

조립재료의 입도특성에 따른 동적 변형특성 평가

Dynamic Deformation Properties of Coarse Granular Materials with Respect to Gradation Characteristics

하 익 수¹ Ha, Ik-Soo

김 남 룡² Kim, Nam-Ryong

Abstract

Coarse granular geomaterials containing large gravels are broadly used for construction of large geotechnical systems such as dams, levees, railways and backfills. It is necessary to evaluate deformation characteristics of these materials for dynamic analysis, e.g. seismic design. This study presents evaluation of dynamic deformation characteristics of coarse materials using large scale resonant column testing apparatus, which uses specimens with 200 mm in diameter and 400 mm in height, and the effects of gradation characteristics on maximum shear modulus, shear modulus reduction curve and damping characteristics were investigated. From experimental study using rock-fill materials for a dam, we could see that the largest or mean particle size affects the shape of shear modulus reduction curve. When the specimens are prepared under the same conditions for maximum particle size, the coefficient of uniformity affects the confining stress exponent of maximum shear modulus. It could be concluded that the maximum particle size is a factor which affects shear modulus reduction curve, and that the coefficient of uniformity is for small strain shear modulus, especially for the sensitivity to confining stress.

요 지

굵은 자갈 이상의 대입경 입자를 포함하는 조립질 지반재료는 댐, 제방, 철도 등 대형 지반구조물의 성토 및 채움재 료로 널리 사용되며, 이러한 구조물의 동적 해석을 위해서는 축조재료의 변형특성에 대한 엄밀한 평가가 필수적이다. 본 연구에서는 대입경 조립재료의 동적 변형특성 평가를 위하여 지름 200mm, 높이 400mm의 공시체에 대한 시험이 가능하도록 개발된 대형 공진주시험기를 활용하여 댐 축조용 사력재의 최대전단탄성계수, 전단탄성계수감소곡선 및 감쇠비를 평가하였으며, 재료의 최대입경과 균등계수와 같은 입도분포특성이 재료의 변형특성에 미치는 영향을 확인 하였다. 재료의 입경이 동적 변형특성에 미치는 영향을 평가한 결과, 동일한 균등계수에서 평균입경의 범위에 따른 전단탄성계수감소곡선에 차이가 발생함을 확인하였다. 동일한 최대입경에 대하여 균등계수를 달리하는 경우 균등계 수에 따라 최대전단탄성계수의 구속압 영향계수가 증가함을 확인하였다. 결과적으로 조립재료의 입도 특성 중 최대입 경은 전단탄성계수감소곡선을, 균등계수는 미소변형영역의 구속압 영향계수에 대한 영향요소임을 확인하였으며, 조 립재료의 동적 변형특성을 엄밀히 평가하기 위한 대형 공진주시험기의 효용성을 확인하였다.

Keywords : Coarse gravel, Small strain elastic shear modulus (G_{max}), Modulus reduction relationships, Damping, Large scale resonant column testing

1 정희원, 경남대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungnam Univ.)

2 정희원, K-water연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, K-water Institute, Tel: +82-42-870-7632, Fax: +82-42-870-7619, namryong@kwater.or.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 다양한 지반구조물의 대형화에 따라 대입경 조립재료는 필댐, 저수지 제방, 철도 노반, 건축 구조물의 기초지반, 항만 방조제 및 방파제, 지하구조물의 뒷채움 등 다양한 유형의 지반구조물 시공에 광범위하게 활용되고 있다(Seo et al., 2007; Jin et al., 2009). 이러한 재료는 굵은 모래 이상의 입경을 나타내는 자갈, 암석 등이 포함된 비점성의 입상재료로서 비교적 큰 전단강도와 변형계수와 같이 양호한 공학적 특성을 나타내며, 현장 인근에서 재료원의 확보가 용이하므로 성토 및 채움 재료로 널리 사용된다(Shin, 2001). 이러한 건설재료를 이용한 지반구조물의 설계와 해석을 위해서는 강도와 변형특성에 대한 충분한 이해가 필수적이다. 현재까지 대입경 조립재료의 공학적 특성은 전단강도를 중심으로 평가하였으며, 국내의 경우 최근 약 10년간 대형 시험기를 이용한 연구가 활발히 진행되어 재료의 입자크기가 강도나 응력-변형을 거동특성에 미치는 영향 등을 평가하였다(Seo et al., 2006; Lee et al., 2006).

지진, 기계적 진동, 파랑, 바람, 발파 및 충격하중과 같이 지반구조물에 가해지는 동적 하중에 대한 구조물의 해석을 위해서는 지반재료의 동적 변형특성에 대한 이해가 필수적이며(Rollins et al., 1998), 전단변형율(γ)에 따라 비선형적 변화를 나타내는 전단탄성계수(G)와 감쇠비(D)는 구조물의 응답해석을 위한 필수적 입력변수로 이용된다(Idriss and Seed, 1968). 미소변형율($\gamma < 10^{-4}\%$) 영역에서 지반재료는 선형탄성의 변형특성을 나타내며 이 때의 변형계수, 즉 최대전단탄성계수(G_{max})는 현장에서 측정된 전단파속도를 이용하여 평가할 수 있다. 한편 지진하중에 의한 응력은 지반재료에 탄성한계변형율(γ_c) 이상의 전단변형을 야기하며, 이 때의 전단탄성계수와 감쇠비는 미소변형율에서와 큰 차이를 나타낸다. 따라서 지반구조물의 신뢰성있는 동적 응답해석을 위해서는 미소변형율($10^{-4}\%$ 이하)에서 중간변형율($10^{-2}\%$) 이상의 영역에서 지반재료의 전단탄성계수감소곡선(G/G_{max})과 감쇠비 특성을 평가하는 것이 중요하다.

자갈질 조립재료의 전단변형율에 따른 전단탄성계수와 감쇠비 특성은 Seed et al.(1984)에 의하여 발표된 이래, 다수의 연구자들이 수행한 대형 반복삼축압축시험 결과를 바탕으로 그 변형계수의 범위가 제시되었다. Rollins et al.(1998)은 기존에 발표된 총 15개의 시험 사례로부터 최대입경이 15mm에서 최대 150mm에 이르는

조립질 자갈 시료에 대하여 대표적 전단탄성계수감소곡선, 감쇠비 곡선 등을 제시한 바 있다. Stokoe et al.(2004)은 대형 공진주시험기를 이용한 다수의 결과를 종합하여, 자갈질 시료의 동적 변형특성에 대한 쌍곡선 모형(hyperbolic model) 계수의 범위를 제안한 바 있으며, Hardin and Kalinski(2005)는 다양한 입도분포를 나타내는 자갈 시료에 대한 공진주시험 결과를 종합하여 시료의 입도분포특성이 재료의 비선형 변형특성에 미치는 영향을 검토하고, 전단탄성계수와 전단변형율을 각각 정규화하였을 때 구속압에 관계 없이 하나의 함수로 표현될 수 있음을 확인하였다. 국내의 경우 Lee et al.(2009)은 댐 축조용 사력재의 동적물성 범위를 제시하고자 기존 문헌에 보고된 135개의 반복삼축압축시험과 대형공진주시험 결과를 분석하여 구속압 수준에 따른 대표적 전단탄성계수감소곡선을 제안한 바 있다. 이들 결과를 종합할 때, 전단탄성계수감소곡선은 시험 시 구속압 조건에 따라 다소 차이를 나타내며 전반적으로 일관성있는 경향을 나타내었다.

조립재료의 동적 변형특성에 대한 데이터가 확보되어 실무에 적용이 가능하다 하더라도, 실제 건설현장에 이용되는 대입경 시료의 물성 파악은 여전히 쉽지 않다. 최근 대형 지반시험기의 개발로 조립재료의 동적 변형특성의 평가가 가능하지만, 실제 건설현장의 대입경 재료는 시험기의 수용범위 이상의 대형 입자를 포함하는 경우가 많아 재료 본연의 동적 변형특성을 직접 평가하는 것은 어렵다. 실제로 댐 축조용 사력재와 같은 대입경 재료의 경우 평행입자분포법(parallel grading method; Lowe, 1964)과 같은 상사입도에 의하여 재조합된 시료를 이용하여 강도 및 변형특성을 평가하는 것이 일반적이며, 이 경우 재료 입도의 상사비가 크고 입경이 작아질수록 강도와 변형계수를 더 작게 평가하는 것으로 나타난다(Marachi et al., 1972; Jin et al., 2009; Lee et al., 2012). 따라서 지반구조물의 동적 성능평가 시 해석에 대한 신뢰성 확보를 위하여 대입경 조립재료의 비선형 동적 변형특성을 실험적으로 평가하고자 할 때, 시편 및 시험 조건이 재료의 동적물성에 미치는 영향을 명확히 이해하여 해석에 반영할 필요가 있다.

본 연구에서는 대입경 조립재료의 동적 변형특성을 평가하기 위하여 신규 구축된 대형 공진주시험기를 이용한 실험을 수행하였다. 대표적인 대입경 조립재료인 댐 축조용 사력재에 대한 상사입도의 영향을 평가하기 위하여 동일 재료원에 대하여 상사비를 달리하는 다수

의 시편을 조성하여 실험을 수행하였으며, 각 시험시편의 구속압에 따른 최대전단탄성계수, 전단탄성계수감소 곡선 곡선 및 감쇠비 특성을 비교하였다. 더불어 동일한 최대입경 시료에 대하여 균등계수(C_u)와 단위중량 차이가 동적 변형특성에 미치는 영향 또한 평가하였다.

2. 시험대상 시료 및 시험장비

2.1 시험대상 시료의 특성

본 연구의 시험에 사용한 조립질 재료는 국내에서 건설 중인 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐인 Y댐의 사력 존 축조재료로서, 최대입경이 약 800mm에 달하는 대입경의 입자를 포함한다. 해당 재료는 규장암으로 분류되는 암석재료로 석영, 사장석, 미사장석, 백운모, 견운모, 녹니석 등의 광물이 포함되어 있으며, 현장 상태의 입도 분포 특성 및 주요 공학적 변수는 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다.

대입경의 조립지반재료는 시험 장비의 크기에 대한 제약조건에 맞추어 재료의 최대입경을 재조정하되, 재료 본연의 물리적, 역학적 특성이 잘 반영되도록 입도를 조정하여 실내시험을 수행하는 것이 일반적이다. 대표적으로, 평행입자분포법은 조절하고자 하는 최대입경 수준에 따라 원입도분포곡선을 평행이동하여 다짐특성에 영향을 미치는 요소인 균등계수를 동일하게 함으로써 입자의 기하학적 배열 특성에 차이를 최소화할 수 있으므로 상사입도 조정방법으로 널리 적용된다. 그러나 입경에 따라 초기밀도나 입자파쇄특성이 달라질 수 있으므로 시료의 다짐밀도나 전단거동에 영향을 미칠 수 있으며, 또한 입경이 작아지면서 세립분 함량이 증가

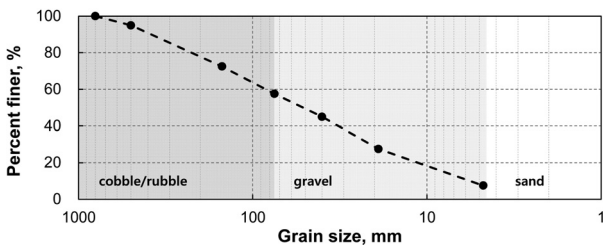


Fig. 1. Original particle size distribution - rockfill material for Y-dam construction)

하므로 시험 조건에 따라 역학적 특성에 영향을 미칠 가능성도 있다. 특히 입도 구간에 따른 입자의 형상 또는 마모 상태에 차이가 나타나는 경우 지반재료의 강도, 강성과 관계된 주요 공학적 특성이 달라지므로 이에 대한 고려 또한 필요하다. 따라서 본 연구에서 상사입도에 따른 조립재료의 동적 변형특성을 평가함에 있어서 세립분의 영향을 배제할 수 있는 상사입도 조건을 계획하였으며, 입도 구간별 입자의 구형도를 비교하여 입자 형상에 의한 효과 유무를 사전에 확인하였다.

2.2 시험 시편의 계획

본 연구에서는 입도특성에 따른 조립재료의 변형특성을 평가하기 위하여 총 5개의 시험시편을 제작하여 대형 공진주시험을 수행하였다. 시험 시료의 최대입경은 공진주시험 표준인 ASTM D4015(ASTM, 2003)에 따라 사용 장비의 공시체 직경인 200mm의 1/6 이하가 되도록 26.5mm 체(sieve) 통과분으로 제한하였으며, 상사비 효과를 비교하기 위한 시편의 경우 각각 9.5mm, 4.75mm 체 통과분을 기준으로 최대입경을 설정하였다. Fig. 2는 5개 시료에 대한 각각의 입도분포를 나타낸다. 시험시편 1, 2, 3은 최대입경을 변화시키되 입도분포 특성을 나타내는 균등계수와 곡률계수(C_c)가 동등한 이상적인 비교조건이 되도록 임의의 직선형태의 입도분포를 설정하여 조제하였으며, 각 시편 내 포함된 토립자의 크기가 극명히 차이날 수 있도록 균등계수가 작은 빈입도의 입도분포를 설정하였다. 이와 같이 준비된 세 시편

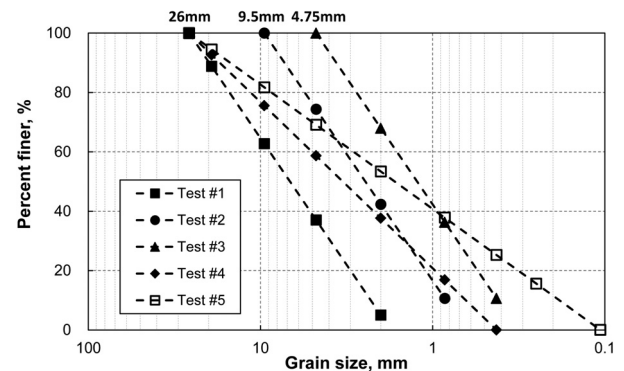


Fig. 2. Particle size distributions for each testing specimen

Table 1. Fundamental characteristics of raw rockfill material for Y-dam construction

D_{max} (mm)	D_{50} (mm)	Porosity	Absorption	C_u	C_c	G_s	USCS
800	51.4	0.59%	0.21%	14.9	0.94	2.79	GW

Table 2. Fundamental characteristics of each testing specimen

ID	D_{max} (mm)	D_{50} (mm)	C_u	C_c	USCS	γ (kN/m ³)	e
Test #1	26.00	6.74	3.86	0.76	GP	17.96	0.524
Test #2	9.50	2.46	3.86	0.76	SP	17.92	0.527
Test #3	4.75	1.23	3.86	0.76	SP	18.09	0.513
Test #4	26.00	3.32	7.82	0.66	SW	19.56	0.400
Test #5	26.00	1.66	15.66	0.57	SW	20.82	0.315

은 상호간의 최대입경 영향을 평가하기 위한 이상적인 상사 시료로 간주할 수 있다. 한편, 시험시편 4와 5는 동일한 최대입경에 대하여 입도분포를 달리하는 경우 해당 입도특성이 재료의 동적 변형특성에 미치는 영향을 평가하고자 균등계수를 각기 달리한 직선형 입도분포로 계획하였다. 각 시료의 입도특성 및 시료성형 조건은 Table 2와 같다.

한편 입자의 형상은 전단파속도(또는 최대전단탄성계수)와 응력-변형을 특성에 영향을 미치는데, 기존 연구에 따르면 입자의 구형도(sphericity)와 원마도(roundness) 등은 미소변형 전단탄성계수와 관계되는 전단파속도의 크기와 구속압의 영향 정도에 영향을 미친다. Cho et al.(2006)의 연구결과에 의하면 입자의 형상이 원형에 가까운 경우 구속압에 따른 전단탄성계수 증가 양상이 상대적으로 작게 나타나며, 모나고 부정형 입자 형상 특성을 나타낼수록 구속압에 민감하게 전단탄성계수가 증가한다. 본 연구에서 사용된 시편의 경우 동일한 재료에 대하여 각각 다른 입도구간의 입자를 이용하여 조성하였으므로, 입도 구간별 입자의 형상 특성에 차이가 있을 경우 이에 따른 변형특성의 차이가 발생할 수 있다. 그러므로 Fig. 3과 같이 각각의 입도 구간별 입자에 대한 형상 특성을 구형도를 기준으로 비교함으로써 해당 특성이 미소변형 전단탄성계수 특성에 영향을 미칠 가능성을 확인하고자 하였다.

입자의 구형도는 각각의 입도 구간에서 최소 30개 이상의 입자를 무작위로 선별하여 최소 외경에 대한 최대 내경의 비로 측정하였으며, 이러한 구형도는 정규분포를 가정하여 Fig. 4와 같이 표현될 수 있다. Fig. 4의 입도 구간별 분포 특성에서 구형도의 평균은 약 0.55에서 0.63 사이로 일반적인 모래의 구형도에 비해 다소 작은 값을 나타낸다(분쇄모래: 0.7-0.8, 자연모래: 0.5-0.9, Cho et al., 2006). 결과 상에서 입경이 감소할수록 평균 구형도가 다소 감소하는 경향이 일부 나타나지만 일관성이 크지 않으며, 구간별 구형도의 차이가 큰 의미를 나타내

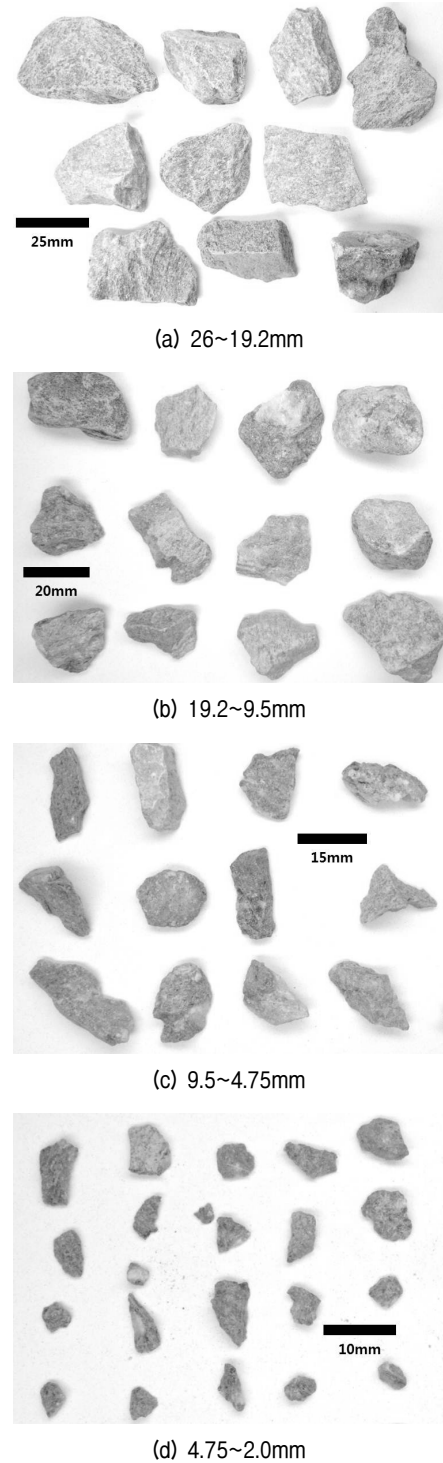


Fig. 3. Shapes of particles selected from various grain size sections

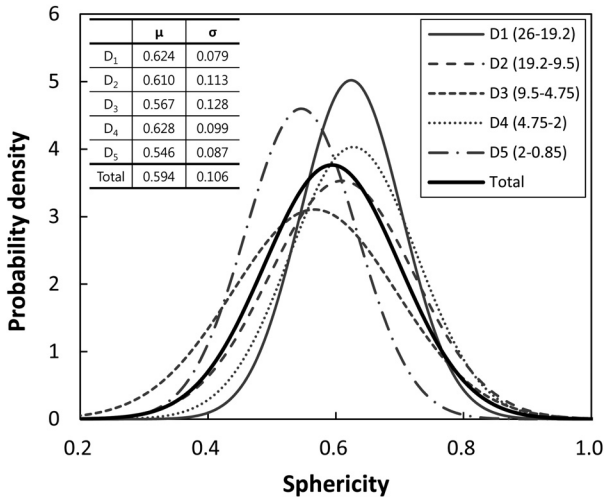


Fig. 4. Probability distribution of particle sphericity for each grain size level

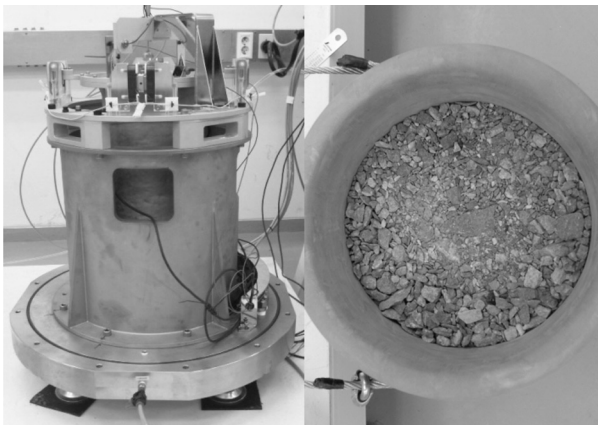


Fig. 5. Large scale resonant column testing apparatus and preparation of specimen

는 것으로 판단할 수 없다. 그러므로 본 연구에서 관심을 두는 최대입경에 따른 변형특성에서 입자 형상에 의한 효과는 미미한 것으로 판단하였다.

2.3 시험 장비 - 대형 공진주시험시스템

Fig. 5는 본 연구에서 조립재료의 동적 변형특성을 파악하기 위하여 사용한 대형 공진주시험기와 시험시편 1의 제작 과정을 나타낸다. 해당 장비는 직경 200mm, 높이 400mm의 중실원주형(cylindrical solid) 대형 공시체에 대하여 시험이 가능하도록 제작된 Stokoe식 공진주시험기로 하부 고정단, 상부는 가진시스템을 포함한 자유단 조건으로 구성되었으며 향후 최대 300mm 직경의 공시체에 대한 시험도 가능한 확장성을 가지고 있다. 반복 비틀하중 제어를 위한 가진장치는 대용량의 전류 증폭기와 코일-자석 시스템으로 구성되었으며, 약 100MPa

Table 3. Specifications of large scale resonant column testing system

Item	Specifications
Specimen dimensions	200 mm(D) × 400 mm(H)
Driving mechanism	Coil-magnet control
Shear strain range	$10^{-5}\%$ - $10^{-1}\%$
Frequency range	0.1 Hz - 20,000 Hz
Max. torque	500 Nm
Max. confining pressure	2,000 kPa
Current amplifier	Eliezer 161AR amplifier
Strain measurement (acc)	PCB 353B15 accelerometer
DAQ device	NI USB-6251

의 전단탄성계수를 나타내는 시편에 대하여 최대 0.1%의 전단변형을 유발할 수 있다. 시험용 압력용기는 최대 2MPa까지 가압이 가능하며, 시험기의 제어 및 계측은 노트북과 USB 타입의 다기능 DAQ 장비로 구성된 전자동 통합시스템에 의하여 수행된다.

3. 대입경 지반 조립재료에 대한 공진주시험

3.1 시험 절차 및 방법

대형 공진주시험을 이용, 조립재료의 입경 특성에 따른 동적 변형특성을 평가하기 위하여 Fig. 2와 Table 2의 입도 및 밀도조건인 공시체 시편을 제작하여 실험을 수행하였다. 시험시편은 바닥판에 멤브레인과 다짐틀을 고정하고, 총 5층의 과소다짐법에 따라 직경 200mm, 높이 400mm로 제작하였다. 표준 직경의 램머를 이용하여 시료를 다질 경우 표면의 입자가 튀거나 파쇄가 발생하므로, 직경 150mm의 금속판을 전동식 진동해머에 연결하여 각 시편마다 동일한 조건으로 다짐으로써 시험시편을 제작하였다. 결과적으로 최대입경을 달리하여 동일한 입도분포특성으로 제작한 시험시편 1, 2, 3의 경우 거의 동일한 밀도조건의 시험시편의 조성이 가능하였다.

대형 공진주시험은 모든 시험시편에 대하여 25kPa, 50kPa, 100kPa, 200kPa, 400kPa 총 다섯 단계의 구속압 상태에서 진행하였으며, 최소 $10^{-4}\%$ 이하, 최대 $10^{-2}\%$ 의 전단변형율에 이르도록 시험을 수행하였다. 여기서 최대 전단변형율은 현 시험시스템에서 구현 가능한 최대 가진하중 조건에 상응하는 값으로 제한되었다. 각 구속압 단계에서는 입력전압 변화에 따라 주파수응답곡선을 이용한 전단탄성계수와 자유진동감소곡선(free-vibration decay curve)을 이용한 감쇠비를 측정함으로써, 재료 물

성의 변형율에 따른 비선형성을 평가하였다.

3.2 시험 결과 및 분석 - 비선형 변형 특성

3.2.1 최대입경의 영향

Fig. 6의 (a), (b), (c)는 각각 시험시편 1, 2, 3에 대한

대형 공진주시험 결과를 도시한 것으로 구속압과 변형율에 따른 전단탄성계수 특성, 변형율에 따른 전단탄성계수감소곡선 및 감쇠비 증가 특성 등을 나타낸다. 각각의 경우 전단탄성계수 특성을 살펴보면 공통적으로 10^{-4} 이하의 미소변형율 영역에서 선형에 가까운 최대 전단탄성계수를 나타내며, 탄성계수의 감소가 시작되는

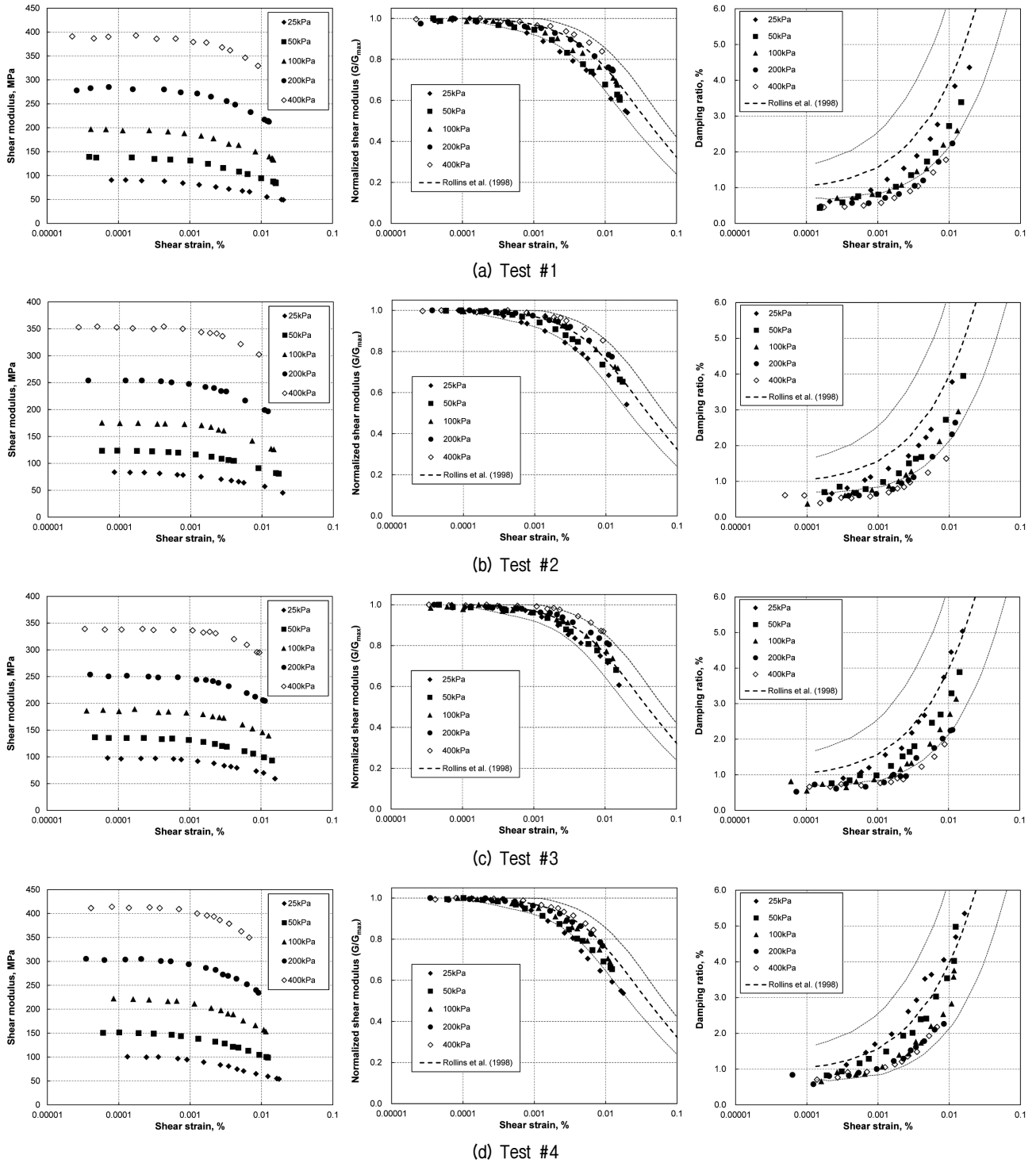


Fig. 6. Small-strain maximum shear modulus, normalized modulus reduction curve, damping characteristics from resonant column testing for each specimen

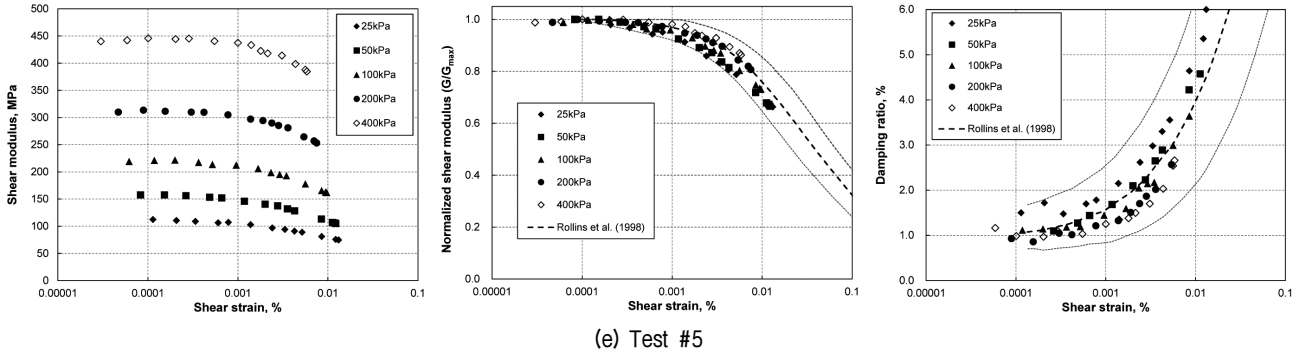
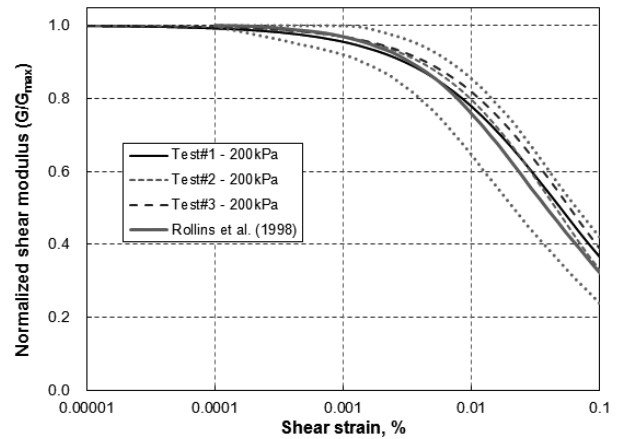


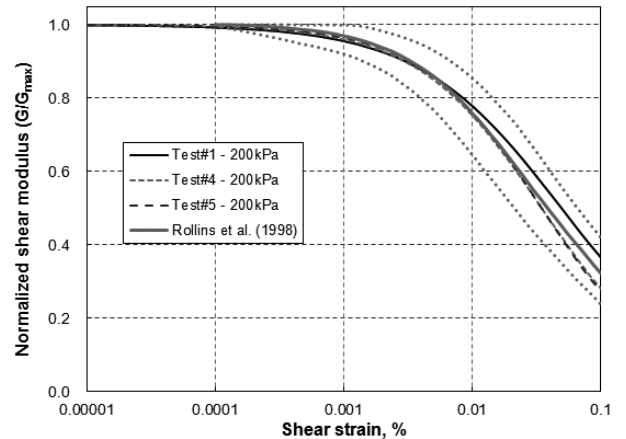
Fig. 6. Small-strain maximum shear modulus, normalized modulus reduction curve, damping characteristics from resonant column testing for each specimen (continued)

탄성한계변형율(elastic threshold shear strain, γ_e^t)은 약 $10^{-4}\%$ 대역에서 나타나는 전형적인 자갈질 재료의 특성을 확인할 수 있다. 전단탄성계수감소곡선은 구속압의 증가에 따라 상승하는 일반적인 지반재료의 특성을 나타내며, 세 가지 모두 약 100kPa~200kPa 구속압 조건에서 획득한 곡선이 Rollins et al.(1998)이 다수의 시험 결과로부터 도출한 자갈의 대표적인 전단탄성계수감소곡선과 근접하여 위치하는 결과를 나타낸다. 감쇠비의 경우 세 가지 모두 Rollins et al.이 제시한 감쇠비곡선의 하한에서 평균까지의 범위에 위치하는데 이러한 감쇠비의 범위는 재료의 고유 특성에 기인하며, 그 증가 양상은 Rollins et al.의 평균 곡선과 유사한 특성을 따른다. 입경이 작은 시료일수록 중간변형을 이하에서의 최소 감쇠비(D_{min})의 크기가 증가 또는 감쇠비곡선의 위치가 상승하는 경향이 있으나 그 정도는 미미하였다.

Seed et al.(1984)의 연구 결과에서 자갈과 모래의 특성을 비교할 경우 일반적으로 자갈질 재료의 전단탄성계수감소곡선은 모래보다 작은 전단변형율에서 감소하는 특성을 나타내며 감쇠비는 모래와 유사한 값을 나타낸다. 본 실험결과에서도 Fig. 7(a)에 나타나는 바와 같이 최대입경이 작아짐에 따라 전단탄성계수감소곡선의 위치가 미세하게 상승하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 최대입경 26mm의 자갈질 시료와 최대입경 4.75mm의 모래 시료의 특성을 비교함에 따라 동일한 입도분포 특성에서도 자갈과 모래의 특성에 따른 차이가 나타나는 것으로 판단할 수 있다. 시험시편 2의 경우에도 최대입경은 자갈로 분류되나 입경 4.75mm 이하의 모래가 60% 이상 포함된 모래로 분류되는 시료이므로, 시험시편 1과 3의 중간 정도의 변형 특성을 나타내는 것으로 판단된다.



(a) G/G_{max} curves - effect of maximum grain size



(b) G/G_{max} curves - effects of coefficient of uniformity (C_u)

Fig. 7. Shear modulus reduction characteristics with respect to grain size distributions

3.2.2 입도분포 특성 - 균등계수의 영향

Fig. 6의 (d), (e)는 각각 시험시편 4, 5에 대한 공진주 시험 결과를 도시한 것으로, Fig. 6(a)의 시험시편 1에 대한 결과와 함께 비교함으로써 동일한 최대입경 조건에 대하여 균등계수의 차이가 재료의 비선형 변형 특성에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 기존의 유사한 연구

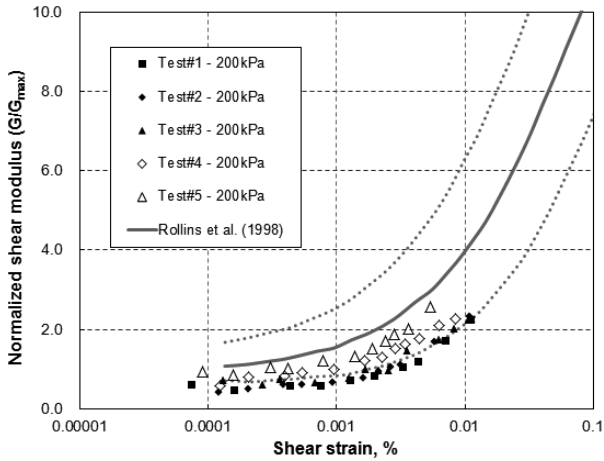


Fig. 8. Comparison of damping characteristics

사례를 살펴보면, 동일한 D_{50} 입경에 대하여 균등계수를 달리하는 직선형태의 입도분포를 나타내도록 다수의 시편을 제작하여 공진주시험을 수행한 경우 균등계수가 클수록 전단탄성계수감소곡선의 비선형성이 커지고, 감쇠비 곡선이 상승하는 특성이 나타난다(Menq, 2003). Fig. 7(b)를 통하여 본 연구에서의 시험시편 1, 4, 5의 비선형 변형특성을 비교할 경우 전단탄성계수감소곡선의 위치는 Rollins 등이 제시한 평균 곡선과 유사한 위치에서 큰 차이를 나타내지 않으며, Menq의 결과와 같이 균등계수에 따른 전단탄성계수감소곡선의 비선형성 차이가 크게 나타나지 않는다. 이러한 현상을 앞서 기존 연구결과와 비교하여 분석하면, 동일 D_{50} 조건에서 균등계수의 증가는 최대입경의 증가를 수반함에 따라 비선형성이 커지는 한편, 동일 최대입경을 갖는 조립재료에서 균등계수의 증가는 작은 입자 함량의 증가량이 상대적으로 크므로 인하여 비선형성이 작아질 수 있다. 본 실험 결과에서 동일 최대입경에 대하여 균등계수에 따라 전단탄성계수감소곡선 차이가 미미한 것으로 미루어 볼 때, 조립질 재료의 입도 특성은 균등계수보다 최대입경이 재료의 비선형 변형 특성에 상대적으로 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

한편 감쇠비의 경우 균등계수가 클수록 데이터의 범위가 미세하게 상승하는 것을 확인할 수 있으며(Fig. 8), 이는 기존 연구 사례에 알려진 바와 유사한 현상으로 해석할 수 있다.

3.3 시험 결과 및 분석 - 최대전단탄성계수

지반재료의 최대전단탄성계수는 일반적으로 간극비,

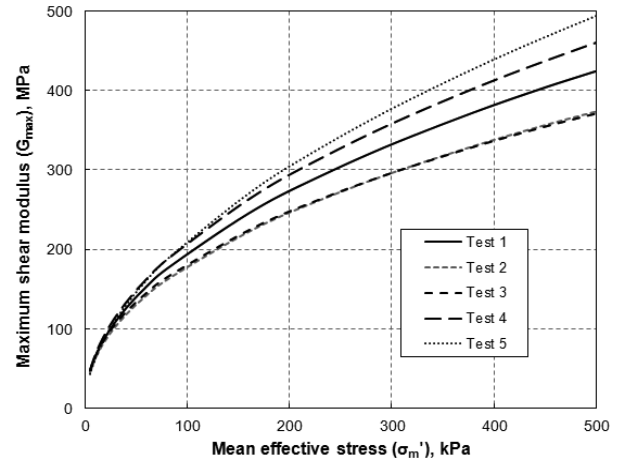


Fig. 9. Estimation of confining stress dependency of maximum shear modulus

선행압밀하중, 구속응력상태 등의 영향을 받으며, 비등방 구속압력 조건에서 응력과 최대전단탄성계수에 대한 관계는 식 (1)과 같이 표현된다(Hardin, 1978; Hardin and Blandford, 1989).

$$G_{ij}^e = \frac{OCR^k}{F(e)} \frac{S_{ij}}{2(1+\nu)} p_a^{1-n} (\sigma'_i \sigma'_j)^{\frac{n}{2}} \quad (1)$$

여기서 OCR 은 과압밀비, S 는 강성계수, ν 는 포아송비, p_a 는 대기압, σ' 은 유효응력을 나타내며, 간극비 함수 $F(e)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$F(e) = 0.3 + 0.7e^2 \quad (2)$$

등방구속압 상태에서 비점성토의 선행압밀하중을 고려하지 않을 때 식 (1)의 재료상수와 관련된 항을 정리하면 평균유효응력 σ'_m 에 대하여 다음과 같이 간략히 표현될 수 있다.

$$G_{\max} = \frac{A}{F(e)} p_a^{1-n} \sigma_m'^n \quad (3)$$

Fig. 9는 시험 대상인 5개 시편에 대하여 $10^{-4}\%$ 이하의 미소변형을 구간에서 측정된 구속압에 따른 최대전단탄성계수를 식 (1) 또는 (3)을 이용하여 도시한 결과이며, 식 (3)의 각 계수는 Table 4에 정리하였다. 동일한 균등계수를 나타내는 시험시편 1, 2, 3의 경우 동등한 간극비 조건에서 최대입경의 감소에 따라 강성계수 A 와 구속압 영향계수 n 이 모두 감소하는 것으로 평가되었으

Table 4. Coefficients determining small strain moduli of each specimen

ID	A	$F(e)$	n
Test #1	955	0.492	0.48
Test #2	879	0.494	0.46
Test #3	874	0.484	0.44
Test #4	854	0.412	0.49
Test #5	774	0.369	0.53

며, 그 차이는 최대입경 26mm인 시험시편 1에서 두드러지는 것으로 확인할 수 있다. 일반적으로 동일 재료에 대하여 균등계수가 동일한 경우 최대입경에 따라 강성계수는 증가하고 구속압 영향계수는 크게 변하지 않는데, 본 연구결과에서도 구속압영향계수의 변화량은 5% 미만으로 작은 값을 나타낸다. 시험시편 2, 3의 경우 구속압에 따른 최대전단탄성계수가 유사한 값을 나타내는데, 이러한 차이는 각 시험시편이 통일분류법과 입도 특성 상에서 유사하게 구분되는 모래시료이기에 나타나는 현상이라 판단되며, 시험시편 1의 자갈과 구분되는 특성으로 볼 수 있다. 자갈과 모래의 구분되는 특성은 앞서 전단탄성계수감소곡선에서 나타난 차이와 일관성을 나타내는데, 결과적으로 동일 재료에 대하여 준비된 상사입도 시험시편이 최대입경, 평균입경(D_{50}) 등에서 자갈과 모래와 같은 상이한 재료적 특성으로 구분될 경우, 전단탄성계수감소곡선과 최대전단탄성계수에서 차이를 나타낼 수 있음을 확인할 수 있다.

한편, Fig. 9의 결과에서 동일 최대입경에 대하여 균등계수를 달리한 시험시편 1, 4, 5를 비교할 경우 균등계수가 큰 시편일수록 구속압의 증가에 따른 최대전단탄성계수 증가 폭이 큰 것을 확인할 수 있다. Table 4를 살펴보면 균등계수가 약 2배, 4배 증가할 때 구속압 영향계수 n 은 증가하고 강성계수 A 는 감소하는 경향을 확인할 수 있으나, 본 연구 결과만으로는 명확한 상관관계를 유추하기 어렵다. 해당 세 시편의 재료는 입도분포의 차이를 고려할 때 동일 재료로 간주하기 어려우므로, 식 (3)을 적용하여 계수를 직접 비교하기에는 한계가 있다. 단, 대기압 p_a 에 대한 기준강성 $k=A/F(e)$ 에 대하여 비교할 경우 균등계수의 증가와 함께 강성도 증가하는 것으로 확인할 수 있다. 결론적으로 동일 재료원에 대하여 양입도로 조성된 시료일수록 전단탄성계수의 값이 크고, 구속압에 보다 민감한 것으로 확인하였다.

본 연구결과를 종합할 때, 동일 재료원에 대하여 최대입경과 균등계수를 달리함으로써 실험을 수행한 결과

재료의 최대입경은 전단탄성계수감소곡선에, 균등계수는 구속압에 따른 최대전단탄성계수에 주된 영향요소로 작용하는 것으로 확인할 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 대입경 조립재료의 입도분포특성에 따른 동적 변형특성을 평가하기 위하여 댐축조용 사력 재료부터 최대입경과 균등계수를 달리 한 총 5개의 시험 시편을 제작하였으며, 대형 공진주시험기를 이용하여 각각의 최대전단탄성계수, 전단탄성계수감소곡선, 감쇠비 특성을 평가하였다. 본 연구 결과를 바탕으로 한 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 댐 축조용 조립재료로부터 준비한 조립질 기반재료에 대하여 대형 공진주시험을 수행한 결과 전단탄성계수감소곡선은 기존에 발표된 시험결과와 통계적 평균값과 유사하게 나타나며, 감쇠비의 경우 전반적으로 평균보다 약간 작게 나타나는 것으로 확인하였다. 재료 입경과 구속압에 따른 시험결과를 종합적으로 고려한다면, 기존의 대표적 전단탄성계수감소곡선은 낮은 구속압에서의 대입경 재료의 동적 물성을 과대평가 할 수 있으므로, 이에 대한 적절한 고려가 필요하다.
- (2) 동일 재료원에 대하여 최대입경을 달리한 상사입도 시편을 비교한 경우, 최대입경이 큰 재료일수록 최대전단탄성계수는 크게 나타나고 구속압영향계수 또한 미세하게 증가하는 것으로 확인하였다. 전단탄성계수의 비선형성을 비교한 결과 최대입경이 작아질 때 전단변형율에 따른 탄성계수의 감소 특성이 미세하게 줄어드는 것으로 확인하였으나, 일정 입경 이하에서는 차이가 없는 것으로 판단할 수 있다. 이러한 효과는 최대입경뿐만 아니라 평균입경, 자갈과 모래의 구분 등 재료의 분류 특성과 관련 지을 수 있는 것으로 판단된다.
- (3) 동일한 최대입경에 대하여 균등계수를 달리하는 경우, 균등계수가 증가함에 따라 최대전단탄성계수는 증가하고 구속압에 대하여 더 민감한 것으로 평가되었다. 또한 전단탄성계수감소곡선의 비선형성은 균등계수보다 최대입경의 영향을 더 크게 받는 것으로 판단할 수 있다.
- (4) 전체적인 실험 결과를 종합하면 조립재료의 최대입

경이 클수록 최대전단탄성계수의 구속압에 대한 민감도가 증가하고, 변형율에 따른 비선형성도 증가하며, 전단탄성계수감소곡선은 기존의 연구 결과로부터 제시된 평균적인 범위 내에서 나타난다. 지반 구조물의 해석 또는 설계를 위하여 대입경 조립재료의 동적 변형특성 평가를 위한 실내시험을 수행할 경우 일반적으로 시험장비 조건에 맞추어 입도를 조정하는 것을 감안한다면, 해당 시험 결과는 원재료의 탄성계수와 비선형성을 다소 작게 평가할 가능성이 있다. 따라서 지반구조물의 동적 해석을 수행 시 기존의 대표적 전단탄성계수감소곡선 또는 실험결과를 이용할 때 입자 크기나 구속압 등의 영향을 합리적으로 판단하여 고려하는 것이 필요하다.

- (5) 한편, 본 연구에서 재료의 최대입경 증가에 따라 그 변형특성이 다소 상이하게 나타나는 것을 확인할 수 있으므로, 실내시험을 이용하여 현장의 대입경 조립재료의 비선형 변형특성을 정확히 측정하는 것에는 한계가 있다. 다만 자갈질 이상의 대형 입자에 대하여 대형 시험장치를 이용하는 시험을 수행할 경우 구조물의 해석 결과에 큰 차이를 나타내지 않는 범위에서 원재료의 입도분포에 보다 근접한 변형특성을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 산하 건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업(09기술혁신F045)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

1. American Society for Testing and Materials (ASTM) (2003), "Standard test methods for modulus and damping of soils by resonant-column method", ASTM D4015, Philadelphia.
2. Cho, G.C., Dodds, J., and Santamarina, J.C. (2006), "Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.132, No.5, pp.591-602.
3. Hardin, B.O. (1978), "The nature of stress-strain behavior of soils", *Proceedings of the ASCE Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Pasadena, CA, ASCE, New York, pp.3-90.
4. Hardin, B.O. and Blandford, G.E. (1989), "Elasticity of Particulate

- Materials", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.115, No.6, pp.788-805.
5. Hardin, B.O. and Kalinski, M.E. (2005), "Estimating the shear wave modulus of gravelly soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.131, No.7, pp.867-875.
6. Jin, G.R., Shin, D.H., Im, E.S., and Kim, K.Y. (2009), "Characteristics of deformation and shear strength of parallel grading coarse-grained materials using large triaxial test equipment", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.25, No.12, pp.57-67.
7. Lee, D.S., Kim, K.Y., Hong, S.Y., and Hwang, S.C. (2006), "Characteristic of shear behavior of coarse grained materials based on large scale direct shear test (II)", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.22, No.4, pp.51-59.
8. Lee, S.H., Kim, D.S., Choo, Y.W., and Kwon, H.K. (2009), "Estimation of dynamic material properties for fill dam : II. Nonlinear Deformation Characteristics", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.25, No.12, pp.87-105.
9. Lee, S.J., Choo, Y.W., Hwang, S.B., and Kim, K.J. (2012), "Test method for Young's modulus of parallel graded coarse granular materials by large triaxial test", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.32, No.5C, pp.211-220.
10. Lowe, J. (1964), "Shear strength of coarse embankment dam materials", *Proceedings of 8th Congress on Large Dams*, pp.745-761.
11. Marachi, N.D., Chan, C.K., and Seed, H.B. (1972), "Evaluation of properties of rockfill materials", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Engineering, ASCE*, Vol.98, No.SM1, pp.95-114.
12. Menq (2003), "Dynamic properties of sandy and gravelly soils", Ph.D dissertation, *the University of Texas at Austin*, Austin, TX.
13. Rollins, K.M., Evans, M.D., Diehl, N.B., and Daily, W.D. (1998), "Shear modulus and damping relationships for gravels", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.124, No.5, pp.396-405.
14. Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M., and Tokimatsu, K. (1984), "Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils", Rep. No. EERC 84-14, *Earthquake Engineering Research Center*, Univ. of California, Berkeley, CA.
15. Seo, M.W., Ha, I.S., and Kim, B.J. (2007), "Effect of particle size and test equipments on shear behavior of coarse materials", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.27, No.6C, pp.393-400.
16. Seo, M.W., Shin, D.H., Ha, I.S., and Park, H.G. (2006), "Evaluation of shear behavior of crushed rock and sand/gravel materials using large triaxial testing equipment", *KGS Fall Conference 2006*, pp. 844-853.
17. Shin, D.H. (2001), "Shear strength characteristics of rockfill materials using large triaxial testing apparatus", Rep. No. WRRI-GT-01-2, Korea Water Resources Corporation.
18. Stokoe, K.H., Darendeli, M.B., Menq, F.Y., and Choi, W.K. (2004), "Comparison of the linear and nonlinear dynamic properties of gravels, sands, silts and clays", *Proceedings of 11th SDEE and 3rd ICEGE*, pp.1-4.

(접수일자 2012. 6. 26, 수정일 2013. 2. 20, 심사완료일 2013. 8. 13)