

국내 철도궤도 흙노반 재료의 회복탄성계수(M_R)-전단탄성계수(G) 상관성 분석

Analysis of Correlation between Resilient Modulus and Shear Modulus of Subgrade soils used as Trackbed

최찬용*, 박재범**†, 임상진**, 지상현**, 임유진**

Chan Yong Choi*, Jae Beom Park**†, Sang Jin Lim**, Sang Hyun Ji**, Yu Jin Lim**

Abstract It is important to determine exact value of soil modulus based on stress-strain relationship of compacted subgrade soil under track that experiences dynamic load of the train. In particular, resilient modulus(M_R) and shear modulus(G) are useful design input parameters that can be used to determine mechanical behavior of the subgrade soil under track. In this study, soil samples prepared for considering change of water content (OMC, $\pm 2\%$) in the field are used for simulating upper subgrade soil and tested by cyclic triaxial compression test and mid-size resonant test(RC) in order to obtain resilient modulus(M_R) and shear modulus(G), respectively. A correlation analysis was performed using those M_R and G tested results. It is found that soil modulus including resilient modulus and shear modulus may increase seriously with decrease of water content.

Keywords: Resilient modulus, Shear modulus, Cyclic triaxial compression test, Mid-size resonant column test, Correlation analysis

초 록 열차의 동적하중을 반복적으로 받게 되는 궤도하부 흙노반 재료는 응력(σ)-변형률(ε) 관계에 기초한 탄성계수의 정확한 분포범위 검토와 응력 및 변형률 수준별 크기를 파악하는 것이 매우 중요하다. 특히, 회복탄성계수(M_R)와 전단탄성계수(G)는 응력수준 및 변형률 크기에 따라 궤도하부 거동을 좌우하는 중요한 설계 입력물성으로, 이를 반영한 노반설계가 반드시 필요한 실정이다. 본 연구에서는 철도노반 신설현장에서 사용되는 상부노반 흙재료에 대해 함수비(OMC, $\pm 2\%$)를 달리하여 반복삼축압축시험과 중형공진주시험을 각각 실시, 산출된 회복탄성계수(M_R)와 전단탄성계수(G)간의 상관성을 조사, 분석하였다. 분석결과 함수비가 감소할수록 회복탄성계수와 전단탄성계수는 급격한 증가현상을 보였다. 향후 분석결과를 바탕으로 추가시험을 통하여 예측모델을 수립하고 각 모델계수 값을 획득할 수 있을 것이다.

주요어 : 회복탄성계수, 전단탄성계수, 반복삼축압축시험, 중형공진주시험, 상관성

1. 서 론

매우 큰 동적하중을 반복적으로 받는 철도궤도 토공노반의 경우에는 하중주파수의 변화를

† 교신저자 : 배재대학교 공과대학 건설환경철도공학과 (passion@pcu.ac.kr)

* 한국철도기술연구원

** 배재대학교 건설환경철도공학과

꺾게 되며 함수비의 변화 등 환경조건의 변화와 하중의 변화에 따라 변형계수의 증가와 감소를 반복적으로 경험하게 된다. 이는 궤도하부구조를 구성하는 노반 흙재료가 하중 재하시 받게 되는 변형특성의 정밀한 모사를 필요로 하며, 응력의 크기 및 변형률 수준에 입각한 흙노반의 정확한 거동해석이 이루어져야 하는 것을 의미한다. 특히 궤도 노반 흙재료의 경우 설계 기준 값 및 다짐관리기준의 확보를 위하여 탄성계수의 정확한 응력 및 변형률의 수준별 크기를 파악하고 적합한 예측모델을 수립하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 철도노반 신설현장에서 사용되는 상부노반 다짐 흙재료에 대해 함수비(OMC, ±2%)를 달리하여 반복삼축압축시험과 중형공진주시험을 각각 실시, 도출된 회복탄성계수(M_R)와 전단탄성계수(G)간의 상관성을 조사, 분석하였다.

2. 본 론

2.1 회복탄성계수(M_R) 산정을 위한 반복삼축압축시험

2.1.1 반복삼축압축시험의 구성 원리 및 시험방법

궤도하부 노반 흙재료의 탄성계수(E)는 응력 및 변형률 의존적 물성 값이다. 철도궤도 노반 흙재료의 경우 축차응력(σ_d)과 변형률(ϵ_r)의 비로 회복탄성계수(M_R)를 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다[1].

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

현재 철도궤도 하부구조 및 도로포장하부구조에 적용할 수 있는 통일된 회복탄성계수 측정 시험법은 제시된 바 없다. 다만 국가별 또는 기관별로 각각의 연구 목적 또는 시행의도에 따라 독자적인 시험법을 수립하여 시험을 수행하고 있다. 본 연구에서는 철도궤도 하부구조에 적용 가능한 반복삼축압축시험의 표준 시험법을 Table. 1과 같이 잠정 결정하였다. 또한 궤도 노반 흙재료의 회복탄성계수(M_R)를 획득하기 위하여 반복삼축압축시험 시스템을 Fig. 1과 같이 구축하였다.

Table. 1 Summary of MR test protocol

Division	Contents	Division	Contents
Material types	Max aggregate size < 0.2mm diameter	Confining pressure	7.5 kPa
Specimen preparation	Impact(proctor) compaction by KS F 2312	Chamber medium	Air
Specimen compaction	Moisture content and density reps of field conditions 5 specimens(OMC, ±2% and more than 95% density)	Specimen conditioning	15kPa confining at deviator stress of 70kPa; 500 reps
Height, Diameter	100mm diameter * 200mm high	Load type	Frequency of sinewave(5Hz)
Response measurement	Internal 2 LVDTs	Results	Average of last 5 cycles use to computed M_R



Fig. 1 Cyclic triaxial compression test

2.2 전단탄성계수(G) 산정을 위한 공진주시험

2.2.1 공진주시험의 구성원리 및 시험 방법

일반적으로 흙노반과 같은 지반재료의 거동특성은 Fig. 1과 같이 전단탄성계수(G)-대수 변형률(γ)의 관계로 나타내어, 선형영역과 비선형영역으로 구분한다. 선형영역과 비선형영역으로 구분 짓는 변형률 크기를 선형한계변형률(γ_r^e)이라 한다. 일반적으로 지반재료의 선형한계변형률은 0.001%~0.01% 범위에 존재하는 것으로 알려져 있다.

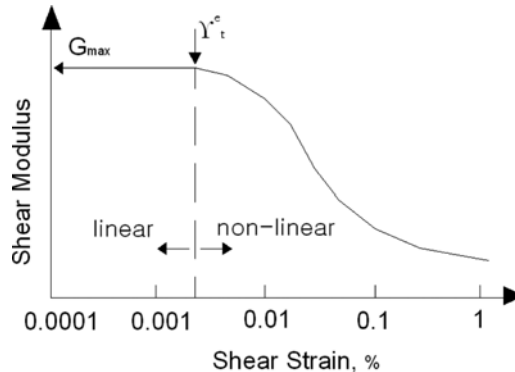


Fig. 2 Shear modulus-log shear strain(G-log γ)relation of typical soils

본 연구에서는 철도노반 신설현장 흙재료로 제작한 시험시편에 대해 공진주시험을 실시하였고, 이때 최적함수비(OMC)에서 획득한 최대전단탄성계수(G_{max}) 대비 전단탄성계수의 변화를 구속압에 따라 산출하였다. 최적함수비(OMC)에서 획득한 전단탄성계수를 정규화 시켜 정규화전단탄성계수(G/G_{max})로 표현할 경우 최적함수비 대비 건조측 및 습윤측에서 탄성계수의 변화를 명확하게 판단해 볼 수 있는 장점이 있다. 이를 위해 직경 $D = 10\text{cm}$, 길이 $L = 20\text{cm}$ 의 시편을 시험할 수 있는 자유단 - 고정단 방식의 Stokoe 형식인 중형 공진주 시험기를 사용하였다. 중형 공진주 시험기의 구성은 Fig. 3과 같다.

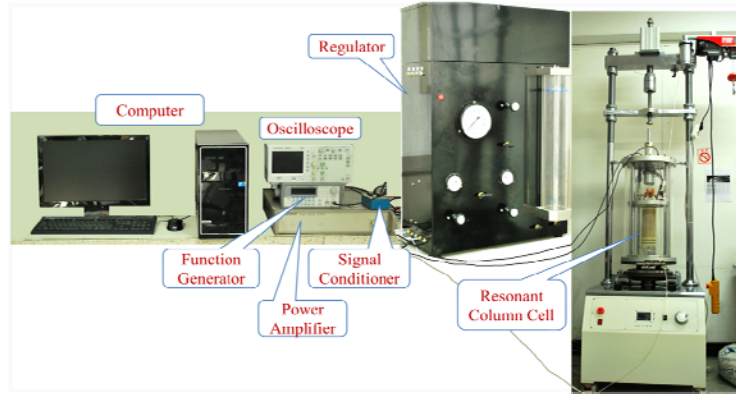


Fig. 3 Mid-size resonant column test

2.3 회복탄성계수(M_R)와 전단탄성계수(G)간의 상관성 분석

2.3.1 반복삼축압축시험 및 공진주 시험 결과

철도노반 신설현장 흙재료(Table. 2)를 대상으로 반복삼축압축시험 및 공진주시험을 실시하여 Fig. 4와 같은 결과를 도출하였다.

Table 2. Summary of basic soil properties

Division	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	C _u	C _c	P ₂₀₀	P ₄	USCS	OMC	γ_{d-max}	Gs	LL	PL
Field A	0.2mm	0.4mm	1.02mm	5.1	0.78	0.35%	98.55%	SP	10.3%	2.08g/cm ³	2.56	NP	NP

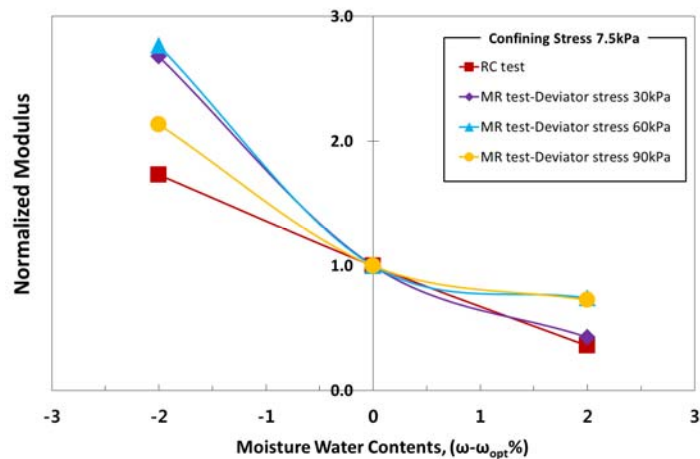


Fig. 4 Test results

검토결과 함수비가 낮은 상태의 건조측에서부터 함수비가 높은 습윤측으로 이동할수록 정규화된 전단탄성계수(G)와 회복탄성계수(M_R)는 감소되는 경향을 보였다. 특히, 최적함수비(OMC)를 기준으로 건조측으로 이동할수록 탄성계수(G , M_R)는 급격히 증가하는 형태를 보였으며, 습윤측으로 이동할수록 정규화된 탄성계수 기울기가 완만해지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 반

복삼축압축시험을 통해 측정된 정규화 회복탄성계수(M_R/M_{Rmax})가 중형공진주시험으로 측정된 정규화 전단탄성계수(G/G_{max})보다 상대적으로 큰 값이 도출되는 것을 확인하였다. 이를 통해 함수비 변화에 따른 흙재료의 급격한 탄성계수 변화를 확인하였고, 철도궤도 노반 현장 다짐 시공시 함수비 관리의 중요성을 인지하여 기준에 만족하는 다짐관리기준의 확보가 반드시 필요할 것으로 판단되었다.

3. 결론

본 연구에서는 철도노반 신설현장에서 사용되는 상부노반 흙재료에 대해 함수비(OMC, $\pm 2\%$)를 달리하여 반복삼축압축시험과 중형공진주시험을 각각 실시, 도출된 회복탄성계수(M_R)와 전단탄성계수(G)간의 상관성을 조사, 분석하였다. 검토결과 함수비가 낮은 상태의 건조측에서부터 함수비가 높은 습윤측으로 이동할수록 정규화된 전단탄성계수(G)와 회복탄성계수(M_R)는 감소되는 경향을 보였다. 특히, 최적함수비를 기준으로 건조측으로 이동할수록 탄성계수(G , M_R)가 급격히 증가하는 형태를 보였으며, 습윤측으로 이동할수록 정규화된 탄성계수 기울기가 완만해지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 반복삼축압축시험을 통해 측정된 정규화 회복탄성계수(M_R/M_{Rmax})가 중형공진주시험으로 측정된 정규화 전단탄성계수(G/G_{max})보다 큰 값이 도출되는 것을 확인하였다. 이를 통해 함수비 변화에 따른 흙재료의 급격한 탄성계수 변화를 확인하였고, 철도궤도 노반 현장 다짐 시공시 함수비 관리의 중요성을 인지하여 기준에 만족하는 다짐관리 확보가 반드시 필요할 것으로 판단되었다. 향후 분석결과를 바탕으로 추가시험을 통해 상관성 분석에 관한 예측모델을 수립하고 각 모델계수 값을 획득하여 궤도 노반 흙재료의 설계 기준 값 및 다짐관리기준 확보가 가능할 수 있을 것이다.

후 기

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

참고문헌

- [1] AASHTO (2002) 2002 Design Guide of New and Rehabilitated Pavement Structures, Research Report, National Cooperative Highway Research Program, USA.
- [2] H.B. Seed, R.T. Wang, I.H. Idriss, K. Tokimuatsu (1986) Moduli and damping factors for dynamic analysis of cohesionless soil, Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-84/14, University of California, Berkely
- [3] 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