

P-delta 영향을 고려한 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 성능평가

Performance Assessment of Precast Segmental PSC Bridge Columns Considering P-delta effects

김태훈¹⁾ · 박세진²⁾ · 김영진³⁾ · 신현목⁴⁾

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

국문 요약 >> 이 연구의 목적은 P-delta 영향을 고려한 프리캐스트 세그먼트 PSC교각의 성능을 파악하는데 있다. 개발된 프리캐스트 세그먼트 PSC교각 실험체에 일정 축하중 하에서 횡방향 반복하중을 가하는 준정적 실험을 수행하였다. 사용된 프로그램은 철근콘크리트 구조물의 해석을 위한 RCAHEST이다. 비교적 큰 압축하중과 함께 지진하중과 같이 큰 규모의 횡하중으로 인한 대변위 문제를 고려할 수 있도록 Total Lagrangian 정식화 기법을 사용하였다. 이 연구에서는 반복하중을 받는 프리캐스트 세그먼트 PSC교각의 실험적, 해석적 결과를 제시하였다.

주요어 P-delta 영향, 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각, 성능, 대변위 문제, Total Lagrangian 정식화

ABSTRACT >> The purpose of this study was to investigate the performance of precast segmental PSC bridge columns with regard to P-delta effects. A model of precast segmental PSC bridge columns was tested under a constant axial load and a cyclically reversed horizontal load. A computer program, RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology), was used for the analysis of reinforced concrete structures. In addition to the material nonlinear properties, an algorithm for the problem of large displacement that may result in additional deformation has been formulated using total Lagrangian formulation. This study documents the testing of precast segmental PSC bridge columns under cyclic loading, and presents conclusions based on the experimental and analytical findings.

Key words P-delta effects, precast segmental PSC bridge columns, performance, large displacement problem, total Lagrangian formulation

1. 서론

국내 교량의 교각은 대부분 현장타설 콘크리트 교각이 주종을 이루고 있으며, 공사비 면에서도 큰 비중을 차지하여 전체 교량의 경제성에 많은 영향을 미치고 있다. 이러한 하부구조의 중요성을 인식하여 최근 국내에서도 새로운 교각 시스템에 대한 연구와 개발이 이루어지고 있다.⁽¹⁾

새로운 교각 시스템에 대한 연구로서 프리캐스트 기술의 적용이 최근 들어 활발하게 이루어지고 있는데, 이러한 프

리캐스트 세그먼트 교각은 여러 개의 교각 세그먼트를 공장에서 제작한 후 현장에서 조립하여 프리스트레스 힘을 도입하는 시스템으로서 최근 선진 각국에서 실용화를 위한 연구가 진행되고 있다.⁽²⁻⁴⁾

이 연구는 국내 환경에 맞는 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각을 개발하기 위한 독자적인 연구로서 교각 구체와 기초 사이의 연결, 교각 구체와 교각 구체의 연결에서 새롭게 고안한 전단저항 연결체^{(5),(6)}와 프리스트레스 긴장재를 동시에 이용하여 개발된 구조시스템의 P-delta 영향을 고려한 성능평가를 수행하였다.

개발된 전단저항 연결체를 갖는 프리캐스트 세그먼트 교각은 그림 1과 같다. 분절된 형식의 세그먼트에 강재덕트를 삽입하여 제작하고, 모든 세그먼트를 거치한 후 강재덕트의 내부에 이보다 직경이 작은 쉬스관을 삽입한다. 이후 쉬스관에 긴장재를 삽입하고 긴장력을 도입하며 모르타르로 충

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

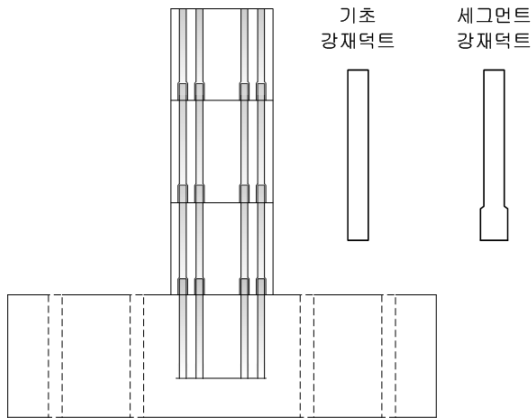
²⁾ 대우건설 기술연구원 전임연구원, 공학석사

³⁾ 대우건설 기술연구원 수석연구원, 공학박사

⁴⁾ 정희원·성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2008년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2008. 6. 2 / 수정일 : 2008. 8. 18 / 게재확정일 : 2008. 8. 18)



〈그림 1〉 개발된 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각 시스템

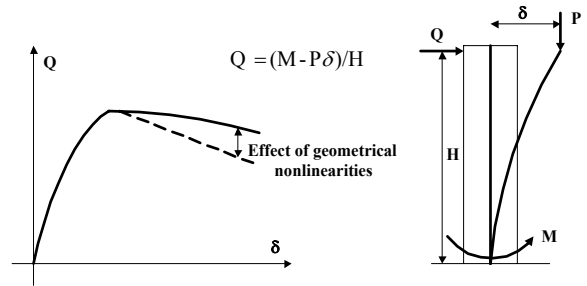
전하여 프리캐스트 교각을 일체화하는 방식을 따르고 있다. 적용된 방식에서 프리캐스트 세그먼트의 접합부에서 작용하는 전단력은 연속된 강재덕트가 저항하고, 접합부에서의 휨모멘트에 대해서는 긴장재로써 저항하는 메커니즘을 갖고 있다.

이러한 프리캐스트 세그먼트 PSC교각은 일반 철근콘크리트 교각에 비하여 초기 강성이 작고 파괴시의 변위도 크게 나타나기 때문에 P-delta 영향을 고려한 거동분석이 필요하다. 비교적 큰 압축하중과 함께 지진하중과 같이 큰 규모의 횡하중으로 인한 프리캐스트 세그먼트 교각의 P-delta 효과는 그림 2와 같이 수평 관성력에 의해 생기는 휨모멘트 외에 중력에 의한 휨모멘트를 발생시키며 초기의 유효강성이 감소되고 항복 후의 강성이 음이 되는 등 수평하중-수평변위 관계에도 많은 영향을 주게 된다.^{(7),(8)}

이 연구의 목적은 이러한 구조적 특성을 지닌 교각구조를 대상으로 비선형 유한요소해석을 실시하여 P-delta 영향을 고려한 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 구조성능을 평가하는데 있다. 따라서 이 연구에서는 2축 응력 상태에 대한 직교 이방성 재료모델에 의해서 균열이 발생한 철근콘크리트 요소의 거동특성을 표현하고, 이를 유한요소법을 사용하여 확장한 기존의 검증된 프로그램⁽⁹⁻¹³⁾에 긴장재의 영향을 고려할 수 있는 부착 또는 비부착 텐션요소와 세그먼트 접합부의 거동특성을 모사할 수 있도록 개발한 접합요소를 이식하고 Total Lagrangian 정식화 기법에 의해 대변위 문제를 고려할 수 있도록 수정을 가하여 P-delta 영향을 고려한 프리캐스트 세그먼트 교각의 성능을 정확하게 예측하고자 한다.

2. 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

이 연구에서는 저자 등에 의하여 그동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소, 경계면요소, 부착 및 비부착 텐션요소



〈그림 2〉 프리캐스트 세그먼트 교각의 P-delta 효과

Lap spliced bar 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	2D Elasto-plastic plane stress element

〈그림 3〉 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

그리고 접합요소 등⁽⁹⁻¹³⁾을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP⁽¹⁴⁾에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램인 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)에 Total Lagrangian 정식화 기법에 의해 대변위 문제를 고려할 수 있도록 수정을 가하여 사용하였다(그림 3).

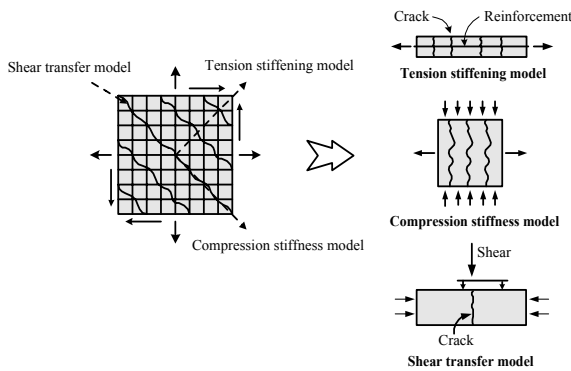
프리스트레스트 콘크리트는 일반적으로 콘크리트와 철근 및 텐션으로 구성되는 복합재료이며, 비선형 재료모델은 이들 각 구성 재료가 중첩된 것으로 표현할 수 있는데 각각의 해석모델은 콘크리트와의 부착특성을 고려하여 개발된 것이라야 한다. 비선형 재료모델은 저자 등에 의하여 이미 발표된 재료모델⁽⁹⁻¹³⁾을 그대로 적용하였으며 사용된 비선형 재료모델의 특징을 간단히 요약하면 다음과 같다.

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

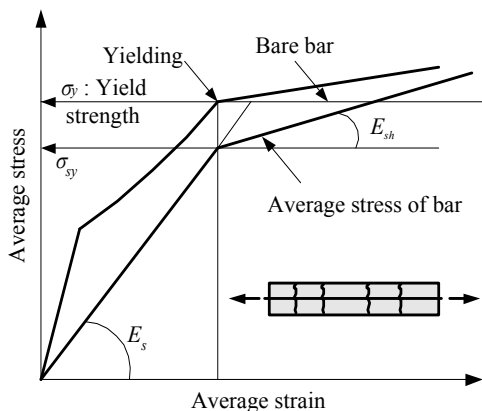
균열이 발생하기 전의 콘크리트의 역학모델은 이축응력 상태에 대한 탄소성파괴모델의 기본개념에 의해서 표현되

며 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 4).

콘크리트 속의 철근에 대한 항복 후 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 5).



〈그림 4〉 균열발생후 콘크리트의 구성모델

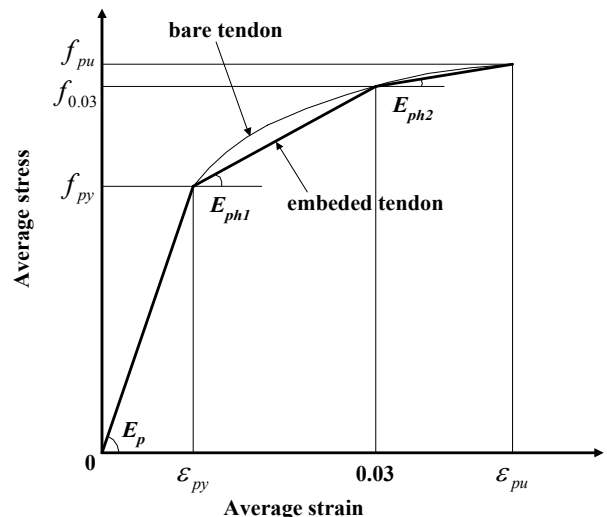


〈그림 5〉 철근모델

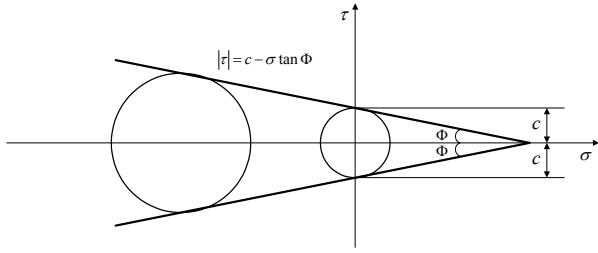
횡방향으로 배근된 구속철근은 콘크리트의 극한강도와 극한변형률을 크게 증가시키는 효과를 가져다준다. 이와 같이 증가된 콘크리트의 강도와 변형률로 인해서 지진하중 등과 같은 반복하중을 받는 경우에 콘크리트의 부재는 구속되지 않은 경우에 비해서 우수한 연성능력 및 복원력 특성을 나타낸다. 이 연구에서는 30MPa 이하의 보통강도 콘크리트의 경우 Mander 등의 제안모델⁽¹⁵⁾을 적용하였으며, 40MPa 이상의 고강도 콘크리트의 경우에는 Sun 등의 제안모델⁽¹⁶⁾을 적용하였다. 그리고 보통강도와 고강도 콘크리트 사이의 강도에는 Mander 등의 제안모델과 Sun 등의 제안모델을 이용하여 개발된 천이모델⁽¹²⁾을 사용하였으며 콘크리트의 단면형상에 관계없이 적용할 수 있고 종방향 철근 및 구속철근의 양, 구속철근의 항복강도 및 배근형태 등을 함께 고려할 수 있도록 하였다.

콘크리트 속의 텐던의 응력과 변형률의 관계는 콘크리트와 텐던사이의 부착효과로 인하여 텐던만의 그것과는 다르게 나타난다. 이 연구에서는 저자 등에 의하여 제안된 부착이 고려된 철근의 응력-변형률 관계를 고려하여 텐던의 응력-변형률 관계를 그림 6과 같은 Trilinear 모델로써 표현하였다. 제하 및 재재하에 대해서는 포락선부분은 단조증가하중에 대한 곡선을 사용하였고 제하부분의 거동은 탄성으로, 그리고 연화부분을 함께 고려하였다.

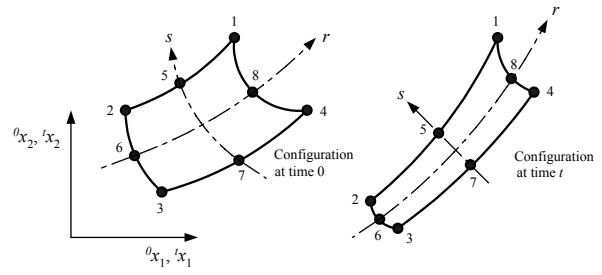
세그먼트 접합부의 부착과괴 기준으로는 그림 7과 같은 Coulomb 파괴기준을 사용하였고 접합요소의 전단응력 모델은 접촉면 밀도함수에 근거한 전단전달모델을 수정하여 표현하였으며 그림 8과 같이 최대값 이후에는 전단전달 연화계수(Softening Parameter)로써 부착과괴까지 감소하는 것으로 가정하였다.



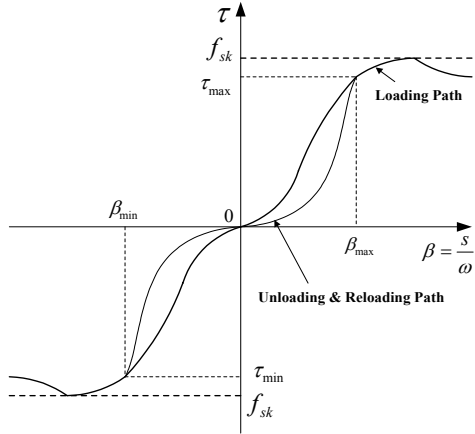
〈그림 6〉 텐던의 Trilinear 모델



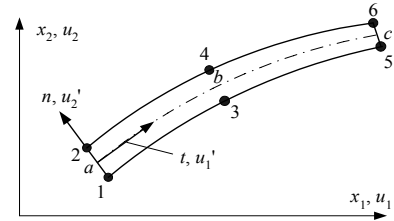
〈그림 7〉 Coulomb 파괴기준



〈그림 9〉 8절점 평면응력요소



〈그림 8〉 전단응력 모델 (Note: β는 정규화된 전단변형률, s는 접합면의 미끄러짐 변위, 그리고 ω는 접합면의 열림 변위)



〈그림 10〉 6절점 평면응력요소

3. Total Lagrangian 기법에 의한 유한요소 정식화

프리스트레스트 콘크리트 부재의 기하적인 비선형성을 고려하기 위해서 이 연구에서는 가상변위의 원리를 이용하여 연속체의 증분 평형방정식을 유도하는 Total Lagrangian 정식화 기법을 사용하였다.

대변형과 재료적인 비선형성을 포함한 증분 평형방정식은 비선형 관계에 있기 때문에 직접적으로 해를 구할 수가 없다. 따라서 정식화에서는 Green-Lagrange 변형률 및 2차 Piola-Kirchhoff 응력 텐서를 사용하여 평형방정식을 선형화한 후, 반복계산에 의해서 수렴기준치에 부합하는 근사적인 해를 구할 수 있다.⁽¹⁷⁾

Total Lagrangian 정식화 기법에 의해서 선형화된 연속체의 평형방정식은 다음 식과 같이 유도할 수 있다.

$$\int_{0V} {}_0C_{ijrs} {}_0e_{rs} \delta_0 e_{ij} d^0V + \int_{0V} {}_tS_{ij} \delta_0 \eta_{ij} d^0V = {}^{t+\Delta t}R - \int_{0V} {}_tS_{ij} \delta_0 e_{ij} d^0V \quad (1)$$

여기서 ${}_0C_{ijrs}$ 는 증분 응력-변형률 텐서로서 재료의 구성방정식으로부터 결정되고, ${}_tS_{ij}$ 는 시간 t 에서의 형상에 작용하

는 2차 Piola-Kirchhoff 응력이며, 그리고 ${}_0e_{ij}$, ${}_0\eta_{ij}$ 는 시간 0에서의 형상에 대한 선형 및 비선형 증분 변형률 텐서이다. 또한 식 (1)에서 좌변의 첫 번째와 두 번째 항은 각각 탄성 및 기하강도행렬을 나타낸다.⁽¹⁷⁾

프리스트레스트 콘크리트 부재의 2차원 비선형 유한요소 해석을 위해서, 그림 9와 그림 10에서와 같이 프리스트레스트 콘크리트요소와 접합요소를 대표하는 8절점 및 6절점을 갖는 평면응력요소를 사용하여 정식화하였다. 이 때 6절점을 갖는 접합요소의 경우에는 다음 식과 같이 절점간의 상대변위를 사용하여 요소의 변형률 변위 변환행렬을 유도할 수 있다.

$$\Delta u_1 = h_a(s) \Delta u_1^a + h_b(s) \Delta u_1^b + h_c(s) \Delta u_1^c \quad (2)$$

$$\Delta u_2 = h_a(s) \Delta u_2^a + h_b(s) \Delta u_2^b + h_c(s) \Delta u_2^c \quad (3)$$

여기서 Δu_1^a 에서 Δu_2^c 는 두 절점간의 상대변위, 그리고 $h_a(s)$ 에서 $h_c(s)$ 는 보간함수를 나타낸다.

이러한 유한요소의 정식화과정을 통해 식 (1)을 한 개의 요소에 대해서 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\int_{0V} {}_tB_{L0}^T {}_0C_0^t B_L d^0V \right) u + \left(\int_{0V} {}_tB_{NL}^T {}_0S_0^t B_{NL} d^0V \right) u = {}^{t+\Delta t}R - \int_{0V} {}_tB_{L0}^T \hat{S} d^0V \quad (4)$$

또는

$$\left({}_0K_L + {}_0K_{NL} \right) u = {}^{t+\Delta t}R - {}_0F \quad (5)$$

여기서 $t_0 B_L$ 은 선형 변형률-변위 변환행렬, 그리고 $t_0 B_{NL}$ 은 비선형 변형률-변위 변환행렬을 나타낸다.

변형률-변위 변환행렬은 각 요소의 가우스 적분점에서 정의되며 요소의 강성행렬 및 하중벡터 등은 가우스 수치적분법을 사용하여 산정하였다. Total Lagrangian 정식화에서는 형상함수의 모든 미분값은 초기의 좌표계에 대해서 정의되므로 첫 번째 하중 단계에서만 계산하여 사용함으로써 수치 해석상 편리함을 준다.⁽¹⁷⁾

4. 해석 예 고찰

4.1 유한요소망의 수렴성 검증

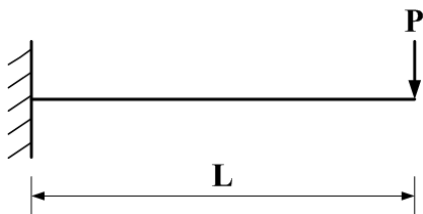
이 연구에서 사용한 유한요소망의 수렴성을 검증하기 위해서 그림 11에 나타난 것과 같은 자유단에 수직하중이 작용하는 캔틸레버 보⁽¹⁸⁾를 선정하였다.

하중증분법을 사용하여 10단계에 걸쳐서 재하하였으며 캔틸레버 보의 민감도 분석을 위해서 그림 12와 같이 12개의 요소와 192개 요소로 각각 모델링하였다.

표 1은 수치하중이 작용하는 경우에 보의 길이로 나눈 자유단의 수직처짐 관계를 나타내고 있으며 엄밀해⁽¹⁸⁾와 이 연구의 해석결과를 함께 비교하여 나타내었다. 표 1에서 보는 바와 같이 해석결과는 요소의 수와 상관없이 엄밀해와 거의 일치하는 결과를 보였으며 전단 변형의 영향으로 엄밀해보다 크게 나오는 경향을 보이고 있다.

4.2 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각 실험체

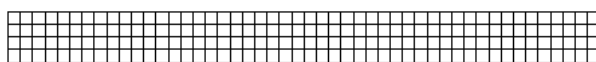
이 연구의 목적인 P-delta 영향을 고려한 프리캐스트 세



〈그림 11〉 수직하중이 작용하는 캔틸레버 보



(a) 12 elements



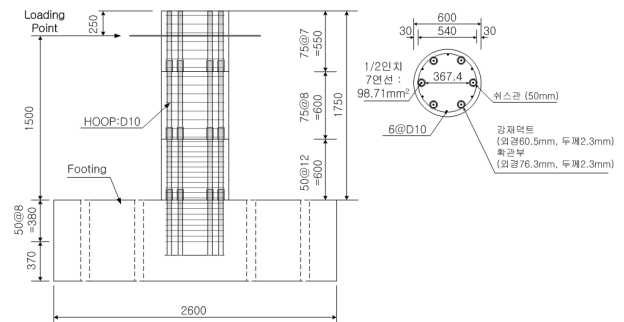
(b) 192 elements

〈그림 12〉 유한요소망

그먼트 PSC교각의 성능평가를 위해서 그림 13에 나타난 것과 같은 프리캐스트 교각실험체를 선정하였으며 교각실험체의 모델 제원은 표 2와 같다. 실험체 설계에서 긴장재의 단면적과 프리스트레스의 크기 결정이 중요한 사항이며 반복 해석한 결과와 축방향 압축응력, 즉 축력과 프리스트레스에 의한 압축응력 합 증가에 따라 변위연성도가 급감하

〈표 1〉 해석결과

$\frac{PL^2}{EI}$	엄밀해 (1)	수치해석		(1)/(2)	(1)/(3)
		12개 요소 (2)	192개 요소 (3)		
1.0	0.302	0.303	0.303	1.00	1.00
2.0	0.493	0.496	0.496	0.99	0.99
3.0	0.603	0.607	0.607	0.99	0.99
4.0	0.670	0.674	0.675	0.99	0.99
5.0	0.714	0.719	0.720	0.99	0.99
6.0	0.745	0.750	0.751	0.99	0.99
7.0	0.767	0.774	0.775	0.99	0.99
8.0	0.785	0.792	0.793	0.99	0.99
9.0	0.799	0.807	0.808	0.99	0.99
10.0	0.811	0.819	0.821	0.99	0.99



〈그림 13〉 프리캐스트 세그먼트 PSC교각 실험체의 형상(단위:mm)

〈표 2〉 실험체의 제원

구분	PT10AD25	PT30AD25	PT50AD25	
단면 직경(m)	0.6			
교각 높이(m)	1.5			
재료 강도	콘크리트(MPa)	35		
	철근(MPa)	SD40 (400)		
	강재덕트(MPa)	315		
	강연선(MPa)	7연선 12.7mm/1본(1600)		
PS 강재	긴장응력(MPa)	160	480	800
주철근	직경	D10		
	철근비(%)	0.2		
횡철근	직경	D10		
	철근비(%)	0.66		
피복두께(mm)	30			
축력	$0.1 A_g f_{ck}$			

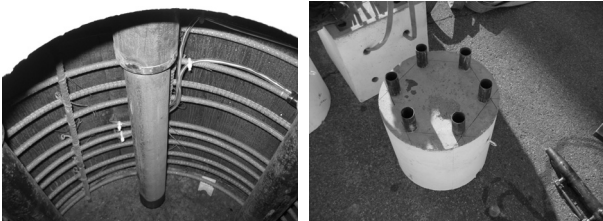
는 범위가 20% 내외임을 고려하여 긴장응력의 수준을 결정하였다.

그림 14는 개발된 프리캐스트 세그먼트 교각 실험체의 제작과정을 나타내고 있다. 그림 14(a)는 기초부 거푸집의 모습이며 세그먼트와 접합하기 위하여 기초부 강제덕트를 설치하였다. 그림 14(b)는 세그먼트에 전단저항 연결체인 강제덕트를 배치하고 강제거푸집을 조립한 모습이다. 그림 14(c)는 전단에 대한 변형과 횡구속 능력에 대한 분석을 위하여 계측용 게이지를 부착한 모습이다. 그림 14(d)는 강제거푸집을 이용하여 세그먼트를 제작한 모습이다. 그림 14(e)는 크레인을 이용하여 세그먼트를 이동하는 모습이다. 그림 14(f)는 기초부 콘크리트에 첫 번째 세그먼트를 조립한 모습이다. 이때 연직도를 맞춘 상태에서 첫 번째 세그먼트의 강제덕트에 기초부 콘크리트의 강제덕트를 삽입하여 완성



(a) 기초부 거푸집

(b) 세그먼트 거푸집



(c) 계측용 게이지 부착

(d) 조립전 세그먼트 전경



(e) 세그먼트 이동

(f) 세그먼트 조립



(g) 강연선 긴장

(h) 모르타르 충전

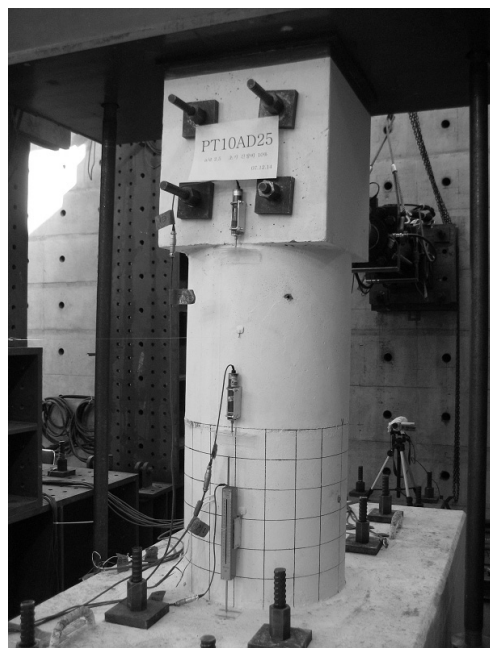
〈그림 14〉 프리캐스트 세그먼트 PSC교각 실험체의 제작

한다. 그림 14(g)는 가력부에 강제 지압판을 거치하고 강연선의 긴장작업을 수행하는 모습이다. 그리고 그림 14(h)는 모르타르를 충전하고 최종적으로 완성된 프리캐스트 세그먼트 PSC교각 실험체의 모습이다.

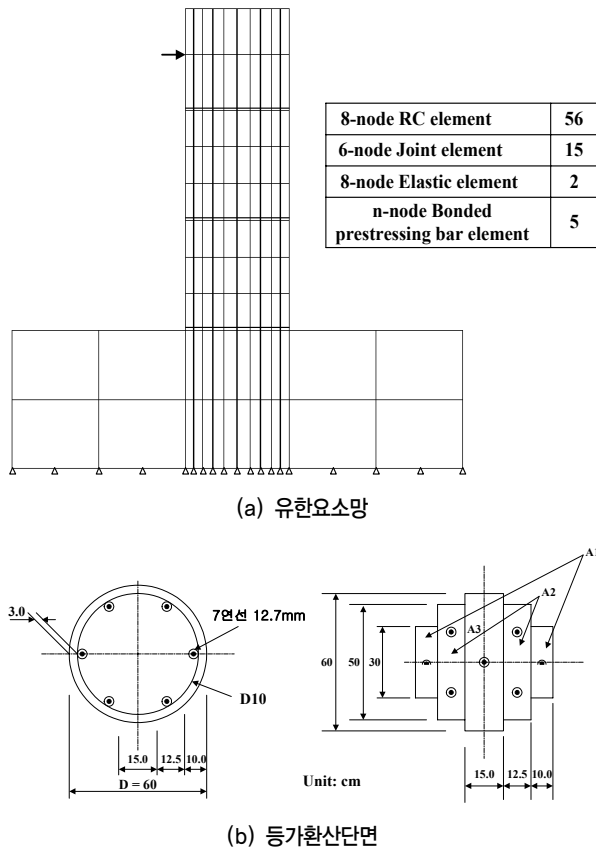
프리캐스트 세그먼트 PSC교각의 성능을 평가하기 위하여 수평력은 그림 15와 같이 최대변위 ±250mm인 1,000 kN 유압가력기(Actuator)를 이용하여 재하하였으며 축력은 교각단면 축강도의 10%를 일정하중 유지장치로 변화가 없도록 재하하는 준정적(Quasi-Static) 실험을 수행하였다. 변위진폭은 Drift Ratio ±0.25%로 시작하여 ±0.5%, ±1.0%, ±1.5%, ±2.0%, ±2.5%, ±3.0%, ±3.5%, ±4.0%, ±4.5%, ±5.0%, ±5.5%, ±6.0%, ±7.0%, ±8.0%, ±9.0%, ±10.0%로 증가시켰으며, 각 단계별로 2회씩 반복 재하하여 동일 변위진폭에 대한 교각의 거동특성 차이를 살펴보았다.

이 실험체들의 유한요소해석을 위해서 프리캐스트 세그먼트 PSC교각을 등가환산단면을 이용하여 그림 16과 같이 2차원 평면요소로 해석이 가능하도록 하였다. 등가환산단면은 원형 프리캐스트 세그먼트 교각 실험체의 실제거동과 유사하도록 PS강재와 콘크리트의 단면적, 하중재하 방향의 단면 2차 모멘트를 같게 하여 유도하였다.

그림 16(a)는 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소 분할된 예이며 기초부와 함께 교각부에 3개의 세그먼트로 구성되어 있으며 총 78개의 요소로 분할하였다. 8절점 철근콘크리트 평면응력 요소가 56개, 교각과 기초사이 및 세그먼트 사이에 6절점 프리캐스트 접합면 요소 15개, 부착텐던의 거동을 고려하기 위한 다절점 부착 텐던요소 5개, 그



〈그림 15〉 실험체의 전경

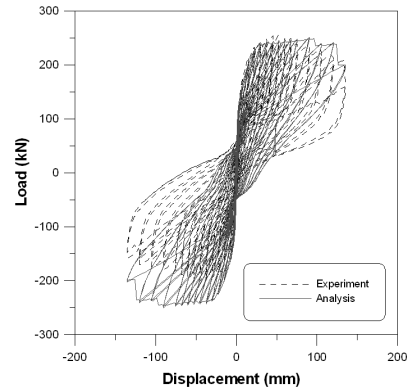


〈그림 16〉 프리캐스트 세그먼트 PSC교각 실험체의 유한요소모델

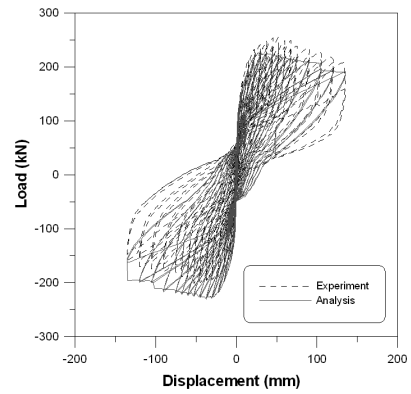
리고 가력부분에 8절점 탄소성 평면응력요소 2개가 사용되었다. 이 때, 부착 텐던요소는 강재덕트와 쉬스관 사이가 좁아 일부분에서는 그라우팅으로 접합이 완전하게 이루어지지 못할 것으로도 예상이 되나 전체적인 거동은 부착 강재에 가까울 것으로 판단하여 사용하였다. 또한 원형 프리캐스트 세그먼트 교각 실험체의 2차원 해석을 위하여 그림 16(b)에서 보는 것처럼 등가환산단면을 이용하여 원형단면을 5개의 직사각형 요소로 변환하여 해석을 수행하였다.

그림 17~그림 19는 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계를 나타내고 있으며 해석결과가 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 이 연구에서는 P-delta 영향을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우를 각각 해석하고 실험과 비교·검토하여 그 필요성을 확인하였다. 이러한 해석결과는 프리캐스트 교각 실험체에 반복 주기하중이 진행되는 동안 소성힌지 영역에서 비탄성 변형이 증대됨에 따라 일어나는 콘크리트의 균열과 파쇄, 그리고 이로 인한 손상이나 파괴와 잘 일치하고 있다.

이 연구의 해석에 의한 최대하중과 변위연성도를 실험과 함께 비교한 결과를 P-delta 영향을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우로 각각 구분하여 표 3과 표 4에 정리하였다. 실험과 해석에서 시스템의 항복변위와 극한변위는 하중-변위

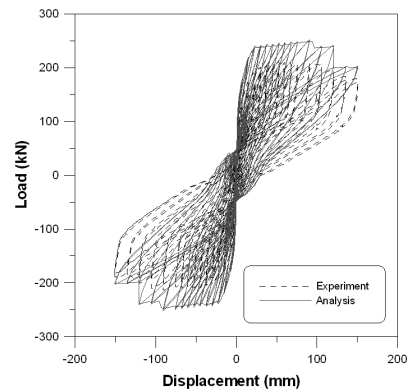


(a) Analysis without P-delta effect

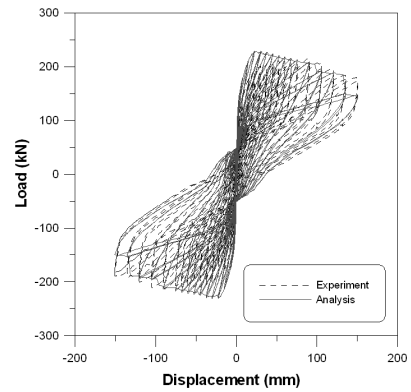


(b) Analysis with P-delta effect

〈그림 17〉 실험체 PT10AD25의 하중-변위 곡선

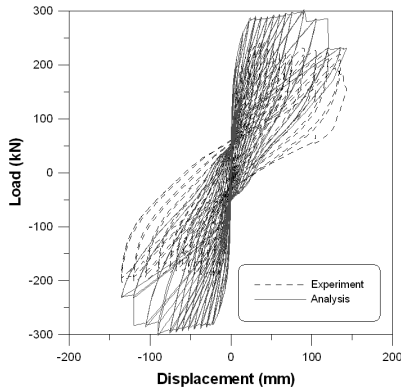


(a) Analysis without P-delta effect

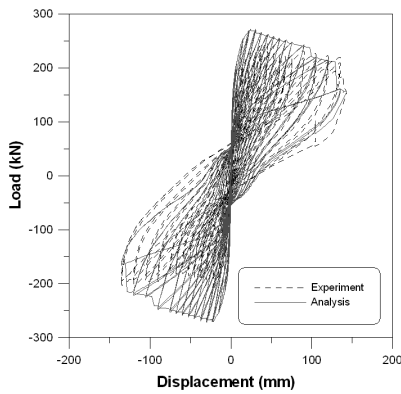


(b) Analysis with P-delta effect

〈그림 18〉 실험체 PT30AD25의 하중-변위 곡선



(a) Analysis without P-delta effect



(b) Analysis with P-delta effect

〈그림 19〉 실험체 PT50AD25의 하중-변위 곡선

곡선으로부터 간접적인 방법⁽¹⁹⁾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 수평변위로 정의하였다.

P-delta 영향을 고려한 유한요소해석 결과에서 최대하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 각각 0.99와 0.12로서, P-delta 영향을 고려하지 않은 경우의 0.89와 0.12에 비해 실험결과를 전반적으로 정확하게 평가하고 있는 것으로 판단된다. 그리고 P-delta 영향을 고려한 유한요소해석 결과에서 변위연성도에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수가 각각 0.83과 0.02로서, P-delta 영향을 고려하지 않은 경우의 0.84와 0.10에 비해 프리캐스트 세그먼트 PSC교각의 비탄성 거동특성을 비교적 정확하게 평가하고 있는 것으로 판단된다.

일련의 해석결과와 실험결과와의 비교로부터 이 연구에서 제안하고 있는 방법은 지진하중과 같은 반복하중에 의한 프리캐스트 세그먼트 PSC교각의 P-delta 영향을 포함한 비탄성 거동을 적절히 평가하고 있으며, 개발된 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 이용함으로써, 해석적 방법에 의한 프리캐스트 세그먼트 교각의 성능평가가 가능할 것으로 판단된다.

〈표 3〉 실험 및 해석 결과의 비교(without P-delta effect)

실험체	실험				해석				(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)		
PT10AD25	254.6	14.3	105.0	7.3	251.1	16.0	125.6	7.9	1.01	0.92
PT30AD25	214.9	14.5	120.0	8.3	252.0	12.3	120.9	9.8	0.85	0.85
PT50AD25	245.8	15.0	120.0	8.0	301.5	11.3	120.3	10.6	0.82	0.75
Mean									0.89	0.84
COV									0.12	0.10

〈표 4〉 실험 및 해석 결과의 비교(with P-delta effect)

실험체	실험				해석				(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)		
PT10AD25	254.6	14.3	105.0	7.3	226.8	11.8	105.8	9.0	1.12	0.81
PT30AD25	214.9	14.5	120.0	8.3	229.1	10.0	99.1	9.9	0.94	0.84
PT50AD25	245.8	15.0	120.0	8.0	272.1	10.5	98.7	9.4	0.90	0.85
Mean									0.99	0.83
COV									0.12	0.02

5. 결 론

이 연구에서는 지진하중을 받고 있는 프리캐스트 세그먼트 PSC교각의 P-delta 영향을 고려한 성능평가를 위해 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 유한요소해석 프로그램을 사용하여, 프리캐스트 교각 실험체를 해석하였다. 실험결과와 비교·검토된 해석 예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

1. 재료적 비선형성을 고려하기 위해서 균열 발생 후의 콘크리트의 인장강성 및 압축강성, 균열면에서의 전단전달 강성, 철근 및 PS강재의 부착 등에 대한 각각의 구성방정식을 조합하여 유한요소해석에 적용함으로써 지진하중과 같은 반복하중을 받는 프리캐스트 세그먼트 교각구조의 균열발생에서부터 철근 및 PS강재의 항복 및 파괴에 이르는 모든 응력상태에 대한 P-delta 영향을 포함한 비선형 거동특성을 비교적 충실히 예측할 수 있었다.
2. 이 연구에서 제안한 P-delta 영향을 고려한 비선형 유한요소해석 결과 최대하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 0.99와 0.12이고 변위연성도에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 0.83과 0.02로서, 전반적으로 실험결과를 잘 평가하고 있음이 확인되었다.
3. 지진하중과 같은 반복하중을 받는 프리캐스트 세그먼트 교각의 비선형 이력거동 특성을 올바르게 평가하기 위해서는 비교적 큰 압축하중과 함께 지진하중과 같이 큰 규모의 횡하중으로 인한 P-delta 효과를 무시할 수 없으며 이에 대한 충분한 고려가 필요하다.
4. 지진하중을 받는 프리캐스트 세그먼트 교각의 응답특성 및 지진손상을 제대로 평가함으로써 프리캐스트 세그먼트 교각구조의 내진성능평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.
5. 이 연구에서는 P-delta 영향을 고려한 프리캐스트 세그먼트 PSC교각의 정확한 성능평가를 수행하였으며, 더 나아가 개발기술의 적용과 성능향상을 통하여 차세대 교각시스템인 프리캐스트 세그먼트 교각의 설계 및 시공기법을 완성할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 이재훈, 양종호, “콘크리트 교각의 새로운 형식,” 한국콘크리트학회지, 한국콘크리트학회, 제16권, 2호, 2004, pp. 24-30.
2. 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).
3. 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.
4. 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.
5. 김태훈, 진병무, 김영진, 김성운, “프리캐스트 콘크리트 세그먼트 구조물의 강재덕트 조립구조,” 가을학술발표회 논문집, 한국콘크리트학회, 제19권, 2호, 2007, pp. 293-296.
6. 김태훈, 진병무, 김영진, 김성운, “프리캐스트 부재의 새로운 전단저항 연결체의 성능에 관한 연구,” 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제28권, 1A호, 2008, pp. 813-821.
7. Kim, J. K. and Lee, S. S., “The Behavior of Reinforced Concrete Columns Subjected to Axial Force and Biaxial Bending,” *Engineering Structures*, Vol. 23, 2000, pp. 1518-1528.
8. Yalcin, C. and Saatcioglu, M., “Inelastic Analysis of Reinforced Concrete Columns,” *Computers and Structures*, Vol. 77, No. 5, 2000, pp. 539-555.
9. 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.
10. 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.
11. 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*, Vol. 34, No. 7, 2007, pp. 843-855.
12. 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.
13. 김태훈, 김영진, 진병무, 신현목, “Numerical Study on the Joints between Precast Post-Tensioned Segments,” 한국콘크리트학회논문집, 한국콘크리트학회, 제19권, 1E호, 2007, pp. 3-9.
14. Taylor, R. L., *FEAP - A Finite Element Analysis Program*, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, 2000.
15. 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.
16. 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.
17. Bathe, K. J., *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall, 1996.
18. Gere, J. M. and Timoshenko, S. P., *Mechanics of Materials*, Chapman & Hall, 1991.
19. 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.