

실물 및 축소모형 비교실험을 통한 휨-전단 RC교각의 내진성능평가

Seismic Performance Evaluation of Shear-Flexure RC Piers through Comparative test of Real Scale and Reduced Scale Model

곽 임 중* 조 창 백** 조 정 래** 김 영 진* 김 병 석***
Kwahk, Imjong Cho, Chang Beck Cho, Jeong Rae Kim, Young Jin Kim, Byung Seok

ABSTRACT

From the analysis results of some as-built drawings in national roadway bridges in Korea, many bridge piers are expected to show complex shear-flexural behaviour under earthquakes. But the previous research works about the seismic evaluation of bridges considered flexural behaviour RC piers only. In addition, the past bridge design specifications in Korea didn't include limitation on the amount of longitudinal lap splices in the plastic hinge zone of piers. Thus a large majority of non-seismically designed bridge piers in Korea may have lap splices in plastic hinge zone.

In this study, prototype pier was selected among existent bridge piers whose failure mode is expected to be complex shear-flexural mode. And then, full scale and 1/2 reduced scale model RC piers with various longitudinal lap splice details were constructed. From the quasi static test results on these model RC piers, the effect of longitudinal lap splices on the seismic performance of bridges piers was analyzed. And the seismic capacity of the non-seismically designed shear-flexural RC piers was evaluated.

1. 서 론

교량의 내진성능에 큰 영향을 미치는 교각의 경우 큰 지진시 비선형 거동을 허용하고 있으며, 내진상세가 있는 교각은 응답수정계수로 비선형 효과를 고려하도록 하고 있다. 하지만 내진상세가 없는 기존 비내진 교각 역시 어느 정도의 내진성능을 가지고 있다고 할 수 있다. 따라서 적절한 수준의 내진보강을 위해서는 기존 비내진 교각에 대한 내진성능 평가가 필수적이다.

2000년도를 전후로 구조물의 대형화 및 고층화에 따라 대형 구조물의 안전도 확보를 위한 실험연구의 중요성이 증대되었고, 대형 토목구조물의 경우 안전성 입증을 위한 기초실험 연구가 절실히 요구되었다. 교량의 내진성능 평가를 위한 교각 구조물 시험체의 내진실험 또한 차츰 그 규모가 대형화되고 있으며 실험장소 및 실험역량의 확대로 실물크기 대형 교각시험체에 대한 실험도 계속 실시되고 있다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원 연구원

*** 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

본 연구에서는 휨-전단 복합거동 교각의 내진특성을 파악하고 실물과 축소모형에 대한 실험을 병행하여 크기에 따른 상사효과에 대해서 분석하였으며 주철근 겹침이음의 시공형태에 따른 거동특성을 조사하였다.

2. 실험개요

휨-전단 복합거동이 예상되는 형상비 2.67의 교각을 실험 대상으로 선정하여 대상교각과 같은 실물 크기 시험체 및 축소모형 시험체를 제작하여 교각의 축소모형 실험에서 발생하는 상사효과에 대해서 고찰하였으며 각 시험체의 주철근 겹침이음의 시공형태에 따른 거동특성을 조사하였다.

시험체의 단면은 그림 1과 같이 모두 원형 중실단면(Circular Solid Type)이며 시험체의 제원과 상사비, 시험체 상세는 표 1, 표 2에 나타내었다.

표 1. 시험체의 Scale Factor 적용

구분	실물크기 시험체	축소모형 시험체	상사비
단면지름 (mm)	D=1200	D=600	2.0
교각높이 (mm)	H=3200	H=1600	2.0
형상비	2.67	2.67	1.0
주철근 직경(mm)	D25=25.4	D13=12.7	2.0
주철근 간격(mm)	86.47	43.38	1.99
띠철근 직경(mm)	D13=12.7	D6=6.35	2.0
띠철근 간격(mm)	S=300	S=150	2.0

표 2. 시험체 상세

구분	본체높이	시험체명*	주철근	겹이음	띠철근	형상비
실물크기 (D=120cm)	H=320cm	FS-H-LS00P	D25 (36EA)	0%	D13 (S=30cm)	2.67
		FS-H-LS000		0%		
		FS-H-LS050		50%		
		FS-H-LS100		100%		
축소모형 (D=60cm)	H=160cm	M-H-LS00P	D13 (36EA)	0%	D6 (S=15cm)	2.67
		M-H-LS000		0%		
		M-H-LS050		50%		
		M-H-LS100		100%		

* FS : Full-Scale, M : Model, H : High-Height(휨-전단), L : Low-Height(전단), P : Pilot Test

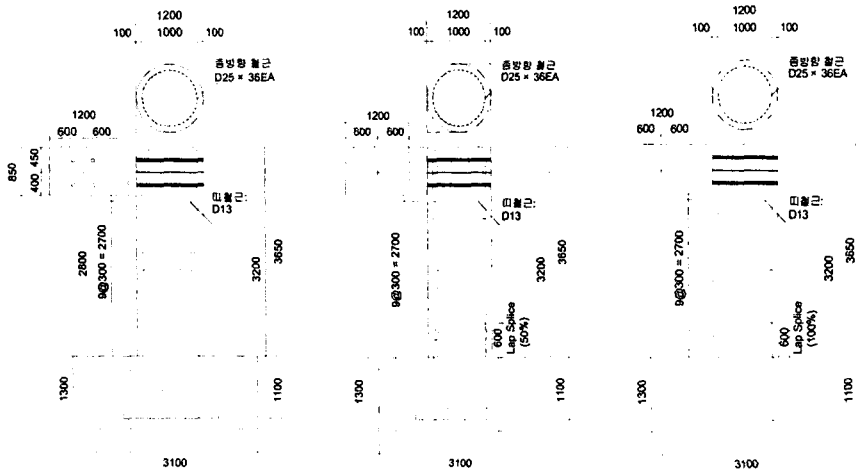
LS000 : 0% Lap splice, LS050 : 50% Lap splice, LS100 : 100% Lap splice

그리고 시험체 제작시 주철근의 겹침이음 시공형태를 달리하여 각각의 실물크기 및 축소모형 시험체에 대하여 소성힌지 부분의 주철근 겹침이음을 ① 겹침이음이 없는 경우 ② 50%만 겹침이음한 경우 ③ 100% 동일위치에서 겹침이음한 경우로 구분하여 시험체를 제작하였다.

주철근의 겹침이음 위치에 있어서 철근은 시공 당시 편의성을 고려하여 기초부 상면에서 시작되는 것으로 가정하였으며 이 기준에 따라 겹침이음의 중심위치는 실물시험체의 경우 기초 상면으로부터 31cm 위치에 그리고 축소시험체의 경우 15.5cm에 설치하였다.

콘크리트는 실제 일반 시공현장에서 사용되는 것과 같이 최대골재치수 25mm의 레드믹스트 콘크리트(Ready Mixed Concrete)를 사용하였으며 압축강도를 측정하여 평균 250kgf/cm²의 압축강도를 얻었다.

철근은 실물크기 및 축소모형 시험체에 대하여 실제 교각과 동일하게 제작하기 위하여 주철근과 띠철근 모두 SD30 상용철근을 사용하여 외부적인 변화요인을 최대한 억제하였다. 각 철근들의 인장시험 결과 D25의 평균항복강도는 3378 kg/cm², D13은 3326 kg/cm²로 거의 동일하게 나타났다.



(a) 겹침이음 0%

(c) 겹침이음 50%

(d) 겹침이음 100%

그림 1. 실물 휨-전단 교각시험체 설계 상세도

3. 준정적 실험

축력은 그림 2와 같이 서보제어밸브가 장착된 압축력 350tonf 용량의 Actuator를 사용하여 실물크기 시험체의 경우 200tonf의 축하중을 일정하게 재하하였으며 실험중 오차는 평균 ±0.29 tonf에 불과하였다.

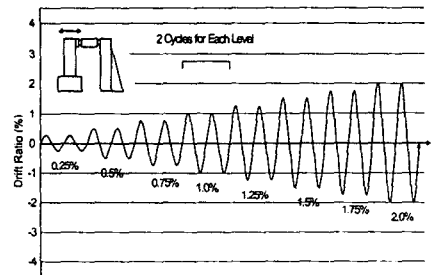


그림 2. 실물크기 시험체의 Setup

그림 3. 축소모형 시험체의 Setup

그림 4. 적용된 Drift Level

본 실험연구에서 다루는 휨-전단 지배적인 교각의 경우, 실험 시작 이전의 수치해석에 의한 거동 예측이 휨거동 교각의 경우보다 신뢰성이 낮고 소성힌지 생성구간의 파악에도 어려움이 있다. 따라서 본 실험에서는 항복변위에 따른 변위이력을 사용하지 않고 그림 4와 같이 교각 시험체의 높이에 대한 수평방향 변위값의 Drift level 기법으로 수평하중을 재하하는 방법을 사용하였다.

4. 실험결과

4.1 실물 - 축소 (주철근 겹침이음 0%)

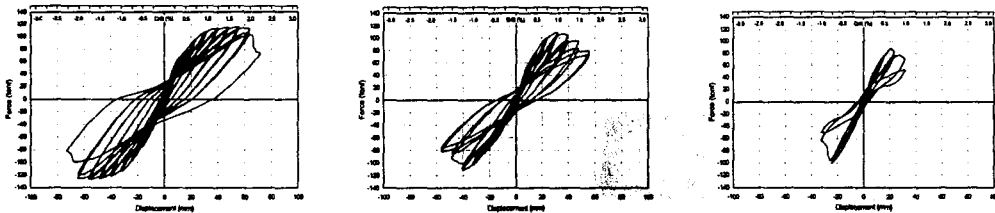
횡방향 철근이 비내진 상세임에도 불구하고 상당한 연성이 발휘되어 그림 5(a), 6(a)와 같이 안정적인 하중-변위 이력곡선을 보이고 있다. 실물시험체의 경우 초기에 휨거동을 보이면서 연성을 발휘하다가 항복 후 나타나는 콘크리트의 전단강도 저하로 인하여 최종적으로는 콘크리트가 전단에 의해 파괴되면서 내하력이 급격히 감소하였다. 교각의 측면부에는 최종 파괴의 원인인 전단 균열이 형성되어 있고, 초기에는 휨에 의한 파괴로 진행되어 최종적으로 전형적인 휨-전단 거동을 나타내었다. 그러나 축소모형 시험체의 경우 최종적으로 휨에 의한 파괴가 발생하여 연속된 주철근에서 있어서 실물과 축소사이의 크기효과의 영향에 따른 최종 파괴모드의 차이와 축소모형의 연성이 더 크게 평가됨을 관측할 수 있었다.

4.2 실물 - 축소 (주철근 겹침이음 50%)

그림 5(b), 6(b)에 나타난 바와 같이 주철근 모두 연속철근을 사용한 것에 비해 연성이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 소성현지 형성 후 휨에 의한 피복 콘크리트의 박리가 상당히 진행되었고 주철근 부착 파괴로 인하여 휨에 대한 내력이 급격히 저하되었는 것이 실물과 축소시험체 모두 유사성을 보였다.

4.3 실물 - 축소 (주철근 겹침이음 100%)

100% 주철근 겹침이음이 설치된 교각은 연속철근 시험체에 비하여 연성도가 크게 저하됨을 보여주고 있다. 이는 어떤 경우와 비교하더라도 가장 열악한 연성도를 나타내고 있는 것이다. 교번하중에 의한 급격한 내력저하와 휨에 의한 주철근 부착파괴로 진행되었음을 나타내고 있다.

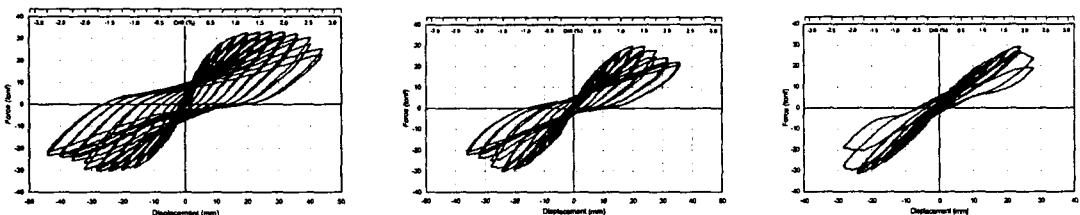


(a) FS-H-LS000

(c) FS-H-LS050

(d) FS-H-LS100

그림 5 실물크기 시험체 하중-변위 이력곡선



(a) M-H-LS000

(b) M-H-LS050

(c) M-H-LS100

그림 6 휨-전단 시험체 하중-변위 이력곡선

5. 결과분석

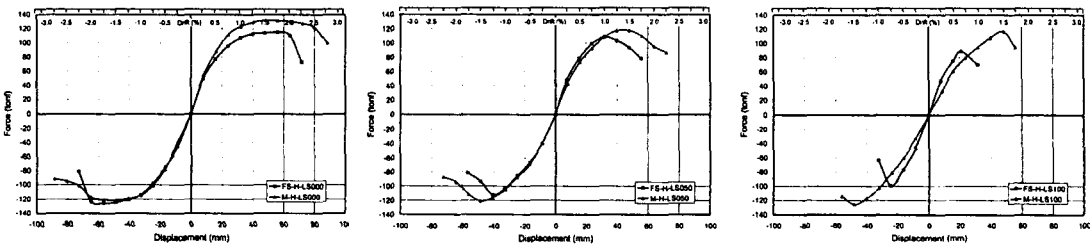
주철근이 100% 겹침이음된 교각(FS-H-LS100, M-H-LS100)이 가장 열악한 연성 거동을 나타냈고 겹침이음이 없는 교각(FS-H-LS000, M-H-LS000)은 안정적인 연성 거동을 보였다. 주철근중 절반만 연속철근을 사용한 교각(FS-H-LS050, M-H-LS050)은 앞의 두 경우의 중간 정도의 연성 거동을 나타내었다. 표 3에서는 최대하중의 75%에 해당되는 초기변위를 항복 변위로 하였으며 극한변위는 일반적으로 적용되는 최대하중의 20% 이상이 감소되는 해당 변위로 하였다

표 3 변위 연성도 및 응답수정계수(R) 추정 결과

구분	겹침이음	① 극한변위(mm)	② 항복변위(mm)	③ 연성도	④ 응답수정계수 R=③
실물크기	0%	68.20	26.00	2.62	2.62
	50%	51.60	22.20	2.32	2.32
휨-전단	100%	31.20	17.3	1.80	1.80
축소모형	0%	43.30	13.00	3.33	3.33
	50%	32.60	14.70	2.22	2.22
휨-전단	100%	28.00	18.60	1.51	1.51

교각의 내진성능 평가를 위해 그 동안 국내에서 수행되었던 교각 실험연구는 주로 축소모형에 의한 것이었다. 이처럼 축소모형 실험에 의한 내진성능 평가시에는 모형의 축소상사에 따른 크기효과가 개입되어 평가결과가 왜곡될 우려가 있다. 이러한 사실을 반영하여 실물크기 휨-전단 모형과 축소 휨-전단 모형의 내진성능을 비교한 결과, 축소모형이 연성도를 과대평가하고 최종 파괴모드도 다르게 나타나는 사실이 관측되었다.

그림 7은 각각 주철근 겹침이음 0%, 50%, 100%인 경우에 대해 실물크기 모형과 축소모형의 하중-변위 포락선을 비교한 것이다. 이때, 축소모형은 실험결과를 축소율만큼 원래의 물리량으로 환산하여 비교하였다. 어떤 경우이든 축소모형에 의한 결과가 실물크기 모형보다 연성이 크게 평가되는 것을 관찰할 수 있다.



(a) 겹침이음 0%

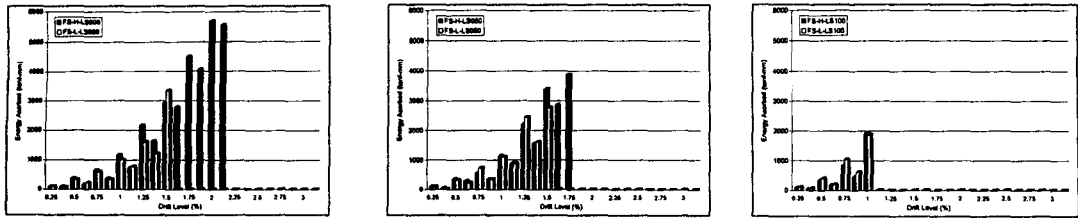
(b) 겹침이음 50%

(c) 겹침이음 100%

그림 7. 실물 및 축소 교각모형의 변위-하중 포락선 비교

그림 8은 Drift level별 에너지 흡수량을 비교한 것으로 겹침이음 0%인 경우 축소모형이 실물크기 모형보다 Drift level별 에너지 흡수량이 크게 나타나고, 특히 최종 파괴모드가 실물크기 시험체는 전단파괴인데 비해 축소모형은 휨파괴로 진행되어 더 높은 level의 Drift까지 저항하였으므로 에너지 흡수량은 축소모형이 훨씬 많게 평가되고 있음을 알 수 있다.

주철근 겹침이음이 포함된 교각 모형의 경우, 최종 파괴형상은 실물크기 모형과 축소모형 모두 주철근 뽑힘에 의한 부차파괴로 나타났다. 하지만, 최종파괴에 이르기까지 저항한 Drift level은 축소모형이 실물크기 모형보다 높게 나타나고 파괴시까지 흡수되는 에너지량도 더 많은 것으로 확인할 수 있었다.



(a) 겹침이음 0% (b) 겹침이음 50% (c) 겹침이음 100%

그림 8. 실물 및 축소 교각모형의 에너지흡수량 비교

이처럼 축소모형으로 실물크기를 대신하여 교각의 내진성능을 평가할 경우에는 그 평가결과가 왜곡될 우려가 있음이 확인되었다. 따라서 부득이하게 축소모형을 사용하여 내진성능을 평가할 수밖에 없는 경우에는 이러한 경향들을 감안하여 축소모형을 제작하고, 실험에 의한 평가결과도 적절히 보정하여 사용해야 한다고 판단된다.

6. 결 론

비내진 설계된 교각에 있어서 주철근 겹침이음 상세를 달리한 실물크기 및 축소모형 휨-전단 교각 시험체를 제작하여 준정적 실험을 실시하였다. 실험 결과 주철근 겹침이음과 크기효과의 영향과 관련하여 다음의 결론을 도출하였다.

- 1) 기존 교량의 상당수 교각들이 시공편의상 소성힌지 영역내 동일 높이에서 모든 주철근을 겹침이음 하였는데, 실험결과 이렇게 100% 겹침이음 처리한 교각은 내진성능이 매우 열악함을 확인하였다.
- 2) 축소모형으로 실물크기를 대신하여 교각의 내진성능을 평가할 경우에는 그 평가결과가 왜곡될 우려가 있음이 확인되었다. 따라서 부득이하게 축소모형을 사용하여 내진성능을 평가할 수밖에 없는 경우에는 이러한 경향들을 감안하여 축소모형을 제작하고, 실험에 의한 평가결과도 적절히 보정하여 사용해야 한다고 판단된다.
- 3) 횡방향 철근이 비내진 상세이더라도 주철근의 겹침이음을 쓰지 않는 것만으로 연성도가 상당히 증가함을 확인하였다. 향후 도로교 설계기준에 이를 반영시켜 내진설계시 과도한 횡방향 철근에 의한 시공성 저하의 문제를 해소할 필요가 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(2000), “도로교 설계기준,” 한국도로교통협회.
2. 한국건설기술연구원(2000), “사회기반 시설물의 내진성능향상 기술 개발,” 한국건설기술연구원 연구보고서 건기연 2000-080.
3. 한국건설기술연구원(2001), “교각 내진성능 평가 및 교량 비선형 내진해석 프로그램 개발,” 한국건설기술연구원 연구보고서 건기연 2001-078.
4. Priestley, M. J. N., Seible, F., Calvi, G. M.(1996), “Seismic Design and Retrofit of Bridges,” John Wiley & Sons.
5. Mander, J. B., Waheed, S. M., Chaudhary, M. T.A., Chen, S.S.(1993), “Seismic Performance of Shear-critical Reinforced Concrete Bridge Piers,” Technical Report NCEER-93-0010, NCEER.