

# 원형중공 콘크리트 교각의 내진성능에 대한 실험적 연구

## Experimental Research for Seismic Performance of Circular Hollow R.C. Bridge Pier

한 기 훈<sup>1)</sup>

Han, Gi Hoon

이 강 균<sup>2)</sup>

Lee, Kang Kyun

정 영 수<sup>3)</sup>

Chung, Young Soo

---

### ABSTRACT

Because of relatively heavy dead weight of concrete itself and unavoidable heat of massive concrete in bridge piers, circular hollow columns are widely used in Korean highway bridges. Since the occurrence of 1995 Kobe earthquake, there have been much concerns about seismic design for various infrastructures, inclusive of bridge structures. It is, however, understood that there are not much research works for nonlinear behavior of circular hollow columns subjected to earthquake motions.

The ultimate of this experimental research is to investigate nonlinear behavior of circular hollow reinforced concrete bridge piers under the quasi-static cyclic load, and then to enhance their ductility by strengthening the plastic hinge region with glassfiber sheets. It is concluded from quasi-static tests for 7 bridge piers that energy dissipation capacity and curvatures for a given displacement ductility factor  $\mu = \frac{\Delta}{\Delta_y}$  are about 20% higher for the seismically designed columns and about 70% higher for the retrofitted piers than the nonseismically designed columns in a conventional way.

---

#### 1. 서 론

최근 중공단면 교각이 구조물의 자중, 사용재료의 경감 및 수화열 억제를 위하여 경제적 및 구조적인 측면에서 고속도로 교량 및 기타 교량에서 널리 설계·시공되어지고 있다. 그러나, 국내·외적으로 중공단면 교각의 지진에 대한 연구가 미흡한 실정에 있으므로 중공단면 교각의 지진에 대한 거동특성의 연구·해석이 요구되어 왔다. 더욱이 비탄성해석을 통한 교량교각의 연성거동능력을 파악하거나 지반운동에 대한 교량의 경제성 및 안전성 확보를 위하여 동적거동에 관한 실험적 연구가 절실히 요구되는 실정이다.

본 연구는 경제·구조적인 특성에서 설계·시공된 중공단면의 교각에 대하여 준정적 실험을 통하여

---

1) 중앙대학교 토목공학과 석사과정

2) 중앙대학교 토목공학과 석사

3) 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수

지진에 대한 비탄성 거동 및 연성거동 능력을 실험적으로 조사하고, 콘크리트 교각의 연성능력을 향상시키기 위한 유리섬유보강 효과를 파악하여 내진성능을 평가하고자 한다.

## 2. 연구내용

대상모델은 국내의 내진 1등급으로 설계된 수원시의 하갈교의 충전단면 교각을 대상으로 하여, 1/3.4 축소모델로 같은 단면적을 갖는 표 1과 같은 원형 중공단면을 구하여 시험체를 제작하였다. 주요실험변수로는 축하중, 심부횡방향 철근비, 하중 Pattern을 선택하여 실험하였다. 표 1은 대상모델과 축소모델의 비교상세이다.

### 2.1 재료특성

#### 2.1.1 철근 특성

축소모델에서의 철근은 KS D 3504에 의한 SD40의 D10의 상용철근을 주철근으로, 횡방향철근 경우 열처리된 #6 Wire를 사용하였으며 KS B 0802에 따라 각각의 3개의 시편에 대한 인장실험을 하였으며 실험결과는 그림 1과 같다. 그림 1에 보여진 바와 같이 3개의 D10 경우 변형률 0.0020와 0.0293에 각각 항복점과 극한점을, 열처리된 3개의 #6 Wire 경우 변형률 0.0016와 0.0210에 각각 항복점과 극한점을 구하였다.

#### 2.1.2 콘크리트 특성

대상 교량구조물 기둥의 콘크리트의 설계기준강도가  $240 \text{ kg/cm}^2$ 으로 설계되었으며 본 연구에서 사용된 콘크리트 배합 및  $\phi 15 \times 30 \text{ cm}$ 로 제작된 공시체의 28일 압축강도는 표 1과 같다. 시멘트는 Type I portland cement, 굵은 골재는 13mm 쇄석을 사용하여 콘크리트가 원활히 타설되도록 하였다. KS F 2405에 따른 공시체의 평균압축강도 실험결과는 약  $242 \text{ kg/cm}^2$ 로서 설계기준강도에 유사한 값을 얻었다.

## 3. 시험체 상세

Quasi-Static 실험에 사용된 총 7기의 시험체는 경기도지역의 실존 RC구조물인 하갈교를 모델로 축소하였으며 축소비율은 시험체의 해석 및 시공이 용이하도록 1/3.4를 이용하였다. 그림 2에서는 시험체의 내진적용 및 미적용 시험체의 설계상세를 나타내고 있으며 표 3에 시험체의 재원을 나타내었다. 실험변수로는 내진설계적용여부에 따른 띠철근비, 축방향 하중증가에 따른 축방향력 및 피로거동에 따른 하중재하 형태, 유리섬유보강으로 분류하였다. 한편, 내진설계 미적용 시험체에 대한 유리섬유의 보강은 그림 3과 같이 내진설계시의 주요부분인 plastic hinge region인 기초상단에서 기둥외경(D)을 기준으로 D/2 높이까지는 유리섬유 4장, D/2 이상 D 높이까지는 3장을 보강하였으며 응력집중을 막기 위하여 Taper구간을 두었다.

## 4. 실험 하중 및 장치

Quasi-Static 실험을 위하여 사하중을 고려한 축방향력은 100ton Oil Jack을 이용하여 일정한 값으로 유지하였고, 횡방향의 반복수평하중 그림 4와 같이 재하하였다. 수평하중은 1,000kN Hydraulic Actuator를 이용하는 변위제어방식을 채택하였다. 기둥시험체의 항복변위  $\Delta_y$ 는 탄성해석을 통하여 이론적인 휨능력에 상응하는 횡방향 하중의 75%값을 하중제어방식으로 1회 반복하여 그 때의 측정된

중방향철근의 변형률 평균값을 이용하여 변형률이 0.002에 해당되는 변위값  $\Delta_y$ 를 기동시험체의 항복 변위로 계산하여 실험을 수행하였다.

횡방향 하중형태는 실험을 통하여 얻은  $\Delta_y$ 에 대하여 그림 5와 같이 3 Cycles, 10 Cycles의 2가지 형태의 피로거동으로 반복재하하였다. 축방향 하중 1은 대상구조물의 사하중를 근거로 하여 축소모델에 상응하는  $0.10 \sigma_{tk} A_g$ 의 43.07 ton을 가하였으며, 축방향 하중 2는 축방향 하중의 증가에 따른 기동의 거동을 조사하기 위하여  $0.15 \sigma_{tk} A_g$ 에 해당되는 70.6 ton을 작용시키었다.

## 5. 실험 계획

### 5.1 하중·변위 및 철근변형률 측정

횡방향 하중은 반력벽에 1,000kN Hydraulic Actuator (Stroke :  $\pm 250$  mm)를 설치하여 변위제어방식으로 재하하였으며, 시험체의 횡방향변위를 측정하기 Actuator 반대편에 기초상면에서 17cm, 49cm, 109cm, 그리고 185 cm 위치에 LVDT 4개를 설치하였다. 또한 예상치 못한 하중재하 직각방향으로의 변위 및 기초부의 이동·휨변위발생에 대하여 LVDT CH5~7를 그림 6와 같이 설치하였다. 그리고, Plastic Hinge Zone에서의 철근변형 거동을 파악하기 위하여 그림 7과 같이 기동시험체의 중방향철근에 4개의 strain gauge를 부착하고, 횡방향철근에 2개의 strain gauge를 부착하였다.

### 5.2 곡률측정

기동의 곡률측정을 위하여 그림 8과 같이 기동 저면에서부터 높이 50 cm 구간에 횡방향 하중재하 방향과 동일하게 하여 기동양쪽면에 Clip gauge를 3개씩 각각 설치하였다..

## 6. 실험결과

### 6.1 하중-이력곡선 및 하중-변위 포락곡선

본 실험에서 하중-이력곡선의 결과는 그림 9와 같으며 내진설계로 제작된 시험체가 내진설계 미적용 시험체에 대하여 Load Pattern I, II에 대하여 변위연성도가 약 1~2단계가 더 우수하게 나타났으며, 유리섬유보강시 변위연성도가 내진설계의 효과를 초월하였다. 또한, 하중-이력곡선에 대한 포락곡선은 그림 10과 같으며 내진설계적용 시험체가 적용하지 않은 시험체에 대하여 최대하중 및 변위에 대하여 우수하게 나타나고 있다.

### 6.2 에너지 흡수 및 누적곡률

Cycle별 에너지 흡수는 그림 11과 같으며 내진설계 미적용시험체에 대하여 적용한 시험체의 에너지 흡수능력이 우수하게 나타났으며, Load Pattern II의 경우 Load Pattern I의 경우보다 약 50% 에너지 흡수능력의 저하되었다. 그리고, Clip gauge를 통하여 측정된 누적곡률은 그림 12와 같으며 각 위치별 상태가 선형적 변화일 때 탄성거동을 나타내며 비선형적 변화에서는 비탄성 거동상태를 나타내고 있다. 결과에서 내진설계에 의하여 Plastic Hinge 구간이 보강된 시험체에서 곡률변화가 안정적으로 분포되어 에너지를 보다 폭넓게 분산·흡수하는 우수한 효과가 나타났으나 보강시험체의 경우 시공현장을 고려하여 의도적으로 발생시킨 기동부와 기초부의 Cold Joint부의 파괴가 발생되어 곡률변화율이 매우 작게 나타났으며 이는 파괴시까지도 거의 탄성거동을 하는 것으로 추정되었다.

### 6.4 등가점성감쇄비 및 강도저하

이력특성에 대한 진동감쇠의 큰 요인인 에너지 소비에 대하여 감쇠성을 Jacobsen의 등가점성감쇠비로 나타낸 결과에서는 그림 13과 같이 변위연성률에 따라서 축방향 철근이 보강된 내진설계의 경우가 내진설계되지 않은 축방향력이 작은 경우 보다 우수하게 나타났다.

초기 극한하중( $F_y$ )에 대한 각 Cycle별 하중( $F$ )의 정규화된 값인 강도감소에 대한 결과는 그림 14와 같으며 내진설계 적용 시험체의 경우가 내진설계를 적용하지 않은 시험체에 비하여 다소 기울기가 완만하였다. 이는 내진적용 시험체의 강도저하의 크기가 내진미적용 시험체보다 적게 발생되고 있음을 나타내는 것이다. 변위연성률에 강도감소율에서는 각각의 반복하중단계별 강도저하에서 내진설계 및 보강시험체의 경우가 내진설계가 적용되지 않은 경우보다 1~2단계가 더 우수하게 나타났다.

## 6.5 하중-변형률

종방향 철근 및 띠철근에 부착된 Strain Gauge에 대하여 각 시험체의  $P-\epsilon$  관계도를 그림 15에 도시하였다. 대체적으로 종방향 철근의 경우, 내진설계 및 보강시험체의 경우 변위연성도 2~3에서 항복 파괴되는 반면, 내진설계 미적용 시험체의 경우에는 변위연성도 1~2에서 항복파괴되었으며, 띠철근 역시 내진설계 및 보강시험체가 내진 미적용 시험체보다 낮은 변형상태를 유지하였다.

## 7. 결 론

본 연구는 경기도 수원시 하갈교를 대상으로 하여, 1/3.4 축소모델로 단일주형식의 교각 시험체를 제작하여 Quasi-Static Test로 실험을 수행하였으며, 내진설계 미적용 시험체의 내진성능 향상을 위한 보강법으로 유리섬유복합재로 교각을 보강하였다. 실험연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- ① 내진설계에 의한 횡방향 철근이 보강된 경우 Hollow R.C기둥은 변위 연성도 5~6 기대가능.
- ② 국내의 내진설계를 적용하지 않은 시험체도 적절한 변위연성도를 확보.
- ③ 유리섬유보강을 통하여 변위 연성도가 내진설계 시험체의 연성도값 이상으로 향상.
- ④ 축방향하중비  $P/\sigma_{ck}A_g$ 가 0.15인 시험체보다 축방향하중비  $P/\sigma_{ck}A_g$ 가 0.10인 시험체의 경우에 에너지 흡수능력이 보다 향상.

## 9. 감사의 글

본 연구는 한국 지진공학센터(과제번호 : 97K3-1301-04-02-3)의 지원을 받아 수행되었으며, 시험체 제작 및 실험계측에 풍림본드(주) 및 현대건설 기술연구소에서 지원을 받아 수행되었다.

## 10. 참고문헌

1. 건설교통부, “도로교 표준시방서”, 1996
2. 한국지반공학회, “진동 및 내진설계”, 구미서관, 1997
3. 한국전산구조공학회, “구조물의 내진설계”, 한국전산구조공학회 기술강습회 자료집, 교재 15-1, 1997
4. 장승필, 김재관, “중약진 지역에서의 내진설계 개념의 발전동향”, 한국지진공학회 학술발표회, 1999
5. 정영수, 한기훈, 이강권, “원형 콘크리트 교각의 내진성능에 대한 준정적 실험”, 한국콘크리트 학회 학술발표회, 1998
6. Newmark, Rosenblueth, “Fundamental of Earthquake Engineering”, PrenticeHall, 1971
7. Y.H.Chai, M.J.N.Priestley, Frieder Seible, “Seismic Retrofit of Circular Bridge Columns for Enhanced Flexural Performance”, ACI Structural Journal V.88, No. 5, 9-10, 1991, pp572~584

표 1 Details of the Prototype and Specimen

	Prototype	Specimen
Longitudinal Reinforcement Steel	40@D29 (28.6 mm)	32 @D10 (9.53 mm)
Confinement Steel	D19 (19.1 mm)	#6 wire (4.8 mm)
Confinement Steel Space	Plastic Hinge Zone : 100 mm Another Zone : 150 mm	Plastic Hinge Zone : 18mm AnotherZone : 23mm
Column Diameter	170 cm	60 cm
Column Height	6.40 m	1.882 m
Axial Load	497.9 t	43.07 ton, 70.6 ton

표 2 Mix Proportions and Compressive Strength of Specimen

Max. Size of Coarse Agg.	13mm	
Slump	12cm	
W/C	46.1	
Fine Coarse Agg. Ratio	49%	
Unit Weigh (kgf/m <sup>3</sup> )	Water	169
	Cement	
	Fine Coarse Agg.	375
	Coarse Agg.	866
A.F.	1.88	
Compressive Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	242	

표 3 Details of Specimen

Classification	Nomenclature	Confinement Steel Space (cm)	Axial Force (ton)	Load Pattern	
Without Glassfiber Retrofit	Seismic Design	CH1P1L1	1.8	43.07	I
		CH1P1L2	1.8	43.07	II
		CH1P2L1	1.8	70.60	I
	Non-Seismic Design	CH2P1L1	2.3	43.07	I
		CH2P1L2	2.3	43.07	II
		CH2P1L-R	2.3	43.07	I

\*註 : CH1 - Seismic Design  
CH2 - Nonseismic Design  
P - Axial Load (43.07ton)  
P2 - Axial Load (70.60ton)  
L1 - 3 Cyclic Load Pattern  
L2 - 10 Cyclic Load Pattern

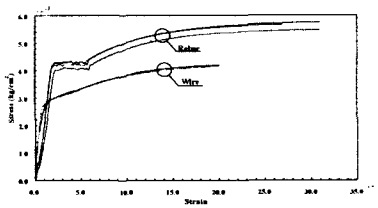
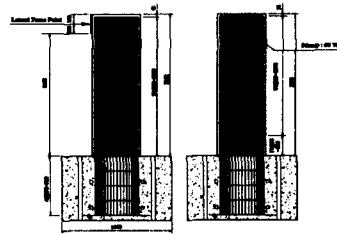


그림 1 Stress-Strain Curve of Reinforcement Steels



(a) Non-Seismic Design (b) Seismic Design  
그림 2 Reinforcement Details of Pier Specimen

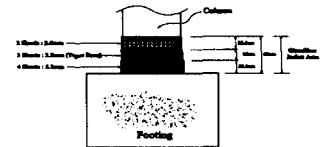


그림 3 Glassfiber Retrofit Specimen

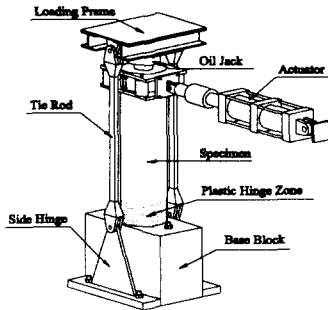
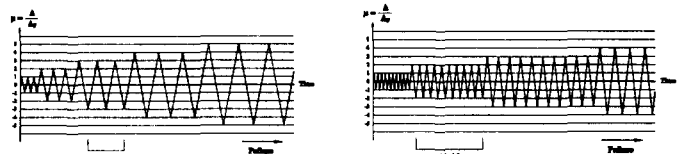


그림 4 Test Schematic Diagram



(a) Load Pattern I (b) Load Pattern II

그림 5 Cyclic Load Pattern

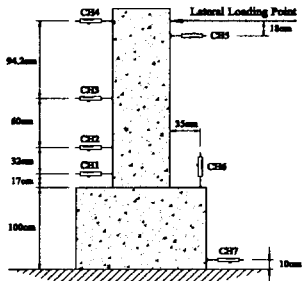


그림 6 LVDT Setup

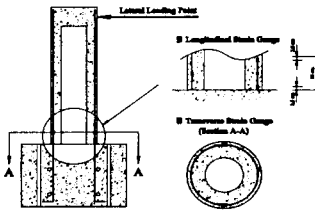


그림 7 Steel Gauge Setup

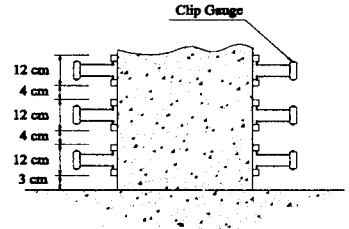


그림 8 Clip Gauge Setup

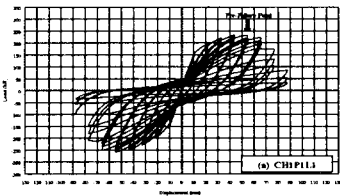


그림 9. Force - Displacement Hysteretic Curve

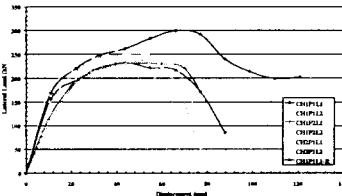


그림 10. Force-Displacement Envelope Curve

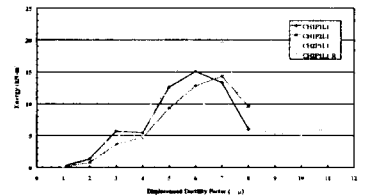


그림 11. Energy Absorption Curve

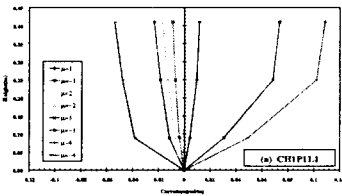


그림 12. Cumulative Curvature

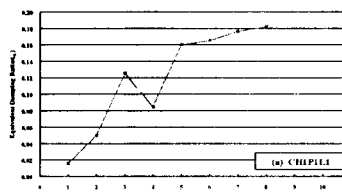


그림 13. Equivalent Viscous Damping Ratio

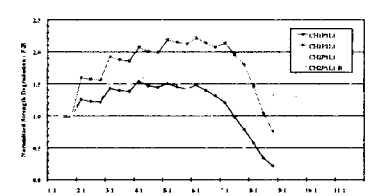


그림 14. Normalized Strength Degradation

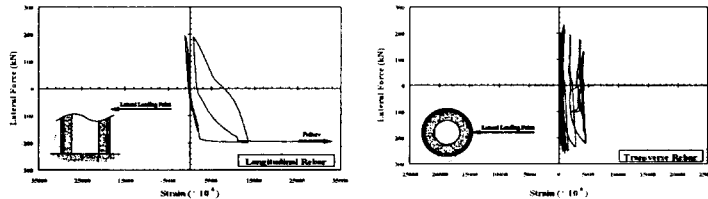


그림 15 Lateral Load-Strain Curve (CH1P1L1)