

고속철도 교량상판의 온도신축작용이 궤도처짐에 미치는 영향과 대책에 관한 연구

The Effect and Countermeasures of The Vertical Track Settlement Caused by Expand and Contract Behavior of the High-Speed Railway Bridge Girder

강기동¹
Kee-Dong Kang

Abstract

According to continuous welded rails on a bridge, temperature changes bring about the expansion of the bridge deck adding axial forces on the track. Moreover, the ballast on the bridge deck expansion joint is moved due to the bridge deck. If bridge decks are longer, the influence is greater, loosening ballast, causing track irregularities, and deteriorating passengers' comfort. Considering structure of bridge itself and tolerance of track irregularities caused by the loosened ballast on bridges, the maximum length of a deck should be less than 80m, which is the same as the standard of the French railway. In this study, an interaction between the expansion related to the bridge length and irregularity in longitudinal level referring to measurements and maintenance works performed in the high-speed railways was analyzed. This research shows that installation of sliding plate or vertical ballast stopper is not a good option since it is difficult to install. On the other hand, installation of movable fastener or gluing is easy but its influence is insignificant. To conclude, switch tie tamping or manual tamping is more effective than others.

Keywords : bridge deck expansion joint(교량신축이음), Vertical Track Settlement(궤도침하), Track maintenance(궤도유지보수)

1. 서론

고속철도 궤도는 고속열차 운행을 위하여 균일한 강성과 일정한 범위내의 궤도선형을 유지하는 것이 필요하다. 국내 최초로 모든 교량에 장대레일을 부설한 것도 이러한 측면에서 시행되었으나 궤도와 교량구조물의 상호작용에 따라 교량 신축이음부의 궤도에서는 궤도자갈의 이완으로 균일한 강성을 유지할 수 없으므로 이러한 문제를 최소화하기 위하여 가능한 한 교량 경간이 짧은 단순 경간으로 하여 상판 신축작용의 영향이 적게 되도록 하는 것이 이상적이다. 그러나 교량의 구조적인 관점에서는 가능한 한 연속교량으로 하는 것이 경제적이므로 이러한 상반되는 관점의 조정이 필요하다.

교량 상의 장대레일은 온도변화에 따라 교량상판이 신

축하기 때문에 궤도에 축력이 더해질 뿐 아니라 교량상판 길이의 변화로 인하여 구조물 단부(신축이음부)에서 궤도자갈이 이완되는 현상이 발생한다. 이러한 영향은 교량상판의 길이가 클수록 더욱 커지며 궤도자갈의 이완을 가중시키고 결국 궤도 고저틀림에 영향을 미쳐 승차감을 악화시키게 된다. 이러한 관점에서 경부고속철도에서는 프랑스 고속철도의 경험과 제안에 따라 교량 경간의 길이를 최대 80m로 제한[1]하여 시공하였다.

이 논문에서는 고속선구간에서 검측결과 나타나고 있는 현상과 그 간의 유지보수 작업의 경과를 바탕으로 교량상판의 온도신축작용과 궤도 처짐의 상관관계를 조사 분석하고 교량신축부의 궤도 강성을 보강하는 방법에 대한 검토 및 시험시공을 통하여 적절한 유지관리 방안을 도출해 내는 연구결과를 제시하였다.

2. 궤도침하의 발생현황

2.1 궤도침하 현상

그간 고속철도 구간의 KTX운행 경과를 보면 경부고속철도 교량의 대표적인 경간 형식인 2@40 또는 3@25의 교량상판의 신축이음부에서 궤도침하가 많이 발생하는 현상을 보이고 있다.

이러한 교량상판 신축이음부의 궤도침하현상은 동절기에 크게 나타나고 침하의 형태도 교량의 신축이음부 위치에 일정한 간격으로 나타나고 있는 것으로서 특히 상판의 길이가 줄어드는 기간 즉 온도가 떨어지는 기간동안 도상이완이 커지는 것으로 확인되었으며, 그림 1에서 보는 바와 같이 이 결합은 신축이음부가 위치한 80m 또는 75m 마다 반복적으로 나타나고, 교량형식이나 신축이음형식과 무관하게 모든 교량의 신축이음부에서 동일하게 나타나고 있으며, 그 크기도 거의 일정하다.

2.2 침하 해석모델

교량과 같이 하부구조물이 충분한 강성을 갖는 선로 상에서는 교각이나 교대의 침하가 발생하지 않는 한 궤도의 변형이 발생되면 일반적으로 궤도에서는 침목 저부의 자갈이 이완되어 침목과 자갈이 분리되는 뜬 침목(Pumping) 현상이 나타나며 이러한 현상은 궤도침하의 전형적인 원인으로 그림 2와 같이 일반적으로 알려진 궤도침하 해석모델과 공식[3]에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$EIy = \frac{q}{12} \left(\frac{x^4}{2} - dx^3 + \frac{d^2x^2}{2} \right) - \frac{6EIh}{d^3} \left(\frac{dx^2}{2} - \frac{x^3}{3} \right) \quad (1)$$

여기서,

y : 궤도처짐 (mm)

EI : 레일의 고저 휨강성 파라미터 ($N \cdot m^2$)

q : 궤도 m 당 단위중량(단선, 레일, 침목, 체결구) (N/m)

d : 궤도처짐 발생 영향구간 (m)

h : 최대 궤도처짐량 (mm)

이 공식의 조건에서 궤도처짐 발생구간의 최소 길이 d 는 $y'(x)=0$ 일때 $x=0$ 의 조건으로 보면 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$d' = \frac{72EIh}{q} \quad (2)$$

이 공식에 실제 적용된 값을 대입하면,

$EI = 6.416 \times 10^6$ (UIC 60 레일의 경우)

$q = 305kg/m = 2990N/m$

그러므로, $d = 3.526 \sqrt[4]{h}$ 이다.

현장 측정결과 최대 궤도처짐량인 $h=5mm$ 를 대입하면,

$d = 3.526 \sqrt[4]{h} = 3.526 \times 1.495 = 5.27m$ 이므로, 고저

틀림 발생 영향구간 $d = 2 \times 5.27 = 10.54m$ 이다.

이 수치는 궤도 검측치 또는 현장조사 결과 확인된 교량 신축부의 처짐 범위인 10~12m와 일치하므로, 이를 통하여 교량신축부의 궤도에서 발생한 궤도침하의 일반적인 현상과 처짐 발생범위 등에 대한 상관관계를 확인할 수 있다.

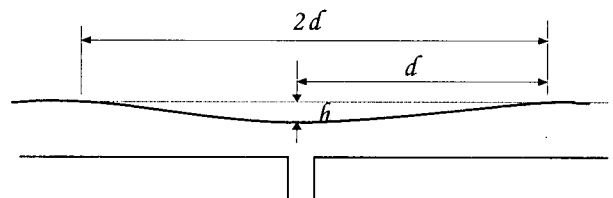


Fig. 2. Track Settlement Analysis Model

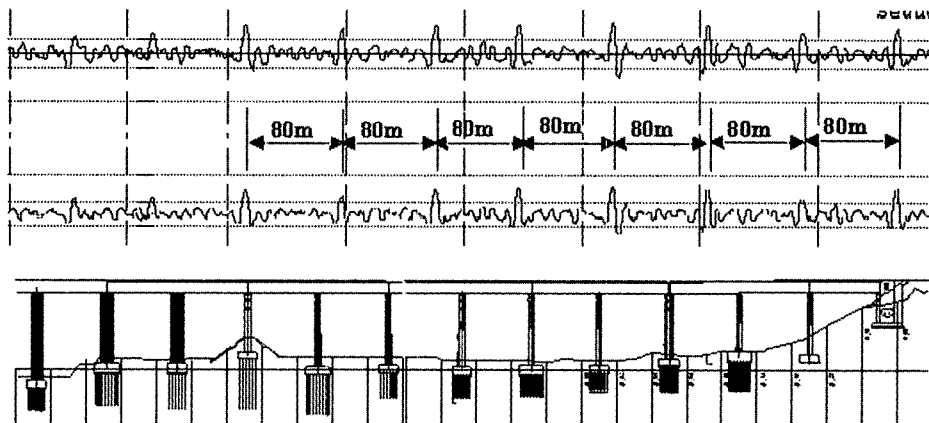


Fig. 1. Track Measuring Graph on the Bridge [2]

2.3 원인분석

2.3.1 교량상판의 온도신축에 의한 도상이완

고속철도 교량의 대표적인 형식인 2@40 교량의 경우 구조물 신축과 연관있는 상판의 길이는 80m로, 이 경우 교량상판의 온도에 따른 길이변화량은 다음과 같다.

$$\Delta l = \beta \cdot \Delta t \cdot l \quad (3)$$

여기서,

Δl : 교량상판의 길이변화량

β : 콘크리트의 선팽창 계수 (1.14×10⁻⁵)

Δt : 온도변화량

l : 교량상판의 길이

상기 식에서 구조물 신축에 영향을 주는 온도범위를 -10℃ ~ 30℃로 가정하여 계산하면 $\Delta l = \beta \cdot \Delta t \cdot l = 1.14 \times 10^{-5} \times 40 \times 8000 = 36.5\text{mm}$ 이다. 이러한 온도신축에 대한 상판의 길이변화는 그림 3의 개념과 같이, 해당구간의 자갈의 밀도를 감소시켜 궤도저침을 유발하고 있다.

2.3.2 사하중 증가에 의한 교량상판의 변형

교량상판은 궤도부설 및 진차선 공사 후 사하중의 증가로 기하학적인 변형(비틀림)이 발생할 수 있으며 이 경우 신축이음부에서 전후 교량 상판간의 높이 차가 생겨 궤도의 처짐을 야기할 수 있다. 이러한 현상은 교량의 일시적인 변화로 나타나는 현상이며 충분한 시간이 경과하여 교량의 변형이 안정화되고 궤도선형조정이 시행되면 해결될 수 있을 것으로 판단된다.

2.3.3 콘크리트 수축 및 철근 이완에 의한 영구변형

대형 프리스트레스 구조물의 경우 시공 후 콘크리트 수축 및 강선 이완으로 변형이 일어나며 일정기간 경과 후에 변형의 진행이 종료되므로 변형이 진행되는 동안 구조

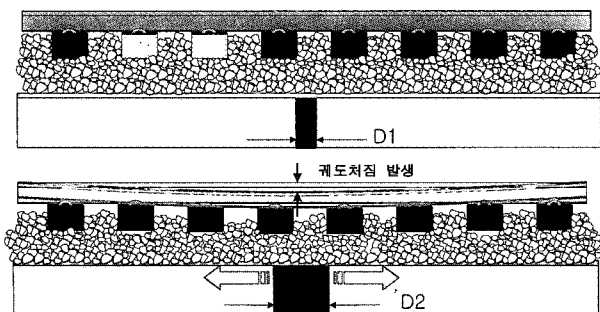


Fig. 3. The Vertical Track Settlement and Expand and Contract Behavior on Bridge

물의 선형변화가 궤도의 틀림으로 나타날 수 있으며, 고속철도의 경우 현재까지 열차의 주행이 많지 않았기 때문에 구조물의 영구변형이 현재까지 진행될 수 있으며 이러한 영향 역시 시간이 경과된 후 안정될 수 있을 것으로 판단된다.

2.3.4 열차 주행시 단부격임각의 증가

연속교량과 같이 상판이 긴 경우, 열차 하중의 재하로 그림 4에서 보는 바와 같이 상판 중앙부에 처짐이 발생하고 이로 인해 단부가 들어 올려지는 현상이 반복적으로 발생되면, 구조물 신축이음부에 위치한 도상자갈의 이완이 발생할 수 있으며, 고속철도 개통 후 열차운행 횟수가 증가하면서 이의 영향도 적지 않을 것으로 보고 있다.

3. 처짐의 추이와 전망

3.1 궤도저침의 대책

앞서 설명한 바와 같이 교량상에서 궤도저침이 발생하는 원인으로서는 ①교량상판의 온도신축에 의한 도상이완, ②열차 주행시 단부격임각의 증가, ③콘크리트 수축 및 철근 이완에 의한 영구변형, ④ 사하중 증가에 의한 교량 상판의 변형 등을 원인으로 볼 수 있으며 이 중 ③ 콘크리트 수축 및 철근 이완에 의한 영구 변형과 ④사하중 증가에 의한 교량상판의 변형은 그 영향이 크지 않거나 시간이 경과됨에 따라 안정될 수 있는 원인으로 판단되므로, 여기서 교량 온도신축의 영향은 계절 변화에 따라 반복되는 현상이고, 단부격임각의 증가로 인하여 발생하는 궤도자갈 이완은 KTX 운행시 반복되는 현상으로서 궤도저침의 주원인이라 할 수 있다.

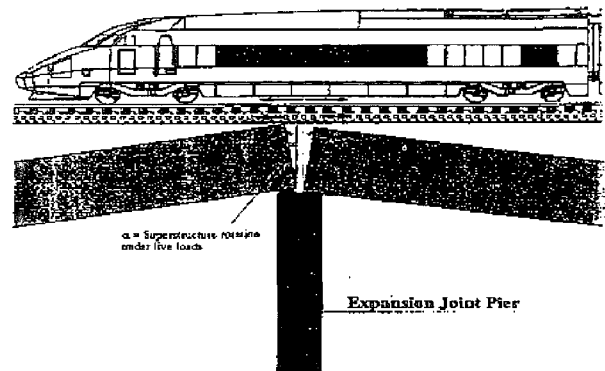


Fig. 4. Effect of Rotation Angle on Girder under Train Running

Table 1. The effect and Countermeasures of The Vertical Track Settlement

원 인	대 책	비 고
① 교량의 온도신축	- 궤도선형 보수 - 종방향 자갈막이 설치 - 활동체결구 사용 - 교량상 플레이트 설치	계절변화에 따라 반복되는 현상
② 단부격입각의 증가	- 궤도선형 보수 - 종방향 자갈막이 설치 - 교량상 플레이트 설치	KTX 운행에 따라 반복되는 현상
③ 콘크리트 수축 및 철근이완	- 궤도선형 보수 - 일정기간 후 안정됨	일시적인 현상
④ 교량상판 변형	- 궤도선형 보수 - 일정기간 후 안정됨	일시적인 현상

3.2 보수작업의 경과와 처짐의 진행 추이

온도변화에 대한 교량상판의 거동과 궤도선형의 영향을 좀 더 구체적으로 분석하기 위하여 궤도틀림 진행현황과 궤도 유지보수현황을 살펴보았다. 2경간 80m 교량으로 시공된 13개소의 신축이음부를 대상으로 궤도선형의 처짐량과 유지보수 작업후의 처짐량 변화추이를 관찰하였다.

그림 5에서와 같이 교량 신축부에서 나타나는 궤도처짐은 전후 약 10m 내외에서 국부적으로 발생하고, 이러한 처짐개소에 대한 정정작업은 인력 또는 스위치 다짐장비(STT)를 이용한 국부적인 궤도처짐 정정작업이 효과적인 것으로 판단된다.

그림 6에서와 같이 해빙기 유지보수 작업으로 궤도선형 조정작업이 실시된 구간은 동절기까지 궤도 처짐량이 평균 2mm

(일부구간에서는 4mm이상) 정도 진행되었으며 특히, 궤도처짐의 50%이상이 동절기에 나타나 교량 상판의 길이가 줄어드는 시점에서 발생되고 있다. 이에 따라 온도에 따른 교량의 길이변화가 도상자갈의 이완을 가중시키며 궤도선형에 영향을 주는 현상으로 판단되나, 현재까지는 궤도선형 보수작업만으로 관리가 가능한 것으로 나타나며, 동절기 궤도 처짐현상이 크게 진행되더라도 현재까지는 유지보수 한도 내에서 관리되고 있어, 여러 가지 해소방안 중에서 처짐 정정 다짐작업이 손쉽게 적용할 수 있는 효과적인 방안으로 판단된다.

3.3 도상고결제 시공

궤도의 고저틀림이 반복적으로 발생하는 교량신축이음부의 전후 6m 구간(총12m)에 대하여 침목하부의 자갈의 강성을 보강하여 궤도틀림을 최소화하고 궤도선형보수 등 유지보수에 대한 노력을 최소화하기 위하여 도상고결제를 시공하고 그 효과를 검토하였다[4].

- 시공위치 : 오송교 126km 784 : 동일구간 상, 하선 시공 (고결제 살포구간, 폭:9m, 길이:12m, 깊이:200mm)
- 시공방법 : 교량 신축이음으로부터 전, 후 각각 6m(총연장 12m) 구간에 대하여 침목저부로부터 15cm 하방의



Fig. 5. The Vertical Track Settlement Progress on Bridge

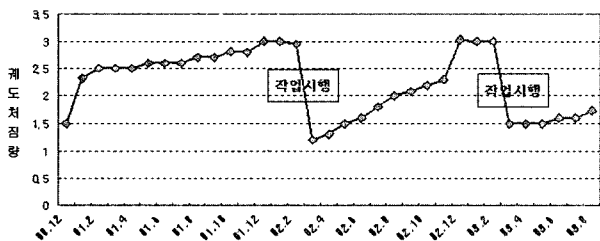


Fig. 6. The Vertical Track Settlement Progress Graph on Bridge

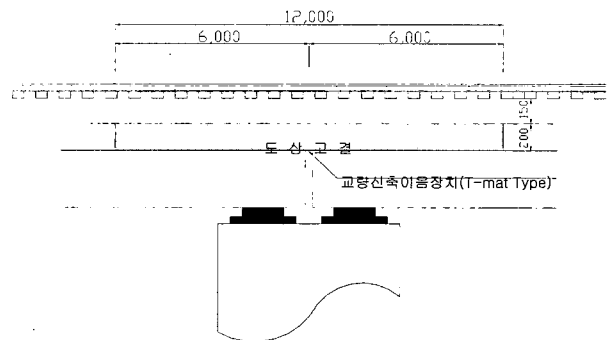


Fig. 7. The Drawing of Bonded Ballast Test Construction

도상(자갈두께 20cm)을 고결시켜 강성을 보강시켜 자갈 이완을 최소화시킴.

3.4 활동체결구 체결

구조물 신축부상에 부설된 체결구의 형식을 활동체결구로 변경하여 체결함으로써 교량의 온도신축으로 인해 발생하는 레일의 축력을 감소시키고 구조물이 온도변화에 따라 신축하는 경우 도상과 침목도 같이 이동하도록 하여 신축부의 궤도강성을 보완할 수 있다. 이 방법은 독일철도에서 일부 적용되었으며 적용이 간편하고 빠른 시일 내에 처리 할

수 있는 장점이 있으므로 그 효과를 검토하여 보았다.

- 시공위치 : 오송교 126km 944~127km706 구간 구조물 신축이음부 11개소
- 시공방법 : 교량상부 구조물 신축부 전후 5m 구간에 대하여 활동체결구를 체결하여 레일축력 및 도상중저항력을 감소시켜 궤도자갈의 이완을 최소화함.

3.5 고결제 시공 및 활동체결구 체결 결과

3.5.1 검측차에 의한 궤도선형 검측 결과(EM-120)

궤도선형검측 결과에 의한 고결제 시공 및 활동체결구 체결

Table 2. The Location of Movable Fastener Installation

구분	위치		연장 (m)	구분	위치		연장 (m)
	시점	종점			시점	종점	
1	126km942	126km948	6	7	127km422	127km428	6
2	127km022	127km028	6	8	127km502	127km508	6
3	127km102	127km108	6	9	127km582	127km658	6
4	127km182	127km188	6	10	127km663	127km668	5
5	127km262	127km268	6	11	127km702	127km710	8
6	127km342	127km347	5				

Table 6. Track Measuring Data (Longitudinal level, mm)

측정일시	P33	P35	P37	P39	P41	P43	P45	P47	P49	P51	P53	P55	P57	평균
01.10.22	3	2.3	3.7	3	3.1	3.7	1.6	3.1	2.3	3	2.9	2.8	2	2.81
02.3.8	3.5	2.8	3	3.1	3.1	4	2	3.2	3	3	2.7	3.1	2	2.96
02.5.20	1.9	1.5	2.2	1.8	2.3	2.8	1	2	1.5	2	1.9	1.8	1	1.82
02.9.19	2.3	1.7	2.2	2	2.5	3.1	1	2.5	2	2.2	1.9	2.8	1	2.09
02.12.16	3.6	2.3	3.7	3	3.5	4.2	2	3.4	2.4	3	3	3.3	2.2	3.05
03.3.20	1.6	1.5	1.3	1.5	1.6	2.8	1.8	1.5	1.9	1	1	1	1	1.50
03.5.27	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2.8	1.8	1.5	1.8	1	1	1	1	1.49
03.8.27	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	3.2	1.8	1.8	2	1	1	1	1	1.56
03.10.21	2.5	2.5	2.5	1.0	1.0	2	2.5	1.5	2.5	1	2.5	1	1	1.81

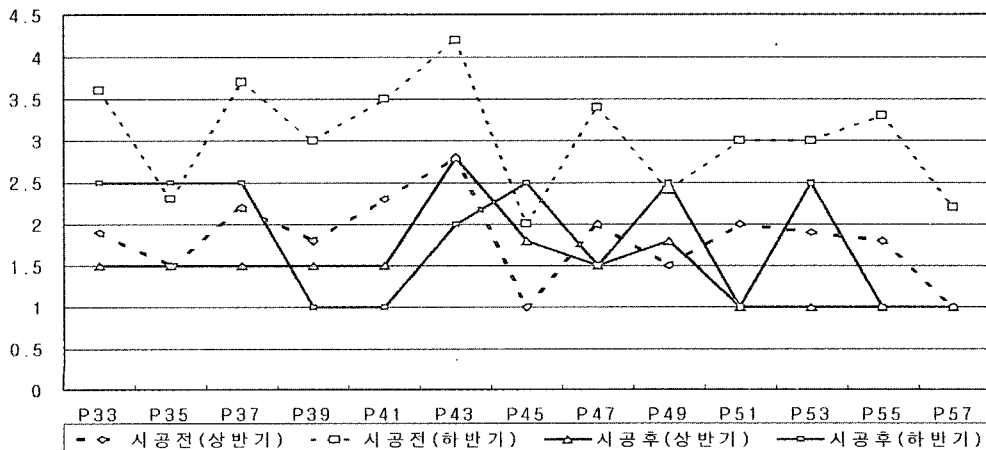


Fig. 8. Track Measuring Data Graph

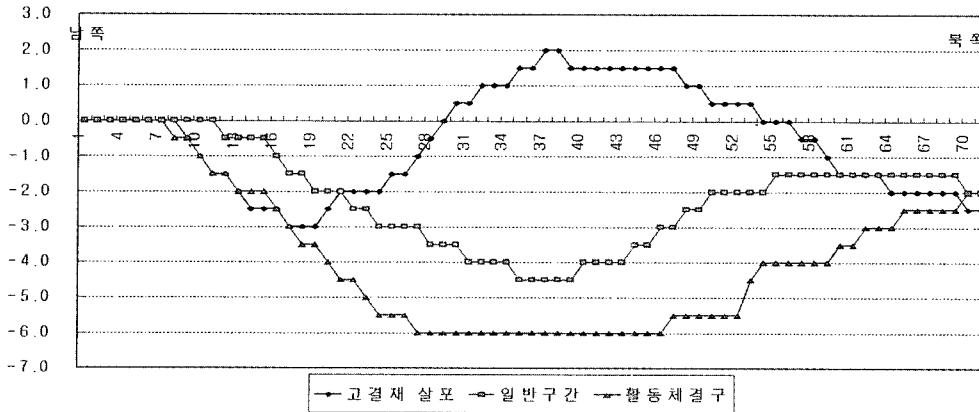


Fig. 9. Track Measuring Data graph by Optic Device

결에 대한 효과를 살펴보기 위하여 시험시공전의 고저틀림 기록치와 시공 후 해당구간에 대한 검측을 실시하고 검측결과 중 강성보강 시험시공 전후의 궤도틀림량을 비교 분석하기 위하여 각각의 상, 하반기 검측자료를 하나씩 선택하여 그 기록치를 비교 분석하였다.

3.5.2 침하구간 정밀측량결과(Optic 레벨 측량)

시험시공위치의 세부적인 고저선형을 측정하기 위하여 각 침목부위의 고저를 레벨기로 측량하여 부설상태 확인하였다.

도상고결제 살포구간(P33)은 상, 하반기 궤도틀림 진행량이 1.7mm에서 1mm로 줄고 하반기 틀림량도 3.6mm에서 2.5mm로 감소되었으나 그 효과에 비하여 시험시공시 도상을 철거하고 재 다짐을 실시함에 따라 도상안정화가 필요한 점과 경제성을 감안할 때 상업운행이 시행되고 있는 현 시점에서 모든 교량에 적용하기는 곤란한 부분이 있는 것으로 판단된다.

활동체결구 체결구간은 다른 구간에 비해 변화가 매우 불규칙적으로 나타나므로 현재까지의 추이로 효과를 판단하기 어려우며 장대레일이 부설된 고속철도 선로에 적용하기 위해서는 효과 및 안전에 대한 검토가 추가적으로 필요하다.

레벨기(Optic)에 의한 레벨을 측정한 결과 고결제 살포구간은 활동체결구 적용구간과 일반구간에 비하여 상대적으로 고저가 높게 나타나며 이는 도상고결로 인한 궤도강성이

증가되어 나타나는 것으로 판단되며 틀림량은 기준치(7mm)를 모두 만족하고 있다.

3.6 종방향 자갈막이 설치[5]

전후 교량간의 도상자갈 및 도상매트를 완전히 분리하여 구조물 신축에 의한 자갈이완을 방지하는 방법이다. 일본의 경우, 레일과 침목간의 종방향 체결력을 2-5kN/m 정도 줄여서 적용하였으며 장대레일 이룬에 의한 계산결과에 따라 레일 신축이음장치를 설치할 필요가 있다. 그러나 이 방법은 설계단계에서 고려되어 구조물 시공시 적용되어야 하므로 현재 고속선로에는 적용하기 곤란하다.

3.7 플레이트 설치

레일과 교량상판의 움직임을 완전히 분리하여 도상자갈의 이완을 방지하기 위하여 신축이 발생하는 위치에 아래 그림과 같은 플레이트를 설치하여 도상과 레일을 분리하여 자갈이완을 방지할 수 있으나 이 방법 역시 시공단계에서 적용이 가능하므로 현재 단계에서 적용하기에는 어려움이 있다.

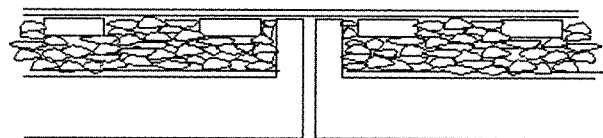


Fig. 10. Separation of Ballast at ends of beam

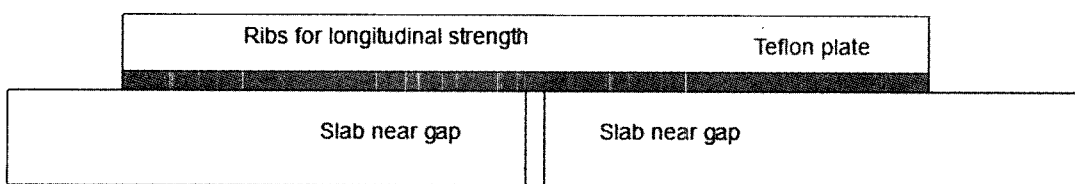


Fig. 11. Principle drawing of Plate Installation

Table 4. Comparison of Countermeasures for Vertical Track Settlement

구분	선형정정	도상고결제	활동체결구	자갈막이	플레이트	비고
궤도선형관리	○	○	△	◎	◎	
시공성	○	×	△	×	×	
경제성	○	×	○	×	×	
유지관리노력	△	○	○	○	○	
신뢰성	◎	○	△	○	○	
적용안	◎					

3.8 검토결과

현재 상태의 선로조건에서 중방향 자갈막이와 플레이트 설치는 효과적인 방법이지만 하나 적용이 곤란하며 도상에 고결제를 살포하여 시공하는 방안도 도상안정화 등 현장사정을 고려해 볼 때 적절한 방안이라고 볼 수 없다. 장기간에 걸친 검측결과와 유지보수 작업실적에 의하면 년 1~2회의 궤도선형 정정작업만으로 궤도의 선형상태를 유지보수 한도 이내로 관리할 수 있으므로 효과적인 궤도선형 정정작업을 수행하여 교량 신축부의 궤도틀림을 관리하는 것이 바람직하다.

결제 살포 등은 시험시공 결과 그 효과가 뚜렷하지 않았다. 따라서 그간의 보수작업 경과와 작업효과 분석결과 스위치 탬핑(STT)이나 소형장비에 의한 인력다짐 작업이 현 시점에서 대처할 수 있는 가장 효과적이라는 결론을 얻었다. 그러나 궤도강성보강방안으로 시험시공한 오송교상의 고결제 살포구간과 활동체결구를 적용한 구간에 대해서도 지속적으로 변화추이를 관찰할 필요가 있으며 여러 가지 방안에 대한 면밀한 검토를 수행하여 향후 2단계의 고속철도 구조물 설계 및 시공시 반영할 수 있도록 관심을 기울여야 할 것이다.

4. 결론

현재의 궤도상태는 상업운행을 개시한지 3~4개월 밖에 지나지 않은 새로운 궤도이므로 향후 선로사용량이 늘어나고 열차의 통과횟수가 증가될 때를 대비하여 지속적인 관심과 관리가 필요하며 특히, 교량신축이음부의 궤도고저틀림에 대해서는 계속적인 관찰이 필요할 것이다.

연구결과 교량상판 이음부에 슬라이딩 플레이트나 중방향 자갈막이를 설치하는 것은 실제 시행이 매우 어려우며, 비교적 쉽게 시행할 수 있는 활동체결구 설치 또는 도상 고

참고문헌

1. High-speed Railway Bridge Design Manual, Systra, 1994.
2. 궤도검측자료, 철도청, 2000~2004.
3. Technical analysis of track issues on Korea High Speed Line, 2002, Systra.
4. Setting behavior of ballast-stabilized with agribond under traffic conditions 2004, CST.
5. The 7th SITAC meeting minutes, 한국고속철도건설공단, 2000.