

채취된 시료의 교란도에 따른 토질 특성변화에 대한 연구 Study on Sampling Disturbance Effects on Soil Properties

이용길¹⁾, Yong-Gil Lee, 이영남²⁾, Young-Nam Lee

¹⁾현대건설기술연구소 연구원, Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology

²⁾현대건설기술연구소 연구위원, Research Director, Hyundai Institute of Construction Technology

개요(SYNOPSIS) : The effects on sampling disturbance to undrained shear strength and deformation characteristics of clay have been investigated using soil samples obtained from two sampling methods; block sampling method and piston sampling method. Mechanical properties of clay studied were characterized using isotropic consolidation undrained triaxial test and oedometer test.

The change of soil properties and degree of sample disturbance have been observed in terms of the volume change, stress-strain curve, the maximum shear strength, axial strain in failure, the elastic modulus of soil.

Experimental investigation of the study indicated that Piston sampling method give a smaller void ratio than block sampling method under same loading condition.

The degree of sample disturbance could be quantified by comparing the consolidation curve and least curvature radius in consolidation tests.

The peak shear strength of block sampled soil was higher than that of piston sampled soil but axial strain in failure was vice verse, which means that sampling methods have a considerable effects on stress-strain behavior of soil.

Key Words : sampling Method, sample disturbance, consolidated-undrained triaxial test
block sample, sample quality

1. 서론

외국에서는 효과적인 샘플링 방법등 여러 연구가 활발히 진행되고 있어 많은 자료가 축적되어 있으나 국내에는 낙후된 보오링 기술자와 샘플링 방법으로 현장 보오링을 통해 채취되는 불교란 시료에 대한 시료의 교란도를 고려하지 않고 토질정수를 판단하는 실정이다. 따라서 실내시험에서 얻어지는 시험값들에 대한 신뢰도를 높이기 위해서, 샘플링 방법에 따른 교란도 상호관계 파악이 필요하다.

전라남도 울촌 제1공단조성을 위한 지반조사 과정에서 현장에서 시료를 채취하였지만, 채취된 시료의 특성이 얼마나 교란에 의해 변화하였는가를 조사할 필요성이 대두되었다. 종래의 방법으로는 시료의 교란도를 단지 육안검사등의 비합리적 방법에 의하여 조사하는 바, 이에 대한 체계를 정립하기 위하여 현장 지반의 동일한 위치와 심도에서 블록 샘플링(Block Sampling)과 피스톤 샘플링(Piston Sampling) 방법에 의해 불교란 시료를 채취한 후 실내 실험실에서 불교란 시료에 대해 삼축시험과 표준압밀시험, 기본 토성 시험을 실시한 후 샘플링 방법에 따른 상호 관계를 비교하여 교란도 특성을 파악하고자 하는데 연구의 목적이 있다.

2. 시료의 교란과 질

2.1 시료의 교란과 교란 원인

시료교란이란 샘플링과 시료취급과정에서 토질구조에 미치는 모든 영향을 말하며, 이에 대하여 많은 연구가 이루어 졌으며 다음과 같이 정리할수 있다.

John Olsson(1925)은 1923년에 최초로 피스톤 샘플러를 만들어 시료교란에 대한 조사를 실시하였다. Hultin(1937)도 개량된 피스톤 샘플러를 이용하여 연약점토의 샘플링에 있어서의 교란을 연구하였다. Caldenius(1925)는 시료의 이송과 저장에 의한 교란을 fall-cone 시험을 통해 조사한 바가 있으며, Jakobson(1954)은 서로 다른 형태의 피스톤 샘플러에 의한 시료질에 대한 비교를 실시하여 피스톤 형태에 따라 전단강도 변화는 심하지만 압축특성 변화는 피스톤 형태와 무관함을 보여주었다. Kallstenius(1958)는 연약점토 시료교란은 심도가 커짐에 따라 샘플러 길이가 감소함에 따라 증가함을 보여주었다. 이와는 반대로 Lundström(1958)은 연약 점토 교란은 시료의 크기가 증가함에 따라 감소한다는 것을 압밀계수를 통해 나타내었다. Berre et al.(1969)은 quick clay의 교란 효과를 샘플러 크기를 통해 조사하였고, Kallstenius(1963)의 연구에 의하면 피스톤 샘플러의 절단각은 강도와 변형 특성에 큰 영향을 준다는 것을 비배수 전단강도의 변화를 통해 보여주었다. Kirkpatrick and Khan(1984)의 결과에 의하면 현장 거동 예측에서 UU의 사용은 응력이완 때문에 오류가 있을 수 있다고 결론지었다. 그러나, Kirkpatrick and Khan(1984)는 현장거동은 현장유효응력 이상으로 압밀시키는 과정에 의해 상당히 재현될 수 있다고 확신하였다.

Graham et al(1990)은 또한 1주일까지 저장한 재구성한 일라이트 점토시료에 대한 시험을 실시하여 UU 시험은 신뢰할 만한 결과를 주지 못하며, 현장유효 응력이상으로 재압밀시킨 시료의 비배수 전단강도는 믿을만하지만 탄성계수에는 많은 차이가 있다고 하였다. 수많은 다른 연구 또한 UU 시험의 부정확성을 보여주었다. 근래의 연구에서 Hight et al(1992)는 초기 유효 응력은 시료 저장 기간에 별 영향이 없음을 발견하였다.

이상적인 실내시험용 시료는 샘플링하기 전의 현장에 존재하는 함수비와 유효응력을 가지고 있어야 한다. 그러나, 블록 샘플링으로 $K_0=1$ 인 흙을 채취하지 않는 한 실현 불가능하기 때문에, 일반적으로 $K_0 \neq 1$ 인 흙을 튜브 샘플러로 채취하는 경우에는 시료 교란을 최소화하거나 시료 교란이 역학적 특성에 미치는 영향을 최소화해야 한다. Jamiolkowski et al.(1985)는 이러한 시료교란의 원인을 표 1과 같이 요약하였다.

튜브 샘플링시 일어나는 시료의 교란 요소를 살펴보면 다음과 같다.

- (1) 드릴링시 공 전면의 토질상태의 변화
- (2) 샘플링 튜브 관입과 회수
- (3) 튜브내의 함수비의 재배열
- (4) 튜브로부터 시료 추출
- (5) 건조 또는 수압의 변화
- (6) 실내시험위한 시료준비 및 트리밍
- (7) 기타 사항으로는 시료내에 용해된 가스의 누출, 타격식 샘플링시의 동적 효과, 이송시의 취급소홀, 온도 변화등을 들수 있다.

여기서, ①⑤⑥은 운용방식에 의한 교란으로 조심하면 제거가 가능하지만, ②③④는 새로채취 기구에 의한 것으로 운용방식을 고쳐도 제거되지 않는 튜브 샘플링시 반드시 생기는 교란이다.

표 1 점성토 시료의 교란 원인

조 건	항 목	비 고
응력해방	천공에 의한 응력변화	· 경천공수로 인한 σ_v 의 과도한 인장변형 유발 · 큰 천공압력이 과잉 압축변형 유발
	현장초기전단응력의 제거	· 결과로 발생하는 전단변형률은 일반적으로 작음
	구속응력의 제거	· 조립재의 존재로 인한 부의 간극수압의 손실 · 기포나 용해되지 않은 가스의 팽창
시료 채취기술	시료의 기하학	이 변수들은 다음에 영향을 미침: 회수율 시료 벽면을 따른 집착력 내부벽면을 따라 교란된 영역의 두께
	샘플러 추진방법	타격법 보다 연속적인 추진방법이 좋음
	시료 회수방법	시료의 바닥에서 suction효과를 제거하기 위해 진공 브레이크 사용
핸들링 방법	운반	충격, 기온변화등을 피할것
	저장	· 박테리아 성장을 최소화하기 위해 현장온도로 저장 · 샘플링 튜브와의 화학적 반응을 피할것 · 저장 시간 장기화에 따른 물의 이동 증가
	시료추출과 성형등	· 더 변형되는 것을 최소화 할 것(주의해서 수행)

2.2 시료의 질 평가

주어진 시료 채취 방법에 따른 시료의 질을 평가하기 위해서 고려해야 할 요소가 많다. 이런 인자에는 함수비 변화, 시료내 가스의 용해와 방출, 시료의 화학 변화, 온도 변화, 응력 이완등이 있다. 다음은 시료의 질을 평가하는데 사용되는 몇가지 방법들이다.

(1) 현장유효 응력으로 재압축시 체적 변화량 이용

불교란시료에 대한 신뢰할만한 응력-변위 곡선, 간극수압결과 등을 얻기 위해서는 시료의 질이 상당히 중요하다. 특히 점성토에 있어서 현장유효응력으로 압밀시 체적변형율을 이용하여 시료의 질을 파악할 수 있다. Berre의 연구결과에서 응력이력과 심도를 고려하여 연약 점성토의 시료의 질을 다음 표 2와 같이 Kleven 등은 제안하였고 본 논문에서도 이 표를 이용하여 시료의 교란정도를 파악하였다.

(2) 잔류유효응력 이용

Ladd 등은 시료의 잔류유효응력과 완전시료의 유효잔류 응력비, 응력차, 정규화 응력비를 통해 시료 교란을 평가하는 방법을 제안하였다. 그러나, 이와같은 시료교란에 대한 정의의 단점은 완전시료의 유효 응력값을 결정할때 가정되거나 측정된 토압계수, K_0 과 간극수압계수 A_u 값에 의존한다는 점이다. 이값의 측정은 어려움이 있고, 적은 잔류응력과 적은 잔류간극수압이 시료교란의 신뢰할만한 지수인지는 잘 알려져 있지도 않다. 다만, 잔류간극수압은 교란이 증가함에 따라 감소한다는 사실만이 알려져 있을뿐이다.

(3) 시료의 탄성계수 이용

시료 교란의 시켄트 계수에 대한 효과는 파괴지수(FI)를 이용하여 Raymond 등에 의해 삼축시험시 파괴시의 축차응력과 임의의 변형율에서의 축차응력의 비로서 제안되었다.

$$\text{파괴지수(FI)} = \frac{\text{임의의 축차응력}}{\text{파괴시의 축차응력}}$$

$$FI = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_j} \quad (1)$$

(4) 압밀 곡선을 이용

압밀 곡선을 이용하여 시료의 교란을 다음 사항을 통해 압축곡선상에서 알 수 있다.

- ① 주어진 압밀응력하에서 공극비가 감소한다.
- ② 최소 곡률반경점을 찾기가 어렵고 선행압밀하중값이 명확하지않거나 낮은 값으로 나타난다.
- ③ 재압축구간에서 압축성이 증가한다.

(5) 기타

그외의 방법으로 시료의 육안 검사를 통해 시료의 휨정도를 관측하거나 샘플링 튜브내의 x-ray 검사를 통해 시료 교란 판정이 가능하다.

표 2 체적 변형율과 유효 수직응력에 따른 시료교란의 분류(Kleven et al. 1986)

OCR	깊이 (m)	아주양호 $\epsilon_v <$ %	양호 $< \epsilon_v <$ %	불량 $\epsilon_v >$ %
1-1.1	0-10	3	3-5	5
	10-50	2	2-4	4
1.2-1.5	0-10	2	2-4	4
	10-50	1	1-3	3
1.5-2	0-10	1.5	1.5-3.5	3.5
	10-50	1	1.0-2.5	2.5
2-3	0-10	1	1-3	3
	10-50	0.75	0.75-2	2
3-8	0-10	0.5	0.5-1	1
	10-50	0.5	0.5-2	2
>8	0-10	(0.25)	(0.25)-(0.5)	(0.5)

3. 시료의 채취와 실내시험

3.1 시료의 채취

본 연구에서는 자체 제작한 블록 샘플링 장비와 기존에 널리 사용되는 피스톤 샘플링 장비를 이용하여 시료를 채취하여 실내시험을 수행하였다. 본 연구에 사용된 시료는 전라남도 울진 제1공단 조성공사 현장에서 블록 샘플러와 피스톤 샘플러를 이용하여 채취하였다. 피스톤 샘플은 2개공에서 9개의 샘플을 블록 샘플은 1개공에서 2개의 샘플을 채취하였다. 블록 샘플의 채취심도는 3.8m~4.2m이고 피스톤 샘플은 4.2m~4.7m와 5.0m~5.5m 이다.

피스톤 샘플러는 Geonor사의 직경 75mm, 길이 585mm의 압입식 샘플러를 이용하였으며, 블록 샘플러는 직경 250mm, 높이 500mm의 원통형 시료를 채취할수 있도록 제작하여 사용하였다.

블록 샘플러는 보링기에 접속해서 사용하며 직경 250mm, 높이 500mm의 원통형 시료를 채취할 수 있도록 고안되었다. 블록 샘플러는 3개의 원형 파이프 골조, 원형 햄머, 공벽유지를 위한 안정액공급장치, 저면정리기, 측벽정리장치, 시료채취날개, 시료절단장치로 구성되어 있다.(그림 1, 그림 2 참조)

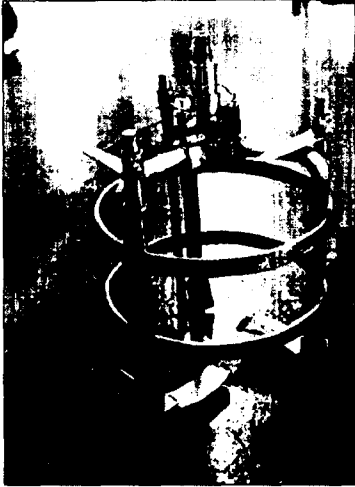


그림 1 블록샘플러



그림 2 블록샘플링

3.2 시료의 질

등방압밀시의 체적 변형율을 이용하여 시료의 질을 살펴볼수 있는데 이를 전술한 표 2의 기준에 의해 살펴보면 표 3에 나타난 것과 같다. 여기서 보면 블록 샘플에 비하여 피스톤 샘플의 체적변형율이 전반적으로 크게 나타났으며 과압밀비와 심도를 고려하면 피스톤 샘플이 상대적으로 교란이 많이 발생되었음을 알수 있다.

표 3 체적변형율을 이용한 시료의 질

구 분	과압밀비	체적변형율 (%)	시료의 질
블록 샘플	1.3	1.8	아주 양호
		2.6	양호
		2.2	양호
피스톤 샘플	0.8~1.1	2.9	아주 양호
		4.4	양호
		7.2	불량

3.3 실내시험

본 연구가 진행된 지역은 점성토로 자연함수비는 74~103%의 범위를 가지며 심도에 따라 일정한 경향을 보이지는 않는다. 액성한계는 60~96%의 범위를 가지고, 소성지수는 34~67%의 범위에 존재한다.

그림 3에 실내시험 결과를 요약해서 도시하였다. 블록 샘플의 자연함수비의 평균값은 80.55%, 액성한계는 69.4%, 소성한계는 27.37%의 값을 지니며, 소성지수(PI)는 42.03%의 값을 가진다. 비중(Gs)시험 결과 2.686이 산출되었고 습윤단위중량의 평균값은 14.77 kN/m^3 (1.506 t/m^3)의 값을 가지는 것으로 나타났다. # 200체 통과량시험의 평균값은 96.43%로 대부분의 입자들이 점토로 구성되었고 통일분류에 의하면 OH로 분류된다.

피스톤 샘플의 자연함수비(Wn)의 범위는 84.41~102.49%의 범위를 보이며, 액성한계는 60.45~92.24%를 소성지수(PI)는 33.95~66.95%의 범위를 가진다. 비중(Gs)시험 결과 2.697~2.775의 범위에 걸쳐 있고, 습윤단위중량의 값의 범위는 $14.25 \sim 14.79 \text{ kN/m}^3$ ($1.453 \sim 1.508 \text{ t/m}^3$)의 값을 가지는 것으로 나타났다. 그리고, # 200체 통과량은 94.11~99.32%를 나타내며, 흙의 분류는 통일분류상으로 CH 또는 OH로 분류된다.

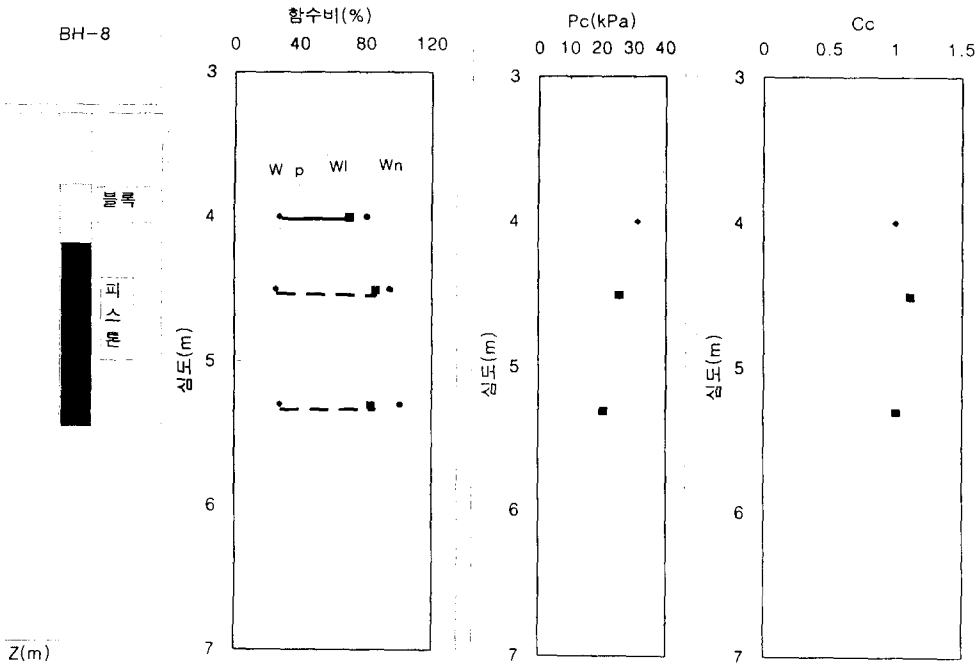


그림 3 실내시험 결과

압밀특성을 나타내는 심도별 압축수 값은 분포폭이 넓어 특정한 상관관계를 나타낼 수 없으나, 0.69 ~ 1.45정도 값으로 분포하며 압밀계수는 지층에 따라 압밀계수 값이 매우 다양하게 나타나고 있으며 그 분산폭은 블록 샘플은 $5.3 \times 10^{-2} \sim 1.13 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 를 보인다.

3.4 압밀 특성 고찰

압밀 곡선의 형태를 다음 그림 4에 나타냈다. 그림 4에서 실선은 블록 샘플의 경우를 나타낸 것이고, 점선은 피스톤 샘플의 경우를 나타내며, 간극비(e)와 재하하중(p)의 관계를 반대수 곡선으로 도시하였다. 이 그림을 살펴보면, 블록 샘플과 피스톤 샘플간의 차이를 발견할 수 있는데 간극비에 있어서는 초기치 일부를 제외하고는 전구간에 걸쳐서 피스톤 샘플의 간극비가 임의의 하중에서 상당히 감소한 값을 보여준다. 이러한 사실은 시료 교란에 의한 영향이 압밀곡선에 영향을 미쳐 나타난 결과라 하겠다.

다음으로 최소 곡률 반경점의 확인을 여하히 할수 있는가의 관점에서 압밀 곡선을 살펴보면, 시료 교란에 의한 영향을 선행 압밀 하중으로 쉽게 판별이 가능함을 알 수 있게 된다.

그림 4에서 보듯이 우선 최소 곡률 반경점 부근의 곡선의 형태가 블록 샘플과 피스톤 샘플 사이에 명확히 구분됨을 알 수 있다. Casagrande 방법에 의한 선행압밀하중의 산정값의 비교를 하면 명확하게 이

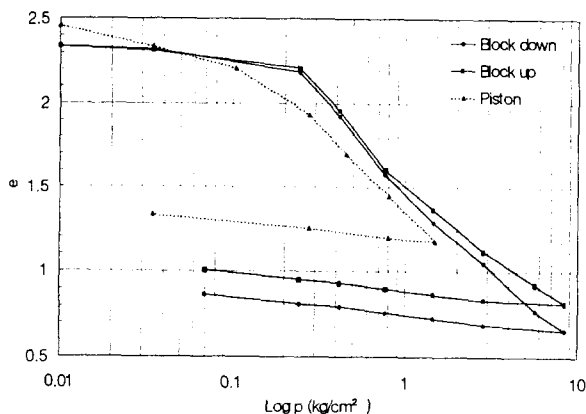


그림 4 샘플링에 따른 압밀곡선 변화

하는 것으로 사료된다.

런 사실이 증명된다. 블록 샘플에 있어서 선행압밀 하중의 평균값은 30.4 kPa (0.31 kg/cm^2)인데 비하여 피스톤 샘플은 25.5 kPa (0.26 kg/cm^2)의 값으로 감소함을 알 수 있다.

재압축 구간의 경사에 대한 비교를 하면 블록 샘플과 피스톤 샘플 사이에는 별다른 영향이 없는 결과가 나왔다.

다음으로 응력 이력의 변화에 대해 고찰하면, 블록 샘플은 약간 과압밀된 것으로 나타나지만, 피스톤 샘플의 경우는 압밀진행중인 점토로 나타나는 것으로 보아 피스톤 샘플이 과압밀비를 과소 평가하는 경향이 있다. 이는 아마도 샘플링 방법에 의한 교란과 시료 추출에 의한 교란의 효과를 반영

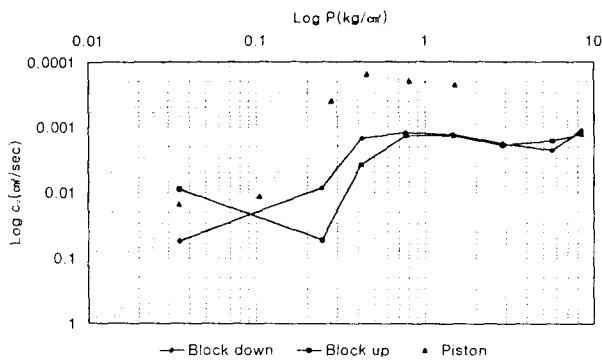


그림 5 샘플링 방법에 따른 압밀계수 변화

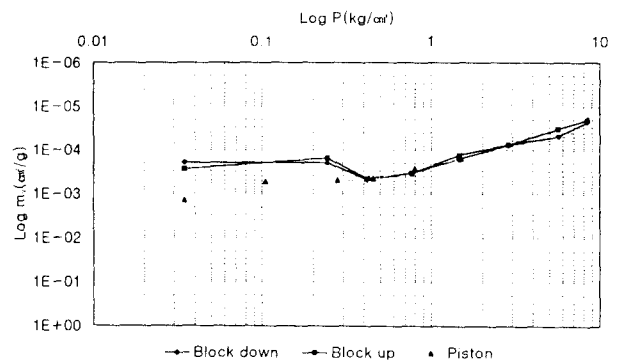


그림 6 체적변화계수와 상재하중의 관계

압밀계수는 블록 샘플이 피스톤 샘플보다 크게 나타났는데 이는 시료교란에 의해 유로가 길어져서 압밀 속도가 느려졌기 때문인 것으로 판단된다.(그림 5)

그리고 하중 증분에 대한 간극비의 감소를 나타내는 체적변화 계수는 재하하중이 선행압밀하중보다 적은 경우에는 피스톤 샘플이 크게 나타났으며, 선행압밀하중 이상에서는 같은 값을 보인다. 이는 산점 이론에서와 같이 현장유효응력보다 상당히 큰 하중하에서는 시료 교란의 효과가 압밀에 미치는 영향이 상당히 제거된다고 볼수 있는 결과라 하겠다. 그러나, 이는 시료 교란이 전단에 미치는 영향과는 또다른 차이가 발생되었다.(그림 6) 이러한 차이는 초기에 피스톤 샘플이 압밀이 크게 일어나다가 일정하중이 되면 압밀량이 안정되는 경향을 보이게 되는 현상이 일어난다고 생각되는데 이 이유는 아마도 초기 선행압밀하중 이하에서는 시료가 교란의 영향을 많이 받았지만 선행압밀하중을 초과하는 하중하에서는 시료교란에 의한 영향이 상당히 줄어드는 것을 의미한다고 볼수 있다.

3.5 전단특성 고찰

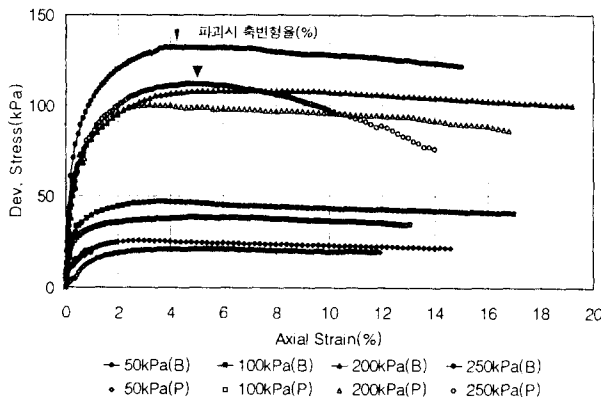


그림 7 압밀압에 따른 삼축압축시험 결과

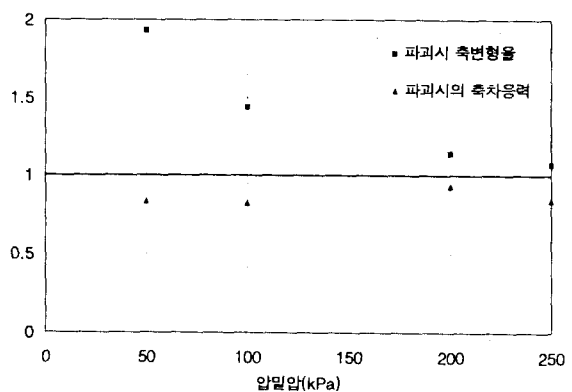
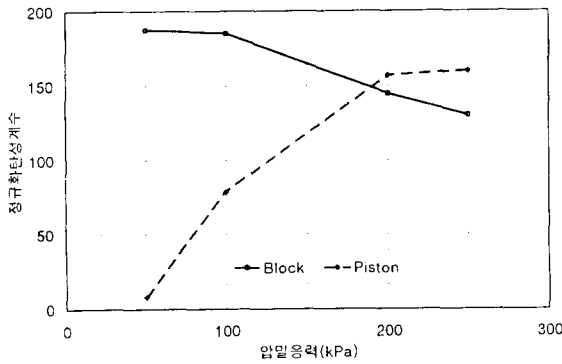


그림 8 파괴시의 축차응력과 축변형률

등방압밀 비배수 삼축압축시험을 실시한 응력과 변형률에 대한 관계는 그림 7과 같다. 여기서 보면, 각 시료에 대한 파괴시의 축차응력, $(\sigma_1 - \sigma_3)_b$ 은 블록 샘플이 항상 크게 산출되었으며, 이때의 축변형률, ϵ_b 은 반대의 경향이 나타났다. 블록 샘플과 피스톤 샘플 사이의 파괴시 축차응력과 축변형률의 비교는 블록 샘플의 값을 1로 보았을때의 상호관계를 그림 8에 나타내었다.

그림 8에서 보면 파괴시의 축차응력 $(\sigma_1 - \sigma_3)_b$ 은 블록 샘플보다 피스톤 샘플이 항상 적게 나타났으며, 감소경향은 압밀압과는 무관한 것으로 나타났다. 그리고 파괴시의 축변형률은 블록 샘플에 비해 피스톤 샘플이 상당히 크게 증가가 일어났다.



또한 그림 9에는 탄성계수비가 도시되어 있는데 여기서 보면, 탄성계수비는 블록 샘플이 피스톤 샘플보다 각 압밀압 변화에 대해 대부분 크게 나타났으며, 변화 폭도 상당히 작게 나타났지만, 피스톤 샘플은 분산이 발생되었다. 이 결과로 볼 때 등방압밀 비배수 삼축시험은 샘플링 방법에 따른 탄성계수의 변화를 규명하는 하나의 인자로 활용이 가능하다고 생각된다.

5. 결론

그림 9 탄성계수비

이상에서 점성토 시료에 대한 교란도와 토질 특성변화에 대한 연구결과에서 알수 있는 항목들로 아래 사항을 들수 있겠다.

1. 현장유효응력으로 압밀시의 체적변형율은 시료교란을 나타내는 중요인자로 작용한다. 본연구에서는 블록 샘플보다 피스톤 샘플의 체적변형율이 상당히 크게 나타나 시료 교란을 감지할수 있는 가장 신뢰성 있는 인자로 사료된다
2. 일정하중에 있어서 블록시료보다 피스톤시료의 간극비 감소와 곡선의 형태의 변화의 관찰을 통하여 압밀시험은 시료교란의 개략적인 판단에 이용될수 있다.
3. 응력이력의 향으로 표시한 과압밀비와 압밀계수, 체적변화계수의 비교에서 블록 샘플이 피스톤 샘플보다 더 크게 나타났고 이 방법도 시료 교란을 감지할수 있는 하나의 방법으로 제안될수 있다고 생각된다.
4. 재압축구간의 압축성 변화는 시료교란을 판정하는 인자로 이용하는데는 어려움이 있다고 사료된다.
5. 최대전단강도는 블록 샘플이 피스톤 샘플보다 항상 크게 나타나며, 또한 파괴시의 축변형율은 블록 샘플이 피스톤 샘플보다 적게 나타나는 것으로 보아 시료채취방법에 따라 시료의 응력-변형율 곡선의 변화가 수반됨을 알수 있었다.

참고 문헌

1. 이 영남, 김 주범, "연약지반(III)", 한국지반공학회지, 제 11권 제 4호, 1995, pp. 141-170
2. Jamiokowski, M. B., Ladd, C. C., Germaine, J. T., and Lancellotta, R.(1985). "Recent Developments in Laboratory and Field Testing," Theme Lecture No. 2, Proceedings of the XI International conference on Soil Mechanics and Foundation engineering, San Francisco, Calif., Vol. 2, pp. 887-892.
3. Lacasse, S., Berre, T., and Lefebvre, G., "Block sampling of sensitive clays," Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Calif., 1985, pp. 887-892
4. Ladd, C. C., and Foott, R., "New Design procedure for stability of soft clays," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 100, No. GT7, 1974, pp. 763-786
5. Okumura, T., "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, 1971, pp. 73-81.
6. Raymond, G. P., Townsend, D. L., and Lojkasek, M. J. (1971). "The effect of sampling on the undrained soil properties of a Leda Soil," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 8, No. 4, pp. 546-557.