

열차운행시 터널-토공접합부에서의 강성천이구간에 대한 실험적 연구

Experimental study on the Variation of Stiffness Transition Zone between Earthwork and Tunnel

이진욱*

Jin-Wook Lee,

최관용*

Chan-Yong Choi,

이일화*

Il-Hwa Lee

ABSTRACT

It is very important to pay careful attention to construction of earthwork/tunnel transition zone for railway. The transition zone of the railway is the section which roadbed stiffness is suddenly varied. Differences in stiffness have dynamic effects and these increase the forces in the track and the extent of deformation. In this study, performance of transition zone was investigated through the field tests. The wheel loads and sleeper settlement were measured after installing field testing sections.

keywords: Earth/Tunnel Transition Zone, Wheel Load, Sleeper Settlement, Field Test

1. 서론

일반적으로 철도노반은 하부구조에 따라 토공구간, 터널구간, 교량구간, 접속구간으로 구분 할 수 있다. 이 중에서 접속구간은 교량과 토공, 터널과 토공 그리고 유도상 궤도에서 유도상궤도로 옮겨 가는 궤도의 하부구조 강성이 변화하는 구간으로서 열차운행에 안정성과 신뢰성에 큰 영향을 미치는 구간이다. 이러한 구간은 강성 차이에 따른 불균등 침하에 의한 충격하중 효과가 발생하여 진입 구간인 토공부분에 상대적인 과대 침하가 발생된다. 불균등한 침하는 차량의 운행 안정성 및 안전성에 영향을 미치는 물론 승차감의 저하 등에 영향을 미치는 요소로서 지속적인 유지보수를 필요로 하는 요인이 된다.

현장계측구간은 전라선 개량구간으로 OO~OO역 구간의 OO터널구간으로 콘크리트 도상화 시공 이후 약 6개월의 열차운행이 되었으며, 터널과 토공접합부에서 콘크리트와 자갈도상간의 강성차이로 인하여 궤도처짐이 증가 등 궤도변형이 가속화되고 있는 현장이다. OO터널을 선정한 가장 중요한 이유는 상·하선이 동시에 운행하는 특수한 구간으로서 강성이 저 강성구간에서 고 강성구간으로 이동하는 토공/터널의 경우와 고 강성구간에서 저 강성구간으로 이동하는 터널/토공부 모두를 측정할 수 있는 구간이다. 현장에서 측정된 항목은 각 측정에서의 음중과 그 사이에 발생된 침묵의 변위를 측정하였다.

2. 강성변화구간의 일반현상

강성변화구간의 일반적인 현상은 충격효과에 의한 토공부분의 과대 침하발생으로 차량의 운행 및 안전성에 영향을 주며, 승차감이 저하되어 지속적인 유지보수를 필요로 한다. 또한, 열차진동으로 인해 도상자갈의 유실 등의 현상이 발생하며, 접속부구간의 구조적 특성으로 MTT 등 기계화 작업의 어려움으로 유지보수하기가 어려운 특징을 가지고 있다.

* 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Engineering Research Dept., KRRRI.

이러한 유지보수 노력을 줄이기 위하여 도상아래의 발라스트 매트를 설치하거나, 보강레일 및 Approach Block을 적절히 설계 배치함으로써 궤도에 미치는 충격력을 최소화 하고 있다. 표 1.은 접속부 위치별 문제의 특징을 나타내었다.

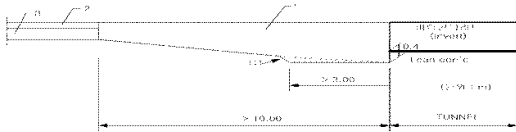
표 1. 접속부 위치별 문제의 특징

터널/토공구간	<ul style="list-style-type: none"> 교량에 비하여 강성변화정도가 상대적으로 작음 과대한 변형현상에 의한 추가적 소음 및 진동발생
교량/토공구간	<ul style="list-style-type: none"> 일시적 작용하중과 반복적 작용하중 <ul style="list-style-type: none"> - 일시하중: 단기변형유발(대부분 복원) - 장기지속하중: 소성변위 유발(강성변화구간의 문제요인)
	<ul style="list-style-type: none"> 과대 변위의 발생요인 <ul style="list-style-type: none"> - 주변 축재, 교대 및채움재의 불충분한 다짐 또는 압밀과정 - 차량하중 또는 온도하중에 의한 궤도구조 및 교량의 이동변위

2.1 국내의 터널-토공 접속부 시공기준

일반적으로 터널-토공 접속부는 구조적 불연속성으로 인해 취약 단면으로 구분되어 관리하고 있다. 한국고속철도공단에서 터널-토공부 관리기준과 일본에 제시된 접속부에 대한 기준과 시공예는 다음과 같다.

- 1) 한국고속철도공단 구조물 접속부
- 터널/토공 접속부



기호	명칭	계절 및 다짐도
1	시멘트 처리된 보조도상	$D_{max}=31.5mm(3\% \text{ 시멘트}), \text{다짐도} \geq 100\%$ $E_{v2} \geq 120MN/m^2, E_{v2}/E_{v1} < 2.2$
2	시멘트처리된 자갈	$D_{max}=63.0mm(3\% \text{ 시멘트}), \text{다짐도} \geq 100\%$ $E_{v2} \geq 120MN/m^2, E_{v2}/E_{v1} < 2.2$
3	입도조정 부순물	$D_{max}=63mm, E_{v2} \geq 80MN/m^2, E_{v2}/E_{v1} < 2.3$

그림 1. 한국고속철도공단 구조물 접속부 단면도 및 시공관리기준

2) 일본 (일반철도 접속부)

- 터널-도상 결합부

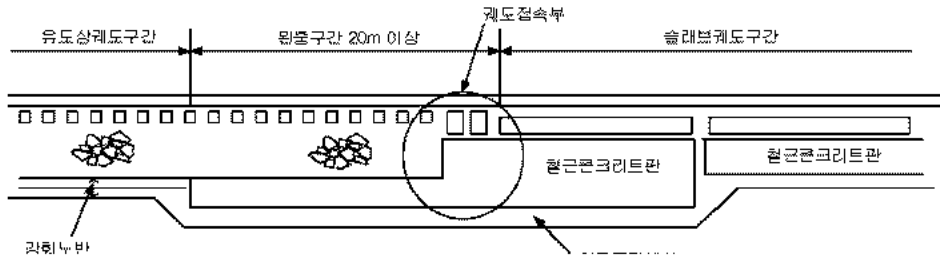


그림 2. 노반과의 접속부 시공예 (鐵道構造物等設計標準東解説 省力化軌道用土構造物)

3. 현장개요

그림 3. 은 터널 콘크리트 도상시공도를 나타내었다. 그림에서와 같이 터널 콘크리트 도상은 LVT 플렉형으로 설계되어져 있다. 현장계측구간으로 선정된 전라선 00역~00역 사이에 있는 00터널은 현재 단선으로 운행 중으로 상·하선 양측방향으로 모두 측정할 수 있으며, 현장 접근성이 다른 터널 보다 우수하기 때문에 현장구간으로 선정하였다.

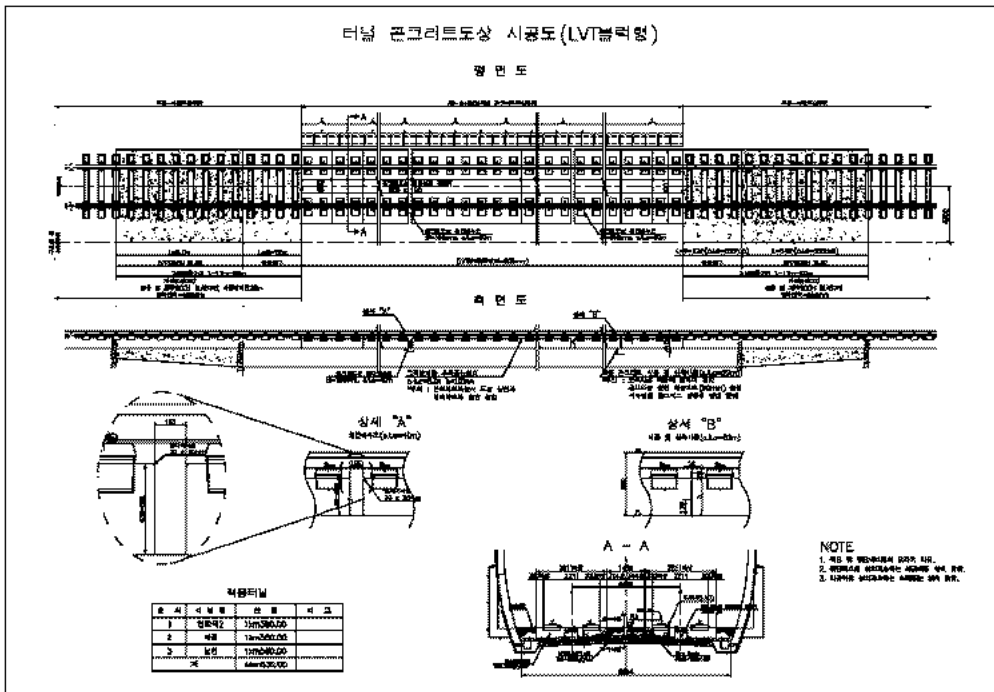


그림 3. 터널 콘크리트 도상 시공도

3.1 계측기 및 계측방법

표 2. 는 접속부에서 발생하는 현상과 현상별 주요 문제점을 정리하였다. 일반적으로 열차의 충격

하중으로 인해 레도부의 윤중 증가와 침하가 발생된다. 따라서, 접속부에서의 열차통과시 레도지지 강성변화를 검토하기 위하여 윤중과 침묵변위를 측정하였다.

표 2. 접속구간에서 발생하는 주요 문제점

구 분	발생 현상	주요 문제점
레도파괴 발생	도상마모의 세립화, 분니발생과 함께 레도마모, 변형과 열화발생	레도구조의 성능 감소로 유지보수비 급증
레도틀림 증가	줄틀림, 먼틀림의 누적발생	차량동요로 인한 승차감악화
	열차주행시 윤중 및 소음발생	민원발생 및 환경파괴
	레도틀림량 한도치초과, 복합틀림동시발생	열차탈선발생

그림 4. 는 현장부설단면의 횡 단면도를 나타내었다. 터널부와 도상부에 설치된 측점은 윤중 8 개소, 침하 11개소로 총 19개 측점을 설치하여 계속하였다.

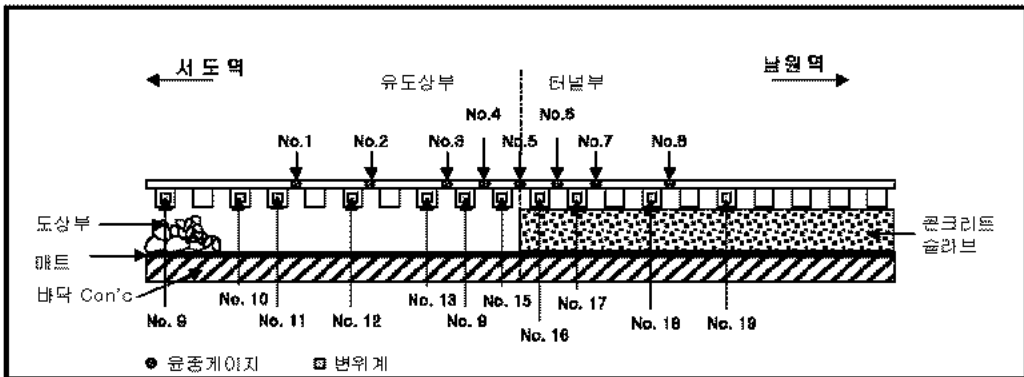


그림 4. 토공 접속부 현장계측 개요도

4. 실험결과 및 분석

4.1 윤중측정 결과

레도의 윤중 측정은 레도각부의 용력변위를 측정함으로써 열차하중에 대한 부재의 강도를 확인 하고, 내구성을 확인하여 현 상태의 레도 상태에 대한 정량적 평가 하기위해 측정하였다. 지상에 대한 윤중의 측정은 침묵간 중심에서 각 100mm 떨어진 위치의 중립축에 45°의 각도를 가지고 8 방향으로 스트레인게이지를 부착하였다. 이 상태에서 내력형의 윤중 검정기를 이용하여 4.0tonf 까지 재하하고 윤중을 검정하였다. 그림 5. 은 화물 열차운행시 측점 5에서의 윤중시간이력곡선을 나타내었다.

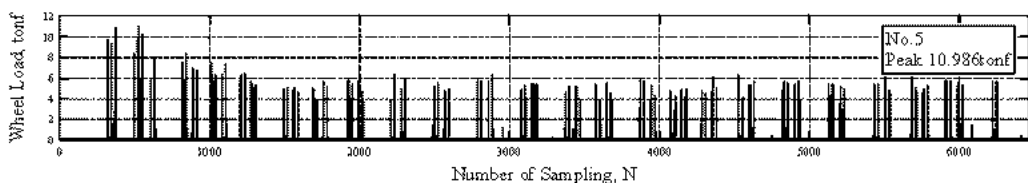


그림 5. 열차통과시 윤중 시간이력 곡선

일본철도종합기술연구소(RTRI)에서는 접속부의 관리기준으로 윤중 변동율을 사용하고 있으며, 윤중변동율은 아래 식 1과 같이 구할 수 있다. 일본에서 윤중변동율 관리기준은 0.13으로 관리를 하고 있다.

$$\Delta P = \frac{P_d - P_s}{P_s} \quad \text{식 1}$$

여기서, ΔP : 윤중변동율, P_d : 동적윤중(tonf), P_s : 정적윤중(tonf)

표 3. 는 초기 계측시 각 측점별 최대 윤중을 나타내었다. 표 3. 에서와 같이 터널부에서 토공부로 열차가 이동할 때 더 큰 윤중이 계측되었다. 이러한 이유는 토공부에서 열차의 충격하중이 크게 발생한 것으로 판단된다.

각 측점별 윤중변동율은 터널부에서는 거의 기준에 만족하는 수치를 보였으나, 토공부에서는 윤중변동율이 기준치 보다 상회하는 측점이 다수 발생하여 열차주행시 승차감에 영향을 주고 있는 것을 알 수 있다.

동일 강성구간에서의 토공부와 터널부 각각 최대 윤중과 최소윤중의 비로 윤중편차를 구하였다. 윤중편차가 1에 가까울수록 편차가 작아 궤도구조에 안전하다는 의미이며, 편차의 비가 작아질수록 궤도구조나 하부구조가 변형이 잘 발생하여 점진적으로 연약화되는 경향이 크다고 볼 수 있다.

열차진행방향이 터널부에서 토공부로 이동할 때 최대윤중과 최소윤중의 비가 0.82정도이며, 토공부에서는 0.76정도로 토공부에서 더 많은 변동이 발생하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 고 강성구간에서 저 강성구간으로 이동시 토공부에서의 더 많은 충격하중에 가해서 토공부에서 bump (덜컹거림)가 더 많이 발생하는 것을 알 수 있으며, 장기적으로는 도상 발라스트에 반복하중이 작용함으로써 발라스트의 입자 재배열 등으로 인한 점진적 침하가 발생하는 요인이 될 수 있다.

열차진행방향이 토공부에서 터널부로 이동하는 경우 윤중변동율은 토공부에서는 관리기준이내의 계측값을 보이고 있으며, 터널부에서는 끝부분에서 관리기준을 상회하는 계측결과가 나타났다. 윤중편차는 토공부에서 0.92, 터널부에서 0.92로 동일 강성구간내에서 윤중편차가 거의 없는 것으로 계측되었다. 이러한 저 강성구간에서 고 강성구간으로 진입시에는 접속부에 윤중편차가 거의 없는 것으로 계측되었다.

표 3. 열차운행 방향에 따른 각 측점별 최대윤중(tonf)

열차진행방향	측정지점	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
터널→토공	윤중 최대값	10.88	<u>5.95</u>	12.30	14.26	10.99	11.53	10.90	9.49
	윤중변동율	0.011	—	0.118	0.296	0.001	0.048	0.009	0.138
토공→터널	윤중 최대값	11.23	<u>5.538</u>	11.06	11.48	10.56	10.36	9.83	9.49
	윤중변동율	0.021	—	0.006	0.043	0.04	0.058	0.107	0.138
토공부							터널부		

* — 는 현장계측결과 이상하게 계측된 결과임

그림 6. 는 열차이동방향에 따른 각 측점별 최대 윤중 크기를 나타내었다. 그림에서와 같이 고 강성구간에서 저 강성구간으로 이동할 때 충격하중이 크게 발생하여 저 강성부분에 윤중이 크게 발생하였다. 이러한 저 강성구간은 계속적인 열차반복하중에 의해 궤도의 손상도가 점진적으로 더 많이 발생할 것으로 판단되며, 유도상 궤도부분에 실질적인 보강방안이 필요할 것으로 판단된다.

또한, 중앙 접속부 구간인 No. 5 구간보다는 No. 4 구간에서 최대 운동이 발생하였다. 이는 No. 5구간이 콘크리트 슬라브와 유도상 궤도부를 각각 1/2씩 지지되어 접하는 구간이기 때문에 No. 4 측점보다 적게 발생한 것으로 판단된다.

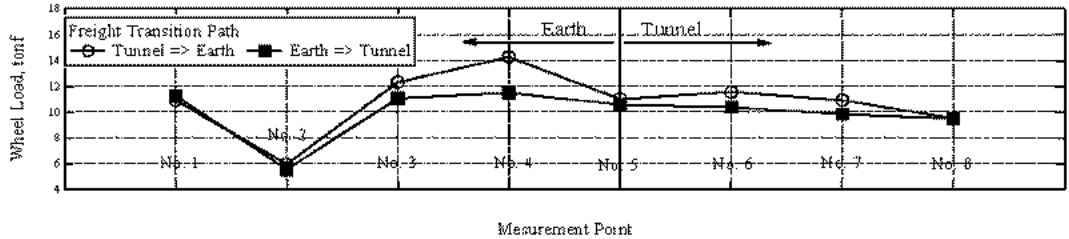


그림 6. 이동방향에 따른 접속부구간에서의 운동변화

4.2 열차주행방향에 따른 침하특성

접속부의 침하는 토공구간에 6개 측점과 터널구간 5개 측점 총 11개의 측점을 계속하였다. 변위계의 위치와 터널과 토공 중앙부에서 토공부는 계속구간을 4m이며, 터널구간은 6m로 계속 범위를 정하였다(그림 2. 참조).

표 4. 는 화물열차 통과시 각 측점별 탄성변위를 나타내었다. 표 4. 에서와 같이 토공 접속부의 중앙 측점인 No. 15에서 가장 큰 변위가 발생하고 있으며, 전반적으로 터널부보다 토공부에서 더 많은 변위가 발생하였다. 토공부에서는 접속부 중앙을 기점으로 접속부에서 멀어짐에 따라 탄성변위가 적게 발생하고 있는 것을 볼 수 있다.

표 4. 화물열차 상행 통과시 측점별 탄성변위(mm)

열차진행방향	측점지점	No.9	No.10	No.11	No.12	No.13	No.14	No.15	No.16	No.17	No.18	No.19
터널→토공	변위 최대값	0.925	0.75	0.725	0.948	1.515	2.075	2.689	1.958	1.586	1.440	1.427
토공→터널	변위 최대값	0.85	0.7	0.775	0.931	1.626	2.898	2.648	1.939	1.295	1.334	1.359
						토공부			터널부			

그림 7.은 열차 이동방향에 따른 각 측점별 탄성변위를 나타내었다. 그림 6.에서와 같이 탄성변위는 열차 이동방향에 거의 영향이 없는 것으로 판단되며, 터널부보다 토공부에서 더 많은 탄성변위가 발생하는 것을 볼 수 있다. 토공부와 터널부의 탄성변위는 각각 최대 3.0mm, 2.0mm 발생하고 있는 것을 볼 수 있다.

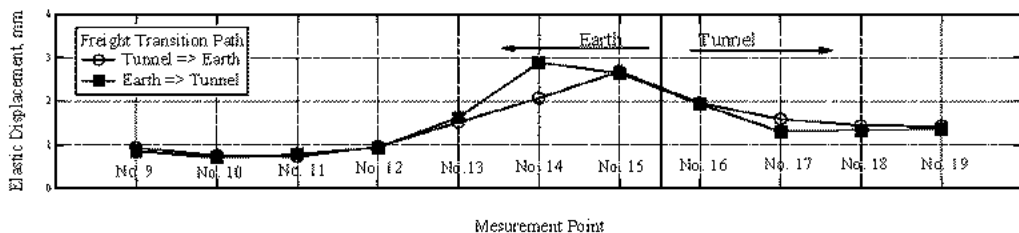
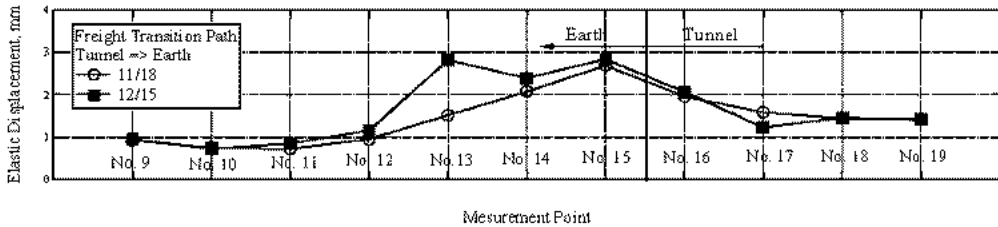


그림 7. 이동방향에 따른 각 측점별 탄성변위(11월 18일)

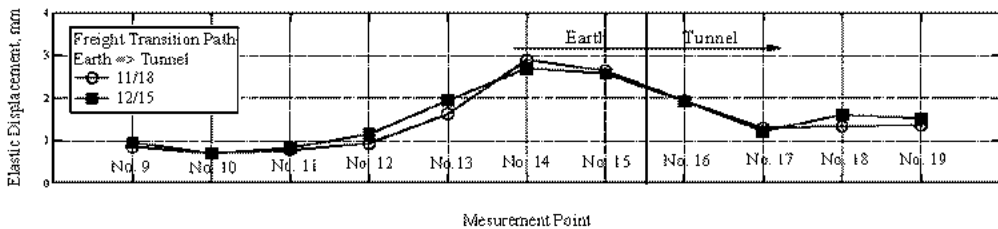
4.3 시일경과에 따른 탄성변위

그림 8. 는 시일경과에 따른 열차이동방향별 탄성변위를 나타내었다. 고 강성구간에서 저 강성구간으로 이동할 때는 시일이 경과함에 따라 점진적으로 토공부에서 침하가 더 많이 발생하고 있으며, 터널부에서는 시일에 경과에 따른 탄성변위가 거의 차이가 없는 것을 볼 수 있다.

저 강성구간에서 고 강성구간으로 이동할 때 탄성변위는 시일이 지남에 따라 탄성변위가 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다.



(a) 터널부에서 토공부로 이동할 때(고 강성구간→저 강성구간)



(b) 토공부에서 터널부로 이동할 때(저 강성구간→고 강성구간)

그림 8. 시일경과에 따른 이동방향별 탄성변위

5. 결론

전라선 OO터널 터널-토공부에 대한 1차 현장측정과 1달 후인 3차 현장측정을 통해 열차운행에 따른 토공접합부의 윤중, 침하 특성을 분석한 결과 아래와 같은 결론을 보였다.

1. 터널에서 토공부로 열차가 이동시 충격하중에 의해 토공부에서 더 많은 윤중이 계측되었으며, 터널부에서의 측정별 윤중범위는 9.5~11.5tonf 범위이며, 토공부에서의 윤중범위는 10.8~14.3tonf으로 터널부 보다 윤중 범위가 더 큰 것을 알 수 있다.
2. 터널부에서 토공부로 열차 이동시 터널부에서의 윤중편차가 0.83이며, 토공부에서는 0.76으로 토공부에서 더 많은 변동이 있는 것을 알 수 있다. 이는 강성구간에서 저강성구간으로 이동시 토공부에서의 더 많은 충격하중에 가해서 토공부에서 bump(덜컹거림)가 더 많이 발생하는 것을 알 수 있다.
3. 토공부에서 터널부로 열차 이동시 윤중범위는 11.0~11.5tonf 발생하였으며, 터널부에서는 9.4~10.4tonf 발생하였다. 윤중편차는 터널부에서 0.92, 토공부에서 0.92로 윤중편차가 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있다.
4. 윤중이 크게 발생된 측정에서 탄성변위도 크게 발생하고 있으나, 터널과 토공 접속 구간에서는 윤중은 작게 측정되고 침하는 상대적으로 크게 발생하였다.
5. 열차진행방향에 따라 윤중의 크기는 영향을 미치고 있으나, 탄성변위는 영향이 매우 적게 발생하였다.

참고문헌

1. 김인계, "고속철도 시험선 구간 궤도유지보수 체계", 한국철도기술, Vol. 39, pp25~27, 2003
2. 한국고속철도공단, "고속철도공사 전문시방서(노반편)", 2003. 4
3. 이일화 등, "고속철도 교량/토공 접속부에서의 궤도 및 차량 거동 특성", 한국철도학회
4. Akira. Namura, Koichir. Matsuo and Shgeru. Miura, "Introduction of Buffers into a Transitionl Track Stiffness Region", RTRI Report, Vol. 11, No. 2, 1997. 2
5. Makoto. Ishida, Shigeru. Miura and Akiko. Kono, "Track Deforming Characteristics and Vehicle running Characteristics due to the Settlement of Embankment Behind the Abutments of Bridges", RTRI Report, Vol 12, No.3, 1998. 3
6. Coenraad Esveld, 서사범 역, "최신 철도선로", 열과알, 2003. 5.
7. 鐵道總合技術研究所, "鐵道構造物等設計標準東解説 省力化軌道用土構造物", 1999