

원형 콘크리트 교각의 내진거동에 관한 유사동적실험

Pseudo-Dynamic Test of Circular Reinforced Concrete Bridge Piers for Seismic Performance

박종협* 조창백** 서주원*** 김용곤**** 정영수*****
Park, Jong-Heob Cho, Chang-Beck Seo, Joo-Won Kim, Yong-Gon Chung, Young-Soo

ABSTRACT

This research aims at evaluating the seismic performance of the existing R/C bridge piers, which were nonseismically or seismically designed in accordance with the provision of Korea Highway Design Specification. Further experimental investigations have been doing to figure out the retrofitting effects of nonseismic R/C bridge piers confined with glass fiber at the plastic hinge zone. Pseudo-dynamic tests have been carried out on nine scaled R/C column specimens to investigate their hysteretic behavior under earthquake loading. Test parameters are axial load, input ground motion, confinement steel ratio, glass fiber, and etc.

1. 서 론

자연적으로 발생하는 재해중에서 지진현상은 가장 심각한 재해이며 특히 1995년 1월17일에 발생한 고베 지진에서도 보듯이 지진은 인간의 생명뿐만 아니라 사회적, 정치적, 경제적으로도 엄청난 영향을 초래하는 것을 보았다. 우리나라도 1978년 10월7일의 홍성 지진으로 한반도도 이제 더 이상 지진에 대해 안전지역이 아님을 인식시켜 주었으며 1982년 사리원 지진 등으로 인하여 1992년 도로교 시방서에 처음으로 내진설계편의 규정을 제정하였다. 그러나 적용기준이 주로 강진지역의 규정을 적용한 탓에 중저진지역의 우리 여건에 무조건적인 사용은 바람직하지 않으며, 관련 연구실적이 상당히 미비한 상태이다. 지진설계에 대한 규정은 지진피해에 따라 시간적, 지역적, 구조 특성별로 변화되는 특성을 가지고 있으나 우리나라는 지진에 대한 피해사례 및 자료가 부족한 실정이다.

본 연구는 구조물의 동적효과를 고려한 Pseudo-Dynamic 실험을 통하여 비내진과 내진 및 중내진 설계된 철근콘크리트 교각의 지진하중하에서의 동적거동을 조사하기 위한 실험적 연구이다. 그

* 중앙대학교 대학원 토목공학과 박사과정
** 중앙대학교 대학원 지구환경시스템공학과 석사과정
*** 현대건설기술연구소
**** 한경대학교 안전공학과 교수
***** 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수, 정회원

리고 기존의 비내진 설계로 시공된 콘크리트 교각의 연성능력을 향상시키기 위한 유리섬유 및 탄소섬유의 내진성능 보강효과를 평가하고자 한다.

2. 실험내용

2.1 실험개요

지진과 같은 외부하중이 작용하는 경우 구조물의 안정성 및 사용성을 확보하기 위하여 정확한 해석 및 설계가 요구된다. 지진하중에 의한 구조물의 동적거동의 예측은 여러 가지 이론적인 가정을 통하여 수행되고 있으나 이러한 가정에 의한 수치해석의 문제점을 해결하고자 실험적인 연구가 수행되었다. 본 실험은 Pseudo-Dynamic Test로서 일명 On-Line Test 또는 Hybrid Test 라고도 불리워지며 전통적 시간이력해석과 유사하나 다만 복원력은 실험에 의해서 직접적으로 측정되어진다. Pseudo-Dynamic Test는 진동대 실험의 사실성과 준정적 실험의 편리성을 결합한 시험방법이라고 말할 수 있으며 진동대 실험의 한계성을 극복한 실험방법이라고 할 수 있다.

본 실험은 실제 교량구조물을 모델로 하여 총 18本の 철근콘크리트 기둥을 제작하여 지진에 대한 내진거동을 실험중에 있으며 실험체에 대한 개요는 다음과 같다.

표 1. 실험체명 및 수량

실험명	실험체명*	수량	비고
Pilot Test	NS-PL-LP1-A1	1	총 18本
Monotonic Test	NS-M-A1	1	
Pseudo-Dynamic Test	NS-PD-LP1-A1, NS-PD-LP2-A1, NS-PD-LP3-A1	4	
	ML-PD-LP1-A1, ML-PD-LP2-A1	2	
	S-PD-LP1-A1, S-PD-LP2-A1, S-PD-LP3-A1	5	
	T-PD-LP1-A1, T-PD-LP2-A1, T-PD-LP3-A1 TD- PD-LP1-A1, C- PD-LP1-A1	5	

* NS: Nonseismic ML: Moderate-Seismic S: Seismic T: 유리섬유 TD: 국산유리섬유 C: 탄소섬유

PL : Pilot Test M : Monotonic Test PD : Pseudo-Dynamic Test

LP1 : Loading Pattern #1 A1 : Axial Force Type #1

2.2 시험체의 콘크리트 및 철근 특성

콘크리트는 목표압축강도 240 kgf/cm²로 최대골재치수 13mm 골재의 레미콘을 사용하였으며 철근은 SD40을 사용하였다. 시험체의 압축강도 측정을 위해 콘크리트 타설시 $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ 인 3개의 몰드에 28일간 양생시킨 후 단면의 편심을 방지하기 위하여 표면을 연마기로 작업한 후 UTM(Universal Testing Machine)으로 압축강도를 측정하였다. 기둥 본체의 콘크리트 압축강도는 약 261 kgf/cm²이었다. 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 kgf/cm²과 4,400 kgf/cm²의 값을 얻었다.

표 2. 시험체 배합설계표

구분	W/C (%)	공기량 (%)	슬럼프 (cm)	단위량 (kg/cm ³)					28일강도
				물	시멘트	잔골재	굵은골재	혼화제	
본체	48.5	5.5	18	182	316	840	903	0.98	261

2.3 실험체 제작

본 실험에 사용된 시험체의 대상모델은 내진 1등급으로 설계된 수원시 하갈교의 교각을 대상으로 하여 1/3.4 축소모델인 원형충진단면으로 설계하였으며, 내진, 중저진, 비내진설계에 따라 소성 힌지 구간의 띠철근은 30mm, 45mm, 125mm 간격으로 배근되었다. 그림 1.은 비내진, 중내진, 내진 설계 교각의 단면을 보여주고 있으며 표 3.은 각 시험체의 단면설계특성을 나타내었다.

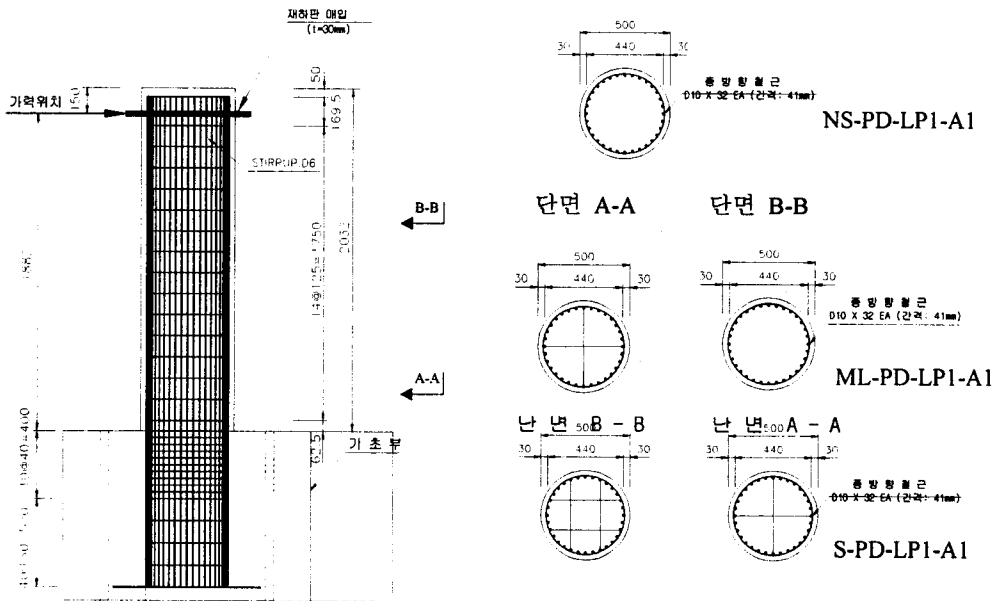


그림 1. 시험체 단면도 (단위:mm)

본 실험에 사용된 철근콘크리트 기둥은 기초부분과 본체부분으로 나누어져 있으며, 실제 교량구조물의 축척계수(scale factor)를 만족하도록 설계 제작되었다.

표 3. 실험체 단면설계특성

구분	단면상세		
	비내진	중내진	내진

주 철근	D10-32EA	D10-32EA	D10-32EA
띠 철근	D6	D6	D6
띠철근간격 (Hinge)	전구간:12.5cm	소성구간: 4.5cm 비소성구간: 5.5cm	소성구간: 3cm 비소성구간: 4.5cm
기둥 직경	D=50cm	D=50cm	D=50cm
기둥 높이	1,882cm	1,882cm	1,882cm
소성 Hinge	-	L=50cm	L=25cm

2.4 실험 하중 및 장치

Pseudo-Dynamic 실험을 위하여 사하중을 고려한 축방향력 재하를 위하여 Oil Jack은 압축력이 변하므로 특수제작한 100tonf 유압실린더를 이용하여 실험체가 거동하는 동안 축방향력이 초기설정 값의 $\pm 5\%$ 이내로 변하도록 제작하였고, 횡방향의 수평하중은 그림 2와 같이 1,000kN Hydraulic Actuator를 이용하여 재하하였다.

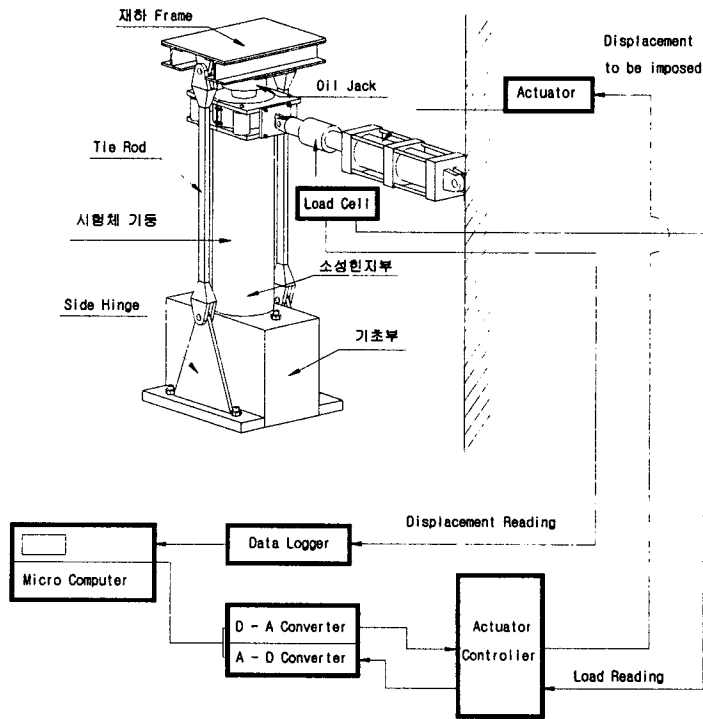


그림 2. 시험체 실험개요

축하중은 대상구조물의 사하중을 근거로 하여 축소모델에 상응하는 $0.1f_{ck}A_g$ 의 43.07tonf를 가하였으며 수평하중은 PGA 값이 0.2g인 국내인공지진파를 이용하여 PGA값에 따른 하중형태를 축척계수를 고려하여 0.154g, 0.22g, 0.3g, 0.4g, 0.5g, 0.6g, 0.7g, 0.8g, 0.9g로 설정하여 실험을 수행하였으며 Pseudo-Dynamic Program을 이용하여 하중과 변위를 제어하고 수치적분 방법으로 Explicit Newmark Method를 이용하였으며, 아래의 표 4.는 Explicit Newmark Method의 알고리즘을 보여주고 있다.

표 4. Newmark Method Algorithm은

Step1 : INPUT Excitation f_{i+1}

Step2 : Calculate Displacement Response $d_{i+1} = d_i + \Delta t v_i + \frac{\Delta t^2}{2} a_i$

Step3 : Imposed d_{i+1} on the Test Structure

Step4 : Measure Restoring Forces r_{i+1} from the Test Structure

Step5 : Compute $a_{i+1} = \left[\frac{m + \Delta t}{2} c \right]^{-1} \left[f_{i+1} - r_{i+1} - c v_i - \frac{\Delta t}{2} c a_i \right]$

Step6 : Set $i=i+1$

Step7 : Goto Step1

입력되는 지진데이터는 한국도로공사에서 작성된 형태I(진앙과 관측지가 비교적 가까운 경우)을 사용하였으며, 토질층은 암반 또는 경질의 토층이고 지속시간은 24초이다. 그림 3.은 축척계수가 고려된 지진데이터를 보여주고 있다.

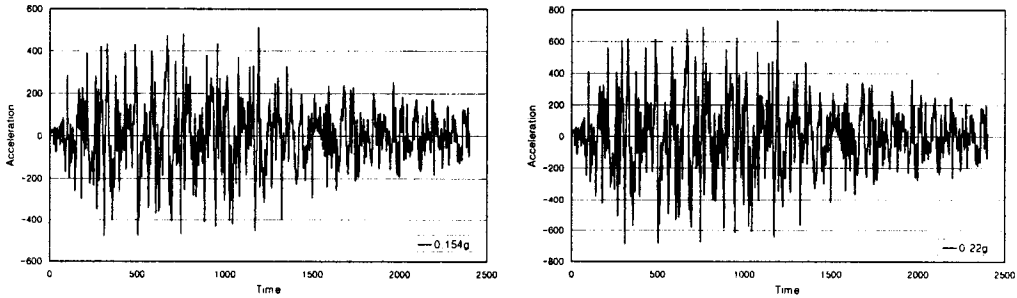


그림 3. 입력지진데이터

2.5 실험계측

2.5.1 하중·변위 및 철근변형률 측정

Hydraulic Actuator의 재하에 의해 발생하는 횡방향 변위를 측정하기 위해 Actuator 반대편과 기둥 중간에 LVDT를 각각 1개를 설치하였으며, 또한 예상치 못한 하중재하 직각방향으로의 변위와 기초부의 이동에 대하여 LVDT를 각각 1개씩 그림 4.와 같이 설치하였다.

소성현저 구간에서의 철근변형 거동을 파악하기 위하여 그림 6.과 같이 내진설계 시험체의 주철근에는 8개, 비내진설계 시험체에는 6개의 Strain Gauge를 부착하고, 띠철근에는 Actuator 가력방향 및 직각방향에 Strain Gauge를 설치하여 철근변형을 파악하였다.

2.5.2 곡률측정

기둥의 곡률은 기둥 저면에서부터 높이 70cm 구간에 수평하중재하 방향과 동일하게 하여 기둥의 양쪽면에 Clip Gauge를 4개씩 각각 설치하여 Actuator 하중재하시 곡률을 측정하고자 하였다. Clip Gauge는 탄성스프링동판에 4개의 Strain Gauge의 회로도를 Wheatston Bridge로 형성시켜 제작하

였으며, 동적변형률측정장비를 이용하여 변형률을 측정하였다.

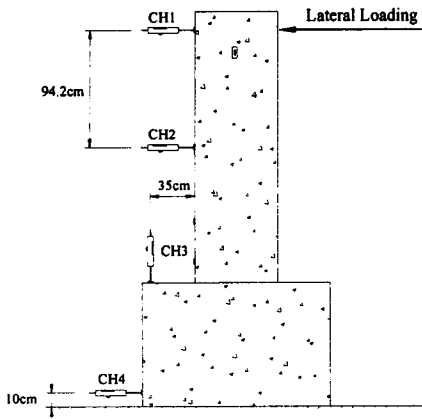


그림 4. LVDT 설치도

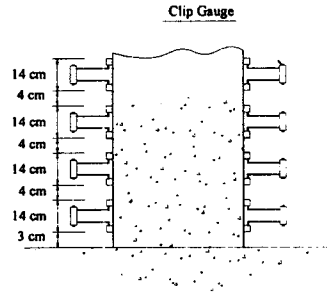


그림 5. Clip Gauge 위치도

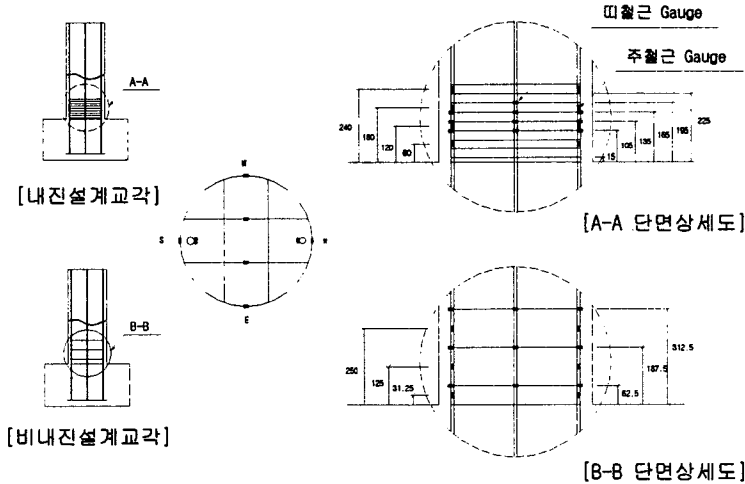
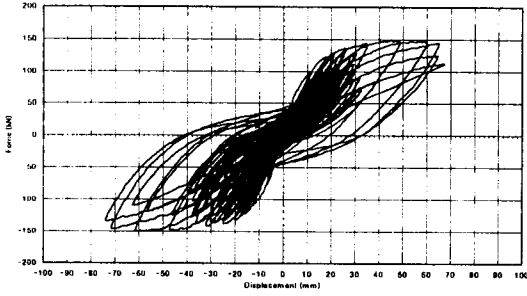


그림 6. Strain Gauge 부착위치도

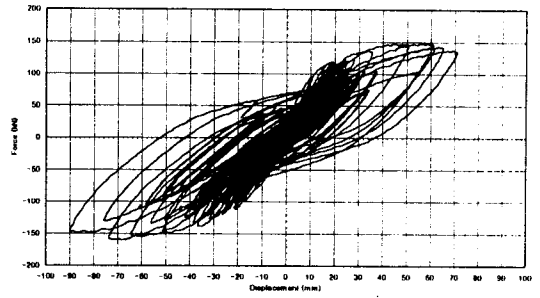
3. 실험결과

3.1 하중-이력곡선

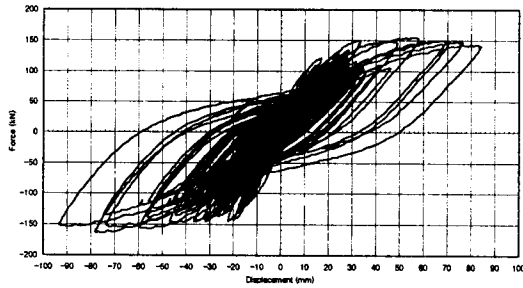
본 실험에서 하중-이력곡선의 결과는 그림.7과 같으며 PGA 값을 단계적으로 증가하여 실험한 결과 0.154g에서 0.5g까지는 모든 실험체가 대체로 선형적인 거동을 보이다 비내진실험체는 0.8g에서 파괴가 되었으나 중내진실험체는 1.0g에서 파괴되었으며, 내진실험체는 1.0g 이상의 값에서 견디었다.



(a) NS-PD-LP1-A1



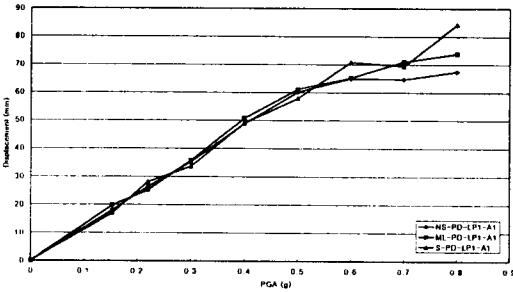
(b) ML-PD-LP1-A1



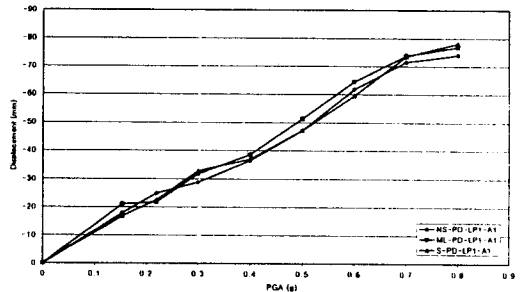
(c) S-PD-LP1-A1

그림 7. 시험체의 하중이력곡선

3.2 하중-변위 포락곡선



(a) Actuator Push Direction



(b) Actuator Pull Direction

그림 8. 하중-변위 포락곡선

4. 결론

본 연구는 경기도 수원시 하갈교를 대상으로 하여 1/3.4 축소모델로 단일주 형식의 교각 실험체로 총 18本를 제작하여 Pilot Test와 Monotonic Test 및 비내진, 중내진, 내진실험체 각 1本씩을 Pseudo-Dynamic Test로 실험을 수행하였으며, 현재 나머지 실험체는 실험이 진행중에 있다.

① PGA 값을 단계적으로 증가하여 실험한 결과 0.154g에서 0.5g까지는 모든 실험체가 대체로 선형적인 거동을 보이다 비내진실험체는 0.8g에서 파괴가 되었으나 중내진실험체는 1.0g에서 파괴되었으며, 내진실험체는 1.0g 이상의 값에서 견디었다.

② 현재까지의 실험으로 비내진설계된 RC 교각도 국내 인공지진에 대해 어느 정도의 연성을 갖고 있는 것으로 판단된다.

5. 감사의 글

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

6. 참고문헌

1. 건설교통부(1996), "도로교 표준시방서"
2. 정영수, 한기훈, 이강균(1999), "준정적 실험에 의한 중공원형 콘크리트 교각의 소성응답 연구", 한국지진공학회 춘계학술발표회
3. 정영수, 한기훈, 이강균(1999), "원형중공 콘크리트 교각의 내진성능에 대한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 봄학술발표회
4. Pui-Shum B. Shing and Stephen A. Mahin(1983), "Experimental Error Propagation in Pseudo-Dynamic Testing", Report No. UCB/EERC-83/12
5. Christopher R. Thewalt and Stephen A. Mahin(1987), "Hybrid Solution Techniques for Generalized Pseudo-Dynamic Testing", Report No. UCB/EERC-87/09
6. Pui-shum B. Shing and Stephen A. Mahin(1984), "Pseudo-Dynamic Test Method for Seismic Performance Evaluation: Theory and Implementation", Report No. UCB/EERC-84/01
7. "相似則を考慮したイブリッド地震應答實驗手法に關する考察", 土木學會論文集 No.507/I-30,1995. 1

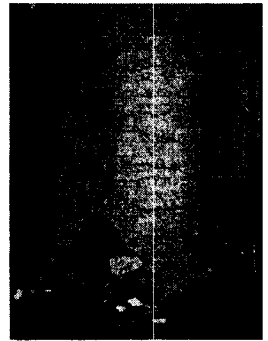
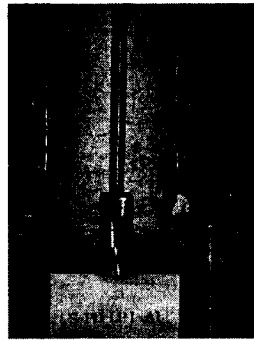
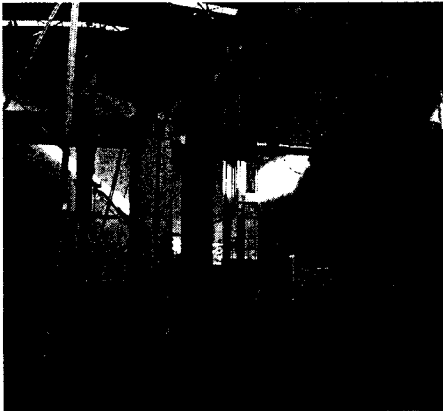


사진 1. 실험체 Setup 및 파괴모습