

외부 프리스트레싱으로 보강된 R.C 보에서 강재량 및 텐던깊이에 따른 프리스트레싱 강재의 극한응력

박상열^{1)*}

¹⁾ 제주대학교 토목환경공학전공

(2003년 3월 26일 원고접수, 2003년 6월 13일 심사완료)

Ultimate Stress of Prestressing Steel with Different Reinforcement and Tendon Depth in R.C Beams Strengthened by External Prestressing

Sang-Yeol Park^{1)*}

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

(Received March 26, 2003, Accepted June 13, 2003)

ABSTRACT

This study deals with literature review, developing a predicting equation for the ultimate stress of prestressing steel, and experimental test with the parameters affecting the ultimate stress of prestressing steel in reinforced concrete beams strengthened by external prestressing. The ACI predicting equation for the ultimate stress of unbonded prestressing steel is analyzed to develop a new integrated predicting equation. The proposed predicting equation takes rationally the effect of internal reinforcing bars into consideration as a function of prestressing steel depth to neutral depth ratio. In the experimental study, steel reinforced concrete beams strengthened using external prestressing steel are tested with the test parameters having a large effect on the ultimate stress of prestressing steel. The test parameters includes reinforcing bar and external prestressing steel reinforcement ratios, 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 external prestressing steel.

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

1. 서 론

외부 프리스트레싱(external prestressing)은 기존 콘크리트 교량의 보강에 가장 적합한 기술 중의 하나이며, 특히 시공의 용이성과 경제적인 이유로 기존 콘크리트 구조물의 보강에 가장 널리 쓰이고 있는 공법중의 하나이다¹⁾. 외부 프리스트레싱 보강공법은 프리스트레싱 강재를 부재단면 밖에 설치하여 보강하는 방법인데, 근래에는 기존 교량의 보강뿐만 아니라 추후 보강의 필요성에 대비하기 위하여 신설교량에도 사용되고 있다.

외부 프리스트레싱 보강공법의 장점은 크게 세 가지로 첫째는 시공의 단순성으로 강재 설치가 매우 용이하다. 둘째는 프리스트레싱 강재가 외부에 노출되어 강재의 상태를 점검하기 쉽고, 부식이나 기타 이유로 강재에 하자가 발생할 경우 대체가 가능하다. 셋째는 다른 공법에 비해

보강효과가 매우 크고, 보강 정도를 조정하기 쉬운 점이다. 구조적으로 외부 프리스트레싱으로 보강된 철근콘크리트 보의 외부 비부착 강재를 가진 부분 프리스트레스트 콘크리트 보로 분류될 수 있는데, 이 부재는 철근 및 외부 비부착 프리스트레싱 강재로 보강되어 있다³⁾. 그러나 이러한 다른 종류의 강재를 조합하여 사용하는 것은 부재의 해석과 설계를 보다 복잡하고 어렵게 만든다. 비록 외부 프리스트레싱 보강공법이 시공의 단순성이나 경제적인 이유로 선호되지만 외부 프리스트레싱 텐던으로 보강된 콘크리트 보의 휨모멘트 강도 계산을 위한 프리스트레싱 강재의 극한응력 예측식은 아직까지 우리나라 콘크리트 구조 설계기준⁴⁾이나 미국 ACI 시방서⁵⁾에 마련되어 있지 못하다. 두 시방서의 응력 예측식은 그 내용에 있어서 거의 동일하다.

이제까지 외부 비부착 프리스트레싱 강재로 보강된 철근콘크리트 보의 극한상태에서의 해석방법은 철근 및 외부 프리스트레싱 강재의 인장력을 각각 계산하고 이를

* Corresponding author
Tel : 064-754-3456 Fax : 064-725-2519
E-mail : sypark@cheju.ac.kr

합한 총 인장력으로 단면해석을 실시하여 극한 휨모멘트 강도를 구하였다. 여기서 우리나라 콘크리트 구조설계기준이나 ACI 시방서의 비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력식은 주인장재로서 프리스트레싱 강재를 사용하였을 때로 철근의 영향을 고려하지 않은 예측식으로 이를 철근과 외부 비부착 텐던을 함께 갖는 콘크리트 보에 적용하는 것은 적합하지 않다. 왜냐하면 외부 비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력은 내부철근의 영향을 받기 때문이다.

Du와 Tao⁶⁾, Campbell과 Chouinard⁷⁾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 ASSHTO LRFD 시방서⁸⁾와 Canada 시방서 CAN3-A23.3-M84⁹⁾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 실험 결과들을 곡선추정(curve fitting)함으로써 문제를 해결하게끔 이끌었다. 이는 그들로 하여금 극한상태에서 비부착 프리스트레싱 강재의 응력을 실험식을 기초로 예측하였고^{6,10-13)}, ACI 시방서도 비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력을 예측하는데 실험식을 채용하고 있다. 우리나라에서 비부착 강재의 극한응력과 해석방법에 대한 최근의 연구는 참고문헌 14~20 등이 있다.

외부 프리스트레스트 보는 내부 비부착 프리스트레스트 보의 문제뿐만 아니라 보의 변형에 따른 편심변화와 텐던 마찰력의 deviator에서의 집중문제를 가진다. 또한, 외부 텐던의 경우 deviator에서의 갑작스런 선형변화에 따른 마찰력에 의해 프리스트레싱 응력이 감소될 수 있다. 그러나 본 연구에서는 이러한 영향은 제외하였다.

따라서 본 연구는 외부 프리스트레싱 강재로 보강하거나 처음부터 외부 프리스트레싱 강재를 일부 갖는 철근콘크리트 보에 있어서 극한상태에서의 비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력을 예측하고자 기존의 독립된 시방식을 철근의 영향을 고려하기 위하여 확장하고 분석하여 새로운 응력 예측식을 제안하고자 한다. 이를 위하여 콘크리트 구조 설계기준과 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, AASHTO 시방식

비부착 프리스트레싱 강재만을 갖는 콘크리트 보에서 우리나라 콘크리트 설계기준 및 ACI 시방서에 따른 비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력은 아래와 같다.

$$\frac{L}{h} \leq 35 : f_{ps} = f_{pe} + 70 + \frac{f_{ck}}{100\rho_p} < f_{py}$$

혹은 $f_{pe} + 400$ (MPa) (1-1)

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

혹은 $f_{pe} + 210$ (MPa) (1-2)

여기서, f_{pe} : 프리스트레싱 강재의 유효응력

f_{ck} : 콘크리트의 압축강도

ρ_p : 프리스트레싱 강재비

f_{py} : 프리스트레싱 강재의 항복응력

또한 AASHTO LRFD 시방식에서는 아래와 같이 비부착 강재의 극한응력을 부착감소계수, Ω_u 를 사용하여 중립축과 강재 깊이비의 함수로 나타내고 있다.

$$f_{ps} = f_{pe} + \Omega_u E_{ps} \epsilon_{cu} \left(\frac{d_b}{c} - 1 \right) < 0.94 f_{py} \quad (2)$$

여기서, E_{ps} : 프리스트레싱 강재의 탄성계수

ϵ_{cu} : 콘크리트의 최대 극한변형률

$\frac{d_b}{c}$: 프리스트레싱 강재와 중립축 깊이의 비

$\Omega_u = 1.5 / \left(\frac{L}{d_b} \right)$ (일점하중)

$\Omega_u = 3.0 / \left(\frac{L}{d_b} \right)$ (이점 하중과 등분포 하중)

그러나 AASHTO 시방식은 미지의 중립축 깊이, c 의 함수로 되어 있기 때문에 위 식과 단면의 힘의 평형조건식, 두 방정식으로부터 미지수 f_{ps} , c 를 시산법에 의하여 구해야하는 불편함이 있다.

2.2 ACI 시방식의 확장

비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력에 대한 독립된 시방식 (1) 혹은 (2)를 살펴보면 모두 강재비의 함수로 되어 있는데 이는 강재량에 따른 인장력과 강재 깊이의 함수임을 뜻한다. 또한 인장력은 중립축의 깊이를 결정할 수 있어 강재의 극한 응력은 중립축의 깊이와 강재 깊이의 함수로 나타낼 수 있다. 다음은 그 과정을 설명하고 있다. 비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력식 (1-1)을 인장력의 항으로 나타내면 아래와 같다.

$$f_{ps} = f_{pe} + 70 + \frac{f_{ck}}{100 \left(\frac{A_{ps} f_{py}}{bd_p f_{py}} \right)} \quad (3)$$

여기서, A_{ps} : 프리스트레싱 강재량, b : 보의 폭
위 식을 살펴보면 프리스트레싱 강재의 극한응력 시방식은 자신만에 의한 인장력의 함수로 표시되어 있다. 따라서, 외부 프리스트레싱 강재로 보강된 철근콘크리트 보에서 위와 같은 독립식을 사용한다면 프리스트레싱 강재의 극한응력을 높게 평가하여 결국 공칭 휨모멘트 강도를 높게 평가하는 결과를 가져온다. 그러므로 외부 프리스트레싱 강재로 보강된 콘크리트 보에서 프리스트레싱 강재의 극한응력은 철근의 보강정도에 따라 달리 계산되어야 할 것이다. 따라서 외부 프리스트레싱 강재를 갖는 콘크리트 보에서 프리스트레싱 강재의 응력은 철근의 영향을 고려하여 다음과 같이 확장할 수 있다.

$$f_{ps} = f_{pe} + 70 + \frac{f_{ck}}{100 \left(\frac{A_{ps} f_{py} + A_s' f_y - A_s' f_y}{bd_p f_{py}} \right)} \quad (4)$$

여기서, A_s : 인장철근량, A_s' : 압축철근량
 f_y : 철근의 항복응력

위 식에서 비부착 강재의 응력은 보수적으로 최대 한계값을 사용하였다. 위 식을 중립축의 위치(c_u)와 강재 깊이(d_p)의 함수로 간단히 나타내면 비부착 프리스트레싱 강재의 극한 응력은 다음과 같다.

$$f_{ps} = f_{pe} + 70 + \frac{f_{py}}{85\beta_1} \left(\frac{d_p}{c_u} \right) \quad (5)$$

여기서, $c_u = \frac{A_{ps} f_{py} + A_s' f_y - A_s' f_y}{0.85 f_{ck} b \beta_1}$ 은 각 강재가 극한상태에서 최대 한계응력에 도달하였을 때의 중립축 깊이이며, β_1 은 중립축과 등가응력블럭의 깊이와의 비이다.

따라서 프리스트레싱 강재의 극한응력 예측식은 외부 프리스트레싱 강재를 함께 사용하는 철근콘크리트 보의 극한 휨모멘트 강도를 계산하기 위하여 철근의 보강효과를 고려해야 한다. 또한 응력 예측식은 직사각형 보나 플랜지를 가진 보 등에도 적용될 수 있는 일반적이고 합리적이며 되도록 단순해야 한다.

2.2 극한응력 예측 제안식

기존 시방식을 확장하여 분석한 결과 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력은 프리스트레싱 강재와 중립축의 깊이비의 함수임을 알 수 있다. 따라서 극한상태의 단면해석에서 완전부착 가정을 전제로 이론적으로 변형률 적합조건식을 이용하여 부착 프리스트레싱 강재의 응력을 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, ϵ_{ps} : 부착 프리스트레싱 강재의 극한 변형률

$c_u = \frac{A_{ps} f_{py} + A_s' f_y - A_s' f_y}{0.85 f_{ck} b \beta_1}$ 로 각 강재가 극한상태에서 최대 한계응력에 도달하였을 때의 중립축 깊이로 T형 보 거동의 경우는 아래와 같다.

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

여기서, b_o : 복부 폭, h_f : 플랜지 두께

그러나 위의 식 (6)의 경우 일반적 프리스트레싱 강재의 탄성계수 E_{ps} 를 사용함으로써 인한 선형탄성 가정과 극한상태에서 중립축 깊이를 구할 때 프리스트레싱 강재의 최대응력을 가정하였기 때문에 실제 실험값들과 차이가 날 수 있다. 이러한 영향을 고려하여 프리스트레싱 강재 깊이와 극한상태에서의 중립축깊이 비로 일반적 1차 함수 관계식으로 표시하면 아래와 같다.

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

여기서 α 와 β 는 위의 기본가정이나 외부 프리스트레싱 강재의 편심변화 등 기타 요인 등으로 인한 응력수정 계수로 실험 등을 통하여 통계적으로 구할 수 있다.

그러나 외부 프리스트레싱 강재의 경우는 비부착 되어 응력이 단면중속이 아니라 부재중속이라는 특성을 고려하여 단면의 변형률 적합조건식으로부터 구한 응력에다 전 부재깊이에 걸친 응력의 평균화에 따른 감소계수를 곱해야 할 것이다. 즉, 응력평균화를 위한 감소계수는 보의 길이(x)에 따른 강재깊이의 변화(d_{px})와 재하하중에 의한 모멘트 변화(M_x)의 영향을 고려한 것이다. 따라서 이를 고려한 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력은 (6)식을 수정하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

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

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

$$\Phi_{ud} = \frac{\bar{d}_p}{d_p} = \int_0^L d_{px} dx / (L d_p)$$

: PS 강재깊이의 변화를 고려한 응력 평균화 계수

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

: 휨모멘트 변화를 고려한 응력 평균화 계수

외부 프리스트레싱 강재의 선형탄성 가정과 최대 중립축 가정, 그리고 그외의 요인들에 의한 실제 극한응력과의 차이를 고려하여 일반적인 형태로 프리스트레싱 강재의 깊이와 극한상태의 중립축 깊이의 함수로 나타내면 다음과 같다.

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

3. 실험연구

3.1 실험계획

3.1.1 시험체

외부 프리스트레싱으로 보강된 철근콘크리트 보에서 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력에 영향을 미치는 인자 및 그 영향을 평가하고 이를 기초로 극한상태에서 프리스트레싱 강재의 극한응력을 예측할 수 있는 모델방정식을 찾기 위해 실험을 실시하였다.

실험에 사용된 시험체는 총 10개의 T형 콘크리트 보로 시험체 채원과 하중재하 장치는 Fig. 1과 같다. 모든 보는 250mm 깊이로서 총길이 2.4m, 지지점 사이의 거리는 2.1m의 단순 T형보로서 극한 휨거동을 관찰하기 위해 4점 재하배치를 사용하였다. 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 스테럽은 H10철근으로 100mm 간격으로 배치하였다.

3.1.2 실험 데이터 수집

하중은 4점 재하법으로 지간의 1/3 지점 두 곳에 하중이 작용될 수 있도록 강재보를 설치하고 가력 프레임에서 유압하중기를 사용하여 파괴시까지 재하 하였다. 하중은 변위조절 방법으로 분당 약 1.5mm의 속도로 재하 하였으며 재하하중 약 3tonf마다 균열을 표시하였다. 데이터 수집은 동적변형률 측정기를 사용하여 컴퓨터 자동 데이터 수집프로그램을 이용하여 작용하중 및 처짐과 철근과 콘크리트, 외부 프리스트레싱 강재의 변형률을 측정하였다. Fig. 2는 시험 데이터 수집을 위한 기기 및 strain gage의 위치를 나타내고 있다.

3.1.3 시험변수

외부 프리스트레싱 강재의 극한응력에 영향을 미치는 인자들에 대한 이제까지의 연구결과를 평가 분석하여 시험변수를 결정하였는데 변수들은 내부철근비, 외부 프리스트레싱 강재비, 지간/유효높이 비 등이다. Table 1은 철근콘크리트 시험보의 시험인자 및 변수를 나타내고 있다.

3.2 재료

3.2.1 콘크리트

철근콘크리트 시험체에 사용된 콘크리트는 설계강도 24.0MPa의 레미콘으로 Type-I의 보통시멘트, 자연모래, 최대 골재크기 25mm의 쇄석골재를 사용하였다. 현장에서 측정된 슬럼프 값은 15 cm였으며 시험보의 실험시 측정된 공시체의 평균 압축강도는 30.5 MPa이었다.

3.2.2 철근 및 프리스트레싱 강재

시험체에 사용된 철근은 철근콘크리트 보의 경우 SD40 등급의 H25, H22, H19, H16을 사용하였고 압축철근으로 H13을, 스테럽용으로 H10을 사용하였다.

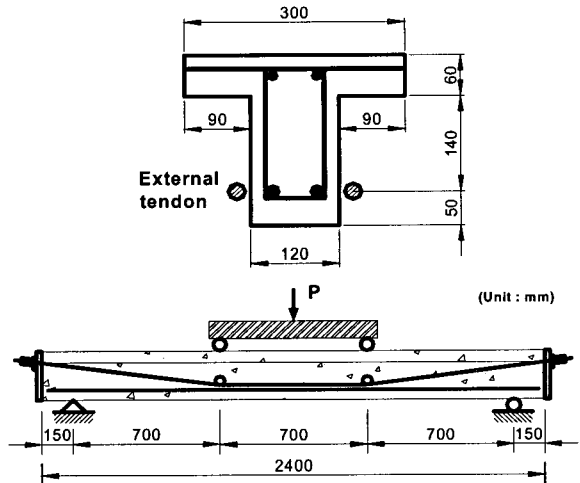


Fig. 1 Dimensions and loading layout of test beam

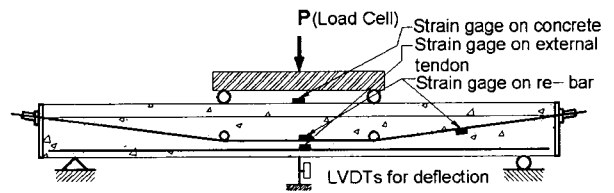


Fig. 2 Layout for data acquisition

Table 1 Parameters and variables of test beams

Parameter	Beam ID	Reinforcing bar	External PS steel	PS steel depth (mm)
Control	RC1	2H22, $A_s=7.74 \text{ cm}^2$ $\rho_{used}=0.61\rho_{max}$	-	$d_p=190$
	RC2	2H16, $A_s=3.97 \text{ cm}^2$ $\rho_{used}=0.31\rho_{max}$	$2 \times 3\phi 5.20$, $f_j=0.6f_{pu}$ $A_{ps}=127.42 \text{ mm}^2$	$d_p=190$
	RC3	2H19, $A_s=5.73 \text{ cm}^2$ $\rho_{used}=0.45\rho_{max}$		
	RC4	2H22, $A_s=7.74 \text{ cm}^2$ $\rho_{used}=0.61\rho_{max}$		
	RC5	2H25, $A_s=10.10 \text{ cm}^2$ $\rho_{used}=0.79\rho_{max}$		
External PS steel ratio	RC6		$2 \times 3\phi 4.35$, $f_j=0.6f_{pu}$ $A_{ps}=89.17 \text{ mm}^2$	$d_p=190$
	RC4	2H22, $A_s=7.74 \text{ cm}^2$ $\rho_{used}=0.61\rho_{max}$	$2 \times 3\phi 5.20$, $f_j=0.6f_{pu}$ $A_{ps}=127.42 \text{ mm}^2$	
	RC7		$2 \times 3\phi 12.7$, $f_j=0.6f_{pu}$ $A_{ps}=197.42 \text{ mm}^2$	
Length/depth ratio	RC8			$d_p=210$
	RC4	2H22, $A_s=7.74 \text{ cm}^2$ $\rho_{used}=0.61\rho_{max}$	$2 \times 3\phi 5.20$, $f_j=0.6f_{pu}$ $A_{ps}=127.42 \text{ mm}^2$	$d_p=190$
	RC9			$d_p=170$
	RC10			$d_p=150$

한편 외부 프리스트레싱 강재는 SWPC 7B의 지름 5.20mm와 4.35mm의 강선 3개와 지름 12.7mm의 7연선을 사용하였다. 아래 Table 2에서는 사용된 철근 및 프리스트레싱 강재의 인장시험결과를 요약하였다.

Table 2 Test results of tensile strength of reinforcement

Type	Diameter (mm)	Yield stress (MPa)	Ultimate stress (MPa)
Re-bar	H25	459.4	640.9
	H22	427.6	650.3
	H19	472.9	685.8
	H16	466.4	683.2
	H13	447.9	676.7
	H10	405.9	648.2
PS steel	Φ5.20(Φ15.2)	1,798.8	2,026.8
	Φ4.35(Φ12.7)	1,835.9	2,069.3

Table 3 Summary of test results

Beam I.D	Ultimate load(KN)	Ultimate deflection (mm)*	Ultimate strain of external PS steel(*10 ⁻³)**	Ultimate stress of external PS steel (MPa)**
RC1	185.7	40.72	-	-
RC2	210.9	51.31	4.43	886
RC3	241.2	44.52	3.65	730
RC4	269.2	40.75	3.16	632
RC5	285.9	34.65	2.48	496
RC6	248.2	40.82	3.68	736
RC7	286.8	29.74	2.16	432
RC8	292.5	39.24	3.92	784
RC9	267.9	41.21	3.04	608
RC10	258.5	38.04	2.45	490

* Deflection at the maximum ultimate load
 ** Increased strain from the effective strain and increased stress from the effective stress

Table 4 Ultimate stress of external prestressing steel

Beam I.D	f_{pe} (MPa)	Measured Δf_{ps} (MPa)	Δf_{ps} in Eq.(1) (MPa)	Δf_{ps} in Eq.(2) (MPa)	$\frac{d_b}{c_u}$	ω_s of re-bar	ω_{ps} of PS steel	L/d_p	Δf_{ps} in Eq.(8) (MPa)	Δf_{ps} in Eq.(9) (MPa)	f_{ps} in Eq.(9) (MPa)	Measured M_u (KN*m)	Calculated M_n (KN*m)
RC2	845.9	886	206.5	610.7	4.09	0.101	0.132	11.05	763.8	901.2	1747.1	73.82	70.36
RC3	834.0	730	206.5	455.8	3.18	0.148	0.132	11.05	581.3	694.8	1528.8	84.42	79.83
RC4	815.0	632	206.5	352.7	2.75	0.181	0.132	11.05	467.1	597.2	1412.2	4.22	86.83
RC5	794.3	496	206.5	233.8	1.64	0.254	0.132	11.05	170.0	345.2	1139.5	100.00	101.11
RC6	729.6	736	263.7	455.8	3.21	0.181	0.095	11.05	591.4	701.6	1431.2	86.87	79.56
RC7	693.3	432	158.1	320.5	1.64	0.181	0.208	11.05	169.6	345.2	1038.5	100.38	90.27
RC8	731.1	784	220.8	477.4	3.04	0.181	0.119	10.00	544.4	663.0	1394.1	102.38	90.07
RC9	789.8	608	192.0	304.6	2.46	0.181	0.148	12.35	389.9	531.3	1321.1	93.77	81.48
RC10	842.1	490	177.7	225.3	2.17	0.181	0.167	14.00	312.6	465.5	1307.6	90.48	78.30

3.3 실험결과 및 분석

외부 프리스트레싱 텐던으로 보강된 철근콘크리트 보의 실험결과(Table 3)를 제안된 프리스트레싱 강재의 응력에 예측식(9)에 적용하기 위하여 측정된 외부 프리스트레싱 강재의 응력을 PS강재와 중립축의 깊이의 함수(d_p/c_u)로 표시하여 응력수정계수 α 와 β 를 구하여 제안된 일반식으로 나타내었다. 제안된 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력 예측식(9)를 다시 나타내면 다음과 같다.

$$f_{ps(u)} = f_{pe} + \Delta f_{ps(u)} = f_{pe} + \left[\beta + \alpha \Phi_u E_{ps} \epsilon_{cu} \left(\frac{d_p}{c_u} - 1 \right) \right]$$

또한, 본 시험체에서 응력평준화계수 = $\Phi_u = 0.445$

$$\Phi_{ud} = \frac{\int_0^L d_{px} dx}{L d_p} = 0.667, \quad \Phi_{um} = \frac{\int_0^L M_x dx}{LM} = 0.667$$

Table 4는 극한상태에서 각 시험체의 외부 프리스트레싱 강재의 측정 및 예측 응력과 모멘트강도를 비교하고 있다. Fig. 3은 PS강재의 응력을 d_p/c_u 의 함수로 나타낸 것으로 제안된 응력 예측식 (9)는 응력수정계수 α 가 0.85, β 가 2,000일 때 실측된 외부 PS강재의 극한응력 증가분의 경향을 가장 잘 표현해주고 있는데 PS강재와 중립축의 깊이의 비가 증가할수록 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력이 증가된다.

한편 기존의 ACI나 우리나라 시방식은 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력의 경향을 잘 나타내고 있지 못한데 이는 기존 시방식이 내부철근의 영향을 고려하고 있지 않으며 보 길이에 따른 강재깊이 변화와 휨모멘트 변화의 영향도 효과적으로 고려하고 있지 못하기 때문이다. 그러나 AASHTO 시방식은 강재와 중립축 깊이비의 함수로 표현하고 있어 제안식과 같은 경향을 보이나 실측값과 큰 차이가 있으며 프리스트레싱 강재의 극한응력을 구하기 위해서는 중립축을 가정하여 단면의 평형조건을 만족할 때까지 시산법으로 계산하여야 하는 불편함이 있다.

한편 Fig. 4에서 보인 바와 9개 시험체의 예측된 프리스트레싱 응력으로 계산된 모멘트강도는 실험에서 측정된 모멘트강도의 약 92%로 매우 양호하게 예측하고 있다.

1) 철근비의 영향

외부 프리스트레싱 텐던으로 보강된 철근콘크리트 보에서 내부 철근비가 외부 텐던의 극한응력에 미치는 영향을 알아보기 위해 시험체 RC2, RC3, RC4, RC5를 비교하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 내부철근의 강제지수 즉, 철근량이 증가하면 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력 증가분이 감소하는데, 기존 ACI 시방식(1)은 내부 철근의 영향을 전혀 반영하고 있지 못하다. 반면 제안식(9)는 PS 강재와 중립축 깊이비의 함수로 표현함으로써 내부철근의 영향을 합리적으로 고려하여 실측 응력값의 경향을 잘 나타내고 있다. 그림에서 예측식의 그래프가 하나의 곡선으로 표시되지 못한 이유는 철근량의 증가에 따라 시험체가 T형보 거동을 하기 때문이다.

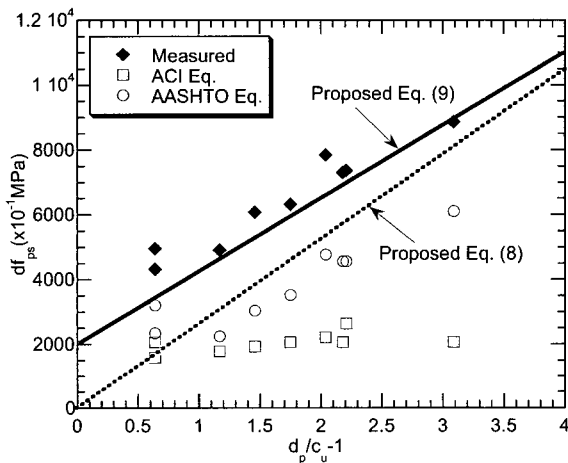


Fig. 3 Increased ultimate stress of external PS steel

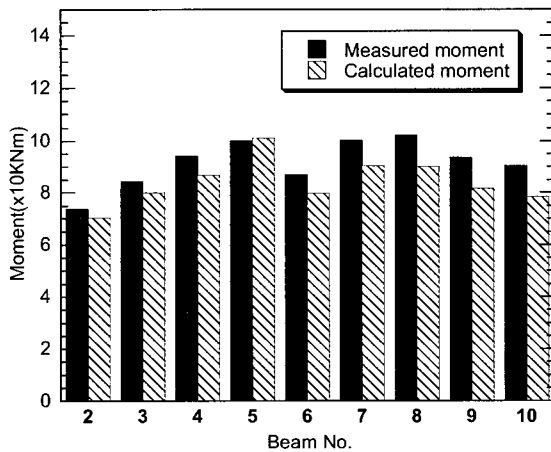


Fig. 4 Comparison of measured and calculated moment

Fig. 6은 철근콘크리트 보의 내부 철근비에 따른 하중-처짐도를 나타내고 있는데 RC1은 외부 보강이 없는 기준 보이다. 기준보 RC1과 같은 철근량을 가진 RC4를 비교하

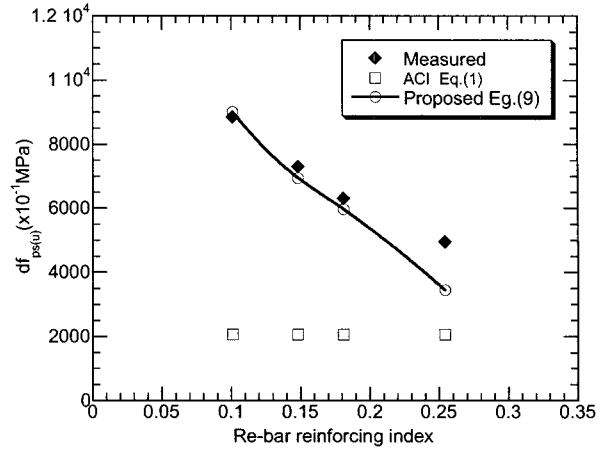


Fig. 5 Increased ultimate stress of external PS steel and reinforcing index of re-bar

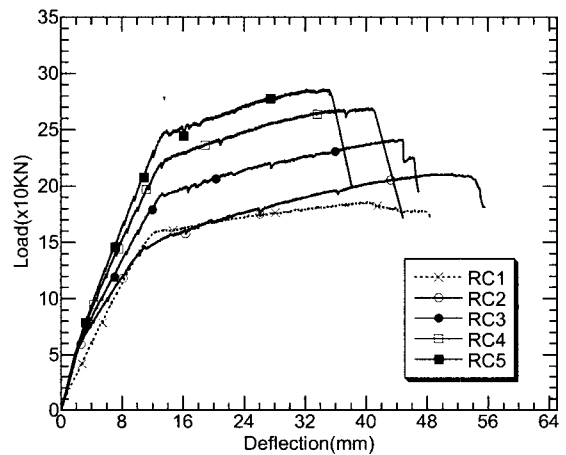


Fig. 6 Load-deflection curves with different re-bar ratio

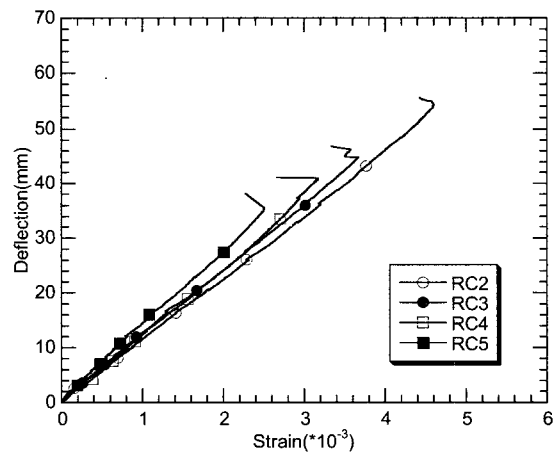


Fig. 7 Deflection-strain of external PS steel with different re-bar ratio

여 보면 전체적인 거동의 경향은 비슷하며 다만 외부 프리스트레싱 강재로 보강된 RC4가 훨씬 높은 극한강도를 가짐을 알 수 있다. 내부 철근량이 다른 RC2, RC3, RC4, RC5를 비교하여 보면 외부 프리스트레싱 강재의 양이 증가할수록 극한강도는 증가하고 극한처짐은 감소함을 알 수 있다. Fig. 7은 철근비에 따른 처짐과 외부 프리스트레싱 강재 변형률과의 선형적 관계를 나타내고 있는데 철근량의 증가에 따라 같은 처짐량에서 응력의 증가정도는 철근량이 적을수록 크다는 것을 그래프의 기울기로서 알 수 있다.

2) 외부 PS강재의 영향

외부 프리스트레싱 텐던으로 보강된 철근콘크리트 보에서 외부 프리스트레싱 강재비가 극한 휨거동과 외부 텐던의 극한응력에 미치는 영향을 알아보기 위해 시험체 RC6, RC4, RC7을 비교하였다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 외부 프리스트레싱 강재비수가 증가할수록 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력 증가분은 감소되는데, 기존 ACI 시방식(1)은 외부 프리스트레싱 강재의 영향을 고려하고 있지만 실험결과와 기울기에 있어서 차이를 보이고 있다. 이는 기존의 ACI 시방식이 최소 내부철근을 갖고 외부 프리스트레싱 강재로만 인장력을 저항하는 경우의 시방식이기 때문으로 판단된다. 반면 제안식(9)는 PS강재와 중립축 깊이비의 함수로 표현함으로써 외부 프리스트레싱 강재비의 영향을 합리적으로 고려하고 있어 실험 응력값의 경향을 잘 반영하고 있다.

Fig. 9는 외부 프리스트레싱 강재비에 따른 각 시험체의 하중-처짐도를 나타내고 있는데, RC1은 외부 보강이 없는 기준보이다. 그림에서 보는 바와 같이 외부 프리스트레싱 강재 보강량이 증가하면 극한강도가 증가하고 극한처짐은 비슷하나, 외부 강재량이 과도한 RC7의 경우만 극한처짐이 상당히 감소함을 알 수 있다.

Fig. 10은 외부 프리스트레싱 강재비에 따른 처짐과 프리스트레싱 강재의 변형률과의 관계를 나타내고 있는데 내부 철근비에 따른 영향에서와 같이 선형적으로 비례하고 외부 프리스트레싱 강재비가 증가할수록 같은 처짐량에서 응력의 증가가 조금씩 낮게 나타나고 있다.

외부 프리스트레싱 텐던으로 보강된 철근콘크리트 보에서 지간과 프리스트레싱 강재의 깊이비가 극한 휨거동과 외부 텐던의 극한응력에 미치는 영향을 알아보기 위해 시험체 RC8, RC4, RC9, RC10을 비교하였다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 지간/강재깊이 비가 증가할수록 외부 PS 강재의 극한응력 증가분은 감소하는데, ACI 시방식은 지간과 보높이 비에 따른 영향을 다른 두식(식 1, 2)으로 표현하고 있어 그 영향을 연속적으로 표현하고 있지 못하다. 그림에서 ACI 시방식이 조금이나마 경향성을 나타내는 이유는 시방식에 포함되어 있는 보높이가 강재깊이와 관련되어 외부 PS강재비 계산에서 고려되기 때문이다.

3) 지간과 강재깊이 비의 영향

Fig. 12은 철근콘크리트 보의 지간/강재깊이 비에 따른 하중-처짐도를 나타내고 있는데 강재깊이의 증가에 따라

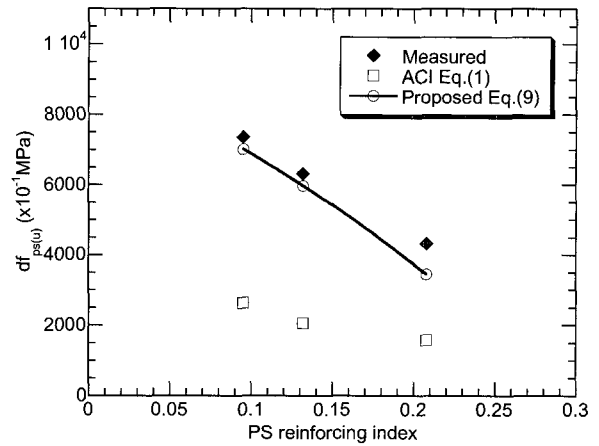


Fig. 8 Increased ultimate stress of external PS steel and reinforcing index of re-bar

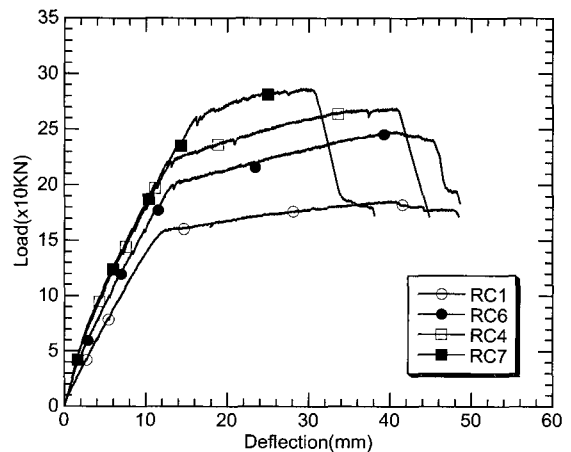


Fig. 9 Load-deflection curves with different reinforcement ratio of external PS steel

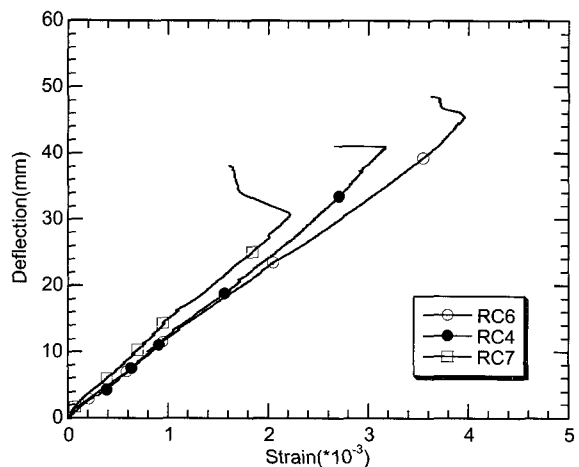


Fig. 10 Deflection-strain of external PS steel with different external PS steel reinforcement ratio

극한강도가 증가되고 있다. Fig. 13에서 보인바와 같이 처짐과 외부 프리스트레싱 강재의 변형률과는 선형적으로 비례하고 있으나 강재깊이의 영향은 다른 영향인자보다는 크다는 것을 기울기의 차이에서 알 수 있다.

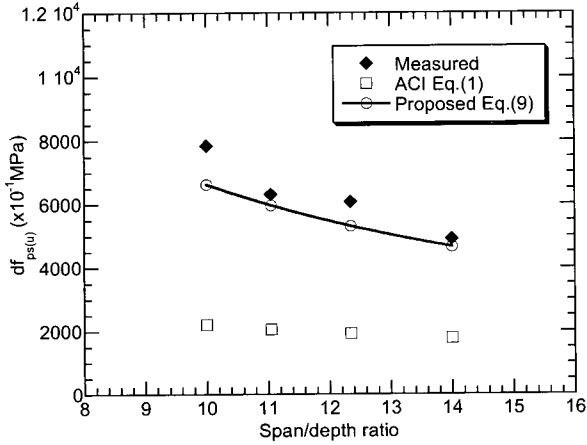


Fig. 11 Increased ultimate stress of external PS steel and span/depth ratio

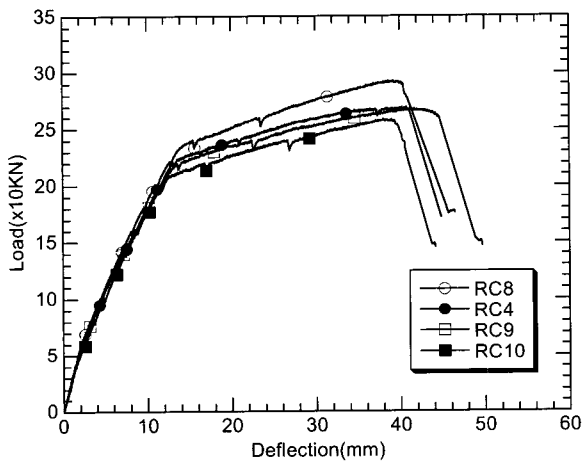


Fig. 12 Load-deflection curves with different span/depth ratio

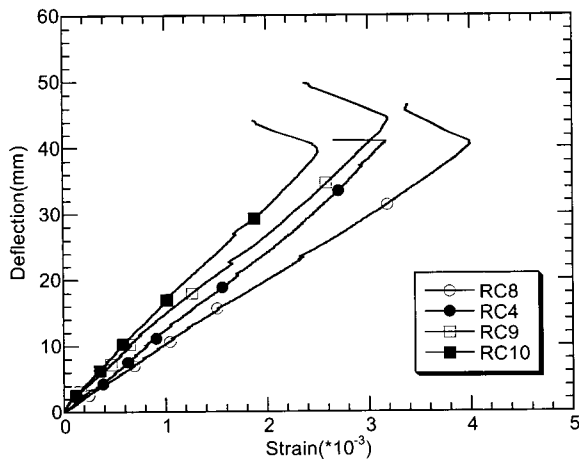


Fig. 13 Deflection-strain of external PS steel with different span/depth ratio

4. 결 론

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

- 1) 기존 ACI 시방식이나 우리나라 시방식의 외부 비부착 프리스트레싱 강재의 응력예측식은 비부착 강재가 주 인장재인 콘크리트 보를 기준으로 하고 있기 때문에 외부 프리스트레싱 강재로 보강된 철근콘크리트 보의 프리스트레싱 강재의 극한응력 예측에 부적합하다. 이는 기존 시방식의 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력 예측식이 내부철근의 영향을 고려하고 있지 않기 때문이다.
- 2) AASHTO 시방식은 프리스트레싱 강재의 극한응력을 강재와 중립축 깊이비의 함수로 나타내고 있어 그 경향성은 비슷하나 실측값들과 오차가 크며 극한응력을 구하기 위해서는 중립축 깊이를 가정하여 단면의 평형 조건을 만족할 때까지 시산법으로 풀어야하는 어려움과 불편함이 있다. 또한 보 전체 길이에 따른 프리스트레싱 강재 깊이의 변화와 재하하중에 따른 모멘트의 변화를 합리적으로 고려하고 있지 못하다.
- 3) 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력은 이론적으로 PS 강재 깊이와 중립축 깊이의 비의 함수로 합리적으로 나타낼 수 있으며 실험을 통한 응력수정계수의 결정으로 정확한 응력예측식을 만들 수 있다.
- 4) 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력 예측시 부착감소 계수와 비슷한 응력 평준화계수를 사용하여 부재길이에 따른 PS 강재깊이 변화와 재하하중에 의한 모멘트 변화를 합리적으로 고려할 수 있다.
- 5) PS강재의 깊이와 중립축의 깊이의 비로 나타낸 프리스트레싱 강재의 극한응력 제안식은 응력 평준화계수와 응력수정계수 등을 도입하여 실험에서 실측된 프리스트레싱 강재의 극한응력을 매우 정확하게 예측하고 있다.
- 6) 철근콘크리트 보에서 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력은 내부 철근과 외부 프리스트레싱 강재비의 증가에 따라 감소한다.
- 7) 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력은 지간/PS강재의 깊이 비의 증가에 따라 감소한다.
- 8) 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력은 철근콘크리트 보의 처짐과 선형적으로 비례한다.

감사의 글

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

참고문헌

1. Virlogues, M., "External Prestressing," IABSE Proceeding, International Association for Bridge and Structural Engineering, Zurich, Switzerland, 1982. pp.101~108.
2. Naaman, A. E., "A New Methodology for the Analysis of Beams Prestressed with External or Unbonded Tendons," ACI SP-120-16, pp.339~354.
3. Naaman, A. E., "Partial Prestressing in the Rehabilitation of Concrete Bridge," Proceedings of the 1st Us-European Workshop, A. S. Nowak and E. Absi Editors, The University of Michigan, 1987, pp.391~406.
4. 건설교통부, 콘크리트 구조 설계기준, 한국콘크리트학회, 2003.
5. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-95)," American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1995.
6. AASHTO, "AASHTO LRFD Bridge Design Specification," 2nd Edition, 2002.
7. Du, G. and Tao, X., "Ultimate Stress in Unbonded Tendons of Partially Prestressed Concrete Beams," PCI Journal, Vol. 30, No. 6, Nov.-Dec. 1985, pp.72~91.
8. 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.
9. Canadian Standards Association Can3-A23.3-M84), "Design of Concrete Structures for Buildings," Dec. 1984.
10. 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, Feb. 1971, pp.116~125.
11. 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, Nov.-Dec. 1991, pp.683~692.
12. Pannell, F. N., "The Ultimate Moment of Resistance of Unbonded Prestressed Concrete Beams," Magazine of Concrete Research, Vol. 21, No. 66, March 1969, pp.43~54.
13. 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, Dec. 1976, pp.203~208.
14. 오병환, 유성원, "외부 프리스트레스트 콘크리트 부재의 극한상태에서의 강선응력 예측식 제안," 콘크리트학회 논문집, 제11권 6호, 1999, pp.12~24.
15. 이종윤, 임재형, 문정호, 신경재, "비부착 긴장재를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 보에서 긴장재 응력의 과대평가," 콘크리트학회 논문집, 제11권 4호, 1999. 9, pp.73~81.
16. 임재형, 문정호, 이리형, "비부착 긴장재의 응력산정을 위한 극한강도 설계식의 평가," 콘크리트학회 논문집, 제11권 3호, 1999. 6, pp.113~122.
17. 임재형, 문정호, 이리형, "비부착 긴장재의 응력을 평가하기 위해 제안된 설계식의 타당성 검증," 콘크리트학회 논문집, 제11권 2호, 1999. 4, pp.127~137.
18. 임재형, 문정호, 이리형, "비부착 긴장재의 응력에 영향을 미치는 중요변수에 대한 실험연구," 콘크리트학회 논문집, 제11권 1호, 1999. 2, pp.209~219.
19. 임재형, 문정호, 음성우, 이리형, "프리스트레스트 콘크리트 부재에서 비부착 긴장재의 극한응력에 관한 연구(I)-기존연구 및 ACI 규준식의 고찰," 콘크리트학회지, 제9권 4호, 1997. 8, pp.167~176.
20. 임재형, 문정호, 음성우, 이리형, "프리스트레스트 콘크리트 부재에서 비부착 긴장재의 극한응력에 관한 연구(II) -변형도 적합조건을 이용한 설계식의 제안," 콘크리트학회지, 제9권 5호, 1997. 10, pp.105~113.

요 약

본 연구는 외부 프리스트레싱으로 보강된 철근콘크리트 보에 관한 문헌연구와 프리스트레싱 강재의 극한응력 예측식의 개발, 극한응력에 영향을 미치는 변수들에 대한 실험 등이다. 새로운 통합 예측식 개발을 위하여 비부착 프리스트레싱 강재의 극한응력에 대한 ACI 시방식을 확장하고 분석하였다. 본 논문에서는 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력에 대한 새로운 합리적 예측식을 제안하고 있는데, 프리스트레싱 강재와 중립축의 깊이 비의 함수로서 표현하여 내부 철근의 영향을 고려하고 있다. 실험연구에서는 프리스트레싱 강재의 극한응력에 가장 큰 영향을 미치는 실험변수를 가지고 외부 프리스트레싱으로 보강된 철근콘크리트 보를 제작하여 실험하였다. 실험연구에서 채택한 영향인자들은 배부철근비, 외부 프리스트레싱 강재비, 시간과 PS 강재높이 비 등이다. 실험결과는 분석되어 외부 프리스트레싱 강재의 극한응력에 대한 제안된 예측식의 합리성과 적용성을 확인하였다.

핵심용어 : 외부 프리스트레싱, 극한응력, 보강, 비부착, 예측식