
재료특성치의 변화에 따른 캔틸레버 공법 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량의 장기거동 분석

Effects of Material Characteristics on the Time-dependent Behavior of
Prestressed Concrete Box Girder Bridges Constructed by Free Cantilever Method



오병환*

Oh, Byung Hwan



양인환**

Yang, In Hwan

ABSTRACT

The mechanical and structural behavior of prestressed concrete box girder bridges is dependent on the material properties and sequential change of structural system due to stepwise construction with time. Therefore, the time-dependent properties of concrete is of importance in the design and construction of segmentally constructed and cast-in-place prestressed concrete box girder bridges. The purpose of the present paper is to analyze the effects of concrete material properties on the long-term behavior of prestressed concrete bridges. The three models of ACI, CEB-FIP and Korea Bridge Code are compared for the time-dependent behavior. The present study indicates that the variation of ultimate creep coefficient and shrinkage strain affects very much the long-term deflection behavior of prestressed concrete box girder bridges. It is also seen that the different methods in design codes give different long term response. It is concluded that the accurate determination of creep and shrinkage characteristics of the corresponding concrete is very critical for the correct prediction of time-dependent response of prestressed concrete box girder bridges.

Keywords : prestressed Concrete Box Girder Bridges, Free Cantilever creep, shrinkage, Time-dependent Behavior, Deflection.

* 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수
** 서울대학교 토목공학과 대학원 박사수료

• 본 논문에 대한 토의를 1998년 4월 30일까지 학회로 보내주
시면 1998년 6월호에 토의회담을 게재하겠습니다.

1. 서론

최근 사회간접자본의 투자 및 기간산업의 확충으로 프리스트레스트 콘크리트(PSC) 박스거더 교량의 건설이 증가하고 있는 실정이다. PSC박스거더 교량은 시공단계별 구조계가 변화하는 시간의존적 거동을 하게 되며, 각 시공단계에 따른 구조계의 변화과정에 의하여 완성된 구조물의 응력 및 기하 형상이 결정된다.

캔틸레버 공법은 교량하부에서 하중을 지지하는 동바리를 설치하지 않고 교각 주두부(pier table)로부터 좌우로 균형을 맞추면서 이동식 작업차(form traveler)를 이용하여 3~5m 길이의 세그먼트를 순차적으로 시공한후 경간중앙에서 캔틸레버 거더를 연결시키는 공법이다.

Fig. 1에 캔틸레버 공법의 시공과정을 나타내었다.

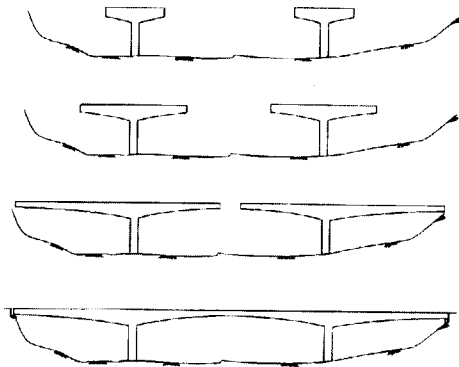


Fig. 1 Construction by free cantilever method

PSC 박스거더 교량의 시간의존적 거동은 주로 콘크리트의 크리프 및 건조수축에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 콘크리트의 크리프 및 건조수축은 여러가지 인자에 의해 영향을 받는다. Bazant¹⁾는 영향인자를 온도, 습도등의 변동성과 같은 외부적 요인 및 콘크리트에 사용되는 재료의 재질 및 배합비의 변동성, 크리프와 건조수축의 내부 메카니즘(mechanism)에 기인하는 변동성과 같은 내부적 요인으로 분류하였다.

따라서, 캔틸레버 세그멘탈 교량의 시간의 존적 거동을 명확히 규명하기 위해서는 사용되는 콘크리트 물성치의 특성 즉, 크리프 및 건조수축량 등의 특성

이 교량의 시간의존적 거동에 어떻게 영향을 미치는가를 분석, 연구하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 교량설계시 사용되는 콘크리트의 최종 크리프계수, 건조수축량 특성 및 외부적 불확실성 인자인 상대습도를 주된 영향인자로 고려하여 박스거더 교량의 시간의존적 거동, 특히 처짐 예측에 미치는 영향을 실제 해석을 통해 분석하고 그 결과를 고찰한다. 또한, 교량설계시에 크리프 및 건조수축 예측을 위해 사용되는 ACI 209모델²⁾, CEB-FIP모델(1990)³⁾ 및 국내의 도로교 표준시방서⁴⁾ 규준에 의한 처짐예측을 수행하여 그 결과도 비교분석하여 고찰한다.

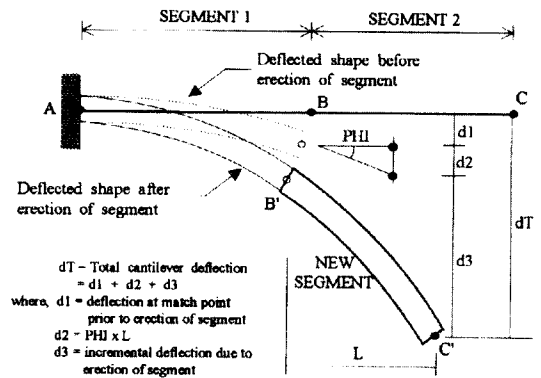


Fig. 2 Joint deflection of segment 2 in cantilever construction method

2. 캔틸레버 가설단계에서의 처짐

캔틸레버공법에 의한 교량 설계시 시공중에 각 세그먼트를 붙여 나갈때 그 처짐을 정확히 예측하는 것과 처짐예측을 통한 시공곡선을 따라가는 것은 매우 복잡한 문제이다.

실제 시공에서 필요로 하는 정량적인 캠버량을 구체적으로 구하는 방법을 살펴보면, 설계자는 먼저 적절한 자료를 이용하여 시공단계 및 공용기간을 고려한 구조해석을 한 후, 얻어진 처짐값을 바탕으로 각 캔틸레버 팔의 타설곡선을 결정하기 위한 캠버 계산표를 작성한다. 구조해석으로부터 설계자는 각 시공단계별 처짐값을 알 수 있고 최종상태에서의 전체 처짐과 캠버곡선을 알게 된다.

기존의 가설되어 있는 세그먼트에 새로운 세그먼트

를 연결하는 각 시공단계에 따라 처짐은 단계적으로 발생한다. Fig. 2에서 세그먼트 2를 연결하기 전에 절점부 B의 변위는 수평변위, 수직변위 및 회전변위에 의한 변위로 표현된다. 세그먼트 2의 가설에 따른 처짐 증분은 AB'C'로부터 구하며, 전체 변위는 수평선 ABC로부터 구한다. Fig. 3에 4개의 세그먼트를 가설할 때의 캔틸레버의 시간에 따른 처짐을 나타내었다. 명확히 표현하기 위해 변위는 직선으로 나타내고, 수평변위는 나타내지 않았다. 세그먼트 4의 가설 후 2개의 인접 캔틸레버를 연결하기 전의 처짐형상은 선분 AB'C'D'E'로 표현된다. 인접 캔틸레버를 연결할 때의 불연속(상대처짐)을 제거 또는 감소시키기 위해 각 세그먼트 시공시 캠버를 고려한다. 캠버량은 선행 절점의 접선으로부터 산출한 처짐량과 크기는 같고 방향은 반대로 고려하여 각 세그먼트 가설시 반영한다.

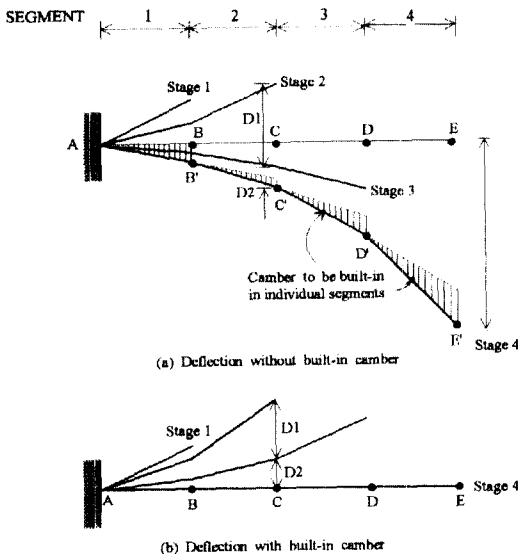


Fig. 3 Deflection of a four-segment cantilever

3. 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량의 시간에 따른 해석

3.1 콘크리트의 시간에 따른 변형도의 모형화

콘크리트 구조물의 시간의존적 거동을 해석하는데 있어서 중요한 가정은 콘크리트의 총변형도를 여러 요인들에 기인하는 개별 변형도들의 합으로 간주하는 중첩의 원리이다. 시간 t 에서 콘크리트의 총변형

도 $\epsilon(t)$ 는 식(1)과 같다.

$$\epsilon(t) = \epsilon_{el}(t) + \epsilon_{cr}(t) + \epsilon_{sh}(t) \quad (1)$$

여기서, $\epsilon_{el}(t)$: 탄성변형도

$\epsilon_{cr}(t)$: 크리프 변형도

$\epsilon_{sh}(t)$: 건조수축 변형도

크리프 변형도는 콘크리트에 작용하는 응력에 대해 다음과 같이 적분식으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{cr} = \int_0^t J(\tau, t - \tau) \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (2)$$

여기서, $J(\tau, t - \tau)$: 크리프 함수

$\sigma(\tau)$: 재령 τ 일에서 콘크리트에 작용하는 응력

식(2)의 적분식을 사용하여 현재의 변형도를 계산하기 위해서는 전 단계의 모든 응력이력이 저장되어야 하기 때문에 상대적으로 간단한 구조물에만 적용할 수 있다. 본 연구에서는 Dirichlet급수를 이용하여 크리프 함수를 다음과 같이 나타낸다.

$$J(\tau, t - \tau) = \sum_{i=1}^m a_i(\tau) [1 - e^{-(y_i(\tau) - y_i(t))}] \quad (3)$$

위에서 $a_i(\tau)$ 는 재료변수로서 하중재하시점 τ 에 관계되는 크리프 컴플라이언스 계수(creep compliance coefficient)이다. $y_i(t) = t / \Gamma_i$ 로 정의되며, Γ_i 는 지연시간(retardation time)으로 시간의 경과에 따른 크리프 함수의 형상과 관계된다. 식(3)의 크리프 함수를 이용하면 식(2)의 적분식은 다음과 같이 된다.

$$\epsilon_{cr}(t) = \int_0^t \sum_{i=1}^m a_i(\tau) [1 - e^{-(y_i(\tau) - y_i(t))}] \frac{d\sigma(\tau) dy_i(\tau)}{dy_i(\tau) d\tau} d\tau \quad (4)$$

크리프변형도는 식(4)를 수치적분하여 구하는데 이를 위하여 시간영역을 필요한 N 개로 분할하고 각 시간구간내에서는 응력 및 재료변수 $a_i(\tau)$ 에 대하여 적절한 가정을 하게 된다. Ketchum⁷은 각 시간구간내에서 응력과 재료변수가 일정한 경우, 재료변수는 일정한 반면 응력은 선형적으로 변하는 경우 및 응력과 재료변수가 모두 선형적으로 변하는 경우 등 세가지로 가정하였다. 이와 같은 가정을 근거로 하여 임의의 시간단계 t_{n-1} 에서 t_n 사이의 구간에서 발생하는 크리프 변형도의 증분을 시간단계 t_{n-1} 과 t_n 에서의

응력이력만을 가지고 구할 수 있는 순환식을 유도할 수 있다. 본 연구에서는 Ketchum이 유도한 순환식을 이용하여 크리프 변형도 증분을 구한다.

3.2 박스거더 교량의 유한요소 정식화

박스거더 교량의 비선형거동을 표현하기 위하여 뼈대요소(frame element)를 사용한다. 이때 각 요소는 Fig. 4(a)와 같이 여러개의 콘크리트 층과 철근 층으로 구성된 것으로 고려하며, 콘크리트층과 철근 층은 각 층의 면적과 기준면으로부터의 거리로 정의한다. 또한 프리스트레싱(PS)강재는 별도로 직선트러스요소로 가정하여 뼈대요소의 양절점에 강체에 의해 연결된 것으로 고려한다. 철근콘크리트 뼈대 요소는 Fig. 4(b)에서처럼 각 절점당 x축 방향 변위, y축 방향 변위 및 회전각 등 3개의 자유도를 갖는 것으로 규정하며, 절점변위의 모든성분은 벡터 \underline{u} , \underline{v} , 및 θ 로 각각 나타낸다.

$$\underline{u} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix}, \underline{v} = \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{Bmatrix}, \theta = \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{Bmatrix}, \underline{r} = \begin{Bmatrix} \underline{u} \\ \underline{v} \\ \theta \end{Bmatrix} \quad (5)$$

여기서 u_3 는 요소강성행렬의 형성과정에서 응축(condensation)하므로 전체구조물의 평형방정식은 포함되지 않는다.

평형방정식은 뼈대요소의 변형단계를 변형이 일어나지 않은 초기상태, 현 단계 및 현 단계에서 변위증분 Δr 과 변형증분 $\Delta u, \Delta v$ 가 발생한 후의 단계를 고려하여 Lagrangian updating기법에 근거하여 나타낸다. 이때, 현 단계에서의 접선평형방정식은 식 (6)과 같이 표현된다.

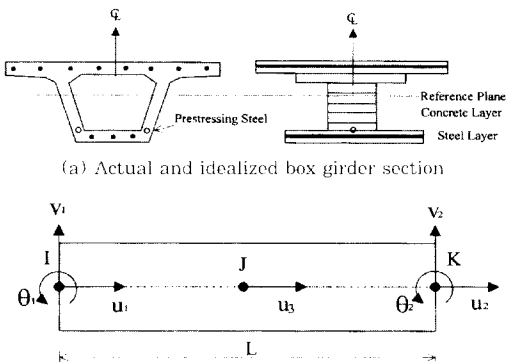


Fig. 4 Geometry of concrete frame element

$$d\underline{R} = \underline{K}_t d\underline{r} \quad (6)$$

여기서, \underline{R} 은 외력벡터이며, \underline{K}_t 은 접선강성행렬로서 기하강성행렬 \underline{K}_g 과 탄성강성행렬 \underline{K}_c 로 구성된다. 변형도-변위 관계행렬(\underline{B})을 식(7)과 같이 축력에 관계되는 부분과 휨에 관계되는 부분으로 나누어 탄성강성행렬 \underline{K}_c 을 식 (8)과 같이 나타내어 계산할 수 있다.

$$\underline{B} = [\phi_x - y\phi_{,xx}] = [\underline{B}_a - y\underline{B}_b] \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \underline{K}_c &= \int_V \underline{B}^T E_t \underline{B} dV \\ &= \int_V \begin{bmatrix} \underline{B}_a^T E_t \underline{B}_a & -y\underline{B}_a^T E_t \underline{B}_b \\ -y\underline{B}_b^T E_t \underline{B}_a & y^2 \underline{B}_b^T E_t \underline{B}_b \end{bmatrix} dV \\ &= \begin{bmatrix} \underline{K}_{aa} & \underline{K}_{ab} \\ \underline{K}_{ba} & \underline{K}_{bb} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)의 부피적분중에서 면적에 관한 적분은 요소길이의 중간점에서 층적분에 의해 계산하며, 길이에 대한 적분은 형상함수의 적분에 의해서 계산할 수 있다.

뼈대요소 중앙에서의 기하강도 행렬 \underline{K}_r 도 같은 방법으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\underline{K}_r = \int_V \underline{C}^T \sigma \underline{C} dV = \int_A \sigma dA \int_0^L \underline{C}^T \underline{C} dx = p \int_0^L \underline{C}^T \underline{C} dx \quad (9)$$

여기서, p 는 뼈대요소의 축방향력이며 \underline{C} 는 비선형 변형도-변위관계 행렬이다.

3.3 프리스트레싱 해석

PS강재는 뼈대요소의 양절점에 강체에 의해 연결된 직선트러스 요소로 가정하며, 실제의 곡선형태로 배치된 PS강재를 각 뼈대요소에 걸쳐있는 직선세그먼트로 이상화한다. (Fig. 5). PS강재의 강성은 뼈대요소에서와 같이 요소의 중간점에서의 값을 평균치로 가정하여 층적분을 이용해서 구하며, 최종적인 프리스트레스트 콘크리트 뼈대요소의 강성매트릭스는 콘크리트층 및 보강철근의 강성에 PS강재의 강성

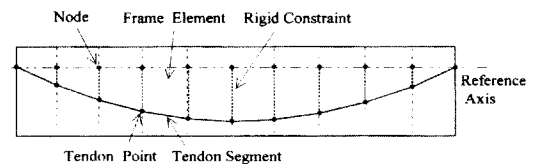


Fig. 5 Tendon discretization

을 더하여 구한다.

3.4 시간에 따른 비선형 해석과정

시간에 따른 해석을 위해 임의의 시간 t 는 기준시간 t_1 으로 부터 t_n 까지 (n-1)개의 구간으로 나눈다. t_1 으로부터 시작하여 각 구간의 결과를 계속적으로 더해감으로써 t_n 까지의 결과를 얻을 수 있다.

즉, t_n 에서의 총 변형도 ϵ_n 은 $t_{(n-1)}$ 에서의 총 변형도 ϵ_{n-1} 에서 t_n 까지의 구간에서 발생하는 변형도의 증분 $\Delta\epsilon_n$ 을 더하여 구한다.

$$\epsilon_n = \epsilon_{n-1} + \Delta\epsilon_n \quad (10)$$

4. 교량의 거동 예측

현재 현장타설 캔틸레버 공법에 의해 시공중에 있는 연속 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량의 한 경간을 대상으로 거동분석을 수행하였다. 캔틸레버 공법으로 시공하는 경간의 전체적인 형상, 캔틸레버의 세그먼트 분할 및 단면형상을 Fig. 6에 나타내었다. 교량의 거더와 하부슬래브의 두께는 종방향으로 변화하며, 교각을 중심으로 대칭이므로 한쪽 캔틸레

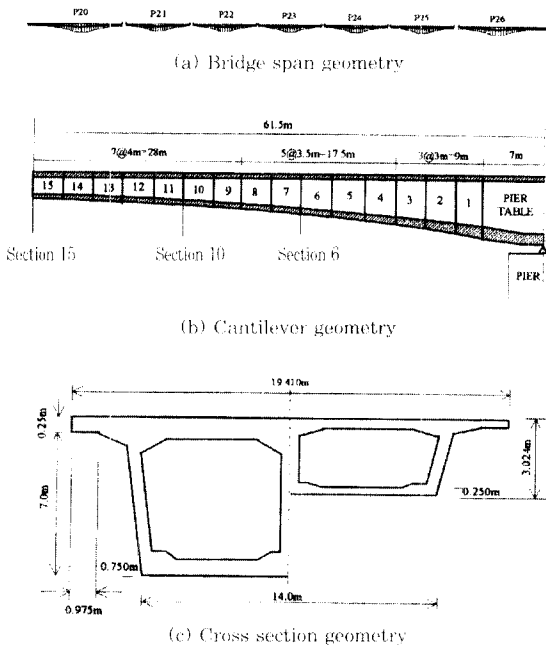


Fig. 6 Cantilever construction geometry

레버 만을 나타내었다.

각 세그먼트는 하나의 요소로 양단에 절점번호를 가진 보요소로 처리하고, 교축방향으로는 설계계획 고로부터 각 단면의 중립축까지의 거리를 고려하여 가능한한 실제 구조물의 변단면 특성을 고려하도록 모델링하였다.

세그먼트당 실제 시공 주기는 작업차 이동설치 2일, 거푸집·철근·슈스판 설치 3일, 콘크리트 타설 1일, 양생 3일, 인장 1일을 포함하여 총 10일이 걸리는 것으로 하였다. 시공단계에서는 각 세그먼트마다 이동식 작업차 설치 후, 콘크리트 타설 후, 텐던 긴장 후 및 이동식 작업차 이동 후를 한 주기로 하여 해석하며, 경간중앙부 집합 후 장기처짐 해석은 10,000일 까지 수행하였다.

4.1 크리프 계수의 영향

크리프는 시간과 더불어 콘크리트의 변형률이 증가하는 시간의존적 변형이다. 시간의존적 변형은 PS강재의 변형률의 감소를 유발하며, 결과적으로 PS강재의 힘(응력)을 감소시킨다. 이러한 영향은 교량 주형의 곡률변화 및 이로 인한 처짐변화를 초래한다.

ACI 209모델에서는 시간에 따른 크리프 예측을 위해 크리프 계수를 설정한 후 콘크리트의 배합특성 및 주위환경인자 등에 따른 보정을 하도록 권장하고 있다. ACI 209모델을 사용하여 크리프 계수를 2.097 및 3.5 두가지로 설정한 후 해석 비교하였다. 크리프 계수 2.097은 본 교량의 캠버 설계시 실제로 적용된 값이다. 국내 도로교 표준시방서 설계편에서는 보통시멘트 사용시 재령 4~7일의 경우에는 크리프 계수를 4.0, 재령 14일 경우에는 크리프 계수를 3.4로 규정하고 있다. 따라서 본 해석에서는 도로교 표준시방서 규준을 반영하여 크리프 계수를 3.5로 설정한 후 해석을 수행하였다.

대표 단면 10 및 15에서의 크리프 계수의 변화에 따른 PS강재의 응력감소를 텐던 긴장후 2,000일까지 Fig. 7에 나타내었다. 단면의 응력이력에 따라 곡선 초기형상에 약간의 차이는 있으나, 대체적으로 초기 일수의 급격한 감소를 나타내다가, 일정기간 경과 후 안정된 값을 나타낸다. 크리프 계수가 클수록 PS강재의 응력감소량은 크게 나타나고 있다.

Fig. 8에 각 시공단계별 처짐량을 비교하였으며,

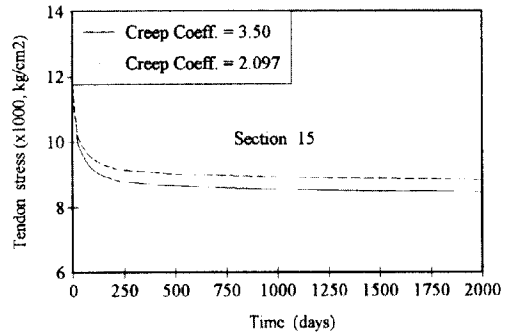
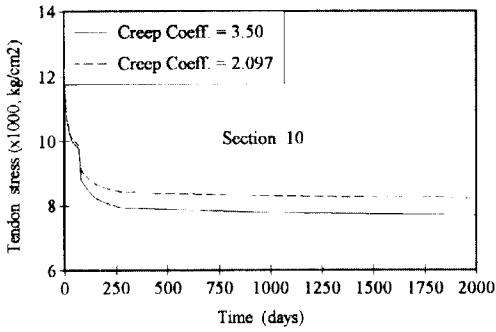


Fig. 7 Effect of creep coefficient on prestress loss

크리프 계수가 클수록 처짐량은 크게 나타나며, 이는 PS강재 긴장력의 감소양상과 상응한다. 캔틸레버 완공시 처짐량은 약 5cm 정도의 차이가 나타나고 있다. 크리프계수 2.097를 사용한 처짐예측값에 대한 크리프 계수 3.5를 사용한 처짐예측값의 차이 정도는 6번 세그먼트 가설시 25%, 10번 세그먼트 가설시 20%, 12번 세그먼트 가설시 96%, 15번 세그먼트 가설시 33%이다. 따라서, 최종 크리프 계수의 값에

따라 장기처짐 거동이 매우 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다.

4.2 건조수축량의 영향

ACI 209모델에서는 크리프 특성 예측과 마찬가지로, 시간에 따른 건조수축 특성 예측을 위해 최종 건조수축량을 설정한 후 콘크리트의 배합특성 및 주위 환경인자 등에 따른 보정을 하도록 권장하고 있다.

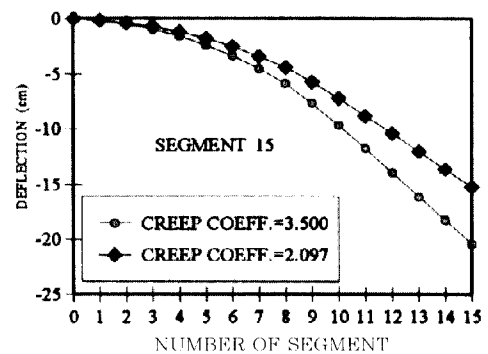
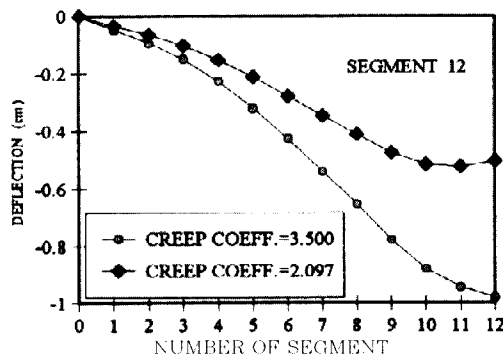
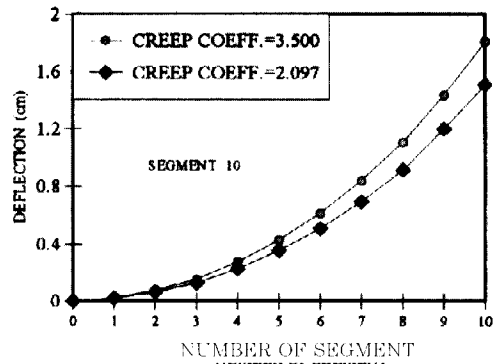
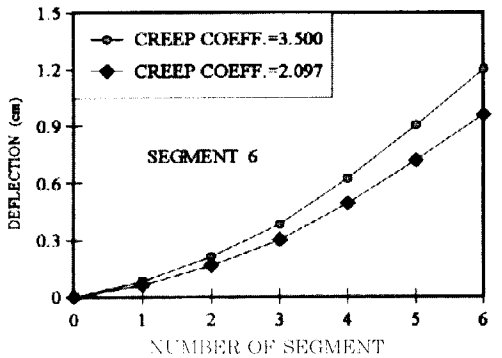


Fig. 8 Effect of creep coefficient on deflection during construction

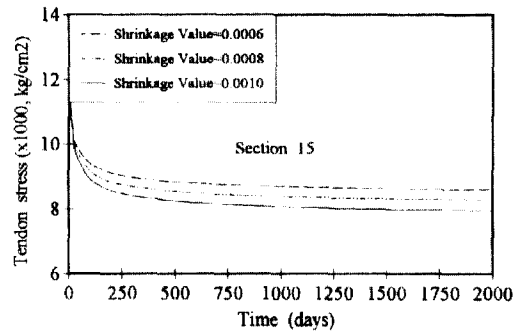
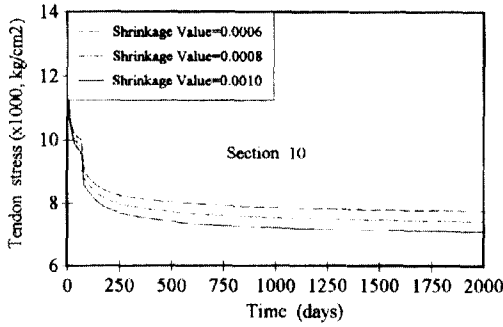


Fig. 10 Effect of shrinkage value on prestress loss

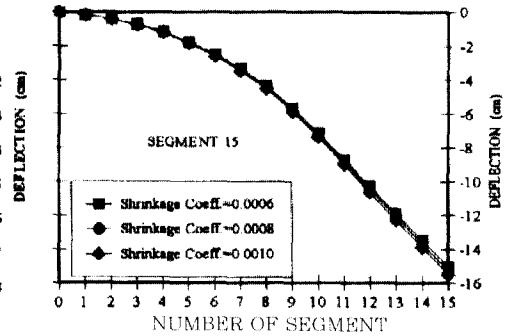
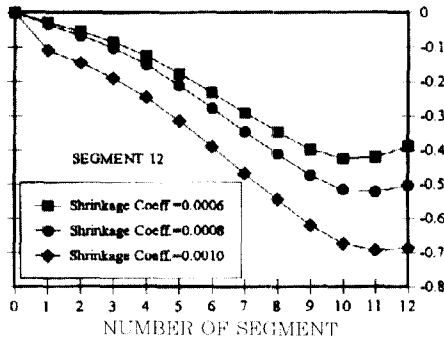


Fig. 10 Effect of shrinkage value on deflection during construction

이때, 최종 건조수축량은 습윤양생시 800×10^{-6} 을 사용하도록 권장하고 있다. 그러나 현장양생조건이 시험실과 다르므로 본 연구에서는 ACI 209모델을 사용하여 최종 건조수축량을 600×10^{-6} , 800×10^{-6} 및 1000×10^{-6} 세가지로 하여 해석 비교하였으며, 시간에 따른 건조수축량의 특성은 ACI규정에 따라 해석에 반영하였다.

대표 단면 10 및 15에서의 건조수축량의 변화에 따른 PS강재의 응력감소를 텐던 긴장후 2,000일까지 Fig. 9에 나타내었다. 단면의 응력이력에 따라 곡선 초기형상에 약간의 차이는 있으나, 대체적으로 초기 일수의 급격한 감소를 나타내다가, 일정기간 경과 후 안정된 값을 나타낸다. 건조수축량이 클수록 PS강재의 응력감소량은 크다.

건조수축량 600×10^{-6} 를 사용한 처짐예측값에 대한 건조수축량 1000×10^{-6} 를 사용한 처짐예측값의 차이의 정도는 6번 세그먼트 가설시 5.3%, 10번 세그먼트 가설시 9.7%, 12번 세그먼트 가설시 77%, 15번 세그먼트 가설시 3.7%이다. 따라서 건조수축량의 차이도 장기거동에 큰 영향을 줄 수 있음을 보

여주고 있다. (Fig.10)

4.3 상대습도의 영향

콘크리트의 크리프 및 건조수축 특성에 영향을 미치는 인자는 여러 가지 있으나, 주요한 인자 중의 하나는 교량이 위치하는 주위의 상대습도이다. 각 시방서의 크리프 및 건조수축 예측식에는 상대습도가 영향인자로서 포함되어 있다. 본 연구에서는 상대습도를 50% 및 80%로 하여 각 시공단계에서의 처짐예측을 수행하였다. 시간에 따른 콘크리트의 특성은 CEB-FIP규정(1990)에 따라 해석에 반영하였다. 상대습도 50%를 사용한 처짐예측값에 대한 상대습도 80%를 사용한 처짐예측값의 차이의 정도는 6번 세그먼트 가설시 1.6%, 10번 세그먼트 가설시 12.3%, 12번 세그먼트 가설시 89.4%, 15번 세그먼트 가설시 12.0%이다.(Fig.11)

4.4 시방서 기준에 따른 처짐 예측

교량설계시 크리프 및 건조수축 예측을 위해 사용되는 방법으로는 ACI 209모델, CEB-FIP모델

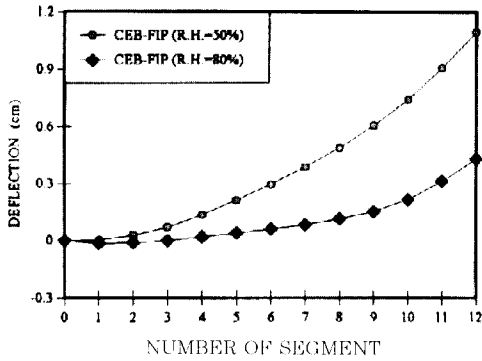
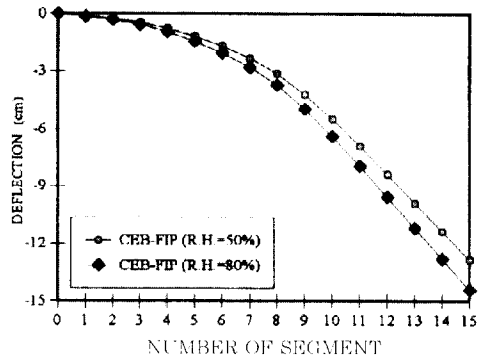


Fig. 11 Effect of relative humidity on deflection during construction



(1990)이 대표적인 방법이다. 국내의 도로교 표준시방서에서는 CEB-FIP(1978)모델이 적용되고 있다. 각 규준에서 제안한 콘크리트의 시간의존적 특성에 측정방법에 따라 처짐해석을 수행하였다.

Fig. 12에 캔틸레버 시공단계마다 캔틸레버 끝단에서의 처짐비교를 나타내었다.

각 규준에 따른 예측처짐량중 최대값과 최소값의 차이는 6번 세그먼트 가설단계에서 약 0.02cm, 10번 세그먼트 가설단계에서 약 0.45cm, 12번 세그먼트 가설단계에서 약 1.45cm, 캔틸레버 완공시 약 5.89cm이다. 최소예측처짐량에 대한 최대예측처짐량의 차이의 정도는 6번 세그먼트 가설시 15%, 10번 세그먼트 가설시 44.4%, 12번 세그먼트 가설시 141%, 15번 세그먼트 가설시 43%이다

4.5 장기처짐 예측

교량의 시공완료후 변형을 살펴보기 위해 마주보는 두 개의 캔틸레버 연결후, 단면 15에서의 장기처짐 예측해석을 수행하였다. 해석일수는 설계시 고려

된 10,000일(27.4년)까지로 하였다. 해석시 건조수축량은 800×10^{-6} 으로 일정하게 하고 크리프 계수를 2.097 및 3.5 두가지로 설정한 후 해석하였으며, 그 예측결과를 Fig. 13에 나타내었다. 초기일수에서 자중에 의한 하향처짐이 유발되며, 박스 하부슬래브의 연속된 긴장 및 이동식 거푸집 제거 직후 상향처짐이 유발된다. 이후 시간에 따라 콘크리트의 시간의존적 특성에 의해 지속적인 하향처짐이 유발된다. 10,000일째 처짐량의 차이는 5.7cm이며, 이는 설계시 사용되는 콘크리트의 재료특성치에 따라 예측정도가 48% 차이가 발생할 수 있음을 나타낸다.

5. 거동 분석 및 고찰

콘크리트의 크리프계수, 건조수축량 특성 및 외부적 불확실성 인자인 상대습도를 주된 영향인자로 고려하여, 예제 해석을 통한 박스거더 교량의 시간의존적 처짐 예측 결과를 Table 1에 나타내었다. ACI 209모델을 사용하여 크리프 계수의 변화에 따른 캔

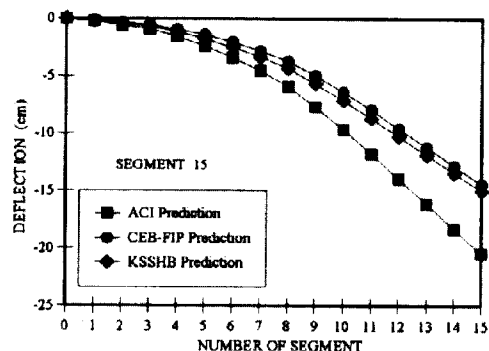
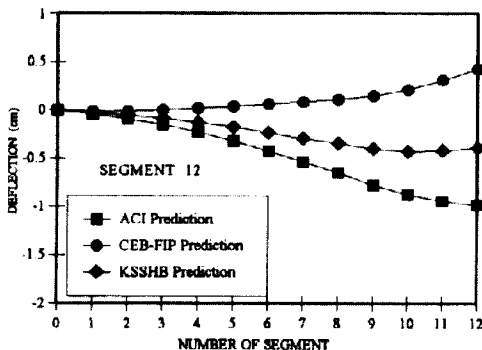


Fig. 12 Comparison of cantilever deflections by ACI, CEB-FIP and KSSHB

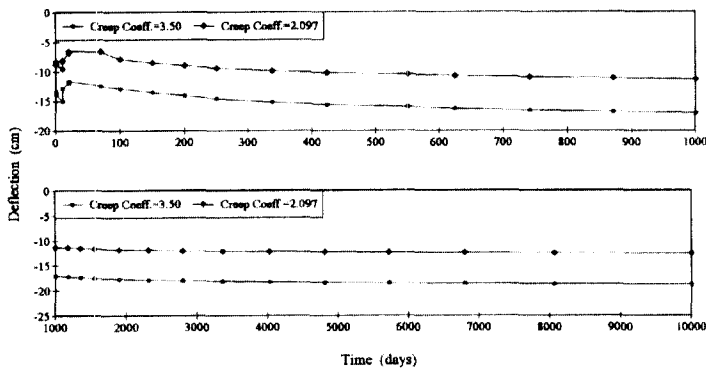


Fig. 13 Prediction of long-term deflection with different creep coefficient

틸레버 시공완료시(15번 세그먼트 가설완료시)의 처짐예측은 33%. 건조수축량의 변화에 따른 처짐예측은 3.7%의 차이가 나고 있다. CEB-FIP모델을 사용하여 상대습도의 변화에 따른 캔틸레버 시공완료시의 처짐예측은 12% 차이가 난다. 또한, 설계시 사용하는 콘크리트의 시간의존적 특성 규준에 따라 처짐예측은 캔틸레버 완공시 43%의 차이가 난다. 예측 차이는 시공단계 12에서 가장 크게 나타나며, 이는 캔틸레버의 변형양상이 상향처짐상태에서 하향처짐상태로 변화하는 과정에서 민감하게 거동응답을 보인 것으로 사료된다.

한편, ACI 209모델을 사용한 크리프 계수의 변화에 따른 10,000일까지의 장기처짐예측은 48% 차이가 난다. 동일한 상황에서 캔틸레버 완공시 처짐예측 차이가 33%임을 고려할 때, 처짐값의 차이는 시간이 경과함에 따라 누적되어 15% 추가로 발생하였다. 시공완료후 처짐은 콘크리트의 크리프 및 건조수축 특성에 의해 계속해서 하향처짐이 유발되며, 시공완료후의 처짐예측이 큰 차이를 나타내지 않을지라도 공용상태에서 주형의 처짐은 큰 차이를 나타낼 수 있다고 판단된다.

Table 1 Deflection prediction with different parameters and specifications (%)

영향인자	크리프 계수	건조수축량	상대습도	사용 규준
	$\frac{\delta(\phi = 3.5)}{\delta(\phi = 2.097)} \times 100$	$\frac{\delta(\epsilon_{sh} = 1000 \times 10^{-4})}{\delta(\epsilon_{sh} = 600 \times 10^{-4})} \times 100$	$\frac{\delta(H = 80\%)}{\delta(H = 50\%)} \times 100$	$\frac{\delta(\text{최대예측처짐량})}{\delta(\text{최소예측처짐량})} \times 100$
시공단계 (가설 세그먼트 번호)				
6	125	105.3	101.6	115
10	120	109.7	112.3	141
12	196	177.0	189.4	241
15	133	103.7	112.0	143

6. 결론

본 연구에서는 콘크리트의 크리프 및 건조수축 특성 및 상대습도를 주된 영향인자로 고려하여 박스거더 교량의 시공중 및 시공후 사용중의 시간의존적 거동, 특히 처짐 예측에 미치는 영향을 실제교량 해석을 통해 분석하고 그 결과를 고찰하였다. 또한, 각기 다른 규준에 의한 처짐예측을 수행하여 그 결과도 고찰하였다.

본 연구결과 현장타설 캔틸레버 공법으로 시공되는 박스거더 교량의 시간의존적 거동은 시공되는 각 교량의 응력이력에 따라 다르므로 일반화시키기는 어려우나, 본 실제해석을 수행한 결과 교량 설계시의 사용되는 시간의존적 특성값들에 따라 시공단계 및 시공후 사용중 장기처짐예측값은 큰 차이가 나타나는 것으로 밝혀졌다. 따라서 콘크리트 시간의존적 특성치의 변동성에 의해 설계시 재료특성치의 가정에 의해 예측된 처짐량과 실제 시공시의 구조물로부터 계측되는 처짐량은 차이가 날 수 있다. 그러므로 시공되는 교량의 실제거동을 정확히 추적하기 위해서는 실제 시공된 콘크리트의 재료특성치를 정확히 결정하는 것이 무엇보다도 중요한 것을 알 수 있다.

그러나 이러한 재료특성치의 정확한 결정은 실제 실험자료에 근거해야 함은 물론 실험자료의 변동성을 합리적으로 고려할 수 있는 기법의 도입이 필요한 것으로 사료된다.

따라서, 기존의 결정론적 예측 방법으로 교량설계시의 정확한 처짐을 예측하는데는 한계가 있다고 판단되며, 장래의 예측방법은 설계자가 콘크리트의 크리프 및 건조수축 등에 대하여 실제 재료특성의 변동

성을 고려한 해석 및 설계를 도모할 수 있도록 확률론적 관점에서 규정되어야 한다고 사료된다.

참고 문헌

1. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures", ACI SP-76, Design for Creep and Shrinkage in Concrete Structures, Detroit
2. ACI 209R-92, "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures", ACI Manual of Concrete Practice-Part 1, 1994.
3. CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, Comite Euro-International Du Beton(CEB), 1990.
4. Bazant, Z. P. , "Mathematical Modelling of Creep and Shrinkage of Concrete", John Wiley & Sons, 1988.
5. Walter Podolny Jr. and Jean M. Muller, "Construction and Design of Prestressed Concrete Segmental Bridges", 1982.
6. Jacques Mathivat, "The Cantilever Construction of Prestressed Concrete Bridges". John Wiley & Sons, 1979.
7. Ketchum, M. A., "Redistribution of Stresses in Segmentally Erected Prestressed Concrete Bridges". Report No. SESM 86-07, University of California at Berkely, May, 1986.
8. Alfred G. Bishara, Nicholas G. Papakonstantinou, "Analysis of Cast-in-Place Concrete Segmental Cantilever Bridges". Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.116, No.5, May, 1990. pp. 1247-1268
9. Young-Jin, Kang., "Nonlinear Geometric, Material and Time Dependent Analysis of Reinforced and Prestressed Concrete Frames". Report No. UCB/SESM 77-1, Jan. 1977.
10. 건설교통부, "도로교 표준시방서", 1996.
11. 오병환, 양인환, 김의성, 최인혁, 김세훈, "재료특성치의 변화로 인한 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량의 거동분석", 한국콘크리트학회 1997년도 가을 정기학술발표회 논문집. pp. 627-632
12. 오병환, 양인환, 김의성, 최인혁, "PC장대교량의 정밀한 전사공을 위한 시공계측관리시스템의 개발에 관한 연구", 한국콘크리트학회 1996년도 가을 정기학술발표회 논문집. pp. 520-525

요 약

캔틸레버 공법으로 시공되는 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량의 구조적 거동은 단계적 시공에 따른 구조물의 순차적 변화 및 콘크리트의 재료적 특성에 의해 시간의존적 거동을 나타낸다. 콘크리트의 시간의존적 특성, 즉 콘크리트의 크리프 및 건조수축 특성은 현장타설 세그멘탈 캔틸레버 공법으로 가설되는 콘크리트 교량의 설계 및 시공에서 매우 중요한 역할을 한다.

본 연구에서는 콘크리트의 크리프 및 건조수축 특성이 교량의 시간의존적 거동, 특히 처짐 및 텐던응력 예측에 미치는 영향을 연구하였다. 교량해석은 본 연구진에 의해 개발된 프리스트레스트 콘크리트 교량해석기법 및 프로그램을 이용하여 크리프의 ACI모델, CEB-FIP모델, 그리고 국내도로교 시방서 모델을 고려하여 해석하였다. 해석결과 최종크리프 값의 크기에 따라 장기처짐의 발생량이 차이가 큰 것으로 나타나고 있으며, 최종건조수축량과 상대습도도 영향을 주는 것으로 나타났다. 또한, ACI모델과 CEB-FIP모델 간에도 차이가 큰 것으로 나타나 실제교량의 크리프 특성 및 건조수축 특성의 정확한 예측이 교량의 정밀 시공 및 거동예측에 매우 중요한 것으로 나타나고 있다.

(접수일자 : 1997. 12. 6)