

게르버 보 형식의 PSC 골조시스템의 구조성능

The Structural Performance of PSC Frame System with Gerber's beam

김 상 식^{*} 최 광 호^{**} 이 종 규^{***} 송 훈^{****}
Sang-Sik Kim Kwang-Ho Choi Jong-Gyu Lee Hun Song

ABSTRACT

이 연구는 게르버 보 형식의 포스트텐션 PC 골조 구조 시스템의 실용화를 위해 골조 전체의 구조 성능 시험을 수행하며, 여기서 보-기둥 접합부 및 내민 보-단순 보 접합부의 구조 성능과 골조의 안전성을 확인한다. 시험은 400 mm×800 mm 단면의 경간 3 m 보와 500 mm×600 mm 단면을 갖는 높이 3 m 기둥의 실물 크기 시험체를 제작하여, 기둥에 80 톤의 축 하중을 준 상태에서 단순 보 중앙에 하중을 가력하여 기둥-보 접합부와 단순 보-내민 보 단면 축소 연결부의 구조성능을 파악한다. 시험 결과, 보 - 기둥 접합부는 예상 설계 하중 40톤 이상에서도 강 접합에 가깝게 거동하였고, 단순 보 - 내민 보의 단면 축소 연결부는 경사철근의 사용으로 초기 균열 및 균열 확산에 대한 억제 효과가 있었으며, 예상 설계 전단력 40톤에서 안전하다는 것이 확인되었다.

1. 서론

이 연구는 국내 건설 여건과 규준을 만족하면서 20 ~ 30 m의 스패에 적용할 수 있는 구조시스템을 개발하기 위하여 게르버 보 형식의 프리스트레스트 PC 골조 구조시스템을 제안하고, 구조성능 시험을 통해 게르버 보 형식의 보-기둥 접합부와 내민 보-단순 보의 연결부에 대한 부재력 전달 및 지지성능을 파악하고 안정성과 시공성을 검토하고자 한다.

제안된 구조 시스템은 그림 1과 같이 중앙 단순 보는 프리텐션 상태로 공장 제작하거나 스패이 커지는 경우 현장에서 포스트텐션에 의한 세그멘탈 보 등으로 만들고, 기둥에 접합되는 내민 보 부위는 긴장재를 이용한 포스트텐션 공법으로 기둥에 압착하여 일체화시킨다. 제안된 구조 시스템의 안전성을 확인하고자 일차적으로 보-기둥 접합부의 구조 성능시험과 단순 보-내민 보 연결부의 전단 시험을 수행하였고 그 결과를 바탕으로 이 연구에서는 전체 골조에 대한 실물 크기 시험체를 제작하여 기둥과 보에 하중을 작용시키며 구조거동을 관찰하고 시험체 제작과정을 통해 시공 효율성을 확인한다.

* 정회원. 인하대학교 건축공학과 교수

** 정회원. 남서울대학교 건축학과 부교수

*** 정회원. POS-AC 구조설계팀, 건축구조기술사, 인하대학교 건축공학과 박사과정

**** 정회원. 인하대학교 건축공학과 석사과정

2. 게르버 보 형식의 PSC 골조 구조시험

2.1 시험체 계획

이 연구의 골조 시스템은 단변 5 m, 장변 20 m 정도의 주차장을 대상으로 가정하여 설계하였다. 게르버 보 형식의 내민 보 설계 시 고정하중 5 t/m, 적재하중 3.4 t/m에 의한 설계하중 8.4 t/m가 작용하는 25 m의 중앙 단순 보 반력 63 톤이 내민 보의 설계 하중이 되어야 하나, 이 연구 이전에 부위별 구조성능 확인을 위해 수행된 구조시험⁽³⁾ 시험체와 같은 400 mm × 800 mm 단면과 상세를 갖도록 하기 위해 63톤의 60 퍼센트 정도인 40 톤을 설계하중으로 하였다. 또한 단면 설계에서 쉬스 관과 단면 도심간의 편심을 18 cm로 하였고, 기둥은 단면이 500 mm × 600 mm, 길이 3 m가 되는 부재를 사용하였다. 이 연구의 시험에서 시험변수를 강연선의 긴장력으로 하여, 긴장력의 변화에 따른 구조 시스템의 거동 차이를 확인하고자 하였다. 강연선의 개수는 보 단면의 허용 인장 응력 내에서 필요한 긴장력을 손실을 고려하여 계산하였으며, 14- ϕ 12.7 mm의 강연선이 필요한 한 것으로 검토되었다. 시험체에 적용된 강연선 개수와 도입 긴장력 및 극한모멘트 값이 표 1에 나타나 있는데, 여기서 FR-1 시험체의 경우 보-기둥 접합부가 게르버 보 중앙의 단순 보보다 먼저 파괴되도록 강연선을 13 가닥으로 조정하였고, FR-2 시험체는 단순 보의 파괴를 유도하기 위해 강연선을 16 가닥으로 하였다. FR-3 시험체는 FR-2 와 강연선 가닥수가 같으나 보 단면의 허용 인장 응력도를 FR-2 시험체의 절반으로 줄이기 위해 도입 긴장력을 다르게 하였다.

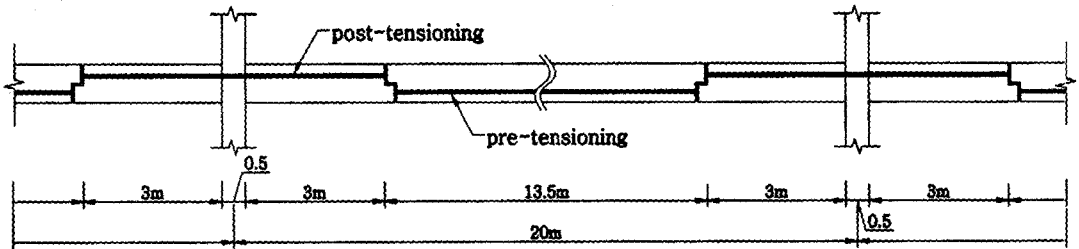
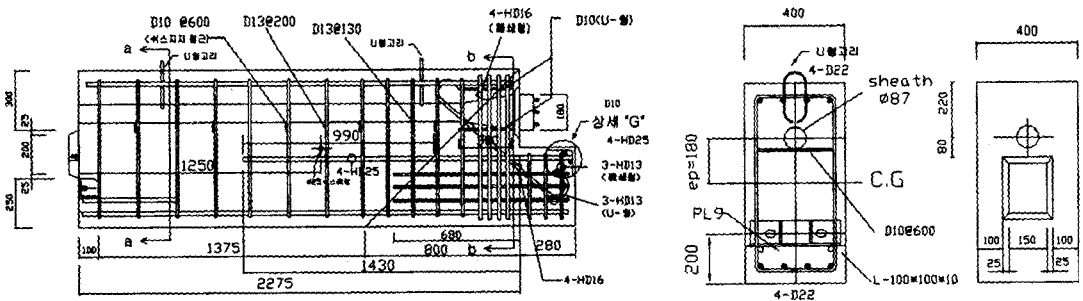


그림 1 제안된 게르버보 형식의 구조 시스템



(a) 보 배근체 시험도

(b) 보 단면 상세

그림 2 보 시험체 배근도

표 1 시험체별 도입된 긴장력

시험체명	FR-1	FR-2	FR-3
도입된 긴장력	150 톤	178 톤	198 톤
강연선 개수	13 가닥	16 가닥	16 가닥
Mu	100 t.m	100 t.m	100 t.m
φMn	95.2 t.m	110 t.m	111.6 t.m

보-기둥 접합부의 전단 내력은 전단지지 요소인 마찰력과 전단키의 전단내력을 합하여 117 톤으로 계산되어 설계 전단력 40 톤을 충분히 지지할 수 있었다. 단순 보 - 내민 보의 단면축소 연결부는 PCI 규준에 의해 전단설계가 되었는데, 단면 축소 연결부의 돌출부는 켈틸레버 거동에 의한 휨과 직접 전단에 대한 수평보강 철근을 배근하고, 사 인장 균열을 막기 위해서 수직 철근을 보강하였다. 또한 균열 진행의 억제에 효과적인 경사 철근을 추가하였으며, 콘크리트 압축강도는 현재 국내에서 PSC 부재용으로 널리 사용되는 400 kgf/cm^2 를 채택하였다.

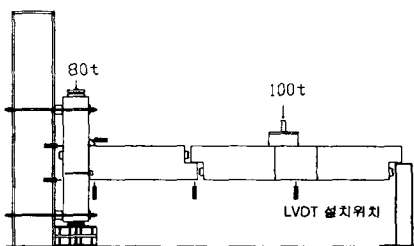
2.2 시험체 가력과 측정

2.2.1 시험체 가력

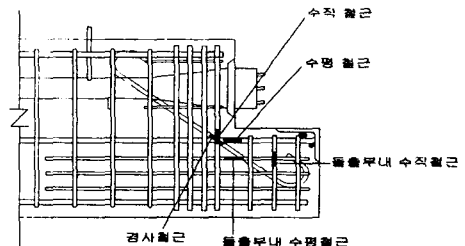
이 연구의 시험은 대전 소재 기계연구소에서 수행되었으며 시험체 설치는 그림 3(a)와 같다. 게르버 보 형식은 가운데 단순 보와 이를 지지하는 양 단부의 내민 보로 구성되어야 하나, 보의 대칭성으로 한 쪽의 내민 보는 제작하지 않았다. 시험체의 가력은 기둥에 80 톤의 축력을 가한 상태에서 단순 보의 중앙부에 100 톤 용량의 액추에이터를 사용하여 단계적으로 하중을 증가시키는 것으로 하였다.

2.2.2 시험체 거동 측정

이 연구의 시험은 사용 하중의 수준을 초과하는 하중을 가력하여 시험체의 선형 거동뿐만 아니라 비선형과 종국 파괴시의 거동 특성을 파악하고자 하였다. 시험체의 보-기둥 접합부에 대한 휨과 전단 거동을 알아보기 위해 접합부의 벌어짐과 처짐을 측정하기 위한 LVDT를 설치하였고, 내민 보 - 단순 보 단면축소 연결부의 전단 지지 성능을 알아보기 위해 수평과 수직, 경사 철근에 스트레인게이지를 부착하였으며 단부 처짐 측정용 LVDT를 설치하였다. 시험체의 거동 측정을 위한 게이지 위치는 그림 3에 나타나있다.



(a) 자동 변위계 설치 위치



(b) 스트레인게이지 부착 위치

그림 3 시험체 거동 측정 위치

3. 실험 결과 및 분석

이 연구의 골조 시험체는 보-기둥 접합부, 단면 축소 부 및 가운데 단순 보의 세 부분에서 각각 파괴가 발생할 수 있으므로 예상 설계 하중에 대해 우선적으로 파괴되는 부위를 고려하였다. 실제 구조물에서 안전성을 고려할 경우 기둥 혹은 보-기둥 접합부보다는 보의 파괴가 우선하는 것이 전체 골조의 안전성에 부합된다고 판단하여, 중앙 단순 보 부위가 먼저 파괴되도록 의도하였다. 따라서 단순 보가 먼저 파괴되었기 때문에 보-기둥 접합부와 단면 축소부는 최종 단계까지 가력하지 못하였으며 단순보가 파괴될 때까지의 보-기둥 접합부와 내민 보 - 단순보의 단면 축소 연결부에 대한 실험 결과는 다음과 같다.

3.1 균열 상황

각 시험체에 대한 실험은 가운데 단순보 상단의 압괴에 의한 파괴까지 진행되었으며 최종 단계의 보-기둥 접합부와 단면 축소부의 균열 상황은 그림 4와 같다. 단순 보의 압괴가 상당히 진행된 후 보-기둥 접합부의 압괴와 내민 보 - 단순보의 단면 축소 연결부의 모서리 균열이 진전되었으나 위험할 정도로는 발전하지 못하였다.

3.2 보-기둥 접합부 거동

보-기둥 접합부의 전단내력은 강연선의 긴장력에 의한 마찰력과 접합면의 전단키에 의해 평가된다. 중앙 단순보가 파괴된 최종 하중 단계에서 보-기둥 접합부의 전단지지 능력을 살펴본 결과 단순 보 파괴 시의 전단력에서도 보-기둥 접합부의 전단 변형이 전혀 관찰되지 않아 보-기둥 접합부는 설계 전단력 40t을 충분히 지지하는 것으로 판단된다.

보-기둥 접합부의 휨 내력을 살펴보기 위하여 단순 보가 파괴된 최종 하중 단계까지 보-기둥 접합면의 벌어짐과 단순 보 - 내민 보 연결부의 단부 처짐을 측정하였으며 이를 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 그림 5는 보-기둥 상부 벌어짐에 의한 $M-\theta$ 곡선으로서 80 tf·m 까지는 접합부의 회전이 거의 발생하지 않았으며 설계 모멘트 100 tf·m까지도 벌어짐은 2.0 mm 이하로 근소하고 접합부의 강성의 변화도 작은 것으로 나타났다. 그림 6은 보 단부의 하중-처짐 곡선으로서, 최대 사용 하중 26 톤 정도에서 처짐이 $l/250$ 에 해당하는 10 mm 가 발생하였으며 중앙 단순 보가 파괴된 40 톤까지도 선형으로 변화하여 급격한 변형 및 처짐은 발생하지 않았고 하중제거 후 다시 탄성적으로 복원되었다. 표 2는 접합면의 균열 하중시 휨모멘트와 내민 보의 단부 처짐값으로서 해석 값과 실험 값이 거의 일치하게 나타났다.

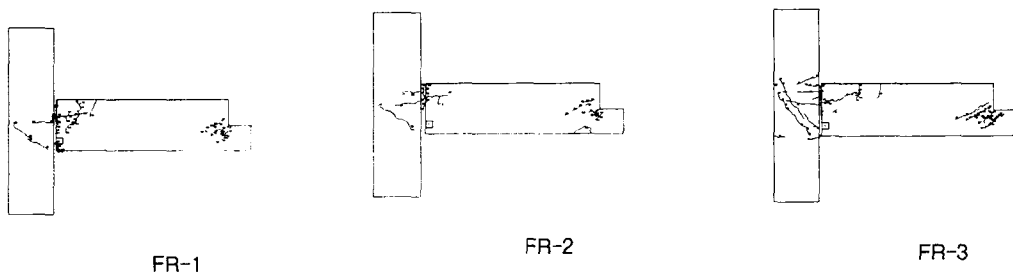


그림 4 시험체 균열 패턴

3.3 보의 단부 모서리

PCI 기준을 적용하여 설계된 내민 보-단순 보 단면 축소 연결부의 초기 균열 발생 하중 및 균열 크기는 표 3과 같으며, 단순 보가 압괴될 때의 최대 하중 40 t 이상에서도 보의 단부 모서리는 파괴되지 않고 제 성능을 발휘하고 있는 것으로 나타났다. 또한 경사철근의 추가적인 사용으로 초기 균

표 2 균열하중시의 모멘트와 처짐

시험체명	균열모멘트(tf · m)			균열하중 시 내민보의 단부 처짐(mm)		
	실험값	해석값	실험값/해석값	실험값	해석값	실험값/해석값
FR-1	72.5	72.12	1.01	3.94	4.23	0.93
FR-2	74.9		1.04	4.33		1.02
FR-3	76.2		1.06	3.96		0.94

표 3 re-entrant 모서리부의 초기 균열 하중 및 균열 상태

시험체 명	FR-1	FR-2	FR-3
초기균열 발생시의 하중	7.5톤	12톤	10톤
파괴시까지의 최대 균열 길이	65cm	80cm	80cm
파괴시까지의 최대 균열 폭	1mm이내	1mm이내	1mm이내

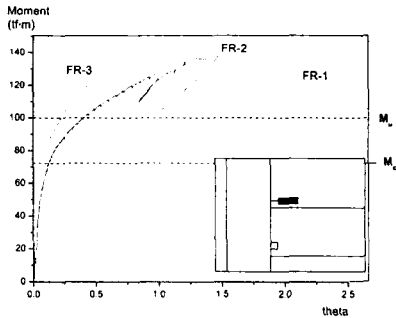


그림 5 보-기둥 상부 벌어짐

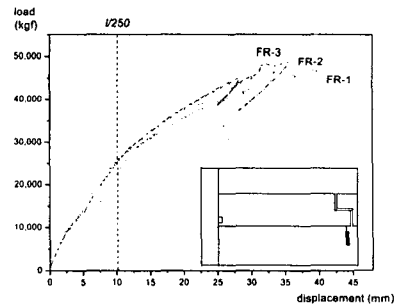
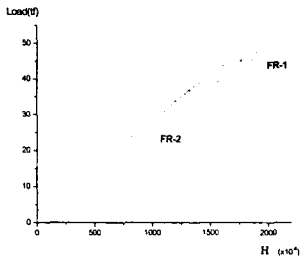
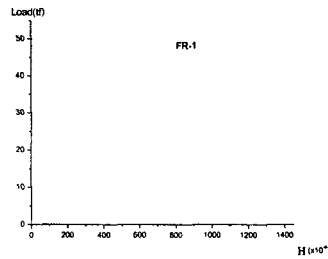


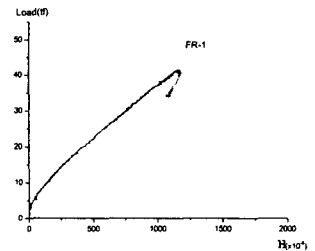
그림 6 보 단부 하중-처짐 곡선



a) 수직 철근



b) 수평 철근



c) 경사 철근

그림 7 철근의 응력-변형률 곡선

열 하중의 증가와 균열 발생 억제 효과가 있었다. 시험체의 철근에 부착된 스트레인지이지에 의해 측정된 변형률은 그림 7과 같다. 여기서, 가운데 단순보가 압괴되는 하중점에서 각 철근의 변형률은 항복 변형률 0.002 이하임을 알 수 있다. 따라서 단순 보 파괴 시까지 단면 축소부의 철근은 항복하지 않아, 설계 하중 이상에서도 이 연구에서 제안한 PSC골조 구조시스템은 안정적인 거동을 보이는 것으로 나타났다.

4. 결론

이 연구는 게르버 보 형식의 포스트텐션 PC 골조구조 시스템의 실용화를 위해 골조 전체의 구조성능 시험을 수행하여 보-기둥 접합부 및 내민 보-단순 보 접합부의 구조 성능과 골조의 안전성을 확인하였으며, 연구 결과는 다음과 같다.

1) 게르버 보 형식에서 중앙 단순보가 파괴된 최종 하중 단계까지 내민 보-기둥 접합부의 벌어짐은 설계 모멘트 $100 \text{ tf} \cdot \text{m}$ 까지도 2.0 mm 이하로 근소하고 접합부의 강성이 선형을 유지하고 있어, 강접 접합부로서 휨모멘트 지지능력을 확인할 수 있었고, 전단 변형은 관찰되지 않았다.

2) 내민 보 - 단순 보의 단면 축소 연결부는 10 tf의 전단력에서 초기 균열이 발생하였고, 중앙 단순보가 압괴 될 때의 최대 하중 40 tf이상에서도 균열 폭이 1 mm 이내이고 전체 전단 보강 철근의 변형률이 항복 변형률 0.002 이하의 선형변화를 보였으며, 경사철근의 추가 사용으로 초기 균열하중의 증가와 균열 발생 억제 효과를 볼 수 있었다.

3) 이 연구의 시험체 제작과 조립 시 현장 공사에 준하는 문제점이 검토되었으며, 이 과정에서 제안된 게르버 보 형식의 PSC 골조 구조시스템은 현장 적용이 용이하고 시공 효율성을 가지는 것으로 확인되었고, 구조시험 결과 보 - 기둥 접합부에서의 부재력지지 및 전달이 순조로운 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건교부 국책과제 “프리스트레스를 도입한 장스팬 PC골조 구조시스템의 개발”의 일환으로 수행된 연구로 건설교통부와 동국대학교, 삼성물산 PC 사업부문, 현대산업개발주식회사의 연구지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김상식, 철근콘크리트 구조설계, 문운당, 1998.
2. 신현목, 프리스트레스트 콘크리트, 동명사, 1999.
3. 김상식 외, “프리스트레스를 도입한 장스팬 PC골조 구조시스템의 개발”, 건교부 ‘99연구개발사업 보고서, R&D/99-0011, 2000. 11.
3. Collins, M. P., Mitchell, D., *Prestressed Concrete Structures*, Frentice Hall, Inc., 1991.
4. CEB-FIP Model Code, Design Code, Thomas Telford, 1991.
5. Mattock, A. H., “Shear Transfer in Concrete Having Reinforcement at an Angle to the Shear Plane”, *Shear in Reinforced Concrete*, ACI, Detroit, 1974.
6. PCI Design Handbook, 3rd Edition, Precast and Prestressed Concrete Institute, 1985.