

면외방향으로 반복하중을 받는 철근콘크리트 벽식 교각의 내진성능평가

Seismic Performance Assessment of RC Pier Walls under Cyclic Out-of-plane Loading

김태훈¹⁾ · 김영진²⁾ · 신현목³⁾

Kim, Tae-Hoon · Kim, Young-Jin · Shin, Hyun-Mock

국문 요약 >> 이 연구의 목적은 면외방향으로 반복하중을 받는 철근콘크리트 벽식 교각의 지진거동을 파악하고 합리적이면서 경제적인 내진설계기준을 개발하는데 있다. 정확하고 올바른 성능평가를 위하여 신뢰성 있는 비선형 유한요소해석 프로그램을 사용하였다. 사용된 프로그램은 철근콘크리트 구조물의 해석을 위한 RCAHEST이다. 유한요소로서는 면내회전강성도를 갖는 4절점 평면 쉘요소가 사용되었다. 두께방향에 대한 철근과 콘크리트의 재료성질을 고려하기 위하여 층상화기법이 도입되었다. 재료적 비선형성에 대해서는 균열콘크리트에 대한 인장, 압축, 전단모델과 콘크리트 속에 있는 철근모델을 조합하여 고려하였다. 신뢰성 있는 실험결과와 비교를 통하여 이 논문의 제안방법이 면외방향으로 반복하중을 받는 철근콘크리트 벽식 교각의 내진성능평가에 적합한 방법임을 입증하고자 한다.

주요어 면외방향, 벽식 교각, 지진거동, 층상화기법, 재료적 비선형성

ABSTRACT >> The purpose of this study is to investigate the seismic behavior of reinforced concrete pier walls under cyclic out-of-plane loading and to develop improved seismic design criteria. The accuracy and objectivity of the assessment process can be enhanced by using a sophisticated nonlinear finite element analysis program. A computer program, named RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology), for the analysis of reinforced concrete structures was used. A 4-node flat shell element with drilling rotational stiffness is used for spatial discretization. The layered approach is used to discretize the behavior of concrete and reinforcement through the thickness. Material nonlinearity is taken into account by comprising tensile, compressive and shear models of cracked concrete and a model of reinforcing steel. The method is verified a useful tool to assess the seismic performance of reinforced concrete pier walls subjected to cyclic out-of-plane load through comparing with reliable experimental results.

Key words out-of-plane, pier walls, seismic behavior, layered approach, material nonlinearity

1. 서론

최근 들어 그리스, 터키, 대만 등에서는 큰 지진으로 인하여 수많은 인명 피해뿐만 아니라 건축물, 사회기반시설물 등에도 심각한 피해를 입었다. 이로부터 주요구조물의 내진 성능의 확보가 인명 및 재산을 지진으로부터 보호하기 위하여 얼마나 중요한지를 다시 한번 확인할 수 있었다.

우리나라에서는 지진에 대한 계기관측을 시작한 이래, 홍

성지진, 영월지진 등 중소규모의 지진이 빈번히 관측되고 있으며, 이에 따라 한반도도 지진에 대해 안전한 곳이 아니라 각성과 함께 지진에 대한 피해를 줄일 수 있는 방안을 논의하게 되었으며 신축 또는 기존 구조물의 지진거동 파악 및 내진설계 등에 많은 노력과 비용이 투입되고 있다. 특히, 기반시설로서 중요한 역할을 수행하는 교량의 구성요소 중에서 교각은 지진하중에 대하여 매우 취약한 곳으로 내진설계 규정이 없었던 과거에 시공된 교각에 대한 내진성능 검토가 요구되고 있다. 따라서 지진하중 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 교각의 내진성능평가를 위한 적절한 해석 기법의 개발이 이루어진다면, 해석적인 방법에 의해서 철근콘크리트 부재의 균열발생에서 파괴에 이르기까지의 거동을 예측함으로써 실제 철근콘크리트 교각구조의 지진응답 특성의 파악과 내진설계 및 검토 등에 충분히 활용될 수 있

¹⁾ 정회원·대우건설 기술연구원 선임연구원, 공학박사
(대표저자: kimith@dwconst.co.kr)

²⁾ 대우건설 기술연구원 수석연구원, 공학박사

³⁾ 정회원·성균관대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2006년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 6. 7 / 심사종료일 : 2006. 8. 28)

을 것이다.

이 연구는 비선형 유한요소해석을 이용하여 신축 또는 기 존 철근콘크리트 벽식 교각의 지진거동을 파악하고 내진성 능을 평가하는데 그 목적이 있다.

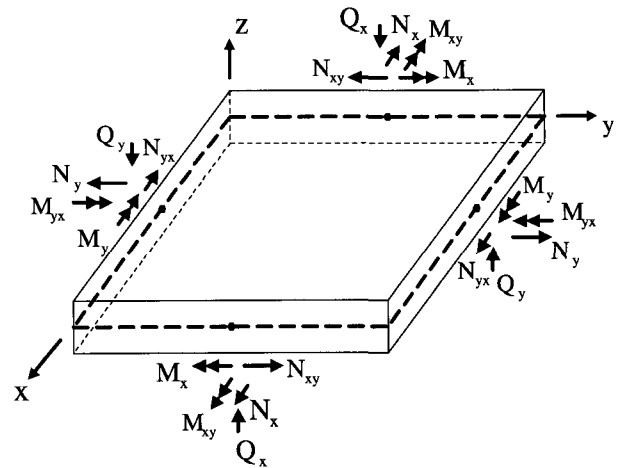
철근콘크리트 벽식 교각은 주로 PSC 박스거터교 등의 하 부구조로 사용된다. 그 이유는 상부하중이 타 교량형식에 비하여 크기 때문에 지진하중과 같은 수평하중에 저항할 수 있는 큰 강성이 필요하기 때문이다. 이러한 벽식 교각은 지 면으로부터 높이가 낮은 경우에 거푸집 운영측면 등의 시공 성 및 경제성에 경쟁력을 갖고 채택되고 있다.⁽¹⁾

철근콘크리트 벽식 교각의 교축직각방향의 강성은 수평 지진력에 비해 상당히 크므로 일반적으로 약축인 교축방향 에 대한 내진성능의 검토가 필요하다. 약축인 면외방향으로 지진하중과 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 벽식 교각 의 비탄성 거동을 해석적으로 규명하기 위해서는 콘크리트 의 균열, 철근의 항복, 철근과 콘크리트의 부착작용 및 균열 면에서의 전단전달효과 등과 같은 재료적인 특성을 정확하 게 표현할 수 있는 재료모델의 구축이 선행되어야 한다. 따 라서 이 연구에서는 2축 응력 상태에 대한 직교 이방성 재 료모델에 의해서 균열이 발생한 철근콘크리트 요소의 거동 특성을 표현하고, 이를 유한요소법을 사용하여 확장한 기존 의 검증된 프로그램⁽²⁾에 철근콘크리트 벽식 교각의 거동특 성을 모사할 수 있도록 수정을 가하여 사용하였다.

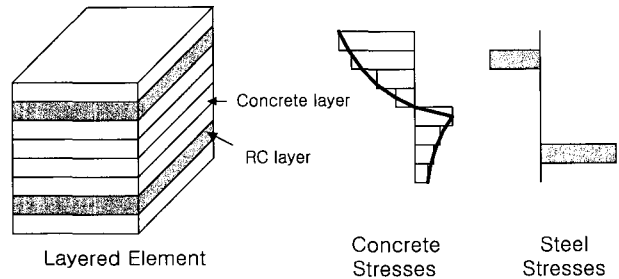
2. 비선형 유한요소해석 프로그램

2.1 철근콘크리트 쉘요소

유한요소해석에서 요소의 선정은 중요하며, 요소범위의 적용과 해석결과의 정확성에 큰 영향을 미친다. 이 연구에 서 면외방향으로 반복하중을 받는 철근콘크리트 벽식 교각 의 모델링에 사용된 철근콘크리트 쉘요소는 2차원 구성방정 식과 층상화기법을 이용하여 임의형상의 철근콘크리트 쉘 구조에 대한 역학적 거동, 즉 탄성, 비탄성, 극한영역 등 모 든 응력상태에 걸친 하중과 변형의 관계와 균열의 진행, 콘 크리트와 철근의 응력추적 등을 정확히 해석할 수 있는 3차 원 철근콘크리트 쉘요소로서 그림 1과 같다. 또한, 3차원 beam-column 요소와 조합하여 사용할 수 있도록 일반적 인 쉘요소의 자유도에 부재회전 방향의 자유도인 drilling 회전강성도가 도입되어 있다. 따라서, 이 요소를 사용함으 로써 철근콘크리트 쉘구조물 뿐만 아니라 슬래브, 전단벽 및 beam-column으로 구성되는 일반적인 구조물의 해석도 가능하다.⁽³⁻⁵⁾



(a) Forces acting on RC shells



(b) Layered element

〈그림 1〉 철근콘크리트 쉘요소

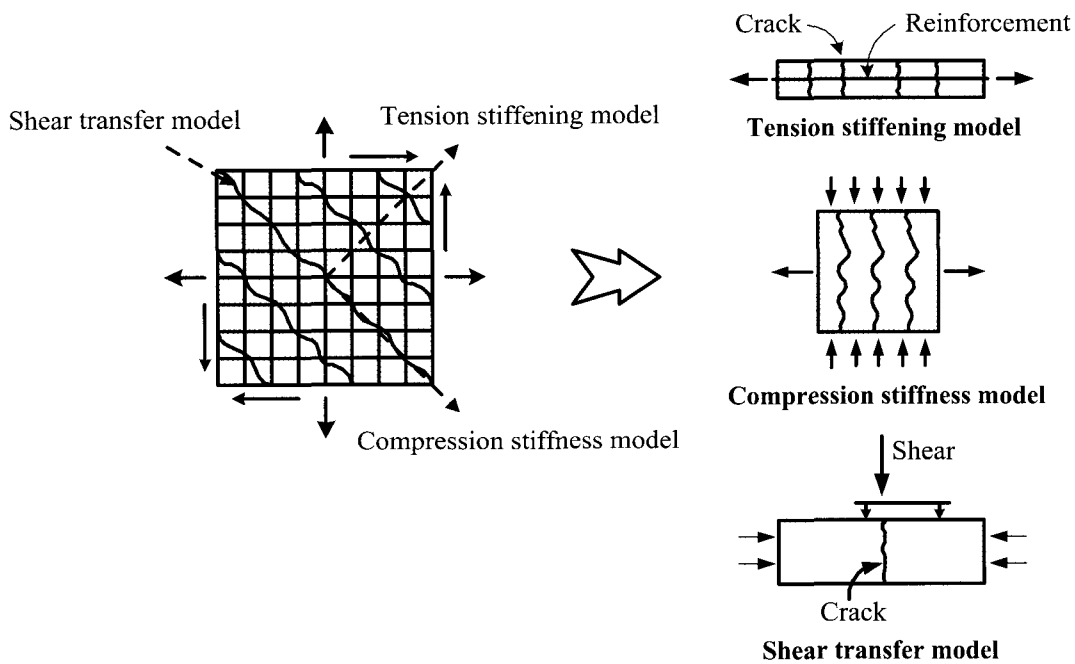
2.2 철근콘크리트의 비선형 재료모델

철근콘크리트의 비선형 재료모델은 저자 등에 의하여 이 미 발표된 재료모델⁽³⁻⁹⁾을 그대로 적용하기로 한다. 사용된 비선형 재료모델의 특징을 간단히 요약하면 다음과 같다.

균열이 분산하여 분포된 철근콘크리트 부재의 변형거동 은 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 강성 을 보다 사실적으로 평가하였다.

균열이 발생하기 전의 콘크리트의 역학모델은 이축응력상 태에 대한 탄소성파괴모델의 기본개념에 의해서 표현된다.

균열발생후의 비선형성은 현저하게 나타나며, 이러한 재 료적 비선형성에 대해서는 철근콘크리트 요소의 직교 이방 성의 가정에 따라, 균열직각방향으로 콘크리트가 부담하게 되는 인장응력을 고려하기 위한 인장강성모델과 균열방향 으로의 압축강성 저하를 고려하기 위한 압축강성모델 및 균 열면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델을 각각 적용한다(그림 2).

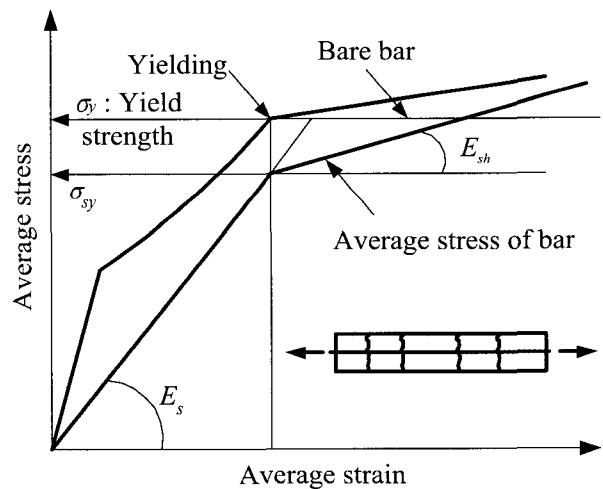


〈그림 2〉 균열발생후 콘크리트의 구성모델

콘크리트 속의 철근에 대한 항복후 거동은 철근만의 특성과 함께 부착효과 등이 동시에 고려되어야 한다. 콘크리트 속의 철근응력은 일정하지 않고 균열면에서 최대가 된다. 철근의 응력-변형률 관계가 탄성영역에 있는 경우에는 철근만의 구성모델을 적용하면 된다. 그러나 균열면에서 철근이 최초로 항복하게 되면 철근의 평균응력-평균변형률 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(그림 3).

횡방향으로 배근된 구속철근은 콘크리트의 극한강도와 극한변형률을 크게 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 복원력 특성을 나타낸다. 이 연구에서는 콘크리트의 단면형상에 관계없이 적용할 수 있고, 종방향 철근 및 구속철근의 양, 구속철근의 항복강도 및 배근형태 등을 고려할 수 있도록 한 Mander 등의 제안모델⁽¹⁰⁾을 적용하였다.

압축파괴가 발생한 콘크리트의 역학적 특성은 이미 여러 연구자들에 의해서 규명된 바가 있다. 이 연구에서는 콘크



〈그림 3〉 철근모델

리트 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.⁽⁸⁾

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 영

항을 적용함으로써 피로손상을 고려하였다. 철근의 피로모델은 Coffin-Manson의 제안식⁽¹¹⁾을 적용하였으며 콘크리트의 피로모델은 Kakuta 등의 제안식⁽¹²⁾을 수정하여 사용하였다.

2.3 유한요소해석 프로그램의 작성

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 그 동안 개발된 면내회전강성도를 갖는 철근콘크리트 셸요소⁽³⁻⁵⁾, 철근콘크리트 평면요소⁽⁶⁻⁹⁾, 그리고 경계면요소⁽⁶⁻⁹⁾ 등을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP⁽¹³⁾에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)⁽²⁾에 철근콘크

리트 벽식 교각의 거동특성을 모사할 수 있도록 수정을 가하여 사용하였다(그림 4).

3. 비선형 유한요소해석에 의한 내진성능평가

3.1 손상지수 산정

최근 들어 내진상세가 적용되지 않은 기존 구조물의 비선형 거동특성의 파악과 내진성능 평가를 위한 노력이 계속되고 있으며 손상정도를 판단하기 위한 척도로서 손상지수를 사용하는 경우가 많아지고 있다. 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 평가방법이 있으며 요소레벨에는 강성의 저하, 피로의 정식화 그리고 이력곡선의 에너지 방출 등을 이용하는 평가방법이 있다. 이러한 구조물레벨의 손상지수 산정법은 구조물의 손상을 정량적으로 평가할 수 있는 방법이지만 각 하중단계에서의 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.^(6,8)

손상지수 $D.I.$ 는 손상이 없는 0.0으로부터 파괴를 나타내는 1.0까지로 표현되며 손상지수 0.75는 파괴의 시점을 알

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 4〉 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

〈표 1〉 요소레벨의 손상지수

Item	Failure Criterion (ϵ_{cu} or ϵ_{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	$1.20 \left(\frac{\epsilon_{ts}}{2ftg_r \epsilon_{tu}} \right)^{0.67}$

* ρ_s = transverse confining steel ratio; f_{yh} = yield stress of the confining steel
 ϵ_{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
 ϵ_{cs} = compressive strain in analysis step; ϵ_{ts} = tensile strain in analysis step
 ϵ_{cu} = ultimate strain of concrete; ϵ_{tu} = ultimate strain of reinforcing bars

린다. 일반 구조물에 대한 각각의 손상지수의 값을 이 연구의 대상인 철근콘크리트 벽식 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.^(6,8)

3.2 손상지수를 이용한 내진성능평가

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.

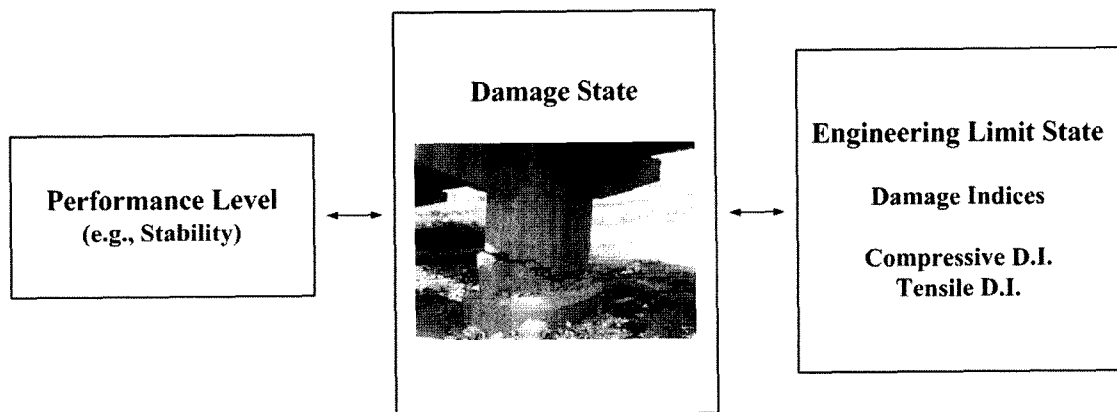
성능기반 내진설계는 구조물이 예측 가능한 내진성능을 확보하고 규정된 성능목표를 달성할 수 있도록 하는데 필요한 해석과 설계절차를 포괄하고 있는 차세대 개념의 내진설계 방법이다. 즉 예상되는 지진하중에 대하여 주어진 조건에서 허용할 수 있는 적절한 피해정도 혹은 에너지 흡수정도를 미리 설정하고, 이를 달성하도록 하는 설계법이다.⁽¹⁴⁾

그림 5는 기존의 연구자들이 제안한 성능기반 내진설계 체계를 나타내고 있으며 성능목표는 지역의 중요도 및 교량의 중요성 등에 따른 위험수준에 의해 결정된다.⁽¹⁵⁾ 이러한 내진설계 체계는 교량과 건물의 여러 성능기반 설계규정과의 유사하다.^(14,16)

이 연구에서는 기존의 지진손상 평가법^(6,8)을 확장하여 표 2와 같이 성능수준과 함께 비교하여 나타냄으로써 철근콘크리트 벽식 교각의 내진성능 평가가 가능하도록 하였다. 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.

Seismic Hazard Level (지진위험수준)	Structural Performance Level (구조성능수준)			
	□ Ordinary (일반) ■ Important (중요)	Fully Operational (완전기능)	Delayed Operational (기능수행)	Stability (붕괴방지)
Minimum Hazard Level (최소위험수준)				
Intermediate Hazard Level (중간위험수준)				
Maximum Hazard Level (최대위험수준)				

〈그림 5〉 성능기반 내진설계 체제⁽¹⁵⁾



〈그림 6〉 성능수준과 손상상태를 평가하는 지진손상 평가법

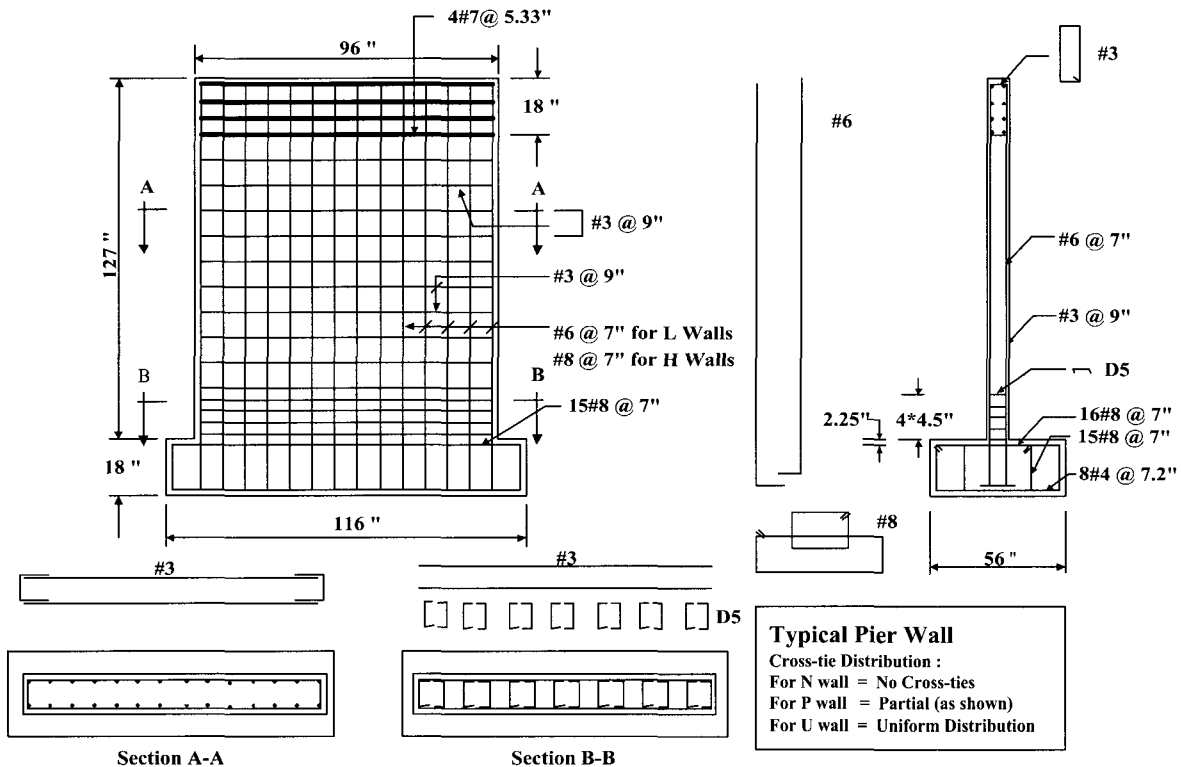
〈표 2〉 성능수준 상세와 지진손상 평가

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

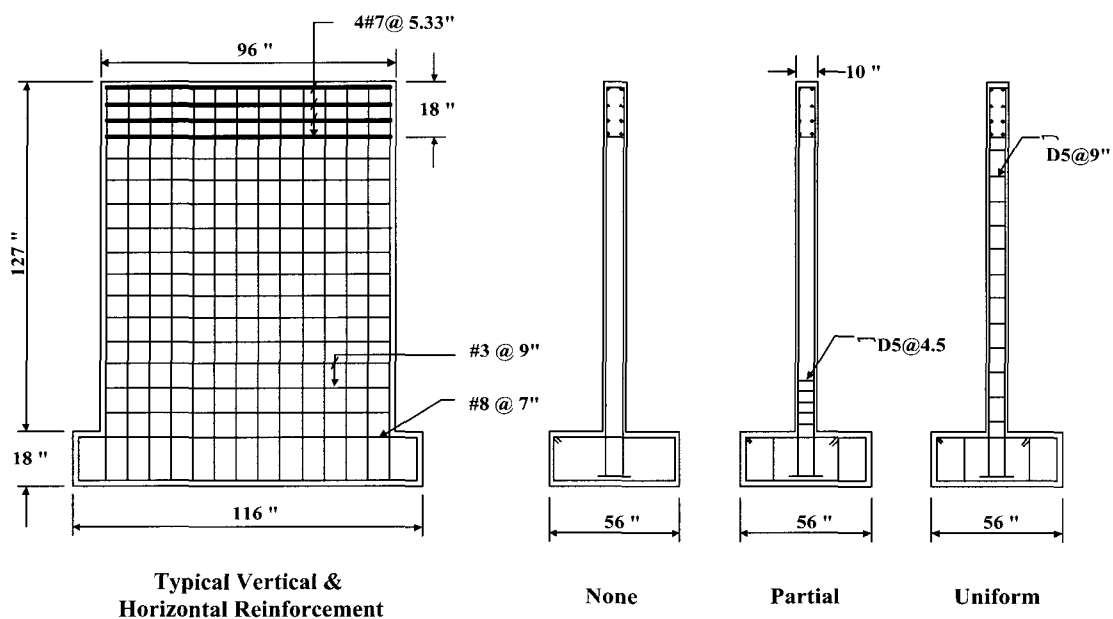
위와 같이 성능기반 내진설계 체제는 손상상태의 정량화가 필수적이며 이는 그림 6과 같이 확장된 지진손상 평가법을 통해서 얻을 수 있다. 손상상태의 정량화는 기존의 연구자들이 제시한 손상지수에 관한 연구결과^(6,8)를 근거로 하고 있으며 손상상태는 한 개 또는 그 이상의 한계상태에 의해 결정되고 각각은 성능수준을 규정할 수 있다.

4. 해석 예 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 그림 7, 8에 나타난 것과 같은 철근콘크리트 벽식 교각의 실험체⁽¹⁷⁾를 선정하였다. 이 실험은 기존 철근콘크리트 벽식 교각구조의 지진거동과 내진성능을 평가하기 위한 것으로서, 실험체의 재료물성은 표 3과 같다.



〈그림 7〉 벽식 교각의 철근상세(1 in. = 25.4mm)



〈그림 8〉 실험체 및 crosstie 상세(1 in. = 25.4mm)

이들 실험체에 대한 재하방법은 그림 9에 나타난 것과 같다. 실험체의 바닥과 벽식 교각사이는 완전 고정으로 하였으며, 모든 실험체는 표 3과 같은 일정한 압축하중을 가한 상태에서, 약축인 면외방향으로 155 kip actuator에 의해 변위를 가한 경우이다. 모든 실험체의 재하는 그림 10과 같이 동일한 변위진폭에 있어서 반복회수를 3회로 하였으며 수평 하중 강도의 20%를 상실할 때까지 수행되었다.

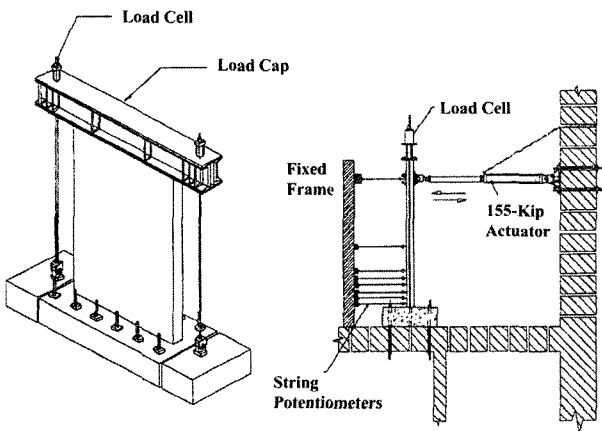
이 실험체들의 유한요소해석을 위해서 철근콘크리트 벽식 교각을 기존의 연구에서 개발된 4절점 철근콘크리트 쉘요소

(3-5)를 사용하여 면외거동을 모델링 하였다. 또한, crosstie에 의한 강도와 연성도의 증가효과를 Mander 등의 제안모델⁽¹⁰⁾을 적용하여 고려하였다.

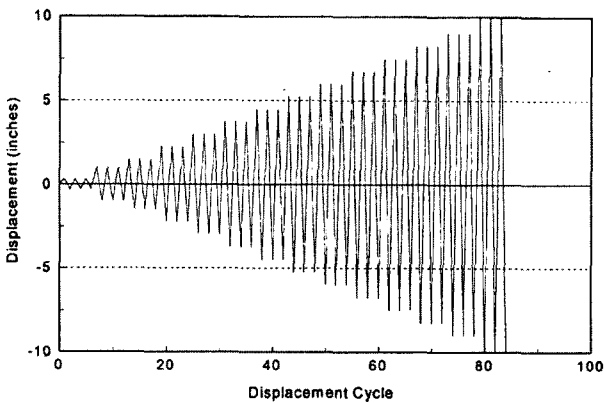
그림 11은 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소 분할된 예이며 2점 가우스 적분을 적용한 42개의 요소로 벽식 교각 실험체를 모델링하였다.

그림 12~그림 17은 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 곡선으로부터 포락선(envelope)의 형태로 나타낸 결과이다. 실험과 해석결과 모두 실험체의 강성은 반복하중이 작용하는 동안 반복 횟수가 증가할수록 점차 감소하였다. 이러한 강성 감소는 반복 주기하중이 진행되는 동안 소성힌지 영역에서 비탄성 변형이 증대됨에 따라 일어나는 콘크리트의 균열과 파쇄, 그리고 주철근의 좌굴 등이 그 주요 원인이다. 균열은 벽식 교각의 외측에서 처음 발생하여 가운데로 진행되었으며 또 다른 균열은 바닥으로부터 벽식 교각의 2/3 높이까지 진행되었다.

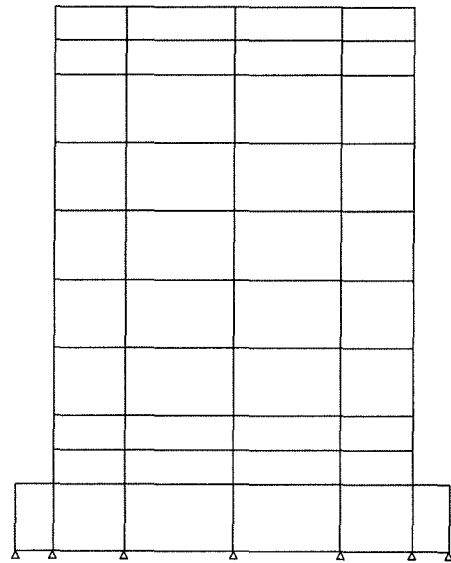
이 연구의 해석에 의한 최대하중과 변위연성도를 실험과



〈그림 9〉 실험체 setting 상세도



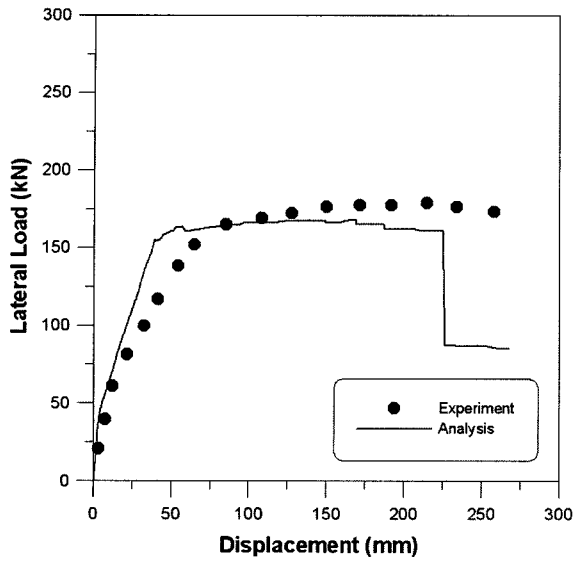
〈그림 10〉 하중이력(1 in. = 25.4mm)



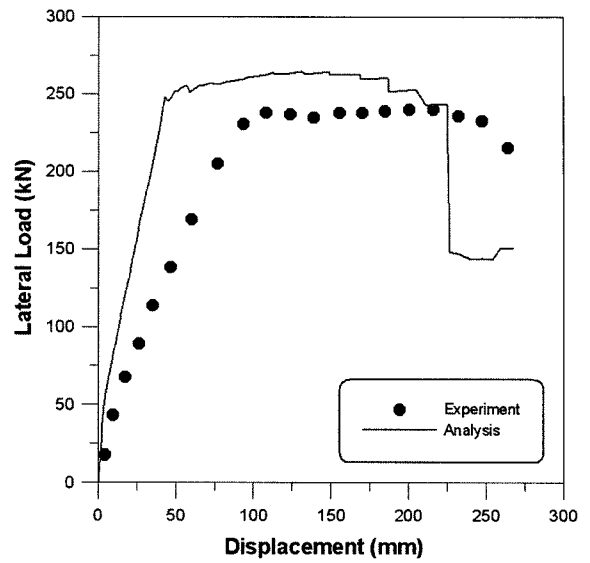
〈그림 11〉 유한요소모델

〈표 3〉 실험체의 재료물성

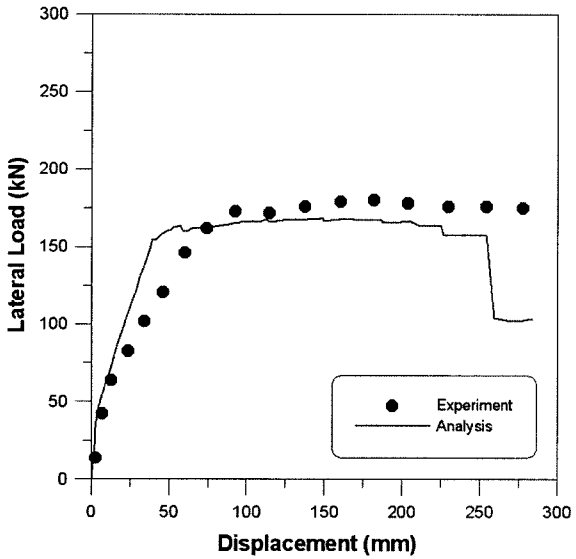
Specimen	Concrete		Reinforcement		Axial load (kN)
	f'_c (MPa)	f_y (MPa)			
		(No. 6, 8, and 3)	(D5)		
LU	33.9	413.7	620.5	880.7	
LP	34.3	413.7	620.5	880.7	
LN	36.9	413.7	-	880.7	
HU	39.3	413.7	620.5	1000.8	
HP	39.0	413.7	620.5	1000.8	
HN	38.5	413.7	-	1000.8	



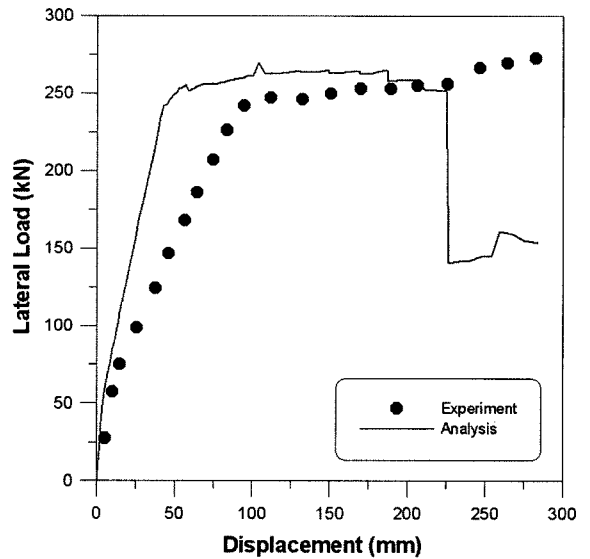
〈그림 12〉 실험체 LU의 하중-변위 곡선의 포락선



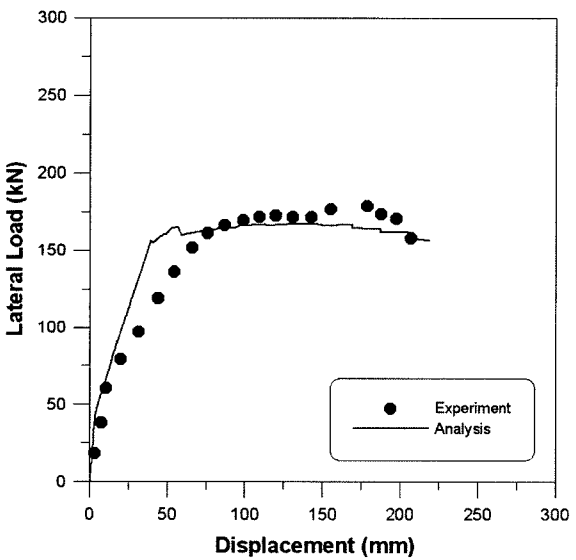
〈그림 15〉 실험체 HU의 하중-변위 곡선의 포락선



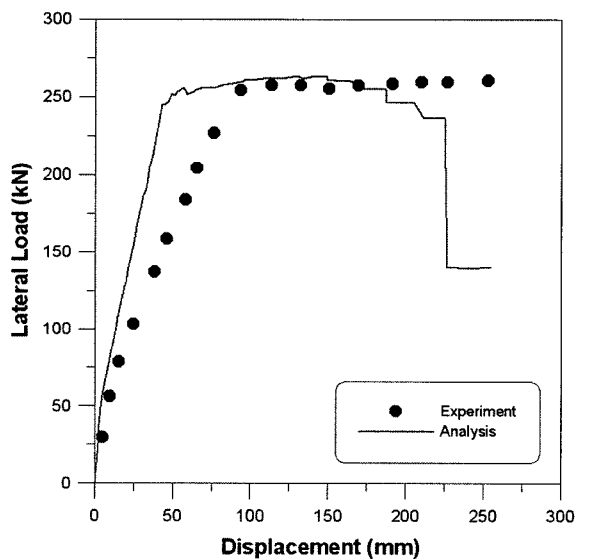
〈그림 13〉 실험체 LP의 하중-변위 곡선의 포락선



〈그림 16〉 실험체 HP의 하중-변위 곡선의 포락선



〈그림 14〉 실험체 LN의 하중-변위 곡선의 포락선



〈그림 17〉 실험체 HN의 하중-변위 곡선의 포락선

함께 비교하여 표 4에 정리하였다. 이 표에서 해석에 의한 시스템의 항복변위와 극한변위는 하중-변위곡선으로부터 간접적인 방법⁽¹⁸⁾으로 결정하였다. 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 수평 변위로 정의하였다.

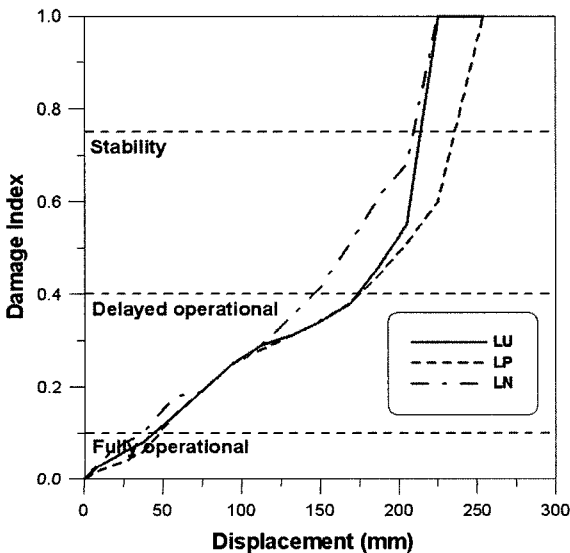
유한요소해석 결과에서 최대하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수가 각각 1.06과 0.02로서, 최대하중의 평균값은 전반적으로 실험결과를 안전측으로 평가하고 있으며 변동계수가 0.02에 불과하여 철근콘크리트 벽식 교각의 비탄성 거동특성을 정확히 평가하고 있는 것으로 판단된다. 그리고 변위연성도에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 각각 0.89와 0.10으로서, 변위연성도의 평균값은 실험결과 보다 다소 크게 평가하고 있으나 변동계수가 0.10에

불과하여 면외방향으로 반복하중을 받는 철근콘크리트 벽식 교각의 지진거동을 비교적 잘 평가하고 있는 것으로 판단된다.

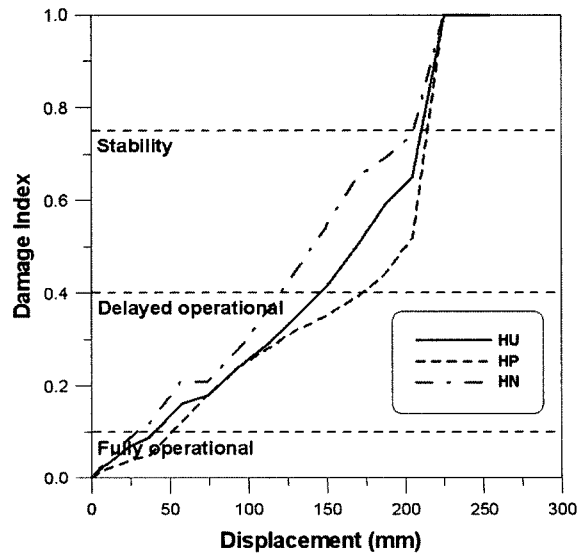
실험과 유한요소해석 결과로부터 모든 벽식 교각의 파괴 거동은 거의 유사함을 알 수 있으며 crosstie가 사용되지 않은 실험체 LN, HN의 손상이 다른 실험체보다 상대적으로 현저함을 알 수 있다. 또한, 소성힌지 영역에만 crosstie를 사용한 실험체 LP, HP는 다른 실험체보다 손상이 경미하며 내진성능면에서도 우수함을 알 수 있다. 이러한 사실은 하중재하에 따른 손상지수의 변화를 성능수준과 함께 비교·검토한 그림 18과 그림 19를 통해서도 평가할 수 있다. 즉 그림 18에서 해석결과의 재하 단계별 손상지수 값을 확인해보면 재하변위 112mm에서 LU 실험체는 0.29, LP 실험체는 0.28, LN 실험체는 0.29이다. 그리고 재하변위 205mm에서 LU 실험체는 0.55, LP 실험체는 0.51, LN 실험체는 0.68이다. 그림 19에서는 해석결과의 재하 단계별 손상지수 값

〈표 4〉 실험 및 해석 결과의 비교

Specimen	Test				Analysis				(1)/(3)	(2)/(4)
	V_{max} kN (1)	δ_y mm	δ_u mm	μ (2)	V_{max} kN (3)	δ_y mm	δ_u mm	μ (4)		
LU	184.4	45.5	259.1	5.69	169.8	40.1	225.3	5.62	1.09	1.01
LP	181.7	45.5	279.4	6.14	169.0	40.3	255.4	6.34	1.08	0.97
LN	177.3	47.3	208.3	4.40	167.4	40.0	225.2	5.63	1.06	0.78
HU	280.7	65.5	266.7	4.07	267.4	45.2	225.2	4.98	1.05	0.82
HP	275.0	68.1	307.3	4.51	263.8	46.2	225.2	4.87	1.04	0.93
HN	269.7	62.7	254.0	4.05	263.6	44.9	225.2	5.02	1.02	0.81
Mean									1.06	0.89
COV									0.02	0.10



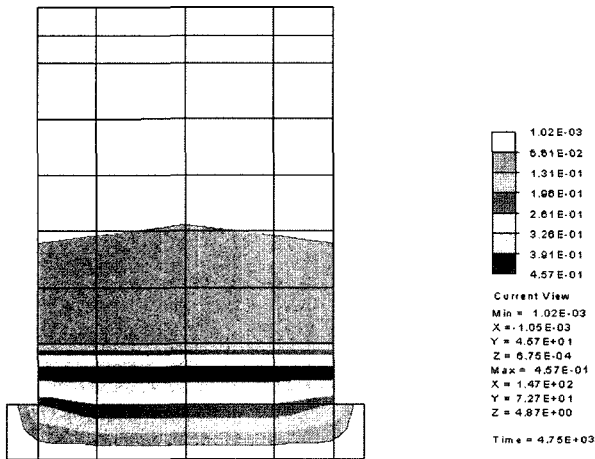
〈그림 18〉 L형 실험체의 내진성능평가



〈그림 19〉 H형 실험체의 내진성능평가



(a) Experiment



(b) Analysis

〈그림 20〉 벽식 교각 HU의 실험 및 해석 결과

을 확인해보면 재하변위 112mm에서 HU 실험체는 0.29, HP 실험체는 0.28, HN 실험체는 0.36이다. 그리고 재하변위 205mm에서 HU 실험체는 0.65, HP 실험체는 0.52, HN 실험체는 0.74이다.

그림 20은 파괴시점의 요소레벨의 손상지수도와 실험결과를 비교한 것으로서 구조물의 중요한 비선형 거동특성인 소성흔지 형성 부위가 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 가시화된 요소레벨의 손상지수도를 통하여 철근콘크리트 벽식 교각의 손상정도를 쉽게 검색할 수 있으며 내진성능평가에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

일련의 해석결과와 실험결과와의 비교로부터 이 연구에서 제안하고 있는 방법은 면외방향으로 반복하중을 받는 철근콘크리트 벽식 교각의 비탄성 이력거동을 적절히 평가하고 있으며, 개발된 철근콘크리트 구조물의 비선형 유한요소

해석 프로그램(RCAHEST)을 이용함으로써, 해석적 방법에 의한 신축 또는 기존 철근콘크리트 벽식 교각의 내진성능 평가가 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

이 연구에서는 철근콘크리트 벽식 교각의 비선형 거동과 내진성능평가를 위한 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 유한요소 해석프로그램을 사용하여, 반복되는 면외력이 작용하는 철근콘크리트 벽식 교각을 해석하였다. 실험결과와 비교·검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 이 연구에서 제안한 비선형 유한요소해석 결과 최대하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 1.06과 0.02이고 변위연성도에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 0.89와 0.10으로서, 실험결과를 비교적 잘 평가하고 있음이 확인되었다.
- (2) 이 연구에서 제안된 비선형 유한요소해석은 철근콘크리트 벽식 교각구조의 응력 분포 및 변형에 대한 구체적인 정보를 제공하고 있으며 실험결과에 나타난 균열 및 변형결과와 전반적으로 일치하는 손상지수도를 보여주고 있다.
- (3) 현행 내진 설계 규정에 만족하지 않는 기존의 철근콘크리트 벽식 교각에 대한 보수보강 등의 판단을 위한 내진성능 평가기법을 제시하였다.
- (4) 철근콘크리트 벽식 교각의 내진성능을 해석적으로 규명함으로써 중약진 지진지역에서의 합리적이며 경제적인 내진설계법의 개발을 위한 기초적인 데이터를 제시하였다.
- (5) 이 연구의 하중-변위 곡선의 해석결과는 실험결과와 교각-기초 접합부의 불연속 변위 등에 있어서 다소 차이를 보이고 있다. 따라서 3차원 철근콘크리트 쉘요소에서 단면강성이 급변함에 따른 철근의 정착슬립(anchor slip), 접합면의 미끄러짐, 그리고 접합면의 관입 등의 국소적인 불연속 변위를 해결하기 위한 3차원 경계면요소(interface element)를 추가로 고려할 필요가 있으며 이를 추후의 연구과제로 다루고자 한다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. Priestley, M. J. N., Seible, F. and Calvi, G. M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Willey & Sons, Inc., 1996.
2. 김태훈, 신현목, "Analytical Approach to Evaluate the Inelastic Behaviors of Reinforced Concrete Structures under Seismic Loads", 한국지진공학회논문집, 제5권, 2호, 2001, pp. 113-124.
3. 김태훈, 유영화, 신현목, "면내회전강성도를 갖는 철근콘크리트 셸요소의 개발", 한국콘크리트학회논문집, 제11권, 6호, 1999, pp. 47-56.
4. 김태훈, 유영화, 신현목, "반복하중을 받는 철근콘크리트 셸구조의 비선형 해석", 한국지진공학회 논문집, 제4권, 1호, 2000, pp. 35-49.
5. Kim, T. H., Lee, K. M. and Shin, H. M., "Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Shells Using Layered Elements with Drilling Degree of Freedom," *ACI Structural Journal*, Vol. 99, No. 4, 2002, pp. 418-426.
6. 김태훈, "비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가", 박사학위논문, 성균관대학교, 2003.
7. 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.
8. 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, 2005, pp. 576-592.
9. Kim, T. H., Kim, B. S., Chung, Y. S. and Shin, H. M., "Seismic Performance Assessment of Reinforced Concrete Bridge Piers with Lap Splices," *Engineering Structures*, Vol. 28, No. 6, 2006, pp. 935-945.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Taylor, R. L., *FEAP - A Finite Element Analysis Program*, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, 2000.
14. Applied Technology Council (ATC), *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, ATC-40 Report, Redwood City, California, 1996.
15. Lehman, D., Moehle, J., Mahin, S., Calderone, A. and Henry, L., "Experimental Evaluation of the Seismic Performance of Reinforced Concrete Bridge Columns," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 6, 2004, pp. 869-879.
16. Federal Emergency Management Agency (FEMA), *NEHRP guidelines of the seismic rehabilitation of buildings*, FEMA 273, Washington, D. C., 1997.
17. Haroun, M., Pardoen, G., Bhatia, H., Shahi, S. and Kazanjy, R. "Structural Behavior of Repaired Pier Walls," *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 2, 2000, pp. 259-267.
18. 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, 1998, pp. 605-616.