

반복하중을 받는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동에 미치는 크기효과에 관한 해석적 연구

Analytical Study on the Size Effect Influencing Inelastic Behavior of Reinforced Concrete Bridge Piers Subjected to Cyclic Load

김 태 훈* 신 현 목**
Kim, Tae Hoon Shin, Hyun Mock

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate size effect on inelastic behavior of reinforced bridge piers subjected to cyclic load. A computer program, named RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology), for the analysis of reinforced concrete was used. Material nonlinearity is taken into account by comprising tensile, compressive 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, discontinuous 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 amplitude has been also taken into account to model the reinforcing steel. To determine the effect of size on bridge pier inelastic behavior, a 1/4-scale replicate model was also loaded for comparison with full-scale bridge pier behavior.

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.

강한 지진을 받는 구조물은 대부분 비탄성 거동을 보이게 되며 이런 경우 구조물이 효과적으로 저항하도록 하기 위해서는 적절한 강도와 연성을 확보해야 한다. 현행 내진설계 규준은 이러한 요

* 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정 수료, 학생회원

** 성균관대학교 토목환경공학과 교수, 정회원

구를 충족시키기 위해 각 단위부재 및 접합부에서의 상세설계를 규정함으로써 부재수준에서 뿐만 아니라 구조물 전체의 연성거동을 구현하고 있다. 이러한 설계기준들은 주로 단위부재의 실험결과에 의존하여 검증, 수립되고 있다. 그런데 이와 같은 실험식의 적용에 있어서는 그 적용범위에 주의하여야 한다. 이것은 실험이 여러 가지 제약조건으로 실제와 같은 단면치수의 실험이 현실적으로 어렵고, 단면치수가 실제보다 훨씬 작은 축소모형을 이용하고 있기 때문이며 이 축소모형에 의한 실험결과를 실제 구조물에 직접 적용할 때는 세심한 주의가 필요하다.

이 연구는 지진하중 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동에 미치는 크기효과를 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 유한요소법을 사용하여 확장한 기존의 검증된 프로그램⁽¹⁾을 이용하여 반복하중을 받는 철근콘크리트 교각의 크기효과를 포함한 비탄성 거동특성을 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 구속철근은 콘크리트의 극한강도와 극한변형률을 크게 증가시켜 콘크리트 부재가 지진하중 등과 같은 반복하중을 받는 경우에 구속되지 않은 경우에 비해서 우수한 연성능력 및 복원력 특성을 나타낸다. 이 연구에서는 콘크리트의 단면형상에 관계없이 적용할 수 있고, 종방향 철근 및 구속철근의 양, 구속철근의 항복강도 및 배근형태 등을 고려할 수 있도록 한 Mander 등의 제안모델⁽⁴⁾을 채택하였다^{(1),(2),(3)}. 그리고, 콘크리트 압축파괴 이후의 효과를 Kent 등에 의해 제안된 해석모델⁽⁵⁾을 수정하여 고려하였다. 또한, 철근을 둘러싸고 있는 콘크리트에 압축파괴가 발생하면 철근이 좌굴을 하였다고 판단하였으며 좌굴 시의 철근의 응력은 압축파괴가 발생한 콘크리트에서와 같이 좌굴을 무시하고 구한 철근 응력의 20%를 취하였다^{(1),(2),(3)}.

이 연구에서 대상으로 하고 있는 철근콘크리트 교각 등과 같은 구조물은 보, 기둥, 기초 등 서로 다른 종류의 부재들로 이루어져 있기 때문에 기둥과 기초부 등의 경계면에는 단면강성이 급변함에 따라 철근의 정착슬립(anchor slip)이나 접합면의 미끄러짐, 접합면의 관입 등의 국소적인

불연속 변위가 발생하게 되는데 이를 고려하기 위해서 경계면 요소(interface element)^{(1),(2),(3)}를 도입하였다.

지진하중과 같은 동적하중을 받는 철근콘크리트 부재의 거동을 지배하는 주철근은 매우 큰 인장과 압축변형률을 교번으로 받는다. 이러한 큰 변형률의 교번작용으로 인한 Low-cycle 피로 문제는 휨부재에서 파괴의 두드러진 형태이다. 이 연구에서는 철근만의 특성을 고려한 Coffin Manson의 제안식⁽⁶⁾을 Miner의 선형 손상모델⁽⁷⁾에 적용하면서 많은 경우에 대한 해석결과로부터 수정 제안하여 콘크리트 속의 철근에 대한 피로거동을 고려하였다⁽³⁾.

3. 비선형 유한요소해석 프로그램

3.1 유한요소해석 프로그램의 작성

이 연구에서는 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소^{(1),(2),(3)} 그리고 경계면요소^{(1),(2),(3)} 등을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP⁽⁸⁾에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)⁽¹⁾를 사용하였다.

3.2 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동에 미치는 크기효과 고려

상사법칙에 의한 축소모형 실험시 여러 가지 제약조건으로 인하여 필연적으로 축소율의 차이에 의해서 생기는 크기효과가 나타난다. 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동에 영향을 미치는 크기효과에는 횡방향으로 배근된 구속철근에 의한 구속효과, 축방향철근의 기초로부터의 정착슬립, 횡방향철근의 배치간격의 영향으로 인한 축방향철근의 좌굴길이의 변화 등이 있다. 따라서, 이러한 영향들을 고려한 해석을 하여야만 정확한 비탄성 거동을 예측할 수 있는 것이다.

이 연구에서는 전 절에서 설명한 비선형 재료모델 등을 통해서 위의 효과들을 고려하였다. 또한, 유한요소해석을 위한 요소크기를 고려하여 콘크리트의 극한변형률을 변화시켜 크기효과를 나타내었다.

4. 수치예제 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 그림 1에 나타난 것과 같은 철근콘크리트 교각의 실험체⁽⁹⁾를 선정하였다. 이 실험체를 해석 예로 채택한 이유는 실제 교각과 같은 구조조건을 재현하기 위해서 2.4 m × 2.4 m의 단면치수를 적용한 모형과 상사법칙을 적용한 1/4 축소모형에 대해서 반복하중시의 비탄성 거동을 비교, 관찰한 실험이기 때문이다.

실험에 사용된 모형은 표준이 되는 L2 실험체와 이를 1/4로 축소한 S1 실험체로 나눌 수 있으며 구조제원을 정리하여 비교하면 표 1과 같고 실험체의 재료물성은 표 2와 같다. 이들 실험체에 대한 재하하는 대형실험체의 경우에는 대변위가력책(최대하중 ±2500 kN, 최대변위 ±600 mm) 2개를 병렬로 배치해서 가했으며 실험에 있어서 재하장치와 반력판의 성능상 축력은 주는 것이 곤란하기

때문에, 축력은 재하하지 않았다. 한편 축소모형은 기둥단면을 횡으로한 형태로 기초를 반력벽에 고정시켰으며 수평력은 가진기(최대하중 ± 1250 kN, 최대변위 ± 500 mm, 최대속도 ± 100 cm/sec)에 의해서 주어졌다. 축력은 대형모형에 대한 실험조건에 맞추어서 작용시키지 않았다. 재하는 항복내력까지는 4단계로 나누어서 하중제어하며, 이후 항복변위의 정수배로 변위제어한다. 실험은 수평력이 최대내력보다 저하되고 축방향철근의 파단 등의 손상이 생길 때까지 수행했다.

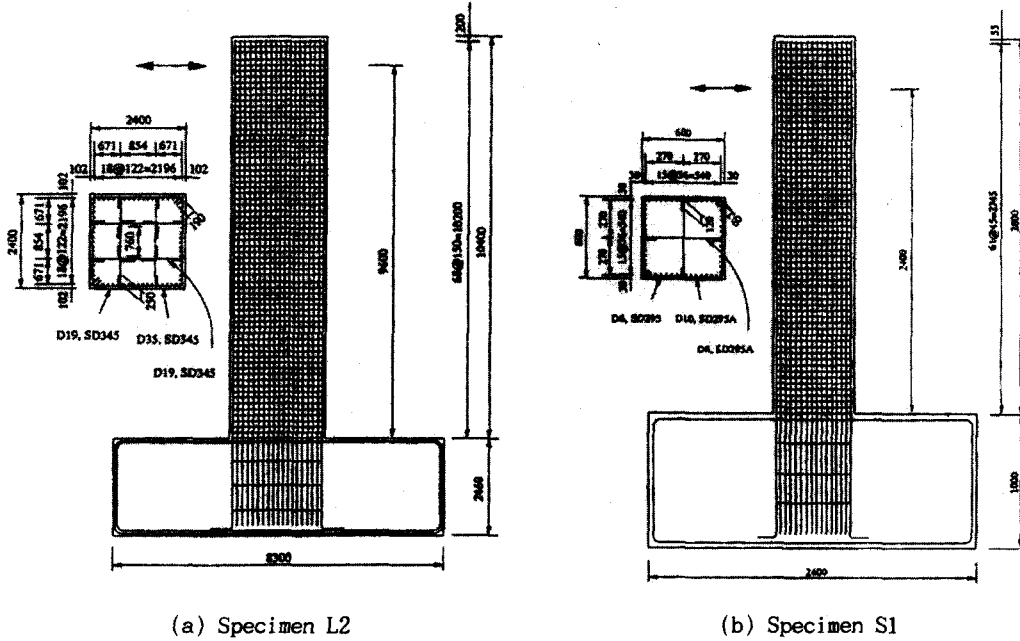


그림 1. 실험체의 제원

표 1. 대형실험체와 소형실험체의 비교

구분	L2	S1	L2 / S1
단면치수 (mm)	2400×2400	600×600	4.0
교각높이 (mm)	9600	2400	4.0
형상비	4.0	4.0	1.0
축방향철근 직경 (mm)	35	10	3.5
축방향철근 간격 (mm)	122	36	3.39
축방향 철근비	0.012	0.012	1.0
횡방향철근 직경 (mm)	19	6	3.17
횡방향철근 간격 (mm)	150	45	3.33
횡방향철근 유효길이 (mm)	854	270	3.16
횡방향철근 체적비	0.0089	0.0104	0.86
최대굵은골재 치수 (mm)	20	20	1.0

표 2. 실험체의 재료물성

Specimen		L2	S1
Dimension of the cross section (cm)		240 × 240 (Square)	60 × 60 (Square)
Effective height (cm)		960	240
Aspect ratio		4.0	4.0
Main reinforcement	Material	SD345 D35	SD295A D10
	Yielding stress (MPa)	424	395
	Reinforcement ratio ρ_l (%)	1.2	1.2
Hoop reinforcement	Material	SD345 D19	SD295 D6
	Yielding stress (MPa)	344	389
	Volumetric ratio ρ_w (%)	0.89	1.04
Strength of concrete (MPa)		32.6	39.0
Axial stress (MPa)		0	0

그림 2는 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소 분할된 망이며 3점 가우스 적분을 적용한 8절점 등매개요소를 이용하였고 하중이 재하되는 부위에는 실험에서와 동일한 조건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지 않는 탄성요소를 사용하였다. 또한, 기초와 교각의 접합부에는 정착 슬립 등의 불연속변위를 고려하기 위하여 6절점 경계면 요소를 사용하였다.

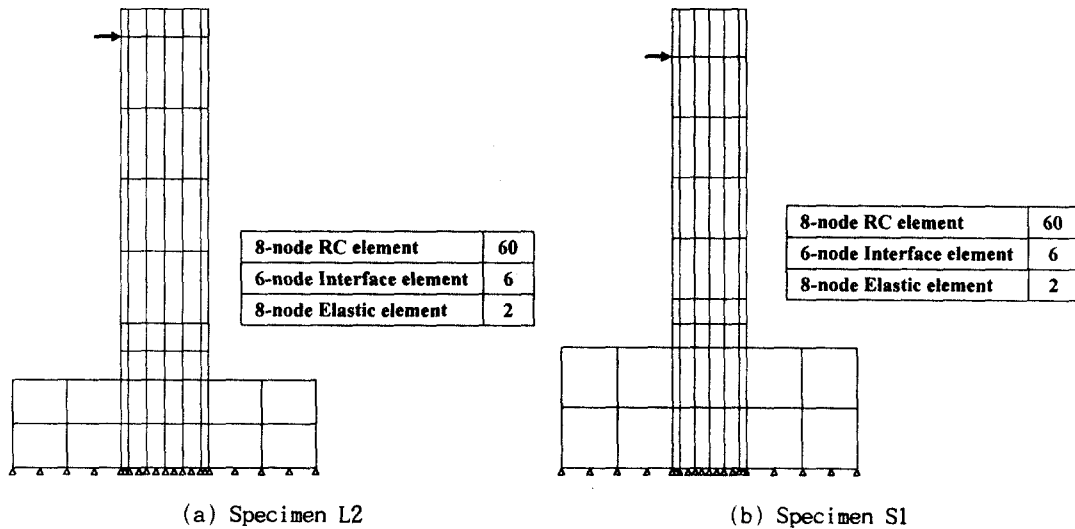


그림 2. 유한요소망

그림 3과 그림 4는 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위

곡선으로부터 포락선(envelope)의 형태로 나타낸 결과이다. 실험과 해석결과 모두 콘크리트 피복이 박리한 후 축방향철근의 좌굴로 인한 손상으로 인해 수평력이 저하함을 알 수 있다.

그림 5는 L2 실험체와 S1 실험체의 수평력-드리프트 관계의 이력곡선의 포락선을 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 S1 실험체의 수평력은 상사법칙에 의해서 보정을 하여 L2 실험체와 상대적인 비교가 가능하도록 했다. 이 그림으로부터 수평력-드리프트 이력곡선의 포락선은 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 단, 최대수평력에 관해서는 L2 실험체가 S1 실험체에 비해서 약 7% 정도 큰 결과를 보이고 있다. 이는 두 실험체의 축방향철근비는 모두 1.2%로 일치하지만 사용된 철근의 항복점이 L2 실험체가 S1 실험체 보다 7% 정도 컸기 때문이라고 판단되며 실험에서도 같은 결과를 보고하고 있다.

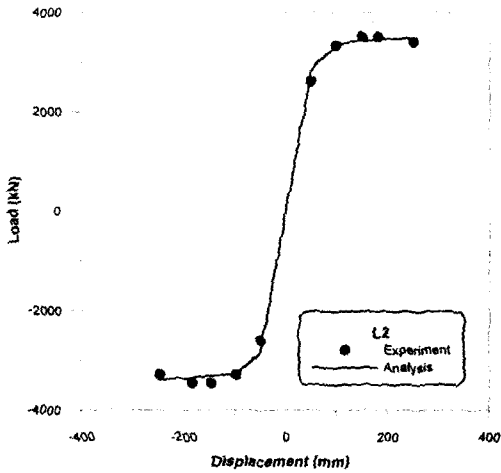


그림 3. 이력곡선의 포락선의 비교

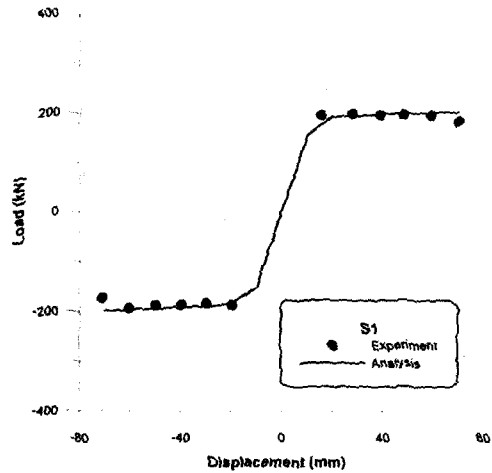


그림 4. 이력곡선의 포락선의 비교

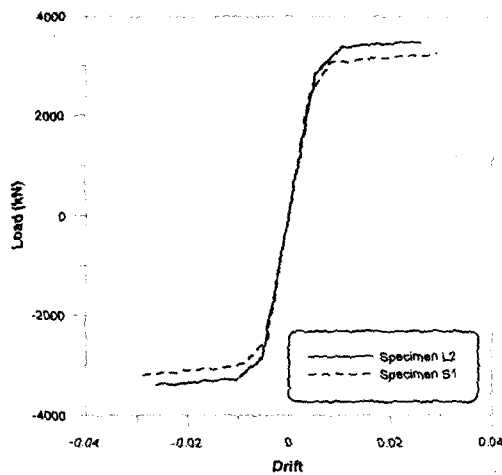


그림 5. 수평력-드리프트 관계

L2 실험체와 S1 실험체의 에너지 흡수성능을 비교하면 종국 시에 도달하기 전까지의 범위에서

는 각 재하단계에 있어서 이력흡수 에너지가 거의 증가였지만, 종국 시에 있어서는 축소모형 쪽이 상대적으로 이력흡수 에너지가 크게 되었다. 이는 그림 5의 수평력-드리프트관계의 이력곡선의 포락선을 통해서도 확인 할 수 있다.

이 연구의 해석에 의한 최대하중과 변위연성도를 실험과 함께 비교하여 표 3에 정리하였다. 이 표에서 해석에 의한 항복변위 및 극한변위는 직접적인 방법⁽²⁾으로 평가하였다. 즉, 항복변위는 시스템 내의 위험단면의 가우스 적분점에서의 철근의 평균응력이 항복응력에 도달하였을 때의 기준점의 수평변위로, 극한변위는 위험단면의 가우스 적분점에서의 콘크리트 또는 철근의 변형률이 각각의 파괴기준 변형률에 도달하였을 때의 기준점의 수평변위로 정하였다⁽²⁾. 해석에 의한 결과를 볼 때 해석결과가 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

표 3. 실험과 해석의 결과 비교

Specimen No.		Yielding displacement (mm)	Ultimate displacement (mm)	Ultimate force (kN)	Ductility factor
L2	Experiment	50	250	3503	5.0
	Analysis	60	285	3536	4.8
	Exp. /Ana.	0.83	0.88	0.99	1.04
S1	Experiment	10	70	197.8	7.0
	Analysis	13	76	206.0	5.8
	Exp. /Ana.	0.77	0.92	0.96	1.20

표 1로부터 알 수 있듯이 S1 실험체의 구조재원은 비교적 L2 실험체를 잘 축소한 것이라고 말할 수 있다. 그러나, 전 재원이 이상적으로 축소한 것은 아니며, 실험과 해석으로부터 얻어지는 결과에는 축소율의 차이에 의해서 생기는 단면효과가 다소 포함되어진 가능성에 주의할 필요가 있다.

5. 결론

이 연구에서는 반복하중을 받는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동에 미치는 크기효과의 영향을 검토하기 위한 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 유한요소 해석프로그램을 사용하여, 반복되는 면내력이 작용하는 철근콘크리트 교각을 해석하였다. 실험결과와 비교·검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 제안한 해석기법과 모델이 반복하중을 받는 철근콘크리트 교각의 크기효과를 포함한 전체적인 거동특성을 바르게 표현하고 있음이 입증되었다.
- 2) 면내 횡하중에 저항해야 하는 철근콘크리트 교각의 크기효과를 포함한 반복거동을 제대로 평가함으로써 단조증가하중에 대한 해석 또는 실험으로 제한되었던 부재의 강도를 유한요소 해석

만으로도 예측이 가능하게 하였으며 내진성능 평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.

3) 수평-드리프트관계의 이력곡선의 포락선을 대형모형과 축소모형에서 비교하면, 이 거동은 비교적 잘 일치했다. 단 에너지 흡수성능을 비교하면, 중국 시에 도달하기 전까지 범위에서는 각 재하단계에 있어서 이력흡수 에너지가 거의 증가였지만, 중국 시에 있어서는 축소모형 쪽이 상대적으로 이력흡수 에너지가 크게 되었다.

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. 김태훈, 유영화, 신현목(2000), "지진하중을 받는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동 및 연성 능력에 관한 해석적 연구," 한국지진공학회 논문집, 제4권, 4호, pp. 37-51.
3. 김태훈, 이상철, 신현목(2001), "지진시 철근콘크리트 교각의 피로거동에 관한 해석적 연구," 한국콘크리트학회 논문집, 제13권, 4호, (인쇄중).
4. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R.(1988), "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826.
5. Kent, D. C., and Park, R.(1971), "Flexural members with confined concrete," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 97, No. 7, pp. 1969~1990.
6. 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.
7. Perera, R., Carnicero, A., Alarcon, E., and Gomez, S.(2000), "A Fatigue Damage Model for Seismic Response of RC Structures," Computers and Structures, Vol. 78, pp. 293-302.
8. Taylor, R. L.(2000), FEAP - A Finite Element Analysis Program, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2.
9. Hosikuma, J., Unjoh, S., and Nagaya, K.(2001), "Size Effect on Inelastic Behavior of Reinforced Concrete Columns Subjected to Cyclic Loading," Journal of JSCE, No. 669, V-50, pp. 215-232 (in Japanese).