

# 크리프 및 건조수축을 고려한 PSC 교량의 시간의존해석 Time-Dependent Analysis of Prestress Concrete Bridge Considering Creep and Shrinkage

박문호<sup>1</sup>, 박순웅<sup>2\*</sup>, 김진규<sup>3</sup>, 박정활<sup>4</sup>, 김복남<sup>5</sup>, 이승엽<sup>6</sup>  
Moon-Ho Park<sup>1</sup>, Soon-Eung Park<sup>2\*</sup>, Jin-Kyu Kim<sup>3</sup>, Jung-Hwal Park<sup>4</sup>  
Bok-Nam Kim<sup>5</sup>, Seung-Yup Lee<sup>6</sup>

## <Abstract>

This study is to give more accurate information by performing the time depend ent analysis to take into account the long-term losses of precast PSC concrete bridge and analyzing the second stress, final camber and cross section stress of precast PSC caused by creep and drying shrinkage. As time goes by, the stress and deformation in the cross section vary continuously by the influence of creep and drying shrinkage. Due to this, the stress redistribution occurs and the internal force variation also happens along the point on the same cross section and with the passage of time.

*Keywords : Creep, Shrinkage, PSC girder, Time-dependent analysis*

## 1. 서 론

프리스트레스 콘크리트 구조물은 고강도 콘크리트의 개발, PS 강재의 강도증가와 질적향상, 그리고 내구성에 미치는 문제점 등을 보완할 수 있을 뿐만 아니라 부재단면을 작게 할 수 있는 효율성 등으로 인하여 오늘날 다양한 토목구조물에 사용되고 있다. 구조체에 도입된 프리스트레스는 여러 가지 원인에 의하여 손실이 발생하며, PSC 교량의 정밀한 구조거동의 예측과 유지관리를 위해서는 구조물에 작용하는 프리스트레스 손실의 정밀한 산정이 요구된다. 시간의 지속에 따라 영향을 미치는 콘크리트

트의 크리프 및 건조수축과 같은 시간의존적 현상들은 대형 구조물의 장기거동에 미치는 영향이 매우 크며, 설계에서도 중요한 위치를 차지한다. 김운학 등은 프리스트레스 콘크리트 구조물의 장기거동해석과 PSC 교량의 프리스트레스 손실에 관한 해석적 연구를 수행하였다.

PSC 거더교의 시공단계는 거더제작, 거더의 거치, 바닥판 콘크리트 타설순으로 이루어진다. PSC 거더교의 경우 이와 같은 각 단계를 거치는 동안 구조계가 변화한다. 프리스트레스 콘크리트 교량에서 단면내의 응력과 변형은 콘크리트의 크리프와 건조수축의 영향으로 인해 시간의 경과에 따라 계속적으로 변화한다. 이

<sup>1</sup>정회원, 경북대학교 토목공학과 교수, 工博

<sup>2</sup>교신저자, 정회원, 영남이공대학 토목과 겸임교수, 工博

<sup>3</sup>정회원, 영남이공대학 토목과 교수, 工博

E-mail : jkkim@ync.ac.kr.

<sup>4</sup>정회원, 한도엔지니어링 부사장, 工博

<sup>5</sup>포스코건설 플랜트사업본부, 과장

<sup>6</sup>한국수자원공사 산단사업처, 과장

<sup>1</sup>Professor Dept. of Civil Eng, PhD Kyungpook National University, Ph. D.

<sup>2</sup>Corresponding Author, Adjunct Professor Dept. of Civil Eng, PhD Yeungnam College of Science & Technology

<sup>3</sup>Professor Dept. of Civil Eng, Yeungnam College of Science & Technology, Ph. D.

<sup>4</sup>A vice-president, Hando engineering, Ph. D.

<sup>5</sup>Section Manager, Posco E&C, Plant Construction

<sup>6</sup>Section Manager, K-water, Industrial Development

때문에 동일 단면내에서도 각 위치별로 시간에 따라 응력의 재분배가 생기며 내력의 변화가 발생한다. 특히 설계하중 작용시 PSC 거더는 현장 타설된 슬래브와 일체식 구조를 이루어 합성단면으로 거동한다. 또한, 프리스트레스 손실을 시방서의 가정 값으로 사용했을 때, 실제 손실량과 오차는 사용하중 작용시 구조거동, 처짐, 솟음, 균열 등에 영향을 미친다.

본 연구는 프리캐스트 PSC 거더교의 프리스트레스 장기손실을 고려하기 위해 크리프, 건조수축을 고려한 시간의존해석을 수행하여 크리프 및 건조수축으로 인한 2차 응력과 최종솟음 및 단면력의 영향을 고려한 해석을 수행하여 보다 정확한 설계를 위한 자료를 제공하고자 한다.

## 2. PSC 거더의 프리스트레스 손실

프리스트레스드 콘크리트부재의 시간의존적 장기 거동예측을 위해 콘크리트 압축강도, 크리프 및 건조수축 등의 물성치는 반드시 확인되어야 한다. 정확한 예측을 위해 실제 시험을 통해 구성된 제안 식들을 적용하였다.

PSC 강재에서 응력의 변화는 AASHTO-LRFD 규정에 의해서 정의되며, Fig. 1에 의해서 설명되어 진다.

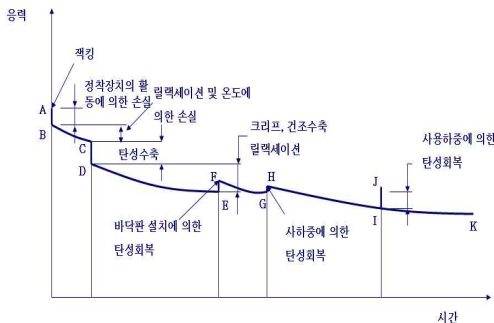


Fig. 1. Stress of prestress Loss of PSC Girder.

### 2.1 건조수축

건조수축은 상대습도와 온도의 일정한 조건 하에서 무차원의 변형률로 나타낸다. AASHTO-LRFD의 건조수축 변형률  $\epsilon_{sh}$ 는 아래 식과 같다.

$$\epsilon_{sh} = k_{td} \epsilon_{sh,u}$$

여기서,  $k_{td} = \frac{t}{55+t}$  : 증기양생 1-3일

$$k_{td} = \frac{t}{35+t} : 습윤양생 7일$$

시간의존계수  $k_{td}$ 의 함수로 정립되고 최종 건조수축  $\epsilon_{sh,u}$ 을 산정하면 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\epsilon_{sh,u} = 560 \times 10^{-6} \gamma_{sh} (\text{증기양생})$$

$$\epsilon_{sh,u} = 510 \times 10^{-6} \gamma_{sh} (\text{습윤양생})$$

여기서,  $\gamma_{sh} = k_s k_{hs}$

$k_s$  = V/S 단면의 보정계수 비

$$= \frac{t}{26e^{0.36V/S} + t} \bigg/ \frac{t}{45+t}$$

$$\frac{1064 - 94V/S}{923}$$

$k_{hs}$  = 건조수축의 상대습도계수

$$= \frac{140 - H}{70} \quad \text{for } H < 80\%$$

$$= \frac{3(100 - H)}{70} \quad \text{for } H \geq 80\%$$

t : 양생이 끝난후의 건조시간(day)

H : 상대습도

V/S : 부피-표면 비

### 2.2 크리프

시간에 따라 변화하는 콘크리트의 크리프는 콘크리트의 크기와 형태 이외의 많은 요소들의 영향을 받는다. 크리프 변형률은 탄성변형률에 대한 크리프 변형율의 비인 크리프 계수  $\psi(t, t_i)$ 에 의한 초기 탄성변형과 관계가 있다.

크리프 변형률은 구조물의 사용수명 동안 극한 크리프 계수  $\psi_u$ 와 함께 극한값에 도달할 것이다. AASHTO-LRFD에 의한 크리프 계수는 다음식과 같다.

$$\psi(t, t_i) = k_{td}\psi_u$$

$$\psi_u = 3.5\gamma_{cr}$$

여기서,  $\gamma_{cr} = k_f k_c k_{hc} k_{ia}$

$k_f$  = 콘크리트 강도계수

$$= \frac{1}{0.67 + \frac{f'_c}{9}}$$

$k_c$  = 크기계수

$$= \frac{t}{26e^{0.36V/S} + t} \bigg/ \frac{t}{45 + t}$$

$$\frac{1.80 + 1.77e^{-0.54V/S}}{2.587}$$

$k_{hc}$  = 크리프의 상대습도계수

$$= \frac{1.58 - H}{120}$$

$k_{ia}$  = 하중재령계수

$$= t_1^{-0.118}$$

$k_{td}$  = 시간의존계수

$$= \frac{(t - t_i)^{0.6}}{10 + (t - t_i)^{0.6}}$$

$t_i$  = 콘크리트의 재령

### 3. PSC 거더교의 처짐

PSC 부재는 고강도 재료가 사용되고 보다 정밀하게 설계시공되기 때문에 RC 부재보다 훨씬 단면이 적게되며 활하중에 대한 사하중의 비가 낮아서 장기간이 된다. 그러므로 PSC 부재는 특히 처짐에 주의하여야 한다.

프리스트레스에 의한 처짐은 상향 처짐이며 긴장재 배치형상에 따라 계산식이 다르게 된다. 프리스트레스 도입시의 프리스트레스에 의한 부재의 초기 탄성처짐은 다음 식에 의하여 계산한다.

① 직선형상 긴장재의 경우

$$d_{pr} = -\frac{P_i e_1 L^2}{8EI}$$

② 절선형상 긴장재의 경우

$$d_{pr} = -\frac{P_i e_1 L^2}{8EI} - \frac{P_i e_2}{EI} \left[ \frac{L^2}{8} - \frac{X^2}{6} \right]$$

③ 포물선형상 긴장재의 경우

$$d_{pr} = -\frac{P_i e_1 L^2}{8EI} - \frac{5P_i e_2 L^2}{48EI}$$

여기서  $d_{pr}$  : 초기 프리스트레스에 의한 처짐 (지간중앙)

$P_i$  : 초기 프리스트레스 힘

$e_1$  : 지점에서의 편심거리

$e_2$  : 지점과 중앙점에서의 긴장재간의 거리(하향+)

PSC거더의 구조해석 프로그램의 개략적인 흐름도는 Fig. 2와 같다.

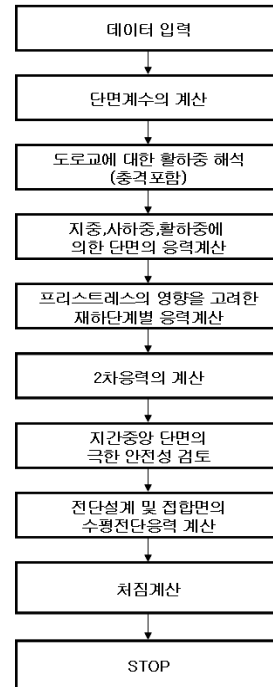


Fig. 2. Analysis algorithm of PSC girder bridge.

### 4. PSC 거더교의 해석

PSC 거더교의 해석모델은 현재 국내에서 시공되고 있는 지간 30 m의 표준단면을 해석모델

로 사용하였다.

연구대상 교량의 횡단구성은 4차선 고속도로의 반폭인 12.15 m이다. 거더의 간격은 25 m, 30 m 모두 2.5 m이며 가로보의 개수는 25 m 5개, 30 m 7개를 적용하였다. 해석모델의 단면은 Fig. 3, Fig. 4와 같다.

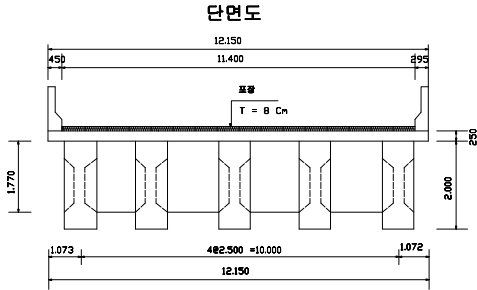


Fig. 3. Cross section of 30m PSC girder bridge.

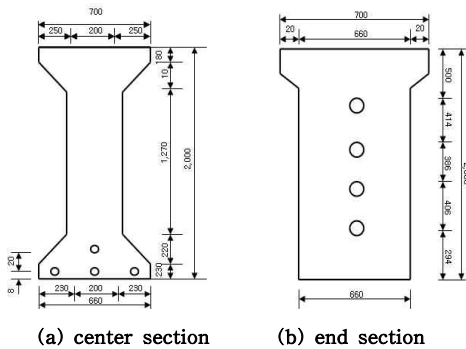


Fig. 4. Cross section 30m PSC girder.

#### 4.1 PSC 거더교의 설계조건

본 연구에서 사용한 PSC 거더교의 설계조건은 다음과 같다.

- 1) 교량형식 : 프리캐스트 PSC 거더교
- 2) 교량등급 : 1등급
- 3) 지 간 장 : 30 m
- 4) BEAM간격 : 2.5 m
- 5) 바닥판 두께 : 0.25 m
- 6) 콘크리트 설계기준강도
  - 거더 : 40 MPa
  - 바닥판 : 27 MPa
- 7) 긴장재
  - SWPC 7B, 12.7 mm 7연선. 응력 제거 강연선

- 극한응력 : 1900 MPa
  - 항복응력 : 1600 MPa
- 8) 철근
    - D16 -항복응력 : 300 MPa
  - 9) 프리스트레스 콘크리트
    - ① 프리스트레스 도입시 압축강도
      - $f_{ci} = 0.8f'_c = 32$  MPa
    - ② 프리스트레스 도입직후
      - 허용 압축응력 :  $0.55 f_{ci} = 17.6$  MPa
      - 허용 인장응력 :  $0.75 \sqrt{f_{ci}} = 1.34$  MPa
    - ③ 설계하중 작용시
      - 허용 압축응력 :  $0.4f'_c = 16$  MPa
      - 허용 인장응력 :  $1.50 \sqrt{f'_c} = 3$  MPa
  - 10) 쉬스판의 직경 : 6.6 cm
  - 11) 마찰계수
    - 곡률 마찰계수 : 0.25/rad(아연도금 금속 쉬스)
    - 파상 마찰계수 : 0.005/m(아연도금 금속 쉬스)
  - 12) 정착장치의 활동 : 0.6 cm
  - 13) 충격계수
    - 30m :  $15/(40+30) = 0.214$
  - 14) 활하중에 대한 횡분배 계수
    - $2.5/1.65 = 1.5152$
  - 15) 활하중 : DB-24

#### 4.2 해석결과 및 고찰

Fig. 5~12는 합성단면에 대한 건조수축과 크리프로 인한 슬래브와 PSC 거더의 시간의존해석에 의한 응력변화를 나타내고 있다. Fig. 5에서 재령 28일에서 건조수축에 의한 슬래브의 상연 응력이 -1.04 MPa이고 하연 응력은 -1.40 MPa로 나타났으며, 재령 360일에서 상연 응력이 -1.25 MPa이고 하연응력은-1.70 MPa로 나타났다. 콘크리트의 재령이 28일에서 360일로 증가함에 따라 슬래브 상·하연의 응력 증가율은 각각 35 %와 19 %로 나타났다. Fig. 6에서 콘크리트의 재령이 28일에서 360일로 증가함에 따라 PSC 거더의 상·하연의 응력 증가율은 모두 약 21 %로 나타났다.

Fig. 7에서 재령 28일에서 건조수축에 의한 슬

래브의 상연 응력이 1.14 MPa이고 하연 응력은 1.03 MPa로 나타났으며, 재령 360일에서 상연 응력이 1.25 MPa이고 하연응력은 1.35 MPa로 나타났다. 콘크리트의 재령이 28일서 360일로 증가함에 따라 슬래브 상·하연의 응력 증가율은 각각 10 %와 31 %로 나타났다. Fig. 8에서 콘크리트의 재령이 28일에서 360일로 증가함에 따라 PSC 거더의 상·하연의 응력 증가율은 각각 26 %와 19 %로 나타났다.

Fig. 9과 Fig. 10은 건조수축에 의한 콘크리트의 재령별 축력과 모멘트를 나타내고 있다. 축력은 재령 28일에서 634 KN이며 재령 360일에서 768 KN으로 나타났으며 증가율은 21 %로 관찰되었다. 모멘트는 재령 28일에서 5268 KN-cm이며 재령 360일에서 7293 KN-cm으로 나타났으며 증가율은 38 %로 관찰되었다.

Fig. 11과 Fig. 12는 크리트에 의한 콘크리트의 재령별 축력과 모멘트를 나타내고 있다. 축력은 재령 28일에서 압축력 500 KN이며 재령 360일에서 677 KN으로 나타났으며 증가율은 35%로 관찰되었다. 모멘트는 재령 28일에서 5191 KN-cm이며 재령 360일에서 6677 KN-cm으로 나타났으며 증가율은 29 %로 관찰되었다.

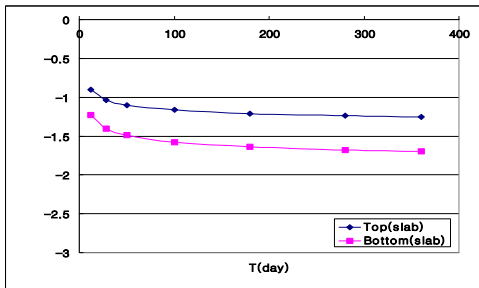


Fig. 5. Shrinkage stress on the age of slab.

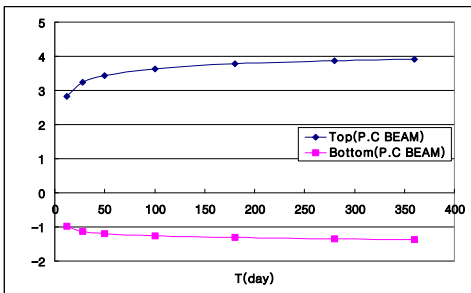


Fig. 6. Shrinkage stress on the age of PSC girder.

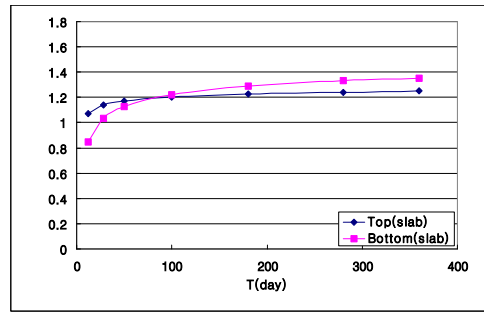


Fig. 7. Creep stress on the age of slab.

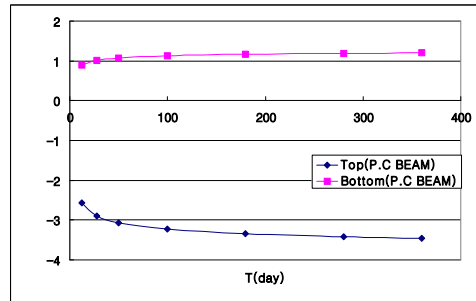


Fig. 8. Creep stress on the age of PSC girder.

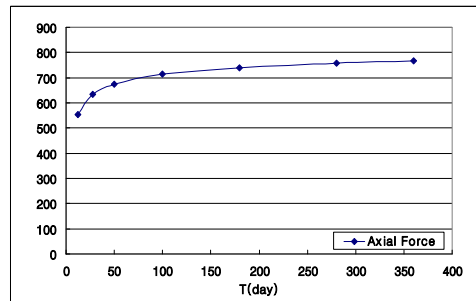


Fig. 9. Creep concrete on the age of PSC girder.

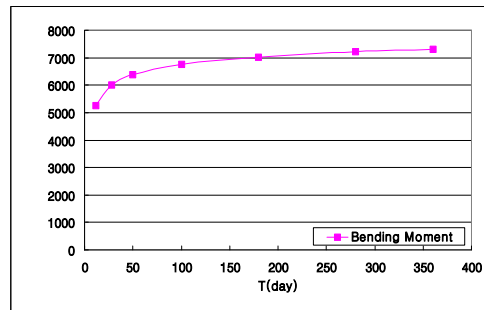


Fig. 10. Creep concrete on the age of PSC girder.

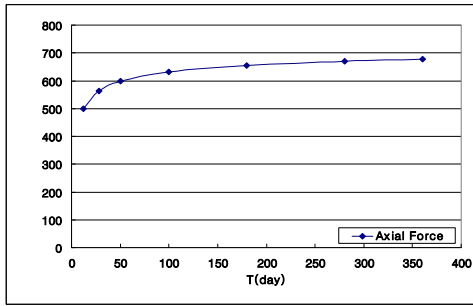


Fig. 11. Creep concrete on the age of PSC girder.

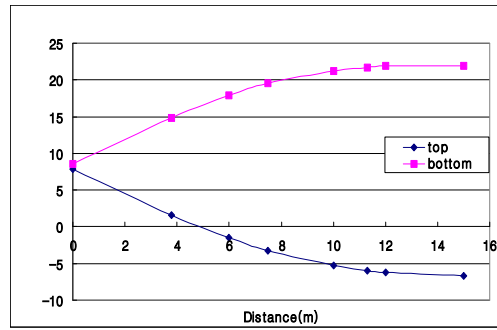


Fig. 14. Creep concrete on the age of PSC girder.

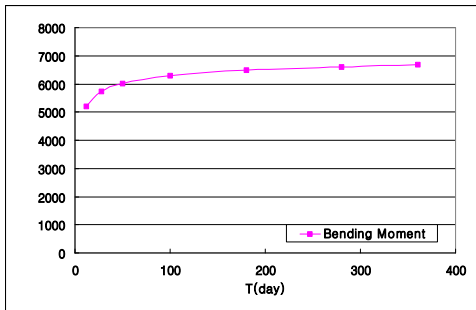


Fig. 12. Creep concrete on the age of PSC girder.

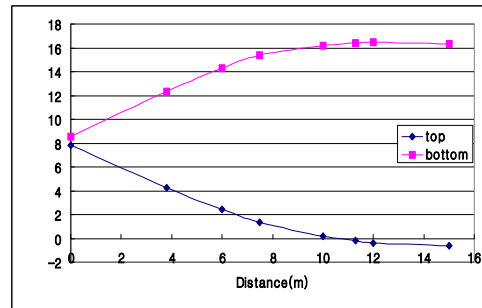


Fig. 15. Creep concrete on the age of PSC girder.

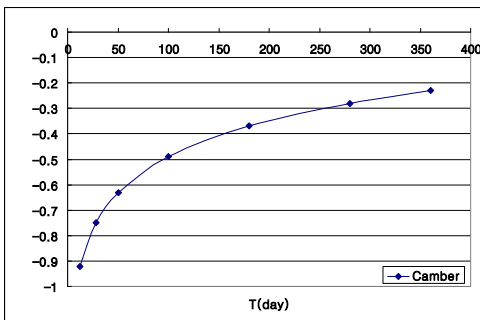


Fig. 13. Creep concrete on the age of PSC girder.

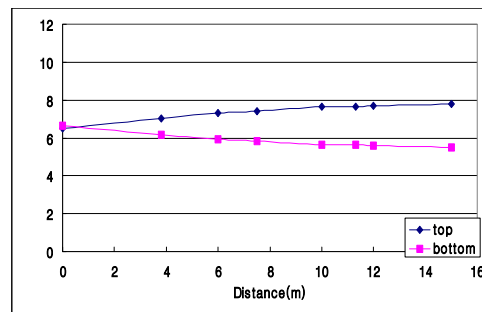


Fig. 16. Creep concrete on the age of PSC girder.

Fig. 13은 크리프 및 건조수축의 영향으로 인한 솟음을 나타내고 있으며 초기재령에서 솟음이 0.92 cm로 나뉘었으며 360일에서의 솟음은 0.23로 관찰되었다. 크리프와 건조수축의 영향으로 인해 솟음 0.69 cm 감소한 것을 보여주고 있다.

Fig. 14~16은 하중과 프리스트레스에 인한 설계응력을 나타내고 있다. Fig. 14의 초기 프리스트레스에 의한 PSC 거더의 상연응력은 단부에서 거리 3.8 m에서 인장응력 -1.54 MPa이며 6.0 m에서 인장응력 1.52 MPa로 관찰되었다.

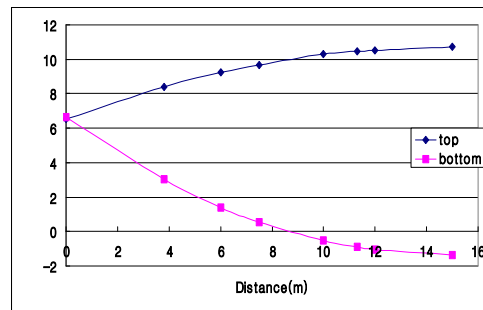


Fig. 17. Creep concrete on the age of PSC girder.

또한, Fig. 15의 초기 프리스트레스와 자중에

의한 상연응력은 거리 10.0 m에서 0.17 MPa이며 거리 11.3 m에서 -0.21 MPa로 관찰되었다. Fig. 17의 유효프리스트레스와 모든 외력에 의한 PSC 거더의 하연응력은 거리 7.5 m에서 0.55 MPa이며 거리 10.0 m에서 -0.54 MPa로 나타났으며, PSC 거더 중앙점인 15.0 m에서 -1.35 MPa로 관찰되었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 프리캐스트 PSC 거더교로 전 폭 4차선 고속도로의 반폭 12.15 m, 지간 30 m, 거더간격 2.5 m의 PSC 거더교의 표준 단면에 콘크리트의 건조수축 및 크리프에 대한 프리스트레스의 장기손실을 고려한 시간의존해석을 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 프리캐스트 PSC 거더교의 프리스트레스 장기손실을 고려하기 위해 크리프, 건조수축을 고려한 시간의존해석을 수행하여 크리프 및 건조수축으로 인한 2차 응력과 단면력을 분석하였다.
2. 크리프 및 건조수축에 의한 2차 응력은 초기재령에 크게 증가하였으며 재령이 경과할수록 증가율이 감소하는 것으로 나타났다. 건조수축에 의한 슬래브의 하연응력은 상연응력에 비해 크게 관찰되었다. 또한, PSC 거더에서 상연은 압축응력이 발생하고 하연은 인장응력이 발생하였다.
3. 크리프와 건조수축에 의한 시간의존해석에서 건조수축에 의한 응력은 PSC 거더의 상연응력에서는 압축응력이 나타났으며 슬래브 상,하연 응력과 PSC 거더의 하연응력에서는 모두 인장응력이 발생하였다. 또한, 크리프에 의한 응력은 건조수축과는 대조 PSC 거더의 상연응력을 제외한 슬래브의 상,하연응력과 PSC 거더의 하연응

력에서 압축응력이 발생하였다. 이는 크리프와 건조수축이 서로 상반된 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

4. 지간30 m, 거더간격 2.5 m, 압축강도 40 MPa에 대하여 현재의 PSC 거더 표준도를 사용할 경우 초기 재령에서 크리프 및 건조수축의 영향을 고려하지 않을 경우최종수축이 -9.2 mm이며 재령에 따른 크리프 및 건조수축의 영향을 고려했을 경우 28일, 50일, 100일, 180일, 280일, 360일에서 -7.5 mm, -6.3 mm, -4.9 mm, -3.7 mm, -2.8 mm, -2.3 mm로 관찰되었다. 초기 최종수축과 180일이 경과한 후에서의 최종수축의 시공오차 -5.0 mm를 초과하므로 설계시 반드시 크리프 및 건조수축에 대한 영향을 고려하여 할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 1) 김운학외, *한국구조물진단학회*, **6, 2**, 113, (2002)
- 2) 오병환외, *한국구조물진단학회*, **5, 2**, 111, (2001)
- 3) 장인호, 최외호, *대한토목학회 논문집*, **20, 3**, 343, (2000)
- 4) 김운학외, *한국콘크리트학회 논문집*, **18, 4**, 479, (2006)
- 5) 조창근외, *한국콘크리트학회 논문집*, **18, 4**, 479, (2006)
- 6) 이존자, "프리스트레스 콘크리트 구조물의 장기거동 및 신뢰성 해석", 건국대학교 토목공학과 박사학위논문, (2001)
- 7) 김민주, " 장기손실을 고려한 PSC보의 응력, 변형률에 관한 민감도 해석 및 신뢰도 평가", 건국대학교 토목공학과 석사학위논문, (2001)

(접수:2009.06.02, 수정:2010.07.23, 게재 확정:2010.08.20)