

반복하중재하시의 슬래브궤도 노반의 거동특성

A Characteristic Behavior of the Roadbeds of Slab Track with the Cyclic Loading

이성혁* 이진욱** 최찬용** 황선근***
Lee, Seong-Hyeok Lee, Jin-Wook Choi, Chan-Yong Hwang, Seon-Keun

ABSTRACT

In many countries the slab track of railroads is mostly applied on the railroad bridges and tunnels, however it hasn't been constructed in the tunnel in Korea. Presently the Korea highspeed railway construction authority is planning to construct slab track in the tunnels to minimize the cost of maintenance and repair.

In this study, dynamic characteristics of the railroad roadbed which was constructed using crushed stones obtained from tunnel construction was investigated through the field investigation, real scale model test and numerical analysis.

As a conclusion, the roadbeds built with the crushed stones produced at the tunneling site satisfy the requirement of roadbed in terms of displacement and earth pressure for the slab track in the tunnel.

1. 서론

경부고속전철의 건설에 있어서 산악터널의 시공시 주로 채택되고 있는 NATM공법은 발파에 의한 굴착이 주요 공종의 하나이다. 터널의 굴착 시에 천공각도 등 천공장비 상의 문제점과 단층, 절리 등의 불연속면의 존재 등으로 부득이 여굴이 발생하는 경우가 생긴다. 이때 터널부는 슛크리트 및 라이닝 콘크리트에 의한 되메움 시공을 하고 있다. 또한 슬래브 궤도를 적용하는 노반부에 대해서는 일반적으로 원암반면을 세정한 후 콘크리트노반 하부까지 버림 콘크리트로 되메우는 것을 권고하고 있으나 일부에는 시멘트처리노반, 강화노반 등이 사용된 예도 볼 수 있다. 한편, 현재 공정이 상당히 진척되어 있는 대부분의 터널에서는 원암반면의 굴착 요철로 인한 장비 주행 문제 등 시공상의 편의를 위해 굴착공사 중 발생된 쇄석이 부설된 상태에 있다.

따라서 본 연구에서는 고속열차의 운행에 따른 보선업무의 효율화 및 소음·분진을 고려한 슬래브 궤도의 도입을 추진하고 있는 시점에서, 국내에서는 교량 구간을 제외하고는 터널 및 토공구간에서의 적용사례도 없으며 이에 대한 연구실적도 미미한 실정이므로, 현재의 터널시공구간을 대상으로 현장 지반 상태를 조사하고 이를 바탕으로 한 실물대형실험을 수행하여 고속열차 주행에 따른 침하, 토압 등 동적 특성을 고찰하고 열차 안전주행에 필요한 대안 수립을 위한 기초자료를 확보코자 하였다.

* 한국철도기술연구원 시설연구본부 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 시설연구본부 주임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 시설연구본부 책임연구원, 정회원

2. 현장 터널내 노반부 현황

현장터널내 노반부의 실태파악과 실물대형실험을 위한 기초자료로 활용하기 위해 평판재하시험과 Multi-Channel SASW시험을 실시하였다. 또한 현장시료의 물성확인을 위해 백호를 이용하여 시료를 채취하였다. 평판재하시험에서는 재하반력으로 만재된 15ton덤프트럭을 이용하며, 상대적으로 취약한 개소라 판단되는 측구 쪽에 근접하여 실시하였다. 결과에 의하면, 표 1에 제시한 바와 같이 K_{30} 은 56.2~99.7 kgf/cm^3 으로서 토공구간에서 기준으로 하고 있는 $K_{30} \geq 11\text{kgf/cm}^3$ 을 초과한 값이며, 터널내부라는 특수한 조건을 고려한다고 해도 다소 안전측으로 볼 수 있다.

표 1. 현장 평판재하시험결과

| 측 점 | 지반반력계수 [kg/cm^2] |
|--------|-----------------------------|
| PB-I | 99.7 |
| PB-II | 85.7 |
| PB-III | 56.2 |
| PB-IV | 60.0 |
| 평 균 | 75.4 |

표 2. 쇄석채움층 전단파 속도

| 측 점 | 쇄석채움층 전단파 속도(m/sec) |
|--------|--------------------------------|
| ST-I | 373 |
| ST-II | 377 |
| ST-III | 296 |
| ST-IV | 261 |
| ST-V | 290 |
| ST-VI | 275 |

또한 원암반면과 쇄석채움층사이의 접촉상태 및 강성 추정을 위하여 Multi-Channel SASW시험을 수행하였다. 시험결과, 표 2에 보인 바와 같이 쇄석채움층의 전단파 속도는 261~377 m/sec 로서 일반적으로 풍화암의 전단파 속도가 약 350 m/sec 를 초과하는 경우를 고려하면 일부 구간은 풍화암의 전단강성을 보이고 있으나 일부는 풍화암보다는 약하지만, 다짐도가 양호한 토사지반의 전단강성을 보이고 있다. 전체적으로 전단강성 측면에서는 양호한 노반으로 판단된다. 그림 1은 ST-II 측정점의 실험분산곡선과 이론분산곡선의 비교를, 그림 2는 ST-II 측정점의 전단파 속도 주상도를 보인 것이다.

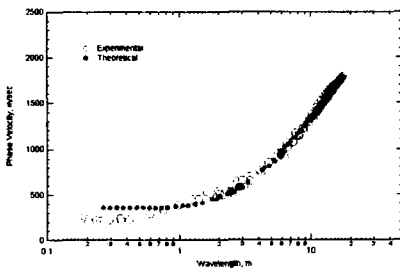


그림 1. 실험분산곡선과 이론분산곡선의 비교

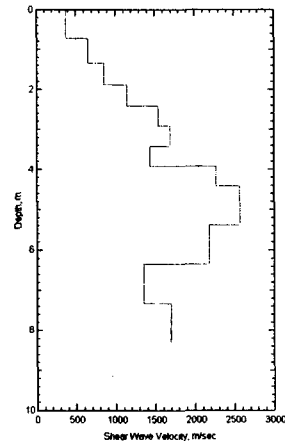


그림 2. 전단파속도주상도

3. 실물대형모형 실험

3.1 실험조건

본 실물대형 반복재하시험을 위한 실험조건의 설정을 위해 설계차량은 한국형 고속전철의 20량

편성을 모델로 하였다. 반복재하실험에서 설정한 실험조건을 정리하면 다음과 같다.

- 정·동적재하하중 : 30tf
- 하중재하 속도 및 재하 회수 : 5Hz, 1,000,000회
- 하중재하파형 및 하중재하방법 : 정현파, 1레일당 하중진폭 15tf
- 궤도슬래브 : Rheda형 궤도 슬래브를 모델로 한 침목매입식
현장타설콘크리트 방식으로 제작, 압축강도 350kg/cm²
- 콘크리트노반 : 프리캐스트 제작, 압축강도 180kg/cm²
- 실험지반의 지반반력계수 : $K_{30} \approx 6, 11, 20 \text{kgf/cm}^3$

3.2 모형토조와 하중재하 시스템

고속전철 터널내 콘크리트 노반 폭은 10m(복선)이다. 따라서 본 실험에서는 단선에 대해 높이 2.4m(높이)×5.1m(폭)×4.2m(길이)의 토조를 구성하였다. 재하시스템은 가진기, 반력빔, 반력빔 연결용 인장말뚝으로 구성되어 있다. 가진기는 최대 stroke이 300mm이며, 최대 50tf의 재하가 가능하다. 그림 3과 사진 1은 각각 모형토조와의 하중재하시스템의 개략도 및 전경을 보인다.

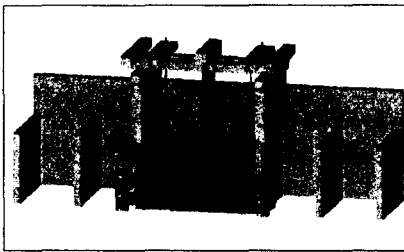


그림 3. 모형토조와 하중재하시스템 개략도



사진 1. 모형토조 전경

3.3 실험지반의 조성 및 계측기 배설

현장 조건에 가급적 부합하는 실험지반의 조성을 위해 실제 터널 내부에서 채취한 시료에 의한 물성시험을 실시하였다. 실험결과를 표 3과 같으며, 통일분류법(USCS)에 의해 GP로 분류되었다. 그리고 실험지반의 균질한 조성을 위해 75mm이상의 재료는 제거하고 동다짐기를 이용하여 실험지반을 조성하였다. 실험지반은 현장밀도시험에 의해 다짐관리하였으며, 실험지반의 상부에서 평판재하시험을 실시하였다. 또한 현장과 동일한 정도의 실험지반의 재현은 사실상 불가능하므로 $K_{30} \geq 11 \text{kgf/cm}^3$ 을 중심으로 하여 실험조건을 설정하였다.

표 3. 현장채취 시료의 물성시험결과

| 시험 종류 | 시험 결과 | 시험 종류 | 시험 결과 |
|------------------|---|---------|---|
| 체분석 시험 | $D_{10}=0.62\text{mm}$ $C_u=26.64, C_c=13.15$ $F_{200} = 2 \%, F_{40} = 7.6 \%$ | 다짐시험 | 최적 함수비 $\omega_{opt}=7.0\%$ 최대건조단위중량 $\gamma_{dmax}=2.22\text{tf/m}^3$ |
| 비중시험 | $G_s=2.64$ | 전단시험 | $c = 0.34\text{kgf/cm}^2, \phi = 31.4^\circ$ |
| 액성한계시험 소성한계시험 | $LL=26 \%$ $PL=18 \%$ | LA 마모시험 | 마모율 = 16.3% |

실험지반의 조성 중에 정·동적 재하시의 거동측정을 위해 그림 4와 표 4에 보인 바와 같이 침하판, 토압계, 속도계를 각각 소정의 위치에 매설하였다.

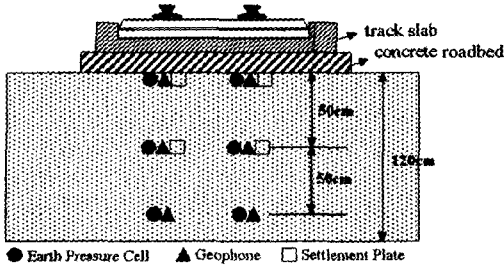


그림 4. 실험지반 및 계측기 매설도

표 4. 계측기 및 측정장비

| 사용센서 | 측정항목 | 용량 | 계측장비 |
|------|------|--|---------------------|
| LVDT | 침하량 | 50mm | EDX-1500A SA 390 |
| 토압계 | 토압 | 2kg/cm ² 5kg/cm ² | |
| 속도계 | 지중속도 | GS-11D | |

4. 실험결과 및 분석

4.1 정적재하실험

궤도슬래브의 시공을 완료하고 나서 소정의 시간이 경과된 후 열차가 운행되는 것을 감안하고, 실험지반과의 밀착을 좋게 하기 위하여 정적재하실험을 실시하였다. 정적하중은 최대 30tf까지 5tf씩 단계별로 재하하였으며, 재하단계마다 계측을 하였다. 그림 5는 최대정적하중 재하 시의 깊이 따른 침하량을 보인 것으로 지반반력계수가 클수록 침하량이 작으며, 재하점으로부터 멀어질수록 감소하는 경향을 볼 수 있다. 또한 그림 6에 보인 바와 같이 토압은 재하하중에 따라 선형적으로 증가하고 있으며, 반복하중 재하 후에 실시한 정적재하실험 결과와 큰 차이를 보이지 않는다.

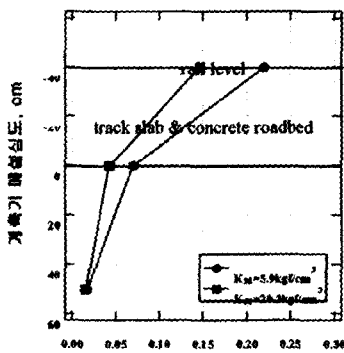


그림 5. 계측심도별 침하량

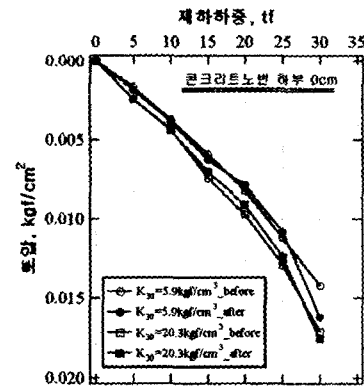


그림 6. 최대정적하중-토압

4.2 반복재하실험

(1) 소성침하량

소성침하량은 궤도토림에 직접 관계되는 사항이며, 일정값 이상의 소성침하량은 궤도슬래브 파괴의 원인이 될 수 있으므로 이에 대한 고찰이 필요하다. 그림 7은 레일부에서 측정된 반복재하회수에 따른 소성침하량을 보인 것으로 200,000만회를 전후하여 수렴하고 있는 것을 볼 수 있으며, 반복재하 종료 시점에서 소성 침하량 차이가 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 반복재하에 따른 다짐효과에 의한 것으로 사료된다. 또한 그림 8은 지반반력계수와 소성침하량의 관계를 도시한 것으로 $K_{30} = 11\text{Kg/cm}^3$ 을 전후하여 소성침하량의 기울기가 완만해지는 것을 볼 수 있다.

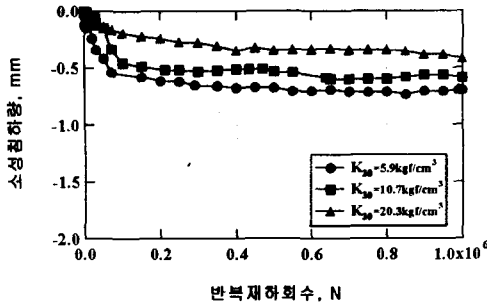


그림 7. 반복재하회수-소성침하량(레일부)

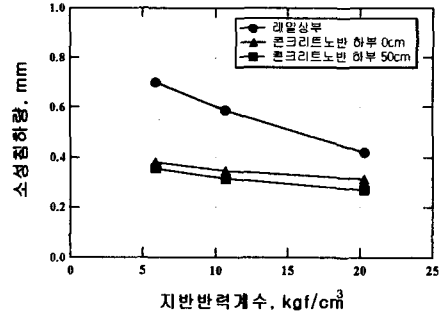


그림 8. 지반반력계수-소성침하량

(2) 변위진폭(탄성침하)

변위진폭은 승차감에 영향을 줄 수 있는 인자이며, 체결구 등 궤도구성품의 수명에 관계가 있다. 그림 9와 그림 10은 각각 지반반력계수가 5.9kg/cm³과 20kg/cm³인 경우에 대한 반복재하회수에 따른 변위진폭과 심도별 변위진폭을 보인 것이다. 그림에서 보인 바와 같이, 100만회 반복재하 후 다소 변위진폭이 감소하는 경향을 보이고 있으나, 큰 변화는 보이고 있지 않다. 또한 심도가 깊어질수록 변위진폭이 감소하여 콘크리트 노반 직하부에서 약 1/2.5로 되고 있다.

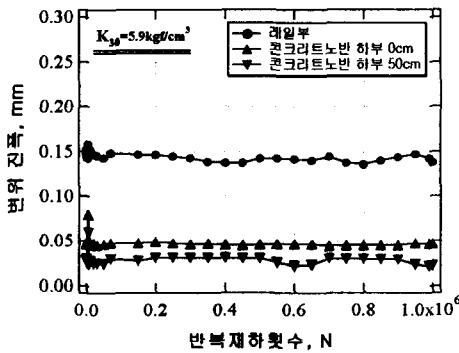


그림 9. 반복재하회수-변위진폭

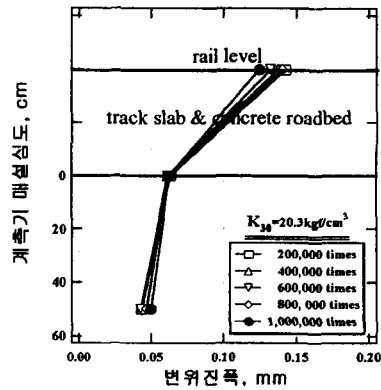


그림 10. 계층심도별 변위진폭

다. 토압 진폭

그림 11은 지반반력계수가 $K_{30}=5.9\text{kg/cm}^3$ 인 경우의 계층심도별 토압진폭을 보인 것이다. 또한 그림 12는 $K_{30}=20.3\text{kg/cm}^3$ 인 경우의 반복재하회수에 따른 토압진폭을 보인 것이다. 그림에 보인 바와 같이 실험 조건별이나 반복재하회수에 따른 뚜렷한 토압진폭 변화는 보이지 않는다. 한편 토압진폭은 재하점에서 멀어질수록, 즉 심도가 깊어질수록 감소하는 경향을 볼 수 있으며, 토압진폭의 크기는 콘크리트노반 직하부에서 0.013~0.015kg/cm²정도이며, 노상면 아래 100cm에서는 노상표면의 1/3~1/2.5의 정도의 값을 보였다. 도상자갈궤도에 대한 기존의 연구결과와 비교할 때 1/10정도의 값을 보이고 있다.

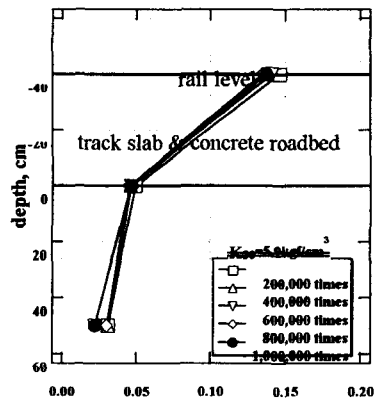


그림 11. 계층심도별-토압진폭

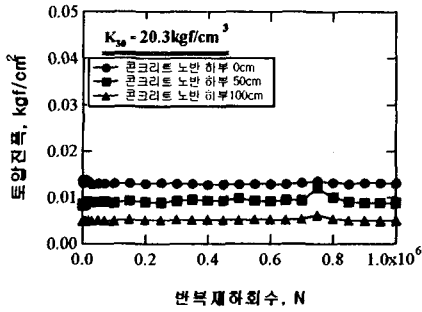


그림 12. 반복재하회수-토압진폭

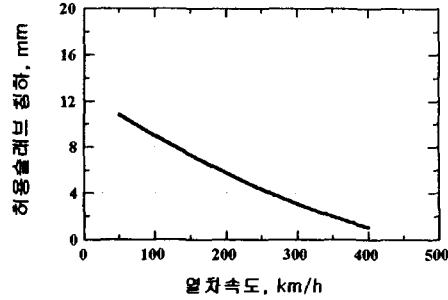


그림 13. 슬래브 추정허용침하량(신간선)

5. 결론 및 고찰

고속전철 터널시공 현장의 발생 쇄석을 이용하여 정·동적 반복재하 실험을 수행하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 현장에서의 평판재하시험과 SASW시험 결과에 의하면 풍화암 내지는 잘 다져진 양질의 토사 정도의 상태이며, 슬래브 궤도노반의 기준인 $K_{30}=11\text{kgf/cm}^3$ 이상이므로 지반 강성 측면에서는 안전측으로 판단된다.
2. 일반적으로 자갈도상궤도에서 탄성침하량을 2.5mm 정도로 하고 있으나 슬래브 궤도의 경우는 주행안전성, 승차감, 체결장치의 여유량 및 유지보수의 어려움 등을 고려하여 보다 엄격한 관리기준이 적용되어야 한다. 이러한 것을 감안해도 반복재하실험에서 측정된 최대 0.15mm의 변위진폭, 소성침하량의 경우는 백만회 재하후 최대 0.7 mm이므로 열차속도가 350km/hr인 경우, 약 2mm정도이므로 안전측으로 판단된다(그림 13참조).
3. 재하부 아래에서 심도별로 측정된 토압진폭은 지반반력계수와 반복재하회수에 따라 뚜렷한 변화를 보이고 있지 않으므로 궤도의 관리기준은 침하량을 중심으로 산정하는 것이 바람직하다.

또한 본 연구에서의 결과들은 지점에서의 반복재하실험이므로 실제 열차 주행시의 거동으로 단정할 수 없다. 따라서 향후 열차 주행 시의 거동분석 및 장기적인 지하수의 영향과 공진주파수 문제 등에 대한 지속적인 연구의 추진을 통한 관리 및 설계기준의 설정이 요망된다.

참고문헌

1. 조성호, 강태호(2000), “지반의 전단파속도 토모그래피 영상을 구하기 위한 Multi-Channel Tomographic SASW(MTSASW)기법” 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp. 387-390.
2. 한국고속철도건설공단(1997), “고속철도노반공사 공사시방서”, 한국고속철도건설공단.
3. 황선근, 이성혁, 이일화, 최찬용(2001), “동적하중재하시 쇄석강화노반의 거동특성”, 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집. pp. 525-532.
4. 鐵道總合技術研究所(1999), “鐵道構造物等設計標準·同解説(省力化軌道用土構造物)”, 鐵道總合技術研究所, pp. 142-149.
5. 村本勝己, 關根悅夫(1998), “列車荷重を受ける盛土の締固め管理手法に関する検討”, RTRI REPORT Vol. 12, No. 4.
6. E. T. Selig, J. M. Waters, “Track Geotechnology and Substructure Management”, Thomas Telford, Railway Geotechnical Consultant, Derby, England