

장흥해성토의 항복특성 연구

A study on the yielding characteristics for Jangheung marine clay

장병욱 · 이경호* · 우철웅(서울대)

Chang, Pyoung Wuck · Lee, Kyung Ho · Woo, Chul Woong

Abstract

Yielding is an important feature of the stress-strain behavior of clays. This study was performed to establish the yielding curves and properties for a marine clay from Jangheung, Chonnam Province. A series of tests was done by means of the various stress path tests. Results of the tests are as follows; 1) The laboratory-determined K_0 is very similar to that applied to the Jaky equation. 2) The shape of yielding curve is nearly symmetrical about the p' axis like other natural clays. 3) The critical state parameters, M_c and M_e are the same for compression and extension tests which contrasts with the result of the isotropically consolidated soils. 4) The state boundary surface using the critical state parameters can represent the normalized yielding curve obtained by various stress path experiments.

I. 서론

사회간접자본시설 확충 일환으로 건설되는 항만, 도로, 방조제 등의 구조물들이 연약점토지반 상에 시공되고 있으며, 도심지의 분산화, 국토의 효율적 이용 등의 이유로 활용 가능성이 커지고 있다. 그런데, 연약점토지반은 공학적으로 매우 다양한 특성과 함께 지지력 부족, 과도한 침하량 등의 많은 문제점을 지니고 있다.⁶⁾

이러한 연약점토지반 거동특성 연구에서, 지금까지 국내에선 단순한 삼축시험을 실시하여 응력-변형률-전단강도 거동으로 파악하였으며, 실제 지반과 파괴의 진 단계인 항복특성에 대하여는 연구된 결과가 미비하다. 지반에 하중이 재하하는 동안 특징적인 강도의 변화가 발생하여 탄성 과압밀 영역에서 소성 정규압밀영역으로의 변화, 즉 항복이 발생하여 파괴로 진행하게 된다.¹⁾ 이러한 점토의 항복거동은 지반 구성식 개발의 기초가 되며, 방조제, 제방, 및 사면 거동해석에 직접 이용되기도 한다.³⁾

본 연구에서는 장흥 해성점토를 선정하여 지반의 전단 진행 중에 나타나는 항복거동을 K_0 정규압밀된 불교란 시료를 대상으로 다양한 응력경로(비배수, 배수, 일정 p')의 압축, 인장 삼축시험을 수행하여, 정규압밀점토의 항복곡선(Roscoe면)을 결정, 항복특성을 파악하며, 이방성을 고려하여 최근 개발된 이론적 항복곡선과 비교, 검증하고자 한다.

II. 이론적 배경

등방압밀한 시료를 바탕으로 개발된 성통적인 한계상태이론의 한계를 극복하고자 하는 노력의 일환으로 이방성을 고려한 상태경계면 이론이 연구되었다.^{1),2),5)} 시료를 K_0 정규압밀시킬 때 비체적 ν 와 $\ln p'$ 관계는 선형적으로 나타나며, 다음 식으로 주어진다.

$$\nu = N_0 - \lambda \ln p' \quad (2.1)$$

여기서, N_0 는 $p' = 1.0$ kPa 일 때의 K_0 정규압밀 시료의 비체적이다.

한계상태는 한계상태선(CSL)으로 나타나며, 다음의 식이 성립한다.

$$q' = M_c p' ; \quad q' = -M_e p' \quad (2.2)$$

$$\nu = \Gamma_c - \lambda_c \ln p' ; \quad \nu = \Gamma_e - \lambda_e \ln p' \quad (2.3)$$

여기서, M 은 일정한 체적평면($p' - q'$)상에 투영된 한계상태선의 기울기, λ 는 $\nu - \ln p'$ 평면상의 한계상태선의 기울기로 K_0 정규압밀선의 기울기와 동일하며, Γ 는 $p' = 1.0$ kPa에 대한 비체적이고, c 와 e 는 각각 압축과 인장을 나타낸다.

서로 다른 초기 상태와 전단 응력경로를 고려하기 위하여, 시험에서 얻어지는 자료를 등가응력 (p_e')과 등가비체적 (ν_λ)으로 정규화하는 것이 편리하며 다음 식과 같다.

$$p_e' = \exp\left(\frac{N_0 - \nu}{\lambda}\right) \quad \text{과} \quad \nu_\lambda = \nu + \lambda \ln p' \quad (2.4)$$

이제, 이방성을 고려한 상태경계면 식을 유도하기 위하여 등방압밀한 시료의 구성모형으로 가장 잘 알려진 수정 Cam Clay model에서 제시하는 상태경계면에 수정을 가한다.^{1),4)} 등방 수정 Cam Clay에 대한 상태경계면은 $q' = 0$ 축에 대하여 대칭을 이루며, 다음 식으로 주어진다.

$$q' = \pm M p' \left[2 \exp\left(\frac{\Gamma - \nu - \lambda \ln p'}{\lambda - x}\right) - 1 \right]^{1/2} \quad (2.5)$$

여기서, x 는 K_0 정규압밀선의 팽창 및 재재하 곡선의 기울기이다.

이제, 알차원 앞밀된 수정 Cam Clay에 대한 비대칭 상태경계면은 식 (2.5)에서 η' 을 $\eta - \eta_0'$ 로, M 을 $M - \eta_0'$ 로 대체함으로 구할 수 있으며, 다음과 같다.

$$q' - \eta_0' p' = (\pm M - \eta_0') p' \left[2 \exp\left(\frac{\Gamma - \nu - \lambda \ln p'}{\lambda - x}\right) - 1 \right]^{1/2} \quad (2.6)$$

여기서, η_0' 은 K_0 정규압밀에 해당하는 q'/p' 값이다.

식 (2.6)은 $q' = 0$ 축에 대칭인 수정 Cam Clay의 타원형 상태경계면이 η_0' 선에 대하여 방향지어져 비틀어진 모양을 한다. 식 (2.4)를 이용하여 이방성을 고려한 다음의 상태경계면 식이 구해진다.

$$\frac{q'}{p_e'} - \eta_0' \frac{p'}{p_e'} = (\pm M - \eta_0') \left(\frac{p'}{p_e'}\right) \left[\left(\frac{p'}{p_e'}\right)^{\frac{-\lambda}{\lambda-x}} - 1\right]^{1/2} \quad (2.7)$$

III. 재료 및 시험방법

3.1. 재료

본 연구에서 사용한 시료는 전라남도 장흥군 삼산간척지 현장에서 채취한 불교란 시료이다. 시료 채취 깊이는 12.0 ~ 17.0 m 이며, 통일분류법상 CL에 속하는 연약한 점토이다. 기본 물성치는 Table 1에, 입도분포는 Fig. 1에 주어져 있다.

Table 1 Physical properties of soil

Location(m)	Natural Water Content (%)	Liquid Limit	Plastic Index	Specific Gravity	U.S.C.S.	Activity
12~17	38.25	29.69	9.59	2.69	CL	0.36

3.2. 시험장치 및 방법

삼축시험 장치는 영국 GDS사 제품으로 3개의 압력조절기와 간극수압 변환기가 컴퓨터로 조작되고, 물로 압력을 조절하는 시험기로, 시스템의 개략도는 Fig. 2와 같다.

시료를 K₀ 정규압밀과 비배수, 배수, 및 p' 일정 압축 및 인장 전단 경로 실험을 수행하기 위하여 삼축시험을 실시하였다. K₀ 압밀된 시료를 압축과 인장으로 전단방법을 달리하여 비배수, 배수, 및 p' 일정 배수 전단시험을 실시하였다. Table 2는 본 연구에서 실시한 삼축시험을 구분하여 나타내고 있다.

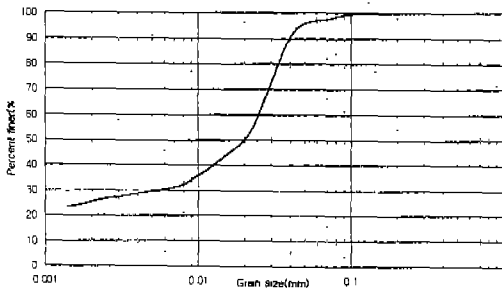


Fig. 1. Grain Size Distribution

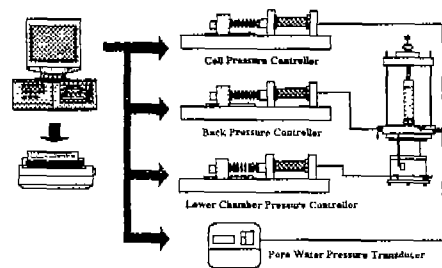


Fig. 2. Schematic layout of the system

Table 2 Schedule for Triaxial Test

시험 구분	유효연직압밀압 (kPa)	시험의 종류
KoCON	200	Ko 압밀시험
KDC200		Ko압밀 배수 압축시험 (CKoDC)
KUE200		Ko압밀 비배수 인장시험 (CKoUE)
KUC300	300	Ko압밀 비배수 압축시험 (CKoUC)
KDC300		Ko압밀 배수 압축시험 (CKoDC)
KPC300		Ko압밀 p' 일정배수 압축시험 (CKoPC)
KUE300		Ko압밀 비배수 인장시험 (CKoUE)

IV. 결과 및 고찰

4.1. K_0 정규압밀시험

횡방향 변형이 억제된 K_0 정규압밀 시험 결과 K_0 값은 Fig. 3에서 평균 0.442로 나타났고, Jacky가 제안한 정규압밀점토에 대한 정지토압계수식을 압축시험에 의한 마찰각 (31.1°)을 이용하여 계산한 값 0.48 보다는 조금 작게 나왔다. K_0 정규압밀선을 Fig. 4

Table 3. K_0 Consolidation Parameters

K_0	λ_0	N_0	η_0
0.442	0.234	3.065	0.888

와 같이 $\nu - \ln p'$ 평면에 도시하여, Table 3의 매개변수 값을 구하였다.

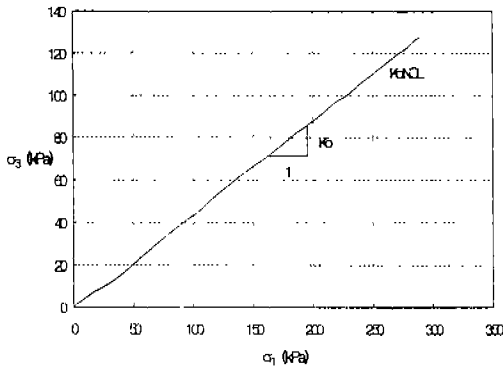


Fig. 3 One-Dimensional(K_0) Normal Consolidation ; determine K_0

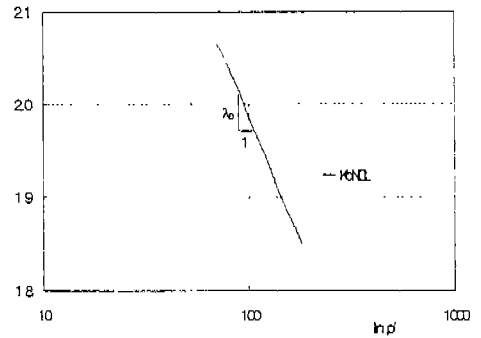


Fig. 4 One-Dimensional(K_0) Normal Consolidation ; determine λ

4.2. 삼축 전단시험

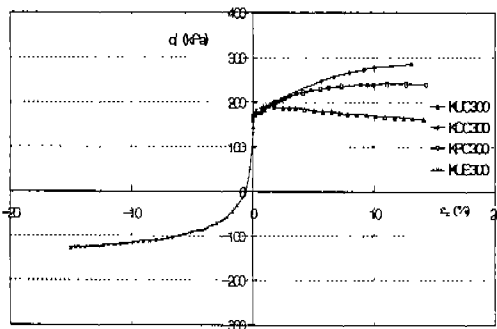


Fig. 5. Deviatoric Stress - Strain Curves for K_0 -consolidated Soils

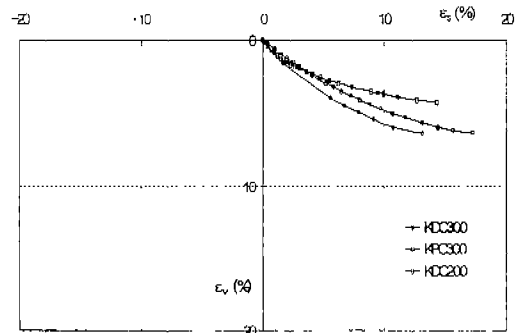


Fig. 6. Volumetric Strains during Shearing

유효연직압이 300 kPa 일 때 응력경로별 축차응력 대 전단변형율의 관계가 Fig. 5 에 주어
져 있다. Fig. 5의 KUC300인 Ko 압밀 비배수 압축시험에서 최대 축차응력을 지나서 Fig. 9의
정규화한 축차응력에서 볼 수 있듯이 한계상태에 도달하고 있는데, 축차응력이 일정해지지 않
고 변동이 생긴다. 이는 시료의 전단이 큰 변형률로 진행되면서 증가한 축정의 오차에 기인하
다고 사료된다. Fig. 6은 배수 전단 시험에서 전단 중 체적변형율을 전단변형율에 대하여 나타
내고 있는데, 한계상태에 이르러 전단변형율만이 증가하게 됨을 확인할 수 있다.

전단 시의 응력경로가 Fig. 7에 각각 주어져 있다.

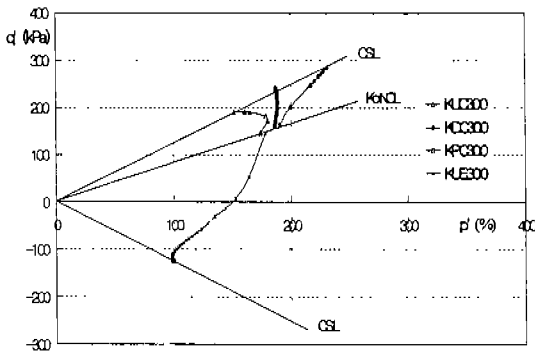


Fig. 7. Stress Paths for Ko-consolidated Soils

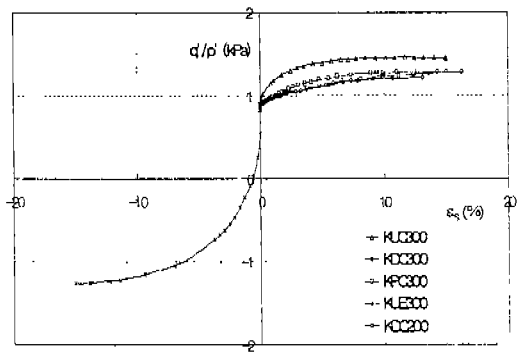


Fig. 8 Stress Ratio - Shear Strain Curves for Ko-consolidated Soils

전단변형율에 대한 축차응력을 유효평균주
응력 p' 으로 정규화한 응력-변형율 관계가
Fig. 8에 나타나 있다. Fig. 8에서 정규화된
Drain 전단경로는 개형이 서로 잘 일치함을
알 수 있다.

각 시험에서 시료를 전단시킴으로써 시료가 도달하게되는 한계상태 점을 각각 Fig. 9와 Fig.
10의 $\nu - \ln p'$ 평면과 $q' - p'$ 평면에 각각 도시하였다. Fig. 10의 결과로부터 압축과 인장에
대한 한계상태선의 기울기 M 값을 결정하였는데 두 값이 비슷함을 알 수 있다. 따라서, Fig.
10에서 한계상태선은 압축과 인장에서 p' 축에 대하여 대칭임을 알 수 있다. 한계상태기울기
M으로부터 압축과 인장 축의 마찰각은 각각 $\phi_c' = 31.1^\circ$ 와 $\phi_e' = 48.5^\circ$ 로 구해졌고, 이는
 $\phi_c' \approx \phi_e'$ 라는 일반적 등방압밀전단시험 연구결과와 상반된다. Fig. 9에서 한계상태선(CSL)의
기울기가 K. 정규압밀선(KoNCL)의 기울기와 거의 같음을 확인하였다. 각 결과로부터 한계상
태선의 매개변수를 얻었으며, Table 4에 주어져 있다.

Fig. 11은 등가응력으로 정규화한 응력경로를 나타내고 있는데, 각 응력경로에 해당하는 항
복곡선들이 서로 밀접히 모여있음을 알 수 있다. 따라서, 장홍해성토에 대하여 시험 응력경로

Table 4 Critical State Line Parameters

λ	Γ	Mc	Me
0.245	3.22	1.25	1.20

에 무관한 단일 상태경계면을 정의할 수 있을 것이다. 여기서 나타나는 항복곡선들은 퇴적시의 응력이방성에 기인하여 전체적으로 K_0 압밀선을 기준으로 찌그려진 모양을 나타내고 있으며, 이는 외국에서 보고된 자연상태 정규압밀점성토 지반의 항복곡선과 유사하다. Fig. 11에서 굵은 실선은 Table 3과 4에서 주어진 매개변수들을 이방성을 고려하여 개발된 식 7에 적용하여 구한 상태경계면 곡선으로, 각 응력경로 별로 구해지는 항복곡선보다 다소 아래의 궤적을 나타내지만, 본 시료의 항복곡선을 대표하는데 무리가 없으리라 본다.

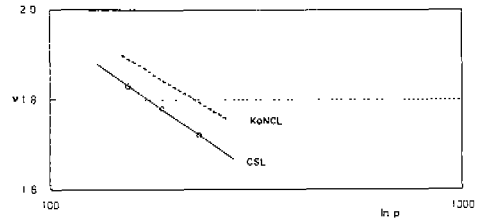


Fig. 9. Critical States for K_0 -consolidated Soils ; $v - \ln p'$ plane

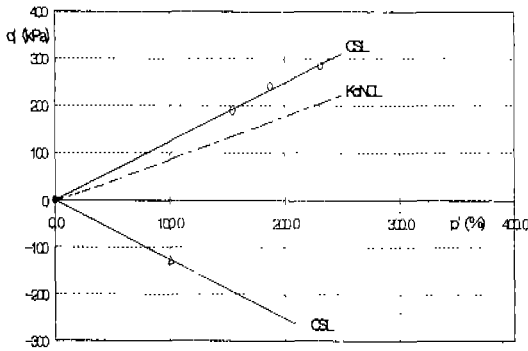


Fig. 10. Critical States for K_0 -consolidated Soils ; $q' - p'$ plane

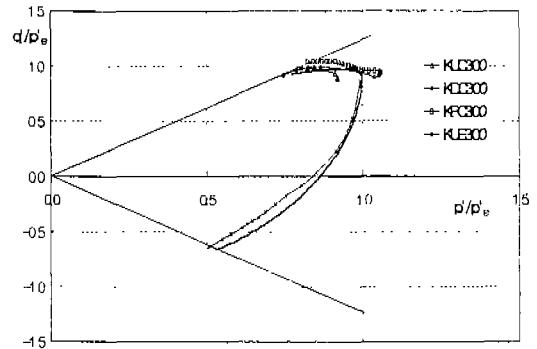


Fig. 11. Normalized Stress Path ; $q'/p_e' - p'/p_e'$ plane

V. 결론

장흥 간척현장에서 채취한 불교란시료를 사용하여 항복특성을 규명하고자 K_0 압밀시험, 비배수, 배수, 일정 p' 의 압축, 인장 삼축시험을 수행하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. K_0 압밀시험을 통하여 구한 K_0 값은 Jacky의 정지토압계수식에 의한 근사값과 비슷하였다.
2. 본 지역 점성토의 항복곡선은 K_0 정규압밀선에 대하여 거의 대칭인 모양으로 나타났으며, 이는 응력 이방성을 반영하는 것으로 외국의 사례와 유사하였다.
3. 압축과 인장에 대한 한계상태선의 기울기는 서로 비슷하여 p' 축에 대하여 대칭적으로 나타났으며, 등방압밀 전단시험에서 흔히 관찰되는 $\phi_c' \approx \phi_e'$ 의 관계가 성립하지 않고, ϕ_e' 가 ϕ_c' 보다 크게 구해졌다.

4. 비배수, 배수, 일정 p' 의 각 응력경로에 따른 정규화된 항복곡선들은 서로 밀접하였고, 한계상태 매개변수를 이용하여 구해지는 상대경계면 곡선으로 이들을 대표할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 1). Atkinson, J.H. and Robinson, P.J., 1987, "Compression and extension of ko normally consolidated kaolin clay", J. Geotech. Engrg., ASCE, Vol. 113, No. 12, pp. 1468-1482.
- 2). Diaz-Rodriguez, J.A. and Aleman, J.D., 1992, "Yielding of Mexico City clay and other natural clays", J. Geotech. Engrg., ASCE, Vol. 118, No. 7, pp. 981-995.
- 3). Tavenas, F. and Leroueil. S., 1980, "The behavior of embankments on clay foundations", Can. Geotech. J., Vol. 17, No. 2, pp. 236-260.
- 4). Wood, D.M., 1990, "Soil behavior and critical state soil mechanics", New York ; Cambrige university press.
- 5). 정진섭, 이문수 공역, 1999, 한계상태 토질역학, 도서출판 세론.
- 6). 박병기 외 2인, 1995, 연약지반에서의 토질역학, 도서출판 세론.