

飽和粘土의 變形에 있어서 時間依存性에 관한 實驗的 研究

An Experimental Study on Time Dependency of Strain for Saturated Clay

朴	炳	基*
Park,	Byong	Kee
李	鎭	濂**
Lee,	Jin	Soo

Abstract

This paper is concerned with the strain characteristics of the time effect on the remoulded saturated clay sampled from the downstream of the Yeongsan river, and the constitutive equation that can generally explain time-dependent behaviors of normally consolidated clay.

This paper examines whether or not the afore-said constitutive equation can be applied to the remoulded Mooan-clay.

Throughout this study, the conclusions obtained are as follows.

1. Throughout the isotropic consolidation test for 7 days and the isotropic relaxation test, the existence of the static and dynamic yielding surfaces is confirmed respectively.
2. The characteristics of time effect of the deformation, namely, the existence of a unique stress-strain-time relation, is conformed from the experimental result on the Mooan-clay.
3. The predictions of the stress path and the strain on the Cam-clay theory is not consistent with those observed during the experiments.
4. Constitutive equation(2-3-12) obtained by applying Cam-clay theory to Perzyna's elastic-viscoplasticity theory can explain the behavior of pore water pressure during isotropic stress relaxation, concerned with time dependency under undrained condition. The equation can also explain the results of the undrained triaxial compression test for the clay with different strain rate under the same or different consolidation history.
5. This constitutive equation has eight material parameters which can be determined from triaxial compression tests.

要 旨

本文은 再生成한 海成粘土에 대한 粘土의 時間效果特性和 正規壓密된 粘土의 時間依存性舉動을 普遍的으로 說明할 수 있는 構成方程式과 關係가 있다. 따라서 本文에서는 T. Adachi와 F. Oka가 提案한 構成式을 採擇하였으며 이 構成方程式은 Cam-clay 理論을 Perzyna의 彈-粘塑性連續體理論

* 正會員·全南大學校 工科大学 教授

** 全南大學校 大學院 博士課程

에 適用하여 樹立된 것이다. 그리고 이 構成方程式이 再生成한 務安粘土에 대하여 어떻게 適用될 것인가를 實驗的으로 研究한 것이다.

本 研究에서 얻어진 結論의 主要한 것은 다음과 같다.

1. 等方壓密과 等方應力緩和試驗의 結果로부터 靜的, 動的인 降伏面이 각각 存在함을 確認할 수 있었다.
2. 一定變形率剪斷試驗과 應力緩和試驗의 結果로부터 時間效果의 特性 즉 應力-變形率-時間間의 唯一한 關係가 存在함을 알 수 있다.
3. Cam-clay 理論에 의한 應力徑路와 變形率 推定에 있어서 理論値와 實驗値間에는 差異가 있다.
4. Cam-clay 理論을 Perzyna의 彈-粘塑性體理論에 適用시킨 構成方程式(6)은 非排水狀態의 等方應力緩和過程中에 發生하는 間隙水壓의 舉動을 說明할 수 있다. 그리고, 同一한 혹은 다른 壓密履歷을 받은 粘土에 대하여 다른 變形速度를 適用한 非排水3軸試驗의 結果를 豫測하는데 상당한 適合性이 있음을 알았다.
5. 이 構成方程式에는 8개의 材料常數가 있는데 3軸壓縮試驗을 통하여 쉽게 얻어진다.

1. 序 論

本文은 飽和粘土의 應力-變形率 關係를 理論化하는 構成方程式에서 變形의 時間依存性을 고려하려는 보다 一般的인 構成方程式의 提案을 위해 그 時間效果를 實驗的으로 살펴보고 기존 理論式과 比較한 것이다.

이 研究는 大韓土木學會 論文集 第3卷第2號에 務安의 再生成粘土에 대해서 Cam-clay 모델을 基本으로 하는 構成方程式을 提案한 바 있는데 여기에 變形率의 時間效果를 導入하고자 하는 基礎的 研究인 것이다.

2. 應力-變形率-時間 關係

飽和粘土의 應力-變形率 關係를 파괴에 이르기까지의 全過程을 包含하여 數式化 한다는 것은 土質力學에서의 오랜 꿈이다. 따라서 그동안 많은 學者들에 의해서 이것이 材料的인 觀點에서 또한 巨視的인 現象에서 研究되어 왔는데 그 가운데 가장 탁월한 業績은 Roscoe가 이끄는 Cambridge 學派의 Cam-clay 理論이다. 그가 提案한 粘土의 構成方程式은 3軸試驗의 結果에서 얻어지는 이른바 3次元 應力空間에서 限界狀態의 存在를 確認하고 이를 境界로 하는 狀態面에서의 應力徑路의 舉動으로부터 數式을 유도하여 提案한 것이다. 여기에는 有効應力徑路式, 變形

率方程式 등이 包含된다. 이 理論은 粘土가 彈性體 또는 彈塑性體 材料로서 다루어진 것이다. 이 理論에서는 剪斷狀態가 排水條件이든 非排水條件이든 限界狀態線(CSL)에 이르게 되고 그以後의 變形은 생각하지 않는다. 따라서 이 理論은 變形이 時間과 더불어 變하는 경우에는 그 一般性이 問題가 된다. 즉, 粘土變形의 時間效果를 說明할 수 없다. 이와 같은 時間效果를 고려하는 構成方程式의 研究는 1970年代 後半에 많은 進展을 보이고 있다. 이 가운데 T. Adachi, F. Okano(1982) 등은 그동안의 여러 研究를 면밀히 檢討하고 Perzyna(1963, 1971)의 彈-粘塑性連續體理論의 도움으로 時間效果를 고려하는 構成方程式의 研究를 的 목적으로 進行하고 있다.

本文은 이 Perzyna의 理論을 檢討하고 變形의 時間依存性은 剪斷時의 變形速度와 關係가 있다는 點, 즉, 應力이 빨리 가해지는 경우와 느리게 가해지는 경우(動的, 靜的載荷)의 差異에서 變形의 時間依存性을 밝힐 수 있다는 觀點에서 이를 實驗的으로 檢討한 것이다.

粘土의 變形과 時間과의 相關性을 몇가지만 간추려 보면 다음과 같다.

1. 1軸壓密 또는 3軸壓密試驗을 試行하여 間隙水壓이 어느 壓密應力 수준에서 정착한 후 非排水狀態로 放置해 두면 間隙水壓은 서서히 發生한다.
2. Mesri(1974) 등에 의하면 等方壓密的 경우에 도 2次壓密이 發生한다.

3. Walker(1969)에 의하면 體積變形率速度는 應力比(q/p)와는 無關하다.

4. Bjerrum이 提案한 이른바 delayed compression도 有效荷重의 增加없이 時間이 지남에 따라 體積減小(壓密)는 계속된다.

以上과 같이 여러가지로 粘土의 變形이 時間과 더불어 進行되는 사실은 明白하다. 그러나 Cam-clay 理論에서는 모든 粘土는 1次壓密이 끝나면 靜的 平衡狀態에 있다고 보고 있다. 이 점을 解決하기 위해서는 Cam-clay 모델을 彈塑性體라는 假定에서 彈-粘塑性體로 보고 時間效果를 고려하는 理論으로 전환할 필요가 있다. Adachi, Oka(1982)는 Perzyna의 이 理論을 檢討하여 時間依存性의 效果는 變形速度의 差異 즉, 材料의 動的, 靜的인 力學的 舉動의 差異로 表現할 수 있다고 보았다. 특히 粘塑性體로써 이러한 變形速度는 다음과 같은 靜的降伏函數로 定義했다.

$$F=f(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}^p)/k_s-1 \dots\dots\dots(1)$$

그리고 Perzyna(1963)는 Druker(1959)의 假定을 使用하여 粘塑性變形에 대한 다음의 flow-rule을 提案하였다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \langle \phi(F) \rangle \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \dots\dots\dots(2)$$

여기에서 $\langle \phi(F) \rangle = \begin{cases} 0 & F \leq 0 \\ \phi(F) & F > 0 \end{cases}$ 이며 $F > 0$ 이다.

한편 靜的인 平衡狀態에 있어서의 粘土의 力學的 舉動은 Cam-clay 理論에 의해 說明될 수 있으

므로 靜的인 降伏函數는 다음과 같이 定義된다.

$$f_s = \sqrt{2J_2^{(s)}}/M^*P^{(s)} + \ln P^{(s)} = \ln P_y^{(s)} = k_s \dots\dots\dots(3)$$

여기서 $F=0$ 은 靜的 降伏條件을 나타내고 動的 降伏函數 f 는 다음과 같이 나타낸다.

$$f = \sqrt{2J_2}/M^*P + \ln P = \ln P_y = k_d \dots\dots\dots(4)$$

그림 1은 위의 靜的, 動的 降伏面을 나타낸 모형도이다. 이 軸差應力 tensor s_{ij} 의 2次不變量 J_2 , 平均有效應力 P 와 塑性體積變形率 V^p 의 3次元 空間에서, $P_i^{(d)}$ 는 어떤 壓力下에서 1日間 等方壓密한 후의 動的 狀態를 表示한다. $P_i^{(s)} \rightarrow P_o^{(s)}$ 는 1日間 壓密한 후 無限한 時間 非排水 狀態로 두었을 때 平均主應力 P 는 間隙水壓의 發生으로 減少함과 동시에 塑性體積變形率 V^p 의 減少를 나타내는 等方應力緩和過程을 보인 것이다. $P_i^{(d)} \rightarrow P_o^{(d)}$ 는 持續壓縮(delayed compression)시켰을 때의 靜的인 壓密狀態로의 徑路를 나타낸다. $P_i^{(d)} \rightarrow P^{(d)}$ 는 剪斷變形過程을 表示한 動的 應力徑路이다. 그리고 $P_i^{(s)}$ 는 $P_i^{(d)}$ 와 塑性體積變形率이 일치하는 靜的인 狀態로 無限한 時間동안 等方壓密에 의해 얻어진 靜的인 等方壓密線 위에 있다. 따라서 그림 1에서 降伏函數 F 는 다음 關係를 얻을 수 있다.

$$F = (\ln P_y^{(d)} - \ln P_y^{(s)}) / \ln P_y^{(s)} \dots\dots\dots(5)$$

결국 式 (1)~(5)와 그림 1로부터 正規壓密된 粘土에 대한 構成方程式은 다음과 같다.

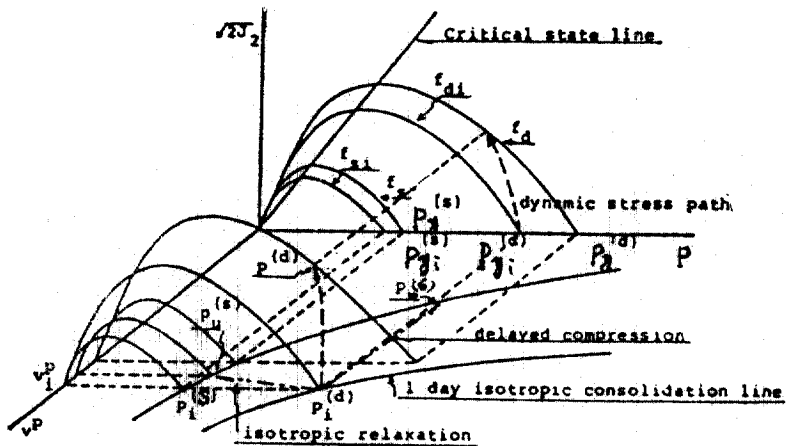


그림 1. Schematic diagram of the dynamic and static yield surface. (T. Adachi & F. Oka)

$$\dot{\epsilon}_{11} = \frac{1}{2G} \dot{\epsilon}_{11} + \frac{k}{3(1+e)} \frac{\dot{P}}{P} \delta_{11} + \frac{1}{M^*P} \langle \phi(F) \rangle \frac{\dot{\epsilon}_{11}}{\sqrt{2J_2}} + \frac{1}{3M^*P} \langle \phi(F) \rangle$$

$$\left[M^* - \frac{\sqrt{2J_2}}{P} \right] \delta_{11} \dots \dots \dots (6)$$

式中 $\phi(F)$ 는 또한 다음과 같다.

$$\phi(F) = C_0 \exp[m' \ln(P_{y_i}(\omega)/P_{y_i}(\omega))] \dots \dots \dots (Oka, 1979)$$

式 (6)에서 常數 G, λ, k, e, M^* 는 Cam-clay 理論에서 決定하는 方法(1983)과 同一하며 時間依存性常數 $C_0, m', P_{y_i}(\omega)$ 도 3縮壓縮試驗을 통하여 얻어진다.

3. 實驗

(1) 試料의 調製

本 研究에 使用된 試料는 榮山江 下流의 務安郡 海際面의 바다粘土를 반입하여 大形壓密槽에서 1 kg/cm^2 로 1個月間 壓密시켜 使用한 것이며 試驗에 使用된 試料의 供試體는 直徑 35 mm, 높이 87.5 mm이다.

本 粘土의 物理的인 特性과 材料常數는 表 1과 같다.

表 1. Physical properties and material parameters of soil

G	LL	PI	U.S. C.S.	Acti- vity	M	λ	k	m'	No. 200세 통과율
2.675	52%	21%	CH	0.7	1.34	0.14	0.023	24.4	90%

(2) 試驗方法

앞장에서 論議된 여러 土質定數를 구하려는 試驗과 더불어 變形의 時間效果를 檢討할 수 있는 다음과 같은 試驗을 試行하였다.

- 1) 壓密試驗 : ㉞ 標準壓密試驗과 膨潤試驗
㉟ 等方壓密試驗과 K_0 壓密試驗

2) 一定變形率 剪斷試驗 : 2 kg/cm^2 로 24時間 等方壓密시킨 후에 0.140, 0.234, 0.469, 0.699, 2.3%/分の 剪斷速度로 非排水 剪斷시킨다.

3) 應力緩和試驗 : 等方壓密壓力 1.5 kg/cm^2 로 24時間 壓密시킨 5개의 試料에 대하여 剪斷變形速度 0.04%/분과 2.14%/분로서 一定變形

率(0.448~11.797%, 표 2참조)까지 剪斷시킨 후 剪斷을 멈추고 緩和應力이 一定한 값에 到達할 때까지 放置한다.

4) 正規壓密 非排水剪斷試驗 : 1.5 kg/cm^2 로 等方壓密시킨 후 다음 두가지 剪斷試驗을 試行하였다. ㉞ 通常의 試驗方法과 같이 24時間 等方壓密시킨 후 剪斷 ㉟ 7日間을 等方壓密시켜 2次壓密까지 發生시킨 후 非排水剪斷試驗한다.

5) 等方應力緩和試驗 : 初期壓密荷重 1.5 kg/cm^2 으로 24時間 等方壓密시킨 후에 非排水條件下에서 1주일간의 間隙水壓의 變化를 測定한다. 다시 24時間 排水밸브를 열어 壓密한 후 위와 같은 條件으로 1주일간 間隙水壓을 測定하는 方法을 반복한다.

4. 實驗結果 및 考察

(1) 壓密試驗

3. (2)에서 言及한 壓密試驗들은 限界狀態에너 지理論에서 主張한 平衡狀態에서의 力學的인 性質을 알기 위하여 필요하다. 試驗結果는 그림 2에 나타났으며 土質常數 λ 와 K 는 等方壓密線과 膨潤線의 기울기로부터 얻어진다.

(2) 一定變形率 剪斷試驗

2 kg/cm^2 로 24時間 等方壓密시킨 5개의 試料

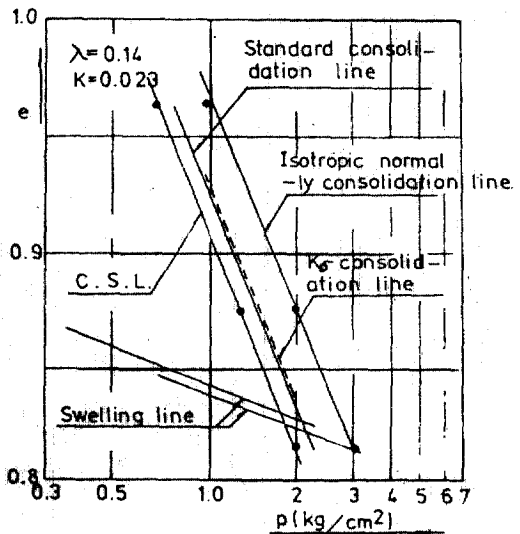


그림 2. $e - \ln P$ characteristics during consolidation

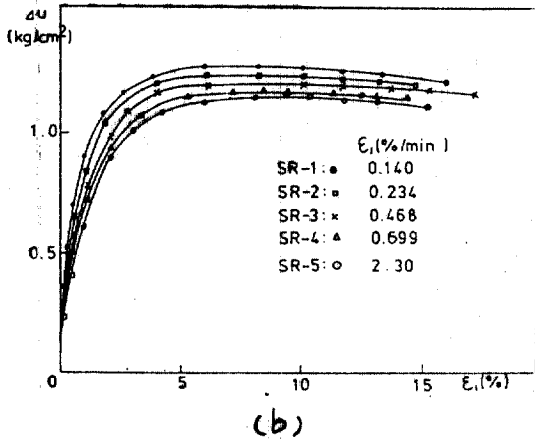
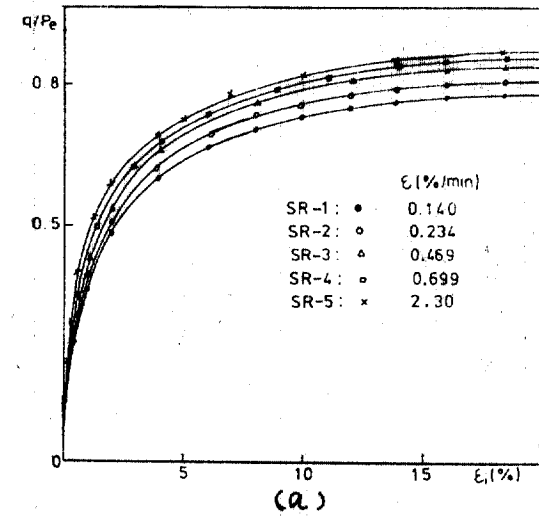


그림 3. (a) Deviator stress-strain relation for different strain rates;
(b) Induced pore water pressure-strain relation for different strain rates.

에 대하여 각각 다른 剪斷速度로 剪斷試驗을 시행한 것이다. 그림 3의 (a), (b)는 變形速度에 따라 應力徑路에 미치는 영향을 調査하기 위하여 軸差應력과 壓密應력의 比 및 間隙水壓을 軸變形率에 대하여 나타냈다. 그림 3의 結果에서 一定變形率에 이르는 軸差應력과 過剩間隙水壓을 剪斷速度別로 整理한 것이 그림 4이다. 그림에서 剪斷速度가 增加함에 따라 軸差應력은 變形率과 함께 比例的으로 커가는 것을 알 수 있다. 그러나 過剩間隙水壓은 變形速度에 큰 영향을 받지 않는 것으로 判斷되나 그림 4(b)에서

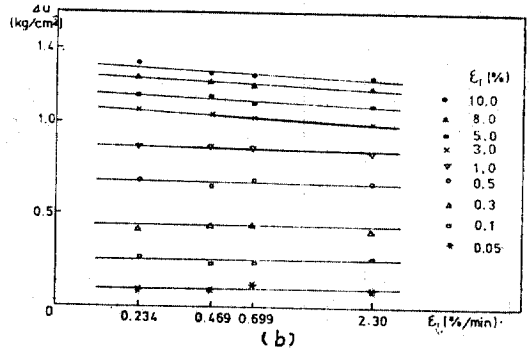
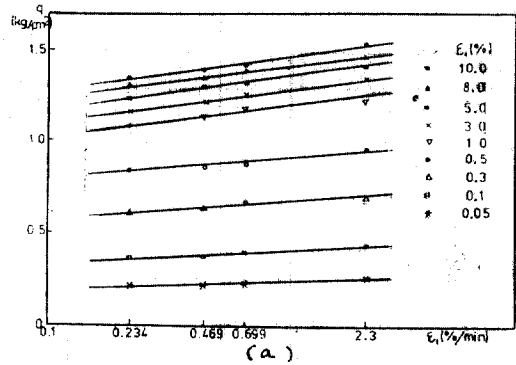


그림 4. (a) Deviator stress versus strain rate relation;
(b) Induced pore water pressure versus strain rate relation for constant strain rate tests.

처럼 變形율이 큰 경우에는 다소 減少하는 경향이 있다. 이것은 本質的인 것이 아니고 試驗機器의 時間差異에 起因된 것으로 생각된다(Akai, 1974). 그림 5는 變形率函數 $\alpha(\epsilon_1)$ 을 그림 4(a)에서 各 直線의 기울기로부터 구하여 變形率에 대하여 表示한 것으로 本粘土에서는 $\alpha(\epsilon_1)$ 는 0.18에서 一定한 값을 유지한다. 또한 $\alpha(\epsilon_1)$ 은 變形率이 1% 이상에서는 거의 변하지 않는다. 이 $\alpha(\epsilon_1)$ 값은 다음의 應力緩和試驗에서 얻어지는 $\beta(\epsilon_1)$ 과 重要한 關係가 있다. 그림 6은 5개의 각각 다른 變形速度에 대한 有效應力徑路를 보여주며 等變形狀態線들은 最大主應力軸에 平行하다는 것을 알 수 있다. 이 事實은 剪斷速度가 間隙水壓에 미치는 영향이 없음을 뒷바침 해준다. 그림 7(a), (b)는 理論式(6)에 의한 것과 實驗值와를 比較檢討한 것인데 相當한 적합성을 갖는 것을 알 수 있다. 반면에 그림에서 점선으로

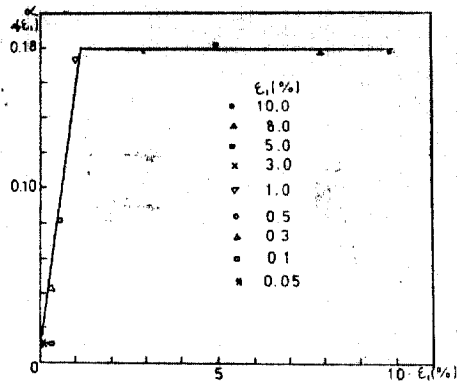


그림 5. Strain dependent slope, $\alpha(\epsilon_1)$ versus strain relation.

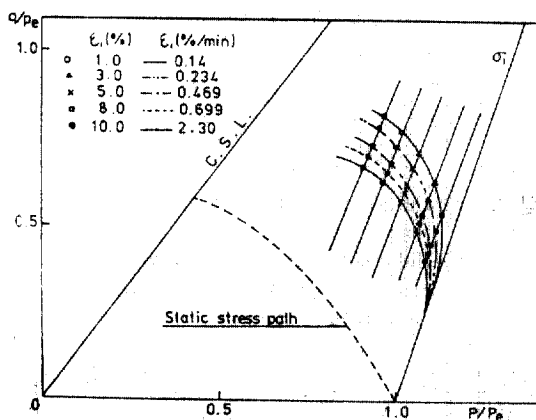


그림 6. Five effective stress paths and equi-strain lines for constant strain rate tests.

로된 應力徑路는 Cam-clay理論式에 本粘土의 土質定數를 適用하여 그린 것으로 實驗値와는 상당한 거리를 두고 떨어져 있다.

(3) 應力緩和試驗

1.5 kg/cm²로 等方壓密시킨 5개의 試料에 대하여 規定된 變形狀態까지 剪斷한 후 緩和應力이 一定한 값에 到達할 때까지 放置한 試驗이다. 이 試驗의 規定한 條件들은 표 2와 같다. 그림 8(a)는 應力緩和試驗에서 時間에 따라 軸差應力이 比例적으로 減少하는 것을 나타낸 것이다. 이 事實은 Murayama(1972)가 提案한 實驗方程式이 妥當함을 보여준다. 그러나 이때 間隙水壓은

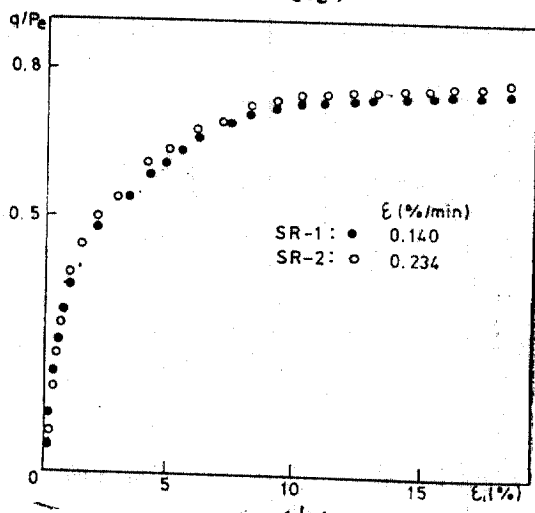
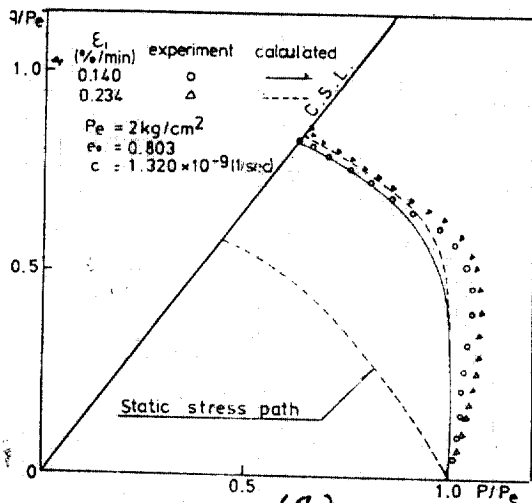


그림 7. (a) Effective stress paths of constant strain rate tests;
(b) Stress-strain relation of constant strain rate tests.

표 2. Test conditions of stress relaxation

Test No.	σ_e (kg/cm ²)	ϵ_1 (%)	$\dot{\epsilon}_1$ (%/min)	Duration of stress related (min)
R-1	1.5	0.448	0.04	1640
R-2	1.5	0.968	0.04	1440
R-3	1.5	1.048	2.14	1440
R-4	1.5	3.244	0.04	1830
R-5	1.5	6.988	0.04	3656
R-6	1.5	11.797	0.04	2060

그림 8(b)에서와 같이 $\epsilon_1 < 1\%$ 인 범위까지는 Δu 가 $\log t$ 의 增加에 따라 거의 一定한 狀態로 유지

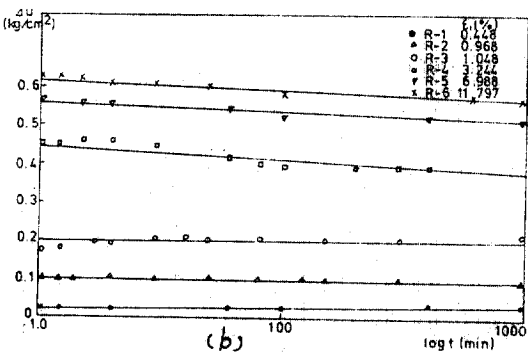
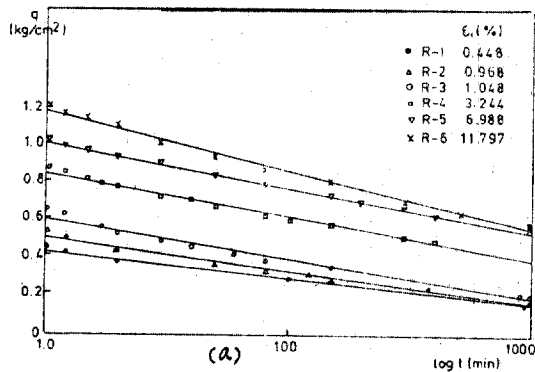


그림 8. (a) Deviator stress vs. time relation;
(b) Induces pore water pressure vs. time relation for stress relaxation test.

되지만 $\epsilon_1 > 1\%$ 인 범위에서는 時間의 增加에 따라 약간 減少하는 경향을 보인다(Akai, 1974).

그림 9는 그림 8(a)의 각 直線部分의 기울기로 定義되는 $\beta(\epsilon_1)$ 을 ϵ_1 에 대하여 나타낸 것으로 變形狀態가 1%以上에서는 거의 一定하다. 그림에서 本粘土에 대한 $\beta(\epsilon_1) \approx 0.176 \text{ kg/cm}^2$ 이다. 한편 言及한 바 같이 Murayama는 2 kg/cm^2 로 等方壓密한 試料에 대하여 각각 $\alpha(\epsilon_1) = 0.2 \text{ kg/cm}^2$ 과 $\beta(\epsilon_1) = 0.140 \sim 0.170 \text{ kg/cm}^2$ 을 얻었다. 이러한 實驗值와 比較해 볼 때에 2 kg/cm^2 과 1.5 kg/cm^2 로 壓密한 本粘土는 $\alpha(\epsilon_1) = 0.180 \text{ kg/cm}^2$ 과 $\beta(\epsilon_1) = 0.176 \text{ kg/cm}^2$ 을 얻음으로써 거의 $\alpha(\epsilon_1) \approx \beta(\epsilon_1)$ 의 理論을 만족시키고 있다. 다만 $\alpha(\epsilon_1)$ 과 $\beta(\epsilon_1)$ 값은 粘土의 種類나 壓密壓力의 差異에 따라 다소 달라진다.

그림 10은 應力緩和試驗法에서 言及한 바 같이 平均主應力을 一定히 하여 剪斷하고 표 2에 나타낸 바와 같은 條件으로 一定時間 壓力을 유

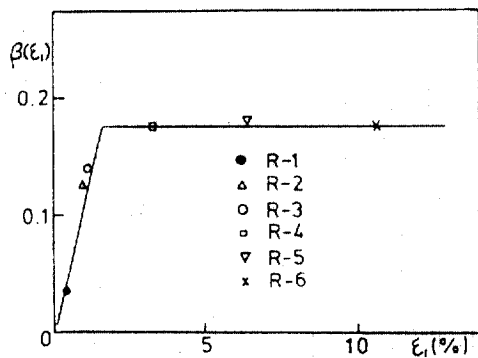


그림 9. Strain dependent slope, $\beta(\epsilon_1)$ vs. strain.

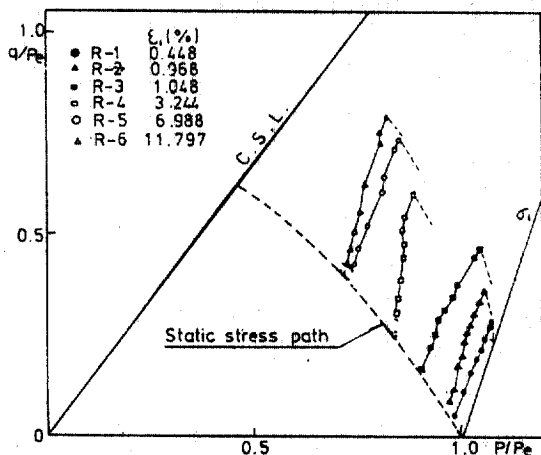


그림 10. Effective stress paths for undrained stress relaxation process.

지하여 應力이 緩和되는 過程과 Cam-clay 理論에 의한 有效應力徑路를 同時에 보인 것이다. 그림에서 $P_e = \exp[(e_s - e)/\lambda]$ 이고 非排水條件下에서는 바로 壓密壓力 값이다. 여기에서 應力緩和中的 有效應力徑路는 最大主應力軸 σ_1 에 거의 平行하게 나타난다. 多小의 試驗誤差는 있지만 이와 같은 事實은 應力緩和中 間隙水壓의 增加나 減少가 거의 發生하지 않는다는 것을 意味한다. 또한 緩和應力이 一定值에 到達했을 때는 靜的 應力徑路의 線上이나 그 附近에 到達되고 있음을 보여준다.

(4) 正規壓密 非排水剪斷試驗

그림 11(a), (b)는 1.5 kg/cm^2 로 1日과 7日等 方壓密한 試料에 대하여 有效應力徑路를 實驗值와 理論式(6)과 比較한 것이고 (b)는 軸差應力

(5) 等方應力緩和試驗

本試驗은 앞의 試驗方法에서 言及한 바와 같고 結果를 理論式(6)과 比較하여 그림 12에 나타낸다. 그림에서 間隙水壓의 增加가 完滿하지만 發生하는 것으로 보아 1次壓密이 끝난 후에 平衡狀態(體積變形率=0)에 到達하지 않는다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 이미 Arurandan et al(1971)이 1次壓密이 끝난 후에도 非排水狀態로 두면 間隙水壓이 發生한다는 研究나 또한 Febro-Cordero와 Mesri(1974)도 等方壓密의 경우에도 2次壓密이 일어난다는 것을 지적한 바 있다. 이러한 2次壓密現象은 Bjerrum의 delayed compression 概念에 關係가 있으며 一定한 有效應力下에서도 體積減少가 있다는 것을 意味하고 2次壓密現象도 함께 表現되고 있다고 판단된다. 그림에서는 理論式과 너무 差異가 있다.

以上の 試驗結果에서, 그림 13은 一定한 壓密應力下에서 1日等方正規壓密線(I)과 7日等方正規壓密線(II)의 關係를 對數座標에 平均主應力 P 와 間隙比 e 의 關係로 나타낸 것이다. 그리고 (III)은 無限한 時間동안 壓密후의 假想等方壓密線이다. 點 $A \rightarrow A_1$ 으로의 移動은 1日 壓

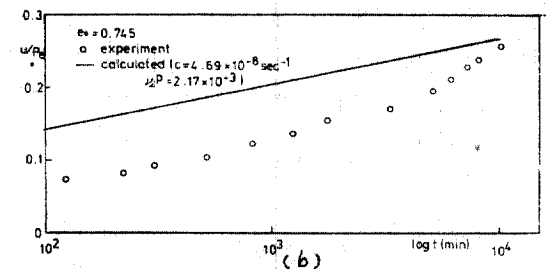
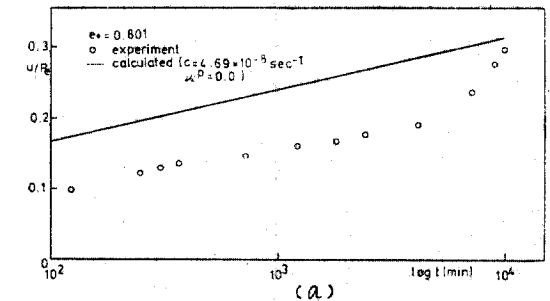


그림 12. (a), (b) Induced pore water pressure vs. time relation for isotropic relaxation test.

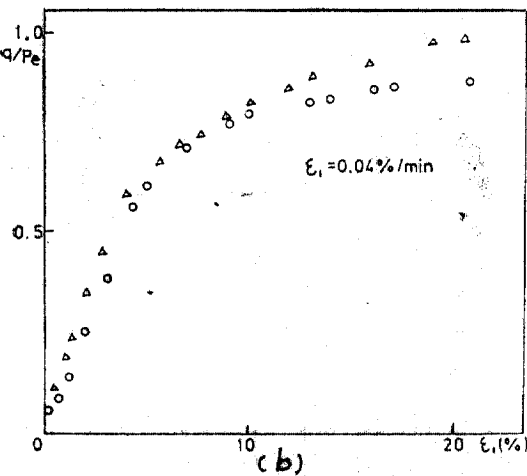
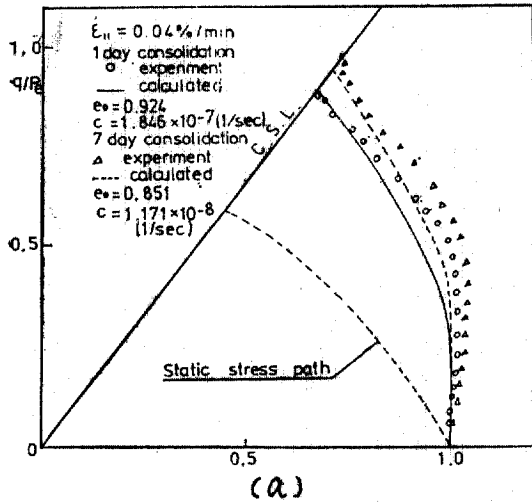


그림 11. (a) Effective Stress path for constant strain rate test; (b) Stress-strain relation for constant strain rate test.

—變形率 關係를 實驗結果로써 보여준 것이다. 그림에서 나타난 것처럼 中間部分까지 應力徑路가 右로 轉향된 것은 剪斷이 시작하여 間隙水壓이 發生해 감에 따라 試料의 dilatancy가 負의 값을 갖는데 應力徑路의 中間部에서 最大의 값을 갖기 때문인 것으로 판단된다. 한편 7日間 壓密한 試料의 強度(Δ 표)는 "aging effect"에 의해 增加되었음을 示나타낸다. 여기서 限界狀態線(CSL)의 기울기는 표 1에서 M 로 定義된 것이다.

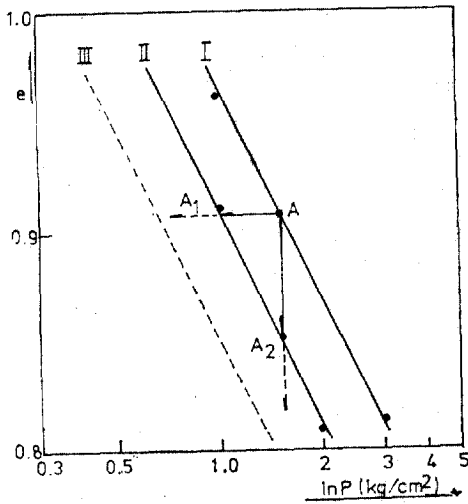


그림 13. The result of isotropic consolidation and isotropic relaxation(1 day and 7 day).

밀한 후 非排水狀態로 두었을 때 間隙水壓의 發生으로 平均主應力 P 의 減少를 意味한다. 또한 點 $A \rightarrow A_2$ 의 過程은 1日 壓密한 후 排水狀態로 유지시켰을 때 계속 壓密이 進行되어 間隙比 e 는 減少된 것이다. 따라서 無限한 時間 壓密한다면 等方正規壓密線(I)은 假想壓密線(III)의 靜的인 狀態線에 到達할 것이다. 위의 結果로 靜的, 動的 降伏面이 각각 존재함을 알 수 있다.

5. 結 論

1. 等方壓密과 等方應力緩和試驗의 結果로부터 靜的, 動的인 降伏面이 각각 存在함을 確認할 수 있었다.
2. 一定變形率剪斷試驗과 應力緩和試驗의 結果로부터 時間效果의 特性, 즉 應力-變形率-時間間의 唯一한 關係가 存在함을 알 수 있다.
3. Cam-clay理論에 의한 應力徑路와 變形率推定에 있어서 理論値와 實驗値間에 差異가 있다.
4. Cam-clay理論을 Perzyna의 彈-粘塑性體理論에 適用시킨 Adachi가 提案한 構成方程式(6)은 非排水狀態의 等方應力緩和過程中에 發生하는 間隙水壓의 舉動을 說明할 수 있다. 그리고 同一한 혹은 다른 壓密履歷을 받은 粘土에 대하여 다른 變形速度를 適用한 非排水

3軸試驗의 結果를 豫測하는데 相當한 適合性이 있음을 알았다.

5. 이 構成方程式에는 8개의 材料常數가 있는데 3軸壓縮試驗을 통하여 쉽게 얻어질 수 있다.

〈부록〉 Notation

- f_d = dynamic yield function
- J_2 = second invariant of deviatoric stress tensor
- k_d = dynamic strain hardening parameter
- k_s = static strain hardening or static work hardening parameter
- m' = material parameter
- M^* = value of $\sqrt{2J_2}/p$ at critical state
- q = deviatoric stress
- p = mean effective stress
- δ_{ij} = Kronecker's delta
- $\dot{\epsilon}_{ij}$ = strain rate tensor
- $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ = plastic strain rate tensor
- σ_{ij} = effective stress tensor
- p_s^d = dynamic hardening parameter
- p_s^s = static hardening parameter
- f = yield function
- $l_s = e$ at $P = 1 \text{ kg/cm}^2$ on $e - \ln P$ curve

參 考 文 獻

1. 朴炳基, 鄭鎮燮, 李汝樹, 姜秉宜 "限界狀態 概念에 의한 飽和粘土의 剪斷特性" 大韓土木學會 論文集 3卷 2號(1983), pp. 45~59.
2. 鄭鎮燮 "飽和粘土의 應力-力變形率에 관한 研究" 博士學位論文, (全南大) 1983, pp. 1~79.
3. Akai, Adachi, K. Adachi, T. and Ando, N. "Existence of a unique stress-strain-time relation of clays", *Soil and Foundations Vol. 15, No. 1.* 1975
4. Adachi, T. and Okano, M.: "A Constitutive Equations for Normally Consolidated Clay," *Soils and Foundations, Vol. 14, No. 4,* pp. 55~73. 1974
5. Adachi, T. and Oka, F.: "Constitutive Equations for Normally Consolidated Clay Based on Elastoviscoplasticity," *Soils and Foundations, Vol. 22, No. 4,* pp. 57~70. 1982
6. Akai, K., Adachi, T. and Ando, N.: "Existence of a Unique Stress-strain-time Relation of

- Clays," *Soils and Foundations*, Vol. 15, No. 1, pp.1~16. 1975
7. Arai, K.: "Soft Clay Behavior Based on Minimization of Dissipated Energy," 土質工學會論文報告集, Vol. 23, No. 3. 1983
 8. Atkinson, J.H. and Bransby, P.L.: "*The Mechanics of Soils. An Introduction to Critical State Soil Mechanics*," McGraw-Hill. 1978
 9. Bierrum, L.: "Engineering Geology of Norwegian Normally Consolidated Marine Clays as Related to Settlement of Buildings," *Geotechnique*, Vol. 17, No. 2, pp.81~118. 1967
 10. Murayama, S., Seuiguchi, H. and Ueda, T.: "Stress Relaxation of Clays," *Proc. Kansai regional meeting of JACE*, pp.III-1. 1972
 11. Perzyna, P.: "The Constitutive Equations for Work-hardening and Rate Sensitive Plastic Materials," *Proc. Vibrational problems, Warsaw*, Vol. 4, No. 3, pp.281~290. 1963

(接受: 1984. 6. 7)