

분절 프리캐스트 콘크리트 중공 거더의 동특성 시험

Dynamic Characteristics of Spliced Precast Concrete Box Girder

정원석* 김재홍** 김현민*** 이성연****
Chung, Wonseok Kim, Jae Heung Kim, Hyunmin Lee, Seong Yeon

ABSTRACT

This paper is to investigate the dynamic characteristics of prestressed concrete (PSC) girder that has been spliced with precast box segments. A 20 m long full-scale spliced precast concrete box railway girder was fabricated and tested to identify its dynamic properties against a monolithic girder. The monolithic girder has the same geometric and material properties with respect to the spliced girder. Dynamic parameters including natural frequency, mode shape, and damping ratio were identified using the a digitally controlled exciter. Modal analyses were performed based on three-dimensional finite element models, and the calculated modal parameters were compared with test results. Finally, the characteristic decrease of natural frequency due to damage for each girder has been examined after the load test.

1. 서론

최근에는 하나의 프리캐스트 거더를 분할하여 여러 개의 세그먼트로 공장에서 제작한 후 현장으로 운반하여 포스트텐션 방식으로 체결하여 가설하는 분절공법이 개발되어지고 있다. 본 연구는 분절공법으로 제작된 철도교 프리캐스트 콘크리트 중공 거더를 대상으로 동특성 시험을 실시하여 동적 특성치를 추정하고자 한다. 본 연구를 위해 3등분으로 제작된 실물 크기의 분절거더를 제작하였다. 또한 분절거더와의 비교분석을 위해 동일한 제원과 물성치를 갖는 일체거더를 제작하였다. 각각의 실물 거더를 대상으로 가진기를 이용한 공진시험을 실시하여 고유진동수, 고유모드, 감쇠비 등을 추정하고 그 결과를 비교 분석하였다. 또한 3차원 유한요소모델을 이용한 모달해석을 수행하고, 그 결과를 실험 결과와 비교하여 해석 모델의 타당성을 검토하였다. 마지막으로 재하시험을 마친 후 손상이 발생한 분절거더 및 일체거더를 대상으로 가진시험을 실시하여 손상 전후의 고유진동수 변화를 분석하였다.

* 정회원, 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부 선임연구원

E-mail : wschung@krri.re.kr

TEL : (031)460-5353 FAX : (031)460-5359

** 삼표이앤씨(주), 교량사업본부 과장

*** 정회원, 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부 주임연구원

**** 삼표이앤씨(주), 교량사업본부장

2. 분절공법

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 높힐 수 있다. 또한 각 세그먼트는 제작되고 조립되기 전에 일정기간 저장되기 때문에 건조 수축의 영향을 줄일 수 있다 [1-3].

분절거더의 시공순서는 먼저 거푸집에 쉬스관을 매입하고 철근을 조립한 후 고강도 콘크리트를 매치캐스트 (match-cast) 방식으로 타설, 양생하여 분할 제작한다. 양생이 완료되면 거더를 가설현장으로 운반한 후 강연선을 삽입하여 배치한다. 연결부 단면의 전체는 에폭시를 얇은 층으로 도포한다. 에폭시는 연결부 표면에 윤활작용을 일으켜 세그먼트 연결을 용이하게 하고 응력 전달을 도와 강도를 증진시키며, 쉬스관의 수분 유입을 방지함으로써 강연선의 부식을 방지하는 효과를 낼 수 있다. 그 후, 프리스트레스 강연선에 긴장력을 도입하여 거더에 압축응력을 유발하여 일체화 시킨다.



그림 1. 분절 조립식 콘크리트 거더

3. 실험 프로그램

실험 대상거더는 철도교 조립식 프리캐스트 프리스트레스 콘크리트 거더로 단면은 형고가 1.4m이고 폭이 2.05m인 중공 박스 형태이다. 단면의 자세한 제원은 그림 2에 나타나있다. 분절거더는 길이 20m인 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. 분절거더와의 비교를 위해 제원이 같은 길이 20m의 일체 거더를 제작하여 동일한 조건에서 재하실험을 수행하였다. 거더의 제작과 실험은 대우건설 기술연구원 대형 구조실험동에서 실시되었다. 그림 3은 하중 프레임에 설치되기 전의 제작 완료된 일체거더 및 분절거더의 모습이다.

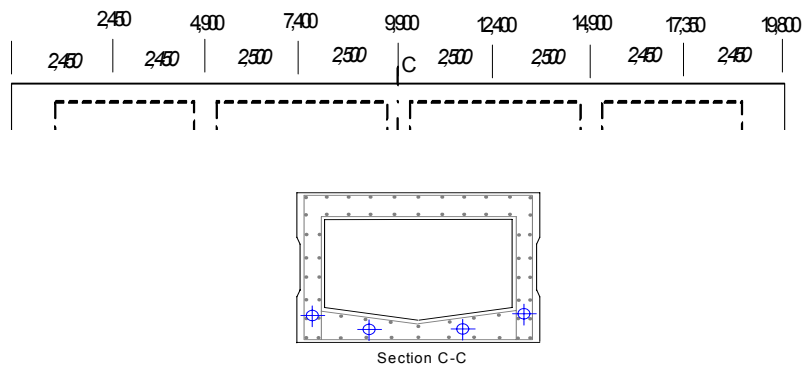


그림 2. 분절 조립식 콘크리트 거더

본 연구에서는 철도교량에 적용하기 위한 프리스트레스 중공 철도 거더의 동특성을 파악하기 위하여 가진기를 이용한 모달테스트를 수행하였다. 대상 거더의 동특성 분석을 위하여 적용된 동적 실험방법은 충격해머를 사용한 충격실험과 가진기를 사용한 공진실험(Resonance Test)으로 구분하였다. 구조물에 공진을 유발하기 위해 한국철도기술연구원에서 보유한 디지털 제어 가진기를 이용하였다. 가진기의 제원과 사진은 표 1과 그림 4에 나타나 있다. 모달테스트를 위한 장비로 가속도계를 상부슬래브의 중앙지점과 1/4 지점 및 단부 부근에 부착하여 같이 총 5개를 설치하였으며, 자세한 설치위치는 그림 5에 나타나 있다. 동적 가속도 측정치는 EDX 1500A 동적 데이터로거를 이용하여 데이터를 입수하였다.

표 1. 가진기 제원

가진형식	기계식 원심력 조절형
가진기 성능: 정격 가진 주파수 정격 가진력 가진력 조절범위 가진파형 가진방향	10 Hz 80 kN (8 tons) 0- 100 % 정현파 상하방향
기타 본체중량 본체크기	1,500 kg 1.2m × 1.2m × 1.2m



그림 3. 완성거더의 모습



그림 4. 디지털 가진기

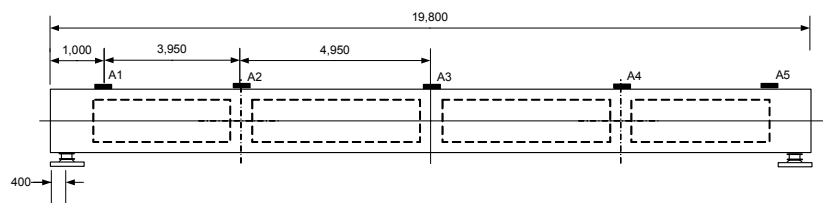


그림 5. 가속도계 설치 위치

4. 실험결과

철도교량용 20m 실물 프리캐스트 콘크리트 중공 거더에 대한 모달실험을 수행하였다. 모달실험은 가진기와 충격해머를 이용하여 진동을 가하고 고유진동수 및 감쇠비를 추정하였다. 충격실험의 경우에는 L/2과 L/4 지점에 충격해머를 이용하여 각각 3회 이상의 타격을 가하였고, 가진기 실험의 경우는 가진기를 실제 시험 대상 거더의 고유진동수까지 가하는 공진테스트를 수행하였다. 또한 실험체의 3차원 유한요소 모델링을 실시하고 고유치해석을 수행하였다. 표 2는 일체거더의 고유치 해석을 통해 얻은 10차 모드까지의 고유진동수(Natural Frequency)이며 그림 6은 각 모드별 모드형상(Mode Shape)이다

표 2. 실험체의 고유치 해석결과

모드	고유진동수 (Hz)		참여 모드 형태
	일체거더	분절거더	
1	7.36	7.12	1차 y축 회전
2	12.98	12.57	1차 z축 회전
3	26.02	25.23	2차 y축 회전
4	36.90	35.77	2차 z축 회전
5	38.87	38.05	x축 병진, y축 회전, z축 회전 혼합
6	46.37	45.63	x축 회전, z축 회전 혼합
7	55.09	55.35	3차 y축 회전
8	63.32	63.25	3차 z축 회전
9	79.03	78.02	4차 z축 회전
10	92.02	89.67	4차 y축 회전

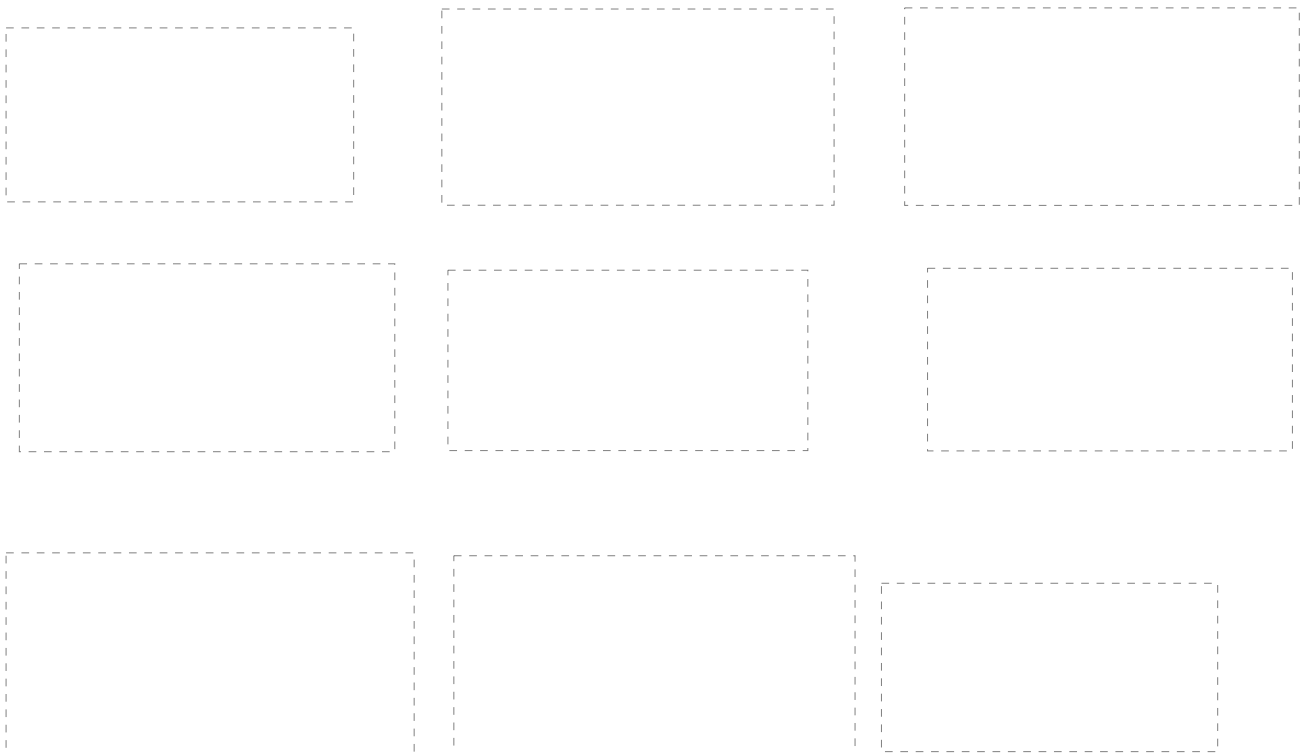
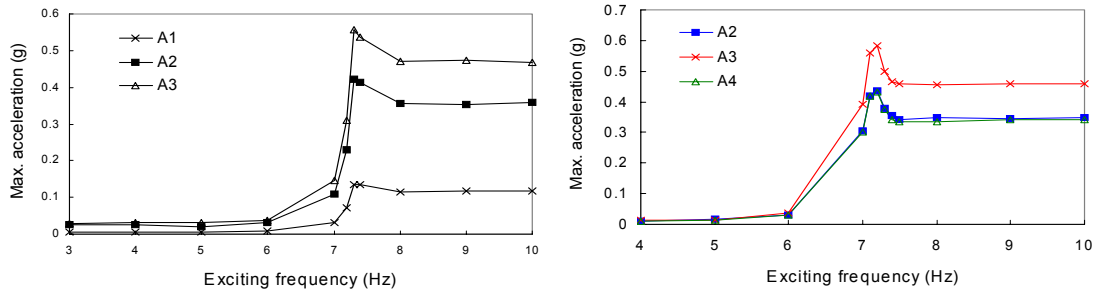


그림 6 실험체의 모드형상

공진실험에서는 실험모형의 첫 번째 휨 고유진동수에서 공진을 일으키기 위하여 가진기의 가진주파수 (rpm)을 조정하여 가진주파수를 변화시키며 수행하였다. 공진실험에서는 steady-state response가 얻어지는 공진주파수를 찾으며, 이 공진주파수에서 얻어진 각 가속도센서의 시간이력은 자유진동에 해당한다. 사용된 가진기의 최대 가진 주파수인 10Hz까지 가진주파를 변화시키며 경간 중앙부에서 측정된 최대진동가속도를 그림 7에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 교량의 고유진동수와 일치하는 주파수로 가진될 때 급격한 응답의 증가로 공진이 발생됨을 알 수 있었다. 그림 8은 분절거더에서 주요 가진주파 대역에 대한 진동가속도 응답의 시간이력을 나타낸 것이다. 가진주파수 9Hz로 일체 거더를 가진하였을 경우, 대상 거더의 고유진동수가 7.2Hz 정도이므로 진동 증가와 감소 시 7.2Hz 대에서 공진이 발생하는 현상을 볼 수 있었다. 가진기에 의한 시간이력곡선을 이용하여 Power Spectrum 응답함수를 분석하면 1차 고유진동수가 일체거더는 7.446Hz, 분절거더는 7.202 Hz를 나타냄을 알 수 있었으며, 그림 9에 이에 대한 응답함수를 나타내었다. 또한 5개의 가속도계에서 각각 얻은 응답함수의 값을 중앙지점의 값으로 normalization하여 도시하면 그림 10과 같이 전형적인 단순보에서의 전형적인 1차 휨모드 형상을 나타낼 수 있다.



(a) 일체거더 (b) 분절거더
그림 7. 가진주파에 따른 최대가속도

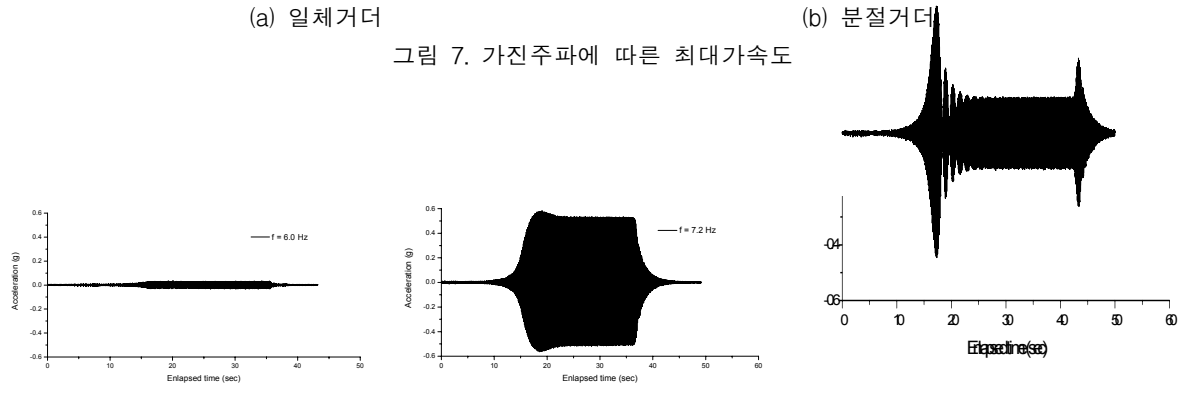
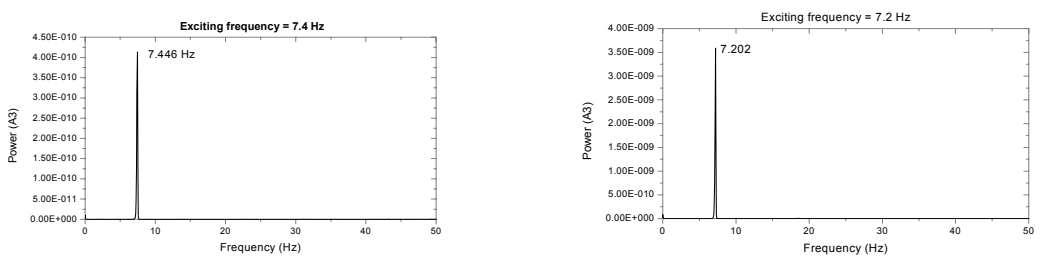


그림 8. 가진주파에 따른 가속도계(A3)의 시계열 응답 (분절거더)



(a) 일체거더 (b) 분절거더

그림 9. 가진기에 의한 주파스 응답

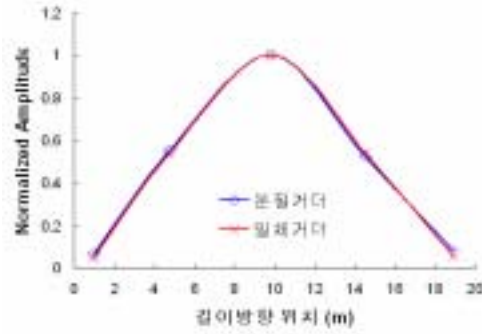


그림 10. 모드 형상

표 3은 본 연구에서 사용된 유한요소 모델을 적용하여 모달해석을 수행한 결과를 실험치와 비교한 것이다. 분절거더와 일체거더에서 해석적으로 얻은 1차 고유진동수가 실험에서 얻은 결과와 3% 이내의 오차를 보이고 있음을 알 수 있었다. 본 연구에서는 구조물의 균열 및 손상이 고유진동수에 미치는 영향을 조사하였다. 표 4는 재하실험 후 모달실험을 수행하여 그 결과를 실험 전의 값과 비교 분석한 결과이다. 분절거더가 약 3.5% 정도의 고유진동수 감소를 나타내었으며, 이는 일체거더의 1.7% - 2.5% 보다 큰 값이다. 이는 분절거더의 실험 후 강성 회복이 상대적으로 일체거더보다 작은 이유에 기인한 것으로 추정된다[4].

표 3. 해석치와 실험치의 고유진동수 비교

	해석치	실험치		실험치/해석치	
		가진기	충격 햄머	가진기	충격 햄머
분절 거더	7.122Hz	7.202Hz	7.324Hz	1.1%	2.8%
일체 거더	7.357Hz	7.446Hz	7.568Hz	1.2%	2.9%

표 4. 실험체 재하 전후의 1차 고유진동수 비교

	재하전		재하후		감소비(재하전/재하후)	
	가진기	충격 햄머	가진기	충격 햄머	가진기	충격 햄머
분절 거더	7.202Hz	7.324Hz	6.958Hz	7.080Hz	-3.5%	-3.4%
일체 거더	7.446Hz	7.568Hz	7.324Hz	7.385Hz	-1.7%	-2.5%

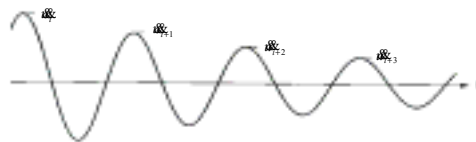


그림 11. 자유진동 시스템의 가속도를 이용한 감쇠 추정

감쇠비의 추정을 위해 본 실험에서는 Logarithmic Decrement 방법을 이용하여 감쇠비(ζ)를 산정하였다. 감쇠비 산정에 대한 곡선은 다음 식과 같이 나타낼 수 있으며 각각의 계수는 그림 11에서 나타낸 값을 의미한다.

$$\zeta = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{a_j}{a_{j+1}} \quad (1)$$

가진기를 이용한 공진실험을 통해 얻은 자유진동구간을 식(1)과 같이 산정하여 표 5에 결과를 나타내었다. 일체거더의 각 가속도계에서 얻어진 감쇠비는 1.53%에서 1.93% 사이의 값을 나타내었으며, 분절거더는 1.79%에서 1.88%의 감쇠비를 나타내었다. 평균감쇠비는 분절거더가 다소 큰 것으로 나타났으며 이는 분절부의 불연속면에서의 에너지 소산이 크기 때문으로 판단된다.

표 5. 추정 감쇠비

가속도계	평균 감쇠비 (%)	
	일체거더	분절거더
A1	1.93	1.88
A2	1.81	1.79
A3	1.84	1.80
A4	1.53	1.84
A5	1.68	1.87
평균값	1.76	1.84

4. 요약 및 결론

본 장에서는 20m 철도교용 실물 프리캐스트 콘크리트 중공 분절 거더에 대한 동특성 실험에 대해 서술하였다. 각각의 일체거더와 분절거더에 대해 충격햄머와 가진기를 사용하여 고유진동수 및 감쇠비를 추정하였다. 일체 거더와 분절 거더의 동특성분석 결과, 고유진동수는 일체 거더가 분절 거더보다 약 4% 큰 값을 보였으며, 감쇠비는 분절 거더가 일체 거더보다 약 5% 큰 값을 보였다. 즉, 실험대상 분절거더가 분절체 연결부에서의 에너지 소산 등의 원인으로 일체거더보다 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 유한요소 모델을 적용하여 모달해석을 수행한 결과를 실험치와 비교해본 결과, 해석치가 실험으로 얻은 1차 고유진동수와 3% 이내의 오차를 보이고 있음을 알 수 있었다. 분절거더와 일체거더를 대상으로 재하실험을 실시한 후 모달실험을 수행하여 고유진동수를 실험 전의 값과 비교 분석하였다. 그 결과, 분절거더가 약 3.5% 정도의 고유진동수 감소를 나타내었으며, 이는 일체거더의 1.7% - 2.5% 보다 크게 나타났다. 이는 분절거더의 실험 후 강성 회복이 상대적으로 일체거더보다 작은 이유에 기인한 것으로 추정된다.

참고문헌

1. 변근주, 송하원 등, 조립식 프리캐스트 콘크리트 중공 슬래브 교량시스템의 개발, 연구보고서, 연세대학교 건설공학연구소. 2004.
2. M.K. Tadros, J.A. Ficenec, A. Einea, S. Holdsworth. "Technique to Create Continuity in Prestressed concrete Members," *PCI Journal*, Vol. 38, No. 5. 1993, pp. 30-37.
3. J.A. Ficenec, S. D. Kneip, M. K.. Tadros, L. G. Fischer. "Prestressed Spliced I-Girder: Tenth Street Viaduct Project, Lincoln, Nebraska," *PCI Journal*, Vol. 38, No. 5. 1993, pp. 38-48.
4. Z. Zembaty, M. Kowalski, S. Pospisil. "Dynamic Identification of a Reinforced Concrete Frame in Progressive States of Damage," *Engineering Structures*, Vol. 28, 2006, pp. 668-681.