



분절 PSC 박스거더의 정적거동에 관한 실험적 연구

정원석^{1)*} · 김재홍²⁾ · 정대기³⁾

¹⁾한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 ²⁾삼표이앤씨(주) ³⁾대우건설 기술연구원

Experimental Study on the Static Behavior of the Spliced PSC Box Girder

Won-Seok Chung^{1)*}, Jae-Hueng Kim²⁾, and Dae-Ki Chung³⁾

¹⁾Track & Civil Engineering Dept., Korea Railroad Research Institute, Uiwang 463-757, Korea

²⁾Sampyo E&C, Seoul 138-834, Korea

³⁾Daewoo Construction & Engineering, Seoul 138-834, Korea

ABSTRACT The main objective of the paper is to investigate the static behavior of a prestressed concrete (PSC) girder that has been spliced with precast box segments. A 20 m long full-scale spliced PSC girder is fabricated and tested to compare its static performance against a monolithic girder. The monolithic girder has the same geometric and material properties with respect to the spliced girder. This includes internal strain, deflections, neutral axis position, and crack patterns for both girders. The test also consists of monitoring relative displacements occurring across the joints. Both the horizontal displacement (gap) and vertical displacement (sliding) are measured throughout the loading procedure. All results have been compared to those obtained from the monolithic girder. It has been demonstrated that the spliced girder offers close behavior with respect to the monolithic girder up to the crack load. Both girders exhibit ductile flexural failure rather than abrupt shear failure at joints.

Keywords : prestressed concrete, spliced girder, behavior, connection

1. 서 론

최근에는 하나의 프리캐스트 거더를 분할하여 세그먼트로 각각 공장에서 제작하여 현장으로 운반한 후 포스트텐션 방식으로 체결하여 가설하는 분절공법이 개발되어지고 있다^{1,4)}. 특히 단면이 상대적으로 큰 철도교 거더의 경우에는 프리캐스트콘크리트 거더를 공장에서 우수한 품질관리를 통해 제작하더라도 현장으로 운반하는데 거더 중량의 문제로 인한 여러 가지 도로교통법 상의 제약을 받게 된다. 분절공법을 이용하면 각각의 세그먼트를 공장에서 제작하고 이를 운반하여 현장에서 일체화함으로써 현장타설을 최소화 할 수 있는 프리캐스트 공법의 장점을 살릴 수 있다. 분절공법으로 제작된 거더의 연결부는 구조적 불연속면으로 응력집중이나 과도한 변위가 발생할 수 있는 부분이므로 재하 실험을 통한 분절 거더의 구조적 성능 검증 연구가 요구된다.

이호준 등⁵⁾은 분절부의 국부 거동을 분석하기 위해 축소 모형 실험을 수행하였다. 실험 변수는 연결부 전단연결재의 형상 및 구속응력의 도입 유무로, 저면/돌출 높이가 비가 1/3일 때 최대 전단저항력을 보이고 있음을 보

였으며 구속응력이 도입되었을 때 강성과 강도에서 큰 증가를 보임을 확인하였다. Kaneko 등^{6,7)}은 전단연결재의 거동해석을 위한 파괴역학모델을 제시하고 이를 실험적으로 검증하였으며, Annamalai⁸⁾는 건물에서 사용되는 전단연결재의 거동을 연구하였다. Stanton⁹⁾은 중공 형태가 아닌 상부 개구 형태 분절 거더에서의 전단연결재 거동을 실험적으로 연구하여 중공 거더와 차이가 있음을 밝혔다. 공용 중인 중공 거더 교량의 접합부 거동을 살펴보기 위해 트럭 하중 하에서의 상대변위와 휨응력을 측정하여 분절 거더의 연결부의 신뢰성을 검토하였다^{10,11)}. 지금까지의 연구들은 주로 분절 거더의 연결부에서의 국부 거동을 살펴보기 위한 이론 혹은 실험 연구로, 실물 분절 거더의 전체적인 구조 거동을 연구하지는 못하였다.

본 연구는 이러한 분절공법으로 제작된 실물 크기의 철도교용 조립식 프리스트레스콘크리트 박스 교량의 정적성능을 실험적으로 검증하고자 한다. 길이 20m의 실물 조립식 콘크리트 거더를 3등분으로 분절하여 제작한 후, 정적 성능 검증을 위해 같은 제원의 일체 거더와 동일한 조건에서 재하 실험을 수행하였다. 분절 거더 및 일체 거더에 대해 중앙 처짐, 단부 회전각, 내부 변형률, 균열 양상 등을 비교하였다. 또한 분절 거더의 접합부 거동을 모니터링하기 위해서 수직 상대 변위 및 수평 상대 변위를 최대 재하 하중까지 측정하였다.

*Corresponding author E-mail : wschung@krii.re.kr

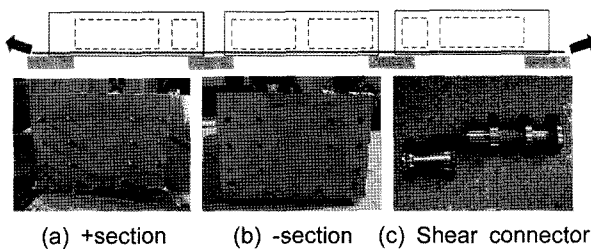
Received November 7, 2006, Accepted May 18, 2007

©2007 by Korea Concrete Institute

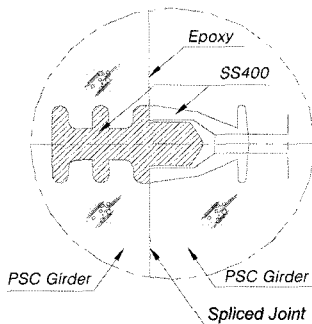
2. 분절 공법

프리캐스트 형식의 철도교는 동일 지간에서 도로교에 비해 상대적으로 중량인 철도설계하중에 의해 형고가 높아지고 소요 강연선량이 증가하게 된다. 이로 인해 자중이 증가하여 프리캐스트 거더의 현장 운반이 어려워진다. 따라서 하나의 프리캐스트 거더를 분할하여 다수의 세그먼트로 제작한 후 현장에서 포스트텐션 방식으로 체결하여 가설하는 분절공법이 개발되어져 사용되고 있다. 분절공법을 적용한 교량의 경우에는 세그먼트를 특별한 제작장이나 공장에서 제작하여 현장까지 운반하기 때문에 공사 기간을 줄일 수 있으며 품질의 신뢰성도 높일 수 있다. 또한 각 세그먼트는 제작되고 조립되기 전에 일정 기간 저장되기 때문에 건조수축의 영향을 줄일 수 있다.

분절 거더의 시공 순서는 먼저 거푸집에 쉬스관을 매입하고 철근을 조립한 후 고강도 콘크리트를 매치캐스트(match-cast) 방식으로 타설, 양생하여 분할 제작한다. 양생이 완료되면 거더를 가설 현장으로 운반한 후 Fig. 1과 같이 강연선을 삽입하여 배치한다. 분절 거더의 접합부는 Fig. 1(c), (d)와 같은 전단연결재를 각각의 단면에 배치한다. 전단연결재는 외경 80 mm, 내경 50 mm인 SS400 강으로 제작되었으며 전단연결재의 근입 깊이는 54 mm이다. 설계 시 콘크리트의 마찰력은 무시하고 접합기만 전단력에 저항하는 것으로 설계 되었다. 또한 단면 전체에는 에폭시를 얇은 층으로 도포하여 연결부 표면에 부착 작용을 일으켜 세그먼트 연결을 용이하게 하고 응력 전달을 도와 강도를 증진시키며, 쉬스관의 수분 유입을 방지함으로써 강연선의 부식을 방지하는 효과를 내도록 하였다. 그 후, 프리스트레스 강연선에 긴장력을 도입하여 거더에 압축응력을 유발하여 일체화 시킨다. 각각의 세그먼트는 설계기준강도 40 MPa의 콘크리트를 사용하였다.



(a) +section (b) -section (c) Shear connector

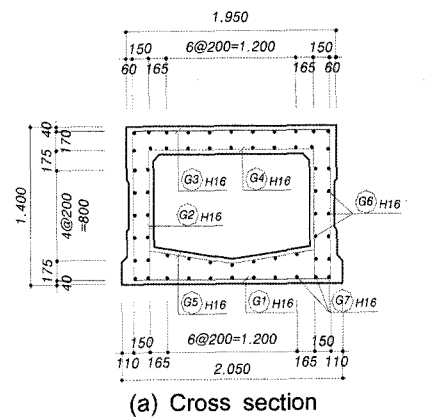


(d) Shear connector details

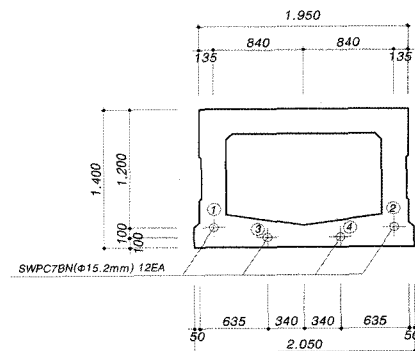
Fig. 1 Fabrication of spliced girder

3. 실험 프로그램

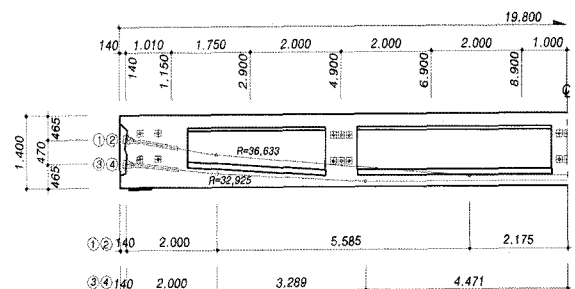
실험 대상 거더는 철도교 조립식 프리캐스트 프리스트레스 콘크리트 거더로 단면은 형고가 1.4 m이고 폭이 2.05 m인 중공 박스 형태이다. 대상 교량의 등급은 LS22 표준 하중으로 설계된 경간 20 m의 1급선 철도교용 거더이다. 단면의 자세한 제원은 Fig. 2에 나타나있다. 분절 거더는 길이 20 m인 실물 프리캐스트 콘크리트를 3개의 세그먼트로 나누어 제작한 후, 포스트텐션 방식으로 각각의 세그먼트에 긴장력을 도입하게 되면 각각의 세그먼트가 결합되고, 완전히 연결된 후에 필요한 양의 긴장력을 추가로 도입하는 방식으로 제작된다. 강연선의 제원은 SWPC7BN PS 강연선 15.2 mm를 1개의 쉬스관에 12개씩 배치하여 총 48개의 SWPC7BN PS 강연선이 배치되었다. 각 텐던 (tendon)의 긴장력은 2,340 kN이며 긴장력에 의한 늘임량은 130 mm이고 솟음량은 13.4 mm



(a) Cross section



(b) Prestressing details



(c) Tendon profile

Fig. 2 Layout of concrete box girder

로 제작되었다. 분절 거더와의 비교를 위해 제원이 같은 길이 20 m의 일체 거더를 제작하여 동일한 조건에서 재하 실험을 수행하였다. Fig. 3은 하중 프레임에 설치되기 전의 제작 완료된 일체 거더 및 분절 거더의 모습이다.

분절 거더와 일체 거더의 처짐 및 단부 회전각을 측정하기 위해 Fig. 4와 같이 지간 중앙, 1/4지간, 단부 등에 다수의 변위계를 설치하였다. 내부 변형률의 측정을 위해 지간중앙, 1/4지간, 3/4지간에 Fig. 5와 같이 상부, 하부 및 거더 깊이 방향으로 다수의 변형률게이지를 설치하였다. 또한 분절 거더 연결부의 거동을 모니터링하기 위해서 Fig. 6(a)와 같이 거더 측면의 연결부 상하부에 총 12개의 변위계를 설치하여 수직 상대 변위 및 수평 상대 변위를 측정하였으며 Fig. 6(b)는 실제 설치된 상대 변위계의 모습이다.

각각의 거더를 Fig. 7과 같이 재하 프레임에 거치한 후 중앙부에서 1 m 떨어진 지점에 정적 하중을 가하여 재하 실험을 수행하였다. Fig. 8은 하중 프레임에 설치 완료

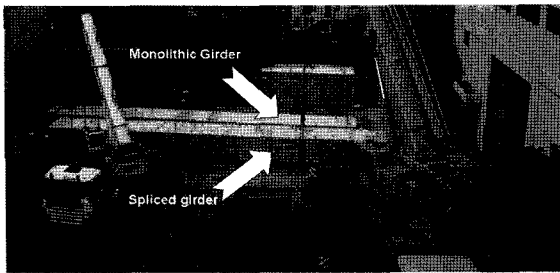
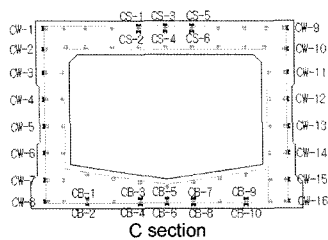


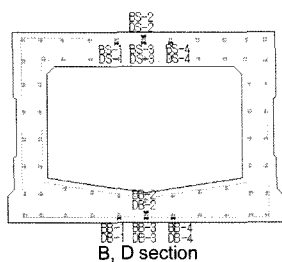
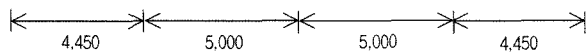
Fig. 3 Photograph of completed test girders



Fig. 4 Position of LVDTs on the bottom surface



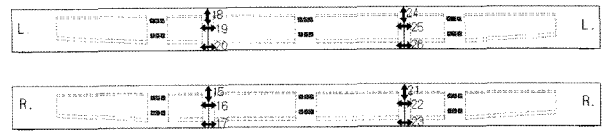
(a) Mid-span



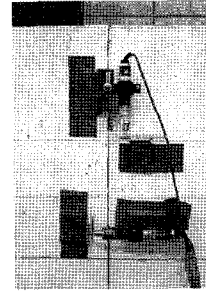
(b) 1/4 span, 3/4 span

Fig. 5 Position of embedded strain gauges

된 실험체의 모습이다. 재하 실험은 초기균열이 발생하기 전까지는 하중 제어 방식으로 진행되었으며 육안으로 확인 가능한 균열이 확인되면 실험실의 안전을 고려하여 변위제어 방식으로 전환하여 수행하였다. 또한 하중 재

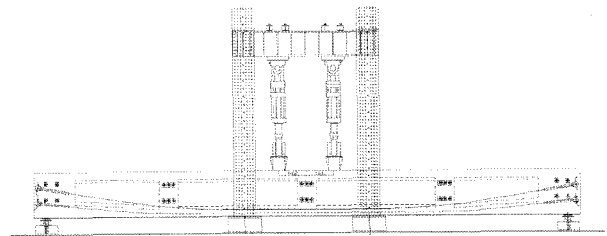


(a) Positions

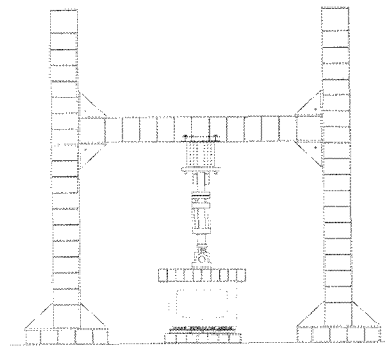


(b) Setup

Fig. 6 Relative displacement transducers



(a) Front view



(b) Section view

Fig. 7 Test setup

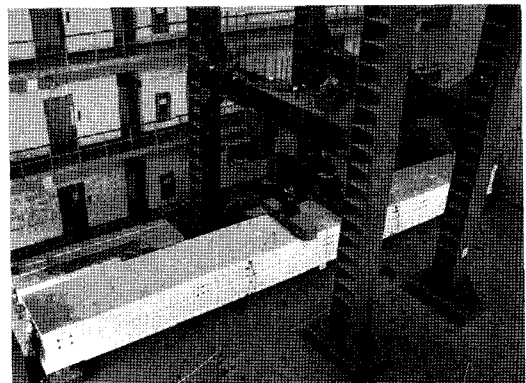


Fig. 8 Photograph of test setup

하 단계별로 거더의 균열 양상을 파악하기 위하여 균열도를 작성하였다. 작용하중은 액츄에이터의 용량과 대형 구조 실험의 안전을 고려하여 분절 거더는 3,500 kN, 일체 거더는 3,700 kN까지 재하하였다.

4. 실험 결과

4.1 변위 결과

Fig. 9는 지간 중앙에서의 일체 거더와 분절 거더의 처짐-하중 관계를 도시한 것이다. 분절 거더의 중앙 처짐은 육안으로 균열이 감지되는 균열하중인 1,200 kN 이상부터 뚜렷한 비선형거동을 보였다. 그림에서와 같이 분절 거더는 균열하중 이상부터 일체 거더보다 큰 처짐을 보이고 있음을 알 수 있으나 균열하중에 도달하기 전까지 일체 거더와 동일한 거동을 보였다. 지간 20 m 철도 교량에 고려되는 최대 설계하중의 합이 약 900 kN 정도임을 감안하면 분절 거더가 설계 범위 내에서 일체 거더와 유사한 성능을 보이고 있다. 최종 재하 하중에서의 처짐량은 분절 거더의 경우 약 160 mm, 일체 거더의 경우 약 130 mm였다.

Fig. 10은 1/4 지간에서의 처짐-하중 관계이고, Fig. 11은 좌우 지점에서의 단부 회전각-하중 관계를 도시한 것

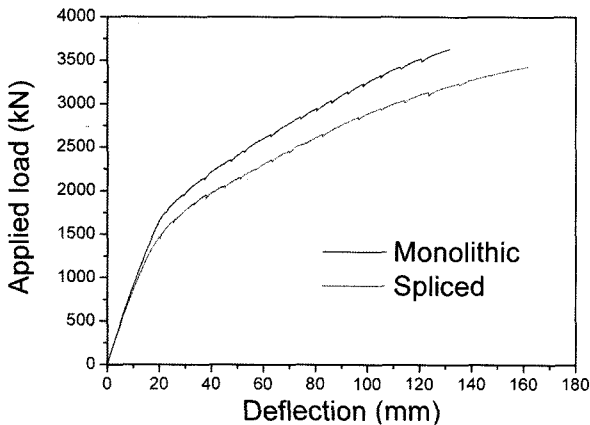


Fig. 9 Load-deflection curve at mid-span

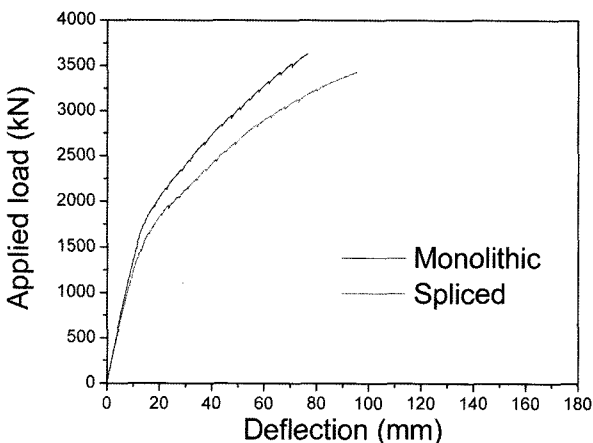


Fig. 10 Load-deflection curve at quarter-span

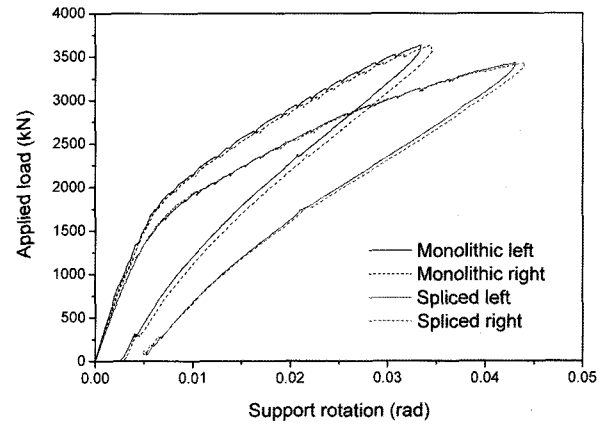


Fig. 11 Load-support rotation curve

이다. 단부 회전각은 미소 변형 가정 하에서 단부 전후에 설치된 변위계로부터 측정된 변위를 이용하여 회전각을 계산한 값이다. Fig. 11에서와 같이 좌우측 지점의 회전각이 동일하게 거동하고 있으므로 작용 하중이 대칭으로 재하되고 있음을 확인할 수 있다. 1/4지간의 처짐과 단부 회전각의 거동은 지간 중앙부의 처짐 거동과 비슷한 거동 양상을 보였다. 즉, 균열이 육안으로 확인되는 1,200 kN 이상부터 비선형거동이 시작되어 하중 증가에 따른 균열 전파의 영향으로 뚜렷한 비선형거동을 보이고 있음을 확인할 수 있었다.

Figs. 12와 13은 분절 거더 연결부의 상대 변위를 나타낸 것이다. 분절 거더의 연결부는 하중 증가에 따라 과도한 하부 분리 (opening) 현상을 나타낼 수 있으므로 이를 측정하기 위해서 2개의 연결부 좌우측에서 4개의 수평 상대 변위계를 설치하였다. 그 결과, Fig. 12와 같이 최종하중에서 최대 2.8 mm 이하의 분리를 보였다. 또한 분절부의 과도한 전단변형 여부를 조사하기 위해 수직 상대 변위 (sliding)를 측정 한 결과, 최종 재하 하중인 3,500 kN 까지 약 0.015 mm 이내의 센서 잡음 범위 내의 결과를 보였다. 즉, 분절 거더는 전단에 의한 구조 변형이 발생하지 않고 있음을 확인하였다. 따라서 분절 거더의 취약 부분인 연결부는 정적 하중 하에서는 연결부 전단파괴와 같이 급격한 파괴에 이르지 않고 있음을 알 수 있다.

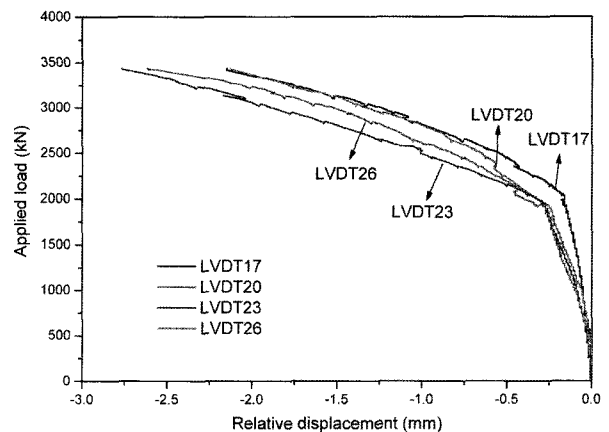


Fig. 12 Relative horizontal displacement at interface

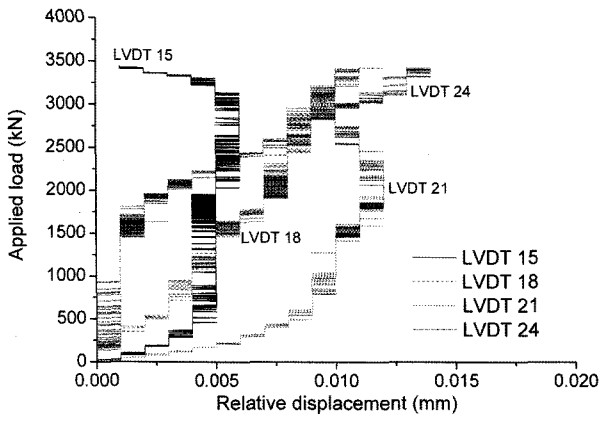


Fig. 13 Relative vertical displacement at interface

4.2 변형률 결과

Fig. 14는 분절 거더와 일체 거더의 중앙 지간 주철근에 부착된 변형률 비교 결과이다. 분절 거더와 일체 거더의 지간 중앙 상부 철근은 최종 재하 하중까지 항복하지 않았지만, 인장측 주철근은 분절 거더의 경우에는 약 1,500 kN, 일체 거더는 약 1,800 kN에서 항복하였다. 즉, 분절 거더의 인장철근이 일체 거더보다 앞서 항복하고 있음을 알 수 있다. 이는 분절 거더의 연결부에서 주철근이 연속으로 배치되지 않으므로 철근을 통한 인장 응력의 분포가 거더 전체에 전달되지 못하고 중앙 세그먼트에 집중되기 때문으로 판단된다. 또한 거더 깊이에 따른 측정 변형률을 비교한 결과는 Fig. 15에 도시되어 있다. Fig. 5와 같이 실험체의 중립축 상부에 설치한 변형률게이지인 CW11은 초기에는 압축변형률 값을 보였으나 하중 증가로 인해 중앙부 인장균열이 발생하고 이로 인해 중립축이 상부로 전이됨에 따라 작용 하중 2,000 kN에서 2,200 kN 사이에서 인장변형률 값으로 변하고 있음을 알 수 있다.

4.3 중립축 위치 및 균열 양상

Fig. 16은 분절 거더 및 일체 거더의 하중별 깊이 방향 변형률 분포를 나타낸 그림이다. 여기서 평면은 휨

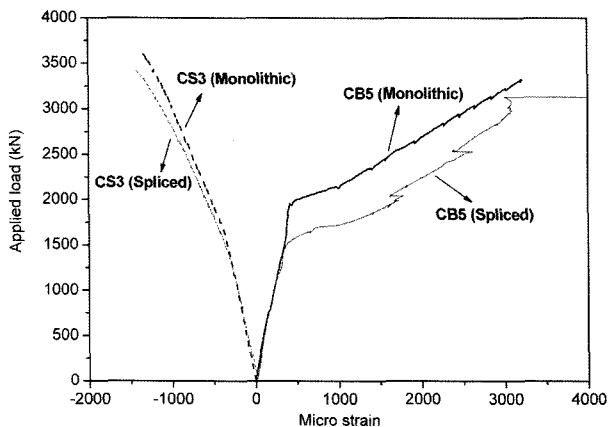
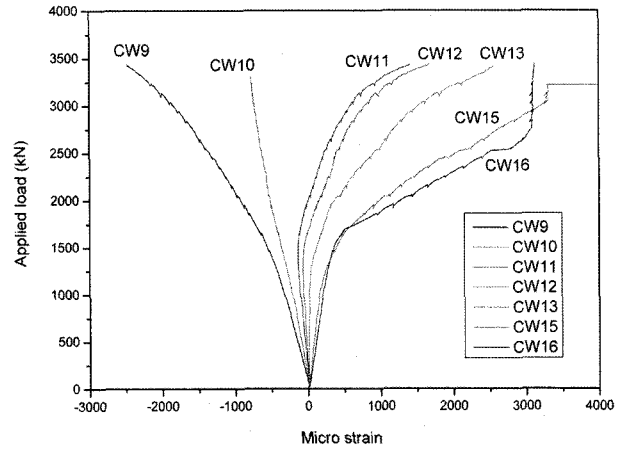
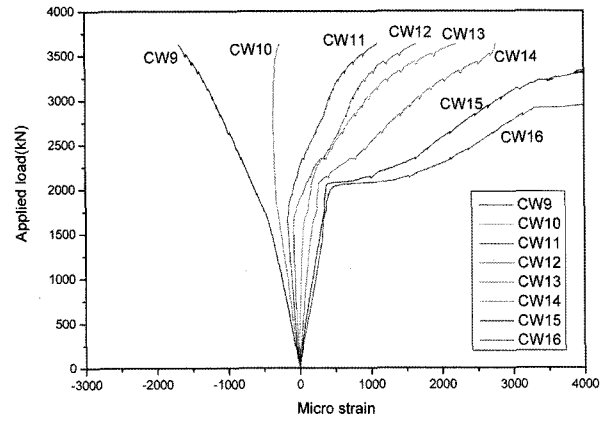


Fig. 14 Reinforcement strains at mid-span

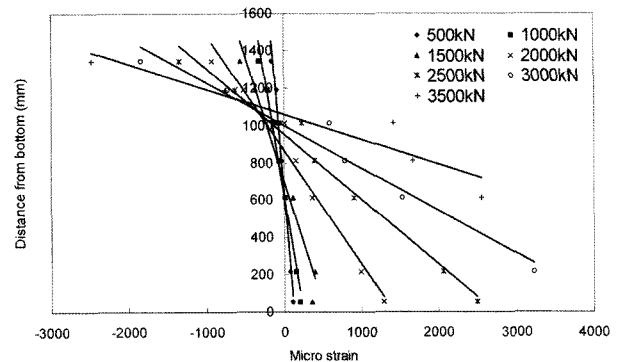


(a) Spliced girder

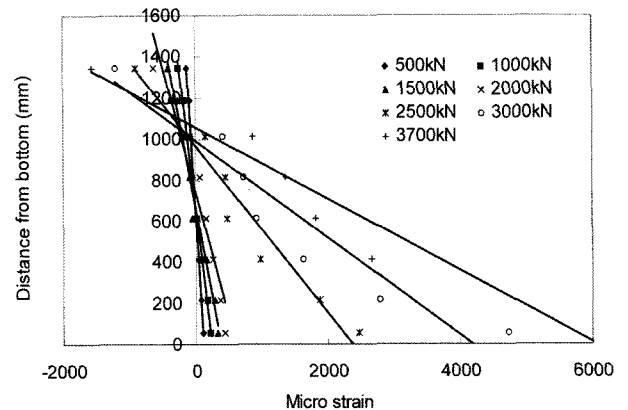


(b) Monolithic girder

Fig. 15 Load-strain curve along the web of girder at mid-span



(a) Spliced girder



(b) Monolithic girder

Fig. 16 Strain distribution over the depth of the girder

변형을 이룬다는 가정 하에 비선형으로 분포된 측정 변형률의 선형 회귀분석을 실시하였다. Fig. 16의 직선은 하중 단계별 선형 회귀분석 결과를 나타낸 것이다. 여기서 변형률의 부호가 바뀌는 부분의 거더 높이가 중립축의 위치가 된다. Fig. 17은 이렇게 구한 거더 하면으로부터의 중립축 위치 변화를 나타낸 그림이다. 중립축 위치 변화는 거의 없다가 분절 거더의 경우는 약 1,200 kN, 일체 거더는 약 1,500 kN 정도부터 중립축이 상부로 이동함을 알 수 있는데 이는 Fig. 18과 같이 구조물의 휨균열이 구조물의 내부에 발생하기 시작하여 진전되고 있음을 의미한다. 육안으로 식별 가능한 균열은 분절 거더의 경우는 2,000 kN, 일체 거더의 경우는 2,500 kN까지 급격히 전파되어 중립축이 심하게 천이되고 있음을 확인할 수 있다.

실제 PSC 거더의 경우에는 프리스트레싱 효과와 콘크리트 균열의 영향을 고려한 중립축의 위치를 정확히 찾아내기가 어렵다. 본 연구에서는 실험에서 측정된 변형률을 이용하여 직접 중립축의 위치를 찾아내므로 프리스트레싱과 콘크리트 균열의 영향을 모두 고려한 중립축 위치를 측정하였다.

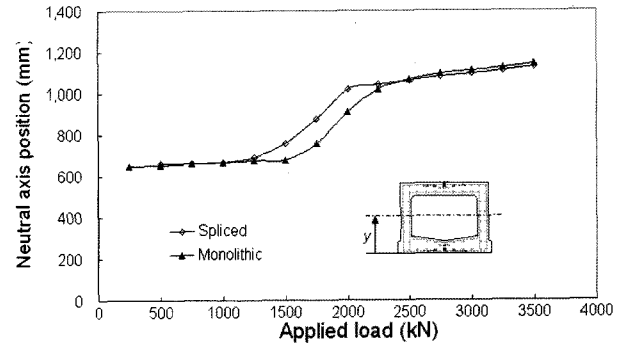


Fig. 17 Neutral axis position from bottom surface

Fig. 18은 하중 단계별 균열형태를 비교한 그림으로 분절 거더가 일체 거더와 같이 휨에 의한 사인장균열의 형태로 파괴가 진행되고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 분절공법으로 제작된 프리캐스트 콘크리트 박스 거더의 성능 검증을 위한 재하시험을 수행하였다. 같은 제원의 일체 거더와 동일한 조건 하에서 실

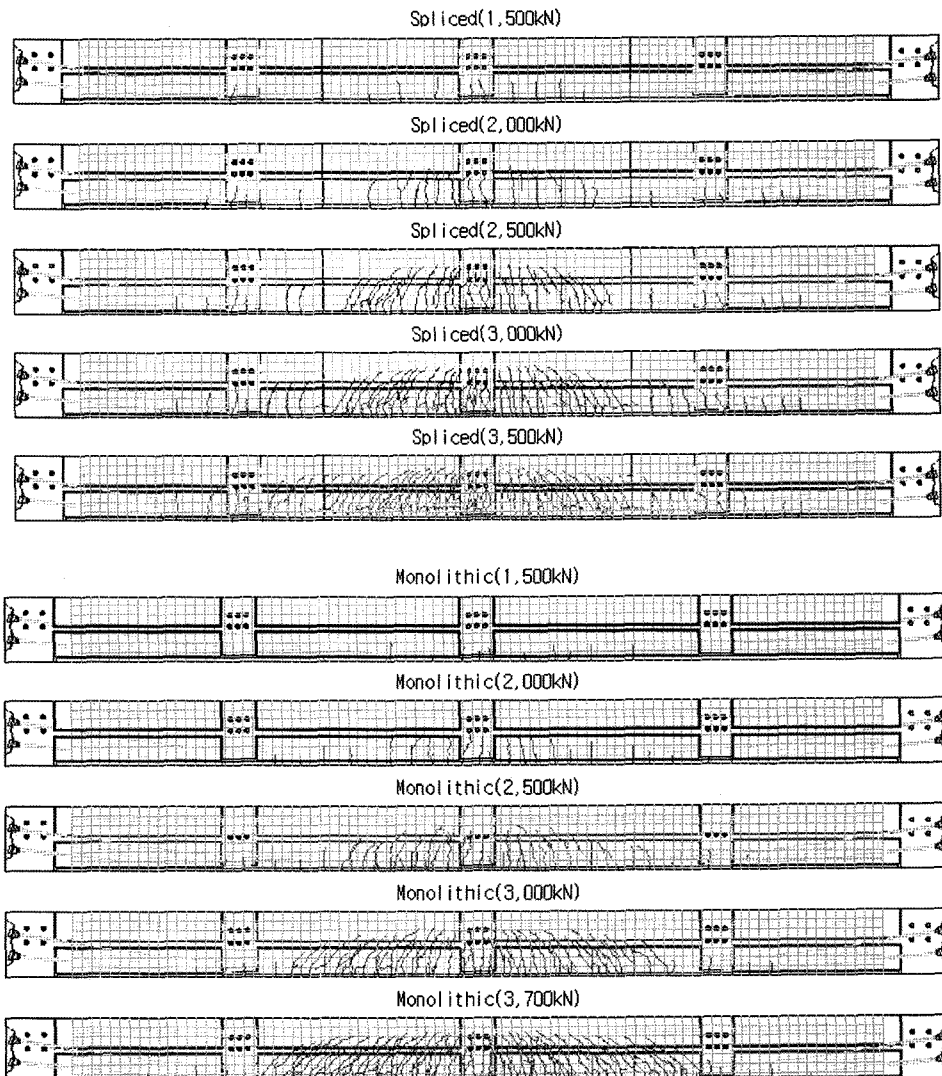


Fig. 18 Crack patterns

험을 수행하여 중앙 처짐, 단부 회전각, 변형률, 균열 양상 등을 비교하였다. 또한 분절 거더의 접합부 거동을 모니터링하기 위해서 수직 상대 변위 및 수평 상대 변위를 최대 재하 하중까지 측정하였다. 그 결과 구조물의 사용 범위인 선형 구간에서는 분절 거더가 일체 거더와 매우 유사한 거동을 보였으며 파괴에 이르기까지 전단파괴가 아닌 휨 파괴 모드로 균열이 진전되고 있음을 확인하였다. 따라서 분절공법으로 제작된 대상 거더는 파괴 거동 및 균열 양상 등을 고려한 결과 정적 성능이 우수한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 정적 재하 실험을 통해 성능을 검토한 것으로 향후 시공된 교량의 장기 모니터링을 통한 내구성 및 사용성 검토가 추가로 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 변근주 등, 조립식 프리캐스트 콘크리트 중공 슬래브 교량시스템의 개발, 연구보고서, 연세대학교 건설공학연구소, 2004.
2. Yamane, T., Tadros, M. K., and Arumugassamy, P. "Short to Medium Span Precast Prestressed Concrete Bridges in Japan", *PCI Journal*, Vol.39, No.2, 1994, pp.74~100.
3. Tadros, M. K., Ficence, J. A., Einea, A., and Holdsworth, S., "Technique to Create Continuity in Prestressed Concrete Members", *PCI Journal*, Vol.38, No.5, 1993, pp.30~37.
4. Ficenece, J. A., Kneip, S. D., Tadros, M. K., and Fischer, G. L. "Prestressed Spliced I-Girder: Tenth Street Viaduct Project, Lincoln, Nebraska", *PCI Journal*, Vol.38, No.5, 1993, pp.38~48.
5. 이호준, 변근주, 송하원, 김호진, 김윤수 "프리스트레스드 콘크리트 중공슬래브 교량의 분절 거동", 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 17권 1호, 2005, pp.43~46.
6. Kaneko, Y., Connor, J. J., Triantafillou, T. C., and Leung, C. K. "Fracture Mechanics Approach for Failure of concrete Shear Key. I: Theory", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.119, No.4, 1993, pp.681~700.
7. Kaneko, Y., Connor, J. J., Triantafillou, T. C., and Leung, C. K. "Fracture Mechanics Approach for Failure of concrete Shear Key. II: Verification", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.119, No.4, 1993, pp.701~719.
8. Annamalai, G. and Brown, R. C., "Shear Transfer Behavior of Posttensioned Grouted Shear Key Connections in Precast Concrete Framed Structures", *ACI Structural Journal*, Vol.87, No.1, 1990, pp.53~59.
9. Stannton, J. F. and Mattlock, A. H., "Load Distribution and Connection Design for Precast Stemmed Multi-beam Bridge Superstructures", NCHRP Report 287, TRB, Washington D.C., 1986.
10. Miller, R. A., Hlavacs, G. M., Long, T., and Greuel, A., "Full-scale Testing of Shear Keys for Adjacent Box Girder Bridges", *PCI Journal*, Vol.44, No.6, 1999, pp.80~90.
11. Huckelbridge Jr., A. A., El-Esnawi, H., and Moses, H., "Shear Key Performance in Multibeam Box Girder Bridges", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, Vol.9, No.4, pp.271~285.

요약 본 연구는 하나의 프리캐스트 거더를 분할하여 세그먼트로 각각 공장에서 제작하여 현장으로 운반한 후 포스트텐션 방식으로 체결하여 가설하는 분절공법으로 제작된 철도교 조립식 콘크리트 박스 거더의 정적 성능을 검증하고자 한다. 길이 20m의 실물 조립식 콘크리트 거더를 3등분으로 분절하여 제작한 후, 정적 성능 검증을 위해 같은 재료의 일체 거더와 동일한 조건에서 재하 실험을 수행하였다. 분절 거더 및 일체 거더에 대해 중앙 처짐, 단부 회전각, 균열 양상 등을 비교하였다. 또한 분절 거더의 접합부 거동을 모니터링하기 위해서 수직 상대 변위 및 수평 상대 변위를 최대 재하 하중까지 측정하였다. 분절 거더의 처짐은 육안으로 균열이 감지되는 균열하중 이상부터 일체 거더보다 상대적으로 크게 발생하고 있음을 알 수 있었다. 그러나 분절 거더는 균열하중에 도달하기 전까지 일체 거더와 동일한 거동을 보였다. 또한 분절부의 전단변형 여부를 조사하기 위한 수직 및 수평 상대 변위를 측정된 결과, 최종 재하 하중까지 전단에 의한 변형이 발생하지 않고 있음을 확인하였다. 또한 각 하중단계 별로 비교한 균열 양상은 분절 거더가 일체 거더와 같이 휨에 의한 사인장균열의 형태로 파괴가 진행되고 있음을 보였다.

핵심용어 : 프리캐스트 콘크리트 교량, 분절공법, 거동, 연결부