

프리스트레스트 콘크리트 구조물의 장기거동 해석

Analysis of Long-Term Behaviors of Prestressed Concrete Structures

김 운 학* 허 만 무** 김 태 훈*** 최 정 호**** 신 현 목*****
Kim, Woon-Hak Hu, Man-Moo Kim, Tae-Hoon Choi, Jeong-Ho Shin, Hyun-Mock

Abstract

In the prestressed concrete structures, stresses are gradually redistributed with time due to the creep and shrinkage of concrete and the stress relaxation of prestressed steel. In this study a numerical procedure and computer program is developed to analyze the behavior of prestressed concrete structures 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. Analytical studies for different examples of prestressed concrete structures have been performed to demonstrated the capabilities and practical applicabilities of the developed program.

keywords : Prestressed Concrete Structures, Time-Dependent Properties, Finite Element Method

* 정회원, 한경대학교 토목공학과 부교수, 공학박사

** 한경대학교 토목공학과, 공학석사

*** 성균관대학교 토목환경공학과, 박사과정 수료

**** 한경대학교 토목공학과 강사, 공학박사

***** 성균관대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사

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

• 본 논문에 대한 토의를 2002년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2002년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트 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 있다.

프리스트레스트 콘크리트 구조물에서 단면내의 응력과 변형은 콘크리트의 크리프(creep)와 건조수축(shrinkage) 그리고 PS 강재의 릴랙세이션(relaxation)의 영향으로 인해 시간의 경과에 따라 계속적으로 변화된다. 이 때문에 동일 단면내에서도 각 부위별로 시간에 따라 응력의 재분배가 생기며, 부정형 구조물인 경우에는 반력의 변화 및 이로 인한 내력의 변화가 야기된다.¹⁾ 이러한 시간에 따른 영향은 일거에 시공하는 구조물보다는 단계별로 시공하는 구조물에서 더욱 중요하다. 그러한 구조물에는 세그먼트 단위로 순차적으로 가설하는 분할시공 교량과 프리캐스트 거더 거치후에 현장타설방식으로 연속화시키는 교량 등이 있다. 이러한 구조물의 장기거동을 정확하게 예측하기 위해서는 시간에 따른 재료성질변화를 반드시 고려해야 한다.

본 연구에서는 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 콘크리트 및 PS 강재의 시간의존적인 특성을 고려한 해석 프로그램의 개발을 목적으로 하였다.

2. 프리스트레스트 콘크리트의 재료적 성질

2.1 콘크리트 부재

콘크리트의 시간의존적인 특성은 강도증가(aging) 현상, 크리프, 건조수축의 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. 건조수축은 응력과는 무관한 변형으로 온도의 변화나 하중의 재하가 없어도 콘크리트의 경화에 따라 발생하는 변형을 말한다.¹⁾

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. 본 연구에서는 시방서에서 보편적으로 이용되고 있는 ACI 209 모델²⁾과 CEB/FIP 모델³⁾을 선택적으로 사용할 수 있도록 하였다.⁴⁾

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 크리프계수로서 하중이 재하된 후 t 일이 지났을 때의 크리프변형과 초기변형과의 상대적인 비를 말하며, C_u 는 최종크리프계수로서 하중이 재하된 뒤 무한한 시간이 지난 후의 크리프변형과 초기변형과의 비를 말한다.

2) 건조수축

$$\begin{aligned} \text{습윤양생 : } \epsilon_{sh}(t, t_0) = \\ -k_s \cdot k_h \cdot \left[\frac{(t-t_0)}{35+(t-t_0)} \right] \cdot 0.51 \times 10^{-3} \quad (2) \end{aligned}$$

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

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 재하시점이 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 강제

PS 강제는 일반적으로 보강철근에 비해 인장강도가 매우 높으며, 응력-변형을 곡선이 계속적으로 변함으로 정확한 항복점을 파악하기가 어려운 특징을 가지고 있다.¹⁾

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 활동에 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.¹⁾

본 연구에서는 각 해석단계마다 콘크리트의 하중제하에 따른 크리프 및 건조수축으로 인하여 발생하는 인장력의 손실은 자동적으로 고려되므로, 인장력의 손실원인중 마찰에 의한 손실, 정착장치의 활동에 의한 손실, 그리고 PS 강재의 이완에 의한 손실들만 별도로 고려하였다.⁴⁾

2.2.1 마찰에 의한 손실

본 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 은 인장단으로부터 생각하는 단면까지의 긴장재의 길이이다.

2.2.2 정착장치의 활동에 의한 손실

긴장이 완료되면 긴장단을 정착시키는데 정착장치에 따라 약간의 정착부 이동이 발생한다. 이로 인하여 긴장단 부근에서는 인장력의 손실이 발생하는데 본 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 은 활동량(cm), l 은 PS 강재의 길이(cm), 그리고 E_p 는 PS 강재의 탄성계수(kgf/cm²)이다.

2.2.3 PS 강재의 이완에 의한 손실

본 연구에서는 PS 강재의 이완을 고려하기 위해 일

반적으로 사용되고 있는 Magura의 식⁵⁾을 사용하였다.

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

단, $\sigma_{pi} > 0.55 \sigma_{py}$ (8)

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. 컴퓨터 프로그램

본 연구에서 사용된 NEO-PCBRG는 미국 California 대학에서 FEM을 교육하기 위해 만들어진 유한요소 해석용 범용 Program인 FEAP (Finite Element Analysis Program)⁶⁾을 근간으로 하여 프리스트레스트 콘크리트를 고려할 수 있도록 수정하여 개발한 프로그램이다.⁴⁾

3.1 프리스트레스트 콘크리트 요소

본 연구에서는 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 해석을 위해서 Fig. 1과 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

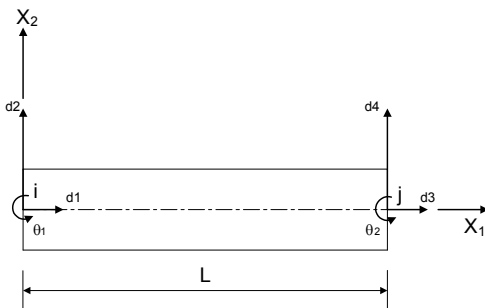


Fig. 1 Displacement component of frame element

method)에 의해 구성되게 된다. PS 강재는 포스트텐션 방식으로 콘크리트와 긴장재가 완전히 부착되어 일체로 작용한다고 가정하며, 각각의 PS 강재는 전체 길이에 대해서 일정한 단면을 가진다고 가정하였다. 또한, 해석과정에서 콘크리트의 크리프, 건조수축 및 강재의 이완 등의 시간적 영향을 고려하도록 하였다.⁴⁾

3.2 프로그램의 구성 및 운용방법

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

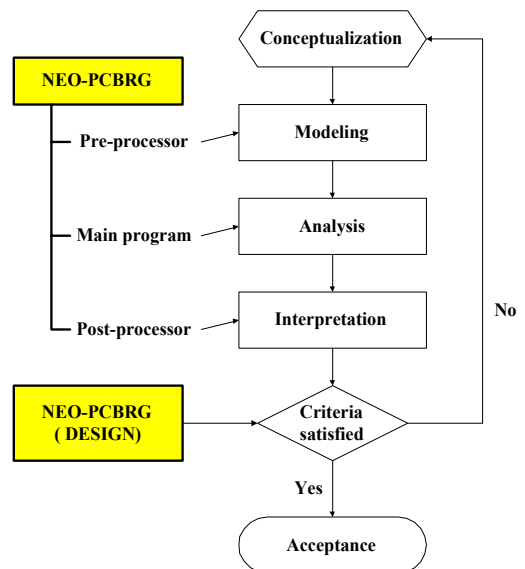


Fig. 2 Entire program procedures

4. 수치예제 및 고찰

4.1 단순 PSC 보의 해석

본 연구에서 제시한 해석과정의 정확성을 검증하기 위해서 Fig. 3에 나타난 것 같은 실험체⁷⁾를 선정하였다. 이 실험은 프리스트레스트 부재의 장기거동을 조사하기 위한 것으로서, 실험체의 재료물성은 다음과 같다.

- 1) 콘크리트 : 자중 $w = 2.50 \text{ tf/m}^3$
 28일 강도 $f_{ck} = 466 \text{ kgf/cm}^2$
 탄성계수 $E_c = 240,000 \text{ kgf/cm}^2$
- 2) PS 강재 : 단면적 $A_{ps} = 100.27 \text{ mm}^2$
 항복강도 $f_{py} = 17,688 \text{ kgf/cm}^2$
 탄성계수 $E_p = 2,000,000 \text{ kgf/cm}^2$
 곡률계수 $\mu = 0.3 \text{ (/radian)}$
 파상계수 $k = 0.0066 \text{ (/m)}$

이 실험체를 해석 예로 채택한 이유는 프리스트레스트 부재의 시간의 경과에 따른 크리프, 건조수축의 영향을 정량화 시킨 실험이기 때문이다.

해석하고자 하는 보는 $15\text{cm} \times 20\text{cm} \times 400\text{cm}$ 의 단순보이며, 중앙 경간으로부터 40cm 위치의 두

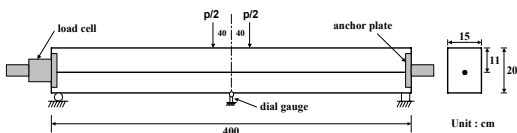


Fig. 3 Flexural test setup

Table 1 Parameters of flexure experiment

Number	Initial prestress (kgf)	Age (day)	Loading (kgf)	Factors	
				Creep	Shrinkage
SB03B	-	3	-	Yes	Yes
SB13B	9,926	3	293	Yes	Yes
SB13C	10,269	3	292	Yes	No

지점에서 하중을 재하하였다. PS 강재는 보의 상연에서 11cm 위치에 직선으로 배치하였으며 각 실험체의 매개변수는 Table 1과 같다.

실험체는 프리스트레스트와 재하하중의 유무에 따른 SB03B, SB13B 그리고, 수분의 손실을 억제하여 기본적인 크리프조건을 모사한 SB13C의 3종류로 나누어 볼 수 있다.

Fig. 4 ~ Fig. 6은 본 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석과 실험에 의한 변위-시간 관계를 나타내고 있다. 해석에 의한 결과를 볼 때 해석결과가 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

4.2 3경간 연속 PSC 교량의 해석

본 연구에서 개발된 프로그램의 해석결과의 검증을 위해서 Fig. 7과 같은 3경간 PSC 연속형교인 Choudhury⁸⁾를 예제로 선택하였다.

대상예제의 재료물성은 다음과 같다.

- 1) 콘크리트 : 자중 $w = 2.48 \text{ tf/m}^3$
 28일 강도 $f_{ck} = 280 \text{ kgf/cm}^2$
 탄성계수 $E_c = 268,000 \text{ kgf/cm}^2$

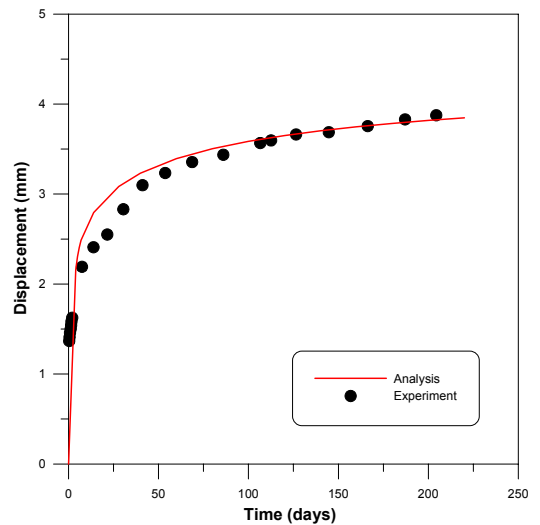


Fig. 4 Displacement at the middle of beam versus time (SB03B)

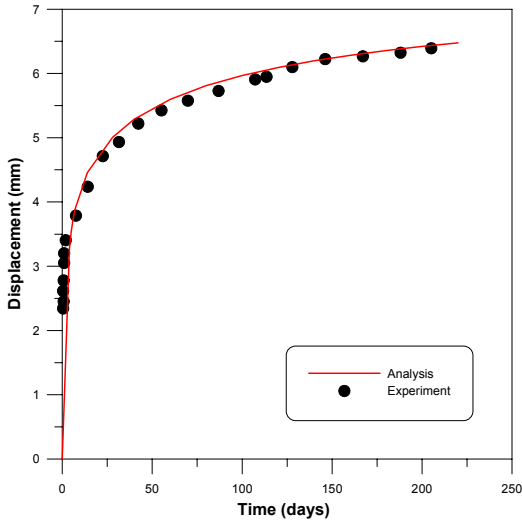


Fig. 5 Displacement at the middle of beam versus time (SB13B)

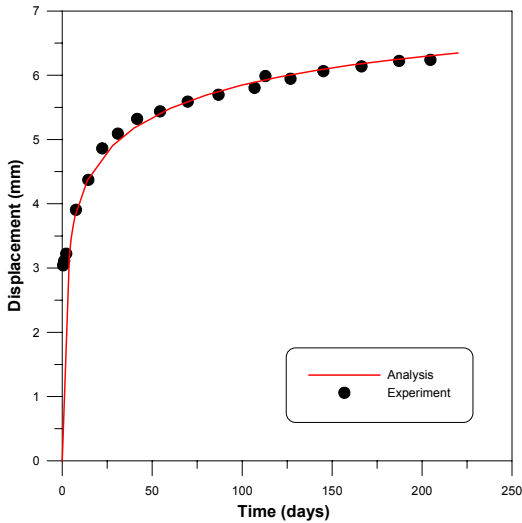


Fig. 6 Displacement at the middle of beam versus time (SB13C)

- 2) PS 강재 : 단면적 $A_{ps} = 183.60 \text{ cm}^2$
 항복강도 $f_{py} = 12,500 \text{ kgf/cm}^2$
 탄성계수 $E_p = 1,786,000 \text{ kgf/cm}^2$
 곡률계수 $\mu = 0.25 \text{ (/radian)}$
 파상계수 $k = 0.001 \text{ (/m)}$

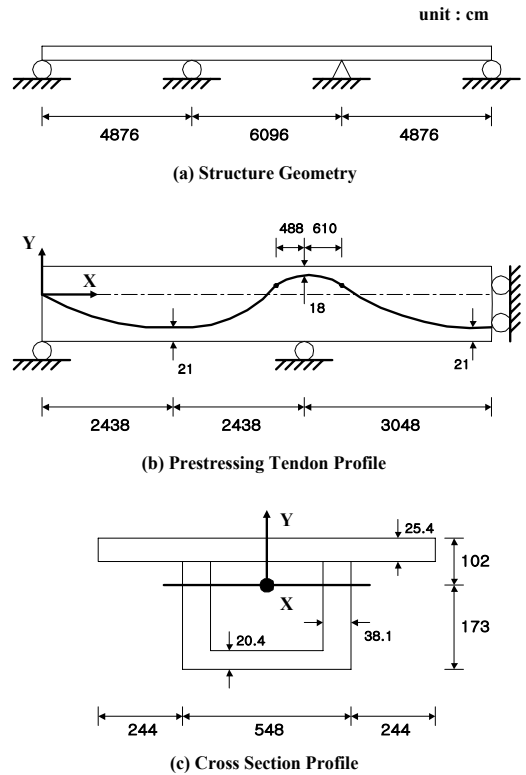


Fig. 7 Three span post-tensioned box girder bridge (Choudhury bridge)⁸⁾

예제로 다루는 교량은 상자형 단면을 가지는 3경간 연속교로서 중앙에 대하여 대칭이므로 교량의 반만을 해석한다. PS 강재는 포스트텐션 방식으로 긴장하며 PS 강재의 배치형태는 Fig. 7과 같다.

해석의 결과는 검증에 위해 SPCFRAME⁹⁾의 결과와 비교 분석하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 사하중에서의 한 장기거동 해석의 처짐변화와 내부지점에 최대 부모멘트가 일어나도록 재하되는 경우의 처짐도이며 SPCFRAME의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

5. 결론

이 연구에서는 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 시간에 따른 거동특성을 고려할 수 있는 수치해석방법을 제시하고 이를 바탕으로 컴퓨터 프로그램을 개발하

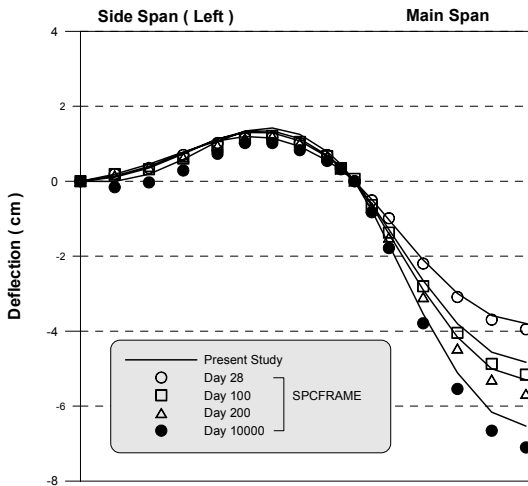


Fig. 8 Deflected shape for different times (without live load)

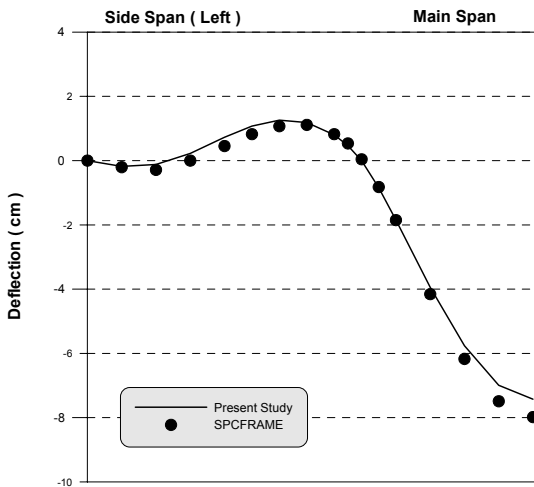


Fig. 9 Deflected shape of the case I

였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 크리프, 건조수축 등과 같은 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 시간의존적 특성을 고려한 해석을 수행할 수 있다.
- 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.

이 연구에서 제시한 해석방법에 의해 각종 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 시간에 따른 거동을 고려하는 정밀해석이 가능하며, 각종 콘크리트 구조물의 해석에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Collins, M. P. and Mitchell, P., Prestressed Concrete Structure, Prentice Hall, 1991.
2. ACI Committee 209, Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, ACI 209R-92, 1992.
3. Comite Euro International Du Beton, CEB-FIP MODEL CODE (DESIGN CODE), 1993.
4. 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.
5. Maura, 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.
6. Zienkiewicz, O. C., The Finite Element Method, 3rd ed., McGraw-Hill Book Company, 1972.
7. Chiu, H. S., Chern, J. C., and Chang, K. C., "Long-Term Deflection Control in Cantilever Prestressed Concrete Bridge. II: Experimental Verification", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 122, No. 6, 1996, pp. 495~501.
8. Choudhury, D., "Analysis of Curved Nonprismatic Reinforced and Prestressed Concrete Box Girder Bridges, University of California, Berkeley, UCB/SEMM-86/13, December 1986.
9. Kang, Y. J., "SPCFRAME-Computer Program for Nonlinear Segmental Analysis of Planar Prestressed Concrete Frames", University of California, Berkeley, UCB/SEMM-89/07, 1989.

(접수일자 : 2001년 9월 6일)