

진동대 실험을 통한 철근콘크리트 교각의 지진거동에 관한 해석적 연구

Analytical Study on the Seismic Behavior of RC Bridge Columns Using Shaking Table Tests

김태훈¹⁾ · 박창영²⁾ · 정영수³⁾ · 신현목⁴⁾

Kim, Tae-Hoon · Park, Chang-Young · Chung, Young-Soo · Shin, Hyun-Mock

국문 요약 >> 이 연구의 목적은 진동대 실험을 통한 철근콘크리트 교각의 지진거동을 파악하는데 있다. 사용된 프로그램은 철근콘크리트 구조물의 해석을 위한 RCAHEST이다. 재료적 비선형성에 대해서는 균열콘크리트에 대한 인장, 압축, 전단모델과 콘크리트 속에 있는 철근모델을 조합하여 고려하였다. 동적 평형방정식의 해는 HHT 법에 의한 수치적분으로 구하였다. 이 연구에서는 진동대 실험을 통한 철근콘크리트 교각의 지진거동을 파악하기 위해 제안한 해석기법을 신뢰성 있는 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

주요어 진동대 실험, 철근콘크리트 교각, 지진거동, 재료적 비선형성, HHT 법

ABSTRACT >> The purpose of this study is to investigate the seismic behavior of reinforced concrete bridge columns using shaking table tests. 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. Solution of the equations of motion is obtained by numerical integration using Hilber-Hughes-Taylor (HHT) algorithm. The proposed numerical method for the seismic behavior of reinforced concrete bridge columns using shaking table tests is verified by comparison with reliable experimental results.

Key words shaking table tests, reinforced concrete bridge columns, seismic behavior, material nonlinearity, HHT algorithm

1. 서론

근래에 세계 각국에서 발생한 지진들, 즉 1989년 Loma Prieta 지진, 1994년 Northridge 지진, 1995년 Kobe 지진, 1999년 대만지진, 그리고 2001년 인도지진 등으로 인하여 빌딩 및 교량과 같은 사회기반시설물의 피해가 잇따르고 있다. 그 중에서도 교량 구조물의 손상 및 붕괴는 현대사회에서 치명적인 손실로 이어질 수 있다. 따라서 기존 교량 구조물의 내진성능을 정확히 평가하는 연구와 그에 따른 내진성능 향상에 대한 연구가 우선적으로 시급한 과제이다.

지진시 교량의 거동은 지진 가속도에 의한 상부구조의 관성력과 이를 지지하고 있는 교각의 거동에 따라 결정된다고 볼 수 있다. 이에 따라 교각의 내진성능은 교량 구조물의 내진성능을 나타내는데 가장 중요한 특성이 된다.

교각에 대한 내진성능을 평가하기 위한 실험은 준정적실험, 유사동적실험, 그리고 진동대 실험이 있다. 국내에서 수행되어 온 교량의 교각에 대한 내진 실험은 주로 준정적 혹은 유사동적 실험으로 수행되어져 왔다. 철근콘크리트 교각의 경우에는 국내에 있는 진동대 용량의 한계로 인해서 소형 축소모형의 경우에도 진동대 실험이 쉽게 이루어지기 힘든 여건이 있었다¹⁾. 따라서 철근콘크리트 교각의 진동대 실험에 관한 적절한 해석기법의 개발이 이루어진다면, 다양한 형태의 교각에 대한 비선형 지진해석을 실시하여 미처 다루지 못한 여러 형태의 교각들의 내진성능평가가 가능할 것이다^{2,3)}.

교각의 내진거동에 대한 실험에서 주로 지반 운동을 원역 지진지반가속도(far field ground motion)에 대해서 다루어 왔지만 최근에 근단층지반운동(near fault ground motion)의

¹⁾ 정희원·대우건설 기술연구원 선임연구원, 공학박사

(대표지자: kimth@dwconst.co.kr)

²⁾ 정희원·중앙대학교 토목공학과 석사과정

³⁾ 정희원·중앙대학교 토목공학과 교수, 공학박사

⁴⁾ 정희원·성균관대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2007년 12월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2007. 6. 27 / 심사종료일 : 2007. 8. 21)

영향에 대한 관심이 높아지고 있다. 최근에 발생한 Northridge 지진(1994), Hyogo-ken Nanbu 지진(1995), Kocaeli 지진(1999), Duzce 지진(1999), Chi-Chi 지진(1999) 등의 경우 단층 근처 지역에서의 지반운동에서의 특징적인 모습들을 보여주고 있다. 이러한 운동은 밀집된 도심지역에서 발생할 경우에 심각한 손상을 유발함을 명확하게 보여주고 있다. 따라서 교각의 내진성능 평가에서 사용하는 지반운동을 근 단층지반운동에 대해서 검토할 필요가 있다^(1,4).

최근에 국내에서도 근단층지반운동에 대한 모델링이 수행되었는데 근단층지반운동은 큰 진폭의 장주기 속도 펄스를 갖는 특징을 갖고 있으며 일반적으로 진앙거리가 약 10km 이내인 지역에서 관측되는 지진지반운동을 말한다. 근단층 지반운동은 단층파열의 전파와 전단파의 전파가 서로 간섭을 일으켜 발생하며 근단층운동이 진행되는 방향에 평행인 경우와 직각인 경우로 구분된다⁽⁵⁾.

이 연구에서는 국내에서 수행된 근단층지반운동에 대한 모델링에서 도출된 지반운동중 근단층운동이 진행되는 방향에 직각인 경우를 이용한 진동대 실험을 검증예제로 채택하였다.

2. 비선형 유한요소해석 프로그램 및 동적해석 기법

2.1 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

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 철근콘크리트 평면응력요소, 경계면요소, 그리고 겹침이음 철근요소 등^(2,3,6,7)을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP⁽⁸⁾에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램인 RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)에 수정을 가하여 사용하였다(그림 1).

철근콘크리트의 비선형 재료모델은 저자 등에 의하여 이미 발표된 재료모델^(2,3,6,7)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 강성을 보다 사실적으로 평가하였다.

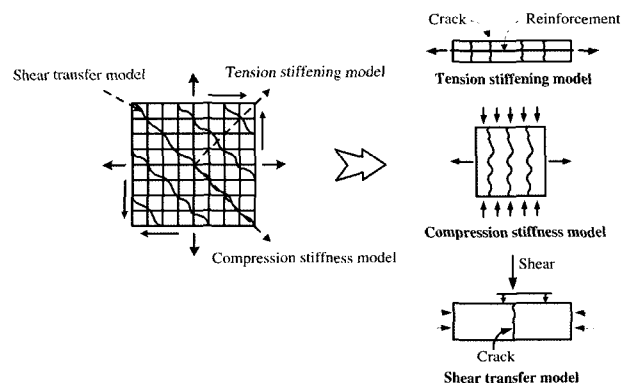
균열이 발생하기 전의 콘크리트의 역학모델은 이축응력 상태에 대한 탄소성파괴모델의 기본개념에 의해서 표현된다.

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(그림 2).

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

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	Element library in RCAHEST		4 nodes RC shell element
Lap spliced bar element	Interface element	RC plane stress element	2D Elasto-plastic plane stress element

〈그림 1〉 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

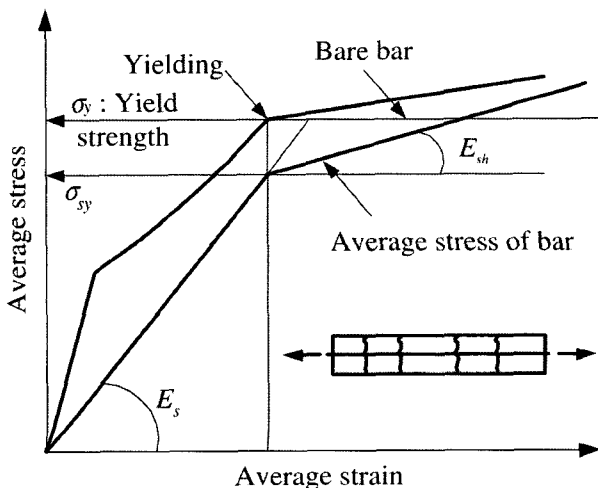


〈그림 2〉 균열발생후 콘크리트의 구성모델

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 제안모델을 채택하였다.

겹침이음된 철근은 실제로 두 개의 정착된 철근이 나란히 놓여져 철근의 강도가 서로 반대방향으로 발휘된다. 따라서 부착의 기본적인 메커니즘은 정착된 철근과 동일하지만 부착저항의 축대칭 성질은 겹침이음된 다른 철근이 있으므로 그 영향을 받게 된다. 겹침이음된 철근의 역학적 거동에 영향을 미치는 요인으로는 콘크리트의 압축강도와 피복두께, 횡방향철근의 직경과 간격, 그리고 겹침이음길이 등이 있다. 이 연구에서는 주철근이 겹침이음된 철근 콘크리트 교각의 거동을 예측하기 위하여 겹침이음된 철근의 슬립, 부착파괴, 그리고 반복하중을 받는 경우의 최대부착력의 감소계수 등을 고려하였다^(7,9).



〈그림 3〉 철근모델

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⁽⁶⁾.

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 해석모델에 하중재하 회수의 누적에 따른 강도 및 강성 저하의 영향을 적용함으로써 피로손상을 고려하였다. 철근의 피로모델은 Coffin-Manson의 제안식⁽¹⁰⁾을 적용하였으며 콘크리트의 피로모델은 Kakuta 등의 제안식⁽¹¹⁾을 수정하여 사용하였다.

2.2 비선형 동적해석 기법 Hilber-Hughes-Taylor 법

시간적으로 변하는 동적하중에 대한 구조물의 응답(response)인 구조물의 동적거동을 해석하기 위해서는 구조물의 강성에 의한 탄성력 이외에 질량에 의한 관성력과 감쇠효과에 의한 감쇠력을 고려하여야 한다.

동적해석의 방법은 크게 모드해석법(mode analysis method)과 시간이력 해석법(time history analysis method)의 두 가지로 나눌 수 있으며 모드해석법은 다시 단일모드 스펙트럼 해석법(single-mode spectral analysis method)과 다중모드 스펙트럼 해석법(multi-mode spectral analysis method)으로 시간이력 해석법은 모드중첩법(mode superposition method)과 직접적분법(direct integration method)으로 구분되는데 이 연구의 목적인 비선형 동적해석에 적합한 해석방법은 직접적분법이다. 직접적분법에 대해서는 Wilson- θ 법, Newmark 법 그리고 Hilber-Hughes-Taylor (HHT) 법 등이 제시되어 있는데, 각 시간마다 비선형 동적 평형방정식을 풀어서 비선형 동적거동을 사실적으로 표현하는 것이지만 해석시간이 많이 소요되며 경우에 따라서는 동적 평형방정식의 해를 구할 수 없는 경우가 발생하기도 한다⁽¹²⁾. 따라서, 안정적인 비선형 동적 평형방정식의 해의 수렴성 및 해석시간의 효율성을 제고할 수 있는 해석방법의 선택은 매우 중요하다.

구조물의 비선형응답은 운동방정식의 점층 증가방식의 수치적분에 의하여 구해지며 주로 직접적분법이 사용되고

있다. 이러한 직접적분법 중 연구에 실제 많이 이용되는 해석법은 Newmark 법과 Hilber-Hughes-Taylor (HHT) 법이다. HHT 법은 Newmark 법이 갖고 있는 단점인 수치적인 감쇠 효과를 유도할 때 발생하는 정확도의 감소를 보완한 해석방법으로서 Hughes에 의해 그 수렴성과 안정성이 검증되었다⁽¹³⁾.

이 연구에서는 비선형 관계로 나타나는 동적 증분 평형방정식은 Hilber-Hughes-Taylor (HHT) 법⁽¹⁴⁾에 의한 시간에 대한 수치적분과정과 수렴에 도달하기 위한 반복계산과정을 거침으로써 해를 구하였다.

Hilber-Hughes-Taylor 법은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$R(t_{n+\alpha}) = F(t_{n+\alpha}) - P(u_{n+\alpha}, \dot{u}_{n+\alpha}, \ddot{u}_{n+\alpha}) = 0 \quad (1)$$

여기서 R 은 잔류력(residual force)벡터로서 불평형하중(unbalanced load)을 나타내며, F 는 시간의 함수로 주어지는 등가의 절점하중(equivalent nodal force)벡터 그리고 P 는 등가의 내력(equivalent internal force)벡터를 의미한다. 또한, $u_{n+\alpha}$ 는 변위, $\dot{u}_{n+\alpha}$ 는 속도 그리고 $\ddot{u}_{n+\alpha}$ 는 가속도를 의미하며 다음 식들로부터 구할 수 있다.

$$u_{n+\alpha} = (1-\alpha)u_n + \alpha u_{n+1} \quad (2)$$

$$\dot{u}_{n+\alpha} = (1-\alpha)\dot{u}_n + \alpha \dot{u}_{n+1} \quad (3)$$

$$\ddot{u}_{n+\alpha} = \ddot{u}_{n+1} \quad (4)$$

위의 식을 단일 매개변수로 단순화하기 위해서 다음 식을 사용한다.

$$\beta = \frac{(2-\alpha)^2}{4} \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{3}{2} - \alpha \quad (6)$$

여기서 α, β, γ 는 해의 안정성과 정확성을 제어하는 매개변수로서 안정적인 해를 얻기 위해서는 α 는 0.5에서 1.0 사이의 값이어야 한다.

식 (1)를 선형화 하여 강성행렬로 나타내면 다음 식과 같다.

$$K^*(i) = \alpha K^{(i)} + \frac{\alpha\gamma}{\beta\Delta t} C^{(i)} + \frac{1}{\beta\Delta t^2} M^{(i)} \quad (7)$$

이 연구의 비선형 해법인 Newton 법⁽¹²⁾을 이용하기 위해서 다음 식과 같이 나타내었다.

$$K^*(i) du_{n+1}^{(i)} = R_{n+\alpha}^{(i)} \quad (8)$$

즉, 식 (8)의 해를 구하기 위해서는 반복계산을 수행하여야 한다. 매 반복계산시에 산정되는 불평형 하중벡터를 사용하여 증분변위를 계산하고 계산된 증분변위가 수렴기준치를 만족할 때까지 반복한다.

3. 철근콘크리트 교각의 진동대 실험

이 연구에서는 철근콘크리트 교각의 내진성능을 근단층 지반운동에 대해서 평가하기 위해서 축소모형을 제작하고 축력효과는 프리스트레스에 의해 구현하고 질량 효과는 별도의 질량모사 프레임에 제작하여 수행한 실험결과를 검증예제로 제시하였다⁽¹⁾.

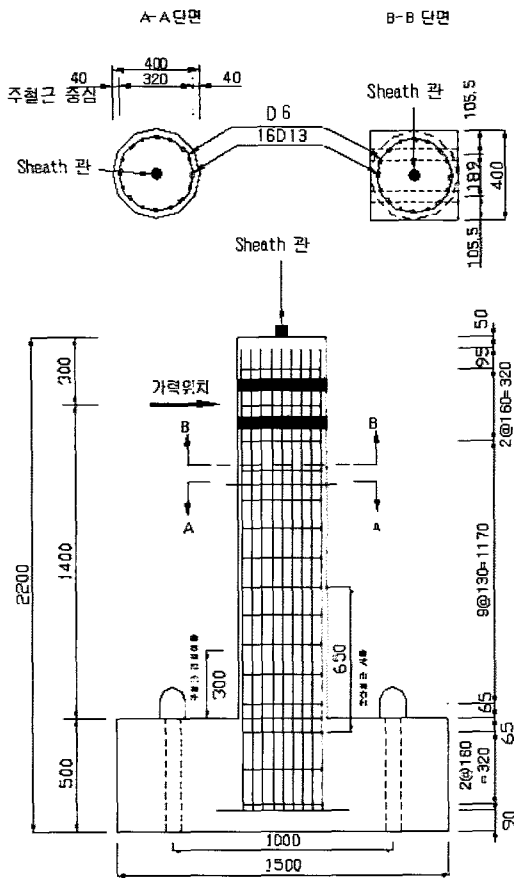
철근콘크리트 교각의 진동대 실험은 여러 가지 제약사항을 갖게 되어 이에 대한 고려가 필요하다. 실험에 사용된 진동대는 일축진동대로 Table의 크기가 5m×3m이고 최대 시편 중량이 30tonf이다. 최대 시편 중량의 제한으로 인해서 교각 축소모형의 크기에 제한이 있고 또한 최대 허용 모멘트의 크기는 50tonf·m, 최대변위는 ±100mm, 그리고 최대 가속도는 1.0g인 것도 실험부재 설계에서 중요한 고려사항이 되었다.

철근콘크리트 교각 실험체의 scale factor는 4.25로 설계되었고 실험체의 제원은 표 1과 같으며 그림 4 ~ 그림 6에 나타내었다. 주된 변수는 횡방향 띠철근의 배근으로 설정하였다. 실험체에 사용된 주철근 13mm의 항복강도는 382.5MPa이고 띠철근 6mm의 항복강도는 323.6MPa과 490.3MPa이다. 그리고 타설된 콘크리트의 설계 압축강도는 24.0MPa이다.

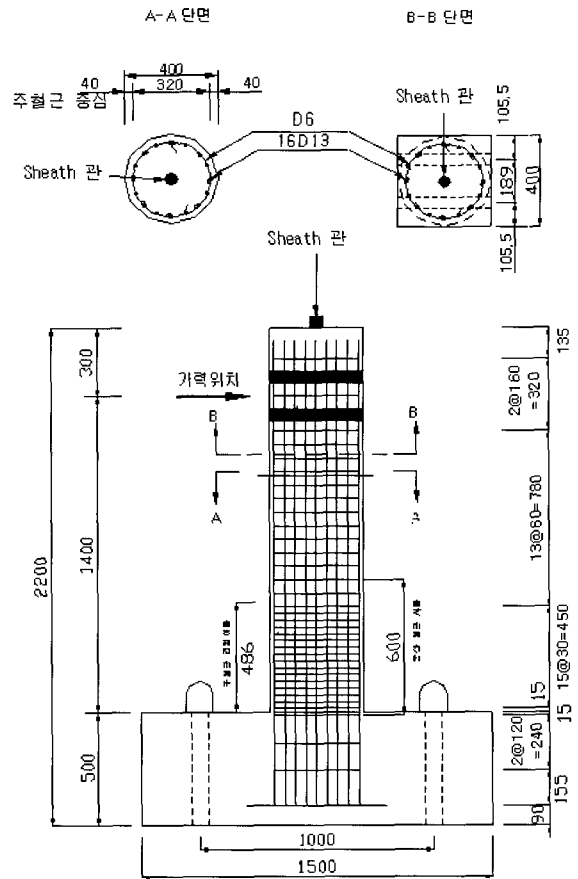
진동대 실험 셋업은 그림 7과 같고 축력을 압축강도의 10% 선에서 도입하기 위해 교각부재의 중심에 프리스트레스를

〈표 1〉 실험체 제원

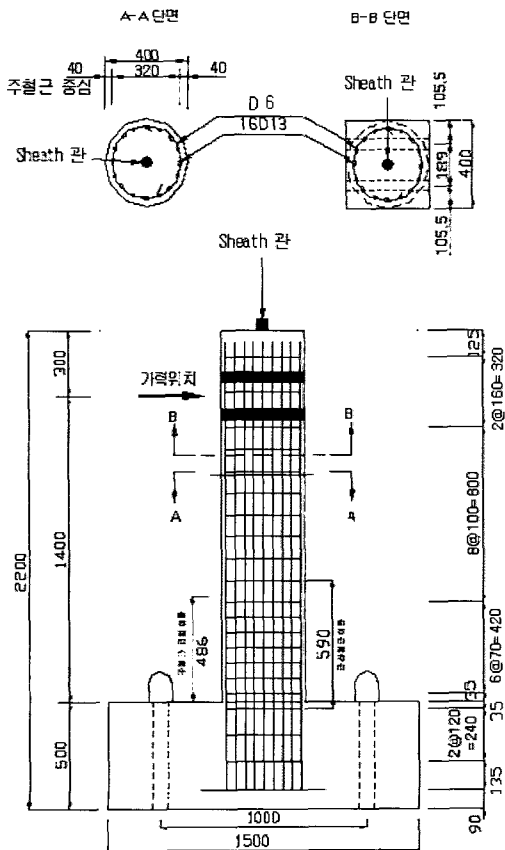
Design	Specimen	Diameter & Height (mm)	Longitudinal Steel		Transverse Steel	
			Set Sectional Ratio	Lap Splice	Confinement Steel Ratio	Space (mm)
Non-Seismic	RC-N-SP50-S	D=400 H=1400	16D13 = 1.61%	50%	0.27%	130/130
Limit-Ductile	RC-L-SP50-S				0.45%	70/100
Seismic	RC-S-SP50-S				1.16%	30/60



〈그림 4〉 실험체 RC-N-SP50-S의 형상 (단위: mm)



〈그림 6〉 실험체 RC-S-SP50-S의 형상 (단위: mm)



〈그림 5〉 실험체 RC-L-SP50-S의 형상 (단위: mm)

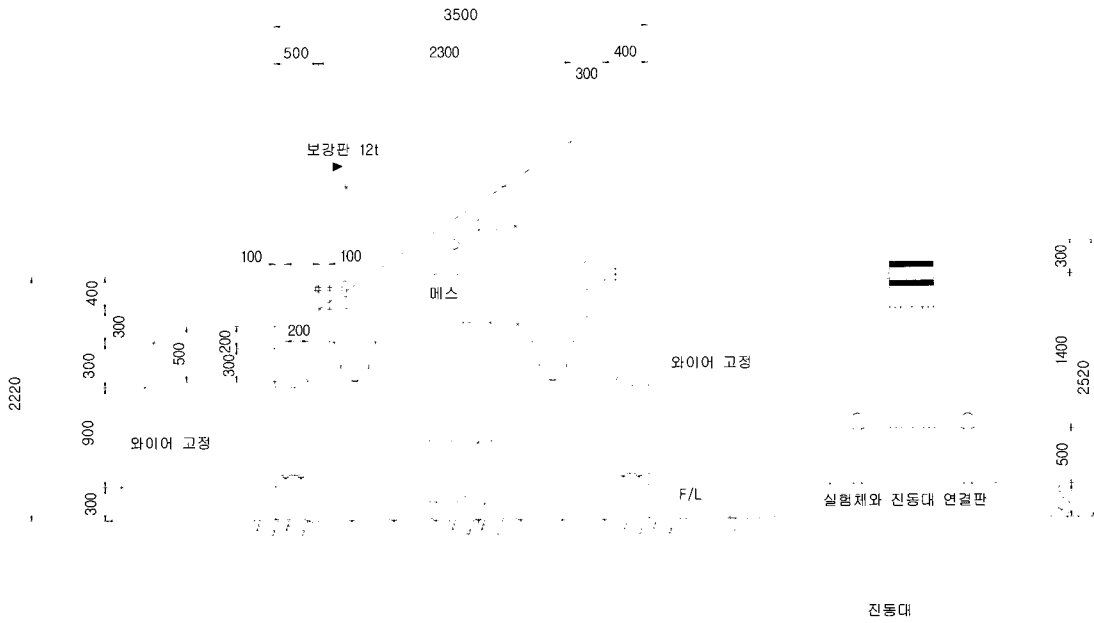
가해서 모사하였으며 질량 효과는 그림 8에 나타난 바와 같이 별도의 질량 프레임 제작하고 상부구조를 모사하는 블록을 한지로 연결하였다. 질량프레임이 교각 부재와 함께 움직일 때 마찰의 효과를 최소화하기 위해서 강재 바퀴내부에 볼 베어링을 설치하고 또한 고정 프레임의 레이면과 바퀴면 사이의 마찰이 최소화되도록 윤활유를 도포하였다.

지반운동은 국내에서 중규모지진에 의한 근단층지반운동 모델을 수행하여 얻어진 결과를 이용하였고 단계별로 가속도 수준을 높이면서 파괴에 이르도록 설정하였다. 근단층지반운동으로 사용한 지반운동은 중규모지진에 의해서 생성된 것으로 0.0627g, 0.0803g, 0.11g, 0.154g, 0.22g, 0.3g, 0.4g, 0.5g, 0.6g, 0.7g, 0.8g, 0.9g까지 가진을 실시하였다.

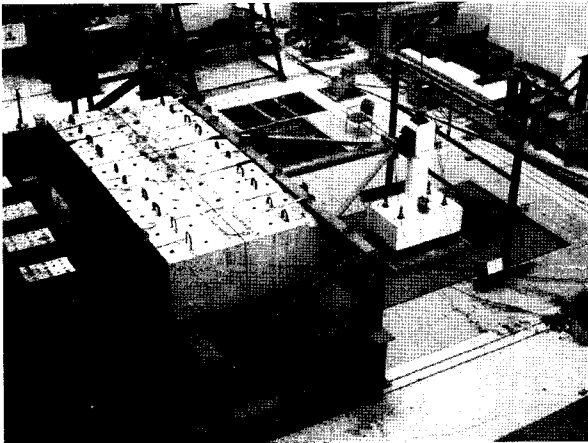
지진모의실험을 위해서 사용된 지진파는 입력지진파의 최대가속도 크기를 조정하였으며, 시간축은 상사성의 원리에 따랐으며 그림 9는 PGA 값이 0.154g인 입력지진파를 나타내고 있다.

4. 해석결과

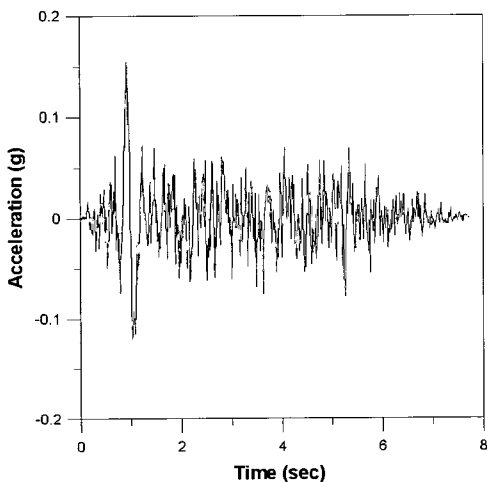
이 실험체들의 유한요소해석을 위해서 원형 철근콘크리트



〈그림 7〉 진동대 실험 셋업



〈그림 8〉 질량프레임의 형상



〈그림 9〉 입력지진파 (PGA 0.154g)

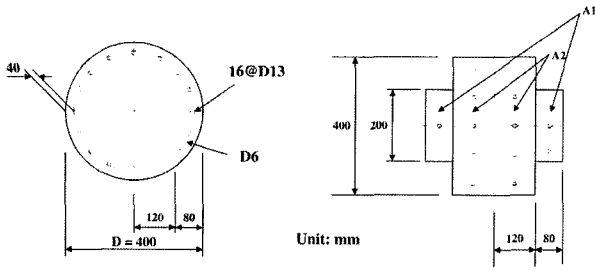
트 교각을 등가환산단면을 이용하여 그림 10과 같이 2차원 평면요소로 해석이 가능하도록 하였다. 등가환산단면은 원형 철근콘크리트 교각의 실제거동과 유사하도록 철근과 콘크리트의 단면적, 하중재하 방향의 단면 2차 모멘트를 같게 하여 유도하였다.

그림 11은 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소 분할된 예이며 3점 가우스 적분을 적용한 8절점 등매개요소를 이용하였고 기초와 교각의 접합부에는 정착슬립 등의 불연속변위를 고려하기 위하여 6절점 경계면 요소를 사용하였다. 그리고 겹침이음된 철근의 역학적 거동을 고려하기 위한 2절점 겹침이음 철근요소가 사용되었다.

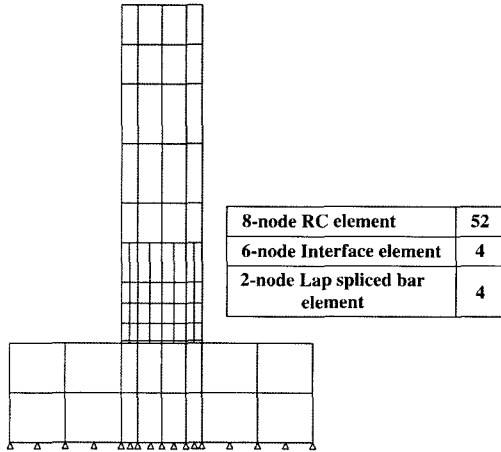
유한요소법을 사용한 비선형 동적해석에 있어서, 비선형 관계로 나타나는 동적 증분 평형방정식은 Hilber-Hughes-Taylor(HHT) 법⁽¹⁴⁾에 의한 시간에 대한 수치적분과정과 수렴에 도달하기 위한 반복계산과정을 단계적으로 거침으로써 해를 구하였다.

FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 통하여 가진단계별로 실험체들의 고유진동수를 측정된 실험결과와 해석에 의한 결과를 비교·검토하였으며 RC-L-SP50-S의 예를 표 2와 그림 12 ~ 그림 14에 나타내었다.

유한요소해석 결과에서 고유진동수에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수가 각각 1.05와 0.23으로서, 고유진동수의 평균값은 실험결과를 비교적 정확하게 평가하고 있다.



〈그림 10〉 등가환산단면



〈그림 11〉 유한요소모델

〈표 2〉 실험 및 해석 결과의 비교 - 고진동수(실험체 RC-L-SP50-S)

구분	Experiment (1)	Analysis (2)	(1) / (2)
0.0627g	3.61328 Hz	4.32909 Hz	0.83
0.0803g	3.61328 Hz	3.62436 Hz	1.00
0.11g	3.61328 Hz	3.62436 Hz	1.00
0.154g	3.12500 Hz	3.22165 Hz	0.97
0.22g	3.12500 Hz	2.91962 Hz	1.07
0.3g	2.53906 Hz	2.21488 Hz	1.15
0.4g	2.14844 Hz	2.21488 Hz	0.97
0.5g	2.14844 Hz	2.21488 Hz	0.97
0.6g	2.14844 Hz	2.21488 Hz	0.97
0.7g	2.14844 Hz	2.21488 Hz	0.97
0.8g	2.14844 Hz	2.21488 Hz	0.97
0.9g	2.14844 Hz	1.20812 Hz	1.78
Mean			1.05(0.99)
COV			0.23(0.08)

또한 해석결과가 실험결과보다 파괴시점을 다소 빨리 평가하고 있는 가진단계인 0.9g를 제외한 변동계수는 0.08에 불과하여 진동대 실험에 의한 철근콘크리트 교각의 비탄성 동적거동특성을 전반적으로 잘 평가하고 있는 것으로 판단된다.

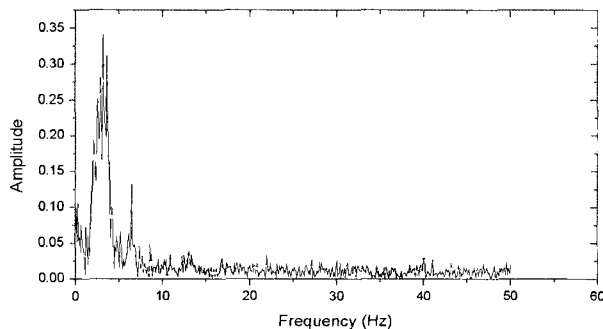
그림 15 ~ 그림 23는 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 변위와 하중의 이력관계를 비교하여 나타내고 있으며 해석결과가 실험결과와 전반적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 즉, 교각구조물의 지진하중에 대한 전체적인 응답특성을 비교적 정확하게 추적하고 있음을 알 수 있다.

실험체별로 분석해보면 비내진 실험체(RC-N-SP50-S)의 해석결과는 실험결과보다 파괴시점을 다소 빨리 평가하고 있는 것을 제외하고는 동적거동을 전반적으로 잘 표현하고 있음을 알 수 있다.

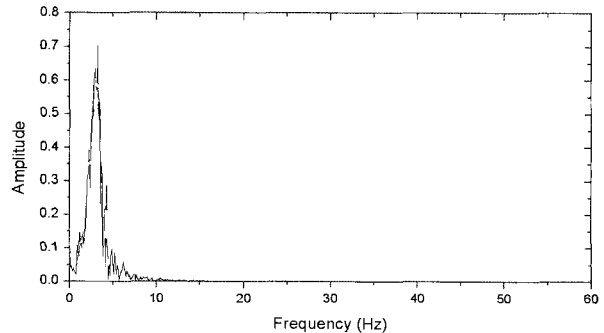
한정연성 실험체(RC-L-SP50-S)의 경우 주철근 겹침이음부의 부작파괴 후의 내력 저하 현상을 포함한 전반적인 비선형 거동을 비교적 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다. 이 연구에서는 주철근이 겹침이음된 철근 콘크리트 교각의 거동을 예측하기 위하여 겹침이음된 철근의 슬립, 부작파괴, 그리고 반복하중을 받는 경우의 최대부착력의 감소계수 등을 고려하고 있다.

내진 실험체(RC-S-SP50-S)는 실험 및 해석결과에서 최대 변위의 크기에서 약간의 차이를 보이고 있으나 변위의 주기 및 지진하중에 대한 전체적인 거동 특성은 비교적 잘 추적하고 있음을 알 수 있다.

일련의 해석결과와 실험결과의 비교로부터 이 연구에서 제안하고 있는 방법은 진동대 실험을 통한 철근콘크리트 교각의 지진거동을 적절히 평가하고 있으며, 개발된 철근콘크리트 구조물의 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 이용함으로써, 해석적 방법에 의한 신설 또는 기존 철근콘크리트 교각의 내진성능평가가 가능할 것으로 판단된다.

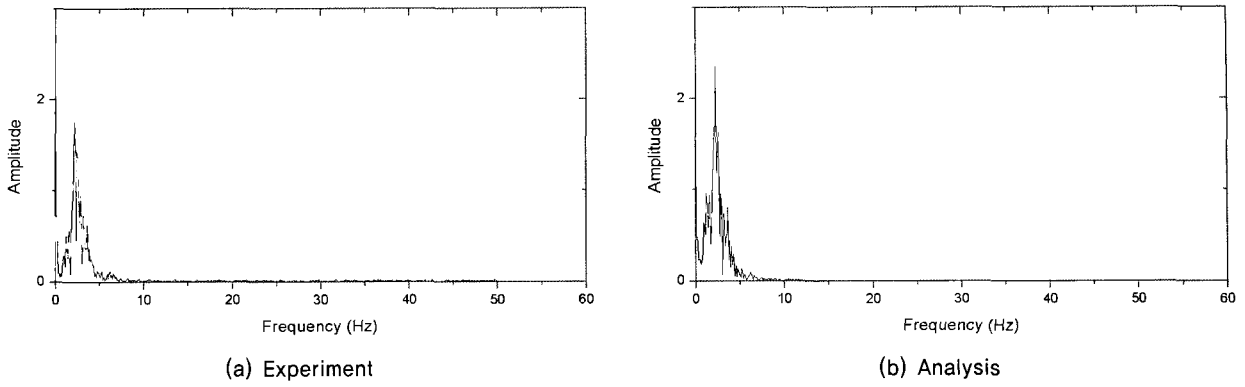


(a) Experiment

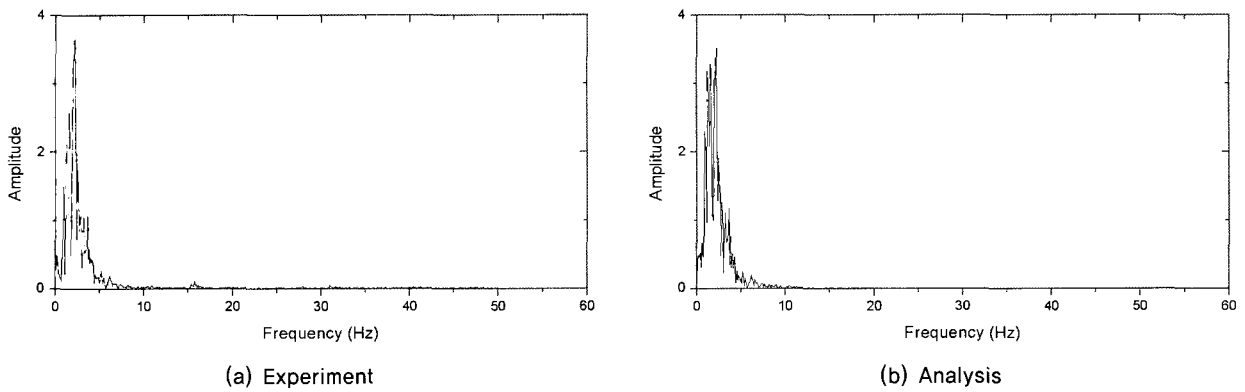


(b) Analysis

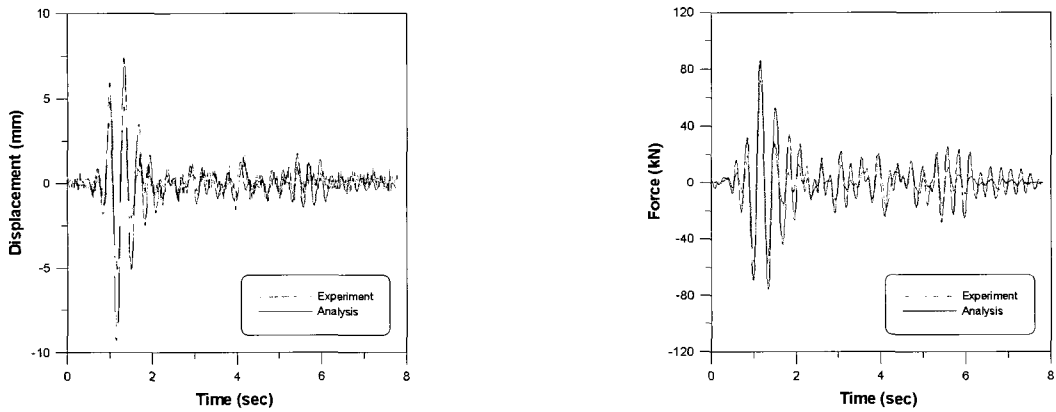
〈그림 12〉 실험체 RC-L-SP50-S의 FFT 분석(0.154g)



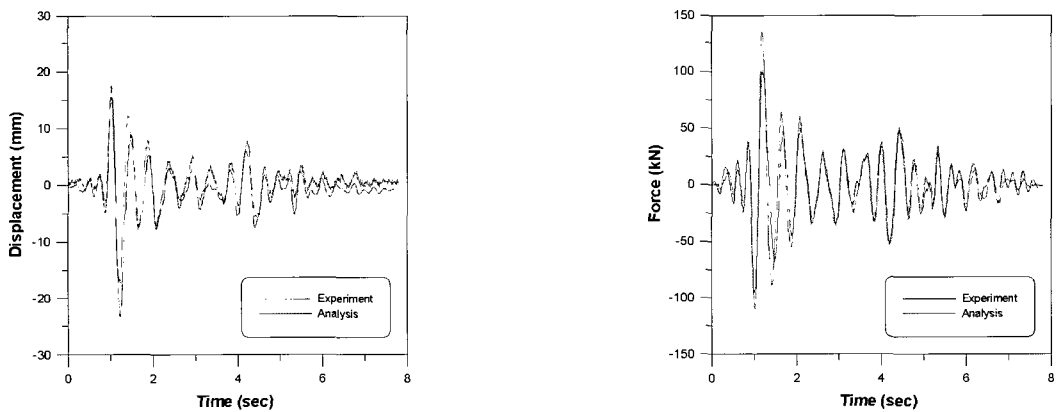
〈그림 13〉 실험체 RC-L-SP50-S의 FFT 분석(0.4g)



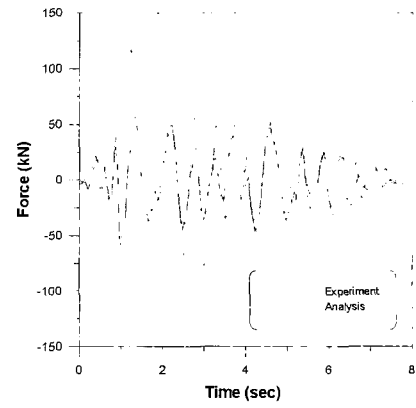
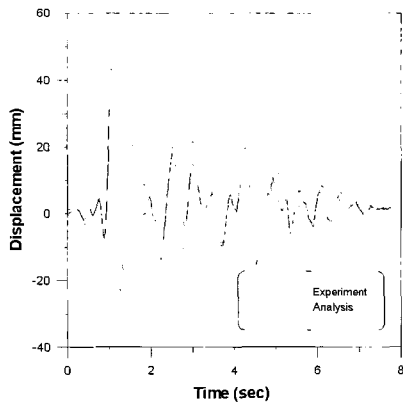
〈그림 14〉 실험체 RC-L-SP50-S의 FFT 분석(0.8g)



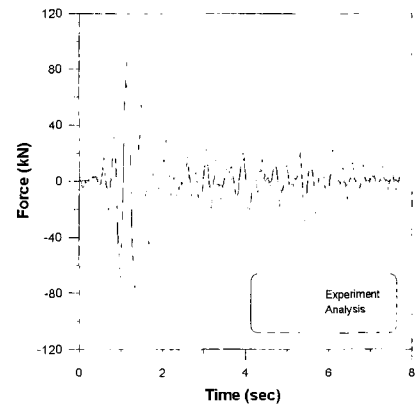
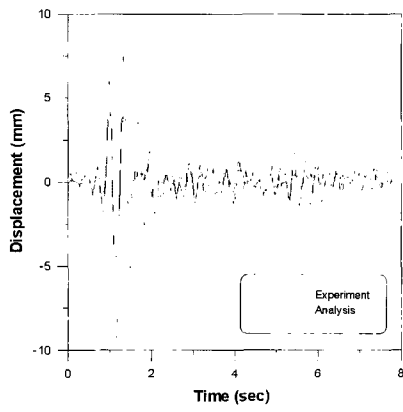
〈그림 15〉 실험체 RC-N-SP50-S의 지진응답(0.154g)



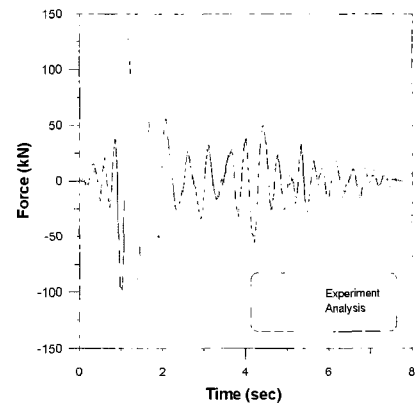
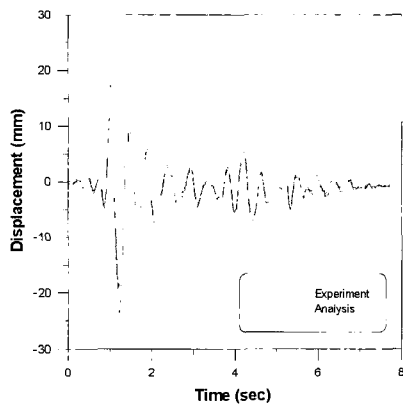
〈그림 16〉 실험체 RC-N-SP50-S의 지진응답(0.4g)



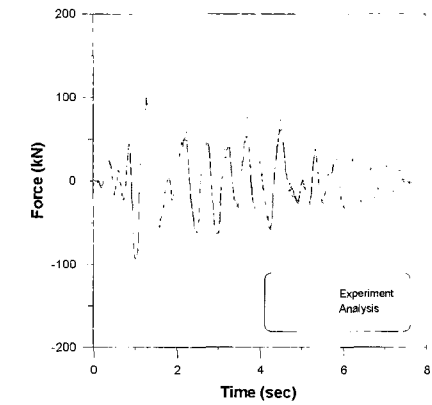
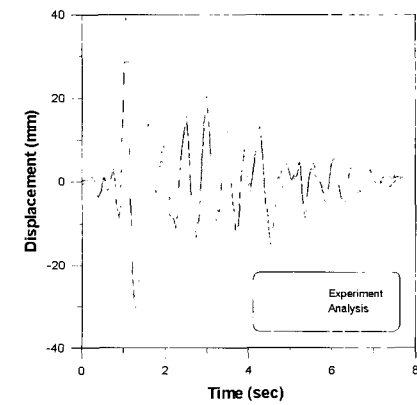
〈그림 17〉 실험체 RC-N-SP50-S의 지진응답(0.8g)



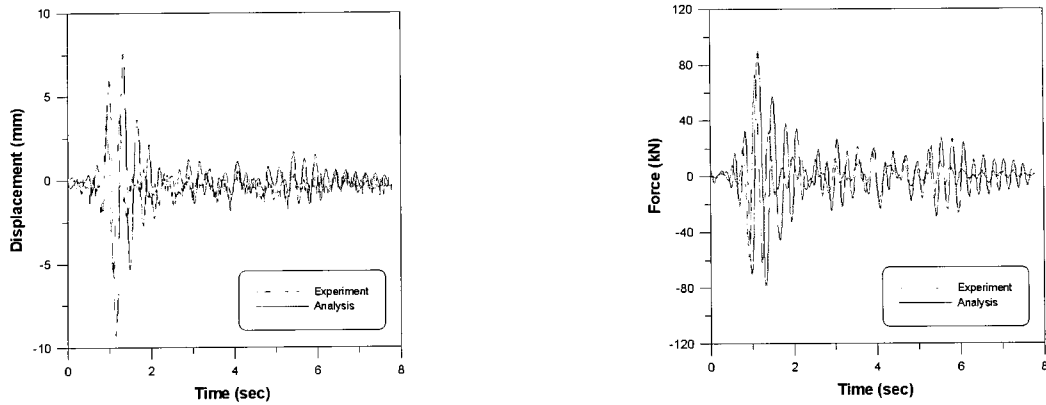
〈그림 18〉 실험체 RC-L-SP50-S의 지진응답(0.154g)



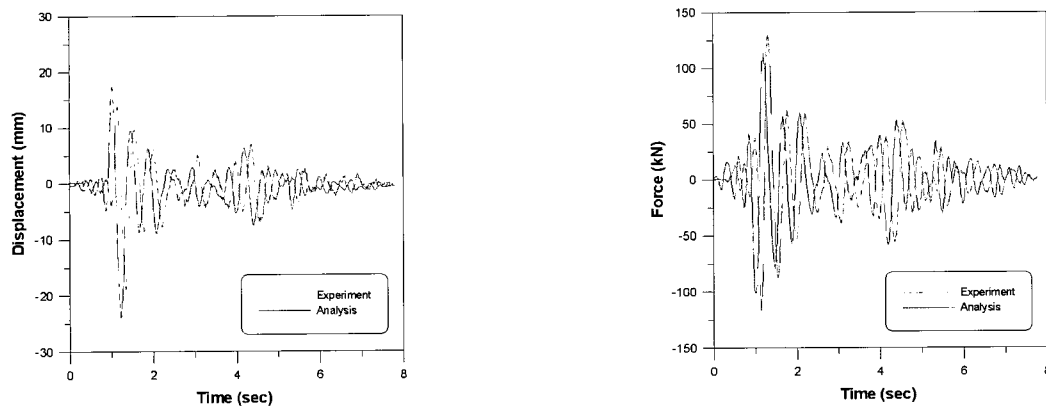
〈그림 19〉 실험체 RC-L-SP50-S의 지진응답(0.4g)



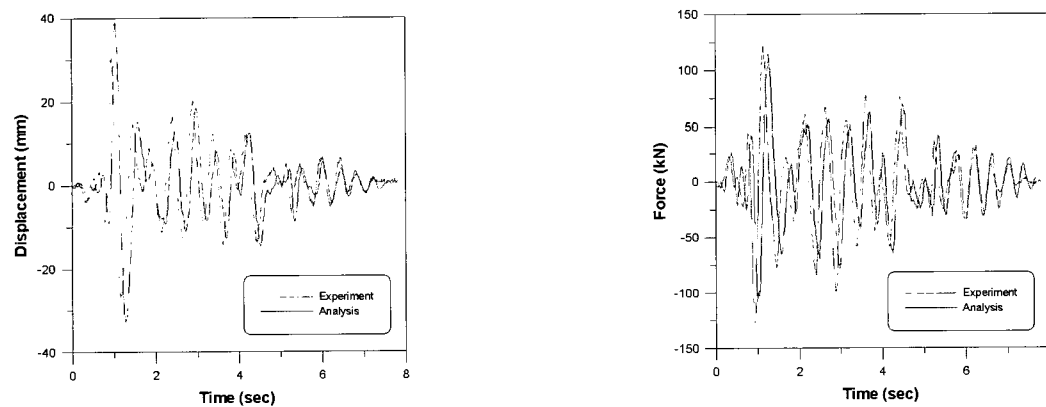
〈그림 20〉 실험체 RC-L-SP50-S의 지진응답(0.8g)



〈그림 21〉 실험체 RC-S-SP50-S의 지진응답(0.154g)



〈그림 22〉 실험체 RC-S-SP50-S의 지진응답(0.4g)



〈그림 23〉 실험체 RC-S-SP50-S의 지진응답(0.8g)

5. 결론

이 연구에서는 진동대 실험을 통한 철근콘크리트 교각의 지진거동과 내진성능평가를 위한 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 비선형 유한요소 해석 프로그램을 사용하여, 지진하중이 작용하는 철근콘크리트 교각을 해석하였다. 실험결과와 비교·검토된 수치에 제로부터 다음의 결론을 얻었다.

(1) 제안한 해석기법과 모델이 진동대 실험을 통한 철근콘

크리트 교각의 전반적인 거동특성을 바르게 표현하고 있음이 입증되었다.

(2) 지진하중의 지속시간 및 크기, 질량의 크기, 그리고 감쇠효과 등을 고려하여 철근콘크리트 부재의 지진응답을 비교적 정확하게 예측하였다.

(3) 지진하중을 받는 철근콘크리트 교각의 응답특성 및 지진손상을 제대로 평가함으로써 철근콘크리트 교각구조의 내진성능평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.

(4) 현행 내진설계 규정에 만족하지 않는 기존의 철근콘크

리트 교각에 대한 보수보강의 판단 등에 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

- (5) 교각 구조물의 동적 특성과 지진동의 동적 특성을 고려하여 내진설계에 반영시킴으로서, 유사시 피해를 최소화 시킬 수 있을 것으로 기대되며 성능기반 내진설계개념에 접목하여 비선형 유한요소해석을 이용한 합리적이고 경제성 있는 차세대 내진설계법의 개발 등에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

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

참고 문헌

- 정영수, 심창수, 박창규, 박창영, "RC 교각의 내진거동 평가를 위한 진동대 실험," 한국콘크리트학회 2006년도 가을 학술발표회 논문집, 제18권, 2호, 2006, pp. 85-88.
- 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.
- 김태훈, "비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가," 박사학위논문, 성균관대학교, 2003.
- Phan, V.T., "Near Fault (Near Field) Ground Motion Effects on Reinforced Concrete Bridge Columns," Thesis, University of Nevada, Reno, August, 2005.
- 김정한, 김재관, "안정대륙권역의 중규모지진에 의한 근단층지반운동의 모델링," 한국지진공학회 논문집, 제10권, 3호, 2006, pp. 101-111.
- 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.
- 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.
- Taylor, R. L., FEAP - *A Finite Element Analysis Program*, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, 2000.
- 김태훈, 박현용, 김병석, 신현목, "철근의 겹침이음을 고려한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가," 한국지진공학회 논문집, 제7권, 3호, 2003, pp. 31-38.
- 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.
- 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.
- Bathe, K.J., *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall, 1996.
- Hughes, T.J.R., *The Finite Element Method*, Prentice-Hall, 1987.
- Hilber, H.M., Hughes, T.J.R. and Taylor, R.L., "Improved Numerical Dissipation for Time Integration Algorithms in Structural Dynamics," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 5, 1977, pp. 282-292.