변동 축하중을 받는 철근콘크리트 교각의 내진성능평가

Seismic Performance Evaluation of Reinforced Concrete Bridge Columns under Varying Axial Force

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

국문요약

이 연구는 변동 축하중을 받는 철근콘크리트 교각의 내진성능평가를 하는데 그 목적이 있다. 사용된 프로그램은 철근콘크리트 구조물의 해석을 위한 RCAHEST이다. 재료적 비선형성에 대해서는 균열콘크리트에 대한 인장, 압축, 전단모델과 콘크리트 속에 있는 철근모델을 조합하여 고려하였다. 이에 대한 콘크리트의 균열모델로서는 분산균열모델을 사용하였다. 두께가 서로 다른 부재간의 접합부에서 단면강성이 급변하기 때문에 생기는 국소적인 불연속변형을 고려하기 위한 경계면요소를 도입하였다. 또한, 같은 변위진폭에 있어서의 하중재하 회수에 의한 효과를 고려하였다. 이 연구에서는 변동 축하중을 받는 철근콘트리트 교각의 내진성능평가를 위해 제안한 해석기법을 신뢰성 있는 연구자의 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

주요어 : 축하중, 철근콘크리트 교각, 내진성능평가, 재료적 비선형성

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate seismic performance of reinforced concrete bridge columns under varying axial force. 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 seismic performance evaluation of reinforced concrete bridge columns under varying axial force is verified by comparison with reliable experimental results.

Key words : axial force, reinforced concrete bridge columns, seismic performance evaluation, material nonlinearity

1. 서 론

근래에 세계 각국에서 발생한 지진들, 즉 Loma Prieta 지진, Northridge 지진, Kobe 지진, 대만지진 등으로 인하여 빌딩 및 교량과 같은 사회기반시설물의 피해가 잇따르고 있다. 그 중에서도 교량 구조물의 손상 및 붕괴는 현대사회에서 치명적인 손실로 이어질 수 있다. 따라서 현존하는 교량들의 내진성능을 정확히 평가하는 연구와 그에 따른 내진성능 향상에 대한 연구가 시급한 과제이다.

지진시 교량의 거동은 지진 가속도에 의한 상부구조의 관성력과 이를 지지하고 있는 교각의 거동에 따라 결정된다고 볼 수 있다. 이에 따라 교각의 내진성능은 교량 구조물의 내진성능을 나타내는데 가장 중요한 특성이 된다.

철근콘크리트 교각은 종방향 및 횡방향 철근, 축력, 형상비 등에 따라 각기 다른 파괴양상 및 연성거동을 보인다. 이에 많은 연구자들이 실험적 방법에 의하여 교각의 내진성능평가를 시도하였다.[1],[2] 그러나 실험대상 교각이 편중되어 있어 국내에 존재하고 있는 다양한 형태를 가진 교각의 내진성능을 평가한 기초 자료의 축적은 미흡한 실정이다. 따라서 지진하중 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 내진성능평가를 위한 적절한 해석기법의 개발이 이루어진다면, 다양한 형태의 교각에 대한 비선형 지진해석을 실시하여 실험으로 미처 다루지 못한 여러 형태의 교각들의 내진성능평가가 가능할 것이다.[3]

이 연구의 목적은 지진하중과 같은 반복하중에 의하여 변동 축하중을 받는 Fig. 1과 같은 다주식 교각의 내진성능평가이다. 이러한 교각구조는 지진에 의해 축력이 변화하여 축인장력과 축압축력이 동반되는 복잡한 거동특성을 지니고 있다.

이 연구에서는 이러한 구조적 특성을 지닌 교각구조를 대상으로 하여 비선형 동적해석을 실시하여 지진거동특성 및 파괴메카니즘을 파악하고 내진성능을 평가하였다. 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, 2축 응력 상태에 대한 직교 이방성 재료모델에 의해서 균열이 발생한 철근콘크리트 요소의 거동특성을

* 정회원 · 성균관대학교 건축 · 조경 및 토목공학 연구소 연구원, 공학박사
(대표저자 : neopilot@skku.edu)
** 정회원 · 국립한경대학교 토목공학과 부교수, 공학박사
*** 정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사
본 논문에 대한 토의를 2003년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2003. 2. 10 / 심사종료일 : 2003. 4. 8)

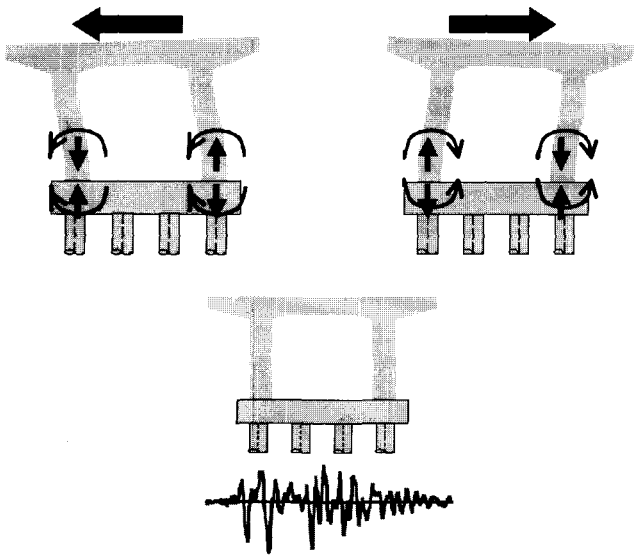


Fig. 1 A column in a pier consisting of several columns

표현하고, 이를 유한요소법을 사용하여 확장한 기존의 검증된 프로그램[3]-[5]을 이용하여 지진하중과 같은 반복하중에 의하여 변동 축하중을 받는 철근콘크리트 교각의 비선형 거동특성을 예측하고자 한다.

2. 철근콘크리트의 비선형 재료모델

철근콘크리트의 비선형 재료모델은 저자 등에 의하여 이미 발표된 재료모델[3]-[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 제2균열의 발생을 제1균열과 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 부착효과 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 균열면 안쪽의 철근 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.

압축파괴가 발생한 콘크리트의 역학적 특성은 이미 여러 연구자들에 의해서 규명된 바가 있다. 이 연구에서는 콘크리트 압축파괴 이후의 효과를 Kent 등에 의해 제안된 해석모델[6]을 수정하여 고려하였다. 또한, 압축파괴가 발생한 콘크리트의 안에 있는 철근의 좌굴거동은 최종적인 내력저하의 원인이 된다. 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.

지진하중과 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 교각의 비선형 이력거동 특성을 올바르게 평가하기 위해서는 하중재하 회수에 의한 피로거동을 무시할 수 없으며 이에 대한 충분한 고려가 필요하다. 이 연구에서는 철근과 콘크리트의 해석모델에 하중재하 회수의 누적에 따른 강도 및 강성 저하의 영향을 적용함으로써 피로손상을 고려하였다. 철근의 피로모델은 Coffin-Manson의 제안식[7]을 적용하였으며 콘크리트의 피로모델은 Kakuta 등의 제안식[8]을 수정하여 적용하였다.

3. 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

3.1 비선형 유한요소해석 프로그램의 작성

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

이 연구에서는 후자의 방법을 택하여 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소, 그리고 경계면 요소 등을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP[9]에 이식한 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)[10]를 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 지수이다. 이러한 손상지수는 구조물레벨과 요소레벨로 나누어 볼 수 있다.

구조물레벨에는 구조물의 기본주기 변화[11]를 이용하는

평가기법이 있으며 요소레벨에는 강성의 저하[12], 피로의 정식화[13] 그리고 이력곡선의 에너지 방출[14] 등을 이용하는 평가기법이 있다. 이러한 구조물레벨의 손상지수 산정법은 구조물의 손상을 정량적으로 평가할 수 있는 방법이기는 하지만 각 하중단계에서의 기본주기를 계산하는 등의 번거로움이 있다.

이에 이 연구에서는 비선형 유한요소해석을 전제로 하여 유한요소해석에서 필연적으로 계산되는 가우스적분점에서의 변형률을 이용하여 해석프로그램에서 직접 손상지수를 산정할 수 있는 방법을 개발하였다. 즉, 비탄성 해석으로 얻어지는 콘크리트와 철근의 극한변형률에 근거한 파괴기준을 토대로 요소레벨의 손상지수를 개발하였다. 파괴기준은 크게 콘크리트의 압축파괴와 전단파괴, 그리고 철근의 인장파괴로 나누어 볼 수 있으며 파괴기준을 기준으로 각 해석단계의 변형률에 해당하는 손상지수를 구한다. 이러한 파괴기준과 손상지수를 정리하여 Table 1에 나타내었다.[3),4)]

비선형 유한요소해석에서는 강성저하, 강도저감, 피로손상, 그리고 이력곡선의 에너지 방출 등을 정확히 예측하고 있으므로 가우스적분점에서의 변형률은 구조물의 손상 정도를 평가할 수 있는 지표로 사용이 가능하다.

4. 해석예 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 Fig. 2와 Fig. 3에 나타난 것과 같은 철근콘크리트 교각의 실험체[15]를 선정하였다. 이 실험체를 해석 예로 채택한 이유는 지진하중과 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 교각의 축하중 영향을 정량화 시킨 실험이기 때문이다.

4.1 선정된 실험체의 제원[15]

실험체의 제원은 Table 2와 같으며 이들 실험체에 대한 재하방법은 Fig. 4에 나타난 것과 같다. 재하는 교각기초부에서 주철근이 항복할 때, 하중작용위치에 생기는 변위를 항복변위 δ_y로 정의하고, 이 변위의 정수 배 $n\times\delta_y(n=1,2,3\ \ldots)$로 순차적으로 변위진폭을 증가시켰으며 동일한 재하변위진폭에 있어서 반복회수를 3회로 하였다. 또한 각 실험체에 대한 축하중은 Fig. 5와 같이 재하하였다. 즉, 실험체 TP-31(CC)는 축압축력 3.0MPa을 일정하게, TP-32(CT)는 축인장력 1.0MPa을 일정하게, TP-33(V1)는 축력을 0~2.0MPa로 변동시켜, 그리고 TP-34(V2)는 축력을 -1.0~2.7MPa로 변동시켜 재하하였다.

Table 1 Damage index of element level

Item		Failure criterion(ε_{cu} or ε_{tu})	Damage index($D.I._e$)
Concrete	Compressive and shear	$0.004+\frac{1.4\rho_s f_{yh}\varepsilon_{sm}}{f'_{cc}}$	$1-ftg_c\left(\frac{2\varepsilon_{cu}-\varepsilon_{cs}}{2\varepsilon_{cu}}\right)^2$
Steel	Tensile	0.10	$1.20\left(\frac{\varepsilon_{ts}}{2ftg_r\varepsilon_{tu}}\right)^{0.67}$

* 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
ftg_c : fatigue parameter for concrete
ftg_r : fatigue parameter for steel
ε_{cs} : compressive strain in analysis step
ε_{ts} : tensile strain in analysis step

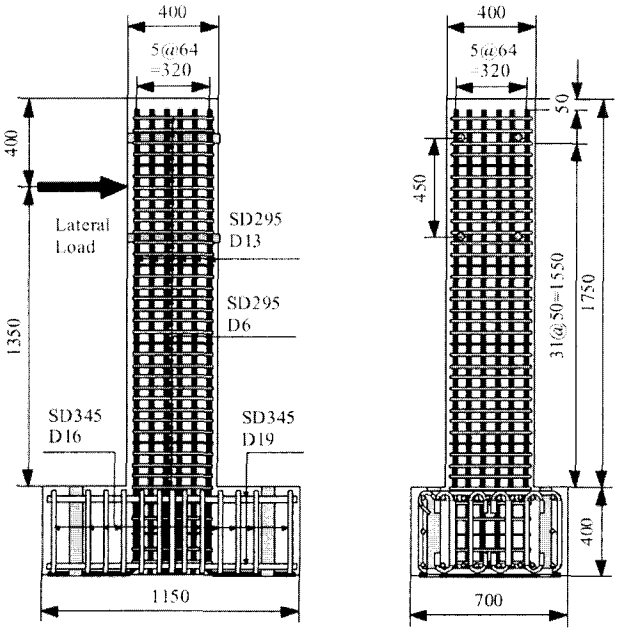


Fig. 2 Test specimen

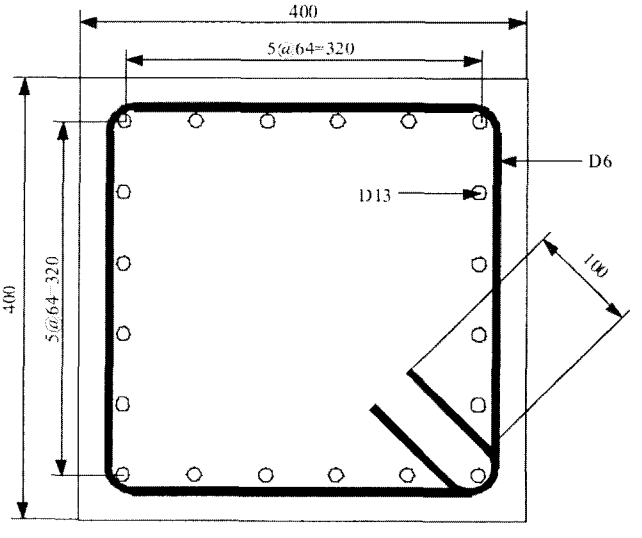


Fig. 3 Cross section

Table 2 Test specimens

Specimen	TP-31	TP-32	TP-33	TP-34
ID in the reference	CC	CT	V1	V2
Section	Square			
Section Size(mm)	400×400			
Effective Height h(mm)	1350			
Effective Depth d(mm)	360			
Aspect Ratio	3.75			
Longitudinal Reinforcement Ratio(%)	1.58			
Volumetric Ratio of Tie Reinforcement ρ_s(%)	0.79			
Cylinder Strength of Concrete σ_{c0}(MPa)	22.9	23.0	22.9	23.0
Longitudinal Reinforcement	SD295A D13(Yield Strength = 374MPa)			
Tie Reinforcement	SD295A D6(Yield Strength = 363MPa)			
Axial Force(kN) (at the Bottom)	470(3.0MPa) (Constant)	-170(-1.0MPa) (Constant)	-10~310(0~2.0MPa) (Varying)	-170~420(-1.0~2.7MPa) (Varying)

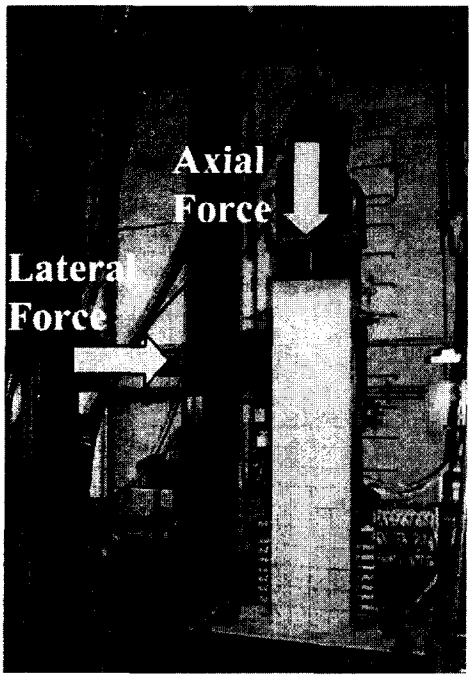


Fig. 4 Test setup

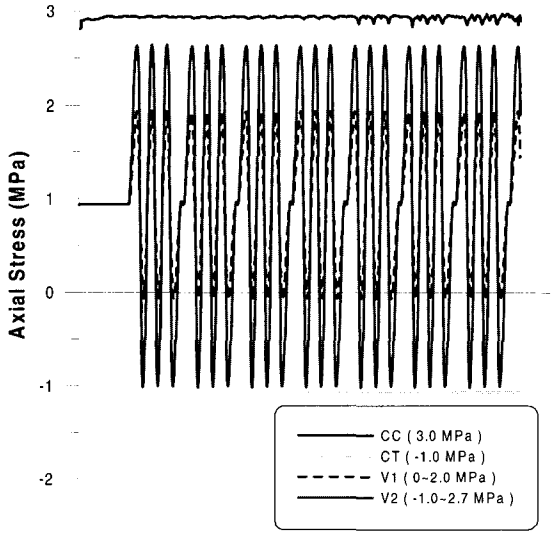


Fig. 5 Loading hystereses for axial force

4.2 유한요소해석을 위한 요소분할

Fig. 6은 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소 분할한 예이며 3점 가우스 적분을 적용한 8절점 등매개 요소를 이용하였고 하중이 재하되는 부위에는 실험에서와 동일한 조건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지 않는 탄성요소를 사용하였다. 또한, 기초와 교각의 접합부에는 정착슬립 등의 불연속 변위를 고려하기 위하여 6절점 경계면 요소를 사용하였다.

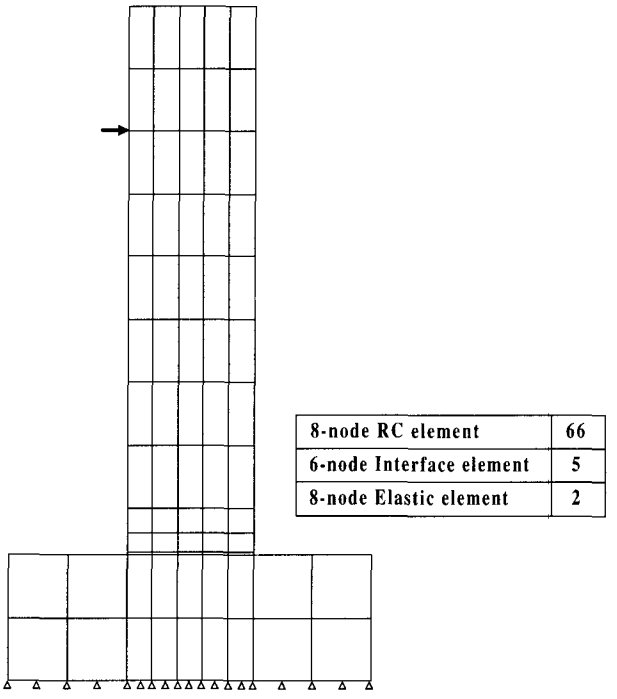
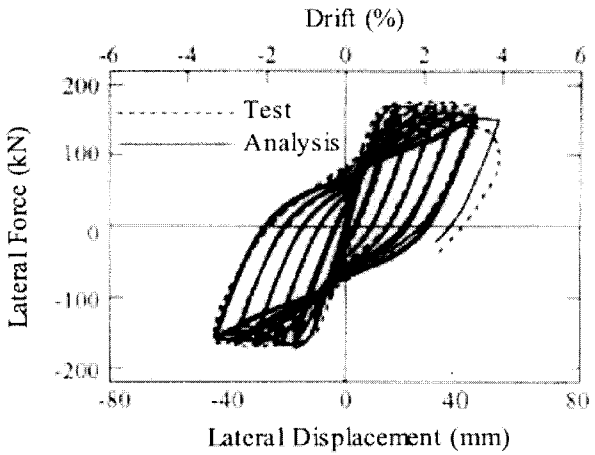


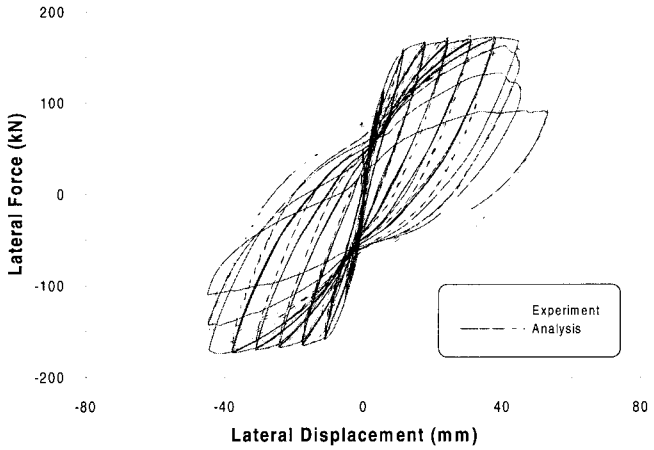
Fig. 6 Finite element mesh used for analysis

4.3 내력, 변형성능과 이력특성

Fig. 7~Fig. 10는 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계를 나타내고 있다. 또한 Sakai 등이 fiber 요소를 사용하여 해석한 결과를 비교하였다.[15]

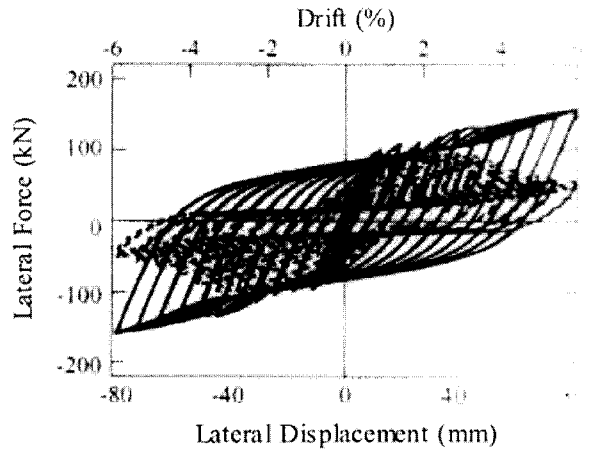


(a) Sakai and Kawashima's result(2002)

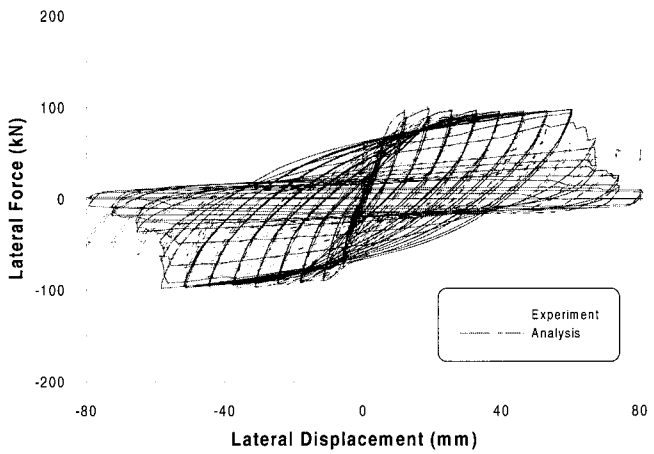


(b) Present analysis

Fig. 7 Lateral force vs. Lateral displacement hysteresis for specimen TP-31

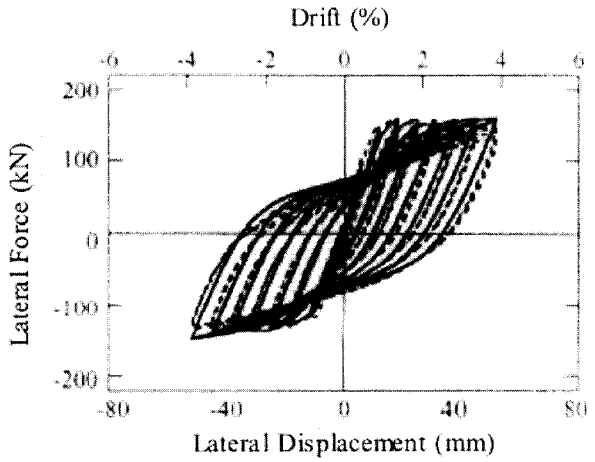


(a) Sakai and Kawashima's result(2002)

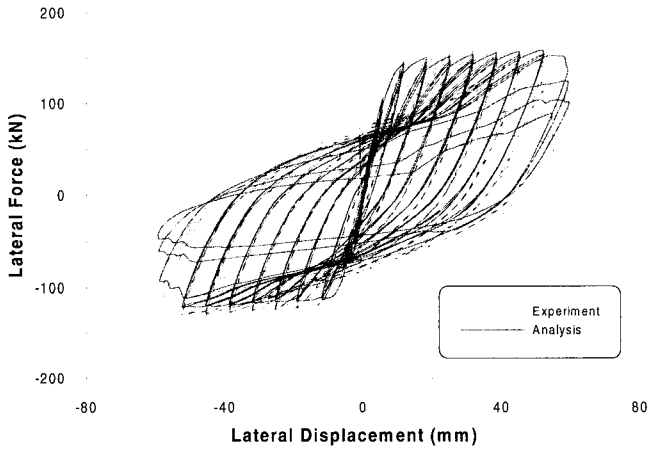


(b) Present analysis

Fig. 8 Lateral force vs. Lateral displacement hysteresis for specimen TP-32



(a) Sakai and Kawashima's result(2002)



(b) Present analysis

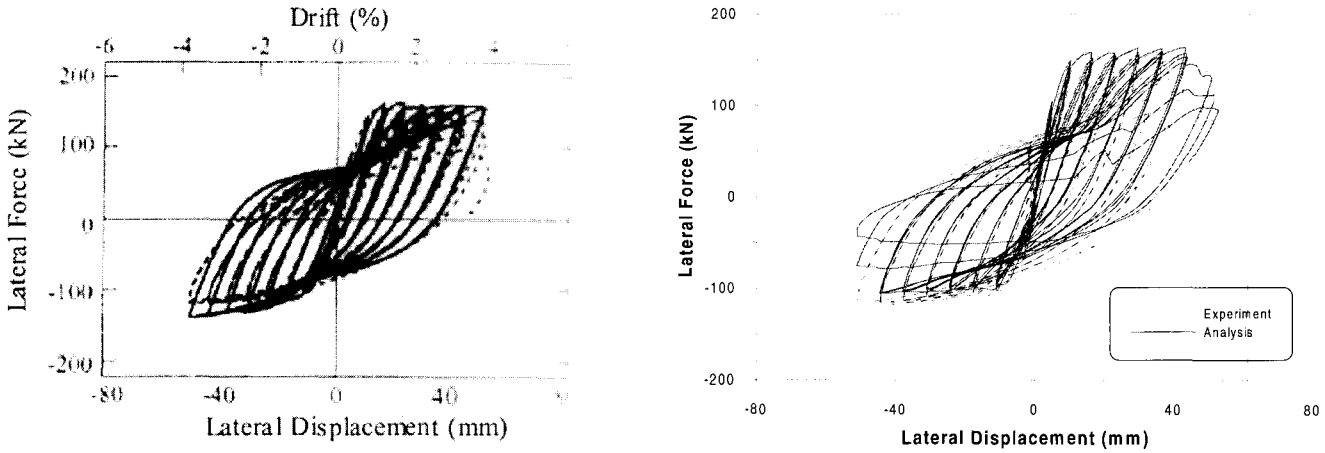
Fig. 9 Lateral force vs. Lateral displacement hysteresis for specimen TP-33

실험체 TP-31(CC)의 강성은 반복 주기하중이 작용하는 동안 점차 감소하였다. 이러한 강성 감소의 주요 원인은 부재 접합부에서의 정착슬립과 콘크리트의 할렬 때문으로 판단된다. 즉 접합부에 균열이 형성되면 주철근의 부착에 대한 저항 능력이 크게 상실하게 되고, 주철근이 항복함에 따라 접합부에서 부분적으로 슬립이 발생하기 때문이다. 이와 같은 비탄성 거동 특성을 이 연구의 해석결과는 올바르게 평가하고 있다.

실험체 TP-32(CI)는 지속적인 축인장력으로 인하여 소성힌지 부분에서 휨균열뿐만 아니라 전단균열이 발생하며 주철근은 휨인장과 전단에 의해 복잡한 좌굴모드로 항복하였다. 이러한 전단변형에 의한 거동특성을 fiber 요소를 이

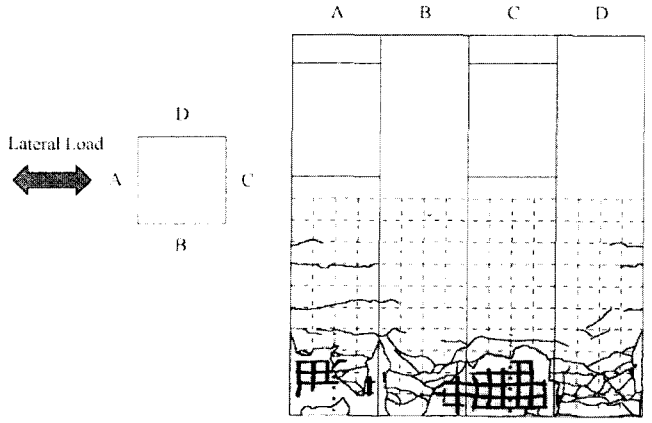
용한 Sakai 등의 해석결과[15]는 제대로 나타내지 못하고 있으나 이 연구의 해석결과는 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

실험체 TP-33(V1)와 TP-34(V2)는 소성힌지 부분의 콘크리트의 압축파괴가 Fig. 11(a)과 Fig. 12(a)와 같이 A면보다 C면에 집중된다. 이는 push 횡변위으로 인한 복원력이 pull 횡변위로 인한 복원력보다 크기 때문이다. 즉, push 횡변위일 때 축하중에 의하여 압축력이 증가하기 때문이다. 이러한 비선형 거동특성을 이 연구에서 제안한 해석방법은 잘 평가하고 있으며 손상정도를 검색하기 위한 파괴시점의 요소레벨의 손상지수도[3]-[5]도 이를 잘 나타내고 있다(Fig. 11(b), Fig. 12(b)).

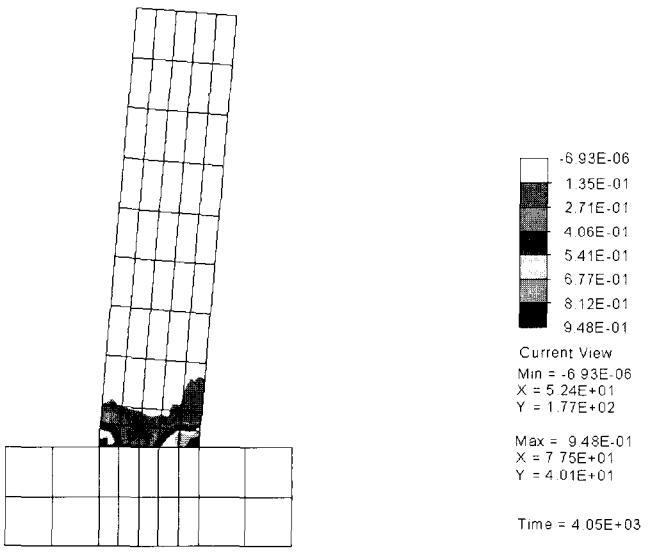


(a) Sakai and Kawashima's result(2002) (b) Present analysis

Fig. 10 Lateral force vs. Lateral displacement hysteresis for specimen TP-34

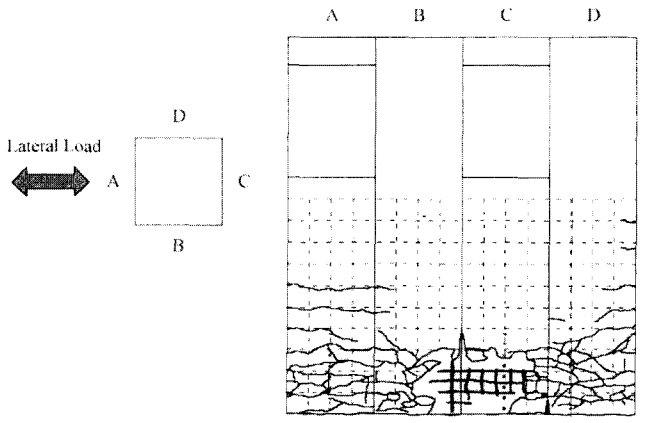


(a) Experiment

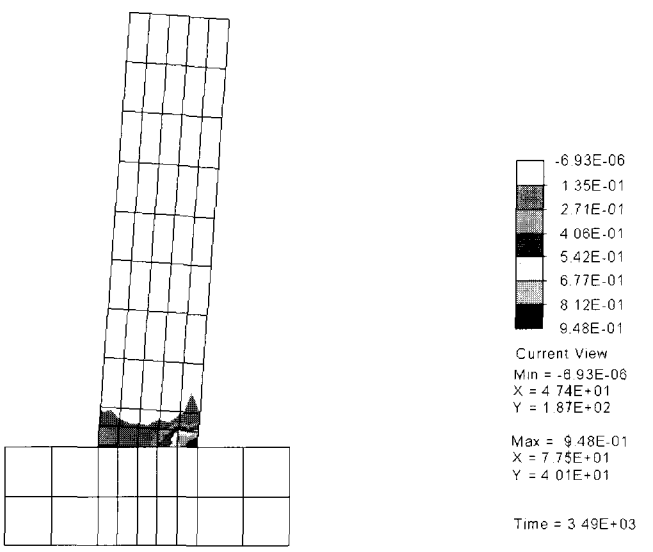


(b) Analysis

Fig. 11 Failure mode for specimen TP-33



(a) Experiment



(b) Analysis

Fig. 12 Failure mode for specimen TP-34

4.4 검증 및 고찰

Fig. 11~Fig. 12는 파괴시점의 요소레벨의 손상지수도와 실험결과를 비교한 것으로서 구조물의 중요한 비선형 거동 특성인 소성힌지 형성 부위가 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 가시화된 요소레벨의 손상지수도를 통하여 철근콘크리트 교각의 손상정도를 쉽게 검색할 수 있으며 내진성능평가에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

일련의 해석결과와 실험결과의 비교로부터 이 연구에서 제안하고 있는 방법은 지진하중과 같은 반복하중에 의하여 변동 축하중을 받는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동을 적절히 평가하고 있으며, 개발된 철근콘크리트 구조물의 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 이용함으로써, 해석적 방법에 의한 신설 또는 기존 철근콘크리트 교각의 내진성능평가가 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 연구에서는 변동 축하중을 받는 철근콘크리트 교각의 비선형 거동과 내진성능평가를 위한 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 유한요소 해석 프로그램을 사용하여, 반복되는 면내력이 작용하는 철근콘크리트 교각을 해석하였다. 실험결과와 비교·검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

1) 제안한 해석기법과 모델이 지진하중과 같은 반복하중에 의하여 변동 축하중을 받는 철근콘크리트 교각의 전체적인 거동특성을 바르게 표현하고 있음이 입증되었다.
2) 이 연구에서 제안된 비선형 유한요소해석은 변동 축하중을 받는 철근콘크리트 교각구조의 응력 분포 및 변형에 대한 구체적인 정보를 제공하고 있으며 실험결과에 나타난 균열 및 변형결과와 전반적으로 일치하는 손상지수도를 보여주고 있다.
3) 지진하중을 받는 철근콘크리트 교각의 응답특성 및 지진손상을 제대로 평가함으로써 철근콘크리트 교각구조의 내진성능평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.
4) 현행 내진 설계 규정에 만족하지 않는 기존의 철근콘크리트 교각에 대한 보수·보강 등의 판단을 위한 내진성능 평가기법을 제시하였다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단 지원, 지진공학연구센터(KEERC)의 연구비 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 정영수, 이강균, 한기훈, 박종협, "단일주 원형 철근콘크리트 교각의 내진거동에 관한 준정적 실험", 한국지진공학회 논문집, 제3권, 제2호, 1999, pp. 55-65.
2. 이재훈, 배성용, 윤석구, "나선철근교각의 내진성능실험", 대한토목학회 논문집, 제21권, 제1-A호, 2001, pp. 109-121.
3. 김태훈, "비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가", 박사학위논문, 성균관대학교, 2003.
4. 김태훈, 김운학, 신현목, "철근콘크리트 교각의 지진손상평가 I: 이론 및 정식화", 한국지진공학회 논문집, 제6권, 제3호, 2002, pp. 31-40.
5. 김태훈, 김운학, 신현목, "철근콘크리트 교각의 지진손상평가 II: 수치해석 예", 한국지진공학회 논문집, 제6권, 제3호, 2002, pp. 41-52.
6. Kent, D. C. and Park, R., "Flexural members with confined concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 97, No. 7, 1971, pp. 1969~1990.
7. Mander, J. B., Panthaki, F. D., and Kasalanati, K., "Low-cycle fatigue behavior of reinforcing steel," *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 6, No. 4, 1994, pp. 453-468.
8. Kakuta, Y., Okamura, H., and Kohno, M., "New concepts for concrete fatigue design procedures in Japan," *IABSE Colloquium on Fatigue of Steel and Concrete Structures*, Lausanne, 1982, pp. 51-58.
9. Taylor, R. L., *FEAP - A Finite Element Analysis Program, Version 7.2, Users Manual*, Vol. 1 and Vol. 2, 2000.
10. 김태훈, 신현목, "Analytical approach to evaluate the inelastic behaviors of reinforced concrete structures under seismic loads," 한국지진공학회 논문집, 제5권, 제2호, 2001, pp. 113-124.
11. Rodriguez-Gomez, S. and Cakmak, A. S., "Evaluation of seismic damage indices for reinforced concrete structures," Report No. NCEER 90-0022, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, 1990.
12. Roufaiel, M. S. L. and Meyer, C., "Analytical modeling of hysteretic behaviour of R/C frames," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 3, 1987, pp. 429-444.
13. Chung, Y. S., Meyer, C., and Shinozuka, M., "Modeling of concrete damage," *ACI Structural Journal*, Vol. 86, No. 3, 1989, pp. 259-271.
14. Kratzig, W. B., Meyer, I. F., and Meskouris, K., "Damage evolution in reinforced concrete members under cyclic loading," *Proceedings of 5th International Conference on Structural Safety and Reliabililty*, San Francisco, Vol. 2, 1989, pp. 795-802.
15. Sakai, J. and Kawashima, K., "Effect of varying axial loads including a constant tension on seismic performance of reinforced concrete bridge piers," *Journal of Structural Engineering*, JSCE, 48A, 2002, pp. 735-746.