

중·약진 지역의 원형 내진 RC교각의 내진성능평가

Seismic Performance of Circular RC Bridge Piers designed in Moderate on low Seismic Zone

박종협* 조창백** 박희상** 정영수***
Park, Jong Heob Cho, Chang Beck Park, Hee Sang Chung, Young Soo

ABSTRACT

This research aims at evaluating the seismic performance of the existing R/C bridge piers, which were seismically designed in accordance with the provision of moderate confinement design code (Eurocode 8). The work presented in this paper experimentally investigates the ductility and hysteretic behavior of circular reinforced concrete columns with moderate confinement. Pseudo-dynamic tests have been carried out on two scaled R/C column specimens to investigate their hysteretic behavior and other seismic performance.

1. 서론

1978년 10월 7일의 홍성 지진과 1982년 사리원지진등으로 인하여 한반도가 지진에 대해 안전지대가 아니라는 인식이 바뀌는 계기가 되었으며 그 결과로 1992년 개정도로교표준시방서에 처음으로 내진설계편이 신설되어 교량에 대한 내진설계가 이루어지고 있다. 그러나 신설된 내진설계규정은 강진지역의 규정을 검증없이 도입되었으며 중약진 지역으로 분류되고 있는 우리나라에 잘 맞지 않는 실정이다. 신설된 도로교설계기준의 내진설계 규준은 강진의 경우에 대한 미국의 시방규준을 반영한 설계지침이라고 할 수 있는데, 이에 따라 설계된 교각은 많은 양의 구속철근을 규정하여 중약진지역으로 분류되고 있는 우리나라와 비교해 볼 때 비경제적일뿐 아니라 과도한 횡방향철근량으로 인하여 오히려 시공성의 문제를 야기시킬수도 있다. 따라서 본 연구는 세계각국의 RC교각의 소성힌지구간에 대한 중저진설계규정을 간략히 고찰해 보고 실 구조물을 모델로 하여 Eurocode 8에 따라 설계된 중저진설계교각 그리고 현행도로교시방서 내진설계규정에 따라 설계된 내진설계교각을 제작하여 유사동적실험에 의해서 내진성능을 분석하고자 한다.

2. 세계각국의 주요 내진규정

지진이 에너지의 방출이라는 관점에서 볼 때 구조물의 붕괴는 운동에너지를 구조물이 어떻게 소산 혹은 흡수할 수 있는지가 중요한 문제이다. 따라서, 종래 탄성해석에서는 주관심사가 "strength" 그 자체였지만 내진설계에서는 "flexural stiffness" 즉 "ductility"가 중요 설계사항으로 대두되고 있다. 교

* 중앙대학교 대학원 박사과정

** 중앙대학교 대학원 석사과정

*** 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수

량에서 중요 구성요소인 RC교각은 일반적으로 지진시 소성힌지구간이 생성되면서 붕괴에 이르는 파괴 메카니즘을 가지고 있다. 따라서 세계각국의 RC교각의 내진설계는 이 소성힌지구간의 횡방향철근량 및 소성힌지길이를 조정하여 연성(ductility)을 증가시켜 에너지 흡수 혹은 소산능력을 크게 하는 것으로 주로 설계가 이루어지고 있다. 따라서 본 절에서는 소성힌지구간의 횡방향철근량에 대한 각국의 중저진설계규정을 간략히 살펴보고 Eurocode 8에 따른 중저진설계규정을 고찰해 보았다. 아래의 표 1은 각국의 횡방향철근량에 관한 규정이다.

표 1 각국의 소성힌지구간에서의 횡방향철근량 비교

구분	심부구속철근 산출식	
사각 띠철근	'99도로교 설계기준	$A_{sh} = 0.30 s h_c \frac{f_{ck}}{f_y} \left[\frac{A_g}{A_c} - 1 \right]$ 또는 $A_{sh} = 0.12 s h_c \frac{f_{ck}}{f_y}$
	EC 8	$\omega_{wd,r} = 1.74 \frac{A_c}{A_{cc}} (0.009 \mu_c + 0.17) \eta_k - 0.07 \geq \omega_{w,min}$ 연성거동 (ductile behavior)의 경우, $\mu_c = 13$, $\omega_{w,min} = 0.12$ 한정연성거동(limited ductile)의 경우, $\mu_c = 7$, $\omega_{w,min} = 0.08$
	ATC-32	$A_{sh} = 0.12 S_t h_c \frac{f_{ye}}{f_{gh}} \left(0.5 + \frac{1.25 P_e}{f_{ce}' A_g} \right) + 0.13 s h_c (p_l - 0.01)$
	NZS	$A_{sh} = \frac{(1.3 - p_l m) s h''}{3.3} \frac{A_g}{A_c} \frac{f'_c}{f_{yt}} \frac{N^*}{\Phi' A_g} - 0.006 s h''$ 또는 $A_{te} = \frac{\sum A_s f_y}{96 f_{yt}} \frac{s}{d_b}$
	CALTRANS	$A_{sh} = 0.12 S_t h_c \frac{f_c}{f_{gh}} \left(0.5 + 1.25 \frac{P_e}{f_c A_g} \right)$
	Paulay and Priestley	$A_{sh} = k s h_c \frac{f_c}{f_{yh}} \frac{A_g}{A_c} \left(\frac{P}{f_c A_g} - 0.08 \right)$
나선철근 및 원형후프	'99도로교 설계기준	$\rho_s = 0.45 \left[\frac{A_g}{A_c} - 1 \right] \frac{f_{ck}}{f_y}$ 또는 $\rho_s = 0.12 \frac{f_{ck}}{f_y}$
	EC 8	$\omega_{wd,c} = 1.40 \omega_{wd,r}$ 연성거동(ductile behavior)의 경우, $\mu_c = 13$, $\omega_{w,min} = 0.12$ 한정연성거동(limited ductile)의 경우, $\mu_c = 7$, $\omega_{w,min} = 0.08$
	ATC-32	$\rho_s = 0.16 \frac{f_{ce}'}{f_{ye}} \left[0.5 + \frac{1.25 P_e}{f_{ce}' A_g} \right] + 0.13 (p_l - 0.01)$
	NZS	$\rho_s = \frac{1.3 - p_l m}{2.4} s h'' \frac{A_g}{A_c} \frac{f'_c}{f_{yt}} \frac{N}{\Phi' A_g} - 0.0084$ 또는 $\rho_s = \frac{A_{te}}{110 d''} \frac{f_y}{f_{yt}} \frac{1}{d_b}$

특히, Eurocode 8에 따르는 교량의 RC교각을 위한 내진설계 과정은 다음과 같다.

먼저 일반화된 축하중(Normalized Axial Force) $\eta_k = N_{ed} / A_c f_{ck}$ 를 계산하여야 하며 $\eta_k \geq 0.8$ 의 조건을 만족하여야 한다. 여기서 A_c 는 콘크리트 단면적, f_{ck} 는 콘크리트의 압축강도, N_{ed} 는 내진설계된

기둥의 소성hinge구간에서 축방향 하중값을 말한다. 위의 요구조건을 만족하면, 구속철근비를 사각형 단면에서는 $W_{wd,r} \geq 1.74 \frac{A_c}{A_{cc}} (0.009 \mu_c + 0.17) \eta_k - 0.007$ 와 같이 계산하고, $W_{wd,r} \geq W_{w,min}$ 의 조건을 만족하여야 한다. 원형단면에서는 $W_{wd,c} = 1.40W_{wd,r}$ 로 계산한다. 여기서 A_c 는 콘크리트의 총단면적이고 A_{cc} 는 구속철근에 의해 구속되는 심부콘크리트의 단면적이다. 또한 μ_c 는 기둥이 가지고 있어야 할 곡률연성도를 말하며 그에 따른 최소의 구속철근비는 표 2와 같이 정리된다

표 2 연성도에 따른 구속철근비

Seismic Behaviour	μ_c	$W_{w,min}$
Ductile	13	0.12
Limited Ductile	7	0.08

그리고 철근의 간격 S 는 축방향 주철근의 지름의 6배 이상, 그리고 구속되는 심부콘크리트의 지름의 1/5 이상이어야 한다. 마지막으로 소성hinge길이(Lh)는 $\eta_k = N_{ed}/A_c f_{ck} < 0.3$ 인 경우에는 Hinge축에 수직인 기둥단면의 길이, Moment가 20%까지 줄어든 지점에 대한 최대모멘트 지점까지의 거리로 계산하는 값 중 큰 값을 선택하며 $0.3 < \eta_k < 0.6$ 인 경우에는 $\eta_k < 0.3$ 의 경우보다 50%를 증가시켜야 한다.

3. 시험체 설계과정

본 연구에서는 현행도로교 시방서 내진규정에 따라 설계된 수원시 하갈교를 1/3.4축소모델로 하여 RC교각을 내진 설계하였고 Eurocode 8에 따라 Limited Ductile Class로 중저진 설계하였으며 아래의 그림 1은 Eurocode 8에 따르는 중저진교각의 설계단면을, 그림 2는 현행 도로교시방서 내진규정에 따라 설계된 내진교각의 설계단면을, 표 3은 설계특성을 보여주고 있다.

표 3 설계특성

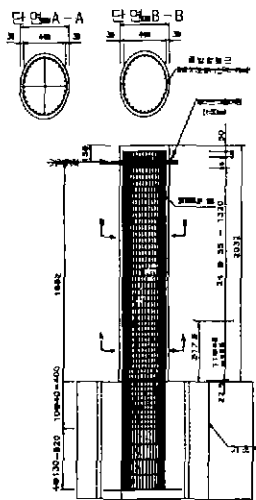


그림 1 중저진설계단면

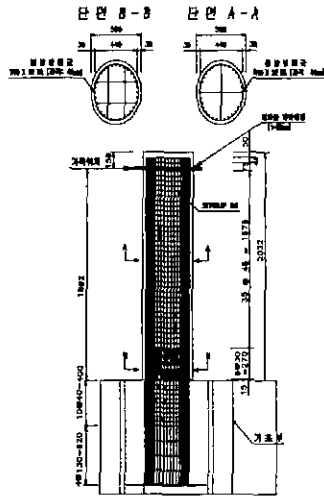


그림 2 내진설계단면

구 분	Solid Section	
	중저진 설계	내진 설계
종방향 철근	D10을 32EA 배근	D10을 32EA 배근
횡방향 철근	D6	D6
횡방향 철근간격	소성 hinge : s=5.5 cm 비소성 hinge : s=4.5 cm	소성 hinge : s=3.0 cm 비소성 hinge : s=4.5 cm
소성 hinge	l=50cm	l=25cm

4. 실험개요

실험은 Explicit Newmark β Method로 유사동적실험을 수행하였으며 횡방향의 지진하중은 1,000kN Hydraulic Actuator를 이용하여 가력하였으며, 정확한 축방향력 재하를 위하여 축방향력이 초기설정값의 5%이내로 변화도록 특수제작한 Hydraulic Axial Force Controller를 이용하여 재하하였다. 아래의 그림 3은 Explicit Newmark β Method의 알고리즘을 보여주고 있으며 사진은 유사동적 실험광경을 보여주고 있다.

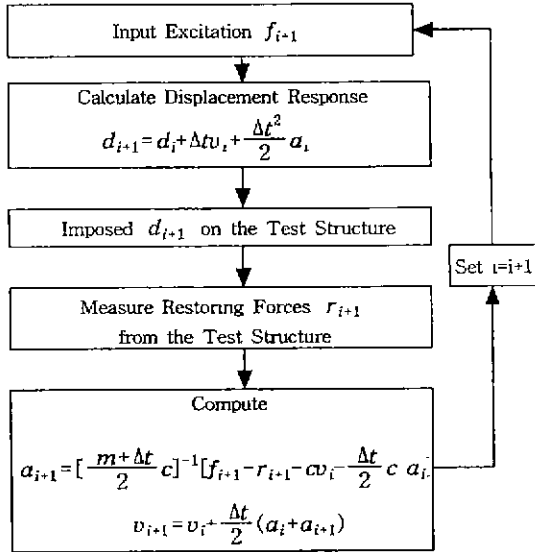


그림 3 Explicit Newmark 적분법



사진 1 유사동적실험

입력지진파는 Rock Soil Condition에 해당하는 PGA가 0.20g인 국내인공지진을 이용하였으며 Loading Pattern은 현재 개정예정인 도로교시방서 규정에 따라 0.154g에서부터 파괴에 이를 때 까지 점진적으로 증가시키면서 실험을 수행하였다. 아래의 그림 4는 실험에 이용한 인공지진파를 보여주고 있다.

표 4 Loading Pattern

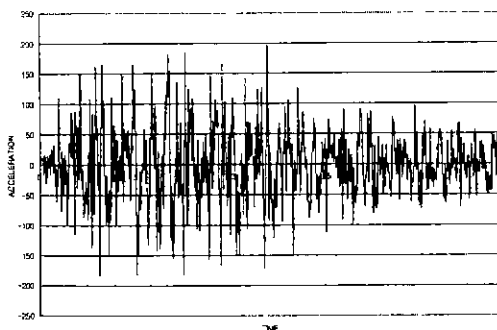


그림 4 국내인공지진파(T2.xy)

지진특성	Input Ground Motion		
	순서	G.M Type	P.G.A
국내인공지진 (T2.xy)	1	I - 45.08(Gal)	0.154g
	2	I + 19.6(Gal)	0.220g
	3	I + 98 (Gal)	0.300g
Rock Soil Sites (P.G.A→0.20g)	4	I + 196(Gal)	0.400g
	5	I + 294(Gal)	0.500g
	6	I + 392(Gal)	0.600g
	7	I + 490(Gal)	0.700g

5. 실험결과 및 분석

수원시 하갈교를 1/3.4축소모델로 하여 RC교각을 현행도로교 시방서 내진규정에 따라 설계된 내진교각 및 Eueocode 8에 따라 Limited Ductile Class로 중저진 설계된 교각의 내진성능을 평가하기 위한 유사동적실험의 실험결과는 다음과 같다. 그림 5, 6은 시간-변위 이력곡선을 보여주고 있으며, 최대응답변위는 중저진교각에서는 0.8g에서 90.09mm, 내진교각에서는 0.9g에서 93.26mm이다. 그림 6, 7은 하중-변위 이력곡선을, 그림 9, 10은 변위포락곡선을, 그림 11, 12는 하중포락곡선을 보여주고 있다.

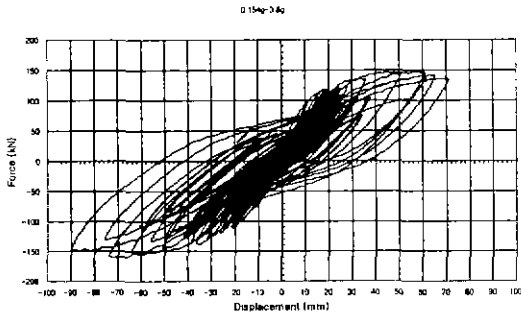


그림 5 중저진교각의 하중-변위 이력곡선

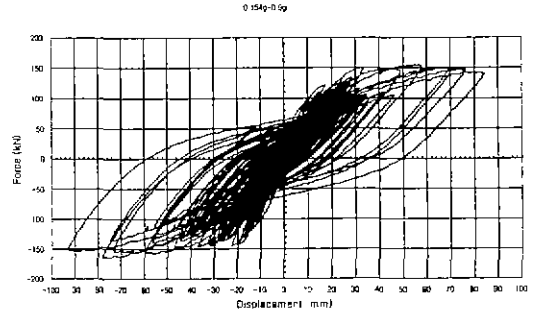


그림 6 내진교각의 하중-변위 이력곡선

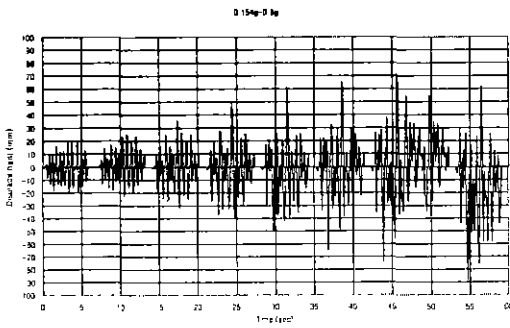


그림 7 중저진교각의 변위 이력 곡선

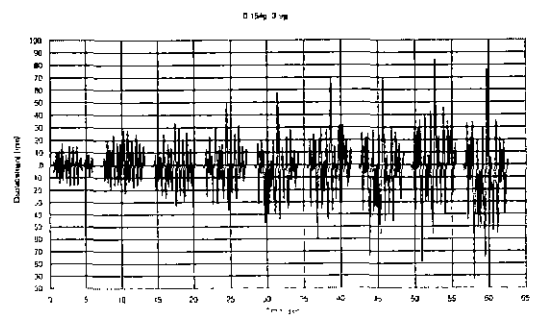


그림 8 내진교각의 변위 이력 곡선

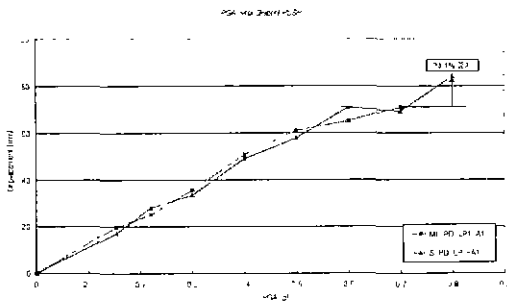


그림 9 변위 포락곡선 PUSH(+)

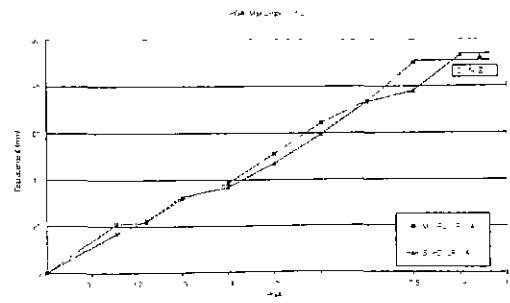


그림 10 변위 포락곡선 PULL(-)

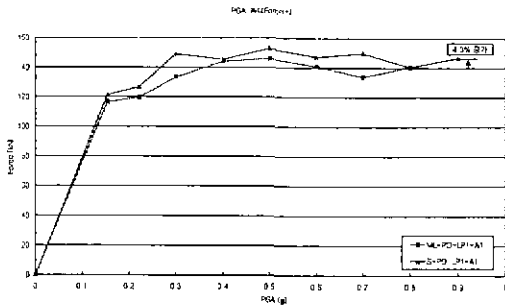


그림 11 하중 포락곡선 PUSH(+)

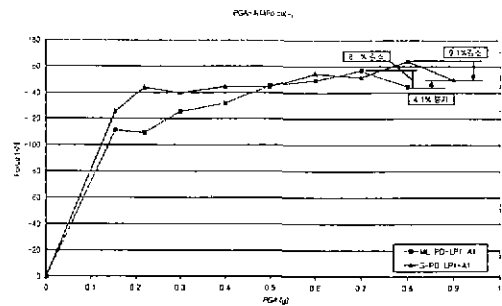


그림 12 하중 포락곡선 PULL(-)

위의 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 국내인공지진에 대해 Eurocode 8에 따르는 중저진설계교각도 상당한 내진성능을 갖고 있는 것으로 사료되며
- 2) 현행도로교 내진설계교각과 Eurocode 8의 중저진설계교각을 비교해 볼 때 국내 실정을 반영하여 중약진 지역에 적합한 설계규정이 시급히 이루어져야 하리라 사료된다.

6. 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.

7. 참고문헌

1. 한국도로교시방서(1996), 건설교통부
2. M. J. N. Priestley, F. Seible, G. M. Calvi, "Seismic Design and Retrofit of Bridges", John Wiley & Sons, Inc.
3. 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
4. Nadim I. Wehbe, M.Said Saidi and David H. Sanders, "Seismic Performance of Rectangular Bridge Columns with Moderate Confinement", ACI Structural Journal, March-April 1999, pp248~258
5. Eurocode 8 "Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures, Part 2. Bridges" ENV 1998-2 : 1994, pp50~54
6. ATC 32 "Improved Seismic Design : Criteria for California Bridges : Provisional Recommendations", California Department of Transportation, pp144~145