

동적하중 제하시 쇄석강화노반의 거동 특성

Characteristics of Behavior of the Crushed Stone Reinforced Roadbed under Cyclic Loading

황선근¹⁾, Seon-Keun Hwang, 이성혁²⁾, Seong-Hyeok Lee, 이일화³⁾, Il-Wha Lee, 최찬용³⁾, Chan-Yong Choi

1) 한국철도기술연구원 시설연구본부 책임연구원, Principal Researcher, Civil Engineering Research Dept., KRRI.

2) 한국철도기술연구원 시설연구본부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Engineering Dept., KRRI.

3) 한국철도기술연구원 시설연구본부 주임연구원, Researcher, Civil Engineering Dept., KRRI.

SYNOPSIS : In this study, performance of reinforced railroad roadbeds with the crushed stones was investigated through the real scale railroad roadbed tests. Several real scale reinforced railroad roadbeds were constructed in the laboratory with different subgrade conditions and were tested with the estimated actual train loads including the impact loading of train. The affecting factors such as settlement, earth pressure and stress change at the surface of reinforced roadbed, subgrade layers as well as surface of rails were measured. It was found through the actual testing that for the roadbed with the same thickness, the settlement and vibration level (velocity) of reinforced roadbed decreases with the increase of reaction modulus of subgrade. The settlement of reinforced roadbed with the same reaction modulus of subgrade also decreases with the increase of thickness of the reinforced roadbed.

Keywords : Real Scale Test, Roadbed, Reaction Modulus, Settlement, Earth Pressure, Velocity

1. 서론

철도노반의 역할은 열차의 주행안정성 확보 및 궤도 상부로부터 전달된 하중을 하부 지반으로 적절히 분산하는 것이며 이러한 역할을 하기 위해서 노반재는 적절한 탄성을 가지며 상부노반의 연약화를 방지하며 또한 상부노반의 내압강도이하로 하중을 분산, 전달하는 기능을 가진다.

또한 철도노반은 동적 열차하중을 장기적으로 반복하여 받고 있으므로 동적거동 특성을 규명하는 것은 열차 운행상의 안정성 확보 및 승차감향상에 있어 필수적인 것이다.

현재 국철에서 주로 사용되고 있는 노반재로는 양질의 흙을 사용하여 노반을 건설하도록 되어 있으나 다짐관리, 배수구배 등의 정밀시공이 미흡한 실정이며, 장기적인 반복하중에 의해 노반으로의 도상발라스트 관입, 도상발라스트의 세립화 등으로 인해 노반이 연약화되어 우기에 빗물과 혼합되어 펴핑현상에 의해 도상으로 분출되어 궤도의 기능을 저하하는 사례가 발생하고 있다. 이러한 연약화 현상은 물, 동적하중, 노반재의 3가지 요인이 복합되어 발생하는 현상으로 이중 하나의 요인만 제거하여도 발생을 억제할 수 있으므로 연약화를 방지하여 열차 운행상의 안정성 및 승차감의 향상을 위해 배수성, 강성 등을 확보할 수 있으며, 기존의 흙노반재를 대체할 수 있는 노반재의 개발이 요구된다.

따라서 한국철도기술연구원이 국내에서 유일하게 보유하고 있는 종합궤도노반시험장치를 활용하여 실제 현장의 조건과 유사하도록 노반재료별, 두께별로 노반을 조성하고 실물 궤도를 제작하여 반복재하실험을 수행하였다. 본고는 국외에서 채택되고 있는 강화노반재료 중 하나인 쇄석강화노반에 대한 실물대형실험을 수행한 결과에 대해 기술한 것이다.

2. 모형실험의 영향 인자 산정

2.1 재하하중 및 재하진동수의 산정

모형토조시험에 적용된 하중은 <식 1>과 같은 기본조건을 근거로 하여 하중을 산정하였다. 일반적으로 노반 압력은 궤도 구조, 윤중 크기, 열차 속도 등을 고려해야 한다.

시험조건은 설계속도 200km/h, 설계하중 LS-22를 적용하였으며, 직선부의 장대레일이 부설되는 경우로 가정하여 설정하였다. 속도에 따른 충격계수는 <식 2>을 이용하였으며, 충격계수를 계산하면 1.6이 된다. 반복 하중에 대한 노반의 응력은 표준하중과 충격율에 의한 표준편차를 이용하여 (표준하중) + (표준편차×1))을 시험하중으로 산정 하였다.

$$S_p = 0.5 \times P_{st} \times (i - 1) \quad \text{<식 1>}$$

$$i = 1 + 0.3 \frac{V}{100} \quad \text{<식 2>}$$

$$\therefore S_p = 0.5 \times 11 \times (1.6 - 1) = 3.3$$

$$\text{설계윤중 } P_w = 11 + 3.3 = 14.3 \text{ tonf} \quad \text{설계축중 } P_a = 14.3 \times 2 = 28.6 \text{ tonf}$$

여기서 S_p : 표준편차

재하하중은 최소하중 1tonf으로 하고 설계하중 14.3tonf이 최대하중이 되도록 하중을 재하였다. 또한 동적재하실험전에 지반의 안정화와 도상다짐이 충분히 되도록 최대하중 14.3tonf으로 0.5Hz를 각 침목당 500회씩 재하하였다.

모형실험에 적용된 재하 진동수는 차량의 대차간 거리(d), 열차주행 속도(V), 통과시간(T)로부터 다음의 식에 의하여 구할 수 있다.

$$d = V \cdot T$$

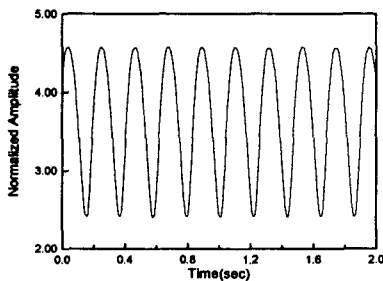
$$\therefore T = \frac{d}{V} \quad \text{<식 3>}$$

여기서 재하 진동수 $f = 1/T$ 이므로,

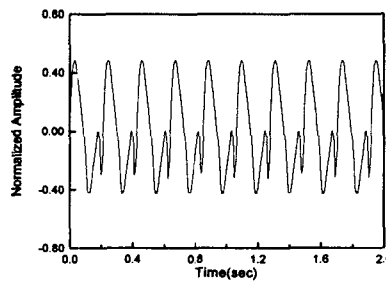
$$f = 1/T = V/d \quad \text{<식 4>}$$

가 된다.

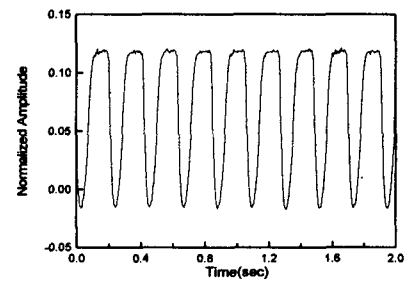
위의 식으로부터 1급선의 설계속도 200km/h기준으로 하중재하속도를 구하여 시험에 이용하였다. <그림 2>는 각 계측기의 신호분포를 나타내었다. 본 시험이 도상발라스트이하의 노반을 대상으로 시험을 실시하였으므로 하중재하의 기준은 대차의 재하횟수를 적용하였다. 상기의 조건으로 계산하면 재하주파수는 약 5Hz가 된다.



(a) 변위계



(b) 속도계



(c) 토압계

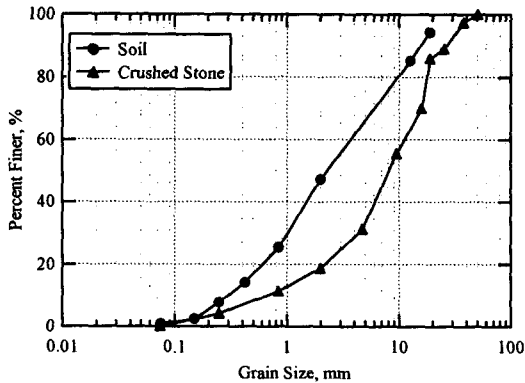
<그림 1> 각 계측기의 신호특성

3. 실험 방법

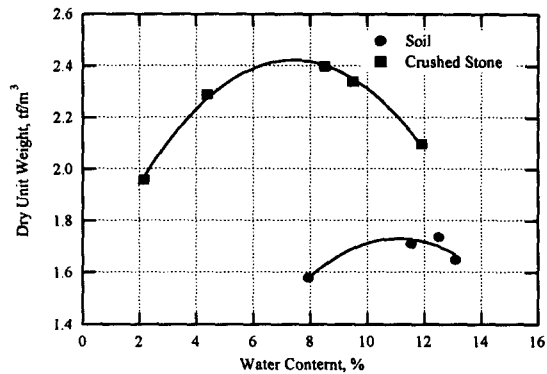
3.1 실험 재료

실험에 사용된 노반재는 「철도구조물등 설계표준·동해설(흙구조물편)」(일본철도총연, 1992년)에 제시되어 있는 기준에 근거하여 흙과 쇄석을 선정하였다. 흙은 철도 노반 공사 현장에서 성토재로 사용되고 있는 화강암 풍화토를, 쇄석의 경우는 최대입경이 40mm이하인 재료로서 상기의 기준에 만족하는 것을 선정하였다.

<그림 2>와 <그림 3>은 각 재료별 입도곡선과 다짐곡선을 나타내었다. 흙노반, 쇄석의 경우 최대건조단위중량(γ_{dmax})이 각각 1.74tonf/m³, 2.45tonf/m³이며, 최적함수비(ω_{opt})는 11.3%, 7.5%로 값을 보이고 있다.



<그림 2> 노반, 노상 재료의 입도 분포 곡선



<그림 3> 노반, 노상 재료의 다짐곡선

3.2 모형토조 및 하중재하장치

철도하중은 일정한 차량의 하중과 주행에 의해 발생하는 동하중, 횡하중, 풍하중, 제동하중, 충격하중, 원심력에 의한 하중 등이 동시에 반복적으로 작용하는 복잡한 메카니즘을 가지고 있다. 따라서, 실제 열차가 주행하고 있는 상태에서의 노반의 거동 특성을 분석하는 것이 가장 정확한 결과를 얻을 수 있으나, 각각의 경우를 모두 재현하여 실험한다는 것은 현실적으로 어려움이 있다. 따라서 축소모델에 의한 실험보다 현실적으로 근접한 조건을 설정하고 실험을 재현하기 위해 한국철도기술연구원이 보유하고 있는 종합노반 시험장비와 실제 단선의 조건에 맞는 대형토조를 활용하여 실험을 수행하였다.

종합노반시험장비는 실물크기로 철도노반을 재현하여 실내에서 반복재하실험을 가능하게 한 장비로서 제한적인 현장계측, 축소모델의 한계에서 오는 문제점을 보완할 수 있는 장비이다. 본 장비는 토조(Soil Tank), 하중재하장치>Loading System, MTS)와 하중작용시 반력대 역할을 하기 위한 하중 반력대>Loading Frame)등 3 가지로 구성되어 있으며, 이밖에 중앙계측실에서 자동계측할 수 있는 자동제어장치(Control System), 펌프실, 냉각장치 등이 있다.

종합노반시험장비는 노반의 성능평가시험 뿐만 아니라 궤도구성품의 피로시험 및 슬래브레도의 개발에 활용할 수 있다. 실험용 모형실험을 위한 토조의 규격은 길이 22m, 폭 6m, 깊이 3m 이며, 토조내부에 장비가 진입할 수 있도록 50°의 비탈구배를 두어 장비가 진입할 수 있도록 제작한 것이다. 또한 각종 실험시 내부 하중을 견딜 수 있도록 350kgf/cm²의 압축강도를 갖는 콘크리트구조로 측벽, 바닥면을 제작하였다. 바닥면은 맨홀을 만들어 물을 배출시킬 수 있는 장치를 두었다. <그림 4>와 <그림 5>는 토조 내부전경을 나타내었다.



<그림 4> 모형토조의 개략도



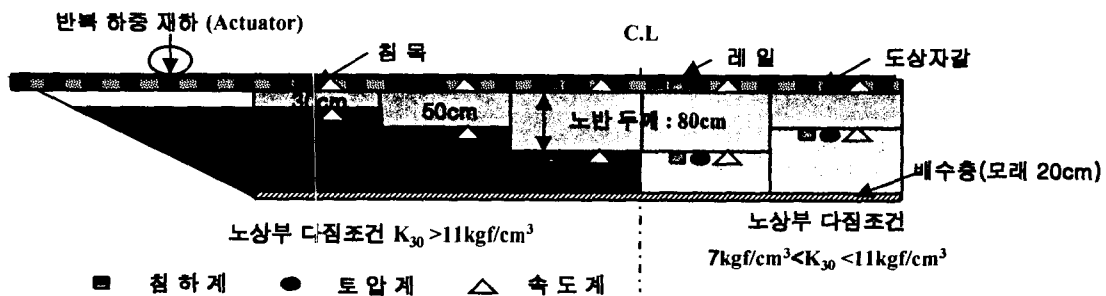
<그림 5> 모형토조장치 전경

3.3 노반 조성

노반은 바닥층은 하부지반의 평탄성을 유지하도록 모래층 20cm를 포설하였으며, 모래층 포설 후 양질의 화강풍화토를 사용하여 노상부를 다짐하였다. 평판재하시험을 통해 전압횟수에 따른 예비 다짐시험 통하여 K_{30} 이 7kgf/cm^3 인 경우, 5tonf다짐롤러를 사용하여 2회 다짐을 실시하고, 11kgf/cm^3 의 경우는 전압횟수를 4회로 하여 소요의 다짐도를 확보하였다.

노반 조성 재료로는 쇄석과 화강암 풍화토를 사용하여 각각 30cm, 50cm, 80cm 노반두께로 조성하였으며, 노반부는 상부에 매설된 계측센서의 보호를 위해 1tonf 다짐롤러를 사용하였다.

도상부는 노반부의 조성을 완료한 후 바브켓에 의해 도상두께가 30cm가 되도록 하였다. 일반적으로 현장에서는 도상부에서는 MTT작업에 의해 다짐을 하고 있으나, 본 실험에서는 불가능하므로 인력에 의한 총다기를 실시하였다. 각단면의 케도는 침목 5분과 레일 2분을 체결하여 제작하여 5ton 크레인으로 시험하고자 하는 단면으로 이동하여 하부를 총다지기하여 셋팅하였다. 각각의 단면의 크기는 6m(폭)×3m(길이)로 되어 있다. <그림 6>은 실물대형 모형토조의 횡단면을 나타낸 것이다.



<그림 6> 실물대형 모형토조 횡단면도

3.4 실험조건

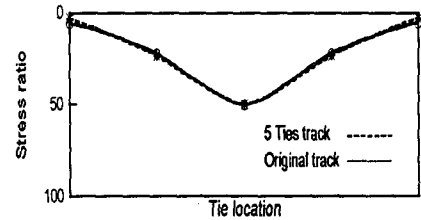
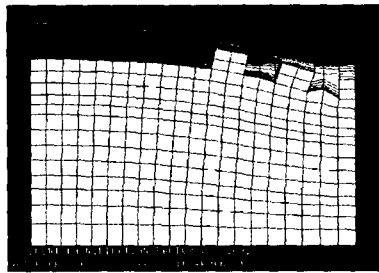
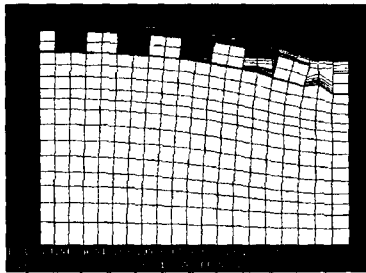
실험조건은 <표 1>에 보인 바와 같이 6가지를 설정하여 노상지반과 노반두께에 따른 동적반복하중 재하시 침하, 토압, 진동속도를 관찰하였다. 반복하중재하 전에 정적하중을 최대하중 14tonf을 단계적으로 2tonf 씩 재하·제하하여 침하, 토압 특성을 비교 분석하였다. 또한 반복하중은 최대하중 14.3tonf과 최소하중 1tonf으로 재하진동수 5Hz로 실험을 실시하였다.

<표 1> 실대형 모형 반복피로시험의 실험조건

실험번호	노상 지반반력계수	노반두께	시료
Test 1	7kgf/cm^3	50cm	쇄석 노반
Test 2	7kgf/cm^3	80cm	
Test 3	11kgf/cm^3	80cm	
Test 4	11kgf/cm^3	50cm	
Test 5	11kgf/cm^3	30cm	
Test 6	11kgf/cm^3	30cm	흙 노반

3.4.1 궤도조건에 따른 하중분배율의 변화

반복재하시험에 사용한 궤도조건은 현장의 궤도조건과는 달리 <그림 7>에서와 같이 5개의 침목만을 체결하여 사용하였다. 이는 시험의 효율성을 높이고 인접 단면으로의 영향을 최소화하기 위한 것이다. 본 연구에서 사용된 궤도조건과 실제 궤도조건을 비교하여 문제점을 검토하기 위해 범용 프로그램을 사용하여 유한요소해석을 하였다. 해석조건은 실제궤도조건과 유사한 12개의 침목으로 구성된 궤도와 본 실험에서 적용한 5개의 침목일 때의 응력 및 변위량에 대한 검토를 수행하였다. <그림 7(c)>은 각 해석조건별 응력의 절대값 및 분배율을 나타내는 그림으로서 수치적으로 거의 차이가 없는 것으로 나타났으며 <그림 3.7(c)>와 같이 변위량에도 차이가 없는 것으로 나타났다. 단지 하중점에서 먼 침목에서 상방으로 작용하는 인장하중에 대한 부담력으로 인하여 3번째 침목에서 다소의 응력 차이가 있었다.

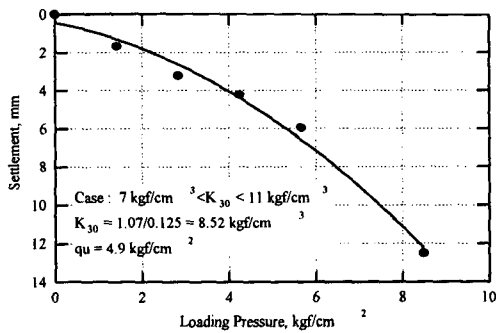


(a) 실험현장의 궤도조건(×300) (b) 반복재하시험 궤도조건 (c) 궤도조건에 따른 하중분배율
<그림 7> 각 궤도조건별 집중하중에 의한 변위량

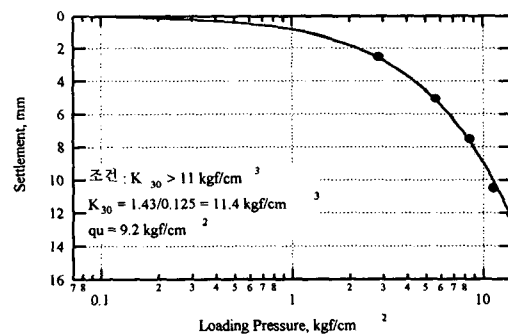
4. 실험결과 및 분석

4.1 노상부 평판재하시험결과

쇄석 80cm 단면의 평판재하시험결과는 <8>과 같다. 일반적으로 많이 사용되는 하중-침하곡선으로부터 지반반력계수와 극한지지력을 구하였으며, 하중-침하곡선으로 변곡점이 나타나지 않은 경우 <그림 8(b)>와 같이 각 좌표를 log scale로 변환시켜 그 변곡점을 극한지지력으로 산정하였다.



(a) $7 \leq K_{30} < 11 \text{ kg/cm}^3$ 인 경우



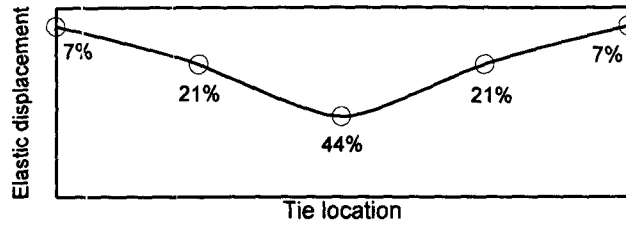
(b) $K_{30} \geq 11 \text{ kg/cm}^3$ 인 경우

<그림 8> 노상지지력에 따른 평판재하시험 결과

4.2 동적재하시험

4.2.1 재하하중에 의한 각 침목에서의 변위량

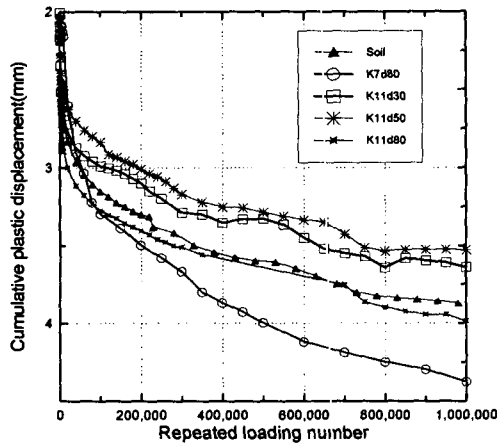
하중재하시 각 침목에서의 변형량을 검토하기 위하여 변위계를 이용하여 측정하였다. 하중이 재하점 직하의 침목을 중심으로 되는 직하의 침목을 중심으로 양쪽으로 각각 3개의 침목만을 고려하였다. 실험결과, 변위량의 분배율은 44 : 21 : 7로 측정되었는데, 통상 일본에서는 40 : 20 : 10을 적용하며 경부고속전철의 경우, 수치해석결과에서는 50 : 20 : 5의 결과를 나타내고 있다. 이는 궤도 및 노반구조의 차이와 실험에 적용한 하중의 차이에서 기인하는 것으로 판단된다.



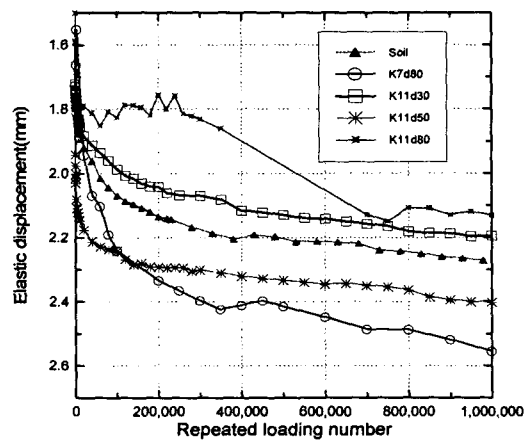
<그림 9> 각 침목에서의 탄성 변위량

4.2.2 레일면에서의 평균 탄소성 변위량

각 단면별 소성 침하량은 양쪽 레일면에서 측정된 값을 평균하여 구하였으며, 탄성변위량은 레일면에서 측정된 데이터의 Peak-to-Peak으로 값으로 하였다.



<그림 10> 레일면에서 발생된 소성 침하량



<그림 11> 레일면에서 발생된 탄성 변위량

<그림 10>은 100만회의 반복재하동안 레일면에서 발생한 소성침하량을 보인 것이다. 100만회 재하후의 소성 침하량은 3.5~4.4mm이며, 노상부의 지반반력계수 k_{30} 값이 클수록 레일면의 침하가 적게 발생하는 것을 알 수 있으며, 노반두께에 따른 레일면에서의 침하량은 상관성이 적은 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 각 실험조건마다 도상부의 다짐정도 및 두께의 차이에서 기인된 실험적 오차로 판단된다. 또한, 흙 노반과 강화노반이 거의 유사한 침하량을 보이고 있는 것을 알 수 있으며, 이러한 경향은 실물대형 실험상의 노반조건이 매우 양호한 지반이며, 연약화 요인 중 물의 영향이 고려되지 않은 상태이므로 명확한 거동 차이가 보이지 않는 것으로 판단된다.

<그림 11>은 레일면에서 측정된 탄성변위로서 궤도틀림이나 주행안정성 및 승차감 등에 큰 영향을 미친다. 각 시험조건을 검토하면 k7d80조건이 가장 큰 탄성 변위량을 가지고 노상부의 강성이 동일한 경우에는 노반의 두께가 두꺼울수록 탄성 변위 진폭이 작아진다.

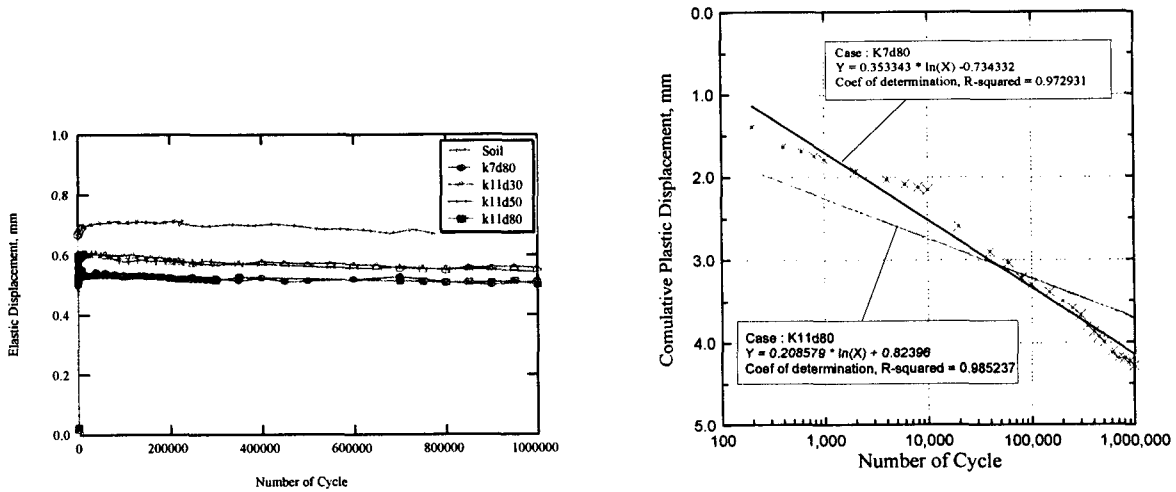
4.2.3 노반면에서의 탄성 변위량

도상부의 다짐도, 두께 등의 차이에서 오는 실험적 오차를 최소화하기 위해 반복 하중재하 전에 0.5 Hz의 선행하중을 재하하여 도상을 안정화하였다.

<그림 12>는 노반면에서의 탄성 변위량을 나타낸 것으로서 전체적으로 1mm이내의 탄성변위를 보이고 있다. 전반적으로 탄성변위가 반복재하횟수에 따라 다소 감소하는 경향을 보였다. 측정결과에 의하면, 흙 노반의 경우가 약 0.7mm로 가장 크며, 쇠석강화노반의 두께가 80cm인 경우가 가장 작게 나타났다. 지지력의 변화에 따라서는 노상의 K_{30} 이 11kg/cm^3 이상인 경우에는 노반 두께가 증가할수록 탄성 변위는 작아지고 있다. 현재 일본에서는 노반에서의 탄성변위 2.5mm를 설계에서 기준으로 사용하고 있는

것을 고려할 때, 물의 영향이 배제된 상태에서의 실험값은 모두 기준에 만족하는 결과를 보인다.

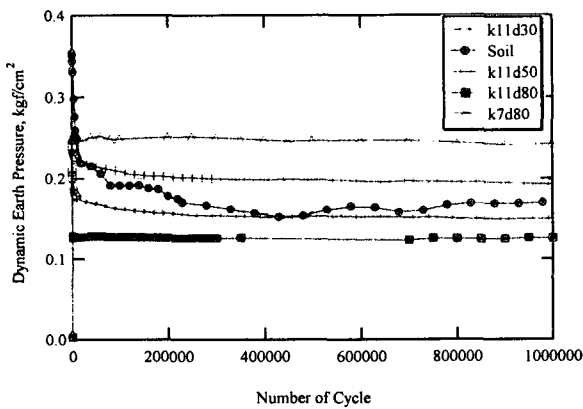
<그림 13>은 상부노반의 강성에 따른 침하량 차이를 확인하기 위하여 K_{30} 이 7, 11kg/cm^3 이고 80cm의 쇠석강화노반이 설치된 층에서 발생한 누적소성침하량의 절대값을 비교하였다. 두 단면에서 초기재하조건과 강화노반층의 다짐조건등으로 인하여 10만회 재하까지는 유사한 침하경향을 나타내지만 10만회 이후부터는 다른 침하율을 나타내고 있다. 또한 초기조건의 영향으로 최종소성침하량값은 각각 3.8, 4.3mm로 큰 차이는 보이지 않지만 반복재하횟수에 따른 소성침하율은 k11d80인 경우보다 k7d80인 경우 70% 이상 큰 침하율을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 본 실험에서는 최종소성침하량값이 큰 차이를 보이는 않지만 실제의 시공시에는 다짐후 장기적으로 방치된 상태에서의 작업차의 운행 및 장기간의 안정화를 거치므로 초기 조건의 영향은 미미할 것이며 선로의 유지보수 주기와 횟수에 영향을 받는 침하율에 지배적인 영향을 받는다. 측정결과에 의하면, 노반의 두께보다는 상부노반의 강성이 전체 침하량에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있다.



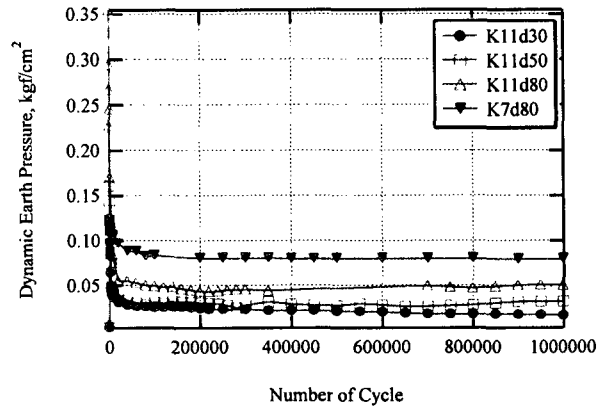
<그림 12> 노반면에서의 탄성 변위량 <그림 13> 상부지반의 강성에 따른 누적소성침하량

4.3 반복재하횟수에 따른 동토압

<그림 14>~<그림 15>은 각 조건별 반복재하횟수에 따른 토압의 분포를 나타내었다. <그림 14>는 각 조건별 노반면에서 반복재하 횟수에 따라 측정된 토압을 나타내었다. 초기하중 재하시에 0.38kgf/cm^2 의 토압이 측정되었으나 200,000회 이후는 동토압이 수렴되는 경향을 보인다. 한편 <그림 15>는 노상부의 토압분포를 나타낸 것으로 0.1kgf/cm^2 의 값을 보이고 있다.



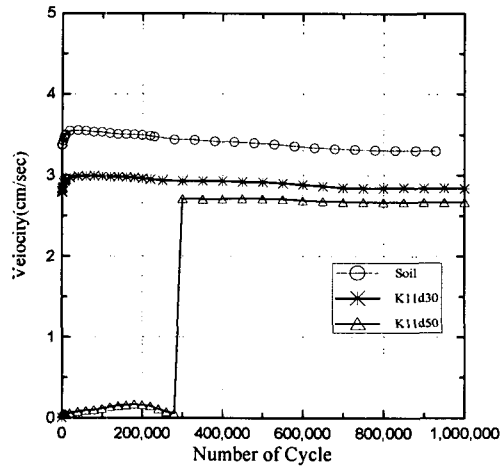
<그림 14> 노반부의 토압분포



<그림 15> 노상부의 토압분포

4.4 변위 진폭

실험에서는 노반두께 및 노상 지지력에 따른 진동속도의 변화를 분석하기 위하여 속도계에 의해 노반과 노상 상부의 진동속도의 감소량을 분석하였다. 각 조건별 재하점 중앙부의 노반과 노상의 진동변위 진폭(전진폭)을 나타내었다. 각 조건별 노반과 노상 표면 진동 변위 진폭은 1.6~2.0cm/sec정도이며, 노반면의 경우 2.3~2.5cm/sec의 속도값을 가지고 있었다. 또한, 반복 횟수에는 영향을 미치지 않고 대개 일정한 추이를 나타내고 있다.



<그림 16> 노반부의 지중 진동속도

<그림 16>은 각 시험조건별 진동속도를 나타내었다. 속도계의 측정시 다소의 측정오류로 인해 활용 가능한 3개의 데이터를 사용하여 도시하였다. <그림 16>에서 흙노반 단면이 속도값이 가장 크고 노반의 K_{30} 이 11kgf/cm^3 이상일 경우는 노반의 두께가 증가하면 진동속도는 감소하는 것으로 나타났다. 속도계에서 계측된 속도값은 탄성변위와 직접적인 관계가 있으므로 탄성변위도 상대적으로 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

열차의 운행 조건을 고려하여 동적 반복 하중을 받는 철도노반의 거동특성의 분석을 위해 본 연구에서는 현재 철도 강화노반재료로 사용되고 있는 쇄석 재료에 대하여 실내 모형반복실험을 실시하여 동적 하중에 대한 거동특성을 분석하였는데 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 쇄석강화노반의 경우, 실험에서 각 조건별 침하량은 노반두께 보다는 노상의 강성도에 많은 영향을 받으며, 토압량은 노반두께의 영향을 많이 받는 것으로 밝혀졌다.
2. 실험에서의 반복하중에 따른 각 조건별 노반면의 토압량은 $0.12\sim 0.37\text{kgf/cm}^2$, 노상면이 토압량은 $0.1\sim 0.08\text{kgf/cm}^2$ 로 나타났다.
3. 하중이 직접 재하되는 침목을 기점으로 양쪽으로 각각 3번째 침목까지의 하중은 44:21:7의 비율로 분배되는 것을 알 수 있었다.
4. 노반두께가 증가함에 따라 진동속도가 감소하였으며, 노반면과 노상면에서의 진동속도는 각각 $2.3\sim 2.7\text{cm/sec}$ 와 $1.6\sim 2.0\text{cm/sec}$ 로 나타났다.

참고문헌

1. 김용필 외(1997), “지반공학시험법 및 응용”, 세진사.
2. 村本勝己, 關根悦夫(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, pp.31-36.
3. 運輸省 鐵道局, “鐵道構造物等設計標準・同解説 土構造物”, 鐵道總合技術研究所, 1992. 10.