

암버력-토사 성토의 회복탄성계수 산정방법

A Methodology to Determine Resilient Modulus for Crushed Rock-Soil Mixture

박인범¹⁾, In-Beom Park, 김성수²⁾, Seong-Su Kim, 정영훈³⁾, Young-Hoon Jung, 목영진⁴⁾, Young-Jin Mok

¹⁾ (주)천일기술단 지반터널사업부 사원, Staff, Geotechnical and Tunnel Engineering Division, Chunil Engineering co.,ltd.

²⁾ 경희대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kyunghee University

³⁾ 경희대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyunghee University

⁴⁾ 경희대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyunghee University

SYNOPSIS : A method was developed to determine resilient modulus for crushed rock-soil mixtures whose usage has been increased recently without engineering specifications. The method is based on the subtle different modulus called nonlinear dynamic modulus and was lately implemented in residual soils and engineered crushed-stones. Hereby, the same method was expanded to crushed rock-soil mixtures containing as large grain diameter as 300mm. The method utilize field direct-arrival tests for the determination of maximum Young's modulus, and a large scale free-free resonant column test, which is recently developed to is capable to test as large grain diameter as 25mm, for modulus reduction curves. The prediction model of resilient modulus was evaluated for crushed rock-soil mixtures of a highway construction site at Gimcheon, Korea.

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

1. 서 론

최근에 산악지역을 관통하는 고속도로와 고속철도 건설현장의 터널 및 절토구간에서 배출되는 암버력-토사를 노반재료로서의 활용이 증가하고 있다. 예를 들면, 대구-부산 간 고속철도구간과 충주-음성고속도로 현장에서 최대 입경 300mm 이하의 암버력-토사를 노반 성토재로 사용하고 있다. 하지만, 암버력-토사 성토의 설계인자 산정방법과 다짐 관리 방법은 전무한 실정이어서 자갈에 준하여 설계인자를 추정하고 있을 뿐, 합리적인 설계인자 산출방법과 시공 중의 다짐관리 방법은 없다. 현재 철도노반 설계는 평판재하시험에서 결정되는 지반반력계수(k_{30})를 사용하고 시공 중 다짐관리도 평판재하시험 결과인 k_{30} 이나, 반복평판재하시험의 지반변형계수(E_{V2})를 사용하고 있다 (철도설계기준, 2004; 고속철도공사 전문시방서, 2006). 일반적으로 평판재하시험은 직경 30cm의 철제 평판을 사용하여 일반 토사에서 수행하고 있으나, 최대 입경이 30cm인 암버력-토사에서는 적용이 불가능하다. 일반적으로 평판의 크기는 작아도 최대입경의 6배 이상 되어야 변형특성을 측정할 수 있으므로, 이러한 암버력-토사에서는 직경 1.8m의 평판이 필요하다. 하중도 일반시험(30cm 평판)에 소요되는 하중의 36배가 필요하므로 현실적으로 평판재하시험을 적용하기는 불가능하다. 따라서 시공관리 뿐만 아니라, 설계를 위한 시험시공에서

도, 현행 설계인자, k_{30} 의 산출마저도 어려운 실정이다. 한편 최근 철도의 강화노반 설계에 다층탄성모델(elastic multi-layer model)에 입각한 회복탄성계수(resilient modulus, E_R)를 도입한 역학적 설계방법을 정착하려는 노력을 하고 있다 (한국철도기술연구원, 2008). 이에 따라 현행 설계인자인 k_{30} 대신, 회복탄성계수를 산정하는 시험법을 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 또한 다짐 시공도 설계인자에 걸 맞는 탄성계수를 갖대로 관리되어야 하므로, 새로운 다짐관리를 위한 시험법이 개발되어야 한다. 최근 동적탄성계수(dynamic elastic modulus)를 이용한 회복탄성계수 산정방법과 다짐관리방안이 일반토사 및 쇄석자갈 노반에서 성공적으로 적용되었다 (박철수 외, 2008; Park et al. 2008). 이러한 기법을 입경이 큰 암버력-토사까지 확장하려면 이 재료의 비선형 변형특성에 대한 기본적 연구가 전제되어야 한다.

2. 연구내용

2.1 암버력-토사의 현황

산악지역 고속도로나 철도 건설현장의 터널 및 절토구간에서 발생하는 암버력-토사를 노반이나 노체의 성토로 재활용되고 있다. 암버력-토사는 입도에 대한 엄격한 공학적 처리 없이 최대골재입경(최대 300mm 혹은 100mm)만 제한하여 성토하고 있다. 그림 1과 같이 골재의 쓸림에 의해 입도가 위치에 따라 매우 달라 균질한 성토는 기대하기 어렵다. 백호(Backhoe)의 버킷($1.27 m^3$)을 단위부피로 채취한 시료를 현장에서 200-300 mm 및 100-200 mm에 해당하는 입자들의 무게를 측정하고, 나머지 부분에 대해서는 8분법을 적용하여 채취하였다. 현장에서 채취해 온 암버력-토사 시료의 입도분석을 위해 대형 체를 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 1. 현장의 암버력-토사의 입도 모습

2.2 회복탄성계수

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 기준 축변형률 (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 공진 주시험 결과 또는 기존 연구자들이 제안한 정규화 전단탄성계수 감소곡선($G/G_{\max} - \log \gamma$)으로부터 직접 산출할 수 있는 장점이 있다.

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 그림2와 같이 대수지(logarithm scale)에 도시한다. A_E 는 I_1/P_a 값 1에 해당하는 E_{\max}/P_a 값이고, n_E 는 직선의 기울기이다. 곡선부의 정규화한 E/E_{\max} 를 반대수지에 그림3과 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 결정 된다.

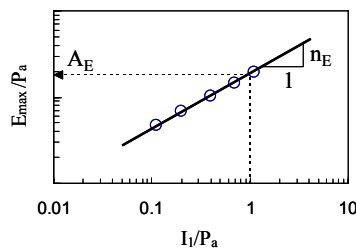


그림 2. A_E 와 n_E 의 결정

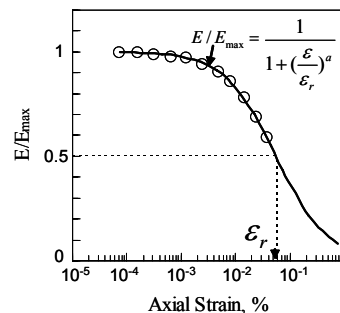


그림 3. ϵ_r 과 a 의 결정

2.3 직접도달파 시험

직접도달파(direct-arrival time)시험은 그림 4와 같이 진동원(source)과 수신기(receiver)를 지표면에

배열하여 측정한다. 이 시험은 성토의 지표부근의 탄성파속도 측정에 경제적과 기술적 측면에서 유리한 방법이다. 본 연구에서는 표면이 거칠고 평평하지 않은 암버력-토사 성토 현장의 특성을 감안하여 이에 맞는 진동원과 수신기를 그림 5와 같이 제작하여 P-파속도(V_p)를 측정하였다. 3개 현장에서 측정한 V_p 를 식 (4)를 이용하여 종파속도(V_c)로 변환하고, 식(5)를 이용하여 현장탄성계수(E_{max})를 표 1과 같이 산출하였다.

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

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

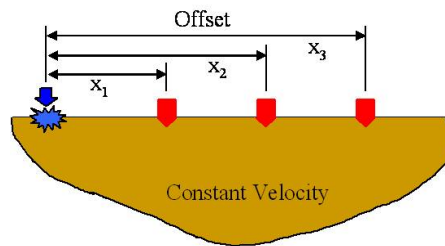


그림 4. 직접도달과 시험의 개념도



그림 5. 진동원(좌)과 수신기(우)

표 1. 현장 E_{max} 의 범위

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

2.4 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 일으키기 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 시료를 하단부에서 지지하면서 배어링을 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 비틀림 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 비틀림 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 저항 없이 운동할 수 있게 한다. 또한, 베어링 상부와 하부의 내경을 달리하여 bottom cap에 연결된 shaft가 상부에만 접하도록 함으로써 비틀림 운동이 베어링 하부로부터 자유롭도록 하였다. 이와 같은 장치로 그림 6과 같이 안정된 시료의 지지와 더불어 자유단-자유단 지점조건에 좀 더 부합할 수 있게 하였다.

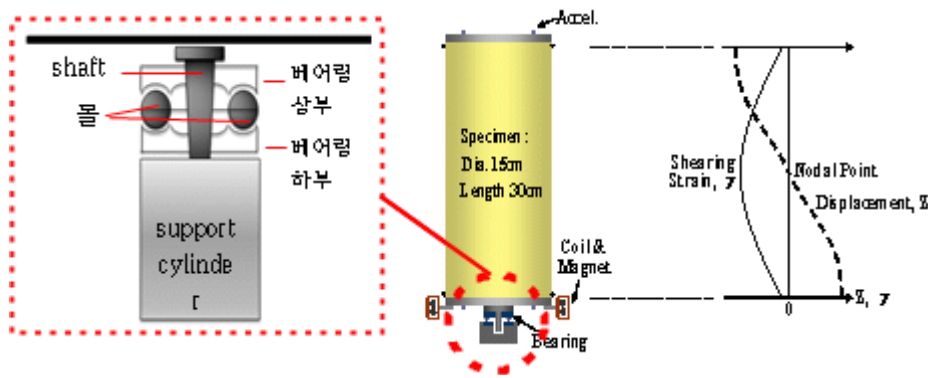


그림 6. 양자유단 지지와 가진 시스템

가진 시스템: 가진 시스템은 자석, 자석-홀더, 시료와 접하는 bottom cap, 코일과 코일-홀더로 이루어져 있다. 그림 7과 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 비틀림력을 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 비틀림력이 전달될 수 있도록 함은 물론, 가진 시스템과 공시체의 커플링 기능을 높여 비틀림력이 효율적으로 전달되도록 하였다. 그림 7과 그림 8에 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.

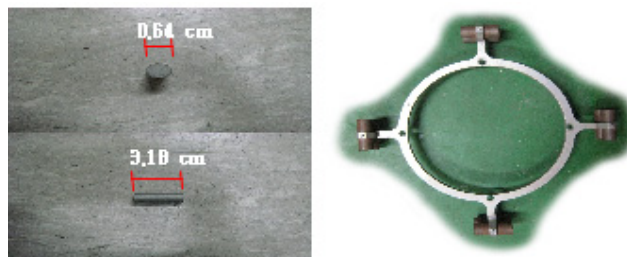


그림 7. 가진 시스템에 사용되는 자석(좌)과 자석홀더(우)

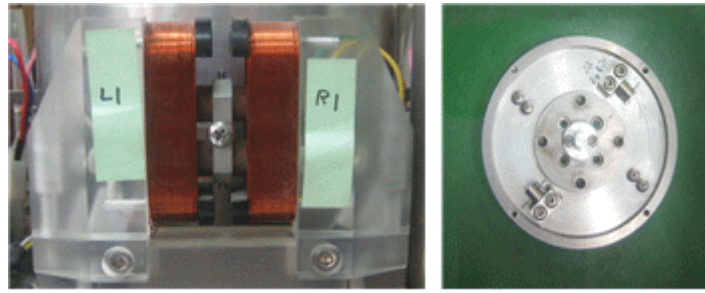


그림 8. 가진 시스템에 사용되는 코일과 하단 가진판

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 안전을 3.6을 바탕으로 구속압 3447kPa(500psi)에 충분히 견디도록 설계되었다. 그러나 가압에 사용되는 air compressor의 가압 용량과 가압 호스의 허용압력을 감안하여 800kPa이하로 운용하였다.

계측 시스템: 계측 시스템은 switch control unit과 4채널 동적신호분석기로 이루어져 있다. 그림 9와 같이 4채널 동적신호분석기에서 발생한 정현 파형의 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.

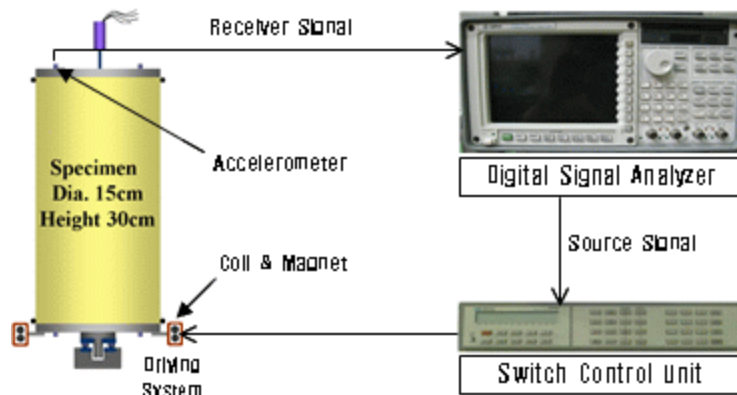


그림 9. 대형 공진주시험기의 계측 흐름도

2.5 비선형 변형계수

모델 시험 재료: 일반적으로 공시체의 직경은 최대 입경의 6배 이상이 되어야 한다. 암버럭-토사의 최대 입경은 300mm이므로 공시체 직경은 그 6배인 1800mm(1.8 meter)가 되어야 한다. 이러한 거대한 공시체 시험은 기술적으로 불가능할 뿐만 아니라 경제적으로 무의미하다. 따라서 부득이 골재 크기를 줄여서 시험한 결과를 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 10과 같이 원재료의 입도분포 곡선과 나란하게 세립자(fine grain)쪽으로 이동시킨 분포이다. 이 모델화된 재료의 강도는, 공시체의 상대밀도가 원재료와 같으

면, 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 2는 김천현장의 암버력-토사(현장 성토재)와 공진주시험을 위한 모델재료의 균등계수, 곡률계수, 세립분의 함수비, 단위중량을 정리한 것이다.

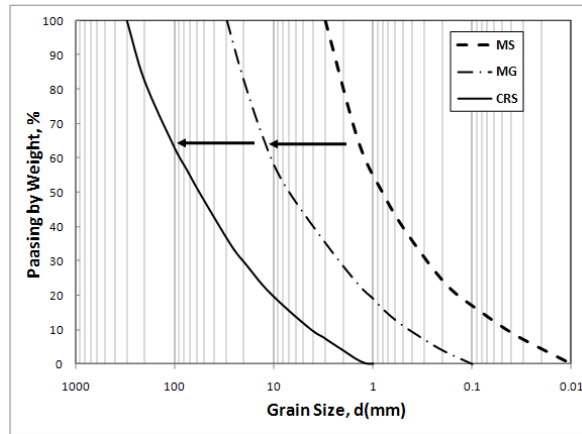


그림 10. 김천현장 암버력-토사와 모델재료의 입도분포

표 2. 암버력-토사와 모델재료의 제원

		C_u	C_g	함수비, %	단위중량, t/m^2
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

공진주 시험 및 결과: 모델재료 MG와 MS를 E-다짐과 동일한 에너지(25.3 kg cm/cm^3)로 멤브레인을 씌운 몰드에서 제작하여(그림 11과 12) 시료를 거치시키고, 구속압을 50 kPa , 100 kPa , 150 kPa , 200 kPa , 250 kPa 로 증가시켜가며 실험을 수행하였다. 대형 공진주 시험 결과를 정규화(normalized)하여 모델재료 MG와 MS의 Ramberg-Osgood 모델로 비선형 전단탄성계수곡선($G/G_{\max} - \log \gamma$)을 그림 13과 그림 14와 같이 결정하였다. 이 감쇠곡선의 특징은 구속압에 둔감하다는 사실이다. 이는 공시체가 최대건조밀도로 다져져, Menq(2003)이 제시한 바와 같이, 구속압의 영향을 많이 받지 않기 때문이다. 구속압 1 atm 을 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.



그림 11. 대형 공시체의 제작

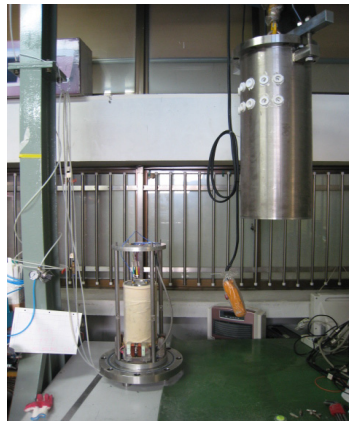


그림 12. 시료 거치 전경

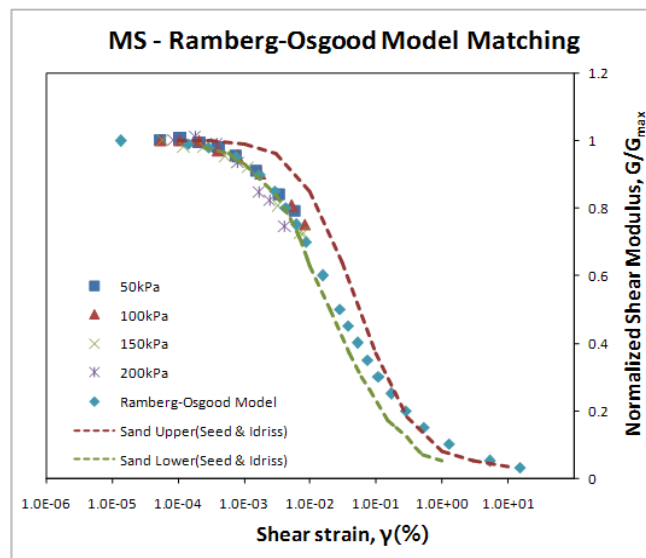


그림 13. 모뮬재료 MS의 G/G_{\max} - $\log \gamma$ 곡선

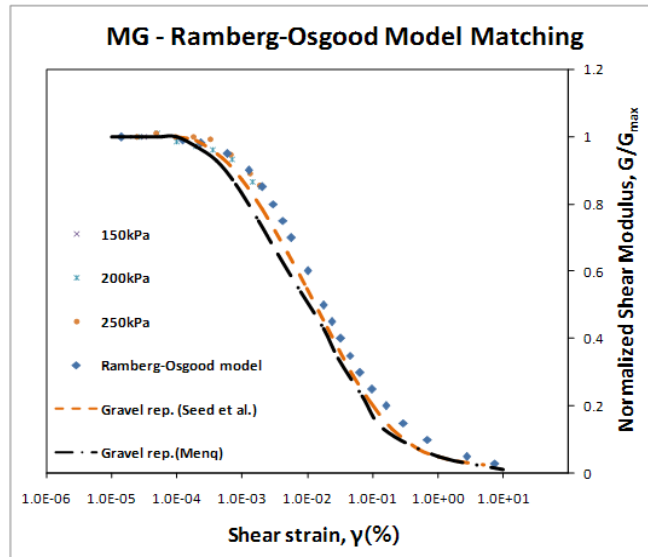


그림 14. 모델재료 MG의 G/G_{max} - $\log \gamma$ 곡선

모델인자 결정: 모델재료 MG와 MS의 각 구속압에서 구한 G_{max} 를 포아슨비 0.3으로 E_{max} 를 계산하여 그림 15와 같이 도시하였다. 모델 재료 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(Menq, 2003) 골재가 굵어지고 토사가 혼입될 때에는 이 값이 감소하는 것으로 나타났다. 실제 경산의 고속철도현장의 현장의 암버력-토사의 성토구간에서 크로스홀시험 결과에서 n_E 값은 0.35-0.40인 것으로 나타났다(박철수, 2008). 경산현장의 최대골재치수가 200mm이고 김천의 현장은 300mm 인 것을 감안하여 김천현장의 n_E 값을 0.47으로 결정하였다. 현장에서 측정한 지표면의 E_{max} 값 255 MPa과 n_E 값 0.47를 적용하여 김천의 암버력-토사(기호, CRS)의 그림15에 표시하고 A_E 값을 9618으로 결정하였다.

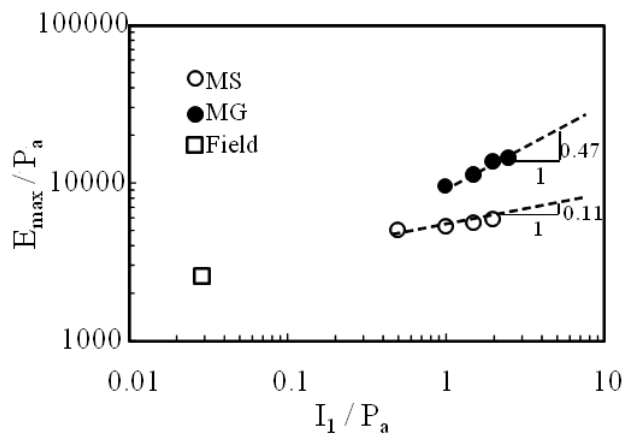


그림 15. 김천현장 암버력-토사의 A_E 와 n_E

비선형 부분의 G/G_{max} - $\log \gamma$ 곡선은 그림 16과 같다. 모델골재 MS의 ϵ_r 과 a 의 는 각각 0.0185와 0.9 이고 모델골재 MG는 0.0135과 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. 이 값들을 표 3에 정리하였고, 김천현장의 암버력-토사의 회복탄성계수 예측모델은 표 4와 같다.

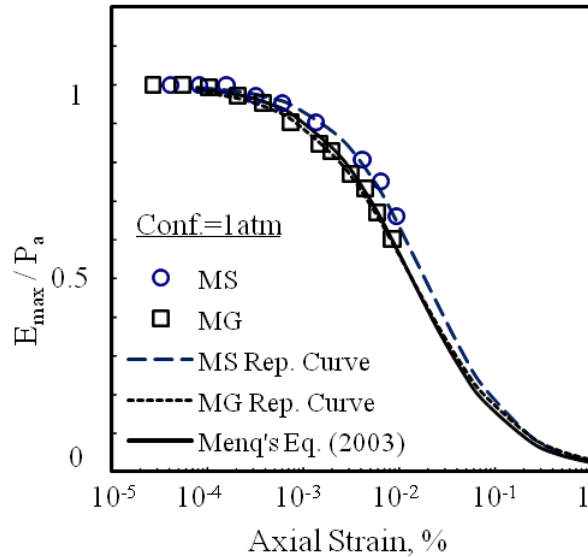


그림 16. 김천현장 암버력-토사의 ϵ_r 과 a

표 3. 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
Reference Strain, ϵ_r	0.0185	0.0135	0.0135
Curvature Coefficient, a	0.9	0.8	0.8

3. 결론

본 연구를 통해 미지의 건설재료인 암버력-토사의 공학적 성질에 대한 실체를 밝힐 수 있는 길을 개척하게 되었다. 본 연구에서 제시한 방법을 적용하여 다양한 암버력-토사의 특성을 집적화하여 데이터 베이스를 구축할 필요성이 있다. 본 연구에서 제시한 회복탄성계수 예측모델을 적용하여 노반의 설계 및 시공관리가 가능하므로, 현장에 적용하고 그 성능을 평가할 단계에 있다. 완공된 암버력-성토노반에 크로스홀시험 등, 추가 실험을 통한 예측모델의 재평가와 피드백(feed-back)으로 예측모델을 개선할 필요성이 있다. 이 연구 과정에서 완성된 대형공진주시험기는 다양한 자갈질 재료를 시험하여 데이터 베이스화 할 수 있는 인프라가 구축되었다. 이러한 후속된 적용사례와 연구를 통하여, 암버력-토사의 노반 설계 및 시공관리에 대한 시방기준 및 지침서를 제시할 기틀이 마련되었다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 박철수(2008), 동적물성치를 이용한 철도노반의 회복탄성계수 산정과 품질관리 방안, 박사학위논문, 경희대학교.
2. 박철수, 최찬용, 최충락, 목영진(2008), “열차 하중에 의한 철도노반의 거동 분석”, 한국철도학회 논문집, 제11권, 제1호, pp. 54-60.
3. 한국고속철도건설공단(2006), 고속철도공사 전문시방서 노반편, 시방서.
4. 한국철도기술연구원(2008), 토공노반 최적두께산정을 위한 설계표준 기술연구, 3차년도 최종보고서.
5. 한국철도시설공단(2004), 철도설계기준 노반편, 시방서.
6. 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.
7. Darendeli, B. M.(2001), *Developpe of A New Family of Normalize Modulus Reduction and Material Damping Curves*, Ph. D. Dissertation, Univ. of Texas at Austin., 362pp.
8. Menq, F. Y.(2003), *Dynamic Properties of Sandy and Gravelly soils*, Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
9. 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.
10. Seed, H. B., R. T. Wong, I. M. Idriss and K. Tokimatsu(1986), “Moduli and Damping factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soil”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 112, No. GT11, pp. 1016-103.