

反復荷重을 받는 等方正規壓密粘土의 舉動 및 限界反復應力

The Critical Repeated Stress and Behavior of the Isotropic Normally Consolidated Clays Subjected to Repeated Loads.

金 八 圭*

Kim, Pal-Kyu

宋 典 燮**

Song, Jeon-Seop

Abstract

The behavior of clays subjected to Repeated loading has been shown to be very different from the behavior under a single load application. Especially the behavior of pore water pressure is of considerable importance.

The objective of this work is to experimentally study the stress-strain characteristics of clays, and this study includes the pore water pressure which is built up during the load repetition.

For this study, the samples were consolidated isotropically in the triaxial cell during 24 hours, and monotonic strain controlled triaxial test is carried out by using the tests of Compression failure, Cycled at failure, and Nonfailure equilibrium on remoulded samples under undrained condition.

Consequently there exists a critical level of repeated loading which separates the behavior of a particular sample into two distinctly different patterns.

要 旨

反復荷重을 받는 粘土의 거동은 單一荷重에 의한 결과와 매우 相異하게 나타나며, 그중에서도 특히 間隙水壓의 거동은 상당히 중요하다.

本 研究는 反復荷重 下에서의 粘土에 대한 應力-變形 特性을 규명하기 위한 實驗的 研究로서 荷重을 가하는 동안에 발생하는 間隙水壓에 대하여도 언급하였다.

試料는 三軸容器 안에서 24時間동안 等方壓密시켰으며, 三軸試驗은 非排水狀態 下에서 再成型된 試料에 대하여 壓縮破壞, 破壞反復, 非破壞 平衡試驗을 變形制御方法으로 수행하였다.

이에 따라 어느 특정한 試料의 舉動을 뚜렷하게 서로 다른 두가지 양상으로 구분하는 反復應力の 限界値가 존재함을 확인할 수 있었다.

* 正會員, 忠南大學校 工科學 土木工學科 教授

** 正會員, 忠南大學校 大學院 博士課程

1. 序 論

흙은 외부에서 작용하는 荷重要因에 의해 應力이 발생하게 되며, 그에 따른 間隙水의 流出, 土粒子의 再配列 등으로 變形이 일어난다.¹⁾ 이러한 應力—變形 關係는 間隙水壓, 飽和度, 初期應力條件, 또는 土粒子의 構成 등의 要因에 따라 복합적으로 變化하는 특성을 지니고 있다.

應力—變形 關係의 研究들은 대부분 단순한 荷重條件에 대한 것들로서 反復荷重을 고려한 내용들은 그리 많지 못한 실정이며, 그중에서도 토모래에 대한 研究가 주류를 이루고 있다.²⁾

최근 국내에서 건설하고 있는 대규모 原子力 發電所 및 海岸 海洋構造物 또는 건물의 高層化 등 反復荷重을 고려하여야 할 必要性이 점차 인식되어 가고 있다.³⁾

일반적으로 飽和粘土에 1회의 荷重을 계속 가할 때 발생하는 變形, 間隙水壓은 反復荷重을 받는 경우와 서로 相異하게 나타난다.⁴⁾ 粘土地盤에 反復荷重을 가하는 경우, 粘土의 特性和 荷重의 傳達速度, 強度, 週期 및 期間 등의 差異에 따라 상당히 變化하게 된다.^{5,6)} 이러한 要因中에서 특히 중요한 것은 荷重이 作用하는 동안에 變化하는 間隙水壓의 舉動양상이라 할 수 있다.⁷⁾ 이때 粘土의 거동을 有效應力概念으로 分析하기 위해서는 精確한 間隙水壓值를 測定하여야 하므로 매우 느린 剪斷變形速度를 채택하여야 한다.⁸⁾

이에 대한 研究는 Bishop, Henkel⁹⁾에 의해 최초로 시도되었으며, Lo, Knight^{10,11)}는 應力 및

變形制御의 反復三軸試驗을 수행하였고, Hyde¹²⁾는 Silt clay의 塑性變形에 대한 특성을 연구하였다. 그 후 Sangrey¹³⁾ Lee¹⁴⁾ Jacques¹⁵⁾ 등에 의해 研究가 진행되어 오다가 최근 Pender¹⁶⁾ 등은 動荷重 적용시 間隙水壓의 動的增加를 예측할 수 있는 일반적인 모델을 제시하기에 이르렀다. 또한 Wroth¹⁷⁾ 등의 Cambridge學派는 자신들의 限界狀態理論을 도입하여 反復荷重을 받는 粘土의 構成方程式을 발표하였다.

本 論文은 反復荷重을 받는 粘土의 舉動을 modelling하기 위한 先단계의 實驗的 研究로서 等方正規壓密粘土의 應力—變形, 間隙水壓—變形 關係를 찾아내어 그에 따른 變形 및 強度變化 特性을 규명코자 하였다.

또한 彈性영역의 反復應力에 의해 나타나는 應力—變形 關係는 線型的이겠으나 이 영역 이상의 軸應力 增加를 받게 되면 殘留變形과 間隙水壓의 舉動은 非線型으로 變化하게 될 것이다. 이러한 變化의 境界, 즉 平衡狀態線과 그에 따른 限界反復應力值를 결정하고자 하였다. 이 限界值는 反復荷重에 의한 粘土의 彈性 및 부분적인 塑性舉動의 境界를 보여주는 것으로서 粘土의 限界狀態를 규명하는데 유용하리라 판단된다.

2. 使用試料

本 研究에 사용된 試料는 錦江 하류의 세도면에서 채취한 河床粘土로서 物理的 性質, 鑛物構成 및 粒度分布는 각각 Table 1, 2 및 Fig. 1과 같다.

현장에서 채취한 試料를 Slurry 상태로 만들어

Table 1. The results of physical properties for used soil

Item	Specific gravity	LL	PL	PI	Natural water content	No. 200 Sieve passing
Soil type						
CL	2.62	32.3%	24.09%	8.21%	49.74%	77.75%

Table 2. The results of mineral analysis for used soil

Composition	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	NaCl	Ig _{loss}
Soil type										
CL	64.8	16.78	0.86	0.09	5.1	1.5	0.8	2.79	1.54	5.5

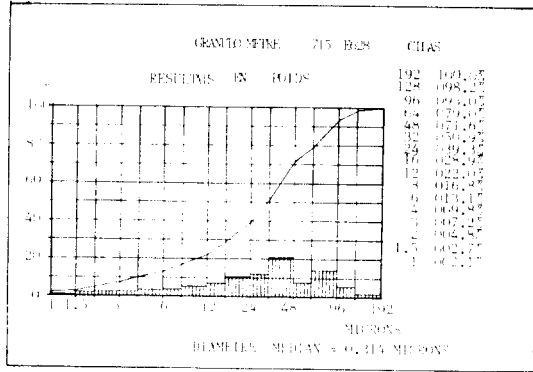


Fig. 1. Grain size distribution curve

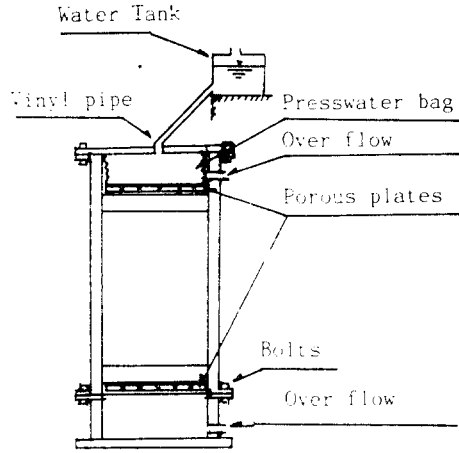


Fig. 2. Consolidation App.

Fig. 2와 같은 壓密成型器에 넣고 兩面 排水狀態로 만든 후, 약 0.5kg/cm²의 壓力으로 150여일간 再壓密, 成型하였다.

三軸試驗機는 自動記錄裝置가 부착된 4連式의 TANIFUJI社 제품을 사용하였다.

3. 試驗方法

試料를 壓密成型機에서 추출하여 Paraffin으로 밀봉한 후 恒溫恒습조에 보관하였다가 적정 量만큼 절취하여 使用하였다. 試料를 三軸容器

에 안치한 후 完全飽和를 시키기 위해 2kg/cm²의 背壓을 24시간 가하였으며, 그에 따른 間隙水壓의 增加를 測定하여 그 값이 安定된 상태에 이르면, 完全飽和狀態로 간주하였다. 다시 24시간동안 2kg/cm²의 拘束應力으로 等方壓密시킨 후 背壓 Value를 降했다. 剪斷變形速度는 0.001%/min로 하였으며, 應力條件은 $\sigma_1', \sigma_2' = \sigma_3'$ 의 圓柱壓縮狀態를 채택하였다. 또한 軸變形에 따른 軸差應力과 間隙水壓으로 결정되는 有效應力經路는 橫軸을 $\sqrt{2}\sigma_3'$ 로 하는 Octahedral Stress Space에 도시하였다.

Table 3. Scheme of triaxial repeated tests

Test No.	Test type	cycles	Deviator stress (kg/cm ²)
K-T 1	Compression failure test	1	3.36
K-T 2	Cycled at failure test	3	
K-T 3	Non-failure equilibrium test	7	1.0
K-T 4	"	9	1.5
K-T 5	"	14	1.75
K-T 6	"	7	1.75
K-T 7	"	19	1.5
K-T 8	"	7	1.0
K-T 9	"	7	0.5
K-T 10	"	7	0.5
K-T 11	"	7	0.1
K-T 12	Compression failure test (1kg/cm ²)	1	
K-T 13	Step test(0.5-1.0-1.5)		

本 研究에서 수행한 試驗內容은 Table. 3에 열거하였으며, 모든 試驗은 CU Test로 실시하였다.

4. 試驗結果

4.1 壓縮破壞試驗

試料의 非排水強度를 결정하기 위한 基本試驗으로서 Fig. 3, 4에 그 결과를 도시하였다. Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 軸差應力은 초기에 急剧하게 增加하다가 $\epsilon \approx 4\%$ 이후부터 완만해지면서 약 5.9%의 軸變形에서 거의 수평하게 되었다. 이후에는 계속적인 變形을 加하여도 매우 미소한 應力의 增加를 예측할 수 있으므로 變形을 중단하고 荷重을 제거하였다. 이때의 最大軸差應力은 3.36kg/cm²로서, 이를 本 試料의 非排水 壓縮破壞強度로 결정하였다.

間隙水壓은 $\varepsilon \doteq 4.5\%$ 에서 最大值 0.556 kg/cm^2 에 도달한 후 軸應力 増分을 제거할 때까지 동일한 값을 유지하였다. 그러나 軸應力을 제거한 직후 약간의 감소를 나타내다가 軸變形이 약 0.3% 회복된 지점에서부터 다시 증가하여 應力이 완전히 제거되자 最大值보다 조금 큰 0.565 kg/cm^2 로 증가하였다. 이는 荷重 제거 시 상대적인 負(-)間隙水壓의 발생으로 인하여 감소하다가 應力의 再分配 현상에 의해 다시 증가하는

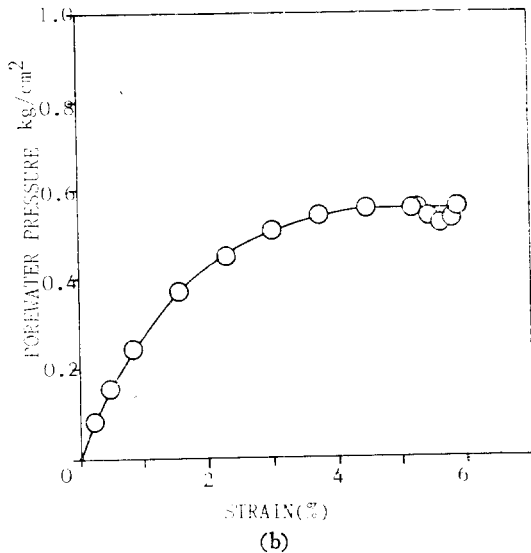
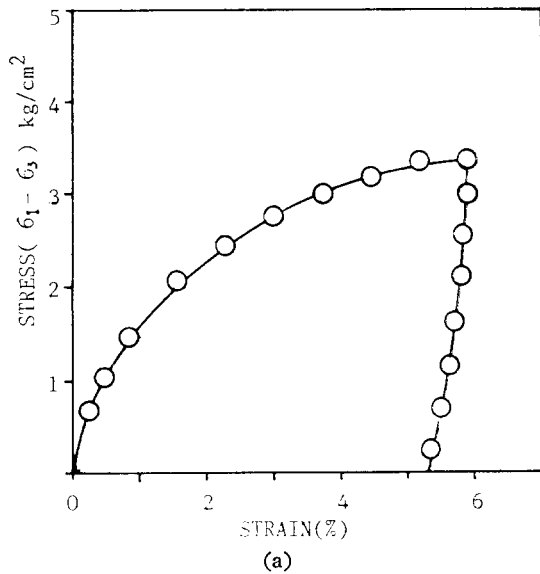


Fig. 3. Stress-strain curve for compression failure test

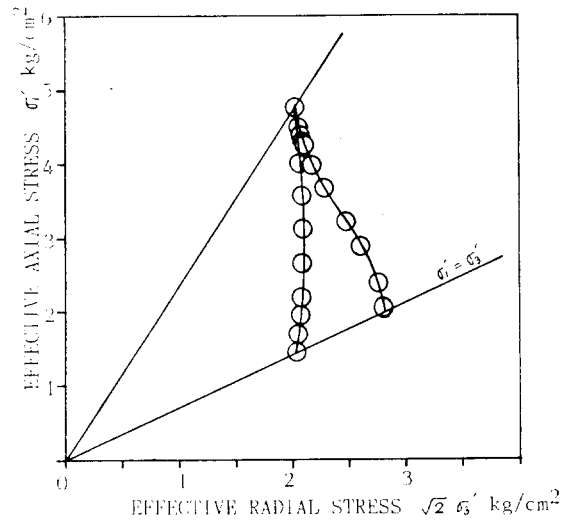


Fig. 4. Stress path for compression failure test

것으로 알려져 있다.¹⁸⁾

Fig. 4에서 破壞 시 應力比로 결정되는 破壞傾斜線 부근의 有效應力經路가 원점방향으로 약간 휘어진 이유는 軸變形 4.5% 이후에 軸應力의 증가에도 불구하고 間隙水壓의 變化가 없기 때문이다. 이러한 거동은 Weald clay나 London clay에서는 나타나지 않으나 Vienna clay의 거동에서 유사한 형태가 보이고 있다.²⁰⁾

4.2 破壞反復試驗

4.1장에서 결정된 非排水 壓縮破壞強度로 1회 週期應力을 가한 후, 荷重을 反復한 결과 Fig. 5, 6과 같았다.

Fig. 5(a)에서 보여지는 1회 週期の 거동형태는 壓縮破壞試驗의 결과와 거의 동일하였으며, 2, 3회 週期の 最大應力値는 점차 낮아진 반면, 間隙水壓은 오히려 계속 증가하였다. 그러므로 Fig. 6의 有效應力經路는 Fig. 4와 매우 다른 형태로 나타나게 된다. b~c, d~e의 초반부는 有效圓柱應力이 감소하는 0~a의 經路와 유사하지만, 荷重作用 期間 중에 間隙水壓이 감소하므로 그에 따른 變曲點이 발생하게 되어 應力經路의 進行方向이 變化되었다.

또한 매 週期の 破壞點 a, c, e가 모두 破壞傾斜線上에 놓이게 되므로서 破壞 시 동일한 應力比를 가져야 하는 條件에 잘 일치하고 있었다.

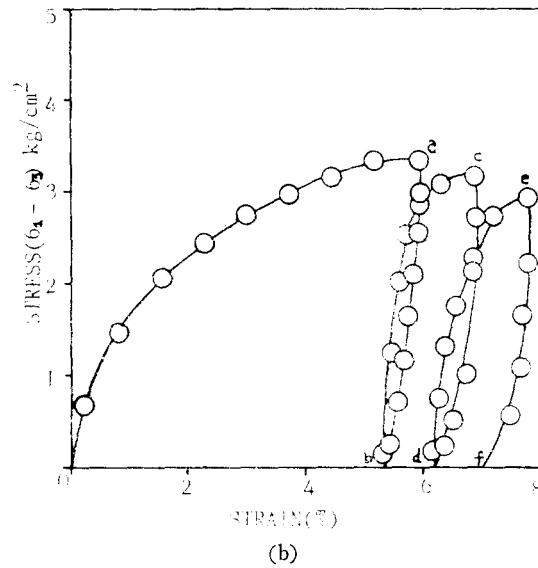
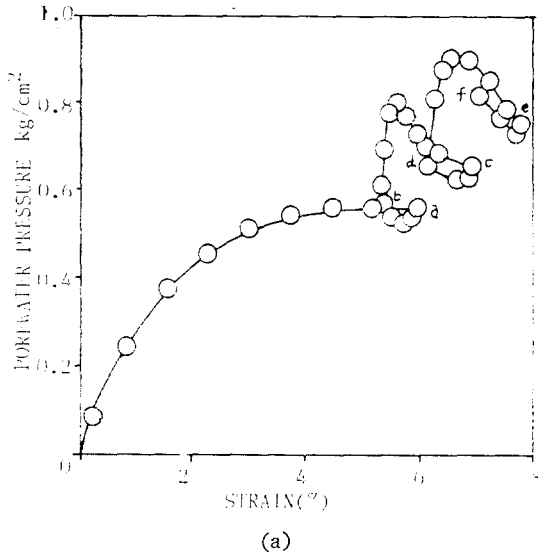


Fig. 5. Stress-strain curve for cycled at failure test

이는 최초의 荷重에 의해 試料가 이미 破壞된 상태이므로 剪斷抵抗力이 계속 감소되어 나타나는 현상이며, 이때는 平衡狀態의 존재없이 곧바로 破壞에 도달하게 된다. 3회 주기 이후에 反復荷重을 가하게 되면 점차 낮은 軸差應力에서 破壞가 발생케 됨을 예측할 수 있다.

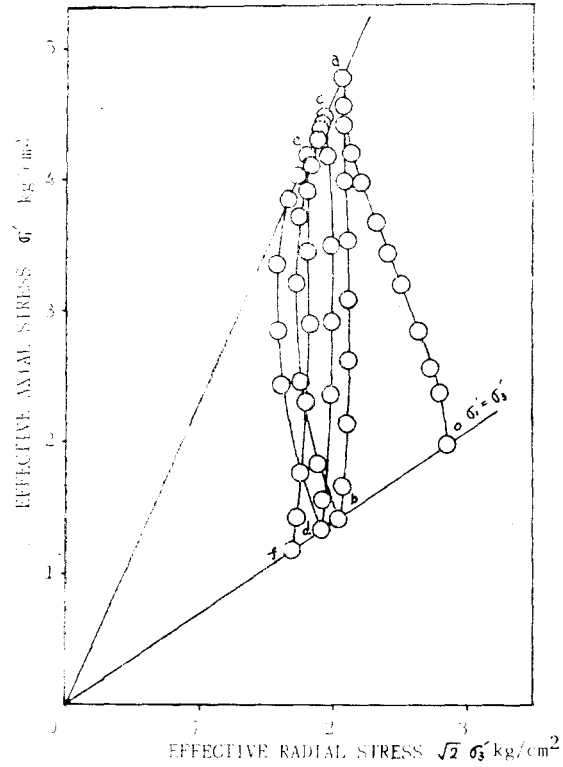
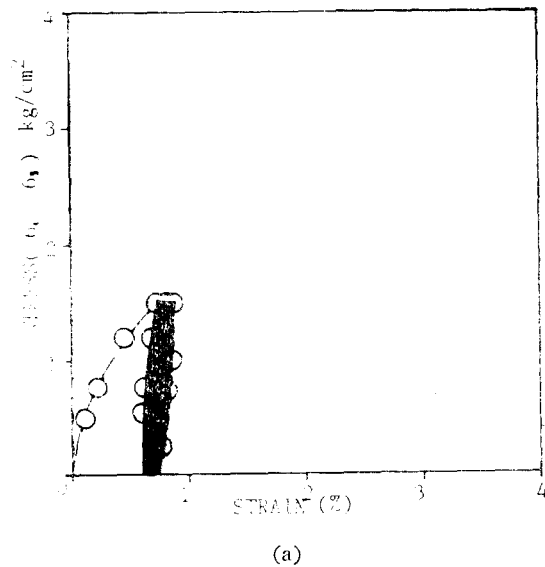


Fig. 6. Stress path for cycled at failure test

4.3 非破壞 平衡試驗

試料가 平衡狀態에 이르는 境界 및 限界反復應力을 결정함에 있어서, 9개의 試料에 대하여



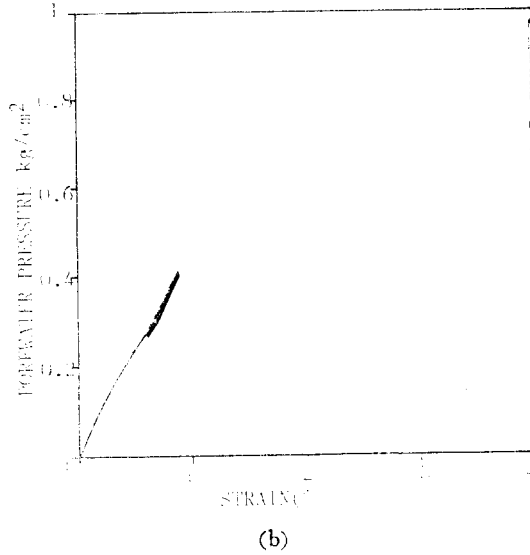


Fig. 7. Stress-strain curve for non-failure equilibrium test

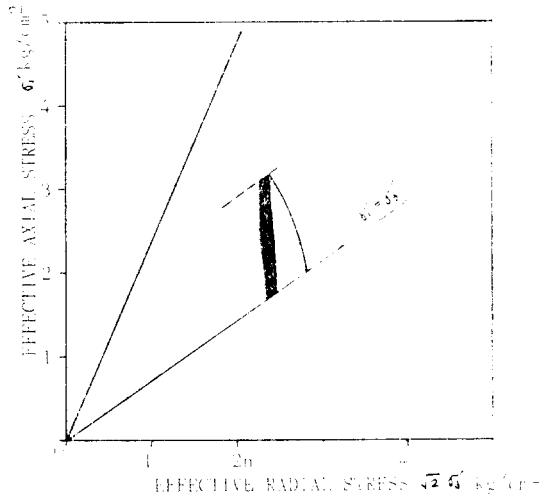


Fig. 8. Stress path for Non failure equilibrium test

서로 다른 初期應力으로 反復荷重을 가하였으며, 그 중 K-T4 試料의 결과만을 Fig. 7, 8 에 대표적으로 도시하였다.

K-T4 에서는 軸差應力 1.5kg/cm² 로 9cycle 을 反復하였으며, 그 결과, 최종週期에서의 軸變形은 7.44%, 間隙水壓은 0.32kg/cm² 이었다.

Fig. 7(b)의 間隙水壓은 거의 증첩되면서 線型的으로 증가함을 볼 수 있으며, 특히 7회 週期부터 載荷 및 除荷 終點의 軸變形과 間隙水壓은 거의 동일한 값을 나타내면서 더 이상의 증가를

증지하였다. 그러므로 應力과 間隙水壓의 經路는 동일한 Hysteresis loop 를 따라 進行되었으며 이러한 현상은 Fig. 8의 有效應力經路에서도 破壞傾斜線에 접근하지 못한 채 계속 증첩되는 형태로 나타나고 있다. 이는 試料가 應力の 反復에도 불구하고 塑性變形의 증가가 정지되면서 彈性壓縮과 回復이 동일한 經路를 따르게 되는 平衡狀態에 도달했음을 의미하는 것으로서, 여러 크기의 初期應力值에 따라 각각 서로 다른 平衡狀態가 나타나게 된다.

5. 分析 및 考察

5.1 一般的 舉動

反復荷重을 받는 粘土의 舉動은 一般的으로 單一荷重으로 지속하는 경우와 판이하게 다르며,⁷⁾ 특히 反復應力值과 週期數에 따라 間隙水壓의 舉動이 특징적으로 變化한다. Fig. 5(b)에서 2, 3회 載荷週期の 間隙水壓은 荷重頂點에서 상대적으로 (-)값을 가지게 되어 매 週期の 反復에 따라 점차 過壓密化하고 있음을 알 수 있었으며, 이러한 거동은 어느 특정한 應力值과 週期數에서 限界에 도달할 때까지 지속됨을 예측할 수 있을 것이다.

本 試料에서 塑性變形과 間隙水壓의 증가가 증지되는 한계는 初期應力值의 크기에 따라 서로 다르게 나타났으며 대체적으로 7회 週期 이상에서 이러한 平衡狀態에 도달하였다. 이때부터는 荷重을 反復하더라도 應力과 間隙水壓의 舉動이 彈性狀態에 머물게 되어 더 이상 破壞로의 進行이 증지되는 非破壞 平衡狀態에 이르게 되었다. 이와같은 狀態에 도달한 試料들의 平衡週期應力值들은 개략적인 線型的關係를 나타내었다. 그러므로 反復應力을 받는 粘土가 非破壞 平衡狀態에 머물거나, 그렇지 않을 경우, 항상 破壞가 발생케 되는 反復應力의 境界를 의미하는 反復應力의 限界值는 平衡狀態線과 破壞傾斜線의 交點으로 결정되며, 이때의 값은 2.89kg/cm² 이었다.

5.2 平衡狀態

Fig. 9에서 보는 바와 같이 限界反復應力值보

다 작은 값으로 非破壞 平衡試驗을 수행하여 그때의 應力條件들로 결정된 本 試料의 平衡狀態線은 直線으로 나타나 있다.

平衡狀態線은 非排水 狀態의 試料에서 발생하는 有效應力이 주어진 初期應力條件과 最大應力差에 따라 변화하는 한계를 나타내 주는 것으로 이러한 有效應力은 間隙水壓의 거동에 따라 변화하므로 결국 間隙水壓과 週期應力值의 일정한 한계의 관계를 의미하는 것이 된다.

試料가 이러한 限界狀態에 도달하게 되면 初週應力值보다 큰 應力을 가하지 않는 한 완전한 彈性舉動을 하게 된다. 물론 應力, 間隙水壓—變形 關係들은 線型이 아닌 Hysteresis loop로 나타나지만 殘留變形 및 間隙水壓의 변화는 거의 중지하였다. 그러나 0.008kg/cm^2 미만의 間隙水壓 증가¹⁹⁾는 있었으나 매우 미소한 값이므로 무시할 수 있었다.

일련의 平衡試驗에서 平衡週期應力值에 대한 最大間隙水壓의 關係를 Fig. 10에 나타내었다. 이러한 直線關係는 初期壓密應力이 일정하므로

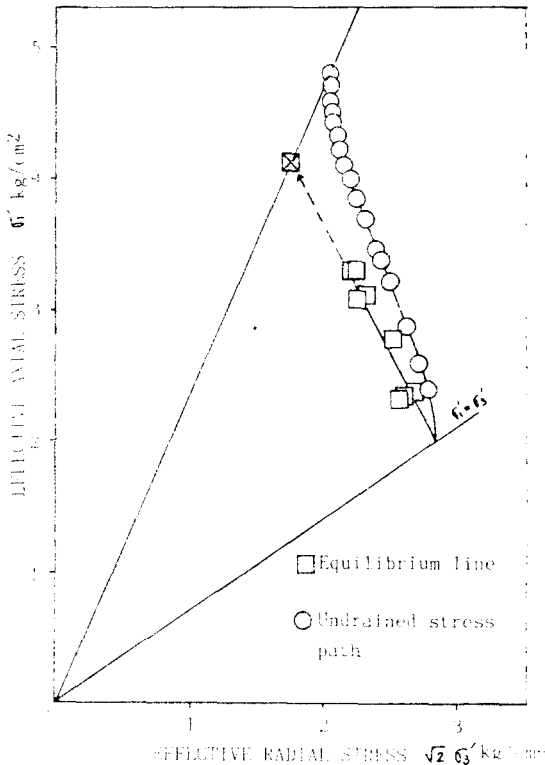


Fig. 9. The equilibrium line

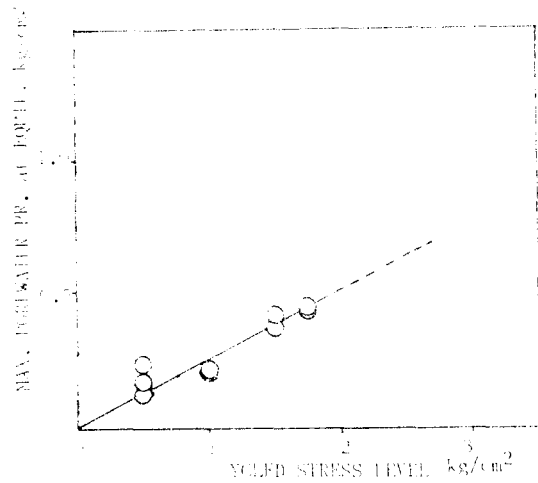


Fig. 10. The relationship of equilibrium pore water pressure to the level of cycled stress

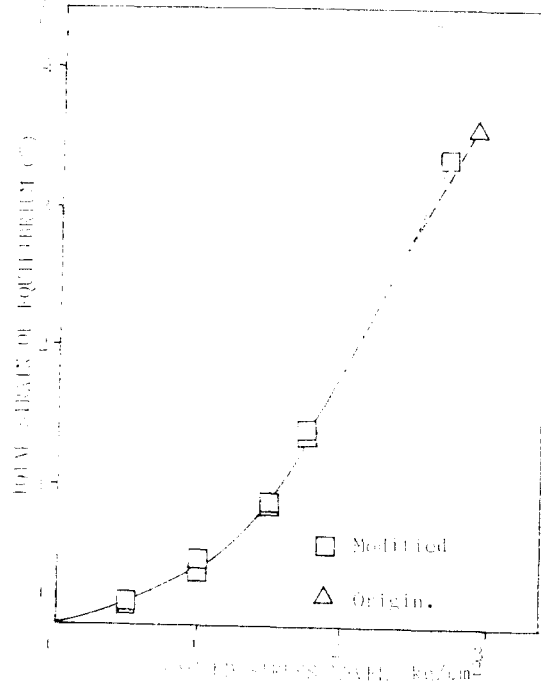


Fig. 11. The relationship of strain to the level of cycled stress

平衡荷重의 最大値에서 나타나는 間隙水壓의 變化가 有效圓柱應力과 직접적으로 관계됨을 보여주는 것이다. 아울러 平衡週期에서 週期應力值에 대한 總變形을 Fig. 11에 도시하였다.

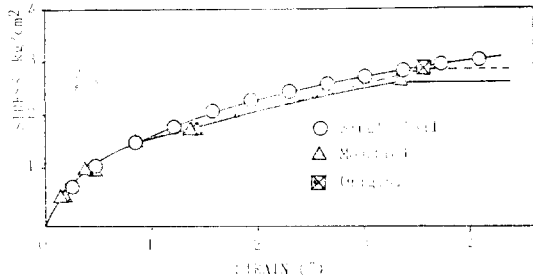


Fig. 12. The comparison of stress curve of single loading and repeated loading

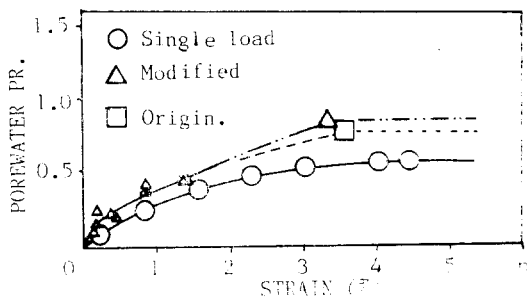


Fig. 13. The comparison of pore water pressure curve of single loading and repeated loading

Fig. 12, 13은 平衡試料들에 대한 週期應力值, 間隙水壓—變形의 關係를 보여주고 있으며, 여기서 單一荷重의 결과는 비교하기 위하여 참고로 도시하였다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 약 1.5kg/cm² 이상의 週期應力值에서는 單一荷重의 경우보다 큰 變形이 발생함을 알 수 있으며, 그 偏差는 限界反復應力值에 도달할 때까지 계속 증가하게 된다. Fig. 13의 間隙水壓은 주어진 變形에 대하여 反復荷重의 경우에서 크게 나타나고 있다.

Fig. 11, 13을 살펴보면 Fig. 9에서 추정했던 限界反復應力值에 대한 總變形 및 間隙水壓이 實驗值에 의한 曲線의 경향과 일치하지 않을 뿐만 아니라, 특히 Fig. 12에서는 單一荷重의 經路보다 最初의 限界反復應力이 낮은 위치에 있어야 함에도 불구하고 동일한 經路에 놓이게 되어 조정하여야 함을 보여주고 있다.

그러므로 Fig. 10~13에 나타난 實驗資料를 근거로 하여 反復應力의 限界值를 2.89kg/cm²에서 2.72kg/cm²로 조정하였다. 그리고 Fig. 15

의 等變形線에서 나타나는 바대로 약 2%의 變形을 기준으로 平衡狀態의 방향이 변화하였으며 이는 Fig. 11~13에서도 동일하게 나타나고 있다. 이와같이 보정된 限界反復應力의 정확도는 過壓密粘土에 대한 舉動을 研究하면서 추후 재확인할 예정이다.

5.3 變形特性

동일한 壓密條件 下에서의 變形特性은 應力공간에서 等變形線으로 나타낼 수 있으며, 서로 다른 壓密條件을 가지는 경우에는 相異한 원점을 통과하는 각각의 等變形線이 될 것이다.

Fig. 14에서는 각 시험에서의 變形增분에 대한 破壞應力比를 Octahedral 應力空間項인 τ_{oct}/σ'_{oct} 로 나타내었다. Fig. 14(a)는 初期週期荷重에 대한 應력과 間隙水壓值들로 應力比를 계산하여 變形增분에 따라 도시한 것으로서, 이 관계는 Fig. 15의 等變形線으로 나타낼 수 있다. 여기에 非排水 應力經路는 다른 크기의 應력으로 正規壓密된 試料의 1회 週期荷重에 대한 變形率과 일치하는 지 확인하기 위하여 도시하였

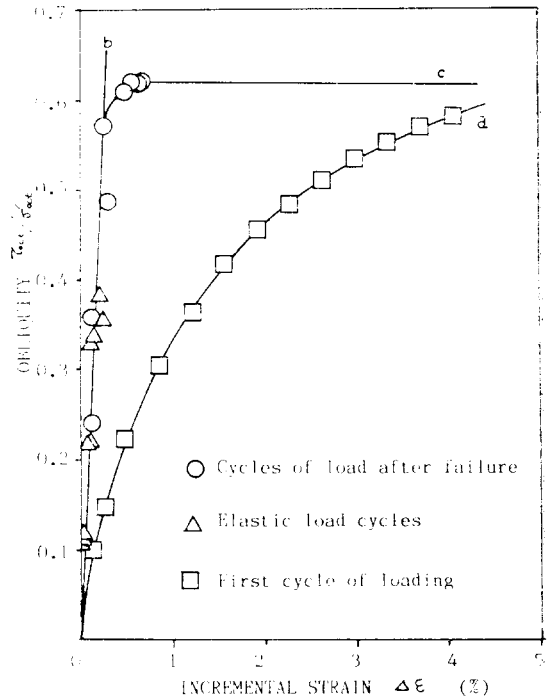


Fig. 14. The relationship between obliquity and strain

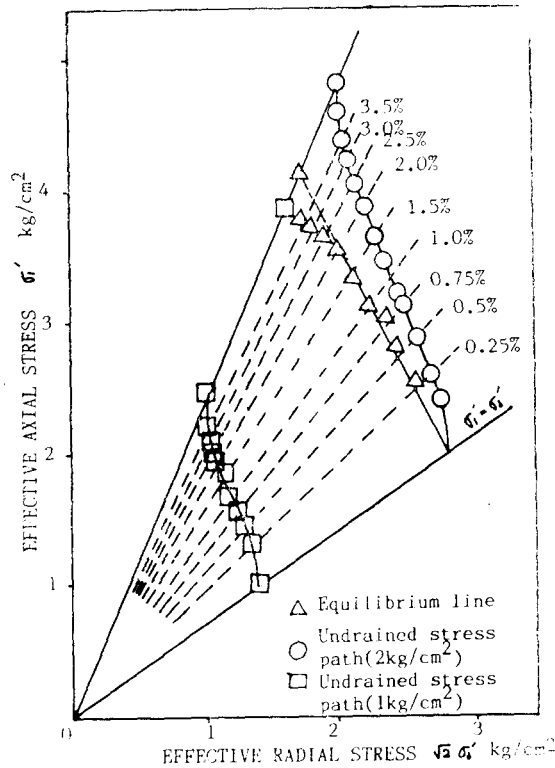


Fig. 15. Contour of strain for the first loading and the equilibrium line

으며, 그 결과 형태와 변형률이 매우 유사하게 나타나므로서 Fig. 15의 등변형선이 유효함을 알 수 있었다.

平衡狀態線上的 변형률도 非排水 經路의 결과와 거의 일치하고 있었으며, 이때의 總變形은 누적된 殘留變形과 平衡週期應力에 따른 彈性變形的 疊과 같아야 하므로 試料의 彈性變形은 破壞應力比와 變形增分の 關係에서 Fig. 14의 (b)와 같은 직선으로 나타나게 된다. 또한 彈性상태에서 最大應力差에 도달하기 전까지는 매 단계마다 동일하게 變形이 증가하였다.

破壞反復試驗에 의한 결과치로 나타낸 Fig. 14의 (c)곡선은 破壞가 발생할 때까지 間隙水壓이 계속 증가하는 시험에 대한 경향이다. 應力比가 0.57일 때까지는 (b)곡선과 동일하게 진행되다가 0.62정도에서 일정한 값을 유지하고 있으나 충분치 못한 實驗值로 인하여 이러한 상태를 平衡狀態로 규정하기에는 미흡한 것으로 판단된다.

5.4 強度特性

Table 3에 나타난 바대로 本 研究에 사용된 시료들은 주어진 初期應力條件으로 反復荷重을 받은 후에 破壞에 도달할 때까지 荷重을 가하였다. 이때 나타나는 破壞強度들을 Fig. 16에 週期應力值에 대하여 도시하였다.

Fig. 16에서 보는 바와 같이 週期應力差가 증가할 수록 점차 낮은 強度에서 破壞가 발생하였으며, 또한 대체적으로 일정한 경향을 나타내고 있었다. 그러나 많은 횟수의 週期荷重을 받은 경우, 強度가 현저하게 저하되었으며 強度의 변화 경향도 일정치 않았다. 여기에서의 이러한 현상이 어느 특정한 週期數를 기준으로 발생한다고 결론을 내리는 데에는 약간의 문제가 있을 수 있으나, 전체적인 強度저하는 限界狀態應力에 접근할 것으로 예측할 수 있다. 결국 限界反復應力보다 작거나 혹은 큰 應力으로 反復하였다 할지라도 最終의 破壞應力은 限界反復應力에 도달하게 됨을 의미하는 것이다.

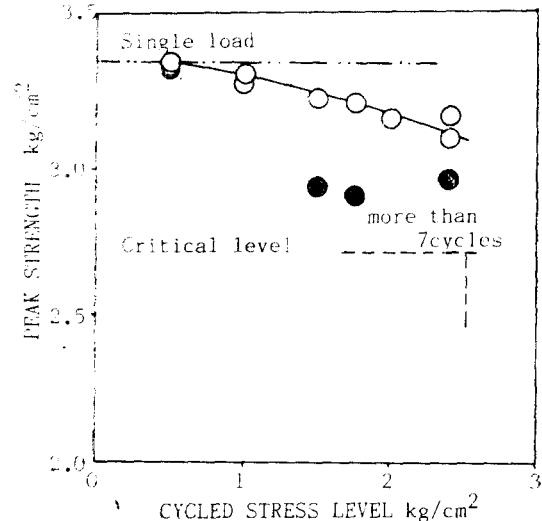


Fig. 16. The peak strength

6. 結 論

反復荷重을 받는 等方正規壓密粘土의 거동형태는 單一荷重에 의한 경우와 매우 相異하게 나타났으며, 특히 間隙水壓의 거동이 특징적으로 변화하였다. 1회의 週期荷重으로 破壞에 도달

한 粘土에 있어서 破壞強度는 荷重週期の 反復에 따라 점차 저하된 반면, 間隙水壓은 過壓密 粘土의 거동특성을 나타내면서 有效破壞應力에 反復應力値가 도달할 때까지 계속 증가하였다. 이때 발생하는 試料의 殘留變形도 매 週期應力値에 대하여 계속적인 증가를 나타내었다.

또한 限界反復應力値보다 작은 크기로 反復荷重을 가하여도 殘留變形과 間隙水壓의 증가를 초래하지만, 그러나 이러한 증가는 平衡狀態에 도달하게 되면 거의 중지하였다. 이때의 間隙水壓은 有效破壞應力에 도달할 수 없는 작은 값일 뿐만 아니라 동일한 Hysteresis loop를 따르는 彈性狀態에 존재하였다. 이와같은 彈性舉動과의 境界를 나타내는 限界反復應力은 2.72kg/cm^2 로 결정되었다.

非排水 壓縮強度에 대한 應力經路 上的 等變形線은 다른 크기의 應力으로 正規壓密된 시료의 결과와 일치하였으며 應力經路의 형태도 유사하게 나타났다. 아울러 平衡狀態線 上的 變形率과도 잘 부합됨을 보여 주었다.

限界反復應力値보다 작거나 큰 값으로 週期應力을 가하여도, 결국 限界反復應力値로 破壞強度가 접근됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) E.W. Brand & R.P. Brenner, *Soft Clay Engineering*, ELSEVIER, 1981.
- 2) Tatsuoka, F. Ochi, K. Fujii, S. & Okamoto, M., "Cyclic undrained triaxial and torsional Shear strength of sands for different sample preparation method", *Soils and Foundations*, Vol. 26, No. 3, 1986.
- 3) 富田邦彦, 八木則男, 欠日部龍一; "粘土の 也ん斷特性に 及ぼす繰り返し荷重の影響", 第16回土質工學研究發表會, 657, 1981.
- 4) Sangrey, D.A., Henkel, D.J. & Esrig, M.I., "The effective stress response of a saturated clay to repeated loading", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 6, pp. 241~252, 1969.
- 5) Seed, H.B. & Peacock, W.H., "Test Procedures for measuring soil liquefaction characteristics", *ASCE* 97, SM3, pp. 1099~1119, 1971.
- 6) Seed, H.B. & Chan, C.K., "Effect of stress history and frequency of stress application on deformation of clay subgrades under repeated loading", *Proc. Hwy. Bd. No. 38*, 1958.
- 7) 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.
- 8) Sukeo, O., Seima, K. & Tesuro, Y., "pore pressure developed in saturated sand subject to cyclic shear stress under partial drainage conditions", *Soils and Foundations*, Vol. 25, No. 2, pp. 45~56, 1985.
- 9) Bishop, A.W. & Henkel, D.J., "Pore pressure changes during shear in two undisturbed clays," *3rd ICSM and FE.*, Vol. 1 : 94, 1953.
- 10) Lo, K.Y., "Stress-strain relationship and pore pressure characteristics of a normally consolidated clay", *6th ICSM and FE.*, Vol. 11 : 103, 1961.
- 11) Knight, K. & Blight, G.E., "Studies of some effects resulting from the unloading of soils", *6th ICSM and FE.*, Vol. 11 : 103, 1965.
- 12) Hyde, A.F.L. and Brown, S.F., "The plastic deformation of silty clay under creep and repeated loading", *Geotechnique*, Vol. 26, pp. 173~184, 1976.
- 13) Sangrey, D.A., Pollard, W.S. & ERgan, J.A., "Errors associated with rate of undrained cyclic testing of clay soils", *Dynamic Geotechnical Testing*, ASTM STP 654, 1978.
- 14) Lee, K.L. & Focht, J.A., "Strength of clay subjected to cyclic loading", *Marine Geotechnolgy*, Vol. 1, pp. 165~185, 1976.
- 15) Moheson, M., Baligh, M. & Jacques, "Consolidation theory for cyclic loading", *J. of Geotech. engrg. Div. GT4*, pp. 415~431, 1978.
- 16) Pender, M.J., "Cyclic mobility a critical state model", *Int'l. Sem. on soil under cyclic and transient loading*, Swansea, Jan., pp. 7~11, 1980.
- 17) Carter, J.P., Booker, J.R. & Wroth, C.P., "A critical state soil model for cyclic loading", *Soil Mechanics Transient and Cyclic loads*, John Wiley & Sons, pp. 219~252, 1982.

(접수일자 1988. 8. 31)