

조립재료 동적물성 산정을 위한 대형삼축압축시험장비 구축 및 검증

Development and Verification of Large Triaxial Testing System for Dynamic Properties of Granular Materials

이 성 진¹ Lee, Sung-Jin

김 윤 기² Kim, Yun-Ki

추 연 옥³ Choo, Yun-Wook

이 세 현⁴ Lee, Sei-Hyun

강 태 호⁵ Kang, Tae-Ho

Abstract

Coarse granular material is used as important fill material in most of large embankments such as railway, road, dam and so on. Therefore, the accurate design parameters of the coarse granular material are necessarily required in design and construction. The behavior of the coarse granular material was not well understood because of the lack of large testing equipment capable of coarse granular material. A large triaxial testing system was developed in this research, capable of large specimens of 500 mm, 300 mm and 150 mm in diameter. In the new large triaxial testing system, the load cell is installed inside the triaxial cell and axial displacement is measured locally on a specimen in order to improve control and measurement in small strain level. Urethane specimens of 300 mm and 50 mm in diameter were prepared. The large triaxial tests were performed on the 300 mm diameter urethane specimens while RC/TS and impact echo tests on the 50 mm diameter urethane specimens to verify this testing system. In this verification test results, we could ascertain the reasonable test results of the KRRI large triaxial testing system.

요 지

조립재료는 철도, 도로, 댐 등의 대형 지반구조물의 중요한 성토재료로 활용되고 있다. 따라서 이러한 조립재료에 대한 정확한 물성산정은 합리적인 설계와 시공을 위해 필수적이다. 하지만 대입경의 조립재료를 실험하기 위한 장비가 부족하여 이에 대한 연구가 매우 제한적이었다. 이에 본 연구에서는 직경 500mm, 300mm, 150mm 등의 공시체에 대한 실험이 가능한 대형삼축압축시험장비를 구축하였다. 본 장비에서는 로드셀을 삼축셀 안에 설치하고, 미소변형률 수준에서의 제어와 변위측정의 정확도를 높이기 위해 시편 중간 영역의 변형을 측정하였다. 본 장비의 동적물성실험 검증을 위해 같은 강성으로 직경 300mm와 50mm의 우레탄 5쌍을 제작하였다. 대형삼축압축시험장비를 이용해서는 직경 300mm의 대형 우레탄 시편에 대한 실험을 수행하였으며, 소형(직경 50mm) 우레탄 시편에 대한 RC/TS, 충격반향기법시험 등을 수행하였다. 시험 결과에서 본 장비의 합리적 시험 결과를 확인할 수 있었다.

Keywords : Coarse granular material, Dynamic property, Large triaxial test, Verification of equipment

1 정희원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute, geolsj@krii.re.kr, 교신저자)

2 정희원, 삼성물산 건설부문 토목ENG팀 대리 공학박사 (Member, Ph.D., Civil Eng. Team, Samsung Construction Corp.)

3 정희원, KAIST 건설및환경공학과 연구교수 (Member, Research Prof., Korea Advanced Institute of Science and Technology)

4 정희원, KAIST 건설및환경공학과 박사후과정 (Member, Post Doc., Korea Advanced Institute of Science and Technology)

5 정희원, 다산컨설팅트 지반공학부 과장 (Member, Manager, Dasan Consultant)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

1.1 연구 배경 및 필요성

최근 지반구조물이 대형화되어 감에 따라, 대입경 조립재료는 대형 필댐, 제방, 항만 방조제 및 방파제, 철도 노반 및 암성토, 교대 및 지하철 박스 뒷채움 등 다양한 지반구조물에 지속적으로 그 활용도가 증가되고 있다. 이러한 대입경 조립재료로 축조된 대형 구조물은 경제적, 사회적으로 국가 중요 기반시설에 해당되는 경우가 대부분으로 그 재료의 중요도에 비해 대입경 조립재료의 물성에 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 불가능하며, 비파괴 표면과 탐사의 경우에도 대입경 조립재료의 불연속성으로 인한 측정 신호의 품질에 대한 신뢰성 문제와 반무한 평면 가정에서 출발된 표면과 기법의 한계로 인해 현장실험에 의한 물성 취득도 매우 어려운 실정이다. 그러나 대입경 조립재료로 구성된 대형 지반구조물은 내진설계 및 내진안정성 평가, 건설 및 운영 중 진동요인에 따른 동적하중에 대한 안정성 평가 및 설계 등과 같은 지반구조물의 합리적 설계 및 시공 등을 위해서는 신뢰성 있는 동적물성 산정을 위한 실험적 연구가 절대적으로 요구된다.

국내에서는 대입경 조립재료에 대해 정/동적 물성을 산정할 수 있는 삼축압축실험장비가 수자원공사와 경주대학교에 구축되어 연구가 진행되고 있다. 초기에는 주로 정적강도 및 물성 산정에 많은 연구(신동훈 등 2000)가 진행되어 왔으며, 이후 동적물성 산정을 위한 장비의 개선과 이에 따른 연구가 진행된 바 있다(신동훈, 2003; 신동훈 등 2004).

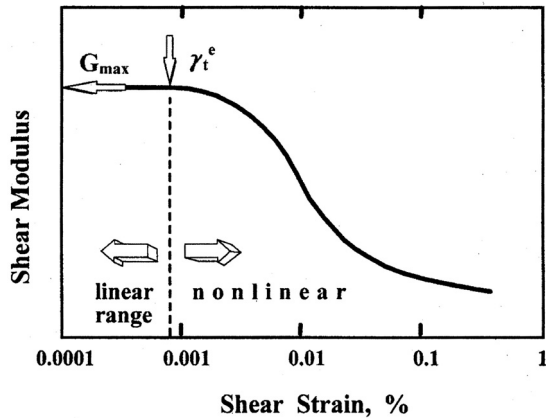
1.2 지반재료의 동적물성

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.

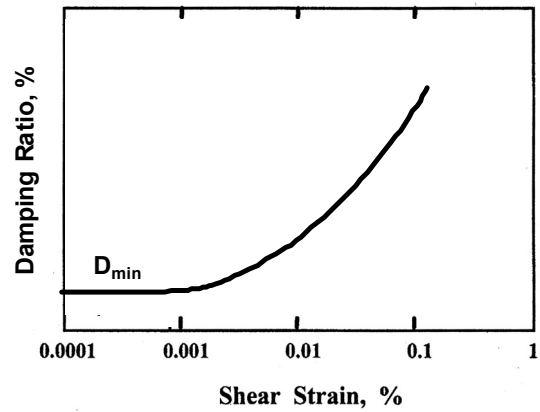
정적실험에서의 계측 정확도가 증가하여 정적물성과 동적물성 사이의 차이가 줄어들고 하중의 종류(정적/동적)보다 유발되는 변형률의 크기가 지반의 거동 예측에 중요한 변수임이 인식되고 있다(Burland, 1989; Tatsuoka 등, 1991; 김동수, 1995). 파괴전의 지반구조물에 대해 계측을 실시한 결과, 실제 구조물에서 지반이 거동하는 변형률 범위가 0.1~1% 이하이고, 이때의 지반변형은 비선형적인 특성을 보이게 되어 이를 고려한 해석의 필요성이 인식되었다.

또한, 지진하중, 파랑하중과 같은 반복적인 동적하중을 받는 지반구조물의 설계에서는 전단탄성계수(Shear modulus, G) 및 감쇠비(Damping ratio, D)로 표현되는 변형특성이 매우 중요한 변수로 사용되고 있다. 저변형률 영역에서의 전단탄성계수와 감쇠비는 기본적으로 변형률의 크기에 무관하여 일정한 값을 가지고, 전단탄성계수는 최대값인 최대전단탄성계수(G_{max})로서 감쇠비는 최소값인 최소감쇠비(D_{min})로서 구분된다. 지진하중이 작용할 경우, 지반재료의 변형이 커짐에 따라 비선형 거동이 나타나기 때문에, 이러한 비선형 거동특성을 신뢰성 있게 평가하기 위하여 전단변형률에 따른 전단탄성계수 감소곡선 및 감쇠비 곡선으로 표현되는 비선형 동적 변형특성의 결정이 중요해진다. 특히, 등가선형 및 비선형 지반응답해석에서 비선형 동적 변형특성이 주요 설계입력변수로 이용된다(Bardet과 Tobita, 2001; Schnabel 등, 1972; Yoshida와 Towhata, 1997). 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 신뢰성있게 규명하는 것이 지반구조물의 해석/설계에 필요한 합리적인 입력변수 제공을 위하여 매우 중요하게 되었다.

지반의 비선형성은 그림 1과 같이 동적변형특성-log(전단변형률, γ)의 관계로 나타내는 것이 일반적이다. 1%이하의 변형률의 범위에서 전단탄성계수의 변화를 보다 정확하게 표현하기 위해서이다. 전술한 바와 같이 전단탄성계수와 감쇠비는 변형률의 크기에 무관하게 일정한 선형영역과 변형률이 증가함에 따라 감소하거나 증가하는 비선형 영역으로 구분되며, 두 영역을 구분짓는 변형률의 크기를 선형한계변형률(γ_c)라 한다. 일반적으로 지반재료의 선형 한계 변형률은 $10^{-4}\% < \gamma < 10^{-2}\%$



(a) 변형률 수준에 따른 전단탄성계수



(b) 변형률 수준에 따른 감쇠비

그림 1. 변형률 수준에 따른 전형적인 동적물성

범위에 존재하며, 입자가 큰 자갈 등 점성이 없는 지반 재료는 낮은 선형탄계변형률을 갖는 반면, 점성이나 세립분을 갖는 지반재료는 상대적으로 높은 선형탄계변형률을 갖는다. 지반의 전단탄성계수와 변형률의 관계는 지반의 종류, 함수비, 구속응력, 하중주파수, 교란상태 등 다양한 조건의 영향을 받으나, 전단탄성계수를 최대전단탄성계수(G_{max})로 정규화한 정규화 전단탄성계수(G/G_{max})와 전단변형률의 관계는 이러한 영향 요소가 줄어들어, 재료에 따라 비교적 일정한 범위의 값을 갖는 것으로 알려져 있다(Seed 등, 1984; Tatsuoka 등, 1991; 김동수, 1995; 권기철, 1999).

Seed 등(1986)과 Rollins 등(1998)은 많은 자료 조사를 통하여 모래와 자갈에 대한 대표 비선형 동적 변형특성을 제안하였으며, 국내에서는 이세현 등(2009)이 국내의 댐 제체재료에 대한 연구결과를 바탕으로 D/B 를 구축하고 대표곡선을 제안한 바 있다. 그러나, 아직까지 대입경 조립재료에 대한 실험적인 연구결과가 대형 시험장비의 부족으로 미비한 실정이다.

본 연구에서는 재료의 입도에 따라 최대 입경 100mm 조립재료까지 실험할 수 있는 대형삼축압축시험장비를 구축하였고, 대입경 조립재료에 대한 강도시험뿐 아니라, 변형특성을 획득할 수 있는 시험시스템을 반영하였다. 구축된 삼축압축시험장비는 하중 및 변위제어가 가능하며 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 대한 검증이 완료되면, 향후 실제 조립재료에 대한 지속적인 연구 수행으로 유용한 결과들을 제시할 수 있을 것으로 기대한다.

1.3 연구 목적 및 범위

실험장비 구축 이후 실험장비의 검증은 향후 수행되는 실험 결과의 신뢰성 확보를 위해서 반드시 필요한 과정이다. 이러한 검증과정에는 실험장비에 사용된 하중, 변위 등 측정용 센서들의 일반적인 검증과 더불어 시스템의 역학적 순응성(System compliance)에 대한 전체적인 검증이 필요하다(권기철 1999). 본 연구에서는 실험장비 시스템의 역학적 순응성 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.

2. KRR1 대형삼축압축시험장비 개요

본 장비의 메인프레임은 2개의 액츄에이터(2000kN, 200kN)를 거치하고 하중의 반력대로 사용되는 Cross Head(약 180kN), Cross Head의 상하이동을 위한 400kN 급의 유압실린더, Cross Head를 4축 Post에 고정시키는

1 신뢰도를 확보할 수 있는 공시체 직경과 재료의 최대입경 사이의 관계는 실험 기준에 따르지만, 일본지반공학회 기준(JGS)에 따르면, 일반적으로 재료의 최대입경/공시체 직경을 1/10으로 하지만, 재료의 균등계수가 5 이상일 경우에는 1/5일 수 있다고 규정하고 있다. ASTM D3999-91에서는 1/6로 제시하기도 한다.

4800kN의 유압클램프가 설치되어 최대하중 또는 최대 속도로 하중재하 시에도 실험에 미치는 영향이 거의 발생되지 않도록 하였다. 본 실험에 앞서 수행된 최대성능 시험에서 2200kN 재하 시 반력대(Cross Head) 중앙부 최대 변위량이 0.26mm로 실험체 변위 이외의 시스템 자체 변위는 무시할 수 있음을 확인할 수 있었다.

본 실험장비에는 주로 정적인 압축실험과 오이도미터실험을 위한 대용량(2000kN)의 액츄에이터와 별도로 미소변형수준의 동적 실험을 위한 200kN 액츄에이터를 분리 설치하여 작은 범위에서의 하중제어를 효율적으로 할 수 있도록 하였다. 200kN 액츄에이터는 총 스트로크 400mm로 최대하중 하에서 $\pm 10\text{mm}/10\text{Hz}$ 의 속도로 고속제어가 가능하다.

본 실험장비에서는 보다 다양한 입도의 조립재료와 다양한 현실적인 환경 및 구속조건에 대한 요소실험이 가능하도록 여러 종류의 삼축셀을 구축하였다. 먼저 일반 삼축압축조건을 실험을 위해서 150 \times 300H, 300 \times 600H, 500 \times 1000H의 공시체의 거치와 미소변형 측정용 센서 및 케이블의 설치와 실험이 가능한 셀(cell)을 500 \times 900H, 700 \times 1200H, 900 \times 1650H으로 각각 구성하였다. 모든 실험 셀(cell)은 최대 구속압 2MPa하에서 안전하도록 설계, 제작되었다. 삼축압축실험을 위해서는 시료의 포화, 시료 내부 배압 및 구속압 제어와 파괴 측정 등을 위해 공압공급장치(Air Compressor), 공기건조시스템(Air Drying system), 탈기수 장치, 이산화탄소 공급장치, 고압레귤레이터, 진공펌프 등으로 구성된 루프시스템을 구축하였으며, 루프상의 밸브와 압력제어는 컨트롤러에서 컴퓨터로 제어가 가능하도록 구성하였다.

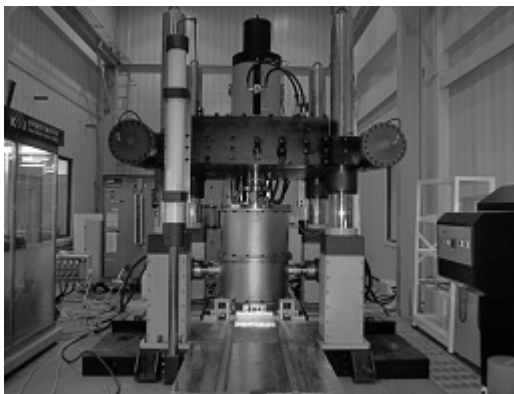
또한 시료의 포화작업이 필요할 경우 이산화탄소로

시편 내부의 공기를 치환하고 이중부압법 또는 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.

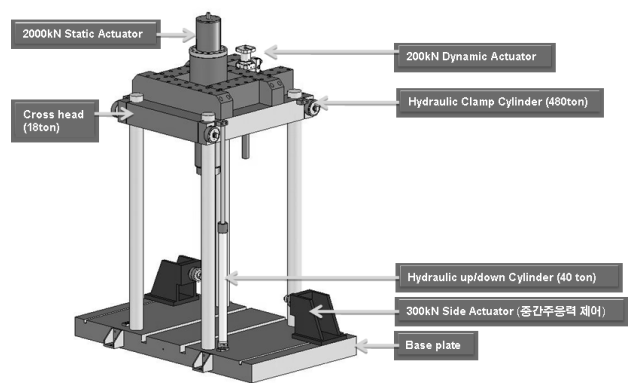
삼축압축실험을 위해서는 실험조건에 맞는 공시체의 제작이 중요한 과정이다. 실험에서 목적으로 하는 밀도를 정하고 그에 맞는 시료를 성형하기 위해서는 공시체를 균일하게 반복 재현가능한 하중으로 성형할 수 있어야 할 것이다. 본 장비에서는 현장다짐조건에 유사한 하중조건에서 공시체를 제작하기 위하여, 하중크기(최대 100kN)와 주파수제어(30Hz, $\pm 1.85\text{mm}$ at 100kN)가 가능한 전용 다짐장비를 제작하여 시편의 일관된 품질 재현의 수준을 향상시켰다.

본 연구에서 사용한 삼축압축실험장비는 하중 및 변위제어가 가능한 장비이며 정확한 하중제어를 위해 로드셀을 셀내부에 설치하였다. 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 타입으로 설치하였다.

변위측정은 내부와 외부에서 측정하는 방법이 있으나, 외부 측정 변위는 미소변위의 측정을 위한 정밀도



(a) 대형삼축압축시험장비



(b) 메인 프레임 구성 개요

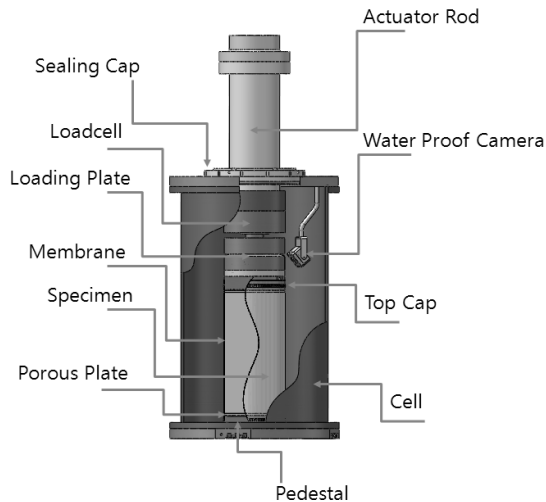
그림 2. 대형삼축압축시험장비 전경(한국철도기술연구원, KRRI)

확보가 어렵고, 단부오차(bedding error)를 포함하기 때문에 미소변형수준의 변위 측정에 적합하지 않다. 단부 오차는 시료의 양쪽 끝부분에서의 평탄성 등의 문제로 인하여 실제보다 큰 변위가 계측되어 변형률이 크게 평가되는 것으로 시료를 성형할 때 아무리 정밀하게 하더라도 완전히 배제할 수 없는 오차 요인이다. 따라서 본 실험장비에서는 국부(local) 변형 측정법을 도입하였고, 이를 위해 셀 내부의 시편 측면에 변위센서(LDT, Local Deformation Transducer)를 부착하여 미소변위를 측정하였다.

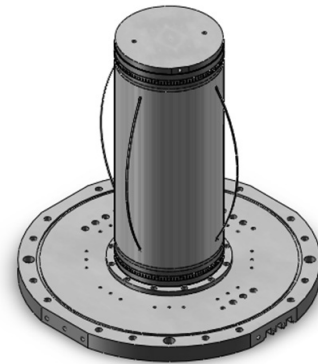
LDT는 국부변위 측정방법의 하나로 1% 이하의 변형률을 측정하고자 할 때 널리 사용되며, 일본의 Tatsuoka 등 (1991)이 개발하여 사용되고 있다. LDT(Local Deformation Transducer)는 얇은 인칭동판에 4개의 변형률계(Strain

gauge)를 Full bridge 형태로 붙여서 동판이 휘어질 때 발생하는 응답을 측정하여 변위를 측정하는 장치이다. 본 연구에서 사용한 동판은 길이 520mm로서 인가전압 3V에 출력은 약 4.5mV/V 범위 이내에서 측정되어 앰프를 이용해 최대 7.3V까지 최대 25mm 변위까지 측정할 수 있다.

LDT를 사용하여 삼축압축실험을 하는 경우 그림 4와 같이 멤브레인에 LDT거치를 위한 힌지를 붙이고 힌지 사이의 거리를 정확히 측정한 다음, 힌지에 LDT의 양끝을 거치하고 실험을 수행한다. 그림 4는 LDT를 시편에 부착한 일례를 나타내며, 그림 5는 Calibration 장치 및 하나의 LDT에 대해 변위 대비 출력값의 변화를 보여주고 있다.

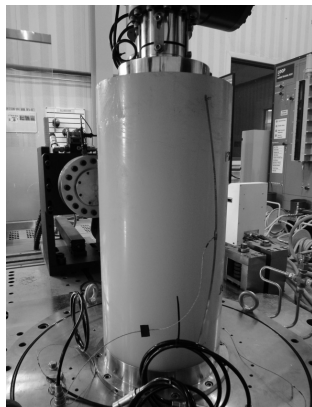


(a) 셀 내부 단면도



(b) LDT 센서 설치 개요도

그림 3. 미소변형 수준의 하중제어를 위한 셀 내부 단면도 및 변형률 측정 장치 설치 개요

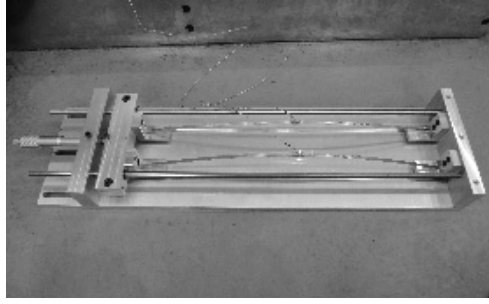


(a) LDT가 부착된 검증시편

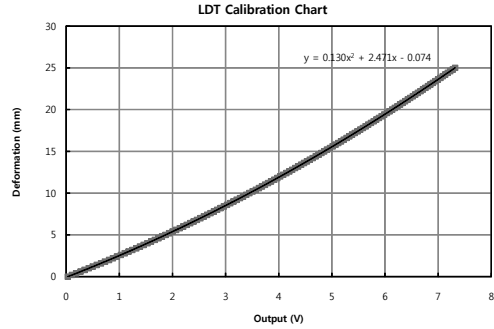


(b) LDT 지점 힌지

그림 4. LDT 부착 공시체 및 힌지 사진



(a) LDT 센서 Calibration 장치



(b) LDT 센서 Calibration Chart

그림 5. LDT 센서 교정 장치 및 결과

3. KRRI 대형삼축압축시험장비 동적물성 산정 시스템 자체 검증

3.1 실험방법

실험은 일본 지반공학회의 JGS 0542-2000을 기준으로 실험을 수행하였다. 이 기준에 따른 일반적인 지반재료에 대한 실험방법을 요약하면 다음과 같다. 먼저 등방압밀 또는 이방압밀 중 실험 조건과 목적에 맞는 구속압, 배압, 축방향 압력 등을 제어한다. 축방향 응력 재하 단계별로 축방향 변형률의 변화율이 0.1%/min 이하가 되도록 축방향 응력을 추가로 재하하며 최종 목표의 유효축방향 및 축방향 응력 조건이 만족되도록 응력 조건을 제어한다. 본 연구의 검증시험에서는 구속압의 영향을 받지 않는 우레탄 재료에 대하여 수행되었기 때문에 대기압상태에서 실험을 수행하였다.

재료에 따른 실험 조건을 만족하는 등방 또는 이방압밀 상태를 확인한 후 다음과 같은 과정으로 반복 축하중을 가하게 된다. 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 0.05~1.0Hz를 표준으로 하며 이때 각 하중단계에서는 11번의 정현파를 가한다.

각 하중단계별로 5회째와 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 각

각 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}

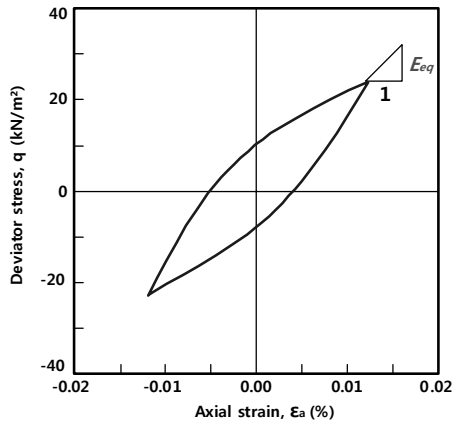
$$E_{eq} = \frac{\sigma_d}{(\epsilon_a)_{SA}} \quad (3)$$

(4) 감쇠비 : $h(\%)$ 또는 $D(\%)$

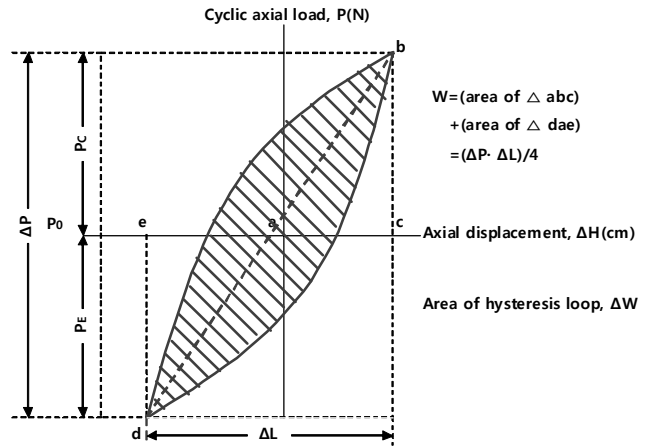
$$h = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} \times 100 \quad (4)$$

여기서,
 ΔW : 반복재하 사이클에서의 감쇠에너지로 축하중 P와 축변위 W로 이루어진 이력곡선의 면적

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



(a) 전형적인 응력-변형률 이력곡선



(b) 감쇠비 계산

그림 6. 동적물성 산정

3.2 검증시편

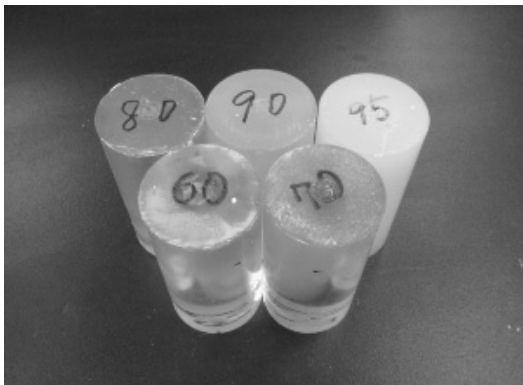
본 연구의 검증 시험에서는 강성이 서로 다른 우레탄 5개 종류의 우레탄 검증시편을 사용하여 실험장비를 검증하였다. 우레탄 재료의 검증시편은 변형률 크기에 따라 탄성계수가 일정한 선형거동을 나타내고, 강성이 구속응력이나 응력이력에 영향을 받지 않으며, 내구성이 좋아 반복사용에 따른 특성치 변화가 없어 취급이 용이한 장점을 갖고 있다(Stokoe 등, 1990). 따라서 우레탄 재료의 시편은 실험장비의 검증시편으로 적합한 것으로 평가된다(권기철 1999). 그러나 이러한 장점이 있는 반면 검증시편의 점탄성으로 인해 하중주파수가 증가하거나 온도가 감소할수록 강성이 증가하는 경향이 있다(Stokoe 등, 1990). 그러므로 각 실험을 유사한 실내온도에서 실시하고, 각 실험이 수행되는 하중주파수를 고려하여 탄성계수를 비교하는 방법을 적용하였다.

5종의 다른 강성을 갖도록 배합된 우레탄 재료를 직경 300mm와 50mm로 즉 강성별로 한 쌍의 대형 및 소형 우레탄 검증시편을 제작하였다.

3.3 KRRI 대형삼축압축시험장비 실험 결과

대형삼축압축시험장비의 검증실험은 대형우레탄시편(직경 3500mm)에 대해 수행하였으며, 지반재료에 대한 동적실험과 같이 JGS 기준으로 실험하였다. 검증시편은 균질, 등방, 탄성이라는 가정 하에서 탄성계수와 전단탄성계수를 서로 계산하기 위해 다음 식을 적용하였다. 두 식에 적용되는 포아송비는 충격반향기법(Impact Echo Test)에서 얻어진 다음 표 1의 값을 각 시편에 적용하였다.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5)$$



(a) 소형 우레탄 시편



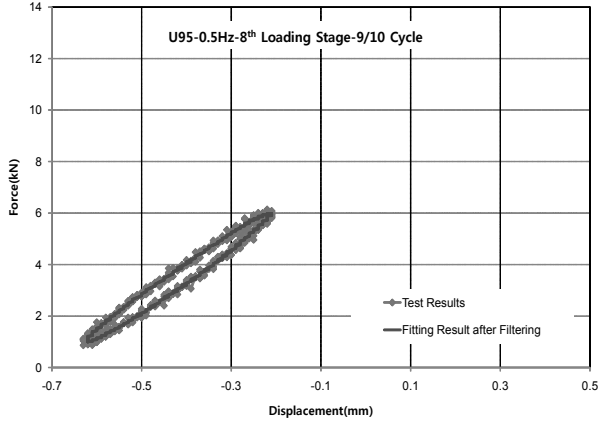
(b) 대형 우레탄 시편

그림 7. 우레탄 검증시편

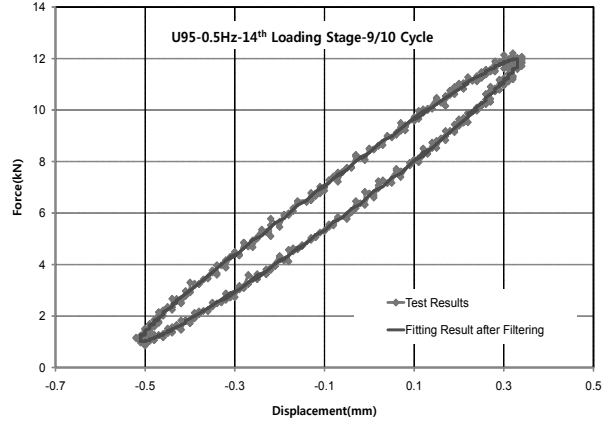
$$\gamma = \epsilon_a(1 + \nu) \quad (6)$$

검증실험을 위해 수행된 우레탄 검증시편에 대한 대 형삼축압축시험의 이력곡선의 일례는 그림 8과 같다.

앞서 언급된 바와 같이 구속압과 변형률 수준에 영향을 받지 않는 우레탄 검증시편의 탄성계수값이 실험결과에서도 변형률에 따라 일정한 값을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 우레탄 재료 특성상 하중주파수에

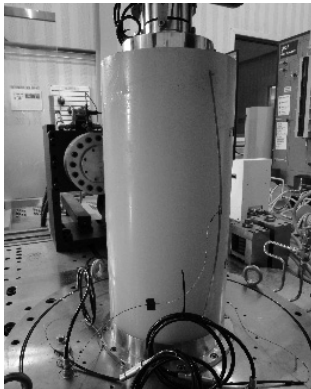


(a) U95시편 8번째 하중단계 9-10cycle



(b) U95시편 14번째 하중단계 9-10cycle

그림 8. 하중-변위 이력 곡선



(a) 우레탄 시편



(b) 대기압 중 우레탄 시편 시험

그림 9. 우레탄 시편 검증 시험

표 1. 충격반향시험 결과(직경 50mm 우레탄 검증시편)

시편 ID		U60	U70	U80	U90	U95
길이, cm		9.8	9.8	9.8	9.8	9.8
직경, cm		5.03	5.03	5.03	5.03	5.03
무게, g		225.3	224.8	206.3	219.5	219.4
밀도, kg/m ³		1156.94	1154.37	1059.37	1127.15	1126.64
공진 주파수	ROD파, Hz	408	528	792	1648	2032
	S파, Hz	240	312	480	1008	1248
탄성파 속도	ROD파, m/s	79.97	103.49	155.23	323.01	398.27
	S파, m/s	47.04	61.152	94.08	197.57	244.61
	P파, m/s	149.43	176.68	201.86	397.98	480.94
포아송비		0.445	0.432	0.361	0.336	0.326
영탄성계수(E, pa)		7.398E6	1.236E7	2.553E7	1.176E8	1.787E8
전단탄성계수(G, pa)		2.560E6	4.317E6	9.377E6	4.400E7	6.741E7

Note * : Poisson's Ratios are determined by v_s and v_c from resonance measurement

따라 증가하는 강성의 경향도 합리적으로 반영하는 것으로 확인되었다.

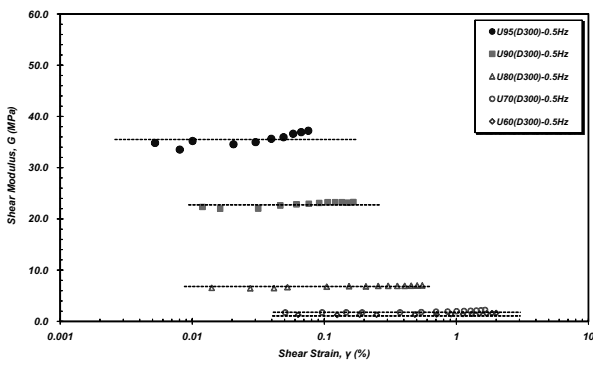
4. 다른 시험법과의 비교 검증

앞서 구축된 시험장비의 자체 검증시험을 통해 하중이나 변형률 수준에 따른 시스템의 성능을 확인할 수 있었다. 이번에는 보다 합리적인 검증을 위해 다른 실험법과의 절대적 시험결과값의 교차검증을 추가로 실시하였다. 즉, 대형우레탄시편에서 수행된 대형삼축압축

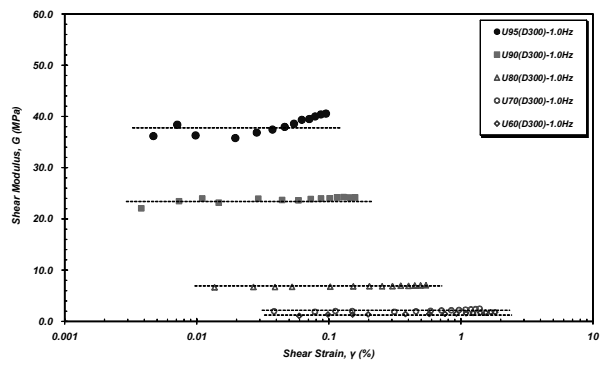
시험 결과를 소형 우레탄시편에 대해 수행된 공진주/비틀전단실험, 충격반향(Impact Echo)실험 결과와 비교 검증하였다. 또한 시험법별로 다른 주파수로 수행된 결과를 반영하여 다른 주파수에 따른 영향도 검토하였다.

4.1 공진주/비틀전단시험

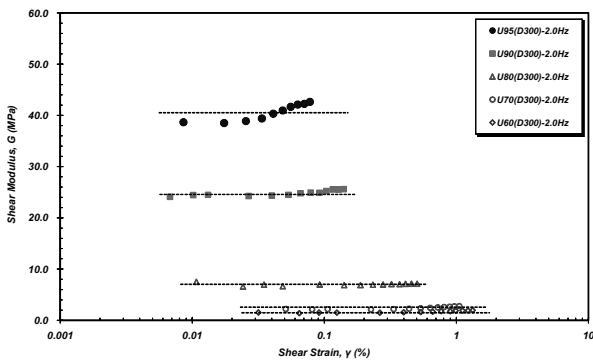
총 5종의 소형 우레탄 시편(직경 50mm)에 대해 구속압을 가하지 않은 대기압 상태에서 공진주/비틀전단시험을 수행하였다. 먼저 낮은 변형률 단계부터 변형률 크



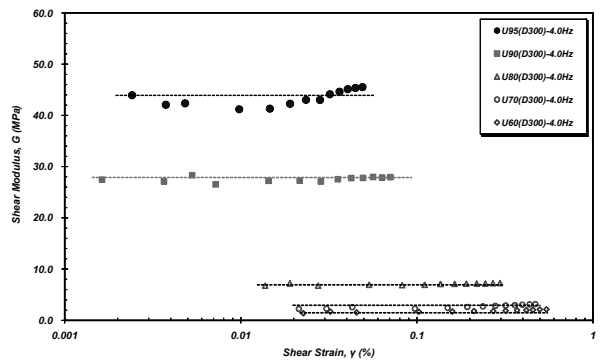
(a) 0.5Hz에서의 LTX 전단탄성계수 결과



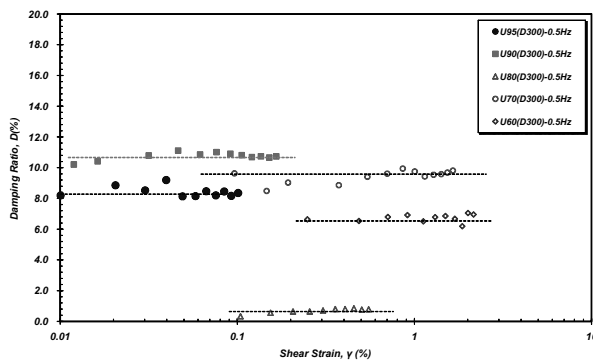
(b) 1.0Hz에서의 LTX 전단탄성계수 결과



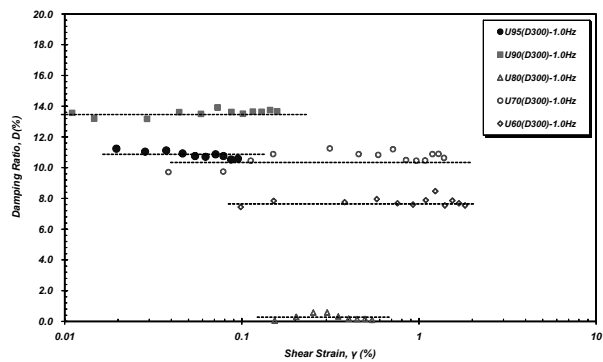
(c) 2.0Hz에서의 LTX 전단탄성계수 결과



(d) 4.0Hz에서의 LTX 전단탄성계수 결과



(e) 0.5Hz에서의 LTX 감쇠비 결과



(f) 1.0Hz에서의 LTX 감쇠비 결과

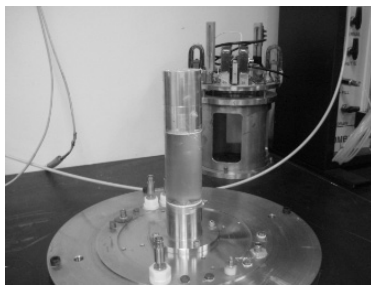
그림 10. 대형삼축압축시험(LTX)로 수행된 주파수별 동적물성 결과

기를 증가시켜 가면서 비틀전단시험과 공진주시험을 번갈아가며 시험을 수행하였다. 비틀전단시험의 경우, 하중재하횟수는 11회로 하였고, 시험 시편의 하중주파수에 따른 전단탄성계수의 영향을 평가하기 위해 하중주파수를 0.1Hz, 0.5Hz, 1Hz, 2Hz, 5Hz, 10Hz로 달리하여 비틀전단시험을 수행하였다. 본 실험에서도 변형률에 따른 강성이 일정한 우레탄 재료의 특성을 그대로 반영하고 있으나, 공진주시험과 비틀전단시험에서 구해지는 전단탄성계수는 차이를 보이고 있고, 이는 앞에서도 언급한 바와 같이 하중주파수의 영향을 받는 우레탄

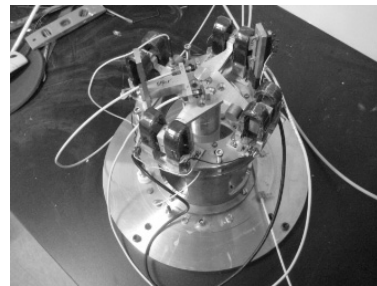
재료의 특성에 기인한 것으로 이에 대한 영향을 뒤 절에서 검토하였다.

4.2 충격반향시험

우레탄 코아시편에 대하여 5종류의 우레탄 강도별 타입에 대하여 충격반향기법에 의해 동적물성치를 평가하였으며, 그 결과는 표 1에 요약한 바와 같다. 본 연구에서는 구속 압축파 (P wave) 속도는 측정하지 않았으며, 측정한 동적 물성치는 비구속 압축파 (Rod wave) 속

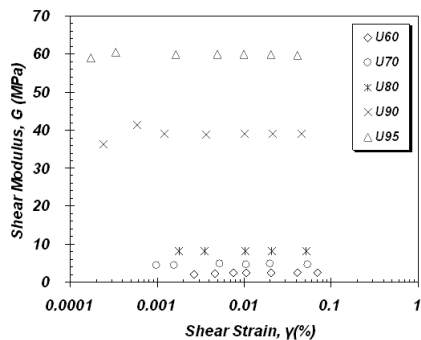


(b) 석고를 이용하여 시편 거치

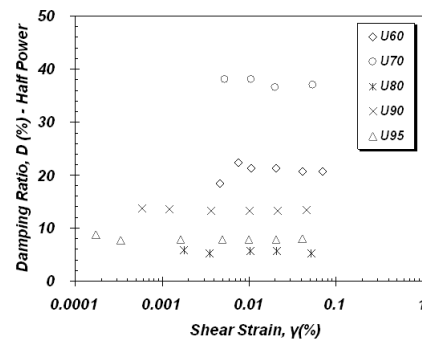


(c) 공진주/비틀전단시험 시스템 세팅 완료

그림 11. 우레탄 시편의 공진주/비틀전단시험 수행 과정

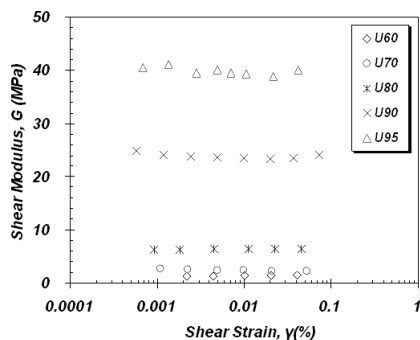


(a) 변형률에 따른 전단탄성계수($G-\log\gamma$)

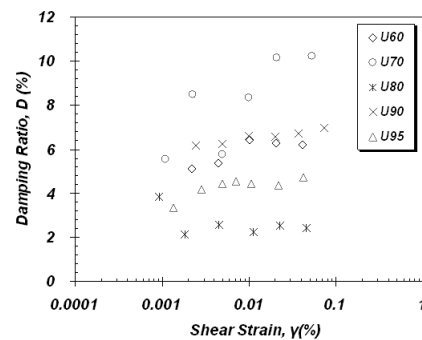


(b) 변형률에 따른 감쇠비($D-\log\gamma$) - Half Power Bandwidth Method

그림 12. 공진주 시험을 통해 획득한 우레탄 시편의 동적물성치

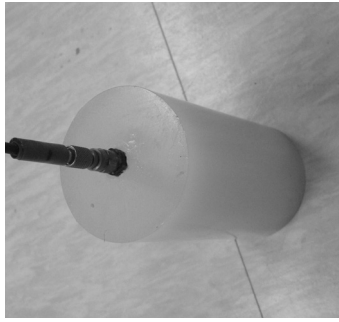


(a) 변형률에 따른 전단탄성계수($G-\log\gamma$)

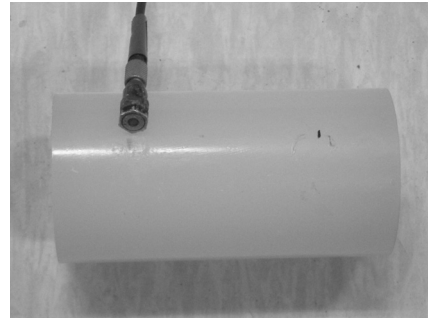


(b) 변형률에 따른 감쇠비($D-\log\gamma$)

그림 13. 비틀전단 시험을 통해 획득한 우레탄 시편의 동적물성치



(a) Rod Wave



(b) S Wave

그림 14. 소형 우레탄 시편의 충격반향시험

도, 전단파 (S wave) 속도이다. 그리고, 비구속압축파 속도와 전단파 속도로부터 구속 압축파 (P wave) 속도를 추정 방법도 시행하였다. 또한, 이들 탄성과 속도로부터 Poisson 비를 측정할 수 있었다. 이와 더불어, 본 연구에서 조사한 우레탄 코어의 단위중량을 계산하였고, 탄성과 속도와 단위중량을 이용하여 전단탄성계수 (G), 영탄성계수 (E) 등을 평가하였다.

4.3 다른 시험법과의 비교 검증 평가

본 검증 시험에는 동일 재질로 만들어진 직경 300mm와 50mm의 한쌍의 우레탄 시편을 5종류로 제작하여 대형삼축압축시험과 소형 공진주시험, 비틀전단시험, 충격반향시험등을 수행하였다. 이 결과를 이용해서 2가지 방법으로 대형삼축압축시험장비 시험 결과를 평가하였다.

앞에서 언급된 바와 같이 우레탄 재료는 구속압에 영향을 받지 않는 대신 하중 주파수에는 영향을 받는 재료이다. 이러한 검증시편의 재료특성을 고려해서 동일한 주파수에서 수행된 전단탄성계수를 비교하였다. 즉, 300mm 우레탄시편에 대해 0.5Hz의 주파수로 수행된

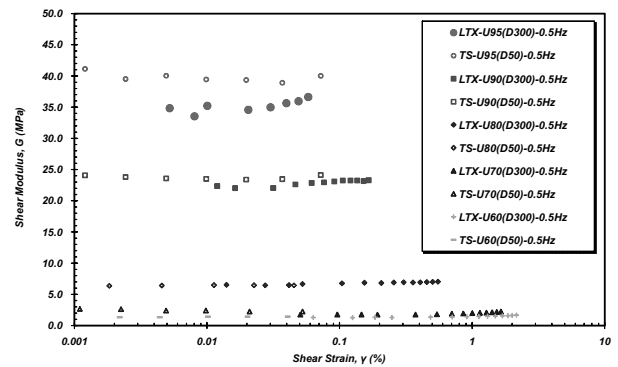
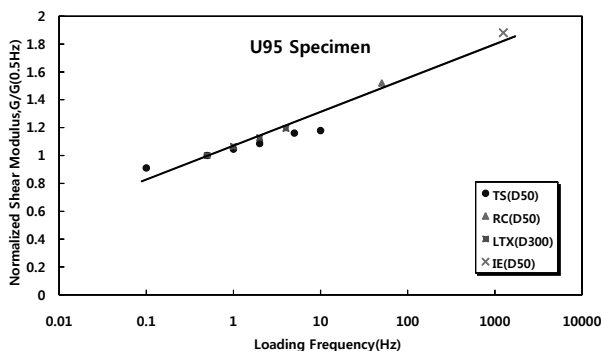
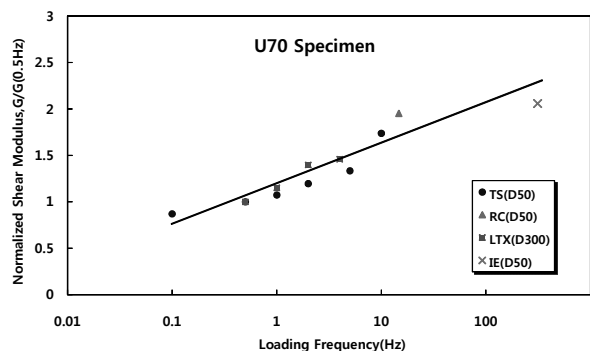


그림 15. 대형삼축압축시험과 비틀전단시험 결과 비교

대형삼축압축시험 결과와 같은 강성으로 제작된 50mm 우레탄시편에 대해서도 동일한 0.5Hz의 주파수로 수행된 비틀전단시험 결과의 절대값을 5쌍의 우레탄 시편들에 대해 비교하였다(그림 15). 그림에서 보는 바와 같이 동일한 강성으로 제작된 각 우레탄 시편에 대해 대형삼축압축시험(LTX)으로 평가된 전단탄성계수와 비틀전단시험(TS)으로 평가된 전단탄성계수가 시험이 수행된 변형률 수준에 관계없이 거의 동일한 결과를 보여주고 있다.



(a) 하중주파수를 고려한 결과 비교(U95)



(b) 하중주파수를 고려한 결과 비교(U70)

그림 16. 시험방법별 다른 주파수 영향을 고려한 결과 비교

추가적으로 다른 주파수 대역에서 전단탄성계수를 평가한 공진주시험과 충격반향시험 결과를 활용해 장비성능을 평가하였다. 즉, 각 실험 방법별로 수행된 결과를 일관된 기준으로 비교 검증하기 위해서는 각 실험법에서 결정된 탄성계수를 주파수의 영향을 고려하였다. 권기철(1999)의 연구결과에서 우레탄 검증시편은 하중주파수의 대수적 증가에 따라 거의 직선적으로 증가하고 있음을 검증한 바 있다. 본 연구에서도 이와 같은 우레탄 시편의 특성 반영 여부를 검증하기 위해 수행된 실험들, 비틀전단실험(TS), 공진주실험(RC), 충격반향시험(IE), 대형삼축압축실험(LTX)에서 각 실험이 수행된 하중주파수의 영향정도를 평가하기 위해 각 실험들에서 얻어진 탄성계수를 0.5Hz로 정규화하여 그 값을 비교하였다(그림 16). 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 전단탄성계수가 하중 주파수에 대하여 거의 직선적으로 증가되고 있음을 확인할 수 있었다. 지반재료의 동적물성치 평가를 위해 널리 사용되고 있는 다양한 시험기법으로 도출된 전단탄성계수 절대값 및 하중주파수에 따른 경향성을 비교함으로써, 대형삼축압축시험장비의 신뢰성을 확인할 수 있다고 판단된다.

4. 결론

실험장비 구축이후 실험장비의 검증은 향후 수행되는 실험 결과의 신뢰성 확보를 위해서 반드시 필요한 과정이다. 본 연구에서는 실험장비 시스템의 역학적 순응성 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 이루어졌으며, 다음과 같은 검증평가 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 연구 대상 대형삼축압축실험장비는 우레탄시편들에서 전단변형률에 따른 탄성계수와 감쇠비가 일정한 값을 나타내면서 우레탄 검증시편의 재료 특성을 잘 반영하고 있음을 확인하였다.
- (2) 같은 강성으로 제작된 소형(직경 50mm) 우레탄시편과 대형(직경 300mm) 우레탄시편에 대해 같은 하중주파수로 수행된 비틀전단시험과 대형삼축압축시험에서 5쌍 검증 시편 모두 절대적인 강성값이 거

의 같은 결과를 보여 다른 시험법과의 비교에서도 합리적인 결과를 검증할 수 있었다.

- (3) 대형삼축압축시험, 비틀전단실험, 공진주실험, 충격반향시험으로 상호 검증한 결과, 일정 하중주파수(0.5Hz)에서의 탄성계수로 정규화하였을 경우 하중주파수의 대수축에 직선적 증가경향을 보이는 우레탄 검증시편의 특성을 매우 이상적으로 나타내고 있었다.
- (4) 이상의 실험 결과들로 대형삼축압축실험장비 전체 시스템의 검증이 이루어져 향후 본 장비로 수행되는 동적물성 실험결과에 대해 신뢰도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 산하 건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업(09기술혁신F045) “대형지반구조물 대입경 조립재료 동적물성 산정기법 연구”과제의 지원을 받아 수행하였습니다.

참 고 문 헌

1. 권기철 (1999) “변형특성을 고려한 노상도 및 보조기층 재료의 대체 MR실험법”, 한국과학기술원 토목공학과 박사학위논문.
2. 김동수 (1995), “공진주/비틀전단시험을 이용한 건조사질토의 변형특성”, *한국지반공학회논문집*, 제 11권 제1호, pp.101-112.
3. 신동훈, 오병현, 박한규, 박성진, 황성춘 (2000), “조립재료의 변형-강도 특성에 대하여(I) -대형삼축시험장치의 개발”, *한국지반공학회 2000 가을 학술발표회 논문집*, pp.311-318.
4. 신동훈 (2003), “대형진동삼축시험기를 이용한 암석재료의 동적 변형특성에 관한 실험적 연구”, *한국지반공학회 2003 봄 학술발표회 논문집*, pp.299-308
5. 신동훈, 김기영, 전제성, 조성은 (2004), “대형삼축시험시 내부측정식 미소변위 측정기법에 의한 조립재료의 탄성계수 산정”, *대한토목학회 2004년도 정기학술대회 논문집*, pp.1439-1443.
6. 이세현, 김동수, 추연욱, 권혁기 (2009), “필립 체체 재료의 동적물성치 평가 : II.비선형 동적 변형특성”, *한국지반공학회논문집*, 제25권, 제12호, pp.87-105
9. 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.
10. 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
11. 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*, ASCE, Vol.124, No.5, pp.396-405.
12. 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.
13. 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.
 14. Stokoe II, K. H., Kim, D. S., and Andrus, R. (1990), “Development of Sythetic Specimens for Calibration and Evaluation of MR Equipment”, In Transportation Research Record 1278, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.63-71.
 15. 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.
 16. Yoshida, N. and Towhata, I. (1997), “YUSAYUSA, Theory and Practice”.

(접수일자 2010. 7. 28, 심사완료일 2010. 10. 25)