주철근 겹침이음된 휨-전단 RC교각의 실물모형 준정적 실험

Quasi Static Test of Lap Spliced Shear-Flexure RC Piers Using Real Scale Models

곽 임 종*, 조 창 백**, 조 정 래**, 김 영 진*, 김 병 석***

Kwahk, Imjong · Cho, Chang Beck · Cho, Jeong Rae · Kim, Young Jin · Kim, Byeong-Seok

Abstract

The past bridge design specifications of Korea didn't include limitation on the amount of lap splices in the plastic hinge zone of piers, and so do current specifications. But these specifications include just limitation on the minimal length of lap splices. Thus, a large majority of non-seismically designed bridge piers may have lap splices in plastic hinge zone. In this study, model pier was selected among existent bridge piers whose failure mode is complex shear-flexure mode. Full scaled RC pier models whose aspect ratio is about 2.67 were constructed and quasi static test according to the drift level history was implemented. From the test results, effect of the lap splices on the seismic performance of bridges piers was analyzed, and the seismic capacity of the model bridges was evaluated by capacity spectrum method.

Keywords : Quasi static test, shear-flexure behaviour column, Real scale test, scale effect, seismic performance

1. 서 론

우리 나라에서는 1992년 도로교 표준시방서에 내진설계편이 제정된 이후 설계기준에 따라 신설 구조물에 대한 내진설계를 수행하고 있다. 그러나 내진설계기준 제정 이전의 비내진 교량에 대한 내진성능 연구는 아직 미흡한 실정이다.

교각의 하단부 시공시 상용철근의 길이 제한이나 시공 편의상의 이유 등으로 하단부에 주철근 겹침이음을 두는 경우가 많은데 국내에 현존하는 기존 RC교각들 중 이 경우에 해당되는 교각들이 상당수 존재할 것으로 추정된다. 과거 도로교 시방서에는 교각 하단부의 축방향 주철근 겹침이음에 대하여 특별히 제한하는 규정이 없었으며 현재 내진설계가 반영된 도로교 설계기준에도 내진설계에 있어서 주철근 겹이음에 대한 제한은 없다. 다만 철근의 최소 겹이음 길이 규정에 따라 최소한의 겹이음 길이를 확보하도록 하고 있다.[1)]

* 한국건설기술연구원 선임연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원 연구원

*** 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

그러나 이 경우에도 교각을 압축부재로 생각하여 최소 겹이음 길이 산정을 압축부재에 대한 규정에 따르고 있다. 실제 지진시에는 교각 하단부에 작용하는 최대 모멘트에 의하여 교각의 주철근은 압축부재로서가 아니라 인장부재로서 역할을 하기 때문에 최소 겹이음 길이는 인장부재에 대한 규정을 따르는 것이 합리적일 것이다. 따라서 과거 국내의 기존 비내진 설계된 교각의 상당수가 하단부 소성힌지 영역에 주철근이 겹침이음되어 시공되었을 가능성을 확인할 수 있었다.

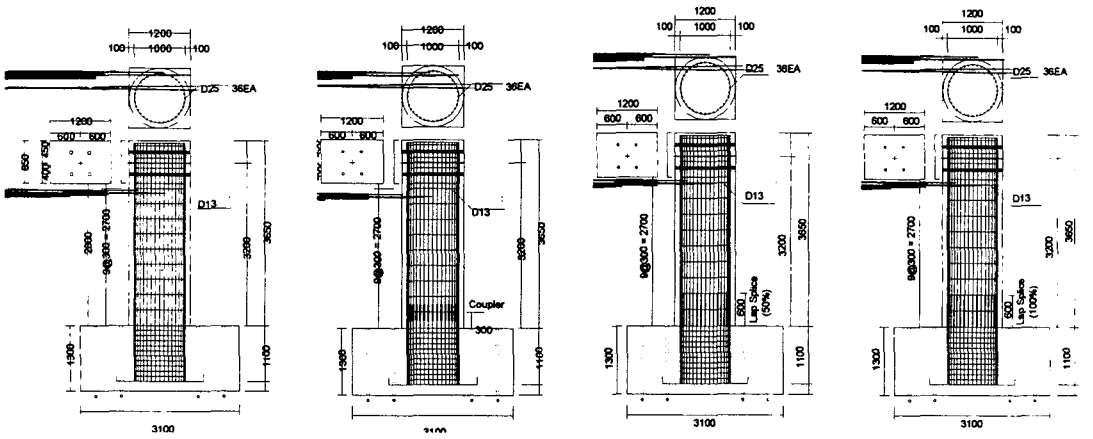
본 연구에서는 휨-전단 복합모드가 작용하여 파괴에 이를 가능성이 많은 형상비 2.5 내외인 기존 교각중에서 형상비가 2.67인 교각을 대상모델로 선정하였다.

기존 대상 교각에 대하여 실물크기로 시험체를 제작하여 Drift level에 따른 하중재하로 준정적 실험(Quasi static Test)을 수행하였다. 실험변수로는 형상비에 대한 휨-전단 거동특성과 주철근의 배근상세 있어서 겹침이음이 없는 경우, 절반이 겹침이음된 경우, 전체가 겹침이음된 경우 그리고 주철근의 이음을 커플러와 같은 기계적 이음을 했을 경우로 구분하여 겹침이음 형태에 따른 교각의 내진 거동특성을 조사하였다.

2. 시험체 제작

본 실험연구에서는 휨-전단 지배거동이 예측되는 각각의 시험체에 대하여 소성힌지 부분의 축방향 주철근 겹침이음을 ① 겹침이음이 없는 경우 ② 50%만 겹침이음한 경우 ③ 100% 동일위치에서 겹침이음한 경우 ④ 철근 커플러(Coupler)를 사용하여 이음한 경우로 구분하여 시험체를 제작하였다.

본 실험연구를 위해 그림 1과 같이 제작된 실물크기 시험체는 전부 5개로서 원형중실단면(Circular Solid Type)이며 단면지름은 120cm, 교각 본체 높이는 320cm로서 형상비가 2.67이다. 그리고 표 1과 같이 대상교각에 대한 상사를 만족하기 위하여 단면크기, 높이 그리고 철근배근에 있어서 실제 교각과 동일하게 제작하였다.



(a) 겹침이음 0% (b) 커플러 이음 (c) 겹침이음 50% (d) 겹침이음 100%

그림 1 실물 휨-전단 교각시험체 설계 상세도

3.주철근의 겹침이음

철근배근에 있어서 주철근은 SD30A의 D25 상용철근을 사용하였으며 띠철근은 D13을 사용하였다. 주철근의 겹침이음 위치에 있어서 철근은 시공 당시 편의성을 고려하여 기초부 상면에서 시작되는 것으로 가정하였다. 이 기준에 따라 겹이음의 중심위치는 기초 상면으로부터 31cm 위치(약 0.26D)에 설치

하였다.

표 1 시험체 상세

구분	본체높이	시험체명*	주철근	겹이음	띠철근	형상비
실물크기 시험체 (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%		
		FS-H-LSCR		커플러		

* 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, LSCR : Coupler Lap splice

기존 비내진 교각의 경우 소성힌지에서 휨에 의한 인장력을 견디도록 설계된 것이 아니라 축방향 하중을 받는 압축부재로서 설계된 것이므로 실험대상 모델 교각이 비내진 상세임을 감안하여 주철근의 겹이음 길이를 계산할 때 인장부재의 철근 겹이음 기준이 아닌 압축부재의 철근 겹이음 기준에 의해 겹침이음 길이를 계산하였다. 주철근 D25의 공칭지름과 철근의 설계항복강도가 4,000kg/cm^2 이하인 경우를 감안하여 겹침이음 길이를 계산하면 62cm가 된다. 이는 최소 30cm 이상의 길이와 그외 항목인 콘크리트의 설계기준 압축강도와 연관된 항목을 모두 만족한다.

철근이음 커플러를 사용하는 경우 커플러의 위치는 그림 3과 같이 겹침이음부의 중심부분이 되도록 설계 및 시공하였다.

그림3 주철근 연결 커플러 (Taper Jack Type)

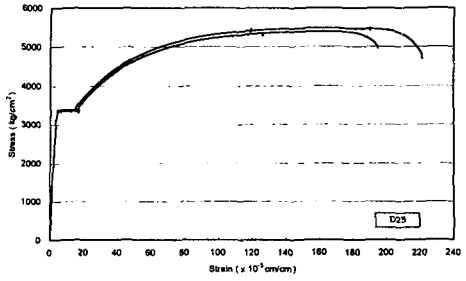
4. 재료특성

- 콘크리트

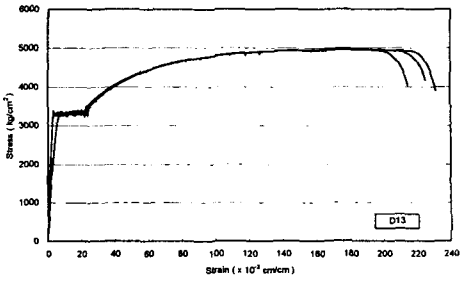
시험체의 압축강도 측정을 위해 콘크리트 타설시 ϕ10cm×20cm인 몰드에 28일간 양생시킨 후 단면의 편심을 방지하기 위하여 표면을 연마기로 Capping 작업후 KS B 0820에 따라 압축강도를 측정하여 평균 250 kgf/cm^2의 압축강도를 얻었다. 콘크리트는 실제 일반 시공현장에서 사용되는 것과 같이 최대 골재치수 25mm의 레디믹스트 콘크리트(Ready Mixed Concrete)를 사용하였으며 본체 타설전 철근의 변형율 측정을 위한 Strain Gauge를 주철근 및 띠철근에 부착하였다.

- 철근

실물크기 실험체의 경우 실제 교각과 동일하게 제작하기 위하여 주철근과 띠철근 모두 SD30 상용철근을 사용하였다. 띠철근은 모두 갈고리가 없이 단순 겹침이음으로 되어 있으며 겹침이음 길이는 21.5cm를 유지하도록 하였다. 띠철근의 간격은 실제교각의 띠철근 간격과 같으며 전 교각에 걸쳐 30cm간격으로 배근되었다. 그림 4와 같이 SD30인 각 철근들의 인장실험결과 주철근 D25의 평균항복강도는 3378 kg/cm^2, 띠철근 D13은 3326 kg/cm^{2}로 나타났다.



(a) D25 - 주철근



(b) D13 - 띠철근

그림 4 D25, D13 철근의 응력-변형률 곡선

5. 준정적 실험

5.1 축력 및 횡방향 가력

축력의 경우 그림 5와 같이 서보제어밸브가 장착된 압축력 350tonf 용량의 Actuator를 사용하여 200tonf의 축하중을 일정하게 재하하였으며 실험중 오차는 평균 ±0.29 tonf에 불과하였다.

횡방향 하중을 가력하는 Actuator는 시험체의 예상 파괴변위와 내력를 상회하는 stroke와 가력능력을 보유한 Actuator를 선택하였으며 Actuator를 시험체의 가력부분과 동일한 높이로 설치하고 미리 제작된 시험체 가력부의 hole에 장볼트로 체결하였다. 그림 6과 같이 본 실험에서는 stroke ±500mm, force 3500kN 인 Hydraulic Actuator를 사용하였으며 실물크기 시험체의 가력높이는 기초 상면으로부터 320cm이다.

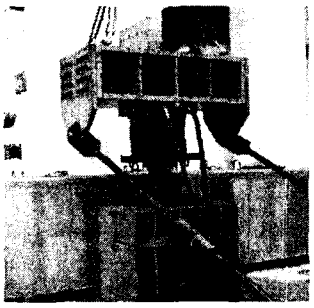


그림 5 축력 재하를 위한 상부 Actuator

그림 6 실물크기 시험체의 Setup

5.2 Drift Level에 의한 횡하중 재하

교각의 내진성능 평가를 위한 준정적 실험에서 지진하중에 대한 교각의 연성도 평가를 위해 항복변위만큼 하중을 재하한 후 변위제어로 하중을 재하하는 것이 기존의 일반적인 방법이다. 그러나 구조해석 또는 철근게이지의 변형률에 의한 항복변위를 정확하게 판정하기가 쉽지 않다는 측면에서 볼 때 여러 가지 어려움이 있다.

여기에는 특히 원형단면 교각의 항복에 있어서 최외곽 주철근의 항복과 교각 자체 항복의 상호관계, 이상적인 구조해석과 실제 시공의 차이, 철근과 strain gauge의 부착성능, 철근 재료 등의 이질성, 변형률 값의 계측오차, 기타 실험오차 등이 있을 수 있을 것이다.

본 실험연구에서 다루는 휨-전단 지배적인 교각의 경우, 실험 시작 이전의 수치해석에 의한 거동예측이 휨거동 교각의 경우보다 신뢰성이 낮고 소성힌지 생성구간의 파악에도 어려움이 있다. 따라서

본 실험에서는 항복변위에 따른 변위이력과는 달리 그림 7,8과 같이 교각 시험체의 높이에 대한 수평방향 변위값의 Drift level 기법으로 하중을 재하하는 방법을 사용하였다.

Drift level 기법에 의한 변위이력은 여러 가지의 방법이 제안되었으나 본 실험에서는 Mander 등이 실시한 전단거동 교각 실험에 대해 사용한 이력을 원용한 변위 이력을 가하고자 하였다.

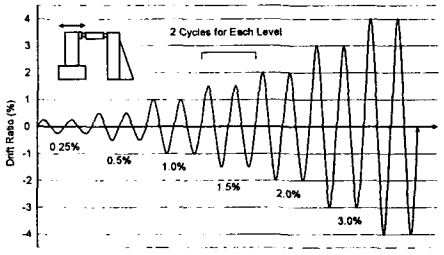


그림 7 Pilot Test에 적용

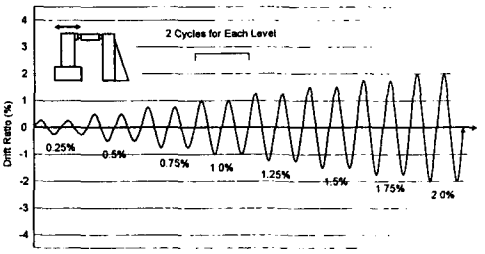


그림 8 본 실험에 적용

본 실험에 앞서 그림 7과 같은 Drift Level 변위이력을 적용하여 휨-전단파괴를 예상한 실물크기 시험체에 대하여 Pilot Test를 실시하였다. 그 결과 휨-전단 복합 파괴거동을 보인 기존의 파괴거동 특성과 달리 휨파괴 영역을 보이지 않고 전단파괴로 급격히 진전됨을 보여주었다. 이는 급격한 Drift level의 증가치, 즉 0.5%→1.0%→1.5로 0.5%씩 증가함에 따라 휨-전단 또는 전단시험체의 거동특성을 파악하기는 어려움이 따른다. 이와 같은 Drift level의 적용은 휨 파괴거동이 지배적인 교각 시험체의 거동특성을 파악하는데 적합함을 알 수 있었다.

따라서 본 실험에서는 그림 8과 같이 Drift level의 증가치를 0.25%→0.5%→1.0% ····의 순서로 파괴시까지 0.25%씩 증가시켜 휨-전단 시험체의 특성에 맞는 거동특성과 파괴양상을 조사하였다.

Drift Level을 이용한 준정적 실험은 Drift Level을 시험체의 본체높이에 대한 Displacement로 계산 후 Actuator Control Program에 입력하여 실험을 진행한다. Drift level 증가치 0.25%에 해당하는 변위는 8㎜로서 실험중 Drift level 증가에 따라 발생된 균열 및 파괴양상을 각 Drift 단계마다 진전된 상황을 조사하였다

6. 실험결과

6.1 실물 휨-전단 교각 (FS-H-LS000, 주철근 겹침이음 0%)

횡방향 철근이 비내진 상세임에도 불구하고 상당한 연성이 발휘되어 그림 9(a)와 같이 안정적인 하중-변위 이력곡선을 보이고 있다. 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, 교번하중에 의한 콘크리트 피복의 박리와 압쇄현상이 나타나 있어 교각 모형이 초기에는 휨에 의한 파괴로 진행되었으며 최종적으로 전형적인 휨-전단 거동을 나타내었다.

6.2 실물 휨-전단 교각 (FS-H-LSCR, 주철근 커플러 이음)

주철근의 연속성을 유지하여 겹침이음을 두지 않으면서도 시공의 편의성을 기할 수 있도록 주철근 연결부에서 coupler를 사용하는 방법이 대안으로 제시될 수 있다. 따라서 이의 실험적 검증을 위해 설정된 교각 모형 FS-H-LSCR은 주철근 겹침이음 길이의 중심부 위치에 기계적 철근이음 장치인 Taperjack coupler를 장착한 것이다. 그림 9(b)를 보면 연속철근을 사용한 그림 9(a)에 비해 더 연성

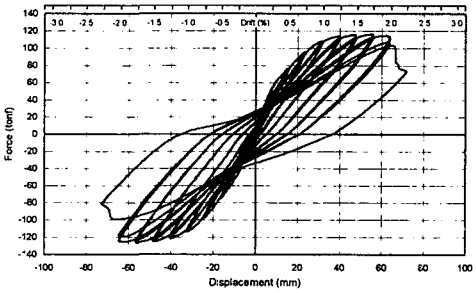
이 발휘되고 있음을 볼 수 있다. 그러나 최대 저항하중은 오히려 작게 발휘되고 있으며 교각모형 내부에서 상당한 slip mechanism이 형성되어 있어서 하중저항을 제대로 동반하지 못하는 강체 운동 변위가 포함된 것을 볼 수 있다. 즉, Taperjack coupler가 철근이 부담할 하중은 전달하고 있으나 이 과정에서 Taperjack coupler 내부와 겹이음 slip을 조금씩 동반하고 있음을 관찰할 수 있었다.

6.3 실물 휨-전단 교각 (FS-H-LS050, 주철근 겹침이음 50%)

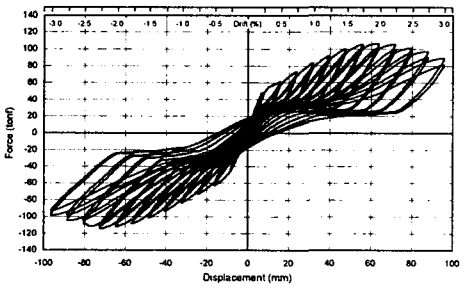
그림 9(c)에 나타난 바와 같이 주철근 모두 연속철근을 사용한 그림 9(a)에 비해 연성이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 소성힌지 형성 후 휨에 의한 피복 콘크리트의 박리가 상당히 진행되었고 주철근 부착파괴로 인하여 휨에 대한 내력이 급격히 저하되었다.

6.4 실물 휨-전단 교각 (FS-H-LS100, 주철근 겹침이음 100%)

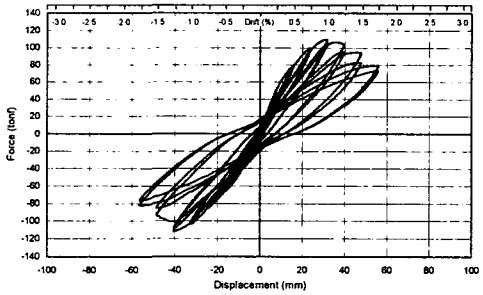
실험전 예상된 바와 같이 그림 9(d)와 같은 100% 주철근 겹침이음이 설치된 교각은 연성도가 크게 저하됨을 보여주고 있다. 이는 어떤 경우와 비교하더라도 가장 열악한 연성도를 나타내고 있는 것이다. 교번하중에 의한 급격한 내력저하와 휨에 의한 주철근 부착파괴로 진행되었음을 나타내고 있다.



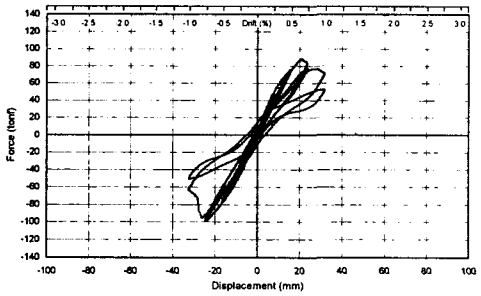
(a) FS-H-LS000



(b) FS-H-LSCR



(c) FS-H-LS050



(d) FS-H-LS100

그림 9 휨-전단 시험체 하중-변위 이력곡선

7. 실험결과

그림 11은 실물크기 휨-전단 교각모형들의 하중-변위 포락선을 비교한 것으로서 주철근이 100% 겹침이음된 교각(FS-H-LS100)이 가장 열악한 연성 거동을 나타내었고 겹침이음이 없는 교각(FS-H-LS000)은 안정적인 연성 거동을 보였다. 주철근중 절반만 연속철근을 사용한 교각(FS-H-LS050)은 앞의 두 경우의 중간 정도의 연성 거동을 나타내었다.

(a) FS-H-LS000 (b) FS-H-LSCR (c) FS-H-LS050 (d) FS-H-LS100

그림 10 휨-전단 시험체 최종 균열상태

표 2 변위 연성도 및 응답수정계수(R) 추정 결과

교각분류	주철근 겹이음	① 극한변위(mm)	② 항복변위(mm)	③ 연성도	④ 응답수정계수 R=③
실물크기 휨-전단교각 (형상비=2.67)	0 %	68.20	26.00	2.62	2.62
	커플러	96.00	38.50	2.49	2.49
	50 %	51.60	22.20	2.32	2.32
	100 %	31.20	17.3	1.80	1.80

표 2에서는 최대하중의 75%에 해당되는 초기변위를 항복 변위로 하였으며 극한변위는 일반적으로 적용되는 최대하중의 20% 이상이 감소되는 해당 변위로 하였다

이렇게 하중-변위 포락선 비교에서 관측된 경향들은 표 2에 나타낸 연성도 추정 결과와도 일치한다. 다만 실물크기 전단 교각에 대한 연성도 추정값의 경우 겹이음을 50% 사용한 경우가 겹침이음을 사용하지 않은 경우보다 오히려 연성도가 미세한 차이로 다소 크게 추정되어 있는 사실을 볼 수 있다. 이것은 변위연성도를 평가하는 방법의 특성상, 전단교각에 있어서 겹침이음이 없는 경우가 겹이음을 50% 사용한 경우에 비해 항복 변위는 다소 크게 추정되고 극한 변위는 거의 같게 추정되었기 때문이다.

한편 주철근 이음 커플러를 사용한 교각모형(FS-H-LSCR)은 각각의 비교그룹 중에서 가장 높은 Drift level까지 저항하였다. 그림 11의 결과만으로 판단할 때에는 커플러를 사용하는 것이 가장 높은 수준의 수평 변위까지 수평 내하력을 잃지 않고 저항할 수 있는 것처럼 보인다. 그러나 가해진 수평변위에 대해 저항하는 수평 내하력의 최대값은 주철근을 전부 또는 일부를 겹침이음 없이 연속철근을 사용한 경우보다 저하된다. 또한 100% 겹침이음된 모형들보다 훨씬 작은 수평 변위에서부터 수평강성이 저하되기 시작한다는 사실이 관측되었다.

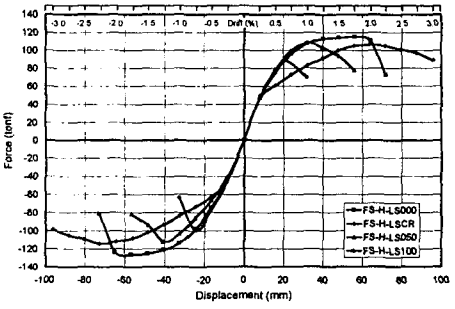


그림 11 변위-하중 포락선

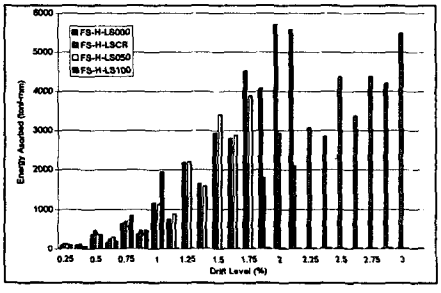


그림 12 Drift level별 에너지흡수량

실물크기 휨-전단 교각의 Drift level 당 흡수 에너지량을 그림 12에 나타내었다. 이 그림들로부터 주철근 겹침이음의 양이 작을수록 에너지 흡수량이 늘어나는 것을 관찰할 수 있다. 그리고 커플러를 사용할 경우 저항할 수 있는 Drift level은 높아지지만 에너지 흡수능력은 불리하다는 사실은 그림에서도 확인할 수 있었으며 주철근의 전부 혹은 일부에 연속 철근을 사용한 경우보다 커플러를 사용한 교각이 동일한 Drift level당 흡수된 에너지량이 현저하게 작은 것을 알 수 있었다.

8. 결 론

비내진 설계된 교각에 있어서 주철근 겹침이음 상세를 달리한 실물크기 휨-전단 교각모형 5기를 제작하여 준정적 실험을 실시하였다. 실험 결과 주철근 겹침이음의 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) 100% 주철근 겹이음을 피하는 대안으로서 주철근의 50%만이라도 연속철근을 사용하거나 철근 커플러를 사용하는 것도 연성도 증가에 상당한 도움이 된다는 사실을 확인하였다. 주철근 이음 커플러를 사용하는 경우 교각의 소성변형 능력은 확실히 증가하지만, 커플러의 내부와 주변부에 미끄러짐(slip)에 의한 강체 휨변위가 포함되어 교각의 거동이 휨거동으로 유도되는 경향이 있고, 따라서 에너지 소산능력은 연속된 철근을 사용하는 경우보다 현저히 떨어짐을 확인하였다.

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. 시설안전기술공단(1999). "기존교량의 내진보강 방안 연구", 한국지진공학회.
3. 한국건설기술연구원(2000). "사회기반 시설물의 내진성능향상 기술 개발", 한국건설기술연구원 연구보고서 건기연 2000-080.
4. 한국건설기술연구원(2001). "교각 내진성능 평가 및 교량 비선형 내진해석 프로그램 개발", 한국건설기술연구원 연구보고서 건기연 2001-078.
5. Priestley, M. J. N., Seible, F., Calvi, G. M(1996). "Seismic Design and Retrofit of Bridges", John Wiley & Sons.
6. Applied Technology Council(1996). "Seismic Evaluation and Retrofit of concrete Buildings", ATC-40 Vol 1, Redwood City, California
7. 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, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo.