

고강도 철근 콘크리트 고교각의 비선형 유한요소해석

Nonlinear Finite Element Analysis of High Piers

이 현 민* 성 대 정** 김 태 훈*** 신 현 목****
Lee, Heon Min Seong, Dae Jung Kim, Tae Hoon Shin, Hyun Mock

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the inelastic behavior of reinforced high-strength concrete bridge columns. A computer program, named RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology), for the analysis of reinforced concrete structures was used. Material nonlinearity is taken into account by comprising tensile, compressive and shear models of cracked concrete and a model of reinforcing steel. The smeared crack approach is incorporated. The increase of concrete strength due to the lateral confining reinforcement has been also taken into account to model the confined high-strength concrete. The proposed numerical method for the inelastic behavior of reinforced high-strength concrete bridge columns is verified by comparison with reliable experimental results.

1. 서론

이 연구에서는 최근 들어 관심과 활용이 증가하고 있는 고강도 철근콘크리트 교각구조를 대상으로 비선형 유한요소해석을 실시하여 비탄성 거동특성 및 파괴메커니즘을 파악하고 그 내진성능을 평가하는데 그 목적이 있다. 철근콘크리트 부재의 거동은 콘크리트의 균열, 철근의 항복, 철근과 콘크리트의 부착작용 및 균열 면에서의 전단전달효과 등과 같은 재료적인 특성에 크게 지배되기 때문에, 이를 해석적으로 예측하기 위해서는 각각의 재료적인 특성을 정확하고 신뢰성 있게 표현할 수 있는 재료모델의 구축이 선행되어야 한다. 따라서 이 연구에서는 2축 응력 상태에 대한 직교 이방성 재료모델에 의해서 균열이 발생한 철근콘크리트 요소의 거동특성을 표현하고, 이를 유한요소법을 사용하여 확장한 기존의 검증된 프로그램에 횡방향 구속철근으로 구속된 고강도 콘크리트의 강도 증가 효과를 고려하여 고강도 콘크리트의 거동특성을 모사할 수 있도록 수정을 가하여 사용하였다. 또한 고강도 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동의 파악을 위해 제안한 해석기법을 신뢰성 있는 연구자의 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

2.1 철근콘크리트의 비선형 재료모델

* 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 석사후과정, 공학석사

** 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정, 공학석사

*** 정회원, 대우건설 기술연구원 선임연구원, 공학박사

**** 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사

이 연구에서는 실제 주응력의 방향과 직각으로 발생하도록 한 비직교 고정균열모델을 적용함으로써 콘크리트의 강성을 보다 사실적으로 평가하였으며 재료적 비선형성에 대해서는 철근콘크리트 요소의 직교 이방성의 가정에 따라, 균열직각방향으로 콘크리트가 부담하게 되는 인장응력을 고려하기 위한 인장강성모델과 균열방향으로의 압축강성 저하를 고려하기 위한 압축강성모델 및 균열면에서의 전단 전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델을 각각 적용하였다.

2.2 비선형 유한요소해석 프로그램

이 연구에서는 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소 그리고 경계면요소 등¹⁻³⁾을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP⁴⁾에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)를 사용하였다.

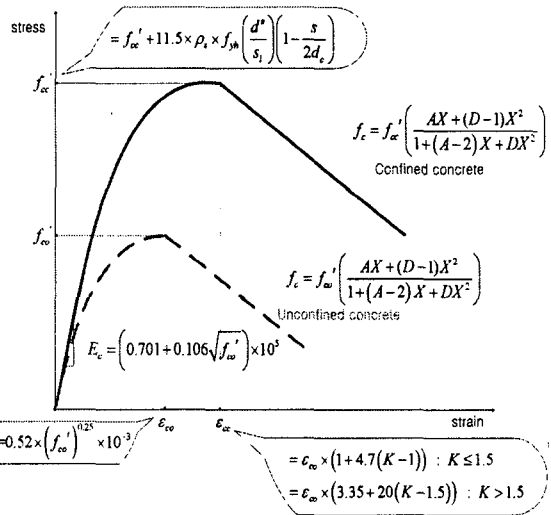
3. 고강도 철근콘크리트의 구속효과 고려

3.1 개요

구속된 고강도 콘크리트의 응력-변형률 특성에 관한 연구는 1980년대 후반부터 여러 연구자들에 의해 진행되었으나 현재까지 구속된 고강도 콘크리트의 특성을 정확하게 예측하고 있는 모델은 거의 없으며, 이에 대한 자료도 부족한 실정이다.

3.2 구속된 고강도 콘크리트의 응력-변형률 모델

비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST에 이식되어 있는 기존의 Mander 등의 제안모델⁵⁾이 구속된 고강도 콘크리트에 대하여 응력 최대점에서의 변형률과 구속된 콘크리트의 최대응력 f_{cc} 을 과대평가하는 경향을 보이고 있어 그 대안으로 구속된 고강도 콘크리트에 대한 응력-변형률 모델인 Sakino-Sun 모델⁶⁾을 적용하였다. Sakino-Sun 모델(그림1)은 콘크리트의 단면형상에 관계없이 적용할 수 있고, 종방향 철근 및 구속철근의 양, 구속철근의 항복강도 및 배근형태 등을 고려할 수 있다. 구속된 고강도 콘크리트에 대한 Sakino-Sun 모델의 신뢰성을 확인하기 위해 일축 압축하중을 받는 실험결과와 비교·분석하였으며 이를 종합하여 본 결과 Skino-Sun 모델의 응력-변형률 곡선은 실험결과와 전반적으로 잘 일치하고 있으며 안전측의 해석결과를 도출하는 것을 확인할 수 있었다.



$$A = \frac{E_c}{E_{cc}}$$

$$X = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} : \text{confined concrete}$$

where $E_{cc} = \frac{f_{cc}'}{\epsilon_{cc}} : \text{confined concrete}$ $\frac{E_c}{\epsilon_{co}} : \text{unconfined concrete}$

$$\frac{f_{co}'}{\epsilon_{co}} : \text{unconfined concrete}$$

$$D = 1.5 - 1.68 f_{co}' \times 10^{-3} + 0.5 \sqrt{\frac{(K-1)f_{co}'}{23}} \quad K = \frac{f_{cc}'}{f_{co}'} : \text{Confined concrete}$$

$$= 1 : \text{Unconfined concrete}$$

그림 1 Stress-strain relationship of confined High Strength Concrete (Sakino-Sun model)

4. 해석 에 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 그림 2에 나타난 것과 같은 실제 고강도 철근콘크리트 교각의 실험체⁽⁷⁾를 선정하였으며 이에 대한 유한요소로 모델링을 그림 3에 나타내었다. 또한 그 실험결과를 그림 4에 나타내었다.

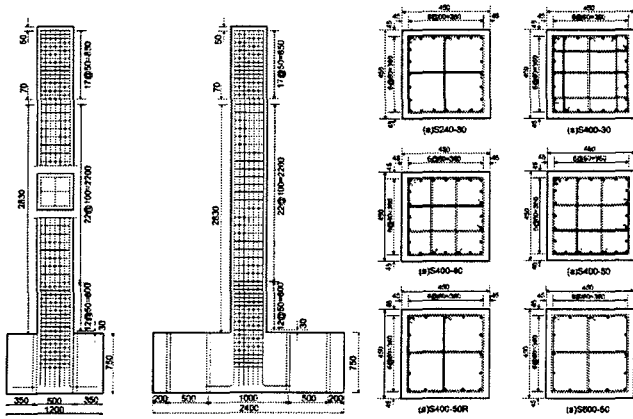


그림 2 Details of specimen

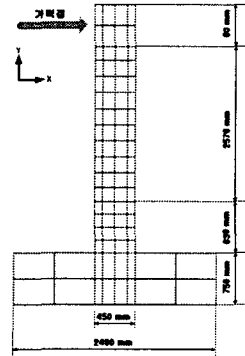


그림 3 Modeling of test specimen

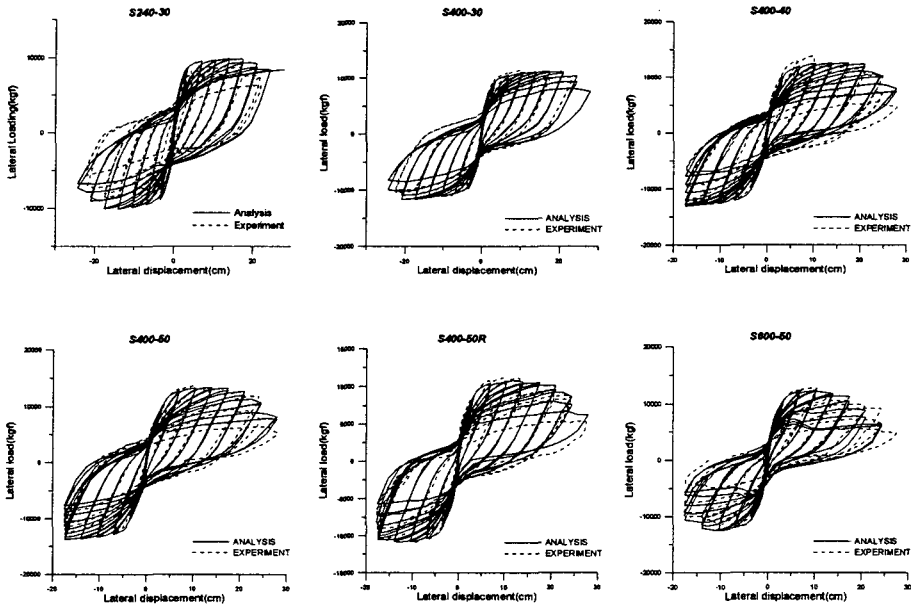


그림 4. Load-Displacement hysteresis curve

5. 결론

이 연구에서는 고강도 콘크리트를 사용한 고성능 콘크리트 교각의 거동특성을 예측하기 위하여

고강도 콘크리트에 적용 가능한 해석기법을 제시하고 이를 비선형 유한요소 해석 프로그램 (RCAHEST)에 이식하여 신뢰성 있는 연구자들이 수행한 구속 또는 비구속 고강도 콘크리트 공시체와 실제 고성능 콘크리트 고교각 시험체의 실험결과와의 비교 및 연구를 수행하였다. 그 결과 콘크리트가 고강도 일 때의 해석 값이 연성에서 실험값과 차이를 보였던 기존의 해석기법을 개선하고 이를 구속효과가 고려되어진 고강도 콘크리트 공시체의 실험결과와 비교하여 만족할만한 신뢰도를 도출해냄으로서 실제 고강도 콘크리트를 사용한 고교각 시험체에 적용할 수 있는 해석기법의 기초를 마련하였다. 또한 콘크리트 강도와 철근의 강도 및 철근비를 달리한 실제 고성능 콘크리트 고교각 시험체에 횡 하중 작용 시 휨 거동 및 변위 연성도를 해석적으로 평가하여 만족할만한 신뢰도를 도출해냄으로서 실제 고성능 콘크리트 고교각의 합리적이면서 경제적인 설계기준의 개발에 필요한 전반적인 기초 자료를 제시하였다. 이 연구에서 사용한 RCAHEST는 고강도 콘크리트를 사용한 고교각의 비선형 이력거동특성을 비교적 정확히 예측함으로써 향후 고성능 콘크리트를 사용한 고교각의 내진설계에 있어서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통한 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업(KBRC)의 연구비 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김태훈, "비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가," 박사학위 논문, 성균관대학교, 2003.
2. Kim, T. H., Lee, K. M., Yoon, C. Y., and Shin, H. M., "Inelastic Behavior and Ductility Capacity of Reinforced Concrete Bridge Piers under Earthquake. I: Theory and Formulation," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 129, No.9, 2003, pp. 1199-1207.
3. Kim, T. H., Lee, K. M., Chung, Y. S., and Shin, H. M., "Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Bridge Columns," *Engineering Structures*, 2005, Vol. 27, No. 4, pp. 576-592.
4. Taylor, R. L., *FEAP - A Finite Element Analysis Program*, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, 2000.
5. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park. R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 8, 1988, pp. 1804-1826.
6. Sun, Y.-P., and Sakino, K., "A Comprehensive Stress-Strain Model for High Strength Concrete Confined by Circular Transverse Reinforcement," *The 6th ASCCS International Conference on Steel-Concrete Composite Structures*, University of Southern California, 2000, pp. 1067-1074.
7. 고성능콘크리트 고교각의 개발 및 실용화기술개발 2003년도 보고서, 건설교통부