

슬립을 고려한 강합성 연속보의 장기거동해석

Long-Term Behavior of Composite Continuous Beams With Flexible Shear Connectors

최 동 호* 김 호 배** 이 동 혁*** 고 상 은****
Choi, Dong Ho Kim, Ho Bae Lee, Dong Hyuk Koh, Sang Eun

ABSTRACT

This study performs the elastic and viscoelastic analysis of composite continuous beams with flexible shear connectors. Due to creep and shrinkage of the concrete part, the stress redistribution between the concrete slab and steel beam, and the evolution of the redundant restraint reaction occur with time. Using the equation of equilibrium, internal and external compatibility condition, and constitutive relationships, mathematical formulations are formulated. The solution is obtained by means of numerical step-by-step techniques and the finite difference method. Numerical parametric studies are performed to evaluate the stress redistribution, and the evolution of the redundant restraint reaction. The parameters include the stiffness and spacing of shear connectors, the age of concrete at loading, and the relative humidity.

1. 서 론

합성형구조에서 전단연결재의 강성이 부족하면 슬립이 발생하여 불완전합성작용을 한다. 구조물의 거동에 중요한 요소인 전단연결재는 연결재료의 탄성특성과 콘크리트의 크리프와 건조수축으로 인한 효과에 의존한다. 특히 합성보에서 사하중과 같은 장기하중이 작용할 경우 콘크리트의 크리프와 건조수축의 영향을 고려하지 못하면 교량의 과도한 처짐과 바닥판의 균열발생등 많은 문제가 유발된다. 그러므로 슬립으로 인한 전단연결재의 변형과 크리프와 건조수축으로 인한 응력의 재분배는 구조물의 해석과 설계에서 고려되어야 한다. 불완전합성형의 탄성거동에 대한 연구는 Newmark 등에 의해 불완전합성형의 기초미분방정식이 유도되었고^(6,7), 실험과 이론적으로 많은 연구가 있었다.^(3,4,5,9)

본 연구에서는 슬립을 고려하여 연속합성보에서 탄성거동해석과 장기거동해석을 수행하였다. 슬립의 영향과 콘크리트의 크리프와 건조수축효과를 분석·평가하기 위해 주형에는 탄성법칙, 콘크리트에는 적분형태의 크리프법칙을 적용하여 불완전합성보의 미분방정식을 유도하여 유한차분법을 이용해 해를 구하였다. 그리고 전단연결재의 강성과 간격, 하중재하시간과 상대습도를 매개변수로 하여 매개변수 해석을 수행하였으며 이를 바탕으로 시간에 따른 두 부재 사이의 응력재분배와 부정정반력 변화 및 단위길이당 전단력의 흐름을 구하였다.

2. 문제의 공식화

슬립을 고려한 합성보를 해석할 때 콘크리트 바닥판과 강재주형의 사이에서 수평전단력이 발생한다. 그림 1은 합성단면의 단위길이당 수평전단력을 보여준다. 슬립 $\Gamma(x, t)$ 은 단일 연결재위에 작용하는 하중의 선형함수로 가정하여 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\Gamma(x, t) = \frac{Q(x, t)}{K} = \frac{s}{K} q(x, t) = \frac{\partial N(x, t)}{\partial x} \quad (1)$$

* 한양대학교 도시환경건설공학과군 토목공학과 조교수
** 한양대학교 토목공학과 박사과정
*** 현대건설 사업부
**** 한양대학교 토목공학과 석사과정

여기서, $q(x, t)$ 는 단위길이당 전단력이고 K 와 s 는 전단연결재의 강성 및 간격이다.

그림 2는 외부모멘트 $M(x)$ 를 적용한 합성단면을 보여주고, 합성단면의 두 부재에서 평면 보존의 법칙이 각각 고려된다는 가정하에 외부모멘트는 각 단면별로 축력과 모멘트로 분리된다. 콘크리트단면의 N_c 와 M_c 그리고 주형단면의 N_s 와 M_s 는 평형조건에 의하여 다음과 같다.

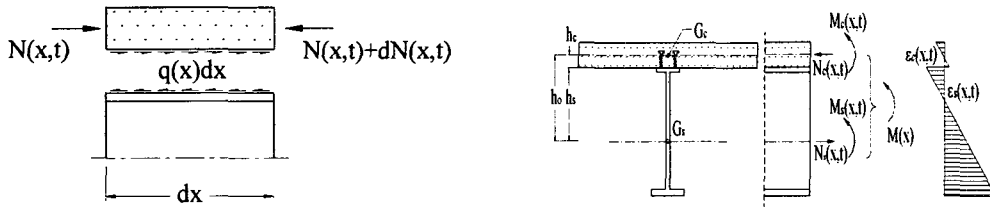
$$N_c(x, t) = -N_s(x, t) = N(x, t) \quad (2)$$

$$M_c(x, t) + M_s(x, t) + N(x, t)h_0 = M(x, t) \quad (3)$$

부정정구조물에서 휨모멘트 $M(x, t)$ 는 미지수이다. 그래서 정정구조물로 가정하여 휨모멘트 $M(x, t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$M(x, t) = M_0(x, t) + m(x) X(t) \quad (4)$$

여기서, $M_0(x, t_0)$ 는 정정구조물의 모멘트, $m(x)$ 는 내부지점의 단위하중에 의한 모멘트, $X(t)$ 는 중앙지점에서의 부정정반력이다.



<그림 1> 단위길이당 수평전단력

(a)합성단면 (b)축면도 (c) 변형률

<그림 2> 합성단면의 내력과 변형률

식 (1)을 x 에 관해 편미분한 것은 주형단면의 최상단 변형률과 콘크리트 단면의 최하단 변형률간의 차이로 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{\partial I(x, t)}{\partial x} = \frac{s}{K} \frac{\partial^2 N(x, t)}{\partial x^2} = \varepsilon_{s, top}(x, t) - \varepsilon_{c, bottom}(x, t) \quad (5)$$

식 (5)에 콘크리트에서 응력-변형률의 관계를 적용하여 $N(x, t)$ 에 대한 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{s}{K} \frac{\partial^2 N(x, t)}{\partial x^2} = & -\varepsilon^{sh}(t) + \frac{N(x, t)}{E_s A_s} - \frac{M_s(x, t)}{E_s I_s} h_s + \left[\frac{N(x, t_0)}{A_c} - \frac{M_c(x, t_0)}{I_c} h_c \right] J(t, t_0) \\ & + \frac{1}{A_c} \int_{t_0}^t J(t, \tau) dN(x, \tau) - \frac{h_c}{I_c} \int_{t_0}^t J(t, \tau) dM_c(x, \tau) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $\varepsilon^{sh}(t)$ 는 건조수축으로 인한 변형률, $J(t, \tau)$ 는 크리프 컴플라이언스로 일정단위응력을 시간 τ 로부터 시간 t 까지 작용시켰을 때의 시간 t 에서의 크리프 함수를 의미한다.

또한, 두 부재사이에 연직 상대처짐이 없다고 가정하여 변형시 두 부재는 같은 곡률을 가진다는 적합조건을 적용해 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{M_s(x, t)}{E_s I_s} = \frac{M_c(x, t_0)}{I_c} J(t, t_0) + \frac{1}{I_c} \int_{t_0}^t J(t, \tau) dM_c(x, \tau) \quad (7)$$

그리고 부정정반력을 구하기 위해서 처짐을 연속적분법으로 구하고, 이는 외부변위 $\delta_j(t)$ 와 같아야 한다는 적합조건을 적용하여 다음식을 얻었다.

$$\int_0^{x_l} \left[\int_0^\xi \frac{M_s(\eta, t)}{E_s I_s} d\eta \right] d\xi + C_1(t)x + C_2(t) = \delta_j(t) \quad ; j = 0, 1, 2 \quad (8)$$

3. 탄성거동해석

탄성해석은 콘크리트와 주형 양쪽 모두 탄성거동한다고 가정하여 초기변형의 시간 t_0 에서 식 (6)은 다음과 같은 단순화된 형태로 된다.

$$\frac{s}{K} \frac{\partial^2 N(x, t_0)}{\partial x^2} = \frac{N(x, t_0)}{E_s A_s} - \frac{M_s(x, t_0)}{E_s I_s} h_s + \frac{N(x, t_0)}{E_c(t_0) A_c} - \frac{M_c(x, t_0)}{E_c(t_0) I_c} h_c \quad (9)$$

식 (2)와 식 (3)에서 주형과 바닥판의 모멘트를 구하여 식 (9)에 대입하면 다음의 미분방정식이 유도된다.

$$\frac{s}{K} \frac{\partial^2 N(x, t_0)}{\partial x^2} - aN(x, t_0) = b[M_0(x, t_0) + m(x)X(t_0)] \quad (10)$$

여기서, $a = \frac{1}{E_c(t_0)A_c} + \frac{1}{E_s A_s} + \frac{h_o^2}{E_c(t_0)I_c + E_s I_s}$ 이고, $b = -\frac{h_o}{E_c(t_0)I_c + E_s I_s}$ 이다.

4. 장기거동해석

장기거동은 $t_0 = t$ 일때 미지의 함수 $N(x, t)$, $M_c(x, t)$ 와 $M_s(x, t)$ 를 구하기 위해 방정식을 시간 t 에 따라 등분하고, trapezoidal rule을 이용해 적분값을 구하며⁽¹⁾, 시간을 $t = t_k$ 로 놓은 식에서 $t = t_{k-1}$ 의 식을 빼서 미지 값들의 증가량에 대한 식으로 나타낼 수 있다. 그래서 식 (6)은 다음과 같이 다시 쓰여진다.

$$\begin{aligned} \frac{s}{K} \frac{\partial^2 \Delta N(x, t_k)}{\partial x^2} = & -\Delta \epsilon^{sh}(t_k) + \left(\frac{1}{E'_k A_c} + \frac{1}{E_s A_s} \right) \Delta N(x, t_k) - \frac{h_c}{E'_k I_c} \Delta M_c(x, t_k) \\ & - \frac{h_c}{E'_k I_c} \Delta M_s(x, t_k) + \left[\frac{N(x, t_0)}{A_c} - \frac{M_c(x, t_0)}{I_c} h_o \right] \Delta J(t_k, t_0) + f^N(x, t_k) + f^{M_c}(x, t_k) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, $E'_k = \frac{2}{J(t_k, t_k) + J(t_k, t_{k-1})}$

$$f^N(x, t_k) = \frac{1}{2A_c} \sum_{i=1}^{k-1} [J(t_k, t_i) + J(t_k, t_{i-1}) - J(t_{k-1}, t_i) - J(t_{k-1}, t_{i-1})] \Delta N(x, t_i)$$

$$f^{M_c}(x, t_k) = -\frac{h_c}{2I_c} \sum_{i=1}^{k-1} [J(t_k, t_i) + J(t_k, t_{i-1}) - J(t_{k-1}, t_i) - J(t_{k-1}, t_{i-1})] \Delta M_c(x, t_i)$$

식 (11)에 주형과 바닥판의 시간에 따른 모멘트증가량을 구하여 정리하면 다음의 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{s}{K} \frac{\partial^2 \Delta N(x, t_k)}{\partial x^2} - a(x, t_k) \Delta N(x, t_k) = b(x, t_k) + c(x, t_k) \Delta X(t_k) \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
\text{여기서, } a(x, t_k) &= \frac{1}{E_k' A_c} + \frac{1}{E_s A_s} + \frac{h_o^2}{E_k' I_c + E_s I_s} \\
b(x, t_k) &= -\Delta \varepsilon^{sh}(t_k) + \left(\frac{h_c}{E_k' I_c} - \frac{h_s}{E_s I_s} \right) \left(\frac{1}{E_s I_s} + \frac{1}{E_k' I_c} \right)^{-1} \cdot \left[\frac{M_c(x, t_0)}{I_c} \Delta J(t_k, t_0) \right. \\
&\quad \left. - \frac{1}{h_c} f^{M_c}(x, t_k) \right] - \frac{h_o}{E_k' I_c + E_s I_s} \Delta M_0(x, t_k) + \left[\frac{N(x, t_0)}{A_c} - \frac{M_c(x, t_0)}{I_c} h_c \right] \\
&\quad \Delta J(t_k, t_0) + f^N(x, t_k) + f^{M_c}(x, t_k) \\
c(x, t_k) &= -\frac{h_o}{E_k' I_c + E_s I_s} m(x)
\end{aligned}$$

선형미분방정식의 이론으로부터 축력의 증가량 $\Delta N(x, t_k)$ 는 구조물에서 외부하중으로 인한 축력과 부정정반력으로 인한 영향으로 생각하면 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.⁽³⁾

$$\Delta N(x, t_k) = \Delta N_0(x, t_k) + \Delta n(x, t_k) \Delta X(t_k) \quad (13)$$

여기서, $\Delta N_0(x, t_k)$ 와 $\Delta n(x, t_k)$ 는 다음식들의 해로서 얻어진다.

$$\frac{s}{K} \frac{\partial^2 \Delta N(x, t_k)}{\partial x^2} - a(x, t_k) \Delta N(x, t_k) = b(x, t_k) \quad (14)$$

$$\frac{s}{K} \frac{\partial^2 \Delta n(x, t_k)}{\partial x^2} - a(x, t_k) \Delta n(x, t_k) = c(x, t_k) \quad (15)$$

또한, 주형과 바닥판의 모멘트 증가량은 다음식으로 표현되며,

$$\Delta M_s(x, t_k) = \Delta M_{s,0}(x, t_k) + \Delta m_{s,1}(x, t_k) \Delta X(t_k) \quad (16)$$

$$\Delta M_c(x, t_k) = \Delta M_{c,0}(x, t_k) + \Delta m_{c,1}(x, t_k) \Delta X(t_k) \quad (17)$$

식 (17)을 식 (8)에 대입하여 부정정력 $\Delta X(t_k)$ 과 적분상수 C_1 과 C_2 를 구하고, 식 (19)에 $\Delta X(t_k)$ 를 적용하여 축력의 증가량을 구하고 각 단면별 모멘트를 구한다.

5. 적용 예

콘크리트의 크리프와 건조수축변형률을 계산하기 위하여 CEB-FIP 1990모델⁽²⁾을 적용하여 고속철도 합성형 교량의 중간단면⁽⁹⁾에 합성후 2차사하중을 재하하여 해석하였다. 이 단면의 기하학적 형상과 치수는 그림 3과 같으며, 적용한 단면상수와 재료상수는 표 1, 2와 같다.

6. 매개변수해석

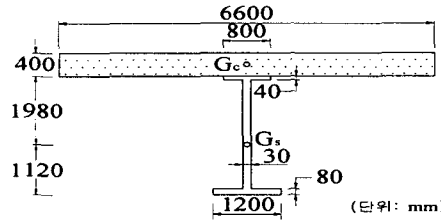
연속합성보에 건조수축만 있는 경우와 등분포하중재하, 그리고 지점침하가 있는 경우에 대해 전단연결재의 강성 및 간격 그리고 하중재하시 콘크리트의 재령일 t_0 와 주변환경을 나타내는 상대습도 RH 를 매개변수로 선택하여 수행하였다. 매개변수 K/s 의 최대값은 두 부분에 슬립이 발생하지 않는 $K/s \rightarrow \infty$ 를 선택하는 반면에 최소값은 1 mm의 탄성변위를 허용하는 $K/s = 0.40 \text{ kN/mm}^2$ 을 택한다.⁽⁸⁾ 그리고 하중재하시 콘크리트의 재령일을 t_0 라 하고 장기거동 해석의 최종시간을 10000일로 선택하여 해석하였다.

<표 1> 적용단면상수 및 재하하중

주형의 길이	$2L = 80\text{ m}$
주형의 등분길이	$\Delta x = 1\text{ m}$
주형의 면적	$A_s = 2.174 \times 10^5\text{ mm}^2$
바닥판의 면적	$A_c = 2.64 \times 10^6\text{ mm}^2$
주형의 단면2차모멘트	$I_s = 31.92 \times 10^{10}\text{ mm}^4$
바닥판의 단면2차모멘트	$I_c = 3.52 \times 10^{10}\text{ mm}^4$
합성 후 2차사하중	$w = 117.6\text{ kN/m}$

<표 2> 재료상수

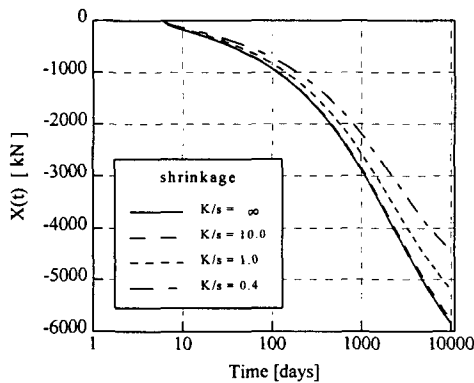
강재의 탄성계수	$E_s = 2.04 \times 10^5\text{ Mpa}$
콘크리트의 탄성계수	$E_c = 0.361 \times 10^5\text{ Mpa}$
하중재하시 콘크리트의 재령일	$t_0 = 30\text{ days}$
상대습도	$RH = 50\%$
콘크리트의 압축강도	$f_{ck} = 39.2\text{ Mpa}$
크리프와 건조수축모델	CEB-FIP 1990 모델 ^[3]



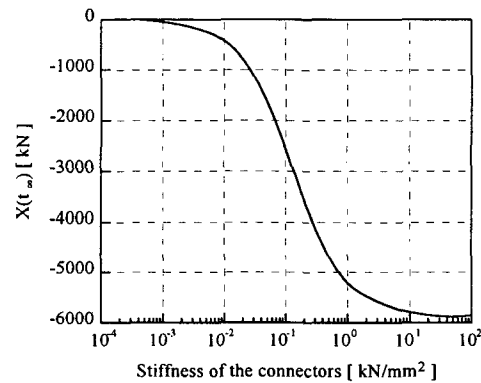
<그림 3> 적용단면 상세

6.1 건조수축의 영향

합성보인 경우 강제주형은 수분의 증발로 인해 콘크리트 바닥판이 자유롭게 수축하는 것을 구속한다. 건조수축만에 의한 영향을 보기 위해 연속합성보의 시간에 따른 거동을 살펴보았다. 그림 4는 건조수축에 대한 부정정반력의 시간에 따른 변화를 나타내었다. 콘크리트 바닥판의 건조수축으로 인하여 부정정반력은 시간에 따라 증가하여 매우 높은 값에 도달한다. 이러한 현상은 건조수축으로 인한 바닥판의 수축을 강제주형이 구속하고 있기 때문이다. 그림 5은 내부지점에서 전단연결재의 강성에 대해 부정정반력의 변화를 나타내었다. 그림에서 보여지듯이 강성이 매우 낮은 값에서는 콘크리트 바닥판이 자유롭게 수축할 수 있기 때문에 건조수축으로 인한 반력은 없다. 그러나 강성이 커짐에 따라 바닥판과 연결된 강제주형이 바닥판의 수축을 구속하기 때문에 $X(t_{\infty})$ 의 값은 많은 증가를 보이게 된다.



<그림 4> 건조수축으로 인한 부정정반력의 시간적 변화



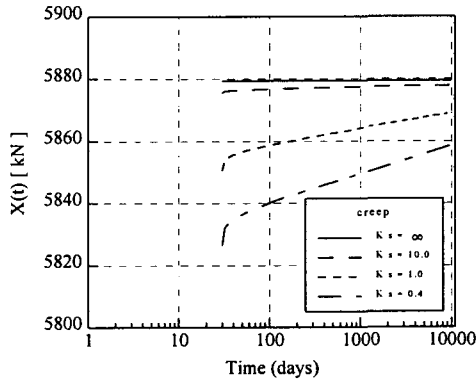
<그림 5> 전단연결재의 강성에 대한 부정정반력의 변화

6.2 등분포하중재하

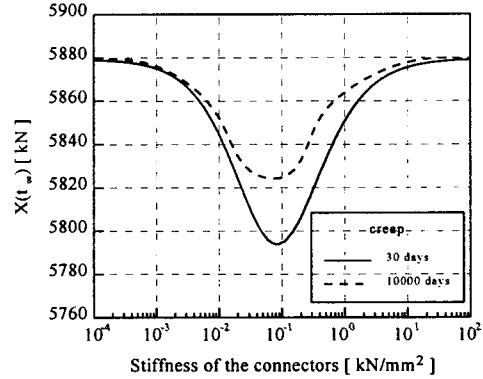
연속합성보에 등분포하중을 시간 t_0 에서 재하했을 경우 크리프로 인한 부정정반력과 내력의 시간에 따른 변화를 해석하였다. 그림 6은 크리프로 인한 부정정반력의 시간에 따른 변화를 나타낸다. 불완전합성인 경우

내력 $[N(x, t), M_s(x, t), M_c(x, t)]$ 의 시간에 따른 재분배가 일어나게 된다. 또한 모멘트 $M(x, t)$ 도 시간에 따라 일정하지가 않게 된다. 이러한 현상은 그림 6에서 보여지듯이 내부지점의 반력이 시간에 따라 증가하기 때문이다. 그러나 이 변화는 K/s 의 값이 0과 ∞ 인 경우 시간에 따라 부정정반력의 변화는 없게 된다. 다시 말하면, 두 부재가 완전합성이거나 완전불완전 합성인 경우 부정정반력은 시간에 따라 변화가 없다. 그리고 전단연결재의 강성에 대해 크리프로 인한 부정정반력의 시간적 변화는 어느 정도 제한되어있다.

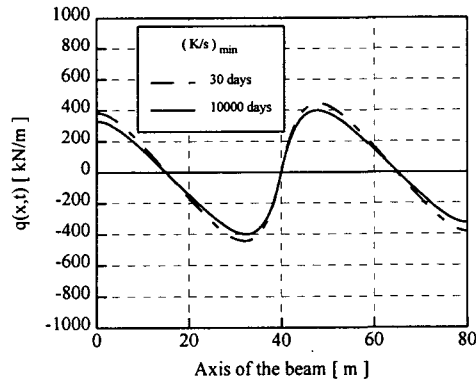
그림 7는 전단연결재의 강성에 대해 $t_0 = 30$ 일과 $t = 10000$ 일에서 부정정반력 $X(t)$ 를 나타내었다. 여기서 K/s 가 0과 ∞ 일 때 부정정반력이 시간에 따라 변화가 없고 서로 잘 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. 이 현상은 전단연결재의 강성이 매우 높은 값과 낮은 값일 때 시간에 따라 내력의 재분배가 발생하지 않기 때문이다. 그림 8과 그림 9는 $(K/s)_{\min} = 0.4$ 와 $(K/s)_{\max} \rightarrow \infty$ 일 때 크리프로 인한 단위길이당 전단력의 시간적 변화를 나타내었다. 여기서 곡선의 형상은 크리프로 인해 변하지는 않지만 시간이 지남에 따라 감소한다는 것을 알 수 있다. 크리프로 인한 단위길이당 전단력의 감소율은 대략 25%정도이다.



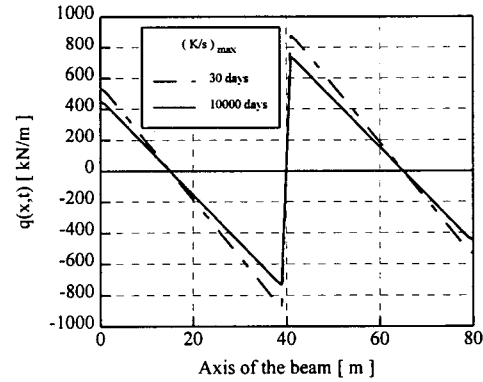
<그림 6> 크리프로 인한 부정정반력의 시간적 변화



<그림 7> 전단연결재의 강성에 대한 부정정반력의 변화



<그림 8> 단위길이당 전단력의 시간적 변화
 $[(K/s)_{\min} = 0.4 \text{ kN/mm}^2]$

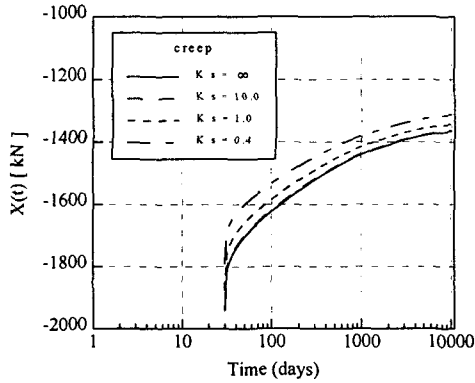


<그림 9> 단위길이당 전단력의 시간적 변화
 $[(K/s)_{\max} \rightarrow \infty]$

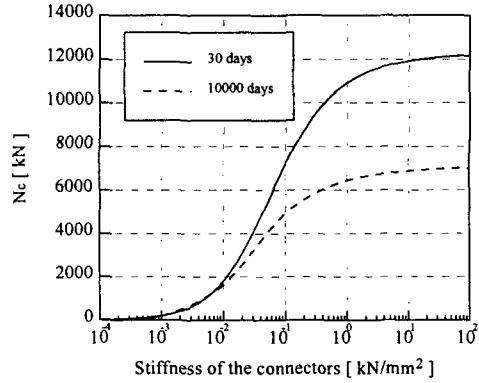
6.3 지점침하

부정정구조물에서는 지점침하로 인한 문제가 발생하기 때문에 내부지점에 100mm의 지점침하가 있는 경우 크리프로 인한 부정정반력과 내력의 시간에 따른 진전을 해석하였다. 그림 10은 크리프로의 영향으로 인한 부정정반력의 시간에 따른 변화를 나타내었다. 여기서 지점침하로 인하여 내부지점에서의 반력은 시간이 지

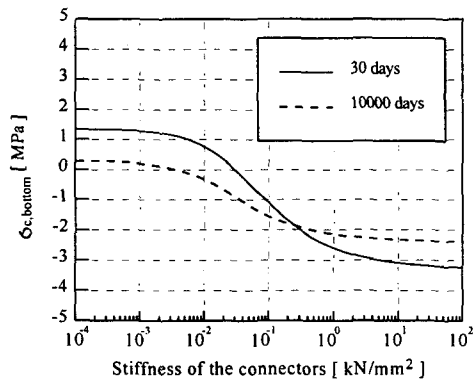
남에 따라 변하게 되나 변화율은 감소된다. 그리고 전단연결재 강성의 영향은 많이 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 그림 11는 전단연결재의 강성에 대해 초기시간 $t_0 = 30$ 일과 최종시간 $t = 10000$ 일 때 내부지점에서 콘크리트 바닥판 축력의 변화를 나타내었다. 30일에서의 축력을 나타내는 곡선은 전단연결재의 강성이 커짐에 따라 증가한다. 그리고 강성이 큰 범위에서 축력의 증가율은 줄어든다. 강성이 클 때 초기값은 최종시간에 가서 크리프의 영향으로 인해 절반정도로 줄어든다.



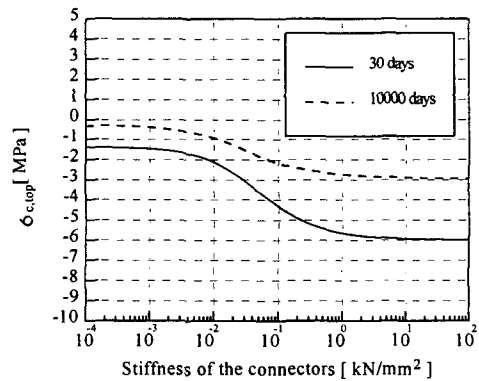
<그림 10> 부정정반력의 시간적 변화



<그림 11> 전단연결재의 강성에 대한 바닥판 축력의 변화

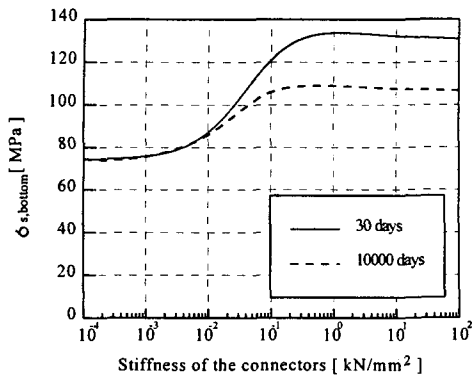


<그림 12> 전단연결재의 강성에 대한 바닥판 하단의 응력변화

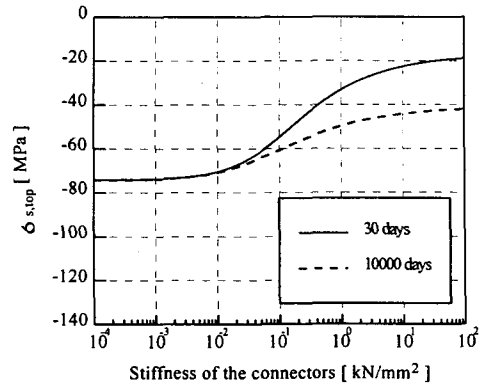


<그림 13> 전단연결재의 강성에 대한 바닥판 상단의 응력변화

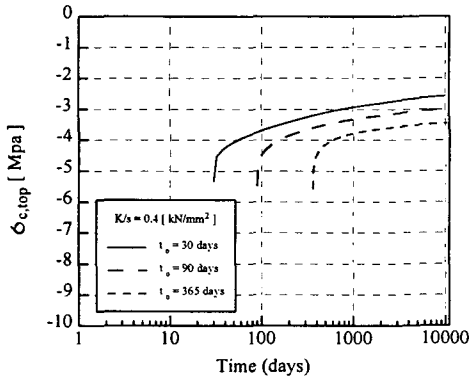
그림 12, 13, 14, 15는 전단연결재의 강성에 대해 초기시간 $t_0 = 30$ 일과 최종시간 $t = 10000$ 일 일때 내부지점에서 콘크리트 바닥판의 하단과 상단 그리고 강재주형 하단과 상단에서 응력의 변화를 나타내었다. 그림 12와 그림 13에서 보여지듯이 $K/s \rightarrow 0$ 일 때 콘크리트 바닥판 하단과 상단에서의 응력값은 초기값과 최종값에서 서로 같은 값이나 부호가 반대이다. 이러한 현상은 바닥판과 강재주형의 두 부분사이에서 시간에 따라 합성이 일어나지 않기 때문이다. 결과적으로 매우 낮은 강성값에서 시간에 따라 콘크리트 바닥판의 응력은 감소하게 되고 강재주형의 응력은 변함이 없다. 반면에 그림 14와 그림 15에서 강성이 증가할수록 강재주형에서 큰 응력의 변화가 일어난다. 강재주형의 모멘트 $M_s(x, t)$ 는 시간에 따라 변화가 없기 때문에 응력의 변화는 축력이 감소하기 때문이다. 그래서 강재주형의 곡률이 또한 시간에 따라 변하지 않기 때문에 내부지점에서 처짐의 변화가 없다. 최종응력값을 보면 강재주형 상단부의 응력을 제외하고는 모두 시간에 따라 감소한다. 그림 16과 그림 17은 콘크리트 바닥판과 강재주형의 상단에서 응력의 시간적 변화에 대한 하중재하시 콘크리트 재령일 t_0 의 영향을 나타내었다. 그림에서 보면 콘크리트의 재령일 t_0 가 짧을수록 콘크리트 바닥판



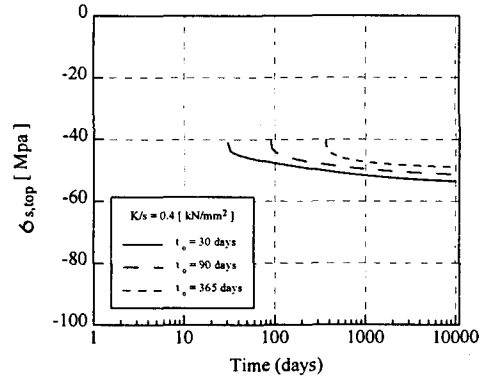
<그림 14> 전단연결재의 강성에 대한 주형하단의 응력변화



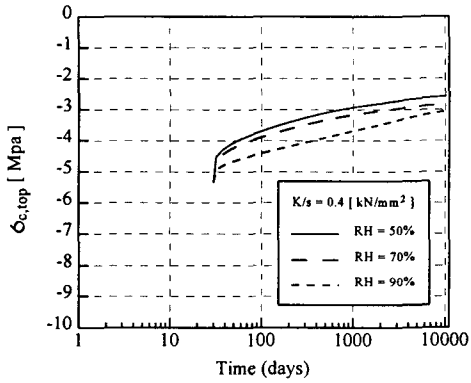
<그림 15> 전단연결재의 강성에 대한 주형상단의 응력변화



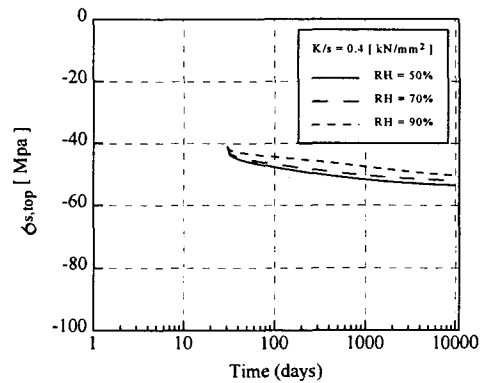
<그림 16> 하중재하시 콘크리트의 재령일에 대한 바닥판상단의 응력변화



<그림 17> 하중재하시 콘크리트의 재령일에 대한 주형상단의 응력변화



<그림 18> 상대습도에 대한 콘크리트 바닥판상단의 응력변화



<그림 19> 상대습도에 대한 강재주형상단의 응력변화

에서 응력의 감소가 크다. 반면에 강재주형상단의 응력은 t_0 가 짧을수록 시간에 따른 응력의 증가가 크다

그러나 하중재하시 콘크리트의 재령일 t_0 이 늦어질수록 이러한 응력의 재분배효과는 점점 줄어든다.

그림 18과 그림 19는 콘크리트 바닥판과 강재주형의 상단에서 응력의 시간적 변화에 대한 상대습도 RH 의 영향을 나타내었다. 건조한 환경에서 콘크리트의 크리프로 인한 시간에 따른 응력의 재분배가 더 크다. 즉 건조할수록 콘크리트 바닥판 상단의 응력은 더 감소하고 강재주형의 응력은 더 증가를 하게 된다.

제 7 장 결 론

본 연구는 슬립을 고려하여 연속합성보에서 탄성거동과 장기거동에 대한 연구를 위해 콘크리트의 크리프와 건조수축의 영향하에서 두 재료의 평형조건, 적합조건, 그리고 응력-변형률관계에 의해 지배방정식을 해석적으로 유도하고 수치해석적인 유한차분법을 이용해 해를 구하였다. 그리고 고속철도 합성형교량의 중간단면을 적용하여 해석하였다. 시간에 따른 응력의 흐름과 부정정반력의 진전에 영향을 주는 변수들의 효과를 평가하기 위한 매개변수 해석을 수행하였다. 본 연구를 통해 크리프와 건조수축으로 인한 콘크리트 바닥판으로부터 주형으로의 응력의 흐름과 부정정반력의 진전을 알 수 있으며 동시에 단위길이당 전단력을 계산할 수 있었다. 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 건조수축으로 인해 내부지점에서 부정정반력의 최종값은 K/s 가 매우 낮은 값에서는 콘크리트 바닥판이 자유롭게 수축할 수 있기 때문에 부정 정반력은 거의 없게 된다. 그러나 강성이 커짐에 따라 콘크리트 바닥판과 연결된 강재주형이 바닥판의 수축을 구속하기 때문에 많은 증가를 보이게 된다.
- 2) 내부지점에서 건조수축으로 인한 부정정반력은 전단연결재의 강성에 관계없이 시간에 따라 크게 증가하였으나 크리프로 인한 부정정반력의 변화는 제한되어 있는데 전단연결재의 강성이 큰 경우는 시간에 따라 변화가 없으나 강성이 낮은 값에서는 시간에 따라 조금 변한다는 것을 알 수 있다.
- 3) 등분포하중재하에서 단위길이당 전단력은 K/s 의 값에 비례하고 크리프의 영향으로 시간에 따라 감소한다는 것을 알 수 있다.
- 4) 지점침하인 경우 K/s 값이 매우 큰 값에서 크리프의 영향으로 강재주형의 상단부를 제외하고는 응력이 모두 시간에 따라 감소한다.
- 5) 하중재하시 콘크리트의 재령일이 빠를수록 바닥판 상단의 응력은 더 큰 감소를 보이고 강재주형상단의 응력은 더 크게 증가를 한다. 그러나 하중의 재하시간이 늦어질수록 응력의 재분배효과는 점점 줄어든다.
- 6) 상대습도가 낮은 건조한 환경일수록 크리프로 인해 콘크리트 바닥판 상단의 응력은 더 감소하고 강재주형의 응력은 더 큰 증가를 하게 된다.

참고문헌

1. Bazant, Z. P. (1972). "Numerical determination of long-range stress history from strain history in concrete." *Mat. Struct.*, 5(27), 135-141.
2. "CEB-FIP model code 1990." (1991). C.E.B. Bulletin d'Information n.190, C.E.B.-F.I.P. Comite Euro-International du Beton (CEB), Paris, France.
3. Dezi, L. and Tarantino, A. M. (1993a). "Creep in composite continuous beams I: Theoretical treatment." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 119(7), 2095-2111.
4. Dezi, L. and Tarantino, A. M. (1993b). "Creep in composite continuous beams. II: Parametric study." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 119(7), 2112-2133.
5. Gilbert, R. I. (1989). "Time-dependent analysis of composite steel-concrete sections." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 115(11), 2687-2705.
6. McHenry, D. (1943). "A new aspect of creep in concrete and its application to design." *Proc., American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, Pa.*, Vol. 43, 1069-1086.
7. Newmark, N. M., Sies, C. P., and Viest, I. M. (1951). "Tests and analysis of composite beams with incomposite interaction." *Proc. Soc. Exp. Stress Anal.*, 9(1), 75-92.
8. Oehlers, D. J. (1989). "Splitting induced by shear connectors in composite beams." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 115(2), 341-362.
9. 동명기술공단 (1998). "고속철도 강 합성형 교량 기본 및 실시설계".