

# 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 성능평가를 위한 지진해석

## Seismic Analysis for Performance Assessment of Precast Segmental PSC Bridge Columns

김태훈<sup>1)</sup> · 박세진<sup>2)</sup> · 김영진<sup>3)</sup> · 신현목<sup>4)</sup>

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

**국문 요약** >> 이 연구는 지진하중을 받는 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 지진거동을 파악하는데 그 목적이 있다. 사용된 프로그램은 철근콘크리트 구조물의 해석을 위한 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)이다. 사용된 부착 또는 비부착 텐던요소는 유한요소법에 근거하며 프리스트레스트 콘크리트 부재의 콘크리트와 텐던의 상호작용을 구현할 수 있다. 그리고 수정된 접합요소는 세그먼트 접합부의 비탄성거동을 예측할 수 있다. 동적 평형방정식의 해는 HHT(Hilber-Hughes-Taylor) 법에 의한 수치적분으로 구하였다. 제안된 해석기법은 수치예제에 대하여 입력지진파에 따른 지진거동을 비교적 정확하게 예측하였다.

**주요어** 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각, 지진거동, 텐던요소, 접합요소, HHT 법

**ABSTRACT** >> The purpose of this study is to investigate the seismic behavior of precast segmental PSC bridge columns. For the analysis of reinforced concrete structures, a computer program named RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology) is used. To represent the interaction between tendon and concrete of a prestressed concrete member, a bonded or unbonded tendon element based on the finite element method is used. A joint element is modified to predict the inelastic behaviors of segmental joints. The solution of the equations of motion is obtained by numerical integration using Hilber-Hughes-Taylor (HHT) algorithm. The proposed numerical method gives a realistic prediction of seismic behavior throughout the input ground motions for numerical examples.

**Key words** precast segmental PSC bridge columns, seismic behavior, tendon element, joint element, HHT algorithm

### 1. 서론

새로운 교각 시스템에 대한 연구로서 프리캐스트 기술의 적용이 최근 들어 활발하게 이루어지고 있는데, 이러한 프리캐스트 세그먼트 교각은 여러 개의 교각 세그먼트를 공장 에서 제작한 후 현장에서 조립하여 프리스트레스 힘을 도입 하는 시스템으로서 최근 선진 각국에서 실용화를 위한 연구 가 진행되고 있다.<sup>(1-4)</sup>

이 연구는 국내 환경에 맞는 프리캐스트 세그먼트 PSC

교각을 개발하기 위한 독자적인 연구로서 교각구체와 기초 사이의 연결, 교각구체와 교각구체의 연결에서 새롭게 고안 한 전단저항 연결체와 프리스트레스 긴장재를 동시에 이용 하여 개발된 구조시스템<sup>(5),(6)</sup>의 지진응답을 해석적으로 예측 하고 내진성능을 평가하는데 그 목적이 있다.

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 있 다. 그 중에서도 교량 구조물의 손상 및 붕괴는 현대사회에 서 치명적인 손실로 이어질 수 있다. 지진시 교량의 거동은 지진 가속도에 의한 상부구조의 관성력과 이를 지지하고 있 는 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 준정적실

<sup>1)</sup> 정회원·대우건설 기술연구원 선임연구원, 공학박사  
(대표저자: kth7love@chol.com)

<sup>2)</sup> 대우건설 기술연구원 전임연구원, 공학석사

<sup>3)</sup> 대우건설 기술연구원 전문위원, 공학박사

<sup>4)</sup> 정회원·성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2009년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2008. 11. 25 / 수정일 1차 : 2009. 2. 13, 2차 : 2009. 3. 9 / 게재확정일 : 2009. 3. 9)

험, 유사동적실험, 그리고 진동대 실험이 있다. 국내에서 수행되어 온 교각의 교각에 대한 내진 실험은 주로 준정적 혹은 유사동적 실험으로 수행되어져 왔다. 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 경우에는 국내에 있는 진동대 용량의 한계로 인해서 소형 축소모형의 경우에도 진동대 실험이 쉽게 이루어지기 힘든 여건이다. 따라서 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각 시스템의 진동대 실험에 관한 적절한 해석기법의 개발이 이루어진다면, 다양한 형태의 교각에 대한 비선형 지진해석을 실시하여 미처 다루지 못한 여러 형태의 교각들의 내진성능평가가 가능할 것이다.<sup>(7)</sup>

교각의 내진거동에 대한 실험에서 주로 지반 운동을 원역 지반운동(Far Field Ground Motion)에 대해서 다루어 왔지만 최근에 근단층지반운동(Near Fault Ground Motion)의 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 내진성능평가에서 사용하는 지반운동을 근단층지반운동에 대해서 검토할 필요가 있다.<sup>(8)</sup>

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. 근단층지반운동은 단층파열의 전파와 전단파의 전파가 서로 간섭을 일으켜 발생하며 근단층운동이 진행되는 방향에 평행인 경우와 직각인 경우로 구분된다.<sup>(9)</sup>

이 연구에서는 국내에서 수행된 근단층지반운동에 대한 모델링에서 도출된 지반운동중 근단층운동이 진행되는 방향에 직각인 경우를 이용하여 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 지진해석을 수행하였다.

**2. 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST**

이 연구에서는 저자 등<sup>(10-14)</sup>에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소, 경계면요소, 겹침이음 철근요소, 부착 및 비부착 텐던요소 그리고 접합요소 등을 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)에 수정을 가하여 사용하

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
Bonded or Unbonded prestressing bar element	Interface element	RC plane stress element	Lap spliced bar element

〈그림 1〉 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

였다(그림 1).

프리스트레스드 콘크리트는 일반적으로 콘크리트와 철근 및 텐던으로 구성되는 복합재료이며, 비선형 재료모델은 이들 각 구성 재료가 중첩된 것으로 표현할 수 있는데 각각의 해석모델은 콘크리트와의 부착특성을 고려하여 개발된 것 이라야 한다. 비선형 재료모델은 저자 등<sup>(10-14)</sup>에 의하여 이미 발표된 재료모델을 그대로 적용하였으며 사용된 비선형 재료모델의 특징을 간단히 요약하면 다음과 같다.

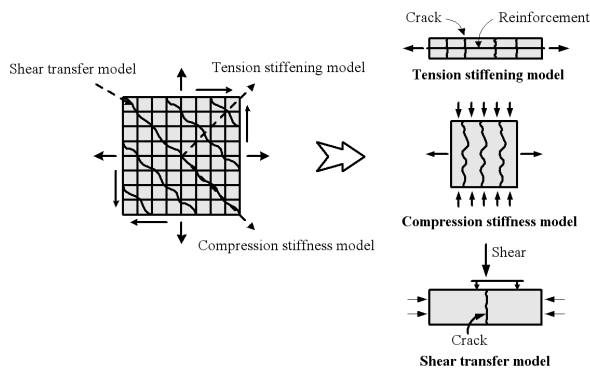
균열이 분산되어 분포된 철근콘크리트 부재의 변형거동은 사용된 균열개념에 크게 영향을 받는다. 이 연구에서는 제 2 균열의 발생을 제 1 균열과 직교방향으로 발생하도록 제한하여 콘크리트의 강성이 과대평가 되는 직교 고정균열 모델과 달리, 실제 주응력의 방향과 직각으로 발생하도록 한 비직교 고정균열모델을 적용함으로써 콘크리트의 강성을 보다 사실적으로 평가하였다.

균열이 발생하기 전의 콘크리트의 역학모델은 이축응력 상태에 대한 탄소성파괴모델의 기본개념에 의해서 표현되며 비선형성은 균열발생 후에 현저하게 나타나게 된다. 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).

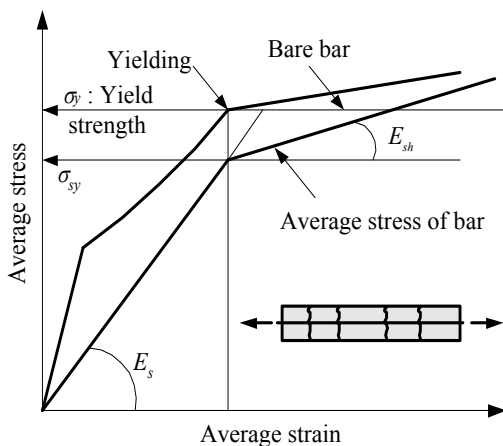
콘크리트 속의 철근에 대한 항복후 거동은 철근만의 특성과 함께 부착효과 등이 동시에 고려되어야 한다. 콘크리트 속의 철근응력은 일정하지 않고 균열면에서 최대가 된다. 철근의 응력-변형률 관계가 탄성영역에 있는 경우에는 철근만의 구성모델을 적용하면 된다. 그러나 균열면에서 철근이 최초로 항복하게 되면 철근의 평균응력-평균변형률 관계는

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 30MPa 이하의 보통강도 콘크리트의 경우 Mander 등<sup>(16)</sup>의 제안모델을 적용하였으며, 40MPa 이상의 고강도 콘크리트의 경우에는 Sun and Sakino<sup>(17)</sup>의 제안모델을 적용하였다. 그리고 보통강도와 고강도 콘크리트 사이의 강도에는 Mander 등<sup>(16)</sup>의 제안모델과 Sun and Sakino의 제안모델을 이용하여 개발된 천이모델<sup>(13)</sup>을 사용하였으며 콘크리트의 단면형상에 관계없이 적용할 수 있고



〈그림 2〉 균열발생후 콘크리트의 구성모델



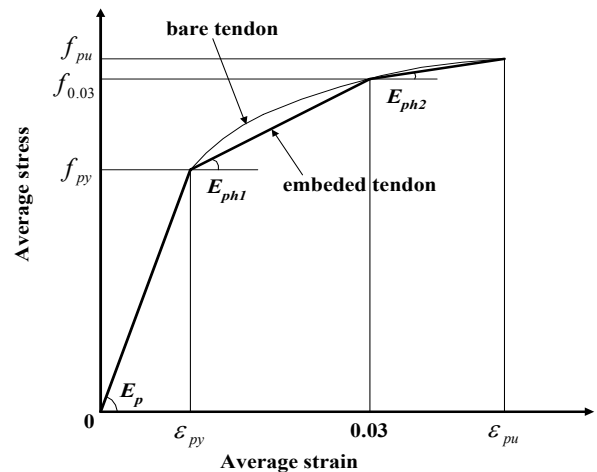
〈그림 3〉 철근모델

종방향 철근 및 구속철근의 양, 구속철근의 항복강도 및 배근형태 등을 함께 고려할 수 있도록 하였다.

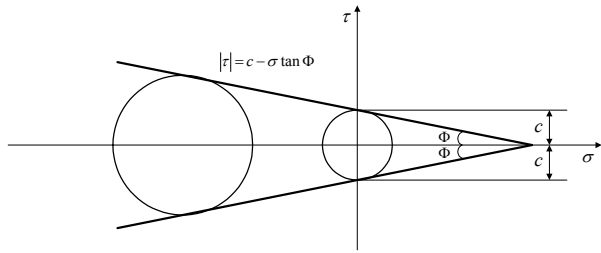
겹침이음된 철근은 실제로 두 개의 정착된 철근이 나란히 놓여져 철근의 강도가 서로 반대방향으로 발휘된다. 따라서 부착의 기본적인 메커니즘은 정착된 철근과 동일하지만 부착저항의 축대칭 성질은 겹침이음된 다른 철근이 있으므로 그 영향을 받게 된다. 겹침이음된 철근의 역학적 거동에 영향을 미치는 요인으로는 콘크리트의 압축강도와 피복두께, 횡방향철근의 직경과 간격, 그리고 겹침이음길이 등이 있다. 이 연구에서는 주철근이 겹침이음된 철근 콘크리트 교각의 거동을 예측하기 위하여 겹침이음된 철근의 슬립, 부착파괴, 그리고 반복하중을 받는 경우의 최대부착력의 감소계수 등을 고려하였다.<sup>(12)</sup>

콘크리트 속의 텐던의 응력과 변형률의 관계는 콘크리트와 텐던사이의 부착효과로 인하여 텐던만의 그것과는 다르게 나타난다. 텐던은 일반적으로 고강도 강재를 사용하므로 일반 철근과 같이 뚜렷한 항복점을 갖지 않으며 항복고원 또한 나타나지 않는다. 따라서 텐던의 경우에는 일반 철근과는 달리 텐던 자체(Bare Bar)의 응력-변형률 관계와 부착이 고려된 텐던의 응력-변형률 관계에서 현격한 차이를 보이지 않게 된다. 따라서 이 연구에서는 저자 등에 의하여 제안된 부착이 고려된 철근의 응력-변형률 관계를 그림 4와 같은 trilinear 모델로써 표현하였다. 제하 및 재재하에 대해서는 포락선부분은 단조증가 하중에 대한 곡선을 사용하였고 제하부분의 거동은 탄성으로, 그리고 연화부분을 함께 고려하였다.

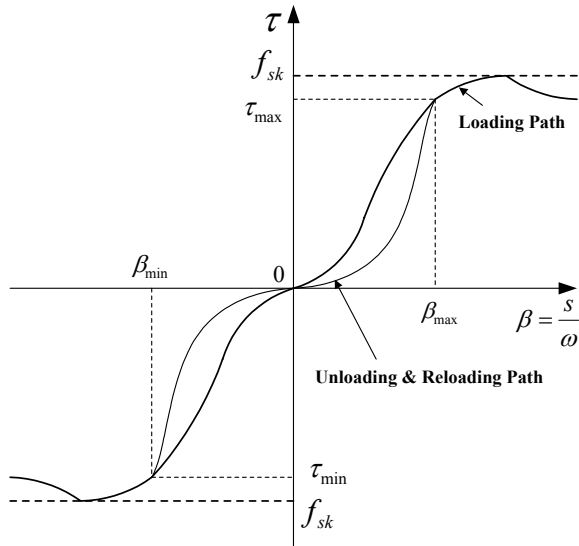
세그먼트 접합부의 부착파괴 기준으로는 그림 5와 같은 Coulomb 파괴기준을 사용하였고 접합요소의 전단응력 모델은 접촉면 밀도함수에 근거한 전단전달모델을 수정하여 표현하였으며 그림 6과 같이 최대값 이후에는 전단전달 연



〈그림 4〉 텐던의 trilinear 모델



〈그림 5〉 Coulomb 파괴기준



〈그림 6〉 전단응력 모델 (Note: β는 정규화된 전단변형률, s는 접합면의 미끄러짐 변위, 그리고 ω는 접합면의 열림 변위)

화계수(Softening Parameter)로써 부착파괴까지 감소하는 것으로 가정하였다.<sup>(14)</sup> 접합요소를 사용하면 접합부에 평행한 수평방향의 전단응력과 이에 수직방향의 인장응력 또는 압축응력을 결정할 수 있다.

### 3. 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 지진해석

#### 3.1 수치예제

지진하중을 받는 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 지진 거동을 파악하기 위한 수치예제로 기존 연구<sup>(5),(6)</sup>에서 준정적 실험으로 검증된 프리캐스트 교각 실험체를 선정하였다.

수치실험에 사용된 예제의 제원과 모델상세는 표 1과 그림 7에 나타내었다. 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 설계는 휨에 대한 저항과 전단에 대한 저항으로 나누어 설계하였다. 수평력에 의해 휨모멘트가 발생할 경우 인장에 대해서는 내부에 삽입된 강연선이 부담하고, 압축에 대해서는 횡방향 철근 내부에 있는 심부구속 콘크리트가 부담하는 것으로 하였다. 설계에서 긴장재의 단면적과 프리스트레스의 크기 결정이 중요한 사항이며 반복 해석한 결과와 축방향 압

〈표 1〉 수치예제의 제원

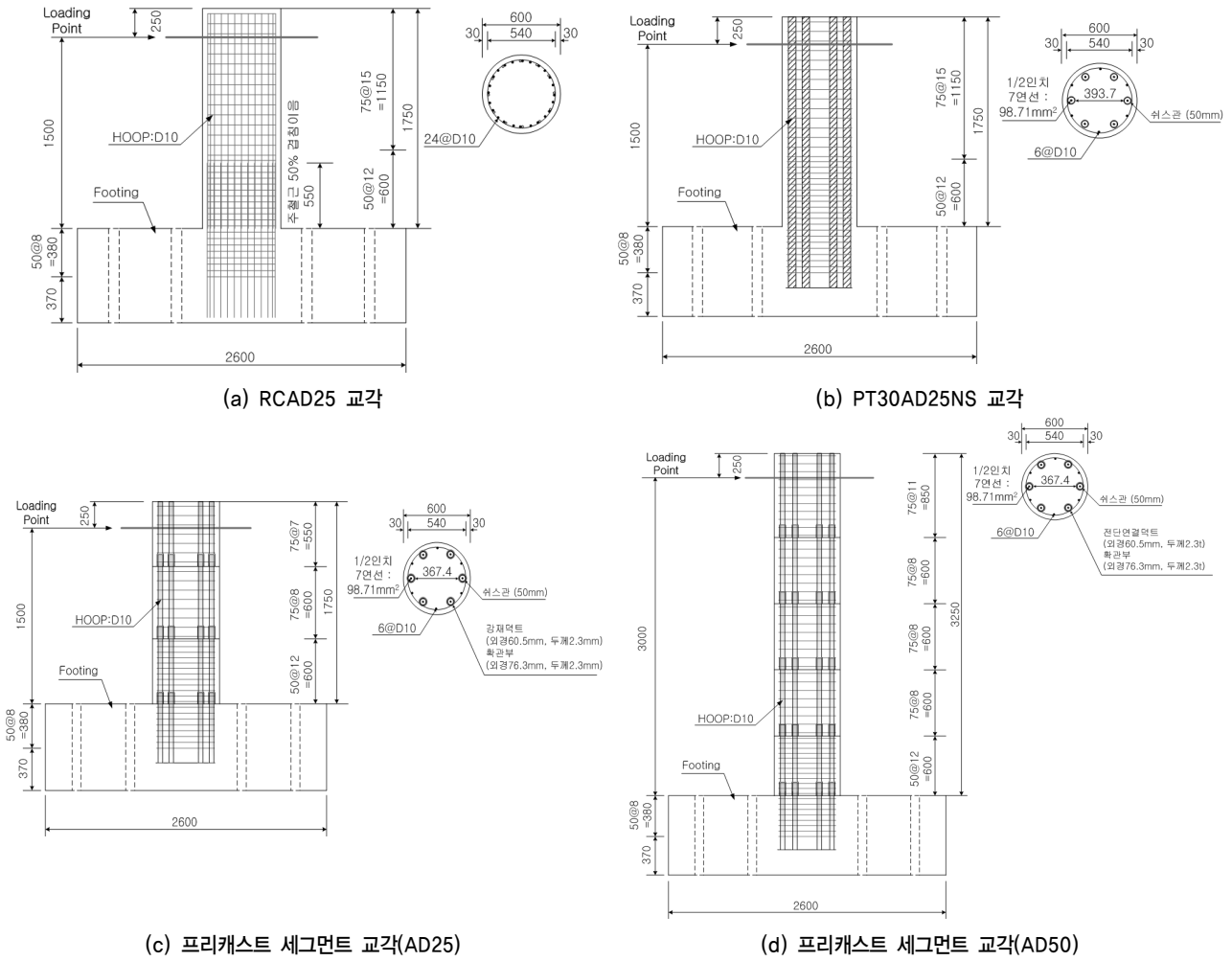
구분	RC	PT30	PT10	PT30	PT50	PT10	PT30	PT50	
	AD25	AD25	AD25	AD25	AD25	AD50	AD50	AD50	
		NS							
	RC 교각	PSC 교각	프리캐스트 세그먼트 PSC 교각						
단면 직경(m)	0.6								
교각 높이(m)	1.5				3.0				
재료 강도	콘크리트 (MPa)	24	35						
	철근 (MPa)	SD40 (400)							
	강재덕트 (MPa)	-	-	315					
	강연선 (MPa)	-	7연선 12.7(15.2)mm/1본 (1600)						
PS 강재	긴장응력 (MPa)	-	480	160	480	800	160	480	800
	주철근	직경	D10						
회철근	철근비 (%)	0.605	최소량(0.2)						
	직경	D10							
회철근	철근비 (%)	0.66							
	피복두께 (mm)	30							
축력	$0.1 A_g f_{ck}$								

축응력, 즉 축력과 프리스트레스에 의한 압축응력 합에 증가에 따라 변위연성도가 급감하는 범위가 20% 내외임을 고려하여 긴장응력의 수준을 결정하였다. 또한, 전단에 대해서는 세그먼트 사이를 연결하는 강재덕트가 저항하도록 하였다.

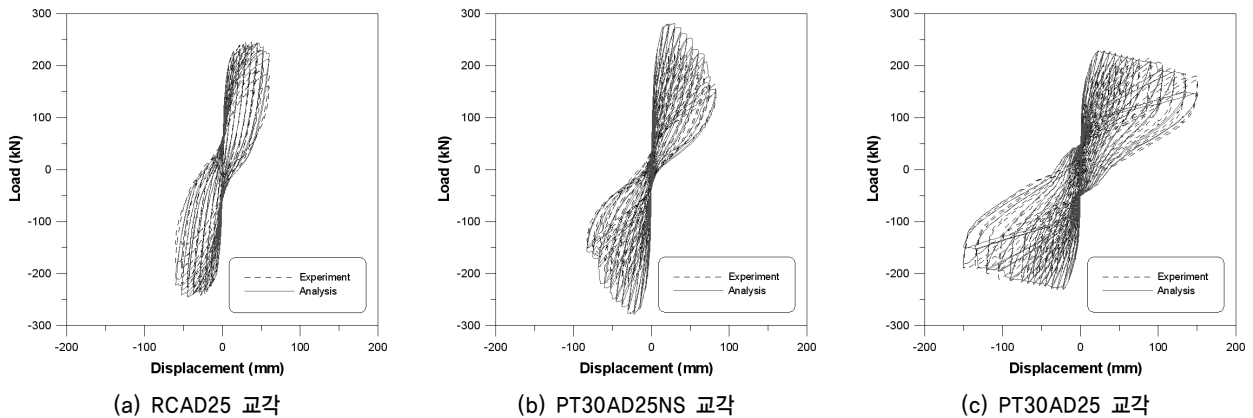
수치예제는 비교·검증을 위하여 표 1과 같이 기준이 되는 철근콘크리트 교각 1기와 철근콘크리트 교각의 공칭모멘트와 동일한 수준을 가지는 프리스트레스 콘크리트 교각 1기, 그리고 개발된 전단저항 연결체를 갖는 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각 6기로 구성되어있다. 기존 연구의 준정적 실험에 대한 세부적인 실험결과와 해석결과는 참고문헌<sup>(5),(6)</sup>에 자세히 설명되어있으며 지진해석 결과와 비교·검토할 수 있는 대표적인 연구결과를 그림 8에 나타내었다. 이때 최대하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 각각 0.93과 0.09로서, 최대하중의 평균값은 전반적으로 실험결과를 정확하게 평가하고 있으며 변동계수가 0.09에 불과하여 비탄성 거동특성을 전반적으로 잘 평가하고 있다.

#### 3.2 지진해석 및 고찰

이 연구에서는 철근콘크리트 교각의 내진성능을 근단층



〈그림 7〉 수치예제의 형상(단위: mm)



〈그림 8〉 준정적 실험 및 해석<sup>(5),(6)</sup>의 하중-변위 곡선 예

지반운동에 대해서 평가하기 위해 축소모형을 제작하고 축력효과는 프리스트레스에 의해 구현하며 질량 효과는 별도의 질량모사 프레임 제작하여 수행한 실험과 해석결과<sup>(7),(18)</sup>를 근거로 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 지진해석을 수행하였다.

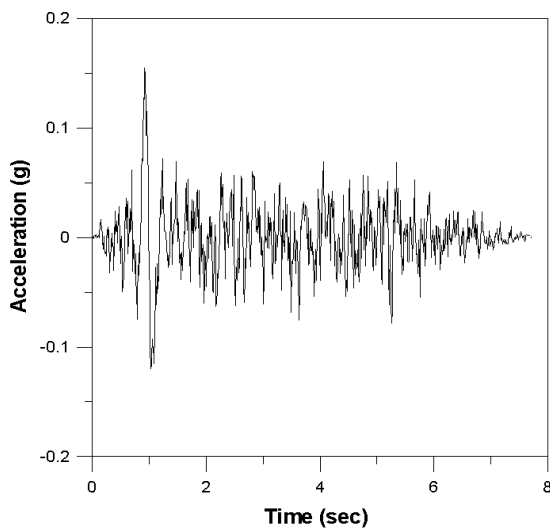
프리캐스트 세그먼트 교각의 scale factor는 5.0이며 지반

운동은 국내에서 중규모지진에 의한 근단층지반운동 모형을 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.

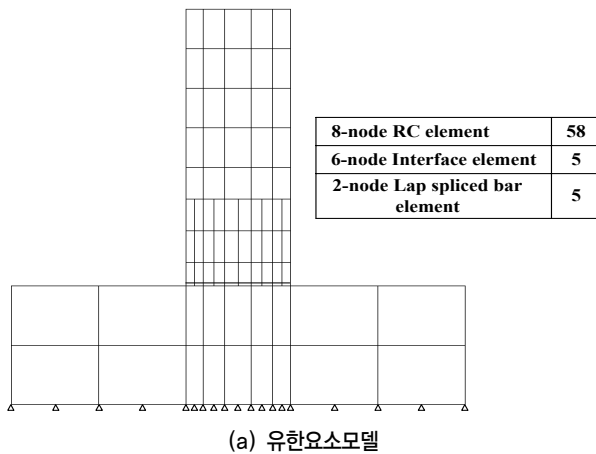
지진해석을 위해서 사용된 지진파는 입력지진파의 최대 가속도 크기를 조정하였으며, 시간축은 상사성의 원리에 따랐고 그림 9는 PGA 값이 0.154g인 입력지진파를 나타내고 있다.

이 연구에서는 비선형 관계로 나타나는 동적 증분 평형방정식은 Hilber-Hughes-Taylor(HHT) 법<sup>(19)</sup>에 의한 시간에 대한 수치적분과정과 수렴에 도달하기 위한 반복계산과정을 거침으로써 해를 구하였다.

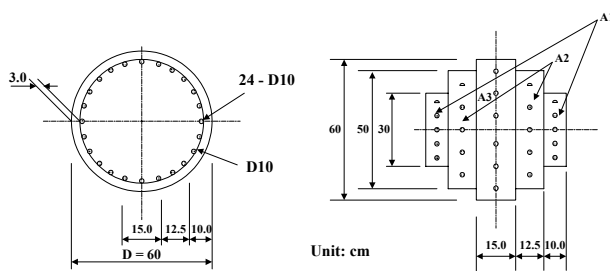
구조물의 비선형응답은 운동방정식의 점층 증가방식의



〈그림 9〉 입력지진파 (PGA 0.154g)



(a) 유한요소모델



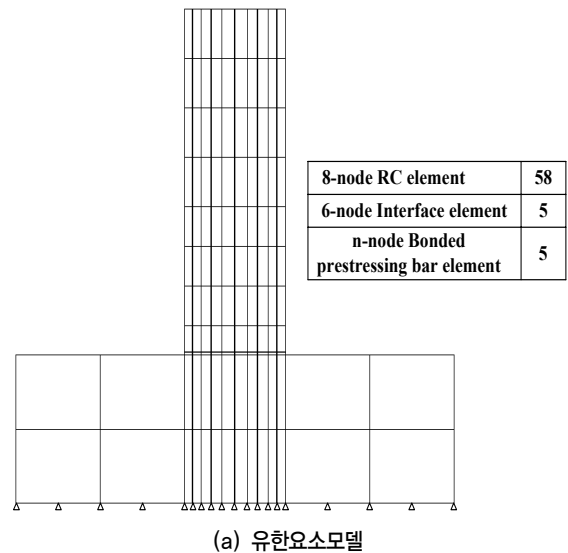
(b) 등가환산단면

〈그림 10〉 RCAD25 교각

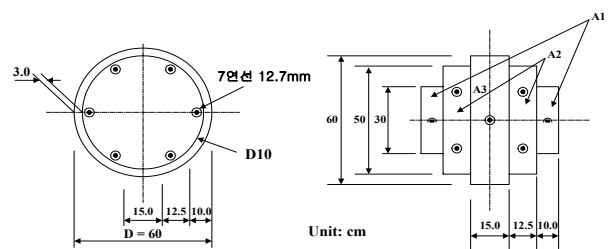
수치적분에 의하여 구해지며 주로 직접적분법이 사용되고 있다. 이러한 직접적분법 중 연구에 실제 많이 이용되는 해석법은 Newmark 법과 Hilber-Hughes-Taylor(HHT) 법이다. HHT 법은 Newmark 법이 갖고 있는 단점인 수치적인 감쇠효과를 유도할 때 발생하는 정확도의 감소를 보완한 해석방법으로서 Hughes<sup>(20)</sup>에 의해 그 수렴성과 안정성이 검증되었다.

그림 10~그림 13은 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소 분할한 예이다. RCAD25 교각의 경우 그림 10(a)에서 보는 것처럼 일체형 교각으로 총 68개의 요소로 분할하였다. 8절점 철근콘크리트 평면응력 요소가 58개, 기초와 교각의 접합부에 정착슬립 등의 불연속변위를 고려하기 위하여 6절점 경계면 요소 5개, 그리고 겹침이음된 철근의 역학적 거동을 고려하기 위한 2절점 겹침이음 철근요소 5개가 사용되었다. 또한 원형 철근콘크리트 교각의 2차원 해석을 위하여 그림 10(b)에서 보는 것처럼 등가환산단면을 이용하여 원형단면을 5개의 직사각형 요소로 변환하여 해석을 수행하였다. 등가환산단면은 원형 철근콘크리트 교각의 실제거동과 유사하도록 철근과 콘크리트의 단면적, 하중재하 방향의 단면 2차 모멘트를 같게 하여 유도하였다.

PT30AD25NS 교각의 경우 그림 11(a)에서 보는 것처럼



(a) 유한요소모델



(b) 등가환산단면

〈그림 11〉 PT30AD25NS 교각

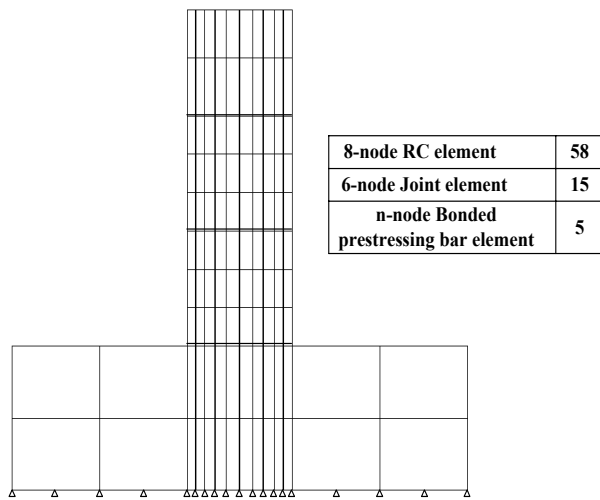
일체형 교각으로 총 68개의 요소로 분할하였다. 8절점 철근 콘크리트 평면응력 요소가 58개, 기초와 교각의 접합부에 정착슬립 등의 불연속변위를 고려하기 위하여 6절점 경계면 요소 5개, 그리고 부착 텐던의 거동을 고려하기 위한 다절점 부착 텐던요소 5개가 사용되었다. 또한 원형 프리스트레스트 콘크리트 교각의 2차원 해석을 위하여 그림 11(b)에서 보는 것처럼 등가환산단면을 이용하여 원형단면을 5개의 직사각형 요소로 변환하여 해석을 수행하였다. 등가환산단면은 원형 프리스트레스트 콘크리트 교각의 실제거동과 유사하도록 PS 강재와 콘크리트의 단면적, 하중재하 방향의 단면 2차 모멘트를 같게 하여 유도하였다.

프리캐스트 세그먼트 PSC 교각(AD25)의 경우 그림 12(a)에서 보는 것처럼 기초부와 함께 교각부에 3개의 세그먼트로 구성되어 있으며 총 78개의 요소로 분할하였다. 8절점 철근콘크리트 평면응력 요소가 58개, 교각과 기초사이 및 세그먼트 사이에 6절점 프리캐스트 접합면 요소 15개, 그리고 부착 텐던의 거동을 고려하기 위한 다절점 부착 텐던요소 5개가 사용되었다. 이때 부착 텐던요소는 강재덕트와 쉬스관 사이가 좁아 일부분에서는 그라우팅으로 접합이 완전하게 이루어지지 못할 것으로도 예상되나 전체적인 거동은 부착 강재에 가까울 것으로 판단하여 사용하였다. 또한

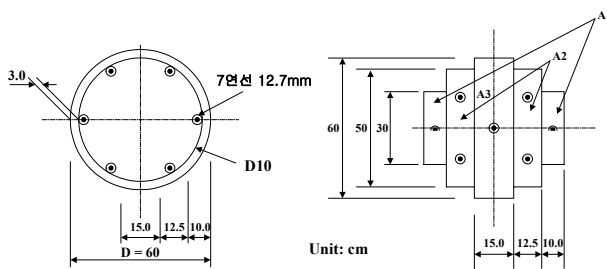
원형 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 2차원 해석을 위하여 그림 12(b)에서 보는 것처럼 등가환산단면을 이용하여 원형단면을 5개의 직사각형 요소로 변환하여 해석을 수행하였다. 등가환산단면은 원형 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 실제거동과 유사하도록 PS 강재와 콘크리트의 단면적, 하중재하 방향의 단면 2차 모멘트를 같게 하여 유도하였다.

프리캐스트 세그먼트 PSC 교각(AD50)의 경우 그림 13(a)에서 보는 것처럼 기초부와 함께 교각부에 5개의 세그먼트로 구성되어 있으며 총 108개의 요소로 분할하였다. 8절점 철근콘크리트 평면응력 요소가 78개, 교각과 기초사이 및 세그먼트 사이에 6절점 프리캐스트 접합면 요소 25개, 그리고 부착 텐던의 거동을 고려하기 위한 다절점 부착 텐던요소 5개가 사용되었다. 또한 원형 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 2차원 해석을 위하여 그림 13(b)에서 보는 것처럼 등가환산단면을 이용하여 원형단면을 5개의 직사각형 요소로 변환하여 해석을 수행하였다.

이 연구에서 사용된 유한요소망과 등가환산단면은 일반 탄성해석과의 수렴성 시험(Convergence Test) 결과 형상비

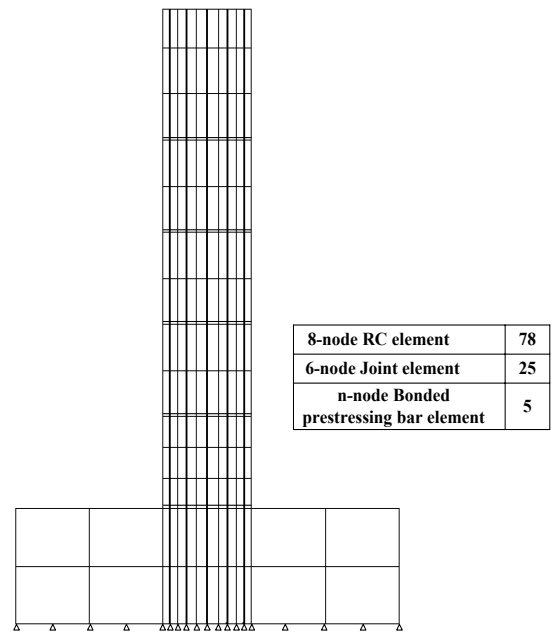


(a) 유한요소모델

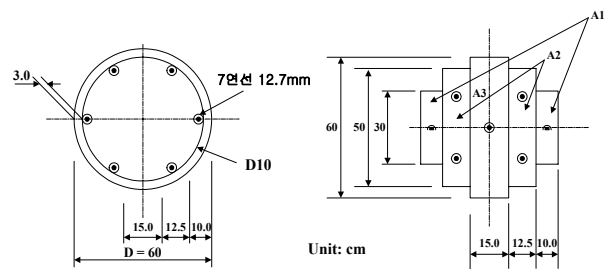


(b) 등가환산단면

〈그림 12〉 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각(AD25)



(a) 유한요소모델



(b) 등가환산단면

〈그림 13〉 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각(AD50)

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

감쇠비를 3%로 하고 고유진동수를 측정한 해석결과를 비교하여 표 2에 나타내었다. 고유진동수는 비교·검증을 위한 철근콘크리트 교각, 프리스트레스트 콘크리트 교각, 그리고 형상비와 초기프리스트레스를 달리하는 프리캐스트 세

〈표 2〉 수치예제의 해석결과 - 고유진동수

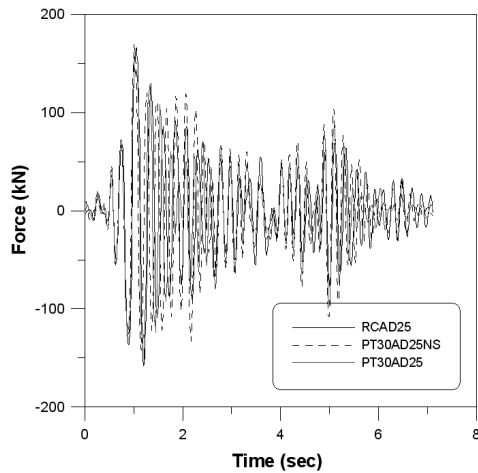
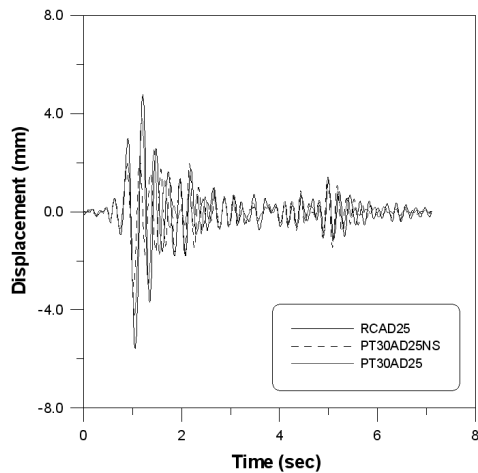
구 분		Natural frequency (Hz)
철근콘크리트 교각	RCAD25	5.10845
프리스트레스트 콘크리트 교각	PT30AD25NS	6.41623
프리캐스트 세그먼트 PSC 교각 (AD25)	PT10AD25	6.50030
	PT30AD25	6.50030
	PT50AD25	6.75804
프리캐스트 세그먼트 PSC 교각 (AD50)	PT10AD50	2.70996
	PT30AD50	2.70996
	PT50AD50	2.84735

그먼트 PSC 교각의 동적거동 특성을 잘 나타내고 있다. 이를 통해 개발된 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각은 기존 현장타설 철근콘크리트 교각 및 프리스트레스트 콘크리트 교각과 강도, 연성, 에너지 소산능력 등의 면에서 동등한 성능을 보임<sup>(5),(6)</sup>과 동시에 유사한 동적거동 특성을 갖고 있음이 확인되었다.

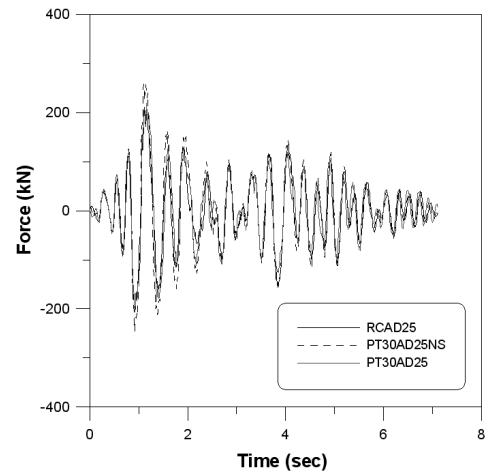
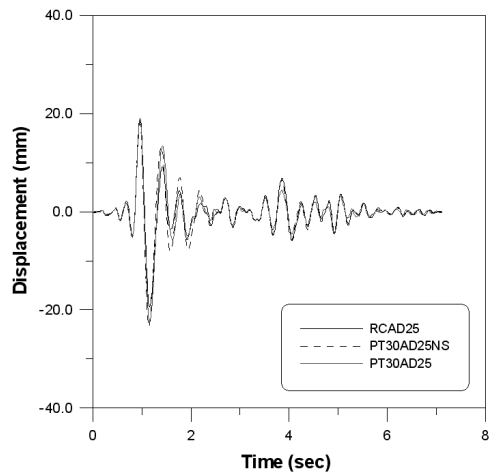
그림 14~그림 22은 비선형 유한요소해석 결과에 의한 변위와 하중의 이력관계를 관련 예제별로 비교하여 나타내고 있으며 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각구조의 지진하중에 대한 전체적인 응답특성을 전반적으로 정확하게 나타내고 있음을 알 수 있다.

관련 예제별로 분석해보면 Series I(RCAD25, PT30AD25NS, PT30AD25)의 해석결과는 개발된 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각이 기존 현장타설 철근콘크리트 교각 및 프리스트레스트 콘크리트 교각과 변위와 하중의 주기 및 전체적인 응답특성이 유사함을 알 수 있다.

Series II(PT10AD25, PT30AD25, PT50AD25)와 Series III(PT10AD50, PT30AD50, PT50AD50)의 경우 초기프리스트레스와 형상비에 따른 변위와 하중의 크기 등 지진응답

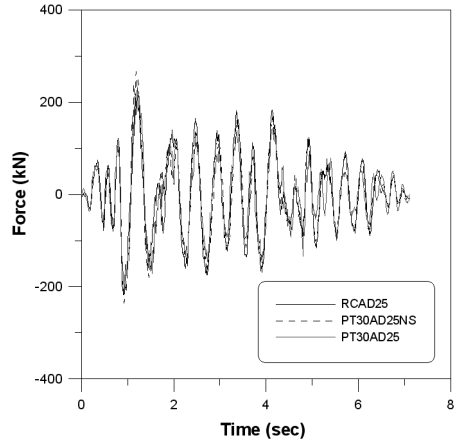
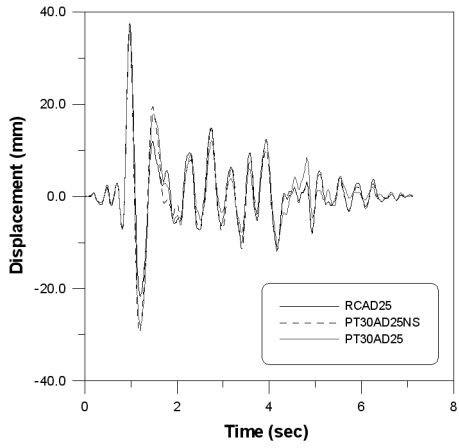


〈그림 14〉 Series I의 지진응답 (0.154g)

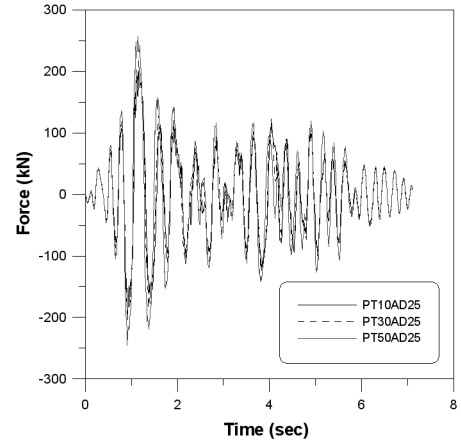
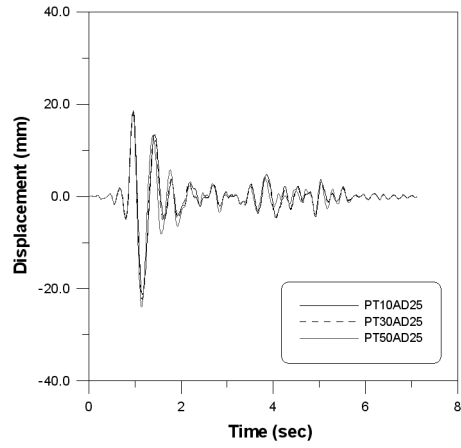


〈그림 15〉 Series I의 지진응답 (0.5g)

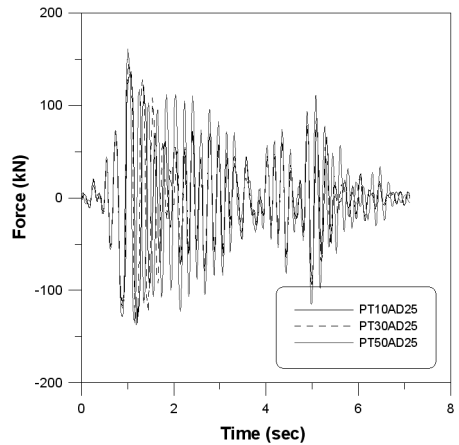
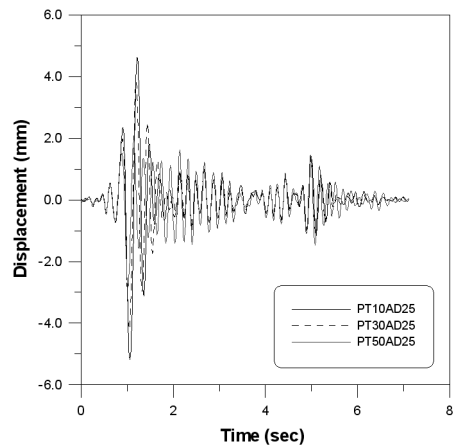




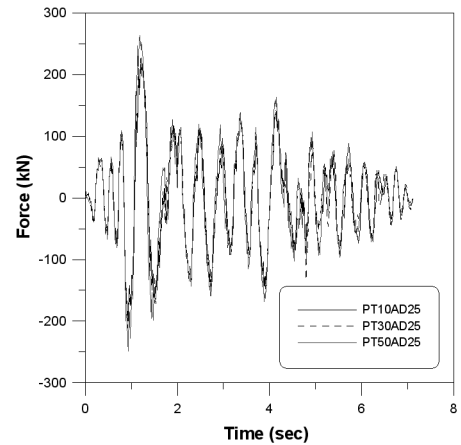
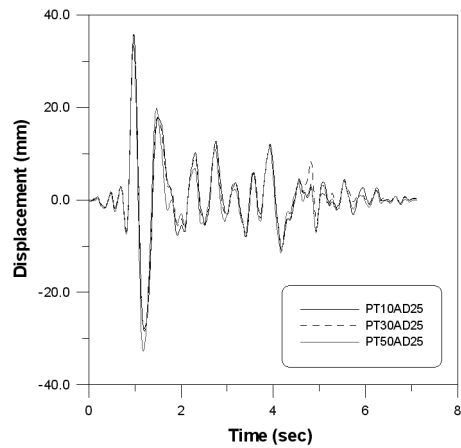
〈그림 16〉 Series I의 지진응답 (0.9g)



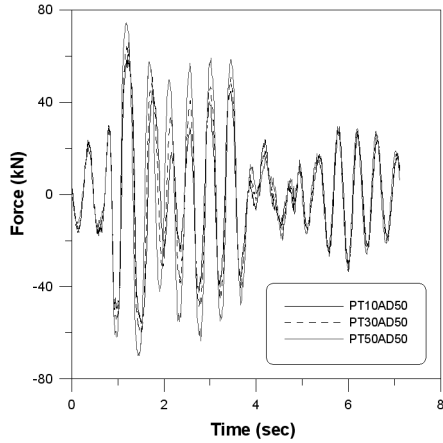
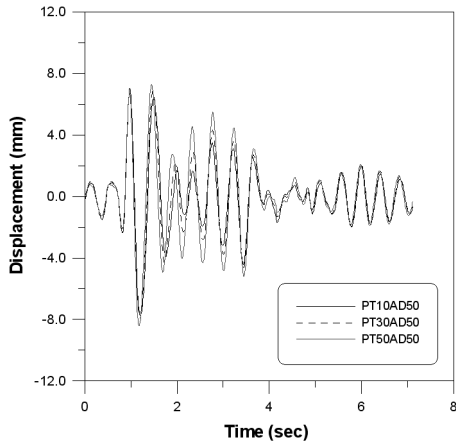
〈그림 18〉 Series II의 지진응답 (0.5g)



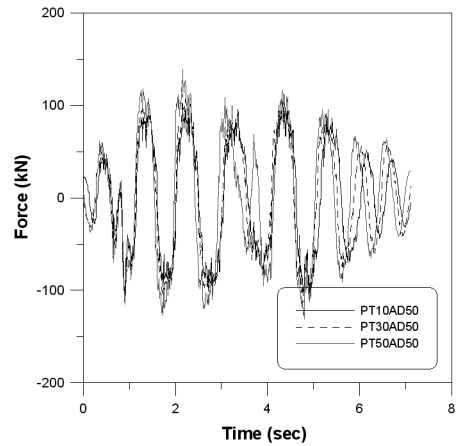
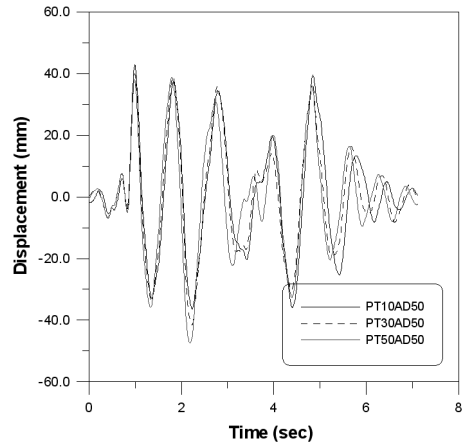
〈그림 17〉 Series II의 지진응답 (0.154g)



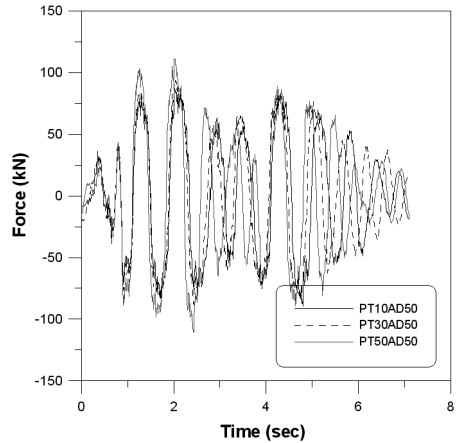
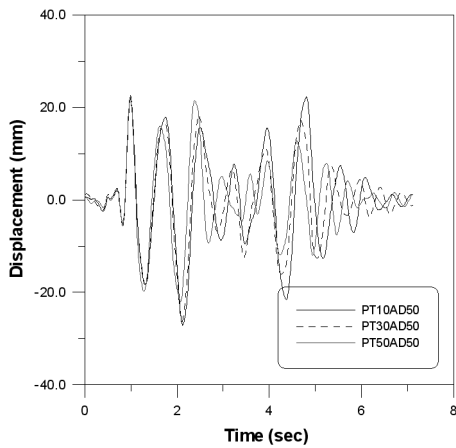
〈그림 19〉 Series II의 지진응답 (0.9g)



〈그림 20〉 Series III의 지진응답 (0.154g)



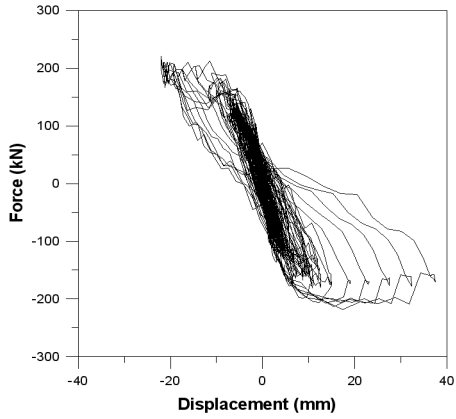
〈그림 22〉 Series III의 지진응답 (0.9g)



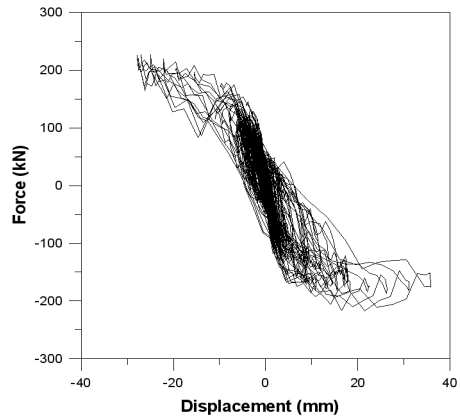
〈그림 21〉 Series III의 지진응답 (0.5g)

특성을 잘 나타내고 있다. 특히 초기프리스트레스의 증가에 따른 변위 진폭의 감소와 하중 진폭의 증가 등의 비선형 이력특성을 비교적 잘 표현하고 있다.

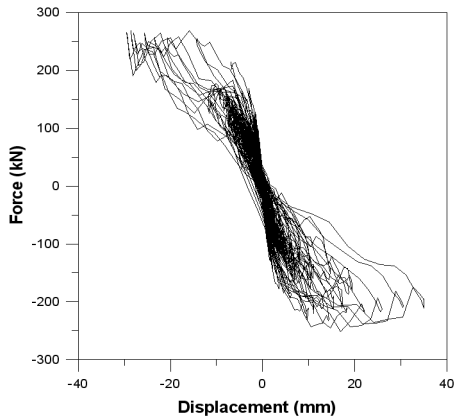
그림 23~그림 31은 각 예제의 복원력 해석결과를 나타내고 있으며 철근콘크리트 교각의 경우에는 주철근의 항복 이후에 잔류변형이 크게 발생하였으나 프리스트레스트 콘크리트 교각과 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 경우에는 변위가 증가하더라도 잔류변형의 크기가 철근콘크리트 교각의 경우에 비해 작게 나타나고 있다. 이를 통해 개발된 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 지진하중에 대한 복원능력이 상당히 유용할 수 있음을 알 수 있다. 0.154g 가진단계의 예를 보면 철근콘크리트 교각(RCAD25)의 잔류변위는 0.020 mm, 프리스트레스트 콘크리트 교각(PT30AD25NS)의 잔류변위는 0.007mm, 그리고 개발된 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각중 하나인 PT30AD25의 잔류변위는 0.017mm를 나타내고 있다. 이와 같이 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각 시스템에서 포스트텐션 방식을 사용함으로써 잔류변위가 감소하는 효과를 이용하면 내진성능 향상에 이용할 수 있을 것이다. 다만 동일한 drift ratio에서 철근콘크리트 교각에 비해 구조물의 에너지 소산능력을 감소시키는 거동특



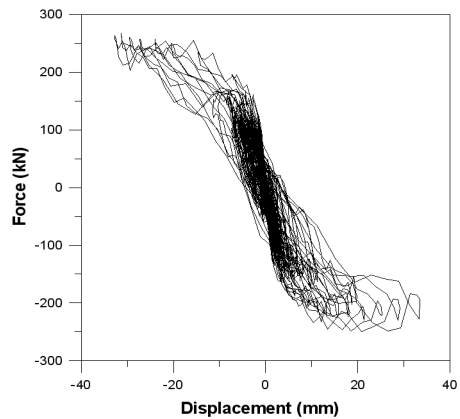
〈그림 23〉 RCAD25 교각의 복원력



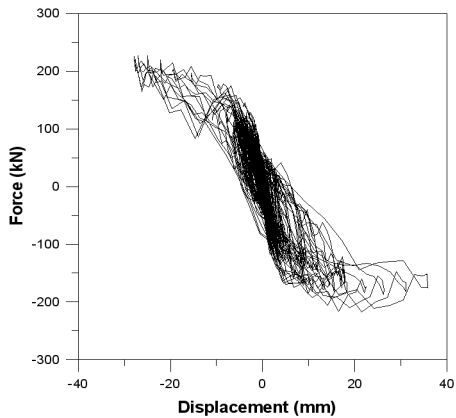
〈그림 27〉 PT30AD25 교각의 복원력



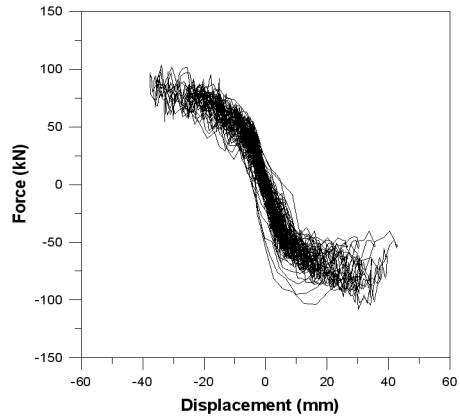
〈그림 24〉 PT30AD25NS 교각의 복원력



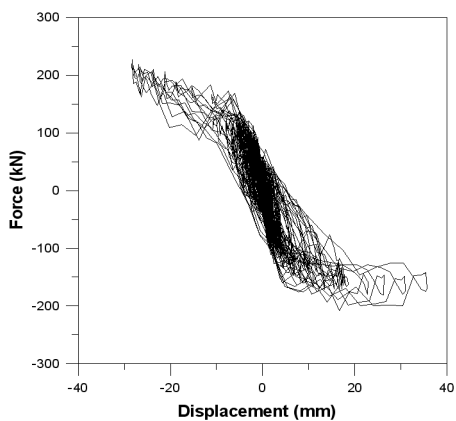
〈그림 28〉 PT50AD25 교각의 복원력



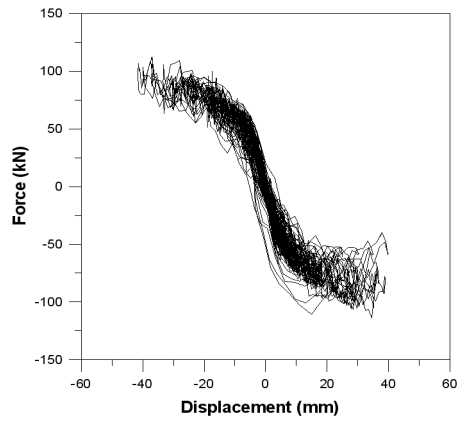
〈그림 25〉 PT30AD25 교각의 복원력



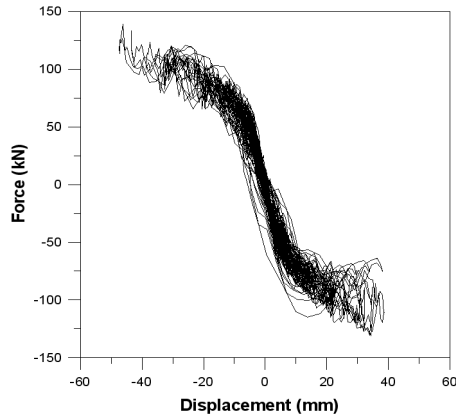
〈그림 29〉 PT10AD50 교각의 복원력



〈그림 26〉 PT10AD25 교각의 복원력



〈그림 30〉 PT30AD50 교각의 복원력



〈그림 31〉 PT50AD50 교각의 복원력

성을 보이고 있어 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 지진거동과 내진성능평가를 위한 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 비선형 유한요소해석 프로그램을 사용하여, 준정적 실험으로 검증된 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각 실험체를 수치예제로 지진해석을 수행하였다. 비교·검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

1. 제안한 해석기법과 모델은 준정적 실험의 연구결과<sup>(5),(6)</sup> 최대하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수가 0.93과 0.09로서 전반적으로 실험결과를 잘 평가하고 있음이 확인되었으며, 또한 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 전반적인 동적 거동특성을 바르게 표현하고 있음이 입증되었다.
2. 지진하중의 지속시간 및 크기, 질량의 크기, 그리고 감쇠 효과 등을 고려하여 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각 시스템의 지진응답을 비교적 정확하게 예측하였다.
3. 지진하중을 받는 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 초기프리스트레스와 형상비에 따른 응답특성 및 지진손상을 제대로 평가함으로써 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각구조의 내진성능평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.
4. 교각 구조물의 동적 특성과 지진동의 동적 특성을 고려하여 내진설계에 반영시킴으로써, 유사시 피해를 최소화시킬 수 있을 것으로 기대되며 성능기반 내진설계개념에 접목하여 비선형 유한요소해석을 이용한 합리적이고 경제성 있는 차세대 내진설계법의 개발 등에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고 문헌

1. Arai, T., Hishiki, Y., Suda, K., Yamamoto, T., Takizawa, S., and Onabe T., "Development of a New Precast Segmental PC Pier," *KaTRI Annual Report*, Vol. 48, KAJIMA Corporation, Japan, 2000 (in Japanese).
2. Billington, S. L. and Yoon, J. K., "Cyclic Response of Unbonded Posttensioned Precast Columns with Ductile Fiber-Reinforced Concrete," *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 9, No. 4, 2004, pp. 353-363.
3. Chou, C. C. and Chen, Y. C., "Cyclic Tests of Post-Tensioned Precast CFT Segmental Bridge Columns with Unbonded Strands," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 35, 2006, pp. 159-175.
4. Wang, J. C., Ou, Y. C., Chang, K. C., and Lee, G. C., "Large-scale Seismic Tests of Tall Concrete Bridge Columns with Precast Segmental Construction," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 37, 2008, pp. 1449-1465.
5. 김태훈, 김영진, 김성운, 신현목, "전단저항 연결체를 갖는 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 성능평가," 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제28권, 4A호, 2008, pp. 591-601.
6. 김태훈, 박세진, 김영진, 신현목, "P-delta 영향을 고려한 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 성능평가," 한국지진공학회 논문집, 한국지진공학회, 제12권, 4호, 2008, pp. 45-54.
7. 김태훈, 박창영, 정영수, 신현목, "진동대 실험을 통한 철근크리트 교각의 지진거동에 관한 해석적 연구," 한국지진공학회 논문집, 제11권, 제5호, 2007, pp. 49-59.
8. Phan, V. T., "Near Fault (Near Field) Ground Motion Effects on Reinforced Concrete Bridge Columns," Thesis, University of Nevada, Reno, August, 2005.
9. 김정환, 김재관, "안정대륙권역의 중규모지진에 의한 근단층 지반운동의 모델링," 한국지진공학회 논문집, 한국지진공학회, 제10권, 3호, 2006, pp. 101-111.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Kim, T. H., Park, J. G., Kim, Y. J., and Shin, H. M. "A Computational Platform for Seismic Performance Assessment of Reinforced Concrete Bridge Piers with

- Unbonded Reinforcing or Prestressing Bars,” *Computers & Concrete*, Vol. 5, No. 2, 2008, pp. 135-154.
14. 김태훈, 김영진, 진병무, 신현목, “Numerical Study on the Joints between Precast Post-Tensioned Segments,” 한국콘크리트학회논문집, 한국콘크리트학회, 제19권, 1E호, 2007, pp. 3-9.
  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. Sun, Y.-P., and Sakino, K., “A Comprehensive Stress-Strain Model for High Strength Concrete Confined by Circular Transverse Reinforcement,” *The 6th ASCCS International Conference on Steel-Concrete Composite Structures*, University of Southern California, 2000, pp. 1067-1074.
  18. 정영수, 박창영, 홍현기, 박지호, 심창수, “주철근 겹침이음된 RC 교각의 근단층지반운동에 대한 진동대 응답과 분석,” 한국콘크리트학회 논문집, 한국콘크리트학회, 제20권, 4호, 2008, pp. 451-458.
  19. 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.
  20. Hughes, T. J. R., *The Finite Element Method*, Prentice-Hall, 1987.

