다단계 긴장 PSC 거더 철도교량의 고유진동수 및 감쇠비 평가를 위한 동적실험

Dynamic Experiments of the Incrementally Prestressed Concrete Girder Railway Bridge for Evaluation of Natural Frequencies and Damping Ratios

김성일* 조재열** 여인호* 이희업* 방춘석*

Kim, Sung Il Cho, Jae Yeol Yeo In Ho Lee Hee Up Bang Choon Seok

ABSTRACT

As an alternative of conventional prestressed concrete (PSC) girders, various types of PSC girders are being developed and applied in bridge structures. Incrementally prestressed concrete girder is one of these newly developed girders. According to design concept, these new types of PSC girders have considerable advantages to reduce their self-weight and make spans longer. However, dynamic interaction between bridge superstructures and passing trains would be sometimes one of critical issues in these more flexible railway bridges. Therefore, it is very important to evaluate modal parameters of newly designed bridges before conducting dynamic analyses. In the present paper, a 25 meters long full scale PSC girder was fabricated as a test specimen and modal testing was carried out to evaluate modal parameters including natural frequencies and modal damping ratios at every prestressing stage. In the modal testing, a digitally controlled vibration exciter as well as an impact hammer is applied to obtain frequency response functions more exactly and the modal parameters are evaluated varying with construction stages. Prestressed force effects on changes of modal parameters are analyzed at every incremental prestressing stage.

1. 서론

근래 철도교량에는 기존의 PSC거더 교량 외에, 다양한 형식의 교량이 제안되고 있으며, 다단계 긴장에 의한 IPC 거더교 및 콘크리트와 강을 다양한 방법에 의해 합성한 구조 등이 있다. 이러한 신형식 교량들은 단면 효율의 극대화, 저형고, 장대화 등에서 많은 장점을 갖고 있으나 이런 유연한 구조물은 필연적으로 동적거동 측면에서 불리함을 가질 수 있다. 특히 철도교량의 경우 공진의 발생 위험이 있으므로 이러한 신형식 교량의 열차하중에 대한 동적성능 수준을 평가할 필요가 있으며 또한 이에 앞서 동특성을 파악하는 연구가 필요하다 (김성일 외, 2005). 이 연구에서는 실물 25m 경간 IPC거더를 제작하여 고유진동수와 감쇠비 등의 모달 변수를 추출해내기 위한 동적실험을 수행하였다. 보다 정확한 동특성 평가를 위하여 기존에 모달테스트 등에서 흔히 활용되는 충격햄

* 정회원 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원

** 정회원 삼성물산 건설부문 과장

머와 더불어 가진기를 적용하여 수행하였다. 실험결과는 동적성능평가를 위한 주행열차하중 동적해석에 신뢰성 높은 입력자료로 사용될 수 있었으며, 프리스트레싱 단계에 따른 구조물 동특성 변화 및 가진 방법에 따른 고유진동수 및 감쇠비 변화를 고찰하였다.

2. 모달테스트 개요

본 연구에서는 철도교량용 IPC거더의 동특성을 파악하기 위하여 다음의 표 1과 같이 시공순서 별로 실험을 수행하였다. Test I부터 Test IV까지는 시공단계에 따른 구조계 변화를 고려한 IPC거더의 동특성을 얻기 위하여 구분하였다. IPC거더의 동특성 분석을 위하여 적용된 동적 실험방법은 충격햄머를 사용한 충격실험과 가진기를 사용한 공진실험(resonance test)으로 구분하였다. 그림 1은 IPC거더에 대한 모달테스트를 수행할 때 사용된 가속도센서(accelerometer)와 변위센서(LVDT)의 위치를 나타내고 있다. Y_0, Y_4는 가진방법별 진동모드 형상을 검증하기 위하여 Test V에 해당하는 IPC거더에 대한 충격실험에만 사용된 센서의 위치를 나타내고 있다. 가속도센서는 3~5개 채널이며 변위센서는 1개 채널이다. 사용된 충격햄머는 질량 5.5kg, 주파수대역은 0~250Hz이며, 가진기는 비균형질량 100kg 2개로 구성되어 최대가진력 80kN, 가진 주파수대역은 0~10Hz의 제원을 가진다.

표 1. 전체 동적실험의 개요

Test Case	실험모형 조건	실험 유형
Test I	하부 텐던만 긴장된 PSC거더 상태에서의 충격실험 수행	충격실험
Test II	PSC거더에 슬래브가 합성된 상태에서 실험 수행	충격 및 가진실험
Test III	슬래브가 합성된 PSC거더에서 상부텐던의 한쪽만 긴장한 상태에서 실험 수행	충격실험
Test IV	슬래브가 합성된 PSC거더에서 상부 텐던 모두 긴장한 상태에서 실험 수행	충격 및 가진실험
Test V	슬래브가 합성된 PSC거더에 대한 진동모드를 확인하기 위한 실험 수행	충격실험

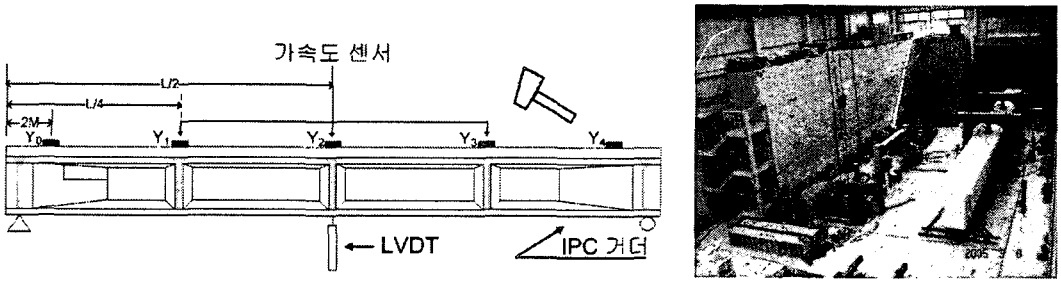

그림 1. 실험모형(IPC 25m거더)에 사용된 센서의 위치 및 실험전경

3. 거더의 동특성 추정

IPC거더의 고유진동수 및 감쇠비의 정확한 추정을 위하여 25m 실물 크기의 IPC거더 1본에 대하여 충격실험의 경우 L/2, L/4 지점에서 충격햄머를 이용하여 각각 15 ~20회 정도의 타격을 실시하여 고유진동수 및 감쇠비를 측정하였으며, L/2 지점에 설치한 디지털 가진기를 이용하여 공진테스트를 수행하였다.

그림 2는 TEST IV에서 실험모형에 대한 충격햄머 타격 시 얻어진 APSD(Averaged Power Spectral Density)함수 (Bendat *et al.*, 2000)를 나타낸다. 감쇠비는 APSD 함수로부터 half-power band width method를 이용하여 추정하였다. 동일한 실험조건에서 가진기를 이용한 실험을 수행하였으며, 실험모형의 첫 번째 휨 고유진동수에서 공진을 일으키기 위하여 가진기의 가진주파수를 조정하며 수행하였다. 공진실험에서는 steady-state response가 얻

어지는 공진주파수를 찾으며, 이 공진주파수에서 얻어진 각 가속도센서의 시간이력은 자유진동응답에 해당한다. 감쇠비는 logarithmic decrement를 이용하여 추정하였다.

표 2는 실험별 첫 번째 휨 고유진동수 및 감쇠비 측정 결과를 나타낸다. 슬래브가 합성 전인 TEST I에 비하여 슬래브 합성 후인 TEST II는 고유진동수가 약 5.32% 증가하였음을 알 수 있다. 또한 상부 텐던 좌, 우측을 긴장한 최종상태인 TEST IV와 비교하여 보면, 텐던 긴장에 의해 충격시험 시 1.78%, 공진시험 시 2.53% 증가하였음을 알 수 있으며, 이 결과로부터 텐던 긴장에 의한 강성 증가 영향이 존재할 수 있음을 확인할 수 있었다.

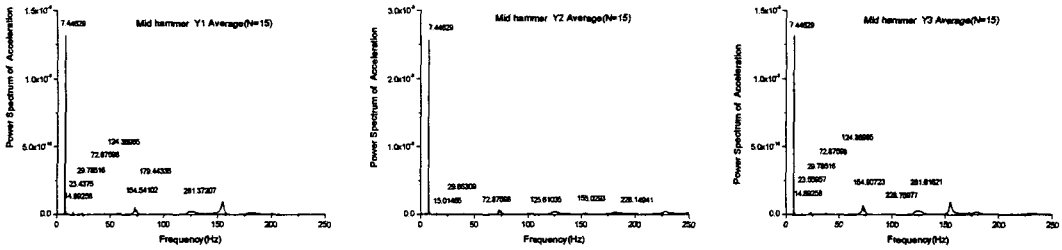

그림 2. 충격시험 시 가속도센서 (Y_1, Y_2, Y_3)에서 얻어진 APSD 함수

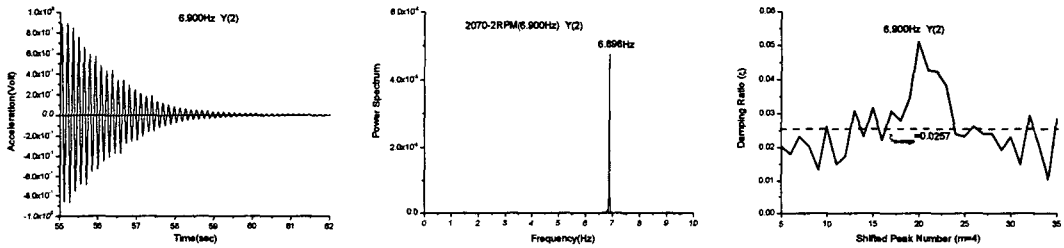

그림 3. 가진기에 의한 Y_2 센서의 자유진동응답, APSD 함수, Logarithmic Decrement에 의한 감쇠비

표 2. 실험별 첫 번째 휨 고유진동수 및 감쇠비 분석 (Y_2 센서)

	충격실험 (L/2) 타격		가진실험		고유치해석
	1st Bending Frequency	Damping Ratio	1st Bending Frequency	Damping Ratio	1st Bending Frequency
TEST I	6.95 Hz	2.19 %	-	-	6.02Hz
TEST II	7.32 Hz	1.25 %	6.73 Hz	2.68 %	-
TEST III	7.45 Hz	2.70 %	-	-	-
TEST IV	7.45 Hz	1.43 %	6.90 Hz	2.57 %	6.79Hz

실험에 앞서 수행한 자유진동해석 결과는 슬래브 타설 전 거더 상태만인 TEST I 구조에서 6.02 Hz, 슬래브 합성 및 긴장완료 후인 TEST IV 구조에서 6.79Hz로 나타났다. 해석결과와 실험결과는 가진기에 의한 공진시험과 잘 일치하였으며, 충격시험의 경우에는 상대적인 오차를 TEST I과 TEST IV에서 보였다. 공시체 시험을 통해 압축강도를 살펴본 결과 약 430kgf/cm^{2}로서 설계강도인 400kgf/cm^{2}과 큰 차이를 나타내지 않아 탄성계수 변화도 미소한 것으로 나타났다. 또한, 가진기에 의한 추가질량 효과(약 1ton)는 실험모형 전체질량(약 75ton)에 비하여 매우 작으므로 가진기에 의한 고유진동수 추정이 보다 정확한 것으로 판단되었다.

앞서 나타난 결과와 같이 충격햄머에 의한 실험과 가진기에 의한 실험 간의 결과 차이 분석을 위하여 TEST

V에서는 1차 진동모드를 얻기 위한 충격실험을 보다 많은 가속도센서를 설치하고 수행한 결과 충격햄머는 가진력 부족으로 실험모형의 1차 진동모드를 정확히 재현하지 못한 것으로 나타으며, 따라서 충격실험에서 얻어진 고유진동수는 공진실험에서 얻어진 고유진동수에 비하여 상대적으로 높은 값으로 나타났다.

그림 4로부터 충격실험을 통한 1차 고유모드의 유효길이를 확인할 수 있다. 앞서 추정한 바와 같이, 충격실험으로부터 얻어진 1차 휨 고유진동수는 실제 해당 진동모드의 유효길이가 22.07m로서 실험모형의 실제 고유진동수보다 큰 값을 얻게 된다. 감쇠비의 평가에서도 가진실험에 의한 감쇠비보다 작은 값을 나타냈다.

가속도 센서	위치(m)	Magnitude of Power Spectrum	Normalization
Y_0	2.0	5.33E-10	0.107
Y_1	6.25	2.72E-9	0.548
Y_2	12.5	4.96E-9	1
Y_3	18.75	2.69E-9	0.542
Y_4	23.0	5.4E-10	0.109

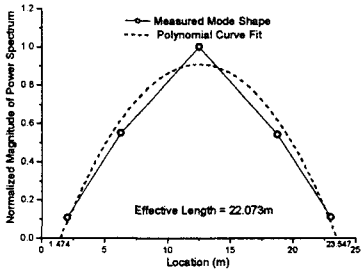

그림 4. Curve Fitting에 의해 추정한 충격시험 시 1차 진동모드의 유효길이

실험결과에서 나타난 감쇠비의 특성은 가속도 응답 크기의 변화에 따라 감쇠비의 변화가 발생하였으며, 이는 얻어진 자유진동응답이 정확하게 exponential decay가 일어나지는 않는다는 것을 의미한다. 따라서 가속도 응답 크기에 따라 변화하는 감쇠비를 평균한 값을 본 실험체의 대표 감쇠비로 추정하였다. IPC거더의 최종 사용상태 단면에 대한 감쇠비는 그림 4의 TEST IV의 결과를 이용해 2.5%로 추정하였다.

실험결과 IPC거더의 고유진동수는 해석치와 1.62%의 오차로 비교적 잘 일치하므로, 탄성계수 및 질량 등 기존의 설계자료를 열차하중 해석에 이용하여도 적합하다는 결론이 도출되었으며, 감쇠비의 경우 2.5%의 감쇠비 적용이 적절한 것으로 판단된다. 이러한 실험결과는 열차하중 동적해석에 신뢰성 높은 입력자료로 활용되어 철도교량의 동적성능을 평가하는데 활용할 수 있다.

4. 결론 및 향후 연구방향

철도교량은 도로교량과 달리 반복되는 일정간격의 축하중을 지속적으로 받게 되어 공진의 발생가능성이 항상 존재한다. 이 연구에서는 철도교량 동적해석의 신뢰성을 높이기 위하여 실물로 제작된 철도교량용 25m IPC거더에 대하여 모달테스트를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 충격햄머에 의한 충격실험 시 실험모형에 대하여 충분한 가진력을 확보할 수 없을 경우 유효지간이 짧아져 고유진동수가 높게 추정되고, 감쇠비도 작은 값으로 추정될 수 있다.

2. 도출된 IPC거더의 모달 특성은 IPC거더 철도교량의 주행하중 동적해석에 적용되어 보다 정확한 동적성능 평가에 적용될 수 있다.

3. 프리스트레싱 단계에 따른 모달테스트 결과 텐던의 긴장에 의한 휨강성 증가 영향이 있음을 확인 할 수 있었으나 이에 대한 정확한 평가를 위해 보다 많은 실험 수행이 필요하며 이론적 검토가 필요할 것이다.

참고문헌

1. 김성일 외 (2005), IPC거더 동적거동 분석에 의한 철도교량 적용성에 관한 연구, 한국철도기술연구원.

2. Bendat, J. S. and Piersol, A. G. (2000) *Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 3rd Ed.*, John Wiley & Sons, Inc.