

고속철도 교량/토공 접속부에서의 궤도 및 차량 거동 특성

Characteristics of Track and Train Behaviors on High-Speed Railway Bridge/Earthwork Transition Zone

이일화* 강윤석* 김 은** 손기준*** 박찬경****
Lee, Il-Wha Kang, Yun-suk Kim, Eun Son, Ki-Jun Park, Chan-kyoung

ABSTRACT

It is very important to pay careful attention to construction of bridge/earthwork transition zone for high-speed 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. An abrupt change of stiffness across two adjacent track portions cause irregular settlement of roadbed, track irregularity, lack of girder bending moment and reduction of lateral resistance. Especially on high-speed railway, track irregularity of transition zone cause sincere effect to track stability and train safety. And so continuous maintenance is needed. To verify this effect and to improve transition zone capacity, In situ test, track irregularity and train acceleration test were performed on high-speed railway bridge/earthwork Transition Zone.

1. 서론

철도에서 접속부는 교량과 토공, 터널과 토공 그리고 유도상궤도에서 무도상궤도로 옮겨가는 구간 등 궤도 하부구조의 강성이 변화하는 구간을 말한다. 즉, 궤도시스템의 구조 강성이 변화하는 구간으로서 철도의 안정성과 신뢰성에 큰 영향을 미치는 구간이다. 접속부에서 강성차에 따른 불균등 침하가 발생하게 되면 이에 따른 충격하중 효과가 발생하여 진입구간인 토공부분에 상대적 과대 침하가 발생된다. 고속주행시, 불균등 침하는 궤도 및 차량의 안정성 및 안전성에 영향을 미치는 물론 승차감의 저하 등에 영향을 미치는 요소로서 지속적인 유지보수를 필요로 하게 하는 요인이 된다. 그러므로 차량의 주행안전성 및 궤도보수상의 관점에서 접속부의 영향은 매우 중요한 검토사항이라고 할 수 있다. 이에 본 논문에서는 경부고속철도 교량/토공 접속부에서의 거동특성을 파악하기 위하여 궤도에서의 현장계측, 궤도틀림자료 그리고 차량진동가속도값을 이용하여 접속부의 성능을 평가하였다.

2. 접속부 궤도손상의 영향요소

접속부에서 열차주행에 의한 궤도손상원인은 궤도, 교량, 토공 등이 서로 복잡하게 작용하여 발생하게 된다. 하나의 발생요인은 또 다른 요인에 영향을 미치게 되며, 최종적으로는 궤도틀림 또는 파괴를 유발하게 된다.

-
- * 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원, 정회원
 - ** 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 주임연구원, 정회원
 - *** 한국고속철도건설공단 중부사무소 대리, 정회원
 - **** 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단, 정회원

다. 다음 Table 1은 접속부케도손상의 영향요소와 설계시 고려되어야 할 사항에 대한 설계대상별로 정리한 표이다.

Table 1. 접속구간에서의 케도손상영향요소와 설계시 고려사항

구분	케도손상영향요소	설계를 위한 고려사항
케도분야	<ul style="list-style-type: none"> - 케도 마모, 변형 및 열화 발생 - 케도틀림의 발생 누적 - 횡저항력의 감소 - 교량 변위로 인한 단부의 케도상승 - 토공부와 교량부의 케도강성차 	<ul style="list-style-type: none"> - 장대레일의 안정성, 축력해석 - 케도 기하구조개선 - 레일 장대화 - 케도강성의 연속화 - 케도/교량/노반의 상호작용
교량분야	<ul style="list-style-type: none"> - 교량의 횡강성 부족 - 교량의 열팽창 - 단부 회전에 의한 변형(거더형 교량) - 축 팽창으로 인한 교량단부의 변형 (제동력과 가속력 및 온도의 영향) 	<ul style="list-style-type: none"> - 변위에 대한 표준 한계 - 교량단부에서의 회전 한계 - 경간의 길이 및 교대 높이
노반분야	<ul style="list-style-type: none"> - 노반의 침하 - 도상의 침하 - 성토사면의 전단 변형 - 배수불량 	<ul style="list-style-type: none"> - 뒷채움 표준단면 - 뒷채움 재료선정 기준 - 뒷채움 다짐도 - 배수공법 및 배수제

접속부설계에 있어서 가장 중요한 요소는 구간별 노반강성차를 줄이는 것이다. 최근 케도설계시에는 이러한 문제점을 감소시키기 위해서 노반강성이 변화하는 구간에 강성이 큰 방향으로 압축성이 작은 재료를 사용하여 완화구간을 설치하는 것을 권장하고 있다.

고속 신선에서 추가적으로 고려해야할 사항은 노반의 결빙 방지와 원활한 배수가 되도록 하여야 한다. 결빙과 배수불량은 뒷채움재의 지지력을 급격히 떨어뜨리는 원인이 되므로 고속선에서는 반드시 이에 대한 검토가 선행되어야 한다. 또한 충분한 노반지지력 확보를 위하여 슬래브케도의 경우, 노반은 콘크리트슬래브층 아래 최소 2.5m 깊이까지 설계할 것을 추천하고 있다. 유도상케도에서도 이와 유사한 수준의 노반범위로 연장할 것을 추천하고 있다. 현재까지 고속철도의 접속부 연장에 대해서 유럽설계사에서는 15m이상을 추천하고 있으며, 성토의 높이에 따라 접속연장을 결정하도록 하고 있다. 접속연장은 최고 성토고의 4배까지 제시하고 있다.

3. 교량/토공 접속부 현장조사 및 계측

3.1 현장계측

현장계측개소는 2개소의 교량-토공의 접속구간으로서 교량A는 환산KP119km지점으로 연장 435m교량부와 연장 103m의 토공부로 접속되어 있다. 토공부는 절토구간으로서 교대배면에 접속부가 연장10m로 시공되어 있으며, 접속구간의 끝단부터는 강화노반으로 시공되어 있다. 교량B는 환산KP129km지점으로서 교량A와 유사한 구조로 되어 있으며 장기적인 계측거동을 비교하기 위하여 측정하였다. 케도에서의 측정은 윤중, 레일저부힘용력, 수직탄성변위값을 측정하였다.

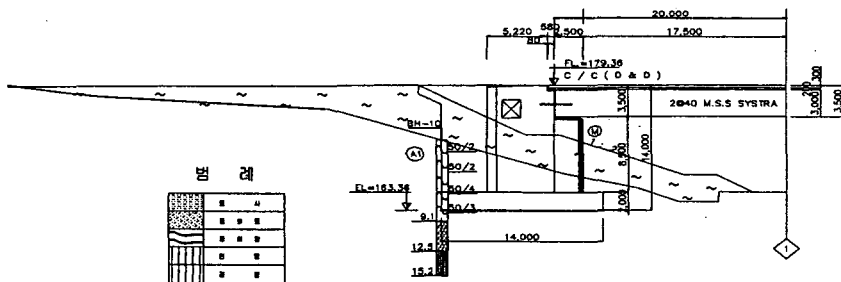


Fig 1. 교량A의 접속부 단면

3.1.1 윤중

윤중의 측정은 교량B에서만 실시되었으며, 주행방향별로 각 1회 씩 측정되었다. 윤중측정시의 주행속도는 168.4km/h와, 214.9km/h로 주행하였으며, 교량구간의 경우 최대 윤중이 9.40ton, 최소 윤중이 7.91ton이 측정되었고, 토공구간의 경우 최대 윤중이 9.51ton, 최소 윤중이 8.38ton이 측정되었다. 토공구간에서 같은 주행속도대에서의 평균값은 약 11.4ton, 교량구간에서는 10.9ton과 비교하면 상대적으로 작은 값이 계속되었다. 특이한 사항은 주행방향에 따라서도 윤중변동이 다르게 나타났는데, 교량부에서 토공부로 진행하는 경우, 변동이 크게 나타났다. 이는 강성이 큰 구간(교량)에서 작은 구간(토공)으로 진행시, 충격율이 더 큰 것을 의미한다고 할 수 있다

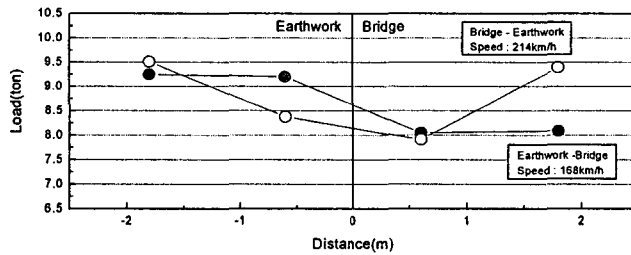


Fig 2. 접속구간의 윤중변동

3.1.2 레일저부힘응력

계측은 교량 A와 B에서 계측되었다. Fig 3을 보면 계측위치에 따라서 많은 차이를 보이고 있다. 그림에서 168.3, 214.9km/h의 열차는 교량B에서 계측한 것이며, 그 외에 결과는 교량A에서 계측한 결과이다. 교량 A의 KTX 자료들은 대부분 300km/h를 넘는 고속 열차 자료이며, 총 5회의 계측을 통해 305.3km/hr, 304.9km/hr, 305.4km/hr, 306.5km/hr, 308.8km/hr의 주행속도시의 레일저부힘응력을 나타내었다. 교량A의 고속주행자료에서는 접속지점보다는 주변선로에서의 응력이 더 크게 나타났다. 열차주행방향별 특성을 보면 토공부에서 교량부로 진행하는 것이 궤도부담이 작은 것으로 나타났다. 이는 주행방향별 강성변화의 조건에 따라 궤도에 대한 하중조건이 달라진다는 것을 의미한다.

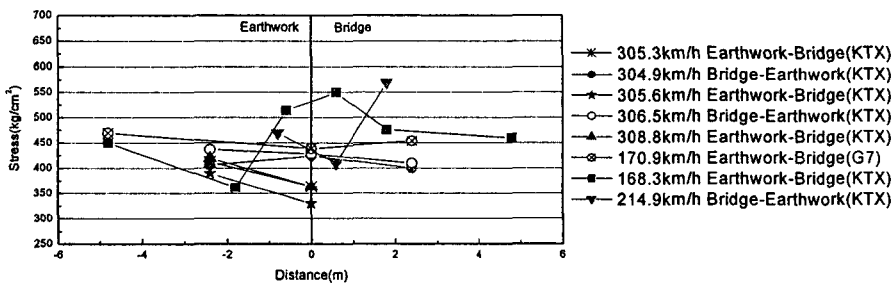


Fig 3. 접속구간의 레일저부힘응력

3.1.3 레일탄성변위

Fig 4는 교량A에서 측정된 측정위치와 속도별 탄성변위에 대한 변동을 나타낸 그림이다. 그림에서는 측정 횟수별 변위의 변화를 도시하였는데, 다른 변위값들은 거의 동일한 값을 보이는 반면, 응력에서와 마찬가지로 토공부에서 교량부로 주행하는 경우 강성천이구간에서의 변위값이 상대적으로 튀는 경향을 보이고 있다.

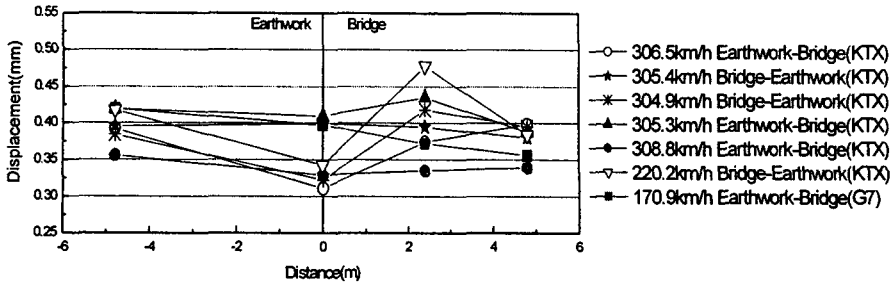


Fig 4. 접속구간 레일탄성변위

3.2 차량상하진동가속도

교량/토공 접속부 통과시 발생하는 차량의 상하진동가속도를 평가하기 위하여 개발차량에서 측정된 가속도 값을 평가하였다. 가속도는 대차(Bogie)와 차체(Car Body)에 부착된 진동가속도계값을 사용하였다. 교량A에서의 주행속도는 300km/h, 교량B에서는 196km/h인 경우이다. Fig 5와 Fig 6은 차체에서의 상하진동가속도로서 일반적으로 주행안전성을 평가하는 기준으로 적용된다. 차체상하진동가속도는 20Hz Low Pass Filter를 사용하여 분석하며 필터링된 차체상하진동가속도의 최대값은 각각 $0.24m/sec^2$, $0.19m/sec^2$ 로 측정되었다. 가속도분석에 있어서 오차발생에 대한 보정을 위하여 접속지점을 기준으로 전후 5m의 오차범위를 적용하였다.

그림에서 원측정자료를 분석하면 접속부 부근에서 차체상하진동가속도도 변동값을 보이지만, 필터링을 거치게 되면 특이한 변동값은 없는 것으로 나타났다. Fig 5는 열차진행방향이 교량부에서 토공부로 진행되는 구간이고 Fig 6은 그 반대 방향이다. 측정결과는 각 위치에 따라 편차가 있을 수 있으나 계속자료를 근거로 판단할 때 교량부에서 토공부로 진행할 때 그 변동량이 더 큰 것으로 나타났다.

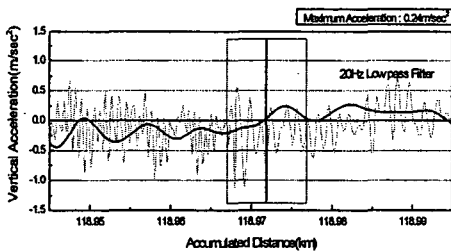


Fig 5. 차체상하진동가속도(교량→토공, 300km/h, A)

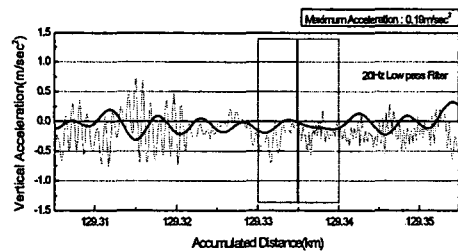


Fig 6. 차체상하진동가속도(토공→교량, 196km/h, B)

3.3 접속부 궤도틀림

접속부에서의 궤도틀림평가를 위하여 줄틀림과 면틀림자료를 분석하였다. 틀림자료는 KTX에 부착된 고속검측설비에서 측정된 자료를 사용하였으며, 측정기선은 10m현을 기준으로 한 자료이다. 틀림분석에 있어서 오차발생에 대한 보정을 위하여 접속지점을 기준으로 전후 5m의 오차범위를 적용하여 그 구간내의 최대값을 사용하였다. 면틀림(Longitudinal Level)은 레일두부 상면의 길이방향 요철을 뜻하며, 고저에 대한 상대적 틀림량이라 할 수 있다. 접속구간에서의 면틀림량에 대한 계산결과, 최대값이 각각 1.4, 0.5mm이며 통과시 특이한 변동은 없었다. 줄틀림(Alignment)은 레일측면의 길이방향 요철을 뜻하며, 수평에 대한 상대적 틀림량이라 할 수 있다. 접속구간에서의 줄틀림량에 대한 계산결과, 최대값이 각각 2.09, 2.0mm이며 통과시 특이한 변동

은 없었다.

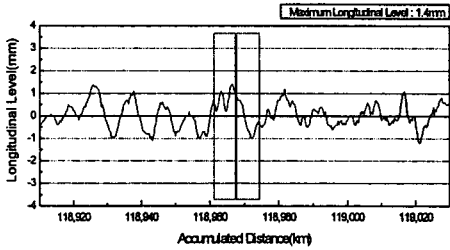


Fig 7. 교량 A 면틀림(교량→토공)

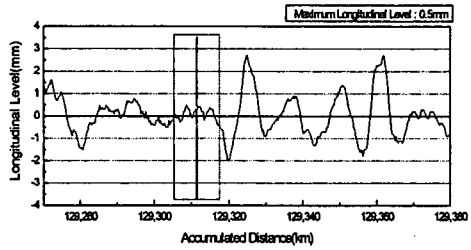


Fig 8. 교량 B 면틀림 (토공→교량)

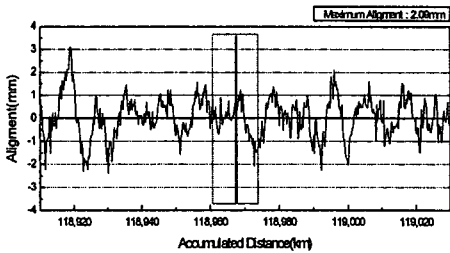


Fig 9. 교량 A 줄틀림(교량→토공)

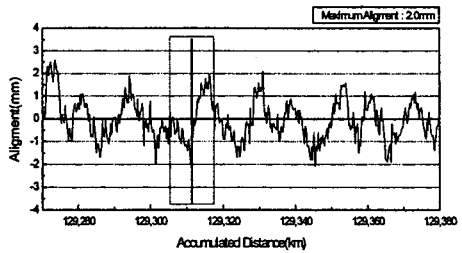


Fig 10. 교량 B 줄틀림(토공→교량)

4. 계측결과 비교분석

지금까지 명확하게 제시되어 적용되는 접속부기준이 없기 때문에 일본철도종합연구소에서 제시하는 기준 신간선 주행판정기준, 독일고속철도기준 및 국내 궤도관리기준을 참고로 비교하였다.

Table 2. 접속부관련 기준과 계측결과와의 비교

계측항목	계측값(최대값)	기준값	비율	비고
차체상하진동가속도	0.24m/sec ²	1.3m/sec ²	18%	(RTRI추천값) ※20Hz Low-Pass Filter
운중변동률	0.117	0.13	91%	(RTRI추천값)
레일응력	569kgf/cm ²	900kgf/cm ²	63%	(RTRI추천값)
		714kgf/cm ²	79%	(독일고속철도기준)
10m현 면틀림(고저)	1.4mm	7mm	20%	(경부고속철도유지관리기준)
10m현 줄틀림(방향)	2.09mm	7mm	29%	(경부고속철도유지관리기준)
레일수직탄성변위	0.478mm	4mm	12%	(신간선주행판정기준)
		1.5mm	32%	(독일고속철도기준)

5. 결론

고속철도 교량/토공접속부 주행특성과 관련하여 궤도 및 차량에서의 거동특성에 대하여 평가하였다.
- 측정 결과 각 평가항목에 대한 계측값을 관련 기준값과 비교하였을 때 매우 양호한 것으로 나타났다.

- 측정결과 교량부에서 토공부로 진행하는 경우, 상대적으로 변동이 크게 나타났다. 이러한 현상은 휨응력, 윤중, 레일변위, 차량가속도값을 통하여 확인할 수 있었다. 이 결과는 지지강성이 큰 구간에서 작은 구간으로 진행시, 충격율이 더 크다는 것을 의미한다.

현재의 경부고속철도의 궤도 상태는 일반영업개시전이기에 때문에 영업개시후 실제 통과톤수가 누적되고 궤도가 피로하중을 받은 상태에서는 보다 큰 변동이 발생할 가능성이 높다. 그러므로 향후 지속적인 계측을 통하여 접속부에서의 거동특성을 파악할 필요가 있다 하겠다.

참고문헌

1. 김인제, "고속철도시험선구간 궤도유지보수 체계", 한국철도기술, Vol. 39, p 25-27, 2003
2. 손기준, "고속검측시스템 소개", 한국철도기술, Vol. 39, p 28-30, 2003
3. Alexander Smekal, "Transition Structure of Railway Bridges", WCRR 1997
4. Akira. Namura, Koichiro. Matsuo and Shigeru. Miura, "Intruduction of Buffers into a Transitional 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, 98.3

후 기

본 연구는 건설교통부에서 시행한 고속철도기술개발사업중 "고속전철 선로구축물시스템 안정화기술 개발"과제의 일환으로 수행되었습니다.