

시간의존적 거동을 고려한 비부착 텐던 모델

Unbonded tendon model considering time-dependent behavior

박 재 근*
Park, Jae Guen

최 정 호**
Choi, Jung Ho

신 현 목***
Shin, Hyun Mock

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop of unbonded tendon model considering time-dependent behavior. In this paper, a numerical model for unbonded tendon is proposed based on the finite element method, which can represent straight or curved unbonded tendon behavior. This model and time-dependent material model are used to investigate the time-dependent behaviors of unbonded prestressed concrete structures. A computer program, named RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology), for the analysis of concrete structures 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 prestressing steel. The proposed unbonded tendon model and numerical method for time-dependent behavior of unbonded prestressed concrete structures is verified by comparison with reliable experimental results.

1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트(이하 PS 콘크리트) 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 변형을 적합조건으로 텐던의 응력을 계산할 수 없으며 구조물의 변형에 영향을 미치기 때문에 이러한 비부착 텐던을 고려할 수 있는 유한요소 프로그램의 개발이 필요하다.

PS 콘크리트 구조물은 콘크리트와 PS 강재의 재료 고유의 시간의존적(time-dependent) 특성 때문에 일정한 응력하에서도 시간의 경과에 따라 구조물의 거동이 지속적으로 변화되는 특성을 보이며 재료성질이 서로 다른 콘크리트와 철근 및 텐던으로 이루어지기 때문에 다른 구조에 비하여 비선형 특성이 상당히 복잡하다. 즉 콘크리트의 재료적 비선형성, 콘크리트와 철근 및 텐던과의 상호작용, 프리스트레싱 효과 뿐만 아니라 크리프(creep), 건조수축(shrinkage), 재령에 따른 강도의 증가(aging) 및

*정회원 · 성균관대학교 건축·조경 및 토목공학 박사과정

**정회원 · 국립한경대학교 토목공학과 조교수

***정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과 교수

텐던의 이완(relaxation) 등의 시간의존적 특성으로 인하여 응력의 재분배가 발생하며, 다양한 시공방법 등에 의한 구조계(structural system)의 변화 등으로 인해서 그 거동이 매우 복잡하게 나타난다(Collins 등, 1991).

이 연구에서는 비부착 텐던을 갖는 PS 콘크리트 구조물에 대한 역학적 거동, 즉 탄성, 비탄성, 및 파괴에 이르기까지의 하중과 변형의 관계와 균열의 진행, 콘크리트와 철근 및 텐던의 응력과 변형률 등을 정확히 표현할 수 있는 해석방법을 제시하고자 한다. 이를 위하여 콘크리트 셸 구조물 등에 적용하여 검증된 바 있는 비선형 유한요소해석 프로그램(Kim 등, 2002)을 근간으로 하고, 이 연구에서 개발한 비부착 텐던요소를 추가·확장시키므로써 연구의 타당성 및 적용성을 검증하고자 한다.

2. 비부착 텐던 모델

부착 PS 콘크리트 보의 경우 텐던과 주변 콘크리트가 부착되어 있음으로써 외력 하에서의 긴장재의 변형을 변화량과 콘크리트의 변형률의 변화량이 동일한 반면, 비부착 PS 콘크리트 보에서는 긴장재와 콘크리트 사이에 미끄러짐이 발생하기 때문에 긴장재와 주변 콘크리트의 변형률 변화가 서로 다르므로, 응력과 변형률을 바르게 평가하기 위해서는 부재 전체의 변형을 고려하여야 한다.

이 연구에서는 비부착 PS 콘크리트 구조물에서의 개별 비부착 텐던을 각각 다절점 트러스 요소 한 개로 표현하였다. 텐던 주변의 콘크리트를 모사하는 요소, 즉 모체 요소와 다절점 트러스 요소와의 조합을 통하여 비부착 PSC 구조물의 거동을 모사할 수 있도록 하였다. 다절점 트러스 요소는 모체 요소와 공유하는 각 절점을 이용하여 강성을 구성하며, 각 절점에서 텐던의 변위는 모체 요소와 동일하지만 하나의 다절점 텐던 요소 전체의 변형량을 텐던의 총 길이로 나누어 모든 텐던 요소내의 변형률을 동일하게 유지하도록 비부착 텐던을 모사하였다. 텐던의 항복후 거동을 표현하기 위한 텐던 모델은 일정한 변형률 경화율을 갖는 것으로 저자 등이 제안한 trilinear 모델을 사용하였다.

3. 시간의존적 거동을 고려하기 위한 재료모델

콘크리트의 시간의존적인 특성은 강도의 증가, 크리프, 건조수축의 3가지로 분류할 수 있다. 강도증가 현상은 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(Collins 등, 1991).

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 크리프와 건조수축은 보편적으로 이용되고 있는 ACI 209 모델(1992)을 사용할 수 있도록 하였으며, PS 강재의 이완에 의한 손실은 Magura의 식(1964)을 적용하였다.

4. 비선형 유한요소해석 프로그램

개발한 비부착 텐던 요소는 저자 등에 의하여 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 추가하였다.

4. 해석 예 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 그림 1~그림 3에 나타난 것과 같은 1/4 scale의 원형 돔 구조물(NUREG/CR-6810, 2003)을 선정하였다. 이 실험은 비부착 텐던을 이용한 원형 돔 구조물로서 내압을 이용하여 구조물의 극한강도와 파괴거동을 조사하기 위한 것으로, 타설후 PS 강재의 긴장 및 내압실험을 하기까지 구조물의 다양한 거동을 측정하였다. 실험결과는 콘크리트 타설 후, PS 강재 긴장시 및 LST(Limit State Test) 실험 전까지 시간의 경과에 따른 크리프, 건조수축 및 PS 강재의 릴렉세이션에 의한 거동을 포함하고 있다.

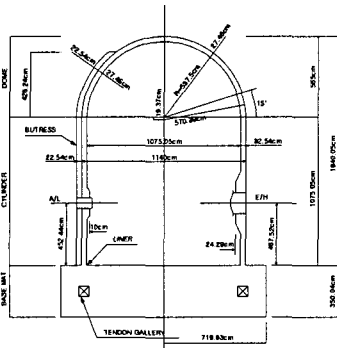


그림 1 원형 돔 입면도

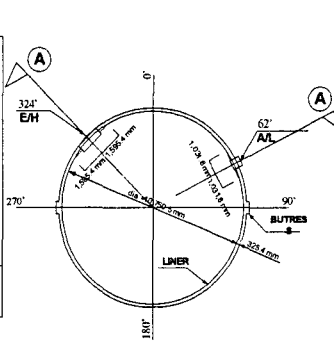


그림 2 원형 돔 평면도

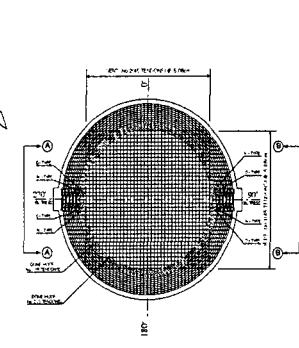


그림 3 텐던 배치도

해석하고자 하는 원형 돔 구조물은 99/4/15일에 타설을 끝냈으며 여러 위치에서 변형률 및 변위를 측정하기 시작한 때는 00/3/3부터이다. PS 텐던은 00/3/10일부터 00/5/3일까지 긴장되었으며 LST실험은 00/9/26일 수행하였다. 이 시험체에 사용된 콘크리트, 텐던, 철근, liner 및 텐던의 재료 물성치와 초기 긴장력은 참고문헌(NUREG/CR-6810, 2003)을 참조하였다. 사용된 텐던은 13.7mm 7연선 3개가 하나의 텐던으로 구성되었으며 90개의 수직 텐던의 초기 긴장력은 49.6tonf, 108개의 수평 텐던의 초기 긴장력은 44.4tonf 이다. 대상구조물은 그림 4와 같이 458개 절점과 532개 셀 요소, 92개의 비부착 텐던 요소를 사용하여 모델링 하였다. 콘크리트의 크리프 계수와 건조수축 변형률은 그림 5, 그림 6에 나타내었듯이 최종 크리프 계수 3.0과 최종 건조수축 변형률 8.0×10^{-4} 을 해석에 적용하였을 때 실험결과와 유사한 거동을 보였다. 따라서 이 수치를 사용하여 원형 돔 구조물의 시간의존적 해석을 수행하

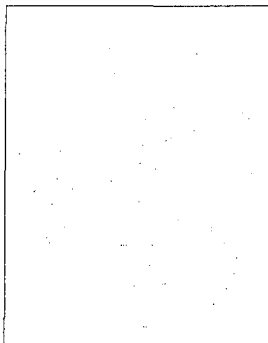


그림 4 모델링

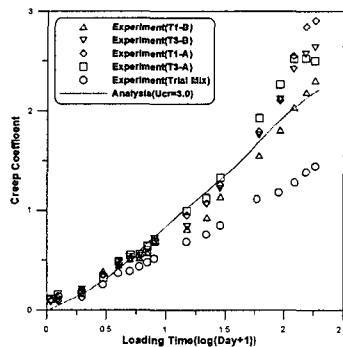


그림 5 크리프 계수

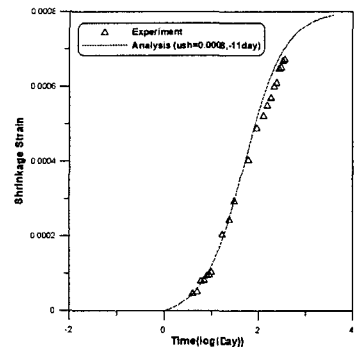


그림 6 건조수축 변형률

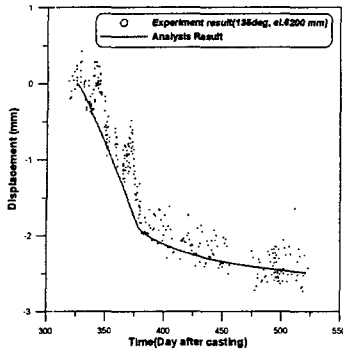


그림 7 해석과 실험 비교(1)

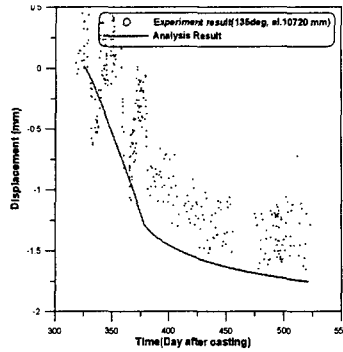


그림 8 해석과 실험 비교(2)

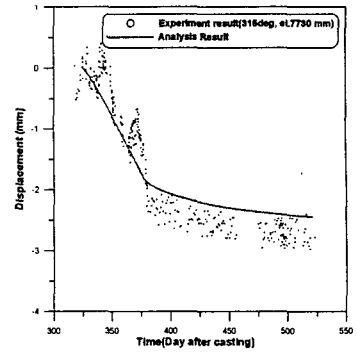


그림 9 해석과 실험 비교(3)

였다. 해석은 원형 돔의 타설이 끝난 시점에서 325일부터 하였으며 해석시 PS 긴장에 의한 변위뿐만 아니라 LST실험전까지 크리프, 건조수축 및 PS의 릴렉세이션을 포함하였다. 해석결과 중에서 그림 2에 나타난 방위각 중 135°에서 벽체 높이 6,200 mm에서 측정된 결과와 돔과 벽체가 만나는 10,720 mm에서 그리고 315° 벽체 높이 7,730 mm에서 해석결과와 실험결과를 그림7~그림9에 비교하였다.

5. 결 론

이 연구에서는 개발한 비부착 텐던 모델을 이용하여 PS 콘크리트 구조물의 시간의존적 거동을 포함한 비선형 거동특성의 예측을 위한 해석기법과 모델을 제시하였고, 제안된 해석기법과 모델을 적용한 유한요소해석 프로그램을 사용하여 시간의존적 거동을 보이는 PS 콘크리트 구조물을 수치예제로 선택하여 해석 및 실험결과를 비교·검증함으로써 이 연구에서 제시한 해석방법에 의해 비부착 텐던을 갖는 PS 콘크리트 구조물의 다양한 거동을 상당한 정확도로 해석할 수 있음을 보였으며, 각종 콘크리트 구조물의 해석에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

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. Collins, M. P., and Mitchell, P. (1991) *Prestressed Concrete Structure*. Prentice Hall.
3. Kim, T. H., Lee, K. M., and Shin, H. M. (2002) Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Shells Using Layered Elements with Drilling Degree of Freedom. *ACI Structural Journal*, Vol. 99, No. 4, pp. 418-426.
4. 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.
5. Overpressurization Test of a 1:4-Scale Prestressed Concrete Containment Vessel Model, NUREG/CR-6810 SAND2003-0840P Project Report No. R-SN-P-010.