

실내 모형반복실험에 의한 철도노반재료의 성능 평가

Evaluation of Performance of the Railroad Roadbed Material by Model Fatigue Test

황선근¹⁾, Seon-Keun Hwang, 이성혁^{2)*}, Seong-Hyeog Lee, 이시한³⁾, Si-Han Lee, 최찬용³⁾, Chan-Yong Choi

1) 한국철도기술연구원 철도노반방재연구팀장, Research Manager, KRRI.

2) 한국철도기술연구원 철도노반방재연구팀 선임연구원, Senior Researcher, KRRI.

3) 한국철도기술연구원 철도노반방재연구팀 연구원, Researcher, KRRI.

SYNOPSIS : Dynamic fatigue test is carried out using soil model box for the evaluation of performance of three different roadbed materials. Bearing capacity, settlement and mud pumping phenomenon of each roadbed materials as well as penetration of model ballast into the roadbeds are investigated. It was found that settlement of slag and crushed stone roadbed is smaller than the soil roadbed during dynamic fatigue test with same initial conditions.

Keywords : Railroad, Roadbed, Fatigue test, Mud pumping, Settlement

1. 서 론

철도에서 기존 노반의 대부분은 준공된 지 상당한 시일이 경과되어 노후화 되어 있으며, 산업사회의 발달에 따라 수송 물량의 증가함에 따라 기존선은 점차 고속화·고밀화 되고 있어 열차 운행상의 안전 확보를 위해 노반의 지지력 증대가 절실히 요구되고 있다. 그러므로 노반의 지지력 증대를 위한 새로운 강화노반재료 및 공법을 개발함으로써 열차의 안전운행과 궤도 구조물의 내구성을 증대하고 선로 유지 및 보수비용을 절감할 필요가 있다. 특히 실제 현장에서 철도 노반은 열차운행과 같은 동적 반복 하중을 받게 됨으로 이에 대한 노반의 거동특성을 분석할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 국내·외에서 현재 철도 노반재료로 사용되고 있는 고로 슬래그, 쇄석, 화강 풍화토(흙) 등 3종의 재료에 대해 실내 모형반복실험을 실시하여 각 재료의 동적 하중에 대한 거동특성을 분석하였다.

2. 모형실험의 영향 인자 산정

2.1 재하하중의 산정

본 연구의 모형토조시험에 적용된 하중은 표 1과 같은 기본조건을 토대로 하여 하중을 산정하였다.

표 1과 같은 재하하중의 기본 조건을 근거로 하여 모형실험에 필요한 노반의 압력은 그림 1과 같은 순서로 구하였다. 일반적으로 노반 압력은 궤도 구조, 윤중 크기, 열차 속도 등을 고려해야 한다.

열차의 윤중에는 정적 하중과 동적인 주행 윤중이 있으며, 주행 윤중 P_d 는 정적 하중 P_s 에 열차 속도 (V)의 함수인 속도 충격율을 곱하여 구할 수 있다. 속도 충격율은 이음 레일의 경우 $1+0.5V/100$ 으로 되며, 장대 레일의 경우 $1+0.3V/100$ 으로 된다(단, 속도 충격율은 최대 1.8로 한다).

또 레일의 강성 등에 의한 하중 분담 효과에 의해 차륜 직하의 침목의 1 체결당 하중은 주행 윤중의 약 40% 정도(50kg 레일, 60kg 레일에서도 거의 동일)이다.

표 1. 모형실험에 적용된 재하하중 조건

항 목	내 용
· 설계속도	120km/h (2급선)
· 축중	25tonf
· 윤중	12.5tonf
· 축간 거리	2.5m
· 대차중심간 거리	12.5m

그림 1에서 나타낸 방법으로 노반압력을 계산하면 주행윤중(P_d)과 침목하중(P_R)은 (식 1)과 (식 2)로 표현할 수 있으며 충격계수를 고려한 주행윤중 P_d 는 17tonf, 침목하중(P_R)은 6.8tonf으로 계산되었다.

- 주행윤중(P_d) (정적 윤중 : 12.5tonf, 속도 : 120km/h)

$$P_d = P_s (1+i) = P_s (1+0.3V/100) = 17.0\text{tonf} \quad (\text{식 } 1)$$

- 침목하중(P_R)

$$P_R = 17.0 \times 0.4 = 6.8\text{tonf} \quad (\text{식 } 2)$$

- 노반압력(P_r)

$$P_r = P_R / A \quad (\text{침목저면 단면적}) \quad (\text{식 } 3)$$

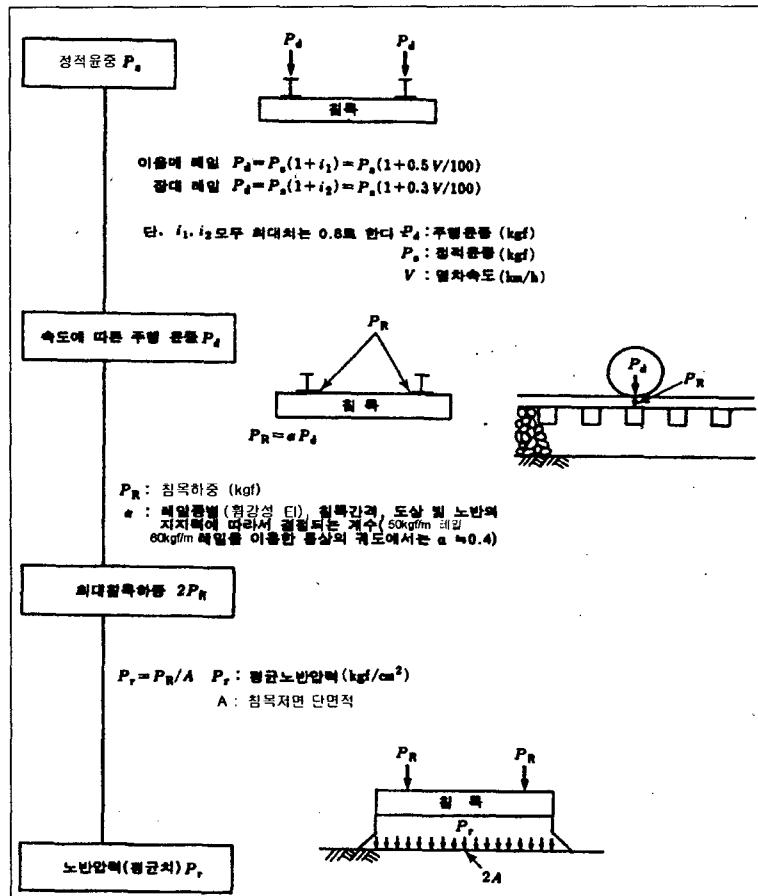


그림. 1 철도 노반 압력 산정법

2.2 재하 진동수 산정

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

$$d = V \cdot T$$

$$\therefore T = \frac{d}{V} \quad (\text{식 } 4)$$

여기서 재하진동수 $f = 1/T$ 이므로

$$f = 1/T = V/d \quad (\text{식 } 5)$$

가 된다.

위의 식으로부터 계산된 재하 진동수는 9.6Hz로 약 10Hz가 되지만, 본 실험에서는 하중 재하장치의 용량을 고려하여 재하 진동수를 11Hz로 하였다.

2.3 반복재하횟수의 산정

본 연구의 모형실험에서 강화노반 재료를 사용하여 조성한 노반에 가해지는 동적 반복재하횟수의 산정을 위해서는 국내 철도에서 열차운행에 따른 연간 통과톤수의 산정이 선행되어야 한다. 연간 통과톤수 산정에 있어서 기준이 된 구간은 경부선 천안~조치원 구간으로서, 이 구간의 연간 통과톤수는 30,355,327tonf으로 약 30MGT 정도 된다.

본 모형시험에서는 모든 통과톤수를 축중 25tonf으로 가정하고 차축 4개가 노반에 가해지는 하중을 1 Cycle로 가정하였으며, 이와 같은 조건으로 통과톤수 30MGT에 대하여 본 실험에 적용한 최대 반복재하횟수는 약 100만회로 계산되었다.

3. 실험 방법

3.1 실험 재료

본 실험에 사용된 노반재료로는 양질의 화강 풍화토, 고로 슬래그 및 쇄석 등 3종의 재료를 사용하였다. 화강 풍화토는 철도 노반 공사 현장에서 성토재로 쓰이는 재료를 사용하였으며, 고로 슬래그는 포항 제철에서 선철을 제조하는 과정에서 산업부산물로 발생한 것으로서 최대입경이 25mm인 것을 사용하였다. 쇄석의 경우는 고속전철의 노반 공사에 보조기층 재료로 사용되는 것으로서 최대입경이 40mm인 재료이다.

표 2에는 각 노반재료의 역학적 특성을 나타낸 것이며, 그림 2는 입도분포곡선을 나타내었다. 표 2에서 보는 바와 같이 각 재료별 최대건조밀도는 쇄석의 경우가 2.45tonf/m^3 으로 가장 큰 값을 보이며, 상대적으로 최적함수비가 7.65%로 가장 적은 값을 보였다.

표 2. 모형실험용 노반재료의 기본 물성치

노반재료	다짐 시험		입도 시험					비중
	최적함수비 (%)	최대건조밀도 (γ_{dmax})	D ₁₀ (mm)	Cu	Cg	No. 40체 통과량	No. 200체 통과량	
화강 풍화토	10.93	1.94tonf/m^3	0.16	11.87	0.96	42.44	12	2.68
고로 슬래그	9.55	2.15tonf/m^3	0.25	25.2	0.91	-	-	2.81
쇄석	7.65	2.45tonf/m^3	0.80	13.5	2.35	-	-	2.92

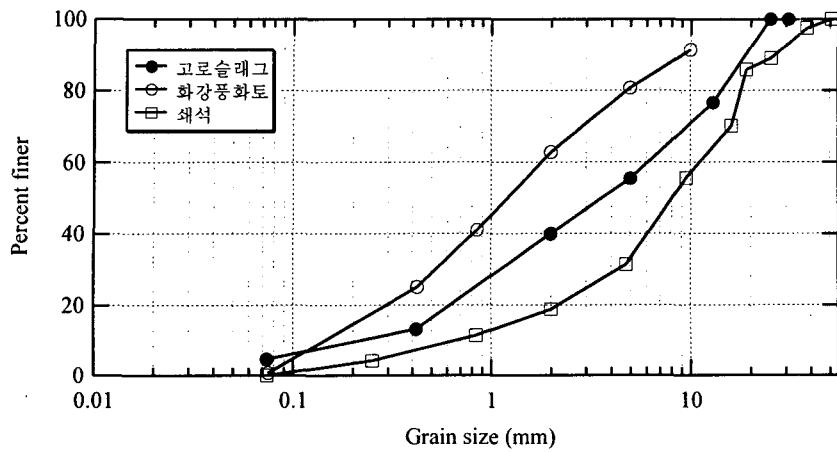


그림 2. 노반 재료의 입도 분포 곡선

3.2 모형토조 및 하중재하장치

그림 3과 그림 4에는 본 연구에 사용된 모형토조의 개략도 및 모형토조시험장치 전경을 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 모형토조는 크게 내측 실린더와 외측 4각형 박스로 나누어져 있으며, 동적 하중재하시 노반의 거동 특성 관찰을 위해 모두 투명한 아크릴로 제작하였다. 내측 실린더는 그림 4에서 보인 바와 같이 직경 48cm, 높이 55cm로서 5kgf/cm²의 압력에 견딜 수 있도록 제작하였고 실린더 하부는 하중 재하시 충격을 고려하여 강철판으로 되어 있으며, 시료의 포화를 위한 침수 및 배수를 원활하게 하기 위하여 강철판에 구멍을 뚫었다. 외측 4각형 박스는 그림 3에 보인 바와 같이 측면에 밸브를 달아 정수위 투수시험과 동일한 원리로서 일정 수위를 유지하면서 내측 실린더에 물이 공급되도록 하였다.

모형노반에 동적 반복하중을 재하하기 위해 사용된 하중재하장치는 영국 ESH사의 시험장비로서 재하프레임, 로드셀, 변위 센서, 지그로 구분되어 있다. 반복하중 재하시 장치 본체의 Stroke의 변위량은 재하장치와 연결된 Control box에 자동적으로 기록되도록 하였다(그림 4 참조).

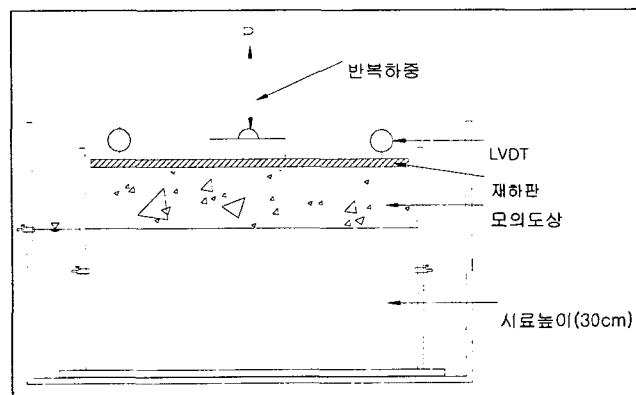


그림 3. 모형토조의 개략도

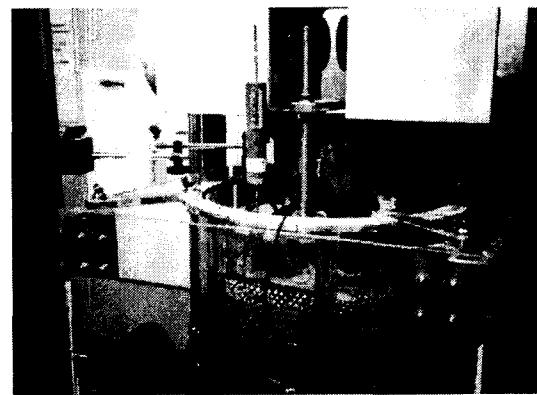


그림 4. 모형토조장치 전경

3.3 모형노반의 조성

실험을 위한 모형노반의 조성은 먼저 실험재료인 고로 슬래그, 화강 풍화토, 쇄석을 표 2에 나타낸 다짐시험 결과를 참고로 하여 각 재료별 최대건조밀도의 70%, 80%, 90%의 3가지 상대다짐도로 모형노반을 조성하였다. 노반은 시료를 최적함수비 상태로 모형토조에 넣은 후 Vibrator를 사용하여 3층(각 층 10cm)으로 나누어 최종 노반두께가 30cm가 되도록 다짐을 실시하였다.

일반적으로 철도 노반의 연약화 요인 중 가장 큰 요인은 분니(mud pumping)현상으로서 분니는 크게 노반내의 니토의 상승으로 인한 노반분니와 열차가 운행함에 따라 도상의 파쇄로 인해 발생하는 도상분니로 나눌 수 있다.

본 연구에서는 이와 같은 분니현상 중 도상분니를 배제한 순수 노반분니만을 실내에서 재현하기 위하여 모의 도상을 사용하였다. 모의 도상으로 사용된 재료는 직경 약 9.5mm의 쇠구슬을 사용하였는데 이 쇠구슬은 모형노반을 조성한 후 노반 표면에 약 4cm 두께로 포설하였다.

모의 도상의 상부에는 반복 하중 재하시에 노반에 등분포 하중이 작용할 수 있도록 원형 강철판을 장착하여 이 강철판과 하중재하장치의 지그가 맞물린 상태에서 하중이 재하되도록 하였다. 실험 준비가 완료되면 앞서 언급한 하중, 재하횟수, 진동조건에 맞게 하중재하장치를 가동하여 노반에 반복하중을 재하하였다.

3.4 실험조건

본 연구에서는 표 3과 같이 12가지 실험조건을 설정하여 실험을 실시하였다. 표 3에서 보는 실험 조건 중 수침 조건의 경우는 분니현상이 발생되는 가장 큰 요인이 노반내로의 우수 침투 및 지하수 등의 물의 영향이 가장 크므로 이를 실내시험에서 재현하기 위하여 시료를 수침시킨 상태에서 실험을 실시하는 수침 조건과 최적 함수비로 다진 상태에서 하중을 재하하는 비수침 조건으로 나누었으며, 다짐조건의 경우는 상대다짐도에 따른 모형노반의 거동특성 분석을 위해 각 시료별로 3가지의 상대다짐도(70%, 80%, 90%)로써 다짐을 하여 실험을 실시하였다.

또한 모형실험 전·후에는 CBR 실험이나 콘지지력 시험을 실시하여 동적하중이 작용된 이후의 각 재료별 노반지지력의 변화를 측정하였으며, 실험 중에는 하중의 반복재하 횟수에 따른 모의 도상의 관입량 및 노반의 침하량을 측정하였다.

표 3. 모형토조 실험조건

실험번호	하중(tonf)	수침조건	주파수	다짐조건	시료
Test 1	6.8	비수침	11Hz	70%	고로 슬래그
Test 2	6.8	비수침	11Hz	80%	
Test 3	6.8	비수침	11Hz	90%	
Test 4	6.8	수 침	11Hz	90%	
Test 5	6.8(13일 양생)	수 침	11Hz	90%	
Test 6	6.8	비수침	11Hz	80%	쇄석
Test 7	6.8	비수침	11Hz	90%	
Test 8	6.8	수 침	11Hz	90%	
Test 9	6.8	비수침	11Hz	80%	흙 (화강풍화토)
Test 10	6.8	비수침	11Hz	90%	
Test 11	6.8	수 침	11Hz	90%	
Test 12	6.8(14일 양생)	수 침	11Hz	90%	

4. 실험결과 및 분석

4.1 모의 도상의 관입 및 노반의 거동 특성

반복하중을 재하하면서 각 시료별 모의도상의 노반내 관입 정도 및 분니현상의 발생 유무를 중심으로 한 모형노반의 거동을 육안으로 관찰하였다. 흙 노반의 경우 비수침 조건에서 상대다짐도 80%의 경우 반복재하횟수 약 35만회부터는 동적재하에 의한 Suction작용으로 인하여 세립분이 하중재하판 위로 상승하였다. 상대다짐도 90%인 흙노반 경우에는 80%과는 달리 세립분이 노반표면으로 상승하지는 않았다. 수침조건에서 실험 종료 후의 흙노반 표면은 세립분과 물이 뒤섞여 곤죽상태를 나타냈다(그림 5 참조).

모의도상의 관입량 측정 결과 흙 노반은 실험조건별로 확연한 차이를 보였다. 즉 상대다짐도가 클수록 모의도상의 관입량은 작게 나타났는데 상대다짐도 90% 수침조건의 경우 관입량이 최대 4cm정도로 나타나 비수침 조건의 2cm 정도에 비해 약 2배 정도 노반내로의 모의도상 관입이 크게 나타났다. 고로 슬래그의 경우 그림 6에 나타낸 바와 같이 대부분의 실험 조건에서 대체적으로 1~2cm 정도의 관입량을 나타내어 동일 조건의 흙노반에 비해 모의도상의 관입이 적게 나타났다. 분니현상의 경우는 수침조건에서 실험 종료 후 슬래그 노반의 중앙부에서 약간의 세립분이 상승되었으나 흙노반에 비해서는 세립분의 상승량이 적었다. 쇄석의 경우는 실험 후의 모의 도상의 관입 정도 및 세립분의 상승량은 고로 슬래그의 경우와 비슷하게 나타났다. 비수침조건에서는 모든 재료에 대해서 세립분의 상승은 거의 일어나지 않았다.



그림 5. 모의도상의 노반내 관입 모습(흙)

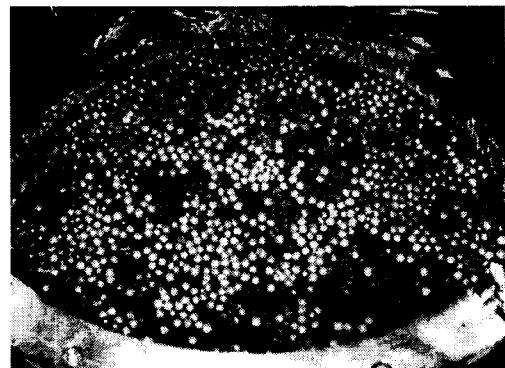


그림 6. 모의도상의 노반내 관입 모습(슬래그)

4.2 지지력의 변화

본 연구에서는 동적하중재하에 따른 노반의 강도변화를 측정하기 위해 모형노반에 하중재하 전과 하중재하 후에 지지력 실험을 실시하였는데 그림 7에 지지력 실험 장면을 나타냈고 표 4에 지지력 실험결과를 보였다. 지지력 측정시 모든 조건에 대하여 CBR 실험을 실시하여 지지력을 측정하려 하였으나 표 4에서 보는 바와 같이 몇 가지 조건에서는 모형노반의 지지력이 너무 연약하여 CBR 실험이 불가능하여 콘지지력 실험을 실시한 다음 (식 6)을 이용하여 콘지지력 값을 CBR 값을으로 환산하였다.

$$\text{현장 CBR} = 0.5 \times \text{콘지지력}(q_c), \quad \text{실내 CBR} = \text{현장 CBR} \times 0.67 \quad (\text{식 } 6)$$

표 4. 모형실험 노반의 지지력 변화

시료	상대다짐도	실내 CBR 값 (%)	
		하중재하 전	하중재하 후
고로 슬래그	70% (비수침)	6*	82
	80% (비수침)	19*	99
	90% (비수침)	29	99
	90% (수침)	45	107
	90% (13일 양생)	22	61
흙	80% (비수침)	12*	9*
	90% (비수침)	20*	17*
	90% (수침)	12*	8*
	90% (14일 양생)	3*	-
쇄석	80% (비수침)	20	60
	90% (비수침)	26	78
	90% (수침)	14	68

* 콘 지지력 값을 환산한 CBR값

표 4에서 보면 고로 슬래그와 쇄석의 경우 반복하중이 재하된 후 노반의 지지력은 상당히 많이 증가하였으나, 흙 노반인 경우 반복하중으로 인해 노반의 지지력이 감소하는 것을 알 수 있었다. 고로 슬래그노반의 경우 하중재하 후에 지지력이 하중재하 전에 비해 최대 약 14배(70% 비수침조건)까지 지지력이 증가하였으며, 쇄석노반은 6최대 약 5배(90% 수침조건)까지 증가하였다. 흙노반인 경우에는 다른 두 재료와는 달리 15%~34% 까지 하중재하 후 노반의 지지력이 감소되고 있는 것을 알 수 있는데 비수침 조건에서도 반복하중이 작용함에 따라 지지력이 감소되는 것을 보아 현재 시공되고 있는 양질의 성토재로 사용하더라도 노반의 장기적 측면에서는 노반의 연약화를 촉진할 것으로 판단된다.

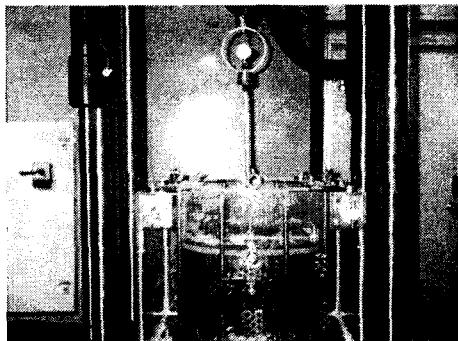


그림 7. 지지력 실험 장면

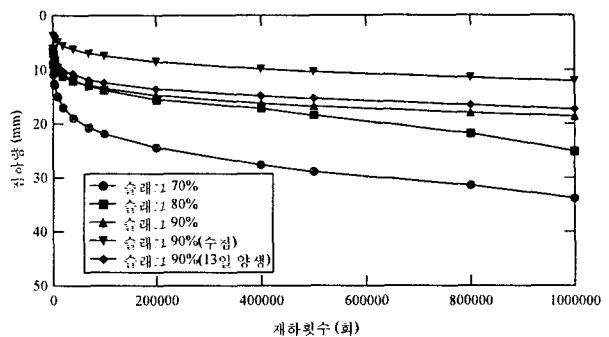


그림 8. 재하횟수에 따른 노반의 침하량(슬래그)

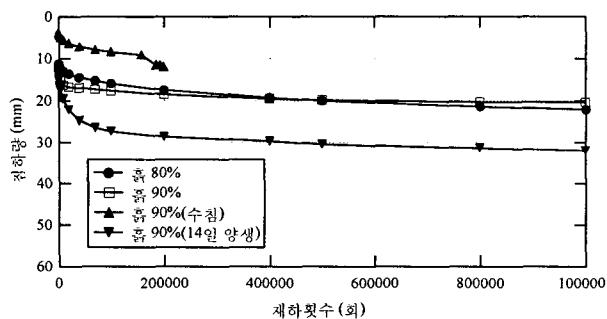


그림 9. 재하횟수에 따른 노반의 침하량(흙)

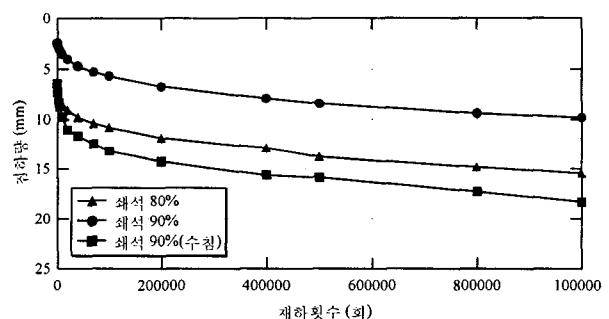


그림 10. 재하횟수에 따른 노반의 침하량(쇄석)

4.3 하중재하횟수에 따른 침하량

그림 8 ~ 그림 10에는 각 시료별 실험조건에 따른 하중재하횟수와 침하량 관계를 나타냈다. 그림 8의 슬래그에 대한 실험결과를 보면 상대다짐도 70%일 때 가장 많은 침하가 발생한 것을 알 수 있으며, 다짐도가 증가함에 따라 점차적으로 침하량이 감소하는 것을 알 수 있었다. 수침과 비수침 조건에서 수침조건의 침하가 클 것으로 생각되었으나, 본 실험에서는 수침상태의 침하량이 상대적으로 적게 발생하였으며, 이는 수침 후의 강도가 비수침에 비해 큰 경우는 하중 조건이 동일하여도 침하는 작아지게 된다. 고로 슬래그의 양생 13일 후의 침하량은 상대다짐도 90% 비수침 조건일 때 보다 침하가 적게 발생하고 있어 고로 슬래그를 철도 노반재료로 활용할 경우 노반이 장기적으로 수침상태로 있는 경우 노반 연약화를 방지할 수 있을 것으로 판단되며, 이는 고로 슬래그의 고유 특성인 물과 반응하면 경화되는 수경성 때문인 것으로 사료된다.

흙노반의 실험결과를 나타낸 그림 9를 보면 비수침 조건에서 상대다짐도 80%일 때가 상대다짐도 90%의 경우보다 최종 침하량은 크지만 동일 조건의 슬래그 경우처럼 큰 차이를 보이지는 않았다. 양생 14일의 결과를 보면 최종 침하량이 약 30mm 정도로 나타나 다른 조건에 비해 침하량이 큰 것을 알 수 있다. 이와 같은 실험결과를 고려해 볼 때 양질의 성토재료로서 철도 노반을 시공한다하더라도 우수 침

투 및 지하수 등으로 인해 분니현상이 발생하고 노반의 연약화를 촉진할 것으로 판단된다.

쇄석노반의 실험결과를 보면 상대다짐도 90%인 수침조건의 침하량이 가장 많이 발생하였으며, 상대다짐도가 증가함에 따라 침하량의 감소폭은 흙 노반에 비해 상대적으로 크게 나타났으며, 동일 조건에서의 침하량은 쇄석이 고로 슬래그나 흙에 비해 침하가 적게 발생하는 것을 알 수 있었다.

5. 결 론

실제 현장에서 열차운행과 같은 동적 반복 하중을 받는 철도노반의 거동특성의 분석을 위해 본 연구에서는 국내·외에서 현재 철도 강화노반재료로 사용되고 있는 고로 슬래그, 쇄석, 화강풍화토(흙) 등 3종의 재료에 대해 실내 모형반복실험을 실시하여 각 재료의 동적 하중에 대한 거동특성을 분석하였는데 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 모형토조실험에서 하중재하 후의 각 노반재료별 모의 도상의 관입량 측정 결과 흙 노반의 경우 동적하중 재하로 인한 suction 작용으로 인해 세립분이 노반 표면위로 상승하여 분니현상이 발생함을 관찰할 수 있었으며, 최대 4cm 정도의 관입량을 나타냈다. 고로 슬래그 및 쇄석의 경우는 약 1~2cm 정도의 모의 도상의 관입량을 나타내어 동일 조건의 흙 노반에 비해 상대적으로 모의도상의 관입량이 적었으며, 세립분의 상승도 흙노반에 비해 적었다.
2. 모형노반의 지지력 실험에서는 고로 슬래그 노반은 하중재하 후의 지지력이 하중재하 전에 비해 최대 약 14배, 쇄석노반은 최대 약 5배까지 증가하였으나 흙 노반의 경우는 두 재료와는 달리 하중재하 후의 지지력이 하중재하 전에 비해 15%~34%까지 감소하였다.
3. 각 재료별 노반의 침하량 측정 결과 고로 슬래그의 경우 상대다짐도가 클수록 침하량은 작게 나타났으며, 특히 양생 13일 조건의 침하량은 상대다짐도 90% 비수침 조건보다 침하량이 작게 나타나 고로 슬래그의 고유 특성인 수경성에 의한 강도 증가현상을 확인할 수 있었다.
4. 흙 노반의 침하량은 상대다짐도에 따른 침하량의 차이는 동일 조건에서의 슬래그의 경우처럼 크지는 않았고 양생 14일 실험조건의 침하량은 약 30mm 정도로서 다른 조건보다 침하량이 크게 나타났다.
5. 쇄석노반의 경우는 상대다짐도 90% 수침조건인 경우가 침하량이 가장 크게 나타났으나, 동일 조건에서 고로 슬래그 및 흙 노반보다 상대적으로 침하량이 적게 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關する検討”, RTRI REPORT, Vol. 12, No. 4, pp.31-36.
3. Braja M. Das(1994), "Principles of Geotechnical Engineering".
4. Terzaghi and Peck(1948), "Soil Mechanics in Engineering Practice".