

# 극한하중상태에서 비부착 긴장재의 응력평가에 관한 실험연구

## Experimental Study on Stress Evaluation of Unbonded Tendon under Ultimate Load

임재형\*      문정호\*\*      이리형\*\*\*  
Lim, Jae-Hyung   Moon, Jeong-Ho   Lee, Li-Hyung

### ABSTRACT

The current study is a part of series of research about the evaluation method of the unbonded tendon stress in prestressed concrete member at flexural failure. As the experimental study, a test program with 14 beams and slabs was planned to identify the contribution of each important variable. The variables are (1) the effective prestress, (2) the concrete strength, (3) the amount of tendons (4) the amount of bonded reinforcements, (5) the loading type, (6) the span/depth ratio. It was found that the tendon stress increment decreases as the effective prestress increases. Also, the contributions of concrete strength, amount of tendons, bonded reinforcements, and loading type were observed to affect on tendon stresses. However, the tendon stress increments were minimal at high values of span/depth in contrast with the ACI Code.

### 1. 서론

비부착 긴장재를 사용하는 프리스트레스트 콘크리트 휨부재에 대한 기존의 실험들은 긴장재의 극한 응력에 대한 다양한 영향인자들을 고려하기보다는 특정한 변수만을 대상으로 그에 대한 영향을 검토하고 있다. 그러나 본 연구자들은 기존연구에 대한 자세한 고찰을 병행한 해석적 연구를 통하여 비부착 긴장재의 응력에 영향을 미치는 많은 변수들을 검증하였으며, 합리적인 해석모델<sup>(1)(2)</sup>도 제안하였다. 그 결과 현행의 ACI 기준<sup>(4)</sup>과 같이 일부 특정 변수 및 국부적인 적합조건(local compatibility)의 사용보다는 전체적인 적합조건(global compatibility)을 사용한 해석이 긴장재의 응력을 평가하는데 바람직함을 알았다. 또한 찾아낸 변수들에 대하여 비부착 긴장재의 극한응력에 미치는 영향의 정도를 판단할 수 있는 해석적 연구<sup>(3)</sup>도 실시하였다.

따라서 본 연구에서는 한정된 실험변수보다는 기존의 설계식에 대한 검토와 본 연구자들에 의해 제안된 설계식을 사용한 분석의 결과로 중요 실험변수를 결정하였다. 그리고 이들을 적절히 조합하여 종합적으로 긴장재의 응력을 고찰할 수 있는 실험을 실시하였다. 그 결과로 본 연구자들에 의해 제안된 설계식의 타당성을 검증하며, 각 변수별 효과에 대하여서도 연구하였다.

### 2. 실험

\* 정회원, (주) ALT구조 이사, 공박  
\*\* 정회원, 한남대 건축공학과 조교수, 공박  
\*\*\* 정회원, 한양대 건축공학과 교수, 공박

표 1. 변수별 검증을 위한 실험체 일람

Loading type	$f_{se}$	$f'_c$ MPa	$\rho_p$	$\rho_s$	L/d <sub>b</sub>		
A-1	0.6f <sub>pu</sub>	23.4	0.00256	0.00242	17.5		
B-1	0.7f <sub>pu</sub>	23.5					
B-2	0.5f <sub>pu</sub>	38.4					
C-1	0.6f <sub>pu</sub>	52.9				0.00171	
C-2		23.5				0.00341	
D-1		23.5				0.00256	
D-2		23.5				0.00242	
E-1	2-point	23.5				0.00256	0.00323
E-2							0.00485
F-1	1-point	23.5				0.00256	0.00242
F-2			0.00242				
G-1	Uniform	23.5	0.00146	0.00194	18		
G-2				0.00216	30		
G-3				0.00216	45		

\* NOTE : Tendon profile = straight  
 $f_{pu}$  = 1860 MPa Grade  
 $f_y$  = 420 MPa Grade  
 $\phi 6$  = 0.1982 cm<sup>2</sup> (3-wire mono-strand)  
 HD8 = 0.50 cm<sup>2</sup> (Deformed bar)

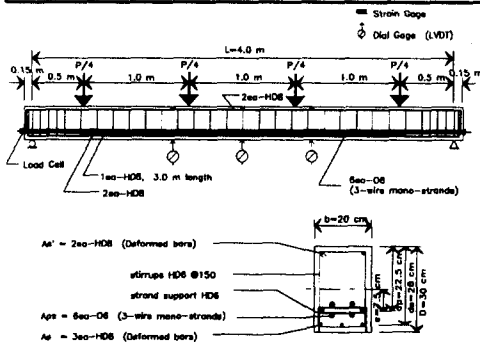


그림 1. 대표적인 실험체(A-1) 상세

반복가력하였고, 이후 초기균열하중, 항복하중순으로 반복가력하였다. 항복하중이후에는 변위제어방식으로 중앙부 변위의 양이 25mm, 50mm, 75mm, 100mm 일때로 1회씩 순차적인 반복가력을 실시하였다. 실험의 종료는 최대하중이후 가력하중이 감소될 때와 긴장재의 응력이 항복하중에 근접되면 긴장재의 파단이라는 위험을 내포하고 있으므로, 하중의 가력을 중단하고 실험을 종료하였다. 그리고, 이때의 하중을 최대하중으로 하였다.

### 2.3. 실험결과 및 고찰

#### 2.3.1. 균열 및 파괴상황

본 연구에서 실험된 실험체는 프리스트레스트 콘크리트 휨부재의 변형능력을 확보할 수 있는 방안으로 ACI에서 규정하고 있는  $\phi M_n > 1.2M_{cr}$ 에 따라 계획하였다. 표 2에서도 알 수 있듯이 균열하중에 대한 최대하중의 비가 대부분 2.0이상으로 나타나고 있기 때문에 프리스트레스트 콘크리트 휨부재의 실험체 설계는 적절한 것으로 판단되었다. 파괴형태를 살펴보면, 대부분의 실험체들에서 초기균열의 발생위치는 최대 모멘트가 발생하는 중앙부에서 인장철근의 위치까지 수직균열인 미세균열로 나타났으며, 점증적으로 하중이 증가하면서 항복하중에 도달할 때까지 좌우로 일정한 간격의 수직 휨균열이 지지부로 확산되는 양상을 보였다.

### 2.1. 실험체 개요 및 재료

연구대상 건물은 아파트단지의 부속동인 지하주차장으로, 1/2.5 크기로 모델링하였다. 제작한 실험체의 수는 총 14개인데, ACI 318-95의 규준에 따라 설계하였다. 실험체는 비교의 기준이 되는 실험체 1개와 변수별 연구를 통하여 결정된 6개의 실험변수에 의한 13개 실험체로 구성되어 있으며, 사용변수는 유효프리스트레스, 콘크리트 강도, 긴장재 양, 인장철근 양, 스펠/츄스 비와 작용하중의 형태 등이다. 이에 대한 실험체 일람을 표 1에 나타내었고 대표적인 실험체(A-1) 상세를 그림 1에 나타내었다. 실험체 제작에 사용된 긴장재는 1가닥의 지름이 2.9mm인 2중 3연선(Low relaxation 3-wire strand)이다. 최근 포스트텐션용으로 사용되는 긴장재의 인장강도는 약 1860MPa Grade이며, 철근은 고강도철근으로 주근이 HD8이고, 전단근은 HD6이다. 콘크리트는 슬럼프 10cm, 골재의 최대치수 19mm, 설계기준강도 30MPa, 40MPa, 60MPa의 조건에 따라 PC공장내의 기계식 자동믹서에서 배합하였다.

### 2.2. 실험방법

실험은 단순보에 대한 휨실험이므로 단순지지되어 있는 보의 상부에서 1000kN 용량의 복동식 오일잭으로 하중을 가력하고, 오일잭에 부착되어 있는 1000kN 용량의 로드셀로 하중의 크기를 측정하였다. 하중의 가력은 가력하중의 이력에 따라 실시하였다. 실험체의 안정화 및 유효프리스트레스의 안정화를 도모하기 위하여 예측된 초기 균열하중의 60%에 해당하는 하중으로 초기 2회

표 2. 실험결과와 일람

실험체명	$F_{sc}$ (kN)	$F_{ps}$ (kN)	$\Delta F_{ps}$ (kN)	$P_{cr}$ (kN)	$P_{max}$ (kN)	$\frac{P_{max}}{P_{cr}}$	$\delta_{max}$ (mm)
A-1	22.25	32.93	10.68	57.33	124.66	2.17	73.8
B-1	25.77	34.79	9.01	55.86	118.58	2.12	72.8
B-2	18.82	32.14	13.32	44.59	114.17	2.56	90.2
C-1	21.85	33.42	11.57	56.84	119.27	2.09	74.8
C-2	22.15	35.67	13.52	61.74	131.026	2.12	97.6
D-1	22.25	35.87	13.62	40.18	95.55	2.37	97.4
D-2	22.15	32.14	9.99	59.78	138.77	2.32	69.2
E-1	22.15	32.83	10.67	52.92	120.05	2.26	74.0
E-2	21.95	28.81	6.85	55.86	132.69	2.37	48.8
F-1	22.05	34.10	12.05	40.18	78.92	1.96	97.4
F-2	22.05	31.75	9.7	27.44	55.27	2.01	71.8
G-1	22.05	36.95	14.9	100.94	228.44	2.26	122.4
G-2	22.05	32.63	10.58	34.01	66.05	1.94	118.4
G-3	22.05	32.34	10.29	15.78	31.07	1.97	166.6

$F_{sc}$  : 긴장재의 유효프리스트레스/1ca  
 $F_{ps}$  : 긴장재의 극한응력/1ca  
 $\Delta F_{ps}$  : 긴장재의 응력증가량/1ca  
 $P_{cr}$  : 초기균열하중  
 $P_{max}$  : 최대하중  
 $\delta_{max}$  : 최대하중에서의 중앙부 변위량

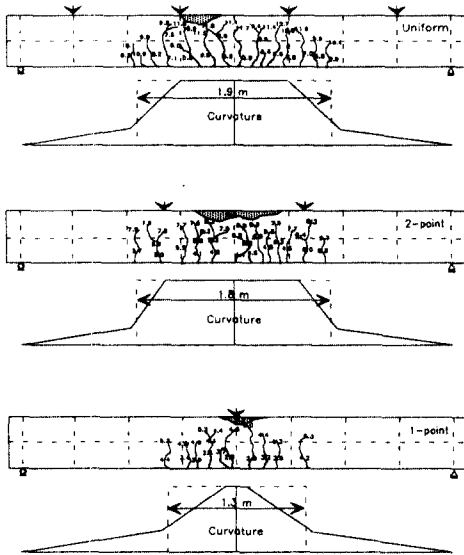


그림 2. 작용하중의 형태에 따른 최종파괴상태

잘 일치하고 있다. 이는 변형도 적합조건에 의한 해석모델이 비부착 긴장재의 극한응력을 평가하는데 정확한 방법임의 예를 나타내는 것이다. 실험결과에서는 유효프리스트레스 양이 증가할수록 긴장재의 응력증가량은 감소하는 것으로 나타나고 있다. 그러나 현행의 ACI 규준에 의한 결과는 유효프리스트레스의 변화와 관계없이 긴장재의 응력증가량은 변화하지 않고 일정한 값으로 나타나고 있다. 또한,

항복하중이후에는 휨균열의 확산범위가 소성힌지로 가정한 범위에서 중단되고 기존에 발생된 균열과 균열사이에서 새로운 균열이 발생하였다. 그리고, 최대 휨모멘트 구간에서 균열의 폭이 증가되면서 압축축콘크리트 연단까지 휨균열이 진행되었다. 이후 최대하중직전까지 1~3개의 균열의 폭이 주변의 균열폭보다 넓어졌고, 최대하중에 도달하면서 중앙부 압축축콘크리트의 압괴가 발생되었다. 압축축콘크리트의 압괴에 의한 파괴이후에는 하중이 급격히 감소하고 변위도 급격히 증가하는 양상을 보였다.

그리고 작용하중의 형태에 따른 최종파괴의 상태를 분석하여 그림 2에 곡률관계로 나타내었다. 2점 집중하중과 등분포하중(4점 집중하중)의 경우에는 소성힌지 범위가 비슷하게 나타났으며, 1점 집중하중이 작용할 경우에는 다른 하중의 형태보다 소성힌지의 범위가 짧게 나타났다.

### 2.3.2. 변수별 효과 분석

본 연구의 실험에서 선정된 변수별로 비부착 긴장재의 극한응력에 미치는 영향을 검토하기 위하여 각각의 변수에 대한 긴장재의 응력증가량을 변형도 적합조건에 의한 해석식<sup>(2)</sup>, ACI 규준식<sup>(4)</sup>, 그리고 본 연구자들의 설계식<sup>(2)</sup>과 비교하여 그림3~그림8에 나타내었다. 여기서, 그림에 표시되어 있는 범례는 다음과 같다.

Exp. = 본 연구의 실험에 의한 결과

ACI = ACI 318-95 규준에 의한 결과

Compat. = 적합조건에 의한 해석식의 결과

Design = 본 연구자들의 설계식에 의한 결과

분석은 실험결과와 변형도 적합조건에 의한 해석결과의 검토, 본 연구자들에 의한 설계식의 타당성 검증, 제안된 설계식과 현행의 ACI 규준식에 의한 결과의 비교로 다음과 같이 각각의 변수별로 기술하였다.

#### (1) 유효프리스트레스 ( $f_{sc}$ )

유효프리스트레스의 변화에 따른 비부착 긴장재의 응력증가량에 대한 해석결과와 실험결과를 비교를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 소성힌지 길이개념이 포함된 변형도 적합조건에 의한 해석결과와 실험결과

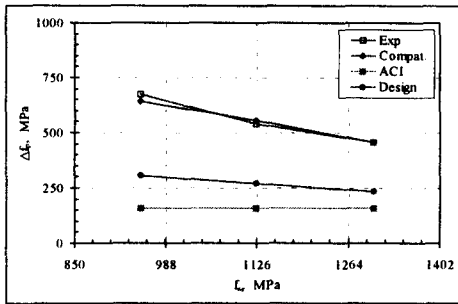


그림 3. 유효프리스트레스의 변화에 따른 해석결과와 실험결과와의 비교

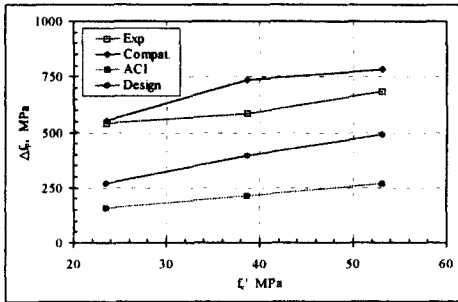


그림 4. 콘크리트 강도의 변화에 따른 해석결과와 실험결과와의 비교

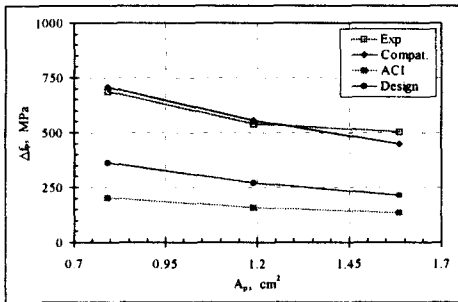


그림 5. 긴장재 양의 변화에 따른 해석결과와 실험결과와의 비교

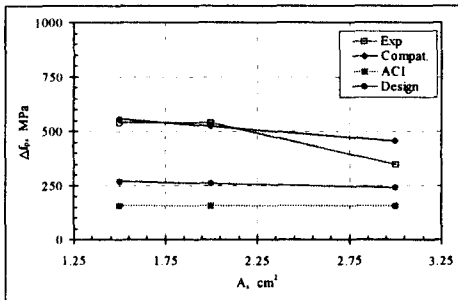


그림 6. 인장철근 양의 변화에 따른 해석결과와 실험결과와의 비교

긴장재의 극한응력( $f_{ps}$ )도 실험값의 68%~83%정도로 상당히 과소평가되고 있는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구자들의 설계식에 의한 결과는 실험결과와 같이 유효프리스트레스의 양이 증가할수록 긴장재의 응력증가량은 감소하는 것으로 나타났으며, 긴장재의 극한응력( $f_{ps}$ )도 실험값의 77%~87%로 나타나 현행의 ACI 규준식보다는 비부착 긴장재의 극한응력을 실험값에 가깝게 그러나 적절한 여유를 가지고 예측하고 있는 것으로 나타났다.

#### (2) 콘크리트 강도 ( $f'_c$ )

콘크리트 강도의 변화에 따른 긴장재의 응력증가량에 대한 해석결과와 실험결과와의 비교를 그림 4에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 콘크리트의 강도가 증가할수록 긴장재의 응력증가량은 실험결과와 본 연구자들의 설계식, 현행의 ACI 규준식에 의한 결과에서 모두 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 실험결과 및 본 연구자들의 설계식에 의한 결과는 미소하나마 비선형적인 증가의 형태를 보이고 있다.

#### (3) 긴장재 양 ( $A_{ps}$ )

긴장재 양의 변화에 따른 긴장재의 응력증가량에 대한 해석결과와 실험결과와의 비교를 그림 5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 실험결과와 변형도 적합조건에 의한 결과가 매우 잘 일치하고 있으며, 긴장재의 양이 증가할수록 긴장재의 응력증가량은 모든 해석식 및 실험결과에서 비선형적인 감소의 형태를 나타내고 있다. 따라서 현행의 ACI 규준식과 본 연구자들의 설계식은 비부착 긴장재의 극한응력을 예측하는데 긴장재의 양에 대한 변수를 바람직한 형태로 고려하고 있는 것으로 판단된다. 다만, 현행의 ACI 규준식은 긴장재의 극한응력을 실험값의 73%~77%정도로 과소평가하고 있으나, 본 연구자들의 설계식은 실험값의 82%정도로 예측하고 있다.

#### (4) 인장철근 양 ( $A_s$ )

인장철근 양의 변화에 따른 긴장재의 응력증가량에 대한 해석결과와 실험결과와의 비교를 그림 6에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 인장철근의 양이 증가할수록 긴장재의 응력증가량은 실험결과에서 감소의 형태를 나타내고 있다. 그러나 해석식과 본 연구자들에 의한 제안식은 인장철근의 변화에 따른 효과를 과소평가하는 경향이 있음을 알았다. 그리고 ACI 규준식은 인장철근의 효과를 고려할 수 없기 때문에 인장철근의 양과는 무관하게 동일한 응력값을 보이고 있다.

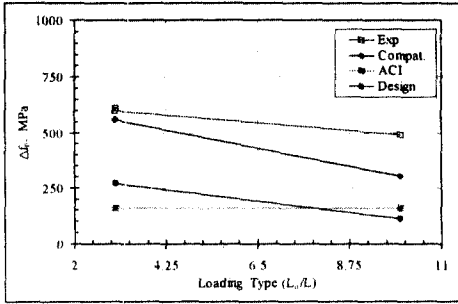


그림 7. 작용하중 형태의 변화에 따른 해석결과와 실험결과와의 비교

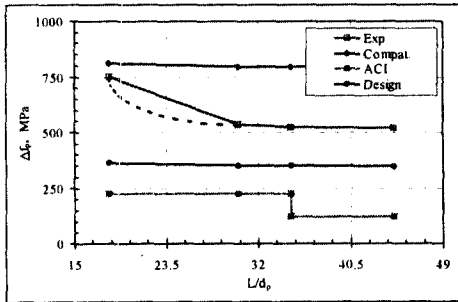


그림 8. 스패/츄스 비의 변화에 따른 해석결과와 실험결과와의 비교

의 실험결과에서 알 수 있듯이 스패/츄스 비가 30정도 이전에는 비부착 긴장재의 응력증가량의 변화가 감소하는 것으로 나타나고 있으나, 30이후에는 비부착 긴장재의 응력증가량이 일정하게 나타나고 있다. 그러나 본 연구자들의 설계식에 의한 결과는 스패/츄스 비의 변화에 따라 미소한 변화가 있지만 거의 일정하게 나타나고 있다. 이는 해석모델의 제안<sup>(2)</sup>에서 작용하중의 형태와 스패/츄스 비의 조합에 의한 소성현저 길이비의 함수로 변수를 고려하도록 되어 있기 때문인데, 본 연구자들의 설계식은 스패/츄스 비가 15 이상인 부재에서는 스패/츄스 비의 변화에 따른 비부착 긴장재의 극한응력에 미치는 영향이 미소하게 나타나고 있으며, 스패/츄스 비의 효과보다는 작용하중의 형태에 의한 변수에 의해 지배되도록 되어 있다. 따라서 본 연구의 실험체는 스패/츄스 비가 18보다 크기 때문에 본 연구자들의 설계식으로 비부착 긴장재의 극한응력을 평가할 때 스패/츄스 비의 효과가 적게 나타난 것으로 사료된다.

본 연구자들의 설계식에 의한 결과와 같이, 스패/츄스 비 18에서부터 30까지의 실험결과를 가상적으로 점선과 같은 형태로 가정할 수 있는데, 이는 해석결과에 의한 가정일 뿐이므로 스패/츄스 비의 효과에 대한 정확한 분석을 위해서는 스패/츄스 비가 5~25까지의 실험체에 대한 실험을 실시한 후, 보다 정확하게 분석할 필요가 있다.

### 3. 결 론

(1) 현행의 ACI 기준식에서는 유효프리스트레스의 크기가 증가하여도 비부착 긴장재의 응력증가량을 동일하게 평가하는 것으로 나타났으나, 실험결과에서는 긴장재의 응력증가량이 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 비부착 긴장재의 극한응력을 평가할 때, 유효프리스트레스의 크기도 고려되는 것이 바람직하다.

#### (5) 작용하중의 형태 ( $f$ , $L_o/L=1/f+L/d_p$ )

작용하중의 형태에 따른 긴장재의 응력증가량에 대한 해석결과와 실험결과와의 비교를 그림 7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 실험결과에서 작용하중의 형태가 등분포하중(4점집중하중)일 경우와 2점집중하중일 경우의 긴장재의 응력증가량은 비슷한 값을 나타내고 있다. 이는 비부착 긴장재의 극한응력을 평가하기 위한 해석적 모델의 제안에서 제시한 결과<sup>(2)</sup>와 같이 2점 집중하중과 등분포하중에 대한 작용하중 형태의 변수를 동일하게 평가할 수 있다는 사실을 증명하는 결과로 판단된다. 따라서 본 연구자들의 설계식에 의한 결과와 같이 비부착 긴장재의 극한응력을 평가할 때 등분포하중과 2점집중하중은 동일한 작용하중의 형태의 계수를 사용하는 것이 바람직하다고 사료된다. 그러나 실험결과에서 알 수 있듯이 1점집중하중에 대한 결과는 등분포하중 및 2점집중하중에 의한 결과와 상이한 긴장재의 응력증가량을 나타내고 있으므로 작용하중의 형태도 비부착 긴장재의 극한응력에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

#### (6) 스패/츄스 비 ( $L/d_p$ )

스패/츄스 비의 변화에 따른 긴장재의 응력증가량에 대한 해석결과와 실험결과와의 비교를 그림 8에 나타내었다. 그림

(2) 실험결과에 따르면 일반철근 양과 작용하중의 형태는 비부착 긴장재의 극한응력에 영향을 미치는 것으로 나타났기 때문에 설계식에서도 이를 고려하는 것이 바람직하다고 사료된다.

(3) 현행의 ACI 규준에서 스패/츄 비의 효과에 대해 고려하고 있는 비부착 긴장재의 극한응력 평가 방법은 실험결과에서 나타났듯이, 높은 스패/츄 비에서 긴장재의 응력변화가 거의 나타나지 않았으므로 스패/츄 비의 효과는 재고찰되어야 한다고 판단된다.

(4) 비부착 긴장재의 극한응력을 평가함에 있어서 변형도 적합조건에 의한 해석결과는 실험결과를 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 보여 주었다.

(5) 본 연구자들에 의한 제안식은 적절한 안전율을 가지고 실험결과를 양호하게 예측하고 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 금호건설기술연구소와 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터와의 공동연구 결과의 일부 분임.

#### 참고문헌

1. 임재형, 문정호, 음성우, 이리형, "프리스트레스드 콘크리트 부재에서 비부착 긴장재의 극한응력 평가에 관한 연구(I) -기존연구 및 ACI 규준식의 고찰-", 콘크리트학회 논문집 제9권 4호, 1997. 8.
2. 임재형, 문정호, 음성우, 이리형, "프리스트레스드 콘크리트 부재에서 비부착 긴장재의 극한응력 평가에 관한 연구(II) -변형도 적합조건을 이용한 해석모델의 제안-", 콘크리트학회 논문집 제9권 5호 1997. 10.
3. 임재형, 이리형, "비부착 긴장재의 극한응력에 영향을 미치는 변수별 효과에 관한 해석적 연구.", 대한건축학회 논문집 제13권 10호 통권 108호 1997. 10.
4. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318-95)," American Concrete Institute, Detroit, 1995.
5. Chakrabarti, P. R., "Ultimate stress for unbonded post-tensioning tendons in partially prestressed beams." ACI Journal, Nov.-Dec., 1995, pp 689-697.