

섬유 보강된 휨전단 RC교각의 내진성능 평가 Seismic Performance Evaluation of Shear-Critical R/C Bridge Piers Retrofitted with Fiber Sheets

송호진* 정영수** 김용곤*** 이은희****
Song, Ho Jin Chung, Young Soo Kim, Yon Gon Lee, Eun Hee

ABSTRACT

Lap splices of longitudinal reinforcement steels were practically located in the potential plastic hinge region of most bridge columns that were constructed before the 1992 seismic design provision of Roadway Bridge Design Specification in Korea. The objective of this research is to evaluate the seismic performance of shear-critical reinforced concrete(RC) bridge piers with poor detailing of the starter bars in the plastic hinge region, and to develop the enhancement scheme of their seismic capacity by retrofitting with fiber composites. Seven test specimens in the aspect ratio of 2.5 were made with three confinement ratios and two types of lap splices. Quasi-static test was conducted in a displacement-controlled test mode. A significant reduction of displacement ductility ratios were observed for test columns with lap splices of longitudinal steels.

1. 서론

현행 세계 각국의 내진설계규정에서는 교각의 소성힌지 구간에서의 주철근 겹침이음을 엄격히 금지하고 있는데 반해 1992년 내진설계규정도입 이전의 국내의 기존 비내진 설계교각의 상당수는 시공상의 이유로 인하여 소성힌지구간에 주철근을 겹침이음하는 경우가 많이 있으며 이로 인한 교각전체의 내진성능 저하가 예상된다. 또한 국내의 철근콘크리트 교각은 1992년 내진설계규정이 도입된 이후 교각의 주철근을 구속철근으로 보강하는 내진설계가 이루어지고 현재까지의 연구결과는 국내의 지진위험도에 비추어 상당한 내진성능을 보유하는 것으로 보고되고 있다. 하지만, 내진설계규정(1992)이 도입되기 이전에 건설된 철근 콘크리트 교각이 지진에 의해 어떠한 거동을 보일지 의문시되고있으며 이러한 교각을 내진설계규정에 만족할 수 있도록 하기 위해 재시공되는 것은 많은 경제적 어려움이 예상된다. 따라서 적절히 기존 교각을 보수·보강하여 사용하는 것이 최선의 방법이라 사료된다. 소성 힌지구간에 겹침이음된 철근콘크리트교각을 섬유보강재로 보강하는 경우 내진성능의 향상정도를 평가하여 기존의 교각에 대한 보수보강의 기준을 마련하고자 한

* 중앙대학교 대학원 토목공학과 석사과정
** 중앙대학교 토목공학과 교수
*** 한경대학교 안전공학과 조교수
**** 중앙대학교 대학원 토목공학과 석사과정

다.

특히 본 연구에서는 전단과 휨에 의한 복합모드가 작용하여 파괴에 이를 가능성이 많은 형상비 (Aspect ratio)가 2.5 내외인 교각의 안전성을 평가해 보고자 하였다. 이들 교각은 일단 초기전단강도는 지진시 작용하는 교각의 전단력보다 크다 하더라도 휨파괴가 진행되면서 전단강도가 저하되고 그에 따라 전단에 대한 안전성이 보장되지 못할 우려가 있기 때문이다.

2. 연구내용

2.1 실험개요

본 연구에서는 국내의 교량 중 내진1등급으로 설계된 교량을 대상으로 비내진, 중저진, 내진설계한 교각을 1/2.83으로 축소하고 형상비(Aspect Ratio)를 2.5로하여 휨전단파괴를 유도한 원형 콘크리트 교각시험체에 준정적실험(Quasi-Static Test)에 의한 내진성능을 평가하기 위하여 제작하였으며, 실험변수로 띠철근 간격에 의한 내진설계의 유/무, 주철근 겹침이음 유/무, 주철근 겹침이음 시험체에 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드섬유의 보강을 채택하였다.

2.2 재료의 특성

교각 시험체 제작에 사용한 콘크리트는 굵은골재 최대치수 25mm 골재의 레드믹스트 콘크리트를 사용하고 철근은 SD30인 D16의 상용철근을 주철근으로, 띠철근은 SD30 D10을 사용하였다. 철근의 인장강도는 KS B 0820에 따라 각각 3개의 시편에 대한 인장실험을 실시하여 D16은 3500 kgf/cm^2 과 D10은 3400 kgf/cm^2 의 평균항복강도를 얻었으며 아래의 그림 1은 철근의 P- Δ curve이다. 기둥본체를 타설한 콘크리트의 압축강도는 264 kgf/cm^2 를 얻었다. 아래의 표 1은 콘크리트의 배합표이다.

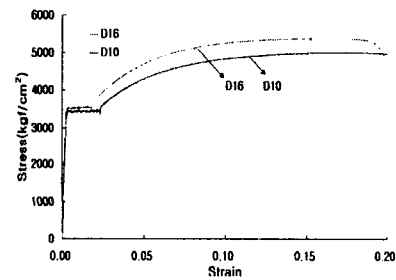


그림 1 P - Δ curve

표 1 시험체 배합설계표

굵은골재 최대치수(mm)	W/C (%)	공기량 (%)	슬럼프 (cm)	단위량 (kgf/m^3)						28일강도 (kgf/m^2)
				물	시멘트	굵은골재	잔골재	혼화제	혼화제	
25	46.4	4.1	14	178	365	816	934	19	1.92	264

2.3 보강섬유

주철근의 50%를 겹침이음시킨 비내진교각시험체 3기에 내진성능향상을 위하여 기둥의 소성힌지구간에 유리섬유, 아라미드, 탄소섬유 세 종류의 보강섬유로 보강하였으며 이들의 물리적 특성은 다음 표 2와 같다.

표 2 보강섬유의 물리적 특성

Classification	Tensile Strength (kgf/cm^2)	Tensile modulus (kgf/cm^2)	Elongation (%)	Thickness (mm)
Glass Fiber (TYFO SEH 51)	5,600	252,000	2.0	1.3
Aramid Fiber (K-49)	21,000	1,100,000	2.6	0.193
Carbon fiber (SK-N300)	35,500	2,350,000	1.5	0.167

보강은 내진시험체와 동일한 횡방향 구속력을 줄 수 있는 섬유보강설계법³⁾을 이용하여 식(1)에 의해 보강설계하였다. 식(1)에서 t_j 는 섬유보강설계두께, ϵ_{cu} 는 구속콘크리트의 극한변형률, D 는 단면의 직경, f'_{cc} 는 구속콘크리트의 항복강도, f_w 및 ϵ_w 는 보강재료의 극한응력 및 극한변형률을 나타낸다. 구속콘크리트의 극한변형률 및 항복강도는 식(2)과 식(3)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 나타낸다⁵⁾. 위의 계산과정에 의해서 보강섬유의 보강은 각각 2장을 전단의 영향을 고려하여 1/2L(75cm)를 감싸는 방법으로 보강하였으며 기초와 기둥하단부의 접촉면에서 보강섬유의 탈락을 방지하기 위하여 기초부위까지 섬유를 연장하여 설치하였으며 그림 2에 나타내었다.

$$t_j = \frac{0.1(\epsilon_{cu} - 0.004) D f'_{cc}}{f_w \epsilon_w} \quad (1)$$

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + \frac{2.5 \rho_{sh} f_{yh} \epsilon_{sh}}{f_{cc}} \quad (2)$$

$$f'_{cc} = f'_c \left(2.254 \sqrt{\frac{1 + 7.94 f'_l}{f'_c}} - \frac{2 f'_l}{f'_c} - 1.254 \right) \quad (3)$$

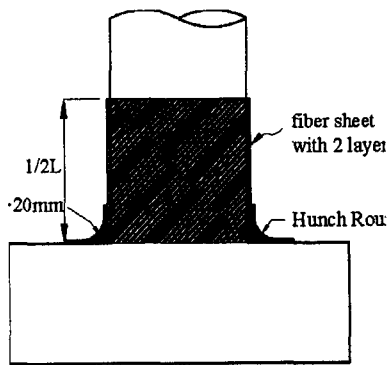


그림 2 보강섬유 상세

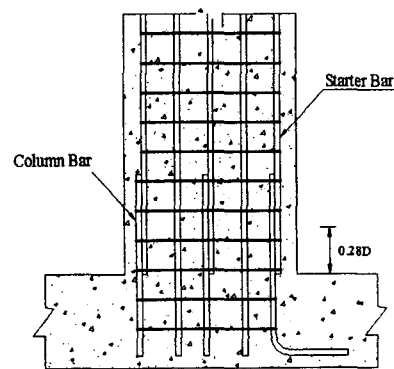


그림 3 겹침이음(50%) 상세

2.4 시험체 제작

기존고속도로 교량의 지진시 철근콘크리트 교각의 파괴거동이 전단파괴모드에서 휨/전단, 휨파

과 모드까지 다양하게 예측됨으로써, 기둥단면지름 60cm, 기둥높이 1.5m (Aspect Ratio=2.5)인 휨전단파괴모드로 설계된 원형 콘크리트 교각을 제작하여 준정적 (Quasi-Static) 실험에 의한 거동 분석을 위하여 겹침이음 및 겹침이음 시험체에 섬유로 보강한 시험체의 내진성능을 평가하고자 하였다. 사용할 총 7기의 시험체 단면의 제원은 그림 1에 나타내었다.

주철근의 겹침이음은 기존 연구결과로부터 주철근의 파단이 처음으로 발생된 부분(기초상단 0.28D)을 겹침이음 중심으로 하여 그림 2와 같이 배근하였으며, 주철근의 겹침이음¹⁾은 종방향 주철근의 50 % 를 겹침이음 하였다.

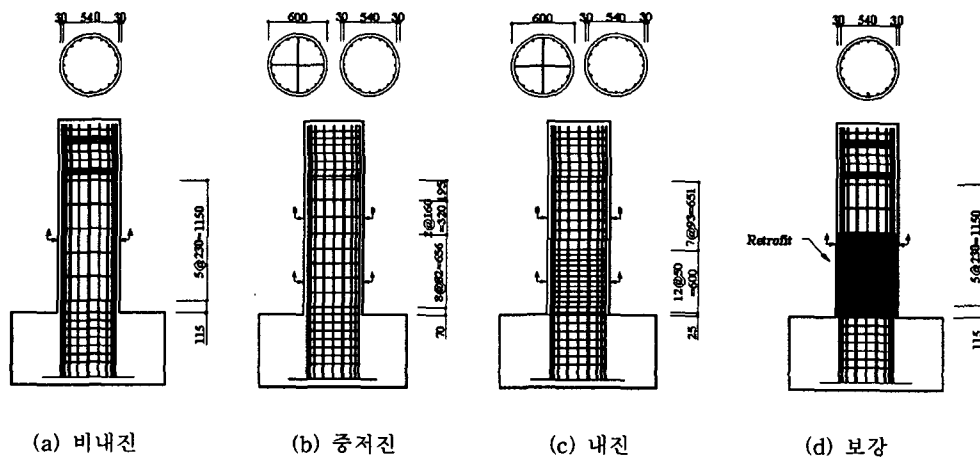


그림 4 시험체 제원

표 3 실험변수 및 시험체명

Classification	Nomenclature	Confinement Steel Space		Axial Force (tonf)	Retrofit
		Space(cm) PHR/NPHR	Ratio(%)		
Nonseismic	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			
Limited Ductile	0%Lap	L-SP00-R0	8.2 /10	0.64	Glass(SEH-51) Aramid(K-49) Carbon(SK-N300)
Seismic	0%Lap	S-SP00-R0	5/9.3	1.06	

PHR:Plastic Hinge Region, NPHR:Non-plastic Hinge Region, N:Nonseismic, L:Limit Ductile, S:Seismic, SP00(50):Longitudinal Bar Lap Splice 0%(50%), R0:Without Retrofitting, R(G,A,C):Retrofit(Glass, Aramid, Carbon),

3. 실험개요

Quasi-Static 실험을 위하여 Oil jack(100tonf)을 이용하여 축하중을 재하하였으며, 횡방향의 반복하중은 100tonf 용량의 Actuator를 이용하여 변위제어 방식으로 가력하였다.

3.1 계측장비

시험체의 주철근에 Strain Gage를 6~8개, 띠철근에 6개, Cross Tie에 3개 부착하여 철근의 변

형틀을 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.

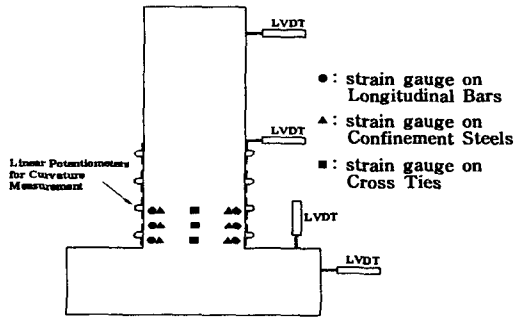


그림 5 측정장치 부착도

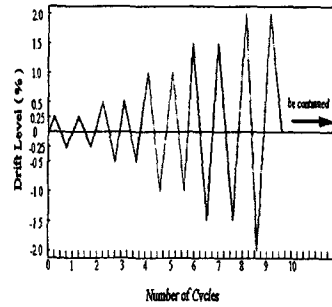


그림 9 하중재하방법

3.2 하중재하형태

기둥상부에 일정한 축력을 유지시킨 상태에서 수평방향으로 반복적인 형태의 하중재하를 하는 준정적(Quasi-Static)실험을 수행하기 위하여 Oil jack (100tonf)을 이용하여 기둥 상부에 재하하고 Load Cell (150tonf)을 설치하여 축력을 측정하며, 횡방향 변위가 발생하더라도, 일정한 축하중이 재하될 수 있도록 일정한 하중을 유지할 수 있는 유압기를 사용하였다. 횡방향의 반복하중은 100tonf 용량의 Hydraulic Actuator를 이용하여 변위제어 방식으로 가력하며, 횡방향변위는 기둥 상면의 가력 방향에 설치된 LVDT를 이용하여 측정하였다.

하중재하형태(Load Pattern)는 변위제어형식으로 그림 6과 같이 Drift Level 0.25 %, 0.5 %, 0.75 % 1 %, 1.5 %, 2 %, 2.5 %, 3 % ... 증가시켜나갔다. 처음 1 %까지는 0.25 %씩 변위를 증가시키며 초기 교각의 연성도를 상세하게 관측하고 1 %이후로 0.5 %씩 증가시키는 2cycle 형태의 피로 거동으로 반복 재하하여 동일한 진폭에 대한 교각의 거동특성의 차이를 비교 분석하였다.

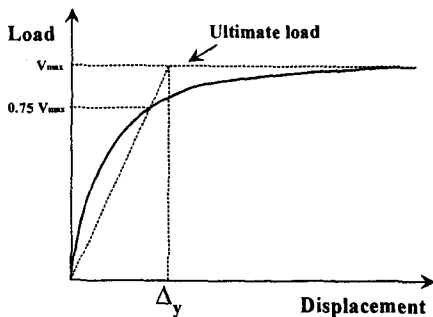


그림 7 항복변위의 정의

표 4 변위연성계수(μ)

Specimen	Displacement(cm)		Ductility Factor(μ)
	Yield	Ultimate	
N-SP00-R0	1.84	5.99	3.25
L-SP00-R0	1.84	8.15	4.43
S-SP00-R0	1.84	7.61	4.14
N-SP50-R0	1.84	4.60	2.50
N-SP50-RG	1.84	6.74	3.66
N-SP00-RA	1.84	7.07	3.84
N-SP00-RC	1.84	8.33	4.53

*Average value all Test specimens without Lap-splice

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 7에서와 같이 간접적인 방법으로 구할 수 있다³⁾. 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_f 와 항복변위 Δ_y 와의 관계식으로 변위연성도를 평가하였다⁴⁾. 표 4에서 보여지는 바와 같이 연성도에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 겹침이음의 유무이며, 비내진시험체 중 주철근의 겹침이음으로 비내진시험체에 비해 77% 정도의 연성능력 저하를 보였다. 겹침이음 비내진시험체를 섬유로 보강한 시험체는 비내진시험체에 비해 112%, 118%, 140% 중저진시험체에 비해서는 83%, 87%, 102%에 해당하는 연성능력을 나타내었다.

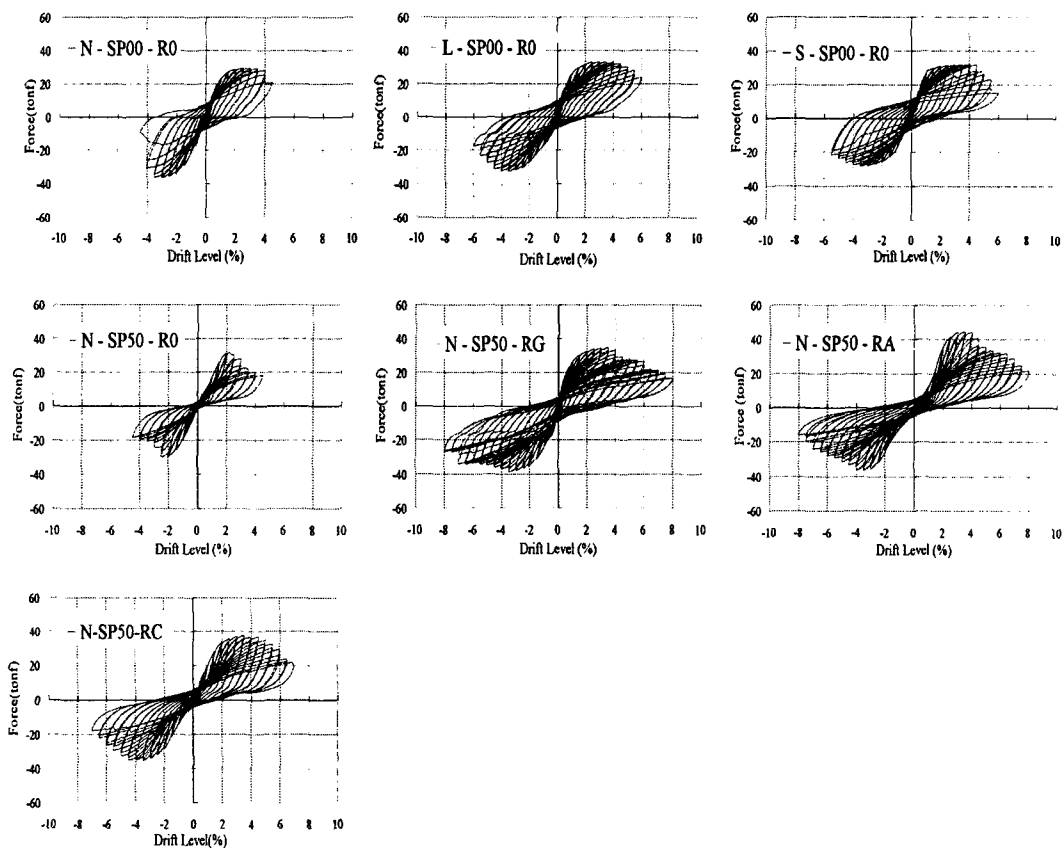


그림 8 하중-변위 이력곡선

4.2 하중-변위 포락곡선

하중변위 포락곡선의 분석결과는 그림 7과 같이 비내진과 내진의 차이, 겹침이음의 유무에 따른 차이, 보강설계의 유무에 따른 차이를 명확히 보여주고 있다. 그림 9-(a)는 겹침이음 시험체는 Drift 2~3 % 사이에서 급격한 저하를 보이지만 겹침이음이 없는 시험체는 Drift 4 % 까지 완만한 하중저하를 보여주고 있다. 그림 9-(b)는 비내진시험체는 4 % 에서 급격한 저하를 보이지만 중저진과 내진설계시험체는 6 % 에서 하중의 저하를 보이는 것을 알 수 있다. 그림 9-(c) 섬유보강시험체는 Drift 4 % 지점의 극한하중에서 급격한 하중저하는 전단의 영향을 받았다는 것을 보여주고 있지만, 이후 극한하중의 75 % 지점에서부터 비내진시험체보다 월등한 내하력을 보여 준다. 휨과괴모드를 보이는 시험체와는 달리 중저진시험체와 내진시험체가 큰 거동의 차이를 보이지 않는 것은 내진시험체라 하더라도 휨과 전단의 조합작용을 받아 내진성능이 충분히 발휘되지 못하는 것으로 해석된다.

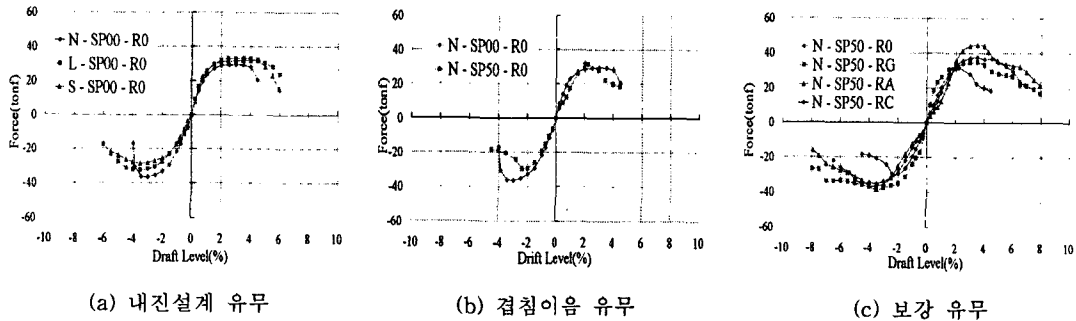


그림 9 하중-변위 포락곡선

4.3 에너지분석

에너지 평가란 콘크리트 교각의 손상을 평가하기 위해 부재가 파괴될 때까지 흡수 또는 소산 할 수 있는 능력은 내진성능을 평가하는데 중요한 요소 중의 하나이다. 구조물 또는 어떤부재의 총 에너지량에 있어서 지진응답해석에 의한 변위이력으로부터 실제로 흡수 및 소산되는 에너지를 계산하고 총에너지량과 비교하여 구조물의 안전성 여부를 축적에너지 흡수능력을 분석하였으며 그림 10에서 에너지 소산능력을 분석하기 위하여 하중-변위 이력곡선의 내부 면적으로 정의하였다. 그림 11-(a) 내진설계 유무의 경우에는 비내진시험체보다 중저진, 내진시험체가 1.2~1.25배정도 높은 값을 나타냈으며, 그림 11-(b)에서는 겹침이음이 있는 시험체가 겹침이음이 없는 시험체에 비해 0.5배정도의 높은 값을 나타냈으며, 그림 11-(c) 보강시험체의 경우는 비보강시험체보다 2.5~3배정도의 높은 흡수능력을 나타냈다.

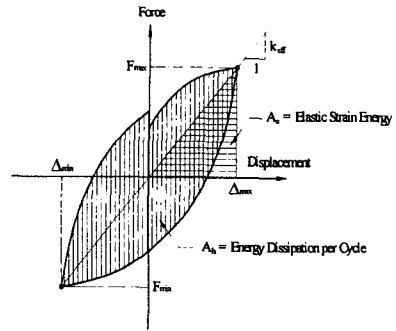


그림 10 이력거동에 의한 에너지소산

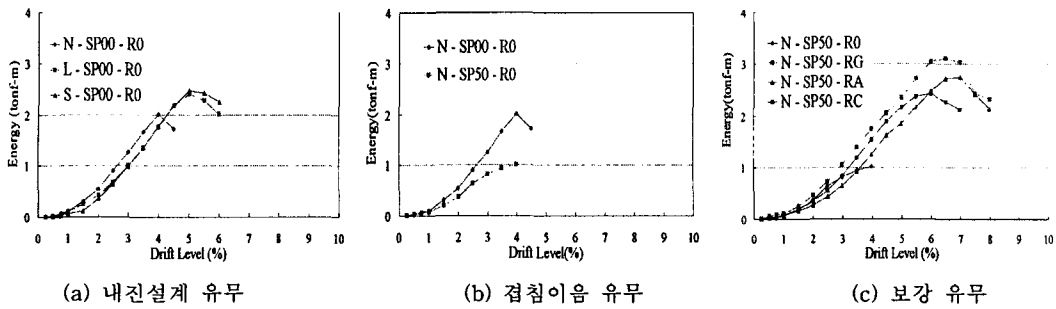


그림 11 에너지소산 그래프

5. 결론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 실험변수로 채택한 주철근 겹침이음, 내진설계 유무, 보강설계 유무에 따른 연성도의 평가에서 주철근 겹침이음에 의한 연성도의 저하가 가장 두드러진 것으로 평가되었으나, 이를 보강섬유로 보강하는 경우 오히려 연성능력이 겹침이음이 없는 시험체보다 높은 값을 나타냈음을 알 수 있었다. 이에 따른 주철근 겹침이음과 보강의 규정이 시급히 마련되어야 할 것이다.
- 2) 형상비가 2.5인 휨전단거동인 겹침이음 교각시험체가 유사동적실험(Pseudo-Dynamic Test)에서는 어느정도의 내진 연성능력을 가질 것인지에 대한 연구의 필요성이 있다.

감사의 글

본 연구는 지진공학연구센터(2001G0302) 및 (주)콘크리닉, (주)리폼시스템, (주)SK케미칼의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김태훈, 유영화, 신현목, "지진하중을 받는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동 및 연성능력에 관한 해석적 연구", 한국지진공학회 논문집, Vol.4, No.4, 2000.12
2. 정영수 외 3인, "준정적실험에 의한 겹침이음된 철근콘크리트 교각의 내진성능 평가", 2001년도 봄 학술 발표회 논문집, 한국콘크리트학회, 제13권, 1호 pp. 877-882, 2001
3. K.K.Lee, G.H.Han, Y.S.Chung, D.H.Lee, E.S. Hwang, "Quasi-Static Tests for Seismic Performance of R.C Bridge Piers", Proceedings of the Korea Concrete Institute, V.10, No.2, 1998, pp. 615~620
4. G.H.Han, K.K.Lee, Y.S.Chung, "Experimental Research for Seismic Performance of Circular Hollow R.C Bridge Piers", Proceedings of the Korea Concrete Institute, V.11, No.1, 1999, pp. 671~676
5. M.J.N. Priestley, F.Seible, G.M.Calvi, "Seismic Design and Retrofit of Bridges", JOHN WILEY & SONS, Inc. 1996