반복 횡하중을 받는 철근콘크리트 교각의 내진성능에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Seismic Performance of Reinforced Concrete Bridge Columns under Lateral Cyclic Load

이 진 옥* 윤 현 도* 황 선 경** 류 효 진*** 나 홍 성*** 이 경 준***
Lee, Chin-Ok Yun, Hyun-Do Hwang, Sun-Kyoung Ryu, Hyo-Jin Na, Hong-Seong Lee, Kyoung-Joon

ABSTRACT

This experimental investigation was conducted to examine the seismic performance of reinforced concrete bridge columns. The columns were subjected to a constant axial load and a cyclic horizontal load-inducing reversed bending moment. The variables studied in this research are the volumetric ratio of transverse reinforcement (ρ_s = 0.96, 1.44 per cent) and axial load ratio (0.05, 0.1, 0.2 P/P_o). Test results show that bridge columns with 50 per cent higher amounts of transverse reinforcement than that required by seismic provisions of ACI 318-02 showed ductile behaviour. For bridge columns with axial load ratio(P/P_o) less than 0.2, the ratio of M_{max} over M_{aci}, nominal moment capacity predicted by ACI 318-02 provisions, is consistently greater than 1 with approximately a 20 percent margin of safty.

1. 서 론

최근의 연이은 국외의 지진 즉, 1995년 일본고베(Kobe)지진, 1999년 터어키 이즈미(Izmit)지진, 2000년 대만 지진(Chi-Chi)지진, 2001년 인도지진 등으로 인하여 지진에 대한 국민적 관심이 고조되고 있으며 이에 국내에서도 내진에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 교량 구조물은 큰 지진이 발생할 경우 다른 구조물에 비해서 잉여력이 부족하므로 어느 한 부분의 요소가 파괴되면 즉시 구조물의 붕괴를 초래하기 때문에 교량의 내진성능을 향상시키기 위한 연구 필요성이 대두되고 있다. 또한 최근 교량이 장주화, 대형화되어 가고 있는 추세에 따라 이와 같은 대형 교량에서 요구되는 부재단면의 축소, 스팬의 장대, 부재응력의 증가에 대응하기 위하여 교량에 사용되는 재료의 고강도화가 요구되고 있으나 이러한 고강도 재료를 사용한 교각에 있어서 재료의 취성적인 특성으로 지진시 유발되는 복잡한 하중상태하에서 교각의 내진성능이 의문시 되고 있다.

본 연구에서는 고강도 콘크리트를 사용한 교량 기둥의 내진성능 연구에 대한 선행연구로서 보통강도 콘크리트를 사용한 교량기둥의 휨거동 및 내진성능을 규명하고자 횡보강근 체적비, 축력비를 실험변수로 총 4개의 시험체에 대한 실험을 수행하여 변수에 따른 교각의 파괴형태, 휨거동, 내진성능을 비교분석하고 규준식의 적용가능성을 검토하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 시험체 계획

시험체는 표 1과 같이 총 4개를 제작하였으며 각 시험체의 하부에는 고정단 효과를 위해 그림 1과 같이

* 정회원, 충남대학교 교수
** 정회원, 우송대학교 강의전담교수
*** 정회원, 충남대학교 대학원

1200mm×700mm×500mm 스터브(Stub)를, 상부에는 횡방향 하중을 가력하기 위해 700mm×400mm×400mm 스터브를 두어 제작하였으며, 기둥 단면은 400mm×400mm×1600mm로 하였다. 전단경간비(h/D)는 콘크리트 교각의 휨파괴를 유도하기 위하여 4.0으로 하였으며, 철근은 그림 1과 같이 배근하였다. 시험체의 상하단 스터브는 기둥부재보다 충분한 강도와 연성을 갖도록 철근으로 충분히 보강하였다. 콘크리트는 350kgf/cm^{2}급으로 하여 레미콘 타설하였으며, 진동다짐기 및 강봉을 사용하여 충분히 다짐을 실시하였다.

표 1 시험체 일람표

Specimen	Transverse reinforcement					Longitudinal Bar			f_{cu} (kgf/cm^2)	$\frac{P}{f_{ck} \cdot A_g}$
	Bar	S (mm)	ρ_s 2) (%)	f_{yh} (kgf/cm^2)	$\frac{\rho_s \cdot f_y}{f_{ck}}$	Bar	f_{yh} (kgf/cm^2)	ρ_f (%)		
NC-S-0.1P	D10	75	0.96	4,222	11.82	16-D16	4,184	2.0	346	0.1
NC-A-0.05P	D10	50	1.44	4,222	17.73	16-D16	4,184	2.0	360	0.05
NC-A-0.1P	D10	50	1.44	4,222	17.73	16-D16	4,184	2.0	343	0.1
NC-A-0.2P	D10	50	1.44	4,222	17.73	16-D16	4,184	2.0	355	0.2

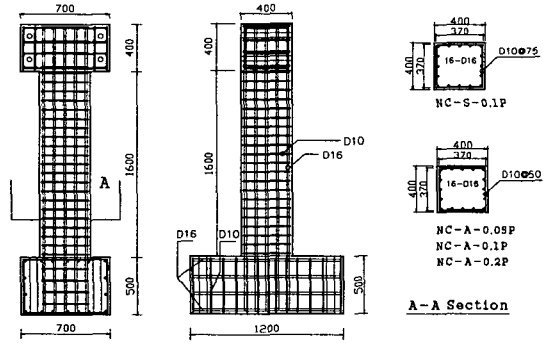


그림 1 시험체 단면상세 (단위 : mm)

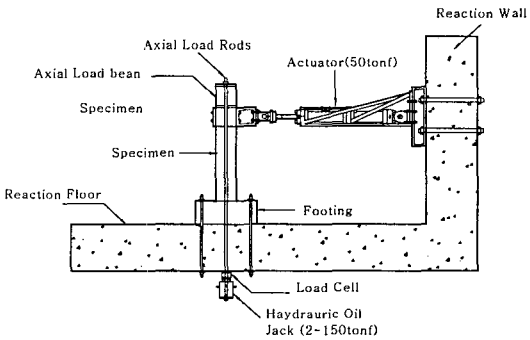


그림 2 시험체 설치상황

재료 실험

시험체 제작에 사용된 콘크리트 조골재의 최대골재치수 19mm, 슬럼프 18cm, 설계기준강도는 350kgf/cm^{2}으로 하였으며, 각 시험체의 실험시 측정된 콘크리트 압축강도는 표 1에 나타내었다. 또한 시험체 제작에 사용된 HD16, HD10 철근의 인장시험 결과는 표 2와 같다.

표 2 철근의 역학적 성질

Type	E_s ($\times 10^6$ kgf/cm^2)	f_y (kgf/cm2)	ε_y ($\times 10$-6)	f_u (kgf/cm2)	ε_u ($\times 10^{-6}$)
HD16	1.899	4,184	0.0022	6,254	0.14204
HD10	1.787	4,220	0.0026	6,241	0.16990

2.3 시험방법

시험체는 그림 2와 같이 수직으로 세워 설치하고 반력판 하부에 설치된 150tonf 용량의 오일잭(2개)과 시험체 상부스터브에 연결된 2개의 35mm 강봉으로 일정축력을 가력하였으며, 횡방향 하중은 반력벽에 설치된 50tonf 용량의 엑츄에이터를 시험체 상부스터브에 고정시켜 그림 3과 같이 가력하였다. 측정장치로는 시험체의 횡변위를 측정하기 위해 횡하중 작용점 높이에 LVDT를, 시험체의 곡률 측정을 위해서 기둥의 양측면에 각각 4개의

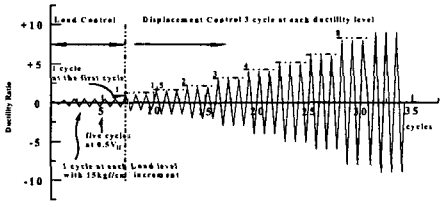


그림 3 변위이력

LVDT를 설치하였다. 또한, 주근 및 횡방향철근의 변형도를 측정하기 위해 Wire Strain Gauge(W.S.G)를 설치하였다.

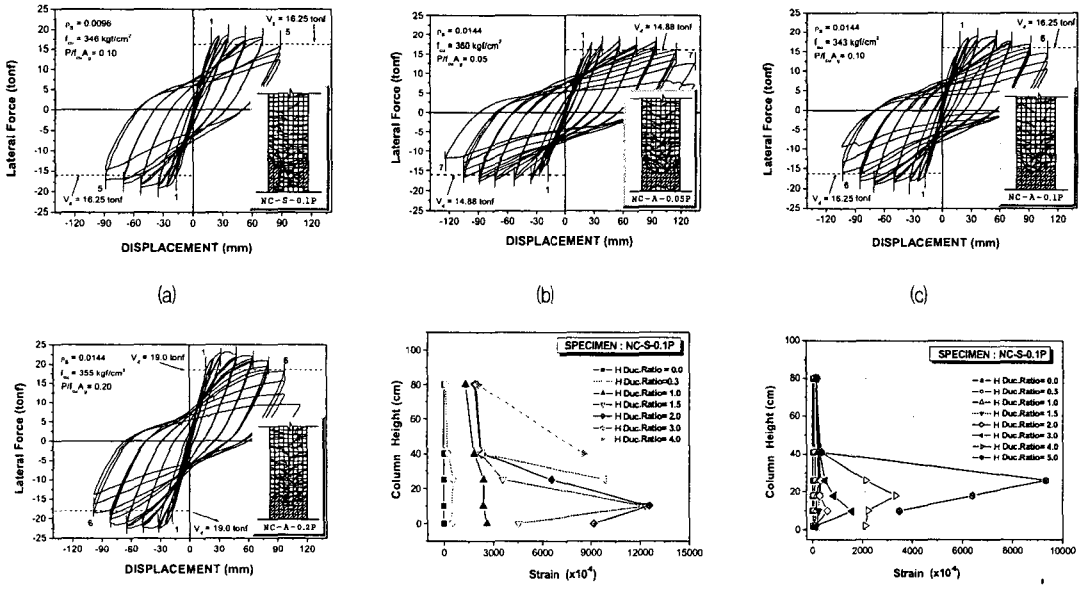
4. 실험결과 및 분석

4.1 균열 및 파괴상황

초기 휨균열은 횡하중 4~5tf에서 발생하였으며 그후 횡하중이 증가함에 따라 휨균열은 인접한 단면으로 더욱 진전되었고 연성비 1에서 전단균열로 발전되었다. 그후 연성비 3에 이르러 전단균열의 깊이가 증가되면서 기둥 우측하부 모서리부분에 수직균열 및 압괴로 인한 피복박리가 시작되었다. 연성비 4에서는 기둥의 모든면에서 피복박리가 급격히 진전되어 주근 및 횡보강근이 노출되었고 연성비 5에서 피복이 완전히 박리되어 횡보강근이 외부로 부풀어오르면서 주근의 좌굴이 시작되었다. 이때 횡하중이 급격히 저하되었으며 연성비 6~7에서 최종 파괴되었다 (그림 4).

4.2 하중-변위 관계

그림 4(a)~(d)는 일정축력 하에서 횡하중을 점증 반복가력하여 얻은 하중-변위 곡선으로 점선으로 표현된 V_{if}는 ACI 규준에 준하여 산정된 휨강도를 기둥의 높이(기둥 하단부에서 횡하중 가력점까지의 거리)로 나눈 계산값이다. 그림에 나타난 바와 같이 규준에 의한 계산값 V_{if}에 대한 각 시험체의 최대내력의 비율이 1.15~1.20 범위로 실험값이 평균 18%크게 나타났다. 횡보강근 체적비에 따른 이력거동를 살펴보면, 체적비가 증가할수록 안정된 내력감소를 보이고 있으며 이는 횡보강근비의 증가로 횡보강근이 주근의 조기좌굴을 억제하고, 주근과 콘크리트 사이의 일체성을 향상시켜 효과적으로 심부콘크리트를 구속시키기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 축력비에 따른 비교에서는 작용 축력비가 작은 NC-A-0.05P 시험체가 다른 시험체에 비해 안정된 이력거동을 보이고 있다.



(a) (b) (c)

(d) (e) 주근의 변형도 (f) 횡보강근의 변형도

그림 4 하중-변위 관계곡선(a~d) 및 철근의 변형도(e, f)

4.3 철근의 변형도

주근의 변형도는 그림 4(e)와 같이 연성비 1에서 항복하고 있으며 연성비가 증가할수록 변형도가 증가하고 있다. 특히, 기둥 하부에서 1.0D(40cm) 떨어진 구간에서 큰 변형도를 보이고 있다. 또한 횡보강근의 변형도는 그림 4(f)와 같이 연성비 4에 이르러 항복에 도달하며 그 후 연성비 5에서 압축을 받는 부분의 콘크리트가 외부로 부풀어오르면서 횡보강근의 변형도가 급격히 증가하면서 주근이 좌굴하였다. 따라서, 철근콘크리트 교각의 연성을 향상시키기 위해서는 주근의 좌굴을 방지하기 위한 횡보강근의 세심한 고려가 요구된다.

4.4 휨 강도 및 변위연성

철근콘크리트 교각의 휨 강도는 표 3에 나타난 바와 같이 이론값 M_{ACI}에 대한 실험값 M_{EXP}의 비율이 1.14~1.24로 규준식이 휨 강도를 안전적으로 평가하고 있으며 횡보강근 체적비에 대한 휨 강도의 차이는 크지 않았고 기둥에 작용하는 축력비가 증가할수록 휨 강도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 한편 교각의 내진성능을 평가하기 위하여 각 변수에 따른 시험체별 변위연성을 비교한 결과 표 3와 같이 횡보강근비를 규준보다 50% 증가시킨 NC-A-0.1P 시험체가 규준에 준하여 배근한 NC-S-1P 시험체보다 15% 증가된 변위연성을 보이고 있으며 축력비에 따른 비교에서는 축력비가 0.05인 NC-A-0.05P 시험체가 다른 시험체에 비해 약 20% 정도 높은 변위연성을 나타내었다.

표 3 휨 강도 및 변위연성지수

Specimen	Displacement(mm)							Displacement ductility		Flexural strength		
	δ_y	δ_{max}			$\delta_{80\%}$			μ_Δ	μ_Δ'	M_{EXP} (tonf.m)	M_{ACI} (tonf.m)	$\frac{M_{EXP}}{M_{ACI}}$
		(+)	(-)	Ave	(+)	(-)	Ave	δ_{max}/δ_y	$\delta_{80\%}/\delta_y$			
NC-S-0.1P	18.3	35.2	32.8	34.04	87.1	87.3	87.2	1.86	4.77	33.37	29.25	1.14
NC-A-0.05P	18.5	56.9	53.3	55.10	123.5	113.2	118.3	2.97	6.39	33.12	26.80	1.24
NC-A-0.1P	17.7	35.7	68.5	52.17	90.1	103.5	96.8	2.94	5.46	34.07	29.25	1.16
NC-A-0.2P	17.5	36.9	35.7	36.30	94.0	97.7	95.8	2.07	5.47	41.68	34.20	1.22

5. 결론

(1) 철근콘크리트 교각 기둥의 하중-변위 관계에서 최대내력은 규준에 의한 계산값 V_{if}보다 평균 18%크게 나타났으며 ACI 규준에 의한 횡보강근 체적비보다 50% 증가시킨 경우 최대내력 이후 보다 안정된 이력거동 양상을 나타내었다.

(2) 기둥 하부에서 1.0D 떨어진 구간에서 주근 및 횡보강근이 큰 변형도를 보이고 있어 철근콘크리트 교각의 연성을 향상시키기 위해서는 주근의 좌굴을 방지하기 위한 횡보강근의 세심한 고려가 요구된다.

(3) 반복하중을 받는 교각의 휨 강도는 ACI 규준식에 의한 이론값 보다 14~24% 증가된 값을 보이고 있어 휨 강도를 안전적으로 평가하는 것으로 나타났다.

(4) 시험체별 변위연성을 비교한 결과 횡보강근 체적비가 증가할수록 그리고 작용 축력비가 감소할수록 변위연성이 증가하는 경향을 나타내고 있어 철근콘크리트 교각의 연성에 횡보강근 체적비와 축력비가 중요한 요인으로 작용할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(과제번호:R05-2002-000-00804-0) 지원으로 수행되었으며 이 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete," American Concrete Institute, 2002.