

철근콘크리트 교각의 지진손상 평가 II : 수치해석 예

Evaluation of Seismic Damage for RC Bridge Piers II : Numerical Analysis

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

국문요약

연계논문⁽¹⁾에서는 철근콘크리트 교각의 지진손상 평가를 위한 비선형 유한요소해석 기법을 제시하였다. 이 논문에서는 철근콘크리트 교각의 이력거동의 예측에 근거한 손상지수를 제시하였다. 손상지수는 지진하중하의 철근콘크리트 교각의 손상을 수치적으로 정량화하는 방법으로서 제안되었다. 제안한 해석기법을 실험된 철근콘크리트 교각에 적용하였고 다른 연구자의 손상지수와 비교·분석하였다. 제안된 해석기법은 조사된 실험체에 대하여 하중단계에 따라 손상을 정확하게 예측하였다.

주요어 : 철근콘크리트 교각, 지진손상, 비선형 유한요소해석, 손상지수

ABSTRACT

In the companion paper⁽¹⁾, nonlinear finite element analysis procedures are presented for the seismic damage evaluation of RC bridge piers. This paper defines a damage index based on the predicted hysteretic behavior of a RC bridge pier. Damage indices aim to provide a means of quantifying numerically the damage in RC bridge piers sustained under earthquake loading. The proposed numerical method is applied to RC bridge piers tested by other, and compared to existing damage indices. The proposed numerical method gives a realistic prediction of damage throughout the loading cycles for several test specimens investigated.

Key words : RC bridge piers, seismic damage, nonlinear finite element analysis, damage index

1. 서 론

지진의 규모와 빈도 및 그로 인한 피해가 증가 추세에 있는 현 상황에서 지진으로 인한 기반시설과 인명의 피해를 최소화 또는 방지하기 위해서는 구조물에 대한 적절한 내진 성능의 평가가 시급히 필요한 실정이다.

연계논문⁽¹⁾에서는 지진하중 하에서의 이력거동에 의한 누적손상을 포함한 정량화된 손상지수를 산출함으로써 철근콘크리트 교각의 지진손상 평가가 가능한 비선형 유한요소해석 기법이 제시되었다.

이 연구에서는 지진하중을 받는 철근콘크리트 교각의 지진손상 평가를 위해 제안한 해석기법을 적용한 결과를 신뢰성 있는 연구자의 실험결과와 비교함으로써 그 타당성을 검증한다. 즉, 제안한 해석기법을 실험된 철근콘크리트 교각에 적용하고 다른 연구자의 손상지수와 비교·분석하며 이를 고찰한다.

지진하중을 받는 철근콘크리트 부재의 균열발생에서 파괴에 이르기까지의 거동을 예측함으로써 실제 철근콘크리트 교각구조의 지진응답특성의 파악과 내진설계 및 검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.

2. 피로하중을 받는 철근콘크리트 교각 실험체

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 Fig. 1에 나타난 것과 같은 철근콘크리트 교각의 실험체^{(2),(3)}를 선정하였다. 이 실험체를 해석 예로 채택한 이유는 같은 변위진폭에 있어서의 하중재하 회수에 의한 철근콘크리트 교각의 피로거동을 정량화 시킨 실험이기 때문이다.

2.1 선정된 실험체의 제원

실험체는 AASHTO의 규정⁽⁴⁾에 따라 설계된 단일주 원형 교각을 실험 여건상 1/4로 축소한 모형으로서 구조제원을 정리하여 나타내면 Table 1과 같다.

실험체의 재료물성은 Table 2와 같으며 이들 실험체에 대한 재하방법은 Fig. 2에 나타난 것과 같다. 실험체의 바닥과 교각사이는 완전고정으로 하였으며, 모든 실험체에는 220kN MTS hydraulic actuator에 의해 $0.1f_c A_g$ 의 일정한 압축하중을 가한 상태에서, 횡방향으로 670kN MTS hydraulic actuator에 의해 변위를 가한 경우이다.^{(2),(3)} 실험체 A2는 증가되는 변위진폭을 가진 반복하중을 파괴시까지 재하한 경우이며 실험체 A3~A6은 2Δy, 3Δy, 4Δy, 5Δy의 같은 변위진폭을 파괴시까지 재하한 경우이다.^{(2),(3)}

2.2 유한요소해석을 위한 요소분할

이 실험체들의 유한요소해석을 위해서 원형 철근콘크리트교

* 학생회원 · 성균관대학교 토목환경공학과, 박사과정 수료
(대표저자 : kth7love@chollian.net)

** 정회원 · 국립한성대학교 토목공학과, 부교수

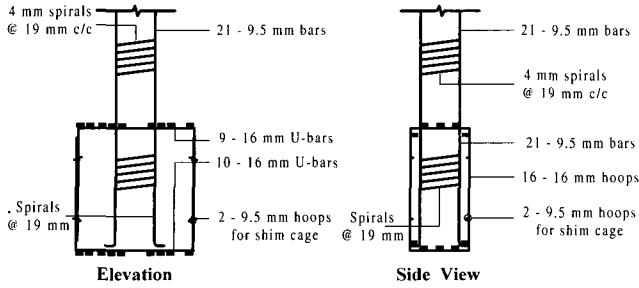
*** 정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과, 교수

본 논문에 대한 토의를 2002년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2002. 3. 12 / 심사종료일 : 2002. 5. 30)

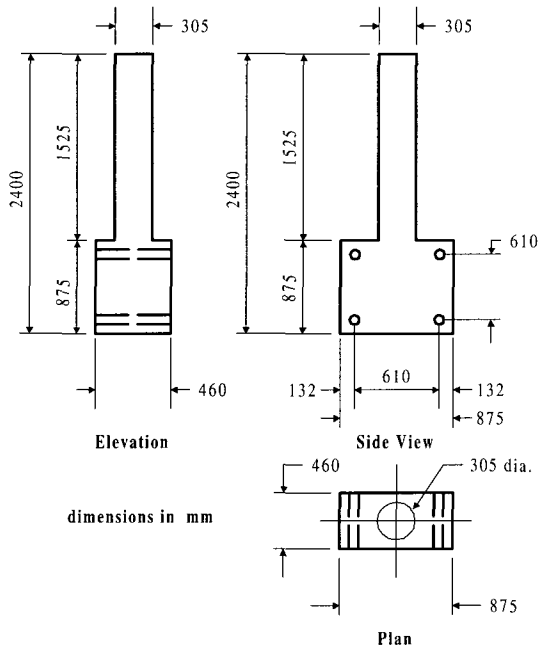
각을 등가환산단면을 이용하여 Fig. 3과 같이 2차원 평면요소로 해석이 가능하도록 하였다. 등가환산단면은 원형 철

근콘크리트 교각의 실제거동과 유사하도록 철근과 콘크리트의 단면적, 하중재하 방향의 단면 2차 모멘트를 같게 하여 유도하였다.⁽⁵⁾

Fig. 4는 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소 분



(a) Reinforcement arrangement for specimen



(b) Configuration and dimensional details of specimen

Fig. 1 Specimen details

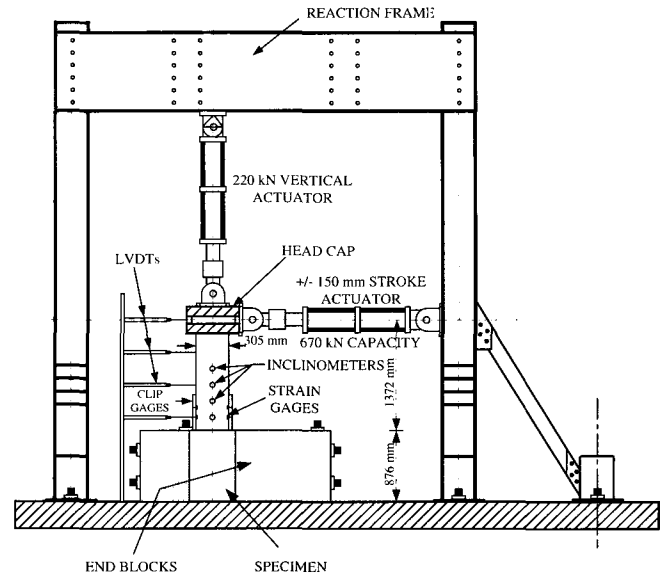


Fig. 2 Test setup and instrumentation

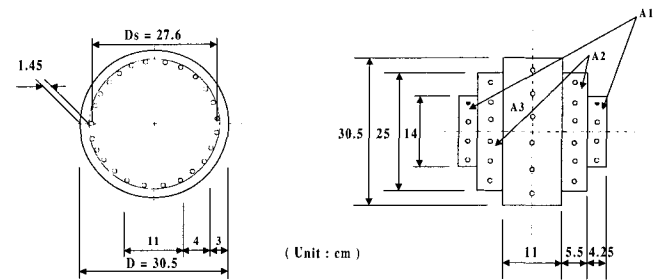


Fig. 3 Transform the circular column to an idealized equivalent rectangular column

Table 1 Details of prototype and model

Item	Prototype	Model	Remarks
Longitudinal reinforcement	24 No. 11(36mm)	21 No. 3(9.5mm)	$\rho = 2\%$
Spirals	No. 5(16mm)	Wire = 4mm diameter	Smooth wire
Spirals pitch	76mm	19mm	$\rho_v = 1\%$
Spiral yield strength	414MPa	380 to 450MPa	-
Column diameter	1.22m	0.3m	Scale 1 : 4
Column length	5.5m	1.37m	Scale 1 : 4
Cover	50mm	12.5mm	Scale 1 : 4
Embedment length of bars	Tension = 1.4m Compression = 0.72m	Tension = 0.35m Compression = 0.18m	-
Axial load	3225kN	806kN	$0.1f'_c A_g$
Lateral load capacity	1550kN	388kN	$V_p = M_p / H$
Spacing of longitudinal steel	100mm	25mm	-

Table 2 Average material characteristics

Specimen	Concrete strength(MPa)	Steel yield strength(MPa)	Spiral yield strength(MPa)
A2~A3	29	448	434
A4~A6	35.5	448	434

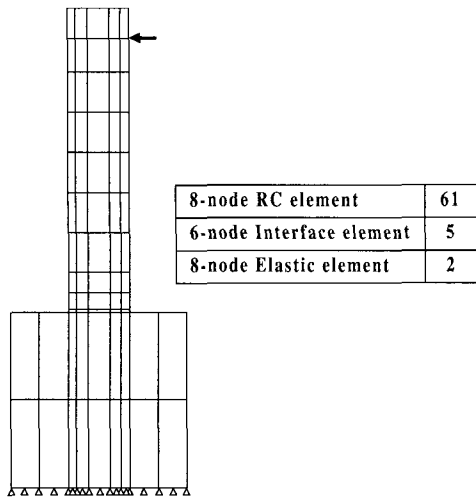


Fig. 4 Finite element mesh used for analysis

할된 예이며 3점 가우스 적분을 적용한 8절점 등매개요소를 이용하였고 하중이 재하되는 부위에는 실험에서의 동일한 조건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지 않는 탄성요소를 사용하였다. 또한, 기초와 교각의 접합부에는 정착슬립 등의

불연속변위를 고려하기 위하여 6절점 경계면 요소를 사용하였다.

2.3 내력, 변형성능과 이력특성

Fig. 5~Fig. 9는 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소 해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계를 나타내고 있으며 해석결과가 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 해석결과는 실험체에 반복 주기하중이 진행되는 동안 소성힌지 영역에서 비탄성 변형이 증대됨에 따라 일어나는 콘크리트의 균열과 파쇄, 그리고 이로 인한 손상이나 파괴와 잘 일치하고 있다.

이 연구의 해석에 의한 최대하중과 변위연성도를 실험과 함께 비교하여 Table 3에 정리하였다. 이 표에서 해석에 의한 항복변위 및 극한변위는 직접적인 방법⁽⁶⁾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 변

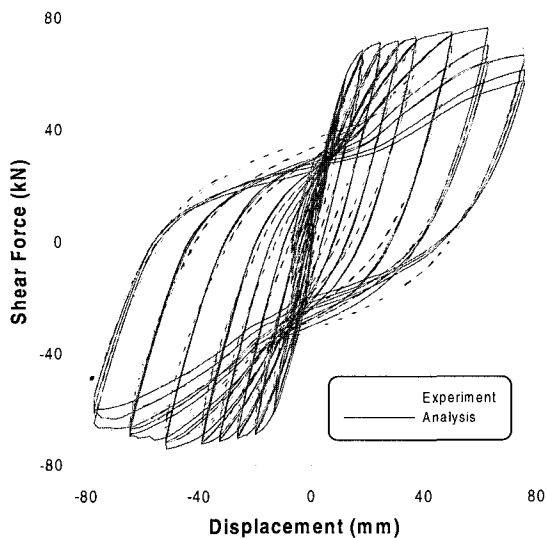


Fig. 5 Shear vs. displacement response of specimen A2

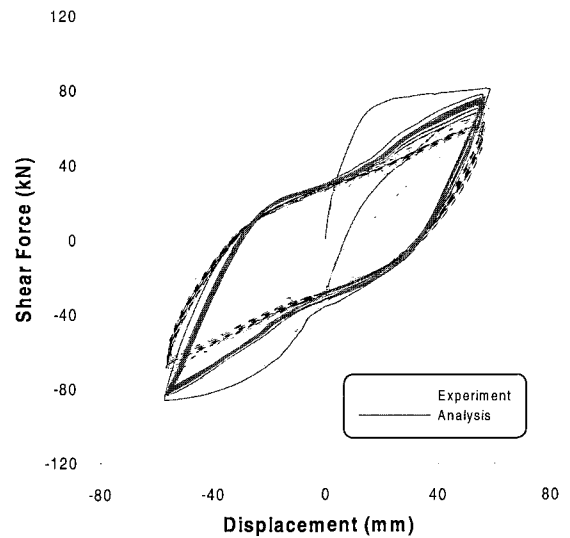


Fig. 7 Shear vs. displacement response of specimen A4

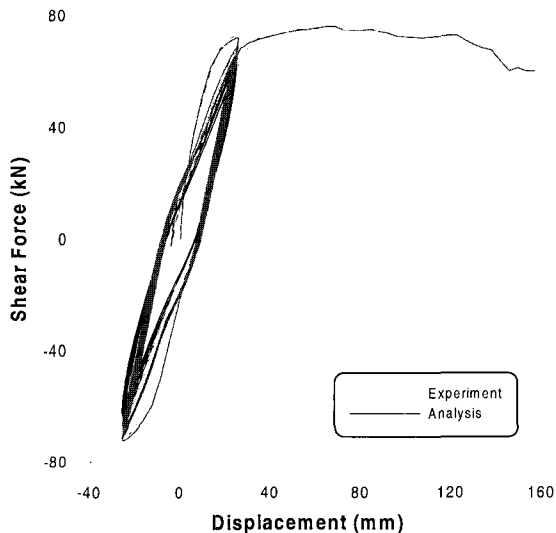


Fig. 6 Shear vs. displacement response of specimen A3

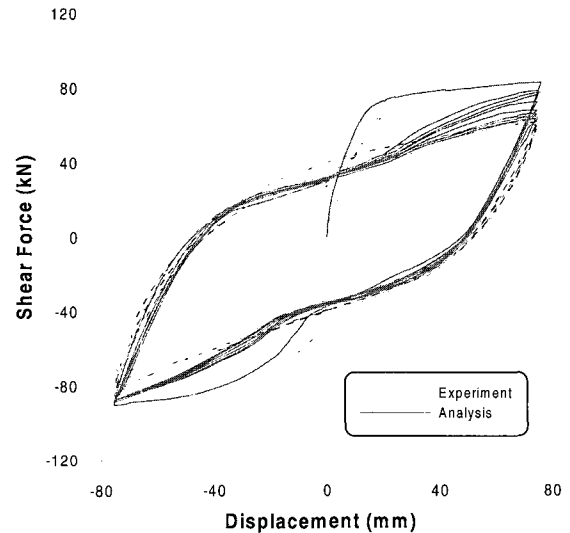


Fig. 8 Shear vs. displacement response of specimen A5

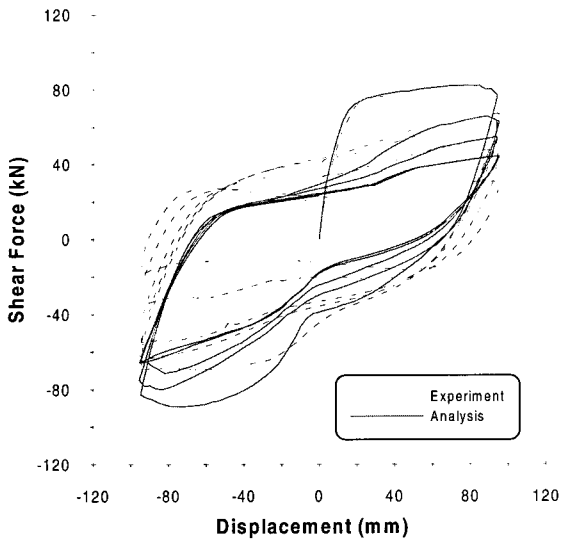


Fig. 9 Shear vs. displacement response of specimen A6

형틀에 도달하였을 때의 기준점의 수평변위로 정하였다. 해석에 의한 결과를 볼 때 해석결과가 실험결과와 전반적으로 잘 일치함을 알 수 있다.

2.4 검증 및 고찰

이 연구에서 제안한 하중재하에 따른 요소레벨의 손상지수의 변화를 연계논문⁽¹⁾에서 제시한 기존의 다른 연구자의

손상지수의 결과와 비교하여 Fig. 10~Fig. 14에 나타내었으며 실험체의 실험결과를 재하 단계별로 다른 연구자의 손상지수와 함께 비교하여 Table 4~Table 8에 정리하였다.

증가되는 변위진폭을 가진 반복하중을 파괴시까지 재하한 실험체 A2의 재하 단계별 손상지수 해석결과에서 Kratzig와 Meskouris 모델⁽⁷⁾과 연화지수(softening index)⁽²⁾는 손상을 과대 평가하고 있으며 Mander와 Cheng 모델⁽⁸⁾은 손상을 과소 평가하고 있다. 이에 비해 이 연구에서 제안한 요소레벨의 손상지수는 정규화된 변형과 에너지 소산의 단순 선형조합으로 구성되어 있는 Park과 Ang 모델⁽⁹⁾ 및 강성저하, 강도저감, 주철근 low-cycle 피로 등의 이력거동 특성을 나타낼 수 있는 Hindi와 Sexsmith 모델⁽¹⁰⁾과 같이 실험에서 관찰된 손상을 적절히 평가하고 있다(Table 4).

24y의 같은 변위진폭을 파괴시까지 재하한 실험체 A3의 재하 단계별 손상지수 해석결과에서 Kratzig와 Meskouris 모델과 연화지수(softening index)는 손상을 과대 평가하고 있으며 Mander와 Cheng 모델은 손상을 과소 평가하고 있다. 그리고, Park과 Ang 모델은 실험체의 손상을 다소 크게 평가하고 있으나 Hindi와 Sexsmith 모델은 재하 단계별 손상을 전반적으로 잘 평가하고 있다. 이에 비해 이 연구에서 제안한 요소레벨의 손상지수는 실험에서 관찰된 손상을 다소 작게 평가하고 있지만 파괴시점은 정확하게 예측하고 있다(Table 5).

Table 3 Comparison of test with analysis

Specimen		A-2		A-3		A-4		A-5		A-6	
		Exp.	Ana.	Exp.	Ana.	Exp.	Ana.	Exp.	Ana.	Exp.	Ana.
Load	Yield load P_y (kN)	65.0	64.3	65.0	67.3	64.0	68.1	64.0	65.0	66.0	69.2
	Maximum load P_u (kN)	75.0	76.0	72.0	72.3	72.0	80.8	93.0	90.1	76.0	82.0
	P_u/P_y	1.15	1.18	1.11	1.07	1.13	1.19	1.45	1.39	1.15	1.18
Disp.	Yield disp. δ_y (mm)	19.0	15.0	19.0	17.3	16.0	14.9	20.0	13.3	18.0	15.7
	Ultimate disp. δ_u (mm)	76.0	55.6	-	-	-	-	-	-	-	-
	δ_u/δ_y	4.0	3.7	-	-	-	-	-	-	-	-

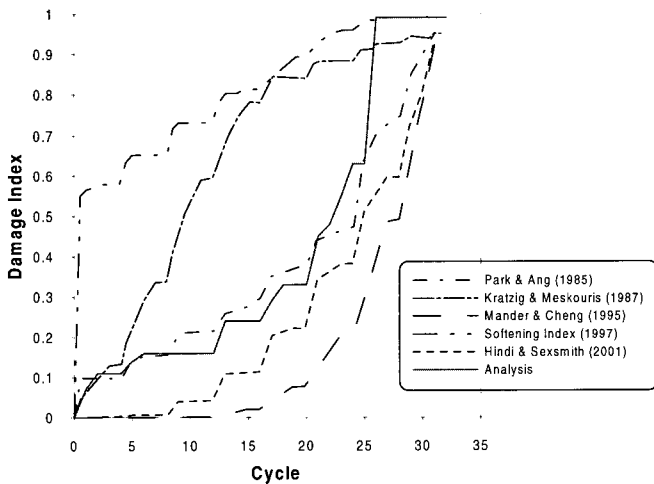


Fig. 10 Comparative evaluation of progressive damage for specimen A2

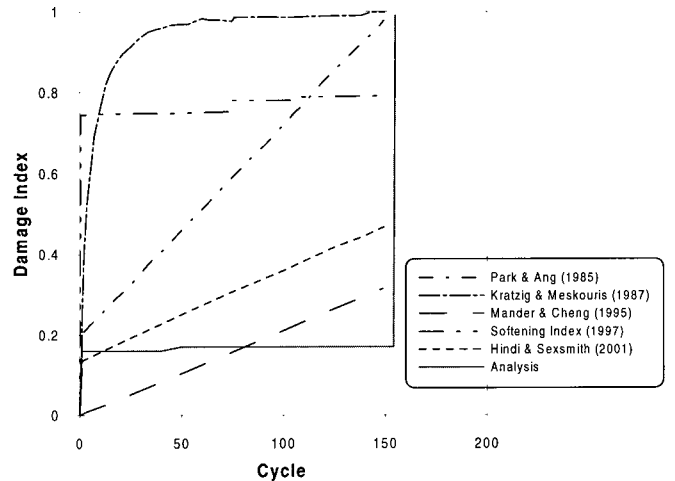


Fig. 11 Comparative evaluation of progressive damage for specimen A3

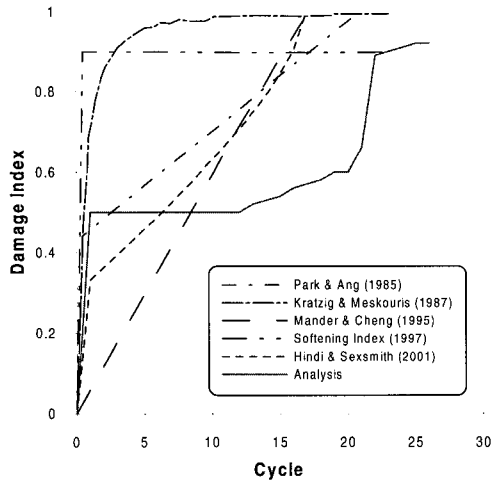


Fig. 12 Comparative evaluation of progressive damage for specimen A4

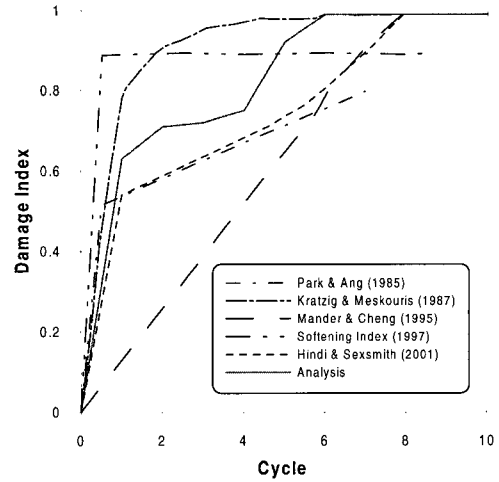


Fig. 13 Comparative evaluation of progressive damage for specimen A5

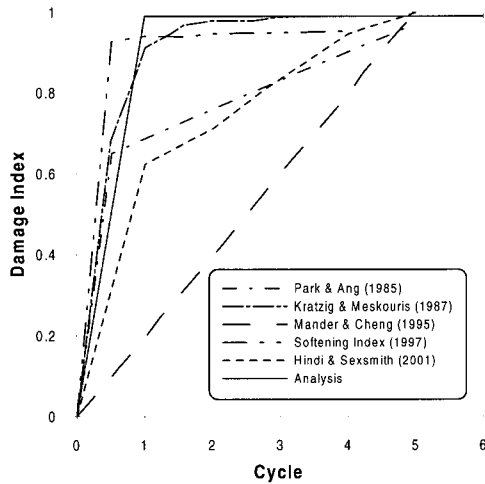


Fig. 14 Comparative evaluation of progressive damage for specimen A6

34y의 같은 변위진폭을 파괴시까지 재하한 실험체 A4의 재하 단계별 손상지수 해석결과에서 Kratzig와 Meskouris 모델과 연화지수(softening index)는 손상을 과대 평가하고

있으며 Mander와 Cheng 모델은 손상을 다소 작게 평가하고 있다. 그리고, Park과 Ang 모델 및 Hindi와 Sexsmith 모델은 재하 단계별 손상을 전반적으로 잘 평가하고 있다. 이에 비해 이 연구에서 제안한 요소레벨의 손상지수는 다소 늦게 평가하고 있으나 실험에서 관찰된 손상은 전반적으로 잘 예측하고 있다(Table 6).

44y, 54y의 같은 변위진폭을 파괴시까지 재하한 실험체 A5, A6의 재하 단계별 손상지수 해석결과에서 Kratzig와 Meskouris 모델과 연화지수(softening index)는 손상을 과대 평가하고 있으며 Mander와 Cheng 모델은 손상을 과소 평가하고 있다. 이에 비해 이 연구에서 제안한 요소레벨의 손상지수는 다소 빨리 평가하는 경향을 보이고 있으나 Park과 Ang 모델 및 Hindi와 Sexsmith 모델과 같이 실험에서 관찰된 손상은 적절히 평가하고 있다(Table 7, Table 8).

이러한 비교결과로부터 이 연구에서 제안한 요소레벨의 손상지수는 실험에서 관찰된 손상을 적절히 평가하여 적용 범위가 충분히 크며 일반성이 있음을 알 수 있다.

Table 4 Comparative evaluation of progressive damage for specimen A2

Cycle No.	Notes	Park & Ang(1985)	Kratzig & Meskouris(1987)	Mander & Cheng(1995)	Softening Index (1997)	Hindi & Sexsmith(2001)	Analysis
1	First cracking, Yielding	0.10	0.05	0.00	0.57	0.00	0.07
15	Spalling of cover	0.28	0.77	0.02	0.81	0.12	0.24
22	Significant spalling, Some bucking of longitudinal bars	0.47	0.95	0.18	0.87	0.37	0.48
30	Failure of spiral on right side	0.90	0.99	0.80	0.94	0.82	0.99

Table 5 Comparative evaluation of progressive damage for specimen A3

Cycle No.	Notes	Park & Ang(1985)	Kratzig & Meskouris(1987)	Mander & Cheng(1995)	Softening Index (1997)	Hindi & Sexsmith(2001)	Analysis
1	First cracking, Minor spalling yielding	0.20	0.25	0.01	0.75	0.14	0.16
100	Significant spalling	0.72	0.99	0.20	0.78	0.36	0.17
150.5	Failure	0.97	1.00	0.31	0.80	0.46	0.99

Table 6 Comparative evaluation of progressive damage for specimen A4

Cycle No.	Notes	Park & Ang(1985)	Kratzig & Meskouris(1987)	Mander & Cheng(1995)	Softening Index (1997)	Hinci & Sexsmith(2001)	Analysis
1	First cracking, Spalling of cover concrete, Yielding	0.46	0.70	0.06	0.90	0.33	0.50
3	Significant spalling	0.51	0.90	0.18	0.90	0.39	0.50
18	Necking of spirals, Some bar bucking	0.91	0.99	1.00	0.90	1.00	0.58
25-26	Hoop failure	1.00	1.00	1.00	0.90	1.00	0.92

Table 7 Comparative evaluation of progressive damage for specimen A5

Cycle No.	Notes	Park & Ang(1985)	Kratzig & Meskouris(1987)	Mander & Cheng(1995)	Softening Index (1997)	Hindi & Sexsmith(2001)	Analysis
1	Cracking, Spalling, Yielding	0.55	0.78	0.14	0.90	0.55	0.63
3	Significant spalling	0.62	0.74	0.39	0.90	0.62	0.72
8	Some bucking, Necking of spirals	1.00	0.99	1.00	0.90	1.00	0.99
9	Failure	1.00	0.99	1.00	0.90	1.00	0.99

Table 8 Comparative evaluation of progressive damage for specimen A6

Cycle No.	Notes	Park & Ang(1985)	Kratzig & Meskouris(1987)	Mander & Cheng(1995)	Softening Index (1997)	Hindi & Sexsmith(2001)	Analysis
1	Spalling commenced at quarter cycle, Yielding will before end of cycle	0.68	0.90	0.20	0.94	0.62	0.99
2	Significant spalling Necking of spirals Buckling of longitudinal bars	0.76	0.97	0.40	0.95	0.70	0.99
3	Failure	0.82	0.99	0.60	0.95	0.82	0.99

3. 지진하중을 받는 철근콘크리트 교각 실험체

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 Fig. 1에 나타난 것과 같은 철근콘크리트 교각의 실험체^{(2),(11)}를 선정하였다. 이 실험체를 해석 예로 채택한 이유는 다양한 지진하중에 의한 철근콘크리트 교각의 지진응답을 정량화 시킨 실험이기 때문이다.

3.1 선정된 실험체의 제원

채택한 실험체는 2절과 동일한 실험체이며 재료물성은 Table 9와 같고 가해진 하중이력은 Table 10과 같다.^{(2),(11)}

3.2 유한요소해석을 위한 요소분할

이 실험체들의 유한요소해석을 위해서 전술한 바와 같이 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.

3.3 내력, 변형성능과 이력특성

Fig. 15~Fig. 20은 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계를 나타내고 있다.

각 실험체의 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.

Table 9 Average material characteristics

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

Table 10 Ground motions selected for generating random displacement histories for specimens A7 to A12

Specimen	Event	Description	Purpose	Record	Scale*	PGA, g
A7	1	Damaging earthquake	First major event	Loma Prieta 1989 Presidio	12.00	1.20
	2	Minor earthquake	Aftershock	Imperial Valley 1979 Superstition Mt.	1.80	0.34
	3	Minor earthquake	Second aftershock	San Fernando 1971 2011 Zonal Ave.	1.20	0.10
	4	Severe earthquake	Failure of bridge	San Fernando 1971 455 S. Figueroa St.	3.60	0.54
A8	1	Minor earthquake	Minor damage	Imperial Valley 1979 Superstition Mt.	1.80	0.34
	2	Minor earthquake	Additional damage	San Fernando 1971 2011 Zonal Ave.	1.20	0.10
	3	Damaging earthquake	First major event	Loma Prieta 1989 Presidio	12.00	1.20
	4	Severe earthquake	Failure of bridge	San Fernando 1971 455 S. Figueroa St.	3.60	0.54
A9	1	Major earthquake	First major event	San Fernando 1971 Orion Blvd.	3.25	1.43
	2	Minor earthquake	Aftershock damage	San Fernando 1971 2011 Zonal Ave.	1.20	0.10
	3	Moderate earthquake	Additional damage	El Centro 1940	1.00	0.35
	4	Minor earthquake	Aftershock	San Fernando 1971 455 S. Figueroa St.	1.00	0.15
	5	Severe earthquake	Failure of structure	San Fernando 1971 Orion Blvd.	3.25	1.43
A10	1	Minor earthquake	Minor damage	San Fernando 1971 2011 Zonal Ave.	1.20	0.10
	2	Moderate earthquake	Additional damage	El Centro 1940	1.00	0.35
	3	Minor earthquake	Aftershock	San Fernando 1971 455 S. Figueroa St.	1.00	0.15
	4	Major earthquake	First major event	San Fernando 1971 Orion Blvd.	3.25	1.43
	5	Severe earthquake	Failure of structure	San Fernando 1971 Orion Blvd.	3.25	1.43
A11	1	Major earthquake	First damaging earthquake	Northridge 1994 VA Hospital	1.00	0.42
	2	Minor earthquake	Aftershock	Northridge 1994 Griffith Observatory	1.00	0.26
	3	Minor earthquake	Additional damage	Taft 1952	1.00	0.36
	4	Severe earthquake	Failure of column SCT	Mexico City 1985	1.00	0.17
A12	1	Minor earthquake	Minor damage	Northridge 1994 Griffith Observatory	1.00	0.26
	2	Minor earthquake	Additional damage	Taft 1952	1.00	0.36
	3	Major earthquake	First damaging earthquake	Northridge 1994 VA Hospital	1.00	0.42
	4	Severe earthquake	Failure of column SCT	Mexico City 1985	1.00	0.17

이 연구의 해석에 의한 최대하중과 변위연성도를 실험과 함께 비교하여 Table 11에 정리하였다. 이 표에서 해석에 의한 항복변위 및 극한변위는 전술한 바와 같이 직접적인 방법⁽⁶⁾으로 평가하였으며 해석에 의한 결과를 볼 때 해석결과가 실험결과와 전반적으로 잘 일치함을 알 수 있다.

3.4 검증 및 고찰

이 연구에서 제안한 하중재하에 따른 요소레벨의 손상지수의 변화를 연계논문⁽¹⁾에서 제시한 기존의 다른 연구자의 손상지수의 결과와 비교하여 Fig. 21 ~ Fig. 26에 나타내었다.

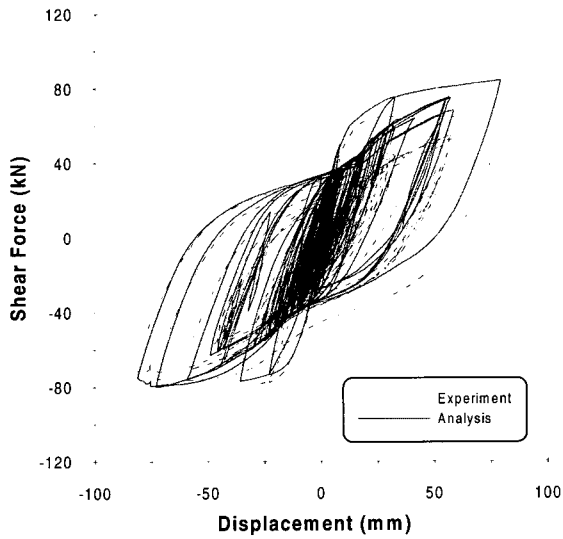


Fig. 15 Shear vs. displacement response of specimen A7

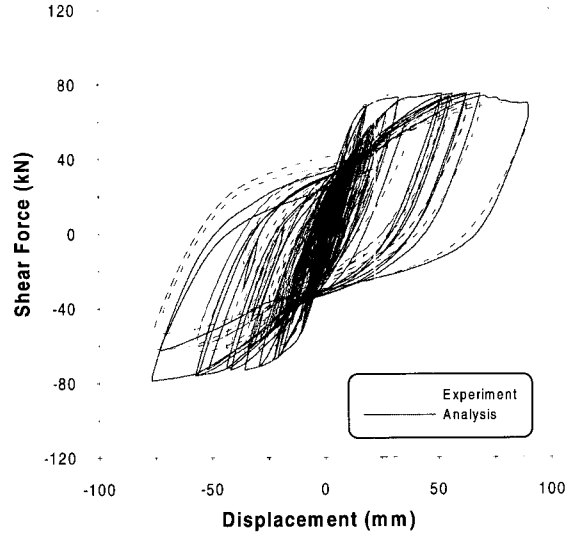


Fig. 18 Shear vs. displacement response of specimen A10

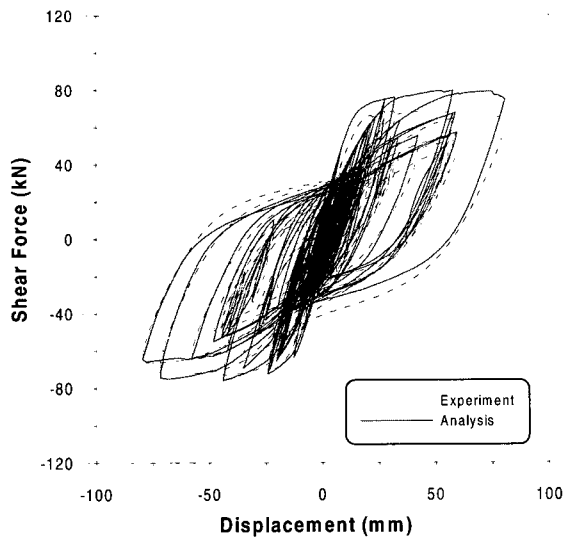


Fig. 16 Shear vs. displacement response of specimen A8

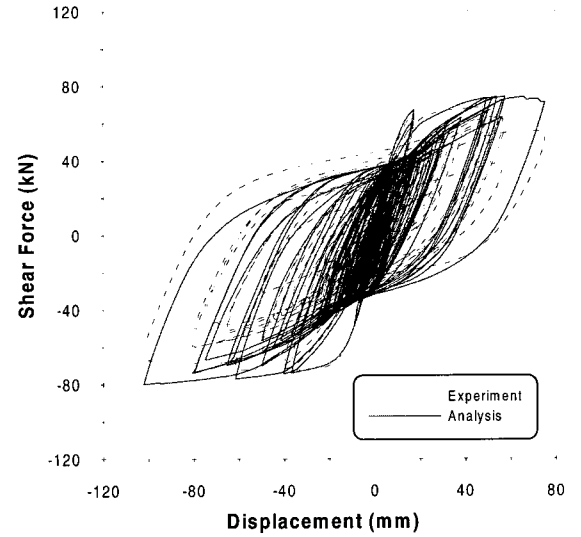


Fig. 19 Shear vs. displacement response of specimen A11

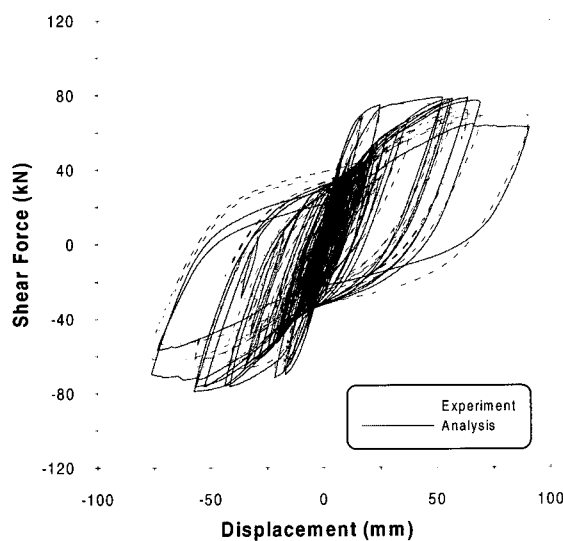


Fig. 17 Shear vs. displacement response of specimen A9

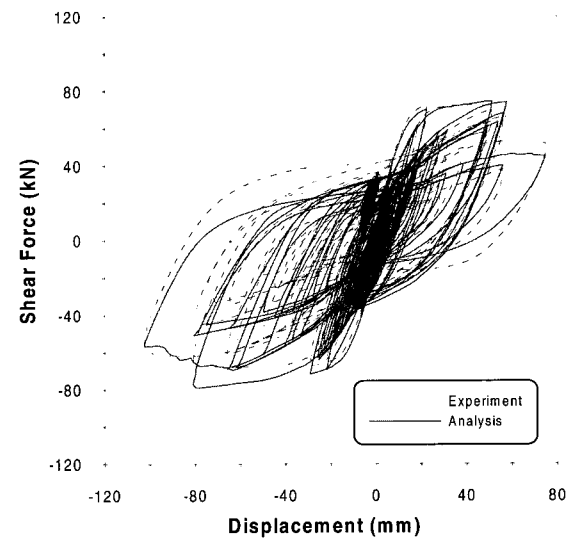


Fig. 20 Shear vs. displacement response of specimen A12

실험체의 실험결과를 재하 단계별로 다른 연구자의 손상지수와 함께 비교하여 Table 12~Table 17에 정리하였다.

실험체 A7은 Table 10에 나타낸 바와 같이 규모가 큰 지

진, 두 단계의 소규모의 지진, 그리고 다시 큰 규모의 지진으로 이어지는 총 4단계의 하중이력을 경험한다. 이러한 하중이력에 대한 손상지수 해석결과에서 Kratzig와 Meskouris

Table 11 Comparison of test with analysis

Specimen		A-7		A-8		A-9		A-10		A-11		A-12	
		Exp.	Ana.	Exp.	Ana.	Exp.	Ana.	Exp.	Ana.	Exp.	Ana.	Exp.	Ana.
Load	Yield load P_y (kN)	60.0	49.8	64.0	66.4	65.0	68.0	58.0	64.3	65.0	65.5	64.0	63.5
	Maximum load P_u (kN)	78.0	84.0	72.0	75.9	75.0	78.6	74.0	74.7	69.0	74.0	72.0	74.4
	P_u/P_y	1.30	1.69	1.13	1.14	1.15	1.16	1.28	1.16	1.06	1.13	1.13	1.17
Disp.	Yield disp. δ_y (mm)	16.0	8.8	15.5	14.4	16.5	15.5	17.0	15.3	18.0	16.1	13.0	14.9
	Ultimate disp. δ_u (mm)	82.5	77.4	81.5	74.6	91.6	67.8	91.2	71.3	103.0	65.9	103.0	79.8
	δ_u/δ_y	5.2	8.8	5.3	5.2	5.6	4.4	5.4	4.7	5.7	4.1	7.9	5.4

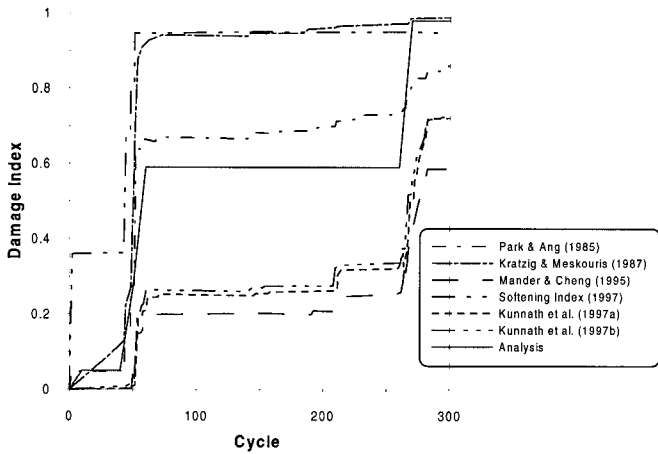


Fig. 21 Comparative evaluation of progressive damage for specimen A7

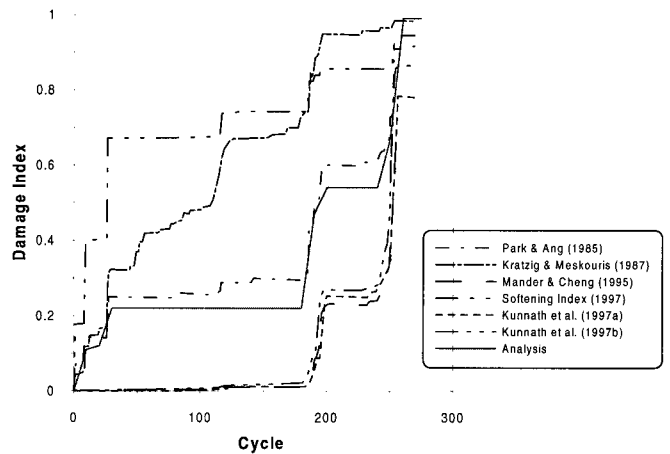


Fig. 24 Comparative evaluation of progressive damage for specimen A10

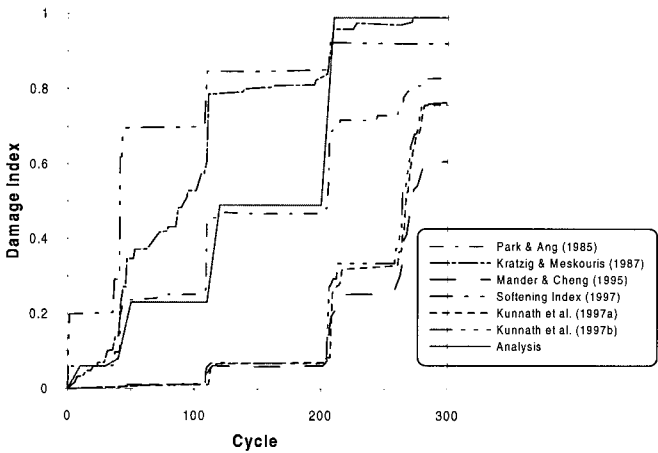


Fig. 22 Comparative evaluation of progressive damage for specimen A8

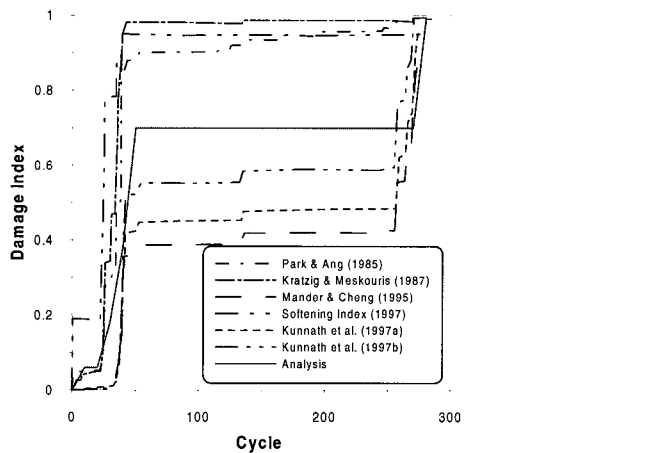


Fig. 25 Comparative evaluation of progressive damage for specimen A11

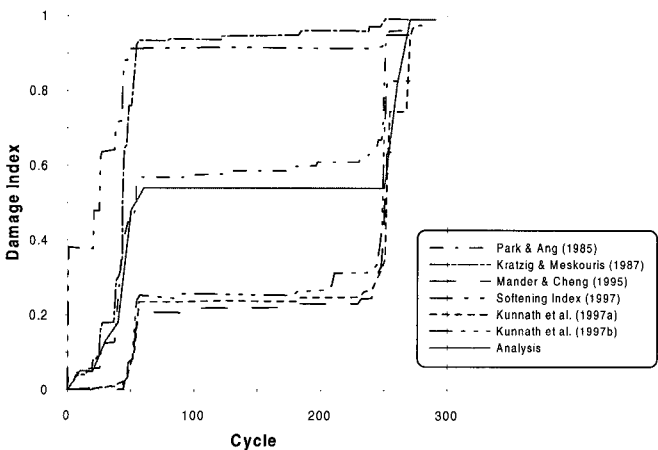


Fig. 23 Comparative evaluation of progressive damage for specimen A9

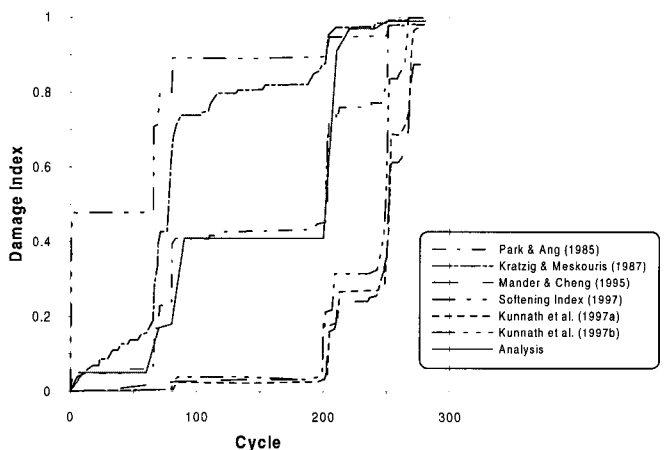


Fig. 26 Comparative evaluation of progressive damage for specimen A12

모델⁽⁷⁾과 연화지수(softening index)⁽²⁾는 손상을 과대 평가하고 있으며 Mander와 Cheng 모델⁽⁸⁾과 Kunnath 등의 모델⁽²⁾은 손상을 과소 평가하고 있다. 이에 비해 이 연구에서 제안한 요소레벨의 손상지수는 정규화된 변형과 에너지 소산의 단순 선형조합으로 되어있는 Park과 Ang 모델⁽⁹⁾과 같이 실험에서 관찰된 손상을 적절히 평가하고 있으며 마지막 단계의 지진으로 인한 추가적인 손상을 잘 예측하고 있다(Table 12).

소규모의 지진 두 단계와 대규모의 지진 두 단계로 구성된 하중이력을 받는 실험체 A8의 손상지수 해석결과에서 Kratzig와 Meskouris 모델과 연화지수(softening index)는 손상을 과대 평가하고 있으며 Mander와 Cheng 모델과 Kunnath 등의 모델은 손상을 과소 평가하고 있다. 이에 비해 이 연구에서 제안한 요소레벨의 손상지수는 Park과 Ang 모델과 같이 실험에서 관찰된 손상을 적절히 평가하고 있다 (Table 13).

총 5단계의 하중이력을 받는 실험체 A9와 A10의 손상지수 해석결과에서 Kratzig와 Meskouris 모델과 연화지수(softening index)는 손상을 과대 평가하고 있으며 Mander와 Cheng 모

델과 Kunnath 등의 모델은 손상을 과소 평가하고 있다. 이에 비해 이 연구에서 제안한 요소레벨의 손상지수는 Park과 Ang 모델과 같이 실험에서 관찰된 손상을 전반적으로 잘 예측하고 있다(Table 14, Table 15).

피로파괴를 유도하기 위한 하중이력을 받는 실험체 A11의 손상지수 해석결과에서 Kratzig와 Meskouris 모델, 연화지수(softening index), 그리고 Park과 Ang 모델은 손상을 과대 평가하고 있으며 피로의 정식화에 근거한 Mander와 Cheng 모델과 Kunnath 등의 모델은 손상을 다소 작게 평가하고 있다. 이에 비해 이 연구에서 제안한 요소레벨의 손상지수는 실험에서 관찰된 손상을 적절히 평가하고 있으며 또한, 파괴시점을 잘 예측하고 있다(Table 16).

실험체 A12는 두 단계의 소규모의 지진과 두 단계의 대규모의 지진으로 이루어진 하중이력을 받는다. 손상지수 해석결과에서 Kratzig와 Meskouris 모델과 연화지수(softening index)는 손상을 과대 평가하고 있으며 Mander와 Cheng 모델과 Kunnath 등의 모델은 손상을 과소 평가하고 있다. 이에 비해 이 연구에서 제안한 요소레벨의 손상지수는 파괴시점을

Table 12 Comparative evaluation of progressive damage for specimen A7

Half-Cycle No.	Notes	Park & Ang(1985)	Kratzig & Meskouris(1987)	Mander & Cheng(1995)	Softening Index(1997)	Kunnath et al.(1997a)	Kunnath et al.(1997b)	Analysis
45	First cracking	0.16	0.16	0.00	0.60	0.01	0.01	0.05
49-52	Spalling	0.28	0.40	0.01	0.81	0.18	0.20	0.27
64	Significant spalling	0.67	0.93	0.20	0.95	0.25	0.26	0.59
220	Visible bucking of longitudinal bars	0.72	0.97	0.25	0.95	0.32	0.33	0.59
269 - 270	Spiral failure	0.80	0.99	0.40	0.95	0.50	0.51	0.98

Table 13 Comparative evaluation of progressive damage for specimen A8

Half-Cycle No.	Notes	Park & Ang(1985)	Kratzig & Meskouris(1987)	Mander & Cheng(1995)	Softening Index(1997)	Kunnath et al.(1997a)	Kunnath et al.(1997b)	Analysis
33	First cracking	0.06	0.10	0.00	0.20	0.00	0.00	0.06
46 - 47	Spalling	0.24	0.35	0.00	0.70	0.01	0.01	0.23
114	Significant spalling	0.47	0.79	0.07	0.86	0.07	0.07	0.49
220	Bucking of longitudinal bar	0.72	0.95	0.26	0.92	0.32	0.33	0.99
267	Necking of spiral reinforcement	0.80	0.97	0.40	0.92	0.52	0.53	0.99
270	Two spiral failed on the left side	0.80	0.97	0.45	0.92	0.60	0.60	0.99

Table 14 Comparative evaluation of progressive damage for specimen A9

Half-Cycle No.	Notes	Park & Ang(1985)	Kratzig & Meskouris(1987)	Mander & Cheng(1995)	Softening Index(1997)	Kunnath et al.(1997a)	Kunnath et al.(1997b)	Analysis
22	First cracking	0.06	0.08	0.00	0.48	0.00	0.00	0.05
49	Spalling	0.45	0.75	0.07	0.90	0.10	0.08	0.48
122	Significant spalling	0.57	0.93	0.22	0.90	0.24	0.26	0.54
190	Initial bucking of longitudinal bar	0.60	0.94	0.23	0.90	0.25	0.27	0.54
260	Spiral failed on the left side	0.95	0.98	0.64	0.94	0.69	0.83	0.82

Table 15 Comparative evaluation of progressive damage for specimen A10

Half-Cycle No.	Notes	Park & Ang(1985)	Kratzig & Meskouris(1987)	Mander & Cheng(1995)	Softening Index(1997)	Kunnath et al.(1997a)	Kunnath et al.(1997b)	Analysis
12	First cracking	0.14	0.15	0.00	0.40	0.00	0.00	0.11
30	Spalling	0.25	0.32	0.00	0.67	0.00	0.00	0.22
194	Significant spalling	0.50	0.90	0.12	0.84	0.25	0.25	0.54
260	Spiral failed on the left side	0.95	0.99	0.67	0.92	0.78	0.86	0.99

Table 16 Comparative evaluation of progressive damage for specimen A11

Half-Cycle No.	Notes	Park & Ang(1985)	Kratzig & Meskouris(1987)	Mander & Cheng(1995)	Softening Index(1997)	Kunnath et al.(1997a)	Kunnath et al.(1997b)	Analysis
27	First cracking	0.28	0.34	0.02	0.78	0.01	0.01	0.18
38	Spalling	0.50	0.85	0.10	0.88	0.30	0.30	0.38
252	Significant spalling, Some bar buckling, and necking of spirals	0.98	0.99	0.43	0.95	0.48	0.59	0.70
270 - 271	Two spiral failed on the right side	1.00	0.99	0.85	0.95	0.80	1.00	0.70
275	Fracture of longitudinal bar	1.00	1.00	0.87	0.95	0.97	1.00	0.99

Table 17 Comparative evaluation of progressive damage for specimen A12

Half-Cycle No.	Notes	Park & Ang(1985)	Kratzig & Meskouris(1987)	Mander & Cheng(1995)	Softening Index(1997)	Kunnath et al.(1997a)	Kunnath et al.(1997b)	Analysis
22	First cracking	0.05	0.07	0.00	0.47	0.00	0.00	0.05
83	Spalling	0.41	0.70	0.03	0.89	0.03	0.04	0.18
205 - 206	Significant spalling, Buckling of long. bars, and initiation of spiral necking	0.73	0.95	0.15	0.94	0.17	0.22	0.41
255	Spiral failed on the right side	1.00	0.99	0.61	0.98	0.75	0.84	0.99

다소 빨리 평가하는 경향을 보이고 있으나 Park과 Ang 모델과 같이 실험에서 관찰된 손상을 적절히 평가하고 있다(Table 17).

이로부터 이 연구에서 제안하고 있는 손상지수에 의한 내진성능평가 기법은 각 하중단계의 손상이나 파괴를 전반적으로 잘 평가하고 있음을 알 수 있다.

일련의 해석결과와 실험결과와의 비교로부터 이 연구에서 제안하고 있는 지진손상 평가법은 철근콘크리트 교각의 재하 단계별 손상정도를 적절히 평가하고 있으며, 제안된 지진손상 평가법을 철근콘크리트 구조물의 동적 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)⁽¹²⁾에 이식함으로써, 해석적 방법에 의한 신축 또는 기존 철근콘크리트 교각의 내진성능평가가 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

이 연구에서는 지진하중을 받고 있는 철근콘크리트 교각의 비선형 거동과 지진손상 평가를 위한 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 유한요소해석 프로그램을 사용하여, 다양한 하중이 작용하는 철근콘크리트 교각을 해석하였다. 실험결과와 비교·검토된 수치예제로부터 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 의하여 이루어졌음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김태훈, 김운학, 신현목, "철근콘크리트 교각의 지진손상

- 평가 I: 이론 및 정식화," 한국지진공학회 논문집, 제6권, 제3호, 2002, pp. 31-40.
2. Kunnath, S. K., El-Bahy, A., Taylor, A., and Stone, W., "Cumulative seismic damage of reinforced concrete bridge piers," Report No. NCEER-97-0006, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, 1997.
 3. El-Bahy, A., Kunnath, S. K., Stone, W. C., and Taylor, A. W., "Cumulative seismic damage of circular bridge columns : Benchmark and low-cycle fatigue tests," *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 4, 1999, pp. 633-641.
 4. American Association of State Highway and Transportation Officials(AASHTO), *Standard Specifications for Highway Bridges*, Sixteenth Edition, Washington, D. C., 1996.
 5. 김태훈, 유영화, 신현목, "등가환산단면을 이용한 원형 철근콘크리트 교각의 비탄성 해석", 대한토목학회 논문집, 제20권, 제5-A호, 2000, pp. 755-763.
 6. 김태훈, 유영화, 신현목, "지진하중을 받는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동 및 연성능력에 관한 해석적 연구", 한국지진공학회 논문집, 제4권, 제4호, 2000, pp. 37-51.
 7. Kratzig, W. B. and Meskouris, M., "Nonlinear seismic analysis of reinforced concrete frames," *Earthquake Prognostics*(Vogel and Brandes, editors), Verlag Friedr, Vieweg and Sohn, Braunschweig, 1987, pp. 453-462.
 8. Mander, J. B. and Cheng, C. T., "Renewable hinge detailing for bridge columns," *Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Melbourne, Australia, 1995. 11, pp. 197-206.
 9. Park, Y. J., Ang, A. H. S., and Wen, Y. K., "Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. ST4, 1985, pp. 740-757.
 10. Hindi, R. A. and Sexsmith, R. G., "A proposed damage model for RC bridge columns under cyclic loading," *Earthquake Spectra*, Vol. 17, No. 2, 2001, pp. 261-290.
 11. El-Bahy, A., Kunnath, S. K., Stone, W. C., and Taylor, A. W., "Cumulative seismic damage of circular bridge columns : variable amplitude tests," *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 5, 1999, pp. 711-719.
 12. 김태훈, 신현목, "Analytical approach to evaluate the inelastic behaviors of reinforced concrete structures under seismic loads," 한국지진공학회 논문집, 제5권, 제2호, 2001, pp. 113-124.