

양산지역 점토의 비배수 전단강도 특성

Characteristics of Undrained Shear Strength of Yangsan Clay

김길수¹⁾, Gil-Soo Kim, 임형덕²⁾, Hyung-Duk Lim, 이우진³⁾, Woo-Jin Lee

¹⁾ (주)삼부토건 연구원, Researcher, Sam-bu Soil and Construction, Co., Ltd.

²⁾ 고려대학교 대학원 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.

³⁾ 고려대학교 토목환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.

SYNOPSIS : SHANSEP method involves the consolidation to stresses in excess of the preconsolidation pressure in order to overcome sample disturbance effect. The concept of SHANSEP is based on an approach to laboratory test which attempts to reproduce the in-situ conditions more closely than is possible in routine tests and evaluates normalized strength parameters for the soil as a function of OCR. But SHANSEP method can be applied only to fairly uniform clay deposits, and is unsuitable for a random deposit. In this study, CK₀U triaxial compression test and incremental loading consolidation test were performed for the application of SHANSEP method on Yangsan clay. During the K₀-consolidation, triaxial specimens were consolidated to stress equal to two times the in-situ vertical effective stress. And for overconsolidated condition, the specimens were swelled to a known vertical effective stress in order to have the desired OCR. With the results of CK₀U triaxial compression test using the block samples, the relationship between c_u/σ'_{vc} and OCR on Yangsan clay was established. For evaluating the undrained shear strength of Yangsan clay with depth, CK₀U triaxial compression test was performed using the piston samples taken from Yangsan site. And also undrained shear strength was analyzed from the in-situ test such as Cone Penetration Test(CPT), Dilatometer Test(DMT), and Field Vane Test(FVT) and was compared with that of CK₀U triaxial compression test.

Key Words : SHANSEP, Preconsolidation pressure, OCR, CK₀U, Undrained shear strength, Cone Penetration Test, Dilatometer Test, Field Vane Test

1. 서론

연약지반상에 구조물이 계획되는 경우에 공학적인 판단에 대한 어려움이 많은 관계로 비배수 조건으로 해석하는 경우가 많다. 예를 들면 토질구조물의 시공직후의 안정해석은 비배수 전단강도를 사용하여 전응력으로 해석한다. 특히 연약지반 위에 제방을 성토할 때에 우려되는 제방의 안정성 문제는 지반의 비배수 전단강도와 관련된다. 자연지반 점토층의 비배수 전단강도는 깊이가 깊어짐에 따라 증가하는 것이 일반적이며 비배수 전단강도는 유효상재압이나 선행압밀하중과 밀접한 상관성을 가지고 있다. 삼축 압축시험에 의해 c_u/σ'_{vo} 를 구하는 경우에는 실제 지반의 압밀조건에 맞추기 위해 연직방향의 변위만을 허용하는 K₀ 압밀을 실시하는 것이 바람직하다. 본 논문에서는 양산지역에서 채취한 블록샘플을 이용하여 CK₀U 삼축압축시험에 SHANSEP 방법을 적용함으로써 양산점토에 대한 정규화 전단강도와 OCR 관계를 규명하였다. 정규화 전단강도와 OCR 관계는 양산지역의 깊이에 따른 OCR 값의 변화와 연직유효

응력을 측정하여 그 지역의 깊이에 따른 비배수 전단강도의 변화와 또는 비배수 전단강도와 연직유효응력을 측정하여 그 지역의 깊이에 따른 OCR 값의 변화를 구하는데 이용된다. 정규화 전단강도와 OCR 관계를 규명하기 위해서는 비용이 많이 들고 시간이 많이 소요된다는 단점이 있지만 정규화 전단강도와 OCR 관계가 확립됨으로써 대규모 공사에서는 효율적으로 이용될 수 있다.

이외에도 본 논문에서는 피스톤샘플을 이용하여 CK₀U 삼축압축시험을 하였으며 그 결과로부터 양산 지역의 깊이에 따른 비배수 전단강도의 변화양상을 구하였다. 그리고 콘 관입시험(CPT), 배인시험(FVT), 그리고 딜라토메타 시험(DMT)과 같은 현장시험으로 얻어진 데이터를 이용하여 양산지역의 비배수 전단강도를 평가하였다. 또, 현장시험 데이터로 해석된 비배수 전단강도는 CK₀U 삼축압축시험으로 측정된 비배수 전단강도와 비교되었다.

2. SHANSEP의 원리

점토시료의 교란효과는 원지반 응력보다 훨씬 더 큰 응력하에서는 소멸되며 또한 점토의 강도는 압밀 응력에 대한 정규화거동을 나타낸다는 사실을 바탕으로 교란효과를 제거하여 비배수 전단강도를 구하는 방법을 SHANSEP 방법이라고 한다. 점토지반에 SHANSEP 방법을 적용하기 위해서는 지반이 정규화 거동을 보여야 하며 그림 1은 정규화거동을 판정하기 위한 과정을 보여주고 있다.

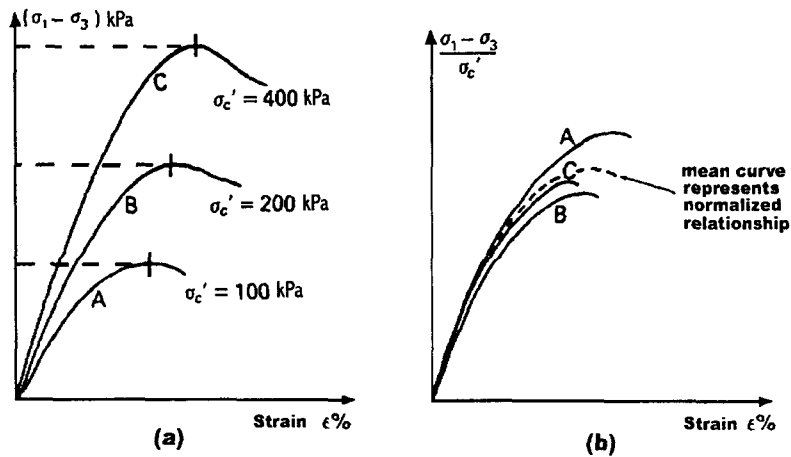


그림 1. 정규화거동

그러나 모든 점토지반이 정규화거동을 보이는 것은 아니며 quick clay나 cemented clay는 정규화거동을 보이지 않는다. 왜냐하면 이들 점토는 지층 형성과정동안에 형성된 흩 구조가 높은 압밀응력으로 인해 파괴되기 때문이다. 정규화거동을 보이는 점토지반에 대해서는 Normalized soil parameter(NSP)를 유도할 수 있으며 SHANSEP 방법을 이용함으로써 OCR에 따른 c_u/σ'_{vo} 의 NSP값이 얻어진다. 그러나 OCR측이 대수측이므로 OCR값의 변화에 따라 c_u/σ'_{vo} 의 변화가 크기 때문에 압밀시험으로 정확한 OCR값을 평가하는 것이 중요하다. 점토지반에 SHANSEP 방법을 적용하기 위해서는 먼저 그 지반의 깊이에 따른 유효응력과 OCR값의 분포를 알아야 한다. 압밀단계 동안 시료는 교란효과를 제거하기 위해 선행압밀하중의 1.5~4배의 응력으로 재하되며 재하 후 시료는 원하는 OCR값을 얻기 위해 OCR에 해당하는 연직유효응력만큼 재하된다. 식 1은 재하하중을 구하기 위한 관계식을 나타내며 그림 2는 SHANSEP 방법의 과정을 나타내고 있다.

$$\sigma'_{vc} = \frac{n \times \sigma'_p}{OCR} \quad (1)$$

여기서, $n = 1.5, 2.5, 4$

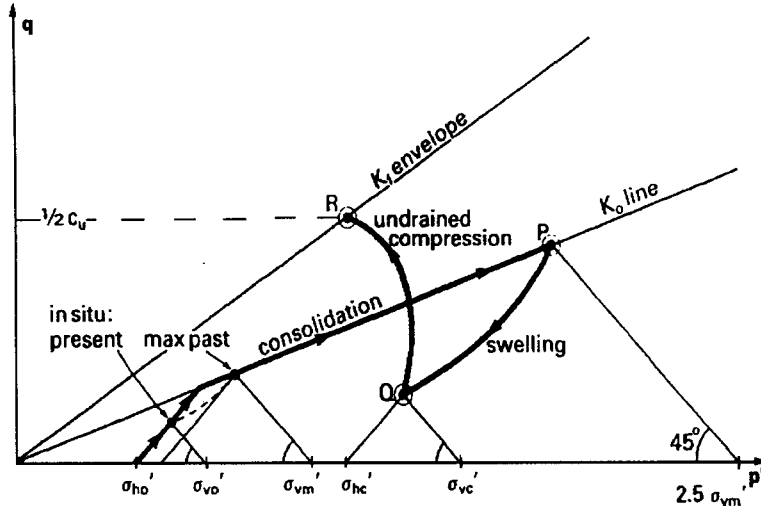


그림 2. SHANSEP 방법에 따른 응력경로

3. 실험계획

3.1 실험시료

본 논문에서 사용된 시료는 경상남도 양산현장에서 76mm 피스톤샘플러와 블록샘플러를 사용하여 채취하였다. 피스톤샘플의 채취심도는 3.0~20m이며 블록샘플은 3.0~7.0m이다. 블록샘플러는 현대건설기술연구소에서 제작한 것이며 제원은 직경 250mm, 높이 500mm이다. 실내시험으로 구한 양산점토의 자연함수비는 55.9~70.53%이며 액성한계는 42.77~58.6%, 소성지수는 18.11~27.99%이다. 양산점토의 비중은 2.70이며 흙의 분류는 CL에 해당한다. CK₀U 삼축압축시험으로 구한 K₀값은 0.35~0.48이다. 그림 3은 깊이에 따른 함수비의 변화를 나타내고 있으며 이는 피스톤샘플로부터 구한 값이다.

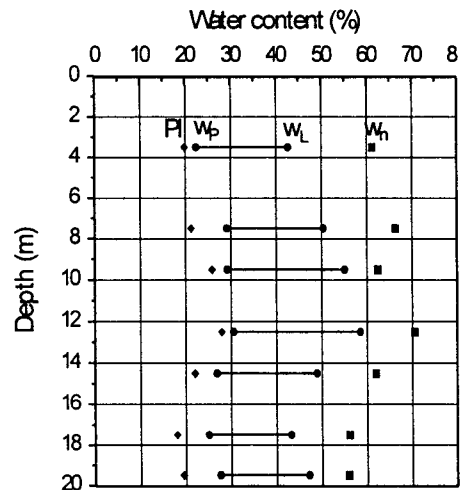


그림 3. 양산점토의 함수비 특성

3.2 실내 실험기기와 방법

본 논문에서 사용한 실험장비는 Chan에 의해서 제작된 자동삼축시험장비이며 실험에 사용한 시료들은 높이를 110~120mm, 직경을 50mm로 성형하여 K₀ 압밀시켰다. 그리고 시료의 포화를 위해 40kPa의 Backpressure를 가하였으며 B값이 0.95이상인 상태를 포화상태로 간주하였다. 실험동안 변형률 속도는 0.01%/min로 일정하게 하였으며 CK₀U 삼축압축시험으로 얻어진 데이터는 Cross-area, Membrane, Side

drain, 그리고 Piston friction에 대해 수정하였다. SHANSEP 방법을 적용하기 위해 블록샘플을 사용하였으며 압밀단계 동안 시료는 연직유효응력의 2배로 K_0 압밀되었다. 압밀 후 시료는 원하는 OCR에 해당하는 연직유효응력만큼 팽창된 후 전단파괴 되었다(그림 4).

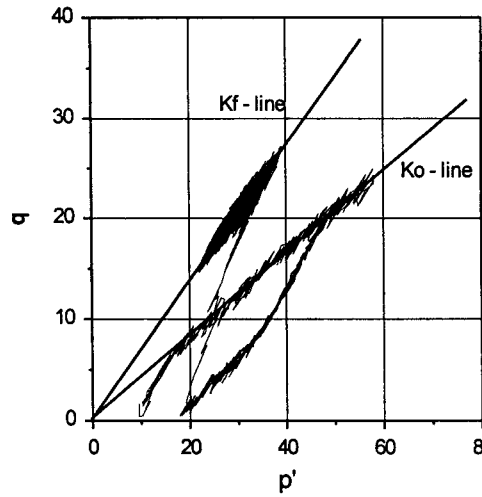


그림 4. OCR = 4에 해당하는 응력경로

3.3 현장시험 데이터의 해석방법

3.3.1 콘 관입시험(CPT)

양산현장에서 사용된 콘 관입시험기는 직경이 35.7mm이며 선단각은 60°이다. CPT 데이터(그림 5)로 비배수 전단강도를 평가하기 위해 식 (2)와 같은 경험식을 사용하였으며 N_{kt} 값은 10을 사용하였다(이선재, 1997).

$$c_u = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{N_{kt}} \quad (2)$$

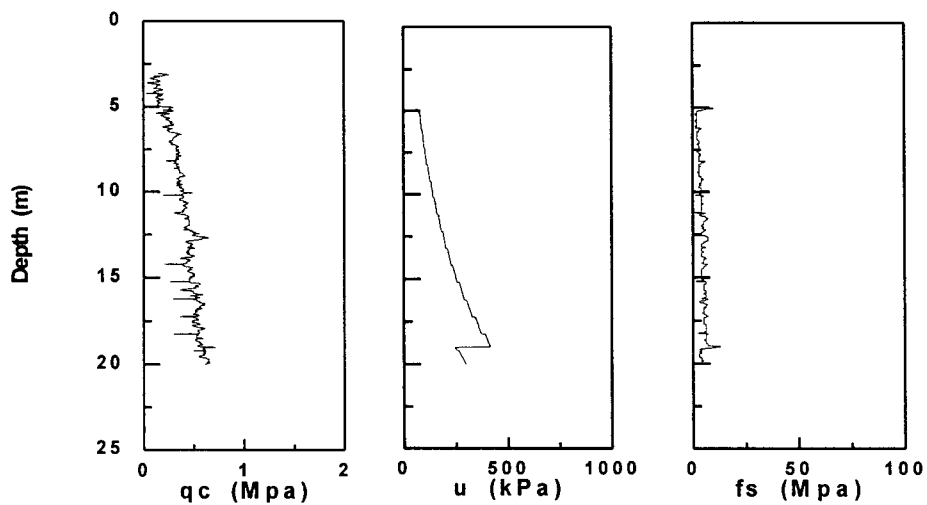


그림 5. CPT 결과

3.3.2 딜라토미터 시험(DMT)

DMT 데이터로 비배수 전단강도를 구하기 위해 Roque 등(1988)이 제안한 식 (3)을 사용하였으며 식 (3)에서 N_c 값은 흙의 종류에 따라 달라지며 양산점토에 대해서는 7을 사용하였다.

$$c_u = \frac{P_1 - \sigma_{ho}}{N_c} \quad (3)$$

여기서, $\sigma_{ho} = K_o \times \sigma'_{vo} + u_o$

$$K_o = \left(\frac{K_D}{1.5} \right)^{0.47} - 0.6$$

$$K_D = \frac{P_o - u_o}{\sigma_v - u_o}$$

3.3.3 베인시험(FVT)

양산현장에서 사용한 베인은 직경이 50mm이며 높이는 100mm인 직사각형 모양이다. FVT 데이터로 비배수 전단강도를 구하기 위해 베인의 수평면에 대한 전단응력은 삼각형 분포로 수직면에 대한 전단응력은 일정하다고 가정하였다. 식 (4)는 FVT 데이터로 비배수 전단강도를 구하기 위한 관계식이다.

$$c_u = \frac{2T}{\pi D^3 \left(\frac{H}{D} + \frac{1}{4} \right)} \quad (4)$$

식 (4)로 구한 비배수 전단강도는 Bjerrum(1974)이 제안한 식 (5)을 이용하여 소성지수에 대해 수정되었으며 표 1은 FVT 데이터로 구한 수정 비배수 전단강도를 나타내고 있다.

$$c_u = \lambda \times c_u' \quad (5)$$

여기서, $\lambda = 1.7 - 0.54 \log(PI)$

표 1. FVT 데이터로 구한 비배수 전단강도

깊이 (m)	최대 토크 (kg×cm)	c_u (kPa)	소성지수 (PI, %)	c_u' (kPa)
5	65	14.43	24.41	13.72
7	89	19.76	21.28	19.42
9	98	21.76	25.89	20.39
11	110	24.42	27.0	22.64
13	121	26.86	21.9	26.22

4. 실험결과 및 분석

4.1 c_u/σ_{vc}' 과 OCR 관계

SHANSEP 방법을 이용하여 얻어진 CK_oU 시험결과를 가지고 양산점토의 정규화 전단강도와 OCR 관계를 산정하기 위해 먼저 간극비와 비배수 전단강도사이의 관계를 유도하였다(그림 6). 관계식은 식 (6)과 같으며 표 2는 압밀이 되기 전의 간극비를 구한 후 그림 6으로 비배수 전단강도를 구한 결과이다. 그림 7은 양산점토의 정규화 전단강도와 OCR 관계를 Ladd와 Edgers(1972)가 CK_oU 직접전단시험으로 구한 결과와 비교하여 나타낸 그림이다.

표 2. 양산점토에 대한 정규화 전단강도

OCR	σ_{vc}' (kPa)	CK_oU 시험의 c_u (kPa)	압밀후 관계		압밀전 관계		$c_u(\text{corrected})/\sigma_{vc}'$
			e	c_u' (kPa)	e	c_{uo}' (kPa)	
1	89.76	27.683	1.4258	27.929	1.6905	22.680	0.2499
2	38.5	19.099	1.4459	27.491	1.6927	22.641	0.3701
3	29.92	26.29	1.4346	27.735	1.6905	22.680	0.7079
4	19.25	18.935	1.4332	27.766	1.6927	22.641	0.7293
5	20.5	21.03	1.4086	28.316	1.6886	22.714	0.7526
6	17.08	22.035	1.4142	28.184	1.6886	22.714	0.9698

$$\ln(c_u) = -0.786537e + 4.45109 \quad (6)$$

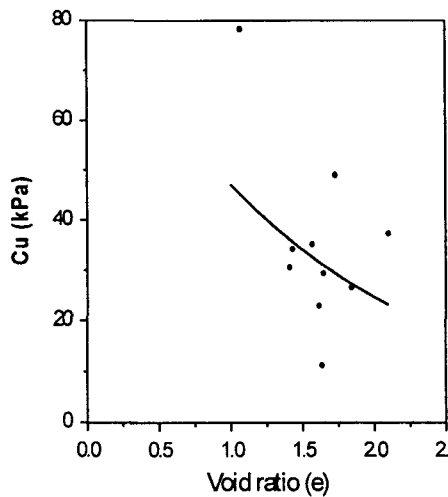


그림 6. CK_oU 시험으로 구한 c_u -e 관계

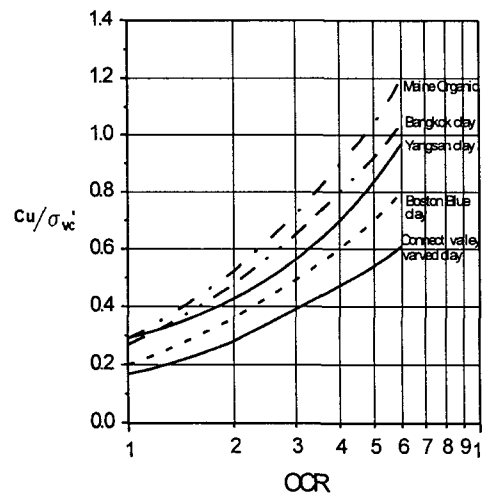


그림 7. 정규화 전단강도와 OCR 관계

SHANSEP 방법으로 구한 양산점토에 대한 정규화 전단강도와 OCR 관계를 이용함으로써 시료로부터 구한 비배수 전단강도만을 측정하여 시료의 OCR 값을 알 수 있다. 그림 8은 SHANSEP 방법과 단계제하 압밀시험으로 구한 OCR 값을 깊이에 따라 비교하고 있다.

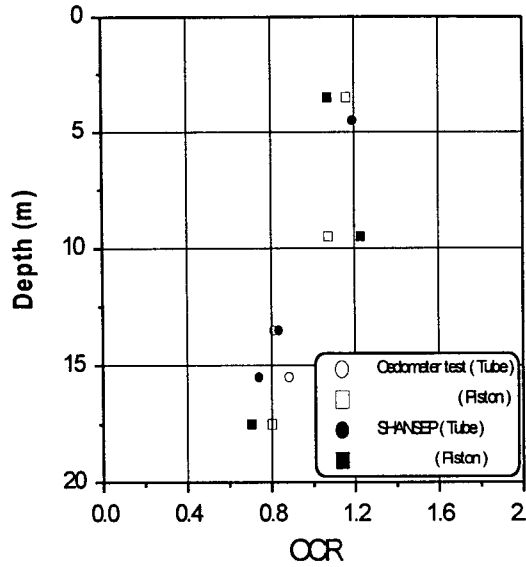


그림 8. SHANSEP 방법과 압밀시험으로 구한 OCR 값의 비교

4.2 실내시험과 현장시험의 결과 비교

양산현장에서 채취한 피스톤샘플을 이용하여 CK₀U 삼축압축시험을 실행한 결과와 현장시험(CPT, FVT, DMT) 데이터로 해석한 비배수 전단강도를 비교하면 그림 9와 같다. 그림 9에 나타나듯이 CK₀U 삼축압축시험과 CPT의 결과는 거의 비슷하며 DMT의 결과는 실내시험보다 다소 작은 값이 얻어졌다. 이는 DMT 데이터의 해석과정에 사용되는 N_c 값을 Roque 등(1988)이 제안한 값으로 사용하였기 때문이다.

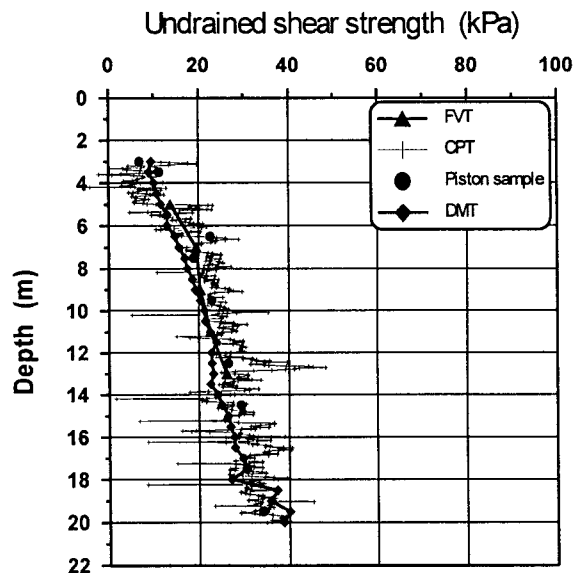


그림 9. 실내시험과 현장시험에 의한 비배수 전단강도 분포

5. 결론

양산현장에서 채취한 블록샘플을 이용하여 CK₀U 삼축압축시험에 SHANSEP 방법을 적용한 결과와 피스톤샘플을 이용한 삼축압축시험 및 현장시험결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 양산점토는 시료의 성형과정중 거의 균일한 지반임을 육안으로 관측할 수 있었으며 따라서 SHANSEP 방법의 적용이 가능하다고 판단되었다. CK₀U 삼축압축시험에 SHANSEP 방법을 적용하여 양산점토에 대한 정규화 전단강도와 OCR 관계를 얻었으며 이는 양산지역에 시공되는 토류구조물들의 안정성 평가를 위해 효율적으로 이용될 것이라고 생각된다.
- 2) 블록샘플을 사용하여 SHANSEP 방법으로 규명한 양산점토에 대한 정규화 전단강도와 OCR 관계를 이용하여 피스톤샘플과 튜브샘플의 OCR 값을 평가한 결과는 단계재하 암밀시험으로 구한 각 샘플의 OCR 값과 거의 비슷한 값을 나타내고 있다.
- 3) 피스톤샘플을 이용한 실내시험(CK₀U 삼축압축시험)의 결과로 양산점토에 대한 깊이별 비배수 전단강도의 분포양상을 얻었다. 또한 CPT, FVT, DMT와 같은 현장시험의 데이터로 양산점토에 대한 비배수 전단강도 값을 얻었으며 실내시험과 현장시험의 결과를 비교해 보면 CK₀U 삼축압축시험과 CPT는 비슷한 결과를 나타냈으나 DMT는 다소 작은 값을 나타내었다.

6. 참고문헌

- 1) 이선재 (1997), "피에조콘을 이용한 국내 지반의 공학적 특성 연구", 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문
- 2) Kim, G. S., The Effects of sample disturbance on undrained properties of Yangsan clay, M.S.C.E. Thesis, Korea University
- 3) Berre, T. and Bjerrum, L. (1973), "Shear strength of normally consolidated clays", 8th ICSMFE, Moscow, Vol. 1, pp. 39~49
- 4) Hanzawa, H. (1979), "Undrained strength characteristics of an alluvial marine clay in the Tokyo bay", Soils and Foundations, Vol. 19, pp. 69~84
- 5) Hanzawa, H. and Hiroyuki T. (1992), "Normalized undrained strength of clay in the normally consolidated state and in the field", Soils and Foundations, Vol. 1, pp. 132~148
- 6) Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine, J. T., and Lancellotta, R. (1985), "New developments in field and laboratory testing of soils", Proceedings of 11th ICSMFE, San-Francisco, Vol. 1, pp. 57~153
- 7) Ladd, C. C., and Foott, R. (1974), "New design procedure for stability of soft clays", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 100, PP. 763~786
- 8) Ladd, C. C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F., and Poulos, H. G. (1977), "Stress-deformation and strength characteristics", Proceedings of the ninth international conference on soil mechanics and foundation engineering, Vol. 2, pp. 421~494
- 9) Richard, J. F. and Choong-Ki Chung (1992), "Stress-strain-strength responses of compressible Chicago glacial clays", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 118, pp. 1607~1625