

프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 조립식 코핑부 : II. 실험 및 해석

Precast Concrete Copings for Precast Segmental PSC Bridge Columns : II. Experiments and Analyses

김태훈* · 김영진** · 이재훈*** · 신현목****

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

Abstract

The purpose of this study is to investigate the inelastic behavior of precast concrete copings for precast segmental PSC bridge columns and to provide the details and reference data. Twelve one-fourth-scale precast concrete copings were tested under quasi-static monotonic loading. In this study, the computer program, named RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology), was used. A joint element is modified to predict the inelastic behaviors of segmental joints. This study documents the testing of precast concrete copings for precast segmental PSC bridge columns and presents conclusions based on the experimental and analytical findings.

Keywords : *inelastic behavior, precast concrete copings, precast segmental PSC bridge columns, computer program, joint element*

요 지

이 연구는 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 조립식 코핑부의 비탄성거동을 파악하고 이에 대한 상세와 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다. 12개의 조립식 코핑부 실험체에 단조증가 하중 하에서 파괴 실험을 수행하였다. 사용된 프로그램은 철근콘크리트 구조물의 해석을 위한 RCAHEST이다. 수정된 접합요소는 세그먼트 접합부의 비탄성거동을 예측할 수 있다. 이 연구에서는 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 조립식 코핑부의 실험적, 해석적 결과를 제시하였다.

핵심용어 : 비탄성거동, 조립식 코핑부, 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각, 프로그램, 접합요소

1. 서 론

연계논문(김태훈 등, 2010)에서는 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 조립식 코핑부의 개발 및 검증에 관한 연구 내용을 상세히 다루었다. 개발된 조립식 코핑부는 매치캐스팅을 적용한 세그먼트간에 긴장재를 통해 횡방향 긴장력을 도입하고 세그먼트 접합에 있어 요철부분의 맞물림 작용 등으로 인하여 전단저항 및 연성을 확보할 수 있는 전단키를 적용함으로써 코핑부를 일체화시키며 공사 기간을 상대적으로 단축시키고 시공성을 향상시킬 수 있다. 또한 프리캐스트 부재를 사용함으로써 현장타설과 대비하여 품질 및 성능을 향상시킬 수 있으며 기존 현장타설 코핑부의 문제점 등을 개선할 수 있다.

이 연구에서는 경제성과 시공성 등을 고려하여 상세를 변

화시킨 코핑부 실험체들의 실험적, 해석적 연구를 통하여 개발된 조립식 코핑부의 구조거동과 소요성능을 확인하였고 그 적용성을 검증하였다.

프리캐스트 세그먼트 교각의 실용화를 위한 연구는 최근 선진 각국에서 진행되고 있다. Billington 등(2004)의 연구에서는 비부착 포스트텐션 방식으로 지진손상을 제어하기 위하여 소성힌지 구역에 Fiber 콘크리트를 사용한 프리캐스트 교각에 대한 거동특성을 평가하였다. Chou 등(2006)이 수행한 연구에서는 비부착 포스트텐션 방식으로 콘크리트 충전 강관을 사용한 프리캐스트 교각의 지진하중과 같은 반복하중에 대한 내진성능을 평가하였다. Wang 등(2008)은 연성거동과 에너지 소산능력을 향상시키기 위하여 세그먼트 접합부에 부착철근을 도입하였으며 이에 대한 실험 모형실험을 수행하여 성능을 평가하였다. Yamashita 등(2009)은 지진하

*정회원 · 교신저자 · (주)대우건설 기술연구원 선임연구원 · 공학박사 (E-mail : kimth@dwconst.co.kr)

**정회원 · (주)대우건설 기술연구원 연구위원 · 공학박사

***정회원 · 영남대학교 토목공학과 교수 · 공학박사

****정회원 · 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수 · 공학박사

중에 대한 복원능력이 우수한 비부착 텐던을 갖는 프리캐스트 교각의 내진성능을 진동대 실험을 통해 평가하였다. 국내에서도 이러한 프리캐스트 세그먼트 교각에 대한 연구가 진행되고 있다(김태훈 등, 2005; 김현호 등, 2007). 그러나 교량 하부구조의 새로운 시스템에 관한 연구로서 조립식 코핑부까지 연구를 확장하여 수행한 경우는 드물다.

이 연구의 목적은 기존 연구에서 개발된 전단저항 연결체를 갖는 프리캐스트 세그먼트 교각(김태훈 등, 2008a; 김태훈 등, 2008b)의 코핑부 상세를 달리하는 실험체에 대한 실험적, 해석적 연구를 통해 개발된 조립식 코핑부 시스템의 성능을 평가하는데 있다. 이때 코핑부 상세는 국외 코핑부의 분절화 사례를 기본 바탕으로 제안된 형식의 실용화를 고려하여 결정하였다.

이 연구에서는 2축 응력 상태에 대한 직교 이방성 재료모델에 의해서 균열이 발생한 철근콘크리트 요소의 거동특성을 표현하고, 이를 유한요소법을 사용하여 확장한 기존의 검증된 프로그램(Kim 등, 2003; Kim 등, 2005; Kim 등, 2007)에 긴장재의 영향을 고려할 수 있는 부착 또는 비부착 텐던요소(Kim 등, 2008)와 세그먼트 접합부의 거동특성을 모사할 수 있도록 개발한 접합요소(김태훈 등, 2007)를 이식하여 사용하였다.

2. 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 조립식 코핑부 성능 실험

2.1 실험체의 제작

실험체는 경제성과 시공성 등을 고려하여 상세[수평전단철근과 전단기의 유무]를 변화시킨 조립식(PC) 코핑부 8기와 비교·분석을 위한 현장타설 프리스트레스트 콘크리트(PSC) 코핑부 4기로 구성되며 실험체의 형상 및 제작과정은 연계논문(김태훈 등, 2010)에 기술한 바와 같다.

조립식 코핑부의 설계는 기존 프리스트레스트 콘크리트 코핑부의 설계에 프리캐스트 블록 이음부 기준 등을 추가하여 코핑 안전성 검토, 휨강도 검토, 전단강도 검토, 전단기 검토 순으로 수행하였다. 이때 설계는 현행 도로교설계기준(2005), 콘크리트구조설계기준(2007), 그리고 AASHTO LRFD(2004)를 근거로 하였으며 수평전단철근과 전단기의 유무를 변수로 정하였다.

모델의 길이는 2,900 mm이고 높이는 650 mm 그리고 폭은 675 mm이며 상사법칙에 의하여 설계되었으며 코핑부 실험체의 제원은 연계논문(김태훈 등, 2010)과 동일하다.

2.2 실험방법

실험체의 거동특성을 살펴보기 위하여 파괴 실험을 수행하였으며 구조실험에는 최대변위 250 mm인 2,000 kN 유압 가력기(actuator) 2대가 사용되었다. 가력점과 지지점에는 실험체의 지압파괴를 방지하기 위한 지지판을 설치하였으며 실험체의 변위는 지지점 사이의 1/2 지점에 설치된 자동 변위계를 통해 측정되었고 변위제어에 의해 각 하중 단계마다 내력, 처짐, 그리고 변형률 등을 기록하였다.

코핑부에서 인장부 철근과 전단변형 구역내의 수평 및 수직 전단철근에 변형률 게이지를 부착하였다. 그리고 하중 재

하점의 변위와 하중은 가력기에 설치된 변위계와 로드셀에 의해 측정하였으며, 코핑부의 하중 재하시 발생할 지도 모르는 수평변위도 변위계를 이용하여 측정하였다.

2.3 실험결과

코핑부 실험체에 대한 하중-변위 곡선을 그림 1~그림 8에 나타내었으며 실험체의 설계전단강도($2V_d$)와 최종 재하 단계에서의 파괴 양상을 함께 표시하였고 각 실험체별 최대하중 등을 정리하여 표 1에 나타내었다.

극한강도 이후에도 상당한 수준의 변형까지 내력을 유지하고 있음을 평가하기 위해 실험체의 극한변위를 확인하였다. 실험에서 시스템의 극한변위는 철근콘크리트 교각의 변위연성도 평가에서 가장 널리 사용되고 있는 하중-변위곡선으로부터 결정하는 간접적인 방법(Park, 1998)으로 구하였다. 조립식 코핑부 실험체는 기존 현장타설 프리스트레스트 콘크리트 코핑부 실험체와 같이 극한강도 이후에도 상당한 수준의 변형까지 내력을 유지하고 있음이 확인되었다.

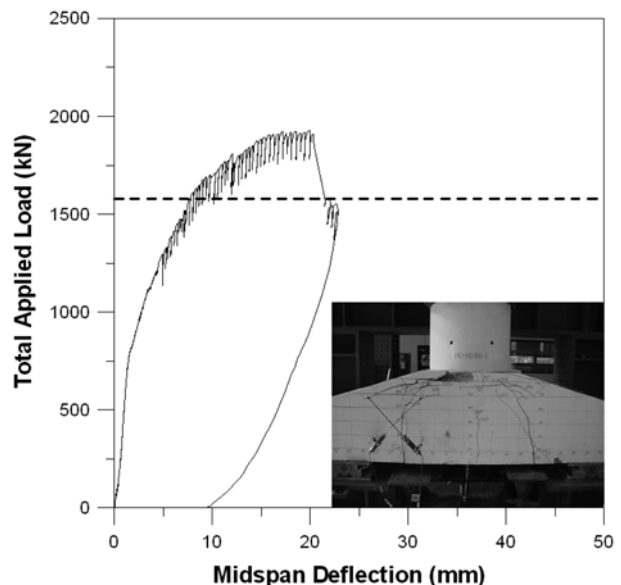


그림 1. 실험체 PC-S1HS0-1의 하중-변위 곡선

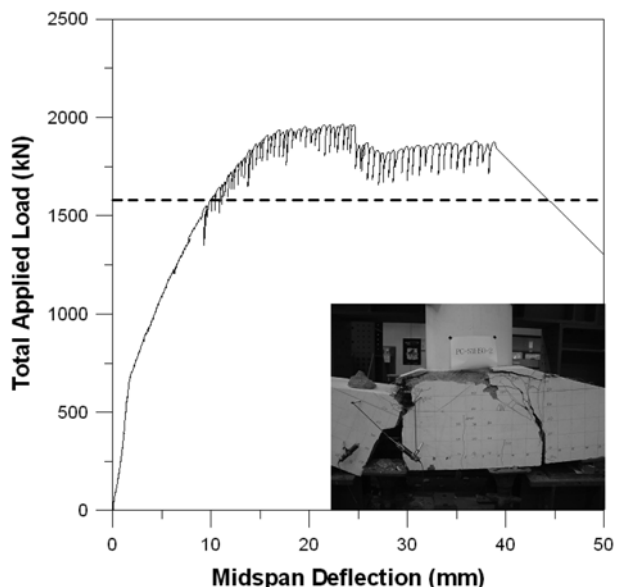


그림 2. 실험체 PC-S1HS0-2의 하중-변위 곡선

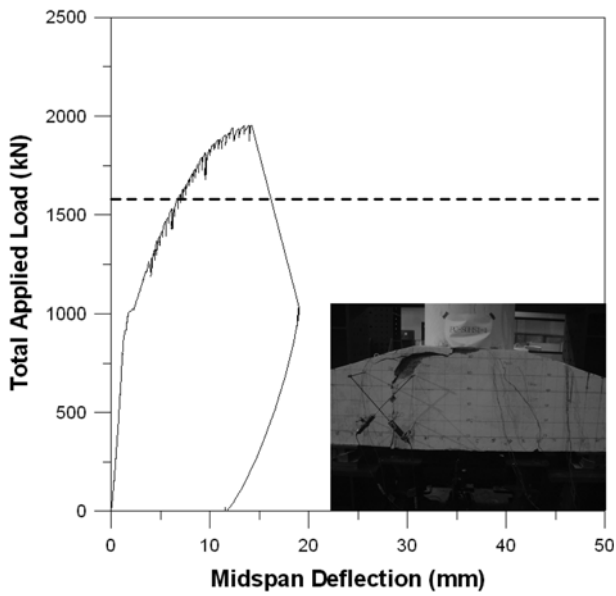


그림 3. 실험체 PC-S0HS1-1의 하중-변위 곡선

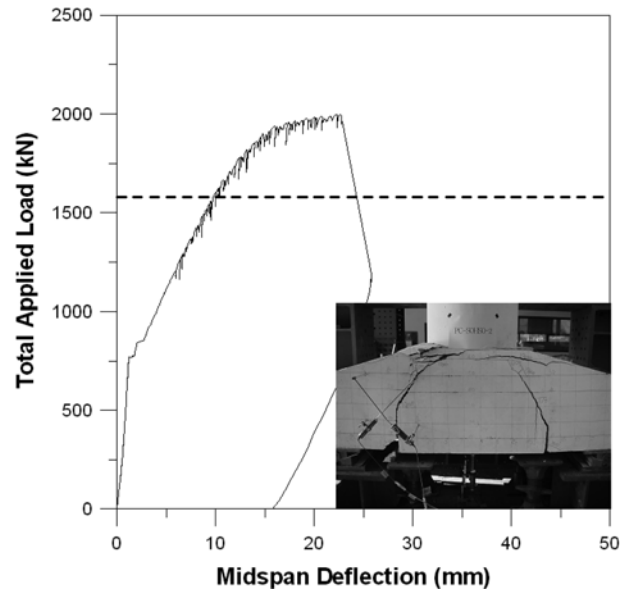


그림 6. 실험체 PC-S0HS0-2의 하중-변위 곡선

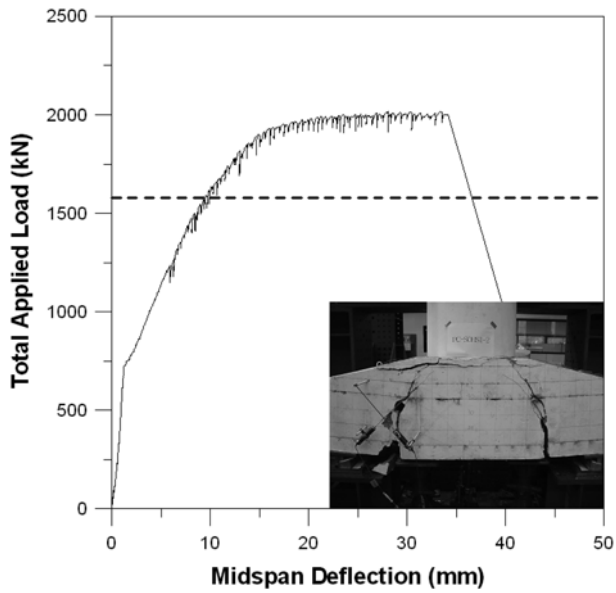


그림 4. 실험체 PC-S0HS1-2의 하중-변위 곡선

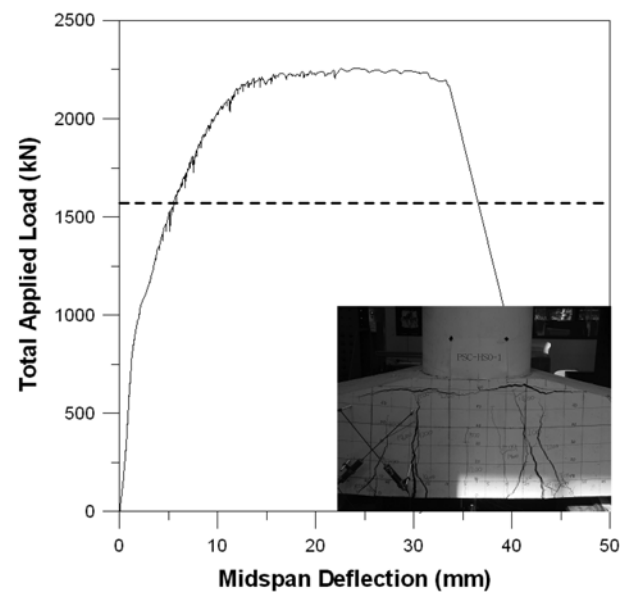


그림 7. 실험체 PSC-HS0-1의 하중-변위 곡선

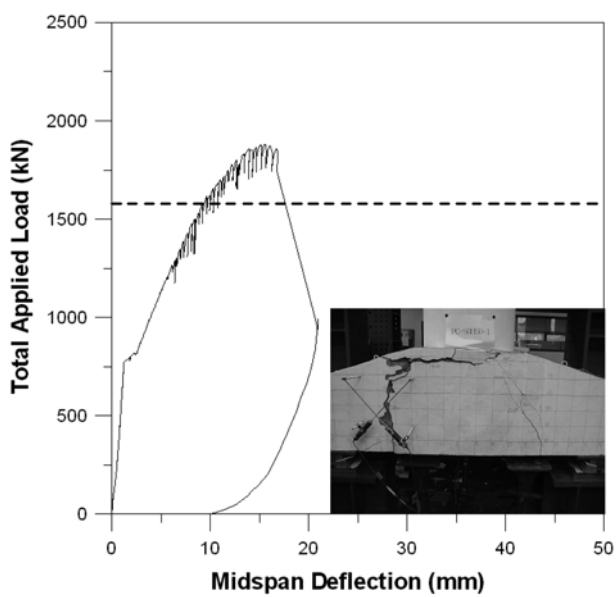


그림 5. 실험체 PC-S0HS0-1의 하중-변위 곡선

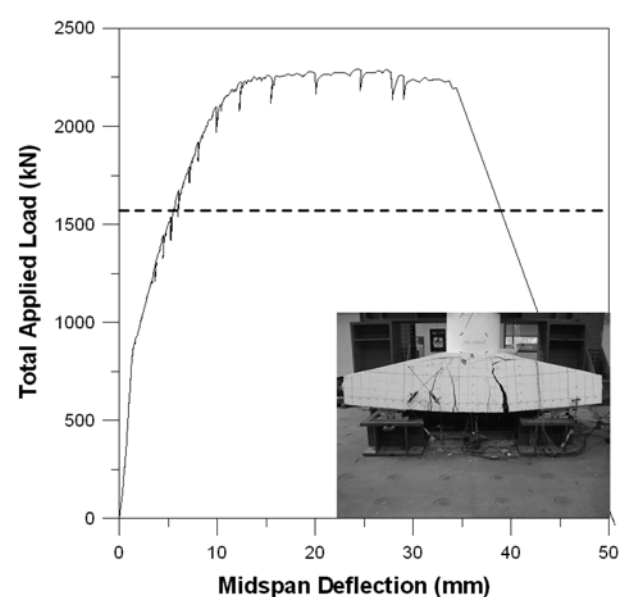


그림 8. 실험체 PSC-HS0-2의 하중-변위 곡선

표 1. 실험결과

Model	$2V_{cr}$ (kN)	$2V_u$ (kN)	δ_{cr} (mm)	δ_u (mm)
PC-S1HS0-1	720.0	1927.2	1.4	21.2
PC-S1HS0-2	565.0	1964.8	1.5	42.3
PC-S0HS1-1	900.0	1953.6	1.5	15.8
PC-S0HS1-2	750.0	2015.4	1.6	35.9
PC-S0HS0-1	785.0	1879.2	1.8	17.6
PC-S0HS0-2	773.0	1996.6	1.7	23.8
PSC-HS0-1	650.0	2254.8	1.1	34.9
PSC-HS0-2	648.0	2290.2	1.1	36.3

Note : 수평전단철근(HS) 유무, 전단키(S) 유무 변수

2.4 실험변수별 분석

2.4.1 하중-변위 곡선

수평전단철근과 전단키의 유무를 변수로 한 코핑부 실험체들의 하중-변위 곡선을 그림 9~그림 13에 함께 나타내었다.

수평전단철근 유무에 따른 조립식 코핑부 실험체[PC-S1HS1, PC-S1HS0]의 평균 실험값은 각각 1880.9 kN과 1946.0 kN이다. 조립식 코핑부 실험체[PC-S0HS1, PC-S0HS0]의 평균 실험값은 각각 1984.5 kN과 1937.9 kN이다. 그리고 프리스트레스트 콘크리트 코핑부 실험체[PSC-HS1, PSC-HS0]의 평균 실험값은 각각 2421.4 kN과 2272.5 kN이다.

전단키 유무에 따른 조립식 코핑부 실험체[PC-S1HS1, PC-S0HS1]의 평균 실험값은 각각 1880.9 kN과 1984.5 kN이다. 조립식 코핑부 실험체[PC-S1HS0, PC-S0HS0]의 평균 실험값은 각각 1946.0 kN과 1937.9 kN이다.

수평전단철근 유무에 따른 조립식 코핑부 실험체[PC-S1HS1, PC-S1HS0]의 평균 극한변위는 각각 21.9 mm와 31.8 mm이다. 조립식 코핑부 실험체[PC-S0HS1, PC-S0HS0]의 평균 극한변위는 각각 25.9 mm와 20.7 mm이다. 그리고 프리스트레스트 콘크리트 코핑부 실험체[PSC-HS1, PSC-HS0]의 평균 극한변위는 각각 31.5 mm와 35.6 mm이다.

전단키 유무에 따른 조립식 코핑부 실험체[PC-S1HS1,

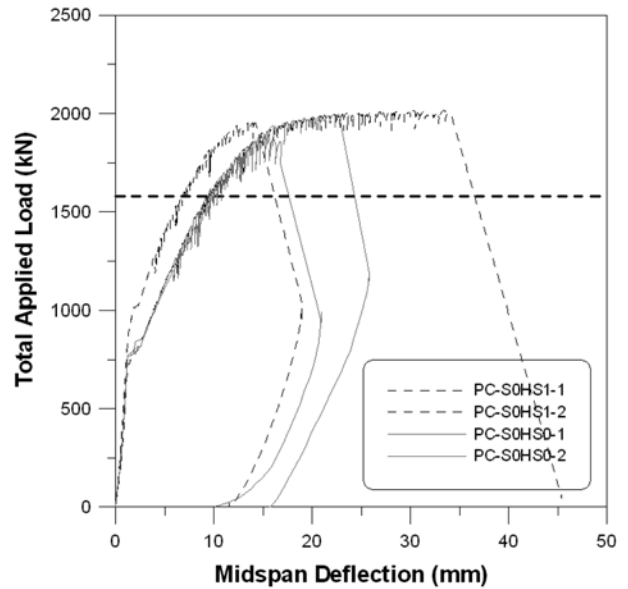


그림 10. 하중-변위 곡선 (수평전단철근 유무)

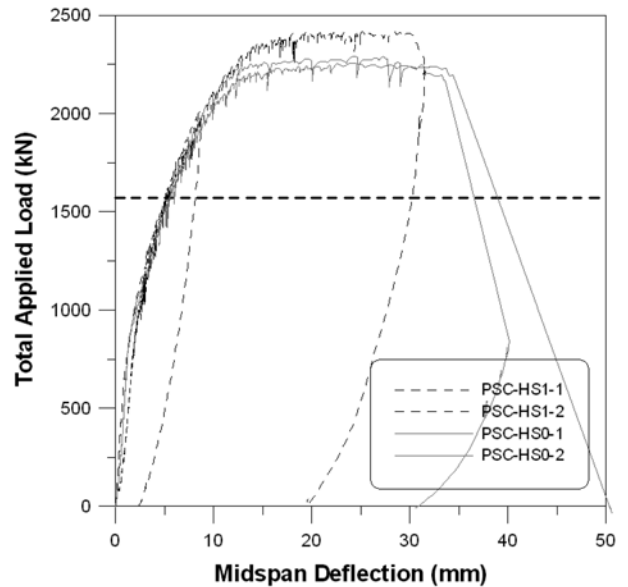


그림 11. 하중-변위 곡선 (수평전단철근 유무)

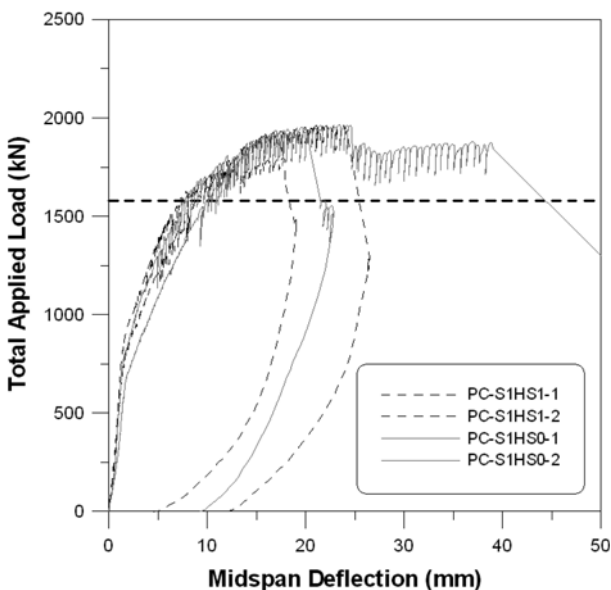


그림 9. 하중-변위 곡선 (수평전단철근 유무)

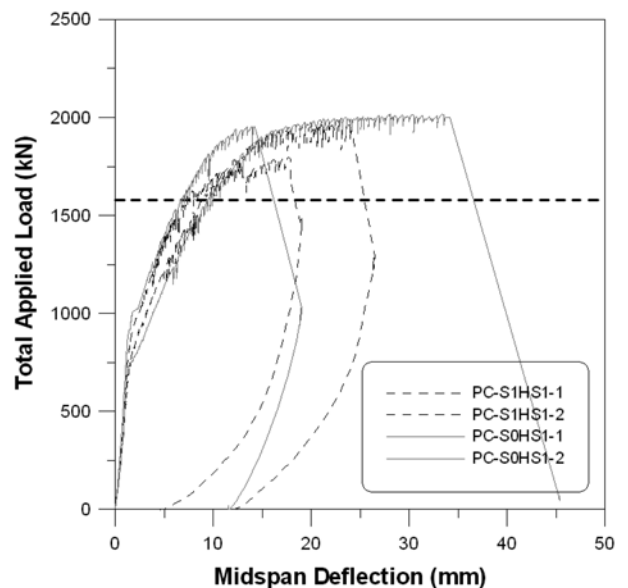


그림 12. 하중-변위 곡선 (전단키 유무)

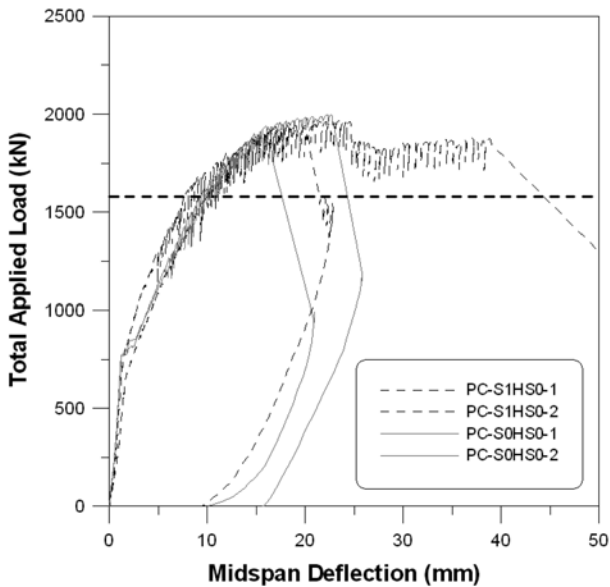


그림 13. 하중 변위 곡선 (전단키 유무)

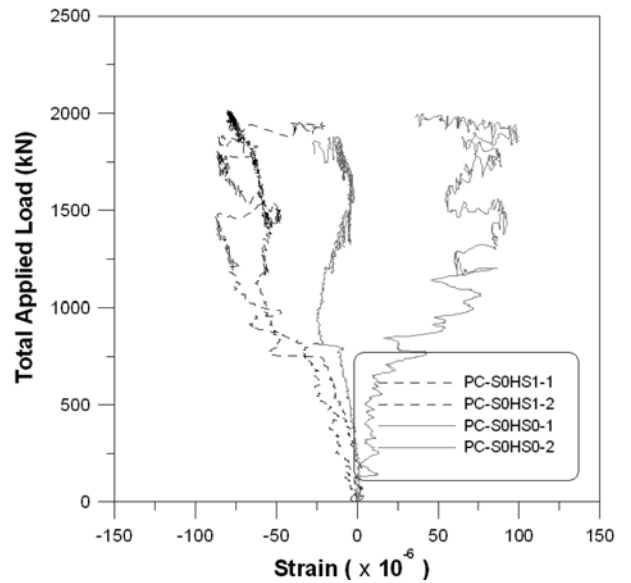


그림 15. 수직전단철근의 변형률 (수평전단철근의 유무)

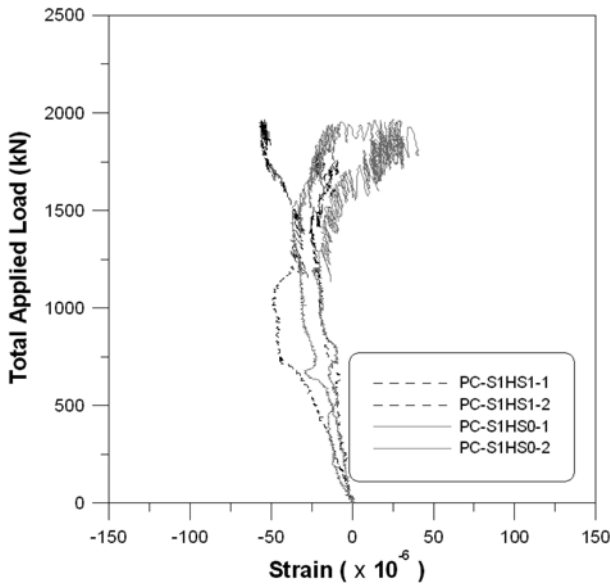


그림 14. 수직전단철근의 변형률 (수평전단철근의 유무)

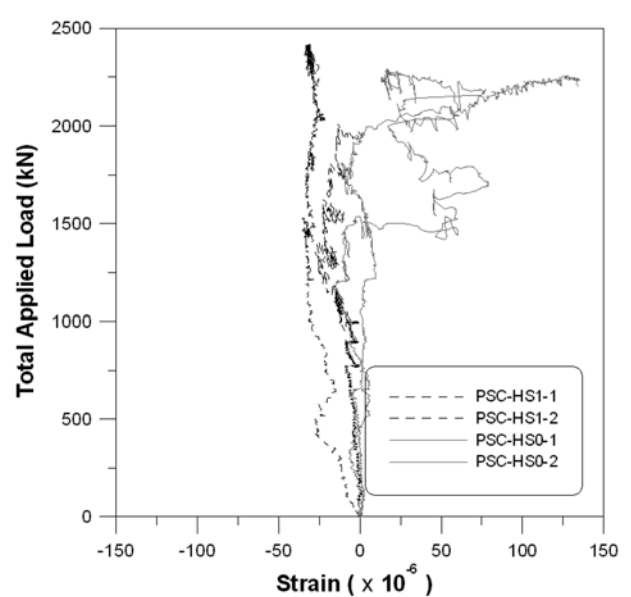


그림 16. 수직전단철근의 변형률 (수평전단철근의 유무)

PC-S0HS1]의 평균 극한변위는 각각 21.9 mm와 25.9 mm이다. 조립식 코핑부 실험체[PC-S1HS0, PC-S0HS0]의 평균 극한변위는 각각 31.8 mm와 20.7 mm이다.

위와 같은 실험결과를 토대로 코핑부 실험체의 소요 성능에는 수평전단철근의 유무가 전단키의 유무보다 큰 영향을 미치고 있으며 연성거동에는 전단키의 유무가 수평전단철근의 유무보다 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

2.4.2 철근 변형률

그림 14~그림 16의 수직전단철근의 변형률을 살펴보면 수평전단철근의 유무에 따라 수직전단철근의 응력부담이 다소 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 그림 17, 18의 수직전단철근의 변형률을 살펴보면 전단키의 유무에 따라서는 수직전단철근의 응력에 거의 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있다.

이 연구에서 경제성과 시공성 등을 고려하여 상세를 변화시킨 실험체 중 수평전단철근과 전단키를 갖는 조립식 코핑

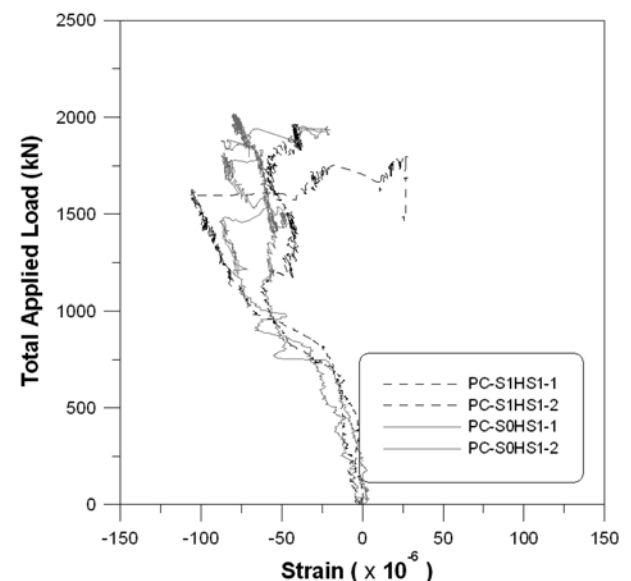


그림 17. 수직전단철근의 변형률 (전단키의 유무)

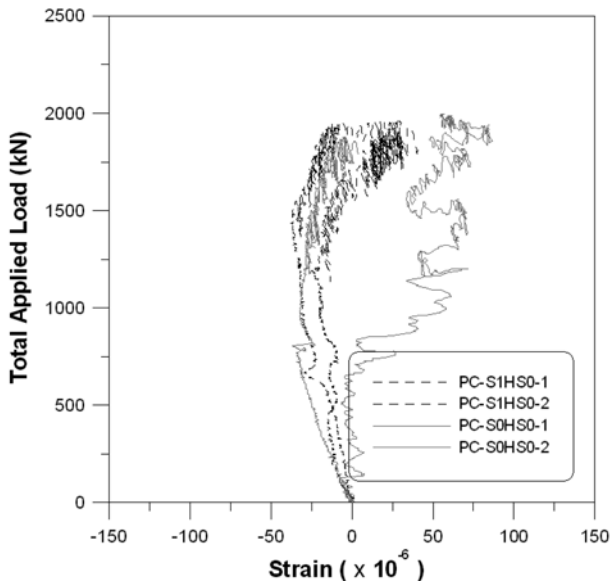


그림 18. 수직전단철근의 변형률 (전단기의 유무)

부 실험체가 우수한 성능을 보임으로써 실용화 측면에서 현장 적용에 가장 적합할 것으로 판단된다.

3. 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 조립식 코핑부의 비선형 해석

3.1 개요

이 연구에서는 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소, 경계면요소 그리고 비부착 텐던요소 등 (Kim 등, 2003; Kim 등, 2005; Kim 등, 2007; Kim 등, 2008) 을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP ver. 7.2(Taylor, 2000)에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology) (김태훈 등, 2001)에 세그먼트 접합부의 부착과괴를 모사할 수 있도록 개발한 접합요소(김태훈 등, 2007)를 수정하여 사

2D or 3D Spring element	4 nodes PSC shell element	2D or 3D Flexibility-based fiber beam-column element	4 nodes Elastic shell element
Interface element	FEAP		4 nodes RC shell element
Joint element	Bonded or Unbonded prestressing bar element	RC plane stress element	2D Elasto-plastic plane stress element

그림 19. 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

용하였다(그림 19). 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 이축응력상태에 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 균열방향으로의 압축강성 저하를 고려하기 위한 압축강성모델 및 균열면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델을 각각 적용한다(그림 20).

콘크리트 속의 철근에 대한 항복후 거동은 철근만의 특성과 함께 부착효과 등이 동시에 고려되어야 한다. 즉 균열부분은 철근의 항복으로 인해 응력의 증가가 없지만 내부의

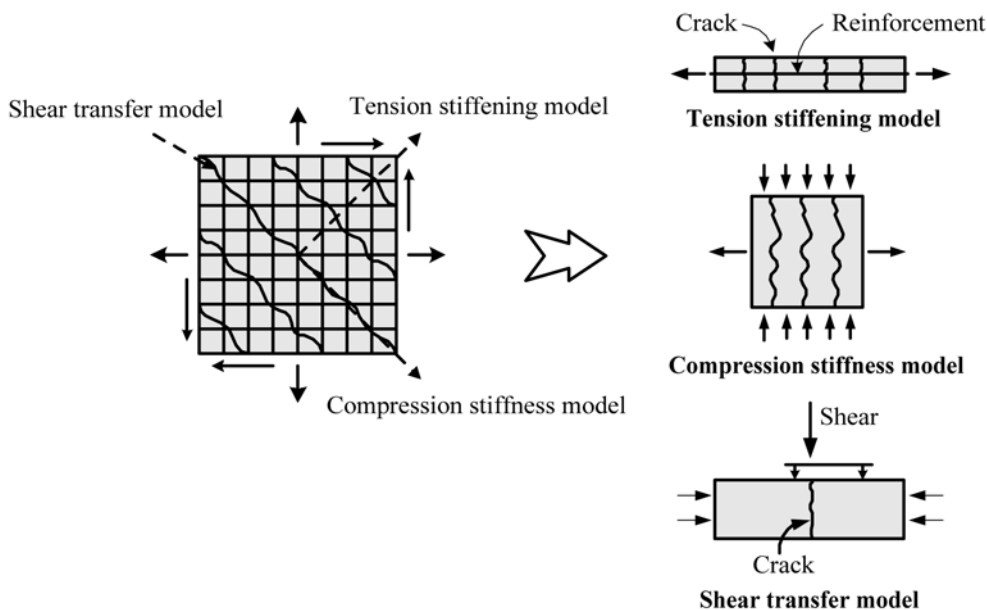


그림 20. 균열발생후 콘크리트의 구성모델

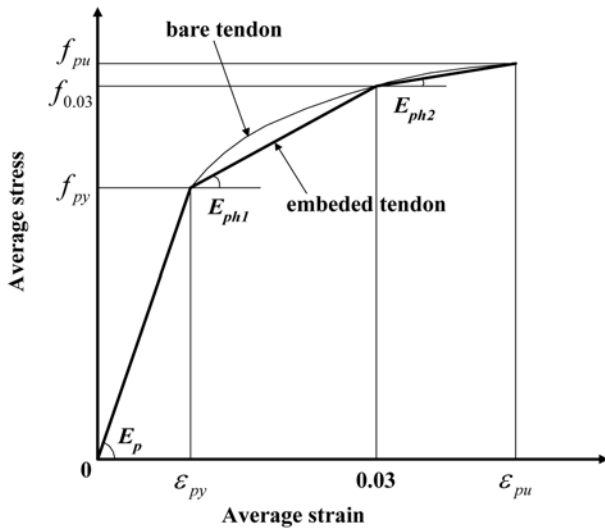


그림 21. 텐던의 trilinear 모델

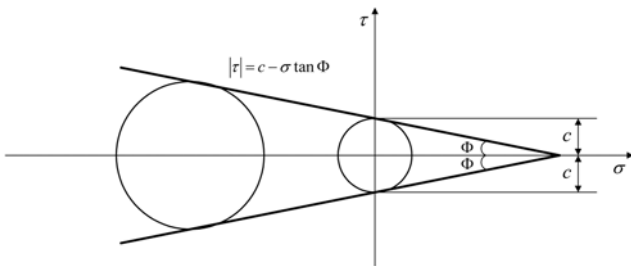


그림 22. Coulomb 파괴기준

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.

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(그림 21).

세그먼트 접합부의 부착파괴 기준으로는 Coulomb 파괴기준(그림 22)을 사용하였고 접합요소의 전단응력 모델은 접촉면 밀도함수에 근거한 전단전달모델을 수정하여 표현하였으며 최대값 이후에는 전단전달 연화계수(softening parameter)로써 부착파괴까지 감소하는 것으로 가정하였다(김태훈 등, 2007). 접합요소를 사용하면 접합부에 평행한 수평방향의 전단응력과 이에 수직방향의 인장응력 또는 압축응력을 결정할 수 있다.

3.2 해석결과 및 분석

그림 23~그림 25은 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소 분할한 예이다. 개발된 조립식(PC) 코핑부 실험체의 경우 그림 23에서 보는 것처럼 5개의 세그먼트로 구성되어 있으며 총 116개의 요소로 분할하였다. 8절점 철근콘크리트 평면응력 요소가 92개, 주세그먼트 및 보조세그먼트 사이에 6절점 프리캐스트 접합면 요소 16개, 가력점과 지지점에 실험체와 동일한 조건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지

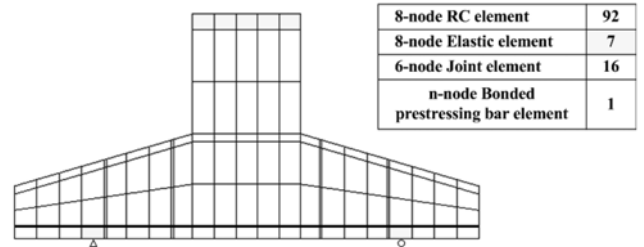


그림 23. PC 코핑부 실험체

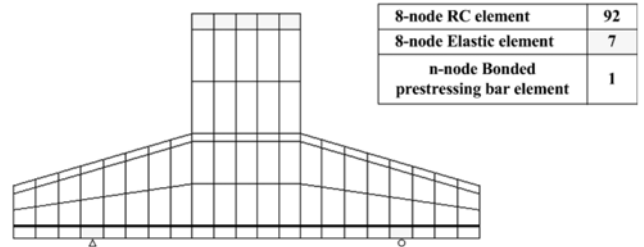


그림 24. PSC 코핑부 실험체

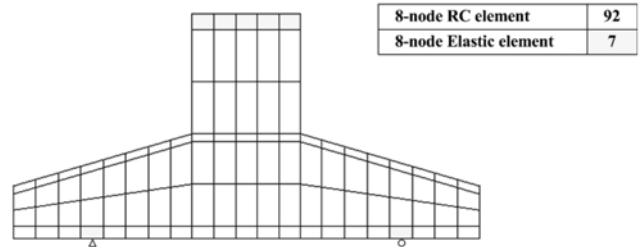


그림 25. RC 코핑부 실험체

않는 탄성요소 7개, 그리고 부착 텐던의 거동을 고려하기 위한 다절점 부착 텐던요소 1개가 사용되었다.

프리스트레스트 콘크리트(PSC) 코핑부 실험체의 경우 그림 24에서 보는 것처럼 총 100개의 요소로 분할하였다. 8절점 철근콘크리트 평면응력 요소가 92개, 가력점과 지지점에 실험체와 동일한 조건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지 않는 탄성요소 7개, 그리고 부착 텐던의 거동을 고려하기 위한 다절점 부착 텐던요소 1개가 사용되었다.

철근콘크리트(RC) 코핑부 실험체의 경우 그림 25에서 보는 것처럼 총 99개의 요소로 분할하였다. 8절점 철근콘크리트 평면응력 요소가 92개, 그리고 가력점과 지지점에 실험체와 동일한 조건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지 않는 탄성요소 7개가 사용되었다.

이 연구에서 세그먼트 접합부의 거동특성을 지배하는 내부 마찰각과 접착력은 기존의 연구결과(김태훈 등, 2005)와 사용된 에폭시의 재료물성을 근거로 전단기의 유무에 따라 각각 60°, 30°와 2.0 MPa로 정하였다. 그리고 사용된 유한요소망은 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 26~그림 32은 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계를 나타내고 있으며 해석결과가 실험결과를 비교적 잘 추적하고 있음을 알 수 있다. 다소 차이를 보이고 있는 초기강성과 연성은 실험

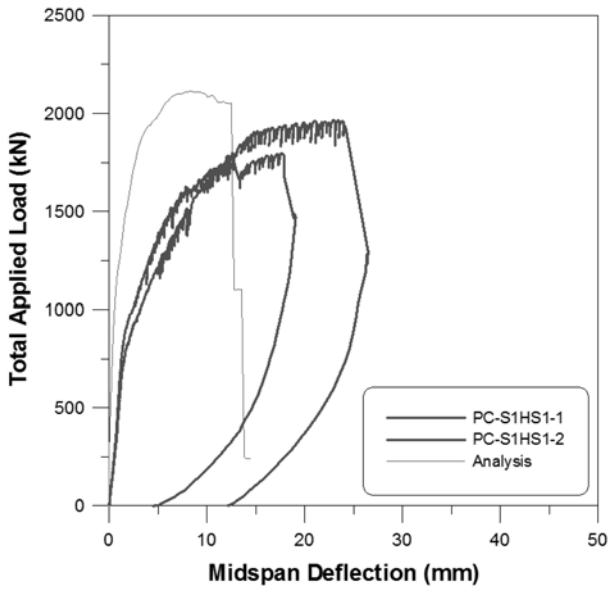


그림 26. PC 코핑부 실험체의 하중-변위 곡선

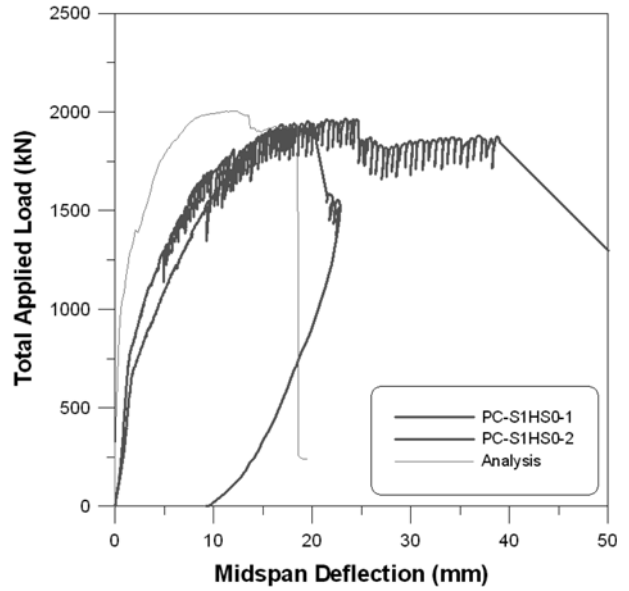


그림 29. 하중-변위 곡선 (PC 코핑부 실험체)

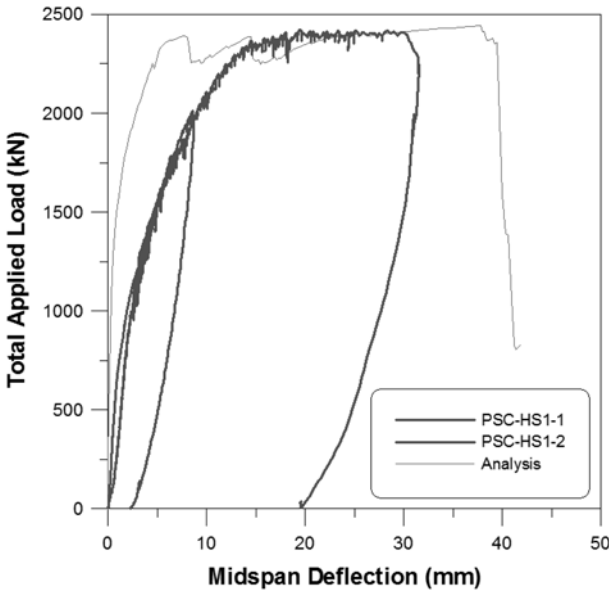


그림 27. PSC 코핑부 실험체의 하중-변위 곡선

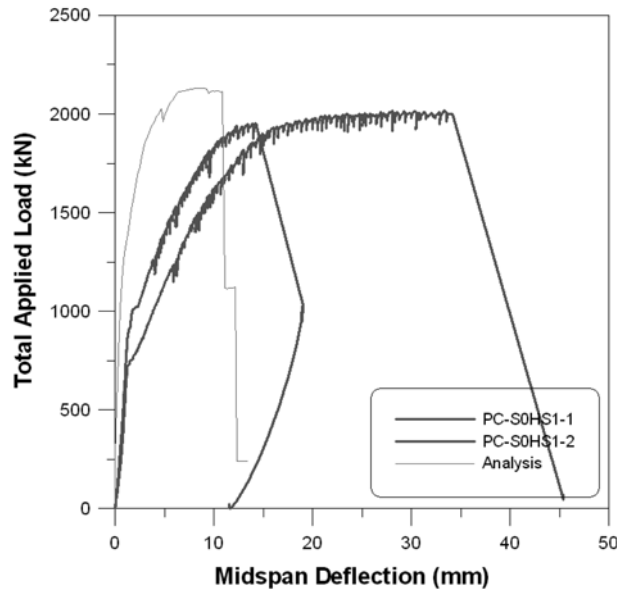


그림 30. 하중-변위 곡선 (PC 코핑부 실험체)

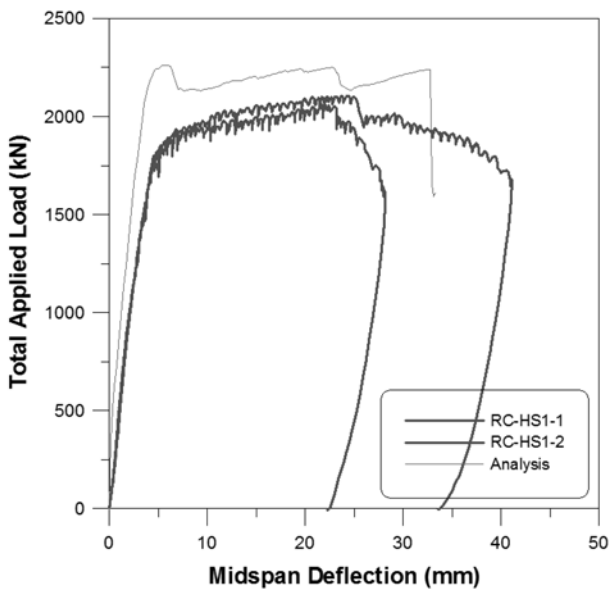


그림 28. RC 코핑부 실험체의 하중-변위 곡선

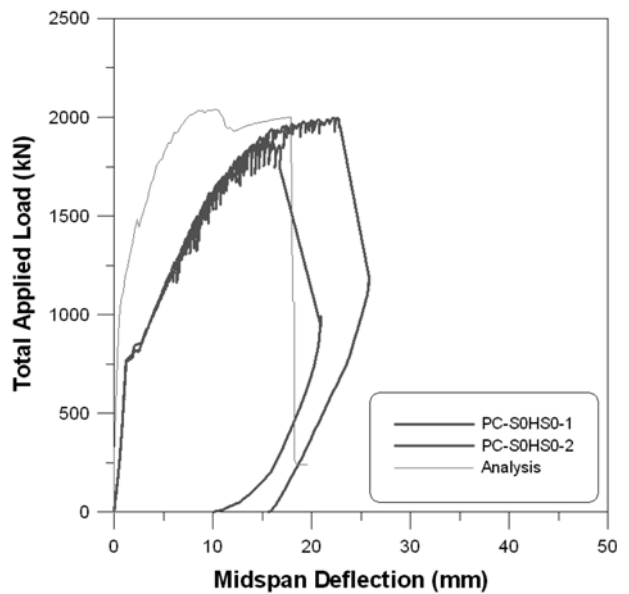


그림 31. 하중-변위 곡선 (PC 코핑부 실험체)

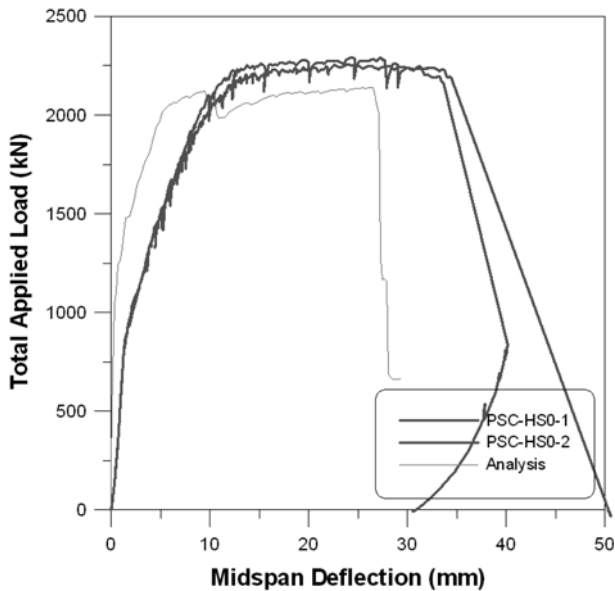


그림 32. 하중-변위 곡선 (PSC 코핑부 실험체)

표 2. 실험 및 해석 결과의 비교

Specimen	Experiment	Analysis	(1)/(3)
	$2V_{max}$ (kN) (1)	$2V_{max}$ (kN) (3)	
PC-S1HS1-1	1796.8	2112.2	0.85
PC-S1HS1-2	1965.0	2112.2	0.93
PC-S1HS0-1	1927.2	2005.1	0.96
PC-S1HS0-2	1964.8	2005.1	0.98
PC-S0HS1-1	1953.6	2131.0	0.92
PC-S0HS1-2	2015.4	2131.0	0.95
PC-S0HS0-1	1879.2	2038.0	0.92
PC-S0HS0-2	1996.6	2038.0	0.98
PSC-HS1-1	NA	NA	NA
PSC-HS1-2	2421.4	2442.8	0.99
PSC-HS0-1	2254.8	2139.6	1.05
PSC-HS0-2	2290.2	2139.6	1.07
RC-HS1-1	2106.2	2260.8	0.93
RC-HS1-2	2061.4	2260.8	0.91
Mean			0.96
COV			0.06

의 오차와 해석의 오차가 겹쳐진 것이 원인으로 분석된다. 특히 실험과 해석의 경계조건의 차이와 실험체들의 전단과 피가 매우 취약적이어서 발생한 것으로 판단된다. 이 연구의 해석에 의한 최대하중을 실험과 함께 비교하여 표 2에 정리하였다.

유한요소해석 결과에서 최대하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수가 각각 0.96과 0.06으로서, 최대하중의 평균값은 실험결과 보다 다소 크게 평가하고 있으나 비교적 실험결과를 정확하게 평가하고 있으며 변동계수가 0.06에 불과하여 코핑부 실험체들의 비탄성 거동특성을 전반적으로 잘 평가하고 있는 것으로 판단된다.

개발된 조립식 코핑부의 경우 접합부의 제원특성에 따라 다양한 거동을 나타내게 되므로, 향후 접합면의 수직강성, 접

착력, 그리고 마찰각 등에 대한 실험적·해석적 매개변수 연구를 통하여 거동특성을 심도 있게 규명할 필요가 있다.

4. 결 론

일련의 실험결과와 해석결과와의 비교로부터 이 연구에서 개발한 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 조립식 코핑부 시스템의 타당성을 확인할 수 있었으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실험과 해석적 연구로부터 개발된 조립식 코핑부 실험체는 설계된 값을 잘 반영하고 있으며 충분한 소요성능을 갖고 있는 것으로 확인되었다.
2. 이 연구에서 제안한 비선형 유한요소해석 결과 최대하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 0.96과 0.06으로서, 비교적 실험결과를 잘 추적하고 있음이 확인되었다. 이를 통해 제안한 해석기법과 모델은 조립식 코핑부 구조의 전반적인 거동특성을 바르게 표현하고 있음이 입증되었으며 향후 프리캐스트 세그먼트 교각구조의 정밀해석이 가능할 것으로 판단된다.
3. 조립식 코핑부의 경제성과 시공성 등을 향상시키기 위하여 수평전단철근과 전단키의 유무를 변수로 실험을 수행하고 이에 대한 적용성을 확인하였다.
4. 프리캐스트 세그먼트 교각의 조립식 코핑부 시스템의 비선형 거동특성을 제대로 평가함으로써 프리캐스트 세그먼트 교각구조 시스템의 성능평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

김태훈, 김영진, 김성운, 신현목(2008a) 전단저항 연결체를 갖는 프리캐스트 세그먼트 교각의 성능평가, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권 제A호, pp. 591-601.

김태훈, 김영진, 진병무, 신현목(2007) Numerical Study on the Joints between Precast Post-Tensioned Segments, **한국콘크리트학회논문집**, 한국콘크리트학회, 제19권 제1E호, pp. 3-9.

김태훈, 박세진, 김영진(2010) 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 조립식 코핑부 : I. 시스템 개발 및 검증, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제30권 제5A호, pp. 463-473.

김태훈, 박세진, 김영진, 신현목(2008b) P-delta 영향을 고려한 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 성능평가, **한국지진공학회는논문집**, 한국지진공학회, 제12권 제4호, pp. 45-54.

김태훈, 신현목(2001) Analytical Approach to Evaluate the Inelastic Behaviors of Reinforced Concrete Structures under Seismic Loads, **한국지진공학회는논문집**, 한국지진공학회, 제5권 제2호, pp. 113-124.

김태훈, 진병무, 김영진, 신현목(2005) 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 비탄성 거동에 관한 해석적 연구, **한국지진공학회는논문집**, 한국지진공학회, 제9권 제5호, pp. 29-40.

김현호, 심창수, 정철현, 김철환(2007) 중실원형단면 조립식 교각의 내진 성능 평가, **한국지진공학회는논문집**, 한국지진공학회, 제11권 제3호, pp. 23-31.

한국도로교통협회(2005) **도로교설계기준**.

한국콘크리트학회(2007) **콘크리트구조설계기준**.

AASHTO (2004) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 3rd Edition.

Billington, S.L. and Yoon, J.K. (2004) Cyclic response of unbonded posttensioned precast columns with ductile fiber-reinforced concrete. *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 9, No. 4,

- pp. 353-363.
- Chou, C.C. and Chen, Y.C. (2006) Cyclic tests of post-tensioned precast cft segmental bridge columns with unbonded strands. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 35, pp. 159-175.
- Kim, T.H., Kim, Y.J., Kang, H.T., and Shin, H.M. (2007) Performance assessment of reinforced concrete bridge columns using a damage index. *Canadian Journal of Civil Engineering*, V. 34, No. 7, pp. 843-855.
- Kim, T.H., Lee, K.M., Chung, Y.S., and Shin, H.M. (2005) Seismic damage assessment of reinforced concrete bridge columns. *Engineering Structures*, Vol. 27, No. 4, pp. 576-592.
- Kim, T.H., Lee, K.M., Yoon, C.Y., and Shin, H.M. (2003) 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, pp. 1199-1207.
- Kim, T.H., Park, J.G., Kim, Y.J., and Shin, H.M. (2008) A Computational platform for seismic performance assessment of reinforced concrete bridge piers with unbonded reinforcing or prestressing bars. *Computers & Concrete*, Vol. 5, No. 2, pp. 135-154.
- Park, R. (1998) Ductility evaluation from laboratory and analytical testing. proc. of the ninth world conference on earthquake engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol. VII, Balkema, Rotterdam, pp. 605-616.
- Taylor, R.L. (2000) *FEAP - A Finite Element Analysis Program, Version 7.2 Users Manual*, Vol. 1 and Vol. 2.
- Wang, J.C., Ou, Y.C., Chang, K.C., and Lee, G.C. (2008) Large-scale seismic tests of tall concrete bridge columns with precast segmental construction. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 37, pp. 1449-1465.
- Yamashita, R. and Sanders, D. (2009). Seismic performance of precast unbonded prestressed concrete columns. *ACI Structural Journal*, Vol. 106, No. 6, pp. 821-830.

(접수일: 2010.4.19/심사일: 2010.6.18/심사완료일: 2010.8.11)