미끄럼 허용 궤광 시스템의 좌굴강도를 고려한 횡방향 지지부재 간격과 강성

Stiffness and Distance of Lateral Support Member Considering Buckling Strength of Sliding Track Panel

박종찬* · 임남형** · 이진옥***

Park, Jongchan*, Lim, Namhyoung**, and Lee, Chinok***

Abstract

Recently, the concept of a Sliding Track Panel (STP) system, which allows the bridge to slide in the longitudinal direction, has been proposed for continuous welded rail method laid on long span non-ballast bridges, such as truss railway bridges. The performance of the STP system is determined based on the ability to prevent the lateral buckling of STP. This study attempts to derive the optimum interval distance and required stiffness of the lateral support member to be installed in the STP system through buckling analysis. According to the analysis, the interval distance of lateral support member, which satisfies the strength of STP, is less than 2.8 m and the rigidity is more than 800 N/mm.

Key words : Non-ballast Bridge, Continuous Welded Rail, Sliding Track Panel (STP)

요 지

트러스 철도교량과 같은 장경간 무도상 교량에 부설된 레일의 장대화를 위하여 최근에는 교량 종방향으로 미끄러짐을 허용하는 궤광 시스템의 개념이 제시되었다. 미끄럼 허용 궤광 시스템의 성능은 횡방향 좌굴 강도의 확보 여부에 따라 결정된다. 본 연구에서는 좌굴해석을 통해 미끄럼 허용 궤광 시스템에 설치될 횡방향 지지구조의 최적 간격과 소요 강성을 도출하고자 한다. 분석 결과 STP 시스템의 좌굴강도를 만족하는 횡방향 지지부재의 간격은 2.8 m 이하, 강성은 800 N/mm 이상으로 도출되었다.

핵심용어 : 무도상 교량, 레일 장대화, 미끄럼 허용 궤광

1. 서 론

1900년대 초반부터 현재까지 공용중인 철도교량의 형식 중에는 Fig. 1과 같은 무도상 교량(Non-Ballast Bridge)이 다수 존재하고 있다(MOLIT, 2016). 이러한 무도상 교량은 교량 상부구조의 자중이 열차하중보다 상대적으로 경량이 라는 특성 때문에 소음과 진동이 타 교량에 비해 상대적으로 크게 발생하고 있으며 장척레일 부설로 인해 운행 속도의

고속화가 어려운 상황이다.

이와 같은 무도상 교량의 단점을 극복하고 열차의 고속화를 추진하기 위한 개량작업의 일환으로 Fig. 1(a)와 같은 짧은 경간(약 10~20 m)으로 구성되는 무도상 판형교에서는 자갈궤도로 개량하는 유도상화 작업이 진행되고 있다. 그러나 Fig. 1(b)와 같은 장경간 트러스 무도상 교량에서는 유도상화 작업을 진행하기가 매우 어려우며 특히 운행선에서의 작업은 많은 위험과 장애가 존재하고 있다. 그러므로 이러한

*정회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정(E-mail: mioso@cnu.ac.kr)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Chungnam National University

**정회원, 충남대학교 토목공학과 정교수

Member, Professor, Department of Civil Engineering, Chungnam National University

***교신저자, 정회원, 충남대학교 토목공학과 정교수(Tel: +82-42-821-7749, Fax: +82-42-825-0318, E-mail: coleec@cnu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Chungnam National University

장경간 무도상 철도교량의 열차주행성능을 향상시키기 위한 방안으로 현재와 같은 무도상 궤도구조를 유지하면서 레일만을 장대화하고자 하는 연구가 진행되고 있다(MOLIT, 2019).

Fig. 1. Non-Ballast Railway Bridge

장경간 교량 상에서 무도상 궤도구조를 유지하면서 장대 레일을 부설하기 위해서는 궤도-교량 상호작용에 의해 부가적으로 발생하는 레일응력과 변위의 한계를 극복해야 한다. 이와 같은 제한조건을 효과적으로 해결하기 위한 방안으로 궤도-교량 상호작용 효과가 원천적으로 제거될 수 있는 Fig. 2와 같은 미끄럼 허용 궤광(Sliding Track Panel, STP) 시스템이 제시되었다(Park et al., 2018). STP 시스템은 교량 종방향으로의 궤광 마찰 저항력이 없어서 종방향으로 미끄러짐이 허용되어 궤도-교량 종방향 상호작용의 효과가 발생되지 않는 장점이 있다. 교량 연직방향으로는 현재의 침목고정장치와 유사한 정도의 강성으로 구속시키고 횡방향으로는 STP의 횡방향 좌굴에 저항할 수 있는 최소한의 강성으로 구속시키는 새로운 시스템이다. 이와 같은 횡방향 강성은 트러스 교량에서는 횡형, 판형교에서는 가로보에 의해 제공될 수 있으며 강성이 부족한 경우에는 교량 상부구조와 STP에 부착되는 추가적인 횡방향 지지부재에 의해 제공될 수 있다(Lim et al., 2019).

Fig. 2. Concept of STP

본 논문에서는 미끄럼 허용 궤광(Sliding Track Panel, STP) 시스템의 횡방향 좌굴 강도를 확보하기 위한 최적의 횡방향 지지부재 간격과 강성을 제시하고자 한다.

2. 미끄럼 허용 궤광의 좌굴강도

무도상 철도교량에서 미끄럼 허용 궤광(STP)의 적용 가능 구간을 설정하기 위한 대상 교량으로 Fig. 3과 같은 무도상 교량(Park et al., 2018)을 선정하였다.

Fig. 3. Non-Ballast Truss Bridge

Fig. 4. Non-Ballast Track Model

적용된 궤도는 Fig. 4와 같은 무도상 목침목 궤도(Park et al., 2018)이다. 레일은 KR60, 체결장치는 목침목용 E-clip, 침목은 교량용 목침목(Wooden Tie), 침목 고정장치(Lateral/Vertical/Longitudinal Resistance of Tie-Fastener)는 개량형 고정장치이며 궤간은 표준궤간 그리고 침목 간격은 0.4 m이다. 궤도의 물성치는 Park et al. (2018)과 Han et al. (2006)의 논문을 참고하였다(Tables 1, 2).

Table 1. Material Property of Rail and Sleeper

Materials	Properties	
Rail (60KR)	Cross-sectional Area (mm ²)	7.75E+3
	Modulus of elasticity (N/mm ²)	2.1E+5
	Thermal coefficient (1/°C)	1.2E-5
	2nd Moment of Inertia (mm ⁴)	6.04E+7
Wooden Sleeper	Cross-sectional Area (mm ²)	5.29E+4
	Modulus of elasticity (N/mm ²)	1.23E+4
	2nd Moment of Inertia (mm ⁴)	2.33E+8

Table 2. Stiffness of Fastener

Type	Resistance
Longitudinal	8,000 N, 0.5 mm
Lateral	2.6E+4 N/mm
Vertical	3.5E+4 N/mm
X-axis Rotation	6.0E+4 N/rad
Y-axis Rotation	
Z-axis Rotation	

궤도-교량 종방향 상호작용 해석과 좌굴해석은 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS 2019를 사용하였으며 유한요소 모델링 방법은 Park et al. (2018, 2019)의 논문을 참고하였다.

2.1 STP 적용 구간

Fig. 3과 같은 무도상 교량과 Fig. 4와 같은 무도상 궤도의 종방향 상호작용의 영향을 분석하기 위하여 철도설계지침 및 편람 KR C-08080 (2017)의 기준을 적용하였다.

Fig. 5. STP Length .vs Additional Stress

Fig. 5는 대상교량의 궤도-교량 상호작용 해석 결과를 나타낸다. 해석결과 무도상교량의 트러스 구간의 단부에서 최대 부가응력 145.2 MPa이 도출되었으며, 이는 KR C-08080에서 제시하고 있는 레일 부가응력 제한치인 72 MPa을 2배 이상 초과하고 있다. 그리하여 이에 대한 해결방안인 STP 시스템을 적용한 궤도-교량 상호작용 해석을 수행하였다.

Fig. 6. STP length .vs Additional Stress

Fig. 6은 온도하중(Temp), 시제동하중(AccBr), 연직하중(Vert)을 고려한 궤도-교량 종방향 상호작용에 의해 레일에 발생하는 축방향 부가응력과 미끄럼 허용 궤광(STP)의 적용 길이와의 관계를 나타낸다. STP는 Fig. 6의 하단부 그림에 나타난 것 같이 3경간 연속교량끼리의 접속 경간에 적용하였다. STP의 적용길이를 80 m까지 변화시키면서 레일 부가응력을 제한치인 72 MPa (철도설계지침에 의한 허용 부가 압축응력의 상한치)과 비교한 결과, 약 60 m에 걸쳐 STP를 적용하면 부가응력의 제한치를 만족하는 것으로 분석되었다.

2.2 STP의 횡방향 지지구조 최적 간격

2.1절에서 Fig. 3과 같은 장경간 무도상 트러스 교량에 장대레일을 부설하기 위해서는 1개 경간 정도인 약 60 m에 걸쳐 STP를 부설해야 함을 알 수 있다. 이를 통해 궤도-교량 종방향 상호작용 효과를 제어할 수 있으나 미끄럼 허용 궤광(STP)은 횡방향으로 충분한 저항 강성이 부족하여 횡방향 좌굴에 취약할 수 있는 단점이 있다.

이러한 단점을 보완하기 위해서는 STP에 횡방향 저항 강성을 제공할 수 있는 횡방향 지지구조를 교량의 상부구조물인 중형 또는 세로보와 궤광에 설치할 필요가 있다. 본 절에서는 횡방향 지지구조의 최적 간격을 제시하기 위하여 Fig. 7과 같은 양단 단순지지로 가정한 60 m의 STP 모델(Fig. 4(b))에 대한 좌굴해석을 수행하였다. 적용한 궤도 줄뜸량은 길이 10 m에 틀림량 10 mm이다.

Fig. 7. STP for Buckling Analysis

Table 3. Distance of Lateral Support Member

Case	Distance (m)	Number of Lateral Support Member (EA)
1	2.4	26
2	2.8	23
3	4	16
4	10	7

횡방향 지지구조의 강성은 무한 강성으로 가정하였으며 간격은 Table 3과 같이 설정하고 변수해석을 수행하였다. Fig. 8은 횡방향 지지구조의 간격에 따른 STP 중앙점에서의 횡방향 변위와 레일온도와의 관계이다.

Fig. 8과 같은 그래프에서 STP의 좌굴강도로 표시되는 좌굴온도를 산출하기 위하여 Southwell Plot기법을 적용하였다. 횡방향 지지구조의 간격에 따른 STP의 좌굴온도는 Fig. 9와 같다. STP의 소요 횡방향 좌굴온도는 장대레일의

평상시 압축응력을 유발하는 레일의 최대 온도변화 38 °C와 궤도교량 상호작용에 의해 발생하는 압축응력의 최대 허용치 72 MPa를 온도로 환산한 30 °C를 고려하면 68 °C이다.

Fig. 8. Lateral Disp. vs Temp. of Rail

Fig. 9. Buckling Temperature of STP

60 m에 걸쳐 STP가 적용된 교량이 충분한 횡방향 좌굴강도를 확보하기 위해서는 약 2.8 m 이하로 횡방향 지지구조가 설치되어야함을 알 수 있다.

2.3 횡방향 지지구조의 소요 강성

STP에 설치될 횡방향 지지구조의 간격을 2.8 m인 경우에 대하여 Table 4와 같은 횡방향 지지구조의 횡방향 강성에 따른 STP의 좌굴강도를 평가하였다. 여기서 횡방향 지지구조의 강성은 STP의 적용에 따라 발생하는 횡방향 좌굴하중에 저항하기 위한 소요강성을 뜻한다.

Table 4. Lateral Stiffness of Lateral Support Member

Case	Distance of Lateral Support Member (m)	Lateral Stiffness (N/mm)
1	2.8	200
2		600
3		1,000
4		1,400
5		2,000
6		6,000
7		10,000

Fig. 10은 횡방향 지지구조의 횡방향 강성과 STP의 좌굴온도를 나타낸 것이다. 소요 횡방향 좌굴온도 68 °C를 고려하면 횡방향 지지구조의 횡방향 강성은 최소 800 N/mm 이상을 확보하여야 한다.

Fig. 10. Buckling Temperature w.r.t Lateral Stiffness

3. 결 론

본 논문에서는 장경간 무도상 교량의 레일 장대화를 위해 미끄럼 허용 궤광(STP)을 적용하는 경우에 대하여 STP의 횡방향 좌굴 안정성 확보를 위한 횡방향 지지구조의 최적 간격과 소요 횡방향 강성을 제안하였다. 60 m 길이의 미끄럼 허용 궤광(STP)을 적용하는 경우, 횡방향 지지구조의 간격은 최대 2.8 m 그리고 소요 횡방향 강성은 최소 800 N/mm를 확보하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 충남대학교 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- 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.
- KR C-08080. (2017). *Track-bridge longitudinal interaction analysis*. Korea Rail Network Authority.
- Lim, N.H., Park, J.C., and Ryou, G.H. (2019). *Non-ballast track structure for allowing longitudinal direction slip of steel railway bridge*. Korean Patent 10-1982567, May 21, 2019.
- Ministry of Land Infrastructure and Transport (MOLIT). (2016). *Development of continuous welded rail technology for non-ballast bridge*.

Ministry of Land Infrastructure and Transport (MOLIT). (2019). *Development of the technology for the continuous welded rail (CWR) on a ballastless track bridge in existing lines*.

Park, J.C., Lee, Y.S., Ryou, G.H., and Lim, N.H. (2018). Installation of CWR on long-span bridges of ballastless tracks. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 7, pp. 47-52.

Park, J.C., Lee, Y.S., Ryou, G.H., and Lim, N.H. (2019).

Analysis of track-bridge interaction effect according to stiffness of sleeper fastener device in ballastless track bridge with CWR installed. *Journal of Korean Society for Urban Railway*, Vol. 7, No. 2, pp. 187-195.

<i>Received</i>	■	May 10, 2020
<i>Revised</i>	■	May 12, 2020
<i>Accepted</i>	■	May 14, 2020