

복합긴장방식이 적용된 세그멘탈 U형 거더 동적 거동 특성 연구

A Study of Dynamic Behavior of Segmental U-shaped Prestressed Concrete Girder Applied with Integrated Tensioning Systems

장현옥¹ · 장일영^{2*}Hyunock Jang¹, Ilyoung Jang^{2*}¹CEO, J Engineering and Construction Co., Ltd., Suwon, Republic of Korea²Professor, Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Republic of Korea

*Corresponding author: Ilyoung Jang, jbond@kumoh.ac.kr

ABSTRACT

Purpose: This study aims to verify structural stability by manufacturing a 40m full-scale specimen composed of a segmental U-shaped PSC girder with integrated tensioning systems and a concrete slab, proceeding dynamic behavior tests, and compare the results of the tests with the results of numerical analysis. **Method:** Dynamic behavior tests were conducted on a full-scale, undamaged specimen using an impact hammer, and the natural frequency and damping ratio were measured and compared with numerical analysis techniques and the general damping ratio of the facilities. **Result:** The natural frequency of the numerical analysis model consisting of a girder and slab composite section was calculated to be 2.561Hz, the natural frequency of the full-scale specimen was measured to be 2.670Hz, and the damping ratio was calculated to be 0.42~0.68%. **Conclusion:** The natural frequency of the full-scale specimen was found to be 4.3% larger than that of the numerical analysis model. Since the masses of the full-scale specimen and the numerical analysis model are the same as 99.97%, it can be derived that the stiffness of the full-scale specimen has secured structural safety and stability. As a result, the dynamic behavior stability of the specimen was verified. The measured damping ratio of 0.42~0.68% was found to be a stable dynamic behavior compared to the PSC structures damping ratio of 0.5~1.0% in the elastic region.

Keywords: Integrated tensioning, Segmental U-shaped, Full-scale specimen, Natural frequency, Damping ratio

요약

연구목적: 본 연구는 복합 긴장 방식이 적용된 세그멘탈 PSC U형 거더와 콘크리트 바닥판 슬래브가 합성된 40m 실험체를 제작하여 동적 거동 실험을 실시하고 수치해석적기법 결과와 비교 검토함으로써 구조적 안정성을 검증하고자 한다. **연구방법:** 손상이 없는 실험체에 impact hammer 타격으로 동적 거동 실험을 실시하여 고유진동수와 감쇠비를 측정하고 수치해석적기법 및 구조물의 일반적인 감쇠비와 상호 비교 검토하였다. **연구결과:** 거더와 슬래브 합성단면으로 구성된 수치해석 모델의 고유진동수는 2.561Hz로 계산되었고 실험체의 고유진동수는 2.670Hz로 측정되었으며 감쇠비는 0.42~0.68%로 산정되었다. **결론:** 실험체 고유진동수는 수치해석 모델의 고유진동수 대비 약 4.3% 증가된 값으로써 실험체와 수치해석 모델의 질량이 동일하므로(99.97%) 실험체 강성은 구조적 안정성을 확보하였음을 도출할 수 있으며 결과적으로 실험체의 동적 거동 안정성을 검증하였다. 측정된 감쇠비 0.42~0.68%는 탄성영역의 PSC구조물 감쇠비 0.5~1.0%와 비교하여 볼 때, 안정적 동적 거동임을 확인하였다.

핵심용어: PSC U형거더, 복합 긴장 방식, 세그멘탈, 실험체, 고유진동수, 감쇠비

Received | 26 March, 2024

Revised | 24 April, 2024

Accepted | 29 April, 2024

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in anymedium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

서론

프리스트레스트 콘크리트(PSC) I형 거더는 1990년 이전 AASHTO 등에서 Type 1~5까지 경간길이별로 표준화하여 현장에 적용하였고(Park, 2015) 국내에서는 한국도로공사에서 경간길이 25, 30, 35m PSC I형 거더 표준도를 제공하면서 중소규모 교량에 매우 활발히 적용되었다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2023). 1999년 PSC I형 거더가 최적화 단면 기법에 따라 효율적인 단면으로 개량되면서 경간길이 40m에서부터 최대 60m에 이르는 기술로 발전되었다(Han et al., 2001; Cho et al., 2004; Kim et al., 2020). 그러나 PSC I형 기술은 교량 장대화에 대하여 연직방향 정적 거동 특성에는 비례적이고 효과적으로 대응하는 단면이지만 약축에 대한 강성이 강축 대비 현저히 작아지는 특성으로 교량 횡단면 상의 비틀림 혹은 뒤틀림 거동의 저항은 한계가 있는 것이 현실이다(KIBSE, 2015; Eby et al., 1973; Karl et al., 1973; Brockenbrough et al., 2011).

국외의 경우 경간길이 50m 이상 직선교 및 곡선교에서는 박스형 혹은 U형 거더 적용이 일반적이고 이에 대한 표준화도 이미 도입되어 있는 것이 현실이며 국내 철도 및 고속도로에서도 생애주기비용 및 장기적인 교량의 안정성 확보를 위하여 PSC 박스형 단면을 활발히 적용하고 있다(Korea Expressway Corporation, 2007). 2000년대 중반 박스형 단면의 보급성을 확대하기 위하여 내부 충전으로 제작 편의성을 확장시킨 박스형 단면 거더가 개발된 바 있으나(Choi, 2011) 낮은 형고비에 따른 단면 구성 부재의 두께 확보 때문에 자중이 증가하여 대형 가설 장비가 필수적으로 투입되는 한계에 노출되어 있다.

본 연구는 거더를 다수 개의 세그먼트로 구분한 후 중앙부 세그먼트는 현장에서 프리텐션 긴장방식을 도입하여 제작하고 양측면부 세그먼트는 단순 철근 콘크리트로 제작한 후 중앙부 세그먼트와 외부 포스트텐션 긴장방식으로 건식접합하여 전체 거더를 완성시키는 복합 긴장 방식의 세그멘탈 U형 단면 거더를 고안하여 기존 박스형 거더의 단점인 과도한 자중을 감량시키는 방법과 추가적으로 효율적인 재료 사용을 도출하는데 연구 목적을 두었다. 본 연구 목적을 검증하기 위하여 40m 실험형 실험체를 제작하여 동적 거동 실험을 수행하고 수치해석적 기법을 활용한 해석적 분석과 비교하여 동적 거동 안정성에 대하여 평가를 수행하고자 한다.

실험체 제작 및 실험 방법

실험형 실험체 제원

중앙부와 양측 세그먼트로 구성된 U형 단면 40m 실험형 실험체를 제작하였다. 현장 프리텐션 긴장 방식용 거푸집 및 유압장비를 활용하여 중앙부 세그먼트를 우선 제작하였다. 중앙부 세그먼트 기준으로 양측면부 세그먼트를 배치하였고 전 거더 길이에 배치하는 외부 긴장재를 적용하여 포스트텐션 방식으로써 거더 연결, 접합하였다. 제작된 거더는 탄성패드에 거치하였고 이후 슬래브를 타설하여 실험형 실험체 제작을 완료하였다. 거더와 슬래브 합성 단면으로 이루어진 실험형 실험체의 동적 거동 특성 실험은 임팩트 해머로 타격 후 일정 시간 구조물의 자유진동이 발생되도록 하는 방법으로 3차례 실험을 진행하였다. 실험형 실험체 동적 거동 특성 평가를 위하여 수치해석적 방법 결과를 기준으로 비교 평가하였다. 자유진동구간 중 특정 시간 동안 측정된 가속도 크기의 감소를 확인한 후 감쇠비를 계산하였고 이를 일반적인 구조물 조건에 대한 기준과 비교하여 구조물의 동적 안정성 평가를 수행하였다(Newmark et al., 1982; Kim, 2009).

실험형 실험체 제원은 Table 1과 같다. 거더 콘크리트 설계기준강도는 40MPa를 사용했고 슬래브 콘크리트 설계기준강도

는 27 MPa를 적용했으며 각 탄성계수는 설계기준에서 제시된 산식으로 산정하였다. 거더의 단면적과 슬래브 합성후 단면적 및 단면2차모멘트를 중앙부 단면과 단부 단면으로 구분하여 Table 2에 요약하였다.

실험체 형상은 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다. 임팩트 해머 타격은 실험체 지점부터 1/3위치에서 가력하여 인위적으로 실험체에 비대칭적 힘이 가해지도록 유도하였다. 거더 하연 5개 지점에서 연직방향 1축 가속도계로 가속도를 측정하였다.

Table 1. Materials properties of PSC U shaped girder for the mock up test

Properties	Girder	Concrete slab
Strength(MPa)	$f_{ck} : 40.00$	$f_{ck} : 27.00$
Mass(kN/m ³)	24.5	24.5
E(MPa) ⁽¹⁾	30,891	27,804

Note (1) : Modulus of elasticity of concrete, $E_c = 8,500 \times \sqrt[3]{f_{cu}}$ (MPa)

Table 2. Geometric properties of PSC U shaped girder for the mock up test

Properties	Central section (l=38m)		End section (l= 1.0+1.0 = 2.0m)		
	Girder	Girder+Slab	Properties	Girder	Girder+Slab
Area(mm ²)	1,217,430	1,937,430	Area(mm ²)	2,644,956	3,364,956
Inertia(mm ⁴)	488,268,056,000	947,239,643,737	Inertia(mm ⁴)	837,351,001,000	1,317,319,496,236
y_b (mm)	-900	-1,243	y_b (mm)	-959	-1,146
Weight (kN)	-	1,803.75	Weight (kN)	-	164.88

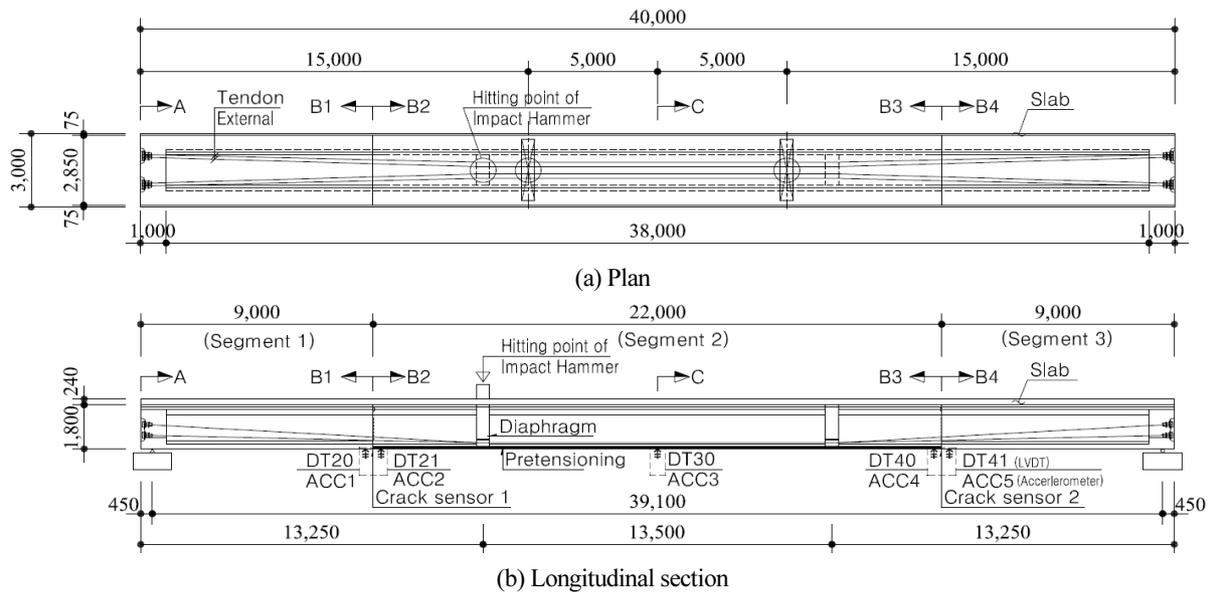


Fig. 1. Impact hammer strike point and accelerometer locations

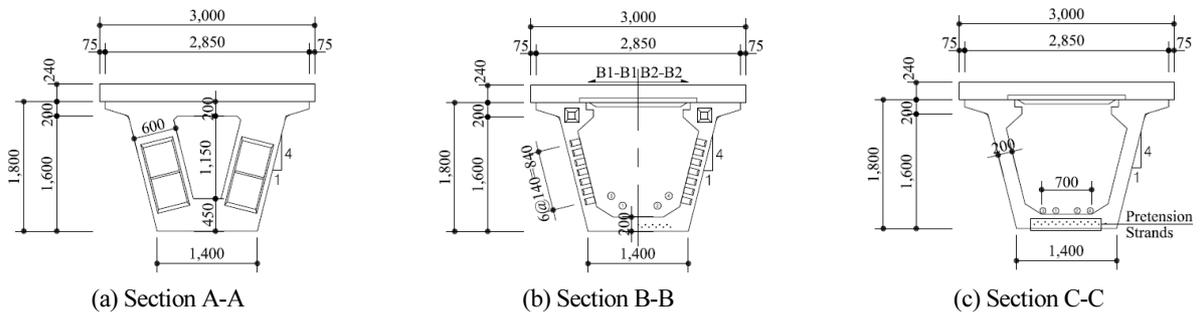


Fig. 2. The cross section of PSC U shaped girder for the mockup test

실대형 실험체 제작

현장 프리텐션 긴장 방식으로 제작된 중앙부 세그먼트는 Fig. 1에서와 같이 22.0m 길이로 제작하였고 철근콘크리트 구조 형식의 양 측면 세그먼트는 9.0m 길이로 제작하였다. 이후 Fig. 3(b)와 같이 각 세그먼트 받침부 설치하고 크레인을 이용하여 탄성패드 받침부에 가설하였다. 거더 전체 길이에 외부 포스트텐션 긴장 방식의 긴장재를 배치하였고 Fig. 3(c)와 같이 긴장력을 도입하였으며 이후 3.0m 폭의 콘크리트 슬래브를 타설하여 40.0m 실대형 실험체 제작을 완료하였다.

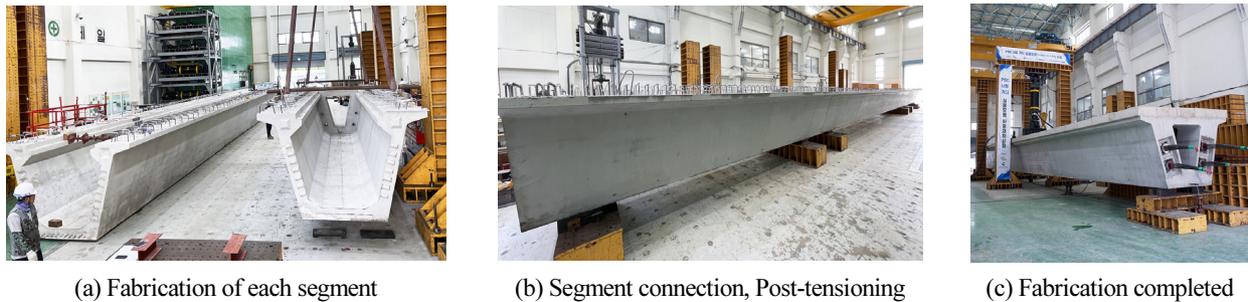


Fig. 3. Procedure of fabrication of PSC U shaped girder for the mockup test

실험 방법

실험체 가속도 센서는 Fig. 4와 같이 배치하였다. 실험체 중앙부에 Fig. 4(b)와 같이 1개소를 설치하였고 Fig. 4(a),(c)와 같이 B1-B2 및 B3-B4 연결부(Dry Joint) 전후 인접한 위치에 가속도 센서를 설치하여 총 5개소에서 가속도를 계측하였다. 거

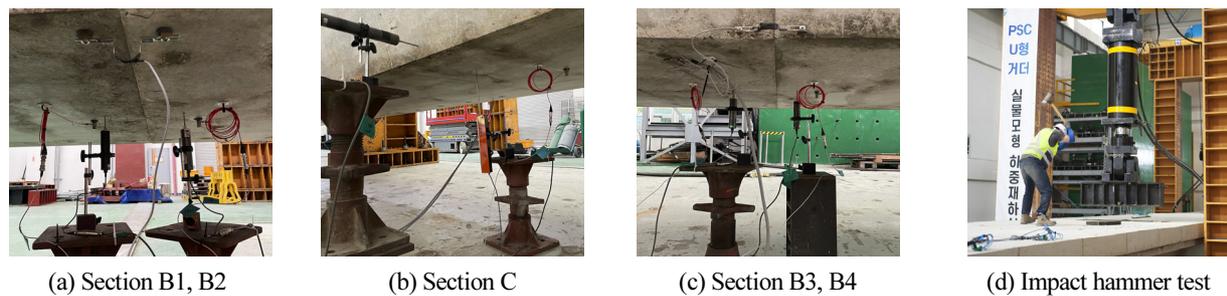


Fig. 4. Installation of dynamic sensors and applying impact load

더 전체 길이 1/3 위치에서 임팩트 해머를 이용하여 총 3회, 약 50~60초의 간격으로 타격, 가진하여 실험체가 구조물 고유의 자유진동 거동을 할 수 있도록 하였다.

실험결과

수치해석 결과

40m 실대형 실험체와 동일하게 Fig. 5와 같이 수치해석용 모델을 제작하였다. 사용프로그램은 MIDAS CIVIL2023이며 8절점 3차원 Solid요소를 적용하였다. 실제 실험체에 적용된 탄성패드 경계조건 특성은 전단저항강성이 연직방향강성보다 작아 저차 모드에서 측방향 혹은 횡방향 변위에 대한 모드가 나타난 후 3차 이후 모드에서 연직방향 탁월 진동수가 발생하는 것이 일반적이며 실제 실험의 계측은 연직방향 1축에 대한 가속도 계측을 수행하였다. 이를 반영하여 수치해석 모델 경계조건은 시점부와 종점부 힌지 및 롤러 경계조건을 적용하여 1차 모드가 연직방향 휨거동 모드가 되도록 유도하였다. 본 대상 실험체는 중앙부 세그먼트의 긴장재를 제외한 나머지 긴장재가 외부 포스트텐션 긴장방식으로 적용되어 있으므로 긴장재를 거더와 탄성계수비에 의한 합성단면으로 구성하는 것은 다소 비합리적인 방법일 수 있다. 한편, 수평방향 긴장력의 탄성적 강성과 수직방향 긴장력의 영향을 실험체와 연계할 경우 동적 특성의 민감도에 큰 영향을 미치는 인자가 아니므로 본 연구에서는 보수적인 해석 방법으로 긴장재의 영향을 배제하고 수치해석 모델을 구성하였다(Kim et al., 2018).

거더 길이 방향이 x 방향이고 연직방향이 z 방향이다. 수치해석 모델은 Table 2의 거더와 슬래브 합성 단면 제원을 기준으로 Fig. 2의 거더 구성과 동일하게 단부 단면과 중앙부 단면으로 구분하여 모델을 구성하였다. 수치해석 결과 자중 1,969.16kN으로 산정되었고 Table 2 실대형 실험체의 자중은 1,968.63kN(1,803.75+164.88) 이므로 실험체는 수치해석 모델 자중 대비 99.97%이다. 시점부와 종점부 반력 984.58kN = 100.36tonf 으로 계산되었다. 수치해석 모델의 중앙부 처짐은 Fig. 5(b)와 같이 47.05mm로 산정되었다. 수치해석 모델의 타당성은 단순보 처짐의 정해(exact solution)와 수치해석 모델 처짐간의 비교로써 검증하였다. 단순보 처짐의 정해 계산은 Table 2의 중앙부 단면을 거더 전체 길이에 적용하여 산정하였고 식(1)과 같이 47.71mm로 계산되었다. 수치해석 모델의 중앙부 처짐값은 Fig. 5(b)에서 47.05mm이며 정해의 처짐값 대비 98.6%로써 수치해석 모델은 적정하다.

$$\delta_c = \frac{wl^2[5l^2 - 12(a^2 + b^2)]}{384EI_g} = \frac{(1.872 \times 24.52) \times 39,100^2 \times [5 \times 39,100^2 - 12 \times 2(450^2)]}{384 \times 30,891 \times 947,239,643,797} = 47.71 \text{ mm} \quad (1)$$

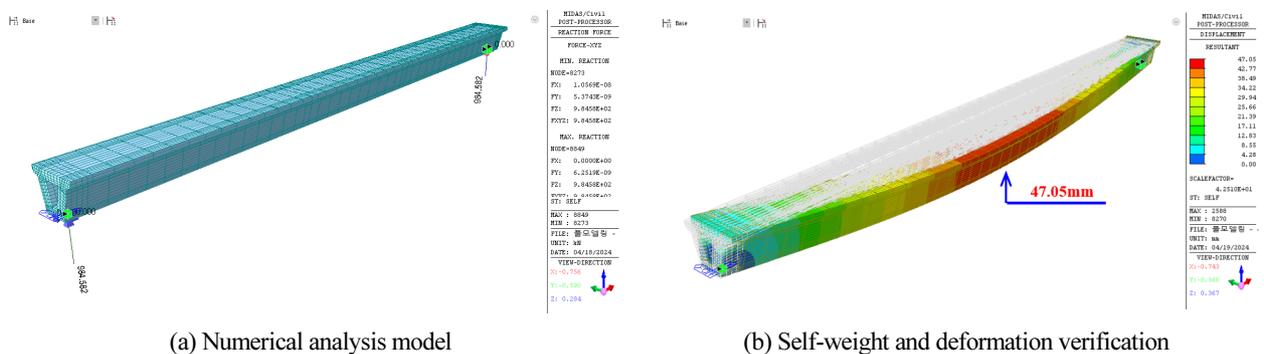


Fig. 5. Numerical analysis model for natural frequency evaluation

수치해석 모델의 고유진동수 해석결과는 Table 3에 요약하였다. 1차 모드는 연직방향 질량참여율 74.18%로써 Fig. 6(a)와 같은 연직방향 휨 모드가 나타났으며 고유진동수는 2.561Hz이다. 2차 모드는 횡방향(y방향) 질량참여율 78.45%, 고유진동수 3.478Hz를 나타내고 있다. 3차 모드는 y 방향 변화없이 x, z 방향으로 질량참여율이 증가되는 결과로써 2번째 연직방향 변형이 발생하여 Fig. 6(c)와 같이 중앙부 기준으로 한주기 파형의 2차 휨 모드 형상이 발생하였고 고유진동수는 9.536Hz이다. 4차 모드는 2번째 y 방향 변형에 대한 모드로써 Fig. 6(d)와 같은 형상이고 고유진동수는 10.275Hz로 계산되었다.

Table 3. Summary of eigenvalue analysis and modal participation masses

Mode No	Eigenvalue analysis		Modal participation masses					
	Frequency		Translation - X		Translation - Y		Translation - Z	
	(rad/sec)	(Hz,cycle/sec)	Mass (%)	Sum (%)	Mass (%)	Sum (%)	Mass (%)	Sum (%)
1	16.088	2.561	2.24	2.24	0.00	0.00	74.18	74.18
2	21.855	3.478	0.00	2.24	78.45	78.45	0.00	74.18
3	59.918	9.536	13.36	15.61	0.00	78.45	0.16	74.34
4	64.558	10.275	0.00	15.61	1.94	80.38	0.00	74.34

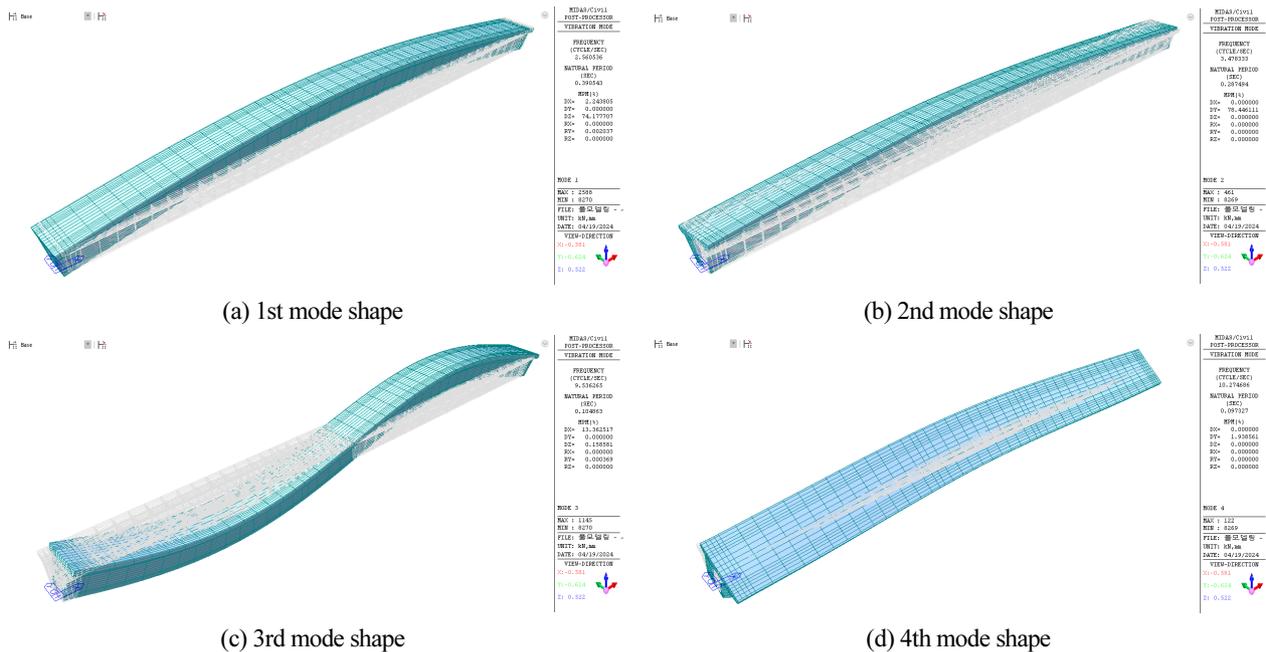


Fig. 6. The results of dynamic behavior, mode shapes of natural frequencies

동적 거동 실험 결과 및 고찰

고유진동수

측정된 데이터를 200Hz로 샘플링하여 분석하였고 가속도 신호를 FFT 분석을 통하여 고유진동수를 산정하였다. Fig. 1 및 Fig. 5와 같이 가속도 센서는 실험체 하면에 5개를 설치하였으며 이에 대한 결과는 Table 4 및 Fig. 7과 같다. 1축 가속도 센서

로써 연직방향 가속도 계측 결과 1차 모드는 계측 시작후 1.335초에 고유진동수 2.670Hz로 계측되었고 Fig. 7(c) 및 (f)에서 확인 할 수 있다. 2차 모드는 계측 시작후 4.885초에 중앙부 가속도 센서(ACC 3)를 제외한 위치에서 Fig. 7(a),(b),(d), (e)와 같이 계측되었고 고유진동수는 9.770Hz이다.

실대형 실험체 고유진동수 2.670Hz는 수치해석 모델의 고유진동수 2.561Hz 대비 4.3% 큰 값으로 계측되었다. 실험체의 두번째 횡모드 고유진동수는 9.770Hz로써 수치해석 모델의 고유진동수 9.536Hz 대비 2.5% 큰 값으로 계측되었다.

고유진동수 산정식은 질량과 구조물 강성의 함수로 구성되며 특히 질량에 반비례하고 구조물 강성에 비례한다. 실대형 실험체의 질량과 수치해석 모델의 질량이 동일(99.97%)하므로 실대형 실험체의 강성은 수치해석 모델의 강성보다 고유진동수의 크기 비례 즉 4.3% 더 큰 강성이 확보되었음을 확인할 수 있다.

Table 4. Summary of natural frequencies of a full-scale specimen [units: Acceleration(Acc.) g/10¹², Natural Frequency(N.F.) Hz]

Sec.	Mode	ACC 1		ACC 2		ACC 3		ACC 4		ACC 5	
		Acc.	N.F.								
1.250		342	2.500	385	2.500	834	2.500	332	2.500	339	2.500
1.300		1,016	2.600	1,179	2.600	2,611	2.600	1,131	2.600	1,053	2.600
1.335	1 st	10,844	2.670	12,552	2.670	27,960	2.670	12,259	2.670	11,655	2.670
1.350		416	2.700	463	2.700	1076	2.700	479	2.700	444	2.700
4.770		520	9.540	555	9.540	2.57	9.540	572	9.540	563	9.540
4.885	2 nd	1,500	9.770	1,605	9.770	0.74	9.770	1,614	9.770	1,576	9.770
4.910		558	9.820	613	9.820	0.24	9.820	611	9.820	600	9.820

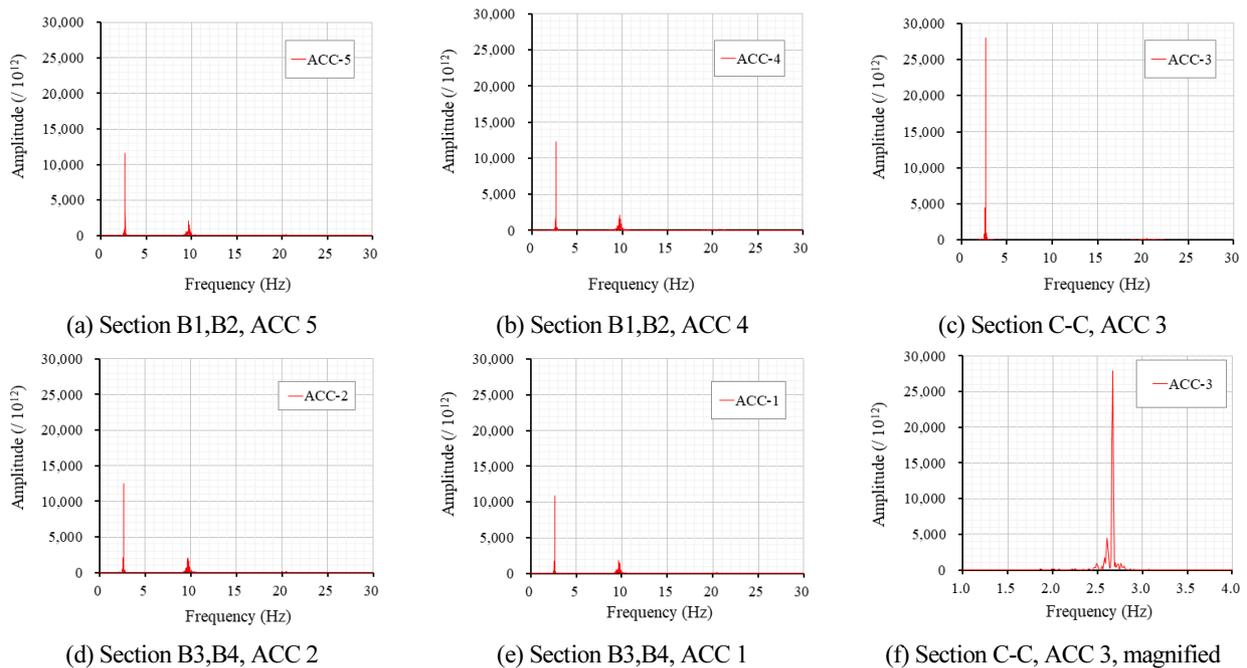


Fig. 7. The results of dynamic behavior, natural frequencies of a full-scale specimen

감쇠비

실험체에 가진력을 전달한 다음 특정 시간 경과 후 구조물의 거동은 자유진동 영역으로 진입하는 것을 가정하였고 이 때의 진폭 감소에 따라 특정 감쇠영역을 선정하여 감쇠비를 산정하였다. 감쇠비 산정식은 식(2)와 같다.

$$\delta = \frac{1}{N} \ln\left(\frac{v_i}{v_{i+1}}\right) \cong 2\pi\xi, \quad \xi \cong \frac{\delta}{2\pi}, \quad \text{여기서, } \delta: \text{대수감쇠비, } \xi: \text{감쇠비} \quad (2)$$

거더 중앙부 하단에 설치한 가속도계의 시간에 따른 가속도 분포는 Fig. 8과 같다. 3회 가진한 결과 Fig. 8(a)와 같이 3개의 특이 가속도 발생구간을 확인하였고 감쇠 분석을 위하여 자유 진동 영역은 3번째 가진 이후 약 220~250초를 샘플링하였다.

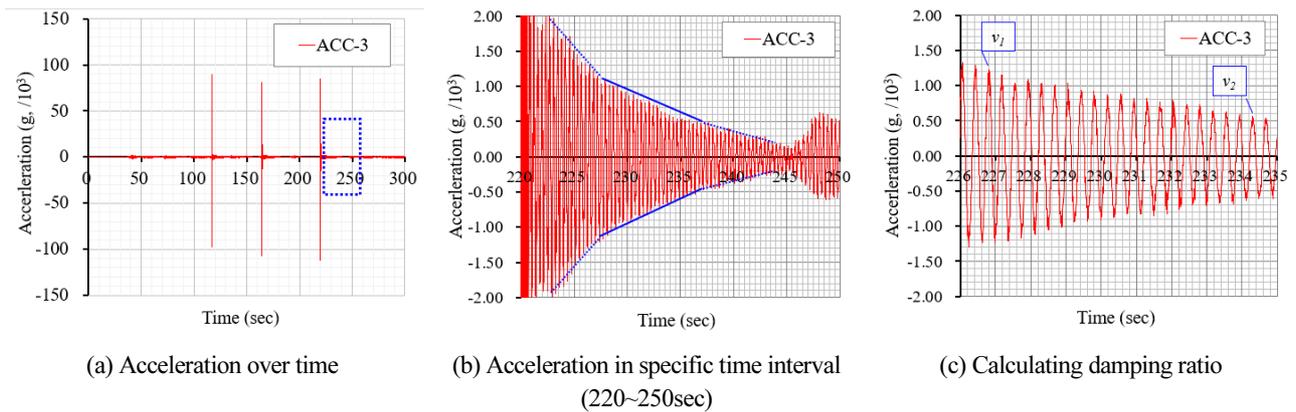


Fig. 8. Acceleration over time as results of the dynamic behavior of a full-scale specimen

Fig. 8(a) 자유진동구간을 확대하여 Fig. 8(b)와 같이 220~250초 구간으로 특정하였고 파란색으로 표시한 바와 같이 220~245초에서 현저하게 감쇠가 진행되는 것을 확인하였다. 1차 220~226초 수렴 구간과 2차 226~235초 사이 기울기 변화 감쇠 구간 및 3차 235~244초 수렴 구간으로 구분을 할 수 있었으며, 2차 중간 감쇠구간을 상세하게 샘플링하였다. Fig. 8(b)에서 226~235초 구간을 다시 확대하여 Fig. 8(c)와 같이 v_1, v_2 그리고 샘플링 회수(N) 20개를 확인하였고 이 값을 식(2)에 대입하여 감쇠비를 산정한 결과를 Table 5에 요약하였다.

Table 5. Results of calculating the damping ratio

Accerlerometers		Number of samplings (N)	v_i	v_{i+1}	δ	ξ	Damping ratio (%)
Notaion	station (m)						
ACC 1	9.0	20	0.000774	0.000454	0.026674	0.004245	0.42
ACC 2	9.0	20	0.000817	0.000447	0.030154	0.004799	0.48
ACC 3	22.0	20	0.001222	0.000566	0.038483	0.006125	0.61
ACC 4	31.0	20	0.000924	0.000421	0.039304	0.006255	0.63
ACC 5	31.0	20	0.000916	0.00039	0.042693	0.006795	0.68

Table 5의 결과에서 보는 바와 같이, 거더 중앙부에 설치한 가속도계(ACC 3)는 0.61%, 세그먼트 1(S1)과 중앙부 세그먼트(S2)연결부에 위치한 가속도계(ACC1, ACC2)는 0.42~0.48%, 중앙부 세그먼트(S2)와 세그먼트 3(S3)의 연결부에 위치한 가속도계(ACC4, ACC5)는 0.63~0.68%로 측정되었다. 각 연결부는 0.2%의 감쇠차이를 보이지만, 동일한 연결부 전후에서 측정된 감쇠비는 매우 유사한 것으로 측정되었다. 동적 거동 특성에 대한 본 연구의 실험은 실험체 제작 완료 직후 시행하였다. 따라서 손상이 전혀 없는 실험체에 대한 실험으로써 구조물 항복점 1/4 미만인 비례한계 거동의 프리스트레스트 콘크리트의 감쇠비 0.5~1.0%와 비교하여 볼 때, 본 실험체 실험체는 안정적인 동적 거동 특성을 나타내고 있음을 확인하였다(Newmark et al., 1982; Kim, 2009).

결론

본 연구는 현장 프리텐션 긴장 방식과 외부 포스트텐션 긴장 방식 등 복합 긴장 방식이 적용된 세그멘탈 U형 단면 거더와 콘크리트 슬래브 단면이 합성된 40m 실험체 동적 거동 특성 결과에 대하여 수치해석 모델 결과와 상호 비교하여 동적 거동 안정성에 대한 평가를 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 실험체와 동일한 단면으로 구성된 수치해석 모델은 이론적 정해(Exact Solution)의 처짐과 비교할 때 98.6%의 일치성을 확보하였고 수치해석 모델 대비 실험체의 자중은 99.97%로써 동일함을 확인하였으므로 본 연구의 수치해석 모델은 적정하다.
- (2) 실험체의 2개소 세그먼트 연결부 전후 및 실험체 중앙부 하연에 설치한 5개의 가속도 센서 결과 분석으로부터 실험체의 고유진동수는 2.670Hz로 측정되었다. 실험체와 동일한 단면을 구성한 수치해석 모델의 고유진동수는 2.561Hz로 계산되어 실험체 고유진동수는 수치해석 모델의 고유진동수 대비 약 4.3% 큰 값으로 측정되었다. 실험체의 질량과 수치해석 모델의 질량이 동일하므로 실험체의 강성은 수치해석 모델 강성 대비 고유진동수의 비율 약 4.3% 이상 더 큰 강성을 확보하고 있음을 확인하였고 결과적으로 실험체의 구조적 안전성 및 안정성은 검증되었다.
- (3) 구조물 항복점 1/4 미만인 탄성영역 거동의 프리스트레스트 콘크리트 감쇠비 0.5~1.0%와 비교하여 볼 때, 감쇠비 0.42~0.68%로 측정된 실험체는 안정적인 동적 거동 특성을 나타내고 있음을 확인하였다.

References

- [1] Brockenbrough, R.L., Merritt, F.S. (2011). Structural Steel Designer's Handbook. 5th Ed., ASCE Press, McGraw-Hill, US.
- [2] Cho, S.K., Youn, S.G., Park, Y.H. (2004). "Optimization of prestressed concrete girders for standard sections." Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 24, No. 4A, pp. 853-859.
- [3] Choi, S.H. (2011). "Dynamic performance evaluation of new type PSC Railroad Bridges." Journal of the Society of Disaster Information, Vol. 7, No. 4, pp. 259-265.
- [4] Eby, C.C., Kulicki, J.M., Kostem, C.N., Zellin, M.A. (1973). The Evaluation of St. Venant Torsional Constants for Prestressed Concrete I Beams. Fritz Laboratory Report No.400.12, Lehigh University, Bethlehem, PA.

- [5] Han, M.Y., Kim, B.Y. (2001). "Dynamic performance evaluation of new type PSC railroad bridge." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 21, No. 4A, pp. 535-546.
- [6] Hindi, A., Macgregor, R., Kreger, M.E., Breen, J.E., (1995). "Enhancing strength and ductility of post-tensioned segmental box girder bridges." *ACI Structural Journal*, Vol.92, No.1, pp. 33-44.
- [7] Karl, R., Melvin, R. (1973). *Bridge Strudl Manual*. Bridge Engineering, University of California Davis, CA. US.
- [8] KIBSE (2015). *Commentary of Bridge Design Standard (Limit State Design)*, Seoul, pp. 4-29-4-35.
- [9] Kim, D.G. (2009). *Dynamics of structures*. GoomiBook, Seoul.
- [10] Kim, H.K., Jang, I.Y. (2018). "The study of a practical modeling method for the analysis of dynamic behavior by the mockup test of prestressed concrete girder." *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 22, No. 6, pp. 148-156.
- [11] Kim, W.H., Lee, J.W., Lee, S.M. (2020). "Evaluation for ultimate flexural strength of steel composite girder with high strength concrete." *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 16, No. 4, pp. 796-805.
- [12] Kiyota, S., Takasu, H. (2006). *Shin Kenchiku Doboku Kouzo Manual*. Rikogakusha Publishing Co., Ltd., Tokyo, Japan.
- [13] Korea Expressway Cooperation (2007). *Construction Magazine of the Gochang-Damyang Expressway on National Highway No. 14*. Korea Expressway Cooperation, Gyeonggi-do.
- [14] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2023). *2023 Road Bridge and Tunnel Status Report*. Ministry of Land, Gyeonggi-do.
- [15] Newmark, N.M., Hall, W.J. (1982). *Earthquake Spectra And Design*. Earthquake Engineering Research Institute, California, USA.
- [16] Park, J.G. (2015). *Efficiency on PSC I Girder by Extending the Upper Flange Width*. Ph.D. Kumoh National Institute of Technology.