

유사정적실험에 의한 지진이력 철근콘크리트 교각의 내진 연성도 평가

Seismic Ductility Assessment of RC Bridge Piers With Minor Earthquake Damage By the Quasi Static Test

이 은 희
Lee, Eun Hee

정 영 수
Chung, Young Soo

박 창 규
Pack, Chang Ku

김 영 섭
Kim, Young Sub

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 of which magnitude 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, and strain energy ductility.

1. 서론

2002년 우리나라에는 총 45차례 지진이 발생하여 한 해 지진발생 회수에서 역대 최다를 기록하였으며, 최근 2003년 3월 23에는 홍도 해역에서 1963년 이후 즉 계기지진 관측이 도입된 이후 5번째 강진인 진도 4.9의 지진이 발생하였다. 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. 이에 본 연구는 1992년 내진설계규정 도입이전의 기존 비내진 설계교각들의 지진발생시 위험요소인 소성힌지구간의 주철근점침이음을 실험변수로 하여 기존 비내진 설계교각의 내진성능 평가하고 섬유보강방법을 이용하여 중약진 지역에 적합한 보강법에 대하여 연구하였다.

지금까지 실시된 대부분의 유사동적 실험은 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration)를 점차적으

* 정회원, 중앙대학교 토목환경공학과 석사과정

** 정회원, 중앙대학교 토목공학과 박사과정

*** 정회원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수

**** 정회원, 중앙대학교 토목환경공학과 석사과정

로 증가시켜 파괴에 도달할때까지 실험을 수행하여 그 결과로 지진 발생시 구조물의 연성과 강성을 평가하였다. 그러나 현행 도로교설계기준에서는 재현주기 2000년의 최대지반가속도를 0.22g로 규정하고 있다. 때문에 이보다 큰 PGA를 가지는 하중을 통한 실험 수행은 중진지역인 우리나라의 실정에 맞지 않는다고 사료된다. 따라서 이 논문에서는 횡방향구속력과 주철근 겹침이음, 섬유보강을 변수로 가진 실험체 6기에 1단계로 도로교 설계기준에서 규정하고 있는 재현주기 200년의 지반가속도인 0.0803g와 재현주기 500년인 0.11g, 재현주기 1000년인 0.154g 그리고 2000년인 0.22g 순으로 증가시켜 유사동적 실험을 수행하여 중소규모의 지진 이력을 경험했던 철근 콘크리트 교각의 내진거동과 손상정도를 평가하였다. 실험 2단계에서는 변위제어형식으로 파괴시까지 유사정적실험을 수행하여 각 변수들이 구조물의 연성능력과 이들에 영향을 미치는 요인들을 분석하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 재료의 특성

교각 시험체 제작에 사용한 콘크리트는 굵은골재 최대치수 25mm의 레디믹스트 콘크리트를 사용하고 철근은 SD30인 D16의 상용철근을 주철근으로, 띠철근은 SD30 D10을 사용하였다. 철근의 인장강도는 KS B 0820에 따라 각각 3개의 시편에 대한 인장시험을 실시하여 D16은 $3,500 \text{ kgf/cm}^2$ 과 D10은 $3,400 \text{ kgf/cm}^2$ 의 평균항복강도를 얻었으며 기둥본체를 타설한 콘크리트의 압축강도는 264 kgf/cm^2 를 얻었다. 또한, 인장응력이 각각 $5,600 (\text{kgf/cm}^2)$, $21,000 (\text{kgf/cm}^2)$, $35,500 (\text{kgf/cm}^2)$ 인 유리섬유, 아라미드섬유, 탄소섬유를 내진성능향상을 위하여 50%주철근 겹침이음된 비내진교각시험체 3기의 교각 하단부의 소성힌지구간에 각각 2겹씩 보강하였으며, 전단의 영향을 고려하여 75cm(1/2L) 구간을 감싸는 방법으로 보강하였다.

2.2 실험체 제작

본 연구에서 사용된 실험체는 기둥단면지름 60cm, 기둥높이 1.5m (Aspect Ratio=2.5)인 휨전단 파괴모드로 설계되었고, 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, 한정연성실험체1기를 제작하여 중진 지역에 알맞은 설계법을 연구하고자 하였다. 이들 실험체의 상세를 그림 1에, 실험변수를 표 1에 나타내었다.

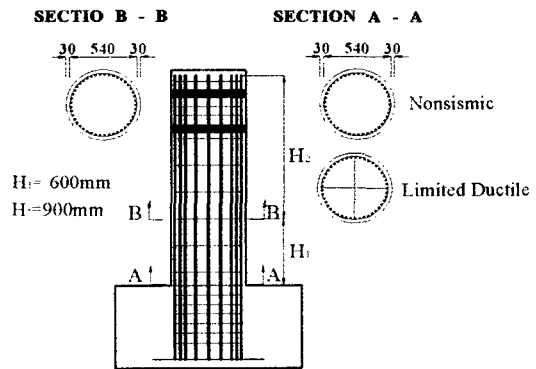


그림 1 실험체 상세

표 1 실험변수 및 시험체명

분류	주철근 겹침이음	실험체명	회박향 철근		주철근비 (%)	축력 (tonf)	보강
			배근간격(cm) PHR/NPHR	철근비 (%)			
비내진	0%	N-SP00-R0	23 /23	0.23	1.54	$\frac{P}{f_c' A_g} = 0.1$ (67.8)	-
	50%	N-SP50-R0					-
		N-SP50-RG					유리(SEH-51)
		N-SP50-RA					아라미드(K-49)
한정연성	0%	L-SP00-R0	8.2 /10	0.64	-	탄소(SK-N300)	

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

2.3 실험 방법

본 연구는 1단계로 유사동적실험을 통한 손상유도 그리고 손상된 시험체에 대한 내진성능평가 등의 2단계실험을 다음과 같이 수행하였다.

- 1 단계 : 유사동적실험

교각시험체의 실제와 유사한 지진 경험을 위하여 도로교설계기준에서 규정하고 있는 재현주기 200년의 지반가속도인 0.0803g와 재현주기 500년인 0.11g, 재현주기 1000년인 0.154g 그리고 2000년인 0.22g 순으로 인공지반운동을 가력한 유사동적 실험을 수행하여 교각시험체에 손상을 유도하였다. 그리고 수치적분은 Explicit Newmarks β method을 이용하였으며, 중진 지역인 우리나라의 실정에 맞추어 PGA 0.2g, 유효지속시간 24초인 한국도로공사에서 개발한 인공지진 데이터(T2)를 입력지진파로 채택하였다.

- 2단계 : 유사정적실험

그림 2과 같이 Drift Level을 처음 0.25%이후 0.5%씩 증가시켜 초기거동을 상세하게 관측하고 3%이후는 1.0%씩 증가시키는 방법으로 각각의 Drift Level마다 2 Cycle 반복재하하여 파괴시까지 거동을 관측하였다.

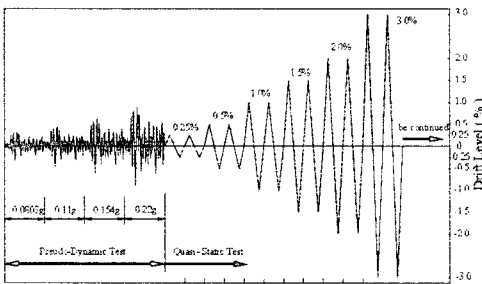


그림 2 하중구성도

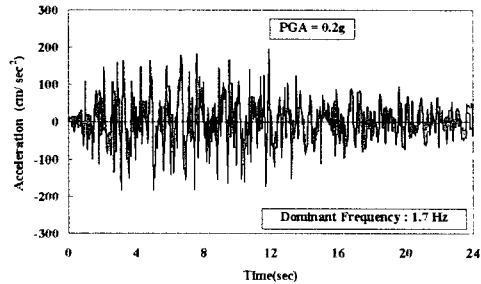


그림 3 인공지진데이터(T2)

3. 실험 결과 분석

3.1 하중변위분석

그림 4는 실험의 하중변위곡선을 굵은 선으로 1단계 유사동적실험 결과를 가는선으로 2단계 유사정적실험의 결과를 나타내었다. 유사동적실험결과 횡방향 구속력과 주철근의 겹침이음에 관계없이 실험체가 PGA 0.22g까지 큰 강성의 저하 없이 거동하고 있음을 알 수 있었다. 그리고 그림4 (d)~(f)는 각기 다른 섬유로 보강한 실험체들이 모두 유사한 이력곡선을 나타냄을 보여주고 있다. 또한 보강한 세 실험체(DN-SP00-RA,RC,RG)가 보강하지 않은 실험체(DN-SP00-R0)보다 최대 변위에서 45% 높은

횡방향 하중을 기록하였다.

유사정적실험결과 그림 4(a)와 (b)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 표2과 같이 한정연성실험체의 극한 변위가 비내진실험체보다 39.4%증가하여 변위연성이 48.9% 향상되었음을 보여주고 있다. 그리고 그림 4(a)와 (c)를 비교분석하여 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, 그림4 (c),(d),(e),(f)는 각 보강재로 인한 연성의 증가를 보여주고 있다.

아래의 표4는 하중-변위 곡선상에서 최대 횡력 V_{max} 을 지나는 수평선과 원점에서 V_{max} 의 75%에 해당하는 횡력을 지나는 직선과의 교점을 항복변위로 결정하고, $0.85 V_{max}$ 때의 변위로 극한 변위를 정의하여 계산한 각 실험체들의 변위연성도를 나타내었다. 각각의 실험체들을 살펴보면, 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. 또한, 비내진 50% 겹침이음 시험체의 변위연성도가 2.45로 도로교설계기준에서 요구하는 연성도 5에 미치지 못하였으나 이를 섬유유로 보강 할 경우 7~8까지 증대되었다는 점에서 섬유를 이용한 내진 보강의 효과가 큼을 알 수 있다.

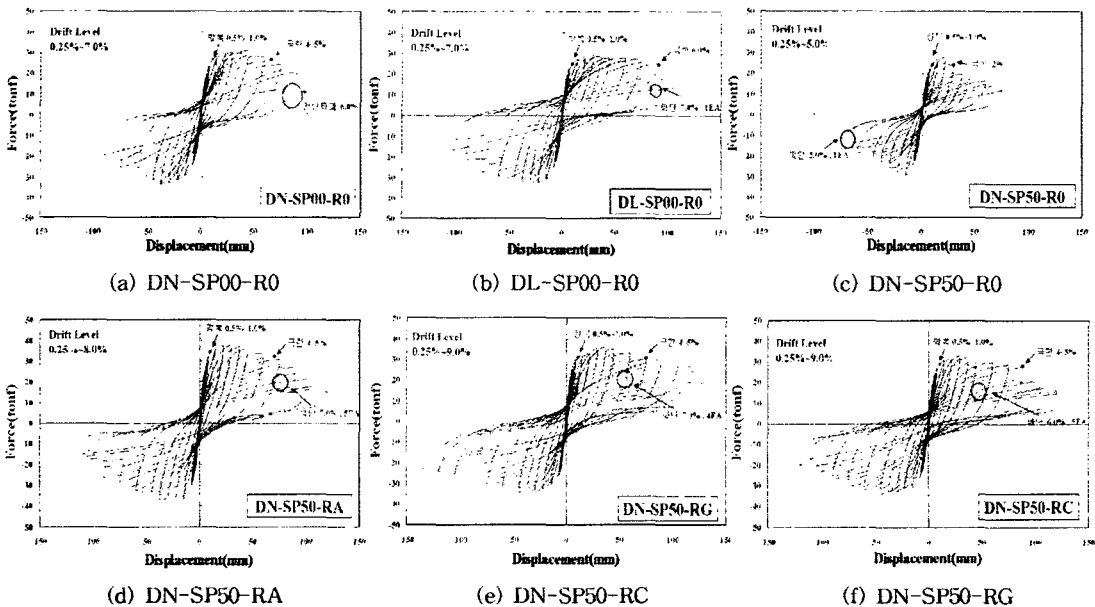


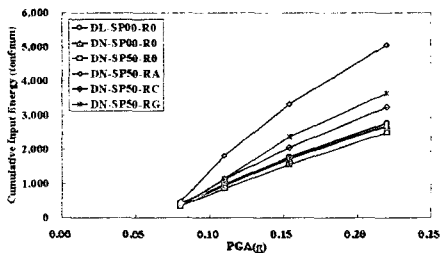
그림 4 하중변위이력곡선

표 2 변위연성도

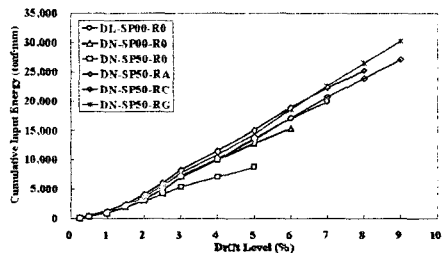
실험체명	항목		극한		변위연성도	항복에너지 (t · mm)	극한에너지 (t · mm)	변형에너지 연성도
	하중(tonf)	변위(mm)	하중(tonf)	변위(mm)				
DN-SP00-R0	26.58	10.82	26.57	66.00	6.10	167.34	1648.38	9.85
DL-SP00-R0	24.81	10.13	24.51	92.00	9.08	159.88	2395.09	14.98
DN-SP50-R0	24.18	9.82	30.00	24.08	2.45	153.77	507.22	3.29
DN-SP50-RA	34.35	9.50	32.22	70.00	7.37	177.48	2039.61	11.49
DN-SP50-RC	30.91	11.19	30.56	74.93	6.70	160.11	2171.89	13.56
DN-SP50-RG	28.94	10.65	28.21	88.00	8.26	176.70	1895.04	10.72

3.2 에너지 분석

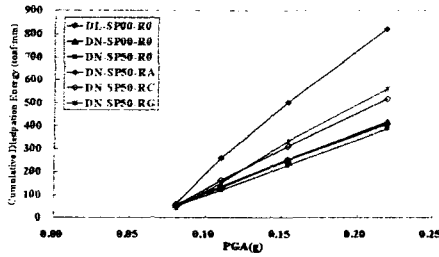
구조물 또는 어떤 부재의 총 에너지량에 있어서 지진응답에 의한 변위이력으로부터 실제로 소산되는 에너지를 계산하고 총에너지량과 비교하여 에너지 흡수능력을 분석하였다. 에너지 소산능력은 하중-변위 이력곡선의 내부 면적으로 정의하였다. 그림 5(a)와 (c)에 나타난 바와 같이 유사동적실험시 보강이 되지 않은 3개의 실험체는 횡방향 철근비와는 관계없이 입력 및 소산에너지가 동일한 값을 보이고 있으며, 주철근 겹침이음이 있는 실험체의 경우에는 다소 적은 값을 나타내었으나 거의 유사한 값을 보이고 있다. 그리고 보강된 실험체들은 보강 되지 않은 실험체들에 비하여 입력 및 소산에너지가 크게 나타났다. 그러나 유사동적실험에 의한 소산에너지 결과는 대체로 누적입력에너지에 비하여 약 16% 정도의 매우 작은 값이었다. 이는 RC 재료의 특성상 탄성범위에서도 다소의 소산에너지가 발생되고 있음을 의미하며, 초기 입력지진력인 0.0803g에서의 미세균열발생과도 관계가 깊음을 알 수 있다. 또한 유사정적실험에서는 Drift Level 1.5%까지는 모든 실험체가 입력 및 소산에너지 모두가 동일하였으며, 겹침이음된 실험체(DN-SP50-R0)의 경우 주철근이 겹침이음된 부분에서 슬립이 발생되어 저항력이 크게 떨어져 Drift Level 2.0%부터 입력 및 소산에너지가 나머지 실험체들에 비하여 저하되었다. 주철근 겹침이음이 없는 실험체(DN-SP00-R0)의 경우에는 Drift Level 4%까지 한정연성실험체(DL-SP00-R0)와 동일한 값을 보이다가, 그 후 차이를 나타내기 시작하였으며 6%에서 전단파괴되었다. 그리고 보강된 실험체들은 보강 섬유 종류에 관계없이 한정연성실험체와 동일한 값을 보이고 있다. 이는 주철근에 겹침이음이 있으나 보강으로 인하여 에너지 흡수 및 소산능력이 한정연성 실험체에 이르는 것으로 판단된다.



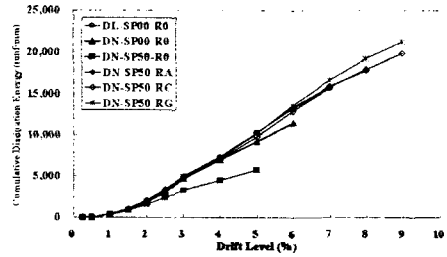
(a) 누적입력에너지(유사동적실험)



(b) 누적입력에너지(유사정적실험)



(c) 누적소산에너지(유사동적실험)

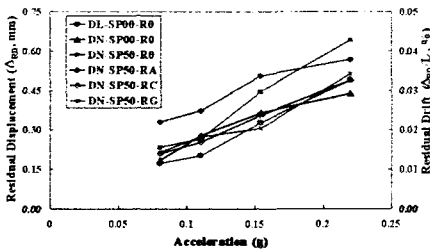


(d) 누적소산에너지(유사정적실험)

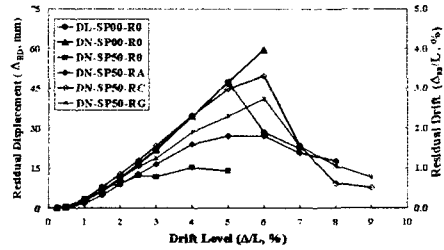
그림 5. 입력에너지 및 소산에너지

3.3 잔류변위

구조물이 외력을 받게 되면, 탄성한도내에서는 입력에너지와 탄성변형에너지가 같게되어 즉, 소산에너지가 없으므로 외력이 제거되면 변형은 없게된다. 그러나 탄성한도가 넘으면 구조물은 에너지를 소산시키면서 영구변형이 발생되며 이로 인하여 잔류변형이 남게 된다. 따라서 본 실험에서는 교각의 잔류변형을 알아보고자 그림 6과 같이 하중단계별 잔류변형을 조사하였다. 그림 6에 나타난 바와 같이 유사동적실험에서 주철근 50% 겹침이음에 있는 실험체(DN-SP50-R0)의 경우 잔류변위 증가가 다른 실험체들에 비하여 커서 0.22g에서 가장 큰 잔류변형을 보였다. 그러나 이들 값은 매우 미미한 값이며 실험체들의 잔류변위도 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 0.22g까지는 실험변수에 관계없이 모든 실험체가 탄성거동에 가까운 응답을 보인 것으로 판단된다. 그리고 유사정적 실험결과에서 주철근 겹침이음에 있는 실험체(DN-SP50-R0)는 2.5%부터 잔류변위가 증가하지 않았다. 이 또한 에너지 분석결과와 일치하는 것으로 주철근 겹침이음의 슬립으로 인해 소성흔지가 일찍 발생된 연유로 판단된다. 또한 Drift Level 5~6% 이후, 한정연성실험체(DL-SP00-R0)와 보강된 실험체의 경우 잔류변위가 오히려 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 교각 하부가 힌지거동, 즉 소성흔지 역할을 한 영향으로 판단되며, 반면에 비내진 실험체(DN-SP00-R0)의 경우에는 6%에서 전단파괴가 발생하였다.



(a) 유사동적실험



(b) 유사정적실험

그림 6. 잔류변위

5. 결론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 유사동적실험결과 하중변위곡선과 에너지분석을 통해 횡방향 구속력, 주철근의 겹침이음, 보강재등의 실험 변수에 따른 내진성능차이는 매우 미소함을 알 수 있었다. 그러나 보강된 실험체들은 나머지 보강되지 않은 실험체들에 비하여 같은 변위에서 31.9% 높은 횡방향 하중을 기록했고 입력 및 소산에너지 또한 크게 나타났다. 또한 겹침이음실험체(DN-SP50-R0)의 경우 잔류변위 증가가 다른 실험체들에 비하여 커서 0.22g에서 가장 큰 잔류변형을 보였으나 이들의 값은 매우 미미한 값이며 실험체들의 잔류변위도 큰 차이를 보이지 않았다.
2. 한편, 유사정적실험결과에 의하면,

- 에너지 분석결과 Drift Level 1.5%까지는 모든 실험체가 동일한 입력과 소산에너지를 보였으나, 겹침이음된 실험체의 경우는 Drift Level 2.0%부터 입력 및 소산에너지가 나머지 실험체들에 비하여 떨어졌고, 주철근 겹침이음이 없는 실험체(DN-SP00-R0)의 경우에는 Drift Level 4%까지 한정연성실험체(DL-SP00-R0)와 동일한 값을 보이다가, 6%에서 전단파괴 되었다. 그리고 보강된 실험체들은 보강 섬유유 종류에 관계없이 한정연성실험체와 동일한 값을 보였다.
- 현행 내진규정의 0.6배에 해당하는 0.64%의 횡방향 철근비를 가진 한정연성실험체는 도로교설계 기준에서 요구하는 연성도 5를 만족하였으며, 비내진50% 겹침이음 실험체(DN-SP00-R0)의 변위 연성도가 2.45로 연성도 5에 미치지 못하였으나 이를 섬유유로 보강한 경우 7~8까지 증대되어 요구연성도를 만족하였다. 즉, 섬유유를 이용한 내진보강 방안이 효과적인 방법임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원(과제번호: R11-1997-005302-0)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 정영수 외 3인, "섬유보강된 휨전단 RC 교각의 내진성능 평가", 2002년도 춘계 학술 발표회 논문집, 지진공학회, pp195~202, 2002.
2. 박종협, 유사동적실험에 의한 원형 철근콘크리트교각의 내진성능평가, 중앙대학교 박사학위논문, 2001.6.
3. 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.