



고성능 콘크리트(HPC)를 사용한 프리텐션 부재의 시간의존거동 해석

남유석¹⁾ · 조창근^{2)*} · 박문호²⁾

¹⁾경북대학교 방재연구소 ²⁾경북대학교 건설공학부

Time-Dependent Behavior Analysis of Pre-Tensioned Members Using High-Performance Concrete (HPC)

Yoo-Seok Nam¹⁾, Chang-Geun Cho^{2)*}, and Moon-Ho Park²⁾

¹⁾Research Institute for Disaster Prevention, KyungPook National University, Daegu 702-701, Korea

²⁾School of Architecture and Civil Engineering, KyungPook National University, Daegu 702-701, Korea

ABSTRACT This paper deals with a research about the time-dependent behavior analysis for pre-tensioned high-performance concrete(HPC) members. By improving AASHTO-LRFD(2004) method for predicting the creep and shrinkage of normal concrete, and the relaxation of prestressing tendon, a time-dependent behavior analysis of high-performance concrete structures has been introduced. Two methods, the step-function method and the time-step method have been incorporated in the time-dependent analysis. The developed program can predict the initial and time-dependent losses of prestressing forces and the deflections of high-performance concrete structures. The present model has been verified by comparing with the experimental results from the test of time-dependent behaviors of pre-tensioned members using high-performance concrete. From this, the current model gives good relations with the experimental results, but the AASHTO method is not good for the prediction of time-dependent behaviors of high-performance concrete members.

Keywords high-performance concrete(HPC), time-dependent behavior analysis, pre-tensioned member

1. 서 론

근래 들어 중·장경간 교량구조물 및 고층 구조물의 건설경향이 두드러지는 한편, FRP 등 새로운 재료의 개발과 강재 및 콘크리트와 같이 기존 구조물을 구성하는 부재의 재료적 성질개선 또한 같은 맥락에서 많은 연구가 활발히 이루어지고 있다. 대형 구조물에 보통강도 콘크리트를 사용할 경우 부재의 단면이 커져 과도한 자중부담으로 인해 경제성, 안전성 및 사용성에 큰 영향을 줄 수 있으며, 이러한 문제점들에 대한 해결책으로 개발된 고강도 콘크리트(High Strength Concrete, HSC)는, 국내의 경우 1980년대 후반부터 연구가 시작되어 1990년 초반부터 시험적용 이후 그 영역이 점차 확대되고 있다.

1990년대 초반부터 국내에 처음으로 소개되기 시작한 고성능 콘크리트(High Performance Concrete, HPC)는 고강도성, 고내구성 및 고시공성의 특징으로 정의되는 유동성 콘크리트로서 일반콘크리트와는 상이한 거동특성을 나타낸다. 국내에서는 윤영수¹⁾ 등이 재료적인 특성 및 배합기법을 중심으로 체계적인 실용화를 위해 이에 관한 연구가 시도되었다.

시간의 지속에 따라 영향을 미치는 콘크리트의 크리프,

건조수축 및 강재의 릴렉세이션과 같은 시간의존적 현상들은 대형 구조물의 장기거동에 미치는 영향이 매우 크며, 설계에서도 중요한 위치를 차지한다. 장기거동 예측으로서, 김세훈 등²⁾은 크리프회복거동을 고려한 철근콘크리트 및 프리스트레스 콘크리트부재의 시간의존해석에 관한 연구를 수행하였다. 조창근 등³⁾은 ACI Committee 209 크리프, 건조수축모델을 적용한 장경간 PSC세그먼트 박스거더형 사장교의 장기거동해석모델을 제안하였다.

고성능 콘크리트의 재료적 특성 및 배합기법 연구와 더불어 부재 및 구조물의 시간의존거동 해석에 관한 연구가 진행되면서, AASHTO-LRFD, ACI 및 PCI에서 제안된 부재의 장기 거동 예측 식들은 고강도·고성능 콘크리트(41 MPa이상) 부재의 실제 거동과는 큰 차이를 보임이 많은 시험적 연구를 통해 밝혀졌다. 이에 따라서 고강도·고성능 콘크리트 부재에 대한 장기거동예측을 위한 새로운 규정이 시급하며, 국외에서도 활발한 연구가 진행 중이며^{4,5)}, 미연방도로국(FHWA)에서는 고성능 콘크리트구조물 설계자의 편의를 위해 지침을 발표하였다.⁶⁾

본 연구의 목적은, 고성능 콘크리트를 사용한 프리텐션 콘크리트 부재에 대한 시간의존거동에 관한 해석프로그램을 구성하여, 향후 널리 이용될 고성능 콘크리트부재의 해석 및 설계시 보다 정확한 시간의존거동 해석결과를 제공하는데 있다.

이를 위하여 첫째, 기존의 일반 콘크리트(41 MPa이하)

*Corresponding author E-mail : chocg70@hanmail.net

Received October 10, 2005, Accepted April 28, 2006

©2006 by Korea Concrete Institute

에 대해 AASHTO-LRFD⁷⁾가 채택하고 있는 시간의존 거동에 대한 예측 식들을 고성능 콘크리트에 대한 예측 식으로 개선한 제안 식들을 소개하였다. 둘째, 수치해석기법인 단계-함수법⁸⁾과 시간-단계법⁹⁾을 각각 적용한 고성능 콘크리트 부재의 크리프, 건조수축 및 강재의 릴렉세이션 현상에 의한 시간의존 거동(프리스트레스 손실 및 처짐) 결과를 실제 거동과 비교하여 그 타당성을 검증하였다. 제시된 시간의존모델 및 수치해석기법을 사용한 시간의존해석프로그램의 타당성 검증을 위해 AASHTO 모델 Grade 2와 Grade 4 HPC를 사용한 프리텐션 부재에 대한 실제 시험측정결과와 비교하였다.

효율적인 연구를 위하여, 콘크리트는 비균열 상태로 프리스트레싱 강재와 완전히 부착된 상태이고, 부재의 변형은 치수에 비해 미소하며, 프리스트레스의 시간손실은 콘크리트의 크리프와 건조수축, 프리스트레싱 강재의 릴렉세이션에 의해 일어나는 것으로 가정하였다.

2. 고성능 콘크리트의 시간의존거동 예측

콘크리트 압축강도, 탄성계수, 크리프 및 건조수축 등의 물성치는 비균열 프리스트레스트 콘크리트부재의 초기 및 시간의존적 장기 변형예측을 위해 반드시 확인되어야 한다. 실제 거동에 근접한 정확한 예측을 위해 실제 시험을 통해 구성된 제안 식들을 적용하였으며, 본 연구에 적용된 콘크리트 압축강도, 탄성계수 등의 시간의존적 물성치와 크리프, 건조수축 모델은 다음과 같다.

2.1 콘크리트 압축강도

콘크리트 압축강도 산정은 W/C비, 골재비, 골재의 최소치수 및 배합조건에 의해 많은 영향을 받으며, 장기거동 예측의 신뢰성에 큰 영향을 끼친다. 따라서, 본 연구에서는 ASTM Type I, III의 고성능 콘크리트 시험결과에 대한 회귀분석을 수행하여, 그 결과를 시간 t 에 따른 쌍곡선 방정식으로 변환한 압축강도 예측 식을 다음과 같이 사용하였다.¹⁰⁾

$$f_c(t) = \left(\frac{t^c}{a + b \cdot t^c} \right) f_c'_{28} \quad (1)$$

여기서, c 는 재령28일 콘크리트 압축강도이고, 3개의 상수값은 양생 및 콘크리트 조건에 따라서 Table 1과 같다.

2.2 콘크리트의 탄성계수

고성능 콘크리트의 탄성계수식은 ACI Committee 363¹¹⁾의 고강도 콘크리트 및 Shams¹²⁾의 고성능 콘크리트 탄성계수 제안 식을 각각 다음과 같이 적용하였다.

$$E_c = 3,320 \sqrt{f_c'} + 6,900 \quad (2)$$

여기서, $21 \text{ MPa} \leq f_c' \leq 83 \text{ MPa}$ 이다.

Table 1 Constants for compressive strength of concrete

TYPE			
ASTM-cured concrete :			
Type I cement	0.99	0.77	0.44
Type III cement	1.11	0.56	0.28
Insulated-cured concrete :			
Type I cement	4.19	-3.05	0.01
Type III cement	0.45	0.95	0.84

$$E_c = 3,403 \sqrt{f_c'} + 2,870 \quad (3)$$

여기서, $62 \text{ MPa} \leq f_c' \leq 117.2 \text{ MPa}$ 이다.

2.3 크리프계수 및 건조수축변형률

고성능 콘크리트의 크리프계수 및 건조수축 변형률 특성은 일반 콘크리트와 크게 차이를 보인다. 고성능 콘크리트에 관한 장기거동의 실험 결과를 바탕으로 하여 Shams¹²⁾은, 기존의 일반 콘크리트용 크리프 및 건조수축에 관한 AASHTO-LRFD(2004)의 예측식을 수정 및 개선하여 고성능 콘크리트에 관한 수정모델을 소개하였다. ACI 및 AASHTO에서 제시하고 있는 콘크리트의 장기거동 관계식들은 설계강도 41 MPa이하의 보통 콘크리트의 해석 및 설계를 위해 제시된 것으로, 고성능 콘크리트 부재의 시간의존거동 예측에는 잘 맞지 않는다. 따라서, 제안된 예측 식의 적용영역은 콘크리트의 설계강도 $62 \text{ MPa} \leq f_c' \leq 117.2 \text{ MPa}$ 이내의 고성능 콘크리트를 대상으로 한 것으로서, 시험데이터에 대한 비선형 회귀분석을 통해 재구성된 곡선식을 사용하였다.

2.3.1 크리프계수

시간에 따라 변화하는 크리프에 관한 단계별 예측은 Bazant¹³⁾의 재령-보정 유효계수법에 따른다. AASHTO 식들 중 고성능 콘크리트를 위해 수정된 관계식들은 크리프모델의 경우 강도 산정식, 재하시 성숙도, 습윤양생기간 및 응력/강도비 계수에 관한 식 등이다. 따라서, 고성능 콘크리트의 크리프 계수 $\phi(t, t')$ 는 다음과 같이 정의되었다.¹²⁾

$$\phi(t, t') = \phi_\infty k_{vs} k_{fc} k_H k_t k_\sigma k_m \frac{(t-t')^{0.6}}{d + (t-t')^{0.6}} \quad (4)$$

여기서, $\phi_\infty = 2.73$

k_{vs} = 표면/체적비 계수

$$= \left[\frac{t}{26e^{0.36(v/s)} + t} \right] \cdot \left[\frac{1.80 + 1.77e^{-0.54(v/s)}}{2.587} \right]$$

v/s = 표면/체적비, in.

k_{fc} = 콘크리트강도계수 $\left(\frac{4.8}{1.645 + f_c'} \right)$

f'_c = 콘크리트설계강도, ksi

$$k_H = \text{비습도 계수} (1.58 - \frac{H}{120})$$

H = 비습도(%)

$$k_r = \text{재하시 성숙도계수} (0.65 \cdot e^{\frac{0.7}{t+0.57}})$$

k_G = 응력/강도비 계수

$$= e^{1.5(\Gamma - 0.4)}; 0.4 \leq \Gamma \leq 0.6$$

$$= 1; 0.4 \geq \Gamma$$

Γ = 재하시 응력/강도비

$$k_m = \text{습윤양생 시간계수} (1 + 0.65(1 - e^{-0.59m})^{5.73})$$

m = 습윤양생시간, days

$$d = \frac{t'}{0.356 + 0.09t'}$$

t, t' 는 콘크리트 성숙도(days)로서, 시간을 고려할 경우와 초기 하중재하 시점의 값을 각각 의미한다. 이는 고성능 콘크리트의 크리프 및 건조수축 변형의 정확한 예측을 위해서는 양생초기 발생하는 높은 온도에 의존하는 초기 재하시점 또는 건조시점(약 24시간이내)의 성숙도와 구조물의 실제거동 시험결과에 근거한 크리프의 습윤양생 효과를 위한 성숙도의 계산이 중요시된다. 따라서, 초기 재하시점 및 건조시점의 성숙도의 예측을 위해 CEB-FIP(1991)에 제시된 식으로부터, 하중재하 시점의 성숙도는 식 (5)에 의해 산정토록 하였다.

$$t, t' = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot e^{\left[\frac{13.65 - \frac{4000}{273 + (T(\Delta t_i)/T_0)} \right]} \quad (5)$$

여기서, $T(\Delta t_i)$ 는 Δt_i (days)기간동안 온도($^{\circ}\text{C}$)이며, T_0 는 1°C 이다.

2.3.2 건조수축변형률

AASHTO의 관계식들 중에서 고성능 콘크리트를 위해 수정된 관계식들은 건조수축변형률의 경우 건조수축변형률과 성숙도계수 및 시간계수에 관한 식 등이다. 고성능 콘크리트의 건조수축변형률 $\epsilon_{sh}(t, t_0)$ 은 다음과 같이 정의되었다.¹²⁾

$$\epsilon_{sh}(t, t_0) = \epsilon_{sh\infty} k'_{vs} k'_H k'_{r0} \left[\frac{t - t_0}{f + (t - t_0)} \right]^{0.5} \quad (6)$$

여기서,

$$\epsilon_{sh\infty} = 380 \cdot 10^{-6} (\text{습윤양생콘크리트})$$

k'_{vs} = 표면/체적비 계수

$$= \left[\frac{\frac{t}{(26e^{0.36(v/s)} + t)}}{\frac{t}{45 + t}} \right] \cdot \left[\frac{1064 - 94(v/s)}{923} \right]$$

k'_H = 비습도 계수

$$= \frac{140 - H}{70}; H < 80\%$$

$$= \frac{3(100 - H)}{70}; H > 80\%$$

$$k'_{r0} = \text{건조시점에서의 성숙도 계수} (0.67 e^{\left[\frac{4.2}{9.45 + t_0} \right]})$$

$f = 23 \text{ days}$

t, t_0 = 콘크리트 성숙도 시간(days)을 고려할 경우와 초기 건조시점의 값(식 (5)에 의해 계산)

3. 프리스트레스 손실 및 처짐의 장기거동 예측모델

프리텐션 부재의 프리스트레스 손실은 정착단 활동과 탄성단축에 의한 순간손실과 크리프, 건조수축 및 릴렉세이션에 의한 상호의존, 시간의존적 손실에 의해 발생되며, 이러한 손실의 예측을 위해 일반적으로 AASHTO규정과 PCI Design Handbook이 사용된다. 장기거동에 있어 초기 처짐은 모멘트-면적법을 이용 프리스트레스의 편심도입으로 인한 캠버($\Delta = \frac{PeI^2}{8EI}$)와 자중에 의한 처짐($\Delta = \frac{5wl^4}{384EI}$)을 계산할 수 있으며, 장기거동의 의한 처짐은 콘크리트 재령에 따른 프리스트레스의 감소, 콘크리트 크리프에 의한 재료의 시간의존 계원, 프리스트레스 손실의 증가 및 지속·순간(활)하중의 부가적용 등에 의해 변화하게 되며, PCI 승수(multipliers)법¹⁴⁾와 Tadros 등(1985) 승수법¹⁵⁾으로 예측되어진다.

그러나, 이러한 방법들은 단순히 초기 및 최종의 프리스트레스 손실과 가설시 및 준공시의 장기처짐을 예측하기 위해 사용되어짐으로 사용하중 상태에서 임의시간의 프리스트레스 손실 및 처짐의 예측을 위해서는 콘크리트와 프리스트레싱 강재의 시간의존적 계원, 프리스트레스 손실들간의 독립성, 외부적 환경적 요인에 따라 변하는 콘크리트의 크리프, 건조수축의 민감도 및 프리스트레스 손실에 의한 장기 처짐의 변화를 고려한 시간의존 해석이 요구되어진다.

본 연구에서는 고성능 콘크리트를 사용한 프리스트레스 부재의 전 시간 영역에 대한 시간의존예측 모델을 제시하였다. 이를 위하여 앞장에서 제시된 고성능 콘크리트의 시간의존거동에 관한 계수 추정 식들을 이용하고, 단계-함수(Dilger, 1982)와 시간-단계(Milinas-Vega, 1988)에 의한 수학적 기법을 각각 적용하여 고성능 콘크리트 부재의 시간의존거동 예측 모델을 구성하였다.

3.1 단계-함수법(Step-Function Method)

단계-함수법들 중 본 연구에서 사용된 Dilger법은 크리프-변형해석(Creep-transform analysis)과정을 이용하여 프리스트레스된 고성능 콘크리트 부재의 시간의존해석을 수행한다.

부재단면의 프리스트레싱 강재는 계수비에 의해 변환되며 계수비는 다음 식과 같다.

$$n^* = n_0(1 + \chi(t, t')\phi(t, t')) \quad (9)$$

여기서, n^* 는 시간 t 에서의 크리프 변형계수비이고, n_0 는 하중재하시점 t' 에서의 계수비이며, χ 와 ϕ 는 재령 및 크리프계수이다.

시간의존 응력과 변형에 도달하기 위해, 비구속 크리프,

자유 건조수축, 저감된 순릴렉세이션으로 인한 강재의 힘들은 크리프-변형 단면에 적용되며, 이러한 시간의존 관계로부터 강재의 응력은 다음 식으로 표현되어진다.

$$\sigma_s^* = n_0 \sigma(t') \phi(t, t') + \varepsilon_{sh}(t, t') E_s + \chi_r L_r \quad (10)$$

변형단면 상에서 시간의존 관계에 기인한 축력과 모멘트는 다음 식들과 같다.

$$N_s^* = \sigma_s^* A_{ps} \quad (11)$$

$$M_s^* = N_s^* e_{ps}^* \quad (12)$$

여기서,

$\sigma(t')$ = 외력과 프리스트레싱에 의한 강재위치에서의 콘크리트 응력

$\phi(t, t')$ = 시간 t 에서의 크리프계수

$\varepsilon_{sh}(t, t')$ = 정착시간까지의 비구속 건조수축변형

$$L_r(t) = \text{순 릴렉세이션(저릴렉세이션강재)} \\ = \frac{\log(24t)}{40} \cdot \left[\frac{f_{pj}}{f_{py}} - 0.55 \right] f_{pj} \quad (13)$$

f_{pj} = 초기프리스트레스

f_{py} = 프리스트레싱 강재의 항복강도

χ_r = 릴렉세이션 감소계수

e_{ps}^* = 크리프-변형단면의 도심으로부터 강재도심까지 거리

N_s^* 과 M_s^* 의해 발생하는 콘크리트 응력은 식 (14)로부터 구하여지며, 이는 콘크리트의 응력 중 실제 시간의존에 따른 변화량을 의미한다.

$$\Delta \sigma(t) = - \left[\frac{N_s^*}{A_c^*} + \frac{M_s^*}{I_c^*} y^* \right] \quad (14)$$

여기서, A_c^* 와 I_c^* 는 크리프-변형단면으로부터 계산된 콘크리트 단면적과 관성모멘트이다.

강재의 총 응력 중 시간의존 변화량은 식 (10)으로부터 구한 강재 응력에 식 (15)로부터 구한 응력을 합하여 산정할 수 있다.

$$\Delta \sigma_s^*(t) = - \left[\frac{N_s^*}{A_c^*} + \frac{M_s^*}{I_c^*} e_{ps}^* \right] n^* \quad (15)$$

따라서, 임의 시간 t 에서의 실제 시간의존 프리스트레스 손실은 다음 식과 같다.

$$\Delta \sigma_s(t) = \sigma_s^*(t) + \Delta \sigma_s^*(t) \quad (16)$$

초기단계 해석 시에는 릴렉세이션에 의한 영향을 제외하여 단지 크리프와 건조수축에 의한 프리스트레스 손실을 계산하며, 다음 단계에서 릴렉세이션 감소계수(χ_r)를 구하여 식 (9)에서 식 (16)까지의 단계를 반복과정을 거쳐 시간의존 프리스트레스 손실의 총합을 산정한다.

릴렉세이션 감소계수는 고성능 콘크리트의 크리프, 건조수축에 의한 프리스트레스 손실과 릴렉세이션에 의한 손실의 상호 연관성을 고려하여 산정한다. 이를 위해 Ghali 등¹⁶⁾이 제안한 식을 도입하여, 다음 식과 같게 고려하였다.

$$\chi_r = e^{(-0.67 + 5.3 \frac{f_{pj}}{f_{pu}}) \Omega} \quad (17)$$

여기서, Ω 는 크리프 및 건조수축에 의한 손실과 초기 프리스트레스와의 비이며, f_{pj} 와 f_{pu} 는 각각 프리스트레싱 강재의 초기 응력과 극한 강도이다.

따라서, 임의시간 t 에서 최종 축변형률과 곡률에 관한 관계식은 각각 식 (18) 및 식 (19)와 같다.

$$\varepsilon(t) = \frac{N_0}{A_c' E(t)} [1 + \phi(t, t')] + \varepsilon_{sh}(t, t') \\ - \frac{N_s^*}{A_c^* E(t')} [1 + \chi(t, t') \phi(t, t')] \quad (18)$$

$$\kappa(t) = \frac{M_0}{I_c' E(t)} [1 + \phi(t, t')] \\ - \frac{M_s^*}{I_c^* E(t')} [1 + \chi(t, t') \phi(t, t')] \quad (19)$$

여기서, A_c' 와 I_c' 는 계수비 n_0 로 변환된 콘크리트의 단면적 및 관성모멘트이다.

3.2 시간-단계법(Time-Step Method)

시간-단계법은 전체 시간을 정해진 범위를 가지고 증가하는 여러 시간단계들로 나누어 시간의존 해석을 수행함으로써 불규칙적으로 결정된 응력이나 변형이력의 문제를 해결하는데 사용된다. 본 연구에서 사용된 Molinas-Vega(1988)법에 의한 시간-단계법은, 콘크리트 탄성계수의 시간의존적 변화와 시간-단계동안 변형에 대한 자중 및 크리프 회복 효과를 계산한 Nilson¹⁷⁾법의 수정 제안 식으로써, 임의의 시간 t_n 에서 프리스트레스힘과 자중에 의한 곡률은 다음 식과 같다.

$$\kappa_2(t) = - \frac{(P_i e_x + M_{x,sw})}{E_i I_c} + \sum_{j=1}^n (P_{j-1} - P_j) \frac{e_x}{E(j) I_c} \quad (20)$$

$$- \sum_{j=1}^n \left[\frac{\phi_j}{E(j)} - \frac{\phi_{j-1}}{E(j-1)} \right] \frac{(P_i e_x + M_{x,sw})}{I_c} \\ + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{n-1} \left[\frac{(\phi)_{j,k} (\phi_R)_{j,k}}{E(j)} - \frac{(\phi)_{j-1,k} (\phi_R)_{j-1,k}}{E(j-1)} \right] \\ \cdot (P_{j-1} - P_j) \frac{e_x}{I_c}$$

여기서, P_i = 탄성 단축 손실 후 초기 프리스트레스 힘
 $M_{x,sw}$ = 자중에 의한 경간 임의의 점 x 에서의 모멘트
 ϕ_j, ϕ_{j-1} = 손실 후 하중적용시 동일시간-단계 시 · 종점에서의 크리프계수
 $\phi_{j,k}$ = k 번째 시간간격에 하중적용(제거)시 j 번째 시간 간격의 크리프계수
 $(\phi_R)_{j,k}$ = k 번째 시간간격에 하중제거시 j 번째 시간간격의 크리프 회복계수

3.3 고성능 콘크리트 부재의 장기거동예측을 위한 해석 알고리즘

상기한 내용을 포함하여 본 연구에서 제시된 프리텐션 고성능 콘크리트 부재의 시간의존거동 예측에 관한 단계-합수법과 시간-단계법의 해석 알고리즘은 각각 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다.

4. 해석 예 및 결과 고찰

4.1 적용 모델

고성능 콘크리트 프리텐션 부재의 시간의존 해석 예를

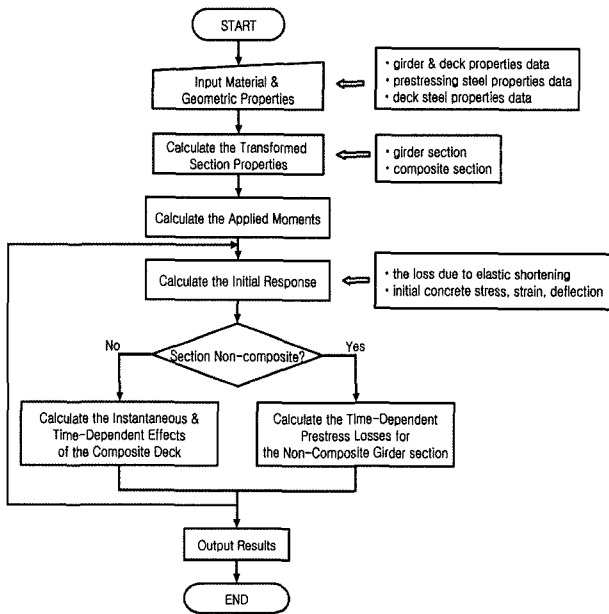


Fig. 1 Flowchart for step-function method

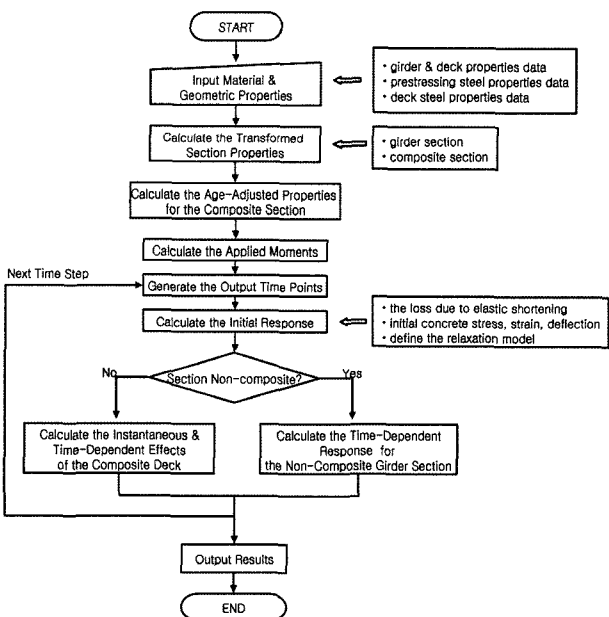


Fig. 2 Flowchart for time-step method

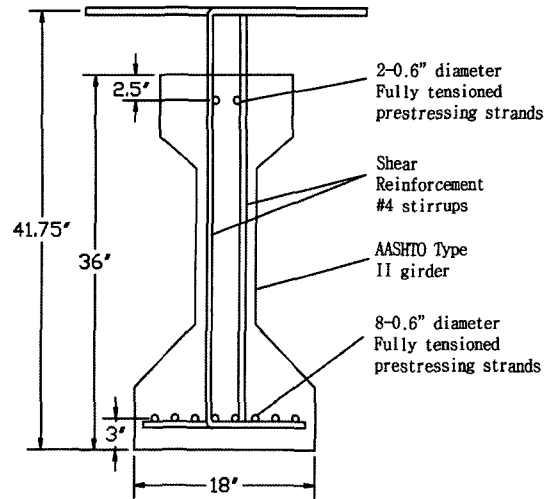


Fig. 3 Typical cross-section of an AASHTO type II girder

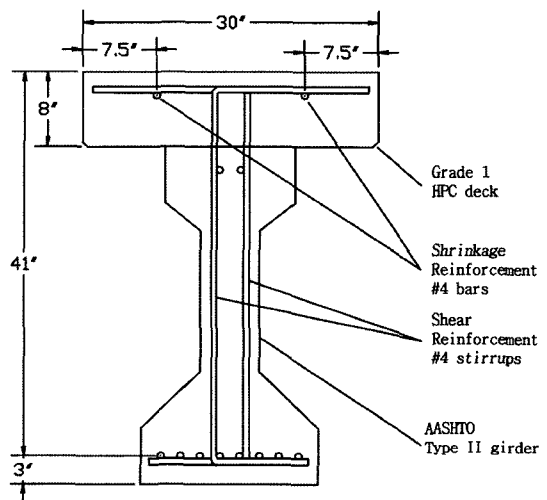


Fig. 4 Typical cross-section of an AASHTO Type II girder and composite deck

통하여 수정·제안된 예측모델의 타당성을 실험 모델과 비교 및 검증토록 하였다. 본 연구에 적용된 고성능 콘크리트 부재는 총연장 10,200 mm의 AASHTO Type II 거더 Grade 2와 Grade 4 모델이다. 재령 58일 콘크리트 설계압축강도는 각각 69 MPa 및 96.5 MPa이고, 7연선의 저릴렉세이션인 직경 15 mm인 강선 8개로 구성된 10 Grade 270-프리텐션 거더를 적용하였다. 합성단면 거더 상부바닥판은 재령 58일 콘크리트 설계압축강도 48.3 MPa인 Grade 1

Table 2 Gross-sectional properties

Gross-sectional properties	
A (in ²)	369
I (in ⁴)	50,979
y_t (in)	20.2
y_b (in)	15.8
S_t (in ³)	2,527.4
S_b (in ³)	3,220.5

Table 3 Transformed-sectional properties

Transformed-sectional properties		
HPC	Grade 2	Grade 4
A (in ²)	555	536
I (in ⁴)	124,180	119,688
y_i (in)	20.1	21.1
y_b (in)	23.9	22.9
S_i (in ³)	6,186	5666
S_b (in ³)	5,191	5232

인 HPC 철근콘크리트로 구성되어 있다. 적용모델의 총단면 및 변형된 합성단면의 제원은 Fig. 3, Table 2 및 Fig. 4, Table 3에 나타난 바와 같다.

4.2 단계-함수법에 의한 프리스트레스 손실 및 캠버 산정

단계-함수해석과정은 Dilger(1982)에 의해 개발된 크리프-변형단면 해석에 근거하였고, Bazant(1972)의 재령보정 콘크리트 탄성계수, AASHTO-LRFD(2004)의 강제 순회렉세이션계수, Ghali와 Trevino¹⁶⁾의 강제 릴렉세이션 감소계수와 본 연구에서 소개된 고성능 콘크리트의 크리프계수 및 건조수축 변형률에 관한 식들을 포함하여 수행된다. 합성단면 바닥판은 ACI Committee 209(1992)의 콘크리트 크리프 및 건조수축 모델을 적용하였다. 하중으로는 거더 자중, 프리스트레스 힘 및 합성 후 재하되는 거더 상부의 바닥판 자중을 고려하였으며, 거더의 최대 인장응력은 콘크리트 인장강도를 초과하지 않는 것으로 가정하였다.

4.3 시간-단계법에 의한 프리스트레스 손실 및 캠버 산정

시간-단계해석법에 의한 고성능 콘크리트 프리텐션 부재의 해석과정은 비합성단면 해석은 Molinas-Vega(1988)의 제안식을 사용하였으며, 합성단면 해석은 재령계수를 생략한 Dilger(1982)법을 사용하였으며, 해석과정에서 Bazant(1972)의 재령보정콘크리트 탄성계수, AASHTO-LRFD(2004)의 강제 순회렉세이션계수와 본 연구에서 소개된 고성능 콘크리트에 관한 크리프계수 및 건조수축 변형률의 관계식들이 포함된다. ACI Committee 209(1992)의 크리프, 건조수축 모델을 사용하여 합성단면 바닥판의 시간의존 해석을 수행하였다.

하중으로는 거더자중, 프리스트레스 힘 및 합성 후 재하되는 거더상부의 바닥판 자중을 고려하고, 거더의 최대 인장응력은 콘크리트 인장강도를 초과하지 않는 것으로 가정하였다.

4.4 결과 검증 및 고찰

적용된 고성능 콘크리트 프리텐션 거더 G2A, G2B, G4A 및 G4B 부재 4가지 모델에 대한 총 시험 측정기간

Table 4 Comparison of initial camber

Girder No.	Initial camber (in)			
	Measured	Predicted		Difference
G2A	0.208	Proposed model I	0.215	5%
	0.208	Proposed model II	0.213	4%
	0.208	AASHTO method	0.218	6%
G2B	0.19	Proposed model I	0.217	14%
	0.19	Proposed model II	0.215	13%
G4A	0.187	Proposed model I	0.193	3%
	0.187	Proposed model II	0.192	3%
G4B	0.193	Proposed model I	0.193	0%
	0.193	Proposed model II	0.192	0%

Table 5 Comparison of prestress losses

Girder No.	Initial losses (ksi)			
	Measured	Predicted		Difference
G2A	10.32	Proposed model I	9.596	7%
	10.32	Proposed model II	9.259	10%
	10.32	AASHTO method	9.557	7%
G2B	9.67	Proposed model I	9.702	0%
	9.67	Proposed model II	9.362	3%
G4A	9.13	Proposed model I	8.637	5%
	9.13	Proposed model II	8.331	9%
G4B	9.33	Proposed model I	8.637	7%
	9.33	Proposed model II	8.331	11%
Girder No.	Time-dependent losses (ksi)			
	Measured	Predicted		Difference
G2A	13.55	Proposed model I	12.006	11%
	13.55	Proposed model II	11.455	15%
	13.55	AASHTO method	26.229	48%
G2B	12.84	Proposed model I	11.809	8%
	12.84	Proposed model II	10.690	17%
G4A	10.79	Proposed model I	10.374	4%
	10.79	Proposed model II	9.881	8%
G4B	11.24	Proposed model I	10.692	5%
	11.24	Proposed model II	10.095	10%

은 각각 275, 250, 324 및 318 일이며, 상부바닥판 합성 시점은 콘크리트 타설 시점으로부터 49, 55, 78 및 85 일이며, 예측모델의 측정기간은 단계-함수법의 경우 349일, 시간-단계법의 경우 300일로 각각 동일하게 적용하였다.

본 연구에서는 고성능 콘크리트부재의 시간의존 거동 예측을 위해 제안된 개선된 AASHTO 수정모델을 적용한 단계-함수법(이하 제안모델 I) 및 시간-단계법(이하 제안모델 II)에 의한 결과와 기존 AASHTO모델을 적용한 단계-함수법에 의한 결과(이하 AASHTO모델)를 실제 시험 측정치와의 비교를 통해 제안모델 I, II의 타당성을 검증하였다.

타당성 검증을 위해 사용된 시험측정치는 Shams¹²⁾의 시험결과 데이터를 사용하였다.

· 제안모델 I: 개선된 AASHTO 수정모델 + 단계-함수법

· 제안모델 II: 개선된 AASHTO 수정모델 + 시간-단계법
 · AASHTO 모델 : 기존 AASHTO(2004) 모델 + 단계-함수법
 Table 4는 G2A, G2B와 G4A, G4B 부재에 대한 초기 처짐 결과로서, 전술한 바와 같이 제안모델 I, II와 AASHTO 모델에 의한 초기캠버 예측치와 실험에 의한 초기캠버 측정치를 나타낸 것이다. G2B 부재의 경우 최대 14% 정도의 예측 오차를 보였으나, 나머지 모델들은 6% 이내의 양호한 결과를 보였다.

Table 5는 프리스트레스 손실에 관한 초기손실 및 장기 손실의 예측치와 실험에 의한 측정치를 제시한 것이다. 초기 손실에 관한 예측치의 편차는 11% 이내의 결과를 보였으며, 제안모델 I이 제안모델 II에 비해 3~4% 정도 측정치에 근접한 결과를 보였다. 장기 손실에 대한 예측에 있어서는 측정치와의 편차가 제안모델에 의한 방법이 4~17% 미만으로서, 기존 AASHTO 모델에 의한 크리프 및 건조수축규정을 적용한 장기거동 예측치의 편차 48%에 비해 매우 정확한 결과를 제공해 주었다. 장기손실의 결과에서도 제안모델 I이 제안모델 II에 비해 보다 정확한 결과를 보였다.

Fig. 5는 G2A 실험 부재의 시간에 따른 장기거동에 따른 캠버(upward deflection)의 실험 및 예측치를 제시한 것이다. 제안모델 I, II의 시간의존 예측치는 거의 동일한 결과를 제공하고 있으며, 실험치와도 매우 일치하는 예측값을 나타내고 있다. 재령 274일에서의 캠버 결과를 비교할

때 제안모델 I, II는 각각 0.198 in, 2.13 in로 측정값 0.208 in와 5%이내의 정확한 값을 예측했다. 반면, 기존 AASHTO 모델에 의한 장기거동 예측 결과는 0.513 in로서 실제 거동과 큰 차이를 보였으며, 일반적으로 프리스트레스 부재는 재령이 증가함에 따라 프리스트레스 손실이 증가하고 캠버는 점차 감소하게 되지만 AASHTO 모델의 해석결과는 캠버가 증가하는 것으로 예측하고 있다. 이는 프리텐션의 경우 초기 재하시점과 건조시점(약 24시간 이내)의 성숙도와 부재의 실제거동 시험결과에 근거한 크리프의 습윤양생효과에 의한 성숙도로부터 초기 변형의 정확한 예측이 요구되어지는데 기존 AASHTO(2004)에서는 건조시점의 성숙도에 대한 정밀식을 제시하고 있지 않으며 극한 크리프계수와 동일한 시간계수를 2.5로 가정하고 있으나 고성능 콘크리트 Grade 2와 4의 경우 0.85와 0.79로서 큰 차이를 보이며 이러한 과도한 시간계수의 사용은 합성단계의 영향을 정확히 고려할 수 없으며 단순히 시간함수의 증분으로 예측함으로써 실제 거동과 큰 차이를 보이며 거동양상 또한 반대로 예측하고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 G2A 실험 부재의 시간에 따른 프리스트레스 손실에 관한 예측 및 실험치를 도시화한 것이다. 제안모델 I, II의 시간의존 거동은 실험에 의한 측정값을 잘 예측해 주고 있으나, AASHTO 모델에 의한 예측치는 시간이 지남에 따라서 실험치와 크게 차이를 보이는 것으로

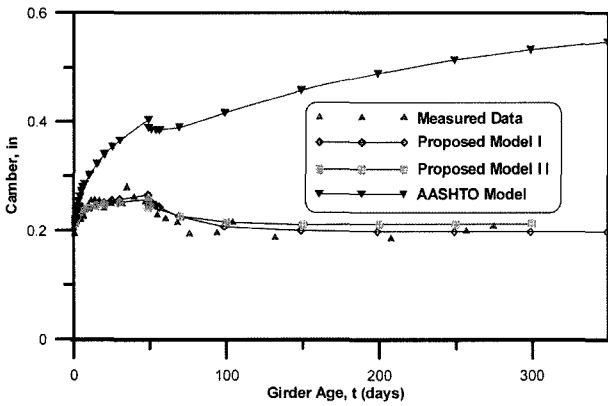


Fig. 5 Comparison of the camber for girder G2A

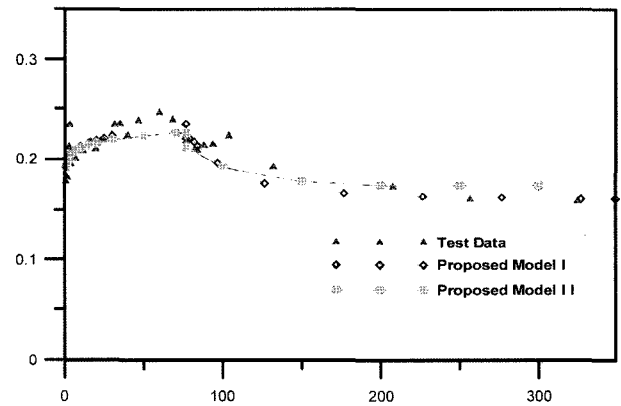


Fig. 7 Comparison of the camber for girder G4A

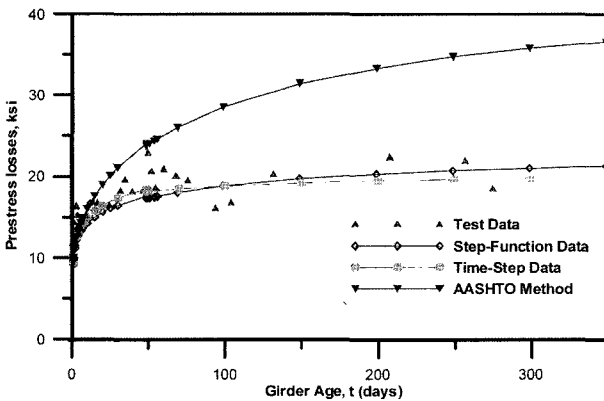


Fig. 6 Comparison of prestress losses for girder G2A

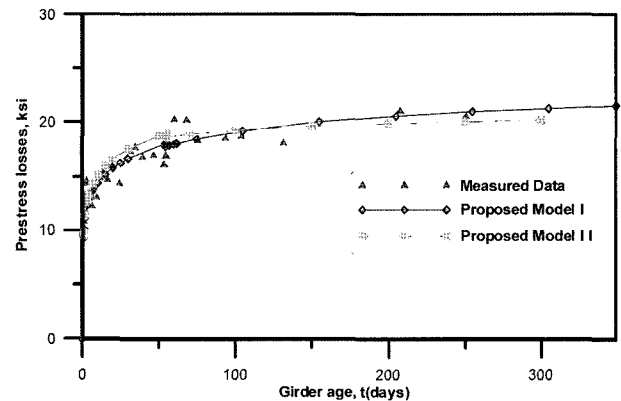


Fig. 8 Comparison of prestress losses for girder G2B

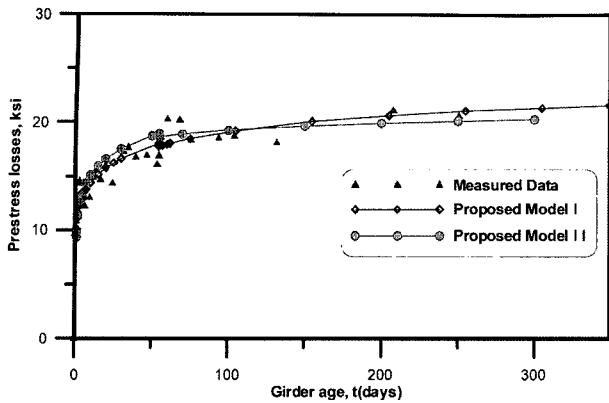


Fig. 9 Comparison of the camber about the modulus of elasticity(girder G2A)

나타났다. 이러한 결과는 Fig. 5의 결과분석과 동일한 원인에서 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 7 및 Fig. 8은 G4A 실험 부재 및 G2B 실험 부재 각각에 대한 장기 처짐 및 프리스트레스 손실에 대한 실험치와 본 연구에서 제시된 두 가지 수학적 해석기법에 의한 예측치와의 비교를 나타낸 것이다. 각각의 경우에서 고성능 콘크리트를 사용한 프리텐션 부재의 장기거동 예측을 시간의 변화에 상관없이 비교적 잘 예측해 주는 것으로 평가되었다.

Fig. 9는 본 연구에서 소개된 고성능 콘크리트에 대한 Shams의 탄성계수 제안식과 ACI 363에서 제시하는 고강도 콘크리트에 대한 탄성계수 제안식을 각각 적용하여 장기거동 해석을 수행하여 실험에 의한 측정값과 비교한 것이다. ACI 363 탄성계수식은 초기 처짐에 예측에 있어서는 0.194 in 로서 편차 5%로 비교적 양호한 값을 보였으나, 장기 처짐의 예측값이 0.172 in, 편차 14%로 Shams의 탄성계수식에 의한 1% 이내의 편차에 비해 큰 오차를 보였다. 이러한 결과는 거더(G2B, G4A, G4B)모델에서도 동일한 결과를 보였다.

따라서, 고성능 콘크리트의 장기거동 예측에 있어서는 기존 AASHTO 모델이 정확한 예측치를 제공해 주지 못하며, 본 연구에서 소개된 모델이 비교적 타당한 예측치를 주는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 고성능 콘크리트를 사용한 프리텐션 부재의 시간의존거동 예측에 관한 연구로서, 고성능 콘크리트의 크리프, 건조수축 및 강재의 릴렉세이션을 고려한 시간의존거동 예측을 위해 기존의 AASHTO 방법을 수정하고, 단계-함수 및 시간-단계의 수치해석기법을 사용한 시간의존해석 프로그램을 구성하였다. 그 결과를 실제 시험 측정값과 비교·검증한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

AASHTO-LRFD(2004) 규정에 의한 시간의존거동 해석과 비교해서, 고성능 콘크리트의 시간의존 예측을 위해

제안 수정된 모델은 고성능 콘크리트를 사용한 프리텐션 부재의 초기 및 시간의존거동 예측에 있어서 실제 거동과 매우 일치하는 결과를 제공해 주었다. 시간의존거동 예측을 위한 수학적 해석기법 중 단계-함수법에 의한 해석결과가 시간-단계법에 의한 결과보다 실험치에 더욱 근접한 결과를 보였다.

ACI Committee 363의 탄성계수식에 비해 본 연구에서 적용한 Shams의 탄성계수 제안 식이 실제 시간의존거동에 더욱 근접하는 예측결과를 제공하였다.

따라서, 본 연구를 통해 소개된 AASHTO수정모델과 수치해석기법인 단계-함수법을 사용함으로써 고성능 콘크리트 프리텐션부재의 해석시 기존 모델에 비해 실제거동에 근접한 시간의존 해석결과를 얻을 수 있으며, 설계의 불확실성 배제 및 경제성확보에 기여할 것으로 판단된다.

향후, 국내에서 실규모 부재 모형의 고성능 콘크리트 부재에 관한 시간의존거동 시험을 실시하여 이에 관한 많은 자료의 수집·분석과 더불어, 현장에서 사용가능 하도록 국내용 고성능 콘크리트 부재에 관한 시간의존거동의 설계기준 확립이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 두뇌한국21산업에 의하여 지원되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 윤영수, “고성능 콘크리트의 재료, 구조 설계 및 시공의 체계적 실용화 기술 개발,” 대한토목학회지, Vol.52, No.10, 2004년 10월. pp.39~46.
2. 김세훈, 오병환, “크리프 회복 거동을 고려한 철근콘크리트 및 프리스트레스트 콘크리트 부재의 장기거동해석에 관한 연구,” 콘크리트학회 논문집, Vol.10, No.1, 1999, pp.279~288.
3. 조창근, 박문호, 남유석, “PSC 세그먼트 박스거더형 사장교의 시간의존해석모델,” 대한토목학회 논문집, Vol.25, No.3A, 2005, pp.471~478
4. Huo, X., and Tadros, M. K., Time-Dependent Effects in Prestressed Concrete Composite Bridge Members, High Strength Concrete, First International Conference, edited by Azizinamini, A., Darwin, D., and French, C., ASCE, 1997, pp.308~320.
5. Mokhtarzadeh, A., and French, C. E., Mechanical Properties of High-Strength Concrete, Research Report 1988-11, Center of Transportation Research, The University of Minnesota, 1998, 595pp.
6. US Department of Transportation, Federal Highway Administration(FHWA) *High Performance Concrete Structural Designer's Guide*, First Edition, March, 2005, 120pp.
7. AASHTO, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, *Third Edition, AASHTO*, Washington D.C., 2004.
8. Dilger, W. H., Creep Analysis of Prestressed Concrete Structures Using Creep-Transformed Section Properties, *PCI Jour-*

- nal, Vol.27, No.1, January-February, 1982, pp.98~117.
9. Molinas-Vega, J. P. I., Time-Step Analysis of Prestressed Concrete Beams: Prestress Losses, Camber, and Deflection, MS Thesis, *Department of Civil and Environmental Engineering*, University of Iowa, 1988. 137pp.
 10. Lai, J., Kahn, L., Travis, D., Champeny, M., Prada, J., Shams, M., and Saber, A., *Mix Design and Properties of High-Performance Concrete*, Final Report to Georgia DOT, Project No.9510, March 1999.
 11. ACI Committee 363, *State-of-the-Art-Report on High-Strength Concrete, ACI Manual of Concrete Practice(ACI 363R 92)*, American Concrete Institute, 1992. 49pp.
 12. Shams, M., *Time-Dependent Behavior of High-Performance Concrete*, Ph. D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, May 2000. 584pp.
 13. Bazant, Z. P., "Prediction of Creep Effects using Age-Adjusted Effective Modulus Method," *ACI Journal*, Vol.69, 1972, pp.212~217.
 14. PCI, *PCI Design Handbook, Fifth Edition*, Precast and Prestressed Concrete Institute, 1999. Chap. 8.
 15. Tadros, M. K. and Ghali, A., *Deflection of Cracked Prestressed Concrete Members*, ACI Special Publication SP-86, Deflection of Concrete Structures, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1986, pp.137-166.
 16. Ghali, A., and Trevino, J., "Relaxation of Steel in Prestressed Concrete," *PCI Journal*, Vol.30, No.5, Sept. Oct., 1985, pp.82~94.
 17. Nilson, A. H., *Design of Prestressed Concrete, 2nd Edition*, John Wiley and Sons, New York, 1987, 592pp.

요 약 본 연구는 고성능 콘크리트를 사용한 프리텐션 콘크리트 부재에 대한 시간의존거동해석에 관한 연구이다. 일반 콘크리트의 크리프, 건조수축 및 강재의 릴렉세이션 현상에 대한 기존의 AASHTO 방법을 수정하여, 고성능 콘크리트 부재에 대한 단계-함수법 및 시간-단계법에 의한 시간의존 해석기법을 소개하였다. 제시된 모델은 고성능 콘크리트 프리텐션 부재의 프리스트레스 손실 및 처짐에 대한 초기 및 시간의존거동 예측 값을 제공해 준다. 제안된 모델을 이용하여, 고성능 콘크리트를 사용한 프리텐션 부재의 시간의존거동에 관한 실험 결과와 비교하였다. 기존의 AASHTO 규정에 의한 시간의존 거동 예측치에 비해, 소개된 모델에 의한 고성능 콘크리트 부재의 초기 및 시간의존거동 예측결과가 실제 거동에 보다 정확한 결과를 제공해 주었다.

핵심용어 고성능 콘크리트(HPC), 시간의존해석, 프리텐션부재