

외부 프리스트레싱으로 보강된 프리스트레스트 콘크리트 보에서 프리스트레싱 강재의 극한응력

박상열 ^{1)*}

¹⁾ 제주대학교 토목환경공학과

(2004년 6월 15일 원고접수, 2004년 8월 25일 심사완료)

Ultimate Stress of Prestressing Steel in Prestressed Concrete Beams Strengthened by External Prestressing

Sang-Yeol Park ^{1)*}

¹⁾ Dept. of Civil and Environmental Engineering, Cheju National University, Cheju, 690-756, Korea

(Received June 15, 2004, Accepted August 25, 2004)

ABSTRACT

This study deals with literature review, developing a predicting equation for the ultimate stress of internal and external prestressing steel, and an experimental test with the parameters affecting the ultimate stress of prestressing steel in prestressed concrete beams strengthened by external prestressing tendons. The proposed predicting equation takes rationally the effect of internal and external prestressing steels into consideration as a function of prestressing steel depth to neutral depth ratio. In the experimental study, prestressed concrete beams strengthened using external steel tendons are tested with the test parameters having a large effect on the ultimate stress of internal and external prestressing steel. The test parameters include internal and external prestressing steel reinforcement ratio, and span to depth ratio. The test results are analyzed to confirm the rationality and applicability of the proposed equation for predicting the ultimate stress of internal and external prestressing steel. This research shows that the results obtained by the proposed equation for predicting the ultimate stress agreed very well with the test results.

Keywords : external prestressing, ultimate stress, strengthening, unbonded, predicting equation

1. 서 론

이제까지 외부 비부착 프리스트레스트 강재로 보강된 내부 부착 프리스트레스트 콘크리트 보의 극한상태에서의 해석방법은 철근과 내부 및 외부 프리스트레싱 강재의 인장력을 각각의 독립된 식으로부터 계산하고 이를 합한 총 인장력으로 단면해석을 실시하여 극한 휨모멘트 강도를 구하였다. 여기서 우리나라 콘크리트구조설계기준²⁾이나 ACI시방서³⁾의 부착 및 비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력식은 주인장재로서 각각의 프리스트레싱 강재만을 사용하였을 때로 이를 내부 부착 및 외부 비부착 텐던을 함께 갖는 콘크리트 보에 적용하는 것은 적합하지 않다. 왜냐하면 내부 부착 프리스트레싱 강재의 극한응력은 외부 비부착 프리스트레싱 강재의 영향을 받고, 외부 비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력은 내부 부착 프리스트레싱

강재의 영향을 받기 때문이다.

Du와 Tao⁵⁾, Campbell과 Chouinard⁶⁾는 최소 철근량 이상을 갖는 비부착 프리스트레스트 콘크리트 보에서 비부착 프리스트레싱 텐던의 극한응력은 철근의 양이 증가함에 따라 감소한다는 사실을 실험연구로부터 확인하였고 철근의 영향을 포함한 총 보강지수가 극한응력 예측에 합리적인 변수임을 주장하였다. 또한 Canada 시방서 CAN3-A23.3-M84⁷⁾는 비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력은 텐던과 중립축의 깊이 차의 함수로 표현하고 있다.

한편, 프리스트레싱 강재가 콘크리트에 부착되어 있지 않을 때에는 극한하중 상태에서 보의 휨 거동 해석은 어려움에 부딪힌다. 이 경우 프리스트레싱 강재와 주위 콘크리트의 완전부착 가정은 더 이상 유효하지 않게 되어, 보의 변형은 단면종속(section dependent)이 아니라 부재종속(member dependent)이 된다. 완전부착 가정을 사용할 수 없음을 많은 연구자들로 하여금 실험결과들을 곡선추정(curve fitting)함으로써 문제를 해결하게끔 이끌었다. 이는 그들로 하여금 극한상태에서 비부착 프리스트레싱 강재의 응력을 실험식을 기초로 예측하였고^{1,8-11)}, ACI 시방

* Corresponding author

Tel : 064-754-3456 Fax : 064-725-2519

E-mail : sypark@cheju.ac.kr

서도 비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력을 예측하는데 실험식을 채용하고 있다. 우리나라에서 비부착 강재의 극한응력과 해석방법에 대한 최근의 연구는 참고문헌 12~19 등이 있다.

외부 프리스트레스트 보는 내부 비부착 프리스트레스트 보의 문제뿐만 아니라 보의 변형에 따른 외부 프리스트레싱 강재의 편심변화와 deviator에서의 마찰력 집중문제를 가진다. 그러나 본 연구에서는 이러한 영향은 제외하였다.

본 연구는 외부 프리스트레싱 강재로 보강하거나 처음부터 외부 프리스트레싱 강재를 일부 갖는 프리스트레스트 콘크리트 보에 있어서 극한상태에서의 외부 프리스트레싱 강재와 내부 프리스트레싱 강재의 극한응력을 예측하고자 새로운 응력 예측식을 제안하고자 한다.

따라서 각 프리스트레싱 강재의 극한응력 예측식은 다른 편 강재(내, 외부 프리스트레싱 강재, 인장 및 압축 철근)의 보강효과를 고려해야 하며 직사각형 보나 플랜지를 가진 보 등에도 적용될 수 있는 일반적이고 합리적이며 단순해야 한다. 이를 위하여 콘크리트구조설계기준과 같은 내용의 ACI 시방식을 이용한 프리스트레싱 강재의 예측응력과 제안식에 의한 예측응력을 실험연구로부터 얻어진 계측응력과 비교하여 그 합리성과 적용성을 검토하였다.

2. 프리스트레싱 강재의 극한응력

2.1 우리나라 및 ACI 시방식

부착 프리스트레싱 강재만을 갖는 콘크리트 보에서 ACI 시방서에 따른 프리스트레싱 강재의 극한응력은 식 (1)과 같다.

$$f_{ps} = f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left\{ \rho_p \frac{f_{pu}}{f_{ck}} + \frac{d_s}{d_p} (\omega - \omega') \right\} \right] \quad (1)$$

여기서, f_{pu} : 프리스트레싱 강재의 극한응력

γ_p : 긴장재의 종류에 따른 계수

β_1 : 등가 직사각형 블록 깊이/중립축 깊이의 비

ρ_p : 내부 프리스트레싱 강재비

f_{ck} : 콘크리트의 압축강도

d_s : 인장철근의 깊이

d_p : 프리스트레싱 강재의 깊이

ω, ω' : 인장, 압축철근의 강재지수

비부착 프리스트레싱 강재만을 갖는 프리스트레스트 보에서 프리스트레싱 강재의 극한응력은 다음과 같다.

$$\frac{L}{h} \leq 35 : f_{ps} = f_{pe} + 70 + \frac{f_{ck}}{100\rho_p} < f_{py} \quad (2-1)$$

혹은 $f_{pe} + 400$ (MPa)

$$\frac{L}{h} > 35 : f_{ps} = f_{pe} + 70 + \frac{f_{ck}}{300\rho_p} < f_{py} \quad (2-2)$$

혹은 $f_{pe} + 210$ (MPa)

여기서, f_{pe} : 프리스트레싱 강재의 유효응력

ρ_p : 외부 프리스트레싱 강재비

f_{py} : 프리스트레싱 강재의 항복응력

2.2 극한응력 예측 제안식

Fig. 1의 프리스트레스트 콘크리트 단면에서 변형률 적합조건식을 이용한 내부 부착 프리스트레싱 강재의 극한 변형률은 다음과 같다.

$$\epsilon_{ps} = \epsilon_{pe} + \Delta\epsilon_{ps} = \epsilon_{pe} + \epsilon_{ce} + \Delta\epsilon_{ps} \quad (3)$$

$$\epsilon_{ps} = \epsilon_{pe} + \epsilon_{ce} + \epsilon_{cu} \left(\frac{d_p}{c_u} - 1 \right) \quad (4)$$

여기서, ϵ_{pe} : 프리스트레싱 강재의 유효 변형률

$\Delta\epsilon_{ps}$: 증가된 프리스트레싱 강재의 변형률

ϵ_{ce} : PS 강재 위치의 콘크리트 압축 변형률

ϵ_{cu} : 콘크리트의 최대극한 변형률

c_u : 극한상태에서의 중립축 깊이

따라서 프리스트레싱 강재의 선형탄성과 완전부착 가정 하에서 변형률 적합조건식을 이용하여 이론적으로 내부 부착 프리스트레싱 강재의 극한응력은 아래와 같다.

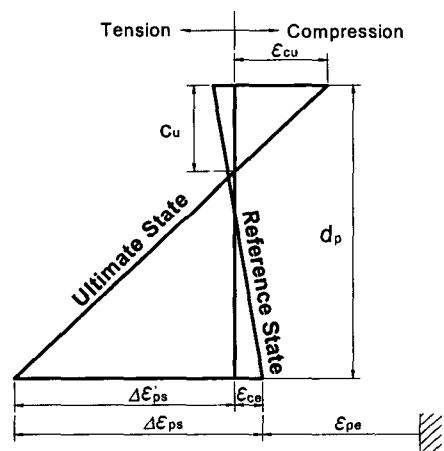


Fig. 1 Strain diagram in bonded prestressed concrete section

$$f_{ps(b)} = f_{pe} + E_{ps}\epsilon_{ce} + E_{ps}\epsilon_{cu}\left(\frac{d_p}{c_u} - 1\right) \quad (5)$$

일반적으로 ϵ_{ce} 값은 다른 항에 비해 작은 값으로 무시한다면 식 (5)는 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$f_{ps(b)} = f_{pe} + E_{ps}\epsilon_{cu}\left(\frac{d_p}{c_u} - 1\right) \quad (6)$$

여기서, E_{ps} = PS 강재의 탄성계수

그러나 위 식 (6)의 경우 프리스트레싱 강재의 선형탄성, 완전부착 가정과 극한상태에서의 중립축을 구할 때 프리스트레싱 강재의 최대 응력 가정, 그리고 프리스트레싱 강재 위치에서의 콘크리트 압축 변형률에 상당하는 강재의 응력 증가량을 무시하였기 때문에 이러한 영향을 고려하여 프리스트레싱 강재와 극한상태에서의 중립축의 깊이비의 함수로 일반적인 관계식으로 표시하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} f_{ps(b)} &= f_{pe} + \Delta f_{ps(b)} \\ &= f_{pe} + \left[\alpha_b E_{ps} \epsilon_{cu} \left(\frac{d_p}{c_u} - 1 \right) + \beta_b \right] \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, α_b 와 β_b 는 위의 기본가정이나 그 외의 요인 등으로 인한 응력수정계수로 실험 등을 통하여 통계적으로 구할 수 있다. 여기서,

$$c_u = \frac{A_{ps(b)}f_{py(b)} + A_{ps(ub)}f_{py(ub)} + A_s f_y - A_s' f_y}{0.85 f_{ck} b \beta_1}$$

로 각 강재가 극한상태에서 동시에 최대 한계응력에 도달하였을 때의 중립축 깊이로 T형보 거동의 경우는

$$\begin{aligned} c_u &= [A_{ps(b)}f_{py(b)} + A_{ps(ub)}f_{py(ub)} + A_s f_y - A_s' f_y \\ &\quad - 0.85 f_{ck} (b - b_o) h_f] / 0.85 f_{ck} b \beta_1 \end{aligned}$$

한편, 외부 프리스트레싱 강재의 경우는 비부착 되어 응력이 단면 종속이 아니라 부재 종속이라는 특성을 고려하여 단면의 변형률 적합 조건식으로부터 구한 응력이나 응력의 전 부재 길이에 걸친 균등화에 따른 감소계수를 곱해야 할 것이다. 즉, 응력평준화를 위한 감소계수는 보의 길이(x)에 따른 강재 깊이의 변화(d_{px})와 재하하중에 의한 모멘트 변화(M_x)의 영향을 고려한 것이다. 따라서 이를 고려한 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$f_{ps(ub)} = f_{pe} + \Phi_u E_{ps} \epsilon_{cu} \left(\frac{d_p}{c_u} - 1 \right) \quad (8)$$

여기서,

$\Phi_u = \Phi_{ud} \times \Phi_{um}$: 응력 평준화 계수

$\Phi_{ud} = \frac{\bar{d}_p}{d_p} = \frac{\int_0^L d_{px} dx}{L d_p}$: PS 강재 깊이의 변화를 고려한 응력 평준화 계수

$\Phi_{um} = \frac{\bar{M}}{M} = \frac{\int_0^L M_x dx}{LM}$: 휨모멘트 변화를 고려한 응력 평준화 계수

외부 프리스트레싱 강재의 선형탄성 가정과 최대 극한 응력 가정, 그리고 그 외의 요인들에 의해 실제 극한응력과의 차이를 고려하여 일반적인 형태로 프리스트레싱 강재의 깊이와 극한상태의 중립축 깊이비의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_{ps(ub)} &= f_{pe} + \Delta f_{ps(ub)} \\ &= f_{pe} + \left[\alpha_{ub} \Phi_u E_{ps} \epsilon_{cu} \left(\frac{d_p}{c_u} - 1 \right) + \beta_{ub} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

3. 실험연구

3.1 실험계획

3.1.1 시험체

외부 프리스트레싱으로 보강된 프리스트레스트 콘크리트 보에서 외부 및 내부 프리스트레싱 강재의 극한응력에 영향을 미치는 인자 및 그 영향을 평가하고 이를 기초로 극한상태에서 각 프리스트레싱 강재의 극한응력을 예측할 수 있는 제안식을 찾기 위해 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 시험체는 총 10개의 T형 프리스트레스트 콘크리트 보로 시험체 채원과 하중재하 장치는 Fig. 2와 같다. 모든 보는 250 mm 깊이로서 총길이 2.4 m, 지지점 사이의 거리

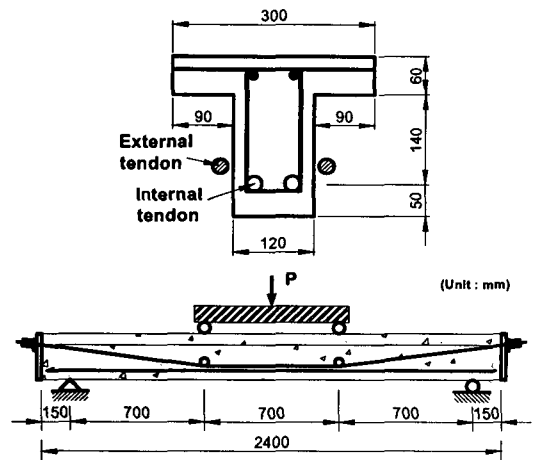


Fig. 2 Dimensions and loading layout of test beam

2.1m의 단순 T형 보로서 극한 휨 거동을 관찰하기 위해 4점 재하배치를 사용하였으며 지간의 1/3 지점 두 곳에 하중이 작용될 수 있도록 강재보를 설치하고 가력 프레임에서 유압 하중기를 사용하여 파괴 시까지 재하 하였다. 외부 프리스트레싱 강재는 지간 중앙부에서는 deviator를 이용하여 유효깊이를 유지하였고 단부에서는 단면의 도심에 일치되게 정착하였다.

스터립의 고정을 위해 압축부에 H13 철근을 2개 배치하였으며 휨 파괴전의 전단파괴를 방지하기 위하여 U형 스테리트를 H10철근으로 100mm 간격으로 배치하였다.

3.1.2 실험 데이터 수집

하중은 파괴 시까지 변위조절 방법으로 분당 약 1.5mm의 속도로 재하 하였으며 재하하중 약 30 KN마다 균열을 표시하였다. 데이터 수집은 동적변형률측정기를 사용하여 컴퓨터 자동 데이터 수집 프로그램을 이용하여 작용하중 및 처짐과 콘크리트, 내부 및 외부 프리스트레싱 강재의 변형률을 측정하였다. 내부 및 외부 프리스트레싱 강재의 변형률 측정을 위한 strain gage는 각각 평균을 위하여 2개씩 부착하여 측정하였다. Fig. 2는 시험 데이터 수집을 위한 기기 및 strain gage의 위치를 나타내고 있다.

3.1.3 실험변수

외부 및 내부 프리스트레싱 강재의 극한응력에 영향을 미치는 인자들에 대한 이제까지의 연구결과를 평가 분석하여 시험변수를 결정하였는데 변수들은 내부 프리스트레싱 강재비, 외부 프리스트레싱 강재비, 지간 대 유효높이 비등이다. Table 1은 프리스트레스트 콘크리트 시험보의 실험인자 및 변수를 나타내고 있다.

3.2 재료

3.2.1 콘크리트

철근콘크리트 시험체에 사용된 콘크리트는 설계강도 35.0MPa의 레미콘으로 Type-I의 보통시멘트, 자연모래, 최대 골재크기 25mm의 쇄석골재를 사용하였다. 현장에서 측정된 슬럼프 값은 100mm였으며 시험보의 실험 시 측정된 공시체의 평균 압축강도는 36.5MPa이었다.

3.2.2 철근 및 프리스트레싱 강재

시험체에 사용된 철근은 압축철근으로 H13을, 스테리트로 H10을 사용하였다. 내부 프리스트레싱 강재는 SWPC 7B의 지름 12.7mm와 15.2mm의 7연선을 사용하였고, 외부 프리스트레싱 강재는 5.20mm와 4.35mm의 강선3개와 지름 12.7mm의 7연선을 사용하였다. 아래 Table 2에서는 사용된 철근 및 프리스트레싱 강재의 인장시험결과를 요약하였다.

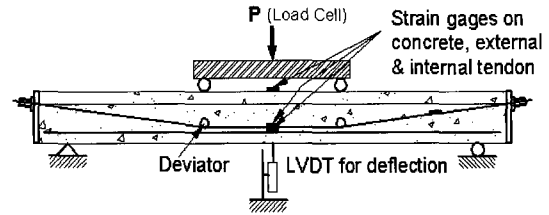


Fig. 3 Layout for data acquisition

Table 1 Parameters and variables of test beams

Parameter	Beam ID	Internal PS steel	External PS steel	Ext. steel depth (mm)
Control	PC1	$2 \times \phi 12.7, f_j = 0.7f_{pu}$ $A_{ps} = 197.42 \text{ mm}^2$	-	d_p 190
Internal PS steel ratio	PC2	$1 \times \phi 12.7, f_j = 0.7f_{pu}$ $A_{ps} = 98.71 \text{ mm}^2$	$2 \times 3\phi 5.20,$ $f_j = 0.6f_{pu}$ $A_{ps} = 127.42 \text{ mm}^2$	d_p 190
	PC3	$1 \times \phi 15.2, f_j = 0.7f_{pu}$ $A_{ps} = 138.7 \text{ mm}^2$		
	PC4	$2 \times \phi 12.7, f_j = 0.7f_{pu}$ $A_{ps} = 197.42 \text{ mm}^2$		
	PC5	$2 \times \phi 15.2, f_j = 0.7f_{pu}$ $A_{ps} = 277.4 \text{ mm}^2$		
External PS steel ratio	PC6	$2 \times \phi 12.7, f_j = 0.7f_{pu}$ $A_{ps} = 197.42 \text{ mm}^2$	$2 \times 3\phi 4.35,$ $f_j = 0.6f_{pu}$ $A_{ps} = 89.17 \text{ mm}^2$	d_p 190
	PC4		$2 \times 3\phi 5.20,$ $f_j = 0.6f_{pu}$ $A_{ps} = 127.42 \text{ mm}^2$	
	PC7		$2 \times 3\phi 12.7,$ $f_j = 0.6f_{pu}$ $A_{ps} = 197.42 \text{ mm}^2$	
Length/depth ratio	PC8	$2 \times \phi 12.7, f_j = 0.7f_{pu}$ $A_{ps} = 197.42 \text{ mm}^2$	$2 \times 3\phi 5.20,$ $f_j = 0.6f_{pu}$ $A_{ps} = 127.42 \text{ mm}^2$	210
	PC4			190
	PC9			170
	PC10			150

Table 2 Test results of tensile strength of reinforcement

Type	Diameter (mm)	Yield stress (MPa)	Ultimate stress (MPa)
Re-bar	H13	447.9	676.7
	H10	405.9	648.2
PS steel	$\phi 5.20(\phi 15.2)$	1,798.8	2,026.8
	$\phi 4.35(\phi 12.7)$	1,835.9	2,069.3

3.3 실험결과 및 분석

외부 프리스트레싱으로 보강된 프리스트레스트 콘크리트 보의 실험결과를 Table 3에 정리하였다. 외부 프리스트레싱 텐던으로 보강된 프리스트레스트 콘크리트 보의 실험결과를 제안된 내부 및 외부 프리스트레싱 강재의 응력예측식(7, 9)에 적용하기 위하여 측정된 내부 및 외부 프리스트레싱 강재의 응력을 프리스트레싱 강재와 중립축의 깊이의 함수(d_p/c_u)로 표시하여 제안된 응력 예측 일 반식이 그 경향성을 잘 표현해주고 있음을 확인하였다.

Table 3 Summary of test results

Beam ID	Ultimate load(KN)	Ultimate deflection (mm)*	Ultimate strain of prestressing steel(*10 ⁻³)**		Ultimate stress of prestressing steel(MPa)**	
			Internal	External	Internal	External
PC1	165.0	26.96	3.93	-	786	-
PC2	157.3	35.84	3.66	3.09	732	618
PC3	190.0	30.87	3.06	2.88	612	576
PC4	226.0	28.60	3.17	2.18	634	436
PC5	236.3	25.75	2.08	1.95	416	390
PC6	200.9	28.25	2.82	2.51	564	502
PC7	265.0	26.90	3.06	2.12	612	424
PC8	250.4	34.87	3.14	3.07	628	614
PC9	216.0	28.68	2.68	2.16	536	432
PC10	209.3	27.77	2.57	1.65	514	330

* Deflection at the maximum ultimate load
 ** Increased strain from the effective stress based on the assumption of linear elasticity

제안된 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력 예측식 (7, 9)을 다시 나타내면 다음과 같다.

$$f_{ps(b)} = f_{pe} + \left[\alpha_b E_{ps} \epsilon_{cu} \left(\frac{d_p}{c_u} - 1 \right) + \beta_b \right] \quad (7)$$

$$f_{ps(ub)} = f_{pe} + \left[\alpha_{ub} \Phi_u E_{ps} \epsilon_{cu} \left(\frac{d_p}{c_u} - 1 \right) + \beta_{ub} \right] \quad (9)$$

한편, 본 시험체에서의 응력 평균화계수는 강재 깊이의 변화에 따른 평균화 계수는

$$\Phi_{ud} = \frac{\bar{d}_p}{d_p} = \frac{\int_0^L d_m dx}{L d_p} = 0.66$$

모멘트 변화에 따른 평균화 계수는

$$\Phi_{um} = \frac{\bar{M}}{M} = \frac{\int_0^L M_x dx}{LM} = 0.66$$

$$\Phi_u = \Phi_{ud} \times \Phi_{um} = 0.445$$

Table 4는 내부 및 외부 프리스트레싱 강재의 측정 및 예측 응력값들을 비교하고 있으며 Figs. 4, 5는 이러한 값들을 d_p/c_u 의 함수값으로 그래프로 나타내어 제안된 응력예측식의 합리성을 확인하고 실험결과로부터 응력수정계수 α_{ub}, β_{ub} 를 구하였다.

Fig. 4에서 보인바와 같이 제안된 내부 부착 프리스트레싱 강재의 응력예측식 (7)은 응력수정계수 α_b 가 0.180 β_b 가 345일 때 실측된 내부 프리스트레싱 강재의 극한응력 증가분의 경향을 가장 잘 표현해주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 내부 프리스트레싱 강재의 극한응력은 내부 프리스트레싱 강재와 중립축의 깊이비가 증가할수록 증가한다.

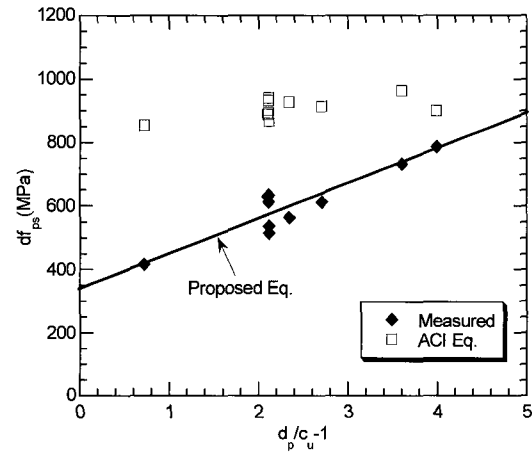


Fig. 4 Increased ultimate stress of internal PS steel as a function of tendon depth/neutral axis depth ratio

Table 4 Ultimate stress of internal and external prestressing steel

Beam ID	d_p/c_u		ω_{ps}		Ext. L/d_p	Ultimate stress of internal PS steel				Ultimate stress of external PS steel			
	Inter.	Exter.	Internal	External		f_{pe} (MPa)	Measured Δf_{ps} (MPa)	Δf_{ps} in ACI Eq. (MPa)	Δf_{ps} in Proposed Eq. (MPa)	f_{pe} (MPa)	Measured Δf_{ps} (MPa)	Δf_{ps} in ACI Eq. (MPa)	Δf_{ps} in Proposed Eq. (MPa)
PC1	4.99	4.74	0.182	-	-	905	786	899	776	-	-	-	-
PC2	4.60	4.37	0.091	0.132	11.05	939	732	963	734	705	618	207	635
PC3	3.71	3.52	0.125	0.132	11.05	949	612	913	638	755	576	207	541
PC4	3.11	2.95	0.182	0.132	11.05	884	634	893	573	750	436	207	477
PC5	1.72	1.63	0.250	0.132	11.05	872	416	853	423	755	390	207	330
PC6	3.34	3.17	0.182	0.095	11.05	877	564	927	598	701	502	264	502
PC7	3.11	2.95	0.182	0.208	11.05	864	612	940	573	692	424	158	477
PC8	3.10	3.26	0.182	0.119	10.00	916	628	888	572	712	614	221	512
PC9	3.11	2.64	0.182	0.148	12.35	872	536	932	573	823	432	192	442
PC10	3.11	2.33	0.182	0.167	14.00	936	514	868	573	757	330	178	408

그러나 기존의 ACI나 우리나라 시방식(1)은 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력의 경향을 전혀 나타내고 있지 못하는데 이는 기존의 시방식이 외부 프리스트레싱 강재의 영향을 고려하고 있지 않기 때문이다. 이로 인하여 ACI나 우리나라 시방식은 안전율을 고려하더라도 높은 극한응력 예측값을 나타내고 있다.

한편, 외부 비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력 예측 제안식 (9)는 Fig. 5에서 보인바와 같이 응력수정계수 α_{ub} 가 0.417, β_{ub} 가 260일 때 실측된 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력 증가분의 경향을 가장 잘 표현해주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력은 외부 프리스트레싱 강재와 중립축의 깊이비가 증가할수록 증가한다.

그러나 기존의 ACI나 우리나라의 시방식(2)는 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력의 경향을 전혀 나타내고 있지 못하는데 이는 기존의 시방식이 내부 부착 프리스트레싱 강재의 영향을 고려하고 있지 않으며 강재깊이의 영향도 효과적으로 고려하고 있지 못하기 때문이다.

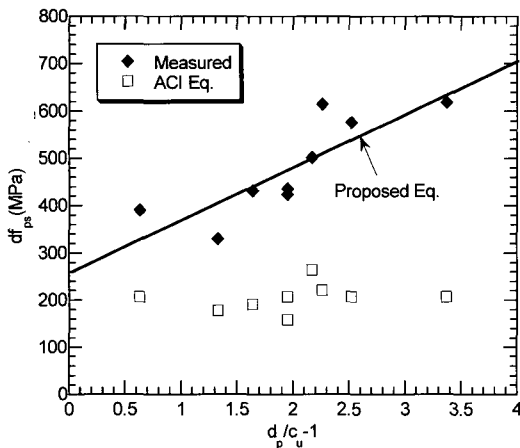


Fig. 5 Increased ultimate stress of external PS steel

Table 5 Calculated and measured ultimate moment

Beam I.D	f_{ps} (MPa)		A_{ps} (mm ²)		d_p (mm)	M_n (KN*m)	M_u (KN*m)	$\frac{M_n}{M_u}$
	Inter.	Ext.	Int.	Ext.				
PC1	1681	0	197	0	200	60.6	57.8	1.05
PC2	1673	1340	99	127	195	59.8	55.1	1.09
PC3	1587	1296	139	127	196	68.1	66.5	1.02
PC4	1457	1227	197	127	197	77.9	79.1	0.98
PC5	1295	1085	277	127	197	86.6	82.7	1.05
PC6	1475	1203	197	89	197	70.8	70.3	1.01
PC7	1437	1175	197	197	196	88.6	92.8	0.95
PC8	1488	1224	197	127	203	81.3	87.6	0.93
PC9	1445	1265	197	127	189	75.5	75.6	1.00
PC10	1509	1165	197	127	183	73.3	73.3	1.00

Table 5는 제안된 응력예측식 (7, 9)로부터 구한 내부 및 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력값으로 구한 공칭 저항모멘트 강도(M_n)와 실험에서 실측된 극한모멘트강도(M_u)을 비교하고 있다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 10개 시험체를 제안식으로 계산한 공칭모멘트 강도와 실측 극한강도와의 비는 최소 0.93에서 최대 1.09 사이에 비교적 양호하게 예측하고 있으며 표준편차 값은 4.6%로 매우 양호하게 분포하고 있음을 알 수 있다. 여기서 매우 작은 표준편차 값 4.6%는 제안된 응력 예측식이 프리스트레싱 강재의 극한응력에 영향을 미치는 영향을 강재깊이와 중립축 깊이비의 함수로서 잘 나타내고 있음을 의미한다.

3.3.1 내부 프리스트레싱 강재의 영향

외부 프리스트레싱 텐던으로 보강된 프리스트레스트 콘크리트 보에서 내부 프리스트레싱 강재비가 내부 프리스트레싱 강재의 극한응력에 미치는 영향을 알아보기 위해 외부 프리스트레싱 강재지수가 일정하고 내부 프리스트레싱 강재지수가 다른 시험체 PC2, PC3, PC4, PC5를 비교, 분석하였다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 내부 프리스트레싱 강재지수가 증가하면 내부 프리스트레싱 강재의 극한응력 증가분이 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 기존 ACI 시방식(1)도 내부 프리스트레싱 강재비로서 그 영향을 고려하여 경향성은 보여주고 있으나 외부 프리스트레싱 강재의 영향을 고려하고 있지 못하기 때문에 제안식보다 높은 예측값을 나타내고 있다. 반면 제안식(7)은 내부 프리스트레싱 강재와 중립축 깊이비의 함수로 표현하고 있어 내부 및 외부 프리스트레싱 강재량의 영향을 합리적으로 고려하여 그 경향성과 응력 정도를 매우 양호하게 나타내고 있다.

한편, 내부 프리스트레싱 강재지수가 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력에 미치는 영향을 알아보기 위해 외부 프리스트레싱 강재지수가 일정하고 내부 프리스트레싱 강재지수가 다른 시험체 PC2, PC3, PC4, PC5를 분석하였다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 내부 프리스트레싱 강재지수가 증가하면 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력 증가분은 직선적으로 감소하는데, 기존 ACI 시방식(2)가 내부 프리스트레싱 강재의 영향을 반영하고 있지 않기 때문에 그 경향성과 응력 정도를 전혀 나타내고 있지 못하다. 반면 제안식 (9)는 외부 프리스트레싱 강재와 중립축 깊이비의 함수로 표현하고 있어 내부 프리스트레싱 강재의 영향을 합리적으로 고려하고 그 경향성과 응력 정도를 잘 나타내고 있다.

Fig. 8은 프리스트레스트 콘크리트 보의 내부 프리스트레싱 강재량에 따른 하중-처짐도를 나타내고 있으며 Fig. 9는 처짐과 외부 프리스트레싱 강재의 변형률과의 관계를 나타내고 있다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 외부 프리스트레싱 강재량이 같은 경우 내부 프리스트레싱 강재량이 증가할수록 극한강도는 증가하고 극한 처짐은 다소 감소하

는 것을 알 수 있다. Fig. 9에서는 외부 프리스트레싱 강재의 응력은 처짐에 선형 비례하고, 내부 프리스트레싱 강재량의 증가에 따라 같은 처짐량에서 응력의 증가 정도가 낮음을 알 수 있다.

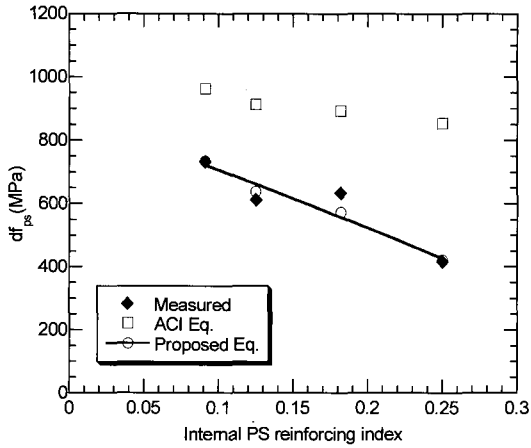


Fig. 6 Increased ultimate stress of internal PS steel and reinforcing index of internal prestress

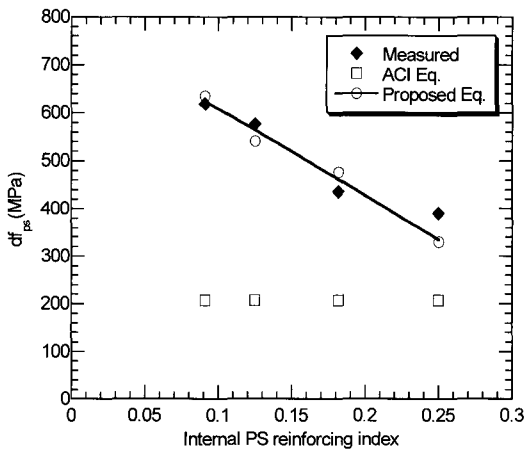


Fig. 7 Increased ultimate stress of external PS steel and reinforcing index of internal prestressing

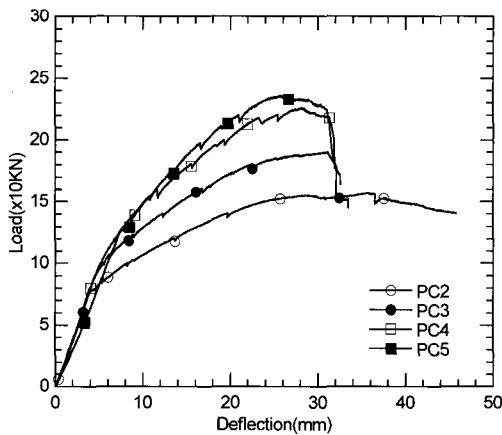


Fig. 8 Load-deflection curves with different internal prestressing reinforcement

3.3.2 외부 프리스트레싱 강재의 영향

외부 프리스트레싱 텐던으로 보강된 프리스트레스트 콘크리트 보에서 외부 프리스트레싱 강재지수가 내부 텐던의 극한응력에 미치는 영향을 알아보기 위해 시험체 PC6, PC4, PC7을 배교하였다.

Fig. 10에서 보는바와 같이 외부 프리스트레싱 강재지수가 증가할수록 내부 프리스트레싱 강재의 극한응력 증가분은 오목 곡선적으로 감소되고 있다. 기존 ACI 시방식(1)은 외부 프리스트레싱 강재의 영향을 고려하고 있지 않아 그 경향성을 전혀 나타내고 있지 못하고 이로 인하여 높은 극한 응력값을 예측하고 있다. 반면 내부 프리스트레싱 강재의 극한응력 예측 제안식(7)은 프리스트레싱 강재와 중립축 깊이비의 함수로 표현하여 외부 프리스트레싱 강재지수의 영향을 합리적으로 고려하고 있어 실측 응력값의 경향과 정도를 잘 나타내고 있다.

또한, 외부 프리스트레싱 강재지수가 외부 프리스트레싱 텐던의 극한응력에 미치는 영향을 알아보기 위해 시험체 PC6, PC4, PC7을 분석하였다.

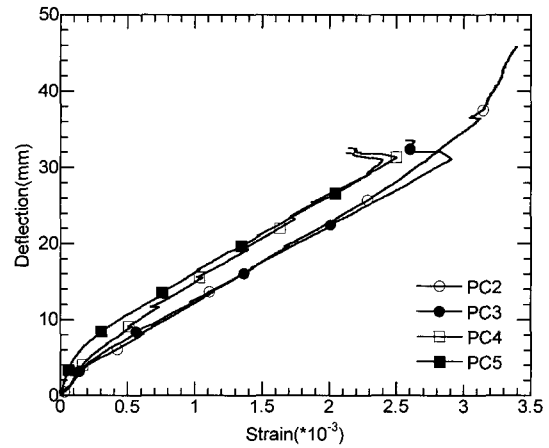


Fig. 9 Deflection-strain curves of external tendon with different internal reinforcement

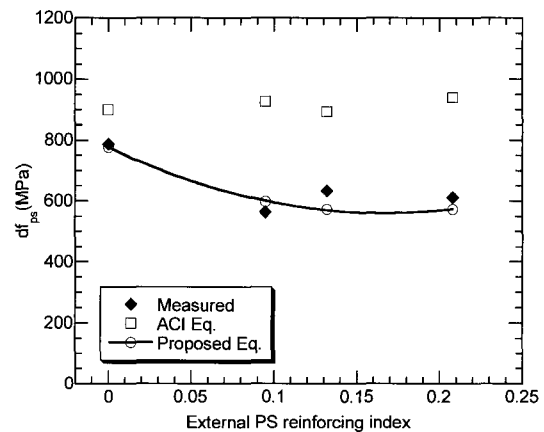


Fig. 10 Increased ultimate stress of internal PS steel and reinforcing index of external prestressing

Fig. 11에서 보는바와 같이 외부 프리스트레싱 강재지수가 증가할수록 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력 증가분은 오목 곡선적으로 감소되고 있다. 기존 ACI 시방식(2)는 외부 프리스트레싱 강재의 영향을 고려하고 있어 외부

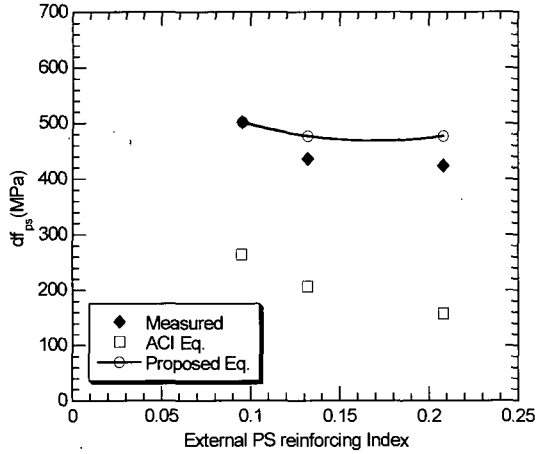


Fig. 11 Increased ultimate stress of external PS steel and reinforcing index of external PS steel

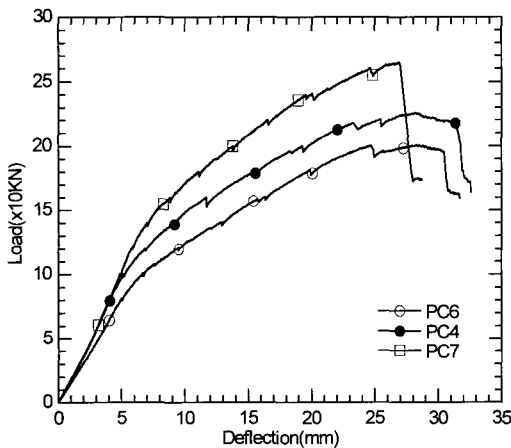


Fig. 12 Load-deflection curves with different reinforcement of external PS steel

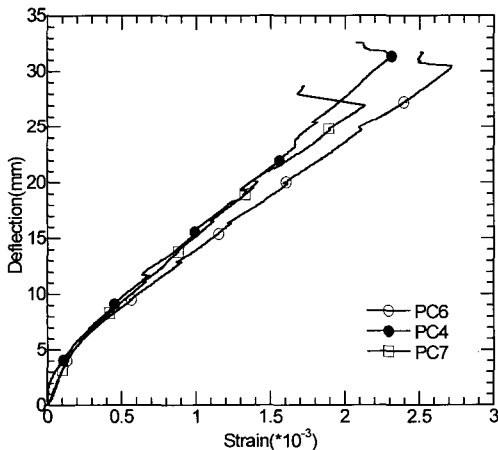


Fig. 13 Deflection-strain of external PS steel with different external PS steel reinforcement

프리스트레싱 강재지수의 증가에 따라 감소하는 경향은 나타내고 있으나 내부 프리스트레싱 강재를 고려하고 있지 않아 낮은 극한응력 예측값을 보여주고 있다. 반면 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력 예측 제안식(9)는 프리스트레싱 강재와 중립축 깊이비의 함수로 표현하여 외부 프리스트레싱 강재지수의 영향을 합리적으로 고려함으로써 실측 응력값의 경향과 정도를 잘 반영하고 있다.

Fig. 12는 프리스트레스트 콘크리트 보의 외부 프리스트레싱 강재량에 따른 하중-처짐도를 나타내고 있으며 Fig. 13은 처짐과 외부 프리스트레싱 강재의 변형률과의 관계를 나타내고 있다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 외부 프리스트레싱 강재량이 증가할수록 극한강도는 증가하고 극한 처짐은 조금 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 13에서는 외부 프리스트레싱 강재의 응력은 처짐에 선형 비례하고, 외부 프리스트레싱 강재량의 증가에 따라 같은 처짐량에서 응력의 증가정도가 다소 낮아짐을 알 수 있다.

3.3.3 지간/유효높이 비의 영향

외부 프리스트레싱 텐던으로 보강된 내부 프리스트레스트 콘크리트 보에서 지간/유효높이 비가 극한휨거동과 외부 프리스트레싱 텐던의 극한응력에 미치는 영향을 알아보기 위해 시험체 PC8, PC4, PC9, PC10을 분석하였다. Fig. 14에서 보는 바와 같이 지간/외부 프리스트레싱 강재의 높이비가 증가할수록 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력 증가분은 개략 선형적으로 감소하고 있다. ACI 시방식(2)는 지간/높이 비에 따른 영향을 고려하고 있으나 다른 두 식(식 2-1, 2-2)으로 표현하고 있어 그 영향을 연속적으로 표현하고 있지 못하다. Fig. 14에서 ACI 시방식(2)가 조금이나마 연속적으로 경향성을 나타내는 이유는 시방식에 포함되어 있는 외부 프리스트레싱 강재비 계산에서 고려되기 때문이다.

Fig. 16은 프리스트레스트 콘크리트 보의 지간/유효높이 비에 따른 하중-처짐도를 나타내고 있으며 Fig. 17은 처짐과 외부 프리스트레싱 강재의 변형률을 나타내고 있다. Fig. 16에서 보는 바와 같이 외부 프리스트레싱 강재의 높이가 증가할수록, 즉, 지간/높이 비가 감소할수록 프리스트레싱 강재의 극한응력이 커져 극한강도가 커짐을 알 수 있다. 또한, Fig. 16은 지간/유효 높이비가 커질수록 극한응력의 증가정도가 낮아짐을 기울기를 통하여 알 수 있다.

4. 결 론

외부 프리스트레싱 텐던으로 보강된 프리스트레스트 콘크리트 보에 있어서 프리스트레싱 강재의 극한응력에 관한 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 기존 ACI 시방식이나 우리나라 시방식의 내부 부착 및

외부 비부착 프리스트레싱 강재의 응력예측식은 내부 부착 혹은 외부 비부착 강재만으로 되어 있는 콘크리트 보를 기준으로 하고 있기 때문에 외부 프리스트레싱 강재로 보강된 프리스트레스트 콘크리트 보에 있어

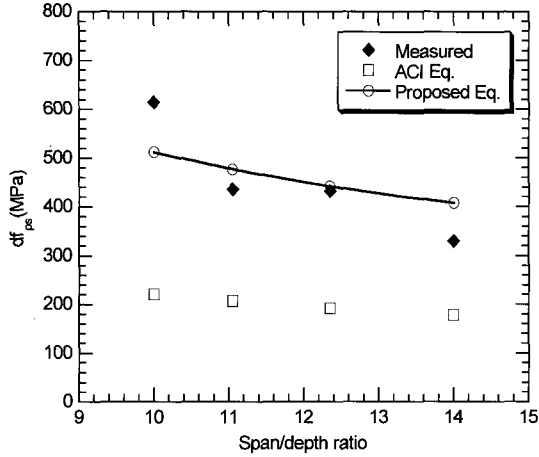


Fig. 14 Increased ultimate stress of external PS steel and span/depth ratio

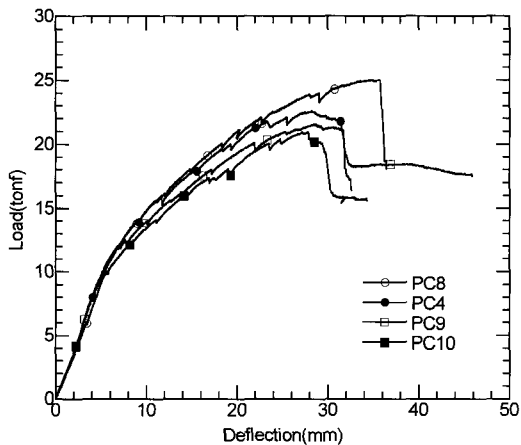


Fig. 15 Load-deflection curves with different span/depth ratio

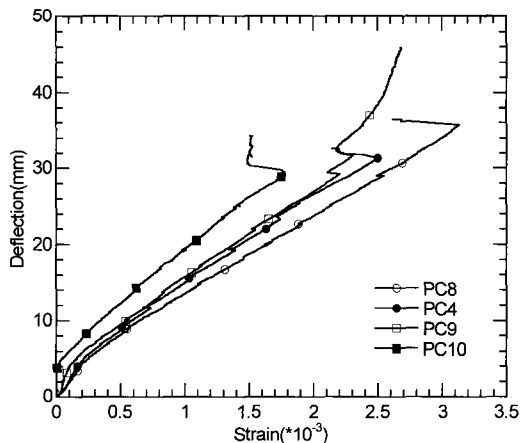


Fig. 16 Deflection-strain of external PS steel with different span/depth ratio

서 각 프리스트레싱 강재의 극한응력 예측에 부적합하다. 이는 기존 시방식의 외부 및 내부 프리스트레싱 강재의 극한응력 예측식이 다른 편 프리스트레싱 강재의 영향을 고려하고 있지 못하기 때문이다.

- 2) 내부 및 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력은 이론적으로 프리스트레싱 강재 깊이와 중립축 깊이비의 함수로 나타낼 수 있으며 실험을 통한 통계적 분석으로 응력수정계수를 결정하여 합리적이고 정확한 응력예측 제안식을 만들 수 있다. 특히, 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력 예측은 제안된 응력 평균화계수 개념을 사용하여 길이에 따른 외부 프리스트레싱 강재 편심 변화와 재하하중에 의한 모멘트 변화를 합리적으로 고려할 수 있다.
- 3) 프리스트레싱 강재깊이와 중립축 깊이비로 나타낸 내부 및 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력 제안식은 응력 평균화계수와 응력수정계수 등의 개념을 도입하여 일반적인 관계식으로 나타낼 수 있으며 실측된 내부 및 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력을 매우 잘 예측하고 있다.
- 4) 프리스트레스트 콘크리트 보에서 내부 프리스트레싱 강재의 극한응력은 내부 및 외부 강재지수의 증가에 따라 감소한다. 한편, 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력도 내부 및 외부 프리스트레싱 강재지수의 증가에 따라 감소한다.
- 5) 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력은 지간/외부 PS강재의 깊이 비의 증가에 따라 감소한다.
- 6) 외부 프리스트레싱 강재의 응력은 프리스트레스트 콘크리트 보의 처짐과 선형적으로 비례한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: R05-2000-000-00374-0) 지원사업에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Naaman, A. E., "A New Methodology for the Analysis of Beams Prestressed with External or Unbonded Tendons," ACI SP-120, American Concrete Institute, 1990, pp.339~354.
2. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계기준," 건설교통부, 2003.
3. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-02)," American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2002.
4. AASHTO, "AASHTO LRFD Bridge Design Specification," 2nd Edition, AASHTO, 2002.

5. Du, G. and Tao, X., "Ultimate Stress in Unbonded Tendons of Partially Prestressed Concrete Beams," *PCI Journal*, Vol.30, No.6, 1985, pp.72~91.
6. Campbell, T. I. and Chouinard K. L., "Influence of Nonprestressed Reinforcement on the Strength of Unbonded Partially Prestressed Concrete Members," *ACI Structural Journal*, Vol.88, No.5, 1991, pp.546~551.
7. Canadian Standards Association Can3-A23.3-M84), "Design of Concrete Structures for Buildings," Canadian Standards Association, 1984.
8. Mattock, A. H., Yamazaki, J., and Jattula, B. T., "Comparative Study of Prestressed Concrete Beams with and without Bond," *ACI Journal*, Vol.68, No.3, 1971, pp.116~125.
9. Naaman, A. E. and Alkhairi, F. M., "Stress at Ultimate in Unbonded Post-Tensioning Tendons: Part 2-Proposed Methodology," *ACI Structural Journal*, Vol.88, No.6, 1991, pp.683~692.
10. Pannell, F. N., "The Ultimate Moment of Resistance of Unbonded Prestressed Concrete Beams," *Magazine of Concrete Research*, Vol.21, No.66, 1969, pp.43~54.
11. Tom, A. and Pannell, F. N., "The Ultimate Moment of Resistance of Unbonded Partially Prestressed Reinforced Concrete Beams," *Magazine of Concrete Research*, Vol.28, No.97, 1976, pp.203~208.
12. 박상렬, "외부 프리스트레싱으로 보강된 RC 보에서 강재량 및 텐던깊이에 따른 프리스트레싱 강재의 극한응력", 콘크리트학회논문집, 15권 4호, 2003, pp.585~593.
13. 오병환, 유성원, "외부 프리스트레스트 콘크리트 부재의 극한상태에서의 강선응력 예측식 제안", 콘크리트학회논문집, 11권 6호, 1999, pp.12~24.
14. 이종윤, 임재형, 문정호, 신경재, "비부착 긴장재를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 보에서 긴장재 응력의 과대평가", 콘크리트학회논문집, 11권 4호, 1999, pp.73~81.
15. 임재형, 문정호, 이리형, "비부착 긴장재의 응력산정을 위한 극한강도 설계식의 평가", 콘크리트학회논문집, 11권 3호, 1999, pp.113~122.
16. 임재형, 문정호, 이리형, "비부착 긴장재의 응력을 평가하기 위해 제안된 설계식의 타당성 검증", 콘크리트학회논문집, 11권 2호, 1999, pp.127~137.
17. 임재형, 문정호, 이리형, "비부착 긴장재의 응력에 영향을 미치는 중요변수에 대한 실험연구", 콘크리트학회논문집, 11권 1호, 1999, pp.209~219.
18. 임재형, 문정호, 음성우, 이리형, "프리스트레스트 콘크리트 부재에서 비부착 긴장재의 극한응력에 관한 연구(I)-기존연구 및 ACI 규준식의 고찰", 콘크리트학회지, 9권 4호, 1997, pp.167~176.
19. 임재형, 문정호, 음성우, 이리형, "프리스트레스트 콘크리트 부재에서 비부착 긴장재의 극한응력에 관한 연구(II) -변형도 적합조건을 이용한 설계식의 제안", 콘크리트학회지, 9권 5호, 1997, pp.105~113.

요 약

본 연구는 외부 프리스트레싱으로 보강된 내부 프리스트레스트 콘크리트 보에 관한 문헌연구와 프리스트레싱 강재의 극한응력 예측식의 개발, 극한응력에 영향을 미치는 변수들에 대한 실험 등이다. 본 논문에서는 내부 및 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력에 대한 새로운 합리적 예측식을 제안하고 있는데, 프리스트레싱 강재와 중립축 깊이비의 함수로 표현하여 내부 및 외부 프리스트레싱 강재의 영향을 고려하고 있다. 실험연구에서는 내부 및 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력에 가장 큰 영향을 미치는 실험변수를 가지고 외부 프리스트레싱으로 보강된 프리스트레스트 콘크리트 보를 제작하여 실험하였다. 실험연구에서 채택한 영향인자들은 내부 프리스트레싱 강재량, 외부 프리스트레싱 강재량, 지간과 프리스트레싱 강재 높이비 등이다. 실험결과는 분석되어 내부 및 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력 예측 제안식의 합리성과 적용성을 확인하였다. 본 연구는 제안된 응력 예측식이 실험에서 얻은 실측값들과 잘 일치함을 보여주고 있다.

핵심용어 : 외부 프리스트레싱, 극한응력, 보강, 비부착, 예측식