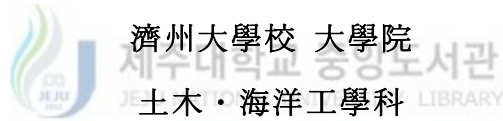


碩士學位論文

송이(Scoria)의 거동특성 및 예측에 관한 연구



邵 在 觀

2002年 6月

송이(Scoria)의 거동특성 및 예측에 관한 연구

指導教授 南 正 萬

邵 在 觀

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



邵在觀의 工學 碩士學位 論文을 認准함

심사위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

濟州大學校 大學院

2002年 6月

A Study on the Characteristics and Prediction of the Behavior of Scorias

Jae-Kwan So

(Supervised by Professor Jung-Man Nam)

A thesis submitted in partial fulfillment of the
requirements for the degree of Master of
Engineering

2002. 6.

This thesis has been examined and approved.

Department of Civil & Ocean Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

목 차	i
Table Contents	iv
Figure Contents	v
Summary	xi
I. 서 론	1
1. 연구배경	1
2. 연구목적	2
II. 제주도내 송이의 분포	3
1. 송이의 정의	3
2. 제주도내 송이의 분포	4
III. 구성방정식	6
1. 소성이론의 기본개념	6
2. 등방단일경화구성모델	8
1) 탄성거동	11
2) 파괴규준	14
3) 소성 Potential 함수	15
4) 항복함수와 일경화법칙	20
(1) 계수 h의 결정방법	26
(2) 변수 q의 결정방법	26

IV. 삼축압축시험	29
1. 사용시료특성	29
1) 암회색송이	30
2) 적갈색송이	32
3) 황갈색송이	34
2. 시험방법	36
1) 시험장비	36
2) 공시체의 제작	38
3. 등방압축시험	40
4. 삼축압축시험	42
V. 시험결과고찰	43
1. 등방압축시험결과	43
2. 구속응력에 따른 거동특성	49
3. 상대밀도에 따른 거동특성	49
4. 색깔에 따른 강도특성	58
5. 입자의 파쇄특성	66
VI. 거동예측	72
1. 단일경화구성모델의 계수결정	72
1) Loose한 경우	72
(1) 탄성거동	72
(2) 파괴규준	72
(3) 소성 Potential 함수	75
(4) 항복함수와 일경화법칙	76
2) Medium한 경우	76
(1) 탄성거동	76

(2) 파괴규준	76
(3) 소성 Potential 함수	79
(4) 항복함수와 일경화법칙	80
1) Dense한 경우	80
(1) 탄성거동	80
(2) 파괴규준	80
(3) 소성 Potential 함수	83
(4) 항복함수와 일경화법칙	84
2. 거동예측	85
VII. 결론	96
VIII. 참고문헌	98



Table Contents

Table 4.1	Chemical Composition of Scorias	30
Table 4.2	Properties of Dark-Grey Scoria	32
Table 4.3	Properties of Reddish-Brown Scoria	34
Table 4.4	Properties of Yellow-Brown Scoria	36
Table 4.5	Testing Contents	40
Table 5.1	Friction Angle of Scorias	65
Table 5.2	Effect of Angularity and Grading on Peak Friction Angle and Typical Value of Drained Angle of Friction for Sand	66
Table 6.1	Summary of Parameter Value for Scoria(Dark-Grey)	84



Figure Contents

Fig 2.1	Colorific Distribution of Scorias in Jeju Island	5
Fig 3.1	Patterns of Yield Surface for Isotropic Soils stress Path for Conventional Triaxial Comparison Test(AC) (Lade, Nelson & Ito, 1987)	9
Fig 3.2	Wedge-Shaped Region of Stress Paths With Decreasing Stresses in Which Soils With Nonassociated Flow maybe Unstable during Hardening inside Failure Surface (Lade, Nelson & Ito 1987)	10
Fig 3.3	Contours of Constant Young's Modulus Shown in (a)Triaxial Plane and (b)Octahedral Plane(Lade, 1988)	12
Fig 3.4	Ellipsoidal Surface along which Young's Modulus is Constant according to Equation(3.9)(Lade, 1988)	12
Fig 3.5	Young's Modulus and Slope of Volume Changes Curve for Determination of Poisson's Ratio from Unloading-Reloading Cycle in Conventional Triaxial Compression Test on Loose SantaMonica Beach Sand(Lade,1988)	13
Fig 3.6	Determination of Parameter for Young's Modulus for Medium Dense Sacramento River Sand($e_i=0.71$, $D_r=78\%$)(Lade, 1988)	15
Fig 3.7	Characteristics of Failure Surface Shown in Principal Stress Space. Traces of Failure Surface Shown in (a)Triaxial Plane and in (b)Octahedral Plane(Lade, 1990)	16
Fig 3.8	Direction of Incremental Plastic Strain Vectors in Triaxial Plane for (a)Triaxial Compression Tests on Fine Silica Sand	

	and (b)Proportional Loading tests on Sand (Kim & Lade, 1988)	17
Fig 3.9	Directions of Incremental Plastic Strains on Octahedral Plane for Fuji River Sand(Yamada & Ishihara, 1979)	18
Fig 3.10	Determination of Parameter C and P in Hardening Law for Fine Sillica Sand(Lade & Kim, 1988)	21
Fig 3.11	Experimental Data Points and Contour Plastic Work Shown on Triaxial Plane for (a)Fine Silica Sand, and for (b)Undrained Tests on EPK Clay(Lade & Kim, 1988)	22
Fig 3.12	Experimental Data Points and Contours Plastic Work Shown on Octahedral Plane for Fuji River Sand (Yamada & Ishihara, 1979)	24
Fig 3.13	Schematic Illustration of the Proposed Yield Surface in Principal Stress Space(Lade & Kim, 1988)	25
Fig 3.14	Observed and Modeled Relation between S and q for Fine Silica Sand(Lade & Kim, 1988)	27
Fig 4.1	Grain Size Distribution for Dark-Grey Scoria	31
Fig 4.2	Grain Size Distribution for Reddish-Brown Scoria	33
Fig 4.3	Grain Size Distribution for Yellow-Brown Scoria	35
Fig 4.4	Illustration of Triaxial Test	37
Fig 4.5	Illustration of Specimen	39
Fig 4.6	Central Bulging of Specimen during Triaxial Test	41
Fig 5.1	Isotropic Test of Dark-Grey Scorias	44
Fig 5.2	Relation of Isotropic Stress and Axial Strain from Isotropic Test of Dark-Grey Scoria	44

Fig 5.3	Isotropic Test of Scorias($D_r=70\%$)	45
Fig 5.4	Relation of Isotropic Stress and Axial Strain from Isotropic Test of Scorias	46
Fig 5.5	Relation of Isotropic Stress and Calculated Axial Strain from Isotropic Test of Scorias	46
Fig 5.6	Specimen After Isotropic Test(Yellow-Brown Scoria)	47
Fig 5.7	Stress-Strain Behavior for Dark-Grey Scoria($D_r=50\%$)	50
Fig 5.8	Stress-Strain Behavior for Dark-Grey Scoria($D_r=70\%$)	51
Fig 5.9	Stress-Strain Behavior for Dark-Grey Scoria($D_r=85\%$)	52
Fig 5.10	Failure Stress and Confining Pressure(Dark-Grey Scoria)	53
Fig 5.11	Failure Stress and Depth(Dark-Grey Scoria)	53
Fig 5.12	Stress-Strain Behavior for Dark-Grey Scoria($\sigma_3=0.51\text{kg/cm}^2$)	55
Fig 5.13	Stress-Strain Behavior for Dark-Grey Scoria($\sigma_3=1.02\text{kg/cm}^2$)	56
Fig 5.14	Stress-Strain Behavior for Dark-Grey Scoria($\sigma_3=2.04\text{kg/cm}^2$)	57
Fig 5.15	Failure Stress and Relative Density(Dark-Grey Scoria)	58
Fig 5.16	Stress-Strain Behavior for Medium Dense Scorias ($D_r=70\%$, $\sigma_3=0.25\text{kg/cm}^2$)	59
Fig 5.17	Stress-Strain Behavior for Medium Dense Scorias ($D_r=70\%$, $\sigma_3=0.51\text{kg/cm}^2$)	60
Fig 5.18	Stress-Strain Behavior for Medium Dense Scorias ($D_r=70\%$, $\sigma_3=1.02\text{kg/cm}^2$)	61
Fig 5.19	Mohr Circles and Failure Envelope for Triaxial Test of Loose Dark-Grey Scoria($D_r=50\%$)	63
Fig 5.20	Mohr Circles and Failure Envelope for Triaxial Test of Medium Dark-Grey Scoria($D_r=70\%$)	63
Fig 5.21	Mohr Circles and Failure Envelope for Triaxial Test of Dense Dark-Grey Scoria($D_r=85\%$)	64

Fig 5.22	Mohr Circles and Failure Envelope for Triaxial Test of Loose Reddish-Brown Scoria($D_r=70\%$)	64
Fig 5.23	Mohr Circles and Failure Envelope for Triaxial Test of Loose Yellow-Brown Scoria($D_r=70\%$)	65
Fig 5.24	Grain Size Distribution for Dark-Grey Scoria of Loose Density($D_r=50\%$)	67
Fig 5.25	Grain Size Distribution for Dark-Grey Scoria of Medium Density($D_r=70\%$)	67
Fig 5.26	Grain Size Distribution for Dark-Grey Scoria of Dense Density($D_r=85\%$)	68
Fig 5.27	Grain Size Distribution for Reddish-Brown Scoria of Medium Density($D_r=70\%$)	68
Fig 5.28	Grain Size Distribution for Yellow-Brown Scoria of Medium Density($D_r=70\%$)	69
Fig 5.29	Percent Retained on Each Sieve For Yellow-Brown Scoria	70
Fig 6.1	Determination of M and λ for Young's Modulus ($D_r=50\%$, Dark-Grey Scoria)	73
Fig 6.2	Determination of η_1 and m for Failure Criterion ($D_r=50\%$, Dark-Grey Scoria)	73
Fig 6.3	Determination of Ψ_2 and μ for Potential Function ($D_r=50\%$, Dark-Grey Scoria)	74
Fig 6.4	Determination of C and p for Work-Hardening Relation ($D_r=50\%$, Dark-Grey Scoria)	74
Fig 6.5	Determination of α for Yield Criterion ($D_r=50\%$, Dark-Grey Scoria)	75
Fig 6.6	Determination of M and λ for Young's Modulus	

	(Dr=70%, Dark-Grey Scoria)	77
Fig 6.7	Determination of η_1 and m for Failure Criterion (Dr=70%, Dark-Grey Scoria)	77
Fig 6.8	Determination of Ψ_2 and μ for Potential Function (Dr=70%, Dark-Grey Scoria)	78
Fig 6.9	Determination of C and p for Work-Hardening Relation (Dr=70%, Dark-Grey Scoria)	78
Fig 6.10	Determination of a for Yield Criterion (Dr=70%, Dark-Grey Scoria)	79
Fig 6.11	Determination of M and λ for Young's Modulus (Dr=85%, Dark-Grey Scoria)	81
Fig 6.12	Determination of η_1 and m for Failure Criterion (Dr=85%, Dark-Grey Scoria)	81
Fig 6.13	Determination of Ψ_2 and μ for Potential Function (Dr=85%, Dark-Grey Scoria)	82
Fig 6.14	Determination of C and p for Work-Hardening Relation (Dr=85%, Dark-Grey Scoria)	82
Fig 6.15	Determination of a for Yield Criterion (Dr=85%, Dark-Grey Scoria)	83
Fig 6.16	Stress-Strain Behavior Comparison of Predicted and Measured for Dark-Grey Scoria(Dr=50%, $\sigma_3=0.51 \text{ kg/cm}^2$)	86
Fig 6.17	Stress-Strain Behavior Comparison of Predicted and Measured for Dark-Grey Scoria(Dr=50%, $\sigma_3=1.02 \text{ kg/cm}^2$)	87
Fig 6.18	Stress-Strain Behavior Comparison of Predicted and Measured for Dark-Grey Scoria(Dr=50%, $\sigma_3=2.04 \text{ kg/cm}^2$)	88
Fig 6.19	Stress-Strain Behavior Comparison of Predicted and Measured for Dark-Grey Scoria(Dr=70%, $\sigma_3=0.51 \text{ kg/cm}^2$)	89

Fig 6.20	Stress-Strain Behavior Comparison of Predicted and Measured for Dark-Grey Scoria($D_r=70\%$, $\sigma_3=1.02\text{kg/cm}^2$)	90
Fig 6.21	Stress-Strain Behavior Comparison of Predicted and Measured for Dark-Grey Scoria($D_r=70\%$, $\sigma_3=2.04\text{kg/cm}^2$)	91
Fig 6.19	Stress-Strain Behavior Comparison of Predicted and Measured for Dark-Grey Scoria($D_r=85\%$, $\sigma_3=0.51\text{kg/cm}^2$)	92
Fig 6.20	Stress-Strain Behavior Comparison of Predicted and Measured for Dark-Grey Scoria($D_r=85\%$, $\sigma_3=1.02\text{kg/cm}^2$)	93
Fig 6.21	Stress-Strain Behavior Comparison of Predicted and Measured for Dark-Grey Scoria($D_r=85\%$, $\sigma_3=2.04\text{kg/cm}^2$)	94

Summary

Jeju island was formed during the Cenozoic period by multiple volcanic eruptions and is located in the far south of Korean peninsular. The scoria formed with the eruptions is scattered throughout the island. Scoria that is called "Song-I" in Jeju dialect is categorized by its color: reddish-brown, yellow-brown, dark-grey and black. To study the stress-strain behavior of scorias, triaxial compression tests are performed on the scorias with particles size between 0.425 and 2.0mm. In these test, it is investigated in characteristics of scorias such as relative density, crushability, compressibility and shear strength. And the behavior of the dark-grey scoria is predicted by single-hardening constitutive model.

The test results are summarized as follows.

As the relative density increases, the failure strength increases but the failure axial strain at peak decreases. When relative density and confining pressure are increased, it is observed that the failure axial strain for the dense particle increases than that for the medium dense.

During the isotropic test, the volumetric strain was compressed. The test result is that the dark-grey scoria has the lowest compressibility followed by the reddish-brown scoria and yellow-brown scoria at the same relative density and confining pressure. The Yellow-Brown scoria has by far the highest compressibility.

According to the test results, the dark-grey scoria showed relatively high shear strength with low crushability in particles. But the yellow-brown scoria and the reddish-brown scoria observed the low shear strength with high crushability. But the reddish-brown scoria had a little higher strength than the yellow-brown scoria.

The axial strain obtained by using the single-hardening constitutive model was almost equal to that obtained from the test results. The predicted values of volumetric strain were also similar to those of the test results.

Therefore, it is concluded that the single-hardening constitutive model, which is used to make predictions on behavior of dark-grey scoria, is an appropriate constitutive model.



I. 서론

1. 연구배경

제주도는 신생대 제3기~4기에 형성된 화산도로 수십 차례에 걸친 화산분출에 의해 형성되어 지리적으로는 한반도의 최남단에 위치하고 있다. 섬 중앙의 한라산을 중심으로 쉘드 화산체를 이루고 있는 제주도는 동서장축의 길이가 약 74km, 남북 단축의 길이가 약 34km이며, 섬 전체 면적은 1,825km²인 타원모양을 하고 있다. 한라산의 정상부에는 화산활동에 의해 형성된 지름이 약 575 x 400m, 깊이가 100m에 이르는 분화구가 있으며, 돛상의 조면암이 분화구 주변에 관입되어 있다. 또한 제주도 전역에는 소위 오름이라 불리는 360여 개의 분석구가 분포하고 있으며, 한반도의 다른 지역에서는 찾아 볼 수 없는 특색 있는 경관을 이루고 있다. 이와 같은 화산활동으로 형성된 제주도의 지질학적 특성은 육지의 화강토와 많은 차이를 나타내고 있고 건설공사를 수행하기 위한 지반조사나 구조물의 축조를 위한 하부 기초공사가 많은 어려움을 겪고 있다.

현재 제주도는 2002년 월드컵과 국제 자유도시 개발 등을 위해 공항, 항만, 도로 등에서 많은 건설공사가 수행되거나 수행될 예정으로 있다. 제주공항은 계류시설 및 유도도로를 확충할 계획이며 항만시설은 제주항에 20,000톤급 선박이 정박할 수 있으며, 80,000톤급 크루즈 접안시설 계획이 예정되어 있다. 도로신설 및 확장계획으로는 2011년까지 총 658km의 도로를 신설·확장할 계획이다.

위와 같이 제주도의 토목공사는 과거보다 대형화되는 경향이다. 그러나 현장에서는 제주도의 특수한 지질학적 특성에 의해 공사수행에 많은 시행착오를 겪고 있으며, 이들 지반 특성에 대한 정리가 매우 시급한 실정이라 할 수 있다.

2. 연구목적

제주도의 지층은 반복된 화산활동과 주위의 기생화산에 의하여 암반층과 화산쇄설층이 반복하여 나타나게 되고, 이러한 지층은 화산폭발시 마그마의 주성분이나 주변상황에 따라 각기 물리·화학적 특성을 달리하고 있다. 특히 암반층 사이에 협재되어 있는 화산쇄설물 즉 ‘송이’는 그 색상에 따라 황갈색, 적갈색, 암회색 및 흑색의 크게 네가지로 자세히 분류하여 보면 적갈색송이 내에 암회색이나 흑색송이가 소량 내포되어 있으며 그 양도 위치에 따라 다르게 나타나고 있다. 따라서 제주도 전역에 널리 분포되어 있는 송이는 화산의 분출시기나 색상에 따라 성질을 다르게 나타내고 있다.

본 연구는 이와 같은 화산쇄설물(송이)에 대한 공학적 특성을 규명하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 암회색송이, 적갈색송이 및 황갈색송이에 대한 물성시험을 수행하고 송이의 강도 및 거동 특성을 조사하기 위하여 이들에 대한 삼축압축시험을 수행하여, 송이의 색상에 따른 전단특성, 입자의 파쇄, 밀도에 따른 영향, 압축성 및 변형특성에 대해 살펴보고자 한다.

또한 지반에 하중을 가하면 응력의 상태에 따라 변형이 발생한다. 이러한 지반의 거동을 해석하고 그 지반의 응력-변형특성과 파괴시의 응력상태를 명확하게 파악하기 위해 흙의 구성모델이 필요하게 된다. 구성모델, 즉 구성방정식은 응력-변형률의 관계를 표현하는 수학적인 표현식이다. 금속재료와 같은 물질은 공장에서 생산된 것으로 입자가 균일하고 탄성체적인 거동을 한다. 그러나 토목공사에서 우리가 접하는 지반이란 삼상체이고 다광물조합체로서 복잡한 입자구조를 갖는다. 실제공사중 문제의 해를 얻으려면 기본방정식을 표현하는 구체적 표현식과 경계조건 및 초기조건을 제기하여야 한다. 이것은 실제 공학적 문제를 물리적 모델로 유도하고 이를 진일보시켜 수학적 모델로 해석하는 과정이다. 그리하여 실험결과를 이용하여 송이의 거동을 예측하여 보고자 한다. 예측에 사용한 구성모델로는 단일경화구성모델(Single-Hardening Constitutive Model)을 사용하였다. 실험치와 예측치를 비교하여 모델에 대한 정확도 및 개선방안에 관하여 보고자 한다. 송이의 거동을 예측함으로써 지반내에 송이의 거동을 규명할 수 있을 것이다.

II. 제주도내 송이의 분포

1. 송이의 정의

화산분출물 중 다공질이며 암색(검정색·적갈색·황갈색·암회색 등)인 암괴(岩塊)로 암재라 한다. 마그마가 대기 중으로 방출되어 그 속의 휘발성 성분이 빠져나가 많은 기공(氣孔)이 생긴 것으로 부석(浮石)보다 다소 무겁고, 염기성 또는 중성의 마그마에서 유래된 것을 스킨리아(scoria)라 한다. 이러한 암재를 제주도 방언으로 송이라 한다.

한라산 화산체의 국부적인 지형의 특징은 중심 화산의 활동이 정지된 후 그 주변의 틈을 이용하여 분출 생성된 360여개의 기생화산과 깊은 관련이 있다. 제주도에는 기생화산이 널리 분포되어 있으며 특히 장축과 일치하는 방향으로 집중적으로 배열되어 있고 제주도에서는 이를 “오름”이라 한다. 이러한 기생화산은 현무암추(Basalt cone)와 분석구(Cinder cone)의 두 종류로 크게 분류할 수 있으며, 전자는 성산층 및 화순층 퇴적기에 형성된 화산구(Volcanic cone)로서 10여개에 불과하고 대부분은 후기 화산활동 후에 형성된 분석구이다.

화산의 화구로부터 분출되는 암편과 화산회를 총칭하여 화산쇄설물이라고 하는데, 그 중 직경이 32mm 이상인 것이 화산암괴(Volcanic block)라 하며, 이 중 어느 정도 둥글거나 방추형으로 생긴 것을 화산탄(Volcanic bomb)이라고 하며 이는 용암이 공중에서 회전하면서 냉각되어 만들어진 것이다. 모양이 불규칙하고 직경이 4 ~ 32mm 사이에 있는 것을 화산력(lapilli) 또는 분석(cinder)이라고 하고, 4mm 이하의 세편을 화산회(Volcanic ash), 0.25mm 이하의 가루를 화산진(Volcanic dust)이라 하며 이러한 화산쇄설물이 낙하하여 퇴적되어 있는 층을 Scoria층이라 한다. 스킨리아로 구성된 분석구는 분출 퇴적 범위는 수 km이며, 분화구에서 3km 지점에는 1cm 크기의 스킨리아가 10cm 두께로 층을 이룬다고 한다. 스킨리아로 구성된 분석구 분포지역은 스킨리아의 물성에 좌우된다. 스킨리아는 기공의 함량의 높고 각력상으로 산출된다. 이러한 조립질층 상위에는 미립질 스킨리아가 협재되어 층리를 형성하고 있다. 분석구 가까이 개설되어

있는 구조물(도로, 건물)은 지하에 분포해 있는 스코리아층의 물성으로 인하여 지반이 불안정하게 되기 쉬우며 이에 대한 면밀한 검토가 필요하다.

2. 제주도내 송이의 분포

송이는 색상에 있어서 적갈색(Redish-Brown), 황갈색(Yellow-Brown), 검정색(Black) 및 암회색(Dark-Grey)으로 크게 구별할 수 있으며, 이 장에서는 우선 이러한 송이의 제주도내 분포를 지역별로 분류하여 화학적 성분과 물리적 특성 등을 검토하여 보고자 한다. 그리고 이들의 공학적 특성을 검토하기 위하여 제주도 가장 많이 분포하고 있는 황갈색, 적갈색 및 암회색 송이를 채취하였다. 황갈색송이는 북제주군 구좌읍 송당리 소재의 체오름에서 채취하였고 적갈색송이는 북제주군 구좌읍 한동리 소재의 둔지봉에서 채취하였다. 암회색송이는 남제주군 안덕면 동광리 소재 서부산업도로 개설공사 4공구 현장에서 채취하였다. 송이는 원 지반이 크고 많은 기공을 가지고 있는 연속체인 덩어리로 되어있어 채취 시 다양한 입도로 분해되므로 흙으로 분류되기에는 다소 문제를 내포하고 있으나, 흙으로 간주하여 이에 대한 물리 화학적 특성 등에 대한 조사를 실시하고, 대형 직접전단시험기를 이용하여 송이의 강도특성, 종류에 따른 특성, 입자의 파쇄특성, 밀도에 따른 강도 특성, 함수비 변화에 따른 분석 등에 대해 고찰하고자 한다.

제주도내 송이의 분포를 조사하기 위하여 일부는 채취하였으며, 일부는 다른 문헌(윤정수, 1995)을 참고하여 송이에 대하여 검토하였다. 이들 자료는 대부분 북제주군 지역을 위주로 하였지만 Fig 2.1에서 보는 바와 같이 일반적으로 적갈색 송이가 20개 지역으로 가장 많이 분포하는 것으로 나타났으며 이들은 특히 중산간 지역에 많이 있는 것으로 나타났다. 다음으로는 황갈색 송이가 9개 지역, 흑색 송이가 5개 지역 그리고 암회색 송이가 6개 지역에 분포하는 것으로 나타났으며 암회색 송이는 주로 해안 지역에서 분포하고 있는 것으로 나타나고 있다.

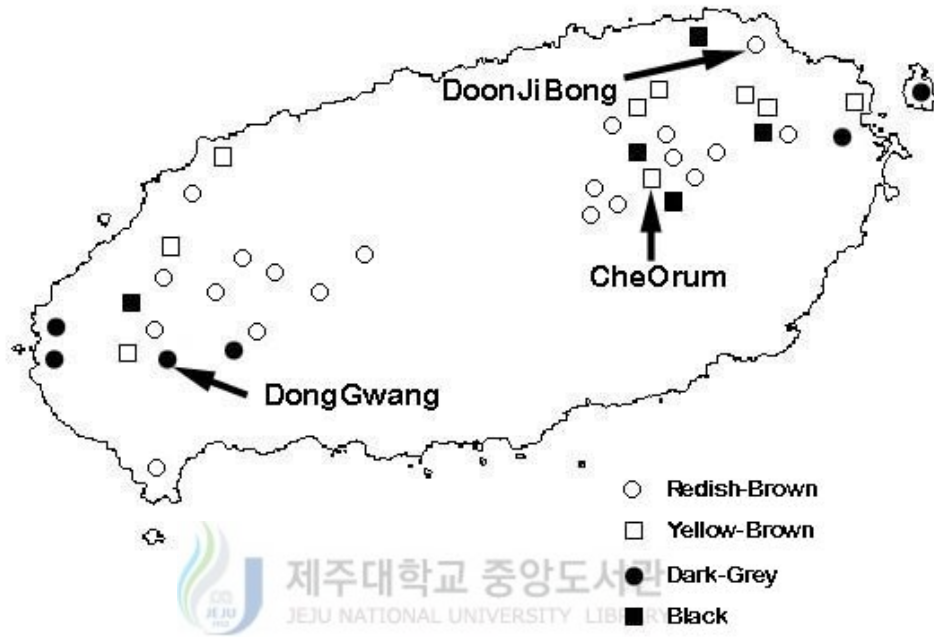


Fig 2.1 Colorific Distribution of Scorias in Jeju Island(윤정수, 1955)

Ⅲ. 구성방정식

소성이론에서는 물체에 외력이 작용하여 변형이 발생하면 이들의 회복성 여부에 따라 탄성변형과 소성변형으로 구분한다. 소성이론이란 탄성역학에서와 같이 물체에 발생한 소성변형을 수학적으로 근사시켜 놓은 것이다. 이러한 소성이론은 Hill, Mendelson, Martin 등에 의해 금속에 대한 기본적인 이론연구가 많이 이루어 졌으며 근래 흙에서의 소성이론에 대한 중요성도 Chen & Baladi(1985), Desai & Siriwardane(1980), Chen & Mizuno(1990) 등에 의해 강조된 바 있다.

소성이론의 공학적 연구는 1773년 Coulomb에 의해 흙의 항복에 대한 규준이 만들어진 이래 실질적인 연구는 1864년 Tresca에 의해 시작되었다. 그러나 이러한 소성이론의 연구는 Tresca에 의해 제안된 이래 20세기 중반까지 금속분야에서 많은 연구가 이루어졌으며 흙에 대한 소성이론의 적용은 Drucker & Prager(1952), Drucker, Gibson & Henkel(1955) 등에 의해 이루어 졌다고 할 수 있다. 또한 처음으로 제안된 첫 번째 흙의 구성모델은 Roscoe, Schofield & Worth(1958)에 의해 제안된 Cam Clay 모델을 들 수 있으며 근래에는 많은 탄소성 모델들이 제안 개발되고 있는 실정이다.

1. 소성이론의 기본개념

소성재료에 대한 변형은 회복이 가능한 탄성변형과 회복이 불가능한 소성변형의 합으로 고려할 수 있다. 수학적인 관점에서 살펴보면 소성변형은 응력의 상태가 항복면상에 있거나 응력벡터가 항복면 바깥쪽으로 향하고 있을 때 가능한 것이다. 따라서, 항복면이란 소성변형이 발생하지 않는 응력상태의 경계면을 응력공간에 나타낸 것이라 할 수 있으며 이를 식으로 표현하면 식(3.1)과 같다.

$$f_p(\sigma, k) = 0 \quad (3.1)$$

여기서, σ 는 응력벡터, k 는 응력경화를 나타내는 변수이다. Prager는 식

(3.1)을 이용하여 하중을 다음과 같이 분류하였다.

$$df_p \begin{pmatrix} > 0 : \text{Loading} \\ = 0 : \text{Unloading} \\ < 0 : \text{Reloading} \end{pmatrix}$$

일반적으로 소성변형을 설명하기 위해 일경화의 개념을 많이 사용한다. 이러한 경화의 기본적인 개념은 Druker의 가설로부터 유도되며 이는 소성일증분을 이용하여 다음과 같이 나타내어진다.

$$d^2 W_p = \dot{\epsilon}_{ij} \cdot \dot{\epsilon}_{ij}^p \geq 0 \quad (3.2)$$

$$dW_p - dW_p^* = (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^*) \dot{\epsilon}_{ij}^* \geq 0 \quad (3.3)$$

여기서 $\dot{\sigma}_{ij}$ 는 소성변형률증분을 일으키는 σ_{ij} 에서의 응력증분이고, σ_{ij} 는 항복 면상에 위치하는 응력상태이고 σ_{ij}^* 는 항복면 내부에 위치하는 응력상태이다. 식(3.2)은 일반적으로 Druker의 제1가설로 간주되며 이는 소성변형률증분의 방향이 항복면에 수직이 되어야 함을 나타내고 있다. 즉, 이것은 항복이 일어나는 항복면이 소성포텐셜면과 일치하고 소성변형률증분이 항복면에 수직인 것을 포함하고 있다. 따라서, Druker의 가설은 관련흐름법칙에 해당하고 금속에서 많이 사용되고 있다. 그리고 식(3.3)은 Druker의 제2가설로서 항복면이 항상 볼록하여야 한다는 것을 나타낸다. 또한 식(3.2)은 안정과 불안정거동을 설명하는데 자주 사용된다. 만약 식(3.2)이 어떤 응력증분상태에서도 만족된다면 이 물질은 무조건 안정하다고 한다. 그리고, 식(3.2)이 응력증분에 따라 구분하여 만족하면 이는 조건적으로 안정한 것이고 모든 응력증분에 대해 만족하지 않으면 이는 완전히 불안정하다고 한다. 또한 식(3.2)이 파괴에서 음이 되면 이를 Instability라고 한다.

Bishop & Hill(1951)과 Hill(1958)은 Druker의 제1가설을 확장하기 위하여 전 응력증분을 이용하여 다음과 같이 제안하였다.

$$d^2 W_p = \dot{\sigma}_{ij} \cdot (\dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p) = \dot{\sigma}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\sigma}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p \geq 0 \quad (3.4)$$

그러나 Morz(1964) 및 Mendel(1964)등은 이러한 가설이 흙에서 더 이상 필요치 않다고 하였다. 그리고 여러 시험결과를 토대로 관련흐름법칙은 인장축으로 과대 산정되고 있으며 소성변형률증분은 항복면에 수직이 아니라는 것이 증명되었다. 따라서, 흙의 구성모델에는 항복면과 소성포텐셜이 구분되는 비관련흐름

법칙이 필요하다.

Fig 3.1은 등방재료에 대한 항복곡면의 한 예를 나타낸 것이며 이러한 항복면은 3차원공간에서 비대칭눈물모양을 하고 있다. 등방재료에 있어서 항복곡면은 Fig 3.1에서와 같이 정수압축에 수직으로 지나고 부드러운 곡선모양을 이루고 있으며 파괴면에 인접한 곳에서는 파괴면과 작은 각을 이루며 교차하는 성질을 가지고 있다. 비관련흐름법칙에 의하면 소성포텐셜면은 항복면과 유사한 모양을 이루고 있으나 조금 다른 형태를 이루고 있다. Lade & Kim(1988, a)에 의하면 이는 비대칭시거모양과 유사하다고 하였다. 그림에서 A점 옆의 빗금친 부분은 대표적인 소성포텐셜면의 한 예라 할 수 있는 지역으로서 이 지역은 식(3.3)의 Druker 제1가설이 만족되지 않는 부분을 나타낸 것이다.

Lade(1989)는 Fig 3.1의 빗금친 부분을 Fig 3.2에서와 같이 보다 상세히 나타내었다. 비관련흐름법칙이 적용되는 어떤 응력점에서의 항복면과 소성포텐셜에 의해 이루어지는 빗금친 부분이 여기에 해당한다. 그리고 이 빗금친 부분은 그림에서와 같이 축차응력과 응력비가 일정한 선이 만드는 영역 내부에 위치한다. 특히 최대축차응력점 아래로 응력경로가 지나는 파괴가 발생하는 비배수시험에서는 식(3.2)과 식(3.1)의 조건을 만족시켜야 하는 관련흐름법칙은 실제로 불안정한 지역을 갖게되어 오류를 범하는 경우가 많다. 이것이 흙에서 비관련흐름법칙이 요구되는 조건이다.

2. 등방단일경화구성모델

일반적으로 시간에 의한 영향을 고려하지 않은 많은 구성모델은 그 거동을 해석하기 위하여 실험에 의한 결과와 탄소성이론을 기본으로 하고 있다. Druker & Prager(1957)에 의해 금속에서의 소성이론을 흙에 확장시킨 이래 흙의 거동을 해석하기 위한 구성모델이 Rescoe & Burland(1968), Dimaggio & Sandler(1971), Lade(1977), Mroz et al. (1981), Desai & Faruque(1984)등에 의해서 개발되어 오고 있다. 본 장에서는 여러 가지 구성모델중 Lade(1990)에 의해 제안된 등방단일경화구성모델(Isotropic Single Hardening Constitutive Model)에 관해 설

명하고자 한다.

이 구성모델은 모래, 점토, 콘크리트, 암 등과 같은 마찰물질에 대해 사용 가능한 흙의 구성식을 여러 가지 실내시험의 결과로부터 유도한 것으로 이 모델은 일경화시 하나의 항복면을 가지는 것과 항복면과 소성 Potential면을 구분하는 비관련흐름법칙을 사용하는 것이 특징이라 할 수 있다. (Kim & Lade 1988 ; Lade & Kim 1988a, 1988b)

어떤 물체에 하중이 작용하여 변형이 발생하면 시간에 의한 영향을 고려하지 않는 경우 일반적으로 이 변형을 탄성변형과 소성변형의 두 가지로 분류하여 식 (3.5)과 같이 나타낸다.

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p \quad (3.5)$$

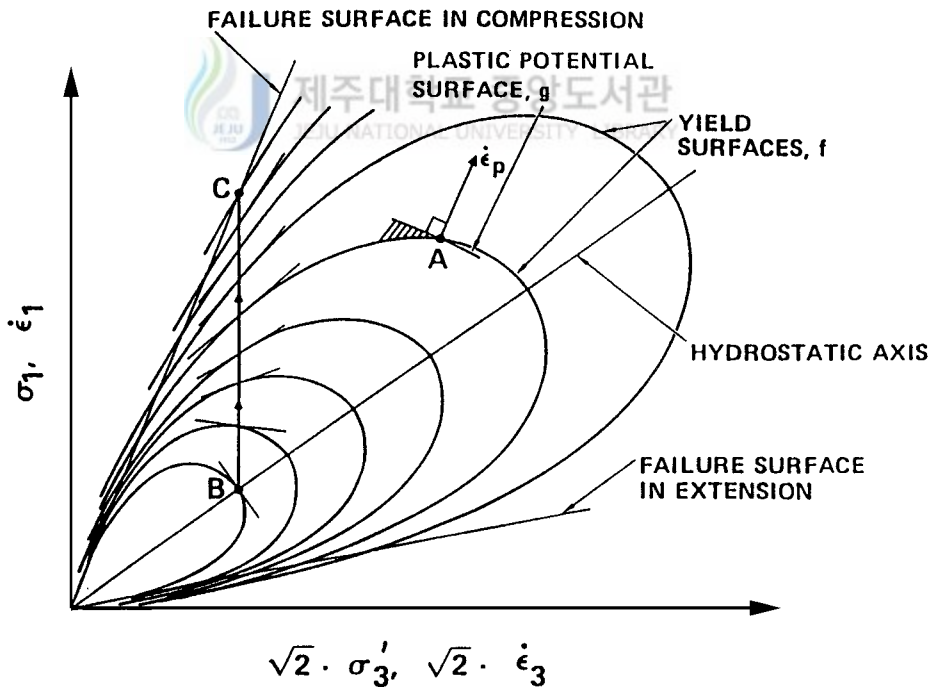


Fig 3.1 Patterns of Yield Surface for Isotropic Soils.
Stress Path for Conventional Triaxial Compression Test(AC)
(Lade, Nelson & Ito, 1987)

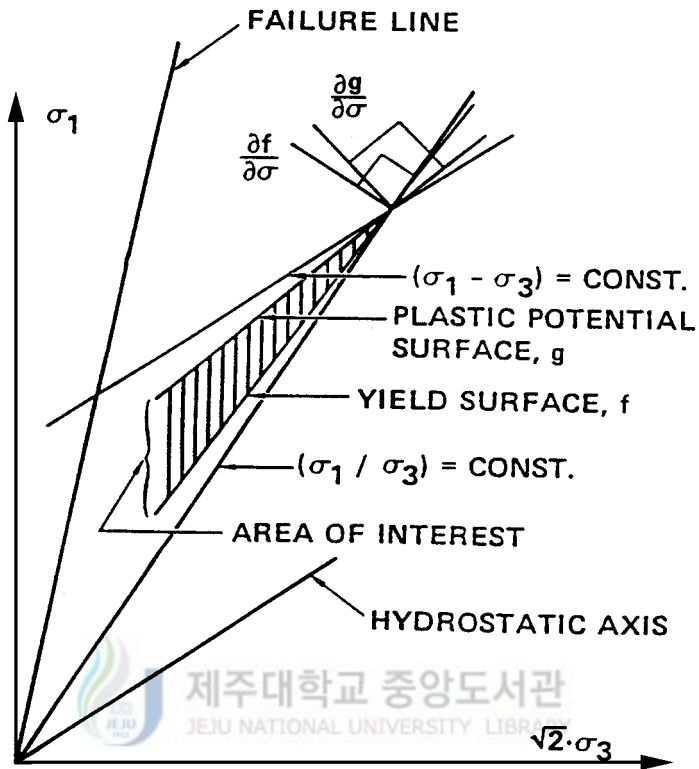


Fig 3.2 Wedge-Shaped Region of Stress Paths with Decreasing Stresses in Which Soils with Nonassociated Flow maybe Unstable during Hardening inside Failure Surface (Lade, Nelson & Ito 1987)

이 모델은 식(3.5)에서 탄성거동은 Hooke의 법칙을 따르고, 소성거동은 파괴 기준과 비관련흐름법칙 및 일경화에 따른 항복기준 등으로 이를 분류하여 응력 불변량의 향으로 나타내었다. 여기서 응력불변량이란 제1응력불변량, 제2응력불변량 및 제3응력불변량으로 구분할 수 있으며 식(3.6)에서 식(3.8)과 같다.

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} I_2 &= -(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1) \\ &= -(\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x) + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$I_3 = \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3$$

$$\begin{aligned}
&= \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z + \tau_{xy} \cdot \tau_{yz} \cdot \tau_{zx} + \tau_{yx} \cdot \tau_{zy} \cdot \tau_{xz} \\
&- (\sigma_x \cdot \tau_{yz} \cdot \tau_{zy} + \sigma_y \cdot \tau_{zx} \cdot \tau_{xz} + \sigma_z \cdot \tau_{xy} \cdot \tau_{yx})
\end{aligned} \tag{3.8}$$

1) 탄성거동

흙의 응력상태에 따른 비선형탄성거동에 대한 등방모델이 Lade & Nelson(1987)과 Lade(1988)에 의해서 소개되었다. 이 모델은 0에서 0.5사이의 Poisson비 값을 가지는 재료에 대해서는 그 거동이 항상 일정한 Poisson비를 가진다는 가정 하에 탄성계수 E를 에너지보존원리를 이용하여 식(3.9)과 같이 나타내었다.

$$E = MP_a \left[\left(\frac{I_1}{p_a} \right)^2 + R \frac{J_2'}{p_a^2} \right] \tag{3.9}$$

여기서

$$R = 6 \cdot \frac{1 + \nu}{1 - 2\nu} \tag{3.10}$$

I_1 은 제1응력불변량이며, J_2' 는 축차응력의 제2불변량으로 식(3.11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_2' = \frac{1}{6} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2] \tag{3.11}$$

여기서, P_a 는 대기압으로 E, I_1 , $\sqrt{J_2'}$ 에 대한 단위를 조절하기 위하여 사용되었으며, 계수 M 과 λ 는 무차원 상수이다.

식(3.9)은 Fig 3.3에서 보는 바와 같이 이를 삼축평면에 도시하였을 시 Poisson비 ν 에 따라 정수압축에 대칭이 되는 타원곡면을 형성하여 $\nu = 0$, $R = 6$ 일 때는 완전한 원을 이루고 Poisson비가 증가할수록 그 모양이 길쭉한 타원 모양으로 변하여 $\nu = 0.5$ 이고 $R = \infty$ 가 되었을 때는 정수압축과 일치하는 직선의 형태를 이루게 된다. 그리고 이 식을 다시 $I_1 = 0$ 인 정팔면체평면에 도시하면, 이것은 삼축평면에서의 정수압축에 수직인 면으로서, ν 에 따른 원의 모양이 나타나게된다.

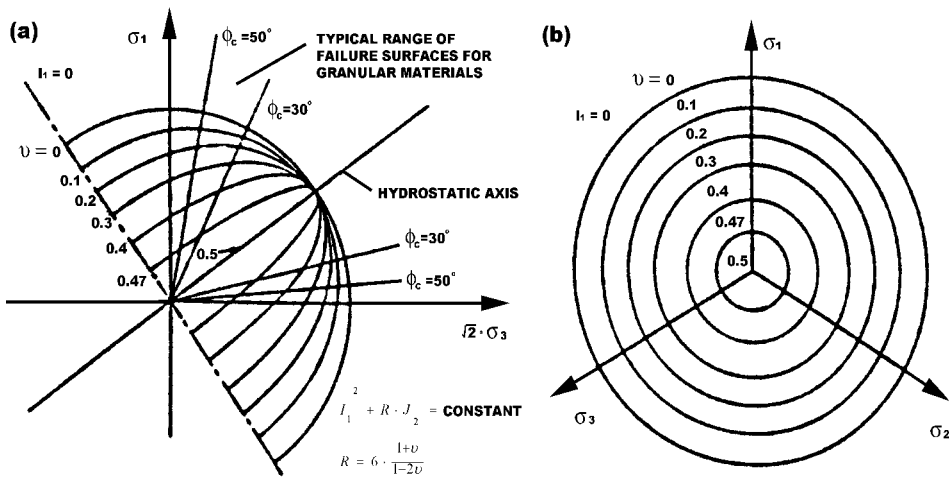


Fig 3.3 Contours of Constant Young's Modulus Shown in (a)Triaxial Plane and (b)Octahedral Plane(Lade, 1988)

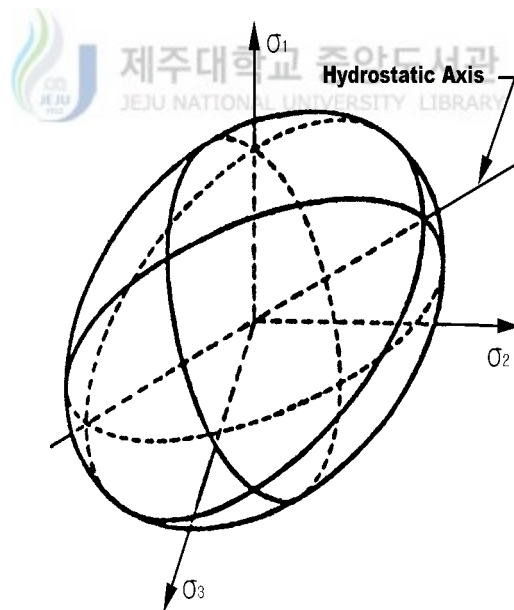


Fig 3.4 Ellipsodal Surface along which Young's Modulus is Constant according to Equation (3.9) (Lade, 1988)

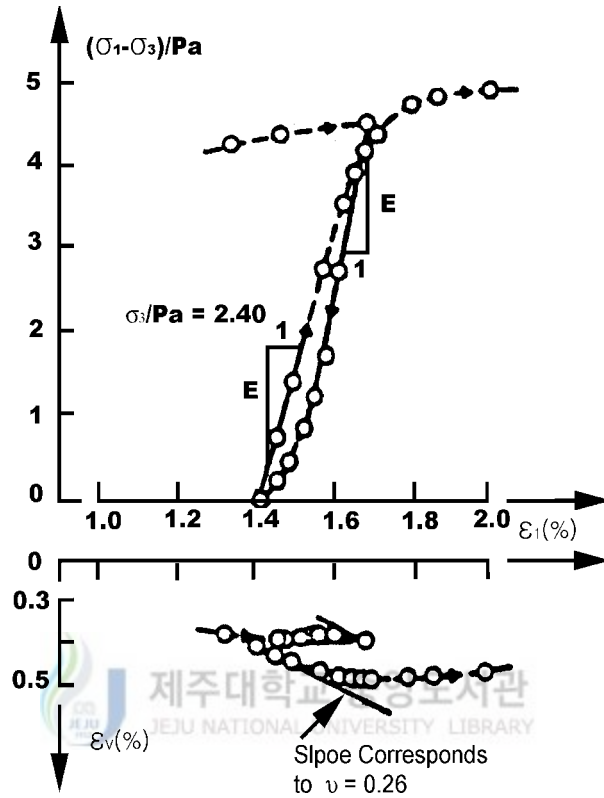


Fig 3.5 Young's Modulus and Slope of Volume Changes Curve for Determination of Poisson's Ratio from Unloading-Reloading Cycle in Conventional Triaxial Compression Test on Loose Santa Monica Beach Sand(Lade, 1988)

여기서 $\nu = 0$ 일 때 가장 큰 원을 형성하게 되며 ν 가 증가함에 따라 원은 점점 작아져 $\nu = 0.5$ 에서는 하나의 점으로 변하게 된다. 이를 다시 3차원 공간에서 도시하게 되면 일정한 ν 에 대한 식(3.9)은 Fig 3.4에서와 같은 타원형의 구를 형성하게 된다.

Lade(1988)는 포아슨비 결정 시 이에 대한 최선의 선택을 위해 Fig 3.5의 하단부 축변형률에 대한 체적변형률 곡선에서 보는 바와 같이 식(3.12)의 $\bar{\epsilon}_v / \bar{\epsilon}_1$

을 응력반전시 정수압축 부근에서 Unloading으로부터 Reloading으로 변하는 초기의 기울기를 이용하도록 제안하였다.

$$\nu = -\frac{\dot{\epsilon}_3}{\dot{\epsilon}_1} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{\dot{\epsilon}_v}{\dot{\epsilon}_1}\right) \quad (3.12)$$

그리고 탄성계수에 대한 계수결정을 위해서 실험으로부터의 탄성계수를 Fig 3.5의 상부에서의 응력변형률 곡선으로부터 하중이 Unloading과 Reloading이 시작되는 초기의 접선계수값을 정하였으며 이때의 응력상태는 응력반전이 발생하는 초기치 값으로 제안하였다. 재료에 대한 계수 M 과 λ 의 결정은 Fig 3.6에서와 같이 가로축에 식(3.9)의 $[(I_1/p_a)^2 + R \cdot \dot{J}_2/p_a^2]$ 를 두고, 실험으로부터 구한 탄성계수 E 를 단위조절을 위해 사용한 대기압 P_a 로 나눈 (E/P_a) 을 세로축으로 하여 이들을 회기분석함으로서 계수를 결정할 수 있다. 여기서 λ 는 회기분석한 결과의 기울기이며 M 은 가로축 값이 1일 때의 절편값이다.

2) 파괴규준



Lade는 마찰물질에 대한 재료의 3차원 파괴규준은 곡선형태의 파괴포락선을 가진다고 하였다. 이 규준은 제1 및 제3응력불변량의 향으로 다음과 같이 제안되었다.

$$\left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27\right) \left(\frac{I_1}{P_a}\right)^m = \eta_1 \quad (3.13)$$

여기서, P_a 는 응력의 단위로 표시된 대기압이며, η_1 과 m 은 재료에 따라 결정되는 토질매개변수이다. 위 식으로부터 얻어지는 파괴면은 주응력공간상에서

Fig 3.7(a)에서 보는 바와 같이 응력축의 원점에서 정점을 가지는 비대칭 탄알모양이며, 정점에서의 각도는 삼축압축시험과 같은 간단한 시험으로 결정되고, η_1 의 값에 따라 증가한다. 여기서 I_1 과 I_3 는 제1응력불변량과 제3응력불변량으로 식(3.6)과 식(3.8)으로 구할 수 있다. 이 파괴면은 정수압축에 대하여 불룩한 형태를 가지고 곡면의 곡률은 m 값에 따라 증가한다. 만약 $m = 0$ 이면 파괴면은 직선 모양이 되고, $m > 1.979$ 이면 파괴면은 점점 정수압축에 대

해 블록해져 그림에서와 반대의 형태를 가진다. 콘크리트와 암에 대한 많은 실험결과들의 분석을 통해 m 값은 1.5를 초과하는 경우가 거의 없다고 하였다. m 이 일정하고 η_1 값이 증가시 정팔면체 상에서 절단면의 모양은 원형에서 끝이 둥근 삼각형에서 원형쪽으로 변한다. Fig 3.7(b)은 $m = 0$ 이고 η_1 이 1, 10^2 , 10^3 인 정팔면체면 (I_1 일정)상의 파괴면의 단면도이다.

3) 소성 Potential함수

등방단일경화구성모델의 가장 중요한 요소 중 하나가 소성변형률증분벡터를 결정하는 소성포텐셜함수 g_p 를 들 수 있다. 즉, 소성변형률증분벡터는 소성포텐셜함수 g_p 로부터 결정되어 진다는 것이다. 이것은 소성변형률증분벡터가 응력 경로에는 무관하고 응력상태로부터 결정된다는 것을 의미하는 것으로서 비관련 흐름법칙이 적용됨을 알 수 있다. 위와 같은 사실은 Poorooshab et al(1985)과 Lade & Duncan(1976)에 의해 증명되었다. 소성변형률증분벡터는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

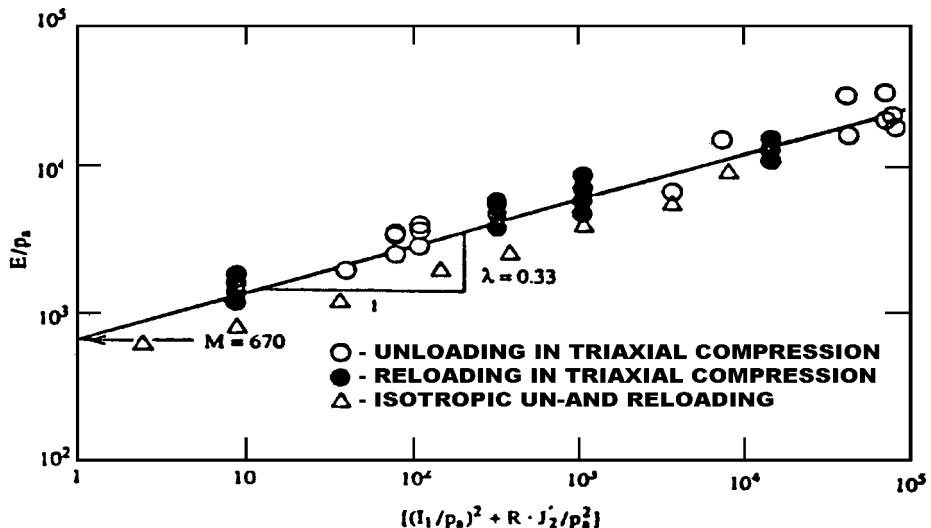


Fig 3.6 Determination of Parameter for Young's Modulus for Medium Dense Sacramento River Sand($e_i=0.71$, $D_r=78\%$) (Lade, 1988)

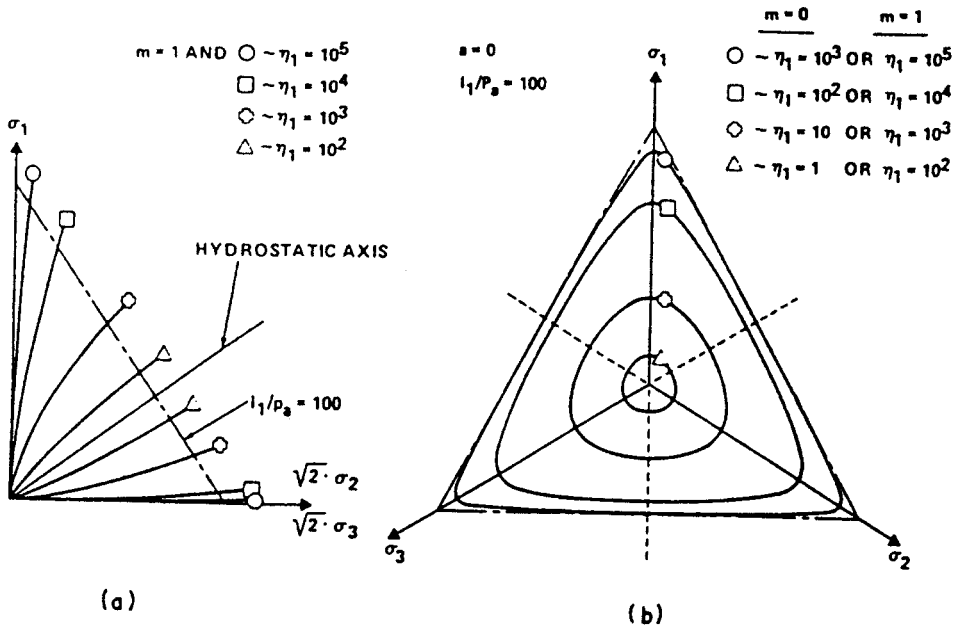


Fig 3.7 Characteristics of Failure Surface Shown in Principal Stress Space. Traces of Failure Surface Shown in (a) Triaxial Plane and in (b) Octahedral Plane (Lade, 1990)

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda_p \cdot \frac{\partial g_p}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3.14)$$

여기서, g_p 는 소성포텐셜 함수이고 $d\lambda_p$ 는 변형률의 크기를 결정하는 상수이다.

Fig 3.8(a)은 점착력이 없는 모래에 대한 삼축압축실험에서 응력에 따른 $d\epsilon^p$ 의 방향을 보여주고 있다. 등방압밀시 정수압축을 따라서 그려진 $d\epsilon^p$ 의 방향은 이상적인 등방체 거동과 일치하여 정수압축과 가까운 응력의 초기단계에서 그 방향은 정수압축에 수직인 선을 기준으로 원점 쪽으로 향하여 소성체적변화가 압축의 경향을 보이고 있으며 파괴시의 응력단계에서는 방향이 원점의 반대편으로 향하여 소성체적변화가 점점 팽창하고 있음을 보여주고 있다. Kim & Lade(1988)는 모래, 점토 및 콘크리트 등과 같은 여러 가지 마찰재료에 대한 시

험결과로부터 Fig 3.8(b) 에서와 같은 소성변형률증분벡터에 대해 수직인 짧은 선을 연결함으로써 이들이 삼축평면에서 약간 뒤틀린 듯한 곡선군이 그려짐을 발견하였다. 이 소성포텐셜곡면군의 모양은 재료에 따라 조금씩 다르지만 대체로 유사한 모양을 나타낸다.

Fig 3.9는 Yamada & Ishihara(1979) 에 의해 보고된 Fuji River Sand 에 대한 입방체형 삼축압축시험에서 구한 소성변형률증분벡터의 방향을 정팔면체평면에 나타낸 것이다. 여기서는 소성변형률증분벡터에 수직인 면이 응력의 초기단계에서는 거의 원형에 가깝고 응력이 증가하여 파괴점에 접근할수록 곡면이 원형에서 둥근 삼각형모양으로 변하여 감을 관찰하였다. 이러한 삼축평면과 정팔면체

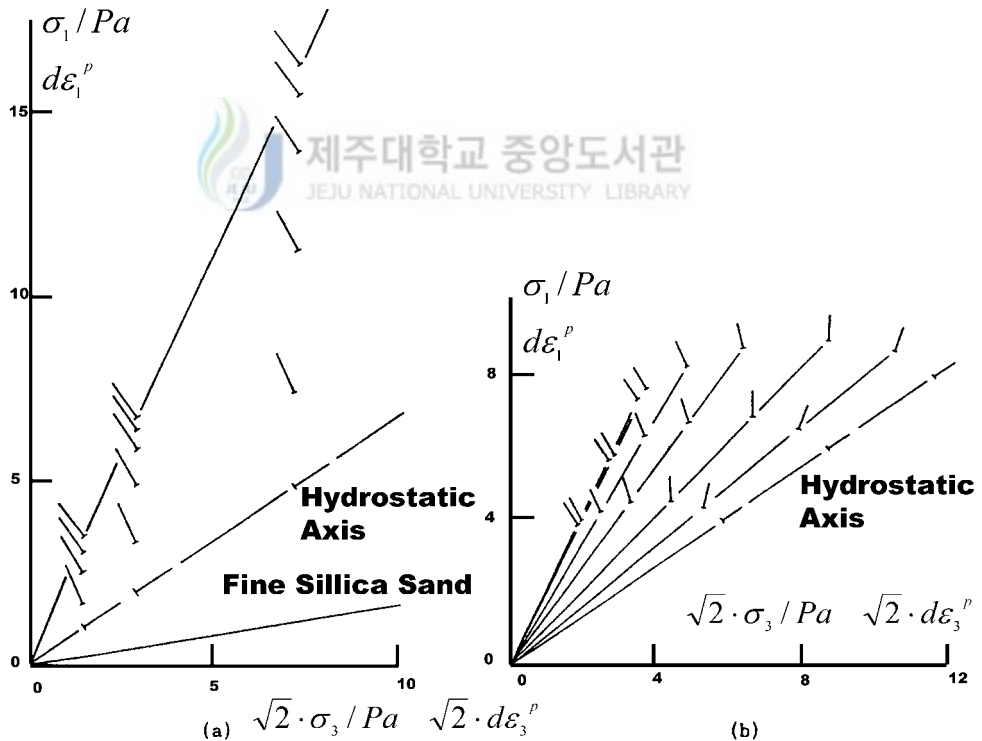


Fig 3.8 Direction of Incremental Plastic Strain Vectors in Triaxial Plane for (a) Triaxial Compression Tests on Fine Silica Sand and (b) Proportional Loading tests on Sand (Kim & Lade, 1988)

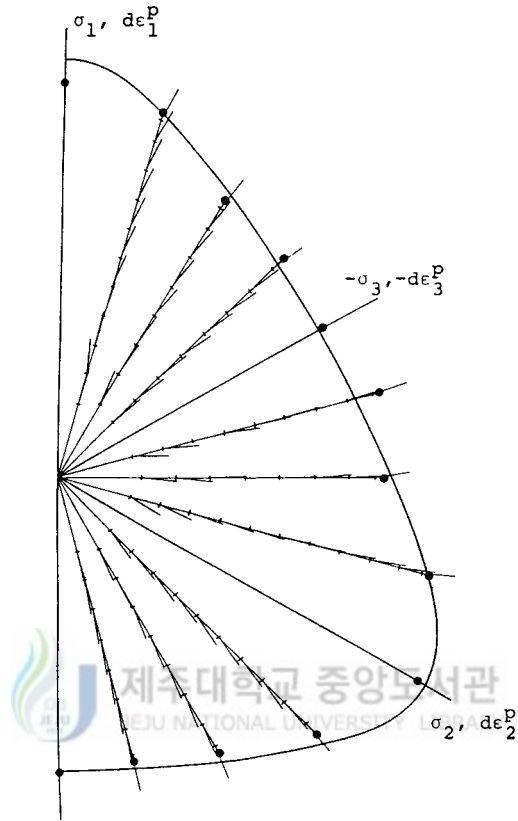


Fig 3.9 Directions of Incremental Plastic Strains on Octahedral Plane for Fuji River Sand(Yamada & Ishihara, 1979)

에서의 검토로부터 Kim & Lade(1988) 은 소성포텐셜함수를 다음과 같은 식으로 제안하였다.

$$g_p = \left(\psi_1 \cdot \frac{I_1^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I_2} + \psi_2 \right) \cdot \left(\frac{I_1}{p_a} \right)^m \quad (3.15)$$

여기서 세 개의 응력불변량 I_1, I_2, I_3 는 식(3.6), 식(3.7), 식(3.8)으로 구한다. 그리고 ψ_1 는 함수의 형태를 삼각형모양(I_3 항으로부터)과 원형(I_1 항으로부터)의 형태를 결정하는 형상계수로서 파괴규준으로부터 구한 m 을 이용하여 식(3.16)으로부터 구할 수 있다.

$$\Psi_1 = 0.00155 \cdot m^{-1.27} \quad (3.16)$$

한편, Ψ_2 는 정수압축과의 교점을 조정하는 계수이고, 지수 μ 는 곡률의 정점을 결정하는 계수이다.

식(3.15)의 소성포텐셜함수를 식(3.14)에서와 같이 응력으로 미분을 하게 되면 변형률에 관한 식(3.17)을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial g_p}{\partial \sigma_{ij}} = \left(\frac{I_1}{p_a} \right)^\mu \begin{bmatrix} G - (\sigma_y + \sigma_z) \cdot \frac{I_1^2}{I_2^2} - \Psi_1(\sigma_y \cdot \sigma_z - \tau_{yz}^2) \frac{I_1^3}{I_3^2} \\ G - (\sigma_z + \sigma_x) \cdot \frac{I_1^2}{I_2^2} - \Psi_1(\sigma_z \cdot \sigma_x - \tau_{zx}^2) \frac{I_1^3}{I_3^2} \\ G - (\sigma_x + \sigma_y) \cdot \frac{I_1^2}{I_2^2} - \Psi_1(\sigma_x \cdot \sigma_y - \tau_{xy}^2) \frac{I_1^3}{I_3^2} \\ 2 \cdot \frac{I_1^2}{I_2^2} \cdot \tau_{yz} - 2 \cdot \Psi_1 \cdot (\tau_{xy} \cdot \tau_{zx} - \sigma_x \cdot \tau_{yz}) \frac{I_1^3}{I_3^2} \\ 2 \cdot \frac{I_1^2}{I_2^2} \cdot \tau_{zx} - 2 \cdot \Psi_1 \cdot (\tau_{xy} \cdot \tau_{yz} - \sigma_y \cdot \tau_{zx}) \frac{I_1^3}{I_3^2} \\ 2 \cdot \frac{I_1^2}{I_2^2} \cdot \tau_{xy} - 2 \cdot \Psi_1 \cdot (\tau_{yz} \cdot \tau_{zx} - \sigma_z \cdot \tau_{xy}) \frac{I_1^3}{I_3^2} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

여기서, G 는 식(3.18)과 같다.

$$G = \Psi_1(\mu+3) \frac{I_1^2}{I_3} - (\mu+2) \frac{I_1}{I_2} + \frac{\mu}{I_1} \Psi_2 \quad (3.18)$$

그리고 단지 주응력만이 작용하였을 시 소성변형률증분벡터를 주응력공간에 도시하면 식(3.17)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} d\varepsilon_1^p \\ d\varepsilon_1^p \\ d\varepsilon_1^p \end{bmatrix} = d\lambda_p \cdot \left[\frac{I_1}{Pa} \right]^\mu \begin{bmatrix} G - (\sigma_y + \sigma_z) \cdot \frac{I_1^2}{I_2^2} - \Psi_1(\sigma_y \cdot \sigma_z - \tau_{yz}^2) \frac{I_1^3}{I_3^2} \\ G - (\sigma_z + \sigma_x) \cdot \frac{I_1^2}{I_2^2} - \Psi_1(\sigma_z \cdot \sigma_x - \tau_{zx}^2) \frac{I_1^3}{I_3^2} \\ G - (\sigma_x + \sigma_y) \cdot \frac{I_1^2}{I_2^2} - \Psi_1(\sigma_x \cdot \sigma_y - \tau_{xy}^2) \frac{I_1^3}{I_3^2} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

여기서 식(3.18)의 G 는 다음과 같은 방법으로 결정할 수 있다. 우선 소성변형률증분의 비를 결정하여야 한다.

$$\nu_p = -\frac{d\varepsilon_3^p}{d\varepsilon_1^p} \quad (3.20)$$

식(3.26)을 식(3.27)에 대입하면 식(3.28)을 구할 수 있다.

$$\xi_y = \frac{1}{\mu} \xi_x - \psi_2 \quad (3.21)$$

여기서

$$\xi_x = \frac{1}{1+V_p} \left\{ \frac{I_1^3}{I_2^2} (\sigma_1 + \sigma_3 + 2V_p \cdot \sigma_3) + \psi_1 \cdot \frac{I_1^4}{I_3^2} (\sigma_1 \cdot \sigma_3 + V_p \cdot \sigma_3^2) \right\} - 3\psi_1 \cdot \frac{I_1^3}{I_3} + 2\frac{I_1^2}{I_2} \quad (3.22)$$

$$\xi_y = \psi_1 \cdot \frac{I_1^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I_2} \quad (3.23)$$

식(3.21)의 $1/\mu$ 와 ψ_2 는 삼축압축시험결과에 대해 가로축에 ξ_x 를 두고 세로축에 ξ_y 를 두어 회기분석을 실시하여 그 기울기의 역수를 μ 로 하고 ψ_2 는 절편으로부터 구할 수 있다.



4) 항복함수와 일경화법칙

공학적 재료에 대한 탄소성응력변형률 이론을 발전시키기 위해 소성항복의 발생조건을 설명하기 위한 기준이 필요하다. 그것이 탄소성모델상의 항복기준인데, 이 기준은 기본적으로 실험적 고찰에 중점을 두고 있으며, 때로는 물질에서 표현된 소성거동의 형태에 관한 가정과도 결합되기도 한다. 그러나 적당한 항복곡면을 구별하는데는 2가지 어려운 점이 있는데, 첫째는 마찰재료에 대하여 항복은 연속적으로 진행하기 때문에 응력-변형률 곡선상에서 항복점을 구별하기가 매우 어렵고, 둘째는 소성이론에서 항복곡면은 소성변형률 증분벡터를 정의하는 경화(연화) 정수와 반드시 연관되어 있기 때문이다. 그래서 항복거동을 연구하기 위해 사용되는 것이 소성일괄적이며, 이는 복잡한 응력경로를 필요로 하는 실험을 포함하지 않고, 응력-변형률곡선상에서 항복점의 결정을 쉽게 할 수 있다는 이점이 있다. 높은 등방압밀시 탄성과 소성변형이 발생하게 되는데, 소성일은 단순히 등방압력의 증가에 의해 행하여지며 압력에 의한 함수로 다음 식과 같이 표현된다.

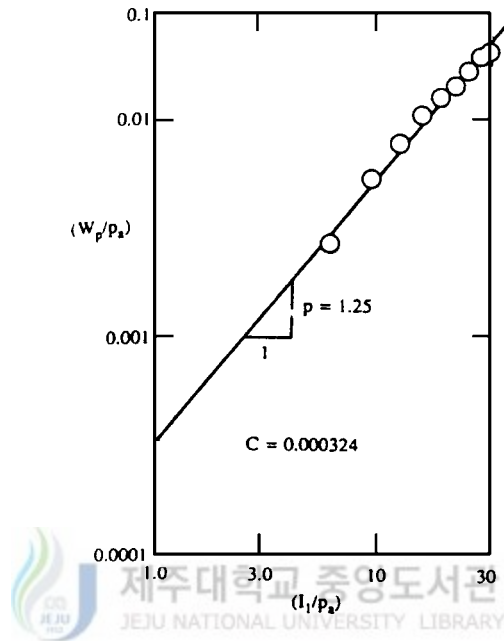


Fig 3.10 Determination of Parameter C and P in Hardening Law for Fine Sillica Sand (Lade & Kim, 1988)

$$W_p = C \cdot P_a \cdot \left[\frac{I_1}{P_a} \right]^p \quad (3.24)$$

여기서, I_1 는 제1응력불변량이며, P_a 는 공기압이고, C , p 는 무차원 상수이다. C 와 p 에 대한 변수값은 (W_p/P_a) 과 (I_1/P_a) 의 관계를 대수용지에 도식하여 구할 수 있다. Fig 3.10에서처럼 (W_p/P_a) 과 (I_1/P_a) 의 관계는 거의 직선의 경향을 보이며, C 는 $(I_1/P_a)=1$ 일 때 y 축인 (W_p/P_a) 의 값이고, p 는 직선의 경사이다.

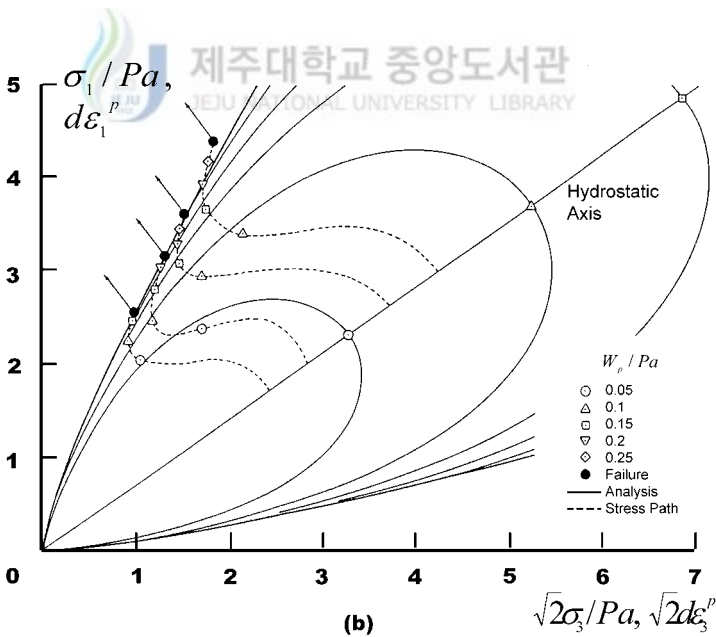
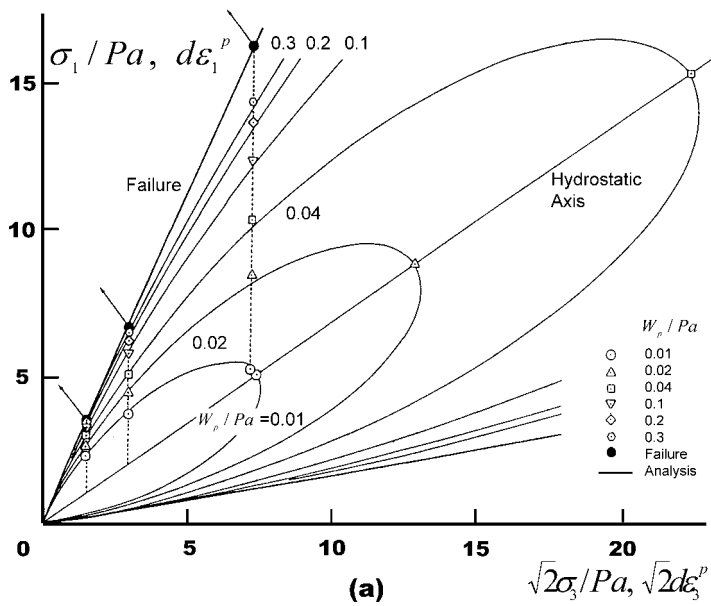


Fig 3.11 Experimental Data Points and Contour Plastic Work Shown on Triaxial Plane for (a) Fine Silica Sand, and for (b) Undrained Tests on EPK Clay (Lade & Kim, 1988)

Fig 3.11(a)과 (b)는 구속압이 각각 1, 2, 5 kg/cm^2 인 Fine Silica Sand에 대한 배수시험결과와 EPK 점토를 재 성형한 정규압밀시료 4개에 대한 비배수 시험 결과로부터 얻은 소성일의 결과를 보여주고 있다. 여기서 점토와 모래 모두에 대해 응력이 낮은 단계에서는 소성일이 응력단계에 따라 서서히 증가하다가 응력이 더 증가하여 파괴선에 접근할수록 소성일의 증가비율이 매우 빠르게 증가하는 유사한 경향을 볼 수 있다. 그리고 모양에 있어서는 점토가 모래에 비해 소성일궤적으로 둘러싸여진 지역이 더 짧고 등글게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 즉, 이것은 체적변화 때문에 등방압축하의 소성일이 모래 보다 점토가 상대적으로 큼을 알 수 있다.

Fig 3.12는 Yamada & Ishihara(1979)에 의한 $\psi_1=0.00472$ 인 Fine Silica Sand의 입방체형 삼축압축실험에 대한 정팔면체 상에서 소성일의 변화를 보여주고 있다. 소성일궤적은 낮은 응력단계에서는 원형이나 점진적으로 응력이 파괴점에 가까워짐에 따라 끝이 둥근 삼각형 모양으로 변함을 볼 수 있다. 또한 소성변형을증분방향이 소성일궤적의 수직방향과 일치함을 보여주고 있다.

반면 Fig 3.11의 삼축평면 상에서 벡터방향은 소성일궤적의 수직방향과 일치하지 않고 있음을 알 수 있다. 즉 파괴시 항복곡면에 대한 수직방향은 실험에 의한 수직의 확인보다는 물질의 팽창(dilation)에 더 의존한다는 것을 의미한다. 이런 점이 비관련유동법칙의 도입을 필요로 하게 된다. 또한 Fig 3.12로부터 파괴시 소성일궤적은 파괴곡면보다 더욱 등글고 그 소성변형을증분벡터방향이 소성일궤적에 수직임을 알 수 있으며 이 소성일궤적을 설명하기 위한 함수, 즉 항복함수를 다음과 같이 제안하였다.

$$f'_p = \left[\psi_1 \cdot \frac{I_3^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I_2} \right] \cdot \left[\frac{I_1}{p_a} \right]^h \cdot e^q \quad (3.25)$$

여기서 ψ_1 는 삼각형 모양 (I_3 항으로부터)과 원형(I_1 항으로부터)사이의 형상계수이며, 변수 h 는 일정하고, q 는 응력단계에 따라 변하는 함수로 다음과 같이 구분할 수 있다.

$q = 0$	등방압축시
$0 < q < 1$	경화시
$q = 1$	파괴응력시

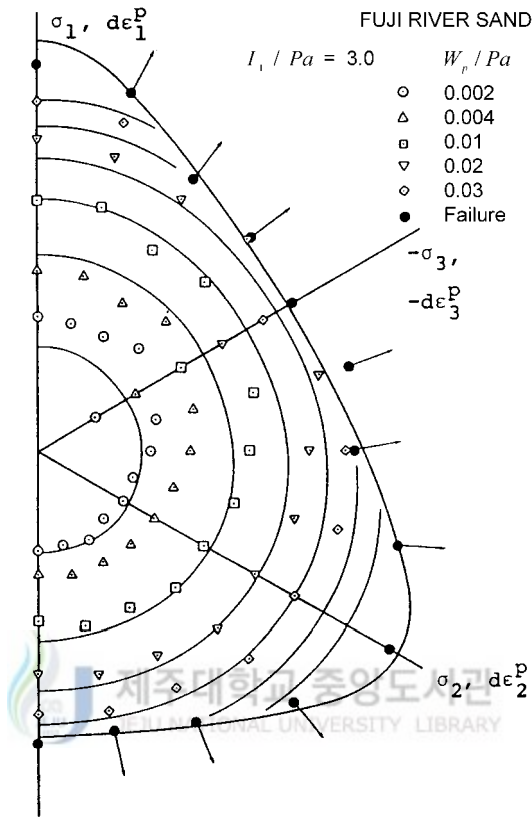


Fig 3.12 Experimental Data Points and Contours Plastic Work Shown on Octahedral Plane for Fuji River Sand(Yamada & Ishihara, 1979)

항복곡면은 Fig 3.13에서처럼 절단면이 등근 삼각형 모양을 가진 눈물방울 형태이며 원점을 제외한 전 응력공간상에서 연속적이다. Fig 3.12에 그려진 항복 곡면군은 식(3.25)에서 f_p 가 일정할 때 곡선으로서 소성일과는 직접적인 관련이 없다. 그러나 항복함수는 소성일궤적의 경향을 설명하는데 매우 적절하다. 또한 식(3.25)은 항복곡면의 등방체적팽창을 나타내고 등방체의 일경화 응력-변형률 모델에 적합하다 할 수 있다. 등방압축상태의 경우 식(3.25)은 다음과 같다.

$$f_p' = (27 \cdot \psi_1 + 3) \cdot \left[\frac{I_1}{p_a} \right]^h \quad (3.26)$$

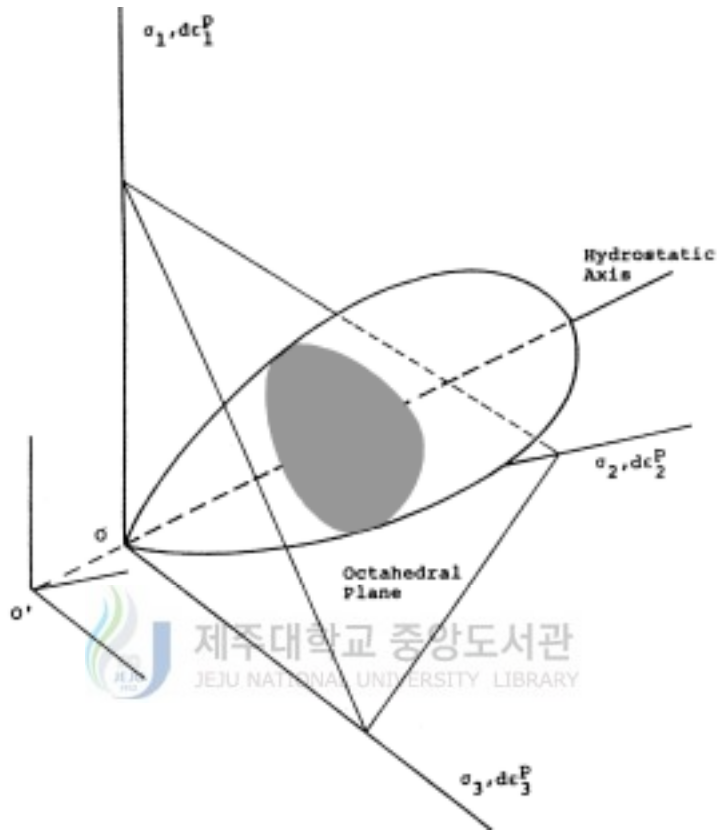


Fig 3.13 Schematic Illustration of the Proposed Yield Surface in Principal Stress Space (Lade & Kim, 1988)

이 식을 사용하여 등방압축에 대한 소성일 방정식을 유도하면,

$$W_p = D \cdot p_a \cdot f_p''^{\rho} \quad (3.27)$$

즉,

$$f_p'' = \left[\frac{1}{D} \right]^{1/\rho} \cdot \left[\frac{W_p}{p_a} \right]^{1/\rho} \quad (3.28)$$

여기에서

$$D = \frac{C}{(27\psi_1 + 3)^\rho} \quad (3.29)$$

$$\rho = p/h \quad (3.30)$$

식(3.27)은 항복기준 f'_p 와 소성일 W_p 사이에 독특한 관계를 설정하고, 모든 응력상태에 대한 일-경화 관계로서 사용된다.

(1) 계수 h의 결정방법

동일한 소성일 궤적상에 있는 두 응력점 A, B를 고려하여 보자. 이 두점은 같은 항복면상에 위치하므로 $f'_{PA} = f'_{PB}$

$$\left[\psi_1 \cdot \frac{K_{1A}^3}{I_{3A}} - \frac{I_{1A}^3}{I_{2A}} \right] \cdot \left[\frac{I_{1A}}{p_a} \right] e^{qA} = \left[\psi_1 \cdot \frac{I_{1B}^3}{I_{3B}} - \frac{I_{1B}^2}{I_{2B}} \right] \cdot \left[\frac{I_{1B}}{p_a} \right]^h \cdot e^{qB} \quad (3.31)$$

여기서 첨자 A와 B는 A와 B점에서의 응력을 나타내며, 만약 A점이 정수압축상에 있고 ($q=0$), B가 파괴포락선상 ($q=1$) 있다면,

$$(27 \cdot \psi_1 + 3) \cdot \left[\frac{I_{1A}}{P_a} \right]^h = \left[\psi_1 \cdot \frac{I_{1B}^3}{I_{3B}} - \frac{I_{1B}^2}{I_{2B}} \right] \cdot \left[\frac{I_{1B}}{P_a} \right]^h \cdot e \quad (3.32)$$

그러므로

$$h = \log \frac{\left[\psi_1 \cdot \frac{I_{1B}^3}{I_{3B}} - \frac{I_{1B}^2}{I_{2B}} \right] \cdot e}{27\psi_1 + 3} \cdot \log \frac{I_{1A}}{I_{1B}} \quad (3.33)$$

(2) 변수 q의 결정방법

q의 값은 응력수준 S에 따라 변하고 다음과 같이 정의된다.

$$S = \frac{f_n}{\eta_1} = \frac{1}{\eta_1} \cdot (I_1^3/I_3 - 27) \cdot \left[\frac{I_1}{p_a} \right]^m \quad (3.34)$$

여기서 f_n 은 마찰재료에 대한 파괴를 설명하기 위해 사용된 함수이고 η_1 은

파괴시 f_n 의 값이다. 응력수준 S 는 정수압축상태의 0으로부터 파괴시 1까지 변한다. q 의 값은 식(3.36)과 식(3.37)을 사용하여 시험결과로부터 결정될 수 있다.

$$q = \ln \frac{\left[\frac{W_p}{D \cdot p_a} \right]^{1/\rho}}{\left[\psi_1 \cdot \frac{I_1^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I_2} \right] \cdot \left[\frac{I_1}{P_a} \right]^h} \quad (3.35)$$

Fig 3.14는 응력수준 S 에 따른 q 의 변화를 보여준다. 단 $0 < q < 1$ 의 범위에서 비율은 특히 중요하다. 왜냐하면 항복과 소성일 사이의 다른 관계가 연화 법칙에서 적용된다. 경화부분의 변이는 쌍곡선으로 표현 설명된다.

$$S = \frac{q}{\alpha + \beta \cdot q} \quad (3.36)$$

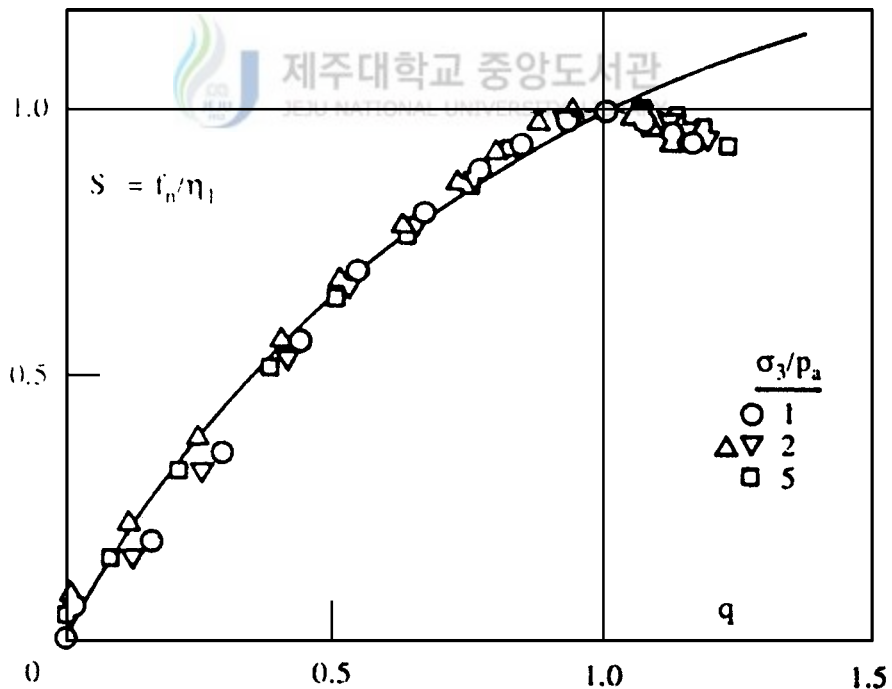


Fig 3.14 Observed and Modeled Relation between S and q for Fine Silica Sand (Lade & Kim, 1988)

곡선이 (1,1)를 통과하기 때문에 $\beta = 1 - \alpha$ 이다. α 는 응력수준 $S=0.8$ 일 때 가장 좋은 값이 구해지므로 이를 식(3.43)에 대입하면

$$\alpha = \frac{1-S}{S} \cdot \frac{q_s}{1-q_s} = \frac{1}{4} \cdot \frac{q_{80}}{1-q_{80}} \quad (3.37)$$

Fine Silica Sand는 $q_{80} = 0.67$ 때 $\alpha = 0.51501$ 이다. 결론적으로 q 는 다음과 같이 표현된다.

$$q = \frac{\alpha \cdot S}{1 - (1 - \alpha) \cdot S} \quad (3.38)$$

식(3.25)의 항복함수는 변수 h 와 q 를 결정함으로써 정의되고, 소성일은 항복이 진행되는 동안 식(3.27)으로 부터 구해진다.



IV. 삼축압축시험

1. 사용된 시료의 특성

이미 Fig 2.1에 언급한 바와 같이 송이는 제주도내 전반적으로 널리 분포하고 있으며 이들은 마그마의 분출상황에 따라 그 특성을 달리 하고 있다. 본 연구에서는 이러한 송이들 중 제주도 남제주군 안덕면 동광리 소재 서부관광도로 개설공사현장에서 채취한 암회색송이와 북제주군 구좌읍 한동리 소재의 둔지봉에서 채취한 적갈색송이 및 북제주군 구좌읍 송당리 소재의 체오름에서 채취한 황갈색 송이에 대해 실내시험을 실시하였다.

Table 4.1은 시험에 사용된 시료들에 대한 화학분석 결과를 나타내었다. 암회색송이의 경우 SiO_2 의 함량이 약 49%를 차지하는 것으로 나타났으며 다른 화학성분에 비해 가장 많은 양을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 적갈색송이 및 황갈색송이는 SiO_2 의 양이 약 44% 정도로 암회색에 비해 약 5% 정도 적게 함유하고 있다. SiO_2 는 한 개의 규소 원자 주위에 4개의 산소원자로 구성되어 있으며 산소원자는 서로 공유하는 사면체구조를 띠고 있다. Al_2O_3 는 SiO_2 다음으로 많이 함유되어 있는 것으로 나타났으며 암회색인 경우에는 약 14.25%, 적갈색과 황갈색송이는 16.40%와 16.50%로 암회색 송이에 비해 약 2%정도 적게 함유하는 것으로 나타난다. Al_2O_3 는 알루미늄원자 주위에 6개의 수산기로 구성된 팔면체 판으로 나타난다. FeO_3 성분은 암회색, 적갈색 및 황갈색 송이가 12.98%, 13.90%, 13.90%로 암회색에서 조금 적게 나타나고 있다. 따라서 SiO_2 , Al_2O_3 , FeO_3 가 약간씩 차이는 있으나 약 75%를 차지하는 주성분을 이루고 있으며 MgO 는 암회색송이가 적갈색 및 황갈색송이에 비해 약간 적게 함유하고 있었으며 CaO 는 암회색 송이가 조금 많이 차지하고 있는 것으로 나타났다. 그리고 Na_2O , TiO_2 , K_2O , P_2O_5 , MnO 등이 조금씩 함유되어 있다. 이상으로 적갈색과 황갈색송이는 화학적 성분이 비슷하게 나타나고 있으며 암회색송이는 정사면체구조인 SiO_2 를 조금 많이 함유하고 있으며 팔면체구조인 Al_2O_3 와 FeO_3 는 조금 적게 함유한 것으로 나타났는데 이는 송이의 강도에 영향을 미칠 것으로 추정된다.

Table 4.1 Chemical Composition of Scorias

Color	Chemical Composition										
	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	FeO ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	K ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	MnO (%)	Loi (%)
Dark Grey	49.00	14.25	12.98	8.82	6.48	3.18	2.23	0.82	0.39	0.18	0.30
Reddish Brown	44.27	16.40	13.90	6.44	7.34	2.25	2.62	1.11	0.57	0.17	5.55
Yellow Brown	44.07	16.50	13.90	6.38	7.36	2.27	2.62	1.10	0.57	0.17	5.33

즉, 사면체구조는 결합성이 양호하고 그 양이 많을수록 안정된 결합 구조를 하고 있다고 볼 수 있으며 이들 결합구조에 팔면체구조가 많이 함유될수록 불안정한 결합을 하게 된다. 따라서 이와 같은 효과가 강도에 미치는 영향이 클 것으로 생각된다.



1) 암회색송이

채취하여온 시료의 입도분포를 조사하기 위하여 건조로에 48시간 정도 건조하여 체분석시험을 실시하였다. 시료에 대한 체분석은 원지반에서 채취한 자연상태의 시료와 실내시험에 사용한 시료에 대하여 각각 3회의 체분석을 실시하였으며 이에 대한 입도분포곡선은 Fig 4.1에 나타내었다. 삼축시험장비의 한계로 인하여 입자의 최대치수를 2.0mm이하로 규정하였고 시험시 입자의 크기를 균일하게 하기 위해 10번체(2.0mm)를 통과하고 40번체(0.425mm)에 남는 것을 대상시료로 결정하였다. 그리고 시험의 정밀성을 기하기 위해 시험에 사용된 시료는 물로 씻어 송이에 포함되어 있는 불순물을 제거하고 건조로에 말린 후 시험을 실시하였다. Fig 4.1에서 ●로 표시한 부분이 삼축시험에 사용한 시료이다.

그러므로 본 연구에서 수행된 삼축시험의 결과로부터 얻어진 송이의 전단강도는 자연상태의 송이에 대한 전단강도와 약간의 차이가 있을 수 있다.

Table 4.2는 입도분포곡선에서 얻은 균등계수등의 값을 나타내었다. 시료를

채취한 원지반상태에서의 균등계수가 3.38이고 곡률계수는 1.40의 값을 얻었고 삼축시험에 사용할 시료는 균등계수가 2.097, 곡률계수는 1.027이었다. 입도분포가 좋은 흙은 자갈의 경우에는 균등계수가 4보다 크고 모래인 경우에는 6보다 커야하며 곡률계수가 1~3사이에 있어야 한다(Braja M. Das 1998). 원지반 상태에서는 크기가 아주 큰 입자부터 작은 입자까지 다양하므로 자갈의 입도분포에 비교하여 보았다. 채취한 시료는 곡률계수가 1.40으로 입도분포가 좋은 상태에 해당하지만 균등계수가 작아 입도분포는 그리 좋지 않았다.

삼축시험에 사용한 암회색송이의 비중은 2.88의 값을 얻었다. 그리고 최대 건조밀도는 $1.407\text{g}/\text{cm}^3$ 이고 최소건조밀도는 $1.159\text{g}/\text{cm}^3$ 이며 최대간극비는 0.862, 최소간극비는 0.711로 나타났다. 일반적인 모래에서의 건조밀도 및 간극비와 비슷한 값을 갖는다.

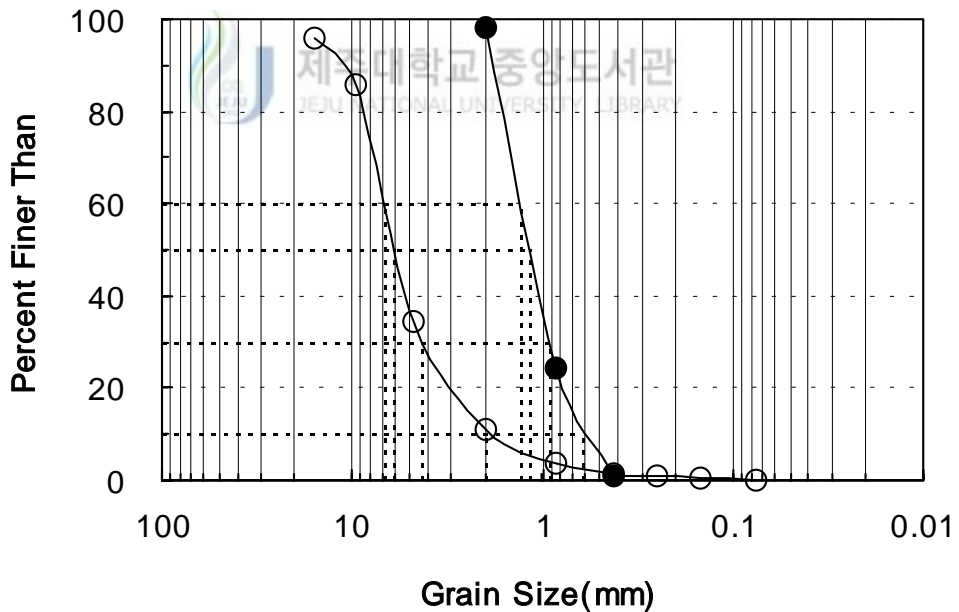


Fig 4.1 Grain Size Distribution for Dark-Grey Scoria

Table 4.2 Properties of Dark-Grey Scoria

Sieve Analysis	Contents	Before Testing	In Field
	D ₁₀ (mm)	0.62	2.00
	D ₃₀ (mm)	0.91	4.35
	D ₆₀ (mm)	1.30	6.75
	D ₅₀ (mm)	1.19	6.05
	$C_U = D_{10}/D_{60}$	2.097	3.38
	$C_C = D_{30}^2 / (D_{60} \times D_{10})$	1.027	1.40
비 중 (Gs)		2.88	
최대건조밀도 (g/cm ³)		1.407	
최소건조밀도 (g/cm ³)		1.159	
최대간극비 (e _{max})		0.862	
최소간극비 (e _{min})		0.711	



2) 적갈색송이

채취하여온 시료의 입도분포를 조사하기 위하여 건조로에 48시간 정도 건조하여 체분석시험을 실시하였다. 시료에 대한 체분석은 원지반에서 채취한 자연상태의 시료와 실내시험에 사용한 시료에 대하여 각각 3회의 체분석을 실시하였으며 이에 대한 입도분포곡선은 Fig 4.2에 나타내었다. 삼축시험장비의 한계로 인하여 입자의 최대치수를 2.0mm이하로 규정하였고 시험시 입자의 크기를 균일하게 하기 위해 10번체(2.0mm)를 통과하고 40번체(0.425mm)에 남는 것을 대상시료로 결정하였다. 그리고 시험의 정밀성을 기하기 위해 시험에 사용된 시료는 물로 씻어 송이에 포함되어 있는 불순물을 제거하고 건조로에 말린 후 시험을 실시하였다. Fig 4.2에서 ●로 표시한 부분이 삼축시험에 사용한 시료이다.

그러므로 본 연구에서 수행된 삼축시험의 결과로부터 얻어진 송이의 전단강도는 자연상태의 송이에 대한 전단강도와 약간의 차이가 있을 수 있다.

Table 4.3은 입도분포곡선에서 얻은 균등계수등의 값을 나타내었다. 시료를

채취한 원지반상태에서의 균등계수가 7.24이고 곡률계수는 2.30의 값을 얻었고 삼축시험에 사용할 시료는 균등계수가 2.252, 곡률계수는 1.041이었다. 입도분포가 좋은 흙은 자갈의 경우에는 균등계수가 4보다 크고 모래인 경우에는 6보다 커야하며 곡률계수가 1~3사이에 있어야 한다(Braja M. Das 1998). 원지반 상태에서는 크기가 아주 큰 입자부터 작은 입자까지 다양하므로 자갈의 입도분포에 비교하여 보았다. 채취한 시료는 곡률계수와 균등계수가 입도분포가 좋은 상태에 해당하므로 양호한 입도분포를 나타내었다. 암회색송이인 경우 40번체를 통과하는 시료의 양이 약 0.87%로 아주 작았지만 적갈색송이인 경우 약 2.66%로 나타나고 있다. 이는 체분석을 실시하면서 입자와 입자 그리고 체와 입자 사이에 부딪치면서 약간씩 깨어지는 것으로 생각된다.

삼축시험에 사용한 적갈색송이의 비중은 2.76으로 암회색송이에 비해 값이 작다. 그리고 최대건조밀도는 $0.929\text{g}/\text{cm}^3$ 이고 최소건조밀도는 $0.754\text{g}/\text{cm}^3$ 이며 최대간극비는 1.362 최소간극비는 1.077로 나타났다. 암회색송이에 비해 작은 값을 나타내고 있다.

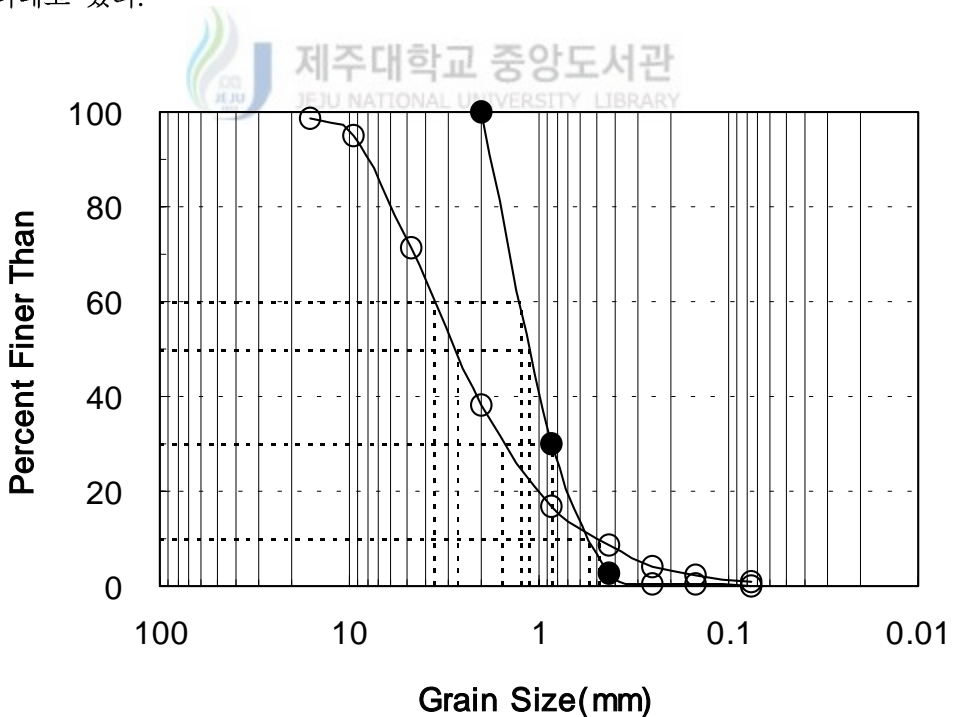


Fig 4.2 Grain Size Distribution for Reddish-Brown Scoria

Table 4.3 Properties of Reddish-Brown Scoria

Sieve Analysis	Contents	Before Testing	In Field
	D ₁₀ (mm)	0.555	0.49
	D ₃₀ (mm)	0.85	2.00
	D ₆₀ (mm)	1.25	3.55
	D ₅₀ (mm)	1.12	2.75
	C _U = D ₁₀ /D ₆₀	2.252	7.24
	C _C = D ₃₀ ² /(D ₆₀ ×D ₁₀)	1.041	2.30
비 중 (Gs)		2.76	
최대건조밀도 (g/cm ³)		0.929	
최소건조밀도 (g/cm ³)		0.754	
최대간극비 (e _{max})		1.326	
최소간극비 (e _{min})		1.077	



3) 황갈색송이

채취하여온 시료의 입도분포를 조사하기 위하여 건조로에 48시간 정도 건조하여 체분석시험을 실시하였다. 시료에 대한 체분석은 원지반에서 채취한 자연상태의 시료와 실내시험에 사용한 시료에 대하여 각각 3회의 체분석을 실시하였으며 이에 대한 입도분포곡선은 Fig 4.3에 나타내었다. 삼축시험장비의 한계로 인하여 입자의 최대치수를 2.0mm이하로 규정하였고 시험시 입자의 크기를 균일하게 하기 위해 10번체(2.0mm)를 통과하고 40번체(0.425mm)에 남는 것을 대상시료로 결정하였다. 그리고 시험의 정밀성을 기하기 위해 시험에 사용된 시료는 물로 씻어 송이에 포함되어 있는 불순물을 제거하고 건조로에 말린 후 시험을 실시하였다. Fig 4.3에서 ●로 표시한 부분이 삼축시험에 사용한 시료이다.

그러므로 본 연구에서 수행된 삼축시험의 결과로부터 얻어진 송이의 전단강도는 자연상태의 송이에 대한 전단강도와 약간의 차이가 있을 수 있다.

Table 4.4는 입도분포곡선에서 얻은 균등계수등의 값을 나타내었다. 시료를 채취한 원지반상태에서의 균등계수가 11.36이고 곡률계수는 1.87의 값을 얻었고

삼축시험에 사용할 시료는 균등계수가 2.365, 곡률계수는 1.051이었다. 입도분포가 좋은 흙은 자갈의 경우에는 균등계수가 4보다 크고 모래인 경우에는 6보다 커야하며 곡률계수가 1~3사이에 있어야 한다(Braja M. Das 1998). 원지반 상태에서는 크기가 아주 큰 입자부터 작은 입자까지 다양하므로 자갈의 입도분포에 비교하여 보았다. 채취한 시료는 곡률계수와 균등계수가 입도분포가 좋은 상태에 해당하므로 양호한 입도분포를 나타내었다. 암회색송이인 경우 40번체를 통과하는 시료의 양이 약 0.87%, 적갈색송이인 경우 약 2.66%로 나타나고 있으며 황갈색송이인 경우에는 4.11%로 다른 두시료에 비해 상당히 많은 양이 40번체를 통과하고 있는 것으로 나타났다. 적갈색에 비해 황갈색송이가 입자가 약할 것으로 추정되며 부서짐의 영향도 상당히 크게 받을 것으로 생각된다.

삼축시험에 사용한 적갈색송이의 비중은 2.54의 값으로 세 가지 시료중 가장 작았다. 그리고 최대건조밀도는 $0.782\text{g}/\text{cm}^3$ 이고 최소건조밀도는 $0.606\text{g}/\text{cm}^3$ 이며 최대간극비는 1.651 최소간극비는 1.279로 나타났다. 이 또한 세 가지 시료중 가장 작은 값을 나타내고 있다.

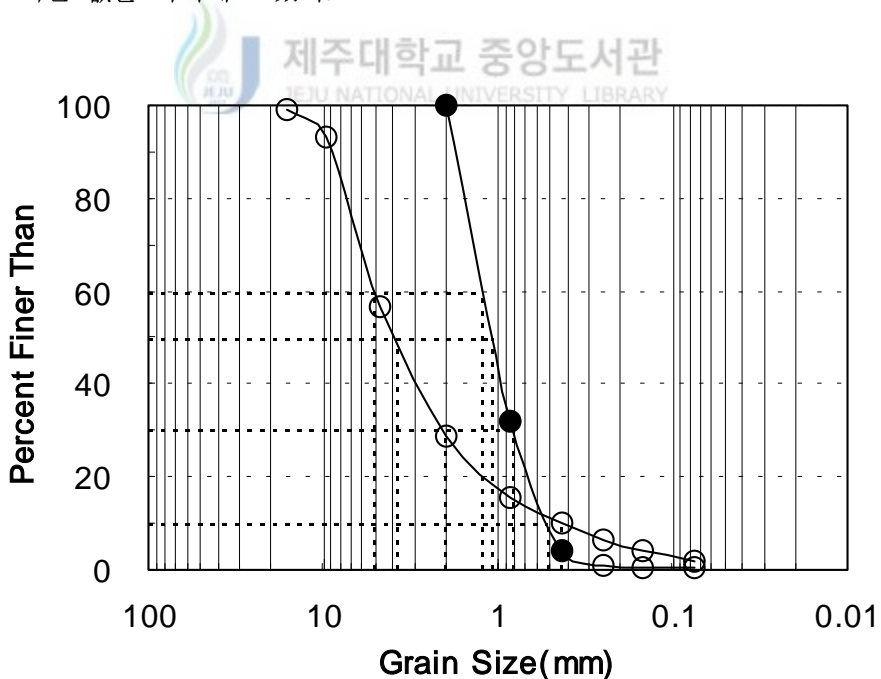


Fig 4.3 Grain Size Distribution for Yellow-Brown Scoria

Table 4.4 Properties of Yellow-Brown Scoria

Sieve Analysis	Contents	Before Testing	In Field
	D ₁₀ (mm)	0.52	0.44
	D ₃₀ (mm)	0.82	2.05
	D ₆₀ (mm)	1.23	5.10
	D ₅₀ (mm)	1.10	3.85
	C _u = D ₁₀ /D ₆₀	2.365	11.89
	C _c = D ₃₀ ² /(D ₆₀ xD ₁₀)	1.051	1.87
비 중 (Gs)		2.54	
최대건조밀도 (g/cm ³)		0.782	
최소건조밀도 (g/cm ³)		0.606	
최대간극비 (e _{max})		1.651	
최소간극비 (e _{min})		1.279	



2. 시험방법

1) 시험장비

본 연구는 일반적인 삼축압축시험기를 사용하여 수행하였다. 변형률제어방식으로 공시체 상하부를 통한 양방향 배수를 시켜 압밀배수삼축압축시험을 실시하였다. 삼축압축시험의 저부가 상승하는 방식으로 변형속도는 0.2mm/min의 속도로 시험을 실시하였다.

Fig 4.4는 삼축압축시험의 압밀배수시험에 대한 대략적 그림을 나타내었다. 삼축압축시험장치는 가압부와 Cell부분으로 나눌 수 있다. 가압은 Air Compressure를 이용하여 Water Pressure Assembly 내의 고무주머니를 팽창시켜

탱크 안의 물을 밖으로 밀어 Pressure Panel 을 통해 압력을 조절하여 Cell과 공시체 내부의 Back Pressure를 조절하여 공급하게 된다. 삼축시험에서 Back Pressure는 $0.51\text{kg}/\text{cm}^2$ 를 가하였다. Cell의 부분은 Pressure Panel을 통해 압력이 들어오는 부분으로 구속압을 결정하는 부분의 Cell Pressure와 공시체 내부의 Back Pressure가 작용하는 부분이라 하겠다. Fig 4.6은 Cell 부분의 그림을 나타낸 그림으로 배수부분과 압력이 작용하는 부분에 대하여 간략히 나타내었다. Cell부분은 공시체를 중심으로 상하부에 Porou Stone이 놓여지고 공시체 외부에는 Cell Pressure와 공시체의 경계를 유지하는 Membrane이 있으며 가압봉과 접촉하고 상부배수를 할 수 있는 Upper Cap부분 그리고 저부배수 부분인 Base Adaptor 부분으로 구성된다. Upper Cap부분에 2개의 O링으로 멤브레인을 고정시키고 Base Adaptor 부분에도 2개의 O링으로 멤브레인을 고정시킨다.

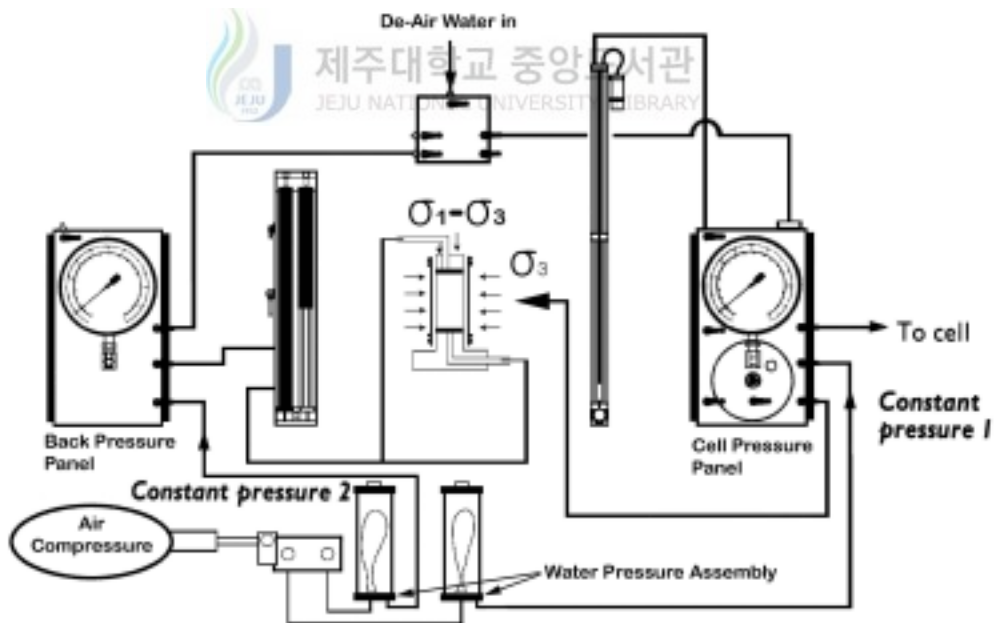


Fig 4.4 Illustration of Triaxial Test

2) 공시체의 제작

삼축압축시험의 공시체 제작을 위해서는 상판과 저판에 연직하중작용시 공시체와의 마찰력을 줄이기 위해 가압봉과 Cell의 상부에 실리콘 그리스를 바른다. 고무 멤브레인을 저판 둘레에 두 개의 O링으로 밀봉시키고 원통형공시체를 만들기 위해 진공 Forming Jacket을 저판위 중심에 설치한다. 이때 멤브레인은 Forming Jacket 내부를 통해 위로 당겨지고 Forming Jacket의 상부 외벽으로 이를 고정시킨 후 진공을 가하여 멤브레인을 공시체의 형태로 만든다. 일정한 상대밀도의 공시체를 만들기 위해 건조한 시료를 멤브레인 내부에 자유낙하 시켜 공시체를 제작하였다. 암회색송이는 Loose, Medium, Dense의 세 가지 상대밀도에 따라 공시체를 제작하였는데 Loose한 경우는 간극비가 0.79인 상대밀도 50%를 만들고 Medium한 경우는 간극비가 0.76인 상대밀도 70%를 만들고 Dense한 경우에는 간극비가 0.73인 상대밀도 85%의 공시체를 제작하였다. 적갈색송이는 Medium한 경우에 대하여 시험을 실시하였는데 간극비가 1.15인 상대밀도 70%의 공시체를 제작하였다. 그리고 황갈색송이도 Medium한 경우에 대해 시험을 실시하였는데 간극비가 1.39인 상대밀도 70%의 공시체를 제작하였다. 일정한 무게의 시료를 주입시키면 공시체가 필요로 하는 높이 보다 약간 높게 퇴적되는데 이때 우레탄 망치로 가볍게 두드려 높이를 조절하게 된다. 각각의 상대밀도에 따라 적절히 두드려 높이를 맞추었다. 이렇게 멤브레인 내부에 모래의 주입이 끝나면 Forming Jacket을 제거하고 상판을 공시체의 중심에 설치한 후 Forming Jacket 주위로 당겨 내려놓았던 멤브레인을 상판주위로 올려 2개의 O링으로 캡에 밀봉시킨다. 공시체에 진공을 가하여 공시체를 고정시키고 공기누출탐색을 위해 Bubble Chamber를 통해 멤브레인의 공기누출여부를 탐색한다. 만일 공기누출이 탐지된다면 시험의 신뢰도를 위해 공시체의 제작을 다시 하였다. 공기누출이 완전히 방지된 것으로 확인되면 삼축셀과 Cap을 조립한 후 Chamber를 물로 채운다.

공시체를 완전히 물로 포화하기 위해서 CO₂가스를 배수선 저부로부터 주입한다. 이산화탄소 가스는 공기보다 무거워 이를 공시체에 주입시 공시체 내부의 공기를 위로 밀어내어 상부배수선을 통해 공기를 밖으로 추출할 수 있으며 공시

체를 물로 포화시킬 때에 완전히 포화가 안되었을 경우에도 CO₂가스의 압축성이 물과 비슷해 체적변형량 측정에 유리한 이점이 된다. CO₂가스를 약 30분 정도 주입한 후 공기가 제거된 물(De-air water)을 공시체에 주입하여 공시체를 포화시키고 실험을 실시한다.

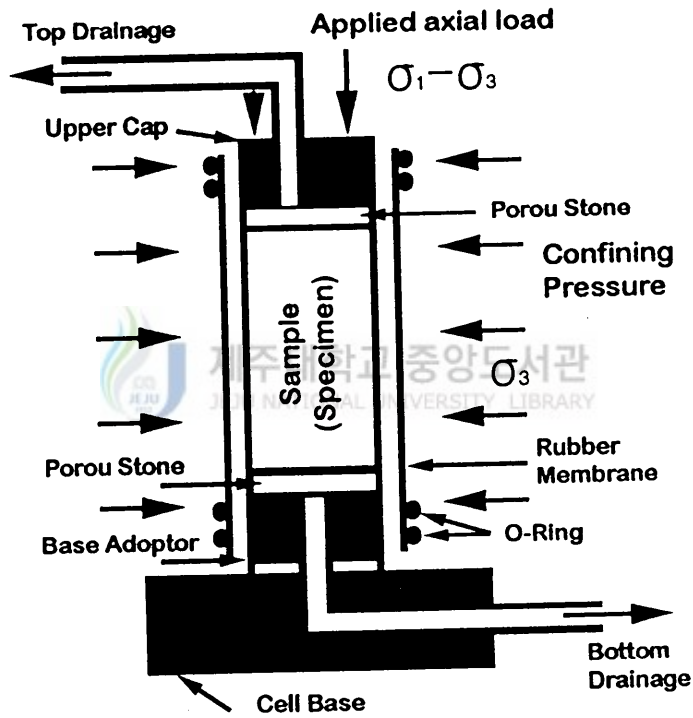


Fig 4.5 Illustration of Specimen

Table 4.5 Testing Contents

	Relative Density (%)	Isotropic Test	Triaxial Test			
			Confining Pressure (kg/cm ²)			
			0.25	0.51	1.02	2.04
Dark-Grey Scoria	50	○		○	○	○
	70	○		○	○	○
	85	○		○	○	○
Reddish-Brown Scoria	70	○	○	○	○	
Yellow-Brown Scoria	70	○	○	○	○	



3. 등방압축시험

등방압축시험은 단일경화구성모델에서 예측에 필요한 변수 C와 p를 결정하기 위해 실시하였다. Table 4.5에서 등방압축시험을 실시한 것을 ○로 표시하여 나타내었다. 암회색송이는 상대밀도 50%, 70%, 85%의 공시체를 제작하여 실시하였고 적갈색과 황갈색은 암회색송이와 등방압축시 응력-변형률 거동변화를 비교하기 위하여 상대밀도 70%의 시료를 제작하여 시험을 실시하였다. 암회색의 등방압축시험은 초기유효구속응력을 0.20kg/cm²(20kPa)에서 시작하여 등방응력을 약 0.51kg/cm²(50kPa)씩 증가시켰고 제하와 재재하 시에는 1.02kg/cm²(100kPa)씩 감소와 증가를 시켰다. 암회색송이에 대한 등방압축시험은 최대유효구속응력이 4.59kg/cm²(450kPa)가 될 때까지 실시하였다. 적갈색과 황갈색송이의 등방압축시험을 실시한 경우 최대구속응력을 암회색송이와 동일한 응력을 가하려고 하였으나 최대유효구속응력에 가까워지면서 멤브레인이 찢어지는 경우가 발생하였다. 멤브레인이 찢어지게 되는 것은 아마 높은 구속응력에서 공시체의 많은 압축과

입자의 쪼개짐면의 날카로운 부분이 멤브레인을 찢는 것으로 생각된다. 따라서 암회색송이에 비해 구속응력을 0.51 kg/cm^2 정도 감소시켜 최대유효구속압이 3.57 kg/cm^2 (350 kPa)이 될 때까지 실시하였다. 그러나 황갈색인 경우에는 시료의 체적 변화량이 크기 때문에 초기유효구속압을 0.20 kg/cm^2 (20 kPa)에서 압력을 약 0.25 kg/cm^2 (25 kPa)씩 증가시켰고 제하와 재재하 시에는 0.51 kg/cm^2 (50 kPa)씩 감소와 증가를 시켜 등방압축시험을 실시하였다.



Fig 4.6 Central Bulging of Specimen during Triaxial Test

4. 삼축압축시험

삼축압축시험은 강도 및 거동특성을 조사하기 위하여 암회색송이는 Loose, Medium, Dense의 세가지 상대밀도에 대해 삼축시험이 실시되었다. 여기서 Loose한 경우는 간극비가 0.79, 건조단위중량이 $1.322\text{kg}/\text{cm}^3$ 로 하여 상대밀도 50%인 공시체를 제작하였고, Medium한 경우는 간극비가 0.76, 건조단위중량이 $1.363\text{kg}/\text{cm}^3$ 로 하여 상대밀도 70%인 공시체를 제작하였으며 Dense한 경우는 간극비가 0.733, 건조단위중량이 $1.407\text{kg}/\text{cm}^3$ 로 하여 상대밀도 85%인 공시체를 제작하였다. 암회색 송이에 대한 삼축압축시험에서 구속응력은 $0.51\text{kg}/\text{cm}^2$ (50kPa), $1.02\text{kg}/\text{cm}^2$ (100kPa), $2.04\text{kg}/\text{cm}^2$ (200kPa)로 변화시켜 시험을 실시하였다.

송이의 색깔에 따른 강도 및 거동을 조사하기 위한 적갈색송이와 황갈색송이의 삼축압축시험은 상대밀도 70%인 경우에만 실시하여 암회색송이와 비교하였다. 이 때 작용한 구속응력은 암회색송이와 동일하게 작용시켰으나 구속응력이 $2.04\text{kg}/\text{cm}^2$ (200kPa)일 때에 하중전달봉과 공시체의 접합점이 이탈되어 정확한 시험을 실시할 수 없어 적갈색과 황갈색송이는 구속응력을 $0.25\text{kg}/\text{cm}^2$ (25kPa), $0.51\text{kg}/\text{cm}^2$, $1.02\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 하였다. Table 4.5에서 삼축압축시험을 실시한 것을 ○로 표시하여 나타내었다.

삼축압축시험시 수평변위는 직접 계측할 수 없다. 따라서 체적변형률과 축변형률의 관계로부터 수평변위를 구하게 되는데 시험시 공시체는 중앙부의 bulging이 발생하게 된다. 이 복부가 팽창하는 부분에서 오차가 발생하는 것으로 생각된다. 이러한 점을 보완하기 위해서 근래의 시험에서 내부압축실의 체적변형률을 측정하고 공시체의 연직변형률을 이용하여 수평변위와 두께변형률의 평균값을 유도하여 사용하고 있다. Fig 4.6에서는 삼축압축시험시 복부팽창을 나타내었다.

V. 시험결과 고찰

송이의 전단저항에 영향을 미치는 요인으로써 크게 두 부류로 나눌 수 있다. 첫 번째 부류로는 구속압과 상대밀도가 동일한 송이라 할지라도 이들의 강도를 상이하게 하는 요인들로 입자의 크기, 입자의 형상, 입도분포 등을 들 수 있다. 다음 두 번째의 부류로는 상대밀도(간극비), 구속압, 하중재하속도 등을 들 수 있다. 이 시험은 첫 번째 부류에 대한 영향을 최소화하기 위해 입도분포가 동일하고 균질한 송이를 준비하여 시험을 실시하였다. 시험을 수행함에 있어서 하중재하 속도는 0.2mm/min으로 동일한 속도 하에서 실시하였다. 이 장에서는 등방압축시험의 결과와 상대밀도에 따른 송이의 거동과 구속압에 따른 거동특성, 송이 파쇄에 의한 거동특성, 송이의 색깔에 따른 거동특성, 송이의 마찰각 등에 대해 고찰하고자 한다.



1. 등방압축시험

암회색송이에 대한 등방압축시험은 상대밀도에 따라 50%, 70%, 85%에 대해 시험을 실시하였다. Fig 5.1은 암회색 시료에 대한 등방압축시험의 결과를 σ_m (kg/cm²)과 ε_v (%)에 대한 관계로 상대밀도에 따라 나타내었다. 상대밀도가 높을수록 체적변화량이 적음을 알 수 있다. Fig 5.2는 암회색송이에 대한 등방압축시험의 결과를 등방응력과 연직변형률 ε_1 (%)의 관계로 나타내었다. 등방응력을 증가시키게 되면 공시체가 압축되며 상부캡과 하중전달봉이 떨어지게 되므로 축변형을 측정하지 못하게 된다. 그러므로 하중전달봉과 상부캡과의 밀착을 위해 삼축압축시험기를 상승시켜 이를 밀착시켰다. 삼축압축시험기를 상승시킬 때에 공시체에 영향을 주지 않기 위해 0.1mm/min의 속도로 Proving Ring의 변화를 관찰하며 접합시점을 찾아 연직변형을 기록하였다. 축변형은 1%이내에서 발생하고 있으며 상대밀도가 높을수록 연직변형도 작아진다.

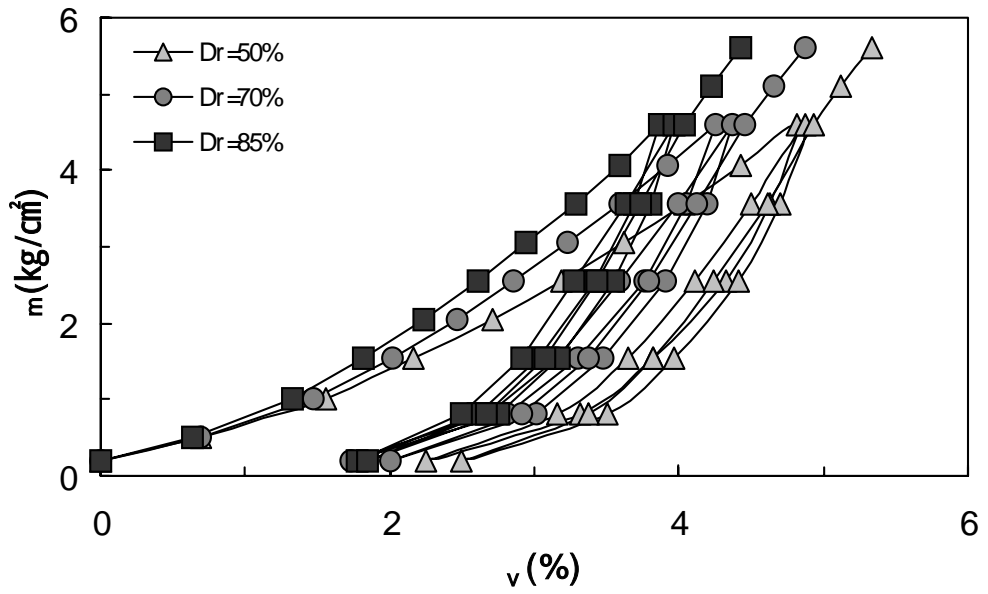


Fig 5.1 Isotropic Test of Dark-Grey Scoria

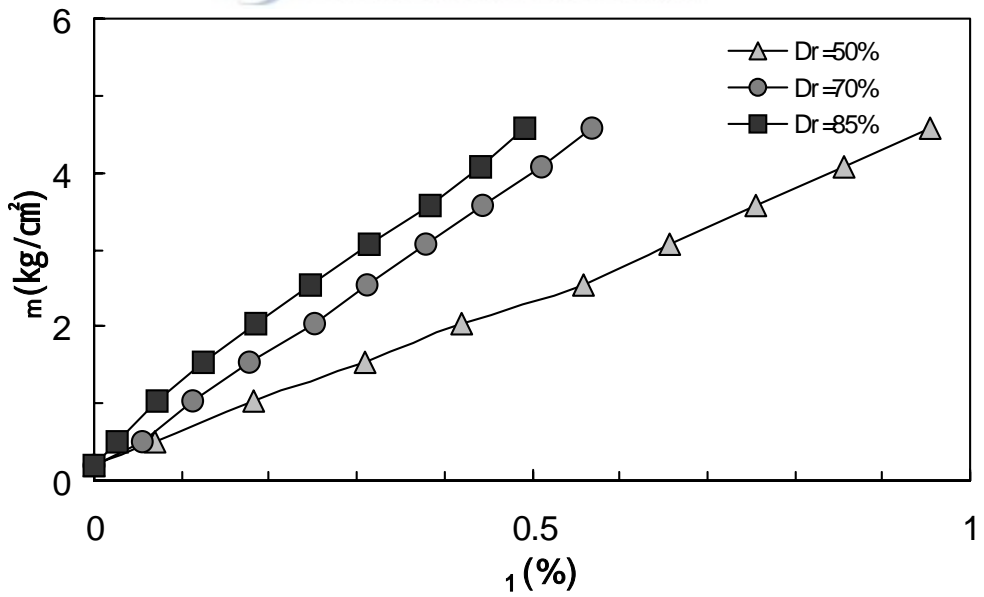


Fig 5.2 Relation of Isotropic Stress and Axial Strain from Isotropic Test of Dark Grey Scoria

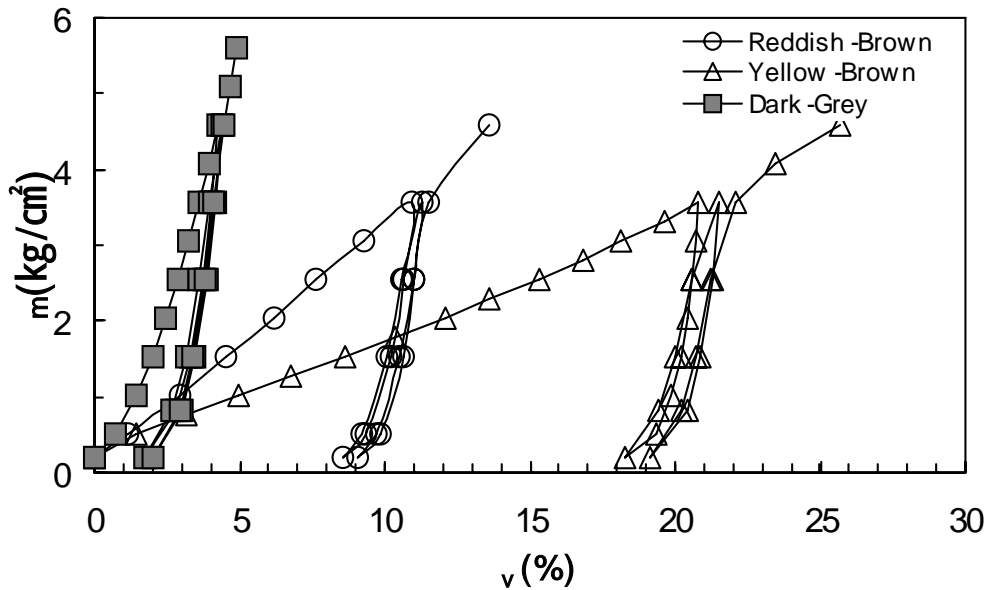


Fig 5.3 Isotropic Test of Scorias(Dr=70%)



적갈색시료와 황갈색 시료는 상대밀도가 70%일 때에 대하여 등방압축시험을 실시하여 비교하였다. Fig 5.3은 등방압축을 실시한 것을 등방응력에 대한 체적변형을 송이의 색깔별로 그래프에 나타내었다. 등방압축시험을 실시하여 보면 등방응력이 증가할수록 공시체가 압축되는 현상을 볼 수 있다. Fig 5.3에서 등방응력이 3.57kg/cm²일 때의 세 가지 시료를 비교하였을 때 암회색송이의 체적변화율은 3.59%로 나타났고 적갈색송이는 10.93%, 황갈색송이는 20.81%의 체적변화가 발생하였다. 황갈색송이는 체적의 변화가 매우 크게 일어남을 확인할 수 있었다. 상대밀도 70%에서 건조단위중량은 암회색인 경우 0.898kg/cm³이고 적갈색인 경우는 1.152kg/cm³이며 황갈색송이인 경우에는 0.749kg/cm³이었다. 또한 간극비는 암회색은 0.756이고 적갈색은 1.152이며 황갈색송이는 1.391이었다. 즉, 건조단위중량이 클수록 압축이 적게 발생하고 간극비가 클수록 압축이 많이 일어난다.

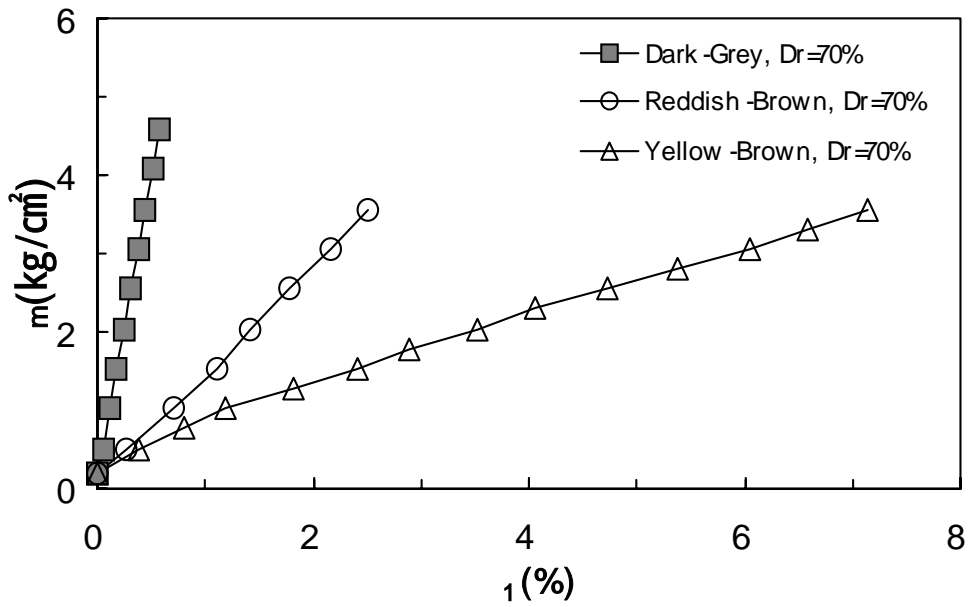


Fig 5.4 Relation of Isotropic Stress and Axial Strain from Isotropic Test of Scorias

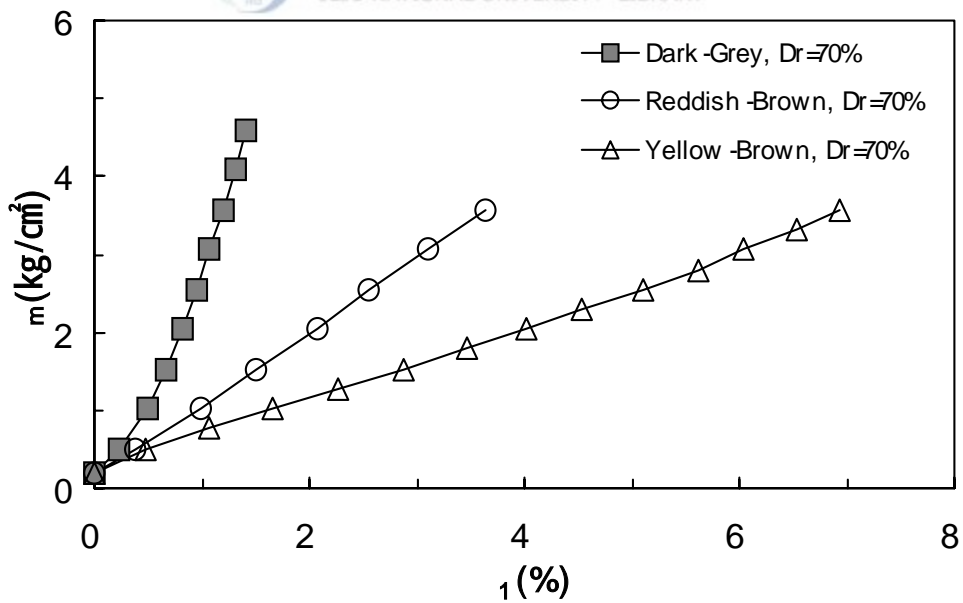


Fig 5.5 Relation of Isotropic Stress and Calculated Axial Strain from Isotropic Test of Scorias



Fig 5.6 Specimen After Isotropic Test
(Yellow-Brown Scoria)

Fig 5.4는 Medium상태에서의 암회색, 적갈색, 황갈색송이에 대한 등방압축시험시 등방응력에 대한 축변형률을 직접 측정하여 도시한 그림이다. 등방응력이 $3.57\text{kg}/\text{cm}^2$ 일 때의 송이의 색깔에 따른 연직변형을 살펴보면 암회색은 0.54%, 적갈색은 2.50%, 황갈색은 7.15%로 암회색과 적갈색은 축변형이 비교적 작은 반면 황갈색은 축변형이 많이 발생하고 있다.

Fig 5.5는 Medium상태에서의 암회색, 적갈색, 황갈색송이에 대한 등방압축시험시 등방응력에 대한 축변형률을 계산하여 도시한 그림이다. 앞에서 비교한 바와 같이 등방응력이 $3.57\text{kg}/\text{cm}^2$ 일 때의 송이의 색깔에 따른 연직변형을 살펴보면 암회색은 1.42%, 적갈색은 3.64%, 황갈색은 6.94%로 나타나고 있다.

암회색송이인 경우에는 계산 값이 측정값에 비해 3배정도 크게 나오고 있고 적갈색송이인 경우에는 약 1.5배정도 측정값이 크게 나온다. 변위가 작은 경우에는 연직변형측정값이 과소하게 산정되는 경향이 있다. 그러나 변위가 많이 발생하는 황갈색송이인 경우에는 계산 값과 측정값이 거의 비슷하다. 이는 작은 변위가 발생한 암회색과 적갈색송이는 장비의 오차로 연직변형률의 값이 영향을 받아 실측값과 계산 값의 차가 큰 반면 변위가 큰 황갈색인 경우에는 장비의 오차에 비해 변위가 많이 발생하므로 그 차가 작다고 하겠다. 등방압축시험시 연직변위를 직접 측정하기란 상당히 까다로운 문제이고 장비의 오차로 인해 체적변형을 이용한 계산이 바람직하다고 하겠다.

연직변위가 상당히 많이 발생한 황갈색송이의 등방압축시험을 끝내고 삼축시험장비에 부착된 dialgage의 연직변형측정값과 Cell을 제거하고 공시체의 연직변형을 공시체의 전·후·좌·우 4면에서 직접 계측한 값의 평균과 비교하여 보았다. Cell 내부의 구속응력을 제거하면 공시체가 교란되기 때문에 공시체를 제작할 때와 같은 압력으로 상부와 하부에 진공을 작용하고 Cell 내부의 구속압을 서서히 줄인 후 내부의 물을 제거하였다. 직접 계측한 연직변형률은 약 5.21%의 변형을 측정할 수 있었다. Cell내부의 물을 제거함으로써 공시체를 구속하는 힘이 없기 때문에 시험시 측정된 값과는 다소 차이를 보이고 있을 것으로 생각된다. Fig 5.6은 황갈색송이의 등방압축시험후 연직변형률을 측정하기 위해 공시체의 상하부에 진공을 가한 공시체의 모습이다.

2. 구속응력에 따른 거동특성

삼축시험에서 구속응력에 대한 영향을 고찰하기 위해 상대밀도가 50%, 70%, 85%인 암회색송이의 공시체를 구속응력 0.51kg/cm^2 , 1.02kg/cm^2 , 2.04kg/cm^2 으로 변화하여 시험을 실시하였다.

Fig 5.7은 Loose한 상태에서 구속응력을 변화시켜 연직변형률에 대한 축차응력과 체적변화량을 도시하였다. Fig 5.8은 Medium한 상태 Fig 5.9는 Dense한 상태에서의 구속응력에 따른 그래프를 나타내었다.

위의 시험결과로부터 구속응력이 증가하면 최대응력이 증가하고 최대응력이 발생하는 변형률도 증가함을 관찰할 수 있었다. 구속응력이 증가할수록 체적변화는 초기의 체적압축이 증가하고 반면 체적팽창은 줄어드는 경향을 나타내고 있다.

입자 사이에 마찰력이 작용하고 그 입자의 접촉면에서의 미끄러짐에 대한 저항은 각 접촉점에 작용하는 법선력에 비례한다. 그러므로 구속응력이 증가하면 전체적인 저항도 증가한다. 입자간의 역물림(interlocking) 또한 전체적인 저항에 기여한다. 구속응력이 증가할수록 역물림은 감소하는데 이는 입자들이 접촉점에서 뾰족한 부분이 부서지며 입자자체도 깨어지기 때문이다. 구속응력의 증가로 송이는 더 조밀하게 하는 반면 전단변형은 더 쉽게 일어나도록 한다.

Fig 5.10은 구속응력에 대한 파괴시의 연직응력을 나타내었고 Fig 5.11은 구속응력으로 표시한 것을 지중깊이로 나타내었다.

3. 상대밀도에 따른 거동특성

삼축시험에서 상대밀도의 변화에 따른 영향을 고찰하기 위해 암회색송이의 삼축압축시험결과를 가지고 구속응력이 0.51kg/cm^2 , 1.02kg/cm^2 , 2.04kg/cm^2 일 때 상대밀도가 50%, 70%, 85%로 변화하는 거동을 고찰하였다.

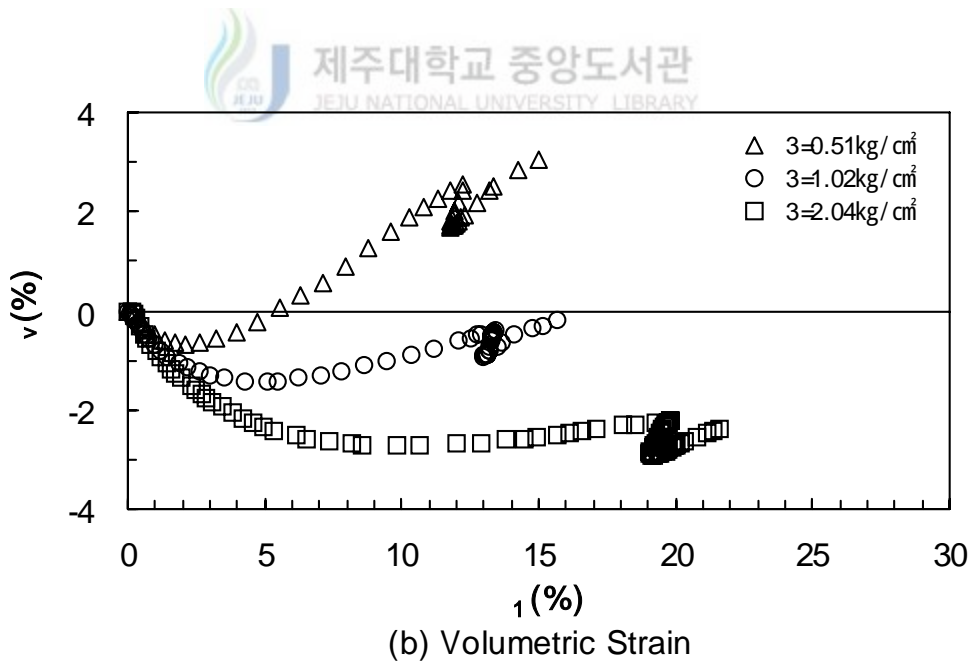
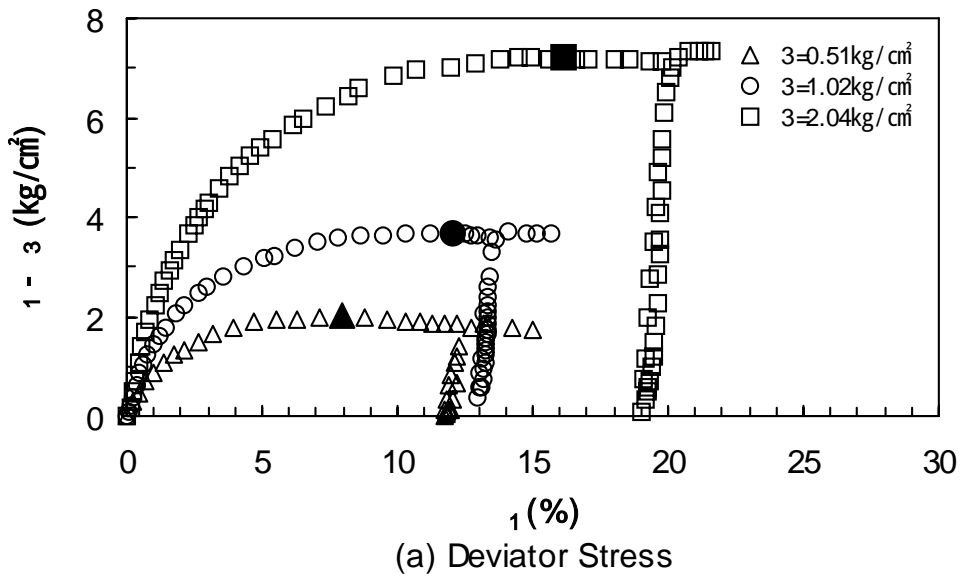
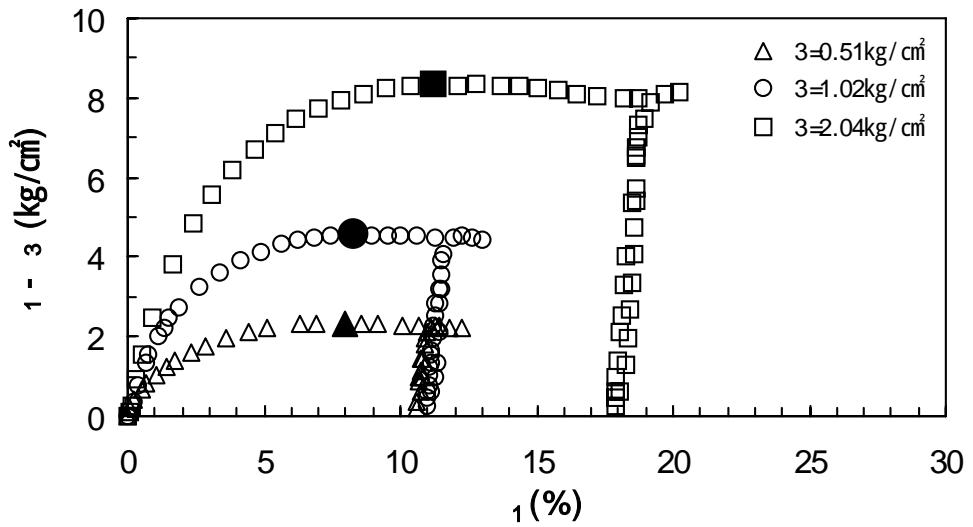
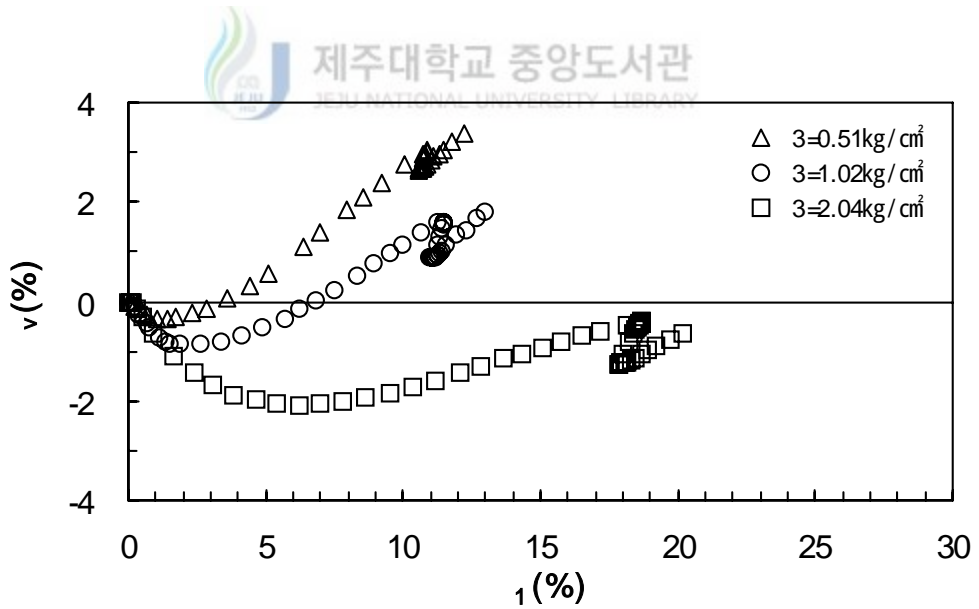


Fig 5.7 Stress-Strain Behavior for Dark-Grey Scoria(Dr=50%)



(a) Deviator Stress



(b) Volumetric Strain

Fig 5.8 Stress-Strain Behavior for Dark-Grey Scoria($D_r=70\%$)

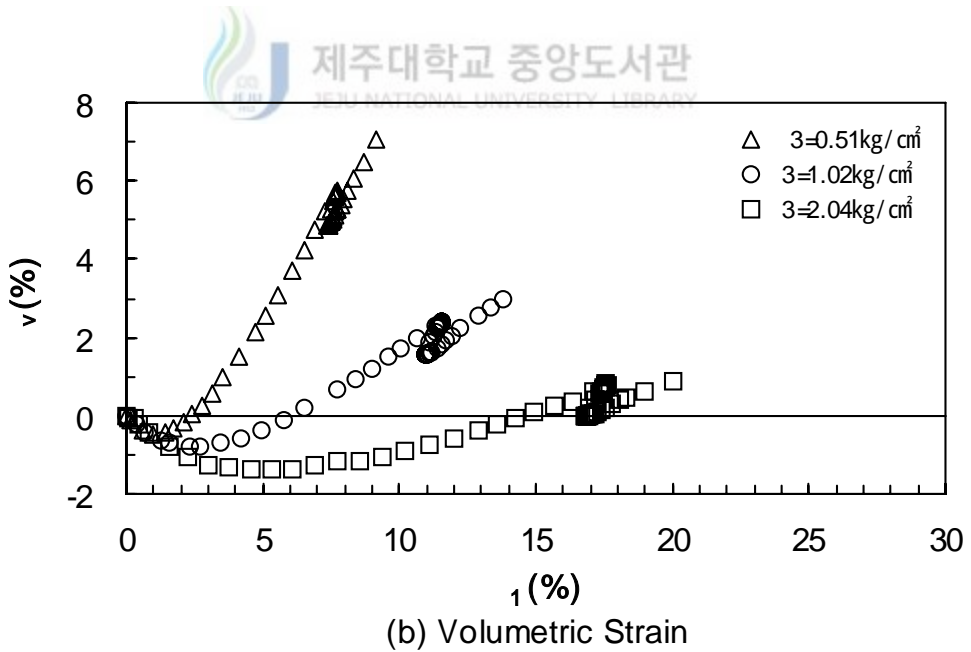
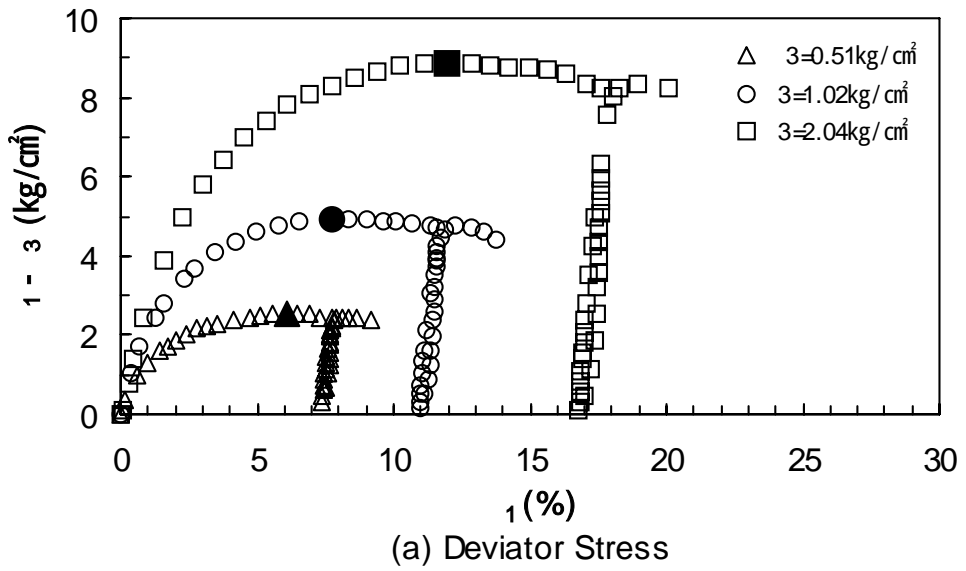


Fig 5.9 Stress-Strain Behavior for Dark-Grey Scoria(Dr=85%)

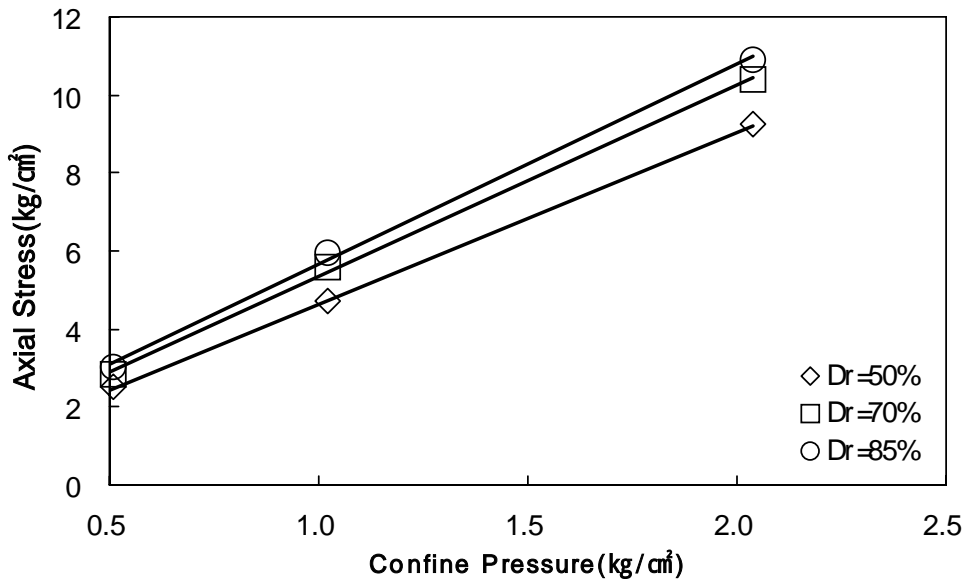


Fig 5.10 Failure Stress and Confining Pressure(Dark-Grey Scoria)

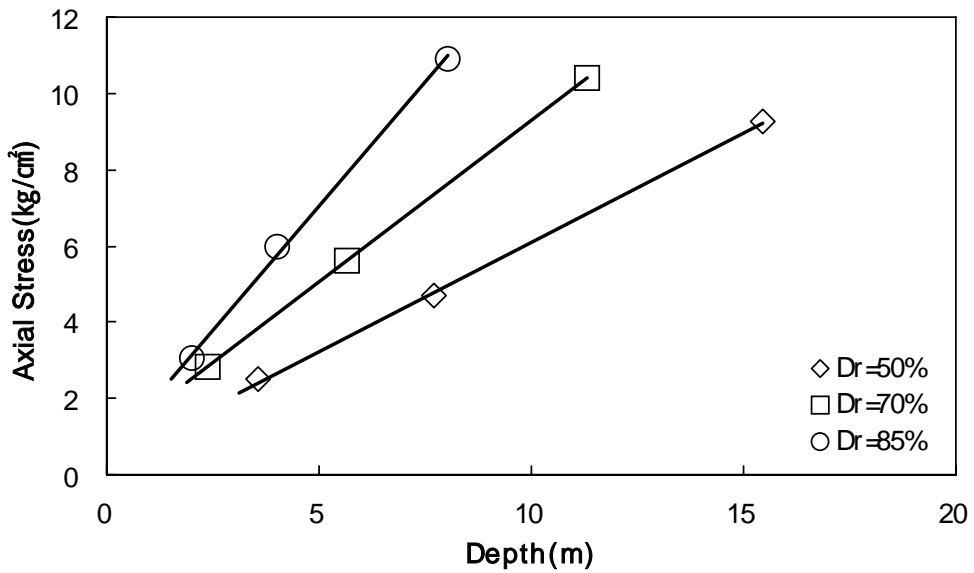


Fig 5.11 Failure Stress and Depth(Dark-Grey Scoria)

Fig 5.12(a)는 구속응력(σ_3) $0.51\text{kg}/\text{cm}^2$ 하 에서 상대밀도에 따른 축차응력과 연직변형률의 비를 나타내었다. 그림에서 Loose와 Medium의 경우에 변형이 약 7.9%에서 파괴가 일어나고 Dense한 경우에는 그보다 작은 6.1%에서 파괴가 발생하였다. Fig 5.12(b)는 축변형에 대한 체적변형의 비를 그림으로 나타내었다. 그림에서 Loose한 경우와 Medium한 경우 체적변형이 비슷하게 거동함을 알 수 있다. Dense한 경우에는 체적의 팽창량이 다른 두 경우에 비해 상당히 크게 일어나고 있다.

Fig 5.13(a)는 구속응력(σ_3) $1.02\text{kg}/\text{cm}^2$ 하 에서 각각의 상대밀도에 따른 축차응력과 연직변형률의 비를 나타내었다. 앞의 구속응력(σ_3) $0.51\text{kg}/\text{cm}^2$ 에서는 Loose와 Medium이 거의 비슷한 변형률에서 파괴가 발생한 것과는 달리 Medium과 Dense한 경우가 비슷한 변형률에서 파괴가 일어난다. Fig 5.13(b)은 축변형에 대한 체적변형의 비를 그림으로 나타내었다. 체적변형 또한 앞의 구속응력(σ_3) $0.51\text{kg}/\text{cm}^2$ 하에서와는 달리 Medium한 경우와 Dense한 경우 체적변형이 비슷하게 일어난다. Loose한 경우보다 체적의 팽창량이 크게 일어나고 있다.

Fig 5.14(a)는 구속응력(σ_3) $2.04\text{kg}/\text{cm}^2$ 하 에서 각각의 상대밀도에 따른 축차응력과 연직변형률의 비를 나타내었다. Medium과 Dense한 상태에의 파괴시 변형률이 약 11.5%에서 파괴가 일어난다. 구속응력(σ_3) $1.02\text{kg}/\text{cm}^2$ 하에서의 거동과 유사한 형태를 나타낸다. Fig 5.14(b)는 축변형에 대한 체적변형의 비를 그림으로 나타내었다.

암회색의 경우 상대밀도에 따른 응력-변형률 거동은 구속응력이 낮을 경우 Loose와 Medium상태의 송이는 비슷한 거동을 하지만 구속응력이 증가할 경우 Medium과 Dense상태의 송이가 비슷한 거동을 함을 나타낸다. 체적의 변화도 구속응력이 낮은 경우에는 Loose와 Medium상태의 송이는 비슷한 거동을 하지만 구속응력이 증가할 경우 Medium과 Dense상태의 송이가 비슷한 거동을 함을 나타낸다. 구속응력이 증가하면서 체적팽창량은 줄어드는 경향을 보이고 있다.

그러나 상대밀도가 증가하고 구속응력이 증가한 경우 Dense상태의 파괴시 변형률이 Medium상태의 파괴시 변형률 보다 약간 더 큰 것을 관찰할 수 있었다. 변형이 발생이 입자의 재배열이나 파쇄에 의해 발생한다고 할 때 상대밀도가 높은 암회색송이 입자가 높은 구속응력에서 재배치되어 나타나는 현상이라고 추정된다. Fig 5.15는 상대밀도의 변화에 따른 최대연직응력을 나타내었다.

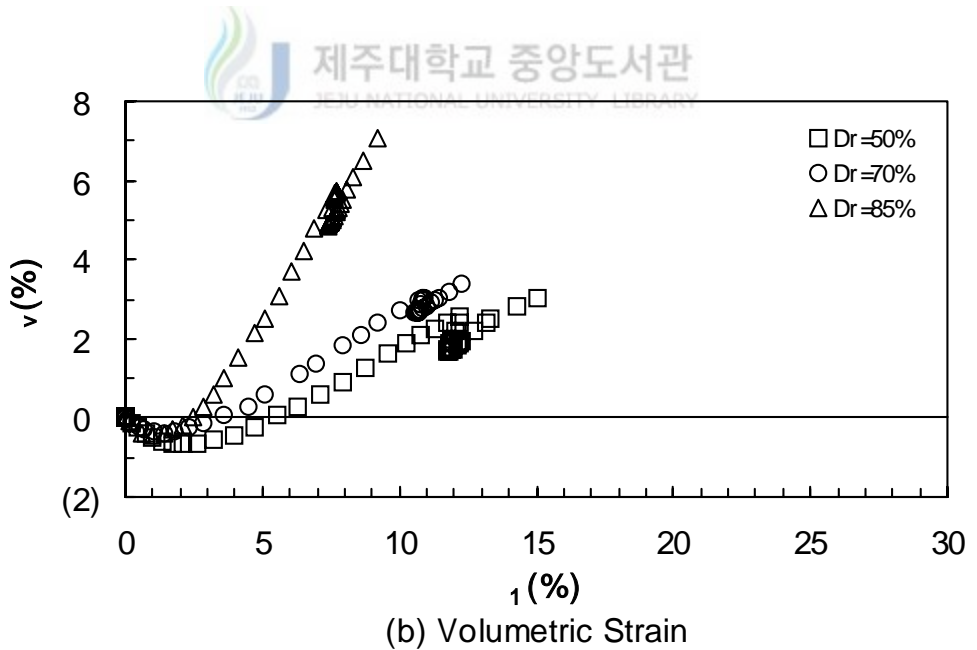
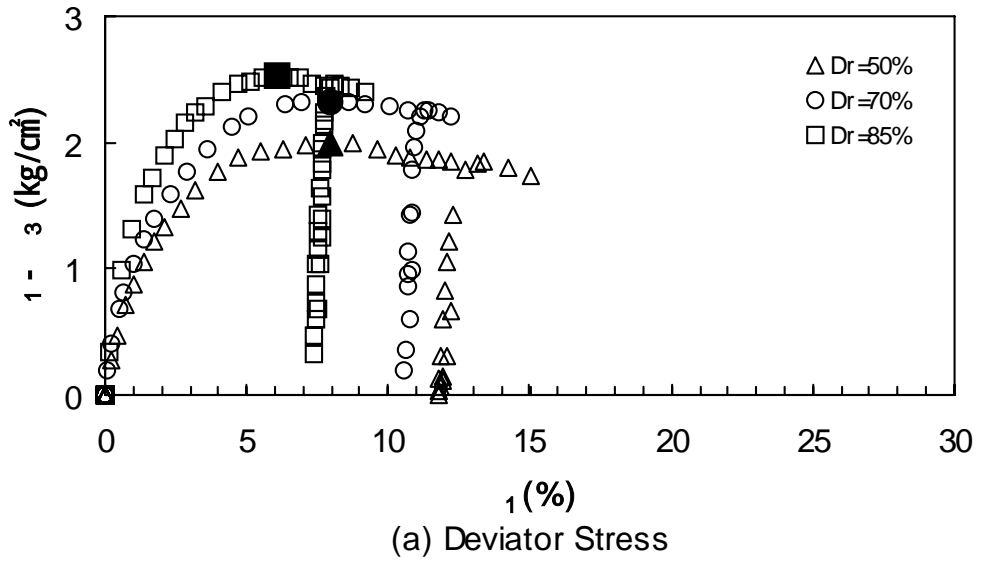


Fig 5.12 Stress-Strain Behavior for Dark-Grey Scoria($\sigma_3=0.51\text{kg/cm}^2$)

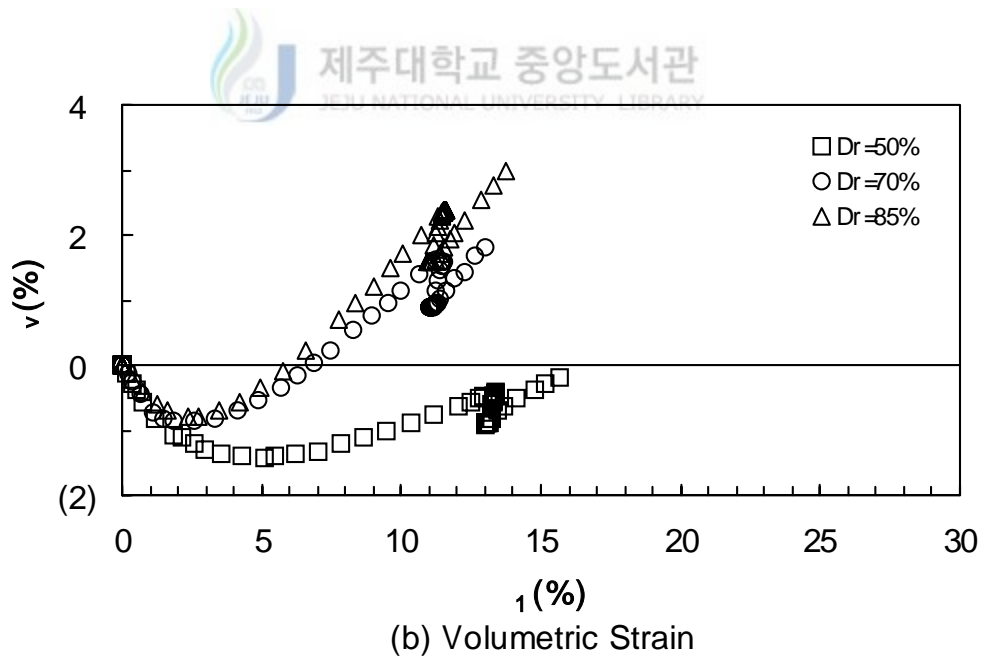
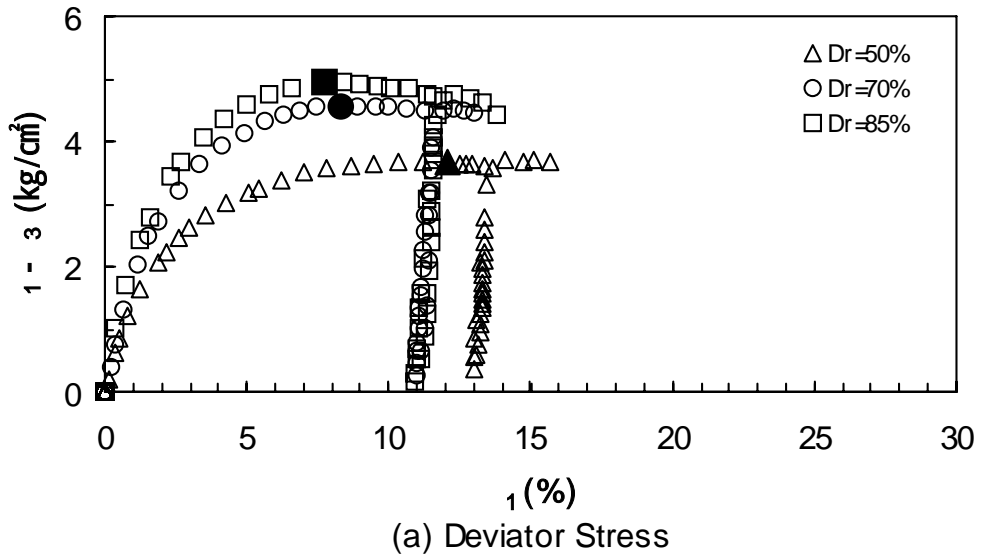
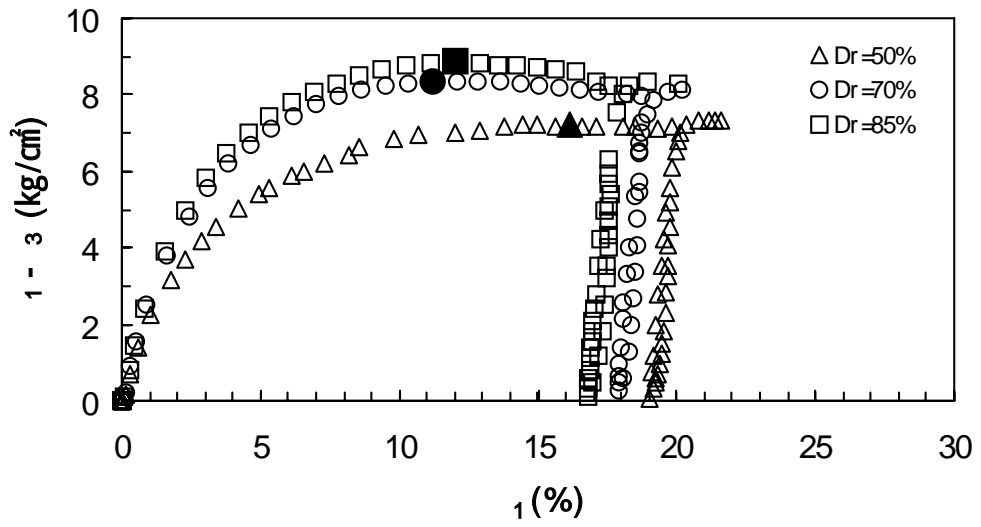
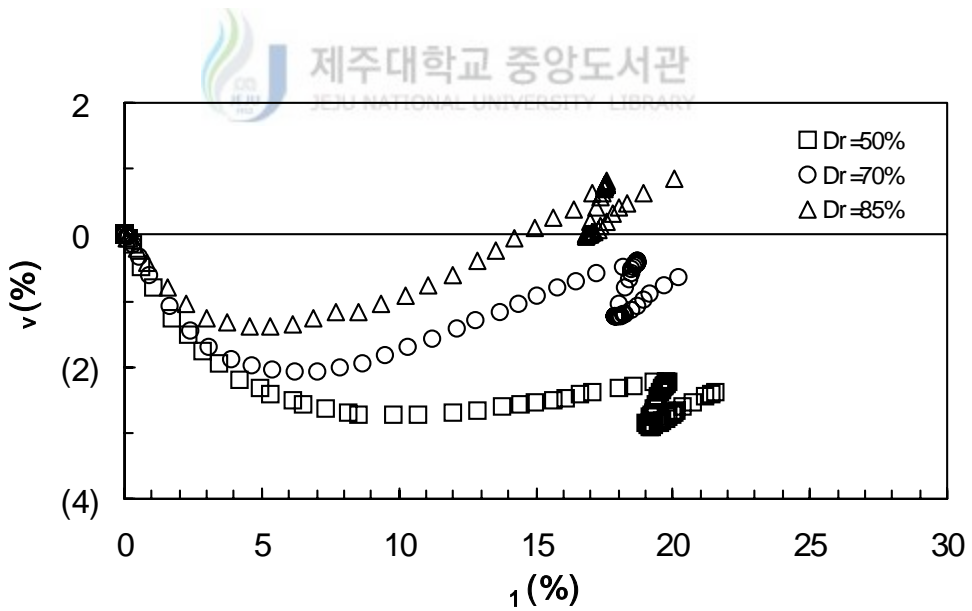


Fig 5.13 Stress-Strain Behavior for Dark-Grey Scoria ($\sigma_3=1.02\text{kg/cm}^2$)



(a) Deviator Stress



(b) Volumetric Strain

Fig 5.14 Stress-Strain Behavior for Dark-Grey Scoria ($\sigma_3=2.04\text{kg/cm}^2$)

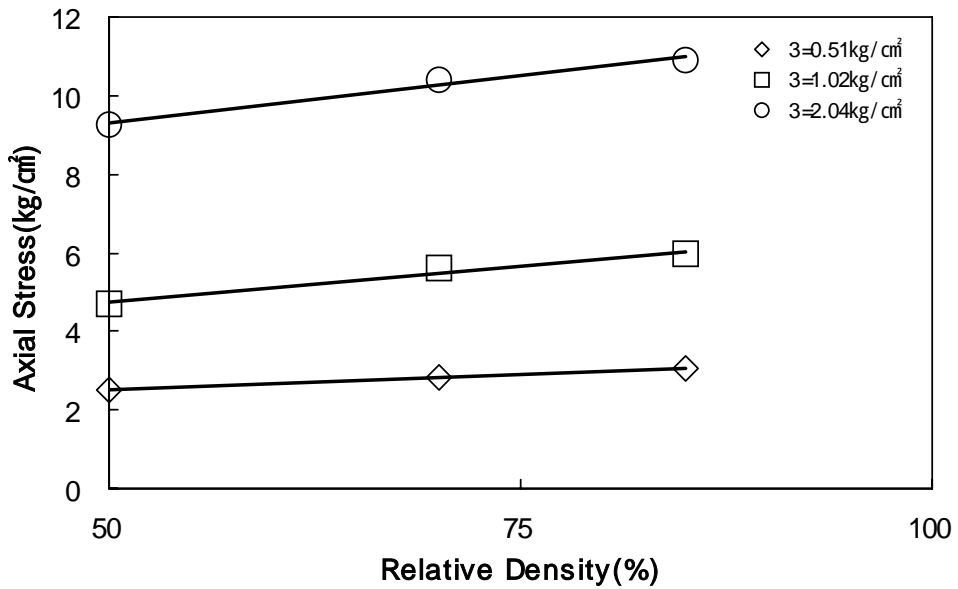
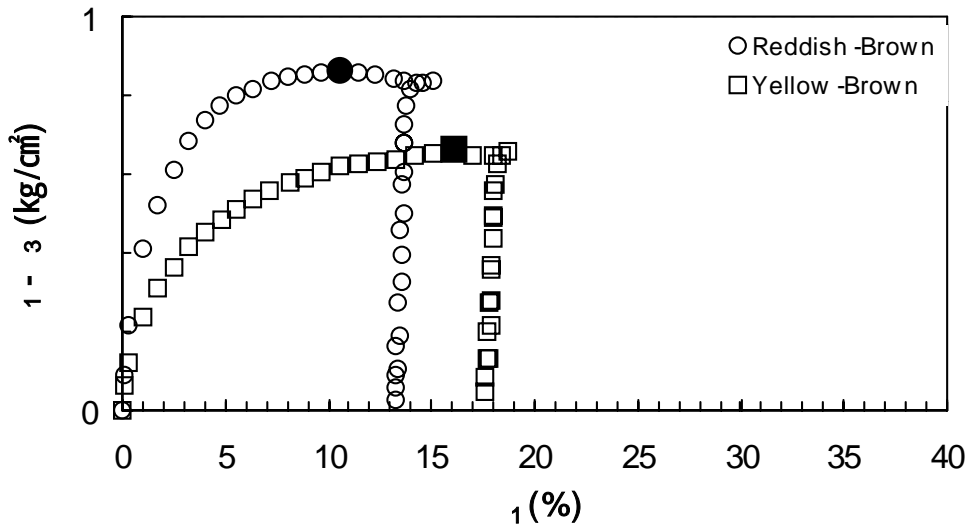


Fig 5.15 Failure Stress and Relative Density(Dark-Grey Scoria)

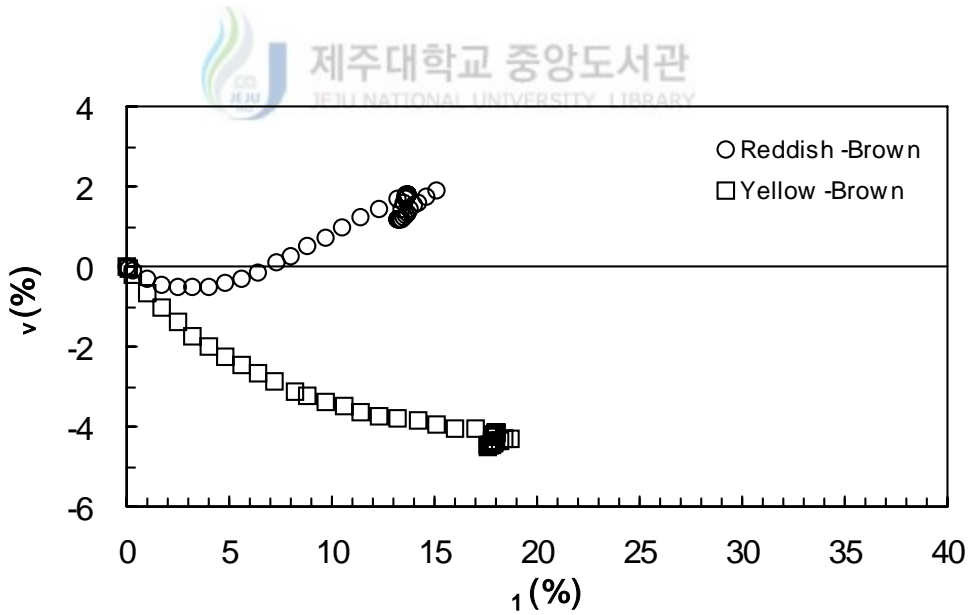
4. 색깔에 따른 강도특성

송이의 색깔에 대한 강도특성을 고찰하기 위해 Medium(Dr=70%)상태의 암회색, 적갈색, 황갈색송이에 대하여 구속응력을 변화시켜 삼축압축시험을 실시하였다. 4장에서 언급한 바와 같이 황갈색과 적갈색은 구속응력이 2.04kg/cm²일 때에 하중전달봉과 공시체 상부캡과의 일탈로 시험을 실시하지 못하여 구속응력을 낮추어 시험을 실시하였다.

Fig 5.18은 구속응력이 0.25kg/cm²일 때 적갈색과 황갈색 송이의 연직변형률에 대한 축차응력과 체적변화를 도시한 그림이다. 황갈색송이가 적갈색송이에 비해 강도가 작고 연직변형률은 크게 나타나고 있으며 적갈색송이는 체적변화가 초기에 적은 압축량을 보이다가 팽창하고 있지만 황갈색송이는 계속 압축변형만 일어나고 있다.

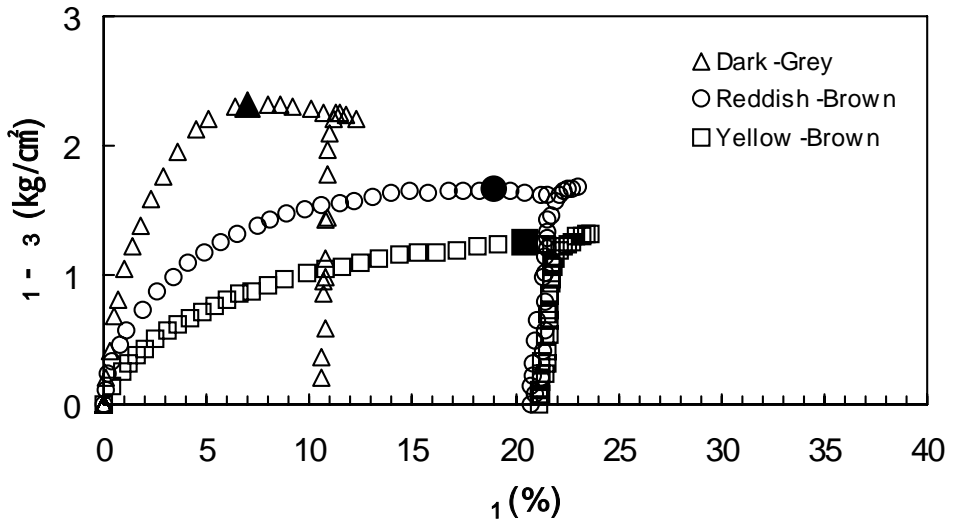


(a) Deviator Stress

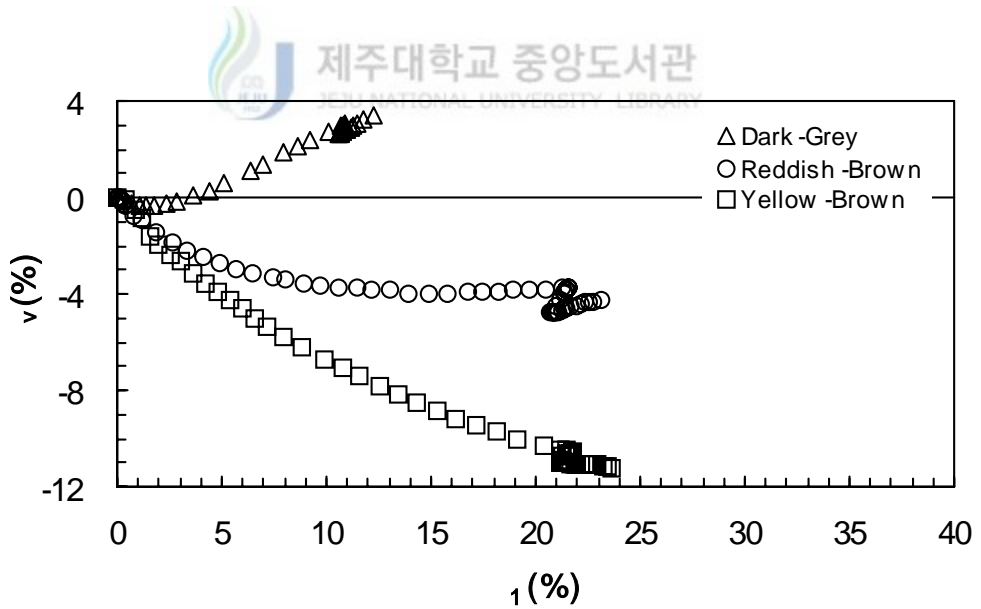


(b) Volumetric Strain

Fig 5.16 Stress-Strain Behavior for Medium Dense Scorias
($D_r=70\%$, $\sigma_3=0.25\text{kg/cm}^2$)

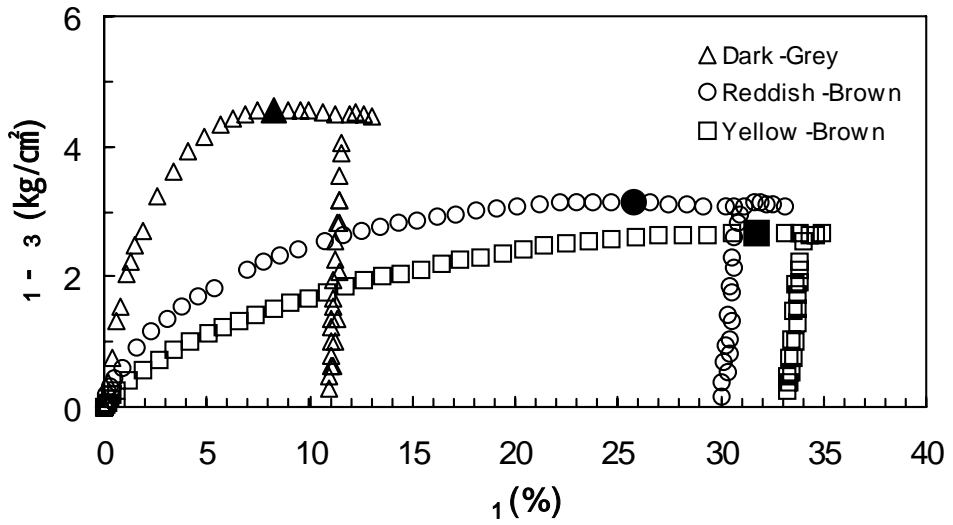


(a) Deviator Stress

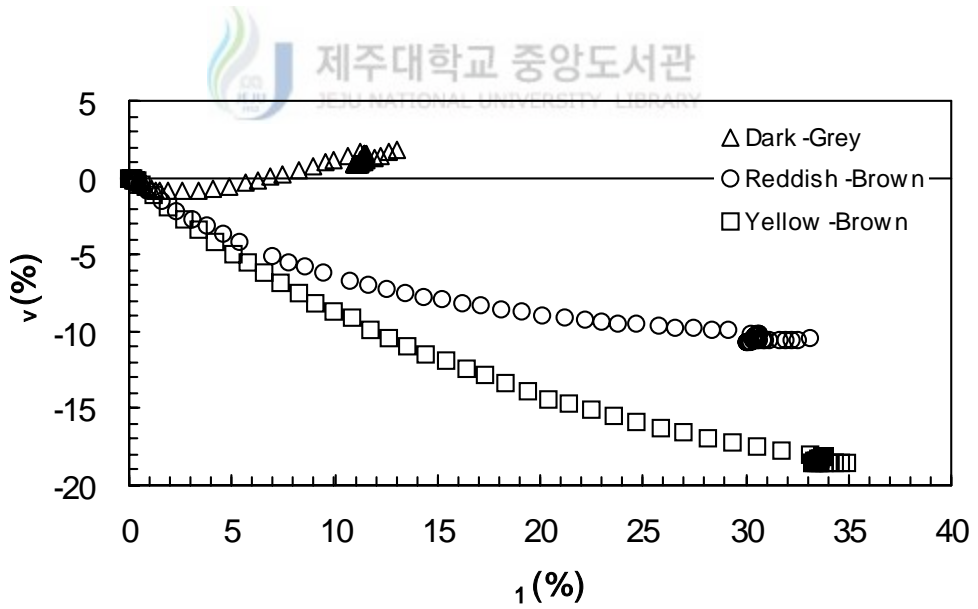


(b) Volumetric Strain

Fig 5.17 Stress-Strain Behavior for Medium Dense Scorias
($D_r=70\%$, $\sigma_3=0.51\text{kg/cm}^2$)



(a) Deviator Stress



(b) Volumetric Strain

Fig 5.18 Stress-Strain Behavior for Medium Dense Scorias
($D_r=70\%$, $\sigma_3=1.02\text{kg/cm}^2$)

Fig 5.19는 구속응력이 $0.51\text{kg}/\text{cm}^2$ 일 때 암회색, 적갈색 그리고 황갈색송이의 연직변형률에 대한 축차응력과 체적변화를 나타내었다. 파괴시 강도는 암회색이 가장 크고 적갈색송이의 체적팽창량은 줄어들고 황갈색의 체적압축량은 약 3배 가량 증가하고 있다.

Fig 5.20은 구속응력이 $1.02\text{kg}/\text{cm}^2$ 일 때의 암회색, 적갈색 그리고 황갈색송이의 연직변형률에 대한 축차응력과 체적변화를 나타내었다.

최대축차응력을 적갈색을 기준으로 살펴보면 구속응력이 0.25 와 $0.51\text{kg}/\text{cm}^2$ 일 때에는 황갈색이 약 25%정도 낮게 나타났고 구속응력이 $1.02\text{kg}/\text{cm}^2$ 일 때에는 약 15%정도 낮게 나타났다.

암회색은 구속응력이 $0.51\text{kg}/\text{cm}^2$ 일 때에는 40%정도 크고 구속응력이 $1.02\text{kg}/\text{cm}^2$ 일 때에는 45%정도 크게 나타났다. 암회색송이인 경우 체적변화가 압축에서 팽창으로 변화하는 것이 뚜렷하게 나타나고 적갈색은 낮은 구속응력에서는 압축에서 팽창으로 변화하다 높은 구속응력에서는 압축이 발생한다. 그러나 황갈색은 체적의 변화가 압축으로만 변화하고 있음을 보여주고 있다. 연직변형률 또한 암회색보다 적갈색과 황갈색이 아주 크게 변화한다.

Table 5.1은 각 송이의 상대밀도에 대한 내부마찰각을 나타내었다. 이를 기초로 하여 배수삼축시험에 대한 Mohr원을 각각의 송이에 나타내어 보았다.

Fig 5.19, 20, 21은 암회색송이의 Dense, Medium, Loose한 경우에 대한 그림이고 Fig 5.22, 23은 적갈색 송이와 황갈색송이에 대하여 Medium한 경우의 그림이다. 상대밀도가 증가할수록 마찰각은 증가함을 알 수 있다.

송이의 거동과 일반적인 사질토와 마찰각을 비교하여 보았다. Table 5.2는 각짐성과 입도분포 그리고 일반적 모래의 배수 마찰각을 표로 나타내고 있다. 암회색송이의 입자를 살펴보면 입자가 대체로 많이 각져 있었다. Table 5.1과 5.2를 살펴보면 암회색송이의 마찰각의 변화가 각이진 모래의 마찰각과 거의 유사한 결과를 나타내고 있는 것을 관찰할 수 있었다.

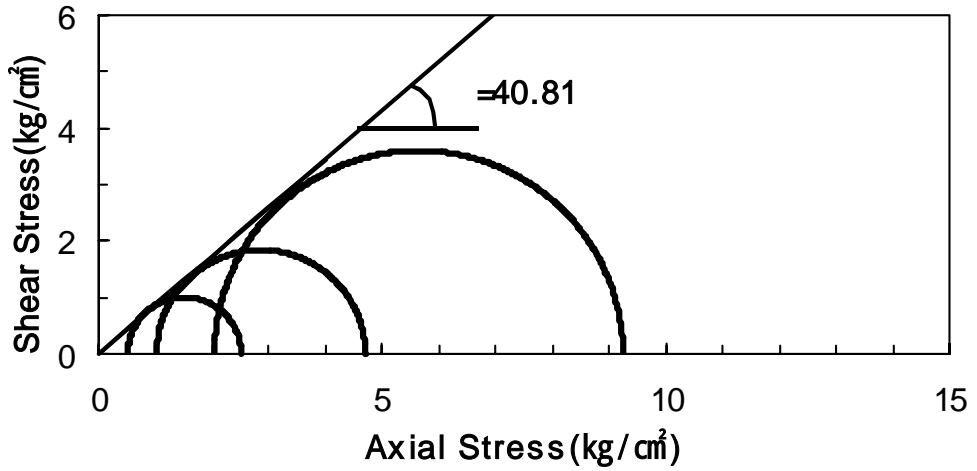


Fig 5.19 Mohr Circles and Failure Envelope for Triaxial Test of Loose Dark-Grey Scoria(Dr=50%)

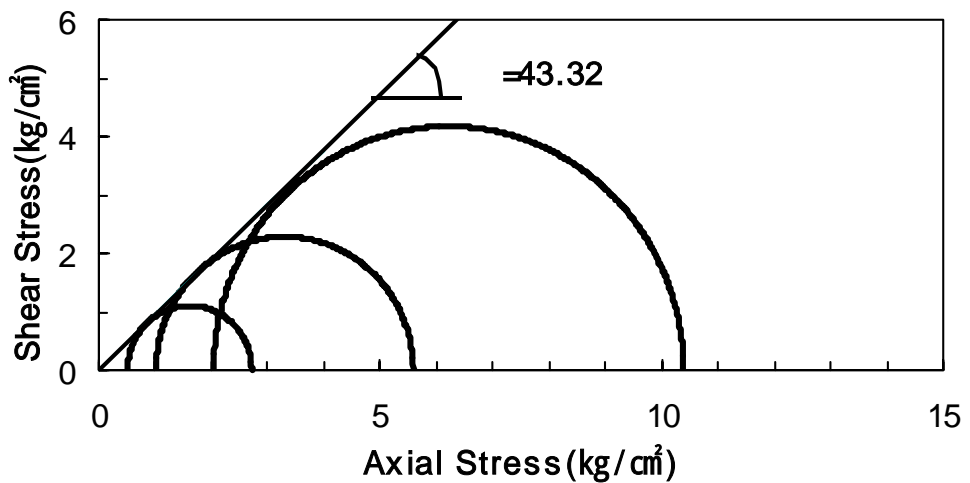


Fig 5.20 Mohr Circles and Failure Envelope for Triaxial Test of Medium Dark-Grey Scoria(Dr=70%)

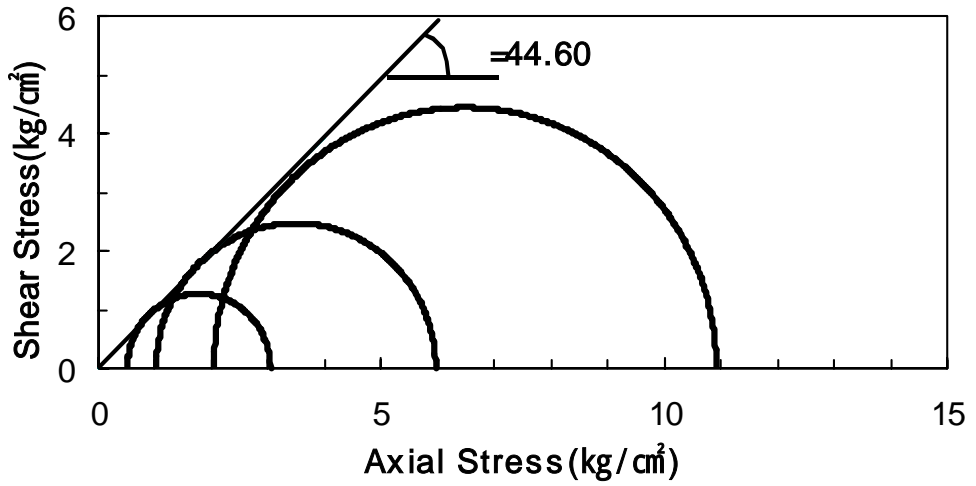


Fig 5.21 Mohr Circles and Failure Envelope for Triaxial Test of Dense Dark-Grey Scoria(Dr=85%)

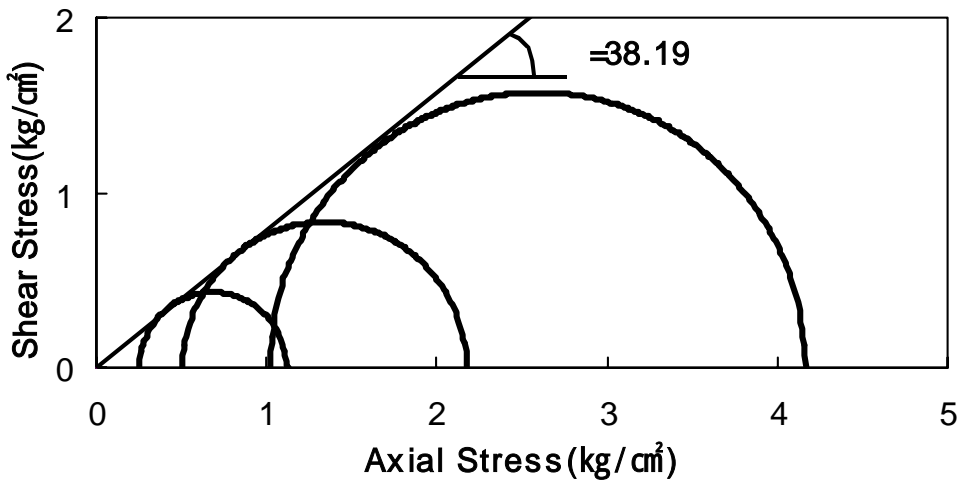


Fig 5.22 Mohr Circles and Failure Envelope for Triaxial Test of Medium Reddish-Brown Scoria(Dr=70%)

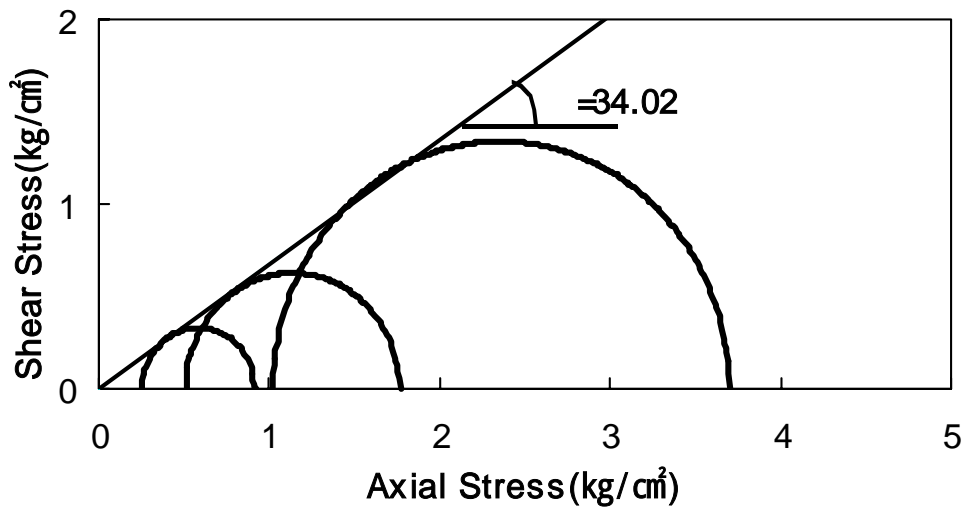


Fig 5.23 Mohr Circles and Failure Envelope for Triaxial Test of Medium Dark-Grey Scoria(Dr=70%)

Table 5.1 Friction Angle of Scorias

Sample Color	Dark-Grey			Reddish -Brown	Yellow -Brown
	Loose (Dr=50%)	medium (Dr=70%)	Dense (Dr=85%)	Medium (Dr=70%)	Medium (Dr=70%)
Friction Angle(ϕ°)	40.81	43.32	44.60	38.19	34.02

Table 5.2 Effect of Angularity and Grading on Peak Friction Angle and Typical Values of Drained Angle of Friction for Sand

Shaping Grading	Loose	Dense		Loose (Dr: 15-50%)	Medium (Dr: 50-70%)	Dense (Dr: 70-85%)
Rounded, Uniform	30°	37°	Round	37-30°	30-35°	35-38°
Rounded, Well graded	34°	40°	Grains			
Angular, Uniform	35°	43°	Angular	30-35°	35-40°	40-45°
Angular, Well graded	39°	45°	Grains			

From Sowers and Sowers, 1951

5. 입자의 파쇄특성

송이의 입자는 암석과 같이 매우 큰 입자에서부터 200번체를 통과하는 미세한 입자까지 매우 다양한 입도분포를 갖는다. 본시험은 2mm에서 0.425mm 사이의 입자를 가지고 암회색, 적갈색 그리고 황갈색의 세 가지 색깔을 띤 송이에 대하여 삼축압축시험을 실시하였다. 암회색송이의 Loose, Medium, Dense한 상태의 초기간극비는 0.787, 0.756, 0.733이고 건조단위중량은 1.322, 1.363, 1.407 kg/cm³의 값을 갖는다. 적갈색과 황갈색송이는 Medium 상태의 초기간극비가 1.152, 1.391이고 건조단위중량이 0.898, 0.749kg/cm³의 값을 갖는다. 이러한 시료의 파쇄특성을 살펴보기 위하여 삼축압축시험을 마친 공시체의 시료를 건조로에 말려 체분석을 실시하였다.

Fig 5.24, 25, 26은 암회색송이를 Loose, Medium, Dense한 상태에서 구속응력을 변화시켜 실시한 시험의 입도분포곡선을 그려 나타내었다. ◆는 시험전 체분석을 실시하였을 때이고 □는 구속응력이 2.04kg/cm², ○는 구속응력이 1.02kg/cm², △는 구속응력이 0.51kg/cm²일 때이다.

Fig 5.27, 28은 적갈색과 황갈색송이를 Medium한 상태에서 구속응력을 변화시켜 삼축시험을 실시한 입도분포곡선을 그려 나타내었다. ◆는 시험전 체분석을 실시하였을 때이고 □는 구속응력이 1.02kg/cm², ○는 구속응력이 0.51kg/cm², △는 구속응력이 0.25kg/cm²일 때이다.

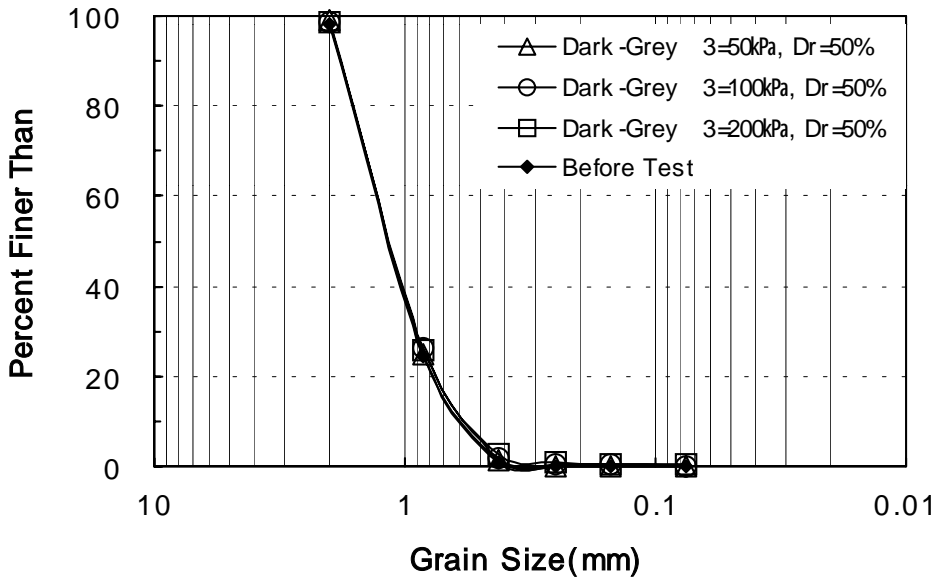


Fig 5.24 Grain Size Distribution for Dark-Grey Scoria of Loose Density ($D_r = 50\%$)

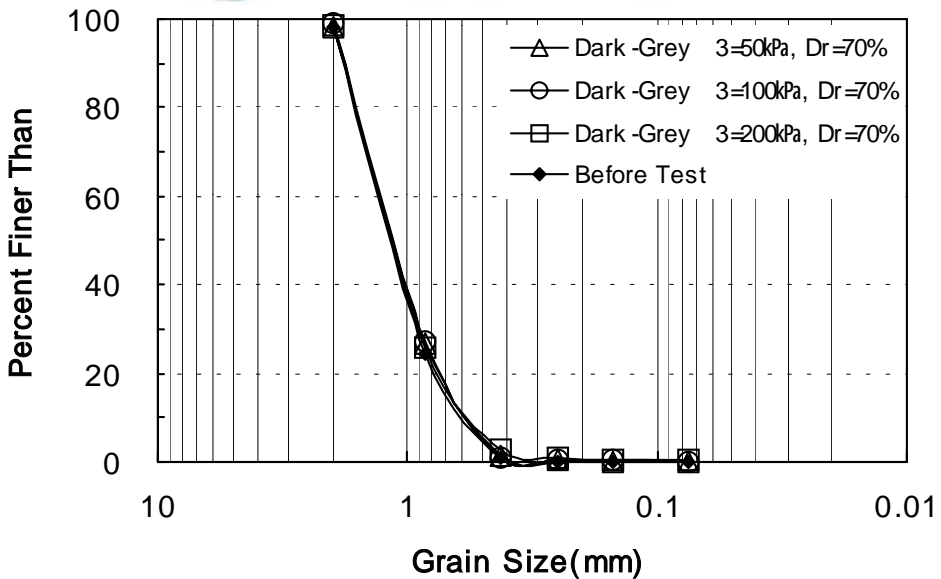


Fig 5.25 Grain Size Distribution for Dark-Grey Scoria of Medium Density ($D_r = 70\%$)

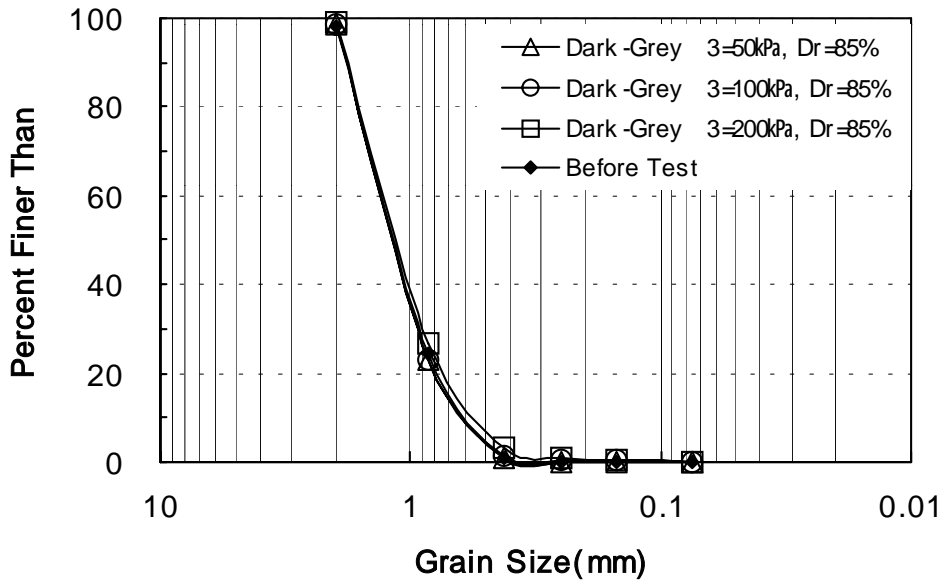


Fig 5.26 Grain Size Distribution for Dark-Grey Scoria of Dense Density($D_r=85\%$)

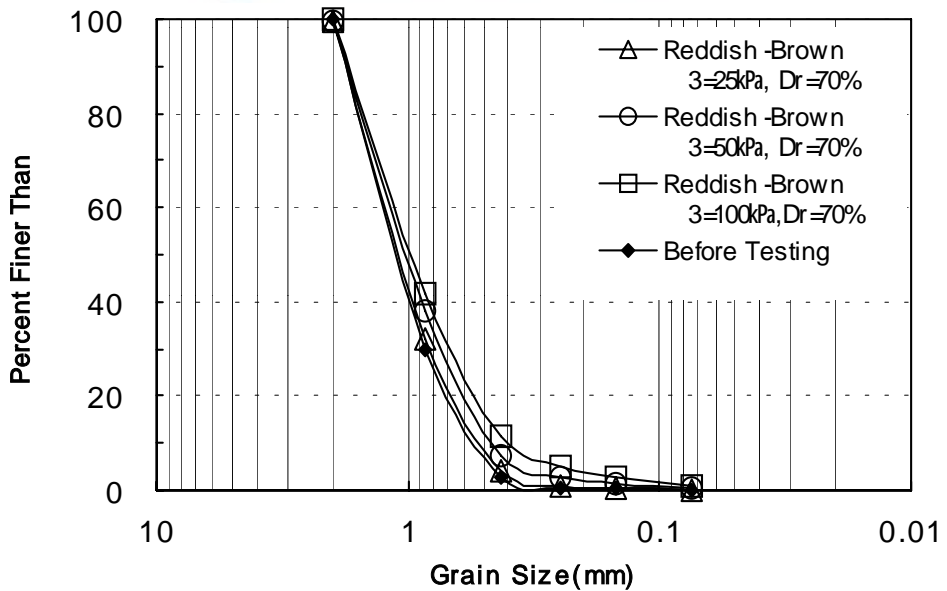


Fig 5.27 Grain Size Distribution for Reddish-Brown Scoria of Medium Density($D_r=70\%$)

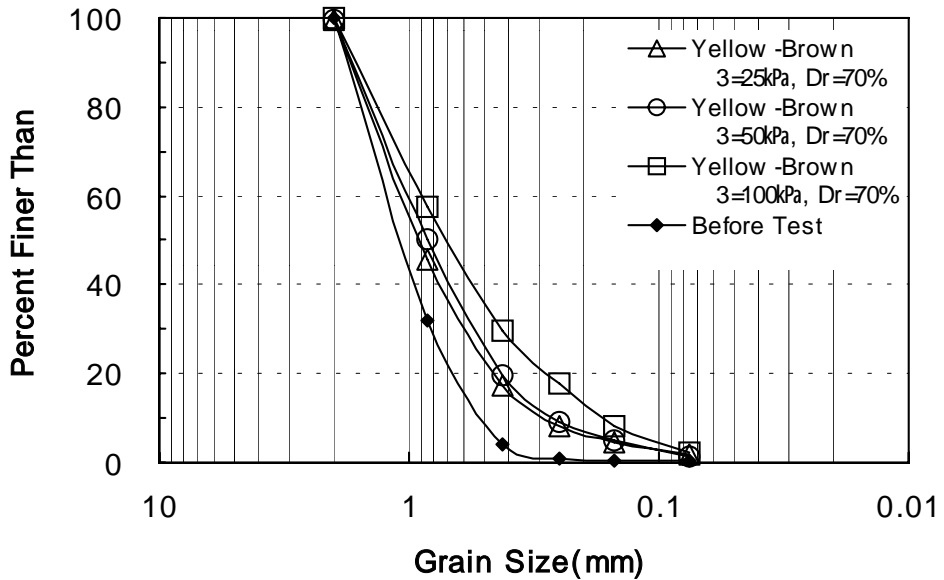


Fig 5.28 Grain Size Distribution for Yellow-Brown Scoria of Medium Density($D_r=70\%$)



암회색송이인 경우 상대밀도가 크고 구속응력이 클수록 파쇄가 더 크게 일어나고 있으나 아주 미세한 차이라 하겠다. Loose한 상태에서 구속응력이 $0.51\text{kg}/\text{cm}^2$ 일 때 40번체(0.425mm)를 통과하는 량은 1.18% , $1.02\text{kg}/\text{cm}^2$ 일 때는 1.76% , $2.04\text{kg}/\text{cm}^2$ 일 때는 2.56% 로 나타났고 Medium 상태에서는 1.26 , 1.07 , 2.71% 이었으며 Dense한 상태에서는 0.75 , 1.24 , 3.11% 로 나타났다. 중간이하의 상대밀도와 낮은 구속응력에서는 역물림 현상이 일어나는 것으로 보이며 조밀하고 높은 구속응력에서는 역물림 면으로부터 입자의 파쇄가 일어남을 추정할 수 있다. 그러나 암회색송이의 파쇄는 입자자체의 강도가 크므로 입자의 파쇄는 거의 일어나고 있지 않다.

적갈색송이는 구속응력이 $0.25\text{kg}/\text{cm}^2$ 일 때 40번체를 통과하는 량이 3.95% , 구속응력이 $0.51\text{kg}/\text{cm}^2$ 일 때는 7.48% , 구속응력이 $1.02\text{kg}/\text{cm}^2$ 일 때는 11.44% 로 나타났고 등방압축시험에서는 6.49% 의 시료가 통과하였고 황갈색송이는 17.53 , 19.66 , 29.74 , 17.40% 의 송이가 통과하였다.

각진 입자는 둥근 입자에 비해 입자간의 맞물림이 더 양호하여 마찰각도 더

크다. Table 5.1과 5.2에 나타난 바와 같이 이러한 현상을 관찰할 수 있었다.

사용한 시료는 암회색송이가 많이 각져 있었고 적갈색과 황갈색은 암회색 송이에 비해 입자표면이 부드럽고 둥근 형태를 띠고 있었다. 모래의 경우 더 이상의 체적변화를 일으키지 않는 한계상태에서도 각이진 입자일수록 마찰각이 크다. 입자가 부서지면 각짐의 영향이 작게 나타난다. 입도분포가 좋은 흙은 입자간의 접촉점이 많아 접촉점간 하중은 입자가 균등한 흙에 비해 더 작기 때문에 입도분포가 좋은 흙이 같은 크기의 균등한 흙에 비해 부서짐이 적다. 여기서 사용한 시료는 균등계수가 6이하로 입도분포가 좋은 시료는 아니다. 따라서 파쇄가 많이 일어날 것으로 예상되었으나 암회색 송이인 경우 입자자체의 강도가 훨씬 크므로 파쇄가 거의 일어나지 않았다.

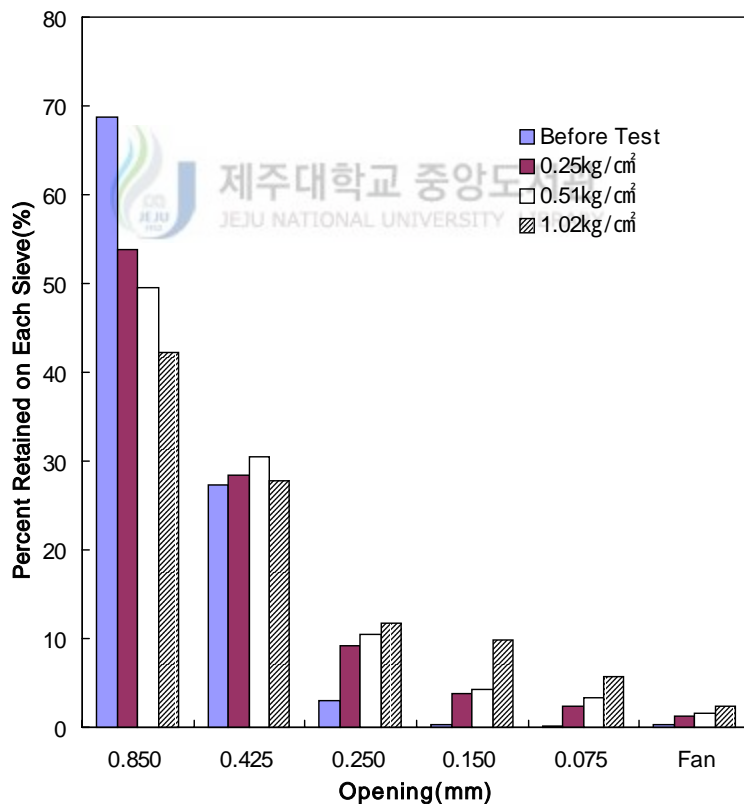


Fig 5.29 Percent Retained on Each Sieve for Yellow-Brown Scoria

Fig 5.29는 황갈색 송이의 체분석에서 각체에 남아있는 송이의 백분율을 나타내었다. 0.85mm에 남는 송이의 양이 구속응력이 증가할수록 감소하고 있는 것으로 크기가 큰 입자가 많이 깨어지고 있다. 0.425mm에 남는 송이의 양은 구속응력이 0.25와 0.51kg/cm²일 때에는 큰 입자가 깨어져 그 크기에 해당하는 입자의 증가로 양이 늘어나고 있지만 구속응력이 1.02kg/cm²일 때에는 그에 해당하는 시료들도 상당히 많이 부서지고 있음을 알 수 있다. 나머지 크기를 살펴보면 입자의 부서짐으로 그 양이 증가하고 있다.



VI. 거동예측

1. 단일경화구성모델의 계수결정

등방단일경화구성모델은 마찰물질을 위한 구성모델로서 이것은 탄성과 소성이론이 그 기본개념이 되고 있다. 이 모델은 11개의 계수를 가지고 있으며 이들 계수는 삼축압축시험 결과로부터 구할 수 있다. 여기서는 암회색 송이에 대한 거동예측을 하였으며 예측에 필요한 계수 결정은 각각의 초기간극비에 따라 결정하였다.

1) Loose한 경우

(1) 탄성거동

암회색송이의 탄성계수를 결정하기 위하여 우선 식(3.12)의 축변형률에 대한 체적변형률의 관계로부터 점토의 포아슨비 ν 를 결정하였다. 상대밀도가 50%로 Loose한 경우 즉 초기간극비(e_0)가 0.787인 암회색송이의 경우는 평균 포아슨비 ν 0.30이다. 그리고 탄성계수 결정시 필요한 식(3.9)의 계수 M 과 λ 의 결정을 위해 삼축시험결과를 이용하여 횡축에 $[(I_1/Pa)^2 + R \cdot (J_2'/Pa^2)]$ 의 값을, 종축에서 시험으로부터 구한 탄성계수의 무차원 값이 E/Pa 를 Fig 6.1과 같이 도시하였다. 여기서 Fig 6.1의 시험결과치에 대한 회기분석을 실시하여 M 은 횡축 값이 1일 때의 종축의 절편값이며, λ 는 그 기울기로서 그 값을 각각 357.77과 0.473으로 결정하였다.

(2) 파괴규준

식(3.13)에 의해 제시된 파괴규준은 Fig 6.2에 나타난 바와 같이 양면대수지에 파괴시의 (I_1^3/I_3-27) 와 (Pa/I_1) 의 관계를 각각 종축과 횡축의 값으로 도시함으로써 구할 수 있다.

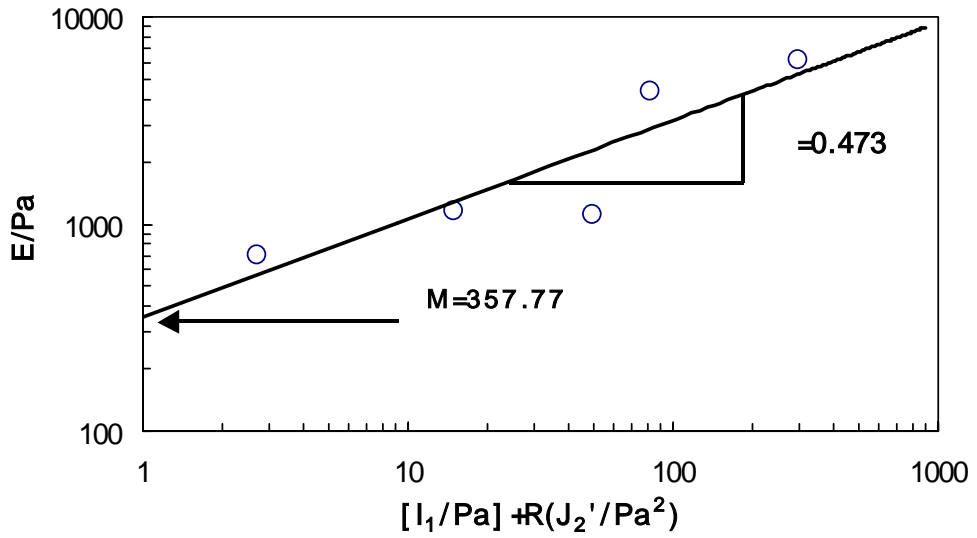


Fig 6.1 Determination of M and λ for Young's Modulus
($D_r=50\%$, Dark-Grey Scoria)

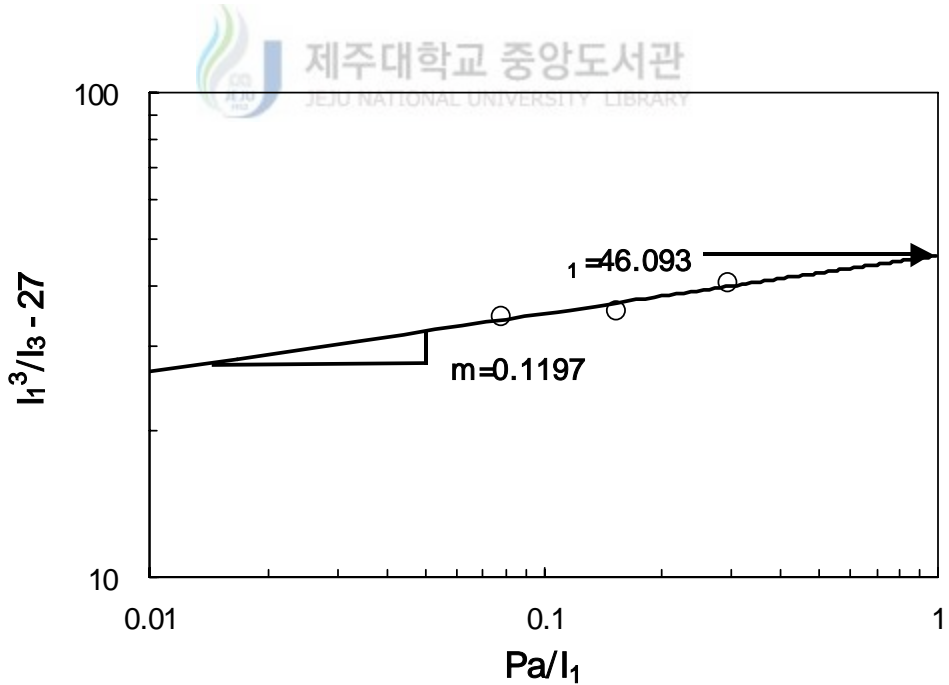


Fig 6.2 Determination of η_1 and m for Failure Criterion
($D_r=50\%$, Dark-Grey Scoria)

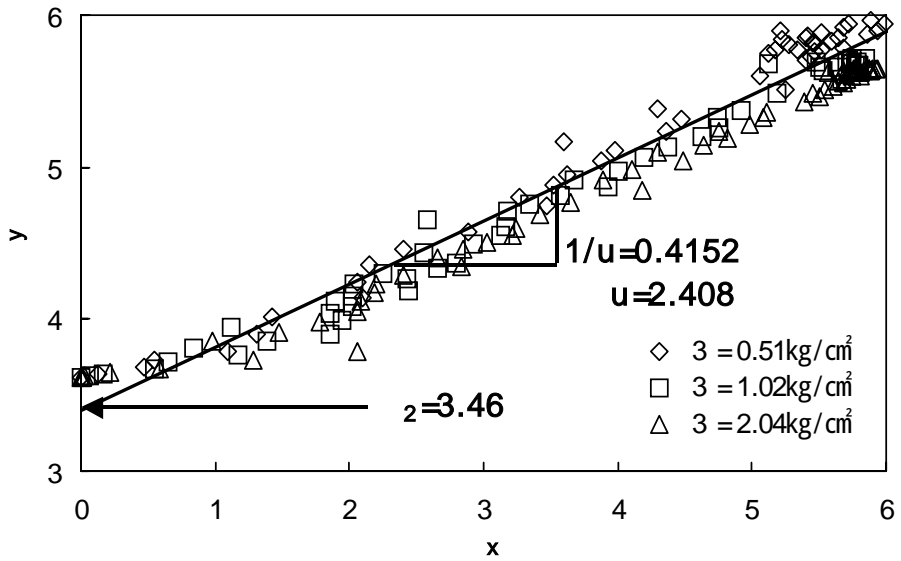


Fig 6.3 Determination of Ψ_2 and μ for Potential Function (Dr=50%, Dark-Grey Scoria)

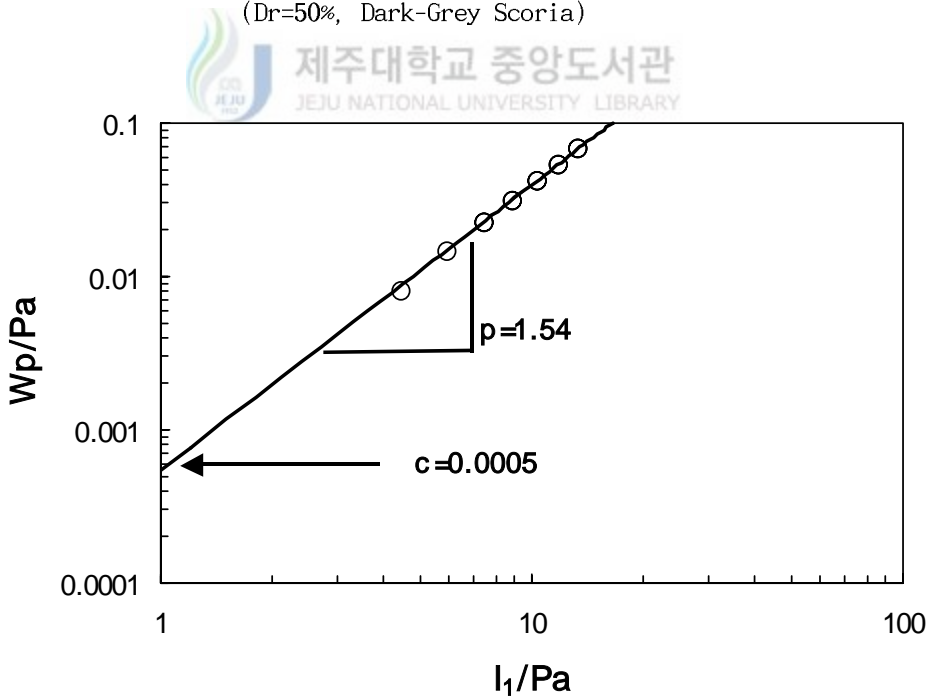


Fig 6.4 Determination of C and p for Work-Hardening Relation (Dr=50%, Dark-Grey Scoria)

여기서 사용된 실험치는 3개의 삼축압축시험 결과치로 n_1 과 m 은 이 값들을 회기분석하여 구한 직선의 절편과 기울기로서 각각 46.09와 0.12로 결정하였다.

(3) 소성 Potential 함수

식(3.15)에 의해 제시된 소성 포텐셜함수는 삼축시험결과로부터 Ψ_2 와 μ 의 결정을 필요로 한다. 이들 계수는 식(3.21)과 삼축시험결과로부터 구할 수 있다. Fig 6.3은 삼축압축시험 결과치를 모두 하나의 도면에 ξ_x 와 ξ_y 의 관계로 나타낸 것으로 여기서 Ψ_2 는 -3.46으로 결정하였으며 μ 는 2.408로 하였다. 또한 Ψ_1 은 식(3.16)에 의해서 0.0229로 결정하였다.

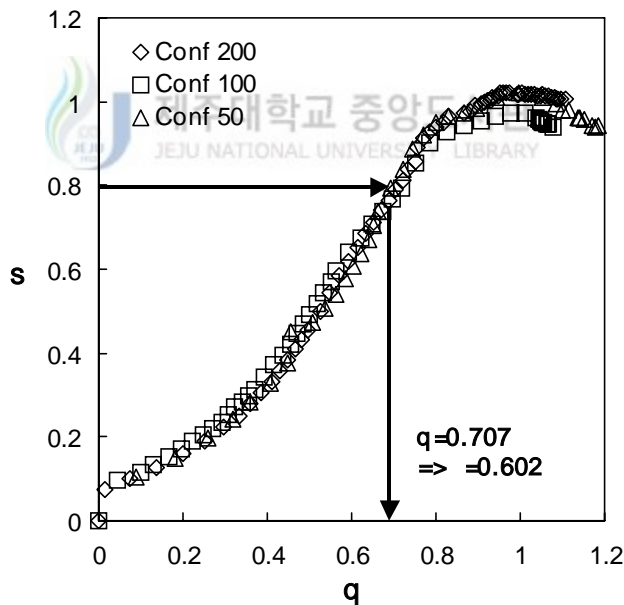


Fig 6.5 Determination of α for Yield Criterion (Dr=50%, Dark-Grey Scoria)

(4) 항복함수와 일경화법칙

항복함수의 q 를 결정하기 위해서는, 이에 앞서 등방압축시 소성일을 나타내는 식(3.24)의 C 와 p 를 결정하여야 한다. 이 계수들을 위해 제1응력불변량에 대한 소성일의 관계를 대수용지를 이용하여 Fig 6.4와 같이 도시하였다. 여기서 C 는 I_1 이 1일 때 절편으로 0.0005를 구할 수 있었으며 p 는 기울기로서 1.54를 얻을 수 있었다. 그리고 h 의 값은 식(3.33)을 이용하여 3개의 삼축압축시험결과로부터 얻은 3개의 값을 평균하여 0.633을 h 로 결정하였다.

Fig 6.5는 식(3.36)의 각 응력수준 S 에 대한 q 값을 구하기 위한 a 값 결정을 위해 그려진 그림으로서, 그림으로부터 식(3.37)의 S 와 q 의 관계가 가장 잘 성립하는 값이 $S_{0.8}$ 에 대한 a 의 값으로 판단하고 a 를 0.602로 결정하였다.

2) Medium한 경우

(1) 탄성거동



암회색송이의 탄성계수를 결정하기 위하여 우선 식(3.12)의 축변형률에 대한 체적변형률의 관계로부터 점토의 포아슨비 ν 를 결정하였다. 상대밀도가 70%로 Medium한 경우 즉 초기간극비(e_0)가 0.756인 암회색송이의 경우는 평균 포아슨비 ν 0.27이다. 그리고 탄성계수 결정시 필요한 식(3.9)의 계수 M 과 λ 의 결정을 위해 삼축시험결과를 이용하여 횡축에 $[(I_1/Pa)^2 + R \cdot (J_2'/Pa^2)]$ 의 값을, 종축에서 시험으로부터 구한 탄성계수의 무차원 값이 E/Pa 를 Fig 6.1과 같이 도시하였다. 여기서 Fig 6.6의 시험결과치에 대한 회기분석을 실시하여 M 은 횡축 값이 1일 때의 종축의 절편값이며, λ 는 그 기울기로서 그 값을 각각 743.06과 0.418로 결정하였다.

(2) 파괴규준

식(3.13)에 의해 제시된 파괴규준은 Fig 6.7에 나타난 바와 같이 양면대수지에 파괴시의 (I_1^3/I_3-27) 와 (Pa/I_1) 의 관계를 각각 종축과 횡축의 값으로 도시함

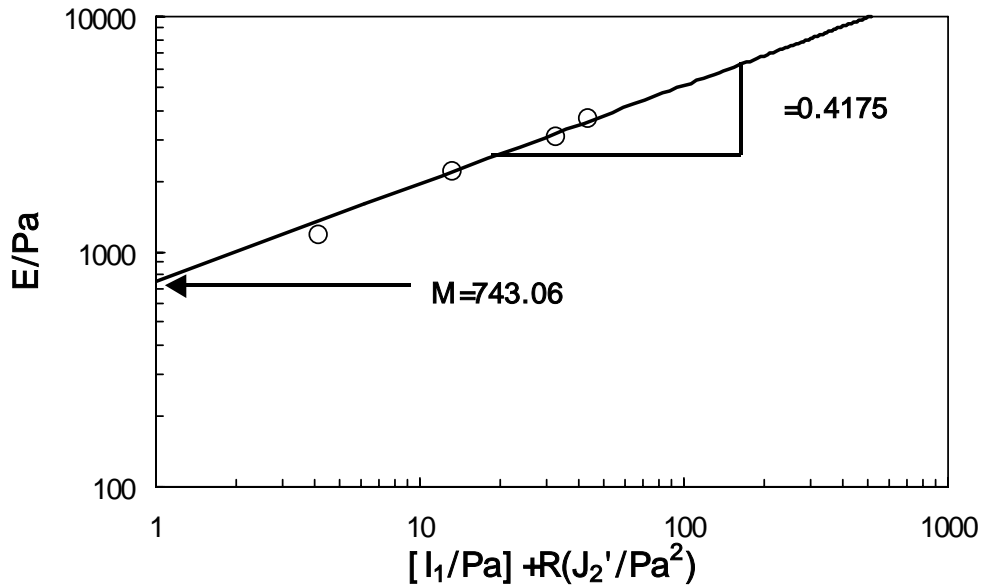


Fig 6.6 Determination of M and λ for Young's Modulus
($D_r=70\%$, Dark-Grey Scoria)

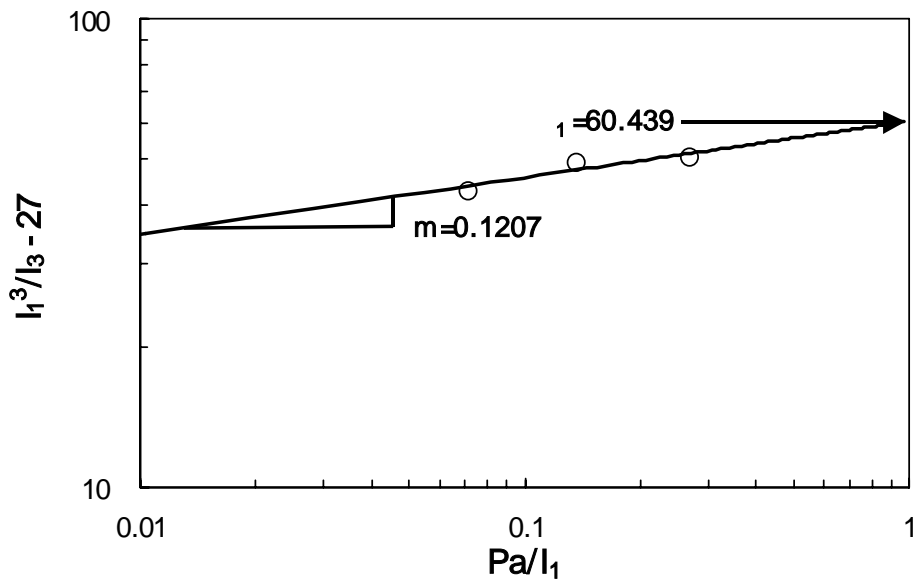


Fig 6.7 Determination of η_1 and m for Failure Criterion
($D_r=70\%$, Dark-Grey Scoria)

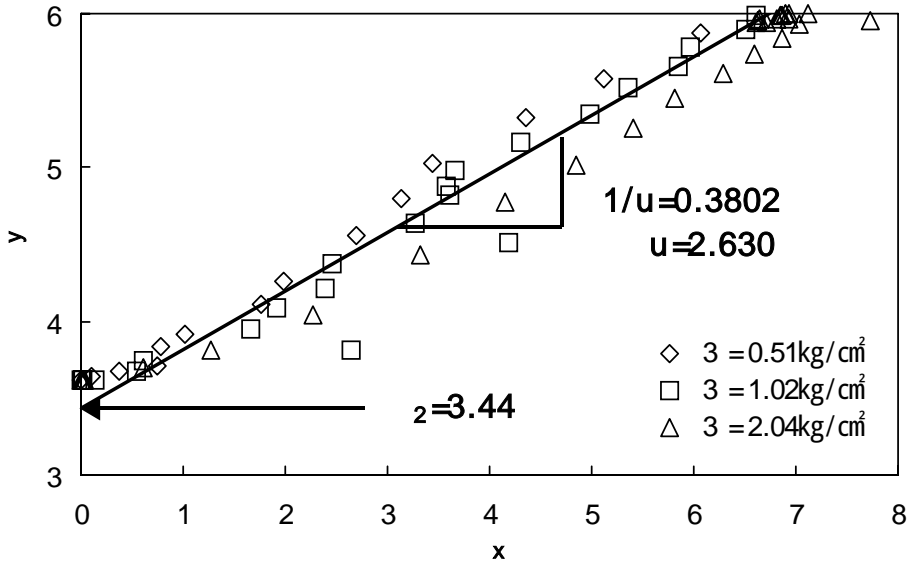


Fig 6.8 Determination of Ψ_2 and μ for Potential Function (Dr=70%, Dark-Grey Scoria)

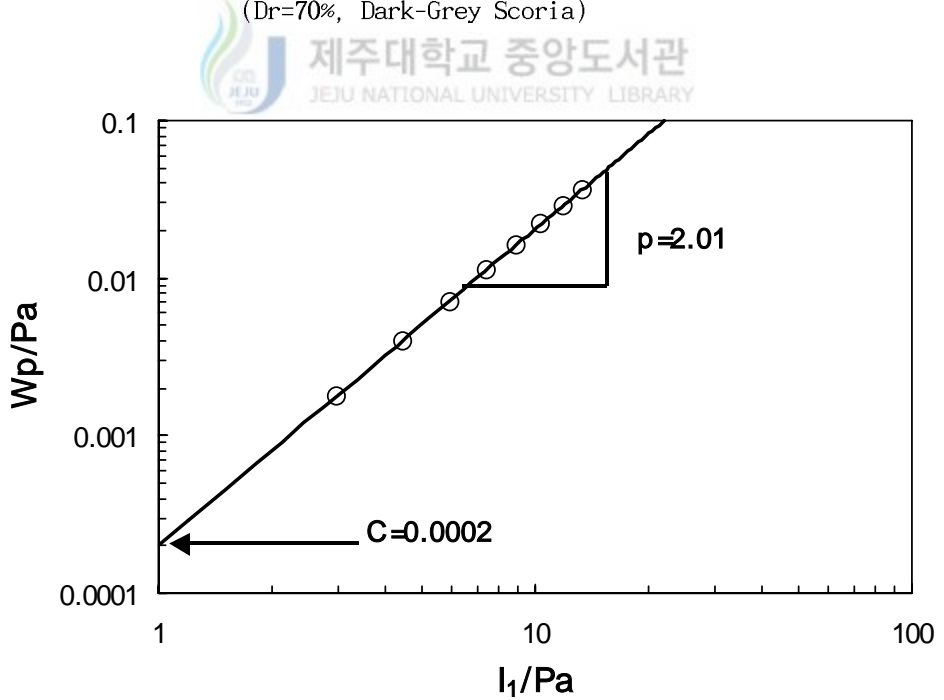


Fig 6.9 Determination of C and p for Work-Hardening Relation (Dr=70%, Dark-Grey Scoria)

으로서 구할 수 있다. 여기서 사용된 실험치는 3개의 삼축압축시험 결과치로 n_1 과 m 은 이 값들을 회기분석하여 구한 직선의 절편과 기울기로서 각각 60.44와 0.121로 결정하였다.

(3) 소성 Potential 함수

식(3.15)에 의해 제시된 소성 포텐셜함수는 삼축시험결과로부터 Ψ_2 와 μ 의 결정을 필요로 한다. 이들 계수는 식(3.21)과 삼축시험결과로부터 구할 수 있다. Fig 6.8은 삼축압축시험 결과치를 모두 하나의 도면에 ξ_x 와 ξ_y 의 관계로 나타낸 것으로 여기서 Ψ_2 는 -3.44로 결정하였으며 μ 는 2.63으로 하였다. 또한 Ψ_1 은 식(3.16)에 의해서 0.0227로 결정하였다.

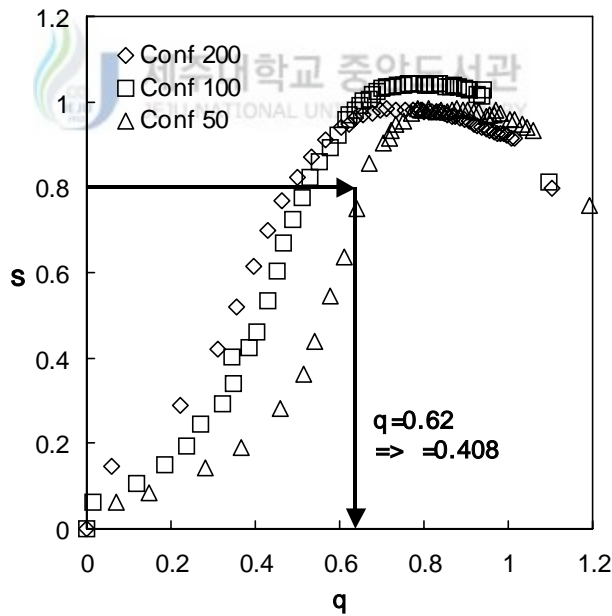


Fig 6.10 Determination of α for Yield Criterion (Dr=70%, Dark-Grey Scoria)

(4) 항복함수와 일경화법칙

항복함수의 q 를 결정하기 위해서는, 이에 앞서 등방압축시 소성일을 나타내는 식(3.24)의 C 와 p 를 결정하여야 한다. 이 계수들을 위해 제1응력불변량에 대한 소성일의 관계를 대수용지를 이용하여 Fig 6.9와 같이 도시하였다. 여기서 C 는 I_1 이 1일 때 절편으로 0.0002를 구할 수 있었으며 p 는 기울기로서 2.01을 얻을 수 있었다. 그리고 h 의 값은 식(3.33)을 이용하여 3개의 삼축압축시험결과로부터 얻은 3개의 값을 평균하여 0.832를 h 로 결정하였다.

Fig 6.10은 식(3.36)의 각 응력수준 S 에 대한 q 값을 구하기 위한 a 값 결정을 위해 그려진 그림으로서, 그림으로부터 식(3.37)의 S 와 q 의 관계가 가장 잘 성립하는 값이 $S_{0.8}$ 에 대한 a 의 값으로 판단하고 a 를 0.408로 결정하였다.

1) Dense한 경우

(1) 탄성거동



암회색송이의 탄성계수를 결정하기 위하여 우선 식(3.12)의 축변형률에 대한 체적변형률의 관계로부터 점토의 포아슨비 ν 를 결정하였다. 상대밀도가 85%로 Dense한 경우 즉 초기간극비(e_0)가 0.733인 암회색송이의 경우는 평균 포아슨비 ν 0.26이다. 그리고 탄성계수 결정시 필요한 식(3.9)의 계수 M 과 λ 의 결정을 위해 삼축시험결과를 이용하여 횡축에 $[(I_1/Pa)^2 + R \cdot (J_2'/Pa^2)]$ 의 값을, 종축에서 시험으로부터 구한 탄성계수의 무차원 값이 E/Pa 를 Fig 6.11과 같이 도시하였다. 여기서 Fig 6.11의 시험결과치에 대한 회기분석을 실시하여 M 은 횡축 값이 1일 때의 종축의 절편값이며, λ 는 그 기울기로서 그 값을 각각 817.57과 0.392로 결정하였다.

(2) 파괴규준

식(3.13)에 의해 제시된 파괴규준은 Fig 6.12에 나타난 바와 같이 양면대수지에 파괴시의 (I_1^3/I_3-27) 와 (Pa/I_1) 의 관계를 각각 종축과 횡축의 값으로 도시함

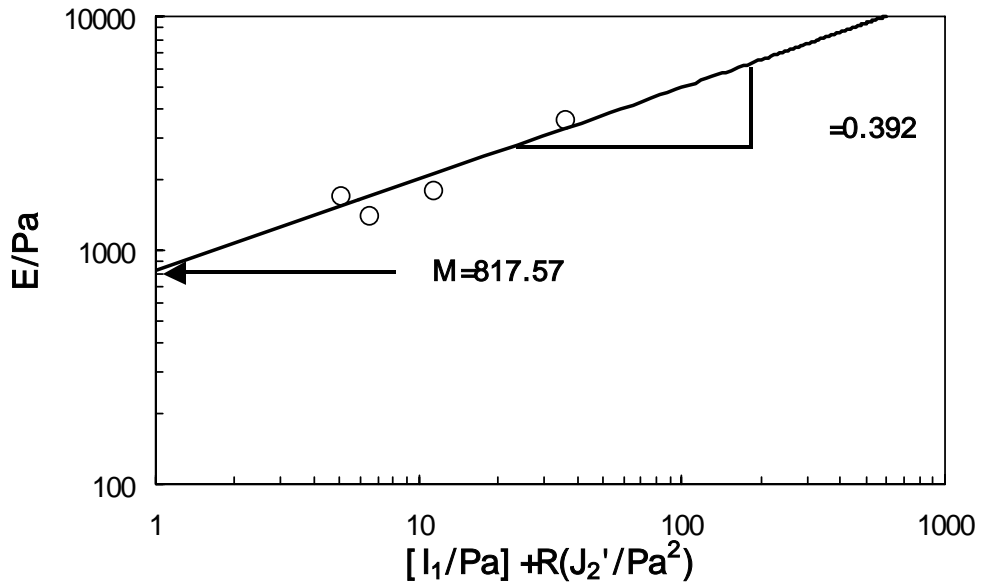


Fig 6.11 Determination of M and λ for Young's Modulus
(Dr=85%, Dark-Grey Scoria)

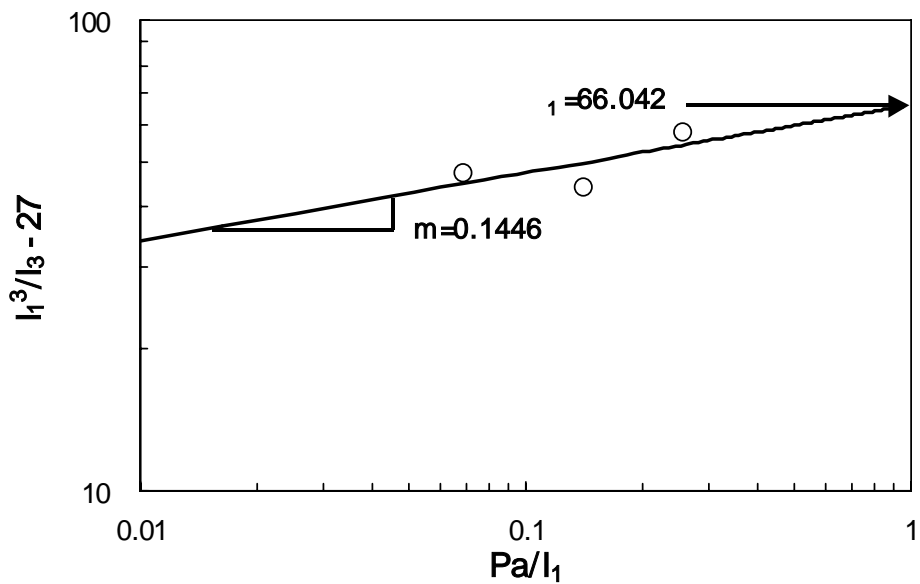


Fig 6.12 Determination of η_1 and m for Failure Criterion
(Dr=85%, Dark-Grey Scoria)

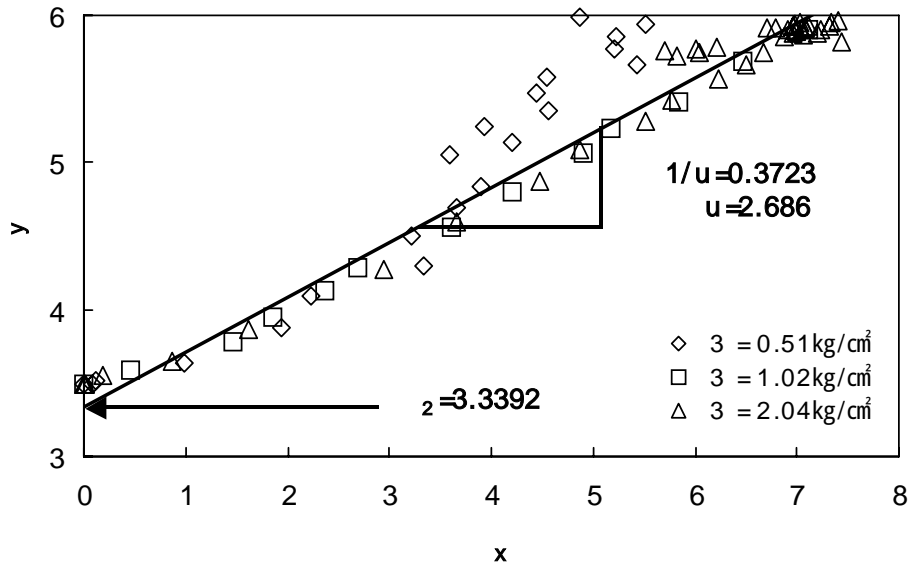


Fig 6.13 Determination of Ψ_2 and μ for Potential Function (Dr=85%, Dark-Grey Scoria)

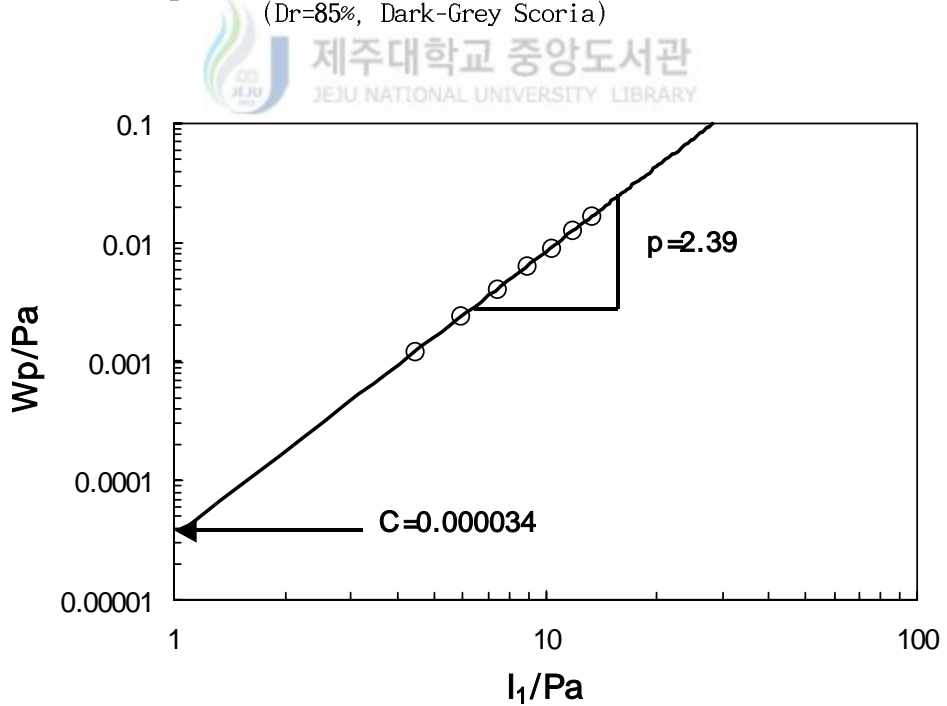


Fig 6.14 Determination of C and p for Work-Hardening Relation (Dr=85%, Dark-Grey Scoria)

으로서 구할 수 있다. 여기서 사용된 실험치는 3개의 삼축압축시험 결과치로 n_1 과 m 은 이 값들을 회기분석하여 구한 직선의 절편과 기울기로서 각각 66.04와 0.145로 결정하였다.

(3) 소성 Potential 함수

식(3.15)에 의해 제시된 소성 포텐셜함수는 삼축시험결과로부터 Ψ_2 와 μ 의 결정을 필요로 한다. 이들 계수는 식(3.21)과 삼축시험결과로부터 구할 수 있다. Fig 6.13은 삼축압축시험 결과치를 모두 하나의 도면에 ξ_x 와 ξ_y 의 관계로 나타낸 것으로 여기서 Ψ_2 는 -3.339로 결정하였으며 μ 는 2.686으로 하였다. 또한 Ψ_1 은 식(3.16)에 의해서 0.0181로 결정하였다.

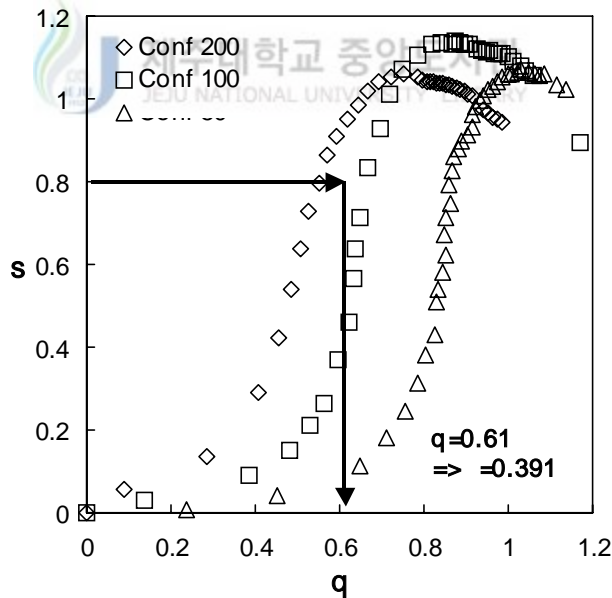


Fig 6.15 Determination of α for Yield Criterion (Dr=85%, Dark-Grey Scoria)

(4) 항복함수와 일경화법칙

항복함수의 q 를 결정하기 위해서는, 이에 앞서 등방압축시 소성일을 나타내는 식(3.24)의 C 와 p 를 결정하여야 한다. 이 계수들을 위해 제1응력불변량에 대한 소성일의 관계를 대수용지를 이용하여 Fig 6.14와 같이 도시하였다. 여기서 C 는 I_1 이 1일 때 절편으로 0.000034를 구할 수 있었으며 p 는 기울기로서 2.39를 얻을 수 있었다. 그리고 h 의 값은 식(3.33)을 이용하여 3개의 삼축압축시험결과로부터 얻은 3개의 값을 평균하여 0.849를 h 로 결정하였다.

Fig 6.15는 식(3.36)의 각 응력수준 S 에 대한 q 값을 구하기 위한 a 값 결정을 위해 그려진 그림으로서, 그림으로부터 식(3.37)의 S 와 q 의 관계가 가장 잘 성립하는 값이 $S_{0.8}$ 에 대한 a 의 값으로 판단하고 a 를 0.391로 결정하였다.

이상에서와 같이 Lade의 Single Hardening 모델에 대한 11개의 계수를 결정하였으며 각각의 상대밀도에 따라 Table 6.1에 요약 정리하여 나타내었다.

Table 6.1 Summary of Parameter Value for Dark-Grey Scoria

상대 밀도		Loose (Dr=50%)	Medium (Dr=70%)	Dense (Dr=85%)
	Parameter			
탄성 거동	M	357.77	743.06	817.57
	λ	0.473	0.418	0.392
	ν	0.30	0.27	0.26
파괴 기준	m	0.120	0.121	0.145
	η_1	46.09	60.44	66.04
소성 Potential	Ψ_2	-3.460	-3.440	-3.339
	μ	2.408	2.630	2.686
항복 기준	h	0.633	0.832	0.849
	a	0.602	0.408	0.391
경화 함수	C	0.0005	0.0002	0.000034
	P	1.54	2.01	2.39

2. 거동예측

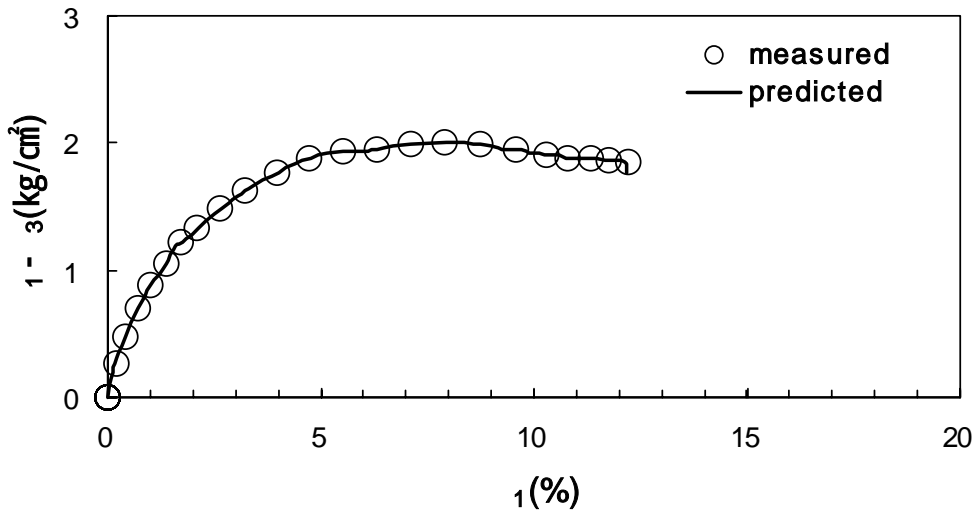
본 장에서는 암회색송이에 대하여 단일경화구성모델의 예측에 필요한 매개변수를 결정하고 이 계수를 이용한 거동예측을 실시하였다. 상대밀도 50%와 70% 그리고 85%에 대하여 삼축압축시험의 결과와 단일경화구성모델에 의한 예측치를 비교하였다. 배수삼축압축시험의 결과로 축차응력에 대한 연직변형률의 변화와 체적변화에 대한 연직변형률의 변화를 도시하였다.

Fig 6.16, 17, 18은 상대밀도 50%인 경우에 대하여 구속응력 0.51kg/cm^2 과 1.02kg/cm^2 , 그리고 2.04kg/cm^2 에 대하여 연직변형률에 대한 축차응력의 변화와 체적변형률의 변화를 나타내었다. 삼축압축시험의 결과는 ○로 표시하여 나타내었고 예측치는 실선을 사용하여 나타내었다.

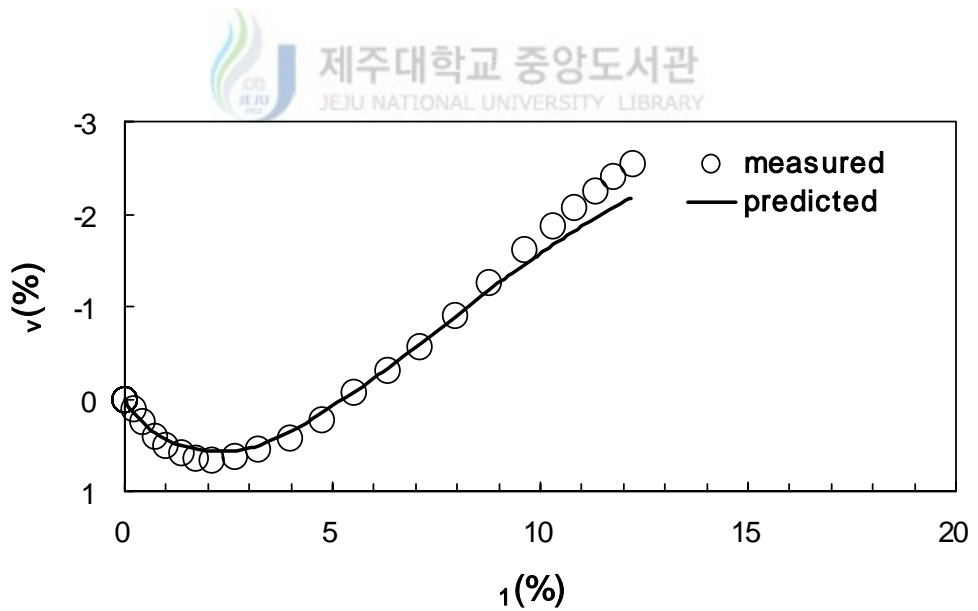
축차응력에 대한 연직변형률의 변화는 실측치와 예측치가 거의 일치하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 체적변형률과 연직변형률의 변화는 구속응력이 0.51kg/cm^2 인 경우 예측치와 실측치가 거의 비슷한 거동을 하고 있음을 보여주고 있지만 구속응력이 1.02kg/cm^2 과 2.04kg/cm^2 인 경우에는 실측치와 예측치가 다소 값의 차이를 나타내고는 있으나 변화의 거동경향은 비슷하게 나타나고 있다. 구속응력 1.02kg/cm^2 인 경우 체적압축이 예측치에 비해 크게 나타나고 있다. 구속응력 2.04kg/cm^2 인 경우에는 초기체적압축량이 예측치에 비해 작게 나타나고 있다.

Fig 6.19, 20, 21은 상대밀도 70%인 경우에 대하여 구속응력 0.51kg/cm^2 과 1.02kg/cm^2 , 그리고 2.04kg/cm^2 에 대하여 연직변형률에 대한 축차응력의 변화와 체적변형률의 변화를 나타내었다.

위의 경우에서와 같이 축차응력에 대한 연직변형률의 변화가 예측치와 실측치가 거의 일치하고 있음을 보여준다. 체적변형률에 대한 연직변형률의 변화는 그 거동경향이 거의 비슷하게 나타나고 있다. 구속응력 1.02kg/cm^2 인 경우에는 실측치와 예측치가 거의 일치하고 있다. 구속응력 0.51kg/cm^2 인 경우 체적압축량이 실측치에 비해 약간 과다하게 산정되나 그 차는 작다. 그에 비해 구속응력 2.04kg/cm^2 인 경우에는 초기체적압축량이 과소하게 산정되고 있지만 그 값의 차이는 작다.

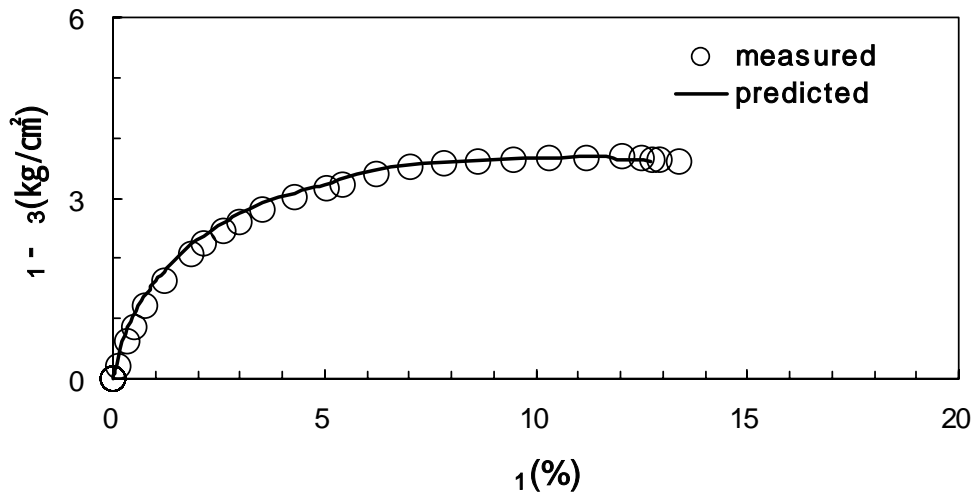


(a) Deviator Stress

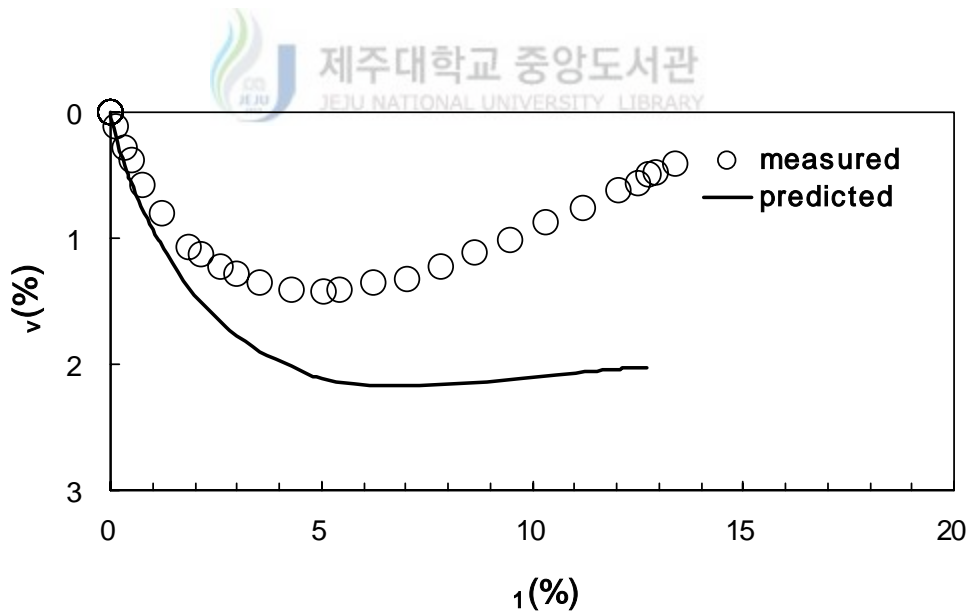


(b) Volumetric Strain

Fig 6.16 Stress-Strain Behavior Comparison of Predicted and Measured for Dark-Grey Scoria(Dr=50%, $\sigma_3=0.51 \text{ kg/cm}^2$)

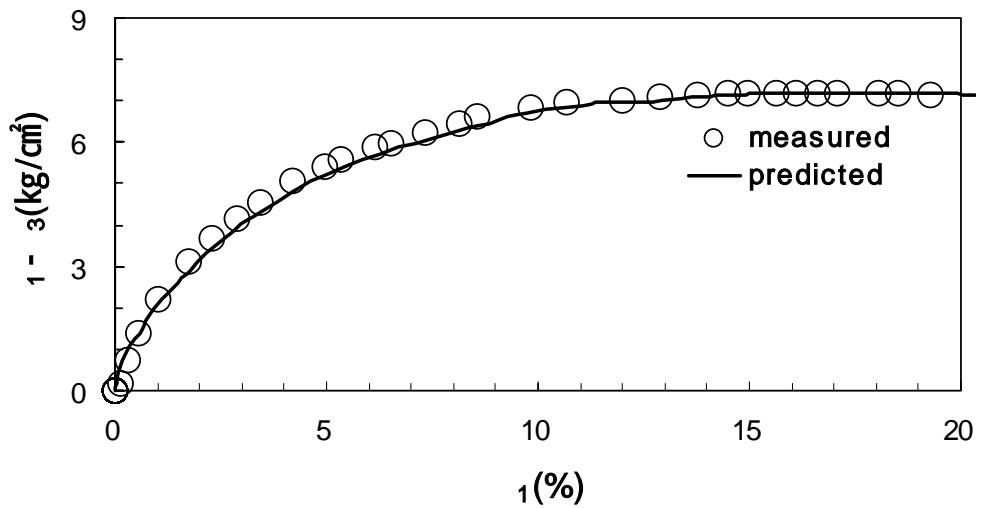


(a) Deviator Stress

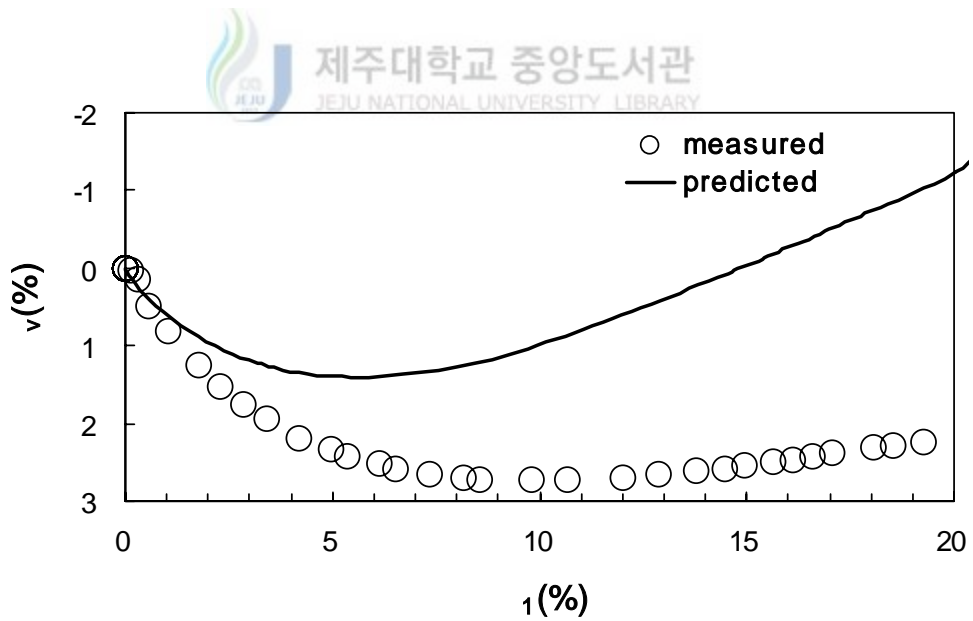


(b) Volumetric Strain

Fig 6.17 Stress-Strain Behavior Comparison of Predicted and Measured for Dark-Grey Scoria($D_r=50\%$, $\sigma_3=1.02\text{kg/cm}^2$)



(a) Deviator Stress



(b) Volumetric Strain

Fig 6.18 Stress-Strain Behavior Comparison of Predicted and Measured for Dark-Grey Scoria(Dr=50%, $\sigma_3=2.04\text{kg/cm}^2$)

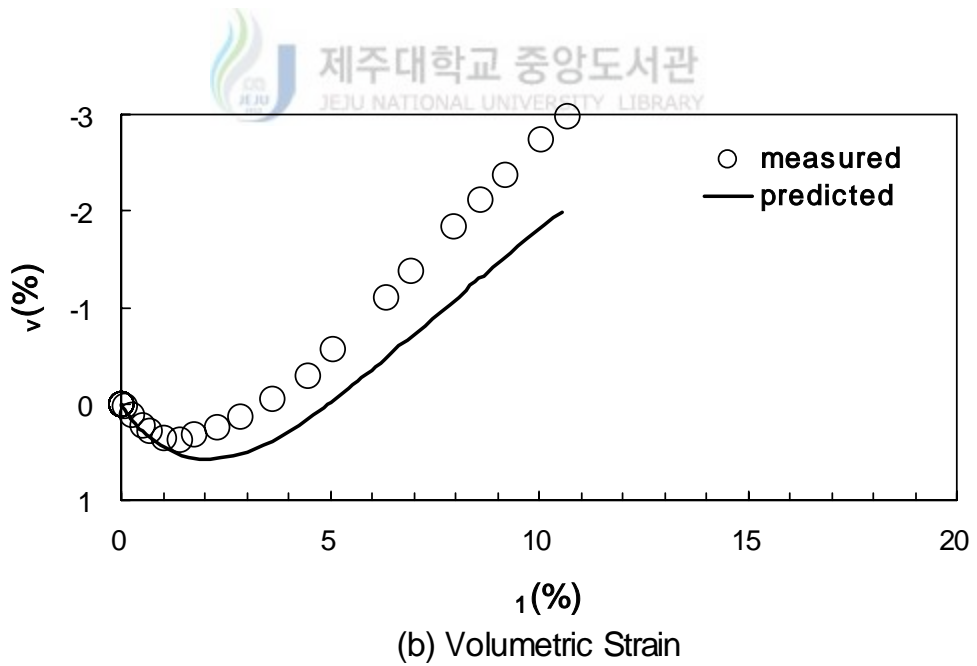
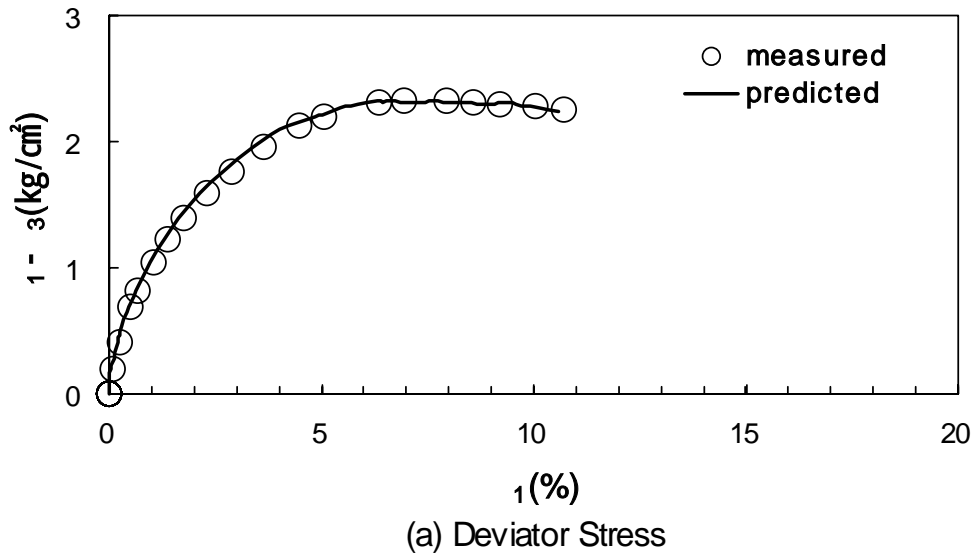


Fig 6.19 Stress-Strain Behavior Comparison of Predicted and Measured for Dark-Grey Scoria($D_r=70\%$, $\sigma_3=0.51\text{kg/cm}^2$)

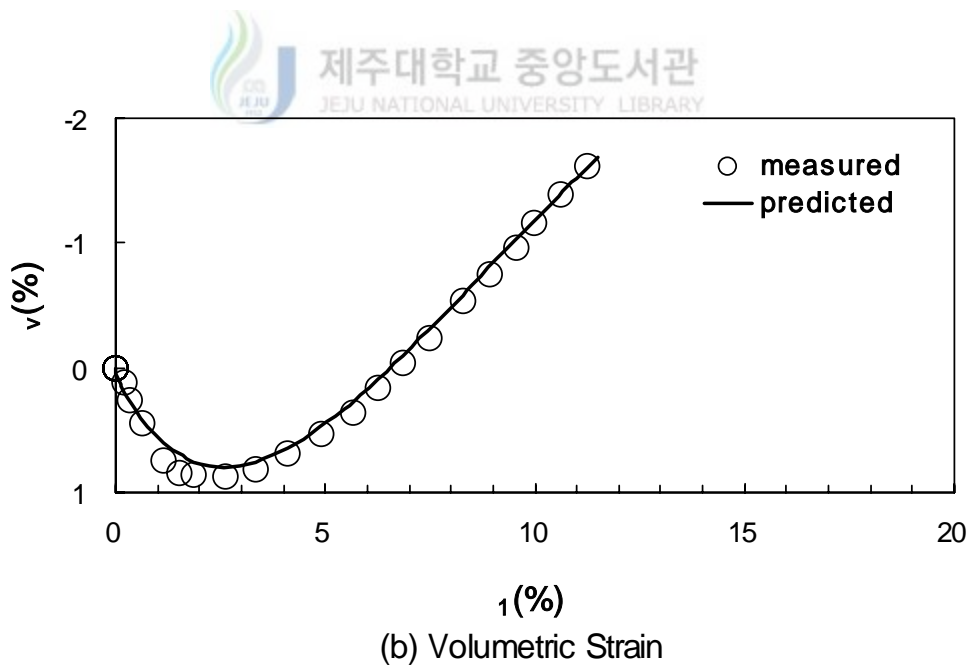
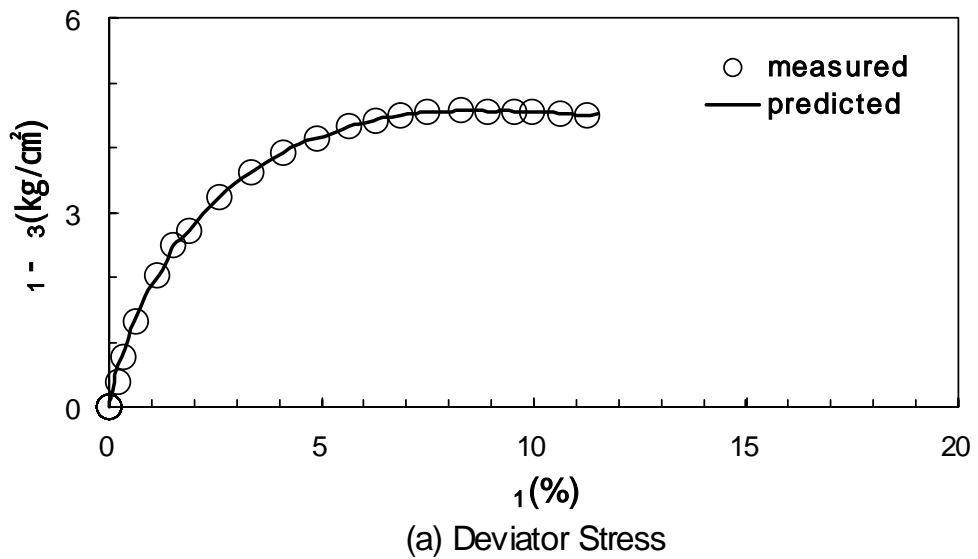
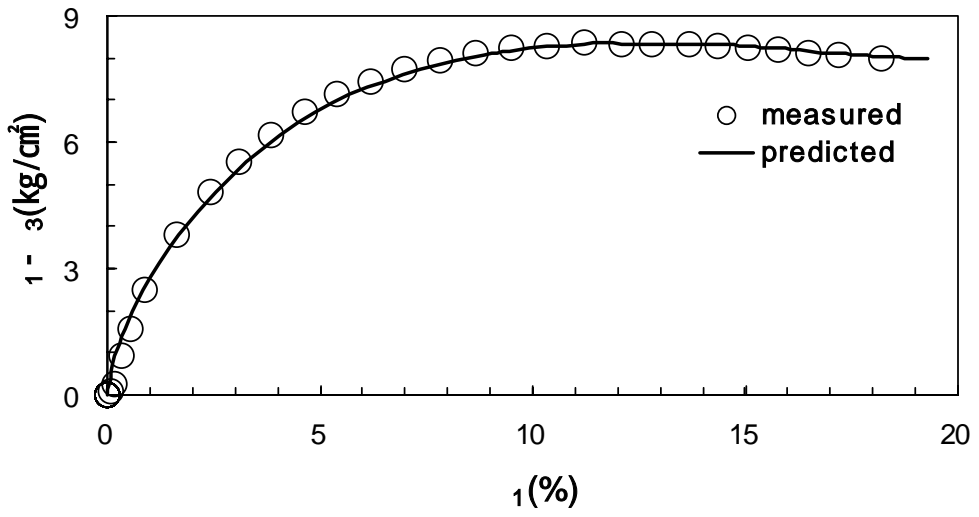
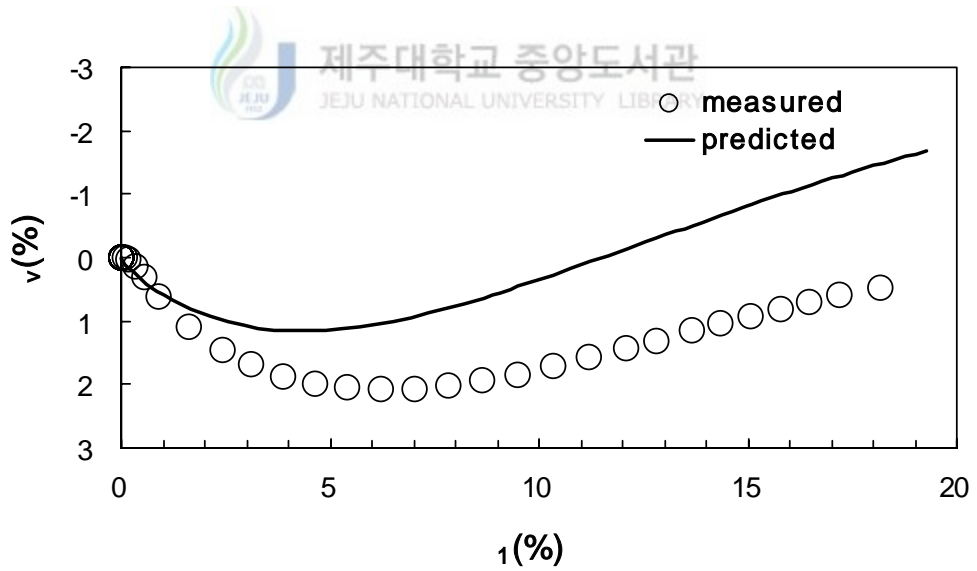


Fig 6.20 Stress-Strain Behavior Comparison of Predicted and Measured for Dark-Grey Scoria(Dr=70%, $\sigma_3=1.02\text{kg/cm}^2$)

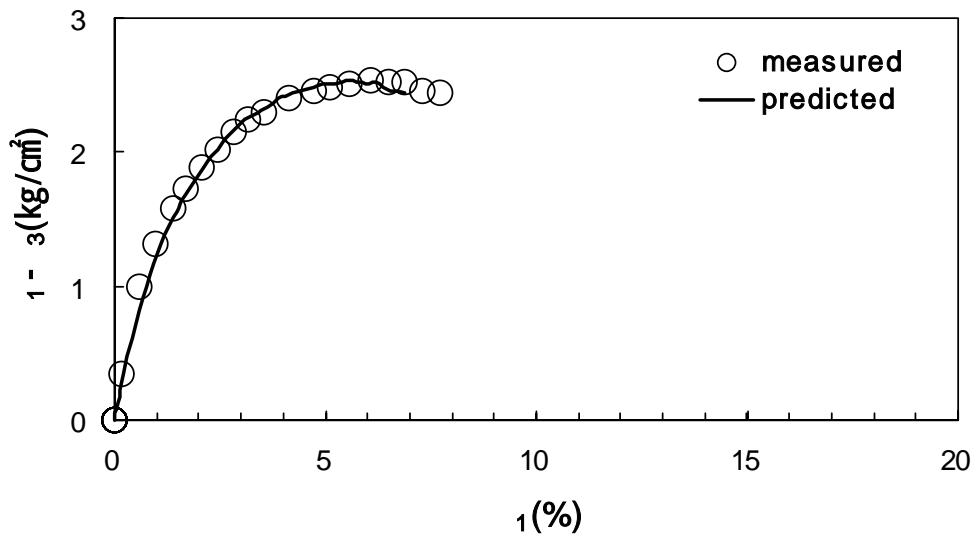


(a) Deviator Stress

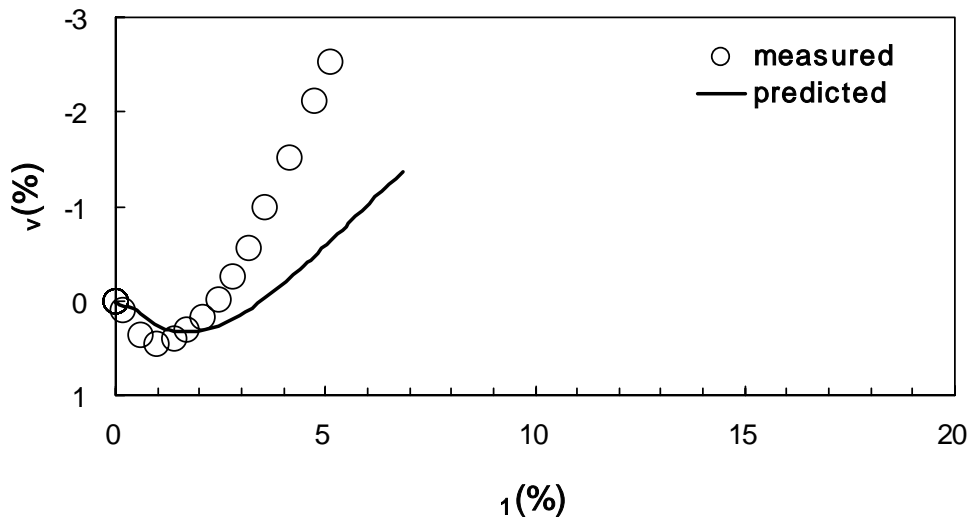


(b) Volumetric Strain

Fig 6.21 Stress-Strain Behavior Comparison of Predicted and Measured for Dark-Grey Scoria($D_r=70\%$, $\sigma_3=2.04\text{kg/cm}^2$)



(a) Deviator Stress



(b) Volumetric Strain

Fig 6.22 Stress-Strain Behavior Comparison of Predicted and Measured for Dark-Grey Scoria($D_r=85\%$, $\sigma_3=0.51 \text{ kg/cm}^2$)

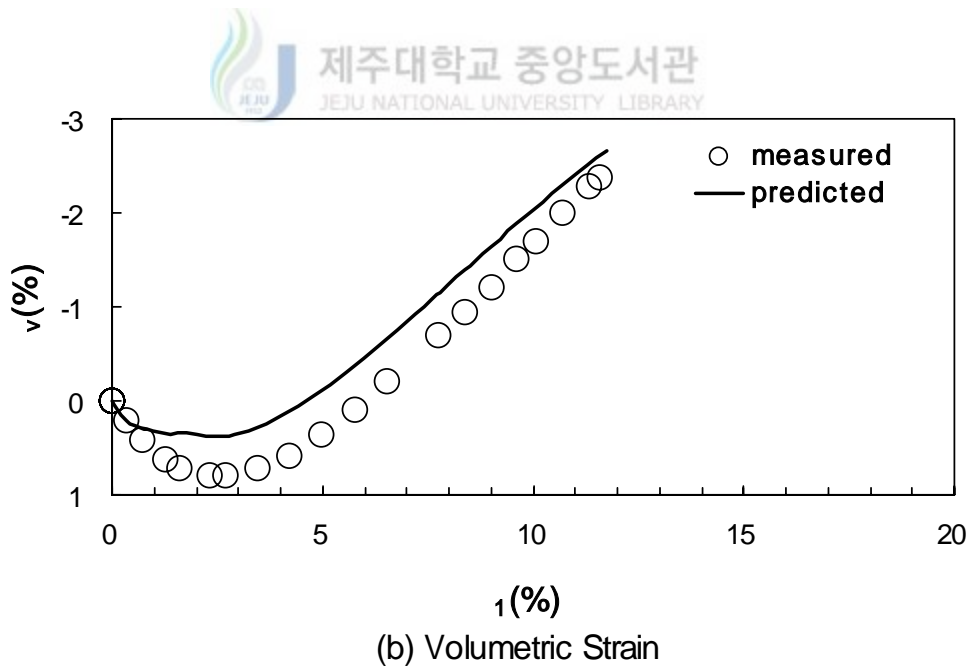
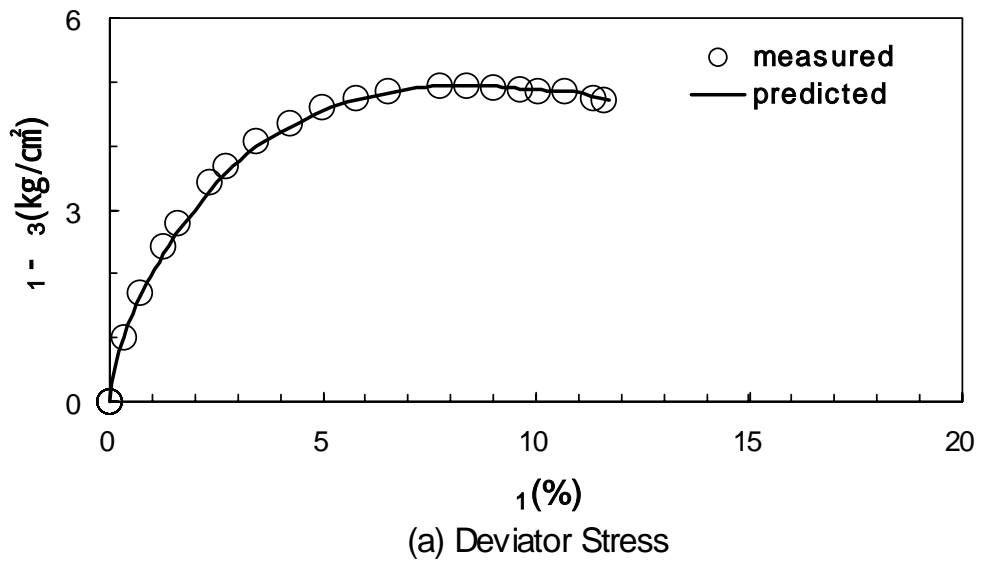
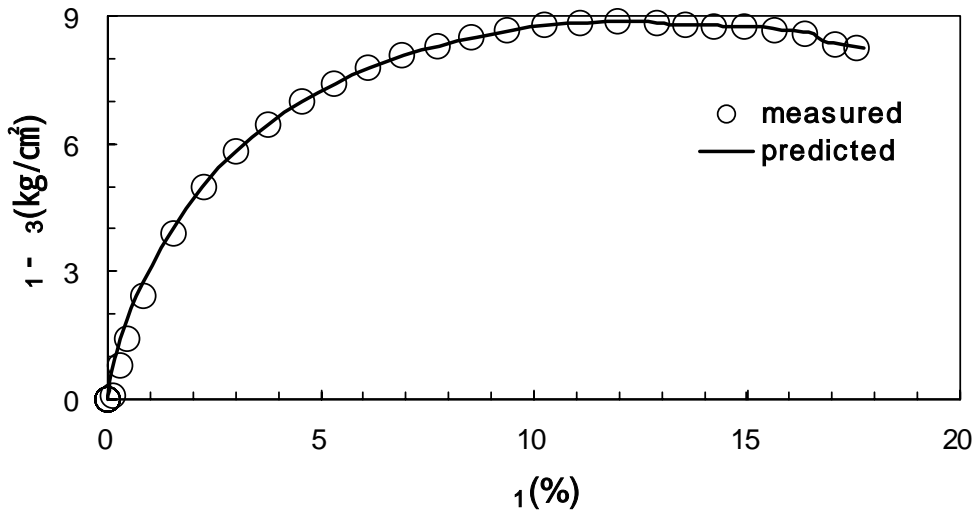
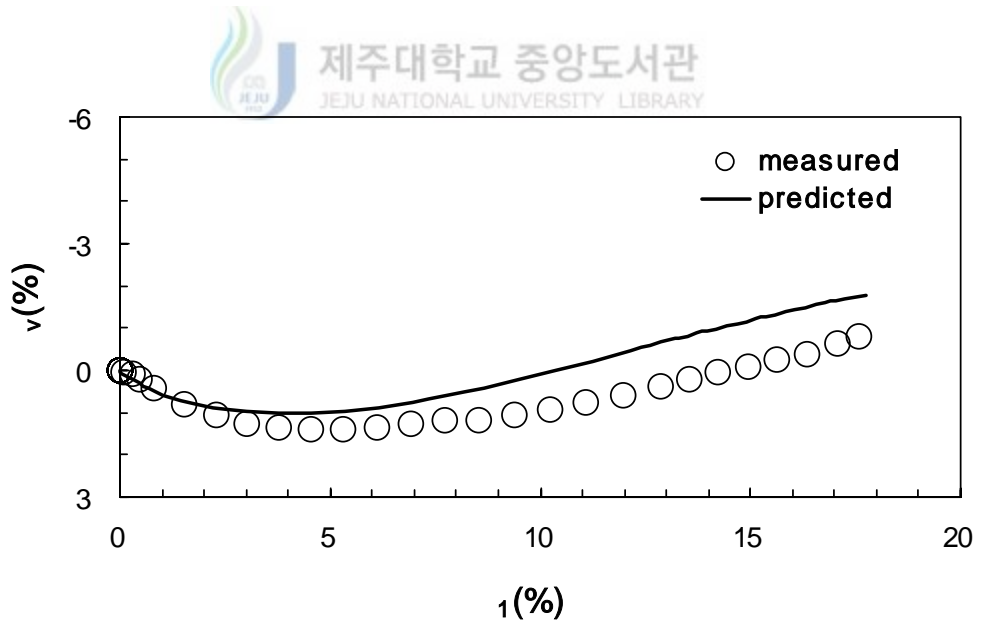


Fig 6. 23 Stress-Strain Behavior Comparison of Predicted and Measured for Dark-Grey Scoria($D_r=85\%$, $\sigma_3=1.02\text{kg/cm}^2$)



(a) Deviator Stress



(b) Volumetric Strain

Fig 6.24 Stress-Strain Behavior Comparison of Predicted and Measured for Dark-Grey Scoria(Dr=85%, $\sigma_3=2.04\text{kg/cm}^2$)

Fig 6.22, 23, 24는 상대밀도 85%인 경우에 대하여 구속응력 0.51kg/cm^2 과 1.02kg/cm^2 , 그리고 2.04kg/cm^2 에 대하여 연직변형률에 대한 축차응력의 변화와 체적변형률의 변화를 나타내었다.

앞의 두 가지 경우에서와 같이 축차응력에 대한 연직변형률의 변화가 예측치와 실측치가 거의 일치하고 있음을 보여준다. 그러나 체적변형률에 대한 연직변형률의 변화가 대부분 과소하게 나타나고 있다. 구속응력 1.02kg/cm^2 인 경우에는 실측치와 예측치가 거의 일치하고 있다. 구속응력 0.51kg/cm^2 과 2.04kg/cm^2 인 경우 실측치에 비해 예측치가 과소하게 산정되고 있지만 그 거동경향은 비슷하다. 초기체적압축량이 아주 작게 나타나고 있다.

이들 시험결과와 예측치가 연직변형률인 경우 대개 일치하고 있으나 체적변형률은 잘 일치하고 있지 않음을 알 수 있다.



Ⅶ. 결 론

송이에 대한 등방압축시험과 삼축압축시험을 실시하여 송이의 거동분석을 고찰하였고 시험결과와 단일경화구성모델에 의한 예측치를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 등방압축시험에서 구속응력을 3.57kg/cm^2 까지 증가시켰을 시 암회색송이는 체적변형률이 약 3.6%를 보였다. 그러나 적갈색송인 경우에는 암회색송이의 약 3배인 10.9%의 체적변형률을 보였으며 황갈색인 경우는 암회색송이의 약 6배, 적갈색송이의 2배인 20.8%로 상당히 많은 체적압축 변형률을 나타내었다.
2. 암회색송이에 대하여 상대밀도를 세가지단계 즉, Loose, Medium, Dense의 조건으로 삼축압축시험을 실시한 결과 상대밀도가 커질수록 파괴강도는 커지나 파괴시 연직변형률은 감소하는 경향을 나타낸다. 그리고 조밀한 시료일 수록 체적팽창량도 크게 나타난다.
3. 색상별 송이의 강도특성을 고찰하기 위하여 상대밀도 70%인 송이에 대한 배수삼축시험을 실시한 결과 암회색송이는 내부마찰각이 40.8° 로 가장 강도가 크게 나타나고 있고 적갈색송이는 38.2° 로 중간정도의 강도를 나타내고 있으며 황갈색송이는 34° 로 가장 낮게 나타나고 있다.
4. 색상별 송이 입자의 파쇄특성을 살펴보기 위하여 대상시료 입자크기를 2mm에서 0.425mm 사이로 결정하여 시험을 실시한 결과 암회색송이는 파쇄가 거의 일어나고 있지 않지만 적갈색과 황갈색송이는 파쇄가 많이 일어나고 있다. 특히 황갈색송이는 입자의 파쇄가 다른 두 시료에 비해 훨씬 크게 나타나고 있다.

5. 구속응력이 증가하면 파괴시 연직변형률이 증가하는 경향을 나타낸다. 연직 변형률의 증가를 살펴보면 암회색송이인 경우 연직변형률의 증가가 미세하지만 적갈색과 황갈색송이는 파괴시 연직변형률이 약 25~30%까지 나타나는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 대변형을 보이는 재료인 적갈색과 황갈색송이인 경우는 파괴의 강도에 대한 안정보다는 침하의 안정에 대하여 신중히 고려하여야 한다.
6. 배수삼축압축시험결과와 단일경화구성모델에 의한 예측치를 비교 분석한 결과 연직변형률에 대한 축차응력의 변화가 시험결과와 잘 일치하는 경향을 나타내고 있다. 시험결과와 예측치의 비교에서 연직변형률에 대한 체적변형량의 값은 잘 맞지 않지만 시험치와 예측치의 거동형태는 비교적 유사하다.

참 고 문 헌

- 김태형, 1994, 단일경화구성모델에 의한 Ko-압밀점토의 거동연구, 중앙대학교 석사학위논문, pp. 4-58.
- 윤정수, 1995, 제주도 북사면의 기생화산체에 관한 연구, 제주대학교 해양연구 보고 제19권, pp. 25-38.
- 공효남·정진섭, 1998, 흙의 소성역학, 구미서관, pp. 1-7.
- 남정만, 1993, 대응력반전시 모래의 거동에 관한 연구, 중앙대학교 박사학위논문, pp. 58-63.
- Lade P.V. ·Mark-Joachim Prabuichi, 1990, Ucla school of engineering and applied science, pp. 1-83.
- T.william Lambe ·Robert V.Whitman, 1993, Soil Mechanics SI Version, Johns Willey & Sons, pp. 97-136.
- Braja M. Das, 1997, Principles of Geotechnical Engineering, PWS publishing company, pp. 52-54.
- Chen W.F. and Mizuno E, 1990, Nonlinear Analysis in Soil Mechanics, Theory and Implementation. Elsevier, Amsterdam.
- Desai C.S. and Sirwardane, H.J., 1980, A Concept of Correction Functions to Account for Non-associative Constitutive Model, Int. J. Geologic.
- Desai C.S. and Faruque M.O., 1984, Constitutive Model for Geologic Materials, Journal of Eng.Mech,Dov., ASCE, Vol. 110, Sept.
- Desai C.S., Somasundaram S. and Frantziskonis G., 1986, A Hiarchical Approach for Constitutive Modelling of Geologic Materials, Int. Journal Num. Meth. Geomech, Vol.10, pp. 225-257.
- Dimaggio F.L. and Sandler I.S., 1971, Mathematical model for granular Soil. Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.97, No.EM3, pp. 935-950.
- Kim M.K. and Lade P.V., 1988, Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials I. : Plastic Potential Function, Computers and

- Geotechnics 5, pp. 307-324.
- Lade P.V., 1977, Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surfaces, International Journal of Soils and Structures, Pergamon Press, Inc., N.Y., Vol.13, pp. 1019-1035.
- Lade P.V., 1982, Three-Parameter Failure Criterion for Concrete, J. Engineering. Mech. Div., ASCE, Vol.108, No.5, pp. 850-863.
- Lade P.V., 1982, Localization Effects in Triaxial Test on Sand, Deformation and Failure of Granular Materials, IUTAM, Symposium on Deformation and Failure of Granular Materials, Aug., pp. 461-471.
- Lade P.V., 1988, Model and Parameter for the Elastic Behavior of Soils, Proc. 6th. Int. Conf. Numerical Methods Geomechanics, Innsbuk, Austria, pp. 359-364.
- Lade P.V., 1989, Experimental Observations of Stability, Instability, and Shear Plane in Granular Materials, Ingenieur -Archiv59, pp. 114-123.
- Lade P.V., 1990, Single-Hardening Model with Application to NC Clay, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.116, NO.3, March, pp. 394-414.
- Lade P.V. and Duncan J.M., 1973, Cubical Triaxial Tests on Cohesionless Soil, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.99, No.SM 10, pp. 793-812.
- Lade P.V. and Duncan J.M., 1975, Elastoplastic stress-strain theory for cohesionless soil, Journal of Geotechnical Engineering Div., Proc., ASCE, Vol.99, No.SM1, pp. 1037-1053.
- Lade P.V. and Duncan J.M., 1976, Stress-Path Dependent Behavior of Cohesionless Soil, Journal of Geotechnical Engineering Div., Proc., ASCE, Vol.102 No.GT1, pp. 51-68.
- Lade P.V. and Kim M.K. 1988a, Single-Hardening Constitutive Model for Frictional Materials II. Yield Criterion and Plastic Work Contours, Computers and Geotechnics, Vol.6, pp. 13-29.
- Lade P.V. and Kim M.K. 1988b, Single-Hardening Constitutive Model for

- Frictional Materials III. Comparisons with Experimental Data, Computers and Geotechnics, Vol.6, pp. 13-29.
- Lade P.V. and Nelson R.B., 1987, Modelling the Elastic Behavior of Granular Materials, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech, Vol.11, pp. 521-542.
- Poorooshasb H.B. and Pietruszczak S., 1985, A Generalized Flow Theory for Sand : A Generalized two-Surface Model, Computers and Geotechnics, Vol.26, No.2, pp. 1-15.



감사의 글

먼저 부족함이 많은 저에게 논문을 마칠 수 있도록 학문의 정도와 참된 인간의 자세를 가르쳐 주시고 많은 지도와 격려를 하여주신 지도교수 남정만 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

그리고, 바쁘신 와중에도 논문의 심사를 맡아 세심하게 검토하고 지적하여 주신 박상렬 교수님 김상진 교수님께 감사드립니다. 학부에서 대학원을 진학하며 많은 가르침을 주신 양성기 교수님, 김남형 교수님, 이병걸 교수님께도 감사드립니다.

조교생활을 하는 동안 힘이 되어준 남국, 고환, 준철, 경철선생께도 고마운 마음을 전합니다. 같은 연구실 생활을 하면서 고생도 많이 했지만 항상 웃어준 영웅형, 동일 그리고 창민선배 그리고 홍민선배에게도 깊은 감사를 드립니다.

대학원 생활을 하면서 많은 힘을 준 영호선배, 영택형, 현우형, 승희, 용철, 태우형, 현수, 영범, 순보에게도 앞으로 멋진 미래가 펼쳐지길 기원합니다.

바쁜 와중에도 학교에 찾아와서 응원을 해준 친구들 선배님들 그리고 후배들에게 진심으로 감사한 마음을 전합니다.

끝으로 논문이 끝나기까지 아낌없는 격려와 용기를 주시고 밤낮으로 기도해주신 아버지, 어머니 그리고 매형과 주부로서 공부를 병행하고있는 큰 누님의 격려에 감사드립니다. 멀리서 공부하고 있는 둘째 누님과 학원과 공부를 병행하면서 많이 아껴준 작은 누님에게도 진심으로 감사한 마음을 전합니다.

2002년 6월

소재관 올림