



## 합성단면의 콘크리트 크리프 효과에 대한 일반화 매개변수의 민감도 분석

연정흠<sup>1)\*</sup>, 김의현<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>인하대학교 토목공학과 <sup>2)</sup>대림산업(주)

### Sensitivity Analysis of Generalized Parameters on Concrete Creep Effects of Composite Section

Jung-Heum Yon<sup>1)\*</sup> and Eui-Hun Kim<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

<sup>2)</sup>Daelim Industrial Co., Ltd., Seoul 110-732, Korea

**ABSTRACT** In this paper, the existing formulas of the step-by-step method were generalized for effective estimation of responses of complicated composite sections due to long-term deformation of concrete. The initial transformed section properties of the composite section were derived from material and section properties of concrete section and sections which confine the long-term deformation of concrete. The transformed section properties at each step were derived from the effective modulus of elasticity considered the creep coefficient variation. Improved formulas of the step-by-step method for generalized responses were derived by introducing 5 generalized parameters. The formulas can be more simplified by applying constant increment of creep coefficient at each step. The constant increment of creep coefficient at each step can also reduce computing time and make equal computing error of each step. The generalized responses for axial elastic strain of concrete section were most sensitive to the area rate of concrete section, and the ratio of the second moment of the confining section area was more sensitive than that of the concrete section. Those for elastic curvature of concrete section were most sensitive to the ratio of the second moment of concrete section area.

**Keywords** : composite section, long-term deformation, step-by-step method, generalized parameters, parameter sensitivity

#### 1. 서 론

건설재료의 향상과 설계 및 시공기술의 발전으로 보다 효율적인 복합(hybrid)구조의 사용빈도가 증가하고 있으며, 최근 콘크리트학회지<sup>1,2)</sup>와 강구조학회지<sup>3,4)</sup>에서도 이에 대한 기술기사를 특집으로 소개하고 있다. 복합구조의 대표적인 합성단면의 예로 PC(precast) 바닥판에 긴장력이 도입되는 합성거더<sup>1)</sup>와 상하 플랜지의 콘크리트 단면과 복부의 강재 트러스가 적용되는 PCT(prestressed composite truss) 거더<sup>2)</sup>가 있으며, 강상자 플랜지 안에 콘크리트가 타설되는 PSSC(prestressed steel and concrete) 거더<sup>3)</sup> 및 SCP(steel confined prestressed concrete) 거더<sup>5)</sup> 그리고 preflex 거더와 같이 강재거더가 콘크리트에 매립되는 Precom(prestressed composite) 거더<sup>4)</sup>와 RPF(represtressed preflex) 거더<sup>6)</sup> 및 MSP(multi stages prestress) 거더<sup>7)</sup> 등이 있다.

이러한 복잡한 합성단면에서 콘크리트 단면의 장기변형은 합성단면에 이보다 작은 추가변형과 콘크리트 단면에 잔류응력의 원인이 되는 추가 탄성변형을 발생시킨다. 특히 여러 단계에 걸친 긴장력의 도입 또는 단면형상의 변화 등과 같이 시공단계가 복잡하면, 정밀한 시공 및 긴장력 손실의 예측을 위해 각 시공 및 사용 단계별로 콘크리트 장기변형의 영향이 정확히 예측될 수 있어야 한다. 이를 위해 이 논문에서는 콘크리트 단면의 크리프변형으로 인한 복잡한 합성단면의 반응(responses)을 효율적으로 평가할 수 있도록 단계별계산법(step-by-step method)<sup>8)</sup>에 대한 기존의 공식<sup>9)</sup>을 무차원의 일반화(generalized) 반응에 대한 일반식으로 재유도하였다.

이 논문에서 제안된 일반화 반응식은 초기 합성단면의 환산 단면특성에 대한 콘크리트와 구속단면의 단면특성 비율과 콘크리트 단면의 축방향 변형률에 대한 곡률의 비율 및 고려 기간의 크리프계수 등의 5개 일반화 매개변수(generalized parameters)로 구성된다. 매개변수를 최소화하기 위한 일반화 매개변수의 도입은 단면특성이 주어지지 않은 경우에도 합성단면에서 콘크리트 장기거동에 대한 각 매개변수의 민감도 분석을 가능하게 한다.

\*Corresponding author E-mail : jyon@inha.ac.kr  
 Received March 27, 2009, Reivese July 12, 2009  
 Accepted July 22, 2009  
 ©2009 by Korea Concrete Institute

특히 이 논문에서는 단계별계산법의 각 단계에서 크리프 계수의 증가가 일정한 “균등 크리프계수 단계별계산법”을 적용하여 계산시간을 감축(16msec/10,000단계)하고 단계별 계산오차를 균등하게 유지하도록 하였다.

## 2. 합성단면의 환산 단면특성

합성단면의 장기변형에 대한 거동을 해석하기 위해서는 고려하는 장기변형을 발생시키는 콘크리트 단면과 이 장기변형의 일부를 구속하는 구속단면으로 구성된 합성 단면의 환산 단면특성이 정의되어야 한다. 특히 크리프 변형을 고려하기 위해 유효탄성계수가 적용된 환산 단면 특성은 합성단면의 변형을 예측하는 데 필수적이다.

### 2.1 초기 환산 단면특성

콘크리트에 장기변형이 발생되기 이전에 장기변형이 발생될 콘크리트의 단면적과 단면이차모멘트가 각각  $A_c$ 와  $I_c$ 이고, 이 장기변형을 구속하게 되는 구속단면의 콘크리트 탄성계수  $E_c$ 에 대한 초기 환산 단면적과 단면이차모멘트  $A_s$ 와  $I_s$ 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$A_s = \sum n_{si} A_{si} \quad (1a)$$

$$I_s = \sum n_{si} (I_{si} + A_{si} y_{si}^2) \quad (1b)$$

여기서 아래첨자  $i$ 는 구속단면을 구성하는 각각의 요소를 의미하며, 구속단면의 각 요소에 대해  $n_{si} = E_{si} / E_c$ 는 탄성계수비,  $A_{si}$ 는 단면적,  $I_{si}$ 는 단면이차모멘트,  $y_{si}$ 는 크리프 변형이 발생되기 이전의 초기 합성단면의 중심에 대한 각 요소의 중심까지 거리이다.<sup>10)</sup> 각 요소에 대한  $y_{si}$ 로부터 구속단면의 중심까지 거리  $y_{sgo}$ 는 다음과 같이 정의될 수 있으며,

$$y_{sgo} = \frac{\sum (n_{si} A_{si} \cdot y_{si})}{A_s} \quad (2a)$$

$y_{sgo}$ 는 합성단면의 중심에서 콘크리트 단면의 중심까지 거리  $y_{cgo}$ 에 대해 다음의 관계를 만족하여야 한다.

$$A_c y_{cgo} = A_s y_{sgo} \quad (2b)$$

콘크리트 단면과 구속단면의 단면특성으로부터 합성단면의 환산 단면특성인 단면적  $A_o$ 와 단면이차모멘트  $I_o$  및 회전반경  $r_o$ 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$A_o = A_c + A_s \quad (3a)$$

$$I_o = (I_c + A_c \cdot y_{cgo}^2) + (I_s + A_s \cdot y_{sgo}^2) \quad (3b)$$

$$\begin{aligned} r_o^2 &= \rho_{co}(r_c^2 + y_{cgo}^2) + \rho_{so}(r_s^2 + y_{sgo}^2) \\ &= \rho_{co} r_c^2 + \frac{\rho_{co}}{\rho_{so}} y_{cgo}^2 + \rho_{so} r_s^2 \end{aligned} \quad (3c)$$

여기서  $r_c^2 = I_c / A_c$ 와  $r_s^2 = I_s / A_s$ 는 각각 콘크리트 단면과 구속단면의 회전반경이며, 합성단면의 환산 단면적에 대한 단면비  $\rho_{co} = A_c / A_o$ 와  $\rho_{so} = A_s / A_o$ 이며, 식 (3c)에는 식 (2b)와 (3a)의  $\rho_{co} + \rho_{so} = 1$ 로부터 유도된 다음의 관계가 적용되었다.

$$\frac{y_{sgo}}{y_{cgo}} = \frac{\rho_{co}}{\rho_{so}} \quad \text{또는} \quad \frac{y_{cgo} + y_{sgo}}{y_{cgo}} = \frac{1}{\rho_{so}} \quad (4)$$

식 (3c)의 각 항을  $r_o^2$ 으로 나누면 각 단면의 단면이차모멘트의 비는 다음의 관계를 만족하여야 한다.

$$1 = \kappa_{co} + \kappa_{cg} + \kappa_{so} \quad (5a)$$

여기서 합성단면의 환산 단면이차모멘트  $I_o$ 에 대한 콘크리트 단면과 구속단면 그리고 단면 편심에 대한 단면이차모멘트 비는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\kappa_{co} = \rho_{co} \frac{r_c^2}{r_o^2} = \frac{I_c}{I_o} \quad (5b)$$

$$\kappa_{so} = \rho_{so} \frac{r_s^2}{r_o^2} = \frac{I_s}{I_o} \quad (5c)$$

$$\kappa_{cg} = \frac{\rho_{co}}{\rho_{so}} \frac{y_{cgo}}{r_o^2} = \frac{y_{cgo} y_{sgo}}{r_o^2} \quad (5d)$$

### 2.2 유효 환산 단면특성

콘크리트 단면에 크리프 변형이 발생된 경우에 콘크리트의 탄성계수 대신에 유효탄성계수가 적용된 합성단면의 환산 단면특성을 적용하면, 크리프 변형이 포함된 적합조건과 평형조건을 모두 만족할 수 있다. 임의 단계  $k$ 의 기간에 크리프계수  $\Delta\phi_k$ 가 발생하면 다음의 유효탄성계수  $E_{ck}$ 가 적용된다.

$$E_{ck} = E_c / (1 + \Delta\phi_k) \quad (6a)$$

식 (6a)의 유효탄성계수에 대한 구속단면 각 요소의 탄성계수비는 다음과 같으며,

$$n_{ski} = E_{si} / E_{ck} = (1 + \Delta\phi_k) n_{si} \quad (6b)$$

구속단면의 환산 단면적과  $A_{sk} = (1 + \Delta\phi_k) A_s$ 와 단면이차모멘트  $I_{sk} = (1 + \Delta\phi_k) I_s$ 가 적용된다.

단계  $k$ 에서 합성단면의 환산 단면적  $A_k$ 와 초기 환산 단면적  $A_o$ 에 대한 비율  $\rho_{ko} = A_k/A_o$  그리고 구속단면적의 합성단면의 환산단면적에 대한 비율  $\rho_{sk} = A_{sk}/A_k$ 는 각각 다음과 같이 계산된다.

$$A_k = A_c + (1 + \Delta\phi_k)A_s \quad (7a)$$

$$\rho_{ko} = \rho_{co} + (1 + \Delta\phi_k)\rho_{so} \quad (7b)$$

$$\rho_{sk} = (1 + \Delta\phi_k)(\rho_{so}/\rho_{ko}) \quad (7c)$$

이 합성단면의 중심에 대한 콘크리트 단면의 중심까지 거리  $y_{c_gk}$ 는 콘크리트 단면의 중심에 대한 구속단면의 중심까지 거리  $y_{c_go} + y_{s_go}$ 로부터 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$y_{c_gk} = \frac{A_{sk} \cdot (y_{c_go} + y_{s_go})}{A_k} = \lambda_{ck} y_{c_go} \quad (8a)$$

여기서  $\lambda_{ck}$ 는  $y_{c_go}$ 에 대한  $y_{c_gk}$ 의 비율로 식 (8a)에는 식 (4)와 (7c)가 적용되었으며, 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda_{ck} = \frac{y_{c_gk}}{y_{c_go}} = \frac{1 + \Delta\phi_k}{1 + \Delta\phi_k \rho_{so}} \quad (8b)$$

합성단면의 중심에서 구속단면의 중심까지 거리  $y_{s_gk}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$y_{s_gk} = \frac{A_c y_{c_gk}}{A_{sk}} = \frac{\rho_{co}}{(1 + \Delta\phi_k)\rho_{so}} y_{c_gk} \quad (8c)$$

식 (7)과 (8)로부터 환산 단면이차모멘트  $I_k$ 와 회전반경  $r_k$ 는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_k = (I_c + A_c \cdot y_{c_gk}^2) + (1 + \Delta\phi_k)(I_s + A_s \cdot y_{s_gk}^2) \\ = A_o [\rho_{co}(r_c^2 + y_{c_gk}^2) + (1 + \Delta\phi_k)\rho_{so}(r_s^2 + y_{s_gk}^2)] \quad (9a)$$

$$r_k^2 = \frac{1}{\rho_{ko}} \{ \rho_{co} r_c^2 + (1 + \Delta\phi_k)\rho_{so} r_s^2 \\ + [\rho_{co} y_{c_gk}^2 + (1 + \Delta\phi_k)\rho_{so} y_{s_gk}^2] \} \\ = \frac{1}{\rho_{ko}} \left[ \rho_{co} r_c^2 + (1 + \Delta\phi_k)\rho_{so} r_s^2 + \lambda_{ck} \left( \frac{\rho_{co}}{\rho_{so}} \right) y_{c_go}^2 \right] \quad (9b)$$

식 (9b)에서 단면의 편심에 대한 3 번째 항은 식 (8)로부터 다음과 같이 유도되었다.

$$\rho_{co} + (1 + \Delta\phi_k)\rho_{so} \frac{y_{s_gk}^2}{y_{c_gk}^2} = \rho_{co} \left[ 1 + \frac{1}{(1 + \Delta\phi_k)} \frac{\rho_{co}}{\rho_{so}} \right] \\ = \rho_{co} \lambda_{ck}^2 \frac{1 + \Delta\phi_k \rho_{so}}{(1 + \Delta\phi_k)\rho_{so}} = \lambda_{ck} \frac{\rho_{co}}{\rho_{so}} \quad (9c)$$

식 (9b)로부터 초기 합성단면의 단면이차모멘트  $I_o$ 에 대

한 단계  $k$ 에서 합성단면의 단면이차모멘트  $I_k$ 의 비  $\kappa_{ko}$ 는 다음과 식 (5)의 초기 단면이차모멘트의 비  $\kappa_{co}$ 와  $\kappa_{so}$  및  $\kappa_{cg}$ 로 나타낼 수 있다.

$$\kappa_{ko} = \frac{I_k}{I_o} = \rho_{ko} \frac{r_k^2}{r_o^2} \\ = \kappa_{co} + (1 + \Delta\phi_k)\kappa_{so} + \lambda_{ck}\kappa_{cg} \quad (10)$$

식 (10)으로부터 합성단면의 구성요소와 크리프계수에 따른 합성단면의 단면이차모멘트의 변화를 평가할 수 있다.

### 3. 단계별계산법의 반응

합성단면에서 콘크리트의 장기변형에 대한 반응을 계산하는 고전적인 방법은 콘크리트 단면의 구속력과 합성 단면의 변형력으로부터 계산된다. 콘크리트 단면의 구속력과 합성단면의 변형력은 서로 자체평형(self equilibrium)되는 내력이다. 합성단면의 변형은 변형력으로부터 계산되는 반면에 콘크리트 단면의 잔류응력은 콘크리트 단면에만 작용하는 구속력과 합성단면에 작용하는 변형력의 합으로부터 계산된다.

#### 3.1 구속력과 변형력

단계별계산법의 단계  $k$ 에서 콘크리트 단면의 평균 탄성변형률  $\varepsilon_{cgek}$ 와 탄성 곡률  $\chi_{cek}$  그리고 단계  $k$  기간의 크리프계수  $\Delta\phi_k$ 에 대한 장기변형의 축방향 구속력  $\Delta F_{conk}$ 와 휨 구속력  $\Delta M_{conk}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta F_{conk} \\ \Delta M_{conk} \end{bmatrix} = -\Delta\phi_k (A_c E_{ck}) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & r_c^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{cgek} \\ \chi_{cek} \end{bmatrix} \quad (11a)$$

여기서 유효탄성계수  $E_{ck} = E_c / (1 + \Delta\phi_k)$ 는 고려하는 단계에 발생하는 잔류응력에 대한 크리프 변형을 고려하기 위해 적용된다. 단계  $k$ 에 발생하는 건조수축 변형률  $\Delta\varepsilon_{shk}$ 가 고려되는 경우에는 다음의 구속력  $\Delta F_{conk}$ 가 적용되어야 한다.

$$\Delta F_{conk} = -\Delta\phi_k (A_c E_{ck}) (\varepsilon_{cgek} + \Delta\varepsilon_{shk} / \Delta\phi_k) \quad (11b)$$

식 (11)의 축방향 단면력 또는 변형률은 압축인 경우 양의 값이 적용되며, 휨에 대해서는 합성단면의 중심을 기준으로 콘크리트 단면에 인장을 발생시키는 모멘트 또는 곡률에 양의 값이 적용된다. 이 경우 콘크리트 단면에 작용된 구속력은 합성단면에 작용하는 다음의 변형력에 의해 평형되어야 한다.

$$\begin{bmatrix} \Delta F_k \\ \Delta M_k \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -y_{c_gk} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F_{conk} \\ \Delta M_{conk} \end{bmatrix} \quad (12a)$$

긴장재의 응력이완  $\Delta P_k$ 과 같은 내력의 변화가 발생하면 다음의 변형력이 적용되어야 한다.

$$\begin{bmatrix} \Delta F_k \\ \Delta M_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ e_k \end{bmatrix} \Delta P_k - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -y_{cgk} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F_{conk} \\ \Delta M_{conk} \end{bmatrix} \quad (12b)$$

여기서  $e_k$ 는 단계  $k$ 에서 합성단면의 중심에 대한 긴장재의 편심거리이다.

### 3.2 합성단면의 변형

식 (12)의 변형력에 대한 합성단면의 변형률의 변화  $\Delta \varepsilon_k$ 는 다음과 같이 계산될 수 있다.<sup>9)</sup>

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_k(y) &= \frac{\Delta F_k}{A_k E_{ck}} + \frac{\Delta M_k y}{E_{ck} I_k} \\ &= - \left[ \frac{\Delta F_{conk}}{A_k E_{ck}} + \frac{(\Delta M_{conk} - \Delta F_{conk} y_{cgk}) y}{E_{ck} I_k} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

변형률의 변화에 대한 식 (13)으로부터 단계  $k$ 의 합성단면 중심에서 평균 변형률과 곡률의 변화  $\Delta \varepsilon_{gk}$ 와  $\Delta \chi_k$ 는 다음과 같이 콘크리트의 탄성변형으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \varepsilon_{gk} \\ \Delta \chi_k \end{bmatrix} &= \frac{1}{A_k E_{ck}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -y_{cgk}/r_k^2 & 1/r_k^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F_{conk} \\ \Delta M_{conk} \end{bmatrix} \\ &= \Delta \phi_k \rho_{ck} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -y_{cgk}/r_k^2 & r_c^2/r_k^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{cgek} \\ M_{cek} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 합성단면의 환산 단면적에 대한 콘크리트 단면적의 비율  $\rho_{ck} = A_c/A_k$ 이다.

### 3.3 콘크리트 단면의 탄성변형

콘크리트 단면에 발생하는 장기변형의 일부가 구속되면 콘크리트 단면에는 콘크리트 단면에 작용하는 구속력과 합성단면에 작용하는 변형력에 의한 잔류응력  $\Delta f_{ck}$ 가 발생한다. 콘크리트 단면의 탄성변형률  $\Delta \varepsilon_{cek}$ 는 식 (11a)의 구속력과 식 (12a)의 변형력에 의한 잔류응력과 크리프계수가 포함되지 않은 탄성계수로부터 다음과 같이 계산되어야 한다.<sup>9)</sup>

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{cek}(y_c) &= \left( \frac{\Delta F_{conk}}{A_c E_c} + \frac{\Delta M_{conk} y_c}{E_c I_c} \right) - \left[ \frac{\Delta F_{conk}}{A_k E_c} \right. \\ &\quad \left. + \frac{(\Delta M_{conk} - \Delta F_{conk} y_{cgk})(y_c - y_{cgk})}{E_c I_k} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)로부터 단계  $k$ 에 콘크리트 단면에 새로 도입되는

평균 탄성변형률  $\Delta \varepsilon_{cgek}$ 와 탄성곡률  $\Delta \chi_{cek}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \varepsilon_{cgek} \\ \Delta \chi_{cek} \end{bmatrix} &= \left\{ \frac{1}{A_c E_c} \begin{bmatrix} 1 - \rho_{ck} & 0 \\ 0 & 1/r_c^2 \end{bmatrix} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{E_c I_k} \begin{bmatrix} y_{cgk}^2 & -y_{cgk} \\ -y_{cgk} & 1 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \Delta F_{conk} \\ \Delta M_{conk} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{A_c E_c} \begin{bmatrix} \rho_{sk} - y_{cgk}^2 \frac{\rho_{ck}}{r_k^2} & y_{cgk} \frac{\rho_{ck}}{r_k^2} \\ y_{cgk} \frac{\rho_{ck}}{r_k^2} & \frac{1}{r_c^2} - \frac{\rho_{ck}}{r_k^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F_{conk} \\ \Delta M_{conk} \end{bmatrix} \\ &= - \frac{\Delta \phi_k}{1 + \Delta \phi_k} \begin{bmatrix} \rho_{sk} - \rho_{ck} \frac{y_{cgk}^2}{r_k^2} & \rho_{ck} y_{cgk} \frac{r_c^2}{r_k^2} \\ \rho_{ck} \frac{y_{cgk}}{r_k^2} & 1 - \rho_{ck} \frac{r_c^2}{r_k^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{cgek} \\ \chi_{cek} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 합성단면의 환산단면적에 대한 구속단면의 단면적비  $\rho_{sk} = A_s/A_k = 1 - \rho_{ck}$ 이다. 콘크리트 단면의 중심에 대한  $y_c$ 에서 단계  $k$ 의 잔류응력은 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta f_{ck}(y_c) = E_c (\Delta \varepsilon_{cgek} + \Delta \chi_{cek} \cdot y_c) \quad (17)$$

## 4. 일반화 매개변수의 유도

합성단면의 단면특성이 주어지면 식 (14)로부터 합성단면의 변형과 식 (16)으로부터 콘크리트 단면의 잔류응력에 대한 탄성변형을 계산할 수 있다. 그러나 콘크리트 장기변형에 대한 합성단면의 일반화 반응의 분석을 위해서는 매개변수를 일반화할 필요가 있으며, 이를 위해 이 논문에서는 각 단계별로 일정한 크리프계수의 증가와 기준반응(basic responses)을 도입하여 식 (14)와 (16)을 보다 일반화하였다.

### 4.1 균등 크리프계수 단계별계산법

재령  $t_p$ 에 도입된 탄성변형의 임의 재령  $t_k$ 에서 크리프계수는 극한 크리프계수  $\phi_u(t_p)$ 와 지속기간에 대한 함수  $\tau_c(t - t_p)$ 로 구성된 크리프 함수  $\phi(t_k, t_p) = \phi_u \tau_c(\phi t_k)$ 로부터 계산된다. 그러나 임의의 지속기간  $t_n$ 에 대한 크리프계수  $\phi_n$ 이 주어진 경우에는 단계 수가  $N$ 인 단계별 계산법의 각 단계에서 일정한 크리프계수  $\Delta \phi_n = \phi_n/N$ 의 증가를 적용하면 재하재령과 하중의 지속기간에 관계없이 크리프 거동에 대한 반응이 계산될 수 있다. 일정한 크리프계수의 증가  $\Delta \phi_n$ 에 대해 각 단계의 유효탄성계수에 대한 합

성단면의 환산단면 특성은 모두 같게 되며, 다음의 값으로부터 단면특성이 계산된다.

$$\text{유효탄성계수} : E_{cn} = \frac{E_c}{1 + \Delta\phi_n}$$

$$\text{유효탄성계수비} : n_{sn} = E_{so}/E_{cn} = (1 + \Delta\phi_n)n_{so}$$

각 단계의 크리프계수 증가  $\Delta\phi_n$ 이 일정하면 식 (14)와 (16)은 모든 단계에서 합성단면의 환산 단면특성이 일정한 다음의 식을 적용할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_{gk} \\ \Delta\chi_k \end{bmatrix} = \Delta\phi_n \rho_{cn} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -y_{cgn}/r_n^2 & r_c^2/r_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{cgek} \\ \chi_{cek} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_{cgek} \\ \Delta\chi_{cek} \end{bmatrix} = -\frac{\Delta\phi_n}{1 + \Delta\phi_n} \begin{bmatrix} \rho_{sn} - \rho_{cn} \frac{y_{cgn}^2}{r_n^2} & \rho_{cn} y_{cgn} \frac{r_c^2}{r_n^2} \\ \rho_{cn} \frac{y_{cgn}}{r_n^2} & 1 - \rho_{cn} \frac{r_c^2}{r_n^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{cgek} \\ \chi_{cek} \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기서 아래첨자  $n$ 은  $\Delta\phi_n$ 에 대한 콘크리트의 유효탄성계수  $E_{cn}$ 에 대한 환산 단면특성을 나타낸다.

## 4.2 기준반응에 대한 일반화 변형

일반화 매개변수를 유도하기 위해 기준반응으로 콘크리트 단면에 도입된 초기 평균 탄성변형을  $\varepsilon_{cgo}$ 와 합성단면의 중심에서 콘크리트 단면의 중심간 거리  $y_{cgo}$ 에 대해 기준 평균변형을  $\varepsilon_{gb}$  및 곡률  $\chi_b$ 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\varepsilon_{gb} = \varepsilon_{cgo} = \frac{\chi_{co} y_{cgo}}{\bar{\chi}_{co}} \quad (20a)$$

$$\chi_b = \frac{\varepsilon_{gb}}{y_{cgo}} = \frac{\chi_{co}}{\bar{\chi}_{co}} \quad (20b)$$

여기서  $\chi_{co}$ 는 콘크리트 단면에 도입된 초기 탄성곡률 그리고  $\bar{\chi}_{co} = \chi_{co}/\chi_b = \chi_{co} y_{cgo}/\varepsilon_{cgo}$ 이며, 두 기준반응의 비는 다음과 같이 된다.

$$\frac{\varepsilon_{gb}}{\chi_b} = y_{cgo} \quad (20c)$$

콘크리트 단면의 초기 평균 변형률  $\varepsilon_{cgo} = 0$ 인 경우에는  $\varepsilon_{gb} = \chi_{co} y_{cgo}$ 와  $\chi_b = \chi_{co}$ 가 적용된다.

합성단면에 대한 식 (14) 또는 (18)의 변형을 기준반응

에 대한 비로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta\varepsilon_{gk}}{\varepsilon_{gb}} \\ \frac{\Delta\chi_k}{\chi_b} \end{bmatrix} = \Delta\phi_n \rho_{cn} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{y_{cgn} y_{cgo}}{r_n^2} & \frac{r_c^2}{r_n^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\varepsilon_{cgek}}{\varepsilon_{gb}} \\ \frac{\chi_{cek}}{\chi_b} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$= \Delta\phi_n \begin{bmatrix} \rho_{cn} & 0 \\ -\rho_{so} \lambda_{cn} \frac{\kappa_{cg}}{\kappa_{no}} & \frac{\kappa_{co}}{\kappa_{no}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\varepsilon_{cgek}}{\varepsilon_{gb}} \\ \frac{\chi_{cek}}{\chi_b} \end{bmatrix}$$

식 (21)에는 식 (5)의 (10) 단면이차모멘트 비율과 식 (8)의 콘크리트 단면 중심거리 비율이 적용되었다. 단계  $N$ 에서 합성단면의 일반화 변형  $\Delta\bar{\varepsilon}_g = \Delta\varepsilon_g/\varepsilon_{gb}$ 와  $\Delta\bar{\chi} = \Delta\chi/\chi_b$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta\bar{\varepsilon}_g \\ \Delta\bar{\chi} \end{bmatrix} = \sum_{j=0}^{N-1} \begin{bmatrix} \Delta\bar{\varepsilon}_{gj} \\ \Delta\bar{\chi}_j \end{bmatrix} \quad (22a)$$

여기서 기준반응에 대한 단계  $j$ 에서 합성단면의 변형의 변화는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta\bar{\varepsilon}_{gj} = \frac{\Delta\varepsilon_{gj}}{\varepsilon_{gb}} \quad \bar{\chi}_j = \frac{\Delta\chi_j}{\chi_b} \quad (22b)$$

단계  $k$ 에서 콘크리트 크리프 변형의 합성단면에 의한 구속으로 콘크리트 단면에 발생하는 탄성변형에 대한 식 (16) 또는 (19)의 기준반응에 대한 일반화 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta\varepsilon_{cgek}}{\varepsilon_{gb}} \\ \frac{\Delta\chi_{cek}}{\chi_b} \end{bmatrix} = -\frac{\Delta\phi_n}{1 + \Delta\phi_n} \begin{bmatrix} \rho_{sn} - \rho_{cn} \frac{y_{cgn}^2}{r_n^2} & \rho_{cn} \frac{y_{cgn}}{r_n^2} \frac{r_c^2}{r_n^2} \\ \rho_{cn} \frac{y_{cgn} y_{cgo}}{r_n^2} & 1 - \rho_{cn} \frac{r_c^2}{r_n^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\varepsilon_{cgek}}{\varepsilon_{gb}} \\ \frac{\chi_{cek}}{\chi_b} \end{bmatrix} \\ = -\frac{\Delta\phi_n}{1 + \Delta\phi_n} \begin{bmatrix} \rho_{sn} - \rho_{so} \lambda_{cn}^2 \frac{\kappa_{cg}}{\kappa_{no}} & \lambda_{cn} \frac{\kappa_{co}}{\kappa_{no}} \\ \rho_{so} \lambda_{cn} \frac{\kappa_{cg}}{\kappa_{no}} & 1 - \frac{\kappa_{co}}{\kappa_{no}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\varepsilon_{cgek}}{\varepsilon_{gb}} \\ \frac{\chi_{cek}}{\chi_b} \end{bmatrix} \quad (23)$$

단계  $k+1$ 에서 콘크리트 단면의 탄성변형은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\varepsilon_{cgek+1}}{\varepsilon_{gb}} \\ \frac{\chi_{cek+1}}{\chi_b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\varepsilon_{cgek}}{\varepsilon_{gb}} + \frac{\Delta\varepsilon_{cgek}}{\varepsilon_{gb}} \\ \frac{\chi_{cek}}{\chi_b} + \frac{\Delta\chi_{cek}}{\chi_b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\varepsilon_{cgo}}{\varepsilon_{gb}} \\ \frac{\chi_{co}}{\chi_b} \end{bmatrix} + \sum_{j=0}^k \begin{bmatrix} \frac{\Delta\varepsilon_{cgej}}{\varepsilon_{gb}} \\ \frac{\Delta\chi_{cej}}{\chi_b} \end{bmatrix} \quad (24)$$

여기서  $\varepsilon_{cgo}/\varepsilon_b = 1$  과  $\chi_{co}/\chi_b = \bar{\chi}_{co}$  이며,  $\varepsilon_{cgo} = 0$ 인 경우  $\varepsilon_{gb} = \chi_{co}y_{cgo}$  와  $\chi_{co}/\chi_b = 1$  이 적용된다. 단계  $N$ 에서 고려하는 크리프계수  $\phi_n$ 에 대한 콘크리트 단면의 일반화 탄성변형  $\Delta\bar{\varepsilon}_{cge} = \Delta\varepsilon_{cge}/\varepsilon_b$  와  $\Delta\bar{\chi}_{ce} = \Delta\chi_{ce}/\chi_b$  는 다음과 같이 계산되며,

$$\begin{bmatrix} \Delta\bar{\varepsilon}_{cge} \\ \Delta\bar{\chi}_{ce} \end{bmatrix} = \sum_{j=0}^{N-1} \begin{bmatrix} \Delta\bar{\varepsilon}_{cgej} \\ \Delta\bar{\chi}_{cej} \end{bmatrix} \quad (25a)$$

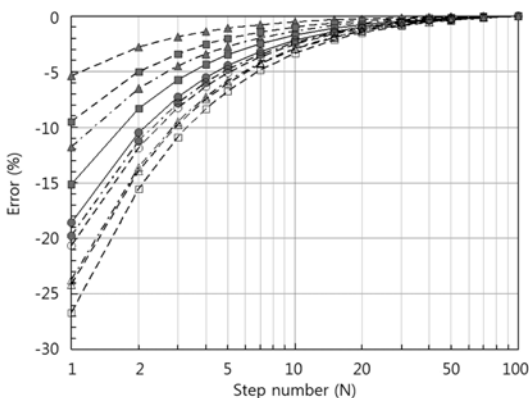
여기서 기준반응에 대한 단계  $j$ 에서 콘크리트 단면의 탄성변형의 변화는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta\bar{\varepsilon}_{cgej} = \frac{\Delta\varepsilon_{cgej}}{\varepsilon_{gb}} \quad \Delta\bar{\chi}_{cej} = \frac{\Delta\chi_{cej}}{\chi_b} \quad (25b)$$

식 (21)과 (23)으로부터 합성단면에서 콘크리트 장기변형에 대한 반응을 분석하기 위한 매개변수는 다음과 같이 5개로 최소화될 수 있다.

- 1)  $\rho_{co} = A_c/A_o$  : 합성단면의 환산 단면적에 대한 콘크리트 단면의 단면적 비율
- 2)  $\kappa_{co} = I_c/I_o$  : 합성단면의 환단 단면이차모멘트에 대한 콘크리트 단면의 단면이차모멘트 비율
- 3)  $\kappa_{so} = I_s/I_o$  : 합성단면의 초기 환단 단면이차모멘트에 대한 구속단면의 단면이차모멘트 비율
- 4)  $\phi_n$  : 크리프계수
- 5)  $\bar{\chi}_{co} = \chi_{co}y_{cgo}/\varepsilon_{cgo}$  : 콘크리트 단면의 평균 탄성변형률에 대한 탄성곡률에 의한 합성단면의 중심에서 변형률의 비율

이 일반화 매개변수가 주어지면 구속단면의 단면적 비율  $\rho_{so} = 1 - \rho_{co}$ , 단면의 편심에 대한 단면이차모멘트 비율  $\kappa_{cg} = 1 - \kappa_{co} - \kappa_{so}$ , 단계별 크리프계수  $\Delta\phi_n = \phi_n/N$ , 그리고 식 (7c)와 (8a) 및 (10)으로부터  $\rho_{sn}$  과  $\rho_{cn} = 1 - \rho_{sn}$  및  $\lambda_{cn}$ 과  $\kappa_{no}$ 가 계산된다.



(a) Elastic deformation of concrete section

## 5. 일반화 매개변수의 민감도 분석

식 (21)과 (23)에 의하면 합성단면에서 콘크리트의 장기변형의 효과는 콘크리트에 도입된 평균 탄성변형률  $\varepsilon_{cgo}$  와 탄성곡률  $\chi_{co}$ 의 비중에 따라 직접적인 영향을 받는다. 이 연구에서는 콘크리트 단면에 축방향 탄성변형률과 탄성곡률 각각에 대해 독립적으로 분석하였다. 합성단면의 단면특성에 대한 일반화 매개변수는  $0 < \rho_{co} < 1$ 와  $0 < \kappa_{co} < \rho_{co}$  및  $0 < \kappa_{so} < \rho_{so}$ 의 범위로 제한된다.

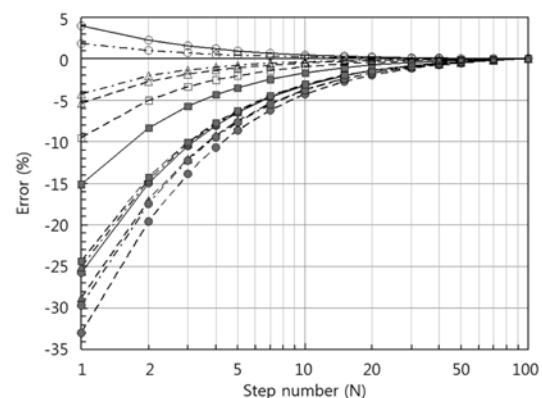
### 5.1 축방향 탄성변형률에 대한 민감도

이 소절에서는 초기 콘크리트 단면에 축방향 탄성변형률만 작용하는 경우 기준반응  $\varepsilon_{gb} = \varepsilon_{cgo}$ 과  $\chi_b = \varepsilon_{cgo}/y_{cgo}$ 에 대한 식 (22a)와 (25a)의 합성단면 변형과 콘크리트 탄성변형에 대한 일반화 매개변수의 민감도가 분석되었다. 민감도 분석의 모든 그림에는 초기 합성단면의 이차모멘트에 대한 콘크리트와 구속단면의 단면이차모멘트 비율에 따라 Table 1의 선형과 기호가 적용된다.

식 (22a)와 (25a)의 일반화 반응에 대해 단계별계산법의 단계 수 101에 대한 단계 수 100의 최대 오차는 0.005%이며, Fig. 1은  $\rho_{co} = \rho_{so} = 0.5$ 와  $\chi_{co} = 0$  및  $\phi_n = 1$ 인 경우 단계 수 100에 대한 각 단계 수에서 일반화 반응의 오차이다. 단계 수 1에서 최대 오차는 강합성거더와 유사한  $\kappa_{co} \approx 0$ 과  $\kappa_{so} \approx \rho_{so}$ 인 단면의 콘크리트 탄성곡률  $\Delta\chi_{ce}$  그리고 PCT 거더와 유사한  $\kappa_{co} \approx \kappa_{so} \approx 0$  또는  $\kappa_{cg} \approx 1$ 인 단면의 합성단면 평균 변형률  $\Delta\varepsilon_g$ 에서 각각 -27%와 -33%이다. Fig. 1 (a)의 콘크리트 탄성곡률  $\Delta\chi_{ce}$ (흰 기호)는 평균 탄성변형률  $\Delta\varepsilon_{cge}$ (검은 기호)보다 상대적으로

Table 1 Line types and symbols of  $\kappa_{co}$  and  $\kappa_{so}$

$\kappa_{co}$		$\kappa_{so}$		
Value	Line type	Value	$\Delta\bar{\varepsilon}_{cge}, \Delta\bar{\varepsilon}_g$	$\Delta\bar{\chi}_{ce}, \Delta\bar{\chi}$
0	Dashed	0	●	○
$\rho_{co}/2$	Center	$\rho_{so}/2$	▲	△
$\rho_{co}$	Solid	$\rho_{so}$	■	□



(b) Deformations of composite section

Fig. 1 Sensitivities of step numbers ( $\rho_{co} = 0.5$ ,  $\chi_{co} = 0$ ,  $\phi_n = 1.0$ )

로 큰 오차를 보인 반면에, Fig. 1(b)의 합성단면 곡률  $\Delta\chi$ (흰 기호)는 평균변형률  $\Delta\varepsilon_g$ (검은 기호)보다 오히려 작은 오차를 보였다.

Ghali 등<sup>11)</sup>에 의한 단계별계산법에서는 6~10의 단계 수에서 상당히 정확한 결과를 보여주는 것으로 보고되었으나, Fig. 1에 의하면 단계 수 10에서 강합성단면의 탄성곡률과 PCT 거더의 합성단면 평균 변형률의 계산오차는 각각 -3.3%과 -4.3%이었다. 1% 이내의 오차에 대한 반응을 계산하기 위해서는 콘크리트 탄성변형과 합성단면 변형에 대해 각각 30과 40 이상의 단계 수가 필요하며, 이 연구에서는 계산시간이 0.15msec인 단계 수 100이 적용되었다.

Figs. 2와 3은 단계 수 100과 초기 탄성곡률  $\chi_{co}=0$  및 고려하는 기간의 크리프계수  $\phi_n=1.0$ 에 대한 합성단면의 단면특성에 대한 일반화 반응이다. Fig. 2에 의하면 초기 콘크리트 단면의 평균 탄성변형률  $\varepsilon_{cgo}$ 에 대한 식 (25)의 콘크리트 단면 탄성변형과 식 (22)의 합성단면 변형은 단면특성 중에서 콘크리트 단면의 단면적 비율  $\rho_{co}$ 에 가장 큰 영향을 받으며, 콘크리트 단면의 단면이차모멘트 비율  $\kappa_{co}$ 보다는 구속단면의  $\kappa_{so}$ 에 보다 민감하다.

콘크리트 단면이 극단적으로 작은 경우( $\rho_{co} \approx 0$ ) 콘크리트 단면의  $\phi_n=1.0$ 에 대한 최대  $\Delta\varepsilon_{cge}$ 는  $\kappa_{so}=\rho_{so}$ 에서 그

리고  $\Delta\chi_{ce}$ 는  $\kappa_{so}=0$ 에서 각각  $\varepsilon_{cgo}$ 와  $\varepsilon_{cgo}/y_{cgo}$ 의 63%이었다. 합성단면의  $\Delta\varepsilon_g$ 는  $\rho_{co}$ 에 근사적으로 비례하는 반면에,  $\Delta\chi$ 는  $\rho_{co}$ 가 증가할수록 감소한다.  $\rho_{co} \approx 0$ 과 개별 단면의 단면이차모멘트를 무시되는  $\kappa_{cg}=1$ 에서 최대  $\Delta\chi = \varepsilon_{cgo}/y_{cgo}$ 가 발생하며,  $\kappa_{so}=0.5\rho_{so}(\Delta)$ 에서 39%이다.

Fig. 3은  $\rho_{co}=0.5$ 에 대한 보다 구체적인 단면이차모멘트 비율  $\kappa_{co}$ 와  $\kappa_{so}$ 의 민감도를 보여준다. 콘크리트 단면의 탄성변형은  $\kappa_{co}$ 에 5% 이내의 오차로 선형관계를 보이며,  $\kappa_{co}$ 와  $\kappa_{so}$ 의 증가에 대해 잔류응력을 발생시키는  $\Delta\varepsilon_{cge}$ 는 증가하는 반면에  $\Delta\chi_{ce}$ 와 합성단면의  $\Delta\chi$ 는 감소하였다. 모든  $\kappa_{co}$ 와  $\kappa_{so}$ 에 대해 합성단면의  $\Delta\varepsilon_g$ 는 0.4~0.5 $\varepsilon_{cgo}$ 의 범위에서 존재하며,  $\kappa_{co}$ 와  $\kappa_{so}$ 의 영향은 미미하였다.

Fig. 4는 고려하는 기간의 크리프계수  $\phi_n$ 에 대한 민감도 분석으로 각 반응은 Fig. 3의  $\rho_{co}=0.5$ 와  $\phi_n=1$ 에서 반응에 대한 비율이며, 각 일반화 반응의 정의는 다음과 같다.

$$\Delta\bar{\varepsilon}_{cge}(\phi) = \frac{\Delta\varepsilon_{cge}(\phi = \phi_n)}{\Delta\varepsilon_{cge}(\phi = 1)} \quad 26(a)$$

$$\Delta\bar{\chi}_{ce}(\phi) = \frac{\Delta\chi_{ce}(\phi = \phi_n)}{\Delta\chi_{ce}(\phi = 1)} \quad 26(b)$$

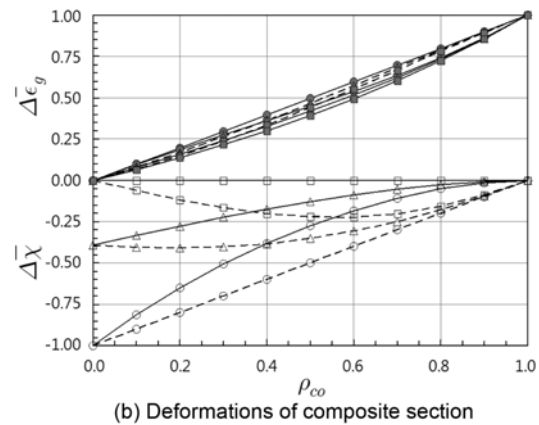
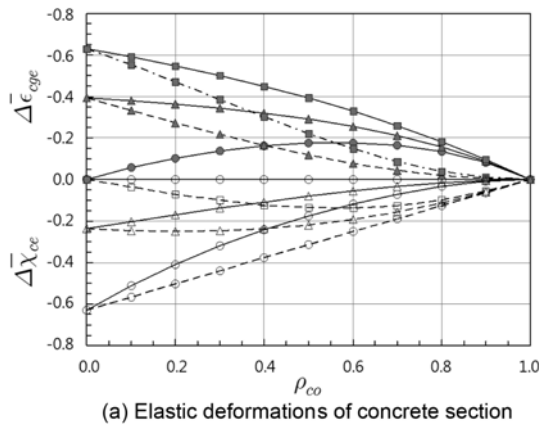


Fig. 2 Sensitivities of concrete section area ratio ( $\chi_{co}=0, \phi_n=1.0$ )

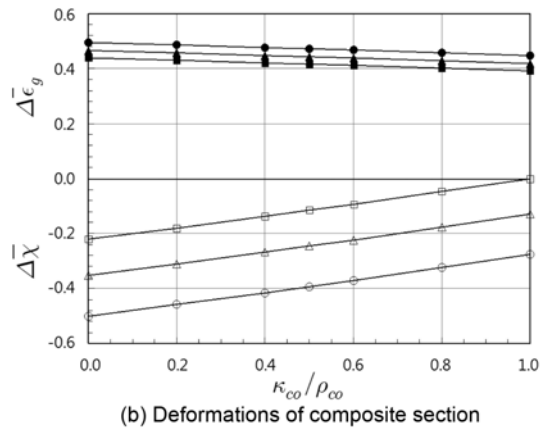
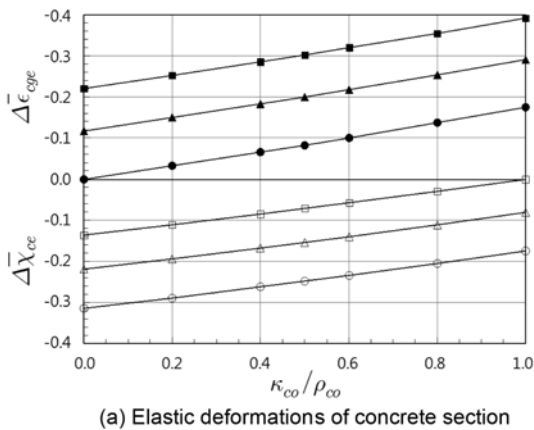


Fig. 3 Sensitivities of second moment ratio of section area ( $\rho_{co}=0.5, \chi_{co}=0, \phi_n=1.0$ )

$$\Delta \bar{\varepsilon}_g(\phi) = \frac{\Delta \varepsilon_g(\phi = \phi_n)}{\Delta \varepsilon_g(\phi = 1)} \quad (26(c))$$

$$\Delta \bar{\chi}(\phi) = \frac{\Delta \chi(\phi = \phi_n)}{\Delta \chi(\phi = 1)} \quad (26(d))$$

크리프계수에 대해 콘크리트 단면의  $\Delta \varepsilon_{cge}$ 와 합성단면의  $\Delta \varepsilon_g$ 는 각각  $\kappa_{co}$ 와  $\kappa_{so}$ 가 감소할수록 큰 민감도를 보이며, 최대 민감도는  $\kappa_{co}=0$ 와  $\kappa_{so}=0$ 인  $\kappa_{cg}=1$ 에서 크리프계수에 선형으로 비례한다. 콘크리트 단면의  $\Delta \chi_{ce}$ 와 합성단면의  $\Delta \chi$ 는  $\kappa_{so}$ 가 감소할수록 큰 민감도를 보였다. 콘크리트 단면의  $\Delta \varepsilon_{cge}$ 에 대한 최소 민감도와  $\Delta \chi_{ce}$ 에 대한 최대 민감도는 같은 조건인  $\kappa_{co}=\rho_{co}$ 와  $\kappa_{so}=0$ 에서 발생되었다. 합성단면의 변형  $\Delta \varepsilon_g$ 와  $\Delta \chi$ 는  $\kappa_{cg}=0$ 에서 최소 민감도가 계산되었으며,  $\Delta \chi$ 에 대한 민감도가  $\Delta \varepsilon_g$ 에 대한 값보다 다소 큰 값이었다.

### 5.2 탄성곡률에 대한 민감도

초기 콘크리트 단면에 도입된 탄성곡률에 대한 콘크리트 장기변형의 민감도는 축방향 변형률만 적용된 경우와 다른 결과를 보여준다. 콘크리트 단면에 초기 탄성변형률  $\varepsilon_{cgo}$ 만 작용하면 콘크리트 단면과 합성단면의 반응은

$\rho_{co}$ 와  $\kappa_{so}$ 에 보다 민감한 반면에, 콘크리트 단면의 초기 탄성곡률  $\chi_{co}$ 에 대해서는 최대 값이  $\rho_{co}$ 인  $\kappa_{co}$ 에 보다 민감한 반응을 보였다.

Fig. 5에서 단계 수에 따른 콘크리트 단면의 축방향 탄성변형의 오차가 탄성곡률의 오차보다 큰 값을 보였으며, 단계 수 1과  $\kappa_{cg} \approx 0$ 에서 최대 오차는 -26%로  $\varepsilon_{cgo}$ 만 작용하는 경우와 유사하였다. 그러나 합성단면의 평균 변형률  $\Delta \varepsilon_g$ 에 대한 오차는 단계 수 1에서 0으로 -100%의 오차를 보였으며, 단계가 증가할수록 누적값의 증가로 오차는 감소하나 곡률  $\Delta \chi$ 에 대한 값보다 큰 값을 보였다.

초기 콘크리트 단면의 탄성곡률  $\chi_{co}$ 에 대한 단면특성의 민감도는 Figs. 6 및 7과 같다. Fig. 6에서 콘크리트 단면의 평균 탄성변형률  $\Delta \varepsilon_{cge} = \Delta \varepsilon_{cge}/\chi_{co} \nu_{cgo}$ 와 합성단면의 평균변형률  $\Delta \bar{\varepsilon}_g = \Delta \varepsilon_g/\chi_{co} \nu_{cgo}$  및 곡률  $\Delta \bar{\chi} = \Delta \chi/\chi_{co}$ 는  $\kappa_{co}$ 의 증가에 같이 증가하였다. 그러나 콘크리트 단면의 탄성곡률  $\Delta \bar{\chi}_{co} = \Delta \chi_{ce}/\chi_{co}$ 는 상대적으로 작은 구속단면의 축방향 강성( $\rho_{co} = 1 - \rho_{co}$ ) 때문에 감소하는 경향을 보였다. Fig. 7에서  $\rho_{co}=0.5$ 와  $\kappa_{co}$ 에 대한 일반화 반응은 근사적으로 선형의 관계를 보이며,  $\kappa_{so}$ 에 대한 영향은  $\Delta \bar{\chi}$ 에서 최대 6%의 작은 민감도를 보였다.

콘크리트 단면의 초기 탄성곡률에 대해 식 (26)에서 정의된 일반화 반응의 크리프계수에 대한 민감도는 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 콘크리트 단면의  $\Delta \varepsilon_{cge}$ 와 합성단면의

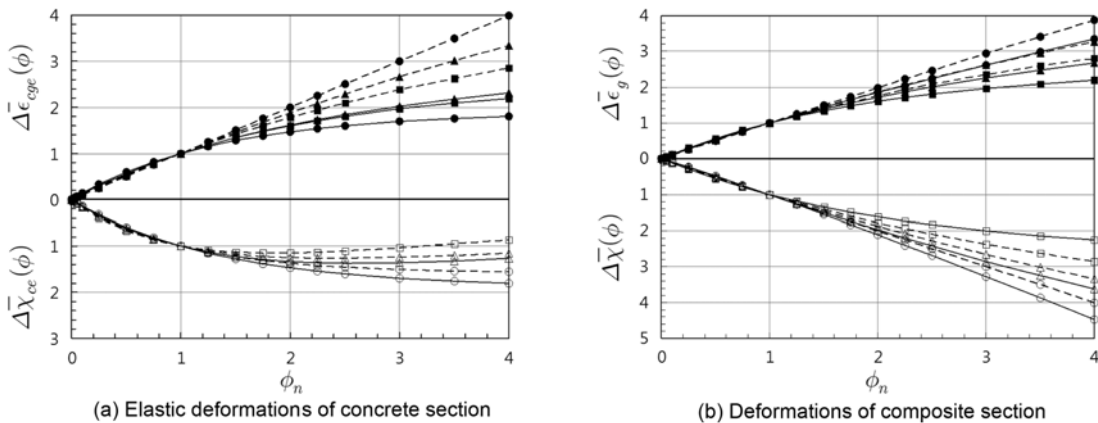


Fig. 4 Sensitivities of creep coefficients ( $\rho_{co}=0.5$ ,  $\chi_{co}=0$ )

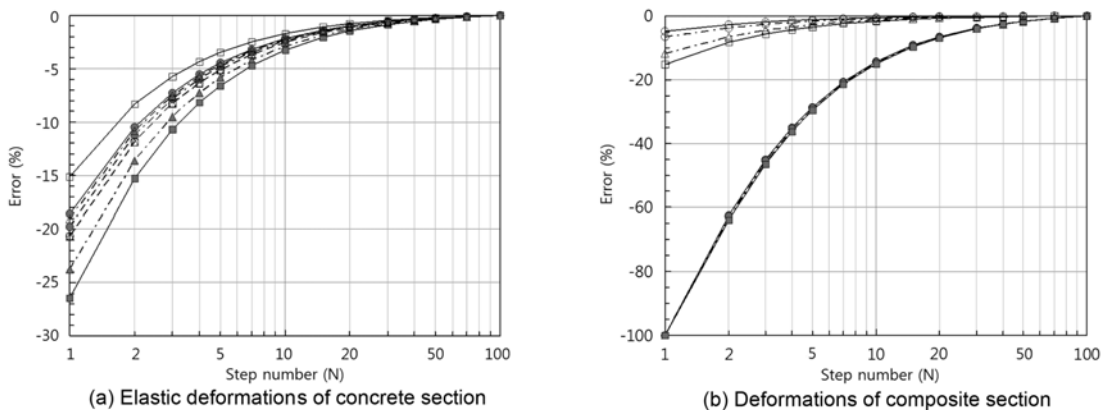


Fig. 5 Sensitivities of step numbers ( $\rho_{co}=0.5$ ,  $\varepsilon_{cgo}=0$ ,  $\phi_n=1.0$ )



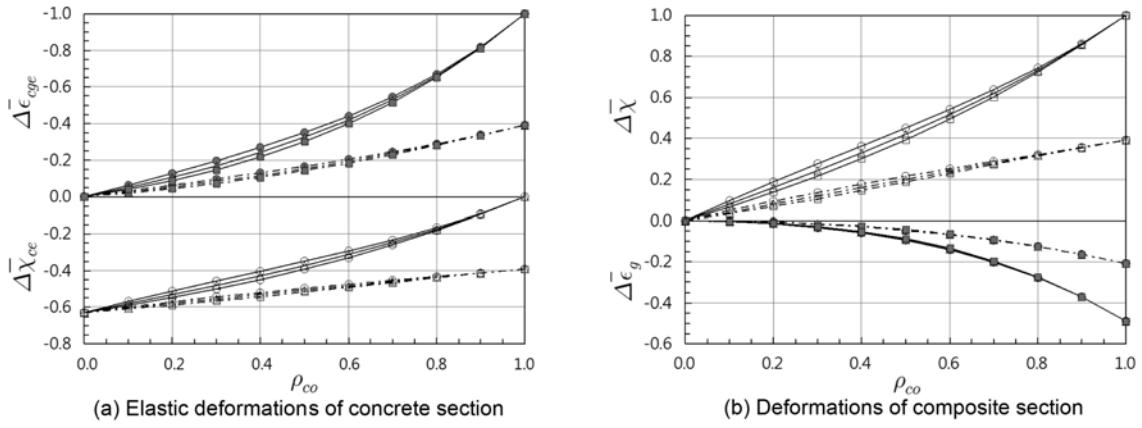


Fig. 6 Sensitivities of concrete section area ratio ( $\varepsilon_{cgo} = 0$ ,  $\phi_n = 1.0$ )

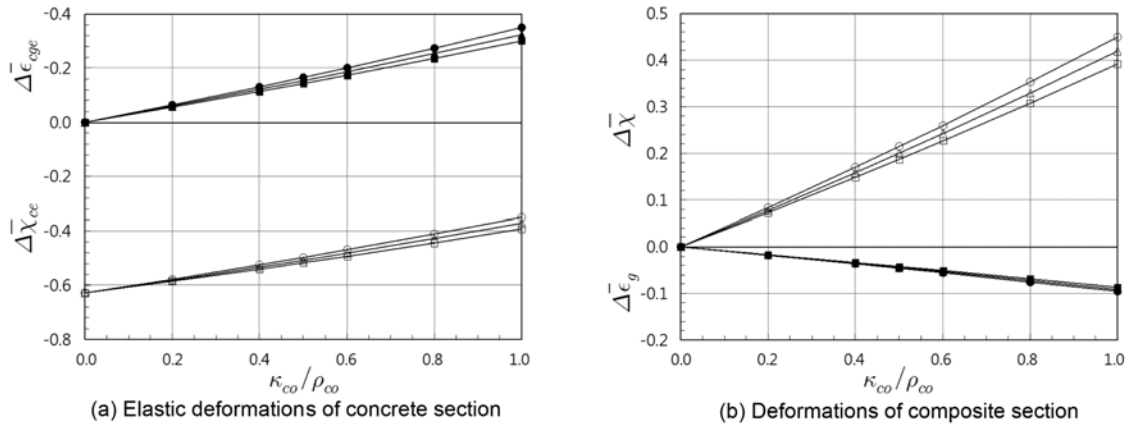


Fig. 7 Sensitivities of second moment ratio of section area ( $\rho_{co} = 0.5$ ,  $\varepsilon_{cgo} = 0$ ,  $\phi_n = 1.0$ )

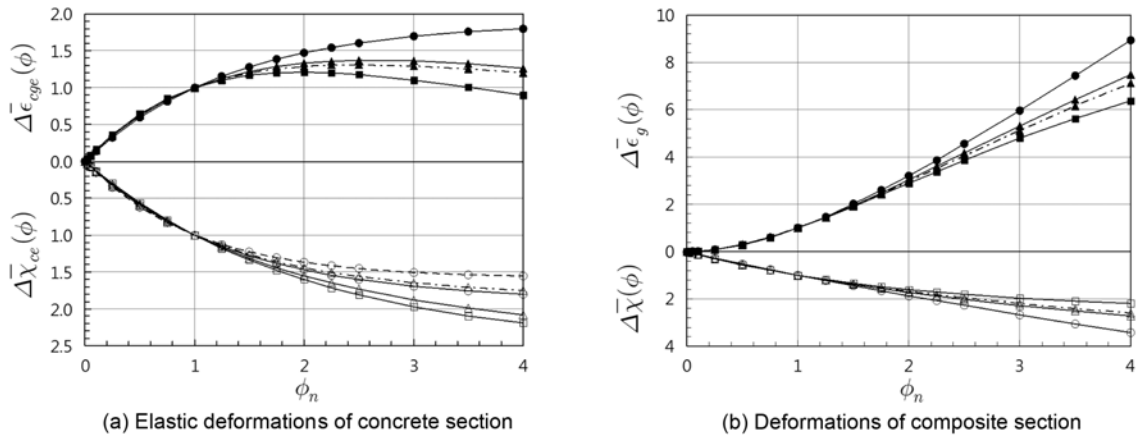


Fig. 8 Sensitivities of creep coefficients ( $\rho_{co} = 0.5$ ,  $\varepsilon_{cgo} = 0$ )

$\Delta\varepsilon_g$ 와  $\Delta\chi$ 는  $\kappa_{so}$ 가 작을수록 크리프계수에 큰 민감도를 보인다. 반면에 콘크리트 단면의  $\Delta\chi_{ce}$ 는  $\kappa_{co}$ 와  $\kappa_{so}$ 가 증가할수록 또는  $\kappa_g$ 가 감소할수록 민감도가 증가하였다. Fig. 8의  $\phi_n=4$ 에서  $\chi_{co}$ 에 대한 콘크리트 단면의  $\Delta\varepsilon_{cge}$ 는 Fig. 4의  $\varepsilon_{cgo}$ 에 대한 값보다 약 반정도 줄어든 반면에 합성단면의  $\Delta\varepsilon_g$ 은 약 2배 증가하였다. 콘크리트 단면의  $\Delta\chi_{ce}$ 와 합성단면의  $\Delta\chi$ 에 대한 크리프계수의 민감도는  $\varepsilon_{cgo}$ 에 대한 값과 유사하였다.

## 6. 결 론

이 논문에서는 합성단면을 구성하는 콘크리트 단면의 크리프에 의한 장기 거동을 해석하는 단계별계산법의 효율적인 사용이 가능하도록 일반화 매개변수가 적용된 일반화 반응식을 다음의 과정으로 유도하였다.

- 1) 합성단면의 변형과 콘크리트 단면에 잔류응력을 발생시키는 탄성변형에 대한 기존의 식으로부터 유효 탄성계수가 적용된 단면특성의 단계별 반응을 계산

하기 위한 식을 재구성하였다.

- 2) 일정한 크리프계수의 증가  $\Delta\phi_n = \phi_n/N$ 에 대한 단계별계산법의 적용으로 식을 단순화하고, 단계별 계산의 오차를 일정하게 유지할 수 있도록 하였다.
- 3) 콘크리트 단면에 도입된 초기 평균 탄성변형률  $\epsilon_{cgo}$  또는 탄성곡률  $\chi_{co}$ 와 합성단면과 콘크리트 단면의 중심간 거리  $y_{cgo}$ 의 기준 반응에 대한 단계별계산법의 일반화 공식을 유도하였으며, 매개변수를 다음과 같이 최소화 하였다.

단면특성 :  $\rho_{co}$ (콘크리트 단면적 비율)

$\kappa_{co}$ (콘크리트 단면이차모멘트 비율)

$\kappa_{so}$ (구속단면 단면이차모멘트 비율)

재료특성 :  $\phi_n$ (고려하는 기간의 크리프계수)

하중특성 :  $\bar{\chi}_{co} = \chi_{co}y_{cgo}/\epsilon_{cgo}$ (변형률과 곡률의 비율)

이의 일반화 매개변수의 민감도를 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 계산오차 1% 이내의 일반화 반응에 대한 단계 수는 30~40으로 기존의 권장 단계 수 6~10보다 많은 단계가 요구된다.
- 2) 콘크리트 단면의 초기 평균 탄성 변형률  $\Delta\epsilon_{cgo}$ 에 대한 일반화 반응은  $\rho_{co}$ 에 가장 민감하며,  $\kappa_{co}$ 보다는  $\kappa_{so}$ 에 보다 민감하다.  $\phi_n = 1.0$ 에서 잔류응력을 발생시키는 최대 탄성변형  $\Delta\epsilon_{cge}$ 와  $\Delta\chi_{ce}$ 는 콘크리트 단면적을 무시할 수 있는  $\rho_{co} \approx 0$ 에서 발생되며, 각각  $\kappa_{so} = \rho_{so}$ 와  $\kappa_{so} = 0$ 에서  $\epsilon_{cgo}$ 와  $\epsilon_{cgo}/y_{cgo}$ 의 63%였다. 합성단면의  $\Delta\epsilon_g$ 는  $\rho_{co}$ 에 근사적으로 비례하나,  $\Delta\chi$ 는  $\rho_{co}$ 가 증가할수록 감소한다.
- 3) 콘크리트 단면의 초기 탄성곡률  $\chi_{co}$ 에 대한 일반화 반응은 최대 값이  $\rho_{co}$ 로 제한되는  $\kappa_{co}$ 에 가장 민감하다. 콘크리트 단면의  $\Delta\epsilon_{cge}$ 와 합성단면의  $\Delta\epsilon_g$  및  $\Delta\chi$ 는  $\rho_{co}$ 의 증가에 같이 증가하나, 콘크리트 단면의 탄성곡률  $\Delta\chi_{ce}$ 는 구속단면의 강성 감소로 감소하였다.  $\kappa_{co}$ 에 대한 일반화 반응은 근사적으로 선형의 관계를 보이며,  $\kappa_{so}$ 에 대한 민감도는  $\Delta\bar{\chi}$ 에서 최대 6%이었다.
- 4) 콘크리트 단면의  $\Delta\chi_{ce}$ 와 합성단면의  $\Delta\chi$ 에 대한 크리프계수의 민감도는  $\epsilon_{cgo}$ 와  $\chi_{co}$ 에서 유사하였으나,

크리프계수  $\phi_n = 4$ 에서  $\chi_{co}$ 에 대한 콘크리트 단면의  $\Delta\epsilon_{cge}$ 는  $\epsilon_{cgo}$ 에 대한 값보다 약 반 정도 줄어든 반면에 합성단면의  $\Delta\epsilon_g$ 은 약 2배 증가하였다.

## 감사의 글

이 논문은 인하대학교 연구지원사업에 의해 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 오현철, 마향옥, 김인규, 김영진, 김성운, “프리캐스트 바닥판을 이용한 장기간 PSC거더 교량의 시공,” 콘크리트학회지, 20권, 2호, 2008, pp. 50~53.
2. 김씨동, 고상윤, “곡선교차로상의 PCT 거더교 설계사례,” 콘크리트학회지, 19권, 4호, 2007, pp. 52~58.
3. 박용민, “현대화된 교량! PSSC 합성거더가 그 꿈을 이룬다,” 한국강구조학회지, 20권, 3호, 2008, pp. 33~37.
4. 김충언, 안혜영, 신동기, “Precom거더(강재거더의 역할을 중심으로),” 한국강구조학회지, 20권, 3호, 2008, pp. 24~27.
5. 임성순, 손석호, 서기홍, “6경간 SCP 거더교의 연속화에 따른 중간 지점부 구조거동에 관한 연구,” 한국구조물진단학회논문집, 8권, 4호, 2004, pp. 135~143.
6. 오병환, 정효정, 진남희, “편심을 가진 연속강성으로 보강된 프리플렉스 거더교량의 해석 및 실험 연구,” 한국구조물진단학회 학술발표논문집, 7권, 1호, 2003, pp. 289~294.
7. 김선주, “MSP 합성거더의 기술적 특징,” 한국강구조학회지, 20권, 3호, 2008, pp. 28~32.
8. Ghall, A., Neville, A. M., and Jha, P. C., “Effect of Elastic and Creep Recoveries of Concrete on Loss of Prestress,” *ACI Journal*, Vol. 64, 1967, pp. 802~810.
9. 연정흠, 주낙진, “콘크리트 장기변형의 구속계수와 선압축력의 손실률,” 콘크리트학회논문집, 14권, 4호, 2002, pp. 521~529.
10. 연정흠, 김도균, “프리스트레스드 콘크리트 합성단면에 도입되는 추가 긴장력 설계와 저항모멘트 평가,” 콘크리트학회논문집, 16권, 3호, 2004, pp. 335~344.
11. Gilbert, G. I., *Time Effects in Concrete Structures*, Elsevier Science Publishers, Netherlands, 1988, 321 pp.

**요약** 합성단면을 구성하는 콘크리트 단면에 크리프에 의한 장기변형이 발생되면 합성단면에는 추가의 변형이 발생되며 콘크리트 단면에는 장기변형의 일부구속으로 잔류응력이 발생한다. 이 논문에서는 복잡한 합성단면에서 콘크리트 단면의 장기변형에 대한 반응을 평가하는 기존의 단계별계산법을 보다 효율적으로 적용할 수 있도록 일반화 하였다. 장기변형이 발생하는 콘크리트 단면과 이 변형의 일부를 구속하는 구속단면의 단면특성과 재료특성으로부터 초기 합성단면의 환산단면특성이 유도되고, 각 단계의 크리프계수가 고려된 유효탄성계수가 적용된 환산 단면특성이 유도되었다. 합성단면의 일반화 반응에 대한 5개의 일반화 매개변수로 구성된 단계별계산법의 식이 유도되었다. 각 단계별 계산식에는 크리프계수의 증가가 일정하도록 하여 식의 단순화와 계산시간의 감축 및 균등한 단계별 계산오차가 가능한 균등크리프 단계별계산법을 제안하였다. 콘크리트 단면의 초기 축방향 탄성 변형률에 대한 일반화 반응은 콘크리트 단면적의 비율에 가장 민감하고, 콘크리트 단면의 단면이차모멘트 비율보다는 구속단면의 단면이차모멘트 비율에 보다 민감하였다. 반면에 콘크리트 단면의 초기 탄성곡률에 대해서는 콘크리트 단면의 단면이차모멘트 비율에 가장 민감하였다.

**핵심용어** : 합성단면, 장기변형, 단계별계산법, 일반화 매개변수, 매개변수 민감도