

손상된 철근콘크리트 교각의 내진성능평가를 위한 실험연구 An Experimental Evaluation of Seismic Performance for Damaged Reinforced Concrete Bridge Piers.

박창규* 이은희** 이대형*** 정영수****
Pack, Chang Ku Lee, Eun Hee Lee, Dae Hyoung Chung, Young So

ABSTRACT

Experimental investigation was conducted into the flexure/shear-critical behavior of earthquake-damaged reinforced concrete columns with lap splicing of longitudinal reinforcement in the plastic hinge region. Six test specimens in the aspect ratio of 2.5 were made with test parameters: confinement ratios, lap splices, and retrofitting FRP materials. They were damaged under series of artificial earthquakes that could be compatible in Korean peninsula. Directly after the pseudo-dynamic test, damaged columns were retested under inelastic reversal cyclic loading simultaneously under a constant axial load, $P=0.1f_{ck}A_g$. Residual seismic performance of damaged columns was evaluated and compared to that of the corresponding original columns. Test results show that RC bridge piers with lap-spliced longitudinal steels in the plastic hinge region appeared to fail at low ductility. This was due to the debonding of the lap splice, which resulted from insufficient development of the longitudinal steels. The specimens externally wrapped with composite FRP straps in the potential plastic hinge region indicated significant improvement both in flexural strength and displacement ductility.

1. 서론

2002년 우리나라에는 총 45차례 지진이 발생하여 한 해 지진발생 회수에서 역대 최다를 기록했다. 기상청은 지진 관측망이 조밀해지고 장비가 현대화돼 지진 관측이 증가한 이유도 있지만, 최근 10년새 지진 발생이 꾸준히 늘고 있다고 밝히고 있다. 이러한 현상은 우리나라의 지진 발생 가능성에 대한 우려의 목소리에 무게를 실어주고 있으며, 최근 안전 불감증으로 그 피해규모가 늘어난 대형참사로 인하여 중요 사회간접 구조물인 교량의 안전성 평가의 필요성이 높아지고 있다.

우리나라는 선진 외국에 비하여 늦은 1992년 처음으로 도로교표준시방서(건설교통부,1992)에 내진설계편이 신설되었다. 때문에 1992년 내진설계규정도입 이전 국내의 기존 비내진 설계교각은 구조물 전체의 내진성능저하를 가져오는 소성현지구간의 주철근접침이음 시공 등, 지진 발생시 큰 피해가 예상되는 요소를 내재하고 있어 기존 비내진 설계교각의 보수, 보강의 필요성이 제기되고

* 중앙대학교 대학원 토목공학과 박사과정
** 중앙대학교 대학원 토목공학과 석사과정
*** 경북도립 경도대학 건설환경과 조교수
**** 중앙대학교 토목공학과 교수

있다. 그러나 1992년 도입된 내진설계규정은 지진에 대한 피해사례의 부족과 미흡한 내진연구 등으로 강진지역의 규정을 여과없이 적용하고 있는 실정이며 중약진 지역에 적합한 내진규정의 산정 또한 시급한 과제이다. 따라서 본 연구에서는 비내진 교각의 내진성능을 알아보기 위하여 내진설계 도입 이전의 설계법으로 실험체 1기를, 기존 비내진 설계교각의 위험요소인 주철근겹침이음을 변수로 실험체 1기를 제작하였다. 또한 이렇게 겹침이음된 실험체에 각각 탄소, 아라미드, 유리 섬유를 사용하여 보강한 실험체 3기를 제작함으로써 보강한 기존 비내진 교각의 내진성능향상 정도를 평가하고자 하였으며, 한정연성개념을 도입하여 중저진 실험체를 1기를 제작하여 중저진 지역에 알맞은 설계법을 연구하고자 하였다.

본 실험은 실제 입력 지진동을 이용하는 유사동적실험(Pseudo-Dynamic Test) 방법으로 도로교 설계기준에서 규정하고 있는 PGA(Peak Ground Acceleration)를 점증적으로 증가시키며 지진 발생시 구조물의 내진성능과 파괴 형상을 살펴보고 준정적실험(Quasi-Static Test)을 통하여 잔류내진성능평가 및 내진성능향상을 분석하고 아울러 중약진지역으로 분류되는 국내 실정에 적합한 보강기법을 평가하기 위한 실험적 연구이다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 재료의 특성

교각 시험체 제작에 사용한 콘크리트는 굵은골재 최대치수 25mm 골재의 래디믹스트 콘크리트를 사용하고 철근은 SD30인 D16의 상용철근을 주철근으로, 띠철근은 SD30 D10을 사용하였다. 철근의 인장강도는 KS B 0820에 따라 각각 3개의 시편에 대한 인장시험을 실시하여 D16은 3,500 kgf/cm^2 과 D10은 3,400 kgf/cm^2 의 평균항복강도를 얻었으며 기둥본체를 타설한 콘크리트의 압축강도는 264 kgf/cm^2 를 얻었다. 아래의 표 1은 콘크리트의 배합표이다. 또한, 인장응력이 각각 5,600(kgf/cm^2)·21,000(kgf/cm^2)·35,500(kgf/cm^2)인 유리섬유·아라미드·탄소섬유를 주철근의 50%를 겹침이음시킨 비내진교각시험체 3기에 내진성능향상을 위하여 기둥의 소성힌지구간에 각각 2겹씩 보강하였으며, 전단의 영향을 고려하여 75cm(1/2L)를 감싸는 방법으로 보강하였다.

표 1 시험체 배합설계표

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

2.4 시험체 제작

기존고속도로 교량의 지진시 철근콘크리트 교각의 파괴거동이 전단파괴모드에서 휨/전단, 휨파괴 모드까지 다양하게 예측됨으로써, 기둥단면지름 60cm, 기둥높이 1.5m (Aspect Ratio=2.5)인 휨전단파괴모드로 설계된 원형 콘크리트 교각을 총 6기제작하였으며, 이들 실험체의 상세를 그림 1에, 실험변수를 표2에 나타내었다. 주철근의 겹침이음은 기존 연구결과로부터 주철근의 파단이 처음으로 발생한 부분(기초상단 0.28D)을 겹침이음 중심으로 하여 그림 2와 같이 배근하였으며, 주철근의 겹침이음은 중방향 주철근의 50%를 겹침이음 하였다.

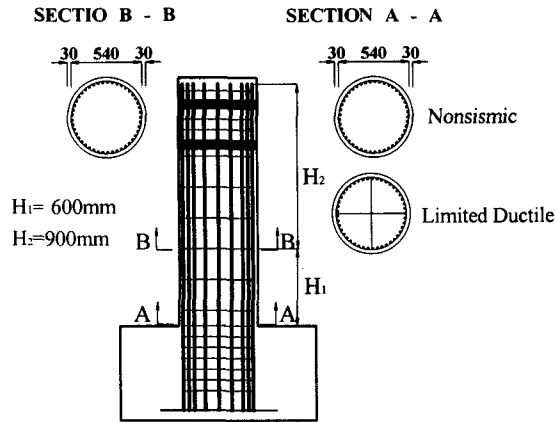


그림 1. 실험체 상세

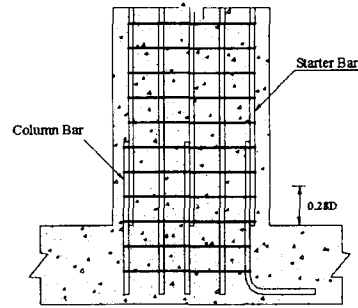


그림 2. 겹침이음(50%) 상세

표 2 실험변수 및 시험체명

분류	실험체명	횡방향 철근 배근간격		축력 (tonf)	보강
		간격(cm)	철근비(%)		
		PHR/NPHR			
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			
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

기둥상부에 $0.1A_g f_{ck}$ 에 해당하는 67.8tonf의 축력을 횡방향 변위가 발생하더라도, 일정한 축하중이 재하할 수 있는 유압기를 사용하여 재하하였으며, 횡방향 하중은 100tonf 용량의 Hydraulic Actuator를 이용하여 가력하였다.

3.1 계측장비

주철근, 띠철근, Cross Tie에 변형률게이지를 부착하여 철근의 변형률을 측정하였고, 시험체의 변위를 측정하기 위하여 시험체의 중앙부와 횡방향 가력위치에 변위계 2기를 설치하였고 기초부의 들림 및 밀림을 측정하기 위하여 상면, 측면에 변위계 2기를 설치하였다. 또한 경사계와 크랙게이지를 측면에 부착하여 실험체의 곡률을 측정하였다.

3.2 하중재하구성

본 실험은 그림 3와 4와 같이 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 준정적실험을 통하여 파괴시까지의 잔류연성능력을 평가하였다.

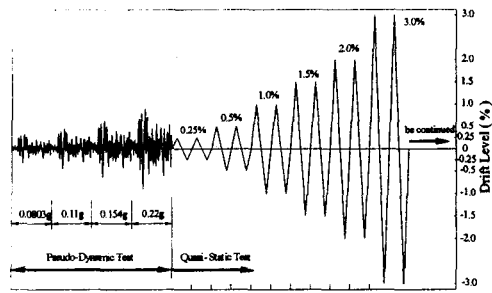


그림 3. 하중구성도

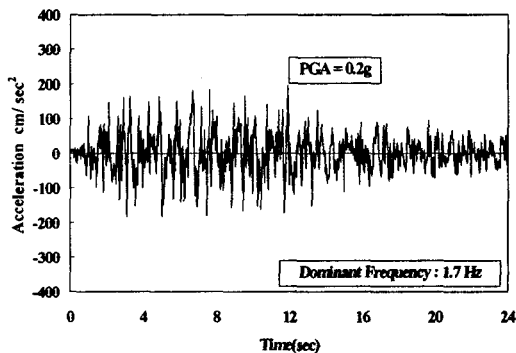


그림 4. 한국도로공사 인공지진데이터(T2)

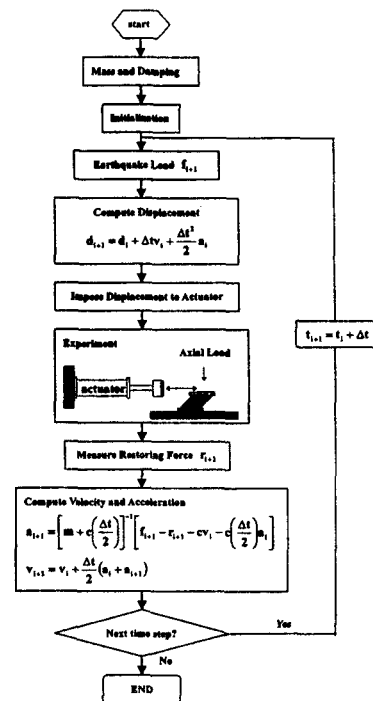


그림 5. 유사동적실험의 개념도

Pseudo Dynamic Test는 일명 On-Line Test 또는 Hybeid Test라고도 하며 그림 5과 같이 실험체에 부과되는 변위 이력은 수치적 계산에 의해 결정되어지고 이들 값이 실험체에 대해 준정적으로 부과되며, 이 부과된 변위에 대해 복원력을 측정하여 step-by-step으로 동적 지배 미분방정식을 수치적으로 풀어서 실험을 진행해 나가는 방법으로 구조물 전체의 응답을 평가하고자 할 때 효율적인 실험방법이며, 동적 수치해석방법과 마찬가지로 구조물의 관성 및 감쇠특성뿐 아니라 지진하중을 컴퓨터에서 수치적으로 고려하며 다만 발생한 복원력은 실험적으로 계측된 값이 사용되므로 진동대 실험의 사실성과 준정적 실험의 편리성을 결합한 실험방법이라고 말할 수 있다. 본 연구에서는 Explicit Newmarks β method을 통하여 수치해석하였고, 중저진 지역인 우리나라의 실정에 맞추어 PGA 0.2g, 유효지속시간 24초인 한국도로공사에서 작성한 인공지진 데이터(T2)를 입력 지진파로 채택하였다. 준정적실험(Quasi-Static Test)은 그림 3과 같이 Drift Level 0.25 %, 0.5 %, 1.0 %, 1.5 %, 2.0 %, 2.5 %, 3.0%, 4.0 % ... 증가시켜나갔다.

4. 실험결과 분석

4.1 하중변위곡선

그림 6의 왼편에는 유사동적실험 결과를 오른편에는 준정적실험 결과를 6(a)~(f)로 나타내었다. 유사동적실험 결과에서 횡방향 구속력과 주철근의 겹침이음에 관계없이 대부분의 실험체가 PGA 0.22g까지 탄성거동을 보이고 있다는 것을 그림 6(a)와 (b)에서 알 수 있으며, 보강한 실험체 모두가 비슷한 이력곡선을 보이고 있다는 점에서 각 보강재 사이의 차이를 나타내지 못하고 있음을

그림 6(d)~(f)에서 보여주고 있다. 또한 보강한 세 실험체(DN-SP00-RA,RC,RG)가 보강하지 않은 실험체(DN-SP00-R0)보다 같은 변위에서 31.9% 높은 횡방향 하중을 기록해 보강하지 않은 실험체보다 보강한 실험체의 초기 강성값이 큰 것으로 나타났다. 준정적 실험결과 그림 6(a)와 (b)에서 횡방향 구속력에 따른 연성의 증가를, 그림 6(a)와 (c)는 비내진설계된 50% 겹침이음한 실험체(DN-SP50-R0)보다 겹침이음이 없는 실험체(DN-SP00-R0)가 높은 연성을 가지고 있음을 나타내고, 그림 6(c),(d),(e),(f)는 보강재로 인한 연성의 증가를 보여주고 있다.

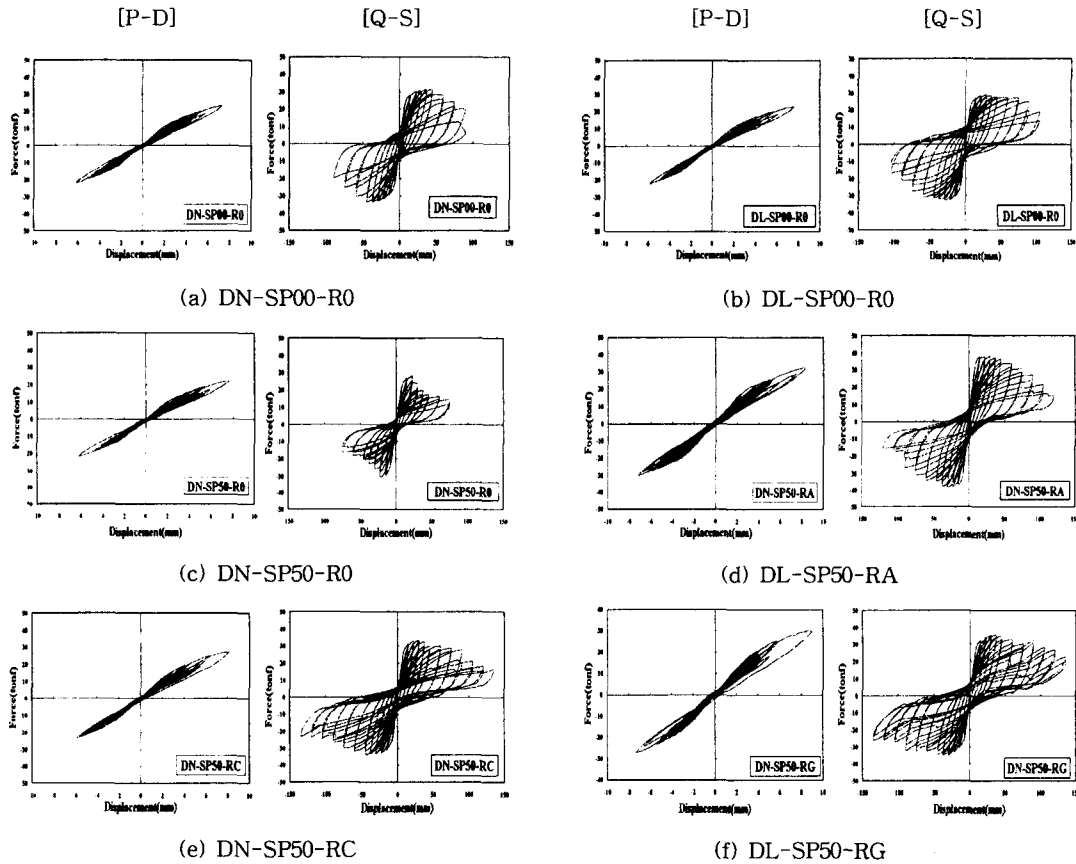


그림 6. 하중-변위 이력곡선

그림 7은 횡방향철근비, 겹침이음의 유무 그리고 보강설계의 유무에 따른 차이를 하중변위 포락곡선을 통해 보여주고 있다. 그림 7(a)는 횡방향 철근비 0.23%의 비내진실험체(DN-SP00-R0)와 비내진실험체의 2.78배에 해당하는 0.64%의 횡방향 철근비를 가진 중저진실험체를 비교하여 나타내었고, 그 결과 표3과 같이 중저진실험체의 극한 변위가 비내진실험체보다 39.4%증가하여 48.9% 큰 변위연성을 보여주고 있다. 그리고 그림 7(b)는 50%겹침이음시험체(DN-SP50-R0)가 22mm~37mm사이의 변위에서 급격한 하중감소를 보이는 반면 겹침이음 없는 비내진실험체(DN-SP00-R0)는 37mm에서 89mm의 변위에서 서서히 감소해 겹침이음이 내진 성능에 미치는 영향을 나타내고 있다. 또한, 그림7(c)는 각 보강재의 보강능력을 겹침이음실험체(N-SP50-R0)와 중저진 실험체(DL-SP00-R0)를 비교하여 보강한 겹침이음실험체가 중저진실험체에 달하는 연성능력 발휘하고 있음을 보여주고 있다.

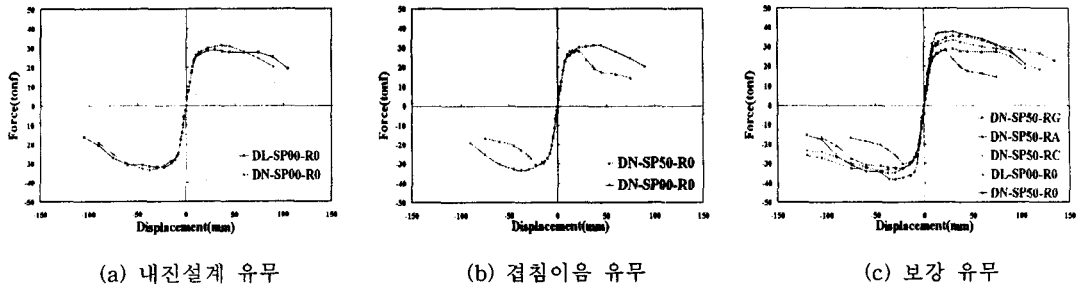


그림 7. 하중-변위 포락곡선

4.2 변위연성도

구조형식, 기둥길이, 기둥의 구속조건에 따른 구조물의 연성을 나타내는 변위연성도는 최대변위와 항복변위의 비($\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y$)로 정의된다. 변위연성도의 경우, 하중-변위의 관계에서 항복점이 뚜렷하지 않기 때문에 항복변위를 결정하기 위해 여러 연구자들이 다양하게 정의를 하였는데 이 중 그림 8과 같이 하중-변위 곡선상에서 최대 횡력 V_{max} 을 지나는 수평선과 원점에서 V_{max} 의 75%에 해당하는 횡력을 지나는 직선과의 교점을 항복변위로 결정하는 방법을 사용하였으며 극한변위는 0.85 V_{max} 때의 변위로 정의하였다. 표 4와 같이 보강된 실험체는 보강하지 않은 실험체에 비해 1.8~2.4의 변위연성도의 증가를 보였고, 겹침이음이 있는 실험체(DN-SP50-R0)는 겹침이음이 없는 실험체(DN-SP00-R0)에 비하여 1.5배의 변위연성도 감소를 보였다.

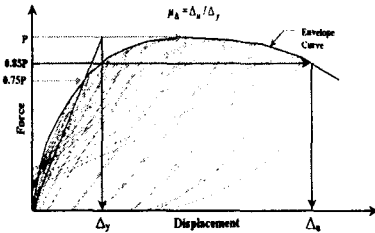


그림 8. 변위연성도 정의

표 3 변위연성도

실험체명	항복		극한		변위연성도
	하중(tonf)	변위(mm)	하중(tonf)	변위(mm)	
DN-SP00-R0	26.58	10.82	26.57	66.00	6.10
DL-SP00-R0	24.81	10.13	24.51	92.00	9.08
DN-SP50-R0	24.18	9.82	30.00	24.08	2.45
DN-SP50-RA	34.35	9.50	32.22	70.00	7.37
DN-SP50-RC	30.91	11.19	30.56	74.93	6.70
DN-SP50-RG	28.94	10.65	28.21	88.00	8.26

4.3 변형에너지

변형에너지를 구조물이 보유한 에너지 흡수 및 소산능력을 기본으로 그림 9와 같이 극한, 항복시까지 이력곡선이 각각 둘러싸는 면적을 극한에너지, 항복에너지라 하고, 극한에너지와 항복에너지의 비($\mu_E = E_u / E_y$)를 변형에너지 연성도라 정의하고 있다. 분석결과 전체 실험체의 항복에너지는 140~180($t \cdot mm$)로 유사한 값을 보였다. 때문에 비내진시험체(DN-SP00-R0)비해 750($t \cdot mm$)정도 극한에너지의 증가를 보인 중저진실험체(DL-SP00-R0)

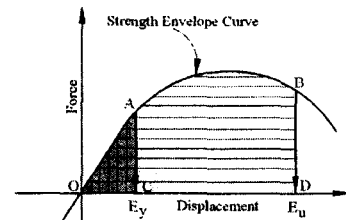


그림 9. 변형에너지 정의

의 변형에너지 연성도가 약 2배의 연성도 증가를 보이고 있으며, 겹침이음시험체의 보강효과는 각 보강재 별로는 탄소, 아라미드, 유리 섬유가 각각 13.56, 11.49, 10.27로 유사한 결과를 나타냈고, 비내진겹침이음시험체(DN-SP50-R0)에 비해서는 약 3~4배의 연성도 증가를 가져와 주철근 겹침이음된 시험체의 경우에도 섬유로 보강할 경우 충분히 내진 규정을 만족할 수 있는 것으로 평가되었다.

표 4 변형에너지 연성도

시험체명	항복에너지(t·mm)	극한에너지(t·mm)	변형에너지 연성도
DN-SP00-R0	167.34	1648.38	9.85
DL-SP00-R0	139.88	2395.09	17.12
DN-SP50-R0	153.77	507.22	3.29
DN-SP50-RA	177.48	2039.61	11.49
DN-SP50-RC	160.11	2171.89	13.56
DN-SP50-RG	176.70	1895.04	10.72

4.4 축적소산에너지

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 에너지 소산능력을 분석하기 위하여 그림 10에서 하중-변위 이력곡선의 내부 면

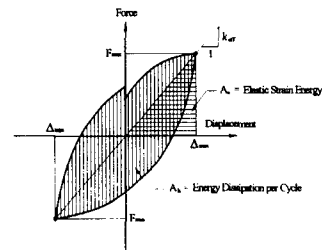


그림 10. 에너지소산

적으로 정의하였다. 그림 11-(a) 횡방향 구속력에는 비내진시험체(DN-SP00-R0)보다 중저진시험체(DL-SP00-R0)가 1.8배정도 높은값을 나타냈으며, 그림 11-(b)에서는 겹침이음이 있는 시험체(DN-SP50-R0)가 겹침이음이 없는 시험체(DN-SP00-R0)에 비해 2.3배정도의 높은 값을 나타냈으며, 그림 11-(c) 보강시험체의 경우는 비보강시험체보다 4.8~5.8배정도의 높은 흡수능력을 나타내 변위연성도나 변형에너지연성도에 비해 보강효과를 더 확실히 나타내주고 있다.

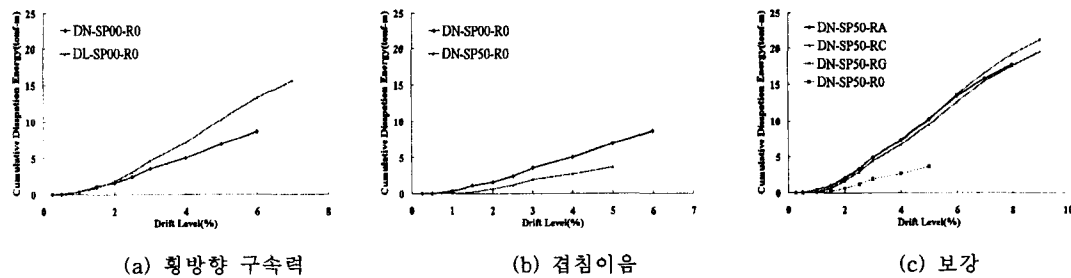
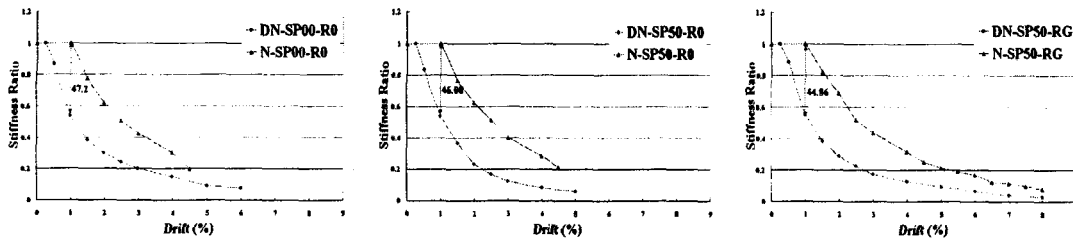


그림 11. 에너지소산 그래프

4.5 강성감소

유사동적실험을 통해 손상을 입은 실험체와 손상을 입지않은 실험체의 강성의 변화 추이를 알아보기 위하여 각 단계의 강성 감소 정도를 각 단계별 강성을 최초 강성으로 나누어 Ref3.의

N-SP00-R0, N-SP50-R0, N-SP00-RG과 비교하여 나타내었다. 분석결과 drift level 1.0% 지점에서 감소율이 가장 크게 나타났으며, 각각의 감소율은 겹침이음이 없는 비내진 실험체 47.2%, 겹침이음이 있는 실험체 46.08%, 유리섬유로 보강한 실험체 44.86%로서 손상을 입은 실험체의 강성비가 더 낮게 평가 되었다.



(a) 겹침이음이 없는 실험체

(b) 겹침이음 시험체

(c) 유리섬유보강 실험체

그림 12. 강성감소

5. 결론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 유사동적실험 결과 거의 대부분의 실험체가 0.22g까지의 지진하중에 대해서 약간의 손상만 입은 채 횡방향력이나 주철근겹침이음, 보강재등의 변수에 큰 영향을 받지 않고 선형거동을 보여 기존의 구조물도 어느정도의 내진성능을 보유하고 있다고 평가된다.
- 2) 비내진실험체의 2.78배에 해당하는 0.64%의 횡방향 철근비를 가진 중저진실험체가 비내진실험체에 비해 극한 변위가 39.4%증가하여 48.9%더 큰 변위연성을 보여주고 있다.
- 3) 보강된 실험체는 보강하지 않은 실험체에 비해 1.8~2.4의 변위연성도의 증가를 보였고, 겹침이음이 있는 실험체(DN-SP50-R0)는 겹침이음이 없는 실험체(DN-SP00-R0)에 비하여 1.5배의 변위연성도 감소를 보였다.
- 4) 섬유 보강된 실험체는 비내진 겹침이음시험체(DN-SP50-R0)에 비해서 약 3~4배의 변형에너지 연성도 증가를 가져와 주철근 겹침이음된 시험체의 경우에도 섬유로 보강할 경우 충분히 내진 규정을 만족할 수 있는 것으로 평가되었다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 정영수 외 3인, "섬유보강된 횡전단 RC 교각의 내진성능 평가", 2002년도 춘계 학술 발표회 논문집, 지진 공학회, pp195~202, 2002
2. Priestly, M. J. N. Chai, Yuk Hon., and Frieder Seible (1991), "Seismic Retrofit of Circular Bridge Columns for Enhanced Flexural Performance" *A structural Journal of the American Concrete Institute*, USA V.88, No.5, Sep.-Oct.1991, 572-584
3. Chung, Y.S. Song, H.J. Kim, Y.G. (2002) Seismic Performance and Retrofit of R/C Bridge Piers with Spliced Longitudinal Steels proceedings of the 2002 SEWC, Yokohama, October9-12.