

비선형 FEM 해석을 이용한 PSC-Steel-PSC 혼합구조 보의 휨 실험 검증

Verification of experimental test for PSC-Steel-PSC hybrid beam using nonlinear FEM analysis

김 상 효* · 원 정 훈** · 박 세 준*** · 이 찬 구****

Kim, Sang-Hyo · Won, Jung-Hun · Park, Se-Jun · Lee, Chan-Gu

요 약

본 연구에서는 비선형 FEM 해석을 이용하여 PSC(Prestressed concrete)와 강으로 구성된 혼합구조 보의 휨 실험을 검증하였다. 혼합구조 보의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 연결부는 Perfobond rib로 구성된 경우와 스티드로 구성된 경우를 고려하였다. 이종 재료가 접하는 경계면의 상호 작용에 대해 완전합성과 부분합성인 경우를 고려하여 혼합구조 보의 비선형 해석을 수행한 후 해석 결과와 실험 결과를 비교하였다. 하중-처짐관계, 파괴 형상 등의 해석 결과를 실험 결과와 비교한 결과, 부분합성을 고려한 모형이 실험 결과와 유사한 거동을 보였으며 또한 Perfobond rib를 갖는 실험체가 스티드를 갖는 실험체보다 해석 결과와 비교 시 안전측의 결과를 나타냈다.

keywords : 비선형 FEM 해석, 혼합구조, 휨 실험, 연결부, Perfobond rib

1. 서 론

최근 교량은 장대화, 장기간화 되어감에 따라 교량의 안전성, 시공성 및 경제성을 고려한 새로운 구조 형식의 개발이 요구되고 있다. 이에 따라 강과 PSC(Prestressed concrete)를 이음부에 의해 결합시킨 혼합구조에 대한 연구가 많이 진행되고 있고 그 적용 사례 또한 늘어나고 있는 실정이다. 본 연구에서는 PSC-Steel-PSC 혼합구조 보를 3차원으로 모형화하여 비선형 FEM 해석을 수행하였으며 실험 결과와의 비교·분석을 통해 혼합구조 보의 휨 실험을 검증하였다.

2. PSC-Steel-PSC 혼합구조 보의 비선형 해석

2.1 대상 구조물

본 연구의 대상 실험체는 PSC-Steel-PSC 혼합구조 보의 연결부 적용성을 평가하기 위해서 연결부 형태에 따라 총 4개의 실험체를 3.9m의 축소 모형으로 제작하였다(그림 1, 표 1). PSC형부와 연결부는 직사각형

* 정회원 · 연세대학교 토목공학과 교수 sanghyo@yonsei.ac.kr

** 정회원 · 연세대학교 토목공학과 박사 후 연구원 wjh0611@yonsei.ac.kr

*** 학생회원 · 연세대학교 토목공학과 석사과정 sejoonee@yonsei.ac.kr

**** 정회원 · GS건설 기술본부 토목구조팀 cglee@gsconst.co.kr

단면으로, 강형부는 I형 단면으로 제작하였으며, 강연선 4가닥을 사용하여 PSC형부와 연결부를 긴장하였다. 제하 실험은 실험체의 중앙에 집중하중을 가하는 3점 휨 실험으로 수행되었다.

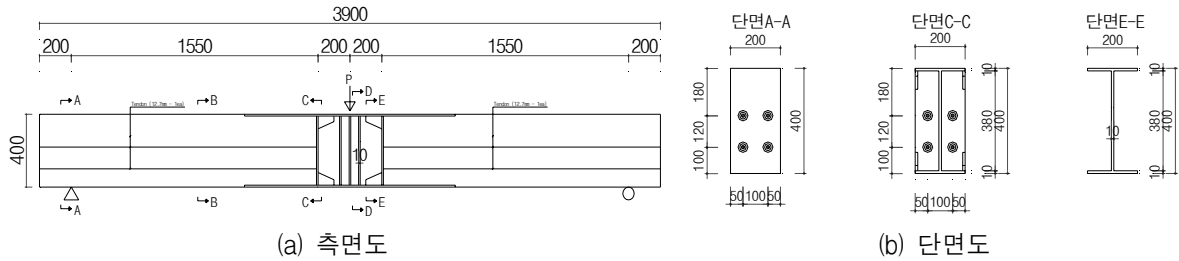


그림 1 실험체 형상

표 1 실험체 구분

실험체명	PR-ST-4-1	PR-ST-4-2	HS-ST-3	HS-ST-4
연결재	Perfobond rib		스터드(Head Stud)	
연결부 형상				

실험에 사용된 PSC형부의 콘크리트 설계강도는 50MPa이고 강형부의 강재는 허용응력 140MPa, 공칭항복강도 240MPa인 SS400 강재가 사용되었다. 철근은 항복강도 400MPa인 SD40이 사용되었고 PSC형부와 연결부의 긴장에는 극한강도 1900MPa인 SWPC7B 12.7mm 강연선이 사용되었다.

2.2 유한요소해석 모델

혼합구조 보의 휨 실험 검증에 위하여 상용 비선형 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS v.6.8을 이용하여 대상 실험체를 모형화하였다(그림 2). 콘크리트는 8절점 3차원 솔리드(Solid)요소로, 강재는 4절점 쉘(Shell)요소로 그리고 강연선은 2절점 트러스(Truss)요소로 모형화하였다. 좌측 지점부는 핀 조건을 적용하고 우측 지점부는 롤러 조건을 적용하여 단순 지지보를 구성하였다. 콘크리트의 재료 비선형 모델은 Concrete damaged plasticity를 적용하였고 강연선과 강재는 Bi-linear 모델로 가정하였다. 철근의 영향은 고려하지 않았으며 강연선은 그림 3에 나타난 이산 모델을 적용하였다. 이산 모델에서는 강연선을 요소처럼 고려하며 이때 강연선 요소 절점과 콘크리트 요소 절점의 연결이 필요하게 된다(전세진 등, 2004). 본 연구의 강연선은 부착으로 가정하고 자체적으로 2개의 절점을 갖는 트러스 요소로 모형화하고, 콘크리트 요소 절점과 직접 연결시켜 수치모형을 구성하였다.

PSC-Steel-PSC 혼합구조 보의 접합부는 완전히 부착되어 일체로 거동하지 않고 개구(Opening)와 슬립(Slip)이 발생하므로 정확한 실험 검증에 위하여 완전합성모형과 불완전합성모형을 각각 모형화하였다. 완전합성모형은 서로 인접한 강재 요소와 콘크리트 요소에 포함되어 있는 절점을 한 절점으로 묶어 변위와 회전 에 대한 자유도를 동일화하는 Tie constraint를 사용하여 구현하였다. 그리고 실험체와 가장 유사한 부분합성

모형은 Contact constraint를 사용하여 모형화하였다. 해석에 사용된 알고리즘은 Lagrange multiplier method이며 접촉면 마찰 모델은 Coulomb friction을 적용하였다. 강재와 콘크리트 접촉면 사이에 마찰계수는 0.7을 적용하였다.

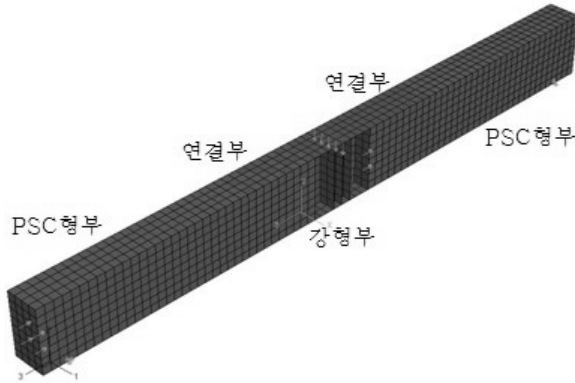


그림 2 해석 모델의 유한요소망

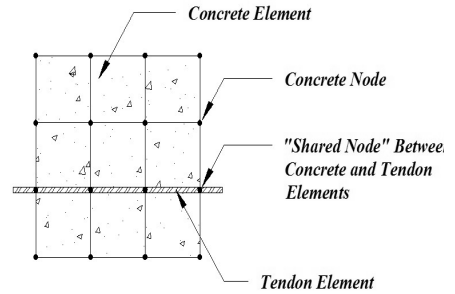


그림 3 강연선의 이산 모델

3. 비선형 해석결과

3.1. 하중-처짐 관계

해석에서 구한 실험체 중앙에서의 하중-처짐 관계를 실험결과와 비교하여 그림 4에 나타내었다. 완전합성 거동을 가정한 Tie constraint와 부분합성거동을 가정한 Contact constraint를 적용한 모형에서 두 경우 모두 탄성 한계까지는 실험결과와 비슷한 거동을 나타내었으나, 그 이후에서부터 극한하중까지 하중 저항 성능이나 전체적인 하중-변위 관계는 Contact를 적용한 모형이 실험결과와 유사한 경향을 나타내었다. Perfobond rib 전단연결재를 갖는 실험체의 결과는 Contact를 적용한 해석 결과보다 다소 안전측의 하중 저항 성능을 보이는 반면, 스티드 전단연결재를 갖는 실험체의 결과는 다소 작은 하중 저항 성능을 보인다. 따라서 Perfobond rib 전단연결재를 사용한 혼합구조의 설계 검증 시 Contact를 고려한 해석 모형이 보다 적합하다고 볼 수 있다. Tie를 적용한 모형은 완전합성의 거동을 보이므로 Contact를 적용한 모형이나 실험 결과에 비해 다소 높은 초기 강성을 갖는다. 이는 강재 요소와 콘크리트 요소의 절점이 공유되어 두 요소 간의 슬립이나 분리 없이 완전히 일체로 거동하기 때문이라고 판단된다.

3.2. 파괴 형상

PSC-Steel-PSC 혼합구조 보의 실험시 파괴형상과 해석에 의한 응력 분포를 각각 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 해석 및 실험 결과 혼합구조 보의 연결부 하단, 즉 경계면에서 휨 변형에 의한 균열이 발생하였으며 이후 하중이 증가함에 따라 PSC형부에 균열이 발생하여 상부로 진전되었다. 실험체와 해석 모형 모두 연결부 상부 플레이트와 PSC형부 접촉면에서 콘크리트의 압축파괴가 발생하였다.

4. 결론

본 연구에서는 비선형 FEM 해석을 이용하여 PSC-Steel-PSC 혼합구조 보의 휨 실험을 검증하였다. 혼합구조의 부분합성 거동을 구현하기 위해 사용된 Contact constraint 모델은 실험 결과와 유사한 결과를 보이고, 특히 Perfobond rib를 갖는 실험체의 경우 Contact를 이용한 유한요소해석

은 안전측의 결과를 나타내어 혼합구조 보의 설계 검증 시 가장 효과적인 방법이라고 판단된다.

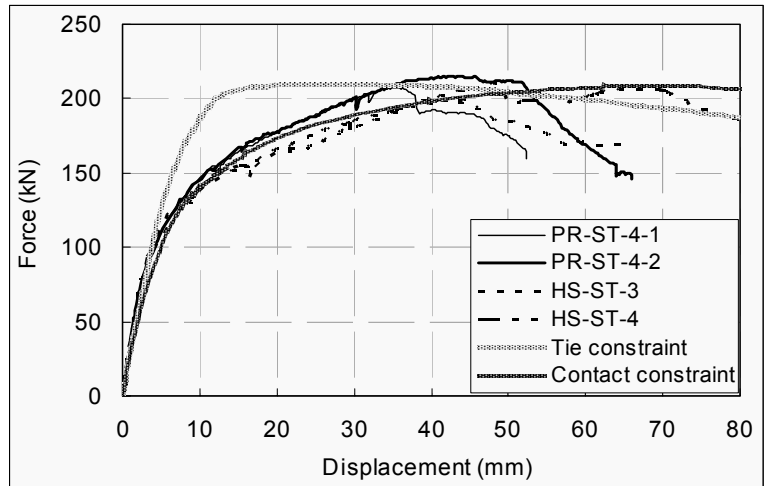


그림 4 하중-처짐관계

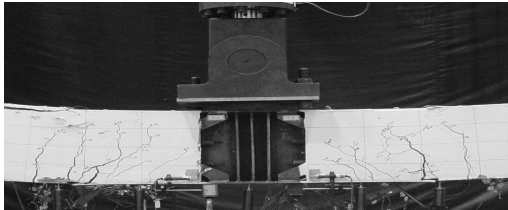


그림 5 실험체 파괴 형상

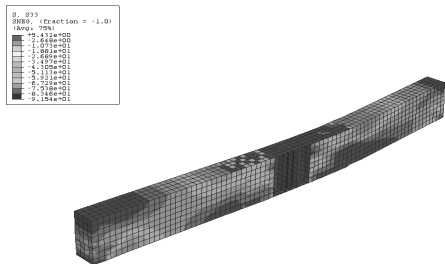


그림 6 해석 모형 변형 형상 및 응력도

감사의 글

본 연구는 GS건설과 삼표이앤씨의 연구비 지원 및 교육인적자원부 BK21사업의 일환인 연세대학교 사회 환경시스템공학부 미래사회기반시설 산학연공동사업단의 지원으로 이루어진 것으로, 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

전세진, 김수만 (2004) 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 해석기법, **콘크리트학회지**, 16(1), pp.57~64.
 전세진 (2005) 텐던의 프리스트레싱 모델링을 위한 등가하중법과 초기응력법의 비교연구, **대한토목학회논문집**, 25(5A), pp.899~906.
 ABAQUS (2008) ABAQUS Analysis User's Manual Ver. 6.8, SIMULIA.