

反復荷重을 받는 실트질 粘土에 관한 實驗的 研究

— 過壓密 粘土를 중심으로 —

An Experimental Study on Silty Clay
Subjected to Repeated Loads

金 八 圭*
Kim, Pal - Kyu
金 慶 鎮**
Kim, Kyong-Jin
宋 典 變***
Song, Jeon - Seop

Abstract

The object of this paper is to study the general characteristics of overconsolidated silty clays subjected to repeated loading. The samples are first remolded, overconsolidated and a series of strain-controlled triaxial repeated tests are carried out.

Generally the relationship of deviator stress—axial strain of overconsolidated clay is similar in pattern to the normally consolidated clay under single load. But the behavior of the pore water pressure build up in the sample subjected to repeated loading is dependent upon the consolidation history and the level of repeated stress. Therefore through the series of the tests, the characteristics of stress—strain relationship of soils which are differently overconsolidated are investigated, analysed and then compared with each soils. And also, from the relationship of test results, the strength and strain characteristics of soils are observed. The equilibrium lines which presents the critical repeated stress and equilibrium state in the sample under repeated loading, are often straight, but may be curved. And the tendency of the equilibrium lines is observed as to the variation of overconsolidation ratio.

要 旨

본 논문은 反復荷重을 받는 過壓密 실트질 粘土의 일반적 특성에 관한 연구로서 재성형 시료를 過壓密 상태로 제작하여 일련의 變形—制御 反復 三軸試驗을 수행하였다.

일반적으로 單一荷重의 경우에 過壓密粘土의 軸差應力—軸變形率 관계는 그 형태에 있어 正規

* 正會員, 忠南大學校 工科大學 土木工學科 教授

** 正會員, 忠南大學校 大學院 土木工學科

*** 正會員, 忠南大學校 工科大學 土木工學科 講師

壓密粘土의 결과와 흡사하지만, 反復荷重을 받게 되면 시료 내의 間隙水壓 거동은 시료의 壓密履歷과 反復應力의 크기에 따라 변화하게 된다. 그러므로 서로 다른 過壓密比를 가진 시료에 대한 反復荷重試驗 결과를 통하여 나타난 일반적 應力-變形 특성에 관하여 상호 비교 분석하고, 이들의 종합적인 관계로부터 變形 및 強度 특성을 찾고자 하였다. 또한 시료가 平衡狀態로 존재할 수 있는 反復應力의 한계치를 의미하는 직선 혹은 곡선 형태의 平衡狀態線을 결정하고 過壓密比의 변화에 따른 平衡狀態線의 경향을 관찰하였다.

1. 序 論

외력에 의한 물체의 거동 및 파괴 현상을 연구함에 있어 應力-變形 관계는 매우 중요한 학문 분야로서 주로 동일한 입자들로 구성된 金屬, 流體 등에 대하여 다루어 졌다.¹⁾ 그러나 土粒子, 間隙 및 間隙水를 포함하고 있는 복합적 상태의 地盤에서는 공기에 의한 부분은 무시하더라도 土粒子, 流體의 二重的인 구조로 동시에 존재하게 되므로, 土體에서 나타나는 應力-變形 특성이 土粒子의 구성, 間隙水壓, 鈎和度, 荷重條件 등의 상호 관계에 따라 변화하게 된다.²⁾ 그러므로 파괴시의 土質定數에 근거한 極限狀態概念의 해석 방법보다는 파괴가 진행되는 과정 중에 나타나는 應力-變形 특성을 분석하여 地盤 연구의 기초 자료로 활용하는 것이 합리적인 방법이라 생각한다.⁴⁾

자연 상태의 殘積土 지반이나 다져진 細粒土에 지속적인 하중을 가할 때 나타나는 應力-變形 특성에 대한 연구가 Bishop & Henkel³⁾ 및 Ladd⁵⁾ 등에 의해 활발하게 추진되어 오던 중, Buchanan & Khuri⁶⁾ 등이 고속도로, 활주로에 작용하는 反復 輪荷重에 의해 지반의 強度-變形 관계에 좋지 못한 영향이 나타남을 발견하면서부터 反復荷重에 대한 연구가 심도있게 진행되기 시작하였다.

일반적으로 서로 다른 하중조건이 鈎和粘土地盤에 작용하게 되면 그에 따른 應力-變形 특성이 매우 달라지게 되는데 이러한 변화의 가장 근본적인 요인은 粘土의 有效應力破壞를 유발하는 間隙水壓의 거동에 있다고 할 수 있다.

최근 국내의 경우 서해안 개발 사업에 힘입어 港灣 및 대규모 臨海 工團, 海岸 高速道路 建設 등 軟弱 地盤의 활용이 절실히 요청되고 있을

뿐만 아니라 각종 구조물에 대한 耐震 設計를 의무화하는 추세이므로 反復荷重에 대한 연구는 현실적으로 매우 의미있는 일이라 판단된다.

본 연구는 正規壓密粘土의 다음 단계 연구로서 過壓密粘土에 反復荷重이 작용할 때 나타나는 應力-變形의 일반적 특성에 관하여 논하였다. 이들 시험 결과들을 상호 비교 분석하고 전체적으로 나타나는 變形 및 強度의 특성을 검토하였다. 또한 각 시료의 初期拘束應力值에 의해 서로 다른 형태로 결정되는 平衡狀態線을 찾아 내므로써 시료의 특성을 구분하는 경계의 존재를 확인코자 하였다.

2. 使用試 料

본 연구에 사용하기 위하여 현장에서 채취한 점토는 운모를 약간 포함한 회색빛의 하상 점토로서 자연 상태의 시료에 대한 粒度分布, 物理的特性 및 鑛物構成, 그리고 三軸試驗機와 試料壓密成形機등은 金 등⁷⁾의 연구에서 밝힌 바 있다. 본 실험에 사용되는 시료를 성형, 제작하는 과정은 일반적인 三軸試驗의 경우와 동일하며, 단지 소정의 過壓密比-O.C.R.=2, 4, 6-를 얻기 위하여 Table 1과 같이 응력을 조절하였다. 이때 각 시료에 대하여 先行壓密應力 및 初期拘束應力を 가하는 시간은 각각 24시간으로 하였다.

Table 1. Stress state of specimens

Specimen	O.C.R.=2	O.C.R.=4	O.C.R.=6
Precon,St	2 kg / cm ²	4 kg / cm ²	6 kg / cm ²
Ini,Conf,St	1 kg / cm ²	1 kg / cm ²	1 kg / cm ²

3. 實 驗

본 실험에서는 시료 내에서 위치에 따른 間隙

水壓의 偏差가 충분히 분산될 수 있도록 하기 위하여 본 三軸試驗機의 가장 느린 剪斷變形速度인 $0.1\% / \text{min}$ 을 채택하였으며, 실험을 시작하기 위한 준비과정에서의 背壓은 2 kg/cm^2 로 가하였다. 본 실험은 壓密 非排水 狀態로 수행되므로 체적변형은 무시하였으며, 또한 하중의 반복시 변환 순간에 발생할 수 있는 기계의 오차에 따른 영향도 고려하지 않았다.

각각의 시료에 대한 구체적인 실험 방법은 金等⁷⁾의 논문에서 기술한 바 있으며 본 연구에서 수행한 실험 내용은 Table 2와 같다.

Table 2. Tests for overconsolidated clay

Samples	Test No.		
Test type	O. C. R. = 2	O. C. R. = 4	O. C. R. = 6
Comp. fail. test	K-02T23	K-04T32	K-06T41
Cycled at fail. test	K-02T24	K-04T33	K-06T42
Non-fail. equil. test	K-02T25~30	K-04T34~39	K-06T43~48
Step test	K-02T31	K-04T40	K-06T49

4. 結果 및 分析

4.1 一般的 舉動

4.1.1 壓縮 破壊 試験

過壓密粘土에 대한 壓縮破壊試験의 일반적 거동 특성을 논술함에 있어, K-06T41(O.C.R.=6) 시료의 결과를 대표적으로 선정하여 이를 正規壓密粘土의 결과와 비교하면 Fig. 1과 같다. 過壓密試料의 軸差應力-軸變形率의 거동 형태는 Fig. 1(a)와 같이 正規壓密粘土의 경우 (K-NT1)와 거의 동일하게 나타났으나, Fig. 1(b)에서의 間隙水壓 거동 형상은 현저하게 다른 모습을 보이고 있었다. Fig. 2에 나타난 서로 다른 過壓密比(O.C.R.=2, 4, 6)를 갖는 시료들에 대한 전반적 거동 형태는 서로 유사하였으나 동일한 初期拘束應力を 받은 시료들에 대한 非排水壓密強度의 크기는 過壓密比의 증가에 따라 증가 경향($2.35 \text{ kg/cm}^2 \sim 2.78 \text{ kg/cm}^2$)을 보였으며, 파괴시 軸變形率은 오히려 감소하고 있었다($8.4\% \sim 6.8\%$). 또한 Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 間隙水壓의 頂點은 過壓密比가 증가할수록 큰 軸變形率($0.4\% \sim 0.8\%$)에서

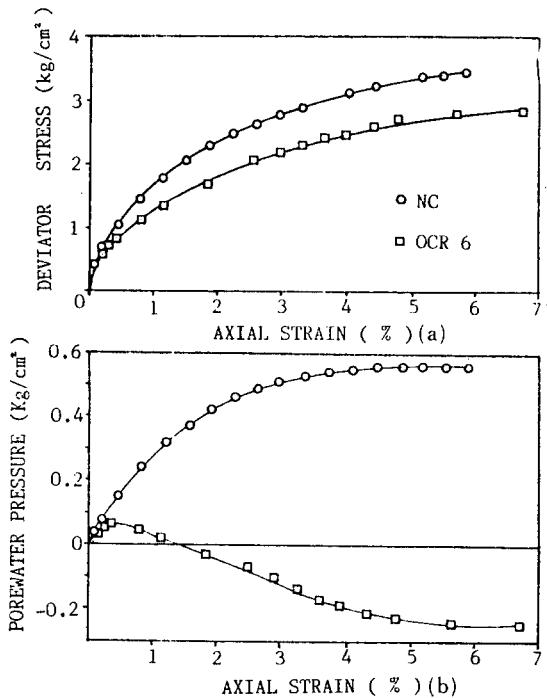


Fig. 1 Stress-strain curve(NC VS O.C.R.=6)

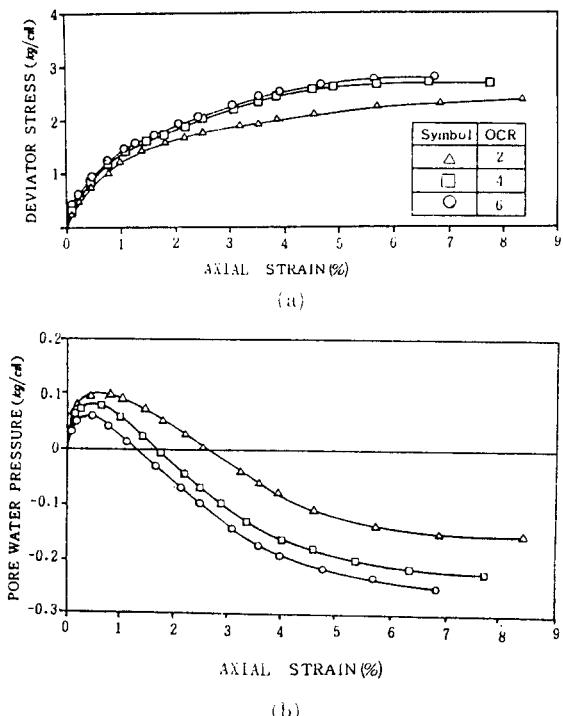


Fig. 2 Stress-strain (O. C. R. = 2, 4, 6)

발생하고 있었을 뿐 아니라 그때의 間隙水壓의 크기도 계속 증가($0.073 \text{ kg/cm}^2 \sim 0.105 \text{ kg/cm}^2$)하였다. 아울러 殘留間隙水壓의 크기도 보다 過壓密比가 큰 시료에서 점차적으로 작게((-) $0.145 \text{ kg/cm}^2 \sim (-) 0.258 \text{ kg/cm}^2$) 나타났다. 過壓密粘土의 軸差應力, 間隙水壓-軸變形率의 결과에 의한 有效應力經路를 Fig. 3에 도시하였다. 이때 3종류의 過壓密試料에 대하여 동일한 初期拘束應力으로 過壓密比를 결정하였으므로 같은 초기점에서 출발함을 보여주었으며 초기 부분의 진행 방향은 正規壓密粘土의 경우와 거의 동일하나 過壓密比의 증가에 따라 기울기가 보다 급해졌다.

상기 내용의 실험 결과치들을 요약하여 Table 3에 나타내었다.

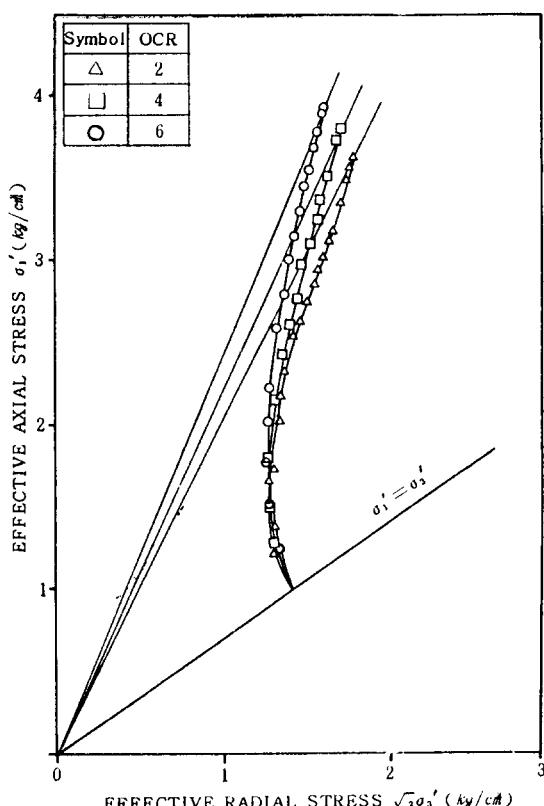


Fig. 3 Effective stress paths

Table 3. Results of compression failure tests for O.C.R.= 2, 4, 6

Specimens	O.C.R.=2	O.C.R.=4	O.C.R.=6
Undr. Comp. Fail.	2.352	2.683	2.784
Str. (Strain) kg/cm^2	(8.4%)	(7.8%)	(6.8%)
Peak pore water pr. (Strain) (kg/cm^2)	0.073	0.084	0.105
Resi. pore water pr. (kg/cm^2)	-0.145	-0.220	-0.258

4.1.2 破壞 反復 試驗

각 시료의 非排水 조건에서 파괴상태까지 하중을 가한 후 다시 파괴 현상이 발생할 때까지 반복하여 하중을 가하는 시험으로서 K-04T3 3(O.C.R.=4) 시료의 결과를 대표적으로 Fig. 4에 도시하였다.

Fig. 4(a)의 1회 주기 거동은 壓縮破壞試驗의 결과와 다를 바가 거의 없으나 非排水 壓縮破壞強度에 의해 시료가 1차 파괴한 이후에 다시 응력을 가하면 작은 추가적인 軸變形量의 증가에서 곧 바로 파괴현상이 나타나고 있다. 이때의 破壞應力值는 1회 주기에서 보다 낮은 값으로 결정되었으며 이러한 과정을 반복할수록 점차 감소하였다.

Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 초반부에서의 間隙水壓 진행형태는 전형적인 過壓密粘土의 거동을 따르고 있으나 하중을 반복하는 과정에서는 독특한 경로를 보이고 있다. 하중이 제거되는 순간에 間隙水壓이 약간 증가하다가 곧 현격하게 증가하여 載荷 도중에 절정치에 도달하였다가 하중을 가하는 동안에 다시 감소하는 현상이 계속하여 반복되었다.

또한 각 주기의 破壞反復荷重에 도달했을 때 나타나는 殘留間隙水壓의 크기는 주기를 반복함에 따라 점차 미세한 증가를 보인 반면 매주기의 間隙水壓 最大值는 거의 동일한 값을 유지하고 있었다.

Fig. 4(c)에서 보는 바와 같이 應力經路의 출발점에서부터 초기 부분까지의 진행형태는 正規壓密粘土 經路의 초기 진행방향과 유사하지만 間隙水壓이 절정치에 도달한 이후, 감소하기 시작하는 경계에서 應力經路의 방향은 우측으로 변화하였다. 이때 결정되는 破壞點들은 2, 3회

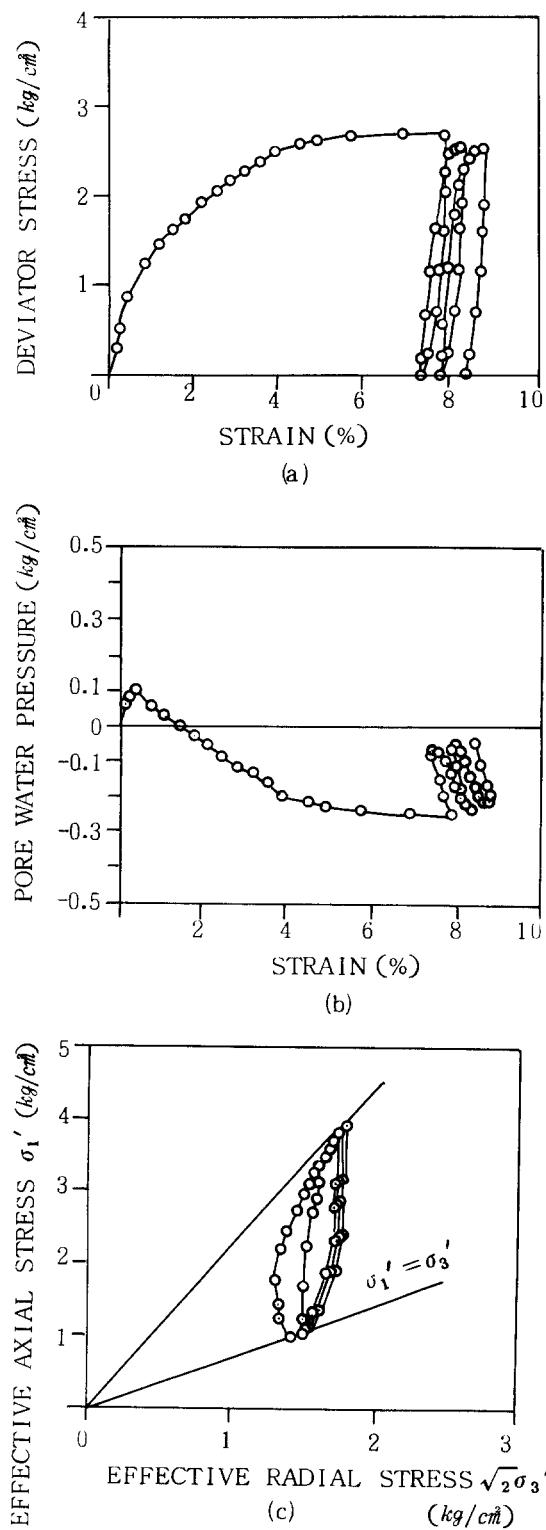


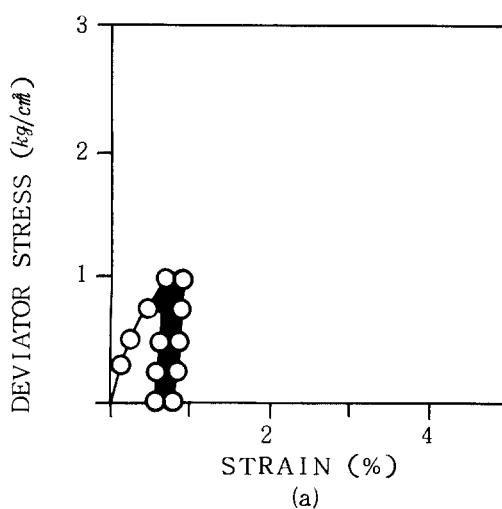
Fig. 4 Stress-strain curve(O.C.R.=4)

주기의 경우에는 거의 동일한 應力比를 가지게 되어 같은 직선상에 놓이게 되는 일관성있는 경향을 보여주었다.

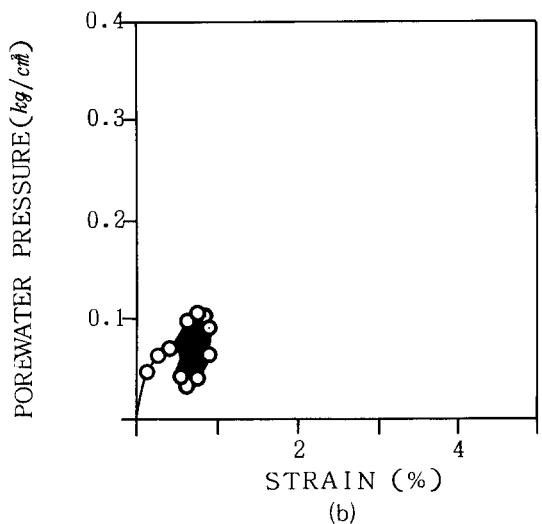
4.1.3 非破壊 平衡試験

시료의 平衡狀態를 결정함에 있어 중요한 역할을 하는 시험으로서 軸變形率 1% 미만의 몇 단계 응력 크기들을 反復荷重值로 결정한 후 동일한 응력으로 계속 반복하였다. 이때 하중의 初期 反復週期 동안에는 시료의 變形이나 間隙水壓이 계속 증가하다가 어느 특정한 週期數에 도달하여 이와 같은 증가현상이 멈추고 동일한 궤적을 따라 중복되는 현상이 나타나게 되면 하중을 제거하였다.

본 실험에서 사용된 시료는 각각 6개씩으로서 이들의 실험에서 서로 다른 反復應力值에 따라 결정된 平衡狀態의 應力點들로 각각의 平衡狀態線을 찾을 수 있게 될 것이다. 이러한 실험에 대한 경향을 알아보기 위해 초기 軸差應力を $(\sigma'_1 - \sigma'_3) = 1 \text{ kg/cm}^2$ 로 반복한 K-02T29, K-04T39, K-06T47의 결과를 Table 4에 요약하여 나타내었으며 대표적으로 K-06T47(O.C.R. = 6)의 시료의 응력-변형 관계를 Fig. 5에 도시하였다.



(a)



(b)

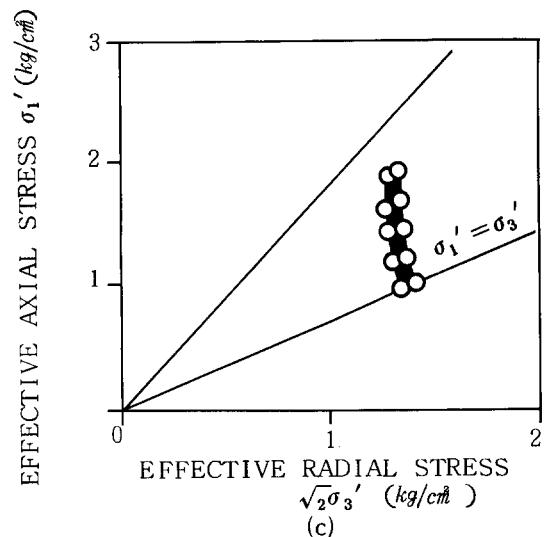


Fig. 5 Stress-strain curve(O.C.R=6)

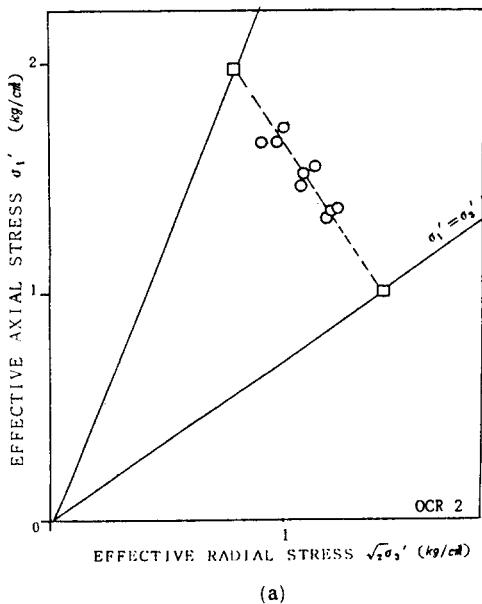
Table 4. The Results of Non-fail. equil.
tests for O.C.R.= 2, 4, 6

Specimens	K-02T29	K-104T39	K-06T47
Dev. Stress (kg / cm ²)	1.0	1.0	1.0
Pore-water Pr. (kg / cm ²) (Strain)	0.11 (0.8)	0.12 (0.7)	0.10 (0.9)
Cycles	10	8	9

4.2 平衡狀態線

각각의 過密壓 시료에대한 非破壊 平衡試驗에 의해 결정된 平衡應力點들을 Fig. 6과 같은 Octahedral 應力空間에 그린 결과, O.C.R.=2의 경우에는 正規壓密粘土의 결과와 같이 직선적 경향을 보이고 있었으나 O.C.R.=4, 6의 시료에서는 곡선으로 나타났으며 이 곡선의 초기 접선을 平衡狀態線의 기울기로 가정하여 각각 그림에 표시하였다.

이와 같이 시료의 壓密 履歷에 따라 서로 다른 양상을 보이는 平衡狀態線은 비배수 상태의 시료에서 발생하는 有效應力이 初期壓密條件과 最大週期應力差에 따라 변화하려는 한계를 나타내 주는 것으로서 有效應力 변화는 間隙水壓에 따르게 되므로 이는 결국 間隙水壓과 週期應力差 사이의 일정한 관계가 존재함을 의미하게 된다. 즉 O.C.R.=2와 같이 平衡狀態線이 직선으로 나타나면 위와 같은 관계가 일정함을 뜻하는 것이지만, 곡선으로 나타난 O.C.R.=4, 6의 경우에는 그렇지 못함을 보여주고 있다. 또한 過壓密比가 증가함에 따라 平衡狀態線의 기울기가 보다 급해지는 현상은 反復 週期應力值에 대한 平衡狀態에서의 間隙水壓 比가 過壓密의 정도에 따라 점차 감소됨으로 나타나는 것이다.



(a)

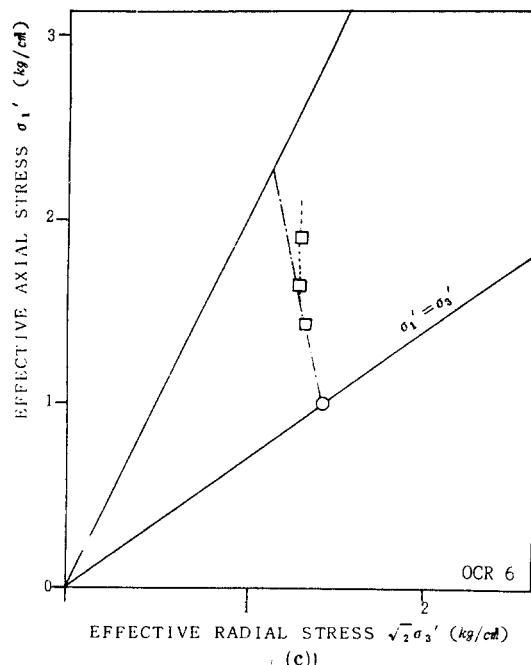
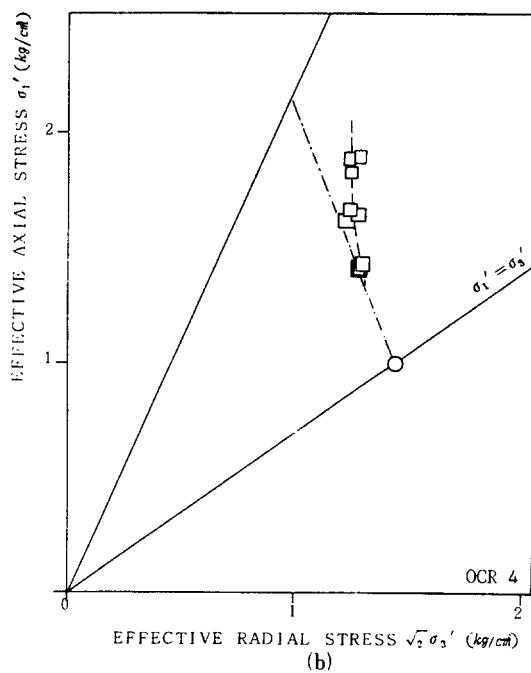


Fig. 6 Equilibrium lines

4.3 強度特性

粘土에 대한 일반적 강도 특성은 破壞反復試驗에서 나타난 결과에서 찾아 볼 수 있는 것으로서, 시료가 破壞荷重에 도달한 이후에 反復荷重

을 받게되면 破壞強度가 점차 낮아져 限界反復應力值에 근접할 때 까지 계속 감소하는 것은 正規壓密粘土의 경우와 동일하였다. 그러나 過壓密粘土의 경우, 동일한 반복 주기 횟수에서 反復軸差應力值의 증가에 따라 최종 週期強度가 점차적으로 감소하는 正規壓密粘土와 같은 일관성 있는 경향을 보이지 않아 이에 대한 결론을 맺기에는 다소 미흡하였다. 그리고 應力段階別試驗과 單一荷重 및 非破壞平衡試驗에 따른 경향을 서로 비교하기 위하여 K-02T31 시료의 결과를 택하여 Fig. 7에 대표적으로 도시하였다. 이때의 軸差應力은 非破壞平衡試驗에서 택한 初期應力值인 $0.5, 0.75, 1.0 \text{ kg/cm}^2$ 의 3단계로 응력을 가한 결과, $0.5, 0.75 \text{ kg/cm}^2$ 의 反復軸差應力值에서는 平衡狀態에 도달하였으나 1.0 kg/cm^2 에서는 도달하지 못하였다. 또한 각 段階別 週期應力值의 최종 주기에서 나타난 強度의 크기는 그때의 週期應力 크기와 동일한 크기의 非破壞平衡試驗 결과치보다 초기응력의 크기가 증가할수록 점차 감소하였으며, 아울러 單一荷重의 경우보다도 強度의 크기는 감소하였으나 그에 비해 間隙水壓의 최대치는 매우 크게 증가 하였다.

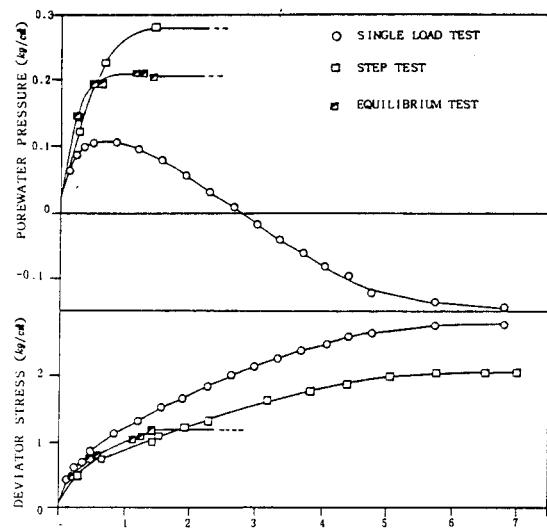


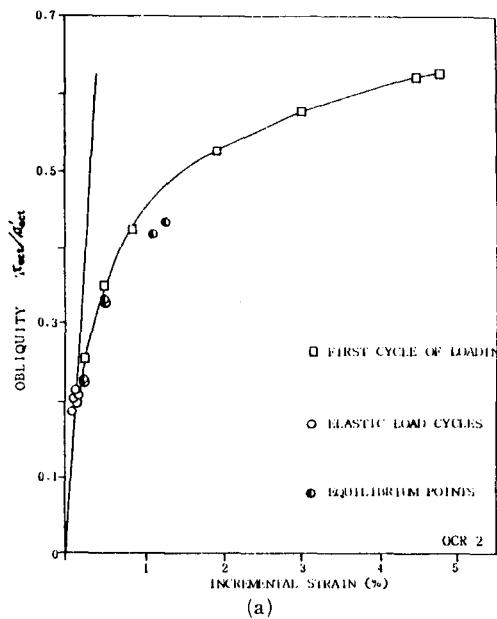
Fig. 7 The comparision of stresses pore water pressures of single, repeated loading & step test(O.C.R.=2)

4.4 變形特性

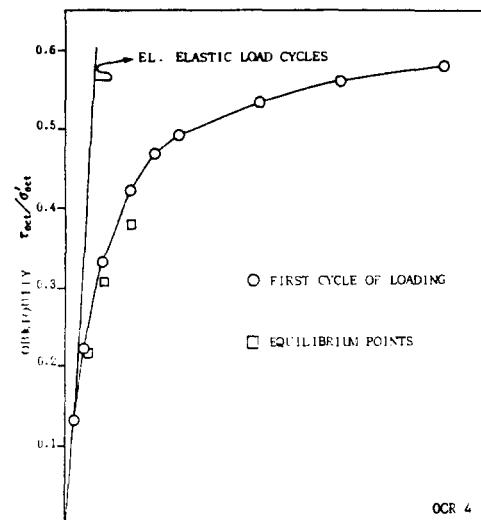
각 실험에서 결정된 초기荷重週期와 平衡狀態點들에 대한 軸變形率 - 破壞應力比($\tau_{oct} / \sigma'_{oc}$)의 관계는 Fig. 8과 같다. Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이 過壓密試料의 初期週期동안의 거동은 기울기 및 진행 궤적의 거의 동일하여 過壓密比에 따른 변화가 거의 없음을 알 수 있었으며 단지 初期區間의 직선부분 길이만 過壓密比의 증가에 따라 미세한 증가를 보였다. 이는 過壓密比의 증가에 따라 降伏面이 팽창하게 되어, 즉 弹性구간의 확장으로 시료가 점차 剛性化되고 있음을 보여주는 결과로 사료 된다.

아울러 變形增分 1.25%를 경계로 應力比의 증가가 현격하게 둔화되어 거의 수평한 상태로 진행되었으며 이러한 수평부분의 기울기는 過壓密比의 증가에 따라 점차 완만하여 짐을 볼 수 있었다. 여기에서 過壓密試料의 弹性區間이 급격한 변화가 발생한 1.25%의 軸變形率 내에 존재함을 유추할 수 있게 되며 또한 이러한 현상은 시료내에서 발생하는 間隙水壓이 현격하게 감소하기 시작하는 상태로부터 기인됨을 알 수 있었다.

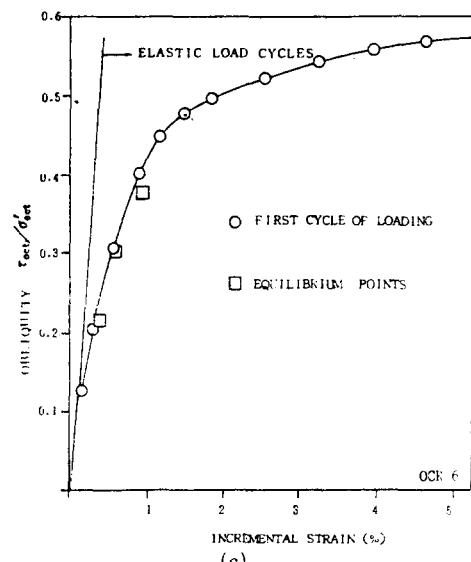
또한 Fig. 8의 (b)에서 보는 것처럼 軸變形率



1% 미만의 구간에 대한 軸變形率과 應力比의 관계는 각각의 결과치가 거의 중첩되어 도시되므로 이 구간의 舉動이 유사함을 입증할 수 있었다.



(b)



(c)

Fig. 8 The relationship between obliquity & strain

5. 結論

일반적으로 粘土의 거동에 가장 큰 영향을

미치는 요소는 시료 내에서 발생하는 間隙水壓으로서 특히 反復荷重下에서의 間隙水壓 거동은 시료의 壓密履歷과 反復應力의 크기에 따라 달라지는 것을 알 수 있었다. 또한 過壓密粘土에서의 間隙水壓 거동은 正規壓密粘土의 경우와는 현저히 달라짐을 볼 수 있었으며 過壓密比의 증가에 따라 最大 및 殘留間隙水壓은 점차 증가 및 감소하는 추세이었다. 過壓密比의 증가에 따라 각 시험에서 나타난 거동형태는 最大軸差應力, 間隙水壓, 殘留間隙水壓 및 平衡應力值 등의 크기에서만 약간의 변화가 있을 뿐 상호 유사하였다. 그러나 平衡狀態線의 경로는 過壓密比의 증가에 따라 점차 곡선적인 경향이 심해졌으며 이때의 기울기는 점차 우측으로 기울어졌다.

強度의 變化에 대한 전체적인 경향은 일관성을 나타내지 않았으나 破壞反復試驗에 의한 결과만은 正規壓密粘土에 대한 연구와 일치하였고 또한 彈性區間에서의 거동은 應力比-變形率 관계에서 시료의 初期 壓密履歷의 차이에도 불구하고 거의 동일한 기울기를 가지는 직선 형태로서 상호 유사하게 나타났으며 약 1.25 %의 軸變形率의 경계를 기준으로 變形率에 대한 應力比의 관계가 급격히 변화함을 알 수 있었다.

본 연구는 1989년도 한국과학재단 기초연구 과제로 선정되어 수행되었으며, 이에 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

1. E.W.Brand & R.P.Brenner, Soft clay Enginee-

ring, ELSEVIER, 1981

2. Tasuoka, F.Ochi, K.Fujii, S.& Okamoto,M., "Cyclic undrained triaxial and tortional Shear strength of sands for different sample preparation method", Soils and Foundations, Vol. 26, No. 3, 1986.
3. Bishop, A.W. & Henkel, D.J., "Pore pressure changes during shear in two undrained clays," 3rd ICSM and FE., Vol.1 : 94, 1953.
4. Hyde, A.F.L & Ward,S.J., "A pore pressure and stability model for a silty clay under repeated loading", Geotechnique 35, No.2, pp.113-125, 1985.
5. Ladd, C.C., "Stress-Strain behavior of anisotropically consolidated clay during undrained shear" Proc. 6th ICSMFE, Vol.1, pp.282-286, 1965
6. Buchanan, S.J. and Khuri, F.I., "Elastic and plastic properties of soils and their influence on the continuous support of rigid pavements," A Report to the Office of the Chief of engineers, Military Construction and the Rigid Pavement Laboratory of the Ohio River Division Laboratories, Marieomont, Ohio, 1954
7. 金八圭 & 宋典燮, "反復荷重을 받는 等方正規壓密粘土의 舉動 및 限界狀態", 대한토질공학회, 제4권, 제3호, pp.43-52, 1988.
8. Wroth, C.P. and Loudon, P.A., "The correlation of strains with a family of triaxial overconsolidated samples of kaolin," Proc. Geot. Conf. Oslo, 1, 159-163, 1967.
9. Roscoe, K.H. and Burland, J.B. ; On the generalized stress-strain behavior of 'wet' clay," On Engineering Plasticity, Cambridge Univ.
10. Schofield, A.N. and Worth, C.P.: Critical State Soil Mechanics, McGrawHill Book Co., London, 1968

(접수일자 1989. 11. 10)