

역학적 실내의 시험에 의한 철도궤도 상부노반용 흙재료의 기본물성과 변형계수 상관성 평가

Construction of Correlation between Basic Soil Properties and Deformation Modulus of Trackbed Soils Based on Laboratory and Field Mechanical Tests

박재범 · 최찬용 · 지상현 · 임상진 · 임유진*

Jae Beom Park · Chan Yong Choi · Sang Hyun Ji · Sang Jin Lim · Yu Jin Lim

Abstract The soils used as trackbed in Korea are selected using USCS utilizing basic soil properties such as Grain Size Distribution(GSD), % passing of #200 sieve (P_{200}), % passing of #4 sieve (P_4), Coefficient of uniformity (C_u), and Coefficient of curvature (C_c). Degree of compaction of the soils adapted in the code by KR should be evaluated by maximum dry density (γ_{d-max}) and deformation modulus E_{v2} . The most important influencing factor that is critical to stability and deformation of the compacted soils used as trackbed is stiffness. Thus, it is necessary to construct a correlation between the modulus and the basic soil properties of trackbed soil in order to redefine a new soil classification system adaptable only to railway construction. To construct the relationship, basic soil test data is collected as a database, including GSD, maximum dry unit weight (γ_{d-max}), OMC , P_{200} , P_4 , C_u , C_c , etc.; deformation modulus E_{v2} and E_{vd} are obtained independently by performing a Repeated Plated Bearing Test (RPBT) and Light Weight Deflectometer Test (LWDT) for ten different railway construction sites. A linear regression analysis is performed using SPSS to obtain the relationship between the basic soil properties and the deformation modulus E_{v2} and E_v . Based on the constructed relationship and the various obtained mechanical test data, a new soil classification system will be proposed later as a guideline for the design and construction of trackbed foundation in Korea.

Keywords : Trackbed Soil classification, Basic properties, Stiffness, Deformation Modulus, Performance design

초 록 국내 궤도 흙노반재료의 선정기준은 기초물성 값(입경, 200번체 통과량(P_{200}), 4번체 통과량(P_4), 균등계수(C_u), 곡률계수(C_c)등)을 이용하는 통일분류법에 의존하고 있으며, 선정된 궤도노반의 현장 다짐도는 들밀도 시험 및 반복평판재하시험 결과 E_{v2} 에 의해 파악한다. 그러나 궤도노반의 변형 및 안정성에 미치는 가장 큰 영향요소는 강성(Stiffness)이므로, 노반재료의 분류특성은 기초물성 값 자체 보다는 다짐 후 변형계수를 활용하는 것이 보다 정확하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 궤도노반에 사용되는 국내 대표적인 흙 재료의 기초물성과 현장시험에 의한 변형계수(E_{v2} , E_{vd})와의 상관식을 도출하였다. 이와 같은 상관특성은 성능설계를 위한 국내 고유의 철도궤도용 전용흙분류기준 수립을 위한 근거로 사용될 수 있다.

주요어 : 궤도노반 흙분류, 기초물성, 강성, 변형계수, 성능설계

1. 서 론

1.1 필요성 및 목적

최근 국내 철도는 고속화와 통과톤수(MGT)의 증가에 의해 보다 높은 수준의 궤도 안정성과 내구성을 확보하기 위하여 엄밀하면서도 새로운 궤도노반 분류기준의 재정립이 요구되고 있다. 현재 해외 철도 선진국은 대부분 자국 내 철도 궤도 노반전용의 흙재료 분류기준을 제정하여 사용하고 있다. 일본의 경우 철도종합기술연구소(RTRI)에서 2007년에 간행한 ‘철도구조물등 설계표준 동해설[1]’을 통하여 성토구간 흙쌓기용 재료분류기준을 새롭게 제시한 바 있다. 독일 또한 자체의 독자적 흙분류기준을 제정하여 사용하고 있다[2]. 이는 독일이 위치한 고유의 지형학적 토질분류 특성을 반영하도록 한 것이며, 매우 엄밀한 노반전

*Corresponding author. Tel.: +82-42-520-5402, E-mail: yujin@pcu.ac.kr.

© 2016 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2016.19.2.204>

용 흙분류기준을 정립하여 사용 중이다. 그러나 현재 사용중인 국내 궤도노반 흙분류 기준은 2007년 개정 이전 일본의 흙재료 분류기준[3]인 ‘철도구조물설계표준 동해설(1992)’에 의거, 통일분류법(USCS)에 의해 노반에 사용 가능한 재료를 구분류로 사용하고 있다. 이는 화강토 계열이 대부분인 국내 노반재료의 토질특성 및 역학적, 공학적 특성과, 철도환경과 통과톤수(MGT)라는 교통하중특성을 대응하기에는 부족하다고 할 수 있다. 또한 향후 성능설계 개념을 궤도노반 설계법 및 설계기준에 효과적으로 반영하기 위해서는 기존 궤도노반 흙분류 체계는 미흡하다고 할 수 있다. 따라서 이러한 국내 궤도노반용 흙재료의 토질특성과 역학적 특성에 근거하여 새로운 철도 궤도노반 흙 재료 분류 기준의 제정이 시급히 요구되고 있다.

먼저, 궤도노반용 흙 재료 분류기준 수립을 위해서는 현재의 궤도노반용 재료분류기준의 타당성을 검토할 필요가 있으며 이를 위하여 실제 철도부설 현장에서 사용되는 노반재료의 물리적, 역학적 특성을 실험, 분석하고 이에 근거하여 기존 분류기준의 적합성을 검토하여야 한다. 실제 흙노반의 침하 등 안정성에 미치는 가장 큰 영향요소는 강성(stiffness), 즉, 변형계수이므로 역학적 특성 중 재료의 다짐 후 변형계수 분포범위와 변화정도를 보다 명확히 파악하여야 하며 이를 위하여 현재 대부분의 분류시스템에서 사용되는 기초물성 값과 실제의 역학적 특성인 변형계수와 사이에 어떠한 상관성이 수립되는지를 면밀하게 분석하여야 한다. 본 연구에서는 철도현장 총 10개소에서 채취한 흙노반재료의 기본물성과 다짐품질관리기준으로 활용하고 있는 변형률계수(E_{v2})와 동적변형률계수(E_{vd})에 대하여 다짐정도, 최적함수비, 200번째 통과량 등 회귀분석을 수행하여 회귀식을 제안하였다.

1.2 연구동향

궤도하부구조를 구성하는 흙노반 재료의 강성을 물리값으로 표현하기 위하여 다양한 방식의 변형계수(E) 표현방법이 사용되어 왔다. 특히, 응력의존성을 고려한 변형계수 표현방법들 중 대표적인 것으로는 도로분야에서 주로 사용되는 회복탄성계수(M_R)를 들 수 있다. AASHTO 도로포장 설계법[4]에서는 체적응력(θ)과 전단응력(Octahedral shear stress 또는 축차응력 τ_{oct})을 고려하여 최적함수비 조건에서 노상토의 변형계수모델로서 식 (1)과 같은 회복탄성계수(M_R) 구성모델을 제안, 반영한 바 있다.

$$M_{Ropt} = k_1 \times P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \times \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (1)$$

여기서, M_{Ropt} =최적함수비조건에서의 회복탄성계수, P_a =대기압, θ =체적응력(주응력의 합= $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$), τ_{oct} =Octahedral 전단응력 및 k_1, k_2, k_3 =실험으로 결정되는 재료상수.

강수량의 변화 등 건습주기의 반복으로 인해 대기중 노출되는 노반 내 함수비가 변하게 되고 이에 따라 흙노반의 변형계수 또한 변하게 되는데, 지금까지의 함수비 변화를 고려한 변형계수 구성모델 연구는 대부분 다짐함수비를 바꾸어 가면서 시료를 성형하여 변형계수의 변화를 분석하였다. 그러나 현장에서는 동일 수준의 다짐함수비와 다짐밀도에서 다져진 후 경년경과에 따라 함수비가 변화하므로 현장상황에 보다 일치하는 시험을 하기 위해서는 일정 함수비 조건에서 다짐 후 함수비의 변화를 유도(post compaction method)할 수 있는 시험과정을 채택, 사용하여야 한다. 그러나 현재까지는 다짐 후 함수비 변화를 통한 회복탄성계수시험이 용이하지 않아 대부분의 연구가 다짐함수비를 시험시편 조성시 변화를 주는 방법으로 함수비 구성모델을 구현하여 왔다. 다음 Fig. 1은 다짐시험시 함수비를 변화시키는 방법을 크게 두 가지로 구분하여 설명한 것이다[5]. 첫째, 일정한 다짐밀도에서 다짐함수비만 바꾸어 가면서 시료를 성형하는 방법(Fig. 1(a)), 그리고 다짐곡선을 따라 함수비와 건조밀도를 바꾸어 가면서 시료를 성형하는 일반적인 방법(Fig. 1(b))이다.

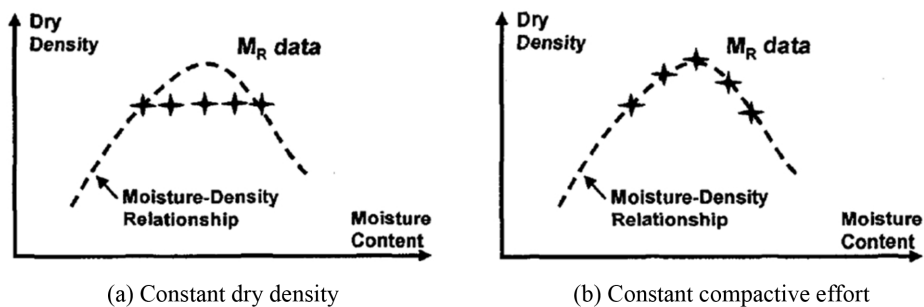


Fig. 1. Comparison of compaction methods.

Li 등 [6]은 11개의 세립 노상토에 대해 일정 다짐밀도에서 다짐함수비를 바꿔가면서(constant dry density, Fig. 1(a)) 반복삼축시험을 실시, 다음과 같은 상관식을 제안한 바 있다.

$$R_{m1} = \frac{M_R}{M_{R(opt)}} = 0.98 - 0.28 \times (\omega - \omega_{opt}) + 0.0029 \times (\omega - \omega_{opt})^2 \quad (2)$$

여기서 M_R =함수비가 ω 인 경우의 회복탄성계수, ω_{opt} =최적함수비(%).

추가로 10개의 세립 노상토에 대해 다짐곡선을 따라 밀도와 다짐함수비를 바꾸어 가면서(constant compactive effort, Fig. 1(b)) 26번의 회복탄성계수 시험을 통하여 다음과 같은 상관식을 제안하였다.

$$R_{m2} = \frac{M_R}{M_{R(opt)}} = 0.98 - 0.18 \times (\omega - \omega_{opt}) + 0.0067 \times (\omega - \omega_{opt})^2 \quad (3)$$

두 시험방법 차에 따른 시험결과를 Fig. 2에 나타내었다. 최적함수비를 기준으로 습윤측에서는 두 시험방법 사이에 큰 차이가 없지만, 건조측으로 갈수록 식 (2)의 탄성계수가 커짐을 알 수 있다. 이와 같은 시험 결과는 같은 함수비 조건이라 할지라도 시료 성형조건에 따라 동일 밀도를 유지하기 위해 식 (3)의 조건보다 에너지를 더 가하였기 때문에 탄성계수에 차이가 발생할 수 있음을 뜻하는 것이며, 현장 다짐조건을 제대로 모사하지 못하는 시험법으로 결정된 모델은 자칫 오류를 범할 수 있음을 암시한다. 실제 현장에서는 하나의 함수비와 다짐밀도로 시공이 되고 이후에 기후조건 등의 영향으로 함수비가 변화하게 된다. 따라서 함수비에 따른 변형계수의 변화와는 또 다른 경향을 나타낼 가능성이 크다. 그러나 전체적인 경향은 함수비 조건변화에 따라 변형계수의 변화가 상당히 클 수 있음에 유의할 필요가 있다.

또한 지반재료의 기초물성 데이터를 이용하여 변형계수를 추출하려는 다양한 시도가 있었다. 예를 들어 실제 역학적 시험 없이 단순하게 200번체 통과량(P_{200}), 4번체 통과량(P_4), 균등계수(C_u), 곡률계수(C_c), 최대건조단위중량(γ_{d-max}), 최적함수비(OMC) 등 기초물성 만을 이용하여 변형계수를 추정하는 방법이다. 미국 플로리다 주 도로국(FDOT)[7]의 경우 주(州) 내에서 점성토에 대한 다양한 시험 데이터를 분석하여 식 (4)와 같은 회복탄성계수 추정식을 제안한 바 있다.

$$\ln(M_R) = 2.01 - 0.014(\omega) + 0.0108(\rho) + 0.0243(C_u) - 0.119(C_c) \quad (4)$$

여기서, M_R =회복탄성계수(ksi), ω =최적함수비(%), ρ =최대 건조 단위 중량(pcf), C_u =곡률 계수, C_c =균등 계수.

Ping[8]의 경우 위와 같은 방법으로 점성토에 대한 다음 식 (5)를 제시하였다.

$$\ln(M_R) = 9.87 - 0.0593(C_c) + 0.0118(C_u) - 0.0414(\omega) + 0.0337(\text{clay}) \quad (5)$$

여기서, M_R =회복탄성계수(ksi), ω =최적함수비(%), C_c =곡률 계수, C_u =균등 계수 $Clay$ =점토함량(%).

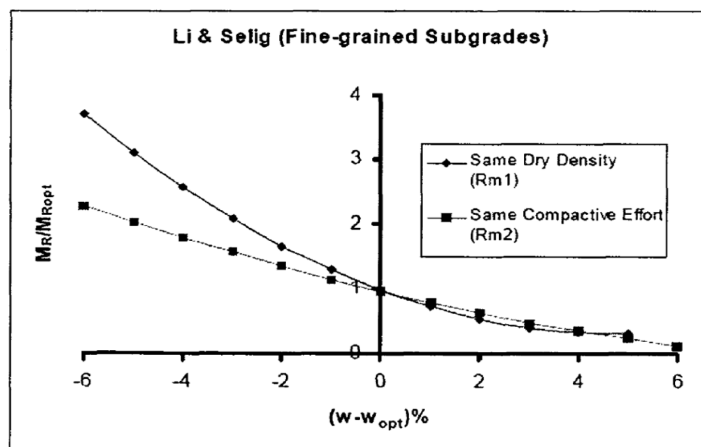


Fig. 2. Resilient modulus changes with water content [6].

국내 궤도노반 흙재료의 새롭고도 엄밀한 분류기준 수립을 위해서는, 현장노반재료에 대한 대규모의 기초물성시험값 및 역학적 특성시험값을 해당시험으로부터 획득하고 이를 데이터베이스(이하 D/B)화하는 과정이 요구된다. 이와 같은 궤도노반의 기초물성 및 역학적 특성값에 대한 D/B 구축을 위하여 국내 신설 철도 토공노반 현장에 대한 다양한 항목별 현장시험을 실시하고 이로부터 채취된 현장흙에 대한 실내시험을 실시하여 이로부터 기초물성과 역학적 특성값 사이의 상관관계가 밝혀져야 한다. 본 연구에서는 궤도노반으로 활용된 흙재료의 기초물성에 입각한 변형계수 예측모델 수립 및 기초물성과 역학적 특성값 사이의 상관관계식 수립을 최종 목적으로 먼저 다수의 국내 신설 철도 궤도노반 흙재료에 대하여 실내 기초물성시험을 실시하였고, 이를 현장시험에서 구한 변형계수(반복평판재하시험 변형계수 E_{v2} 및 동평판재하시험 변형계수 E_{vd})와의 회귀분석을 통해 상관식을 도출하고 이에 대한 유효성을 검토하였다.

2. 시험 방법

2.1 현장시험을 통한 변형계수 데이터 분석

현행 국내 철도설계기준[9]에서는 반복평판재하시험(Repetitive Plate Bearing Test; RPBT)을 상·하부노반 다짐도 품질기준으로 사용하고 있다(Fig. 3 참조).

반복평판재하시험은 국내 표준규격은 아직 제정된 바 없으나 철도분야에서만 유일하게 독일 규정[10]을 준용하도록 되어 있으며, 규정에서 정해진 하중단계에 따라 침하량(s)을 측정하여 하중-침하량 곡선을 작성한다. 하중강도(σ_0)와 재하판의 침하량(s)을 이용하여 식 (6)의 2차함수를 회귀분석하면 각 계수(a_0, a_1, a_2)를 구할 수 있다. 회귀분석으로부터 얻은 각 계수를 다음 식 (7)에 대입하여 최종적으로 변형계수 E_v 를 획득한다.

$$s = a_0 + a_1 \cdot \sigma_0 + a_2 \cdot \sigma_0^2 \quad (6)$$

$$E_v = 1.5 \cdot r \cdot \frac{1}{a_1 + a_2 \cdot \sigma_{0\max}} \quad (7)$$

여기서, σ_0 =재하판 저부 하중강도(MN/m²), s =재하판 침하량(mm), a_0 =상수(mm), a_1 =상수(mm/(MN/m²)), a_2 =상수(mm/(MN²/m⁴)), E_v =변형계수(MN/m²), r =재하판 반지름(mm), $\sigma_{0\max}$ =최대 하중강도(MN/m²).

반복평판재하시험에서 재하하중은 재하(load) - 재하(unload) - 재재하(reload)로 하중을 반복적으로 가하여 초기 소성침하량의 영향을 제거하여 순탄성침하량에 해당하는 변형계수를 산출하도록 하며 단계별 하중재하 시간이 빠른 특징을 가지고 있다. 현재 국내 고속철도 현장에서는 2차 재재하단계에서의 변형계수 E_{v2} , 1차 하중재하단계에서 구한 변형계수 E_{v1} 과 2차 재재하시의 변형계수 E_{v2} 의 비인 E_{v2}/E_{v1} 을 모두 적용하여 품질관리기준으로 사용하고 있다.

추가적인 변형계수 값을 비교분석하기 위해 반복평판재하시험을 실시한 위치의 근접거리에서 동평판재하시험(Light Weight Deflectometer Test; LWDT)(Fig. 4 참조)을 실시하였다. 아직까지 국내 철도 노반 다짐도 품질관리를 목적으로 사용되는 동평판재하시험에 대한 시험기준 및 기준값이 없으므로 KRRI[11]에서 제시된 바 있는 동평판재하시험 변형계수(E_{vd})와 반복평판재하시험 변형계수(E_{v2})의 상관관계를 이용하여 비교 분석을 실시하였다. Table 1과 Table 2는 각각 변형계수(E_{v2}, E_{vd}) 사이의 상관관계 및 일반적인 LWDT의 구성 사양을 정리한 것이다. 동평판재하시험기의 자세한 구성 및 구동원리는 Lim[12]에 자세히 설명되어 있으므로 생략한다.

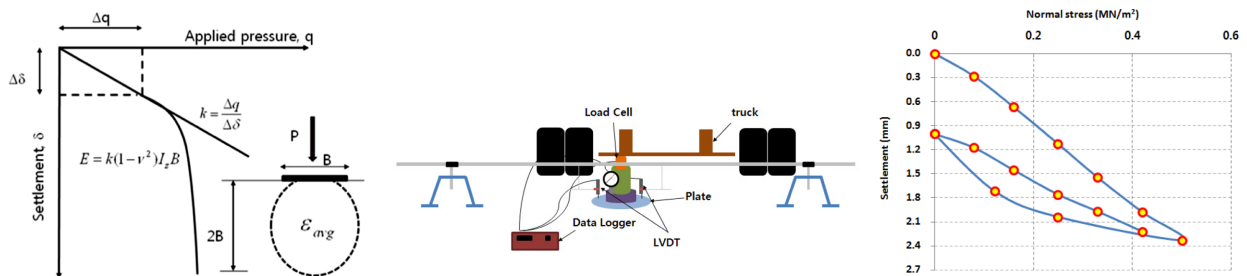


Fig. 3. Schematics of RPBT and normal stress (σ_0)-settlement (s) graph.

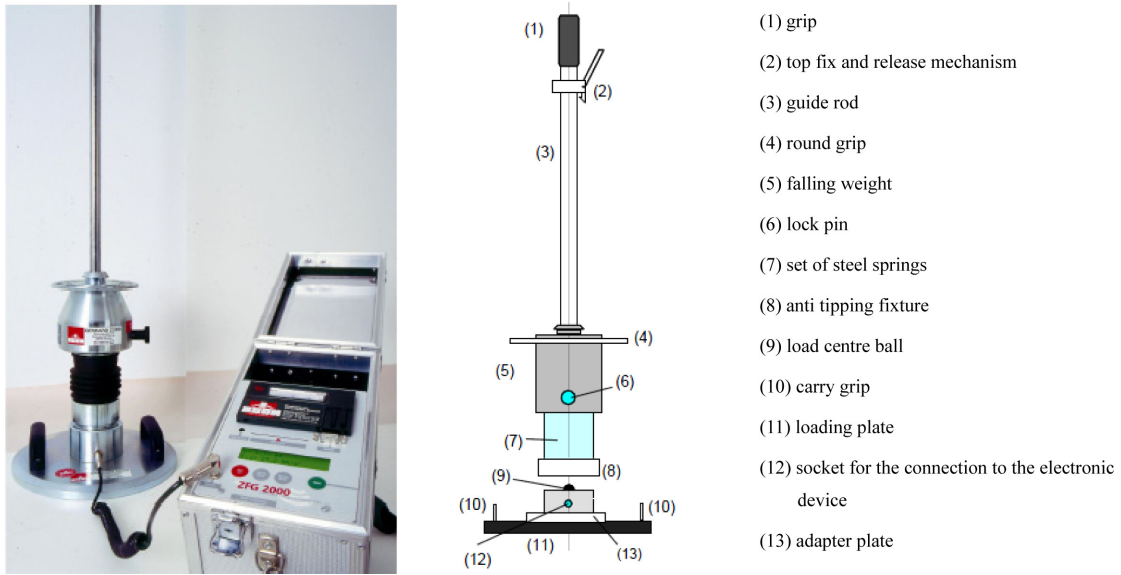


Fig. 4. General description of LWDT device.

Table 1. Correlation between E_{v2} and E_{vd} (KRRI[9]).

E_{v2} (MN/m ²)	E_{vd} (MN/m ²)
120	60
100	50
80	40
45	25

Table 2. General specifications of LWDT device.

Plate	Diameter	300mm
	Thickness	20mm
	Weight	15kg
Falling weight	Weight	10kg
Guide rod weight	Weight	5kg
Measuring devices	Measurement Range	8 ~ 100Hz
	Displacement amplitude	0.2 ~ 1.0mm
	Accuracy	0.02mm

3. 시험 결과

3.1 기본물성시험 결과

다짐된 궤도노반용 흙재료에 대한 평가는 물리적, 역학적 시험을 통해 적정여부를 검토한다. 물리적 판단기준으로는 일반적으로 입도시험을 통한 200번체 통과량(P_{200}), 4번체 통과량(P_4), 균등계수(C_u), 곡률계수(C_c) 및 다짐시험을 통한 최대건조단위 중량(γ_{d-max}), 최적함수비(OMC) 등의 기초물성 값이 사용될 수 있으며, 역학적 판단기준으로는 점착력(c), 내부마찰각(ϕ) 및 변형계수(E) 등이 사용될 수 있다. 국내 철도설계기준[9]에서는 궤도용 흙노반 재료에 대해 통일분류법(USCS)에 근거하여 균분류([A], [B], [C], [D]군)를 한 후 각 군에 속한 흙재료가 흙노반에 적합한 지를 판단하도록 분류규정을 제시하고 있다. 그러나 이와 같은 균분류 기준은 군(群)별 구체적인 역학적 특성치에 대한 제시가 결여되어 있으며, 각 흙재료의 다짐 후 역학적 특성을 간과하고 단순한 입도와 컨시스턴시(PI 등) 위주의 물성만을 고려한 것으로서 다짐조건(다짐도 및 함수비)에 따라 달라지는 흙재료의 변형특성을 반영할 수 있도록 하여야 한다.

Table 3은 본 연구에서 진행한 바 있는 국내 신설 철도공사 현장 10개 공구의 상부노반층에서 채취된 궤도노반 흙재료에 대한 기초물성 데이터를 정리한 것이다.

실내 기초물성시험을 실시한 결과 4번체 통과량(P_4)은 74.55~99.05%, 200번체 통과량(P_{200})은 0.10~1.40%로 국내 철도설계 기준에 제시된 기준 값(최대입경: 100mm이하, P_4 : 25~100%, P_{200} : 0~25%) 내에 모두 포함되는 결과를 보였다. 균등계수(C_u)는 3.67~11.67, 곡률계수(C_c)는 0.47~1.30으로 USCS분류기준에 따라 SW, SP 두 종류의 흙으로 분류되었으며, 이는 철도설계 기준에 의해서 [A군] 또는 [B군]에 해당하는 것임을 확인할 수 있었다.

Table 3. Basic soil properties of trackbed soils obtained from 10 new railway construction field sites in Korea.

Division	Basic soil properties								
	$P_{200}(\%)$	$P_4(\%)$	C_u	C_c	G_s	$\gamma_{dmax}(kN/m^3)$	OMC(%)	USCS	Field ω (%)
Field A	0.55	84.95	7.92	0.87	2.69	2.19	8.7	SP	5.0
Field B	0.35	74.85	10.00	1.01	2.65	2.15	8.0	SW	8.3
Field C	0.40	76.00	6.77	0.75	2.65	2.09	9.8	SP	6.1
Field D	0.35	98.55	5.10	0.78	2.56	2.08	10.3	SP	4.3
Field E	0.10	89.50	4.66	1.01	2.53	2.07	10.5	SP	7.9
Field F	1.35	75.55	11.50	1.04	2.64	2.07	9.8	SW	4.4
Field G	1.40	74.55	11.67	0.47	2.66	2.05	9.8	SP	8.1
Field H	0.50	92.10	5.00	1.30	2.65	2.11	7.4	SP	4.8
Field I	0.60	98.60	5.14	1.10	2.64	2.02	9.5	SP	6.7
Field J	0.25	99.05	3.67	1.13	2.60	2.05	9.7	SP	5.6

3.2 변형계수 데이터 분석

다음 Table 4는 국내 신설 철도시공 현장 10개 공구로부터 획득된 변형계수 현장측정결과를 정리한 것이다. 반복평판재하시험(RPBT) 및 동평판재하시험(LWDT)을 실시하였고, 시험결과를 Table 4에 각 변형계수의 평균값(Average)으로 계산하여 정리하였다.

Table 4. Average deformation modulus (E_{v2} , E_{vd}) measured in field test.

Division	Average field deformation modulus									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
E_{v2} (MPa)	72.40	86.76	80.13	173.06	227.12	99.80	94.32	91.97	63.70	131.61
E_{vd} (MPa)	39.98	72.67	51.24	115.19	137.65	58.74	68.94	56.46	32.26	59.62

시험분석 대상인 동일 현장 10개 공구에서 반복평판재하시험 및 동평판재하시험을 각각 30회, 236회 실시한 결과 대부분 다짐도 품질관리 기준값을 만족하는 결과를 보였으나 일부 부족한 경우도 확인되었다. 그러나 정확한 판정기준 수립을 설정하기 위해서는 반복평판재하시험 변형계수 E_{v2} 및 동평판재하시험 변형계수 E_{vd} 의 상관성을 보다 정확하게 분석하여 새롭게 품질기준을 제시할 필요가 있다. 또한 공진주시험 및 회복탄성계수 시험결과 등과의 비교분석을 통한 역학적 특성의 타당성을 부여하고 이들 사이의 상관성을 수립할 필요가 추가되어야 함을 확인하였다.

4. 상관성 분석

4.1 기초물성과 변형계수(E_{v2} , E_{vd})의 상관성 분석

4.1.1 상관성 분석을 위한 회귀분석

본 연구에서는 통계분석 프로그램인 SPSS를 사용하여 선형 회귀분석을 실시, 예측모델에 필요한 회귀 모델 계수를 결정하였다. 이를 이용하여 실내 및 현장시험을 통해 획득한 기초물성 데이터와 변형계수의 상관식을 도출하였다.

4.1.2 궤도 흙노반 재료의 기초물성과 변형계수와의 상관식 도출

선형회귀분석의 입력변수로 사용되는 종속변수(변형계수; E_{v2} , E_{vd})를 예측하기 위한 필요한 독립변수들을 200번째 통과량(P_{200}), 4번째 통과량(P_4), 균등계수(C_u), 곡률계수(C_c), 최대진조다짐밀도(γ_{d-max}), 최적함수비(OMC), 비중(G_s)로 설정하고 독립변수와 종속변수 사이에 선형적 관계식 설정을 유도하기 위하여 log - log 대수법을 응용하여 자연로그(ln) - 자연로그(ln) 대수 관계식이 설정되는 것을 가정하였다. 예측모델에 자연로그를 씌우면 아래 식 (8)과 같은 모형식이 유도된다.

$$\ln(E_{v2}, E_{vd}) = \ln A + B \cdot P_{200} + C \cdot P_4 + D \cdot C_u + E \cdot C_c + F \cdot G_s + G \cdot \gamma_{d-max} + H \cdot OMC \quad (8)$$

다음 Table 5와 Table 6은 선형회귀분석을 통해 얻은 회귀계수 값을 정리한 결과표이다. 시험 값과 예측 값의 신뢰수준은 비교 값 사이의 R²로 판단할 수 있다. 변형계수 예측식에 대한 R² 값은 각각 0.85, 0.68로 비교적 높은 신뢰수준을 나타내었다. 산출된 회귀계수 값을 식 (8)에 대입하여 기초물성데이터와 흙노반 변형계수(E_{v2} , E_{vd})간의 상관식을 도출하였다(식 (9), 식 (10)).

$$E_{v2} = 2834.502 - 4.004P_{200} - 0.5P_4 + 2.068C_u - 12.6C_c - 1143.75G_s + 159.097\gamma_{d-max} - 0.814OMC \quad (9)$$

$$E_{vd} = 2285.729 - 1.007P_{200} - 0.249P_4 + 1.107C_u - 34.753C_c - 858.787G_s + 43.638\gamma_{d-max} + 3.515OMC \quad (10)$$

결정된 상관식(식 (9), 식 (10))의 유효성 검토를 위해, 본 연구에서 실시한 국내 신설철도 시공현장 10개 공구 데이터 이외에 추가로 기존 문헌[13]에서 철도궤도 상부노반 흙재료에 대한 실내물성시험 데이터 및 현장시험 데이터를 수집하였다. 수집된 실내물성시험 데이터 및 현장시험 데이터를 이용, 예측 변형계수(predicted E_{v2} , E_{vd})와 현장 측정 변형계수(Measured E_{v2} , E_{vd})로 각각 구분하여 유효성 검토를 실시하였다(Fig. 5). 우선 실측값과 예측값을 1:1로 매칭하여(검은 실선) 나타낸 후 비교 검토한 결과, E_{v2} 데이터의 경우 기본물성시험을 예측식에 대입하여 얻은 예측 변형계수(predicted E_{v2})와 실제 현장에서 시험을 통해 측정된 변형계수(measured E_{v2})가 상당부분 일치하며 R²값이 0.85로 실측값과 예측값이 비교적 높은 상관관계를 갖는 것임을

Table 5. Linear regression analysis by SPSS (I).

Division	E_{v2}		E_{vd}	
	Coefficient	Standard error	Coefficient	Standard error
Index	2834.502	207.368	2285.729	227.828
P_{200}	-4.004	8.689	1.007	9.546
P_4	-0.500	0.302	-0.249	0.331
C_u	2.068	1.838	1.107	2.019
C_c	-12.600	8.041	-34.753	8.834
G_s	-1143.749	50.791	-858.787	55.802
γ_{d-max}	159.097	39.719	83.562	43.638
OMC	-0.814	3.199	-9.234	3.515

Table 6. Linear regression analysis by SPSS (II).

E_{v2}				E_{vd}			
R	R ²	Modified R ²	Standard error	R	R ²	Modified R ²	Standard error
0.919 ^a	0.845	0.840	19.15671	0.825 ^a	0.681	0.672	21.04681

a. Predicted value : constant, P_{200} , P_4 , C_u , C_c , G_s , γ_{d-max} , OMC

b. Dependent variable : E_{v2} , E_{vd}

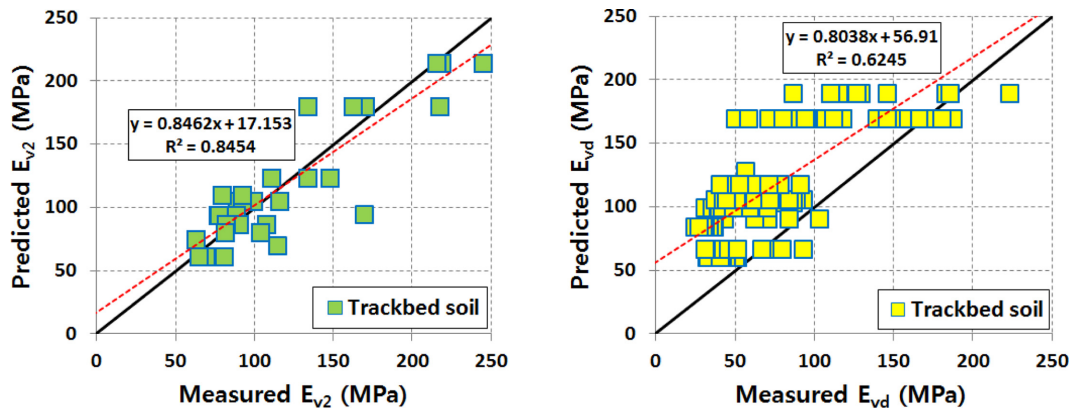


Fig. 5. Comparison of measured and predicted deformation modulus (E_{v2} , E_{vd}).

확인하였다. 다만 E_{vd} 비교 데이터에서는 예측 변형계수(predicted E_{vd})가 실제 현장에서 측정된 변형계수(measured E_{vd})보다 상대적으로 크게 산출되며, R^2 값이 0.62로 E_{v2} 데이터에 비해서는 상대적으로 낮은 상관관계 수준을 나타내었다.

결정된 상관식은 국내 신설 철도시공 현장 10개 공구에서 실시한 시험결과를 분석하여 도출된 것이며 일반화 하기에는 아직까지 데이터수가 상대적으로 부족하며 보다 많은 현장시험과 실내시험을 통한 데이터베이스의 확장 및 이들 사이의 상관성 제고가 필요하다. 또한 대부분의 현장 사용노반 흙재료가 비교적 양질인 것을 감안하여 향후 비교적 열위의 보다 많은 현장시험(반복평판재하시험 및 동평판재하시험)을 추가로 실시하여 역학적 시험결과에 기반한 흙분류 기준을 재정립 할 예정이다.

5. 결 론

본 연구에서는 궤도노반으로 사용되는 흙재료의 기초물성에 입각한 변형계수 예측모델 수립을 최종 목적으로 국내 신설 철도현장에서 채취된 노반 흙재료에 대하여 실내 기본물성시험을 실시하였고, 이를 현장에서 직접 구한 변형계수(E_{v2} , E_{vd})와의 회귀분석을 통해 상관식을 구하고 이의 유효성을 검토하였으며 아래와 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 시험분석 대상인 10개 공구의 현장에서 실제 사용하는 흙노반 재료는 대부분 양질의 재료군에 속하였으며 현행 철도설계 기준에 의해서 [A군] 또는 [B군]에 해당하는 것을 확인하였다.

(2) 시험분석 대상 동일 현장 10개소에서 반복평판재하시험 및 동평판재하시험을 각각 30회, 236회 실시한 결과 대부분 다짐도 품질관리 기준 값을 만족하는 결과를 보였으나 일부 부족한 경우도 확인되었다. 그러나 정확한 판정기준 수립을 설정하기 위해서는 반복평판재하시험 변형계수 E_{v2} 및 동평판재하시험 변형계수 E_{vd} 의 상관성을 정확하게 분석하여 새롭게 품질기준을 제시할 필요가 있다. 또한 공진주시험 및 회복탄성계수 시험결과 등과의 비교분석을 통한 역학적 특성치의 타당성을 부여하고 이들 사이의 상관성을 수립할 필요가 추가되어야 함을 확인하였다.

(3) 선형회귀분석을 통해 기초물성 데이터와 흙노반 변형계수(E_{v2} , E_{vd}) 간의 비교적 신뢰도가 높은 상관식을 도출하였으며 다음과 같다.

$$E_{v2} = 2834.502 - 4.004P_{200} - 0.5P_4 + 2.068C_u - 12.6C_c - 1143.75G_s + 159.097\gamma_{d-max} - 0.814OMC$$
$$E_{vd} = 2285.729 - 1.007P_{200} - 0.249P_4 + 1.107C_u - 34.753C_c - 858.787G_s + 43.638\gamma_{d-max} + 3.515OMC$$

(4) 결정된 상관식은 국내 신설 철도시공 현장 10개 공구에서 실시한 시험결과를 분석하여 도출된 것이며 일반화 하기에는 아직까지 데이터수가 상대적으로 부족하며 보다 많은 현장시험과 실내시험을 통한 데이터베이스의 확장 및 이들 사이의 상관성 제고가 필요하다. 또한 대부분의 현장 사용노반 흙재료가 비교적 양질인 것을 감안하여 향후 비교적 열위의 보다 많은 현장시험(반복평판재하시험 및 동평판재하시험)을 추가로 실시하여 역학적 시험결과에 기반한 흙분류 기준을 재정립 할 예정이다.

후 기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(15RTRP-B067919-03)에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] RTRI (2007) Railway Structure and Design Standards Commentator, Railway Technical Research Institute.
- [2] DIN 18 196 (2011) Soil classification for civil engineering purposes and methods of soil identification, Deutsche Industrienormen.
- [3] RTRI (1992) Railway Structure and Design Standards Commentator, Railway Technical Research Institute.
- [4] AASHTO (2004) Guide for mechanistic-empirical design, American Association of State Highway and Transportation Officials, National Cooperative Highway Research Program.
- [5] M.W. Witzczak (2000) Resilient Modulus as Function of Soil Moisture A study of the expected changes in resilient modulus of the unbound layers with changes in moisture for 10 LTPP sites, Inter Team Technical Report Seasonal 2, NCHRP 1-37A.
- [6] D. Li and E.T. Selig (1994) Resilient modulus for fine-grained subgrade soil, *Journal of Geotechnical Engineering Proceedings of ASCE*, 120(6), pp. 939-957.
- [7] Zhang, Chaohan (2004) The effect of high groundwater level on pavement subgrade performance, *Ph.D Thesis*, Florida State University.

- [8] W.V. Ping (2007) Enhancement of Resilient Modulus Data for the Design of Pavement Structures in Florida, Florida Department of Transportation.
- [9] KR (2013) Design Specification for Railroad, Korea Rail Network Authority.
- [10] DIN 18 134 (1993) Plattendruckversuch, Deutsches Institut C Institut für Normung e. V, Deutsche Industrienormen.
- [11] KRRI (2012) Development of Asphalt Roadbed and Track System suited to Speed Up, report for the Korea Railroad Research Institute.
- [12] Y.J. Lim, C.Y. Choi, J.W. Lee, H.J. Cho (2015) Correction factors for modulus calculation equation used in light weight deflectometer considering track foundation, *Journal of the Korean Society for Railway*, 18(1), pp. 53-62.
- [13] D.S. Kim (2012) Evaluation of modulus and load-settlement characteristics of subgrade soil used in track foundation, *Master's Thesis*, PaiChai University.
- [14] C.Y. Choi, E.C. Shin, H.H. Kang (2012) Prediction of plastic settlement of roadbed materials through cyclic loading test, *Korea Geosynthetics Society*, 11(3), pp.1-9.
- [15] G.H. Kweon, J.N. Jo, T.J. Hwang (2009) Correlation model between strength and stiffness characteristics for subgrade soils in Korea, *Korea Society of Road Engineers*, 11(4), pp.17-23.
- [16] S.W. Park, C.H. Lee, K.Y. Hwang (2006) Effect of density on water content reflectometer measured field water content in pavement subgrades, *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, 8(3), pp. 115-127.
- [17] C.Y. Choi, J.B. Park, S.J. Lim, S.H. Ji, Y.J. Lim (2015) Development of correlation between soil properties and modulus of subgrade soils used as trackbed, *2015 Spring Conference of the Korea Society for Railway*, Korea, pp. 1047-1052.
- [18] R.F. Pezo, D.S. Kim, K.H. Stoke and W.R. Hudson (1991) Developing a reliable resilient modulus testing system, *Transportation Research Record 1307*, Washington D. C, pp. 98-99.
- [19] K.R. Massarsch (2004) Deformation properties of fine-grained soils from seismic test, Keynote lecture, *International Conference on site Characterization*, Milpress, Porto, p. 14.
- [20] H.B. Seed, R.T. Wang, I.H. Idriss and K. Tokimatsu (1984) Moduli and damping factors for dynamic analysis of cohesionless soil, *College of Engineering*, University of California, pp. 1-34.

(Received 18 February 2016; Revised 21 March 2016; Accepted 11 April 2016)

Jea-Beom Park: bum1982@hanmail.net

Department of Civil, Environmental and Railroad Engineering Paichai University, 155-40 Baejae-ro, Seo-gu, Daejeon, Korea

Chan-Yong Choi: cychoi@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 437-757, Korea

Sang-Hyun Ji: jsh7077@nate.com

Department of Civil, Environmental and Railroad Engineering Paichai University, 155-40 Baejae-ro, Seo-gu, Daejeon, Korea

Sang-Jin Lim: qseszs@naver.com

Department of Civil, Environmental and Railroad Engineering Paichai University, 155-40 Baejae-ro, Seo-gu, Daejeon, Korea

Yu-Jin Lim: yujin@pcu.ac.kr

Department of Civil, Environmental and Railroad Engineering Paichai University, 155-40 Baejae-ro, Seo-gu, Daejeon, Korea