

# 이중합성 박스 거더의 재령종속적 거동실험 및 해석

## Experimental Observation of Double Composite Box Girders subjected to Concrete Creep and Shrinkage

강병수 \*\* · 김정현 \* · 광동석 \* · 홍인택 \* · 이용학 \*\*\*

Kang, Byung-Soo · Kim, Jeong-Hyeon · Kwak, Dong-Seok · Hong, In-Taek · Lee, Yong-Hak

### ABSTRACT

Time dependent deflections of double composite box girders are investigated based on the on going laboratory experiments scheduled for 3months long. Two of 2-span double composite box girders with 2.5m each span length are cast and time dependent behaviors are measured using 30 strain gages and 2 LVDTs after 5 days' curing. The measured experimental results are compared with the numerical predictions performed based on the one dimensional finite element method adopting beam element. The FEM formulation adopts the time dependent concrete constitutive model which is derived in an incremental format by expanding the total form of stress-strain relation by the first order Taylor series with respect to the reference time. A good agreement between the measured and predicted results are observed and the effects of the bottom concrete placed at the negative moment region of the bridge girder are discussed.

### 1. 서론

이중합성 박스거더의 시간종속적 거동특성을 파악하기 위해 1경간의 길이가 2.5m인 2경간 박스거더를 2개 제작하여 3개월 예정으로 실험실에서 거동계측을 수행하였다. 실험이 진행되는 동안에 동일한 조건 하에 제조한 150mm×300mm의 실린더형 공시체에 대하여 크리프와 건조수축 변형량을 각각 계측하였다. 거동계측을 위해 하부 강 박스에 16개의 변형률 게이지, 상부 플랜지 콘크리트에 12개의 변형률 게이지와 각 경간의 최대처짐 부에 1개의 LVDT를 설치함으로써 1개의 실험체 당 총 32개의 계측장비를 부착하였다.

보 요소를 사용한 시간 종속적 유한요소해석을 수행하였으며 예측된 결과를 실험에서 계측한 결과와 비교하였다. 해석에 사용한 콘크리트의 시간종속적 구성모델은 총 변형률을 기준시간에 관하여 Taylor 급수확장을 이용하여 확장함으로써 증분적 표현으로 유도하였다. 두 결과의 비교는 비교적 잘 일치하였으며, 부모멘트 구간 하단에 타설된 콘크리트가 거더의 전반적 거동에 미치는 영향을 파악하기 위해 부모멘트 구간 하부의 콘크리트 타설두께를 달리하여 해석을 수행하였다.

### 2. 응력-변형률의 증분관계

그림 1은 콘크리트에 작용된 비역학적 변형으로 인해 강 합성 박스거더의 단면에 발생된 변형률을 보여준다. 콘크리트의 건조수축 및 크리프 현상으로 인한 비역학적 변형은 콘크리트와 강재의 상호구속

\* 정회원, 건국대학교 토목공학과 석사과정

\*\* 정회원, 건국대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\* 정회원, 건국대학교 토목공학과 부교수

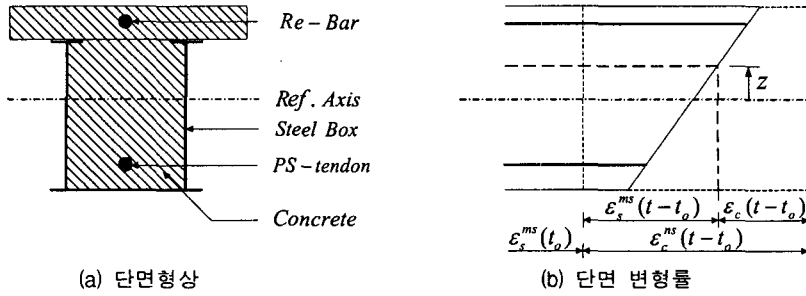


그림 1 강 합성 박스 거더의 단면 변형률

에 관하여 Taylor의 급수확장을 이용하여 선형적으로 확장하면 강 박스, 콘크리트, 철근 및 PS 강선의 작용으로 인해 각각의 단면에 역학적 변형을 초래한다. 그림 1(b)에 보여진 바와 같이, 현재시간  $t$ 에서 강재 단면에 발생한 총 변형률  $\epsilon_s^{ms}(t)$ 을 단면깊이에 따른 일정변형률  $\epsilon_0(t)$ 과 곡률  $\phi(t)$ 로 분리하여 강 박스, 콘크리트, 철근 및 PS 강선에 발생하는 변형률과 각 단면의 응력을 유도한다. 현재시간  $t=t_n$  응력 증가율은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\sigma}_b = E_b \dot{\epsilon}_b^{ms}, \quad \dot{\sigma}_c = \frac{\partial \sigma_c}{\partial \epsilon_c} \Big|_{t=t_n} E_c + \frac{\partial \sigma_c}{\partial \epsilon_c} \Big|_{t=t_n} \dot{\epsilon}_c, \quad \dot{\sigma}_s = E_s \dot{\epsilon}_s^{ms}, \quad \dot{\sigma}_p = E_p \dot{\epsilon}_p^{ms} \quad (1)$$

### 3. 유한요소 정식화

#### 3.1 변형률과 변위 관계

그림 2는  $x$  및  $z$  축을 따르는 절점 증분변위  $\dot{u}$ ,  $\dot{w}$ 와 증분회전각  $\dot{\theta}$ 의 자유도를 갖는 보요소를 보여준다. 부재의 임의 단면에서 평면보존의 법칙이 성립하는 것으로 가정할 때, 축 방향 증분변위  $\dot{u}(x, z)$ 를 축성분  $\dot{u}_o(x, z)$ 와 휨성분  $\dot{u}_b(x, z)$ 으로 분리하여 단면상의 변형률 증분  $\dot{\epsilon}(x, z)$ 를 유도하며, 두 독립변수  $\dot{u}_o$ 와  $\dot{w}$ 를 갖는 증분변위와 변형률은 Bar 요소 형상함수  $N_o$ 와 보 요소 형상함수  $N_b$ 을 분리하여 절점변위에 관하여 근사화하여 강 박스, 콘크리트, 철근 및 PS 강선에 발생하는 변형률증분을 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon}_b(t) = (B_o z_b B_b) \dot{d}, \quad \dot{\epsilon}_c(t) = B \dot{d} - \dot{\epsilon}_{ns}(t)$$

$$\dot{\epsilon}_s(t) = (B_o z_{si} B_b) \dot{d}, \quad \dot{\epsilon}_p(t) = (B_o z_{pj} B_b) \dot{d} \quad (2)$$

크리프 변형률과 건조수축 변형률은 각각 초기상태 변형률과 최종상태 변형률에 시간 종속적 계수를 곱한 형태의 일반적인 시방서 규정함수를 사용하며 식 (3)로 표시된다. 각각의 증분변형률 관계는 식 (4)로 표시된다.

$$\epsilon_{cr}(t) = C_c(t)(\epsilon_{ok} + \phi_k z), \quad \epsilon_{sh}(t) = S_s(t)\epsilon_{shu} \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}_{cr}(t) = \dot{C}_c(t)(\epsilon_{ok} + \phi_k z), \quad \dot{\epsilon}_{sh}(t) = \dot{S}_s(t)\epsilon_{shu} \quad (4)$$

#### 3.2 요소 강성 매트릭스

내적 증분 에너지  $U$ 는 식 (5), (6)를 합하여 유도하고 총 포텐셜 에너지  $V$ 를 절점변위에 관한 극소화 조건인  $\partial V / \partial \dot{d} = 0$ 을 적용하면, 요소의 강성매트릭스는 식(7)과 같다.

$$U_b = \frac{1}{2} \int_{V_b} \dot{\sigma}_b \dot{\epsilon}_b dV_b, \quad U_s = \frac{1}{2} \int_{V_s} \dot{\sigma}_s \dot{\epsilon}_s dV_s, \quad U_p = \frac{1}{2} \int_{V_p} \dot{\sigma}_p \dot{\epsilon}_p dV_p \quad (5)$$

$$U_c = \frac{1}{2} \int_{V_c} \dot{\sigma}_c \dot{\epsilon}_c dV_c - \frac{1}{2} \int_0^l \sum_i (\dot{\sigma}_c \dot{\epsilon}_c)_{z=z_n} A_{si} dx - \frac{1}{2} \int_0^l \sum_j (\dot{\sigma}_c \dot{\epsilon}_c)_{z=z_n} A_{pj} dx \quad (6)$$

$$K = \int_0^L \begin{bmatrix} A_r B_0^T B_0 & G_r B_0^T B_b \\ G_r B_b^T B_0 & I_r B_b^T B_b \end{bmatrix} dx \quad (7)$$

여기서,  $A_r = E_b A_b + E_c A_e + E_s \sum_i A_{si} + E_p \sum_j A_{pj}$ ,  $G_r = E_b G_b + E_c G_e + E_s \sum_i z_{si} A_{si} + E_p \sum_j z_{pj} A_{pj}$

$$I_r = E_b I_b + E_c I_e + E_s \sum_i z_{si}^2 A_{si} + E_p \sum_j z_{pj}^2 A_{pj}$$

### 3.3 프리스트레스의 수식화

본 논문에서의 프리스트레스의 수식화는 하중 평형법을 이용하였다. 보요소내에서의 PS강선은 직선 배치로 가정한다. 그림 3은 보요소의 절점에서의 프리스트레스의 평형을 나타낸다. 그림 3(a)는 요소 자체 내에서 평형을 만족하지 않으므로 그림 3(b)와 같이 평형을 이루기 위해 힘  $p^*$ 와  $p^{**}$ 를 추가하여 평형을 만족하였다.

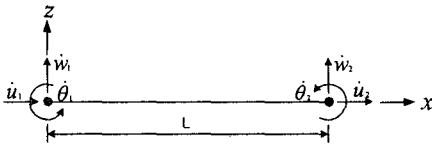


그림 2 보 요소에서의 절점 증분 변위 벡터

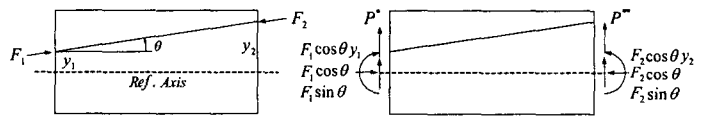
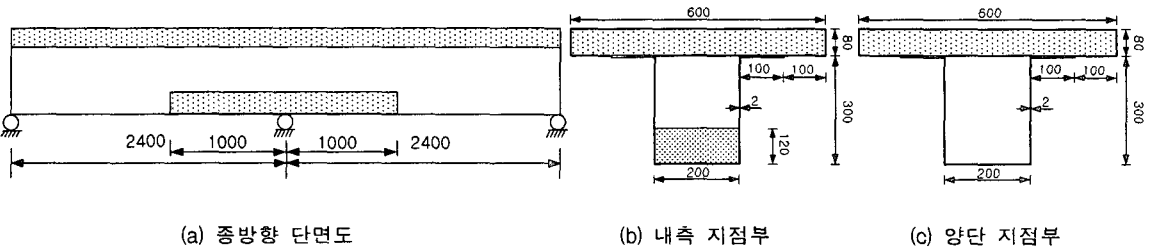


그림 3 보 요소에서 프리스트레스의 평형

### 4. 실험결과 및 수치해석

실험체는 부모멘트 구간인 내측지점 하단부 전·후 각 1m 구간에 두께 20cm 콘크리트를 타설함으로써 중립축 하단 강재에 발생하는 큰 압축응력을 콘크리트가 분담하게 하는 구조형식이며, 2경간 연속 이중합성 강 박스 거더의 교축 및 교축직각 방향 단면 형상이 그림 4와 같으며, 처짐은 양단에서 안쪽으로 80cm 떨어진 곳에 변위기를 설치하여 측정하였다. 실험체는 이중합성 박스 거더의 상부슬라브와 부모멘트 구간 하단부 콘크리트의 건조수축 작용 및 자중을 제외한 어떠한 재하하중도 없는 상태로 콘크리트 타설 후 재령 7일째부터 수행하였다. 실험은 실험실에서 수행하였지만, 온도와 습도같은 환경조건은 관리하지 않았으며, 실험체와 공시체는 같은 조건으로 실험을 수행했다. 크리프와 건조수축특성은 15×30cm인 6개의 공시체로 측정하였으며, 그중 3개는 비하중상태로 두고 나머지 3개는 재령 7일에 10MPa의 응력을 가하였다.



(a) 종방향 단면도 (b) 내측 지점부 (c) 양단 지점부

그림 4 이중합성 강 박스 거더 단면도 (단위 : mm)

실험체의 재령 28일 콘크리트 탄성계수는  $E_{28} = 2.21 \times 10^4 \text{MPa}$ 이고, 압축강도는  $f_{28} = 33.4 \text{MPa}$ 이다. 강재의 탄성계수는  $E_s = 2.1 \times 10^5 \text{MPa}$ 이다. 그림 4는 이중합성 박스 거더의 상부슬라브와 부모멘트 구간 하단부 콘크리트의 건조수축 작용에 의해 발생하는 초기재령 종속적 처짐 실험치와 초기재령 콘크리트의 탄성계수 변화와 크리프 및 건조수축 현상을 고려하는 이중 합성 거더의 시간 종속적 해석치를 나타낸 것이다. 수치해석에 사용된 크리프와 건조수축 변형률의 예측에 대한 시간종속적 모델은 ACI 209 예측 모델(ACI Model)과 크리프 및 건조수축 실험으로부터 선형회귀분석으로 나온 예측모델(TEST Model)을 사용하였다. ACI 209 예측 모델을 사용한 경우, 식(14)에서 크리프 계수는

$C_c(t) = t^{0.6} / (10 + t^{0.6}) C_{c0}$ 이고, 최종 크리프 계수는 2.0을 사용하였고, 건조수축 계수는  $S(t) = t / (t + 35)$ 을 최종 건조수축 변형률은  $8 \times 10^{-4}$ 를 사용하였다. 선형회귀분석으로 도출된 예측모델을 사용한 경우, 크리프 계수는  $C_c(t) = 0.259 \times t^{0.3735}$ 이고, 건조수축 계수는  $S(t) = 1.199 \times 10^{-6} \times t^{0.3774}$ 을 사용하였다.

그림 5는 초기재령 콘크리트의 탄성계수 변화와 크리프 및 건조수축 현상을 고려하는 2경간 연속 이중 합성 거더의 시간 종속적 해석치와 실험치의 비교한 것이다. 그림 5에서 ACI Model을 사용한 경우는 시간 종속적 해석치가 실험치보다 작게 나타났다. 이러한 결과는 ACI Model이 초기재령에서 시간 종속적 거동이 과소평가 되었다는 것을 알 수 있다. 반면에 공시체 실험의 결과를 회귀분석한 TEST Model의 경우는 시간 종속적 해석치와 실험치가 비교적 일치하였다.

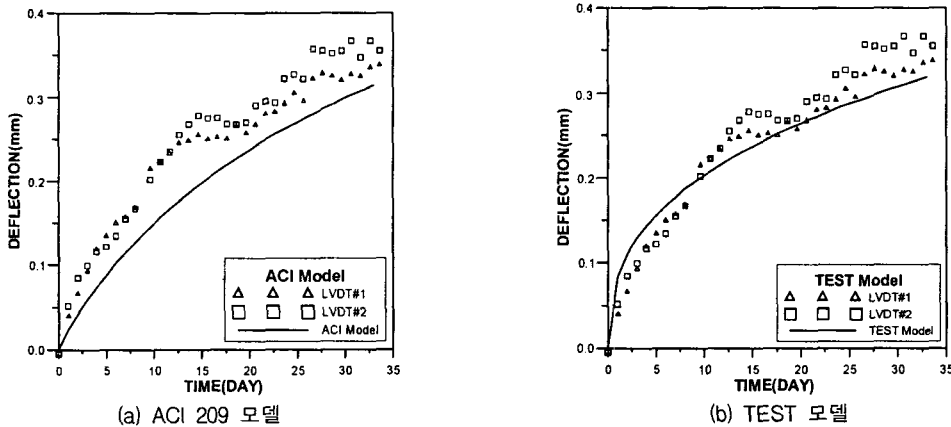


그림 5 실험치와 해석치의 처짐비교

## 5. 결론

본 연구는 초기재령 콘크리트의 탄성계수 변화와 크리프 및 건조수축 현상을 고려하는 프리스트레스 및 힘을 받는 합성형 거더의 시간 종속적 거동해석을 수행하기 위한 증분유한요소해석법의 정식화를 유도하였다. 초기재령 콘크리트의 탄성계수 발현과정을 고려한 구성관계는 총 응력-변형률 관계를 Taylor의 선형급수 확장을 이용하여 기준시간에 관하여 확장함으로써 시간 종속적 증분형태로 유도하였다.

부모멘트 구간의 강박스 하단에 콘크리트를 타설한 2경간 연속 이중합성 박스거더의 초기재령 거동 실험을 수행하였으며, 초기재령 상태에서 콘크리트 탄성계수의 발현과정을 고려한 시간 종속적 증분유한요소해석법의 결과와 실험결과를 비교하였다.

## 참 고 문 헌

1. ACI, (1983), "Designing of Creep and Shrinkage in Concrete Structures", SP-76.
2. Bradford, M. A., (1991), "Deflections of Composite Steel-Concrete Beams Subject to Creep and Shrinkage ", ACI Structural J., Vol.88, No.5, pp.610-614.
3. Chiu, H. S., Chern, J. C. and Chang, K. C., (1996), "Long-Term Deflection Control in Cantilever Prestressed Concrete Bridges ", Journal of Engineering Mechanics, Vol.122, No.6, June, pp.495-501.
4. Ghali, A., (1986), "A Unified Approach for Serviceability Design of Prestressed and Non-Prestressed Reinforced Concrete Structures ", PCI Journal, Vol.31, No.2, March-April, pp.118-137.
5. Gilbert, R. I. and Bradford, M. A., (1995), "Time-Dependent behavior of continuous Beams at service loads ", J. of Structural Engineering, ASCE, Vol.121, No.2, pp.319-327.
6. Jendele, L. and Phillips, D. V., (1992), "Finite Element Software for Creep and Shrinkage in Concrete ", Computers & Structures, Vol.45, Issue.1, pp.113-126