

중공원형 철근콘크리트 교각의 횡방향철근에 따른 내진성능평가

Seismic Performance Assessment of Hollow Circular Reinforced Concrete Bridge Columns with Confinement Steel

김태훈¹⁾ · 강형택²⁾

Kim, Tae Hoon · Kang, Hyeong Taek

국문 요약 >> 이 연구의 목적은 중공원형 철근콘크리트 교각의 횡방향철근에 따른 지진거동을 파악하고 합리적이면서 경제적인 내진 설계기준의 개발을 위한 자료를 제공하는데 있다. 3개의 중공원형 교각 실험체에 일정 축하중 하에서 횡방향 반복하중을 가하는 준정적 실험을 수행하였다. 정확하고 올바른 성능평가를 위하여 신뢰성 있는 비선형 유한요소해석 프로그램을 사용하였다. 이용된 해석기법은 조사된 실험체에 대하여 하중단계에 따라 내진성능을 비교적 정확하게 예측하였다. 실험적, 해석적 결과로부터 중공원형 철근콘크리트 교각의 설계와 시공 실무를 향상하기 위한 내진상세를 제시하였다.

주요어 중공원형, 철근콘크리트 교각, 지진거동, 준정적 실험, 내진성능

ABSTRACT >> The purpose of this study was to investigate the seismic behavior of hollow circular reinforced concrete bridge columns with confinement steel, and to develop improved seismic design criteria. Three hollow circular columns were tested under a constant axial load and a quasi-static, cyclically reversed horizontal load. The accuracy and objectivity of the assessment process can be enhanced by using a sophisticated nonlinear finite element analysis program. The numerical method used gives a realistic prediction of the seismic performance throughout the loading cycles for the several test specimens investigated. Based on the experimental and analytical results, design recommendations are presented to improve current practice in the design and construction of hollow circular reinforced concrete bridge columns.

Key words Hollow circular, Reinforced concrete bridge columns, Seismic behavior, Quasi-static, Seismic performance

1. 서론

교량이 장대화 되고, 교각의 높이가 높아짐에 따라 발생하는 자중증가에 따라 과도한 설계 지진력을 감소시킬 수 있는 교각의 필요성이 대두되었으며, 이러한 필요에 의해 개발된 교각구조가 바로 중공단면 교각이다.^{(1),(2)} 이러한 중공단면 교각은 근래에 구조물의 자중, 사용재료의 경감 및 수화열 억제를 위하여 경제적 및 구조적인 측면에서 고속도로 교량 및 기타 교량에서 널리 설계·시공되어지고 있다.⁽³⁻⁵⁾

우리나라와 같은 중·약진 지역의 경우에는 완전연성을

확보하기 위한 강진지역의 내진설계개념보다는 한정연성 (Limited Ductility) 내진설계와 같이 연성도를 직접 고려한 내진설계법이 보다 합리적이면서 경제적인 내진설계 방법으로 인식되어 왔다. 현행 도로교설계기준⁽⁶⁾의 연성도를 고려한 내진설계의 기본 개념은 응답수정계수 R을 적용하는 소성거동 영역을 한정연성 구간과 완전연성구간으로 구분하고, 한정연성 구간에서는 교각의 소요연성도(Ductility Demand)에 따라 횡방향철근량을 배근함으로써 합리적인 설계를 유도하며 과도한 횡방향철근의 배근으로 인한 시공성 문제를 해결하자는 것이다. 이러한 연성도 내진설계의 심부구속 횡방향철근량 산정식은 중실단면에 관한 연구결과로부터 제안된 것으로 중공단면에서의 적용성에 대해서는 연구가 미흡한 실정이다.⁽⁷⁻¹⁰⁾

중공단면 교각의 심부구속 철근에 대해서는 도로교설계 기준에 명시적으로 규정되어 있지 않으며 중실단면에 비해 상대적으로 심부콘크리트 면적이 작은 중공단면의 횡방향

¹⁾ 정회원 · 삼성물산(주) 건설부문 기반기술연구소 수석연구원, 공학박사
(교신처: th1970.kim@samsung.com)

²⁾ 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2012년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2011. 10. 31 / 수정일 1차: 2011. 12. 3, 2차: 2011. 12. 12 / 게재확정일 : 2011. 12. 12)

© 2012EESK www.eesk.or.kr

철근량이 과도하게 산정되고 있는 실정이다. 이 경우 안전적인 설계결과를 제공할 수 있을 것으로 판단되나 경제성 및 합리성을 고려한 경우 이러한 방법은 바람직한 방법이라고 볼 수 없다.⁽¹¹⁾ 따라서 이 연구에서는 중공원형 철근콘크리트 교각의 철근상세의 개선방안을 도출하고자 이러한 구조적 특성을 지닌 교각구조를 대상으로 준정적(Quasi-static) 실험과 비선형 유한요소해석을 실시하여 비탄성 거동특성 및 파괴메커니즘을 파악하고 그 내진성능을 평가하였다.

이 연구의 목적은 중공원형 철근콘크리트 교각의 내진설계시 실무에서 당면하고 있는 심부구속을 위한 횡방향철근량 산정에 관한 문제점을 해결하고 성능기반 내진설계개념에 접목하여 비선형 유한요소해석을 이용한 합리적이고 경제성 있는 차세대 내진설계법의 개발을 위한 자료를 제공하는데 있다.

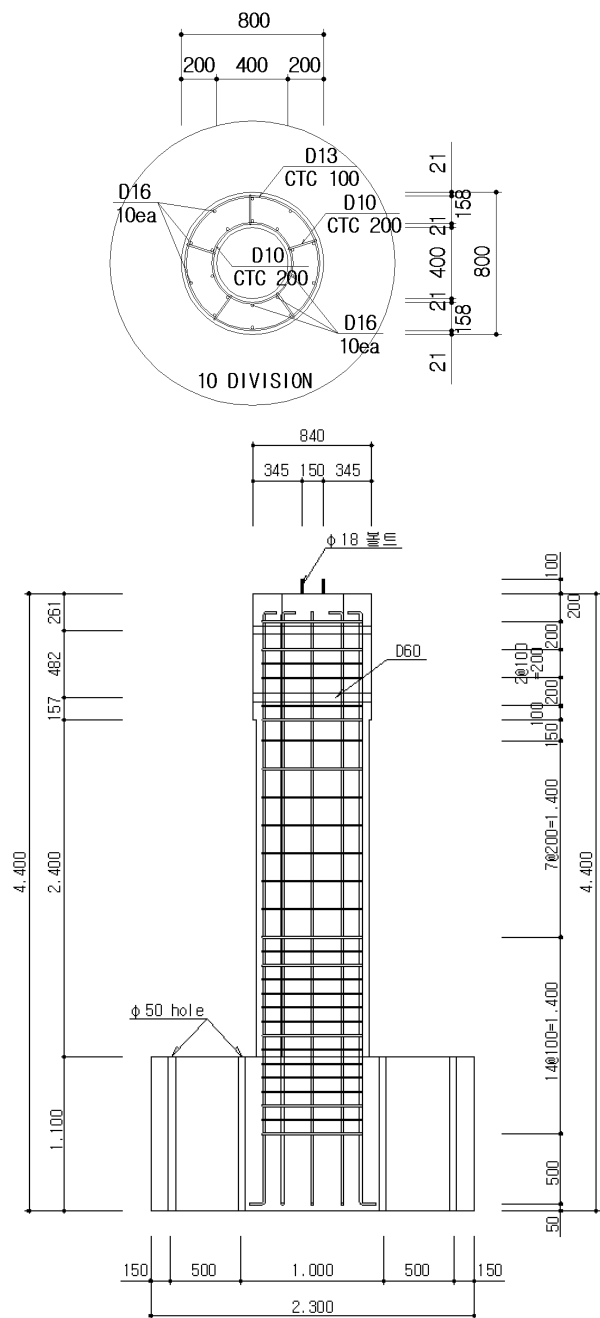
철근콘크리트 부재의 거동은 콘크리트의 균열, 철근의 항복, 철근과 콘크리트의 부착작용 및 균열 면에서의 전단전달효과 등과 같은 재료적인 특성에 크게 지배되기 때문에, 이를 해석적으로 예측하기 위해서는 각각의 재료적인 특성을 정확하고 신뢰성 있게 표현할 수 있는 재료모델의 구축이 선행되어야 한다. 따라서 이 연구에서는 2축 응력 상태에 대한 직교 이방성 재료모델에 의해서 균열이 발생한 철근콘크리트 요소의 거동특성을 표현하고, 이를 유한요소법을 사용하여 확장한 기존의 검증된 프로그램⁽¹²⁾에 중공원형 철근콘크리트 교각의 거동특성을 모사할 수 있도록 수정을 가하여 사용하였다. 그리고 다자유도계 구조물의 적용에 한계를 보일 수 있는 역량스펙트럼법(Capacity Spectrum Method, CSM)의 단점을 보완한 손상지수를 이용한 내진성능평가 기법⁽¹³⁾을 확장하여 중공원형 철근콘크리트 교각의 내진성능을 해석적으로 평가하고자 한다. 손상지수를 이용한 내진성능평가 기법은 기존의 연구⁽¹³⁾를 통하여 지진하중과 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 교각의 내진성능을 적절히 평가하고 있음이 검증된 바 있다.

2. 구조거동 실험

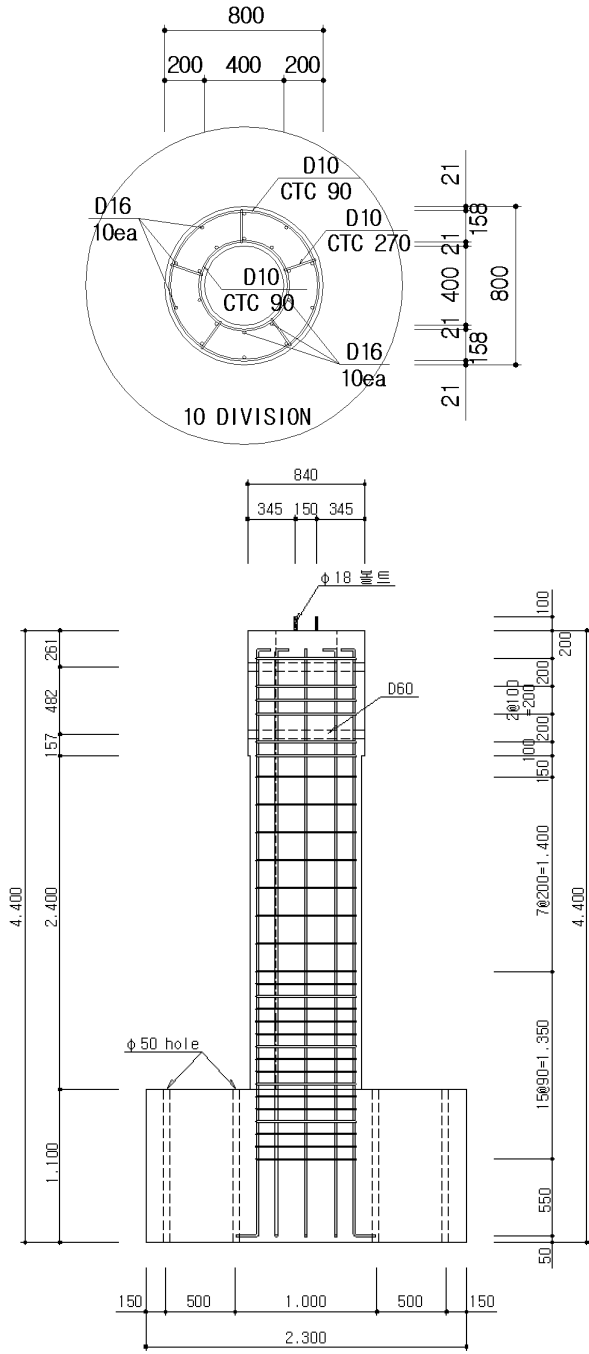
2.1 실험체 제작 및 실험방법

중공원형 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동 및 연성능력 등을 파악하기 위하여 현행 도로교설계기준을 근거로 그림 1~그림 3과 같은 총 3개의 중공 교각 실험체를 설계하고 제작하였다. 설계된 중공원형 교각 실험체의 제원은 표 1에 나타내었다. 이때 원형후프띠철근은 용접이음으로 연결하여 나선철근과 동등한 심부구속효과를 발휘할 수 있도록 하였다.

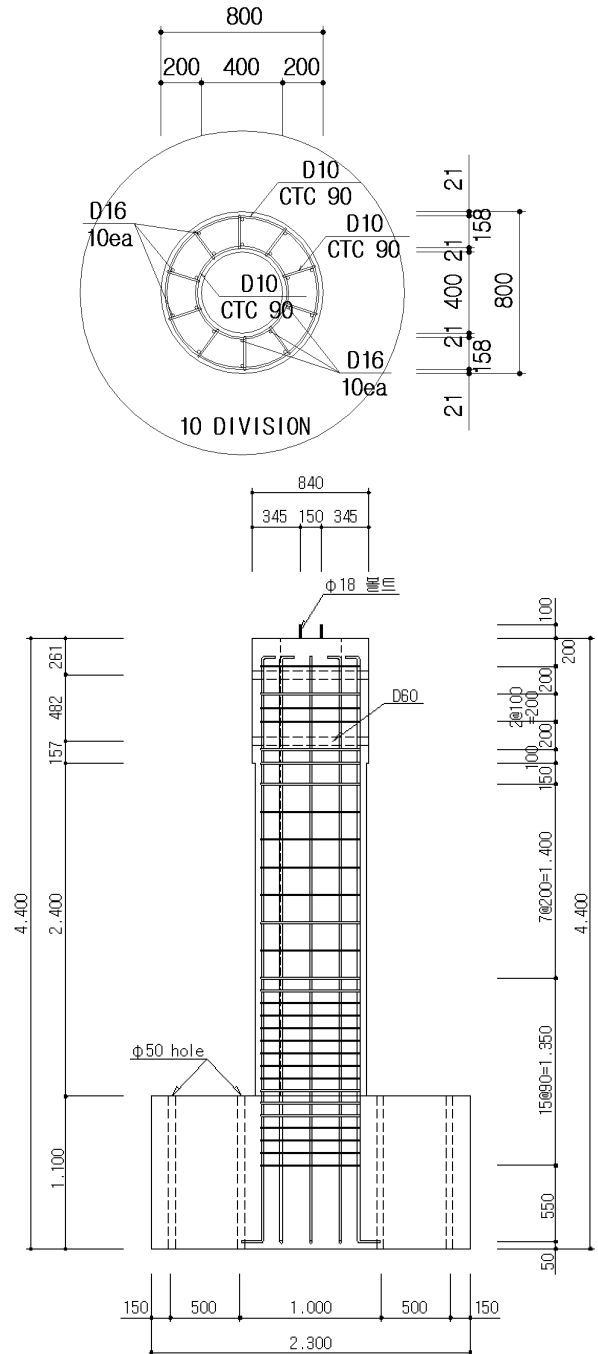
실험변수는 표 1과 같이 소성힌지부 외측 및 내부 구속철근의 여부와 간격, 그리고 보강띠철근의 개수 및 간격으로 각각 결정하였다. HC-O-100 실험체는 설계기준 요구량을 기준으로 100%의 횡방향철근비를 외측 구속철근에 배근하고 내측에는 조립철근만을 배근하였으며 HC-IO-90-L, HC-IO-90-H 실험체는 100%의 횡방향철근비를 내외측 철근에 각각 50%씩 배근하고 보강띠철근의 개수 및 간격을 달리하였다. 이때 모델의 단면은 외경이 800mm, 내경이 400mm인 중공원형이고 교각의 재하점까지의 높이는 2,800mm이며 부재의 제작과정을 통해서 시공오차의 원인이 될 수 있는 항목을 면



〈그림 1〉 실험체 HC-O-100의 전경 (단위: mm)



〈그림 2〉 실험체 HC-IO-90-L의 전경 (단위: mm)

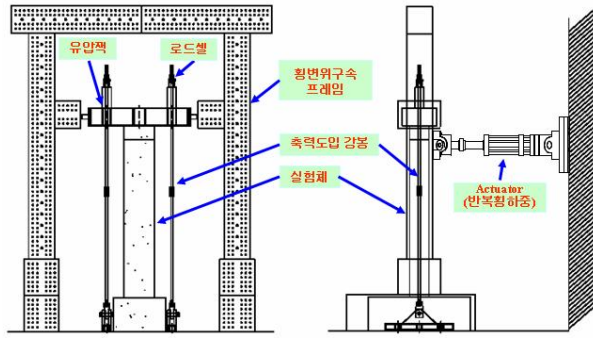


〈그림 3〉 실험체 HC-IO-90-H의 전경 (단위: mm)

〈표 1〉 실험체의 특성

Specimen	Cylinder concrete strength (MPa)	Longitudinal reinforcement (D16)		Transverse reinforcement (D13, D10)		Cross-tie (D10)		Axial force $P/f_{ck}A_g$
		f_{yl} (MPa)	ρ_l (%)	f_{yt} (MPa)	Space (mm)	f_{yt} (MPa)	Space (mm)	
HC-O-100	22.4	441.9	1.05	376.6	외측 D13 @100, 내측 D10 @200	392.3	5개@ 200	0.1
HC-IO-90-L					내외측 D10 @90		5개@ 270	
HC-IO-90-H					내외측 D10 @90		10개@ 90	

Note: HC-○-○-○에서 첫번째항은 외측 및 내측 구속철근의 여부, 둘째항은 심부구속 철근간격, 그리고 셋째항은 보강 띠철근의 개수 및 간격을 나타냄



(a) Schematic of test setup



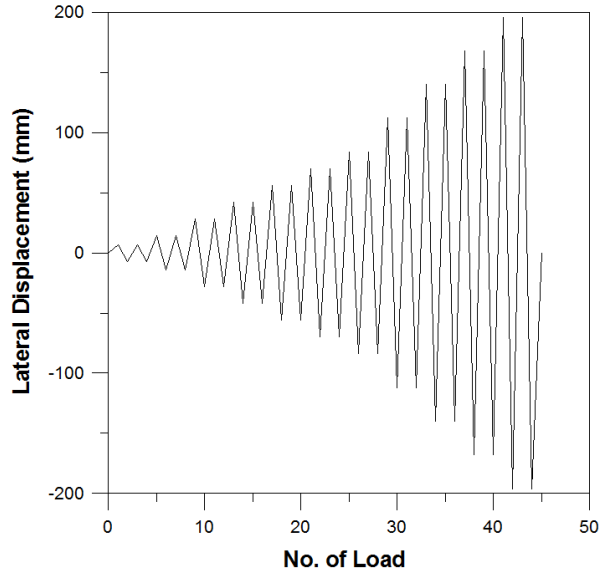
(b) Photograph of experimental setup

〈그림 4〉 실험체의 전경

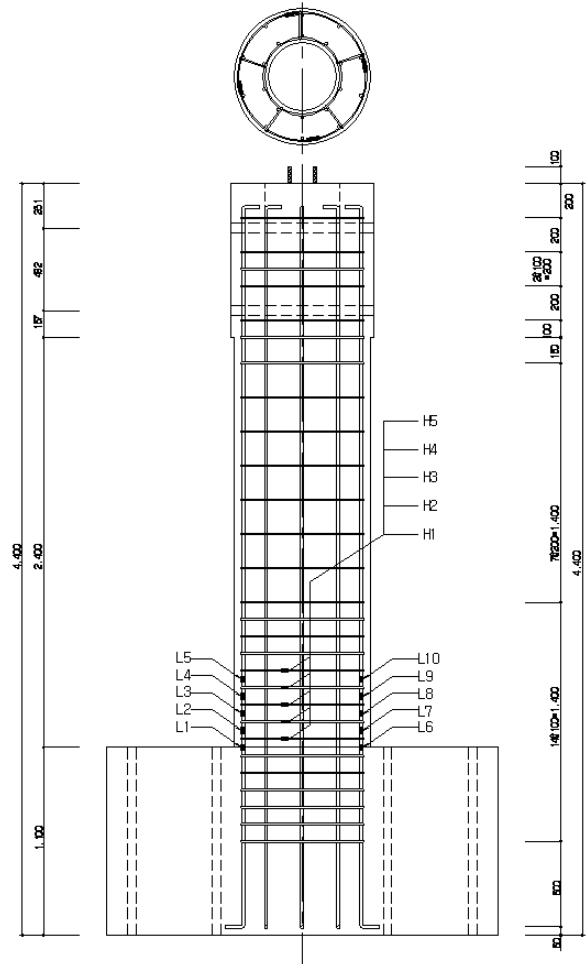
밀히 검토하여 반영하였다.

중공원형 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동 및 연성능력 등을 파악하기 위하여 준정적(Quasi-Static) 실험을 수행하였다. 수평력은 그림 4와 같이 최대변위 ±250mm인 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%로 증가시켰으며, 각 단계별로 2회씩 반복 재하하여 동일 변위 진폭에 대한 교각의 거동특성 차이를 살펴보았다. 이때 사용된 가력 이력곡선은 그림 5와 같다.

실험수행 중 실험체의 거동을 분석하기 위한 계측장비로 하중값은 가력기(Actuator)에 내장되어 있는 Load cell을 이용하였고, 횡방향 변위는 LVDT(Liner Variable Differential



〈그림 5〉 실험체의 가력이력



〈그림 6〉 철근의 변형을 계이지의 예 (단위: mm)

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 6).

2.2 실험결과 및 분석

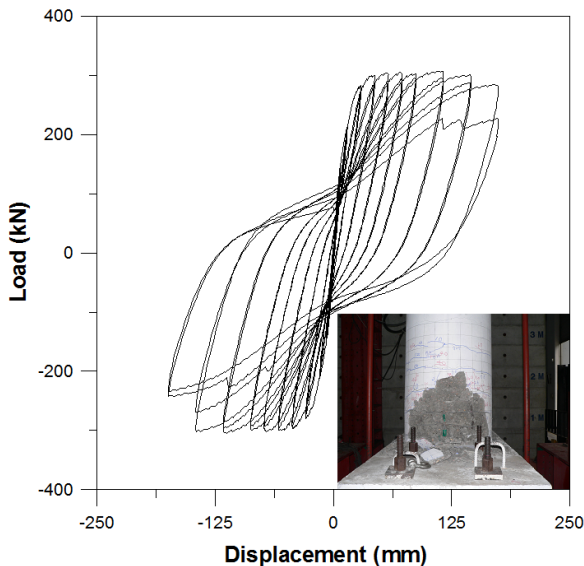
그림 7~그림 9에 실험체에 대한 하중-변위 이력곡선을 나타내었다. 또한 실험체의 최종 재하 단계에서의 파괴 양상을 함께 나타내었다. 하중-변위 이력곡선은 횡방향 하중 및 가력지점의 변위에 의해 표시되는데 실험체의 강도, 연

성, 그리고 에너지 소산능력을 평가하는 중요한 분석 자료이다.

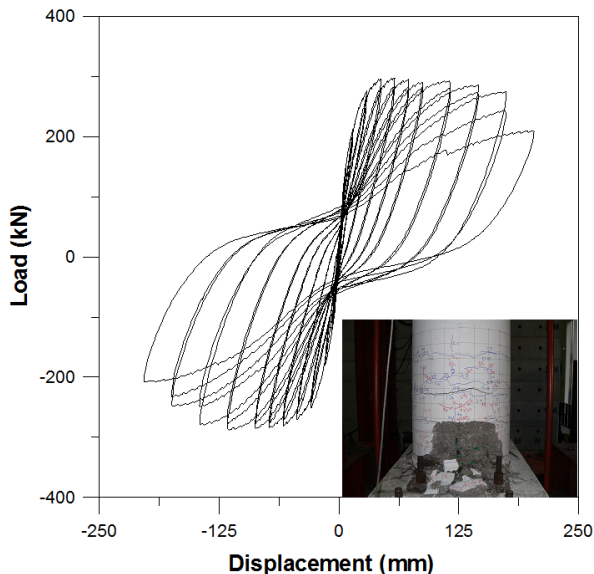
하중-변위 이력곡선에서 나타내고 있듯이 모든 실험체에서 항복변위까지는 강도저하 현상은 나타나지 않았으며, 실험체 항복이후 반복하중의 영향으로 부재의 강성이 서서히 감소하기 시작하였으나 최대하중 이후 축방향철근의 파단으로 인한 시험체의 파괴 이전까지 급격한 강도저하는 나타나지 않고 비교적 안정적인 거동을 나타내었다.

설계기준 요구량을 기준으로 100%의 횡방향철근비를 외측 구속철근에 배근하고 내측에는 조립철근만을 배근하는 HC-O-100 실험체의 최대하중은 -304.8 kN, 306.7kN이다. 100%의 횡방향철근비를 내외측 철근에 각각 50%씩 배근하고 보강띠철근의 개수 및 간격이 5개와 270mm인 HC-IO-90-L 실험체의 최대하중은 -288.3kN, 297.7kN이다. 그리고 100%의 횡방향철근비를 내외측 철근에 각각 50%씩 배근하고 보강띠철근의 개수 및 간격이 10개와 90mm인 HC-IO-90-H 실험체의 최대하중은 -297.5 kN, 276.2 kN이다. 즉 실험변수인 외측 및 내부 구속철근의 여부와 간격, 그리고 보강띠철근의 개수 및 간격에 따라 전반적으로 유사한 거동특성을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

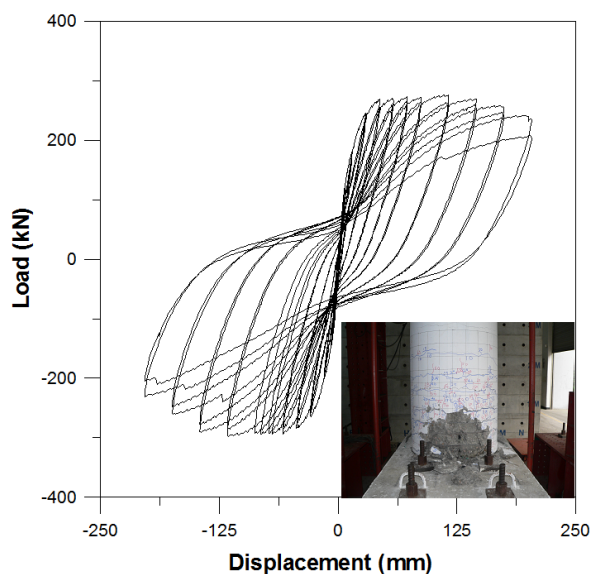
실험에서 교각시스템의 항복변위와 극한변위는 철근콘크리트 교각의 변위연성도 평가에서 가장 널리 사용되고 있는 하중-변위곡선으로부터 결정하는 간접적인 방법⁽¹⁴⁾으로 구하였다(그림 10). 즉, 하중-변위곡선으로부터 시스템의 수평 저항능력이 최대 내력에 비하여 15% 저하되었을 때의 변위를 극한변위로 정의하였으며, 항복변위는 하중-변위곡선의 원점과 최대 내력의 75%에 달하였을 때의 변위점을 이은



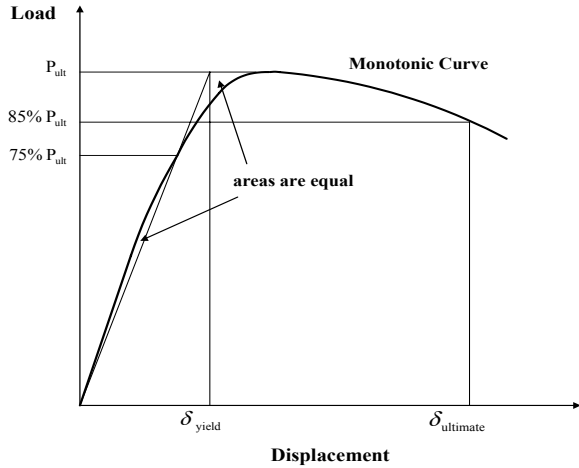
〈그림 7〉 실험체 HC-O-100의 하중-변위 곡선



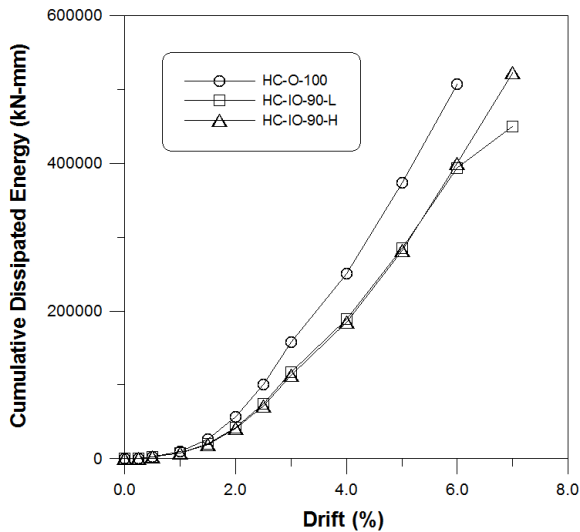
〈그림 8〉 실험체 HC-IO-90-L의 하중-변위 곡선



〈그림 9〉 실험체 HC-IO-90-H의 하중-변위 곡선



〈그림 10〉 교각시스템의 항복변위와 극한변위

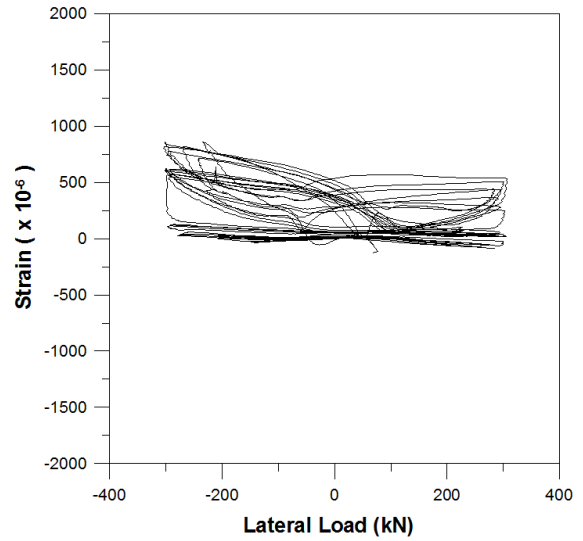


〈그림 11〉 실험체들의 누적 소산에너지 곡선

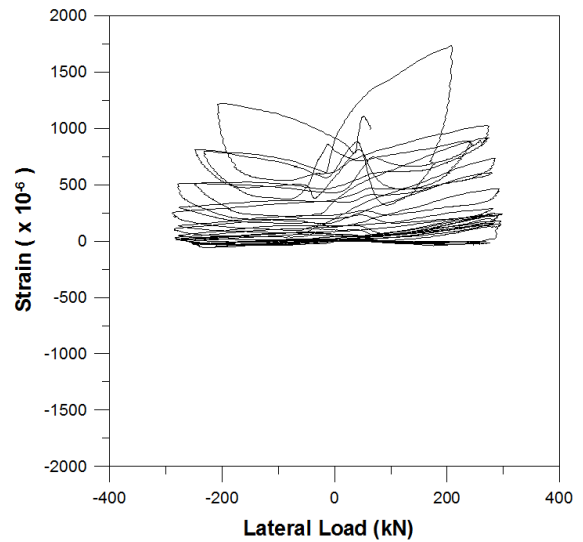
직선이 최대 내력점에 도달하였을 때의 수평변위로 정의하였다.

HC-O-100, HC-IO-90-L, HC-IO-90-H 실험체들의 변위 연성도는 각각 7.6, 7.8, 7.8로 도로교설계기준에서 규정하고 있는 단주교각의 응답수정계수에 해당하는 요구연성도 5를 충분히 만족하고 있음이 확인되었다. 즉 실험변수인 외측 및 내부 구속철근의 여부와 간격, 그리고 보강띠철근의 개수 및 간격과 상관없이 요구연성도를 만족하고 있으나 이는 현행 도로교설계기준에서 중실단면에 비해 상대적으로 심부 콘크리트 면적이 작은 중공단면의 횡방향철근량이 과도하게 산정되고 있기 때문인 것으로 판단된다.

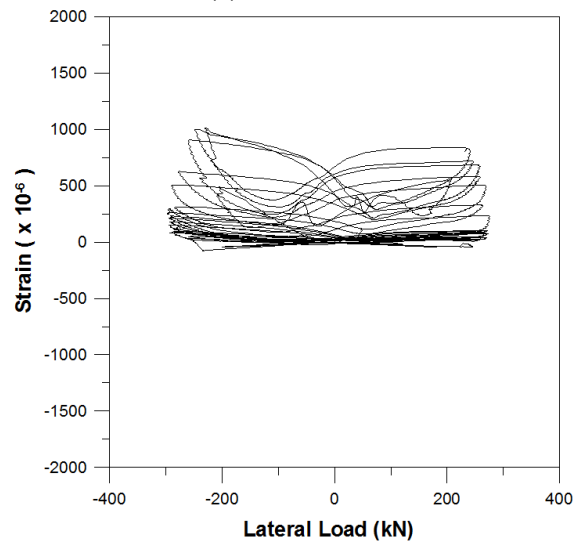
그림 11에 실험체들의 누적 소산에너지를 실험 변수별로 비교하여 나타내었다. 소산에너지는 하중-변위 이력곡선의 내부면적으로 정의되며 누적 소산에너지는 내부면적의 합으로 산정된다. 교각의 손상을 평가하기 위해 부재가 파괴



(a) HC-O-100



(b) HC-IO-90-L



(c) HC-IO-90-H

〈그림 12〉 심부구속 철근의 변형률

될 때까지 흡수 또는 소산할 수 있는 능력은 내진성능을 평

가하는데 중요한 요소 중 하나이다.

외측 구속철근의 간격이 100mm인 HC-O-100 실험체의 누적 소산에너지는 506,000kN·mm이다. 내외측 구속철근의 간격이 90mm이고 보강띠철근의 개수 및 간격이 5개와 270mm인 HC-IO-90-L 실험체의 누적 소산에너지는 450,000kN·mm이다. 그리고 내외측 구속철근의 간격이 90 mm이고 보강띠철근의 개수 및 간격이 10개와 90mm인 HC-IO-90-H 실험체의 누적 소산에너지는 522,000kN·mm으로서 전반적으로 유사한 거동특성을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

중공원형 교각 실험체의 국부적 거동특성을 분석하기 위하여 전술한 바와 같이 소성한지구간에서 축방향 철근에 10개, 심부구속 철근에 5개의 변형률 게이지를 부착하였다. 수평하중이 작용할 경우 횡방향철근은 하중의 변화에 따라서 변형률의 증가 또는 감소가 발생하고 있으며 실험체 모두 항복변형률(2,000microstrains) 이내에서 실험변수와 전반적으로 유사한 거동특성을 보이고 있음을 그림 12에서 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 소성한지구에서 콘크리트 피복의 탈락이 시작되었다. 콘크리트 피복이 탈락이 된 이후에도 상당한 변형능력을 보이다가 노출된 철근의 좌굴과 인장이 반복되면서 축방향철근이 파단에 이르렀다. 이때 교각 실험체의 파괴시 중립축의 위치는 모두 중공 단면 내부에 위치하는 것으로 나타났다.

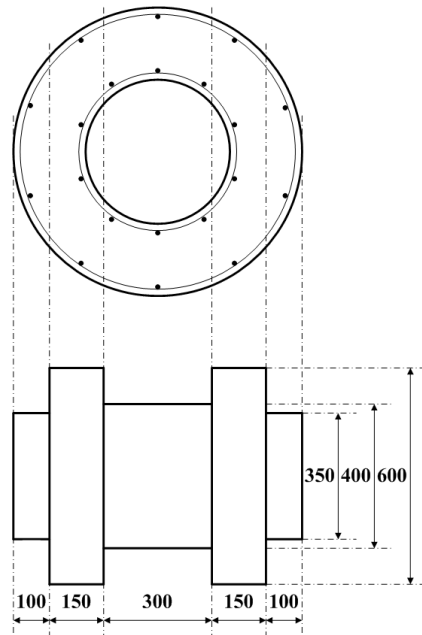
3. 구조거동 해석

3.1 유한요소 모델링

이 연구에서는 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소, 그리고 경계면요소 등^{(13),(15-18)}을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP ver. 7.2⁽¹⁹⁾에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)에 중공원형 단면의 구속효과를 고려할 수 있도록 수정을 가하여 사용하였다(그림 13). 이때 철근콘크리트의 비선형 재료모델은 저자 등에 의하여 이미 발표된 재료모델^{(13),(15-18)}을 그대로 적용하기로 하며 중공원형 단면의 구속효과는 콘크리트의 단면형상에 관계없이 적용할 수 있고, 축방향 철근 및 구속철근의 양,

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 13〉 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

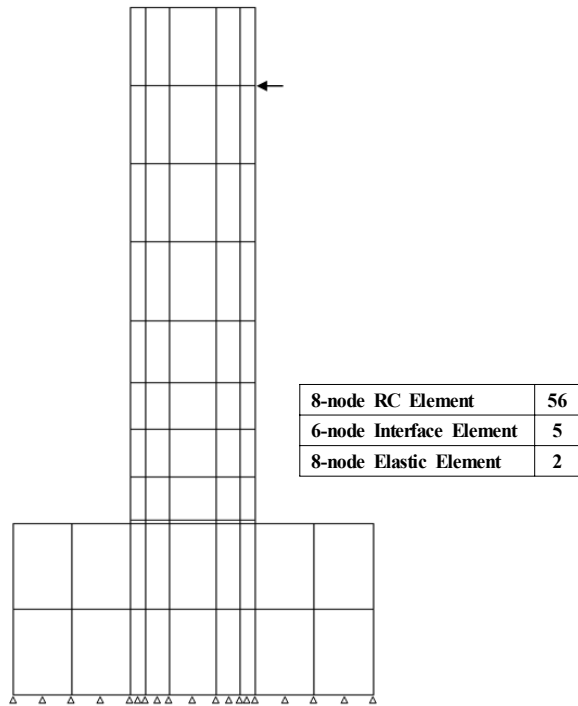


〈그림 14〉 등가환산단면 (단위: mm)

구속철근의 항복강도 및 배근형태 등을 고려할 수 있도록 한 Mander 등⁽²⁰⁾의 제안모델을 채택하여 고려하였다.

실험체들의 유한요소해석을 위해서 중공원형 철근콘크리트 교각을 등가환산단면을 이용하여 그림 14와 같이 2차원 평면요소로 해석이 가능하도록 하였다. 등가환산단면은 중공원형 철근콘크리트 교각의 실제거동과 유사하도록 철근과 콘크리트의 단면적, 하중재하 방향의 단면 2차 모멘트를 같게 하여 유도하였다.

실험체들의 유한요소해석을 위해서 중공원형 철근콘크리트 교각을 그림 15와 같이 요소 분할하였다. 3점 가우스 적분을 적용한 8절점 등매개요소를 56개를 이용하였고 하중이 재하되는 부위에는 실험체와 동일한 조건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지 않는 탄성요소를 2개 사용하였다. 또한, 기초와 교각의 접합부에는 정착슬립 등의 불연속변위를 고려하기 위하여 6절점 경계면 요소를 5개 사용하였다.



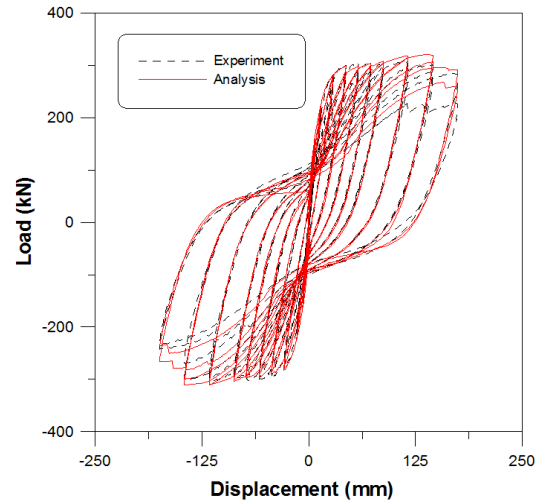
〈그림 15〉 유한요소모델의 예

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(Aspect Ratio)에 의한 영향은 1.0% 미만이었으며 이는 콘크리트구조의 비선형해석에서 예상되는 오차에 비하여 매우 작은 것으로 나타나 그 타당성이 검증되었다.

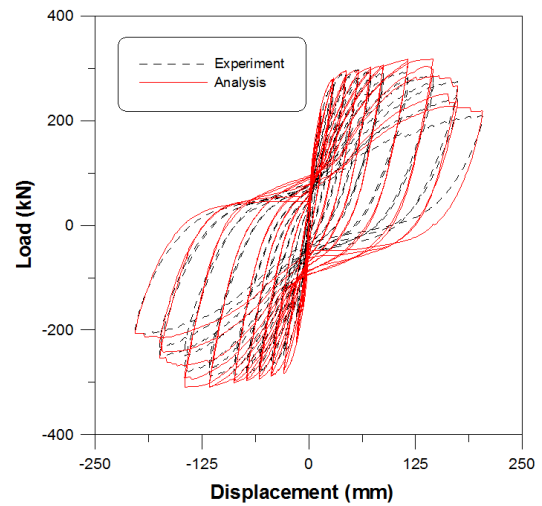
3.2 해석결과 및 분석

그림 16~그림 18은 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계를 나타내고 있으며 해석결과는 실험결과와 다소 차이를 보이고 있으나 전반적으로 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있어 제안된 해석기법의 적용 가능성을 확인 할 수 있다.

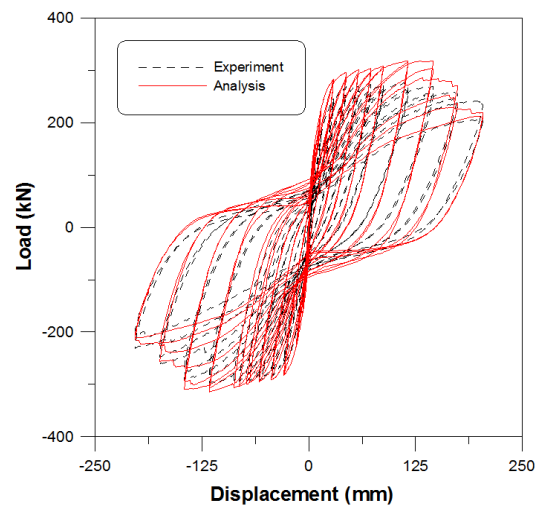
이러한 해석결과는 실험 결과와 재하, 제하, 그리고 재재하시의 거동면에서 잘 일치하고 있으며 실험체에 반복 주기 하중이 진행되는 동안 소성흔적 영역에서 비탄성 변형이 증대됨에 따라 일어나는 콘크리트의 균열과 파쇄, 그리고 이



〈그림 16〉 실험체 HC-O-100의 하중-변위 이력곡선



〈그림 17〉 실험체 HC-IO-90-L의 하중-변위 이력곡선



〈그림 18〉 실험체 HC-IO-90-H의 하중-변위 이력곡선

로 인한 손상이나 파괴와 잘 일치하고 있다. 또한 파괴시 교각 하단부의 각 가우스 적분점에서의 변형률을 비교한 결과

〈표 2〉 실험 및 해석 결과의 비교

Specimen	Experiment		Analysis		(1)/(3)	(2)/(4)
	V_{max} kN (1)	μ (2)	V_{max} kN (3)	μ (4)		
HC-O-100	-304.8	7.6	-310.2	7.8	0.98	0.97
	306.7		320.9		0.96	
HC-IO-90-L	-288.3	7.8	-309.6	7.7	0.93	1.01
	297.7		317.6		0.94	
HC-IO-90-H	-297.5	7.8	-314.2	7.7	0.95	1.01
	276.2		318.3		0.87	
Mean					0.95	1.00
					0.92	
COV					0.03	0.02
					0.05	

실험에서와 같이 중립축의 위치는 모두 중공 단면내부에 위치하고 있으며 그 결과도 거의 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 0.95, 0.92와 0.03, 0.05로서, 최대하중의 평균값은 전반적으로 실험결과를 비교적 정확하게 평가하고 있으며 변동계수가 0.03, 0.05에 불과하여 중공원형 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동특성을 전반적으로 잘 평가하고 있는 것으로 판단된다. 그리고 변위연성도에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 각각 1.00와 0.02로서, 변위연성도의 평균값은 실험결과를 전반적으로 잘 평가하고 있으며 중공 교각 실험체들의 내진성능을 포함한 거동특성을 정확하게 평가하고 있는 것으로 판단된다.

4. 횡방향철근에 따른 내진성능평가

4.1 개요

최근 철근콘크리트 교각의 설계는 한계상태설계(Limit State Design) 이론을 도입하여 사용하고 있으며, 이를 기본으로 성능기반설계(Performance Based Design) 이론으로 전환하여 한층 선진화되는 과정에 있다. 또한 요구되는 성능기준에 적합한 구조물을 설계하기 위한 기반기술의 개발이 필요시 되고 있다.

성능기반 내진설계는 구조물이 예측 가능한 내진성능을 확보하고 규정된 성능목표를 달성할 수 있도록 하는데 필요한 해석과 설계절차를 포괄하고 있는 차세대 개념의 내진설

계 방법이다. 즉 예상되는 지진하중에 대하여 주어진 조건에서 허용할 수 있는 적절한 피해정도 혹은 에너지 흡수정도를 미리 설정하고, 이를 달성하도록 하는 설계법이다.⁽²¹⁾

이러한 성능기반 내진설계 체제는 손상상태의 정량화가 필수적이며 그림 19와 같이 확장된 지진손상 평가법⁽¹³⁾을 통해서 얻을 수 있다. 손상지수는 유한요소해석에서 필연적으로 계산되는 가우스 적분점에서의 변형률을 이용하여 해석단계별로 직접 산정할 수 있으며 콘크리트와 철근의 극한 변형률에 근거한 파괴기준을 토대로 하고 있다. 이때 각 손상상태는 한 개 또는 그 이상의 한계상태에 의해 결정되고 각각은 성능수준을 규정할 수 있다(표 3). 완전기능 수준은 손상이 거의 발생하지 않아 보수가 요구되지 않으며 기능수행 수준은 경미한 손상이 발생하여 보수가 필요한 상태이다. 그리고 붕괴방지 수준은 심각한 손상이 발생하여 부분 또는 전체적인 보수 및 보강이 필요한 상태를 의미한다.

이 연구에서는 위와 같이 기존의 손상지수를 이용한 내진성능평가 기법⁽¹³⁾을 이용하여 중공원형 철근콘크리트 교각의 횡방향철근에 따른 내진성능 평가를 가능하도록 하였다.

4.2 내진성능평가

표 4~ 표 6은 하중재하에 따른 손상지수의 변화를 실험결과 및 성능수준과 함께 비교하여 교각실험체의 내진성능 평가를 나타내고 있다.

이 연구에서 수행된 내진성능평가 예로서 외측 구속철근의 간격이 100mm인 HC-O-100 실험체의 실험결과를 재하단계별로 기술하면 다음과 같다. Drift 0.25%에서 교각 전면에 미세한 수평 휨균열이 생기며(표 4), 0.5%에서는 기초부의 휨 균열이 진전하였다. 1.0%에서 재하방향과 평행한



〈그림 19〉 성능수준과 손상상태를 평가하는 지진손상 평가법

〈표 3〉 성능수준 상세와 지진손상 평가

Performance level	Service	Repair	Damage	
			State	Index
Fully operational	Full service	Limited epoxy injection	Hairline cracks	0.1
Delayed operational	Limited service	Epoxy injection Concrete patching	Open cracks Concrete spalling	0.4
Stability	Not useable	Replacement of damage section	Bar buckling/Fracture Core crushing	0.75

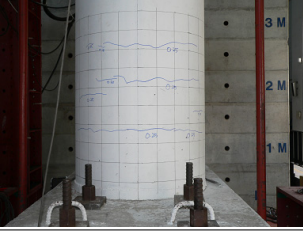
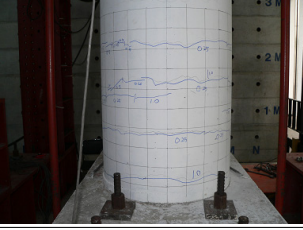
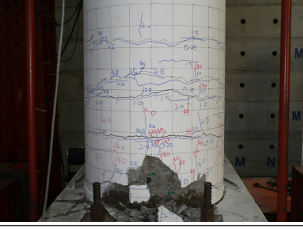

면에 경사 균열이 발생하였으며(표 4), 1.5%에서는 경사균열이 진전하였다. 2.0%에서 수직 균열이 발생하였으며, 2.5%에서는 기초부로부터 콘크리트 피복이 박리하기 시작하였다. 3.0%에서 기초부로부터 약 200mm 높이에 걸쳐 콘크리트 피복이 박리되었으며, 4.0%에서는 축방향 철근의 좌굴이 발생하였다(표 4). 5.0%에서 축방향 철근의 좌굴이 진전되었으며, 6.0%에서는 축방향 철근이 파단이 일어나 실험을 종료하였다(표 4). 이에 대하여 해석결과의 재하 단계별 손상지수 값은 Drift 0.25%에서 0.05, 0.5%에서 0.09, 1.0%에서 0.19, 1.5%에서 0.24, 2.0%에서 0.29, 2.5%에서 0.39, 3.0%에서 0.46, 4.0%에서 0.70, 5.0%에서 1.00, 그리고 6.0%에서 1.00을 나타내고 있다. 이 해석결과에 나타난 손상지수의 값을 성능평가 기법으로 표현하면, Drift 0.25%에서는 완전기능 수준으로 손상이 거의 발생하지 않아 보수가 요구되지 않는 상태이다. Drift 1.0%와 2.5%에서는 기능수행 수준으로 경미한 손상이 발생하여 보수가 필요한 상태이다. Drift 4.0%에서는 붕괴방지 수준으로 심각한 손상이 발생하여 부분 또는 전체적인 보수 및 보강이 필요한 상태를 의미한다.

하중재하에 따른 요소레벨의 손상지수의 변화를 나타내는 그림 20은 이 실험의 변수로 사용한 횡방향철근량에 따른 실험체의 거동특성을 비교한 것으로 실험결과를 해석결과가 잘 모사하고 있다. 해석결과의 재하 단계별 손상지수 값을 확인해보면 Drift 1.0%에서 HC-O-100 실험체는

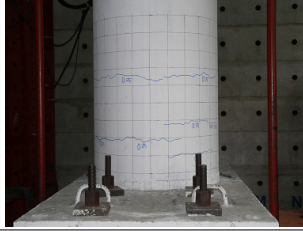
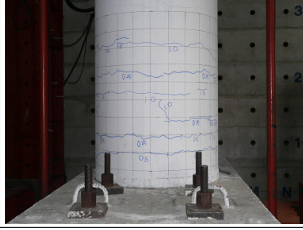


〈표 4〉 실험체 HC-O-100의 내진성능평가

Drift	Experiment	Analysis
0.25%		First cracking
		Fully operational
1.00%		0.19
		Delayed operational
4.00%		0.70
		Stability
6.00%		1.00
		-

〈표 5〉 실험체 HC-IO-90-L의 내진성능평가

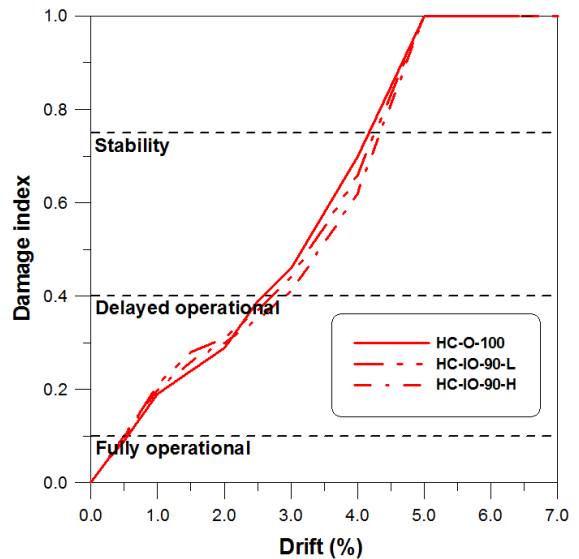
Drift	Experiment	Analysis
0.25%		First cracking
		Fully operational
1.00%		Open cracks
		Delayed operational
4.00%		Buckling
		Stability
7.00%		Fracture
		-

〈표 6〉 실험체 HC-IO-90-H의 내진성능평가

Drift	Experiment	Analysis
0.25%		First cracking
		Fully operational
1.00%		Open cracks
		Delayed operational
4.00%		Buckling
		Stability
7.00%		Fracture
		-

0.19, HC-IO-90-L 실험체는 0.21, HC-IO-90-H 실험체는 0.20이다. Drift 2.0%에서 HC-O-100 실험체는 0.29, HC-IO-90-L 실험체는 0.31, HC-IO-90-H 실험체는 0.30이다. 그리고 drift 4.0%에서 HC-O-100 실험체는 0.70, HC-IO-90-L 실험체는 0.66, HC-IO-90-H 실험체는 0.62이다. 즉 내외측 구속철근의 간격이 90 mm이고 보강띠철근의 개수 및 간격이 5개와 270mm인 HC-IO-90-L 실험체 및 내외측 구속철근의 간격이 90mm이고 보강띠철근의 개수 및 간격이 10개와 90mm인 HC-IO-90-H 실험체가 외측 구속철근의 간격이 100mm인 HC-O-100 실험체보다 동일한 하중단계에서 손상이 다소 지연되고 있음을 확인할 수 있다.

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



〈그림 20〉 횡방향철근에 따른 내진성능평가

5. 결론

이 연구는 중공원형 철근콘크리트 교각의 내진설계시 현

행 실무에서 당면하고 있는 심부구속을 위한 횡방향철근량 산정 및 상세에 관한 문제점을 해결하고 합리적인 내진설계법의 개발을 위한 자료를 제공하기 위한 연구로서 준정적 실험과 비선형 유한요소해석을 함께 수행하였다. 실험체의 실험결과와 해석결과와의 비교를 통하여 다음의 결론을 얻었다.

1. 이 연구에서 제안한 비선형 유한요소해석 결과 최대하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 0.95, 0.92와 0.03, 0.05이고 변위연성도에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 1.00와 0.02로서, 전반적으로 실험결과를 잘 평가하고 있음이 확인되었다. 또한 중공단면 교각의 거동특성을 결정하는 파괴시 중립축의 위치는 실험과 해석결과 모두 단면내부에 위치하고 있으며 그 결과도 잘 일치하고 있다. 이를 통해 제안한 해석기법과 모델은 중공원형 철근콘크리트 교각구조의 전반적인 거동특성을 바르게 표현하고 있음이 입증되었으며 향후 중공원형 교각구조의 정밀해석이 가능할 것으로 판단된다.
2. 이 연구에서는 횡방향 구속철근 및 보강띠철근의 횡구속 효과와 중공단면 교각의 거동특성을 규명하기 위하여 외측 및 내측 구속철근의 여부와 간격, 그리고 보강띠철근의 개수 및 간격을 변수로 선정하여 실험적, 해석적 연구를 수행하였으며 이를 통해 중공원형 철근콘크리트 교각의 설계와 시공 실무를 향상하기 위한 내진상세를 제시하였다.
3. 중공원형 철근콘크리트 교각의 내진설계법을 개발하기 위한 연구자료를 제공함으로써 성능기반 내진설계개념에 접목하여 비선형 유한요소해석을 이용한 합리적이고 경제성 있는 차세대 내진설계법의 개발 등에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.
4. 이 연구에서는 하중 재하에 따른 구조물의 손상정도를 수치적으로 표현하며 전체 구조물의 성능특성을 나타낼 수 있는 손상지수에 의한 내진성능평가 기법을 이용하여 중공원형 철근콘크리트 교각의 횡방향철근에 따른 내진성능을 평가하였다. 이때 설계 지진에서는 이축방향으로 지진하중이 작용하게 되고 이러한 경우에는 일축방향으로 가력하는 경우보다도 내진성능이 저하될 가능성이 있으므로 이를 고려하여 내진성능을 다소 안전측으로 평가하는 것이 필요할 것으로 판단된다.
5. 이 연구에서는 일반적으로 많이 사용되는 중공비 50%인 중공원형 철근콘크리트 교각의 준정적 실험을 통해 변형 성능 및 거동특성을 분석하였다. 향후 중공단면의 내진설

계기준을 정립하기 위해서는 다양한 중공비를 갖는 교각에 대한 연구를 통하여 중공단면 교각의 거동특성을 심도 있게 규명할 필요가 있다. 또한 중공단면 교각의 경우 단면형상, 축력비, 축방향철근비 등 제원특성에 따라 다양한 거동을 나타내게 되므로, 향후 매개변수 연구를 통하여 거동특성을 심도 있게 규명할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. Zahn, F.A., Park, R., and Priestely, M.J.N. "Flexural Strength and Ductility of Circular Hollow Reinforced Concrete Columns without Confinement on Inside Face," *ACI Structural Journal*, Vol. 87, No. 2, 156-166, 1990.
2. 정영수, 한기훈, 이강균, 이대형, "원형중공 콘크리트 교각의 내진성능에 대한 준정적 실험," 한국지진공학회논문집, 제3권, 제2호, 41-53, 1999.
3. Yeh, Y.-K., Mo, Y. L., and Yang, Y., "Seismic Performance of Hollow Circular Bridge Piers," *ACI Structural Journal*, Vol. 98, No. 6, 862-871, 2001.
4. Yeh, Y.-K., Mo, Y. L., and Yang, Y., "Seismic Performance of Rectangular Hollow Bridge Columns," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 128, No. 1, 60-68, 2002.
5. Mo, Y.L., Wong, D.C., and Maekawa, K., "Seismic Performance of Hollow Bridge Columns," *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 3, 337-348, 2003.
6. 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2010.
7. 김익현, 정영식, 신원철, 선창호, "중공사각단면 기둥에 있어서 횡철근과 Cross-tie의 횡방향 구속 효과에 대한 해석적 연구," 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제15권, 제2호, 617-620, 2003.
8. 선창호, 김익현, "횡방향철근이 감소된 중공사각단면 교각의 내진기동 특성," 한국지진공학회논문집, 제13권, 제3호, 51-65, 2009.
9. 문홍인, 선창호, 김익현, "중공사각단면 교각의 횡구속 철근 상세 적용성에 관한 연구," 한국콘크리트학회 가을 학술회 논문집, 제22권, 제2호, 365-366, 2010.
10. 선창호, 김익현, "중공단면 교각의 내진상세 개선에 관한 연구," 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집, 제15권, 75-78, 2011.
11. 천주현, 이승진, 이병주, 이재훈, 신현목, "설계변수에 따른 중공원형 철근콘크리트 교각의 비선형 유한요소해석," 한국지진공학회논문집, 제15권, 제2호, 35-42, 2011.
12. 김태훈, 신현목, "Analytical Approach to Evaluate the Inelastic Behaviors of Reinforced Concrete Structures under Seismic Loads," 한국지진공학회논문집, 제5권, 제2호, 113-124, 2001.
13. 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, 843-85, 2007.

14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Taylor, R.L., *FEAP - A Finite Element Analysis Program*, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, 2000.
20. 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.
21. Applied Technology Council (ATC), *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, ATC-40 Report*, Redwood City, California, 1996.