

## 결합원형띠철근을 갖는 철근콘크리트 교각의 내진성능평가

### Seismic Performance Assessment of Reinforced Concrete Bridge Columns with Interlocking Circular Hoops

김태훈<sup>1)</sup> · 박광순<sup>2)</sup> · 강형택<sup>3)</sup>

Kim, Tae Hoon · Park, Kwang Soon · Kang, Hyeong Taek

**국문 요약** >> 이 연구의 목적은 결합원형띠철근을 갖는 철근콘크리트 교각의 내진성능을 파악하는데 있다. 3개의 인터락킹 교각 실험체에 일정 축하중 하에서 횡방향 반복하중을 가하는 준정적 실험을 수행하였다. 사용된 프로그램은 철근콘크리트 구조물의 해석을 위한 RCAHEST이다. 사용된 해석기법은 조사된 실험체에 대하여 하중단계에 따라 성능을 비교적 정확하게 예측하였다. 실험적, 해석적 결과로부터 결합원형띠철근을 갖는 철근콘크리트 교각의 설계와 시공 실무를 향상하기 위한 상세를 제시하였다.

**주요어** 결합원형띠철근, 철근콘크리트 교각, 내진성능, 준정적 실험, 하중단계

**ABSTRACT** >> The purpose of this study was to investigate the seismic performance of reinforced concrete bridge columns with interlocking circular hoops. Three interlocking columns were tested under a constant axial load and a quasistatic, cyclically reversed horizontal load. A computer program, RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology) was used for the analysis of reinforced concrete structures. The used numerical method gives a realistic prediction of performance throughout the loading cycles for several test specimens investigated. Based on the experimental and analytical results, design recommendations are presented to improve the existing practice in the design and construction of reinforced concrete bridge columns with interlocking circular hoops.

**Key words** Interlocking circular hoops, Reinforced concrete bridge columns, Seismic performance, Quasistatic, Loading cycles

## 1. 서론

세계적으로 지진의 규모와 빈도 및 그로 인한 피해가 증가 추세에 있는 현 상황에서 지진으로 인한 기반시설과 인명의 피해를 최소화 또는 방지하기 위해서는 구조물의 역학적 거동을 올바르게 예측하는 방법이 시급히 필요한 실정이다. 특히 교량 구조물의 손상 및 붕괴는 현대사회에서 치명적인 손실로 이어질 수 있으며 이에 따라 기존 또는 신설 교량 구조물의 지진응답 특성을 정확히 평가하는 연구와 이를 통한 내진성능 평가에 대한 연구가 우선적으로 요

구되고 있다.

이 연구의 목적은 원형 단면 나선철근 기둥에 비하여 심부구속 철근량이 많이 요구되는 단점을 가진 직사각형 단면을 보완할 수 있는 인터락킹(Interlocking) 교각 실험체의 비탄성 거동특성 및 파괴메커니즘을 파악하고 그 내진성능을 평가하는데 있다. 직사각형 단면에 대한 심부구속철근은 직사각형이 후프띠철근과 보강띠철근으로 이루어지므로 원형의 나선철근 기둥에 비하여 심부구속철근의 요구량이 많다.<sup>(1-3)</sup> 따라서 이러한 단점을 보완할 수 있는 방안으로 인터락킹 형태의 나선철근을 가진 장방형(Oblong) 단면을 고려해 볼 수 있다.

인터락킹 교각은 이중 또는 삼중으로 결합된 원형 나선철근이 직사각형 후프띠철근 보다 구속효과의 효율성과 시공성 등의 장점<sup>(4-8)</sup>을 지니고 있어 미국, 일본, 뉴질랜드 등 강진 지역 국가에서 그림 1과 같이 널리 사용되고 있으나 국내에서는 한정되어 적용되어 왔으며 제한된 실험적 연구<sup>(9),(10)</sup>만 수행되었다.

<sup>1)</sup> 정회원 · 삼성물산(주) 건설부문 기반기술연구소 수석연구원, 공학박사 (교신저자: th1970.kim@samsung.com)

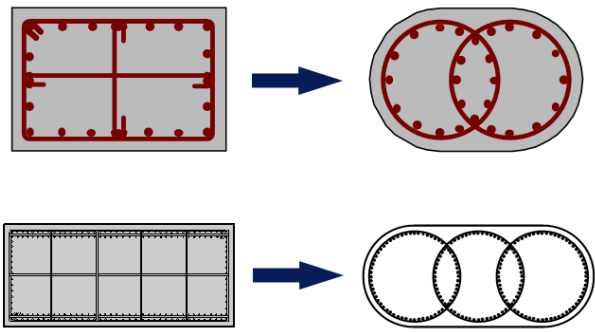
<sup>2)</sup> 정회원 · 한국시설안전공단 시설안전연구소 수석연구원, 토목구조기술사

<sup>3)</sup> 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2012년 2월 29일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2011. 10. 11 / 수정일 1차: 2011. 11. 29, 2차: 2011. 12. 5 / 게재확정일 : 2011. 12. 6)

© 2011EESK www.eesk.or.kr



〈그림 1〉 결합 원형띠철근 또는 나선철근을 갖는 철근콘크리트 교각<sup>(6)</sup>

나선철근을 2개 이상 겹친 인터락킹 형태의 장방형 단면 실험체는 사각형단면 실험체 보다 내진성능이 우수하다고 보고 되고 있으며 외국의 경우 Eurocode 8<sup>(11)</sup> 및 AASHTO-LRFD<sup>(12)</sup> 등에서 인터락킹 기둥에 대한 기준이 제시되고 있다. 그러나 국내의 경우 결합 원형띠철근 또는 나선철근을 갖는 철근콘크리트 교각의 성능 및 설계를 위한 현행기준<sup>(13)</sup>은 중약진 지진지역인 우리나라의 특성을 완전히 반영하지는 못하고 있는 실정이다.

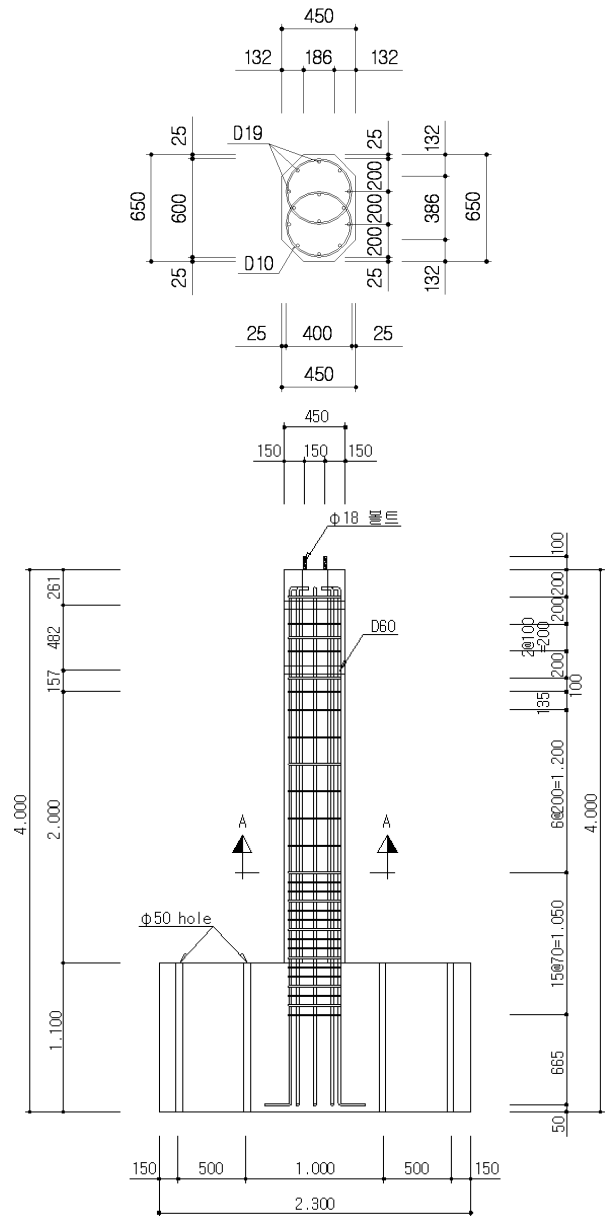
이 연구에서는 이러한 결합원형띠철근을 갖는 철근콘크리트 교각의 내진설계시 실무에서 당면하고 있는 심부구속을 위한 횡방향 철근량 산정 및 상세에 관한 문제점을 해결하고 연성도를 고려한 합리적인 내진설계기준의 개발을 위한 자료를 제공하고자 인터락킹 교각구조를 대상으로 준정적(Quasi-Static) 실험과 비선형 유한요소해석을 실시하고 비탄성 거동특성 및 파괴메커니즘을 파악하여 그 내진성능을 평가하였다. 이때 기존 연구자들의 실험과 달리 횡방향 철근비와 재하방향을 주요 실험변수로 결정하였다.

철근콘크리트 부재의 거동은 콘크리트의 균열, 철근의 항복, 철근과 콘크리트의 부착작용 및 균열 면에서의 전단전달효과 등과 같은 재료적인 특성에 크게 지배되기 때문에, 이를 해석적으로 예측하기 위해서는 각각의 재료적인 특성을 정확하고 신뢰성 있게 표현할 수 있는 재료모델의 구축이 선행되어야 한다. 따라서 이 연구에서는 2축 응력 상태에 대한 직교 이방성 재료모델에 의해서 균열이 발생한 철근콘크리트 요소의 거동특성을 표현하고, 이를 유한요소법을 사용하여 확장한 기존의 검증된 프로그램<sup>(14)</sup>에 수정을 가하여 사용하였다.

## 2. 구조거동 실험

### 2.1 실험체 제작 및 실험방법

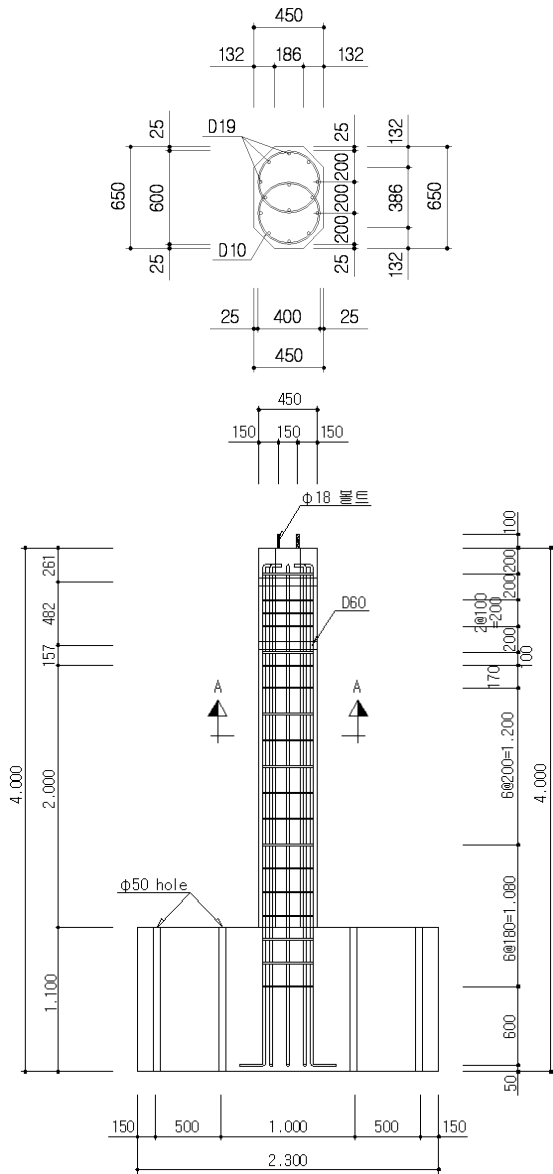
결합원형띠철근을 갖는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거



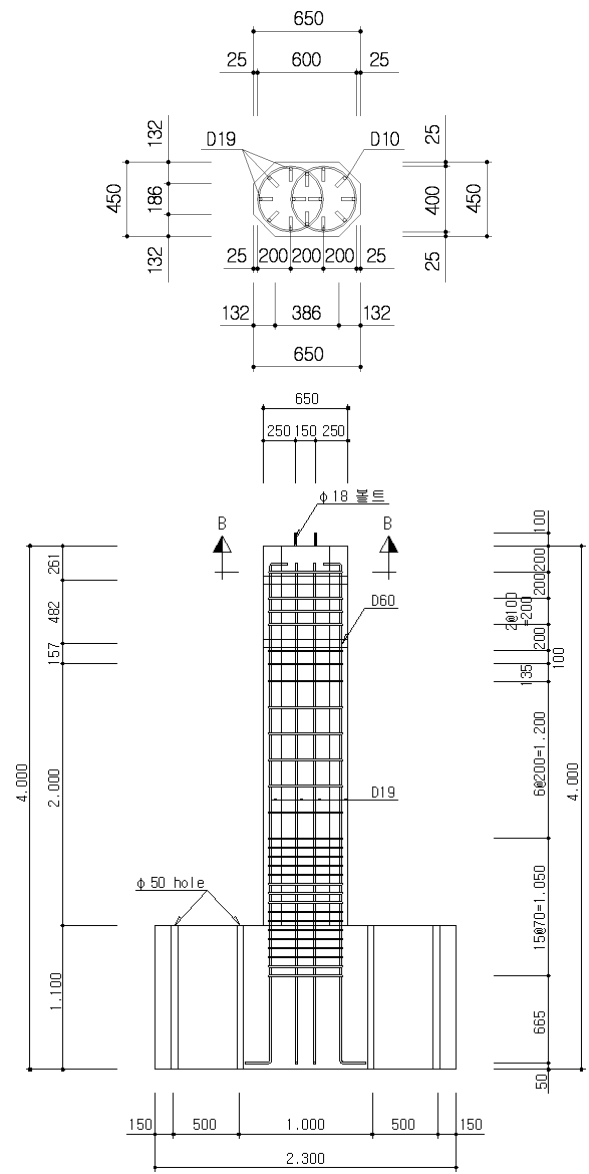
〈그림 2〉 실험체 IC14-70-1의 전경

동 및 연성능력을 파악하기 위하여 현행 도로교설계기준을 근거로 그림 2~그림 4와 같은 총 3개의 인터락킹 교각 실험체를 설계하고 제작하였다. 설계된 인터락킹 교각 실험체의 제원은 표 1에 나타내었다. 이때 축방향철근 중심간 수평 간격은 158mm, 나선철근간의 중심간격은 심부단면치수의 0.5배, 그리고 결합부분에는 4개의 축방향철근을 배근하여 현행 도로교설계기준을 만족시켰으며 원형후프띠철근은 용접이음으로 연결하여 나선철근과 동등한 심부구속효과를 발휘할 수 있도록 하였다.

실험변수는 표 1과 같이 횡방향 철근비는 설계기준 요구량을 기준으로 100%와 40%, 그리고 재하방향은 약축(형상비 5.3)과 강축(형상비 3.7)으로 각각 결정하였다. 이때 모델의 단



〈그림 3〉 실험체 IC14-180-1의 전경



〈그림 4〉 실험체 IC14-70-2의 전경

〈표 1〉 실험체의 특성

Specimen	Cylinder concrete strength (MPa)	Longitudinal reinforcement (D19)		Transverse reinforcement (D10)			Axial force
		$f_{yt}$ (MPa)	$\rho_l$ (%)	$f_{yt}$ (MPa)	$\rho_s / \rho_{s, req}$ (%)	Space (mm)	$P / f_{ck} A_g$
IC14-70-1 (재하방향- 약축)	22.4	351.4	1.37	392.3	100	70	0.1
IC14-180-1 (재하방향- 약축)					40	180	
IC14-70-2 (재하방향- 강축)					100	70	

Note: IC○-○-○에서 첫째항은 축방향철근의 개수, 둘째항은 심부구속 철근간격, 그리고 셋째항은 재하방향을 나타냄

면은 450mm × 650mm이고 교각의 재하점까지의 높이는 2,400mm이며 부재의 제작과정을 통해서 시공오차의 원인

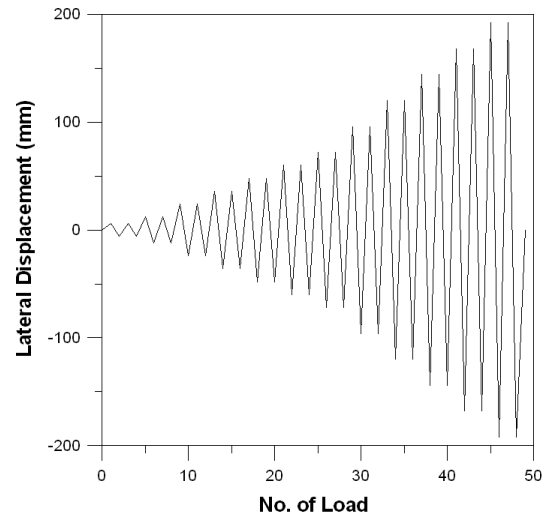
이 될 수 있는 항목을 면밀히 검토하여 반영하였다.

결합원형띠철근을 갖는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거

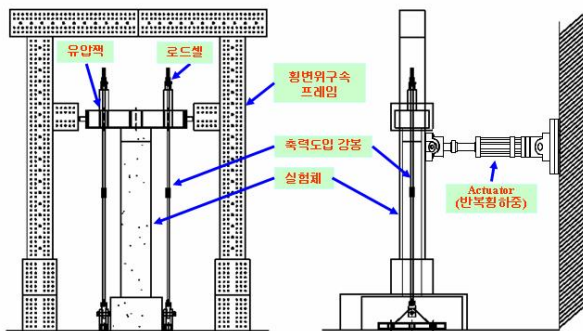
동 및 연성능력 등을 파악하기 위하여 준정적(Quasi-Static) 실험을 수행하였다. 수평력은 그림 5와 같이 최대변위 ±250 mm인 2,000kN 유압가력기(Actuator)를 이용하여 재하하였으며 축력은 교각단면 축강도의 10.0%를 일정하중 유지장치로 변화가 없도록 재하하였다. 변위진폭은 drift ratio ±0.25%로 시작하여 ±0.5%, ±1.0%, ±1.5%, ±2.0%, ±2.5%, ±3.0%, ±4.0%, ±5.0%, ±6.0%, ±7.0%, ±8.0%로 증가시켰으며, 각 단계별로 2회씩 반복 재하하여 동일 변위 진폭에 대한 교각의 거동특성 차이를 살펴보았다. 이때 사용된 가력 이력곡선은 그림 6과 같다.

실험수행 중 실험체의 거동을 분석하기 위한 계측장비로 하중값은 가력기(Actuator)에 내장되어 있는 Load cell을 이용하였고, 횡방향 변위는 LVDT(Liner Variable Differential Transformer)를 이용하였다. LVDT는 횡방향 재하지점에 1개를 설치하였으며, 기초부의 이동을 조사하기 위하여 1개를 설치하였다. 소성힌지구간에서 철근의 변형률을 파악하

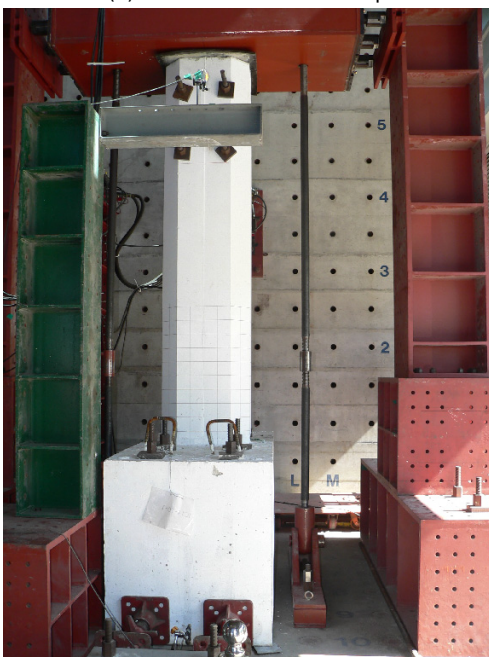
기 위하여 축방향 철근에 10개, 심부구속 철근에 5개의 변형률 게이지를 부착하였다. 이때 변형률 게이지는 축방향 철근의 경우 인장력과 압축력을 받는 2개의 철근에 일정한 간격으로 내진상세가 된 구간에 부착하였다. 그리고 동일한 구간의 심부구속 철근에는 부착위치가 서로 마주 볼 수 있도록 변형률 게이지를 각각 2개씩 부착하였다(그림 7).



〈그림 6〉 실험체의 가력이력

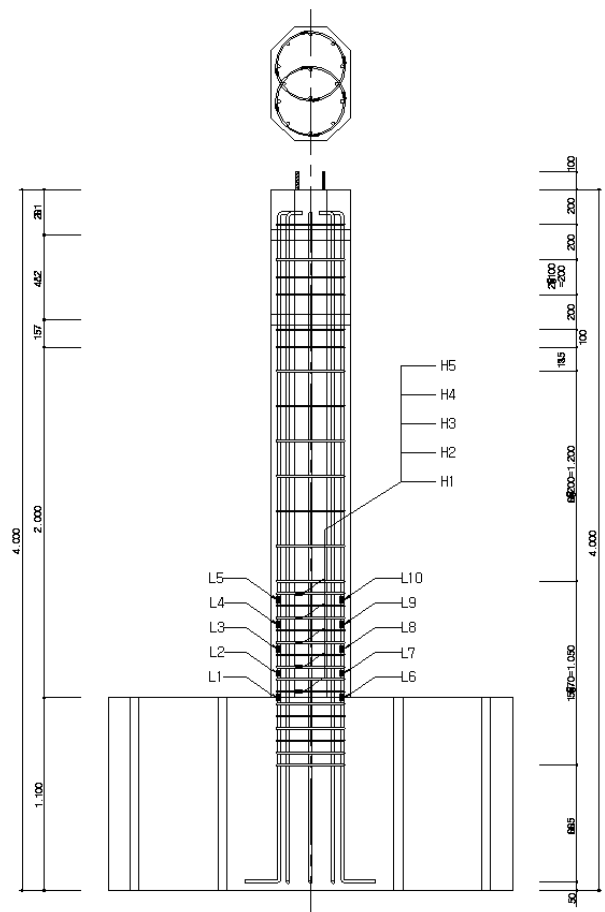


(a) Schematic of test setup



(b) Photograph of experimental setup

〈그림 5〉 실험체의 전경



〈그림 7〉 철근의 변형률 게이지의 예 (단위: mm)

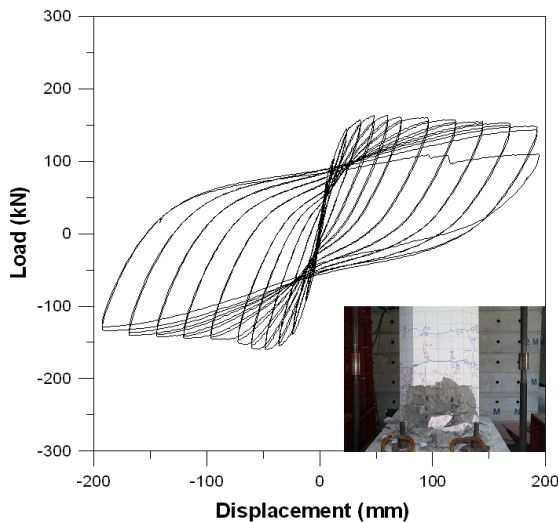
## 2.2 실험결과 및 분석

그림 8~그림 10에 실험체에 대한 하중-변위 이력곡선을 나타내었다. 또한 실험체의 최종 재하 단계에서의 파괴 양상을 함께 나타내었다. 하중-변위 이력곡선은 횡방향 하중 및 가력지점의 변위에 의해 표시되는데 실험체의 강도, 연성, 그리고 에너지 소산능력을 평가하는 중요한 분석 자료이다.

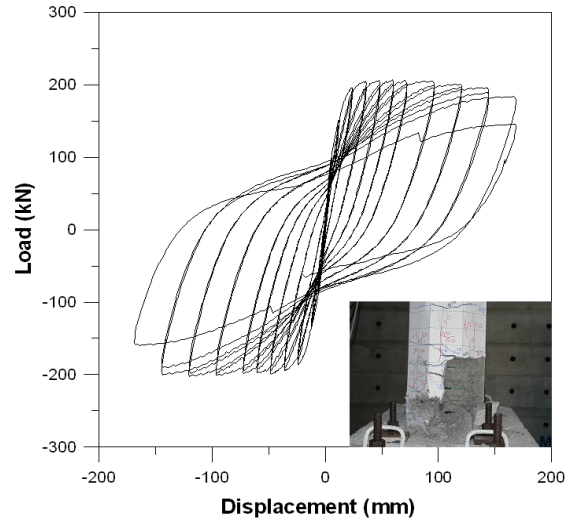
설계기준 요구량을 기준으로 100%와 40%의 횡방향 철근비를 갖는 IC14-70-1과 IC14-180-1 실험체의 최대하중은 각각 163.6 kN과 156.8 kN으로 IC14-180-1 실험체는 IC14-70-1 실험체에 비해 96% 수준으로 내력이 발휘되고 있다. 그리고 재하방향이 약축과 강축인 IC14-70-1과 IC-14-70-2 실험체의 최대하중은 각각 163.6 kN과 206.7 kN으로 IC-14-70-2 실험체는 IC14-70-1 실험체에 비해 126% 수준으로 내력이 발휘되고 있다.

실험에서 교각시스템의 항복변위와 극한변위는 철근콘크리트 교각의 변위연성도 평가에서 가장 널리 사용되고 있는 하중-변위곡선으로부터 결정하는 간접적인 방법<sup>(15)</sup>으로 구하였다(그림 11). 즉, 하중-변위곡선으로부터 시스템의 수평 저항능력이 최대 내력에 비하여 15% 저하되었을 때의 변위를 극한변위로 정의하였으며, 항복변위는 하중-변위곡선의 원점과 최대 내력의 75%에 달하였을 때의 변위점을 이은 직선이 최대 내력점에 도달하였을 때의 수평변위로 정의하였다.

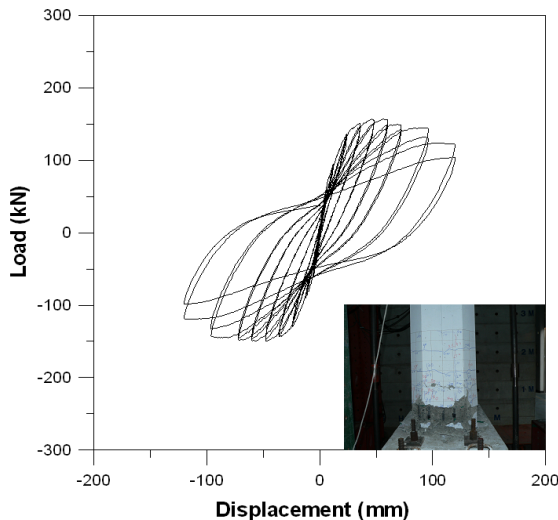
현행 설계기준 요구량을 만족하도록 설계된 교각 실험체들(IC14-70-1, IC14-70-2)의 변위연성도는 각각 8.7과 9.5로 도로교설계기준에서 규정하고 있는 단주교각의 응답수정계수에 해당하는 요구연성도 5를 충분히 만족하고 있음이 확인되었다. 그리고 현행 내진규정의 40%에 해당하는 횡방향 철근비를 가진 실험체(IC14-180-1)의 변위연성도는 4.0으로서 도로



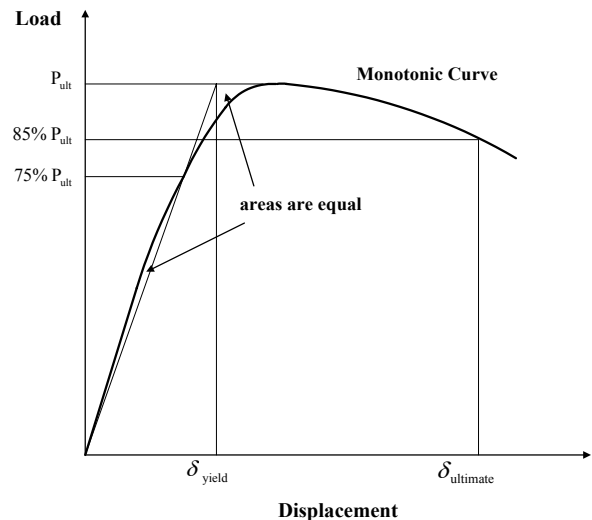
〈그림 8〉 실험체 IC14-70-1의 하중-변위 곡선



〈그림 10〉 실험체 IC14-70-2의 하중-변위 곡선



〈그림 9〉 실험체 IC14-180-1의 하중-변위 곡선



〈그림 11〉 교각시스템의 항복변위와 극한변위

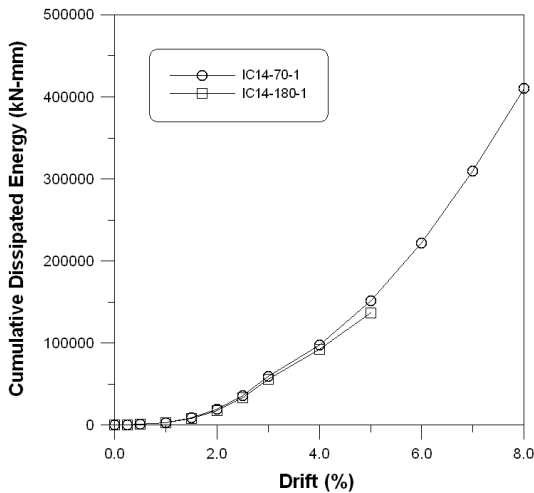
교설계기준에서 규정하고 있는 단주교각의 요구연성도 5를 만족하지 못하고 있으나 국내지진규모를 감안할 때 다소의 변위 연성도를 확보하고 있음이 확인되었다.

그림 12와 13에 실험체들의 누적 소산에너지를 실험 변수별로 비교하여 나타내었다. 소산에너지는 하중-변위 이력 곡선의 내부면적으로 정의되며 누적 소산에너지는 내부면적의 합으로 산정된다. 교각의 손상을 평가하기 위해 부재가 파괴될 때까지 흡수 또는 소산할 수 있는 능력은 내진성능을 평가하는데 중요한 요소 중 하나이다.

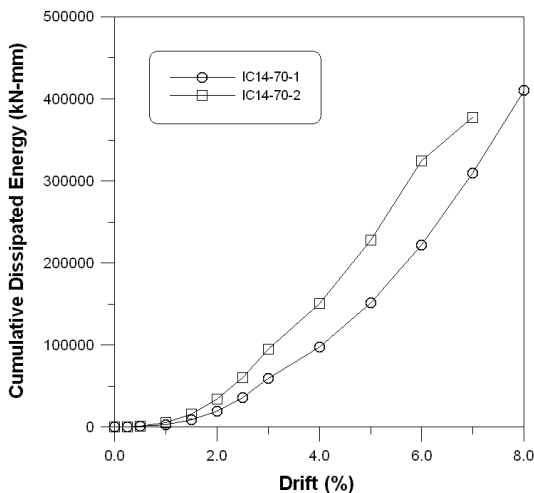
설계기준 요구량을 기준으로 100%와 40%의 횡방향 철근비를 갖는 IC14-70-1과 IC14-180-1 실험체의 누적 소산에너지는 최종 파괴시점에서 각각 410,000 kN·mm와 136,000 kN·mm으로 3배의 에너지 소산능력 차이를 보이고 있다. 그리고 재하방향이 약축과 강축인 IC14-70-1과 IC-14-70-2 실험체의 누적 소산에너지는 최종 파괴시점에서 각각 410,000kN·mm와 377,000kN·mm으로 거의 유사한 에너지

소산능력을 보이고 있다.

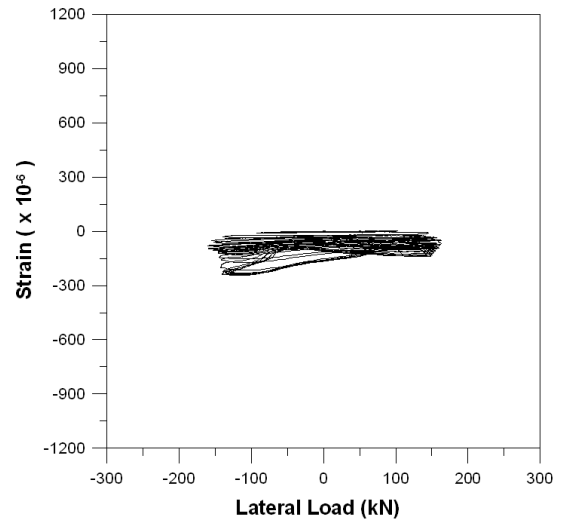
인터락킹 교각 실험체의 국부적 거동특성을 분석하기 위



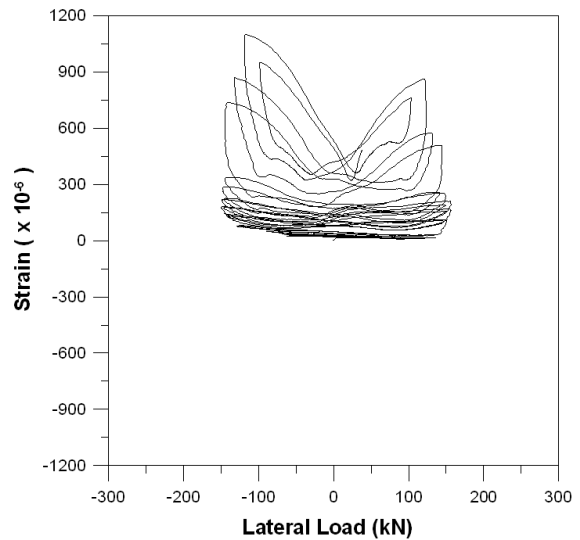
〈그림 12〉 실험체 IC14-70-1과 IC14-180-1의 누적 소산에너지 곡선



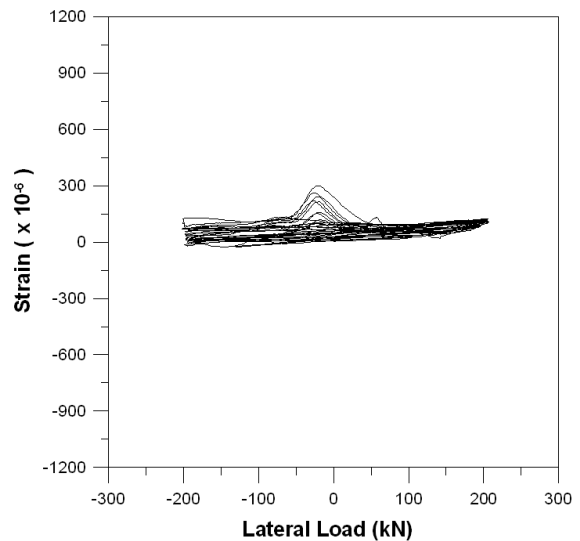
〈그림 13〉 실험체 IC14-70-1과 IC14-70-2의 누적 소산에너지 곡선



(a) IC14-70-1



(b) IC14-180-1



(c) IC14-70-2

〈그림 14〉 심부구속 철근의 변형률



하여 전술한 바와 같이 소성힌지구간에서 축방향 철근에 10개, 심부구속 철근에 5개의 변형률 게이지를 부착하였다. 수평하중이 작용할 경우 횡방향 철근은 하중의 변화에 따라서 변형률의 증가 또는 감소가 발생하고 있으며 실험체 모두 항복변형률(2,000 Microstrains) 이내에서 실험변수와 전반적으로 유사한 거동특성을 보이고 있음을 그림 14에서 확인할 수 있다.

일반적인 실험체의 파괴형상은 먼저 수평 휨균열이 발생하고 다음으로 수평균열 주위로 미세한 수직균열이 발생하였다. 상부 변위가 더욱 커지면서 최초로 발생한 수평균열이 사방향으로 발전하게 되며 이 단계에서부터 수직균열이 발생하였다. 이후 하중이 반복되면서 소성힌지부에서 콘크리트 피복의 탈락이 시작되었다. 콘크리트 피복이 탈락이 된 이후에도 상당한 변형능력을 보이다가 노출된 철근의 좌굴과 인장이 반복되면서 축방향철근이 파단에 이르렀다.

### 3. 구조거동 해석

#### 3.1 유한요소 모델링

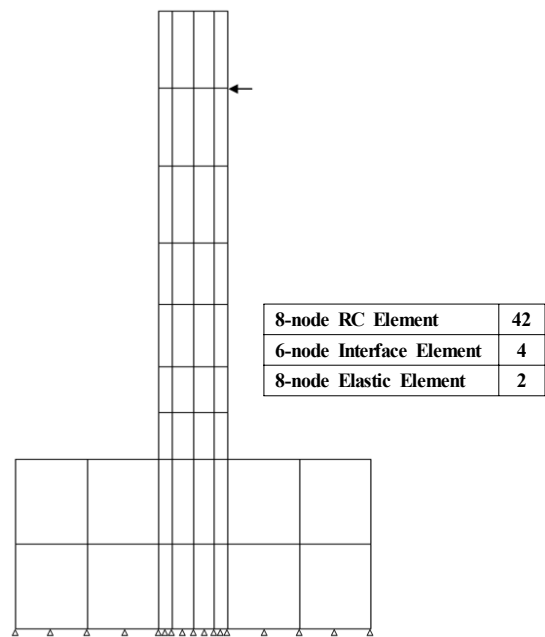
이 연구에서는 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소, 그리고 경계면요소 등<sup>(16-20)</sup>을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP ver. 7.2<sup>(21)</sup>에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)에 장방형 단면의 구속효과를 고려할 수 있도록 수정을 가하여 사용하였다 (그림 15). 이때 철근콘크리트의 비선형 재료모델은 저자 등에 의하여 이미 발표된 재료모델<sup>(16-20)</sup>을 그대로 적용하기로 하며 장방형 단면의 구속효과는 콘크리트의 단면형상에 관계없이 적용할 수 있고, 축방향 철근 및 구속철근의 양, 구속철근의 항복강도 및 배근형태 등을 고려할 수 있도록 한 Mander 등<sup>(22)</sup>의 제안모델을 기본적으로 채택하여 고려하였

2D or 3D Spring Element	4 nodes PSC Shell Element	2D or 3D Flexibility-Based Fiber Beam-column Element	4 nodes Elastic Shell Element
Joint Element	FEAP		4 nodes RC Shell Element
Reinforcing or Prestressing Bar Element	Interface Element	RC Plane Stress Element	2D Elasto-plastic Plane Stress Element

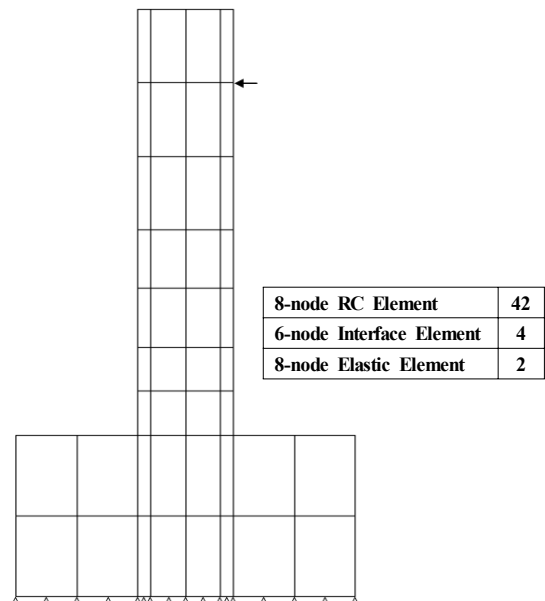
〈그림 15〉 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

다. 이때 콘크리트의 역학모델은 균열이 발생하기 전에는 이축응력상태에 대한 탄소성파괴모델로, 균열발생 후에는 균열직각방향으로 콘크리트가 부담하게 되는 인장응력을 고려하기 위한 인장강성모델과 균열방향으로의 압축강성저하를 고려하기 위한 압축강성모델 및 균열면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델을 각각 적용하였다. 또한 전단 잠김 현상은 라그랑지안 정식화에 의한 가정 변형률 방법을 사용하여 해결하였다.

실험체들의 유한요소해석을 위해서 결합원형띠철근을 갖는 철근콘크리트 교각을 그림 16 및 17과 같이 요소 분할하



〈그림 16〉 유한요소모델 (실험체 IC14-70-1, IC14-180-1)



〈그림 17〉 유한요소모델 (실험체 IC14-70-2)

였다. 3점 가우스 적분을 적용한 8절점 철근콘크리트 평면 응력요소를 42개 이용하였고 하중이 재하되는 부위에는 실험에서와 동일한 조건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지 않는 탄성요소를 2개 사용하였다. 또한, 기초와 교각의 접합 부에는 정착슬립 등의 불연속변위를 고려하기 위하여 6절점 경계면 요소를 4개 사용하였다.

이산균열개념에 근거한 경계면 요소는 기본적으로 요소의 평행 및 직각방향으로만 응력이 발생하는 것으로 가정하고 있기 때문에 전술한 철근과 콘크리트의 재료모델을 그대로 적용할 수 있다. 그러나 경계면 요소의 변형은 인접한 두 부재간의 상대변위로부터 결정되기 때문에 요소의 응력-변형률 관계는 압축응력-압축변위 및 전단응력-전단미끄러짐의 관계로 정의된다. 이때 경계면 요소의 총 전단변위는 접합면에서의 미끄러짐과 국소적인 응력집중의 영향으로 인한 변위의 합으로 표현하였다. 그리고 사용된 유한요소망은 일반 탄성해석과의 수렴성 시험(Convergence Test) 결과 형상비(Asspect Ratio)에 의한 영향은 1.0% 미만이었으며 이는 콘크리트구조의 비선형해석에서 예상되는 오차에 비하여 매우 작은 것으로 나타나 그 타당성이 검증되었다.

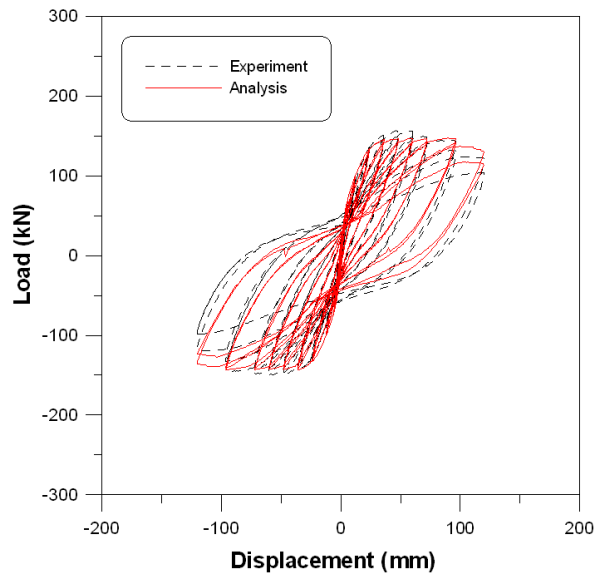
### 3.2 해석결과 및 분석

그림 18~그림 20은 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계를 나타내고 있으며 해석결과가 실험결과와 전반적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 해석결과는 실험체에 반복 주기하중이 진행되는 동안 소성힌지 영역에서 비탄성 변형이 증대됨에 따라 일어나는 콘크리트의 균열과 파쇄, 그리고 이로 인한 손

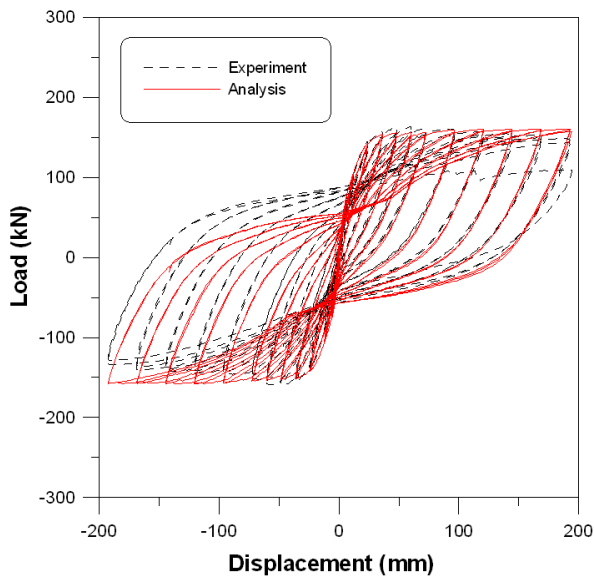
상이나 파괴와 잘 일치하고 있다.

이때 비선형 유한요소해석은 실험결과로부터 얻은 변위에 의해 제어하여 수행되었으며 이 연구의 해석에 의한 최대하중과 변위연성도를 실험과 함께 비교하여 표 2에 정리하였다.

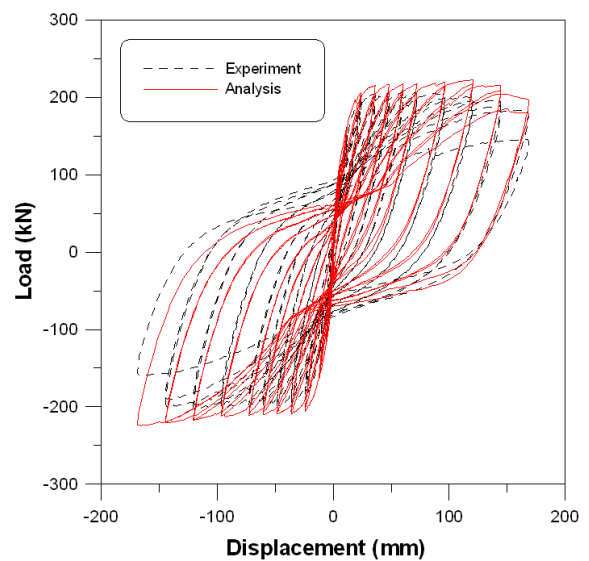
유한요소해석 결과에서 최대하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수가 각각 1.00과 0.07로서, 최대하중의 평균값은 전반적으로 실험결과를 정확하게 평가하고 있으며 변동계수가 0.07에 불과하여 결합원형띠철근을 갖는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동특성을 전반적으로 잘 평가하고 있는 것으로 판단된다. 그리고 변위연성도에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 각각 0.92와 0.06으로서, 변위연성도의 평균값은 실험결과 보다 다소 크게 평가하고



〈그림 19〉 실험체 IC14-180-1의 하중-변위 이력곡선



〈그림 18〉 실험체 IC14-70-1의 하중-변위 이력곡선

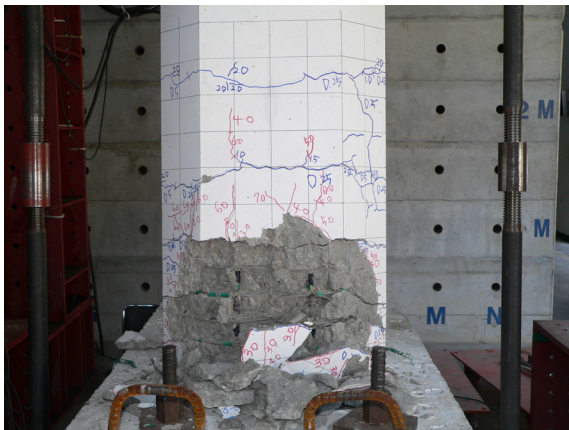


〈그림 20〉 실험체 IC14-70-2의 하중-변위 이력곡선

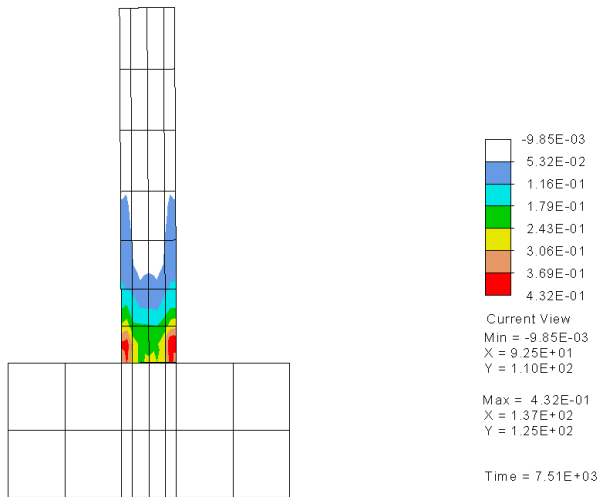


〈표 2〉 실험 및 해석 결과의 비교

Specimen	Experiment		Analysis		(1)/(3)	(2)/(4)
	$V_{max}$ kN (1)	$\mu$ (2)	$V_{max}$ kN (3)	$\mu$ (4)		
IC14-70-1	163.6	8.7	160.6	9.3	1.02	0.94
IC14-180-1	156.8	4.0	147.2	4.7	1.07	0.85
IC14-70-2	206.7	9.5	222.4	9.9	0.93	0.96
Mean					1.00	0.92
COV					0.07	0.06



(a) Experiment



(b) Analysis (손상지수도)

〈그림 21〉 실험체 IC14-70-1의 실험 및 해석 결과

있으나 인터락킹 교각 실험체들의 내진성능을 포함한 거동 특성을 비교적 정확하게 평가하고 있는 것으로 판단된다.

그림 21은 파괴시점의 요소레벨의 손상지수도<sup>(18)</sup>와 실험 결과를 비교한 것으로서 구조물의 중요한 비선형 거동특성인 소성힌지 형성 부위가 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 가시화된 요소레벨의 손상지수도를 통하여 결합원형띠철근을 갖는 철근콘크리트 교각의 손상정도를 쉽게 검색할 수

있으며 내진성능평가에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

일련의 실험결과와 해석결과와의 비교로부터 이 연구에서 사용하고 있는 방법은 지진하중과 같은 반복하중에 의한 인터락킹 교각의 비탄성 이력거동을 적절히 평가하고 있으며, 개발된 철근콘크리트 구조물의 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 이용함으로써, 해석적 방법에 의한 신설 또는 기존 결합원형띠철근을 갖는 철근콘크리트 교각의 내진성능평가가 가능할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

이 연구는 결합원형띠철근을 갖는 철근콘크리트 교각의 내진설계시 현행 실무에서 당면하고 있는 심부구속을 위한 횡방향 철근량 산정 및 상세에 관한 문제점을 해결하고 합리적인 내진설계법의 개발을 위한 연구로서 준정적 실험과 비선형 유한요소해석을 함께 수행하였다. 실험체의 실험결과와 해석결과와의 비교를 통하여 다음의 결론을 얻었다.

1. 이 연구에서 사용한 비선형 유한요소해석 결과 최대하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 1.00와 0.07이고 변위연성도에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 0.92와 0.06으로서, 전반적으로 실험결과를 잘 평가하고 있음이 확인되었다. 이를 통해 장방향 단면의 구속효과 등 제안한 해석기법과 모델은 결합원형띠철근을 갖는 철근콘크리트 교각구조의 전반적인 거동특성을 바르게 표현하고 있음이 입증되었으며 향후 인터락킹 교각구조의 정밀해석이 가능할 것으로 판단된다.
2. 수행된 결합원형띠철근을 갖는 철근콘크리트 교각의 실험적, 해석적 연구를 통해 내진설계 적용 실험체의 경우에는 충분한 변위 연성도를 확보하고 있으며 내진설계 미적용 실험체인 경우에도 국내지진규모를 감안할 때 다소의 변위 연성도를 확보하고 있음이 확인되었다.
3. 파괴양상, 변위연성도, 그리고 누적 소산에너지 등을 기

- 준으로 볼 때 결합원형띠철근의 철근상세가 뛰어난 심부 구속능력을 보유한 것으로 판단된다. 결합원형띠철근은 구속능력을 확대하여 철근콘크리트 교각의 연성능력을 확장시키는 것으로 판단되며 적용된 인터락킹 교각의 횡방향철근 상세는 실무 적용시 양호한 내진성능이 기대된다.
4. 결합원형띠철근을 갖는 철근콘크리트 교각의 내진설계법을 개발하기 위한 연구자료를 제공함으로써 성능기반 내진설계개념에 접목하여 비선형 유한요소해석을 이용한 합리적이고 경제성 있는 차세대 내진설계법의 개발에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

1. 박창규, 정영수, 윤상철, “사각단면 철근콘크리트 교각의 심부 구속철근비 제안,” 한국콘크리트학회논문집, 제18권, 제6호, 749-757, 2006.
2. 정혁창, 김익현, “횡철근에 의해 횡구속된 콘크리트의 응력-변형률 특성,” 한국지진공학회논문집, 제13권, 제3호, 67-80, 2009.
3. 정혁창, 차수원, 김익현, “후프띠철근과 보강띠철근으로 횡구속된 정사각단면 콘크리트의 응력-변형률 특성,” 한국지진공학회논문집, 제14권, 제3호, 39-48, 2010.
4. Tanaka, H., and Park, R., “Seismic Design and Behavior of Reinforced Concrete Columns with Interlocking Spirals,” *ACI Structural Journal*, Vol. 90, No. 2, 192-203, 1993.
5. Priestley, N.M.J., Seible, F., and Calvi, M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, 1996.
6. Fujikura, S., Kawashima, K., Shoji, G., Zhang, J., and Takemura, H., “Effect of the Interlocking Ties and Cross Ties on the Dynamic Strength and Ductility of Rectangular Reinforced Concrete Bridge Columns,” *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering*, JSCE, No. 640/I-50, 71-88, 2000.
7. Correal, J., Saiidi, M. S., Sanders, D., and El-Azazy, S., “Seismic Performance of Bridge Columns with Double Interlocking Spirals,” *Proc. of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, 2004, CD.
8. Matsumoto, T., Okstad, E., Kawashima, K., and Mahin, S. A., “Seismic Performance of Rectangular Columns and Interlocking Spiral Columns,” *Proc. of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 2008, CD.
9. 이재훈, 고성현, 서진원, 이지영, 한상엽, “원장방향 철근콘크리트 교각의 내진성능에 관한 실험적 연구,” 한국지진공학회 추계학술대회 논문집, 368-375, 2003.
10. 고성현, 이재훈, 서진원, 이지영, 손혁수, 최진호, “결합나선철근 및 결합원형띠철근 교각의 내진성능에 관한 실험적 연구,” 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제15권, 제1호, 943-948, 2003.
11. CEN, *Eurocode 8 - Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 2: Bridges*, European Committee for Standardization, 2005.
12. AASHTO, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, 4th Edition, 2007.
13. 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2010.
14. 김태훈, 신현목, “Analytical Approach to Evaluate the Inelastic Behaviors of Reinforced Concrete Structures under Seismic Loads,” 한국지진공학회 논문집, 제5권, 제2호, 113-124, 2001.
15. Park, R., “Ductility Evaluation from Laboratory and Analytical Testing,” *Proc. of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol. VII, Balkema, Rotterdam, 605-616, 1998.
16. Kim, T. H., Lee, K. M., Yoon, C. Y., and Shin, H. M., “Inelastic Behavior and Ductility Capacity of Reinforced Concrete Bridge Piers under Earthquake. I: Theory and Formulation,” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 9, 1199-1207, 2003.
17. Kim, T. H., Lee, K. M., Chung, Y. S., and Shin, H. M., “Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Bridge Columns,” *Engineering Structures*, Vol. 27, No. 4, 576-592, 2005.
18. Kim, T. H., Kim, Y. J., Kang, H. T., and Shin, H. M., “Performance Assessment of Reinforced Concrete Bridge Columns Using a Damage Index,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 34, No. 7, 843-855, 2007.
19. Kim, T. H., Hong, H. K., Chung, Y. S., and Shin, H. M., “Seismic Performance Assessment of Reinforced Concrete Bridge Columns with Lap Splices Using Shaking Table Tests,” *Magazine of Concrete Research*, Vol. 61, No. 9, 705-719, 2009.
20. Seong, D. J., Kim, T. H., Oh, M. S., and Shin, H. M., “Inelastic Performance of High-Strength Concrete Bridge Columns under Earthquake,” *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 9, No. 2, 205-220, 2011.
21. Taylor, R. L., *FEAP - A Finite Element Analysis Program*, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, 2000.
22. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., “Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete,” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 8, 1804-1826, 1988.