

조립식 PSC 중공슬래브교의 휨거동에 관한 연구

A Study on Flexural Behavior of Precast Prestressed Concrete Hollow Slab Bridge

김기용* 송하원** 김호진*** 변근주** 김윤수****
Kim, Ki yong Song, Ha Won Kim, Ho Jin Byun, Keun Joo Kim, Yun Soo

ABSTRACT

Recently, precast concrete products have been increasingly used in the construction of bridges except for special bridges like long-span bridge due to their easy and high-quality construction. Specially the use of precast prestressed concrete hollow box slab bridges is also increased due to the merits in their construction. Thus, an experimental evaluation of flexural behavior of the precast PSC hollow box slab bridges and a development of effective analytical technique for the behavior are necessary. For the development, experimental study on the flexural behavior of the precast bridges up to ultimate states is needed.

In this study, two full-scale precast PSC hollow box slab girders are manufactured and full-scale flexural failure tests of the girders subjected to cyclic loading are carried out. For the failure analysis of the girders, the so-called volume control method is applied to finite element analysis of the precast PSC hollow box slab girders discretized using multi-layered shell elements. The analytical results by the volume control method is verified by comparing with test results.

1. 서론

최근 각종 교량의 건설에 있어 시공 효율과 품질이 우수한 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 구조의 교량이 주종을 이루고 있으며 건설산업이 발달한 선진외국에서는 인접 프리캐스트 PSC 빔을 체결하여 일체화시킨 다중보 형식의 교량이 실용도가 높은 공법으로 활용되어 왔다. 이러한 다중보 형식 교량의 추세와 수요에 비해 국내의 시공사례는 전무하고 인식조차 불분명하여 보다 적극적인 거동특성 및 해석 등의 연구가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 다중보 형식의 교량으로서 조립식 PSC 중공슬래브 교량을 실물로 제작하여 휨 파괴 실험을 통해 반복하중에 따른 휨 파괴 거동을 규명하고 다층적층셀 요소를 도입한 체적제어법을 적용하여 유한요소 해석을 수행하였다.

* 정희원, 도화종합기술공사 사원

** 정희원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

*** 정희원, 연세대학교 토목공학전공 박사과정

**** 정희원, 삼표산업(주) 교량기술연구소장

2. 휨 파괴 시험

2.1 대상부재 재원

시험체는 증공형 박스 단면으로 설계기준강도 500 kgf/cm²로 제작된 순경간 18 m의 단순 프리캐스트 PSC 부재이다. $\phi 15.2$ SWPC 7BN의 PS 강연선 15개를 사용하였으며 하연 PS 강연선 6개는 단부의 응력 감소를 위해 비부착으로 적용하였다. 시험대상 부재의 단면도는 그림 1과 같고 물성값은 표 1과 같다.

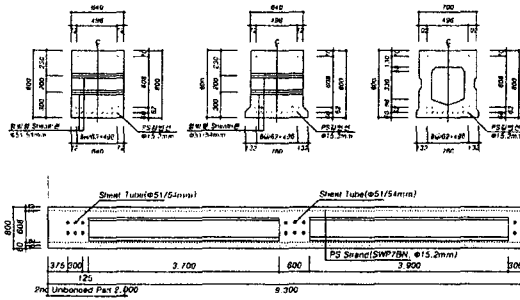


그림 1 시험대상 부재의 종단면 및 횡단면도

표 1 시험대상 부재의 물성값

단 면 적 A	약 0.4 m ²
시 편 길 이 L	18.6 m 순경간 18.0 m
최 대 모 멘 트 M_{max}	225.0 tonf · m
공 칭 하 중 ϕP_n (4 point bending)	46.8 tonf
부 재 중 량 W	약 20.0 tonf

2.2 시험방법

그림 2와 같이 2대의 정적 액추에이터를 중앙에서 각각 2 m씩 떨어진 지점에 설치하여 1 tonf/min의 재하속도로 하중을 재하하였다. 한편 콘크리트 · 강선 게이지 및 변위측정계(LVDT)를 설치하여 표 2의 시험 하중단계에서 각각의 처짐과 변형률을 모니터링하고 균열폭과 균열진행방향을 측정하여 균열도를 작성하였다.

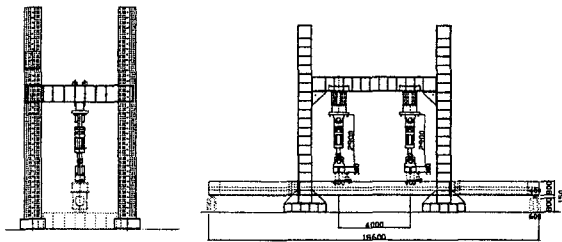


그림 2 시험 재하장치도

표 2 시험하중단계

하 중 (tonf)	예 상 처 짐 (mm)	내 용
$P_{service}$	15.3	편도 4차선 교량에서 발생하는 최대 활하중 모멘트의 대응 하중
P_0	19.8	중앙부 하면응력이 0이 되는 하중
P_{crack}	33.2	균열 하중
P_{ult}	225.4	극한강도에 도달하는 하중

2.3 시험결과 및 분석

그림 3에서와 같이 시험대상 부재는 사용하중 범위에서 안정적인 탄성거동을 보였으며, 부재의 공칭 하중인 46.8 tonf를 약 21% 초과하는 56.8 tonf에서 파괴되어 안전성에 문제가 없는 것으로 시험입증 되었다. 한편, 부재의 균열은 단부 부분을 제외한 중앙단면의 L/4 범위 내에서 발생되었고 최대 균열폭은 3 mm로 측정되었다. 시험대상 부재의 균열도와 시험전경을 그림 4과 그림 5에 각각 나타내었다.

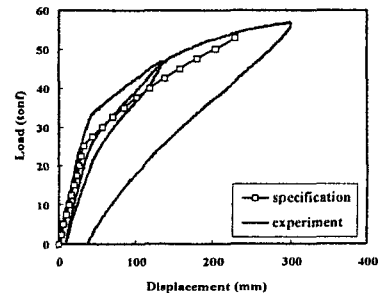


그림 3 하중-변위 시험결과 (중앙단면)

(a) 시험대상 부재의 균열발생전경



(b) 중앙부 균열발생도

그림 4 시험대상 부재의 균열발생도

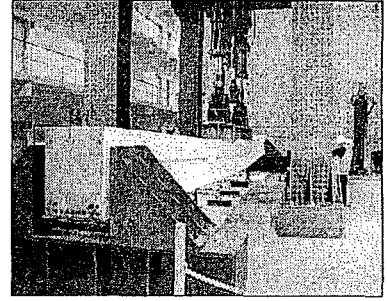


그림 5 시험전경

3. 조립식 PSC 중공슬래브교의 휨 거동 해석

3.1 해석 모델링

조립식 PSC 중공슬래브교의 해석을 위해 시험대상 부재를 기하학적인 형상에 따라서 2개의 층을 갖는 8 절점 적층셀요소를 적용하여 그림 6과 같이 모델링하였다. 한편 대상부재의 해석에는 하중제어 및 변위제어 해석방법의 단점을 보완할 수 있는 체적제어법을 적용하였으며 재하점에서 탄성범위 내의 초기변형을 유도한 후 요소를 체적제어하여 파괴에 도달할 때까지의 거동을 해석하였다. 해석 모델에 사용된 물성값은 표 3과 같다.

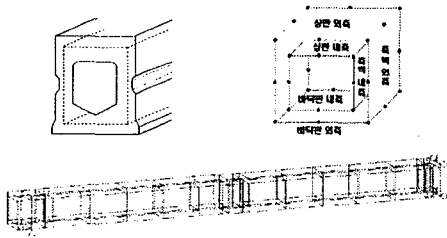
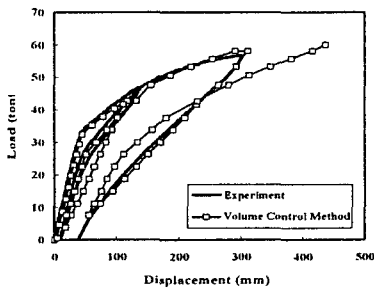


그림 6 다층적층셀 요소 모델링

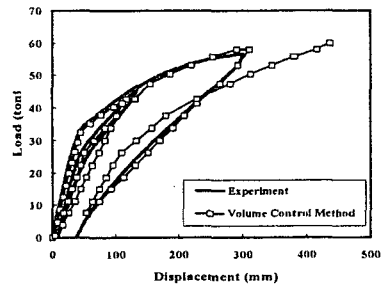
표 3 해석에 사용한 각 요소의 물성값

요소	콘크리트 압축강도	철근비 ρ_s	PS 강선비 ρ_{ps}
상판 외측	500 (kgf/cm ²)	0.004	0.0052
상판 내측		0.0054	-
측벽 외측		0.0054	-
측벽 내측		-	0.0054
바닥판 외측		0.004	0.0233
바닥판 내측		-	0.0132

3.2 해석결과



(a) 중앙지점 하중-변위 관계



(b) 1/4지점 하중-변위 관계

그림 7 제어제어법을 이용한 하중-변위 해석 결과 비교

체적제어 기법을 적용하여 해석한 결과 그림 7과 같이 시험결과와 유사한 경향으로 해석되었다. 탄소성 이론에 의한 감소된 강성은 균일하게 회복되는 것으로 나타났으며, 재재하과정을 통하여 시험부재가 완전히 파괴에 이르는 시점까지 해석한 결과 시험값보다 다소 큰 하중에서 파괴에 도달하였다. 한편 시험에서는 하중 재하과정에서 발생된 균열이 닫히는 현상으로 인해 소성 변형이 빠르게 회복된 후 손상된 탄성거동을 하는 것으로 나타났다.

또한 본 연구에서는 분포균열모델을 체적제어기법에 적용하여 각 적분점에서의 균열 진행방향을 예측하고 강성의 감소를 해석하였다. 각 적분점에서 해석단계(하중단계)별 균열의 진행방향 및 균열 분포형상은 그림 8과 같다. 균열은 시험결과와 마찬가지로 부재의 중앙부분에 집중 발생되고 초기균열은 하중 재하점과 중앙점 사이에서만 발생하는 것으로 해석되었다.

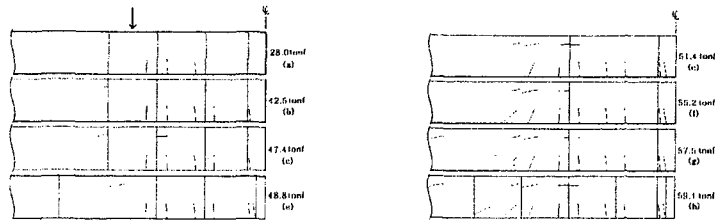


그림 8 하중 변화에 따른 균열의 진행 방향

4. 결론

- 1) 실물 PSC 부재의 휨파괴 시험을 통해 하중이력에 의존한 파괴 형상 및 휨응력에 의하여 발생하는 변위, 균열 등의 분석하여 조립식 PSC 중공슬래브교의 휨거동을 규명하였다.
- 2) 조립식 PSC 중공슬래브교를 다층적층셀 요소를 적용한 체적제어법으로 해석하여 시험결과와 비교함으로써 체적제어법의 적용성을 검증하였다.

참고문헌

- 1) Maekawa, K., Irawan, P., and Okamura, H. (1997), "Path-Dependent Three-Dimensional Constitutive Laws of Reinforced Concrete-Formulation and Experimental Verifications", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 5, No. 6, pp. 117-128.
- 2) Maekawa, K., Okamura, H., and Pimanmas, A. (2003), Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press.
- 3) Song, H.-W., Bang, J. Y., Byun, K. J., and Choi, K. R. (2001a), "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Reactor Containment Vessels subjected to Internal Pressure", Nuclear Engineering and Design, Accepted.
- 4) Song, H.-W., Shim, S. H., Byun, K. J., and Maekawa, K. (2002), "Failure Analysis of RC Shell Structures using Layered Shell Element with Pressure Node", Journal of the Structural Engineering, Vol. 128, No. 5, pp. 655-664.