

장경간 Spliced PSC 거더의 휨거동에 관한 실험적연구

An Experimental Study on the Flexural Behavior of Long Span Spliced PSC Girder

심 종 성^{*} 오 흥 섭^{**} 김 민 수^{***}
Sim, Jongsung Oh, Hongseob Kim, Min-Su

ABSTRACT

A bulb-tee sectioned girder is proposed for long span bridge exceeding 40 meters. The proposed bulb-tee girder is developed by non-linear analysis process. This study investigates the structural behavior and efficiency of proposed bulb-tee sectioned girder using 1/2 scaled prototype beam specimen. Three specimens are tested under three point static loading system. The crack patterns, failure mode and ultimate load capacity of each specimen are reported in this paper and they are compared to each other.

1. 서론

국내건설환경의 변화 등으로 인하여 새로운 도로망의 확충을 필요로 하고 있으며, 이 경우 보다 경제적이고 효율적인 교량형식의 선정이 요구되고 있다[1,2,3,5]. 따라서 본 연구에서는 일차적으로 장경간 교량에 적합하고 경제적인 40, 50 및 60m 지간에 대하여 표준거더의 단면을 제안하였으며, 지간이 장대화됨에 따른 교량 상부 시공시에 발생할 수 있는 문제점을 해결할 수 있는 방안으로서 집합시공 기법(spliced method)을 제안하였다[1,2,3]. 제안된 단면 및 시공기법은 이론적인 해석만을 통하여 제안 되었으므로, 이에 대한 안전성 및 구조 효율성을 확인하기 위하여 본 연구에서는 실험적 검증을 실시 하였다. 구조실험을 수행함으로써 이론 설계시 나타나지 않은 시공상의 문제점 및 거동 특성을 고찰할 수 있었으며, 본 논문에서는 이들을 요약하여 소개하였다.

*정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 교수

**한양대학교 토목공학과 박사과정

***한양대학교 토목·환경공학과 석사과정

2. 장경간 Spliced PSC Bulb-Tee 거더의 축소모델 시험

2.1 시험개요

개발된 거더단면에 대한 현장 적용 가능성 및 구조거동 특성을 입증하기 위한 실험적 연구로서 본 연구에서는 제안된 시공방법을 사용한 축소모델 실험을 통하여 구조거동 특성을 규명하고자 하였으며, 또한 실험 결과를 기초로 하여 Bulb-Tee 거더의 구조적 장·단점을 분석하였다. 축소모델 실험은 50m 제안단면의 1/2 축소모델 시험을 수행하였으며, 설계 조건 등은 실험 여건 및 시공상 문제점 등을 감안하여 가급적 제안 단면의 경우와 동일하게 적용하였다.

2.2 시험변수

본 시험에서는 일체제작 Control 거더와 Spliced 거더, 그리고 슬래브를 타설한 합성 Spliced 거더 시험체를 제작하였으며, 시험 변수는 표 1과 같다. 신공법으로 제안된 Bulb-Tee 거더의 접합시공방법 (spliced method)의 현장 적용가능성과 일체형 거더와의 거동 차이를 고찰하기 위하여 Control 거더와 Spliced 거더를 제작하여 시험을 수행하였다. PSC 거더는 슬래브 합성 전, 후의 거동에 차이가 있으므로, 이에 대한 영향을 정확히 고찰하고자 합성 Spliced 거더의 하중-변위관계 및 파괴양상 등을 Control 거더와 비교 관찰하였다.

표 1 시험변수

설계지간	콘크리트 강도	거더 시공방법	상부 슬래브	시험체 명	시험체 갯수
25m	400kg/cm ²	일체제작	×	Control 거더	1
		segment제작	×	Spliced 거더	1
		segment제작	○	합성 Spliced 거더	1

2.3 시험체 설계

시험체의 설계는 그림 1과 같이 제안된 지간 50m 교량의 1/2 단면축소모델에 대하여 DB-24의 내하력을 가질 수 있도록 설계하였다[1]. 이때 콘크리트의 압축강도는 현재 국내에서 PSC 거더용으로 가장 널리 상용되고 있는 400 kg/cm²을 채택하였다. 축소모델 교량의 설계지간은 24.9m이며, 교폭은 7.42m의 2차선 교량으로 설계하였다. 교량 상판의 경우 슬래브 최소 두께는 15cm로 설계하였으며, 시험체의 상세제원은 그림 2와 같다.

시험체의 설계는 개발된 프로그램을 사용하여 휨, 전단 및 정착부에 대한 상세 설계를 실시하였으며, 접합부에 대해서도 제안거더와 동일한 방법을 적용하였다. 이때 단면과 긴장재량에 비하여 주철근의 단면적이 작기 때문에 휨해석 및 설계에서는 철근에 대한 영향을 고려하지 않았다.

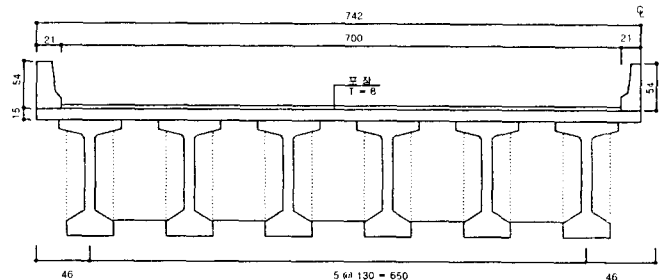
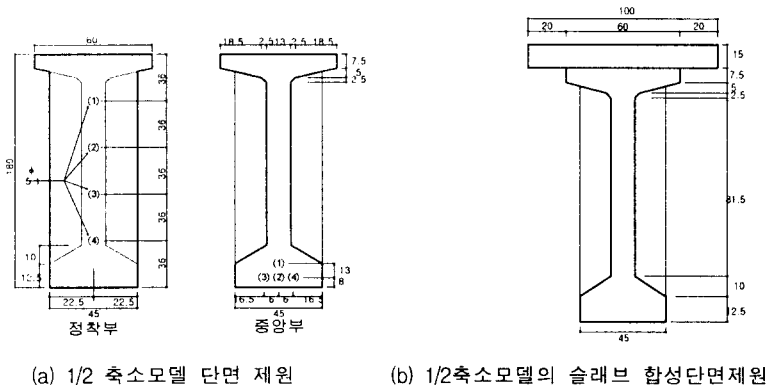


그림 1 지간 25m의 축소모델 교량 단면도(단위 : cm)



(a) 1/2 축소모델 단면 제원 (b) 1/2축소모델의 슬래브 합성단면제원

그림 2 축소모델 시험체의 단면제원(단위 : cm)

2.4 시험체 제작

시험체 제작시 콘크리트의 압축강도는 400kg/cm^2 강도이며, 콘크리트의 건조수축 등으로 인한 품질 저하를 피하고 콘크리트의 조기강도 발현을 위하여 타설후 12시간동안 증기양생을 실시하였다.

접합부의 시공은 사진 1과 같으며, Spliced 거더 시험체의 경우 segment의 접합부는 지점으로부터 6.25m 정도 떨어진 곳에 두어 휨 및 전단의 영향을 최소화하고자 하였다. 또한 접합부 시공시에는 에폭시로 접합할 뿐만 아니라, 양단 segment 복부를 temporary tendon으로 구속하는 방법으로 시공하였다.

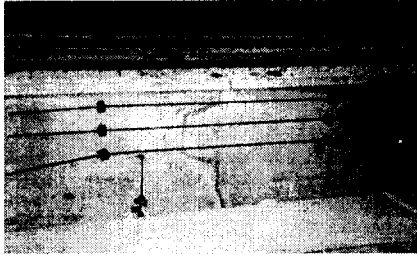


사진 1 접합부 시공 전경

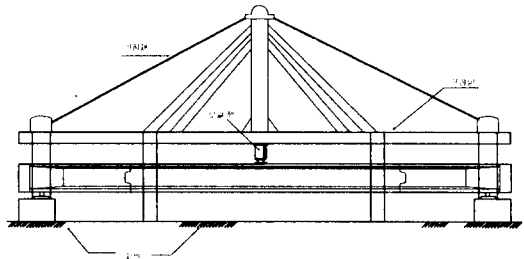


그림 3 PSC Bulb-Tee 거더 가력 방법

각 시험체의 프리스트레스 도입직후의 설계 솟음은 5.48cm로 계산되었으나, 시험체의 실측량은 5.8cm~9cm 정도로 관찰되었다. 또한, 잭킹 후 7일이 경과한 후의 솟음이 약간 증가하는 것으로 나타나고 있다. Spliced 거더 시험체의 경우 접합부 단면에서의 처짐이 약간 불연속성을 나타내는 것으로 조사되고 있으며, 이는 접합부에서 콘크리트 및 철근이 연속화되지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

2.5 재하 및 측정방법

시험체의 휨거동 및 파괴특성을 고찰하기 위하여 제작된 시험체에 대한 휨과파 시험을 그림 3과 같이 수행하였다. 휨 과파 시험의 가력장치는 200ton 용량의 유압잭(Oil Jack)을 사용하여 3점 재하 방법으로 중앙집중 재하하였고, 이때 하중은 10ton 단위로 증가시킨후, 탄성회복 될 때까지 하중을 제거하였다가 다시 가력하는 방법을 사용하여 극한 하중까지 하중제어 방법에 의해 시험을 수행하였다. 시

험체 중앙부 철근에 철근게이지를 부착하였으며, 시험체 중앙부 및 단부로부터 4m, 8m 지점에서 변위를 측정하였다.

3. 시험결과

휨파괴 시험결과 비합성 단면 거더인 Control 거더와 Spliced 거더는 하중이 증가함에 따라 균열이후의 거동에서 휨 및 압축의 복합하중에 의하여 파괴되었으며, 인장주철근이 항복한 이후 최대하중에서 상단부 콘크리트가 급작스럽게 파괴되는 형태를 나타내었다. 그러나 합성단면 시험체(합성 Spliced 거더)의 경우에는 인장주철근이 항복한 이후에도 충분한 연성을 확보한 것으로 관찰되었으며, 최대하중에서 상단 슬래브의 콘크리트가 압축파괴되는 것으로 나타났다. 그림 4에는 시험체별 균열도를 나타내었다. Control 거더는 균열하중 이후 전형적인 휨균열이 진전되어 파괴되는 휨-압축파괴 형태를 나타내었으며, Spliced 시험체의 경우에는 접합부의 경계조건 변화에 의하여 접합부에 휨인장균열이 발생한 것으로 나타났으며, 시험체 중앙부의 균열 개수는 감소하는 것으로 관찰되었다. 그러나 Spliced 거더의 휨파괴모드는 Control 거더와 동일한 복합파괴형태를 나타내었다. 합성 Spliced 거더의 경우에는 비합성단면 시험체에 비하여 휨균열의 개수가 증가하였으며, 균열의 폭이 감소하는 것으로 관찰되었고, 파괴형태 또한 연성적인 휨파괴형태를 나타내었다.

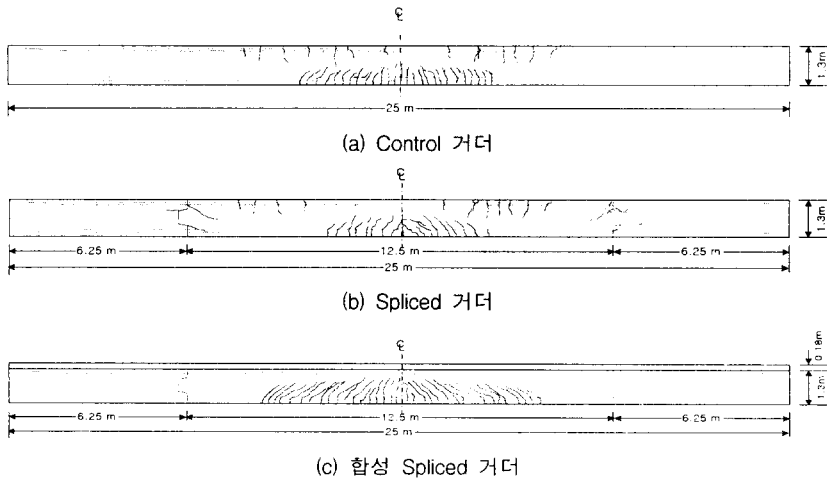


그림 4 시험체별 균열도

모멘트-변위곡선을 통한 거동을 분석한 결과 Spliced 거더와 일체제작된 Control 거더의 구조거동은 그림 5와 같으며, Spliced 거더와 합성 Spliced 거더와의 모멘트-변위 관계는 그림 6과 같다. 그림 5에 나타난 것과 같이 Control 시험체와 Spliced 시험체의 전체적인 거동은 유사한 것으로 나타났으며, 균열 모멘트 및 최대하중은 Spliced 시험체의 경우 약간 낮게 관찰되었다. 그러나 균열 이전 및 이후의 강성은 두 시험체 모두 거의 동일한 것으로 고찰되었다. 그림 6과 같이 합성 Spliced 거더의 경우에는 비합성 단면에 비하여 구조성능이 우수한 것으로 나타났으며, 또한 철근의 항복이후 충분한 연성을 확보한 것을 알 수 있다. 이것은 상부 슬래브 합성으로 인하여 중립축이 상대적으로 높아졌기 때문인 것으로 판단되며, 따라서 실제 거더의 현장 적용시에도 사용하중단계에서 충분한 안전도를 획득할 수 있을 것으로 판단된다.

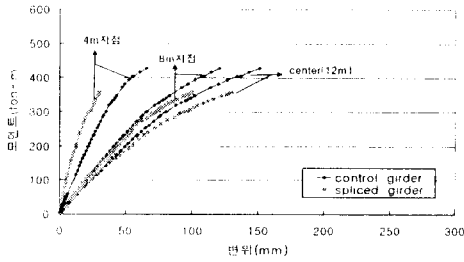


그림 5 Control Girder와 Spliced Girder의 모멘트 변위 선도

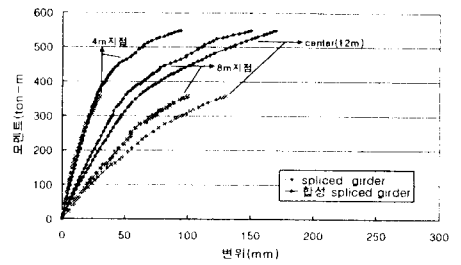


그림 6 Spliced 거더와 합성 Spliced 거더의 모멘트 변위 선도

표 2 시험결과와 강도설계법에 따른 균열모멘트, 파괴하중 및 변위 비교

시험체명	접합부	상부 슬래브	균열모멘트(ton-m)			공칭강도와 파괴강도의 비교 (ton-m)			최대하중변위(cm) (시험변위/해석변위)		
			시험값	해석값	시험값/해석값	파괴강도	공칭강도	파괴강도/공칭강도	시험 결과 최중변위(cm)	해석치짐 (cm)	시험변위/해석변위
Control 거더	×	×	250	202.87	1.23	430	401.73	1.07	15.3	15.074	1.015
Spliced 거더	○	×	230	202.87	1.13	395	401.73	0.983	15	15.074	0.995
합성 Spliced 거더	○	○	350	265.37	1.33	550	532	1.034	17.1	12.393	1.38

표 2에는 시험결과와 강도설계법에 의한 시험체별 균열 모멘트, 파괴모멘트 및 치짐을 나타내었다. 균열모멘트의 경우 비합성 시험체의 경우 모두 해석값보다 13~23%정도 높은 것으로 나타났으며, 합성단면 시험체의 경우에도 33% 정도 높은 것으로 나타났다. 이것은 사용단계에서의 Bulb-Tee 거더의 휨거동이 충분히 안정적임을 나타내는 것이며, 슬래브합성작용으로 인하여 거더의 강성이 상대적으로 크게 증가되었음을 나타내는 것이다. 시험체의 파괴강도는 강도설계법에 의한 공칭강도와 거의 유사한 것으로 나타났다. 합성 spliced 거더의 경우 최대하중 작용시의 치짐 또한 상대적으로 큰 것으로 관찰되었으며, 이는 부재가 충분한 연성을 확보하였기 때문인 것으로 판단된다.

그림 7은 단면의 각 위치에서 균열하중과 파괴하중에서의 모멘트-변형률의 변화를 도시한 그림으로서, 균열모멘트에서 Control 거더와 Spliced 거더의 변형률을 비교하여 볼 때 거의 같은 거동을 하며, 따라서 접합부 시공에 의한 Spliced 거더는 슬래브를 합성함으로써 구조거동에는 영향력이 거의 없다는 것을 알 수 있다. 이에 반하여 슬래브를 합성한 합성 Spliced 거더의 경우 중립축 상승으로 인한 휨강성의 증가로 인하여 균열모멘트 및 파괴모멘트의 값이 비합성거더에 비해 훨씬 증가하였으며, 인장축 변형률이 상대적으로 큰 것을 알 수 있다(그림 5, 표2 참조).

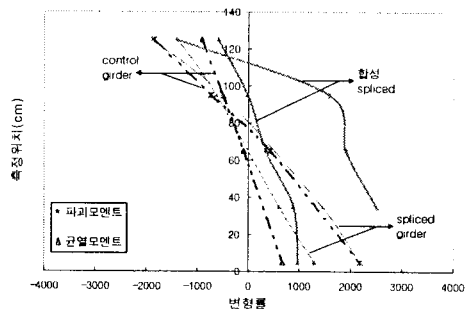


그림 7 측정위치별 변형률관계

4. 결론

제안된 Spliced Bulb-Tee거더의 설계 및 휨 파괴시험결과를 통한 PSC Bulb-Tee거더의 휨거동 특성을 다음과 같이 기술하였다.

1. 제안된 장경간 Spliced 거더의 휨거동 특성을 고찰하기 위하여 실제 거더의 거동을 충분히 반영할 수 있으며, Bulb-Tee거더의 단면 특성을 그대로 유지할 수 있는 50m 제안단면에 대한 1/2축소모델에 대하여 구조실험을 수행하였다. 시험체는 지간 25m, 높이 1.3m의 시험체로 설계되었으며, 이론 연구를 통하여 제안된 50m 지간 단면과 동일한 시공방법으로 제작하였다.
2. 휨파괴 시험결과 모든 시험체가 압축 및 휨파괴되는 복합파괴형상을 나타내었다. 시험체별 균열모멘트는 모든 시험체가 해석값에 비해 실험값이 크게 나타났으며, 극한강도와 파괴강도는 거의 비슷한 결과를 나타냈다. 각 시험체의 최대하중을 비교하여 본 결과 일체거더인 Control 거더에 비해 Spliced 거더는 약 8% 감소하였으며, 합성 Spliced 거더는 Control 거더에 비해 28%, Spliced 거더에 비해 39% 증가한 것으로 나타났다. 따라서 제안된 단면은 구조적 충분한 효율성 갖으며, 접합부는 거동상의 안전에 영향력이 거의 없는 것으로 판단된다.
3. 각 시험체의 최대하중이 작용시 처짐량을 비교한 결과 Control 거더와 Spliced 거더의 경우 캠버량의 차이를 보이고 있으나 하중재하에 의한 총 처짐량은 거의 같은 값을 나타내며 합성 Spliced 거더의 경우 해석결과와 비교하여 실제 처짐량이 38% 정도 증가하였다. 이는 제안거더의 경우 합성 단면에서 충분한 연성을 확보함으로써 구조적 안전성이 확대된 것으로 판단된다

감사의 글

본 연구는 대우엔지니어링의 연구비 지원에 의하여 연구가 진행되었으며, 저자들은 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 심종성, 한만엽, 오홍섭, 김정구, "장경간 Spliced PSC 거더교량의 개발에 대한 연구", 한국콘크리트학회 학술발표 논문집, V. 10, No. 2, Nov.,1998, pp.680~685
2. Abdel-Karim, Ahmad, and Tadros, Maher K., "Design and Construction of Spliced I-Girder Bridges," PCI JOURNAL, V. 37, No. 4, July-August 1992, pp. 114-122.
3. Abdel-Karim, Ahmad, and Tadros, Maher K., "State-of-the-Art of Precast/Prestressed Spliced-Girder Bridges," PCI Special Publication sponsored by PCI Committee on Bridges, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL, 1993, 133pp.
4. Bardow, Alexander K., Seraderian, Rita L., Culmo, Michael P., "Design, Fabrication and Construction of the New England Bulb-Tee Girder," PCI JOURNAL, Nov-Dec 97, pp30-40.
5. Federal Highway Administration "Optimized Sections for High Strength Concrete Bridge Girders," FHWA-RD-95-180, Aug., 1997