적용하여 이에 의한 성능향상 정도와 그 거동 특성을 고찰하기 위한 실험을 수행하였다.

* 한국건설기술연구원 연구원
** 한국건설기술연구원 선임연구원
*** 한국건설기술연구원 수석연구원

2. 실험 개요

본 실험은 교량의 성능을 향상시킬 필요가 발생할 경우를 가정하여 보강한 후의 성능 회복효과 및 향상정도를 검토하기 위한 것으로서 DB18로 설계된 폭 8.5m, 경간장 30m인 PSC의 표준도(건설연구사, 1974)를 근거로 하여 축소 모형을 제작하였다.

콘크리트 압축강도는 주형과 바닥판이 각각 350, 240kgf/cm², 내부 긴장재는 SWPC 7B로서 공칭직경이 12.7mm를 사용하였다. 또한, 상기 표준도의 안전계수(공칭강도/소요강도)를 동일하게 고려하여 실험체에 도입할 긴장력을 결정하였다. CFRP 쉬트는 H사의 NR72 제품을 주형 하부에 대해 시공하였으며, 외부 프리스트레싱은 12.7mm 강선 두 가닥을 2점 절곡으로 배치한 후 각 강선별로 3tonf의 인장력으로 프리스트레스(이하 PS)를 도입하였다. 4점 휨재하를 실시하였으며, 설계 PS가 모두 도입된 실험체와 손실이 발생한 것을 모사하기 위해 PS력의 30%를 임의 손실시킨 실험체에 대해 각각 CFRP 쉬트와 외부 프리스트레싱에 의해 보강을 실시하였다.

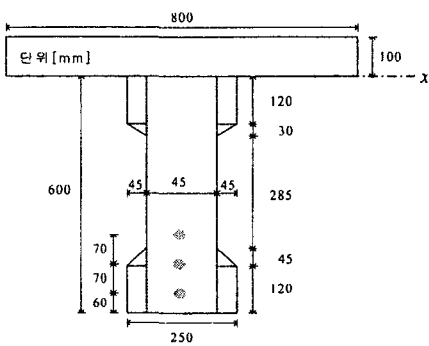


그림 1 중앙단면 제원

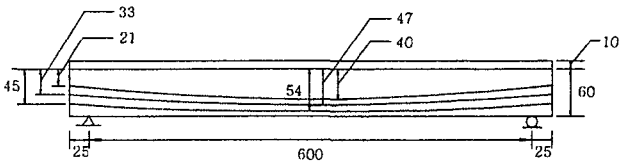


그림 2 내부 긴장재의 위치(단위 : cm)

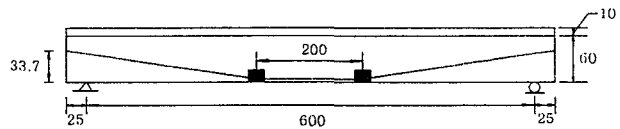


그림 3 외부 긴장재의 위치(단위 : cm)

표 1 PSC 보 실험체 명칭

변수명	보강방법	보강량	설계 PS 힘
CONTROL	무보강	-	39.177 tonf
T30NR	무보강	-	27.424 tonf
CFRPT100	CFRP 쉬트	25cm×2매	39.177 tonf
CFRPT70		25cm×2매	27.424 tonf
EXPT100	외부 긴장	6tonf	39.177 tonf
EXPT70	외부 긴장	6tonf	27.424 tonf

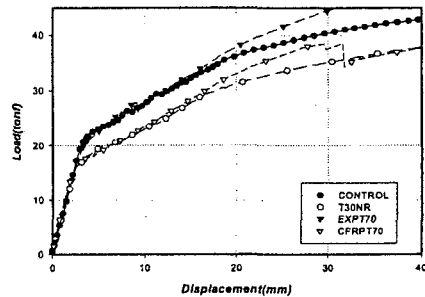


그림 4 사용상태에서의 하중-변위

3. 실험 결과

사용하중 상태에서의 보강성능 : 그림 4에서 내부 긴장재의 PS가 30% 감소된 보를 외부 프리스트레싱으로 보강한 경우(EXPT70) CONTROL 보와 거의 유사하게 진행하고 있는 것으로 보아 내부 긴장재의 PS가 손실되기 이전의 상태로 성능을 개선시키는 것을 확인할 수 있다. 반면, 이를 CFRP 쉬트로 보강할 경우(CFRPT70)에는 사용하중 상태에서의 거동에 있어서 성능 회복효과가 없는 것으로

나타났다. 다만, 인장철근 항복이후 CFRP 슈트에 의해 강성이 유지되어 최대하중이 거의 CONTROL 실험체에 근접하는 경향을 나타내고 있어서 박리파괴를 방지할 수 있는 장치가 마련된다면 CFRP 슈트 보강공법을 이용하여 PSC 보의 강도는 회복시킬 수는 있을 것으로 판단된다.

균열하중과 최대하중 : 측정된 균열하중과 최대하중을 표 2에 나타내었다. 단면해석은 비부착 효과를 고려하기 위하여 Namman(1991)에 의해 제시된 감소계수를 사용하였으며, 편심거리 변화에 따른 긴장재 응력변화량의 감소를 고려하기 위하여 가정한 변위량에 따른 편심변화량이 계산 변위량에 의한 편심변화량과 같아지도록 시산법을 이용하였다. 단면해석에 의한 강도 예측은 대부분 안전측이지만, CFRP 슈트로 보강한 경우에는 이론값이 최대하중을 다소 과대평가하고 있음을 볼 수 있다(③/④). 내부 긴장력의 손실에 따라 균열하중 값은 20.5%(CONTROL), 19.7%(CFRP), 18.6%(EXPT)로 감소하지만 최대하중은 각각 2.7%, 4.9%, 5.7%로 내부 긴장력의 손실이 30%임을 감안할 때 긴장력의 손실이 없는 실험체와 거의 동일한 값을 가지고 있음을 볼 수 있어 긴장력의 크기는 보의 극한강도에 미치는 영향이 작음을 알 수 있다.

표 2 실험 결과

실험결과	실험체별 균열하중 및 최대하중						CFRP 슈트 보강 실험체별 박리하중					
	균열하중 (tonf)			최대하중 (tonf)			박리하중 (tonf)			파괴하중 (tonf)		
실험체명	실험값 ①	이론값 ②	①/②	실험값 ③	이론값 ④	③/④	실험값 ⑤	이론값 ⑥	⑤/⑥	실험값 ⑦	이론값 ⑧	⑦/⑧
CFRPT100	21.3	19.5	1.09	46.32	50.0	0.93	45.15	38.87	1.16	46.32	37.78	1.23
CFRPT70	17.1	14.7	1.16	44.05	49.8	0.88	38.58	37.50	1.03	44.05	37.63	1.17
CONTROL	21.0	19.3	1.09	47.36	37.8	1.25	외부 긴장재의 단계별 변형률 증가량($\times 10^{-6}$)					
T30NR	16.7	14.5	1.15	46.09	37.6	1.23						
EXPT100	25.3	24.4	1.04	67.10	57.7	1.16	긴장 완료후 ①	균열 하중시 ②	최대 하중시 ③	⑤/②	⑦/①	
EXPT70	20.6	19.6	1.05	63.31	57.5	1.10	1,970	230	6,744	0.12	3.42	
							2,194	215	5,334	0.10	2.43	

CFRP 슈트로 보강된 실험체에 대해서는 일반적인 CFRP 슈트로 보강된 RC 보에서와 마찬가지로 부착파괴에 의한 조기파괴가 발생하였다. 이것은 단면해석 방법이 콘크리트가 극한압축변형률에 도달함과 동시에 CFRP 슈트는 파단변형률에 도달한다고 가정하고 있기 때문으로 실험체는 CFRP 슈트의 변형률이 파단변형률에 도달하기 전에 부착파괴가 진행되었기 때문이다. RC 부재에서는 인장철근의 항복변형률보다 CFRP 슈트의 파단변형률이 크기 때문에 CFRP 슈트가 인장측 파괴를 지배하므로 CFRP 슈트 파단시의 강도가 곧 보의 공칭강도가 된다. 하지만 PSC 보를 CFRP 슈트로 보강할 경우에는 극한 상태에서 긴장재의 변형률이 대략 4~6%로 CFRP 슈트의 파단변형률 1.5%~2%에 비해 월등히 크기 때문에 보강량에 따라서는 극한 상태 도달 전에 CFRP 슈트가 파단 또는 박리되며, 이런 경우에는 소성구간이 있는 강재와는 달리 완전탄성체인 CFRP 슈트는 보강성능에 전혀 기여하지 못하게 된다. 따라서, CFRP 슈트로 PSC 보를 보강하는 경우에는 CFRP 슈트의 파단 또는 박리 시까지 압축파괴가 발생하는지 여부를 검토하여 발생하지 않을 경우에만 CFRP 슈트 파단 또는 박리시의 강도를 공칭강도로 결정할 수 있다.

하중-변형률 관계 : 그림 5에서 슈트의 최대 변형률은 균열하중 이전까지는 중앙에서 발생하고 점차 가력점 쪽으로 이동하여 그 이후에는 중앙과 가력점 사이에서 발생하고, 항복 이후 급속히 증가하여 최종적으로 가력점 하단부에서 발생하는 것을 볼 수 있다. 한편, 순수 휨구간 내에서는 하중에 따

라 같은 변형률로 변화하는 것으로 나타났으며, 그 값은 가력점 하단부에서와 크게 차이가 나지 않는 것으로 나타났다. 그러나, 단부쪽으로 떨어진 위치에서는 가력점에서의 변형률과 점차 격차가 벌어지는 경향을 나타내고 있다. 이러한 원인으로 가력점 하단부에서의 박리가 단부쪽으로 급격하게 진행된 것으로 판단된다.

표 2에서 균열하중 상태에서 외부 긴장재에 발생한 추가적으로 변형률은 유효 PS에 의해 발생한 변형률에 비해 10% 정도 발생하였고, 최대하중 상태가 되었을 때에는 342% (EXPT100), 243% (EXPT70) 증가하였다. 따라서, 외부 프리스트레싱으로 보강된 PSC 보의 보강설계를 검토할 경우, 사용하중에 대한 검토시에는 변형률의 증가량의 크지 않으므로 외부 긴장재의 응력 변화량을 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다. 그러나, 극한하중 상태에서의 변형률은 유효 PS에 비해 200%이상 증가되므로 증가된 변형률로 인해 긴장재에는 인장강도 이상의 응력이 발생할 수 있기 때문에 보의 극한 강도를 평가할 시에는 이에 대한 엄밀한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

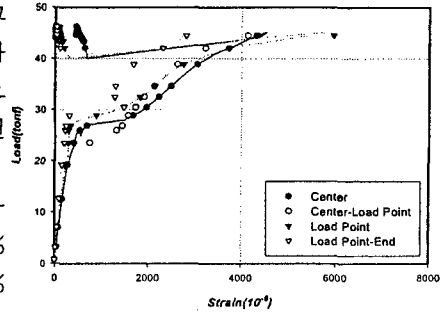


그림 5 하중-변형률 곡선(CFRPT100)

4. 결론

본 연구결과를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 단면 해석결과 FRP 보강공법에 의한 응력 개선 효과는 거의 나타나지 않고 있다. 한편, 외부 프리스트레싱에 의해 보강된 실험체의 경우에는 외부 PS에 의해 응력 개선 효과가 뚜렷이 나타나고 있음을 알 수 있다.
- (2) PSC 보는 극한 상태에서 긴장재의 변형률이 대략 4~6%로 CFRP 쉬트의 파단변형률 1.5%~2%에 비해 월등히 크기 때문에 보강량에 따라서는 극한 상태 도달 전에 CFRP 쉬트가 파단 또는 박리되어 CFRP 쉬트는 보강성능에 기여하지 못하게 되므로 이러한 박리파괴를 방지할 수 있다면 FRP 보강공법을 이용하여 PSC 보의 강도를 회복시킬 수는 있을 것으로 판단된다.
- (3) 외부 긴장재의 변형률 변화량은 사용하중 상태에서 유효 PS에 의한 변형률의 10% 내외로 사용하중에 대한 검토시에는 외부 긴장재의 응력 변화량을 고려하지 않아도 될 것으로 판단되지만 극한 상태에서는 243%, 342%로 증가되므로 보의 극한 강도를 평가할 시에는 이에 대한 엄밀한 고려가 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설연구사, <건설부제정>표준설계도집원, 1974.
2. Antoine E. Naaman, Fadi M. Alkhairi, "Stress at Ultimate in Unbonded Post-Tensioning Tendons : Part 2 - Proposed Methodology", ACI Structural Journal, Vol. 88, Issue 6, 1991.
3. 신현목, 프리스트레스트 콘크리트, 동명사, 1995.
4. 건설교통부, 교량현황조사서, 1996.
5. 한국콘크리트학회 · 대한건축학회, 콘크리트 구조설계기준, 1999.