다짐점토 노반의 회복탄성 및 영구변형 거동

Resilient and permanent behavior of compacted cohesive subgrade soils

김대현* · 사공명** · 이용희***
Daehyeon Kim · Myung Sagong · Yonghee Lee

1. 서 론

도로분야에서는 1998년 AASHTO에서 합리적인 설계 및 해석을 위해 회복탄성계수를 설계입력 물성값으로 이용한 해석을 적용하면서 회복탄성계수의 중요성이 확대되었다. 최근에는 북미를 중심으로 새로운 설계법의 대두로 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 도로 포장 분야에서 노상토 및 보조기층 재료의 회복탄성계수를 결정하기 위하여 동적 시험방법인 자유단 공진주시험과 공진주/비틂전단 시험을 이용한 대체 시험법을 제안한바 있다[1, 2].

이와 같이 도로분야에 있어서 회복탄성계수의 적용에 대한 관심이 제고되는 상황이므로 본 논문에서는 노반재료의 회복거동에 대한 평가 및 실험결과를 바탕으로 점성토 및 실트질흙에 대한 회복탄성계수 예측 모델을 도출하고자 한다. 이러한 결과를 바탕으로 노반 설계 입력자료의 도출이 가능하며 설계자들에게 회복탄성계수의 추정이 가능할 것이다.

2. 회복탄성계수

2.1 회복탄성계수의 정의

회복탄성계수는 노반토체의 응력-변형율 특성을 나타내는 중요한 변수중의 하나로서 도로 및 철도노반 설계에 있어 중요한 입력변수이다. 회복탄성계수는 교통하중 작용시 비선형적인 노반의 거동을 모델링 하기 위하여 일련의 조합된 구속압과 축차응력 조건을 가하였을 때 발생하는 회복 가능한 변형율을 바탕으로 한다(**그림 1.** 참조). 회복탄성계수는 다음과 같이 정의 된다.

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \qquad \textbf{식 1.}$$

여기서 Mr은 회복탄성계수이며 σ_d 는 반복되는 축차응력, 그리고 ε_r 는 회복가능한 축변형율을 나타낸다. **식 1.**에서 기본적인 가정은 가해진 축차응력이 흙의 전단응력한도 이내인 경우 수많은 반복하중이 작용하더라도 회복 가능한 변형율만이 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 Mr 실험이 수행되는 단계에서도 영구 변형이 발생하는 사례가 있다. **식 1.**에서 추론

* 정회원 · 조선대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사(E-mail : dkimgeo@chosun.ac.kr)-발표자
** 정회원 · 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원
*** 정회원 · 한전 전력연구원 원자력발전연구소 연구원

할 수 있듯이 회복가능한 변형이 클수록 회복탄성계수는 적은 값을 보이며 이때 노반의 상태는 연약한 경우이다. 이러한 조건은 결국 회복탄성계수가 적으면서 연약한 노반의 경우 반복하중에 따른 펌핑이 발생할 수 있음을 나타낸다.

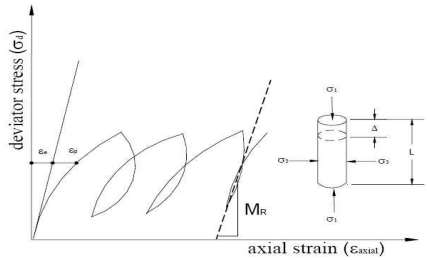

그림 1. Definition of resilient modulus from the repeated axial load2.1.1

2.2 회복탄성계수 실험 - AASHTO T 307

ASHTO T 274[3]와 T 294-94[4]에서 업그레이드 된AASHTO T 307[5]에는 회복탄성계수 결정을 위한 표준실험방법이 기술되어 있다. 대부분의 기존 논문들이 AASHTO T 294-94와 AASHTO T 274를 중심으로 다루고 있으며 일부 논문에서 AASHTO T 307을 다루고 있다[5]. AASHTO T 307 기준에는 현장조건이 사전 조정(conditioning) 및 표준실험을 통하여 재현되도록 한다.

회복탄성계수 실험시 사전 조정(conditioning)은 본 실험을 실시하기 전 공시체와 다공판 사이의 간격이 발생치 않도록 하기위해 예비로 하중을 가하는 것을 의미하며, 사전조정 이후에 15단계의 본실험이 실시된다. 조정은 구속압 41.4kPa조건에서 축차응력 27.6kPa 를 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, 69 kPa)을 적용하여 결국 15 단계의 하중이 적용된다(조정단계를 포함하면 16 단계의 하중이 작용). **그림 2**.는 16 단계중 6 단계까지 탄성 및 소성변형율에 대한 축차응력을 나타내고 있다.

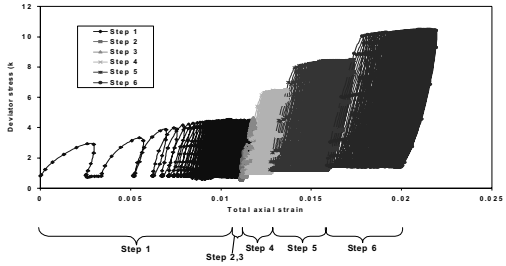

그림 2. Test results of resilient modulus

그림 2.에서 확인할 수 있듯이 소형변형율은 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 Mr 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 Mr 값의 산정에 있어 도움이 될 것이다. 또한 반복 삼축 실험에 있어 회복 가능한 변형률 수준은 10^{-3} ~ 10^{-4} 수준으로서 실험체 변형의 측정 정도에 있어 이상의 수준을 유지하여야 할 것이다.

일반적으로 노반의 회복탄성계수는 축차응력, 구속압, 함수비, 건조단위중량, 다짐방법, 틱소트로피와 동결융해 사이클에 의존적이다. 구속압이 동일한 조건에서 점성토의 회복탄성계수는 축차응력의 함수이며 회복탄

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

3. 회복탄성계수의 적용

3.1 도로 설계에 있어 적용되는 회복탄성계수의 적용

도로 노반설계의 경우 1986년 AASHTO에서 제안된 포장구조 설계 가이드 라인이 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. 최근들어 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[6]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. 이중 가장 정확도가 높은 단계는 Level 1이며 이 단계에서는 필요한 재료 계수 값인 k1, k2, k3가 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 교통량의 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 Mr 간의 상관성이 제시되었다. 회복탄성실험의 복잡성과 어려움으로 인하여 변형율이 0.1% 미만인 작은 변형률 단계에서 일축압축실험, 정적인 삼축실험이 반복삼축압축 실험의 대체 방법으로 제안되었는데, 가압하는 구속압과 축차응력의 횟수를 줄이는 방법을 통하여 회복탄성실험 간편화된 실험절차가 제안되었다.

3.2 노반의 회복탄성계수 예측 모델

노반의 회복탄성계수에 대한 예측을 위하여 여러 모델이 제안되었다. 조립토에 대한 최초 예측 모델은 K-θ 모델[7] 로 다음과 같다.

$$M_r = k_1\theta^{k_2} \qquad \textbf{식 2.}$$

여기서 k_1과 k_2는 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 식으로의 형태는 **식 3.**과 같다.

$$M_r = k_1\sigma_d^{k_2} \qquad \textbf{식 3.}$$

여기서 σ_d는 축차응력을 나타낸다. K-σ_d는 축차응력만을 고려하고 있다.
축차응력과 구속압을 모두 고려하기 위하여 [8]은 K-θ나 K-σ_d 보다 일반적인 모델을 제안하였다. 제안된 모델은 **식 4.**와 같다.

$$M_r = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2}\left(\frac{\sigma_d}{p_a}\right)^{k_3} \qquad \textbf{식 4.}$$

여기서 k_1, k_2, k_3는 회귀계수, θ는 주응력의 합, Pa는 기준값으로 100kPa $\approx$1 kgf/cm^2, 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.

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

여기서 τ_{oct} 는 octahedral shear strength를 나타낸다. k1 과 같은 비선형 탄성회귀계수는 AASHTO T 307을 근거로 실험데이터에 대한 비선형 회귀분석을 통하여 계산할 수 잇다. 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 실험장비는Geocomp사에서 제작된 자동화된 삼축압축장비가 사용되었다. 반복축차응력 및 구속압은 유압시스템에 의해 공기압을 이용하여 제어되었으며, 삼축셀에 연결된 LVDT로 탄성변위 및 영구변형을 측정하였다.
본 논문에서는 총 14개의 세립질 조립토 흙을 사용하였다. 흙의 기본물성 평가를 위하여 체분석, Atterberg 분석, 표준 다짐 실험, 일축압축실험, 그리고 회복탄성계수 실험을 수행하였다. **표 1.**은 본 실험에서 적용된 흙의 물성값을 나타내고 있다.

표 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

일반적으로 모든 Mr 실험은 최적함수비 조건 혹은 최적함수비±2% 범위내에서 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 건조

측에 있다.

이러한 현장조건을 고려하여 Mr 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))을 제작하였다. 각 조건별 두 개 이상의 실험체가 제작되어 실험결과의 반복성에 대한 확인이 이루어졌다.

Mr 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 적용되었다. 다짐결과는 **그림. 3**에서 확인할 수 있다.

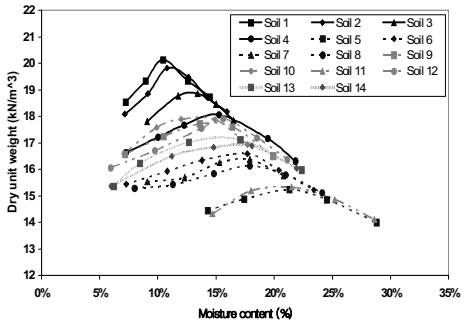

그림 3. Compaction curves for soils used in this study

그림. 3의 경우 실트질 흙의 경우(실험체 1, 4) 건조단위중량은 18-20 kN/m^3 의 범위이며 최적함수비의 범위는 9~13% 이며, 점토질 흙의 경우 건조단위중량은 18-20 kN/m^3 이며 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

회복탄성계수의 예측 모델로서 **식 6.**과 같이 [9]에서 제안된 1% 변형율 발생시 일축압축값을 이용하여 회복탄성계수 값을 추정하는 방법이 있다.

$$M_r = 695.4\, s_{u\,1.0\%} - 5.93\, s_{u\,1.0\%} \qquad \textbf{식 6.}$$

여기서 Su0.1%는 1% 변형율 발생시 일축압축강도이다 (단위는 psi 임). **식 6.**은 사전 조정(conditioning)이 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 조정(conditioning)은 항상 필요하기 때문이다. 또한 **식 6.**은 식 자체의 간편성은 존재하나 특별한 흙의 경우 첨두강도가 변형율의 1% 이내에서 발생할 경우 **식 6.**의 적용은 적합하지 않다.

따라서 회복탄성계수의 예측을 위한 새로운 모델의 제안을 위하여 획득된 데이터 간의 상관성이 도출되었다. 이를 위하여 각 변수간의 상관성이 일차적으로 평가되었다. 이후 13.8kPa의 구속압 조건과 47.4kPa의 축차응력 조건에서의 Mr값과 각 변수간의 상관성이 평가되었다. 예측모델의 도출을 위하여 사용된 상세한

데이터는 [10]에서 소개된바 있다. 그 결과 결정계수 0.79인 **식 7.**같은 예측 모델이 결정되었다.

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

여기서 E = 접선탄성계수, q_u = 일축압축강도(첨두강도), ε_f = 파괴 변형율, Ef = 첨두치에서의 할선탄성계수, ε_y= 항복변형율, 그리고 Mr = 구속압 13.8 kPa, 축차응력 47.4 kPa 조건에서의 회복탄성계수 (kPa).

= 첨두치에서의 할선탄성계수, ε_y= 항복변형율, 그리고 Mr = 구속압 13.8 kPa, 축차응력 47.4 kPa 조건에서의 회복탄성계수 (kPa).

= 첨두치에서의 할선탄성계수, ε_y = 항복변형율, 그리고 Mr = 구속압 13.8 kPa, 축차응력 47.4 kPa 조건에서의 회복탄성계수 (kPa).

그림. 4는 예측 모델(**식 6., 7.**)에서 계산된 회복탄성계수 값과 측정된 값을 비교하고 있다. **그림 4.**에서 확인할 수 있듯이 [18]이 제안한 식의 결과 보다 예측모델의 결과가 실측치에 보다 근사한 것을 알 수 있다.

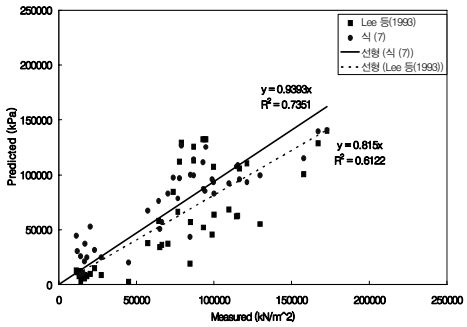

그림 4. Comparison between measured and predicted resilient moduli using equation (7)

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 반복횟수로는 장기적으로 반복되는 하중으로 인하여 흙이 보이는 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 물성값의 악화를 더욱 극대화 할 것이다. **그림 5(a), (b)**는 장기 회복탄성계수의 변화를 보이고 있다. 하중 사이클 5000회 이후에서는 과도한 영구변형을 나타내는 실험체 12의 습윤조건에서의 실험결과를 제외하고는 일정한 회복탄성계수 값이 관측되었다.

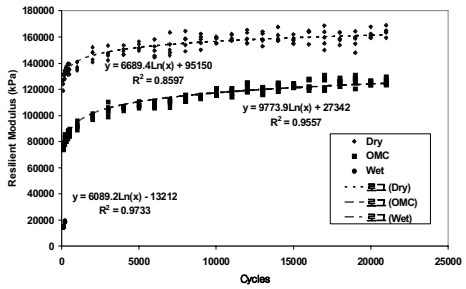

그림 5(a)

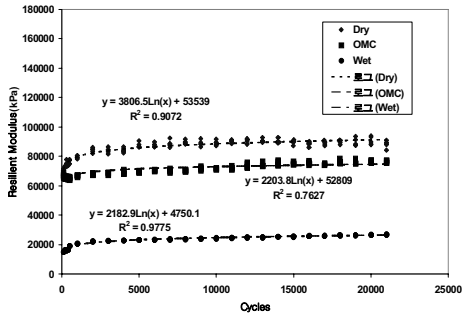

그림 5(b)

그림. 5 Long term resilient modulus test results ,(a) Soil 12 (b) Soil 14

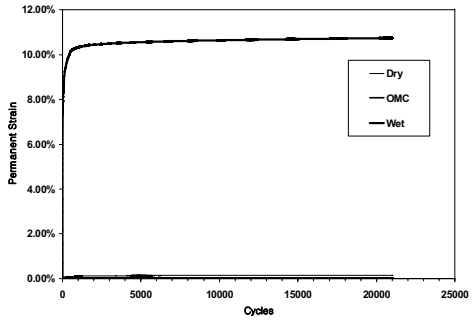

그림 6(a)

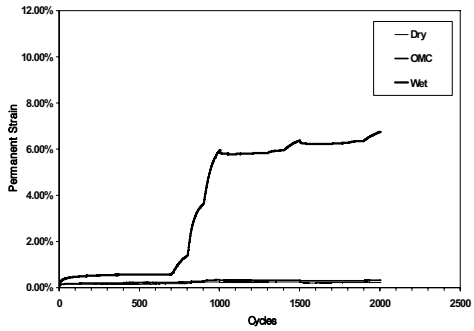

그림 6(b)

그림. 6 Permanent strain for different cycles of loads
(a) Soil 14 (Long term Mr test) (b) Soil 14 (Standard test)

그림 6.은 실험체 14에 대한 장기 변형거동을 나타내고 있다. 실험결과를 살펴보면 **그림 6(a)**은 반복재하하중 횟수의 증가(20,000회)에 따른 영구변형 거동을 나타내고 있으며 **그림 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 변형 값을 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 표현 될 수 있는 반면에 표준 실험의 경우 하중의 변화로 인하여 연속함수로 표현되기에는 한계가 있음을 알 수 있다. 영구변형율의 추이를 살펴보면 구속 압이 감소하는 시점에서 영구변형률이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상의 발생 원인은 실험중 지속적으로 가해지는 축차응력의 일시적인 이완에 의한 것으로 판단된다. 표준실험결과에 있어 연구변형률 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. 결 론

본 논문에서는 노반체로 사용할 흙의 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 (1993)에 의해 제안된 0.1%의 변형율 발생 시의 일축압축 강도와 상관성을 가지는 회복탄성계수 예측모델에 비해 예측치와 실측치간의 높은 상관성을 가지는 것으로 관측되었다. 또한 노반에 장기간에 적용하는 교통하중에 의한 영구변형특성을 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.

참고 문헌

1. 권기철, "변형특성을 고려한 노상토 및 보조기층 재료의 대체 Mr시험법", 한국과학기술원, 박사학위논문, 1999.
2. 권기철, "국내 노상토의 회복탄성계수에 대한 구성모델", 대한토목학회논문집, 제30권, 제3-D호, pp. 301-310, 2000.1. 한국철도시설공단, "철도설계기준 (노반편)" 2004
3. AASHTO. "Resilient Modulus for Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils", AASHTO T 274, Washington D.C., 1992.
4. AASHTO. "Resilient Modulus for Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils-SHRP Protocol P46", AASHTO T 294-94, Washington D.C., 1994.
5. AASHTO. "Determining the resilient modulus of soils and aggregate materials", AASHTO T 307, Washington D.C., 2000
6. Transportation Research Board, "National Cooperative Highway Research Program, NCHRP 1-37A, Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Software", Transportation Research Board. 2004.
7. Seed, H. B., Mitry, F. G., Monismith, C. L., and Chan, C. K. "Prediction of flexible Pavement Deflections from Laboratory Repeated Load Tests" NCHRP Rep. No. 35, 1967.
8. Uzan, J. "Characterization of granular material". Transportation Research Record, 1022, TRB, National Research Council, Washington, D. C., 1022: 52-59, 1985.
9. Lee, W., Bohra, N. C. and Altschaeffl, A. G. "Subgrade Resilient Modulus for Pavement Design and Evaluation", Final Report, JHRP-92-23, Purdue Univ., W. Lafayette, IN., 1993.
10. Kim, D. and Siddiki, N.. "Simplification of Resilient Modulus Testing for Subgrade Soils", Final Report, FHWA/IN/JTRP-2005/23, Purdue Univ., W. Lafayette, IN., 2005.