

정규압밀 점성토의 교란에 따른 강성 변화

Disturbance Effects on the Stiffness of Normally Consolidated Clay

박 해 용¹ Park, Hae-Yong

신 현 영² Shin, Hyun-Young

오 명 학³ Oh, Myoung-Hak

조 완 제⁴ Cho, Wanjei

Abstract

Laboratory tests are generally used to determine the input parameters for the selected constitutive models controlling various stress and drainage conditions, but have disadvantages in that the tests are performed on the samples obtained from the bore hole which are prone to be disturbed by various factors such as the tube penetrations, sample preparations and storage. To overcome these disadvantages, it is necessary to understand the effect of disturbance on the stiffness of the sample, especially the normally consolidated clays which are generally considered as soft clays. Therefore, in this study triaxial tests are performed on the normally consolidated kaolinite to evaluate the sample disturbance effects on the stiffness and to determine the field representative input parameters. The stress path results show that the shear and coupling modulus degradation patterns with strain are affected seriously by the disturbance. However, the strengths of the normally consolidated kaolinite are little influenced by the disturbance.

요 지

실내시험은 다양한 응력조건과 배수조건의 모사가 가능하므로 상용 유한요소 해석프로그램의 입력변수 산정에 필수적인 요소가 되나 시료의 운송, 시료추출, 트리밍, 함수비 손실, 응력이완으로 인한 교란과 채취기 관입시의 교란으로 양질의 시료를 얻는데 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 교란에 따른 시료의 변화를 이해하고 이를 실내 시험 결과로부터 입력변수 산정에 적용할 수 있는 방법을 찾아내는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 정확한 입력정수의 산정이 필수적인 연약점성토의 교란에 대한 영향을 파악하고자 정규압밀 점성토의 교란에 따른 강도 및 강성의 변화를 삼축시험기를 이용한 응력경로시험을 통하여 파악하였다. 그 결과, 교란의 정도가 강도에 미치는 영향은 크지 않았으나, 전단강성계수와 커플링강성계수의 변형율에 따른 감소 경향에는 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Keywords : Clays, Disturbance, Stiffness, Stress path, Triaxial test

1. 서 론

도심지에서의 고층 구조물의 건설이 많아짐에 따라 정확한 지반의 거동을 예측할 필요성이 대두되고 있

다. 대부분의 지반 거동 예측은 유한요소 해석을 통해 이루어지고 있으며, 정확한 해석을 위해서는 흙의 실제 거동을 잘 모사할 수 있는 구성모델의 선택과 그 모델에 필요한 입력 정수들이 대상 지반을 적절히 대표할

1 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 석사 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environ. Eng, Dankook Univ.)

2 정회원, (주) 대우건설 토목연구팀 선임연구원 (Member, Researcher, Civil Research Team, Daewoo E&C.)

3 정회원, 한국해양연구원 연안개발연구본부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Coastal Eng. Research Dept., Korea Ocean Research & Development Institute)

4 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil and Environ. Eng, Dankook Univ., jei0421@dankook.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

수 있어야 한다.

이미 다양한 흙의 구성모델들이 제시되었고, 대상 구조물의 중요도와 위치, 지반의 균질성 등에 따라 구성모델을 선정하게 된다. 대부분의 상용 유한요소 해석프로그램에서 이들을 적용할 수 있도록 구성되어 있으나, 흙의 비탄성, 비선형성을 고려할 수 있는 구성모델들은 입력 변수들의 수가 많아지게 되며, 그 입력 변수의 정확성 및 지반 대표성이 전체 해석에 미치는 영향이 커지게 된다. 지반조사를 통해 이러한 구성모델의 입력변수들을 산정하게 되는데, 이는 주로 실내 및 현장 시험을 통해 이루어진다.

실내시험의 경우 시료의 운송, 시료추출, 트리밍, 함수비 손실, 응력이완으로 인한 교란과 채취기 관입시의 교란으로 인해 양질의 시료를 얻는데 한계가 있으나, 다양한 응력조건과 배수조건을 조절할 수 있으므로, 필요한 입력변수 산정에 필수적인 요소가 된다. 실내시험에서의 교란은 흙 구조의 파괴, 함수비, 간극비에 변화를 일으켜 강성, 강도, 압밀특성에 영향을 미치게 되므로 예상침하량과 실제 침하량에 차이가 발생되고, 예상치 못한 지반파괴 또는 비경제적인 설계 등의 문제가 야기된다. Santagata, M.C와 Germaine, J.T.(2002)은 교란이 발생하면 압축비와 비배수 강도가 감소하고, 재압축비와 파괴시 변형율이 증가하며, 선형압밀압이 감소됨을 밝혀냈다.

박성재 등(2002)과 정용우 등(2006)과 같은 기존의 연구들은 교란에 의한 강도 변화에 초점을 맞추어 연구를 수행하였으나, 실제적인 침하량 및 지반변형의 문제에 있어서는 강도와 더불어 강성 또한 중요한 변수이므로 본 연구에서는 정확한 지반변형 예측을 위한 실내시험의 신뢰성 있는 적용을 위해 교란이 강도 및 강성에 미치는 영향을 파악하였다. 이를 위하여 대형 시료성형기를 제작하여 응력이력이 일정한 정규압밀 점성토를 재성형 하였다. 제작된 시료를 통하여 시료채취과정 중 불가피한 교란으로 판단되는 응력이완에 의한 교란만이 고려된 완전시료(perfect sample)를 기준으로 하여 일반적으로 사용되는 튜브시료 채취기에 의해 발생하는 추가적인 축변형에 의한 교란을 고려한 이상시료(ideal sample)를 자동화 삼축시험기를 통해 응력경로 시험으로 모사하였다. 추가적인 축변형에 의한 교란 외의 다른 변인을 조절하기 위하여 원지반 시료의 상태부터 채취과정 그리고 실험실에서 현장을 모사하기 위한 압밀과정 및 전단과정의 전과정을 응력경로시험을 통하여 모사하였다.

이 과정에서 실내시험에서 현장상태를 모사하기 위하여 일반적으로 적용되는 K_0 값을 적용하여 완전시료와 이상시료를 이방압밀하여 그 거동을 비교하여 K_0 값의 현장 대표성을 확인하여 보았다. 지반구조물의 해석에서 일반적으로 입력되는 전단강성계수와 전단으로 인한 체적 변형에 대한 강성을 선정하기 위하여 평균 유효주응력을 일정하게 유지하면서 축차응력을 단계별로 증가시키는 응력경로 시험을 수행하였다. 이러한 응력경로 시험을 통하여 두 종류의 채취과정에 의한 시료 상태를 잔류유효응력으로 시료의 질적 평가를 실시하였고 완전시료와 이상시료의 전단강성계수(G)와 축차응력이 체적 변형율에 미치는 영향을 나타내는 커플링강성계수(J_v)를 산정하여 교란에 의한 영향을 파악하였다.

2. 문헌고찰

2.1 시료교란

시료교란이란 현장에서의 샘플링과 시료취급과정에서 시료의 흙입자 구조에 미치는 모든 영향을 말한다(Lee 등, 1998). 교란의 원인에 대해서는 연구자 및 관련 학회, 관공서에 따라 분류기준 및 항목에 있어 다소 차이가 있으나 세부항목과 그 내용에 있어서 대부분 유사한 내용을 담고 있다. Jamiołkowski 등(1985)은 표 1과 같이 시료교란의 원인을 응력이완, 시료채취과정, 운반과정에서 발생하는 시료 교란 원인들을 분류하고 각 항목에 대한 문제점 및 대책에 대해 기술하였다. 이외에도 시료교란 원인을 튜브 채취기 관입시 작업 단계별로 분류하거나, 시료채취 전, 채취 중 및 채취후로 분류하기도 하며 특수한 경우로서 심부의 해석점토에서 용해된 가스의 배출, 해머채취기에 의한 충격, 이동 및 화학적·생물학적·생물화학적 활동, 지반의 온도 변화 및 물리적인 변화 등으로 분류하기도 한다. 튜브 채취기 관입시 일어나는 일반적인 시료의 교란 요소를 살펴보면 다음과 같다.

- ① 시추작업 중 시추가 진행되는 전반에서의 흙 구조의 변화
- ② 채취관의 관입 및 지상으로의 추출
- ③ 튜브내의 함수비의 재분배
- ④ 튜브로부터 시료 추출
- ⑤ 시료추출 후에 발생하는 간극수압의 변화 및 건조

표 1. 시료 교란의 원인(Jamiolkowski 등, 1985)

항 목	원 인	문제점 및 대책
응력이완	<ul style="list-style-type: none"> • 천공에 의한 응력변화 • 원위치 전단응력의 제거 • 구속응력의 제거 	<ul style="list-style-type: none"> • 이수를 사용하지 않아 연직응력의 과도한 감소와 큰 인장변형 유발 • 큰 천공압력이 과잉 압축변형 유발 • 결과로 발생하는 전단 변형율은 일반적으로 작음 • 조립토의 존재로 인한 부의 간극수압의 손실 • 기포나 용해된 가스의 팽창
시료채취 과정	<ul style="list-style-type: none"> • 샘플러의 기하형태 : 길이비, 면적비, 여유비 • 샘플러 추진방법 • 시료 회수방법 	<ul style="list-style-type: none"> • 회수율 저조, 시료벽면의 부착력 증가, 내부벽면을 따라 교란된 영역의 증대 • 타격법보다 연속적인 압입방법이 좋음 • 시료의 바닥에서 suction효과를 제거하기 위해 진공 제거필요
운반과정	<ul style="list-style-type: none"> • 운반 • 저장 • 시료추출과 성형 등 	<ul style="list-style-type: none"> • 박테리아 성장을 최소화하기 위해 현장 온도로 저장 • 샘플링 튜브와의 화학적 반응을 피할 것 • 저장 시간이 장기화하면 간극수의 이동증가 • 추가적인 변형이 없도록 주의

⑥ 실내시험을 위한 시료준비 및 트리밍

위에서 언급된 교란 요소들 중, 시추과정에서의 응력이완과 채취관 관입에 의한 영향이 가장 큰 것으로 알려져 있으므로, 본 연구에서는 시료 채취과정 중 불가피한 교란으로 분류되는 응력이완에 의한 교란과 일반적으로 사용하는 채취기 관입 시 발생하는 축변형에 의한 교란에 중점을 두어 응력경로 시험을 수행하였다. 또한, 원지반 상태부터 채취 및 압밀, 전단 과정이 응력경로시험으로 모사하기 때문에 시료 추출 후에 발생하는 간극수압의 변화 및 건조, 시료 준비 및 트리밍 과정에서 발생하는 교란은 고려하지 않았다.

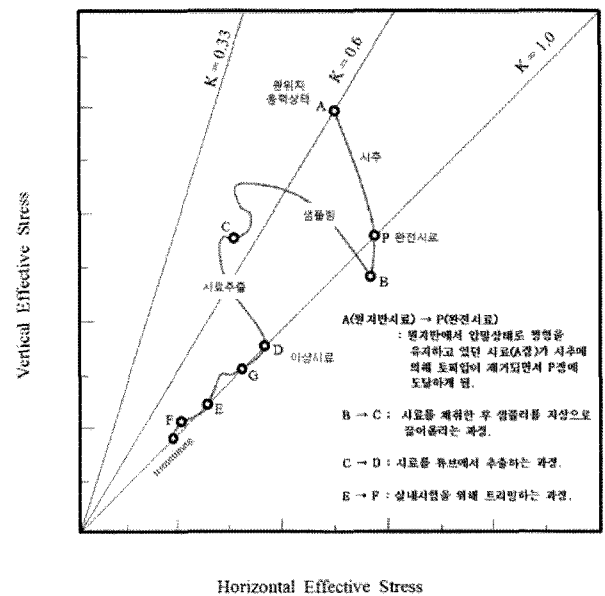


그림 1. 시료 채취시와 채취후의 응력변화(Ladd와 Lambe, 1964)

2.2 완전시료(Perfect sample)

그림 1은 Ladd와 Lambe(1964)에 의하여 가정된 시료 채취 시에서부터 시험 직전의 응력경로를 나타낸다. 점 A는 현장상태의 응력으로 전혀 교란의 영향을 받지 않은 상태를 나타내며, 일반적으로 원지반 상태(Original condition at in-situ)라고 한다. 점 P는 전혀 교란되지 않았으나 시료채취에 의하여 현장응력이 이완된 상태이며, 이러한 시료를 완전시료라고 한다. 점 A에서 점 B로 가는 과정은 샘플러를 관입하기 위해 천공시에 발생한 응력변화이고, 점 B에서 점 C로 가는 과정은 시료를 채취한 후에 채취기를 지상으로 끌어올리는 과정에서의 응력변화를 나타내며, 점 C에서 점 D로의 이동은 시료를 샘플러에서 추출하는 과정에서 발생하는 응력변화이다. 점 D에서 점 E는 함수비 재분배와 공동현상에 의한 변화이고, 점 E에서 점 F로의 변화는 실내시험을 하기 위한 트리밍 작업과정에서의 응력변화를 나타낸다. 그리고 점 F는 전단직전에 있는 시료상태로써 실제시료

(actual sample)라고 한다.

실내시험에서 불교란 시료를 얻는 것은 불가능하기 때문에 채취기 관입에 의한 응력이완만을 고려한 완전시료를 원지반에 가까운 불교란 시료로 간주할 수 있다. 실내 시험에서 완전시료를 모사한 Perfect sampling approach 이론은 Ladd와 Lambe(1964)이 제안한 것으로 Block sampling에 의해 채취된 시료로 원지반 상태와 동일하게 교란이 없으나 지중에서 지상으로의 채취과정에서 발생하는 응력이완으로 인하여 시료자체의 잔류유효응력만 존재하는 상태이다. 여기서 잔류유효응력(Residual effective stress)은 시료 채취후, 운반, 보관, 트리밍 이후에 시료에 잔류하고 있는 유효응력을 뜻한다(Hight 2004; Ladd와 Lambe 1964; Skempton과 Sowa 1963). 잔류유효응력은 완전시료의 개념에 그 뿌리를 둔 개념으로 이론적으로 산정한 응력이완에 의한 교란만을 경험한 완

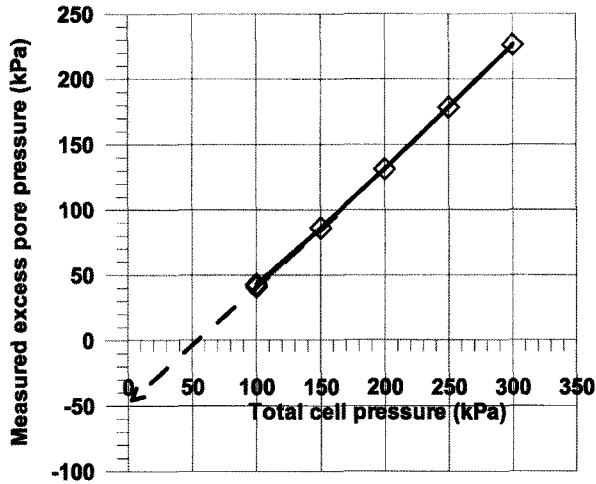


그림 2. 선형회귀분석을 통한 시료의 잔류유효응력 산정

전시료의 잔류유효응력을 기준으로 실제 채취된 시료의 잔류유효응력을 비교하여 응력이완 외의 추가적인 교란에 의한 잔류유효응력 감소로써 교란된 정도를 정성적으로 판단할 수 있다(Baldi와 Hight 1988; Ladd와 Lambe 1964). 시료의 잔류유효응력은 삼축시험의 배압 포화과정 이전에 비배수 상태에서 등방압을 증가시켜 발생하는 간극수압의 증가를 통해 측정할 수 있다(Cho 등, 2007; Ladd와 Lambe 1964; Skempton과 Sowa 1963). 일반적으로, 그림 2에서 보듯이 300kPa까지 50kPa씩 구속압을 증가시키면서 간극수압을 측정한다. 선형회귀분석을 통하여 구속압이 0일 때의 음의 간극수압을 추정할 수 있는데, 이를 시료의 잔류유효응력이라 한다.

2.3 이상시료(Ideal sample)

이상 시료(Ideal sample)는 Baligh(1987)가 제안한 시료의 상태로 그림 1에서 표시된 D점의 상태를 가진 시료를 뜻한다. 이상 시료는 응력이완에 의한 교란만을 경험한 완전 시료(Perfect sample)와는 달리 튜브 샘플러의 채취 과정에서 발생할 수 있는 채취관의 관입과 채취된 시료의 추출과정에서 발생하는 교란의 영향을 포함하고 있다. 단, 여기서 채취관에 시료가 관입될 때와 채취관에서 분리되었을 때 전단응력이 발생하여 교란이 발생하는데, 이상시료의 경우 채취관의 관입 및 시료의 추출에서 발생하는 축변형에 의한 교란만을 고려하고 있다.

Baligh(1987)는 채취기 내로 시료가 관입될 때 발생하는 변형을 연구하여 그림 3과 같은 관계를 밝혔다. 변형의 크기는 직경이 B 이고 채취기의 두께가 t 인 채취기의 두께비(B/t)에 따라 결정되었고, 시료가 채취기에 접근함에 따라 즉, z (깊이) $\leq -0.35B$ (폭) 구간에서 압축변형이 발생되며, 채취기 내로 들어감에 따라 즉, $|z| < 0.35B$ 에서는 다시 인장변형이 발생하였다가 그 이후에는 다시 감소하는 것으로 나타났다. 다음 식 (1)은 Baligh(1987)가 튜브 채취기가 관입됨에 따라 발생하는 축변형을 두께비의 함수로 제안한 식이고, 식 (2)는 채취기 관입에 의한 최대축변형을 두께비에 따른 근사치로 제안한 식이다.

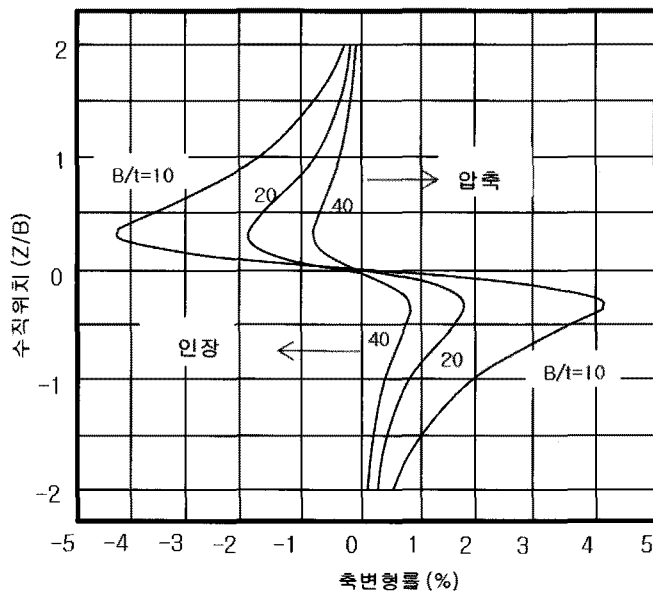


그림 3. 시료가 튜브내로 관입하기 전후의 변형(Baligh, 1987)

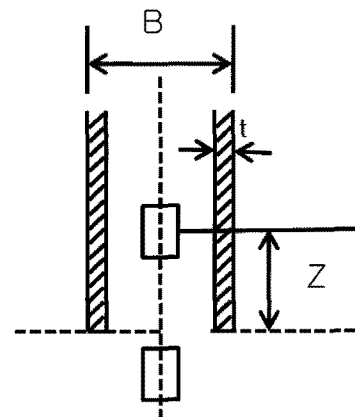


표 2. 일반적으로 사용되는 채취기의 두께비와 채취시 발생하는 최대변형률

채취기	내경(mm)	길이	두께(mm)	피스톤	$ \epsilon_{\max} $ (%)
Shelby tube	72	610	1.65	무	0.88
수압식	73.8	850	1.0	유	0.52
익스텐션로드식	75	1000	1.5	유	0.77

표 3. EPK 카울리나이트의 기본물성과 압밀특성

I_L (%)	I_P	G_s	# 200번체 통과량	흙의 분류	C_c	C_r	p'_c (kPa)
61.03	31.36	2.60	99.8%	CH	0.602	0.062	120

$$\epsilon_{zz} = -\ln\left(1 + \frac{2t}{B} \frac{z/B}{[1+4(z/B)^2]^{3/2}}\right) \quad (1)$$

$$|\epsilon_{\max}| \approx \left(\frac{2}{3^{3/2}}\right) \frac{t}{B} = 0.385 \frac{t}{B} \quad (2)$$

식 (2)를 통하여 B/t 가 각각 10, 20, 40인 경우에 대해 최대 축변형 $|\epsilon_{\max}|$ 는 각각 3.85, 1.93, 0.96%가 된다. 일반적으로 사용되는 채취기의 두께비와 Baligh(1987)가 제안한 식 (2)에 의해 산정된 최대 축변형률을 나타낸 표 2는 세계적으로 많이 사용되는 샘플러에 대한 기하형상을 나타낸 것이다.

3. 시험계획

3.1 적용시료

본 연구에서 사용된 EPK 카울리나이트 시료는 액성한계 이상의 함수비를 가지는 슬러리 상태의 카울리나이트를 K_0 대형 시료 성형기내에서 150kPa의 연직응력으로 압밀 재성형하여 균질하고 일정한 응력이력을 갖는 정규압밀 점토시료를 구현하였다. 액성한계 (LL), 소성지수 (I_p), 비중 (G_s), 200번 체 통과량 및 대상 시료의 통일분류법상의 분류와 표준압밀시험 결과에 의한 압축지수 (C_c), 재압축지수 (C_r) 그리고 선행압밀하중 (p'_c) 은 표 3에 제시하였다. 표준압밀시험을 통해 평가된 재성형 카울리나이트 시료의 선행압밀하중은 성형 시 가해진 연직압밀압력보다 작은 120kPa정도로 나타났는데, 이는 피스톤과 벽체의 마찰에 의한 것으로 사료된다.

3.2 시험장치

본 연구에서 사용된 시험기는 Chan, C.K(1981)이 개발한 자동화 삼축시험기(그림 4)로서 축압, 셀압, 그리고 배

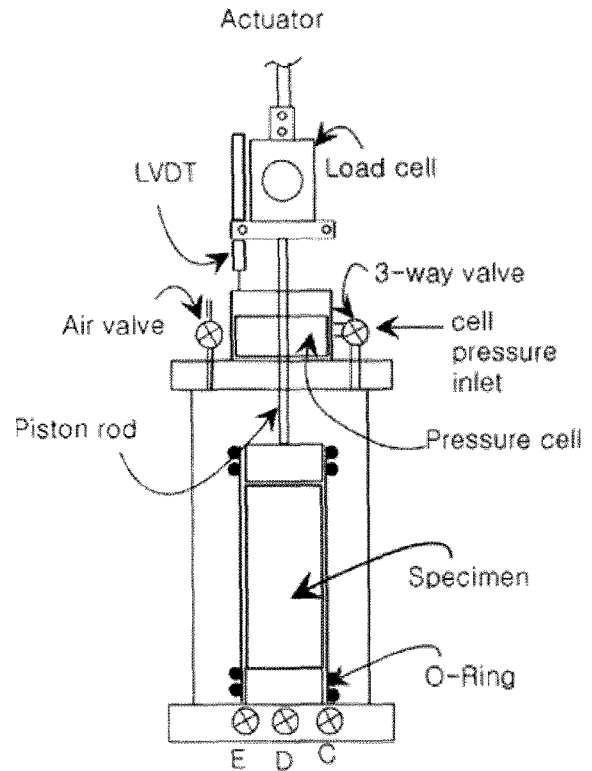


그림 4. 자동화 삼축시험기

압을 컴퓨터로 제어가 가능하다. 측정장치로는 축응력과 연직변위를 측정하는 Load Cell, LVDT, 그리고 구속응력, 유효응력, 체적변화를 측정하는 3개의 DP-Transducer 와 여기에서 측정된 값을 디지털 신호로 변환하는 Signal Conditioner가 있다.

3.3 응력경로 시험

본 연구에서 적용된 응력경로는 재성형된 시료를 사용하여 시료의 원지반 상태로 만드는 1차 이방 압밀 과정, 블록 샘플링으로 채취하는 완전 시료와 튜브 채취기로 채취하는 이상 시료의 채취과정을 모사하기 위한 비배수 상태에서의 제하 과정, 그리고 이렇게 채취된 시료

로써 실내 시험을 수행할 시 현장을 모사하기 위한 2차 이방 압밀 과정, 그리고 강성의 변화를 살펴보기 위한 전단과정으로 구성된다. 그림 5는 본 연구에서 적용된 완전시료와 이상시료의 응력경로 시험을 나타낸다.

자연지반의 초기상태를 모사하기 위한 K_0 압밀에서는 대형시료 성형기에 재성형된 시료의 추출, 함수비 재분배, 트리밍 및 삼축시험기에서의 시료 거치과정에서 발생할 수 있는 교란의 영향을 배제하기 위하여 압밀시험결과를 토대로 처녀압축곡선에서 선형성이 명확하게 나타나는 지점인 선형압밀하중의 1.5배까지 압밀하였다. 일관적인 응력 경로 시험을 위하여, 경험식을 통하여 산정된 K_0 값을 적용하여 이방압밀을 실시하였다. 여기서, EPK 카올리나이트의 K_0 값은 소성지수에 따른 경험식(식 (3))을 적용하였다(Massarsch 1979). 재성형 시료의 소성지수 값에 따른 K_0 값은 0.56으로 산정되었다.

$$K_0 = 0.44 + 0.42(\Pi/100) \quad (3)$$

이어지는 제하과정에서 완전시료의 경우, 응력이완만 발생하는 블록 샘플링을 모사하기 위하여 현장의 K_0 상태를 모사한 응력상태에서 등방상태까지 제하하였다. 이상시료의 경우, 일반적으로 널리 사용되는 Shelby tube sampler를 대상으로 하여 식 (2)에 따른 채취에 의해 발생하는 최대 축변형(ϵ_{max})인 0.88%를 적용하였다. 비배수 상태로 앞서 산정한 최대 축변형까지 압축-인장력을 재하하였고, 그 후에 튜브에서 채취 시 발생하는 응력이완을 모사하기 위하여 등방상태로 제하하였다. 이 후 완전시료와 이상시료, 두 시료를 산정된 K_0 상태로 이방압밀 하였고 전단하였다.

축대칭 조건에서, 재료의 거동은 식 (4)와 같이 전단 변형, 체적 변형, 이 둘의 상호 작용(cross-coupling)으로

나타날 수 있다. 일반적으로 등방의 탄성 재료인 경우 전단 변형과 체적변형에 대한 상호작용은 무시하여 J_v 와 J_s 가 무한대로 가정하고 전단강성계수와 체적변형계수를 산정할 수 있다. 지반 재료의 경우, 일반적으로 계산의 편리성으로 인하여 종종 등방의 선형탄성으로 가정하여 전단 변형과 체적 변형에 대한 상호작용이 없다고 가정하여 전단강성계수와 체적변형계수를 산정하고 있다. 본 연구에서는 평균주응력(p')을 일정하게 유지하고 축차응력(q)을 증가시키면서 전단시험을 수행하여, 식 (5)과 같이 전단강성계수(G)와 축차응력에 대한 체적 변형율의 강성인 커플링강성계수(J_v)를 산정하였고, 완전시료와 이상시료의 거동을 비교하였다.

$$\begin{Bmatrix} \Delta\epsilon_{vol} \\ \Delta\epsilon_{sh} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 1/K & 1/J_v \\ 1/J_s & 1/3G \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta p' \\ \Delta q \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } p' &= (\sigma'_a + 2\sigma'_r)/3; q = \sigma'_a - \sigma'_r \\ \epsilon_{sh} &= \frac{2}{3}(e_a - \epsilon_r); \epsilon_{vol} = \frac{1}{3}(e_a + 2\epsilon_r) \end{aligned}$$

σ'_a, ϵ_a 는 축방향 유효응력과 변형율, σ'_r, ϵ_r 는 방사방향 유효응력과 변형율 그리고 $\epsilon_{sh}, \epsilon_{vol}$ 는 전단 변형율과 체적 변형율을 나타낸다.

$$G = \frac{\Delta q}{3\Delta\epsilon_{sh}}; J_v = \frac{\Delta q}{\Delta\epsilon_{vol}} \quad (5)$$

4. 시험결과

4.1 잔류유효응력

완전시료와 이상시료의 채취과정으로 모사하기 이전, 추정된 K_0 값을 적용하여 압밀시험을 통하여 추정된 선

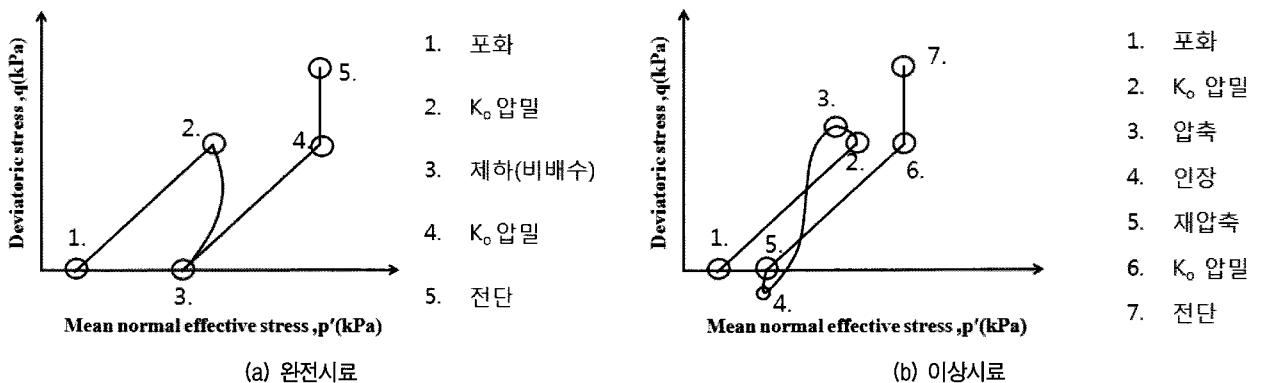
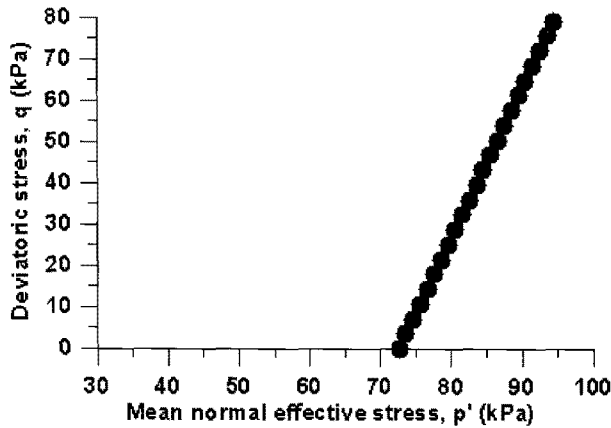
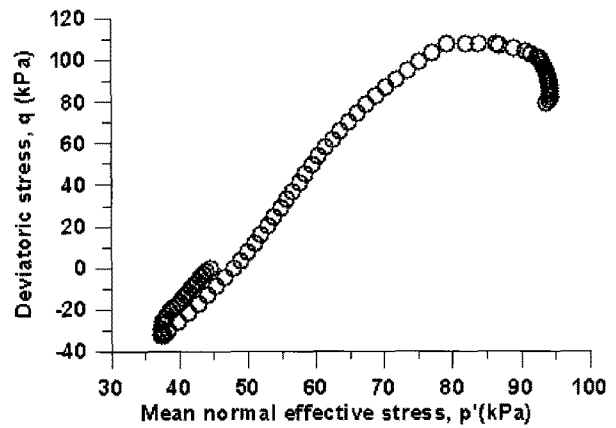


그림 5. 응력경로 시험 과정



(a) 완전시료



(b) 이상시료

그림 6. 제하 시 유효응력 경로

행압밀압의 1.5배의 연직유효응력까지 1차 이방압밀을 수행하였고, 이후 완전시료와 이상시료로 나뉘는 채취 과정을 묘사한 응력경로를 거치게 된다.

일반적으로 시료의 잔류유효응력은 2.2절에서 설명하였듯이 구속압을 증가시키면서 간극수압을 측정하고 이를 선형회귀분석을 통하여 구속압이 0 일 때의 음의 간극수압으로 결정되게 된다. 하지만 본 연구에서는 완전시료와 이상시료에 적용된 응력경로 상에서 채취를 묘사한 제하과정시 최종 유효주응력으로 잔류유효응력이 결정되게 된다. 그림 6은 EPK 카올리나이트 점토를 지중과 동일한 상태로 재현하기 위한 1차 이방압밀 후, 시료채취 과정을 거친 등방상태에서의 응력경로를 나타내고 있다.

완전시료의 경우 시료 채취에 의한 상부응력을 제거하는 과정에 의한 응력이완만을 경험하여 최종적으로 축차응력이 0인 등방상태에 이르게 되며 잔류유효응력은 73kPa로 나타났다. 이는 원지반 응력상태인 평균 유효주응력 95kPa에서 응력이완에 의해 22kPa 감소한 것으로 나타났다. 이상시료의 경우, 시료채취기의 관입에 의한 시료의 압축 및 인장으로 인한 축변형에 의해 비선형적인 응력경로를 보이며, 최종적으로 채취기에서 시료를 추출한 상태인 등방상태에 이르러서는 잔류유효응력이 44kPa로 나타났다. 이는 응력이완과 더불어 채취기의 관입 및 시료 추출에 의한 잔류유효응력의 추가적인 감소가 나타난 것으로 판단된다.

일반적으로 알려진 블록 샘플의 잔류유효응력은 원지반 연직유효응력의 30~40% 정도로 나타나며, Shelby 튜브 채취기로 채취한 시료의 경우 10~20%를 나타낸다(Cho 등 2007). 본 연구에서 얻어진 완전시료와 이상

시료의 잔류유효응력은 각각 원지반 연직유효응력의 41%와 24%로 문헌에서 알려진 값의 상한값과 유사한 결과를 나타내고 있다. 이는 응력경로시험을 통하여 시료채취과정을 묘사하였기 때문에 실제 시료채취에서 발생할 수 있는 추가적인 교란에 대한 영향을 포함하고 있지 않기 때문인 것으로 판단된다.

4.2 완전시료와 이상시료의 2차 이방압밀 결과

완전시료와 이상시료의 현장 시료채취를 묘사한 후, 강도정수 산정을 위한 K_0 압밀 과정의 응력경로를 묘사하였다. Massarch(1979)의 경험식에 의해 산정된 K_0 값을 적용하여 이방압밀을 실시하였다. 앞 절에서 언급한 바와 같이 완전시료와 이상시료의 잔류유효응력 차이로 인하여 그림 7에서 보이듯이, 완전시료와 이상시료에서 잔류유효응력에는 차이를 보이고 있으나, 동일한 K_0 값을 적용하여 두 시료의 응력경로 기울기가 같게

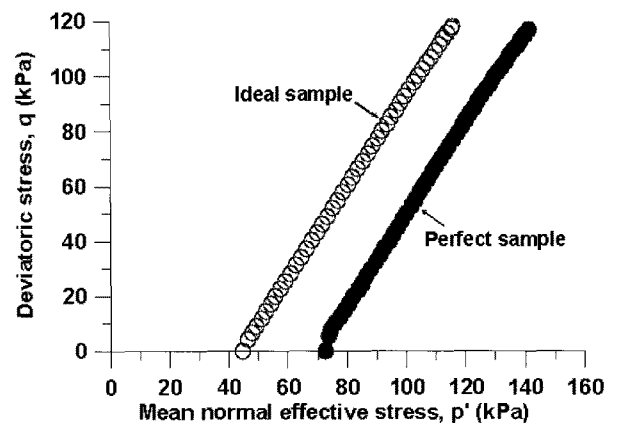
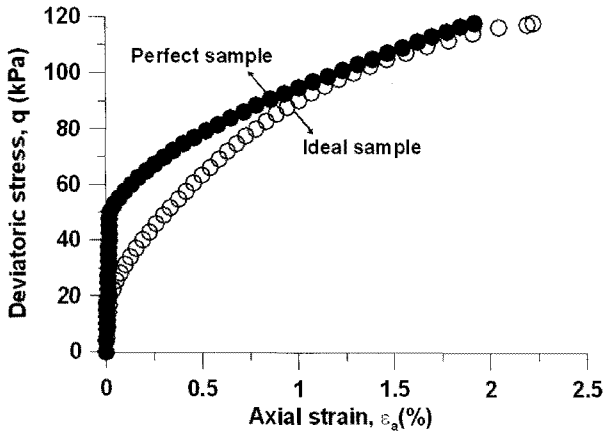
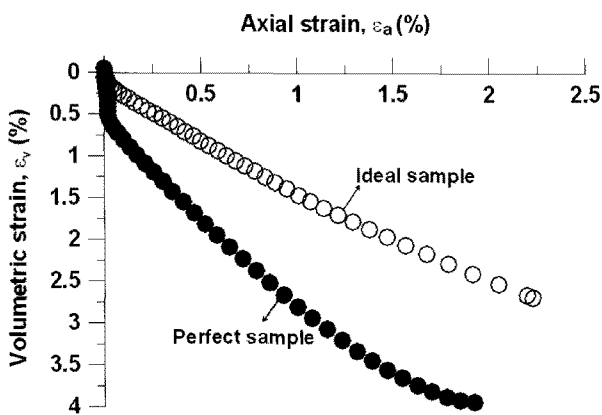


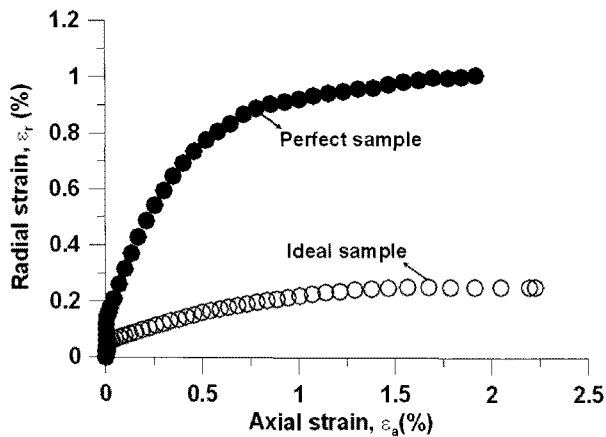
그림 7. 2차 이방압밀 과정의 완전시료와 이상시료의 유효응력경로



(a) 응력-축변형을 곡선



(b) 응력-체적 변형을 곡선



(c) 축변형을-방사방향 변형을 곡선

그림 8. 2차 이방압밀 과정의 응력-변형을 곡선

나타났다.

그림 8은 산정된 K_0 값을 적용한 이방압밀 과정의 응력-변형율과 응력-체적 변형율의 관계를 나타내고 있으며, 표 4는 2차 이방압밀 결과를 나타낸 것이다. 그림 8(a)를 보면 초기 축변형율 0.02%~1%에서는 축차응력이 거의 동일하나 그 이후부터 이상시료의 축변형이 점차 증가 되는 것이 보여 이상시료가 완전시료에 비해 연약한 것으로

표 4. K_0 압밀 결과 비교

	완전시료	이상시료
평균 주응력, P' (kPa)	142.85	115.94
축차응력, q (kPa)	118	118
축 변형율, ϵ_a (%)	1.92	2.22
체적 변형율, ϵ_{vol} (%)	3.93	2.68
방사방향 변형율, ϵ_r (%)	1.01	0.25

로 나타나고 있다. 하지만 그림 8(b)와 표 4의 이방압밀 과정에서 발생한 체적변형을 살펴보면, 완전시료의 체적 변형이 더 크게 발생하였는데, 이는 Massarch(1979)의 경험식에 의해 산정된 K_0 값이 완전시료의 K_0 값을 과소 평가하고 있는 것으로 판단된다. 그림 8(c)의 이방압밀 과정에서 발생된 방사방향 변형율을 살펴보면 이상시료의 경우 방사방향 변형율이 0.2% 정도로 Massarch(1979)의 경험식에 의한 K_0 값이 적절한 것으로 판단되나, 완전시료의 경우 방사방향 변형율이 1%까지 발생한 것으로 보아 K_0 값을 과소평가하고 있는 것으로 나타났다. 이는 대부분의 K_0 값에 대한 실내시험 결과들이 튜브 샘플러로 채취한 시료의 시험 결과에 의한 것들로서, 블록시료에 대한 K_0 값 산정시 과소평가할 수 있음을 나타내고 있다.

4.3 전단 시험 결과

실내시험 상에서의 현장응력 상태를 구현하기 위한 2차 이방압밀과정을 종료한 후, 완전시료와 이상시료에 대해 평균 유효주응력(p')을 일정하게 유지하고 축차응력(q)을 증가시키면서 전단시험을 수행하여, 전단강성계수(G)와 축차응력에 대한 체적 변형율의 강성인 커플링강성계수(J_r)를 산정하였다.

강성 비교에 앞서 두 시료의 강도를 평가하기 위해 응력-변형율 곡선(그림 9(a))을 비교하였다. 완전시료의 축차응력이 높게 평가되지만 압밀완료시의 평균 유효주응력이 다르기 때문에 그림 9(b)의 유효응력경로를 통한 파괴포락선을 산정하여 강도를 평가하였다. 완전시료의 경우 $K_f = 1.29$, 이상시료의 경우 $K_f = 1.23$ 으로 유사한 결과를 나타내고 있어, Shelby tube sampler로 채취된 이상시료의 경우, 완전시료와 비교하여 채취과정에서 발생하는 축변형에 의한 교란이 강도에 미치는 영향은 적은 것으로 판단된다.

시료채취과정에서의 채취기 관입에 의한 축변형으로

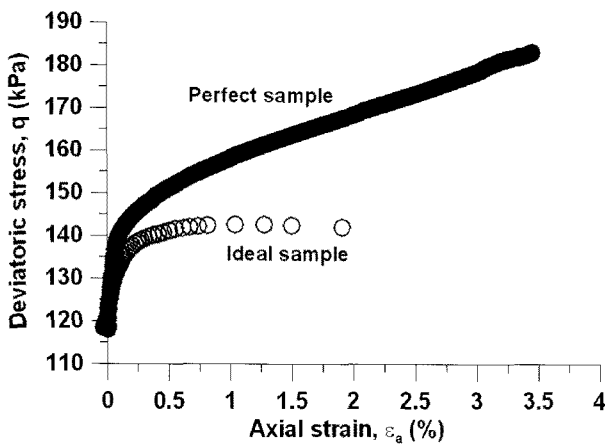
인한 교란의 영향이 강성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 이상시료와 완전시료의 전단 변형률-축차응력, 체적 변형률-축차응력을 그림 10에 도시하였다. 그림 10(a)의 전단 변형률-축차응력 곡선에서 이상시료의 경우 약 0.7%의 전단 변형률이 발생하였을 때 최대 축차응력을 나타내었으며, 완전시료의 경우는 이보다 큰 2.7%의 전단 변형률에서 최대 축차응력을 나타내었다. 채취과정에서 축변형에 의한 교란을 고려한 이상시료의 경우, 취성 거동을 보였으나 완전시료의 경우는 변형을 경화현상이 나타남을 알 수 있다. 이는 축변형에 의한 교란으로 인하여 이상시료의 경우 완전시료보다 축방향 응력에 대한 거동이 달라졌음을 의미한다.

또한 그림 10(b)의 축차응력-체적 변형률의 경우, 최대 축차응력에서 이상시료의 경우 0.3%의 체적 변형률이 발생하였으며, 완전시료의 경우 2.1%의 체적 변형률이 발

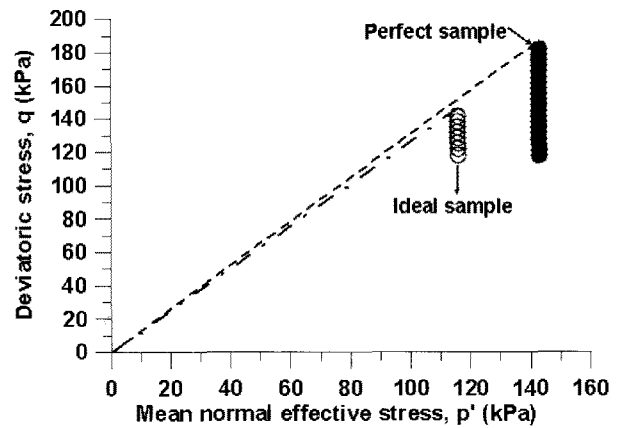
생하였다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 완전시료의 2차 이방압밀 과정에서 발생한 방사방향 변형이 이상시료의 방사방향 변형보다 크게 발생하여 축방향 응력에 의한 방사방향 변형의 강성이 약화되었기 때문으로 판단된다.

완전시료와 이상시료의 변형률 증가에 따른 전단강성계수 및 축차응력에 따른 체적 변형을 나타낸 커플링 강성계수의 감쇠곡선을 그림 11에 도시하였다. 본 연구에서 사용된 삼축시험기의 정확도에 따라 전단 변형률 최소 0.04%, 체적 변형률 최소 0.05%부터 강성 감쇠곡선을 도시하였다. 또한 LVDT와 로드셀과 같은 계측기들의 노이즈가 반대수 평면의 미소변형 구간에서 극대화되어 전체적인 경향을 파악하기 힘들기 때문에 응력-변형률 관계를 구간을 나누어 3차 및 4차 함수인 추세선으로 나타난 데이터를 토대로 강성을 도시하였다.

그림 11(a)에 도시된 전단강성계수 감쇠곡선의 경우,

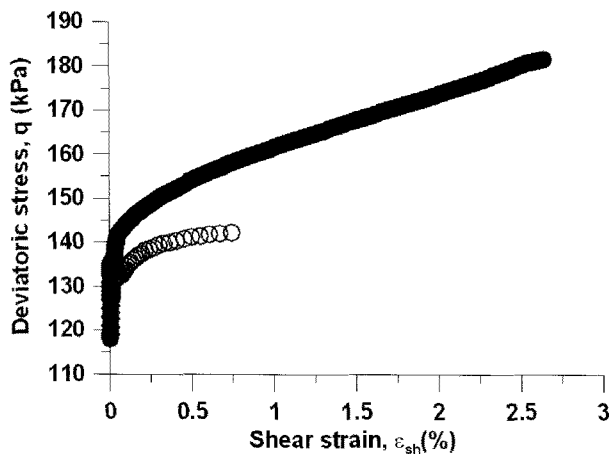


(a) 응력-변형률 곡선

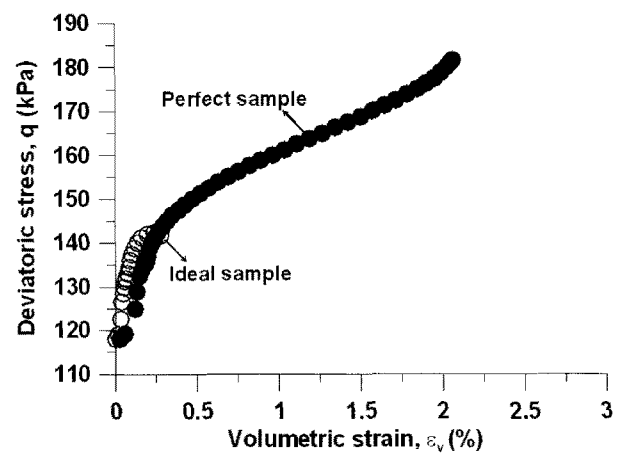


(b) 유효응력 경로

그림 9. 완전시료와 이상시료의 강도 비교

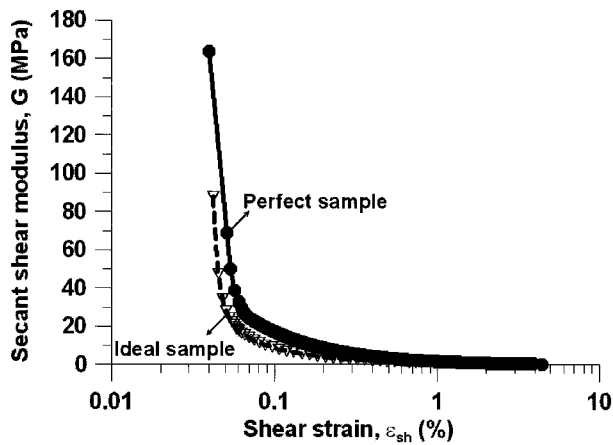


(a) 축차응력-전단 변형률 곡선

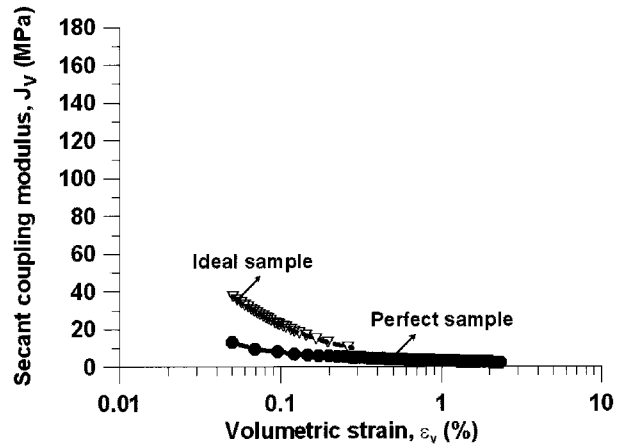


(b) 축차응력-체적 변형률 곡선

그림 10. 완전시료와 이상시료의 응력 변형률 곡선



(a) 전단강성계수



(b) 커플링강성계수

그림 11. 완전시료와 이상시료의 강성 비교

완전시료의 경우 최대 전단강성계수가 164MPa, 이상시료의 경우 88MPa로 되어 약 1/2정도 감소된 것을 확인할 수 있고 전단변형율의 증가에 따라 이러한 차이는 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이상시료는 0.7%의 전단변형율에서 그리고 완전시료는 2.7%의 전단변형율에서 파괴가 일어났으며 전단이 진행됨에 따라 교란의 영향에 의한 강성차이는 감소하는 것으로 나타났다.

한편 체적 변형율의 영향인자인 커플링강성계수(J_v)의 감소곡선이 도시된 그림 11(b)에서는 완전시료의 최대 커플링강성계수는 10MPa, 이상시료의 경우 46MPa로 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 2차 이방압 밀시 완전시료의 경우 과소평가된 K_0 값으로 인한 과도한 방사방향 변형으로 인한 교란으로 인하여 이상시료보다 체적 변형이 더 크게 일어났기 때문으로 판단된다.

또한 흥미로운 것은 본 연구에서 계측된 변형율 범위에서 축차응력에 의한 체적 변형의 커플링강성계수의 크기가 전단강성계수의 크기와 큰 차이가 없으므로, 이는 종종 지반재료가 등방탄성으로 가정되어 커플링강성계수를 무시하여 해석에 적용되는 것이 문제가 있다는 것을 의미한다. 더 나은 정밀도의 계측기기를 설치한 삼축시험기를 사용하여 미소변형에서의 전단 변형, 체적 변형 그리고 서로 다른 전단 변형과 체적 변형의 커플링강성계수를 산정·비교하는 추후 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론 및 향후 연구 계획

본 연구에서는 상용프로그램의 발달로 입력물성치의

중요성이 대두되고, 다양한 조건에서의 지반상태를 파악하기 위해 실내시험의 중요성이 인식되었지만 응력이완, 시료채취과정, 운반과정에 따른 교란이 발생되어 자연지반의 응력상태와는 상이한 결과를 가져온다. 이 중 일반적으로 많이 사용되는 채취기 관입 시 발생하는 축변형 교란에 따른 영향을 살펴보고자 카울리나이트 점토를 이용하여 응력이력이 일정하고 균일한 정규압밀 점성토를 얻기 위해 대형시료 성형기를 통하여 원지반상태의 시료를 성형하였고, 교란에 따른 강성의 변화를 파악하기 위해 자동화 삼축시험기를 이용하여 응력경로 시험을 실시하였다. 응력이완이 고려된 완전시료와 축변형 발생 후 응력이완된 이상시료의 비교·평가한 결과는 다음과 같다.

- (1) 자동화 삼축시험을 통해 지중에서 지상으로 배출 시 K_0 상태에서 등방상태로의 변화를 모사하였을 때, 두 시료에 남아있는 잔류응력을 비교한 결과 채취기 관입에 의한 축변형이 발생된 이상시료가 완전시료에 비하여 현저히 감소된 것으로 나타나 잔류유효응력으로 교란의 정도를 판단하는 기존의 문헌과 일치하는 결과를 보였다.
- (2) 소성지수를 적용하여 산정한 K_0 값을 적용하여 이방압밀한 결과 이상시료에서는 K_0 상태를 유지하고 있었으나, 완전시료에서 방사 방향으로의 변형을 제어하지 못하는 것으로 나타나, 현장지반의 K_0 값을 과소평가하는 것으로 나타났다.
- (3) 강도를 평가하기 위해 유효응력경로에서 파괴포락선으로 확인하여 본 결과, 완전시료의 경우 $K_{f1} = 1.29$,

참 고 문 헌

- 이상시료는 $K_{f2} = 1.23$ 으로 큰 차이를 보이지 않아, 채취기 관입에 의한 축변형이 시료의 강도 평가에 미치는 영향은 작은 것으로 나타났다.
- (4) 전단강성계수(G)와 커플링강성계수(J_v)를 통해 평가한 결과, 최대 전단강성계수가 완전시료에 비해 이상시료가 76MPa 감소됨을 확인하였고, 전단 변형율이 발생됨에 따라라도 이상시료의 전단강성계수가 작은 것으로 나타났다. 하지만, 최대 커플링강성계수(J_v)를 살펴보면 이상시료가 완전시료에 비해 4배 가량 큰 것으로 나타났으며, 이는 2차 이방압밀시 발생된 방사방향 변형에 의하여 시료에 추가적인 교란이 발생하였기 때문으로 판단된다.
- (5) 본 연구에서 측정된 변형율 범위내의 축차응력과 체적 변형율과의 관계에서 도출된 커플링강성계수(J_v)와 전단강성계수(G)의 크기가 완전시료와 이상시료 모두에서 유사하였으며, 이는 일정 변형율 이상에서 지반재료를 등방탄성 재료로 가정하는 것은 무리가 있다는 것을 의미한다.

향후 축차응력(q)를 일정하게 하여 평균 유효주응력(p')을 증가시키는 응력경로 시험을 통하여, 완전시료와 이상시료의 체적변형계수, $K(= \Delta p' / \Delta \epsilon_{vol})$ 와 평균 유효주응력(p')의 증가에 따른 전단 변형율의 변화를 나타내는 커플링강성계수, $J_s(= \Delta p' / \Delta \epsilon_{sh})$ 를 비교하여 채취시 발생하는 축변형에 의한 교란 영향을 파악하려고 한다. 또한 일반적으로 적용되고 있는 K_0 값의 산정식들의 적합성을 판별하기 위하여 방사방향 변위를 제어하여 압밀하는 K_0 압밀을 적용하여 완전시료와 이상시료의 압밀시 거동을 비교·분석할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구원의 주요사업인 “친환경 인공섬 조성 핵심기술 개발”의 연구비 지원과 한국연구재단의 연구비 지원(2011-0013147)으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

1. 김종국, 이강운, 채영수 (2003a), “대형자연시료를 이용한 시료교란의 공학적 특성 연구”, *대한토목학회 정기학술 발표회 논문집*, pp.3742-3747.
2. 박성재, 오원택, 정경환, 여주태 (2002), “흡수력시험에 의한 양산 지역 점성토의 교란특성과 원위치 강도 추정에 관한 연구”, *토목학회 논문집*, Vol.22 No.6-c.
3. 신운섭, 김연정, 김학중, 김영웅 (2003), “대형자연시료 채취를 통한 시료 교란도 분석에 관한 연구”, *한국지반공학회, 학술발표회 논문집*, pp.325-332.
4. 정용우, 류완규, 김병일, 이만수 (2006), “연약해성점토의 깊이별 흡수력 시험과 일축압축시험 결과를 이용한 시료교란도 연구”, *명지대학교 산업기술연구소 논문집*, Vol.25, pp.74-77.
5. Atkinson, J. H., Allman, M. A., 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, No.2, pp.349-354.
6. Baldi, G. and Hight, D.W., 1988, “State-of-the-art: A Reevaluation of Conventional Triaxial Test Methods”, *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, ASTM STP 977*, ASTM International, West Conshohocken, PA, pp.219-263.
7. Baligh, M. M., Azzouz, A. S., and Chin, C.-T. (1987), “Disturbances due to ideal tube sampling”, *J. Geotech. Eng.*, Vol.113, No.7, pp.739-757.
8. Carruba, P. (2000), “Stress relief disturbance and Residual pore pressure in cohesive soils”, *Soil and Foundations*, Vol.40, No.1, pp.5.
9. Chan, C. K. 1981. “An electropneumatic cyclic loading system”, *Geotech. Test. J.*, 44, 183-187.
10. Cho, W., Holman, T. P., Jung, Y. H., and Finno, R. J. 2007. “Effects of swelling during saturation in triaxial tests in clays”, *Geotech. Test. J.*, 305, 378-386.
11. Hight, D.W. (2004), “Sampling effects in soft clay : An Update on Ladd and Lambe (1964)”, *Geotechnical Consulting Group*.
12. Jamiolkowski, M., et al. (1985), “New developments in field and laboratory testing of soils”, *Proc., 11th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, Vol.1, pp.57-153.
13. Lee, Y.G. and Lee, Y.N. (1998), “Study on sampling disturbance effects on soil properties”, *KGS, Spring '98 National Conference*, pp.67-74.
14. Massarsch, K.R. (1979), “Lateral Earth Pressure in Normally Consolidated Clay”, *Proceedings of the Seventh European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Brighton, England, Vol.2, pp.245-250.
15. Santagata, M. C. and Germaine, J. T. (2002), “Sampling Disturbance Effects in Normally Consolidated Clays”, *J. Geotech. and Geoenviron. Eng.*, Volume 128, No.12, pp.997-1006.
16. Skempton, A. W. and Sowa, V. A. (1964), “The Behavior of Saturated Clays During Sampling and Testing”, *Geotechnique*, Vol.13, No.4, pp.269-290.

(접수일자 2011. 5. 20, 심사완료일 2011. 7. 25)