

하중재하 시점 및 긴장력 변화를 고려한 철도교 PSC 합성보의 장기 솟음 분석

김경현¹, 김기현², 백인열^{3*}

Long-term Camber Analysis of PSC Composite Beam for Railway Bridge Considering Changes in Loading Time and Prestressing Force

Kyung-Hyun Kim¹, Ki-Hyun Kim², In-Yeol Paik^{3*}

Abstract: As part of a study to analyze the excessive camber occurring in prestressed concrete railway bridges, this paper develops a time-dependent camber analysis program for concrete structures and analyzes the change in camber according to the variation of applying time and duration of prestressing force and self-weight as well as the change in live load. The incremental time-step analysis method is applied in order to consider time-related variables such as the strength of concrete in early stage, the applying time and duration of the prestressing force and loads, and the decrease in prestressing force over time. The equations for calculating the creep coefficient and loss of prestressing force are applied according to the domestic bridge design codes. By applying the developed method to an example PSC composite beam for railway bridge, the instantaneous deflection at various loading points and the long term creep deflection for the loading period are obtained. Also the effect of reducing the camber is examined when the prestressing force is reduced considering the degree of allowance of the railway live load. Through numerical examples, it can be shown that the camber increases if the initial prestressing force is introduced early or the period to the slab placement is long or a combination of the two. When the live load is reduced by taking into account the actual train weight, the camber is reduced.

Keywords: Creep deflection, PSC composite beam, Railway bridge, Incremental time-step analysis, Loading period, Design live load

1. 서 론

국내 철도교량에 널리 사용되는 프리스트레스트 콘크리트 (Prestressed concrete, 이하 PSC) 구조는 긴장력과 자중이 지속하여 작용하므로 콘크리트의 크리프 현상에 의한 장기 처짐이 발생하게 된다. 특히 고속으로 주행하는 열차가 짧은 시간동안만 재하되는 철도교에 활하중을 포함하는 총 하중에 대하여 콘크리트의 허용응력을 만족하도록 큰 긴장력을 도입하는 경우에, 긴장력에 의한 시간에 따른 크리프로 인하여 철도교량에 솟음이 크게 발생할 수 있다.

PSC 거더 교량의 시공 과정에서 발생하는 솟음으로 인하여 슬래브 타설 시점과 웨도 작업 시점에서 문제가 발생할 수 있다. 먼저 PSC 거더를 교각에 거치 후에 슬래브 타설을 위하여 거푸집을 제작하는 시점에서 PSC 거더의 솟음이 크거나 PSC

거더 사이에서 서로 불균등한 솟음이 발생하여 슬래브용 거푸집의 횡방향 및 종방향 평탄성을 맞추어야 하는 문제를 일으키는 경우이다. 또한 철도교 노반 과업을 마무리한 후에 웨도 과업을 착수하는 시점에서 PSC 합성보의 시간에 따른 과도한 솟음 발생으로 인하여 지점부에 비하여 중앙부의 장기 솟음이 상대적으로 크게 발생한 경우에 웨도의 평탄성을 유지하기가 어려운 문제가 발생할 수 있다. 완공 후에도 시간에 따른 장기 솟음이 진행된다면, 사용하중이 작용하는 시점에서도 웨도의 평탄성 유지를 어렵게 하는 요인이 되므로 고속으로 주행하는 열차의 주행 편의성과 안전성 관점에서 문제가 될 수 있다.

시간에 따라 콘크리트에 발생하는 크리프 현상은 매우 복잡하며 영향을 미치는 요인은 매우 다양하고 아직 정확하게 밝혀지지 않고 있으므로, 크리프에 의한 처짐의 크기를 정확하게 구하는 것은 어렵다. Lee(2021)는 특히 PSC 합성보의 처짐은 합성되기 전과 후의 단면 강성이 달라지고, 탄성계수, 크리프, 건조수축 등 시간 의존적 특성이 크므로, 한 번의 콘크리트 타설로 시공되는 PSC 보에 비하여 매우 복잡한 해석과정이 필요한 점을 설명하고 있다. 현행 콘크리트 교량 설계기준인 KDS 24 14 21(MOLIT, 2024)과 콘크리트 구조 설계기준인 KDS 14 20 01(MOLIT, 2024)에는 이와 같은 시간 의존적인 변수들에 대하여 시간의 함수로 수식을 정의하고 있다. 이

¹정회원, 가천대학교 공학박사, (주)도화엔지니어링 철도2부 대리

²정회원, 한국철도기술연구원 첨단웨도토목본부 철도구조연구실 선임연구원

³중신회원, 가천대학교 토목환경공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: pinyeol@gachon.ac.kr

Gachon University, 1342, Seongnam-daero, Sujeong-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2025년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2025년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

연구에서는 설계기준의 수식을 사용하여 PSC 합성보에 대한 시간에 따른 처짐의 변화를 구한다. 이 과정에서 처짐의 크기의 정확성을 강조하기보다는 크리프에 영향을 주는 재하 시점과 재하 기간의 변화에 따른 상대적인 처짐의 크기를 비교 분석한다. 또한, 시공 방법에 따라 연속조건이 발생한다면 크리프와 건조수축에 의한 부정적 효과 여부도 분석하여야 하나, 이 논문에서는 하중의 재하기간에 따른 분석에 중점을 두기 위하여 단순보를 대상으로 한다.

국내 철도설계 활하중 선정을 위한 Kim et al.(2010)의 결정론적 연구와 국내 운행 중인 실 열차차량에 대한 중량 데이터를 통계 분석한 Park et al.(2015)의 연구를 보면, 철도교 설계활하중의 하중효과는 실제 열차차량에 비하여 30% 이상의 여유도를 보유하고 있다. 철도교량은 동일한 노선에 고속인 열차가 머무는 시간이 짧아서, 교량 사용수명 중 99%의 기간 동안 활하중을 제외한 긴장력과 고정하중만 작용되는 특성이 있다.

이 논문에서는 콘크리트 구조물의 시간에 따른 솟음 산정 프로그램을 작성하여 긴장력과 자중이 가해지는 시점과 작용 기간에 의한 솟음의 크기 변화를 분석한다. 초기 콘크리트 강도 확보 기간, 긴장력 및 하중이 작용하는 시점, 긴장력의 시간에 따른 감소 등 시간에 대한 변수를 해석에서 고려하기 위하여 증분 시간단계 해석 방법을 적용하는 상세해석을 수행한다. 철도교량 PSC 합성보 예제에 적용하여 다양한 재하시점에 따른 즉시 처짐과 재하기간에 따른 크리프 처짐을 구하고, 철도 활하중의 여유도를 고려하여 긴장력을 감소시키는 경우의 솟음 감소 효과를 검토한다.

2. 장기 솟음 해석 방법

고속으로 운행하는 열차의 주행 안전성에 영향을 미치는 PSC 교량 거더의 솟음을 해석하기 위하여, 이 연구에서는 하중별 재하기간, 긴장력 손실 및 크리프에 의한 장기변형을 시간별로 상세하게 모델링할 수 있는 증분 시간단계 해석 (Incremental time-step analysis) 방법을 적용한다. 증분 시간단계 해석 방법은 재하시간에 따라 PSC 교량을 해석하기 위하여, 긴장력이 도입되는 초기 시간부터 해석의 목표시간까지를 단위 시간으로 나누고, 단위시간 동안 변화한 긴장력과 곡률을 계산한 후 이를 누적하여 처짐을 산정하는 방법이다. 즉, 시간 t 시점의 지간 방향 x 위치에서 총 장기 곡률(Total long-term curvature) $\phi_T(t, x)$ 는 식 (1)과 같이 즉시 곡률 $\phi_i(x)$ 와 긴장력 손실에 의한 곡률 변화량 $\Delta\phi_{ps}(t, x)$, 크리프에 의한 장기 곡률 변화량 $\Delta\phi_{CR}(t, x)$ 로 정의할 수 있다 (Nawy, 2000; Lee, 2021).

$$\phi_T(t, x) = \phi_i(x) + \Delta\phi_{ps}(t, x) + \Delta\phi_{CR}(t, x) \quad (1)$$

이 논문에서는 장기 손실과 처짐을 해석하는 방법에 관한 참고문헌과 설계기준의 수식을 함께 종합하여 통일성 있게 기술하기 위하여 일부 기호는 수정하여 기술한다.

식 (1)에서 하중에 의한 즉시 처짐 $\phi_i(x)$ 는 초기 PS 긴장력과 작용 외력에 의한 모멘트 성분을 합쳐서 개념적으로는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_i(x) = -\frac{P_i e(x)}{E_c I(x)} + \sum_{j=1}^{N_i} \frac{M_j(x)}{E_c I(x)} \quad (2)$$

여기서, P_i 는 초기 긴장력, $e(x)$ 는 시간에 따른 긴장재 편심 거리, E_c 는 콘크리트 탄성계수, $I(x)$ 는 단면2차모멘트이며 경간 위치에 따라 단면 크기가 다른 경우에는 변하는 값이며 시공 단계별로 콘크리트 순단면, 강재 환산단면 및 합성단면으로 구분하여 적용한다. 또한, N_i 은 외력의 개수를 나타내며, 이 연구에서 외력은 PSC빔 자중인 DC1, 슬래브 자중인 DC2 및 궤도하중인 DW로 외력의 개수 $N_i=3$ 이며, 사용하중 작용시에 각 외력에 의한 응력의 크기는 선형 탄성 영역 내에 있으므로, 크리프 처짐은 중첩의 원리를 적용하여 각 하중에 의한 처짐 성분을 구한 후 합친다(Kang, 1977). 또한, $M_j(x)$ 는 이들 외력에 의한 모멘트로 외력의 작용 시점이 다르므로 식 (2)의 초기 곡률을 나타내는 식에도 시간을 나타내는 변수를 표시해야 하지만, 이 식은 이들 초기 외력들에 의한 총 곡률 성분을 개념적으로 나타내고 시간 표시는 제외하였다.

식 (1)에서 우측 두 번째 항인 $\Delta\phi_{ps}(t, x)$ 는 시간 경과에 따른 긴장력 감소로 인한 곡률 변화량을 나타내는데, 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi_{ps}(t, x) = \sum_{k=1}^{N_t} \frac{(P_{k-1}(x) - P_k(x))e(x)}{E_c I(x)} \quad (3)$$

여기서 N_t 는 시간 증분 개수를 나타내며, $k=1$ 일 때의 분자의 첫 항 값 P_0 은 초기 PS 긴장력 P_i 를 의미한다. E_c 는 해당 시간증분에서의 콘크리트 탄성계수이며, 이 연구에서는 국내 교량설계기준-한계상태설계법의 콘크리트 교량코드(이하 콘크리트 교량코드)인 KDS 24 14 21(MOLIT, 2024)에서 제시하고 있는 식을 사용한다. PS 거더의 초기 콘크리트 탄성계수는 즉시 처짐과 이후 장기 처짐에 미치는 영향이 크므로, 콘크리트 교량코드에서 제시하는 식을 적용하여 구한다.

$$E_c(t) = \sqrt{\exp\left\{\beta_{sc}\left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{1/2}\right]\right\}} E_c \quad (4)$$

여기에서 β_{sc} 는 시멘트 종류와 양생방법에 따른 상수로 1종 시멘트 습윤 양생인 경우를 택하였으며, 이 연구에서는 PSC 거더가 재령 28일 이내에서 강도를 발현하는 도중에는 위 식을 적용하여 탄성계수를 변수로 취급하였으며, 그 이후에는 재령 28일 값을 상수로 적용하였다.

시간이 경과하면서 콘크리트의 크리프(Creep), 건조수축(Shrinkage) 및 긴장재의 릴랙세이션(Relaxation)으로 긴장력에 장기손실이 발생된다. 이 연구에서는 식(3) 우측항 분자의 긴장력 감소량은 콘크리트 교량 코드의 지속하중 하에서 PS 긴장력의 장기 손실을 구하는 식을 사용하였으며 이는 식(5)와 같다.

$$\Delta f_{p, CR+SH+RE} = \frac{\varepsilon_{SH}(t, t_s) E_p + 0.8 \Delta f_{pRE} + \alpha \varphi_{CR}(t, t') (f_{c(g+q)} + f_{cpo})}{1 + \alpha \frac{A_p}{A_c} (1 + \frac{A_c}{I_c} z_{cp}^2) [1 + 0.8 \varphi_{CR}(t, t')]} \quad (5)$$

여기에서 $\varphi_{CR}(t, t')$ 는 시간 t' 에 재하된 하중에 의한 시간 t 일 때의 크리프계수를 의미하며 식(6)과 같이 구한다. 콘크리트 교량 코드의 식(5)에서 식(8)까지를 구하기 위해 필요한 상세한 수식과 이들 식에 적용되는 변수들의 기호 설명은 지면 제약상 KDS 24 14 21로 대체하며, 시간 t 와 관련하여 이 연구에서 논의하는데 필요한 수식 및 변수를 위주로 설명한다.

식(6)의 크리프계수와 식(7)의 건조수축 변형률은 CEB-FIP 1990 Model Code를 기본으로 하고 있다.

$$\varphi_{CR}(t, t') = \varphi_{RH} \frac{16.8}{\sqrt{f_{cm}}} \frac{1}{(0.1 + (t')^{0.2})} \beta_c(t - t') \quad (6)$$

$$\varepsilon_{SH}(t, t_s) = \varepsilon_{SH0} \beta_s(t - t_s) \quad (7)$$

식(6)과 같이 크리프함수는 설계기준강도, 부재의 크기, 상대습도, 재하시점의 재령, 재하기간, 시멘트 종류 등의 변수를 고려하고 있으며, 외기 환경조건 계수인 φ_{RH} 가 증가할수록, 재료강도 f_{cm} 가 낮을수록, 크리프는 증가하며, 또한 교량의 공용기간이 증가할수록 크리프는 증가한다. 식(7)의 건조수축 변형률은 대기의 상대습도, 건조기간, 시멘트 종류 등의 변수로 표현되며, 콘크리트가 공기에 노출되는 재령 t_s 부터 시간 t 까지의 공용기간이 증가할수록 건조수축 변형률 $\varepsilon_{SH}(t, t_s)$ 도 증가한다.

Δf_{pRE} 는 릴랙세이션에 의한 긴장력 손실량으로 식(8)과 같이 구한다.

$$\Delta f_{pRE} = 0.66 \rho_{1000} e^{9.1\mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0.75(1-\mu)} f_{pi} 10^{-3} \quad (8)$$

또한 식(6)의 크리프 계수와 식(7)의 건조수축 변형률을 구하기 위하여 이 연구에서는 대기온도는 20°C, 상대습도는 70%로 상수로 적용하며 추가의 보정은 수행하지 않았다.

식(1)의 마지막 항인 $\Delta \phi_{CR}$ 은 콘크리트의 크리프에 의한 장기곡률이며, 식(1)의 처음 두 항에 대한 장기곡률 성분을 나타낸다. 첫 항인 즉시곡률에 대한 크리프 성분은 식(2)에 크리프계수를 곱하여 산정할 수 있다. 이는 즉시곡률을 나타내는 식(2)가 이 연구에서 대상으로 하는 PSC 거더는 시간에 따라 변하지 않는 변수들로 이루어져 있기 때문이다. 다만 식(2)의 마지막 항인 외력들은 시공 단계에 따라 재하 시점이 다르기 때문에 동일한 최종 시간에 대한 장기처짐을 구할 때에도 외력별로 구분된 재하시점의 크리프계수를 적용하여야 한다. 즉, 콘크리트 양생 개시 시점부터의 시간 t 와 하중 작용 시점부터의 재하시간 t' 로 나타내는 크리프계수 $\varphi(t, t')$ 을 산정하여, 이를 각 시공단계에 작용하는 외력에 의한 즉시 변형률 $\phi_i(x)$ 에 곱하여 산정한다.

식(1)의 우측 세 번째 항인 장기곡률 성분 $\Delta \phi_{CR}$ 은 긴장력 성분 $\Delta \phi_{CR,ps}$ 과 외력 성분 $\Delta \phi_{CR,l}$ 로 이루어진다.

$$\Delta \phi_{CR}(t, x) = \Delta \phi_{CR,ps}(t, x) + \Delta \phi_{CR,l}(t, x) \quad (9)$$

먼저 긴장력에 의한 장기곡률 성분은 시간에 따른 긴장력 변화를 고려할 수 있도록 증분 시간단계 해석방법으로 구할 수 있다.

$$\Delta \phi_{CR,ps}(t, x) = \sum_{k=1}^{N_t} \frac{(\varphi_{CR,k} - \varphi_{CR,k-1}) P_{k-1} e(x)}{E_c I(x)} \quad (10)$$

여기서, 첫 번째 시간증분인 $k = 1$ 일 때 $\varphi_0 = 0$ 이고, $P_0 = P_i$ 로 한다.

외력에 의한 장기곡률 성분은

$$\Delta \phi_{CR,l}(t, x) = \sum_{j=1}^{N_t} \varphi_{CR}(t, t_j') \frac{M_j(x)}{E_c I(x)} \quad (11)$$

여기서, t_j' 은 j 번째 외력이 가해지는 시점이다.

이와 같은 과정을 거쳐 식(1)로 표시되는 총 곡률 $\phi_T(t, x)$ 를 구하면, 임의의 시점 t 에 부재의 위치 x 에서의 회전각 $\theta(t, x)$ 와 처짐 $v(t, x)$ 는 식(12)와 식(13)으로 구할 수 있다 (Gere and Goodno, 2013).

$$\theta(t, x) = \int \phi_T(t, x) dx \quad (12)$$

$$v(t, x) = \int x \phi_T(t, x) dx \quad (13)$$

위 관계식은 모멘트 면적법(Moment area method)에 따른 처짐 산정 과정과 동일하므로, 이 연구에서는 이를 적용하여 총 처짐을 구한다. Fig. 1에는 이 연구에서 예제로 사용한 경간

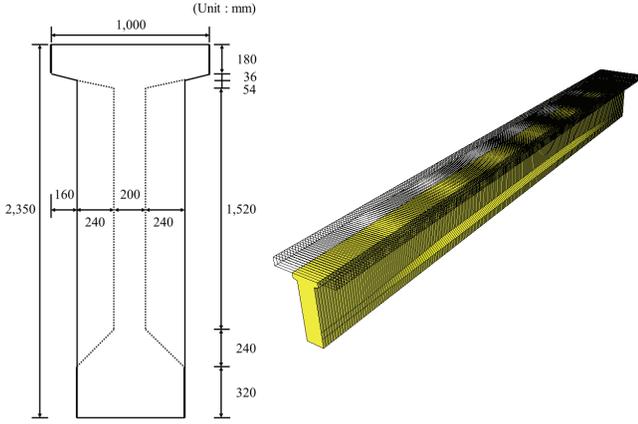


Fig. 1 Dimension and side view of an example PSC girder

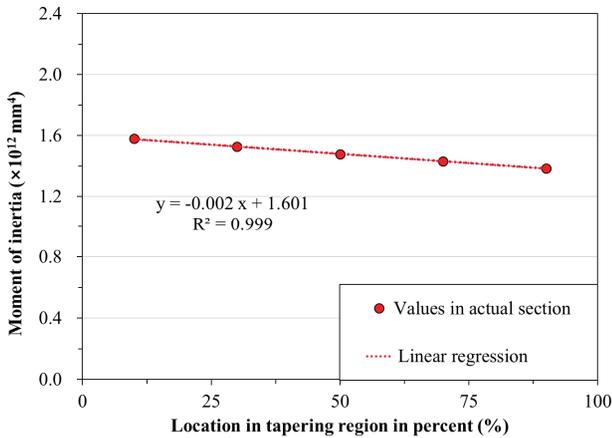


Fig. 2 Moment of inertia in the tapering region of the PSC girder in Fig. 1

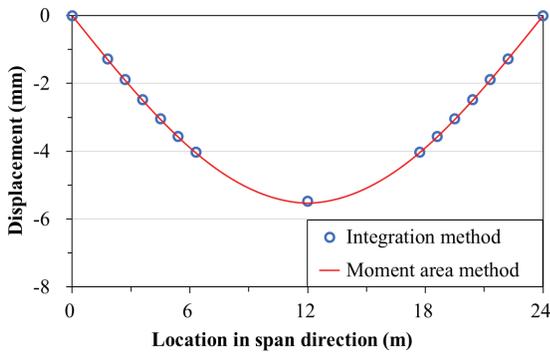


Fig. 3 Displacements obtained by integration method and moment area method

24 m의 PSC 거더 단면(KRRI, 2016)을 도시하였으며, 지점부의 북부폭은 680 mm이고 중앙부의 북부폭은 200 mm로 변단면 구간이 존재하는 보이다. 변단면 구간에서는 단면2차모멘트가 위치 x 에 따라 변하게 된다. Fig. 2에는 변단면 구간의 단면2차모멘트를 도시하였으며 경간 방향에 따라 거의 직선 관계임을 알 수 있다. 따라서 이 연구에서는 계산을 간편하게 하기 위하여 변단면 구간 내부의 단면2차모멘트는 시작점과 끝점 값을 직선보간하여 사용한다. Fig. 3에는 이 예제 보에 등분포하중이 작용하는 경우에 경간 길이 방향 x 에 대한 처짐을 나타낸다. 식 (13)에 따른 적분으로 구한 값과 이 연구에서 작성한 수치해석 프로그램을 적용하여 구한 값이 서로 일치함을 알 수 있다.

Fig. 4에는 이 논문에서 PSC 빔 거더에서 발생하는 솟음을 해석한 방법에 대한 흐름도를 지면 제약 상 간략하게 나타내었다. 여기에서 초기 변형률은 각 하중에 의하여 산정된 모멘트를 모멘트면적법을 적용하여 변형률을 구하며, 이 산정식은 Fig. 4와 같이 곡률과 처짐에 대한 식을 일반화하여 나타내었다. 먼저 분석 대상 PSC 거더의 단면 및 재료 제원으로부터

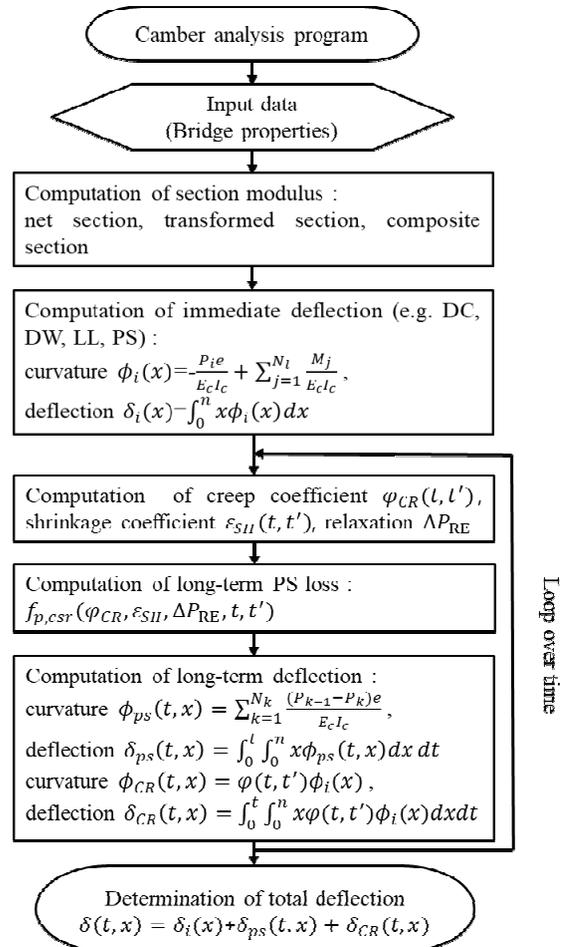


Fig. 4 Flowchart of camber analysis program for PSC beam

단면계수를 계산하며, 외력이 작용하면서 발생하는 즉시 변형을 산정한다. 이후 재하기간에 따른 크리프에 의한 변형을 분석하도록 크리프계수를 분석한다. 마지막으로 증분 시간단 계해석 방법으로 재하기간에 따른 장기 변형은 최종 곡률을 적분하여 해석한다.

합성단면의 크리프계수를 구할 때, PS 거더가 먼저 긴장력과 자중을 받고, 슬래브는 합성된 이후에 크리프 변형을 받게 되는 점을 고려하였다. 이에 대한 설명은 아래 Fig. 6의 처짐 해석 결과 논의 과정에서 자세하게 다룬다.

3. 시간에 따른 장기 쏏음 분석

3.1 작용 하중에 따른 쏏음 분석

2장에서 기술한 과정에 따라 작성한 처짐해석 프로그램을 사용하여 철도 하중을 받는 PSC 보의 쏏음 해석을 수행하고 그 결과를 분석하여 PSC 보의 과도한 쏏음 문제를 분석한다. 분석을 위한 수치 예제는 Fig. 1과 같은 변단면 PSC 거더를 지점에 거치하고, 동바리 없이 RC 슬래브를 타설하여 합성되며, 철도 설계하중이 작용하는 Fig. 5와 같은 단면을 가진 PSC 합성보이다. PSC 거더의 콘크리트설계기준강도는 45 MPa이다. 슬래브의 콘크리트설계기준강도는 35 MPa이며, 두께는 300 mm이고, 유효폭은 2 m, PSC 거더 콘크리트로 환산한 환산폭은 1.86 m이다.

PSC 빔 교량에서 과다 쏏음이 문제가 되는 3가지 시점은 슬래브 타설 시점, 궤도 작업 시점 및 사용하중이 작용하는 시점을 들 수 있다. 첫 번째 시점에서는 PSC 보를 교각에 거치 후에 슬래브 타설을 위하여 거푸집을 제작하는 시점에서 PSC

보가 과도한 쏏음을 보이거나 PSC 보들 사이에서 불균등한 쏏음이 발생하여 슬래브용 거푸집의 평탄성을 맞추기가 어려운 문제를 일으키는 경우이다. 두 번째 시점에서는 PSC 합성보의 과도한 쏏음으로 인하여 지점부에 비하여 중앙부의 쏏음이 큰 경우에 궤도 설치의 평탄성을 유지하기가 어려운 문제가 발생할 수 있다. 세 번째 시점에서는 사용상태에서 쏏음이 지속적으로 진행된다면 궤도의 평탄성을 저해하게 되므로 고속으로 주행하는 열차의 주행 편의성과 안전성 문제가 대두될 수 있다. 이 연구에서는 이러한 3가지 시점을 대상으로 하중재하 시기와 설계변수의 변화에 따른 해석을 통하여 과다 쏏음의 요인을 분석한다.

콘크리트에 크리프 변형을 발생시키는 각 하중의 재하시점은 Fig. 6과 같이 일반적인 시공 기간을 고려하여 이 연구에서 수치 예를 보이기 위한 기준으로 정한다. 콘크리트 양생 개시 t_0' 를 시간 t 의 시작점으로 한다. 부재하단에 배치된 긴장재에 프리스트레스 긴장력 (PS)이 도입될 때 부재가 쏏으면서 빔 자중(DC1)도 가해지는 시점을 t_1' 으로 하며 재령 28일째이다. 이후 그라우팅 작업 및 빔을 운반하고 거치하는 등의 작업 기간을 고려하여, 60일 기간 경과 후에 바닥판(DC2)이 타설되는 시점을 t_2' 라고 하고 원점부터 88일째가 된다. 이 시점까지 노반작업에 관련된 하중이 모두 재하된다. 양생 기간은 Stage 0으로 하고, 위와 같은 하중들이 가해지는 시점 사이 기간을 Stage I, II, III라 한다. 하중에 의한 즉시 처짐을 구할 때 단면2차모멘트는 t_1' 에서 긴장력과 PSC 빔 자중에 대하여는 순단면, t_2' 에서 슬래브 자중은 환산단면, t_3' 에서 궤도하중은 합성단면의 값을 적용한다. 일반적으로 철도 노선 시공의 특성상 노반과업이 마무리 된 후에 궤도과업이 분리 발주되어 시공에 착수하므로, 이 연구에서는 이 사이 기간에 172일의 여유를 두어 궤도하중(DW)이 재하되는 시점인 t_3' 은 양생 후

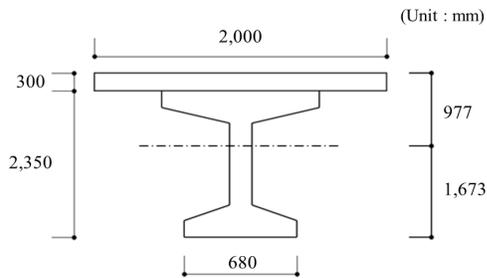


Fig. 5 Example PSC composite section

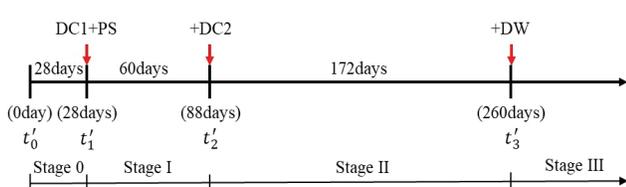


Fig. 6 Example loading time t_i' along construction stage

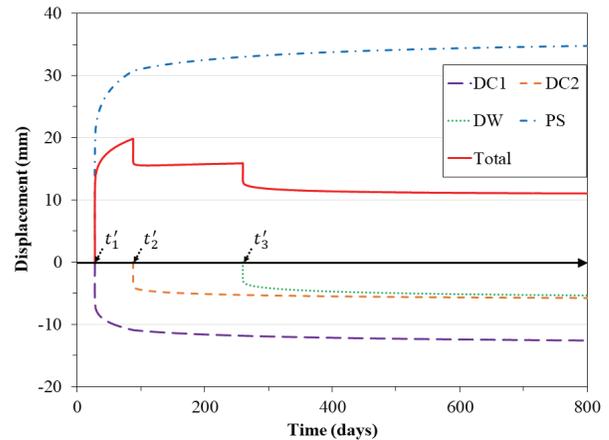


Fig. 7 Immediate and long-term displacement due to prestress and dead loads in a composite PSC beam (camber (+), deflection (-))

260일로 정한다. 여기에서 궤도하중(DW)은 궤도공사에 적용되는 레일에 의한 하중, 기타 설비에 의한 하중 등을 포함하며 t_3' 에 재하되는 것으로 가정한다.

Fig. 7에는 Fig. 6의 재하기간에 따라 발생하는 솟음을 각 시공단계를 고려하여 시간에 따라 해석한 결과를 하중별로 구분하여 나타내었다. 이 연구에서는 긴장력에 의한 상향 솟음을 양의 부호로 하고 외력에 의한 하향 처짐을 음의 부호로 나타낸다. 최초 응력이 가해지는 t_1' 시점에서 긴장력에 의하여 상향 솟음 성분이 발생하며, 작용 기간이 증가하면 크리프의 영향으로 장기솟음이 증가한다. 반면 t_1' 시점의 PSC 빔 자중, t_2' 시점의 바닥판 자중, t_3' 시점인 궤도하중 등 연직 하향인 고정하중에 의해서는 하향 처짐이 발생되며, 이들 처짐도 시간에 따라 크리프의 영향으로 장기처짐이 증가하게 된다.

Table 1에는 Fig. 7에서 합성되기 전부터 PS 거더에 작용하는 긴장력 및 거더 자중에 대한 크리프 처짐을 구할 때, 합성 후 시점의 크리프 계산에서 여전히 PS 거더 단면의 강성을 사용하거나 아니면 합성 후 시점에는 합성단면 강성을 고려하거나 여부에 따라 해석 결과를 비교하여 나타내었다. 설계 과정에서 교량의 처짐을 구조해석하는 경우, 합성전 단면에 재하된 하중에 대하여는 이후 합성여부에 상관없이 단순히 비합성 단면에 경과기간만 적용하여 솟음량을 구하는 경우가

흔하므로 이 논문에서는 단면이 합성되면서 변화하는 강성을 고려하여 변형을 구하고 차이를 분석한다. 먼저 Method I은 최초 단면의 강성인 PS 거더만의 강성으로 합성된 이후의 장기처짐 계산에도 적용하는 경우이고, Method II는 t_2' 시점 이후부터는 단면 강성이 합성단면 강성으로 강해지는 효과를 고려하여 크리프 처짐을 구한 결과이다. Method II는 PS 거더 단면이 크리프에 의한 변형으로 곡률이 변하려고 할 때, 식 (10), (11) 분모의 단면2차모멘트에 합성단면으로 커진 강성값을 적용하였다. 즉, 합성 후에는 크리프로 인한 변형 전, 후의 합성단면이 평면을 유지해야 하는 철근콘크리트 역학의 기본가정에 따라서, PS 거더부의 크리프 변형 발생 요인을 합성단면 전체의 휨강성이 받아주는 것으로 적용한다.

Table 1로부터 처짐 성분이 가장 큰 PS 긴장력 성분을 비교하면, 초기 즉시 솟음이 16.8 mm이고, 궤도하중이 작용하는 $t_3' = 260$ 일에서의 크리프 솟음량을 비교하면 Method I은 20.9 mm이고 Method II는 17.6 mm로 약 18.7% 차이가 난다. 모든 하중에 의한 솟음과 처짐 값을 합친 값은 1.5% 차이가 남을 볼 수 있다. 시간이 2년과 10,000일이 경과하면서 총 처짐의 차이는 조금씩 증가함을 알 수 있다. 이 논문의 모든 처짐 그래프는 Method II를 적용한 결과이다.

이들 하중에 의한 총 처짐인 Fig. 7의 실선을 보면, 긴장력 도입 후 바닥판 타설 이전까지인 $t_1' \sim t_2'$ 사이 기간에는 긴장력에 의한 솟음이 빔 자중에 의한 처짐보다 커서, 이 기간이 증가할수록 PSC 빔에 발생하는 전체 솟음이 증가한다. 재하시점 $t_3' = 260$ 일에 궤도하중인 추가고정하중이 재하되어 연직 하중에 의한 처짐의 영향이 증가하며 반면에 긴장력에 의한 솟음의 영향이 이전보다 감소하면서 재하기간에 따라 솟음의 증가 정도가 감소하게 된다. 이 예제 교량의 경우에 시공 단계에 따라 작용하는 하중효과의 크기를 비교하면 Fig. 8과 같다. 이 그림의 모멘트는 하중계수를 곱하지 않은 사용하중 값이다. Fig. 8의 왼쪽 2개의 막대 그래프는 Stage I 기간에 작용하

Table 1 Displacement components due to loads and long term creep effect by method I and II

Component	Method	Displacement (mm)			
		260 d.	2 yr.	10,000 d.	
Loads and PS loss	I & II	PS	16.8	16.8	16.8
		Δ PS	-0.7	-0.8	-1.1
		DC1	-5.8	-5.8	-5.8
		DC2	-3.7	-3.7	-3.7
		DW	-2.7	-2.7	-2.7
Long-term creep	I	PS	20.9	25.6	30.3
		Δ PS	-0.8	-1.3	-1.9
		DC1	-7.2	-8.8	-10.4
		DC2	-3.4	-4.4	-5.3
		DW	0	-2.6	-3.2
	II	PS	17.6	19.7	21.8
		Δ PS	-0.7	-0.9	-1.3
		DC1	-6.1	-6.8	-7.5
		DC2	-1.6	-2.1	-2.5
		DW	0.0	-2.6	-3.2
Total	I	13.4	12.3	12.9	
	II	13.2	11.1	10.8	
Ratio of II/I (%)		98.5	90.2	83.7	

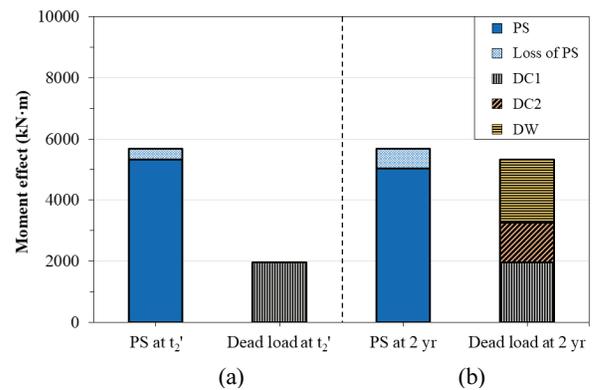


Fig. 8 Moment effects according to construction stage (a) Stage I (b) Stage II & III

는 긴장력과 거더 자중으로, 그림에서 PS로 표시된 성분의 일부가 나타내는 손실되는 긴장력을 고려하여도 긴장력이 거더 자중에 비하여 훨씬 크므로 이 기간이 증가할수록 장기 수축이 증가할 것임을 예측할 수 있다. 또한 Fig. 8의 3번째 막대 그래프는 2년 후 손실된 긴장력을 나타내고, 4번째 그래프는 아래에서부터 DC1, DC2 및 DW를 나타낸다. Stage II 기간에 작용하는 DC1+DC2는 감소된 긴장력보다 작아서 장기 수축이 증가하고, Stage III 기간에는 DC1 + DC2 + DW이 작용하므로 감소된 긴장력과 비슷하게 되어 그 이후에는 장기 수축은 감소하게 된다. 다만 이와 같은 경향은 외력이 재하되는 시점을 Fig. 6과 같이 가정하였을 경우이고, 하중의 크기가 이 예제와 같은 경우이나, 실제 교량을 시공하는 경우에는 현장 작업환경 및 과업 진행에 따른 후속 과업의 발주 일정 변동 등 여러 불확실성으로 인하여 시공 단계별 재하기간에 많은 차이가 발생하게 된다. 이 연구에서는 시공 단계별 재하기간이 달라지는 경우에 PSC 거더에 발생하는 수축의 크기가 어떤 영향을 받는지 분석한다.

3.2 시공단계별 경과 기간에 따른 수축 분석

Fig. 9에는 시공 단계별 각 하중의 재하시점과 재하기간이 달라지는 경우에 발생하는 전체 수축을 비교하여 나타내었다. 여기서 PS + DC1, DC2, DW 작용시점인 t_1' , t_2' , t_3' 와 이들 사이의 시공 기간인 Stage 0, I, II에 대하여 Fig. 6에 나타낸 시점 전후로 Stage 0은 7일 간격, Stage I은 14일 간격, Stage II는 60일 간격으로 재하기간에 따른 수축을 분석하였다.

Fig. 9(a)는 긴장력을 도입하는 시점 t_1' 을 변화시키고 그 이후 다른 하중 재하기간은 동일하게 유지한 경우의 수축을 나타낸다. 이 그림의 위쪽 두 곡선으로 나타난 최초 긴장력이 도입되는 시점이 Stage 0 = 14일, 21일인 경우의 그래프에서, 슬래브 타설시점 t_2' 직전에서의 수축이 각각 22.7 mm, 20.9 mm로 Stage 0 = 28일인 경우의 수축인 19.8 mm 보다 각각 2.9 mm, 1.1 mm 더 큰 값을 보이며, 비율로는 각각 14.6%, 5.6% 더 큰 값을 보인다. 이 두 경우의 궤도하중 재하시점인 t_3' 직전에서의 수축은 각각 18.6 mm, 16.9 mm로 Stage 0 = 28일인 경우의 15.9 mm보다 각각 2.7 mm, 1.0 mm 더 크고 비율로는 각각 17.0%, 6.3% 더 큰 값을 보인다. 2년 경과한 사용상태 시점의 수축은 세 경우에서 13.5 mm, 12.0 mm, 11.0 mm로 긴장력을 미리 도입하는 두 경우는 각각 2.5 mm, 1.0 mm 더 크고 비율로는 22.7%, 9.1% 큰 값을 보인다. 즉, Stage 0 = 28일보다 미리 긴장력을 도입하는 경우에는 28일에 긴장하는 경우와 비교할 때 초기에 발생한 즉시 수축과 크리프 수축을 합친 전체 수축의 차이가 시간에 따라 거의 같은 크기로 유지되며 수축의 비율은 증가함을 볼 수 있다. 참고로 PS 거더 콘크리트의 양생 초기 강성 차이로 인한 즉시 처짐의 차이는 각각 0.5 mm,

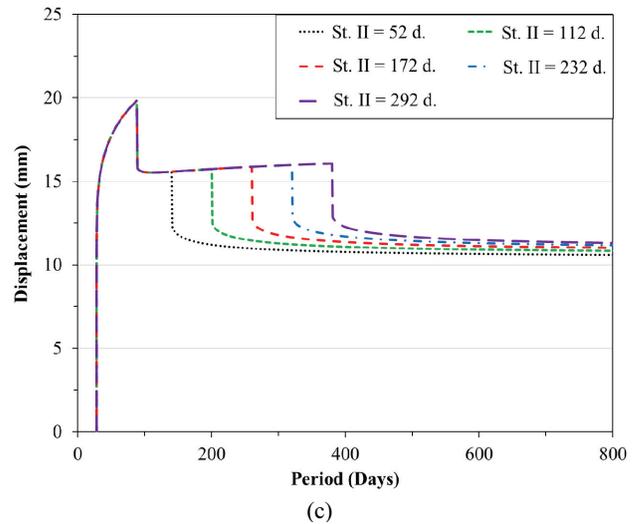
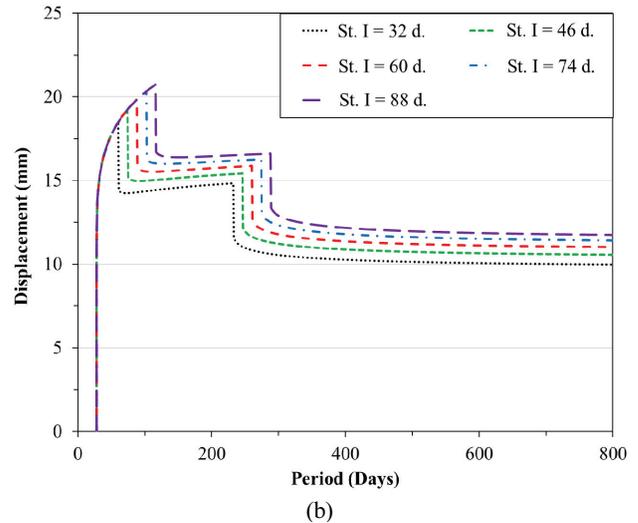
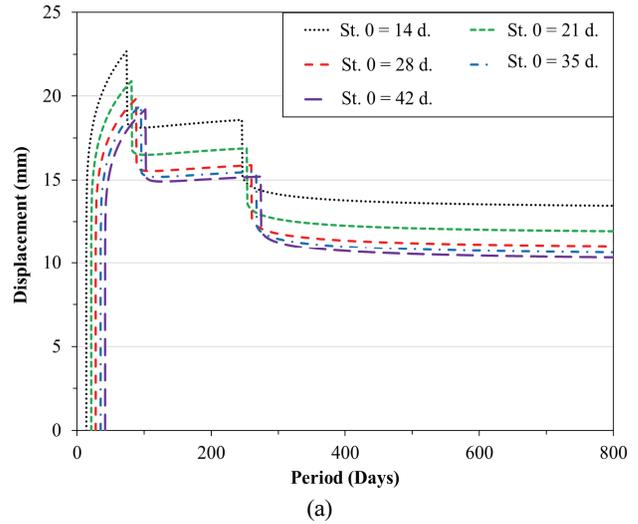


Fig. 9 Displacement for different elapsed periods of each construction stage ; (a) Stage 0, (b) Stage I, (c) Stage II

0.2 mm이다. 최초 긴장력 도입시점이 28일 이후인 Stage 0 = 35일, 42일인 경우의 시간에 따른 솟음 감소는 Fig. 9(a)에서 볼 수 있듯이 그리 크지 않다. 이와 같이 콘크리트 양생 후 28일보다 빠른 시점에 초기 긴장력을 도입하는 경우에는 식 (6)의 분모에 있는 응력 작용시점 t' 과 콘크리트 강도 f_{cm} 이 작아서 크리프계수가 커지는 효과가 있으며, 또한 양생 후 28일 이내에 긴장하는 경우에는 식 (4)의 콘크리트 탄성계수가 작아서 솟음이 크게 나타나기 때문이다.

Fig. 9(b)는 긴장력은 $t_1' = 28$ 일 동일한 시점에 도입 후, 슬래브 타설 시점 t_2' 까지인 Stage I의 경과 시간이 다를 경우에 대한 총 솟음을 비교하였다. 그림에서 보면 처짐 그래프들이 시간에 관하여 거의 일정한 차이를 보임을 알 수 있다. Stage I = 32일, 88일인 최대, 최소 그래프에 대하여, Stage I = 60일인 중간 그래프에 대한 값 차이는 각각 -1.3 ~ -1.1 mm와 0.9 ~ 0.7 mm로 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 즉, 시공 기간 중에 비교적 전반 기간인 Stage I의 경과 시간의 크기에 따라 발생하는 크리프 처짐의 차이가 이후에 유지되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9(c)는 바닥판 타설 이후 케도 설치를 위한 추가고정하중이 재하되는 시점 t_3' 사이인 Stage II의 경과 시간이 다를 경우에 대한 총 솟음을 비교하였다. 그림에서 보면 처짐 그래프들의 차이가 시간에 관하여 매우 작으며 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다. Stage II = 52일, 292일인 최소, 최대 그래프에 대하여, Stage II = 172일인 중간 그래프에 대한 값 차이는 각각 -0.3 ~ -0.5 mm와 0.2 ~ 0.3 mm로 매우 작으며 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 즉, 시공 기간 중에 후반 기간인 Stage II의 경과 시간의 크기에 따라 발생하는 크리프 처짐의 차이는 크지 않음을 알 수 있다.

Table 2는 Fig. 9 (a), (b)에서 본 바와 같이 Stage 0과 Stage I

의 기간이 처짐에 큰 영향을 미치므로, 이 두 기간을 조합한 시공기간별 처짐을 비교한 표이다. 이 표는 바닥판의 타설 시점인 t_2' 과 재하기간 2년인 시점에서의 처짐을 나타낸다. PS 거더 타설 후 긴장력이 가해지기까지인 Stage 0 기간을 14일부터 42일까지로 1주일 단위씩 변화시키고, 각각에 대하여 바닥판 타설까지 기간인 Stage 1 기간을 32일부터 88일까지로 2주일 단위씩 변화 시킨 경우에 처짐을 구하여 비교하였다. 바닥판 타설 시점인 t_2' 에서 PS 거더의 솟음이 최소로 발생하는 조건은 Stage 0 기간이 최대인 42일이면서 Stage I 기간이 최소인 32일인 경우로 17.92 mm이며, 최대로 발생하는 조건은 Stage 0 기간이 최소인 14일이면서 Stage I 기간이 최대인 88일인 경우로 23.79 mm이다. 최대 솟음은 최소 솟음에 비하여 32.8% 더 큰 값을 보인다. 마찬가지로 재하기간 2년인 시점에서 동일 조건에서 최소 및 최대 솟음이 발생하는 것을 알 수 있다. 이 표에서 볼 수 있듯이 긴장력이 도입되는 시기인 Stage 0가 짧으면서 슬래브가 타설되기까지 기간인 Stage I이 길어질수록 솟음이 증가하는 것을 알 수 있다. 이 조건에서는 바닥판 타설 전 거더만의 작은 강성이 작용하고, 솟음을 일으키는 긴장력 성분이 크므로, Stage I 기간이 길어질수록 상향 크리프 효과가 증가되어 솟음이 크게 발생된다. 반대로 긴장력이 도입되기 전인 Stage 0이 길면서 슬래브가 타설되기까지인 Stage I 기간이 짧아질수록 초기 콘크리트 강성이 크므로 이후 크리프가 작아지고, 단면 강성이 작은 기간이 짧으므로 크리프 솟음이 감소하게 된다.

Fig. 10에는 Table 2에서 구한 Stage 0과 Stage I의 조합 중에서 솟음이 최소로 발생하는 조건과 최대로 발생하는 조건 및 Fig. 6에서 가정한 조건으로 구한 처짐을 비교하여 나타내었다. 이 그래프에서 Table 2의 최댓값을 나타내는 조합에 대한 곡선을 보면, 콘크리트가 양생되는 기간이 많이 경과한 후에

Table 2 Displacement at t_2' and in 2 years for different combination of Stage 0 and Stage I

Time	Stage 0	Stage I				
		32 d.	46 d.	60 d.	74 d.	88 d.
t_2'	14 d.	20.96	21.92	22.67	23.28	23.79
	21 d.	19.39	20.23	20.89	21.42	21.87
	28 d.	18.48	19.25	19.84	20.33	20.74
	35 d.	18.17	18.91	19.48	19.95	20.35
	42 d.	17.92	18.64	19.20	19.65	20.04
2 years	14 d.	12.13	12.89	13.49	13.99	14.41
	21 d.	10.79	11.45	11.96	12.39	12.76
	28 d.	10.01	10.59	11.06	11.45	11.79
	35 d.	9.65	10.21	10.66	11.03	11.36
	42 d.	9.38	9.92	10.34	10.71	11.02

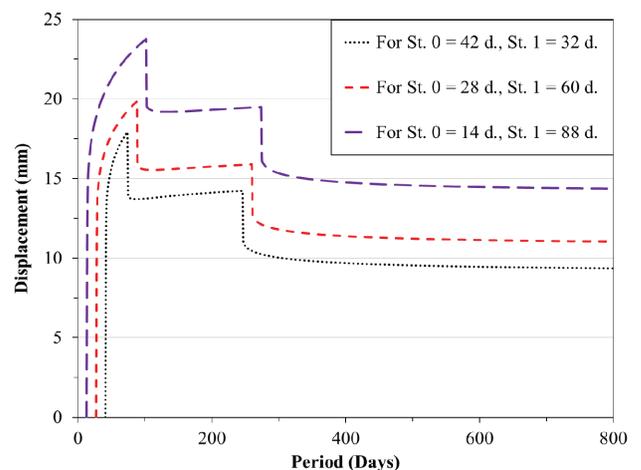


Fig. 10 Maximum and minimum displacement from combination of Stage 0 and Stage I in Table 2

긴장력이 도입되고, 그 후 짧은 기간 내에 바닥판이 타설될수록 이후 시점에서 크리프에 의한 솟음을 포함한 총 솟음이 작아지는 것을 그림으로 확인할 수 있다.

3.3 설계 활하중 여유도를 고려한 솟음 분석

이 절에서는 철도 활하중의 여유도를 고려하여 긴장력을 조정하는 경우에 거더의 솟음을 검토한다. 국내 철도 설계 활하중은 현재 운행 중인 실제 열차차량에 비하여 30% 이상의 여유도를 보유하도록 설정하고 있다.(Kim et al., 2010; Park et al., 2015) 따라서 설계 활하중에 대하여 콘크리트의 허용응력을 만족시키도록 설계되는 PS 긴장력은 실제 중량보다 큰 하중에 대하여 설계되므로, 이 절에서는 사용상태인 솟음을 중심으로 설계를 고려할 때, 긴장력을 감소시키는 경우를 가정하고 이에 대한 솟음을 구하여 비교한다.

Table 3에는 예제 교량을 대상으로 활하중을 여유도 만큼 감소시킨 후 재설계를 하여 긴장재 개수를 수정한 결과를 나타낸다. 여기서 긴장력의 크기는 세 가지로 구분하였는데, 최초 설계(Design)된 긴장력, 설계 활하중 효과에 딱 맞게 구한 100% 긴장력 및 활하중 여유도를 고려하여 70% 활하중 크기에 딱 맞게 구한 긴장력이다. 설계기준의 안전성과 사용성을 만족시키도록 재설계한 결과 최초 설계의 긴장재 수 12개에 비하여, 설계 활하중에 100% 딱 맞는 값에 대하여는 11개, 설

계 활하중에 70% 딱 맞는 값에 대하여는 10개의 긴장재를 사용하면 만족시킬 수 있었다. 이 표에서 M_d 는 단면의 설계휨강도로 모두 계수모멘트보다 크며, σ_t 는 가장 인장에 가까운 응력을 찾은 값으로 이 경우는 모두 압축 값인 양수로, 허용범위인 0 이상으로, 인장응력을 나타내지 않고 있음을 알 수 있다. 여기서 PS 강선의 수를 제외한 나머지 변수들은 기존의 설계와 동일하게 적용하였다.

Fig. 11에는 강선 개수를 조정하여 재설계된 경우의 재하 기간에 따른 변위를 나타내었다. 3가지 경우에 대한 긴장력 성분에 의한 즉시 솟음 및 크리프 솟음이 그래프 위쪽에 세 곡선으로 나타나며, 자중에 의한 처짐을 합친 총 솟음은 아래 세 곡선과 같이 나타난다. PS 긴장재에 의한 솟음 성분을 보면 긴장력을 설계 활하중의 100%와 70%에 맞춘 경우의 솟음은 즉시 솟음 뿐이 아니라 향후 시간에 따른 크리프 솟음도 감소하고 있음을 알 수 있다.

Table 3의 맨 우측 두 열에 나타난 바와 같이 100%와 70% 경우의 솟음은 슬래브 타설 시점인 t_2' 에서 각각 88.1%, 75.9%의 크기를 보이고, 2년 경과한 시점에는 각각 75.7%, 51.1%의 크기를 보인다. 즉, PS 강선의 수가 1개씩 감소되는 경우 t_1' 에서 발생하는 즉시 솟음 값 뿐만 아니라 재하 기간에 따라 상향 솟음에 대한 크리프 효과도 감소되어 재하 기간이 길어질수록 자중에 의한 연직 하향 처짐 성분이 상대적으로 크게 되므로, 솟음이 감소하게 된다.

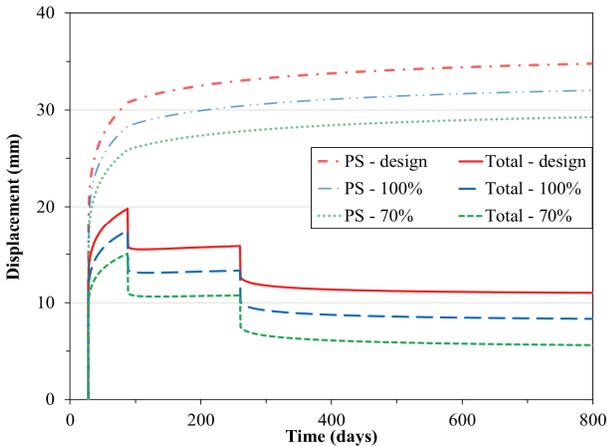


Fig. 11 Displacement due to PS and total component for different live load effects

4. 결론

철도교량의 PS 콘크리트 거더에서 시간에 따라 발생하는 크리프 솟음을 예측하는 것은 고속으로 주행하는 열차의 주행 안전성 확보를 위하여 특히 중요한 문제이다. 이 연구에서는 증분 시간단계해석 방법으로 PS 콘크리트 거더의 작용하중에 따라 발생하는 솟음을 상세 해석하는 프로그램을 작성하였다. 이 논문에서 예제로 사용한 PSC 합성보 단면에 적용하여 얻은 주요 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 초기 긴장력이 도입되고 PS 거더 자중이 가해지는 Stage I 기간 동안은 단면 강성은 작고 상향력 효과는 커서 즉시 처짐이나 크리프에 의한 장기처짐 값이 가장 크게 발

Table 3 Redesigned PS strand and displacement at t_2' and in 2 years considering reduced live load

Ratio of live load		Factored moment (kN·m)			Number of PSC strand (EA)	Prestressing force (kN)	M_d (kN·m)	Stress (MPa)		Displacement (mm)	
Parameter	Percent (%)	Dead load	Live load	Total load				σ_t	σ_{ta}	t_2'	2 yr
	Design		7,171	14,554	12	4,902	19,575	1.78	0	19.84	11.06
Live load	100	7,384	7,171	14,554	11	4,537	18,002	0.53	0	17.47	8.38
	70		5,019	11,861	10	4,160	16,215	0.79	0	15.07	5.65

생하는 시기이다. 즉, 이 기간의 단면 강성은 PS 거더만으로 이루어져서 이후 합성 단면에 비하여 작으며, Fig. 8(a)와 같이 상향 솟음을 일으키는 긴장력이 최대이며, 하향 처짐을 일으키는 연직하중은 PS 거더 자중뿐으로 작아서, 시공 초기에 상향 솟음이 발생하게 된다.

- 2) 슬래브가 합성된 이후의 PS 거더의 크리프 처짐 계산에 합성단면 강성을 추가 고려한 해석 결과는 합성단면 강성을 고려하지 않은 단순 해석 결과에 비하여, 하중이 10,000일 재하된 시점에서 83.7%의 솟음 값을 주었다. 즉, 슬래브 양생 후 단면의 강성이 커지면 이후의 장기 변형을 합성단면의 강성이 받아서 장기처짐값이 감소하는 효과를 반영하면, 궤도하중 작용시점이나 이후 사용시점의 솟음량이 감소되는 결과를 얻게 된다.
- 3) PS 합성보에 작용하는 긴장력 및 하중의 작용 시점 사이의 시공기간인 Stage 0, I, II가 달라지는 경우에 대한 솟음을 계산하여 결과를 분석하였다. Fig. 9(a)로부터 Stage 0에 해당하는 양생 후 긴장력이 최초로 도입되는 기간이 28일보다 작은 경우에, 즉시 솟음과 크리프 솟음이 모두 가장 크게 나왔으며, 바닥판 타설시점인 t_2' 직전의 솟음 차이가 2년이 지난 시점까지 비슷한 크기의 차이로 유지됨을 알 수 있다. Fig. 9(b)로부터 Stage I에 해당하는 긴장력 도입 후 바닥판 타설까지 기간이 긴 경우에도 PS 거더의 크리프 솟음의 크기가 크게 발생하였으며, 이 Stage I의 기간별 차이에 따른 솟음 크기의 차이는 시간이 지나도 유지되고 있다. Fig. 9(c)로부터 Stage II에 해당하는 바닥판 타설 이후에 궤도 하중이 가해지는 기간의 차이에 따른 크리프 처짐의 차이는 크지 않았다. 이는 바닥판 합성 후의 증가된 단면강성이 고려되기 때문이다.
- 4) Stage 0과 Stage I 기간이 솟음의 크기에 영향을 많이 미치므로, 이 두 기간이 조합하게 될 때, Stage 0이 짧으면 Stage I이 긴 경우에 가장 큰 솟음이 발생하며, Table 2와 같이 두 기간의 조합에 따른 t_2' 시점의 최대 솟음인 23.79 mm인 경우는 최소 솟음인 17.92 mm인 경우에 비하여 32.8% 더 큰 값을 보인다.
- 5) 설계활하중의 여유도를 고려하여 30% 감소된 활하중에 맞추어 재설계한 긴장력에 대하여 솟음을 구한 경우에, 감소된 긴장력으로 인하여 즉시 솟음뿐만 아니라 재하 기간에 따른 크리프 효과도 감소하여, 슬래브 타설 시점에는 75.9%, 2년 경과 시점에는 51.1%의 크기로 솟음이 감소된다.

교량의 시공단계에서 하중 재하시점과 재하기간에 따라 변형에 차이가 발생한다. 교량에 발생하는 변형을 분석하는 시점에서 철도 콘크리트교와 같이 솟음이 많이 발생하여 문제가 생기는 경우에는 다음과 같은 조건에서 솟음을 감소시킬

수 있다. 콘크리트 양생 후 긴장력을 도입하기까지의 기간이 길수록, 또한 긴장력 도입 이후 바닥판을 타설하는 시점이 짧을수록 장기 솟음을 감소시킬 수 있다.

또한 이 연구의 수치 예제에서는 Fig. 8과 같이 긴장력과 자중들의 합이 거의 비슷한 수준이어서 시간이 경과함에 따라 솟음이나 처짐이 한 방향으로 두드러지게 진행되지는 않고 일정한 크기의 솟음을 유지하는 것으로 나타났다. 만일 활하중 작용 시에 허용 응력을 만족시키도록 설계하는 경우 등에서 긴장력의 크기가 자중의 크기에 비하여 차이가 많이 나는 경우에는 다른 경향을 나타낼 수 있으므로, 다양한 설계 예를 검토할 필요가 있다. 이 연구에서는 수치적인 분석을 수행하였으나 향후 실제 교량을 대상으로 장기간의 실측을 통한 솟음 계산 값의 검증이 필요하며, 현실적으로 장기간의 실측이나 실험 크기의 실험이 어려운 경우에는, 궤도하중이 재하되기 전까지인 시공 초기단계에서 변형을 실측하거나, 실험 모형을 제작하여 하중재하 시점에 따른 솟음량 변화를 검증할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 기본사업(PK2303A1)의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 연구지원에 감사드립니다.

References

1. Lee, J. (2021), Prestressed Concrete : Strength Design and Limit State Design, Dong Myeong Publishers, Republic of Korea, 399-411, 739-741 (in Korean).
2. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2024), Concrete Bridge Design Code - Limit State Design Method : 24 14 21, Korea Construction Standards Center, Korea.
3. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2024), Concrete Structural Design Code : 14 20 01, Korea Construction Standards Center, Korea.
4. Kim, S., Kim, H., and Lee, M. (2010), A Deterministic Investigation for Establishing Design Load of Railway Bridges, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(3), 290-297 (in Korean).
5. Park, S., Yeo, I., and Paik, I. (2015), Analysis of Design Live Load of Railway Bridge Through Statistical Analysis of WIM Data for High-speed Rail, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 28(6), 589-597 (in Korean).
6. Nawy, E. G. (2000), Prestressed Concrete: A Fundamental Approach, Prentice-Hall, USA, 400-451.
7. Kang, Y. J. (1977), Nonlinear Geometric, Material and Time-dependent Analysis of Reinforced and Prestressed Concrete Frames, University of California, Berkeley, UC-SESM 77-1, 45-59.

8. Comité Euro-International du Béton. (1993), CEB-FIP 1990 Model Code for Concrete Structures.
9. Gere, J. M., and Goodno B. J. (2013), Mechanics of Materials, Cengage Learning, USA, 760-773.
10. Korea Railroad Research Institute. (2016), Development of Reliability -based Design Standards for Concrete Slab Track and Railway Bridge, and Improvement of Design Standards for

Roadbed and Track Alignment, Final report to R&D of Ministry of Land, Infrastructure and Transport (in Korean).

Received : 08/30/2024

Revised : 10/22/2024

Accepted : 10/22/2024

요 지 : 프리스트레스트 콘크리트 철도 교량에서 발생하는 과도한 수축 문제를 분석하는 연구의 일환으로, 이 논문에서는 콘크리트 구조물의 시간에 따른 수축 산정 프로그램을 작성하여, 긴장력과 자중이 가해지는 시점과 작용 기간 및 활하중 크기의 변화에 대한 수축의 크기 변화를 분석한다. 초기 콘크리트 강도 확보 기간, 양생 후 긴장력 및 하중이 작용하는 시점, 긴장력의 시간에 따른 감소 등 시간에 대한 변수를 해석에서 고려하기 위하여 중분 시간단계해석 방법을 적용하고, 크리프 계수 및 긴장력 손실 산정식은 국내 교량설계기준의 수식을 적용한다. 철도 교량 PSC 합성보 예제에 적용하여 다양한 재하시점에 따른 즉시 처짐과 재하기간에 따른 크리프 처짐을 구하고, 철도 활하중의 여유도를 고려하여 긴장력을 감소시키는 경우의 수축 감소 효과를 검토한다. 수치 예제를 통하여 초기 긴장력을 도입하는 시점이 빠르고 슬래브 타설 시점 사이의 기간이 길어지거나 이들이 조합되면 시공 단계별 수축의 크기가 커지고, 실제 열차 중량을 고려하여 활하중을 감소시키는 경우에 수축이 감소됨을 보인다.

핵심용어 : 크리프 처짐, PSC 합성보, 철도 교량, 중분 시간단계 해석, 재하 기간, 설계 활하중
