

주철근 겹침이음된 철근콘크리트 교각의 보강에 의한 내진성능평가

Seismic Performance and Retrofit of Reinforced Concrete Bridge Piers with Spliced Longitudinal Steels

정영수* 이재형**
Chung, Young Soo Lee, Jae Hyung

ABSTRACT

It has been known that lap splicing in the longitudinal reinforcement of bridge columns is not desirable for seismic performance, but it is sometimes unavoidable. Lap splices were usually be located in the plastic hinge region of most bridge columns that were constructed before the adoption of the seismic design provision of Korea Bridge Design Specification on 1992. This research is to evaluate the seismic performance of reinforced concrete bridge piers with lap splicing of longitudinal reinforcement in the plastic hinge region, and to develop the enhancement scheme of their seismic capacity by retrofitting with glassfiber sheets and to develop appropriate limited ductility design concept in low or moderate seismicity region. Nine test specimens in the aspect ratio of 4.0 were made with three confinement ratios and three types of lap splicing. Quasi-static tests under three different axial load levels were conducted. It has been observed that displacement ductility ratios of test columns with lap splicing were significantly reduced.

1. 서론

근래에 히로시마 지진과 인도의 지진을 계기로 지진에 대한 사회적 관심이 고조되고 있으며 여러 역사적 기록과 근래에 국내에서 발생하는 지진은 한반도에서의 지진에 대한 인식을 전환하는 계기를 마련하고 있다. 따라서, 사회기반시설의 하나인 기존교량의 RC교각에 대한 내진성능 향상 및 보수보강기법에 관한 연구는 시급한 실정이라 할 수 있다. 국내의 철근콘크리트 교각은 1992년 도로교표준시방서에 내진설계규정이 도입된 이후 교각의 주철근을 구속철근으로 보강하는 내진설계가 이루어지고 현재까지의 연구결과는 국내의 지진위험도에 비추어 상당한 내진성능을 보유하고 있는 것으로 보고되고 있다. 하지만, 도로교표준시방서(1992)에 내진설계규정이 도입되기 이전에 건설된 철근콘크리트 교각이 지진에 의해 어떠한 거동을 보일지 의문시되고있으며, 이러한 교각을 내진설계규정에 만족할 수 있도록 하기 위해 재시공하는 것은 많은 경제적 어려움이 예상된다. 따라서 적절히 기존 내진설계규정 도입 이전에 설계된 교각을 보강하여 사용하는 것이 최선의 방법

* 중앙대학교 토목공학과 교수, 정회원

** 중앙대학교 토목공학과 석사과정, 학생회원

이라 사료된다. 보강방법에는 여러 가지가 있겠으나 본 연구에서는 유리섬유로 철근콘크리트 교각의 소성힌지구간에 보강하는 방법을 이용하였다. 그리고 현행 세계 각국의 내진설계규정에서는 교각의 소성힌지구간에서의 주철근겹침이음을 엄격히 금지하고 있는데 반해 1992년 내진설계규정도입 이전의 국내의 기존 비내진 설계교각의 상당수는 주철근 겹침이음 시공되었으리라 판단되며, 주철근 겹침이음에 대한 명확한 도면이 없는 탓에 실제 건설당시 시공현장에서 소성힌지구간에서의 주철근 겹침이음없이 시공되었는지는 판단할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 소성힌지구간에 겹침이음된 철근콘크리트 교각을 유리섬유 등으로 보강하는 경우 내진성능의 향상정도를 평가하여 기존의 교각에 대한 보강의 기준을 마련하고자 하였다.

2. 연구내용

본 연구를 위한 대상 모델은 국내의 내진 1등급으로 설계된 수원시의 하갈교를 대상으로 비내진, 중저진, 내진설계한 교각을 1/2.8로 축소하고, 형상비(Aspect Ratio)는 4.0으로 하여 휨파괴를 유도한 원형 철근콘크리트 교각시험체를 제작하였다.

2.1 재료의 특성

2.1.1 콘크리트 및 철근

콘크리트는 기둥 목표압축강도 270 kgf/cm^2 으로 하단부의 원활한 타설을 위하여 골재 최대치수는 13mm골재, 슬럼프 18cm의 레미콘을 사용하였다. 주철근은 SD40 D10, 띠철근은 SD30 D6을 사용하였다. 철근의 인장강도는 KS B 0820에 따라 각각 3개의 시편에 대한 인장시험을 실시하여 4600 kgf/cm^2 과 3600 kgf/cm^2 의 평균항복강도를 얻었으며, 아래의 그림 1은 철근의 P- Δ curve이다. 기둥본체를 타설한 콘크리트의 압축강도는 296 kgf/cm^2 를 얻었다. 아래의 표 1은 콘크리트의 배합표이다.

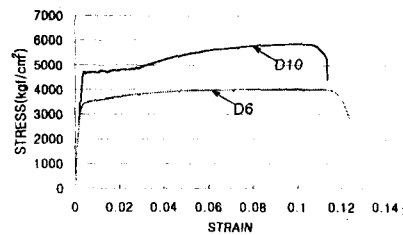


그림 1 철근의 P- Δ curve

표 1 시험체 배합설계표

굵은골재 최대치수(mm)	W/C (%)	공기량 (%)	슬럼프 (cm)	단위량(kgf/m^3)					28일강도 (kgf/m^2)
				물	시멘트	굵은골재	혼화제	혼화제	
13	50.8	6.5	21	208	409	762	46	1.37	296

2.1.2 유리섬유

주철근의 50%를 겹침이음시킨 비내진교각시험체 2기에 내진성능향상을 위하여 기둥의 소성힌지구간에 TYFO SEH51과 CAFGL1000 두 종류의 유리섬유로 보강하였으며 각각의 유리섬유에 대한 설계파단 인장강도가 5600 kgf/cm^2 , 5000 kgf/cm^2 인 제품을 사용하였다. 이들의 물리적 특성은 다음 표 2와 같다.

표 2 유리섬유의 물리적 특성

Classification	Tensile Strength (kgf/cm ²)	Tensile modulus (kgf/cm ²)	Elongation (%)	Thickness (mm)
Foreign Glass Fiber (TYFO SEH 51)	5,600	252,000	2.0	1.3
Domestic Glass Fiber (CAFGL-1000)	5,000	250,000	2.3	1.0

2.2 시험체 제작

Quasi-static 실험에 사용된 총 9기의 시험체의 단면과 띠철근 및 Cross tie 제원은 그림 3에 나타내었다. 내진시험체의 보강띠철근 및 후프띠철근의 갈고리의 연장길이는 40mm, 겹침이음길이는 190mm이고 중저진(EC8)시험체의 보강띠철근 및 후프띠철근의 갈고리의 연장길이는 65mm, 겹침이음길이는 190mm이고 비내진시험체는 후프띠철근에 갈고리없이 겹침이음이 190mm만 있게 설계하였다. 실험변수에 따른 띠철근 간격 및 축하중은 다음 표 3에 나타내었다. 축하중비는 축하중에 의한 내진능력의 영향을 평가하기 위해 $0.1f_{ck}A_g$, $0.15f_{ck}A_g$, $0.2f_{ck}A_g$ 의 축하중비를 선택하였으며 주철근의 겹침이음은 기존 연구결과²⁾로부터 주철근의 파단이 처음으로 발생된 부분(기초상단 0.28D)을 겹침이음 중심으로 하여 배근하였으며, 주철근의 겹침이음 종류를 50%와 100%의 2가지로 채택하였으며 그림 4에 나타내었다. 겹침이음길이는 다음 식(1)과 같이 결정하였다.¹⁾ 보강은 내진시험체와 동일한 횡방향 구속력을 줄 수 있는 섬유보강설계법³⁾을 이용하여 식(2)에 의해 보강설계하였다. 식(2)에서 t_g 는 섬유보강설계두께, ϵ_{cu} 는 구속콘크리트의 극한변형률, D는 단면의 직경, f'_{cc} 는 구속콘크리트의 항복강도, f_{ug} 및 ϵ_{ug} 는 보강재료의 극한응력 및 극한변형률을 나타낸다. 구속콘크리트의 극한변형률 및 항복강도는 식(3)과 식(4)에 의해 계산되며 각각의 식에서 ρ_{sh} 는 횡방향구속철근비, f_{yh} 및 ϵ_{sh} 는 횡방향구속철근의 항복강도 및 극한변형률, f'_l 및 f'_c 는 단면형상에 따른 유효구속응력 및 콘크리트의 압축강도를 나타낸다. 위의 계산과정에 의해서 유리섬유의 보강은 1장을 소성힌지구간에 감싸는 방법으로 보강하였으며 유리섬유의 탈락을 방지하기 위하여 기초부위까지 연장하여 보강하고 앵커링을 하였으며 그림 2에 나타내었다.

$$l_d = 0.007 f_y d_b = 0.007 \times 4000 \times 0.953 = 26.684 \text{ cm} \approx 27 \text{ cm} \quad (1)$$

$$t_g = \frac{0.1(\epsilon_{cu} - 0.004) D f'_{cc}}{f_{ul} \epsilon_{ul}} \quad (2)$$

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + \frac{2.5 \rho_{sh} f_{yh} \epsilon_{sh}}{f_{cc}} \quad (3)$$

$$f'_{cc} = f'_c \left(2.254 \sqrt{\frac{1 + 7.94 f'_l}{f'_c}} - \frac{2 f'_l}{f'_c} - 1.254 \right) \quad (4)$$

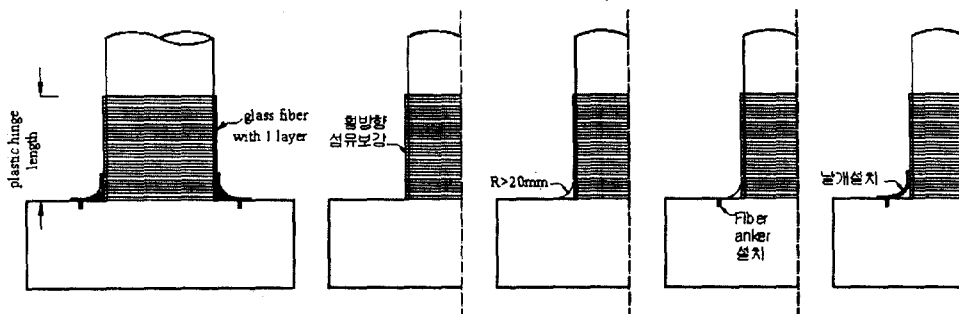


그림 2 유리섬유부착 상세

표 3 실험변수 및 시험체명

Classification	Nomenclature	Confinement Steel Space		Axial Force	Retrofit Glass Fiber	
		PHR	NPHR			
Nonseismic	$P/f_{ck}A_g=0.1$	N-SP00-P1-R0	12.2 cm	16.8 cm	None	
	$P/f_{ck}A_g=0.15$	N-SP00-P2-R0				
	$P/f_{ck}A_g=0.2$	N-SP00-P3-R0				
	50% Lap-Splice	N-SP05-P1-R0			67.8 tonf	SEH 51
		N-SP05-P1-R1				CAFGL-1000
		N-SP05-P1-R2				
100% Lap-Splice	N-SP10-P1-R0					
Limited Ductile	L-SP00-P1-R0	5 cm	6 cm	None		
Seismic	S-SP00-P1-R0	3 cm	4.5 cm			

PHR:Plastic Hinge Region, NPHR:Non-plastic Hinge Region, N:Nonseismic, L:Limit Ductile, S:Seismic, SP00(05,10):Longitudinal Bar Lap Splice 0%(50%,100%), R0:Without Retrofitting, R(1,2):Retrofit(SEH-51, CAFGL), P1(2,3): $P/f_{ck}A_g = 0.1(0.15,0.2)$

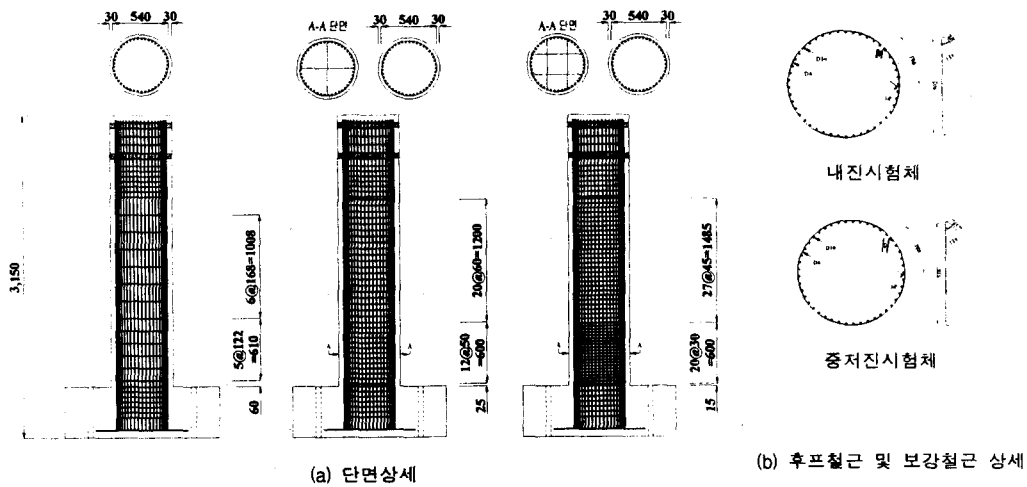


그림 3 시험체 상세

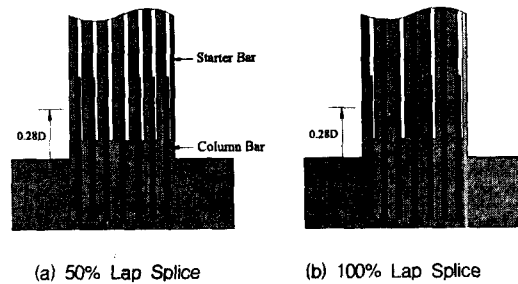


그림 4 겹이음 상세

3. 실험개요

Quasi-Static 실험을 위하여 300tonf Oil jack을 이용하여 축하중을 재하하였으며, 횡방향의 반복하중은 1000kN Actuator를 이용하여 변위제어 방식으로 가력하였다.

3.1 계측장비

시험체의 주철근에 Strain Gage를 6~8개, 띠철근에 6개, Cross Tie에 3개 부착하여 철근의 변형률을 측정하였고, 시험체의 변위를 측정하기 위하여 시험체의 중앙부와 횡방향 가력위치에 LVDT 2기를 설치하였고 기초부의 들림 및 밀림을 측정하기 위하여 상면, 측면에 LVDT 2기를 설치하였다. 그림 5에 시험체의 측정장치 부착도를 나타내었다.

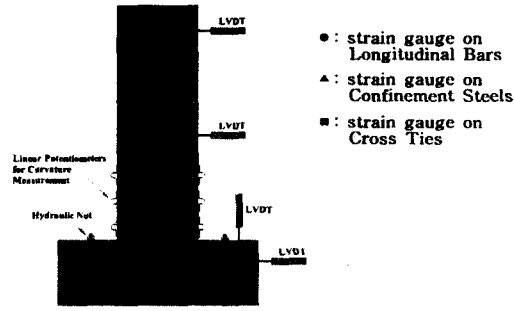
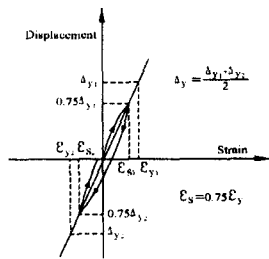


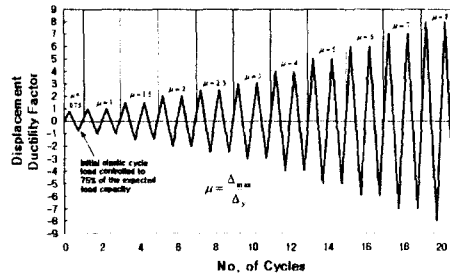
그림 5 측정장치 부착도

3.2 항복변위 및 재하형태

기동시험체의 항복변위 Δ_y 는 주철근의 변형률이 항복변형률인 0.002의 75%에 도달시까지 하중제어방식으로 1cycle 재하한 후 그때 측정된 양방향 변위의 평균값으로부터 항복변위를 계산하였다. 횡방향 하중형태는 실험을 통하여 얻은 Δ_y 에 대하여 $1.0\Delta_y, 1.5\Delta_y, 2.0\Delta_y, 2.5\Delta_y, 3.0\Delta_y, 4.0\Delta_y, \dots$ 로 초기에는 변위를 $0.5\Delta_y$ 씩 증가시켜 초기 교각의 연성도를 상세하게 관측하였고 $3.0\Delta_y$ 이후로 $1.0\Delta_y$ 씩 증가시키는 2cycle형태의 피로거동으로 반복재하하였으며 아래 그림 6에 나타내었다.



(a) Δ_y 의 계산방법



(b) 하중 Pattern

그림 6 하중재하방법

4. 실험결과 분석

4.1 변위연성도

지진과 같은 과도한 변형에 대해 구조물이 안전하려면 충분한 변형에너지의 소산능력이 필요하며 이는 구조시스템에서 충분한 연성도를 갖고 있어야 한다. 콘크리트와 같은 복합구조물을 이용한 실험에서 구조물의 항복변위와 극한변위를 결정하기는 매우 어려우므로 Park, R.이 제안한 그림 8에서와 같이 간접적인 방법으로 구할 수 있다.²⁾ 구조물의 수평하중이 최대하중에 비해 15%정도 저하되었을 때의 변위를 극한변위로 정의하고 항복변위는 하중-변위곡선의 원점과 최대내력의 75%에 해당하는 변위점을 이은 직선이 최대내력점에 도달하였을 때의 수평변위로 정의한다.

본 연구에서 변위연성도(μ)의 평가는 파괴변위 Δ_u 와 항복변위 Δ_y 와의 관계식으로 변위연성도를 평가하였다. 먼저 합리적인 연성도의 정의를 위하여 항복변위를 실험적으로 구한 결과와 Park, R.이 제안한 방법 그리고 최대변위는 최대내력의 저하가 85%인 시점에서의 변위를 이용하여 연성

도를 구하였다.

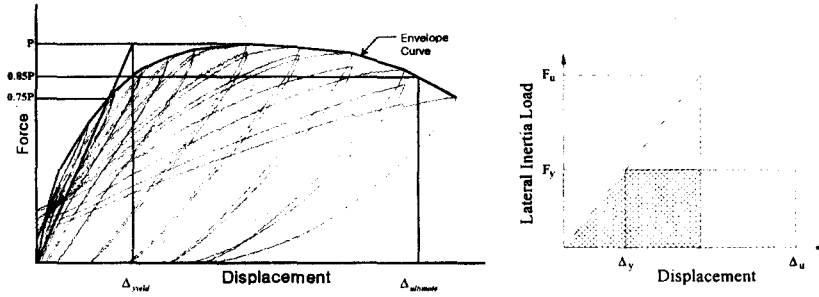
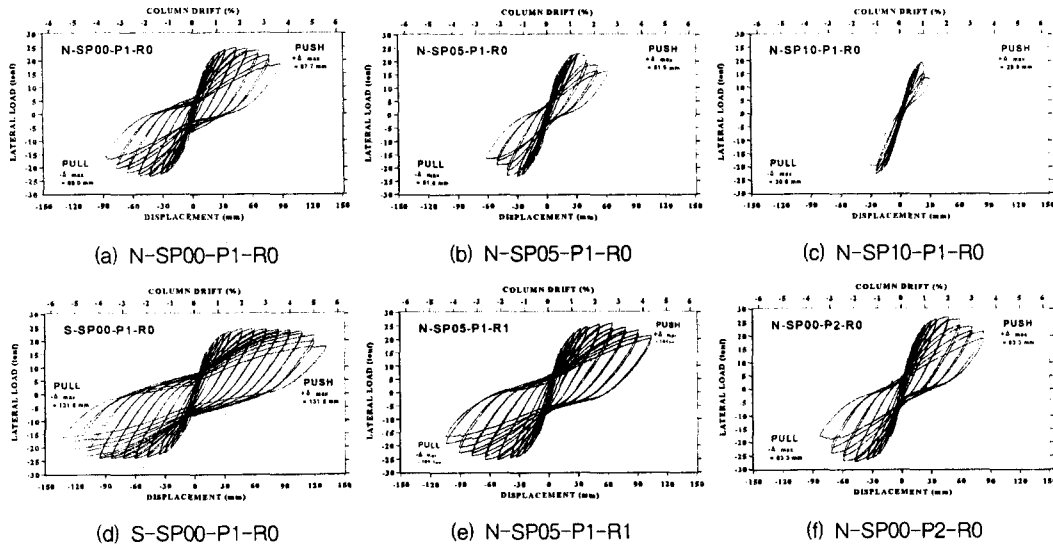


그림 8 항복변위와 극한변위의 정의

표 4와 그림 9에 보이는 바와 같이 연성도의 경우 비내진, 중저진, 내진시험체의 순으로 높은 연성도의 증가현상이 나타났다. 또한 축하중이 증가할 경우 소성힌지부에서 휨 모멘트의 증가로 연성도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 연성도에 큰 영향을 미치는 변수는 겹침이음의 정도이며, 비내진시험체중 주철근을 50%겹침이음한 경우는 겹침이음이 없는 시험체에 비해 63%, 100%겹침이음한 경우 41%의 연성도를 보였으며, 50%겹침이음된 시험체에 유리섬유로 보강한 경우 연성도가 1.7배가량 증가하는 것으로 나타났다.

표 4 변위연성계수(μ)

Specimen	Yield Displacement		Failure Displacement	Ductility Factor(μ)	
	Experimental (1)	Analytical (2)	Strength 15% drop(3)	(3)/(1)	(3)/(2)
N-SP00-P1-R0	11	19.973	79.810	7.3	4.0
N-SP00-P2-R0	11.9	21.905	73.764	6.2	3.4
N-SP00-P3-R0	13.5	22.812	75.890	5.6	3.3
N-SP05-P1-R0	10	18.719	46.928	4.7	2.5
N-SP05-P1-R1	13	24.527	98.751	7.6	4
N-SP05-P1-R2	12.4	22.217	94.834	7.6	4.3
N-SP10-P1-R0	10	15.700	25.753	2.6	1.6
L-SP00-P1-R0	11.9	22.339	97.902	8.2	4.4
S-SP00-P1-R0	12	21.339	123.724	10.3	5.8



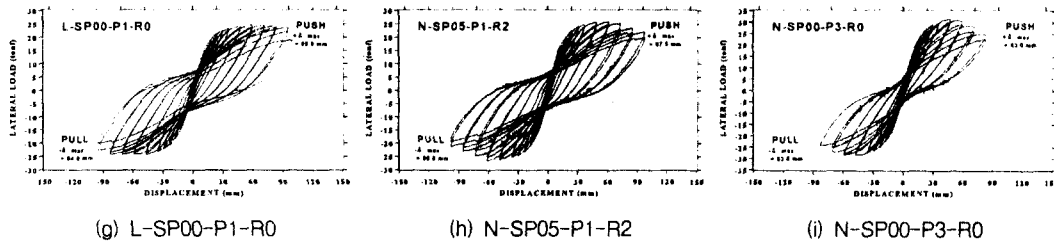


그림 9 하중-변위 이력곡선

4.2 하중-변위 포락곡선

다음 그림 10은 하중-변위포락곡선을 나타내고 있으며 실험변수에 따른 연성도의 차이는 겹침이음에 따른 변화가 가장크며 내진설계유무, 축하중의 차이에 따라 연성도의 차이를 보이고 있다.

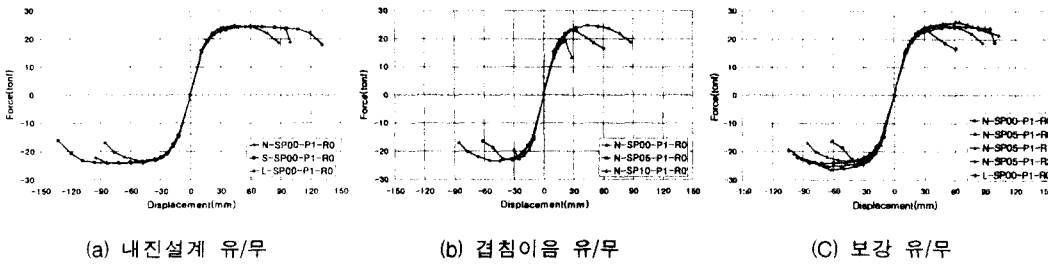


그림 10 Lateral Force-Displacement Envelope Curve

4.3 에너지분석

다음 그림 11은 각 실험변수에 따른 에너지 흡수능력을 나타내고 있다. 내진설계유무에 따라 비내진시험체에 비해 중저진 및 내진시험체는 약 1.65배에서 1.71배 정도 높은 값을 나타냈으며, 겹침이음유무에 따라 100%겹침이음 시험체는 분석이 불가능하였고 50%겹침이음 시험체는 비내진시험체에 비해 0.63배 정도 낮은 값을 나타내었다. 50%겹침이음 시험체에 보강하였을 경우에는 1.92배 정도의 높은 에너지 흡수능력을 나타냈다.

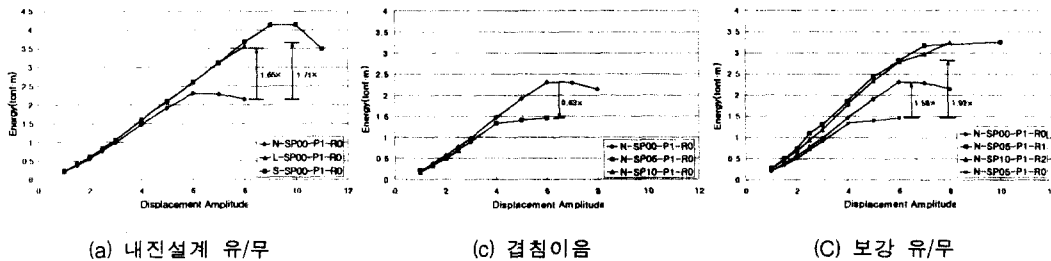


그림 11 Energy Absorption Curve

4.3 역량 스펙트럼

하중-변위 이력곡선으로부터 역량스펙트럼방법에 의하여 철근콘크리트 교각실험체의 내진성능을 평가하였으며 아래 그림 12에 나타내었다. 2경간 연속 교량인 하갈교를 대상모델로 하여 각 실험체의 역량스펙트럼 분석 결과 100%겹이음실험체의 경우를 제외하고는 기능수행수준 및 붕괴방지수준을 만족시키는 것으로 나타났다.

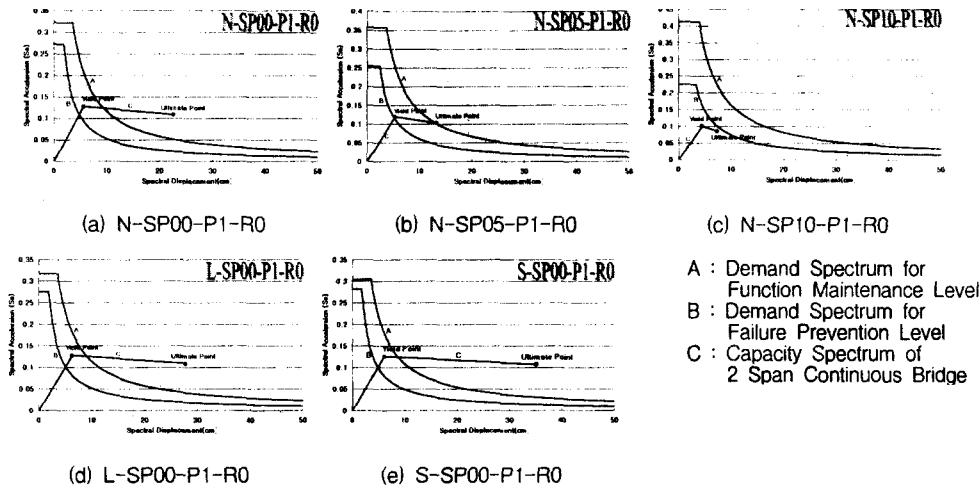


그림 12 Capacity Spectrum

5. 결론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 실험변수로 채택한 겹이음, 축하중 비, 내진설계 유/무에 따른 연성도의 평가에서 겹침이음에 의한 연성도의 저하가 가장 두드러지는 것으로 평가되었으며 주철근 겹침이음에 대한 규정이 시급히 마련되어야 하리라 판단된다.
2. 100%겹침이음 시험체의 경우 상당한 연성능력의 저하현상을 나타내었는데 이는 휨파괴에 대한 저항능력이 전혀 없는 것으로 판단되며, 이를 보강하였을 경우 어느정도 연성능력이 향상될 것 인지에 대한 연구의 필요성이 있다.

감사의 글

본 연구는 지진공학연구센터(2000G0302) 및 (주)콘크리닉의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

Reference

1. 도로교설계기준(2000), 한국도로교교통협회
2. K.K.Lee, G.H.Han, Y.S.Chung, D.H.Lee, E.S. Hwang(1998), "Quasi-Static Tests for Seismic Performance of R.C Bridge Piers", Proceedings of the Korea Concrete Institute, V.10, No.2, , pp615~620
3. M.J.N. Priestley, F.Seible, G.M.Calvi,(1996), "Seismic Design and Retrofit of Bridges"-, JOHN WILEY & SONS, Inc.