

재활용 암버력-토사의 회복탄성계수 예측 모델

A Prediction Model of Resilient Modulus for Recycled Crushed-Rock-Soil-Mixture

박 인 범 Park, In-Beom
 목 영 진 Mok, Young-Jin

비회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 석사 (E-mail : inbeompark@gmail.com)
 정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수 · 교신저자 (E-mail : yjmok@khu.ac.kr)

ABSTRACT

A prediction model of resilient modulus(E_R) was developed for recycled crushed-rock-soil mixtures. The evaluation of E_R , using the "orthodox" repeated loading tri-axial test, is not feasible for such a large-size gravelly material. An alternative method was proposed hereby using the subtle different modulus called nonlinear dynamic modulus. The prediction model was developed by utilizing in-situ measured shear modulus(G_{max}) and its reduction curves of modeled materials using the large free-free resonant column test. A pilot evaluation of the model parameters was carried out for recycled crushed-rock-soil-mixture at a highway construction site near Gimcheon, Korea. The values of the model parameters(A_E , n_E , ϵ_r and a) were proposed as 9618, 0.47, 0.0135, and 0.8, respectively.

KEYWORDS

crushed-rock-soil mixture, resilient modulus, a large scale free-free resonant column test, direct-arrival test, nonlinear dynamic modulus

요지

재활용된 암버력-토사의 회복탄성계수 예측모델이 개발되었다. 반복삼축시험을 통한 회복탄성계수의 전통적 평가방법은 큰 입경을 가진 자갈에는 실현 불가능하다. 미세한 차이가 있는 비선형 전단탄성계수를 이용하여 회복탄성계수를 산출하는 대체기법을 제안하였다. 현장에서 측정된 최대전단탄성계수와 대형공진주 시험으로 구한 감소곡선을 이용하여 회복탄성계수 예측모델을 개발하였다. 이 예측모델을 김천의 고속도로공사현장에서 재활용한 암버력-토사에 적용하여 모델인자 A_E , n_E , ϵ_r , a 를 각각 9618, 0.47, 0.0135, 0.8로 제안하였다.

핵심용어

암버력-토사, 회복탄성계수, 대형 양단자유단 공진주 시험, 직접도달파 시험, 비선형 동적계수

1. 서론

산악지역을 관통하는 신설 고속도로와 고속철도 건설현장에서, 터널 및 절토에서 배출되는 암버력-토사를 노반재료로 재활용하고 있다. 예를 들면, 충주-음성고속도로, 대구-부산 고속철도구간 현장에서 별도의 공학적 처리(입도 분포 등)없이 최대 입경만 30cm 이하로 관리하여 노반 성토재로 재사용하고 있다. 이 재활용 노반재료의 설계인자 산정방법과 다짐 관리 방법은 전무한 실정이라서 자갈에 준하여 설계인자를 추정하고

있을 뿐, 합리적인 설계인자 산출방법과 다짐관리 방법에 대한 기준이 없는 실정이다. 현재 도로설계는 노상지지력계수(SSV, Soil Support value), CBR값을, 철도노반 설계는 평판재하시험에서 결정되는 지반반력계수(k_{30})를 사용하고 있다. 시공 중 다짐관리도 평판재하시험 결과인 k_{30} 이나, 반복평판재하시험의 지반변형계수(E_{V2})를 사용하고 있다(건설교통부, 2000; 한국철도시설공단, 2004; 한국고속철도건설공단, 2006). 일반적으로 평판재하시험은 직경 30cm의 철판을 사용하여

일반 토사에서 수행하고 있으나, 최대 입경이 30cm인 암버력-토사에서는 적용이 불가능하다. 일반적으로 평판의 크기는 최소한 최대입경의 6배 이상 되어야 변형특성을 측정할 수 있으므로, 이러한 암버력-토사에서는 직경 1.8m의 평판이 필요하다. 하중도 일반시험(직경 30cm 평판)에 소요되는 하중의 36배가 필요하므로 현실적으로 평판재하시험으로 설계인자, k_{30} 을 측정하거나 현장 다짐을 관리하기에는 무리가 있다. 따라서 시공관리는 물론 시험시공 조차도, 현행 설계인자, k_{30} 의 산출은 불가능한 실정이다. 한편 최근 도로 및 철도노반 설계에 다층탄성모델(elastic multi-layer model)에 입각한 회복탄성계수(resilient modulus, E_R)를 도입한 역학적 설계방법을 정착하려는 노력을 하고 있다(건설교통부, 2007; 한국철도기술연구원, 2008). 이에 따라 현행 설계인자를 대체할 회복탄성계수를 산정하는 시험법을 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다.

회복탄성계수는 반복 교통하중을 받는 노반의 거동을 가장 합리적으로 나타낼 수 있는 설계인자로 인식되고, 반복 삼축 압축시험으로 산출하는 것을 원칙으로 하고 있다. 그러나 이 인자의 실무 적용은, 측정값의 일관성 부족, 까다로운 시험절차, 전문 시험 인력의 부재, 시험장비가 고가 등, 기술적 어려움 때문에 지연되고 있다. 따라서 기존의 잘 정립된 시험에 기반을 둔 대체시험법을 개발하여 일반 토사의 E_R 을 실무에 적용하려는 우회적인 노력을 하고 있다(Kim et al., 2001). 하물며 암버력-토사와 같은 큰 입경을 포함한 노반 재료의 회복탄성계수를 반복 압축시험의 원론적 개념으로 산출한다는 것은 더더욱 상상이 되지 않는다. 따라서 기존의 잘 정립된 시험에 근거한 대체방법을 긍정적으로 검토하게 되었다. 최근 동탄성계수(dynamic elastic modulus)를 이용한 회복탄성계수 산정방법과 다짐관리방안이 일반토사 및 쇄석자갈 노반에서 성공적으로 적용되었다(박철수, 2008; 박철수 외, 2008; Park et al., 2008). 이 방법의 선정 이유 및 장점은 다음과 같다. 첫째 동적탄성계수와 회복탄성계수는 매우 유사하며, 둘째로 현장탄성파시험이 30cm와 같이 큰 입경을 무리 없이 해상(resolve)할 수 있는 정도의 큰 부피에서 수행하고, 마지막으로 신뢰성이 검증된 시험이기 때문이다.

본 논문에서는 이 대체방법을 간략하게 설명하고, 현장탄성파시험과 새로 개발된 대형공진주시험 결과를 이용하여 암버력-토사의 회복탄성계수 모델을 결정하는 일련의 과정을 제시하고자 한다.

2. 회복탄성계수 예측 모델

2.1. 모델

도로나 철도와 같이 반복 교통하중을 받는 노반의 거동을 반영하는 인자가 회복탄성계수이다. 여러 가지 회복탄성계수의

모델 중에서 May & Witczak(1981)의 모델이 모래나 쇄석자갈과 같은 입상재료에 알맞고, 변형률-의존 비선형탄성계수를 곧바로 이 모델에 적용할 수 있어, 암버력-토사의 모델로 채택하였다. 이 모델은 최대영탄성계수(E_{max})와 축변형률-의존 영탄성계수감소곡선($f(\epsilon)$)의 곱의 형태로 되어 있다. 최대영탄성계수는 식 (1)과 같이 대기압($P_a=101.3\text{kPa}$)으로 정규화한(normalized) 평균유효주응력(mean effective principal stress, I_1 , 단위는 kPa)의 승함수이다.

$$E_{max} = A_E P_a \left(\frac{I_1}{P_a} \right)^{n_E} \quad (1)$$

여기서 A_E 와 n_E 는 선형부분의 모델인자이다. 영탄성계수감소곡선은 식 (2)와 같이 기준축변형률(reference strain, ϵ_r)과 만곡계수(curvature coefficient, a)로 표현한 Darendeli(2001)의 개량쌍곡선함수(modified hyperbolic function)를 채택하였다.

$$f(\epsilon) = E/E_{max} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_r} \right)^a} \quad (2)$$

여기서 ϵ_r 는 탄성계수(E)가 최대값(E_{max})의 50%가 될 때의 축변형률로 감소곡선을 정의하는 기준 값이고 a 는 곡선의 만곡 형태를 좌우하는 인자이다. 회복탄성계수(E_R)는 식 (1)과 (2)의 곱의 형태로 식 (3)과 같다. 즉 선형의 A_E 와 n_E , 비선형곡선의 ϵ_r 와 a , 도합 4개의 인자를 재료특성에 맞게 결정하면 이 예측 모델이 완성된다.

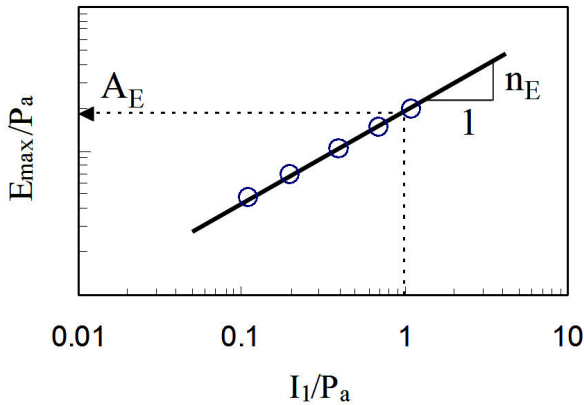
$$E_R = A_E P_a \left(\frac{I_1}{P_a} \right)^{n_E} \frac{1}{1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_r} \right)^a} \quad (3)$$

이 모델의 최대영탄성계수(E_{max})와 감소곡선($f(\epsilon)$)은 지금까지 잘 정립된 현장탄성파시험과 실내 공진주시험 결과 또는 기존 연구자들이 제안한 정규화 전단탄성계수 감소곡선($G/G_{max} - \log \gamma$)으로부터 직접 산출할 수 있는 장점이 있다.

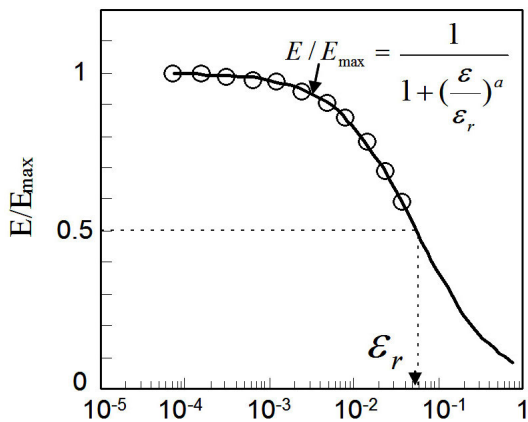
2.2. 산출 방법

전단탄성계수(G)와 전단변형률(γ)의 비선형곡선을 $E=2G/(1+\nu)$ 와 $\epsilon=\gamma/(1+\nu)$ 관계를 이용하여 영탄성계수(E)와 축변형률(ϵ)의 곡선으로 변환할 수 있다. 여러 값의 I_1 에서 측정된 G_{max} 을 변환한 E_{max} 을 대기압으로 정규화(normalize)하여 그림 2와 같이 대수지(logarithm scale)에 도시

한다. A_E 는 I_1/P_a 값 1에 해당하는 E_{max}/P_a 값이고, n_E 는 직선의 기울기이다. 곡선부의 정규화된 E/E_{max} 를 반대수지에 그림 3과 같이 도시하여, ϵ_r 은 E/E_{max} 가 0.5일 때의 ϵ 값이고 a 는 데이터에 가장 잘 맞는 쌍곡선함수($f(\epsilon) = 1/(1 + (\epsilon/\epsilon_r)^a$)에서 결정된다.



(a) A_E 와 n_E 의 결정



(b) ϵ_r 과 a 의 결정

그림 1. 모델인자 결정

2.3. 예측 모델의 검증

이 모델을 검증하기 위해, 평택 부근의 시험노반의 탄성 응답을 3차원 탄성해석프로그램(GEOTRACK)로 계산하고 열차 운행 중 예측한 변위와 비교하여 평가하였다. 열차하중은 자동차하중에 비해 일정하고 잘 정립되어 이 모델 검증을 두 종류의 시험노반에서 수행하였다. 한 노반(이하 노반 A로 칭함)은 0.3m의 자갈도상(ballast), 0.8m의 입도조정 쇄석강화노반(sub-ballast), 2.2m의 다짐도 90%의 화강암 풍화토 노반(subgrade), 원지반 순으로 조성되었다. 다른 노반(노반 B)은 쇄석강화노반을 다짐도 95%의 풍화토노반(sub-ballast)으로 대체한 것 이외에는 동일한 층 구조를 이루고 있다. 쇄석강화노반과 풍화토노반의 회복탄성계수 모델인자

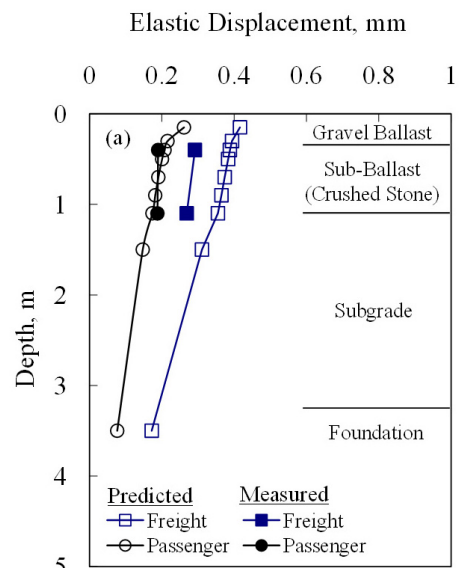
는 표 1과 같다. 다짐도 90%의 풍화토노반(subgrade)의 모델인자는 95% 풍화토노반(sub-ballast)와 동일한 모델인자를 사용하였다. 열차의 운행속도를 고려한 동적 운하중은 화물열차는 134kN, 여객열차는 60kN으로 산출하였다. 두 종류의 열차하중에 대한 노반 A와 B의 거동을 수직변위로 평가하였다. 각 노반의 열차 운행 중의 변위를 깊이 0.4m와 1.1m에 설치한 속도감지기로 지반진동을 측정하여 수직변위로 환산하였다. 각 노반의 수직변위 해석결과와 측정결과는 그림 2와 같다. 두 결과가 두 열차하중에 대해 변위 크기는 물론, 깊이에 따르는 감소 경향도 쇄석강화노반과 풍화토강화노반이 뚜렷하게 차이를 보이며 잘 일치하고 있다. 따라서 이 회복탄성계수의 예측모델은 일반토사 뿐만 아니라, 자갈과 같은 큰 입경의 입상 매질에서도 잘 작동한다고 평가되고 있다. 본 논문에서는 이 모델을 적용하여 재활용 암버력-토사의 모델인자를 산출하고자 한다.

표 1. 노반재료의 모델인자

Material	Model Parameters				Description
	1) A_E	2) n_E	3) ϵ_r	4) a	
Crushed Stone	18590	0.61	$1) 0.02 \times (\frac{I_1}{P_a})^{0.34}$	$1) 0.86 + 0.1 \times \log(\frac{I_1}{P_a})$	Well-graded crushed stone ($D_{50}=8\text{mm}$, $C_u=13.5$)
Weathered Soil	2312	0.1	$0.05 \times (\frac{I_1}{P_a})^{0.23}$	$0.9 \times (\frac{I_1}{P_a})^{0.084}$	Well-compacted weathered granite soil ($D_{50}=3.4\text{mm}$, $C_u=22.2$)

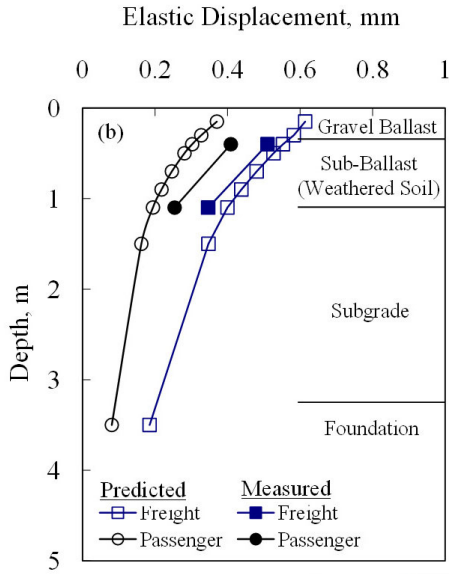
Note : 1) Equations form Menq(2003)

2) I_1 is in kPa, $P_a = 101.3\text{kPa}$



(a) 노반 A

<그림 계속>



(b) 노반 B

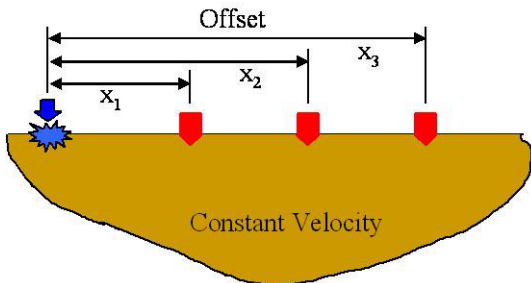
그림 2. 노반의 변위 비교

3. 동탄성계수 시험법

암버력-토사의 모델인자, A_E , n_E , ϵ_r , a 를 결정하기 위해 현장시험과 실내시험을 수행하였다. 현장시험은 E_{max} 와 관련된 인자 A_E 와 n_E 를 결정하기 위해 직접도달파(direct-arrival time)시험을 채택하고, 탄성계수감소곡선($f(\epsilon)$)에 관련된 인자, ϵ_r 와 a 를 결정하기 위해 대형공진주시험기를 개발하여, 암버력-토사의 모델 공시체(modeled specimen)를 시험하였다.

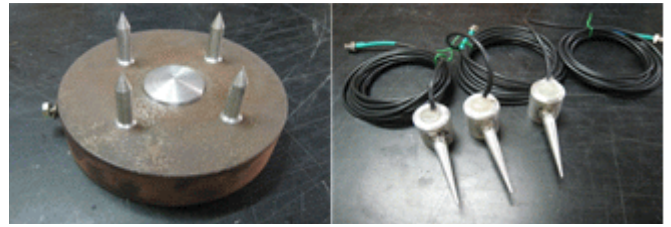
3.1. 직접도달파 시험

이 시험법은 그림 3과 같이 진동원(source)과 수신기(receiver)를 지표면에 배열하여, 성토 표면의 탄성파속도 측정에 경제적과 기술적 측면에서 유리한 방법이다. 본 연구에서는 표면이 거칠고 평평하지 않은 암버력-토사 성토 현장의 특성을 감안하여 이에 맞는 진동원과 수신기를 그림 3과 같이 제작하여 P-파속도(V_p)를 측정하였다.



(a) 개념도

<그림 계속>



(b) 진동원(좌)과 수신기(우)

그림 3. 직접도달파 시험

3.2. 대형공진주시험기

공시체 크기는 직경 150mm, 높이 300mm로, 최대 입경 25mm까지의 골재를 시험할 수 있는 공진주시험기이다. 직경 150mm 이상의 공시체의 고유진동수는 상당히 높아 가진 시스템으로 공진을 일으키기는 불가능하다. 본 연구에서 개발한 대형공진주시험기는 미국 텍사스대학의 Menq(2003)이 개발한 MMD(Multi Mode Device, 이하 MMD)를 개량하였다. 이 시험기의 주요 부품은 아래와 같다.

- 지지 시스템: 본 장비의 가장 큰 특색은 시료 지지시스템으로 대형 시료가 자유단-자유단의 지점조건으로 장비에 거치되도록 두 가지 부분을 고안하였다. 첫째는 Menq의 MMD는 피아노 강선을 이용하여 시료를 거치하여 자유단-자유단 지점조건을 구현하는 반면, 본 연구에서는 공시체를 하단부에서 지지하면서 베어링을 이용하여 자유단-자유단 지점조건을 구현한다. 이는 피아노 강선을 이용한 지지보다 안정적으로 시료를 거치할 수 있으며, 장비가 시료의 실험 결과에 미치는 영향이 작도록 한다. 둘째는 공시체 하단부의 bottom cap에 연결되는 중심축인 shaft와 베어링 중앙의 빈 공간을 이용하여 시료의 전도를 방지하는 이점이 있다. 시료의 1차 비틀 운동 중 시료의 가운데 부분에서 변위가 발생하지 않는 nodal point가 형성되는데, 이 부분이 시료의 축 상에 있음을 이용하여 전도를 방지하게 된다. 베어링은 NTN제품의 51200 베어링으로 bottom cap에 연결되는 중심축에 결합되어 공시체의 비틀 운동이 자유단 경계조건에서 부합되도록 하였다. 51200 베어링은 스러스트 베어링(thrust bearing)의 한 종류로서 상부와 하부 사이에 케이지(cage)로 둘러싸인 볼이 들어있는 구조로 이루어져 있으며, 공시체의 무게로 인해 수직방향 힘을 받게 되는 상부 구조가 수평방향으로 저항없이 운동할 수 있게 한다. 또한, 베어링 상부와 하부의 내경을 달리하여 bottom cap에 연결된 shaft가 상부에만 접하도록 함으로써 비틀 운동이 베어링 하부로부터 자유롭도록 하였다. 이와 같은 장치로 그림 4와 같이 안정된 시료의 지지와 더불어 자유단-자유단조건에 좀 더 부합할 수 있게 하였다.

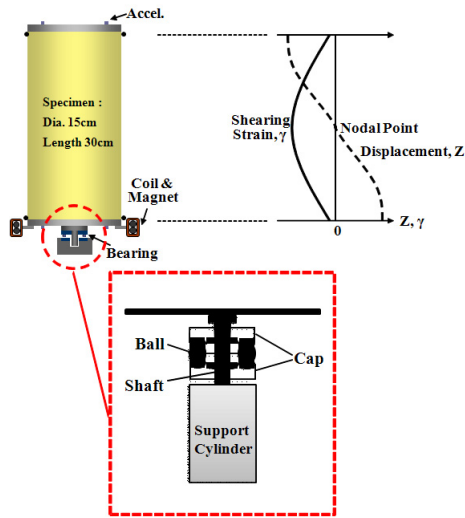


그림 4. 양자유단 지지와 가진 시스템

• 가진 시스템: 가진 시스템은 자석, 자석-홀더, 시료와 접하는 bottom cap, 코일과 코일-홀더로 이루어져 있다. 그림 5와 같이 직경 0.64cm, 길이 3.18cm의 원통형 자석 한 쌍이 평행하게 자석-홀더의 네 방향에 부착된다. 소요자석의 개수는 8개이며, 코일-홀더와 코일-홀더 거치대의 재질은 가진 시스템에 영향을 미치지 않도록 아크릴 재질을 사용하였다. 대형 공시체의 크기가 기존의 공시체의 크기에 비해 무려 27배의 부피차이를 보이기 때문에 기존 코일-자석의 가진 시스템으로는 비틀력을 공시체 하단까지 전달하는 데에 한계를 보이는 단점이 있다. 따라서 대형 공진주 시험 장비에서는 가진 시스템의 위치를 공시체 하단부에 설치하여 공시체 무게의 관성을 이용하여 공시체 전체에 비틀력이 전달될 수 있도록 함은 물론, 가진 시스템과 공시체의 커플링 기능을 높여 비틀력이 효율적으로

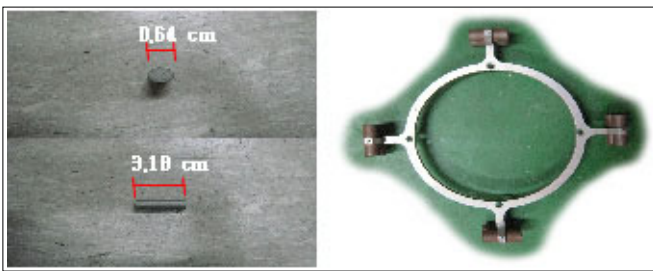


그림 5. 가진 시스템에 사용되는 자석(좌)과 자석홀더(우)

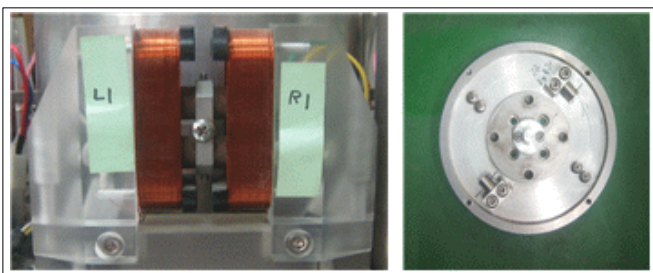


그림 6. 가진 시스템에 사용되는 코일과 하단 가진판

로 전달되도록 하였다. 그림 5와 그림 6에 가진 시스템에 쓰이는 자석과 자석이 장착되는 홀더, 코일과 bottom cap이 나타나 있다. 자석이 부착된 자석-홀더는 bottom cap에 연결되고, 코일은 공진주 chamber의 원형 bottom plate에 연결되었다.

• 구속압 재하 시스템: 구속압 재하 시스템은 시료에 가하는 압력 chamber로 cylinder, 상하부 plate, clamping rod로 구성되어 있다. 하부 plate는 cylinder 하부에 위치하며 가진 시스템과 연결되고 cylinder 상부에 위치한 top plate와 8개의 rod로 연결되어 있다. 이 밖에도 주변 장치로 lifting frame과 작업 table이 있다. 구속압 재하 시스템은 안전율 3.6을 바탕으로 구속압 3447kPa(500psi)에 충분히 견디도록 설계되었다. 그러나 가압에 사용되는 air compressor의 가압 용량과 가압 호스의 허용압력을 감안하여 800kPa 이하로 운용하였다.

• 계측 시스템: 계측 시스템은 switch control unit과 4채널 동적신호분석기로 이루어져 있다. 그림 7과 같이 4채널 동적신호분석기에서 발생한 정현파형의 신호를 switch control unit을 통해 가진 시스템으로 보내진다. 이에 대한 시료의 반응을 가속도계로 측정하여 그 반응신호를 4채널 동적신호분석기로 보내게 된다. 가속도계는 PCB 사의 333B50 모델의 가속도계로서 민감도 1059mV/g, 주파수 0.5Hz에서 3000Hz에 이르는 측정 범위를 가진다. 가속도계는 top cap에 장착하여 사용하는데, 이 때 가속도계의 무게로 인하여 시료의 비틀 운동에 편심 발생을 방지하기 위해 가속도계와 동일한 무게를 가지는 counter-weight를 함께 장착하였다.

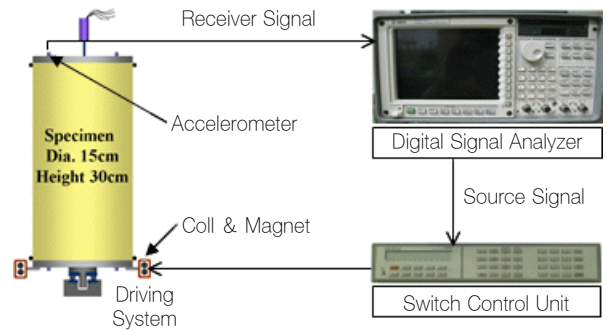


그림 7. 대형 공진주시험기의 계측 흐름도

4. 암버력 - 토사의 변형 특성

4.1. 일반 현황

산악지역 고속도로나 철도 건설현장의 터널 및 절토구간에서 발생하는 암버력-토사를 노반이나 노체의 성토로 재활용하고 있다. 암버력-토사는 입도에 대한 엄격한 공학적 처리없이 최대골재입경(최대 300mm 혹은 100mm)만 제한하여 성토하고 있다. 그림 8과 같이 골재의 쓸림에 의해 입도가 위치에 따라

매우 달라 균질한 성토는 기대하기 어렵다. 백호(Backhoe)의 버킷(1.27m³)을 단위부피로 채취한 시료를 현장에서 200-300mm 및 100-200mm에 해당하는 입자들의 무게를 측정하고, 나머지 부분에 대해서는 8분법을 적용하여 채취하였다. 현장에서 채취해 온 암버력-토사 시료의 입도분석을 위해 대형체를 제작하여 입도분석을 실시하였다. 김천현장의 입도분포는 균등계수(C_u)와 곡률계수(C_g)는 각각 30과 0.5로 빈입도 자갈(통일분류법, GP)로 분류되었다. 타 3개 현장의 입도분포도 예상한대로 모두 빈입도로 분류되었다.



그림 8. 현장의 암버력-토사의 입도 모습

4.2. 현장 탄성계수

표 2와 같이 3개 현장에서 측정한 V_p 를 식(4)를 이용하여 종파속도(V_c)로 변환하고, 식(5)를 이용하여 현장탄성계수(E_{max})를 산출하였다. 여기서, 포아슨비(ν)는 0.25를 사용하였다.

$$V_c = V_p \sqrt{\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}} \quad (4)$$

$$E_{max} = \rho V_c^2 \quad (5)$$

표 2. 현장 E_{max} 의 범위

	진해	순창	김천
$V_p, \text{max(m/s)}$	300~335	361~405	379~393
$V_c, \text{max(m/s)}$	259~289	311~349	327~339
$E_{max} \text{ (MPa)}$	154~192	223~280	245~265

4.3. 비선형 전단탄성계수

일반적으로 공시체의 직경은 최대 입경의 6배 이상이 되어야 한다. 암버력-토사의 최대 입경은 300mm이므로 공시체 직경은 그 6배인 1800mm(1.8meter)가 되어야 한다. 이러한 거대한 공시체 시험은 기술적으로 불가능할 뿐만 아니라 경제적으로 무의미하다. 따라서 부득이 골재 크기를 줄여서 시험한 결

과를 분석하여 결정하는 방안을 모색하고자 한다. Becker et al.(1972)는 rockfill의 내부마찰각 산정을 위해 모델입도곡선(modeled grain-size curve)을 갖는 공시체를 사용하였다. 이 모델재료(modeled material)의 입도 분포는 그림 9와 같이 원재료의 입도분포 곡선과 나란하게 세립자(fine grain)쪽으로 이동시킨 분포이다. 이 모델화된 재료의 강도는, 공시체의 상대밀도가 원재료와 같으면, 원재료의 강도와 동일하다는 사실이 밝혀졌다. 모델재료와 원재료의 상대밀도가 같더라도 간극비는 다를 수 있다. 이와 같은 동일한 개념을 공진주시험 결과인 비선형전단탄성계수에 도입하였다. 원지반의 입도 분포와 나란한 일련의 모델입도곡선의 공시체를 동일한 상대밀도로 제작하여 비선형전단탄성계수의 변화를 분석하여 원지반의 비선형전단탄성계수를 추정하였다. 표 3은 김천현장의 암버력-토사(현장 성토재)와 공진주시험을 위한 모델재료의 균등계수, 곡률계수, 세립분의 함수비, 단위중량을 정리한 것이다.

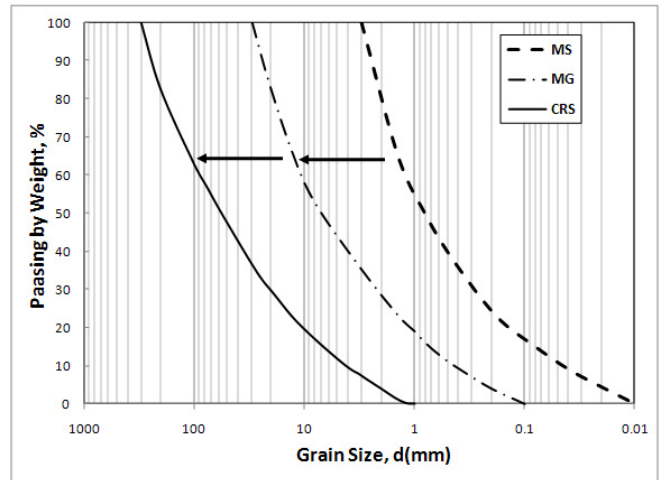


그림 9. 김천현장 암버력-토사와 모델재료의 입도분포

표 3. 암버력-토사와 모델재료의 제원

	C_u	C_g	함수비, %	단위중량, t/m ³	
암버력-토사(CRS)	22.9	1.70	6.5	2.30	
모델화 재료	MG	27.5	2.05	6.57	2.20
	MS	28.3	1.73	6.5	2.28

모델재료 MG와 MS를 E-다짐과 동일한 에너지(25.3kg cm/cm³)로 멤브레인을 씌운 몰드에서 제작하여(그림 10과 11) 시료를 거치시키고, 구속압을 50kPa, 100kPa, 150kPa, 200kPa, 250kPa로 증가시켜가며 실험을 수행하였다. 대형공진주 시험결과를 정규화(normalized)하여 모델재료 MG와 MS의 Ramberg-Osgood 모델로 비선형 전단탄성계수곡선($G/G_{max} - \log \gamma$)을 그림 12와 그림 13과 같이 결정하였다. 이 감쇠곡선의 특징은 구속압에 둔감하다는 사실이다. 이는 공시체



그림 10. 대형 공시체의 제작



그림 11. 시료 거치 전경

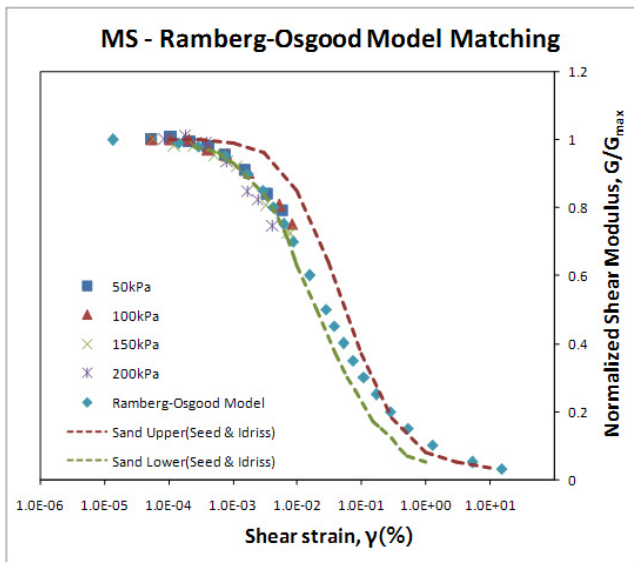


그림 12. 모델재료 MS의 $G/G_{max} - \log \gamma$ 곡선

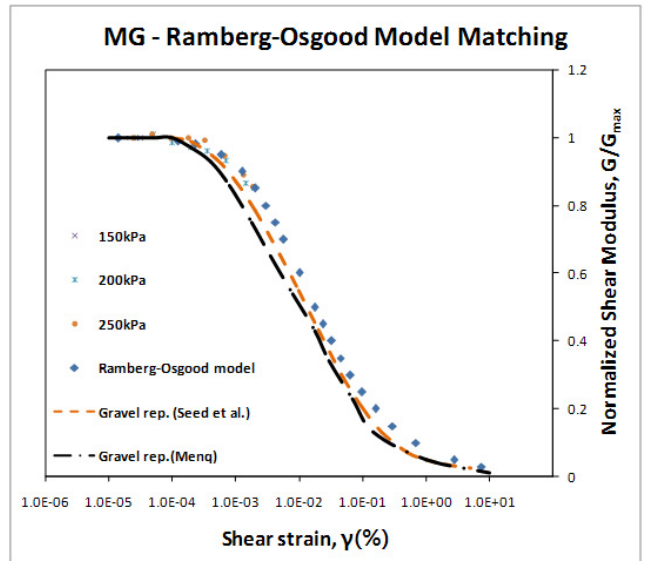


그림 13. 모델재료 MG의 $G/G_{max} - \log \gamma$ 곡선

가 최대건조밀도로 다져져, Meng(2003)이 제시한 바와 같이, 구속압의 영향을 많이 받지 않기 때문이다. 구속압 1atm을 기준으로 평균하여 모든 구속압의 감소곡선을 대표하였다. 모델재료 MS는 Seed et al.(1986)이 제안한 곡선의 아래 범위 내에 있으며, 대표재료 MG는 Meng과 Seed et al.이 제시한 곡선과 근접하고 있다.

5. 모델인자 결정

모델재료 MG와 MS의 각 구속압에서 구한 G_{max} 를 포아손비 0.25로 E_{max} 를 계산하여 그림 14와 같이 도시하였다. 모델재료 MS의 A_E 와 n_E 는 각각 5420과 0.11이고 모델재료 MG는 9618과 0.47이었다. 잔자갈의 n_E 값은 0.47-0.68인 범위에 있고(Meng, 2003) 골재가 굵어지고 토사가 혼합될 때에는 이 값이 감소하는 것으로 나타났다. 실제 경산의 고속철도현장의 암버력-토사의 성토구간에서 크로스홀시험 결과에서 n_E 값은 0.35-0.40인 것으로 나타났다(박철수, 2008). 경산현장의 최대골재치수가 200mm이고 김천의 현장은 300mm인 것을 감안하여 김천현장의 n_E 값을 0.47으로 결정하였다. 현장에서 측정된 지표면의 E_{max} 값 255 MPa과 n_E 값 0.47를 적용하여 김천의 암버력-토사(기호, CRS)는 그림 14에 표시하고 A_E 값을 9618으로 결정하였다. 비선형 부분의 $G/G_{max} - \log \gamma$ 곡선은 그림 15와 같다. 모델골재 MS의 ϵ_r 과 a 의 값은 각각 0.0185와 0.9이고 모델골재 MG는 0.0135와 0.8이다. 골재가 큰 다짐성토의 감쇠곡선은 큰 변화가 없는 것을 감안하여, 김천현장의 암버력-토사의 ϵ_r 과 a 의 값을 각각 0.0135과 0.8로 결정하였다. 김천현장의 암버력-토사의 회복탄성계수 예측모델의 인자는 표 4와 같다.

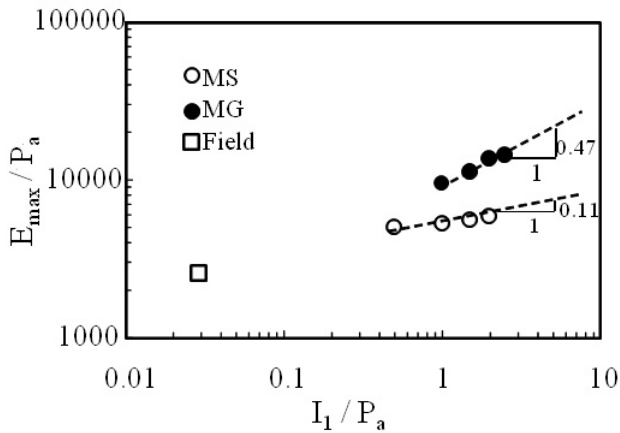


그림 14. 김천현장 암버력-토사의 A_E 와 n_E

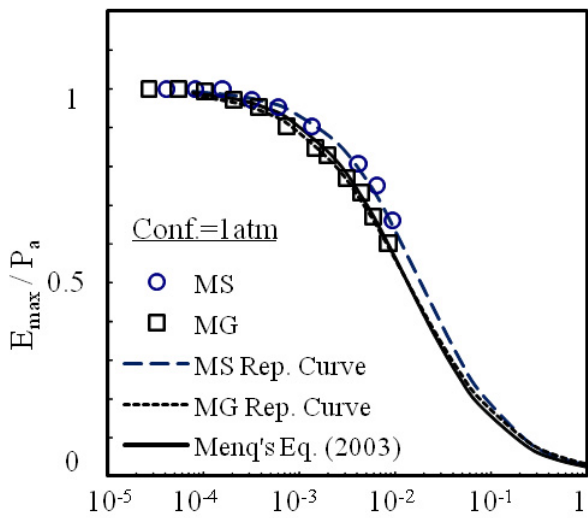


그림 15. 김천현장 암버력-토사의 ϵ_r 과 a

표 4. 김천현장의 모델인자

Model Parameter	Material Type		
	MS	MG	Crushed Rock-Soil Mixture(CRS)
A_E	5420	9618	9618
n_E	0.11	0.47	0.47
ϵ_r	0.0185	0.0135	0.0135
a	0.9	0.8	0.8

6. 결론

본 논문의 목적은 암버력-토사를 재활용한 성토의 회복탄성계수의 예측모델을 제시하는 것이다. 이러한 특수 성토재료의 회복탄성계수는 "정통적인" 반복 삼축압축시험으로는 산출하기 어렵다. 잘 정립된 기존 시험을 이용하여 간접적으로 산출하는 방법을 모색하는 것이 현실적이다. 이 논문에서 제시한 대체방법은 1) May와 Witczak(1981)이 제시한 예측모델이

비선형 전단탄성계수와 상당한 유사한 점에 착안하여, 2) 모델인자를 최대전단탄성계수와 감소곡선으로부터 결정하도록 개발되었다. 이 예측모델은 공학적으로 처리한 쇄석노반에 적용하여 열차하중에 대한 거동 분석을 통해 입증되었다. 이 모델을 적용하여 현장탄성파시험과 대형공진주시험을 병용하여 재활용 암버력-토사의 모델인자를 제시하였다. 이 논문에서 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

1. 현장탄성파시험으로부터 E_{max} 와 관련된 인자 A_E 와 n_E 를 결정할 수 있으며, 빈입도 암버력-토사의 값을 각각 9618과 0.47로 제시된다.
2. 탄성계수감소곡선($f(\epsilon_r)$)에 관련된 인자, ϵ_r 와 a 는 대형공진주시험 결과로 결정할 수 있으며, 각각 0.0135와 0.8로 제시된다.
3. 이 모델인자 값은 제한된 데이터로부터 도출되어서, 새로운 성토재료인 암버력-토사의 모델인자의 첫 가늠에 공학적 의미가 있다. 이 모델인자에 미치는 여러 가지 영향을 분석하여 보완되어야 한다. 또한 완공된 암버력-성토노반에 크로스홀시험 등, 추가 실험을 통한 예측모델의 재평가와 피드백(feed-back)하여 예측모델을 개선할 필요성이 있다.
4. 이 연구 과정에서 완성된 대형공진주시험기는 다양한 자갈질 재료의 변형특성에 대한 연구에 요긴하게 사용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단(현 한국연구재단)의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-313-2-D01066).

참고 문헌

- 건설교통부(2000), *도로설계편람 제7편*, 시방서
- 건설교통부(2007), *한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구*, 연구보고서
- 박철수(2008), "동적물성치를 이용한 철도노반의 회복탄성계수 산정과 품질관리 방안", 박사학위논문, 경희대학교.
- 박철수, 최찬용, 최충락, 목영진(2008), "열차 하중에 의한 철도노반의 거동 분석", *한국철도학회 논문집*, 제11권, 제1호, pp. 54-60.
- 한국고속철도건설공단(2006), *고속철도공사 전문시방서 노반편, 시방서*.
- 한국철도기술연구원(2008), "토공노반 최적두께산정을 위한 설계 표준 기술연구", 3차년도 최종보고서.
- 한국철도시설공단(2004), *철도설계기준 노반편*, 시방서.
- Becker, E., Chan, C. K., and Seed, H.B.(1972), *Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials in Plane Strain and Triaxial Compression Tests*, Report TE-72-3, Office of Research Services,

University of California, Berkeley, CA.

Darendeli, B. M.(2001), "Develope of A New Family of Normalize Modulus Reduction and Material Damping Curves", Ph. D. Dissertation, Univ. of Texas at Austin

Menq, F. Y.(2003), "Dynamic Properties of Sandy and Gravelly soils.", Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.

Kim, D. S., G. C. Kweon, and K. H. Lee(2001). Alternative Method of Determining Resilient Modulus of Subgrade Soils Using a Static Triaxial Test. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.38, No.1, pp.107-116.

Park, C. S., Park, I. B., Kim. E. J. and Mok, Y. J.(2008), A Tentative Methodology for Quality Control of Trackbed Fills Using Field and

Laboratory P-Wave Measurements, *International Journal of Railway, IJR*, Vol. 1, No. 2, pp. 64-71.

Seed, H. B., R. T. Wong, I. M. Idriss and K. Tokimatsu, Moduli and Damping factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. GT11, 1986, pp. 1016-103.

접 수 일 : 2010. 11. 1

심 사 일 : 2010. 11. 9

심사완료일 : 2010. 11. 29