

## 과압밀 실트의 응력-변형을 거동 The Stress-Strain Behavior of Overconsolidated Silt

정 상 섭 , SANG-SEOM JEONG

연세대학교 토목공학과, 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

**SYNOPSIS :** 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 overconsolidated silt increases due to its dilatant nature which is not seen in clay. It was also found that the existing models for sand and clay were not able to predict the overall behavior of silt.

### 1. 서론

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 수적으로는 비교가 되지 않을 정도로 적지만 그 연구 결과를 보면 실트질흙의 응력-변형을 관계<sup>(1)</sup>, Alaska OCS 실트의 토질특성<sup>(10)</sup>, 포화된 실트의 전단특성<sup>(8)</sup>, Beaufort 바다 실트의 비배수 동적거동<sup>(6)</sup> 등이 있다. 그러나 대부분의 연구결과를 살펴볼때 실트질에 대한 연구는 실트와 모래 또는 실트와 점토질이 섞인 흙의 거동에 대한 연구가 대부분이었으며 변형특성에 큰 영향을 미치는 응력레벨, 구속압력, 흙의 배수와 이력상태 등과 같은 요인의 고려가 명확하지 않으며 주로 강도 측면에서의 연구가 대부분이었다.

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

기존 연구결과 실트질흙은 사질토와 같이 비점토광물(non-clay mineral)로 분류되어 거동양상이 전반적으로 사질토에 비해 양적인 차이는 있지만 사질토와 유사한점이 많고 점성토와 비교해서는 거동이 다르다고 알려져 있다.<sup>(10)</sup> 그러나 점성토의 거동과 비교할 수 있는 구속압력이나 응력이력과 배수상태에 따른 실트질흙의 체계적인 거동 분석이 미미한 실정이다.

이와같은 배경에서 본 연구에서는 강도측면에서 보다는 변형특성에 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 실내시험과 모델 예측을 토대로 비교 분석하고자 한다.

### 2. 시료 및 실험방법

#### 2.1 시료

본 연구를 위해 사용한 실트는 비소성 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.

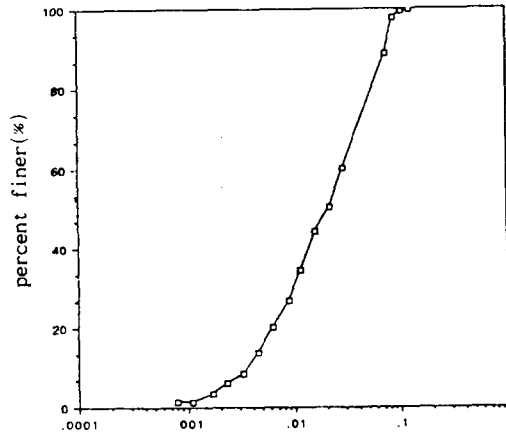


그림 1. Grain Size Distribution

균등하고 균질의 시료성형을 위해 다짐과 작은 진동을 동시에 가하여 성형하였다. 진동 테이블 (vibrating table) 위에 삼축 모울드를 올려 놓고 건조실에서 24시간 건조한 순수 실트를 깔대기 (hopper) 를 통하여 모울드 안으로 낙하하고를 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 cap 과 base 와의 마찰저항 (end restraint)<sup>(7)</sup>으로 시료의 중앙부에서 불균등한 응력분포를 가능한 줄일 수 있도록 높이 15 cm, 직경 7.5 cm 인 시료를 성형하였다.

2.2 실험 방법

시료 성형후 시료를 완전 포화시키기 위해 높은 진공의 부압을 가하였으며 본 연구를 위하여 사용한 자세한 시료의 포화과정은 그림 2 에 나타나 있다. 진공의 부압을 evacuation chamber 를 통하여 시료에 작용함으로써 공기기포가 없는 중류수를 시료안으로 빨아 올리는데, 사용한 진공의 부압은 back pressure 가 -1 atm 에 도달 할때까지 시료에 약 20 kPa ( 15 cm 의 수은 높이에 해당) 의 유효 구속압력을 유지 할 수 있도록 점진적으로 증가시켰다. 중류수가 시료의 상단에 연결된 튜브를 통해 흘러나올때까지 시료를 포화 시킨후 삼축 cell을 하중 프레임으로 옮겨 설치후 back pressure 와 구속압력을 점진적으로 증가시켜 Skempton 의 간극수압계수, B 값을 약 0.98-1.0 을 유지하도록 했으며 일정한 B 값의 확인후 시료를 본 연구를 위해 사용한 450 kPa 의 유효 구속압력까지 등방 압밀 시킨후 압밀하중을 서서히 감소시켜 과압밀비 2.46 인 과압밀 시료들을 만들었으며 100 kPa, 300 kPa, 450 kPa 의 유효 구속압력을 갖는 정규압밀 시료들을 만들었다. 다음으로 비배수 상태에서 삼축압축과 인장시험을 하였다. 실험은 자동화된 삼축 시험기를 사용했으며 변형률을 제어 (strain control) 하면서 여러가지 타입의 응력경로를 고려 하였다. 표 2 는 본 연구를위해 수행한 총 14 개의 삼축시험 결과를 보인다.

표 1. 실트 시료의 토성시험 결과

입경의 범위(직경, mm)	0.1-0.001
유효입경, D <sub>10</sub> (mm)	0.004
균등계수, C <sub>u</sub>	6.25
비중, G <sub>s</sub>	2.64
최대 건조밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	1.72
(최소 간극비)	0.53
최소 건조밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	1.24
(최대 간극비)	1.13
액성한계, L.L. (%)	19.9

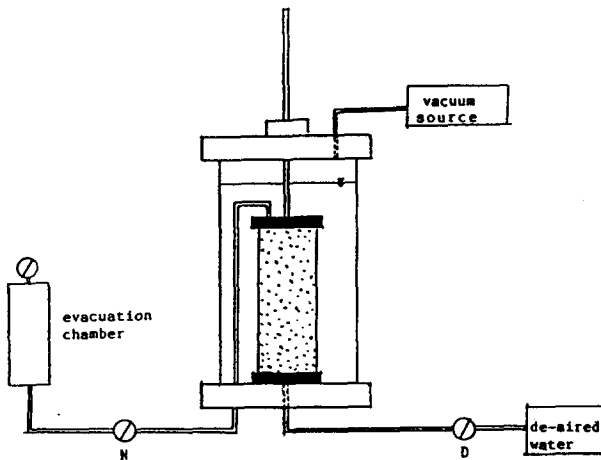


그림 2. Procedure for Sample Saturation

표 2. 비배수 삼축압축, 인장 시험

P <sub>o</sub> (kPa)	하중타입	제어방법	Dr(%)	e <sub>o</sub>	OCR
450*	압 축	변형률	36	0.90	1
300	압 축	변형률	36	0.91	1
225	압 축	변형률	36	0.91	2
113	압 축	변형률	37	0.90	4
100	압 축	변형률	36	0.91	1
75	압 축	변형률	37	0.90	6
450*	인 장	변형률	36	0.91	1
300	인 장	변형률	36	0.91	1
225	인 장	변형률	36	0.91	2
100	인 장	변형률	36	0.91	1
75*	인 장	변형률	36	0.91	6

\* 실험의 정확도를 위해 2 번씩 실험 하였음.

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

### 3. 실험결과 및 분석

실트의 거동특성을 위해 수행한 일련의 시험을 토대로  $p' - q$  평면상에서 도시한 실트의 전형적인 유효 용력 경로 ( $p' - q$ )는 그림 3 과 4 와 같으며 용력 변형률 관계 ( $q - \epsilon_1$ ) 는 그림 5 와 6 과 같다. 여기서  $p'$  는 유효 구속압력 (effective mean confining pressure)으로  $(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$  에 해당하고  $q$  는 축차용력 (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 용력 경로지만 모든 시료의 극한 상태를 연결하면 유일한 선인 파괴선 (failure line)<sup>(9)</sup>에 도달한다. 따라서, 압축 파괴선  $q/p' = M_c = 1.55$  와 신장파괴선  $-q/p' = M_e = 0.87$  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 상태변형선 (phase transformation line)<sup>(3)</sup> 이 존재하나 과압밀 실트 (그림 4) 에 있어서는 OCR 이 2보다 커짐에따라 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 용력경로는 최고강도 (비배수강도),  $q_{max}$  를 가지며 이때의 변형률은 약 1% 이며 최고치를 넘어서는 변형이 증가함에 따라 현저하게 강도 저하를 보여 잔류용력 (residual stress)상태에 도달한다 (그림 5-6 참조). 이와같은 거동은 사질토에서도 볼수있는 현상이다.
- ⑤ 파괴 근처의 유효용력 경로는 정규압밀과 과압밀된 모든시료에 있어 파괴선 밑에서 파괴선에 접근한다 (그림 7 참조).

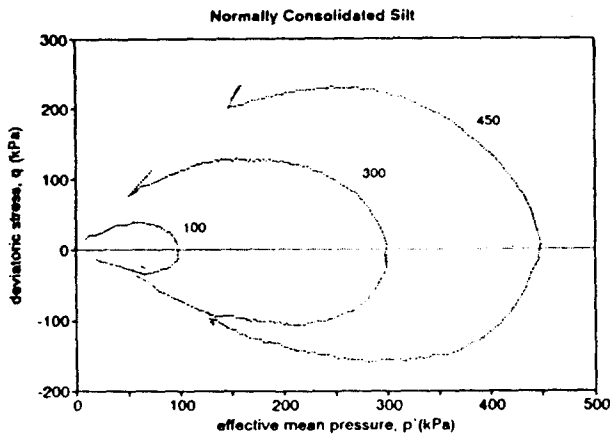


그림 3. Effective Stress Path for N.C. Samples tested in Compression and Extension

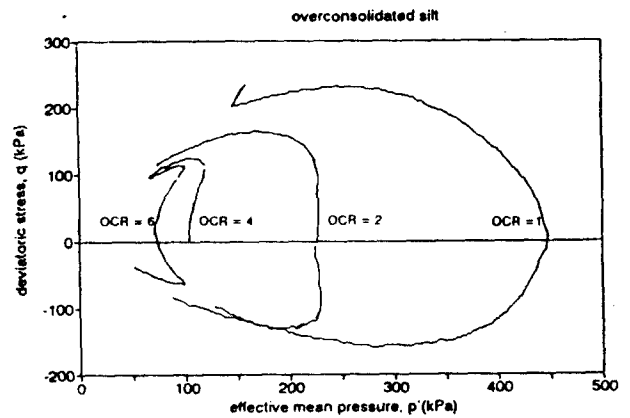


그림 4. Effective Stress Path for O.C. Samples tested in Compression and Extension

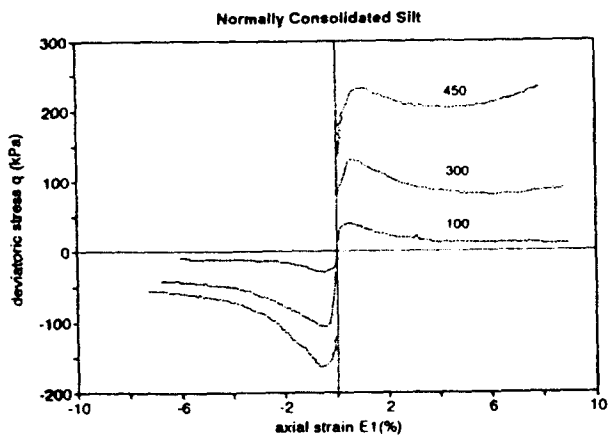


그림 5. Deviatoric Stress vs. Axial Strain for N.C. Samples in Compression and Extension

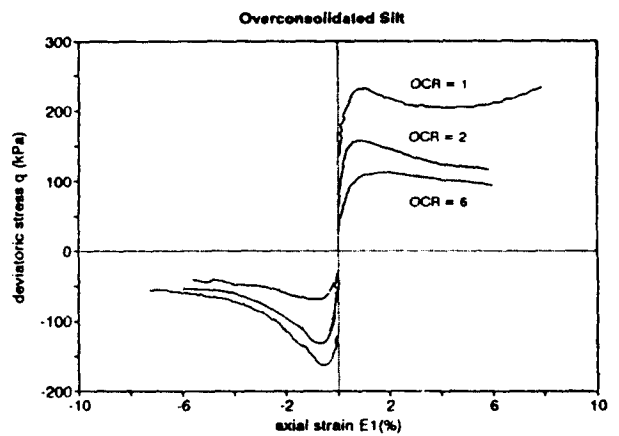


그림 6. Deviatoric Stress vs. Axial Strain for O.C. Samples in Compression and Extension

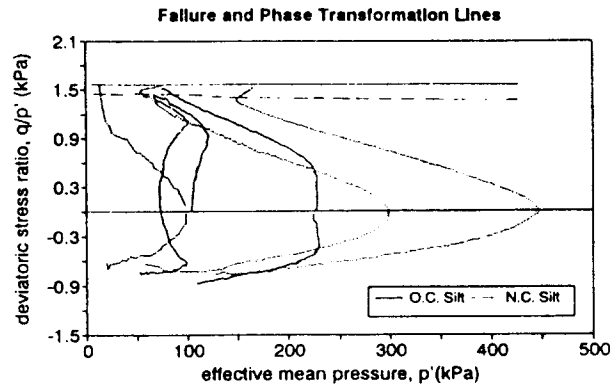


그림 7. Identification of Failure and Phase Transformation Lines

#### 4. 점성토와 비교한 실트의 거동

그림 8 은 실트와 점토<sup>(4)</sup> 의 비배수 삼축압축 인장시험 결과이다. 여기서 점토의 시험결과는 Jafroudi<sup>(4)</sup> 에 의한 kaolinite 와 Montmorillonite 의 혼합토에 대한 인장시험결과 인데 사용한 혼합토의 토성시험 결과 입경은 0.002 mm 이하이고 초기 간극비,  $e_0 = 0.8$ , 압축지수,  $C_c = 0.30$ , 팽창지수,  $C_s = 0.041$  값을 보였다. 그림 8 에서 정규압밀 실트의 거동은 상태변형선을 넘어서는 점토질에서 볼 수 없는 체적 팽창경향을 보이거나 OCR 이 2보다 커짐에따라 초기에는 체적 팽창경향이 있다가 상태 변형선을 넘어서는 체적 감소 경향이 있다 (사질토도 아주 느슨한 상태를 제외하고는 상태 변형선을 갖는다). 반면에 정규 압밀점토 (OCR=1.0) 에 있어서는 파괴까지 체적 감소 경향이 있지만 OCR 이 2보다 커짐에따라 초기부터 파괴까지 체적 팽창 경향이 있다.

그림 5 와 6 에서 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 초기상태까지는 급격한 강도증가가 있지만 최고치 ( $q_{max}$ ) 가 없으며 축변형률이 커짐에따라 점진적으로 파괴상태까지 일정한 강도를 유지한다.

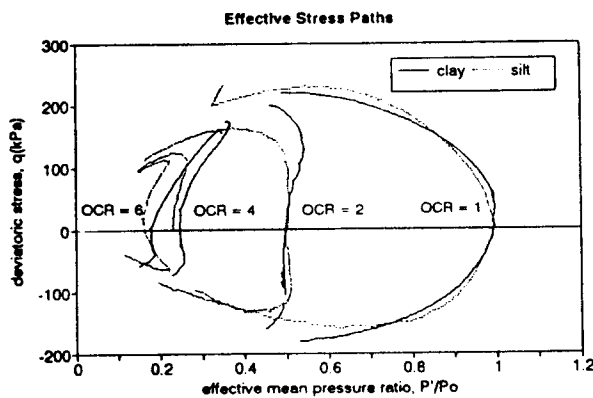


그림 8. Undrained Behavior of Silt (Present Study) and Clay (Jafroudi, 1983)

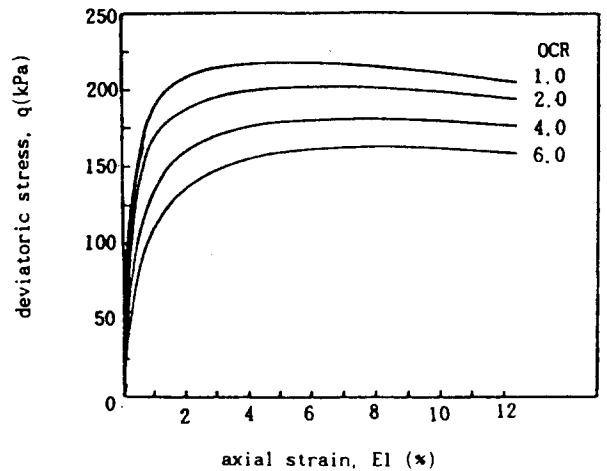


그림 9. Undrained Behavior of Clay (Jafroudi, 1983)

#### 5. 모델 예측

본 연구에서는 1970년대말 Dafalias 에 의해 제안된 사질토와 점성토에 적용가능한 경계곡면모델(Bounding Surface Model) 을 사용하여 OCR 비에 따라 각각의 실트거동을 예측하여 보았다. 본래 이 모델은 기존에 제안되었던 여러 모델과 같이 소성이론에 근거하여 개발된 모델로서 사질토 및 점성토에 적용하여 그 타당성이 입증되었으나 본 연구를 통하여 실트에도 적용가능한지를 알아보려고 하였다.

이 모델은 기존 모델인 Mohr-Coulomb 모델, Cam clay 모델 및 Cap 모델에 비해서는 좀더 흙의 응력-변위 관계를 비교적 적절히 예측하는 것으로 알려져 있다. 따라서 점성토에 적용가능한 경계곡면 모델<sup>(2)(5)</sup>을 사용하여 실트의 거동을 예측하여 보았다. OCR=1 인 경우의 실험데이터를 calibration하여 모델에 사용되는 변수를 구하였으며, 이를 토대로하여 서로 다른 OCR에 대해 흙의 응력-변위를 예측하였다.

그림 10, 그림 11 및 그림 12 는 모델예측과 실험결과를 함께 도시한 결과로, 여기서 실선은 실험에서의 모델예측을 나타내며 점선은 실제 실험한 실트의 거동을 나타내고 있다. 이를 토대로 비교분석하면 다음과 같다.

- (1) 삼축압축과 삼축인장에서 비배수 최대강도,  $q$ 에 도달하기 전의 실트의 거동은 점토모델로써 예측할 수 있었다.
- (2) 심하게 과압밀된 경우 초기 dilatation 으로 인한 축차응력은 점토모델로 그 개형을 개략적으로 예측할 수 있었다.
- (3) 이 모델은 실트의 최대강도 이후(post-peak strength)의 비배수강도 거동을 예측할 수는 없으나 OCR에 따른 실트의 거동은 정성적으로 예측할 수 있었다.

다음은 사질토에 적용가능한 경계곡면 모델<sup>(11)</sup>을 사용하여 실트의 거동을 예측하여 보았다. (그림 13-14 참조) 여기서 실선은 실험의 모델예측결과를 나타내며 점선은 실제 실험결과를 나타내고 있다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 실트의 최대강도 이전과 이후의 거동(OCR이 6보다 작은 경우)을 전반적으로 전범위에 걸쳐 예측할 수 있었다.
- (2) 잔류강도는 실험결과치보다는 작은 값으로 예측되었으며 이것은 공학적 측면에서 보면 안전측이라 할 수 있다.
- (3) 모래에 적용할 수 있는 경계곡면모델은 OCR이 큰 실트의 경우에 있어 초기 dilatation을 예측할 수 없었다. 그결과 축차응력은 실험치보다는 낮은 값으로 예측되었다.

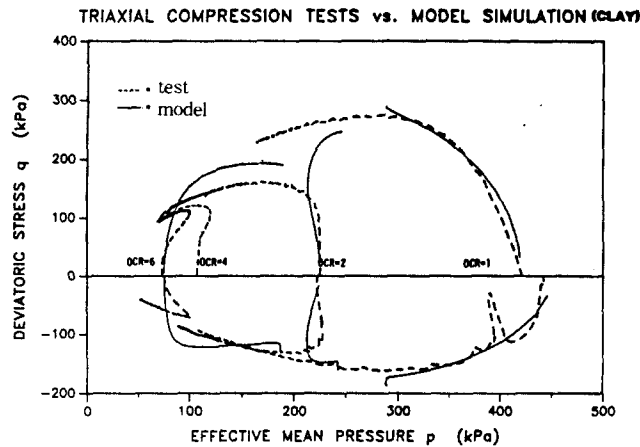


그림 10. Effective Stress Path

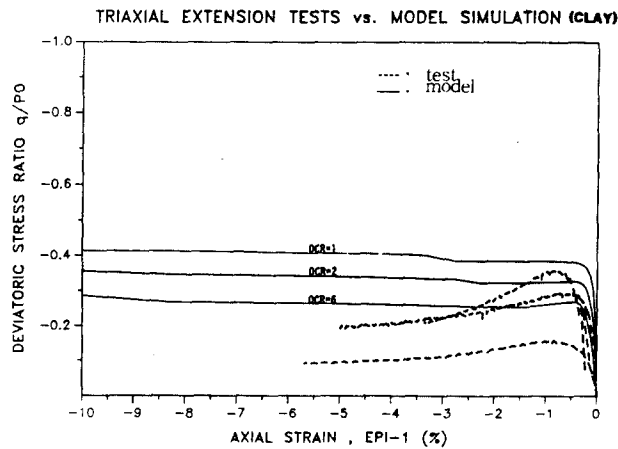


그림 11. Deviatoric Stress vs. Axial Strain

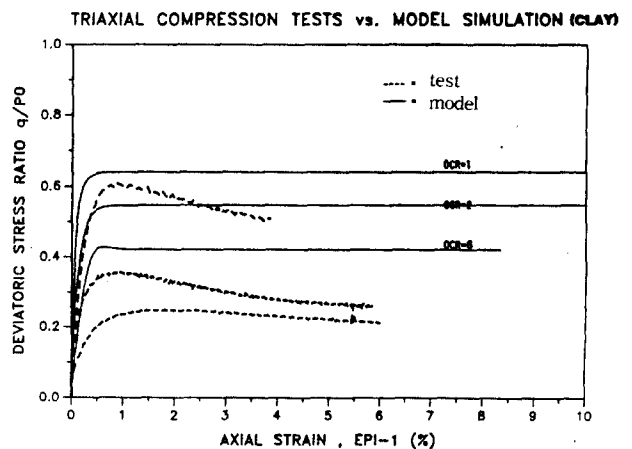


그림 12. Deviatoric Stress vs. Axial Strain

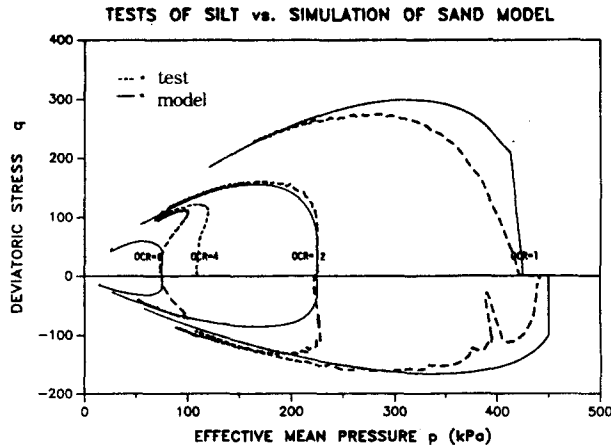


그림 13. Effective Stress Path

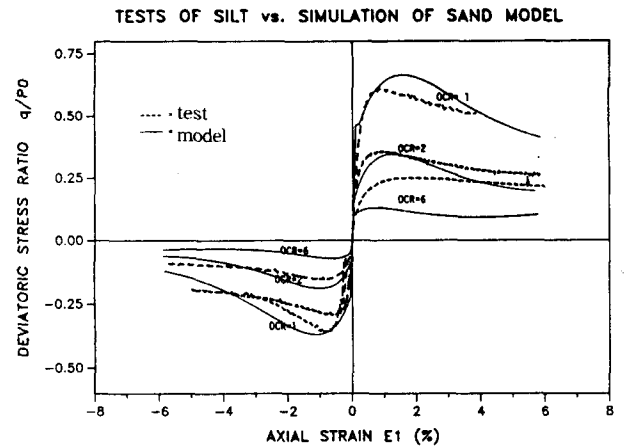


그림 14. Deviatoric Stress vs. Axial Strain

## 6. 결론

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

1. 파괴선  $q/p' = M_e$  와  $-q/p' = M_e$  가 시험한 구속응력, 흙의 이력상태(OCR)에 상관없이 유일하게 존재한다.
2. 점성토와 달리 실트는 아주 느슨한 모래를 제외하고 나타나는 상태 변형선 (phase transformation line)  $q/p' = M_{pe}$  와  $-q/p' = M_{pe}$  가 존재한다.
3. 정규압밀 실트에 있어 비배수 압축강도는 전단하에서 체적팽창으로 계속 증가한다. 이것은 점토질에서는 볼 수 없는 현상이다.
4. 정규 압밀점토나 실트(OCR=1.0)에 있어서는 전단 초기에는 체적 감소 경향이 있다. 과압밀 실트 (OCR > 2) 에 있어 초기에는 체적 팽창경향이 있다가 상태 변형선을 넘어서는 체적 감소 경향이 있다. 반면에 과압밀 점토에 있어서는 초기부터 파괴까지 체적 팽창 경향이 있다.
5. clay에 적용가능한 경계곡면모델은 실트의 최대강도 전까지는 예측이 가능하나 최대강도 이후의 거동은 예측할 수 없었으며, sand에 적용가능한 경계곡면모델은 실트의 최대강도 전후 거동은 예측할 수 있으나 OCR이 큰 실트의 초기 dilatation은 예측할 수 없었다. 따라서 실트의 전반적인 거동을 예측할 수 있는 새로운 모델이 필요하다고 판단된다.

## 참고문헌

1. Borgesson, L. (1982). Shear Strength of Inorganic Silty Soils. Interdisciplinary Conference on Mechanisms of Deformation and Fracture, Lulea, Sweden, pp.567-572.
2. Dafalias, Y. F. (1981). The concept and Application of Bounding Surface in Plasticity Theory. Physical Non-linearities in Structural Analysis, IUTAM symposium, Senlis, France, May, J. Hult and J. Lemaitre, Eds., Springer Verlag, Berlin, W.Germany, pp.56-63.
3. Ishihara, K., Shigeru Okada (1978). Yielding of Overconsolidated Sand and Liquefaction Model under Cyclic Stresses. Soils and foundation, Vol.18, No.1, pp.57-72.
4. Jafroudi, S. (1983). Experimental Verification of Bounding Surface Plasticity Theory for Cohesive Soils. Ph. D Thesis of University of California, Davis.
5. Kaliakin, V. N. and Herrmann, L. R. (1987). Numerical Implementation of the Elastoplastic-Viscoplastic Bounding Surface Model for Isotropic Cohesive Soils. Department of Civil Engineering, University of California, at Davis.
6. Konrad, J. M. (1985). Undrained Cyclic Behavior of Beaufort Sea Silt. OTC No. 3887, pp.830-837.
7. Lee, K. L. (1970). End Restraint Effects in Undrained Static Triaxial Strength of Sand. J. of Geotech. Eng., ASCE, Vol. 96, GT6, pp.687-704.
8. Penman, A. D. M. (1953). Shear Characteristics of a Saturated Silt Measured in Triaxial Compression. Geotechnique, Vol. 3, No. 4, pp.312-328.
9. Schofield, A. and Wroth, P. (1968). Critical State Soil Mechanics. McGraw Hill, London.
10. Wang, J. L., Vivatrat, V. and Ruster, J. R. (1982). Geotechnical Properties of Alaska OCS Silts. Proceedings, Offshore Technology Conference, Houston, Tx. Vol. 4, pp.415-420, OTC No. 4412.
11. Wang, Z. L., Dafalias, Y. F. and Shen, C. K. (1988). Bounding Surface Hypoplasticity Model for Sand. I: Theoretical Formulation.