

PSC 교량의 프리스트레스 손실에 관한 해석적 연구

Analytical Study on the Prestress Losses of Prestressed Concrete Bridges

김 운 학* 라 정 균** 김 태 훈*** 신 현 목****
Kim, Woon-Hak Ra, Jeong-Kyoun Kim, Tae-Hoon Shin, Hyun-Mock

Abstract

This paper presents an analytical prediction of the prestress losses of prestressed concrete bridges. In this study a numerical procedure and computer program is developed to analyze the behavior of prestressed concrete bridges considering the time-dependent properties of material. It accounts for the aging, creep and shrinkage of concrete and the stress relaxation of prestressed steel. The structural model uses two dimensional plane frame elements with three nodal degree of freedom and is analyzed based on the finite element method. Member cross section can consist of concrete, reinforcement and prestressing steel. Two different set of equations for the prediction of time-dependent material properties of concrete are presented, which are ACI, CEB-FIP. The proposed numerical method for the prestress losses of prestressed concrete bridges is verified by comparison with reliable experimental results.

Keywords : prestress losses, prestressed concrete bridges, time-dependent properties, finite element method

1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트(이하 PSC) 구조물은 초기에는 재료의 개발부족으로 인하여 실용화되지 못하였으나 고강도 콘크리트의 개발, PS 강재의 강도증가

및 질적 향상, 컴퓨터를 이용한 구조해석기술의 발전으로 인하여 오늘날 다양한 토목구조물에 사용되고 있으며 PSC 교량은 대표적인 PSC 구조물이다. PSC 교량은 교량 상부구조물의 주요 가설단계마다 프리스트레스를 도입한다.

* 정희원, 국립한경대학교 토목공학과 부교수, 공학박사

** 정희원, 국립한경대학교 토목공학과, 공학석사

*** 정희원, 성균관대학교 토목환경공학과, 박사과정 수료

**** 정희원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사

E-mail : whkim@hnu.hankyong.ac.kr 011-342-0738

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2003년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

구조체에 도입된 프리스트레스는 여러 가지 원인에 의해 손실이 발생하며, PSC 교량의 정밀한 구조거동의 예측과 유지관리를 위해서는 구조물에 작용하는 프리스트레스의 정밀한 산정이 요구된다.

프리스트레스 손실의 원인은 크게 즉시손실과 장기손실로 나누어진다. 즉시손실은 프리스트레스를 도입할 때 생기는 손실로써 PS 강재와 쉬스관 사이의 마찰에 의한 손실, 정착장치의 활동(anchorage slip)에 의한 손실, 그리고 콘크리트의 탄성변형에 의한 손실이 있다. 장기손실은 프리스트레스를 도입한 후 시간의 경과에 따라 일어나는 손실을 말하여 콘크리트의 크리프와 건조수축, PS 강재의 이완(relaxation)에 의한 손실이 있다.⁽¹⁶⁾

PSC 교량의 프리스트레스 손실에 관해서는 다수의 연구가 진행되었다. 정배근 등⁽²⁾은 실물크기의 PSC 거더에서 프리스트레스의 마찰손실에 관한 연구를 수행하였으며, 오병환 등⁽³⁾은 실제의 PSC 박스 거더 교량 시공시의 텐던 긴장력의 현장 측정을 통하여 프리스트레스의 초기손실 추정 연구를 수행하였다. Pessiki 등⁽¹²⁾은 수십년의 공용기간이 경과한 PSC 거더의 프리스트레스의 추정 연구를 하였고, Burns 등⁽⁵⁾은 비부착된 연속보에서의 프리스트레스 손실 연구를 수행하였다. Sharif 등⁽⁶⁾은 PSC 합성보에서의 시간에 따른 프리스트레스 손실 연구를 하였으며, Saiidi 등⁽⁷⁾은 프리스트레스의 시간에 따른 손실에 관한 연구를 수행하였다.

그러나 기존의 대부분의 연구는 실험을 통한 프리스트레스 손실 측정과 즉시손실을 산정하기 위한 해석기법에 관하여 주로 이루어졌다. 따라서, 이 연구에서는 프리스트레스의 즉시손실과 장기손실을 모두 고려한 손실 추정에 관한 해석적 연구를 수행하고자 한다. 이를 위하여 각 해석단계마다 콘크리트의 하중재하에 따른 크리프 및 건조수축으로 인하여 발생하는 프리스트레스의 손실을 고려하였으며, 프리스트레스의 손실원인 중 마찰에 의한 손실, 정착장치의 활동에 의한 손실, 그리고 PS 강재의 이완에 의한 손실들도 별도로 고려하였다. 또한 신뢰성 있는 연구자의 실험결과⁽⁸⁾와 해석결과의 비교·분석을 통하여 프리스트레스 손실에 대한 현행 설계기준의 타당성을 평가하고자 하였다.

2. PSC의 재료적 성질

2.1 콘크리트 부재

콘크리트의 시간의존적인 특성은 강도증가(aging) 현상, 크리프(creep), 건조수축(shrinkage)의 3가지로 분류할 수 있다. 강도증가현상은 시간이 경과함에 따라 콘크리트의 탄성계수 및 압축강도가 증가하는 현상을 말하며, 크리프는 응력이 일정한 상태에서 시간이 경과함에 따라 변형이 증가하는 것을 말한다. 그리고 건조수축은 응력과는 무관한 변형으로 온도의 변화나 하중의 재하가 없어도 콘크리트의 경화(hardening)에 따라 발생하는 변형을 말한다.⁽¹⁶⁾

시간에 따라 변하는 콘크리트의 특성은 실제적인 실험에 의한 결과를 분석하여 예측할 수 있지만, 실험은 현실적으로 많은 제약이 있기 때문에 주로 콘크리트의 배합설계 및 주변환경변수에 따라 제안된 실험식을 이용한다. 이 연구에서는 시방서에서 보편적으로 이용되고 있는 ACI 209 모델⁽⁹⁾과 CEB/FIP 모델⁽¹⁰⁾을 선택적으로 사용할 수 있도록 하였다.^{(4),(11)}

2.1.1 ACI 209 모델

1) 크리프

$$C(t) = \frac{t^{0.60}}{10 + t^{0.60}} C_u \quad (1)$$

여기서, C(t)는 크리프계수(creep coefficient)로서 하중이 재하된 후 t일이 지났을 때의 크리프변형과 초기변형과의 상대적인 비를 말하며, C_u는 최종크리프계수(ultimate creep coefficient)로서 하중이 재하된 뒤 무한한 시간이 지난 후의 크리프변형과 초기변형과의 비를 말한다.

2) 건조수축

$$\text{습윤양생 : } \epsilon_{sh}(t, t_0) =$$

$$- k_s \cdot k_h \cdot \left[\frac{(t - t_0)}{35 + (t - t_0)} \right] \cdot 0.51 \times 10^{-3} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{증기양생 : } \epsilon_{sh}(t, t_0) = \\ - k_s \cdot k_h \cdot \left[\frac{(t-t_0)}{55 + (t-t_0)} \right] \cdot 0.56 \times 10^{-3} \quad (3) \end{aligned}$$

여기서, $\epsilon_{sh}(t, t_0)$ 는 $(t-t_0)$ 일에서의 건조수축변형, t 는 관측시점, t_0 는 양생이 종료된 시점, k_s 는 부재의 크기를 고려하는 계수, 그리고 k_h 는 상대습도를 고려하는 계수이다.

2.1.2 CEB/FIP 모델

1) 크리프

$$\epsilon_c(t, t_0) = \frac{\sigma_0(t_0)}{E(28)} \phi(t, t_0) \quad (4)$$

여기서, $\epsilon_c(t, t_0)$ 는 시간 t_0 에서 응력 $\sigma_0(t_0)$ 가 작용했을 때 시간 t 에서의 크리프 변형, $E(28)$ 는 재령 28일에서의 초기탄성계수, 그리고 $\phi(t, t_0)$ 는 재하 시점이 t_0 이고 관측시점이 t 일 때의 크리프 계수이다.

2) 건조수축

$$\epsilon_{sh}(t, t_s) = \epsilon_{sh0} \beta_{sh}(t - t_s) \quad (5)$$

여기서, $\epsilon_{sh}(t, t_s)$ 는 t 일에서 t_s 일 사이에 발생하는 건조수축변형, t 는 관측하고자하는 시점, t_s 는 건조수축이나 팽창이 일어나기 시작하는 콘크리트 재령일, ϵ_{sh0} 는 순수 이론적 건조수축계수, 그리고 $\beta_{sh}(t - t_s)$ 는 시간의 증가에 따르는 건조수축의 진전을 나타내는 계수이다.

2.2 PS 강재

PS 강재는 일반적으로 보강철근에 비해 인장강도가 매우 높으며, 응력-변형률 곡선이 계속적으로 변함으로 정확한 항복점을 파악하기가 어려운 특징을 가지고 있다.⁽¹⁶⁾

PS 강재에 도입되었던 인장응력은 여러 가지 원인에 의하여 감소하며 따라서 콘크리트의 프리스트레스도 감소하게 된다. 프리스트레스 손실의 원인은 크게 즉시손실과 장기손실로 나누어진다. 즉시손실은 프리스트레스를 도입할 때 생기는 손실로써 PS 강재와 쉬스관 사이의 마찰에 의한 손실, 정착장치의 활동(anchorage slip)에 의한 손실, 그리고 콘크리트의 탄성변형에 의한 손실이 있다. 장기손실은 프리스트레스를 도입한 후 시간의 경과에 따라 일어나는 손실을 말하여 콘크리트의 크리프와 건조수축, PS 강재의 이완(relaxation)에 의한 손실이 있다.⁽¹⁶⁾

이 연구에서는 각 해석단계마다 콘크리트의 하중재하에 따른 크리프 및 건조수축으로 인하여 발생하는 인장력의 손실을 고려하였으며, 인장력의 손실원인중 마찰에 의한 손실, 정착장치의 활동에 의한 손실, 그리고 PS 강재의 이완에 의한 손실들도 별도로 고려하였다.

2.2.1 마찰에 의한 손실

이 연구에서는 다음 식을 이용하여 각각의 절점당 마찰손실을 구하고 절점과 절점사이의 손실은 직선으로 변화한다고 가정하여 PS 강재의 마찰에 의한 손실을 산정하였다.

$$P_x = P_0 e^{-(\mu\alpha + kl)} \quad (6)$$

여기서, P_x 는 인장단으로부터 거리 x 인 곳에서의 긴장재의 인장력, P_0 는 인장단에서의 긴장재의 인장력, μ 는 각변화 1 radian에 대한 곡률 마찰계수, α 는 각변화(radian), k 는 긴장재의 길이 1 m에 대한 파상 마찰계수, 그리고 l 는 인장단으로부터 생각하는 단면까지의 긴장재의 길이이다.

2.2.2 정착장치의 활동에 의한 손실

긴장이 완료되면 긴장단을 정착시키는데 정착장치에 따라 약간의 정착부 이동이 발생하는 한다. 이로 인하여 긴장단 부근에서는 인장력의 손실이 발생하는데 이 연구에서는 다음 식을 이용하여 이를 고려하였다.

$$\Delta \sigma_{ps} = E_p \cdot \Delta l / l \quad (7)$$

여기서, $\Delta \sigma_{ps}$ 는 정착장치에서의 활동에 의한 PS 강재의 인장응력의 감소량, Δl 는 활동량(cm), l 는 PS 강재의 길이(cm), 그리고 E_p 는 PS 강재의 탄성 계수(kgf/cm²)이다.

2.2.3 PS 강재의 이완에 의한 손실

이 연구에서는 PS 강재의 이완을 고려하기 위해 일반적으로 사용되고 있는 Magura의 식(13)을 사용하였다.

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_{pi}} = 1 - \frac{\log t}{c} \left(\frac{\sigma_{pi}}{\sigma_{py}} - 0.55 \right) \quad (8)$$

단, $\sigma_{pi} > 0.55 \sigma_{py}$

여기서, σ_{pi} 는 초기응력, σ_p 는 긴장후 t 시간후의 응력, σ_{py} 는 항복응력, 그리고 c는 PS 강재의 제조 방법에 따라 달라지는 계수로써 보통 10을 사용한다.

3. 수치해석 프로그램

이 연구에서 사용된 NEO-PCBRG는 미국 California 대학에서 FEM을 교육하기 위해 만들어진 유한요소 해석용 범용 Program인 FEAP (Finite Element Analysis Program)⁽¹⁴⁾을 근간으로 하여 PSC를 고려할 수 있도록 수정하여 개발한 프로그램이다.^{(4),(11)}

3.1 PSC 요소

이 연구에서는 PSC 교량의 해석을 위해서 Fig. 1 과 같이 축대칭인 단면을 가지며 길이방향으로 단면의 변화가 없는 2차원 골조요소를 사용하였다.

부재의 각 단의 절점은 X1 방향변위, X2 방향변위 및 회전변위의 3개의 자유도를 가지고 있으며, 구조물의 강도매트릭스는 직접강도법(direct stiffness method)에 의해 구성되게 된다.

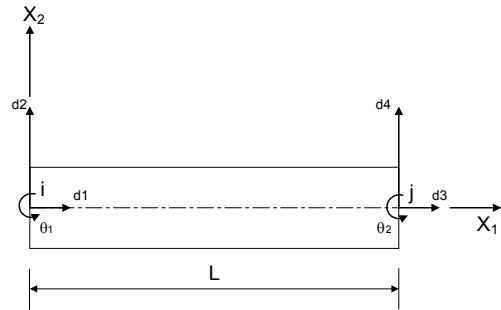


Fig. 1 Displacement component of frame element

PS 강재는 포스트텐션(post-tension)방식으로서 콘크리트와 긴장재가 완전히 부착되어 일체로 작용한다고 가정하며, 각각의 PS 강재는 전체길이에 대해서 일정한 단면을 가진다고 가정하였다. 또한, 해석과정에서 콘크리트의 크리프, 건조수축 및 강재의 이완 등의 시간적 영향을 고려하도록 하였다.^{(4),(11)}

3.2 시공단계의 모사

PSC 교량은 공법에 따라서 거동특성이 달라지기 때문에 시공단계를 고려한 해석을 해야만 정확한 거동을 추적할 수 있다. 시공중의 각 단계를 고려하기 위해서는 교량의 실제 시공중에 발생하는 여러 공정중에서 구조적으로 의미가 있는 공정을 가능한 정확히 해석적으로 구현하여 그 공정이 구조물의 거동에 미치는 영향을 파악할 수 있어야 한다. 그리고 각 공정의 순서와 실시되는 시간을 고려해야 하고 동시에 진행되는 여러 공정도 고려해야 한다. 또한 콘크리트의 크리프, 건조수축, 그리고 PS 강재의 이완 등 시공중에 시간의 경과에 따라 발생하는 시간의존적인 변형들이 구조계에 미치는 영향도 고려해야만 한다.

이 연구에서는 요소의 설치 및 제거, PS 강재의 긴장, 경계조건의 변화, 이동식 작업차를 포함한 가설장비의 설치, 이동 및 제거 등과 같은 각각의 공정을 모사할 수 있는 부명령어(sub-command)를 이용하여 실제의 공정과정을 모사함으로써 시공단계를 고려한 PSC 교량의 해석을 수행할 수 있도록 하였다.

3.3 프로그램의 구성 및 운용방법

NEO-PCBRG는 PSC 교량의 해석 및 설계를 효율적으로 처리할 수 있는 유한요소해석 프로그램으로서 프로그램의 구성은 크게 전처리 프로그램(pre-processor), 주 프로그램(main program) 및 후처리 프로그램(post-processor)으로 되어 있으며 Fortran과 Windows 용 프로그램인 Visual-Basic을 이용하여 개발한 후 Module화 하였고 Windows 환경에서 Mouse를 이용한 간편한 메뉴선택에 의해서 유기적으로 상호작용을 하는 통합 시스템으로 개발되었다.^{(4),(11)} Fig. 2는 프로그램의 전체적인 순서도 이다.

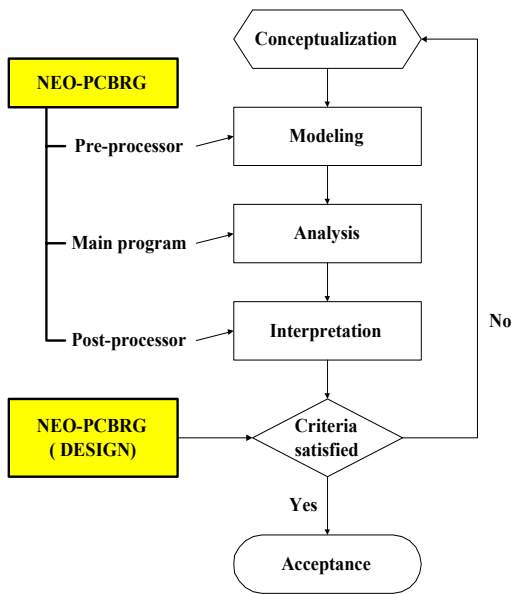


Fig. 2 Entire program procedures

4. 해석 예 및 고찰

이 연구에서 제시한 해석과정의 정확성을 검증하기 위해서 Fig. 3에 나타난 것 같은 실험체⁽⁸⁾를 선정하였다.

이 실험은 수십년의 공용기간, 즉 34년이 경과한 PSC 거더의 구조상태를 평가하기 위한 것으로서, 실험체의 재료물성은 다음과 같다.

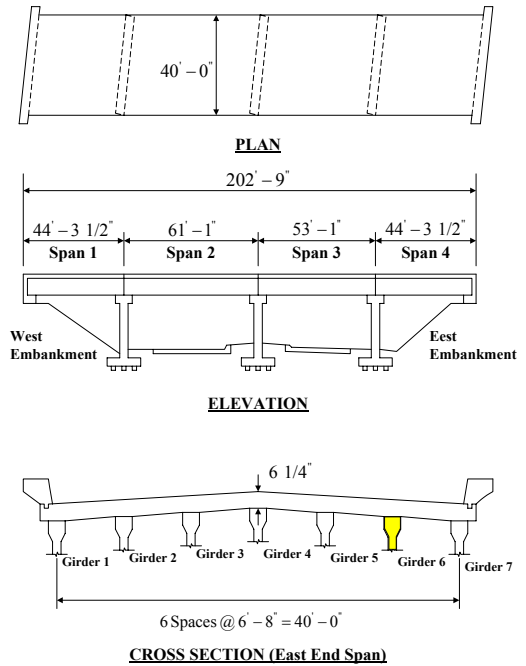


Fig. 3 Plan, elevation and cross section of the bridge
(1 ft = 12 in.; 1 in. = 25.4 mm)

- 1) 콘크리트 : 자중 $w=2.50\text{tf/m}^3$
 28일 강도 $f_{ck}=415\text{kgf/cm}^2$
 탄성계수 $E_c=305,573\text{kgf/cm}^2$
- 2) PS 강재 : 단면적 $A_{ps}=1265\text{mm}^2$
 항복강도 $f_{py}=16,876\text{kgf/cm}^2$
 탄성계수 $E_p=1,968,060\text{kgf/cm}^2$
 곡률계수 $\mu=0.3$ (/radian)
 파상계수 $k=0.0066$ (/m)

이 실험체를 해석 예로 채택한 이유는 PSC 거더의 프리스트레스트 손실을 정량화 시킨 실험이기 때문이다.

Fig. 3의 거더 6을 해체하여 실험실로 이동시켜 실험하였으며 거더는 AASHTO의 규정⁽¹⁵⁾에 따라 설계되어 있다. 텐던의 배치는 Fig. 4와 같이 상부텐던(No. 1)은 16 - 0.25 in. (6 mm)로 되어있으며 하부텐던(No. 2 and No. 3)은 12 - 0.25 in. (6 mm)로 각각 구성되어 있다.

모든 텐던은 그라우팅이 되어있으며 P. I. 포스트텐션 방식을 따르고 있다.⁽⁸⁾ 텐던은 긴장재의 항복강도 또는 극한강도를 고려하여 구조물 설계시 초기 긴장력을 결정한다. 이 실험체의 초기 긴장력은 11,676 kgf/cm² 이며 항복강도 16,876 kgf/cm²의 69%에 해당한다.

PSC 거더의 해석모델은 17개의 절점과 16개의 2차원 골조요소로 모델링하였다. 또한 절점과 요소의 번호는 거더 끝단으로부터 시작하여 순차적으로 부여하였다. 마지막으로 측정된 거더의 프리스트레스의 손실은 1754 kgf/cm²로서 초기 긴장력의 15%에 해당하며 수십년의 공용기간이 경과한 후 측정된 프리스트레스의 손실은 2039 kgf/cm²로서 초기 긴장력의 17.5%에 해당한다. 그리고 AASHTO의 규정⁽¹⁵⁾에 의해 계산된 프리스트레스의 손실은 2325 kgf/cm²이며 초기 긴장력의 20%에 해당한다. 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석에 의한 프리스트레스의 손실은 1833 kgf/cm²이며 초기 긴장력의 15.7%에 해당한다. 이 연구의 이론적 프리스트레스 손실 산정시에는 도로교 설계기준⁽¹⁾ 및 AASHTO 기준⁽¹⁵⁾에서 권장하고 있는 곡률 마찰계수(μ)=0.3/radian 및 파상 마찰계수(k)=0.0066/m를 적용하였으며 프리스트레스의 즉시손실과 장기손실을 모두 고려한 손실

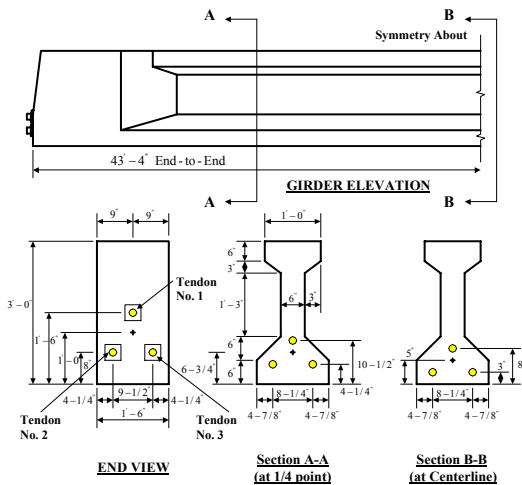


Fig. 4 Locations of post-tensioning tendons (1 ft = 12 in.; 1 in. = 25.4 mm)

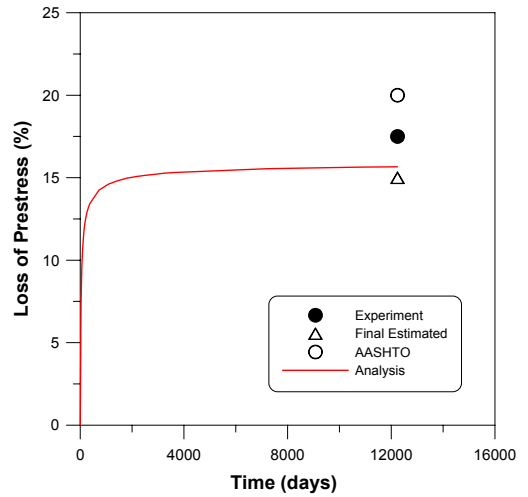


Fig. 5 Estimated effective prestress

추정을 하였다. 해석결과가 실험결과 및 시방규정에 의한 계산결과와 약간의 편차를 보이고 있는 것은 국부적인 프리스트레스의 변동과 손실 산정시 사용한 마찰계수의 차이에 의한 영향으로 판단된다. 그러나 해석에 의한 결과를 볼 때 해석결과가 실험결과 및 다른 추정식의 결과와 전반적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 이와 같은 결과들을 함께 비교하여 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 6 ~ Fig. 9는 시공단계별 해석결과를 후처리 프로그램을 이용하여 그래픽으로 처리한 결과이다.

시공단계에서의 상·하연 응력도는 Fig. 6, 7과 같이 상연에서의 최대응력은 41.6 kgf/cm²이고 하연에서의 최대응력은 72.9 kgf/cm²으로써 현행 도로교 설계기준⁽¹⁶⁾의 허용응력 182.6 kgf/cm²을 모두 만족시킴을 알 수 있다.

사용하중하에서의 상·하연 응력도는 Fig. 8과 Fig. 9와 같이 상연에서의 최대응력은 72.8 kgf/cm²이고 하연에서의 최대응력은 61.8 kgf/cm²으로써 현행 도로교 설계기준⁽¹¹⁾의 허용응력 166.0 kgf/cm²을 모두 만족시킴을 알 수 있다.

위와 같은 후처리 기능에 의해 사용자가 해석결과를 즉시 화면상으로 검토할 수 있도록 하여 해석결과 분석에 소요되었던 시간과 노력을 절감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

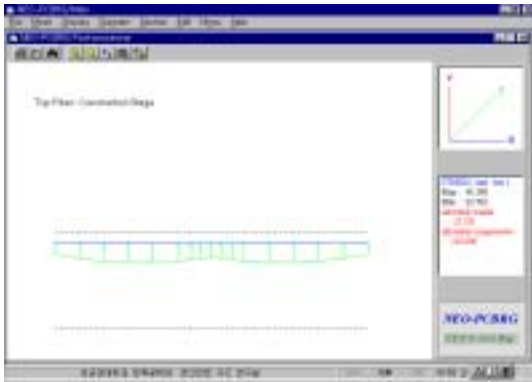


Fig. 6 Stresses at the construction stage (Top fiber)

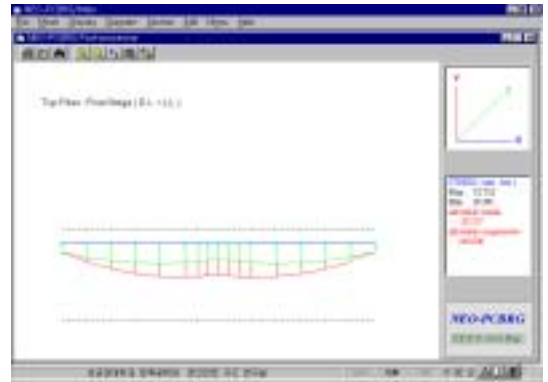


Fig. 8 Stresses at the final stage (Top fiber)

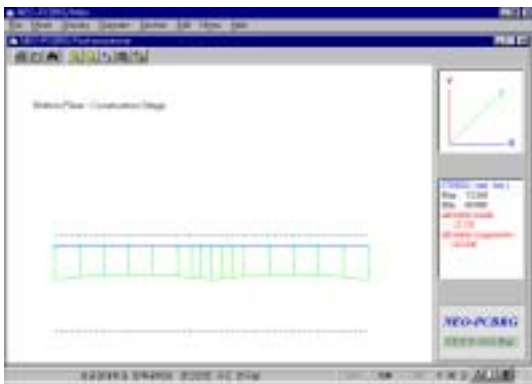


Fig. 7 Stresses at the construction stage (Bottom fiber)

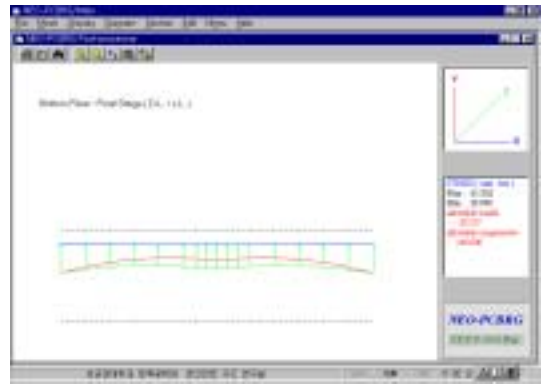


Fig. 9 Stresses at the final stage (Bottom fiber)

5. 결론

이 연구에서는 PSC 교량의 프리스트레스 손실을 추정할 수 있는 해석기법을 제시하고 이를 바탕으로 수치해석 프로그램을 개발하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) PSC 교량의 시간의존적 특성인 크리프, 건조 수축 등의 영향을 고려한 해석을 수행할 수 있으며, 부명령어(sub-command)를 이용하여 시공 단계를 모사함으로써 여러 가지 다양한 가설공법을 고려한 해석을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 콘크리트의 재령별 크리프와 건조수축량은 ACI,

CEB-FIP의 모델을 선택적으로 사용하여 예측하도록 하였다.

- 3) 프리스트레스트 힘은 콘크리트에 작용하는 외력으로 간주하며, 정착시의 초기손실뿐만 아니라 시간경과별 장기손실을 단계별로 계산하도록 하였다. 또한 이를 통해 PSC 교량의 정밀한 구조거동의 예측과 유지관리를 가능하게 하였다.

이 연구에서 제시한 해석기법에 의해 각종 PSC 교량의 시간에 따른 거동을 고려하는 정밀해석이 가능하며, 특히 단계별 분할시공방식이 적용되는 교량을 비롯한 각종 콘크리트 구조물의 해석에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2000), 도로교 설계기준.
2. 정배근, 한경봉, 박선규, “PS 긴장재의 마찰손실에 관한 실험적 연구,” 대한토목학회 논문집, 제20권, 5-A호, 2000, pp. 797-804.
3. 오병환, 양인환, 김지상, “프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량의 프리스트레스 손실 추정에 관한 연구,” 한국구조물진단학회 논문집, 제5권, 2호, 2001, pp. 111-120.
4. 김운학, 허만무, 김태훈, 최정호, 신현목, “프리스트레스트 콘크리트 구조물의 장기거동 해석,” 한국구조물진단학회 논문집, 제6권, 2호, 2002, pp. 113-119.
5. Burns, N. H., Helwig, T., and Tsujimoto, T., “Effective Prestress Force in Continuous Post-Tensioned Beams with Unbonded Tendons,” *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 1, 1991, pp. 84-90.
6. Sharif, A., Taher, S. E. F., and Basu, P. K., “Time-Dependent Losses in Prestressed Continuous Composite Beams,” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 11, 1993, pp. 3151-3168.
7. Saiidi, M. S., Shields, J., O'Connor, D., and Hutchens, E., “Variation of Prestress Force in a Prestressed Concrete Bridge During the First 30 Months,” *PCI Journal*, Vol. 41, No. 5, 1996, pp. 66-72.
8. Tabatabai, H., and Dickson, T. J., “Structural Evaluation of a 34-Year-Old Precast Post-Tensioned Concrete Girder,” *PCI Journal*, Vol. 38, No. 5, 1993, pp. 50-63.
9. ACI Committee 209, Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, ACI 209R-92, 1992.
10. Comité Euro International Du Béton, CEB-FIP MODEL CODE (DESIGN CODE), 1993.
11. Kim, T. H., Choi, J. H., Lee, K. M., and Shin, H. M., “Development of a Computer Program for User-Oriented Analysis and Design of Prestressed Concrete Bridges,” *An International Journal of the Korea Concrete Institute, KCI*, Vol. 12, No. 2, 2000, pp. 3-10.
12. Pessiki, S., Kaczinski, M., and Wescott, H. H., “Evaluation of Effective Prestress Force in 28-Year-Old Prestressed Concrete Bridge Beams,” *PCI Journal*, Vol. 41, No. 6, 1996, pp. 78-89.
13. Magura, D. D., Sozen, M. A., and Siess, C. P., “A Study of Stress Relaxation in Prestressing Reinforcement,” *PCI Journal*, Vol. 9, No. 2, 1964, pp. 13-57.
14. Zienkiewicz, O. C., *The Finite Element Method*, 3rd ed., McGraw-Hill Book Company, 1972.
15. AASHTO (1992), *Standard Specifications for Highway Bridges*, Fifteenth Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C.
16. Collins, M. P. and Mitchell, P., *Prestressed Concrete Structure*, Prentice Hall, 1991.

(접수일자 : 2002년 7월 10일)