대형삼축압축시험을 이용한 상사입도 조정 재료의 탄성계수 산정시험

Test method for Young's Modulus of Parallel Graded Coarse Granular Materials by Large Triaxial Test

이성진* · 추연욱** · 황수범*** · 김기재****

Lee, Sung Jin · Choo, Yun Wook · Hwang, Su Beom · Kim, Ki Jae

Abstract

Coarse granular materials such as gravel, rubble is used as major fill materials in earth structures of railway, road and dam. Therefore, it is essential to accurately evaluate properties of these materials for reasonable design and construction. In the precedent study, we built large triaxial testing system and verified system compliance with a focus on the dynamic properties. And we could secured the reliability of the system. In this study, the cyclic triaxial tests were performed in various experimental conditions on coarse granular material. Two series of parallel graded samples are prepared by mixing crushed rock. The influence of grain size, loading pattern, loading frequency, and fine contents were analyzed and discussed.

Keywords : large scale triaxial test, coarse granular material, Young's modulus, parallel grading method

요 지

왜석, 자갈 등과 같은 대입경의 조립지반재료들은 철도, 도로, 댐 등과 같은 지반구조물의 주요한 성토재료로 사용되고 있다. 따라서 합리적인 설계와 시공을 위해서 이들 재료의 물성을 정확하게 평가하는 것은 필수적이다. 본 연구에 앞서 대형 삼축압축시험장비를 구축하고 미소변형 수준에서의 물성산정을 위한 시스템 검증을 수행하여, 시험장비의 신뢰성을 확보할 수 있었다. 본 연구에서는 대입경의 조립지반재료의 다양한 실험 조건들을 고려하여 반복삼축압축시험이 수행되었다. 특히 상사입도 조정재료 시편들에 대해 입자크기, 하중패턴, 하중 주파수, 세립분 함유 조건 등이 탄성계수 결과에 미치는 영향에 대해 검토, 분석하였다.

핵심용어 : 대형삼축압축시험, 대입경 조립지반재료, 탄성계수, 상사입도법

1. 서 론

대입경 조립재료는 철도 노반, 도로, 댐, 교대/지하철 뒤편, 항만, 제방 등 대형 지반구조물에 그 활용이 지속적으로 이루어지고 있다. 이러한 대형 지반구조물들은 국가 중요 기반 시설로서 경제적이고 안전한 설계와 시공이 요구된다. 따라서 대입경 조립재료에 대한 보다 정확한 이해가 필수적이다. 그러나 이러한 기반시설들의 중요도에 비해 주요한 재료로써 사용되는 조립지반재료에 대한 물성의 실험적 평가가 합리적으로 이루어지지 않고 있다. 이는 입경이 큰 재료의 시험이 가능한 대형요소시험장비의 부족과 시편 제작 및 시험의 어려움 등에 그 원인이 있다. 한편 위와 같은 대형지반구조물에 대한 내진설계와 건설 및 운영 중 진동 요인에

따른 동적 거동을 고려한 합리적 설계와 시공을 위해서는 사용재료에 대한 물성의 정확한 평가가 요구된다.

대입경 조립지반재료의 거동에 대한 연구는 1960년대부터 시작되었다(Marsal et al., 1965; Marsal, 1967; Marachi et al., 1972; Becker et al., 1972). 이들은 대형삼축압축시험을 통해 내부마찰각으로 파괴시의 응력-변형률의 관계를 규명하는 데에 집중된 연구를 수행하였다. 시험장비의 구축과 활용이 쉽지 않아 많은 연구가 수행되지는 못했지만 여러 연구자들에 의해 Rockfill 재료에 대한 거동(Chavez and Alonso, 2003; Hu et al., 2011), 도상자갈의 동적 거동(Indraratna et al., 1998; Lackenby et al., 2007) 그리고 자갈재료의 정적/동적 탄성계수(AnhDan et al., 2002; Koseki et al., 1999; Modoni, 2011)에 대한 연구가 수행된 바 있다.

*정회원, · 교신저자 · 한국철도기술연구원 첨단인프라연구단 선임연구원 (E-mail : geolsj@krii.re.kr)

**정회원 · KAIST 건설및환경공학과 연구교수 (E-mail : ywchoo@kaist.ac.kr)

***한국철도기술연구원 첨단인프라연구단 연구원 (E-mail : remnant1982@krii.re.kr)

****한국철도기술연구원 첨단인프라연구단 연구원 (E-mail : kimkj@krii.re.kr)

국내에서는 대입경조립재료의 물성 산정을 위한 대형삼축 압축시험장비가 수자원공사와 경주대학교에 구축되어 초기에는 주로 정적강도 및 모델정수 산정에 대한 연구가 주로 진행되어 왔으며, 최근에는 동적물성 산정을 위한 장비의 개선과 이에 따른 연구(신동훈 등, 2000)가 진행된 바 있다(신동훈, 2003, 2004; 이세현 등, 2009).

이후 한국철도기술연구원에서는 최대입경 100mm의 조립 재료까지 실험이 가능한 대형삼축압축시험장비를 구축하여, 이에 대한 미소변형 수준의 동적물성산정을 중심으로 장비의 검증연구를 수행하였다(이성진 등, 2010).

그러나 지반구조물에 따라 최대입경이 100mm 이상인 경우도 적지 않다. 즉, 대형 지반구조물에 사용되는 조립지반 재료의 경우 원입도의 최대입경이 대형시험장비에서 실험이 가능한 최대입경보다 큰 경우가 있기 때문에, 대입경 조립 지반재료의 요소시험을 위해서는 원재료의 입도를 조정해야 할 필요가 있다. 이를 위해 입도를 조정하는 방법은 크게 3가지가 기존 연구를 통해 제시된 바 있다. 상사입도조정법(Parallel grading method), 전두입도법(Scalping technique), 자갈입도보정법(Scalping and replace method) 중에서 상사입도법(Parallel grading method)이 가장 많이 사용되고 있다(Marachi et al., 1972).

본 연구에서는 상사입도로 조정되었을 때의 입도 및 최대입경 등의 변화를 중심으로 반복하중 패턴, 하중 주파수, 세립분 함량 등의 시험 조건 등이 저변형률 수준에서의 탄성 계수에 미치는 영향을 실험으로 검토하여 상사입도법에 대한 적용성을 평가하고자 하였다.

2. 대형삼축압축시험장비

본 연구에 사용된 대형삼축압축시험장비는 한국철도기술연구원에 구축된 장비로서 실험장비 구축 이후 향후 수행되는 실험 결과의 신뢰성 확보를 위해서 검증연구를 수행한 바 있다(이성진 등, 2010). 즉, 실험장비 시스템의 역학적 순응

성 검증을 위해 동적물성 결과를 중심으로 검증작업을 수행하였으며, 이를 위하여 고유의 역학적 특성치(탄성계수)가 같은 직경 300mm와 50mm의 검증시편을 5종류로 제작하여 검증시험에 활용하였다. 검증 시험에는 대형삼축압축시험, 소형의 공진주시험, 비틀전단시험, 충격반향시험 등이 이루어졌다.

검증 실험 결과 대형삼축압축실험장비는 우레탄시편들에서 전단변형률에 따른 탄성계수와 감쇠비가 일정한 값을 나타내면서 우레탄 검증시편의 재료 특성을 잘 반영하고 있음이 확인되었으며, 같은 강성으로 제작된 소형(직경 50mm) 우레탄 시편과 대형(직경 300mm) 우레탄시편에 대해 유사한 하중주파수로 수행된 비틀전단시험과 대형삼축압축시험에서 5쌍 검증 시편 모두 절대적인 강성값이 거의 같은 결과를 보여 다른 시험법과의 비교에서도 합리적인 결과를 검증할 수 있었다. 또한 대형삼축압축시험, 비틀전단시험, 공진주시험, 충격반향시험으로 상호 검증한 결과들에서는, 일정 하중주파수(0.5Hz)에서의 탄성계수로 정규화하였을 경우 하중주파수의 대수축에 직선적 증가경향을 보이는 우레탄 검증시편의 특성을 매우 이상적으로 나타내고 있었다. 이와 같은 검증 실험 결과들로부터 향후 수행되는 동적물성 실험결과에 대해 신뢰도를 확보할 수 있을 것으로 판단하였다(이성진 등, 2010).

3. 대형삼축압축시험 결과에 미치는 영향 요소 평가

3.1 실험재료

본 연구에 사용된 재료는 규장암(석영; 30.7%, 사장석; 31%, 미사장석; 15.5%, 백운모; 7.4%, 견운모; 12%, 녹니석; 3.4%)으로 분류되는 암석이 주로 포함된 재료로서, 구간별로 입도를 분류한 재료는 그림 2와 같으며, 암석의 기본 물성¹⁾은 표 1과 같다.

3.2 실험 및 결과 분석 방법

본 연구에서 사용한 삼축압축실험장비의 로드셀은 2MPa

(a) 대형삼축압축시험장비

(b) 삼축셀 내부

그림 1. 대형삼축압축시험장비(한국철도기술연구원, KRRI)

1) 비중, 흡수율, 공극률, 밀도: ASTM C97/C97M-09 Standard Test Methods for Absorption and Bulk Specific Gravity of Dimension Stone, 탄성파속도: ASTM D2845-08 Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock, 일축압축강도, 탄성계수: ASTM D7012-07 Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures

그림 2. 재료 입도별 분류

표 1. 재료의 암석 기본 물성

구분	건조밀도 Bulk Density (kN/m ³)	비중 Specific Gravity	공극율 Porosity (%)	흡수율 Absorption (%)	초음파속도 Ultrasonic Velocity(m/s)		압축강도 UCS (MPa)	q- (MPa) Ave.
					P파	S파		
Test 1	27.31	2.79	0.43	0.15	5,563	3,752	175.1	115.2
Test 2	27.46	2.81	0.82	0.29	5,549	3,713	165.1	
Test 3	27.12	2.77	0.53	0.19	4,667	3,039	180.8	
AVE	27.30	2.79	0.59	0.21	5,259	3,501	173.66	

표 2. 시험 시편의 기본 물성

Sample ID	D _{max} [*] (mm)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u	C _c
YJ-D300-d20	20	0.14	0.5	1.2	2.1	15.71	0.81
YJ-D300-d50	50	0.33	1.2	3.1	5.2	15.76	0.84
YJ-D300-d50-B	50	1.25	2.4	4.0	5.2	4.16	0.89
YJ-D500-d90	90	0.61	2.2	5.9	9.5	15.57	0.84
YJ-D500-d90-B	90	2.5	4.4	7.4	9.5	3.80	0.82

* D_{max} : 최대입경

압력까지 내압 방수형으로 삼축셀 내부에 위치하도록 하여 삼축셀과 재하로드(rod)와의 마찰이 실험에서 측정되는 하중에 미치는 영향을 제거하여 보다 정확한 하중제어가 가능하게 하였으며, 압축과 인장 실험이 모두 가능한 타입으로 설치하여, 다양한 하중 패턴의 하중제어를 수행할 수 있게 하였다.

변위측정은 내부와 외부에서 측정하는 방법이 있으나, 외부 측정 변위는 시료의 양쪽 끝부분에서의 평탄성 등의 문제로 실제보다 큰 변위가 계측되어 변형률이 크게 평가되는 단부오차(bedding error)를 포함할 수밖에 없다. 물론 이러한 단부오차는 반복 재하를 통해 초기에 상당부분 제거하거나

단부의 석고처리 등으로 오차요인을 제거할 수 있으나(권기철, 1999) 본 실험장비에서는 미소한 변위 수준에서 보다 정밀한 측정을 위해 국부(local)변형 측정법을 도입하였고, 이를 위해 셀 내부의 시편 측면에 변위센서(LDT, Local Deformation Transducer)를 부착하여 미소변위를 측정하였다(그림 3).

실험은 일본 지반공학회의 JGS 0542-2000을 기준으로 수행하였다. 먼저 재료에 따른 실험 조건을 만족하는 구속압 상태를 확인한 후 반복 축하중을 가하게 된다. 하중은 변형률이 0.000001 수준에서 0.01 수준까지 발생할 수 있도록 하중을 단계적으로 증가시켜서 실험을 수행한다. 각 하중단

그림 3. LDT센서 부착 시편

계에서는 일정 진폭의 연속적인 반복축하중을 정현파로 재하여 하중과 변위를 측정하며, 이때 각 하중단계에서는 11 번의 정현파를 가한다.

하중단계별로 매 cycle의 정현파에서 측정된 하중과 변위로 축차응력의 편진폭, 축변형률의 편진폭, 등가탄성계수 (Equivalent elastic modulus)를 산정한다(그림 4).

먼저 반복 편차응력의 편진폭 σ_d (kNm²), 축변형률의 편진폭 $(\varepsilon_a)_{SA}$, 등가탄성계수 E_{eq} 를 각각 다음 식으로 산정한다.

(1) 편차응력의 편진폭 : σ_d (kNm²)

$$\sigma_d = \frac{P_C + P_E}{2A_n} \quad (1)$$

여기서, P_C , P_E : 압축, 인장 반복 축하중 편진폭
 A_n : 반복 재하 단계의 시편의 단면적

(2) 축변형률의 편진폭 : $(\varepsilon_a)_{SA}$

$$(\varepsilon_a)_{SA} = \frac{\Delta L}{2H_n} \quad (2)$$

여기서, ΔL : 반복 하중사이클에서 시편의 축변위의 양진폭
 H_n : 반복 재하단계에서 시편의 변위측정 구간

그림 4. 전형적인 응력-변형률 이력곡선 및 탄성계수 정의

(3) 등가탄성계수 : E_{eq}

$$E_{eq} = \frac{\sigma_d}{(\varepsilon_a)_{SA}} \quad (3)$$

그림 5. 시편의 입도분포

3.3 시편 및 실험 조건

본 연구에서는 표 3과 같은 시편 및 시험 조건을 구성하여 실험을 수행하였다. 최대입경 90mm의 시편들(YJ-D500-d90 and YJ-D500-d90-B)은 직경 500mm, 시편높이 1000mm로 제작되었고, 최대입경 50mm의 시편들(YJ-D300-d50, YJ-D300-d20, YJ-D300-d50-B)은 직경 300mm, 시편높이 620mm로 조성되었다. 시편은 건조상태에서 목표 건조단위중량에 도달하도록 10층으로 다짐을 수행하였다.

입경이 큰 조립지반재료의 실내실험 시, 실험장비와 시편 크기를 고려하여, 재료의 최대입경을 조정하고 입도를 조정하여 실험하는 것이 일반적이다. 이를 위해 가장 많이 사용되는 방법이 상사입도조정방법에 의한 시편 제작이다.

상사입도조정방법은 최대입경 크기에 따라 원입도분포곡선을 평행이동하여 다짐특성에 영향을 미치는 요소인 균등계수를 동일하게 하여 기하학적 입자배열에 큰 차이를 없애는 방법이다. 그러나 입경에 따라 초기밀도나 입자과쇄특성이 달라짐으로 해서 다짐밀도와 전단특성 등에 영향을 미칠 수 있는 가능성이 있다. 또한 입경이 작아지면서 세립분의 함유량이 많아지기 때문에, 시험조건에 따라서는 세립분의 함유량 정도에 따라 역학적 특성에 영향을 미칠 가능성도 있다.

본 연구에서는 먼저 조립지반 재료의 동적물성, 즉 저변형률 수준에서의 탄성계수 산정을 위한 실험법의 검토로 상사입도법에 의한 영향을 비교하였다. 이를 위해 본 연구에서는 총 5가지 입도의 시편에 대한 실험을 수행하였다. 즉 상사입도조정법이 탄성계수에 미치는 영향을 평가하기 위해 2개 Group의 시편 조건을 그림 5와 같이 구성하였다. 시험 Group I은 최대입경 90mm, 50mm, 20mm으로 조성된 시편으로 YJ-D500-d90, YJ-D300-d50, YJ-D300-d20이며, 각각 15.57, 15.76, 15.71로 유사한 균등계수를 가지고 있다. 또한 두 번째 시험 Group II는 최대입경 90mm, 50mm으로 조성된 시편 YJ-D500-d90-B, YJ-D500-d50-B이며, 각각 3.8과 4.16의 유사한 균등계수를 가지고 있다. 이처럼 두 시험 Group 모두 최대입경만 다르게 평행 이동한 상사입도조건의 재료가 되도록 하였다. 시험 Group II는 시험 Group I에서 2mm이하의 재료를 제거하여 세립분의 포함여부의 경향도 동시에 평가할 수 있었다. 즉 YJ-D300-d50과

YJ-D500-d90는 각각 2mm 이하 함유율은 40%와 30%였으나, YJ-D300-d50-B와 YJ-D500-d90-B의 경우에는 각각 20%와 0%였다.

같은 크기의 정현파를 재하/제하를 하는 경우에도 그림 6에서 볼 수 있는 3가지 패턴의 하중조건으로 제어할 수 있으며, 조립지반재료의 경우 이러한 하중조건, 즉 구속압과 축차응력 수준에 큰 영향을 받는 것으로 인정되고 있다. 따라서 이에 대한 평가를 위해 하중패턴을 다르게 하여 경향을 검토하였다.

이 외에도 표 3과 같이 실험 결과에 영향을 미칠 수 있는 조건으로 세립분의 영향, 주파수 영향 등을 검토할 수 있도록 시험 조건을 달리하여 시험을 수행하였다. 이 외에도 고려할 영향 인자들이 더 있을 수 있으나, 본 연구에서는 이상의 실내요소시험에서 중요한 시험조건들에 대해 비교함으로써 향후 조립지반재료에 대한 보다 합리적인 동적물성

산정 시험이 이루어질 수 있도록 기본적인 시험법에 대한 검토를 수행하고자 하였다.

3.4 실험결과

3.4.1 하중 패턴

지반 재료는 구속응력 조건과 축차응력수준에 따라 거동이 다르게 나타날 수 있기 때문에, 이러한 하중조건이 변형률 영역의 탄성계수에 미치는 영향을 검토할 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 그림 6에 보이는 바와 같이 3종류의 하중 패턴으로 같은 시편에 대해 시험을 수행하고 그 영향 정도를 비교하였다.

그림 6(a)의 경우 등방압밀조건에서 반복축차응력을 압축과 인장축에 같은 진폭으로 하중을 가하는 방식이다. 이는 전단응력이 0인 상태에서 반복축차응력이 재하되면서 시험이 시작된다. 축응력이 구속응력보다 크기 때문에 최대주응력축과 최소주응력축은 각각 수직과 수평방향이 된다. 축차응력이 최고치에 도달한 후에 다시 0으로 되돌아올 때까지 여전히 최대주응력축은 수직방향이 된다. 그러나 축차응력이 (-)이 되면서 즉각 수평방향으로 회전한다. 재하와 제하를 반복하면서 축차응력이 0을 통과할 때마다 주응력축은 90도 회전하게 된다. 그림 6(b)의 경우에는 실제 지반조건과 같이 이방압밀 상태에서 반복축차응력을 가하게 되면서, 반복축차응력 수준이 커질수록 일부 인장에 놓이게 되는 하중 패턴이다. 그림 6(c)는 압축상태에서 반복축차응력이 재하되고, 축차응력이 0까지 제하되는 하중패턴으로 철도나 도로와 같이 지표근처의 지반에서 압축의 하중만 반복적으로 받는 경우에 적합한 하중 패턴으로 볼 수 있을 것이다(Kramer, 1996).

시험 결과는 그림 7에서 볼 수 있는 바와 같이, 압축과 인장이 반복되는 하중패턴 I의 경우 반복축차응력이 증가되면서 변형률 수준이 증가할수록 탄성계수가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이방압밀 조건으로 상재하중이 존재하는 경우를 모사한 하중패턴 II의 경우에는 하중패턴 I에 비해 같은 변형률 수준에서 상대적으로 큰 탄성계수 값을 보이는 것으로 나타났다. 반면, 압축상태에서만 반복축차응력이 재

그림 6. 하중 패턴

표 3. 시험조건

Test ID	Sample	Unit weight kN/m ³	Specimen diameter (mm)	Loading Pattern	Confining Pressure (kPa)	Loading Frequency (Hz)
T-1	YJ-D300-d50	19.5	300	Loading mode I	100	0.1
T-2	YJ-D300-d50-B	17.0	300	Loading mode I	100	0.1/0.5/1.0
					150	0.1/0.5/1.0
					200	0.1/0.5/1.0
T-3	YJ-D300-d50-B	17.0	300	Loading mode I	100	0.1
T-4	YJ-D300 d50-B	17.0	300	Loading mode II	170(V*), 100(H*)	0.1/0.5/1.0
T-5	YJ-D300-d50-B	17.0	300	Loading mode III	100	0.1
T-6	YJ-D300-d20	19.4	300	Loading mode I	100	0.1
T-7	YJ-D500-d90	19.4	500	Loading mode I	100	0.1/0.5/1.0
					200	0.1/0.5/1.0
T-8	YJ-D500-d90-B	17.0	500	Loading mode I	100	0.1/0.5/1.0
					200	0.1/0.5/1.0

*V=vertical stress, H=horizontal stress

그림 7. 하중패턴 영향

하되는 하중패턴 III의 경우에는 하중수준과 변형률 수준이 커지면서 오히려 탄성계수값이 증가하는 경향을 보였다. 이는 축차응력이 증가하면서 체적응력이 동시에 증가하는 응력조건에서 축차응력 증가에 따라 감소되는 탄성계수의 경향보다 체적응력 증가에 따라 증가되는 탄성계수의 특성이 더 크게 반영된 결과라고 할 수 있을 것이다.

하중조건에 따라 다른 거동과 물성의 차이를 보이는 것은 기존 연구에서도 확인된 바 있다. 예를 들어 지표면 하부 지반 요소가 수직으로 전파되는 S파의 영향을 받을 경우 수직수평응력은 일정한 상태로 유지되면서 전단응력이 증가되기 때문에 모어원의 반경은 커지지만 그 중심점은 움직이지 않게 된다. 즉 응력경로가 수직으로 움직이게 되며, 주응력축이 회전하게 됨을 의미한다(Kramer S.L, 1996). 이러한 주응력축의 회전은 중요한 의미가 있다. 문헌(Wong and Arthur, 1986; Symes et al., 1988; Sayao and Vaid, 1989)에 의하면 주응력축의 회전 자체만으로도 전단변형 및 체적변형을 발생시키는 것으로 보고되고 있다(그림 8).

권기철(1999), Kim 등(2001)의 연구 결과에서도 하중 조건에 따른 최대입경 38mm의 보조기층(subbase)재료에 대한

회복탄성계수의 특성을 다음과 같이 설명하고 있다. 즉, 동일한 구속응력에서 변형률 크기(또는 축차응력)가 증가하면서 탄성계수가 증가하고 있음을 언급하였다. 이러한 결과는 변형률 크기가 증가함에 따라 탄성계수가 감소한다는 일반적인 사실과 상반된다. 그러나 동일한 구속응력에서 축차응력의 크기가 증가하는 경우에는 체적응력도 함께 증가하게 되므로, 축차응력(변형률)의 증가에 의해 탄성계수가 감소되는 정도보다 평균주응력(또는 체적응력)의 증가에 의해 회복탄성계수가 증가하는 정도가 커서 동일한 구속응력에서 축차응력이 증가함에 따라 탄성계수가 증가하는 것으로 설명하고 있다. 또한 Rhee(1991)의 연구에 의하면 체적응력에 따른 회복탄성계수의 변화에 대해 다음과 같이 설명하고 있다. 즉, 동일한 구속응력에서 반복재하시험이 수행되면 축차응력이 증가함에 따라 회복탄성계수가 초기에는 감소하다가 일정부분에서 증가하고 축차응력이 상당히 크면 다시 감소하게 됨을 보여주고 있다. 이러한 현상은 앞에서 언급된 바와 같이 탄성계수에 영향을 주는 체적응력과 변형률 크기의 영향이 복합적으로 결합되어 나타나는 것이다. 즉 체적응력과 변형률 크기가 동시에 증가하면 탄성계수는 이 두가지 요소의 영향 정도에 따라 증가하거나 감소할 수 있는 것이다. 본 연구에서 수행한 하중패턴의 경우 3번째가 위에서 언급한 회복탄성계수 시험과 유사한 하중패턴을 갖고 있다. 따라서 그림 7(c)의 결과는 이와 같은 현상으로 축차응력이 증가하면서 발생하는 변형률 크기의 증가에 의한 탄성계수 감소효과보다 체적응력이 증가되면서 얻어지는 탄성계수의 증가 효과가 더 크게 발현된 것으로 판단된다. 따라서 내진 해석을 위한 탄성계수 산정, 혹은 교통하중 등에 의한 거동 평가를 위한 회복탄성계수 등 적용하고자 하는 대상, 하중(변형)수준 및 하중 조건 등에 적합한 하중형태를 고려한 실험이 이루어지는 것이 합리적인 것이다. 이후 본 연구에서의 실험은 내진해석을 고려하여 주응력 축의 회전과 유사한 하중조건을 반영한 하중 패턴 I으로 수행하여 결과를 검토하였다.

그림 8. 동적하중 하의 응력 변화 상태(Kramer, 1996)

3.4.2 상사입도조정 시험 결과

본 시험장비에서는 3종류 직경(500mm, 300mm, 150mm)의 공시체에 대한 시험이 가능하기 때문에, 최대입경의 입도 분포를 가진 재료에 대한 실험이 가능하다. 따라서 하나의 시험장비를 가지고 상사입도조정법과 그에 따른 최대입경 차이가 저변형을 수준에서의 탄성계수에 미치는 영향을 보다 합리적으로 평가할 수 있었다.

그림 9(a), (b), (c)에서 볼 수 있는 바와 같이, 같은 균등계수를 가지고 입도분포를 평행이동시켜 시편을 조성한 상사입도분포의 시험 결과, 최대입경이 큰 시험들에 비해 상대적으로 큰 탄성계수의 경향을 나타냈다. 즉, 그림 9(a)의 경우 원입도 최대입경이 90mm, 50mm인 입도분포로 조성된 시험 결과의 탄성계수값이 같은 변형을 수준에서 최대입경 20mm의 입도분포로 조정된 시편의 시험에 비해 상대적으로 큰 값을 나타냈다. 그림 9(b)와 (c)의 경우에도 같은 균등계수를 갖는 입도분포로 시편을 조성하여 시험하였으나, 최대입경이 큰 입도로 조성된 시편의 시험 결과가 더 큰 탄성계수값을 보이고 있다.

변형을 수준별로도 차이를 볼 수 있었다. 즉, 보다 저변형을 영역인 $5 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4}$ 의 변형을 영역에서 상대적으로 큰 차이를 보였으며, 중간변형을 영역($5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3}$) 이상에서는 큰 차이를 보이지 않고 거의 하나의 곡선에 수렴하는 경향을 보였다. 결국 원입도의 재료에 비해 상사입도로 조정된 시편에서 얻어진 시험 결과가 저변형을 영역에서 탄성계수를 과소평가할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 다음과 같이 입자배열 구조에 의한 설명이 합리적인 것으로 판단된다.

즉, 그림 10과 같이 굵은 골재를 포함하는 시편의 경우 굵은 골재의 접촉정도에 따라 3가지로 상태를 분류할 수 있다(Siddiqi, 1984). floating 상태는 굵은 골재와 굵은 골재 사이에 접촉이 전혀 없는 상태이고, non-floating 상태는 굵은 골재와 굵은 골재 사이에 완벽한 접촉이 이루어진 상태이며, intermediate 상태는 일부분의 굵은골재와 굵은 골재가 서로 접촉하고 있는 상태를 나타낸다. floating상태에서는 그림 10에서 나타낸 soil matrix의 특성이 시료 전체의 특성을 좌우하고, non-floating상태에는 굵은 골재와 굵은 골재 사이의 접촉이 시료 전체의 특성을 좌우하게 된다(Siddiqi, 1984; Thevanagam, 1998). 결국, 최대입경 변화에 따른 탄성계수의 증가 또는 감소 여부는 floating 또는 non-floating 상태에 따라, soil matrix의 간극비에 주요하게 영향받는지 아니면 굵은 골재만의 간극비에 주요하게 영향받는 지에 따

(a) 상사입도 시험 결과 I

(b) 상사입도 시험 결과 II

(c) 상사입도 시험 결과 III

그림 9. 상사입도 조정시편들의 탄성계수 실험 결과

라 결정되게 된다(권기철, 1999)고 말할 수 있을 것이다.

즉 본 연구의 시험 결과와 같이 시료의 최대입경이 증가

그림 10. Oversize 입자 배열 상태(Siddiqi, 1984)

하고 세립분이 감소할수록 탄성계수가 증가하는 경향을 보이는 것은 이때의 재료가 non-floating상태의 특성을 보이는 것으로 판단할 수 있다. 물론 이러한 결과는 본 연구에서 수행된 재료, 입도, 세립분 조건 등에 의한 결과로 정량적인 일반화는 어려울 수 있다. 그러나 본 연구에서 목적으로 하는 저변형률 영역에서의 탄성계수를 산정하는 시험을 위해서 상사입도방법으로 조성된 시편의 시험 결과를 반영하는 것은 주의가 필요함을 확인할 수는 있었다. 결국 대상재료의 입도분포, 시편제조를 위해 조정된 입도조정 조건 등에 따라 시험 결과에 영향을 받을 수 있으므로, 보다 다양한 조건의 시편에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단되며, 설계나 시공에 적용하기 위해서는 보다 실제 사용되는 재료의 입도분포와 최대입경에 유사한 상태로 시험을 수행하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

3.4.3 하중 주파수

시험 방법에서도 언급한 바와 같이 저변형률 영역에서의 탄성계수 산정을 위해 하중 단계별로 11회의 반복하중을 일정 주파수로 재하하고 얻어진 응력-변형률 Loop에서 기울기로 탄성계수값을 산정하는데, 하중재하속도, 즉 하중 재하 주파수에 따라 변형률 수준에 따른 탄성계수 경향이 영향을 받는지 검토하였다.

본 연구에서 0.1Hz, 0.5Hz, 1.0Hz 세 종류의 하중 주파수로 재하하여 그 결과를 비교한 결과 그림 11에서 볼 수 있는 바와 같이, 그 차이가 뚜렷하지 않았으며, 전체적인 변형률 수준에 따른 탄성계수 변화 곡선에도 변화가 거의 없는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 사용되는 조립재료와 같이 입자가 큰 재료의 경우, 하중 주파수가 탄성계수 산정 시험에 미치는 영향은 없는 것으로 판단된다.

3.4.4 세립분 함유율 영향

상사입도조정방법으로 시편을 제작할 경우 상대적으로 세립분의 함량이 증가하게 되며, 이는 시험종류에 따라 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 미소변형률 수준에서 탄성계수에 미치는 세립분의 영향을 검토하기 위해 같은 최대입경으로 2mm이하의 함량을 변화시켰을 때의 결과를 검토하였다. 그림 12에서 보는 바와 같이 직경 300mm 공시체로 2mm체 통과량 약 40%인 YJ D300 d50 시편과 2mm체 통과량을 약 20%로 감소시킨 YJ D300 d50-B 시편을 비교하였으며, 직경 500mm 공시체에 대해서

는 2mm체 통과량이 약 30%정도의 YJ D500 d90의 시편과 여기서 2mm이하 입자를 모두 제거한 YJ D500 d90-B 시편에 대해 실험을 수행하여 그 결과를 비교하였다.

그림 12. 세립분 함량 평가를 위한 시편 입도 조건

그림 13과 같이 두가지 시편의 각 구속압별 시험결과에서, 세립분 함량을 감소시켰을 경우 같은 다짐 에너지 하에서 다짐밀도가 감소되었으나 오히려 같은 변형률 수준에서의 탄성계수값이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과도 앞선 상사입도조정 시편 결과에서와 같이 상대적으로 굵은골재(Over size particle)를 포함하는 시편에서 굵은 골재의 집적정도에 따라 다른 결과를 보이기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 대입경 조립재료에 대한 저변형률 영역의 탄성계수를 산정하기 위한 대형삼축압축시험에 대한 연구를 수행하였다. 즉, 보다 정확한 실험을 위하여, 실험 결과에 미치는 영향 요소들에 대한 평가로서 먼저 상사입도조정법에 대한 영향을 중심으로 하중 패턴, 주파수, 세립분 함유율 등에 의한 탄성계수의 변화 경향 평가 연구를 수행하였으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 최대입경 90mm이상의 재료까지 즉 공시체 직경 500mm 까지 시험이 가능한 장비를 제작 사용하였기 때문에, 하나의 시험장비로 상사입도, 최대입경 크기 효과를 보다 합리적으로 검증할 수 있었다.
2. 최대입경에 따라 입도분포를 평행이동한 상사입도법에 의

(a) 주파수 영향 평가 I

(b) 주파수 영향 평가 II

그림 11. 하중주파수영향

(a) 직경 300mm 공시체 ; 세립분 함량 변화 결과

(b) 직경 500mm 공시체 ; 세립분 함량 변화 결과 I

(c) 직경 500mm 공시체 ; 세립분 함량 변화 결과 II

그림 13. 세립분함량에 따른 탄성계수 변화 결과

한 실험결과에서 탄성계수의 차이를 확인할 수 있었다. 즉, 최대입경이 큰 원입도시편(최대입경 90mm)의 경우에 최대입경 50mm와 20mm의 입도분포로 상사입도조정하여 제작된 시편의 시험들보다 상대적으로 큰 탄성계수의 경향이 나타나고 있음을 볼 수 있었다.

3. 변형률 수준별로도 차이를 볼 수 있었다. 즉, 보다 저변형률 영역인 $5 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4}$ 의 변형률 영역에서 상대적으로 큰 차이를 보였으며, 중간변형률 영역($5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3}$) 이상에서는 큰 차이를 보이지 않고 거의 하나의 곡선에 수렴하는 경향을 보였다. 즉, 원입도의 재료에 비해 상사입도로 조정된 시편에서 얻어진 시험 결과가 저변형률 영역에서 탄성계수를 보다 과소평가할 수 있음을 확인할 수 있었다.
4. 압축과 인장이 같은 크기로 반복되는 하중패턴 I과 이방

- 압밀 조건으로 상재하중이 존재하는 경우를 모사한 하중패턴 II의 경우에는 탄성계수의 절대적인 값에서의 차이를 보이는 반면, 압축상태에서만 반복축차응력이 재하되는 하중패턴 III의 경우에는 하중수준과 변형률 수준이 커지면서 오히려 탄성계수값이 증가하는 경향을 보였다.
5. 주파수 변화의 경우, 시험결과에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.
6. 미소변형 레벨에서 특히 탄성계수는 oversize 입자의 비율과 입도분포에 따른 입자 연결정도에 따라 영향을 받는 것으로 인정되고 있다. 본 연구에서도 원입도 시편이나 세립분 비율이 낮은 시편과 같이 즉 oversize 입자들이 floating되지 않고 chain식으로 연결된 정도가 강할 때 탄성계수 값이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.
7. 이상의 상사입도조정 재료의 실험 결과는 본 연구에서 수행된 재료, 입도, 세립분 조건 등에 의한 결과로 정량적인 일반화는 어려울 수 있다. 그러나 본 연구에서 목적으로 하는 저변형률 영역에서의 탄성계수를 산정하는 시험을 위해서 상사입도방법으로 조성된 시편의 시험 결과를 반영하는 것은 주의가 필요함을 확인할 수는 있었다.
8. 결국 대상재료의 입도분포, 시편제조를 위해 조정된 입도 조정 조건 등에 따라 시험 결과에 영향을 받을 수 있으므로, 보다 다양한 조건의 시편에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단되며, 설계나 시공에 적용하기 위해서는 보다 실제 사용되는 재료의 입도분포와 최대입경에 유사한 상태로 시험을 수행하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 산하 한국건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업(09기술혁신F05) “대형지반구조물 대입경 조립재료 동적물성 산정기법 연구”과제의 지원을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

- 권기철(1999) 변형특성을 고려한 노상토 및 보조기층 재료의 대체 M_R 실험법, 박사학위논문, 한국과학기술원.
- 신동훈(2003) 대형진동삼축시험기를 이용한 암석재료의 동적변형 특성에 관한 실험적 연구, 한국지반공학회 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 299-308.
- 신동훈, 김기영, 전제성, 조성은(2004) 대형삼축시험시 내부측정식 미소변위 측정기법에 의한 조립재료의 탄성계수 산정, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 1439-1443.
- 신동훈, 오병현, 박한규, 박성진, 황성준(2000) 조립재료의 변형-강도 특성에 대하여(I) 대형삼축시험장치의 개발, 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 311-318.
- 이성진, 김운기, 추연옥, 이세현, 강태호(2010) 조립재료 물성산정을 위한 대형삼축압축시험장비 구축 및 검증, 한국지반공학회 논문집, 한국지반공학회, 제26권 12호, pp. 5-17.
- 이세현, 김동수, 추연옥, 권혁기(2009) 필댐 제체 재료의 동적물성치 평가 : II. 비선형 동적 변형특성, 한국지반공학회 논문집, 한국지반공학회, 제25권 제12호, pp. 87-105.
- AnhDan, L., Koseki, J., and Sato, T. (2002) Comparison of Young's Moduli of Dense Sand and Gravel Measured by Dynamic and Static Methods, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 25, No. 4, pp. 349-358.

- AnhDan, L. and Koseki, J. (2003) Anisotropic Deformation Properties of Dense Granular Soils by Large-Scale True Triaxial Tests, *Proc. of Deformation Characteristics of Geomaterials*, pp. 305-312.
- AnhDan, L. and Koseki, J. (2004) Effects of Large Number of Cyclic Loading on Deformation Characteristics of Dense Granular Materials, *Soils and Foundations*, Vol. 44, No. 3, pp. 115-123.
- AnhDan, L., Koseki, J., and Sato, T. (2006) Evaluation of Quasi-Elastic Properties of Gravel Using the Large-Scale True Triaxial Apparatus, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 29, No. 5, pp. 373-384.
- Becker, E., Chan, C. K., and Seed, H.B. (1972) Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials in Plane Strain and Triaxial Compression Tests, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, Report No. TE 72-3.
- Chavez, C. and Alonso, E. E. (2003) A Constitutive Model for Crushed Granular Aggregates Which Include Suction Effects, *Soils Found*, Vol. 43, No. 4, pp. 215-227.
- Hu, W., Dano, C., Hicher, P.-Y., LeTouzo, J.-Y., Derks, F., and Merliot, E. (2011) Effect of Sample Size on the Behavior of Granular Materials, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 34, No. 3, pp. 1-12.
- Indraratna, B., Ionescu, D., and Christie, H. D. (1998) Shear Behavior of Railway Ballast Based on Large-Scale Triaxial Tests, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No. 5, pp. 439-449.
- Kim, D. S. and Kweon, G. C. (2001) Alternative Method of Determining Resilient Modulus of Subbase Soils Using a Static Triaxial Test, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 38, No. 1, pp. 117-124.
- Koseki, Balakrishnaier, K., and Tatsuoka, F. (1999) Large Scale Triaxial Tests on Elastic Properties of Undisturbed Gravel Containing Fines, *Proc. of Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials*, pp. 299-304.
- Kramer S. L. (1996) *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall.
- Lackenby, J., Indraratna, B., McDowell, G., and Christie, D. (2007) Effect of Confining Pressure on Ballast Degradation and Deformation, *Geotechnique*, Vol. 57, No. 6, pp. 527-536.
- 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.
- Marsal, R. J. (1965) Discussion, *Proc. of the 6th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, Vol. 3, pp. 310-316.
- Marsal, R. J. (1967) Large-Scale Testing of Rockfill Materials, *J Soil Mech. and Found. Eng., ASCE*, Vol. 93, No. SM2, pp. 27-44.
- Modoni, G., Koseki, J., and AnhDan, L. Q. (2011) Cyclic Stress-Strain Response of Compacted Gravel, *Geotechnique*, Vol. 61, No. 6, pp. 473-485.
- Rhee, S. K. (1991) *A Study of Resilient Behavior and Constitutive Modeling of Thick Granular Layers for Heavily Loaded Asphalt pavement*, Ph.D Dissertation, Texas A&M University.
- Sayao, A. S. F. and Vaid, Y. P. (1989) Deformations due to principal stress rotation, *Proceedings, 12th International conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, Brazil, Vol. 1, pp. 107-110.
- Siddiqi, F. H. (1984) *Strength Evaluation of Cohesionless Soils with Oversize Particles*, Ph.D Dissertation, The University of California, Davis.
- Symes, M. J., Gens, A., and Hight, D. W. (1988) Drained principal stress rotation in saturated sand, *Geotechnique*, Vol. 38, No. 1, pp. 59-81.
- Thevanagam, S. and Mohan, S. (1998) Intergranular Void ratio-Steady state strength relations for sands, *Geotechnical special publication No.75, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, ASCE*, Vol. 1, pp. 349-360.
- Wong, R. K. S. and Arthur, J. R. F. (1986) Sand shear by stresses with cyclic variations in direction, *Geotechnique*, Vol. 36, No. 2, pp. 215-226.

(접수일: 2012.6.21/심사일: 2012.7.29/심사완료일: 2012.8.9)