

단일주 원형 철근콘크리트 교각의 내진거동에 관한 준정적 실험

Quasi-Static Tests for Seismic Performance of Circular RC Bridge Piers

정 영 수* 이 강 균** 한 기 훈** 박 종 협***
Chung, Young Soo Lee, Kang Kyun Han, Gi Hoon Park, Jong Heob

국문요약

본 연구는 철도, 도시고속도로 및 고속도로 교량의 교각으로 많이 이용되고 있는 철근콘크리트기둥의 내진성능 평가에 관한 quasi-static 실험으로서, 사용된 실험변수는 축하중, 내진설계유무에 따른 띠철근량, 변위제어 하중형태 등을 채택하였다. RC 기둥시험체는 수원에 위치한 하갈교의 교각을 1/3.4의 축소모델로 하여 내진설계된 단면과 내진설계되지 않은 시험체를 각각 4개씩 총 8개를 제작하였으며 소성힌지구간에서의 띠철근의 간격은 2.2cm 및 4.4cm이다. 실험변수에 따른 내진 및 비내진 시험체의 내진성능 검토를 위하여 충전콘크리트 교각의 하중-변위 이력특성, 연성능력, 강도감소, 에너지 흡수능력, 등가점성계수 등을 실험적으로 분석조사하였다.

'96년 개정된 도로교시방서의 RC기둥에 관한 내진설계기준은 AASHTO(1992)와 유사한 것으로서 중·약지진 지역으로 구분되는 국내의 실정에는 다소 과다설계로 판단된다. 실험결과 비내진설계된 콘크리트 교각도 어느 정도의 연성능력을 발휘한 것으로 조사되었으나 추가의 충분한 실험연구가 요구된다. 그러나 비내진설계교각도 적절한 내진보강방안을 강구한다면 우수한 내진성능을 발휘할 수 있으리라 판단된다.

주요어 : 원형교각, 연성률, 하중이력, 에너지흡수, 강도감소, 준정적 실험, 등가점성 감쇄비

ABSTRACT

Eight RC bridge piers have been made on a 1/3.4 scale model and have been tested in a quasi-static cyclic load so as to investigate their seismic performance. The ultimate objective of this experimental study is to investigate the hysteretic behavior of reinforced concrete piers, which have been widely used for urban transportation facilities in Korea. Important test parameters are hoop ratio, axial load, load pattern, and etc. And nonlinear behaviors of test columns have been evaluated through their yield and ultimate strength, energy dissipation, ductility and load-deflection characteristics under quasi-static cyclic loads.

From the quasi-static tests on 8 bridge piers, it is concluded that energy dissipation, ultimate strength and curvature for a given displacement factor $\mu = \Delta/\Delta_y$, are higher for the seismically designed columns than for the nonseismically designed columns.

Key words : quasi-static test, RC pier, ductility, energy dissipation, curvature

1. 서 론

1995년에 발생했던 일본의 Kobe 지진참사

이후, 지진에 대하여 대체적으로 안전지대라고 생각되었던 우리 나라에서도 1978년 10월 7일에 발생한 홍성지진, 1982년 2월 14일에 발생한 사리원지진, 최근의 1996년의 진도 약 4.0 이상의 경주, 영월지진 등의 연이은 중·소규모의 지진발생으로 한반도에서도 예기치 못한 지진에 대한 대비책의 필요성이 부각되고 있다.

* 정회원 · 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수

** 중앙대학교 토목공학과 석사과정

*** 정회원 · 중앙대학교 토목공학과 박사과정

본 논문에 대한 토의를 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

수많은 구조물의 파괴를 일으켰던 1971년 San Fernando earthquake 이후 각국의 내진 설계기법은 새로운 변화를 가져왔다. 지진에 의한 교각 파괴의 위험을 적게 하기 위해 교각의 축방향철근이 항복점을 초월하더라도 임의의 변형범위 내에서는 파괴되지 않는 연성을 부여하는 설계의 필요성을 인식하였다. 교량내진설계시 탄성 영역만을 고려하여 설계하는 것은 과도설계를 초래하여 비경제적일 수 있으므로, 구조물에 아주 심한 파손이 일어나지 않는다면 어느 정도의 극한 하중을 견디고, 연성적인 거동을 할 수 있도록 설계된다면 붕괴는 피할 수 있을 것이다. 실제 여러 나라에서 교량과 빌딩에 대한 경제적인 내진설계를 위해 탄성해석으로 얻은 설계지진력을 응답수정계수로 나누거나 비탄성 설계응답스펙트럼을 사용하는 방법 등이 제시되고 있다.

특히, 우리 나라와 같이 중진 또는 약진지역에는 강진지역의 경우에 개발된 내진설계 개념을 검증없이 도입하는 것은 무리가 있다. 따라서, 국내에 적합한 합리적이고 체계적인 내진 설계의 기본 개념을 설정하기 위해서는 중진 혹은 약진 지역에서 예상되는 구조물의 거동 특성의 분석이 필요하리라 판단된다. 본 연구에서는 교각의 비탄성거동, 연성설계를 위한 기존 교각의 연성물을 판단하기 위해서 축소모형 교각시험편의 축방향하중, 횡방향철근간격, 수평하중 pattern을 달리 하여 단일주형식의 콘크리트 교각의 연성능력, 에너지소산능력

등을 파악하였다.

2. 실험 내용

대상모델은 1996년 도로교 표준시방서의 내진 1등급으로 설계된 수원시의 하갈교의 교각을 대상으로 하여, 1/3.4 축소모델로 시험체를 제작하였다. 사용된 띠철근은 겹이음하여 시공되었으며, 상부사하중의 크기, 횡방향철근간격, 하중반복횟수에 따른 영향을 파악하기 위해 실험변수로서 축하중, 심부횡방향 철근비, 하중 pattern을 선택하여 실험을 수행하였다. Table 1은 대상모델과 축소모델의 비교상세이다.

2.1 재료특성

축소모델에서의 철근은 KS D 3504에 의한 SD40의 D10의 상용철근을 주철근으로, 횡방향철근은 열처리된 #6 Wire를 사용하였으며 KS B 0802에 따라 각각의 3개의 시험편에 대한 인장실험을 수행하여 대략적으로 주철근은 $4,000\text{kg/cm}^2$, Wire는 $3,000\text{kg/cm}^2$ 의 항복강도를 얻었다.

대상 교량은 기둥의 콘크리트 설계기준강도가 240kg/cm^2 으로 설계되었으며 본 연구에서 사용된 콘크리트 배합 및 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 로 제작된 공시체의 28일 압축강도는 Table 2와 같다. KS F 2405에 따른 공시체의 압축강도 실험결과, 공시체의 평균압축강도가 약 242kg/cm^2 로서 설계기준강도에 유사한 값을 얻었다.

Table 1 Detail of prototype and specimen

		Prototype	Specimen	Remark
Longitudinal Reinforcement Steel		40@D29 (28.6mm)	32 @D10 (9.53mm)	$\rho=1.1\%$
Confinement Steel	Diameter	D19 (19.1mm)	#6 wire (4.8mm)	
	Steel Space	Plastic Hinge Zone : 100mm Another Zone : 150mm	Plastic Hinge Zone : 22mm Another Zone : 44mm	
Column	Diameter	170cm	50cm	
	Height	640cm	188cm	
Axial Load		497.9ton	43.06ton, 70.60ton	

Table 2 Mix proportions and compressive strength of specimen

Max. Size of Coarse Agg.	Slump p	W/C (%)	Fine Coarse Agg. Ratio	Unit Weight (kgf/m ³)					Compressive Strength (kgf/cm ²)
				Water	Cement	Fine Coarse Agg.	Coarse Agg.	A.E.	
13mm	12cm	46	49%	169	375	866	937	1.88	242

2.2 시험체

원형단면의 원형철근배열 기둥에 대해서 Whitney가 제안한 식을 이용하여 P-M상관도를 구하였으며, 본 시험체의 항복변위 Δ_y 를 계산하였다.⁽¹⁵⁾ 시험체의 단면형상은 Fig. 1과 같다.

일반적으로 기둥의 유효강성은 축방향하중비와 종방향철근비에 영향을 받는다. 종방향철근비 A_{st}/A_g 와 축방향하중비 $P_{axial}/(A_g\sigma_{ck})$ 에 의한 유효강성의 영향을 종방향철근비 1~4% 그리고 축방향 하중비 5~35%까지 Fig. 2에서 나타내었다. 유효단면 관성모멘트 I_e 는 단면 관성모멘트 I_g 값의 35~60% 사이에서 감

소한다.⁽¹⁶⁾ 본 연구에서는 종방향철근비 1.1%와 축방향 하중비 9%, 15%를 사용하였으며, 시험체의 이론적인 Δ_y 는 축방향하중 43.06ton, 70.60ton일 때 각각 $\Delta_{y1}=0.88cm$, $\Delta_{y2}=0.99cm$ 로 계산되었다.

본 실험에서 이용한 시험체는 경기도지역의 실존 RC구조물인 하갈교를 축소된 모델을 이용하였으며, 시험체의 단면은 지름이 50cm, 유효높이 47cm, 전단지간 185cm, 전단지간비 $a/d=3.94$ 인 원형충진 RC기둥이다. Table 3에 시험체 상세를 나타내었으며, 실험변수로는 띠철근비, 축방향력 및 하중재하 형태이다. 띠철근간격은 내진설계 유무에 따라 2.2cm, 4.4cm의 두 가지 경우로 하였다. 본 실험에서는 대상구조물의 상부사하중의 $1/(3.4)^2$ 로 축소된 축하중 43.06ton을 재하하였고 이 때의 축방향 압축응력은 $21.94kg/cm^2$ 이 예상된다. 축방향하중을 변수로 하여 $P/\sigma_{ck}A_g=0.15$ 로 하는 경우 축방향 압축응력은 $36.01kg/cm^2$ 가 예상된다. 다음 Fig. 3은 시험체의 제원 및 배근도를 나타내고 있다.

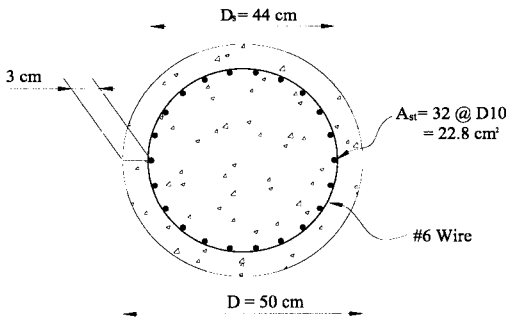


Fig. 1 Column section units

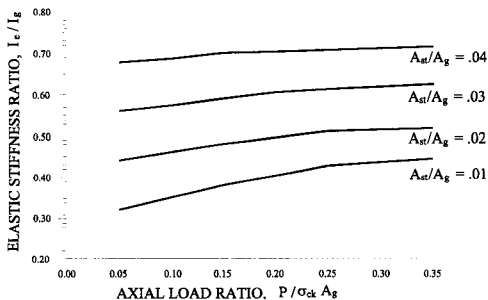


Fig. 2 Effective stiffness of cracked RC circular column

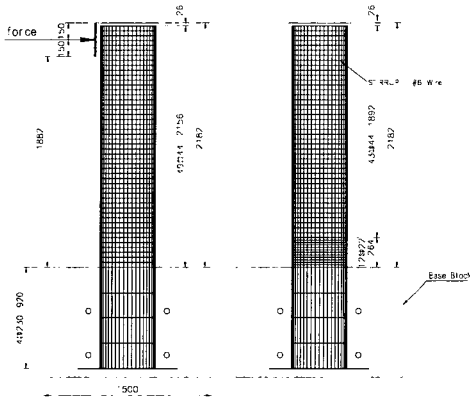
2.3 실험하중 및 장치

하중재하는 축방향력을 일정한 값으로 유지한 상태에서 기둥의 상부에 횡방향의 반복하중을 재하하였으며, 횡방향하중은 변위제어 방식을 채택하였다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 횡방향하중을 재하하는 경우 기둥의 하부에서 축방향력의 편심으로 인한 P- Δ 효과가 발생할 수 있다. 그러나, 이 값은 횡방향변위 Δ_y 및 횡방향하중에 의해 발생하는 기둥 하부의 극한휨모멘트의 약 2.8 %정도로써 본 연구에서는 고려하지 않았다.

Table 3 Important test parameter

Classification	Specimen Designation	Transverse Steel Space	Axial Load	Load Pattern
Seismic design	CS1P1L1	2.2cm	43.06t	L1
	CS1P1L2	2.2cm	43.06t	L2
	CS1P2L1	2.2cm	70.60t	L1
	CS1P2L2	2.2cm	70.60t	L2
Non-Seismic design	CS2P1L1	4.4cm	43.06t	L1
	CS2P1L2	4.4cm	43.06t	L2
	CS2P2L1	4.4cm	70.60t	L1
	CS2P2L2	4.4cm	70.60t	L2

* 주 : CS1-Seismic Design CS2-Non-Seismic Design P1-Axial Force 1(43.06ton)
 P2-Axial Force 2(70.60ton) L1-3 Cyclic Loads L2-10 Cyclic Loads



(a) Non-seismic design (b) Seismic design

Fig. 3. Detail of specimens

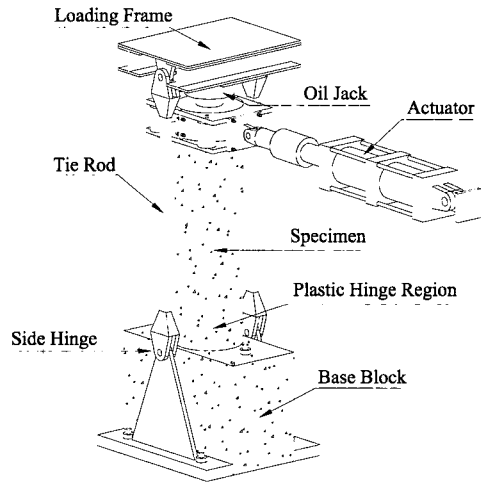


Fig. 4 Test schematic diagram

축방향하중은 Fig. 4와 같이 기둥상부의 oil jack을 통하여 가력하였다. 여기서, 축방향하중 1은 대상구조물의 사하중을 근거로 하여 축소 모델에 상응하는 43.06ton을 가하였고, 축방향하중 2는 축방향하중의 증가에 따른 기둥의 거동을 알아 보기 위해 $0.15 \sigma_{ck} A_g$ 에 해당하는 70.60ton을 가하였다. 그리고, 실험적인 항복변위 Δ_y 는 Fig. 5와 같이 이론적인 휨능력에 상응하는 수평하중의 75%값을 1회 반복하여 그때의 중방향철근의 변형률을 측정하여 변형률이 0.002가 될 때의 기둥시험체의 변위를 Δ_y 로 결정하였다. 수평하중 pattern은 Fig. 6

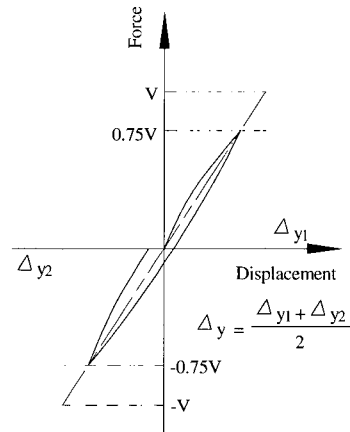


Fig. 5 Experimental definition of yield displacement

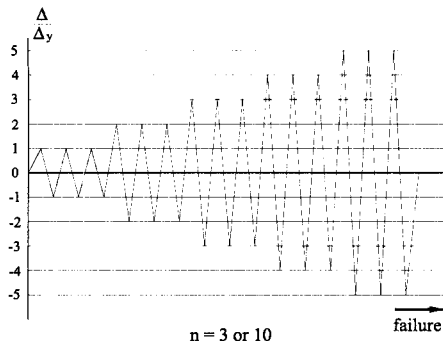


Fig. 6 Cyclic load pattern

과 같이 변위제어방식을 이용하여 반복변위 하중을 가하였다. 여기서 L1은 반복횟수를 3회로 하였고, L2는 반복횟수를 10회로 구분하여 하중을 가하였다.

본 실험은 시험체의 plastic hinge의 위치와 길이 plastic hinge zone내의 소성변형에 의한 곡률과 변위연성능력을 파악하고자 기둥시험체의 종방향철근에 4개의 strain gauge를 부착하고, 횡방향철근에 3~4개의 strain gauge를 부착하였다. 그리고 기둥시험체의 수평하중 재

하부위의 변위값과 기둥 높이별 변위값을 측정하기 위하여 LVDT 4개를 설치하였다. 그리고 기초는 완전고정으로 설계하였으나 예상하지 못한 변위가 발생할 우려가 있기에 기초 저면과 기초 상면에 LVDT를 각각 설치하였다. 또한 예상 plastic hinge zone내에 기둥 시험체의 곡률을 측정하기 위해 6개의 clip gauge를 제작하여 설치하였다. 자세한 gauge plan은 Fig. 7에 도시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 파괴정의 및 변위연성도

시험체의 파괴는 각 시험체별 최대횡방향중의 0.75배의 하중단계를 파괴상태로 생각하고, 변위연성도를 $\mu = \Delta_f / \Delta_y$ 로 정의하였다. 여기서 Δ_f 는 파괴상태의 횡방향변위이고, Δ_y 는 종방향철근의 변형률이 0.002일 때의 횡방향변위이다.

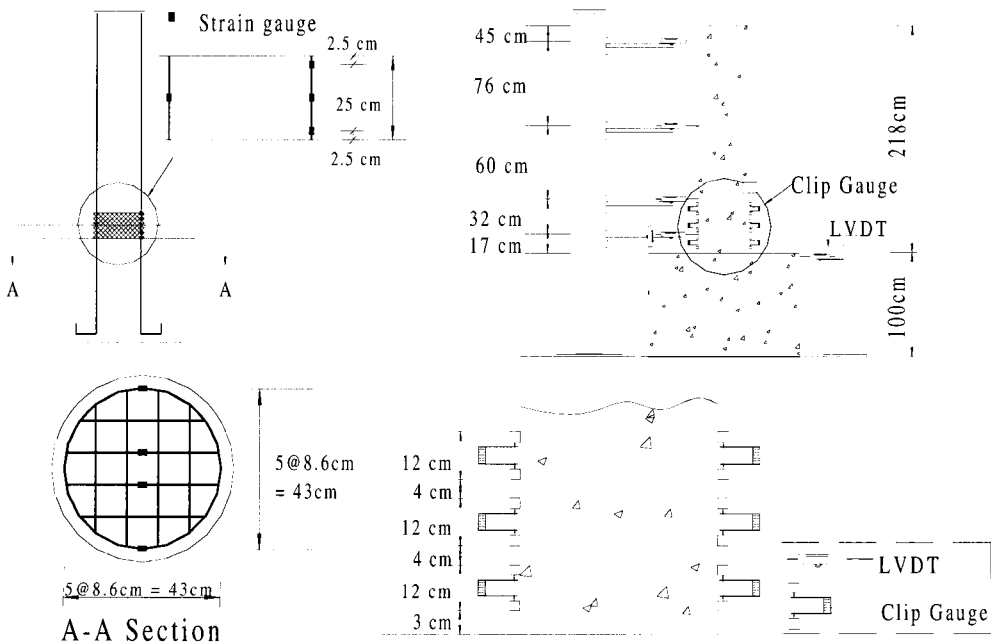


Fig. 7 Gauge plan

일반적인 시험체의 파괴형상은 먼저 수평 균열이 발생하고 다음으로 수평균열 주위로 미세한 수직균열이 발생한다. 상부 변위가 더욱 커지면서 최초에 발생한 수평균열이 사방향으로 발전하게 되며 이 단계에서부터 수직균열이 발생한다. 이후 하중이 반복되면서 소성힌지부에서 피복콘크리트의 탈락이 시작된다. 피복 콘크리트가 탈락이 된 이후에도 상당한 변형능력을 보이다가 노출된 철근의 좌굴과 인장이 반복되면서 이후 주철근이 파단에 이른다. 육안관찰결과 전반적인 소성힌지부는 기둥하부에서 약 13-15cm 가 일반적이었다. 소성힌지부의 길이는 축방향 하중이 큰 시험체에서 더 크게 나타나고 있다. 또한 횡방향균열은 소성힌지부를 중심으로 발생하여 하중단계가 높아짐에 따라 발전하여 최고 100cm 높이까지 발생하였다. 모든 시험체들이 Fig. 8과 같은 비슷한 양상으로 파괴되었다.

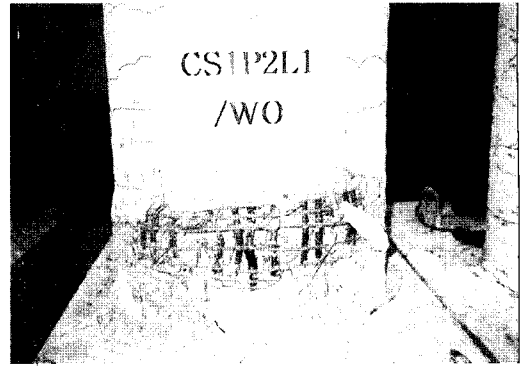


Fig. 8 Failure of specimen

3.2 하중-이력곡선

내진설계 적용 시험체 즉, CS1계열의 시험체가 CS2계열의 시험체보다 같은 하중조건에서 변위연성도가 약 1~2단계가 더 우수하였다. load pattern에 따라 L2에서 변위연성도가 한 단계 떨어졌다. 각 시험체별 하중-이력 곡선을 Fig. 9에 도시하였다.

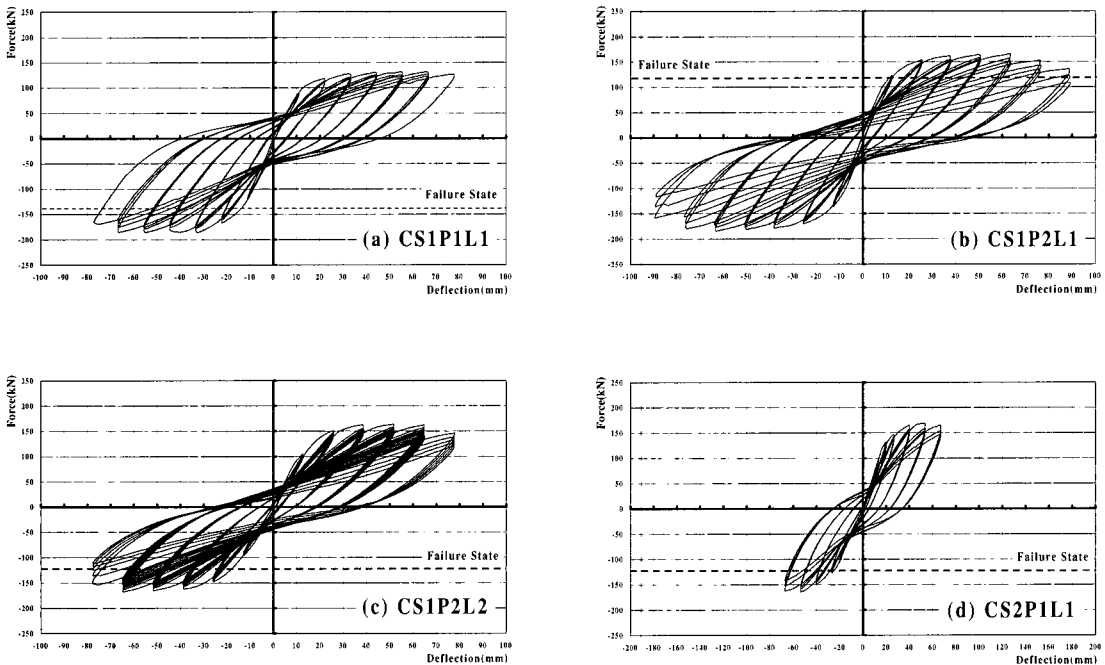


Fig. 9 Hysteretic curve

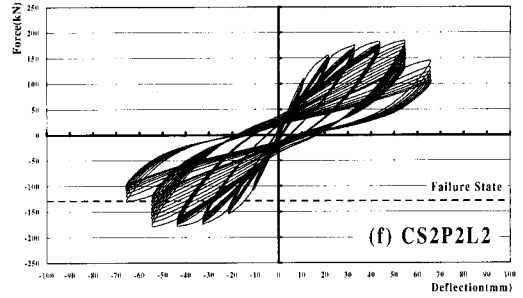
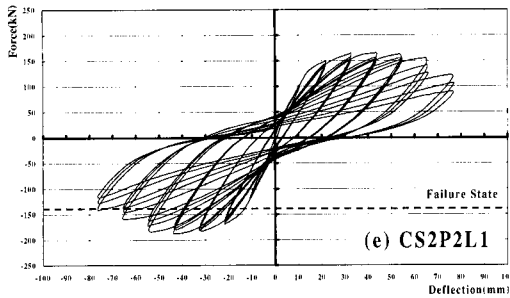


Fig. 9 Hysteretic curve (continue)

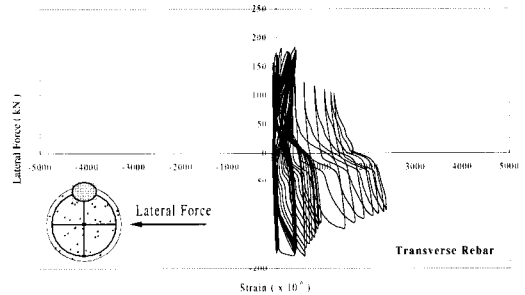
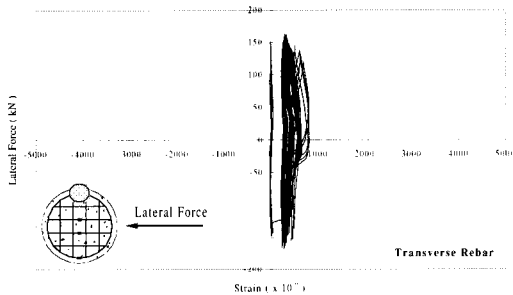
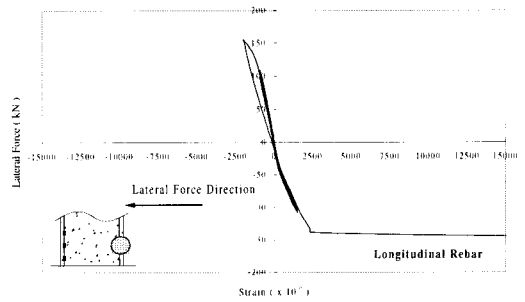
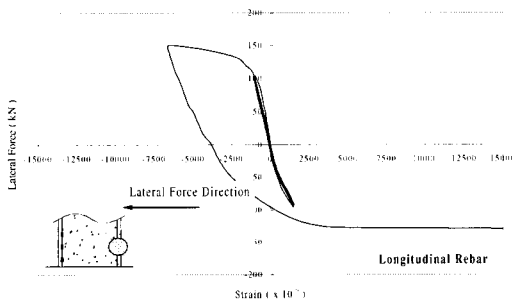
3.3 하중-변형률 응답

주철근 및 횡방향철근의 하중-변형률 응답을 Fig. 10에서 나타내었다. 주철근변형률이 변위 연성도 $\mu=1$ 일 때 변형률이 0.002에 도달함으로써 추정된 항복횡방향변위 Δ_y 가 타당함을 알 수 있었다. 그리고, 횡방향철근의 변형률 조사시 내진설계된 시험체의 횡방향철근 변형률이 내진설계된 시험체의 횡방향철근 변형률에 비해 항복이 빠름을 알 수 있었다. 그러나 추후연구에는 하중작용방향의 횡방향철근에 strain gauge 부착이 바람직하다고 판단된다.

3.4 기둥의 곡률 및 강도저하

식 (1)에 의한 기둥의 곡률은 기둥 저면에서 부터 높이 50cm 구간에 횡방향하중재하 방향과 동일하게 하여 기둥양쪽면에 clip gauge를 3개씩 각각 설치하였다. clip gauge는 탄성스프링동판에 4개의 strain gauge로 구성되며, 4개의 strain gauge로 wheatstone bridge를 형성하여 제작하였다.

$$\phi = \frac{(\Delta_2 - \Delta_1)}{Lx} \quad (1)$$



(a) CS1P2L2

(b) CS2P2L2

Fig. 10 Lateral force-strain hysteresis

여기서, Δ_1 , Δ_2 은 기둥 양쪽면에 설치된 clip gauge의 변형량, x 는 두 clip gauge 사이의 수평거리이고 L 은 gauge length를 나타낸다. 교각의 소성힌지부의 곡률값은 같은 높이의 3쌍의 clip gauge의 변형값을 이용하여 식 (1)에 의하여 통해 곡률을 구할 수 있다. clip gauge의 측정값을 Fig. 11와 같이 평가하여 계산한 곡률을 Fig. 12에서 보여주었다.

하중이 커짐에 따라 측정위치상의 곡률값이 상대적으로 커지게 되는 지점이 소성힌지점으로 평가할 수 있으며, 이 결과로 시험체의 소성힌지점을 기둥하부에서 약 25cm이하로 판단되었다. 실험수행 중, 시험체의 콘크리트 파복파괴로 인한 clip gauge의 탈락으로 곡률측정이 균열발생시점까지만 수행되었다.

각 변위연성률단계에서 횡방향하중 반복에 의한 강도감소를 조사하기 위하여, 1cycle에서의 최대횡방향하중에 대한 마지막 반복 최대 횡방향하중의 비로 강도감소율을 알아보았다. 강도감소는 축방향하중, 횡방향하중반복횟수, 띠철근간격에 비례하여 강도감소율이 커지는 추세였다. 각 시험체별 변위연성률에 따른 강도감소율을 Table 4에 정리하였다.

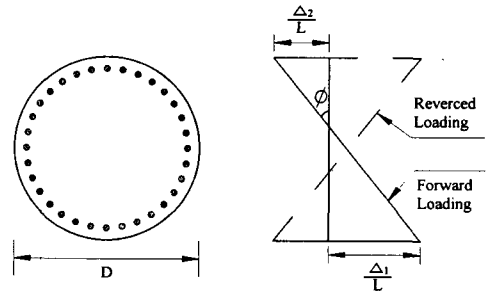
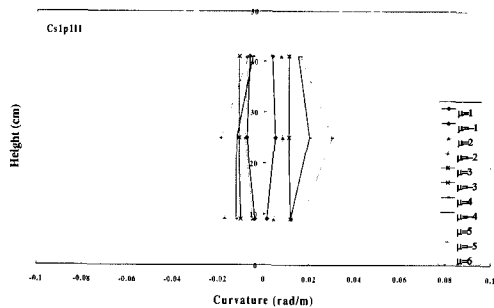
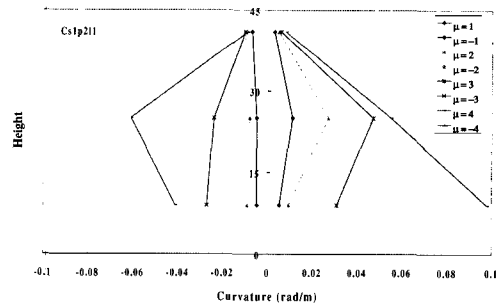


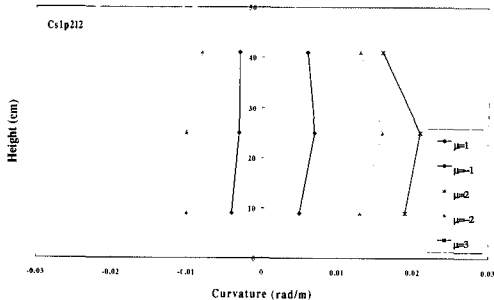
Fig. 11 Curvature of Section



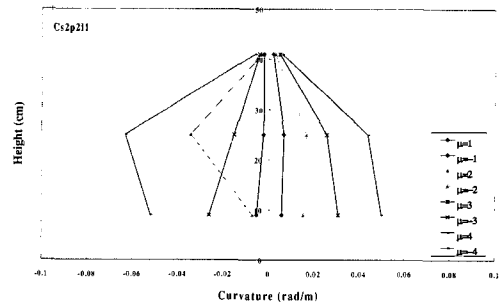
(a) CS1P1L1



(b) CS1P2L1



(c) CS1P2L2



(d) CS2P2L1

Fig. 12 Curvature on height of specimen

Table 4 Strength deterioration on displacement ductility factor (F_{min}/F_{max})

Displacement Ductility Factor (μ)	Specimens					
	CS1P1L1	CS1P2L1	CS2P1L1	CS2P2L1	CS1P2L2	CS2P2L2
1	0.983	0.975	0.990	0.994	0.953	0.907
2	0.946	0.964	0.966	0.963	0.916	0.948
3	0.946	0.946	0.956	0.954	0.935	0.916
4	0.945	0.993	0.931	0.902	0.907	0.918
5	0.941	0.909	0.884	0.947	0.901	0.702
6	0.913	0.877		0.874	0.835	0.733
7		0.763		0.806		

3.5 에너지흡수능력 및 등가점성비

교량에서 가장 일반적인 형태의 damping과 에너지 소산은 하중-이력 응답의 hysteresis damping이다. 철근콘크리트 기둥의 복원력특성을 Fig. 13과 같이 나타내면 cycle당 에너지 흡수능력(에너지소비량)은 loop가 포함하는 면적 A_h 로 나타낸다. A_h 는 최대변위의 크기에 의해 값이 변화하고, 부재의 특성을 정수적으로 나타내는 것은 불합리하므로 일반적으로는 재하시에 부재에 축적된 에너지 A_e 를 갖고, 이들을 편이적으로 파괴를 수반한 진동계에서 점성감쇠정수 c 와 같게 평가하는 것으로 다음 식 (2)로 나타내는 등가점성감쇠비 ξ_{eq} 가 에너지흡수능력 또는 감쇠성을 나타내는 지표로 이용된다.⁽¹⁷⁾

$$c_{eq} = \xi_{eq} C_{cr} \quad \xi_{eq} = \frac{A_h}{2\pi V_m \Delta_m} = \frac{A_h}{2\pi A_e} \quad (2)$$

Fig. 13에서 V_m 과 Δ_m 은 최대평균 변위와 하중을 나타낸다. 시험체별로 에너지 흡수 및 등가점성감쇠비 ξ_{eq} 를 변위 연성도에 따라 Fig. 14와 15에 각각 도시하였다. 등가점성감쇠비는 전단철근의 간격과 축방향압축력의 비와 관계가 있다. 전단철근의 간격이 좁고 축방향압축력비 $P/\sigma_{ck}A_g$ 가 0.15인 시험체 CS1P2L1의 등가점성감쇠비가 우수하였다. 그리고 기둥의 에너지흡수능력은 띠철근 간격의 영향을 가장 많이 받는 것으로 판단되었다. 변위연성률에 따른 시험체별 에너지흡수능력과 등가점성비를 Table 5와 Table 6에 정리하였다.

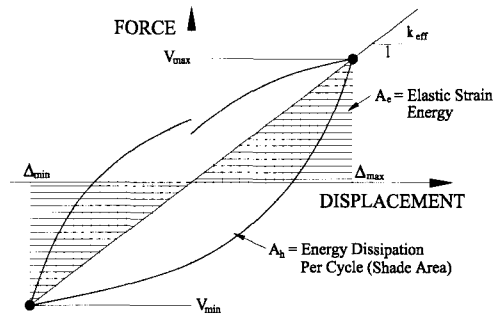


Fig. 13 Equal maximum potential energy response

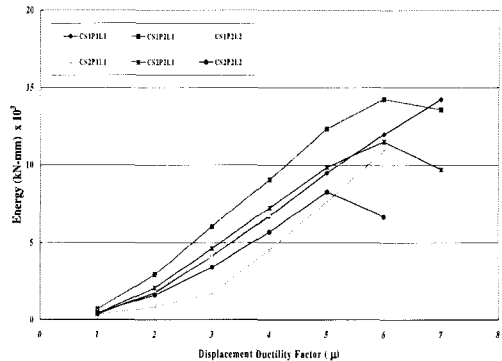


Fig. 14 Absorption of energy

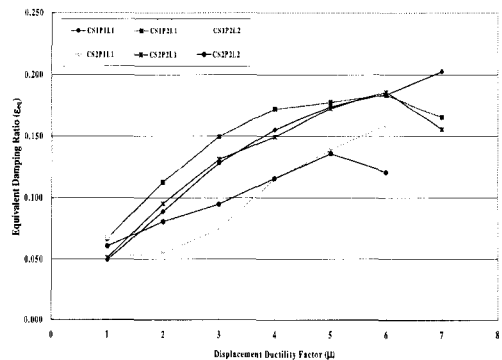


Fig. 15 Equivalent viscous damping ratio

Table 5 Absorption of energy on displacement

μ	Specimen					
	CS1P1L1	CS1P2L1	CS1P2L2	CS2P1L1	CS2P2L1	CS2P2L2
1	366.9	692.3	537.9	356.9	385.6	453.7
2	1763.3	2928.1	1852.2	822.4	2080.7	1617.2
3	4138.6	6029.5	4159.2	1709.5	4611.0	3414.9
4	6692.7	9049.3	6786.6	4543.4	7222.8	5684.2
5	9472.8	12320.0	9757.0	7612.2	9835.8	8237.2
6	11965.5	14235.3	10975.3	10908.0	11501.9	6641.8
7	14225.4	13583.3			9708.5	

Table 6 Equivalent damping ratio on ductility factor (kN · mm) displacement ductility factor (ϵ_{eq})

μ	Specimen					
	CS1P1L1	CS1P2L1	CS1P2L2	CS2P1L1	CS2P2L1	CS2P2L2
1	0.049	0.067	0.068	0.051	0.051	0.061
2	0.089	0.113	0.076	0.055	0.095	0.080
3	0.128	0.150	0.109	0.074	0.131	0.095
4	0.155	0.172	0.127	0.115	0.150	0.116
5	0.174	0.177	0.145	0.139	0.173	0.136
6	0.184	0.183	0.151	0.159	0.186	0.121
7	0.203	0.165			0.156	

4. 결론 및 추후연구과제

본 연구는 경기도 수원시 하갈교를 대상으로 하여, 1/3.4 축소모델로 단일주형식의 교각 시험체를 제작하여 내진성능을 검토하고자 quasi-static test 실험을 수행하였다. 본 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- ① RC 기둥의 소성힌지부는 기둥의 지름이하의 위치에서 일어나며 정확한 위치는 기둥에 따라 다소 차이가 있으나 대부분 기둥 지름의 1/2이하의 위치에서 발생하였다.
- ② 내진설계 적용 시험체의 변위연성률을 약 6정도 그리고 내진설계 미적용 시험체의 변위연성률 약 5정도로 조사되었으며 내진설계 미적용 시험체도 국내지진규모를 감안할 때 다소의 변위연성도를 확보하고 있는 것으로 판단되었다.
- ③ 횡방향철근의 심부구속량에 따라 변위연성도에서 다소 차이가 있었다. 효과적으로

변위연성도를 높이기 위해서는 횡방향철근의 간격을 좁게하는 것이 효과적이었다.

- ④ 에너지흡수능력은 띠철근의 간격이 좁을수록 증가하였고, 각 하중단계별로 볼 때 축방향하중비 $P/\sigma_{ck}A_g$ 가 0.09인 시험체보다 축방향하중비 $P/\sigma_{ck}A_g$ 가 0.15인 시험체의 경우가 에너지흡수능력이 증가하였다.

내진설계가 적용되기 전에 건설된 교각의 지진에 대한 내진성능의 검증을 위하여 pseudo-dynamic 실험을 할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 '97 건설기술연구개발사업(과제번호 : 97003-4)의 지원을 받아 수행되었으며, 시험체 제작 및 실험에 지원을 해주신 풍림본드(주) 및 현대건설 기술연구소에 감사드립니다.

참 고 문 헌

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 발전 동향", 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 217-222.
5. 이강균, 한기훈, 정영수, 이대형, 황의승, "철근콘크리트 교각의 내진성능에 관한 준정적 실험", 1998년 가을학술발표회논문집, 한국콘크리트학회, 제 10권 2호, pp. 615-620.
6. 한기훈, 이강균, 정영수, "원형중공 콘크리트 교각의 내진성능에 대한 실험적 연구", 1999년 봄학술발표회논문집, 한국콘크리트학회, 제 11권 1호, pp. 671-676.
7. 정영수, 이강균, 한기훈, 이대형, "원형 중공 콘크리트 교각의 내진성능에 대한 준정적 실험", 한국지진공학회논문집, 제3권 제2호, 1999. 6.
8. Newmark, R., *Fundamental of Earthquake Engineering*, Prentice Hall, 1971.
9. Benson, H. T., *Principle of Vibration*, Oxford University Press, 1996.
10. Chai, Y. H., Priestley, M. J. N., and Seible, F., "Seismic retrofit of circular bridge columns for enhanced flexural performance," *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 5, 1991. 9-10, pp. 572-584.
11. Ghee, A. B., Priestley, M. J. N., and Paulay, T., "Seismic shear strength of circular reinforced concrete," *ACI Structural Journal*, Vol. 86, 1989. 1-2, pp. 45-59.
12. Priestley, M. J. N. and Park, R., "Strength and ductility of concrete bridge columns under seismic loading," *ACI Structural Journal*, Vol. 84, 1987. 1-2, pp. 61-76.
13. Zahn, F. A., Priestley, M. J. N., and Park, R., "Flexural strength and ductility of circular hollow reinforced concrete columns without confinement on inside face," *ACI Structural Journal*, Vol. 87, No. 2, March-April, 1990, pp. 156-166.
14. Moehle, J. P., "Strength of slab-column edge connections," *ACI Structural Journal*, Vol. 85-511, November-December, 1988, pp. 89-98.
15. Park, R. and Paulay, T., *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons, Inc. pp. 118-194.
16. Priestley, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M., *Seismic design and retrofit of bridges*, John Wiley & Sons, Inc.
17. Wong, Y. L., Paulay, T., and Priestly, M. J. N., "Response of circular reinforced concrete columns to multi-directional seismic attack", *ACI Structural Journal*, Vol. 90, No. 2, March-April, 1993, pp. 180-191.
18. 幸在賢二, 大塚久哲, 星隈順一, 佐佐木協一, 新保弘, "RC橋脚の變形性能向上に關する實驗的研究", 土木學會 論文集, Vol. 37, No. 578, 1997. 11, pp. 43-56.
19. 瀧本和志, 川島一彦, "基部で曲げ破壊する RC橋脚の エネルギー-吸收容量定式化", 土木學會 論文集, Vol. 30, No. 532, 1996. 2, pp. 5-13.