

# 외부 후긴장으로 보강한 합성보에 대한 실험적 연구

## Experimental Study on the Composite Beam Strengthened by External Post Tensioning

김 기 봉<sup>1)</sup> · 정 영 수<sup>1)</sup> · 최 혁 주<sup>2)</sup> · 강 보 순<sup>3)</sup>

*Kim, Gi Bong Chung, Young Soo Choi, Hyok Chu Kang, Bo Soon*

요 약 : 최근 2등급(DB18)으로 설계된 국도상의 일부 교량들은 교통량 수송능력 향상을 위해 외부후긴장 방법을 적용하여 보강하는 방법이 사용되고 있으나, 그러한 보강 작업의 대부분은 실험 및 해석적 검증없이 사용되고 있다. 본 논문에서는 DB18로 설계된 단순 합성보에 외부 후긴장을 적용하여 보강효과 및 거동을 실험적으로 연구하였으며 실험 결과로부터 외부 후긴장은 극한 및 항복에 대한 강성을 증가시키며 인장파괴 모드로 설계된 구조물의 인장보강에 특히 효과적임을 알 수 있었다.

ABSTRACT : The application of additional post-tensioning tendons has recently been widely considered and requires very little interference with the existing structure. Several bridges on the national roadway designed as the second class were strengthened by external post-tensioning for the capacity enhancement purpose, but much of that strengthening work was not verified analytically as well as experimentally. This paper examines experimentally the behavior of simple composite steel-concrete beams designed as the second class(DB-18) When they are strengthened with external post-tensioning tendon. Test results show that external post-tensioning increases the ultimate load and the magnitude of tendon force increases the yield load but not the ultimate load.

핵심용어 : 외부 후긴장, 강합성보, 긴장재, 보강, 긴장력

KEYWORDS : External post-tensioning, Composite steel-concrete beams, Tendon, Strengthening, Tendon force

### 1. 서 론

국내의 교량중 약 70%정도가 2등급이하로 설계되었으며 1960년대에서 1970년대에 건설된

교량중 약 87.4%가 DB18 혹은 DB13.5로 설계되었으며 최근 교통량의 급격한 증가 및 수송차량의 대형화로 교량의 노후화 현상이 한층 가속화 되고 있으며 국도상의 각종 교량에 따라서는

1) 정회원, 중앙대학교 토목공학과 교수  
2) 중앙대학교 토목공학과 석사과정  
3) 중앙대학교 토목공학과 강사

본 논문에 대한 토의를 1999년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

설계기준의 상향 조정 방안이 검토되고 있는 실정이다<sup>(1)</sup>. 따라서 현존하는 많은 교량이 통과 차량 하중에 적합하지 않고, 또 노후되어 교량의 신설 또는 보수, 보강을 필요로 하고 있다.

본 연구에서는 강합성 구조물에 긴장력을 도입하는 보강 방법중 특히 강형(Steel)에 외부 후긴장을 이용하는 보강 방법에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 보강 방법으로 외부 후긴장을 이용할 경우 보강부재의 자중이 가벼워 하중의 증가가 거의 없으며 설치가 간편하며 추후 필요시 긴장재의 교체가 용이하다는 장점이 있다<sup>(2)</sup>. 국내에서 강합성교에 후긴장을 적용한 사례는 문막교와 양구대교 2건이 있으나 보강 설계의 경우 실험 및 이론적 검증 없이 경험에 의해 이루어지고 있는 실정이다<sup>(3)</sup>. 따라서 본 실험에서는 보강한 단순 강-콘크리트 합성부재에 대한 파괴 실험을 수행하여 정모멘트 범위에서의 휨거동과 보강시 강성의 증가 정도와 긴장력 차이에 따른 효과의 차이를 비교하였으며 실험 결과치와 비선형 구조해석 Program에 의한 해석치를 비교 검증 하였다.

해석은 실제 실험과 동일한 조건을 부여하였으며 비선형 해석을 위해 smeared cracking model을 사용하였으며 철근 및 강재는 Von-misses yield criterion을 사용하였다. 또한 철근, 콘크리트 상판 및 강재의 부착은 완전 부착으로 가정하였다.

## 2. 실험 내용 및 방법

### 2.1 실험체 제작

실험체는 도로교 시방서 규정에 의거하여 2등급(DB18) 수준으로 제작하였으며<sup>(2)(3)(4)</sup> 긴장재는 실험체의 하부 인장 플랜지(tension flange) 바닥면을 따라 긴장재(7연선 Strand)를 직선 부분 배치하였고 긴장재의 재료특성은 표 2와 같다.

긴장력 및 긴장재 위치는 DB24 수준의 성능과 초기 긴장력 도입시 압축부 콘크리트 상판

표 1. 실험체 명

	실험체명	보강여부	비고
Case 1.	CSWO	무보강	
Case 2.	CSWT-1	9ton 긴장보강	긴장재 배치는
Case 3.	CSWT-2	12ton 긴장보강	7연선 Strand를
Case 4.	CSWT-3	15ton 긴장보강	실험체 하부에 직선 부분배치

표 2. 긴장재 재료특성

종류	Nominal Diameter	Breaking Load	Unit Weight	긴장 방법	길이
7연선 (KSD 7002)	15.2 mm	26.5 ton	1.1 kg/m	하부 플랜지 하단에 직선 배치	4m

(concrete deck)상에 나타나는 인장응력에 의해 발생할수 있는 인장 균열등의 현상을 고려하여 표 1과 같은 실험체를 사용하였다. 사용 긴장력은 구조 계산에 의해 DB24로의 성능개선과 초기 긴장력 도입시 압축부 콘크리트 상판에 발생하는 인장응력에 의한 인장균열을 방지하기 위해 허용범위<sup>(4)</sup>내의 인장응력을 발생시키는 계산상 적절한 긴장력인 12ton을 적용하였고 허용범위를 초과하는 인장응력을 발생시키는 15ton 긴장보강의 경우와 외부하중 재하시 추가 긴장력의 효과를 검토하기 위하여 성능 향상을 위한 필요 긴장력에 미달되는 9ton 긴장보강 실험체에 대한 실험을 수행하여 긴장력별 보강효과 및 영향을 비교하였다. 긴장재 위치는 긴장작업의 공간확보를 위해, 즉 긴장위치에서 최소 돌출 긴장재길이와 prestressing jack 길

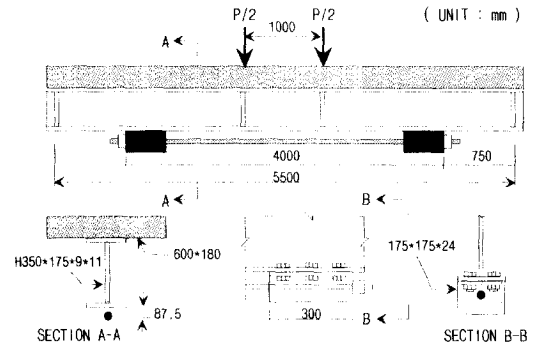


그림 1. 실험체 단면 상세

이의 확보를 위해 지점과의 간격을 75cm로 결정 하였으며 정착구의 단면은 mono head의 지름이 60mm인 점을 감안하여 정착판에 긴장력에 의한 판좌굴을 방지할 수 있는 충분한 두께와 크기의 강판을 사용 하였다<sup>(5)</sup>.

## 2.2 사용재료

본 실험에서 사용된 콘크리트는 설계강도가 240kg/cm<sup>2</sup>로 설계된 표 3과 같은 레미콘 제품을 사용하였으며, 콘크리트재령 28일 압축강도 실험 결과 표 4와 같이 240.64kg/cm<sup>2</sup>로 나타났다. 또한 긴장재와 정착구 mono head는 현재 시판되고 있는 KSD7002 7연선 규격제품과  $\phi$  60mm 규격제품을 사용하였다.

## 2.3 하중재하 및 측정방법

가력은 컴퓨터로 제어되는 정격하중 50ton의 actuator 및 정격하중 100ton의 오일 잭을 strong frame에 설치하여 재하 하였으며 실험체의 운반은 Strong frame에 레일과 chain block 을 설치하여 실험체가 정확한 위치에 놓일수 있도록 하였다.

하중의 재하는 DB24 후륜 집중하중에 근접한 10ton까지는 2ton씩, 그리고 구조해석에 의한 예상 항복하중까지는 1ton씩 증가시켰으며 그후 부재 파괴시까지 0.5 ton씩 증가시켜 재하 하였다. 또한 실험체에 하중 재하시 일정한 휨 모멘트를 가지는 구간을 만들기 위해 2점 재하가 가능한 재하블럭을 제작하여 사용하였다.

실험체의 거동을 측정하기 위하여 실험부재 중

표 4. 콘크리트 28일 압축강도

NO.	단면적 (cm <sup>2</sup> )	최대하중 (kg)	압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	비고
1	78.54	19230.0	244.84	
2	78.54	18290.0	232.88	
3	78.54	19180.0	244.21	
평균		18900	240.64	

양 및 L/4지점의 상부콘크리트면 및 상하부 플랜지에 각각 변형계를 설치하였으며 부재 중앙부와 L/4 지점의 처짐을 측정하기 위하여 LVDT를 설치하였으며 하중 재하시 실험체 강형의 복부판에 나타나는 하중상태에 따른 변형의 형태 및 위치, 진전 상황을 용이하게 파악하기 위하여 강형 복부판에 흰색 페인트를 도포하였다. 참고적으로 실험체 제작시 적용한 전단연결재의 작용을 검증하기 위해 그림 2와 같이 dial gage를 설치하여 슬래브와 강형간의 상대변위(slip)를 측정하였으며 특히 긴장재 하부에 변형계를 설치하여 초기 긴장시와 긴장후 외부하중에 따른 긴장재의 영향을 측정하였다. 변형계의 경우 변형계의 손상대비 및 보다 정확한 측정값을 얻기위하여 같은 위치에 2개씩의 변형계를 설치하였다. 그림 2는 본 실험

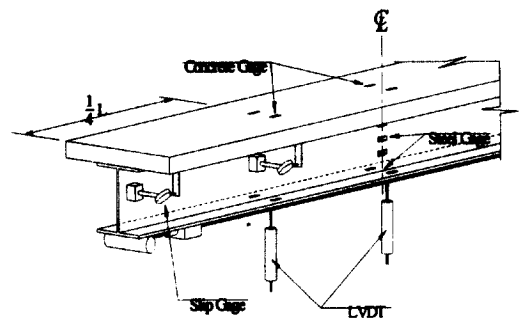


그림 2. 변형계 및 변위계 위치 상세도

표 3. SLAB의 배합설계

항목 구분	설계기준 강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 (cm)	공기량의 범위 (%)	혼화제	골재종류구분	염화물 함량 (kg/cm <sup>2</sup> )	시멘트종류에 따른 구분
시방 배합	240	25	12	4.5±1	표준형	부순돌	0.30이하	포틀랜드 시멘트1종

에서 변형률 및 변위의 측정 위치를 나타낸 그림이며 그림 3은 실험체 설치 후 긴장을 위한 prestressing jack이 설치된 모습과 실험체 고정 을 위해 제작된 고정 장치부의 모습을 나타낸 그림이다.



그림 3. 실험체 긴장 모습

### 3. 실험결과 및 구조해석 결과와의 비교 고찰

본 실험에서는 합성보 실험체의 압축부 콘크리트의 변형률이 극한 변형률 0.003~0.004에 도달했을 경우를 파괴로 간주하였으며 또한 보강 시험체의 비선형 거동을 검증하기 위하여 비선형 구조해석 프로그램인 DIANA를 사용하여 구조해석을 실시하여 실험 결과와 비교·분석 하였다.

해석결과 항복강도는 콘크리트의 경우 실험치와 거의 유사한 값을 나타냈으며 강형의 경우 실험 결과가 조금 큰 값을 나타냈다. 하중-변형을 비교결과 탄성구간에서는 콘크리트 및 강형의 경우 기울기가 거의 같게 나타났으며 항복점 및 파괴 강도는 약간의 차이를 보였지만 실험치와 유사한 경향을 보였다.

#### 3.1 하중-변위 관계

그림 4는 무보강 및 9ton, 12ton, 15ton의 긴장력으로 보강한 실험체의 시간 중앙에서의 하중-변위

관계를 나타낸 그림으로 합성보 실험체가 파괴될 때까지 재하한 하중의 전 범위에 대한 영역을 나타냈다. 각 경우에 거동은 초기엔 모두 선형이며 처음 인장플랜지(tension flange)의 항복이 발생하면 강재의 항복은 점차 복부판(web)으로 진척됨에 따라 거동은 점차적으로 비선형을 나타낸다.

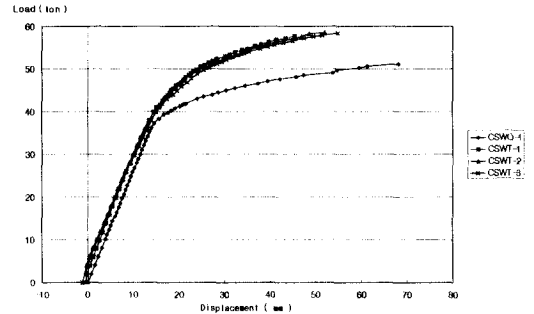


그림 4. 실험체 시간 중앙 하중-변위 관계

그림 4에서 각 긴장력별로 하중-변위 관계를 비교해 보면 합성보 실험체에 후긴장 보강을 한 경우 무보강에 비해 항복하중 및 극한하중이 모두 증가했으나 각 긴장력 별로는 항복 및 극한하중은 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

선형 및 비선형구간에서 하중에 따른 변위의 증가 추세를 살펴보면 선형 구간에서는 보강을 한 경우와 무보강의 경우가 거의 유사한 기울기로 증가하며 비선형 구간에서는 무보강의 경우가 보강의 경우보다 더욱 급격한 변위의 증가를 보이며 항복후에도 무보강의 경우보다 뚜렷한 강성의 증가가 있음을 알 수 있다.

#### 3.2 하중-변형률 관계

그림 5는 각 긴장력별 합성보 실험체의 인장플랜지에 대한 하중-변형률 관계를 나타낸 그림으로 긴장 보강한 실험체의 경우 초기 긴장력에 의해 변형률은 무보강에 비해 초기값이 감소된 상태에서 변형률이 증가한다.

그림에서와 같이 곡선은 인장플랜지가 항복할

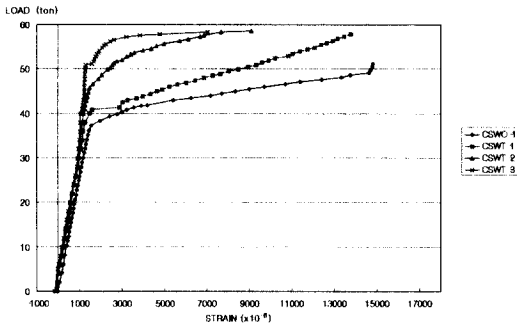


그림 5. 실험체 지간 중앙 인장플랜지의 하중-변형률 관계

때까지 선형으로 증가하며 인장플랜지 항복후 중립축은 상향으로 이동됨에 따라 변형률이 비선형을 나타내며 급격히 증가한다.

무보강 실험체에 비해 보강시험체의 경우 항복하중(yield load) 및 극한하중(ultimate load)이 모두 큰폭으로 상승했으나 그림 5에서도 알 수 있듯이 긴장력별로 항복하중 및 항복후 강성도는 증가하지만 극한하중은 거의 차이가 없었다.

긴장재는 강제 항복 및 콘크리트 파괴후에도 항복하지 않았으므로 이후 하중은 전부 긴장력에 의해 저항된다고 볼 수 있으며 본 실험에서는 긴장재의 항복전에 실험을 중단하였다.

그림 6은 실험값과 해석값을 비교한 그림으로 선형구간에서는 거의 유사한 값과 기울기를 나타내며 항복 및 극한에서의 하중은 약간의 차이를 나타내지만 거의 유사하다.

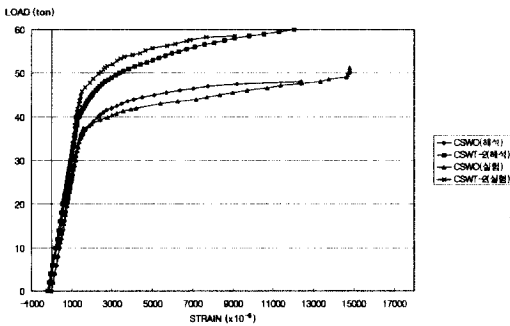


그림 6. 실험체 지간 중앙 인장플랜지의 하중-변형률 관계에 대한 실험치와 해석치의 비교

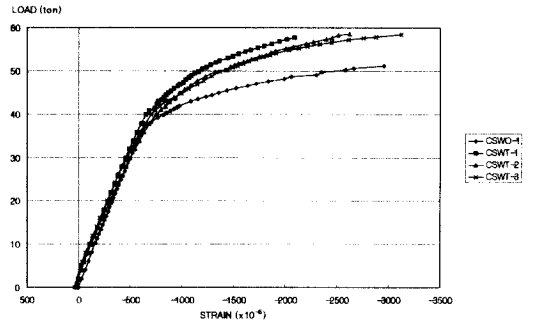


그림 7. 실험체 지간 중앙 압축부 슬래브에 대한 하중-변형률 관계

그림 7은 압축부 콘크리트 상판의 전 재하 하중 범위에 대한 하중-변형률 관계를 나타낸 그림이며 긴장 보강한 경우는 무보강의 경우에 비해 극한에 대한 하중이 약 51ton에서 59ton정도로 크게 증가하였음을 알 수 있다. 압축부 콘크리트 상판의 경우 강제에 비해 보강 효과가 다소 떨어지며 특히 초기 긴장력에 의해 일정수준의 하중재하 전에는 인장을 나타내므로 초기 긴장력 도입시 인장균열에 대한 대비가 필요하다. 따라서 보강 설계시 긴장력 및 긴장재 정착 위치는 초기 긴장력 도입 직후 압축부 콘크리트 상판상에 나타나는 인장응력에 의해 인장균열이 발생하지 않도록 설계해야 한다. 실험 결과 긴장력 도입 직후 인장응력이 허용치를 초과할것으로 예상했던 15ton 긴장의 경우에도 시방서에서 규정하는 0.2mm이상의 균열은 초기 긴장력 도입시에 발생하지 않았지

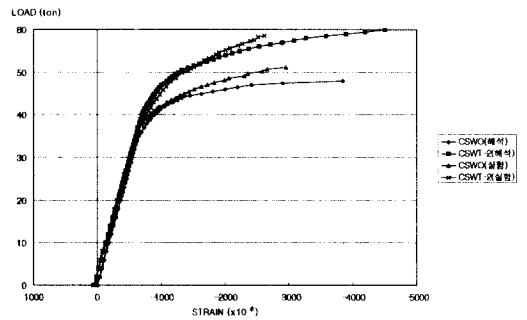


그림 8. 실험체 지간중앙 압축부 콘크리트 데크의 하중-변형률 관계에 대한 실험치와 해석치의 비교

만 실제 설계시에는 허용치 내에 속하는 응력을 갖도록 긴장력 및 긴장재 위치를 선정하여 안전측으로 설계하는 것이 바람직하다고 사료된다.

그림 8은 해석값과 실험 결과치를 비교한 곡선을 나타낸 그림으로 선형구간에서 항복 및 극한에 대한 하중이 거의 일치하며 선형구간에서의 기울기도 거의 일치한다.

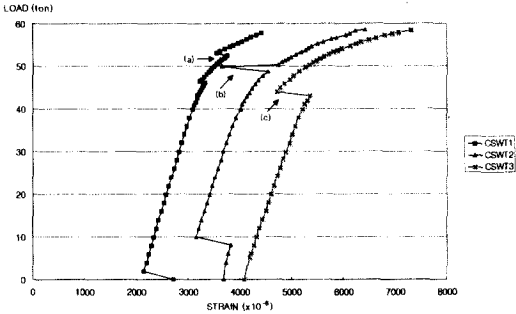


그림 9. 긴장재의 지간 중앙 위치에서의 하중-변형률 관계

그림 9는 긴장재의 지간 중앙부에서 측정된 변형률 값을 재하한 하중별로 나타낸 그림이다. 거동은 초기 모두 선형으로 증가하다가 인장플랜지 항복이후 변형률이 급격히 증가하는데, 이는 긴장재가 강재 항복 후 더 큰 비율의 몫으로 내부 모멘트에 저항을 시작했다는 것을 알 수 있다.

그림 9에서 9ton과 12ton 긴장 보강의 경우 초기 변형률이 급격히 감소되는 구간을 보이는데 이는 정착구 영향에 의한 긴장재의 응력 감소 현상으로 추정된다.

### 3.3 상대변위

그림 10은 무보강 실험체와 각 긴장력을 적용한 실험체의 상대변위(slip)를 나타낸 그림으로 긴장 보강 하였을 경우 무보강보다 50%이상 상대변위가 억제되었으며 무보강의 경우와 비교할 때 특히 초기 20ton 미만의 외부하중 작용시까지는 상대변위(slip)가 전혀 없었는데 이는 긴장력에 의해 하중에 대한 상대변위도 상당히 억제된

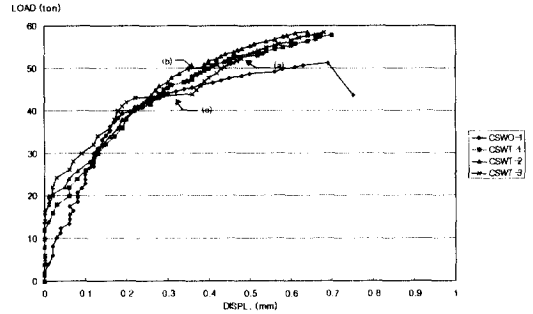


그림 10. 실험체의 하중-상대변위 관계

다는 것을 알 수 있다.

그림 9와 10의 (a),(b),(c)를 비교해 볼 때 (a),(b),(c)의 위치에서 전단 연결재의 손상에 따른 슬립 현상이 있었음을 알 수 있다.

### 3.4 보강 효과 및 결론

실험체의 각 위치별, 긴장력별 영향을 살펴보면 외부 후긴장을 적용한 경우 대체로 항복하중 및 극한하중이 무보강 시험체에 비해 증가하며 변위량 또한 현저하게 감소한다. 따라서 긴장력을 적용한 경우가 무보강의 경우보다 극한 변형률에 도달하는 하중이 크게 증가하므로 긴장은 최초 인장플랜지의 항복을 지연시키는 역할을 한다고 할 수 있다. 또한 외부 후긴장을 적용하는 방법은 강재에 대한 보강효과가 특히 우수한데 이는 긴장력 작용시 단면 하부의 경우 긴장력에 의해 외부하중에 대한 반대의 응력만 발생하므로 단면 상부에서 보다 큰 응력 감소 효과가 있기 때문이다.

표 5와 그림 11에는 실험체의 항복 및 인장강도에 대해, 실험을 통해 얻은 보강 효과를 비교하여 나타냈으며 그림 12는 실험체의 파괴모습을 나타낸 그림이다.

그림 11에서는 무보강 및 12ton 긴장보강 실험체의 인장 및 압축부의 거동을 비교하였는데 실험체는 합성 거동을 하므로 인장 및 압축부의 상태에 따른 거동의 양상이 비슷하게 나타난다. 초

표 5. 실험체의 보강효과

보강여부 (실험체명)		항복하중 (ton)	효과 (%)	극한하중 (ton)	효과 (%)	(초기 변형률 감소효과) 긴장력 도입직후 인장플랜지 변형률 ( $\times 10^{-6}$ )
무보강 (CSWO)	실험치	36.2	-	51.2	-	0
	해석치	33	-	48	-	0
9ton 긴장 (CSWT-1)	실험치	41	13.3	57.8	13	-86
	해석치	38	15.5	60	25	-152.8
12ton 긴장 (CSWT-2)	실험치	45.8	26.5	58.6	14.5	-135
	해석치	40	21.2	60	25	-203.7
15ton 긴장 (CSWT-3)	실험치	51	40.9	58.4	14.1	-169
	해석치	42	27.3	60	25	-254.6

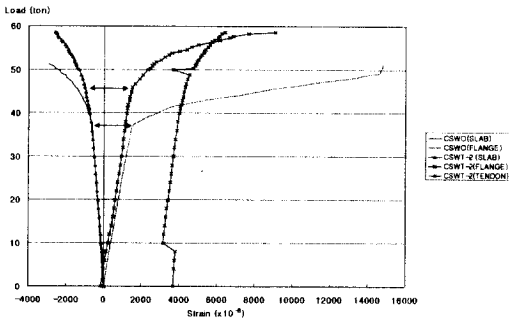


그림 11. 실험체 인장 및 압축부의 변형률 비교

기 무보강 및 12ton 긴장 보강의 경우 모두 인장부, 압축부 및 긴장재동의 변형률은 일정한 기울기로 선형증가를 하며 강재 항복점에서 변형률이 급격히 증가한다. 또한 강재의 경우 항복이후 강

성증가 폭이 압축부에 비해 현저히 증가했음을 알 수 있다.

일반적으로 합성보는 인장파괴 모드로 설계하므로 단순지간에서는 위험단면이 대체로 단면하부, 즉 하부플랜지이다. 따라서 외부 후긴장 보강 방법은 단면하부의 보강에 매우 효과적이지만 상부단면, 즉 콘크리트부에서는 단면하부 만큼의 효과는 기대하기 어렵다.

그러므로 외부 후긴장 보강은 정모멘트 부에서 인장파괴 모드로 설계된 구조물의 인장보강에 매우 적합하다고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 합성형교량의 보수 보강 대책으

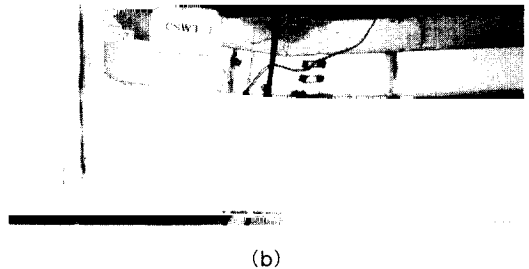
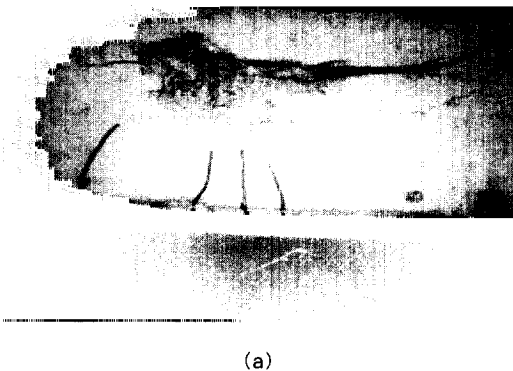


그림 12. 실험체 파괴모습

로 외부 후긴장을 적용하였을 때 실험 및 구조해석 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 강교 또는 합성형교량에 후긴장을 적용하여 교량의 항복강도 및 극한강도를 증가시킬 수 있다.
- 2) 후긴장을 적용한 경우 탄성범위가 확대된다.
- 3) 단순 합성보에 후긴장 보강을 할 경우 인장측 하부플랜지에서 더욱 효과적이다.
- 4) 구조물에 후긴장을 적용하는 경우 긴장력의 증가에 따라 항복강도 및 항복후 강성은 증가하지만 극한강도의 증가효과는 매우 미비하다.
- 5) 후긴장을 적용한 보의 일부 단면은 압축응력과 인장응력을 번갈아 받게되므로 부재의 피로연구가 필요하다.
- 6) 구조물의 압축부 콘크리트 및 처짐에 대한 보강의 경우 반드시 큰 긴장력이 더 큰 보강효과를 나타내지는 않는다.
- 7) 후긴장보 설계시 초기 긴장력에 의해 발생되는 부응력이 상부 슬래브에 오히려 악영향을 미칠 수 있다는 점을 감안하여 규정하는 긴장력의 크기 및 긴장재 정착위치를 신중히 고려하여야 한다.

### 감사의 말

본 연구는 '96 건설교통 기술연구 개발사업' 및 '98 중대 학술 연구 조성비 지원'에 의해 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- (1) 건설교통부, 한국건설기술연구원, 1996.5, "교량 현황 조사"
- (2) Saadatmanesh, H., Albrecht, P., and Ayyub, B. M. 1989. "Design guidelines for prestressed composite beams," J.Struct. Engrg., ASCE
- (3) 건설교통부, 원주 지방국도 관리청, 1996.9, "문막교 보강공사에 따른 보강 효과 및 내하력 조사 보고서"
- (4) 건설교통부, 1996. "도로교 표준시방서"
- (5) 한국건설기술연구원, 1995.12, "외부프리스트레스를 도입하는 구조물의 설계 및 시공에 관한 연구"
- (6) Saadatmanesh, H., Albrecht, P., and Ayyub, B. M. 1989. "Analytical study of prestressed composite beams," J.Struct. Engrg., ASCE, 115(9)
- (7) Hoadley, P. G. (1963). "Behavior of prestressed composite steel beams," J.Struct. Div., ASCE, 89(3)
- (8) Troitsky M. S., 1990. "Prestressed Steel Bridges Theory and Design", Van Nostrand Reinhold Co, New York.
- (9) Hambly E. C., 1991. "Bridge Deck Behaviour", Chapman & Hall.
- (10) 방명석, "강교설계의 기초", 도서출판 건설도서

(접수일자 : 1998년 11월 5일)