

비부착 프리스트레스트 보강재를 갖는 PSC 부재의 변위와 프리스트레스트 보강재 응력의 상관관계 및 변수별 효과

문정호¹⁾ · 임재형^{2)*} · 이창규¹⁾

¹⁾한남대학교 건축공학과 ²⁾우송공업대학 건축디자인과
(2001년 9월 3일 원고접수, 2002년 1월 22일 심사완료)

Relation of Deflection of Prestressed Concrete Members to Unbonded Tendon Stress and Effects of Various Parameters

Jeong-Ho Moon¹⁾, Jae-Hyung Lim^{2)*}, and Chang-Kyu Lee¹⁾

¹⁾ Department of Architectural Engineering, Hannam University, Daejeon, 306-791, Korea

²⁾ Department of Architectural Design Engineering, Woosong Technical College, Daejeon, 300-719, Korea

(Received September 3, 2001, Accepted January 22, 2002)

ABSTRACT

This paper is a part of research series for the verification of the proposed Moon/Lim design equation. An analytical study was performed to examine the relation between the flexural behavior and the unbonded tendon stress of PSC members. The strain compatibility assumption was used in this study since previous studies showed that the stress variations of tendon had a close relation with the member displacements. The proposed equation has been developed with the same assumption of strain compatibility. Therefore the analytical procedure with the strain compatibility assumption was developed to compute the member displacements of previous tests. Then the analytical results were compared with tests results. The comparison showed that the strain compatibility assumption can be properly applicable to the design equation. Based on the analytical results, the relation between the tendon stress and the member flexural behavior at ultimate was examined. A parametric study also carried out with regard to the member displacements. As results, the parameters used for the proposed equation were proven to be proper for the computation of tendon stress.

Keywords : unbonded tendons, strain compatibility, tendon stress, deflection, proposed equation, effect of factors

1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트(PSC) 부재에 비부착 프리스트레스트 보강재를 사용하였을 때, 부재의 휨변형으로 인한 프리스트레스트 보강재의 응력변화는 부재의 거동 및 강도에 영향을 미치게 된다. 그리고 프리스트레스트 보강재의 응력은 여러가지 변수들에 의해서 영향을 받는다. 따라서 비부착 프리스트레스트 보강재의 응력값을 정확하게 예측하기 위해서는 부재의 휨변형에 영향을 주는 요소를 포함한 적절한 변수들의 선택과 조합이 필수적이다.

ACI 318-99¹⁾에서는 비부착 프리스트레스트 보강재의 응력평가에 있어서 프리스트레스트 보강재 비(ρ_p), 콘크리트 강도(f_{ck}), 경간/깊이 비(L/d_p)등을 변수로한 다음과 같은 식을 사용토록 하고 있다.

$$f_{ps} = f_{se} + 69 + \frac{1.4f_{ck}}{k \rho_p} \quad (\text{MPa})$$
$$k = 100(L/d_p \leq 35)$$
$$k = 300(L/d_p > 35) \quad (1)$$

그러나 식(1)은 비부착 프리스트레스트 보강재의 극한 응력을 비교적 간단하게 평가할 수 있는 장점은 있으나, 프리스트레스트 보강재의 극한응력에 영향을 미칠 수 있는 몇몇 중요한 변수를 포함하고 있지 않기 때문에 일부 조건에서 비부착 프리스트레스트 보강재의 극한응력을 과대평가 혹은 과소평가할 수 있다²⁾.

본 연구자들은 식(2)와 같이 프리스트레스트 보강재의 단면적(A_{ps}), 콘크리트의 강도(f_{ck}), 경간/깊이 비(L/d_p) 등 ACI 식에서 사용하고 있는 변수들과 함께 유효프리스트레스트(f_{se}), 인장철근의 단면적(A_s), 작용하중의 형태(f)를 추가로 고려한 새로운 Moon/Lim 설계식을 제안^{3,4)}한 바 있다.

* Corresponding author

Tel : 042-629-6415 Fax : 042-629-6421

E-mail : jhlim@woosongtech.ac.kr

$$f_{ps} = 70 + 0.8 f_{se} + \frac{1}{15} \frac{(A'_s - A_s) f_y}{A_{ps}} + 6.5 \sqrt{\frac{d_s}{d_p} \frac{f_{ck}}{\rho_p} \left(\frac{1}{f} + \frac{d_p}{L} \right)} \quad (\text{MPa})$$

$$f_{se} + 70 \leq f_{ps} \leq f_{py} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

여기서, f 는 작용하중의 형태를 고려할 수 있는 변수로 1점 집중하중이면 $f=10$, 2점 집중하중 및 등분포 하중이면 $f=3$ 을 사용한다. 그리고 $1/f + d_p/L$ 는 소성힌지 길이 비를 나타내는 변수인데, 결과적으로는 작용하중의 형태와 경간/깊이 비의 함수로 표현되고 있다. 식(2)는 재료의 성질, 변형률 적합조건(strain compatibility), 힘의 평형조건 등을 고려한 이론식을 전개하고, 그 결과물로서 주요 변수 및 이들의 조합을 찾는 방법으로 개발되었다. 그리고 기존의 실험결과에 대한 통계적 분석을 통하여 선정된 각 변수 및 이들의 조합에 적합한 계수를 도출하는 방법을 사용하였다. 또한 제안식에 대한 타당성을 검증하기 위한 일련의 실험연구²⁵⁻⁷⁾를 실시하였으며, ACI 318-99 식보다 정확하게 비부착 프리스트레스트 보강재의 극한응력을 평가함도 검증하였다.

제안식(2)를 전개하는 과정에서 사용한 변형률 적합조건은 이론적인 가정에 의해서 유도되었다²⁾. 즉 휨변형시 최대모멘트가 작용하는 구간에서 소성힌지가 발생하고, 이 부분에서의 변형이 프리스트레스트 보강재의 응력에 모든 영향을 미치는 것으로 가정^{3,4)}하였다. 따라서 본 연구에서는 식(2)에서 사용한 변형률 적합조건의 타당성을 검증하기 위한 해석적인 연구를 수행하였다. 본 연구와 관련된 일련의 연구 중에서 이선화 등의 연구결과^{6,7)}는 비부착 프리스트레스트 보강재를 갖는 PSC 부재의 변위(중양부 처짐)와 프리스트레스트 보강재의 응력증가량이 밀접한 관계가 있음을 보였다. 따라서 본 연구에서는 상기와 동일한 변형률 적합조건의 기법을 이용하여 PSC 부재의 중양부 변위를 계산하고, 이를 실험결과와 비교하여 사용한 가정의 타당성을 증명하고자 하였다. 그리고 제안식(2)에서 사용한 변수의 타당성 및 정확도의 검증을 위한 변수별 연구도 함께 수행하였다.

2 연구 목적 및 내용

이선화 등^{6,7)}은 비부착 프리스트레스트 보강재의 응력변화에 영향을 미치는 주요 변수별 효과를 분석하기 위하여 보강비, 경간/깊이 비, 작용하중 형태 등을 변수로 총 21개의 실험체를 실험하였다. 실험결과, Fig. 1에 나타난 바와 같이 부재 중양부의 변위와 비부착 프리스트레스트 보강재의 응력증가량은 비례적인 관계가 있음을 보였다. 즉 부재의 중양부 변위값이 커질수록 프리스트레스트 보강재

의 응력 값도 함께 증가하고 있다.

따라서 본 연구는 부재 중양부의 변위에 대한 이론적인 계산값과 기존의 실험결과를 비교하여, 제안식(2)에서 사용한 가정의 적합성을 검증하고자 하였다. 이를 위하여 부재 변위를 구하는 해석방법에도 식(2)에서 사용한 가정(변형률 적합조건)을 동일하게 적용하여 부재의 변위를 산정하였다. 그리고 그 결과를 실험결과와 비교하여 사용한 가정의 타당성을 분석하였다. 또한 부재의 중양부 변위값과 주요 변수의 관계도 함께 분석하여, 각 변수들이 프리스트레스트 보강재의 응력에도 유사한 영향을 미치는 지에 대하여서도 분석하였다.

3. 해석연구

중양부 변위값을 계산하기 위하여 먼저 식(2)에서 사용한 변형률 적합조건과 함께 재료의 성질을 고려하여, 부재 단면에 대한 모멘트-곡률 관계를 유도하였다. 그리고 모멘트 분포도로부터 곡률 분포도를 산정하고, 모멘트 면적법에 의해서 하중-변위 곡선을 유도하였다. 본 연구의 해석에 사용된 콘크리트, 철근, 프리스트레스트 보강재 등의 재료모델 및 부재 중양부 변위의 산정방법은 다음과 같다.

3.1 재료모델

콘크리트의 재료모델은 식(3)과 같다.

$$f_c = f_{ck} \left[2 \left(\frac{\epsilon_{cm}}{\epsilon_{co}} \right) - \left(\frac{\epsilon_{cm}}{\epsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (\epsilon_{cm} \leq \epsilon_{co})$$

$$f_c = f_{ck} [1 - Z (\epsilon_{cm} - \epsilon_{co})] \quad (\epsilon_{co} < \epsilon_{cm}) \quad (3)$$

여기서, ϵ_{cm} 은 콘크리트의 압축변형률이고, ϵ_{co} 값은 0.002로 하였다. 식(3)에서 Z 는 콘크리트의 재료성질에 따

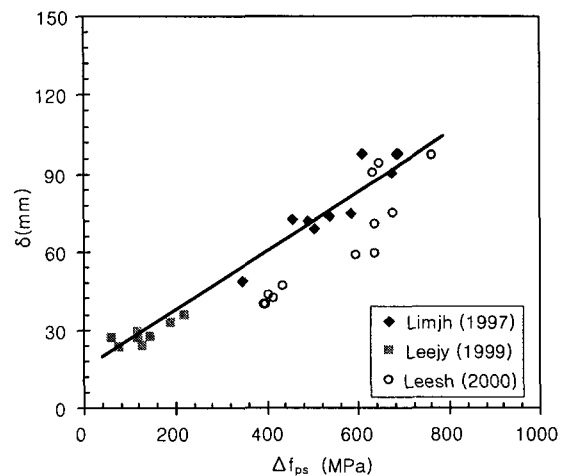


Fig. 1 Experimental relationship of Δf_{ps} and deflection⁷⁾

라 달라지기 때문에, Fig. 2와 같이 다양한 Z값(150~600)에 대한 해석결과를 실험결과와 비교하였으며, 그 결과 Z=200을 선정하였다.

철근의 변형경화는 부재의 극한 휨거동에 큰 영향을 미치므로, 철근의 재료모델은 식(4)와 같이 변형률 값에 따라 4구간으로 구분하여 항복점 및 항복 이후의 변형경화를 고려할 수 있도록 하였다.

$$\begin{aligned}
 \text{i) } \epsilon_s \leq \epsilon_y & : f_s = E_s \epsilon_s \\
 \text{ii) } \epsilon_y < \epsilon_s \leq \epsilon_{sh} & : f_s = f_y \\
 \text{iii) } \epsilon_{sh} < \epsilon_s \leq \epsilon_{sm} & : f_s = f_y + (f_u - f_y)(2\eta - \eta^2) \\
 \text{iv) } \epsilon_{sm} < \epsilon_s & : f_s = f_{su}
 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $\eta = \frac{\epsilon_s - \epsilon_{sh}}{\epsilon_{sm} - \epsilon_{sh}}$, $\epsilon_{sm} = \epsilon_{sh} + 2 \frac{f_{su} - f_y}{E_{sh}}$ 이다. ϵ_{sh} 는 변형경화가 시작될 때의 변형률이고, ϵ_{sm} 은 극한 변형률이다.

프리스트레스트 보강재의 응력은 Menegotto/Pinto (1973)⁸⁾에 의해 제안된 식(5)를 사용하여 산정하였다.

$$f_{ps} = E_{ps} \epsilon_{ps} Q + \frac{(1-Q)}{[1 + (\frac{E_{ps} \epsilon_{ps}}{k f_{py}})^N]^{1/N}} \quad (5)$$

여기서, $f_{pu}=1,860$ MPa일때, $N=7.433$, $K=1.0618$, $Q=0.01174$, $E_{ps}=192,300$ MPa, $f_{py}=1,680$ MPa, $\epsilon_{pu}=0.069$ 이다.

3.2 변형률 적합조건

프리스트레스트 보강재의 응력값은 재료의 성질과 변형률 적합조건을 모두 만족하는 상태에서 산정되어야 한다. 변형률 적합조건은 프리스트레스트 보강재 위치에서의 부재길이 변화의 합이 프리스트레스트 보강재의 길이변화의 값과 같다는 조건을 의미한다. 그리고 재료의 성질을 반영한 힘의 평형조건에 관한 식과의 조합에 의해서 다음과 같이 유도된 식(6)^{3,4)}을 사용하였다.

$$f_{ps} = \frac{1}{\alpha_p A_{ps}} \frac{0.85 f'_{ck} b_w d_p \beta_1 (\frac{L_0}{L}) \epsilon_{cu}}{\epsilon_{ps} - \epsilon_{se} - (\frac{L_0}{L}) \epsilon_{ce} - \epsilon_{cu}} + \frac{(A_s - \alpha_s A'_s) f_y + C_f}{\alpha_p A_{ps}} \quad (6)$$

$$\text{여기서, } \alpha_p = \frac{(d_p - \frac{\beta_1 c}{2})}{(d_e - \frac{\beta_1 c}{2})}, \quad \alpha_s = \frac{(d_s - \frac{\beta_1 c}{2})}{(d_e - \frac{\beta_1 c}{2})}$$

이다.

그런데 프리스트레스트 보강재는 식(5)와 같은 비선형 거동을 하게 되므로, Fig. 3에서와 같이 재료의 성질을 나타내는 선과 변형률 적합조건을 나타내는 선이 만나는 점을 찾아야 하며, 이는 시행착오법(trial-and-error)에 따라 계산할 수 있다.

3.3 변위산정

제안식(2)에서는 Fig. 4와 같은 이상화된 곡률분포로부터 소성힌지 발생구간(L_0)를 가정하였고, 모든 곡률변화는 이 구간내에서만 발생하는 것으로 가정하였다. 이를 근거로 프리스트레스트 보강재의 변형률을 산정하였으며, 부재의 변위산정도 이와 동일한 방법을 사용하였다. 그러나 Fig. 5(a)의 이상화된 곡률분포는 Fig. 5(b)와 같은 빗금친 부분의 영향을 무시한 가정이었기 때문에 Fig. 6에서와 같이 선형변형구간에서 실험결과와 약간의 상이한 결과가 발생하였다. 따라서 본 해석연구에서는 Fig. 5(b)의 빗금친 부분의 영향까지를 고려하여 변위를 산정하였고, 그 결과를 비교하였으나, 프리스트레스트 보강재의 극한응력에 미치는 영향은 매우 작음을 확인할 수 있었다.

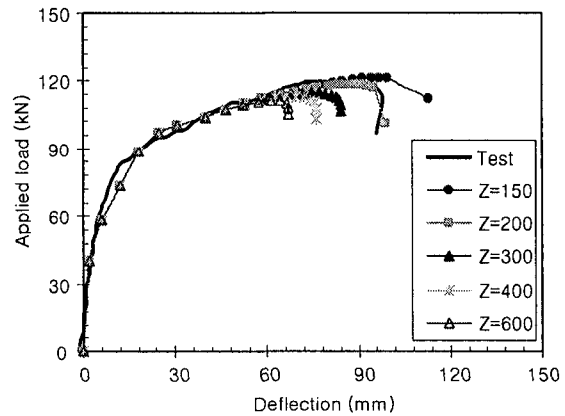


Fig. 2 Load-deflection curves at various Z values

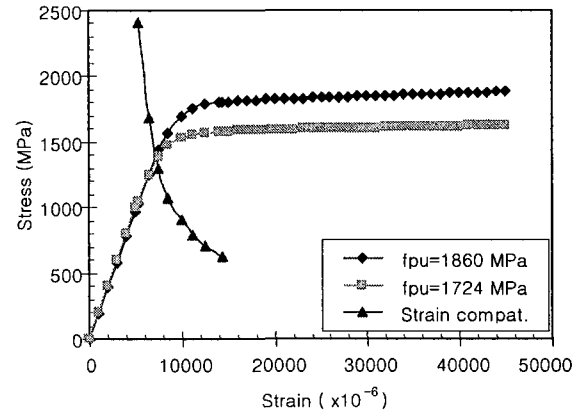


Fig. 3 Strain compatibility requirement

3.4 해석대상 실험체

해석에 사용된 실험체는 Table 1에 나타내었으며, 비교적 상세한 정보를 정확하게 얻을 수 있는 총 77개의 실험체를 대상으로 하였다.

4. 해석결과 및 고찰

4.1 하중-변위 곡선

제안식(2)에 사용된 동일한 가정을 변위산정방법에 적용하여 대상 실험체의 하중-변위 곡선을 구하고, 이를 기존 실험결과와 비교하였다. Fig. 7~12에는 전체 해석결과 중에서 일부 실험체에 대한 결과를 나타낸 것으로서, 국내 연구의 실험체(Fig. 7~9)와 국외연구의 실험체(Fig. 10~12)로 구분하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 해석결과와 실제 실험결과는 매우 일치하고 있다. 따라서 소성힌지 길이개념과 변형을 적합조건에 의한 해석방법이 비부착 프리스트레스트 보강재를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 부재의 휨거동과 비부착 프리스트레스트 보강재의 극한응력을 적절히 평가할 수 있는 방법이 될 수 있다는 점을 증명하였다고 할 수 있다.

4.2 변수별 효과

본 연구에서 사용한 변위산정방법이 부재의 휨거동과 프리스트레스트 보강재의 극한응력을 적절히 평가할 수 있는 방법이 될 수 있기 때문에, 변위를 대상으로 변수별 연구를 수행하였다. 왜냐하면 변위를 대상으로 한 각 변수별 영향분석의 결과와 프리스트레스트 보강재 응력을 대상으로 한 영향분석의 결과에 대한 비교를 통하여, 프리스트레스트 보강재 응력변화에 영향을 미치는 변수를 검증할 수 있기 때문이다.

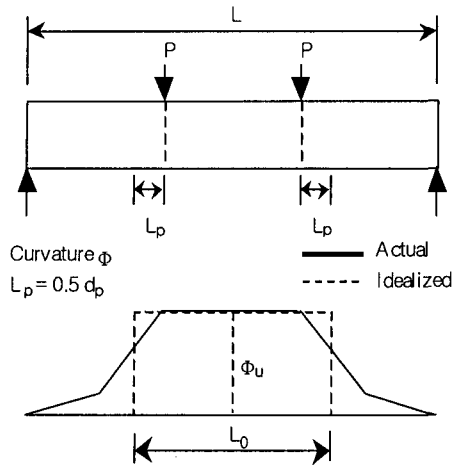


Fig. 4 Idealized curvature distribution

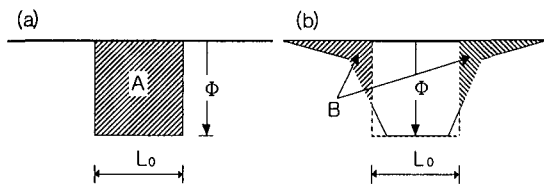


Fig. 5 Idealized and actual curvature distributions

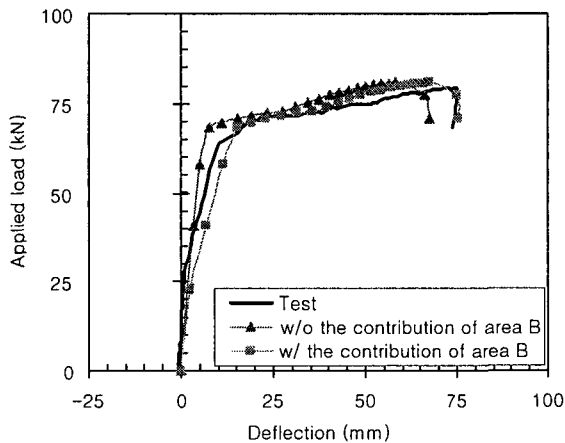


Fig. 6 Consideration of elastic deflection

Table 1 Specimen lists

Ref.	Specimen names	Number of specimen	Loading			Parameters	f_{ck} (MPa)	ρ	ρ_p	L/d_p
			1-point	2-point	4-point					
[2]	A, B, C, D	8	8	0	0	$A_{ps}, L/d_p$	34.34	0.001917	0.00092 ~0.00268	17.7 ~20.5
[5]	A, B, C, D, E, F, G, H, I	20	4	4	12	$f_{se}, f_{ck}, A_s, A_{ps}, L/d_p, \text{Loading Type}$	23.4 ~52.9	0.00268 ~0.00536	0.00147 ~0.00453	17.8 ~44.4
[6][7]	J, K, L	21	9	12	0	$A_s, A_{ps}, L/d_p, \text{Loading Type}$	35.3	0.00403 ~0.00122	0.00074 ~0.00223	15.0 ~44.9
[9]	A	9	0	9	0	$f_{se}, f_{ck}, A_s, A_{ps}$	30.6 ~33.1	0.00393 ~0.02010	0.00111 ~0.00445	19.1
[10]	A, B, C, PPR9, K, E	18	0	18	0	$f_{se}, f_{ck}, A_s, A_{ps}, L/d_p$	33.77 ~54.4	0.0025 ~0.01818	0.00101 ~0.00503	21.2 ~55.2
[11]	No. 1 (Shallow beam)	1	Both-span			Continuous beam (2 span)	34.48	0.00267	0.00348	27.3

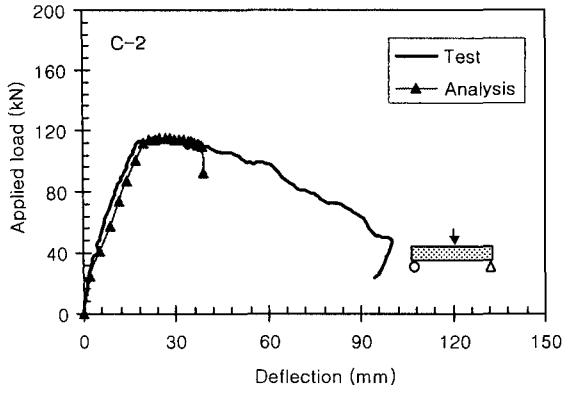


Fig. 7 Comparison between test and analysis results²⁾

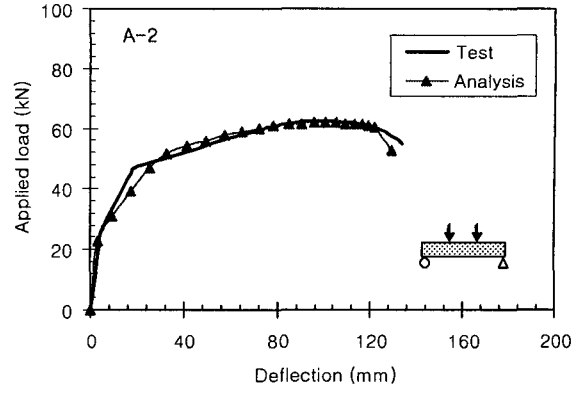


Fig. 10 Comparison between test and analysis results⁹⁾

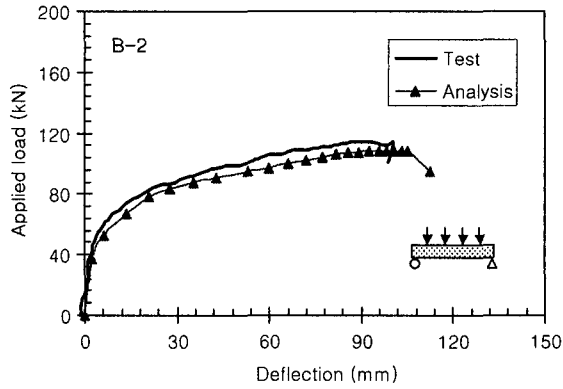


Fig. 8 Comparison between test and analysis results⁵⁾

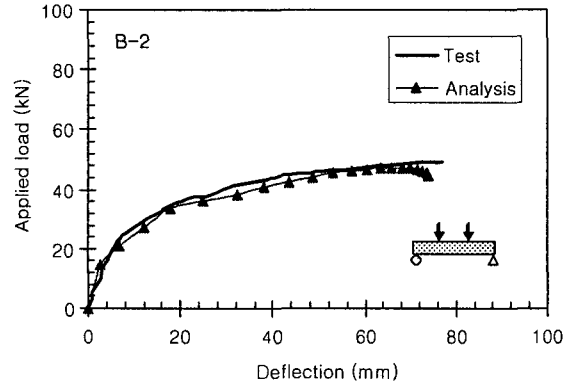


Fig. 11 Comparison between test and analysis results¹⁰⁾

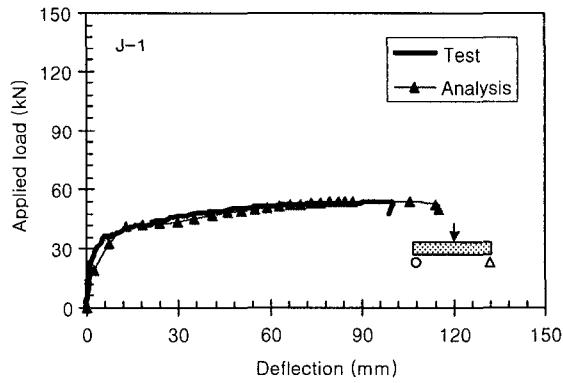


Fig. 9 Comparison between test and analysis results^{6,7)}

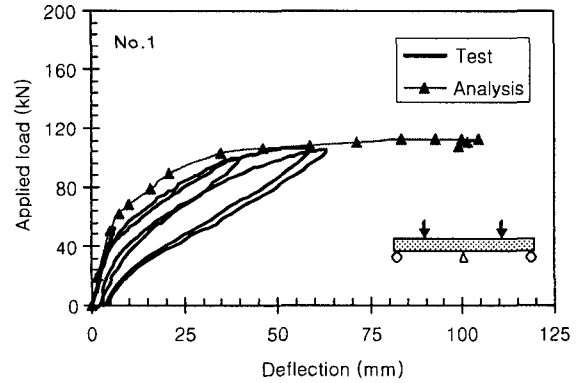


Fig. 12 Comparison between test and analysis results¹¹⁾

현재까지 대부분의 연구는 각 변수가 프리스트레스트 보강재 응력변화에 미치는 영향에 대한 연구가 주로 이루어져 왔다. 그리고 이에 대하여서는 상당한 연구결과가 발표되어 있지만, 부재 변위와 프리스트레스트 보강재 응력변화에 대한 연구는 많지 않다. 그러나 부재 변위와 프리스트레스트 보강재 응력변화가 밀접한 관계가 있음이 실험적으로 증명되었기 때문에, 동일한 변수가 부재의 변위에 미치는 영향에 대한 연구도 가능하다. 결과적으로 각 변수가 프리스트레스트 보강재 응력변화에 미치는 영향에 대한 보완적인 연구를 수행할 수 있음을 의미한다.

콘크리트 압축연단의 변형률이 $\epsilon_{cm} = 0.003$ 일 때의 해석 결과로부터 얻어진 부재의 중앙부 변위를 대상으로 변수별 연구를 수행하였다. 해석에 의한 변위를 분석의 대상으로 한 이유는 두가지로 요약할 수 있다. 첫째는 언급된 것처럼 해석결과와 실험결과의 변위값이 매우 일치함을 본 연구에서 보였기 때문이다. 둘째는 콘크리트의 압축연단 변형률이 0.003에 도달할 때를 실험에서 찾는 것이 매우 어렵기 때문이다. 본 논문에서는 주요변수를 중심으로 변위와 변수와의 관계를 분석하여 Fig. 13~17에 나타내었다.

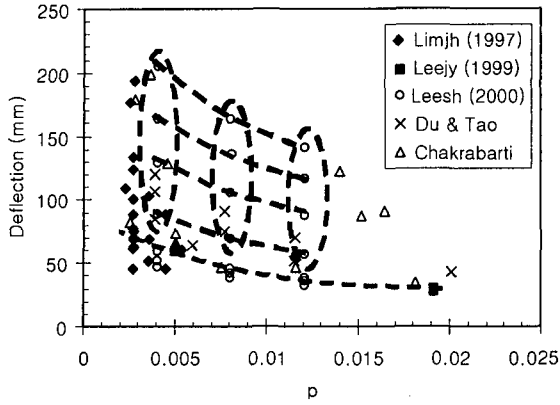


Fig. 13 Reinforcing ratio vs. deflection

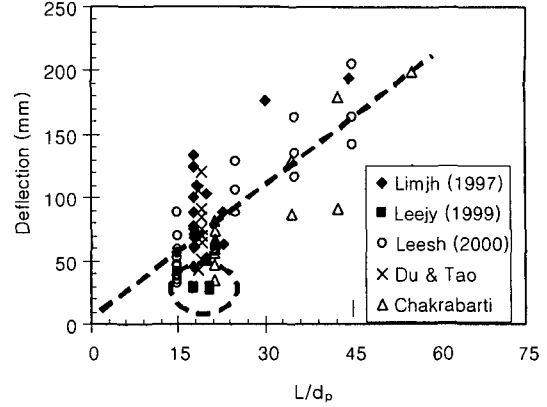


Fig. 16 Span/depth ratio vs. deflection

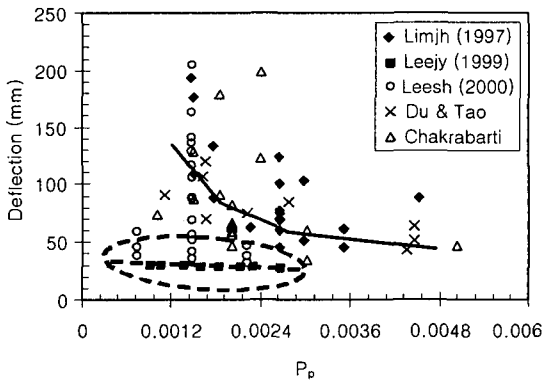


Fig. 14 Prestressing ratio vs. deflection

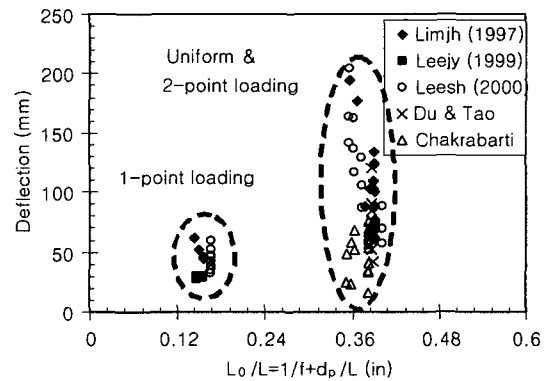


Fig. 17 Loading type vs. deflection

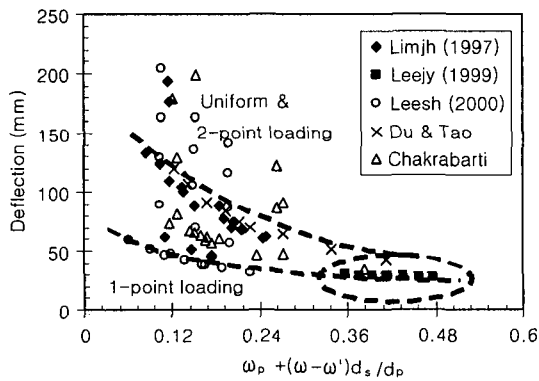


Fig. 15 $\omega_p + (\omega - \omega')d_s/d_p$ vs. deflection

4.2.1 인장철근 비 (ρ)

기존연구에서 인장철근의 비와 프리스트레스트 보강재의 응력증가량의 관계는 반비례의 관계가 있음을 밝히고 있다⁵⁾. Fig. 13은 인장철근의 비(—· 표시)와 경간/깊이 비(○ 표시)가 부재의 변위에 미치는 영향을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 경간/깊이 비가 동일할 때 인장철근 비와 부재 변위는 반비례관계가 있다. 이는 인장철근의 비가 증가함에 따라 공칭강도 및 휨강성은 증가하지만, 압축력을 받는 면적의 증가로 인하여 곡률이 감소하게 되는 현상 때문인 것으로 사료된다. 또한 타원으

로 표시된 부분은 인장철근 비가 일정하고 경간/깊이 비가 변화하는 실험체로써 경간/깊이 비에 따라 부재의 중앙부 변위가 달라지기 때문에 경간/깊이 비도 부재의 중앙부 변위에 영향을 미치는 변수임을 알 수 있다.

4.2.2 프리스트레스트 보강재 비 (ρ_p)

기존연구에서 프리스트레스트 보강재의 비가 증가함에 따라 프리스트레스트 보강재의 응력증가량은 감소하는 것으로 나타났다⁵⁾. 또한 보강지수가 $0.36\beta_1$ 근처의 실험체 (Fig. 14에서 ○ 표시)에서는 프리스트레스트 보강재의 비가 증가함에도 불구하고, 그 효과가 미소한 것으로 나타났다^{26,7)}. 한편 본 연구결과를 나타내는 Fig. 14에서도 프리스트레스트 보강재의 비와 부재 중앙부 변위의 관계가 동일한 현상을 보이고 있음을 알 수 있다.

4.2.3 보강지수 ($\omega_p + (\omega - \omega')d_s/d_p$)

기존연구에서는 보강지수가 커질수록 프리스트레스트 보강재의 응력증가량은 감소하는 관계가 있음을 보였다⁵⁾. Fig. 15에는 하중의 종류(등분포 혹은 2점집중하중, 1점집중하중)별로 보강지수가 부재 변위에 미치는 영향을 나타내었다. 본 연구의 결과에서도 역시 보강지수의 증가는 부재변위의 감소로 나타나고 있음을 알 수 있다.

그리고 이종윤 등에 의한 연구²⁾결과에서처럼 보강지수가 최대 보강비 $0.36\beta_1$ 에 근접하는 경우(○ 표시), 부재 변위도 매우 미소하게 감소하였다. 따라서 최대 보강비 $0.36\beta_1$ 에 근접하게 보강된 경우에는 보강지수가 부재 변위에 미치는 영향이 미소할 것으로 예측할 수 있다.

4.2.4 경간/깊이 비 (L/d_p)

기존연구에서 경간/깊이 비는 프리스트레스트 보강재 응력증가량에 미소한 영향만 미치는 것으로 나타났으나⁵⁾, Fig. 16의 경간/깊이 비에 대한 부재 변위의 관계에서는 경간/깊이 비가 증가함에 따라 부재 변위도 증가하고 있다. 이는 경간/깊이 비가 증가할수록 부재의 휨강성이 낮아지기 때문에 변위는 증가하나, 중립축으로부터 프리스트레스트 보강재까지의 거리가 짧아지기 때문인 것으로 사료된다.

휨 부재의 변형률은 중립축으로부터의 거리에 비례하기 때문에 경간/깊이 비가 큰 경우에는 프리스트레스트 보강재 위치에서 콘크리트의 변형률이 작아지고, 결과적으로 프리스트레스트 보강재의 길이변화의 값이 작아지게 된다. 따라서 실질적으로 프리스트레스트 보강재 응력변화는 부재 변위보다는 중립축으로부터 프리스트레스트 보강재까지의 거리에 보다 밀접한 관계가 있다고 할 수 있다.

4.2.5 작용하중의 형태 ($L_0/L=1/f+d_p/L$)

Fig. 17에 따르면 1점 집중하중이 작용할 때보다 2점 집중하중이나 등분포 하중이 작용할 때가 프리스트레스트 보강재의 응력증가량이 더 크게 나타나고 있다. 왜냐하면 2점 집중하중이나 등분포 하중이 작용할 때 소성인장 길이가 길어지기 때문이다. 따라서 작용하중의 형태도 부재의 중앙부 변위증가에 영향을 미칠 수 있는 변수로 판단된다.

4.3 설계식에 사용된 변수별 효과

본 연구에서는 개별변수가 조합되었을 때의 조합변수가 미치는 영향도 분석하였다. 왜냐하면 ACI 설계식이나 제안식(2) 등 대부분의 설계식들이 다양한 방법에 의한 조합변수를 사용하고 있기 때문이다. 본 연구에서는 ACI 설계식이나 제안식(2)에서 사용하고 있는 조합변수를 대상으로 비교·연구를 수행하였고, 그 결과는 Fig. 18~21에 나타내었다.

ACI 식에서는 조합변수 f_{ck}/ρ_p 를 사용하고 있기 때문에 이러한 조합변수의 영향을 검토하기 위하여 Fig. 18에 조합변수 f_{ck}/ρ_p 와 부재 변위의 관계를 나타내었다. 그 결과 부재 변위는 조합변수 f_{ck}/ρ_p 와 비례적인 관계가 있음을 알 수 있다. 따라서 이를 프리스트레스트 보강재 응력 변화량에 대한 주요변수로 사용한 ACI 식은 타당하다고

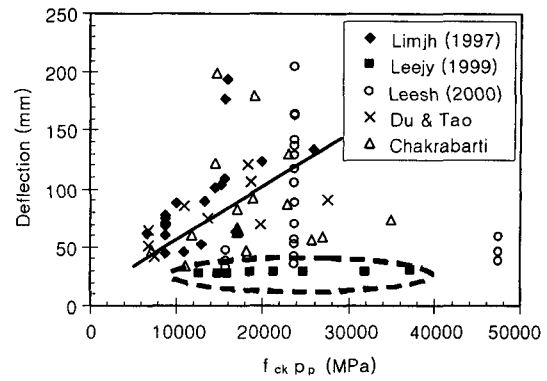


Fig. 18 Deflection vs. f_{ck}/ρ_p

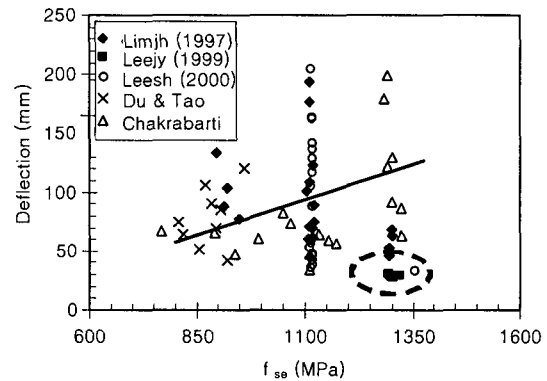


Fig. 19 Deflection vs. f_{se}

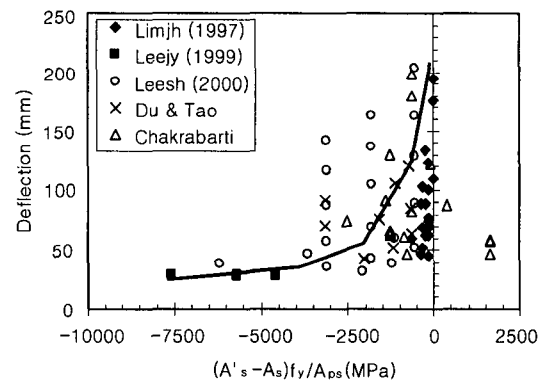


Fig. 20 Deflection vs. $(A'_s - A_s)f_y/A_{ps}$

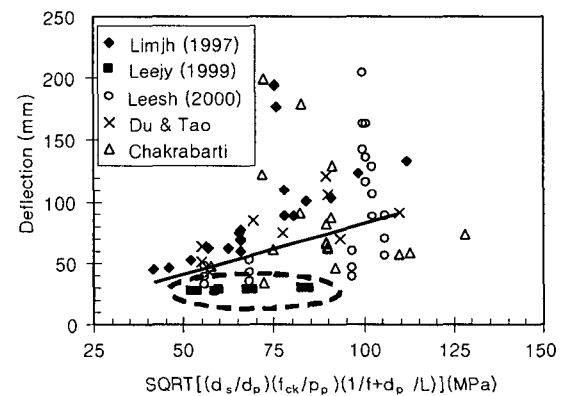


Fig. 21 Deflection vs. $\sqrt{(d_s/d_p)(f_{ck}/\rho_p)(1/f+d_p/L)}$

할 수 있다. 그러나 보강지수가 최대값인 $0.36\beta_1$ 에 근접하는 실험체(○ 부분)에서는 조합변수의 영향이 거의 나타나지 않고 있다. 따라서 보강지수가 최대값에 근접할 때, ACI 식은 부적합한 결과를 보일 수 있을 것으로 예상되며, 이는 기존연구^{2,6,7)}의 결과와 동일하였다.

제안식(2)에서는 유효프리스트레스(f_{se}), $(A'_s - A_s)f_y/A_{ps}$, $\sqrt{(d_s/d_p)(f_{ck}/\rho_p)(1/f + d_p/L)}$ 등과 같은 변수를 사용하고 있기 때문에 이에 대한 분석을 실시하였다. 먼저 Fig. 19에는 부재변위와 유효프리스트레스의 관계를 나타내었는데, 부재 변위와 유효프리스트레스의 관계는 매우 미소한 관계가 있음을 알 수 있다. 따라서 유효프리스트레스는 비부착 프리스트레스트 보강재의 극한응력을 평가하는 하나의 변수로써 생각할 수 있지만, 그 영향이 크지 않기 때문에 제안식(2)에서처럼 $0.8f_{sc}$ 와 같이 고려하는 것도 바람직하다고 사료된다. 그러나 유효프리스트레스가 변수가 되어야 하는 경우에 대해서는 보다 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다. 그리고 Fig. 20에는 부재 변위와 $(A'_s - A_s)f_y/A_{ps}$ 의 관계를 나타내었는데, $(A'_s - A_s)f_y/A_{ps}$ 의 절대값이 커질수록 부재 변위는 작게 발생함을 알 수 있다. 따라서 절대값이 음의 방향으로 커질수록 프리스트레스트 보강재 응력증가량이 감소하도록 제안된 식(2)와 유사한 결과를 나타내고 있음도 알 수 있다.

Fig. 21에는 조합변수 $\sqrt{(d_s/d_p)(f_{ck}/\rho_p)(1/f + d_p/L)}$ 과 부재 변위의 관계를 나타내었으며, 부재의 변위와 $\sqrt{(d_s/d_p)(f_{ck}/\rho_p)(1/f + d_p/L)}$ 는 비례적인 관계에 있음을 알 수 있다. 따라서 제안식(2)에서 사용된 조합변수는 합리적으로 선택되었다고 사료된다.

4.4 프리스트레스트 보강재의 응력증가량과 부재 변위

본 연구에서 사용한 부재 변위와 프리스트레스트 보강재 응력변화량의 관계를 분석하기 위하여 이들의 관계를 Fig. 22~24에 나타내었다. 응력변화량의 산정을 위해서는 본 연구에서 사용한 해석방법, ACI 식, 제안식(2)를 사용하였으며, 이들에 의한 결과는 Fig. 22, Fig. 23, Fig. 24에 각각 나타내었다.

Fig. 22에 나타낸 프리스트레스트 보강재의 응력 증가량과 부재 변위의 관계는 거의 비례함을 보이고 있다. 그러나 ○로 표시된 부분은 상관관계 선으로부터 많이 벗어나 있음을 보이고 있는데, 이들은 주로 경간/깊이 비가 큰 실험체들로 부재변위가 프리스트레스트 보강재의 응력증가량보다 크게 발생한 경우이다.

또한 ACI 식 및 제안식(2)에 의한 프리스트레스트 보강재 응력변화량과 부재 변위와의 관계를 나타내고 있는 Fig. 23과 Fig. 24에서 알 수 있듯이, ACI 식에 의한 계산값은 부재 변위와 비례하지 않음을 알 수 있으며, 제안식(2)에 의한 결과는 부재 변위와 비례적인 관계에 있음을

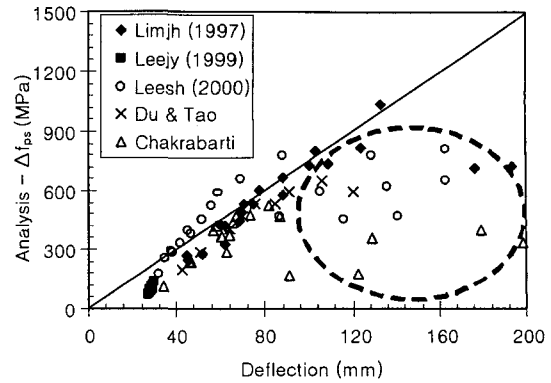


Fig. 22 Deflection vs. Analysis- Δf_{ps}

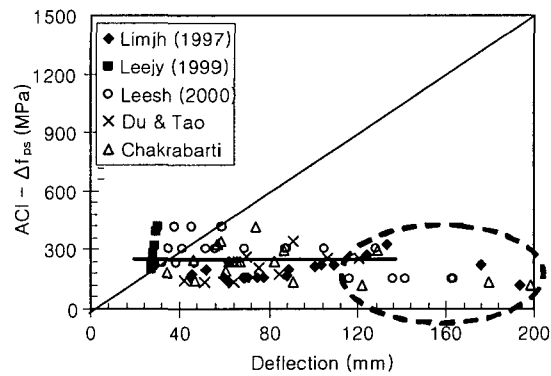


Fig. 23 Deflection vs. ACI- Δf_{ps}

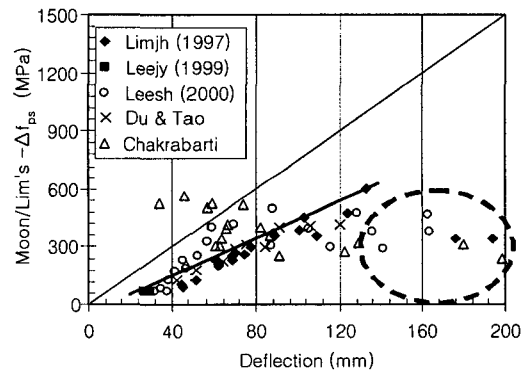


Fig. 24 Deflection vs. Moon/Lim's- Δf_{ps}

알 수 있다. 여기에서도 ○로 표시된 부분은 경간/깊이 비가 큰 실험체들을 나타낸다. 그리고 Fig. 24에서 부재 변위쪽에 상관관계선이 그려진 이유는 제안식(2)가 안전율을 고려하여 프리스트레스트 보강재 응력값을 약간 낮게 평가하도록 유도되었기 때문이다. 따라서 ACI 식보다는 제안식(2)가 비부착 프리스트레스트 보강재의 응력을 보다 더 적절하게 평가할 수 있는 것으로 사료된다.

5. 결 론

이상과 같이 비부착 프리스트레스트 보강재를 갖는 PSC 부재의 휨거동과 프리스트레스트 보강재의 극한응력

변화의 관계분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 비부착 프리스트레스트 보강재의 응력 증가량이 증가하면 부재 변위도 증가하는 관계가 있다.
- 2) 소성인자 길이개념과 변형률 적합조건을 사용한 해석 방법은 비부착 프리스트레스트 보강재의 극한응력과 부재의 휨거동을 비교적 정확하게 평가할 수 있다.
- 3) 경간/깊이 비를 제외한 주요 변수들이 비부착 프리스트레스트 보강재의 극한응력에 미치는 영향은 부재 변위에도 거의 유사한 영향을 미친다.
- 4) 제안식(2)에 사용된 주요변수 및 이들의 조합으로 이루어진 항은 합리적으로 선택되었다.

감사의 글

이 논문은 2000년도 한남대학교 학술연구 조성비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-99) and Commentary (ACI 318R-99)," American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1999, p.369.
2. 임재형, 문정호, 이리형, "비부착 긴장재의 응력을 평가하기 위해 제안된 설계식의 타당성 검증," 한국콘크리트학회 논문집, 제11권 2호, 1999, pp.127~137.
3. Lee, L. H., Moon, J. H., and Lim, J. H., "Proposed Methodology for Computing of Unbonded Tendon Stress at Flexural Failure," *ACI Structural Journal*, V.96, No.6, Nov.-Dec. 1999, pp.1040~1048.
4. 임재형, 문정호, 음성우, 이리형, "프리스트레스트 콘크리트 부재에서 비부착 긴장재의 극한응력 평가에

관한 연구(II) - 변형률 적합조건을 이용한 설계식의 제안," 한국콘크리트학회 논문집, 제9권 5호, 1997, pp.105~114.

5. 임재형, 문정호, 이리형, "비부착 긴장재의 응력에 영향을 미치는 중요변수에 대한 실험연구," 한국콘크리트학회 논문집, 제11권 1호, 1999, pp.209~219.
6. 이선화, 문정호, 임재형, "비부착 긴장재의 응력변화에 영향을 미치는 변수에 관한 고찰," 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제12권 1호, 2000, pp.651~656.
7. 이선화, "비부착 긴장재의 응력변화에 영향을 미치는 변수에 관한 고찰," 한남대학교대학원 석사학위논문, 2000, pp.113.
8. Menegotto, M and Pinto, P.E., "Method of Analysis for Cyclically Loaded RC Plane Frames," *IABSE Preliminary Report for Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well-Defined Reported Loads*, Lisbon, Portugal, 1973, pp.22~55.
9. Du, G and Tao, X., "Ultimate Stress of Unbonded Tendons in Partially Prestressed Concrete Beams," *PCI Journal*, Vol. 31, No. 6, 1985, pp.72~91.
10. Chakrabarti, P. R., "Ultimate Stress for Unbonded Post-Tensioning Tendons in Partially Prestressed Beams," *ACI Structural Journal*, Vol. 92, No. 6, 1995, pp.689~697.
11. Burns, N. H., Helwig, T and Tsujimoto, T., "Effective Prestress Force in Continuous Post-Tensioned Beams with Unbonded Tendons," *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 1, 1991, pp.84~90.
12. Harajli, M. H., "Effect of Span-Depth Ratio on the Ultimate Steel Stress in Unbonded Prestressed Concrete Members," *ACI Journal*, Vol. 87, No. 3, May-Jun., 1990, pp.305~312.

요 약

본 연구는 비부착 프리스트레스트 보강재를 갖는 PSC 부재의 휨거동과 프리스트레스트 보강재의 극한응력과의 관계분석을 위한 해석연구로서, Moon/Lim의 제안식을 검증하기 위한 일련의 연구에 포함된다. 프리스트레스트 보강재의 응력변화량이 부재의 변위와 밀접한 관계가 있다는 기존 실험연구의 결과를 토대로 변형률 적합조건을 이용한 해석적 연구를 수행하였다. 제안식이 변형률 적합조건을 사용하였기 때문에 동일한 방법을 사용하여 부재변위를 해석적으로 구하고 실험결과와 먼저 비교하였다. 그 결과를 통하여 변형률 적합조건을 사용하는 해석방법과 제안식의 타당성을 증명하였다. 그리고 검증된 해석결과를 이용하여 비부착 프리스트레스트 보강재를 갖는 PSC 부재의 휨거동과 프리스트레스트 보강재의 극한응력과의 관계를 분석하였다. 또한 부재변위를 대상으로 한 변수별 효과분석을 통하여 기존연구의 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 끝으로 제안식에 사용한 변수들도 적절하게 선정되었음도 검증하였다.

핵심용어 : 비부착 프리스트레스트 보강재, 변형률 적합조건, 프리스트레스트 보강재 응력, 부재 변위, 제안식, 변수별 효과