

## 대형삼축압축시험장비 구축과 도상자갈의 정적삼축시험 평가

### Building of Large Triaxial Testing Apparatus and Static Triaxial Testing for Railway Ballast

이성진<sup>†</sup> · 김윤기\* · 이일화\*\* · 이준석\*\*\* · 박재준\*\*\*\*

Sung-jin Lee · Yun-Ki Kim · Il-Wha Lee · Jun S. Lee · Jae-Jun Park

**Abstract** We built multi-purpose large triaxial testing system that can test and evaluate various geotechnical design parameters such as shear strength, deformation modulus and stress-strain behaviour for large diameter granular materials, which are the most commonly used construction materials in the railway, road embankments. The details of the built testing system and the results obtained from static triaxial test carried out for gneiss ballast material are discussed within the scope of this paper. Ballast is hardly saturated and is confined at low overburden pressure, since the depth is shallow and the permeability is very high. Herein we ascertained that the confining pressure can effectively be controlled by vacuum. The rational trend could be checked up through triaxial test results such as shear strength, deformation, and particle breakage. And the shear strength envelope could be non-linearly represented with the parent rock strength, confining pressure of the triaxial test and proper parameters.

**Keywords** : Large Triaxial test, Shear Strength, Degradation, Granular material, Ballast

요 지 본 연구에서는 철도, 도로 등 대형 성토지반구조물의 주요 지반재료인 입경이 큰 조립재료에 대해 전단강도, 변형계수, 응력-변형 거동과 같은 지반공학적 설계정수를 평가 산정할 수 있는 대형삼축압축시험장비를 구축하고, 이를 활용한 도상자갈재료에 대한 정적삼축압축시험 결과를 통해 그 의미와 적용 가능성을 제시하였다. 도상자갈과 같이 지표면에 설치되어 포화 가능성이 낮고, 구속압이 작은 경우에는 진공압(vacuum)으로 구속압을 제어하는 방식이 효과적임을 확인할 수 있었다. 도상자갈 재료의 삼축압축시험 결과로부터 구속압별 전단강도, 변형계수, 입자파쇄 영향 등의 합리적인 결과와 경향을 확인하였으며, 모암의 입자강도, 구속압 등의 영향을 고려하여 전단강도 포락선을 예측할 수 있는 비선형식에 적합한 재료 상수를 산정, 적용하여 실험 결과를 근접하게 재현해낼 수 있었다.

주요어 : 대형삼축압축시험, 전단강도, 입자파쇄, 조립재료, 도상자갈

## 1. 서론

철도 및 도로의 성토체, 제방, 지하철박스 뒤채움 등 지반 구조물들은 점차 대형화되어 가고 있으며, 이러한 지반구조물들의 주재료는 입경이 큰 조립재료이다. 따라서 이러한 조

립재료의 전단강도, 압축특성, 응력-변형거동(stress-strain) 등은 지반공학적 설계에서 가장 기본적이고 중요한 설계정수이다. 즉 지반구조물의 합리적인 해석, 설계, 시공을 위해서는 사용되는 조립재료의 강도나 강성을 포함한 정확한 지반공학적 물성들이 요구된다.

철도 지반의 경우, 최근 들어 고속철도 운행과 함께 기존 열차에 비해 운행되는 열차 속도, 하중 및 그 운행 빈도가 증가하여, 도상 자갈의 입자파쇄(degradation)와 궤도(track) 변형 등으로 유지보수 비용이 증가되고 있다. 철도를 운영하는 모든 나라에서 유지보수에 매우 큰 비용을 지불하고 있으며, 이 중 상당부분이 지반공학적 문제와 관련되어 있다[1]. 이러한 비용을 줄이기 위해서는 도상자갈이 주어진

<sup>†</sup> 책임저자, 교신저자 : 정희원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원

E-mail : geolsj@krii.re.kr

TEL : (031)460-5072 FAX : (031)460-5026

\* 한국철도기술연구원 철도구조연구실 박사후연구원

\*\* 정희원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원

\*\*\* 정희원, 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실 책임연구원

\*\*\*\* 케이엔알시스템 선행연구팀 팀장

조건과 하중 하에서 어떻게 거동하는 지에 대한 정확한 이해가 필수적이며, 거동에 영향을 미치는 지반공학적 변수들의 정확한 역할들을 검토할 필요가 있다. 예를 들어 반복되는 열차하중에 대한 궤도의 응답을 해석적 또는 수치해석적으로 예측하기 위해서는 대상재료의 응력-변형 거동에 대한 정확한 정보가 필요하다.

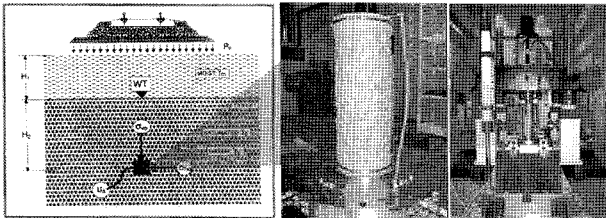


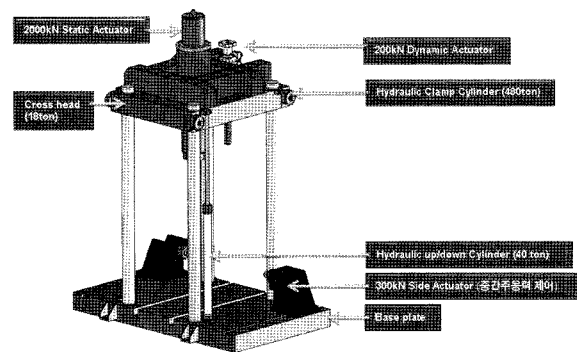
Fig. 1. Concept of Triaxial Test

삼축압축시험장비는 현장 지반요소의 구속조건을 고려하여 지반재료에 대한 강도 및 변형특성을 얻을 수 있는 다목적으로 활용이 가능한 유용한 실험장비이다(Fig. 1, Fig. 2). 그럼에도 일반적으로 사용되는 소형 삼축압축시험장비는 현장에서 활용되는 크기의 조립재료 입자에 대한 실험이 불가능하기 때문에 상사입도법을 이용하여 실험할 경우, 입자 부서짐 등의 메커니즘이나 입자크기에 영향을 받는 조립재료의 거동특성을 실제 현상 그대로 반영할 수 없다. 따라서 도상자갈 등 입자 크기가 큰 조립재료에 대해 보다 합리적인 지반공학적 요소시험 결과를 얻기 위해서는 대형삼축압축시험장비의 사용이 필수적이다. 그러나 대형삼축압축시험장비가 소형삼축압축장비에 비해 갖추어야 할 장치에 따른 큰 구축비용과 제작기술의 부족 등으로 장비 구축이 어려워, 국내에서는 대부분의 조립재료 설계정수를 경험적 자료나 해외문헌의 자료로 적용해왔다. 다행히 2000년대 초에 한국수자원공사와 경주대학교에서 직경 300mm 공시체의 실험이 가능한 대형삼축압축시험장비를 구축하여 현재 여러 분야에 활용 중에 있다[2]. 뒤를 이어 한국철도기술연구원에서는 최근 직경 150mm, 300mm, 500mm의 공시체와 사각시편(중간주응력/평면변형률) 등 보다 크고 다양한 입경의 조립재료에 대한 실험 뿐 아니라  $K_0$ , 중간주응력 조건, 온도제어(동결/융해)조건 등을 재현할 수 있는 부대장비를 갖추어 보다 현장 조건을 합리적으로 반영할 수 있는 대형삼축압축시험 시스템을 설계/구축하였다. 세부적인 특수시험 조건에 대한 내용은 다른 논문에서 소개, 설명할 계획이며, 본 논문에서는 먼저 이번에 구축된 대형삼축압축시험장비의 기본적인 구성 및 사양과 특성에 대해서 설명하고, 도상자갈 재료에 대해 수행한 정적삼축압축시험 결과의 분석으로 시험장비의 적용분야 및

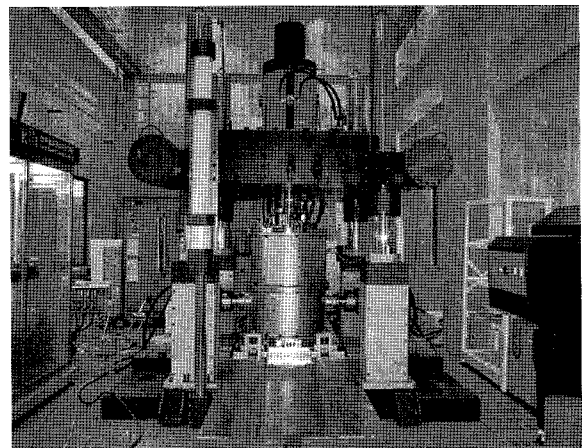
의미를 설명하고자 한다.

도상자갈의 구속응력은 대부분  $140(\text{kN/m}^2)$  이하이기 때문에, 결과적으로 낮은 구속응력 수준에서의 거동이 주된 관심사이다[3]. 과거 조립재료에 대한 연구에서 암성토재료(rockfill)에 대한 연구가 많이 이루어진 바 있으나, 철도 도상자갈(railway ballast)의 거동과는 분명히 다른 응력경로와 구속응력 등으로 인해 큰 차이가 있음이 확인되었다[4]. 이에 본 논문에서는 도상자갈재료에 대한 대형삼축압축시험으로 수행할 수 있는 기초연구로서 먼저 낮은 구속압 하에서의 전단강도, 입자파쇄(particle degradation) 등에 대해 소개할 것이다.

## 2. 대형삼축압축시험장비 개요



(a) Main Frame



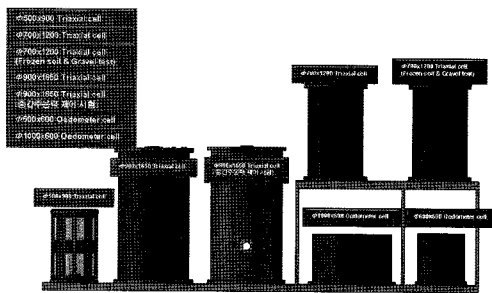
(b) Whole view of the testing system

Fig. 2. Large Triaxial Testing System(KRRI)

본 장비의 메인프레임은 2개의 액츄에이터(2000kN, 200 kN)를 거치하고 하중의 반력대로 사용되는 Cross Head(약 180kN), Cross Head의 상하이동을 위한 400kN급의 유압실린더, Cross Head를 4축 Post에 고정시키는 4800kN의 유압

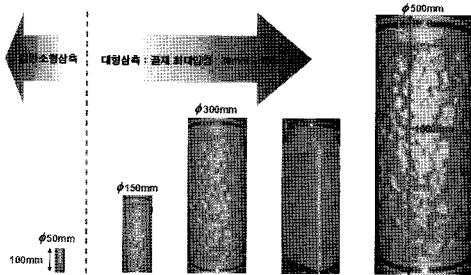
클램프, 중간주응력을 제어할 수 있는 300kN 액츄에이터 (2ea)와 이를 고정 및 이동시킬 수 있는 베이스플레이트 및 삼축압축시험셀을 거치하고 이동할 수 있는 무빙플레이트 (Moving Plate) 등으로 구성되어 있다. 시험장비의 최대 높이는 약 6m 정도로 최대 1m 높이의 공시체와 이를 위한 삼축셀, 로드셀 등 각종 지그류의 설치가 가능하도록 하였다.

본 시험장비에는 주로 정적인 압축시험과 오이도미터시험을 위한 대용량(2000kN)의 액츄에이터와 미소변형수준의 동적 시험을 위한 200kN 액츄에이터를 Fig. 2와 같이 분리 설치하여 시험 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 시험에서 측정되는 하중에 미치는 영향을 제거하였으며, 압축과 인장 시험이 모두 가능한 타입이다.



(a) Triaxial Cells and Oedometer Cells

← 다양한 입도의 조립재료 시험 가능 → 시료직경  $\phi$  500, 300, 150, 사각(300x300, 300x171)  
 → 오이도미터셀  $\phi$  1000,  $\phi$  600

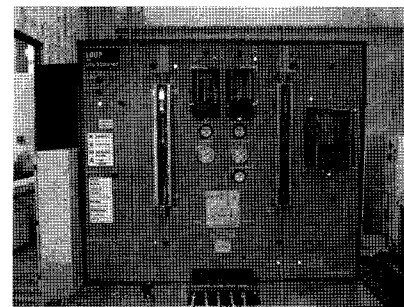


(b) Test specimen

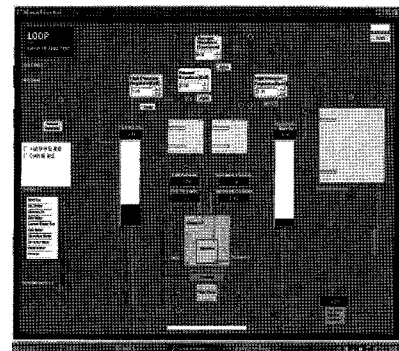
Fig. 3 Cell for test and Specimen

본 시험장비에서는 보다 다양한 입도의 조립재료와 현실적인 환경 및 구속조건에 대한 요소시험이 가능하도록 여

러 종류의 삼축셀을 구축하였다(Fig. 3(a)). 먼저 일반 삼축압축조건 실험을 위해서 Fig. 3(b)와 같이 150 $\times$ 300H, 300 $\times$ 600H, 500 $\times$ 1000H의 공시체의 실험이 가능하도록 셀(cell)은 500 $\times$ 900H, 700 $\times$ 1200H, 900 $\times$ 1650H으로 각각 구성하였다. 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. 500 $\times$ 900H의 셀(cell)은 Fig. 3(a)의 첫 번째 셀과 같이 전체적으로 투명한 창으로 구성되어 실험 상황을 눈으로 관측할 수 있도록 하였으며, 그 외의 삼축실험용 셀(cell)은 내부에 카메라를 설치하여 실험 상황을 관찰하고 녹화할 수 있도록 하였다. 또한 대형오이도미터실험을 위해 오이도미터셀을 두 종류(1000 $\times$ 600H, 600 $\times$ 600H)로 구성하였다.



(a) Loop System

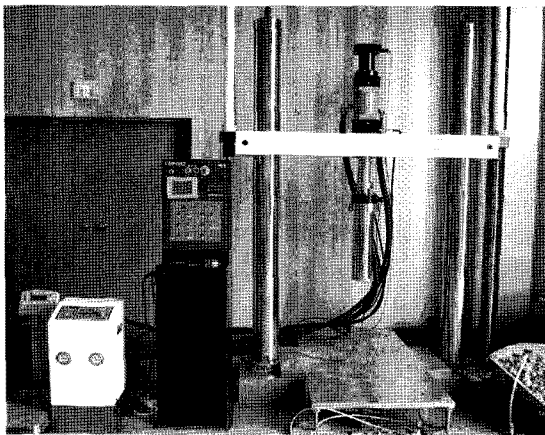


(b) Loop controller

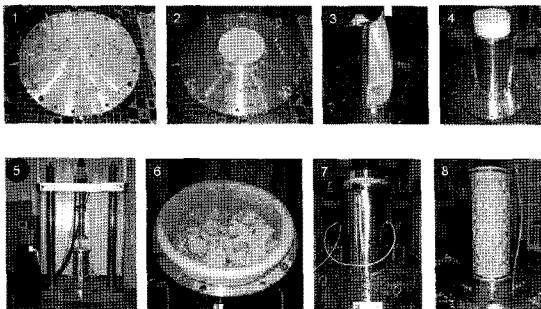
Fig. 4. Loop System and Controller Monitor

삼축압축실험을 위해서는 시료의 포화, 시료 내부 배압 및 구속압 제어와 부피 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 구축하였으며, 루프상의 밸브와 압력제어는 컨트롤러에서 컴퓨터로 제어가 가능하도록 구성하여 실험자의 편의성을 높였다(Fig. 4).

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 발생될 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 부피변화는 시료 내부 간극수의 변화량으로 측정할 수 있으며, 불포화 시료의 경우 셀내부의 구속압을 제어하는 물의 부피변화로 부피변화를 측정할 수 있도록 하였다.



(a) Compaction System



(b) Specimen Preparation Procedure

Fig. 5 Compaction System and Specimen Preparation Procedure

삼축압축시험을 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(Fig. 5).

이 외에도 본 실험 장비에서는 일반적인 삼축압축시험 (CD, CU, UU) 이외에도 Ko구속압 제어, 삼축인장시험, 중간주응력제어시험, 온도제어(동결/융해), 미소변형 수준의 동적물성실험 등으로의 실험장비 확장이 가능하도록 하였다. 이와 같이 구축된 한국철도기술연구원의 대형삼축압축 시험장비는 주요 구성 및 사양을 정리하면 다음 Table 1과 같다.

Table 1. Major Specification of Large Triaxial Testing System

구분	구축 사양
1	Main Frame <ul style="list-style-type: none"> <li>4800(kN) Hydraulic Clamp Cylinder</li> <li>400(kN) Hydraulic Up/Down Cylinder</li> </ul>
2	Static Actuator 2000kN <ul style="list-style-type: none"> <li>Stroke ±200mm</li> <li>Hydraulic performance Maximum test speed 500mm/min &amp; Minimum test speed 0.01mm/min</li> </ul>
3	Dynamic Actuator 200kN <ul style="list-style-type: none"> <li>Stroke ±200mm</li> <li>Hydraulic performance minimum ±10mm at 10Hz on 160kN</li> </ul>
4	Load cell 2000kN, 200kN <ul style="list-style-type: none"> <li>내압 방수형</li> </ul>
5	Triaxial cell <ul style="list-style-type: none"> <li>Cell Size 500Ø×900H (1set) - 1 set for general triaxial test</li> <li>700Ø × 1200H (2 set) - 1 set for general triaxial test - 1 set for frozen soil &amp; gravel triaxial test</li> <li>900Ø × 1650H (2 set) - 1 set for general triaxial test - 1 set for intermediate principal stress control test</li> <li>Specimen size : 150Ø × 300H, 300Ø × 600H, 500Ø × 1000H</li> <li>Confining pressure : 2MPa</li> </ul>
6	Oedometer Cell <ul style="list-style-type: none"> <li>1000Ø×600H (1set), 600Ø×600H (1set)</li> <li>100kN Hydro Static Actuator</li> </ul>
7	Compaction Tester <ul style="list-style-type: none"> <li>Load cell 100kN</li> <li>30Hz, ±1.85mm at 100kN</li> </ul>
8	Large sieve analysis tester <ul style="list-style-type: none"> <li>Sieve Sizes : 2mm, 4.75mm, 9.5mm, 19mm, 26.5mm, 37.5mm, 53mm, 75mm, 90mm</li> </ul>
9	Frozen Soil & Gravel Triaxial System <ul style="list-style-type: none"> <li>-15°C ~ +80°C</li> <li>Cell Size 700Ø×1200H</li> </ul>
10	Intermediate Principal Stress Control Test <ul style="list-style-type: none"> <li>사각공시체 300×300×600, 300×171×600</li> <li>중간주응력 제어 : 30ton Stroke ±50mm, ±2.7mm at 2Hz Hydraulic Actuator 2EA</li> </ul>
11	Test preparation system <ul style="list-style-type: none"> <li>Air compressor/vacuum Pump</li> <li>탈기수 제조장치</li> <li>헬륨가스 공급장치</li> <li>이산화탄소 가스 탱크</li> </ul>

Table 2. Physical properties of parent rock

시료번호 Sample I.D.	건조밀도 Bulk Density (kN/m <sup>3</sup> )	비중 Specific Gravity	공극률 Porosity (%)	흡수율 Absorption (%)	초음파속도 Ultrasonic Velocity (m/s)		압축강도 UCS (MPa)	점하중강도 q <sub>ti</sub> (MPa)
					P파	S파		
S-1	25.53	2.61	1.26	0.48	4,365	2,817	164.5	167.52
S-2	25.52	2.62	0.98	0.37	4,756	3,123	169.9	145.20
S-3	25.56	2.62	0.58	0.22	4,578	2,866	173.1	146.16
Ave	25.53	2.62	0.94	0.36	4,566	2,935	169.2	153.00

### 3. 도상자갈의 정적삼축압축시험

삼축압축시험장비는 라텍스 재질의 멤브레인을 매개로 시험편에 구속압을 가하고 이어 시험목적에 맞는 정/동적 축하중을 가하는 것이 전형적인 시험방법이다. 또한 시험은 공시체 직경의 1/5-1/6의 최대 입경을 갖는 시료에 대해 합리적으로 실험이 가능하며, 단부효과를 최소화하기 위해 시험시험편의 높이는 직경의 2배 이상이 필요하다[5]. 따라서 본 연구에서 사용된 도상자갈의 최대입경이 63mm 이하인 것으로 고려하여 직경 300mm 공시체의 실험이 합리적인 것으로 판단할 수 있다.

#### 3.1 시험 재료

본 실험에 사용한 재료는 철도 현장에 공급되는 도상자갈로서 암석학적으로는 편마암(gneiss)로 분류되며 Fig. 6 과 같은 입도분포를 보였다. 시험 기준들([6], [7], [8], [9])에 따라 수행되어 얻어진 암석입자에 대한 비중, 흡수율, 공극률, 탄성파속도, 압축강도, 점하중강도 등 기본 물성은 Table 2와 같으며, 실험에 사용한 공시체는 직경 300mm, 높이 620mm로 부피는 0.0438m<sup>3</sup>에 건조무게는 64kg으로 밀도는 14.6kN/m<sup>3</sup>로 균일하게 제작되었다(Fig. 7).

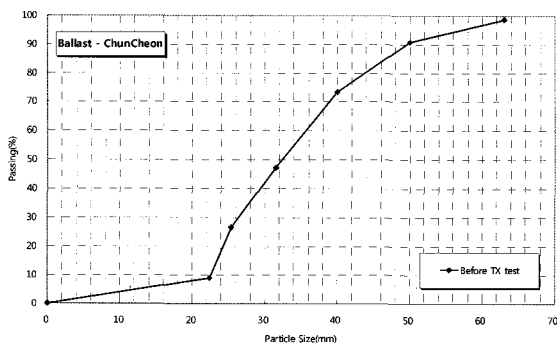
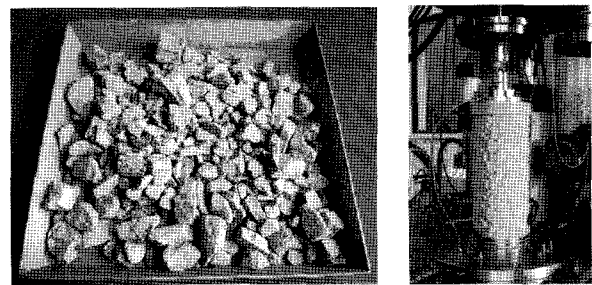


Fig. 6. Particle distribution curve for test ballast



(a) Ballast materials (b) Testing specimen

Fig. 7. Test ballast materials and Testing specimen

#### 3.2 시험종류 및 방법

전통적인 삼축압축시험은 구속압을 삼축셀에 채워진 물로 가압하고 제어하는 것이 일반적이다. 본 연구에서 구축된 장비도 포화시료의 실험이나 고압의 구속압이 요구되는 대부분의 경우에는 구속압을 물로 가압할 수 있도록 하였다. 그러나 본 실험 대상인 도상자갈의 경우 거의 모든 현장에서 대기에 노출된 상태로 포화조건이 아니며 20-80 kPa 정도의 낮은 구속압 조건에서 거동([10])하므로 본 실험에서는 실험의 효율성을 높이기 위해 구속압을 진공압(vacuum)으로 제어하여 실험을 수행하였다. 본 실험은 현장 도상자갈의 조건을 모사한 요소시험으로서 건조상태에서 유효구속압을 진공압(vacuum)으로 30kPa, 55kPa, 80 kPa 세가지 조건 하에서 실험을 수행하여 그 특성을 평가하였다.

#### 3.3 시험결과

유효구속응력 30kPa, 55kPa, 80kPa에서 수행된 삼축 압축시험의 응력-변형률 그래프는 Fig. 8과 같다. 예상할 수 있는 바와 같이 축차응력은 구속응력의 증가와 함께 증가하는 경향을 보였으며, 축변형률 1% 이내의 초기변형 계수( $E = \frac{\Delta(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{\Delta\epsilon_a}$ )도 Fig. 9와 같이 구속응력에 따라

증가하는 것을 확인할 수 있었다. Indraratna 등(1998)의 현무암계열의 도상자갈에 대한 결과([1])와 비교했을 때, 작은 변형계수의 경향을 보이고 있으며, 이는 시편의 단위중량 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 본 실험의 경우 정적삼축압축시험결과에서 1% 변형률 수준의 변형계수를 계산한 것으로 실제 운영 중에 발생하는 미소한 변형률 수준에서의 변형계수와는 또 다른 차이를 보일 수 있다. 따라서 추후에는 시료 단부의 변형률 오차(bedding error)를 제거하고 다양한 변형률 수준에서의 시험을 위해 시료 중간 부분의 변형을 측정하여 보다 합리적인 설계변수의 적용이 가능하도록 할 필요가 있다.

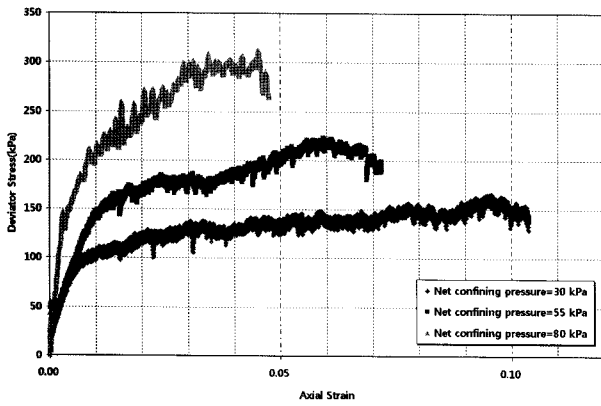


Fig. 8. Stress-strain curves at different confining pressures

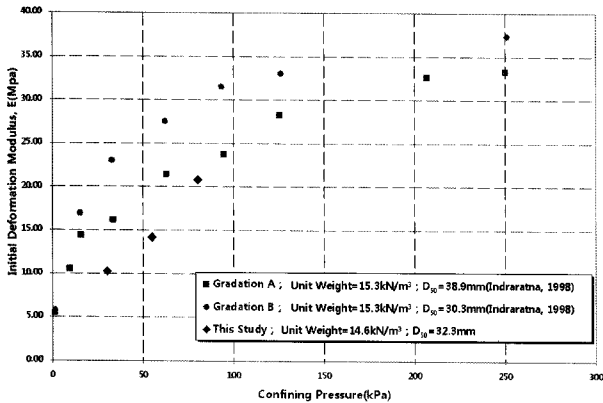


Fig. 9. Deformation modulus at different confining pressures

3종류의 구속압에 대해 수행한 실험에서 구속응력과 전단강도와의 관계는 전형적인 모어원(Mohr circles)으로 Fig. 10과 같이 표현되며, 3개의 실험에서 얻어지는 강도정수는  $c = 20.4(kPa)$ ,  $\phi' = 35.06^\circ$  로 얻어졌다. 그러나 자갈의 재료적 특성을 고려하여 점착력을 0으로 고정하고 구속압별 내부마찰각을 평가하는 것이 보다 합리적인 전단강도

일 것으로 판단되며, Fig. 11과 같이 구속압이 증가함에 따라 감소하는 특성을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 암성토(rockfill)재료에 대해 수행되었던 많은 연구들([11], [12], [13])에서도 확인할 수 있었으며, 특히 낮은 구속압력 수준이나 입도분포가 균일(uniform)할수록 그 경향은 더욱 뚜렷한 것으로 나타나고 있다.

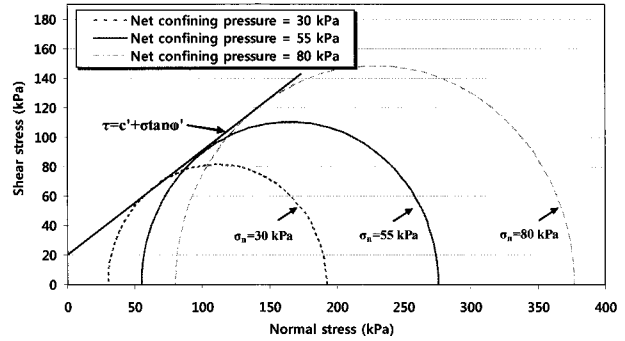


Fig. 10. Mohr-Circle and failure envelope

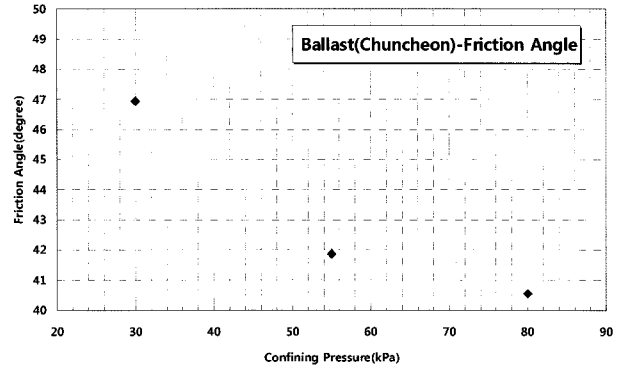
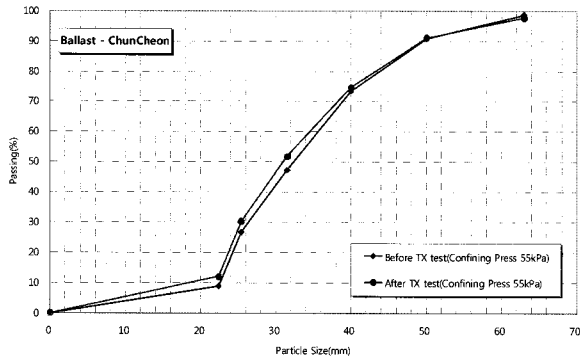
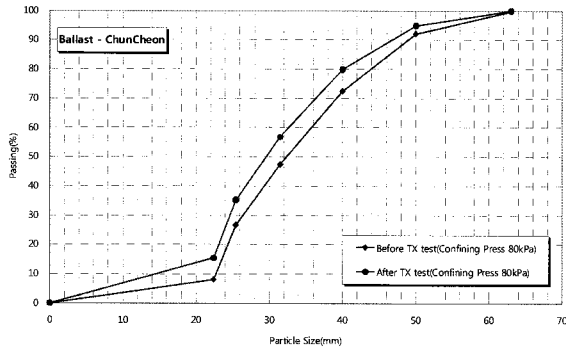


Fig. 11. Peak friction angles

입자의 파쇄 정도는 도상자갈재료의 강도나 변형에 영향을 주게 되고, 또한 궤도의 전반적인 거동에 영향을 주게 된다[14]. 초기에는 입자간의 접촉점에서 부분적인 파쇄가 발생하게 되고 뒤이어 하중의 증가에 의해 약한 입자의 완전파쇄로 이어지게 된다. 이러한 입자파쇄는 궤도의 부등침하와 측방변형을 유발할 수도 있으며, 장기적으로 지속되면서 자갈도상의 간극률을 감소시키고 세립자의 축적으로 강우 시 비배수 파괴 조건을 야기할 수 있다. 입자파쇄는 보다 큰 입자들이 높은 구속압을 받을 때 더 크게 발생된다[15]. 이번 실험에서도 다짐 전 입도와 구속압별 삼축압축시험 후 입자파쇄의 영향을 반영한 입도를 검토한 결과 다음 Fig. 12와 같이 높은 구속압 하에서의 압축시험 시 더 많은 입자파쇄로 인한 세립화 경향이 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.



(a) PSD before and after test at confining pressure 55kPa



(b) PSD before and after test at confining pressure 80kPa

Fig. 12. Degradation before and after test

입자파쇄는 도상자갈의 거동에 중요한 영향인자이며, 이러한 파쇄의 정도는 모암의 압축강도, 구속압, 초기다짐도 등 여러 가지 조건의 영향을 받게 된다. 이를 반영하여 Indraratna 등(1998)은 비선형적인 전단강도 포락선을 제안한 바 있다.

$$\frac{\tau_f}{\sigma_c} = m \left( \frac{\sigma_n}{\sigma_c} \right)^n \quad (1)$$

여기서  $\sigma_c$ 는 모암의 점하중시험의 일축압축강도이고,  $m$ ,  $n$ 은 재료의 특성을 반영하는 상수로서 낮은 구속압 단계의 하한계선으로  $m=0.16$ ,  $n=0.73$ 을, 높은 구속압단계의 상한계선으로  $m=0.29$ ,  $n=0.73$ 을 제안하였다[15].

본 연구의 실험도 앞서 언급된 바와 같이 100kPa 이하의 낮은 구속압단계에서 수행된 자료로서, Table 2의 암석 점하중 일축압축강도 실험결과 153,000(kPa)를 고려하여 제안된 하한계 상수에 근접한  $m=0.13$ ,  $n=0.73$ 으로 산정하여 예측하였을 때 실험결과를 비교적 근접하게 재현하였다(Fig. 13). 즉, 일반적으로 사용되는 암석재료들을 암석자체의 강도로 분류하고 이에 대한 대형삼축압축시험에 대한 합리적인 자료가 축적되어 이와 같은 수식과 상수값이 제시된다면 모암의 압축강도와 적용 대상의 구속압 수준으로

전단강도의 파괴포락선을 손쉽게 예측할 수 있어 도상 및 노반의 적용가능 기준으로 활용할 수 있을 것이다.

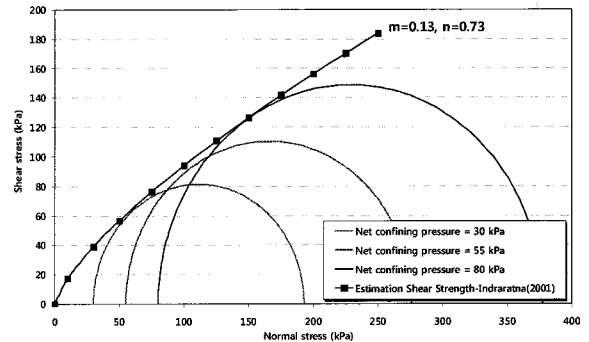


Fig. 13. Non-linear failure envelope

#### 4. 결론

본 연구에서는 철도, 도로 등 대형 성토지반구조물의 주요 지반재료인 입경이 큰 조립재료에 대해 전단강도, 변형계수, 응력-변형 거동과 같은 지반공학적 설계정수를 평가산정할 수 있는 대형삼축압축시험장비를 구축하고, 이를 활용한 도상자갈재료에 대한 정적삼축압축시험 결과를 통해 그 의미와 적용 가능성을 제시하였다.

- 1) 본 연구에서 구축한 장비는 최대입경 100mm의 조립 재료까지 실제 입도로 시험이 가능하도록 공시체 직경을 500mm, 300mm, 150mm로 다양화 하였다. 또한 중간응력조건, 평면변형을 조건,  $K_0$  응력상태, 온도(동결/융해) 변화 등 보다 현실적인 현장 구속 및 환경 조건 하에서 실험이 가능하도록 설계 구축하였다.
- 2) 도상자갈과 같이 거의 지표면에 설치되어 포화의 가능성이 적고, 구속압이 낮은 경우에는 진공압(vacuum)으로 구속압을 제어하는 방식으로 효과적인 실험이 가능함을 확인할 수 있었다. 그러나 이러한 실험방식의 경우 시편의 부피변화 측정을 위해서는 별도의 장치가 추가되어야 할 것이다.
- 3) 유효구속응력 30kPa, 55kPa, 80kPa에서 수행된 삼축 압축시험에서 축변형률 1% 이내의 초기변형계수도 구속응력과 단위중량에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있었는데, 여기서 궤도 주변 자갈의 확실한 다짐의 필요성을 다시 확인할 수 있었다.
- 4) 도상자갈 재료의 삼축압축시험 결과로 구속압별 전단강도, 변형계수, 입자파쇄 영향 등의 합리적인 결과와 경향을 확인하였으며, 모암의 입자강도, 구속압 등의 영향을 고려하여 전단강도 포락선을 예측할 수 있는 Indraratna 식에 적합한 재료 상수를 산정( $m=0.13$ ,

$n=0.73$ ), 적용해 실험 결과를 근접하게 재현해낼 수 있었다.

- 5) 본 논문에서 수행된 정적압축시험의 목적은 전단강도 등 정적거동 평가를 위한 목적 이외에도 반복삼축 시험에서 수행할 수 있는 최대 응력수준의 확인과 높은 변형률 수준에서의 강도, 강성의 비교, 검토에도 활용될 수 있을 것이다.
- 6) 이번 연구는 정적삼축압축시험에 따른 입자파쇄의 경향만을 언급하였으나, 실제 현장에서는 반복적인 열차하중에 의해 거동하게 된다. 따라서 보다 경제적이고 안전한 도상자갈의 유지관리를 위한 가이드라인 제시를 위해서는 실제 열차하중을 모사한 반복삼축압축시험으로 자갈의 입자파쇄 대한 지속적인 실험과 자료 축적이 필요할 것이다.
- 7) 도상자갈 및 압성토재료의 기본 입자 및 광물특성 등과 지속적인 대형삼축압축실험 결과의 축적으로 향후 도상 및 노반 설계 시공에 열차운행 및 각종 영향 요소의 조건에 따라 적용 가능한 재료범위를 제시하여 보다 안전하고 경제적인 시공과 유지보수에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

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

## 참고 문헌

1. B. Indraratna, D. L. Ionescu, and H. D. Christie (1998), “Shear behavior of railway ballast based on large-scale triaxial tests,” *J. of Geotech. and Geoenvironmental Eng.* ASCE May Vol. 124, No. 5, pp. 439-449.
2. 신동훈, 오병현, 박한규, 박성진, 황성춘 (2000), “조립재료의 변형-강도 특성에 대하여(1)-대형삼축시험장치의 개발,” 한국지반공학회 2000 가을 학술발표회 논문집, pp. 311-318.
3. G. P. Raymond and J. R. Davies (1978), “Triaxial test on dolomite railroad ballast,” *J. Soil Mech. and Found. Div.*, ASCE, Vol. 104, No. 6, pp. 737-751.
4. E. Schultze (1961), “Elastic properties of ballast,” *Proc., 5th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, Dunod Publishers, Paris, France, pp. 323-327.
5. ASTM D5311-92 Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil, *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
6. ASTM C97/C97M-09 Standard Test Methods for Absorption and Bulk Specific Gravity of Dimension Stone, *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
7. ASTM D2845-08 Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock, *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
8. ASTM D7012-07 Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures, *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
9. ASTM D5731-08 Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications, *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
10. F. S. Adam, G. Louis, and W. Andy Take (2009), “A large-scale triaxial apparatus for prototype railroad ballast testing,” *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 32, No. 4, pp. 1-8.
11. R. J. Marsal (1967), “Large scale testing of Rockfill materials,” *J. Soil Mech. and Found. Div.*, ASCE, Vol. 93, No. 2, pp. 27-43.
12. J. A. Charles and K. S. Watts (1980), “The influence of confining pressure on the shear strength of compacted rockfill,” *Geotechnique*, London, U.K., Vol. 30, No. 4, pp. 353-367.
13. B. Indraratna, L. S. L. Wijewardena, and A. S. Balasubramaniam (1993), “Large-Scale triaxial testing of greywacke rockfill,” *Geotechnique*, London, U.K., Vol. 43, No. 1, pp. 37-51.
14. 이춘길, 김남홍, 우병구, 이상욱 (2008), “고속선 도상자갈의 파쇄특성에 관한 연구,” 한국철도학회논문집, 제 11권, 제 4호, pp. 384-389.
15. B. Indraratna, D. L. Ionescu, W. Salim, and H. D. Christie (2001), “Stress-Strain and degradation behaviour of railway ballast under static and dynamic loading, based on large-scale triaxial testing,” *Proceedings of the 15th International Conference in Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 3, pp. 2093-2099.

접수일(2009년 12월 21일), 수정일(2010년 2월 7일),  
게재확정일(2010년 2월 22일)