아산만 해성토의 응력-변형률 거동

The Stress-Strain Behavior of Asan Marine Soil

홍 창 수*1
Hong, Chang-Soo
정 상 섬*2
Jeong, Sang-Seom
김 수 일*3
Kim, Soo-Il

Abstract

The undrained behavior of Asan marine soil was investigated by using an automated triaxial testing device. The stress-strain behavior at the pre- and post- failure state of marine soil under undrained compression and extension conditions was compared with the behavior of pure silt, pure clay and the overall behavior of Asan marine soil was predicted with the modified Cam-clay model and the bounding surface model.

The marine soil sampled in Asan bay area was clayey silts with 70% silt-30% clay content and the testing samples were prepared in both undisturbed and remolded conditions. All samples are normally consolidated with 400 kPa of effective mean confining pressure and each sample is unloaded to 200, 100, 67 kPa, respectively. And then the shear test was performed with different confining pressure.

According to experimental results, there exists an unique failure line whose slope is lower than silt's and higher than clay's. It is identified that the undrained shear strength of normally consolidated samples increases after crossing the phase transformation line because of volume dilation tendency which is not seen in clay.

Overconsolidated samples show different soil behavior compared with pure silt due to its tendency of change in volume. It is also found that the overall behavior of Asan marine soil cannot be predicted precisely with the modified Cam-clay model and the bounding surface model.

*1 삼보기술단 사원

*2 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 조교수

*3 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수

요 지

본 연구에서는 아산만 지역의 해안 연약층에서 채취한 해성토의 거동을 자동화된 삼축실험기를 사용하여 비배수 상태하에서 실내실험과 모델예측을 수행하여 파괴전과 파괴상태시 응력-변형률 상태를 점토질 및 실트질 흙과 비교분석하였다.

채취한 해성토는 실트질 70%와 점토질 30%가 섞인 혼합토로 현장의 비교란 시료와 이를 재성형한 시료의 2종류로 만들어 400kPa인 유효구속압력까지 등방압밀 시킨 후 압밀하중을 감소시키며 구속압이 각각 400, 200, 100, 67kPa인 경우에 비배수 상태로 삼축압축 및 인장실험을 하였다.

본 연구결과 모든 시료의 극한상태를 연결하면 일정한 파괴선에 도달하였으며 이때 파괴선은 순수점토나 실트에 비해서는 그 기울기에 차이가 있었다. 또한 정규압밀된 아산만 해성토에서는 전단초기에는 순수점토와 유사하게 전단하에서는 양의 간극수압이 발생하여 p′이 계속 감소하나 실트질에서 나타나는 상태변형선을 지나서는 체적팽창경향이 나타나며 전단강도가 증가하고 있다. 과압밀 시료는 체적변형 경향으로 순수실트와는 상당히 다른 거동을 보임을 알 수 있었다. 수정 Cam-clay 모델 및 항복경계면 모델을 사용하여 예측한 결과 정규압밀된 경우에는 최대강도 이전까지는 실제거동을 적절히 예측할 수 있었으나 과압밀비($2 \leq OCR \leq 6$)가 커질수록 그 거동에는 정량적인 차이를 보임을 알 수 있었다.

Keywords : Triaxial compression/Extension test, Undisturbed/Remolded sample, Failure line, Phase transformation line, Normally consolidated sample, Overconsolidated sample, Model prediction

1. 서 론

최근들어 국토개발의 일환으로 부족한 부지확보 및 중국과의 교역을 위해 서해안 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 서해연안의 해성퇴적층은 대부분 실트질이 포함된 연약한 점토로 이루어져 있으며 흙의 분류상 ML, MH, CL, CH층으로 구성되어 있다고 보고 되고 있다. 그러므로 지반공학 측면에서 이 지역에 존재하는 해성토의 응력-변형률 거동 파악은 준설이나 매립을 통한 지반개량 및 기초구조물 설계시 부등침하나 압밀침하 등의 문제점 해결에 많은 도움이 되리라 판단된다.

기존에 해성토에 대한 거동 연구는 완전포화되고, 등방, 균질인 비교란 시료와 재성형시료에 대한 실험적 연구와 이를 뒷받침할 수 있는 이론적인 연구가 병행되어 왔다. 최근에는 국내에서도 해성토에 관한 거동파악을 위하여 실내실험을 통한 이론적해석이 수행되고는 있으나 해성토의 체계적인 거동분석은 미비한 실정이다.

해성토 지반은 구속압력이나 이력상태에 따라 서로 상이한 응력-변형률 관계를 보이므로 주로 현장상태를 재현할 수 있는 실내실험을 통한 연구가 수행되고 있다. 현재까지는 거의 100% 포화를 확인할 수 있고, 등방이며, 균질이라고 가정할 수 있는 이상적인 재성형 점토시료를 토대로 많은 연구가 진행되었다. (Andrew,1994) 그러나 현장시료인 경우, 특히 해성토는 공기기포를 포함하기도 하며, 실트질 및 유기질이 다량 포함되어 있고 비등방 상태인 K_o로 압밀되어 있기 때문에 실험실에서 성형한 점토시료와는 응력-변형률 거동에 많은 차이가 있다.

따라서 본 연구에서는 압밀 비배수 전단시험을 통한 아산만 해성토의 변형특성에 초점을 맞춰 흙의 구속압력이나 이력상태에 따른 파괴까지의 거동파악에 연구의 목적을 두었다.

따라서 정하중 작용시 아산만 해성토의 응력-변형률 경로나 파괴까지의 응력 경로를 토대로 순수점토나 실트질 흙과의 거동을 실내실험과 모델 예측을 토대로 비교분석 하였다.

2. 시료 및 실험방법

2.1 시료

본 연구에서 사용한 시료는 현장의 비교란 시료와 이를 재성형한 시료의 2종류이다. 비교란 시료의 경우는 아산만 해성토를 표토 약 2m 정도를 제거한후 교란되지 않도록 주의하여 지름이 12cm 정도인 원통형의 용기에 담았으며 실험실에서 추출기를 이용하여 추출한 후 트리밍하여 지름 5cm, 높이 10cm 크기의 원통형공시체로 성형을 하였다. 재성형시료의 경우는 아산만 해성토를 나무봉을 사용하여 잘게 부순 후 증류수(distilled water)를 첨가하여 슬러리로 만들어 완전 포화시켰으며 폭 45cm, 높이 25cm, 길이 약 1.2m인 상자에 넣고 배수를 허용하면서 상재압을 점진적으로 증가시키며 약 10일간 압밀시켜 시료의 성형이 가능하게 되었을때 지름 5cm, 높이 10cm 크기의 원통형으로 성형을 하였다. 시료로 사용한 비교란시료와 재성형시료에 대하여 실시한 Oedometer 실험(그림 1 참조) 및 기본 물성실험(표 1 참조) 결과는 다음과 같다.

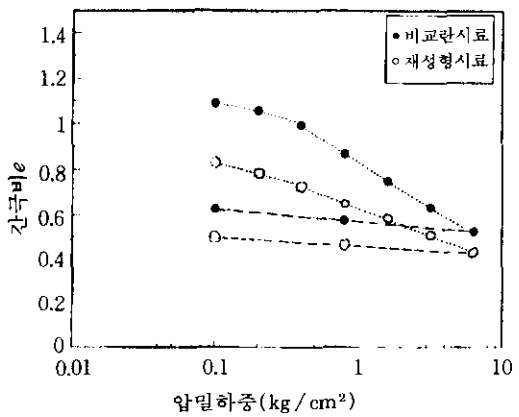

그림 1. 압밀시험

표 1. 아산만 해성토의 기본 물성치

	비교란 시료	재성형시료
초기간극비	1.098	0.891
비중(G_s)	2.681	2.681
함수비(%)	48.1	34.4
액성한계(LL)	42.6	42.6
소성지수(PI)	21.1	21.1
점토질 (%)	30.66	30.66
실트질(%)	69.34	69.34
유효입경(D_{10})	0.002	0.002
선행압밀응력(σ'_c)	0.31(kg/cm²)	0.30(kg/cm²)
압축지수(C_c)	0.391	0.253
팽창지수(C_s)	0.055	0.039
일축압축강도	0.114(kg/cm²)	0.113(kg/cm²)
통일분류	CL	CL

2.2 실험방법

시료 성형후 자동화된 삼축 실험기를 사용하여 유효구속압을 점진적으로 50, 100, 200, 400kPa 으로 증가시키며 등방압밀시켰고 각 구속압력 단계에서 더 이상 체적의 변화가 없을때 압밀이 종료되었다고 보았다. 여기서 ε_v는 체적변형률 $\Delta V/V_0$ 이며 ΔV는 본 시료가 포화시료이므로 시료로부터 배출되는 간극수의 체적을 측정하여 확인하였다. 그 후 압밀압력을 서서히 감소시켜 과압밀비 1, 2, 4, 6 인 시료들을 만들어 각각 400, 200, 100, 67kPa의 초기유효구속압을 갖도록 하였다. 전단실험은 각각의 초기유효구속압을 갖는 상태로부터 비배수 상태로 실시하였으며, 시간당 0.10%의 변형률 속도로 변형률 제어실험을 하였고 구속압을 일정하게 유지시키며 압축실험인 경우는 σ_1을 증가

시켜 전단변형률 15%까지 실험하였으며, 인장인 경우는 σ_1을 감소시켜 축차응력이 일정하게 되는 전단변형률 10%까지 실험하였다. 표 2는 본 연구를 위해 수행한 총 12개의 삼축실험 결과를 보이고 있다.

표 2. 비배수 삼축압축 및 인장실험

하중 타입	초기유효 구속압 (kPa)	과압밀비	초기간극비(e_0)	
			비교란 시료	재성형 시료
압축	400	1	1.089	0.882
압축	200	2	1.094	0.894
압축	100	4	1.095	0.895
압축	67	6	1.097	0.896
인장	400	1	1.085	-
인장	200	2	1.101	-
인장	100	4	1.097	-
인장	67	6	1.087	-

3. 실험결과 및 분석

그림 2는 비교란 시료에 대한 삼축압축 및 인장실험의 결과로 p′~q 평면상의 유효응력 경로를 나타낸 것이며 그림 3과 4는 비교란 시료와 재성형시료의 p′~q 경로 및 응력-변형률 관계를 나타내고 있다. 여기서 p′은 유효구속압력(effective mean confining pressure)으로 $(\sigma'_1+2\sigma'_3)/3$ 에 해당하며 q는 축차응력(deviatoric stress)으로 $(\sigma'_1-\sigma'_3)$을 나타낸다. 비교란 시료와 교란시료의 거동특성은 다음과 같다.

1. 서로 다른 초기유효구속압(400, 200, 100, 67kPa)과 과압밀비를 갖는 응력경로로 구속압에 따라 응력경로에는 많은 차이를 보이고 있으나 모든 시료의 극한상태를 연결한 파괴선은 거의 일치하였으며 그 크기는 압축인 경우 $M_c=q/p'=1.39$, 인장인 경우 $M_e=-q/p'=1.078$로 시험한 하중의 구속압력, 이력상태(loading history), 교란정도에 상관없이 유일하게 존재하는 본 시료의 물성값이다.
2. 정규압밀토의 경우 전단초기(ε_1<1%)에 급격한 강도증가가 있은 후에 축변형률이 커짐에 따라 점진적으로 증가하여 파괴상태에 도달하고 있으며 과압밀비가 증가함에 따라 파괴 상태에 도달하는 축변형률이 커지며 그때의 비배수강도는 작아지고 있다. 동일한 과압밀비를 가지며 변형률이 서로 같은 상태에서는 초기간극비가 작은 재성형 시료가 비교란 시료에 비해 더 높은 전단강도를 갖고 있지만 전반적으로 약간의 강도차이만을 보일뿐 비교란시료와 재성형시료의 거동은 전반적으로 유사한 특성을 보이고 있다. 원래 비교란 시료의 구조 및 입자간의 결합이 재성형시료에 비해 더 단단하고 좋으나 본 연구에서는 실험여건상 초기간극비가 다르기 때문에 일반적인 경향과는 다르게 나타나고 있다.
3. 정규압밀된 경우 전단초기 체적감소현상을 보이다가 실트질 흙이나 사질토에서 나타나는 상태변형선을 보이면서 체적팽창경향으로 바뀌고 있으며 파괴선 아래에서부터 파괴선에 접근하고 있지만 과압밀된 경우는 전단초기부터 파괴까지 체적팽창 경향을 보이며 파괴선을 지나 다시 파괴선에 도달하고 있다.

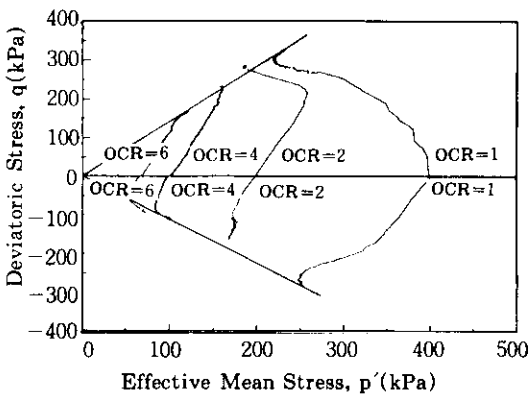

그림 2. 비교란 시료의 p′−q 경로

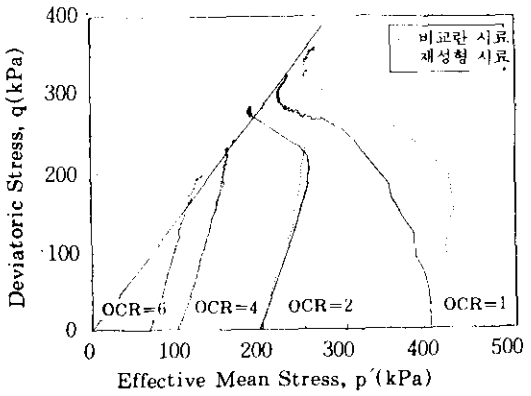

그림 3. 비교란 시료와 재성형 시료의 p′−q 경로

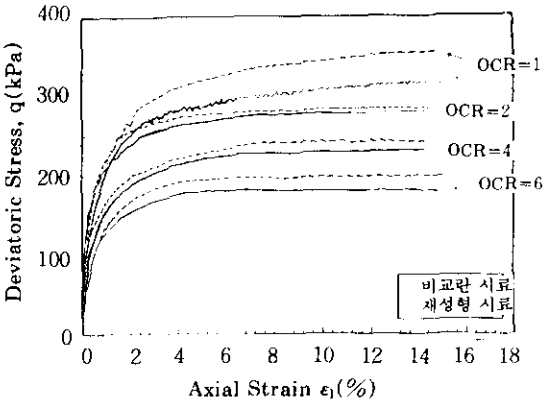

그림 4. 비교란 시료와 재성형시료의 응력 −변형률 관계

4. 점성토 및 실트와 비교한 거동분석

아산만 해성토는 실트질을 약 70% 포함한 점토(표1 참조)로 점토함유량에 따른 특성을 알아보기위해 순수점토, 순수실트 그리고 혼합토와 비교분석하였다. 순수점토에 대한 실험결과는 본 연구와 비슷하게 삼축압축 및 인장 실험을 한 Jafroudi(1983) 실험치를 사용하였으며, 순수실트에 대한 실험결과는 정상섬(1993)의 실험치를 사용하였고, 혼합토와 비교는 Sawitzki와 Konrad(1994)의 실험결과를 인용하였다. 이를 요약하면 다음과 같다.

4.1 점성토와의 비교분석

그림 5는 순수점토와 비교한 본 연구결과를 p′~q 공간상에 나타낸 것이다. 여기서 사용한 점토는 kaolinite와 montmorillonite의 혼합토에 대한 것으로 입경은 0.002mm 이하이고 초기간극비 e_o=0.8, 압축지수 C_c=0.30, 팽창지수 C_s=0.041 값을 보였다. 그림 5에서 보면 정규압밀된 경우에 순수점토는 전단초기부터 파괴에 이르기까지 p′가 계속 감소된 반면 본 연구결과는 전단초기에는 순수점토와 같이 간극수압의 증가로 인해 유효응력이 감소되어 체적감소경향을 보이다가 실트나 사질토에서 나타나는 상태변형선을 보이며 유효응력이 증가되고 있다. 과압밀비가 증가할수록 초기부터 파괴까지 체적팽창 경향을 보이며 파괴선을 지났다가 다시 파괴선에 접근하여 순수점토와 같은 거동을 보이나 그 값에는 정량적인 차이가 있었다. 인장실험결과 역시 상태변형선을 보이고 있으며 압축실험과 비교해 볼때 상태변형선과 파괴선 사이가 더 가까움을 알수가 있다.

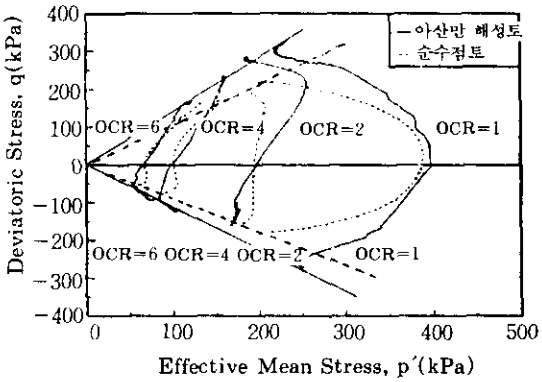

그림 5. 순수점토와 비교한 p′−q 경로

4.2 실트와의 비교분석

순수실트에 대한 실험결과는 정(1993)의 실험치를 사용하였으며, 여기서 사용한 실트는 입경이 0.074~0.002mm 범위에 있고, 비중 G_s

=2.64, 최대건조밀도 1.72 g/cm³, 최소 건조밀도 1.13g/cm³, 액성한계 19.9%의 값을 보였다.

그림 6은 순수실트와 비교한 본 연구결과를 p′-q 공간상에 나타낸 것이다. 그림에서 보면 정규압밀된 경우는 실트질 흙이나 사질토에서 나타나는 상태변형선이 나타나고 있으며, 거의 비슷한 거동을 보이고 있다. 그러나 과압밀비가 커질수록 실트질 흙에서는 초기에 체적팽창 경향이 있다가 상태변형선을 넘어서는 체적 감소경향을 보이며 파괴선 밑에서 파괴선에 접근하는 반면 점토질을 포함한 본 연구의 결과에서는 순수점토와 비슷하게 초기부터 파괴까지 체적팽창 경향을 보이며 파괴선을 넘었다가 다시 파괴선에 근접하고 있다.

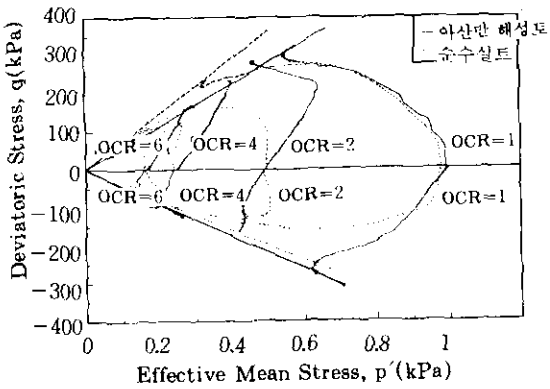

그림 6. 순수실트와 비교한 p′−q 경로

4.3 혼합토와의 비교분석

혼합토에 대한 실험결과는 Sawitzki와 Konard(1994)의 실험결과를 인용하였으며, 여기서 사용한 시료는 유효입경 0.0017mm, 비중 2.603, 소성지수 34.1인 kaolinite와 유효입경 0.016 mm, 비중 2.656 인 실트의 혼합토로 초기간극비는 e_0=0.585 이다. 초기 구속압, 초기 간극비 및 상대밀도 등이 다르기 때문에 기존의 연구와 비교시 초기응력으로 규준화하여 응력경로를 비교해 보았으며 토체의 특성인 파괴포락선을 삼축실험을 이용하여 알아보았다.

그림 7은 순수점토, 본 연구결과, 점토 15%를 포함한 실트, 순수실트에 대한 p′~q 경로를 초기응력으로 규준화시켜 나타낸 것이다. 초기구속압 및 초기 간극비에 관계없이 순수점토가 낮은 응력비에서 파괴가 일어났으며 실트질이 많아질수록 큰 응력비에서 파괴가 일어나며 그 후에도 계속 응력증가가 발생하고 있다. 또한 실트질에서 나타나는 상태변형선이 본 연구결과에서도 나타나고 있다. 순수실트 및 순수점토 그리고 혼합토와 파괴선의 기울기를 비교해 본 결과 순수점토에서는 0.8~1.2 범위에 있었으며 순수실트는 1.55~1.57, 점토질 15%를 포함한 혼합토에서는 1.50으로 점토함유량이 감소할수록 파괴선의 기울기는 비례하여 증가하고 있었으며 본 연구에서 사용한 아산만 해성토 역시 점토질 30%를 포함한 혼합토로 파괴선 기울기가 1.4로 나와 기존의 연구결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

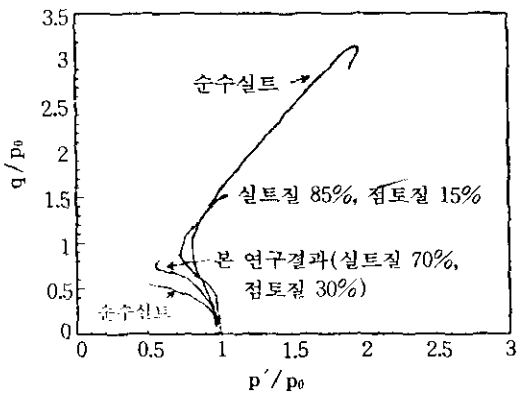

그림 7. 기존의 연구와 비교한 $p'/p_0-q/p_0$ 경로

5. 모델예측

본 연구에서는 Dafalias(1986)에 의해 개발된 항복경계면 모델과 Cambridge 대학의 Roscoe (1963) 등에 의해 개발된 수정 Cam-clay 모델을 사용하였으며 압밀실험을 통해 매개변수를 산정하여 과압밀비에 따라 각각의 아산만 현장시료의 응력-변형률 거동을 예측하여 보았다.

항복경계면 모델은 항복곡면을 단일화 시켜 관련유동법칙을 사용하였기 때문에 사용되는 변수는 수정 Cam-clay 모델에서 사용하는 변수 외에 투영법칙에 사용되는 경화 변수 h를 추가하여 총 7개의 변수를 사용하였다.(표 3.참조)

표 3. 모델에서 사용한 매개변수

사용변수		수정 Cam-clay모델	항복 경계면 모델
초기치	e_o	1.096	1.096
	p_i	$\frac{400}{OCR}$	$\frac{400}{OCR}$
항복변수	M	1.39	1.39
구성식에 관련된 변수	λ	0.170	0.170
	κ	0.024	0.024
	ν	0.25	0.25
항복경계모델에서 추가된 변수	h	-	10

기존의 연구결과에 의하면 두 모델은 소성이론에 근거하여 개발된 모델로서 항복경계면 모델은 사질토 및 점성토에 적용가능하며 Cam-clay모델은 주로 점성토의 응력-변위관계를 적절히 예측하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 점토질을 포함한 실트질 흙에도 이 모델들이 적용 가능한가를 알아보고자 하였다. 본 연구결과 재성형 시료와 비교란 시료의 거동은 거의 유사한 것으로 나타나 비교란 시료를 이용하였으며, 아산만 해성토의 거동 특성을 모델 예측치와 비교한 결과는 그림 8 및 9에 나타내었다.

그림 8 및 9는 응력-변형률의 관계에 있어 두 모델의 예측치와 실측치를 비교해 놓은 것이다. 이 그림에서 전반적으로 모델예측치보다 실측치가 좀 더 큰 축변형률에서 한계상태에 이르렀고 과압밀비 증가에 따라 한계상태에 도달하는 축변형률이 커지고 있다. 정규압밀된 경우 수정 Cam-clay 모델과 항복경계곡면 모델의 예측결과는 거의 일치하며 변형률 2% 이내에서 한계상태에 이르렀고 실측치는 계속적인 응력증가를 보인 반면 모델에서는 한계상태에서 응력이 일정하게 나타나고 있다. 과압밀비가 2인 경우는 한계상태가 모델과 동일한 응력상태를 나타내고 있으나 과압밀비가 증가할수록 과대추정값을 보이고 있으며 그 정도가 커지고 있다.

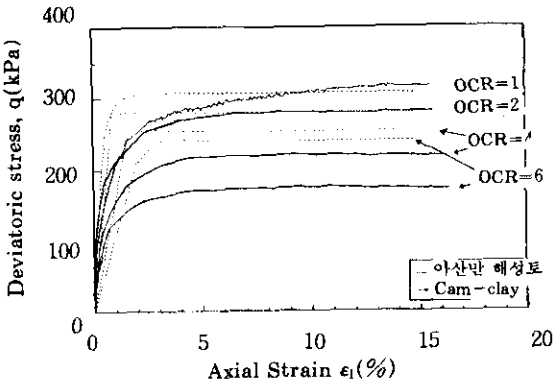

그림 8. 수정 Cam-clay 모델과 비교한 응력-변형률 경로

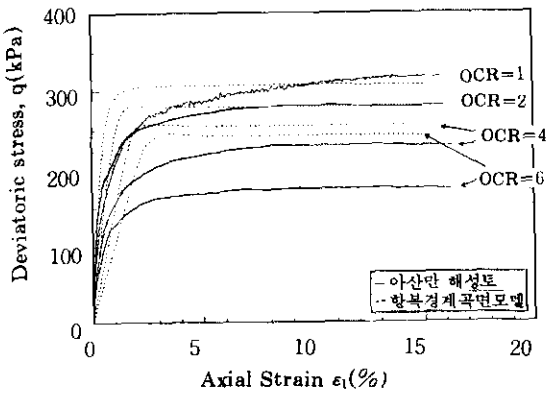

그림 9. 항복경계곡면 모델과 비교한 응력-변형률 경로

6. 결 론

본 연구에서는 아산만 해성토의 거동에 대하여 순수 점토 및 순수 실트와 비교하여 알아

보았다. 연구결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 삼축 압축 및 인장 실험의 결과 응력경로는 달라도 과압밀비, 구속압, 교란정도에 무관하게 극한상태인 파괴선에 도달하였다. 압축인 경우 M_c=1.39, 인장인 경우 M_e=1.078로 순수점토에 관한 실험과 비교해 볼때 비교적 크게 나왔으며 순수실트와 비교해 볼때 작게 나타나 점토의 함유량이 적어 질수록 파괴선의 기울기가 커짐을 알 수 있었다.
2) 정규압밀된 경우 전단초기 계속적인 체적감소 현상이 발생하다가 실트나 사질토에서 보이는 상태변형선을 지나 체적 증가 경향을 보여 기존의 연구중 순수실트와 비슷한 경향이 나타났다.
3) 과압밀된 경우($2 \leq OCR \leq 6$) 전단초기부터 파괴까지 체적팽창 경향을 보이며 파괴선을 지나 다시 파괴선에 접근하는 순수점토와 비슷한 경향을 보였다. 기존의 연구결과 실트나 사질토는 최대강도를 보인후 극한상태에 도달하지만 본 연구결과에서는 순수점토와 같이 최대강도 없이 한계상태에 이르렀다.
4) 수정 Cam-clay 모델과 항복경계면 모델의 예측결과 정규압밀된 경우는 최대강도 전까지는 실험치와 비교적 일치하였으나 과압밀비가 증가 할수록 체적팽창경향을 적절히 예측하지 못했다. 따라서 앞으로 점토와 실트의 혼합토를 적절히 예측할 수 있는 모델개발이 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김주범(1994), 연약지반의 흙의 제반 토질시험치 사이의 관계.
2. 박병기, 정진섭, 이강일, 이광찬, 이종천(1995), "Cap Model을 이용한 점토의 비배수 거동해석", 1995년도 학술발표회 논문집(Ⅲ), 대한토목학회, pp.227-230.
3. 이용길, 한창연, 황규호, 이송(1995), "구성 방정식을 이용한 해성점토의 변형 해석", 1995년도 학술발표회 논문집(Ⅲ), 대한토목학회, pp. 223-226.
4. 정상섬(1993), "사질토 및 점성토와 비교한 순수실트의 응력-변형률 거동", 한국지반공학회지, 제9권, 제4호, 한국지반공학회, pp.27-35.
5. Andrew, J.W.and Michael J.K.(1994), "Formulation of MIT-E3 Constitutive Model for Overconsolidated Clays", *Journal of Geotechnical Engineering,* ASCE, Vol.120, No.1, pp. 173-197.
6. Dafalias, Y.F.(1986), "Bounding Surface Plasticity I: Mathematical Foundation and Hypoplasticity", *Journal of Geotechnical Engineering,* ASCE, Vol.112, No.9, pp.966-987.
7. Dafalias, Y.F.and Herrmann, L.R.(1986), " Bounding Surface Plasticity Ⅱ: Application to Isotropic Cohesive Soils", *Journal of Engineering Mechanics,* ASCE, Vol.112, EM12, pp.1263-1290.
8. Ishihara, K. Tatsuoka, F. and Yasuda, S., (1975), "Undrained Deformation and Liquefaction of Sand under Cyclic Stresses", *Soils and Foundations,* Vol.15, No.1, pp.29~44.
9. Jafroudi, S.(1983), "Experimental Verification of Bounding Surface Plasticity Theory for Cohesive Soils", *Ph. D Thesis of University of California,* Davis.
10. Mitchell, R.J. and King, R.D.(1968), "General Stress-Strain-Time Functions for Soils", *Journal of Soil Mech. Found.,* ASCE, Vol.94, No.SM1.
11. Roscoe, K.H. and Burland, J.B.(1963), "On the Generalized Stress-Strain Behavior of 'Wet' clay", *Engineering Plasticity,* Cambridge Univ. Press., Cambridge, England, pp. 535-609.
12. Sawitzki, D.G. and Konrad, J.M.(1994), "Undrained Behaiour of clay-silt Mixtures in Triaxial Compression", *Pro. Comptes Rendus, 13th ICSMFE,* New Delhi, India, Vol.1, pp. 33-38.

13. Schofield, A.N. and Wroth C.P.(1968), *Critical State Soil Mechanics,* McGraw-Hill.
14. Wood, D.M.(1990), *Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics,* Cambridge, pp.55-236.
15. Wroth, C.P. and Loudon, P.A.(1967), "The correlation of strains within a family of triaxial tests on overconsolidated samples of kaolin", *Proc. Geotech. Conf., Oslo,* pp.159-163.

(접수일자 1996. 2. 10)