무도상 판형교의 장대레일 부설을 위한 거더-침목 고정장치의 횡저항력 산정

Determination of Lateral Resistance of Girder-sleeper Fastener for CWR on Ballastless Plate Girder Bridge

이형덕* · 송종걸** · 문지호***

Lee, Hyeoung-Deok*, Song, Jong-Keol**, and Moon, Jiho***

Abstract

Recently, deteriorated ballastless railway bridges in South Korea have been modified by adding slabs and ballast to improve performance and extend their lifetime. However, this project has been delayed owing to a lack of budget, poor working conditions around the bridge, and the absence of traffic-blocking time. As an alternative, there is ongoing research on the direct installation of a continuous welded rail (CWR) to the bridge using an improved girder-sleeper fastener. To achieve this, the girder-sleeper fastener must have sufficient lateral resistance to prevent track buckling. In this study, to prevent track buckling, an appropriate lateral resistance for the girder-sleeper fastener was proposed by a series of parametric studies based on the additional axial stress of the rail on the bridge specified in the Korean design code. The parameters considered in this study were the span length, track radius, lateral displacement of the plate girder, and lateral resistance of the girder-sleeper fastener.

Key words : Ballastless Plate Girder Bridge, CWR, Girder-sleeper Fastener, Track Buckling, Additional Axial Stress

요 지

최근 국내에서는 노후화된 무도상 판형교의 교량구조개선 사업의 일환으로 유도상화 사업이 진행되고 있으나, 예산 부족, 현장작업여건의 취약 및 운행선 차단시간의 부족 등의 이유로 진행속도가 더딘 상태이다. 이를 해결하기 위하여 기존에 무도상 판형교에 설치되어 있는 거더-침목 고정장치를 개선하여 비교적 쉽게 레일장대화를 수행할 수 있는 연구가 진행 중이다. 레일장대화를 위하여는 궤도 좌굴이 반드시 방지되어야 하며 본 연구에서는 무도상 판형교 상의 장대레일의 좌굴을 방지하기 위한 거더-침목 고정장치의 적정 횡저항력을 일련의 변수해석결과와 국내의 교량상 허용부가축응력 기준을 고려하여 산정하였다. 해석변수로는 지간장의 길이, 곡률반경, 거더의 횡변위 그리고 횡저항력을 고려하였다.

핵심용어 : 무도상 판형교, 장대레일, 거더-침목 고정장치, 궤도 좌굴, 허용부가축응력

1. 서 론

1900년대 초반부터 건설되어져 현재까지 공용중인 무도상 판형교는 궤광과 교량이 직접 연결되어있는 구조로써

열차 주행 시 Fig. 1과 같은 이음매부에 작용하는 지속적인 충격하중이 교량에 직접 전달된다. 이러한 구조적 특성으로 인하여 궤도재료와 교량의 수명이 짧아지며 궤도보수작업의 빈도가 증가하게 되어 레일장대화가 필요한 실정이다.

*학생회원, 강원대학교 토목공학과 석사과정(E-mail: duk09292@naver.com)

Member, Master's Course, Department of Civil Engineering, Kangwon National University

**공학박사, 강원대학교 토목공학과 교수

Professor, Department of Civil Engineering, Kangwon National University

***교신저자, 정회원, 공학박사 · 강원대학교 토목공학과 조교수(Tel: +82-33-250-6234, Fax: +82-33-259-5543, E-mail: jmoon1979@kangwon.co.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Kangwon National University

Fig. 1. Example of Rail Joint

현재 국내에서는 교량구조개선 중장기 계획의 일환으로 2015년부터 국내 무도상 교량의 유도상화 사업이 진행 중이며, 2018년 기준으로 기 계획된 43개소 대비 25 %인 11개소의 유도상화가 완료되었다. 이처럼 계획보다 실적이 저조한 주요 원인은 운행선 차단시간의 부족, 현장작업여건 취약 그리고 예산의 부족 등이 있다.

유도상화 공법 이외의 현재까지 개발된 레일장대화 공법으로는 Zero Longitudinal Restraint (ZLR) 및 Reduced Longitudinal Restraint (RLR) 같은 활동체결장치를 사용하여 열차 주행 시 발생하는 레일과 침목간 종방향 저항을 최소화시켜 부가축응력을 감소시키는 공법이 있다. 또한, 침목과 거더간 종방향 저항을 최소화 시키는 활동 침목고정장치를 사용하는 공법, 종방향 변위제어가 가능한 받침 또는 축력저감형 받침을 포함한 특수받침을 사용하여 레일 축력을 감소시킬 수 있는 공법, 교량 상부를 연속화하여 교각에는 이동지점을 교대에는 고정지점을 설치하여 장대 레일 부설 시 발생하는 수평력을 교대에서 모두 부담하는 공법 등이 있다. 수평력을 모두 교대에서 저항하는 공법의 경우, 무도상 교량에서 일반적으로 사용되는 무근 콘크리트 중력식 교각에 유리하나 교대부에 발생하는 종방향 반력이 지지한계를 초과할 경우 보강을 실시하여야 단점이 있다 (Hwang et al., 2017; Lee et al., 2017; Chae et al., 2019; Choi, 2019).

이러한 공법들은 주로 궤도-교량 종방향 상호작용에 따른 레일 축력을 어떻게 효과적으로 제어하는지에 초점이 맞추어져 있다. 장대레일은 근본적으로 레일의 온도가 상승함에 따라 횡방향 궤도 좌굴이 발생할 수 있으므로 궤도의 횡방향 좌굴안정성에 대하여 반드시 검토되어야 한다.

현재 사용되고 있는 거더-침목 고정장치인 T-볼트(Fig. 2)는 횡방향 저항력이 낮아 궤도좌굴에 충분히 저항하지 못할 것으로 판단되므로 레일 장대화를 위하여는 횡저항력을 증대시킨 개선된 거더-침목 고정장치의 개발이 필요하다. 이러한 거더-침목 고정장치를 개발하기 위하여는 궤도좌굴을 방지하기 위한 적정 횡방향 저항력을 산정하는 것이 선행되어야 한다.

Fig. 2. Example of T-bolt Type Girder-sleeper Fastener

본 연구에서는 변수해석을 수행하여 개발 중인 개선된 거더-침목 고정장치에 필요한 횡저항력을 산정하였다. 해석 시 고려한 변수로는 지간장, 곡률반경, 거더의 횡방향 변형 및 거더-침목 고정장치의 횡방향 저항력이다. 최종적으로 본 연구에서는 해석 결과를 종합하여 KR C-14050 (2016)에서 제시하고 있는 자갈도상 및 콘크리트도상의 허용부가축응력(Allowable Additional Stress, A.A.S.) 기준을 만족할 수 있는 적정 횡저항력은 제시하였다.

2. 좌굴해석 모델

2.1 해석 무도량 교량의 제원

해석대상 교량은 (구)철도청에서 작성한 무도상 판형교 표준도를 참고하여 선정하였다(Lee et al., 2019). 해석에 사용된 무도상 판형교의 지간은 9.0 m, 15.2 m, 30.0 m이며 자세한 제원은 Table 1 및 Fig. 3에 나타나 있다.

Table 1 및 Fig. 3에서 D 는 주거더의 중심 간 거리, h_w 는 복부판의 높이, t_w 는 복부판의 두께, $b_{f,u}$ 와 $b_{f,b}$ 는 각각 상·하부 플랜지의 폭, $t_{f,u}$ 와 $t_{f,b}$ 는 각각 상·하부 플랜지의 두께, EA 는 축방향 강성, EL_y 는 면내 휨강성, EL_z 는 면외 휨강성 그리고 GJ 는 순수 비틀림 강성이다.

Table 1. Properties of Main Girder

Span (m)	D (m)	h_w (m)	t_w (mm)	b_f (mm)		t_f (mm)	
				$b_{f,u}$	$b_{f,b}$	$t_{f,u}$	$t_{f,b}$
9.0	1.6	1,170	10	250	250	30	30
15.2	1.8	1,629	12	360	360	34	34
30.0	2.0	2,548	12	480	560	38	40
Span (m)	EA (kN)	EL_y (kN · m ²)	EL_z (kN · m ²)	GJ (kN · m ²)			
9.0	1.15×10^7	2.76×10^6	7.38×10^6	3.50×10^5			
15.2	1.87×10^7	8.42×10^6	1.52×10^7	8.04×10^5			
30.0	3.04×10^7	3.51×10^7	3.08×10^7	2.38×10^6

Fig. 3. Dimensions of Cross Section of Main Girder

해석에 사용된 레일은 UIC60 레일 제원을 사용하였다. 레일두부의 폭은 74.3 mm, 레일두부의 두께는 41 mm, 레일 복부의 두께는 23 mm, 레일하부의 폭은 150 mm, 레일하부의 두께는 13 mm, 레일의 높이는 172 mm이다. 침목은 한국철도 표준규격(KRS TR 0007-15, 2006)에서 규정된 표준계간용 교량 목침목을 사용하였으며, 침목의 폭은 230 mm, 침목의 높이는 230 mm, 침목의 길이는 3,000 mm이다.

2.2 무도상 판형교의 좌굴해석 모델

본 연구에서는 Lee et al. (2018)이 개발한 직선 무도상 판형교에 대한 좌굴해석 모델을 사용하였다. 해석에 사용된 프로그램은 범용구조해석 프로그램인 ABAQUS (2018)이다. Fig. 4는 이상화된 해석모델의 단면을 나타낸다. 레일, 침목 및 거더는 해석의 편의를 위하여 3차원 2절점 보요소 (B31)를 사용하였다. 보의 위치는 각 부재의 도심에 위치시켰으며 Fig. 4와 같이 무도상 판형교의 상부구조는 하나의 등가보요소를 사용하여 모델링 하였으며 입력된 단면상수는 Table 1에 나타나 있다. 거더는 탄성거동을 한다고 가정하였으며 탄성계수, E_G 는 210,000 MPa, 푸아송비, ν 는 0.3이다.

Fig. 4. Idealized Section of Analysis Model

레일과 침목의 연결은 ABAQUS (2018)에서 제공하는 연결요소인 CONN3D2를 사용하여 모델링 하였다. 레일 체결장치는 변위와 회전을 포함한 6자유도를 갖는다고 가정하였다. y 및 z 방향 변위에 대한 강성 $K_{y,f}$ 와 $K_{z,f}$ 는 각각 2.6×10^7 N/m와 3.5×10^7 N/m이며(Han et al., 2006), x 방향 변위에 대한 강성 $K_{x,f}$ 는 KRS TR 0014-15R (2009)에서

규정하고 있는 목침목용 레일 체결장치의 종저항력을 고려하여 1.4×10^7 N/m로 설정하였다(x, y, z 의 방향은 Fig. 3에 따른다). 그리고 x, y, z 의 회전에 대한 강성 $R_{x,f}$, $R_{y,f}$, $R_{z,f}$ 는 모두 6.0×10^4 N/rad로 동일하다고 가정하였다 (Han et al., 2006).

레일 체결장치는 종방향(x 방향)을 제외하고 모두 탄성거동을 한다고 가정하였다. 레일 체결장치의 종방향 물성치의 경우, 탄성한계는 0.5 mm, 레일 체결장치당 종저항력은 7 kN으로 설정하였다.

거더-침목 고정장치도 Fig. 4와 같이 거더의 중심과 침목하부를 CONN3D2를 이용하여 연결 하였다. 다만, 거더-침목 고정장치는 회전에 대하여 저항능력이 굉장히 미미할 것으로 판단되어 x, y, z 방향에 대한 회전은 고려하지 않았다. 본 연구에서 거더-침목 고정장치의 종방향(x 방향) 저항력은 KR C-08080 (2017)에서 제안하는 콘크리트 도상의 저항력 40 kN/m/track을 사용하였다. 여기서 탄성한계는 2 mm로 설정하였다. 수직방향(z 방향)은 탄성거동을 한다고 가정하였으며 궤도계수 300 kgf/cm/cm/rail을 적용하였다. 거더-침목 고정장치의 횡방향 저항력은 본 연구의 주요 해석 변수로 16 kN/m/track과 27 kN/m/track사이에서 값들을 변화시키며 해석을 수행하였다.

레일의 탄성계수, E_R 은 210,000 MPa, 푸아송비는 0.3, 열팽창계수, α 는 1.14×10^{-5} / $^{\circ}\text{C}$ (KR C-14050, 2016)으로 설정하였다. 침목의 탄성계수, E_S 는 10,300 MPa, 푸아송비는 0.3이며 침목 간격은 0.4 m이다.

Fig. 5는 본 연구에서 사용된 직선 무도상 판형교의 좌굴해석 모델 예이다. 좌굴해석 모델은 장대레일의 길이를 충분히 모사하기 위하여 교량 구간과 토공 구간을 포함하였다. 교량 구간은 3경간 FMFM방식으로 단순지지되어 있다, 토공 구간은 교량 좌측과 우측에 각각 100 m를 모델링 하였다. 해석은 레일의 온도를 증가시키면서 좌굴 온도를 산정하였다.

Fig. 5. Example of FE Model for Straight Ballastless Plate Girder Bridge: (a) Bridge region; (b) End of embankment region

좌굴해석모델은 기하학적 비선형을 고려하였으며 궤도 좌굴을 유도하기 위하여 레일의 초기변형을 입력하였다. 본 연구에서는 레일에 초기변형을 입력하여 좌굴을 유도하였다. 또한, 열차 주행에 따라 거더에 동적 횡변형이 발생할 수 있으므로 이를 변수로 해석을 수행하였다. 따라서, 본 연구에서 입력한 최종 초기변형은 레일과 거더의 초기변형의 합과 같다. 이는 Fig. 6과 같다. 여기서, L_R 는 레일의 초기변형이 적용되는 구간의 길이, L_G 는 거더의 길이, e_R 는 레일 초기변형의 최대크기, e_G 는 거더 횡방향 변형의 최대크기, L_0 는 초기변형이 적용되는 총 구간의 길이를 나타낸다. 최종적으로 레일의 초기변형, δ_R 과 거더의 횡방향 변형, δ_G 는 Eqs. (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_R = e_R \sin\left(\frac{\pi x}{L_R}\right) \sin\left(\frac{\pi x}{L_R}\right) \quad (1)$$

$$\delta_G = e_G \sin\left(\frac{\pi x}{L_G}\right) \quad (2)$$

좌굴을 유도하기 위한 L_R 및 e_R 은 선로유지관리지침(KR, 2016)에서 제시하고 있는 방향틀림 측정 기준과 기존연구(Lee et al., 2018)를 준용하여 $L_R=10$ m과 $e_R=10$ mm ($=L_R/1,000$)로 설정하였다. e_G 의 경우, 본 연구에서는 0, $L_G/1,500$, $L_G/1,000$ 세 가지 경우를 고려하여 거더 횡변형의 영향을 살펴보았다.

Fig. 6. Determination of Initial Imperfection Shape: (a) Span=9.0 m, $e_G=L_G/1,000$; (b) Span=30.0 m, $e_G=L_G/1,000$

곡선 무도상 판형교를 모사하기 위하여 본 연구에서는 침목의 배치형태를 레일과 직교하도록 방사형태로 배치하였으며, 경계조건 및 연결요소는 국부좌표계(Local coordinate)를 따르도록 설정하였다. 국부좌표계는 ABAQUS (2018)에서 제공하는 Cylindrical 좌표계를 활용하였다. Fig. 7은 Cylindrical 좌표계를 사용하여 모델링한 곡선 해석모델의 예를 보여주며, 이 그림에서 알 수 있듯이 경계조건들이 곡선 레일의 Tangent와 Radial 방향으로 배치되어 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 7. Example of FE Model for Curved Ballastless Plate Girder Bridge: (a) x-y plane; (b) B.C. arrangement

3. 허용부가축응력 및 해석변수

3.1 허용부가축응력의 결정

교량 상 궤도의 경우, 궤도-교량 종방향 상호작용으로 인하여 레일에 추가적인 축방향 응력이 발생하게 되며 국내 및 국외의 기준에서는 이러한 축방향 응력을 허용부가축응력보다 작도록 규정하고 있다. 본 연구에서는 좌굴해석을 통하여 좌굴온도 및 허용부가축응력을 산정하였다.

KR C-14050 (2016)의 경우 자갈도상 및 콘크리트 도상에서 곡률반경 1,500 m이상 일 때 허용부가축응력을 각각 72 MPa 및 92 MPa로 규정하고 있다. 본 연구에서는 목표 허용부가축응력을 위의 두 값으로 설정하여 각각 허용부가축응력에 대하여 필요한 거더-침목 고정장치의 횡저항력을 역산하였다.

국내에서 레일의 온도 범위는 $-20^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 로 규정하고 있으며, 중위온도, T_n 은 20°C 이다. 따라서, 온도 상승으로 인한 최고 온도 변화는 40°C 이다. 이러한 온도변화에 의한 응력을 좌굴해석에서 얻은 하좌굴 응력에서 제외하여 허용

부가축응력을 계산할 수 있다.

본 연구에서 궤도의 하좌굴응력 산정에 필요한 하좌굴온도의 결정은 UIC 720-R (2005)에서 규정하고 있는 Level 1 Safety를 사용하였다. Level 1 Safety는 상좌굴온도와 하좌굴온도의 차이가 20 °C를 초과할 경우 좌굴 허용 온도, T_{all} ,는 하좌굴온도를 사용할 수 있다고 제안하고 있다. 상좌굴온도와 하좌굴온도의 차이가 20 °C미만의 경우에는 해석에서 계산된 하좌굴 온도를 일정부분 감소시켜 사용하여야 한다.

3.2 해석 변수

본 연구에서 사용한 해석변수는 무도상 판형교에 사용된 거더의 지간장, 곡률반경, 거더의 횡변위 그리고 거더-침목 고정장치의 횡저항력으로 총 4개이다. Table 2는 해석변수의 범위를 보여준다.

Table 2. Range of Parameters

Parameter	Range	Remarks
Span length (m)	9.0, 15.2, 30.0	3 cases
Radius (m)	Straight, 1,500, 750	3 cases
Lateral disp. of girder	Base($e_G=0$), $L_G/1,500$, $L_G/1,000$	3 cases
Lateral resistance (kN/m/track)	16 - 27 (Elastic limit = 2 mm)	5 cases

지간장 길이는 9.0 m, 15.2 m, 30.0 m이며 무도상 판형교의 표준도상 나타난 최소 및 최대 지간장을 포함하였다. 곡률반경은 직선부터 750 m까지 변화시키며 해석을 수행하였다. 열차주행에 따라 발생할 수 있는 거더의 횡변위의 경우 횡변위가 없을 때 ($e_G=0$)부터 $e_G=L_G/1,000$ 까지 증가시키면서 해석을 수행하였다. 마지막으로 거더-침목 고정장치의 횡저항력을 16 ~ 27 kN/m/track으로 변화시키며 해석을 수행하였다.

4. 해석 결과 분석

4.1 좌굴 형상

Fig. 8은 해석결과 나타난 직선 및 곡선($R=1,500$ m)일 때 좌굴 형상을 보여준다. 좌굴은 대칭 3 half wave형태로 나타났으며 모든 해석 모델에서 동일하게 나타났다.

4.2 변수해석 결과

Fig. 9는 거더의 횡변위가 없을 때 ($e_G=0$)인 경우, 변수해석 결과를 보여준다. Fig. 9에서 x 축은 거더-침목 고정장치의 횡저항력, y 축은 허용부가축응력 (A.A.S.)이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 거더의 지간장과 무관하게 거더-침목 고정장치

Fig. 8. Example of Buckling Shape: (a) Straight model; (b) Curved model ($R=1,500$ m, $e_G=0$)

Fig. 9. Analysis Results ($e_G=0$): (a) 9.0 m; (b) 15.2 m; (c) 30.0 m

의 횡저항력이 증가할수록 허용부가축응력은 거의 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한, 궤도의 곡률반경이 감소할수록 허용부가축응력은 감소하는 것을 볼 수 있다. 해석 결과, 궤도의 곡률반경이 직선에서 최소 750 m로 감소하는 경우, 허용부가축응력은 최대 10 % 감소하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 10은 Fig. 9의 결과를 궤도의 곡률반경별로 정리한 그림이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 동일 곡률반경에서 무도상 판형교의 지간장에 따른 허용부가축응력의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. Fig. 10에 나타나 있지 않은 곡률반경 1,500 m의 경우도 유사한 결과를 나타내었다. 해석결과, 지간장에 따른 허용부가축응력의 최대 변동은 약 4 %로 나타났다.

Fig. 10. Analysis Results ($e_G=0$): (a) Straight model; (b) $R=750$ m

Fig. 11은 곡률반경이 750 m인 경우 해석 결과를 종합한 그림이다. 무도상 판형교의 지간장이 9.0 m인 경우, 거더의 횡변위가 0에서 $L_G/1,000$ 까지 증가하면서 허용부가축응력이 약 17 %까지 감소하는 것으로 나타났다. 반면에 지간장이 30.0 m인 경우는 허용부가 축응력의 변화는 미미하였다. 이러한 이유는 지간장이 작은 경우, L_R 과 L_G 의 값이 서로 유사하여 거더의 횡변형이 궤도의 초기변형에 미치는 영향이 크고(Fig. 6 참조), 거더의 면외방향 강성도 지간장이 작아지면서 감소하기 때문인 것으로 판단된다(Table 1 참조).

결과를 종합하면 허용부가축응력에 미치는 영향은 거더-침목 고정장치의 횡방향강성이 가장 크며, 곡률반경의 경우,

직선에서 750 m로 변화하면서 약 10 %의 허용부가축응력이 감소하였다. 또한, 무도상 판형교의 지간장이 30.0 m에서 9.0 m로 작아지는 경우 거더의 횡방향 변위가 0에서 $L_G/1,000$ 까지 증가하면서 허용부가축응력이 최대 17 %까지 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 11. Analysis Results ($R=750$ m): (a) $L_G=9.0$ m; (b) $L_G=30.0$ m

4.3 거더-침목 고정장치의 횡저항력 제한

앞서 언급한 바와 같이 무도상 판형교의 곡률반경 및 지간장이 작을수록 허용부가축응력은 감소하였다. 본 연구의 경우, $R = 750$ m 및 $L_G = 9.0$ m, $e_G = L_G/1,000$ 인 경우 허용부가축응력은 최소값을 갖는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 각각 곡률반경별(직선, $R = 1,500$ m, $R = 750$ m)로 해석 결과를 종합하여 Fig 12와 같이 나타내었다. 그리고, 최소허용부가축응력을 갖는 해석결과를 회귀분석하여 자갈도상 및 콘크리트 도상에 대응하는 허용부가축응력(72 MPa 및 92 MPa)에 대한 거더-침목 고정장치의 횡저항력을 Table 3과 같이 산정하였다.

무도상 판형교의 장대레일 부설에 필요한 거더-침목 고정장치의 횡저항력은 직선 무도상 판형교에서 콘크리트 도상 수준으로 설치할 경우 23.5 kN/m/track, 자갈 도상 수준으로 설치할 경우 최소 18 kN/m/track이 적절한 것으로 나타났다. $R = 750$ m인 경우에는 콘크리트 도상 수준으로 설치할 경우 25 kN/m/track, 자갈 도상 수준으로 설치할 경우는 19.5 kN/m/track이 적절한 것으로 나타났다.

Fig. 12. A.A.S vs. Lateral Peak Resistance: (a) Straight; (b) $R=1,500$ m; (c) $R=750$ m

Table 3. Proposal of Bridge-sleeper Fastener's Lateral Resistance

Radius (m)	A.A.S. (MPa)	Lateral resistance (kN/m/track)
Straight	92 (con'c)	23.5
	72 (gravel)	18.0
1,500	92 (con'c)	24.5
	72 (gravel)	19.0
750	92 (con'c)	25.0
	72 (gravel)	19.5

5. 결 론

본 연구에서는 무도상 판형교의 레일 장대화를 위한 거더-침목 고정장치의 횡저항력 기준을 제안하기 위하여 유한요

소해석을 이용한 변수해석을 수행하였다. 변수해석 결과 나타난 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 변수해석 결과, 거더-침목 고정장치의 횡저항력이 증가할수록 허용부가축응력은 증가하는 것을 알 수 있었다.
- (2) 무도상 판형교의 곡률반경이 작아지는 경우, 허용부가축응력은 감소하였다. 또한, 무도상 판형교의 지간장에 따른 허용부가축응력의 감소는 미미한 것으로 나타났다으며 거더의 횡변위는 무도상 판형교의 지간장이 작아지는 경우 그 영향이 크게 나타났다.
- (3) 해석결과를 종합하여 각 곡률별로 자갈 및 콘크리트 도상 수준의 허용부가축응력을 확보하기 위한 거더-침목 고정장치의 적정 횡저항력을 산정하였다. 그 결과, 직선 무도상 판형교의 경우, 72 MPa (자갈도상 수준의 허용부가축응력) 및 92 MPa (콘크리트도상 수준의 허용부가축응력)를 확보하기 위하여는 거더-침목 고정장치의 횡저항력이 각각 18 kN/m/track 및 23.5 kN/m/track 이 확보되어야 하는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업(19RTRP-B137949-03)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- ABAQUS. (2018). *Abaqus Analysis Guide 2018*. Dassault Systems Simulia Corp.
- Chae, S.H., Yoo, Y., Lim, C.S., and Choi, S.H. (2019). Applicability analysis of a continuous welded rail construction method on an open deck steel railway bridge using displacement control. *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 22, No. 2, pp. 158-168 (in Korean).
- Choi, S.H. (2019). Technology of CWR for an open deck steel railway bridge. *Magazine of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 67, No. 5, pp. 68-73 (in Korean).
- Han, S.Y., Park, N.H., Lim, N.H., and Kang, Y.J. (2006). Sensitivity of the continuous welded rail and the fastener on the track stability. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 4A, pp. 719-726 (in Korean).
- Hwang, M.H., Bae, Y., Kang, K.-D., and Kwon, S.-J. (2017). Comparative study of CWR method of existing plate girder bridges. *Proceedings of 2017 Spring Con-*

- ference, Korean Society for Railway, pp. 304-309 (in Korean).
- Korea Rail Network Authority (KR). (2016). *Line maintenance guidelines*.
- KR C-14050. (2016). *Continuous welded rail*. Railway Design Guidelines and Handbook, Korea Rail Network Authority.
- KR C-08080. (2017). *Analysis of longitudinal track-bridge interaction*. Railway Design Guidelines and Handbook, Korea Rail Network Authority.
- KRS TR 0007-15(R). (2006). *Wooden sleeper*. Korean Railway Standards.
- KRS TR 0014-15(R). (2009). *Rail fastening system*. Korean Railway Standards.
- Lee, D.-Y., Cho, H.-C., and Jun, Y.-J. (2017). A study on the continuous welded rail on plate girder. *Yooshin Technical Bulletin*, Vol. 24, pp. 37-48 (in Korean).
- Lee, H.D., Lee, J.H., Song, J.K., and Moon, J.H. (2018). Development of buckling analysis model for CWR on ballastless plate girder bridge and evaluation of minimum resistance for a bridge-sleeper fastener. *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 21, No. 10, pp. 993-1002 (in Korean).
- Lee, H.D., Lee, J.H., Song, J.K., and Moon, J.H. (2019). Theoretical evaluation of section properties of ballastless plate girder bridge's superstructure. *Journal of Korean Society for Urban Railway*, Vol. 7, No. 3, pp. 361-371 (in Korean).
- UIC 720-R. (2005). *Laying and maintenance of CWR track*. Paris, France.

Received	November 4, 2019
Revised	November 6, 2019
Accepted	November 21, 2019