

중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 성능평가

Performance Assessment of Hollow Precast Segmental PSC Bridge Columns

김태훈¹⁾ · 박영기²⁾ · 김영진³⁾ · 신현목⁴⁾

Kim, Tae Hoon · Park, Young Ky · Kim, Young Jin · Shin, Hyun Mock

국문 요약 >> 이 연구의 목적은 중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 성능을 파악하는데 있다. 제안된 중공 프리캐스트 교각 시스템은 현장에서의 작업을 줄이고 공사기간의 단축을 가져올 수 있다. 공사기간의 단축은 교통차단이나 교통우회가 필요한 공사의 안전성과 경제성에 직결된다. 2개의 중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각 실험체에 일정 축하중 하에서 횡방향 반복하중을 가하는 준정적 실험을 수행하였다. 사용된 프로그램은 철근콘크리트 구조물의 해석을 위한 RCAHEST이다. 제안된 해석기법은 조사된 실험체에 대하여 하중단계에 따라 성능을 비교적 정확하게 예측하였다.

주요어 중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각, 성능, 공사기간, 준정적 실험, 하중단계

ABSTRACT >> The purpose of this study was to investigate the performance of hollow precast segmental PSC bridge columns. The proposed system can reduce work at a construction site and makes construction periods shorter. Shortened construction times, in turn, lead to important safety and economic advantages when traffic disruption or rerouting is necessary. Two hollow precast segmental PSC bridge columns were tested under a constant axial load and a quasistatic, cyclically reversed horizontal load. A computer program, RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology), for the analysis of reinforced concrete structures, was used. The proposed numerical method gives a realistic prediction of performance throughout the loading cycles for several test specimens investigated.

Key words Hollow precast segmental PSC bridge columns, Performance, Construction periods, Quasistatic, Loading cycles

1. 서론

프리캐스트 세그먼트 PSC 교각은 여러 개의 교각 세그먼트를 공장에서 제작한 후 현장에서 조립하여 프리스트레스 힘을 도입하는 교각 시스템으로서 여러 가지 복합적인 요인으로 공법의 장점이 부각되어 최근 선진 각국에서 실용화를 위한 연구가 진행되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 또한 교량건설에서 전체 공기와 공사비 면에서 큰 비중을 차지하는 하부구조의 새로운 시스템에 관한 연구로서 조립식 기초부에 대한 연구도 시도되고 있다.

이 연구는 국내 환경에 맞는 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각 시스템을 개발하기 위한 일련의 연구로서 전단저항 연결체를 갖는 프리캐스트 세그먼트 교각⁽⁴⁾ 및 조립식 기초부를 갖는 프리캐스트 세그먼트 교각^{(5),(6)}과 연계된다.

기존에 개발된 전단저항 연결체를 갖는 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각은 분절된 형식의 세그먼트에 강재덕트를 삽입하여 제작하고 이를 이용하여 모든 세그먼트를 거치한다. 이후 정착부의 특성에 따라 미리 삽입된 또는 후에 삽입되는 PS 강연선에 긴장력을 도입하고 모르타르를 충전하여 프리캐스트 교각을 일체화 하는 방식을 따르고 있다. 적용된 방식에서 프리캐스트 세그먼트의 접합부에서 작용하는 전단력은 연속된 강재덕트가 저항하고, 접합부에서의 휨모멘트에 대해서는 PS 강연선이 저항하는 메커니즘을 갖고 있다(그림 1).

이 연구의 목적은 기존 연구에서 개발된 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각 시스템⁽⁴⁻⁶⁾의 경제성과 시공성 등을 고려하여 중공단면을 도입한 교각 실험체에 대한 실험적, 해석적

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

²⁾ 성균관대학교 사회환경시스템공학과 석사과정, 공학사

³⁾ 대우건설 기술연구원 전문위원, 공학박사

⁴⁾ 정회원·성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2010년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

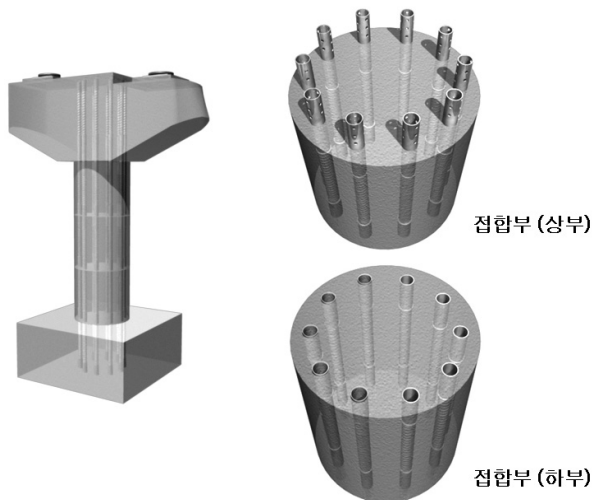
(논문접수일 : 2009. 8. 28 / 수정일 : 2009. 12. 23 / 게재확정일 : 2009. 12. 23)

연구를 통해 중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각 시스템의 성능을 평가하는데 있다.

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 억제 등을 위하여 경제적 및 구조적인 측면에서 고속도로 교량 및 기타 교량에서 널리 설계·시공되어지고 있으며 국내외적으로 중공단면 교각에 대한 연구가 진행되고 있다.⁽⁷⁻¹²⁾ 그러나 중공 프리캐스트 세그먼트 교각에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 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 프리캐스트 세그먼트 교각을 등가환산단면을 이용하여 2차원 평면요소로 해석이 가능하도록 하고 비선형 유한요소해석을 실시하여 비탄성 거동특성 및 파괴메커니즘을 파악하였다. 그리고 2축 응력 상태에 대한 직교 이방성 재료모델에 의해서 균열이 발생한 철근콘크리트 요소의 거동특성을 표현하고, 이를 유한요소법을 사용하여 확장한 기존의 검증된 프로그램⁽¹³⁻¹⁵⁾에 긴장재의 영향을 고려할 수 있는 부착 또는 비부착 텐던요소⁽¹⁶⁾와 세그먼트 접합부의 거동특성을 모사할 수 있도록 개발한 접합요소⁽¹⁷⁾를 이식하여 사용하였다.



〈그림 1〉 전단저항 연결체를 갖는 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각

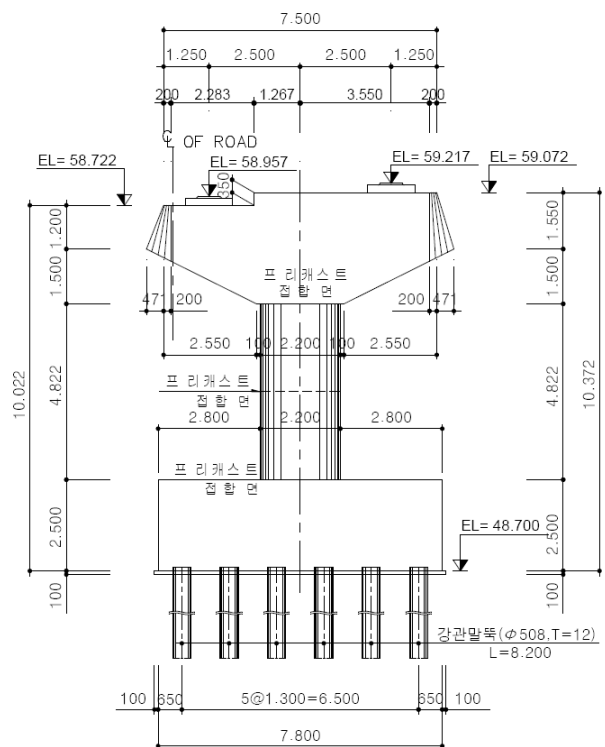
2. 중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 성능실험

2.1 실험체 설계

중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 성능을 평가하기 위하여 그림 2와 같은 실제 중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각을 대상으로 1/2.75로 축소하여 모델을 설계하였다. 중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 설계는 휨에 대한 저항과 전단에 대한 저항으로 나누어 설계하였다. 이때 설계는 현행 도로교설계기준⁽¹⁸⁾과 콘크리트구조설계기준⁽¹⁹⁾을 근거로 하였으며 기둥의 강제량 검토는 AASHTO LRFD 5.7.4.2⁽²⁰⁾를 따랐다.

수평력에 의해 휨모멘트가 발생할 경우 인장에 대해서는 실험체 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 압축응력, 즉 축력과 프리스트레스에 의한 압축응력 합에 따라 변위연성도가 급감하는 범위를 고려하여 긴장응력을 긴장재 설계기준항복강도의 45% 수준으로 긴장하였다. 이로 인해 교각에 도입되는 축력의 크기는 교각 단면 강도의 13%에 해당한다. 또한, 전단에 대해서는 세그먼트 사이를 연결하는 강제덕트가 저항하도록 하였다.

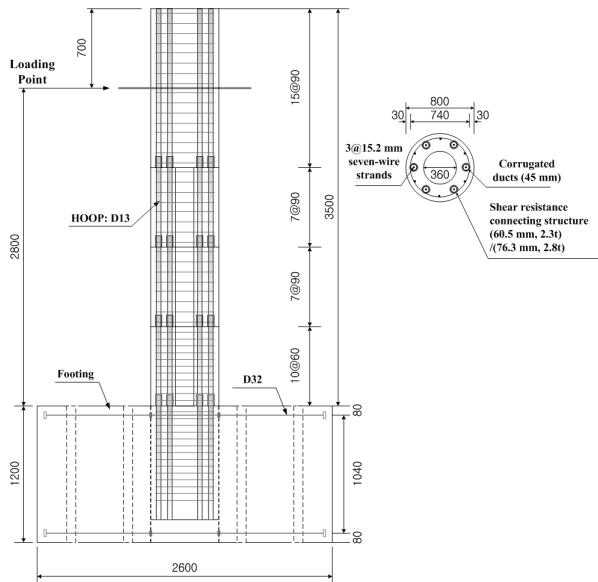
모델의 직경은 800mm이고 교각의 재하점까지의 높이는



〈그림 2〉 Prototype의 형상 (단위: m)

〈표 1〉 실험체의 자원

구 분		Prototype	Model
단면 직경(m)		외경 2.2 내경 1.0	외경 0.80 내경 0.36
교각 높이(m)		7.522	2.8
형상비		3.4	3.5
콘크리트	기초부 설계기준압축강도(MPa) 실제강도(MPa)	40 -	40 48.1
	구체부 설계기준압축강도(MPa) 실제강도(MPa)	40 -	40 48.1
PS 강재	직경	7연선 15.2mm	7연선 15.2mm
	설계기준항복강도(MPa) 실제강도(MPa)	1,860 -	1,860 1,968.2
	유효긴장응력(MPa)	842.3	842.3
주철근	직경	D16	D10
	철근비(%)	0.2 (최소량)	0.2 (최소량)
	설계기준항복강도(MPa) 실제강도(MPa)	400 -	400 544.6
횡철근	직경	D22	D13
	철근체적비 (%)	1.2	1.2
	설계기준항복강도(MPa) 실제강도(MPa)	400 -	400 476.3
기초부 철근	직경	D32	D32
	설계기준항복강도(MPa) 실제강도(MPa)	400 -	400 463.6
피복두께(mm)		80	30
축력		$0.075 A_g f_{ck}$	



〈그림 3〉 중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각 실험체의 형상 (단위: mm)

2,800mm로 형상비는 3.5이며 상사법칙에 의하여 설계된 교각실험체의 자원을 표 1에 나타내었다. 실험체의 설계는 시공성을 고려하였으며 부재의 제작과정을 통해서 시공오차의 원인이 될 수 있는 항목을 면밀히 검토하여 반영하였

다. 실험체는 성능검증을 위하여 그림 3과 같이 동일한 중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각 2기로 구성된다.

2.2 실험체 제작 및 실험방법

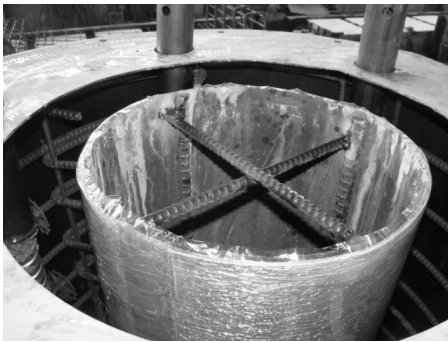
그림 4는 중공 프리캐스트 세그먼트 교각 실험체의 제작 과정을 나타내고 있다. 그림 4(a)는 프리캐스트 기초부재를 거치하고 커플러에 헤드 바를 연결한 후 나머지 기초부 철근을 배근하여 조립한 모습이다. 그림 4(b)는 콘크리트를 타설하여 완성된 조립식 기초부의 모습이다. 그림 4(c)는 구체부 세그먼트 거푸집의 모습이며 전단에 대한 변형과 횡구속 능력에 대한 분석을 위하여 계측용 게이지를 부착하였다. 그림 4(d)는 강재거푸집을 이용하여 세그먼트를 제작한 모습이다. 그림 4(e)는 세그먼트간의 용이한 접합을 위하여 매치캐스팅을 적용한 모습이다. 그림 4(f)는 매치캐스팅으로 제작된 가력부 세그먼트의 모습이다. 그림 4(g)는 천정 크레인을 이용하여 세그먼트를 이동하는 모습이다. 그림 4(h)는 구체부 세그먼트를 조립하는 모습이며 연직도를 맞춘 상태에서 전단저항 연결체인 강재덕트를 삽입하여 완성한다. 그리고 강재 지압판을 거치하고 강연선의 긴장작업과 모르타



(a) 프리캐스트 기초부재 조립



(b) 조립식 기초부 전경



(c) 구체부 세그먼트 거푸집



(d) 구체부 세그먼트 전경



(e) 구체부 매치캐스팅



(f) 가력부 세그먼트 전경



(g) 세그먼트 이동



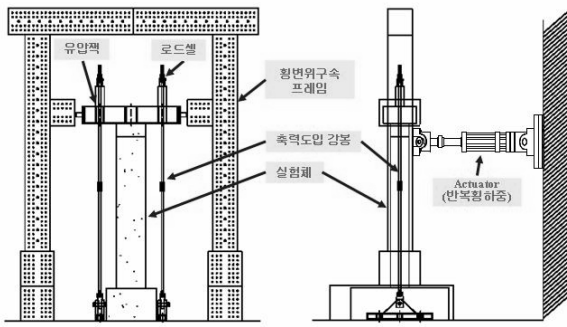
(h) 세그먼트 조립

〈그림 4〉 중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각 실험체의 제작

르 충전작업을 수행하여 최종적으로 중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각 실험체를 완성한다.

중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 성능을 평가하기 위하여 준정적(Quasi-Static) 실험을 수행하였다. 수평력은

그림 5와 같이 최대변위 $\pm 375\text{mm}$ 인 2,600kN 유압가력기 (Actuator)를 이용하여 재하하였으며 축력은 교각단면 축강도의 7.5%를 일정하중 유지장치로 변화가 없도록 재하하였다. 변위진폭은 drift ratio $\pm 0.25\%$ 로 시작하여 $\pm 0.5\%$, $\pm 1.0\%$,

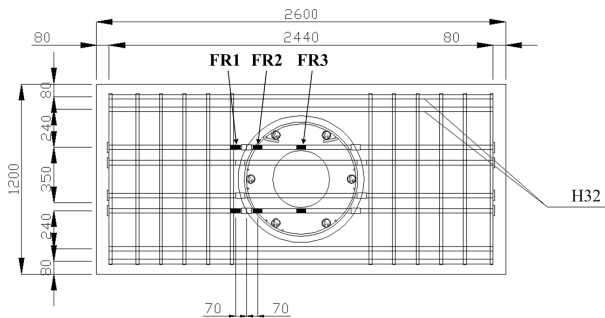


(a) Schematic of test setup



(b) Photograph of experimental setup

〈그림 5〉 실험체의 전경



〈그림 6〉 기초부 철근의 변형률 게이지 (단위: mm)

±1.5%, ±2.0%, ±2.5%, ±3.0%, ±3.5%, ±4.0%, ±4.5%, ±5.0%, ±6.0%, ±7.0%로 증가시켰으며, 각 단계별 2회씩 반복 재하하여 동일 변위 진폭에 대한 교각의 거동특성 차이를 살펴보았다.

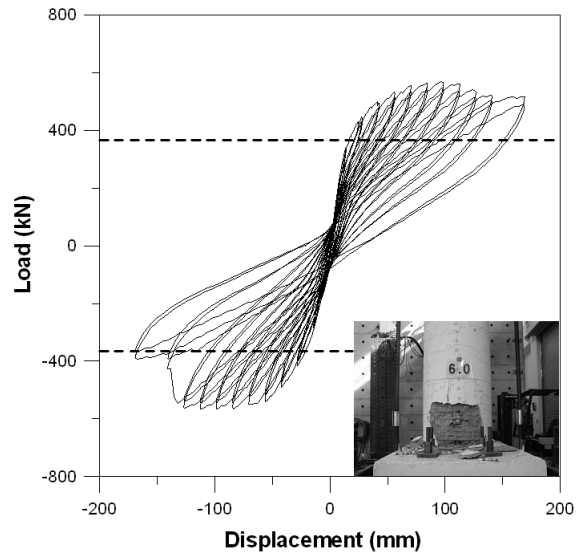
교각에서 소성힌지 구역내의 횡방향 철근과 강재덕트에 변형률 게이지를 부착하였으며 또한 조립식 기초부의 거동 특성을 확인하기 위하여 상·하면 기초부 철근에 변형률 게이지를 부착하였다(그림 6). 그리고 하중 재하점의 수평변

위와 수평하중은 가력기에 설치된 변위계와 로드셀에 의해 측정하였으며, 가력부 및 교각 중앙부의 하중 재하시 예상치 못한 기초부위의 수평변위나 들림을 변위계를 이용하여 측정하였다.

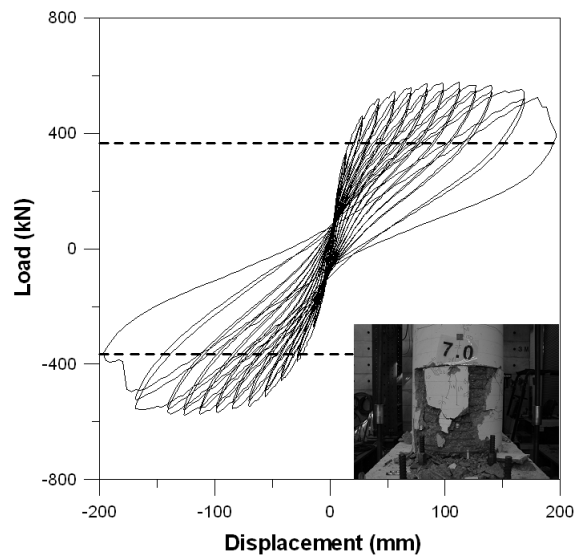
2.3 실험결과 및 분석

그림 7, 8에 실험체에 대한 하중-변위 이력곡선을 나타내었다. 또한 실험체의 공칭모멘트에 대한 설계하중과 최종 재하 단계에서의 파괴 양상을 함께 나타내었다. 하중-변위 이력곡선은 횡방향 하중 및 가력지점의 변위에 의해 표시되는데 실험체의 강도, 연성, 그리고 에너지 소산능력을 평가하는 중요한 분석 자료이다.

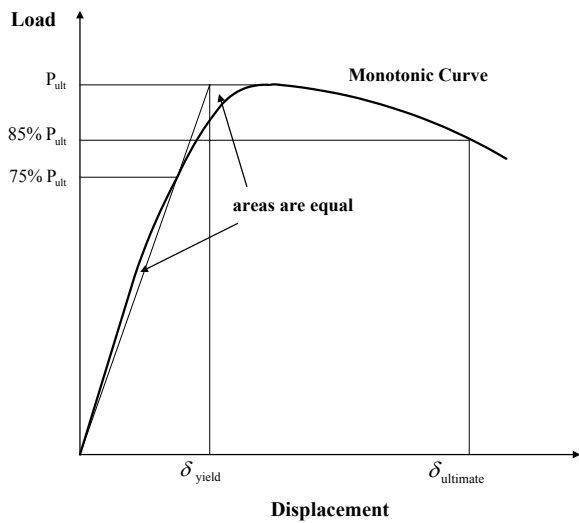
중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각 실험체[Model(1),(2)]



〈그림 7〉 실험체 Model(1)의 하중-변위 곡선



〈그림 8〉 실험체 Model(2)의 하중-변위 곡선



〈그림 9〉 교각시스템의 항복변위와 극한변위

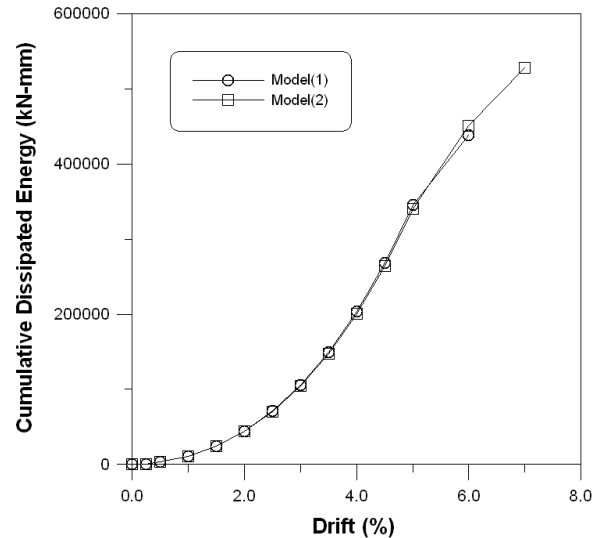
의 공칭모멘트에 대한 설계하중은 366.4 kN이며 실험값은 각각 568.1 kN과 577.0 kN이다. Model(1)의 경우 설계하중의 155% 수준까지 내력이 나타나고 있으며 Model(2)의 경우 설계하중의 157% 수준으로 충분한 내력이 발휘되고 있다.

실험에서 교각시스템의 항복변위와 극한변위는 철근콘크리트 교각의 변위연성도 평가에서 가장 널리 사용되고 있는 하중-변위곡선으로부터 결정하는 간접적인 방법⁽²¹⁾으로 구하였다(그림 9). 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 수평변위로 정의하였다.

중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 경우 PSC 구조 시스템의 특성상 RC 대응 항복변위가 철근콘크리트 교각의 경우에 비해 일반적으로 크게 평가됨에도 불구하고, 교각 실험체[Model(1),(2)]의 변위연성도는 각각 5.3과 5.8로 도로교설계기준에서 규정하고 있는 단주교각의 응답수정계수에 해당하는 요구연성도 5를 만족하고 있음이 확인되었다.

그림 10에 실험체 Model(1),(2)에 대한 누적 소산에너지를 나타내었다. 소산에너지는 하중-변위 이력곡선의 내부면적으로 정의되며 누적 소산에너지는 내부면적의 합으로 산정된다. 교각의 손상을 평가하기 위해 부재가 파괴될 때까지 흡수 또는 소산할 수 있는 능력은 내진성능을 평가하는데 중요한 요소 중 하나이다.

중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각 실험체[Model(1),(2)]의 누적 소산에너지는 drift 6.0%에서 각각 437,000 kN·mm



〈그림 10〉 실험체 Model(1),(2)의 누적 소산에너지 곡선

와 450,000 kN·mm으로 거의 유사한 에너지 소산능력을 보이고 있다. 또한 기존 연구⁽⁴⁾에서 프리캐스트 세그먼트 교각 실험체는 동일한 drift ratio에서 철근콘크리트 교각의 에너지 소산능력의 50%에 해당하지만 최종 파괴시점에서는 프리캐스트 세그먼트 교각의 에너지 소산능력이 200% 이상 커지는 것을 확인하였다.

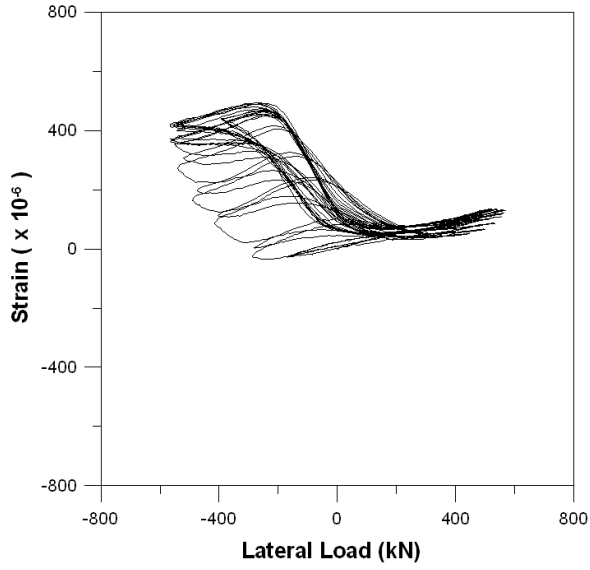
중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각 실험체에 함께 적용된 조립식 기초부 시스템의 국부적 거동특성을 분석하기 위하여 전술한 바와 같이 기초부 상하면의 철근에 각각 6개씩의 변형률 게이지를 부착하였다. 수평하중이 작용할 경우 기초부 철근은 하중의 변화에 따라서 변형률의 증가 또는 감소가 발생하고 있으며 Model(1),(2) 모두 항복변형률(2,000 microstrains) 이내에서 전반적으로 유사한 거동특성을 보이고 있음을 그림 11, 12에서 확인할 수 있다. 이때 Model(2)의 FR1 변형률은 게이지 손상으로 측정하지 못하였다.

그림 13은 중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각 실험체 [Model(1),(2)]의 하중단계별 파괴거동의 예를 보여주고 있으며 두 실험체 모두 유사한 거동특성을 나타내고 있다.

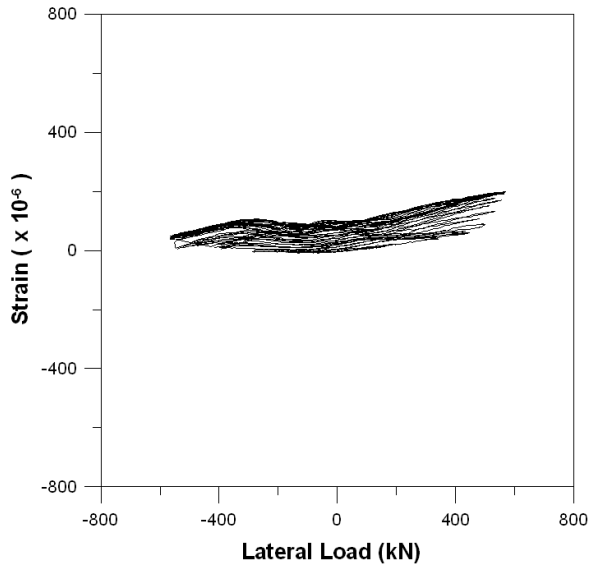
3. 비선형 유한요소해석 및 성능 평가

3.1 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAST

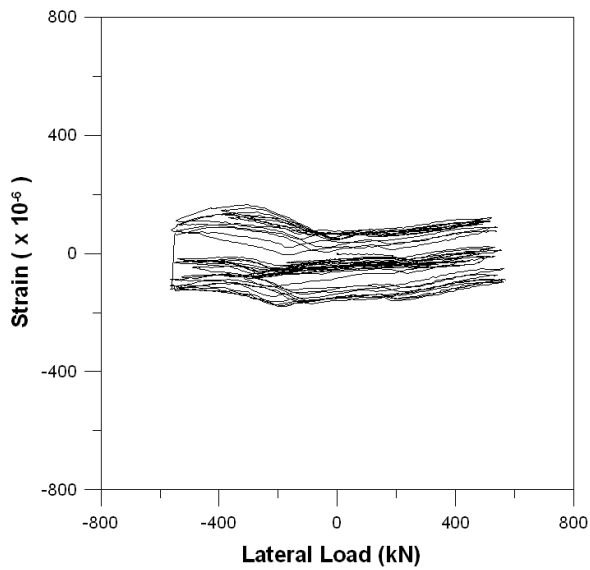
이 연구에서는 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소, 경계면요소 그리고 비부착 텐던요소 등⁽¹³⁻¹⁶⁾을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP ver. 7.2⁽²²⁾에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAST (Reinforced



(a) FR1의 변형률



(b) FR2의 변형률

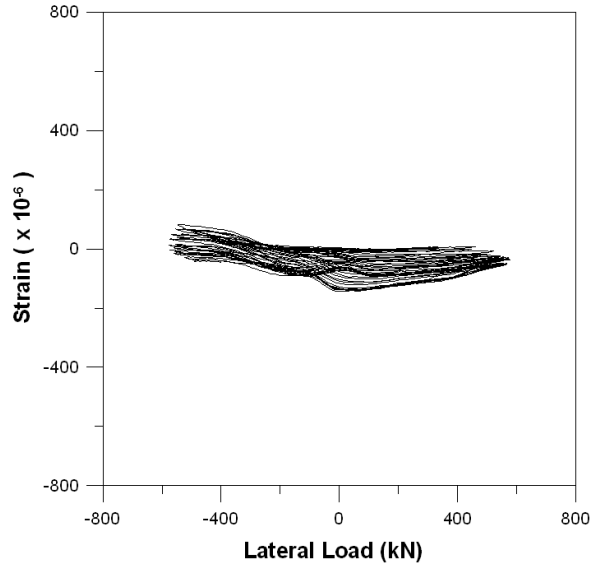


(c) FR3의 변형률

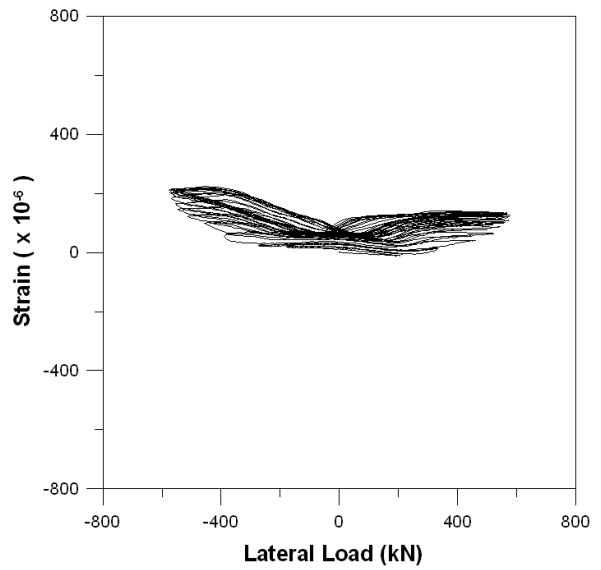
〈그림 11〉 실험체 Model(1) 기초부 철근의 변형률

게이지 손상

(a) FR1의 변형률 - 게이지 손상

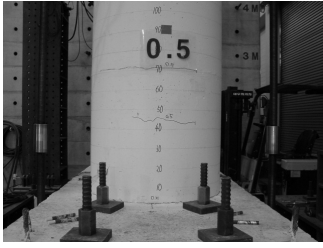
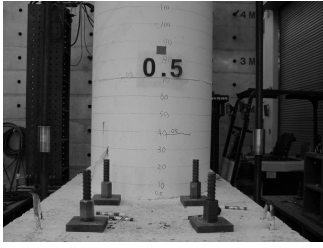
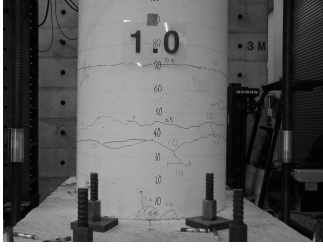

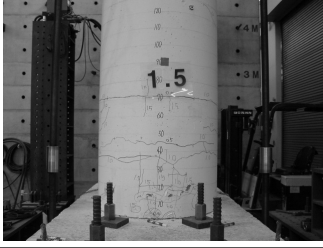
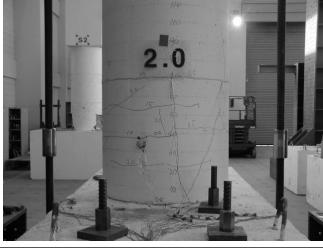







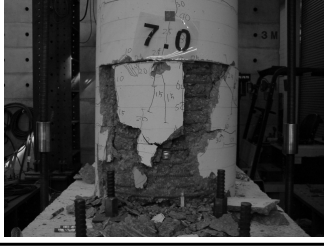


(b) FR2의 변형률



(c) FR3의 변형률

〈그림 12〉 실험체 Model(2) 기초부 철근의 변형률

파괴양상	Model(1)		Model(2)	
휨균열		Drift 0.5%		Drift 0.5%
기초 접합부 손상		Drift 1.0%		Drift 1.5%
수직 균열		Drift 1.5%		Drift 2.0%
피복 박리		Drift 2.5%		Drift 3.0%
피복 박리 진전		Drift 3.5%		Drift 4.0%
심부 콘크리트 파괴		Drift 4.5%		Drift 5.0%
PS강연선 파단		Drift 6.0%		Drift 7.0%

〈그림 13〉 하중단계별 파괴거동 비교

Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)에 세그먼트 접합부의 부착파괴를 모사할 수 있도록 개발한 접합요소⁽¹⁷⁾를 수정하여 사용하였다(그림 14). 사용된 비선형 재료모델의 특징을 간단히 요약하면 다음과 같다.

이 연구에서는 제 2 균열의 발생을 제 1 균열과 직교방향으로 발생하도록 제한하여 콘크리트의 강성이 과대평가 되는 직교 고정균열모델과 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 균열발생후에 현저하게 나타나게 된다. 이러한 재료적 비선형성에 대해서는 철근콘크리트 요소의 직교 이방성의 가정에 따라, 균열직각방향으로 콘크리트가 부담하게 되는 인장응력을 고려하기 위한 인장강성모델과 균열 방향으로의 압축강성 저하를 고려하기 위한 압축강성모델 및 균열면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달 모델을 각각 적용한다.

콘크리트 속의 철근에 대한 항복후 거동은 철근만의 특성과 함께 부착효과 등이 동시에 고려되어야 한다. 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 이러한 포락선부분에 대한 철근의 항복후 거동을 저자 등이 제안한 trilinear 모델로써 표현하였다.

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 구속되

지 않은 경우에 비해서 우수한 연성능력 및 복원력 특성을 나타낸다. 이 연구에서는 Mander 등의 제안모델과 Sun 등의 제안모델을 이용하여 개발된 천이모델⁽¹⁶⁾을 사용하였으며 콘크리트의 단면형상에 관계없이 적용할 수 있고 종방향 철근 및 구속철근의 양, 구속철근의 항복강도 및 배근형태 등을 함께 고려할 수 있도록 하였다.

텐던은 일반 철근과 달리 텐던 자체(bare bar)의 응력-변형률 관계와 부착이 고려된 텐던의 응력-변형률 관계에서 현격한 차이를 보이지 않는다. 이 연구에서는 저자 등에 의하여 제안된 trilinear 모델로써 텐던의 응력-변형률 관계를 표현하였다. 제하 및 재제하에 대해서는 포락선부분은 단조 증가 하중에 대한 곡선을 사용하였고 제하부분의 거동은 탄성으로, 그리고 연화부분을 함께 고려하였다.

세그먼트 접합부의 부착파괴 기준으로는 Coulomb 파괴 기준을 사용하였고 접합요소의 전단응력 모델은 접촉면 밀도함수에 근거한 전단전달모델을 수정하여 표현하였으며 최대값 이후에는 전단전달 연화계수(Softening Parameter)로써 부착파괴까지 감소하는 것으로 가정하였다.⁽¹⁷⁾ 접합요소를 사용하면 접합부에 평행한 수평방향의 전단응력과 이에 수직방향의 인장응력 또는 압축응력을 결정할 수 있다.

프리캐스트 기초부재와 후타설 기초부 사이와 같이 두께가 서로 다른 부재간의 접합부에서는 단면강성이 급변함에 따라 철근의 정착슬립(Anchorage Slip)이나 접합면의 미끄러짐, 접합면의 관입 등의 국소적인 불연속 변위가 집중하기 때문에 이를 고려하기 위해 경계면 요소(Interface Element)를 도입하였다.

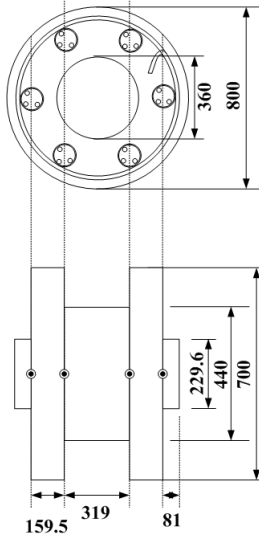
3.2 해석결과 및 분석

이 실험체들의 유한요소해석을 위해서 중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각을 등가환산단면을 이용하여 그림 15와 같이 2차원 평면요소로 해석이 가능하도록 하였다. 등가환산단면은 중공 프리캐스트 세그먼트 교각의 실제거동과 유사하도록 PS 강재와 콘크리트의 단면적, 하중재하 방향의 단면 2차 모멘트를 같게 하여 유도하였다.

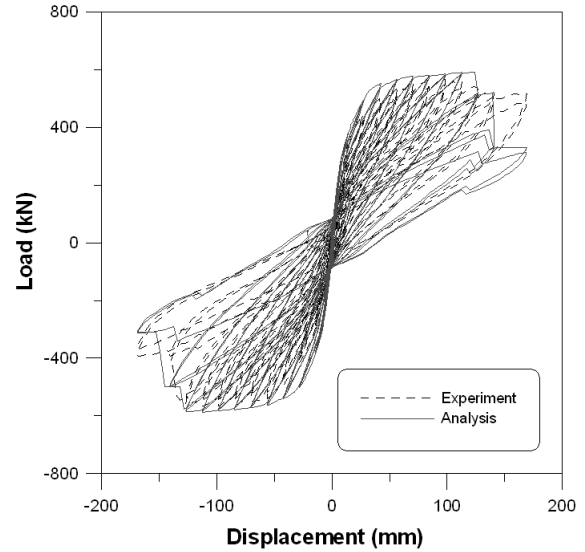
그림 16은 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소 분할한 예이며 3점 가우스 적분을 적용한 8절점 등매개 요소를 이용하였다. 그림 16에서 보는 것처럼 기초부와 함께 교각부에 4개의 세그먼트로 구성되어 있으며 총 102개의 요소로 분할하였다. 8절점 철근콘크리트 평면응력 요소가 72개, 교각과 기초사이 및 세그먼트 사이에 6절점 프리캐스트 접합면 요소 20개, 프리캐스트 기초부재와 후타설 기초부 사이에 6절점 경계면 요소 6개, 그리고 부착 텐던의 거동

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

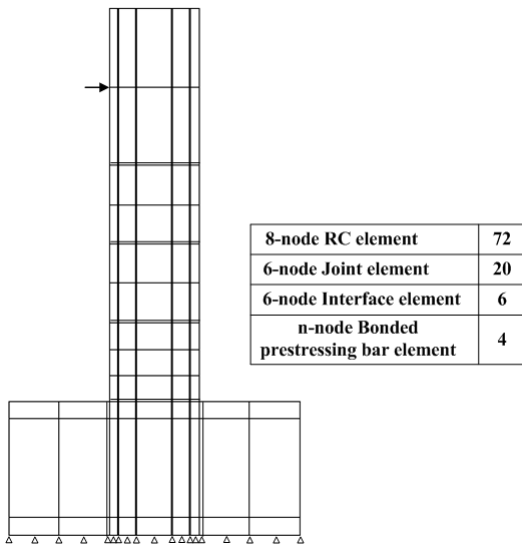
〈그림 14〉 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST



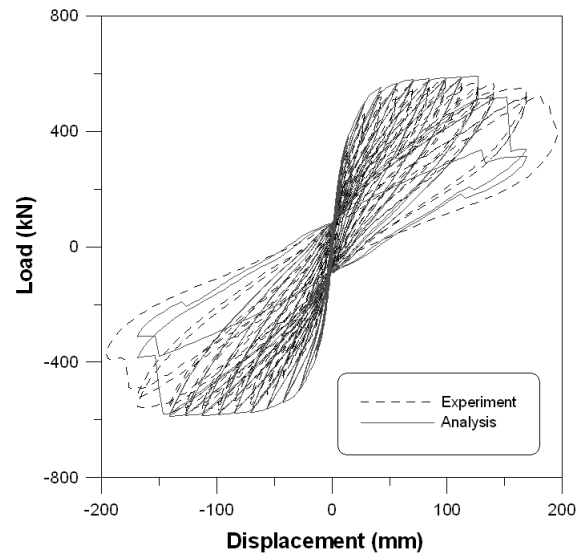
〈그림 15〉 등가환산단면 (단위: mm)



〈그림 17〉 실험체 Model(1)의 하중-변위 이력곡선



〈그림 16〉 유한요소모델



〈그림 18〉 실험체 Model(2)의 하중-변위 이력곡선

을 고려하기 위한 다절점 부착 텐던요소 4개가 사용되었다.

이 연구에서 세그먼트 접합부의 거동특성을 지배하는 내부마찰각과 점착력은 기존의 연구결과⁽²³⁾와 사용된 에폭시의 재료물성을 근거로 각각 45°와 5.88 MPa로 정하였다. 그리고 사용된 유한요소망과 등가환산단면은 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.

그림 17, 18은 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계를 나타내고 있으며 해석결과가 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 이때 해석은 실험결과로부터 얻은 변위에 의해 제어하여 수행

〈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)		
Model(1)	568.1	5.3	591.9	5.0	0.96	1.06
Model(2)	577.0	5.8	592.1	5.5	0.97	1.05
Mean					0.97	1.05

하였다. 하중-변위 이력곡선은 횡방향 하중 및 가력지점의 변위에 의해 표시되는데 실험체의 강도, 연성, 그리고 에너지 소산능력을 평가하는 중요한 분석 자료이다. 이 연구의 해석에 의한 최대하중과 변위연성도를 실험과 함께 비교하여 표 2에 정리하였다.

유한요소해석 결과에서 최대하중에 대한 실험값/해석값의 평균은 0.97로서 전반적으로 실험결과를 정확하게 평가하고 있으며 교각 실험체들의 비탄성 거동특성을 잘 평가하고 있는 것으로 판단된다. 그리고 변위연성도에 대한 실험값/해석값의 평균은 1.05로서, 변위연성도의 평균값은 실험결과 보다 다소 작게 평가하고 있으나 교각 실험체들의 내진성능을 포함한 거동특성을 비교적 정확하게 평가하고 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

이 연구에서는 개발된 중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 거동특성과 성능평가를 위하여 실험 및 해석적 연구가 수행되었으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실험과 해석적 연구로부터 개발된 중공 프리캐스트 세그먼트 교각 실험체는 설계된 값을 잘 반영하고 있으며 충분한 소요성능을 갖고 있는 것으로 확인되었다.
2. 이 연구에서 제안한 비선형 유한요소해석 결과 최대하중에 대한 실험값/해석값의 평균은 0.97이고 변위연성도에 대한 실험값/해석값의 평균은 1.05로서, 전반적으로 실험결과를 잘 평가하고 있음이 확인되었다. 이를 통해 제안한 해석기법과 모델은 중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각구조의 전반적인 거동특성을 바르게 표현하고 있음이 입증되었으며 향후 프리캐스트 세그먼트 교각구조의 정밀해석이 가능할 것으로 판단된다.
3. 이 연구에서는 조립식 기초부를 갖는 중공 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각 시스템을 개발하였으며, 더 나아가 개발기술의 적용과 성능향상을 통하여 차세대 교각시스템인 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 설계 및 시공기법을 완성할 수 있을 것으로 기대된다.
4. 중공 프리캐스트 세그먼트 교각의 경우 단면형상, 중공비, 축력비 그리고 접합부의 제원특성에 따라 다양한 거동을 나타내게 되므로, 향후 실험적 매개변수 연구를 통하여 거동특성을 심도 있게 규명할 필요가 있다.

참고 문헌

1. Billington, S. L., Barnes, R. W., and Breen, J. E., "Alternative Substructure Systems for Standard Highway Bridges," *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 6, No. 2, 87-94, 2001.
2. 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, 159-175, 2006.

3. 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, 1449-1465, 2008.
4. 김태훈, 김영진, 김성운, 신현목, "전단저항 연결체를 갖는 프리캐스트 세그먼트 교각의 성능평가," 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제28권, 4A호, 591-601, 2008.
5. 김태훈, 박세진, 김영진, "조립식 기초부를 갖는 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각. I. 시스템 개발 및 검증," 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제29권, 4A호, 395-405, 2009.
6. 김태훈, 김영진, 이재훈, 신현목, "조립식 기초부를 갖는 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각. II. 실험 및 해석," 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제29권, 4A호, 407-419, 2009.
7. 정영수, 한기훈, 이강균, 이대형, "원형중공 콘크리트 교각의 내진성능에 대한 준정적 실험," 한국지진공학회 논문집, 제3권, 2호, 41-53, 1999.
8. 김재관, 김익현, 임현우, 이재호, "수평 반복하중을 받는 비내진상세 RC 중공구형교각의 거동특성," 한국콘크리트학회 논문집, 제15권, 2호, 263-272, 2003.
9. 김익현, 이종석, 이운복, 김원섭, 선창호, "50% 주철근 겹침이음을 갖는 중실 및 중공 사각단면 교각의 거동특성," 한국지진공학회논문집, 제7권, 5호, 25-35, 2003.
10. Yeh, Y.-K., Mo, Y. L., and Yang, Y., "Seismic Performance of Hollow Circular Bridge Piers," *ACI Structural Journal*, Vol. 98, No. 6, pp. 862-871, 2001.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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*, V. 34, No. 7, 843-855, 2007.
16. 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, 135-154, 2008.
17. 김태훈, 김영진, 진병무, 신현목, “Numerical Study on the Joints between Precast Post-Tensioned Segments,” 한국콘크리트학회논문집, 한국콘크리트학회, 제19권, 1E호, 3-9, 2007.
 18. 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2005.
 19. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준, 2007.
 20. AASHTO, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, 3rd Edition, 2004.
 21. 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.
 22. Taylor, R. L., FEAP - A Finite Element Analysis Program, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, 2000.
 23. 김태훈, 진병무, 김영진, 신현목, “조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 비탄성거동에 관한 해석적 연구,” 한국지진공학회논문집, 한국지진공학회, 제9권, 5호, 29-40, 2005.