

## 수평 반복하중을 받는 비내진상세 RC 중공구형교각의 거동특성

김재관<sup>1)\*</sup> · 김익현<sup>2)</sup> · 임현우<sup>3)</sup> · 이재호<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>서울대학교 지구환경시스템공학부 <sup>2)</sup>울산대학교 건설환경공학부 <sup>3)</sup>한국공군 작전사령부 시설처

(2002년 10월 15일 원고접수, 2003년 3월 10일 심사완료)

### Behavior of Hollow Rectangular RC Piers without Seismic Detailing Subjected to Cyclic Lateral Load

Jae-Kwan Kim<sup>1)</sup>, Ick-Hyun Kim<sup>2)</sup>, Hyun-Woo Lim<sup>3)</sup>, and Jae-Ho Lee<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Civil Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-744, Korea

<sup>2)</sup> Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan, Ulsan, 680-749, Korea

<sup>3)</sup> Air Force Operations Command, Korea

(Received October 15, 2002, Accepted March 10, 2003)

#### ABSTRACT

Scaled model tests were carried out to investigate a seismic behavior of reinforced concrete piers with hollow-rectangular section that were not detailed for seismic load. Additional lateral reinforcing bars were not provided that might be required for confinement against earthquake load. Two kinds of reinforcement details were considered for the longitudinal reinforcing bars: lap-spliced and continuous. In the lap-spliced model all longitudinal bars were lapped at the same height in a bottom plastic hinge zone. In the other model all longitudinal bars extended continuously throughout the height. The constructed models were subjected to quasi-static cyclic lateral loading in the presence of the constant vertical load. Limited ductile behavior was observed in the test of lap-spliced model and more ductile behavior was observed in the test of a continuous longitudinal reinforcement model.

**Keywords :** hollow rectangular RC column, seismic detailing, lap splice, seismic performance, ductility

#### 1. 서 론

내진설계가 적용되지 않은 우리나라 대다수의 기존교량 특히, 다경간 연속교는 그 구조적 특성으로 볼 때 교축방향에 대하여 지진에 매우 취약한 것으로 판명되고 있어 적절한 내진보강대책이 요구되고 있다.<sup>1,2)</sup> 1990년에 들어서는 중공단면 교각이 다경간 연속교에 널리 적용되고 있으며 이는 교각의 자중 감소로 인하여 기초부의 하중부담을 크게 줄일 수 있고 지진력도 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나, 지진하중을 고려하지 않은 기존 교각의 경우 시공의 편의를 위하여 주철근의 겹침이음을 기초의 직상부에 두고 있으며 횡철근은 횡구속을 위한 내진상세를 가지고 있지 않은 구조적 특성을 지니고 있다. 주철근의 겹침이음 위치와 횡철근의 양 및 상세는 교량의 내진성능을 결정하는 매우 중요한 인자이다. 미국의 경우 강진지역에서는 교각의 충분한 변형성능을 확보하기 위하여

소성힌지 영역에서의 주철근의 겹침이음을 허용하지 않으나, 상대적으로 작은 변위연성도가 요구되는 중약진지역에서는 아직도 소성힌지 영역에서의 주철근 겹침이음을 허용하고 있다.<sup>3,4)</sup> 그러나, 겹침이음부에서의 충분한 횡구속을 위한 내진상세를 규정하고 있어 소요연성도를 기대하고 있다. 우리나라에서도 미국의 중약진지역과 동일한 개념의 내진규정을 적용하고 있다. 만약, 기존교각과 같이 주철근의 겹침이음이 소성힌지 영역내에 있고 충분한 횡철근이 배치되어 있지 않다면 지진과 같은 수평반복하중에서는 주철근 이음부의 부착파괴와 같은 취성파괴의 가능성이 매우 높아진다. 따라서, 적절한 내진보강대책을 강구하기 위해서는 비내진상세 교각의 구조적 특성에 따른 거동 특성을 충분히 이해하고 이에 근거한 내진성능 평가가 절실하게 요구된다.

최근 우리나라에서도 교각의 지진거동에 관한 실험적 연구가 활발하게 진행되고 있다. 정영수<sup>5,6)</sup> 등은 주철근에 겹침이음이 없는 연속철근을 사용한 중공원형과 중실원형 단면의 철근콘크리트 교각의 축소모델을 제작하여 반복하중에 대한 응답특성을 연구하였다. 김재관<sup>7)</sup> 등은 소성힌

\* Corresponding author  
Tel : 02-880-8387 Fax: 02-887-0349  
E-mail: jkwan@plaza.snu.ac.kr

지역에서의 주철근이 겹침이음된 중실원형단면과 겹침이음이 없는 교각을 대상으로 거동특성 실험을 수행하였으며, 이재훈<sup>8)</sup> 등은 서해대교의 내진성능 평가를 목적으로 중공 육각형 단면 철근 콘크리트 교각의 축소모델을 제작하여 반복하중재하실험을 수행하였다. 이때, 주철근은 기둥하단에서 교호 겹침이음에 의해서 연장되는 것으로 설계되었다. 이대형<sup>9)</sup> 등은 비내진 상세 중실원형 단면 교각을 대상으로 주철근 겹침이음 특성에 따른 교각의 거동특성을 연구하였다. 김병석<sup>10)</sup> 등은 휨-전단복합과괴모드를 갖는 기존의 비내진상세 교각을 대상으로 하여 내진성능 평가 실험을 수행하였다.

미국의 경우, 1971년 San Fernando 지진 이전에는 교각의 주철근을 기둥하단에서 겹침이음으로 연장하고 횡방향 구속철근도 고려하지 않는 설계법이 사용되었다.<sup>11)-13)</sup> 따라서, 이러한 철근상세를 갖는 교각의 거동에 대한 연구가 최근까지도 계속해서 실시되고 있으나 대부분 중실단면을 그 대상으로 하고 있다. Chai<sup>12)</sup> 등과 Jaradat<sup>13)</sup> 등은 원형 교각의 내진보강과 관련하여 비내진상세 교각의 거동을 조사하였다. Aboutaha<sup>14)</sup> 등은 장방형 교각의 내진보강과 관련하여 비내진상세 교각의 거동을 연구하였다. Priestley<sup>15)</sup> 등과 Mander<sup>16)</sup> 등은 중공단면 교각의 휨강도 및 연성도에 대한 연구를 수행하였으나 이들 시험체는 주철근의 겹침이음이 없고 횡구속된 교각의 거동특성을 파악하는 것이었다.

위에서 살펴본 바와 같이 기존의 연구에서는 중실단면의 경우에는 겹침이음의 영향과 보강 효과에 대한 연구가, 중공단면 교각의 경우에는 내진상세에 따른 거동특성의 실험적 연구가 주종을 이루고 있다. 교각의 거동에 대한 철근 상세의 영향을 밝히기 위해서는 횡방향 철근의 상세와 종방향 철근의 이음상세의 영향을 분리하여 조사하는 것이 필요하며, 이러한 철근상세를 지닌 중공단면 교각의 거동특성에 대해서는 극히 제한적으로 연구가 수행되었다.

본 연구에서는 우리나라에 건설된 기존교량 중 내진설계가 적용되지 않은 중공구형 단면 교각의 축소모델을 제작하여 거동특성에 관한 실험을 수행하였다. 주철근의 겹침이음이 교각의 거동특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 주철근을 겹침이음한 모델과 주철근을 연속시킨 축소모델에 대해서 거동실험을 수행하여 겹침이음의 효과를 비교분석하였다. 실험결과 단면의 형상이 기둥의 연성거동에 미치는 영향이 작지 않음을 확인할 수 있었고 이러한 측면에서 본 연구는 중요한 의의를 가진다고 할 수 있다.

## 2. 시험체의 설계와 제작

일반적으로 내진설계가 실시되지 않은 교각은 지진 발생시 휨과괴, 휨-전단과괴, 전단과괴, 주철근의 부착과괴, 기타 기초 및 연결부의 국부적인 파괴형태를 보이게 된

다.<sup>17)</sup> 본 연구에서는 구조외형 특성상 전단파괴가 동반되지 않는 기존 중공구형교각의 거동특성을 분석하는 것을 목표로 하였다. 실험대상 모델(Prototype) 교량은 1994년도에 영동고속도로에 건설된 강천 2교로서 주철근이 겹침이음에 의해서 연장된 모델 1기와 주철근이 겹쳐이지 않고 연속되는 모델 1기를 제작하였다. 대상교각(Prototype)의 기하 형상은 Fig. 1과 같다. 단변이 3.0m, 장변이 5.2m, 두께 75cm인 중공구형단면으로 교각의 높이는 25m이다. 하중은 교축방향에 해당하는 단면의 약축방향으로 재하되므로 단면의 단변에 대한 교각의 높이 비는 8.33이 되어 전단파괴가 배제된 재원특성을 갖는다. 한편 재하방향에 대한 중공비(단면 외측치수에 대한 내측치수 의 비)는 0.5이다. 대상교각(Prototype)의 구조적 특성과 시험시설의 규모와 성능을 고려하여 시험체의 축소비는 1/5로 정하였다.

### 2.1 주철근의 겹침이음

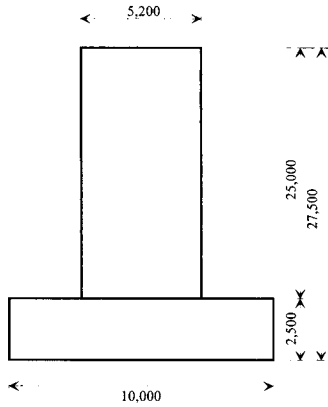
실교각의 주철근은 D25이며 겹침이음의 위치와 길이는 설계도에는 표시되어 있지 않다. 다수의 현장조사에 의하면 시공편의를 위하여 주철근은 압축 이형철근의 겹침이음길이를 만족하면서  $30 \sim 40 d_b$ (주철근의 지름)의 이음길이를 시공되었으며 당시 관행으로는, 겹침이음 길이에 대한 최소 요구가 만족된다면 주철근은 동일한 위치에서 모두 겹침이음하는 것이 일반적이었다. 따라서, 본 연구에서는 D10 상용철근을 기초상면에  $30 d_b$ 의 겹침이음 길이로 동일한 높이에서 한꺼번에 겹침이음 되는 것으로 모델을 설계하였다. 교각 기부의 소성힌지영역을 교각단면크기(D)의 0.5D~1.0D로 가정하는 경우, 주철근의 겹침이음이 소성힌지영역내에 위치하게 되어 대상교각과 유사한 조건을 갖게 된다. 기초부 정착은 대상교각과 유사하게 갈고리를 사용하여 충분히 철근강도를 발휘할 수 있게 하였다.

### 2.2 횡철근 배근상세

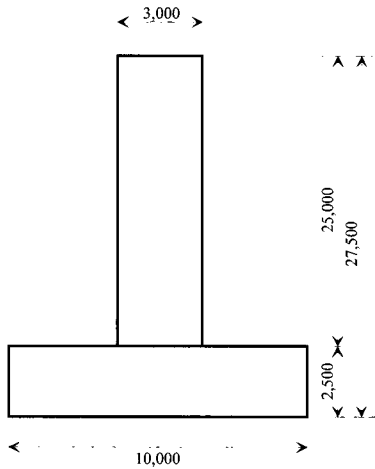
Fig. 1(d)에서와 같이 대상교각의 횡철근은 갈고리 없이 D19 철근을 사용하여 4곳에서 겹침이음길이 45cm로 단순히 겹침이음 되어 있다. 횡철근의 간격은 소성힌지영역에서 15cm이고 교각의 중앙부에서는 30cm이다. 축소모델의 횡철근은 #6(지름: 4.8mm, 공칭면적:  $0.181\text{cm}^2$ )의 와이어를 열처리하여 사용하였으며 횡철근의 겹침이음은 12cm로 하여 횡철근 직경에 비례하도록 하였다. 횡철근의 간격은 동일한 횡철근비가 얻어지도록 소성힌지영역에서 6cm, 중앙부에서는 12cm로 하였다.

### 2.3 피복두께

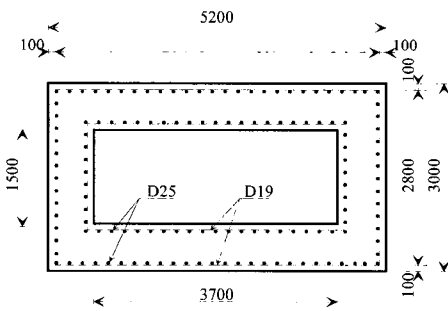
실험 대상인 교각은 주철근이 소성힌지영역내에서 겹침



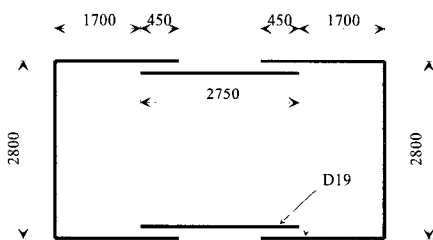
(a) Front view



(b) Side view



(c) Arrangement of re-bars



(d) Detail of transverse re-bar

Fig. 1 Dimension of prototype(unit; mm)

이음되어 있고 횡철근은 갈고리가 없이 단순하게 겹쳐이 어져 교각 심부콘크리트의 구속 효과는 크지 않은 철근상 세를 지니고 있다. 따라서 지진과 같은 수평하중이 지속 적으로 작용하게 되면 소성힌지영역의 주철근의 겹침이음 부에 미세균열이 발생하고 그에 따른 콘크리트의 유효인 장강도 감소로 부착강도가 저하되어 주철근 겹침이음부에서 부착파괴가 발생하기 쉽다. 이러한 부착파괴는 횡철근 또는 피복콘크리트와 같은 횡구속에 의해 크게 영향을 받는다. 따라서, 부착파괴에 직접적으로 관여되는 콘크리트의 피복두께는 단순하게 축소비를 적용하는 것보다 주철근 겹침이음부의 부착파괴 (Bond Failure) 모델을 고려하여 피복두께를 결정하는 것이 보다 합리적이라고 판단된다. 본 연구에서는 Priestley가 제안하는 부착파괴모델<sup>17)</sup>을 참조하여 대상교각의 파괴면의 주변장  $p$ 를 계산하여 이를 대상교각과 축소모델의 주철근 직경비로 축소하여 적용하였다.

본 연구에서는 Fig. 2의 주철근의 배열에서와 같이 주철근의 주변장에 대한 축소율을 대상교각과 맞추기 위하여 주철근을 지그재그 형태로 배열하였다. 대상교각의 피복두께는 외측 및 내측이 각각 87.5mm, 137.5mm이며 축소모델의 피복두께는 각각 31.0mm, 45.0mm이다.

## 2.4 축력비

우리나라 교량의 교각 단면크기는 강도측면보다 교량의 받침수 및 배열에 의하여 결정되는 경우가 많아 대체적으로 크게 설계되고 있다. 따라서, 축력비는 축압축강도의 5 ~ 10% ( $0.05 \sim 0.10 f_{ck} A_g$ ) 정도로 매우 낮은 것이 일반적이다.<sup>2)</sup> 본 연구의 축소모델에 가한 압축력은 48.3tonf로 축압축강도의 약 5% 정도 수준이다.

Table 1은 대상교각과 시험 모델의 설계 규격을 비교한 것이며 시험모델의 철근배근도는 Fig. 2와 같다.

Table 1 Comparison of details between prototype and test model

Description		Prototype	Test model
b×h: section(m)	outer	5.2×3.0	1.04×0.60
	inner	3.7×1.5	0.74×0.30
H: Height(m)		25.0	5.0
Long. St	Diameter	D25	D10
	Re-bar ratio(%)	1.089	1.100
Trans. St	Diameter	D19	#6Wire(4.8mm)
	Spacing (Plastic Hinge zone)	15cm	6cm
	Confinement ratio(%)	0.710	0.736
Cover thickness(cm)		8.75(outside), 13.75(inside)	3.10(outside), 4.50(inside)
Axial force		$0.05 \sim 0.10 f_{ck} A_g$	$0.05 f_{ck} A_g$

## 2.5 재료특성

설계자료에 의하면 국내 교량의 콘크리트 설계압축강도는 210~280kgf/cm<sup>2</sup>이며 철근은 SD30 ( $f_y=3000$  kgf/cm<sup>2</sup>)이 주로 사용되었다. 모델 제작시 콘크리트의 타설은 교각의 기초부와 교각 부분으로 나누어 실시하였으며 굵은 골재의 치대치수는 피복두께 등을 고려하여 19mm로 하였다. 28일 양생 후의 공시체(φ15×30 cm)의 압축강도는 기초부에서 평균 311 kgf/cm<sup>2</sup>, 교각부에서 평균 313 kgf/cm<sup>2</sup>이다.

축소모델의 주철근은 대상교각과 동일재료인 SD30의 철근을 사용하였다. 실교각의 띠철근은 주철근과 동일하게 SD30을 사용하였으나 축소모델의 경우 #6 (지름: 4.8mm, 공칭면적:0.181cm<sup>2</sup>)의 와이어를 열처리하여 사용하였다. 인장시험 결과 열처리된 와이어의 항복강도는 대략 2200 kgf/cm<sup>2</sup> 정도이다.

## 2.6 기초부

실제 지진발생시 기초부도 취약부로 손상의 위험이 있으나 본 연구에서는 충분한 강도를 발휘하도록 설계하여 기초부의 파괴를 방지하였다.

## 2.7 시험체 구성

시험체는 소성힌지영역에서 동일 위치에서 주철근이 겹침이음 되어 있는 모델(모델명 HR1)과 연속철근으로 겹침이음이 없는 모델(모델명 HR2) 2기를 제작하였다. 주철근의 겹침이음외의 다른 설계조건은 두 모델에서 모두 동일하다. 모델 HR1의 실험목적은 기존교각의 거동특성 파악이며, 모델 HR2는 주철근 겹침이음에 따른 거동특성의 차이를 파악하기 위함이다.

# 3. 준정적 반복재하실험

## 3.1 하중재하

본 연구에서 교각의 내진성능 평가는 축력이 일정하게 가해진 상태에서 수평력을 주기적으로 반복 재하하여 수행되었다(Fig. 3). 축력은 ENERPAC사의 용량 100tonf 오일 잭을 이용하여 축력재하장치를 통하여 재하하였다. 축력재하장치는 수평력에 의한 교각의 소성 변형시에도 시험체의 상부에 부가 모멘트가 걸리지 않도록 하고 시험체의 수평 변위와 함께 회전 가능하도록 설계되었다. 수평력은 MTS사의 Stroke가 ±10in.(254mm)이고 용량 2000kN의 Hydraulic Actuator를 이용하여 변위제어방식으로 주기하중을 반복하여 가하였다. 수평력을 가할 시에

는 반복회수와 하중의 증분크기를 결정하는 것이 중요하다. 실제 지진시에 예상되는 구조물의 거동특성을 고려하여 이와 유사하게 정적하중을 주기적으로 가하는 것이 바람직하지만 이를 파악하기는 쉽지 않다. 본 연구에서는 각 변위진폭에서 주기하중의 반복횟수를 2회(Cycle #1 및 Cycle #2)로 정하였으며 항복변위를 찾기 위한 0.75P<sub>i</sub>(Ideal Lateral Load Capacity)까지는 하중제어로 재하하였고 그 이후부터는 변위제어로 재하하였다(Fig. 4). 한편, 하중제어단계에서는 초기균열상태를 파악하기 위하여 0.5P<sub>i</sub>에서도 반복하중을 재하하였으며 변위제어단계에서의 변위진폭의 증분은 항복변위( $\Delta_y$ )의 1/2로 취하여 재하하였다.

항복변위의 결정에는 여러 가지 방법이 사용되는데, Priestley와 Park<sup>15)</sup>이 제안한 공식을 채택하였다. 먼저, 교각에서 실험된 재료값들을 이용한 해석을 통하여 콘크리트 압축연단의 극한 변형률이 0.003인 상태에서의 이론적 수평내하력 P<sub>i</sub> (Ideal Lateral Load Capacity)를 구하고 Fig. 5에서와 같이 축소모델에 0.75 P<sub>i</sub>를 미치는 방향(Fig. 3의 서쪽방향(W)으로 재하시)과 당기는 방향(Fig. 3의 동쪽방향(E)으로 재하시)으로 가하여 각각의 변위  $\Delta'_{0.75}$ ,  $\Delta''_{0.75}$ 를 구한다. 아래 식에서와 같이 외삽법에 의해 평균하여 항복변위  $\Delta_y$ 를 구하였다.

$$\Delta_y = \frac{\Delta_{y_1} + \Delta_{y_2}}{2} = \frac{\Delta'_{0.75} + \Delta''_{0.75}}{2 \times 0.75}$$

## 3.2 계측

수평하중 재하에 따른 교각의 거동특성을 파악하기 위하여 다양한 계측항목을 설정하고 계측장치를 설치하여 계측하였다. 하중 재하에 따른 주철근의 변형률과 주철근 겹침이음부에서의 슬립과 같은 현상을 정량적으로 계측하기 위하여 주철근에 변형률계를 설치하였고, 횡철근의 횡구속효과를 파악하기 위하여 횡철근에도 변형률계를 설치하였다. 또한, 기초부에 매입된 주철근의 변형률 분포로부터 주철근의 뽑힘량을 계산할 수 있도록 기초부 철근에도 변형률계를 설치하였다. 하중재하에 따른 시험체의 전체적인 변형을 파악하기 위하여 기초상면에서 50cm, 100cm, 200cm, 500cm의 위치에 LVDT를 설치하여 횡변위를 측정하였으며 동일한 위치에서 광과측정도 병행하였다. 한편, 수평하중의 증가에 따른 기초부의 지지력 부족으로 인한 기초부의 이동, 회전 또는 들림과 같은 예기치 못한 변위를 계측할 수 있도록 기초부에 5개의 Dial Gauge를 설치하여 측정하였다.

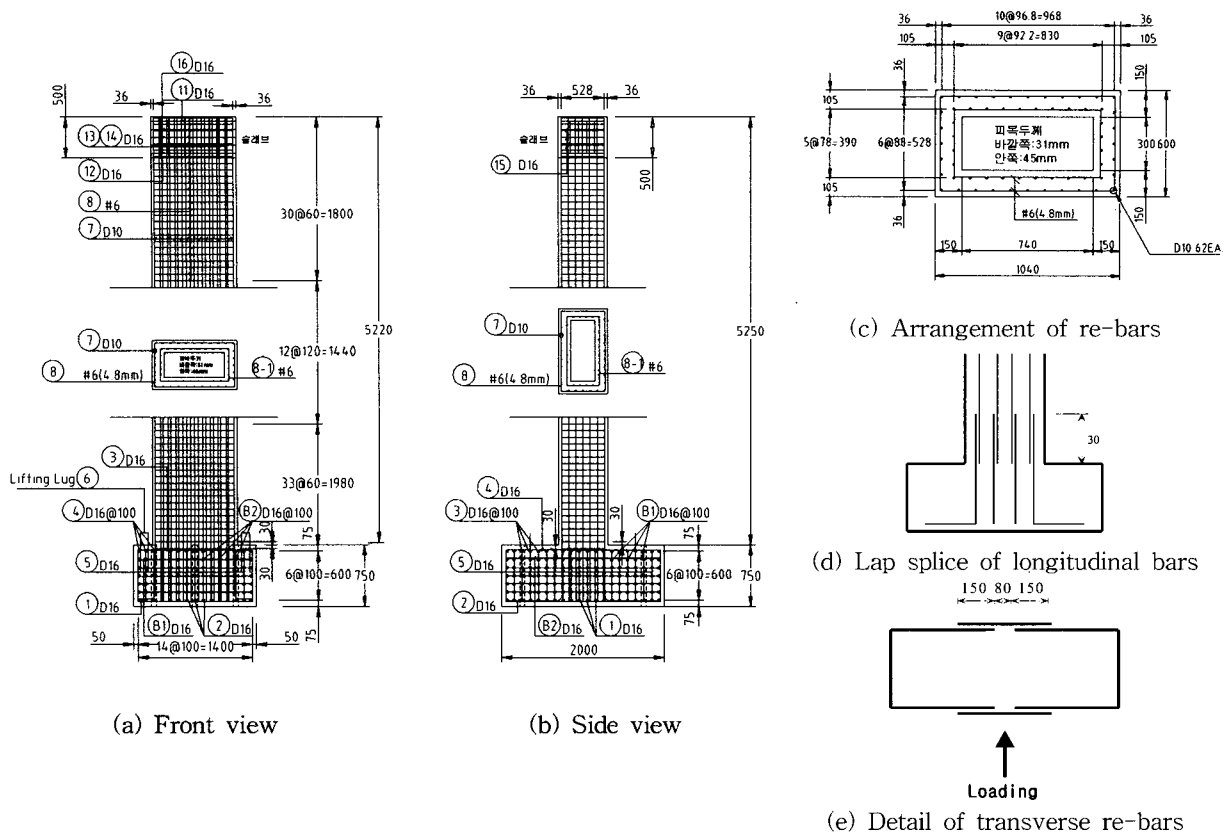


Fig. 2 Detail of test model(unit; mm)

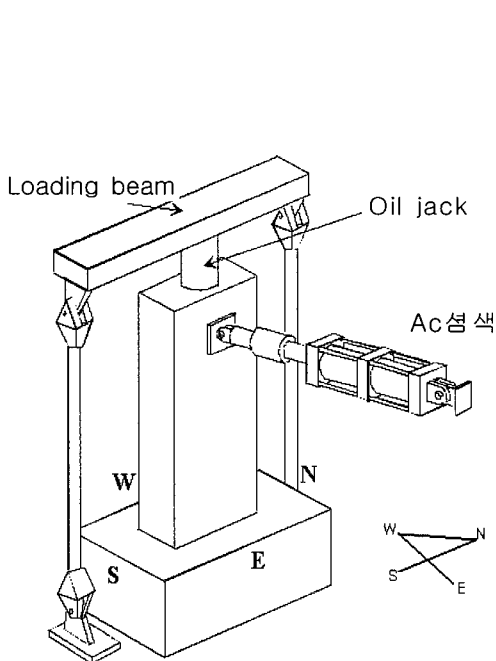


Fig. 3 Set-up for the cyclic loading test

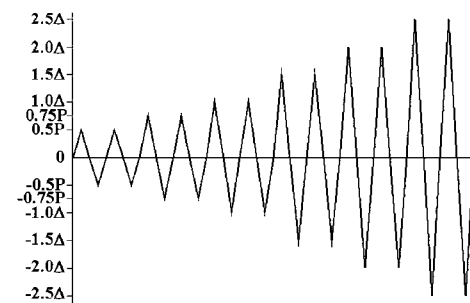


Fig. 4 Loading history

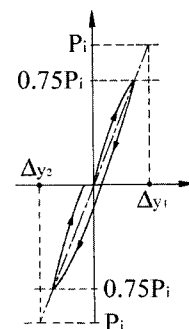


Fig. 5 Determination of  $\Delta_y$ (yield displacement)

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 계측의 일반적 관찰 및 항복변위

계측결과 변형률계에 의한 주철근 및 횡철근에 있어서 교각의 수평변위에 대한 변형률의 관계는 일관성 있는 결과를 얻지 못하였다. 일단, 교각에 균열이 발생하면 균열면 사이의 주철근의 응력상태는 콘크리트와의 부착작용에 의하여 위치에 따라 달라져 철근단체에서의 응력상태와는 다르게 된다. 따라서, 게이지가 부착된 위치에 따라 각기 다른 변형률 값을 주게 되며 또한, 교각의 변형이 커지면 주철근의 변형률도 커져 변형률계가 파손되어 소성상태에서의 합리적인 변형률을 얻지 못한 결과라고 판단된다.

하중 재하에 따른 기초부의 이동량을 계측한 결과 이들 값은 무시할 정도로 매우 작은 값이다. 따라서, 기초부의 변위는 교각의 변형에 영향을 거의 주지 않았음을 확인하였다.

LVDT와 광파측정에 의해 계측한 시험체의 변위는 유사한 값을 주었다. 우선 실험의 재하패턴에 기준이 되는 항복변위를 계측된 값으로부터 계산하면 모델 HR1 및 모델 HR2에 대하여 각각 40mm, 44mm 이었다.

### 4.2 손상과정 및 파괴모드

수평하중재하에 따른 교각의 균열진전 상황과 최종파괴 양상은 지진 시 교각의 피해를 예측하는데 매우 중요한 정보를 제공하게 된다. 모델 HR1의 경우, 피복콘크리트의 박리와 주철근의 좌굴은 발생하지 않았고 주철근 겹침이음부에서의 부착파괴모드에 의한 파괴가 관찰되었다. 이로 인하여 제한적인 연성거동을 보였다. 이에 반해 모델 HR2의 경우에는 피복콘크리트의 박리, 주철근의 좌굴로 이어지는 전형적인 휨파괴의 특징을 나타내었으며 매우 큰 연성거동을 보였다. 두 모델의 손상과정은 다음과 같다.

모델 HR1의 경우, 하중  $P=0.50P_i$  재하시 균열이 발생하여 하중이 커짐에 따라 확대되었다. 가장 큰 수평균열은 주철근의 겹침이음 위치인 30cm 근처에서 생성되었고 주로 높이 30~100cm에 집중되었다. 이는 겹침이음에 의한 주철근량의 증가로 교각하단부 보다는 겹침이음부의 선단부에 균열이 집중되는 것으로 파악된다.  $\mu_d = 2.0$  ( $\mu_d = \Delta_{max} / \Delta_y$ ; 변위연성도) 재하시, 수평균열은 기존의 균열이 진전되는 수준에서 머물렀다. 하지만, 주철근의 겹침이음부가 있는 위치에서 상향으로 길이 10cm 가량의 수직균열이 발생하였다.  $\mu_d = 4.0$  재하시, 수평 및 수직 균열이 뚜렷해졌으며 기존의 수직균열이 아래로 하강하는 경향을 나타내었다.  $\mu_d = 5.0$  재하시, 높이 20cm, 30cm

에서 수평균열의 폭이 2mm이상으로 나타났으며 동·서 양측면(방향은 Fig. 3 참조)에서 주철근의 부착파괴와 연관된 수직균열이 갑자기 생성되었으며 이와 함께 수평내하력이 급격하게 감소하였다. 모델 HR1의 파괴시의 균열 발생 상황은 Photo 1과 같다. 모델 HR2의 경우, 하중  $P=0.50P_i$  재하시 균열이 기초부로부터 높이 40cm, 60cm와 110cm의 위치에 발생되어 확대되었다. 그러나, 모델 HR1과의 차이점은 수평균열의 분포가 상당히 분산되어 있다는 것과 높이 0~20cm의 기초부에 인접한 곳에서 뚜렷한 수평균열을 발생하였다는 점이다.  $\mu_d = 2.0$  재하시, 동·서 양측면에서 높이 0~20cm 사이에 수많은 수평균열이 생성되었으며 특히, 높이 20cm에 위치한 수평균열의 폭이 갑자기 커졌다.

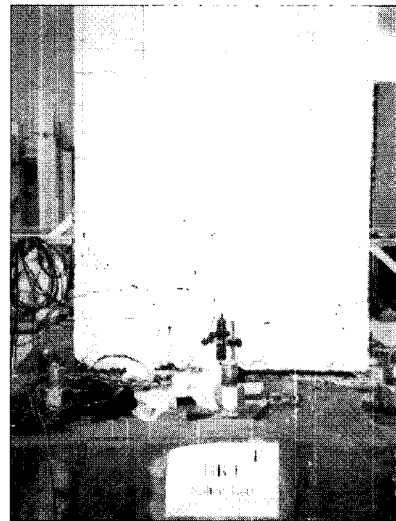


Photo 1 Failure pattern of model HR1 ( $\mu_d = 5.0$ )

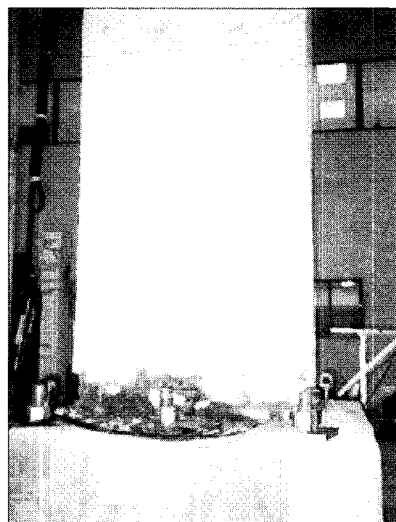


Photo 2 Failure pattern of model HR2 ( $\mu_d = 8.5$ )

또한, 교각의 측면에서 몇 개의 수직균열의 생성을 확인할 수 있었다.  $\mu_d = 2.5$  재하시, 동·서 양측면에서 계속적으로 높이 0~50cm에 위치한 균열의 폭이 크게 증가했으며 이러한 현상은 높이 20cm에서 특히 심화되었다.  $\mu_d = 8.0$  일때 동·서 양측면의 높이 0~10cm에서 피복 콘크리트의 박리현상이 관찰되었으며  $\mu_d = 8.5$ 에서는 높이 0~40cm까지 박리가 발생하였으며 특히, 모서리 부분에서 뚜렷한 박리현상이 나타났다. 이와 함께 수평내하력의 감소가 뚜렷해졌다. 모델 HR2의 파괴시의 균열 발생 상황은 Photo 2와 같다.

### 4.3 수평내하력-변위 관계

Fig. 6은 모델 HR1의 하중-변위 이력곡선을 나타내는 그림이다. 소성변위  $\mu_d = 5.0$ 까지는 비교적 안정적인 이력곡선 (Hysteresis Loop)의 특성을 보이다가 그 후 수평 내하력이 급격하게 저하되는 것을 알 수 있다. 피복콘크리트의 박리 및 주철근의 좌굴이 동반되지 않아 주철근 겹침이음부의 부착파괴(Bond Failure)가 일어나는 것으로 판단된다. 이는 먼저  $\mu_d = 3.0 \sim 4.0$ 에서 주철근의 겹침이음이 끝나는 높이 30cm를 기준으로 상향의 수직균열이 높이 30~50cm에서 생성되었다가  $\mu_d = 4.0 \sim 5.0$ 에서 어느 정도의 하중재하가 진행된 후 다시 하향의 수직균열이 주철근의 겹침이음부인 0~30cm에서 형성되는 사실과 일치하고 있다. 최대 수평력은 변위가 200mm일 때, 136kN으로 이는  $P_i$ 의 106.13%의 성능을 발휘하고 있음을 알 수 있다. 하중이 최대일때의 연성도는  $\mu_m = 5.0$ 이었으며 파괴 시(최대내하력이 80%로 저하되는 때로 정의)의 연성도는  $\mu_f = 6.0$ 이었다.

Fig. 7은 주철근의 겹침이음이 없는 모델 HR2의 하중-변위 이력곡선으로 대체적으로 안정적인 이력곡선 (Hysteresis Loop)의 특성을 보여주고 있다. 변위연성도  $\mu_d = 5.0$  이후부터는 액츄에이터의 스트로크가 부족하여 교각의 파괴가 유도되도록 서쪽방향(Push Direction)으로 재하하였으며 동쪽방향으로는 스트로크의 확보가 가능한  $\mu_d = 2.0$ 까지만 재하하였다.  $\mu_d = 8.0$ 에서 동쪽교각면에서 최초로 박리가 발생하였지만 수평내하력은 완만하게 저하되는 것을 알 수 있다. 이는 피복콘크리트의 박리로 횡철근이 구속효과를 발휘하지 못하여 주철근이 압축을 받으면 새장모양의 좌굴이 생겨서 압축력을 부담하지는 못하지만 인장을 받게 되면 좌굴된 주철근이 다시 펴지면서 상당량의 인장력을 부담하기 때문이다. 최대 수평력은 변위가 308mm일 때, 138kN으로 이는  $P_i$ 의 107.69%에 해당한다. 하중이 최대일때의 연성도는  $\mu_m = 7.0$ 이었으며

파괴시의 연성도는  $\mu_f = 8.5$ 로 연성도의 증가를 확인할 수 있었다. 이상의 실험결과에서, 소성인지부내에 주철근의 겹침이음이 있는 중공구형단면 교각은 상당한 정도의 변위 연성도를 확보하고 있다는 점은 주목할만한 특징이다.

Fig. 8은 모델 HR1 및 모델 HR2의 하중-변위 포락곡선을 함께 나타낸 것이다. 주철근의 겹침이음이 있는 모델

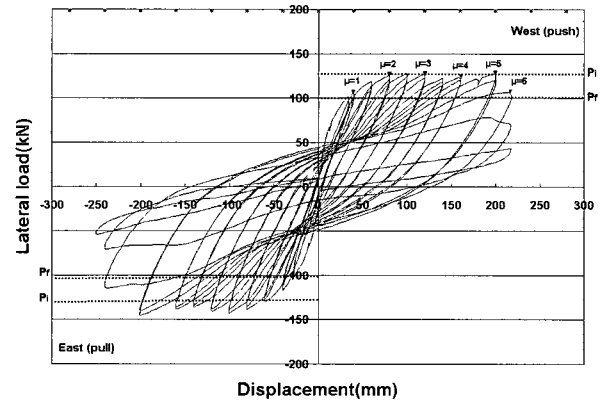


Fig. 6 Load-displacement hysteresis loop(HR1)

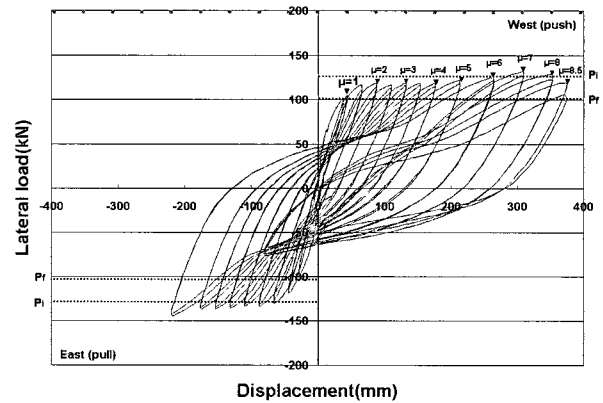


Fig. 7 Load-displacement hysteresis loop(HR2)

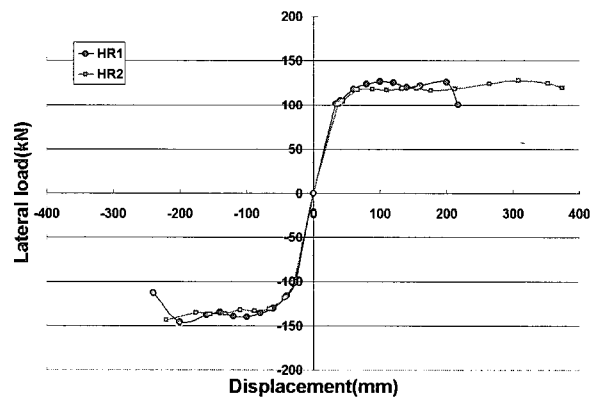


Fig. 8 Comparison of envelopment curve

HR1의 변위연성도가 겹침이음이 없는 모델 HR2의 연성도 보다 크게 저하되는 것을 알 수 있다. 즉, 소성현지역역내에서의 주철근 겹침이음에 의하여 보다 취성적인 파괴가 유도되는 것을 알 수 있다.

실험결과를 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2 Summary of test results

Description	HR1	HR2
$\Delta_y$ : yield displacement	40(mm)	44(mm)
$\Delta_m$ : displacement at $P_m$	200(mm)	308(mm)
$\Delta_f$ : displacement at failure	240(mm)	374(mm)
$\mu_m$ ( $\mu_\Delta$ at $P_m$ )	5.0	7.0
$\mu_f$ ( $\mu_\Delta$ at failure)	6.0	8.5
$\mu_f / \mu_m$	1.20	1.21
$P_m / P_i$	106.13(%)	107.69(%)
$\Delta_f / H$ (drift ratio)	4.80(%)	7.48(%)

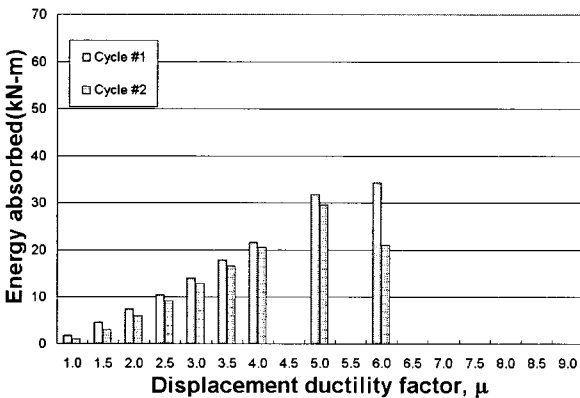


Fig. 9 Energy absorption capacity(model HR1)

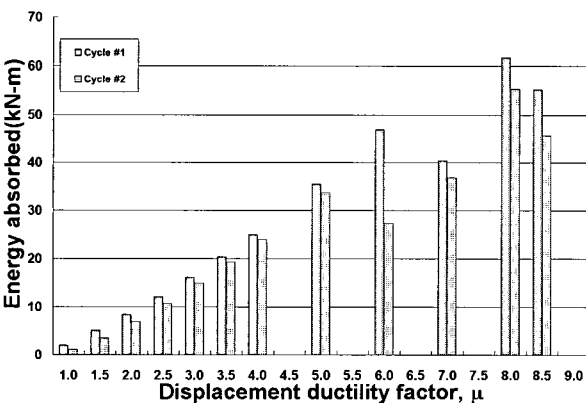


Fig. 10 Energy absorption capacity(model HR2)

#### 4.4 에너지 흡수능력

Fig. 9 및 Fig. 10은 하중-변위 이력곡선의 각 하중단계에서 첫번째 하중사이클(Cycle #1)과 두번째 하중사이클(Cycle #2)의 Loop에 의해 둘러싸인 면적을 계산하여 에너지 흡수능력을 나타낸 그림이다. 변위연성 능력이 큰 모델 HR2가 모델 HR1에 비하여 큰 에너지를 흡수능력을 지니고 있음을 보여주고 있다. 모델 HR1의 경우, 변위연성도  $\mu_\Delta = 5.0$ 에서 최대내하력에 도달한 후 에너지흡수능력이 크게 둔화되는 것을 알 수 있다. 변위가 증가하더라도 내하력이 감소하고 펀칭에 의한 에너지흡수능력이 저하되기 때문이다. 모델 HR2의 경우,  $\mu_\Delta = 8.0$ 에서 최대내하력에 도달한 후  $\mu_\Delta = 8.5$ 에서 에너지 흡수능력은 오히려 감소하고 있다. 이는 변위가 조금 증가한데 비하여 내하력이 크게 저하되고 큰 변위연성도에 따른 손상의 축적으로 펀칭이 크게 일어나기 때문이다. 한편, Fig. 9 및 Fig. 10에서 첫 번째 하중사이클과 두번째 하중사이클에서의 흡수에너지를 비교해 보면, 두번째 하중사이클에서는 손상의 축적에 의하여 에너지흡수능력 저하되고 있는 것을 알 수 있다. 이는 지진과 같은 반복하중에 의하여 교각이 수평반복변위를 경험하게 되면 에너지 흡수능력이 저하되어 지진에 취약해진다는 것을 보여 주고 있다.

#### 4.5 다른 연구와의 비교 검토

본 연구와 같이 내진상세가 적용되지 않은 중공구형단면 교각에 대하여 내진성능 실험을 수행한 국내외 연구는 확인되고 있지 않다. 따라서, 유사한 실험결과와 비교함으로써 거동특성을 파악하고자 한다. 소성현지역역에서의 주철근의 겹침이음과 비내진 횡철근상세를 가진 중실단면교각의 내진성능은 많이 수행되었다. 김재관<sup>7)</sup> 등은 동일한 철근상세를 가진 중실 원형교각에 대하여 내진성능 실험을 수행하였다. 시험체는 변위연성도 1.5에서 주철근 겹침이음부에서의 부착파괴가 발생하여 매우 취성적으로 내하력이 저하되었다. 이와 매우 유사한 연구결과가 Chai<sup>12)</sup> 등의 중실원형교각의 축소모델 실험에서도 보고 되고 있다. 이대형<sup>9)</sup> 등도 겹침이음된 중실원형단면을 대상으로 한 내진성능 실험에서 드리프트 비율(Drift Ratio)이 1% 정도에서 파복콘크리트의 박리없이 급작스런 파괴가 발생하였음을 보고하고 있다. 이들 중실단면 실험결과와 비교할 때 본 연구의 겹침이음상세를 갖는 중공구형 교각 모델의 변위연성도의 크기는 매우 주목할 만하다. 본 모델과 비교적 유사한 실험연구가 이재훈<sup>8)</sup> 등에 의해서 수행된 바 있다. 단면형상은 육각형 중공단면이며 주철근은 철근직경의 30배의 겹침이음길이 가지고 있으나 본 연구의 모델과는 달리 겹침이음은 교각의 동일한 높이에서 전부 수행되지 않고



주철근을 1본 건너 겹침이음이 되었다. 모델은 피복콘크리트바리, 주철근의 좌굴에 의한 강도 저하를 나타내는 전형적인 휨 파괴 모드를 나타내었다. 주철근이 파단되는 시점을 파괴로 정의하고 계산한 변위연성도는 모델1(콘크리트 강도는  $270\text{kgf/cm}^2$ )이 5.5 이상, 모델2(강도  $360\text{kgf/cm}^2$ )가 3.6이었다.

이들은 본 연구와 유사하게 동일한 모델에 주철근으로 연속철근을 사용한 모델에 대해서도 내진성능 실험을 수행하였다.<sup>8)</sup> 강도  $360\text{kgf/cm}^2$  모델의 경우 변위연성도는 6.0 이상으로 주철근의 겹침이음이 있는 모델에 비하여 다소 큰 것으로 보고하고 있다. 정영수<sup>6)</sup> 등도 유사한 철근상세를 갖는 중공원형단면 교각의 거동특성 실험을 수행한 바 있다. 모델은 전형적인 휨 파괴 모드로 파괴되었으며 파괴 시까지의 변위연성도는 6으로 보고하고 있다.

이상에서와 같이 중공단면 교각에서는 소성힌지 영역에서의 주철근의 겹침이음이 비록 횡구속이 되지 않아도 중실단면 교각에 비해서는 비교적 큰 연성도를 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 자료조사와 현장조사를 통하여 얻은 비내진 상세 기존교각의 구조적 특성을 참조하여 1994년도에 영동고속도로 상에 건설된 강천 2교를 대상으로 축소모형을 제작하여 준정적 반복하중 재하실험을 실시하였다. 축소모델은 단면이 중공구형이고 전단경간비가 8.33으로 전단파괴를 배제시켰다. 실제 설계와 시공상태를 고려하여 주철근이 교각의 하단부에서 동일한 높이에서 겹침이음된 모델(HR1)과 이와 비교하기 위하여 주철근을 단순 연속시켜서 배근한 모델(HR2)의 거동을 실험적으로 구명하였다.

연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 소성힌지영역내에 주철근의 겹침이음이 있는 기존교각은 비록 제원 상 휨파괴 유형을 갖는 교각이라도 주철근 겹침이음부의 부착파괴로 매우 취약적인 파괴유형을 나타내는 것이 일반적이다. 본 연구의 중공구형교각의 경우 콘크리트피복 박리와 주철근의 좌굴과 같은 휨파괴의 특징은 뚜렷하게 관찰되지 않아 다소 변형성능이 떨어지는 것으로 확인되었다. 그러나, 파괴시의 연성도는 제한적이지만 6정도로 비교적 큰 변위연성도를 확보하고 있는 것으로 확인되었다.
- 2) 주철근을 소성힌지영역에서 겹쳐 잇지 않고 연속시킨 시험체는 피복콘크리트의 박리와 주철근의 좌굴을 동반한 전형적인 휨파괴 거동을 보였다. 횡철근이 비내진상세로 배근되어 있을지라도 변위연성도 8 정도의 연성거동을 보여 상당히 우수한 내진성능을 확보할 수 있음을 알 수 있다. 다만, 본 연구에서의 축하중의 비율은 단면의 축강도의 5%에 해당하는 낮은 수준으로 축력이

큰 교각에서의 변위연성도는 이 보다는 다소 작을 것으로 판단된다.

- 3) 중실원형 단면을 대상으로 하는 기존연구결과와 비교하면 중공구형 단면 교각은 주철근이 겹침이음으로 연장되었을 경우에도 상당한 크기의 연성거동과 에너지 흡수능력 특성은 나타내고 있다. 이 결과는 단면의 형상 특성에 따라서 교각의 지진거동이 달라질 수 있음을 보여주고 있고, 유리한 단면이 있을 수 있는 가능성을 보여 주고 있다.
- 4) 실제 지진에서는 이축방향으로 지진하중이 작용하게 되고 이러한 경우에는 일축방향으로 가력하는 경우보다도 내진성능이 저하될 가능성이 있으므로 이를 고려하여 내진성능을 다소 안전측으로 평가하는 것이 필요할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국시설안전기술공단의 연구비 지원에 의해서 수행되었으며, 연구비의 일부는 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC)를 통한 한국과학재단의 우수연구센터 지원금과 2001년도 두뇌한국21사업의 지원금에 의한 것임.

## 참고문헌

1. 김재관, 김익현, 임현우, 전귀현, "전단키를 이용한 다경간 연속교의 내진성능 향상 방법", 한국지진공학회 추계 학술발표회 논문집, Vol. 3, No. 2, 1999, pp.313-316.
2. 시설안전기술공단, 기존교량의 내진보강방안 연구 보고서, 1999.7.
3. American Association of State Highway and Transportation Officials, Standard Specifications for Highway Bridges, 1996.
4. Transit New Zealand, Bridge Manual plus amendment No. 1, Wellington, New Zealand, 1994.
5. 정영수, 이강균, 한기훈, 이대형, "원형중공 콘크리트 교각의 내진성능에 대한 준정적 실험", 한국지진공학회 논문집, 제 3권 제2호, 1999, pp.41-54.
6. 정영수, 이강균, 한기훈, 박종협, "단일주 원형 철근콘크리트 교각의 내진거동에 관한 준정적 실험", 한국지진공학회 논문집, 제3권 제2호, 1999, pp.55-65.
7. 김재관, 김익현, 임현우, 전귀현, "수평반복하중을 받는 비내진상세 RC 중실원형교각의 거동특성", 한국지진공학회 논문집, 제5권 제4호, 2001, pp.83-95.
8. 이재훈, 손혁수, 배성용, 박찬민, "서해대교 PSM교 교각의 내진성능", 한국지진공학회 논문집, 제4권 제3호, 서울, 2000, pp.67-81
9. 이대형, 박진영, 정영수, 조대연, 이재훈, "주철근 겹이음에 따른 철근 콘크리트 교각의 내진성능 평가", 2001년도 추계학술발표회 논문집, 한국지진공학회, 2001, pp.

- 187-193.
10. 김병석, 김영진, 곽임중, 조창백, 조정래, "휨-전단 복합 거동을 보이는 RC 원형교각의 내진성능 평가", 한국지진공학회 논문집, 제5권 제3호, 2001, pp.29-36.
  11. Cheok, G.S., and Stone, W.C., "Behavior of 1/6-Scale Model Bridge Columns Subjected to Inelastic Cyclic Loading," *ACI Structural Journal*, Vol. 87, No. 6, Nov.-Dec. 1990, pp.630-638.
  12. Chai, Y.H., Priestley, M.J.N. and Seible, F., "Seismic Retrofit of Circular Bridge Columns for Enhanced Flexural Performance," *ACI Structural Journal*, V.88, No. 5, September-October 1991. pp.572-584.
  13. Jaradat, O., McLean, D.I., and Marsh, M.L., "Performance of Existing Bridge Columns under Cyclic Loading-Part 1: Experimental Results and Observed Behavior," *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 6, Nov.-Dec.. 1998, pp.695-704.14.
  14. Aboutaha, R.S., Engelhardt, M.D., Jirsa, J.O. and Kreger, M.E., "Experimental Investigation of Seismic Repair of Lap Splice Failures in Damaged Concrete Columns", *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No.2, Mar.-Apr.. 1999, pp.297-306.
  15. Priestley, M.J.N., and Park, R., "Strength and Ductility of Concrete Bridge Columns Under Seismic Loading," *ACI Structural Journal*, V. 84, No. 1, Jan.-Feb. 1987, pp.61-76.
  16. Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R., "Behaviour of ductile hollow reinforced concrete columns," Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 16, 4, Dec. 1983, pp.273-290.
  17. Priestley, M.J.N., Seible, F., and Calvi, G.M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, Inc., 1996.

## 요 약

내진상세가 적용되지 않은 RC중공구형단면 교각의 지진 시 거동특성 및 내진성능을 파악하기 위하여 축소모델 실험을 수행하였다. 축소모델은 교각의 소성현지역역내에 동일한 위치에서 모든 주철근이 겹침이음된 모델과 연속된 철근을 사용하여 겹침이음을 없앤 모델로 설계하였다. 실험은 축력이 재하된 상태에서 준정적 반복하중을 재하였다. 실험결과 겹침이음모델은 주철근의 겹침이음부에서의 부차파괴가 발생하였지만 비교적 큰 연성거동을 나타냈으며 연속철근을 사용한 모델은 전형적인 휨파괴 특성과 매우 큰 연성거동을 보였다.

**핵심용어** : RC 중공구형교각, 내진상세, 겹침이음, 내진성능, 연성도