

PSC 구조물의 비선형 거동 예측에 관한 해석적 연구

Analytical study on prediction of nonlinear behavior of PSC structures

박 재 근*
Park, Jae Guen

오 명 석**
Oh, Myung Seok

최 정 호***
Choi, Jung Ho

신 현 목****
Shin, Hyun Mock

ABSTRACT

This paper presents an analytical prediction of nonlinear characteristics and behavior characteristics PSC structures with un-bonded tendon system. In this paper, a numerical model for un-bonded tendon is proposed based on the finite element method, which can represent straight or curved un-bonded tendon behavior. this model and time-dependent material model used to investigate the time-dependent behavior of un-bonded prestressed concrete structures. The accuracy and objectivity of the assessment process may be enhanced by the use of sophisticated nonlinear finite element analysis program. A computer program, named RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology), for the analysis of concrete structures and steel plate was used. The material nonlinearities are taken into account by comprising the tension, compression, and shear models of cracked concrete and models for reinforcements and tendons in the concrete. The smeared crack approach is incorporated. It accounts for the aging, creep and shrinkage of concrete and the stress relaxation of prestressed steel. The proposed un-bonded tendon model and numerical method of un-bonded prestressed concrete structures is verified by comparison with reliable experimental results.

1. 서 론

PSC 구조물은 구조적 효율성을 이용하는 대표적인 토목구조물로서 보, 교량, 고층건물, 각종 저장탱크 및 격납구조 등에 다양하게 적용되고 있다. PSC 구조물중 많은 수의 구조물에 비부착된 텐던이 사용되었으며 또한 기존 콘크리트구조물의 보강에 외부 프리스트레스트공법이 많이 사용되고 있다. 이러한 비부착된 텐던은 콘크리트와 일체로 거동하지 않기 때문에 단면의 변형도 적합조건으로 긴장재의 응력을 추정할 수 없으며 구조물의 변형에 영향을 미치기 때문에 이러한 비부착 텐던을 고려할 수 있는 유한요소 프로그램의 개발이 필요하다.

PS 콘크리트 구조물은 구성재료의 재료비선형성과 시간의존적 재료성질로 인하여 다른 구조에 비하여 비선형 특성이 상당히 복잡하다. 이 연구에서는 PS 콘크리트 구조물에 대한 역학적 거동, 즉 탄성

*정회원 · 성균관대학교 토목공학과 박사수료(E-mail: parkjg@skku.edu)

**정회원 · (주)서영엔지니어링 구조설계실 전무, 토목구조기술사

***정회원 · 국립한경대학교 토목공학과 조교수

****정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과 교수

비탄성, 및 파괴에 이르기까지의 하중과 변형의 관계와 균열의 진행, 콘크리트와 철근 및 텐던의 응력과 변형률 등까지를 포함하여 정확히 표현할 수 있는 해석방법을 제시하고 비부착 텐던을 갖는 PSC 구조물의 비선형 해석을 통한 그 거동특성을 파악하고자 한다.

2. 비부착 텐던 모델

비부착 텐던 모델은 콘크리트와 긴장재가 부착되어 있지 않았기 때문에 부재 전체길이의 변형을 고려해야한다.

모체 콘크리트 부재의 도심에서 텐던까지의 편심거리를 그림 1과 같이 $G_2(x_1)$, $G_3(x_1)$ 라 하자.

변형전 비부착 텐던의 위치벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{r}_0(x_1) = x_1 \mathbf{t}_1 + G_2(x_1) \mathbf{t}_2 + G_3(x_1) \mathbf{t}_3 \quad (1)$$

텐던의 위치벡터로 변형전 초기 비부착 텐던의 길이는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$ds_0^2 = d\mathbf{r}_0 \cdot d\mathbf{r}_0 = (\mathbf{t}_1 dx_1 + G_2' \mathbf{t}_2 dx_1 + G_3' \mathbf{t}_3 dx_1) \cdot (\mathbf{t}_1 dx_1 + G_2' \mathbf{t}_2 dx_1 + G_3' \mathbf{t}_3 dx_1) \quad (2)$$

$$\text{따라서, } L^0 = \int \sqrt{1 + (G_2')^2 + (G_3')^2} dx_1 \quad (3)$$

그림 1에서와 같이 단면내 어떤 점에서의 변위성분은 다음과 같은 형식으로 나타낼 수 있다.

$$\hat{\mathbf{u}} = \hat{u}_1 \mathbf{t}_1 + \hat{u}_2 \mathbf{t}_2 + \hat{u}_3 \mathbf{t}_3 \quad (4)$$

$$\text{여기서, } \hat{u}_1 = u_1 + G_3 \omega_2 - G_2 \omega_3, \hat{u}_2 = u_2 - \omega_1 G_3, \hat{u}_3 = u_3 + \omega_1 G_2$$

베르누이의 가정으로 전단변형을 무시하면 변형후 위치벡터와 변형후 텐던의 길이는 다음과 같이 계산된다.

$$\mathbf{r}_t = x_1 \mathbf{t}_1 + (u_1 - G_3 u_3' - G_2 u_2') \mathbf{t}_1 + (u_2 - \theta G_3) \mathbf{t}_2 + (u_3 + \theta G_2) \mathbf{t}_3$$

$$L^t = L^0 + \int \frac{u_1 - G_2 u_2'' - G_3 u_3'' + (G_2 G_3' - G_2' G_3) \theta'}{\sqrt{1 + (G_2')^2 + (G_3')^2}} dx_1 \quad (5)$$

비부착 텐던요소가 n 개의 segment, n+1 개의 절점으로 구성된다고 가정하면 식 (5)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L^t = L^0 + \sum_{k=1}^n \int_0^{l_k} \frac{A_k}{\alpha_k} dx \quad (6)$$

위식들을 이용하여 비부착 텐던요소의 변형률과 강성을 구성할수 있다.

텐던의 재료모델은 텐던의 항복후 거동은 일정한 변형률 경화율을 갖는 것으로 저자 등이 제안한 trilinear 모델을 사용하여 고려하였으며 크립와 건조수축은 보편적으로 이용되고 있는 ACI 209 모델(1992)을 사용할 수 있도록 하였으며 PS 강재의 이완에 의한 손실은 Magura의 식(1964)을 적용하였다.

개발한 비부착 텐던요소는 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소 그리고 탄성요소 등을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)(Kim 등, 2002)에 이식하여 사용하였다.

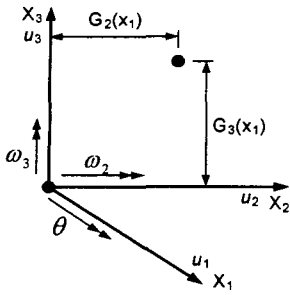


그림 1 변위 성분 묘사

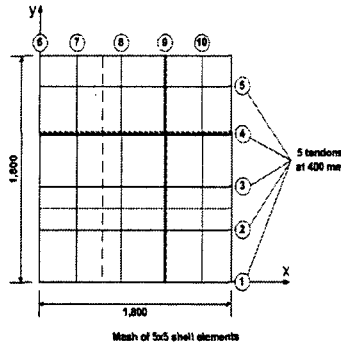


그림 2 2방향 슬래브 모델링

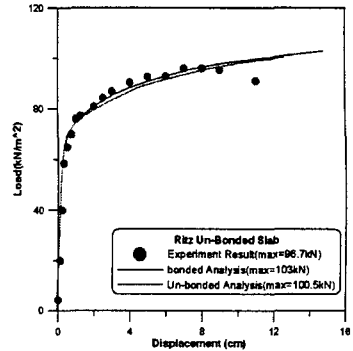


그림 3 2방향 슬래브 해석결과

3. 해석 예 및 고찰

3.1 곡선 배치된 비부착 2방향 슬래브

제시한 비부착 텐던모델과 기존 RC셀 요소와의 조합을 통한 2방향 슬래브의 해석을 통하여 해석과정의 정확성을 검증하기 위해서 Ritz(1975)등이 실험한 2방향 슬래브에 대하여 해석을 수행하였다.

해석은 대칭성을 이용하여 그림 2와 같이 1/4만 모델링 하여 해석을 수행하였으며 하중을 슬래브 전면에 대하여 등분포 하중을 작용하였다. 해석결과는 그림 3에 나타내었다. 실험시 최대 등분포하중은 96.7 kN/m^2 이었으며 비부착 해석시 최대 하중은 100.5 kN/m^2 , 부착 해석시 103 kN/m^2 로 실험결과와 유사하게 나타났으며 그림 3에 나타나듯이 초기 강성, 콘크리트의 균열, 텐던의 항복등을 실제 실험결과를 잘 추적하는 것을 알 수 있다.

3.2 원형 돔 구조물

비부착 텐던 요소의 검증을 위하여 1/4 scale의 원형 돔 구조물(NUREG/CR-6810, 2003)을 선정하였다. 이 실험은 비부착 텐던을 이용한 원형 돔 구조물로서 내압을 이용하여 구조물의 극한강도와 파괴 거동을 조사하기 위한 것으로, 타설후 PS 강재의 긴장 및 내압실험을 하기까지 구조물의 다양한 거동을 측정하였다. 해석에 사용된 콘크리트의 크리프 계수 및 건조수축 변형율은 그림4와 그림5와 같이 최종크리프 계수 3.0과 최종 건조수축 변형율이 8.0×10^{-4} 로 하였다. 시간이력 해석은 그림6과 그림7에서와 같이 해석과 실험결과를 비교하였다. 시간의존적 거동에 의한 구조물의 거동을 실제와 같이 해석한 후 LST실험시와 동일하게 1.295 MPa 까지 내압을 증가시켜 해석을 수행하였으며 벽체 높이 $6,200 \text{ mm}$ 에서의 결과는 그림 8에 원형 돔 최상부에서 결과는 그림 9 나타내었으며 해석결과는 실험결과를 잘 추적하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

이 연구에서는 저자 등이 제안한 비부착 텐던 모델을 이용하여 비부착 텐던 구조물의 비선형 거동 특성의 예측을 위한 해석기법과 모델을 제시하였고, 제안된 해석기법과 모델을 적용한 유한요소해석 프로그램을 사용하여 비부착 텐던을 사용하여 만들어진 PSC 구조물을 선택하여 해석 및 실험결과를 비교·검증함으로써 제시한 해석방법에 의해 비부착 텐던을 갖는 PS 콘크리트 구조물의 시간의존적

거동을 포함한 비선형 거동을 상당한 정확도로 해석할 수 있음을 보였으며, 각종 비부착 텐던을 갖는 콘크리트 구조물의 해석에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

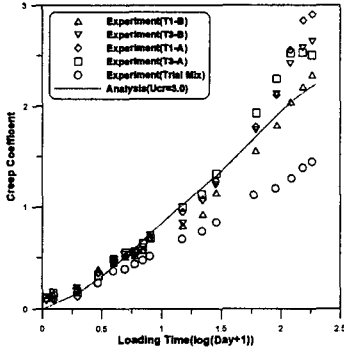


그림 4 크리프 계수

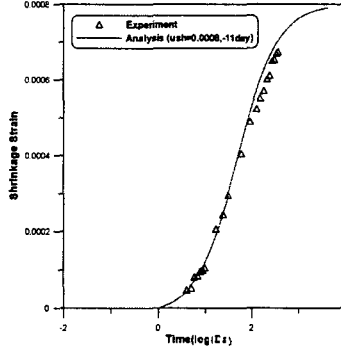


그림 5 건조수축 변형률

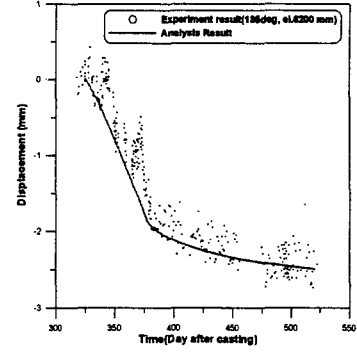


그림 6 해석과 실험 비교(1)

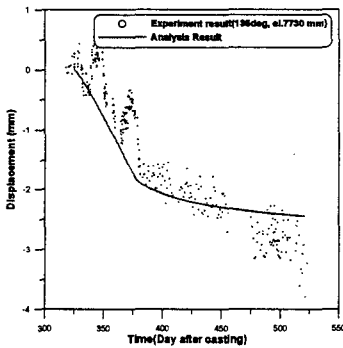


그림 7 해석과 실험 비교(2)

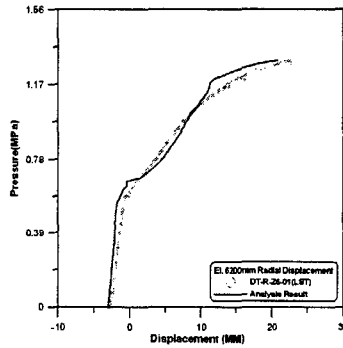


그림 8 벽체에서의 결과

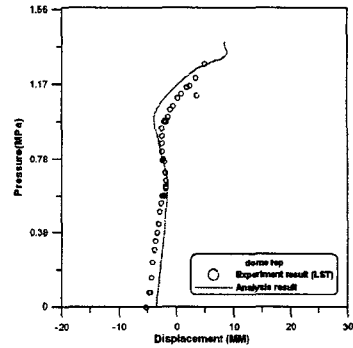


그림 9 Dome 최상부에서의 결과

감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단(KBDERC)의 지원으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. ACI Committee 209 (1992) *Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures*. ACI 209R-92.
2. Magura, D. D., Sozen, M. A., and Siess, C. P. (1964) A Study of Stress Relaxation in Prestressing Reinforcement. *PCI Journal*, Vol. 9, No. 2, pp. 13-57.
3. P. Ritz, P. Marti, and B. Thurlimann, Versuche uber das Biegeverhalten von Vorgespannten Platten ohne Verbund. Institut fur Baustatik und Konstruktion, Zurich, Reprot No. 7305-1(1975)
4. Overpressurization Test of a 1:4-Scale Prestressed Concrete Containment Vessel Model, NUREG/CR-6810 SAND2003-0840P Project Report No. R-SN-P-010.