

소성힌지 영역의 주철근 겹이음에 의한 RC교각의 비선형 거동특성 및 중약진지역의 내진설계 개선방향

The Influence of Lap Splice of Longitudinal Bars in the Plastic Hinge Zone on the Nonlinear Behavior Characteristics of RC Piers and New Seismic Detailing Concept in Moderate Seismicity Region

장승필*, 김재관**, 김익현***, 임현우****
CHANG, Sung-Pil, KIM, Jae Kwan, KIM, Ick-Hyun, LIM, Hyun-Woo

ABSTRACT

The influence of lap splice of longitudinal bars in the plastic hinge zone on the nonlinear behavior characteristics of RC piers has been investigated through the scale model tests. The seismic performance of bridge piers with lap splice is found to be insufficient due to the premature bond failure. On the other hand it is confirmed that the preventing lap splice in the plastic hinge zone enhances the seismic performance considerably even without the seismic details of transverse reinforcements. Based on these experimental results new seismic detailing concept appropriate to moderate seismicity region has been proposed.

1. 서론

1996년 이후 우리나라에서는 구조물의 합리적인 내진설계를 위한 개념연구 및 정립, 기존구조물의 내진성능 평가, 신설 및 기존구조물의 내진성능 확보를 위한 합리적 방안 등 다양한 연구가 수행되고 있다. 특히, 1999년의 터어키 지진 및 대만 지진은 구조물의 내진설계의 중요성을 다시 한번 일깨워 주는 계기가 되었다. 우리나라 도로교의 내진설계는 1992년 도로교시방서에 처음으로 도입되었으며 본격적인 내진설계의 수행은 1996년 이후라고 할 수 있다. 미국 AASHTO의 내진설계기준을 근간으로 하고 있으며 설계지진하중하에서 구조물의 비선형 거동을 허용하고 있어 큰 연성도를 확보하기 위한 내진상세를 채용하고 있다. 그러나, 지금까지 수행되어 온 연구결과를 살펴보면 우리나라의 지진세기는 미국의 강진지역과 달리 상당히 작은 편이며 내진상세가 적용되지 않은 구조물도 어느 정도 횡방향 내진성능을 지니고 있어 설계지진 하중하에서 상당히 제한된 비선형 거동 특성을 보이는 경우가 많다. 따라서, 이에 적합한 내진설계개념의 정립과 내진상세의 개발이 필요하다는 지적이 있어 온 것이 현실이다.

본 연구에서는 일반적으로 허용되고 있는 소성힌지영역의 주철근의 겹침이음이 교각의 내진성능에 미치는 영향을 실험을 통하여 살펴보고 현재의 복잡한 횡철근상세를 대신하여 우리나라와 같은 중약진지역에서 적용 가능한 내진설계상세 개념에 대하여 제안하였다.

* 서울대학교 토목공학과 교수, 지진공학연구센터 소장, 정회원

** 서울대학교 토목공학과 교수, 정회원

*** 지진공학연구센터 연구전담교수, 정회원

**** 광주광역시 토목사무관

2. 내진설계 검토

우리나라 도로교의 내진설계기준은 미국 AASHTO의 내진설계기준을 근간으로 하고 있다. 이 설계의 기본개념은 구조물의 연성도를 확보하여 사용기간 내에 발생확률이 매우 작은 지진운동 즉, 지반운동세기가 큰 설계지진에서도 붕괴를 방지하여 인명의 피해를 최소화하는 것이다. 우선, 구조물의 거동을 선형탄성거동으로 가정하여 탄성지진력을 구하고 이를 구조부재의 형태에 따라 각기 다른 응답수정계수를 도입하여 나누어 설계지진력으로 한다. 따라서, 설계지진에서 구조물의 큰 비선형 거동을 허용하게 되고 이에 따른 연성도를 확보하기 위한 철근상세를 규정하고 있다. AASHTO에서는 가속도계수(A)의 크기에 따라 4개의 지역으로 구분하고 있으며 각기 다른 내진상세를 규정하고 있다. 이를 요약하면 표1과 같다.

우리나라의 내진상세 규정⁽¹⁾은 AASHTO의 Category II의 내진규정과 매우 유사하여 소성현지 영역에서의 주철근의 겹침이음을 묵시적으로 허용하고 있다. 대신 상당량의 횡철근과 후크의 설치로 소성현지영역의 심부콘크리트를 구속하여 연성도의 확보를 기대하고 있다.

교량구조의 연성도는 횡철근에 의해 크게 영향을 받지만 횡구속이 충분하지 않은 상태에서는 소성현지영역에서의 주철근의 겹침이음에 의해서도 큰 영향을 받게 된다. 따라서, 향후 우리나라의 지진환경에 적합한 내진상세를 개발하기 위해서는 소성현지영역의 주철근의 겹침이음이 연성도에 미치는 영향을 평가하는 것이 필요하다.

표 1 AASHTO 및 우리나라의 내진관련 규정 비교

구분	AASHTO				우리나라 ⁽¹⁾	
	I	II	III	IV	I	II
지진구역						
가속도계수(A)	$A \leq 0.09$	$0.09 < A \leq 0.19$	$0.19 < A \leq 0.29$	$0.29 < A$	A=0.07	A=0.11
겹침이음 (Splice)	No consideration of seismic forces :	Not specified	Used only within the center half of column height (>400mm or 60d _b)		Not specified	
횡철근 (Transverse reinforcement)	Conventional design	Amount & spacing are specified	Same as the Category II		Amount & spacing are specified	

3. 소성현지 영역내의 주철근 겹침이음에 따른 RC 교각의 거동특성

3.1 비내진 상세 기존교각의 구조적 특성⁽²⁾

기존교각의 단면의 크기는 PC 박스교의 원형교각인 경우 3.0m-3.5m 가 일반적인 크기로 하중을 고려한 강도측면보다 교량의 받침크기 등에 의해 결정되는 것이 일반적이다. 따라서, 주철근비는 0.7%-1.2% 정도로 낮은 편이며 교각에 작용하는 압축력도 강도의 5-10% 정도의 매우 낮은 수준이다. 주철근은 시공의 편의 상 기초의 상단면에서 절단하여 겹침이음하는 것이 일반적이다. 겹침이음위치는 엇갈리게 배치하거나 또는 동일한 단면에서 실시하였다. 이 때 겹침이음길이는 압축이형철근의 겹침이음길이를 적용하고 있으며 주철근 지름의 30-40배 정도가 일반적이다. 따라서, 대부분의 경우 겹침이음 위치가 소성현지영역내에 위치하게 된다. 비내진 상세 기존교각의 횡철근량은 체적비로 0.1-0.3%로 매우 작으며 후크를 사용한 예는 극히 드물고 대부분의 경우 겹침

이음으로 처리되어 있다. 이 때 겹침이음 위치는 엇갈리게 하는 경우 보다 일반적으로 한 방향에 위치한다.

상기의 철근상세로 볼 때 횡철근에 의한 효과적인 심부콘크리트의 구속은 기대하기 어려운 상황이며 지진하중과 같은 정부의 교대하중이 지속적으로 작용하는 경우 주철근 겹침이음의 선단위치에서의 휨균열 발생에 따른 급속한 전단균열의 진전, 또는 주철근의 부착파괴에 의한 조기파괴가 예상되는 구조적 특성을 지니고 있다.

3.2 실험개요

1) 시험체 개요

교각의 제원에 따라 다양한 형태의 파괴패턴을 예상할 수 있으나 본 연구에서는 전단파괴가 동반되지 않는 교각을 모델로 하였다. 교각의 단면형상은 널리 적용되고 있는 중실원형교각으로 하고 상기의 파괴모드 및 실험 여건 등을 고려하여 종횡비(Aspect ratio)는 5.0으로 선정하였다. 축소비는 1/3.5이다. 주철근은 SD30을 사용하였고 콘크리트의 설계압축강도는 240kgf/cm^2 (실제 강도 313kgf/cm^2)이다. 콘크리트의 피복두께는 주철근 겹침이음부의 부착파괴모델⁽³⁾을 고려하여 결정하였으며 주철근 및 횡철근의 겹침이음길이는 사용철근의 지름(d_b)에 비례하도록 설계하였다($30d_b$). 주철근의 겹침이음위치는 동일한 단면에 있는 것으로 하였으며 겹침이음이 없는 모델은 1본의 장철근을 주철근으로 사용하였다(그림 1). 실험교각과 축소모형의 상세비교는 표2와 같다.

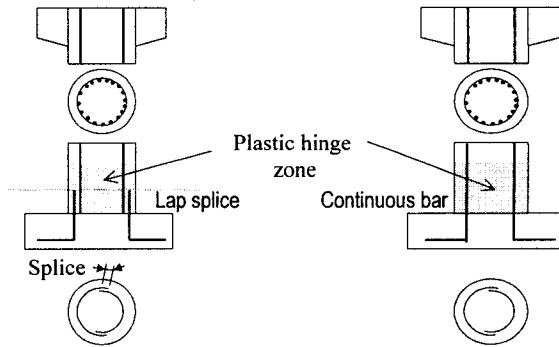


그림 1 모델의 철근상세 개념도

표 2. 실험교각과 축소모형의 상세비교

항목	타입	Prototype	Model(1/3.5 Scale)
재료강도 (kgf/cm^2)	콘크리트	240	240
	철근	SD30	SD30
원형:지름(D)		3.5	1.0
H:높이(m)		17.5	5.0
주철근	지름	D32	D13
	철근비(%)	0.858	0.855
횡철근	지름	D13	$\phi 6$
	Spacing(소성현지부)	20cm	8cm
	철근비(%)	0.158	0.151
피복두께(cm)		8.4cm+18.4cm(2열배열)	3.5cm
축력		$0.05 \sim 0.10 \sigma_{ck} A_g$	$0.0378 \sigma_{ck} A_g (=71.20\text{tf})$

2) 실험방법

횡철근의 겹침이음이 있는 방향으로 준정적 반복하중을 재하하여 실험을 수행하였다. 축력은 ENERPAC사의 용량 100tf 오일 잭을 사용하여 재하하였으며 수평력에 의한 소성 변형시에도 시험체의 상부에 $P-\Delta$ 효과에 의한 추가적인 모멘트가 걸리지 않도록 디바이스를 설치하였다.

수평력은 MTS사의 Stroke가 $\pm 10\text{in.}(254\text{mm})$ 이고 용량 2000kN의 Hydraulic Actuator를 이용하여 재하하였다. 우선, 콘크리트 압축연단의 극한 변형률이 0.003인 상태에서의 이론적 수평내하력 P_i (Ideal Lateral Load Capacity)을 구하고 $0.75 P_i$ 을 하중재하방식에 따라 재하하여 Push Direction과 Pull Direction의 변위 $\Delta_{0.75}^+$, $\Delta_{0.75}^-$ 를 각각 구하였다. 이를 외삽법에 의해 각 방향에 대한 항복변위 Δ_{y1} , Δ_{y2} 를 구하여 평균하여 항복변위 Δ_y 를 정의하였다(식 1 참조). $0.75 P_i$ 까지는 하중재하방식, 그 후는 변위재하방식으로 $1.0 \Delta_y$, $1.5 \Delta_y$, ...의 변위를 각 2회씩 재하하였다.

$$\Delta_y = \frac{\Delta_{y1} + \Delta_{y2}}{2} = \frac{\Delta_{0.75}^+ + \Delta_{0.75}^-}{2 \times 0.75} \quad (1)$$

3) 실험결과 및 비교분석

그림 2는 모델교각의 이력곡선을 나타낸다. 주철근의 겹침이음이 있는 모델에서는 겹침이음부의 윗부분에서 수평균열이 집중적으로 발생하여 주철근 겹침이음부로 진전되었다. $\mu_d = 1.5$ 까지는 미세한 수직균열이 생성되었지만 안정적인 이력곡선(hysteresis loop)의 특성을 보여주고 있다. 그 후 수직균열의 발생이 많아지면서 $\mu_d = 2.0$ 에서 주철근의 겹침이음부에 걸쳐서 진전된 수직균열로 급격한 하중의 저하가 발생하였다. 피복콘크리트의 박리나 주철근의 좌굴현상은 관찰되지 않았다.

한편, 주철근의 겹침이음이 없는 모델에서는 비교적 수평균열이 분산되면서 상당히 안정적인 이력곡선을 보여주고 있다. $\mu_d = 3.0$ 에서 최초의 좌굴이 발생하였지만 급격한 내하력의 저하 없이 파괴에 이르렀다.

그림 3은 하중-변위 포락선을 서로 비교한 그림이다. 최대내하력의 80% 이하로 떨어지는 점을 파괴로 정의하고 연성도를 구하면 겹침이음이 있는 모델에서는 연성도가 약 1.5이며 겹침이음이 없는 모델에서는 약 4.5정도이다. 소성현지역에서의 주철근의 겹침이음을 방지함으로써 3배 정도의 연성도를 확보할 수 있었다.

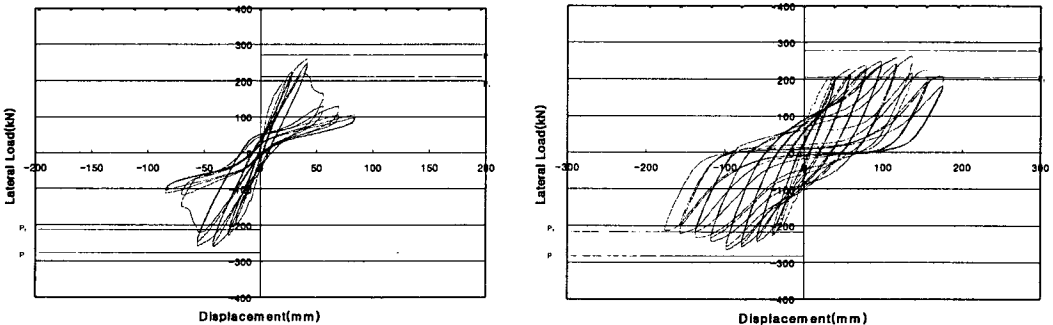


그림 2 하중-변위 이력곡선

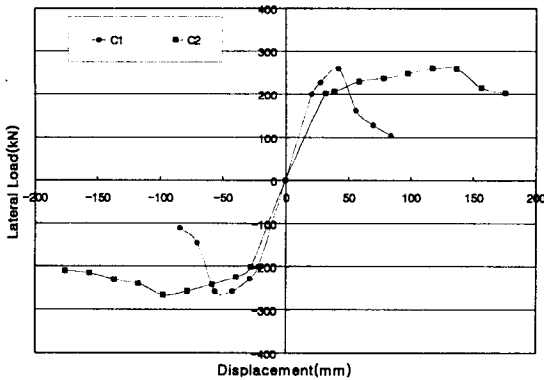


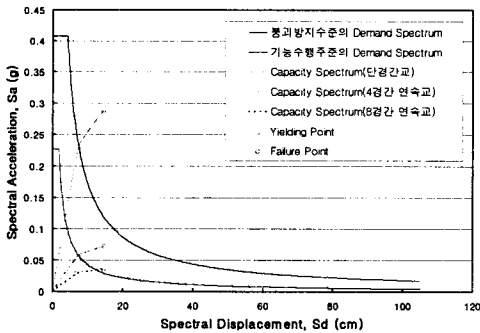
그림 3. 하중-변위 포락곡선의 비교

(C1: 겹침이음 있는 모델, C2: 겹침이음 없는 모델)

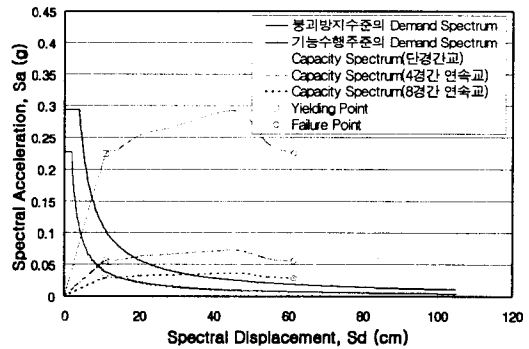
침이음이 없는 모델의 경우는 연성도의 증가에 따른 감쇠효과의 증가와 큰 변형성능으로 소요성능을 충분히 확보하는 것을 알 수 있다.

4. 중진지역의 구조거동 특성

내진설계가 적용되지 않은 기존구조물의 비선형 거동특성을 연구한 기존 연구결과^{(4)(5),(6),(7)}를 살펴보면 이들 구조물도 상당한 내진성능을 보유하고 있어 설계지진에서는 상당히 작은 량의 비선형 거동을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 강진지역의 내진설계에서 기대하는 큰 연성도가 아닌 비교적 작은 연성도의 확보만으로 소요성능을 만족할 수 있음을 시사하고 있다. 그림 4는 상기의 교각모델을 단경간, 4경간연속교, 8경간연속교에 적용하는 경우의 내진성능을 역량스펙트럼으로 평가한 그림이다. 소성힌지 영역의 주철근 겹침이음에 의한 조기파괴는 다경간 연속교의 경우는 연성도의 부족으로 소요성능을 확보하고 있지 않다. 그러나 주철근의 겹



(a) 주철근 겹침이음이 있는 모델



(b) 주철근 겹침이음이 없는 모델

그림 4 역량스펙트럼에 의한 내진성 평가

5. 내진상세의 개선방향

현행 우리나라의 내진설계 기준에서는 충분한 심부콘크리트 구속에 의한 소요연성도를 확보하기 위하여 충분한 량의 횡구속철근 및 후크 등 횡철근상세를 규정하고 있다. 이는 철근 조립 및 콘크리트 타설의 어려움으로 시공현장에서 상당한 어려움을 호소하는 원인이 되고 있다. 기존의 연구결과와 같이 우리나라와 같은 중약진 지역의 설계지진하중에서 상당히 한정된 연성도의 확보로 소요성능을 만족한다면 이를 위한 내진상세의 개발이 필요하다. 전술한바와 같이 주철근의 겹침이음과 횡철근의 상세는 구조물의 연성거동에 크게 영향을 주는 주요인자이다. 소성힌지 영역내에서의 주철근의 겹침이음에 대한 규정은 기준에는 명시되어 있지 않아 이를 묵시적으로 허용하

고 있다. 본 연구의 결과에서와 같이 비록 횡철근에 대한 내진상세를 적용하지 않더라도 소성힌지 영역에서의 주철근 겹침이음의 방지하는 것으로 연성도가 크게 개선되는 것을 알 수 있다. 따라서 소성힌지영역에서의 주철근의 겹침이음 방지는 시공상 까다로운 횡철근의 상세를 크게 완화할 수 있는 새로운 내진상세의 대안으로 적용 가능하다는 것을 시사하고 있다.

6. 결론

우리나라의 현행 내진설계기준에는 소성힌지영역의 주철근 겹침이음 방지를 위한 명시적인 규정이 없어 이를 묵시적으로 인정하고 있다. 본 연구에서는 교각의 축소모형 실험을 통하여 소성힌지 영역의 주철근의 겹침이음에 의한 내진성능의 영향을 평가하고 실험결과를 기본으로 하여 우리나라의 지진환경에서 적용 가능한 새로운 내진상세 개념에 대하여 검토하였다.

소성힌지영역의 주철근 겹침이음은 지진하중과 같은 반복하중 재하시 주철근의 부착파괴에 의한 조기파괴로 내진성능이 상당히 취약함을 확인하였다. 또한 횡철근에 대한 내진상세를 적용하지 않더라도 소성힌지영역의 주철근 겹침이음의 방지는 연성도를 크게 향상시켜 내진성능이 크게 개선되는 것도 확인되었다. 따라서, 우리나라와 같은 중약진지역에서는 상기방법이 다량의 횡철근 및 후크를 요구하는 현행 내진상세를 크게 완화할 수 있는 좋은 해결책으로 판단된다.

본 연구는 휨파괴 형태가 지배적인 시험체를 대상으로 주철근 겹침이음에 의한 내진성능의 영향을 연구하였으나 향후 다양한 파괴유형에 대하여 횡철근상세가 내진성능에 미치는 영향을 다각적으로 검토, 종합함으로써 합리적인 내진상세의 확립이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 시설안전기술공단의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다. 또한, 실험에 많은 도움을 주신 현대건설기술연구소 관계자 여러분께도 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국도로교통협회, 도로교 설계기준(안), 1999, 6.
2. 전귀현, 이지훈(1998), "기존 철근콘크리트 교각의 내진성 평가", 한국지진공학회 논문집, 제2권 제4회, 1998. 12, pp. 155-168.
3. Priestley, M.J.N., Seible, F., and Calvi(1996), G.M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, Inc., 1996, 686 pp.
4. Lee, H.-S., Woo, S.-W., Heo, Y.-S. (1998), "Inelastic behaviors of a 3-story reinforced concrete frame with nonseismic details", 한국콘크리트학회 추계학술발표회논문집, 1998, 10(1), 429-432.
5. 김재관, 김익현(1998), "중진지역에서의 한정연성도 내진설계", 한국지진공학회 추계학술발표회 논문집, 1998. 2(1)
6. 김익현, 김재관(1999), "비내진상세 철근콘크리트 구조물의 내진성능 및 중약진지역 내진설계에의 적용", 한국지진공학회 추계학술발표회 논문집, 1999, 3(2).
7. NCEER (1996), *Seismic Performance of a Model Reinforced Concrete Bridge Pier Before and After Retrofit*, Technical Report NCEER-96-0009, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.