

대형삼축압축실험을 이용한 동적물성 산정 : 장비구축 및 검증

Evaluation of Dynamic Properties through Large Triaxial Test : Development and Verification of Apparatus

이성진† 김윤기* 이준석** 황선근*** 박재준****
Sung-Jin Lee Yun-Ki Kim Jun-S. Lee Seon-Keun Hwang Jae-Jun Park

ABSTRACT

Coarse granular materials such as gravel and crushed stone have been used as an important fill materials to large soil structure of railway, road, dam and so on. Although much studies for general soil materials have been carried out domestically, the studies for coarse materials were insufficient. Particularly, it is the level in which the study for dynamic properties(Elastic modulus and damping ratio) of coarse materials, applies the foreign country literature. This is due to the lack of large equipment for element test. But large soil structures made of coarse granular materials are generally important infrastructures. Therefore, the reliable design parameters for coarse materials should be obtained for safe and economic design, construction and maintenance. Triaxial test is the laboratory test method that is capable of controlling a confining pressure and boundary condition. In this project, we made a multi-purpose large triaxial testing system. This testing system is able to test coarse granular materials with maximum particle diameter of 100mm and support both the load control and displacement control. The load cell is installed inside of triaxial cell and the axial displacement is measured locally in order to control and measure more accurately in the small strain level. The verification test of this testing system was carried out with urethane verification specimens. So, from now on the useful information for coarse granular materials are expected to suggested by performing many tests with various material and condition

1. 서론

최근 지반구조물이 대형화되어 가는 추세인 점을 고려할 때, 대입경 조립재료는 대형 필댐, 저수지 제방, 항만 방조제 및 방파제, 철도 노반 및 암성토, 교대 및 지하철 박스 뒷채움 등 다양한 구조물에 지속적으로 활용도가 증가될 것으로 예상된다. 이러한 대입경 조립재료로 축조된 대형 구조물은 경제적·사회적으로 국가 중요 기반시설에 해당되는 경우가 대부분이다. 이러한 활용도의 증가에 비해 그 동적물성에 대한 평가는 용이하지 않은 상황이다. 대입경 조립재료의 경우, 대부분 입경이 커서 시료에 대한 직접적인 실내실험이 실험장비의 크기 한계로 인해 수행이 어렵고, 시추공을 이용한 현장실험은 대입경 특성에 의해 시추공 형성이 어려워 실험이 거의 불가능하고, 비파괴 표면과 탐사의 경우에도 대입경 조립재료의 불연속성으로 인한 측정 신호의 품질에 대한 신뢰성 문제와 반무한 평면 가정에서 출발된 표면파 기법의 한계로 인해 현장실험에 의한 물성 취득도 매우 어렵기 때문이다.

과거 지반공학분야에서는 극한상태의 지반거동, 강도에 대한 연구가 중심을 이루어 왔다. 그러나 최근 구조물이 대형화되고 도심재개발로 인한 근접공사들이 증가함에 따라 지반의 변위, 토류구조물의 변형, 건물기초의 침하예측이 지반공학분야의 문제로 많은 관심을 받고 있다. 특히 정적실험에서 계측의 정확

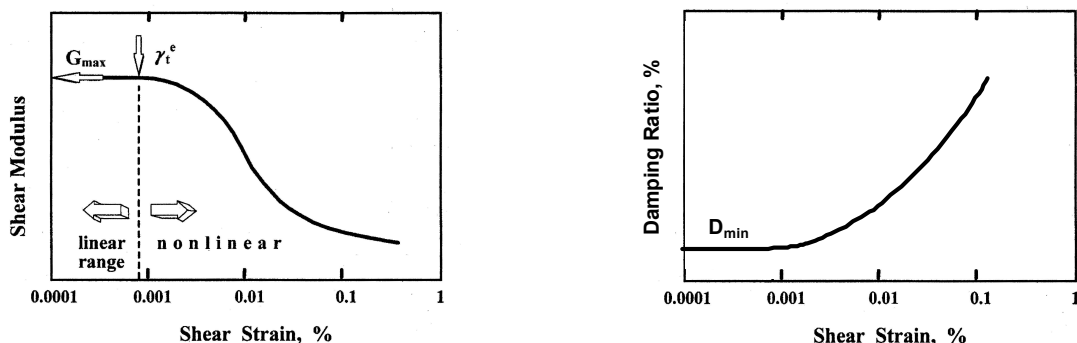
† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원
E-mail : geolsj@krti.re.kr
TEL : (031)460-5072 FAX : (031)460-5032
* 비회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 박사후연구원
** 정회원, 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실 책임연구원
*** 정회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 책임연구원
**** 비회원 케이엔알시스템 연구개발팀장

도가 증가하여 정적물성치와 동적물성치 사이의 차이가 줄어들고 하중의 종류(정적/동적)보다 유발되는 변형률의 크기가 지반의 거동 예측에 중요한 변수임이 인식되고 있다(김동수, 1995; Burland, 1989; Tatsuoka, 1991). 파괴전의 지반구조물에 대해 계측을 실시한 결과, 실제 구조물에서 지반이 거동하는 변형률 범위가 0.1-1% 이하이고, 이때의 지반변형은 비선형적인 특성을 보이게 되어 이를 고려한 해석의 필요성이 인식되고 있다. 또한 원자력발전소, 장대교량, 고층건물들에 대한 내진설계와 합리적인 변형특성평가에 대한 필요성이 늘어남에 따라, 정적 및 동적하중을 받는 토목구조물의 해석 및 설계를 위해 저변형률($10^{-5}\% < \gamma < 10^{-3}\%$) 및 중간변형률($10^{-3}\% < \gamma < 10^{-1}\%$) 하에서 지반의 변형 특성을 신뢰성 있게 규명하는 것이 지반구조물의 해석/설계에 필요한 합리적인 입력변수 제공을 위하여 매우 중요하게 되었다.

지진하중, 파랑하중, 폭발하중과 같은 반복적인 동적하중을 받는 지반구조물의 설계에서 전단탄성계수(Shear modulus, G) 및 감쇠비(Damping ratio, D)로 표현되는 동적물성치는 매우 중요한 변수이다. 미소변형률 영역에서의 전단탄성계수와 감쇠비는 기본적으로 변형률의 크기에 무관하여 일정한 값을 가지고, 전단탄성계수는 최대값인 최대전단탄성계수(G_{max})로서 감쇠비는 최소값인 최소감쇠비(D_{min})로서 고려된다. 반면, 지진하중이 작용할 경우 지반재료는 변형 정도에 따라 비선형 거동특성을 보이는데, 이러한 비선형 거동특성을 신뢰성 있게 평가하기 위하여 지반재료의 전단변형률에 따른 전단탄성계수 감소곡선 및 감쇠비 곡선으로 표현되는 비선형 동적 변형특성의 결정이 중요해진다. 특히, 등가선형 및 비선형 지반 응답해석에서 비선형 동적 변형특성이 중요한 설계입력변수로 이용된다(Bardet과 Tobita, 2001; Schnabel 등, 1972; Yoshida와 Towhata, 1997).

지반의 비선형성은 그림 1과 같이 동적물성치와 $\log(\text{전단변형률}, \gamma)$ 의 관계로 나타내는 것이 일반적이다. 이것은 실제 작용하는 하중의 범위에서 지반 재료가 경험하는 변형률의 범위인 1% 이하에서 탄성계수를 보다 정확하게 표현하기 위해서이다. 그림에서 볼 수 있듯이 탄성계수와 감쇠비가 변형률의 크기에 무관하게 일정한 선형영역과 변형률이 증가함에 따라 감소하거나 증가하는 비선형 영역으로 구분되며, 두 영역을 구분 짓는 변형률의 크기를 선형한계변형률(γ_r^0)라 한다. 일반적으로 지반재료의 선형 한계 변형률은 $10^{-4}\% < \gamma < 10^{-2}\%$ 범위에 존재하며, 입자가 큰 자갈 등 점성이 없는 지반재료는 낮은 선형 한계변형률을 갖는 반면, 점성이나 세립분을 갖는 지반재료는 상대적으로 높은 선형한계변형률을 갖는다.

지반의 전단탄성계수와 변형률의 관계는 지반의 종류, 함수비, 구속응력, 하중주파수, 교란상태 등 다양한 조건에 따라서 매우 다르게 나타나게 된다. 그러나 전단탄성계수를 최대전단탄성계수(G_{max})로 정규화한 정규화 전단탄성계수(G/G_{max})와 전단변형률의 관계로 나타내면 이러한 영향 요소에 비교적 무관하며, 재료에 따라 비교적 일정한 범위의 값을 갖는 것으로 알려져 있다(Seed 등, 1984; 권기철, 1999).



(a) 전단변형률에 따른 전단탄성계수 경향

(b) 전단변형률에 따른 감쇠비 경향

그림 1. 전형적인 전단탄성계수 및 감쇠비 경향

Seed 등(1986)은 많은 자료 조사를 통하여 모래와 자갈에 대한 대표 비선형 동적 변형특성을 제안하였으며, 국내에서는 이세현 등(2009)이 국내의 연구결과를 바탕으로 D/B를 구축하고 대표곡선을 제안한 바 있다.

본 연구에서 구축한 대형삼축압축시험장비는 최대 입경 100mm 조립재료까지 실험할 수 있으며, 하중 및 변위제어가 가능하고 정확한 하중제어를 위해 로드셀을 셀내부에 설치하였다. 변위측정은 미소변위의 측정을 위한 정밀도 확보를 위해 단부오차(bedding error)를 제거할 수 있도록 국부(local)변형 측정을 위해 시편 내부에 변위센서를 부착하여 미소변위를 측정하였다. 이와 같이 구축된 대형삼축압축시험장비에 대해서 우레탄 검증 시편으로 장비를 검증하였으며, 향후 실제 조립재료에 대한 실험을 수행으로 유용한 결과들을 제시할 수 있을 것으로 기대한다.

2. KRRI 대형삼축압축시험장비

2.1 KRRI 대형삼축압축시험장비 기본 개요

본 장비의 메인프레임은 2개의 액츄에이터(2000kN, 200kN)를 거치하고 하중의 반력대로 사용되는 Cross Head(약 180kN), Cross Head의 상하이동을 위한 400kN급의 유압실린더, Cross Head를 4축 Post에 고정시키는 4800kN의 유압클램프, 중간주응력을 제어할 수 있는 300kN 액츄에이터(2ea)와 이를 고정 및 이동시킬 수 있는 베이스플레이트 및 삼축압축시험셀을 거치하고 이동할 수 있는 무빙플레이트(Moving Plate) 등으로 구성되어 있다. 시험장비의 최대 높이는 약 6m 정도로 최대 1m 높이의 공시체와 이를 위한 삼축셀, 로드셀 등 각종 지그류의 설치가 가능하도록 하였다.



그림 2. Large Triaxial Testing System(KRRI)

본 시험장비에는 주로 정적인 압축시험과 오이도미터시험을 위한 대용량(2000kN)의 액츄에이터와 미소변형수준의 동적 실험을 위한 200kN 액츄에이터를 분리 설치하여 실험 종류에 따라 사용할 수 있도록 하였다. 2000kN 액츄에이터는 총 스트로크 400mm로 최고속도 500mm/min와 최저속도 0.01mm/min 범위에서 제어가 가능하며, 200kN 액츄에이터는 역시 총 스트로크 400mm로 160kN 하에서 $\pm 10\text{mm}/10\text{Hz}$ 의 속도로 고속제어가 가능하다. 로드셀은 각 액츄에이터에서 가해지는 하중을 측정하고 제어하기 위해 액츄에이터 하부 재하 로드(rod)에 설치되었다. 특히 본 장비에 구축된 로드셀은 2MPa 압력까지 내압 방수형으로 삼축셀 내부에 위치하도록 하여 삼축셀과 재하로드(rod)와의 마찰이 실험에서 측정되는 하중에 미치는 영향을 제거하였으며, 압축과 인장 실험이 모두 가능한 타입이다.

본 시험장비에서는 보다 다양한 입도의 조립재료와 현실적인 환경 및 구속조건에 대한 요소실험이 가능하도록 여러 종류의 삼축셀을 구축하였다. 먼저 일반 삼축압축조건을 실험을 위해서 150 \times 300H,

3000×600H, 5000×1000H의 공시체의 실험이 가능하였다.

또한 중간 주응력 실험을 위한 셀(cell)과 동결융해조건 실험용 셀(Cell)을 별도로 구성하여 효율적인 실험이 가능하도록 하였다. 모든 실험 셀(cell)은 최대 구속압 2MPa하에서 안전하도록 설계 제작되었다. 또한 대형오이도미터실험을 위해 오이도미터셀을 두 종류(10000×600H, 6000×600H)로 구성하였다.

삼축압축실험을 위해서는 시료의 포화, 시료 내부 배압 및 구속압 제어와 파괴 측정 등을 위한 루프(loop)시스템이 필요하다. 본 장비에서는 시료의 포화를 위해 Air Compressor, Air Drying 시스템, De-airing장비, 이산화탄소 공급장치, 고압레귤레이터, 진공펌프 등으로 구성된 루프시스템을 구축하였다.

또한 시료를 포화시키는 작업이 필요할 경우 이산화탄소로 시편 내부의 공기를 치환하고 이중부압법, 배압법 등으로 포화도를 높일 수 있도록 하였다. 그리고 실험 도중 시편 내부의 배압(back pressure) 제어 시 고압에서 공기가 시편 내부 간극수로 녹아들어 발생할 수 있는 포화도 저하를 최소화 하기 위해 질소, 산소 등 일반대기의 기체에 비해 그 용해도가 약 10-20%에 불과한 헬륨을 이용해 배압을 제어할 수 있는 시스템이 추가되었다. 포화시료의 실험 중에 시료의 파괴변화는 시료 내부 간극수의 변화량으로 측정할 수 있으며, 불포화 시료의 경우 셀내부의 구속압을 제어하는 물의 파괴변화로 파괴변화를 측정할 수 있도록 하였다. 삼축압축실험을 위해서는 실험조건에 맞는 공시체의 제작이 중요한 과정이다. 실험에서 목적으로 하는 밀도를 정하고 그에 맞는 시료를 성형하기 위해서는 공시체를 균일하게 반복 재현가능한 하중으로 성형할 수 있어야 할 것이다. 따라서 본 장비를 구축하면서 현장다짐조건에 근접한 하중 제어를 통한 공시체 제작을 위해 하중크기(최대 100kN)와 주파수제어(30Hz, ±1.85mm at 100kN)가 가능한 전용 다짐장비를 제작하여 시료를 성형하였다.

이 외에도 본 실험 장비에서는 일반적인 삼축압축실험(CD, CU, UU) 이외에도 Ko구속압 제어, 삼축인장실험, 중간주응력제어실험, 온도제어(동결/융해), 미소변형 수준의 동적물성실험 등으로의 실험장비 확장이 가능하도록 하였다.

2.2 동적물성 산정을 위한 시스템

삼축압축실험은 구속조건과 경계조건의 정의가 명확하고 이들의 제어가 가능한 실내실험법이다. 본 연구에서 사용한 삼축압축실험장비는 하중 및 변위제어가 가능한 장비이며 정확한 하중제어를 위해 로드 셀을 셀내부에 설치하였다. 변위측정은 내부와 외부에서 측정하는 방법이 있으나, 외부 측정 변위는 미소변위의 측정을 위한 정밀도 확보가 어렵고, 단부오차(bedding error)를 포함하기 때문에 미소변형수준의 변위 측정에 적합하지 않다. 단부오차는 시료의 양쪽 끝부분에서의 평탄성 문제로 인하여 상대적으로 큰 변위가 발생하여 변형율이 크게 평가되는 것으로 시료를 성형할 때 아무리 정밀하게 하더라도 완전히 배제할 수 없는 오차 요인이다. 따라서 본 실험장비에서는 내부(internal)변형 및 국부(local)변형 측정을 위해 시편 내부에 변위센서(LDT, Local Deformation Transducer)를 부착하여 미소변위를 측정하였다.

LDT는 국부변위 측정방법의 하나로 1% 이하의 변형률을 측정하고자 할 때 사용되며, 일본의 Tatsuoka 등(1991)이 개발하여 사용되고 있다. LDT(Local Deformation Transducer)는 얇은 인칭동판에 4개의 스트레인게이지(Strain gauge)를 Full bridge 형태로 붙여서 동판이 휘어질 때 발생하는 변형률(출력신호)를 측정하여 변위를 측정하는 장치이다. 본 연구에서 사용한 동판은 길이 520mm로서 인가전압 3V에 출력은 약 4.5mV/V 범위 이내에서 측정되어 앰프를 이용해 최대 6V범위에서 측정하도록 하였다.

LDT를 사용하여 삼축압축실험을 하는 경우 그림 3과 같이 멤브레인에 힌지를 붙이고 힌지 사이의 거리를 정확히 측정하는 다음, 힌지에 LDT의 양끝을 거치하고 실험을 수행한다.



(a) 시편에 설치한 LDT



(b) LDT 지점 힌지

그림 3. LDT 부착 사진

3. KRRRI 대형삼축압축실험장비 동적물성 산정 시스템 검증

실험장비의 검증은 하중 및 변위 측정용 센서들의 일반적인 검증과 더불어 시스템의 역학적 순응성 (System compliance)에 대한 전체적인 검증이 필요하다(권기철 1999). 본 연구에서도 실험 시스템의 역학적 순응성 검증을 위하여 고유의 역학적 특성치(탄성계수)가 서로 다른 검증시편을 사용하였다. 동일한 검증시편에 대한 각각의 실험을 독립적으로 수행하고, 실험들에서 결정된 강성도를 하중 주파수의 영향을 고려하여 서로 비교하는 방법을 적용하여 시스템을 전반적으로 검증하고자 하였다.

3.1 검증시편

강성도가 서로 다른 우레탄 5개 종류의 검증시편을 사용하여 실험장치를 검증하였다. 우레탄 재질의 검증시편은 변형률크기에 따라 탄성계수가 일정한 선형거동을 나타내고, 강성도가 구속응력이나 응력이력에 영향을 받지 않으며, 내구성이 좋아 반복사용에 따른 특성치 변화가 없어 취급이 용이한 장점을 갖고 있다(Stokoe 등, 1990).



(a) 소형 우레탄 시편



(b) 대형 우레탄 시편

그림 4. 우레탄 검증시편

따라서 우레탄 재질의 시편은 실험장비의 검증시편으로 적합한 것으로 평가된다(권기철 1999). 그러나 이러한 장점이 있는 반면 검증시편의 점탄성 때문에 하중주파수가 증가하거나 온도가 감소할수록 강성도가 증가한다(Stokoe 등, 1990). 그러므로 각 실험을 유사한 실내온도에서 실시하고, 각 실험이 수행되는 하중주파수를 고려하여 탄성계수를 비교하는 방법을 적용하였다.

각 종류의 검증시편은 같은 강성도를 갖도록 배합된 우레탄재료를 직경 300mm, 높이 600mm와 직경 50mm/높이 100mm의 크기로 동시에 제작하였다.

3.2 실험방법

우레탄검증시편은 구속압 및 배수조건의 영향을 받지 않으므로 시편에 LDT센서를 설치한 다음 다음과 같은 과정으로 반복 축하중을 가한다. 하중은 변형률이 0.0001% 수준에서 0.1% 수준까지 발생할 수 있도록 하중을 단계적으로 증가시켜서 실험을 수행한다. 각 하중단계에서는 일정 진폭의 연속적인 반복축하중을 정현파로 재하하여 하중과 변위를 측정한다. 이때 주파수는 0.5Hz, 1.0Hz, 2.0Hz, 4.0Hz로 하며 이때 각 하중단계에서는 11번의 정현파를 가한다.

각 하중단계별로 10회째의 정현파에서 측정된 하중과 변위로 축차응력의 편진폭, 축변형률의 편진폭, 등가탄성계수(Equivalent elastic modulus), 감쇠비(Damping ratio)를 산정한다.

먼저 반복 편차응력의 편진폭 $\sigma_d(kN/m^2)$, 축변형률의 편진폭 $(\epsilon_a)_{SA}$, 등가탄성계수 E_{eq} , 감쇠비 $h(\%)$ 를 각각 다음 식으로 산정한다.

(1) 편차응력의 편진폭 $\sigma_d(kN/m^2)$

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

여기서, P_C, P_E : 압축, 인장 반복 축하중 편진폭

A_n : 반복 재하 단계의 시편의 단면적

(2) 축변형률의 편진폭 $(\epsilon_a)_{SA}$

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

여기서, ΔL : 반복 하중사이클에서 시편의 축변위의 양진폭

H_n : 반복 재하단계에서 시편의 변위측정 구간

(3) 등가탄성계수 E_{eq}

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

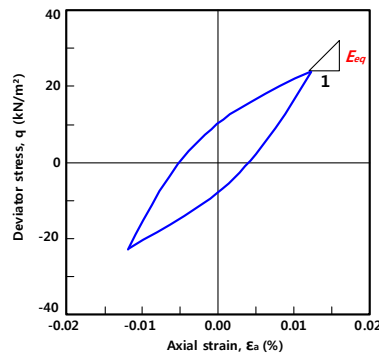


그림 5. 전형적인 응력-변형률 이력곡선

(4) 감쇠비 $h(\%)$ 또는 $D(\%)$

$$h = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} \times 100 \quad (4)$$

여기서, ΔW : 반복재하 싸이클에서의 감쇠에너지로 축차하중 P와 축변위 W로 이루어진 이력곡선의 면적

$$W : \frac{(P_C + P_E)\Delta L}{4} \quad (5)$$

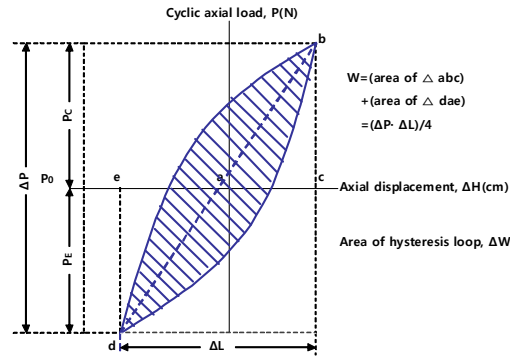


그림 6. 감쇠비

3.3 KRR1 대형삼축압축실험장비 자체 검증

이번 검증실험은 대형우레탄시편(직경 300mm)에 대해 수행하였으며, 기반재료에 대한 동적실험과 같이 JGS 기준으로 실험하였다. 검증시편은 균질, 등방, 탄성이라는 가정 하에서 Young계수와 전단탄성계수를 서로 계산하기 위해 다음 식을 적용하였다.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (6)$$

$$\gamma = \epsilon_a(1+\nu) \quad (7)$$

위 두 식을 적용하기 위해서는 검증시편의 포아송비를 알아야 한다. 포아송비는 충격반향기법에서 수행된 실험에서 얻어진 다음 표와 같은 값을 각 시편에 적용하였다.

표 1. 충격반향기법으로 얻어진 우레탄검증시편의 포아송비

시편 ID	60	70	80	90	95
포아송비	0.453	0.414	0.376	0.357	0.340

앞서 언급된 바와 같이 구속압과 변형률 수준에 영향을 받지 않는 특성을 가진 우레탄 검증시편의 탄성계수값이 실험결과에서도 변형률에 따라 일정한 값을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 5개의 모든 검증시편에서 각기 다른 강성으로 제작된 시편의 강성 경향을 합리적으로 나타내고 있어 실험 시스템과 분석 프로세서를 신뢰할 수 있는 것으로 판단된다. 한편, 우레탄 재료 특성상 하중주파수에 따라 증가하는 강성의 경향도 결과로 잘 나타나고 있다. 따라서 보다 합리적인 검증을 위해 다른 실험법과의 교차검증을 추가로 실시하여 주파수에 따른 영향도 검토하였다.



(a) 우레탄 시편

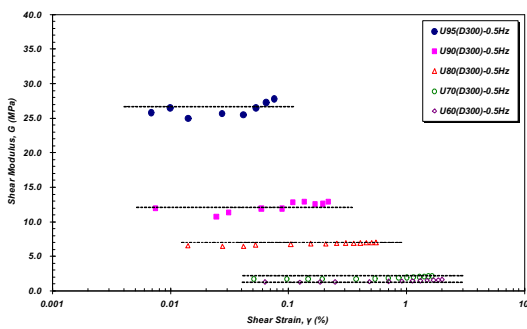


(b) 검증시험 전경

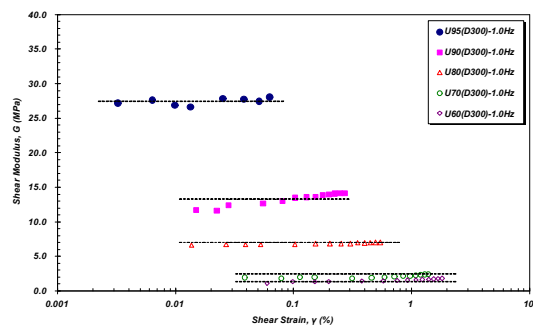
그림 7 우레탄 시편 검증시험

새로 구축된 KRRRI 대형삼축압축시험장비 전체 시스템 검증을 위해 소형 우레탄시편에 대한 공진주 (RC)비틀전단실험(TS), 대형 우레탄 시편에 대한 대형삼축압축실험(LTX), 두가지 시편에 대해 모두 충격반향(IET, Impact Echo)실험을 수행하여 그 결과를 비교 검증하였다. 검증시편의 강성도는 구속응력의 영향을 받지 않는 장점이 있으므로 대기압 상태에서 실험을 수행하였으나 실험 하중 주파수의 영향을 받게 된다. 따라서 각 실험 방법별로 수행된 결과를 일관된 기준으로 비교 검증하기 위해서는 각 실험 법에서 결정된 탄성계수를 주파수의 영향을 고려해야 한다(권기철, 1999).

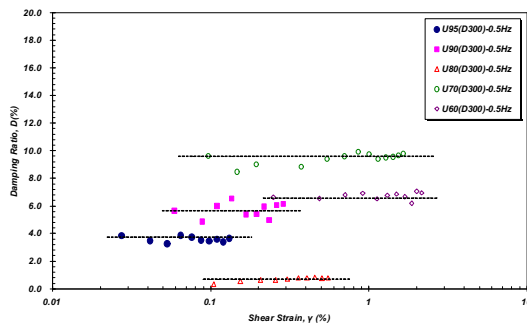
즉, 예를 들어 U95와 U70시편에 대해 각 실험법 별로 수행된 실험들의 주파수와 대표적인 탄성계수값을 정리하면 다음 그림 9와 같다.



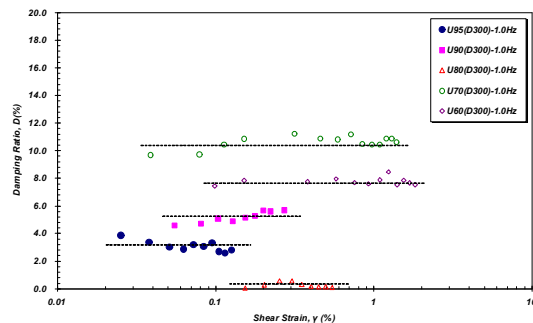
(a) 검증시편 전단탄성계수(0.5Hz)



(b) 검증시편 전단탄성계수(1.0Hz)

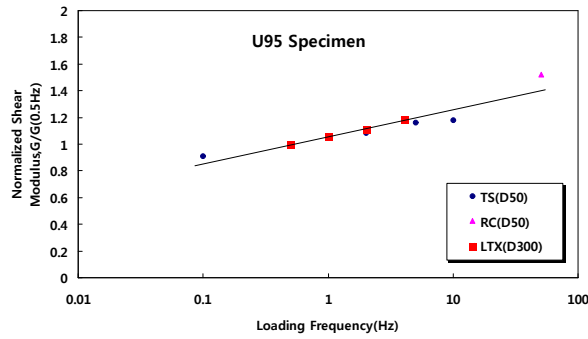


(c) 검증시편 감쇠비(0.5Hz)

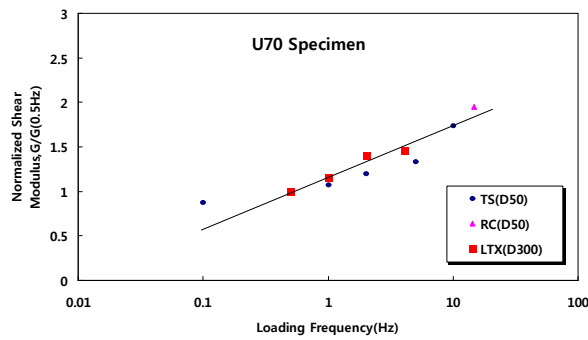


(d) U70 검증시편 감쇠비(1.0Hz)

그림 8. 검증시편 시험결과



(a) U95 검증시편



(b) U70 검증시편

그림 9. 주파수별 강성도 변화

앞선 대형삼축압축시험장비 자체 검증결과에서 확인할 수 있었듯이 하중주파수 조건이 같을 경우 변형률 크기에 따라 탄성계수가 일정한 값을 보였으나, 하중주파수에 따라 증가되는 강성을 보이고 있다. 이는 우레탄시편이 점탄성의 재료로서 갖는 고유한 특성에 기인하고 있다. 또한 권기철(1999)의 연구결과에서 우레탄 검증시편은 하중주파수의 대수적 증가에 따라 거의 직선적으로 증가하고 있음을 검증한 바 있다. 본 연구에서 수행된 실험들, 비틀전단실험(TS), 공진주실험(RC), 대형삼축압축실험(LTX)도 각 실험이 수행된 하중주파수가 다르므로 이를 고려하여 평가하였다. 즉 하중주파수의 영향정도를 평가하기 위해 각 실험들에서 얻어진 탄성계수를 0.5Hz로 정규화하여 그 값을 비교하였다(그림 9). 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 각 실험들이 수행된 하중 주파수별로 거의 직선적으로 증가되고 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서 구축된 대형삼축압축시험장비는 강성이 다른 우레탄시편들에서 전단변형률에 따른 탄성계수와 감쇠비가 일정한 값을 나타내며, 또한 같은 강성으로 제작된 소형 우레탄시편에 대해 비틀전단실험과 공진주실험으로 상호검증한 결과, 일정 하중주파수에서의 탄성계수로 정규화하였을 경우 하중주파수의 대수축에 직선적 증가경향을 보이는 우레탄 검증시편의 특성을 합리적으로 나타내고 있다. 이러한 실험 결과로 대형삼축압축시험장비 전체 시스템의 검증이 이루어져 조립지반재료에 대해서도 신뢰도를 확보한 실험을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 산하 건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업(09기술혁신F045) “대형지반구조물

대입경 조립재료 동적물성 산정기법 연구”과제의 지원을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

1. 권기철(1999) “변형특성을 고려한 노상토 및 보조기층 재료의 대체 M_R 실험법” 한국과학기술원 토목공학과 박사학위논문
2. 김동수(1995), “공진주/비틀전단시험을 이용한 건조사질토의 변형특성,” 한국지반공학회논문집, 제 11권 제1호, pp.101-112.
3. 이세현, 김동수, 추연욱, 권혁기(2009), “필댐 체체 재료의 동적물성치 평가 : II.비선형 동적 변형특성”, 한국지반공학회논문집, 제25권, 제12호, pp.87-105
4. Bardet, J.P. and Tobita, T.(2001), "NERA : A Computer program for nonlinear earthquake site response analysis of layered soil deposits", University of Southern California.
5. Burland, J.B.(1989), "Ninth Lauritis Bjerrum Memorial Lecture: Small is Beautiful-the Stiffness of Soils at Small Strains" Canadian Geotech. Journal, 26, pp.499-516
6. Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.(1972), "SHAKE : A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites", Report EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
7. Seed, H.B., Wang, R.T., Idriss, I.M. and Tokimatsu(1984), Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soils, Earthquake Engineering Research Center, Report No.UCB/EERC-84/14, University of California, Berkely.
8. Stokoe II, K. H., Kim, D. S., and Andrus, R.(1990), "Development of Sythetic Specimens for Calibration and Evaluation of M_R Equipment" In Transportation Research Record 1278, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.63-71.
9. Tatsuoka, F. and Shibuya, D.S.(1991), “Deformation Characteristics of Soils and Rocks from Field and Laboratory Tests,” Key Note Lecture for Session No.1, The 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, December.
10. Yoshida, N. and Towhata, I.(1997), "YUSAYUSA, Theory and Practice".