



제주도 화산쇄설물(송이)의 강도특성에 관한 연구

A Study on Strength Characteristics of Jeju-island's Scoria(Song-E)

남정만* · 고희성** · 오동일***
Nam, Jung-Man · Ko, Ho-Seong · Oh, Dong-Il

Abstract

Song-E(scoria) is civil material that we frequently meet with in road building in Jeju-island. It is known that Song-E is the material of high crush and large particle. But, the study on the scoria is not enough, so there are many difficult in handling method. In this study, We research basic strength characteristics on Song-E gathered at various part in Jeju-island. Results of this study(strength characteristics of Song-E) are applied to design of road, breast wall and slope as basic data.

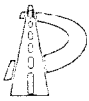
Keywords : scoria, crush, particle, strength characteristics, basic data

요 지

제주도 여러 도로현장에서 송이(화산쇄설물)는 빈번하게 접하는 토목재료이다. 송이는 일반적으로 파쇄성이 크고, 입자가 큰 재료로 알려져 있을 뿐, 이 화산쇄설물에 대한 연구가 미미하여 이 송이에 대한 처리방법에 많은 어려운 점이 따르고 있다. 본 연구에서는 제주도 각 지역에서 채취한 송이의 기본적인 강도특성에 관하여 연구하였다. 연구결과로 구한 송이의 강도특성 값은 추후 도로, 옹벽, 사면 등의 각종 설계 시 기본적인 자료로써 적용되어 질 수 있을 것이다.

핵심용어 : 화산쇄설물, 파쇄성, 입자, 강도특성, 기본적인 자료

* 정회원 · 제주대학교 토목환경공학과 부교수
** 제주대학교 토목환경공학과 계약교원
*** 유성건설(주) 토목부 기사



1. 연구배경 및 목표

제주도 각 지역에는 후기 화산활동과 관련이 있는 화산쇄설물인 암재구가 도내 전역에 광범위하게 분포되어 있으며, 암재구를 구성하고 있는 화산쇄설물을 제주도 방언으로 “송이(scoria)”라 칭한다(원종관, 1975). 이 송이는 일반적인 화강풍화토나 사질토와는 공학적 성질에 있어서 현저하게 다르며 송이에 대한 공학적 특성은 단지 각 공사현장에서의 경험적인 방법에 의해 시공되어질 뿐이지 이에 대한 정리와 규명이 아주 미미한 상태이다(건설부, 1979). 제주도는 국제자유도시특별법(2002.4.1)의 시행 이후 도로신설 및 확장계획으로 2011년까지 총 658Km의 도로를 신설·확장할 계획이며, 현재 여러 지역에서 시공중이다. 여러 지역의 도로공사현장에서 송이를 접하고 있으며, 송이의 특성이 파쇄성의 범위가 매우 커서, 노상지반을 치환해야하는 복잡한 공정이 되거나, 노상재료로 사용할 시에도 다짐시공이 까다로우며, 비탈면이나 사면처리 시에도 송이층의 비탈면보호를 위한 시공을 해야하는 등 송이의 처리방법에 어려운 문제에 봉착하는 경우가 빈번하게 발생하고 있다. 특히 화산쇄설물 송이의 노상 및 기층재료로서의 적합성에서, 도로인접 사면 및 옹벽처리시의 강도특성에 이르기까지 송이의 공학적 특성에 관한 정리가 매우 시급한 실정이라 할 수 있다(남정만, 2000).

본 연구에서는 이와 같은 송이에 대한 공학적 특성을 조사 분석하여 각종 설계와 시공에 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다. 송이에 대한 물성시험을 수행하고 송이의 강도 및 거동특성을 연구하기 위해 표준직접전단시험, 대형직접전단시험 및 삼축압축시험을 수행하였다.

2. 송이의 분포 및 시료의 채취

송이는 색상에 있어서 적갈색(Redish-Brown),

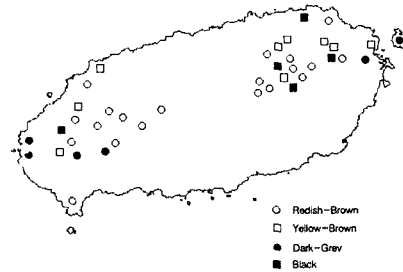


그림 1. Colorific Distribution of Scorias in Jeju Island(윤정수, 1995)

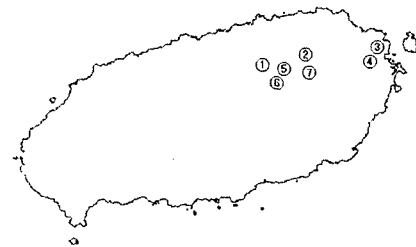


그림 2. 시료 채취지역

황갈색(Yellow-Brown), 검정색(Black) 및 암회색(Dark-Grey)으로 크게 구별할 수 있다. 이들 송이의 분포의 경우 북제주군 지역에서 일반적으로 적갈색 송이가 20개 지역으로 가장 많이 분포하는 것으로 나타났으며 이들은 특히 중산간 지역에 많이 있는 것으로 나타났다. 그림 1에서 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.

본 연구에 사용된 시료는 그림 2에서 나타낸 바와 같이 동쪽지역을 중심으로 조천읍 3개소, 구좌읍 3개소, 성산읍 1개소로 모두 7개 지역에서 송이를 채취하였다. 대부분 오름에서 채취하였으며, 색상별 강도 특성을 알아보기 위해 서로 다른 색깔의 송이를 채취하였다. 표 1은 채취한 시료에 대한 소재지와 색상을 나타내었다.



표 1. 채취된 대상 시료 현황

Sample No.	Place name	Color	Location
①	Daho Park	Redish brown	Bukjejugun Jocheuneup Seonhyulri
②	Buk Orum	Redish brown	Bukjejugun Gujwaeup Deukchonri
③	Jimi Mt.	Dark grey	Bukjejugun Gujwaeup Chongdalri
④	Dusan Mt.	Dark grey(30%) Yellow brown(70%)	Namjejugun Seongsaneup shihungri
⑤	Gomun Orum	Dark grey(70%) Yellow brown(30%)	Bukjejugun Jocheuneup Seonhyulri
⑥	Budae Mt.	Yellow-brown	Bukjejugun Jocheuneup Seonhyulri
⑦	Andol Orum	Yellow-brown	Bukjejugun Gujwaeup Songdangri

3. 기본 물성치시험

채취한 각 지역의 송이시료에 대해 기본적인 물성치를 알아내기 위해 체분석 시험과 비중시험, XRF 시험기를 이용해 화학분석을 실시하였다. 각 시료의 분석결과는 표 2~표 4와 같다.

입도분포의 경우 다호농장, 지미봉, 거문오름, 부대악에서 채취한 시료의 경우 입도분포가 좋은 것으로 나타났으며 비중은 2.54~2.92 사이의 값을 보이고 있다. 표 2에서 균등계수는 4~22, 곡률계수가 0.9~3.28로 나오고 있다. 부대악과 안돌오름은 균등계수, 곡률계수가 아주 크게 나오고 지미봉과 두산봉이 상대적으로 균등계수가 작은 값을 가졌다.

표 4의 화학분석 결과를 보면 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 의 함이 조금씩 차이는 있으나 전체 화학성분의 70%~77%로 대부분을 차지하고 있다. 황갈색인 안돌오름과 부대악은 SiO_2 가 31%정도로 작게 나타났고 Fe_2O_3 가 20%정도로 크게 나타나고 있다. 한편 SiO_2 는 원자구조가 사면체구조를 띠며 Al_2O_3 와 Fe_2O_3 는 팔면체구조를 갖는다. 일반적으로 사면체구조는 결합성이 양호하고 그 양이 많을수록 안정된 결합구조를 하고 있다고 볼 수 있으며 이들 결합구조에 팔면체구조가 많이 함유될수록 불안정한 결합을 하게 된다(Lambe & Whitman, 1993). 따라서 이와 같은 효과가 강도에 미치는 영향이 클 것으로 사료된다.

표 2. Uniformity Coefficient(C_u) and coefficient of Gradation(C_c) in Field.

Place name	D10	D30	D60	C_u	C_c
Daho Park	0.37	1.3	3.25	8.78	1.41
Buk Orum	0.54	1.66	5.4	10	0.94
Jimi Mt.	1.4	4.9	9	4.74	1.4
Dusan Mt.	0.53	1.05	2.3	4.34	0.9
Gomun Orum	0.85	2.5	6	7.06	1.23
Budae Mt.	0.15	1	3.2	21.33	2.08
Andol Orum	0.22	1.9	5	22.73	3.28

표 3. Specific Gravity of Scorias

Place name	Gs
Daho Park	2.67
Buk Orum	2.92
Jimi Mt.	2.70
Dusan Mt.	2.80
Gomun Orum	2.83
Budae Mt.	2.54
Andol Orum	2.89



표 4. Chemical Composition of Scorias

Place name	SiO ₂ wt(%)	Al ₂ O ₃ wt(%)	TiO ₂ wt(%)	Fe ₂ O ₃ wt(%)	MgO wt(%)	CaO wt(%)	Na ₂ O wt(%)	K ₂ O wt(%)	MnO wt(%)	P ₂ O ₅ wt(%)	LOI wt(%)	Total wt(%)
Daho Park	48.20	16.15	2.54	11.18	4.05	7.08	2.61	1.48	0.16	0.48	5.14	99.06
Buk Orum	38.34	19.89	2.93	13.53	4.61	7.31	2.44	0.96	0.22	0.70	9.30	100.22
Jimi Mt.	43.51	20.82	2.87	12.61	4.06	5.32	2.12	1.68	0.19	0.48	6.24	99.90
Dusan Mt.	44.68	15.93	2.63	13.63	7.84	7.38	2.30	0.93	0.20	0.50	4.07	100.08
Gomun Orum	42.23	20.06	2.96	14.40	3.20	4.46	1.51	0.60	0.30	0.56	9.66	99.93
Budae Mt.	31.82	20.18	4.05	20.04	2.72	0.77	0.24	-	0.37	0.54	18.50	99.22
Andol Orum	31.27	19.84	4.03	19.31	3.55	1.20	0.31	-	0.41	0.73	18.36	99.00

4. 직접전단시험

송이는 입자의 크기가 일반 흙과는 달리 생성 과정의 특징과 풍화도에 따라 미세 입자로부터 입경이 10cm 이상 되는 것도 있다. 즉 표준 직접전단시험만 으론 송이의 강도특성을 밝히는데 부족하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 송이의 입자크기를 고려하여 대형직접전단시험기를 개발하여 표준직접전단시험과 동시에 대형직접전단시험을 수행하였다.

(1) 실험장치

본 연구에 사용된 표준직접시험기는 몰드는 직경이 63.3mm, 높이가 42mm인 원기둥형이다. 연직하중의 범위는 0~1000kg이고, 추를 이용해서 재하하는 방식이다. 수평변위계의 속도 범위는 0~9.99mm/min이다. 그림 3은 대형직접전단시험기로 몰드는 가로, 세로, 높이가 각각 20cm인 정육면체 형이다. 상부 전단상자에 가해지는 연직하중은 유압을 이용해서 재하하는 방식으로 수직응력의 범위는 0~7.5kg/cm²이고, 수평변위계의 속도범위는 0.2mm/min~3.5mm/min이다(서창민, 2001).

(2) 실험방법

본 연구에서는 모든 공시체에 상재하중을 10분 동안 재하한 이후 직접전단시험을 시작하였으며, 전단

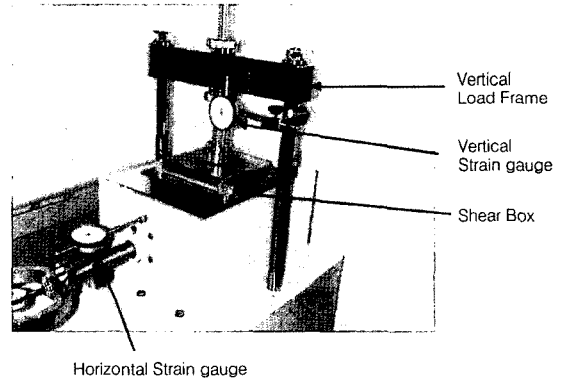


그림 3. Vertical Loading System

속도는 소형인 경우 0.2mm/min, 대형인 경우 1mm/min을 적용하였다. 표준 및 대형 직접전단시험에서 시료는 상대밀도 70%로 조성하였으며, 사용시료의 입경은 전단상자의 크기를 고려하여, 표준전단시험인 경우 4.75mm~2mm, 대형전단시험인 경우 15.9mm~4.75mm로 정하였다.

(3) 실험결과

시료에 대한 표준직접전단시험의 결과는 그림 4~그림 7과 같다.

대형직접전단시험의 결과는 그림 8~그림 9와 같다.

표준직접전단시험의 경우 수평변형이 진행됨에 따

22

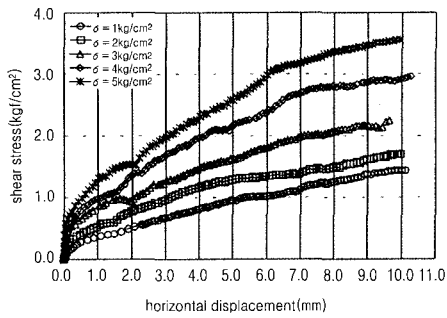


그림 4. Standard Size Direct Shear Test (Daho Park)

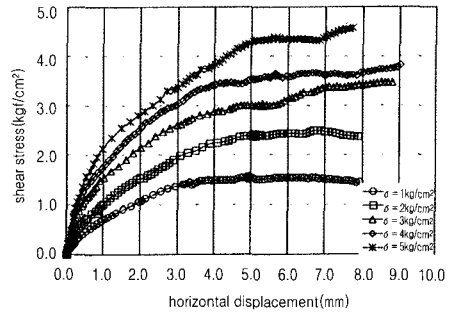


그림 5. Standard Size Direct Shear Test (Buk Orum)

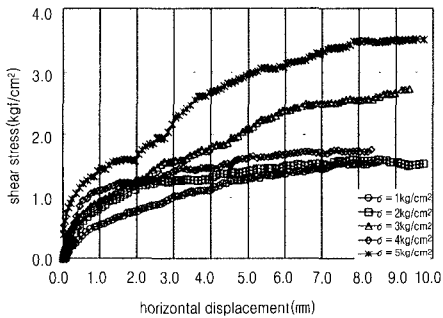


그림 6. Standard Size Direct Shear Test (Jimi Mt.)

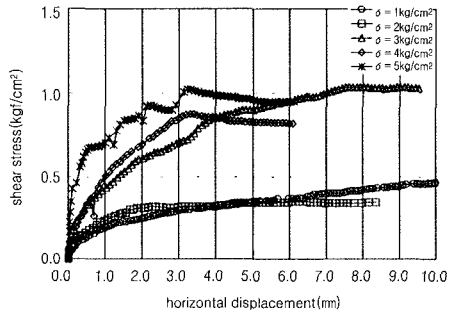


그림 7. Standard Size Direct Shear Test (Budae Mt.)

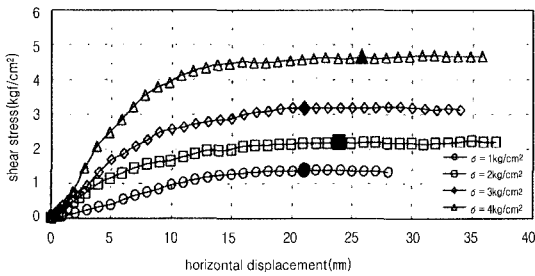


그림 8. Large Size Direct Shear Test (Daho Park.)

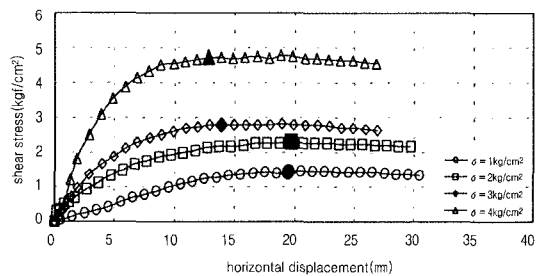


그림 9. Large Size Direct Shear Test (Dusan Park.)

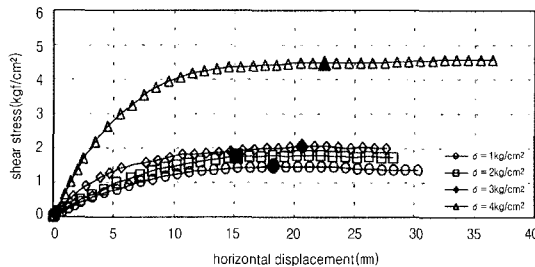


그림 10. Large Size Direct Shear Test (Andol Orum.)



라 전단응력 또한 지속적으로 증가해 뚜렷한 파괴점의 파악이 어려워 강도정수의 결정이 불가능한 경우가 다소 발생하였다. 이러한 현상은 입자의 마모현상이 많이 발생하고 마모된 입자들이 재배치에 의해 응력증가가 발생하여 강도가 계속적으로 증가하는 것으로 보여진다. 대형직접전단시험의 경우는 파괴점의 형상이 뚜렷이 나타나는 등 표준직접전단시험과는 전혀 다른 거동형상을 보이고 있으며, 일반적인 흙의 거동형상과 각 시험결과와 비교하여보면, 더욱 신뢰도 높은 결과값임을 알 수 있다. 즉 입자의 크기가 다소 크며, 파쇄성을 갖고 있는 송이의 경우 일정 크기 이상의 전단상자가 필요함을 알 수 있다. 대형 직접전단시험 결과로 전단저항각과 점착력을 구하면 표 5와 같다.

표 5. Strength Parameter

Place name	Large size	
	c	ϕ
Daho Park	1.20	41.5
Dusan Mt.	1.13	41.9
Andol Orum	0.81	40.9

5. 삼축압축시험

송이의 강도특성을 명확히 밝히기 위하여 각 시료에 대하여 삼축압축시험을 수행하였다. 시험에 사용된 시험장치는 ELE사에서 제작한 삼축압축시험기를 이용하였다.

(1) 실험방법

삼축압축시험의 시료는 전단시험시와 동일한 조건인 상대밀도 70%로 낙하법을 이용하여 제작하였다. 시료의 포화를 위하여 CO₂가스주입법, 배압법 등을 이용하였으며, 전단속도는 0.2mm/min로 삼축압축 전단시험을 실시하였다 그림 11은 삼축압축시험의 모식도이다.

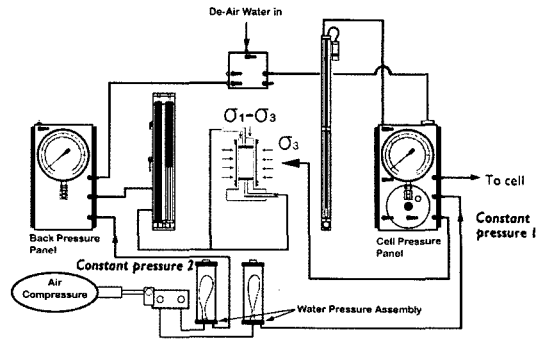


표 11. Illustration of Triaxial Test(소재관, 2002)

(2) 실험조건

표 6은 각 송이에 대한 실험시 상대밀도와 건조단위중량, 그리고 초기 간극비이다. 다호농장, 복오름, 두산봉, 거문오름은 동일한 상대밀도 70%에 대하여 구속압을 0.51kg/cm²(50kPa), 1.02kg/cm²(100kPa), 2.04kg/cm²(200kPa)로 변화시켜 시험을 실시하였다. 거문오름은 구속압을 0.51kg/cm²(50kPa), 1.02kg/cm²(100kPa), 1.53kg/cm²(150kPa)로 하였고, 부대약은 0.25kg/cm²(25kPa), 0.51kg/cm²(50kPa), 0.77kg/cm²(75kPa), 1.02kg/cm²(100kPa)로 하여 시험을 실시하였다.

표 6. Unit weight and void ratio of Scorias (Triaxial test)

Place name	Relative density Dr(%)	Unit weight	Void ratio e ₀
Daho Park	70	0.78	2.42
Buk Orum	70	1.04	1.81
Jimi Mt.	70	0.79	2.42
Dusan Mt.	70	0.98	1.86
Gomun Orum	70	0.72	2.93
Budae Mt.	70	0.55	3.62

(3) 실험결과

그림 12는 삼축압축시험시의 복부팽창을 나타내었다. 각 시료에 대한 삼축압축시험결과 축변형률-

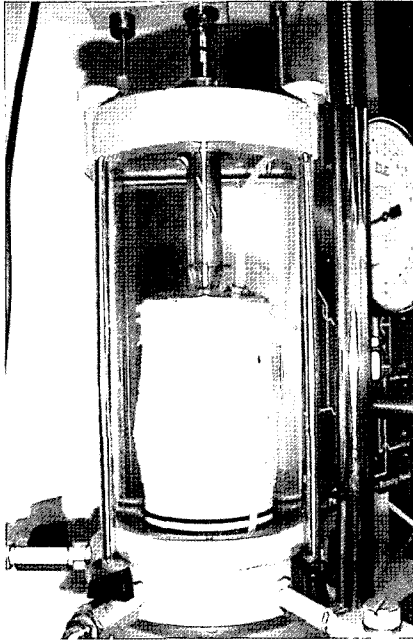


그림 12. Triaxial Test Cell

표 7. Strength Parameter

Place name	Triaxial test
	ϕ
Daho Park	33.5
Buk Orum	37.8
Jimi Mt.	33.8
Dusan Mt.	37.4
Gomun Orum	31.4
Budae Mt.	26.8

축차응력의 관련그래프는 그림 13~그림 18과 같다. 응력-변형을 곡선은 대형직접전단시험과 유사한 경향을 보였으며, 각 시료의 내부마찰각은 표 7에 나타내었다.

일반적으로 완전포화된 사질토의 경우 점착력의 값은 0이지만 송이의 경우 시료에 따라서 Mohr-coulomb의 파괴규준으로 정리할 시 그림 19~그림 24

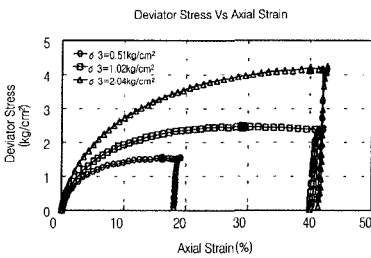


그림 13. Relationship between stain and Deviator stress(Daho Park)

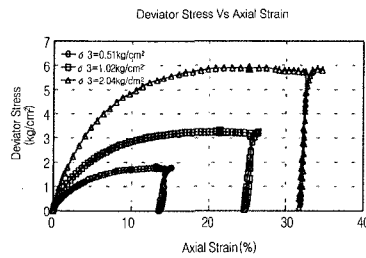


그림 14. Relationship between stain and Deviator stress(Buk Orum)

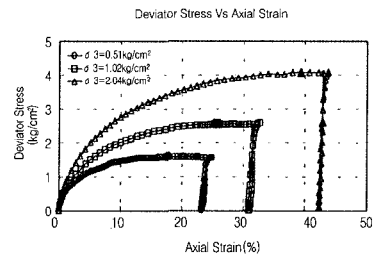


그림 15. Relationship between stain and Deviator stress(Jimi Mt.)

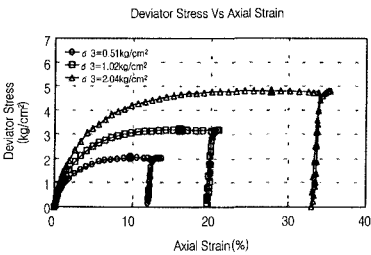


그림 16. Relationship between stain and Deviator stress(Dusan Mt.)

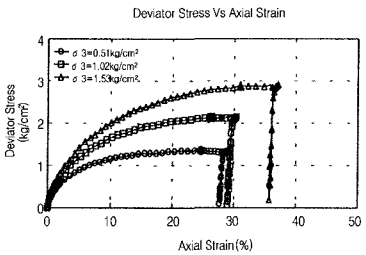


그림 17. Relationship between stain and Deviator stress(Gomun Orum)

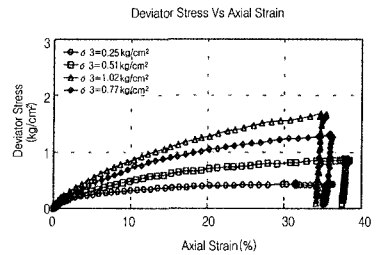


그림 18. Relationship between stain and Deviator stress(Buda Mt.)

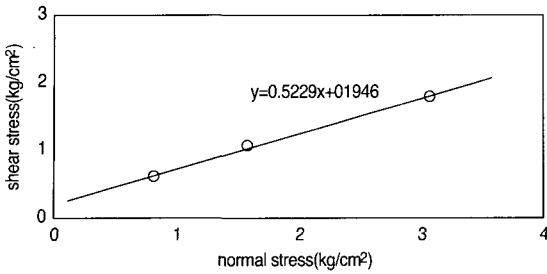


그림 19. Relationship between confining pressure and deviator stress (Daho Park)

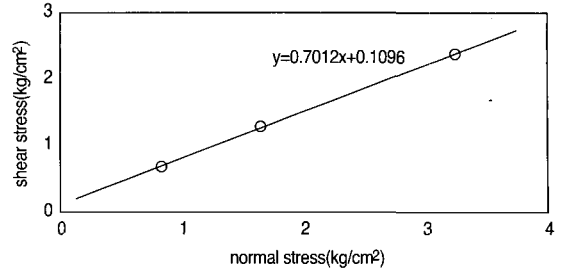


그림 20. Relationship between confining pressure and deviator stress (Buk Orum)

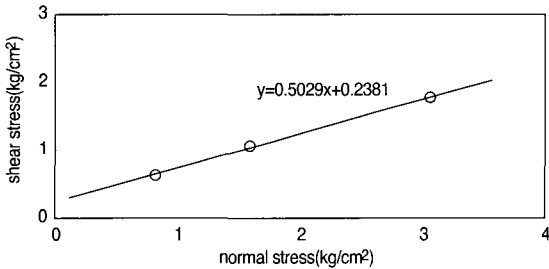


그림 21. Relationship between confining pressure and deviator stress (Jimi Mt.)

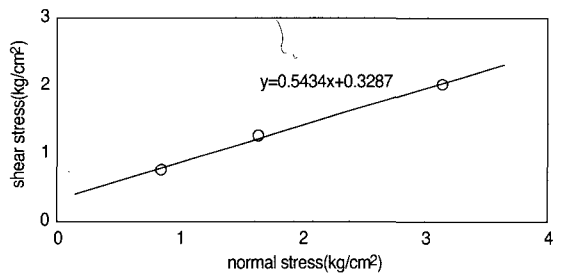


그림 22. Relationship between confining pressure and deviator stress (Dusan Mt.)

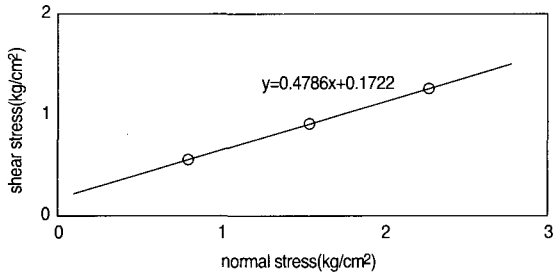


그림 23. Relationship between confining pressure and deviator stress (Gomun Orum)

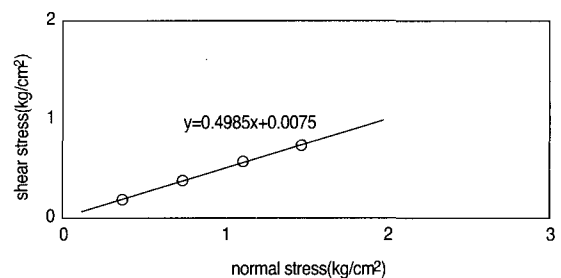


그림 24. Relationship between confining pressure and deviator stress (Budae Mt.)

에서 점착력이 일부시료에서 보인다(Lade, 1988). 이는 송이내의 입도분포에 따른 영향과 더불어 송이의 파쇄성으로 말미암아 높은 구속압 조건하에서 시료가 일부 파쇄됨으로써 전단변형시 전단저항각이 감소되어 마치 큰 점착력이 발생한 것처럼 보이게 되는 현상으로 판단된다. 따라서, 삼축시험결과를 설계 과정에 적용 시 송이의 전단시험결과로 구한 점착력

의 값의 직접적인 적용은 다소 불합리한 것으로 판단된다.

삼축시험결과 내부마찰각은 건조단위중량, 간극율, 비중과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다. 건조단위중량이 1.04인 북오름이 37.8°로 제일 크게 나타났고, 건조단위중량이 0.55인 부대악이 26.8°로 제일 작은 값을 가졌다. 즉, 건조단위중량과 비중이

클수록 내부마찰각은 크게 나타났고, 간극율이 작을수록 큰값을 나타냈다. 파괴점에서의 축변형률은 구속압이 증가함에 따라 다호농장과 지미봉이 15%~40%, 북오름과 두산봉이 10%~30%, 거문오름이 24%~31%, 부대악이 31%~38%로 크게 나타났다. 특히 부대악은 구속압(0.25, 0.51, 0.77, 1.02kg/cm³)이 가장 작은데도 축변형률은 크게 나타났다. 이와 같이 송이는 파괴시 변위가 많이 발생함을 알 수 있다. 따라서 도로나 기타 구조물 설계시 강도보다는 변위에 대한 고려가 필요할 것이다.

화학분석결과와 내부마찰각을 비교해보면 SiO₂ 함량이 많을수록 내부마찰각이 커지고 Fe₂O₃ 함량이 많을수록 내부마찰각이 작아지는 경향을 보이고 있다. 사면체구조는 결합성이 양호하고 그 양이 많을수록 안정된 결합구조를 하고 있다고 볼 수 있으며 부대악과 안돌오름의 경우 팔면체구조인 FeO₃와 Al₂O₃가 많이 함유하는 경우는 송이의 내부마찰각이 작아지는 경향을 보이고 있다.

6. 송이의 파쇄성

구속압의 조건에 따른 송이의 파쇄정도를 구하기 위하여 자연상태의 송이의 입도분포곡선과 각 전단 시험중 비교적 자연상태와 유사한 대형전단시험 후의 시료의 입도분포곡선을 비교하였다. 그림 25~그림 28은 대형직접전단 시험전과 시험후의 입도분포곡선이다. 그림에서와 같이 구속압증가에 따른 입도의 파쇄정도가 명확히 드러나고 있다.

색상에 따른 파쇄정도를 보면 황갈색인 안돌오름이 파쇄가 현저히 나타나고, 두산봉(황갈색70%, 암회색30%)이 그 다음이고 다호농장(적갈색)과 지미봉(암회색)이 비슷한 파쇄정도를 나타내었다. 황갈색이 많을수록 파쇄가 많이 일어나고 적갈색, 암회색 순으로 파쇄가 많이 일어났다.

송이는 입자가 파쇄되어짐에 따라 각 입자의 거친 정도가 감소될 것이다. 즉 입자파쇄로 인한 전단저항각의 감소가 예측되어진다. 따라서 송이의 파괴규준

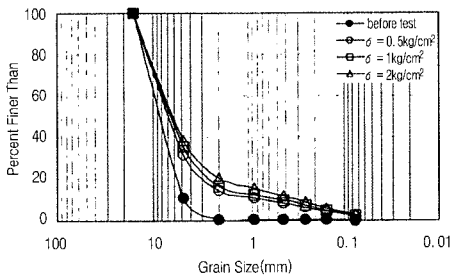


그림 25. Grain Size Distribution Curve, (Large direct shear test, Daho Park)

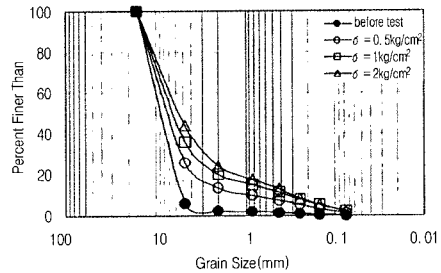


그림 26. Grain Size Distribution Curve, (Large direct shear test, Jimi Mt.)

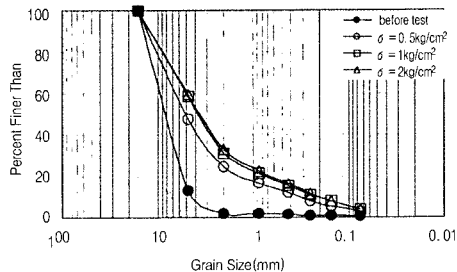


그림 27. Grain Size Distribution Curve, (Large direct shear test, Dusan Mt.)

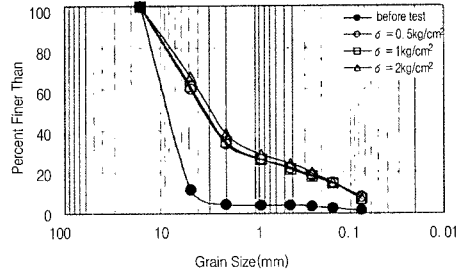


그림 28. Grain Size Distribution Curve, (Large direct shear test, Andol Orum)



은 응력-변형을 곡선에서 파쇄성의 크기에 따라 포물선형상을 이룰 것으로 판단된다.

실험전과 실험후의 입도분포를 살펴보면 송이 입자 파쇄가 초기의 작은 구속압에서 많이 발생하는 것을 볼 수 있다.

7. 송이의 변형계수

송이는 파쇄성 등의 입자의 특징으로 말미암아 일반적인 흙에 비하여 응력에 따른 변형량이 상대적으로 큰 편으로 알려져 있다. 송이의 축대칭 삼축시험 결과에서 탄성계수(변형계수)를 구하였다. 탄성계수를 결정하는 방법으로는 여러 가지 법이 있으나 본 연구에서는 파괴전단응력의 1/2 지점의 변형률값을 기준으로 $E = \frac{q \text{ (축차응력)max}}{2 \times \epsilon \text{ (1/2}q \text{ max에서의 변형률)}}$ 의 방법으로 구하였다(토목공법연구회, 1984). 각 시료에 따른 탄성계수의 값은 표 7과 같다. 표 7에서 보면 아주 연약한 부대약 시료를 제외한 나머지 송이시료의 경우 탄성계수가 약 2~9kg/cm²이다. 이는 일반적인 사질토에 비하여 아주 적은 값이며, 거의 점성토의 탄성계수와 유사함을 알 수 있다.

표 8. The Elasticity Coefficient of Scoria(Soing-E)

Place name	Elasticity Coefficient
Daho Park	3.26kg/cm ²
Buk Orum	5.41kg/cm ²
Jimi Mt.	3.65kg/cm ²
Dusan Mt.	8.12kg/cm ²
Gomun Orum	2.47kg/cm ²
Budae Mt	0.08kg/cm ²

8. 결론

본 연구에서는 송이의 일반적인 강도정수를 제시

하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 표준직접전단시험보다는 대형직접전단시험 및 삼축압축시험결과가 더욱 신뢰도가 높다.
2. 삼축시험결과 송이의 내부마찰각은 건조단위중량과 비중이 클수록 크게 나타났고, 간극율이 클수록 작게 나타났다.
3. 송이는 파괴시 변위가 많이 발생하는데 도로나 기타 구조물 설계시 강도보다는 변위에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다.
4. 송이의 주성분은 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ 이며, SiO₂가 함량이 많을수록 내부마찰각이 커지고 Fe₂O₃와 Al₂O₃의 함량이 많을수록 내부마찰각이 작아지는 경향을 보이고 있다.
5. 송이의 색상별 파쇄는 황갈색, 적갈색, 암회색 순으로 많이 발생하였다.
6. 송이의 파괴규준은 응력-변형률곡선에서 파쇄성의 크기에 따라 포물선형상을 이룰 것으로 판단된다.
7. 부대약 시료를 제외한 나머지 송이시료의 경우 탄성계수가 약 2~9kg/cm² 값을 보였다. 이는 일반적인 사질토에 비하여 아주 적은 값이며, 거의 점성토의 탄성계수와 유사한 경향을 보이고 있다.
8. 송이특성중 변형이 크게 발생하며, 탄성계수가 사질토에 비하여 작은 점을 감안하면, 도로의 각종 재료로써 사용되어질 경우 침하, 균열 등의 지반변형이 발생할 가능성이 높다고 하겠다. 따라서 각종 적용대상에 따라 다짐 및 주입 등의 보강공법을 통한 충분한 탄성계수의 확보가 필요하다고 하겠다.

9. 후기

이 논문은 BK21 사업에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

10. 참고문헌

1. 건설부 국립건설연구소, 1979, 제주도산 송이의



-
- 공학적 특성 연구보고서, 건설연구소자료 No. 395.
2. 남정만, 2000, 제주도 지반의 공학적 특성, 한국지반공학회 암반역학위원회 논문집, pp.171-182.
3. 서창민, 2001, 대형직접전단시험기를 이용한 송이의 강도특성에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문, pp. 38-60
4. 소재관, 2002, 송이(Scoria)의 거동특성 및 예측에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문, PP. 43-66.
5. 원종관, 1975, 제주도의 형성과 화산활동에 관한 연구, 건국대학교, 이학논총 제1집.
6. 윤정수, 1995, 제주도 북사면의 기생화산체에 관한 연구, 제주대학교 해양연구보고 제19권, pp. 25-38.
7. 토목공법연구회, 1984, 기초설계자료집성, 창우출판, pp. 50-55
8. Lade, P.V. 1988, "*Failure Criterion for Friction Materials*", Mechanics of engineering materials, C. S. Desai and R. H. Gallagher, eds., John Wiley and Sons. Inc., New York, N. Y., pp. 385-402.
9. T. willam Lambe · Robert V. Whitman, 1993, *Soil Mechanics SI Version*, Johns Willey & Sons, pp. 97-136, 201-281.

〈접수 : 2003. 11. 17〉