

## 프리스트레스트 콘크리트 합성단면에 도입되는 추가 긴장력 설계와 저항모멘트 평가

연정흠<sup>1)\*</sup> · 김도균<sup>1)</sup>

인하대학교 토목공학과

(2003년 12월 10일 원고접수, 2004년 4월 10일 심사완료)

### Design of Additional Tendon Force and Evaluation of Resistant Moment for Prestressed Concrete Composite Section

Yon, Jung-Heum<sup>1)\*</sup> and Kim, Do-Goon<sup>1)</sup>

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

(Received December 10, 2003, Accepted April 10, 2004)

#### ABSTRACT

A general composite section of precast and cast-in-place concrete with prestressed and nonprestressed reinforcements was analyzed to calculate residual stresses and loss of prestressing force caused by internal constraints of concrete long-term deformation. From the analytical results, equations to design additional prestressing force and to evaluate resistant moment of the composite section were proposed. The equations shows that the additional prestressing force can be over-estimated if the loss rate of the first prestressing force is over-estimated from the lumped sum of a design code. The analytical procedure with the proposed equations has been applied to a composite section using the AASHTO Type 5 girder. The loss rates of the additional prestressing force applying to the precast concrete girder was less than those applying to the composite girder. However, the resistant moment of the additional prestressing force on the composite girder was much larger than that on the precast concrete girder. The additional prestressing force applying to the composite section was very effective for strengthening of the prestressed concrete composite girder.

**Keywords :** concrete composite section, prestressing force, loss rate, long-term deformation, resistant moment

#### 1. 서 론

구조물에 대한 콘크리트의 효율적인 사용을 위해서 최근 다양한 방법으로 콘크리트 단면에 압축력을 도입하는 공법이 제안되고 있다. 이러한 시도로 일차 긴장력이 도입되는 프리캐스트(precast) 콘크리트 거더에 바닥판이 경화된 후 합성거더에 추가 긴장력이 도입되는 IPC (incremental prestressing concrete) 합성거더<sup>1)</sup>, 강재의 인장변형을 구속하는 방법으로 콘크리트 단면에 압축력이 도입되는 프리플렉스(preflex) 합성거더<sup>2)</sup>, 연속 강재거더의 내부지점부에 설치되는 프리캐스트 바닥판의 사용<sup>3)</sup> 등이 있다. 또한 사용 중인 강합성 거더에 외부 긴장력을 도입하거나 프리캐스트 콘크리트 거더에 예비 덕트(duct)를 설치하여 추가 긴장력의 도입에 의한 보강에 대비하고 있다.

서로 다른 재료특성의 여러 단면으로 구성되는 합성단면에서 콘크리트의 크리프와 건조수축에 의한 장기변형의

일부는 다른 재료에 의해 내부적으로 구속된다. 합성단면에서 장기변형의 구속은 긴장된 강재의 수축을 억제시키기 때문에 긴장력의 손실은 감소한다.

그러나 콘크리트 변형의 구속은 콘크리트 단면에 잔류인장응력을 발생시켜서 도입된 압축응력의 추가 손실의 원인이 된다. 긴장력 손실은 콘크리트에 의한 구속정도에 의해 결정되기 때문에 콘크리트 장기변형의 일부구속에 의한 콘크리트 응력의 부정적인 영향은 긴장력의 긍정적인 효과보다 크다. 결과적으로 콘크리트의 장기변형이 구속될수록 콘크리트에 도입된 압축력의 손실은 증가하게 된다<sup>4)</sup>.

이 논문에서는 장기변형의 내부구속에 의한 잔류응력과 긴장력 손실의 복잡한 상호작용을 고려하기 위해 기존의 크리프와 건조수축 및 응력이완 함수에 대한 단계별 계산법(step-by-step method)<sup>5)</sup> 그리고 여러 하중단계의 프리스트레스트(prestressed) 콘크리트 합성거더에서 응력과 긴장력의 손실률을 분석한다. 분석된 일차 긴장력의 손실을 고려하여 사용 중인 프리캐스트 콘크리트 거더 또는 합성거더에 보강의 목적으로 도입되는 추가 긴장력의 설

\* Corresponding author

Tel : 032-860-7569 Fax : 032-873-7560

E-mail : jyon@inha.ac.kr

계식과 이에 따른 저항모멘트의 평가식이 제안된다. 또한 제안된 추가 긴장력의 설계 및 해석 방법은 AASHTO Type 5 합성거더에 대해 검토된다.

## 2. 합성단면의 응력

재령에 따라 순차적으로 콘크리트와 강재의 여러 단면 그리고 여러 단계의 하중이 도입되는 Fig. 1과 같은 일반적인 합성단면의 응력변화는 콘크리트의 장기변형에 대한 내부구속을 고려하여 계산되어야 한다. 프리스트레스트 콘크리트 휨부재는 일반적으로 허용응력법에 의해 설계되고, 사용하중에 대해 균열이 발생되지 않으며, 선형탄성의 재료특성이 적용된다. 이 경우 콘크리트 단면의 응력은 각 하중을 지지하는 합성단면의 응력에 중첩의 원리를 적용하여 계산될 수 있다. 합성단면의 응력에 대한 콘크리트 장기변형의 영향은 이전 단계의 응력변화를 고려하는 단계별 계산법<sup>5)</sup>으로 정확히 계산된다. 단계별 계산법에서 재령  $t_k$ 에 작용한 외부하중에 대해 임의재령  $t_n$ 에서 콘크리트의 응력  $f_c^k(t_n)$ 은 각 재령의 단계에서 콘크리트의 응력변화  $\Delta f_c^k(t_j)$ 의 합으로 다음과 같이 계산된다.

$$f_c^k(t_n) = \sum_{j=k}^n \Delta f_c^k(t_j) \quad (1)$$

### 2.1 외부하중에 의한 응력

재료특성이 서로 다른 여러 단면으로 구성되는 합성단면의 환산 단면특성은 각 재료의 탄성계수를 기준이 되는 콘크리트의 탄성계수로 가정한 단면력의 변화가 없는 유효 폭을 적용하여 계산된다. 재령  $t_k$ 에 작용된 긴장재의 재킹력 또는 외부하중과 이 하중을 지지하는 합성단면의 환산 단면특성에 대해 콘크리트의 응력변화  $\Delta f_c^k$ 는 다음과 같다.

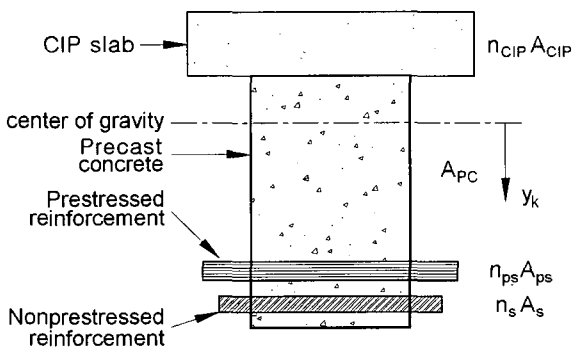


Fig. 1 General section of a prestressed concrete composite section

$$\Delta f_c^k = \frac{F_k}{A_k} + \frac{M_k y_k}{I_k} = \lambda_k(y_k) f_{kg} \quad (2)$$

여기서, 아래첨자  $k$ 는 콘크리트의 재령  $t_k$ 에서 하중과 이를 지지하는 합성단면의 환산 단면특성이며, 각 기호는 다음과 같이 정의된다.

- $F_k$  = 긴장재의 재킹력 또는 외부 축하중
- $M_k$  = 재킹력 또는 외부하중에 의한 휨모멘트
- $A_k, I_k$  = 합성단면의 환산 단면적과 단면이차모멘트
- $r_k$  = 환산단면의 회전반경 =  $\sqrt{I_k/A_k}$
- $y_k$  = 환산단면의 중심에 대한 위치로 아래 연단 쪽으로 양의 값
- $f_{kg}$  = 축하중  $F_k$ 에 대한 평균 또는 기준응력 =  $F_k/A_k$  ( $F_k \neq 0$ )
- $\lambda_k$  = 기준응력에 대한  $y_k$ 에서 응력의 비 =  $1 + y_{kF} y_k / r_k^2$
- $y_{kF}$  =  $M_k$ 에 대한  $F_k$ 의 등가 편심거리 =  $-M_k/F_k$  ( $F_k \neq 0$ )

축하중이 작용하지 않는 경우( $F_k = 0$ )에는 합성단면의 중심을 제외한 임의 위치  $y_{ko}$ 에 대해서  $y_{kF} = y_{ko}$ 와  $f_{kg} = -M_k y_{ko} / I_k$  그리고  $\lambda_k = y_k / y_{ko}$ 가 적용된다.<sup>4)</sup> 포스트텐션으로 도입되는 긴장재의 재킹력은 초기 탄성수축이 발생되기 이전의 긴장력이며, 긴장되는 동안 합성단면에 발생하는 탄성수축이 포함되어 있다. 포스트텐션의 긴장재가 동시에 긴장되면 긴장재의 단면이 합성단면의 계산에 포함되지 않는다.

그러나 긴장력이 순차적으로 도입되면 이전에 도입된 긴장재의 탄성수축을 고려하기 위해 긴장재 단면의 반만 포함된다. 긴장력과 함께 작용하는 자중 등의 하중에도 같은 환산 단면특성이 적용된다. 평형상태를 유지하는 긴장력 또는 긴장력의 변화(손실)로부터 콘크리트의 응력이 계산되는 경우에는 긴장력 그리고 긴장력과 동시에 작용하는 자중 등의 외부하중에 대한 환산단면의 계산에 긴장재의 단면이 포함되지 않는다.

### 2.2 장기변형의 내부구속에 의한 응력변화

합성단면에서 콘크리트 장기변형의 내부구속에 의해 발생하는 콘크리트와 다른 재료의 단면력은 서로 자체평형을 유지하여야 한다. 내부구속에 의한 합성단면의 평형조건은 콘크리트의 장기변형을 구속하기 위한 "구속력"과 합성단면의 변형을 발생시키는 "변형력"으로부터 만족될 수 있다. 구속력은 장기변형을 발생시킨 콘크리트 단면에만 작용되며, 구속력과 크기와 작용점이 같고 방향이 반대

인 변형력은 합성단면에 작용된다. 크리프계수가 고려된 유효탄성계수<sup>6)</sup>의 적용으로 크리프변형이 포함된 합성단면의 적합조건이 고려될 수 있다.

재령  $t_{j-1} \sim t_j$ 의 기간에 크리프계수  $\Delta\phi^j$ 와 건조수축 변형률  $\Delta\epsilon_{sh}^j$ 에 대해 구속력  $N_j$ 와 콘크리트 중심에 대한 구속력의 작용위치  $y_{cN}$ 은 각각 다음과 같다.

$$N_j = -A_c \bar{E}_c^j (\Delta\phi^j \epsilon_{cg}^{j-1} + \Delta\epsilon_{sh}^j) \quad (3a)$$

$$y_{cN} = -\frac{\bar{E}_c^j I_c \Delta\phi^j \chi_{ce}^{j-1}}{N_j} \quad (3b)$$

여기서, 아래첨자  $c$ 는 장기변형이 발생된 콘크리트의 단면 및 재료특성에 대한 값이며, 다음과 같이 정의된다.  $A_c, I_c$  = 장기변형이 발생된 콘크리트의 단면적과 단면이차모멘트

$\bar{E}_c^j$  = 고려하는 기간의 크리프 변형을 고려하기 위한 콘크리트의 유효탄성계수 =  $E_c / (1 + \Delta\phi^j)$   
 $\epsilon_{cg}^{j-1}, \chi_{ce}^{j-1}$  = 재령  $t_{j-1}$ 에서 콘크리트 단면의 평균 탄성변형률과 탄성곡률

장기변형에 의한 콘크리트의 응력변화는 콘크리트 단면의 구속력  $N_j$ 와 합성단면의 변형력  $-N_j$ 에 대한 다음의 응력변화  $\Delta f_c^{con}$ 와  $\Delta f_c^{def}$ 의 합으로 계산된다.

$$\begin{aligned} \Delta f_c^{con} &= \frac{N_j}{A_c} \left( 1 + \frac{y_{cN} y_c}{r_c^2} \right) \\ &= \lambda_c^{con} f_{cg}^j \end{aligned} \quad (4a)$$

$$\begin{aligned} \Delta f_c^{def} &= -\frac{N_j}{A_j} \left( 1 + \frac{\bar{y}_{jN} \bar{y}_j}{r_j^2} \right) \\ &= \bar{\lambda}_j^{def} \bar{f}_g^j \end{aligned} \quad (4b)$$

여기서, 아래첨자  $j$ 는 재령  $t_j$ 에서 환산 단면특성 및 재료특성에 대한 값이며, 각 기호는 다음과 같이 정의된다.

$r_c$  = 장기변형이 발생한 콘크리트 단면의 회전반경 =  $\sqrt{I_c / A_c}$   
 $y_c$  = 콘크리트의 단면중심에 대한 위치  
 $f_{cg}^j$  = 구속력에 대한 콘크리트의 평균응력 =  $N_j / A_c = \bar{E}_c^j (\Delta\phi_j \epsilon_{cg}^{j-1} + \Delta\epsilon_{sh}^j)$   
 $\lambda_c^{con}$  = 평균응력  $f_{cg}^j$ 에 대한  $y_c$ 에서 응력비 =  $1 + y_{cN} y_c / r_c^2$

$\bar{A}_j, \bar{r}_j$  = 유효탄성계수  $\bar{E}_c^j$ 에 대한 합성단면의 환산 단면적과 회전반경

$\bar{y}_j$  = 합성단면의 중심에 대한 위치

$\bar{y}_{jN}$  = 합성단면의 중심에 대한 변형력의 작용 위치 =  $\bar{y}_{cg} + y_{cN}$   
 $\bar{y}_{cg}$  = 합성단면의 중심에 대한 콘크리트 단면중심 위치  
 $\bar{f}_g^j$  = 변형력에 대한 합성단면의 평균응력 =  $-N_j / \bar{A}_j$   
 $\bar{\lambda}_j^{def}$  = 평균응력  $\bar{f}_g^j$ 에 대한  $\bar{y}_j$ 에서 응력비 =  $1 + \bar{y}_{jN} \bar{y}_j / \bar{r}_j^2$

긴장된 강재의 응력이완에 의한 응력변화는 합성단면에서 평형조건을 만족하는 값으로 이에 의한 콘크리트의 응력 계산에 응력이완이 발생한 긴장재의 단면은 포함되지 않는다. 긴장재의 응력이완  $\Delta f_{ps}^{re}$ 에 의한 콘크리트의 응력변화  $\Delta f_c^{re}$ 는 다음의 식으로부터 계산된다.

$$\Delta f_c^{re} = \frac{\Delta f_{ps}^{re} A_{ps}}{\bar{A}_j} \left( 1 + \frac{\bar{y}_{jp} \bar{y}_j}{\bar{r}_j^2} \right) \quad (4c)$$

여기서,  $A_{ps}$  = 응력이완이 발생한 강재의 단면적

$\bar{A}_j, \bar{r}_j$  = 응력이완이 발생한 강재가 고려되지 않은 합성단면의 콘크리트 유효탄성계수에 대한 환산 단면적과 회전반경

$\bar{y}_{jp}, \bar{y}_j$  = 합성단면의 중심에 대한 긴장재의 중심과 응력이 계산되는 위치

고려되는 기간에 콘크리트의 장기변형과 긴장된 강재의 응력이완에 의한 콘크리트의 응력변화  $\Delta f_c(t_j)$ 는 다음과 같이 식 (4)에 대한 중첩의 원리를 적용하여 계산된다.

$$\Delta f_c(t_j) = \Delta f_c^{con} + \Delta f_c^{def} + \Delta f_c^{re} \quad (5a)$$

합성단면에서 긴장되거나 긴장되지 않은 강재와 다른 재령에 타설된 콘크리트 등과 같이 콘크리트의 장기변형을 구속하는 단면의 적합조건을 만족하는 변형률은 합성단면에 작용하는 변형력의 결과이다. 합성단면의 중심에 대한 보강재의 위치  $\bar{y}_{js}$ 에서 콘크리트의 변형률  $\Delta\epsilon_c(\bar{y}_{js}) = \Delta f_c^{def}(\bar{y}_{js}) / \bar{E}_c^j$ 이며, 응력이완이 고려되지 않는 강재의 응력변화  $\Delta f_s(t_j)$ 는 다음과 같다.

$$\Delta f_s(t_j) = -\bar{n}_s^j [\Delta f_c^{def}(\bar{y}_{js}) + \Delta f_c^{re}(\bar{y}_{js})] \quad (5b)$$

합성단면의 중심에 대해  $\bar{y}_{jp}$ 에 위치한 긴장된 강재의 손실응력  $\Delta f_{ps}^k$ 에는 응력이완에 의한 응력변화  $\Delta f_{ps}^{re}$ 를 포함하여 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta f_{ps}(t_j) = \Delta f_{ps}^{re} - \bar{n}_{ps}^j \Delta f_c^{def}(\bar{y}_{jp}) \quad (5c)$$

여기서,  $\bar{n}_s^j, \bar{n}_{ps}^j$  = 콘크리트 유효탄성계수에 대한 긴장되지 않은 강재와 긴장된 강재의 탄성계수비  
 $= E_s/\bar{E}_c^j$ 와  $E_{ps}/\bar{E}_c^j$

평형상태를 만족하는 긴장력의 응력변화  $\Delta f_{ps}$ 에 대한 콘크리트 단면의 응력변화는 긴장된 강재가 포함되지 않은 합성단면에 대한 긴장력의 변화  $\Delta f_{ps} A_{ps}$ 로부터 다음과 같이 계산될 수도 있다.

$$\Delta f_c(t_j) = \frac{\Delta f_{ps} A_{ps}}{A_j} \left( 1 + \frac{\bar{y}_{j0} \bar{y}_j}{\bar{r}_j^2} \right) \quad (5d)$$

### 2.3 긴장력의 손실률

외부하중에 의한 합성단면의 응력은 하중이 제거되면 회복이 가능하기 때문에 손실응력으로 고려되지 않는다. 긴장력과 이로 인해 콘크리트에 도입된 압축응력의 손실에는 콘크리트의 장기변형과 긴장된 강재의 응력이완에 의한 응력변화만 고려된다.

콘크리트의 재령  $t_{j-1} \sim t_j$ 의 기간에서 긴장력의 손실률  $\Delta LR_{ps}^j$ 는 콘크리트에 긴장력이 도입된 직후의 초기 긴장력  $P_i$ 에 대한 값으로 다음과 같이 정의되며,

$$\Delta LR_{ps}^j = -\frac{\Delta P_j}{P_i} = -\frac{\Delta f_{ps} A_{ps}}{P_i} \quad (6)$$

재령  $t_k$ 에 도입된 긴장력 재령  $P_k$ 에 대해  $t_n$ 에서 긴장력  $P_n$ 은  $P_k - LR_{ps}^n P_k$ 로 계산된다. 재령  $t_k \sim t_n$ 의 기간의 손실률  $LR_{ps}^n$ 은 다음과 같으며,

$$LR_{ps}^n = \sum_{j=k}^n \Delta LR_{ps}^j \quad (7)$$

식 (7)의 손실률은 재령  $t_k \sim t_n$ 의 기간에 외부하중의 변화가 없는 경우에 적용될 수 있다. 긴장력의 변화  $\Delta P_n = -LR_{ps}^n P_i$ 에 대한 콘크리트의 응력변화  $\Delta f_c(t_n)$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta f_c(t_n) = \frac{\Delta P_n}{A_n} \left( 1 + \frac{\bar{y}_{n0} \bar{y}_n}{\bar{r}_n^2} \right) \quad (8)$$

식 (8)에서 합성단면의 환산 단면특성 계산에 긴장된 강재가 포함되지 않으며, 콘크리트의 단면특성에는 상대적으로 긴 하중단계  $t_k \sim t_n$ 에서 크리프계수의 변화를 고려하기 위해서 이 기간의 평균 탄성변형률에 대한 재령수정 유효탄성계수(age adjusted effective elastic modulus)가 적용된다.<sup>7)</sup>

### 3. 추가 긴장력과 저항모멘트

콘크리트 합성단면 또는 강합성 교량의 보강을 위해 도입되는 추가 긴장력의 크기는 전적으로 도입 직전 허용응력 지배연단의 응력에 의해 결정된다. 프리스트레스트 콘크리트 합성거더는 사용하중에 대해 허용응력을 만족하도록 설계되며, 최대 추가 긴장력은 연단응력이 외부하중에 의한 응력과 반대 방향의 허용응력이 되도록 결정되어야 한다. 이 조건에서 지지할 수 있는 활하중이 포함된 최대 추가 외부하중으로 정의되는 저항모멘트는 유효 긴장력에 대한 연단응력과 허용응력의 차이에 연단의 단면계수를 곱한 값으로 평가된다.

합성단면을 보강하기 위해 도입된 추가긴장재의 탄성수축 직후 초기 긴장력  $P_i^{2nd}$ 에 의한 프리스트레스트 콘크리트 단면의 응력변화  $\Delta f_{ci}^{2nd}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta f_{ci}^{2nd} = \frac{P_i^{2nd}}{A_2} + \frac{P_i^{2nd} y_2^{2nd} y_2}{I_2} = \frac{P_i^{2nd}}{A_{2e}} \quad (9)$$

여기서, 아래첨자 2는 추가로 도입되는 긴장재의 단면이 포함되지 않은 합성단면의 환산 단면특성으로 각 기호는 다음과 같이 정의된다.

- $A_2, I_2$  = 추가로 긴장된 강재가 포함되지 않은 합성단면의 환산 단면적과 단면이차모멘트
- $y_2^{2nd}$  = 합성단면의 중심에 대한 추가로 긴장된 강재의 중심위치로 아래 연단 쪽으로 양의 값
- $y_2$  = 합성단면의 중심에 대한 위치로 아래 연단 쪽으로 양의 값
- $S_2$  = 추가로 긴장된 강재가 포함되지 않은 합성단면의 단면계수 =  $I_2/y_2$
- $k_2$  = 합성단면의 단면적에 대한 단면계수의 비 =  $-S_2/A_2$
- $A_{2e}$  = 추가 긴장력에 의한 콘크리트 거더의 응력을 계산하기 위한 유효 단면적 =  $S_2/(y_2^{2nd} - k_2)$

식 (9)의  $y_2$ 에 추가 긴장재가 설치되는 프리캐스트 콘크리트 단면의 위와 아래 연단에 대한 위치  $y_2^{top}$ 과  $y_2^{bot}$ 을 적용하면, 추가 긴장력에 의한 프리캐스트 콘크리트 단면의 연단응력  $\Delta f_{ci}^{top}$ 과  $\Delta f_{ci}^{bot}$ 의 관계는 다음과 같이 된다.

$$\frac{\Delta f_{ci}^{top}}{\Delta f_{ci}^{bot}} = \frac{A_{2e}^{bot}}{A_{2e}^{top}} = \frac{y_2^{top}}{y_2^{bot}} \frac{y_2^{2nd} - k_2^{bot}}{y_2^{2nd} - k_2^{top}} \quad (10)$$

여기서,  $k_2^{top}, k_2^{bot}$  = 합성단면에 대한 상핵점과 하핵점 =  $-S_2^{bot}/A_2$ 와  $-S_2^{top}/A_2$

추가 긴장력의 도입 직후 평형을 유지하는 상태에서 프리캐스트 콘크리트 단면의 응력  $f_{ci}^{2nd}$  는 다음과 같다.

$$f_{ci}^{2nd} = f_{co} + \Delta f_{ci}^{2nd} \quad (11)$$

여기서,  $f_{co}$  = 추가 긴장력의 도입 직전 프리캐스트 단면의 응력

### 3.1 최대 추가 긴장력

외부하중에 대해 콘크리트의 응력은 Table 4의 허용응력 범위에 있어야 한다. 프리캐스트 콘크리트 단면의 위와 아래 연단에서 허용응력을 모두 만족하기 위해서 합성 거더에 도입되는 추가 긴장력은 다음을 만족하여야 한다.

$$P_i^{2nd} \leq \Delta f_{cai}^{govi} A_{2e}^{govi} \quad (12)$$

여기서, 위첨자  $govi$ 는 추가 긴장력의 도입 초기에 허용응력의 지배연단을 나타내며,  
 $\Delta f_{cai}^{govi}$  = 추가 긴장력의 도입에 의한 초기 지배연단의 최대 응력변화 =  $f_{cai}^{govi} - f_{co}^{govi}$

프리캐스트 콘크리트 단면의 허용응력 지배연단은 각 연단에서  $\Delta f_{cai}^{top} A_{2e}^{top}$  과  $\Delta f_{cai}^{bot} A_{2e}^{bot}$  중 작은 값에 의해 결정된다. 식 (12)에서 최대 추가 긴장력은 도입 직전 허용응력 지배연단의 응력  $f_{co}^{govi}$ 에 의해서 큰 영향을 받는다. 이는 상대적으로 초기재령에 추가 긴장력이 도입되는 경우 일차 긴장력의 손실률에 설계규준의 일괄손실이 적용으로 과대평가되면, 최대 추가 긴장력 또한 과대평가되어 추가 긴장력의 도입 초기에 허용응력을 초과하게 된다. 프리캐스트 단면의 연단응력이 동시에 Table 1의 최종상태 허용응력에 도달하는 긴장력은 다음과 같으며,

$$P_{bi}^{2nd} = \frac{\Delta f_{cai}^{top} y_2^{bot} - \Delta f_{cai}^{bot} y_2^{top}}{h_{PC}} A_2 \quad (13)$$

여기서, 프리캐스트 단면의 높이  $h_{PC} = y_2^{bot} - y_2^{top}$  이며,  $P_{bi}^{2nd}$ 는 초기 균형긴장력으로 정의된다. 결정된 긴장력  $P_i^{2nd}$ 가 초기 균형 긴장력  $P_{bi}^{2nd}$ 보다 크면 압축연단이 그리고 작으면 인장연단이 지배연단이 된다.

추가 긴장력의 도입 이후 최종상태까지 일차 긴장력과 추가 긴장력의 손실률  $LR_{1st}$  과  $LR_{2nd}$ 에 의한 다음의 긴장력의 변화  $\Delta P_{1st}$  와  $\Delta P_{2nd}$ 에 대해,

$$\Delta P_{1st} = -LR_{1st} P_i^{1st} \quad (14a)$$

$$\Delta P_{2nd} = -LR_{2nd} P_i^{2nd} \quad (14b)$$

**Table 1** Effective allowable stresses of prestressed concrete for second prestressed force<sup>9)</sup>

External moment	Extreme fiber	Allowable stress $f_{ca}$	
		Initial $f_{cai}$	Final $f_{cae}$
Positive	Top	$-1.6\sqrt{f_{ck}}$	$0.4f_{ck}$
	Bottom	$0.4f_{ck}$	$-1.6\sqrt{f_{ck}}$
Negative	Top	$0.4f_{ck}$	$-1.6\sqrt{f_{ck}}$
	Bottom	$-1.6\sqrt{f_{ck}}$	$0.4f_{ck}$

콘크리트 거더의 유효 연단응력  $f_{ce}^{2nd}$  는 다음과 같으며,

$$f_{ce}^{2nd} = f_{ci}^{2nd} + \frac{\Delta P_{1st}}{A_{1e}} + \frac{\Delta P_{2nd}}{A_{2e}} \quad (15a)$$

여기서,  $A_{1e}$  = 초기에 도입된 일차긴장재의 단면이 포함되지 않은 합성단면의 유효 환산 단면적  
 $= S_1 / (y_1^{ps} - k_1)$

일반적으로 추가 긴장력은 일차 긴장력의 충분한 손실 후에 도입되므로 (15a)는 근사적으로 다음과 같이 가정된다.

$$\begin{aligned} f_{ce}^{2nd} &\approx f_{ci}^{2nd} + \frac{\Delta P_{2nd}}{A_{2e}} \\ &= f_{ci}^{2nd} - LR_{2nd} \frac{A_{2e}^{govi}}{A_{2e}} \Delta f_{ci}^{govi} \end{aligned} \quad (15b)$$

프리캐스트 콘크리트 단면의 최종상태 허용응력 지배연단에서 추가긴장재의 유효긴장력에 대한 유효응력  $f_{ce}^{govi}$  은 다음과 같다.

$$f_{ce}^{gove} = f_{ci}^{gove} - LR_{2nd} \Delta f_{ci}^{gove} \quad (15c)$$

최종상태에서 지지하게 될 활하중이 포함된 추가 외부하중에 대한 허용응력 지배연단은 최종상태에서 프리캐스트 콘크리트 단면의 연단 모두에서 허용응력이 되는 긴장력으로 정의되는 다음의 균형 긴장력  $P_{be}^{2nd}$ 에 의해 판정될 수 있다.

$$P_{be}^{2nd} = \frac{\Delta f_{cae}^{top} y_2^{bot} - \Delta f_{cae}^{bot} y_2^{top}}{h_{PC}} A_2 \quad (16)$$

여기서  $\Delta f_{cae}^{top}$  과  $\Delta f_{cae}^{bot}$  은 각각 프리캐스트 콘크리트 단면의 위와 아래 연단에서 추가 긴장력의 도입 직전의 응력  $f_{co}$ 에 대한 Table 1의 최종상태에서 허용응력까지 응력변화이다. 추가 긴장력의 손실 후 유효 긴장력  $P_e^{2nd}$ 이 위의 값보다 크면 압축연단이 그리고 이보다 작으면 인장연단이 허용응력이 최종상태에서 지배연단이 결정된다.

### 3.2 저항모멘트

이 논문에서 저항모멘트는 추가 긴장력이 도입된 직후 프리캐스트 콘크리트 단면의 연단응력이 허용응력을 초과하지 않으면서 합성단면이 지지할 수 있는 활하중이 포함된 최대 추가하중으로 정의 된다. 유효 추가 긴장력에 대한 최종상태 지배연단에서 프리캐스트 콘크리트 단면의 응력  $f_{ce}^{gove}$ 에 대해 저항모멘트  $M_r$ 은 다음과 같이 평가될 수 있다.

$$\begin{aligned} M_r &= (f_{ce}^{gove} - f_{cae}^{gove}) S_2^{gove} \\ &= M_{ri} - LR_{2nd} \Delta M_{ri}^{2nd} \end{aligned} \quad (17)$$

여기서, 위첨자 gove는 최종상태에서 허용응력 지배연단을 나타내며, 각 기호는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} M_{ri} &= \text{최종상태 허용응력 지배연단에 대한 추가 긴장력이 도입될 때의 초기 저항모멘트} \\ &= (f_{ci}^{gove} - f_{cae}^{gove}) S_2^{gove} \\ \Delta M_{ri}^{2nd} &= \text{최종상태 허용응력 지배연단에서 추가 긴장력의 도입에 의한 초기 저항모멘트의 증가} \\ &= \Delta f_{ci}^{govi} S_2^{gove} (A_{2e}^{govi} / A_{2e}^{gove}) \end{aligned}$$

전통적으로 프리스트레스트 콘크리트 단면의 설계는 단면의 효율적인 사용을 위해서 초기와 최종상태에서 지배연단이 같게 하기 위해 손실률  $LR$ 에 대해 다음과 같도록 콘크리트 단면과 긴장력이 설계된다.

$$P_{bi} \leq P_i \leq P_{be} / (1 - LR) \quad (18)$$

식 (18)을 만족하면서 프리캐스트 콘크리트 단면의 허용응력 지배연단의 응력이 허용응력이 되도록 최대 추가 긴장력이 도입되면, 저항모멘트는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} M_{ri} &= (f_{ci}^{gov} - f_{cae}^{gov}) S_2^{gov} \\ &= (0.4f_{ck} + 1.6\sqrt{f_{ck}}) S_2^{gov} \end{aligned} \quad (19a)$$

$$\begin{aligned} \Delta M_{ri}^{2nd} &= (f_{ci}^{gov} - f_{co}^{gov}) S_2^{gov} \\ &= \Delta f_{ci}^{gov} S_2^{gov} \end{aligned} \quad (19b)$$

여기서, 위첨자 gov는 초기와 최종상태의 지배연단을 의미한다.

그러나 가능한 작은 콘크리트 단면의 사용을 위해 상대적으로 큰 긴장력의 도입된 경우에는 긴장력의 도입 초기와 최종상태에서 허용 압축응력에 대한 지배연단이 같지 않게 된다. “정모멘트 외부하중”을 지지하는 단면의 경우 추가 긴장력의 도입 초기에 아래 연단과 최종상태에서 위 연단의 허용 압축응력에 의해 저항모멘트는 다음의 값으로부터 계산되어야 한다.

$$\begin{aligned} M_{ri} &= (f_{ci}^{top} - f_{cae}^{top}) S_2^{top} \\ &\leq -(0.4f_{ck} + 1.6\sqrt{f_{ck}}) S_2^{top} \end{aligned} \quad (20a)$$

$$\begin{aligned} \Delta M_{ri}^{2nd} &= \frac{A_{2e}^{bot}}{A_{2e}^{top}} \Delta f_{ci}^{bot} S_2^{top} \\ &= \frac{A_{2e}^{bot}}{A_{2e}^{top}} (f_{cae}^{bot} - f_{co}^{bot}) S_2^{top} \end{aligned} \quad (20b)$$

특히 추가 긴장력에 의해 위 연단의 압축응력이 도입되면 저항모멘트가 오히려 감소되기 때문에 다음의 조건이 만족되어야 한다.

$$\Delta f_{ci}^{top} = \frac{P_i^{2nd}}{S_2^{top}} (y_2^{2nd} - k_2^{bot}) \leq 0 \quad (21a)$$

$$\text{또는 } y_2^{2nd} \geq k_2^{bot} = -\frac{S_2^{top}}{A_2} \quad (21b)$$

여기서,  $k_2^{bot}$ 은 추가로 긴장된 강재가 프리캐스트 콘크리트 단면에 인장응력을 발생시키지 않기 위한 추가 긴장력에 의한 압축단면력의 아래쪽 한계 위치로 정의되는 하핵점(lower kern point)이다. 위 연단  $y_2^{top}$ 에 대한 단면계수  $S_2^{top}$ 은 음의 값으로 하핵점은 합성단면의 중심에서 아래 연단 쪽에 위치한다. 추가 긴장력의 위치는 합성단면의 하핵점보다 아래에 위치하여야 한다. “부모멘트 외부하중”을 지지하는 경우 추가긴장재는 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$y_2^{2nd} \leq k_2^{top} = -\frac{S_2^{bot}}{A_2} \quad (21c)$$

여기서,  $k_2^{top}$ 은 프리캐스트 콘크리트 단면에 인장응력을 발생시키지 않는 압축단면력의 위쪽 한계위치로 정의되는 상핵점(upper kern point)이며, 추가긴장재는 상핵점보다 위쪽에 위치하여야 한다.

#### 4. 프리스트레스트 콘크리트 합성거더 해석

여러 고정하중이 서로 다른 재령에 작용되면, 콘크리트의 크리프계수는 각 고정하중의 재하재령에 따라 서로 다른 값이 적용되어야 한다. 이를 위해 합성단면의 환산 단면특성은 하중별로 독립된 크리프함수의 유효탄성계수로부터 계산된다. 재령  $t_n$ 에서 콘크리트의 응력  $f_c(t_n)$ 은 재령  $t_k$ 에 작용한 각각의 외부하중에 대한 식 (1)의 재령  $t_j$ 에서 콘크리트의 응력변화  $\Delta f_c^k(t_j)$ 의 합으로 다음과 같이 계산된다.

$$f_c(t_n) = \sum_{k=1}^m \left[ \sum_{j=k}^n \Delta f_c^k(t_j) \right] \quad (22)$$

여기서,  $m$ 은 재령  $t_n$  이전에 작용된 고정하중의 수이다.

#### 4.1 적용 예

이 논문에서 제안된 여러 단계로 단면이 설치되고 하중이 작용하는 합성거더에 도입되는 추가 긴장력의 설계와 해석 방법을 검토하기 위해서 경간 3. m의 교량에 일반적으로 사용될 수 있는 AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials)에서 제안된 Type 5<sup>8)</sup>의 프리캐스트 콘크리트 거더와 250 mm 두께의 현장치기(cast-in-place, CIP) 콘크리트 바닥판으로 구성된 합성거더를 분석하였다. 이 합성거더의 단면제형은 Fig. 2와 같으며, 재료 및 단면특성은 Table 2와 같다. 콘크리트 장기변형을 계산하기 위한 매개변수는 Table 3의 값이 적용되었으며, Table 3 이외의 매개변수에 대해서는 표준상태의 값이 적용되었다. 이 합성거더의 기본설계에 적용된 하중과 재하재령은 Table 4와 같다. 재령 10년에 합성거더 또는 바닥판이 제거된 프리캐스트 콘크리트 거더에 도입된 추가 긴장력은 Table 5와 같다.

Table 4의 각 재하재령에 대한 프리캐스트 콘크리트 단면의 콘크리트구조 설계기준<sup>9)</sup> 또는 Eurocode 2<sup>10)</sup>와 ACI 209<sup>11)</sup>의 제안에 의한 크리프계수는 Fig. 3과 같으며, 재하재령 10년에 대한 크리프함수는 추가 긴장력에 대한 값이다. Fig. 3에서 초기재령에 도입된 하중에 대해서 Eurocode 2의 제안식이 ACI 209 제안식보다 큰 크리프계수를 보이니, 재하재령이 증가함에 따라 Eurocode 2의 극한 크리프계수가 ACI 209보다 크게 감소하였다.

콘크리트 단면에 발생하는 건조수축변형률은 Fig. 4와 같다. 프리캐스트 콘크리트 단면의 건조수축변형률은 재령 7일에 대기에 노출된 건조수축변형률 함수에서 일차 긴장력이 도입되는 재령 30일 이후의 값이다. 바닥판은 재령 40일에 현장타설되고, 재령 47일에 대기에 노출된 것으로 설정하였다.

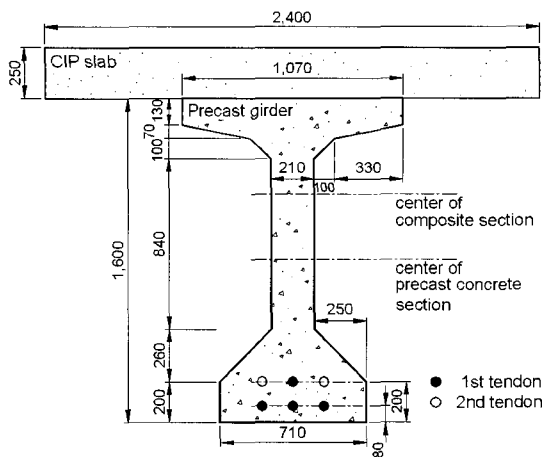


Fig. 2 Example composite section with AASHTO type 5 precast concrete girder (unit mm)

Table 2 Material and section properties of example composite section (unit kgf/cm<sup>2</sup> or cm)

Property	Concrete		First tendon
	Precast girder	CIP slab	
Type	$f_{ck} = 400$	$f_{ck} = 270$	SWPC 7B
$E$	280,000	246,000	2,000,000
$n$	1.00	0.88	7.14
$A$	6,476	6,000	41.46
$I$	21,150,000	312,500	0
$y_g^\dagger$	82.53	172.5	11.0

\* Distance from bottom of precast girder to center of each section

Table 3 Parameters for long-term deformation of precast concrete

Parameter	Value
Cement	Type I
Relative humidity	70 %
Fine aggregate ratio	50 %
Cement content	410 kgf/m <sup>3</sup>
Curing method	3 days steamed
Slump	7.5 cm
Air content	6 %
Temperature	20°C

Table 4 Dead loads and loading ages

Type	Age (days)	Load (tonf·m)	
Jacking force $P_J^{1st}$	30	551	
Self Weight	Girder $M_{PCo}$	30	174
	Slab $M_{slab}$	40	162
Super imposed load $M_{so}$	70	67.5	

\* Prestressing force after loss due to friction and anchorage seating and before elastic shortening

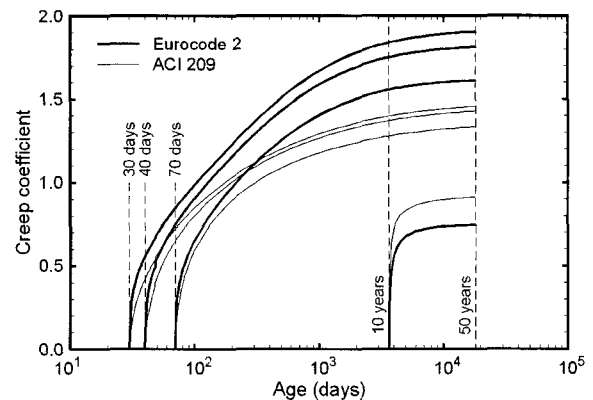


Fig. 3 Creep coefficients of precast concrete girder

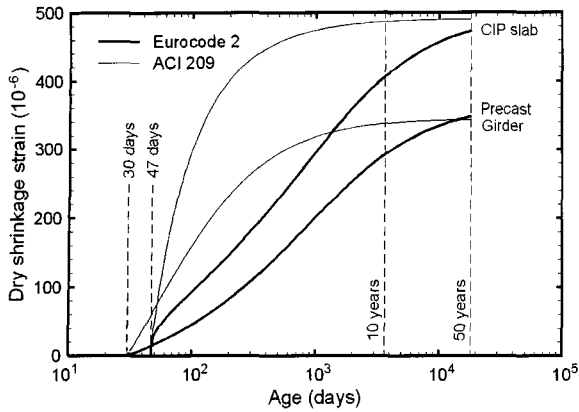


Fig. 4 Dry shrinkage strains of precast concrete girder and CIP slab

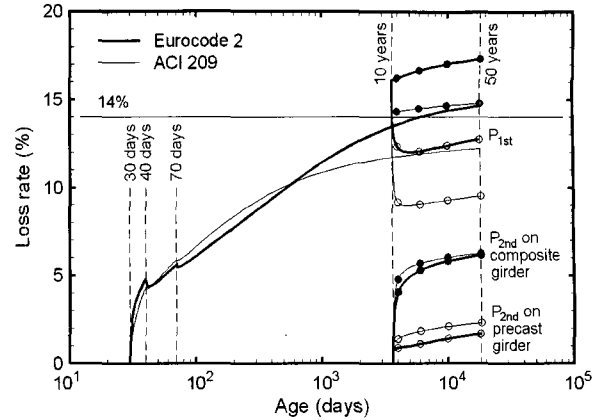


Fig. 6 Loss rates of first and second tendon forces

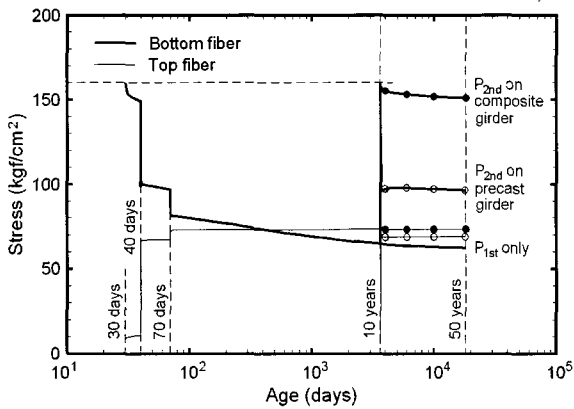


Fig. 5 Stresses at extreme fibers of precast girder according to creep and shrinkage of Eurocode 2

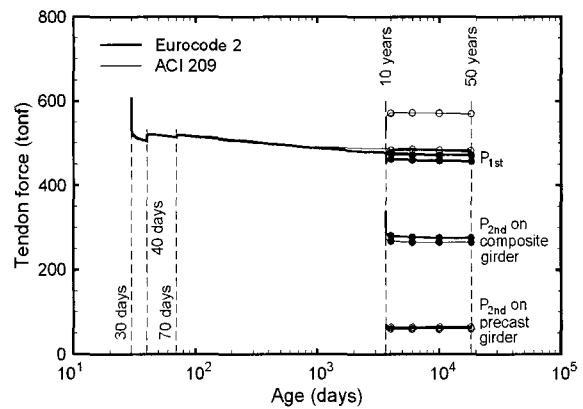


Fig. 7 Change of first and second tendon forces

Table 5 Second prestressed force

Type	Age (days)	Load ( tonf·m )
Composite section		
Jacking force $P_f^{2nd}$	3,650	300 <sup>*</sup> 281 <sup>*</sup>
Precast girder		
Jacking force $P_f^{2nd}$	3,650	62.4 <sup>*</sup> 51.6 <sup>*</sup>
Slab self weigh $M_{slab}$	3,660	162
Super imposed load $M_{so}$	3,690	67.5

\* Prestressing force after loss due to friction and anchorage seating and before elastic shortening.

\* For Eurocode 2 creep coefficient and dry shrinkage strains

\* For ACI 209 creep coefficient and dry shrinkage strains

추가 긴장력의 도입 이후에 다시 타설되는 바닥판의 경우도 같은 건조수축변형률 함수가 적용된다. ACI 209의 건조수축변형률은 Eurocode 2보다 큰 값을 보이나, 재령의 경과에 극한 건조수축변형률은 서로 유사한 값을 보였다. Figs. 3과 4 그리고 ACI 209에서 제한하는 긴장력의 응력이완 제안식<sup>11)</sup>이 적용된 경우 Fig. 2의 합성단면에서

긴장력의 변화는 Fig. 5와 같다. 이 그림에서 검은 원은 추가 긴장력이 합성거더에 도입된 경우 일차 긴장력과 추가 긴장력의 변화이며, 흰 원은 바닥판을 제거하고 추가 긴장력이 프리캐스트 콘크리트 거더에 도입된 후 Table 5와 같이 바닥판과 추가 고정하중이 도입된 경우이다. 합성거더에 추가 긴장력이 도입되면 탄성수축에 의해 일차 긴장력은 감소한다. 그러나 프리캐스트 콘크리트 거더에 추가 긴장력이 도입된 경우에는 일차 긴장력은 증가하였다. 이는 추가 긴장력의 도입 이후 재하되는 바닥판의 자중과 추가 고정하중에 의한 긴장재의 신장 때문이다. 허용응력을 초과하지 않는 최대 추가긴장재의 탄성수축 이전 제킹력은 Table 5와 같이 합성거더에 도입되는 경우에는 300 ton이나, 프리캐스트 콘크리트 거더에 도입되는 경우에는 62.4 ton으로 큰 차이를 보였다. 식 (6)으로 정의되고 식 (7)에 의해 계산된 긴장력의 손실률은 Fig. 6과 같다. 일차 긴장력만 도입되는 경우 재령 10년에서 손실률은 Eurocode 2와 ACI 209에 대해 각각 13.5%와 11.7%이며, 재령 50년에는 각각 14.5%와 12.2%이다. 이 예제의 단면과 일차 긴장력에 대해 콘크리트의 장기변형에 의한 도로교설계기준<sup>12)</sup>의 일괄손실률은 Fig. 6의 14.0%로 약 20



년의 재령에서 이 논문의 단계별 계산법의 결과 유사하였다. 재령 10년에서 50년 사이의 손실률은 약 1% 이내이다.

추가 긴장력의 손실률은 합성거더에 도입된 경우 62%와 프리캐스트 콘크리트 거더에 도입된 경우 1.7~2.3%로 프리캐스트 콘크리트 거더에 도입된 경우에 작은 값을 보였다. 이는 추가 긴장력 이후에 타설되는 바닥판의 상대적으로 큰 부등건조수축으로 인한 곡률의 형성 때문이다. 프리캐스트 콘크리트 거더에 추가 긴장력이 도입된 경우 일차 긴장력의 증가 또는 손실률의 감소도 추가 긴장력의 도입 이후 타설된 바닥판의 부등건조수축에 의해 큰 영향을 받았다. 추가 긴장력에 대한 Eurocode 2의 작은 손실률은 Fig.3에서 재령 10년에 도입되는 하중에 대해 상대적으로 작은 크리프계수 때문으로 판단된다.

Fig. 7은 Eurocode 2의 크리프계수와 건조수축변형률이 적용된 경우 프리캐스트 콘크리트 단면에서 연단응력이다. 재령 10년에서 아래 연단의 응력과 Table 1의 허용응력 그리고 식 (12)로부터 Table 5의 추가 긴장력이 결정되었다. 추가 긴장력이 합성거더에 도입되면 아래 연단의 압축응력은 허용응력까지 증가되나, 프리캐스트 콘크리트 거더에 도입된 경우에는 바닥판의 자중과 추가의 고정하중에 의해 약  $95 \text{ kgf/cm}^2$ 까지 다시 감소하였다. 프리캐스트 콘크리트 단면 위 연단의 응력은 거의 일정한 값을 유지하며, 이는 추가 긴장력의 작용점이 식 (22b)로 정의되는 합성단면의 하핵점 부근에 위치하기 때문이다. ACI 209의 크리프계수와 건조수축변형률에 대한 프리캐스트 콘크리트 단면의 연단응력도 Fig.7과 거의 유사하였다.

Fig. 7의 프리캐스트 콘크리트 단면 연단응력에 대해 Fig. 2의 합성단면은 Fig. 8의 저항모멘트를 지지할 수 있다. 일차 긴장력만 도입된 경우 재령 50년에서 저항모멘트는 약  $390 \text{ tonf} \cdot \text{m}$ 이나, 합성거더에 추가 긴장력이 도입되면 약  $740 \text{ tonf} \cdot \text{m}$  그리고 프리캐스트 콘크리트 거더에 대해 약  $520 \text{ tonf} \cdot \text{m}$ 로 각각 90%와 33%의 증가를 보였다. 합성단면에 추가 긴장력이 도입되면 프리캐스트 콘크리트 단면에 도입되는 경우보다 대략 현장치기 바닥판과 추가 고정하중에 해당되는 모멘트( $230 \text{ tonf} \cdot \text{m}$ )를 더 지지할 수 있게 되어 보강효과를 높일 수 있다.

#### 4.2 합성단면에 도입된 추가 긴장력의 영향

추가 긴장력의 크기는 긴장력이 도입되기 직전 허용응력 지배연단의 응력에 의해 크게 영향을 받는다. IPC 합성거더<sup>1)</sup>와 같이 추가 고정하중이 작용하기 직전의 합성단면에 추가 긴장력이 도입되는 경우에 Fig. 7의 프리캐스트 콘크리트 단면 아래 연단에서 응력은  $97 \text{ kgf/cm}^2$  그리고 Fig. 6에서 일차 긴장력의 손실률은 5.6%이며, 식 (12)에 의해 도입될 수 있는 최대 추가 긴장력은 약  $200 \text{ tonf}$ 이다. 그러나 일반적으로 적용되는 15%의 손실률에 대한

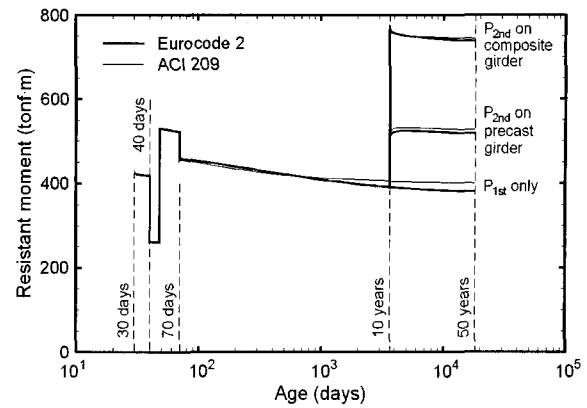


Fig. 8 Maximum resistance moments

프리캐스트 단면 아래 연단의 응력  $77 \text{ kgf/cm}^2$ 과 이 응력에 대한 식 (12)의 최대 추가 긴장력은  $260 \text{ tonf}$ 이 계산되어 프리캐스트 콘크리트 아래 연단의 응력은 허용 압축응력을  $19 \text{ kgf/cm}^2$  초과하게 된다. Table 5의 추가 긴장력은 콘크리트 재령 10년에서 Eurocode 2와 ACI 209에 의한 일차 긴장력의 손실률 그리고 합성단면에 작용하는 Table 4의 추가 고정하중이 고려된 값이다.

초기상태와 최종상태에서 허용응력 지배연단이 같은 일반적인 경우에 최대 추가 긴장력이 도입된 직후 저항모멘트는 식 (19a)와 같이 허용 인장응력과 압축응력 그리고 허용응력 지배연단에 대한 추가 긴장력이 도입된 단면의 단면계수에 의해서 결정되며, 일차 긴장력에 독립적이다. 이는 Fig. 2의 예제 단면에 대한 Fig. 7의 연단응력에 대한 Fig. 8의 저항모멘트에서도 확인될 수 있다. 그러나 Fig. 8과 같은 추가 긴장력의 도입 이후의 저항모멘트 감소는 식 (19b)의 초기 추가 긴장력에 의한 저항모멘트의 증가와 추가 긴장력의 손실률에 의해 결정된다. Fig. 6의 프리캐스트 콘크리트 단면에 도입된 추가 긴장력의 합성단면에 도입된 경우보다 작은 손실률은 바닥판의 부등건조수축에 의해 설명될 수 있으나, Fig. 8의 상대적으로 작은 저항모멘트는 현장타설 바닥판과 추가 고정하중의 제거에 의한 아래 연단에서 압축응력  $f_{bot}^c$ 의 증가로 판단된다. 프리캐스트 콘크리트 단면에 추가 긴장력이 도입되는 경우에 추가 긴장력에 의한 저항모멘트는 Fig. 8에서 일차 긴장력에 대한 초기 최대 저항모멘트와 유사한 값을 보인다. 이는 프리캐스트 콘크리트 거더에 도입된 추가 긴장력이 손실된 일차 긴장력을 보완하는 역할을 하는 것을 나타낸다. 합성단면에 추가 긴장력이 도입된 경우에 큰 저항모멘트의 증가는 바닥판과 추가 고정하중이 포함된 아래 연단의 응력으로부터 추가 긴장력이 결정되고, 합성단면에서 아래 연단에 대한 단면계수의 증가에 원인이 있다. Fig. 2의 예제단면의 해석결과는 Fig. 6과 같이 추가 긴장력에 의한 일차 긴장력의 탄성수축에 의한 손실 그리고 합성단면에 도입된 추가 긴장력의 프리캐스트 콘크리트 거더에 도입된 추가 긴장력보다 큰 손실률에도 불구하고

고 Fig. 8에서 큰 저항모멘트의 증가를 보였다. 이는 합성 거더에 도입된 큰 추가 긴장력의 부정적인 영향보다 긍정적인 영향이 큰 것을 보여준다. 이 결과는 추가 긴장력은 일차 긴장력의 손실이 충분히 발생한 후 가능한 큰 고정하중이 작용할 때 도입되면 일차 긴장력 손실의 보완뿐만 아니라 상당히 큰 보강의 효과도 발휘할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

이 논문에서는 여러 재하재령의 하중이 작용하는 다른 재료특성의 여러 단면으로 구성된 합성단면에 대한 단계별 해석방법이 적용되었다. 이 해석방법에는 콘크리트 장기변형의 내부구속 효과, 긴장력의 손실, 그리고 추가 긴장력의 도입 등이 고려되었다. 추가 긴장력이 도입되는 합성단면의 해석에 대한 제안식에는 추가 긴장력의 설계와 저항모멘트의 평가에 필요한 매개변수들을 포함하고 있다. 추가 긴장력이 도입되는 프리스트레스트 콘크리트 합성거더에 대한 이 논문의 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 콘크리트의 크리프와 건조수축 그리고 긴장된 강재의 응력이완에 대해 합성단면의 내부구속에 의한 잔류응력이 단계별 계산법으로 분석되었다. 또한 각 하중의 재하재령에 대해 독립적인 크리프함수를 적용한 환산단면특성으로부터 크리프변형이 포함된 적합조건이 고려되었다.
- 2) 최대 추가 긴장력은 추가 긴장력 도입 직전의 허용응력 지배연단의 응력과 유효단면적에 의해 결정된다. 이로 인해 일차 긴장력의 손실이 과대평가되면 추가 긴장력에 의해 연단응력이 허용응력을 초과할 수 있다. 특히 비교적 초기재령에 추가 긴장력이 도입되는 경우 추가 긴장력의 도입재령에서 보다 정확한 일차 긴장력의 손실률의 평가가 필요하다.
- 3) 최대 추가 긴장력이 도입된 경우 저항모멘트는 허용응력과 허용응력 지배연단에 대한 단면계수에 의해 결정되며, 추가 긴장력에 의해 증가된 저항모멘트와 손실률에 의해 감소된다.
- 4) 프리캐스트 콘크리트 단면에 추가 긴장력이 도입되면 일차 긴장력의 손실과 추가 긴장력의 손실률은 감소하나, 이보다는 합성단면에 추가 긴장력이 도입된 경우가 상당히 큰 저항모멘트의 증가를 보일 수 있다. 프리캐

스트 콘크리트 거더에 도입된 추가 긴장력은 일차 긴장력을 보완하는 역할을 할 수 있는 반면에, 합성거더에 도입된 추가 긴장력으로 상당한 보강효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 한만엽, 김진근, 이차돈, 박준범, "프리스트레스를 단계적으로 도입하는 IPC 거더의 설계 이론 연구", 한국콘크리트학회지, 12권, 4호, 2000, pp.121~130.
2. 구민세, 박영제, 정봉수, "하중재하를 이용한 연속 프리플렉스 합성보의 라멘구조에 의한 적용", 대한토목학회 학술발표회논문집, 2000, pp.661~664.
3. 장승필, 심창수, 최규용, 정철현, "프리캐스트 교량 바닥판의 종방향 프리스트레스 손실량", 대한토목학회 논문집, 19권, I-6호, 1999, pp.917~927.
4. 연정흠, 주낙진, "콘크리트 장기변형의 구속계수와 선압축력의 손실률", 한국콘크리트학회지, 14권, 4호, 2002, pp.521~529.
5. 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.
6. Gilbert, R. I., "*Time Effects in Concrete Structures*," Elsevier, Amsterdam, 1988.
7. Bazant, Z. P., "Prediction of Concrete Creep Effects using Age-Adjusted Effective Modulus Method," *ACI Journal*, Vol.63, 1972, pp.212~217.
8. PCI, "*Bridge Design Manual, Precast/Prestressed Concrete Institute*," PCI, Chicago, 1999.
9. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조 설계기준", 한국콘크리트학회, 기문당, 1999.
10. CEN (European Committee for Standardization), "*Eurocode 2: Design of Concrete Structures, ENV (European Prestandard) 1992-1-1*," Brussels, Belgium, 1994.
11. ACI Committee 209, "*Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effect in Concrete Structures*," ACI 209R-92, ACI, 1997.
12. 대한토목학회, "도로교설계기준", 대한토목학회, 기문당, 2003.

## 요 약

이 논문에서는 프리캐스트 콘크리트와 현장타설 콘크리트 그리고 긴장된 강재와 긴장되지 않은 강재 등으로 구성되는 합성 단면에서 콘크리트 장기변형의 내부구속에 의한 잔류응력과 긴장력 손실을 해석하였다. 이 해석결과로부터 사용 중에 도입되는 추가 긴장력으로 합성거더를 보강하는 경우에 필요한 추가 긴장력의 설계식과 저항모멘트 평가식이 제안되었다. 제안된 식은 일차 긴장력의 손실률이 설계기준의 일괄손실 등에 의해 과대평가되는 경우에 허용응력으로부터 결정되는 추가 긴장력 또한 과대평가될 수 있음을 보여준다. 일반적으로 많이 사용되는 AASHTO Type 5 거더의 합성단면에 대해 이 논문의 해석방법을 적용 및 검토하였다. 프리캐스트 콘크리트 거더에 추가 긴장력이 도입되는 경우 일차 긴장력과 추가 긴장력의 손실률은 합성거더에 도입되는 경우보다 작았으나, 저항모멘트는 합성거더에 추가 긴장력이 도입되는 경우 상당히 증가하였다. 합성거더에 도입된 추가 긴장력의 보강효과는 매우 우수하였다.

**핵심용어** : 콘크리트 합성단면, 긴장력, 손실률, 콘크리트 장기변형, 저항모멘트