

점성토의 회복 및 영구변형 특성 평가

Evaluation of the Resilient and Permanent Behaviors of Cohesive Soils

사공명† · 김대연* · 최찬용**

Myung Sagong · Dae-hyeon Kim · Chan-Yong Choi

Abstract Resilient modulus has been used for characterizing the stress-strain behavior of subgrade soils subjected to traffic loadings. With the recent release of the M-E Design Guide, highway agencies are further encouraged to implement the resilient modulus test to improve subgrade design. The subgrade design for the trackbed, however, is primarily relying on the static test results such as K_{30} and deformation modulus, E_v . Therefore applicability of the resilient modulus for the design of trackbed needs to be evaluated. In this study, physical property tests, unconfined compressive tests and resilient modulus tests were conducted to assess the resilient and permanent strain behavior of 14 cohesive subgrade soils. A predictive model for estimating the resilient modulus is proposed based on the results of unconfined compressive tests and tangent elastic modulus, unconfined compressive strength, failure strain, secant modulus at peak, and yield strain. The predicted resilient moduli using the predictive models compare satisfactorily with measured ones. Although the permanent strain occurs during the resilient modulus test, the permanent behavior of subgrade soils is currently not taken into consideration.

Keywords : Resilient Modulus, Traffic Load, Permanent Deformation, Subgrade Soils

요 지 교통하중이 작용하는 노반의 응력-변형을 간의 상관성의 특징을 나타내기 위하여 회복탄성계수가 사용되어왔다. 최근 도로의 경우 노반의 설계에 있어 AASHTO에서 제안된 역학적-경험적 설계기이드에 따라 회복탄성계수의 사용이 더욱 권장되는 실정이다. 이에 비해 국내 철도의 노반설계에 있어서는 정적실험 결과인 K_{30} 이나 변형계수를 사용하고 있는 실정이다. 따라서 철도노반의 설계에 있어 회복탄성계수의 적용 가능성에 대한 평가가 이루어져야 할 것이다. 본 연구에서는 14종의 점성토 흙에 대하여 회복 및 영구변형 특성에 대한 평가를 위하여 기본 물성실험, 일축압축실험 그리고 회복탄성계수 실험을 수행하였다. 또한 일축압축 실험결과와 점선탄성계수, 일축압축강도, 파괴시 변형을 침투강도에서의 합선탄성계수와 항복변형을 바탕으로 회복탄성계수 추정을 위한 예측모델이 제안되었다. 본 연구에서 제안된 예측모델은 실험결과와의 비교시 만족할 만한 값을 보이는 것으로 확인되었다. 다만 회복탄성계수 실험시 발생하는 영구변형에 대해서는 현재 고려하고 있지 않다.

주 요 어 : 회복탄성계수, 교통하중, 영구변형, 노상토

1. 서 론

국내 철도 선로의 총 연장은 6,845km이며 영업거리는 3,140km(2003년 기준)으로 연 평균 2.1%씩 증가하고 있으며 국가 기간 교통망 계획 및 21세기 국가 철도망 구축 기본

계획 수립에 따르면 영업연장은 지속적으로 증가할 전망이다. 이와 같이 철도 인프라의 증가에도 불구하고 국내에서 토공 노반 설계 및 해석방법은 정적하중 기반으로 수행되고 있다. 국내 철도 현장에서 노반 지지력을 일반철도와 고속철도 모두 재하실험의 일종인 평판재하 시험으로 노반의 지지력을 평가하고 있다.

이와 같이 철도 인프라의 증가에도 불구하고 국내에서 토공 노반 설계 및 해석방법은 정적하중 기반으로 수행되고 있는데 국내 일반철도의 노반 설계기준으로는 상부 노반 재료

† 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원
E-mail : rockcore@krti.re.kr

TEL : 031-460-5363 FAX : 031-460-5319

* 비회원, Indiana State Department of Transportation, Research Division

** 정희원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원

에 대해서는 $K_{30} > 11 \text{kgf/cm}^3$ 이며 하부 노반재료에 대해서는 $K_{30} > 7 \text{kgf/cm}^3$ 이다[1]. 또한 고속철도의 경우 변형계수를 적용하여 상부노반 재료의 경우 $E_{v2} \geq 80 \text{MN/m}^2$, $E_{v2}/E_{v1} < 2.3$, 하부노반 재료의 경우 $E_{v2} \geq 60 \text{MN/m}^2$, $E_{v2}/E_{v1} < 2.7$ 이 적용된다.

이상의 정적 재하시험 방법은 교통하중과 같이 반복적인 거동을 반영하지 못하는 단점을 가지고 있다. 또한 실제 현장에서 평판재하시험을 실시하여, 원지반, 노상, 보조기층 등 각 층의 탄성계수를 산정하여 다층에서의 평판재하시험 결과를 Burmister's의 2층 이론을 적용한 역산으로부터 각 층의 탄성계수를 산정하는 방법을 제시하였다[2]. 그러나, 이로부터 구한 탄성계수는 비선형성을 나타내지 못하는 등가선형 탄성계수이므로 설계단계에서의 회복탄성계수와 비교하기에는 문제가 있다.

철도분야에서 회복탄성계수를 이용하여 도상자갈의 두께를 결정하는 설계방법이 제안되었다[3,4]. 설계도표에는 열차하중과 반복재하횟수를 반영하였으며 노상 층에 대한 특성은 회복탄성계수, 흙의 압축강도, 그리고 흙의 종류를 고려하여 도상자갈 두께를 결정하는 설계도표가 개발되었다. 이후 강화노반 재료의 탄성계수를 평가하기 위하여 CBR 모델을 이용하여 실용적이며 쉽게 회복탄성거동을 구현할 수 있는 대체 회복탄성계수 방법이 제안되었다[5]. 이외에 회복탄성계수 시험법으로 크로스홀 시험과 실내 공진주시험이 도입되었으며[6] 강화노반에 주로 사용되는 쇄석 재료와 상,하부노반의 주재료인 SM계열의 토사 재료에 대한 동적 물성치를 측정하였다. 또한 토공노반 설계방법을 역학적인 설계방법으로 회복탄성계수를 적용하는 설계방법에 대하여 연구가 진행 중에 있다[7,8].

도로분야에서는 AASHTO에서 합리적인 설계 및 해석을 위해 회복탄성계수를 설계입력 물성값으로 이용한 해석을 적용하면서 회복탄성계수의 중요성이 확대되었다. 회복탄성계수는 교통하중의 반복재하 조건에서 노반의 탄성거동 특성을 가장 합리적으로 나타내는 물성값으로 인정받고 있다. 이와 같은 회복탄성계수를 측정하기 위하여 매우 복잡하고 까다로운 시험절차와 고도의 숙련된 전문기술을 요구하며 고가의 시험장치가 필요한 단점을 가지고 있다. 따라서 실용성 및 실무적 측면에서 반복재하 방법에 의한 실험을 대체할 수 있는 시험법 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 도로포장 분야에서 노상도 및 보조기층 재료의 회복탄성계수를 결정하기 위하여 동적 시험방법인 자유단 공진주시험과 공진주비틀전단 시험을 이용한 대체 시험법을 제안한바 있다[9,10].

이와 같이 철도 및 도로분야에 있어서 회복탄성계수의 적용에 대한 관심이 제고되는 상황이므로 본 논문에서는 노반

재료의 회복거동에 대한 평가 및 실험결과를 바탕으로 점성토 및 실트질 흙에 대한 회복탄성계수 예측 모델을 도출하고자 한다. 이러한 결과를 바탕으로 철도노반 설계 입력자료의 도출이 가능 할 것이며, 설계자들에게 회복탄성계수의 추정 이 가능할 것이다.

2. 회복탄성계수

2.1 회복탄성계수의 정의

회복탄성계수는 노반의 응력-변형률 특성을 나타내는 중요한 변수중의 하나로서 도로 및 철도노반 설계에 있어 중요한 입력변수이다. 회복탄성계수는 교통하중 작용시 비선형적인 노반의 거동을 모델링하기 위하여 일련의 조합된 구속압과 축차응력 조건을 가하였을 때 발생하는 회복 가능한 변형률을 바탕으로 한다 (Fig. 1 참조). 회복탄성계수는 다음과 같이 정의 된다.

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

여기서 M_r 은 회복탄성계수이며 σ_d 는 반복되는 축차응력, 그리고 ϵ_r 는 회복가능한 축 변형율을 나타낸다. 식(1)에서 기본적인 가정은 가해진 축차응력이 흙의 전단응력 한도 이내 인 경우 수많은 반복하중이 작용하더라도 회복 가능한 변형률만이 발생한다는 것이다. 그러나 이러한 가정은 이동하중이 작용하는 모든 흙에 대해서 동일하게 적용할 수는 없다. 예를 들어 일부 점착력이 있는 흙의 경우 일반적인 이동하중 (예를 들면 80kN)의 하중범위에서 M_r 실험이 수행되는 단계에서도 영구 변형이 발생하는 사례가 있다. 식 (1)에서 추론할 수 있듯이 회복 가능한 변형이 클수록 회복탄성계수는 작은 값을 보이며 이때 노반의 상태는 연약한 경우이다. 이러한 조건은 결국 회복탄성계수가 적으면서 연약한 노반의 경우 반복하중에 따른 팽팽이 발생할 수 있음을 나타낸다.

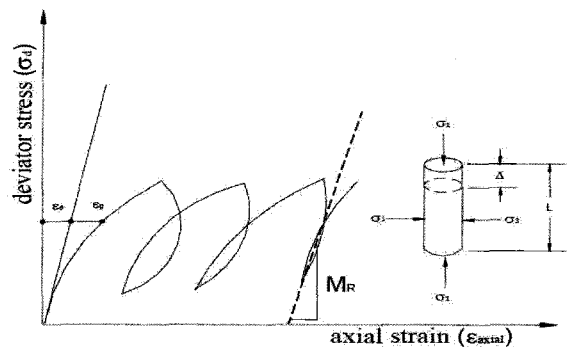


Fig. 1. Definition of resilient modulus from the repeated axial load

2.2 회복탄성계수 실험 - AASHTO T 307

AASHTO T 274[11]와 T 294-94[12]에서 업그레이드 된 AASHTO T 307[13]에는 회복탄성계수 결정을 위한 표준시험방법이 기술되어 있다. 대부분의 기존 논문들이 AASHTO T 294-94와 AASHTO T 274를 중심으로 다루고 있으며 일부 논문에서 AASHTO T 307을 다루고 있다[14]. AASHTO T 307 기준에는 현장조건이 사전 조정(conditioning) 및 표준시험을 통하여 재현되도록 한다.

회복탄성계수 실험 시 사전 조정은 본 실험을 실시하기전 공시체와 다공판 사이의 간격이 발생치 않도록 하기 위하여 예비로 하중을 가하는 것을 의미하며, 사전조정 이후에 15단계의 본 실험이 실시된다. 조정은 구속압 41.4 kPa 조건에서 축차응력 27.6kPa를 500에서 1000회 적용하는 것이며 본 실험에서는 세 단계의 구속압과(13.8, 27.6, 47.4kPa) 다섯 단계의 축차응력(13.8, 27.6, 41.4, 55.2, 69kPa)을 적용하여 결국 15단계의 하중이 적용된다(조정단계를 포함하면 16 단계의 하중이 작용). Fig. 2는 16 단계 중 6 단계까지 탄성 및 소성 변형률에 대한 축차응력을 나타내고 있다.

Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 소성 변형률은 하중 사이클의 증가에 따라 증가한다. AASHTO T 307에서는 조립토 흙을 타입 1로 그리고 점성토 흙은 타입 2로 구분한다. 본 논문에서의 실험조건은 두 종류의 흙에 대하여 동일한 조건을 적용하였으며 배수 조건에서만 수행되었다.

AASHTO T 307에서는 M_r 값의 산정에 있어 실험체의 원 길이를 사용하도록 규정되어 있다. 작은 변형이 발생하는 흙의 경우 이러한 방법은 적용가능 할 것이다. 그러나 큰 값의 소성변형이 발생하는 경우 변형이 발생한 실험체의 길이와 수정된 면적을 사용하는 것이 보다 정확한 M_r 값의 산정에 있어 도움이 될 것이다. 또한 반복 삼축 실험에 있어 회복 가능한 변형률 수준은 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 수준으로서 실험체 변형의 측정 정도에 있어 이상의 수준을 유지하여야 할 것이다.

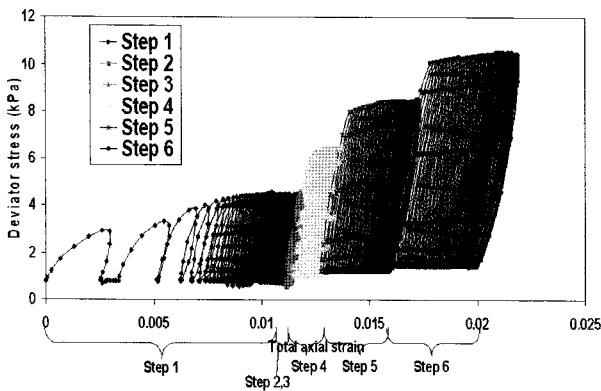


Fig. 2. Test results of resilient modulus

일반적으로 노반의 회복탄성계수는 축차응력, 구속압, 함수비, 건조단위중량, 다짐방법, 텍스토로피와 동결융해 사이클에 의존적이다. 구속압이 동일한 조건에서 점성토의 회복탄성계수는 축차응력의 함수이며 회복탄성계수는 구속압이 증가함에 따라 증가한다. 점성토의 경우 낮은 축차응력 조건에서 반복하중이 작용하는 경우 축차응력의 증가에 따라 회복탄성계수는 상당한 감소를 보이며 반대로 축차응력이 큰 조건에서 회복탄성계수는 소량 감소하거나 거의 일정한 값을 보인다.

함수비는 조립토의 경우에는 회복탄성계수에 비교적 영향이 적은 것으로 나타났으며, 점성토의 경우 상당한 영향이 관측되었다. 점성토의 경우 함수비가 높을수록 회복탄성계수는 작은 값을 나타내었다.

3. 회복탄성계수의 적용

3.1 도로 설계에 있어 적용되는 회복탄성계수의 적용

도로 노반설계의 경우 1986년 AASHTO에서 제안된 포장 구조 설계 가이드라인이 제안된 이후 약 20년 동안 도로의 노반 설계에 있어 반복하중에 의한 삼축압축실험을 통하여 회복탄성계수의 사용이 시작되었다. 또한 정확하며 손쉬운 방법을 통한 회복탄성계수의 도출을 위하여 상당히 많은 연구가 수행되어왔다. 최근 들어 신설 혹은 복구되는 포장구조를 위하여 제안된 M-E (Mechanistic- Empirical) 설계 가이드로 인하여 도로 설계에 있어 회복탄성계수의 적용은 더욱 장려되고 있는 실정이다.

M-E 설계 가이드[15]는 포장 설계와 해석값의 입력에 있어 계층적인 설계 접근법을 사용하고 있다. M-E 설계 가이드는 중요도와 정확도에 따라 Level 1, 2, 3의 입력 단계가 있다. 이 중 가장 정확도가 높은 단계는 Level 1이며 이 단계에서는 필요한 재료 계수 값인 k_1, k_2, k_3 가 반복 삼축압축 실험을 통하여 얻을 수 있다. 따라서 Level 1 조건에서의 입력값을 얻기 위해서는 Level 2와 3에 비해 훨씬 더 많은 시간과 노력이 필요하다. Level 1 설계는 교통량이 많은 주간선 고속도로에 적용하는 것이 타당할 것이다. Level 2설계는 중간 정도의 정확도를 제공하며 현존하는 AASHTO 가이드와 어느 정도 유사한 결과를 도출하는 정도이다. Level 2 설계는 Level 1을 위한 실험장비가 존재하지 않을 경우 사용될 수 있다. Level 3은 가장 정확도가 낮은 단계이다.

기존의 많은 연구에서는 반복삼축실험 혹은 CPT, DCPT와 같은 실험에서 측정된 측정값과 M_r 간의 상관성을 제시하였다. 회복탄성실험의 복잡성과 어려움으로 인하여 변형률이 0.1% 미만인 작은 변형률 단계에서 일축압축실험, 정적인 삼

축실험이 반복삼축압축 실험의 대체 방법으로 제안되었는데, 가압하는 구속압과 축차응력의 횡수를 줄이는 방법을 통하여 간편화된 회복탄성 실험절차가 제안되었다.

3.2 노반의 회복탄성계수 예측 모델

노반의 회복탄성계수에 대한 예측을 위하여 여러 모델이 제안되었다. 조립토에 대한 최초 예측 모델은 K- θ 모델[16]로 다음과 같다.

$$M_r = k_1 \theta^{k_2} \quad (2)$$

여기서 k_1 과 k_2 는 회귀계수이며 θ 는 주응력의 합이다. 식 (2)는 회복탄성계수를 구속압의 함수로 표현하고 있으며 축차응력의 효과에 대해서는 고려하고 있지 않다. 점성토에 대해서는 K- σ_d 모델이 있으며 식의 형태는 식 (3)과 같다.

$$M_r = k_1 \sigma_d^{k_2} \quad (3)$$

여기서 σ_d 는 축차응력을 나타낸다. K- σ_d 는 축차응력만을 고려하고 있다.

축차응력과 구속압을 모두 고려하기 위하여 Uzan[17]은 K- θ 나 K- σ_d 보다 일반적인 모델을 제안하였다. 제안된 모델은 식 (4)와 같다.

$$M_r = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{p_a}\right)^{k_3} \quad (4)$$

여기서 k_1, k_2, k_3 는 회귀계수, θ 는 주응력의 합, p_a 는 기준값으로 100kPa \approx 1 kgf/cm², σ_d 는 Pa와 같은 단위를 적용하는 축차응력이다.

M-E 설계 가이드에서는 식 (4)와 유사한 모델을 사용하여 회복탄성계수를 추정하도록 제안하고 있으며 이때 모델의 형태는 식 (5)와 같다.

$$M_r = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3} \quad (5)$$

여기서 τ_{oct} 는 octahedral shear stress를 나타낸다. k_1 과 같은 비선형 탄성회귀계수는 AASHTO T 307을 근거로 실험 데이터에 대한 비선형 회귀분석을 통하여 구할 수 있다. 따라서 식 (3), (4), (5)를 제대로 사용하기 위해서는 실험을 통하여 각 재료의 회귀계수값을 도출하여야 한다.

4. 실내실험

4.1 실험에 사용된 흙의 특성

본 연구에서 사용된 반복삼축압축 실험장비는 Geocomp사

Table 1. Material properties for soils used

Soil	Gravel %	Sand %	Silt %	Clay %	LL %	PI %	AASHTO	USCS
1	26	6.2	A-4	26	26	6.2	A-4	CL-ML
2	26	6.2	A-4	26	26	6.2	A-4	CL-ML
3	16	33	33	18	24.2	14.7	A-6	CL
4	26	6.2	A-4	26	6.2	A-4	A-4	CL-ML
5	0.3	4.8	52.3	42.6	50	23	A-7-6	CH
6	2.6	20.5	52.7	24.2	39	16	A-6	CL
7	8.7	20.6	62.6	8.1	40	15	A-6	CL
8	2.5	23.2	59.8	14.5	43	21	A-7-6	CL
9	3.2	21.5	55.4	19.9	33	16	A-6	CL
10	0.9	19.6	58.1	21.4	28	9	A-4	CL
11	0.3	3.2	60.6	35.9	46	26	A-7-6	CL
12	3	32	41	24	29.8	12	A-6	CL
13	11.5	24.5	45	19	30.5	9.1	A-4	CL
14	2	10	65	23	31	8.5	A-4	CL

에서 제작된 자동화된 삼축압축장비가 사용되었다. 반복축차응력 및 구속압은 유압시스템에 의해 공기압을 이용하여 제어되었으며, 삼축셀에 연결된 LVDT로 탄성변위 및 영구변형이 측정되었다.

본 논문에서는 인디애나 주에서 발견되는 총 14개의 세립의 점토질 흙을 사용하였다. 점성토 흙의 경우 흙쌓기 지반에서는 사용되지 않는 재료이나 땅깁기 구간에서 원지반 조건에서 존재할 수 있는 노반재료이다. 향후 계획되어 있는 호남고속전철사업구간의 경우 여러 개소에서 점성토 원지반이 사용될 가능성이 높다. 본 연구에서는 흙의 기본물성 평가를 위하여 체분석, Atterberg 분석, 표준 다짐 실험, 일축압축실험, 그리고 회복탄성계수 실험을 수행하였다. Table 1은 본 실험에서 적용된 흙의 물성값을 나타내고 있다.

일반적으로 모든 M_r 실험은 최적함수비 조건 혹은 최적함수비 \pm 2% 범위 내에서 수행이 된다. 그러나 현장의 경우 다짐관리가 표준다짐 조건에서 상대다짐도에 따라 이루어지고 있다. 주로 95% 상대다짐도를 노반의 다짐관리 기준으로 사용하고 있으며 이러한 조건의 경우 함수비가 최적함수비의 습윤 혹은 건조측에 있다.

이러한 현장조건을 고려하여 M_r 의 상한계와 하한계를 확인하기 위하여 실험은 여러 함수비와 건조단위중량 조건에 대하여 수행되었다. 함수비 조건이 다른 세 종류의 실험체(최적함수비의 건조측(95% 상대다짐), 최적함수비(100% 상대다짐), 최적함수비의 습윤측(95% 상대다짐))를 제작하였다. 각 조건별 두 개 이상의 실험체가 제작되어 실험결과와 반복성에 대한 확인이 이루어졌다.

M_r 실험과 일축압축실험을 위하여 특별히 제작된 몰드를 사용하여 실험체가 제작되었다. 몰드의 크기는 직경 7.1cm, 높이 15.2cm이다.

표준다짐실험을 이용하여 다짐이 수행되었으며 총 다섯층에 대한 다짐이 수행되었다. 각 층별 다짐에너지는 일정하게 적용되었으며 다짐결과는 Fig. 3에서 확인할 수 있다. Fig. 3의 경우 실트질 흙의 경우(실험체 1, 2, 4) 건조단위중량은 18-20kN/m³의 범위이며 최적함수비의 범위는 9~13% 이며, 점토질 흙의 경우 건조단위중량은 18-20kN/m³이며 최적함수비의 범위는 12~23%이다.

구속압의 적용을 위하여 공기압을 사용하였으며 실험은 AASHTO T 307에서 제시하는 절차를 따라 수행되었다. 또한 회복탄성계수의 장기거동과 소성변형에 대한 평가를 위하여 장기 회복탄성계수에 대한 실험이 수행되었다.

4.2 회복탄성계수 예측모델의 제안

구속압 및 축차응력의 조건에 따른 회복탄성계수의 거동에 대한 특징은 다음과 같이 정리할 수 있을 것이다. 1) 동일한 축차응력 조건에서 구속압이 클수록 회복탄성계수는 더 큰 값을 보인다. 2) 구속압 13.8kPa, 축차응력 47.4kPa를 적용한 간편 절차의 결과는 AASHTO T 307의 결과와 비교할 수 있을 정도로 근사한 결과를 나타내고 있다. 3) 특정 흙의 경우 과도한 소성변형이 실험중에 발생하였는데, 이러한 거동의 원인으로서는 축차응력과 침투응력의 비가 아주 큰 경우이며 침투강도에 도달하기 위한 소성변형율이 약 7%정도로 상대적으로 높게 나타났다. 4) 최대 회복탄성계수 값은 조립토 흙에서 최적함수비 혹은 건조층에서 관측되었으며 습윤층에서 구해진 최소 회복탄성계수 값은 계절적으로 봄에 적용 가능한 M_r 의 한계값으로 적용 가능하다. 5) 현재 M_r 는 실험체의 초기상태의 길이를 적용하였으나 보다 정확한 계산을 위하여 변형된 실험체의 길이를 사용하여야 할 것이다.

또한 회복탄성계수의 예측 모델로서 식 (6)과 같이 Lee 등

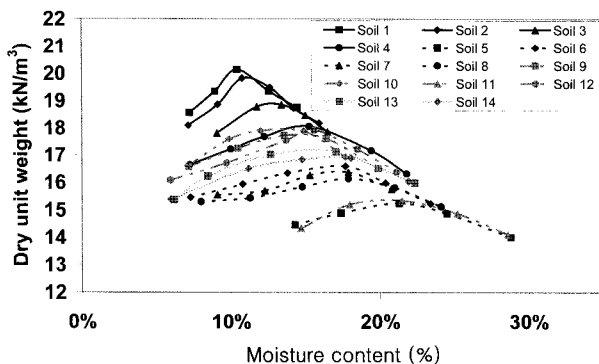


Fig. 3. Compaction curves for soils used in this study

[18]이 제안한 1% 변형을 발생시 일축압축값을 이용하여 회복탄성계수 값을 추정하는 방법이 있다.

$$M_r = 695.4 s_{u1.0\%} - 5.93 (s_{u1.0\%})^2 \quad (6)$$

여기서 $S_{u1.0\%}$ 는 1% 변형을 발생시 일축압축강도이다 (단위는 psi 임). 식 (6)은 사전 조정이 수행되지 않은 일축압축 실험과 회복탄성계수 실험이 수행된 동일한 실험체에서 획득된 결과를 바탕으로 제안되었다. 이에 반해 본 연구에서는 회복탄성계수와 일축압축강도 실험의 수행은 서로 다른 실험체에 대하여 수행되었다. 이러한 과정을 선택한 이유는 삼축실험 셀 내부에서 실험체와 다공판사이에 간격이 발생하지 않도록 하기 위하여 사전 조정은 항상 필요하기 때문이다. 또한 식 (6)은 식 자체의 간편성은 존재하나 특별한 흙의 경우 침투강도가 변형율의 1% 이내에서 발생할 경우 식 (6)의 적용은 적합하지 않다.

따라서 새로운 회복탄성계수 예측 모델의 제안을 위하여 획득된 데이터 간의 상관성이 도출되었다. 이를 위하여 각 변수간의 상관성이 일차적으로 평가되었다. 이후 13.8kPa의 구속압 조건과 47.4kPa의 축차응력 조건에서의 M_r 값과 각 변수간의 상관성이 평가되었다. 예측모델의 도출을 위하여 사용된 상세한 데이터는 Table 2에 나타내었다. 그 결과 결정계수 0.79인 식 (7)과 같은 예측 모델이 결정되었다.

$$M_r = 11268 \ln(E) + 3217 \ln(q_u) - 76.9/\epsilon_f - 8725 \ln(E_f) - 2587 \ln(q_f) + 127.5/\epsilon_y - 13513 \quad (7)$$

여기서 E = 접선탄성계수, q_u = 일축압축강도(침투강도), ϵ_f = 파괴 변형율, E_f = 침투치에서의 할선탄성계수, ϵ_y = 항복 변형율, 그리고 M_r = 구속압 13.8kPa, 축차응력 47.4kPa 조건에서의 회복탄성계수 (kPa) 이다.

Fig. 4는 예측 모델(식 (6), (7))에서 계산된 회복탄성계수

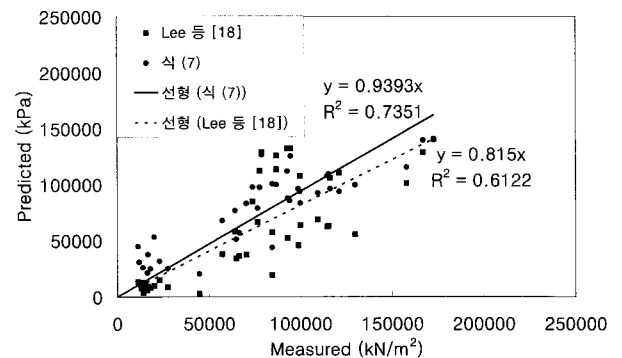


Fig. 4. Comparison between measured and predicted resilient moduli using equation (7)

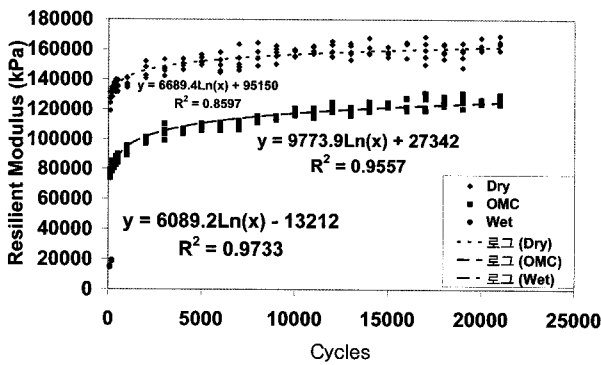
값과 측정된 값을 비교하고 있다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 Lee 등[18]이 제안한 식의 결과 보다 예측모델의 결과가 실측치에 보다 근사한 것을 알 수 있다.

4.3 다짐 노반의 영구변형 특성

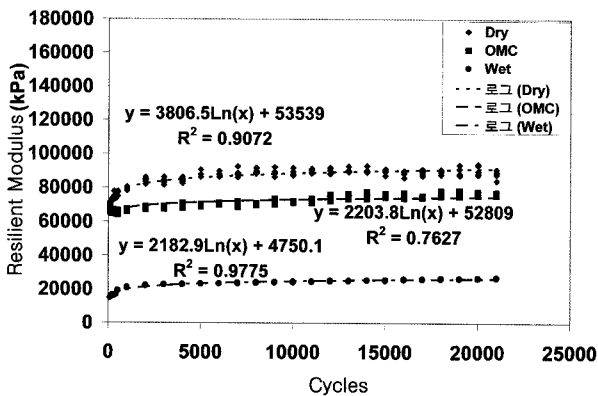
표준 회복탄성실험인 AASHTO T 307은 노반 조건에서 경험할 수 있는 다양한 하중조건에서 흙의 거동을 모델링 할 수 있도록 설계되었다. 이 실험방법에서는 시간과 노력을 절약하기 위하여 하중재하 반복횟수를 2000번으로 제한하고 있다. 이 반복횟수는 실제 흙이 사용기간 동안 받는 하중횟수보다 훨씬 낮은 수치이다. 이처럼 낮은 반복횟수로 반복되는 하중으로 인하여 흙의 장기 회복거동을 충분히 나타내기에는 한계가 있다. 따라서 장기적인 하중의 작용에 따른 노반의 거동을 파악하기 위하여 하중 사이클을 2,000에서 20,000회로 늘렸다. 또한 회복탄성계수의 최대변화와 영구변형량의 최대값을 결정하기 위하여 최대 축차응력(69kPa)과 최소 구속압(13.8kPa)을 사용하였으며 이 조건은 전체 장기 실험에 있어 적용되었다. 이러한 조건은 상당히 보수적인 예측을 낳을 것이며 표준화된 실험결과에서 관측되는 흙의

물성값을 더욱 악화 시킬 것이다. Fig. 5(a), (b)는 장기 회복탄성계수의 변화를 보이고 있다. 하중 사이클 5000회 이후에는 과도한 영구변형으로 초기 파괴가 발생한 실험체 12의 습윤조건에서의 실험결과를 제외하고는 일정한 회복탄성계수 값이 관측되었다.

Fig. 6은 실험체 14에 대한 장기 변형거동을 나타내고 있다. 실험결과를 살펴보면 Fig. 6(a)은 반복재하하중 횟수의 증가(20,000회)에 따른 영구변형 거동을 나타내고 있으며 Fig. 6(b)는 실험체 14의 표준 실험결과(반복하중 횟수 2,000회)를 나타내고 있다. 장기거동 실험결과를 살펴보면 일정한 구속압 조건에서 약 500회 반복하중 이후 건조, 습윤, OMC 측의 흙 모두 일정한 변형값을 나타내고 있다. 비록 본 논문에서는 단일 실험체에 대한 실험결과를 나타내고 있는 한계가 있으나 이와 같은 장기거동 실험 결과는 로그함수로 표현이 가능할 것으로 판단된다. 장기 거동 실험결과가 로그함수로 표현될 수 있는 반면에 표준실험의 경우 하중의 변화로 인하여 연속함수로 표현되기에는 한계가 있음을 알 수 있다. 영구변형율의 추이를 살펴보면 구속압이 감소하는 시점에서 영구변형율이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상의 발생 원

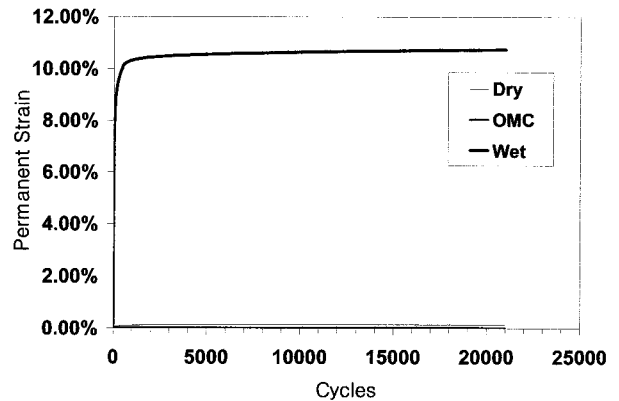


(a) Soil 12

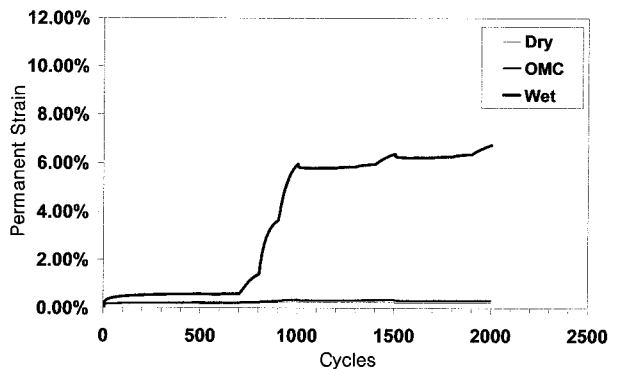


(b) Soil 14

Fig. 5. Long term resilient modulus test results



(a) Soil 14 (Long term Mr test)



(b) Soil 14 (Standard test)

Fig. 6. Permanent strain for different cycles of loads

Table 2. Unconfined compressive test data used for development of equation (7)

Sample	Peak stress (kPa)	Strain at Peak Stress	Initial Elastic modulus (kPa)	Secant modulus at peak stress (kPa)	Yield stress (kPa)	Yield Strain	Stress at 1% Strain (kPa)	Measured Mr (kPa)
1 Dry	458	2.4%	26400	182031	342	1.2%	306	94055
1 OMC	95	4.5%	2286	15762	80	3.3%	22	22940
2 Dry	119	0.8%	30497	210277	90	0.4%	115	109403
2 OMC	131	1.7%	14017	96650	95	0.8%	111	76562
2 Wet	65	6.7%	1197	8253	45	3.8%	13	27371
3 Dry	128	0.7%	27889	192296	105	0.5%	104	115215
3 OMC	101	2.9%	6139	42327	54	1.0%	56	66405
3 Wet	132	13.1%	1155	7967	90	8.5%	12	17961
4 Dry	116	0.8%	21693	149573	99	0.5%	93	84657
4 OMC	107	1.6%	13029	89834	77	0.7%	95	64190
4 Wet	49	6.4%	829	5714	39	4.3%	12	13761
5 Dry	568	3.7%	25224	173918	390	2.4%	103	114574
5 OMC	480	4.1%	23583	162601	280	1.3%	227	86787
5 Wet	164	12.7%	1852	12771	127	6.5%	29	84560
6 Dry	429	1.5%	38968	268686	381	1.2%	306	92696
6 OMC	404	3.2%	21863	150746	283	1.4%	217	121097
6 Wet	180	12.0%	1887	13013	161	10.4%	14	16753
7 Dry	332	1.8%	24590	169549	260	1.2%	208	99557
7 OMC	369	4.1%	16554	114141	231	1.9%	90	129716
7 Wet	203	10.3%	2542	17530	176	8.1%	20	11260
8 Dry	437	1.6%	47599	328198	359	1.2%	289	78865
8 OMC	511	5.2%	18125	124972	291	1.8%	149	73756
8 Wet	191	12.2%	1784	12300	163	9.2%	17	11839
9 Dry	492	1.2%	67322	464185	456	1.1%	420	172699
9 OMC	556	4.8%	26480	182582	358	1.7%	189	157868
9 Wet	42	9.7%	490	3381	39	7.0%	11	12990
10 Dry	620	1.3%	80398	554346	529	1.0%	521	166921
10 OMC	416	4.5%	13250	91356	307	2.6%	105	99902
10 Wet	125	12.8%	1142	7876	125	12.8%	9	16385
11 Dry	727	2.8%	53122	366273	437	1.3%	307	94634
11 OMC	406	6.8%	10340	71293	260	2.7%	84	93000
11 Wet	100	13.4%	973	6708	66	6.0%	18	13969
12 Dry	312	1.6%	42081	290146	233	0.8%	274	86787
12 OMC	173	4.9%	9649	66532	94	1.3%	72	98750
12 Wet	67	8.8%	1443	9948	51	4.9%	15	20091
13 Dry	227	1.1%	27614	190399	194	0.8%	223	77748
13 OMC	158	5.6%	3819	26333	118	2.8%	53	64875
13 Wet	34	15.2%	293	2022	27	8.9%	5	14100
14 Dry	213	1.2%	25429	175332	174	0.8%	203	116167
14 OMC	188	4.6%	7945	54781	105	1.7%	58	70350
14 Wet	62	9.7%	730	5036	50	6.4%	11	15501

인은 실험 중 지속적으로 가해지는 축차응력의 일시적인 이완에 의한 것으로 판단된다. 표준실험결과에 있어 영구변형을 곡선의 기울기는 동일한 구속압에 있어서 축차응력의 증가에 따라 증가하며, 각각의 축차응력에 대한 영구변형의 기울기는 (표준실험에서는 구속압이 작아지는 순서로 실험이 진행됨)다소 완만하게 되는 경향을 알 수 있다. 이는 반복하중 횟수가 증가함에 따라 시료가 다소 다져져서 수직변형이

점차적으로 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 노반체로 사용될 점성토 및 실트질흙의 회복변형 및 영구변형 특성을 평가하기 위하여 일반적인 흙의 물성실험과 회복탄성계수 실험이 수행되었다. 실험결과 흙의

접선탄성계수, 일축압축강도, 파괴변형율, 할선탄성계수, 항복변형율을 바탕으로 하는 회복탄성계수 예측 모델이 제안되었다. 이 모델은 Lee 등[18]에 의해 제안된 1.0%의 변형을 발생시의 일축압축 강도를 이용한 회복탄성계수 예측모델에 비해 예측값과 실측값 간의 높은 상관성을 보이는 것으로 확인되었다.

또한 노반에 장기간에 작용하는 교통하중에 의한 영구변형 특성을 고찰하기 위하여 20,000회의 하중을 재하한 상태에서 회복변형계수의 변화 추이를 관측하였다. 그 결과 영구변형은 약 500회 이후 어느 정도 일정하게 유지되는 양상을 보이는 것으로 나타났으며 회복탄성계수 값의 변화에 있어서도 흙의 상태와 구속압의 조건에 따라 상이하게 나타났으나 점토 및 실트질의 흙이 조성의 다수를 차지하는 경우 회복탄성계수 값은 장기 하중재하에도 불구하고 일정하게 관측되었다.

이상의 결과의 사용에 있어 국내 철도노반체로 자주 사용되는 화강풍화토의 경우 흙의 거동은 세립자의 함유량, 흙 입자의 형상, 구속하중상태, 함수비 등 여러 조건에 따라 발현되는 강도특성 및 그에 따른 회복탄성계수 값은 다르게 나타날 것이다. 따라서 본 연구에서 수행된 점성토에 대한 결과를 바탕으로 화강풍화토 노반의 다짐특성을 충분하게 나타내기에는 한계가 있을 것으로 판단된다. 따라서 향후 다양한 흙의 상태 및 구속하중의 조건에 따른 다짐 노반의 거동에 대한 평가가 필요하며 이에 대한 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 R&D 인프라 구축사업의 지원으로 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국철도시설공단(2004), “철도설계기준(노반편)”
2. Ping W. V. and Ling G. and Harold G. (1995). “Evaluation of Pavement Layer Moduli Using Field Plate Bearing Load Test,” Transportation Research Record No. 1501, 1995 Annual Meeting, Washington, D.C., pp.39-49.
3. Li, D and Selig, E. T. (1998a). “Method for railroad track foundation design I : Development.” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124(4), pp.316-322.
4. Li, D and Selig, E. T. (1998b). “Method for railroad track foundation design II : Application.” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124(4), pp.323-329.
5. Senanie S. R. (2006). “Evaluation and Modelling Performance of Capping Layer in Rail Track Substructure”, PhD. Dissertation, Central Queensland University, Queensland, Australia.
6. 박철수, 최찬용, 최충락, 목영진(2007). “강화노반 및 궤도하부노반 재료의 회복탄성계수”, 2007년 한국철도학회 추계학술대회 논문집.
7. 한국철도기술연구원(2004). “토공노반 최적두께 산정을 위한 설계표준 기술연구(1차년도)”, 연구보고서.
8. 한국철도기술연구원(2005). “토공노반 최적두께 산정을 위한 설계표준 기술연구(2차년도)”, 연구보고서.
9. 권기철(1999), “변형특성을 고려한 노상토 및 보조기층 재료의 대체 Mr시험법”, 한국과학기술원, 박사학위논문, 1999.
10. 권기철(2000), “국내 노상토의 회복탄성계수에 대한 구성모델”, 대한토목학회논문집, 제30권, 제3-D호, pp.301-310.
11. AASHTO (1992). “Resilient Modulus for Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils”, AASHTO T 274, Washington D.C..
12. AASHTO (1994). “Resilient Modulus for Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils-SHRP Protocol P46”, AASHTO T 294-94, Washington D.C..
13. AASHTO (2000). “Determining the resilient modulus of soils and aggregate materials”, AASHTO T 307, Washington D.C.
14. Kim, D. and Siddiki, N. (2005). “Simplification of Resilient Modulus Testing for Subgrade Soils”, Final Report, FHWA/IN/JTRP-2005/23, Purdue Univ., W. Lafayette, IN.
15. Transportation Research Board (2004). “National Cooperative Highway Research Program, NCHRP 1-37A, Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Software”, Transportation Research Board.
16. Seed, H. B., Mitry, F. G., Monismith, C. L., and Chan, C. K. (1967). “Prediction of flexible Pavement Deflections from Laboratory Repeated Load Tests” NCHRP Rep. No. 35.
17. Uzan, J. (1985). “Characterization of granular material”. Transportation Research Record, 1022, TRB, National Research Council, Washington, D. C., 1022: pp.52-59.
18. Lee, W., Bohra, N. C. and Altschaeffl, A. G. (1993). “Subgrade Resilient Modulus for Pavement Design and Evaluation”, Final Report, JHRP-92-23, Purdue Univ., W. Lafayette, IN.

(2008년 1월 16일 논문접수, 2008년 2월 12일 심사완료)