Journal of the Korea Concrete Institute
Vol.14, No.4, pp.521~529, August 2002

콘크리트 장기변형의 구속계수와 선압축력의 손실률

연정흠[1)*] • 주낙친[1)]

[1)]인하대학교 토목공학과

(2002년 1월 7일 원고접수, 2002년 6월 5일 심사완료)

Restraint Coefficient of Long-Term Deformation and Loss Rate of Pre-Compression for Concrete

Jung-Heum Yon[1)*], and Nak-Chin Joo[1)]

[1)] Dept. of Civil Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received January 7, 2002, Accepted June 5, 2002)

ABSTRACT

A restraint coefficient for creep and dry shrinkage deformation of concrete in a composite section was derived to calculate the residual stress, and an equation for the loss rate of the pre-compression force was proposed. The derived restraint coefficient was computed by using the transformed section properties for the age-adjusted effective modulus of elasticity. The long-term behavior of complicate composite sections could be analyzed easily with the restraint coefficient. The articles of the current design code was examined for PSC and steel composite sections. The dry shrinkage strains of $150 \sim 200 \times 10^{-6}$ for the computations of the statically indeterminate force and the expansion joint could be under-estimated for less restrained sections such as the reinforced concrete. The dry shrinkage strain of 180×10^{-6} for the computation of residual stress in the steel composite section was unreasonably less value. The loss rate of 16.3 % of the design code for the PSC composite section in this study was conservative for the long-term deformation of the ACI 209 but could not be used safely for that of the Eurocode 2. For pre-compressed concrete slab in the steel composite section, the loss rate of prestressed force with low strength reinforcement was much larger than that with high strength tendon. The loss rate of concrete pre-compression increased, while that of pre-tension decreased due to the restraint of the steel girder.

Keywords : concrete, long-term deformation, creep, dry shrinkage, composite section, restraint coefficient, loss rate

1. 서 론

콘크리트 재료특성의 향상과 새로운 시공기술의 개발로 콘크리트는 보다 복잡한 합성단면의 일부로 사용되고 있다. 이러한 합성단면에서 콘크리트 장기변형의 일부는 다른 재료의 단면에 의해 구속되며, 콘크리트 단면에는 잔류응력이 발생된다. 특히 여러 단계에 걸친 긴장력의 도입 또는 단면형상의 변화[2,3] 등과 같이 시공단계가 복잡하면, 정밀한 시공을 위해서 각 시공단계별로 콘크리트 장기변형의 영향이 정확히 예측될 수 있어야 한다.

콘크리트가 긴장되지 않은 보강재 또는 강재거더 등의 다른 재료와 합성단면으로 사용되면 콘크리트에 발생되는 장기변형 일부의 구속으로 콘크리트에는 잔류응력이 발생한다. 긴장된 보강재 또는 강재거더의 변형 등에 의해 콘크리트에 선압축력(pre-compression)이 도입되면 콘크리트의 장기변형은 긴장된 보강재의 선인장력(pre-tension)의 손실을 초래하여 선압축력이 감소한다. 긴장되지 않은 보강재와 긴장된 보강재가 함께 사용되는 경우에는 콘크리트 장기변형 일부의 구속으로 긴장된 보강재의 선인장력의 손실은 감소하는 반면에[2], 콘크리트에는 인장 잔류응력의 발생으로 다른 선압축력의 손실을 보인다.

이 논문에서는 긴장되거나 긴장되지 않은 보강재 또는 강재거더 등과 합성단면으로 작용하는 콘크리트에 발생되는 장기변형의 구속정도를 나타내는 구속계수가 유도되었다. 이 구속계수를 사용하여 도로교 설계기준[4]의 콘크리트 장기변형에 대한 규정들이 검토되었다. 콘크리트 단면에 선압축력이 도입된 경우에 대해서는 장기변형의 구속계수를 사용하여 콘크리트 선압축력의 손실률의 계산식이 제안되었다. 제안된 구속계수와 손실률의 계산식으로 콘크리트구조 설계기준[5]과 도로교 설계기준에 도입된 장기변형에 대한 Eurocode 2[6]의 제안식과 PS 콘크리트에 도입된 긴장재의 손실응력 계산식이 검토되었다. 또한 강합성단면의 콘크리트 바닥판에 선압축력이 도입된 경우에 콘

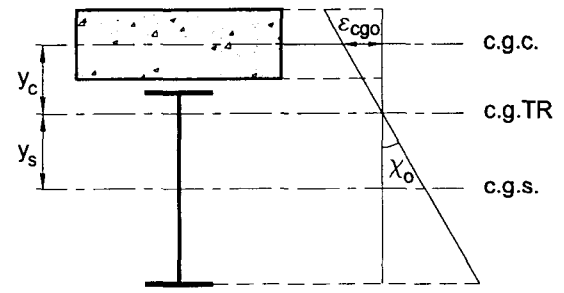
* Corresponding author
Tel : 032-860-7569 Fax : 032-873-7560
E-mail : jyon@inha.ac.kr

크리트 장기변형의 일부 구속으로 발생될 수 있는 잔류응력에 의한 선압축력의 손실이 계산되었다.

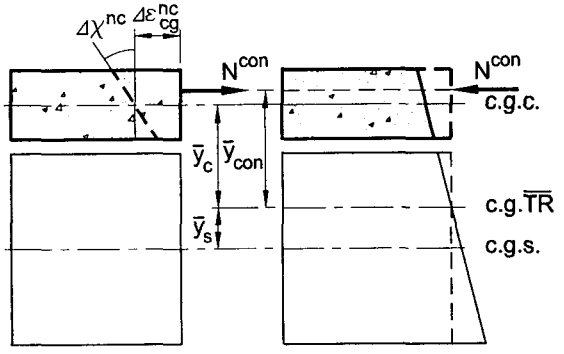
2. 콘크리트 장기변형의 구속계수

합성단면에서 콘크리트 장기변형의 일부가 구속되는 경우에 콘크리트의 장기변형을 완전히 구속하는 구속력을 콘크리트 단면에 그리고 이 구속력과 크기가 같고 방향이 반대인 변형력을 합성단면에 작용시켜 변형을 계산하는 것이 일반적이다. 이 경우 전체 단면은 자체평형을 유지하면서 적합조건을 만족한다. 합성단면의 잔류응력은 이 변형력에 의한 응력이 되며, 장기변형을 발생시키는 콘크리트 단면의 잔류응력은 합성단면의 잔류응력에 구속력에 의한 응력을 중첩하여 계산된다.

장기변형이 발생되기 직전에 콘크리트의 탄성계수 E_c에 대해 계산된 환산단면 A_{TR}과 I_{TR}이 Fig. 1(a)와 같고, 콘크리트의 중심 y_c에서 탄성변형률과 곡률은 각각 ε_{cgo}와 χ_o이다. Fig. 1(b)와 같이 콘크리트가 구속되지 않은 경우에 발생되는 자유 장기변형 $\Delta\varepsilon_{cg}^{nc}$와 $\Delta\chi^{nc}$는 크리프계수 ϕ와 건조수축변형률 $\Delta\varepsilon_{sh}$에 대해 각각 다음과 같다.



(a) Transformed section for E_c and strain distribution for external loads



(b) Non-composite section (c) Transformed section for $\bar{E}_c$

Fig. 2 Long-term deformation of composite section

$$\Delta\varepsilon_{cg}^{nc} = \phi\varepsilon_{cgo} + \Delta\varepsilon_{sh} \tag{1a}$$

$$\Delta\chi^{nc} = \phi\chi_o \tag{1b}$$

이 변형을 완전히 구속하기 위한 구속력 N^{con}과 M^{con}은 각각 다음과 같다.

$$N^{con} = \Delta\varepsilon_{cg}^{nc} A_c \bar{E}_c \tag{2a}$$

$$M^{con} = \Delta\chi^{nc} \bar{E}_c I_c = N^{con} y_{con} \tag{2b}$$

여기서, A_c와 I_c는 콘크리트 단면의 단면적과 단면이차모멘트이며, y_{con}은 콘크리트의 단면중심에 대한 축방향 구속력 N^{con}의 작용점, $\bar{E}_c$는 재령수정계수 β[7]가 고려된 재령수정 유효탄성계수[8]로 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{E}_c = \frac{E_c}{1+\beta\phi} \tag{3}$$

콘크리트의 변형이 완전히 구속된 경우에 콘크리트 단면중심으로부터 위치 y에서 발생되는 콘크리트의 잔류응력 Δf_c^{con}은 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta f_c^{con} = -\left(\frac{N^{con}}{A_c} + \frac{N^{con} y_{con} y}{I_c}\right) = -\Delta\varepsilon_{cg}^{nc}\bar{E}_c\left(1 + \frac{y_{con} y}{r_c^2}\right) \tag{4}$$

콘크리트 장기변형의 일부가 구속된 경우에 실제 발생되는 장기변형은 유효탄성계수 $\bar{E}_c$에 대해 계산된 Fig. 1(c)의 환산단면 $\bar{A}_{TR}$과 $\bar{I}_{TR}$에 변형력 $-N^{con}$을 $\bar{y}_{con}$에 작용시켜 계산된다. Fig. 1의 구속력과 변형력에 의한 잔류응력 Δf_c^{res}은 다음과 같다.

$$\Delta f_c^{res} = \Delta f_c^{con} + \left(\frac{N^{con}}{\bar{A}_{TR}} + \frac{N^{con}\bar{y}_{con}\bar{y}}{\bar{I}_{TR}}\right) \tag{5a}$$

재령수정계수 $\beta = 0.5$를 사용하는 경우에 위의 식은 도로교 표준시방서[9] 강교편 합성형의 해설에 있는 야쓰미의 제안식과 같은 식이다.

식 (5a)는 다음과 같이 식 (4)의 완전히 구속된 경우의 잔류응력 Δf_c^{con}으로 나타낼 수 있으며,

$$\Delta f_c^{res} = \left[1 - \bar{\rho}_c\left(1 + \frac{\bar{y}_{con}\bar{y}}{\bar{r}_{TR}^2}\right)\frac{\Delta f_{cg}^{con}}{\Delta f_c^{con}}\right]\Delta f_c^{con} \tag{5b}$$

여기서, $\bar{\rho}_c = A_c/\bar{A}_{TR}$은 환산단면 $\bar{A}_{TR}$에 대한 콘

크리트의 단면비, $\bar{r}^2_{TR} = \bar{I}_{TR}/\bar{A}_{TR}$이다. $\bar{E}_c$에 대해 구속된 변형률 $\Delta\varepsilon_c^{res} = \Delta f_c^{res}/\bar{E}_c$은 다음과 같다.

$$\Delta\varepsilon_c^{res} = -\left[1 - \bar{\rho}_c\left(1 + \frac{\bar{y}_{con}\bar{y}}{\bar{r}^2_{TR}}\right)\frac{\Delta\varepsilon_{cg}^{nc}}{\Delta\varepsilon_c^{nc}}\right]\Delta\varepsilon_c^{nc} \quad (5c)$$

장기변형의 구속계수 $\bar{\lambda} = -\Delta\varepsilon_c^{res}/\Delta\varepsilon_c^{nc}$는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\lambda} = 1 - \bar{\rho}_c\left(1 + \frac{\bar{y}_{con}\bar{y}}{\bar{r}^2_{TR}}\right)\frac{\Delta\varepsilon_{cg}^{nc}}{\Delta\varepsilon_c^{nc}} \quad (6a)$$

자유 장기변형의 구속으로 실제 발생되는 콘크리트의 변형률 $\Delta\varepsilon_c$의 변형계수 $\lambda = \Delta\varepsilon_c/\Delta\varepsilon_c^{nc}$는 다음과 같다.

$$\lambda = 1 - \bar{\lambda} = \bar{\rho}_c\left(1 + \frac{\bar{y}_{con}\bar{y}}{\bar{r}^2_{TR}}\right)\frac{\Delta\varepsilon_{cg}^{nc}}{\Delta\varepsilon_c^{nc}} \quad (6b)$$

3. 콘크리트 선압축력의 손실률

콘크리트의 장기변형 이외에 재령에 따라 콘크리트 응력의 변화에 영향을 주는 매개변수로 긴장된 강재의 응력이완이 있다. 응력이완에 의해 콘크리트 탄성변형의 변화가 발생하며, 이에 의한 크리프 변형을 고려하기 위해 재령수정 유효탄성계수가 적용되어야 한다. 긴장된 강재의 응력이완이 발생되면, Fig. 1(c)에 있는 환산단면의 중심에 대한 긴장된 강재의 단면중심 $\bar{y}_p$에 감소된 강재의 응력 Δf_{re}에 해당하는 축방향력 $N^{re} = \Delta f_{re}A_{ps}$가 긴장력과 반대방향으로 작용하는 것과 같다. 그러므로 긴장재의 응력이완에 의한 콘크리트의 응력변화 Δf_c^{re}는 다음과 같이 된다.

$$\Delta f_c^{re} = -\left(\frac{N^{re}}{\bar{A}_{TR}} + \frac{N^{re}\bar{y}_p\bar{y}}{\bar{I}_{TR}}\right) = -\bar{\rho}_p\left(1 + \frac{\bar{y}_p\bar{y}}{\bar{r}^2_{TR}}\right)\Delta f_{re} \quad (7a)$$

여기서, $\bar{\rho}_p = A_{ps}/\bar{A}_{TR}$는 환산단면 $\bar{A}_{TR}$에 대한 긴장된 강재의 단면비이다. 위의 식으로부터 긴장재의 응력이완에 의한 콘크리트 변형률의 변화 $\Delta\varepsilon_c^{re} = \Delta f_c^{re}/\bar{E}_c$는 $\bar{n}_p = E_p/\bar{E}_c$에 대해 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta\varepsilon_c^{re} = -\bar{n}_p\bar{\rho}_p\left(1 + \frac{\bar{y}_p\bar{y}}{\bar{r}^2_{TR}}\right)\Delta\varepsilon_{re} \quad (7b)$$

여기서, $\Delta\varepsilon_{re} = \Delta f_{re}/E_p$는 긴장재의 응력이완에 해당하는 변형률이다. 응력이완에 대한 변형계수 λ^{re}는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\lambda^{re} = -\frac{\Delta\varepsilon_c^{re}}{\Delta\varepsilon_{re}} = \bar{n}_p\bar{\rho}_p\left(1 + \frac{\bar{y}_p\bar{y}}{\bar{r}^2_{TR}}\right) \quad (8)$$

장기변형의 구속계수 $\bar{\lambda}$와 긴장재의 응력이완에 대한 변형계수 λ^{re}로부터 콘크리트에 잔류응력을 발생시키는 변형률 $\Delta\varepsilon_c^{res}$는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\Delta\varepsilon_c^{res} = -(\bar{\lambda}\Delta\varepsilon_c^{nc} + \lambda^{re}\Delta\varepsilon_{re}) \quad (9)$$

위의 식에서 구속된 변형률 $\Delta\varepsilon_c^{res} = (1+\beta\phi)\Delta\varepsilon_{ce}$에는 잔류응력에 해당하는 탄성변형률 $\Delta\varepsilon_{ce}$와 이 변형률에 의한 크리프 변형률 $\beta\phi\Delta\varepsilon_{ce}$가 포함된다. 콘크리트의 초기 탄성변형률 ε_{co}과 $\Delta\varepsilon_c^{nc} = \phi\varepsilon_{co} + \Delta\varepsilon_{sh}$에 대한 탄성변형률의 변화 $\Delta\varepsilon_{ce} = \Delta\varepsilon_c^{res}/(1+\beta\phi)$는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta\varepsilon_{ce} = -\frac{\bar{\lambda}\Delta\varepsilon_c^{nc} + \lambda^{re}\Delta\varepsilon_{re}}{1+\beta\phi} = -\frac{\bar{\lambda}(\phi\varepsilon_{co} + \Delta\varepsilon_{sh}) + \lambda^{re}\Delta\varepsilon_{re}}{1+\beta\phi} \quad (10)$$

그러므로 식 (6a)와 식 (8)로부터 장기변형에 의한 콘크리트 선압축력의 손실률 $\bar{R}_c = -\Delta\varepsilon_{ce}/\varepsilon_{co}$은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{R}_c = \frac{\bar{\lambda}(\phi + \Delta\bar{\varepsilon}_{sh}^{co}) + \lambda^{re}\Delta\bar{\varepsilon}_{re}^{co}}{1+\beta\phi} \quad (11)$$

여기서, $\Delta\bar{\varepsilon}_{sh}^{co} = \Delta\varepsilon_{sh}/\varepsilon_{co}$이며, $\Delta\bar{\varepsilon}_{re}^{co} = \Delta\varepsilon_{re}/\varepsilon_{co}$이다.

긴장된 강재의 단면중심 $\bar{y} = \bar{y}_p$와 $\Delta\varepsilon_c^{nc} = \Delta\varepsilon_{cg}^{nc}$에서 장기변형과 응력이완의 변형계수 λ_p와 λ_p^{re}를 각각 다음과 같이 정의하면,

$$\lambda_p = \bar{\rho}_c\left(1 + \frac{\bar{y}_{con}\bar{y}_p}{\bar{r}^2_{TR}}\right) \quad (12a)$$

$$\lambda_p^{re} = \bar{n}_p\bar{\rho}_p\left(1 + \frac{\bar{y}_p^2}{\bar{r}^2_{TR}}\right) \quad (12b)$$

긴장된 강재의 단면중심에서 식 (6a)의 콘크리트 장기변형의 구속계수 $\bar{\lambda}_p = 1 - \lambda_p(\Delta\varepsilon_{cg}^{nc}/\Delta\varepsilon_{cp}^{nc})$가 된다. 긴장된 강재의 단면중심에서 장기변형 $\Delta\varepsilon_{cp}^{nc} = \phi\varepsilon_{cpo} + \Delta\varepsilon_{sh}$에 대해 콘크리트 응력변화의 원인이 된 식 (9)의 구속된 변형률 $\Delta\varepsilon_{cp}^{res}$와 식 (10)의 탄성변형률 $\Delta\varepsilon_{cpe}$는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\varepsilon_{cp}^{\text{res}} = -(\Delta\varepsilon_{cp}^{nc} - \lambda_p\Delta\varepsilon_{cg}^{nc} + \lambda_p^{re}\Delta\varepsilon_{re}) = -[(1-\lambda_p\varepsilon_{cgo}/\varepsilon_{cpo})\phi\varepsilon_{cpo} + (1-\lambda_p)\Delta\varepsilon_{sh} + \lambda_p^{re}\Delta\varepsilon_{re}] \quad (13)$$

$$\Delta\varepsilon_{cpe} = \frac{\Delta\varepsilon_{cp}^{\text{res}}}{1+\beta\phi} \quad (14)$$

긴장된 강재의 단면중심에서 장기변형에 의한 콘크리트 선압축응력의 손실률 $\overline{R}_{cp} = -\Delta\varepsilon_{cpe}/\varepsilon_{cpo}$은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\overline{R}_{cp} = \frac{1}{1+\beta\phi}[\phi(1-\lambda_p\overline{\varepsilon}_{cgo}^{cpo}) + (1-\lambda_p)\Delta\overline{\varepsilon}_{sh}^{cpo} + \lambda_p^{re}\Delta\overline{\varepsilon}_{re}^{cpo}] \quad (15)$$

여기서, $\overline{\varepsilon}_{cgo}^{cpo} = \varepsilon_{cgo}/\varepsilon_{cpo}$이며, $\Delta\overline{\varepsilon}_{sh}^{cpo} = \Delta\varepsilon_{sh}/\varepsilon_{cpo}$ 그리고 $\Delta\overline{\varepsilon}_{re}^{cpo} = \Delta\varepsilon_{re}/\varepsilon_{cpo}$이다.

긴장된 강재에서 선인장력의 손실은 긴장된 강재의 단면중심 $\overline{y} = \overline{y}_p$에서 구속되지 않고 콘크리트에 실제 발생되는 다음의 변형률 $\Delta\varepsilon_{cp}$로부터 계산되어야 한다.

$$\Delta\varepsilon_{cp} = -[\lambda_p\Delta\varepsilon_{cg}^{nc} + (1-\lambda_p^{re})\Delta\varepsilon_{re}] \quad (16)$$
$$= -[\lambda_p(\phi\varepsilon_{cgo} + \Delta\varepsilon_{sh}) + (1-\lambda_p^{re})\Delta\varepsilon_{re}]$$

식 (16)으로부터 선인장력의 손실률 $\overline{R}_p = -\Delta\varepsilon_{cp}/\varepsilon_{pso}$는 다음과 같다.

$$\overline{R}_p = \lambda_p(\phi\overline{\varepsilon}_{cgo}^{pso} + \Delta\overline{\varepsilon}_{sh}^{pso}) + (1-\lambda_p^{re})\Delta\overline{\varepsilon}_{re}^{pso} \quad (17)$$

여기서, $\Delta\overline{\varepsilon}_{cgo}^{pso} = \varepsilon_{cgo}/\varepsilon_{pso}$이며, $\Delta\overline{\varepsilon}_{sh}^{pso} = \Delta\varepsilon_{sh}/\varepsilon_{pso}$, 그리고 $\Delta\overline{\varepsilon}_{re}^{pso} = \Delta\varepsilon_{re}/\varepsilon_{pso}$이다.

4. 건조수축에 의한 합성단면의 변형

매스콘크리트가 아닌 경우에 일반적으로 콘크리트의 건조수축은 콘크리트 단면에 일정하게 발생되는 것으로 가정될 수 있다. 건조수축변형의 일부가 구속되어 콘크리트에 발생되는 잔류응력의 크리프효과가 고려된 식 (6)의 구속계수와 변형계수는 초기 탄성변형에 의한 곡률 $\chi_o = 0$에 대한 $\overline{y}_{\text{con}} = \overline{y}_c$와 $\Delta\varepsilon_c^{\text{nc}} = \Delta\varepsilon_{cg}^{\text{nc}}$를 적용하여 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{\lambda}^N = 1 - \overline{\rho}_c\left(1 + \frac{\overline{y}_c\overline{y}}{\overline{r}_{\text{TR}}^2}\right) \quad (18a)$$

$$\lambda^N = \overline{\rho}_c\left(1 + \frac{\overline{y}_c\overline{y}}{\overline{r}_{\text{TR}}^2}\right) \quad (18b)$$

위의 식으로부터 상대적으로 강재가 많이 사용된 경우에 단면비 $\overline{\rho}_c = A_c/\overline{A}_{\text{TR}}$와 $\overline{y}_c\overline{y}/\overline{r}_{\text{TR}}^2$는 작아지며, 구속계수는 증가한다. 특히 단면적에 비해 단면이차모멘트가 크거나 콘크리트 단면중심이 환산단면 $\overline{A}_{\text{TR}}$의 중심에서 가까이 있는 경우에 구속계수는 증가한다.

도로교 설계기준에서 제안하는 건조수축변형의 구속에 대한 재령수정 크리프계수 $\beta\phi = 2.0$에 대해 콘크리트에는 변형계수와 극한 건조수축변형률에 따라 Fig. 2의 변형이 발생된다. 콘크리트구조 설계기준과 도로교 설계기준에서 채택하고 있는 Eurocode 2의 무근 콘크리트에 대한 극한 건조수축변형은 상대습도 70 %와 주변온도 20 ℃의 표준상태 그리고 1종 시멘트가 사용된 경우에 콘크리트의 강도 $f_{ck} = 210 \sim 500\,\text{kgf/cm}^2$에 대해 $350 \sim 500\times10^{-6}$의 범위에 있다. 도로교 설계기준은 콘크리트의 건조수축에 의한 부정정력의 산출에 $150 \sim 200\times10^{-6}$의 변형률과 신축이음량의 계산에 대해 200×10^{-6}을 제안하고 있다. Fig. 2는 0.30 이하의 변형계수에서 안전측으로 적용될 수 있으나 변형계수가 0.60보다 크면 불안전 측으로 계산될 수 있는 것을 보여준다. 일반적으로 강합성단면의 변형계수는 0.3 ~ 0.6의 값으로 콘크리트의 극한 건조수축변형률이 상대적으로 크거나 강재비가 적으면 변형계수에 의한 실제 변형의 예측이 필요하다.

도로교 설계기준에서 건조수축변형의 구속에 의한 잔류응력의 계산식 또는 식 (5a)의 구속력 계산에 적용되는 건조수축변형률은 무근 콘크리트에 대한 극한 건조수축변형률이어야 하며, 도로교 설계기준에서 사용을 허용하는 건조수축변형률 180×10^{-6}은 강합성 단면에서 실제 발생

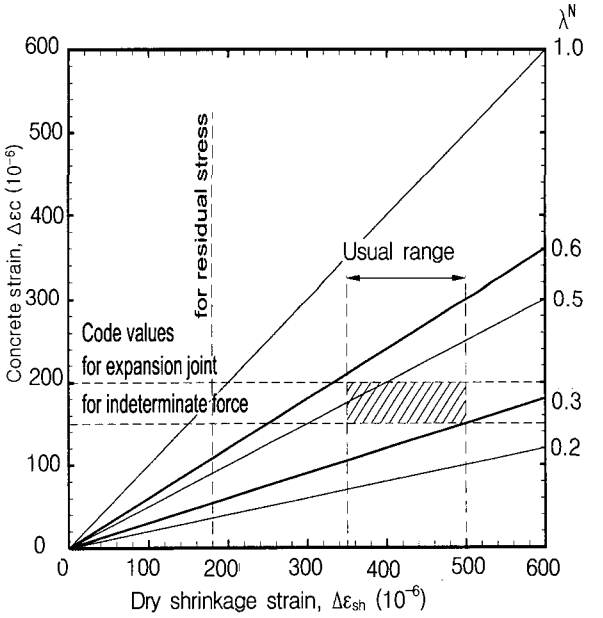


Fig. 25 Concrete deformation for dry shrinkage strain

될 수 있는 Fig. 2의 변형률로 이 값이 적용되는 경우에 잔류응력은 극한 건조수축변형은 $350 \sim 500 \times 10^{-6}$에 대해 48~64% 과소평가된다.

5. PS 콘크리트 합성단면 긴장력의 손실

무근 콘크리트의 크리프계수와 건조수축변형에 대한 Eurocode 2의 제안식이 콘크리트구조 설계기준과 도로교 설계기준에 도입되었음에도 도로교 설계기준의 긴장력 손실에 대한 계산식은 ACI 209[10]에 기초한 AASHTO[11]의 제안식을 그대로 적용하고 있다. 새로 도입된 Eurocode 2의 콘크리트 장기변형과 긴장재 응력이완에 의한 손실률을 계산하여 도로교 설계기준에 있는 제안식의 결과와 비교하였다. PS 콘크리트 합성단면의 다양성 때문에 모든 경우에 대해 검토할 수는 없으나, 이 논문에서는 도로설계편람[12]에서 긴장력의 손실계산에 적용된 한국도로공사 30 m 표준단면이 검토되었다. 이 PSC 합성단면은 Fig. 3과 같이 PC(precast) 거더와 현장타설 바닥판으로 구성되며, 사용된 재료의 특성은 Table 1과 같다. 콘크리트의 재령에 따라 도입되는 긴장재와 바닥판의 단면이 고려된 콘크리트의 탄성계수에 대한 환산단면 특성은 Table 2와 같으며, 이때 Table 3의 고정하중이 각 재령에 도입된다. Table 3에서 콘크리트의 탄성변형률 ε_{cpe}는 긴장재 단면중심의 값으로, 하중이 재하될 때의 환산단면에 대해 다음과 같이 계산되었다.

$$\varepsilon_{cpe} = \frac{P_J}{A_{TR}E_c}\left(1 + \frac{y_p^2}{r_{TR}^2}\right) \quad \text{또는}$$

$$= -\frac{M_o y_p}{E_c I_{TR}} \tag{19}$$

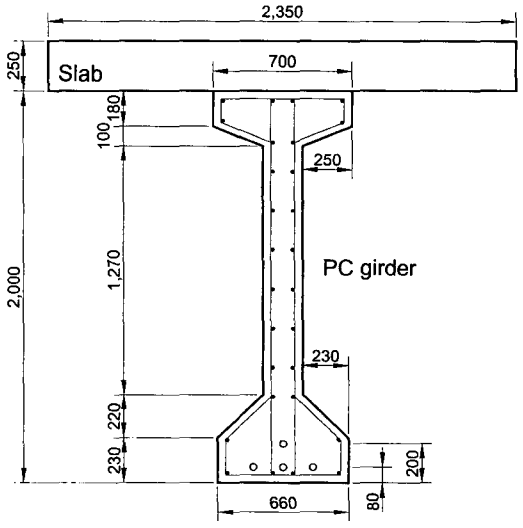


Fig. 26 Configurations of PSC composite section (unit : mm)

긴장력의 손실에 대한 도로교 설계기준의 제안식의 결과는 Table 4와 같다. 초기의 재킹응력 12.2 tonf/cm²에 마찰과 콘크리트의 탄성수축에 의해서 1,660 kgf/cm²의 순간손실이 발생되며, 마찰과 초기 탄성수축 이후의 초기응력 10.5 tonf/cm²에 대한 장기변형에 의한 손실률이 계산되었다. Table 4에서 크리프와 건조수축 및 응력이완에 의한 총 손실응력 1,720 kgf/cm²는 탄성수축 후 긴장재의 초기응력에 대해 16.3%이었다.

설계기준에 도입된 크리프와 건조수축의 계산식으로 정확한 선인장력 손실의 계산을 위해 단계별(step-by-step) 계산법이 사용되었다. 재하재령 t_o인 고정하중에는 재령 $t_{j+1} - t_i$에 크리프계수 $\Delta\phi_j = \phi(t_{j+1}, t_o) - \phi(t_j, t_o)$가

Table 1 Material properties of PSC composite section

Material	Property	
Slab	f_{ck}	270 kgf/cm²
PC girder	f_{ck}	400 kgf/cm²
	E_c	0.28×10^6 kgf/cm²
Strand	Type	SWPC 7B, 12.7 mm, low relaxation
	E_p	2.0×10^6 kgf/cm²
	A_p	48@(0.9871 cm²) = 47.38 cm²
	μ	0.25/rad
	K	0.005/m
Steel bar	Type	D16, SD40
	E_s	2.0×10^6 kgf/cm²
	A_s	28@(1.986 cm²) = 55.61 cm²

Table 2 Section properties of PSC composite section

Property	Concrete age	
	Before 30 days	After 30 days
A_{TR}	7,344 cm²	12,520 cm²
I_{TR}	37.4×10^6 cm⁴	80.6×10^6 cm⁴
r_{TR}^2	5,102 cm²	6,437 cm²
ρ_c	0.90	0.528
y_p	81.7	130.8

$\rho_c = A_c/A_{TR}$

Table 3 Sustained loads on PSC composite section

Age	Load		Concrete elastic strain
7 days	P_J	578 tonf	649×10^6
	M_o^{girder}	200 tonf m	-156×10^6
30 days	M_o^{sd}	290 tonf m	-226×10^6

M_o^{girder}: Self-weight of PC girder

M_o^{sd}: Self-weight of slab and superimposed dead load

적용되었다. 재하기간 $t_{j+1}-t_j$ 동안 발생되는 탄성변형률의 변화에는 재령 t_j에 작용된 하중으로 가정하여 재하재령 t_j에서 t_{j+1}까지 크리프계수 $\phi_j=\phi(t_{j+1},t_j)$가 적용되었다.

크리프계수와 건조수축변형의 계산에 적용된 변수는 Table 5와 같이 가정되었다. Fig.4는 Table 5의 조건에 대한 Eurocode 2와 ACI 209의 제안식에 의해 계산된 1일 재하기간의 크리프계수이다. 초기 재령에 재하된 하중에 대해 Eurocode 2의 제안식이 ACI 209 보다 상당히 크게 계산되나, 재하재령이 증가할수록 점차 ACI 209에 대한 값에 수렴하고 있다. Fig. 5는 재령 3일에 대기에 노출된 PC 거더와 재령 30일에 대기에 노출된 바닥판의 건초수축변형률이다. 크리프계수와 달리 Eurocode 2의 제안식에서 ACI 209보다 적은 건조수축변형률이 계산되었다. 1일 단위로 계산된 단계별 계산법의 콘크리트 응력변화에 대한 크리프계수는 Fig. 4의 값이 사용되며, Fig. 5의 건조수축 변형률은 PC 거더와 현장타설 바닥판의 부등 건조수축의 계산에도 적용되었다.

Eurocode 2와 ACI 209의 제안식이 적용된 단계별 계산법에 의한 긴장재와 긴장재의 단면중심에서 콘크리트의 탄성변형률은 Fig. 6과 같다. 재령 7일과 30일에서 급격한 변형률의 변화는 탄성수축과 추가로 작용하는 고정하중 때문이다. Fig. 7은 탄성수축에 의한 손실이 발생된 이후에 콘크리트의 장기변형과 긴장재의 응력이완에 의해 손실된 콘크리트와 긴장재의 응력의 비율이다. 일반적으로 크리프계수가 크게 계산되는 Eurocode 2의 제안식에 의한 경우에 ACI 209보다 큰 손실률이 계산되었다. ACI 209에

Table 4 Stress loss of strand according to the design code for highway bridges(unit : kgf/cm^2)

Item	Equation	Stress
Jacking	$f_{pJ} = P_J/A_p$	12,200
Friction	$\Delta f_{ps}^{fr} = f_{ps}^{\text{end}}[1-e^{-(\mu\alpha+Kx)}]$	1,167
Elastic shortening	$\Delta f_{ps}^{el} = 0.5\, n_{pi} f_{cpi}$	493
Short-term loss		1,660
Initial tendon stress		10,540
Creep	$\Delta f_{ps}^{cr} = 12 f_{cpi} - 7 f_{cps}$	1,215
Dry shrinkage	$\Delta f_{ps}^{sh} = 0.8(1,190 - 10.5 H_r)$	364
Stress relaxation	$\Delta f_{ps}^{re} = 350 - 0.05(\Delta f_{ps}^{cr} + \Delta f_{ps}^{sh}) - 0.07\Delta f_{ps}^{fr} - 0.1\Delta f_{ps}^{el}$	140
Long-Term loss		1,719

Anchorage movement does not affect the loss at the mid-span

f_{cpi} = 138 kgf/cm^2 and f_{cps} = 63 kgf/cm^2

Loss rate due to long-term deformation 16.3 %

Table 5 Parameters for creep coefficient and dry shrinkage

Condition	Value
Cement type	I
Relative humidity	70%
Fine aggregate rate	50%
Cement content	410 kgf/m^3
Curing method	3 days steam cured
Slum	7.5 cm
Air content	6%
Ambient temperature	20℃

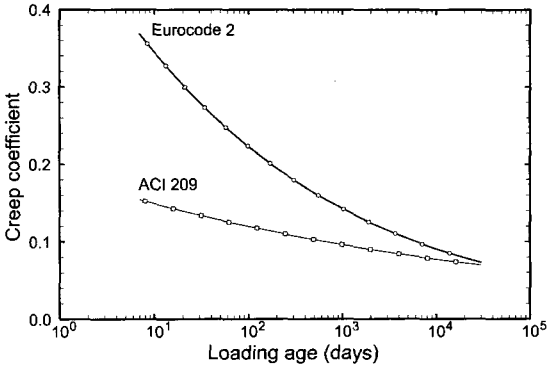


Fig. 27 Creep coefficients of PC girder for 1 day duration

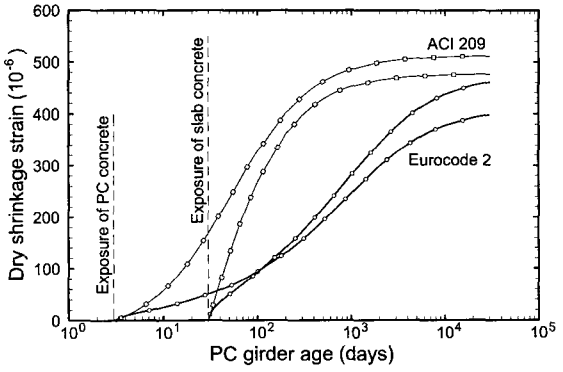


Fig. 28 Dry shrinkages of PC girder and slab

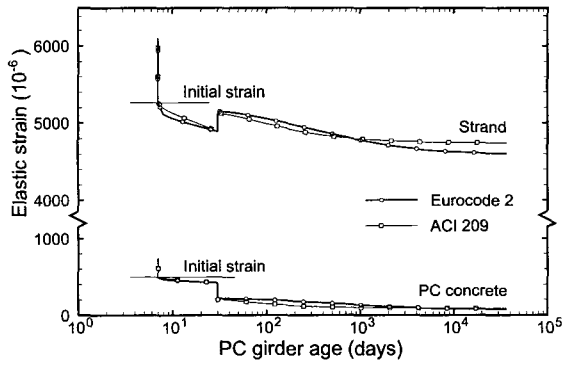


Fig. 29 Elastic strains of strand and PC concrete

의한 손실률은 재령 10년에서 일정한 값에 수렴하며, 설계기준의 계산식에 의한 값은 충분히 안전성을 확보하고 있다. 그러나 Eurocode 2에 의한 손실률은 콘크리트의 재령에 따라 계속 증가하며, 재령 100년에서 설계기준의 값보다 약간 큰 값이었다. 긴장재 단면중심에서 콘크리트 선압축력의 손실은 긴장재 선인장응력의 손실보다 약 60% 크다. 재령 30일에서 일시적인 손실률의 감소는 바닥판의 자중에 의한 인장변형의 구속으로 발생되었다.

6. 강합성 거더 콘크리트 선압축력의 손실

콘크리트 바닥판에 선압축력이 도입된 이후에 강재거더에 고정되면 콘크리트의 장기변형의 일부는 상대적으로 큰 강재비에 의해 구속된다. 이 경우 콘크리트 선압축력의 원인이 된 긴장된 보강재의 선인장력의 손실은 감소하는 반면에, 콘크리트에는 인장 잔류응력이 발생되어 선압축력의 손실은 증가한다. Fig. 8의 도로설계편람에서 예제로 사용된 강합성 단면에 대해 콘크리트 바닥판의 중심에 있는 보강철근과 긴장재의 선인장력 또는 콘크리트 바닥판의 타설 전후에 강재거더의 변형에 의해 콘크리트 바닥판에 선압축력이 도입되었다. 일반적으로 콘크리트 바닥판의 선압축력을 도입하기 위해서 콘크리트 단면중심에 긴장된 보강재가 배치되기 때문에 $\bar{y}_{con} = \bar{y}_c$와 $\bar{y}_p = \bar{y}_c$에서 식 (18a)의 축방향력에 대한 계수로 다음의 값이 적용된다.

$$\bar{\lambda}_{cg}^{N} = 1 - \bar{\rho}_c\left(1 + \frac{\bar{y}_c^2}{r_{TR}^2}\right) \tag{20a}$$

$$\lambda_p = \lambda_{cg}^{N} = \bar{\rho}_c\left(1 + \frac{\bar{y}_c^2}{r_{TR}^2}\right) \tag{20a}$$

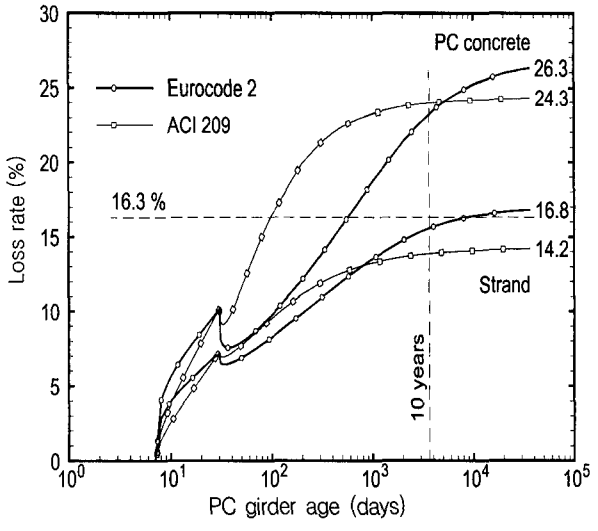


Fig. 7 Loss rate of strand and PC concrete

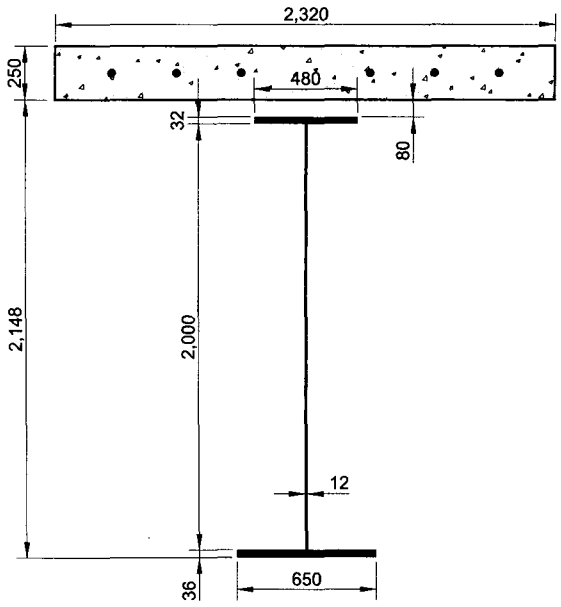


Fig. 33 Configurations of steel composite section (unit : mm)

콘크리트 바닥판이 강재 거더와 합성되기 전에 선압축응력이 도입되므로 초기에 긴장된 보강재의 응력 f_{pso}는 콘크리트 바닥판의 초기 선압축응력 f_{cgo}에 대해 다음의 평형조건을 만족한다.

$$f_{cgo}A_c = f_{pso}A_p \quad 또는 \quad \varepsilon_{cgo} = n_p\rho_p\varepsilon_{pso} \tag{21}$$

여기서, $\rho_p = A_p/A_c$는 긴장된 보강재의 콘크리트 단면에 대한 단면비이며, $n_p = E_p/E_c$는 콘크리트의 탄성계수에 대한 탄성계수비이다. 식 (15)와 (17)에 식 (21)을 적용하여 긴장된 보강재의 응력이완이 무시되는 경우에 콘크리트 단면중심에서 콘크리트 선압축력과 긴장된 보강재 선인장력의 손실률은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{R}_{cg} = \frac{\bar{\lambda}_{cg}^{N}}{1 + \beta\phi}\left(\phi + \frac{\varepsilon_{sh}}{\varepsilon_{cgo}}\right) \tag{22a}$$

$$\bar{R}_p = \lambda_{cg}^{N}\left(\phi n_p\rho_p + \frac{\varepsilon_{sh}}{\varepsilon_{pso}}\right) \tag{22b}$$

콘크리트 바닥판의 압축강도 $f_{ck} = 400\,kgf/cm^2$에 대해 허용 압축응력 $f_{cgo} = 160\,kgf/cm^2$ 또는 콘크리트의 탄성계수 $E_c = 0.28\times10^6\,kgf/cm^2$에 대해 탄성변형률 $\varepsilon_{cgo} = 570\times10^{-6}$까지 선압축응력이 도입되었다. SD40 보강철근이 사용되고, 항복응력의 80%까지 인장응력 $f_{rso} = 3,200\,kgf/cm^2$ 또는 변형률 $\varepsilon_{rso} = 1,600\times10^{-6}$에 의해 선압축응력이 도입되면, 탄성계수비 $n_s = 7.14$

에 대해 필요한 보강철근비 $\rho_{rs} = 0.05$ 이며, SWPC 7B 강연선의 선인장응력 $f_{pso} = 12.0\text{tonf/cm}^2$ 또는 변형률 $\varepsilon_{pso} = 6,000\times10^{-6}$에 대해 필요한 강재비 $\rho_{ps} = 0.013$ 이다. 강재거더의 변형에 의해 콘크리트 바닥판에 선압축력이 도입되는 경우에는 바닥판에 보강철근이 배근되지 않은 것으로 가정되었다.

콘크리트 바닥판의 크리프계수 $\phi = 2.0$과 일반적으로 적용되는 재령수정계수 $\beta = 0.8$[8]에 대해 콘크리트 바닥판에 선압축력의 도입 방법에 따른 강합성 단면의 환산단면특성은 Table 6과 같다. 식 (22)에 의해 계산된 콘크리트 선압축력의 손실률 $\overline{R}_{cg}$와 보강재의 손실률 $\overline{R}_p$는 건조수축률에 대해 Fig. 9와 같다. 콘크리트의 손실률 $\overline{R}_{cg}$는 구속계수 $\overline{\lambda}^N_{cg}$에 비례하므로 보강철근에 의해 콘

Table 6 Transformed section properties for methods of introducing pre-compression

Property	Method of introducing pre-compression		
	Steel bar	Strand	Girder deformation
A_c	5,510 cm^2	5,725 cm^2	5,800 cm^2
ρ_{rs}, ρ_{ps}	0.050	0.013	-
$\overline{A}_{TR}$	22,551 cm^2	18,780 cm^2	17,455 cm^2
$\overline{I}_{TR}$	1.93×10^8 cm^4	1.70×10^8 cm^4	1.60×10^8 cm^4
$\overline{r}^2_{TR}$	8,559 cm^2	9,073 cm^2	9,173 cm^2
$\overline{\rho}_c$	0.244	0.305	0.332
$\overline{y}_c$	-70.7	-84.9	-91.3
$\overline{\lambda}^N_{cg}$	0.613	0.453	0.366
λ^N_{cg}	0.387	0.547	0.634

$\phi = 2.0$, $\beta = 0.8$

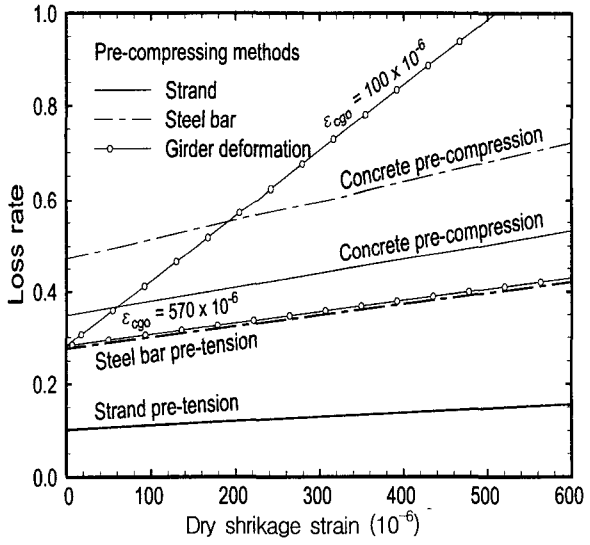


Fig. 36 Loss rates of concrete pre-compression and steel pre-tension

크리트 바닥판에 선압축력이 도입된 경우 긴장력의 의한 경우보다 콘크리트의 선압축력의 손실률은 35 % 크며, 보강재 선인장력의 손실률 $\overline{R}_p$는 식 (22b)에서 긴장재에 대한 $n_p\rho_{ps} = 0.0928$보다 상대적으로 큰 보강철근의 $n_s\rho_{rs} = 0.357$에 의해 보강철근이 사용되는 경우가 긴장재가 사용되는 경우보다 약 170 % 크다. 콘크리트의 장기변형이 구속된 경우에 콘크리트 선압축력의 원인이 된 강재의 선인장력의 감소는 구속이 되지 않은 경우보다 작아지는 반면에, 콘크리트 선압축력의 감소는 상당히 증가한다. 구조물의 설계는 보강재의 선인장력이 아니라 콘크리트의 선압축력에 의해 결정되므로, 콘크리트의 장기변형이 구속된 경우에 긴장력의 손실보다는 콘크리트 선압축력의 손실이 계산되어야 한다.

강재거더의 변형에 의해 콘크리트 바닥판에 선압축력이 도입된 경우[1]에는 상대적으로 적은 보강재의 사용으로 가장 작은 손실계수를 보이나 강재거더의 변형에 의해 콘크리트에 허용 압축응력까지 선압축응력을 도입에 어려움이 있고, 콘크리트 바닥판의 압축강도는 400 kgf/cm^2보다 작은 값이 사용되는 것이 일반적이다. 이 경우 콘크리트 바닥판의 곡률과 바닥판에 배근된 철근의 영향을 무시할 수 있으면 콘크리트 바닥판에 도입된 선압축응력의 손실계수는 크리프계수 $\phi = 2.0$와 재령수정계수 $\beta = 0.8$과 도입된 초기 탄성변형에 대해 Fig. 10과 같다. 이 경우 손실률은 초기 탄성변형률에 대한 건조수축 변형률의 비에 비례하기 때문에 초기 탄성변형률이 적은 경우에 손실률은 급격히 증가하게 된다. 특히 초기 선압축응력 $\varepsilon_{cgo} = 100\times10^{-6}$ 또는 $f_{cgo} = 28\text{ kgf/cm}^2$보다 작으면 장기적으로 콘크리트에 도입된 선압축력의 효과는 기대할 수 없다. $\varepsilon_{cgo} = 570\times10^{-6}$ 또는 $f_{cgo} = 160\text{ kgf/cm}^2$까지 선압축응력이 도입된 경우에도 손실률은 40 % 이상이 된다.

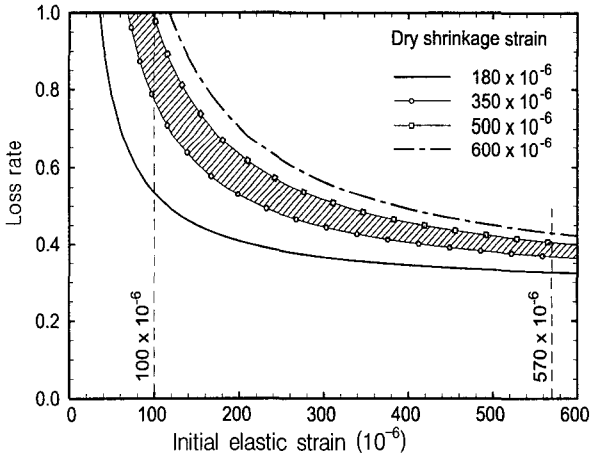


Fig. 38 Loss rate of pre-compression strain introduced by girder deformation

7. 결 론

복잡한 형태의 합성단면에서 콘크리트 장기변형의 일부가 구속되는 경우에 구속의 정도를 나타내기 위한 장기변형의 구속계수가 유도되었다. 선압축력이 도입된 콘크리트 단면에 대해서는 구속계수를 사용하여 선압축력의 손실률의 계산식이 제안되었다. 제안된 구속계수와 손실률의 계산식으로 설계기준의 관련 식들을 검토하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) 부정정력과 신축이음량의 계산에 사용되는 설계기준의 건조수축 변형률은 장기변형의 구속정도가 적은 경우에 과소 계산될 수 있으며, 제안된 장기변형의 구속계수 또는 변형계수를 사용하여 간단하면서도 보다 정확히 계산될 수 있다.

2) 강합성 단면에서 건조수축에 의한 잔류응력의 계산에는 무근 콘크리트에 대한 건조수축 변형률이 적용되어야 하며, 설계기준의 180×10^{-6}은 비정상적으로 작은 값이다.

3) 이 논문에서 사용된 PSC 합성단면에서 Eurocode 2와 ACI 209의 크리프계수와 건조수축 변형률에 의한 긴장력의 손실률은 각각 16.8%와 14.2%이었으며, 도로교 설계기준의 제안식에 의한 손실률 16.3%는 ACI 209에 대해서는 안전측으로 계산되었으나 Eurocode 2에 대해서는 안전을 보장할 수 없다. 콘크리트 선압축응력의 손실률은 긴장력의 손실률보다 약 60% 큰 값이었다.

4) 강합성 단면의 콘크리트 바닥판에 일반 보강철근의 긴장에 의해 선압축력이 도입되면 철근비의 증가로 긴장재에 의한 경우보다 상당히 큰 손실이 발생되었다. 강재거더의 변형에 의해 선압축력이 도입되는 경우에 손실률은 콘크리트의 초기 탄성변형률의 크기에 큰 영향을 받으며, 40% 보다 큰 값이다.

참고문헌

1. 구민세, 박영제, 정봉수, "하중재하를 이용한 연속 프리플렉스 합성보의 라멘구조에의 적용," 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2000, pp.661~664.
2. 장승필, 심창수, 최규용, 정철헌 "프리캐스트 교량 바닥판의 종방향 프리스트레스 손실량," 대한토목학회 논문집, 제19권, I-6호, 1999, pp.917~927.
3. 한만엽, 김진근, 이차돈, 박준범, "프리스트레스를 단계적으로 도입하는 IPC 거더의 설계 이론 연구," 한국콘크리트학회 논문집, 제12권, 4호, 2000, pp.121~130.
4. 한국도로교통협회, "건설교통부 제정 도로교 설계기준," 도서출판 건설정보, 2000.
5. 한국콘크리트학회, "건설교통부 제정 콘크리트구조 설계기준," 기문당, 1999.
6. CEN (European Committee for Standardization), *Eurocode 2: Design of Concrete Structures*, ENV (European Prestandard) 1992-1-1, Brussels, Belgium, 1994.
7. Bazant, Z. P., "Prediction of Concrete Creep Effects Using Age-Adjusted Effective Modulus Method," *ACI Structural Journal*, Vol. 63, 1972, pp.212~217.
8. Gilbert, R. I., *"Time Effects in Concrete Structures,"* Elsevier, Amsterdam, 1988.
9. 대한토목학회, 건설교통부 제정 도로교 표준시방서, 기문당, 1996.
10. ACI Committee 209, *"Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effect in Concrete Structures,"* ACI 209R-92, American Concrete Institute, 1997.
11. AASHTO, *"Standard Specifications for Highway Bridges,"* 6th Edition, American Association of Highway and Transportation Officials, 1996.
12. 건설교통부, 도로 설계편람 III, 한국건설기술연구원, 2001.

요 약

콘크리트의 크리프와 건조수축에 의한 장기변형의 일부가 구속되는 합성단면에 대해 콘크리트에 발생되는 잔류응력과 이로 인한 콘크리트 단면에 선압축력의 손실을 계산하기 위해 콘크리트 장기변형의 구속계수가 유도되었으며, 선압축력의 손실률을 계산하기 위한 식을 제안하였다. 제안된 구속계수는 재령수정 유효탄성계수가 적용된 환산단면특성으로부터 계산되며, 복잡한 형태의 합성단면에 대해서도 쉽게 적용될 수 있다. 기존 설계기준에서 콘크리트의 장기변형과 관련된 조항을 검토하기 위해서 도로설계편람의 일반 합성단면에 대해 이 구속계수와 선압축력의 손실 계산식이 적용되었다. 부정정력과 신축이음량의 계산에 적용되는 건조수축변형률 $150\sim200\times10^{-6}$은 장기변형의 구속정도가 적은 경우에 과소 계산될 수 있으며, 잔류응력의 계산에는 적용되는 180×10^{-6}은 비정상적으로 작은 값이다. 이 논문에서 적용된 PSC 합성단면에 대한 도로교 설계기준의 손실률 16.3%는 ACI 209에 대해서는 안전측으로 계산되었으나 Eurocode 2에 대해서는 안전을 보장할 수 없었다. 강합성 단면의 콘크리트 바닥판에 일반 보강철근의 긴장에 의해 선압축력이 도입되면 철근비의 증가로 긴장재에 의한 경우보다 상당히 큰 손실이 발생되었으며, 강재거더의 구속에 의해 긴장된 보강재 선인장력의 손실은 감소한 반면에, 콘크리트 선압축력의 손실은 증가하였다.

핵심용어 : 콘크리트, 장기변형, 크리프, 건조수축, 합성단면, 구속계수, 선압축력의 손실률