

반복 횡하중을 받는 철근콘크리트 골조의 비탄성 거동 및 연성능력

김태훈^{1)*} · 김운학²⁾ · 신현목¹⁾

¹⁾성균관대학교 토목환경공학과 ²⁾한경대학교 토목공학과

(2001년 9월 3일 원고접수, 2002년 6월 9일 심사완료)

Inelastic Behavior and Ductility Capacity of Reinforced Concrete Frame Subjected to Cyclic Lateral Load

Tae-Hoon Kim^{1)*}, Woon-Hak Kim²⁾, and Hyun-Mock Shin¹⁾

¹⁾ Dept. of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea

²⁾ Dept. of Civil Engineering, Hankyong National University, Anseong, 456-749, Korea

(Received September 3, 2001, Accepted June 9, 2002)

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the inelastic behavior and ductility capacity of reinforced concrete frame subjected to cyclic lateral load and to provide result 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. The strength increase of concrete due to the lateral confining reinforcement has been taken into account to model the confined concrete. In boundary plane at which each member with different thickness is connected, local 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 displacement amplitude has been also taken into account to model the reinforcing steel. The proposed numerical method for the inelastic behavior and ductility capacity of reinforced concrete frame subjected to cyclic lateral load is verified by comparison with reliable experimental results.

Keywords : inelastic behavior, ductility capacity, reinforced concrete frame, cyclic lateral load, material nonlinearity

1. 서 론

최근 들어 그리스, 터키, 대만 등에서는 큰 지진으로 인하여 수많은 인명 피해뿐만 아니라 건축물, 사회간시설물 등에도 심각한 피해를 입었다. 이로부터 주요구조물의 내진성능의 확보가 인명 및 재산을 지진으로부터 보호하기 위하여 얼마나 중요한지를 다시 한번 확인할 수 있다.

우리나라에서는 1970년부터 지진에 대한 계기관측을 시작한 이래, 홍성지진, 영월지진 등 중소규모의 지진이 빈번히 관측되고 있으며, 이에 따라 한반도도 지진에 대해 안전한 곳이 아니라는 각성과 함께 지진에 대한 피해를 줄일 수 있는 방안을 논의하게 되었으며 신축 또는 기존 구조물의 지진거동 파악 및 내진 설계 등에 많은 노력과 비용이 투입되고 있다.

지진 등과 같은 횡하중 하에서 철근콘크리트 구조물은 대부분 비탄성 영역까지 이르는 변형을 겪게 되기 때문에

지진시에 대비한 내진성능평가를 위해서는 비탄성 범위에서 반복 주기하중을 받는 부재의 특성, 즉 부재의 연성, 강성저하, 에너지의 소산능력 등을 파악하여야 하며, 부재의 이력 거동 특성을 정확히 구명할 필요가 있다.

지진하중과 같은 반복 횡하중을 받는 철근콘크리트 골조의 비탄성 거동을 해석적으로 규명하기 위해서는 콘크리트의 균열, 철근의 항복, 철근과 콘크리트의 부착작용 및 균열 면에서의 전단전달효과 등과 같은 재료적인 특성을 정확하게 표현할 수 있는 재료모델의 구축이 선행되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 2축 응력 상태에 대한 직교 이방성 재료모델에 의해서 균열이 발생한 철근콘크리트 요소의 거동특성을 표현하고, 이를 유한요소법을 사용한 부재 수준에 대한 것으로 확장함으로써 철근콘크리트 골조의 비선형 이력거동 및 내진성능 평가 기법에 대한 기초를 마련하고자 한다. 또한, 철근콘크리트 교각 등 정정 구조물에서 검증된 바 있는 비탄성 유한요소해석에 의한 손상지수 평가¹⁾를 부정정 구조물인 철근콘크리트 골조에 적용하여 그 타당성을 확인하고자 한다. 즉, 여유력으로 인하여 하나의 소성힌지 발생으로는 붕괴에 이르지 않

* Corresponding author

Tel : 031-290-7543 Fax : 031-290-7549

E-mail : kth7love@nature.skku.ac.kr

는 등 정정 구조물과는 다른 역학거동 특성이 예상되는 철근콘크리트 골조의 하중단계의 손상이나 파괴 등의 평가에 적용할 수 있는지를 검토하고 필요에 따라 제안된 평가식을 수정하고자 한다.

본 연구의 목적은 이러한 비선형 유한요소해석을 이용하여 신축 또는 기존 철근콘크리트 골조의 비탄성 거동 및 연성능력을 파악하는데 있다.

2. 철근콘크리트의 비선형 재료모델

2.1 콘크리트의 직교 이방성 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 균열면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델을 각각 적용한다²⁾.

균열이 분산하여 분포된 철근콘크리트 부재의 변형거동은 사용된 균열개념에 크게 영향을 받는다. 본 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 평가하였다²⁾.

균열이 발생하기 전의 콘크리트의 역학모델은 이축응력 상태에 대한 탄소성파괴모델의 기본개념에 의해서 표현할 수 있다²⁾.

콘크리트에 균열이 발생한 후에도 철근과 콘크리트의 부차작용에 의해서 균열면의 직각방향으로 콘크리트는 응력의 일부분을 부담한다. 이와 같은 균열직각방향으로의 인장강성효과를 고려하기 위해서, 철근의 방향에 관계없이 적용할 수 있고 비교적 간단한 모델인 Okamura 등이 제안한 부차모델을 기본적으로 적용한다. 단, 본 연구에서는 부차모델로부터 구한 콘크리트의 응력을 각 철근의 방향으로 변환함으로써 원실험식에 충실하도록 하였다²⁾.

균열이 발생한 콘크리트는 균열이 발생하기 전의 콘크리트에 비해서 강성이 작아진다는 사실은 이미 여러 연구자들에 의해서 구명된 바가 있다. 균열이 발생한 콘크리트의 압축강성의 저하는, 균열직각방향으로의 인장변형률의 함수로 표현되고 있는 파라미터에 의해서 강성의 저감을 고려하였다²⁾.

균열면에서 골재의 맞물림 현상으로 인한 전단전달 효과는 접촉면 밀도함수에 근거하여 유도한 응력전달모델을 사용하였다. 이 모델에서는 균열면의 형상을 세 개의 파

라메트로 표현하고, 접촉면에서 콘크리트의 탄소성 거동을 가정하고 있기 때문에 제하 및 재재하와 같은 임의 하중 이력에 대해서 그 적용성이 좋다²⁾.

2.2 철근콘크리트에 대한 철근모델

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 철근의 응력은 항복응력보다 작기 때문에, 철근만의 응력-변형률 관계에서 볼 수 있는 항복고원현상은 나타나지 않으며 즉시 변형률 경화현상을 보인다. 본 연구에서는 포락선부분에 대한 철근의 항복후 거동을 일정한 변형률 경화율을 갖는 것으로 저자 등이 제안한 trilinear 모델을 사용하여 고려하였다²⁾.

2.3 횡방향 철근의 구속효과

횡방향으로 배근된 구속철근은 콘크리트의 극한강도와 극한변형률을 크게 증가시키는 효과를 가져다준다. 이와 같이 증가된 콘크리트의 강도와 변형률로 인해서 지진하중 등과 같은 반복하중을 받는 경우에 콘크리트의 부재는 구속되지 않은 경우에 비해서 우수한 연성능력 및 복원력 특성을 나타낸다. 본 연구에서는 콘크리트의 단면형상에 관계없이 적용할 수 있고, 종방향 철근 및 구속철근의 양, 구속철근의 항복강도 및 배근형태 등을 고려할 수 있도록 한 Mander 등의 제안모델³⁾을 채택하였다²⁾.

2.4 콘크리트 압축파괴 이후의 효과

압축파괴가 발생한 콘크리트의 역학적 특성은 이미 여러 연구자들에 의해서 구명된 바가 있다. 본 연구에서는 콘크리트 압축파괴 이후의 효과를 Kent 등⁴⁾에 의해 제안된 해석모델을 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 취하였다²⁾.

2.5 경계면요소의 모델

철근콘크리트 골조 등과 같은 구조물은 보, 기둥, 기초

등 서로 다른 종류의 부재들로 이루어져 있기 때문에 기동과 기초부 등의 경계면에는 단면강성이 급변함에 따라 철근의 정착슬립(anchorage slip)이나 접합면의 미끄러짐, 접합면의 관입 등의 국소적인 불연속 변위가 발생하게 되는데 이러한 변위는 구조물의 강도에는 큰 영향을 미치지 않지만 구조물 전체 변위의 약 30%에 달하고 있다⁵⁾. 따라서, 구조물의 거동특성을 올바르게 평가하기 위해서는 부재 경계면에서의 불연속 변위를 무시할 수 없으며 이를 고려하기 위한 경계면 요소(interface element)⁶⁾의 도입이 필요하다.

2.6 하중재하 회수에 의한 피로거동

지진하중과 같은 반복하중을 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. 콘크리트 속의 철근에 대한 피로거동 모델은 철근만의 특성과 함께 부차효과 등이 동시에 고려되어야 하며 유한요소해석에의 적용성이 평가되어야 한다. 본 연구에서는 철근만의 특성을 고려한 Coffin-Manson의 제안식⁷⁾을 Miner의 선형 손상모델⁸⁾에 적용하면서 많은 경우에 대한 해석결과로부터 수정 제안하여 콘크리트 속의 철근에 대한 피로거동을 고려하였다⁹⁾.

3. 비선형 유한요소해석 프로그램

3.1 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 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. 본 연구에서는 후자의 방법을 택하여 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면 요소^{2,6,9)} 그리고 경계면요소^{2,6,9)} 등을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP¹⁰⁾에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(reinforced concrete analysis in higher evaluation system technology)¹¹⁾를 사용하였다.

3.2 비선형 유한요소해석에 의한 손상지수 평가

내진상세가 적용되지 않은 기존 구조물의 비선형 거동

특성의 파악과 내진성능평가를 위한 노력이 계속되고 있으며 손상정도를 판단하기 위한 척도로서 손상지수를 사용하는 경우가 많아지고 있다. 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 변화¹²⁾를 이용하는 평가기법이 있으며 요소레벨에는 강성의 저하¹³⁾, 피로의 정식화¹⁴⁾ 그리고 이력곡선의 에너지 방출¹⁵⁾ 등을 이용하는 평가기법이 있다.

3.2.1 구조물레벨의 손상지수

구조물레벨의 손상지수의 산정은 기본주기의 변화를 이용한 Rodriguez-Gomez 등의 연구¹²⁾를 적용하였으며 손상지수를 초기조건에 의한 접선강성의 변화에 기인한 구조물의 기본주기 변화에 근거하여 구조물의 손상을 정량적으로 평가하기 때문에 매우 효율적이다. 손상지수는 다음 식과 같이 정의된다.

$$D.I._s = 1 - \left(\frac{T_{initial}}{T_{final}} \right)^2 \quad (1)$$

여기서, $D.I._s$ 는 손상지수(damage index), $T_{initial}$ 는 처음 단계의 기본주기 그리고 T_{final} 는 마지막 단계의 기본주기이다.

손상지수 $D.I._s$ 는 손상이 없는 0.0으로부터 파괴를 나타내는 1.0까지로 표현되며 손상지수 0.7은 파괴의 시점을 알린다. 이러한 한계는 본 연구의 목적과 특성에 일치하는 철근콘크리트 구조물에 대한 Rodriguez-Gomez 등의 연구결과¹²⁾를 수정하여 사용하였으며 Table 1에 나타나 있는 기존의 연구자들이 제안한 손상지수^{16,17,18)}와도 전반적으로 일치함을 알 수 있다¹⁾.

3.2.2 요소레벨의 손상지수

구조물레벨의 손상지수 산정법은 구조물의 손상을 정량적으로 평가할 수 있는 방법이지만 각 하중단계에

Table 1 Correlations of damage index with damage state

Damage state	Minimum value of damage index		
	Park et al.	Stone and Taylor	Williams et al.
Repairable damage	0.10	0.11	0.12
Irreparable damage	0.40	0.40	0.39
Collapse	1.00	0.77	1.28

서의 기본주기를 계산하여야 하며 기본주기로부터 손상지수를 산정하여야 하는 번거로움이 있다. 이에 본 연구에서는 비선형 유한요소해석을 전제로 하여 유한요소해석에서 필연적으로 계산되는 가우스적분점에서의 변형률을 이용하여 해석프로그램에서 직접 손상지수를 산정할 수 있는 방법을 제안하였다. 즉, 비탄성 해석으로 얻어지는 콘크리트와 철근의 극한변형률에 근거한 파괴기준을 토대로 요소레벨의 손상지수를 제안하였다.

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 2에 나타내었다¹⁾.

4. 수치예제 및 고찰

본 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 Fig. 1에 나타난 것과 같은 1/2 축소 2경간 3층 철근콘크리트 골조의 시험체¹⁹⁾를 선정하였다. 이 실험은 기존 철근콘크리트 골조의 비탄성 거동을 예측하기 위한 것으로서 시험체의 재료물성은 Table 3과 같다.

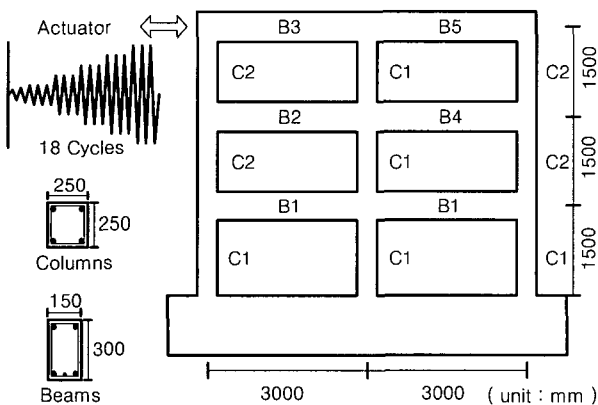


Fig. 1 Test specimens

시험체에 대한 재하방법은 Fig. 1에 나타난 것과 같다. 시험체의 바닥과 철근콘크리트 골조 사이는 완전 고정으로 하였으며 횡방향으로 변위를 가한 경우이다. 재하는 항복변위의 정수배 $n \times \delta_y$ ($n=1, 2, 3 \dots$)로 순차적으로 변위진폭을 증가시키며 동일한 재하변위진폭에 있어서의 반복회수는 3회로 하였다¹⁹⁾.

시험체는 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 Fig. 2와 같이 철근콘크리트요소 430개, 경계면요소 9개, 그리고 집중하중이 작용하는 부분의 파괴를 방지하기 위한 탄성요소 1개로 총 440개의 요소로 분할하였다. 철근콘크리트요소의 경우에는 8절점을 갖는 면요소로서 3점 가우스적분을 적용하고, 경계면요소의 경우에는 6개의 절점을 가지며 요소의 길이방향으로 3개의 적분점에 대해서 변형률과 응력을 산정하도록 하였다.

Fig. 3은 본 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계를 나타내고 있으며 해석결과가 실험결과와 강성, 강도, 그리고 에너지 소산능력등의 측면에서 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 시험체의

Table 3 Details of half-scale model frame

Section	Concrete		Steel	
	f'_c (MPa)	f_y (MPa)	No. of bars & bar dia. (mm)	Hoops
Column C1	40.2	400	4 # 14	12 mm @ 75 mm
Column C2			4 # 12	8 mm @ 75 mm
Beam B1			TOP : 2 # 16 BOT : 2 # 16	6 mm @ 75 mm
Beam B2			TOP : 2 # 16 BOT : 2 # 16, 1 # 10	6 mm @ 75 mm
Beam B3			TOP : 2 # 12 BOT : 2 # 14	6 mm @ 75 mm
Beam B4			TOP : 2 # 18 BOT : 2 # 16	6 mm @ 75 mm
Beam B5			TOP : 2 # 14 BOT : 2 # 14	6 mm @ 75 mm

Table 2 Damage index of element level

Item		Failure criterion (ϵ_u)	Damage index ($D.I._e$)
Concrete	Compressive Shear	$0.004 + \frac{1.4 \rho_s f_{yh} \epsilon_{sm}}{f'_{cc}}$	$1 - \left(\frac{2\epsilon_u - \epsilon_c}{2\epsilon_u}\right)^2$
Steel	Tensile	0.10	$1 - \left(\frac{2\epsilon_u - \epsilon_t}{2\epsilon_u}\right)^2$

* ρ_s = Transverse confining steel ratio

ϵ_{sm} = Steel strain at maximum tensile stress

f_{yh} = Yield stress of the confining steel

f'_{cc} = Confined concrete compressive strength

강성은 반복 주기하중이 작용하는 동안 반복 횟수가 증가할수록 점차 감소하였다. 이러한 강성 감소는 반복 주기하중이 진행되는 동안 소성힌지 영역에서 비탄성 변형이

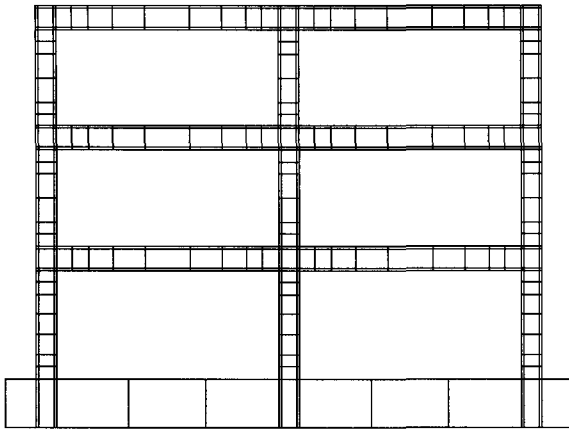
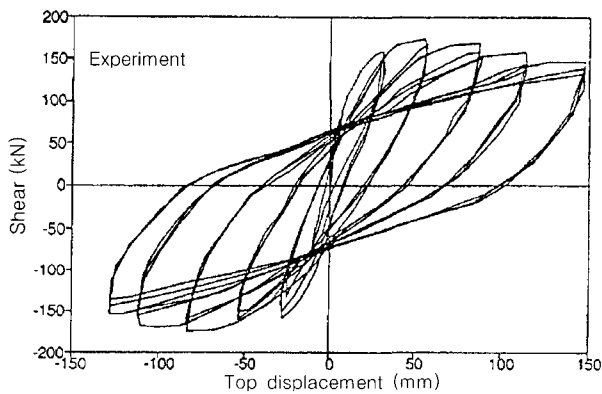
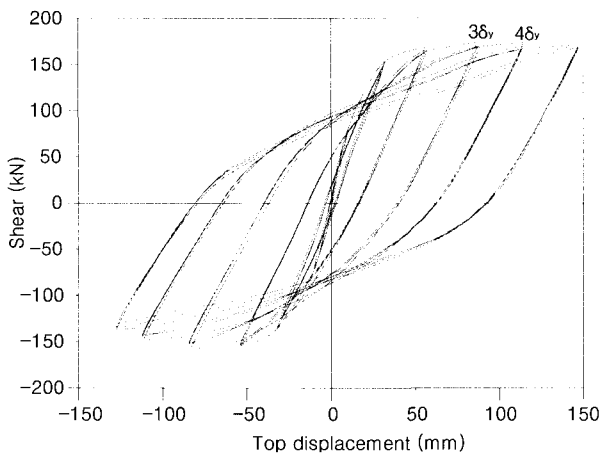


Fig. 2 Finite element mesh used for analysis



(a) Experiment



(b) Analysis

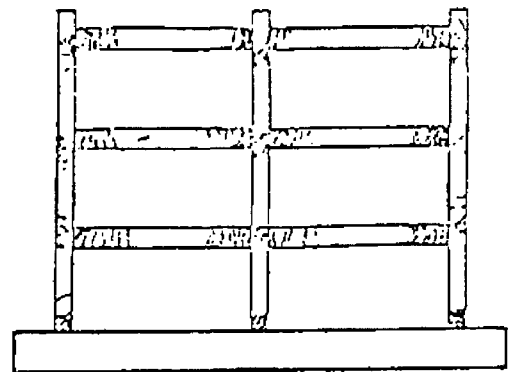
Fig. 3 Comparison of observed vs. simulated force-deformation response

증대됨에 따라 일어나는 콘크리트의 균열과 파쇄, 그리고 주철근의 좌굴이 그 주요 원인이다.

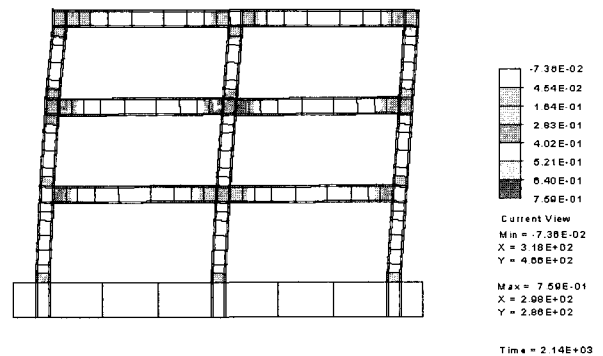
본 연구에서 변위연성도는 해석에 의한 직접적인 방법으로 평가하였다. 즉, 항복변위는 시스템 내의 위험단면의 가우스 적분점에서의 철근의 평균응력이 항복응력에 도달하였을 때의 기준점의 수평변위로, 극한변위는 위험단면의 가우스 적분점에서의 콘크리트 또는 철근의 변형률이 각각의 파괴기준 변형률에 도달하였을 때의 기준점의 수평변위로 정하였다²⁾.

위와 같은 방법으로 철근콘크리트 골조의 항복변위 δ_y 와 극한변위 δ_u 를 구하면 각각 23.5 mm, 84.9 mm로서 전체 변위연성도는 3.6 정도를 나타내고 있으며 이는 하중-변위곡선으로부터 도해적으로 변위연성도를 구하는 간접적인 방법¹⁾의 결과와 일치함을 알 수 있다.

Fig. 4는 파괴시점의 요소레벨의 손상지수¹¹⁾와 실험결과를 비교한 것으로서 구조물의 중요한 비선형 거동특성인 소성힌지 형성 부위가 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 가시화된 요소레벨의 손상지수도를 통하여 철근콘크리트 골조의 손상정도를 쉽게 검색할 수 있으며 내진성능평가에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) Experiment



(b) Analysis

Fig. 4 Failure mode for specimen

요소레벨의 손상지수 해석결과는 $3\delta_y$ 및 $4\delta_y$ 에서 각각 0.72와 1.00을 나타내고 있으며 구조물레벨의 손상지수는 $4\delta_y$ 에서 0.85를 나타내고 있다. $3\delta_y$ 에서의 손상지수 값 0.72는 Rodriguez-Gomez 등의 연구¹²⁾ 및 Table 1에 의하면 구조물의 파괴가 시작되는 점이며 $4\delta_y$ 에서의 손상지수 값 1.00은 구조물의 붕괴가 일어난 점을 알 수 있다. 이러한 사실은 Fig. 3의 하중-변위 곡선에서도 확인할 수 있으며 이로부터 철근콘크리트 교각 등 정정 구조물에 적용되어 그 타당성이 검증된 비탄성 유한요소 해석에 의한 손상지수 평가¹³⁾가 부정정 구조물로서 여유력으로 인하여 하나의 소성힌지 발생으로는 붕괴에 이르지 않는 등 정정 구조물과는 다른 역학거동 특성이 예상되는 철근콘크리트 골조의 하중단계의 손상이나 파괴 등도 전반적으로 잘 평가하고 있음을 알 수 있다. 이는 손상지수 평가식에 사용된 극한 변형률이 충분히 커서 처음 발생된 소성힌지점에서의 요소레벨의 손상지수가 1.00에 가까워질 때는 이미 구조물 전체에 소성힌지가 발달되었으며 붕괴 메커니즘에 도달하여 있음을 보여주고 있는 것이다. Fig. 5는 하중재하에 따른 요소레벨과 구조물레벨의 손상지수의 변화를 나타내고 있다.

일련의 해석결과와 실험결과와의 비교로부터 본 연구에서 제안하고 있는 방법은 반복 횟수를 받는 철근콘크리트 골조의 비탄성 거동을 적절히 평가하고 있으며, 개발된 철근콘크리트 구조물의 비선형 유한요소해석 프로그램 (RCAHEST)¹⁴⁾을 이용함으로써, 해석적 방법에 의한 신축 또는 기존 철근콘크리트 골조의 내진성능평가가 가능할 것으로 판단된다.

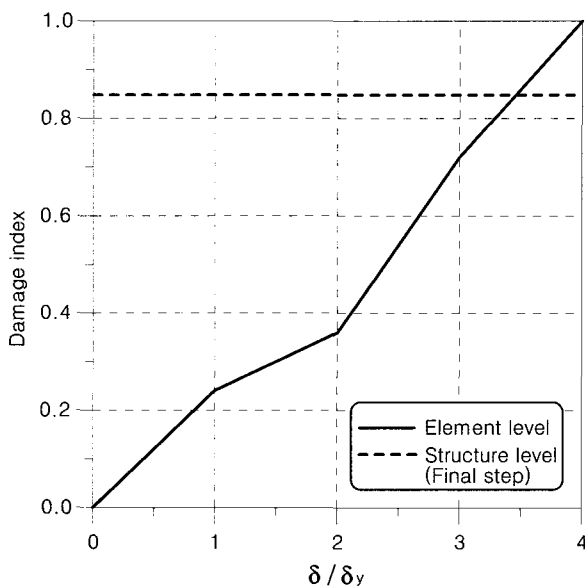


Fig. 5 Development of damage during test

5. 결 론

본 연구에서는 철근콘크리트 골조의 비탄성 거동과 내진성능평가를 위한 해석기법 및 모델을 제시하였고 실험 결과와 비교·검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 제안한 해석기법과 모델이 철근콘크리트 골조의 전체적인 거동특성 즉, 강성, 강도, 그리고 에너지 소산능력 등을 바르게 표현하고 있음이 입증되었다.
- 2) 철근콘크리트 골조의 반복거동을 제대로 평가함으로써 단조증가하중에 대한 해석 또는 실험으로 제한되었던 부재의 강도를 유한요소 해석만으로도 예측이 가능하게 하였으며 내진성능평가 및 설계검토에 변위연성도와 손상지수도 등이 응용될 수 있음을 알 수 있었다.
- 3) 철근콘크리트 골조의 힘의 분포 및 재분배 과정에 관련하여 해석은 실험결과 나타난 균열 및 변형결과와 전반적으로 일치하는 소성힌지 분포를 나타내었으며 또한 붕괴메커니즘 같은 구체적인 정보를 제공하였다.
- 4) 구조물의 손상정도를 판단하기 위한 척도로서 개발한 손상지수를 신뢰성 있는 연구자의 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.
- 5) 현행 내진 설계 규정에 만족하지 않는 기존의 철근콘크리트 골조에 대한 보수·보강의 판단 등에 사용될 수 있을 것으로 판단된다.
- 6) 철근콘크리트 골조의 내진성능을 해석적으로 구명함으로써 중앙진 지진지역에서의 합리적이면서 경제적인 설계법의 개발을 위한 기초적인 데이터를 제시하였다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 김태훈, 이상철, 신현목, "비탄성 손상 해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가," 대한토목학회 논문집, 제21권, 3-A호, 2001, pp.361~372.
2. 김태훈, 유영화, 신현목, "지진하중을 받는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동 및 연성능력에 관한 해석적 연구," 한국지진공학회 논문집, 제4권, 4호, 2000, pp.37~51.
3. 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.
4. Kent, D. C. and Park, R., "Flexural Members

- with Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.97, No.7, 1971, pp.1969~1990.
5. Saatcioglu, M., Alsiwat, J. M., and Ozcebe, G., "Hysteretic Behavior of Anchorage Slip in R/C Members," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 9, 1992, pp.2439~2458.
 6. 김태훈, 신현목, "지진시 철근콘크리트 기둥-기초 접합부의 불연속 변위에 관한 해석적 연구," 한국콘크리트학회 논문집, 제12권, 6호, 2000, pp.83~90.
 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. Perera, R., Carnicero, A., Alarcon, E., and Gomez, S., "A Fatigue Damage Model for Seismic Response of RC Structures," *Computers and Structures*, Vol. 78, 2000, pp.293~302.
 9. 김태훈, 이상철, 신현목, "지진시 철근콘크리트 교각의 파괴거동에 관한 해석적 연구," 한국콘크리트학회 논문집, 제13권, 4호, 2001, pp.389~396.
 10. Taylor, R. L., "FEAP - A Finite Element Analysis Program," Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, 2000.
 11. 김태훈, 신현목, "Analytical Approach to Evaluate the Inelastic Behaviors of Reinforced Concrete Structures under Seismic Loads," 한국지진공학회 논문집, 제5권, 2호, 2001, pp.113~124.
 12. 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.
 13. Roufaiel, M. S. L. and Meyer, C., "Analytical Modeling of Hysteretic Behavior of R/C Frames," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 3, 1987, pp.429~444.
 14. Chung, Y. S., Meyer, C., and Shinozuka, M., "Modeling of Concrete Damage," *ACI Structural Journal*, Vol. 86, No. 3, 1989, pp.259~271.
 15. 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 Reliability*, San Francisco, Vol. II, pp.795~802.
 16. Park, Y. J., Ang, A. H.-S., and Wen, Y. K., "Damage-Limiting Aseismic Design of Buildings," *Earthquake Spectra*, Vol. 3, No. 1, 1987, pp.1~26.
 17. Stone, W. C. and Taylor, A. W., "Seismic Performance of Circular Bridge Column Designed in accordance with Aashto/Caltrans Standards," NIST Building Science Series 170, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, M. D.
 18. Williams, M. S., Villemure, I., and Sexsmith, R. G., "Evaluation of Seismic Damage Indices for Concrete Elements Loaded in Combine Shear and Flexure," *ACI Structural Journal*, Vol. 94, No. 3, 1997, pp.315~322.
 19. Yunfei, H., Yufeng, C., Chang, S., and Bainian, H., "The Experimental Study of Two-Bay Three-Story Reinforced Concrete Frame under Cyclic Loading," *Proceedings of the 8th Symposium on Earthquake Engineering*, Roorkee, India, 1986.

요 약

본 연구는 반복 횡하중을 받는 철근콘크리트 골조의 비탄성 거동 및 연성능력을 파악하고 합리적이면서 경제적인 내진설계기준의 개발을 위한 자료를 제공하는데 그 목적이 있다. 사용된 프로그램은 철근콘크리트 구조물의 해석을 위한 RCAST이다. 재료적 비선형성에 대해서는 균열콘크리트에 대한 인장, 압축, 전단모델과 콘크리트 속에 있는 철근모델을 조합하여 고려하였다. 이에 대한 콘크리트의 균열모델로서는 분산균열모델을 사용하였다. 횡방향 구속철근으로 인한 강도의 증가 효과를 고려하였다. 두께가 서로 다른 부재간의 접합부에서 단면강성이 급변하기 때문에 생기는 국소적인 불연속변형을 고려하기 위한 경계면요소를 도입하였다. 또한, 같은 변위진폭에 있어서의 하중재하 회수에 의한 효과를 고려하였다. 본 연구에서는 반복 횡하중을 받는 철근콘크리트 골조의 비탄성 거동 및 연성능력의 파악을 위해 제안한 해석기법을 신뢰성 있는 연구자의 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

핵심용어 : 비탄성 거동, 연성능력, 철근콘크리트 골조, 반복 횡하중, 재료적 비선형성