

철근콘크리트 교각의 지진응답 예측 Predictions of Seismic Behavior of Reinforced Concrete Bridge Piers

김 태 훈* 김 운 학** 신 현 목***
Kim, Tae Hoon Kim, Woon Hak Shin, Hyun Mock

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the seismic behavior of reinforced concrete bridge piers and to provide the data for developing improved seismic design criteria. 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. In boundary plane at which each member with different thickness is connected, local discontinuity in deformation due to the abrupt change in their stiffness can be taken into account by introducing interface element. The effect of number of load reversals with the same displacement amplitude has been also taken into account to model the reinforcing steel and concrete. The proposed numerical method for the prediction of seismic behavior for reinforced concrete bridge piers is verified by comparison with the reliable experimental results.

1. 서론

세계적으로 지진의 규모와 빈도 및 그로 인한 피해가 증가 추세에 있는 현 상황에서 지진으로 인한 기반시설과 인명의 피해를 최소화 또는 방지하기 위해서는 구조물의 역학적 거동을 올바르게 예측하는 방법이 시급히 필요한 실정이다.

우리 나라에서도 지진 발생빈도와 그로 인한 피해 가능성이 증가하면서, 신축 또는 기존구조물의 지진거동 파악 및 내진설계 등에 많은 노력과 비용이 투입되고 있다. 특히 기반시설로서 중요

* 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정 수료, 학생회원

** 국립한경대학교 토목공학과 부교수, 정회원

*** 성균관대학교 토목환경공학과 교수, 정회원

한 역할을 수행하는 교량의 구성요소 중에서 교각은 지진하중에 대하여 매우 취약한 곳으로 내진 설계 규정이 없었던 과거에 시공된 교각에 대한 내진성능 검토가 요구되고 있으며 내진설계가 되지 않은 교각을 현행 내진설계 규정에 만족시키기 위해서 교각을 전면 교체하는 것보다는 보강을 통하여 교각의 성능을 향상시키는 경제적인 방안에 관한 관심이 모아지고 있다. 따라서 지진하중 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 내진성능평가를 위한 적절한 해석기법의 개발이 이루어진다면, 해석적인 방법에 의해서 철근콘크리트 부재의 균열발생에서 파괴에 이르기까지의 거동을 예측함으로써 실제 철근콘크리트 교각구조의 지진응답특성의 파악과 내진설계 및 검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.

이 연구는 지진하중 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 교각의 지진거동을 해석적으로 예측할 수 있는 기법을 제시하는데 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 유효요소법을 사용하여 확장한 기존의 검증된 프로그램⁽¹⁾을 반복하중에 따른 피로거동을 예측하고 손상지수를 산출할 수 있도록 수정을 가하여 철근콘크리트 교각의 지진응답을 예측하고자 한다.

2. 철근콘크리트의 비선형 재료모델

철근콘크리트는 복합재료이며, 재료의 비선형성은 타구조재료에 비해 극히 복잡하다. 특히 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 균열 면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델을 각각 적용한다. 이때 사용된 균열개념은 콘크리트의 강성을 보다 사실적으로 평가할 수 있는 비직교 고정균열모델이다. 콘크리트 속의 철근에 대한 항복후 거동은 철근만의 특성과 함께 부착효과 등이 동시에 고려되어야 한다. 이 연구에서는 포락선부분에 대한 철근의 항복후 거동을 일정한 변형을 경화율을 갖는 것으로 저자 등이 제안한 trilinear 모델을 사용하여 고려하였다^{(1),(2),(3)}.

횡방향으로 배근된 구속철근에 의한 연성능력 및 복원력 특성을 포함시켰으며 콘크리트 압축파괴 이후에 발생하는 철근의 좌굴 등과 같은 효과를 함께 고려하였다^{(1),(3)}. 또한 단면강성이 급변하는 기둥과 기초부 등의 경계면에서의 국소적인 불연속 변위를 고려하기 위한 경계면 요소(interface element)^{(1),(3)}를 도입하였다.

지진하중과 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 교각은 필연적으로 피로손상이 나타난다. 철근콘크리트 교각의 지진거동에 영향을 미치는 피로손상에는 큰 변형률의 교번작용으로 인한 주철근의 Low-cycle 피로와 반복하중 하에서의 콘크리트의 강도저하 등이 있다. 따라서, 이러한 영향들을 고려한 해석을 하여야만 정확한 지진거동을 예측할 수 있는 것이다. 이 연구에서 주철근의 Low-cycle 피로 문제는 Coffin - Manson의 제안식⁽⁴⁾을 Miner의 선형 손상모델에 적용하여 고려하

였으며 하중재하 회수에 따른 콘크리트의 피로강도는 Kakuta 등의 제안식⁽⁵⁾을 수정 제안하였다. 즉, 비선형 유한요소해석을 전제로 유한요소해석에서 필연적으로 계산되는 가우스 적분점에서의 변형률을 이용하여 피로파괴시까지의 하중재하 회수를 구한다⁽³⁾.

3. 비선형 유한요소해석에 의한 손상지수 평가

3.1 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

이 연구에서는 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소^{(1),(3)} 그리고 경계면요소^{(1),(3)} 등을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP⁽⁶⁾에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)⁽¹⁾를 수정하여 사용하였다.

3.2 손상지수 평가

손상지수는 구조물의 손상된 정도를 평가할 수 있는 편리한 방법으로서 하중 재하에 따른 구조물의 손상정도를 수치적으로 표현하며 전체 구조물의 성능특성을 나타내는 지수로서 최근 들어 기존 구조물의 비선형 거동특성의 파악과 내진성능 평가를 위하여 사용되는 경우가 많아지고 있다.

이 연구에서는 비선형 유한요소해석시 계산되는 각 요소의 가우스 적분점에서의 변형률로부터 직접 요소레벨의 손상지수를 산정하였다. 신뢰성 있는 비선형 유한요소해석은 구조물의 강성저하, 강도저감, 피로손상, 그리고 이력곡선의 에너지 방출 등을 고려하고 있으므로 손상정도를 평가하기에 충분한 정보를 보유하고 있다고 할 수 있다.

구조물의 손상지수와 구조물의 상태와의 관계는 보수가 가능한 손상지수 값 0.1은 주철근의 항복이 일어나기 전으로서 경미한 휨균열이 발달한 상태로, 보수가 불가능한 손상지수 값 0.4는 주철근이 항복한 후 매우 큰 휨 또는 전단균열에 의해서 콘크리트의 피복이 박리된 상태로, 파괴시점의 손상지수 값인 0.7은 주철근의 파단이 일어나기 시작한 상태로, 그리고 손상지수 값 1.0은 주철근이 대부분 파단되어 붕괴된 상태로 설명할 수 있다⁽³⁾.

위의 관계를 콘크리트 및 철근에 각각 적용하여 요인별 손상지수를 정하고 그 중 큰 값을 요소레벨의 손상지수로 하는 것으로 한다.

3.2.1 콘크리트의 압축 손상지수

콘크리트의 주 압축변형률이 콘크리트의 극한변형률에 도달하였을 때 구조물의 파괴시점이라 할 수 있는 손상지수 값은 0.75로, 콘크리트의 최대 응력시의 변형률을 초과할 때 보수가 불가능한 손상지수 값은 0.4가 되도록 콘크리트의 압축 손상지수를 설정하였다(표 1).

3.2.2 철근의 인장 손상지수

철근의 인장변형률이 철근의 극한변형률에 도달하였을 때 구조물의 파괴시점이라 할 수 있는

손상지수 값은 0.75로, 철근의 항복변형률을 초과하여 항복고원에 이르는 변형률에 도달하였을 때 보수가 불가능한 손상지수 값은 0.4, 그리고 철근의 항복변형률의 75%에 도달하여 경미한 휨 균열이 발달할 때 손상지수 값은 0.1이 되도록 철근의 인장 손상지수를 설정하였다(표 1).

표 1. 요소레벨의 손상지수

Item		Failure Criterion (ϵ_{cu} or ϵ_{tu})	Damage Index
Concrete	Compressive and Shear	$0.004 + \frac{1.4 \rho_s f_{yh} \epsilon_{sm}}{f_{cc}}$	$1 - ftg_c \left(\frac{2 \epsilon_{cu} - \epsilon_{cs}}{2 \epsilon_{cu}} \right)^2$
Steel	Tensile	0.10	$1.20 \left(\frac{\epsilon_{ts}}{2 ftg_r \epsilon_{tu}} \right)^{0.67}$
ρ_s = transverse confining steel ratio f_{yh} = yield stress of the confining steel ϵ_{sm} = steel strain at maximum tensile stress f_{cc} = confined concrete compressive strength			

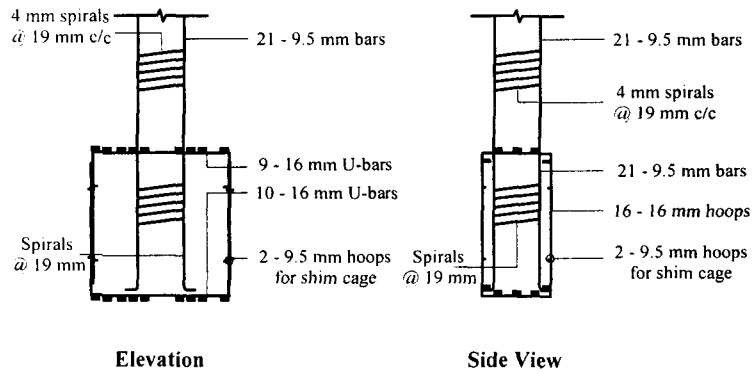
4. 수치예제 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 그림 1에 나타난 것과 같은 철근콘크리트 교각의 실험체⁽⁷⁾를 선정하였다. 이 실험체를 해석 예로 채택한 이유는 다양한 지진 하중에 의한 철근콘크리트 교각의 지진응답을 정량화 시킨 실험이기 때문이다.

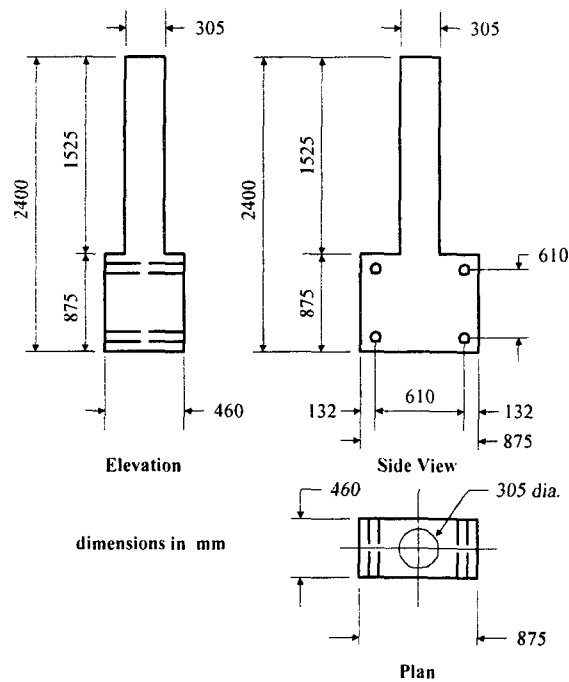
실험체는 AASHTO의 규정에 따라 설계된 단일주 원형교각을 실험 여건상 1/4로 축소된 모형으로서 실험체의 재료물성은 표 2와 같다. 실험체의 바닥과 교각사이는 완전고정으로 하였으며, 모든 실험체에는 220 kN MTS hydraulic actuator에 의해 $0.1f_c A_g$ 의 일정한 압축하중을 가한 상태에서, 횡방향으로 670 kN MTS hydraulic actuator에 의해 하중이력에 해당하는 변위를 가한 경우이다⁽⁷⁾.

표 2. 재료물성

Specimen	Concrete strength (MPa)	Steel yield strength (MPa)	Spiral yield strength (MPa)
A7 ~ A8	32.8	448	434
A9	32.5	448	434
A10 ~ A12	27.0	448	434



(a) Reinforcement arrangement for specimen



(b) Dimensional details of specimen

그림 1. 실험체의 제원

이 실험체들의 유한요소해석을 위해서 원형 철근콘크리트 교각을 등가환산단면을 이용하여 2차원 평면요소로 해석이 가능하도록 하였으며 실험체들은 철근콘크리트요소 61개, 경계면요소 5개, 그리고 집중하중이 작용하는 부분의 파괴를 방지하기 위한 탄성요소 2개로 총 68개의 요소로 분할하였다.

그림 2는 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계를 나타내고 있으며 해석결과가 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 그리고 이 연구에서 제안

한 하중재하에 따른 요소레벨의 손상지수 변화를 기존의 다른 연구자의 손상지수⁽³⁾의 결과와 비교하여 그림 3에 나타내었다. 이로부터 이 연구에서 제안하고 있는 손상지수에 의한 내진성능평가 기법은 각 하중단계의 손상이나 파괴를 전반적으로 잘 평가하고 있음을 알 수 있다.

실험체의 실험결과를 재하 단계별로 다른 연구자의 손상지수와 함께 비교한 결과는 참고문헌⁽⁸⁾에 자세히 기술되어 있다.

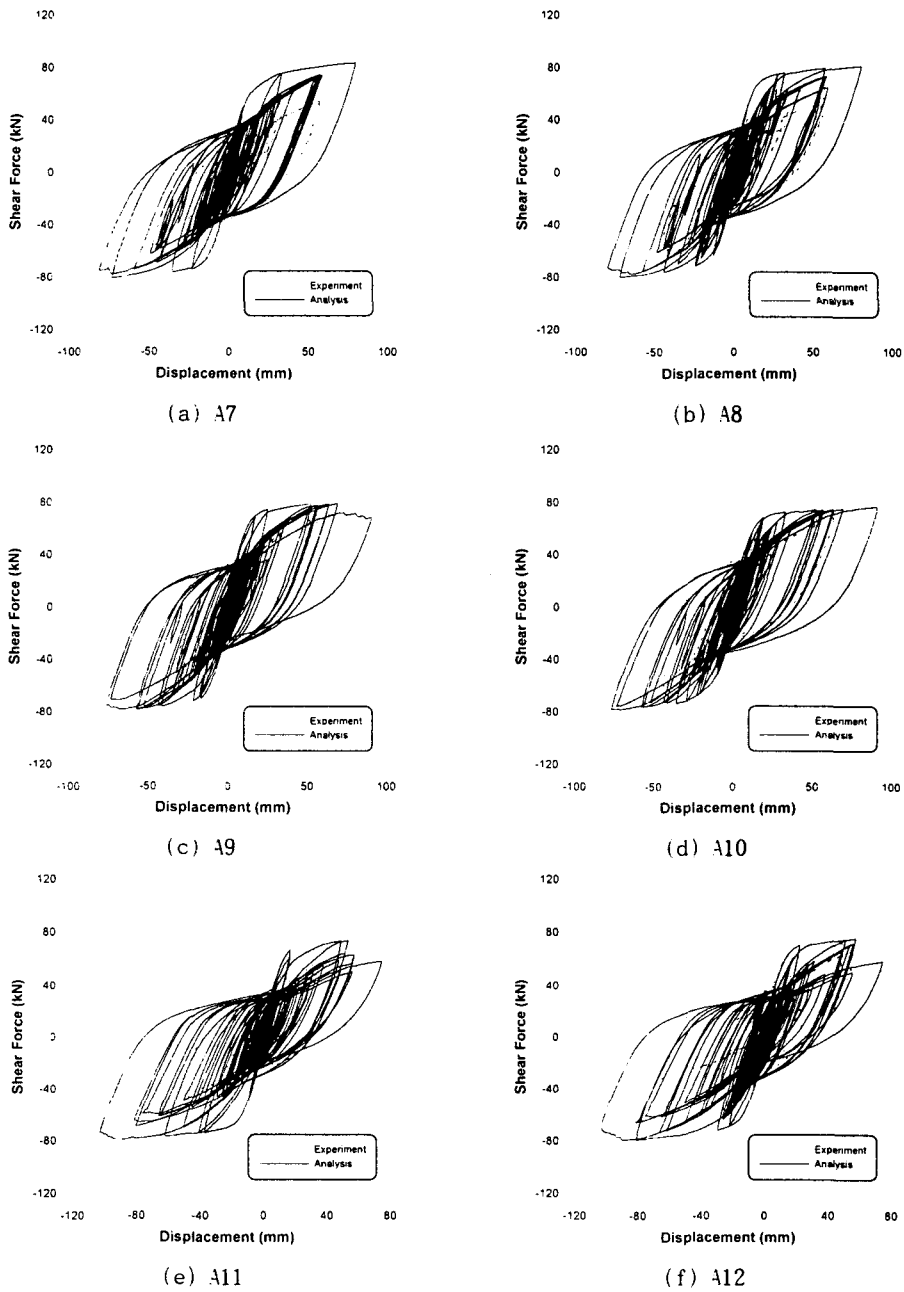


그림 2. 하중-변위 관계

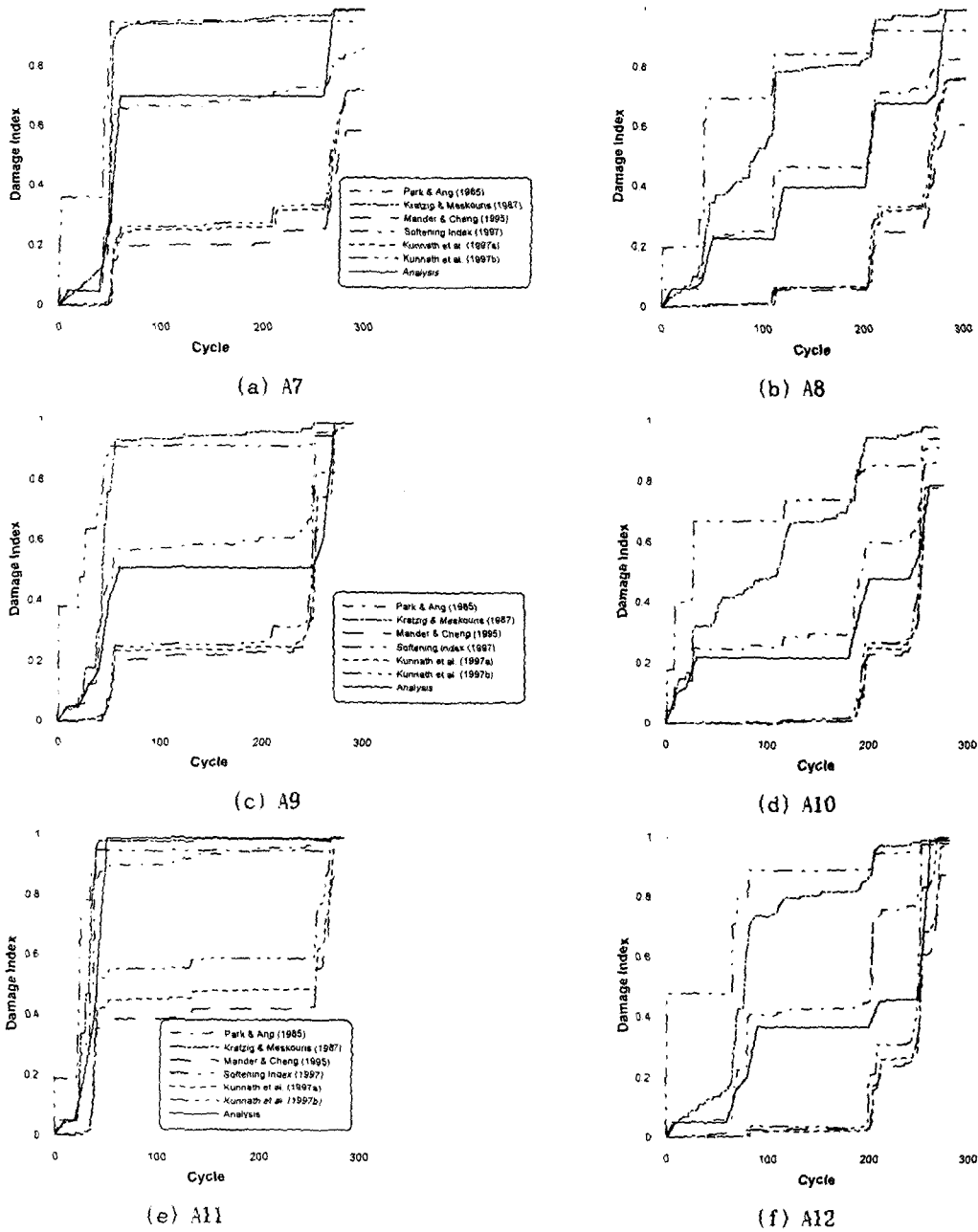


그림 3. 하중단계별 손상지수

5. 결론

이 연구에서는 지진하중을 받는 있는 철근콘크리트 교각의 비선형 거동과 지진손상 평가를 위한 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 유한요소 해석프로그램을 사용하여, 다양한 하중이 작용하는 철근콘크리트 교각을 해석하였다. 실험결과와 비교·검토된 수

치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

1) 제안한 해석기법과 모델이 철근콘크리트 교각의 전체적인 거동특성을 바르게 표현하고 있음이 입증되었다.

2) 이 연구에서 구조물의 손상정도를 판단하기 위한 척도로서 개발한 손상지수를 신뢰성 있는 연구자의 실험 및 해석결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

3) 지진하중을 받는 철근콘크리트 교각의 응답특성 및 지진손상을 제대로 평가함으로써 철근콘크리트 교각구조의 내진성능평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.

4) 현행 내진설계 규정에 만족하지 않는 기존의 철근콘크리트 교각에 대한 보수·보강의 판단 등에 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단 지원, 지진공학연구센터(KEERC)의 연구비 지원에 의한 연구로서, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김태훈, 신현목(2001), "Analytical Approach to Evaluate the Inelastic Behaviors of Reinforced Concrete Structures under Seismic Loads," 한국지진공학회 논문집, 제5권, 2호, pp. 113-124.
2. 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.
3. 김태훈, 김운학, 신현목(2002), "철근콘크리트 교각의 지진손상 평가 I: 이론 및 정식화," 한국지진공학회 논문집, 제6권, 3호, pp. 31-40.
4. Mander, J. B., Panthaki, F. D., and Kasalanati, K.(1994), "Low-Cycle Fatigue Behavior of Reinforcing Steel," Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 6, No. 4, pp. 453-468.
5. Kakuta, Y., Okamura, H., and Kohno, M.(1982), "New Concepts for Concrete Fatigue Design Procedures in Japan," IABSE Colloquium on Fatigue of Steel and Concrete Structures, Lausanne, pp. 51-58.
6. Taylor, R. L.(2000), FEAP - A Finite Element Analysis Program, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2.
7. El-Bahy, A., Kunnath, S. K., Stone, W. C., and Taylor, A. W.(1999), "Cumulative Seismic Damage of Circular Bridge Columns: Variable Amplitude Tests," ACI Structural Journal, Vol. 96, No. 5, pp. 711-719.
8. 김태훈, 김운학, 신현목(2002), "철근콘크리트 교각의 지진손상 평가 II: 수치해석 예," 한국지진공학회 논문집, 제6권, 3호, pp. 41-52.