

중형 공진주 시험기를 이용한 철도 흙노반재료의 동적특성 평가 Evaluation of Dynamic Properties of Track Bed Subgrade Soils Used in Korea Using Midsize Resonant Column Test Apparatus

임유진*[†], 김대성*, 조호진*, 이성혁**, 이진욱**

Yujin Lim*[†], Dae-Sung Kim*, Hojin Cho*, Seong-Hyeok Lee**, Jin-Wook Lee**

Abstract It is a well-known fact that dynamic properties should be considered in design and maintenance of civil structures undergoing dynamic force such as rail track. For designing of the rail track structures, dynamic properties of track bed subgrade soil such as shear modulus (G) and damping coefficients(D) obtained in small($10^{-5}\%$ ~ $10^{-3}\%$) to medium range($10^{-3}\%$ ~ $10^{-1}\%$) of shear strain must be known. In this study, a Stokoe type fixed-free resonant column test apparatus was designed and built to test a medium size compacted track bed subgrade soil sample of 10 cm diameter and 20 cm height with changing water content((OMC) $\pm 2\%$) and confining stresses (7.5, 15, 30 kPa each). It was possible to evaluate dynamic properties of the trackbed subgrade soil so that residual settlement can be predicted using a prediction model based on the dynamic properties of the subgrade soils.

Keywords : Trackbed subgrade, Shear modulus, Resonant column test, Water content

초 록 레도하부구조물과 같이 동적하중 작용시의 지반구조물의 정밀한 동적, 정적변형해석을 위해 저변형률($10^{-5}\%$ ~ $10^{-3}\%$) 및 중간변형률($10^{-3}\%$ ~ $10^{-1}\%$) 영역을 포함한 흙의 신뢰성 있는 비선형 전단탄성계수(G)와 감쇠비(D)등 동적물성치의 평가가 매우 중요하다. 국내 철도에서 보편적으로 사용되는 상부 흙노반재료에 대한 동적변형특성을 평가하기 위하여 직경 D=10cm, 길이 L=20cm의 시편을 시험할 수 있는 Stokoe 방식의 고정단-자유단 중형 공진주 시험기를 이용하여 공진주시험을 실시하였다. 흙노반의 깊이별 구속압 효과를 고려하여 구속압 7.5, 15, 30 kPa 및 최적함수비(OMC) $\pm 2\%$ 조건별로 공진주 시험을 수행하여 레도하부 흙노반이 경험하는 동적특성을 정량화할 수 있었으며 이를 활용하면 향후 레도하부구성층의 잔류침하량 등을 예측할 수 있는 모델수립이 가능할 것으로 판단된다.

주요어 : 흙노반, 전단탄성계수, 공진주시험, 함수비

1. 서 론

[†] 교신저자: 배재대학교 공과대학 건설환경철도공학과(yujin@pcu.ac.kr)

* 배재대학교 공과대학 건설환경철도공학과

**한국철도기술연구원

최근 철도차량하중 등 진동에 의해 궤도틀림 및 침하 등 궤도구조물의 피해사례가 증가하고 있다. 이러한 동적하중 작용시 궤도구조물의 정밀한 동적, 정적변형해석을 위해 저변형률($10^{-5}\% \sim 10^{-3}\%$) 및 중간변형률($10^{-3}\% \sim 10^{-1}\%$) 영역을 포함한 흙노반재료의 신뢰성 있는 비선형 전단탄성계수(G)와 감쇠비(D)등 동적물성치의 평가가 매우 중요하다. 흙노반 재료의 동적특성을 파악하기 위하여 직경 $D=10\text{cm}$, 길이 $L=20\text{cm}$ 의 시편을 시험할 수 있는 Stokoe 방식의 고정단-자유단 중형 공진주 시험기를 설계 및 제작하였으며 이를 이용하여 공진주시험을 실시하였다. 흙노반의 깊이별 구속압 효과를 고려하기 위하여 유한요소해석(ABAQUS)을 이용, 깊이별 구속압 분포를 파악(7.5, 15, 30kPa)하였으며 이를 바탕으로 최적함수비(OMC) 및 $OMC \pm 2\%$ 각 함수비 조건별로 공진주 시험을 실시하여 통상의 흙노반 재료가 경험하는 동적특성(G 및 D)을 평가하였다.

2. 흙노반재료에 대한 중형 공진주 시험

2.1 공진시험기의 구성

궤도하부구조물의 상부 흙노반이 경험하는 동적특성(G 및 D)을 평가하기 위하여 직경 $D = 10\text{cm}$, 길이 $L = 20\text{cm}$ 의 시편을 시험할 수 있는 자유단-고정단 방식의 Stokoe형식인 중형 공진주 시험기와 구동시스템 및 구동프로그램을 제작하였다. 시험기의 구성은 Fig. 1과 같다.



Fig. 1 Mid-size Resonant Column Test Apparatus

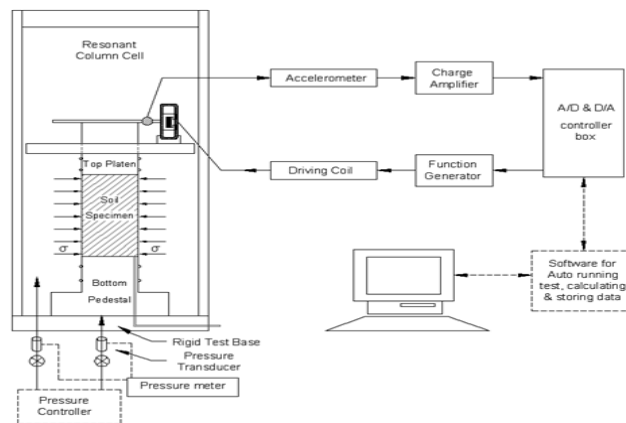


Fig. 2 System configuration of Resonant Column Test Apparatus

2.2 흙노반 재료의 기본물성시험

중형공진주 시험에 사용하는 시험시료는 국내 고속철도 공사현장에서 보편적으로 사용되고 있는 상부 흙노반 재료중 화강풍화토 계열의 노반재료를 선택하였다. Table 1 ~ Table 3 은 각 재료에 대한 기본 물성 시험 결과이다.

Table 1 Test Results of Sieve Analysis

Sieve analysis	D10 (mm)	0.21
	D30 (mm)	0.61
	D60 (mm)	3
	$(Cc) = (D30)^2 / (D60)(D10)$	0.59
	$(Cu) = D60 / D10$	14.29
	#200 Passing	0.5
	#4 Passing	71.5
Soil Classification	USCS	SP

Table 2 Compaction Test Results of Subgrade Soil

OMC (%)	8.5
Max, dry density (t/m^3)	2.16

Table 3 Specific Gravity and Atterberg Test Results

구 분	Subgrade Soil
비중(Gs)	2.74
액성한계(LL, %)	34.5
소성지수(PL, %)	NP

2.3 시험방법

중형공진주 시험기를 이용한 흙노반재료의 동적물성 평가시험을 위하여 먼저 Table. 4와 같이 유한요소해석에 의해 상부 흙노반이 경험하는 구속압 분포를 획득하고 이를 기반으로 시험을 실시하였다. 또한 최적함수비(OMC) 및 최적함수비(OMC) 대비 $\pm 2\%$ 별로 시편을 제작(Fig. 3)하여 각 함수비 대역별로 구속압조건을 바꾸어 가며 공진주 시험을 실시하였다. 축차응력이 가하여지지 않는 공진주시험에서는 시험시 시료에 가해지는 손상은 무시할 수 있을 정도이므로 하나의 시료로 모든 구속응력단계에서 시험을 실시하는 단계별시험법(staged testing)을 채택하였다. 시료를 공진주시험기 가압셀 내에 설치하고 시험준비가 완료되면 구속압을 가하고 Table 4와 같은 입력전압을 따라 순차적으로 전압을 높여가며 시험을 수행하였다.

Table 4 Input Voltages and Confining Pressure Applied on RC Samples

Confining Pressure	Water contents	Input Voltages
7.5kPa	OMC±2%	0.01V, 0.02V, 0.04V, 0.08V, 0.1V, 0.2V, 0.4V, 0.8V, 1V, 2V, 4V, 8V, 10V
15 kPa	OMC±2%	The same as 7.5kPa case
30 kPa	OMC±2%	The same as 7.5kPa case



Fig. 3 Prepared test samples at different water contents

3. 시험결과 분석

3.1 흙노반재료의 전단탄성계수 감소 곡선

레토구조물하부의 상부흙노반 재료를 최적함수비(OMC) 및 최적함수비±2% 조건에서 95% 이상의 다짐도로 직경 D=10cm 및 높이 H=20cm의 시편을 제작한 후 공진주 시험을 수행하여 전단변형률(γ) 변화에 따른 전단탄성계수(G) 감소곡선을 획득하였다. Fig. 4는 구속압 변화 및 함수비 변화 (OMC±2%)에 따른 전단탄성계수 감소곡선을 나타낸 것이다. 먼저 화강 풍화토 계열인 시험시료는 다짐 함수비에 따른 전단탄성계수의 변화가 매우 큼을 확인할 수 있다. 동일 구속압 조건에서 살펴보면 구속압 7.5 kPa에서는 OMC에서 준비된 시편의 전단탄성계수가 가장 크게 발현되었다. 반면 함수비가 OMC+2%에서는 이 보다 크게 전단탄성계수가 감소하는 경향을 보였으며 OMC-2%에서는 감소의 정도가 매우 작았다.

구속압 15 kPa에서는 미소변형에서 즉, 최대전단탄성계수(G_{max})의 크기는 OMC와 OMC-2%에서는 유사하였으나 OMC+2%에서는 상당히 감소한 결과를 보였다. 또한 전단변형률이 중간변형률 수준이 될 경우 OMC에서의 전단탄성계수보다 OMC-2% 및 OMC+2%에서의 전단탄성계수 감소가 두드러지는 경향을 보였다. 구속압이 작으면서(7.5kPa) 동시에 함수비가 OMC+2%가 되면 전체 전단변형률 영역에서 가장 작은 분포의 전단탄성계수를 보였다. 따라서 구속압이 작은 레토직하부에서 우수 유입에 의한 흙노반 강성저감에 매우 유의할 필요가 있다. 이는 분리의 발생과도 매우 밀접한 상관관계가 있을 것으로 판단된다.

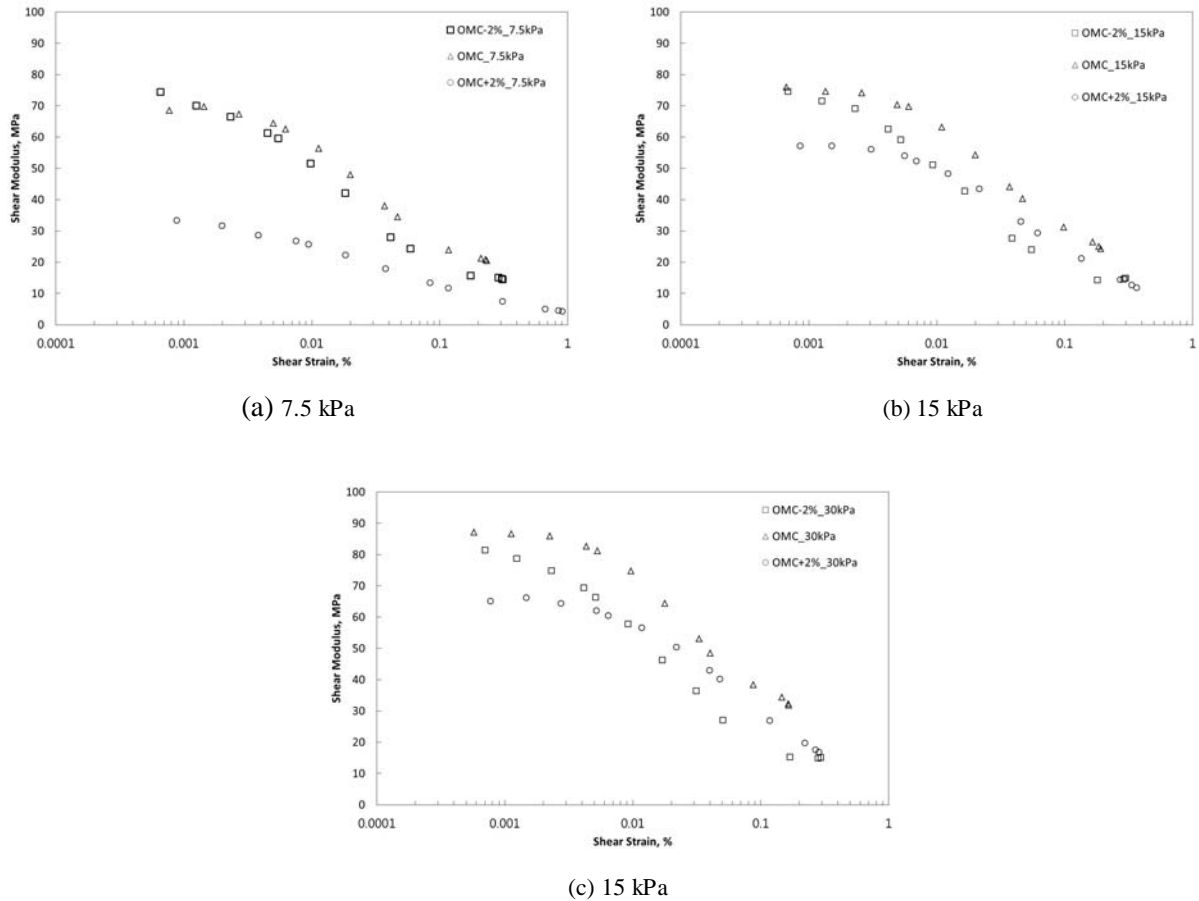


Fig. 4 Shear modulus reduction curves at different confining pressure levels

동일 함수비조건에서 살펴보면(Fig. 5) 전단탄성계수는 모든 전단변형률 대역에서 구속압의 영향이 있음을 알 수 있다. 즉, 구속압이 증가할수록 전단탄성계수가 증가하는 경향을 보였다. 반면, 건조측인 OMC-2%에서는 구속압의 영향이 매우 작음을 알 수 있으며(Fig. 5(a)) 함수비가 증가하여 OMC 또는 OMC+2%에서는 구속압의 영향이 상대적으로 두드러지게 커짐을 알 수 있다. 특히 건조측인 OMC-2%에서는 중간변형률 대역이상에서 구속압의 영향이 거의 없어지는 것을 확인할 수 있었다. 변형률이 증가함에 따라 구속압의 영향이 줄어드는 현상은 건조측 뿐 만 아니라 최적함수비 및 습윤측(OMC+2%)에서도 확인할 수 있었다.

최대전단탄성계수(G_{max})의 크기를 살펴보면 건조측인 OMC-2%(6.9%)에서는 약 74 ~ 81 MPa의 분포를 보였다. 이는 포아송비를 0.3으로 가정하였을 때 탄성계수 E값이 약 193 MPa ~ 211 MPa 정도에 이르는 것을 뜻한다. OMC(8.9%)에서는 최대전단탄성계수(G_{max})가 약 68 ~ 87 MPa의 분포를 보였다. 이는 포아송비를 0.3으로 가정하였을 때 탄성계수 E값이 약 178 MPa ~ 226 MPa 정도에 이르는 것을 뜻한다. 습윤측인 OMC+2%(10.9%)에서는 최대전단탄성계수(G_{max})가 약 33 ~ 65 MPa의 분포를 보였다. 이는 포아송비를 0.3으로 가정시 탄성계수 E값이 약 86 MPa ~ 169 MPa 정도에 이르는 것을 뜻한다. 따라서 함수비의 영향이 상당히 큼을 확인할 수 있으며 습윤측에서의 감소크기에 유의할 필요가 있다. 다만 과도한 습윤상태만 방지할 수 있다면 OMC+2% 정도에서는 통상의 노반재료의 다짐강성 요구수준(CBR=8)

을 벗어 나지 않는 것으로 판단된다. 또한 전단변형률이 증가하면서 전단탄성계수는 크게 감소하며 감소하는 정도는 함수율에 따라 달라지는 것을 알 수 있다.

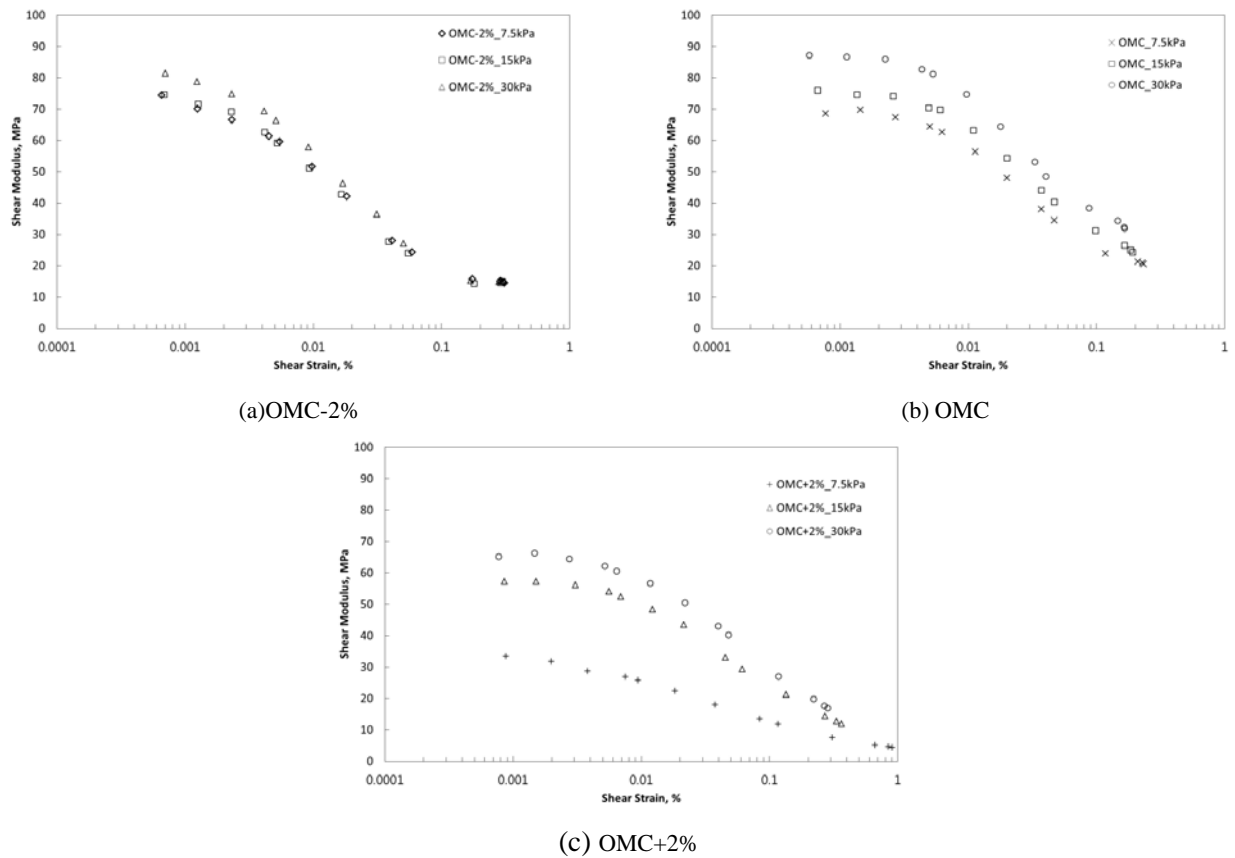


Fig. 5 Shear modulus reduction curves at different moisture contents

3.2 정규화 전단탄성계수(G/G_{max}) 감소곡선 비교

Fig.6은 흙노반 재료에 대한 중형 공진주 시험 결과 중 각 함수비 대역별(OMC 및 $OMC \pm 2\%$) 정규화 전단탄성계수 (G/G_{max}) 감소곡선을 비교하여 도시한 것이다. 정규화 전단탄성계수의 저감률은 함수비가 클수록 작다는 것을 알 수 있다. 또한 전단변형률이 증가함에 따라 전단탄성계수의 감소가 시작되는 한계변형률은 10^{-3} % 정도임을 알 수 있다. 이와 같은 감소율은 중간변형률 영역인 10^{-1} %에서 비교하여 보면 OMC에서(최대 전단탄성계수에 비하여 약 60% 감소) 보다는 건조측(OMC-2%)에서 더 큰 경향(최대 전단탄성계수에 비하여 약 75% 감소)을 보였으며 습윤측(OMC+2%)에서 62% 정도 저감하여 오히려 감소 정도로만 판단하였을 때 건조측의 감소율이 더 컸다.

각 구속압 단계별(7.5, 15, 30 kPa)로 함수비 변화에 따른 전단탄성계수 감소곡선을 살펴보면(Fig. 4) 동일 구속압에서 함수비가 증가할수록 오른쪽으로 이동하는 경향을 보인다. 따라서 모든 구속압 대역에서 습윤측일수록 전단탄성계수의 감소정도가 작음을 다시 확인할 수 있다.

따라서 철도차량과 같은 동적하중을 받는 상태에서의 흙노반 강성은 습윤상태일 경우 전단변형률 증가에 따른 구속압의 영향이 커짐에 유의하여야 하며 반면 건조측일 경우 구속압 보다는 전단변형률 증가에 따른 감소에 더욱 유의 하여야 함을 알 수 있다.

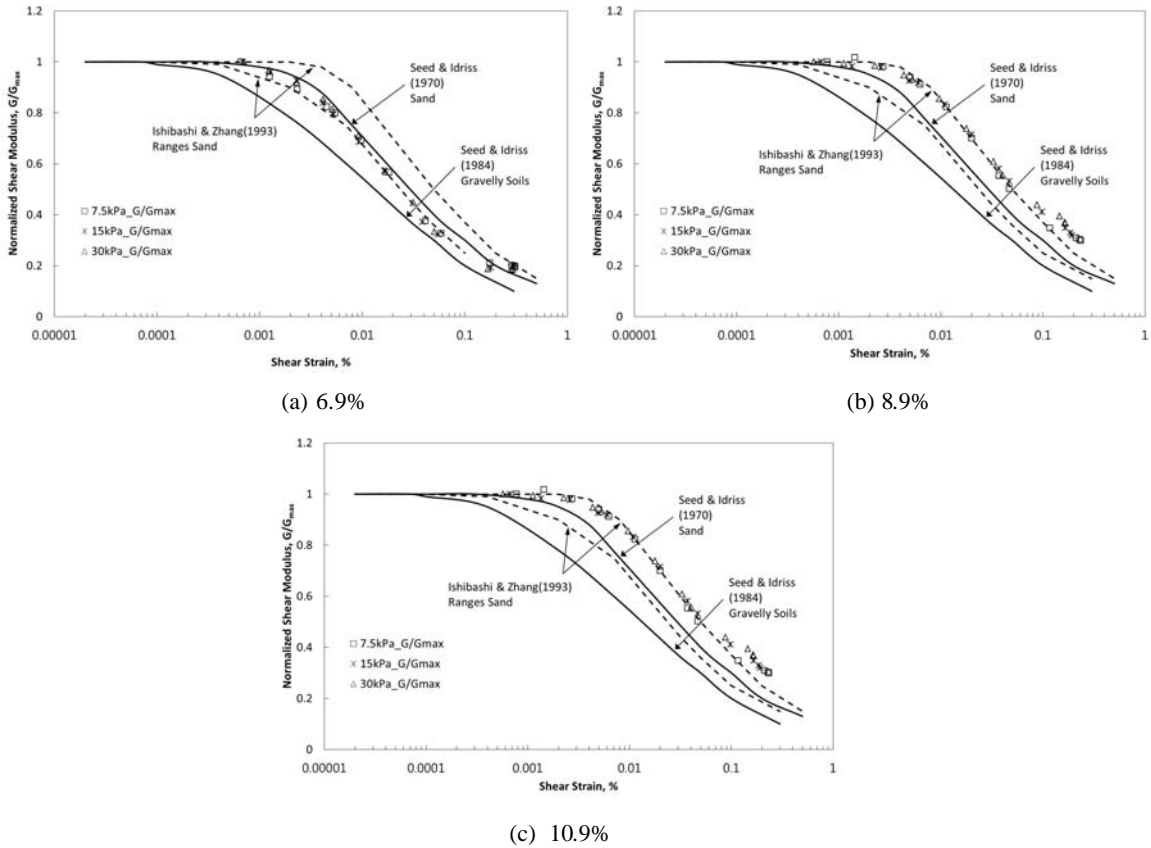


Fig. 6 Normalized shear modulus reduction curves at different water contents

4. 결론

본 연구에서는 국내 철도에서 보편적으로 사용되는 상부 흙노반재료에 대한 동적변형특성을 평가하기 위하여 Stokoe 방식의 고정단-자유단 중형 공진주 시험기를 이용하여 공진주시험을 실시하였다. 흙노반의 깊이별 구속압 효과를 고려하여 구속압 7.5, 15, 30 kPa 및 최적함수비(OMC) \pm 2% 조건별로 공진주 시험을 수행하여 궤도하부 흙노반이 경험하는 동적특성을 파악할 수 있었으며 동적특성에 미치는 구속압 및 함수비의 영향이 상당히 있음을 확인할 수 있었다. 특히, 구속압이 작을 경우 반복하중을 받는 궤도하부에서 습윤측 함수상태에 놓인 중간변형률 정도의 전단변형을 받는 흙노반의 다짐강성이 크게 감소할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 “철도건설 및 운영비 절감을 위한 경제성 향상 기술개발” 과제중 “고속화에 대응한 철도 아스팔트 노반 및 궤도구조 개발” 세부연구과제 성과물의 일부로서 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] H. B. Seed, and I. M. Idriss (1970) Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis, Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, Sept, 37p
- [2] K. H. Stokoe, II and P. E. Lodde (1978) Dynamic Response of San Francisco Bay Mud, *Proceedings, Earthquake Engineering and Soil Dynamic Conference*, ASCE, Vol. II , pp .940-945