

# 합성구조물의 장기거동에 관한 연구

## A Study for the Long Term Behavior of Steel-Concrete Composite Structures

김진근\*                      어석홍\*\*                      김윤용\*\*\*  
Kim, Jin Keun              Eo, Seok Hong              Kim, Yun Yong

### ABSTRACT

In this study, analytical methods for predicting the long term behavior of steel-concrete composite structures due to creep and shrinkage of concrete are investigated.

For structural analysis considering long term behavior, the results are much dependent on the predictive models for creep and shrinkage of concrete which are ACI model, CEB-FIP model and BP model and the methods for the time analysis of structures which are AEMM, RCM and IDM. To demonstrate the validity of the program which was developed for this study, a steel-concrete composite column subjected to constant axial deformation was tested, and the experimental results were compared with analytical results.

It was found that stresses are redistributed between concrete and wide flange steel, and analytical results by ACI model and IDM well predict the experimental data.

### 1. 서    론

가장 대표적인 건설재료는 콘크리트와 강재로서 현대의 모든 구조물은 이 2가지 재료를 이용하여 건설된다. 최근까지는 강구조 혹은 철근콘크리트 구조물이 주로 사용되는 구조시스템이었으며 그에 반하여 본 연구의 대상 구조물인 강재-콘크리트 합성구조(composite structure)의 사용은 다소 드물었다. 재료의 특성을 최대한 유용하게 활용하면서 비용을 절감시키기 위하여 합성구조를 선택하는데 주로 압축부에는 콘크리트를, 인장부에는 강재를 사용한다.

본 연구의 주된 목적은 이러한 시간의존적 재료특성을 파악하여 보다 정확한 해석이 가능하도록 해석 프로그램을 개발하는 것이다.

### 2. 본    론

#### 2.1 크리이프 및 건조수축 예측 모델

일반적으로 콘크리트의 장기거동 예측 모델식은 식(1)의 멱급수형 표현식과 식(2)와 같은 지수형 표현식, 그리고 식(3)과 같은 쌍곡선형 표현식 등이 있다[ 1~4].

\* 한국과학기술원 토목공학과 교수

\*\* 창원대학교 토목공학과 전임강사

\*\*\* 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

$$\phi(t, \tau) = \alpha(t-\tau)^\beta \text{(Straub, 1930)} \quad (1a)$$

$$\phi(t, \tau) = \alpha(t-\tau)^\beta \tau^\gamma \text{(Bazant \& Osman, 1976)} \quad (1b)$$

$$\phi(t, \tau) = \alpha [1 - e^{-\beta(t-\tau)^\beta}] \text{(Thomas, 1933)} \quad (2)$$

$$\phi(t, \tau) = \frac{(t-\tau)}{\alpha + \beta(t-\tau)} \text{(Ross, 1937)} \quad (3)$$

ACI 모델식은 급수형과 쌍곡선형의 조합에 의한 식이며 다음의 식(4)와 같다[5].

$$\phi(t, \tau) = \frac{(t-\tau)^{0.6}}{10 + (t-\tau)^{0.6}} \phi^* \quad (4)$$

여기서, t는 측정하고자 하는 시간,  $\tau$ 는 하중이 작용하는 시간을 각각 나타낸다. 한편, 공시체가 시간  $t_0$  에서 공기중에 노출되었을 때, 시간 t 에서의 건조수축량은 다음 식(5)와 같이 표현된다.

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \frac{(t-t_0)}{a + (t-t_0)} \varepsilon_{sh}^* \quad (5)$$

여기서, a 는 콘크리트의 양생조건에 따른 상수로서 7일간 수중양생인 경우 35, 1~3일간의 증기양생인 경우에는 55를 각각 사용한다. 그리고  $\varepsilon_{sh}^*$  는 극한 건조수축값으로  $\phi^*$  와 마찬가지로 외부환경 및 배합조건에 따라 변한다.

한편, BP 모델[6]은 다양한 인자와 물리적 의미를 변수로 두어 수식이 상당히 복잡한 모델식이다. 제안된 건조수축에 관한 모델식은 다음의 식(6)과 같다.

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = K_h \varepsilon_{sh}^* \left[ \frac{(t-t_0)}{\tau_{sh} + (t-t_0)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

BP 모델에서는 크리이프에 관한 모델을 기본 크리이프와 건조 크리이프 등의 2가지 경우로 나누어 제안하였다. 즉 BP 모델은 건조 상태에서 발생하는 크리이프 변형량이 건조수축량과 크리이프양의 산술적인 합보다 크게 나타나는 현상(피켓효과)을 건조 크리이프 모델식에 의하여 표현하였다.

이 모델에 의한 기본 크리이프의 크리이프

함수는 다음과 같다.

$$J(t, \tau) = \frac{1}{E_o} + \frac{\phi_1}{E_o} (\tau^{-m} + \alpha)(t-\tau)^n \quad (7)$$

또한, 건조크리이프의 크리이프함수(creep function)는 다음과 같다.

$$J(t, \tau) = \frac{1}{E_o} + C_o(t, \tau) + C_d(t, \tau, t_o) \quad (8)$$

한편, CEB-FIP 모델은 ACI, BP 모델과는 달리 모든 매개변수들을 그래프를 사용하여 결정함으로써 각 함수값과 계수를 구하도록 되어 있다. 그러나 본 연구에서는 해석 프로그램을 개발하기 위하여 기존의 그래프로부터 제안된 여러 경험식을 사용하였다.

CEB-FIP 모델에 의한 시간 t 에서의 평균 건조수축량은 다음과 같다.

$$\varepsilon_{sh}(t, t_o) = \varepsilon_{sho} [ \beta_{sh}(t) - \beta_{sh}(t_o) ] \quad (9)$$

또한 이 모델에서 정의된 크리이프계수  $\phi(t, \tau)$ 는 앞의 두 모델과 달리 재령 28일의 순간(탄성)변형에 대한 크리이프의 비이다. 따라서 시간 t에서 건조수축을 제외한 총변형도는 다음 식으로 표현된다.

$$\varepsilon(t, \tau) = \sigma_o \left[ \frac{1}{E_{c(\tau)}} + \frac{\phi(t, \tau)}{E_c(28)} \right] \quad (10)$$

그러므로 일반적인 의미의 크리이프계수로 바꾸려면  $\phi(t, \tau)$ 값에  $E_c(\tau)/E_c(28)$ 을 곱해야 한다. 이 모델에서 정의한 크리이프계수  $\phi(t, \tau)$ 는 다음식과 같다.

$$\phi(t, \tau) = \phi_d \beta_d(t-\tau) + \beta_a(\tau) + \phi_l [ \beta_l(t) - \beta_l(\tau) ] \quad (11)$$

## 2.2 장기거동 해석기법

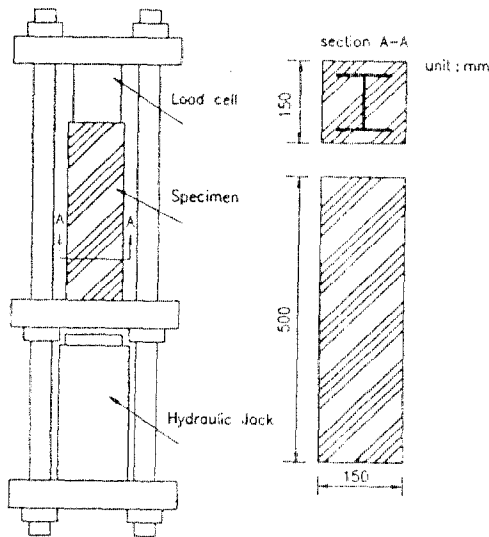
시간에 따른 강재-합성구조의 거동해석을 위한 대표적인 해석법은 다음과 같다.

- o 수정유효탄성계수법(AEMM: Age-adjusted Effective Modulus Method) : 유효탄성계

수법에 재령계수의 개념을 도입하여 크리이프를 해석하는 방법이다.

- o 크리이프율법(RCM; Rate of Creep Method) : 하중재하의 시간과 관계없이 크리이프에 의한 변형도가 재령의 함수라고 가정하는 방법이다.
- o 개선된 Dischinger법(IDM; Improved Dischinger Method) : 크리이프율법의 단점을 보완하여 만들어진 것으로 변형도를 초기탄성변형도, 지연탄성변형도, 소성변형도의 3가지로 나누어 사용하는 기법이다.

### 2.3 합성기둥 실험



(a) relaxation test (c) specimen size

그림 1 실험장치 및 시험체의 상세

해석 프로그램의 검증을 위한 리렉세이션 실험으로서 목표압축강도 350 kg/cm<sup>2</sup>의 시험체를 제작하기 위하여 다음의 표 1과 같은 배합을 선택하여 콘크리트를 제조하였다.

표 1 배합설계

단 위 중 량 (kg/m <sup>3</sup> )				슬럼프 (mm)
시멘트	물	잔골재	굵은골재	
380	190.0	737.6	977.6	115

사용된 강재는 100×100mm 의 H형강으로서 시험체의 길이(500mm)에 맞게 절단하여 사용하였으며 단면적이 21.9 cm<sup>2</sup>이고 인장강도가 약 4,500 kg/cm<sup>2</sup>인 SS 41 제품이다.

실험의 조건은 기본크리이프이었으며 하중재하시기에 측정된 압축강도는 362 kg/cm<sup>2</sup> 으로 나타났다.

### 3. 비교고찰

#### 3.1 합성기둥의 해석결과 및 실험결과

합성기둥 실험에 사용된 실험체를 예제로 개발된 합성기둥 해석 프로그램을 이용하여 모델식에 따른 크리이프 계수 및 건조수축 변형도(그림 2), 콘크리트 및 강재 응력의 경시 변화(그림 3) 등을 비교·분석하였다. 강재와 콘크리트의 시간에 따른 응력 재분배 현상을 보면, 시간이 지남에 따라 콘크리트의 응력은 감소하고 강재의 응력은 점차로 증가하는 현상을 알 수 있다. 재하시점에서( $\tau=63$ 일) 콘크리트의 응력은 129.21 kg/cm<sup>2</sup> 으로 작용하중(45.4 ton)의 약 58%를 부담하고 있었으나 ( $t-\tau=896$ 일 후에 73.77 kg/cm<sup>2</sup> 으로 감소하여 하중분담율이 약 33%로 감소하였다(ACI 모델을 사용하고 AEMM 해석법을 이용한 경우). 같은 기간동안 강재의 응력은 초기 874.76 kg/cm<sup>2</sup> 으로 증가하여 하중분담율이 42%에서 67%로 증가하고 있다.

리렉세이션 실험의 결과 최초의 하중(재령 63일)은 45.4 ton 이었으며, 재령 218일 쯤의 하중은 31.83 ton 으로 측정되었다.

그림 4는 ACI 모델식과 각종 해석방법에 의하여 해석적으로 계산된 리렉세이션 예측값과 실험결과를 콘크리트의 응력으로 환산하여 도시한 것으로서 하중분담율을 볼 때, 초기에는 강재가 46%의 하중을 1부담하였으나 재령 218일에는 65%의 하중을 분담하는 것으로 실측되었다.

그림 5는 콘크리트-강재 합성기둥과 무근 콘크리트 기둥이 초기에 같은 하중을 받고 있

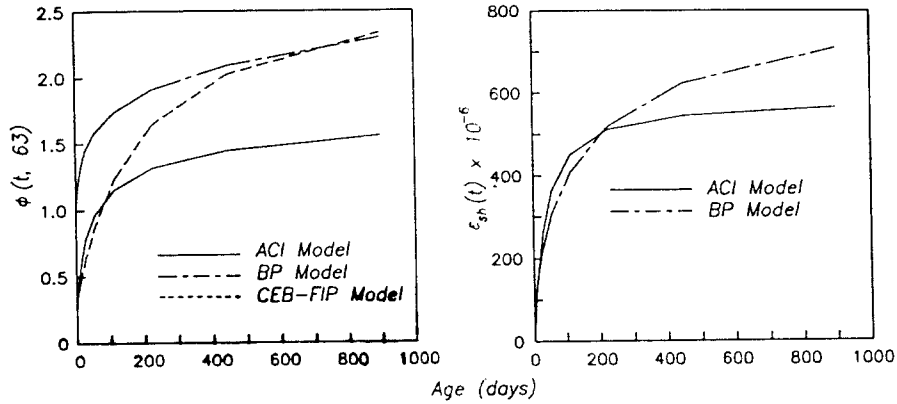


그림 2 크리이프 계수 및 건조수축량의 예측값

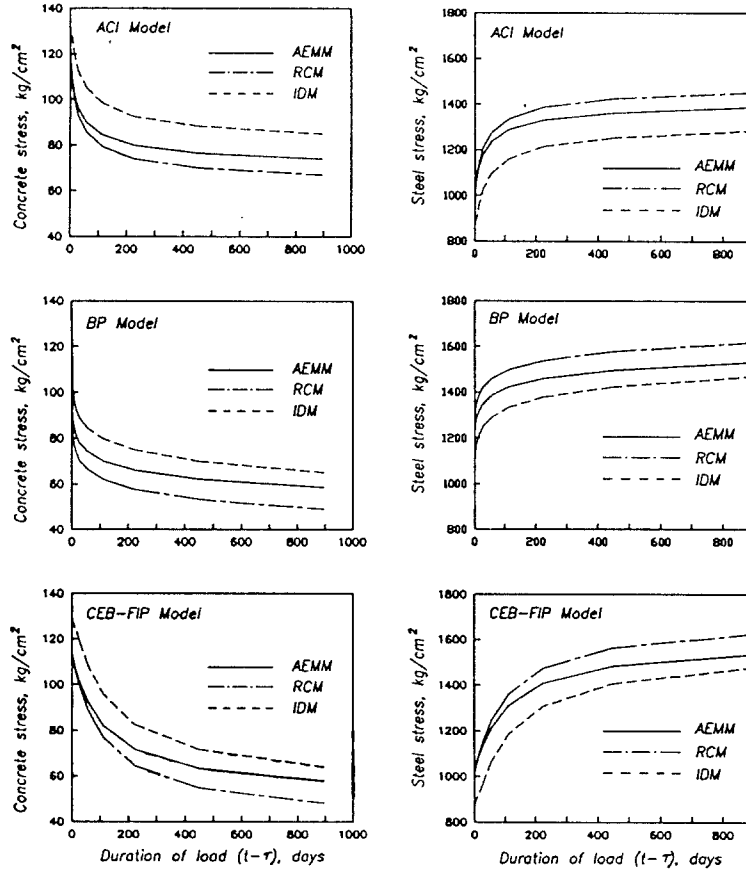


그림 3 콘크리트 및 강재 응력의 경시 변화

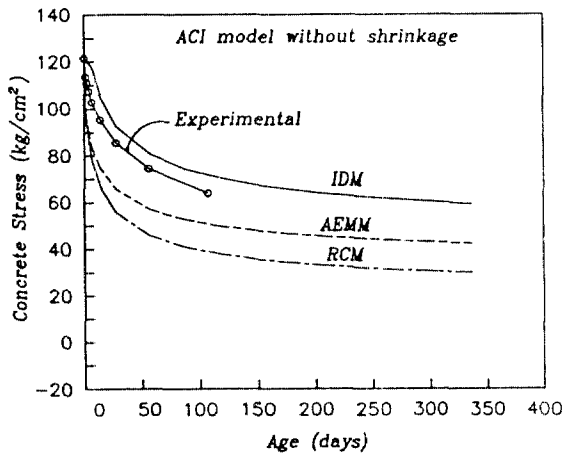


그림 4 해석치와 실험치의 비교

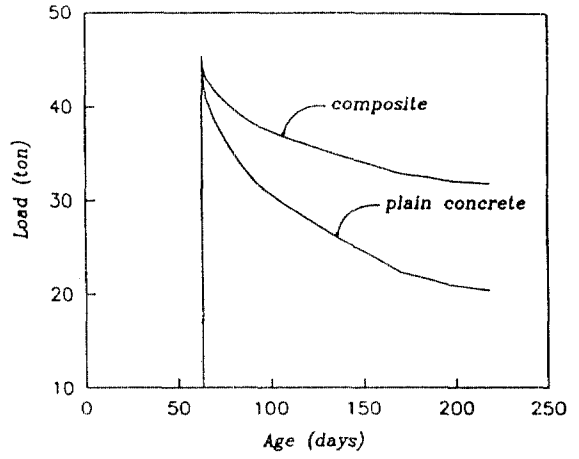
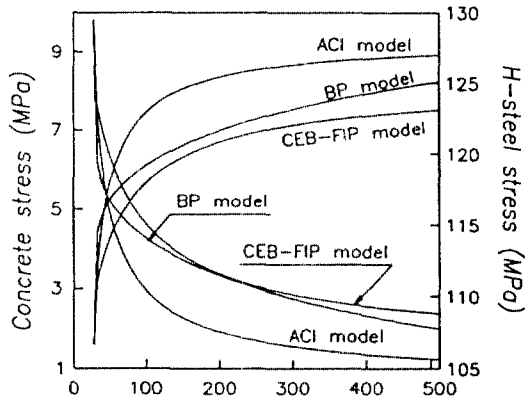
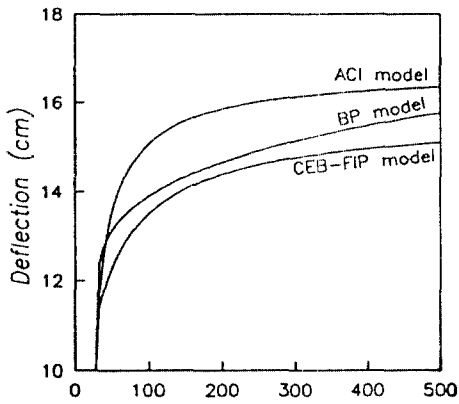


그림 5 합성기둥과 무근콘크리트 기둥의 비교



Time (day)

그림 6 합성보의 처짐, 응력의 시간에 따른 변화

을 경우의 무근콘크리트 기둥에서 리렉세이션 값을 비교 도시한 그림으로서 재령 218일에 합성기둥의 경우 하중의 손실량이 13.6 ton 인 반면 무근 콘크리트의 하중 손실량은 25 ton 으로서 약 84%의 차이를 보이고 있다.

### 3.2 합성보의 해석결과

합성보의 해석은 수정유효탄성계수법(AE MM)을 사용하였으며 예제로서 지간이 10 m 이고 콘크리트와 강재로 이루어진 합성보에서 등분포 하중에 의하여 중앙에서의 휨 모멘트 1.0 MN-m 가 발생하였을 경우의 시간에 따른 해석을 수행한다. 여기서 재령계수( $\chi$ )는 0.8로 가정하였다.

그림 6은 각종 모델식에 의하여 해석된 시간에 따른 처짐의 변화, 콘크리트 최연단에서의 응력변화, 강재의 최하단에서의 응력변화 등을 도시한 것이며 지속적으로 콘크리트의 응력이 재분배되고 있음을 알 수 있다.

### 4. 결 론

1. 사용하중 하에서 크리이프 및 건조수축에 의한 장기거동을 예측하는 해석 프로그램을 개발하기 위하여 ACI 표준식, BP 모델식, CEB-FIP 모델식 등을 사용하였다.
2. 위의 모델식을 이용하여 계산된 크리이프 계수 및 건조수축율을 갖고 AEMM, RCM, IDM 등의 해석법을 이용하는 합성기둥의 해석 프로그램을 개발하였으며 사용자에게 의하여 3가지 해석법을 임의로 선택할 수 있도록 하였다. 해석의 결과에 따르면 콘크리트의 응력은 점차로 감소하고 강재의 응력은 점차로 증가하는 응력의 재분배 현상이 발생하였다.
3. 합성부재의 해석 프로그램을 검증하기 위하여 합성기둥의 리렉세이션 실험을 수행하였다. ACI 표준식과 CEB-FIP 모델식을 사용하고 AEMM과 IDM을 이용한 해석 결과가 실측치에 근접한 값을 예측하는 것으

로 나타났다.

### 감사의 글

본 연구는 1993년도 (주)포항제철 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

### 5. 참 고 문 헌

1. Straub, L.G., "Plastic Flow in Concrete Arches", Proc. Am. Soc. of Civil Engineers, 56, January 1930.
2. Bazant, Z.P. and Osman, E., "Double Power Law for Basic Creep of Concrete", Materials and Structures, (RILEM, Paris) 9, No 49, 1976, pp.3-11.
3. Thomas, F.G., "A Conception of the Creep of Unreinforced Concrete and an Estimation of the Limiting Values", The Structural Engineer, 11, No 2, 1933, pp.69-73.
4. Ross, A.D., "Concrete Creep Data", The Structural Engineer, 15, No 8, 1937, pp.314-326.
5. Meyers, B.L., Branson, D.E., Schumann, C.G., and Christiason, M.L., "The Prediction of Creep and Shrinkage Properties of Concrete", Final Report No. 70-5, Iowa Highway Commission, August 1970, 140 pp.f Creep and Shrinkage Properties of Concrete", Final Report No. 70-5, Iowa Highway Commission, August 1970, 140 pp.
6. Bazant, Z.P. and Panula, L., "Practical Prediction of Time-Dependent Deformation of Concrete", Materials and Structures, Research and Testing (RILEM, Paris), Vol.11, No.65, Sept.-Oct. 1978, pp.307-328; V.11, No.66, Nov.-Dec. 1978, pp.415-434; and Vol.12, No.69, May-June 1979, pp.169-183.