

## 체적변형 경향에 따른 실트의 거동

### The Behavior of Silt due to Volume Deformation Tendency

정 상 섬\*

Jeong, Sang Seom

#### Abstract

The behavior of pure silt was investigated by using an automated triaxial testing device. The stress-strain behavior of silt due to the volume deformation tendency was compared with the behavior of clay prior to failure and behavior at failure under monotonic undrained compression and extension conditions. A pure silica flour was chosen to form samples. The isotropically normally-consolidated samples with 450 kPa of effective mean confining pressure and overconsolidated samples through unloading were tested. Based on the experimental results, it was qualitatively identified that the undrained strength of normally-consolidated silt increases due to its dilatant nature which is not seen in clay. Also the overconsolidated silt shows a significantly different behavior under the monotonic loadings due to the volume deformation tendency.

#### 요 지

본 연구에서는 실트흙의 거동을 자동화된 삼축시험기를 사용하여 비배수 상태하에서 정적 삼축압축과 인장시험을 수행하여 파괴전과 파괴상태시 체적변형 경향으로 인한 응력 변형을 상태를 점토질흙<sup>(6)</sup>과 비교 검토하였다. 점토질흙의 거동과 비교하기 위하여 순수 실트인 실리카 분말을 사용하여 성형된 시료를 450 kPa인 유효구속 압력까지 등방압밀시킨 후 압밀하중을 감소시키며 과압밀비(OCR)가 다른 시료를 만들어 전단시험을 하였다. 해석 결과 정규압밀 실트의 비배수 강도는 점토와 달리 전단하에서 체적팽창으로 계속 증가하며 과압밀 실트 (OCR>2)에 있어서도 체적변형 경향으로 상당히 다른 거동을 보임을 알 수 있었다.

#### 1. 서 론

일반적으로 실트질흙은 동결 용해에 민감하고 반복하중이나 지진, 바람, 발파등 무작위 동하중에 의한 액상화(liquefaction)로 불안정하며 기초파괴를 유발하기 쉽다. 이와같은 실트의 거동에 대한 기존 연구는 모래와 점토의 연구에 비해 숫적으로는 비

교가 되지 않을 정도로 적지만 그 연구결과를 보면 실트질흙의 응력-변형을 관계,<sup>(1,2)</sup> Alaska OCS 실트의 토질 특성,<sup>(12)</sup> 포화된 실트의 전단특성,<sup>(9)</sup> Beaufort 바다 실트의 비배수 동적거동<sup>(7)</sup> 등이 있다. 그러나 대부분의 연구결과를 살펴 볼 때 실트질에 대한 연구는 실트와 모래 또는 실트와 점토질이 섞인 흙의 거동에 대한 연구가 대부분이었으며 변형특성에 큰 영향을 미치는 응력레벨, 구속압력, 흙의 배수와 이

\* 정희원 · 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사후과정

력상태 등과 같은 요인의 고려가 명확하지 않으며 주로 강도 측면에서의 연구가 대부분이었다.

지금까지 실트층으로 구성되어 있는 현장의 기초 설계시 많은 경우에 있어 점토질이나 모래질 흙에서와 같이 구조물을 설계하고 있어 순수 실트의 거동과와 없이는 많은 설계과오를 범할 수 있다. 지반의 구성요소를 볼 때 순수 실트질층으로 구성된 경우는 흔하지 않고 대부분이 실트와 점토, 모래질 흙으로 혼합되어 있다. 따라서 실트와 모래, 또는 실트와 점토질의 혼합도에 대한 연구를 위해서는 순수 실트지반의 거동에 대한 체계적인 연구 없이는 그 효과가 없다고 하겠다.

기존 연구결과 실트질흙은 사질토와 같이 비점토 광물(non-clay mineral)로 분류되어 거동양상이 전반적으로 사질토에 비해 양적인 차이는 있지만 사질토와 유사한 점이 많고 점성토와 비교해서는 거동이 다르다고 알려져 있다.<sup>(12)</sup> 그러나 점성토의 거동과 비교할 수 있는 구속압력이나 응력이력과 배수상태에 따른 실트질흙의 체계적인 거동 분석이 미미한 실정이다.

이와같은 배경에서 본 연구에서는 강도측면에서 보다는 변형 특성에 초점을 맞춰 흙의 구속압력(confining pressure)이나 이력상태(stress history)에 따른 파괴까지의 응력 변형을 경로나 파괴시 실트질흙의 거동 파악에 연구의 목적을 두었다. 따라서 정하중(monotonic loading) 작용시 순수 실트의 응력-변형을 거동과 파괴까지의 응력경로를 토대로 순수 점토질흙과의 거동을 비교분석하고자 한다.

## 2. 시료 및 실험방법

### 2.1 시료

본 연구를 위해 사용한 실트는 실리카 분말로 대부분 전형적인 실트입경인 0.074 mm-0.002 mm 범위내에 있으며 입도 분포곡선은 그림 1과 같고 시료로 사용한 실트에 대해 실시한 토성시험 결과는 표 1과 같다.

균등하고 균질의 시료성형을 위해 다짐과 작은 진동을 동시에 가하여 성형하였다. 진동 테이블(vibrating table) 위에 삼축 모울드를 올려 놓고 건조로에서 24시간 건조한 순수 실트를 깔대기(hopper)

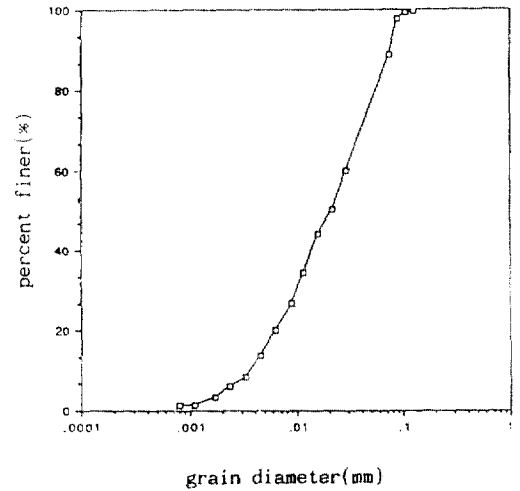


그림 1. Grain Size Distribution

표 1. 실트 시료의 토성 시험결과

입경의 범위 (직경, mm)	0.1-0.001
유효입경, $D_{10}$ (mm)	0.004
균등계수, $C_u$	6.25
비중, $G_s$	2.64
최대 건조밀도 ( $g/cm^3$ )	1.72
(최소 간극비)	0.53
최소 건조밀도 ( $g/cm^3$ )	1.24
(최대 간극비)	1.13
액성한계, L.L. (%)	19.9

를 통하여 모울드 안으로 낙하고를 일정하게 유지하며 낙하시켰다. 각 층마다 나무봉(timber pestle)을 사용한 탬핑(tamping)과 진동 테이블에 의한 미소 진동으로 균등하고 균질인 시료를 만들었으며 시료의 상하단에서 하중 cap과 base와의 마찰저항(end restraint)<sup>(8)</sup>으로 시료의 중앙부에서 불균등한 응력 분포를 가능한 줄일 수 있도록 높이 15 cm, 직경 7.5 cm인 시료를 성형하였다.

### 2.2 실험 방법

시료성형 후 시료를 완전 포화시키기 위해 높은

진공의 부압을 가하였으며 본 연구를 위하여 사용한 자세한 시료의 포화과정은 그림 2에 나타나 있다. 진공의 부압을 evacuation chamber를 통하여 시료에 작용함으로써 공기기포가 없는 증류수를 시료 안으로 빨아 올리는데, 사용한 진공의 부압은 back pressure가 -1 atm에 도달할 때까지 시료에 약 20 kPa(15 cm의 수은 높이에 해당)의 유효 구속압력을 유지할 수 있도록 점진적으로 증가시켰다. 증류수가 시료의 상단에 연결된 튜브를 통해 흘러 나올 때까지 시료를 포화시킨 후 삼축 cell을 하중 프레임으로 옮겨 설치 후 back pressure와 구속압력을 점진적으로 증가시켜 Skempton의 간극수압계수, B 값을 약 0.98-1.0을 유지하도록 했으며 일정한 B 값의 확인 후 시료를 본 연구를 위해 사용한 450 kPa의 유효 구속압력까지 등방압밀시킨 후 압밀하중을 서서히 감소시켜 과압밀비 2, 4, 6인 과압밀 시료들을 만들었으며 100 kPa, 300 kPa, 450 kPa의 유효 구속압력을 갖는 정규압밀 시료들을 만들었다. 다음으로 비배수 상태하에서 삼축압축과 신장시험을 하였다. 시험은 자동화된 삼축 시험기를 사용했으며 변형률을 제어(strain control) 하면서 여러가지 타입의 응력경로를 고려 하였다.

표 2는 본 연구를 위해 수행한 총 14개의 삼축시험 결과를 보인다.

여기서  $P_0$ 는 축차응력을 가하기 전 상태의 유효 구속압력,  $D_r$ 는 시료를 성형한 후의 상대밀도,  $e_0$ 는 시료를 성형한 후의 간극비, OCR는 과압밀비(over consolidation ratio)를 의미한다.

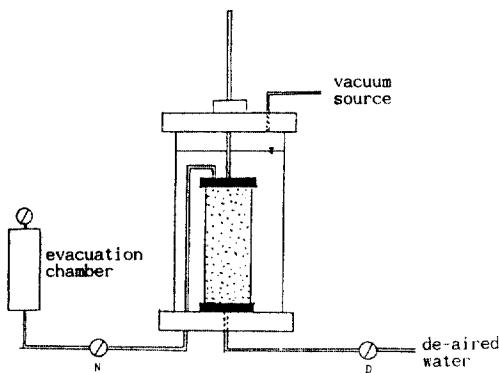


그림 2. Procedure for Sample Saturation

표 2. 비배수 삼축압축, 신장 시험

$P_0$ (kPa)	하중타입	제어방법	$D_r$ (%)	$e_0$	OCR
450*	압축	변형률	36	0.90	1
300	압축	변형률	36	0.91	1
225	압축	변형률	36	0.91	2
113	압축	변형률	37	0.90	4
100	압축	변형률	36	0.91	1
75	압축	변형률	37	0.90	6
450*	신장	변형률	36	0.91	1
300	신장	변형률	36	0.91	1
225	신장	변형률	36	0.91	2
100	신장	변형률	36	0.91	1
75*	신장	변형률	36	0.91	6

\* 시험의 정확도를 위해 2 번씩 실험 하였음.

### 3. 실험결과 및 분석

실트의 거동특성을 위해 수행한 일련의 시험을 토대로  $p'-q$  평면상에서 도시한 실트의 전형적인 유효응력 경로( $p'-q$ )는 그림 3과 4와 같으며 응력 변형률 관계( $q-\epsilon_s$ )는 그림 5와 6과 같다. 여기서  $p'$ 는 유효 구속압력(effective mean confining pressure)으로  $(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$ 에 해당하고  $q$ 는 축차응력(deviatoric stress)으로  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 를 의미한다. 비배수 상태하의 정적 삼축압축( $\sigma_3 =$  일정,  $\sigma_1 =$  증가)과 신장거동( $\sigma_3 =$  일정,  $\sigma_1 =$  감소)은 다음과 같다

1) 서로 다른 초기 구속압력과 과압밀비(OCR)를 갖는 응력 경로지만 모든 시료의 극한 상태를 연결하면 유일한 선인 파괴선(failure line)<sup>(10)</sup>에 도달한다. 따라서, 압축 파괴선  $q/p' = M_c = 1.55$ 와 신장 파괴선  $-q/p' = M_c = 0.87$ 은 시험한 하중의 구속압력이나 이력상태(loading history)에 상관없이 유일하게 존재하는 실트 고유의 물성값이다(그림 7 참조).

2) 체적 변형현상은 과압밀비에 크게 좌우된다. 정규압밀 실트(그림 3)에 있어서는 삼축압축과 신장시험 결과 파괴선에 도달하기 전에 초기에는 체적 감소경향(volume contraction tendency)이 체적 팽창경향(volume dilation tendency)으로 바뀌는 상태 변형선(phase transformation line)<sup>(4)</sup>이 존재하나 과

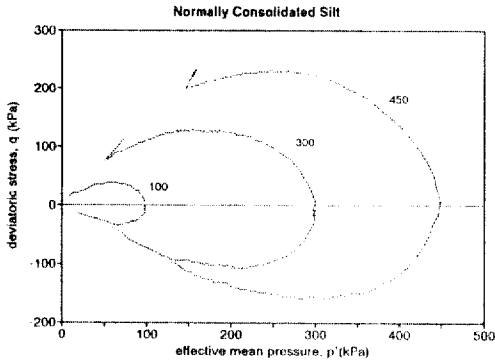


그림 3. Effective Stress Path for Normally Consolidated Samples tested in Compression and Extension

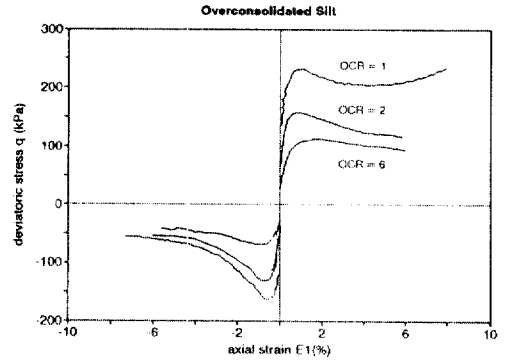


그림 6. Deviatoric Stress vs. Axial Strain for Overconsolidated Samples in Compression and Extension

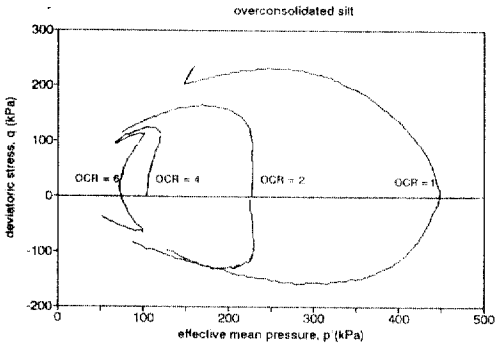


그림 4. Effective Stress Path for Overconsolidated Samples tested in Compression and Extension

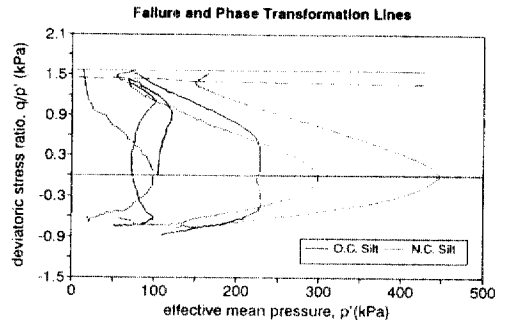


그림 7. Identification of Failure and Phase Transformation Lines

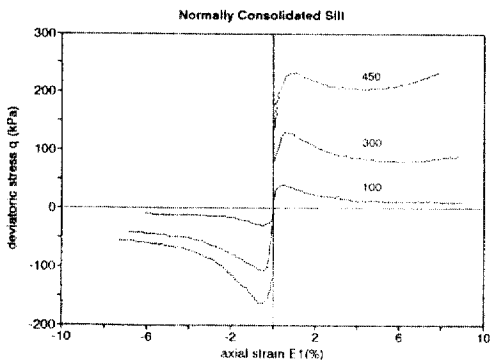


그림 5. Deviatoric Stress vs. Axial Strain for Normally Consolidated Samples in Compression and Extension

압밀 실트(그림 4)에 있어서는 OCR이 2보다 커짐에 따라 초기에는 체적 팽창경향이 있다가 상태 변형선을 넘어서는 체적 감소경향이 있다.

3) 삼축 압축 영역에서가 인장영역에서 보다 파괴선(failure line)과 상태 변형선 사이의 거리가 더 멀다.

4) 모든 시료의 응력경로는 최고강도(비배수 강도),  $q_{max}$ 를 가지며 이때의 변형률은 약 1%이며 최고치를 넘어서는 변형이 증가함에 따라 현저하게 강도 저하를 보여 잔류응력(residual stress) 상태에 도달한다(그림 5, 6 참조). 이와같은 거동은 사질토에서도 볼 수 있는 현상이다.

5) 파괴 근처의 유효응력 경로는 정규압밀과 과압밀된 모든 시료에 있어 파괴선 밑에서 파괴선에 접근한다(그림 7 참조).

#### 4. 점성토와 비교한 실트의 거동

그림 8은 실트와 점토<sup>(6)</sup>의 비배수 삼축압축 신장 시험 결과이다. 여기서 점토의 시험결과는 Jafroudi<sup>(6)</sup>에 의한 kaolinite와 Montmorillonite의 혼합토에 대한 시험결과인데 사용한 혼합토의 토성 시험결과 입경은 0.002 mm 이하이고 초기 간극비,  $e_0=0.8$ , 압축지수,  $C_c=0.30$ , 팽창지수,  $C_s=0.041$  값을 보였다. 그림 8에서 정규압밀 실트의 거동은 상태변형선을 넘어서는 점토질에서 볼 수 없는 체적팽창 경향을 보이거나 OCR이 2보다 커짐에 따라 초기에는 체적팽창 경향이 있다가 상태 변형선을 넘어서는 체적감소 경향이 있다(사질토도 아주 느슨한 상태를 제외하고는 상태 변형선을 갖는다). 반면에 정규 압밀점토(OCR=1.0)에 있어서는 파괴까지 체적감소 경향이 있지만 OCR이 2보다 커짐에 따라 초기부터

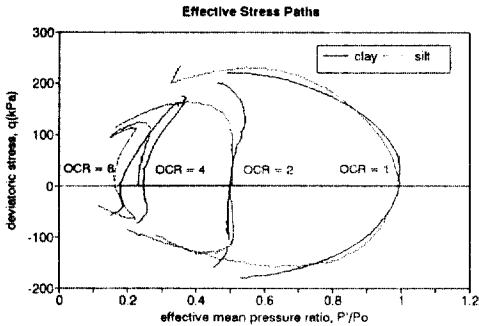


그림 8. Undrained Monotonic Behavior of Silt(present study) and Clay(Jafroudi, 1983)

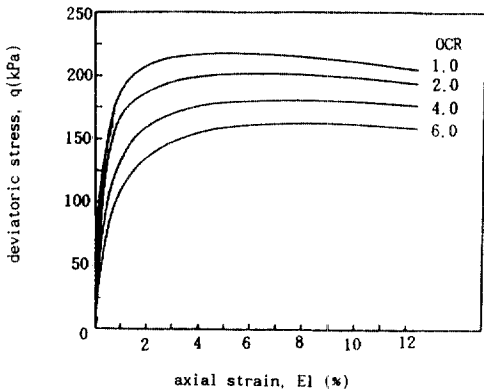


그림 9. Undrained Behavior of Clay under Monotonic Loading(After Jafroudi, 1983)

파괴까지 체적팽창 경향이 있다.

그림 5와 6에서 실트 시료의 응력경로는 최고강도(비배수강도),  $q_{max}$ 를 가지며 이때의 변형률은 약 1%이며 최고치를 넘어서는 변형이 증가함에 따라 현저하게 강도 저하를 보여 잔류응력(residual stress) 상태에 도달한다. 반면에 점성토의 거동(그림 9)에 있어서는 1% 미만의 초기 상태까지는 급격한 강도증가가 있지만 최고치( $q_{max}$ )가 없으며 축변형률이 커짐에 따라 점진적으로 파괴상태까지 일정한 강도를 유지한다.

#### 5. 요약

본 연구에서는 정하중하에서 비소성 실트의 거동에 대한 연구를 토대로 점성토와 비교분석 하였다. 실트와 점성토의 거동에 유사점과 차이점을 요약하면 다음과 같다.

##### 5.1 유사점

- 1) 파괴선  $q/p'=M_c$ 와  $-q/p'=M_c$ 가 시험한 구속압력이나 흙의 이력상태에 상관없이 유일하게 존재한다.
- 2) 정규 압밀점토나 실트(OCR=1.0)에 있어서는 전단 초기에는 체적 감소경향이 있다.
- 3) 과압밀비가 2 이상이 되면 초기에는 실트나 점토 모두가 체적팽창 경향이 있다.

##### 5.2 차이점

- 1) 상태 변형선(phase transformation line)  $q/p'=M_{pc}$ 와  $-q/p'=M_{pc}$ 가 실트에 있어서는 존재하나 점성토에서는 존재하지 않는다.
- 2) 실트 시료의 응력경로는 최고강도(비배수강도),  $q_{max}$ 를 가지며 이때의 최고치를 넘어서는 변형이 증가함에 따라 현저하게 강도 저하를 보여 잔류응력(residual stress) 상태에 도달하는 반면에 점성토의 거동에 있어서는 초기상태(축변형률 $\leq 1.0\%$ )에는 급격한 강도의 증가가 있지만 최고치가 없으며 축변형률이 커짐에 따라 일정한 강도를 유지하며 파괴에 접근한다.
- 3) 파괴 근처의 유효응력 경로는 실트시료에 있어서는 파괴선 밑에서 파괴선에 접근하지만 점토시

료에서는 특히 과압밀 점토의 경우 파괴선을 넘었다가 파괴선에 접근한다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 실트의 거동에 대하여 점성토와 비교하여 알아 보았다. 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 파괴선  $q/p' = M_c$ 와  $-q/p' = M_c$ 가 시험한 구속응력, 흙의 이력상태에 상관없이 유일하게 존재한다.
- 2) 점성토와 달리 실트는 상태 변형선(phase transformation line)  $q/p' = M_{pk}$ 와  $-q/p' = M_{pk}$ 가 존재한다.
- 3) 정규압밀 실트에 있어 비배수 압축강도는 전단하에서 체적팽창으로 계속 증가한다. 이것은 점토질에서는 볼 수 없는 현상이다.
- 4) 과압밀 실트( $OCR > 2$ )에 있어 초기에는 체적 팽창 경향이 있다가 상태 변형선을 넘어서는 체적 감소 경향이 있다. 반면에 과압밀 점토에 있어서는 초기부터 파괴까지 체적팽창 경향이 있다.

## 참 고 문 헌

1. Borgesson, L., "Stress-Strain Relationships for Silty Soils", *Interdisciplinary Conference on Mechanisms of Deformation and Fracture*, Lulea, Sweden, 1978, pp. 343-350.
2. Borgesson, L., "Shear Strength of Inorganic Silty Soils", *Interdisciplinary Conference on Mechanisms of Deformation and Fracture*, Lulea, Sweden, 1982, pp. 567-572.

3. Ladd, C.C., Weaver, J.S., Germaine, J.T. and Sauls, D.P., "Strength-Deformation Properties of Arctic Silt", *Journal of Civil Eng. in Arctic Off-shore*, 1985, pp. 820-829.
4. Ishihara, K., Tatsuoka, F. and Yasuda, S., "Undrained Deformation and Liquefaction of Sand under Cyclic Stresses", *Soils and Foundations*, Vol. 15, No. 1, 1975, pp. 29-44.
5. Ishihara, K. and Shigeru Okada, "Yielding of Overconsolidated Sand and Liquefaction Model under Cyclic Stresses", *Soils and Foundation*, Vol. 18, No. 1, 1978, pp. 57-72.
6. Jafroudi, S., "Experimental Verification of Bounding Surface Plasticity Theory for Cohesive Soils", Ph. D Thesis of University of California, Davis, 1983.
7. Konrad, J.M., "Undrained Cyclic Behavior of Beaufort Sea Silt", *OTC No. 3887*, 1985, pp. 830-837.
8. Lee, K.L., "End Restraint Effects in Undrained Static Triaxial Strength of Sand", *J. of Geotech. Eng.*, ASCE, Vol. 96, GT6, 1970, pp. 687-704.
9. Penman, A.D.M., "Shear Characteristics of a Saturated Silt, Measured in Triaxial Compression", *Geotechnique*, Vol. 3, No. 4, 1953, pp. 312-328.
10. Schofield, A. and Wroth, P., *Critical State Soil Mechanics*, McGraw Hill, London, 1968.
11. Schultze, E. and Horn, A., "The Shear Strength of Silt", *Proceedings, 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Eng.* Vol. 1, 1965, pp. 350-353.
12. Wang, J.L., Vivatrat, V. and Ruster, J.R., "Geotechnical Properties of Alaska OCS Silts", *Proceedings, Offshore Technology Conference*, Houston, Tx. Vol. 4, 1982, pp. 415-420, OTC No. 4412.

(接受 : 1993. 8. 4)