

이축반복하중을 받는 2주형 철근콘크리트 교각의 실험거동

Experimental Behavior of Reinforced Concrete Column-Bent Piers under Bidirectional Repeated Loading

박창규*
Park, Chang Kyu

이범기**
Lee, Beom Gi

송희원***
Song, Hee Won

정영수***
Chung, Young Soo

국문요약

기존의 RC 교각에 대한 내진성능 연구는 실험여건상 일방향 반복하중을 받는 단주교각에 집중되어 있었다. 그러나 고속도로상의 교각은 대다수가 다주교각으로 이루어져 있으므로, 본 연구에서는 국내고속도로에서 많이 사용되고 있는 2주형 교각에 대한 이축지진하중에서의 지진응답을 실험적으로 조사하였다. 실험체는 지름 400mm, 높이 2,000mm인 2주형 원형 교각 4기를 제작하였으며, $0.1f_{yk}A_g$ 크기의 축방향 하중작용하에서 횡방향 하중을 이축으로 교번반복 재하하였다. 실험변수는 횡구속 철근비와 주철근 겹침이음으로서 기존 단주에 대한 연구결과와 유사하게 이들 실험변수들은 교각의 내진성능에 상당한 영향을 미치고 있었다. 또한 동일하게 설계된 일축하중을 받는 단주와 이축하중을 받는 다주의 내진성능을 비교한 결과 단주의 경우 손상이 하부 소성힌지 한 곳에 집중된 반면 다주의 경우 교축직각방향 하중으로 인하여 손상이 상·하부 두 곳으로 분산되어 나타났다.

주요어 : RC 이주형교각, 이축지진하중, 주철근 겹침이음, 횡구속비, 지진응답

ABSTRACT

Response of reinforced concrete (RC) column-bent piers subjected to bidirectional seismic loadings was experimentally investigated. RC column-bent piers represent one of the most popular shapes of piers used in Korea highway bridges. Four column-bent piers were constructed in 400 mm diameter and 2,000 mm height. Each pier has two circular supporting columns. These piers were tested under bidirectional lateral load reversals with an axial load of $0.1f_{yk}A_g$. The test parameters included : different transverse reinforcement contents and lap-spliced longitudinal reinforcing steels. Test results indicate that the lap splice of longitudinal reinforcing steels have significantly influenced on hysteretic response of column-bent piers similar to previous test results for single columns with corresponding test parameters. Column capacity was changed with the level of transverse confinement. From the comparison of test result for single column under unidirectional loading, the damage of single column was concentrated on lower plastic hinge region but the damage of column-bent piers was scattered to upper and lower plastic hinge region.

Key words : RC column-bent pier, bidirectional seismic loadings, lap-spliced longitudinal reinforcing steels, lateral confinement ratio, hysteretic response

1. 서론

우리나라는 최근까지도 지진에 대하여 안전지대라 여겨 내진설계에 소홀히 하였다. 그러나 최근에 이르러 많은 중·소 규모의 지진이 다수 발생함은 물론 1995년 이웃 나라 일본의 고베지진의 피해 등으로 사회기반 시설에 대한 내진안전성에 관하여 많은 관심이 고조되고 있다. 특히 지난 2004년 5월 29일에는 경북 울진 동쪽 약 80km 해역에서 규모 5.2의 지진이 발생하였으며, 이는 1978년 계기지진을 관측한 이후 한반도 남한에서 일어난 지진 중 가장 큰 지진이다. 우리나라에서는 2003년 규모 4.0이상의 지진이 총 38회 발생하였다. 이에 많은 연구자들이 최근 몇 년 동안 내진에 관하여 많은 연구를 수행하여 좋은 성과를 올리고 있으나 지진발생시 피해가 큰 교량교각의 경우에는 실험여건상 일방향 반복하중을 받는 단주에 한정되어 연구가 진행되고 있다. 그러나 고속도로상의 교각은 거의 대부분이 다주교각으로 이루어져 있

며, 또한 지진발생시 지진하중은 매우 불규칙한 하중으로서 어느 한 방향으로만 작용하지 않는다. 그럼에도 불구하고 다축하중을 받는 다주형 교각에 대한 연구는 현재까지는 매우 미흡한 실정이다.

국내에서는 김재관등⁽¹⁾은 사각형 철근콘크리트 단주 교각에 관하여 축력이 재하되지 않은 상태로 2축 휨 실험을 하였으며, 실험결과 일축하중을 받는 교각에 비하여 강도, 강성 및 연성이 저하된다고 보고하고 있다. 또한 정영수 등⁽²⁾은 주철근 겹침이음을 갖는 2주형 원형 철근콘크리트 교각에 대하여 교축방향과 교축직각방향에 대하여 각각 휨 실험을 하였으며, 실험결과 하중재하 방향별로 시방서에 제시된 응답수정계수의 검증에 대한 필요성을 제시하였다. 국외에서는 NCEER 보고서에서 J. B. Mander 등⁽³⁾은 주철근 겹침이음이 있는 3주형 교각을 단면중설 보강하여 내진성능을 실험하였으며, 또한 시공된지 32년된 2주형 교각의 안전성 평가를 하였다.

우리나라의 기존 비내진 설계된 현재 공용중인 교각의 경우 주철근 겹침이음을 가지고 있는 것이 대부분이다. 이대형 등⁽⁴⁾과 정영수 등⁽⁵⁾이 철근 콘크리트 교각의 내진성능 연구결과에 의하면 주철근 겹침이음이 있는 경우 지진시 주철근의 부착파괴에 의하여 내진성능이 크게 저하

* 학생회원 · 중앙대학교 토목공학과, 박사수료

** 학생회원 · 중앙대학교 토목공학과, 석사과정

*** 정회원 · 중앙대학교 토목공학과, 교수(대표저자: chung47@cau.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2005년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2004. 11. 14 / 심사종료일 : 2005. 1. 21)

표 1 실험체 콘크리트의 배합표

굵은골재 최대치수 (mm)	W/C (%)	공기량 (%)	슬럼프 (mm)	단위질량(kg/m ³)					압축강도 (MPa)
				물	시멘트	굵은골재	진골재	AE 감수제	
25	49.7	3.9	130	171	344	975	852	1.73	28

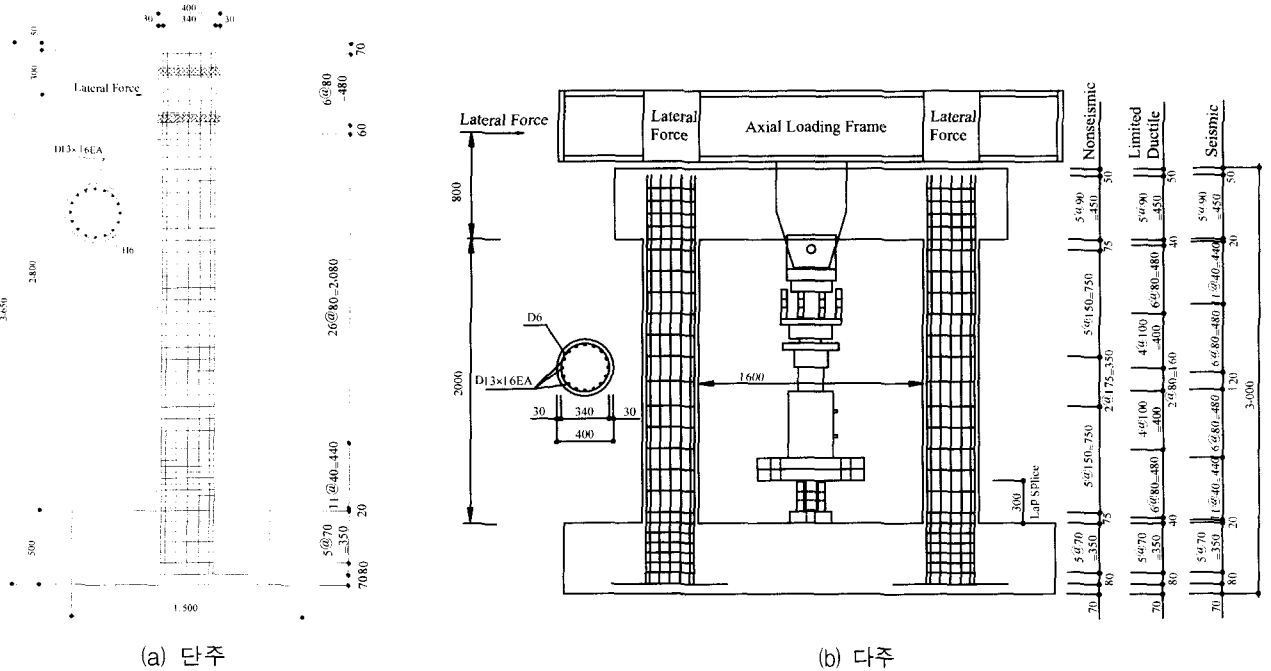


그림 1 실험체 상세

되는 것으로 보고되고 있으며, 주철근 겹침이음이 없는 비내진교각의 경우에는 휨파괴가 유도되나 요구연성도를 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

본 연구의 목적은 내진설계가 수행되지 않은 기존 다주교각의 거동특성을 파악하고 현행 내진설계기준의 철근 상세에 비하여 대폭적으로 완화된 철근 상세를 갖는 다주교각의 내진성능을 확인하는 것이다. 따라서 일축반복하중을 받는 단주에 관한 선행 연구에 이어 본 연구에서는 주철근 겹침이음된 비내진 설계된 2주형 교각의 2축반복하중하에서의 내진성능과 다양한 횡구속 철근비에 따른 내진성능을 실험적으로 파악하고자 하였다. 실험변수로는 횡방향 구속철근비와 주철근 겹침이음으로서 비내진 설계된 교각의 경우 주철근 겹침이음 유무를 변수로 하였다. 주철근 겹침이음이 없는 비내진 설계된 교각과 현행 도로교설계기준⁽⁶⁾에 따라 내진설계된 교각과 내진설계시 요구되는 횡방향 구속철근비의 50% 횡구속철근을 갖는 한정연성실험체의 내진성능을 파악하고자 하였다.

2. 실험계획

교각실험체 제작에 사용한 콘크리트는 굵은 골재 최대치수 25 mm의 레드믹스트 콘크리트를 사용하였으며 기둥 본체에 타설된 콘크리트의 28일 평균압축강도는 28

MPa이었다. 그리고 주철근과 띠철근은 각각 SD30인 D13과 SD30인 D6을 사용하였으나, 인장실험결과 각각의 항복강도는 330MPa(D13), 390MPa(D6)이 나왔다. 다음 표 1은 콘크리트의 배합표이다.

실험체 기둥은 그림 1과 같이 단면지름이 0.4m, 높이 2m로 횡방향하중 가력높이는 코핑부 및 받침부 높이까지 고려한 2.8m인 이주형 휨실험체를 설계하였다. 여기서 실험체는 실험여건상 축소모형으로 계획하였으며 이전 김남식⁽⁷⁾의 상사법칙에 관한 연구결과를 고려하면 실 교각과의 거동차이는 거의 없을 것으로 판단된다. 그리고 다주와 동일한 단면과 높이를 가진 단주형 실험체를 설계 및 제작하여 단주와 다주의 거동을 비교하였으며 비내진 교각의 내진성능을 조사하기 위하여 표 2에서 보는 바와 같이 이주형 비내진실험체 2기(겹침이음 50%, 0%)와 한정연성실험체, 내진실험체 각 1기, 단주내진실험체 1기, 총 5개의 실험체를 제작하였다. 주철근 겹침이음이 있는 경우 겹침이음 길이는 과거 교각의 주철근을 압축철근으로 고려하였으므로 압축철근의 이음식을 적용하였으며 그 길이는 300 mm이다.

콘크리트와 띠철근 각각의 설계기준 강도 24MPa과 350MPa을 이용하면 내진설계시 요구 횡철근비는 0.823 % (간격 s=42.1mm), 실제 강도 28MPa과 390MPa을 이용하면 0.862% (s=40.2mm)가 산출된다. 그리고 실제로 배근된 철근비는 0.867% (s=40mm)로 실제 재료강

표 2 실험체의 특성

실험체명			주철근(16D13)		횡방향철근(D6)		축력(kN) ($P=0.1f_{ck}A_g$)
			철근비 (%)	겹침이음 (%)	철근비 (%)	간격(mm) PHR / NPHR	
다주	비내진	N2C-SP00	1.61%	0	0.231	150 / 150	600
		N2C-SP50		50			
	한정연성	L2C-SP00		0	0.433	80 / 100	
		S2C-SP00					
단주	내진	S1C-SP00	0.867	40 / 80	300		

* PHR : 소성힌지구간, NPHR : 비소성힌지구간

도를 이용하여 계산된 결과와 유사하다. 그리고 한정연성실험체의 철근비는 내진실험체의 50%로 선정하여 배근하였다.

3. 실험방법

본 실험에서는 그림 2와 같이 축방향력과 교축 및 교축직각방향의 이축방향으로 횡하중을 재하하도록 계획되었다.^{(8),(9)} 실험체의 상부에는 가력프레임을 설치하여 축방향력과 2방향의 횡하중을 재하할 수 있도록 설계되었으며 코핑부와 완전일체가 되어 거동할 수 있도록 하였다. 축방향력은 $0.1f_{ck}A_g$ 에 해당하는 600 kN을 가력하여 각각의 기둥에 300 kN이 재하되도록 하였다. 그리고 교축방향의 하중은 2개의 1,000 kN Actuator를 교축직각방향의 하중은 500 kN의 Actuator를 가력벽에 부착하여 재하하였다.

그림 3은 실험체의 변위, 곡률, 그리고 철근의 변형률을 측정하기 위하여 교축방향과 교축직각방향에 설치한 계측기의 위치를 보여주고 있다. 실험수행 후 실험체의 거동을 분석하기 위한 측정장비로 하중과 변위값은 Actuator에 내장되어 있는 Load Cell을 이용하였으며, 횡방향변위를 측정하기 위하여 변위계를 설치하였다. 또한 주철근, 띠철근에 변형률 게이지를 부착하여 철근의

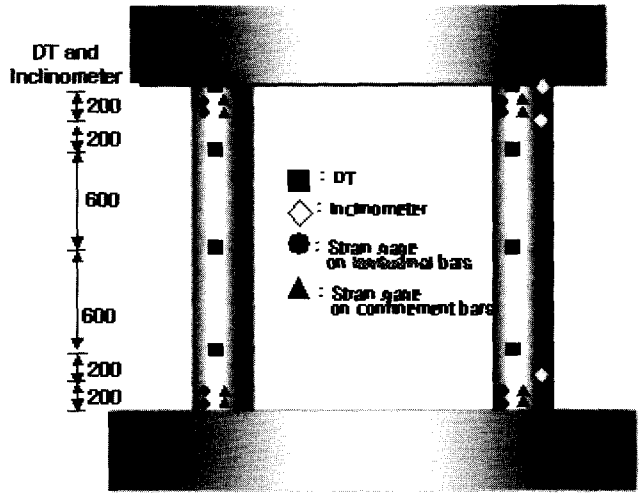


그림 3 계측계획

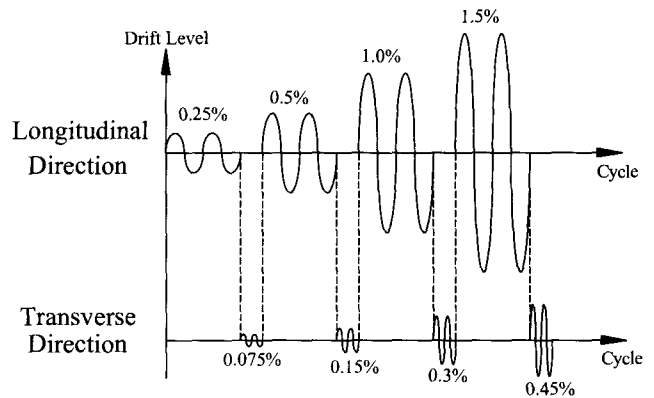


그림 4 하중 재하순서

변형률을 측정하였다. 그리고 기초 하단으로부터 200 mm, 1,800 mm, 2,000 mm 지점에 경사계를 부착하여 상·하부 소성힌지구간의 곡률을 측정하도록 하였다.

반복하중 재하 패턴은 그림 4와 같이 진행되었다. 기둥의 유효길이에 대한 가력된 변위의 퍼센트(%)로, 하중의 주방향인 교축방향은 기초상단에서 높이 2.8m인 가력부에서 $\pm 0.25\%$, $\pm 0.5\%$, $\pm 1.0\%$, $\pm 1.5\%$, $\pm 2.0\%$, $\pm 3.0\%$, $\pm 4.0\%$... 단계로 파괴시까지 진행되었다. 각각의 가력변위 크기(drift level) 마다 동일 변위제어 하중을 2회 반복재하하여 교각의 거동특성을 비교 분석하였다. 또한 부방향



그림 2 실험전경

인 교축직각방향의 가력변위크기는 교축방향하중의 30%에 해당하는 값으로 설정되었다.

4. 실험결과

4.1 실험체 거동특성

표 3은 주하중방향인 교축방향에서의 파괴거동양상을 보여주고 있다. 모든 실험체의 초기균열은 가력변위크기 (drift level) 0.25%에서 약 0.5D 높이에서 발생하였으며 가력변위크기 1.5%에서 항복하였으며, 실험체별 거동특성은 다음과 같다.

S1C-SP00 : 겹침이음이 없이 내진설계된 단주실험체로서 가력변위크기 3.0%에서 최대 횡하중에 도달하였고 압축부의 피복콘크리트가 탈락되는 현상이 나타났다. 또한 가력변위크기 7.0%에서 주철근이 파단되고 가력변위크기 8.0%에서 극한변위에 도달하였다.

N2C-SP50 : 50% 주철근 겹침이음된 비내진 이주형 실험체로서 단주와 같이 가력변위크기 3.0%에서 최대횡하중에 도달하고 압축부의 피복콘크리트가 탈락하는 현상이 발생하였다. 주철근 겹침이음으로 4%의 가력변위크기에서 극한변위에 도달하였다.

N2C-SP00 : 주철근 겹침이음이 없는 비내진 이주형 실험체로서 수직균열은 겹침이음이 있는 비내진 실험체와 같이 가력변위크기 3.0%에서 발생하였다. 그러나, 최대횡하중과 피복탈락이 가력변위크기 4.0%에서 진행되고 가력변위크기 5.0%에서 극한변위에 도달하여 겹침이음이 없는 실험체(N2C-SP00)가 겹침이음이 있는 실험체(N2C-SP50)보다 내진성능이 더 우수한 것으로 나타났다. 이 실험체는 가력변위크기 4.0% 최대 횡하중 이후 횡구속력 부족으로 인하여 연성이 저하되었으며, 극한점 이후 최종 파괴시 가력변위크기 6.0%에서는 피복콘크리트가 완전히 탈락되고 횡구속철근 즉 전단철근의 부족으로 인하여 교축직각 방향 재하시에 전단으로 파괴되었다.

L2C-SP00 : 현행 내진 규정의 50%, 혹은 비내진 교각의 1.87배 횡구속철근비를 갖는 실험체로서 최대횡하중과 피복탈락은 겹침이음이 없는 비내진실험체와 같이 가력변

위크기 4.0%에서 발생하였지만 극한점과 주철근의 파단은 비내진실험체보다 우수한 가력변위크기 7.0%에서 발생하였다.

S2C-SP00 : 도로교설계기준에 따라 설계된 내진실험체로서 다른 실험체들보다 모든 면에서 향상된 모습을 보여주고 있다. 최대하중은 가력변위크기 6.0%에서 발생하였다. Actuator의 최대가력 변위인 238 mm에도 하중이 저하되지 않아 교축방향의 경우 가력변위크기 8.5%(238 mm)를 교축직각방향은 가력변위크기를 계속 증가시키어 파괴시까지 반복재하하였으며, 가력변위크기 8.5% 반복재하시 주철근 파단이 발생하였다. 이에 교축직각방향의 가력변위가 커짐에 따라 S2C-SP00-L만 교각의 상단피복이 탈락하였다.

4.2 하중-변위 및 모멘트-곡률 이력곡선

그림 5는 하중-변위 이력곡선을 보여주고 있으며 그림 5의 좌측 그림들은 교축방향, 우측 그림들은 교축직각방향 결과들을 보여주고 있다. 그림 6(c)~(e)를 보면 횡구속철근비가 클수록 교축방향의 연성도가 크고, 교축직각방향의 최대하중은 각각 261 kN (N2C-SP50), 279 kN (N2C-SP00), 294 kN (L2C-SP00), 297 kN (S2C-SP00)으로 점점 커지는 것을 알 수 있다. 즉 교축방향의 내진 연성이 작을수록 부재에 손상이 크게 발생하여 교축직각방향의 횡하중이 최대하중에 도달하기 이전에 감소되는 것으로 판단된다. 비내진 실험체(N2C-SP00)의 경우 주철근이 파단이 발생하지 않았지만 횡구속력 부족으로 인한 횡하중 감소로 극한하중에 도달하였고 단주와 한정연성실험체의 경우에는 주철근의 파단으로 횡하중이 감소하여 극한상태가 되었음을 볼 수 있다.

그림 6은 모멘트-곡률 이력곡선을 보여주고 있으며, 좌측 및 우측 그림들은 각각 교축방향의 교각 하부 및 상부에서의 거동을 나타낸다. 주철근 겹침이음이 있는 실험체인 그림 6(b)와 주철근 겹침이음이 없는 실험체인 그림 7(c) 실험체의 모멘트-이력곡선을 비교해 보면 주철근이 겹침이음된 실험체가 겹침이음이 없는 실험체보다 하부소성힌지 구간의 곡률이 더 작게 나타남을 알 수 있다. 이

표 3 하중단계별 교축방향 파괴거동

Drift Level / Specimen	0.25%	0.5%	1.0%	1.5%	2.0%	3.0%	4.0%	5.0%	6.0%	7.0%	8.0%	8.5%
S1C-SP00	★			●		♥♦				▲	●	
N2C-SP50*	★			●		♥♦	●					
N2C-SP00*	★			●		♥	♦	●	♦			
L2C-SP00	★			●		♥	♦			▲●		
S2C-SP00	★			●		♥			♦			▲**

★: 초기균열 ♥수직균열 ●: 항복변위 ♦: 최대횡하중 ○: 극한변위 ▲: 주철근 파단 ◆: 전단파괴
 *: 주철근 파단이 발생하지 않음, **: 추가 반복재하시 주철근 파단발생.

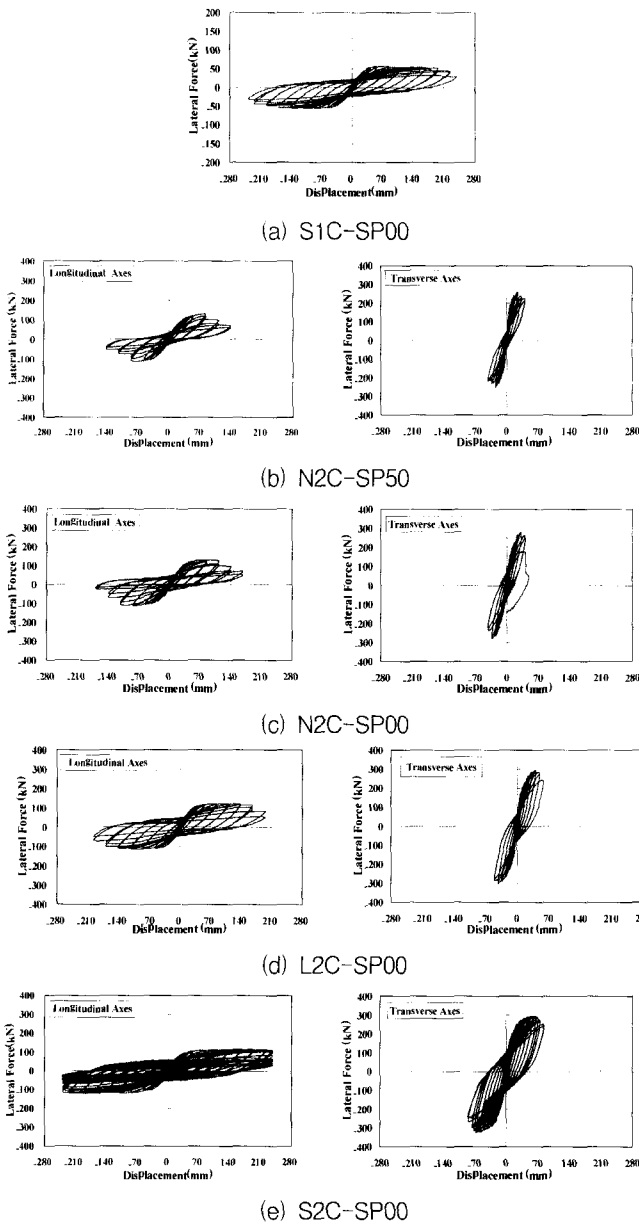


그림 5 하중-변위 이력곡선

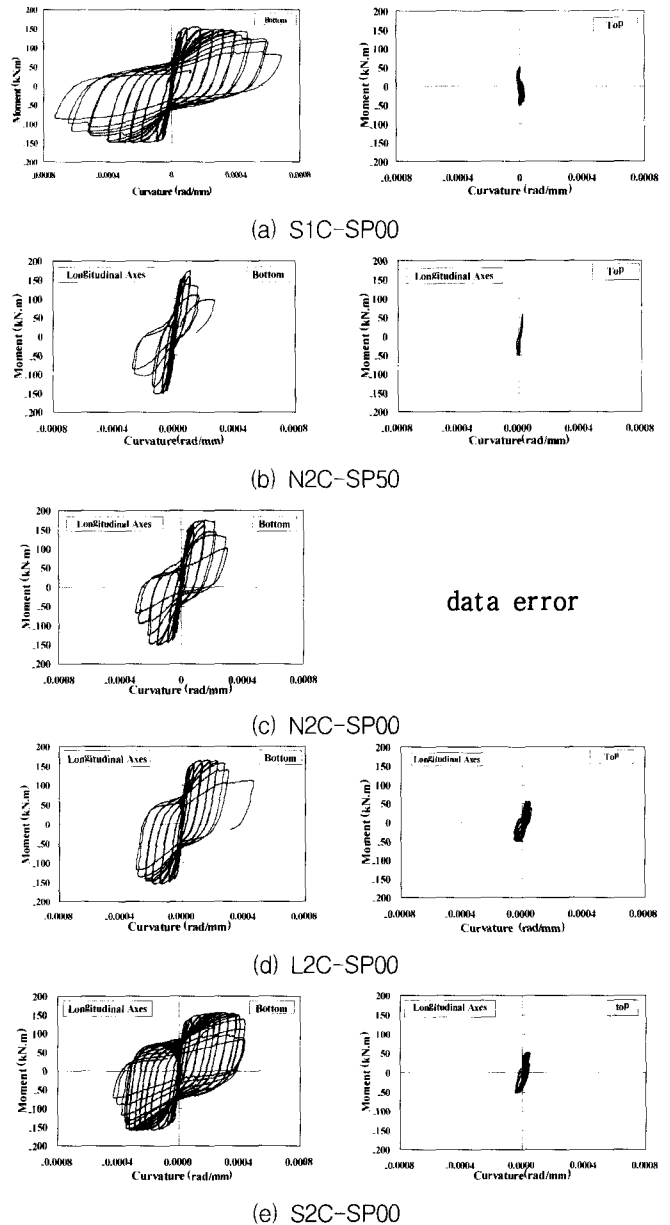


그림 6 모멘트-곡률 이력곡선

는 주철근 겹침으로 인한 부착활동(Bond slip)으로 인하여 주철근 겹침이음이 없는 실험체보다 작은 곡률에서 파괴됨을 볼 수 있다. 또한 횡구속 철근비가 증가할수록 소성힌지부의 곡률이 증가함을 볼 수 있다. 이는 횡구속 철근비가 증가함에 따라 연성도의 증가를 가져오며, 내진성능이 향상됨을 보여준다. 주철근 겹침이음이 없는 비내진 실험체(N2C-SP00)인 그림 6(c)의 경우 높이 1,800 mm의 경사계가 측정되지 않아서 교축직각방향의 모멘트-곡률곡선을 측정하지 못하였다.

4.3 균열도 분석

그림 7은 각 실험체별 좌·우 기둥의 균열진행양상을 보여주고 있으며 좌측 및 우측 4개의 그림들은 각각 좌측기둥과 우측기둥의 균열도를 보여주고 있다. 겹침이음이 있는 실험체인 그림 7(b)와 겹침이음이 없는 실험체인

그림 7(c)를 비교해 보면 겹침이음이 있는 실험체가 소성힌지부에서 균열진전이 빠르게 진행되어 가력변위크기 3.0%의 인장측에서 주철근 겹침이음부의 부착파괴로 인한 수직균열이 발생하였다. 또한 횡구속철근비가 커짐에 따라 그림 7(c)~7(e) 균열 형태는 기둥 상·하부에 걸쳐 균열의 수는 증가하지만 균열간격이 작아짐을 볼 수 있다. 이는 횡구속 철근이 증가함에 따라 기둥이 하중을 전면적으로 부담하는 것으로 생각된다. 또한 모든 4개의 다주실험체가 가력변위크기 0.25%에서 초기균열이 발생하였지만 횡구속 철근비가 클수록 초기균열 수가 적음을 알 수 있다. 단주실험체인 그림 7(a)도 내진실험체인 그림 7(e)와 달리 균열의 간격이 큼을 볼 수 있다.

한편, 교각하부의 소성힌지구간의 피복은 양방향 하중으로 인하여 모두 탈락하였으며, 비내진 실험체와 한정연성실험체는 교각상부의 소성힌지 구간에 원주방향으로 모두 휨균열은 발생하였으나 피복은 탈락하지 않았다. 그러

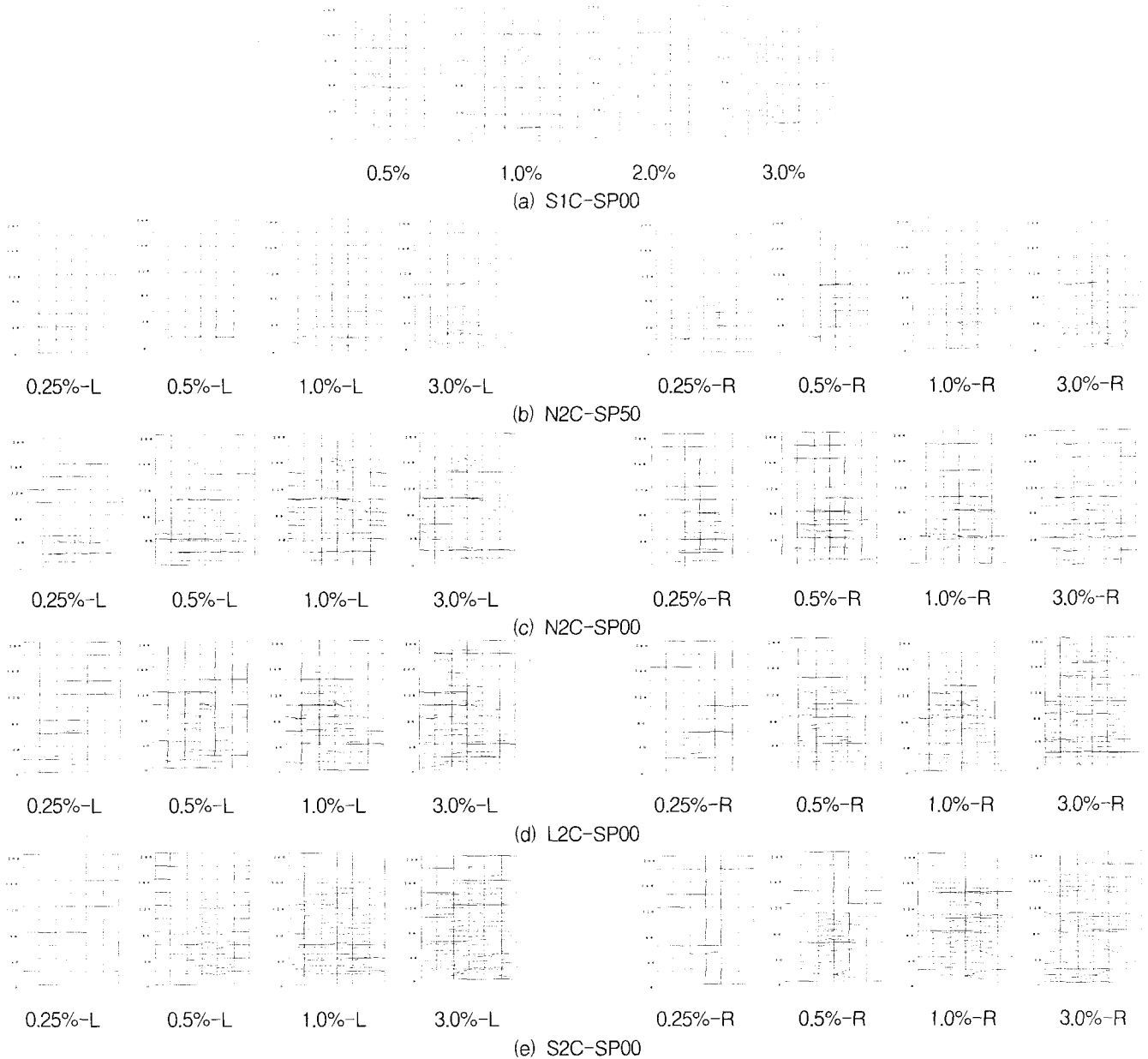


그림 7 실험체별 균열 진행양상

나 내진실험체의 경우는 교축방향 연성능력이 매우 커서 다른 실험체에 비하여 상대적으로 큰 변위하중이 가력되어 교각 상단의 피복이 탈락하였으며 그림 8과 9는 한정 연성 및 내진 실험체의 실험종료 후 교각 상·하부의 파괴모습을 보여주고 있다.

4.4. 연성도분석

주하중방향(교축방향)에 대한 실험결과인 변위 및 곡률 연성도를 그림 10 및 표 4에 비교정리 하였다. 그림 10에서 다주의 경우 단주와의 비교를 위하여 하중 및 모멘트를 2로 나누어 교각 1개에 대한 포락곡선으로 표현하

표 4 변위 및 곡률연성도

Specimen	Yield		Ultimate		Ductility	
	Displacement (mm)	Curvature (rad/mm)	Displacement (mm)	Curvature (rad/mm)	Displacement	Curvature
S1C-SP00	37.4	4.2E-5	207.8	5.26E-4	5.6	12.52
N2C-SP50	39.7	3.6E-5	99.7	1.36E-4	2.5	3.74
N2C-SPOO	37.0	4.6E-5	126.4	2.55E-4	3.5	5.54
L2C-SP00	36.8	3.3E-5	176.9	2.93E-4	4.8	8.87
S2C-SP00	38.7	3.7E-5	238.0	4.36E-4	> 6.2	> 11.77

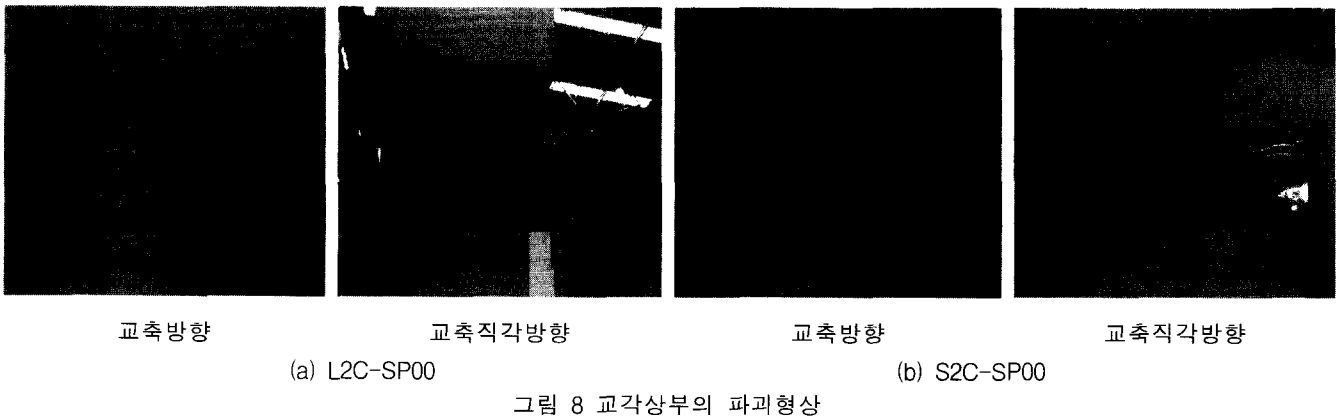


그림 8 교각상부의 파괴형상

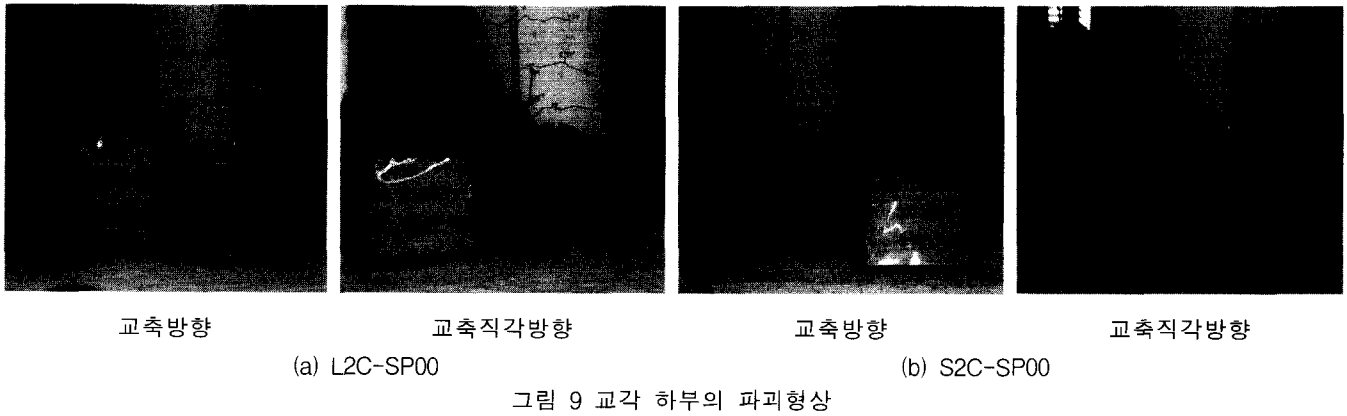


그림 9 교각 하부의 파괴형상

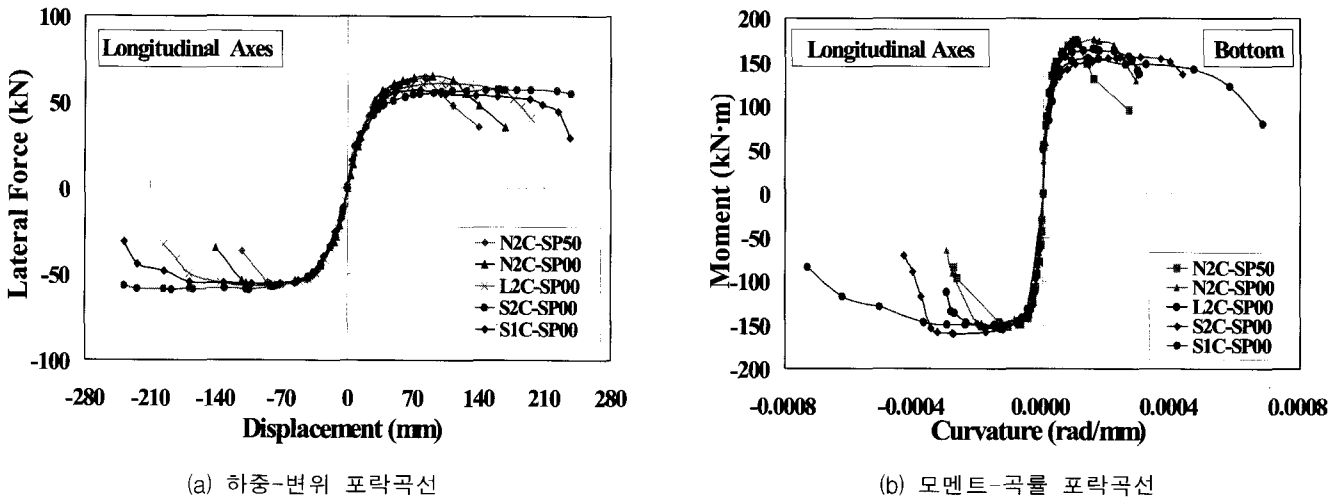


그림 10 변위 및 곡률연성도

였다. 단주연성도의 정의는 하중-변위 포락곡선상에서 최대 횡력 V_{max} 를 지나는 수평선과 원점에서 V_{max} 의 75%에 해당하는 횡력을 지나는 직선과의 교점을 항복점으로 결정하는 방법을 사용하였으며, 극한점은 최대하중에서 횡방향 하중이 15% 감소된 $0.85 V_{max}$ 가 되는 점으로 정의하였다. 분석결과 주철근 겹침이음이 있는 실험체(N2C-SP50)의 경우는 변위연성도가 가장 작은 것으로 나타났다. 따라서 기존에 건설된 교각들 중 많은 부분을 차지하고 있는 겹침이음된 교각에 대하여 교량등급 및 중요도에 따라 소요연성도가 다를 수는 있지만 현행 도로교 설계기준의 요구연성도를 만족하기 위해서는 내진보강이 필요하다고 판단된다. 그리고 주철근 겹침이음이 없는 경우에는

횡구속철근비가 증가할수록 연성도가 증가하는 것으로 이전의 일축반복하중을 받는 단주형 교각의 연구결과와 유사하게 나타났다. 그러나 주철근 겹침이음이 없는 비내진 설계된 경우 이전 연구^{(4),(5)}에서는 일축반복하중을 받을 시 요구변위연성도를 만족하는 것으로 보고하고 있으나, 본 연구에서는 이축반복하중을 받는 비내진실험체(N2C-SP00)는 어느 정도의 연성능력이 있으나 요구변위연성도 5에는 미치지 못하는 것으로 나타났다. 그리고 한정연성실험체(L2C-SP00)의 경우에도 기존 단주에 대한 연구결과와 다소 상이한 결과를 보이고 있다. 선행 연구⁽²⁾에 따르면 일축반복하중을 받는 단주의 경우 30%만의 횡구속철근비에도 요구변위연성도를 만족하는 것으로 보고되고 있다. 그

러나 본 실험체(L2C-SP00)는 현행규정의 50%에 해당하는 횡구속철근비로도 요구변위연성도에 근접은 하였으나 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 이는 이전 연구의 형상비와 재료강도가 다른 점도 연성도에 영향을 주고 있는 것으로 판단되나, 일축이 아닌 이축반복하중을 받음으로써 손상도가 증가하여 연성이 저하되는 것이 주된 이유로 판단된다. 그러나 Eurocode 8에서 제시하고 있는 한정연성 곡률연성도 "7"은 만족하는 것으로 나타났다. 내진실험체(S2C-SP00, S1C-SP00)의 경우에 동일한 횡구속철근비를 갖고 있는 다주 및 단주의 내진성능의 차이가 약간 있어 보이는데도 전반적으로 변위 및 곡률연성도 값은 유사한 결과를 나타낸 것이라 사료되며, 또한 다소의 실험오차도 포함된 것이라 판단된다. 이 두 실험체는 그 연성도가 매우 뛰어나 요구연성도를 충분히 만족하는 것을 알 수 있으나 다주의 경우에 Actuator의 가력한계로 인하여 정확한 연성도를 구하지는 못하였다. 이상의 결과로 미루어 볼 때 주철근 겹침이음이 없는 경우에는 내진설계가 되지 않았어도 어느 정도는 연성능력을 가지고 있다고 판단되며, 또한 현행 내진규정의 횡방향 구속철근비의 약 50% 정도의 매우 적은 양으로도 요구연성도에 근접할 것으로 판단된다.

5. 결 론

1. 교축직각 방향의 반복하중에 의해 교각상부에도 휨균열이 발생하였으며, 주하중방향이 교축방향인 경우의 2주형 교각의 내진거동은 단주교각의 파괴거동과 유사하다.
2. 주철근 겹침이음이 없는 경우 일축반복하중을 받는 비내진 설계된 단주는 요구연성도를 만족하는 경우도 있었지만, 2축반복하중을 받는 경우에는 어느 정도의 연성능력은 보유하고 있지만 요구연성도에는 못 미치는 것으로 나타났다. 더욱이 주철근 겹침이음이 있는 비내진 교각의 경우는 주철근 겹침이음이 없는 경우보다 연성도가 26% 낮게 나타나, 교량등급 및 중요도에 따라 소요연성도가 다를 수는 있지만 현행 도로교 설계기준의 요구연성도를 만족하기 위해서는 내진보강이 필요한 것으로 일축반복하중을 받는 경우의 연구결과와 동일하게 나타났다.
3. 횡구속 철근비를 증가시킨 한정연성 교각의 경우 비내진 교각보다 연성도가 41% 높게 나타났다. 그러나 일축 반복 하중을 받는 경우 횡구속철근비가 현행 내진규정의 30% 만으로도 요구연성도를 만족하였으나, 이축 반복하중을 받는 경우에는 현행 내진규정의 50%의 횡구속철근비에도 연성능력을 보유하고 있으나 요구연성도는 만족하지 못하였다. 따라서 중진지역에 적합한 내진설계식 검토시 이축반복 하중에 의한 연구결과를 고려해야 할 것으로 판

단된다.

감사의 글

본 연구는 지진공학연구센터(과제번호: R11-1997-045-12005-0)의 지원 및 현대건설기술연구소 구조실험동 관계자의 협조로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김재관, 김익현, 이재호, 김남식, "이축방향 교반복하중을 받는 구형 철근 콘크리트교각의 거동특성 시험", 한국지진공학회 학술발표회 논문집, 제5권, 제1호, 2001, pp. 3213-3218.
2. 정영수, 이재훈, 김재관 등, 고속도로 기존 교량의 유형별 내지 성능평가를 위한 실험적 연구, 한국도로공사, 2001.
3. Mander J.B., Kim J.H., and Ligozio C.A., "Seismic Performance of a Model Reinforced Concrete Bridge Pier Before and After Retrofit," Technical Report NCEER-96-0009, 1996.
4. 이대형, 정영수, 이재형, 송호진, "주철근 겹침이음된 형상비 4.0의 원형 철근콘크리트 교각의 내진성능평가", 대한토목학회 논문집, 제22권, 제5A호, 2002, pp. 1193-1202.
5. 정영수, 박창규, 이은희, "지진을 경험한 형상비 2.5 RC 교각의 내진 변위연성도 평가", 한국지진공학회 논문집, 제7권, 제3호, 2003, pp. 79-88.
6. 건설교통부, 도로교설계기준, 2000.
7. 김남식, 광영학, 장승필, "내진성능평가를 위한 상사법칙에 관한 연구", 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집, 2003, pp. 208~215.
8. Wong Y.L., Paulay T., and Priestley M.J.N., "Response of Circular Reinforced Concrete Columns to Multi-Direction Seismic Attack," *ACI Structural Journal*, Vol. 90, No. 2, 1993, pp. 180-191.
9. Zahn F. A., Park R., and Priestley M.J.N., "Strength and Ductility of Square Reinforced Concrete Column Sections Subjected to Biaxial Bending," *ACI Structural Journal*, Vol. 56, No. 2, 1989, pp. 123-130.
10. Robert S., Donald A., and Daryl E., "Cyclic Behavior of Concrete Bridge Bents," *ACI Structural Journal*, Vol. 94, No. 2, 1997, pp. 103-113.
11. Priestley M.J.N., Seible, F., and Calvi, G.M., *Seismic Design And Retrofit of Bridge*, John Wiley & Sons, Inc., 1996.