

正規壓密粘土의 非排水剪斷強度에 미치는 壓密方法의 影響

Effect of Consolidation Methods on Shear Strength of
Normally Consolidated Clay

洪 元 杓*
Hong, Won-Pyo

Abstract

Although natural soil deposits have been consolidated under K_0 -stress system, the soil behavior has been predicted in laboratory from the results of tests performed on specimens consolidated under an isotropic stress system. A series of undrained triaxial compression tests are performed on remolded specimens of clay consolidated under both types of stress systems, and the results are compared.

One-dimensional consolidation history induces anisotropy in clays, which is called as the stress induced anisotropy. However, if the clays would be reconsolidated under isotropic stress system, the anisotropy of undrained strength would be decreased with decrease of overconsolidation ratio.

Undrained shear strength of normally consolidated clay depends on consolidation methods. Both the Rutledge hypothesis and the study of Henkel and Sowa do not agree with the test results obtained in this paper. In addition, a new theory is explained about the relationships between consolidation stresses, water contents and undrained shear strength.

要 旨

自然地盤에서는 K_0 응력상태로 압밀이 진행됨에도 불구하고 室内에서 지반강도를 조사할 때 등방압밀 시료에 대한 시험결과로 이방압밀시료의 거동을 예측하는 경우가 많다. 그 합리성을 검토하기 위하여 분말상태의 점토시료를 高含水比로 반죽성형하여 만든 점토공시체에 대하여 등방압밀 및 K_0 압밀을 한 후 비배수삼축압축시험을 실시한다.

일차원압밀이력을 가지는 시료는 應力誘導異方性의 영향을 받으며 이 시료를 等方壓으로 재압밀할 경우 過壓密比가 적을 수록 비배수강도의 이방성이 감소하고 등방성이 나타난다. 正規壓密 점토의 비배수강도는 압밀방법에 따라 크게 영향을 받으며 Rutledge 가설 및 Henkel 과 Sowa 의 연구는 본 연구의 결과와 잘 일치하지 않는다. 끝으로 압밀응력, 함수비 및 비배수강도 사이에 새로운 이론이 설명된다.

* 正會員, 中央大學校 工科大學 土木工學科 副教授

1. 序 論

퇴적 후 압밀에 의하여 형성되는 自然粘性土地盤에서는 側方變形이 발생되지 않는 K_0 응력 상태하에서 압밀이 진행된다. 그러나 飽和粘性土의 室內三軸試驗에는 等方壓密 방법이 일반적으로 많이 사용되고 있다. 이는 K_0 壓密과 같은 異方壓密의 작업과정이 等方壓密에 비하여 번거롭고 또 시간도 많이 소요되는 어려움 이외에도 전단 저항각은 압밀방법에 크게 영향을 받지 않는다는 연구결과 때문이기도 하다.¹⁻⁷⁾

Rendulic¹⁾은 鉛直方向壓密應力을 동일하게 한 壓密非排水試驗에 있어서는 압밀시의 含水量 변화와 전단시의 應力徑路가 압밀방법에 영향을 받지 않는다고 하였다. 이 이론은 Taylor²⁾에 의하여 지지된 바 있었고 Skempton과 Bishop^{3,8,9)}은 이를 이용하여 파괴시의 間隙壓係數와 有效內部摩擦角은 압밀시의 有效主應力比(=水平壓密應力/鉛直壓密應力)에 영향을 받지 않는다고 가정할 수 있었다. 따라서 等方壓密시험에 대한 시험결과로부터 異方壓密시험의 거동을 예측할 수 있음을 시사하였다.^{4,5)}

그 후 이 理論의 타당성 여부에 관하여 찬반의 연구가 계속되어 오고 있는 실정이다. 그 중 Broms and Ratnam,⁶⁾ Henkel^{4,5)} 및 Lee and Morrison⁷⁾은 실험을 통하여 압밀후의 含水量과 非排水強度는 압밀시의 有效主應力比에 관계없이 일정한 관계를 가진다는 Rutledge의 가설을 입증하였다.

그러나 Henkel과 Sowa⁸⁾는 이 이론이 모든 점토에 항상 적용되는 않는다는 사실을 실험으로 입증하였다. Ladd⁹⁾도 일련의 실험을 통하여 最大軸差應力(Maximum deviator stress) 상태에서 구한 유효내부마찰각은 等方壓密試料의 경우가 異方壓密試料의 경우보다 평균 4° 정도 크게 나타나고 있음을 보여 비배수강도는 壓密主應力比에 무관하지 않다고 주장하였다. 특히 異方壓密試料의 應力-變形率 특성은 等方壓密試料의 경우와 전혀 다름을 지적하였다. 그러나 最大有效主應力比(Maximum principal effective stress ratio) 상태에서 구한 有效應力強度는 壓

密主應力比에 무관하여 전혀 영향을 받지 않음을 주장하였다.^{9,10)}

여기에 본 연구에서는 분말상태의 Edgar Plastic Kaolinite 점토시료를 高含水量比로 반축성형하여 얻은 공시체에 대하여 等方壓密 및 K_0 壓密을 한 후, 비배수삼축압축시험을 실시하여 K_0 압밀시험의 비배수전단강도 등을 등방압밀시험과 비교검토하되 Rendulic, Rutledge 연구 이후 실시되어 오고 있는 압밀방법의 영향에 관한 연구에 一附言을 하고자 한다. 또한 반축성형한 시험의 異方性에 관하여서도 약간의 고찰을 하고자 한다.

삼축시험에서는 공시체내에 간극압의 균일 분포 및 地域破壞(Zone failure)¹⁷⁾가 일어날 수 있도록 특히 세심한 노력을 기울인다.

2. 三軸壓縮試驗

2.1 試驗裝置

축대칭 圓筒形 供試體를 사용하는 보편적인 三軸試驗機를 약간 改造하여 사용한다.

供試體 上下部에 공시체의 직경보다 약간 큰 합성수지 Lucite 판을 통상의 Porous stone 배수판 대신 사용한다. 상하부에 Porous stone을 제거하는 대신 Lucite 판 측면에 Filter stone을 마련하고 공시체와 Lucite 판을 둘러싼 Filter paper를 통하여 배수가 진행되도록 한다.

공시체의 포화도를 개선시키기 위하여 Back pressure 기법이 사용되며 이때 Back pressure는 Cell pressure와 독립적으로 조절할 수 있게 하였다.

압밀비배수압축시험 시에는 연직하중, 축압, 간극수압 및 연직변위가 측정된다. 연직하중의 작용은 변형제어와 응력제어 모두가 가능하게 하여 전단시에는 변형제어로 연직하중을 작용시키며 K_0 압밀시에는 응력제어로 하중이 작용되게 한다. 이러한 응력제어는 공기압에 의하여 작동되는 실린더를 삼축시험기 상부에 부착시키므로서 가능하게 된다. 이 연직하중은 상부에 부착시킨 Load cell을 통하여 기록측정되며 側壓과 間隙水壓은 삼방향 발브를 통하여 壓力 Transducer로 측정된다. 또한 연직변위는 삼축 Cell

밖의 연직하중측에 부착시킨 Dial gauge 로 측정된다.

2.2 粘土供試體

시험에 사용될 粘土시료는 Feldspar Corporation 에서 분말상태로 시판되고 있는 Edgar Plastic Kaolinite (EPK) 점토이며 40%의 실트분과 60%의 점토분으로 구성되어 있다. 이 점토의 액성한계는 60%이고 소성한계는 30%이며 비중은 2.62이다. 또한 活性度(Activity)는 0.50이므로 Skempton¹²⁾의 분류방법에 따르면 이 점토는 非活性粘土에 해당한다.

이 공기전조상태의 EPK 점토분말을 함수비가 120%가 되도록 脫氣水(De-aired water)*와 섞어 점토 현탁액을 만든다. 이 때 점토는 US표준체 #20 (0.83mm)를 통하여 물속에 침전하도록 하며 손으로 천천히 저어서 덩어리나 공기가 남아 있지 않도록 한 후 전동믹서로 15~20분간 반죽한다. 그런 후 이 점토현탁액을 양면배수장치가 있는 大型壓密裝置(內徑이 25.4cm 초기높이가 20.3cm)에 넣어 일차원 압밀을 한다. 압밀응력으로는 처음에 0.5kg/cm² 정도의 낮은 응력을 작용시켜 점토가 배수선으로 새어 나오는 것을 방지하며 점토에 어느정도 강도가 생긴 후 2.0kg/cm²의 압밀응력으로 압밀을 실시한다.

압밀이 완료된 후 시료를 공시체보다 약간 큰 크기의 덩어리로 자르고 Saran wrap 으로 싸서 비닐봉지에 넣은 후 습윤상자에 보관한다. 이 시료는 삼축시험전에 직경과 높이가 7.1cm 가 되는 원통형 공시체를 만들고 남은 부분의 시료로 함수비를 측정한다.

삼축시험을 통하여 압밀후의 함수비는 43.9~47.1%(평균치 45.0%)였으며 전조단위중량은 1.16~1.21t/m³(평균치 1.19t/m³)였다.

실험실에서 점토시료를 성형하는 경우 위와 같은 점토현탁액으로 再成形하는 방법은 다짐방법보다 유리하며 공시체내의 함수비와 밀도가 균일하게 분포하는 利點이 있다.

2.3 試驗方法

점토 공시체를 삼축시험기에 놓기 전에 공시

체와 상하부의 Lucite 판 사이에 마찰구속력을 없애기 위하여 Lucite 판에 Silicone grease 를 바르고 0.3mm 두께의 고무 Membrane 조각을 부친다. 이 때 고무 Membrane 과 Lucite 사이에 공기가 남아 있지 않게 세심한 처리가 필요하다. 하부 Lucite 에 부친 고무 Membrane 위에 물을 약간 뿌린 후 공시체를 놓고 공시체 상부면에도 물을 약간 뿌리고 상부 Lucite 를 씌운다. 이 상하부 Lucite 와 공시체를 일정간격의 홈을 뚫은 Filter paper 로 둘러싼 후 고무 Membrane 을 씌우고 하단을 O-링으로 고정시킨다. 고무 Membrane 과 공시체 사이에 물을 넣어 눈에 보이는 공기방울을 상부로 빼낸 후 고무 Membrane 상단을 O-링으로 고정시킨다. 공시체와 Membrane 사이에 남아 있는 과잉수는 0.3kg/cm² 정도의 진공압으로 배수선을 통하여 배수시킨다. 이 진공압 사용과정은 대개 20~40분 정도 소요된다.

삼축 Cell 을 씌우고 물을 채운 다음 소정의 Cell pressure 와 Back pressure 를 가하여 압밀을 실시한다. 압밀은 等方壓密과 K₀ 壓密의 두 가지를 실시하며 有效 Cell pressure 는 2, 3 및 5kg/cm²의 세 경우를 채택한다. 공시체의 포화도를 높여 주기 위하여 사용하는 Back pressure 는 2kg/cm² 을 채택하므로 결국 Cell pressure 는 4, 5 및 7kg/cm² 이 되게 된다. 이 상태에서 배수선을 열어서 等方壓密을 실시한다. 한편 K₀ 압밀은 等方壓密과 동일한 Back pressure 와 Cell pressure 의 조건에서 공시체에 側方變形이 발생하지 않도록 연직하중을 조정작용시킨다. 즉 배수량으로 산정된 체적변화는 연직변위에 의하여 산정된 체적변화와 동일하게 ($\epsilon_v = \epsilon_1$) 되도록 연직하중을 응력제어방식으로 증가시켜간다. 본연구에서 실시된 K₀ 압밀 결과 K₀(= $\sigma_{3c}' / \sigma_{1c}'$)는 0.56~0.65였다. 압밀시 배출되는 배수량을 측정하여 압밀-시간 관계로 부터 일차압밀의 종료 여부를 확인한다.

압밀이 완료된 후 배수선을 잠그고 Cell pressure 를 약간 증가시키고 10분 후 정도에서 간극압의 변화를 측정하여 계산한 간극압계수¹³⁾ B(= $\Delta u / \Delta \sigma_3$)로 부터 포화정도를 검사한다. 본

* 물속의 공기를 제거시킨 물로 본실험에는 전부 이 물을 사용한다.

연구에서의 B 값은 0.94~1.09 사이였다.

B 값을 검사한 후 Cell pressure 를 원래로 환원시키고 변형제어로 전단시험을 실시한다. 전단시 공시체내의 간극압이 균일하게 분포될 수 있게 하기 위하여는 적절히 느린 속도로 시험을 하여야 하기 때문에¹⁴⁾ 본시험에서는 $8.6 \times 10^{-3} \% / \text{mim}$ 의 속도로 전단시험을 실시하며 시험은 最大有效主應力比(σ_1'/σ_3')_{max}가 좀 지난 후까지 계속 실시한다. 전단시험 완료 후 공시체의 치수 무게 및 함수비를 측정한다.

또한 앞절에서 성형한 시료의 異方性을 조사하기 위하여 3kg/cm^2 의 等方壓 조건에서 연직방향시료와 수평방향시료의 압밀비배수삼축압축시험도 실시한다.

이상에 설명한 시험 기간중의 실내온도는 항상 $20^\circ \sim 21^\circ\text{C}$ 가 되도록 유지시켜 준다. 그리고 軸差應力(Deviator stress) 계산시 고무 Membrane, Filter paper 등의 영향은 Lade and Musantte¹⁵⁾ 방법을 이용하여 보정한다.

2.4 破壞형태

축대칭 원통형공시체용 삼축시험기에는 排水 및 間隙水壓 측정을 목적으로 공시체 상하면에 Porous stone 을 사용하는 경우가 많다. 이러한 조건에서는 공시체가 변형할 때 공시체 상하면에서의 마찰저항으로 인하여 단부에 전단응력이 발생하며 공시체는 가운데가 불룩한 형태로 변형된다.¹³⁾ 이는 결국 응력 변형 및 간극수압이 공시체 내부에 불균일하게 되는 원인이 되며 흙의 전단강도 및 응력-변형을 거동에 큰 영향을 미치게 된다.¹⁹⁻²¹⁾ 따라서 현재 이 端部구속마찰의 영향을 최소화시키기 위하여 공시체의 높이와 직경의 비를 2~2.5로 하여 사용하고 있다.

그러나 Lade¹¹⁾는 공시체의 높이를 그림 1(a)에서 보는 바와 같이 직경 d 의 $\tan(45^\circ + \phi/2)$ 배 이상 높게하면 공시체는 항상 단일선파괴(Line failure)형태로 파괴된다고 하였다. 이는 파괴선 부근의 흙에는 응력이 강도에 도달하였으나 파괴선 부근 이외의 흙에는 응력이 아직 강도에까지 도달하지 않았음을 의미한다. 결국 이는 응력과 변형이 공시체의 각 부분에 골고루 발생되어 있지 않음을 의미한다.

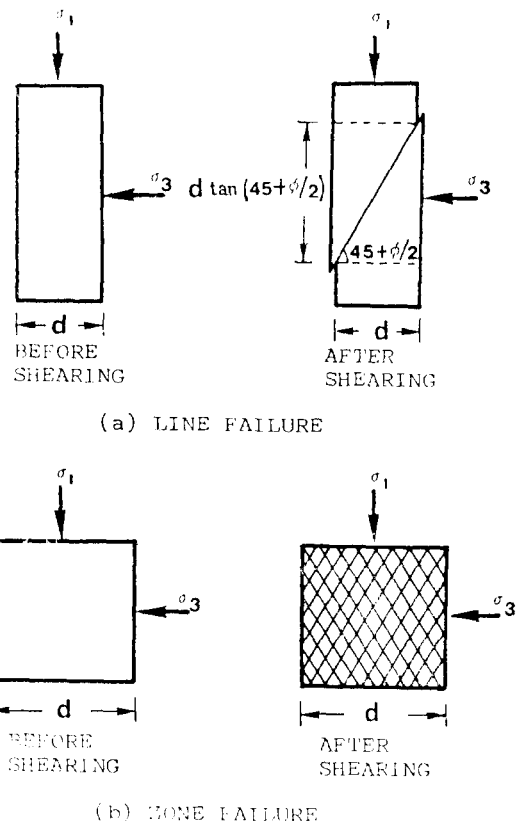


Fig. 1. 三軸壓縮試驗용 供試體의 파괴형태

삼축압축시험을 要素(Element)시험으로 하기 위하여는 다시 말하여 삼축시험용 공시체를 하나의 要素로 생각하여 그 특성을 살펴보면 Rankine 파괴선과 같은 파괴형태가 要素 전체에 걸쳐 균일하게 발생하는 Fig. 1(b)의 地域破壞(Zone failure)¹⁷⁾ 형태로 파괴됨이 이상적일 것이다. 이러한 파괴형태를 발생시키기 위하여는 공시체 속의 응력 변형 및 간극수압이 전부분에 걸쳐 균일하게 발생되도록 주의를 기울여야 할 것이다. 이를 위하여는 공시체의 높이를 $d \tan(45^\circ + \phi/2)$ 보다 작게 함과 동시에 공시체 상하면에 潤滑面(Lubricated end)을 마련하여 단부의 마찰저항을 제거시켜 주어야만 할 것이다.

따라서 본연구에서는 공시체의 높이와 직경의 비를 Fig. 1(b)와 같이 1:1로 하고 공시체 상하면에 마찰력이 강한 Porous stone 대신 2.1절 및 2.3절에서 설명한 합성수지 Lucite 를 사용

한다.

Lade and Musante¹⁵⁾ 및 Lade and Tshai^{16,31)}가 동일한 방법으로 시험한 결과에 의하면 $H/d=1$ (H 와 d 는 각각 공시체의 높이와 직경이다)로 실시한 결과는 地域破壞형태는 물론이고 立方體型공시체에 대한 多軸三軸壓縮실험결과와 아주 잘 일치하여 원통형 공시체 사용에 의한 공시체 형상의 영향을 없앨 수 있다 하였다. 또한 $H/d=2.3$ 이고 단부의 마찰영향을 제거하지 않은 공시체에 대한 시험결과는 단부마찰력을 제거한 $H/d=1$ 공시체의 시험결과 보다 강도가 다소 크게 산정되고 있다.^{15,16)}

3. 使用試料의 異方性

Duncan and Seed²²⁾는 흙의 異方性을 固有異方性(Inherent anisotropy) 및 應力誘導異方性(stress-induced anisotropy)의 두가지로 구분하였다. 固有異方性은 흙이 하중을 받아 변형하기 이전부터 가지고 있던 본래의 構造異方性이며 應力誘導異方性은 흙이 자중 등의 하중을 받아 변형하여 발생한 후천적 構造異方性을 의미한다.

사질토는 흙입자가 침강 퇴적되는 과정에서 개개의 흙입자 운동이 중력에 의하여 지배되기 때문에 固有異方性이 강하게 나타나지만, 점성토층의 생성과정에서는 사질토와 달리 개개의 흙입자 운동이 입자 간에 작용하는 여러가지 表面力에 의하여 지배되기 때문에 固有異方性은 현저하지 않다. 그럼에도 불구하고 점성토지반의 역학적 거동은 일반적으로 異方性을 보이고 있다. 이것은 흙입자의 長軸이 수평으로 배열된 固有異方性에 의한 것이라기 보다 흙입자가 等方的으로 퇴적된 후 받은 一次元壓密이력에 의한 후천성 이방성 즉 應力誘導異方性에 의한 것이다. 따라서 이 경우의 이방성은 등방성의 흙요소소가 복잡한 응력이력을 받은 경우의 응력-변형관계의 일종이다.

3.1 체적변형이방성

2.2절에서 설명한 바와 같이 2kg/cm^2 의 연직압밀응력으로 일차원압밀을 한 점토공시체의 이방성을 조사하기 위하여 이 공시체를 삼축 Cell

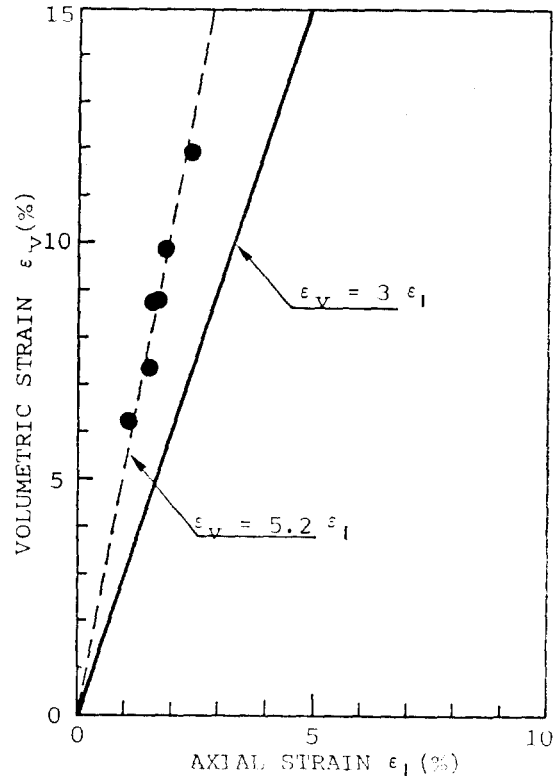


Fig. 2. 一次元압밀이력 공시체의 등방압밀결과

內에서 2,3 및 5kg/cm^2 로 다시 등방압밀을 하여 얻은 연직축 방향 변형율, ϵ_1 과 체적변형율, ϵ_v 사이의 관계를 정리하면 Fig. 2와 같다. 그림에서 실선은 이상적 등방체의 관계 $\epsilon_v=3\epsilon_1$ 을 의미한다. 이 그림에 의하면 등방압밀 완료후의 체적변형율, ϵ_v 는 $3\epsilon_1$ 보다 큰 $5.2\epsilon_1$ 와 같으므로 연직방향 압축성이 수평방향 압축성보다 훨씬 적음을 알 수 있다. 이는 이 점토공시체가 현재 등방적 응력상태 하에 있다고 하더라도 시료제작 과정에서 이미 2kg/cm^2 의 일차원 압밀이력을 받았으며 이로 인하여 점토의 구조가 이방적으로 변한 후천적 이방성을 지니고 있었음을 입증하는 것이다. 이러한 이방성은 흙의 강도 및 압축성에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.²²⁻²⁴⁾

3.2 비배수강도이방성

흙의 이방성이 흙의 거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 2kg/cm^2 로 일차원 압밀한 시료를 Fig. 3(b) 속에 圖示한 바와 같은 연직공시

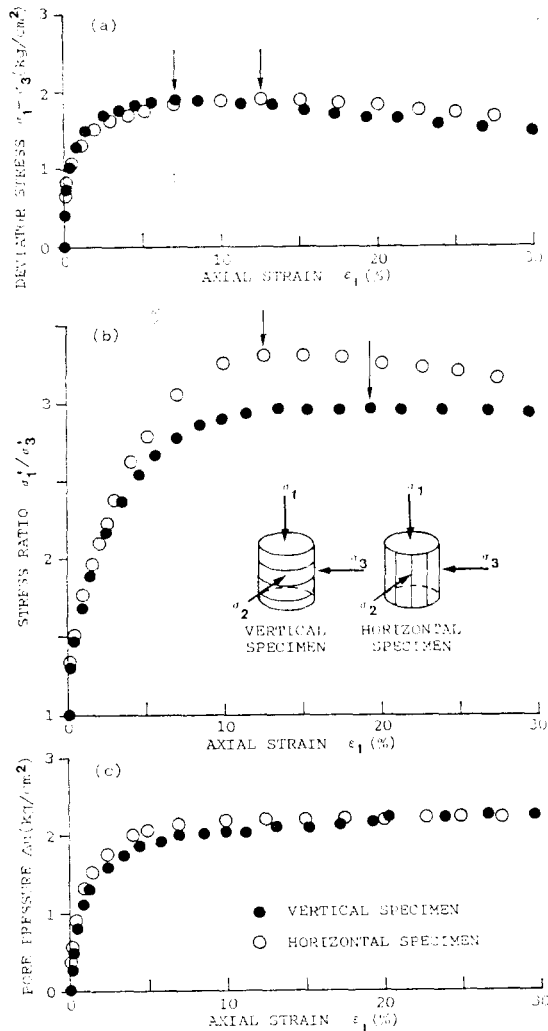


Fig. 3. 연직공시체와 수평공시체의 비배수 삼축압축시험결과

체와 수평공시체를 만들어 3kg/cm²로 등방압밀을 한 후 비배수삼축시험을 실시한 결과를 Fig. 3과 같이 정리하였다.

이들 두 공시체의 응력-변형률거동은 Fig. 3 (a)에서 보는 바와 같이 서로 큰 차이를 보이고 있지 않으나 最大軸差應力($\sigma_1 - \sigma_3$)_{max}에 도달하는 축방향변형률, ϵ_f (그림중 화살표 표시부분)는 연직공시체보다 수평공시체의 경우가 더 크다. 그러나 最大主應力比, (σ_1'/σ_3')_{max}에 도달하는 변형률, ϵ_f 는 수평공시체의 경우는 변하지 않았으나 연직공시체의 경우는 ($\sigma_1 - \sigma_3$)_{max} 이후

變形率軟化(Strain softening) 현상이 발생한 후 (σ_1'/σ_3')_{max}에 도달하며 ϵ_f 의 값도 수평공시체보다 크다.

압밀응력에 대한 비배수강도 증가율 c_u/σ_{1c}' 는 Table 1에서 보는 바와 같이 연직공시체와 수평공시체가 각각 0.32와 0.33으로 별 차이가 없다. 결국 이 점토공시체의 비배수강도에는 이방성이 두드러지게 나타나지 않음을 알 수 있다. 이는 초기에는 일차원압밀이력의 영향으로 이방성을 지니고 있었으나 일차원압밀이력보다 큰 압력으로 등방압밀을 하는 과정에서 수평방향 압축변형이 연직방향 압축변형보다 많았던 Fig. 2의 사실을 상기하면 이 등방압밀과정에서 공시체가 등방성을 다소 회복하게 되었다고 생각할 수 있을 것이다.

그러나 Fig. 3(c) 및 Table 1로부터 ($\sigma_1 - \sigma_3$)_{max}에서의 간극압계수, A_f 는 연직공시체의 경우 1.06이고 수평공시체의 경우 1.15로 A_f 에는 이방성을 보였다. 또한 ($\sigma_1 - \sigma_3$)_{max}에서의 유효응력 내부마찰각, ϕ' 도 Table 1로부터 연직공시체가 수평공시체보다 4.3° 적은 28.1°로 나타나는 이방성을 보이고 있다. Duncan과 Seed²²⁾는 점토의 비배수강도 이방성은 간극압계수 A_f 나 유효응력강도정수 c' 와 ϕ' 에 기인한다고 하였다. 그러나 본실험의 결과는 간극압계수와 유효응력강도정수 모두가 이방성을 가지고 있어도 비배수강도는 등방성을 보여 주고 있다. 이 결과로부터 점토의 비배수강도이방성에 영향을 주는 요소는 Duncan과 Seed²²⁾의 주장과 같이 간극압계수와 유효응력강도정수 중 어느 하나에 의한 것이 아니고 Ladd et al²⁴⁾이 주장한 복합이방성(Combined anisotropy) 입장에서 생각하여 이들 요소가 서로 복합적으로 작용하고 있는 것이라고 할 수 있겠다.

Duncan과 Seed는 과압밀 Kaolinite 점토의 시험으로 부터 비배수강도의 이방성은 간극압계수의 차에 의한 것이라고 하였다.²²⁾ 본실험결과를 시험방법 및 사용시료가 유사한 Duncan과 Seed의 결과와 연결지어 비교하여 보면 Fig. 4와 같다. 이 그림에서 보는 바와 같이 비록 동일한 Kaolinite 점토는 아니지만 본실험의 결과는 Duncan & Seed의 과압밀점토의 경향을 그대로 정

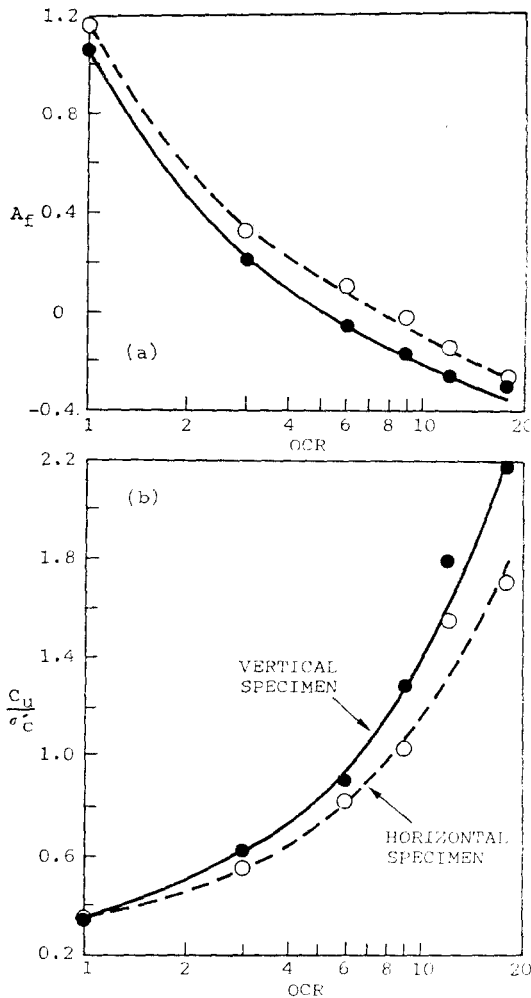


Fig. 4. Kaolinite 粘土의 異方性(과압밀 데이터는 Duncan & Seed²³⁾ 시험임)

규압밀점토까지 연결시킨 선상에 존재하므로 두 실험결과는 동일 경향이라 할 수 있다. 즉 수평 공시체의 간극압계수는 정규압밀점토 및 과압밀 점토 모두 연직공시체의 간극압계수보다 크지만 압밀응력에 대한 비배수강도증가율은 과압밀비의 감소와 함께 연직공시체와 수평공시체의 차가 감소하여 정규압밀점토의 경우에는 서로 일치하고 있다. 이 결과로부터 일차원압밀이력을 가지는 시료를 등방압으로 재압밀한 경우 과압밀비가 적을 수록 시료의 이방성이 감소하고 등방성이 현저하게 나타남을 알 수 있다. 따라서 현장에서 채취한 정규압밀점토에 대한 등방압밀

비배수삼축시험은 시료의 이방성을 크게 과소평가하게 될 것이다. 그러므로 정규압밀점토의 현장 이방성을 그대로 고려한 강도특성을 삼축시험으로 조사하려면 K_0 압밀을 실시하여 일차원 압밀 응력상태를 계속 유지시킨 상태에서 전단 시험을 실시함이 타당할 것이다.

4. 壓密方法의 影響

앞장에서 검토한 바와 같이 본연구에 사용된 EPK 점토 공시체는 시료성형시 받은 일차원압밀응력보다 큰 응력으로 등방압밀을 할 경우는 비배수강도가 시료채취방향에 무관하게 등방성을 보임을 알았다.

본장에서는 현장에서의 응력상태를 삼축시험기 내에서 재현시킨 K_0 압밀시료와 등방압밀시료를 비교하여 압밀방법에 따른 점토의 異方構造의 영향을 조사하여 보고자 한다.

4.1 壓密非排水試驗

Fig. 5는 파괴시의 평균주응력 $p' (= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3))$ 혹은 $p' (= \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_3'))$ 와 전단강도 $q (= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3))$ 사이의 관계를 전응력 및 유효응력 상태로 정리한 결과이다. 最大軸差應力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 상태파괴시 평균주응력과 軸差應力 사이의 관계를 나타내는 Fig. 5(a)에 의하면, K_0 압밀시료와 등방압밀시료의 전응력비배수강도는 크게 차이가 있음을 알 수 있다. 즉 동일한 평균주응력 상태에서 K_0 압밀시료는 등방압밀시료보다 30~40% 정도 비배수전단강도가 크게 나타나고 있다. 따라서 점토의 비배수강도는 압밀이력에 의한 이방성의 영향을 분명히 받고 있다고 할 수 있을 것이다.

한편 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 에서의 결과를 유효응력으로 정리하여 보면 Fig. 5(b)와 같다. 이 결과에 의하면 유효응력강도는 전응력상태에서의 강도보다 압밀방법에 따른 영향이 훨씬 줄어 들었음을 알 수 있다. 더우기 最大主應力比 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ 상태파괴시의 강도를 유효응력으로 정리한 Fig. 5(c)에 의하면 두가지 압밀방법에 의한 강도에는 차이가 없이 유효평균주응력 p' 와 강도 q 사이

에는 유일한 관계가 성립함을 알 수 있다.

결국 이들 결과를 통하여 점토의 비배수전단 강도는 압밀방법에 따른 압밀이력에 크게 영향을 받으나 근본적으로는 동일한 유효응력 포락선을 가진다고 생각할 수 있다.

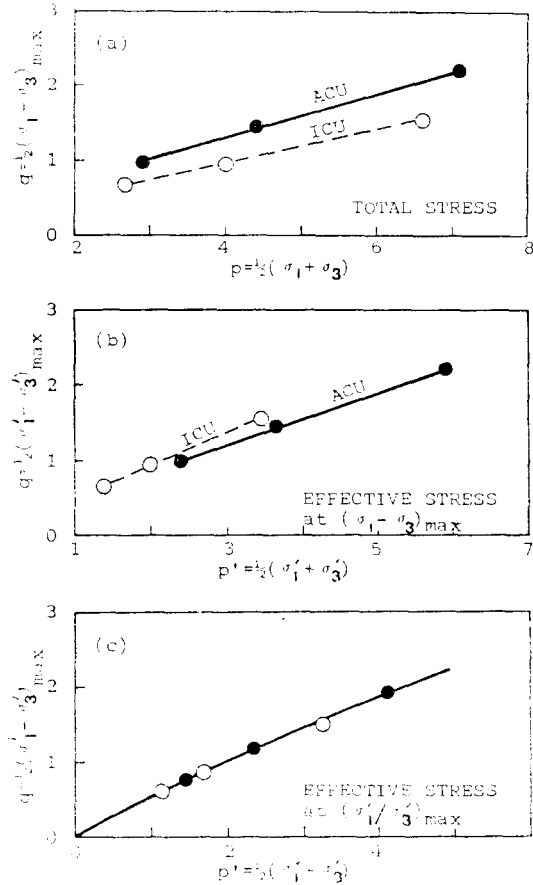


Fig. 5. 평균주응력과 최대전단응력의 변화

4.2 非排水强度增加率

연직압밀응력 σ_{1c}' 에 대한 비배수강도증가율 c_u/σ_{1c}' 는 Table 1에서 보는 바와 같이 등방압밀의 경우가 0.31~0.34 이고 K_0 압밀의 경우가 0.27~0.29 가 되어 등방압밀의 경우가 K_0 압밀보다 최대 15% 정도 크게 나타나고 있다. 이는 Ladd⁹⁾의 대부분의 결과와도 비슷하다. 따라서 실험실에서 등방압밀을 하여 삼축압축시험을 한 경우의 비배수강도는 실제의 c_u/σ_{1c}' 를 과다산정할 우려가 있다.

Skempton 과 Bishop 은 정규압밀점토에 대한 이방압밀을 실시한 시료의 비배수강도증가율 c_u/σ_{1c}' 는 다음 식으로 산정할 것을 제안한 바 있다.^{3,8,9)}

$$\frac{c_u}{\sigma_{1c}'} = \frac{[K + A_f(1-K)] \sin \phi'}{1 + (2A_f - 1) \sin \phi'} \dots \dots \dots (1)$$

여기서 $c_u = (\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} / 2$, $K = \sigma_{3c}' / \sigma_{1c}'$, ϕ' 와 $A_f (= (\Delta u - \Delta \sigma_3) / (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3))$ 는 각각 유효내부마찰각과 간극압계수이며 식(1)사용시는 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ 에서의 값을 사용한다.

K_0 압밀의 경우 K_0 를 식(2)의 Jaky³⁰⁾ 공식을 사용하면 식(3)이 얻어진다.

$$K_0 = 1 - \sin \phi' \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{c_u}{\sigma_{1c}'} = \frac{[1 - (A_f - 1) \sin \phi'] \sin \phi'}{1 + (2A_f - 1) \sin \phi'} \dots \dots \dots (3)$$

등방압밀의 경우는 $K=1$ 로 하여 식(4)가 얻어진다.

$$\frac{c_u}{\sigma_{1c}'} = \frac{\sin \phi'}{1 + (2A_f - 1) \sin \phi'} \dots \dots \dots (4)$$

상기식들을 사용하여 계산한 c_u/σ_{1c}' 값을 실험 결과와 비교하면 등방압밀의 경우는 산정치가 실

<Table 1> 시 험 결 과

σ_{3c}' (kg/cm ²)	c_u/σ_{1c}'		ϕ' (Degree)				A_f				비 고
			at $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$		at $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$		at $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$		at $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$		
	ICU	ACU	ICU	ACU	ICU	ACU	ICU	ACU	ICU	ACU	
2	0.34	0.28	28.9	23.9	31.5	32.8	0.99	1.22	1.22	—	
3	0.32	0.29	28.1	23.0	29.7	30.6	1.06	0.90	1.30	4.84	연직 공시체
	0.33	—	32.4	—	32.4	—	1.15	—	1.15	—	수평 공시체
5	0.31	0.27	26.6	21.8	27.4	28.2	1.03	1.02	1.10	4.17	

험치 보다 4% 이내의 오차로 적고 K_0 압밀의 경우는 극히 잘 일치하고 있으므로 식(1)의 타당성을 입증할 수 있었다.

4.3 함수비와 강도의 유일성

Fig. 6에서 Fig. 8까지는 압밀후의 함수비와 압밀응력 사이의 관계를 圖示한 것이다. Fig. 6은 유효연직압밀응력 혹은 유효압밀최대주응력 σ_{1c}' 와의 관계를 나타내며 Fig. 7은 유효수평압

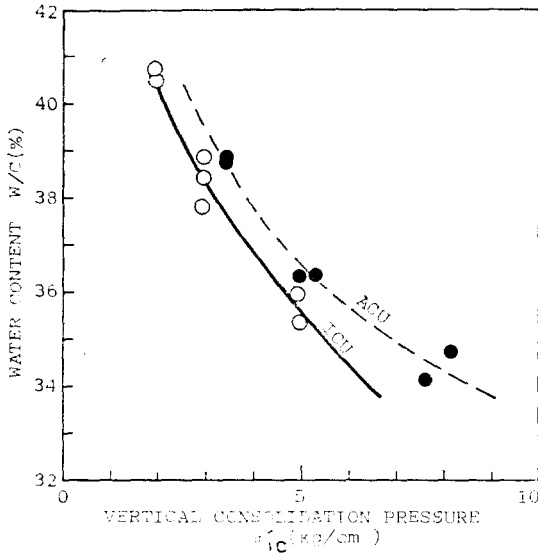


Fig. 6. 연직압밀응력과 함수비 관계

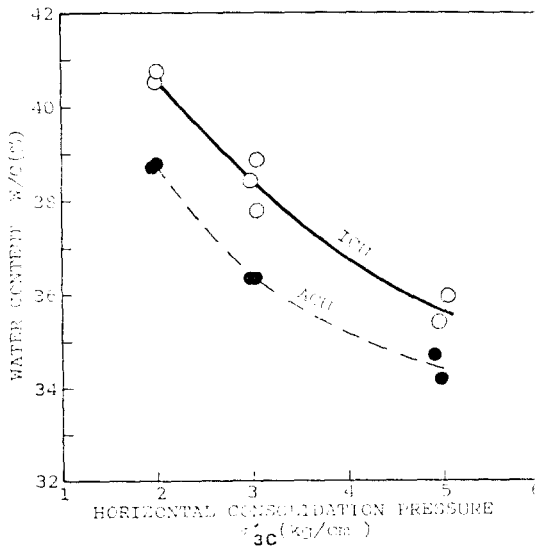


Fig. 7. 수평압밀응력과 함수비 관계

밀응력 혹은 유효압밀최소주응력 σ_{3c}' 와의 관계를 나타내고 있다. 이들 결과에 의하면 압밀후의 함수비 즉 체적변화는 압밀방법에 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 따라서 압밀후의 함수비는 압밀시의 최대주응력 혹은 최소주응력과 단일함수관계를 가지지 않음을 알 수 있다. 그러나 Lee와 Morrison⁷⁾은 다점성형한 Kaolinite 점토 및 Higgins 점토시료를 사용한 시험결과를 통하여 압밀후의 함수비와 최대주응력과는 유일한 함수관계를 가지며 이방압밀에 무관하다고 하여 Rutledge 가설의 타당성을 입증한 바 있다. 따라서 본 실험결과는 Lee와 Morrison의 결과와는 일치하지 않고 있다. 그 밖에도 이 Rutledge 가설에 대하여서는 여러차례 의문이 제기되어 이 가설이 언제나 성립되는 가에는 많은 의문이 남아 있다.^{8,9)}

최대주응력 σ_{1c}' 를 동일하게 한 등방압밀과 K_0 압밀의 경우를 생각하여 보면, 최소주응력 σ_{3c}' 는 K_0 압밀의 경우가 등방압밀에 비하여 훨씬 적으므로 K_0 압밀시료는 등방압밀시료에 비하여 Fig. 6에서 보는 바와 같이 체적변형이 덜 발생함이 타당하다고 생각된다.

한편 Fig. 7의 경우와 같이 동일한 최소주응력 σ_{3c}' 상태에서 생각하여 보면 K_0 압밀의 σ_{1c}' 가 등방압밀경우보다 크므로 K_0 압밀시료가 등방압밀시료보다 체적변형이 많이 즉 함수비가 적게 됨은 역시 타당하다고 생각된다.

따라서 압밀로 인한 체적변형은 어느 하나의 주응력에 대하여만 조사하는 것보다 시료에 작용하는 전체응력에 대하여 조사하는 것이 합당할 것이다.²⁵⁾ 여기에 압밀후의 함수비와 평균압밀응력 사이의 관계를 조사하여 보면 Fig. 8과 같이 된다. 평균압밀응력으로는 有效正八面體수직응력 (Effective octahedral normal stress) (σ'_{oct}) ($=\frac{1}{3}(\sigma_{1c}' + \sigma_{2c}' + \sigma_{3c}')$) 값을 도입하였다. 이 결과에 의하면 압밀후의 함수비는 평균주응력의 대수관계로 특정지어짐을 알 수 있고 동시에 압밀방법에 무관하지 않음을 알 수 있다. 즉 등방압밀과 K_0 압밀에 의한 압밀거동 특성은 비슷한 경향을 보이기는 하지만 함수비가 압밀방법에 따라 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 즉 동일한 $(\sigma'_{oct})_c$ 조건에서 K_0 압밀의 경우는 등방압밀

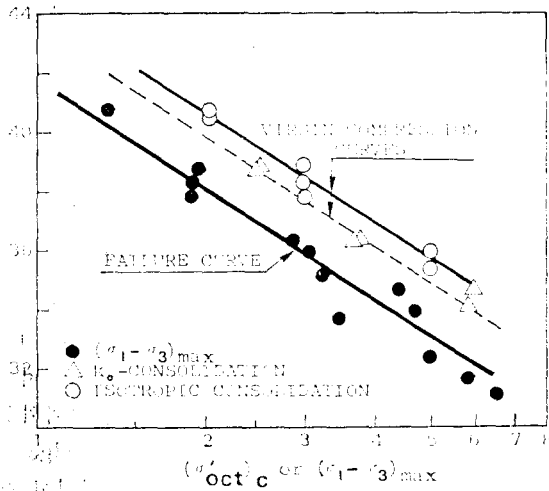


Fig. 8. 평균압밀응력 및 강도와 함수비의 관계

보다 함수비가 0.7% 정도 적다. 이는 K_0 압밀과 같은 이방압밀의 경우는 등방압밀의 경우와 달리 주응력차에 의한 전단변형이 부가적으로 발생되었기 때문으로 해석된다. 즉 이방압밀의 경우는 압밀시 전단응력이 공시체 속에 발생하며 이로 인한 Dilatancy 거동으로 체적변화의 특성이 달라지게 된다. Olsen 과 Wabls²⁵⁾ 및 Bhaskaran^{26,27)}도 역시 압밀후의 함수비는 압밀시의 평균수직응력, 軸差應力 및 主應力比에 관련된다고 하였다. 또한 Akai 와 Adachi²⁸⁾도 K_0 압밀의 경우 체적변형계수는 평균유효응력에 의한 사항과 軸差應力에 의한 사항의 두가지 성분으로 되어 있다 하였으며 Lewin 과 Burland²⁹⁾도 이와 유사한 사실을 실험으로 입증하였다.

따라서 압밀에 의한 체적변형은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\epsilon_v = \alpha(\sigma'_{oct})_c + \beta(\tau'_{oct})_c \dots\dots\dots(5)$$

여기서 α, β 는 계수이며 $(\tau'_{oct})_c$ 는 압밀시의 正六面體전단응력으로 다음식과 같다.

$$(\tau'_{oct})_c = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma'_{1c} - \sigma'_{2c})^2 + (\sigma'_{2c} - \sigma'_{3c})^2 + (\sigma'_{3c} - \sigma'_{1c})^2} \dots\dots\dots(6)$$

Fig. 8에는 압밀후 실시한 삼축압축시험으로부터 얻은 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 에서의 강도와 그 때의 함수비와의 관계도 정리하였다. Fig. 8중에는 비배수시험 및 배수시험³¹⁾의 결과를 함께 정리하

였다. 이 결과에 의하면 파괴시의 함수비와 강도의 대수 사이에는 유일성이 존재함을 알 수 있다. 즉 압밀방법(등방압밀 및 K_0 압밀)과 시험방법(비배수전단 및 배수전단)에 관계없이 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 파괴상태에서의 함수비와 강도의 관계는 항상 일정함을 보여 주고 있다.

결국 등방압밀과 이방압밀에 의한 실험결과는 압밀후의 함수비가 같으면 비배수전단강도는 같을 것이 예상된다. 그러나 식(5)에서 검토한 바와 같이 평균압밀응력이 동일하다 하여도 이방압밀의 경우는 $(\tau'_{oct})_c$ 에 의한 부가적 체적변형이 발생하므로 등방압밀과 이방압밀에 의한 함수비는 같아 지지 않으며 그것은 결국 함수비의 변화에 따른 비배수강도의 차이를 유발시키게 되므로 Rutledge의 가설은 항상 성립되는 것은 아닌 것 같다.

4.4 他理論과의 比較

앞절에서 얻은 결론과 기존 이론을 비교한 概略圖가 Fig. 9이다.

우선 Rutledge(1947)가설은 Fig. 9(a)에서 보는 바와 같이 압밀특성은 압밀중의 최대주응력 σ_{1c}' 에만 의존하며 비배수전단강도도 함수비와 유일함수관계를 가진다. 따라서 압밀특성선과 강도특성선을 알면 주어진 연직압밀응력 σ_{1c}' 에서 압밀방법에 관계없이 압밀후의 함수비를 A점에서 산정할 수 있으며 나아가 비배수강도는 A점에서 수평으로 이동하여 B점의 강도를 얻어 비배수강도를 산정할 수 있다. 이 이론은 Henkel⁵⁾ 및 Lee 와 Morrison⁷⁾에 의하여 입증된 바 있다. 그러나 이들 시험에서는 액성한계가 50% 이하인 시료에 대하여 함수비가 액성한계보다 낮은 상태에서 반죽 혹은 다짐에 의하여 시료가 성형된 경우이므로 자연상태에서와 같은 높은 함수비로 퇴적성형된 흙의 특성과는 차이를 보일 것이다.

Henkel 과 Sowa⁸⁾는 Weald 점토를 점토현탁액 상태로 부터 반죽 성형하여 실시한 일련의 시험으로부터 Rutledge의 가설은 모든 점토에 항상 적용될 수는 없음을 보여 주었다. Fig. 9(b)는 그들의 시험결과 얻은 사항을 정리한 것이다. 이 결과에 의하면 압밀후의 함수비는 평균응력

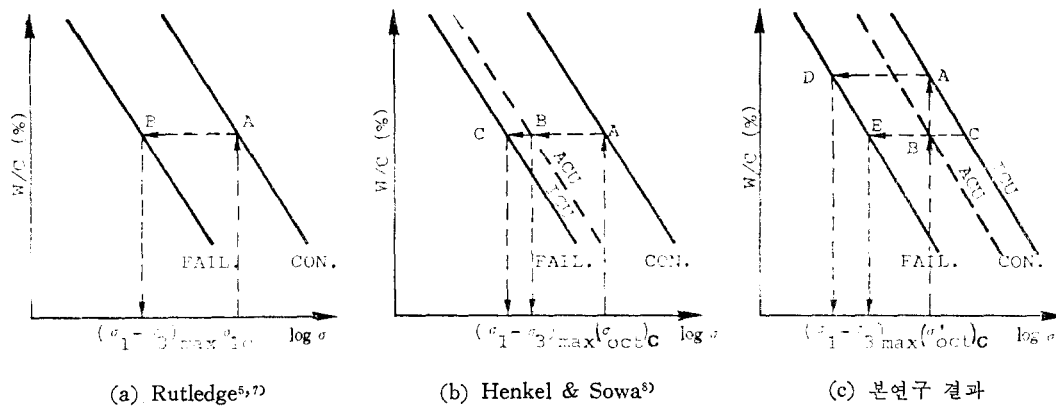


Fig. 9. 應力—含水比 관계의 概略圖

$(\sigma'_{oct})_c$ 와 압밀방법에 관계없이 유일함수관계에 있으나 비배수강도는 Fig. 9(b)에서 보는 바와 같이 압밀방법에 영향을 받고 있음을 보여 주었다. 따라서 점토의 비배수전단강도는 함수비와 유일함수관계에 있지 않을 수도 있다고 주장하였다. 따라서 평균응력 $(\sigma'_{oct})_c$ 에서 A 점의 함수비를 알았을 때 비배수전단강도는 K_0 압밀과 등방압밀의 경우 각각 B 점과 C 점이 되어 강도가 서로 달라지게 된다.

한편 본연구를 통하여 얻은 결과는 Fig. 8 및 Fig. 9(c)와 같이 함수비와 평균응력 $(\sigma'_{oct})_c$ 사이에 유일함수관계가 존재하지 않으므로 동일한 평균응력 조건에서 압밀한 경우 등방압밀은 A 점에 K_0 압밀은 B 점에서 함수비를 얻게 된다. 결국 \overline{AB} 분량의 함수비는 $(\tau'_{oct})_c$ 의 효과에 기인한 부분이 된다. 비배수전단강도에 대하여는 비록 함수비와 비배수강도가 유일함수관계를 가지지만 압밀후의 함수비가 압밀방법에 따라 A 점 및 B 점으로 다르므로 비배수전단강도도 각각 D와 E로 다르게 된다. 만약 압밀후의 함수비가 동일한 C 점과 B 점에서 압밀이 완료되면 비배수전단강도는 E 점으로 동일하게 될 것이다. 그러기 위하여서는 등방압밀의 응력은 K_0 압밀의 평균응력보다 커야 할 것이다. 또한 이때 등방압밀시료는 \overline{CE} 사이에 전단변형이 많이 발생하게 되나 K_0 압밀의 경우는 \overline{BE} 사이의 과정에 해당하는 전단변형만이 발생하게 된다. 그러나 이 경우는 \overline{CB} 부분에 해당하는 전단변형이 이미 공시체 속에 K_0 압밀과정중에 발생한 이력이 있

으며 그로인한 과잉간극수압은 압밀과정에서 소멸되어 버린 것이 된다.

5. 結 論

등방압밀과 K_0 압밀을 실시한 점토공시체에 地域破壞가 발생하도록 유도한 壓密非排水三軸壓縮試驗 結果로 부터 다음과 같은 結論을 얻을 수 있었다.

(1) 일차원압밀이력을 가지는 시료는 應力誘導異方性的의 영향으로 연직방향압축성이 수평방향압축성보다 훨씬 적다. 그러나 이 시료를 等方壓으로 再壓密할 경우 過壓密比가 적을 수록 비배수강도에 있어서 이방성이 감소하고 등방성이 나타난다.

(2) 점토의 비배수강도이방성은 Duncan 과 Seed 의 주장과 같이 간극압계수와 유효응력내부마찰각 중 어느 하나에 의하여서만 영향을 받는 것이 아니고 Ladd et al의 주장과 같이 이들 요소가 서로 복합적으로 영향을 미치고 있다.

(3) 正規壓密점토의 비배수강도는 압밀방법에 따른 압밀이력에 크게 영향을 받으나 근본적으로는 동일한 유효응력포락선을 가진다.

(4) 등방압밀비배수시험은 K_0 압밀비배수시험보다 비배수강도증가율 c_u/σ_{1c}' 가 크게 구하여지며 이 c_u/σ_{1c}' 의 시험치는 Skempton 과 Bishop 식에 의하 산정치와 잘 일치하였다.

(5) 압밀후의 함수비변화 혹은 체적변화는 正八面體수직응력 $(\sigma'_{oct})_c$ 와 正八面體전단응력 $(\tau'_{oct})_c$

의 함수로 표시된다.

(6) 파괴시의 함수비와 강도의 대수값 사이에는 유일함수관계가 존재한다.

(7) 正規壓密粘土에 대한 압밀응력 함수비 및 비배수강도 사이의 유일성에 관한 Rutledge 가설 및 Henkel 과 Sowa 의 이론은 본연구결과와 잘 일치하지 않으며 본문에서 밝힌 바와 같이 새로운 이론이 제안되었다.

感謝의 말

本研究는 한국과학재단의 1985년도 전반기 해외연수지원에 의하여 미국 UCLA 에서 수행된 研究結果이며 同財團에 謝意를 表하는 바이다.

아울러 연수기간중 많은 편의와 유익한 토론으로 도움을 준 UCLA 토목공학과와 Poul V. Lade 教授에게도 감사를 드리는 바이다.

參 考 文 獻

1. Rendulic, L.: Discussion, "Relation Between Void Ratio and Effective Principal Stresses for a Remolded, Silty Clay," *Proc. 1st ICSMFE, Harvard University, Vol. 3*, 1936, pp. 48~51.
2. Taylor, D.W.: *Fundamental of Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, New York, 1948, pp. 362~405.
3. Skempton, A.W. and Bishop, A.W.: *Soils in Building Material-Their Elasticity and Inelasticity*, North Holland Publication Co., Amsterdam, 1954, pp. 417~482.
4. Henkel, D.J.: "The Relationships between the Effective Stresses and Water Content in Saturated Clay," *Geotechnique, Vol. 10*, No. 2, 1960, pp. 41~54.
5. Henkel, D.J.: "The Shear Strength of Saturated Remoulded Clays," *Proc. ASCE Research Conference on the Shear Strength of Cohesive Soils, Boulder, Colorado*, 1960, pp. 533~554.
6. Broms, B. and Ratnam, M.V.: "Shear Strength of Anisotropically Consolidated Clay," *Jour., SMFD, ASEC, Vol. 89, No. SM6*, 1963, pp. 1~26.
7. Lee, K.L. and Morrison, R.A.: "Strength of Anisotropically Consolidated Compacted Clay," *Jour., SMFD, ASCE, Vol. 96, No. SM6*, 1970, pp. 2025~2043.
8. Henkel, D.J. and Sowa, V.A.: "The Influence of Stress History on Stress Paths in Undrained Triaxial Tests on Clay," *Laboratory Shear Testing of Soils, ASTM Special Technical Publication, No. 361*, 1963, pp. 280~291.
9. Ladd, C.C.: "Stress-Strain Behavior of Anisotropically Consolidated Clays during Undrained Shear," *Proc. 6th ICSMFE, Montreal, Vol. 1*, 1965, pp. 282~286.
10. Donaghe, R.T. and Townsend, F.C.: "Effects of Anisotropic versus Isotropic Consolidation in Consolidated-Undrained Triaxial Compression Tests of Cohesive Soils," *Technical Report S-75-13, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.*
11. Lade, P.V.: "Localization effects in triaxial tests on sand," *IUTAM Conference on Deformation and Failure of Granular Materials, Delft*, 1982, pp. 461~471.
12. Skempton, A.W.: "The Colloidal Activity of Clays," *Proc. 3rd ICSMFE, Zurich, Vol. 1*, 1953, pp. 57~61.
13. Skempton, A.W.: "The Pore-Pressure Coefficients A and B," *Geotechnique, Vol. 4*, 1954, pp. 143~147.
14. Blight, G.E.: "The Effect of Nonuniform Pore Pressures on Laboratory Measurements of the Shear Strength of Soils," *Laboratory Shear Testing of Soils, ASTM Special Technical Publication, No. 361*, 1963, pp. 173~184.
15. Lade, P.V. and Musante, H.M.: "Three Dimensional Behavior of Normally Consolidated Cohesive Soil," *Report No. UCLA-ENG-7626, UCLA*, 1976.
16. Lade, P.V. and Tsai, J.I.: "Three-Dimensional Behavior of Remolded Overconsolidated Clay," *Report No. UCLA-ENG-85-09, UCLA*, February 1985.
17. Jacobsen, M.: "The Undrained Shear Strength of Preconsolidated Boulder Clay," *Proc. Geot. Conf., Oslo, Vol. 1*, 1967, pp. 119~122.
18. Lee, K.L.: "End Restraint Effects on Undrained Static Triaxial Strength of Sand," *Jour., GED, ASCE, Vol. 104, No. GT6*, 1978, pp. 687~704.

19. Barden, L. and McDermott, R.J.W.: "Use of Free Ends in Triaxial Testing of Clays," *Jour., SMFD, ASCE, Vol. 91, No. SM6*, 1965, pp. 1~23.
20. Duncan, J.M. and Dunlop, P.: "The Significance of Cap and Base Restraints," *Jour., SMFD, ASCE, Vol. 94, No. SM1*, 1968, pp. 271~290.
21. Rowe, P.W. and Barden, L.: "The Importance of Free Ends in Triaxial Testing," *Jour., SMFD, ASCE, Vol. 90, No. SM1*, 1964, pp. 1~27.
22. Duncan, A.M. and Seed, H.B.: "Anisotropy and Stress Reorientation in Clay," *Jour., SMFD, ASCE, Vol. 92, No. SM5*, 1966, pp. 21~50.
23. Duncan, A.M. and Seed, H.B.: "Strength Variation along Failure Surfaces in Clay," *Jour., SMFD, ASCE, Vol. 92, No. SM6*, 1966, pp. 81~104.
24. Ladd, C.C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F. and Poulos, H.G.: "Stress-Deformation and Strength Characteristics," *State-of-the-Art Report, Proc., 9th ICSMFE, Tokyo, Vol. 2*, pp. 421~496.
25. Olson, J.P. and Wahls, H.E.: "Predicting Effective Stress Paths," *Jour., SMFD, ASCE, Vol. 97, No. SM8*, 1971, pp. 1139~1143.
26. Bhaskaran, R.: "Undrained Strength of Anisotropically Consolidated Sand," *Discussion, Jour., SMFD, Vol. 97, No. SM. 1*, 1971, pp. 249~250.
27. Bhaskaran, R.: "Strength of Anisotropically Consolidated Compacted Clay," *Discussion, Jour., SMFD., Vol. 97, No. SM1*, 1971, pp. 1128~1131.
28. Akai, K. and Adachi, T.: "Study of One-Dimensional Consolidation and the Shear Strength Characteristics of Fully Saturated Clay," *Proc., 6th ICSMFE, Montreal, Vol. 1*, 1965, pp. 146~150.
29. Lewin, P.I. and Burland, J.B.: "Stressprobe Experiments on Saturated Normally Consolidated Clay," *Geotechnique, Vol. 20, No. 1*, 1970, pp. 38~56.
30. Jaky, J.: "Pressure in Soils," *Proc., 2nd ICSMFE, Rotterdam, Vol. 1*, 1948, pp. 103~107.
31. Lade, P.V. and Tsai, J.: "Effects of Localization in Triaxial Tests on Clay," *Proc., 11th ICSMFE, San Francisco, Vol. 2*, 1985, pp. 549~552.
32. 洪元杓, "正規壓密粘土의 舉動에 미치는 K_0 -壓密效果", 大韓土木學會 論文集 1987, 投稿中.