

## 변동 축하중을 받는 중공 철근콘크리트 교각의 비탄성거동에 관한 해석적 연구

### Analytical Study on the Inelastic Behavior of Hollow Reinforced Concrete Bridge Columns under Varying Axial Load

김태훈<sup>1)</sup> · 신현목<sup>2)</sup>

Kim, Tae-Hoon · Shin, Hyun-Mock

**국문 요약** >> 이 연구의 목적은 변동 축하중을 받는 중공 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동을 파악하는데 있다. 변동 축하중은 연성도, 강도, 강성, 에너지 소산 등에 큰 영향을 미친다. 사용된 프로그램은 철근콘크리트 구조물의 해석을 위한 RCAHEST이다. 재료적 비선형성에 대해서는 균열콘크리트에 대한 인장, 압축, 전단모델과 콘크리트 속에 있는 철근모델을 조합하여 고려하였다. 이 연구에서는 변동 축하중을 받는 중공 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동의 파악을 위해 제안한 해석기법을 신뢰성 있는 연구자의 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

**주요어** 변동 축하중, 중공 철근콘크리트 교각, 비탄성거동, 재료적 비선형성

**ABSTRACT** >> The purpose of this study is to investigate the inelastic behavior of hollow reinforced concrete bridge columns under varying axial load. The role of the variable axial load is very important in the ductility, strength, stiffness, and energy dissipation. A computer program, named RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology), for the analysis of reinforced concrete structures was used. Material nonlinearity is taken into account by comprising tensile, compressive and shear models of cracked concrete and a model of reinforcing steel. The proposed numerical method for the inelastic behavior of hollow reinforced concrete bridge columns under varying axial load is verified by comparison with reliable experimental results.

**Key words** varying axial load, hollow reinforced concrete bridge columns, inelastic behavior, material nonlinearity

## 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.

근래에 이러한 중공단면 교각이 구조물의 자중, 사용재료의 경감 및 수화열 억제를 위하여 경제적 및 구조적인 측면에서 고속도로 교량 및 기타 교량에서 널리 설계·시공되어

지고 있으나 국내·외적으로 중공단면 교각의 지진에 대한 연구는 미흡한 실정이다.<sup>(1-8)</sup> 더욱이 비탄성해석을 통한 중공단면 교각의 연성능력을 파악하거나 지반운동에 대한 경제성 및 안전성 확보를 위하여 동적거동에 관한 실험적·해석적 연구가 절실히 요구되는 실정이다.

중공단면 교각의 내진성능은 동일한 단면적을 갖는 중실 단면 교각과 내진성능이 유사한 것으로 평가되었으며 비내진 상세를 갖는 중공 교각도 어느 정도의 연성능력을 확보하고 있는 것으로 조사되었다. 그러나 일반적으로 전단에 취약하며 높은 축력비를 갖는 경우 중공 안쪽면의 압축파괴로 취성거동을 보임으로써, 연성거동을 위한 기술개발이 요구되고 있다. 또한 중공단면 교각의 경우 중공비, 축력비, 주철근비 등 제원특성에 따라 다양한 거동을 나타내게 되므로, 매개변수 연구를 통하여 거동특성을 심도 있게 규명할 필요가 있다.

<sup>1)</sup> 정희원·대우건설 기술연구원 선임연구원, 공학박사

(대표저자: kimth@dwconst.co.kr)

<sup>2)</sup> 정희원·성균관대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2006년 10월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

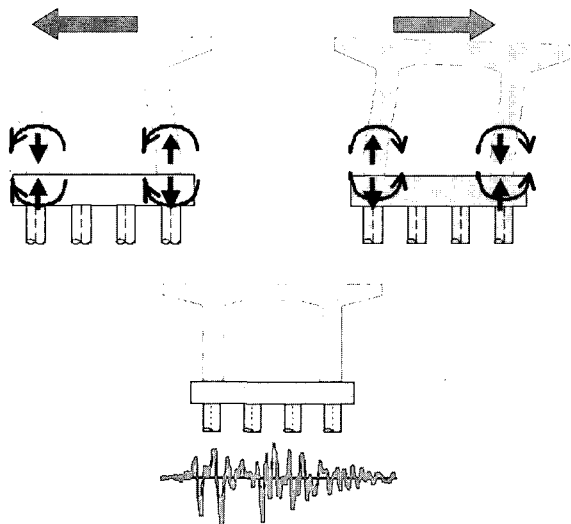
(논문접수일 : 2006. 2. 15 / 심사종료일 : 2006. 4. 25)

이 연구의 목적은 최근 들어 관심과 활용이 증가하고 있는 중공 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동을 해석적으로 예측하는 것이다. 아울러 그림 1과 같은 다주식 교각의 경우 발생할 수 있는 변동 축하중에 의한 영향을 파악하는 것이다. 이러한 교각구조는 지진에 의해 축력이 변화하여 축인장력과 축압축력이 동반되는 복잡한 거동특성을 지니고 있다.

중공 철근콘크리트 교각의 정확한 해석을 위해서는 3차원 해석 즉 3차원 유한요소와 3차원 구성모델이 필요하다. 실제 구조물에 기초를 둔 3차원 솔리드(solid)요소에 의한 해석은 정확한 결과를 얻을 수 있다는 장점이 기대되지만 신뢰성 있는 재료모델의 개발이 어려우며 데이터 및 계산량이 방대하여 실제문제에 적용하기는 어렵다.

이 연구에서는 중공 철근콘크리트 교각을 등가환산단면을 이용하여 2차원 평면요소로 해석이 가능하도록 하고 비선형 유한요소해석을 실시하여 비탄성 거동특성 및 파괴메커니즘을 파악하였다.

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>(9)</sup>에 중공 철근콘크리트 교각의 거동특성을 모사할 수 있도록 수정을 가하여 사용하였다.



〈그림 1〉 변동 축하중을 받는 다주식 교각

## 2. 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

### 2.1 철근콘크리트의 비선형 재료모델

철근콘크리트의 비선형 재료모델은 저자 등에 의하여 이미 발표된 재료모델<sup>(10-12)</sup>을 그대로 적용하기로 한다. 사용된 비선형 재료모델의 특징을 간단히 요약하면 다음과 같다.

균열이 분산하여 분포된 철근콘크리트 부재의 변형거동은 사용된 균열개념에 크게 영향을 받는다. 이 연구에서는 제 2 균열의 발생을 제 1 균열과 직교방향으로 발생하도록 제한하여 콘크리트의 강성이 과대평가 되는 직교 고정균열 모델과 달리, 실제 주응력의 방향과 직각으로 발생하도록 한 비직교 고정균열모델을 적용함으로써 콘크리트의 강성을 보다 사실적으로 평가하였다.

균열이 발생하기 전의 콘크리트의 역학모델은 이축응력상태에 대한 탄소성파괴모델의 기본개념에 의해서 표현된다.

균열발생후의 비선형성은 현저하게 나타나며, 이러한 재료적 비선형성에 대해서는 철근콘크리트 요소의 직교 이방성의 가정에 따라, 균열직각방향으로 콘크리트가 부담하게 되는 인장응력을 고려하기 위한 인장강성모델과 균열방향으로의 압축강성 저하를 고려하기 위한 압축강성모델 및 균열면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델을 각각 적용한다.

콘크리트 속의 철근에 대한 항복후 거동은 철근만의 특성과 함께 부착효과 등이 동시에 고려되어야 한다. 콘크리트 속의 철근응력은 일정하지 않고 균열면에서 최대가 된다. 철근의 응력-변형을 관계가 탄성영역에 있는 경우에는 철근만의 구성모델을 적용하면 된다. 그러나 균열면에서 철근이 최초로 항복하게 되면 철근의 평균응력-평균변형을 관계는 더 이상 탄성관계가 성립하지 않는다. 균열부분을 제외하면 철근은 아직 항복을 하지 않았으므로 증가된 변형률에 따라 응력이 증가하게 된다. 즉 균열부분은 철근의 항복으로 인해 응력의 증가가 없지만 내부의 철근의 응력은 증가하여 철근의 평균응력이 증가하게 되므로 철근만의 응력-변형률 관계에서 볼 수 있는 항복고원현상은 나타나지 않는다. 이 연구에서는 포락선부분에 대한 철근의 항복후 거동을 저자 등이 제안한 trilinear 모델로써 표현하였다.

압축파괴가 발생한 콘크리트의 역학적 특성은 이미 여러 연구자들에 의해서 규명된 바가 있다. 이 연구에서는 콘크리트 압축파괴 이후의 효과를 Kent 등에 의해 제안된 해석 모델을 수정하여 고려하였다. 또한, 압축파괴가 발생한 콘크리트의 안에 있는 철근의 좌굴거동은 최종적인 내력저하의 원인이 된다. 철근을 둘러싸고 있는 콘크리트에 압축파괴가

발생하면 철근이 좌굴을 하였다고 판단하였으며 좌굴 시의 철근의 응력은 압축파괴가 발생한 콘크리트에서와 같이 좌굴을 무시하고 구한 철근 응력의 20%를 취하였다.<sup>(12)</sup>

지진하중과 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 교각의 비선형 이력거동 특성을 올바르게 평가하기 위해서는 하중재하 회수에 의한 피로거동을 무시할 수 없으며 이에 대한 충분한 고려가 필요하다. 이 연구에서는 철근과 콘크리트의 해석 모델에 하중재하 회수의 누적에 따른 강도 및 강성 저하의 영향을 적용함으로써 피로손상을 고려하였다. 철근의 피로모델은 Coffin-Manson의 제안식<sup>(13)</sup>을 적용하였으며 콘크리트의 피로모델은 Kakuta 등의 제안식<sup>(14)</sup>을 수정하여 사용하였다.

**2.2 비선형 유한요소해석 프로그램**

유한요소해석 프로그램을 작성하는 방법은 사용목적에 맞는 전용 프로그램을 새롭게 작성하는 방법과 사용자가 개발한 요소를 추가할 수 있는 모듈화된 범용 유한요소해석 프로그램을 이용하는 방법으로 구분될 수 있다. 전자의 방법은 전용프로그램으로서 입력자료의 작성이 간단하고 해석시간을 줄일 수 있는 장점이 있는 반면에 이미 개발된 또는 앞으로 개발될 다른 종류의 요소와 조합으로 사용하기가 곤란하다.

이 연구에서는 후자의 방법을 택하여 저자 등에 의하여 그동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소, 그리고 경계면요소 등<sup>(9-12)</sup>을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP<sup>(15)</sup>에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램인 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)<sup>(9)</sup>을 중공 철근콘크리트 교각의 거동특성을 모사할 수 있도록 수정을 가하여 사용하였다(그림 2).

**2.3 손상지수 평가**

손상지수는 구조물의 손상된 정도를 평가할 수 있는 편리한

방법으로서 하중 재하에 따른 구조물의 손상정도를 수치적으로 표현하며 전체 구조물의 성능특성을 나타내는 지수이다. 이러한 손상지수는 구조물레벨과 요소레벨로 나누어 볼 수 있다.

구조물레벨에는 구조물의 기본주기 변화를 이용하는 평가기법이 있으며 요소레벨에는 강성의 저하, 피로의 정식화 그리고 이력곡선의 에너지 방출 등을 이용하는 평가기법이 있다. 이러한 구조물레벨의 손상지수 산정법은 구조물의 손상을 정량적으로 평가할 수 있는 방법이기도 하지만 각 중단계에서의 기본주기를 계산하는 등의 번거로움이 있다.

이에 기존의 연구에서는 비선형 유한요소해석을 전제로 하여 유한요소해석에서 필연적으로 계산되는 가우스적분점에서의 변형률을 이용하여 해석프로그램에서 직접 손상지수를 산정할 수 있는 방법을 개발하였다. 즉, 비탄성 해석으로 얻어지는 콘크리트와 철근의 극한변형률에 근거한 파괴기준을 토대로 요소레벨의 손상지수를 개발하였다. 파괴기준은 크게 콘크리트의 압축파괴와 전단파괴, 그리고 철근의 인장파괴로 나누어 볼 수 있으며 이를 토대로 각 해석단계의 변형률에 해당하는 손상지수를 구한다. 이러한 파괴기준과 손상지수를 정리하여 표 1에 나타내었다.<sup>(10,12)</sup>

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 2〉 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

〈표 1〉 요소레벨의 손상지수

Item		Failure Criterion ( $\epsilon_{cu}$ or $\epsilon_{tu}$ )	Damage Index ( $D.I_e$ )
Concrete	Compressive and Shear	$0.004 + \frac{1.4\rho_s f_{yh} \epsilon_{sm}}{f'_{cc}}$	$1 - ftg_c \left( \frac{2\epsilon_{cu} - \epsilon_{cs}}{2\epsilon_{cu}} \right)^2$
Steel	Tensile	0.10	$1.20 \left( \frac{\epsilon_{ts}}{2ftg_r \epsilon_{tu}} \right)^{0.67}$

\*  $\rho_s$  = transverse confining steel ratio;  $f_{yh}$  = yield stress of the confining steel  
 $\epsilon_{sm}$  = steel strain at maximum tensile stress;  $f'_{cc}$  = confined concrete compressive strength  
 $ftg_c$  = fatigue parameter for concrete;  $ftg_r$  = fatigue parameter for steel  
 $\epsilon_{cs}$  = compressive strain in analysis step;  $\epsilon_{ts}$  = tensile strain in analysis step  
 $\epsilon_{cu}$  = ultimate strain of concrete;  $\epsilon_{tu}$  = ultimate strain of reinforcing bars

손상지수  $DI$ 는 손상이 없는 0.0으로부터 파괴를 나타내는 1.0까지로 표현되며 손상지수 0.75는 파괴의 시점을 알린다. 일반 구조물에 대한 각각의 손상지수의 값을 이 연구의 대상인 중공 철근콘크리트 교각에 적용하면, 보수가 가능한 손상지수 값 0.1은 주철근의 항복이 일어나기 전으로서 경미한 휨균열이 발달한 상태로, 보수가 불가능한 손상지수 값 0.4는 주철근이 항복한 후 매우 큰 휨 또는 전단균열에 의해서 콘크리트의 파복이 박리된 상태로, 파괴 시점의 손상지수 값인 0.75는 주철근의 파단이 일어나기 시작한 상태로, 그리고 손상지수 값 1.0은 주철근이 대부분 파단되어 붕괴된 상태로 설명할 수 있다.<sup>(10,12)</sup>

### 3. 중공 철근콘크리트 교각의 구속효과 고려

중공 철근콘크리트 교각에서 횡방향으로 배근된 구속철근은 콘크리트의 극한강도와 극한변형률을 증가시키는 효과를 가져다준다. 이와 같이 증가된 콘크리트의 강도와 변형률로 인해서 지진하중 등과 같은 반복하중을 받는 경우에 콘크리트의 부재는 구속되지 않은 경우에 비해서 우수한 연성능력 및 복원력특성을 나타낸다.

구속된 콘크리트의 압축강성을 표현하기 위한 압축응력-압축변형률 관계에 대해서는 많은 연구자들<sup>(16,17)</sup>이 제안한 모델이 있으며, 이 연구에서는 콘크리트의 단면형상

에 관계없이 적용할 수 있고, 종방향 철근 및 구속철근의 양, 구속철근의 항복강도 및 배근형태 등을 고려할 수 있도록 한 Mander 등<sup>(6)</sup>의 제안모델을 수정하여 고려하였다 (그림 3).

Mander 등은 횡방향으로 구속된 콘크리트 교각에 적용할 수 있는 응력-변형률 모델을 제시하였는데 제시된 응력-변형률 모델은 Popovics<sup>(18)</sup>가 제안한 콘크리트 구성방정식에 기초한 것이다.

이 모델에서는 횡방향으로의 구속효과는 임의 단면형상에 대한 유효구속응력(effective confining stress)과 유효구속계수(effective confining coefficient)를 구함으로써 고려할 수 있다.

유효구속응력  $f'_l$ 은 식 (1)과 같이 평균구속응력에 유효구속계수를 곱한 값으로 정의된다.

$$f'_l = K_e f_l \tag{1}$$

여기서  $K_e (= \frac{A_e}{A_{cc}})$ 는 유효구속계수로서 횡방향철근에 의해서 구속된 콘크리트의 단면적에 대한 콘크리트 심부의 유효단면적의 비,  $A_e$ 는 콘크리트 심부의 유효단면적, 그리고  $A_{cc}$ 는 횡방향철근에 의해서 구속된 콘크리트의 단면적으로서 다음 식과 같다.

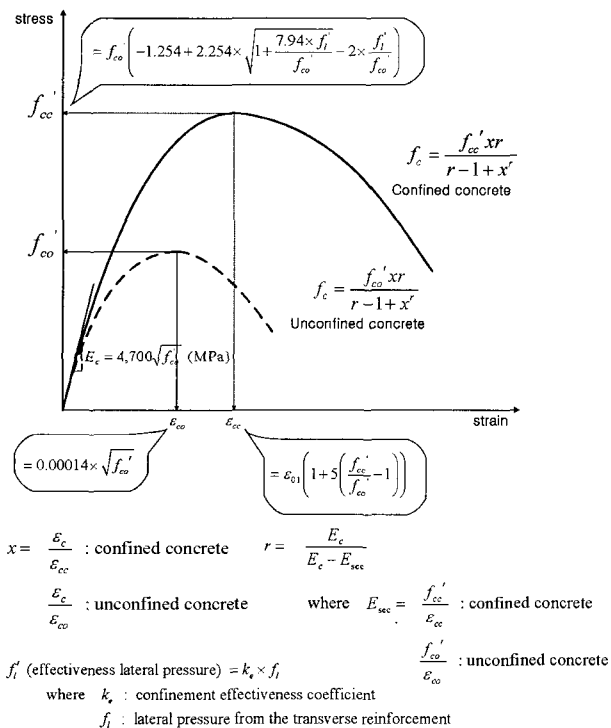
$$A_e = A_c (1 - \rho_{cc}) \tag{2}$$

여기서  $\rho_{cc}$ 는 콘크리트 심부의 면적에 대한 종방향철근의 비, 그리고  $A_c$ 는 나선 또는 띠철근 중심의 내부 면적이다.

이 연구에서는 구속된 콘크리트의 최대압축강도  $f'_{cc}$ 를 계산하기 위해, 삼축 압축응력상태에 대해서 William 등<sup>(19)</sup>이 제안한 모델을 적용하였다. 구속된 콘크리트가 나선 또는 원형 띠철근으로 인해 동등한 유효 구속응력  $f'_l$ 의 삼축압축 상태에 있다면 구속된 콘크리트의 압축강도는 다음과 같다.

$$f'_{cc} = f'_{co} \left( -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}} \right) \tag{3}$$

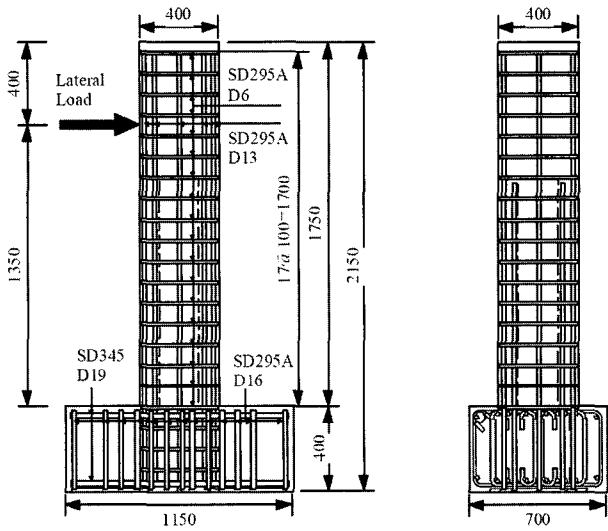
여기서  $f'_{co}$ 는 구속되지 않은 콘크리트의 압축강도, 그리고  $f'_l$ 은 식 (1)에서 주어진다.



(그림 3) 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계(Mander 모델)

### 4. 해석 예 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 그림 4, 5에 나타난 것과 같은 중공 철근콘크리트 교각의 실험체<sup>(20)</sup>를 선정하였다. 이 실험체를 해석 예로 채택한



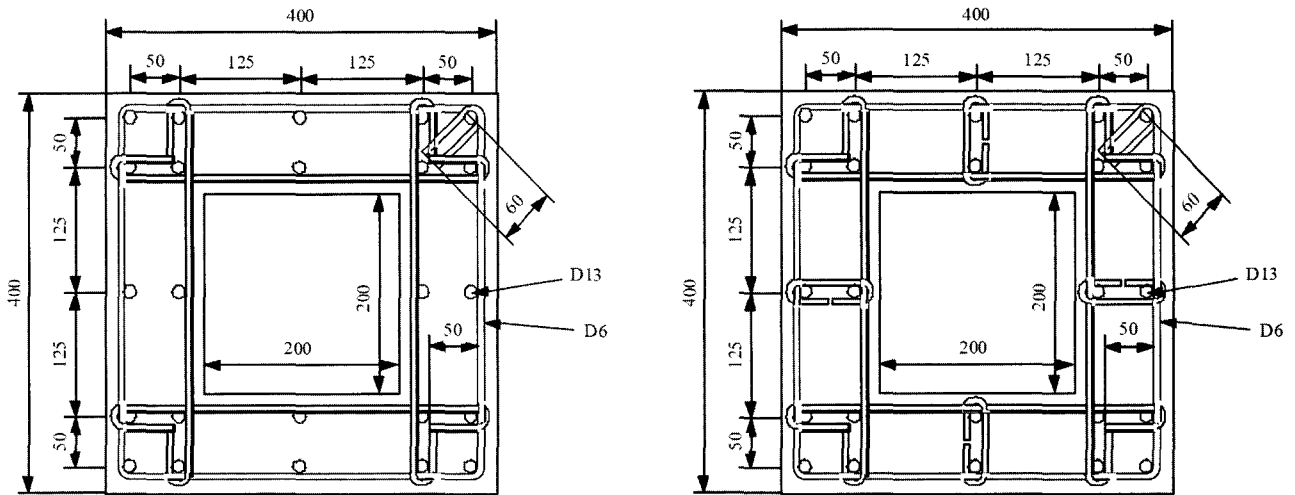
〈그림 4〉 실험체의 형상(단위: mm)

이유는 지진하중과 같은 반복하중을 받는 중공 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동특성을 정량화 시킨 실험이기 때문이다.

#### 4.1 선정된 실험체의 제원<sup>(20)</sup>

실험체의 단면은 중공 사각형 단면이며 형상비(shear aspect ratio)는 3.86이다. 실험체의 제원은 표 2와 같으며 이들 실험체에 대한 재하방법은 그림 6에 나타난 것과 같다.

재하는 교각기초부에서 주철근이 항복할 때, 하중작용위치에 생기는 변위를 항복변위  $\delta_y$ 로 정의하고, 이 변위의 정수 배  $n \times \delta_y (n=1,2,3 \dots)$ 로 순차적으로 변위진폭을 증가시켰으며 동일한 재하변위진폭에 있어서 반복회수를 3회로 하였다. 또한 각 실험체에 대한 축하중은 그림 6과 같이 재하하였다. 즉, 실험체 TP-35와 TP-36은 축압축력 230kN을



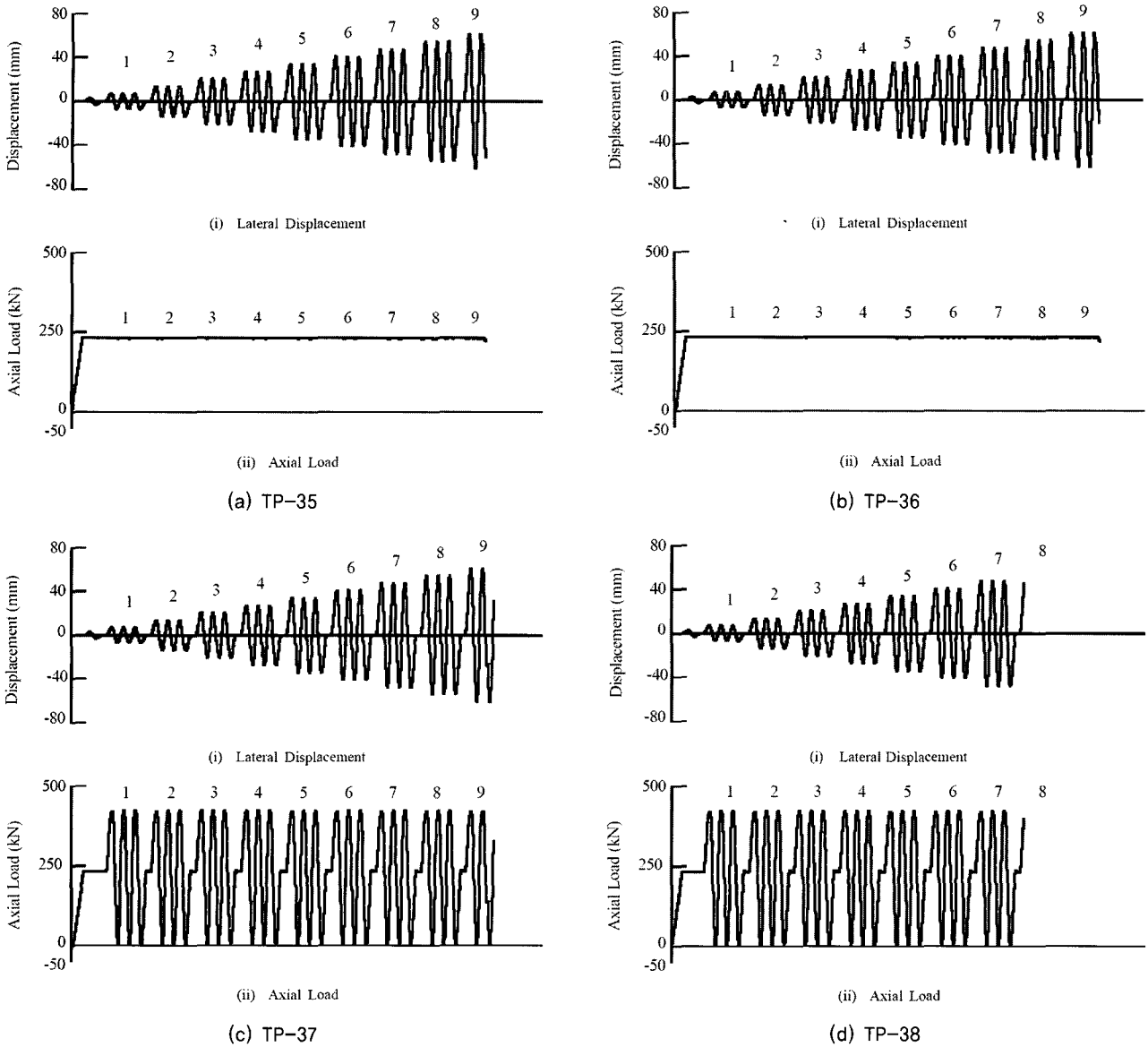
(a) TP-35, TP-37

(b) TP-36, TP-38

〈그림 5〉 실험체의 단면(단위: mm)

〈표 2〉 실험체의 제원

Specimen	TP-35	TP-36	TP-37	TP-38
ID in the Reference	TYPE-A	TYPE-B	TYPE-D	TYPE-E
Section	Square (Hollow)			
Section Size (mm)	400×400 (200×200)			
Effective Height $h$ (mm)	1350			
Effective Depth $d$ (mm)	350			
Aspect Ratio	3.86			
Longitudinal Reinforcement Ratio (%)	2.53			
Volumetric Ratio of Tie Reinforcement $\rho_s$ (%)	1.13	1.23	1.13	1.23
Cylinder Strength of Concrete $\sigma_{c,0}$ (MPa)	24.0	29.7	24.0	25.7
Longitudinal Reinforcement	SD295A D13 (Yield Strength = 374 MPa)			
Tie Reinforcement	SD295A D6 (Yield Strength = 363 MPa)			
Axial Force (kN)	230 (Constant) (2.0 MPa at the Bottom)		-10~410 (Varying) (0~3.5 MPa at the Bottom)	



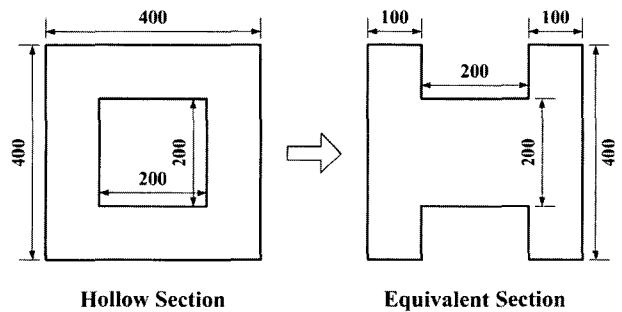
〈그림 6〉 하중이력

일정하게, TP-37과 TP-38은 축력을 -10~410kN로 변동시켜 재하하였다.

4.2 유한요소해석을 위한 요소분할

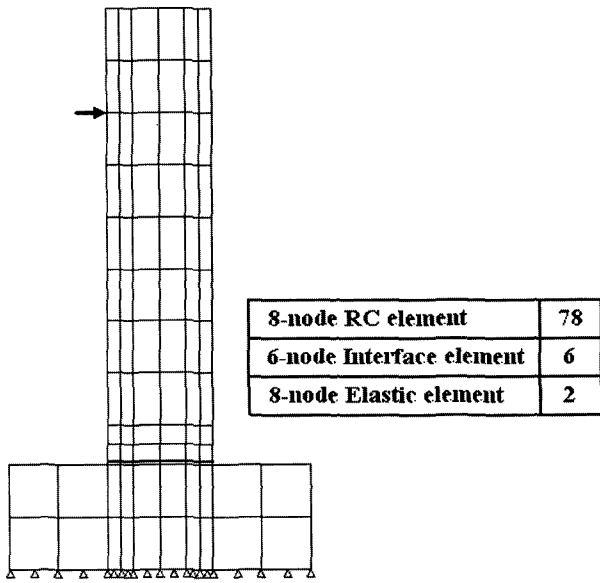
이 실험체들의 유한요소해석을 위해서 중공 철근콘크리트 교각을 등가환산단면을 이용하여 그림 7과 같이 2차원 평면요소로 해석이 가능하도록 하였다. 등가환산단면은 중공 철근콘크리트 교각의 실제거동과 유사하도록 철근과 콘크리트의 단면적, 하중재하 방향의 단면 2차 모멘트를 같게 하여 유도하였다.

그림 8은 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소 분할한 예이며 3점 가우스 적분을 적용한 8절점 등매개 요소를 이용하였고 하중이 재하되는 부위에는 실험에서와 동일한 조



〈그림 7〉 등가환산단면(단위: mm)

건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지 않는 탄성요소를 사용하였다. 또한, 기초와 교각의 접합부에는 정착슬립 등의 불연속 변위를 고려하기 위하여 6절점 경계면 요소를 사용하였다. 이산균열개념에 근거한 경계면 요소는 기본적으로 요소

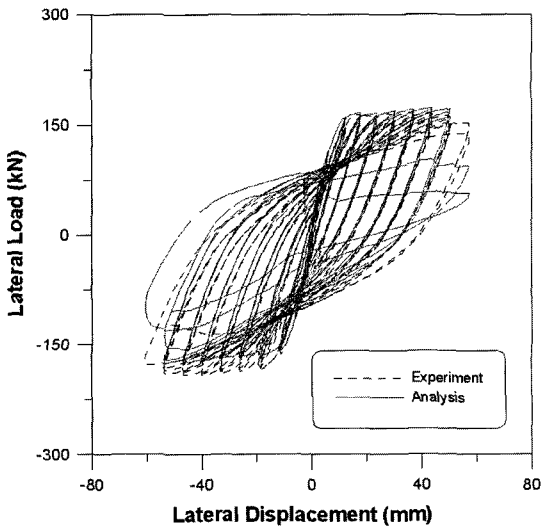


〈그림 8〉 유한요소모델

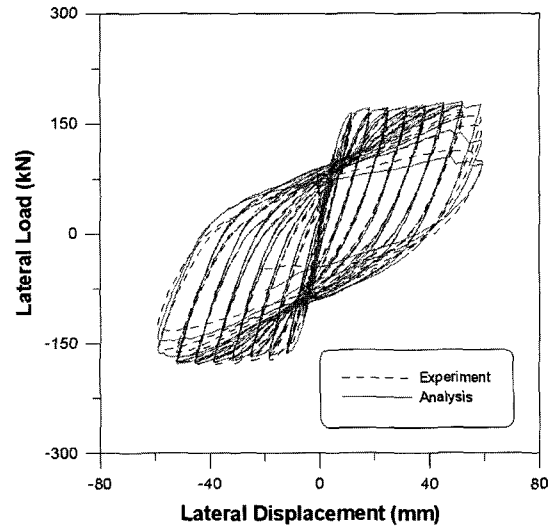
의 평행 및 직각방향으로만 응력이 발생하는 것으로 가정하고 있기 때문에 전술한 철근과 콘크리트의 재료모델을 그대로 적용할 수 있다. 그러나 경계면 요소의 변형은 인접한 두 부재간의 상대변위로부터 결정되기 때문에 요소의 응력-변형률 관계는 압축응력-압축변위 및 전단응력-전단미끄러짐의 관계로 정의된다. 이때 경계면 요소의 총 전단변위는 접합면에서의 미끄러짐과 국소적인 응력집중의 영향으로 인한 변위의 합으로 표현하였다.<sup>(10-12)</sup>

### 4.3 검증 및 고찰

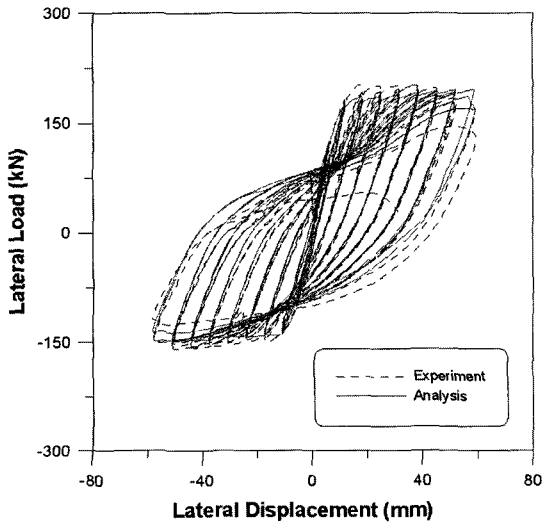
그림 9~그림 12는 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계를 나타내고 있으며 해석결과가 실험결과와 전반적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 해석결과는 실험체에 반복 주기하중이 진행되



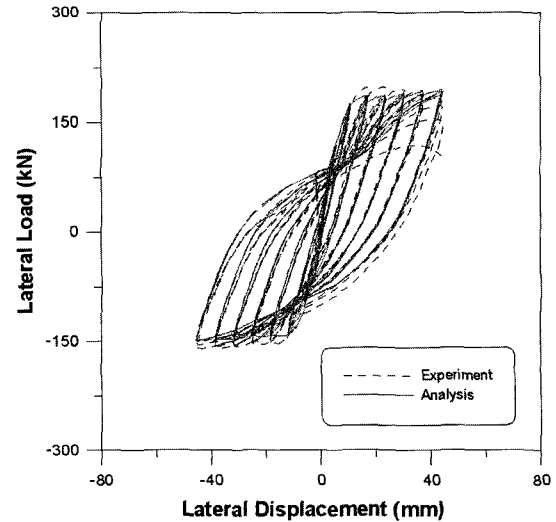
〈그림 9〉 실험체 TP-35의 하중-변위 이력곡선



〈그림 10〉 실험체 TP-36의 하중-변위 이력곡선



〈그림 11〉 실험체 TP-37의 하중-변위 이력곡선



〈그림 12〉 실험체 TP-38의 하중-변위 이력곡선

는 동안 소성힌지 영역에서 비탄성 변형이 증대됨에 따라 일어나는 콘크리트의 균열과 파쇄, 그리고 이로 인한 손상이나 파괴와 잘 일치하고 있다.

이 연구의 해석에 의한 최대하중을 실험과 함께 비교하여 표 3에 정리하였다. 유한요소해석 결과에서 최대하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수가 각각 0.99와 0.04로서, 최대하중의 평균값은 전반적으로 실험결과를 정확하게

〈표 3〉 실험 및 해석결과

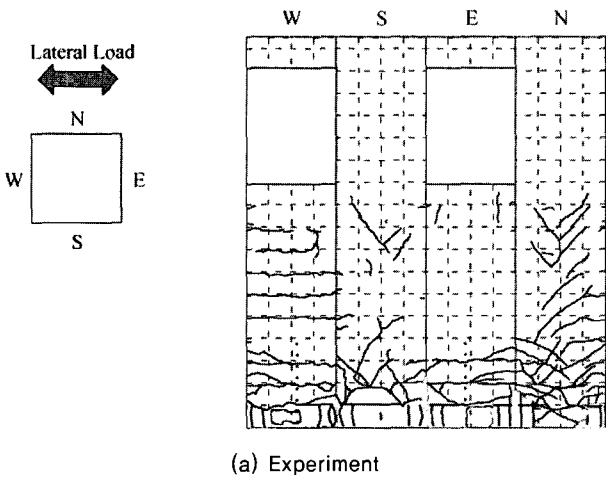
Specimen	Experiment	Analysis	Ratio of experimental and analysis results
	$V_{max}$ (kN)	$V_{max}$ (kN)	$V_{max}$
TP-35	166.3	173.0	0.96
TP-36	172.4	179.1	0.96
TP-37	202.2	196.1	1.03
TP-38	197.4	193.8	1.02
	Mean		0.99
	COV		0.04

평가하고 있으며 변동계수가 0.04에 불과하여 중공 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동특성을 전반적으로 잘 평가하고 있는 것으로 판단된다.

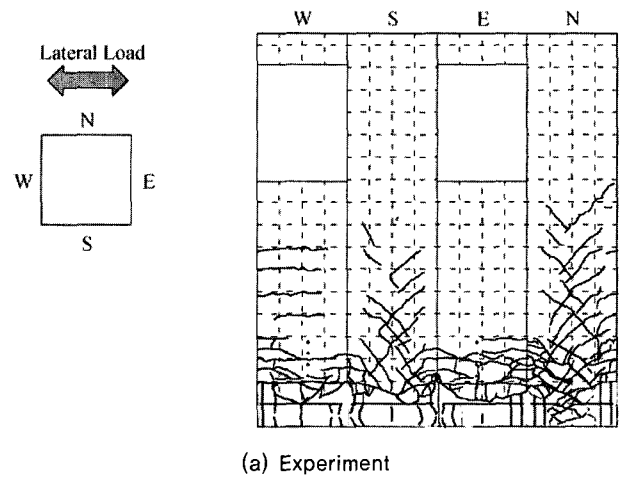
그림 13~그림 16은 파괴시점의 요소레벨의 손상지수도와 실험결과를 비교한 것으로서 구조물의 중요한 비선형 거동특성인 소성힌지 형성 부위가 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 가시화된 요소레벨의 손상지수도를 통하여 중공 철근콘크리트 교각의 손상정도를 쉽게 검색할 수 있으며 내진성능평가에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

일정한 축하중을 받는 실험체 TP-35와 TP-36의 강성은 반복 주기하중이 작용하는 동안 점차 감소하였다. 이러한 강성 감소의 주요 원인은 부재 접합부에서의 정착슬립과 콘크리트의 피복박리 등이다. 즉 접합부에 균열이 형성되면 주철근의 부착에 대한 저항 능력이 크게 상실하게 되고, 주철근이 항복함에 따라 접합부에서 부분적으로 슬립이 발생하기 때문이다. 이와 같은 비탄성 거동 특성을 이 연구의 해석결과는 올바르게 평가하고 있다.

변동 축하중을 받는 실험체 TP-37과 TP-38은 소성힌지 부

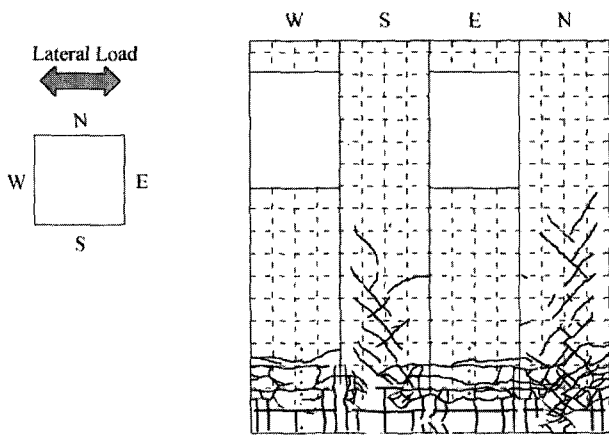


〈그림 13〉 실험체 TP-35의 파괴양상

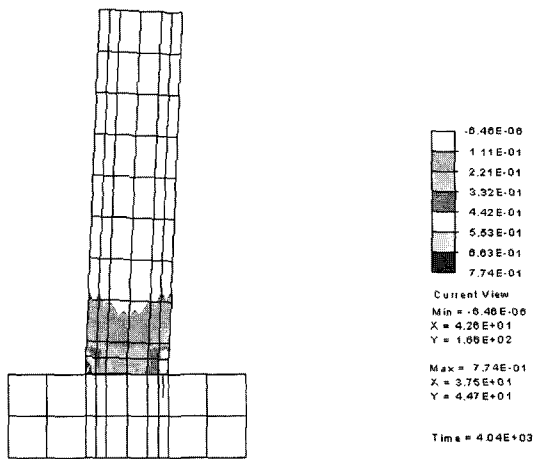


〈그림 14〉 실험체 TP-36의 파괴양상



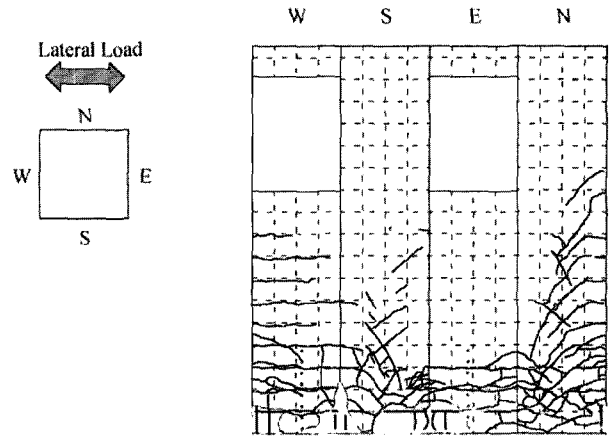


(a) Experiment

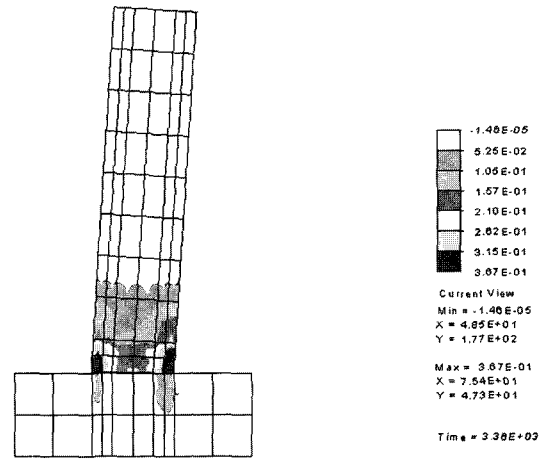


(b) Analysis

〈그림 15〉 실험체 TP-37의 파괴양상



(a) Experiment



(b) Analysis

〈그림 16〉 실험체 TP-38의 파괴양상

분의 콘크리트의 압축파괴가 그림 15(a)와 그림 16(a)과 같이 Pull 방향보다 Push 방향에 집중된다. 이는 Push 횡변위로 인한 복원력이 Pull 횡변위로 인한 복원력보다 크기 때문이다 (그림 11, 그림 12). 즉, Push 횡변위일 때 축하중에 의하여 압축력이 증가하기 때문이다. 이러한 비선형 거동특성을 이 연구에서 제안한 해석방법은 잘 평가하고 있으며 손상정도를 검색하기 위한 파괴시점의 요소레벨의 손상지수도<sup>(10,12)</sup>도 이를 잘 나타내고 있다(그림 15(b), 그림 16(b)).

위와 같이 지진에 의해 변동 축하중을 받는 교각구조는 축인장력과 축압축력이 동반되는 복잡한 거동특성에 의해 강도, 연성도, 파괴양상 등에서 일정 축하중을 받는 경우와 상이한 결과를 가져오므로 이에 대한 충분한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

일련의 실험결과와 해석결과와의 비교로부터 이 연구에서 제안하고 있는 방법은 변동 축하중을 받는 중공 철근콘크리트 교각의 비탄성 이력거동을 적절히 평가하고 있으며, 개발된 철근콘크리트 구조물의 비선형 유한요소해석 프로그

램(RCAHEST)을 이용함으로써, 해석적 방법에 의한 신설 또는 기존 중공 철근콘크리트 교각의 내진성능평가가 가능할 것으로 판단된다.

### 5. 결론

이 연구에서는 변동 축하중을 받는 중공 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동특성을 파악하기 위한 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 비선형 유한요소해석 프로그램을 사용하여, 반복되는 면내력이 작용하는 중공 철근콘크리트 교각을 해석하였다. 실험결과와 비교 검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 제안한 해석기법과 모델이 변동 축하중을 받는 중공 철근콘크리트 교각의 전체적인 거동특성을 바르게 표현하고 있음이 입증되었다.
- (2) 이 연구에서 제안된 비선형 유한요소해석은 중공 철근

콘크리트 교각구조의 응력 분포 및 변형에 대한 구체적인 정보를 제공하고 있으며 실험결과에 나타난 균열 및 변형결과와 전반적으로 일치하는 손상지수도를 보여주고 있다.

- (3) 변동 축하중을 받는 교각구조는 축인장력과 축압축력이 동반되는 복잡한 거동특성에 의해 강도, 연성도, 파괴양상 등에서 일정 축하중을 받는 경우와 상이한 결과를 가져오므로 이에 대한 충분한 고려가 필요할 것으로 판단된다.
- (4) 지진하중을 받는 중공 철근콘크리트 교각의 응답특성 및 지진손상을 제대로 평가함으로써 중공 철근콘크리트 교각구조의 내진성능평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.
- (5) 중공단면 교각의 경우 단면형상, 중공비, 축력비, 주철근비 등 제원특성에 따라 다양한 거동을 나타내게 되므로, 향후 매개변수 연구를 통하여 거동특성을 심도 있게 규명할 필요가 있다.

### 감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. 정영수, 한기훈, 이강균, 이대형, "원형중공 콘크리트 교각의 내진성능에 대한 준정적 실험", 한국지진공학회는문집, 제3권, 2호, 1999, pp. 41-53.
2. 이재훈, 손혁수, 배성용, 박찬민, "서해대교 PSM교 교각의 내진성능", 한국지진공학회는문집, 제4권, 3호, 2000, pp. 67-81.
3. 김재관, 김익현, 임현우, 이재호, "수평 반복하중을 받는 비내진상세 RC 중공구형교각의 거동특성", 한국콘크리트학회 논문집, 제15권, 2호, 2003, pp. 263-272.
4. 김익현, 이종석, 이윤복, 김원섭, 선창호, "50% 주철근 겹침이음을 갖는 중실 및 중공 사각단면 교각의 거동특성", 한국지진공학회는문집, 제7권, 5호, 2003, pp. 25-35.
5. Zahn, F. A., Park, R. and Priestley, 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, 1990, pp. 156-166.
6. Yeh, Y.-K., Mo, Y. L. and Yang, Y., "Seismic Performance of Hollow Circular Bridge Piers," *ACI Structural Journal*, Vol. 98, No. 6, 2001, pp. 862-871.
7. 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, 2002, pp. 60-68.
8. Mo, Y. L., Wong, D. C. and Maekawa, K., "Seismic Performance of Hollow Bridge Columns," *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 3, 2003, pp. 337-348.
9. 김태훈, 신현목, "Analytical Approach to Evaluate the Inelastic Behaviors of Reinforced Concrete Structures under Seismic Loads", 한국지진공학회는문집, 제5권, 2호, 2001, pp. 113-124.
10. 김태훈, "비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가", 박사학위논문, 성균관대학교, 2003.
11. 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, 2003, pp. 1199-1207.
12. Kim, T. H., Lee, K. M., Chung, Y. S. and Shin, H. M., "Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Bridge Columns," *Engineering Structures*, 2005, Vol. 27, No. 4, pp. 576-592.
13. Mander, J. B., Panthaki, F. D. and Kasalanati, K., "Low-Cycle Fatigue Behavior of Reinforcing Steel," *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 6, No. 4, 1994, pp. 453-468.
14. Kakuta, Y., Okamura, H. and Kohno, M., "New Concepts for Concrete Fatigue Design Procedures in Japan," *IABSE Colloquium on Fatigue of Steel and Concrete Structures*, Lausanne, 1982, pp. 51-58.
15. Taylor, R. L., *FEAP - A Finite Element Analysis Program*, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, 2000.
16. 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, 1988, pp. 1804-1826.
17. Sheikh, S. A. and Uzumeri, S. M., "Strength and Ductility of Tied Concrete Columns," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 106, No. 5, 1980, pp. 1079-1102.
18. Popovics, S., "Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curves for Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 3, No. 5, 1973, pp. 582-599.
19. William, K. J. and Warnke, E. P., "Constitutive Model for Triaxial Behavior of Concrete," *Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering*, 19, 1975, pp. 1-30.
20. Kawashima, K., Une, H. and Sakai, J., "Seismic Performance of Hollow Reinforced Concrete Arch Ribs Subjected to Cyclic Lateral Force under Varying Axial Load," *Journal of Structural Engineering*, JSCE, 48A, 2002, pp. 747-757.