

LRB 교좌장치를 사용한 교량의 장대레일 축력안정성 평가

Stability evaluation of CWR on the bridge with Lead Rubber Bearing(LRB)

양 신 추*, 윤 철 근**, 이 전 우***
 Yang, Sin-Chu, Yun, Cheol-Kyun, Lee Jin-Woo

ABSTRACT

LRB(Lead rubber bearing) has small resistance force against slowly acting loadings such as temporal and creep loadings vice versa large resistance force against rapid loadings such as earthquake and braking loadings. By those mechanical characteristics, it has the advantage to reduce longitudinal load acting on abutments and piers, and moreover to improve the running stability of train by restricting the behavior of bridge under the required level. In this study, a stability evaluation method of CWR on the bridge with LRB is presented. Several parametric studies are carried to investigate how LRB contributes to the improvement of CWR stability.

1. 서론

LRB 교좌장치는 온도하중이나 크리프하중과 같이 서서히 작용하는 하중에 대해서는 저항력이 작게 발생하고 제동하중 또는 지진하중과 같이 급격히 작용하는 하중에 대해서는 저항력이 크게 발생하므로 온도하중 등에 대해서는 교대 및 교각에 작용하는 종하중을 저감시키고, 제동하중 등에 대해서는 교량의 거동을 소정의 요건 이하로 제한하여 열차의 주행안전을 도모할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 LRB 교좌장치를 사용하는 국철교량의 축력 안전성을 평가하는 방법을 제시한 후, LRB교좌장치가 교량상에 설치된 장대레일의 축력안정성에 기여하는 정도를 평가하였다.

2. 검토하중

온도하중은 장대레일이 설정되는 온도로 부터 변화되는 온도를 하중으로 환산하여 적용하였다. 본 검토에서는 국내의 기후조건을 고려하여 레일에는 $\pm 45^{\circ}\text{C}$ 를, 교량상판에는 $\pm 35^{\circ}\text{C}$ 를 적용하였다.

시/제동하중 검토시 제동하중은 LS22하중

11의 15% 크기로 300m의 거리에 걸쳐 작용하는 것으로, 시동하중은 LS22하중(동력차)의 25%의 크기로 33m의 거리에 걸쳐 작용하는 것으로 가정하였다. 이들 하중의 조합은 안전측의 검토를 위하여 동일방향으로 작용하는 것으로 가정하였다. 이들 하중을 기초로 시동 및 제동하중의 작용크

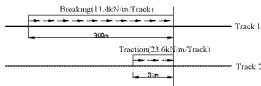


그림 1 제동 및 시동하중의 재하위치 및 크기

* 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 책임연구원

** (주)서영기술단 구조설계실 이사

*** (주)서영기술단 구조설계실 차장

기 및 길이를 구하면 그림 과 같다.

LS-22하중을 등분포하중으로 환산하고 중격계수 1.4를 적용할 때 수직하중선도는 그림 2와 같다.

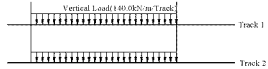
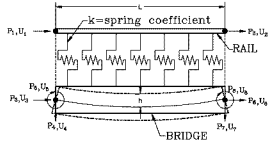


그림 2 열차수직하중

3. 축력해석방법

3.1 레일/교량 인터페이스 요소

레일/교량 상호작용해석은 기본적으로 유한요소법을 사용하였다. 그러나 교량 및 레일은 기존의 요소로 모형화하였으나 레일과 교량의 상호작용은 그림 4와 같은 인터페이스요소를 개발하여 모형화하였다. 탄성 및 소성영역내에서의 인터페이스요소의 각 질점에 작용하는 힘과 질점변위와의 관계식은 다음식과 같이 나타내진다.



$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \\ P_8 \end{bmatrix} = kL/6 \begin{bmatrix} 2 & 1 & -2 & 0 & -2h & -1 & 0 & -h \\ 1 & 2 & -1 & 0 & -h & -2 & 0 & -2h \\ -2 & -1 & 2 & 0 & 2h & 1 & 0 & h \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2h & -h & 2h & 0 & 2h^2 & h & 0 & h^2 \\ -1 & -2 & 1 & 0 & h & 2 & 0 & 2h \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -h & -2h & h & 0 & h^2 & 2h & 0 & 2h^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \\ U_7 \\ U_8 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \\ P_8 \end{bmatrix} = \phi_{max} L/2 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(탄성영역) (소성영역)

여기서 h는 교량상판의 중립축에서 상부면까지의 높이이다.

이때 인터페이스요소가 탄성 및 소성영역에 있는지에 대한 판단식은 식 (17)과 유사하게 다음 식으로 주어진다.

$$\left| \frac{(U_1 + U_2)}{2} - \frac{(U_3 + U_6)}{2} \right| = \delta_u \begin{cases} > \delta_u \rightarrow \text{소성영역} \\ \leq \delta_u \rightarrow \text{탄성영역} \end{cases} \quad (18)$$

3.2 교좌장치 유형별 상판 휨거동과 수평거동과의 관계

3.2.1 교대부 교좌장치

일반적으로 차량주행시 교대부의 거동은 매우 작으므로 고정되었다고 가정할 수 있다. 따라서 고정받침인 경우는 그림에서 나타난 바와 같이 다음과 같은 경계조건으로 처리할 수 있다.

$$(i) \text{ 좌측단인 경우 : } U_1 = bU_3, U_2 = 0 \quad (ii) \text{ 우측단인 경우 : } U_4 = -bU_6, U_5 = 0$$

이동받침인 경우는 좌, 우측 모두 수직방향 자유도만을 0으로, 즉 $U_2=0, U_5=0$ 으로 처리하면 된다. 탄성받침인 경우는 그림 (B)로부터 전점변위와 전점하중과의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} K_H & 0 & -bK_H \\ 0 & K_V & 0 \\ -bK_H & 0 & b^2K_H + K_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix}$$

여기서 K_H, K_V, K_M 은 각각 수평, 수직 회전 변위에 대응하는 스프링상수이며, b는 상판하면에서부터 중립축까지의 높이이다.

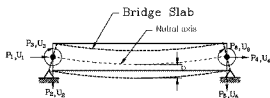


그림 고정받침 교각장치 하중 및 변위조건

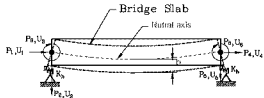


그림 탄성받침 교각장치 하중 및 변위조건

3.2.2 교각에서의 교좌장치

교좌장치가 교각에 설치되는 경우 교좌장치유형에 따라 상판의 좌우단절점과 교각 첩단에서의 각 자유의 종속성은 달라지게 된다. 그림과 같은 좌단 고정단으로 되어있는 교좌장치인 경우 자유도 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$U_1 = U_3 + b\phi_1, \quad V_1 = V_2 = V_3$$

교좌장치가 탄성받침으로 되어 있는 경우는 상판의 하변에서 중립축까지의 높이를 고려하여 상판과 교각의 사이의 인터페이스요소로 모형화할 수 있다, 이때 요소행렬은 다음 식으로 나타내진다.

$$K_{\text{Elastic pad}} = \begin{bmatrix} K_{H1} & 0 & -bK_{H1} & -K_{H1} & 0 & 0 \\ 0 & K_V & 0 & 0 & -K_V & 0 \\ -bK_{H1} & 0 & b^2K_{H1} + K_M & bK_{H1} & 0 & -K_M \\ -K_{H1} & 0 & bK_{H1} & K_{H1} & 0 & 0 \\ 0 & -K_V & 0 & 0 & K_V & 0 \\ 0 & 0 & -K_M & 0 & 0 & K_M \end{bmatrix}$$

여기서 K_H , K_V 및 K_M 은 각각 탄성받침의 수평, 수직 및 회전자유도에 대응하는 스프링 상수이다.

일반적으로 교량의 교좌장치는 고정단, 자유단, 및 탄성받침의 조합으로 다음과 같이 12가지의 유형이 있을 수 있다. 이들 각각의 교좌장치 유형에 대하여 휨과 수평변위와의 관계는 앞서 언급한 바와 같은 개념으로 적절한 관계식을 유도한 후 이들을 시스템 평형방정식의 부가적인 제한조건으로 적용함으로써 고려할 수 있다.

3.3.3 LRB 교좌장치 종방향 거동모형

지진 및 제동하중과 같이 급격한 하중을 받거나 온도하중 및 크리프하중과 같이 서서히 작용하는 하중에 대하여 LRB교좌장치는 LRB와 같은 특성을 갖는다고 가정할 수 있다.

온도, 크리프, 건조수축에 대한 수평력은 다음식과 같이 나타내지며

$$F_{\text{seis}} = 0.25Q_d + K_p \times d_{\text{seis}}$$

시/제동하중 및 지진하중에 대한 수평력은 다음식과 같이 나타내진다.

$$F_{\text{seis}} = Q_d + K_p \times d_{\text{seis}}$$

4. 해석제원 및 불성적

속력해석에 사용된 레일 및 도상의 불성적은 표 2와 같다.

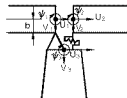


그림 6 교좌장치 유형에 따른 절점 힘과의 관계

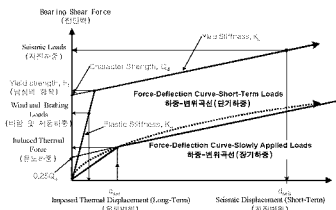


표 장대레일 축력해석을 위한 LRB 특성값

유형	본체 갯수	K_r (kN/m)	K_e (kN/m)	K_p (kN/m)	K_m (kNm/rad)	u_r (m)	u_n (m)	비고
LRB 3500ton	2	2.1E7	온도 : 1.4E4 시/제동: 1.3E5	1.12E4	-	0.1	9.6E-3	P1, P2, P3, P6, P7, P8 교각
LRB 5000ton	4	3.1E7	온도: 2.1E4 시/제동: 1.8E5	1.84E4	-	0.1	7.7E-3	P4, P5 교각
FPB	2	1.8E8	2.9E3	0	-	0.1	0.1	A1, A2 교대

여기서 u_r 는 온도하중에 대한 탄성한계변위이며, u_n 는 시/제동하중에 대한 탄성한계변위이다.

4. LRB교각장치를 갖는 교량 및 궤도 상호작용해석

4.1 부가응력 해석

레일부가응력 검토를 위하여 온도하중, 시제동하중, 수직하중에 대하여 해석한 결과를 그림 에 나타내었다. 이에 안전측을 위하여 궤도중저항력 2.0ton/m 적용하였다.

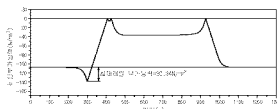


그림 온도하중 작용시 레일부가응력

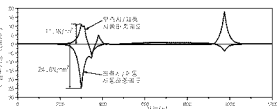


그림 시/제동하중 작용시 레일부가응력

온도하중, 시제동하중, 열차수직하중에 대한 부가응력의 총합은 54.9N/mm^2 로서 기준치인 72kN/mm^2 이내임을 알 수 있다. 한편 인장에 대한 부가응력 총합은 59.5N/mm^2 로서 기준치인 92kN/mm^2 이내임을 알 수 있다.

4.2 레일 및 교량의 변위해석

시제동 위치를 변경하면서 가장 불리한 위치 선정하여 최대 레일/교량 상대변위를 구하여 그림 에 나타내었으며 교량의 절대변위를 그림 에 나타내었다. 열차수직하중 작용시 상판단부 회전변위에 대한 해석결과는 그림 과 같다. 이에 각각의 해석에서 안전측 검토를 위하여 궤도중저항력 1.2ton/m 적용하였다. 레일/교량 상대변위는 2.6mm 로써 기준치인 4mm 이내임을 알 수 있으며, 교량의 절대변위는 4.7mm 로써 기준치인 5mm 이내임을 알 수 있다. 또한 수직하중에 대한 단부회전변위는 2.33mm 로써 기준치인 8mm 보다 매우 적음을 알 수 있는데 이것은 LRB 교각장치를 사용함에 따라서 교량상판의 연속화가 가능했기 때문으로 판단된다.

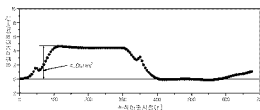


그림 수직하중 작용시 레일부가응력

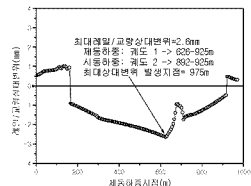


그림 12 시제동하중 작용시 레일/교량 상대변위

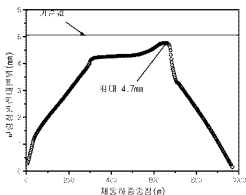


그림 13 제동하중 작용시 교량상판의 최대변위

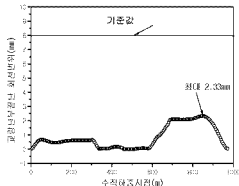


그림 14 수직하중 작용시 교량상판의 단부회전변위

은도하중 및 제동하중이 각각 작용할 때 교대 및 교각에 작용하는 중하중들의 절대 최대값을 표에 나타내었다. 이들 결과로부터 교각에 작용하는 중하중의 최대값은 설계값인 400ton 이내임을 알 수 있다.

교각 및 교대번호	중하중(ton)
A1	-22.3
P1	-129.8
P2	-101.0
P3	-91.5
P4	-15.0
P5	57.1
P6	122.1
P7	156.0
P8	187.8
A2	46.0

5. 결론

본 연구에서는 수직하중 및 LRB교좌장치의 중방향비선형성을 고려할 있는 장대레일/교광 상호작용해석방법을 제시하였다. 장대레일 축력안정성 평가체계를 정립하여 LRB교좌장치를 사용하는 국철교광을 대상으로 축력평가를 수행하였다. 제시한 장대레일 축력해석방법은 새롭게 정립된 장대레일 축력기준인 UIC774-3(2)기준을 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있음을 알 수 있으며, 다양한 철도교광의 장대레일 축력해석에 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 철도청, “국유철도건설규칙”, 2000. 8.
2. “Track/bridge Interaction Recommendations for calculations”, UIC774-3, 2nd edition, October 2001