

기존 실물 원형 철근콘크리트 교각의 내진 성능 평가를 위한
실험적 연구

Experimental Study for Seismic Performance Evaluation with
Existing RC Bridge Piers

이 대형* 김 훈** 정 영수*** 이 재훈****
Lee, Dae Hyoung · Kim, Hoon · Chung, Young Soo · Lee, Jae Hoon

ABSTRACT

The recent earthquakes in worldwide have caused extensive damage to highway bridge structures. In particular, it has been demonstrated that concrete columns with inadequate lateral reinforcement contributed to the catastrophic collapse of many bridges. The poor detailing of the starter bars in these columns compounded the problem of seismic deficiency. Therefore, this study has been performed to verify the effect of lap spliced longitudinal steel and confinement steel type for the seismic behavior of reinforced concrete bridge piers.

Eight concrete columns were constructed with existing scale as diameter, 1.2m and height, 4.8m. 4 confinement steel types were adopted for seismic performance evaluation. All specimens were rested under inelastic cyclic loading while simultaneously subjected to a constant axial load. The longitudinal steel lap-splice is highly effective in seismic performance deterioration of reinforced concrete bridge piers.

1. 서론

전 세계적으로 크고 작은 지진의 발생으로 많은 인명의 손실과 경제적 손실이 발생되고 있다. 아울러, 한반도에서도 지진관측이 빈번해지면서, 갈수록 지진발생확률이 높아짐에 따라 사회적인 관심이 모아지고 있다. 이러한 추세에 맞추어 1996년 도로교표준시방서 개정작업을 통해 도로교 설계기준「내진설계편」이 완성되어 발간되었다. 그러나 내진설계편은 신설교량에 주로 적용하였으며 기존교량에 대해서는 아직까지도 특별한 적용기준이 제시되지 못했으며, 내진 성능을 정확하게

* 정회원 · 경도대학 건설환경공학과 교수
** 학생회원 · 중앙대학교 토목환경공학과 석사과정
*** 정회원 · 중앙대학교 토목공학과 교수
**** 정회원 · 영남대학교 토목공학과 교수

파악하기도 용이하지 않다. 따라서 본 연구는 이러한 기존교량의 실물실험을 함으로써 정확한 내진 성능을 평가하고자 하였다.

2. 연구내용

본 연구는 RC교각의 내진 성능에 영향을 미치고 있는 변수들로서 구속철근비, 횡방향 철근 배근형태에 대한 준정적(Quasi-Static)실험을 실시하여 실험변수에 의한 현재 고속도로상에 기 설계·시공된 RC교각에 대하여 내진 성능을 평가하여 보수·보강여부를 판단하는 자료를 제시하고자 한다.

2.1 제원조사

현재 사용중인 고속도로상의 내진 설계되지 않은 교량의 교각에 대하여 제원과 띠철근 형태 등을 조사하였다. 특히 내진설계 규정이 처음으로 적용된 1992년 도로교 표준시방서 이전에 설계된 23개를 조사·분석하여 그중 단주에 해당하는 16개의 교량에 대하여 자세히 분석하여 표 1.과 표 2.에 나타내었다.

표 1. 고속도로상 기존 교량의 교각 단면 형태

도로명	교량명	교각구분	교각단면 형상	교각 size		Aspect Ratio(H/D)
				직경(m):D	높이(m):H	
서울외곽	왕숙1교	단주	원형	3	4.749	1.6
	거여고가교	단주	사각형	2.5×3	4.124	
88 고속도로	낙동강교	단주	타원형*	a = 4.0 b = 1.8	3.39	
	요천3교	단주	원형	1.8	3.908	2.2
	요천1교	단주	원형	1.8	5.79	3.2
	순창교	단주	타원형*	a = 4.5 b = 1.5	3	
남해선	억만교	단주	원형	2.2	13.75	6.3
	곤양교	단주	원형	2.4	4.174	1.7
경부선	천수천교	단주	원형	2.2	4.437	2.0
	미호천교	단주	원형	3.5	3.224	0.9
	서화천교	단주	원형	3	10.7	3.6
	금강3교	단주	원형	3	8.586	2.9
	입장천교	단주	원형	1.8	2.353	1.3
	금호3교	단주	원형	2	3.94	2.0
구마선	광려천교	단주	원형	2.5	6.271	2.55
	남지교	단주	타원형*	a = 4.0 b = 2.0	4.728	


















* 타형 단면 교각에서 a=장축길이, b=단축길이

2.1 재료의 특성

교각 시험체 제작에 사용한 콘크리트는 굵은 골재 최대치수 25mm 골재의 레디믹스트 콘크리트를 사용하고 철근은 SD30인 D19의 상용철근을 주철근으로, 띠철근은 D10을 사용하였다. 압축강도는 28일간 표준 양생시킨 후 측정된 결과, 약 253kgf/cm²의 값을 얻었다. 또한 철근은 인장시

험을 실시하여 각각 평균항복강도 D19는 3,500kgf/cm², D10은 3,800kgf/cm²의 값을 얻었다.

표 2. 고속도로상 기존 교량 교각의 철근 형태

도로명	교량명	중방향철근		띠철근				철근비	보강띠철근 규격	비고
		철근 규격	겹침이음 길이 (mm)	철근 규격	연결 상세	겹침이 음길이 (mm)	배근 간격 (mm)			
서울외곽	왕숙1교	D32	-	D19		-	150-300	0.747	D16	이열배근
	왕숙2교	D32	940	D13		300	200-300	0.110	-	이열배근
	거여고가교	D32	820	D13		300	300	-	-	이열배근
88 고속도로	낙동강교	D25	-	D13		470	400	-	D13	일열배근
	요천3교	H29	1160	H16		640	300	0.165	-	일열배근
	요천1교	H29	1210	H16		640	300	0.165	-	일열배근
	순창교	D25	1000	D16			200	-	-	일열배근
남해선	억만교	D29	-	D16			150	0.498	D13	일열배근 이열배근
	곤양교	D32	840	D13		340	150	0.25	D13	일열배근
경부선	천수천교	D25	-	D16		480	300	0.260	D13	일열배근
	미호천교	D25	880	D19		570	200	0.174	-	이열배근
	서화천교	D32	800	D13		650	400	0.05	-	일열배근
	금강3교	D32	800	D13		650	350	0.052	-	일열배근
	입장천교	D22	-	D13		393	200	0.259	D13	일열배근
	금호3교	D32	-	D13		318	100	0.280	-	일열배근
구마선	광려천교	D32	1200	D13		300	150	0.240	D13	일열배근
	남지교	D25	770	D16		370	300	-	-	일열배근

* "-"는 도면에서 확인할 수 없는 항목

2.2 시험체 제작

본 연구에서는 주철근의 겹침 이음 및 횡방향철근의 배근형태에 따른 철근콘크리트 교각의 내진성능을 평가하기 위하여 단면의 직경 120cm, 부재의 총길이 480cm인 원형단면의 시험체 8개를 제작하였으며 시험체의 변수 및 시험체명은 표 3.와 같다. 또한 띠철근 형태는 표 4.과 같이 HT1은 겹침이음을 1회만 하였고 HT2는 겹침이음을 2회하였으며 HT3과 HT4는 보강띠철근으로 보강

하였다. 시험체의 주철근 겹침이음 길이는 도로교 표준시방서²⁾의 규정에 따라 다음 식 (1)과 같이 나타내며 계산된다.

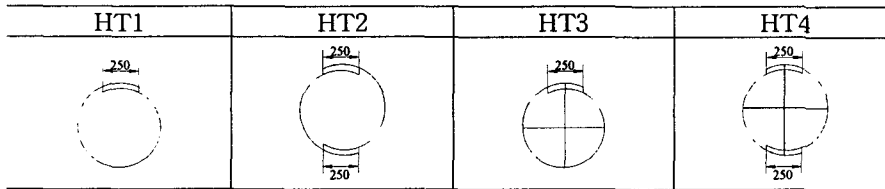
$$0.007d_b f_y \text{ 이상} : f_y \leq 4000 \text{ kgf/cm}^2 \quad (1)$$

$$l_d = 0.007 f_y d_b = 0.007 \times 3500 \times 1.91 = 46.80 \text{ cm} \approx 47 \text{ cm} \text{ 겹침이음}$$

표 3. 실험변수 및 시험체명

시험체명	콘크리트 강도 (kgf/cm ²)	주철근			띠철근			Axial Load (tonf)
		f_y (kgf/cm ²)	ρ_l	겹침이음	f_y (kgf/cm ²)	ρ_s	간격	
NS-HT1-A-L2	253	3500	1.01	Starter bar 100%	3800	0.13	20	190
NS-HT2-A-L2								
NS-HT3-A-L2								
NS-HT4-A-L2								
NS-HT1-H-L2				Starter bar 50%				
NS-HT2-H-L2								
NS-HT3-H-L2								
NS-HT4-H-L2								

표 4. 띠철근 형태



2.3 계측장비

시험체의 주철근, 띠철근, Cross Tie에 Strain Gage를 부착하여 철근의 변형률을 측정하였고 시험체 기둥부의 횡방향 처짐량을 측정하기 위하여 상단부에 1000mm Wheel LVDT를 설치하였고, 기초의 들림과 slip을 측정하기 위하여 100mm LVDT를 기초에 직각방향으로 설치하였다. 또한 소성현지구간의 곡률을 측정하기 위하여 push방향과 pull 방향에 Clip Gage를 각각 4개씩 설치하고 가력방향의 직각방향에는 소성현지구간의 1/4지점과 1/2지점에 각각 2개씩의 경사계를 설치하였다.

3. 실험개요 및 방법

Quasi-static⁴⁾ 실험을 위하여 축하중을 300ton Oil jack을 이용하여 재하하고 횡방향 변위가 발생하더라도 일정한 축하중이 재하될 수 있도록 일정한 하중을 유지할 수 있는 유압기를 이용하였다. 횡방향의 반복하중은 350ton actuator를 이용하여 변위제어방식으로 가력하였다. 변위제어 유

형은 기둥높이에 대한 하중변위의 비율(Drift Level)⁵⁾로 그림2.와 같이 $\pm 0.25\%$, $\pm 0.5\%$, $\pm 1.0\%$, $\pm 1.5\%$, $\pm 2.0\%$, $\pm 2.5\%$, $\pm 3.0\%$, $\pm 4.0\%$...로 Drift Level을 처음에는 0.25%, 0.5%씩 증가시켜 초기에는 교각의 연성도를 상세하게 관측하고 $\pm 3.0\%$ 이후는 1.0%씩 증가시키는 방법으로 2 cycle 반복 재하하여 동일 진폭에 대한 교각의 거동특성의 차이를 비교 분석하였다. 다음 그림 1.과 그림 2.는 각각 시험체의 설치 및 하중재하형태를 나타낸다.

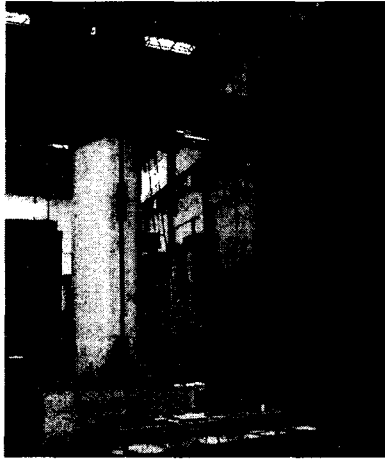


그림 1. Test Setup

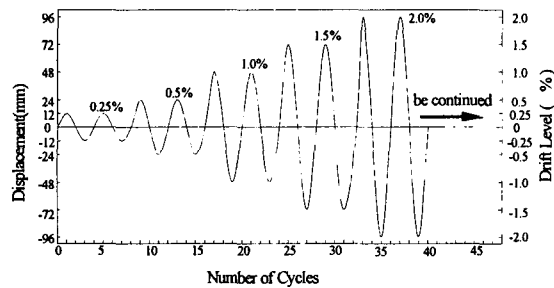


그림 2. 수평하중 재하

4. 실험결과분석

4.1 파괴유형

실험결과로는 초기균열은 대부분 Drift Level $\pm 0.25\%$ 이내에서 발생하였으며 주철근은 Drift Level 1.0%에서 항복하였으며 수평하중은 대체적으로 Drift Level 1.5%에서 가장 큰 하중이 발생하였고 최대하중은 60ton ~ 65ton 사이의 값이 측정되었다. 주철근 겹침이음이 100%인 시험체의 경우 피복콘크리트의 파괴가 없이 약간의 들림 현상만이 발생하고 피복콘크리트의 완전한 파괴나 주철근의 좌굴파괴는 발생하지 않았다. 또한 주철근 겹침이음이 50%인 비내진 시험체의 경우에는 NS-HT3-H-L2에서만 피복콘크리트의 탈락이 발생하였다.

4.2 하중-변위곡선

그림 3.과 그림 4.을 보면 100%겹침이음 시험체는 Drift Level 1.0%에서 급격한 하중감소를 보이고 있는 반면 50%겹침이음 시험체는 Drift Level 1.0%에서 하중감소를 보이고 있으나 Drift Level 3.0%까지 완만한 결과를 보이고 있다.

표 5.에서는 주철근 겹침이음량이 100%인 시험체와 50%인 시험체를 비교해 보면 항복변위에서 겹침이음량이 100%인 시험체(NS-HT4-A-L2)의 Drift level가 50%인 시험체(NS-HT4-H-L2)에 비해 크게 나타났다. 이는 100%인 시험체가 50%인 시험체에 비해 소성힌지부에서의 주철근비가 2배 큰 원인으로 분석된다. 즉, 항복변위 이전에는 철근콘크리트 교각의 소성힌지부의 겹침이음에서 부착파괴가 일어나지 않고 Column Bar와 Starter bar 모두 탄성적으로 거동하는 것으로 사료

된다. 하지만, 주철근의 겹침이음에 따른 부차파괴가 발생한 이후의 극한변위에서는 50% 겹침이음 시험체가 Drift level에서 상당히 큰 차이를 보이고 있다. 겹침이음량이 100%인 시험체의 경우 항복변위 이전에는 소성힌지구간에 배근된 주철근양의 증가로 상대적으로 우수한 강성을 유지하나, 기둥의 변위가 항복변위에 도달한 이후에는 별다른 연성거동이 나타나지 않고 급격한 횡하중 감소가 발생한다. 따라서 내진설계 도입이전에 시공된 콘크리트교각에서 다수의 주철근을 겹침이음 하였다면 연성능력에 문제가 있을 것으로 판단된다. 또한 비내진 시험체중 50%주철근 겹침이음된 시험체에서는 Drift level 0.5% ~ 1.5%사이에서 얼마간의 연성이 유지되어 횡하중에 저항할 수 있으나 현행시방서의 내진성능규정에는 미달하는 것으로 판단된다.

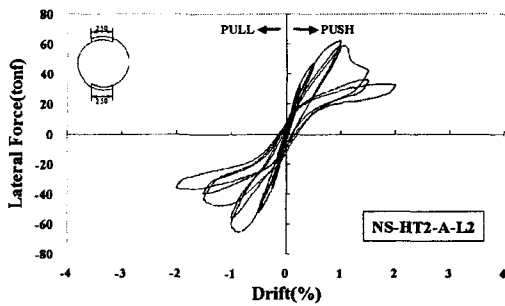


그림 3. 100% 겹침이음된 시험체의 하중-변위이력곡선

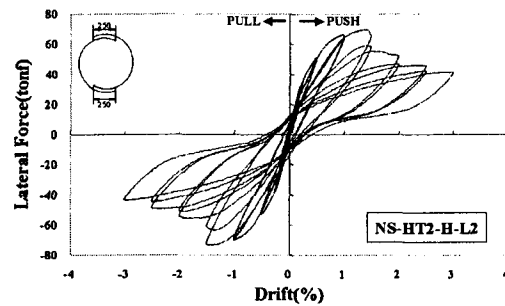


그림 4. 50%겹침이음 시험체의 하중-변위이력곡선

본 연구에서 항복변위(Δ_i)의 결정방법은 그림 5.과 같이 단면해석을 통하여 구한 설계모멘트강도(M_n)에 해당하는 횡력(V_i)을 결정한 후 $0.5V_i$, $0.75V_i$ 의 하중을 실험한 결과 데이터에서 찾아 $0.75V_i$ 일 때의 변위 Δ' 를 찾은 후 Push 방향과 Pull 방향에 대한 변위 Δ' 를 평균하여 0.75 로 나누어 항복변위(Δ_i)를 결정하였다.

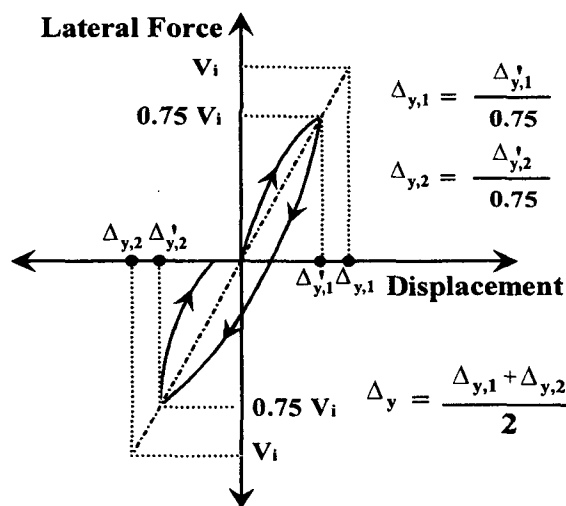


그림 5. 항복변위 결정방법

표 5. 시험체의 변위연성도

연번	시험체명	항복변위 (Δ_y) [drift level %]		극한변위 (Δ_u) [drift level %]		변위연성도 (μ) [drift level %]	
		push	pull	push	pull	push	pull
1	NS-HT1-A-L2	0.44	0.42	0.64	0.56	1.46	1.33
2	NS-HT2-A-L2	0.46	0.41	1.29	1.24	2.79	3.04
3	NS-HT2-H-L2	0.40	0.39	1.88	1.89	4.71	4.81
4	NS-HT3-A-L2	0.50	0.46	1.30	1.42	2.62	3.06
5	NS-HT3-H-L2	0.60	0.47	1.88	1.72	3.36	3.68
6	NS-HT4-A-L2	0.69	0.75	1.31	1.45	1.90	1.94
7	NS-HT4-H-L2	0.51	0.52	2.19	1.98	4.32	3.84

응답수정계수와 연성도와의 관계는 다음 식(2)과 같이 쓸 수 있으며 단주교각의 경우 응답수정계수 3에 해당하는 변위연성도는 5이다. 본 연구의 실험결과로부터 실험변수에 따른 연성도의 최저 값을 시험체별로 평균한 값은 다음 표 6에 나타내었다. 비내진 시험체의 경우 100% 주철근 겹침이음 시험체의 경우에는 상당히 낮은 연성능력을 나타내므로 적절한 보강이 필요할 것으로 판단된다. 기존 고속도로 교량의 철근콘크리트 교각의 소성힌지구간에서의 주철근 및 구속철근에 대한 정확한 시공방법에 대한 자료가 불충분하므로 적절한 안전율을 고려하여야 한다면 적절한 보강이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

$$R = \sqrt{2\mu - 1} \quad (2)$$

표 6. 시험체별 연성도 평균값 및 응답수정계수²⁾

시험체	비내진 시험체 100% 겹침이음	비내진 시험체 50% 겹침이음
변위 연성도	2.16	3.97
응답수정계수	1.82	2.63

4.3 하중-변위 포락곡선

그림 6.을 보면 다른 실험변수가 동일하고 띠철근의 유형이 다른 경우 하중-변위 이력곡선에서 하중의 감소는 거의 동일한 Drift Level에서 시작되고 전체적인 유형은 거의 유사한 것으로 평가된다. 하지만, 실험결과 띠철근이 심부콘크리트의 구속력을 발휘해야 하나 주철근의 좌굴과 함께 띠철근의 겹침이음이 슬립이 일어나면서 주철근과 함께 피복콘크리트를 파괴하면서 심부콘크리트를 구속할수 없게 된 것으로 판단된다.

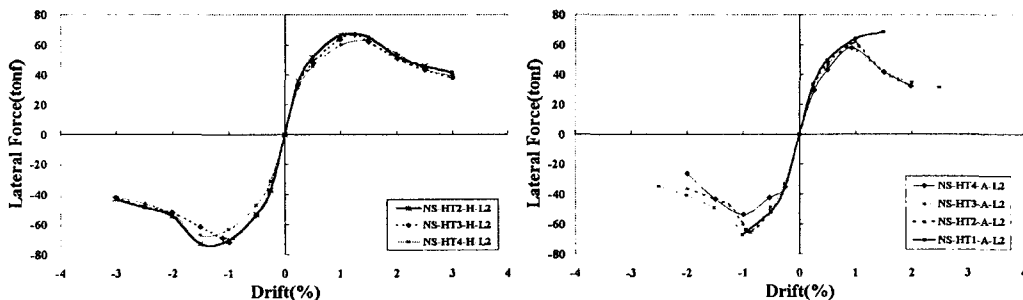


그림 6. 띠철근 유형에 따른 하중-변위포락곡선

5. 결론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 비내진 설계된 시험체에서 주철근 100%겹침이음 시험체와 50%겹침이음 시험체는 Drift level $\pm 1.0\%$ 까지는 유사한 성능을 보이나, 그 이후 100%겹침이음 시험체가 급격한 강도저하를 나타낸다.
2. 주철근 100%겹침이음 시험체와 50%겹침이음 시험체 모두 주철근의 좌굴로 인한 파괴현상이 발생되지 않고, 띠철근과 그에 따른 심부 콘크리트의 파괴, 그리고 겹침이음 부분의 슬립으로 인한 파괴 형태를 보였다.
3. 다른 실험변수는 동일하고 띠철근의 형태가 다른 경우 하중-변위 이력곡선에서 하중의 감소는 거의 동일한 Drift Level에서 시작되고 전체적인 유형은 거의 유사한 것으로 평가된다.
4. 보강띠철근(cross tie)은 구속철근의 항복과 구속철근의 겹침이음길이의 부족 등으로 인한 구속효과의 저하로 인하여 피복콘크리트가 파괴된 이후 효과적인 심부콘크리트를 구속할 수 없는 것으로 평가된다. 따라서 향후 또 다른 띠철근형태와 보강띠철근 상세에 대한 연구가 더 요구된다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 “고속도로 기존 교량의 내진성능 평가를 위한 실험적 연구”의 일환으로 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부(1996), 한국도로교설계기준(2001)
2. 건설교통부(1996), 도로교표준시방서
3. 정영수 외 3인(2001), 준정적실험에 의한 겹침이음된 철근콘크리트 교각의 내진성능 평가, 2001년도 봄 학술발표회 논문집, 한국콘크리트학회, 제13권, 1호 pp. 877-882
4. K.K.Lee, G.H.Han, Y.S.Chung, D.H.Lee, E.S.Hwang, "Quasi-Static Test for Seismic Performance of R.C Bridge Piers," Proceedings of the Korea Concrete Institute, V.10, No.2, 1988, pp.615-620
5. Chin-Tung Cheng and John B.Mander(1997), "Seismic Design of Bridge Column Based on Control and Repair ability of Damage", Technical Report NCEER-97-0013