

---

# PSC-Beam 교량의 연속화에 따른 거동해석 (1)

Behaviors of PSC-Beam Bridges According to Continuity of Spans (1)



곽 효 경\*

Kwak Hyo-Gyoung



서 영 재\*\*

Seo Young-Jae



정 찬 목\*\*\*

Jung Chan-Mook



박 영 하\*\*\*\*

Park Young-Ha

---

## ABSTRACT

This paper deals with behaviors of PSC-Beam bridges according to continuity of spans. To analyze the long-term behavior of bridges, an analytical model which can simulate the effects of creep, the shrinkage of concrete, and the cracking of concrete slabs in the negative moment regions is introduced. To consider the different material properties across the sectional depth, the layer approach in which a section is divided into imaginary concrete and steel layers is adopted. The element stiffness matrix is constructed according to the assumed displacement field formulation, and the creep and shrinkage effects of concrete are considered in accordance with the first-order algorithm based on the expansion of the creep compliance. Correlation studies between analytical and experimental results are conducted with the objective to establish the validity of the proposed model. Besides, many uncertainties related to the continuity of spans are analyzed to minimize deck cracking at interior supports.

Keywords : PSC-beam bridge, continuity of spans, creep, shrinkage, long-term behavior

---

\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 조교수

\*\* 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

\*\*\* 우송대학교 토목공학과 조교수

\*\*\*\* 한국도로공사 도로연구소 선임연구원

• 본 논문에 대한 토의를 2000년 2월 29일까지 학회로  
보내주시면 2000년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

국내 중, 소 교량의 경우 시공이 간편하고 경제적인 PSC-Beam 교량의 설계와 시공이 활발히 이루어지고 있다. 이러한 PSC-Beam의 단면은 미국 AASHTO 규정과 마찬가지로 국내에서도 25m와 30m의 표준단면을 정하여 설계와 시공에 사용되고 있다. PSC-Beam교량은 강박스 교량 등 주형이 강재로 제작된 교량보다 무겁다는 단점이 있지만 콘크리트를 사용함으로써 보다 경제적이며 강재와 같이 부식에 대한 염려가 없으므로 더욱 내구적이라는 장점을 갖고 있다<sup>(1)</sup>.

그러나 PSC-Beam 교량의 경우 바닥판은 현장 타설 콘크리트로 시공되므로 주형 콘크리트와 시간의존적 거동의 차이가 발생하며 또한 연결재의 경우도 현장타설 콘크리트로 시공되므로 이에 대한 효과가 추가된다. 따라서 이러한 시간의존적 거동을 효과적으로 고려하지 못하는 경우 교량의 과도한 처짐과 바닥판의 균열발생 등 교량의 사용성과 관련한 많은 문제가 유발된다. 또한 교량을 설계할 때 여러 가정으로부터 계산된 초기 솟음(Camber)이 부적합한 경우 일정시간이 경과하면 과도한 추가 솟음이 발생하게 되고 따라서 요철부가 유발되므로 교량의 주행성이 떨어지게 되며 결국 구조물의 취약부가 되어 수명을 감소시키게 된다.

이 논문에서는 PSC-Beam교량의 연속화에 따른 거동을 예측하기 위해 표준단면을 갖는 2경간 PSC-Beam교량을 여러 인자를 고려하여 해석하였다. PSC-Beam교량의 연속화에 따른 거동에 영향을 미치는 인자는 매우 많으므로 우선 이 논문에서는 사용된 해석방법과 바닥판 철근량, 바닥판 콘크리트의 상, 하부 철근량, 지점조건에 따른 영향등이 고려되었다.

## 2. 재료모델

일반적인 PSC-Beam교량에 사용되는 재료에는 철근과 긴장재에 각각 사용된 강재와 콘크리트로 나눌 수 있으며 각 재료의 응력-변형률 관계는 다음과 같이 정의되었다.

콘크리트의 일축 응력-변형률 관계는 널리 사용되고 있는 Hognestad<sup>(2)</sup>가 제안한 식을 기본으로 하였으며 콘크리트의 인장강화효과를 고려하기 위하여 식 (1)에 따른 최대 인장변형률을 토대로 선형의 변형연화 영역이 정의되었다<sup>(3)</sup>.

$$\epsilon_{t0} = \frac{2 \cdot G_f \cdot \ln(3/b)}{f_t \cdot (3-b)} \quad (1)$$

여기서  $\epsilon_{t0}$ 는 콘크리트의 최대 인장변형률,  $b$ 는 한요소의 길이,  $f_t$ 는 콘크리트 인장강도를 각각 나타내고,  $G_f$ 는 파괴에너지로서 이 연구에서는 0.0894 kg/cm를 사용하였다.

또한 강재의 일축 응력-변형률 관계는 압축부와 인장부의 거동이 동일한 대칭의 형상을 갖는 선형탄성-완전소성(linear elastic-perfect plastic)관계를 사용하였다. 끝으로 긴장재의 경우 인장강도가 매우 크므로 완전 소성영역을 정하는 것은 매우 어렵다. 또한 항복은 점진적으로 발생하며 비탄성 영역에서 응력은 인장강도까지 변형률의 증가에 따라 완만하게 증가한다. 이러한 긴장재의 특성을 고려하기 위하여 이 논문에서는 다중선형 응력-변형률 관계를 도입하였다.

다음은 콘크리트의 시간의존적 거동을 수치적으로 모사하기 위해 제안된 많은 수치모델 가운데 비교적 간단하면서도 응력변화 이력을 효과적으로 나타낼 수 있는 크리프 Compliance 전개에 기본을 둔 1차 순환적 단계 알고리즘(the first-order algorithm based on expansion of creep compliance)을 도입하였다<sup>(4)</sup>. 콘크리트의 건조수축에 의한 변형률의 경우 이 연구에서는 단면의 깊이에 따라 일정하다고 가정하였고, 건조수축은 응력변화이력에 영향을 받지 않으므로 각 모델식에서 제안된 식을 직접 적용하였다<sup>(5)</sup>. 또한 이 연구에서는 단면해석을 위하여 단면을 가상의 층으로 나누어 해석하는 적층단면을 사용하여 각 단면의 평형관계를 만족시켰으며 이로부터 각 단면의 변형률과 응력이 계산되었다.

긴장력의 효과는 하나의 보 요소내에 일정한 수의 긴장재가 존재한다고 가정하고 요소내의 각 긴장재는 직선이며 길이에 따라 일정한 단면과 긴장력을

찾는다고 가정하였다. 긴장력 도입후 각 긴장재의 변형률 증분은 긴장력 도입전 길이에 대한 현재와 전 해석시간에서의 긴장재 길이의 변화비로 계산하고 임의의 해석시간에서 전체 긴장재 변형률을 계산하여 긴장재 응력-변형률 관계로부터 응력을 계산하고 이 응력에 전단계 해석까지의 응력이완을 제함으로써 최종적인 긴장재의 응력을 계산하였다. 응력이완의 계산은 Magura<sup>(6)</sup>등이 제안한 식을 기본으로 하여 Hernandez와 Gamble이 제안한 방법을 사용하였다<sup>(7)</sup>.

이와 같이 시간에 따른 변형률의 변화는 구조계의 지점조건, 철근 등에 의하여 구속되게 되며 이로인하여 응력의 재분배가 발생하게 되고 단면의 중립축도 변하게 된다. 이러한 중립축의 변화를 고려하기 위하여 각 해석단계마다 단면의 평형관계를 만족하도록 반복법을 사용하여 중립축을 직접계산하였으며 이러한 중립축의 효과를 해석에 반영하였다. 자세한 내용은 참고문헌 8에 나타내었다.

### 3. 요소강성행렬

이 연구에서는 수직축 대칭인 단면을 갖는 평면보요소를 이용하여 변위법을 바탕으로 요소강성행렬 등 기본적인 식을 유도하였다<sup>(9)</sup>. 그림 1에서 나타낸 바와 같이 각 방향으로의 변위벡터를 절점변위를 이용하여 표현하면  $\mathbf{u} = \{u_1, u_2\}^T$ ,  $\mathbf{v} = \{v_1, v_2\}^T$ ,  $\boldsymbol{\theta} = \{\theta_1, \theta_2\}^T$ 로 나타낼 수 있으며 이를 토대로 보 요소의 전체 변위벡터를  $\mathbf{r} = \{\mathbf{u}, \mathbf{v}, \boldsymbol{\theta}\}$ 로 쓸 수 있다. 또한 x방향의 축방향 변위장  $\mathbf{U}(x)$ 를 선형의 형상함수(shape function)로, y방향의 변위장  $\mathbf{V}(x)$ 를 3차의 형상함수로 각각 가정하여 일반적인 유한요소법의 전개과정을 거쳐 식 (2)의 요소 강성행렬을 구하였다.

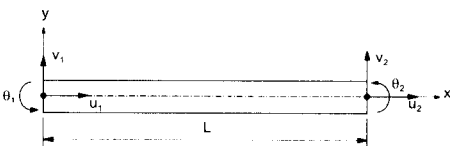


Fig. 1 Components of a beam element

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} a_1 & a_8 & a_9 & -a_1 & -a_8 & a_{10} \\ & a_2 & a_3 & a_8 & -a_2 & a_7 \\ & & a_4 & a_9 & -a_3 & a_6 \\ & & & a_1 & a_8 & -a_{10} \\ & & & & a_2 & -a_7 \\ & & & & & a_5 \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)에서 사용된 기호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{2L} \sum_{k=1}^3 E_k A_k w_k \\ a_2 &= \frac{18}{L^3} \sum_{k=1}^3 E_k I_k (2\xi_k - 1)^2 w_k \\ a_3 &= \frac{6}{L^2} \sum_{k=1}^3 E_k I_k (2\xi_k - 1)^2 (3\xi_k - 2) w_k \\ a_4 &= \frac{2}{L} \sum_{k=1}^3 E_k I_k (3\xi_k - 2)^2 w_k \\ a_5 &= \frac{2}{L} \sum_{k=1}^3 E_k I_k (3\xi_k - 1)^2 w_k \\ a_6 &= \frac{2}{L} \sum_{k=1}^3 E_k I_k (3\xi_k - 1)(3\xi_k - 2) w_k \\ a_7 &= \frac{6}{L^2} \sum_{k=1}^3 E_k I_k (3\xi_k - 1)^2 (2\xi_k - 1) w_k \\ a_8 &= \frac{3}{L^2} \sum_{k=1}^3 E_k Q_k (1 - 2\xi_k) w_k \\ a_9 &= \frac{1}{L} \sum_{k=1}^3 E_k Q_k (2 - 3\xi_k) w_k \\ a_{10} &= \frac{1}{L} \sum_{k=1}^3 E_k Q_k (1 - 3\xi_k) w_k \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $k$ 는 가우스점의 번호를 표시하며  $\xi_k$ 와  $w_k$ 는  $k$ -번째 가우스 점의 위치와 가중치를 각각 나타내고  $\xi_1 = 0.11$ ,  $\xi_2 = 0.50$ ,  $\xi_3 = 0.89$ 와  $w_1 = w_3 = 5/9$ ,  $w_2 = 8/9$ 의 값을 갖는다. 식 (3)에서 사용된 단면계수는 적층단면의 특성을 이용하여 계산하였으며 자세한 사항은 참고문헌 10에 나타내었다.

구성된 강성행렬과 절점하중을 이용하여 구조물을 해석함에 있어서 이 연구에서는 하중 증분법과 반복법을 함께 사용하는 복합법(combined method)이 사용되었다. 또한 각 하중단계에서의 수렴여부를 판단하기 위해 사용한 수렴기준은 모든 절점 중에서 불균형 하중의 최대 수직력과 최대 모멘트를 구하여 각각의 수렴기준과 비교하는 방법을 사용하였다<sup>(9)</sup>.

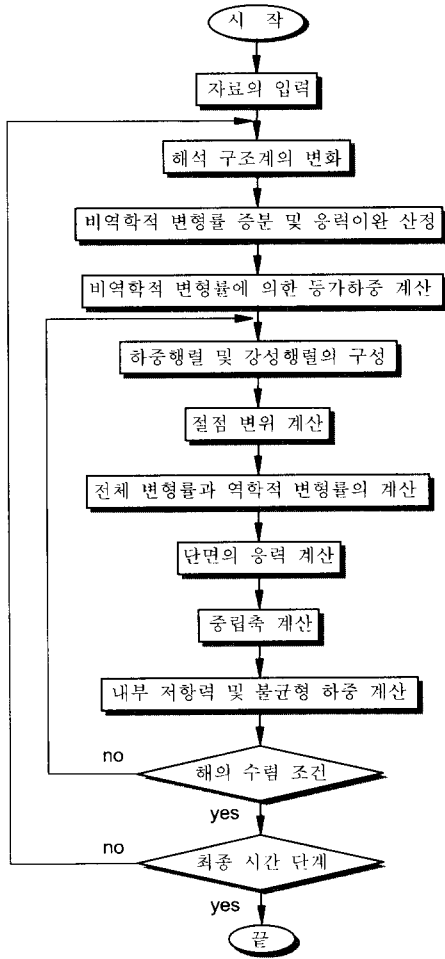


Fig. 2 Flow chart

#### 4. 검증예제

이 연구에서 제안된 해석모델을 검증하기 위하여 철근 콘크리트 캔틸레버 보의 연속화 예제가 해석되었다. 해석단면은  $20\text{cm} \times 60\text{cm}$ 를 갖는 복철근 직사각형 단면으로 상부와 하부 철근면적은  $6\text{cm}^2$ 이

사용되었고, 해석에 사용된 재료상수는 표 1과 같다. 해석은 캔틸레버 보의 콘크리트 재령 7일에 연속화되며 최종시간은 365일로 가정하였고, 하중은 사하중으로 철근 콘크리트 단위중량  $2.5\text{t}/\text{m}^3$ 을 사용하였다. 해석에 사용한 철근콘크리트 캔틸레버 보는 그림 3과 같고 콘크리트 모델은 ACI모델<sup>(5)</sup>을 사용하였다.

Table 1 Material Properties

$\sigma_y$	$f'_c$	$E_c$	$E_s$	$\varphi_c^{\infty}$
2000 kg/cm <sup>2</sup>	280 kg/cm <sup>2</sup>	$2.5 \times 10^9$ kg/cm <sup>2</sup>	$2.1 \times 10^6$ kg/cm <sup>2</sup>	2.5

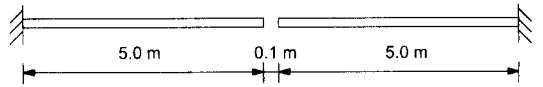


Fig. 3 RC cantilever

이론적으로 콘크리트의 재령 초기에서 연속되어 재령이 무한대일 때 모멘트 값은 양단 고정인 보의 모멘트값으로 수렴해야 하므로 표 2에는 양단 고정 보의 지점모멘트 및 PTI<sup>(11)</sup>에서 제안된 식을 사용한 결과와 이 연구의 해석결과를 비교하였다. PTI 식에는 건조수축은 포함되지 않으므로 비교를 위하여 이 해석에서도 건조수축효과는 고려되지 않았다.

해석결과에서 알 수 있듯이 이 연구의 결과가 PTI의 식을 사용한 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

### 5. 2경간 PSC-Beam 교량의 거동

#### 5.1 해석교량의 모델링

이 연구에서 해석한 PSC-Beam 교량은 2경간이며 교축방향으로 단면이 변하는 경우로 전체 교량형상은 그림 4에, 단면의 치수와 해당구간은 그림 5, 6과 표 3에 각각 나타내었다.

Table 2 Comparison of moments

Method	Fixed end beam	PTI	This study
Formula	$M = -\frac{q\ell^2}{12}$	$M = -\frac{q\ell_1^2}{2} + \left(\frac{q\ell^2}{2} - \frac{q\ell_1^2}{12}\right)(1 - e^{-\varphi})$	-
Moment	-2.55 t-m	-2.72 t-m	-2.71 t-m

Note : the total span length  $\ell = 10.1\text{m}$ , the cantilever span length  $\ell_1 = 10.1\text{m}$ ,  $\varphi$  at 365 days = 1.93

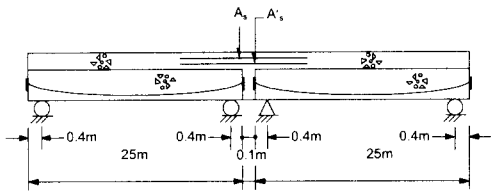


Fig. 4 2 span continuous PSC-Beam Bridge

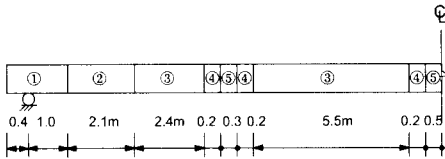


Fig. 5 Modelling of PSC-Beam Bridge

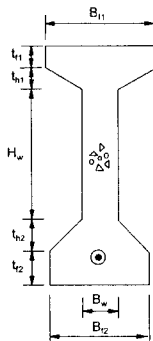


Fig. 6 Typical cross section

Table 3 Dimensions of sections (cm)

Sec.	Web		Flange					
			Upper			Lower		
	H <sub>w</sub>	B <sub>w</sub>	B <sub>f1</sub>	t <sub>f1</sub>	t <sub>h1</sub>	B <sub>f2</sub>	t <sub>f2</sub>	t <sub>h2</sub>
1	158	60	64	16	0.8	0.0	0	0
2	157	60	64	16	2.5	0.0	0	0
3	110	20	64	16	9.1	60	20	20
4	120	40	64	16	9.0	60	20	10
5	120	40	64	16	9.0	60	20	10

일반적으로 PSC-Beam은 횡방향으로 2.5m의 간격을 두고 배치되므로 해석을 위해 사용된 바닥판 슬래브의 크기는 폭 2.5m, 두께 25cm로 각각 가정하였다. 또한 교량의 긴장재 위치는 PSC-Beam 표준도를 참고하여 중심선을 기준으로 주형의 시작과 중간, 끝에서 단면의 긴장재 중심의 좌표를 잇는 포물선 분포를 사용하였는데 각 좌표는 주형 양끝은

3.5cm, 중앙 -89.5cm이며 긴장력은 432.7ton이 사용되었다. 해석에 사용된 재료성질은 현재 적용되고 있는 PSC-Beam 교량을 기준으로 바닥판 콘크리트의 압축강도는  $280\text{kg/cm}^2$ , 주형 콘크리트의 압축강도는  $400\text{kg/cm}^2$ 를 각각 사용하였으며, 강재의 경우 철근은  $4000\text{kg/cm}^2$ , 긴장재용 강재는  $18400\text{kg/cm}^2$ 를 사용하였다. 또한 콘크리트의 극한 크리프 계수와 극한 건조수축 변형률은 각 영향을 고려하지 않는 경우 4.0과  $400 \times 10^{-6}$ 을 각각 사용하였고 철근량은 일반적인 설계과정으로 계산된  $57.31\text{cm}^2$ 이 사용되었다. 바닥판의 경우 실제로 2방향 거동을 하게되나 교량 구조물의 특성상 교축방향의 강성이 횡방향보다 매우 크고 활하중에 의한 하중분배와 달리 사하중에 의한 시간의존적 거동은 길이방향으로 발생하는 휨모멘트에 의한 응력에 비례하므로 주형과 같이 평면 보요소로 가정하였다.

## 5.2 바닥판 철근량의 효과

철근 콘크리트 구조물에서 철근량은 콘크리트의 시간의존적 변형을 구속하는 효과를 나타내므로 콘크리트의 건조수축과 크리프 변형을 구속하게 되는데 이에 따라 단면내에서는 응력 재분배가 발생하게 된다. 특히 철근에 의한 건조수축의 구속은 콘크리트에 인장의 역학적 변형률을 유발시키게 되고 이에 대응하는 인장응력이 인장강도를 초과하게 되면 균열이 발생하게 되므로 내측 지점부의 바닥판 철근량이 교량거동에 어떤 영향을 나타내는지 알아보았다.

해석을 위하여 주형 콘크리트의 극한 건조수축 변형률은  $400 \times 10^{-6}$ 을 사용하였으며 주형의 긴장력은 주형 콘크리트 재령( $t_0$ )이 7일에서 도입하는 것으로 가정하였다. 바닥판 철근량의 영향을 알아보기 위하여 철근 단면적은 우선 상, 하 철근량이 같은 경우가 해석되었다. 해석에 사용된 철근 단면적,  $A_s$ 는 무근 경우인  $0.0\text{cm}^2$ , 최소철근비  $14/\sigma_y$ 를 갖는 경우로  $37.1\text{cm}^2$ , 일반적으로 실무에서 사용되고있는 단면해석에 의한 경우인  $57.31\text{cm}^2$ , 끝으로 과다 철근량인 경우로 3번째 철근량의 2배인  $114.62\text{cm}^2$  일 때를 기준으로 각각 해석되었다.

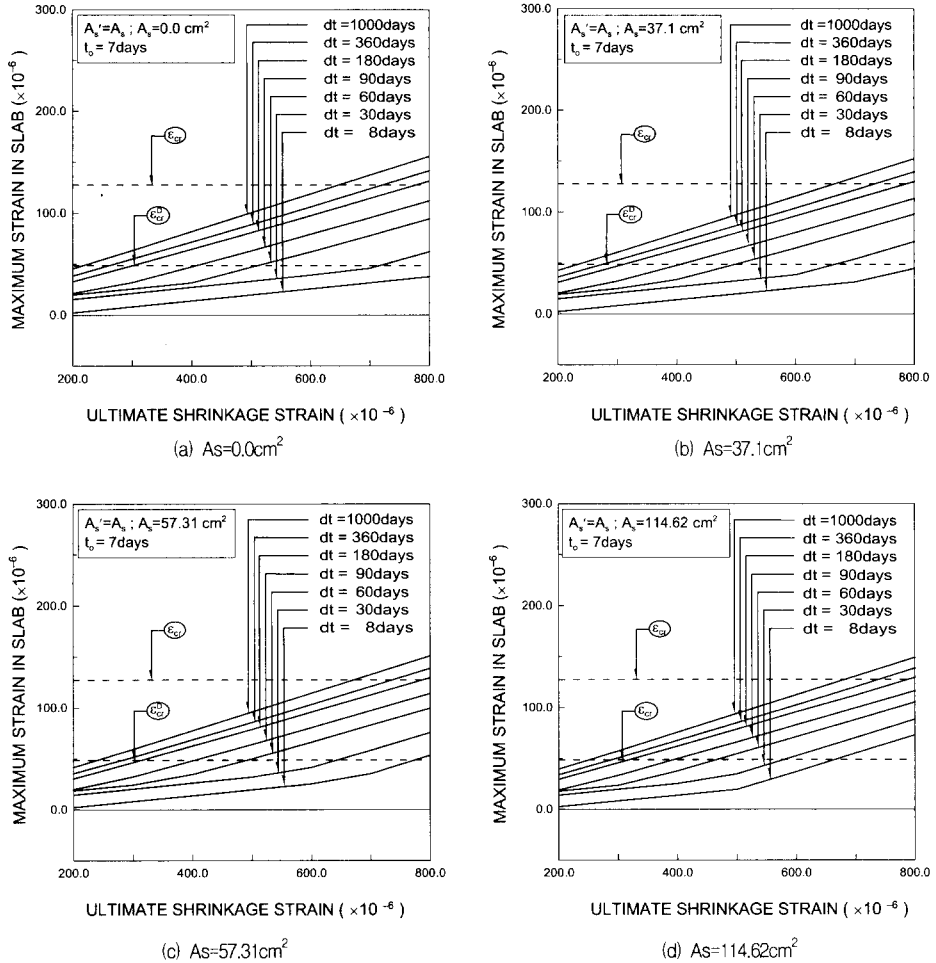
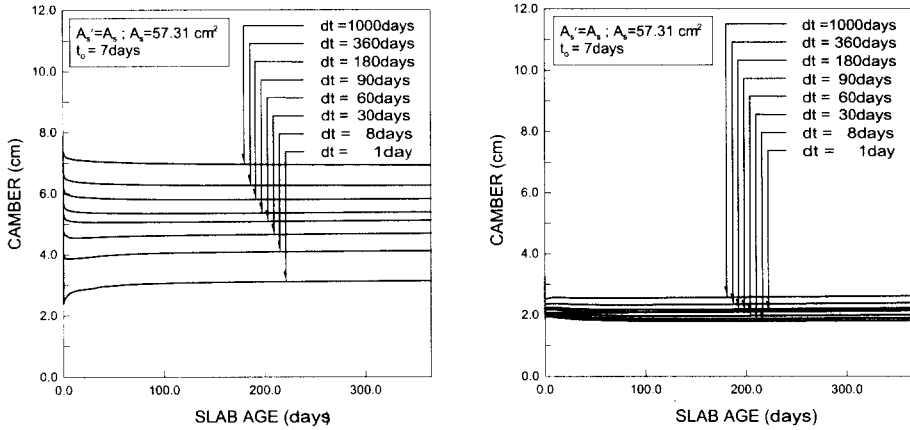


Fig. 7 The variation of maximum strains in slab with steel area

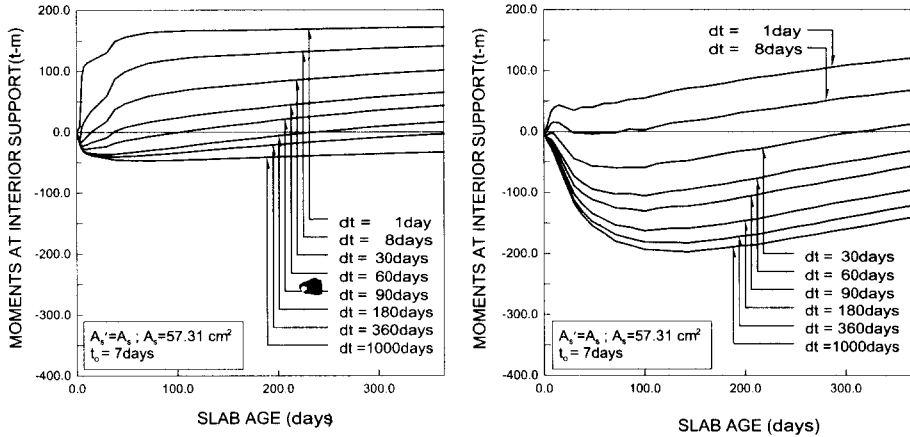
그림 7의 해석결과는 바닥판 콘크리트의 극한 건조수축 변형률에 따른 내측 지점에서의 바닥판 콘크리트의 최대 역학적 변형률의 값을 바닥판과 주형 콘크리트의 재령차이( $dt$ )에 따라 나타내었다. 점선으로 표시한 직선은 일반적인 콘크리트에 균열이 발생할 때의 변형률로써 콘크리트의 인장강도를  $\sigma_t = 2 \times \sigma_{28}^{1/2}$ , 콘크리트의 탄성계수,  $E_c = 2.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 으로 각각 가정하여 계산한 값  $\epsilon_{cr} = 127.5 \times 10^{-6}$ 을 나타낸다. 또한 지점부에서 발생하는 활하중 모멘트는  $134.9t\text{-m}$ 로 이에 대응하는 역학적 변형률은  $69.0 \times 10^{-6}$ 의 값을 갖으며 바닥판 타설완료후 8cm의 Asphalt포장에 의하여  $26.9t\text{-m}$ 의 모멘트 증가가 유발되므로 약  $10 \times 10^{-6}$ 의 추가적인 변형률

증가가 유발된다. 따라서 이와 같은 모든 효과를 고려하면 사하중만이 작용하는 시공단계에서는  $48.5 \times 10^{-6}$ 의 변형률값이 균열제어를 위한 한계 변형률값으로 설정되며 이를  $\epsilon_{cr}^D$ 로 표시하였다.

해석결과를 살펴보면 전체적으로 철근량에 따라 최대 역학적 변형률의 값이 증가하나 철근량에 따른 차이는 크지 않았다. 특히 바닥판의 재령과 주형의 재령차( $dt$ )가 상대적으로 클 경우는 그 차이가 거의 없는 반면 바닥판과 주형의 재령차이가 작고 바닥판의 건조수축률이 주형의 건조수축률보다 크게 되는  $400 \times 10^{-6}$ 이상에서 철근비가 증가함에 따라 그 증가폭이 다소 커지는 것을 알 수 있다. 또한 무근 콘크리트 바닥판의 경우 바닥판과 주형의 재령차  $dt =$



(1) Camber



(2) Moment

(a) Creep only

(b) Shrinkage only

Fig. 8 Camber & moment variations with concrete time effects

180일 이하에서는 모두 균열 변형률,  $\epsilon_{cr}$ 을 초과하지 않으며  $dt=1000$ 일인 경우에서도 극한 건조수축 변형률이 약  $640 \times 10^{-6}$  이상이 되어 균열 변형률을 초과하고 있다. 이와 같이 바닥판과 주형의 재령차가 작고 바닥판의 건조수축률이 증가함에 따라 철근비의 증가와 함께 역학적 변형률이 증가되는 것은 철근이 바닥판의 건조수축을 구속하는 효과가 커지기 때문이다. 이와는 달리 바닥판과 주형의 재령차가 큰 경우 철근비에 따른 슬래브의 변형률 차이가 비교적 작게 나타나는 것은 주형은 이미 크리프와 건조수축에 의한 변형이 거의 완료되어 바닥판의 건조수축이 발생할 경우 주형의 바닥판 건조수축에 대

한 구속이 상대적으로 크기 때문에 철근의 영향은 상대적으로 작게 된다.

다음은 크리프와 건조수축을 따로 적용함으로써 각각의 효과를 알아 보았다. 해석을 위한 교량은 철근의 단면적  $A_s = 57.31 \text{ cm}^2$ 이고 바닥판과 주형의 극한 크리프계수와 극한 건조수축률은 4와  $400 \times 10^{-6}$ 을 적용하였다. 그림 8의 해석결과를 살펴보면 내측지점에서 유발되는 모멘트는 주형 콘크리트의 초기재령에서 바닥판이 타설되면 주형 콘크리트의 재령이 작기 때문에 연속화이후 크리프 변형은 크게 발생되고 이를 구속하기 위한 정모멘트가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 주형의 재령이 클 때 바닥판

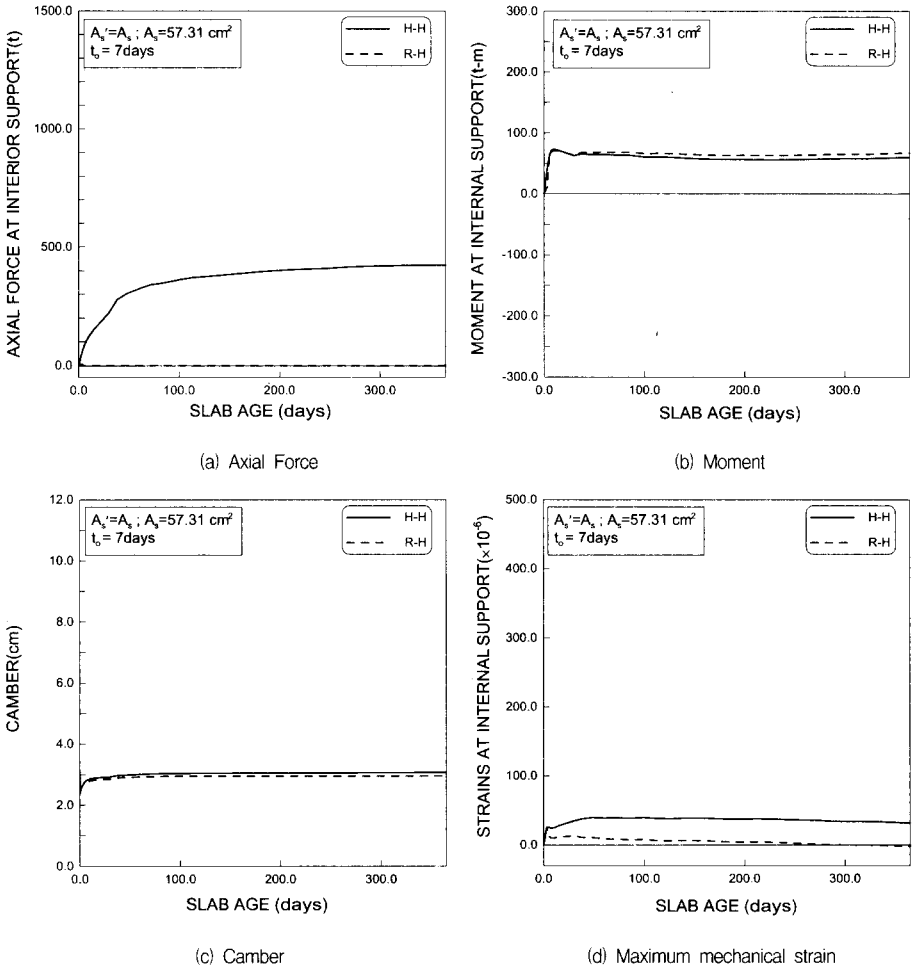


Fig. 10 The effects of support conditions

이 타설되는 경우 주형의 크리프 변형은 연속화 이전에 거의 완료되므로 연속화에 의한 효과는 작게 된다. 따라서 철근 콘크리트 보의 거동과 마찬가지로 지점부에서 부모멘트가 발생하게 된다. 한편 건조수축에 의한 모멘트는 두 콘크리트의 재령차이가 작은 경우 두 콘크리트의 건조수축변형률의 차이는 작으나 바닥판 콘크리트는 철근에 의해 구속되므로 바닥판 콘크리트의 수축량이 주형 콘크리트의 수축량보다 작게 된다. 따라서 내측지점에서 부의 회전변위가 유발되며 이 변위를 연결재가 구속하므로 정 의 모멘트가 발생하게 된다. 반면에 주형 콘크리트의 재령이 큰 경우 바닥판의 건조수축량이 크게 되어 정의 회전변위가 유발될 것이며 따라서 연결재의

구속에 의하여 부의 모멘트가 내측지점에서 발생하게 된다.

한편 교량의 중앙부에서 발생하는 솟음(camber)의 변화를 살펴보면 크리프에 의한 영향이 큰 것을 알 수 있는데 특히 주형의 재령에 따른 크리프의 거동 차이에 기인한 것임을 알 수 있다.

### 5.3 바닥판 상, 하부 철근량의 차이 효과

지금까지의 해석은 현재 우리나라에서 설계를 할 때 사용하는 콘크리트 바닥판의 상, 하부 철근량이 같은 경우에 대하여 수행되었다<sup>(12)</sup>. 그러나 하중에 대한 저항은 상부 철근이 더 크므로 외국 설계의 경



우 하부 철근의 양을 상부 철근보다 감소시키고 있다. 이러한 상, 하부 철근량의 해석 교량에 대한 영향을 알아보기 위하여 상부 철근량  $A_s = 57.31\text{cm}^2$  인 경우에 대하여 하부 철근의 양이 상부 철근의 2/3일 때와 1/2일 때에 대하여 해석하였으며 그림 9에 그 해석결과를 내측지점에서 바닥판의 최대변형률로 나타내었다.

해석결과에 의하면 하부 철근량에 따라 최대 변형률은 영향을 받으나 그 변화량은 매우 작으며 직접적인 비례관계도 나타나지 않음을 알 수 있다. 따라서 하부 철근량은 변형률에 크게 영향을 나타내지 않으며 지점부의 종방향 철근을 배근할 때 현재 이론적 근거보다는 관행을 토대로 상부와 동일한 양의 철근을 하부에 배근하는 것보다는 미국의 AASHTO 규정에서 언급하고 있는 것과 같이 하부 철근량을 상부 철근량의 2/3로 줄이거나 그 이하인 1/2로 줄이는 것이 가능할 것으로 판단된다. 또한 Daniels의 실험에 의하면 합성형 교량의 경우 구조물의 재령초기에 유발되는 상부 종철근의 피로파괴를 막기 위해서는 최소한 콘크리트 단면적의 1%를 배근할 것을 추천하고 있다<sup>(13)</sup>. Daniels<sup>(14)</sup>의 실험결과와 비교를 위해 해석 교량의 철근비를 구해보면  $(57.31 \times 2) / (22 \times 250) = 2.1\%$ 이므로 하부 철근량을 50% 감소시켜도 문제가 없을 것으로 판단된다.

#### 5.4 내측지점 지지조건의 차이효과

지금까지 해석에 사용된 교량은 내측지지점이 이동-고정의 경우였으나 고정-고정단의 경우가 현재 혼용되고 있다. 또한 지지점이 고정-이동단으로 설치된 경우일지라도 시공중에는 임시로 고정시키게 되는데 완공후 이를 제거하지 않아 종종 고정-고정인 상태로 남는 경우가 있다. 이러한 지점부의 영향에 따른 거동상의 특징을 살펴보기 위해 고정-고정단의 지점조건을 갖는 2경간 PSC-Beam교량의 거동과 앞의 고정-이동단을 갖는 교량의 거동을 비교함으로써 그 차이를 살펴보았다. 해석은 긴장력 도입시 주형의 재령( $t_0$ )은 7일이고, 바닥판과 주형의 극한 건조수축 변형률은  $400 \times 10^{-6}$ 으로 동일한 값

을 갖으며 극한 크리프계수는 모두 4.0인 경우에 대하여 수행되었다. 해석 결과는 그림 10에 나타내었는데 그림에서 H-H는 고정-고정단을, R-H는 이동-고정단을 각각 의미한다.

상부 슬래브와 주형의 재령차( $dt$ )가 1일인 경우를 기준으로 해석결과를 살펴보면 축력의 경우 이동-고정단은 고정-고정단의 축방향 구속이 제거되며, 가해진 축방향 하중이 없는 관계로 전체 축력은 발생하지 않는다(그림 10(a) 참조). 그러나 모멘트의 경우 회전에는 대한 구속은 고정-이동과 마찬가지로 고정-고정에서도 발생하지 않으므로 지점조건의 영향은 거의 없게 된다(그림 10(b) 참조).

이러한 거동은 습음과 변형률의 시간에 따른 변화에도 나타나고 있는데 습음의 경우 앞에서 살펴본 바와 같이 주형의 긴장력과 크리프 현상에 지배를 받기 때문에 지점의 영향은 거의 나타나지 않으나, 이동-고정단의 변형률의 경우 축력에 의한 변형률이 발생하지 않으므로 그 만큼의 차이가 발생하게 된다(그림 10(c), (d) 참조).

## 6. 결 론

지금까지 PSC-Beam교량의 연속화에 따른 거동에 대하여 전체 바닥판 철근량과 상, 하부 바닥판 철근량의 차이에 대한 효과를 고려하여 수치적인 방법으로 예측해 보았다. 바닥판 철근량의 증가에 따라 바닥판 상부의 최대 변형률의 값은 증가하나 영향은 크지 않음을 알 수 있다. 또한 주형과 바닥판 콘크리트의 재령차이에 따라서 철근량의 효과도 달라지는데 특히 재령차이가 작을수록 주형과 바닥판의 시간의존적 거동차이가 작으므로 철근의 영향이 크게 나타나나 재령차이가 커질수록 주형의 바닥판에 대한 구속이 철근의 구속보다 증가함으로써 철근의 영향은 작게 나타나고 있다.

바닥판 상, 하부 철근량의 차이에 따른 영향도 교량거동에 큰 영향을 나타내지 않았으므로 우리나라에서 관행적으로 상, 하부 철근량을 동일하게 사용하는 것보다는 외국의 경우와 같이 하부 철근량을 상부 철근량의 1/3이나 1/2로 감소하는 것이 바람

직하겠다.

또한 지점의 구속조건은 현재 이동-고정단과 고정-고정단이 혼용되고 있으나 앞의 해석결과로부터 알 수 있듯이 콘크리트의 시간의존적 변형에 따른 2차 부재력의 효과가 작은 이동-고정단으로 규정하는 것이 필요하다.

### 감사의 글

이 연구는 한국도로공사의 지원(과제명: 합성형 교량의 설계, 시공 및 유지관리 기술개발 연구)에 의하여 수행되었음

### 참고문헌

1. Xanthakos, P.P., Theory and Design of Bridges, J. Wiley & Sons, New York, 1994
2. Hognestad, E., A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Member, Bulletin No. 399, Engineering Experiment Station, Univ. of Illinois, Urbana, Illinois 49(22), 1951
3. Kwak, H.G. and Filippou, F.C., "Nonlinear FE Analysis of R/C Structures under Monotonic Loads," Computers & Structures, Vol. 65, No.1 1997, pp.1-16

4. ASCE, State-of-Art Report on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete, New York, 1982.
5. Neville, A.M. and et al., Creep of Plain and Structural Concrete, Construction Press, London, 1983.
6. Magura, D.D. and et al., "A Study of Stress Relaxation in Prestressing Reinforcement," PCI Journal, Vol.2, No.9, April 1964.
7. Hernandez, H.D., and et al., Time-Dependent Pre-stress Losses in Pretensioned Concrete Construction, Structural Research Series No. 417, Civil Engineering Studies, Univ. of Illinois, Urbana, May, 1975
8. 광효경, 서영재, 박영하, "합성형 교량의 장기거동 해석," 대한토목학회 논문집, 제 19권 제I-1호, 1999, 1, pp.1-17
9. Kang, Y.J., Nonlinear Geometric, Material and Time Dependent Analysis of Reinforced and Prestressed Concrete Frame, Report No. UC-SEEM77-1, UC Berkeley, California, 1977
10. 광효경, 서영재, 박영하, "프리캐스트 주형을 갖는 합성형 교량의 연속화에 따른 거동 해석," 한국전산구조공학회 논문집, 제 11권, 2호, 1998, 6 pp.327-339
11. PTI, Post-Tensioned Box Girder Bridge Manual, Post-Tensioning Institute, 1978
12. 건설부, 도로교 표준 시방서, 1996
13. AASHTO, Standard Specifications for High-way Bridges, 1996
14. Tonia, D.E., Bridge Engineering, McGraw-Hill, New York, 1995

### 요 약

이 논문은 PSC-Beam 교량의 주형을 연속화함에 따라 발생하는 거동에 관한 것이다. 이 교량의 장기거동을 해석하기 위해서 콘크리트 크리프와 건조수축 효과, 부모멘트에 의한 균열효과 등을 고려하였다. 또한 단면의 다른 재료상태를 고려하기 위하여 단면을 가상의 층으로 나누어 해석하는 적층단면을 사용하였다. 요소 강성행렬은 변위법을 기초로하여 구성하였으며, 크리프와 건조수축 효과는 크리프 Compliance의 전개를 기본으로 한 1차 순환적 단계알고리즘을 사용하였다. 해석모델을 검증하기 위하여 실험결과 및 다른 해석적 접근방법과의 비교가 이루어졌으며 경간의 연속화에 따른 균열의 영향을 최소화하기 위한 예제해석을 수행하였다.

(접수일자 : 1999. 3. 9)