

# 세그멘탈 합성보 접합부 전단 모델 시험

## Shear Modeling Tests for Post-Tensioned Composite Segmental Beams

실동재\* 김인규\*\* 유승룡\*\*\*  
 Seol, Dong Jae Kim, In Gyu Yu, Sung Yong

### ABSTRACT

A precast concrete beam which is larger than the limits of domestic transportation regulation in weight, length, and volume is divided into three parts, transported separately, and erected with a composite beam by post-tensioning in site. Shear tests are performed on the post-tensioned composite segmental beam models with 1/2 scale. The jacking force and the ratio of area of shear key to beam section are major experimental variables. Nine shear strength are resulted from the tests with two variables. Rational equation for estimation of shear strength are obtained from the regression analysis on test results.

### 1. 서론

본제화된 3개의 부재를 포스트텐션에 의해 일체화시킨 합성보의 내력에서 가장 의문시되는 부분이 접합부의 전단성능이라 할 수 있다. 이 합성보의 설계를 위하여 접합부에서의 전단내력을 예측할 수 있어야 한다. 9개의 전단 모델 시험체를 긴장력과 전단키 면적비를 변수로 하여 제작, 실험하였다. 결과에 대한 회귀분석으로 합리적인 예측식을 제안하려한다.

시험체의 수는 총 9개로 변수는 전단키 면적비와 초기 긴장력으로 하였다. 시험체 단면적에 대한 전단키 면적 비율은 0, 0.1, 0.2의 3가지 값으로 설계하였다. 강선 긴장력은 각 전단키 비율 시험체에 직경 12.7mm 7연강선을 2, 3, 4개의 3가지 유형으로 적용하였다. 강선 한 개당 긴장력은 13.5tf으로 동일하게 적용하였다. 표 1에 각각의 조건에서 설계된 시험체의 휨내력, 전단 내력, 접합부 전단내력과 예상 파괴 모드를 나열하였다.

표 1 시험체 변수 및 예측 강도

시험체명	강선수(개)	전단키면적비	받침점거리(m)	휨강도(t)	전단강도(t)	접합부 강도(t)	예상파괴모드
S-1	2	0.0	0.6	56.4	83.58	31.40	접합부 파괴
S-2		0.1				38.12	
S-3		0.2				46.76	
S-4	3	0.0		78.5	84.29	47.09	
S-5		0.1				53.81	
S-6		0.2				60.53	
S-7	4	0.0		96.0	85.00	62.79	
S-8		0.1				69.51	
S-9		0.2				76.23	

주 : 전단키 면적비란 시험체 단면적에 대한 전단키 단면적을 나타낸다.

### 2. 시험체 제작

시험체는 삼성물산 음성 PC 공장에서 제작하였다. 실험체 제작 물드는 10mm 철판을 사용하여 제작하였고, 콘크리트는 자동화 배치플랜트 설비의 회전식 믹서에 의해 배합된 콘크리트를 진동기를 사용하여 타설하였다.

전단키 면적비에 따른 접합면 형상은 그림 1에서 그림 3과 같다.

\* 정회원, 동국대학교 대학원 석사과정

\*\* 정회원, 동국대학교 대학원 석사과정

\*\*\* 정회원, 동국대학교 부교수, 공학박사

※ 본 연구는 (주)삼성물산, 삼연PCE, 건설교통부의 연구비 지원과 강남건영(주) 장소합찬으로 수행 되었습니다.

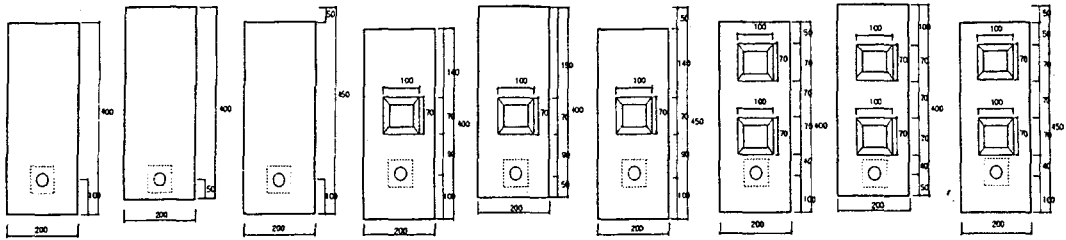


그림 1 전단키 면적비 0 전단 시험체    그림 2 전단키 면적비 0.1 전단 시험체    그림 3 전단키 면적비 0.2 전단 시험체

### 3. 실험방법

실험은 실험 여건상 부재 단면의 1/2 스케일로 축소 실험하였다. 골조 프레임은 그림 4, 그림 5와 같으며, 실험은 강남건영(주) PC공장에서 진행하였다. 실험은 1/2크기의 9개의 부재에 대해 집합부 전단성능을 실험하였다. 순수 전단 파괴를 유도하기 위하여 그림 4와 같이 폭 20cm 가력보로 받침점간 거리 60cm인 시험체를 실험하였다.

하중은 초기 슬립 발생 후 시험체에 분당 3tf으로 가력하며 공칭 강도 80%에 다다르면 하중 재하 속도를 분당 1tf으로 하여 극한하중에 이를 때까지 가력하였다. 집합부 전단 시험체는 순수 집합부 전단 파괴를 유도하기 위해 전 길이에 대해 전단 보강을 하였다. 보강근은 D13( $f_y = 4000\text{kg/cm}^2$ )을 사용하며, 전 길이에 대해 5cm 간격으로 배근하였다.

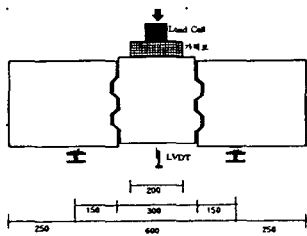


그림 4 전단시험체 설치



사진 5 전단 시험체 설치전경

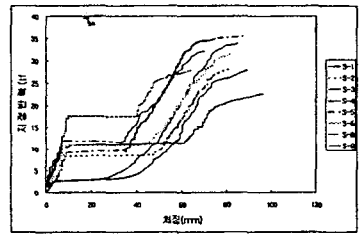


그림 6 집합부 하중-변위 곡선

### 4 실험결과 및 분석

#### 4.1. 강도

중국하중 하에서 연결부의 공칭전단강도는 위의 그림 6과 같이 강선수와 밀접한 관계를 가지며, 전단키의 개수 또는 전단키 면적비는 별 영향이 없는 것으로 평가되었다. 그러나 집합부 중국내력은 전단키 파괴 후 발생하는 중앙부재의 슬립과 동반하는 많은 균열이 진행된 상태이후 추가되는 마찰저항을 포함시킨 결과이므로 사용성에 적합하지 않으므로 포스트텐션 보 연결부 설계에서 전단키의 파괴 강도를 부재 내력으로 보는 것이 합리적이라고 판단된다.

집합부 전단 성능 시험체의 하중-변위 곡선이 위의 그림 6에 도시되어 있다. 전단키가 없는 시험체 S-1과 S-4는 하중을 받은 즉시 시험체 탄성 처짐과 중앙부재의 슬립이 동시에 발생하여 증가하며, 두 면의 마찰저항 내력보다 큰 외력에서 중앙부재의 슬립이 주도하여 하중의 증가가 없는 처짐의 증가를 보이며, 증가된 슬립으로 덕트상부면이 강선 위에 접촉한 후 새로운 급격한 강도증가를 보여주며 파괴되었다. 단, 하중-변위 곡선은 각 변환점에서 매우 완만하게 변형되었다.

전단키가 있는 다른 모든 시험체는 하중을 받은 즉시 시험체 탄성 처짐의 주도로 선형으로 변형하며, 전단키의 전단내력보다 큰 외력에서 전단키의 파괴가 일시에 발생하며 그후 중앙부재의 슬립이 주도하여 하중의 증가가 없는 처짐의 증가를 보이며, 증가된 슬립으로 덕트상부면이 강선 위에 접촉한 후 새로운 급격한 강도증가를 보여주며 파괴되었다. 단, 하중-변위 곡선은 각 변환점에서 급격하게 변형되었다.

표 2 이론 및 실험 강도

시험체 명	①접합부 이론강도(t)	②전단기 파괴강도(t)	초기균열발생시 강도(t)	③시험체 파괴강도(t)	②결과/①이론	③결과/①이론	부재파괴시치짐 (mm)	파괴 모드
S-1	14.33	1.78	13.03	27.89	0.12	1.96	91	접합부 전단기 파괴
S-2	18.36	8.24	9.78	28.16	0.49	1.53	81	접합부 전단기 파괴
S-3	23.36	11.12	11.12	22.59	0.48	0.96	96	접합부 전단기 파괴
S-4	23.12	2.38	9.83	33.99	0.10	1.47	85	접합부 전단기 파괴
S-5	27.10	9.75	13.03	35.53	0.36	1.31	76	접합부 전단기 파괴
S-6	31.09	10.78	10.78	31.57	0.35	1.02	82	접합부 전단기 파괴
S-7	-	-	-	-	-	-	-	강선긴장시 미끄럼 파괴
S-8	35.92	12.08	12.08	32.05	0.37	0.89	70	접합부 전단기 파괴
S-9	39.58	17.60	17.60	27.89	0.44	0.70	62	접합부 전단기 파괴

주) 모든 강도는 지점반력으로 계산된 값임.

접합부 전단 성능에 대한 이론 및 시험강도를 표 2에 도시하였다. 전단기가 없이 강선 4개를 적용한 S-7 시험체는 강선긴장 시 접합부의 미끄러짐에 의해 파괴되었다. 표 2의 (3)항에 대한 (1)항의 값이 평균 22%를 상회하는 값을 얻었다. 그러나 표 2의 (3)항 값은 Annamalai 등이 시험체의 중국 전단파괴강도를 합성보의 전단내력으로 산정한 값으로 슬립에 의한 부재치짐으로 인해 사용성에 대한 문제점을 안고 있다. 본 연구에서는 이 실험 결과를 토대로 회귀분석에 의하여 부재의 슬립이 발생하는 시점의 강도를 합성보의 전단내력으로 하여 사용성에 적합한 새로운 식을 제한하려 한다.

#### 4.2. 전단기 면적비

그림 7에서 그림 9은 강선수를 고정하고 강선수에 따라 각각 전단기 면적비를 0.0, 0.1, 0.2로 증가 적용한 실험결과를 보여준다. 이 실험 결과들에서 전단기의 면적비가 전단내력증가에 직접적인 영향을 주는 것을 알 수 있다. 강선수를 고정하고 전단기 면적비의 변화를 변수로 실험한 결과 최종 파괴시 모든 시험체의 파괴 강도는 비슷한 값을 가졌는데, 이것은 중앙부재가 슬립에 의해 하부 강선에 밀착하면서 발생하는 내력으로 전단기와는 무관하게 부재 단면 성능에 대한 내력이라고 볼 수 있다. 이러한 단면 성능에 대한 내력은 전단기 파괴시 발생하는 급격한 슬립이 발생한 후의 부재 내력이다. 많은 균열이 발생한 다음 추가되는 마찰저항을 포함시킨 결과이므로 사용성측면에서 볼 때 접합부 설계 시 접합부 전단강도는 부재의 중국파괴시 강도가 아닌 전단기가 파괴되어 부재의 슬립이 발생하기 시작하는 시점을 접합부 내력으로 보는 것이 바람직하다고 판단된다.

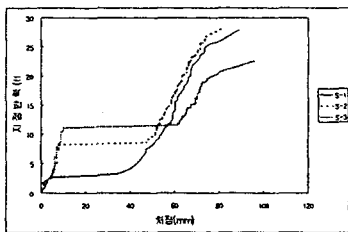


그림 7 강선 2개인 접합부 전단시험체 하중-변위곡선

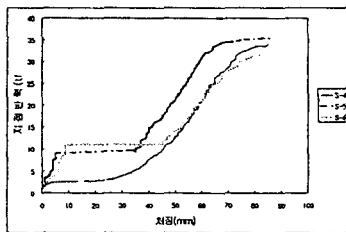


그림 8 강선 3개인 접합부 전단시험체 하중-변위곡선

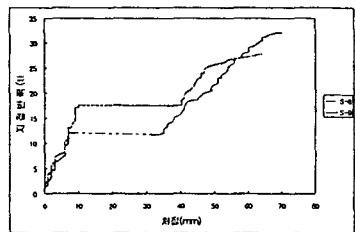


그림 9 강선 4개인 접합부 전단시험체 하중-변위곡선

그림 7에서 전단기가 없는 시험체 S-1은 하중을 받은 후 2.5tf에 이르러 강선이 덩트에 접촉할 때까지 약 4cm 슬립이 진행되었다. 이 과정에서 하중의 증가는 미소하였다. 강선이 덩트에 밀착된 후 내력을 발휘하기 시작하여 가력하중이 각각 27.89tf에서 중국 파괴하였다.

전단기 면적비가 0.1인 S-2 시험체는 전단기가 가력하중에 대해 저항하다 하중이 16.41tf에 이르러 전단기가 파괴되면서 중앙부재의 슬립이 발생하였다. 전단기 면적비가 0.1인 이들 시험체는 전단기가 없는 시험체들에 비하여 약 7배의 내력에서 중앙부재의 슬립이 발생하였다. 그후 내력을 발휘하기 시작하여 가력하중이 각각 28.16tf에서 중국 파괴하였다.

전단기 면적비가 0.2인 S-3시험체는 가력하중이 22.17tf에 이르러 전단기 파괴와 함께 중앙부재의 슬립이 발생하였다. 전단기 면적비가 0.2인 이 시험체들의 전단기 파괴시 강도는 전단기 면적비가 0.1인 시험체에 비해 평균 33.7%의 높은 내력을 상수를 보인 것을 알 수 있다. 그후 22.59tf에서 중국 파괴하였다.

그림 8에서 강선3개 긴장력 40.5tf인 3개의 시험체와 그림 9에 강선 4개 긴장력 54tf인 시험체 2개에 대하여 하중치짐 곡선을 비교하였다. 이 그림에서도 전단기 면적의 증가는 초기 전단기 파괴하중과는 직접적인 영향을 갖으나, 종국적인 접합부 파괴와는 상관관계가 없는 것을 알 수 있다.

### 4.3. 강선 긴장력

그림 10에서 그림 12는 전단기 면적비를 고정하고 각 강선수를 2, 3, 4개로 변화시킨 실험체들의 실험결과를 보여준다. 그림 10는 전단기가 없는 S-1, S-4 시험체는 내력 발생 시점과 최종 파괴 강도에서 차이를 보였는데, 이것은 하부 강선수에 따라 중앙부재가 강선에 밀착되는 시점이 강선 3개인 시험체 S-4가 강선 2개인 시험체 S-1보다 먼저 발생하여 내력이 상승하고 최종 파괴 역시 강선 긴장력이 높은 S-4 시험체가 더 높은 강도에서 파괴된 것일 뿐 일반적인 부재의 거동은 유사하였다. 전단기 면적비 0.1을 적용한 시험체를 위한 그림 11에서 긴장력의 증가가 전단기 파괴강도증가로 그대로 반영되는 현상을 볼 수 있다. 그러나 긴장력증가가 종국 전단강도에는 큰 영향이 없는 것으로 평가되었다.

그림 12의 경우 그림 10, 11과는 다르게 S-3시험체와 S-6시험체의 전단기가 거의 같은 강도에서 파괴된 모습을 보이고 있다. 이것은 그림 11에서도 나타나는 현상인데, 강선수가 2개인 시험체 S-2와 강선이 3개인 시험체 S-5의 강도 차이가 가격하중 2tf정 차이가 나는 반면, 강선이 4개인 시험체 S-8과 S-5의 강도는 5tf로서 강도의 차이가 점차 커져가는 것으로 보아 어느 일정한 강선수 즉, 단면 성능에 따른 최소 긴장력 이하일 경우 전단기가 내력을 충분히 발휘하지 못하고 파괴되는 것으로 보인다. 따라서 단면 성능에 따른 최소 긴장력 제한에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

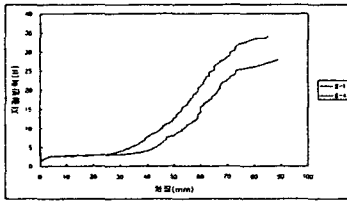


그림 10 전단기 면적비 0 접합부  
전단시험체 하중-변위곡선

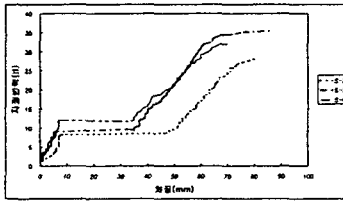


그림 11 전단기 면적비 0.1 접합부  
전단시험체 하중-변위곡선

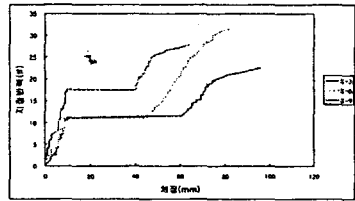


그림 12 전단기 면적비 0.2 접합부  
전단시험체 하중-변위곡선

### 4.4. 회귀분석

본 연구에서는 접합부 전단성능 실험을 위해 Annamalai 등이 제안한 식 (1)을 적용하여 설계, 실험하였다. 여기서, Annamalai 등은 실험 시 시험체에 외장강선을 사용해 전단면에 강선긴장력이 콘크리트 단면에 고르게 적용되도록 실험하였으며, 내부 체움 모르타르로 전단기를 형성하였고, 전단기도 시험체 전체폭을 전단기 폭으로 활용하여 실무 활용과는 큰 차이점이 있다. 본 연구에서는 현실에 적용할 수 있는 실험조건을 만들기 위해 강선을 시험체 내부에 삽입한 돌출형 전단기를 위주로 실험을 진행하였다. 실험한 결과 시험체의 종국강도는 Annamalai 등이 제안한 식의 예상강도에 평균 22%를 상회하는 값을 얻었으나(표 2의 (3)항 참조) 사용성에 대한 문제를 해결하지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 새로운 실험값을 토대로 다중 회귀분석하여 사용성을 만족하는 새로운 전단설계식을 제시하려 한다.

실험 결과 값을 통한 다중 회귀분석에 필요한 기본 값을 표 3에 표현 하였다. 표 3의 (4)항의 실험값은 실험을 통해 얻은 전단력이며, PC 강도는 실험 당일 날 측정된 콘크리트 강도이다.

표 3 다중 회귀분석을 위한 기본값

시험체명	(4)실험값(tf)	긴장력(tf)	연결부 전면적(cm <sup>2</sup> )	전단기면적(cm <sup>2</sup> )	PC강도(kg/cm <sup>2</sup> )	지중에 의한 전단력(tf)
S-1	1.78	27.0	700	0	357.8	0.06
S-2	8.24	27.0	700	80	359.8	0.06
S-3	11.12	27.0	700	140	352.4	0.06
S-4	2.38	40.5	700	0	362.6	0.06
S-5	9.75	40.5	700	80	354.6	0.06
S-6	10.78	40.5	700	140	355.6	0.06
S-8	12.08	54.0	700	80	357.3	0.06
S-9	17.60	54.0	700	140	341.8	0.06

다중 회귀분석에 필요한 데이터의 변수를 최소화 한 값을 표 4에 도시하였다. 변수의 최소화는 표본 회귀 방정식이 표본 자료에 얼마나 잘 적합되었는지를 나타내는 근사성의 척도로 사용되는 다중 상관계수(R2)의 값이 변수의 증가로 인해 증가하는 것을 최소화 하기 위함이다. 표 4의 (5)항의 값은 실험을 통해 얻은 실험값(표 3의 (4))을 연결부의 전단응력으로 치환한 값이다.

표 4 회귀분석 Input 값

시험체명	⑤ $\nu_n$	$N_p / A_{cr}$	$B f_{ck} / A_{cr}$
S-1	2.54	38.571	0.0
S-2	11.77		41.1
S-3	15.89		70.5
S-4	3.40	57.857	0.0
S-5	13.93		40.5
S-6	15.40		71.1
S-8	17.26	77.143	40.8
S-9	25.14		68.4

표 5 회귀분석 결과(1)

⑥다중 상관계수	0.935987825
결정계수	0.876073208
조정된 결정계수	0.688752076
표준 오차	2.813773219
관측수	8

주:  $N_p$ : 강선 긴장력  $A_{cr}$ : 접합부 전 단면적  $\nu_n$ : 전단응력  $B$ : 접합부 전단키 면적  $f_{ck}$ : 실험 당일날 콘크리트 강도

실험값을 토대로 회귀 분석한 결과 위의 표 5을 얻었다. 본 연구에서의 실험값을 토대로 다중 회귀분석한 결과 표 5의 (6)항의 다중 상관계수는 93.6%의 적합성을 얻었다. 다중 회귀분석 결과를 토대로 내부 강선 도입시 일반식을 아래 식 (2)와 같이 유도할 수 있다. 식 (1)과 (2)를 비교해 보면, 식 (1)의 전치식의 계수가 식 (2)에 비해 약 1.56배, 후치식의 계수가 3.5배에 해당하는 것을 알 수 있다.

$$\frac{\nu_n}{f_c} = 0.16 \frac{B}{A_{cr}} + 0.66 \frac{N_p}{A_{cr} f_c} \quad \dots\dots(1) \quad \frac{\nu_n}{f_c} = 0.1024 \frac{B}{A_{cr}} + 0.1890 \frac{N_p}{A_{cr} f_c} \quad \dots\dots(2)$$

표 6 회귀분석 결과(2)

시험체명	⑦식 (1)에 의한전단응력 예측값	⑧식 (2)에 의한전단응력 예측 값	⑨실험값	⑩결과/⑦이론	⑪결과/⑧이론
S-1	20.48	3.95	2.54	0.12	0.64
S-2	26.23	11.72	11.77	0.49	1.00
S-3	29.19	17.27	15.89	0.48	0.92
S-4	33.03	5.92	3.40	0.10	0.57
S-5	38.71	13.58	13.93	0.36	1.03
S-6	44.41	19.36	15.40	0.35	0.80
S-8	51.32	15.61	17.26	0.37	1.11
S-9	56.54	20.82	25.14	0.44	1.21
평균	37.49	13.53	13.17	0.34	0.91

주: ⑩의 실험값은 접합부에 작용한 힘을 전단면에 대해 나눈 값이다.

회귀분석을 통해 얻은 식 (2)로 예측한 접합부 전단 강도를 재 계산한 값을 표 6에 나열하였다. 실험값에 대한 예측값에 비가 강선수에 따라 크게 다른 것을 표 6에서 알 수가 있는데, 이것은 위의 그림 10에서 그림 12와 같이 전단키 단면이 요구하는 최소 긴장력 이하일 경우 전단키가 내력을 충분히 발휘하지 못하고 파괴되는 것으로 보인다.

#### 4.5. 회귀분석 결과

그림 13과 그림 14에서 직선은 회귀분석을 통해 유도한 식 (2)에 의해 계산된 예측값이며, 분산된 점은 실험을 통해 얻은 결과값을 나타낸다. 그림 13은 전단키 면적비를 고정한 상태에서 전단응력과 강선긴장력에 대한 상관관계도를 나타낸다. 전단키가 없는 시험체들은 분산된 점들이 직선의 하부에 위치에 예상강도에 미치지 못하는 것을 볼 수가 있으며, 전단키 면적비가 0.1인 시험체는 강선 긴장력이 증가함에 따라 점차 예상치에 못 미치는 값을 나타내고 있다. 반면, 접합부의 전단키 면적비가 0.2인 시험체들은 모두 예상값의 상위에 놓여져 있는 모습을 볼 수 있다. 따라서 접합부 전단 설계시 전 단면에 대한 전단키의 면적은 ACI나 PCI에서 제한한 0.2~0.5 사이 값을 지켜주는 것이 바람직하다.

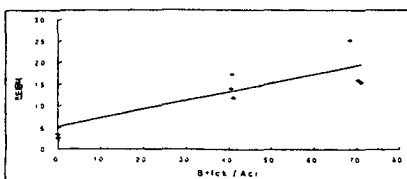


그림 13 전단응력과 전단키면적비의 상관관계도

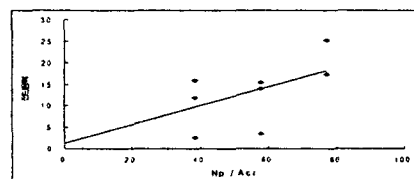


그림 14 전단응력과 강선긴장력의 상관관계도

그림 14는 강선 긴장력을 고정된 상태에서 전단응력과 전단키 면적비에 대한 상관 관계도를 나타낸다. 그림 14에서 보면, 동일한 전단키 면적비에서 강선 긴장력이 어느 일정한 값 아래에 존재할 때 예측값에 미치지 못하는 것을 볼 수 있다. 시험체별 균열 양상은 그림 15에서 그림 23에 도시하였다.



그림 15 S-1 시험체 균열양상

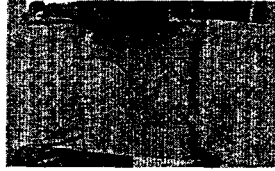


그림 16 S-2 시험체 균열양상



그림 17 S-3 시험체 균열양상



그림 18 S-4 시험체 균열양상



그림 19 S-5 시험체 균열양상



그림 20 S-6 시험체 균열양상



그림 21 S-7 시험체 파손



그림 22 S-8 시험체 균열양상

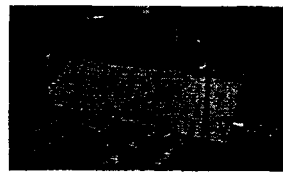


그림 23 S-9 시험체 균열양상

## 5. 결론

분재화된 부재를 포스트텐션에 의해 연결한 후, 강선 긴장력의 크기와 전단키 면적비에 따른 집합부의 전단 내력을 구하기 위해 1/2크기의 9개의 부재에 대해 집합부 전단성능을 실험하였다. 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. 중국하중 하에서 연결부의 공칭전단강도는 강선수와 밀접한 관계를 가지며, 전단키의 개수 또는 전단키 면적비는 별 영향이 없는 것으로 평가되었다.

나. 집합부 종국내력은 전단키 파괴 후 발생하는 중앙부재의 슬립과 동반하는 많은 균열이 진행된 상태이후 추가되는 마찰저항을 포함시킨 결과이므로 사용성에 적합하지 않으므로 포스트텐션 보 연결부 설계에서 전단키의 파괴 강도를 부재 내력으로 보는 것이 합리적이라고 판단된다.

다. 본 연구에서 전단키 파괴강도를 위한 예측식을 실험결과에 대한 회귀분석으로 제안하였다. 이에 대한 해석에서 집합부의 전단키 면적비가 0.2인 시험체들은 모두 예상값의 상위에 위치하는 반면 다른 실험체는 그 아래에 위치하는 것을 알 수 있었다. 따라서 집합부 전단 설계시 전 단면에 대한 전단키의 면적비는 ACI나 PCI에서 제한한 0.2~0.5 사이 값을 지켜주는 것이 바람직하다.

## 참고 문헌

1. Arthur H. Nilson, "Design of Prestressed Concrete(Second Edition)," 1987. pp 33~373.
2. G. Annamalai and Robert C. Brown Jr, "Shear-Transfer Behavior of Post-Tensioned Grouted Shear-Key Connection in Precast Concrete-Framed Structures," ACI Journal. 1987 Jan~Feb. pp 53~65.