

지진시 철근콘크리트 교각의 피로거동에 관한 해석적 연구

김태훈^{1)*} · 이상철²⁾ · 신현목¹⁾

¹⁾성균관대학교 토목공학과 ²⁾시설안전기술공단

(2001년 3월 21일 원고접수, 2001년 7월 18일 심사완료)

Analytical Study on the Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Bridge Piers under Earthquake

Tae-Hoon Kim^{1)*}, Sang-Cheol Lee²⁾, and Hyun-Mock Shin¹⁾

¹⁾ Department of Civil Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea

²⁾ KISTEC, Koyang, 411-410, Korea

(Received on March 31, 2001, Revised on July 18, 2001)

ABSTRACT

This paper presents an analytical prediction of the fatigue behavior of reinforced concrete bridge piers under earthquake. 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 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 fatigue behavior of reinforced concrete bridge piers under earthquake will be verified by comparison with reliable experimental results.

Keywords : fatigue behavior, reinforced concrete bridge piers, smeared crack, interface element, load reversals

1. 서 론

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

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

반복하중을 받는 철근콘크리트 교각의 최대 강도 이후의 거동을 해석적으로 예측하기 위해서는 해석모델에 하중재하 회수의 누적에 따른 강도 및 강성 저하의 영향을 고려할 필요가 있다.

즉, 철근콘크리트 구조물의 내진성능평가를 해석적으로

수행하기 위해서는 반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 거동을 정확히 예측할 수 있는 재료모델 뿐만 아니라 하중재하 회수의 누적에 따른 강도 및 강성 저하의 영향을 고려할 수 있는 재료모델의 개발이 필요하게 된다.

이 연구에서는 철근콘크리트 부재의 역학거동의 해석적인 예측에 대해서는 저자들에게 의하여 기 보고된 논문^{1~3)}의 비선형 재료모델을 그대로 인용하고 같은 변위진폭에 있어서의 하중재하 회수에 대한 피로거동을 고려할 수 있는 모델을 개발함으로써 철근콘크리트 교각의 하중재하 회수에 따른 강도와 에너지 소산능력 등의 비선형 이력거동을 예측할 수 있는 해석기법을 제시하고자 한다.

2. 철근콘크리트 비선형 재료모델

철근콘크리트의 재료모델은 콘크리트의 균열 및 철근과의 부착 등과 같은 비선형 특성을 고려하여 이들을 중첩함으로써 표현할 수 있다. 균열이 발생한 철근콘크리트 요소는 직교 방향에 대해서 이방성이 현저해지므로 이 연구에서는 균열이 발생한 철근콘크리트의 직교 이방성의 가정에 따라, 균열직각방향으로 콘크리트가 부담하게 되는

* Corresponding author

Tel : 031-290-7543

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

인장응력을 고려하기 위한 인장강성모델과 균열방향으로의 압축강성 저하를 고려하기 위한 압축강성모델 및 균열면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델을 각각 적용한다^{1~3)}.

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^{1~3)}.

21 콘크리트의 직교 이방성 재료모델

균열이 발생하기 전의 콘크리트의 역학모델은 이축응력 상태에 대한 탄소성파괴모델의 기본개념에 의해서 표현할 수 있다. 이 모델에 의하면, 식 (1)과 같이 콘크리트의 응력상태를 콘크리트의 초기탄성계수, 파괴 파라미터 및 등가의 소성변형률의 함수로 이루어진 등가응력-등가변형률 관계로 표현하고 있다^{1~3)}.

$$\sigma = E_o K_o (\epsilon - \epsilon_p) = E_o K_o \epsilon_e \quad (1)$$

여기서 σ 는 등가응력, ϵ 는 등가의 전체 변형률 ($\epsilon_e + \epsilon_p$), E_o 는 콘크리트의 초기 탄성계수 그리고 K_o 는 콘크리트 파괴 진전을 나타내는 파괴 파라미터이다. 등가 소성변형률은 콘크리트의 응력이 0이 될 때의 변형률이며, 파괴 파라미터는 제하시의 강성의 감소를 나타낸다. 등가응력은 평면응력상태에 작용하는 응력수준을 의미하며, 평균응력과 편차응력의 함수로 정의된다.

콘크리트에 균열이 발생한 후에도 철근과 콘크리트의 부착작용에 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 부착모델을 기본적으로 적용한다. 단, 이 연구에서는 부착모델로부터 구한 콘크리트의 응력을 각 철근의 방향으로 변환함으로써 원실험식에 충실하도록 하였다^{1~3)}. 제하 및 재재하의 경우에는 Tamai 등이 제안한 모델을 적용하였다. 이 모델에서는 콘크리트가 부담하는 인장응력은 철근과의 부착에 의한 응력과 균열면의 접촉에 의한 응력의 합으로 결정된다. 제하시의 경우, 균열면의 접촉은 콘크리트의 평균변형률이 완전히 0이 되기 전에 이미 시작되고 있으므로 균열면의 접촉개시 변형률을 정의하여 콘크리트의 인장변형률이 이보다 클 경우에는 접촉에 의한 응력은 발생하지 않고, 반대로 이보다 작을 경우에는 콘크

리트의 인장변형률과 접촉에 의한 응력은 선형관계를 나타낸다. 이 연구에서는 제하 및 재재하와 같은 반복하중 이력으로 인한 콘크리트의 손상증가 및 에너지 소비를 고려하는 것과 함께 수치해석상의 편리를 위해서, 제하시의 응력-변형률 관계를 제하시점과 잔류변형률을 지나는 단순 2차 포물선으로 가정하였으며 재재하시의 관계는 재재하시점과 제하점을 지나는 1차식으로 가정하였다^{1~3)}.

균열이 발생한 콘크리트는 균열이 없는 콘크리트에 비해서 강성이 작아진다는 사실은 이미 여러 연구자들⁴⁾에 의해서 규명된 바가 있다. 균열이 발생한 콘크리트의 압축강성의 저하는, 균열직각방향으로의 인장변형률의 함수로 표현되고 있는 파라미터에 의해서 강성의 저감을 고려할 수 있다(식 (2)). 즉, 균열을 포함한 콘크리트의 파괴 파라미터 K 와 균열이 없는 콘크리트의 파괴 파라미터 K_o 는 다음과 같은 관계에 있다.

$$K = \omega K_o \quad (2)$$

따라서, 균열이 발생한 콘크리트의 탄소성파괴모델은 다음 식과 같이 된다(Fig. 1).

$$\sigma_y = E_o K (\epsilon_y - \epsilon_p) \quad (3)$$

여기서, E_o 는 콘크리트의 초기탄성계수, ϵ_y 는 균열평행방향의 변형률 그리고 ϵ_p 는 균열평행방향의 소성변형률이다.

균열면에서 골재의 맞물림 현상으로 인한 전단전달 효과는 접촉면 밀도함수에 근거하여 유도한 응력전달모델을 사용하였다. 이 모델에서는 균열면의 형상을 세 개의 파라미터로 표현하고, 접촉면에서 콘크리트의 탄소성 거동을 가정하고 있기 때문에 제하 및 재재하와 같은 임의 하중 이력에 대해서 그 적용성이 좋다(Fig. 2).

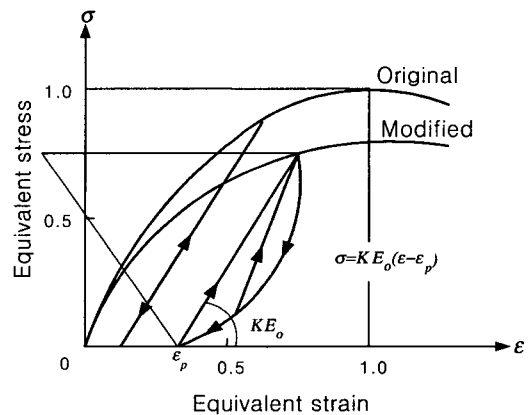


Fig. 1 Equivalent stress-equivalent strain relationship at unloading and reloading

2.5 콘크리트 crushing 이후의 효과

crushing이 발생한 콘크리트의 역학적 특성은 이미 여러 연구자들에 의해서 규명된 바가 있다. 이 연구에서는 콘크리트 crushing 이후의 효과를 Kent 등⁷⁾에 의해 제안된 해석모델을 수정하여 고려하였다(Fig. 4). 또한, crushing이 발생한 콘크리트의 안에 있는 철근의 좌굴거동은 최종적인 내력저하의 원인이 된다. 철근을 둘러싸고 있는 콘크리트에 crushing이 발생하면 철근이 좌굴을 하였다고 판단하였으며 좌굴 시의 철근의 응력은 crushing이 발생한 콘크리트에서와 같이 좌굴을 무시하고 구한 철근 응력의 20%를 취하였다^{2,3)}.

3. 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.

low-cycle 피로에 관한 여러 연구 결과로부터 철근이 경험하는 소성변형률이 중요한 변수임을 알 수 있었다⁸⁾.

이 연구에서는 다음 식과 같은 Coffin-Manson의 제안식⁸⁾을 적용하였다.

$$\epsilon_{ap} = 0.0777(2N_f)^{-0.486} \quad (4)$$

여기서, ϵ_{ap} 는 $\frac{\Delta \epsilon_p}{2}$, ϵ_p 는 $(\epsilon_p)_{\max} - (\epsilon_p)_{\min}$, $2N_f$ 는 피로파괴시까지의 하중재하 회수, $(\epsilon_p)_{\max}$ 는 하중재하 회수당 최대변형률 그리고 $(\epsilon_p)_{\min}$ 는 하중재하 회수당 최소변형률이다.

이 연구에서는 Miner가 제안한 선형의 손상모델⁹⁾을 기본적으로 사용하였다. 이 손상 모델은 손상지수가 1이 될 때 철근의 피로 파괴가 발생하는 것으로서 하중재하 회수당 손상지수는 다음 식과 같다.

$$\text{Damage} / \text{Cycle} = \frac{1}{N_f} \quad (5)$$

콘크리트 속의 철근에 대한 피로거동은 철근만의 특성과 함께 부착효과 등이 동시에 고려되어야 한다. 이 연구에서는 철근만의 특성을 고려한 Miner의 제안모델⁹⁾을 많은 경우에 대한 해석결과로부터 다음 식과 같이 수정 제안하였다.

$$\text{Damage} / \text{Cycle} = \frac{0.25}{N_f} \quad (6)$$

따라서, 많은 하중재하 회수를 경험하는 경우의 누적 손상지수는 다음 식과 같다.

$$\text{Damage} = \sum \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (7)$$

여기서, n_i 는 재하된 반복 하중재하 회수이고, N_{fi} 는 각각의 하중재하 기준의 피로수명이다.

또한, 하중재하 회수의 누적에 따른 콘크리트 속의 철근의 응력저하를 고려하기 위하여 피로 파라미터를 도입하였다.

4. 수치예제 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 Fig. 5에 나타난 것과 같은 실험체¹⁰⁾를 선정하였다. 이 실험체를 해석 예로 채택한 이유는 같은 변위진폭에 있어서의 하중재하 회수에 의한 철근콘크리트 교각의 피로거동을 정량화 시킨 실험이기 때문이다.

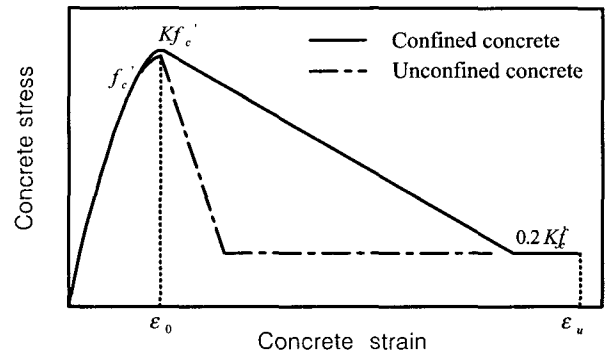


Fig. 4 Stress-strain relation for confined and unconfined concrete

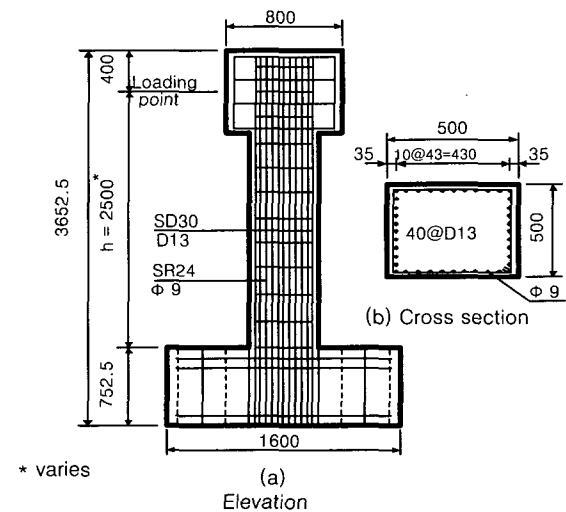


Fig. 5 Test specimens

실험체의 재료물성은 Table 1과 같으며 이들 실험체에 대한 재하방법은 Fig. 6에 나타난 것과 같다. 재하는 교각 기초부에서 주철근이 항복(실험에 기초해서 항복변형률을 1800×10^{-6} 로 한다.)할 때, 하중작용위치에 생기는 변위를 항복변위 δ_y 로 정의하고, 이 변위의 정수배 $n \times \delta_y$ ($n=1, 2, 3 \dots$)로 순차적으로 변위진폭을 증가시킨다. 또한, 동일한 재하변위진폭에 있어서의 반복회수는 3~10 회로 하였다.

Fig. 7은 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소 분할된 예이며 3점 가우스 적분을 적용한 8절점 등대개 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 요소³⁾를 사용하였다.

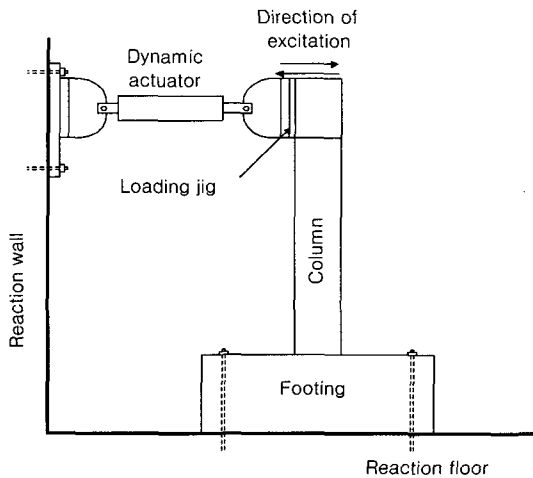


Fig. 6 Experimental set-up

Fig. 8 ~ Fig. 10은 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 곡선으로부터 포락선(envelope)의 형태로 나타낸 결과이다.

실험과 유한요소해석 결과로부터 전단스팬비(h/d)가 5.4와 3.8인 휨에 지배적인 실험체보다는 전단스팬비(h/d)가 2.2인 전단에 지배적인 실험체가 같은 변위진폭에 있어서의 하중재하 회수에 의한 영향이 크게 나타남을 알 수 있다.

실험체들의 각 재하단계에 따른 손상의 진전상태를 파괴시점의 요소레벨의 손상지수도와 함께 Fig. 11 ~ Fig. 16에 나타내었다.

전단스팬비(h/d)가 5.4와 3.8인 실험체는 휨에 의하여 파괴되었다. 재하하중이 커짐에 따라 기초부위에 휨균열이 발생하고 콘크리트 피복이 박리하기 시작했고 휨균열이 진전됨에 따라 주철근 또는 횡방향 구속철근이 파단되었다. 주철근의 파단은 강성과 강도저하에 큰 영향을 미친다.

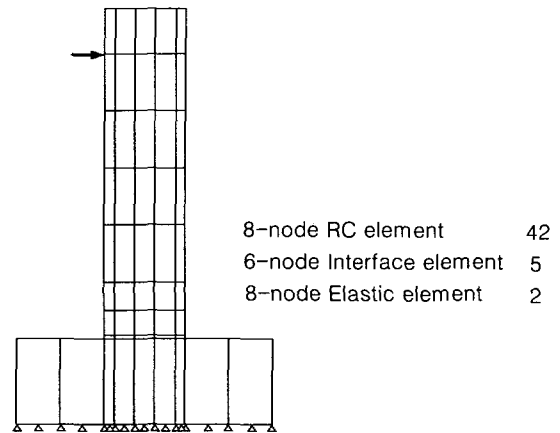


Fig. 7 Finite element mesh used for analysis

Table 1 Specifications of test specimens

Shear-span ratio (h/d)		5.4		3.8		2.2	
Number of loading cycles (n)		10	3	10	3	10	3
Specimen		P-10	P-19	P-17	P-20	P-18	P-21
Cross-section (cm)		50×50	50×50	50×50	50×50	50×50	50×50
Effective height (cm)		250	250	175	175	100	100
Main reinforcement	Material and diameter (mm)	SD30, 13	SD30, 13	SD30, 13	SD30, 13	SD30, 13	SD30, 13
	Reinforcement ratio (%)	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03
Tie bar	Material and diameter (mm)	SR24, 9	SR24, 9	SR24, 9	SR24, 9	SR24, 9	SR24, 9
	Reinforcement ratio (%)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Concrete	Max. grain size of Aggregate (mm)	10	10	10	10	10	10
	Cylinder strength (kgf/cm ²)	319	340	328	324	324	321
Loading velocity (cm/sec)		25	25	25	25	25	25

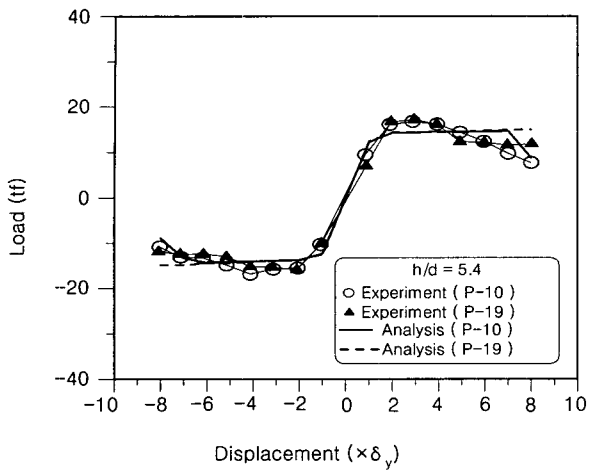


Fig. 8 Comparison of envelope of hysteresis loop ($h/d = 5.4$)

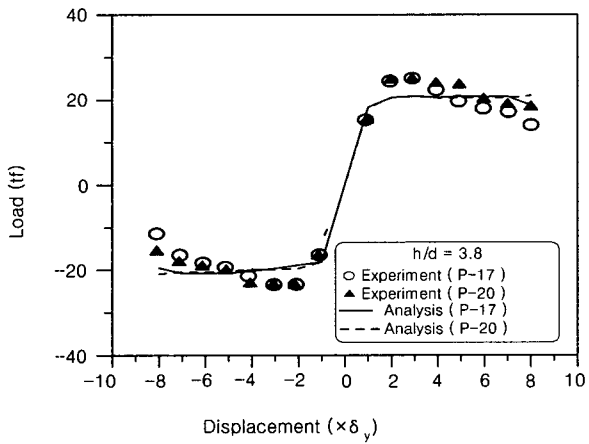


Fig. 9 Comparison of envelope of hysteresis loop ($h/d = 3.8$)

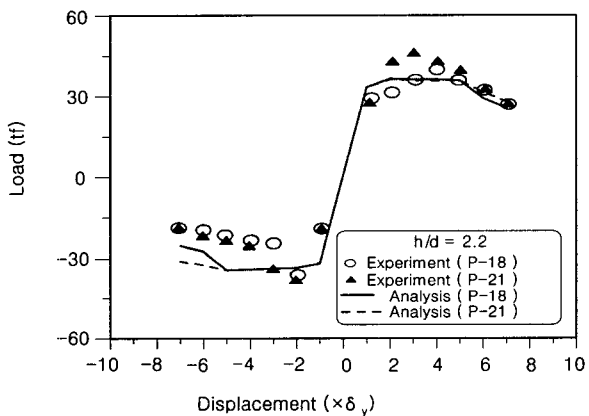


Fig. 10 Comparison of envelope of hysteresis loop ($h/d = 2.2$)

이에 비해 전단스팬비(h/d)가 2.2인 실험체는 전단에 의하여 파괴되었다. 즉, 재하하중이 커짐에 따라 측면에 경사

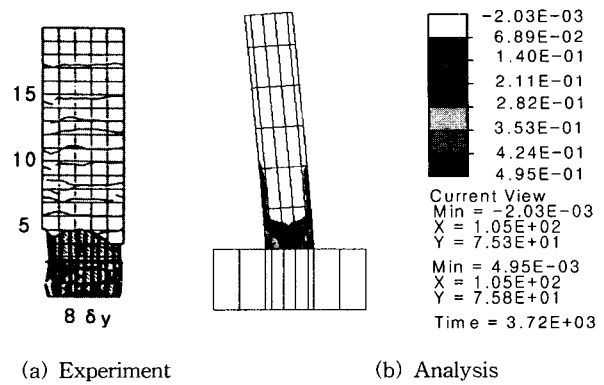


Fig. 11 Failure mode for specimen (P-10) (Number of loading cycle $n = 10$)

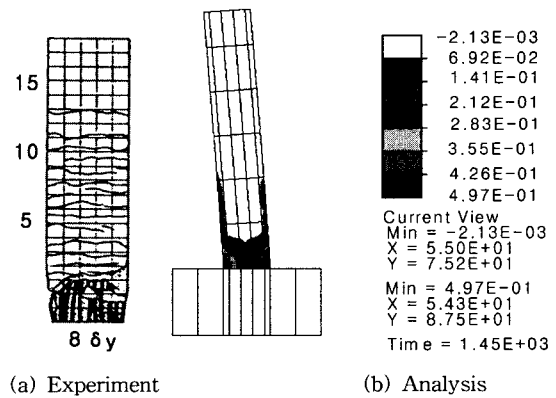


Fig. 12 Failure mode for specimen (P-19) (Number of loading cycle $n = 3$)

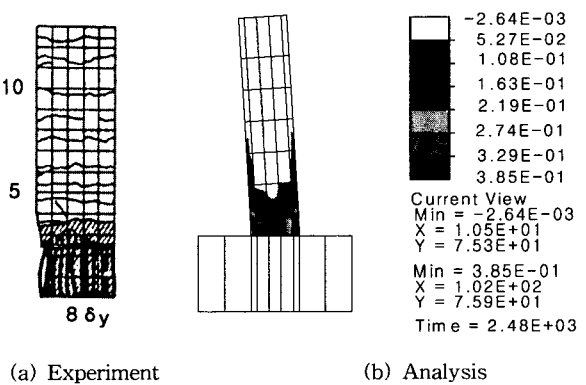


Fig. 13 Failure mode for specimen (P-17) (Number of loading cycle $n = 10$)

전단 균열이 발생하며 이로 인해 콘크리트 피복의 박리가 일어났으며 최종적으로 강성저하를 가져왔다. 이러한 강성

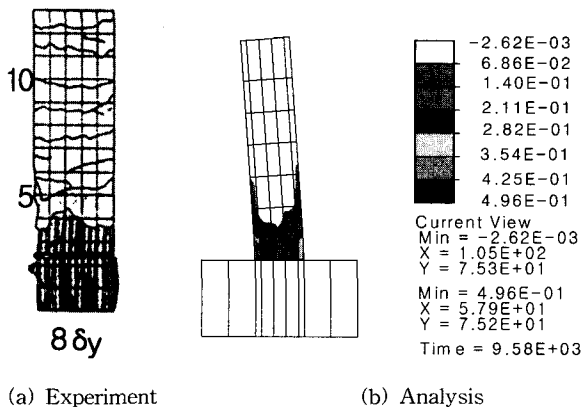


Fig. 14 Failure mode for specimen (P-20)
(Number of loading cycle $n = 3$)

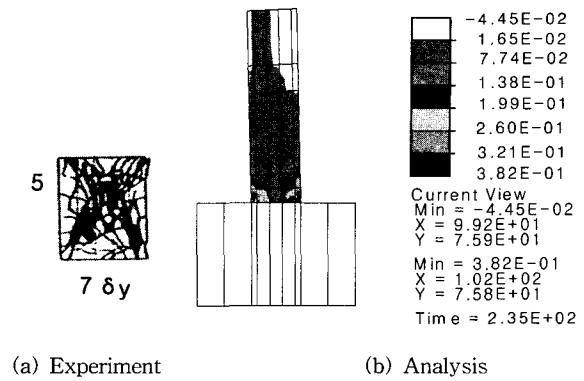


Fig. 16 Failure mode for specimen (P-21)
(Number of loading cycle $n = 3$)

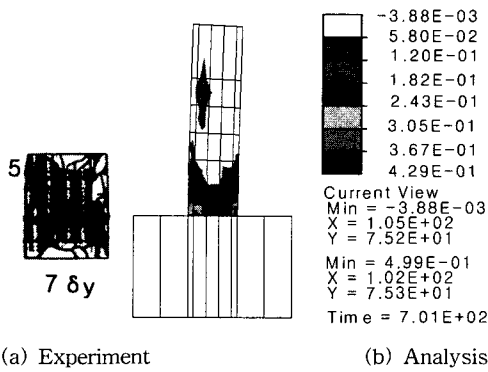


Fig. 15 Failure mode for specimen (P-18)
(Number of loading cycle $n = 10$)

감소는 반복 주기하중이 진행되는 동안 소성현저 영역에서 비탄성 변형이 증대됨에 따라 일어나는 콘크리트의 균열과 파쇄, 그리고 주철근의 좌굴이 그 주요 원인이다.

이 연구의 해석에 의한 최대하중과 변위연성도를 실험과 함께 비교하여 Table 2에 정리하였다. 이 표에서 해석에 의한 항복변위 및 극한변위는 직접적인 방법²⁾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 정하였다²⁾. 해석에 의한 결과를 볼 때 해석결과가 실험 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

Table 2 Comparison of test with analysis

Shear-span ratio (h/d)		5.4				3.8				2.2			
		10		3		10		3		10		3	
Specimen		P-10		P-19		P-17		P-20		P-18		P-21	
		Exp.	Ana.	Exp.	Ana.	Exp.	Ana.	Exp.	Ana.	Exp.	Ana.	Exp.	Ana.
Load	Yield load, P_y (tf)	11.6	12.8	10.9	12.9	15.9	19.2	15.5	19.1	27.6	33.3	27.7	32.8
	Maximum load, P_u (tf)	16.8	14.6	16.6	15.1	24.2	20.9	24.6	21.0	39.1	36.4	42.7	36.1
	P_u / P_y	1.45	1.14	1.52	1.17	1.52	1.09	1.59	1.10	1.42	1.09	1.54	1.10
Displacement	Yield displacement δ_y (cm)	1.30	1.43	1.30	1.43	0.75	0.94	0.75	0.94	0.39	0.40	0.39	0.40
	Ultimate displacement, δ_u (cm)	9.26	7.80	12.59	10.40	5.92	5.25	7.08	6.00	2.02	2.00	1.99	2.00
	δ_u / δ_y	7.1	5.5	9.7	7.3	7.9	5.6	9.4	6.4	5.2	5.0	5.1	5.0

5. 결 론

이 연구에서는 같은 변위진폭에 있어서의 하중재하 회수에 의한 철근콘크리트 교각의 피로거동을 파악하기 위한 해석기법과 모델을 제시하였고, 제안된 해석기법과 모델을 적용한 유한요소 해석프로그램을 사용하여 반복하중을 받는 실험체를 해석하였다. 실험결과와 비교·검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

1) 제안한 해석기법과 모델이 같은 변위진폭에 있어서의 하중재하 회수에 의한 철근콘크리트 교각의 피로거동을 포함한 전체적인 거동특성을 바르게 표현하고 있음이 입증되었다.

2) 전단스팬비(h/d)가 5.4와 3.8인 휨에 지배적인 실험체보다 2.2인 전단에 지배적인 실험체가 하중재하 회수의 영향을 더 크게 받음을 알 수 있다.

3) 지진하중같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 교각의 비탄성 이력거동 특성을 올바르게 평가하기 위해서는 하중재하 회수에 의한 피로거동을 무시할 수 없으며 이에 대한 충분한 고려가 필요하다.

4) 전단스팬비(h/d)가 2.2인 전단에 지배적인 실험체의 해석 결과는 실험결과와 피로거동에 있어서 차이를 보이고 있는데 이는 이 연구에서는 철근의 피로모델만을 고려하고 있기 때문이다. 따라서, 콘크리트의 해석모델에 하중재하 회수의 누적에 따른 강도 및 강성 저하의 영향을 추가로 고려할 필요가 있으며 이를 추후의 연구과제로 다루고자 한다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 김태훈, 유영화, 신현목, "등가환산단면을 이용한 원형 철근콘크리트 교각의 비탄성 해석," 대한토목학회 논문집, 제20권 5-A호, 2000, pp.755~763.
2. 김태훈, 유영화, 신현목, "지진하중을 받는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동 및 연성능력에 관한 해석적 연구," 한국지진공학회 논문집, 제4권 4호, 2000, pp.37~51.
3. 김태훈, 신현목, "지진시 철근콘크리트 기둥-기초 접합부의 불연속 변위에 관한 해석적 연구," 한국콘크리트학회 논문집, 제12권 6호, 2000, pp.83~90.
4. Collins, M. P., and Vecchio, F. J., "The Response of Reinforced Concrete to In-plane Shear and Normal Stresses," University of Toronto, 1982.
5. 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.
6. Sheikh, S. A., and Uzumeri, S. M., "Strength and Ductility of Tied Concrete Columns," *Journal of Structural Division*, ASCE, Vol. 106, No. 5, 1980, pp.1079~1102.
7. Kent, D. C., and Park, R., "Flexural Members with Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 97, No. 7, 1971, pp.1969~1990.
8. 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.
9. 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.
10. Kawashima, K., and Koyama, T., "Effect of Number of Loading Cycles on Dynamic Characteristics of Reinforced Concrete Bridge Pier Columns," *Journal of JSCE*, Vol. 5, No. 1, 1988, pp.183~191.

요 약

이 논문에서는 지진시 철근콘크리트 교각의 피로거동을 해석적으로 예측할 수 있는 기법을 제시하였다. 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 불연속 변형을 고려하기 위한 경계면 요소를 도입하였다. 또한, 같은 변위진폭에 있어서의 하중재하 회수에 의한 효과를 고려하였다. 이 연구에서는 지진시 철근콘크리트 교각의 피로거동을 파악하기 위해 제안한 해석기법을 신뢰성 있는 연구자의 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

핵심용어 : 피로거동, 철근콘크리트 교각, 분산균열, 경계면 요소, 하중재하 회수