

형상비 2.5 RC 교각의 곡률분석평가

Evaluation of Curvature Analysis at RC Bridge Piers in an aspect ratio of 2.5

박창규*
Pack, Chang Ku

정영수**
Chung, Young So

이은희***
Lee, Eun Hee

김영섭****
Kim, Young Sub

ABSTRACT

Before the implementation of the 1992 seismic design provisions in Korea, longitudinal steels of RC bridge piers were practically lap-spliced in the plastic hinge region. Experimental investigation was made to evaluate the seismic performance of RC bridge pier specimens in a flexure/shear mode. Six circular test specimens in an aspect ratio of 2.5 (600mm in diameter) were made with test parameters : confinement ratio, lap splices, and retrofit FRP materials. They were damaged under a series of artificial earthquakes with 0.22g PGA, being compatible in Korean peninsula, through the pseudo-dynamic test. Probable damages were assessed by the Park and Ang damage index. Approximate 0.1 and 0.3 damage indices were obtained for RC specimens without lap splice and with lap splice, respectively. Directly after the pseudo-dynamic test, damaged test columns were laterally actuated under inelastic reversal cyclic loadings simultaneously under a constant axial load. Through curvature measurements, residual seismic performance was evaluated for test specimens. Test results show that RC pier specimens with lap-spliced appeared to fail at low ductility, but significant improvement was obtained for the ductility of these specimens if externally wrapped with FRP.

1. 서론

우리나라의 내진설계기준에서는 지진하중 작용시 소성거동을 유도하기 위해 변위연성도를 이용한 응답수정계수만을 설계에 적용하고 있다. 그러나 Eurocode 8, NZS 3101를 비롯한 세계각국의 내진설계규정에서는 변위연성도와 함께 곡률연성도를 중요한 변수로 적용하고 있다. 구조형식, 기둥길이, 기둥의 구속조건 등에 따른 구조물전체의 연성능력을 나타내는 변위연성에 비하여 곡률연성도는 단면의 형상, 재료의 특성, 철근의 배근형태 등에 따른 기둥 단면의 연성을 나타낸다. 이는 지진이력시 부재의 변형이 하부에 집중되는 교각의 거동특성을 가만할 때 위험단면의 연성도를 나타내는 곡률연성의 중요성이 높다고 판단된다. 이에 Priestley는 비교적 손쉽게 얻을 수 있는 변위연성도를 이용하여 곡률연성도를 얻고자 곡률연성과 변위연성의 상관관계를 제시하여 하였다. 국내에서는 단면의 곡률 측정이 쉽지 않아 활발한 연구활동이 이뤄지지 못하였으나 최근 손혁수

* 중앙대학교 대학원 토목공학과 박사수료
** 중앙대학교 토목공학과 교수
*** 중앙대학교 대학원 토목공학과 석사과정
**** 중앙대학교 대학원 토목공학과 석사과정

는 심부구속철근 요구량에 따른 철근콘크리트 교각의 내진설계 방법에 관한 연구에서 형상비, 축력비, 심부구속철근비, 콘크리트강도에 따른 변위연성과 곡률연성의 상관식을 해석모델을 사용하여 Priestley와 비교하여 제시하였다.

본 연구는 이러한 배경을 바탕으로 직경60cm, 높이 1.5m의 형상비 2.5의 휨-전단 실험체를 횡방향 철근비, 주철근겹침이음 그리고 보강을 변수로 총 6기 제작하였으며, 기둥하단으로부터 15cm(0.25D), 35cm(≒0.5D), 55cm(≒D)의 높이에 경사계를 설치, 각 위치별 곡률값을 측정하여 지진발생시 가장 손상을 많이 받는 위험구간을 알아보고자 하였다. 실험방법은 1단계로 유사동적 실험을 수행하였으며, 실험 2단계로 유사정적실험을 실시하여 각 변수들이 구조물의 연성보유능력에 미치는 영향을 평가하였다. 실험결과, 비내진 실험체의 경우 7.82로 완전연성에는 미치지 못하나 한정연성 요구곡률연성도 “7”에 근사한 값을 나타냈으나 겹침이음 실험체의 경우 4.22로서 Eurocode의 요구곡률연성도를 만족하지 못한 것으로 나타났다. 이에 주철근 겹침이음이 없는 경우 기존 비내진 구조물도 내진성능을 보유하고 있다고 판단되며, 주철근 겹침이음 시공된 기존 구조물에 대해서는 알맞은 보강법을 적용하여 내진성능을 확보해야 한다고 사료된다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 시험체 제작

기존고속도로 교량의 지진시 철근콘크리트 교각의 파괴거동이 전단파괴모드에서 휨/전단, 휨 파괴 모드까지 다양하게 예측됨으로써, 기둥단면 지름 60cm, 기둥높이 1.5m (Aspect Ratio=2.5)인 휨전단파괴모드로 설계된 원형 콘크리트 교각을 총 6기제작하였으며, 이들 실험체의 상세를 그림 1에, 실험변수를 표1에 나타내었다. 주철근의 겹침이음은 기존 연구결과로부터 주철근의 파단이 처음으로 발생된 부분(기초상단 0.28D)을 겹침이음 중심으로 하여 배근하였으며, 주철근의 겹침이음은 종방향 주철근의 50%를 겹침이음 하였다.

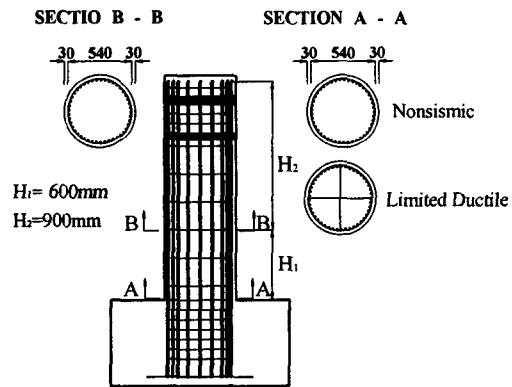


그림 1. 실험체 상세

표 1 실험변수 및 시험체명

분류	실험체명	횡방향 철근 배근간격		축력 (tonf)	보강
		간격 (cm)	철근비 (%)		
비내진	0%Lap	N-SP00-R0	23/23	0.23	$\frac{P}{f'_c A_g} = 0.1$ (67.8)
	50%Lap	N-SP50-R0			
		N-SP50-RG			
		N-SP50-RA			
		N-SP50-RC			
중저진	0%Lap	L-SP00-R0	8.2 /10	0.64	유리(SEH-51) 아라미드(K-49) 탄소(SK-N300)

- PHR : Plastic Hinge Region, NPHR : Non-plastic Hinge Region

- N : Nonseismic, L : Limit Ductile R : Retrofit, Lap: Lap splice - G : Glass, A : Aramid, C : Carbon,

3. 실험방법

3.1 계측장비

본 논문과 관련한 소성힌지구간의 곡률값의 측정은 기존의 연구결과 0.25D일 때 가장 큰 곡률을 나타내어 그림2, 사진 1과 같이 기초상단으로부터 15cm(0.25D), 35cm(≒0.5D), 55cm(≒D)의 높이에 설치하한 경사계로 측정하였다. 위치별 곡률값을 측정하여 지진발생시 가장 손상을 많이 받는 위험구간을 알아보려고 하였다.

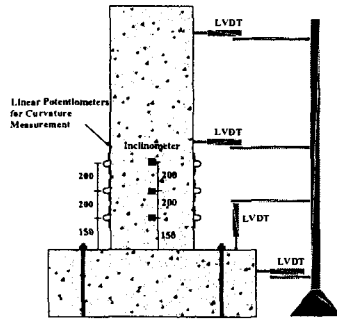


그림 2 계측도



사진 1 경사계 설치도

3.2 하중재하구성

본 실험은 그림 3과 4와 같이 중저진 지역인 우리나라의 실정에 맞추어 PGA 0.2g, 유효지속시간 24초인 한국도로공사에서 작성한 인공지진 데이터를 입력지진파로 채택하였으며, 도로교설계기준에서 규정하고 있는 재현주기 200년의 지반가속도인 0.0803g와 재현주기 500년인 0.11g, 재현주기 1000년인 0.154g 그리고 2000년인 0.22g 순으로 증가시켜 유사동적 실험을 수행하여 구조물에 실제 지진과 유사한 손상을 가한 뒤 2cycle 형태의 변위제어형식으로 Drift Level 0.25 %, 0.5 %, 1.0 %, 1.5 %, 2.0 %, 2.5 %, 3.0%, 4.0 % ... 증가시켜 준정적실험을 수행, 파괴시까지의 잔류연성능력을 평가하였다.

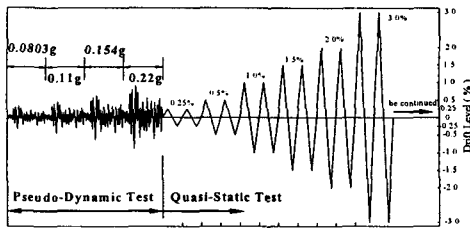


그림 3. 하중 조합

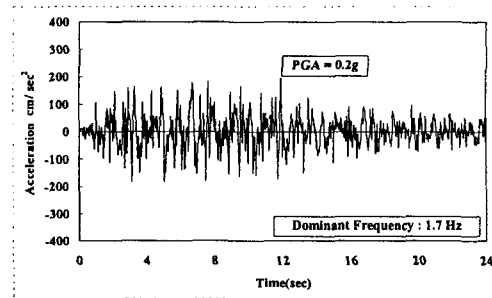


그림 4. 한국도로공사 인공지진데이터(T2)

4. 실험결과 분석

4.1 모멘트 곡률 이력곡선

4.1.1 유사동적실험

실험1단계 유사동적실험의 각 단면별(C1, C2, C3) 모멘트-곡률 이력곡선을 그림 5과 같이 나타

내었다. 각 단면별 최대곡률을 살펴본 결과 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났으며, 모든 실험체가 횡방향 구속력과 주철근의 겹침이음, 보강등의 실험 변수에 미소한 영향을 받으며 큰 곡률의 증가없이 유사하게 거동함을 확인할 수 있었다.

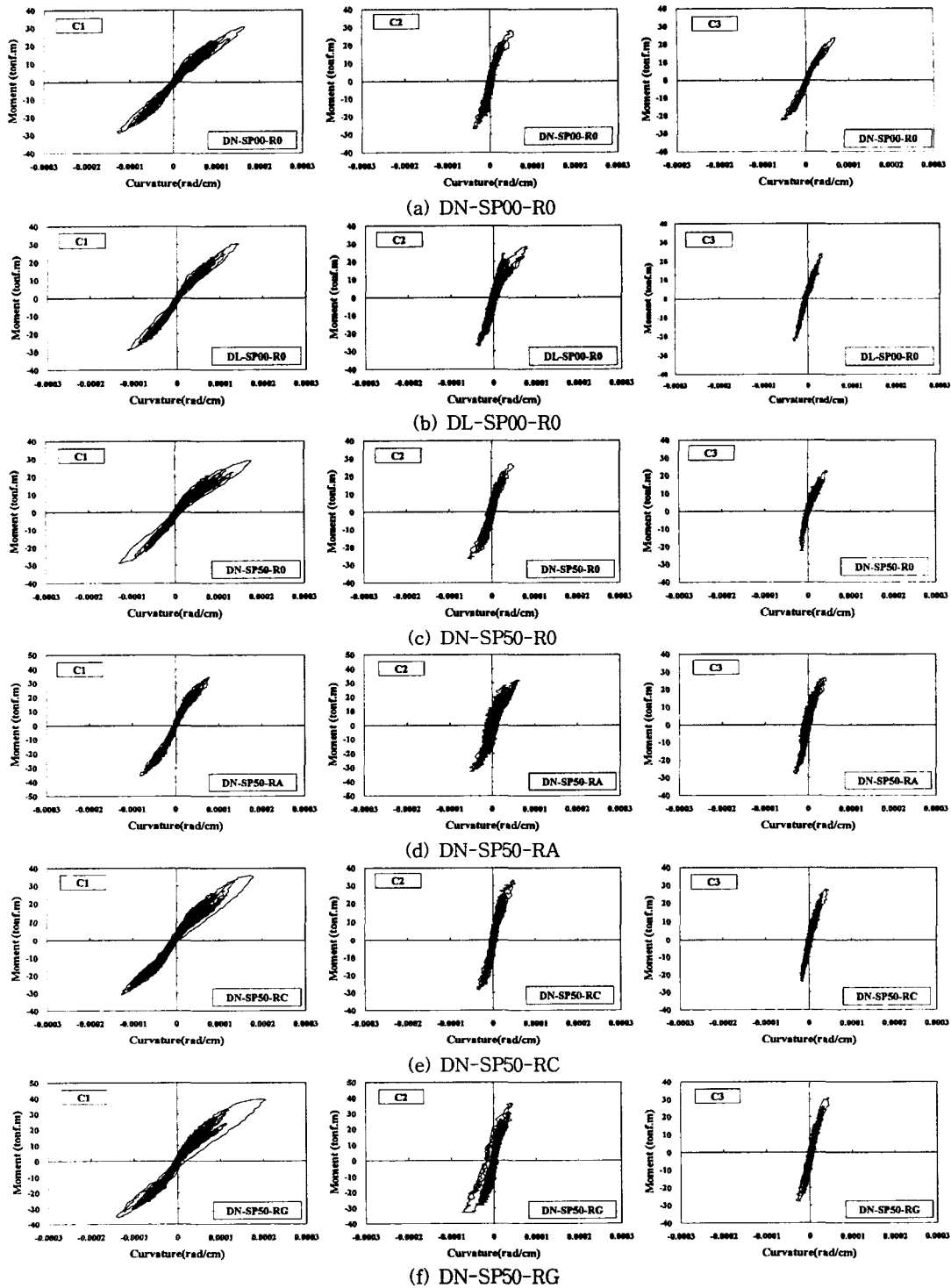
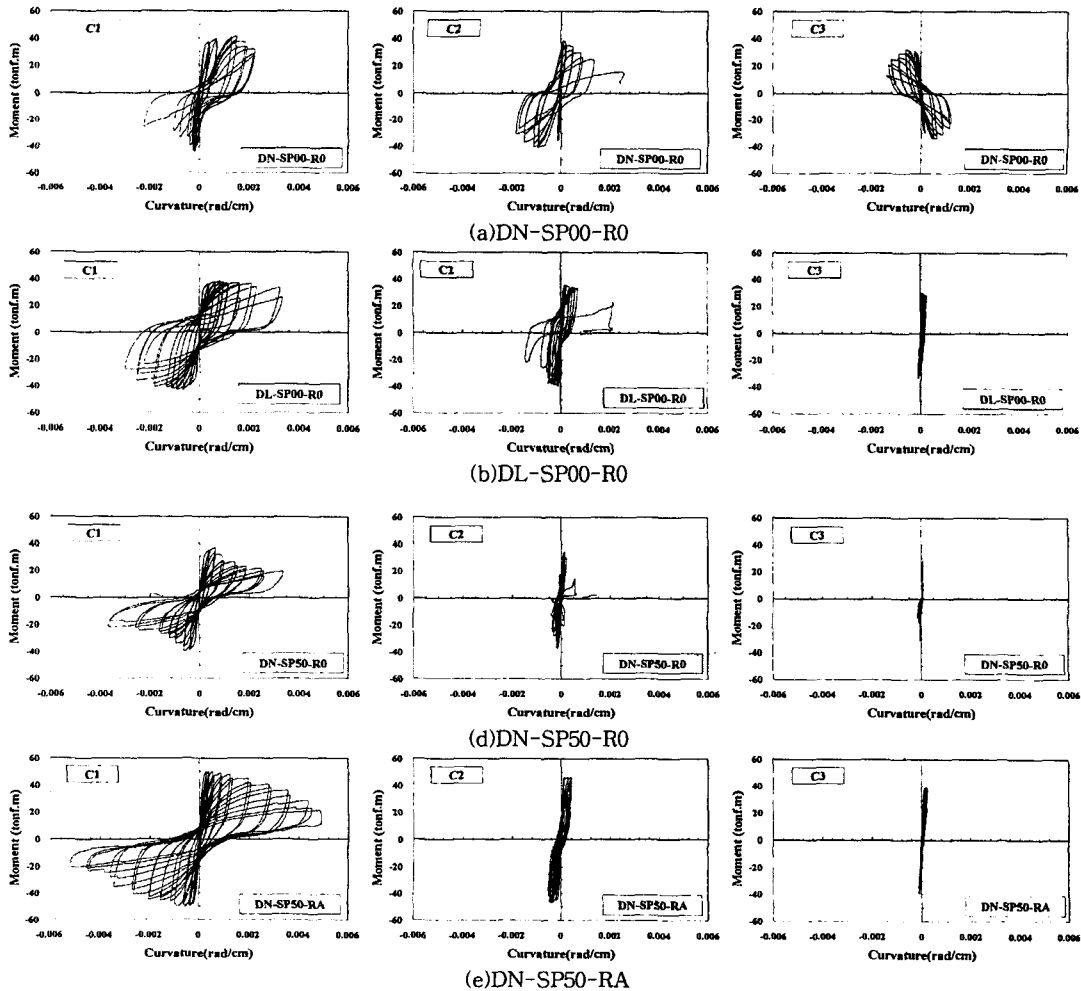


그림 5. 모멘트-곡률 이력곡선

4.1.2 유사정적실험

실험2단계 유사정적실험의 모멘트-곡률 이력곡선 결과를 그림6에 나타내었다. 실험결과 모든 실험체가 기둥하단 0.25D(15cm)지점인 C1에서 가장 큰 곡률을 나타내었으며, 그림 6(a),(b)의 겹침이음이 없는 실험체와 (c)~(g)의 겹침이음이 있는 실험체를 비교하여 본 결과, 주철근 50% 겹침이음된 실험체 보다 주철근 겹침이음이 없는 실험체가 C2(35cm), C3(55cm) 지점의 곡률이 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 주철근 겹침이음이 없는 실험체의 경우 횡방향 하중이 커짐에 따라 증가되는 곡률을 구조물 전체가 나누어 흡수시키는 반면 주철근 50%겹침이음이 있는 실험체의 경우 실험체의 곡률이 겹침이음구간 아래서 집중적으로 나타나기 때문에 주철근겹침이음 구간이 전체 구조물의 가장 취약한 부분이 될 수 있음을 의미한다고 판단된다.

그리고 겹침이음 실험체를 섬유로 보강한 실험체가 보강하지 않은 겹침이음 실험체와 같은 거동을 하는 것으로 나타났다. 이는 섬유로 보강을 한다 하더라도 주된 파괴거동은 주철근 겹침이음으로 인한 슬립파괴이나 섬유가 피복콘크리트까지 구속하여 연성을 증가시키는 것으로 판단된다. 또한 비내진 겹침이음이 없는 실험체의 경우 C3보다 C2의 측정각이 더 크게 나타나 실험상의 오차인 것으로 여겨진다.



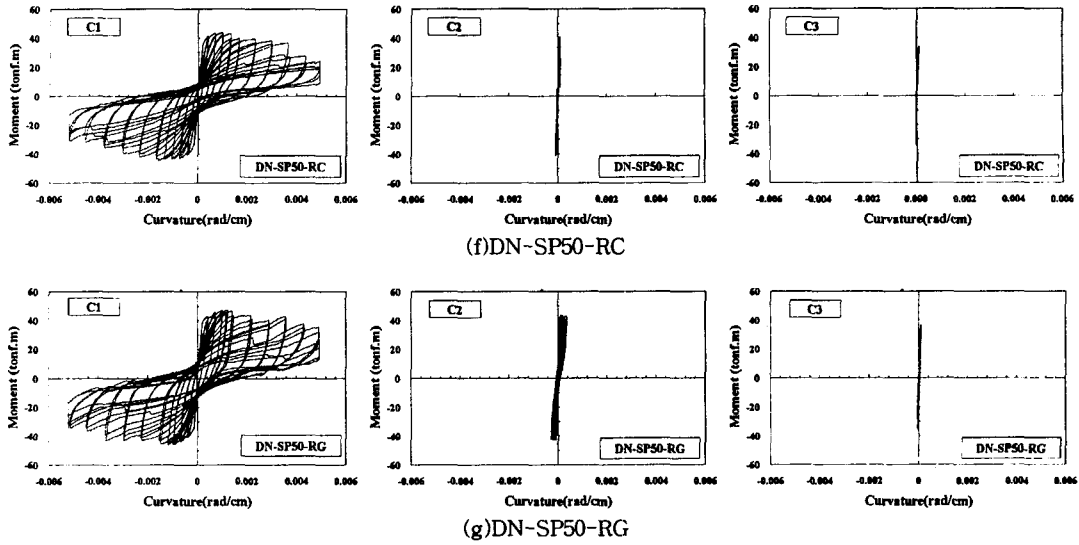


그림 6. 유사정적실험의 모멘트-곡률 이력곡선

4.2 모멘트 곡률 포락곡선

모멘트-곡률 포락곡선은 가장 지배적인 곡률을 나타낸 C1(15cm)단면의 이력곡선을 그림 6에 나타내었으며, 하중-변위 이력곡선의 포락곡선을 그림 7에 나타내었다. 모멘트-곡률 포락곡선과 하중-변위 포락곡선은 횡방향 구속력, 겹침이음, 보강의 변수에 따른 내진성능차이를 유사하게 나타내었다. 횡방향철근비의 증가에 따라 비내진실험체의 3.7배, 내진실험체의 0.6배에 해당하는 0.86%의 횡방향 철근비를 가진 한정연성실험체(DL-SP00-R0)가 횡방향 철근비 0.23%의 비내진실험체(DN-SP00-R0)에 비해 곡률연성과 변위연성 모두 큰 연성을 보여주고 있다. 또한 겹침이음 유무에 따라 50%겹침이음시험체(DN-SP50-R0)는 항복이후 급격한 모멘트감소를 보이는 반면, 겹침이음 없는 비내진실험체(DN-SP00-R0)는 극한까지의 넓은 범위에서 모멘트가 서서히 감소해 연성의 증가를 보였다. 또한, 보강설계의 유무에 따라 보강한 겹침이음실험체가 보강하지 않은 실험체에 비해 모멘트와 곡률 모두 크게 나타내며 한정연성실험체와 유사한 연성능력 발휘하고 있음을 보여주고 있다. 이상의 결과는 참고문헌(6)의 하중-변위 분석을 통한 결과와 동일하였다.

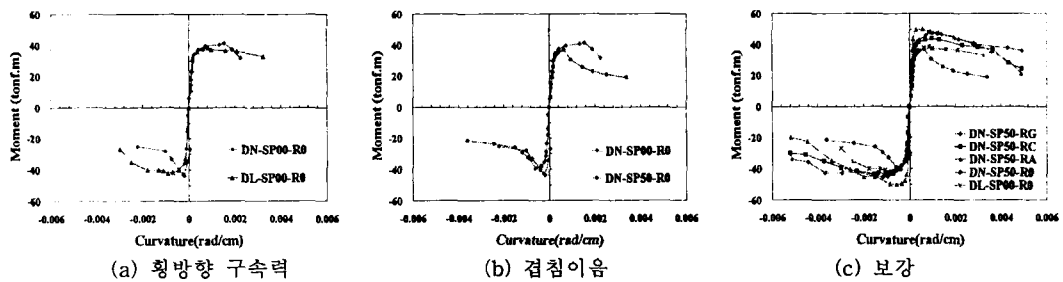


그림 7 모멘트-곡률 포락곡선

4.3 곡률연성도

표 2의 곡률연성도 분석 결과 횡방향철근비, 겹침이음의 유무 그리고 보강설계의 유무에 따른 내진성능의 차이를 나타내고 있다. 곡률연성도 분석 결과 한정연성실험체는 비내진 실험체의 2배에 해당하는 연성도를 나타냈고, 보강된 실험체는 보강하지 않은 실험체에 비해 3~4배의 곡률연성도의 증가를 보이며 한정연성실험체의 연성능력에 근접하는 모습을 나타냈다. 또한, 겹침이음이 있는 실험체(DN-SP50-R0)는 겹침이음이 없는 실험체(DN-SP00-R0)에 비하여 약 2배의 연성도 감소를 보였다. 대표적인 한정연성개념 설계규정인 Eurocode 8과 비교하여 볼 때 한정연성실험체의 곡률연성도가 15.81로서 Eurocode의 한정연성 요구곡률연성도 “7”의 두배에 해당되는 결과가 나타났다. 또한 비내진 실험체의 경우 7.82로 근사한 값을 나타냈으나 겹침이음 실험체의 경우 4.22로서 Eurocode의 요구곡률연성도를 만족하지 못한 것으로 나타났다. 표2의 변위연성도 역시 곡률연성도와 유사한 결과를 얻을수 있었다.

표 2 곡률 및 변위연성도

실험체명	항복				극한				곡률/변위 연성도
	곡률 (rad/m)	모멘트 (tonf · m)	변위 (mm)	하중 (tonf)	곡률 (rad/m)	모멘트 (tonf · m)	변위 (mm)	하중 (tonf)	
DN-SP00-R0	0.00025959	34.56	10.82	26.58	0.00203	35.11	66.00	26.57	7.82/6.10
DL-SP00-R0	0.00020589	32.67	10.13	24.81	0.00326	32.40	92.00	24.51	15.81/9.08
DN-SP50-R0	0.00021185	30.64	9.82	24.18	0.00089	31.67	24.08	30.00	4.22/2.45
DN-SP50-RA	0.00019800	44.68	9.50	34.35	0.00250	42.46	70.00	32.22	13.16/7.37
DN-SP50-RC	0.00021782	37.39	11.19	30.91	0.00337	37.29	74.93	30.56	15.47/6.70
DN-SP50-RG	0.00022081	39.42	10.65	28.94	0.00293	46.17	88.00	28.21	13.27/8.26

5. 결론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 모멘트-곡률 이력곡선 분석

-유사동적실험 : 모든 실험체의 곡률이 C1(15cm)단면에서 가장 크게 나타났으나 단면별 곡률의 차이는 작게 나타났다.

-유사정적실험 : 모든 실험체가 C1(15cm)단면에서 가장 큰 곡률을 나타내었다. 겹침이음이 없는 실험체와 겹침이음이 있는 실험체를 비교하여 보면 주철근 50% 겹침이음된 실험체 보다 주철근 겹침이음이 없는 실험체가 C2(35cm), C3(55cm) 지점의 곡률이 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 주철근 겹침이음이 없는 실험체의 경우 횡방향 하중이 커짐에 따라 증가되는 곡률을 구조물 전체가 나누어 흡수시키는 반면 주철근 50% 겹침이음이 있는 실험체의 경우 실험체의 곡률이 겹침이음구간 아래서 집중적으로 나타나기 때문에 주철근 겹침이음 구간이 전체 구조물의 가장 취약한 부분이 될 수 있음을 의미한다.

2. 곡률연성도

-Eurocode 8과 비교하여 볼 때 한정연성실험체의 곡률연성도가 15.81로서 요구곡률연성도 “13”

을 만족하는 결과가 나타났다. 또한 비내진 실험체의 경우 7.82로 한정연성 요구폭률연성도 “7”에 근사한 값을 나타냈으나 겹침이음 실험체의 경우 4.22로서 Eurocode의 요구폭률연성도를 만족하지 못한 것으로 나타났다. 이에 주철근 겹침이음 시공된 기존 구조물에 대해서는 알맞은 보강법을 적용하여 내진성능을 확보해야 한다고 사료된다

감사의 글

본 연구는 지진공학연구센터(과제번호:R11-1997-005302-0)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부, 한국도로교설계기준
2. Eurocode 8 Part 2, Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures- Bridges, European Committee for Standardization, 1996
3. New Zealand Standard., Concrete Structures Standard - Part 1 : Design of Concrete Structure, NZS 3101, 1995
4. T. Paulay, M.J.N Priestley, 'Seismic Design of Reinforced concrete and Masonry Buildings', John Wiley& Sons, INC. 744pp
5. 손혁수, “심부구속철근 요구량에 따른 철근콘크리트 교각의 내진설계방법에 관한 연구”, 박사학위논문, 영남대학교, 286p
6. 정영수, 박창규, 이은희, ‘지진을 경험한 형상비 2.5 RC 교각의 내진 변위 연성도 평가’, 지진공학회, 2003. 6, Vol 7, No 3, pp79-88
7. 정영수외, “고속도로 기존 교량의 유형별 내진 성능평가를 위한 실험적 연구”, 보고서, 한국도로공사, 2001