

유사동적 실험에 의한 기존 RC교각의 내진성능 평가

Seismic Performance Evaluation of Existing RC Bridge Piers by Pseudo Dynamic Test

박종협*, 정영수**, 박희상*** 이재형****

Park, Jong Heob · Chung, Young Soo · Park, Hee Sang · Lee, Jae Hyung

ABSTRACT

The pseudo dynamic test has been carried out so as to investigate the seismic performance of RC bridge piers strengthened with and without glass fiber sheets. The Lessons from severe damage of many infrastructures in Kobe(1995) and Northridge(1996) earthquakes have emphasized the need to develop the retrofit measures to enhance flexural strength, ductility and shear strength of RC bridge piers nonseismically designed before 1992. Therefore, the objective of this experimental research is to investigate the seismic behavior of circular reinforced concrete bridge piers by the pseudo dynamic test, and then to enhance the ductility of concrete piers strengthening with glass fiber sheets in the plastic hinge region. 7 circular RC bridge piers were made in a 1/3.4 scale. Important test parameters are confinement steel ratio, retrofitting, load pattern, etc. The seismic behavior of circular concrete piers under artificial ground motions has been evaluated through strength and stiffness degradation, energy dissipation. It can be concluded that existing bridge piers wrapped with glass fibers in the plastic hinge regions could have enough seismic performance.

1. 서론

자연적으로 발생하는 재해 중에서 지진현상은 가장 심각한 재해이며 최근 잇달아 발생하였던 고베지진, 터키지진 그리고 대만지진등은 내진에 대한 관심을 크게 고조시키고 있는 실정이다. 우리나라도 1978년의 홍성지진, 1982년의 사리원지진 등으로 인하여 뒤늦게나마 1992년에 처음으로 도로교시방서에 내진설계 규정을 도입하여 시행하고 있다. 그러나 1992년 내진설계기준이 제정되기 이전 설계·시공된 수많은 기존 교량에 대한 내진성능평가 및 내진보강에 관한 연구는 아직 체계적으로 이루어지지 않은 실정이다.

본 연구는 실제의 입력지진동을 이용하여 유사동적 실험방법으로 기존 비내진설계된 RC교각의 내진성능을 평가하고 유리섬유 및 탄소섬유를 이용하여 기존 비내진 RC교각의 내진성능향상 및보강효과를 평가하기 위한 실험적 연구이다.

* 정회원 · 중앙대학교 토목공학과 박사수료 · 공학석사 · 031-670-4661 (E-mail: jongheob@chollian.net)

** 정회원 · 중앙대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · 031-670-3339 (E-mail: chung47@cau.ac.kr)

*** 정회원 · 중앙대학교 토목공학과 석사과정 · 031-670-4661 (E-mail: hanla-mt@hanmail.net)

**** 정회원 · 중앙대학교 지구환경시스템공학과 석사과정 · 031-670-4661 (E-mail: pionus@as.cau.ac.kr)

2. 실험 내용

2.1 사용재료의 물리적 특성

콘크리트는 목표압축강도 240kgf/cm^2 로 최대골재치수 13mm 골재의 레미콘을 사용하였으며 철근은 SD40을 사용하였다. 기둥본체의 콘크리트 평균압축강도는 261kgf/cm^2 이었다. 철근은 KS D 3504에 의한 SD40인 D10의 상용철근을 주철근으로, 띠철근은 D6을 사용하였으며 KS B 0820에 따라 각각의 3개의 시편에 대한 인장실험을 실시하여 각각 평균항복강도 $4,700\text{kgf/cm}^2$ 과 $4,400\text{kgf/cm}^2$ 의 값을 얻었다. 아래의 표 1.은 콘크리트 배합설계표를 보여주고 있다.

표 1. 시험체 배합설계표

구분	W/C (%)	공기량 (%)	슬럼프 (cm)	단위량 (kg/m^3)					28일 강도 (kgf/cm^2)
				물	시멘트	잔골재	굵은골재	혼화재	
본체	48.5	5.5	18	182	316	840	903	0.98	261

비내진설계된 기존 교량 교각의 내진성능 향상을 위하여 기둥의 소성hinge 구간에 유리섬유, 탄소섬유로 각각 보강하였다. 유리섬유는 아래의 표 2.와 같이 설계파단 인장강도가 $5,600\text{kgf/cm}^2$ 이 되는 TYFO SEH51(두께 1.3mm)의 제품을 사용하였으며, 탄소섬유는 아래의 표 3.과 같이 인장강도 $35,500\text{kgf/cm}^2$ 의 SK-N200(두께 0.111mm)제품을 사용하였다.

표 2. TYFO섬유 (Glass Fiber+Epoxy)

설계파단 인장강도	$5,600\text{ kgf/m}^2$
인장탄성계수	$252,000\text{ kgf/m}^2$
신 장 율	2.0 %
두 겜	1.3 mm
내구성시험	$5,500 \sim 6,150,920\text{ kgf/m}^2$

표 3. SK-탄소섬유

구 분	SK-N200 특성치
섬유중량(g/m^3)	200
설계두께 (mm)	0.111
인장강도(kgf/cm^2)	35,500
인장탄성율(kgf/cm^2)	2.35×10^6

2.2 시험체 제작

본 실험에 사용된 시험체의 대상모델은 내진1등급으로 설계된 수원시 하갈교의 교각을 대상으로 하여 1/3.4 축소모델인 원형충진단면으로 설계하였다. 그림 1.은 도로교표준시방서 내진설계 규정 도입 이전의 비내진 설계된 설계단면을 보여주고 있으며, 횡방향철근 간격은 전구간 12.5cm 이다. 그림 2.는 현행 도로교표준시방서 내진설계규정에 따라 설계된 도면을 보여주고 있으며 소성hinge 구간의 길이는 25cm 이며, 횡방향철근 간격은 소성hinge구간에서는 3cm , 비소성hinge구간에서는 4.5cm 이다. 그림 3.은 섬유보강 설계도면을 보여주고 있다. 섬유는 유리섬유 및 탄소섬유를 이용하여 소성hinge 구간에서는 2장을, 소성hinge 윗 구간에는 25cm 연장하여 1장을 횡으로 감싸는 공법으로 보강하였다.

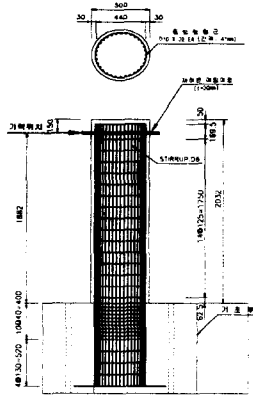


그림 1. 비내진설계

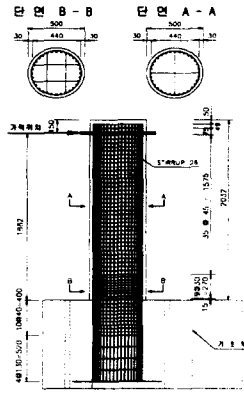


그림 2. 내진설계

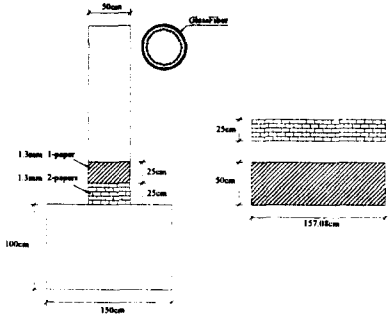


그림 3. 섬유보강설계

2.3 실험 계획

2.3.1 실험 개요

본 실험은 유사동적실험으로 일명 On Line Test 또는 Hybrid Test라고도 불리워지며 전통적 시간이력해석과 유사하나 다만 복원력은 실험에 의해서 직접적으로 측정되어 진다. 사용된 수치적 분 방법은 Explicit Newmark β Method이며, 그림 4.에 유사동적실험개요를 보여주고 있다. 본 실험은 경기도 수원시에 위치한 내진 1등급으로 설계된 하강교를 3.4축소모델로 총 7本の RC교각을 제작하여 실험을 수행하였다. 실험체명 및 수량은 표 4.와 같다.

표 4. 실험체명 및 수량

실험명	실험체명*	수량	비고
Pseudo Dynamic Test	NS-PD-LP1-A1	2	총 7本
	NS-PD-LP2-A1		
	S-PD-LP1-A1	2	
	S-PD-LP2-A1		
	T-PD-LP1-A1	2	
T-PD-LP2-A1			
	C-PD-LP2-A1	1	

註) NS : Nonseismic S : Seismic
 T : 유리섬유 C : 탄소섬유
 PD : Pseudo - Dynamic Test
 LP1 : Loading Pattern 1
 LP2 : Loading Pattern 2
 A1 : Axial Force Type 1

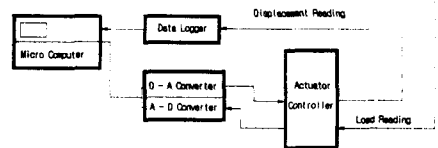
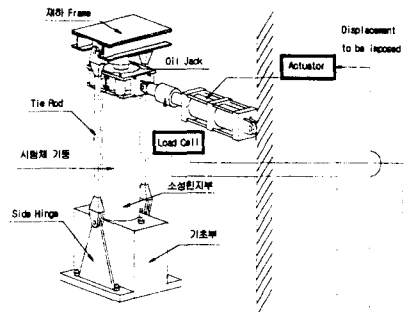


그림 4. 유사동적실험 Scheme

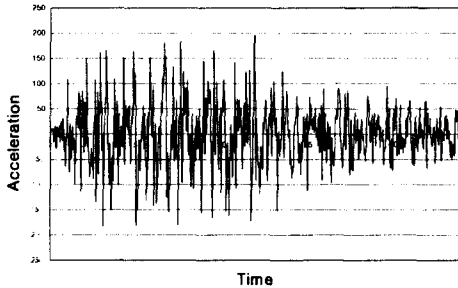
2.3.2 실험하중 및 장치

사하중을 고려한 정확한 축방향력 재하를 위하여 특수제작한 Hydraulic Axial Force Controller를 이용하여 축방향력이 초기설정값의 $\pm 5\%$ 를 유지하도록 하였다. 축하중은 대상 구조물의 사하중을 근거로 하여 축소모델에 상응하는 43.07tonf를 가하였으며 수평하중은 PGA값

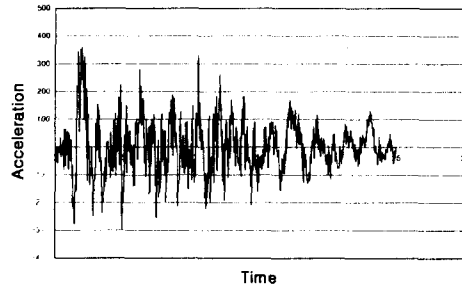
이 0.2g인 Moderate Artificial Earthquake과 0.36g인 Strong Artificial Earthquake를 Scale Factor를 고려하여 0.154g부터 Failure State까지 점진적으로 증가시키면서 실험을 수행하였으며, 실험계획은 표 5.에 보여주고 있다. 입력되는 지진데이터는 한국도로공사에서 작성된 형태 I (진앙과 관측지가 가까운 경우, Rock Soil Condition, T2.xy)과 일본건설성에서 작성된 인공지진 데이터(지진시 보유수평내력 조사용, Rock Soil Condition, kaihokus.xy)를 사용하였다. 그림 5.는 각 지진데이터의 입력가속도를 보여주고 있다.

표 5. 실험계획

Loading Pattern	Artificial Earthquake	Input Ground Motion	
		G.M Type	PGA
I	T2.xy (PGA:0.2g)	I -45.1(g)	0.154g
		I +19.6(g)	0.22g
		I +98.0(g)	0.30g
		I +196(g)	0.40g
		I +294(g)	0.50g
		I +392(g)	0.60g
II	Kaihokus.xy (PGA:0.36g)	II -201.8(g)	0.154g
		II -137.2(g)	0.22g
		II -98(g)	0.26g



(a) Moderate Region



(b) Strong Region

그림 5. Artificial Earthquake

2.4 실험 계측

교각의 폭를은 그림 6.과 같이 기둥저면에서부터 높이 70cm구간에 수평 하중재하 방향과 동일하게 하여 기둥의 양쪽에 Clip Gauge를 4개씩 각각 설치하여 Actuator 하중재하시 기둥소성힌지구간의 폭를을 측정하였다. 소성힌지구간에서의 철근변형 거동을 파악하기 위하여 내진설계 시험체의 주철근에는 8개, 비내진설계시험체에는 6개의 소성용 Strain Gauge를 부착하고, 띠철근에는 Actuator 가력방향 및 직각방향에 소성용 Strain Gauge를 설치하여 철근변형을 파악하였다.

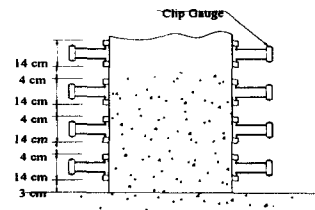
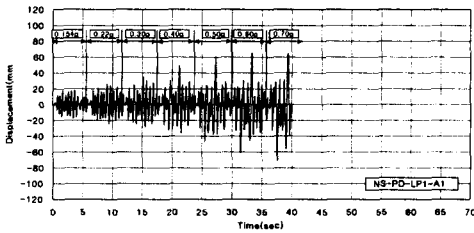


그림 6. Clip Gauge 부착위치도

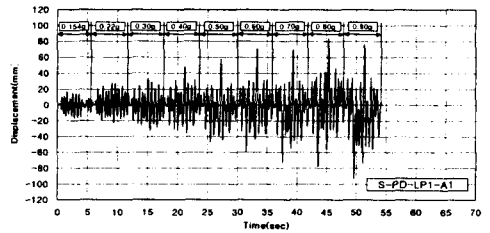
3. 실험 결과

3.1 시간 변위 이력곡선

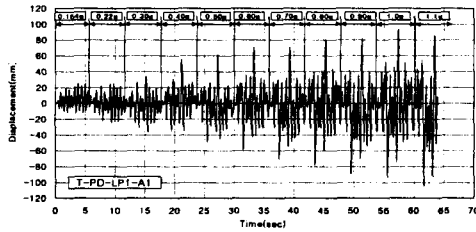
아래의 그림 7.은 각 실험체의 시간-변위 이력곡선을 보여주고 있으며, 시간-변위 이력곡선으로부터 얻어진 최대응답변위는 NS-PD-CP1-A1실험체가 67.314mm, S-PD-CP1-A1실험체가 84.109mm, T-PD-LP1-A1실험체가 93.660mm, NS-PD-LP2-A1실험체가 68.490mm, S-PD-LP2-A1실험체가 149.380mm, C-PD-LP2-A1실험체가 108.320mm, T-PD-LP2-A1실험체가 153.580mm로 나타났다.



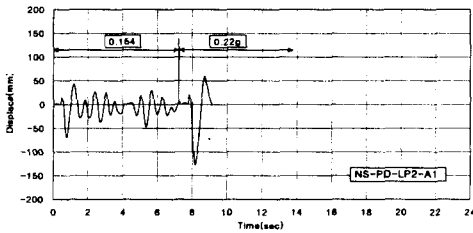
(a) NS-PD-LP1-A1



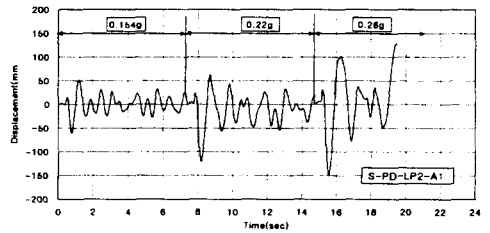
(b) S-PD-LP1-A1



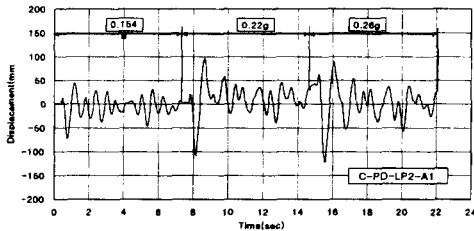
(c) T-PD-LP1-A1



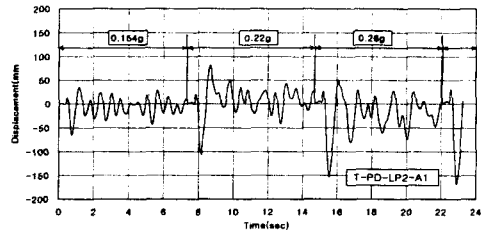
(d) NS-PD-LP2-A1



(e) S-PD-LP2-A1



(f) C-PD-LP2-A1

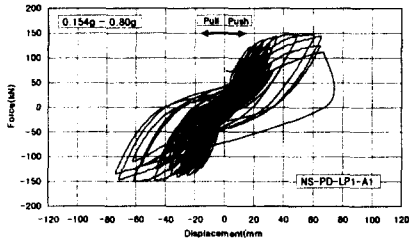


(g) T-PD-LP2-A1

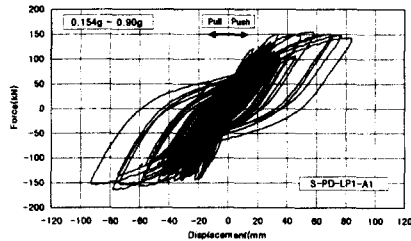
그림 7. Time-Displacement History

3.2 하중 변위 곡선

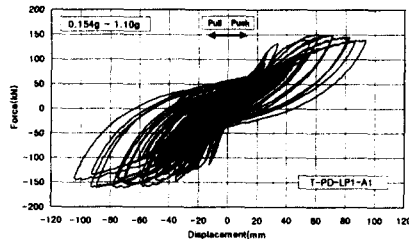
아래의 그림 8.는 각 실험체의 하중-변위 이력곡선을 보여 주고 있다. LP1에 대하여 비내진 실험체는 0.60g에서, 내진실험체는 0.9g에서 Failure State를 보였으며 유리섬유보강 실험체는 1.0g까지 견디었다. 한편 LP2에 대해서 비내진 실험체는 0.154g에서, 유리섬유보강 실험체는 0.26g에서 Failure State를 보였으며, 탄소섬유보강 실험체는 0.26g에서 Failure State를 보였다. 비내진설계 실험체가 LP1에 대해 0.60g까지 견디었으나 LP2에 대해서는 동일한 하중 Pattern에서 0.154g에서도 현저한 손상을 보였다.



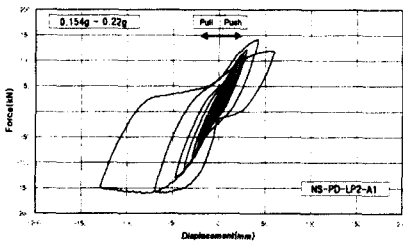
(a) NS-PD-LP1-A1



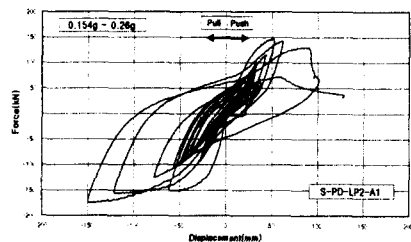
(b) S-PD-LP1-A1



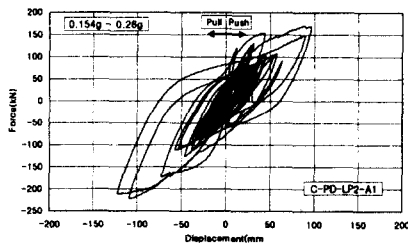
(c) T-PD-LP1-A1



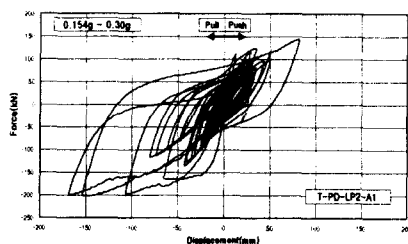
(d) NS-PD-LP2-A1



(e) S-PD-LP2-A1



(f) C-PD-LP2-A1

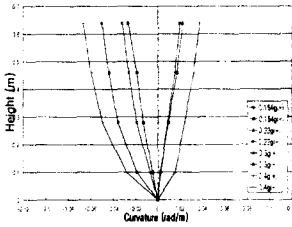


(g) T-PD-LP2-A1

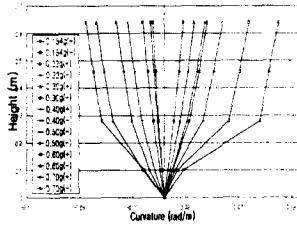
그림 8. Hysteresis Curve

3.3 곡률 및 Strength Envelope Curve

그림 6.과 같이 측정된 소성힌지 구간의 곡률을 분석해 본 결과 그림 9.와 같이 나타내었다. NS-PD-LP1-A1 실험체는 0.30g에서 비선형 분포를 나타내기 시작했으며, T-PD-LP1-A1 실험체는 0.50g에서 비선형 분포를 나타내기 시작했다. 그림 10.은 Moderate Artificial Earthquake에 대한 각 PGA별 최대 Strength Envelope Curve를 보여 주고 있다. 비내진 실험체는 0.30g까지 일정한 증가를 보이다가 0.40g에서 강도가 감소하는 경향을 보였고, 내진 및 보강시험체는 0.50g까지 일정한 증가를 보이다가 0.60g부터 강도가 감소하는 경향을 보였다.



(a) NS-PD-LP1-A1



(b) T-PD-LP1-A1

그림 9. Cumulative Curvature Curve

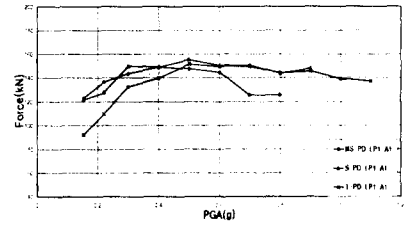


그림 10. Strength Envelope

3.4 연성도

RC교각의 내진성능평가를 위해서는 변위연성도, 곡률연성도, 에너지연성도를 가지고 분석할 수 있으며, 본 연구에서는 파괴시점까지의 누적에너지 (E_u) 및 변위 (Δ_u)에 대한 항복시점까지의 누적에너지 (E_y) 및 변위 (Δ_y)의 비로 정의하여 에너지 연성도 ($\mu_E = \frac{E_u}{E_y}$) 및 변위연성도 ($\mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$)를 평가하였으며, 그 결과를 표 6.에 보여주고 있다. 에너지 및 변위연성도는 내진 및 섬유보강실험체는 비내진 실험체에 비해 1.5~2배 정도의 연성능력을 가지고 있는 것으로 나타났으며, 탄소섬유 및 유리섬유는 비슷한 연성능력을 보여주었다.

표 6. 에너지 및 변위연성도

Loading Pattern	공시체명	파괴시점(PGA)	Normalized Input Energy Ductility	Displacement Ductility
LP 1	NS-PD-LP1-A1	0.60g	1	5.35
	S-PD-LP1-A1	0.90g	1.89	10.73
	T-PD-LP1-A1	1.0g	2.06	8.90
LP 2	NS-PD-LP2-A1	0.154g	1	2.73
	S-PD-LP2-A1	0.26g	1.82	6.95
	T-PD-LP2-A1	0.26g	1.63	6.86
	C-PD-LP2-A1	0.26g	1.34	5.79

4. 결론

본 실험 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 섬유보강 실험체는 비내진실험체에 비해 1.5~2배 정도의 변위연성능력을 보여주었으며 유리 섬유보강실험체 및 탄소섬유보강실험체는 비슷한 변위연성도를 보여 주었다.
- 2) 섬유보강실험체 및 내진실험체는 비내진실험체에 비해 1.5~2배 정도의 에너지 연성능력을 보여 주었다.
- 3) 내진설계 실험체의 실험결과 중저진지역으로 분류되는 우리나라의 경우는 다소 과도한 설계로 사료되며 우리여건에 맞는 내진설계기준의 정립이 필요한 것으로 사료된다.
- 4) 비내진설계된 실험체라도 실제 정확한 설계와 정밀한 시공이 이루어진다면 중저진 지진에 대하여 충분한 연성을 발휘할 수 있으리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부(과제번호:970003-4), 한국지진공학센터(과제번호:1997G0402)의 지원 및 1998년도 중앙대학교의 교내 연구기자재 지원사업의 일원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 건설교통부(1996), "도로교 표준시방서"
2. 정영수의 3인(2000), "Pseudo-Dynamic 실험에 의한 원형충진 RC교각의 내진거동, 2000년도 봄 학술발표회 논문집", 한국콘크리트학회, 제12권, 1호, pp. 464-469
3. 조창백(2000), "원형철근콘크리트 교각의 내진성능에 관한 유사동적실험 연구", 석사학위논문, 중앙대학교
4. Pui-Shum B. Shing and Stephen A. Mahin(1983), "Experimental Error Propagation in Pseudo-Dynamic Testing", Report No. UCB/EERC-83/12
5. Shing, P.B., Mahin, S.A., "Experimental Error Propagation in Pseudo-dynamic Testing", EERC Report No. UCB/EERC-83/12, University of California, June 1985
6. Thewalt, C.R., and Mathin, S.A., "An Conditionally Stable Hybrid Pseudo-Dynamic Algorithm" Earthquake Engineering and Structural Dynamics, VOL.24, 723-731 (1995)
7. Mario, R., and Park, R., Seismic Load Tests on Reinforced Concrete Columns Strengthened by Jacketing", ACI Structural Journal, vol.91, no.2 March-April, 1994, pp.150-159