

PC 단순보의 강재영향을 고려한 장기처짐해석

Long-term Deflection Analysis of Simply Supported PC Beams Considering Steel Effects

이 대 우* 박 영 식** 이 재 훈*** 신 영 식****
Dae-Woo Lee Young-Shik Park Jae-Hoon Lee Young-Shik Shin

ABSTRACT

Steel effects on creep deformation of prestressed concrete structures are investigated by a parametric study. Prestressed steel ratio, prestressed steel distribution, initial flexural stress gradient, and modular ratio are selected as parameters. Sectional analysis for the beam section of parameter combination is performed to find curvature change due to creep. Based on the investigation, long-term curvature formulas from regression analysis are proposed. Application of the formulas to simply supported prestressed concrete beam shows the effect of steel on deflection.

1. 서론

PC (프리스트레스트 콘크리트) 구조물은 콘크리트, 보강철근 및 PC강재로 구성되는 복합구조물로서 재료의 비선형 응력-변형도 관계는 물론 콘크리트의 크리프, 건조수축, 강도증가와 PC강재의 이완 등 재료의 시간의존적 특성으로 인하여 복잡한 거동을 나타낸다. 특히 콘크리트의 시간의존적 특성에 의하여 시공중이나 시공이 완료된 후에도 처짐이 변하고 응력이 재분배되어 구조물의 거동이 더욱 복잡해진다.

본 논문에서는 매개변수연구를 통하여 크리프변형에 대한 강재의 영향을 알아봄으로써 좀더 합리적인 해석방법을 연구하는데 기초적인 자료를 제공하고, 장기처짐에 대한 크리프의 영향을 쉽게 예측할 수 있는 식을 유도하여 정확한 장기처짐과 캠버량 계산으로 효율적인 예비설계와 시공중 처짐관리를 가능하게 하고자 한다. 비균열단면에 대하여 긴장재의 량, 긴장재의 배치형태, 초기응력분포와 탄성계수비를 매개변수로 하여 크리프에 의한 곡률변화양상을 도출하였으며, PC 단순보에 적용하여 장기처짐에 주는 긴장재의 영향을 검토하였다.

* (주) 대우, 토목기사

** 영남대학교 토목공학과 박사과정

*** 영남대학교 토목공학과 전임강사

**** 영남대학교 토목공학과 교수

2. 크리프해석, 곡률변화 및 장기처짐

Faber(1927)에 의해 제안된 유효탄성계수법(Effective Modulus Method)을 이용하여 단면을 해석하였다. 축력 N_i 와 모멘트 M_i 가 작용하는 Fig. 1 의 단면에 대하여 초기 변형률 ε_0 , 곡률 k_i , 상단에서 거리 y 에서의 변형률 $\varepsilon_{0,y}$ 는 다음과 같다.

$$\varepsilon_0 = \frac{BM_i + IN_i}{E_c(AI - B^2)} \quad (1)$$

$$k_i = \frac{AM_i + BN_i}{E_c(AI - B^2)} \quad (2)$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{oi} - y k_i \quad (3)$$

이때 A, B, I 는 환산단면의 면적, 단면상단에서의 1차, 2차모멘트이고 단면상단을 중심으로 한 M_i 와 N_i 는 긴장력 P_k 를 고려하여 다음식과 같이 계산할 수 있다.

$$N_i = N_s + \sum P_k \quad (4)$$

$$M_i = M_s - N_s d_{ns} - \sum P_k d_{pk} \quad (5)$$

크리프가 진행됨에 따라서 발생하는 축력의 증분 ΔN 과 모멘트의 증분 ΔM 은 식 (6), (7) 과 같으며, 이에 따른 변형률의 증분 $\Delta \varepsilon_0$ 와 곡률의 증분 Δk 는 식 (8), (9) 와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta N = E_e [\varphi (A_c \varepsilon_{oi} - B_c k_i) + \varepsilon_{sh} A_c] \\ - \sum_{k=1}^m k_k R_k \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta M = E_e [\varphi (-B_c \varepsilon_{oi} + I_c k_i) - \varepsilon_{sh} A_c] \\ + \sum_{k=1}^m k_k R_k d_{pk} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\Delta \varepsilon_0 = \frac{B_e \Delta M + I_e \Delta N}{E_e (A_e I_e - B_e^2)} \quad (8)$$

$$\Delta k = \frac{A_e \Delta M + B_e \Delta N}{E_e (A_e I_e - B_e^2)} \quad (9)$$

$$E_e = \frac{E_c}{1 + \varphi} \quad (10)$$

이때, φ 는 크리프계수이며, A_i, B_i, I_i 는 콘크리트만의 단면적, 단면 1차모멘트, 단면 2차모멘트이다. $k_k R_k$ 는 PC강재의 이완을 나타내는 상수이며 A_e, B_e, I_e 는 식 (10)의 유효탄성계수에 대한 탄성계수비를 이용한 보정환산단면의 면적, 단면상단에서의 1차모멘트, 2차모멘트이다.

비균열 단면에서는 곡률의 분포 및 크기가 처짐과 직접적인 관계에 있으므로, 크리프에 의한 곡률의 변화로 장기처짐을 계산할 수 있을 것이다. 따라서, 장기처짐 계산은 크리프에 의하여 변화된 곡률을 직접 적분하거나, 식 (11)과 같이 곡률변화 비율인 λ 를 이용하여 식 (12)와 같이 총 처짐을 계산할 수 있을 것이다.

$$\lambda = \frac{\Delta k}{k_i} \quad (11)$$

$$\Delta_{total} = \Delta_i + \Delta_{cp} = \Delta_i (1 + \lambda) \quad (12)$$

3. 매개변수 연구

3.1 매개변수의 설정

매개변수로는 다음의 4가지를 택하였으며 크리프계수는 3.5까지 사용하였다.

1. 긴장재 비 : 0.003 0.007 0.011
2. 긴장재편심 : 0 1/8(h) 1/4(h) 3/8(h)
3. 초기응력구배 : 3가지 (Fig. 2 참조)
4. 탄성계수비 : 6, 7

도로교시방서의 제III편의 철근 및 PC강재의 제한에서 강재지수개념을 사용해 사각단면에서는 식 (13)과 같은 형태의 식을 기준으로 한다.

$$q_p = w_p \frac{\sigma_{ps}}{\sigma_{ck}} \quad (13)$$

q_p 는 강재지수, w_p 는 긴장재비, σ_{ps} 는 극한하중하에서 긴장재의 평균응력, σ_{ck} 는 콘크리트의 28일 강도를 나타낸다. 시방서에서 강재지수가 0.3을 초과하지 않아야 한다고 규정하고 있으므로, 이를 고려하여 3가지 긴장재비를 택하였다.

3.2 단면해석 결과분석

Fig. 1의 단면에 대한 해석을 컴퓨터 프로그램에 의하여 수행하여 각 매개변수에 대한 곡률변화를 관찰하였다. Fig. 3에서 5까지의 그림에서 곡선 옆의 첫번째 숫자는 긴장재비의 번호, 두번째 숫자는 PC강선의 단면도심에서의 편심거리의 번호, 세번째 숫자는 초기응력분포 형태를 나타낸다.

- (1) 동일한 긴장재비를 가진 단면에서 도심에서의 편심거리가 커짐에 따라 λ 값이 작아짐을 볼 수 있다(Fig. 3).
- (2) 초기응력구배가 큰 경우의 λ 값이 작은 경우의 λ 값보다 크다(Fig. 4).
- (3) 긴장재비와 긴장재의 편심거리가 커짐에 따라 λ 값이 작아진다(Fig. 5).

3.3 회귀분석

크리프에 따른 곡률 변화양상은 긴장재비, 탄성계수비, PC강선의 편심, 초기응력구배에 따라서도 달라짐을 볼 수 있었으므로 초기응력구배를 고려하는 변수 μ 를 포함한 식(15)를 회귀식의 변수로 택하여 분석한 결과 다음과 같은 식을 구하였다.

$$\lambda = C_0 \varphi^{C_1} \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{nI_p}{I_c + (n-1)I_p} \times \frac{1}{\mu} \quad (15)$$

$$C_0 = \frac{0.66}{18.56 \alpha + 1} + 0.32 \quad (16)$$

$$C_1 = \frac{0.71}{12.53 \alpha + 1} + 0.28 \quad (17)$$

여기서, n 는 탄성계수비, I_c 는 해석단면의 도심에서의 콘크리트의 단면 2차모멘트, I_p 는 해석단면의 도심에서의 PC강선의 단면 2차 모멘트 ($= \sum_{j=1}^n A_{pj} d_{pj}^2$) 이며,

μ 는 초기응력구배 형태에서 구한 값으로 Fig. 6과 같은 개념으로 계산한다.

3.4 회귀식의 오차

식(14) - 식 (17)의 정확도를 확인하기 위하여 해석에 의한 곡률변화와 제안된 공식에 의한 곡률변화를 504 개의 단면에 대하여 비교한 결과 Fig. 7과 같은 오차를 보였으며, 94%의 단면(474개의 단면)이 오차범위 10%이내에 있었다.

4. 단순보에의 적용

본 연구에 의하여 얻은 회귀식을 단순 PC 보에 적용하여 긴장재가 장기처짐에 주는 영향을 검토하였다. 부재단면은 Fig. 8과 같은 AASHTO Type II 단면을 선택하였고, 지간 15 m, 포물선 긴장재 배치의 최대 편심 25 cm, 긴장재 단면적 17.651 cm² (지름 12.4 mm SWPC 7A 강연선 19가닥, 긴장재비 0.741 %), 정착장치의 활동량 0.2 cm, 파상계수 0.004/m, 곡률계수 0.2/radian을 사용하였으며 223.5 ton으로 양단에서 긴장한다고 가정하였다. 크리프는 ACI 모델을 사용하였으며 극한 크리프계수로 2.05를 사용하였다. Fig. 9는 긴장력 도입시의 긴장력을 보여주는데, 정착장치가 활동하기 전 마찰에 의하여 손실이 발생한 긴장력과 정착장치활동 후의 긴장력 분포를 보여준다. 제안된 회귀식과 크리프변형 발생 후의 곡률을 이용하여 해석한 결과

Fig. 10의 처짐분포를 얻었다. Fig. 11은 긴장재의 영향을 고려한 중앙부 처짐과 고려하지 않은 처짐을 보여주는데 긴장재의 영향을 고려한 경우에 고려하지 않은 경우에 비하여 10일 후에는 약 5 %, 100일 후에는 약 13 % 작게 계산되었다. Fig. 12는 보강철근을 포함한 경우에 대한 것으로 0.2 %의 철근비를 가진 단면은 긴장재만 있는 경우와 크게 다르지 않으나, 철근비가 커질수록 장기처짐에 주는 영향이 크다는 것을 보여준다.

5. 결론

크리프에 의한 장기처짐에 주는 강재의 영향을 검토하기 위하여 매개변수 연구를 수행하였으며, 회귀분석에 의하여 크리프에 의한 곡률변화를 예측할 수 있는 회귀식을 제안하였다. 제안된 회귀식을 PC 단순보에 적용해 본 결과, 장기처짐에 대한 강재의 영향을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. R. I. Gilbert, *Time Effects on Concrete Structures*, Elsevier, 1988.
2. 건설부, 도로교표준시방서, 1992.
3. 이대우, *강재의 영향을 고려한 프리스트레스트 콘크리트구조물의 장기처짐해석에 관한 매개변수연구*, 영남대 토목공학과, 석사학위논문, 1994.

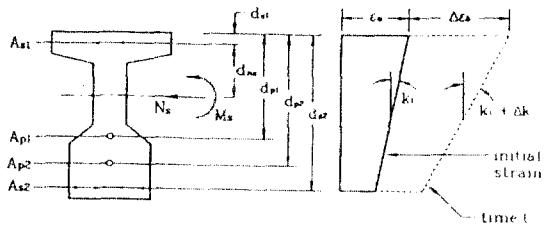


Fig.1 General Section

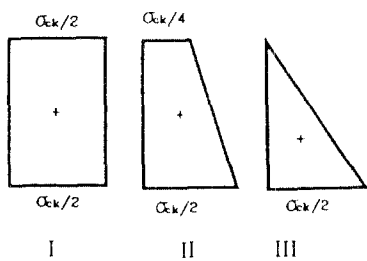


Fig.2 Initial Stress Gradient

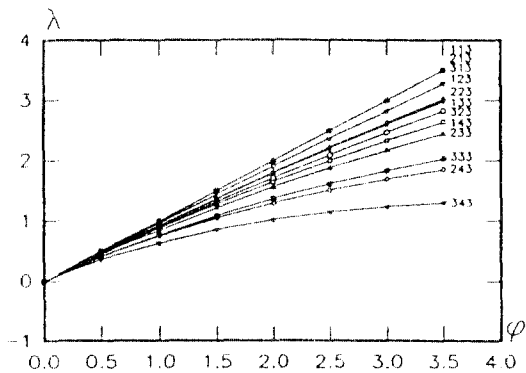


Fig.5 ϕ - λ Curves : Stress III (n=6)

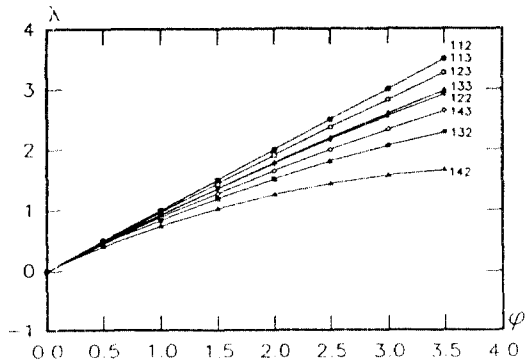


Fig.3 ϕ - λ Curves : $w_p = 0.3\%$ (n=6)

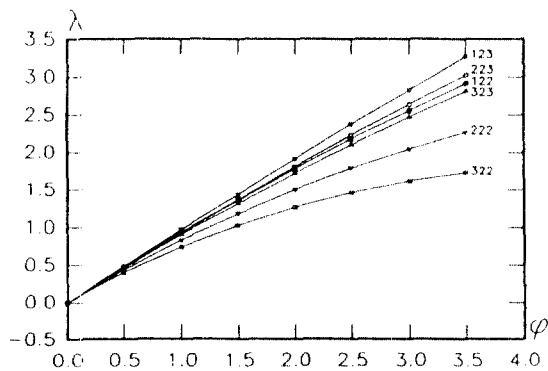


Fig.4 ϕ - λ Curves : $e = h/8$ (n=6)

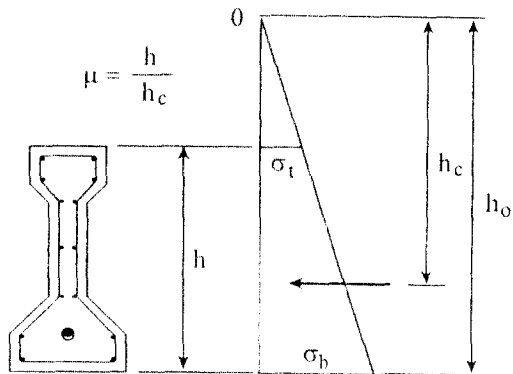


Fig.6 μ Value Estimation

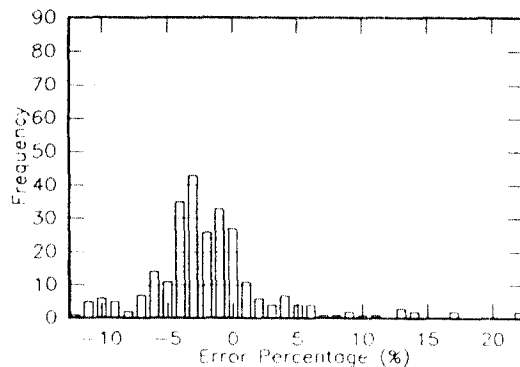


Fig.7 Accuracy of Formulas

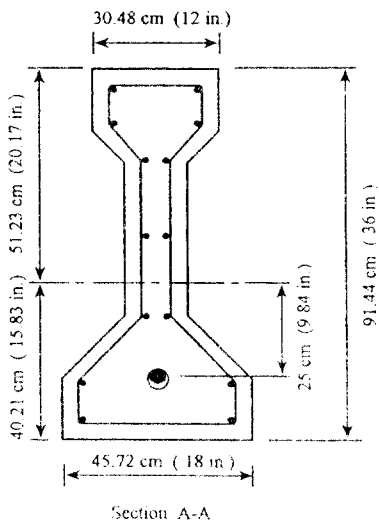
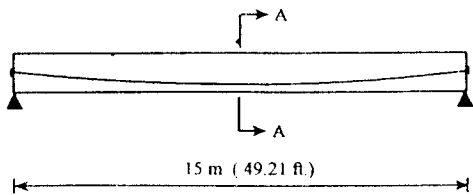


Fig. 8 Selected PC Beam

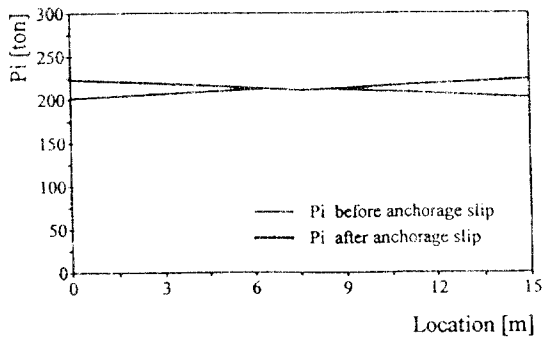


Fig. 9 Tendon Force Distribution

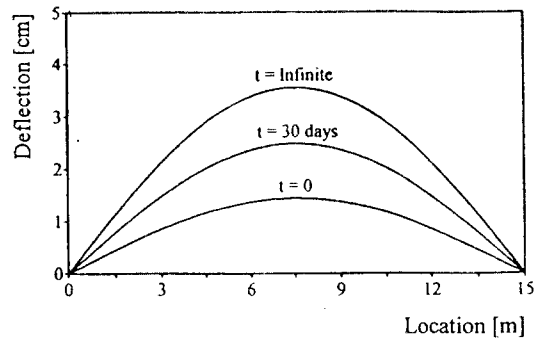


Fig. 10 Deflection of PC Beam

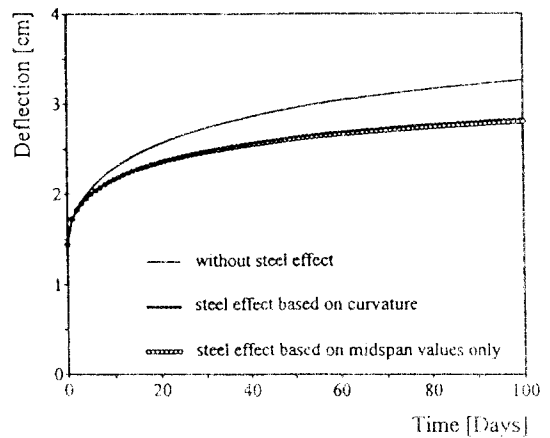


Fig. 11 Midspan Deflection of PC Beam

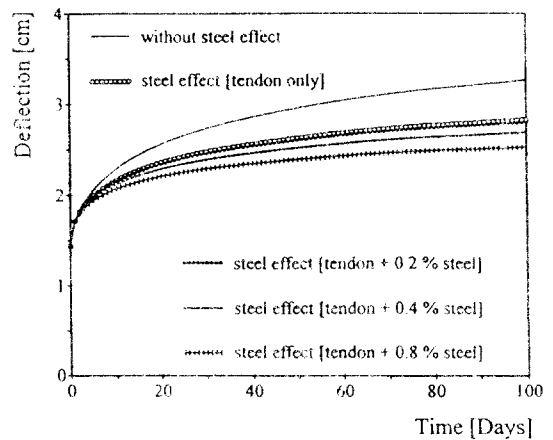


Fig. 12 Midspan Deflection : (Steel Content)