

조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 비선형 유한요소해석

Nonlinear Finite Element Analysis of Precast Segmental Prestressed Concrete Bridge Columns

김 태 훈* 진 병 무** 김 영 진*** 신 현 목****
Kim, Tae Hoon Jin, Byeong Moo Kim, Young Jin Shin, Hyun Mock

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the inelastic behavior of precast segmental prestressed 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. An unbonded tendon element based on the finite element method, that can represent the interaction between tendon and concrete of prestressed concrete member, is used. A joint element is newly developed to predict the inelastic behaviors of segmental joints. The proposed numerical method for the inelastic behavior of precast segmental prestressed concrete bridge columns is verified by comparison with reliable experimental results.

1. 서 론

최근 들어 교각의 내진성능을 보다 합리적으로 만족시키는 구조형식으로 프리스트레스트 콘크리트 교각에 대한 연구가 이루어지고 있으며 실제 시공조건에 따라 프리캐스트 공법에 의한 프리스트레스트 콘크리트 교각에 관한 연구도 이루어지고 있다⁽¹⁾⁻⁽³⁾.

공장 등에서 제작되어진 프리캐스트 세그먼트를 쌓아올려 PS 강재로 긴장 연결함으로써 교각을 구축하는 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각은 종래의 철근콘크리트 교각에 비해 공기단축 및 품질향상 등에서 유리한 공법이다.

* 정회원 · 대우건설 기술연구원 선임연구원, 공학박사(E-mail: kimth@dwconst.co.kr)

** 정회원 · 대우건설 기술연구원 선임연구원, 공학박사

*** 정회원 · 대우건설 기술연구원 수석연구원, 공학박사

**** 정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사

이 연구는 이러한 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 비선형 이력거동을 해석적으로 예측할 수 있는 기법을 제시하는데 그 목적이 있다.

프리스트레스트 콘크리트의 역학적 거동에서 프리스트레스에 의하여 콘크리트가 초기에 압축력을 받는 이외의 거동은 철근콘크리트와 유사하다고 볼 수 있다. 따라서 이 연구에서는 저자 등에 의하여 개발된 철근콘크리트의 비선형 재료모델^{(4),(5)}을 그대로 사용하고 여기에 프리스트레싱을 고려할 수 있는 텐던요소와 세그먼트 접합부의 거동특성을 모사할 수 있는 접합요소를 조합함으로써 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 역학적 거동을 예측하고자 한다.

2. 이차원 응력 하에서의 비선형 재료모델

2.1 철근콘크리트의 비선형 재료모델

철근콘크리트의 비선형 재료모델은 저자 등에 의하여 이미 발표된 재료모델^{(4),(5)}을 그대로 적용하기로 한다. 사용된 비선형 재료모델의 특징을 간단히 요약하면 다음과 같다.

균열발생후의 비선형성은 현저하게 나타나며, 이러한 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 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델을 각각 적용한다.

균열이 분산하여 분포된 철근콘크리트 부재의 변형거동은 사용된 균열개념에 크게 영향을 받는다. 이 연구에서는 제 2 균열의 발생을 제 1 균열과 직교방향으로 발생하도록 제한하여 콘크리트의 강성이 과대평가 되는 직교 고정균열모델과 달리, 실제 주응력의 방향과 직각으로 발생하도록 한 비직교 고정균열모델을 적용함으로써 콘크리트의 강성을 보다 사실적으로 평가하였다.

콘크리트 속의 철근에 대한 항복후 거동은 철근만의 특성과 함께 부차효과 등이 동시에 고려되어야 한다. 콘크리트 속의 철근응력은 일정하지 않고 균열면에서 최대가 된다. 철근의 응력-변형률 관계가 탄성영역에 있는 경우에는 철근만의 구성모델을 적용하면 된다. 그러나 균열면에서 철근이 최초로 항복하게 되면 철근의 평균응력-평균변형률 관계는 더 이상 탄성관계가 성립하지 않는다. 균열부분을 제외하면 철근은 아직 항복을 하지 않았으므로 증가된 변형률에 따라 응력이 증가하게 된다. 즉 균열부분은 철근의 항복으로 인해 응력의 증가가 없지만 내부의 철근의 응력은 증가하여 철근의 평균응력이 증가하게 되므로 철근만의 응력-변형률 관계에서 볼 수 있는 항복고원현상은 나타나지 않는다. 이 연구에서는 포락선부분에 대한 철근의 항복후 거동을 저자 등이 제안한 trilinear 모델로써 표현하였다.

2.2 텐던의 재료모델

콘크리트 속의 텐던의 응력과 변형률의 관계는 콘크리트와 텐던사이의 부차효과로 인하여 텐던만의 그것과는 다르게 나타난다. 이러한 부차효과에 대해서 많은 연구가 있었지만 여러 가지 변수 등의 영향으로 인하여 평균응력, 평균변형률 관계는 명확하게 규명되지 않고 있다⁽⁶⁾.

텐던은 일반적으로 고강도 강재를 사용하므로 일반 철근과 같이 뚜렷한 항복점을 갖지 않으며

항복고원 또한 나타나지 않는다. 따라서 텐던의 경우에는 일반 철근과는 달리 텐던 자체(bare bar)의 응력-변형률 관계와 부착이 고려된 텐던의 응력-변형률 관계에서 현격한 차이를 보이지 않게 된다. 이 연구에서는 텐던의 거동특성을 부착 등을 고려하여 저자 등이 제안한 trilinear 모델로써 표현하였다.

2.3 접합요소의 재료모델

조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 세그먼트 접합부의 부착파괴 기준으로 Mohr-Coulomb 파괴기준을 사용하였으며 접합요소의 전단 응력 모델은 그림 1과 같이 최대 전단 응력값까지는 선형증가를 보이고 그 이후부터 부착파괴까지는 급격히 감소하는 것으로 가정하였다.

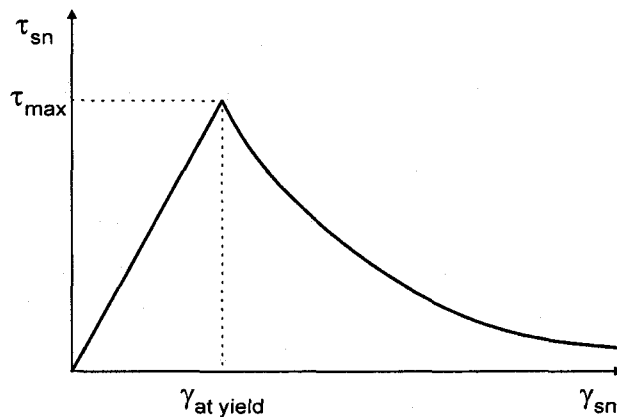


그림 1. 전단응력 - 전단변형률 관계

3. 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

3.1 비부착 텐던요소

이 연구에서는 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 비탄성 거동을 예측하기 위해서 저자 등이 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 비선형 유한요소해석을 위하여 개발한 비부착 텐던요소⁽⁷⁾를 목적에 맞게 수정하여 사용하였다.

비부착 텐던요소는 모체 요소와 공유하는 각 절점을 이용하여 강성을 구성한다. 그리고 각 절점에서 비부착 텐던의 변위는 모체 요소와 동일하지만 각각의 비부착 텐던요소의 변위를 비부착 텐던 전체 길이로 나누어 모든 비부착 텐던요소의 변형률을 동일하게 유지함으로써 비선형 거동특성을 모사하였다.

3.2 접합요소

접합요소는 그림 2와 같이 수직방향 2개 절점의 위치가 같은 가상의 절점을 이용한 6절점 접합

요소 또는 4절점 접합요소 중의 하나를 선택하여 사용할 수 있도록 하였다. 접합요소를 사용하면 접합부에 평행한 수평방향의 전단응력과 이에 수직방향의 인장응력 또는 압축응력을 결정할 수 있다.

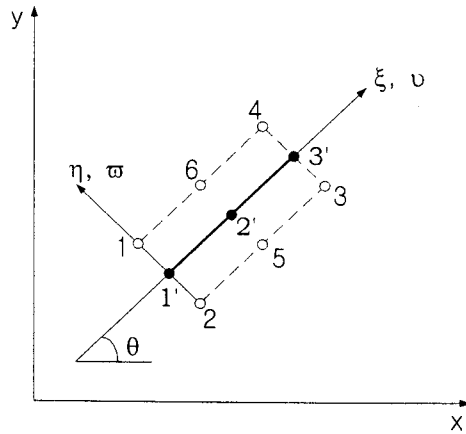


그림 2. 접합요소

3.3 비선형 유한요소해석 프로그램

유한요소해석 프로그램을 작성하는 방법은 사용목적에 맞는 전용 프로그램을 새롭게 작성하는 방법과 사용자가 개발한 요소를 추가할 수 있는 모듈화된 범용 유한요소해석 프로그램을 이용하는 방법으로 구분될 수 있다. 전자의 방법은 전용프로그램으로서 입력자료의 작성이 간단하고 해석시간을 줄일 수 있는 장점이 있는 반면에 이미 개발된 또는 앞으로 개발될 다른 종류의 요소와 조합으로 사용하기가 곤란하다.

이 연구에서는 후자의 방법을 택하여 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력 요소, 그리고 경계면요소 등^{(4),(5)}을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP⁽⁸⁾에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램인 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)에 비부착 긴장재의 영향을 고려할 수 있도록 수정을 가하고 개발된 비부착 텐던요소를 이식하였다. 그리고 세그먼트 접합부의 부착 파괴를 모사할 수 있도록 개발한 접합요소를 이식하여 함께 사용하였다.

4. 수치예제 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 그림 3에 나타난 것과 같은 프리스트레스트 콘크리트 교각의 실험체⁽⁹⁾를 선정하였다. 그리고 이 연구의 대상인 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각에의 적용성을 확인하기 위해서 선정된 실험체에 조립식 공법을 모사하기 위한 세그먼트 접합부를 400 mm 마다 임의로 설치하였다.

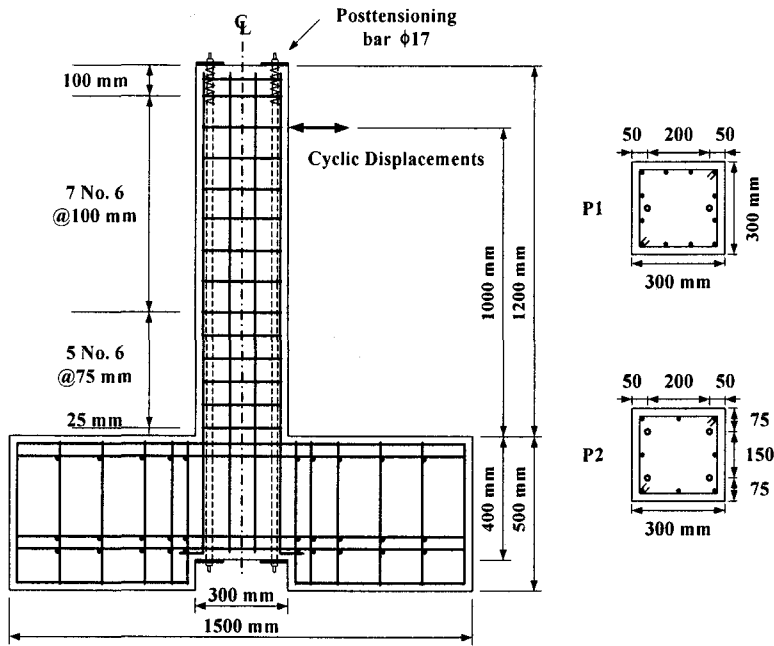


그림 3. 실험체 (unit: mm)

실험체의 재료물성은 표 1과 같으며 이들 실험체에 대한 재하는 교각기초부에서 주철근이 항복할 때, 하중작용위치에 생기는 변위를 항복변위 δ_y 로 정의하고, 이 변위의 정수 배 $n \times \delta_y$ ($n=1,2,3,\dots$)로 순차적으로 변위진폭을 증가시켰다.

표 1. 실험체의 제원

Specimen	Axial force (kgf/cm ²)	f_c (kgf/cm ²)	Mild steel	Mild steel f_y (kgf/cm ²)	Prestress steel ($f_y = 12,500$ kgf/cm ²)	Prestress (kgf/cm ²)	Shear reinf. ($f_y = 3,540$ kgf/cm ²)
P1(N)	10	356	12-D10	4,090	2- ϕ 17mm	35	Base: D6@75mm;
P1(H)	40		12-D10	4,090	2- ϕ 17mm	35	elsewhere: D6@100 mm

(Note: $1 \text{ kgf/cm}^2 = 9.80665 \times 10^{-2} \text{ MPa}$)

그림 4는 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소 분할된 예이며 3점 가우스 적분을 적용한 8절점 등매개요소를 이용하였고 하중이 재하되는 부위에는 실험에서와 동일한 조건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지 않는 탄성요소를 사용하였으며 기초와 교각의 접합부에는 정착슬립 등의 불연속변위를 고려하기 위하여 6절점 경계면 요소를 이용하였다. 또한 세그먼트 접합부의 비탄성 거동을 모사할 수 있도록 개발된 접합요소를 사용하였으며, 비부착 긴장재의 거동을 고려하

기 위한 다절점 비부착 텐던요소를 이용하였다. 이때 세그먼트 접합부의 거동특성을 지배하는 내부마찰각과 점착력은 기존의 연구결과⁽¹⁰⁾를 근거로 하여 각각 45°와 60 kgf/cm² (5.88 MPa)로 가정하였다.

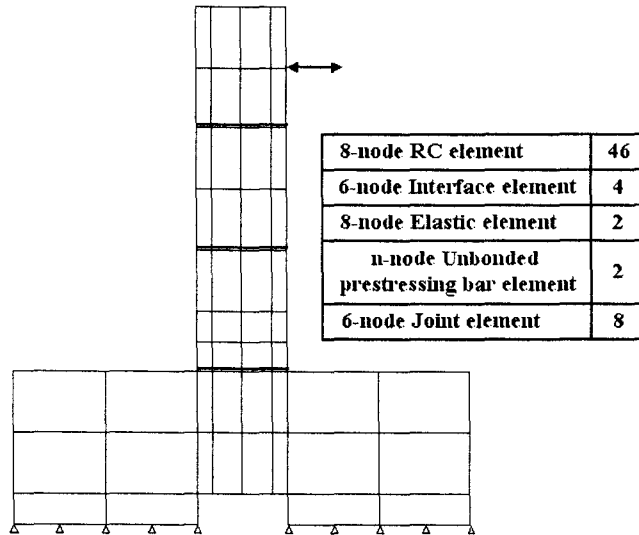
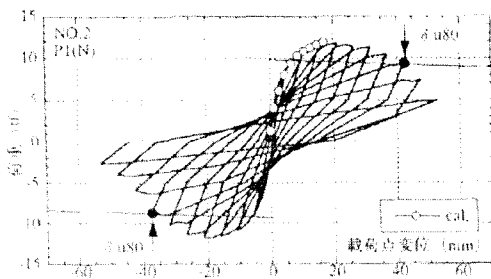


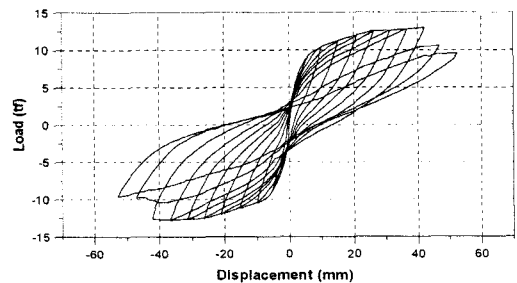
그림 4. 유한요소모델

그림 5와 6은 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계를 나타내고 있으며 해석결과가 실험결과와 전반적으로 잘 일치함을 알 수 있다.

실험결과와의 비교를 통해 타당성이 검증된 해석결과에 세그먼트 접합부를 도입한 해석결과를 함께 비교하여 그림 7과 8에 나타내었다. 두 해석결과와의 비교로부터 교각의 내력은 일치하며 세그먼트 접합부를 도입한 해석의 변위연성도가 약간 떨어지는 것이 보이나 전반적인 내진성능에는 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. 이를 통해 적절한 세그먼트 접합부의 성능특성을 갖는 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각은 현장타설 프리스트레스트 콘크리트 교각의 성능특성과 거의 유사함을 알 수 있다.

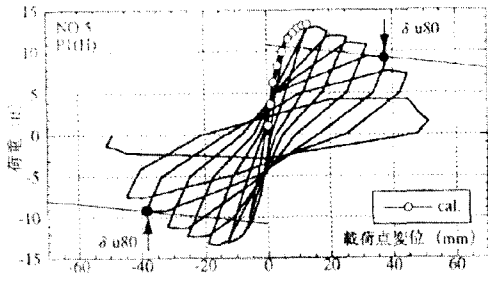


(a) Experiment

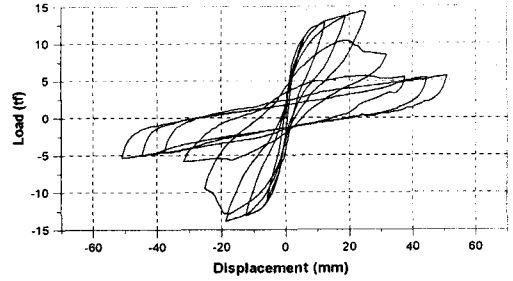


(b) Analysis

그림 5. 하중-변위 관계 P1(N) (1 tf = 9.80665 kN)



(a) Experiment



(b) Analysis

그림 6. 하중-변위 관계 P1(H) (1 tf = 9.80665 kN)

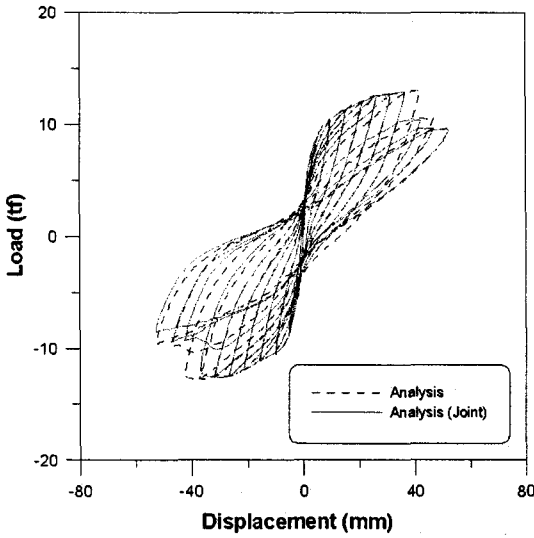


그림 7. 하중-변위 관계 P1(N)
(1 tf = 9.80665 kN)

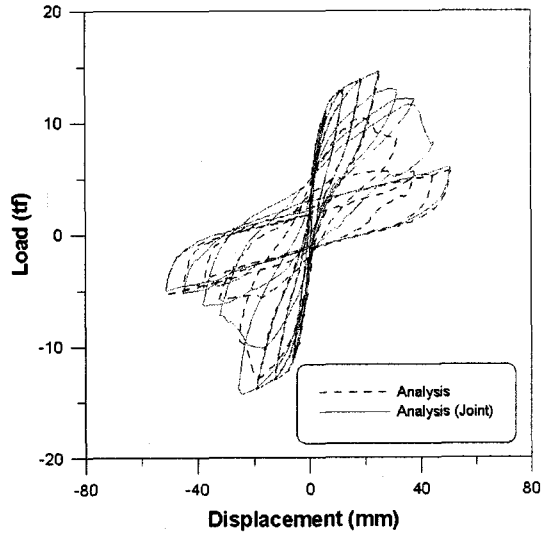


그림 8. 하중-변위 관계 P1(H)
(1 tf = 9.80665 kN)

조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 내진성능에 대한 연구를 수행한 결과 성능특성을 발휘할 수 있는 적절한 세그먼트 접합부를 도입한다면 철근콘크리트 교각이나 프리스트레스트 콘크리트 교각과 비교하여 전반적으로 유사한 내진성능을 나타낼 것으로 기대되며 이로부터 현장타설 콘크리트 교각에 비하여 시공성이 우수한 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 실용화가 가능할 것으로 판단된다.

일련의 해석결과와 실험결과와의 비교로부터 이 연구에서 제안하고 있는 방법은 조립식 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 교각의 비탄성 거동을 적절히 평가하고 있으며, 개발된 철근콘크리트 구조물의 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 이용함으로써, 해석적 방법에 의한 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 내진성능평가가 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 연구에서는 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 비선형 거동특성의 예측을 위한 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 유한요소 해석프로그램을 사용하여, 실험용 교각을 해석하였다. 실험결과와 비교·검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 제안한 해석기법과 모델이 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 전반적인 거동특성을 바르게 표현하고 있음이 입증되었다.
- 2) 적절한 성능특성을 갖는 세그먼트 접합부를 도입한 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각은 일반 프리스트레스트 콘크리트 교각의 거동특성과 거의 일치할 것으로 판단되며 설계에도 이러한 점을 반영할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 지진하중을 받는 프리스트레스트 콘크리트 교각의 응답특성 및 지진손상을 제대로 평가함으로써 향후 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각구조의 내진성능평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 이재훈, 양종호, “콘크리트 교각의 새로운 형식,” 한국콘크리트학회지, 제16권, 2호, 2004, pp. 24-30.
2. Billington, S. L., Barnes, R. W., and Breen, J. E., “Alternative Substructure Systems for Standard Highway Bridges,” Journal of Bridge Engineering, ASCE, Vol. 6, No. 2, 2001, pp. 87-94.
3. Mori, T., Park, D.-K., Ikeda, S., and Yoshioka, T., “Seismic Performance of Prestressed Piers,” The First fib Congress, 2002, CD.
4. 김태훈, “비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가”, 박사학위논문, 성균관대학교, 2003.
5. 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.
6. Collins, M. P., and Mitchell, P., *Prestressed Concrete Structure*, Prentice Hall, 1991.
7. 박재근, 최강룡, 신현목, “PSC 구조물의 비선형 해석을 위한 비부착 텐던 모델,” 대한토목학회 학술대회 논문집, 2004, pp. 470-475.
8. Taylor, R. L. “FEAP - A Finite Element Analysis Program”, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, 2000.
9. Ito, T., Yamaguchi, T., and Ikeda, S., “Seismic Performance of Concrete Piers Prestressed in Vertical Direction,” Proc. Japan Concrete Institute, Vol. 19, No. 2, 1997, pp. 1197-1202. (in Japanese)
10. 박윤제, 신동혁, 이광명, 신현목, “강판으로 보강된 RC보의 에폭시-콘크리트 계면의 부착특성,” 한국콘크리트학회 논문집, 제13권, 제3호, 2001, pp. 221-227.