

프리스트레스트 콘크리트 휨 부재의 민감도 해석

Sensitivity Analysis for Flexural Behaviors of PSC Members

이 존 자* 이 봉 구* 김 민 주* 이 용 학**

Lee, Jon-Ja Lee, Bong-Goo Kim, Min-Joo Lee, Yong-Hak

Abstract

A general procedure to evaluate the sensitivity of design variables to stresses and strains in PSC flexural members is proposed. To accomplish the purpose of this study, long-term losses including creep, shrinkage, and PS steel relaxation are formulated based on the equilibrium states of the deformed sectional geometry. Thereby, the formulation follows the basic steps which consider the fundamental formulas adopted by CEB-FIP, ACI, and KCI rather than the age adjusted effective modulus concept. Twenty-one design variable including the material and geometrical properties of concrete, nonprestressing steel and prestressing steel, and the geometry of the cross section are considered in the sensitivity analysis. The gradients of the stresses and strains needed for the sensitivity assessment are calculated in a closed format. The derived formulation is applied to the T-type section PSC beam with prestressing and nonprestressing steels for the sensitivity analysis. The analytically calculated sensitivity results are compared with those numerically calculated to ensure the validity of the proposed procedure.

keywords : Prestressed concrete, Sensitivity analysis, Time-dependent behaviors, Stress and strain

1. 서 론

구조물의 거동성질은 설계과정을 통해 결정하는 설계변수의 물성값에 따라 지배된다. 시간 종속적 거동

을 하는 PSC 구조물은 시간 독립적 거동을 하는 일반 구조물에 비하여 설계변수 간의 상호작용 메커니즘이 더욱 복잡하게 되므로 설계변수의 설계값을 합리적으로 결정한다는 것은 극히 제한적 범위내에서 가능하게 된다.

* 건국대학교 대학원 토목공학과

** 정회원, 건국대학교 토목공학과

E-mail : leeyo@konkuk.ac.kr 02-450-3458

• 본 논문에 대한 토의를 2002년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2002년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

이러한 경우에 효율적 설계를 위한 설계변수 값은 각 설계변수가 설계기준에 대해 갖는 영향정도에 근거하여 결정할 수 있으며, 이때 설계변수의 영향성 평가는 설계기준에 대한 각 변수의 그래디언트를 계산하는 민감도 해석을 필요로 한다.

본 논문은 설계기준을 단면응력과 변형률로 정의하여 콘크리트와 철근 및 PS 강선의 재료상수, 시간중속적 손실원인 구성인자, 단면의 기하학적 형상, 작용하중에 관련한 21개의 설계변수가 설계기준에 끼치는 영향정도를 분석하기 위해 민감도 해석을 수행한다. 이러한 민감도 해석을 위해 요구되는 단면변형률 및 단면응력의 계산 관계식은 콘크리트 크리프, 건조수축 및 PS 강선 릴랙세이션의 장기손실과 하중작용에 의해 발생하는 변형률을 두 변수인 일정변형률과 곡률로 분리하고, 단면상에 힘의 평형 및 모멘트 평형의 두 평형조건을 적용함으로써 유도한다. Ghali(1986)가 제안한 방법에서 장기손실을 구성하는 각 구성인자가 변형률 및 응력에 미치는 영향성 분석을 목적으로 Bazant (1972)가 제안한 재령 중속적 보정 탄성계수를 이용하지 않고 장기손실과 하중작용으로 인한 각 변형단면의 기하학적 관계로부터 힘 및 모멘트 평형조건식을 유도한다.

그래디언트 계산을 효율적으로 수행하기 위해 변형률 및 응력을 21개 설계변수의 함수인 functional 형태로 표현하고, 연쇄미분법을 적용하는 과정을 통해 21개 설계변수의 변형률 및 응력에 대한 그래디언트를 힘 및 모멘트 평형 관계식으로부터 확정적 형태로 유도한다. 여기서 제안되는 그래디언트 계산을 위한 확정적 관계식은 단면형상, 철근 배치단의 수, PS 강선 배치단의 수에 제약을 받지 않는 일반적 형태를 취한다.

끝으로, 본 논문을 통해 제안하는 그래디언트 계산 방법을 철근과 PS 강선이 배치된 T형 단면의 민감도 해석에 적용하여 각 설계변수가 설계기준에 끼치는 영향성을 평가하고 효율적인 설계를 위한 설계변수 선정 방법을 제시한다. 해석적 방법으로 계산한 그래디언트 값을 설계변수에 미소변동을 주어 그래디언트를 계산하는 수치해석적 방법 결과와 비교함으로써 해석적 방법의 정확성을 검증한다.

2. 시간중속적 선형해석

콘크리트와 철근 및 PS 강재의 단면상수와 재료물성값, PS 강재 긴장력, ACI, CEB-FIP, KCI의 시방서가 제시하는 각 손실인자, 작용하중 등의 설계변수가 총 변형률 및 단면응력에 대하여 갖는 민감도 계산을 목적으로 Bazant (1972)가 제안한 재령중속적 보정 탄성계수 대신에 각 변형률 발생원인에 대한 힘 및 모멘트 평형방정식을 유도한 후 중첩의 원리를 적용하여 총 변형률을 계산한다 (이존자, 2001).

콘크리트 크리프, 건조수축 및 PS 강선 릴랙세이션의 장기손실 원인과 작용하중에 의해 PSC 임의 단면상에 발생하는 변형률의 계산을 위해 각 변형률 원인에 대한 변형단면의 기하학적 변형률 관계를 결정하고, 총 변형률을 일정변형률 ϵ_o 과 곡률 Φ 로 분리하여 힘 및 모멘트 평형조건으로부터 두 변수 ϵ_o 와 Φ 를 계산하는 평형조건식을 유도하면 다음과 같다.

• 콘크리트 크리프

힘의 평형조건 ;

$$[E_c A_c + \sum A_{si} E_s + \sum A_{pi} E_p] \epsilon_{st}^o + [\sum A_{si} E_s y_{si} + \sum A_{pi} E_p y_{pi}] \Phi_{st} = E_c A_c (C_t(t) C_u) \epsilon_k^o \quad (1)$$

모멘트 평형조건 ;

$$[\sum A_{si} E_s y_{si} + \sum A_{pi} E_p y_{pi}] \epsilon_{st}^o + [\sum A_{si} E_s y_{si}^2 + \sum A_{pi} E_p y_{pi}^2 + E_c I] \Phi_{st} = EI \Phi_{cr}^k \quad (2)$$

• 콘크리트 건조수축

힘의 평형조건 ;

$$[E_c A_c + \sum A_{si} E_s + \sum A_{pi} E_p] \epsilon_{sh}^o + [\sum A_{si} E_s y_{si} + \sum A_{pi} E_p y_{pi}] \Phi_{sh} = E_c A_c \epsilon_{sh} \quad (3)$$

모멘트 평형조건 ;

$$\begin{aligned} & [\Sigma A_{si} E_s y_{si} + \Sigma A_{pi} E_p y_{pi}] \epsilon_{sh}^o \\ & + [\Sigma A_{si} E_s y_{si}^2 + \Sigma A_{pi} E_p y_{pi}^2 + E_c I] \Phi_{sh} \quad (4) \\ & = 0 \end{aligned}$$

• PS 강제 Relaxation

힘의 평형조건 ;

$$\begin{aligned} & [E_c A_c + \Sigma A_{si} E_s + \Sigma A_{pi} E_p] \epsilon_{re}^o \\ & + [\Sigma A_{si} E_s y_{si} + \Sigma A_{pi} E_p y_{pi}] \Phi_{re} \quad (5) \\ & = - \Sigma \Delta f_{pi} A_{pi} \end{aligned}$$

모멘트 평형조건 ;

$$\begin{aligned} & [\Sigma A_{si} E_s y_{si} + \Sigma A_{pi} E_p y_{pi}] \epsilon_{re}^o \\ & + [\Sigma A_{si} E_s y_{si}^2 + \Sigma A_{pi} E_p y_{pi}^2 + E_c I] \Phi_{re} \quad (6) \\ & = - \Sigma \Delta f_{pi} A_{pi} y_{pi} \end{aligned}$$

• 하중작용

힘의 평형조건 ;

$$\begin{aligned} & [E_c A_c + \Sigma A_{si} E_s + \Sigma A_{pi} E_p] \epsilon_{ld}^o \\ & + [\Sigma A_{si} E_s y_{si} + \Sigma A_{pi} E_p y_{pi}] \Phi_{ld} \quad (7) \\ & = \Sigma P_i \end{aligned}$$

모멘트 평형조건 ;

$$\begin{aligned} & [\Sigma A_{si} E_s y_{si} + \Sigma A_{pi} E_p y_{pi}] \epsilon_{ld}^o \\ & + [\Sigma A_{si} E_s y_{si}^2 + \Sigma A_{pi} E_p y_{pi}^2 + E_c I_c] \Phi_{ld} \quad (8) \\ & = \Sigma P_i y_{pi} + \Delta M \end{aligned}$$

식 (1)부터 (8)의 각 변형률 원인에 대한 평형조건을 중첩하여 총 일정 변형률과 총 곡률 계산을 위한 두 관계식을 나타내면 다음과 같다.

• 총 변형률

힘의 평형조건 ;

$$\begin{aligned} & [E_c A_c + \Sigma A_{si} E_s + \Sigma A_{pi} E_p] \epsilon_o \\ & + [\Sigma A_{si} E_s y_{si} + \Sigma A_{pi} E_p y_{pi}] \Phi \quad (9) \\ & = P \end{aligned}$$

모멘트 평형조건 ;

$$\begin{aligned} & [\Sigma A_{si} E_s y_{si} + \Sigma A_{pi} E_p y_{pi}] \epsilon_o \\ & + [\Sigma A_{si} E_s y_{si}^2 + \Sigma A_{pi} E_p y_{pi}^2 + E_c I_c] \Phi \quad (10) \\ & = M \end{aligned}$$

식 (1)부터 (10)에서 E_c =콘크리트 탄성계수, E_p =PS 강제 탄성계수, E_s =인장철근 탄성계수, E_{ss} =압축철근 탄성계수, A_c =콘크리트 순 단면적, A_p^i = i 번째 층의 PS 강제 단면적, A_s^i = i 번째 층의 철근 단면적, I_c =콘크리트 단면 단면 2차 모멘트, y_{pi} =기준축으로부터 i 번째 층의 PS 강선까지 거리, y_{si} =기준축에서 i 번째 층의 철근까지 거리, P_i^i = i 번째 층의 PS 강제 초기긴장력, M =외적 작용 모멘트, $C_i(t)$ =크리프 보정계수, C_u =크리프 계수, K_{sh} =상대습도에 따른 건조수축 보정계수, K_{sh} =형상과 크기에 따른 건조수축 보정계수, $K_{\epsilon_{sh}}(t)$ =건조수축 보정계수, ϵ_{shu} =최종 건조수축 변형률, Δf_{re} =PS 강제 탈락세이션이다.

식 (9)와 (10)에서

$$P = \Sigma P_i + E_c A_c (C_i C_u) \epsilon_k^o + E_c A_c \epsilon_{sh} - \Sigma \Delta f_{pi} A_{pi}$$

$$M = \Sigma P_i y_{pi} + \Delta M + EI \Phi_{cr}^k - \Sigma \Delta f_{pi} A_{pi} y_{pi},$$

$$\epsilon_o = \epsilon_{cp}^o + \epsilon_{sh}^o + \epsilon_{re}^o + \epsilon_{ld}^o,$$

$$\Phi = \Phi_{cp} + \Phi_{sh} + \Phi_{re} + \Phi_{ld} \text{ 이다.}$$

3. 확률변수의 그래디언트 계산

3.1 변형률에 대한 그래디언트 계산

PSC 휨 부재 내의 단면변형률 해석에 관한 관계식

을 구성하는 하중, 재료상수, 단면상수, 긴장력 및 장기 손실 원인의 총 21개 변수에 관한 변형률과 응력의 그래디언트를 해석적인 방법을 통해 계산한다. 수식화 과정의 편의를 위하여 설계변수 벡터 $\mathbf{X} = \{E_c, E_p, E_s, \dots\}^T$ 로 표시한다.

총 변형률 ε_{tot} 와 일정변형률 ε_o , 곡률 ϕ 의 관계를 나타내는 $\varepsilon_{tot} = \varepsilon_o + \phi y$ 의 양변을 확률변수 \mathbf{X} 에 관하여 편미분함으로써 총 변형률 ε_{tot} 의 확률변수 \mathbf{X} 에 관한 그래디언트를 계산한다.

$$\frac{\partial \varepsilon_{tot}}{\partial \mathbf{X}} = \frac{\partial \varepsilon_o}{\partial \mathbf{X}} + \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{X}} y \quad (11)$$

식 (11)에서 총 일정변형률 ε_o 및 총 곡률 ϕ 의 그래디언트 $\partial \varepsilon_o / \partial \mathbf{X}$ 와 $\partial \phi / \partial \mathbf{X}$ 는 각각 콘크리트 크리프, 건조수축, PS 강제 릴랙세이션 및 하중작용에 대한 각 4개의 힘의 평형 및 모멘트 평형 관계식을 편미분하여 중첩함으로써 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon_o}{\partial \mathbf{X}} &= \frac{\partial \varepsilon_o}{\partial \mathbf{X}} \Big|_{cp} + \frac{\partial \varepsilon_o}{\partial \mathbf{X}} \Big|_{sh} + \frac{\partial \varepsilon_o}{\partial \mathbf{X}} \Big|_{re} + \frac{\partial \varepsilon_o}{\partial \mathbf{X}} \Big|_{ld} \\ \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{X}} &= \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{X}} \Big|_{cp} + \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{X}} \Big|_{sh} + \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{X}} \Big|_{re} + \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{X}} \Big|_{ld} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 일정변형률 $\varepsilon_o = \varepsilon_o(\mathbf{X})$, 곡률 $\phi = \phi(\mathbf{X})$ 이며, $|_{cp}$, $|_{sh}$, $|_{re}$, $|_{ld}$ 은 각각 크리프, 건조수축, 릴랙세이션 및 하중작용에 관련하는 것을 나타낸다.

식 (12)의 우변 각 항에 대한 그래디언트 계산상의 편의를 위해 일정변형률 ε_{cp}^o , ε_{sh}^o , ε_{re}^o , ε_{ld}^o 및 곡률 ϕ_{cp} , ϕ_{sh} , ϕ_{re} , ϕ_{ld} 을 식 (1)부터 (10)의 관계를 이용하여 설계변수에 관한 functional 형태로 나타낸다. 이러한 목적으로 각 변형률 발생요인에 의한 일정변형률 및 곡률의 관계식을 행렬관계로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{st}^o \\ \phi_{st} \end{bmatrix} = K_1 \begin{bmatrix} C_1 F_r - B_1 M_r \\ -B_1 F_r + A_1 M_r \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서,

$$A_1 = E_c A_c + \Sigma A_{st} E_s + \Sigma A_{pi} E_p,$$

$$B_1 = \Sigma A_{st} E_{sy} + \Sigma A_{pi} E_{py},$$

$$C_1 = \Sigma A_{st} E_{sy}^2 + \Sigma A_{pi} E_{py}^2 + E_c I_c,$$

$$\varepsilon_{cr}^o = C_i(t) C_u \varepsilon_k^o,$$

$\phi_{cr}^k = C_i(t) C_u \phi_k$, $K_1 = 1/(A_1 C_1 - B_1^2)$ 이고, 밑 지수 r 은 cr , sh , re , ld 를 각각 의미한다. F_r 과 M_r 은 r 에 대응하는 식 (1)에서 (8)의 우변 항인 힘과 모멘트이다. 식 (13)을 이용하여 각 변형률 및 곡률을 functional 형태로 나타내면 다음과 같다.

• 콘크리트 크리프

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cp}^o &= \varepsilon_{cp}^o \{K_1, B_1, C_1, F_{cp}, M_{cp}\} \\ \phi_{cp}^o &= \phi_{cp}^o \{K_1, A_1, B_1, F_{cp}, M_{cp}\} \end{aligned} \quad (14)$$

• 콘크리트 건조수축

$$\begin{aligned} \varepsilon_{sh}^o &= \varepsilon_{sh}^o \{K_1, B_1, C_1, F_{sh}\} \\ \phi_{sh}^o &= \phi_{sh}^o \{K_1, A_1, B_1, F_{sh}\} \end{aligned} \quad (15)$$

• PS 강선 릴랙세이션

$$\begin{aligned} \varepsilon_{re}^o &= \varepsilon_{re}^o \{K_1, B_1, C_1, F_{re}, M_{re}\} \\ \phi_{re}^o &= \phi_{re}^o \{K_1, A_1, B_1, F_{re}, M_{re}\} \end{aligned} \quad (16)$$

• 하중작용

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ld}^o &= \varepsilon_{ld}^o \{K_1, B_1, C_1, F_{ld}, M_{ld}\} \\ \phi_{ld}^o &= \phi_{ld}^o \{K_1, A_1, B_1, F_{ld}, M_{ld}\} \end{aligned} \quad (17)$$

식 (14)에서 (17)의 우변에 사용된 계수 K_1 , A_1 , B_1 , C_1 , F_r , 및 M_r 을 functional 형태로 나타내면 다음과 같다:

$$\begin{aligned}
K_1 &= K_1\{A_1(\mathbf{X}_A), B_1(\mathbf{X}_B), C_1(\mathbf{X}_C)\}, \\
A_1(\mathbf{X}_A) &= A_1\{E_c, E_p, E_s, A_c, A_p, A_s\}, \\
B_1(\mathbf{X}_B) &= B_1\{E_p, E_s, A_p, A_s, y_{pi}, y_{si}\}, \\
C_1(\mathbf{X}_C) &= C_1\{E_c, E_p, E_s, A_p, A_s, I_c, y_{pi}, y_{si}\}, \\
F_{cp} &= F_{cp}\{E_p, A_c, C_t, C_u, \epsilon_k^o\}, \\
M_{cp} &= M_{cp}\{E_c, I_c, C_t, C_u, \Phi_k^o\}, \\
F_{sh} &= F_{sh}\{E_c, A_c, K_{sh}, K_{ss}, \epsilon_{shu}, \epsilon_{shu}\}, \\
F_{re} &= F_{re}\{\Delta f_p, A_p\}, \\
M_{re} &= M_{re}\{\Delta f_p, A_p, y_p\}, \\
F_{ld} &= F_{re}\{P\}, \\
M_{ld} &= M_{re}\{P, y_p, M\}.
\end{aligned}$$

식 (14)부터 (17)과 위의 관계를 사용하여 식 (13)을 연쇄미분법으로 편미분함으로써 식 (12)의 그라디언트를 계산한다.

3.2 응력에 대한 그라디언트 계산

단면 입의 깊이에서 응력-변형률 선형관계를 정의하는 $\sigma = E_c \epsilon_{tot}$ 의 양변을 확률변수 벡터 \mathbf{X} 에 관하여 편미분할 때, 응력에 관한 그라디언트는 다음의 관계를 통해서 계산된다.

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \mathbf{X}} = \frac{\partial E_c}{\partial \mathbf{X}} \epsilon_{tot} + E_c \frac{\partial \epsilon_{tot}}{\partial \mathbf{X}} \quad (18)$$

식 (18)에서 $\partial E_c / \partial \mathbf{X}$ 는 $\mathbf{X} = E_c$ 일 때 1이고 이외의 경우에는 0이 되며, $\partial \epsilon_{tot} / \partial \mathbf{X}$ 는 식 (11)과 (12)의 결과를 사용한다.

4. 수치해석

식 (1)에서 (19)까지 유도한 관계식을 이용하여 Fig. 1의 T형 단면 PSC 휨 부재의 단면변형률 및 응력에 대한 설계변수의 민감도 해석을 수행한다. 해석적으로 계산한 그라디언트를 설계변수에 1%의 변동을

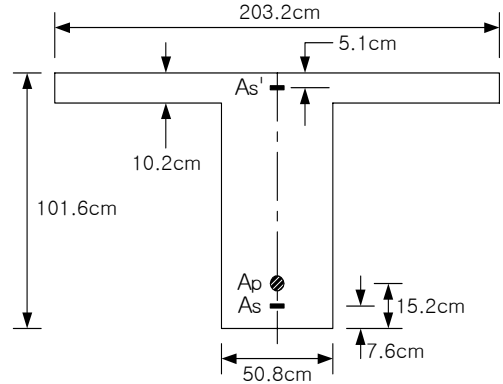


Fig. 1 T-type Section

주어 수치적으로 계산한 결과와 비교함으로써 해석적 계산결과와 정확성을 검증한다. 각 설계변수가 단면응력 및 변형률에 끼치는 영향정도를 계산된 그라디언트를 사용하여 분석함으로써 효율적 설계를 위해 요구되는 설계변수 값의 결정방법을 제시한다.

PS 강재의 편심배치에 따른 변화를 분석하기 위해 Fig. 1의 T형 긴장재를 단면의 1/2높이인 $e=0\text{cm}$ 로부터 $e=-23.3\text{cm}$, $e=-46.6\text{cm}$ 의 세경우로 변화시켜 각 경우에 대한 해석을 수행한다. 해석에 사용된 콘크리트, 철근, PS 강재의 단면상수 및 물성값과 장기손실 원인에 관련된 입력값은 Table 1과 같다:

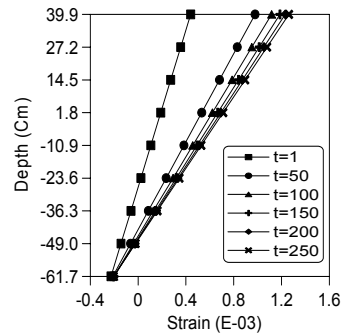
4.1 변형률에 관한 그라디언트 계산

시간 $t=1$ 일에 초기 긴장력 $P_i=272\text{ ton}$ 과 단면 모멘트 $M=121.7\text{ t}\cdot\text{m}$ 을 받는 Fig. 1의 단면은 시간의 경과에 따라 하중의 변화 없이 크리프, 건조수축, 릴랙сей션의 장기손실만을 받는다. Fig. 2는 시간 $t=1, 50, 150, 200, 250$ 일에 변형률을 계산한 결과이다. 해석적으로 계산한 그라디언트가 입력자료에 1%의 변동을 주어 수치해석적으로 계산한 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 Fig. 3은 보여준다. 21개 설계변수의 기하학적 요인별, 재료물성적 요인별, 장기거동 특성 요인별 및 외적하중 요인별로 분류하고 계산된 민감정도를 고려하여 변형률에 대한 설계인자의 영향정도를 가장 큰 민감정도를 나타내는 A로부터

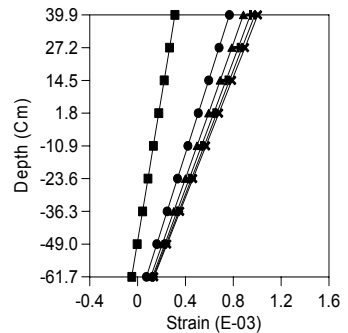
Table 1 Design Variable Values

입력 변수명	입력 변수값		
	편심거리		
	$e=0cm$	$e=-23.3cm$	$e=-46.6cm$
E_c (kgf/cm ²)	281,000	281,000	281,000
E_{ps} (kgf/cm ²)	1,900,000	1,900,000	1,900,000
E_s (kgf/cm ²)	2,040,000	2,040,000	2,040,000
E_{ss} (kgf/cm ²)	2,040,000	2,040,000	2,040,000
A_G (cm ²)	7,390	7,390	7,390
A_{ps} (cm ²)	19.4	19.4	19.4
A_{st} (cm ²)	64.5	64.5	64.5
A_{sc} (cm ²)	25.8	25.8	25.8
I_G (cm ⁴)	6,944,000	6,944,000	6,944,000
y_{pi} (cm)	0	-23.3	-46.5
y_{sti} (cm)	-54.3	-54.3	-54.3
y_{sci} (cm)	34.6	34.6	34.6
P_i (ton)	272	272	272
M (t · m)	121.7	121.7	121.7
$C_i(t)$	0.5112	0.5112	0.5112
C_u	2.35	2.35	2.35
K_{sh}	0.9	0.9	0.9
K_{ss}	0.745	0.745	0.745
ϵ_{shl}	0.588	0.588	0.588
ϵ_{shu}	0.0006	0.0006	0.0006
Δf_{re} (kgf)	1,820	1,820	1,820

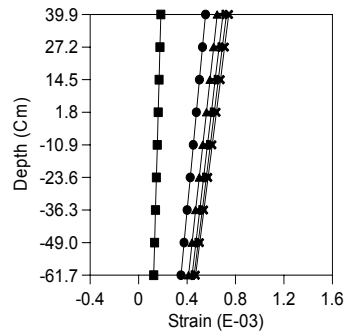
가장 낮은 민감도를 나타내는 D의 4 영역으로 구분한다. 각 영역에 속하는 설계변수를 분류하면 다음과 같다: A영역; 크리프 및 건조수축을 구성하는 장기손실 설계변수, B 영역; PS 강선 및 철근의 단면적과 배치위치, C 영역; 콘크리트 단면적과 탄성계수, PS 강선 긴장력, PS 강선 릴랙세이션 계수, D 영역; 철근 및 PS 강선의 탄성계수, 콘크리트 단면의 단면 2차 모멘트, 외적작용하중. 분석된 민감정도 결과에서 PS 강선 긴장력이 갖는 민감도도는 C 영역에 속하여 일반적으로 PS 강선의 긴장력은 배치위치에 비해 덜 민감하게 작용한다.



(a) PS steel eccentricity ($e=0cm$);



(b) PS steel eccentricity ($e=-23.3cm$);



(c) PS steel eccentricity ($e=-46.5cm$)

Fig. 2 Strain distributions with the lapse of time:

Fig. 3에서 단면깊이에 따른 그래디언트의 기울기의 변화는 식 (11)에서 총변형률에 대한 그래디언트를 구성하는 성분가운데 곡률에 관한 그래디언트 $(\partial\Phi/\partial\mathbf{X})_y$ 의 영향이며, 일정변형률에 관한 그래디언트 $\partial\epsilon_o/\partial\mathbf{X}$ 는 단면깊이에 따른 일정한 값의 그래디언트 값을 준다.

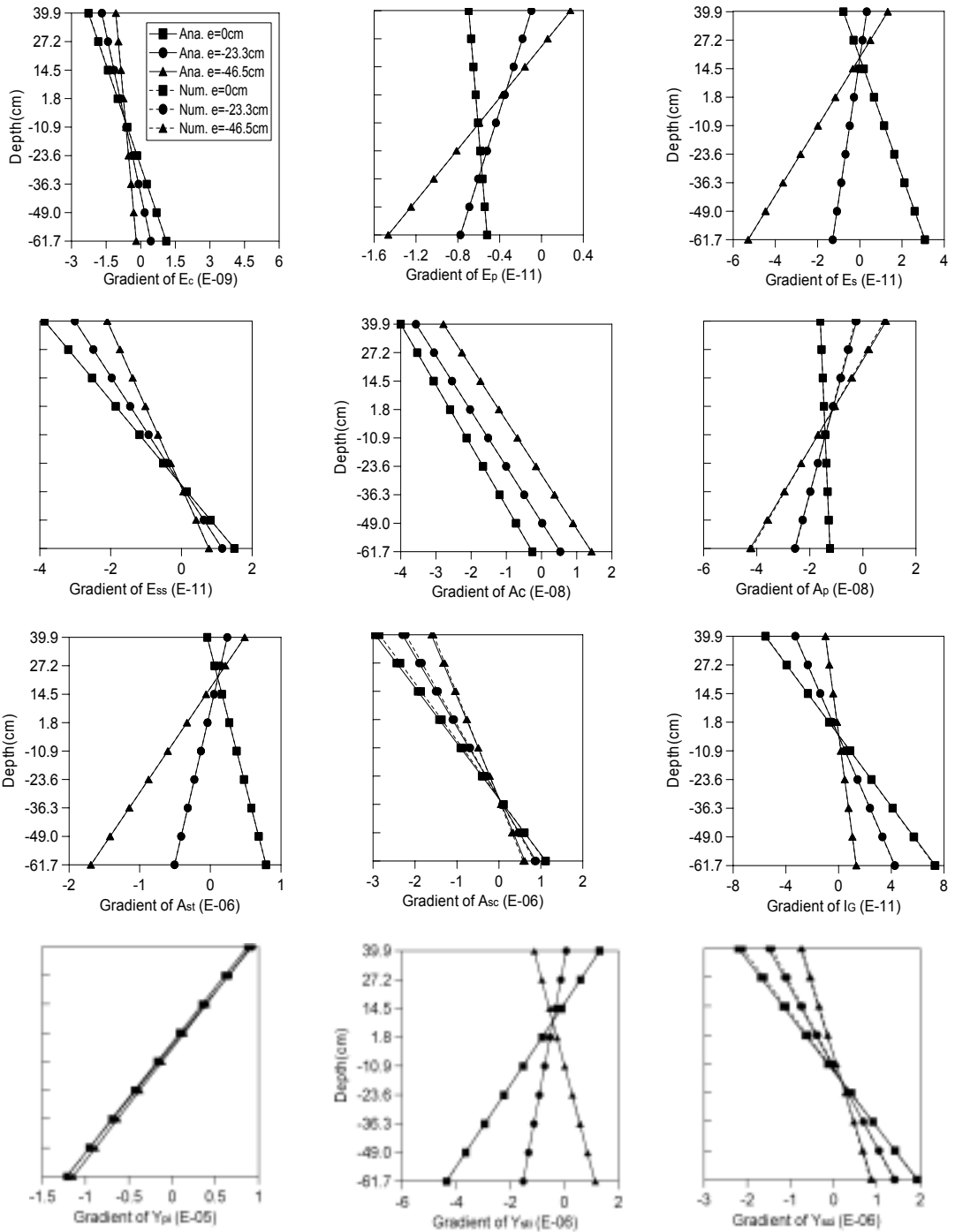


Fig. 3 Comparisons of Gradients of Strains (continue)

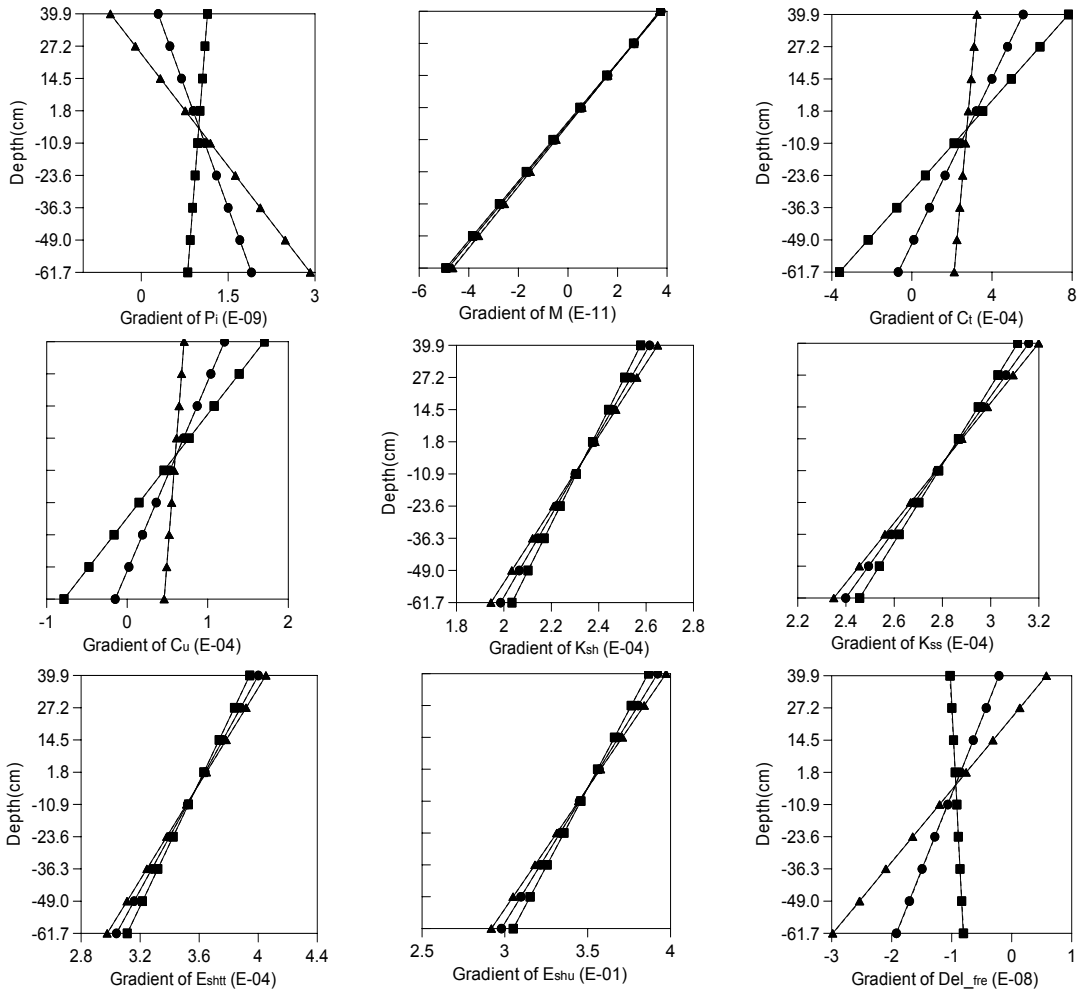


Fig. 3 Comparisons of Gradients of Strains

Fig. 1의 T형단면에 대한 변형률과 응력의 그래디언트 계산은 단면의 도심축을 기준하므로 Fig. 3의 단면깊이축의 0위치에서 변형률축의 0위치와 만나는 크기가 각 설계변수에 관한 일정변형률의 민감성 $\partial \epsilon_o / \partial X$ 의 값을 나타낸다. 결과적으로 기울기가 큰 값을 나타내는 경우는 변형률의 민감도가 곡률, 즉 휨에 의한 민감성보다는 일정변형률, 즉 축 방향 압축력에 의해 지배되는 것을 의미하는 반면, 기울기가 비교적 작은 값을 나타내는 경우에는 변형률의 민감도가 휨 성분에 의해 지배됨을 의미한다.

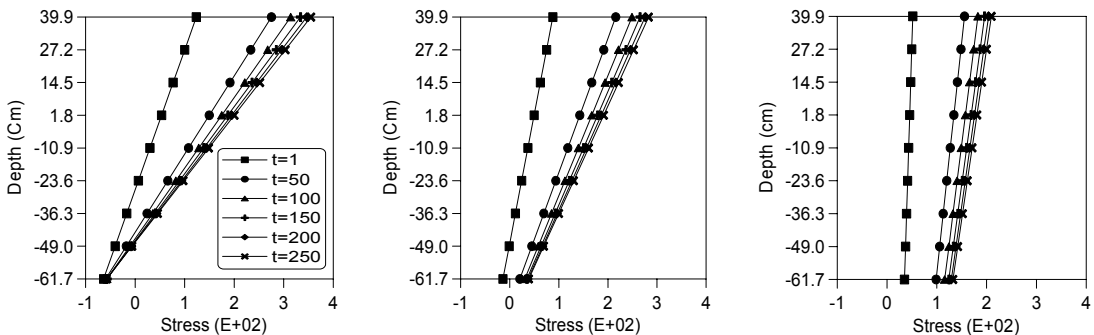
4.2 응력에 관한 그래디언트 계산

Fig. 4는 시간 $t=1, 50, 150, 200, 250$ 일에 단면응력을 계산한 결과이다. 해석적으로 계산한 그래디언트가 입력자료에 1%의 변동을 주어 수치해석적으로 계산한 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 Fig. 5는 보여준다. 21개 설계변수 민감정도 평가를 위한 4 영역 구분을 적용하면 다음과 같다: A영역; 크립 및 건조수축을 구성하는 장기손실 설계변수, B 영역; PS 강선 및 철근의 단면적과 배치위치, C 영역; 콘크리트 단면적과 탄성계수, PS 강선 긴장력, PS 강선 릴랙스

이선 계수, D 영역; 철근 및 PS 강선의 탄성계수, 콘크리트 단면의 단면 2차 모멘트, 외적작용하중. 단면 응력에 대한 설계변수의 민감도도는 총 변형률에 대한 민감도도와 유사한 경향을 보여주고 있다. 이러한 유사한 경향은 응력에 대한 민감도 계산이 식 (18)에 근거하므로 결과적으로 계산되는 민감도도는 콘크리트 탄성계수의 경우를 제외하고는 총 변형률의 민감도에 콘크리트 탄성계수를 곱한 값으로 결정되기 때문이다. 단면깊이에 따른 그래디언트의 기울기의 변화는 식 (18)의 우변 두 번째 항을 구성하는 총 변형률의 각 설계변수에 대한 그래디언트 성분 가운데 곡률에 관한 그래디언트 $(\partial\phi/\partial X)_y$ 의 영향이며, 일정변형률에 관한 그래디언트 $\partial\epsilon_o/\partial X$ 는 단면깊이의 위치에 관계 없이 일정한 값을 갖는 응력의 민감성을 준다. 이러한 관계는 Fig. 3의 변형률에 관한 그래디언트 계산결과와 유사한 경향을 보인다. 그림에서 기울기가 큰 값을 나타내는 경우는 단면응력의 민감도가 곡률, 즉 휨에 의한 민감성보다는 축 방향 응력성분 즉 P/A_c (P =PS 강선 긴장력, A_c =콘크리트 단면 단면적)에 의해 지배되는 것을 의미하며, 기울기가 비교적 작은 값을 나타내는 경우에는 휨 성분 즉 $\{(Pe+M)/I_c\}_y$ (e =PS 강선 편심거리, M =작용모멘트, I_c =콘크리트 단면 단면2차모멘트)에 의해 지배됨을 의미한다.

5. 결론

효율적 PSC 휨 부재 설계를 위해 요구되는 각 설계인자의 영향성 평가를 위한 민감도 해석을 수행하였다. 민감도 해석을 위해 요구되는 콘크리트 크리프, 건조수축, Relaxation 및 하중작용에 의해 결과하는 변형률 계산은 네 변형률 발생원인에 대한 평형상태로부터 각 원인에 대한 일정변형률 및 곡률에 관한 관계식을 유도하였다. 시간종속적 보정탄성계수를 사용하지 않고 국내·외 시방서에서 규정하는 각 시간종속적 손실원인에 관한 실험식을 직접 적용함으로써 각 손실원인에 대한 민감도평가를 가능하게 하였다. 하중, 재료상수, 단면상수, 긴장력 및 장기손실 원인을 포함하는 21개 설계변수의 변형률에 관한 민감도 해석을 위해 요구되는 변형률에 관한 각 변수의 Gradient 계산 관계식은 임의단면의 임의 높이에 철근 및 PS 강선이 배치된 휨 부재 변형률 해석 관계식으로부터 확정적 형태로 유도하였다. 수치해석 예제로 적용된 시간종속적 거동을 하는 T형 단면 PSC 보의 민감도 해석결과는 시간종속적 손실원인인자, 철근 및 PSC 긴장력의 단면적 및 배치위치, 단면정수 및 재료정수 값의 순서로 민감도도를 나타내었다. 해석적 방법에 의해 계산된 결과를 수치해석적 방법에 의한 Gradient 계산결과와 비교하였으며, 두 결과는 잘 일치하였다. 본 논문에서 수행된 민감도 해석방법은 효율적 설계를 위한 기본자료로 사용되는 적용성을 갖는 것으로 판단된다.



(a) PS steel eccentricity ($e=0cm$); (b) PS steel eccentricity ($e=-23.3cm$); and (c) PS steel eccentricity ($e=-46.5cm$)

Fig. 4 Variation of Stresses with the Lapse of Time:

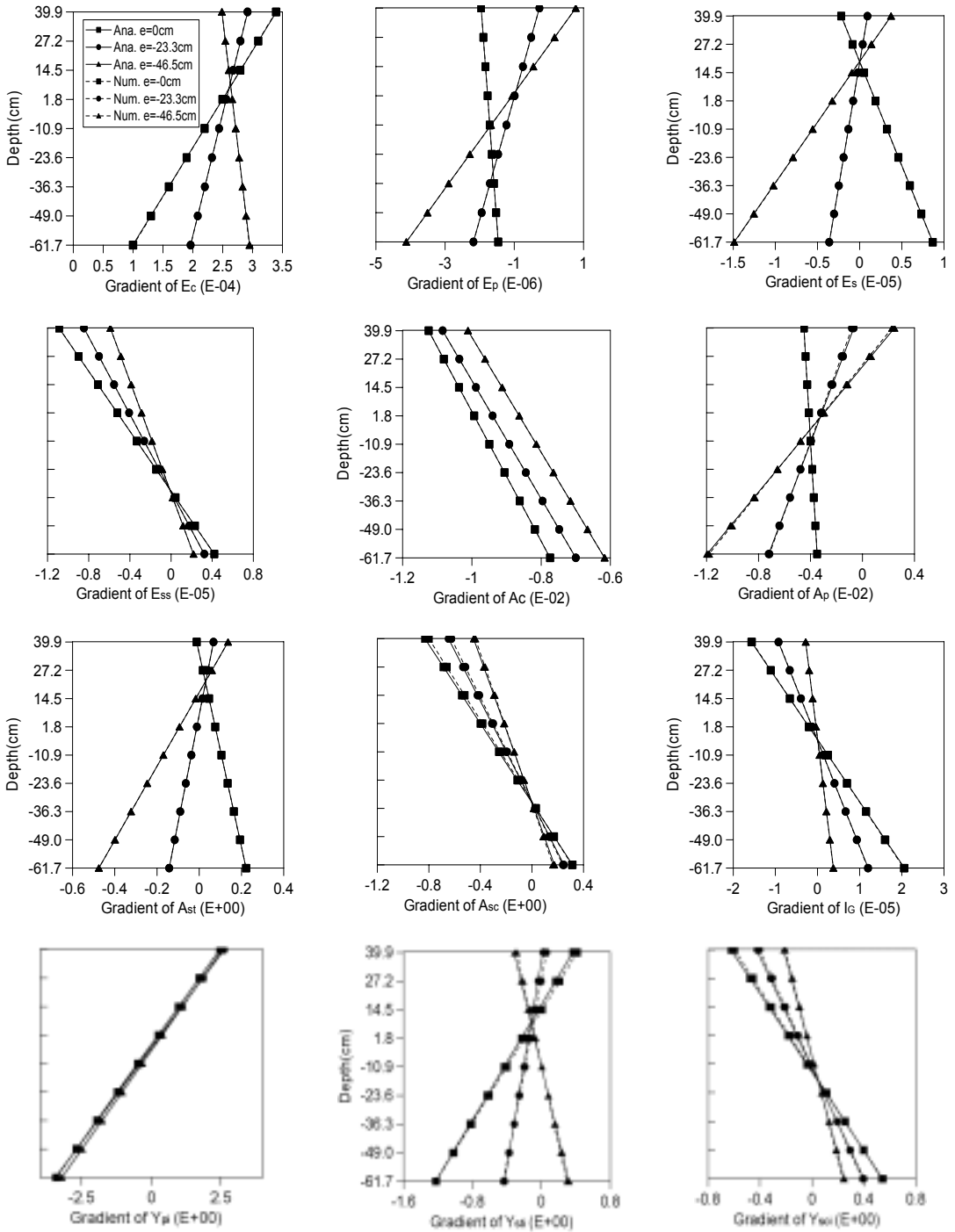


Fig. 5 Comparisons of Gradients of Stresses (continue)

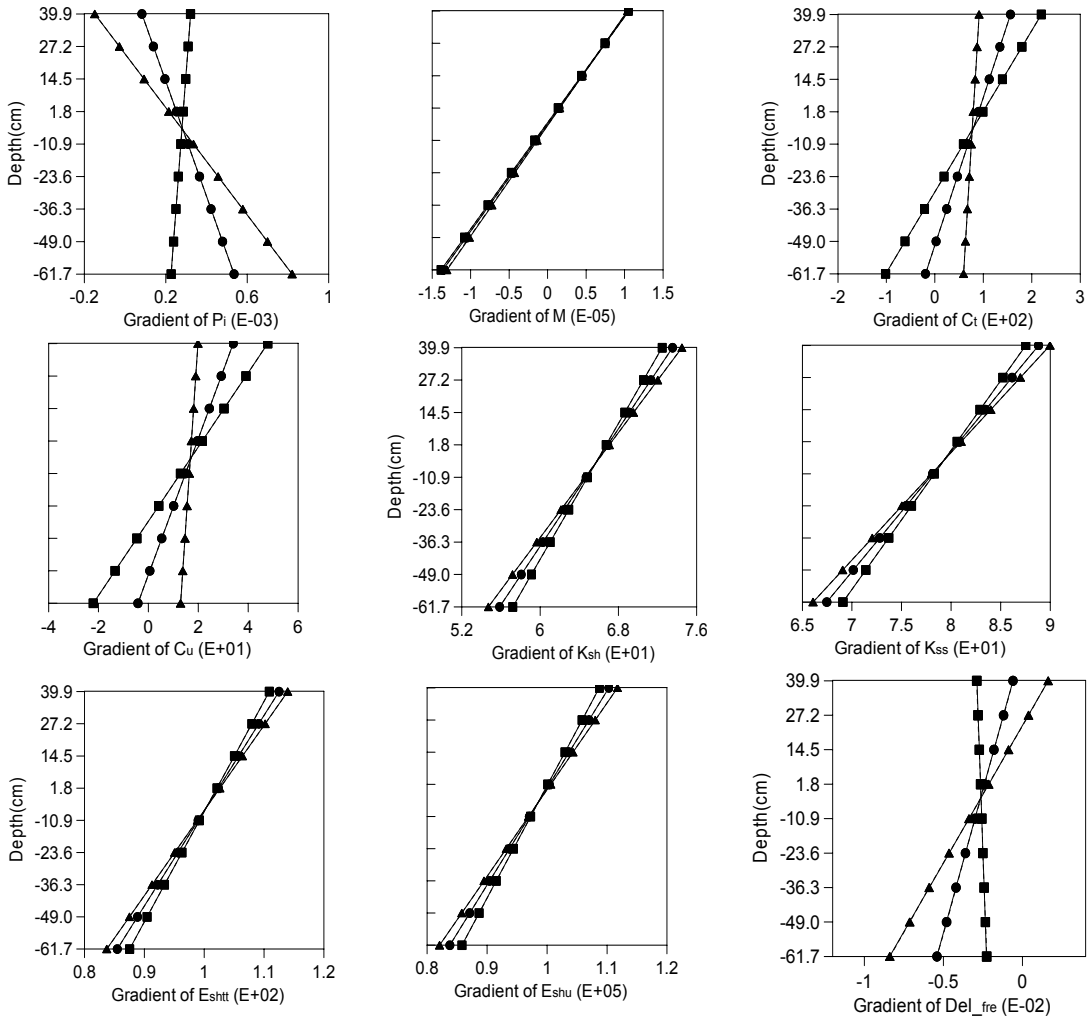


Fig. 5 Comparisons of Gradients of Stresses

참 고 문 헌

1. 도로교 표준시방서, 건설교통부, 1999.
2. 콘크리트 표준 시방서, 건설교통부, 1999.
3. 김민주, "장기손실을 고려한 PSC보의 응력, 변형률에 관한 민감도 해석 및 신뢰도 평가", 건국대학교 토목공학과 석사학위논문, 2001.
4. 이준자, "프리스트레스트 콘크리트 구조물의 장기 거동 및 신뢰성 해석", 건국대학교 토목공학과 박사학위논문, 2001.
5. ACI Committee, "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effect in Concrete Structures"
6. Al-Harthy, A. S. and Frangopol, D. M. "Reliability Assessment of Prestresses Concrete," J. of Stur. Engrg., ASCE, Vol.120, No.1, 1994, pp.180~199.
7. Bazant, Z. P, "Prediction of Concrete Creep Effects Using Age-Adjusted Effective Modulus Method", ACI Struc. J., Vol.69, No.4, 1972, pp.212~217.
8. Ghali, A, "A Unified Approach for Serviceability Design of Prestressed and Nonprestressed Reinforced Concrete Structures", PCI Journal, Vol.31, No.2, 1986, pp.118~137.

-
9. Ghali, A and Trevino, J, "Relaxation of steel in Prestressed Concrete", PCI Journal, Vol.30, No.5, 1985, pp.82~94.
 10. Ghali, A. "Stress and Strain Analysis in Prestressed Concrete A Critical Review", PCI Journal, Vol.34, No.6, 1989, pp.80~97.
 11. PCI Design Handbook, Fourth Edition, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL, 1992, pp.4.36~4.40.1. 도로교 표준시방서, 건설교통부, 1999.

(접수일자 : 2001년 11월 15일)