

## 강화노반 및 궤도하부노반 재료의 회복탄성계수 Resilient Moduli of Sub-ballast and Subgrade Materials

박철수\* · 최찬용\*\* · 최충락\*\*\* · 목영진†

Chul-Soo Park · Chan-Yong Choi · Choong-Lak Choi · Young-Jin Mok

**Abstract** In the trackbed design using elastic multilayer model, the stress-dependent resilient modulus ( $E_R$ ) is an important input parameter, that is, reflects substructure performance under repeated traffic loading. However, the evaluation method for resilient modulus using repeated loading triaxial test is not fully developed for practical purpose, because of costly equipment and the significantly fluctuated values depending on the testing equipment and laboratory personnel. In this study, the paper will present an indirect method to estimate the resilient modulus using dynamic properties. The resilient modulus of crushed stone, which is the typical material of sub-ballast, was calculated with the measured dynamic properties and the range of stress level of the sub-ballast, and approximated with the power model combined with bulk and deviatoric stresses. The resilient modulus of coarse grained material decreases with increasing deviatoric stress at a confining pressure, and increases with increasing bulk stress. Sandy soil (SM classified from Unified Soil Classification System) of subgrade was also evaluated and best fitted with the power model of deviatoric stress only.

**Keywords** : Resilient Modulus, Dynamic Properties, Crosshole Tests, Resonant Column Tests, Sub-ballast, Subgrade

**요 지** 다층 탄성모델에 근거한 철도노반 설계는 열차의 반복 운하중에 의한 궤도 하부 구조의 거동을 반영하는 응력 의존적인 회복탄성계수( $E_R$ )가 각 층의 중요한 입력물성치가 된다. 그러나 반복하중을 가하는 기존의 회복탄성계수 시험법은 비용이 고가이고 시험장비와 숙련도에 따라 결과의 일관성이 떨어지는 단점이 있어 실질적인 적용에 어려움이 있었다. 본 연구에서는 이를 극복하기 위해 동적물성치를 이용한 대체 회복탄성계수 시험법을 적용하여 철도노반의 회복탄성계수를 결정하였다. 강화노반에 주로 사용되는 쇄석의 회복탄성계수는 측정된 동적물성치와 열차 운행 중 경험하는 강화노반의 응력을 고려하여 결정되었고, 체적응력과 축차응력의 거듭제곱 형태로 예측모델을 나타내었다. 쇄석의 회복탄성계수는 체적응력이 증가함에 따라 전체적으로 증가하는 경향을 보였고 축차응력이 증가함에 따라 감소하였다. 상하부노반의 주재료인 SM계열 토사 재료에 대하여 회복탄성계수를 평가하였고, 축차응력만을 이용한 거듭제곱 형태의 예측모델과 상관성이 매우 높게 나타났다.

**주 요 어** : 회복탄성계수, 동적물성치, 크로스홀 시험, 공진주 시험, 강화노반, 궤도하부노반

### 1. 서 론

철도노반은 평판재하시험으로부터 결정되는 지반반력계수( $k_{30}$ )나 변형계수( $E_{v2}$ )를 기초로 설계되어왔다. 그러나 이와 같은 설계입력변수는 운행 시 열차의 반복 운하중에 의

한 철도노반의 거동을 반영하지 못하는 단점이 있어, 다층 탄성모델에 근거한 새로운 개념의 합리적인 노반설계가 시도되고 있다. 다층 탄성모델에서는 궤도 하부구조인 철도노반의 각 층을 응력 의존적인 회복탄성계수( $E_R$ )로 표현한다.

반복하중을 가하는 기존의 회복탄성계수 시험법은 열차의 반복하중에 의한 철도노반의 거동을 이상적으로 모사할 수 있지만 실질적으로 적용에 어려움이 많다. 이를 극복하기 위해 동적물성치를 이용한 대체 회복탄성계수 시험법을 적용하여 철도노반의 회복탄성계수를 결정하였다. 동적물성치는 변형률 크기에 따라 저변형률 영역과 비선형 영역의 변형계

† 책임저자 : 정희원, 경희대학교 토목건축대학, 교수  
E-mail : yjmok@khu.ac.kr  
TEL : (031)201-2927 FAX : (031)202-8854

\* 정희원, 경희대학교 토목공학과, 박사과정

\*\* 정희원, 한국철도기술연구원, 궤도노반연구팀, 선임연구원

\*\*\* 비희원, (주)평화엔지니어링, SOC 사업부, 차장

수로 구분 지어진다. 저변형률 영역의 동적 강성(stiffness)은 크로스홀 시험으로부터 결정하고 비선형 영역의 변형계수 감소곡선은 공진주시험을 통하여 결정하였다. 본 연구에서는 궤도 하부 구조의 강화노반(sub-ballast)으로 주로 사용되는 쇄석(crushed stone)과 상하부노반(subgrade)의 주재료인 SM 계열의 토사 재료에 대해 회복탄성계수를 결정하고 예측모형을 개발하였다. 결정된 회복탄성계수는 열차의 반복하중에 의해 철도 노반이 경험하는 축차응력(deviatoric stress)과 체적응력(bulk stress), 그리고 열차의 반복하중 주파수(frequency of repeated train load) 등이 고려되었다.

## 2. 회복탄성계수( $E_R$ )의 정의

노반은 열차 주행에 의해 운하중을 반복적으로 받는다. 열차의 지속적인 반복하중이 작용하여 노반 내부에 다양한 응력의 변화와 변형이 발생하게 된다. 노반 내부에 이러한 반복하중이 지속적으로 작용하게 되면 탄성변형과 회복변형이 반복되고 반복횟수의 증가에 따라 소성변형도 누적되면서 재료가 안정화 되는 변형률 경화(strain hardening)가 일어난다. 하중재하 횟수가 충분히 증가하면 Fig. 1과 같이 소성변형보다 회복변형이 지배적으로 나타나게 된다. 이때의 응력-변형률 곡선의 기울기를 회복탄성계수( $E_R$ )라 정의하며 식 (1)과 같이 표현한다. 회복탄성계수는 시험 시 재료가 경험하는 축차응력 및 구속응력의 크기와 재하특성 등 응력조건에 따라 그 값이 변화하는 응력 의존적 탄성계수이다.

$$E_R = \sigma_d / \epsilon_r \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_d$ 는 반복축차응력(deviatoric stress)이며,  $\epsilon_r$ 은 충분한 반복재하에 의해 소성변형이 제거된 축방향의 회복변형률(recoverable strain)이다.

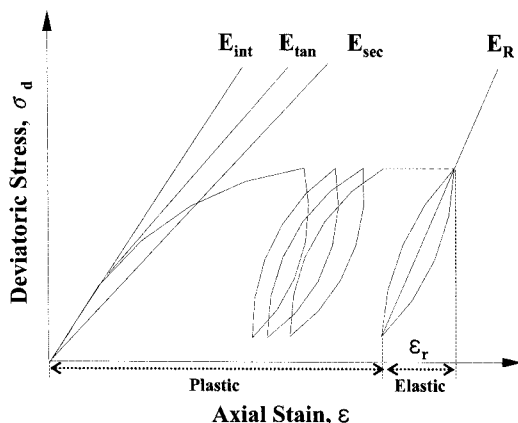


Fig. 1. Stress-strain relationship of trackbed under repeated loading

## 3. 시험방법 및 시험시료

### 3.1 대체 회복탄성계수 시험법

철도노반은 열차의 반복하중 상태에서 중간변형률 ( $10^{-3}\% \sim 10^{-1}\%$ )에 해당하는 변형을 경험한다. 이와 같은 운행환경이 반영된 탄성계수는 회복탄성계수이다. 회복탄성계수는 이론적으로 가장 이상적이고 노반이 경험하는 응력상태 등이 잘 반영된 탄성계수임에도 불구하고 그것의 결정이 매우 어렵고 보편화되어있지 않다. 따라서 본 연구에서는 탄성과 시험을 도입하여 철도노반의 회복탄성계수를 결정하고자 노력하였다. 권기철[1,2]은 이미 도로 포장 분야에서 노상도 및 보조기층 재료의 회복탄성계수를 결정하기 위하여 동적 시험방법인 자유단 공진주시험과 공진주/비틀전단 시험을 이용한 대체 시험법을 제안한바 있다.

대체 회복탄성계수 시험법은 철도노반이 경험하는 역학적 특성을 충분히 반영하면서 일반 기술자들이 보편적으로 사용이 가능하도록 절차가 간편하고 결과의 신뢰도가 높아야 한다. 본 연구에서는 대체 회복탄성계수 시험법으로 크로스홀 시험과 실내 공진주시험을 도입하였으며 강화노반에 주로 사용되는 쇄석 재료와 상하부노반의 주재료인 SM 계열의 토사 재료에 대하여 동적물성치를 측정하였다.

대표적인 노반의 동적물성치는 전단파속도 또는 전단변형계수( $G$ , shear modulus)이다. 현장 탄성파시험을 통해 측정된 전단파속도로부터 최대전단변형계수( $G_{max}$ )를 획득할 수 있고, 실내 공진주시험 또는 경험곡선으로부터 결정된 중간변형률 영역의 정규화 전단변형계수 감소곡선( $G/G_{max}$ )을 결합하여 변형률 크기에 따른 철도노반의 전단변형계수 감소곡선(shear modulus reduction curve)을 획득한다. 전단변형계수 및 전단변형률은 포아송비( $\nu$ , poisson's ratio)를 이용하여 영계수( $E$ , Young's modulus)와 축변형률( $\epsilon$ )로 변환된다. 영계수와 축변형률의 관계( $E-\epsilon$ )를 획득하는 일련의 과정을 Fig. 2에 도시하였다. 최종적으로 전체 변형률 영역의 영계수와 축변형률 관계로부터 노반이 경험하는 축차응력(변형률 크기)에 해당하는 영계수 즉, 회복탄성계수를 구하면 된다.

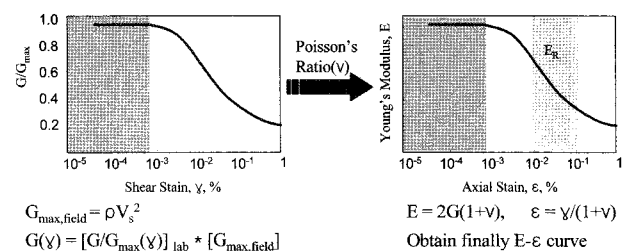


Fig. 2. Determining procedure of Young's modulus reduction curve

Table 1. Physical properties of trackbed materials

Trackbed Materials	Compaction Test		Sieve Analysis				PI, %	Specific Gravity	
	OMC, %	$\gamma_{dmax}$ , kN/m <sup>3</sup>	D10, mm	Cu	Cg	Percent Passing #40, %			Percent Passing #200, %
Crushed Stone	7.65	24.05	0.8	13.5	2.35	-	-	NP	2.70
Sandy Soils	10.3	19.42	0.35	22.2	1.78	55.6	3.5	3	2.68

3.2 시험시료

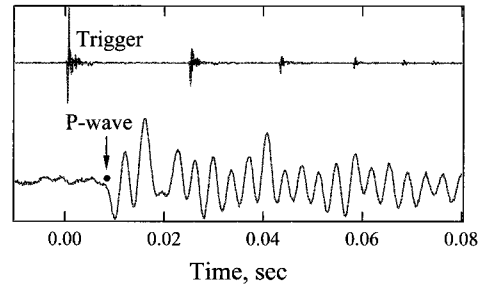
시험에 사용된 시료는 강화노반으로 주로 사용되는 입도 조정 쇄석과 상하부노반의 주재료인 SM계열의 토사 재료이다. 크로스홀 시험을 이용하여 미소변형률 영역의 동적 강성을 측정하기 위해 평택에 위치한 강화노반 현장부설구간에 검측공을 설치하였다. 노반 조성 재료의 기본 물성치는 Table 1에 나타내었다. 입도 조정 쇄석(M-40)은 경기도 안성에 위치한 채석장에서 채취한 것으로 주 압질은 호상 편마암이었다. 입도 조정 쇄석의 품질은 KS에 규정된 골재의 품질규정을 만족하고 있으며 최대건조밀도( $\gamma_{dmax}$ )는 24.05 kN/m<sup>3</sup>, 최적함수비(OMC)는 7.65%였다. 토사 시료는 화강풍화토로 다짐시험 결과 최대건조밀도( $\gamma_{dmax}$ )가 19.42 kN/m<sup>3</sup>, 최적함수비(OMC)는 10.3%였다[3].

4. 철도노반의 회복탄성계수와 예측모델

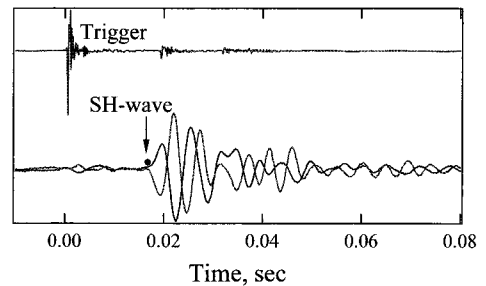
4.1 철도노반의 동적물성치

철도의 궤도 하부구조(substructure)인 노반은 일반적으로 도상자갈(ballast) 아래에 강화노반과 일반 토사 노반으로 단면이 구성된다. 강화노반은 상부노반위에 흙보다 강성이 큰 재료를 사용하여 도상층 하부에서 전달되는 응력을 노반 상부에서의 허용 하중(응력) 이하로 감소시킴으로써 노반의 훼손을 방지하고, 빗물이 노반으로의 침투되는 것을 방지하여 분니의 발생을 억제한다. 본 연구에서는 1999년 경부선 신설 구간에 시공 완료된 평택의 강화노반 현장부설구간에서 철도 노반 재료별 강성을 계측하기 위해 크로스홀 시험을 수행하였다. 각 재료별 크로스홀 시험을 위한 검측공의 간격은 대략 3.5m로 동일하였다.

0.8m 두께의 쇄석 강화노반과 일반 토사 노반에서 깊이 0.2m 간격으로 각각 크로스홀 시험을 수행하였다. Fig. 3은 크로스홀 시험으로부터 획득한 철도노반의 대표적인 탄성과 신호이다[4]. 쇄석에서 계측된 전단파 속도는 254-297 m/sec 이었고 P-파 속도는 461-499 m/sec이었다. 파동방정식에 근거하여 탄성과 속도와 쇄석의 밀도를 이용하면 전단탄성계수와 구속탄성계수를 획득할 수 있다. 계측된 토사 노반의 전단



(a) p-wave signal (sandy soil)



(b) s-wave signal (crushed stone)

Fig. 3. Typical Elastic wave signals of railroad trackbed from crosshole tests

파 속도는 182-209 m/sec이었고 P-파 속도는 357-408 m/sec 이었으며 동일한 방법으로 토사 노반의 탄성계수를 획득하였다. 또한 전단파 속도와 P-파 속도를 이용하면 포아송비( $\nu$ )를 계산할 수 있다. Fig. 4에서는 각 깊이별로 계측된 탄성과 속도와 계산된 포아송비를 나타내었다. 쇄석 강화노반의 포아송비는 평균 0.26, 토사 노반의 평균 포아송비는 0.33이다. 쇄석과 토사 노반에서 계측된 저변형률 영역의 동적물성치를 Table 2에 정리하였다.

철도노반의 전체 변형률 영역의 동적물성치를 결정하기 위해서는 위에서 구한 저변형률 영역( $10^{-3}\%$  이하)의 동적 강성과 함께 중간변형률 이상의 비선형 동적물성치가 필요하다. 철도노반의 비선형 동적물성치는 공진주시험(resonant column test)을 이용하여 측정하였다. 공진주시험을 통해 저변형률에서 중간 변형률( $10^{-1}\%$ )까지의 전단변형률(shearing strain) 크기에서 동적물성치를 신뢰성 있게 측정할 수 있다[5]. 또한 하

나의 공시체에 대해 여러 단계의 구속응력(confining stress)을 가하여 구속응력에 따른 변화도 평가가 가능하다. 본 연구에서는 회복탄성계수를 결정하기 위한 대체 시험법의 일부로

공진주시험을 도입하였으며, 변형률과 구속응력에 따른 전단 변형계수의 비선형 거동특성을 살펴보았다.

쇄석은 Seed 등[6]이 자갈질 시료(gravelly soils)에 대하여 제안한 감소곡선을 이용하였으며, 토사 시료의 감소곡선은 공진주시험으로부터 획득하였다. 회복탄성계수는 시료의 축 방향으로 반복하중을 가해 획득하게 되는, 임의의 회복변형률 크기에서의 영계수( $E$ )이다. 따라서, 공진주시험으로부터 획득된 전단변형계수 감소곡선(shear modulus reduction curve)은 포아송비( $\nu$ )를 이용하여 영계수 감소곡선(Young's modulus reduction curve)으로 변환하면 된다.

#### 4.2 동적물성치를 이용한 회복탄성계수 결정

본 연구에서는 철도노반의 회복탄성계수를 결정하기 위해 열차의 반복하중에 의해 철도 노반이 경험하는 축차응력(deviatoric stress)과 열차의 반복하중 주파수(cyclic loading frequency)를 고려하였다. 쇄석과 일반 토사 시료에 대한 하중조합은 Table 3과 같다. 열차 운행에 따라 철도노반이 경험하는 하중주파수는 1급선 설계속도 200 km/hr와 대차간격 12.5m를 고려하여 대략 5 Hz로 결정하였다. 쇄석과 같은 조립질 재료는 일반적으로 하중주파수의 영향이 거의 없지만 토사 시료의 경우 소성지수에 따라 하중주파수의 영향을 받는 것으로 알려져 있다[7]. 따라서 토사 노반에 대해서는 식 (2)를 이용하여 하중주파수의 영향이 반영된 저변형률 영역의 최대 영계수( $E_{max}(5Hz)$ )를 결정하였다. 토사 노반에서 크로스홀 시험으로 결정된 탄성과 속도의 지배주파수(predominant frequency)는 약 240 Hz이었다. 하중주파수가 동적물성치에 미치는 영향정도를 나타내는 영향계수(FE, frequency effect)는 시료의 소성지수(PI)에 따라 다르다. 하중주파수 영향계수의 의미는 하중주파수가 10배 증가하면 최대 영계수는 6.3%씩 증가한다는 것이다. 본 연구에서 사용된 토사 시료의 소성지수는 3이고, 이에 해당하는 하중주파수 영향계수는 6.3%/log

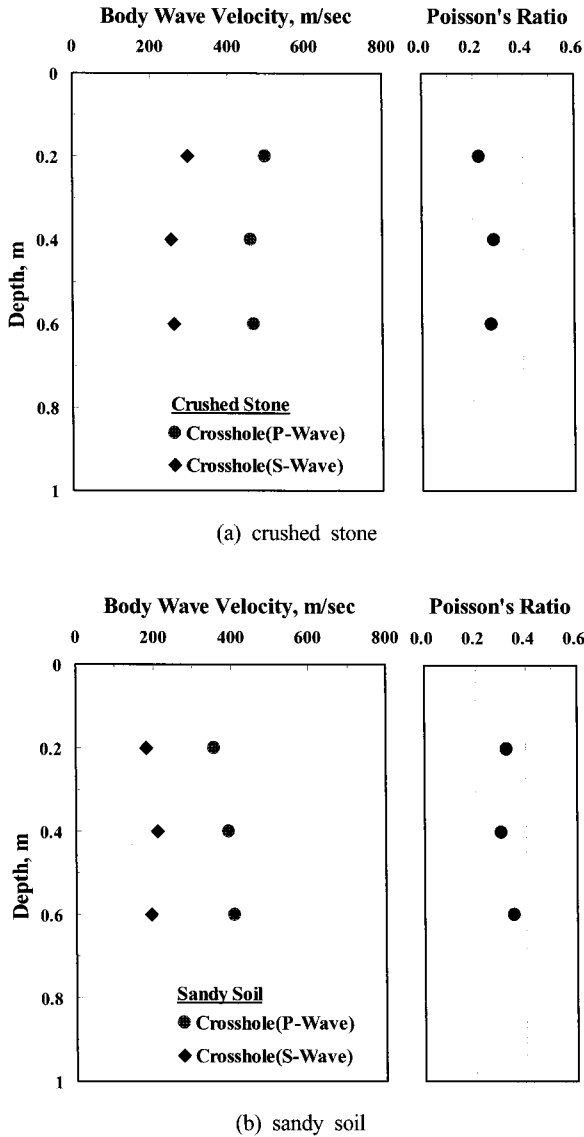


Fig. 4 Elastic wave velocity and poisson's ratio of railroad trackbed with depth

Table 2. Small-strain dynamic stiffness of trackbed materials

Trackbed Materials	Test Method	Elastic Wave Velocity, m/sec	Modulus <sup>1)</sup> , MPa	Poisson's Ratio
Crushed Stone	Cross-hole	$V_s$ : 254-297	$G$ <sup>2)</sup> : 170-233	0.26
		$V_p$ : 461-499	$M$ <sup>3)</sup> : 562-657	
Sandy Soils	Cross-hole	$V_s$ : 182-209	$G$ : 72-96	0.33
		$V_p$ : 357-408	$M$ : 278-364	

1) Strain levels of G and M obtained from crosshole test are below  $10^{-3}\%$ .  
 2) Shear modulus, 3) Constrained modulus

Table 3. Loading condition of alternative resilient modulus test for trackbed materials

Crushed Stone		Sandy Soils	
Confining Pressure, kPa	Deviatoric Stress, kPa	Confining Pressure, kPa	Deviatoric Stress, kPa
5	10, 20, 30	4	
12	20, 40, 60		5,
20	30, 60, 80		10,
40	50, 90, 130	10	20,
70	80, 120, 180		40,
110	120, 200, 280	16	80

(freq.)이었다[8].

$$E_{\max}(5Hz) = \frac{1 + FE}{1 + FE \cdot \log(freq./0.5)} E_{\max}(freq.) \quad (2)$$

전단변형계수-전단변형률 관계는 Fig. 2에 나타난 식과 포아송비를 이용하여 영계수-축변형률 관계로 전환한다. 포아송비는 평택의 강화노반 현장부설구간에서 크로스홀 시험으로부터 측정된 결과를 바탕으로 쇄석은 0.26, 토사 노반은 0.33을 사용하였다. 이와 같이 재료적 특성과 열차의 운행환경(응력상태, 변형률 크기, 하중주파수 등)을 반영하여 시험

을 수행하고 최종적으로 철도 노반의 재료에 따른 영계수 감소곡선( $E-\epsilon$ )을 획득하였다. Fig. 5는 구속응력에 따른 쇄석과 토사 노반의 영계수 감소곡선이다.

토사 재료의 구속응력에 따른 영계수 감소곡선은 저변형률 영역의 최대 영계수와와의 결합 시 구속응력 증가에 따른 최대 영계수의 증가 폭이 작아 비슷한 범위 내에서 비선형 거동을 보였다. 이는 충분히 다져진 토사 노반의 최대 영계수에 대하여 상대적으로 구속응력에 의한 영향이 작았기 때문으로 보여진다.

### 4.3 철도노반에 대한 회복탄성계수 예측모델과 모델상수

Fig. 6(a)는 체적응력과 축차응력에 따른 쇄석의 회복탄성계수이다. 구속응력과 축차응력의 합으로 체적응력이 결정되는데, 쇄석의 회복탄성계수는 하나의 구속응력에서는 축차응력이 증가함에 따라 감소하였으며 구속응력(또는 체적응력)이 증가함에 따라 전체적으로 증가하는 경향을 보였다. 따라서 쇄석의 회복탄성계수 예측모델은 축차응력( $\sigma_d$ )과 체적응력( $\theta$ )이 모두 고려된 거듭제곱 형태의 예측모델(prediction model of power)을 적용하는 것이 타당하였다. Uzan[9]은 체적응력( $\theta$ )과 축차응력요소( $\tau_{ocd}$ )가 결합된 형태의 모델을 입상재료(granular materials)에 대하여 제안하였으며, 본 연구에서는 쇄석 재료에 식 (3)과 같은 예측모델을 적용하여 모델상수( $k_1, k_2, k_3$ )를 결정하였다.

$$E_R = k_1(\theta)^{k_2}(\sigma_d)^{k_3} \quad (3)$$

여기서,  $E_R$  : 회복탄성계수, MPa

$\theta$  : 체적응력( $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 3\sigma_c + \sigma_d$ ,

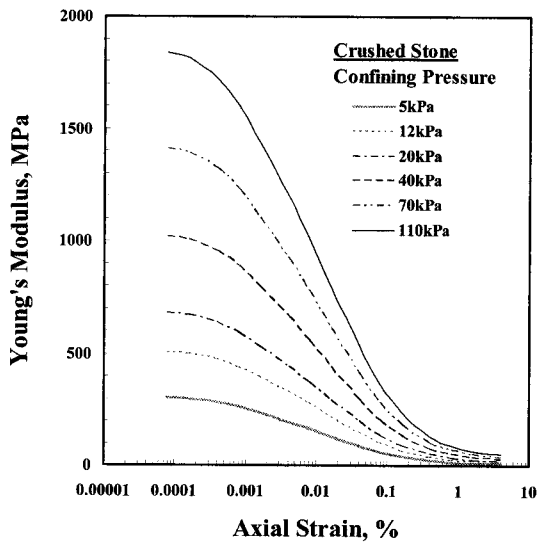
$\sigma_c$ 는 평균유효구속응력), kPa

$\sigma_d$  : 축차응력, kPa

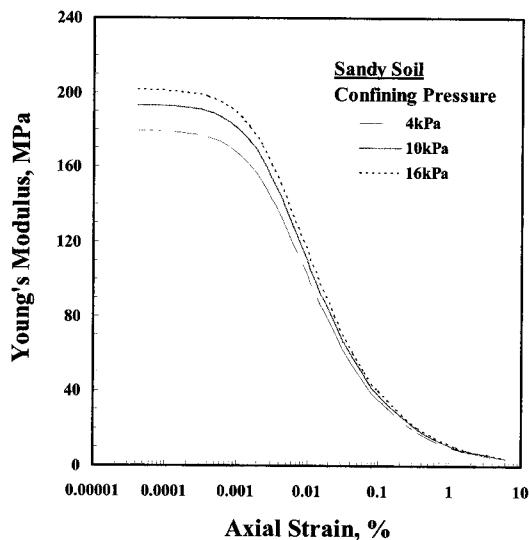
$k_1, k_2, k_3$  : 실험으로 결정되는 모델상수

Fig. 6(b)는 축차응력에 따른 일반 토사의 회복탄성계수이다. 본 과제에서 철도노반의 토사 성토재료로 주로 사용되는 SM계열(USCS 분류)의 토사 재료에 대하여 대체 회복탄성계수 시험 수행하였다. 토사 재료의 경우 주로 축차응력(변형률)에 의해 영향을 많이 받는다. Moosazadeh와 Witczak[10]은 노상토에 대하여 축차응력모델을 제안한바 있다. 특히 본 과제에서 수행된 토사 시험은 충분히 잘 다져진 상태에서 구속응력의 영향이 크지 않아 식 (4)와 같이 축차응력만을 모델 변수로 활용하였다.

$$E_R = k_1(\sigma_d)^{k_2} \quad (4)$$

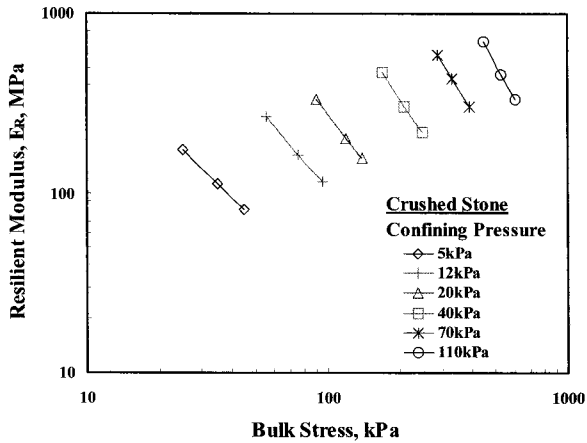


(a) crushed stone

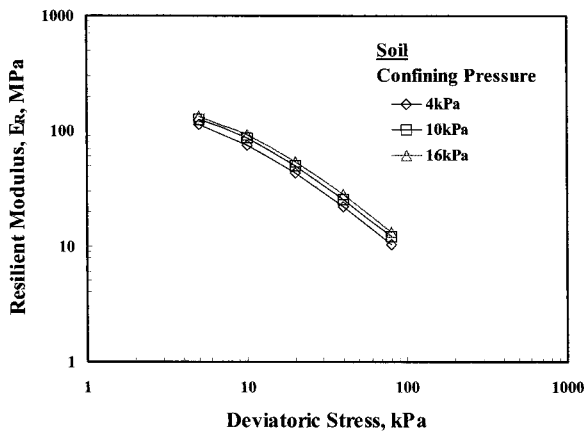


(b) sandy soil

Fig. 5. Young's modulus reduction curves with axial strain and confining pressure



(a) crushed stone



(b) sandy soil

Fig. 6. Resilient moduli of railroad trackbed with bulk stress and deviatoric stress

Table 4. Model parameters for resilient modulus

Trackbed Materials [Prediction Model]	Model Parameter, <i>k</i>	Coefficient of Correlation, <i>R</i> <sup>2</sup>
Crushed Stone [ $E_R = k_1 (\theta)^{k_2} (\sigma_d)^{k_3}$ ]	<i>k</i> <sub>1</sub>	16.80
	<i>k</i> <sub>2</sub>	1.87
	<i>k</i> <sub>3</sub>	-1.60
Sandy Soils [ $E_R = k_1 (\sigma_d)^{k_2}$ ]	<i>k</i> <sub>1</sub>	559.28
	<i>k</i> <sub>2</sub>	-0.85

\* Unit:  $E_R$  [MPa],  $\theta$  [kPa],  $\sigma_d$  [kPa]

여기서,  $E_R$  : 회복탄성계수, MPa

$\sigma_d$  : 축차응력, kPa

$k_1, k_2$  : 실험으로 결정되는 모델상수

대체 시험법으로 각 재료에 대하여 결정된 회복탄성계수를 예측모델 식 (3), 식 (4)에 적용하고 선형회귀분석(linear

regression analysis)을 통하여 모델상수(*k*, model parameter)를 결정하였다. 결정된 모델상수는 Table 4에 제시하였고 각각의 결정계수( $R^2$ , coefficient of correlation)는 0.99, 0.97로 상관성이 높게 나왔다. 즉, 쇄석 노반과 토사 노반의 회복탄성 거동은 적용한 모델에 만족할 만큼 적합성이 높았으며, 예측 모델과 결정된 모델상수를 활용하여 철도노반의 두께 산정 시 탄성해석에 활용이 가능하다. 제시된 예측모델에 대하여 결정된 모델상수는 시험과정에서 적용된 응력의 범위 내에서 사용 가능할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구는 동적물성치를 이용하여 궤도 하부 구조인 철도 노반에 주로 사용되는 입도 조정 쇄석과 양질의 토사의 회복탄성계수를 결정하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 평택의 강화노반 현장부설구간에서 크로스홀 시험을 수행하여 쇄석 강화노반과 일반 토사노반의 동적 강성 즉, 전단파 속도와 P-파 속도를 측정하였고 포아송비를 획득하였다. 실내에서는 토사 노반에 대하여 공진주시험을 수행하고 쇄석은 문헌에 제시된 정규화 전단변형계수 감소곡선을 이용하여 구속응력과 변형률에 따른 정규화 전단 변형계수 감소곡선을 결정하였다.
- (2) 열차의 반복하중에 의해 철도노반이 경험하는 축차응력과 체적응력을 고려하여 대체 회복탄성계수 시험법의 하중조합을 구성하였고, 열차의 하중 주파수와 포아송비를 이용하여 전단변형계수 감소곡선을 영계수와 축변형률의 관계로 변환하였다. 영계수 감소곡선으로부터 하중조합의 축차응력에 해당하는 변형률 크기의 영계수를 회복탄성계수로 결정하였다.
- (3) 쇄석은 체적응력이 증가함에 따라 전체적으로 증가하는 경향을 보였고 축차응력이 증가함에 따라 감소하였으며, SM계열의 토사 재료는 축차응력(변형률)이 증가함에 따라 감소하였다. 쇄석은 축차응력과 체적응력을, 토사 재료는 축차응력만을 모델 변수로 활용하여 예측모델을 제시하였다. 제안된 예측모델에 대하여 선형회귀분석을 하여 모델상수를 결정하였으며 적합성이 매우 높게 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설교통R&D정책인프라사업의 연구비지원(C105B1000008-06B010000612)에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 권기철(1998), "변형특성을 고려한 노상토 및 보조기층 재료의 대체 MR 시험법," 박사학위논문, 한국과학기술원.
2. 권기철(2004), "국내 보조기층 재료의 변형특성을 고려한 전체 변형률 영역의 구성모델 개발," 한국도로학회 논문집, 제6권, 제3호, pp.65-77.
3. 한국철도기술연구원(2000), "철도강화노반재료 및 지지력 강화방안에 관한 연구," 보고서, KRRRI 연구 00-37.
4. 목영진, 박철수, 임정열, 최충락(2007), "현장탄성파시험을 이용한 강화노반의 시간적 강성 변화," 한국철도학회 춘계학술대회 논문집.
5. Hwang, S. K. (1997), "Dynamic Properties of Natural soils," Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
6. Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M., and Tokimatsu, K. (1984), "Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soils," Report No. EERC 84/14, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, September.
7. Kim, D. S. and Stokoe, K. H., II (1992), "Characterization of Resilient Modulus of Compacted Subgrade Soils Using Resonant Column and Torsional Shear Tests," Transportation Research Record 1369, TRB, National Research Council, Washington, D. C., pp.83-91.
8. 한국과학기술원(1999), "현장부설시험장 노반재료의 동적설계정수 평가," 보고서.
9. Uzan, J. (1985), "Characterization of Granular Material," Transportation Research Record 1022, TRB, National Research Council, Washington, D. C., pp.52-59.
10. Moossazadeh, J., and Witczak, M. W. (1981), "Prediction of Subgrade Moduli for Soil that Exhibits Nonlinear Behavior," Transportation Research Record 810, TRB, National Research Council, Washington, D. C., pp.9-17.

(2007년 11월 16일 논문접수, 2008년 1월 14일 심사완료)