

양산점토의 비배수 특성에 대한 시료교란의 효과

The Effects of Sample Disturbance on Undrained Properties 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 : It is important to estimate the mechanical properties of clay since it is directly related to the design and the construction of geotechnical structures. Site exploration, which is composed of boring, sampling, in-situ, or laboratory tests, is performed to estimate the mechanical properties. However, mechanical properties of clay measured from laboratory test may be different from in-situ properties due to disturbances occurred during sampling, transportation, storage, and trimming. In this study, the degree of disturbance according to sampling method was estimated with the test results of CK_oU triaxial compression test on Yangsan clay. The soil samples were obtained by three types of sampling method, i.e., 76mm-tube sampler, 76mm-piston sampler, and block sampler. In order to evaluate the quality of samples, volumetric strain, undrained shear strength, secant Young's modulus, and pore pressure coefficient at peak measured from each sample were compared with one another. From the test results, it was observed that mechanical properties of the block and piston samples were more reliable than those of tube samples. But it was observed that the water content of piston was similar to that of tube samples at given depths while the water content of block samples was 14.3~15.8% smaller than that of piston and tube samples. In addition to the evaluation of the quality of samples, relationship between c_u/σ_{vc}' and OCR was established from the results of the CK_oU triaxial compression tests, which were carried out using SHANSEP method. And also undrained shear strength was analyzed using the in-situ test data such as Cone Penetration Test(CPT), Dilatometer Test(DMT), and Field Vane Test(FVT) and was compared with that evaluated from CK_oU triaxial compression test.

Key words : Disturbance, CK_oU, volumetric strain, undrained shear strength, secant Young's modulus, SHANSEP, Cone Penetration Test, Dilatometer Test, Field Vane Test

1. 서론

흙의 공학적 성질을 얻기 위해 행하는 실내시험은 현장으로부터 샘플러를 통해 채취된 시료를 이용하여 행하여진다. 그러나, 현장으로부터 채취된 시료는 샘플러의 종류, 샘플러의 근입방법, 추출방법 및 시료의 운반, 저장 그리고 성형방법에 따라 교란되어진다. 따라서, 실내시험으로부터 결정된 지반의 공학

적 성질은 시료교란으로 인해 원자반의 성질과 다르게 측정된다. Jamiolkowski 등(1985)은 시료교란을 Sampling process, Stress relief, 그리고 Handling process로 인해 발생되는 흙의 성질변화로 정의하였으며 본 논문에서는 Sampling process로 인한 시료교란의 효과를 연구하였다. 시료에 대한 교란의 효과를 조사하기 위해 CK₀U 삼축압축시험을 행하였으며 삼축시험으로 얻어지는 체적변형률, 비배수 전단강도, 파괴시 축변형률, Secant Young's modulus, 그리고 파괴시 간극수압계수를 이용하여 양산현장에서 채취한 시료들(튜브샘플, 피스톤샘플, 블록샘플)의 상태를 비교하였다. 삼축시험에서 파괴상태는 응력-변형률 곡선에서 응력이 최고점에 도달했을 때를 파괴상태로 보았다. 이외에도 Ladd와 Foott(1974)가 제안한 SHANSEP 방법을 CK₀U 삼축압축시험에 적용하여 양산점토에 대한 정규화 전단강도와 OCR사이의 관계를 규명하였다. 양산현장에서는 샘플링이외에도 콘 관입시험(CPT), 베인시험(FVT), 그리고 딜라토미터 시험(DMT)과 같은 현장시험이 행해졌으며 현장시험 데이터로부터 계산된 비배수 전단강도를 실내시험으로부터 구한 값과 비교하였다.

2. 실험계획

2.1 실험시료

본 논문에서 사용된 시료는 경상남도 양산현장에서 76mm 튜브샘플러, 76mm 피스톤샘플러, 그리고 블록샘플러를 사용하여 채취하였다. 피스톤과 튜브샘플러를 가지고 각각 2개공에서 10개와 8개의 샘플을 채취하였으며 블록샘플러로는 4개의 샘플을 채취하였다. 피스톤샘플의 채취심도는 3.0~20m이며 튜브샘플은 3.0~16m, 블록샘플은 3.0~7.0m이다. 그리고 블록샘플러는 현대건설기술연구소에서 제작한 것이며 제원은 직경 250mm, 높이 500mm이다. 블록샘플러는 3개의 원형 파이프 골조, 원형해머, 공벽유지器를 위한 안정액 공급장치, 저면정리기, 축벽정리기, 시료채취날개, 시료절단장치로 구성되어 있다. 실내시험으로부터 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. 깊이에 따른 함수비의 변화(그림 1)는 피스톤샘플로부터 구한 값이며 함수비의 상태는 피스톤샘플과 튜브샘플은 거의 비슷하였으며 블록샘플의 함수비가 가장 낮았다(그림 2). 이는 블록샘플의 저장동안 함수비의 손실이 발생하였기 때문이다. CK₀U 삼축압축시험으로 구한 각각의 샘플의 K₀값은 그림 3과 같으며 0.35~0.48의 분포를 보이고 있다. 단계재하 압밀시험으로 구한 각각의 샘플의 OCR값은 그림 4와 같으며 13m이하에서는 OCR값이 1이하의 분포를 나타내고 있다.

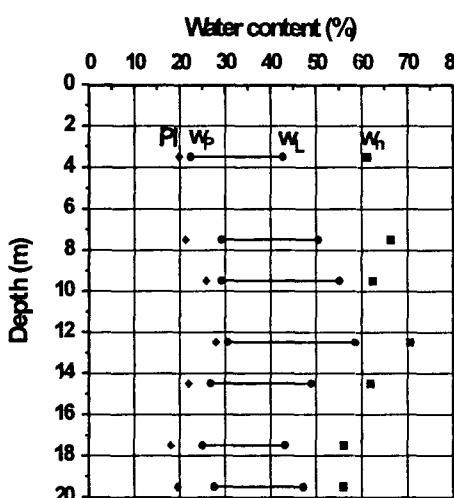


그림 1. 함수비의 분포

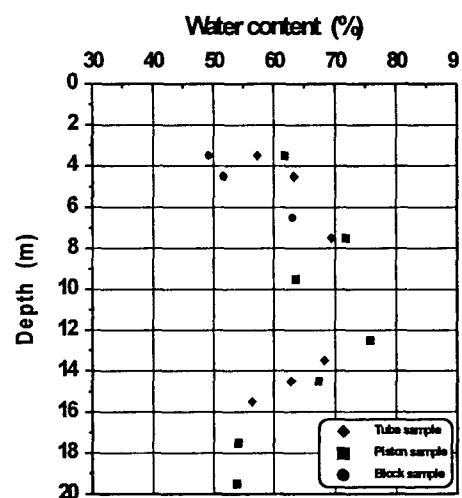


그림 2. 샘플에 따른 함수비의 변화

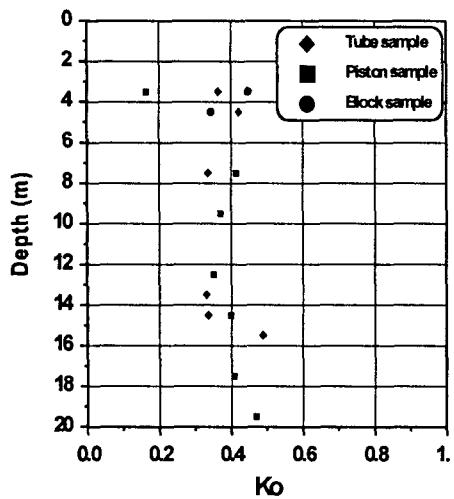


그림 3. K_o 의 분포

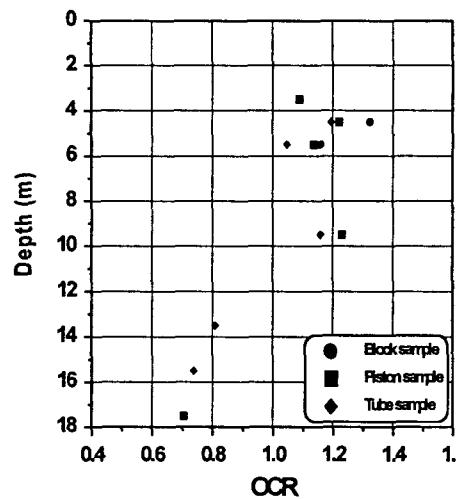


그림 4. OCR의 분포

2.2 실험기기와 방법

본 논문에서 사용한 실험장비는 Chan에 의해서 제작된 자동삼축시험장비이며 실험에 사용한 시료들은 높이를 110~120mm, 직경을 50mm로 하여 K_o 압밀 뒤(그림 5) 전단파하였다. 그리고 시료의 포화를 위해 40kPa의 Backpressure를 작용시켰으며 B값이 0.95이상인 상태를 포화상태로 간주하였다. 실험동안 변형률 속도는 0.01%/min로 일정하게 하였으며 CK_oU 삼축압축시험으로부터 얻어진 시험데이터는 Cross-area, Membrane, Side drain, 그리고 Piston friction에 대해서 수정하였다. 그리고 SHANSEP 방법을 적용하기 위해 블록샘플을 사용하였으며 압밀단계 동안 시료는 K_o 압밀되었으며 압밀응력은 연직 유효응력의 2배로 하였다. 압밀 후 시료는 원하는 OCR에 해당하는 연직유효응력만큼 팽창시켰다(그림 6).

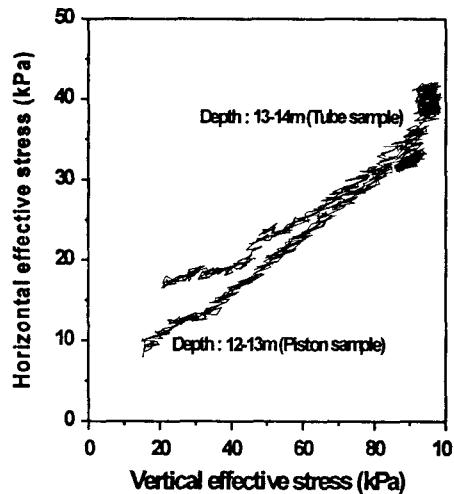


그림 5. K_o 압밀을 위한 응력경로

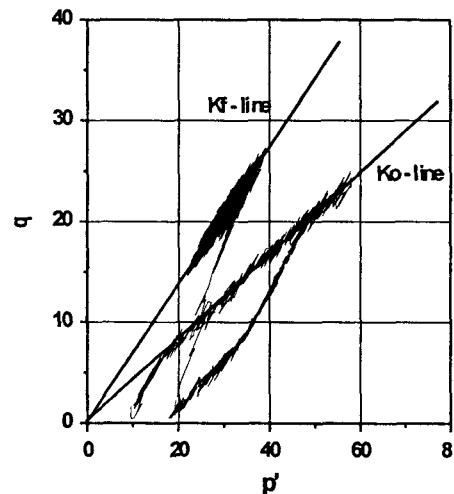


그림 6. SHANSEP을 위한 응력경로

3. 실험결과 및 분석

샘플링 방법에 따라 발생되는 시료교란의 효과가 양산점토의 비배수 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 암밀완료 단계에서 측정되는 체적변형률, 응력-변형률 곡선으로부터 얻어지는 비배수 전단강도, 파괴시 축변형률, 그리고 파괴시 간극수압계수를 이용하여 각각의 샘플러로부터 채취된 시료들의 상태를 비교하였다. 그리고 CK_0U 삼축압축시험을 이용하여 SHANSEP 방법을 적용함으로써 양산점토에 대한 정규화 전단강도와 OCR사이의 관계를 유도하였다. 또, 양산현장에서 실시한 현장시험(CPT, FVT, DMT)의 데이터로부터 평가된 비배수 전단강도와 실내시험(CK_0U 삼축압축시험)으로부터 측정된 비배수 전단강도를 짚어별로 비교하였다.

3.1 체적변형률

Andresen (1969)과 Lacasse 등(1985)은 현장 연직유효응력으로 재암밀하는 동안 발생되는 시료의 체적변화를 이용하여 시료의 상태를 비교할 수 있다고 제안하였으며 시료가 교란되어질수록 체적변형률은 더 증가한다고 보고하였다. 양산현장에서 채취된 시료들의 현장조건을 재현하기 위해 시료들은 연직유효응력으로 24시간동안 K_0 암밀되었으며 각 시료로부터 암밀의 완료단계에서 측정된 체적변형률은 그림 7과 같다. 투브샘플의 경우, 체적변형률은 1.511~7.596%이며 피스톤샘플은 1.024~4.515%, 블록샘플은 0.963~1.77%이었다. 그림 7에서 보이듯이 체적변형률은 깊이가 깊어질수록 증가하는 경향을 보이고 있으며 이는 깊이가 깊을수록 상재하중의 제거효과가 크기 때문이다.

3.2 비배수 전단강도

CK_0U 삼축압축시험의 결과로 측정한 각 시료의 비배수 전단강도를 짚어별로 비교해 보면 그림 8과 같다. 각 시료의 비배수 전단강도는 축차응력-변형률 곡선의 최고점으로부터 평가되었으며 그림 8에서 보이듯이, 피스톤 샘플과 블록샘플의 비배수 전단강도는 거의 비슷하며 투브샘플의 비배수 전단강도보다는 2.4~10%정도 큰 값을 나타내고 있다.

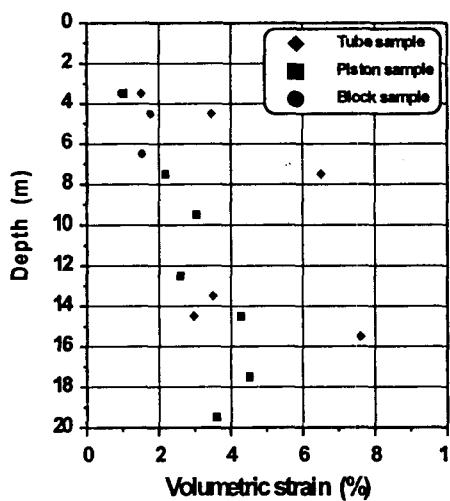


그림 7. σ_{vo}' 로 K_0 암밀시 발생되는 체적변형률

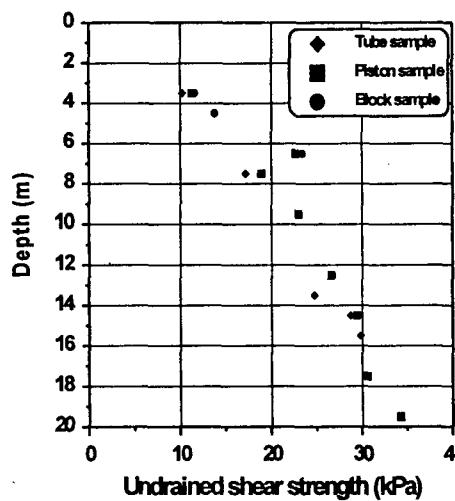


그림 8. 각 시료의 비배수 전단강도

3.3 Secant Young's modulus와 간극수압계수

각 시료의 Secant Young's modulus는 축차응력-변형률 곡선에서 최대 축차응력의 50%에서 구한 기울기로서 그림 9는 깊이 7~8m에서 구한 축차응력-변형률 곡선이며 피스톤샘플의 Secant Young's modulus가 투브샘플보다 1.5배정도 큰 값을 나타내었다. 그림 10은 깊이 7~8m에서 구한 간극수압계수를 나타내고 있으며 피스톤샘플은 1.85%의 축변형률에서, 투브샘플은 2.1%의 축변형률에서 파괴되었으므로 파괴시의 간극수압계수를 비교해 보면, 피스톤샘플이 투브샘플보다 큰 값을 나타내고 있다.

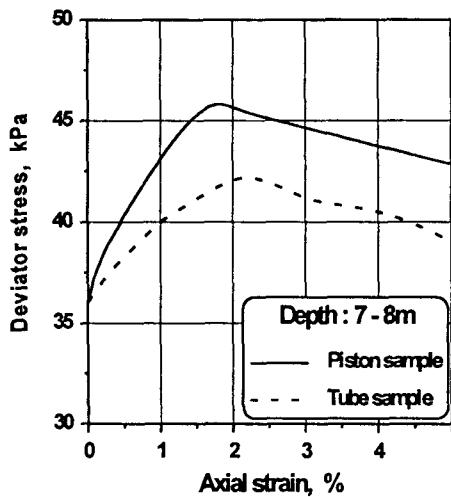


그림 9. Secant Young's modulus의 비교

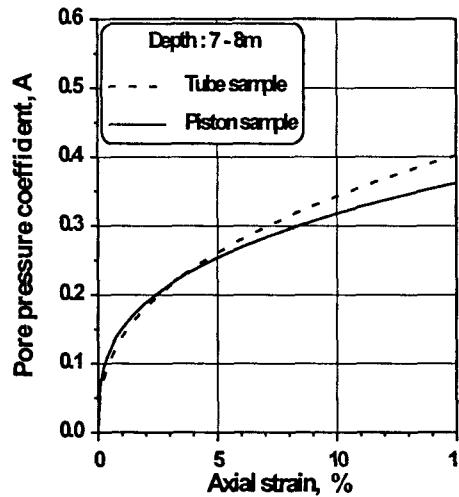


그림 10. 간극수압계수의 비교

3.4 정규화 전단강도와 OCR 관계

깊이 4~5m, 5~6m 그리고 6~7m에서 채취된 블록샘플에 SHANSEP 방법을 적용하였다. SHANSEP 방법을 이용하여 얻어진 $C_{k_0}U$ 시험결과를 이용하여 양산점토의 정규화 전단강도와 OCR 관계를 산정하기 위해 먼저 간극비와 비배수 전단강도사이의 관계를 유도하였다(그림 11). 관계식은 식 (1)과 같으며 표 1은 압밀이 되기 전의 간극비를 구한 후 그림 11로 비배수 전단강도를 구한 결과이다. 그림 12는 양산점토의 정규화 전단강도와 OCR 관계를 Ladd와 Edgers(1972)가 $C_{k_0}U$ 직접전단시험으로 구한 결과와 비교하여 나타낸 그림이다.

표 1. 양산점토에 대한 정규화 전단강도

OCR	σ_{vc}' (kPa)	CK ₀ U 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

$$\ln(c_u) = -0.786537e + 4.45109 \quad (1)$$

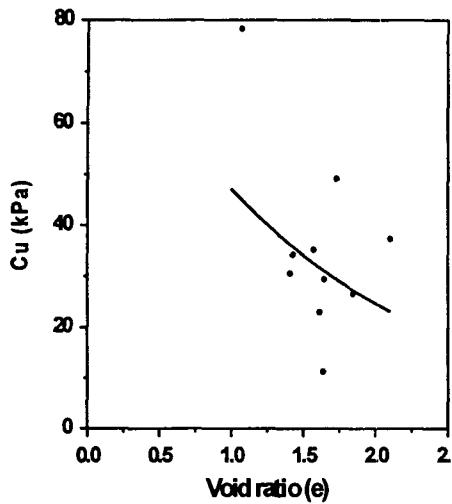


그림 11. CK_oU 시험으로 구한 c_u-e 관계

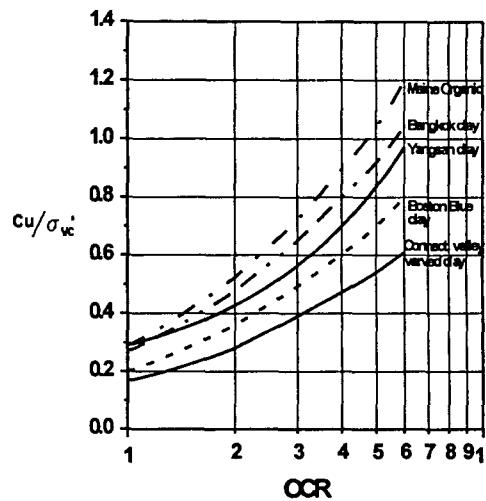


그림 12. 정규화 전단강도와 OCR 관계

SHANSEP 방법으로 구한 양산점토에 대한 정규화 전단강도와 OCR 관계를 이용함으로써 각각의 시료로부터 구한 비배수 전단강도를 이용하여 각각의 시료에 대한 OCR 값을 알 수 있다. 그림 13은 SHANSEP 방법과 단계재하 압밀시험으로 구한 OCR 값을 깊이에 따라 비교하고 있다.

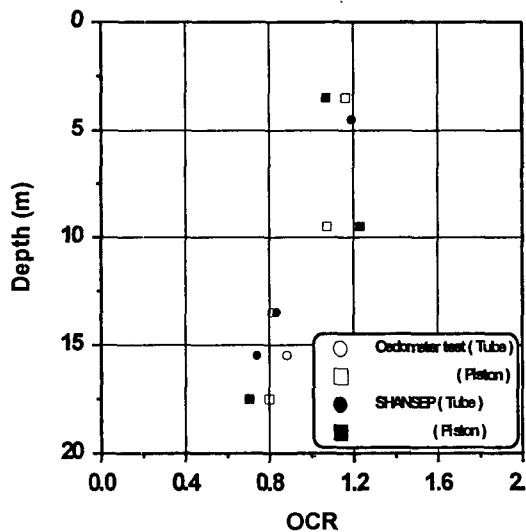


그림 13. SHANSEP 방법과 압밀시험으로 구한 OCR 값의 비교

3.5 실내시험과 현장시험의 결과 비교

양산현장에서 행해진 현장시험(CPT, FVT, DMT) 데이터로 해석한 비배수 전단강도를 실내시험(CK_oU 삼축압축시험)으로 구한 비배수 전단강도와 비교하면 그림 14와 같다. FVT로 구한 비배수 전단강도는 소성지수 효과에 대해서 수정되었다.

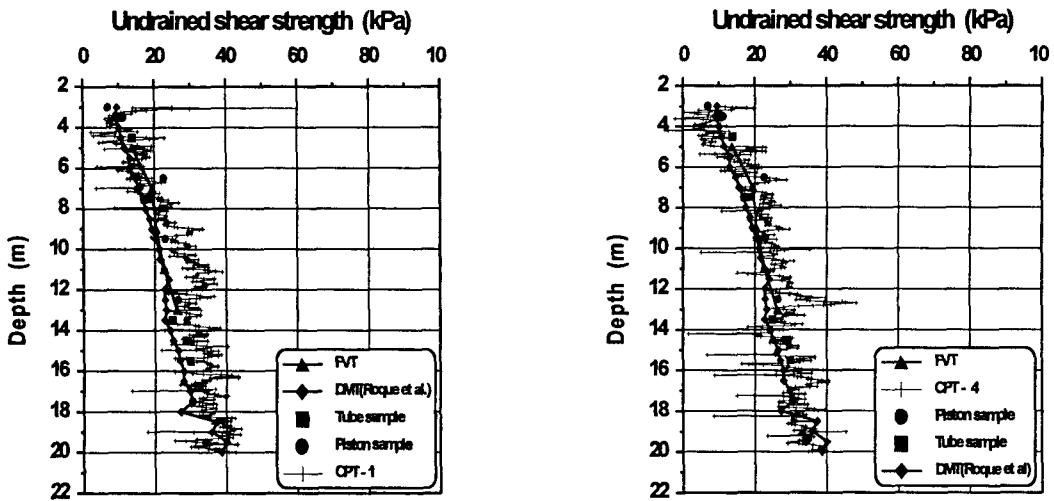


그림 14. 실내시험과 현장시험의 결과 비교

4. 결론

세 가지 종류의 샘플러로 채취한 샘플을 이용하여 샘플링 방법에 따른 시료교란의 효과를 알아보기 위해 CK_0U 삼축압축시험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) σ_{vo}' 로 K_0 압밀하여 각 샘플로부터 구한 체적변형률을 비교해 보면, 동일 깊이에서 튜브샘플의 체적변형률이 피스톤샘플이나 블록샘플보다 32.23~66.67% 정도 크게 나타났다. 측정된 체적변형률은 깊이와 함께 증가하는 경향을 보이고 있으며 이는 깊이가 증가할수록 샘플링으로 인한 상재하중의 제거효과가 크기 때문이라고 사료된다. 그리고 각 샘플의 자연함수비를 비교해 보면, 동일 깊이에서 튜브샘플과 피스톤샘플의 자연함수비는 거의 같았으며 블록샘플은 튜브샘플이나 피스톤샘플보다 14.29~15.8% 낮게 관측되었다. 이는 블록샘플의 저장동안 함수비의 손실이 발생하였기 때문이다.
- 2) 비배수 전단강도의 경우, 블록샘플과 피스톤샘플은 거의 같으며 튜브샘플은 블록샘플이나 피스톤샘플보다 2.4~10% 정도 낮게 관측되었다. 그리고 깊이 6~7m에서의 비배수 전단강도가 크게 관측되었는데 이는 시료의 내부에 단단한 실트 성분과 조개껍질이 함유되어 있었기 때문이다.
- 3) 파괴시 축변형률은 튜브샘플이 1.75~3.45%, 피스톤샘플이 0.789~2.35%, 그리고 블록샘플이 0.8~3.2%로 관측되었으며 동일 깊이에서 튜브샘플의 파괴시 축변형률이 피스톤샘플이나 블록샘플보다 크게 관측되었다. 그리고 파괴시 간극수압계수는 샘플에 따라 일정한 경향을 보이지 않았으나 1%의 축변형률을 기준으로 하여 비교해 보면, 블록샘플이나 피스톤샘플의 간극수압계수가 튜브샘플보다 크게 관측된다. Secant Young's modulus의 경우, 피스톤샘플이나 블록샘플의 Secant Young's modulus가 튜브샘플 보다 1~2.4배정도 크게 관측되었으며 이는 피스톤샘플이나 블록샘플이 높은 축차용력과 낮은 축변형률 상태에서 파괴되었기 때문이다.
- 4) Secant Young's modulus가 체적변형률, 비배수 전단강도, 파괴시 축변형률, 그리고 1% 축변형률에서의 간극수압계수보다 각각의 샘플에 따라 더 큰 차이를 보이고 있으므로 샘플링 방법에 따른 시료교란의 효과를 알아보기 위해서는 각 샘플의 Secant Young's modulus를 비교하는 것이 낫다고 할 수 있다.

참고문헌

- 1) 이선재 (1997), “피에조콘을 이용한 국내 지반의 공학적 특성 연구”, 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문
- 2) Atkinson, J. H. and Boese, R. J. (1992), "Influence of laboratory sample preparation procedures on the strength and stiffness of intact Bothkennar soil recovered using the Laval sampler", *Geotechnique*, Vol. 42, pp. 349~354
- 3) Hanzawa, H. and Tanaka, H. (1992), "Normalized undrained strength of clay in the normally consolidated state and in the field", *Soils and Foundations*, Vol. 32, pp. 132~148
- 4) 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
- 5) Lacasse, S., Berre, T., and Lefebvre, G. (1985), "Block sampling of sensitive clays", *Proceedings of the 11th ICSMFE*, San-Francisco, Vol. 1, pp. 887~892
- 6) 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
- 7) Lefebvre, G. and Poulin, C. (1979), "A new method of sampling in sensitive clay", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 16, pp. 226~223
- 8) Martin, C. D. and Brian S. (1994), "The effect of sample disturbance on laboratory properties of Lac du Bonnet granite", *Canadian Geotechnical Journal*, pp. 692~702
- 9) Okumura, T. (1971), "The variation of mechanical properties of clay samples depending on its degree of disturbance", *Proceedings of the Special Session on Quality in Soil Sampling*, 4th Asian Conference, International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, pp. 73~81