

飽和된 正規壓密粘土의 非排水 剪斷中에 發生하는 過剩間隙 水壓과 變形의 關係

The Relationships between Excess Pore Water Pressure and Strain in
Normally Consolidated Saturated Clays During Undrained Shear

朴 鎔 遠*

Park, Yong-Won

鄭 寅 峻**

Chung, In-Joon

Abstract

Consolidated undrained standard triaxial tests for two remoulded clays and one undisturbed clay were carried out in order to find out the relationship between excess pore water pressure and axial strain in normally consolidated saturated clays during undrained shear. Tests were performed with isotropically-normally consolidated specimens by strain controlled and stress controlled loading.

As the result of this study a hyperbolic function expressing the relationship between pore water pressure and strain was found out, and it showed the same form as the Kondner's hyperbolic function for stress-strain behaviour. Two parameters used for the function can be obtained by \overline{CU} -triaxial test.

要 旨

飽和된 正規壓密 粘土가 非排水 剪斷을 받을 때 흙 속에 發生하는 過剩間隙水壓과 變形의 關係를 밝히기 爲하여 두개의 再成形 粘土와 한개의 非攪亂 試料를 使用하여 壓密-非排水 三軸壓縮 試驗을 施行하였다. 試驗은 等方-正規壓密된 試料에 對한 標準 三軸壓縮 試驗으로 變形 制御와 應力 制御 方式에 依하여 遂行되었으며, 試驗 結果로 부터 剪斷中의 過剩間隙水壓과 變形의 關係를 表現할 수 있는 雙曲線 函數를 찾아내었다. 이 雙曲線函數는 應力-變形 舉動에 對한 Kondner의 雙曲線 模型과 같은 形態의 函數이며 이 函數에 사용되는 두개의 係數는 三軸壓縮 試驗(\overline{CU})으로 부터 求해진다.

1. 序 論

本 研究는 正規壓密된 飽和粘土가 非排水 狀

態에서 剪斷될 때 粘土 試料속에 發生하는 過剩 間隙水壓과 試料의 軸方向 變形사이의 關係를 實驗을 通하여 究명한 것이다. 剪斷變形이 發生 되지 않는 1次元 荷重을 받는 飽和粘土層內에

* 正會員, 明知大學校 工科學 副教授.

** 正會員, 서울大學校 工科學 教授

發生하는 過剩間隙水壓은 Terzaghi의 理論이 定說로서 認定되고 있으나 剪斷變形을 隨伴하는 境遇에 對하여는 많은 사람들의 研究에도 不拘하고 아직까지 確實한 過剩間隙水壓發生 機構가 밝혀지지 못한 實情이다. 지금까지는 一般的으로 過剩間隙水壓을 土體內的 主應力成分의 變化量의 函數로 取扱하는 所謂 ‘應力理論’에 依하여 過剩間隙水壓을 算定하여 왔으며, Skempton^{1),2),3)}, Henkel⁴⁾, Henkel과 Wade⁵⁾, Juarez-Badillo⁶⁾, Tinoco⁷⁾ 등의 間隙水壓 函數들이 그 代表的인 것들이다. 한편 Parry와 Wroth^{8),9)}, Schofield와 Wroth¹⁰⁾ 등은 限界狀態概念에 依據하여 過剩間隙水壓을 算定하는 方法을 提示하였고 Togrol¹¹⁾은 經驗的 方法에 依하여, Olson¹²⁾과 Yoshida¹³⁾는 흙의 Dilatancy 特性을 利用한 間隙水壓 函數를 開發하였다. 이러한 여러가지 間隙水壓 函數들 중에서 現在 가장 一般的으로 利用되고 있는 것은 Skempton과 Henkel의 應力理論에 依한 間隙水壓 函數들이다.

그러나 이들 間隙水壓—應力 函數들은 다음과 같은 現象들을 說明할 수 없다는 共通的인 限界를 가지고 있다. ¹⁴⁾ 첫째, 除荷時에도 殘留하는 間隙水壓, 둘째, 同一한 荷重이 持續될 때 增加하는 間隙水壓, 셋째, 破壞應力 以後 應力은 減小하는데 間隙水壓은 增加하는 경우 등이다. 이러한 應力理論의 限界點을 克服할 수 있는 方法으로서 間隙水壓을 應力の 函數 아닌 變形的 函數로 보는 變形理論이 Lo¹⁴⁾에 依하여 提示되었다. 그는 理論과 實驗을 通하여 間隙水壓—變形函數의 可能性을 提示하였으나^{14),15)} 具體的인 函數를 提示하지 않았다. 그 밖에 Scott¹⁶⁾와 Chen¹⁷⁾ 등도 間隙水壓의 算定에 變形을 考慮한 바 있다.

本 論文에서는 正規壓密된 粘土試料를 使用한 壓密非排水 三軸壓縮試驗을 通하여 剪斷에 依하여 飽和粘土內에 發生하는 過剩間隙水壓과 試料의 軸方向 變形과의 關係를 觀察하고 그 結果로부터 間隙水壓—變形 函數를 찾아내었다.

2. 間隙水壓—變形 函數

2.1 應力—變形—間隙水壓 變動의 考察

透水性이 낮은 飽和된 粘土에 荷重을 加하면 土

體內에 變形이 發生하게 되는데 變形은 흙 構造의 變化를 同伴하게 되고, 그것은 또한 間隙構造의 變化를 意味하며 間隙부피의 變化를 誘發하려는 原因이기도 하다. 이때 透水性이 極히 不良하면 間隙水의 排水는 不可能하며 間隙水의 排水없이 間隙부피의 變化는 있을 수 없으므로 結果的으로 間隙水壓이 發生하게 된다. 여기서 土體內的 應力 變化가 過剩間隙水壓 發生의 原因이지만 그것은 變形이라는 媒介를 通해서 作用한다는 것을 알 수 있다. 바꾸어 말하면 過剩間隙水壓 發生의 直接的인 原因은 變形이다. 다만 여기서 말하는 過剩間隙水壓은 等方應力에 依한 間隙水壓(Δu_a)이 아니라 軸差(剪斷)應力에 依한 過剩間隙水壓(Δu_s)을 말하는 것이며 흙속에서 發生하는 全間隙水壓(Δu)은 이 두 要素의 合이다. 非排水 狀態의 飽和土內의 Δu_a 는 變形을 隨伴하지 않으며 이러한 間隙水壓은 互視的으로 境界等方應力の 變化和 같다는 것이 工學的으로 認定된 定說이다.

漸增하는 應力을 받는 正規壓密粘土의 變形은 그 初期狀態부터 彈性變形과 塑性變形的 合으로 나타나며 應力 水準이 높아 질수록 彈性變形보다는 塑性變形的 比重이 커지며 破壞狀態에 이르면 塑性變形이 絶對的으로 優勢하게 된다. 흙속의 間隙水壓이 흙속의 間隙形態의 變化에 起因되므로 彈性變形에 依하여 發生한 間隙水壓은 그 原因이 消滅되면 따라서 없어지게 되지만 塑性變形에 依한 間隙水壓은 그 原因이 除去되어도 남아 있으므로 排水가 되지 않는 한 殘留間隙水壓으로 남게 된다. 여기서, 間隙水壓—變形關係와 應力—變形 關係 사이의 相似性을 알 수 있다. 이미 Chen¹⁷⁾은 흙의 非線型 應力—變形關係를 考慮하여 間隙水壓을 應力 不變係數들에 대한 3次式을 誘導한 바 있다. 다만 그가 提示한 式은 매우 복잡할 뿐만 아니라, 그 妥當性을 證明할 實驗結果를 갖지 못하였다.

2.2 間隙水壓—變形 關係에 對한 雙曲線 函數의 假定

Lo¹⁴⁾는 剪斷에 依하여 飽和된 正規壓密粘土에 發生하는 過剩間隙水壓을 變形的 函數로 表示할 수 있다는 것을 보였고 軸對稱이나 平面變形的

境遇에 對해서는 間隙水壓은 오로지 最大主變形인 ϵ_1 만의 函數로 表示될 수 있음을 보였다. 即,

$$\Delta u_s / \sigma_c = f(\epsilon_1) \quad (1)$$

여기서, Δu_s 는 剪斷에 依하여 發生되는 過剩間隙水壓이고 σ_c 는 拘束應力으로서 式 兩側의 次元을 一致시키기 爲하여 使用되었다. 筆者는 式(1)의 間隙水壓—變形 函數의 具體的 形態를 찾아냄에 있어서 前節에서 記述한 바와 같은 應力—變形 關係와 間隙水壓—變形 關係의 相似性에 留意하고, 文獻에 報告된 여러 사람들^{12, 15, 18, 19, 20}의 實驗結果를 觀察하여 應力—變形 關係에 대한 Kondner²¹의 雙曲線, 模型과 같은 形態의 雙曲線 函數를 式(1)의 具體的 函數 形態로 假定하였다.

Kondner의 應力—變形 舉動에 關한 雙曲線 函數는 三軸壓縮試驗의 경우에는 다음과 같이 表記된다.

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_u = \frac{\epsilon_1}{1/E_i + \epsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3)_u} \quad (2)$$

여기서, E_i 는 應力—變形 曲線의 初期 接線 彈性係數이고, $(\sigma_1 - \sigma_3)_u$ 는 極限狀態의 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 값이다. 이 때 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 는 $\Delta\sigma_1$ 으로 表記할 수도 있다. 위 式에서 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 대신에 剪斷에 依해 發生하는 過剩間隙水壓 Δu_s 를 代入하면,

$$\Delta u_s = \frac{\epsilon_1}{1/U_i + \epsilon_1/\Delta u_{su}} \quad (3)$$

여기서, U_i 는 間隙水壓—變形 曲線의 初期接線의 기울기를 나타내는 係數로서 E_i 와 같은 次元의 數이며 Δu_{su} 는 極限狀態의 Δu_s 값이다.

그런데 이 들 雙曲線式은 다음과 같이 直線式으로 變換될 수 있다. 即,

$$\epsilon_1 / \Delta u_s = \frac{1}{U_i} + \left(-\frac{1}{\Delta u_{su}} \right) \epsilon_1 \quad (4)$$

위 式은 $\epsilon_1 / \Delta u_s$ 와 ϵ_1 을 軸으로 하는 直角座標에서 $1/U_i$ 를 切片으로, $(-1/\Delta u_{su})$ 를 기울기로 갖는 直線이 된다. (Fig. 1 참조) 따라서 間隙水壓과 變形이 式(3)과 같은 雙曲線 函數 關係를 가지려면 그들 두 값이 $\epsilon_1 / \Delta u_s$ 와 ϵ_1 을 軸으로 하는 直角座標에서 하나의 直線에 收斂해야 한다.

또한, 正規壓密 粘土에서 應力—變形 舉動과 有效應力 經路는 壓密應力에 依하여 正規化 舉動을 나타내므로^{8, 22, 23} 間隙水壓—變形 舉動도 正規化 舉動을 나타낼 것이다. 지금 式(2)와 式(3)

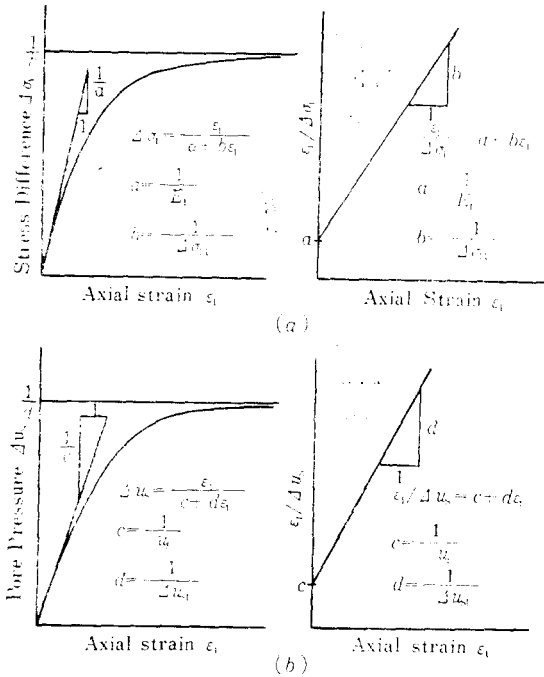


Fig. 1 Hyperbolic Function for Stress-Strain and pore pressure-Strain Relation

의 兩邊을 拘束應力 σ_c 로 나누면 두 式 모두 無次元式이 된다. 即,

$$r_s = \Delta\sigma_1 / \sigma_c = \frac{\epsilon_1}{1/E_{in} + \epsilon_1/r_{su}} \quad (5)$$

$$r_u = \Delta u_s / \sigma_c = \frac{\epsilon_1}{1/U_{in} + \epsilon_1/r_{su}} \quad (6)$$

여기서, r_s 를 應力比, r_u 를 間隙水壓比라 부르기로 하며, $E_{in} = E_i / \sigma_c$, $U_{in} = U_i / \sigma_c$, $r_{su} = \Delta\sigma_{1u} / \sigma_c$, $r_{uu} = \Delta u_{su} / \sigma_c$ 로 나타낸다. 또, 式(5)와 式

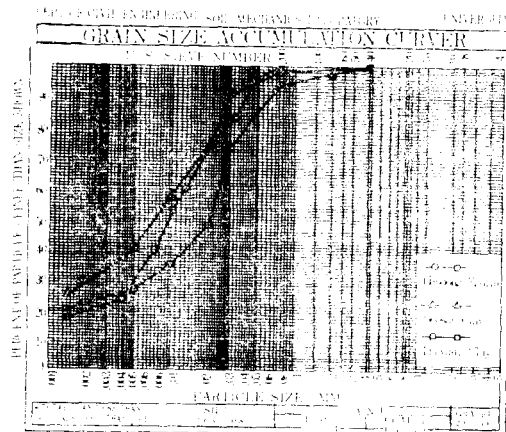


Fig. 2 Grain Size Distribution Curves of Test Samples

(6)을 直線型으로 變形하면,

$$\epsilon_1/r_s = 1/E_{in} + (1/r_{su})\epsilon_1 \quad (7)$$

$$\epsilon_1/r_u = 1/U_{in} + (1/r_{uu})\epsilon_1 \quad (8)$$

이 된다.

3. 實驗 材料 및 實驗 方法

3.1 實驗 材料

實驗에는 3 種의 粘土가 사용되었다. 그 것들의 產地와 土性은 (表-1)과 같다.

이 試料들 중에서 河東 高靈土는 市中에서 購入한 것을 實驗室에서 #200 체 通過分을 取하여 使用하였는데 실트분이 많은 淡黄色의 흙이다. 端山粘土는 忠南 端山郡 大竹里 海岸에서 採取된 것을 조개 껍질을 除去하고 實驗室에서 再壓密시켜 使用하였으며 半月 粘土는 半月工業團地 앞 海岸에서 非攪亂 狀態로 採取된 試料이다 이들의 粒度分布는 (그림-2)에 圖示되었다.

Table. 1 Index Properties and Origin of Soils

Soils	Origin	Status	Gs	LL(%)	PI(%)	w(%)
Hadong Kaolin	Residual Soil	Remoulded	2.62	48	9	50
Seosan Clay	Marine Clay	Remoulded	2.65	44	22	46
Panwall Clay	Marine Clay	Undisturbed	2.72	34	13	36

Table 2. Soils and Types of Test

Symbol	Soils	Confining pressure (kg/cm ²)	Type of Test
RHDC	Remoulded	1.0	Strain
	Hadong	2.0	Controlled
	Kaolin	3.0	Test
RHSC	Remoulded	1.0	Stress
	Hadong	2.0	Controlled
	Kaolin	3.0	Test
RSDC	Seosan	0.6	Strain
	Marine	1.0	Controlled
	Clay	1.6	Test
		2.0	
UPSC	Panwall	1.0	Stress
	Marine	3.0	Controlled
	Clay	3.0	Test

3.2 實驗 方法

飽和된 正規壓密粘土에 發生하는 過剩間隙水壓中에서 純全히 軸差應力에 依한 것만 測定하기 爲하여 本 研究에서는 壓密—非排水 標準 三軸壓縮試驗을 施行하였다. 剪斷中에는 側壓은 一定($\Delta\sigma_3=0$)하게 維持하고 間隙水壓은 $\Delta\sigma$ 에 依해서만 發生토록 하였다. 또 載荷方法은 變形 制御形과 應力 制御形의 두 가지 試驗을 行하였다. 試驗에 使用된 壓密應力과 載荷方法을 (表-2)에 整理하였다.

供試體는 直徑 35 mm, 길이 87.5 mm의 円筒形으로 만들었으며 非攪亂 試料는 試料管에서 밀어내어 使用하였고, 再成形 試料는 實驗室에서 (그림-3)에 圖示된 것과 같은 試料壓密器를 使用하여 鉛直方向 壓密應力 0.4kg/cm² 으로 2 週目 以上 壓密시킨 後 使用하였다.

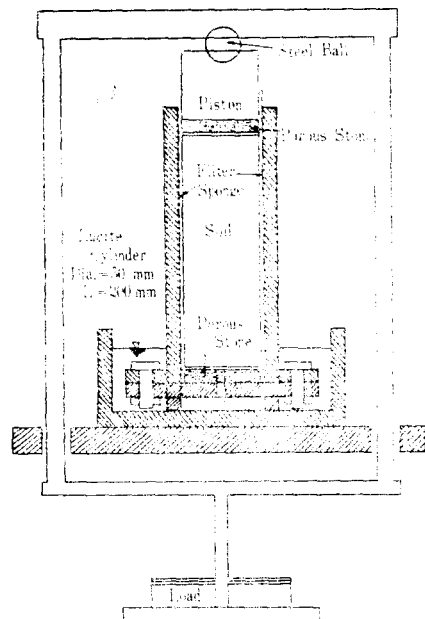


Fig. 3. Remoulded Samples Consolidation Device

本 研究에 사용된 三軸壓縮試驗裝置는 Norway 式 三軸室과 Bishop 式 恒壓裝置로 이루어진 것이며, 間隙水壓 測定은 間隙水壓 變換器가 사용된 自動計測裝置를 利用하여 遂行되었다. 再成形 試料속의 氣泡를 除去하기 爲하여 試料壓密器 속에 넣기 전에 試料를 끓인 後에 사용하였고, 試驗에 사용된 여과지와 多孔板도 끓인 後에 물 속에 담가 놓고 使用하였다.

變形制御試驗에서의 變形速度는 0.08mm/min (0.1%/min) 였으며, 應力制御試驗은 한 번에 0.2kg의 分銅 한개(試料에 加해지는 荷重은 1kg 이 됨)씩 올려 놓고 間隙水壓의 變化가 멈추면 또 하나의 分銅을 追加하는 方式으로 施行하였다. 이 때 試料의 初期斷面積이 9.62cm² 이므로 1kg의 荷重은 約 0.1kg/cm²의 應力으로 試料에 作用하게 된다.

5. 實驗結果의 分析 및 考察

5.1 三軸壓縮試驗의 結果

(表-3)에는 三軸室에서 24時間 等方壓密 시킨 試料의 載荷前의 含水比와 間隙比가 收錄되었다. 表에서 C_c 는 等方壓密에서의 壓縮指數이다. 제 가지 試料中에서 河東 高臺土는 壓縮性이 매우 작은 흙이었다.

Table 3. Water Content and Void Ratio before Shear

σ_c (kg/cm ²)	Hadong Kaolin		Seosan Clay		Panwall Clay	
	(1) w_c (%)	(2) e_c	w_c (%)	e_c	w_c (%)	e_c
0.6	—	—	41.22	1.12	—	—
1.0	43.49	1.14	37.81	1.03	35.61	0.94
1.6	—	—	35.60	0.97	—	—
2.0	41.65	1.09	23.82	0.92	30.62	0.81
3.0	40.19	1.05	—	—	27.30	0.72
(3) C_c	0.19		0.34		0.36	

Note : 1) w_c : Water Content after Consolidation
 2) e_c : Void ratio after Consolidation
 3) C_c : Compression Index

壓密非排水 三軸壓縮試驗에서 測定된 軸差應力과 軸方向 變形의 關係와 間隙水壓과 軸方向

變形의 關係는(그림·4)와 (그림·5)에 收錄되었다. 또한 그 때의 軸差應力과 間隙水壓을 各各의 壓密應力으로 나누어 (그림·6)과 (그림·7)에 收錄하였다. (그림·6)과 (그림·7)에서 보여 주듯이 軸差應力과 間隙水壓의 變形과의 關係는 그 拘束應力에 依하여 正規化되었다.

5.2 應力—變形에 對한 雙曲線 函數

(그림·6)에 圖示된 軸差應力과 變形의 關係가 Kondner의 雙曲線 函數에 依하여 表示 可能한 가를 檢討하기 爲하여 (그림·6)에 주어진 曲線을 ϵ_1/r_s 와 ϵ_1 을 兩軸으로 하는 直角座標에 圖示한 것이 (그림·8)이다. 이 그림에서 보면 네개의 試料에서 모두 ϵ_1/r_s 와 ϵ_1 이 하나의 直線으로 훌륭히 收斂하고 있음을 알 수 있다. 이 때 이들 直線의 ϵ_1/r_s 軸 切片은 $1/E_{in}$ 의 값을, 直線의 기울기는 $1/r_{su}$ 의 값을 나타내므로 그 直線의 式은 式(7)과 같이 되고, 따라서 이들은 E_{in} 을 初期 接線의 기울기로 하고 r_{su} 를 漸近線으로 하는 式(5)와 같은 雙曲線 函數로 나타낼 수 있다. 結果적으로 (그림·6)에 圖示된 軸差應力— 變形 曲線들은 Kondner의 雙曲線 函數로서 훌륭히 表現됨을 알 수 있었다. (그림·8)의 直線 式으로 부터 구한 各 試料의 雙曲線 係數들을 整理하면 (表-4)와 같다. 이 表에서 보면 R_f (파괴 시와 극한상태의 축차응력의 비) 값은 0.9前後의 값을 가지며, Christian과 Desai²⁴⁾는 $0.7 < R_f \leq 0.9$ 의 範圍를 提示한 바 있다. 이 R_f 값을 使用하여 式(5)를 다시 쓰면, $R_f = r_{sf}/r_{su}$ 이므로

$$r_s = \Delta\sigma_1/\sigma_c = \frac{\epsilon_1}{1/E_{in} + (R_f/r_{sf})\epsilon_1} \quad (9)$$

이 된다.

5.3 間隙水壓—變形에 對한 雙曲線 函數

飽和된 正規壓密粘土內에 剪斷에 依하여 發生하는 過剩間隙水壓과 變形의 關係가 軸差應力— 變形의 關係와 마찬가지로 雙曲線 函數로 表現될 수 있으리라는 (2·2)節에서의 假定の 成立與否를 알아보기 爲하여 (그림·7)에 圖示된 間隙水壓—變形 曲線을 ϵ_1/r_u 와 ϵ_1 을 兩軸으로 하는 直角座標 平面에 옮겨 보았으며 (그림·9)에 圖示된 것이 그 結果이다. 그림에 提示된 係數들은 最小自乘法에 依하여 구해진 값들이다. 이 그림

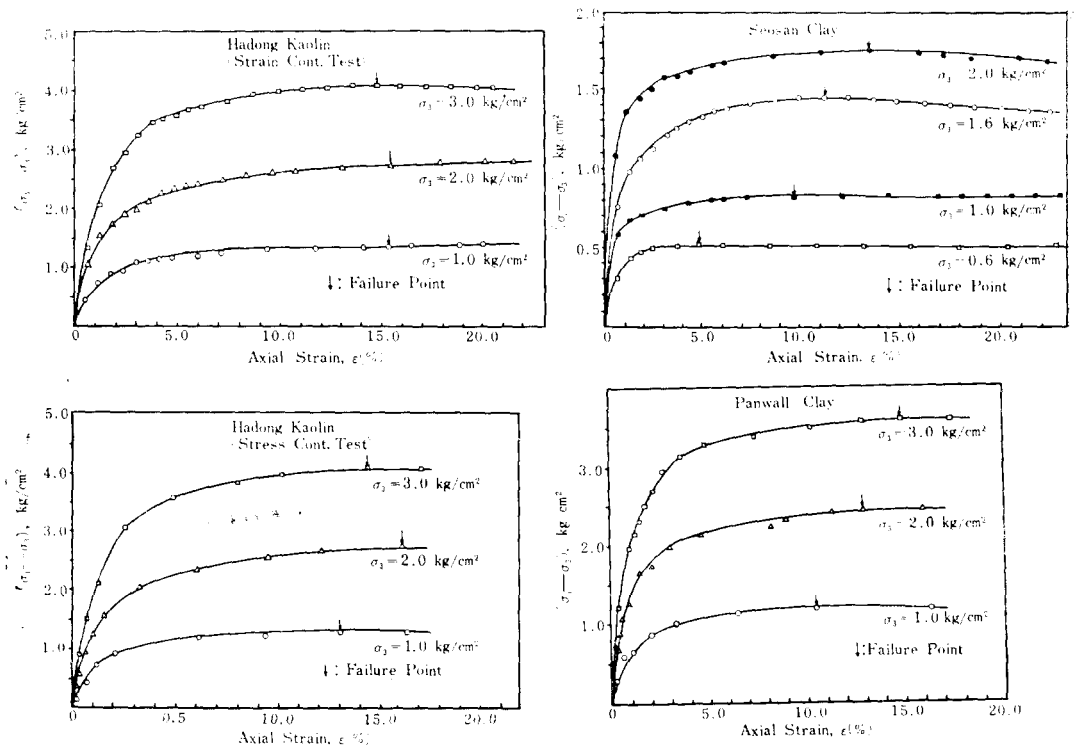


Fig. 4. Stress vs. Strain Curves from Triaxial Compression Tests.

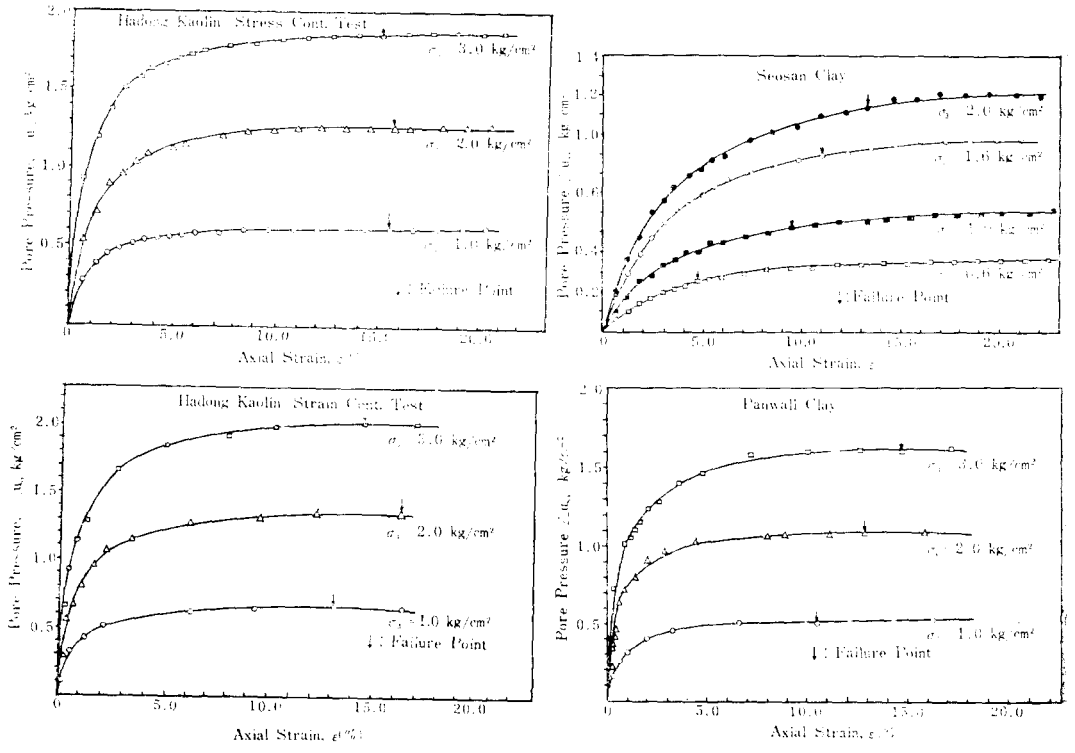


Fig. 5. Pore Pressure vs. Strain Curves from Triaxial Compression Tests.

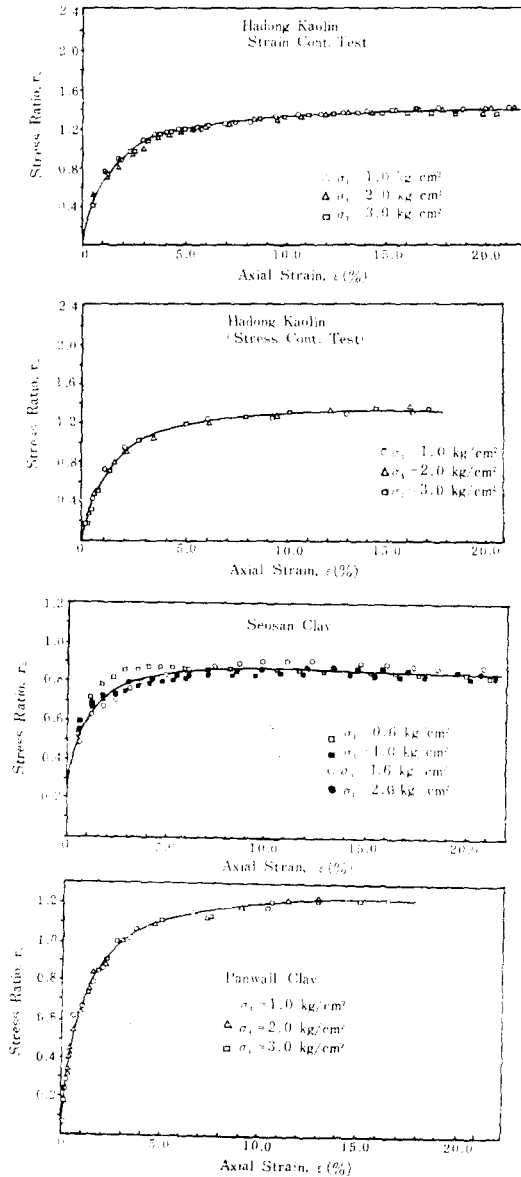


Fig. 6. Normalized Stress vs. Strain Curves.

Table 4. Parameters for hyperbolic Stress-Strain functions.

Test	E_{in}	r_{su}	r_{sf}^*	R_f^{**}
RHDC	1.22	1.49	1.37	0.92
RHSC	1.11	1.45	1.34	0.92
RSDC	1.43	0.94	0.84	0.89
UPSC	1.58	1.27	1.21	0.95

Note: * r_{sf} is the average $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ value divided by σ_c

** $R_f = (\sigma_1 - \sigma_3)_f / (\sigma_1 - \sigma_3)_u = r_{sf} / r_{su}$

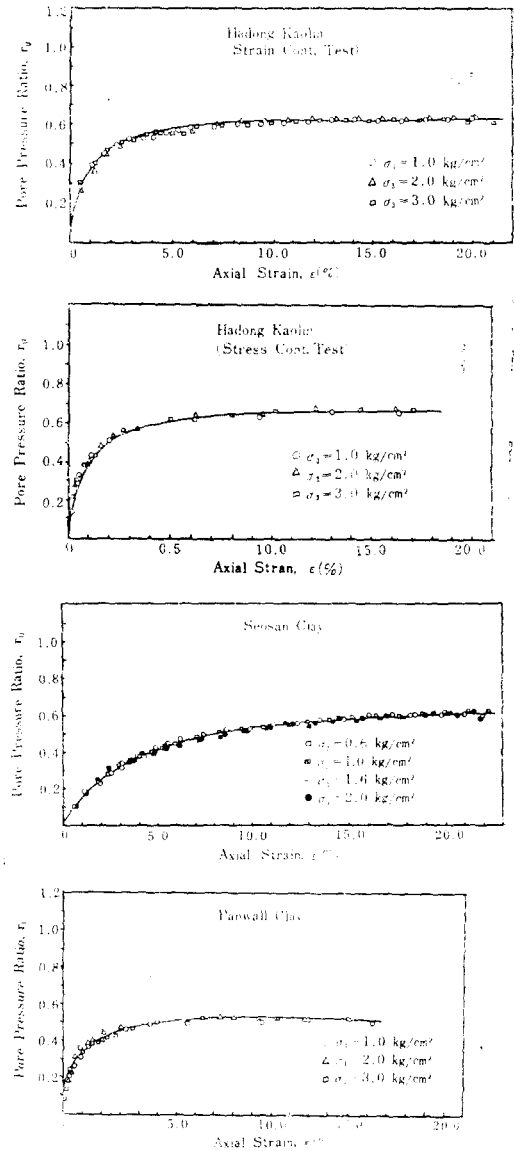


Fig. 7. Normalized Pore Pressure vs. Strain Curves.

Table 5. Parameters for hyperbolic Pore Pressure-Strain function.

Test	U_{in}	r_{uu}	r_{uf}^*	R_{uf}^{**}
RHDC	0.83	0.70	0.62	0.89
RHSC	0.97	0.70	0.67	0.96
RSDC	0.20	0.72	0.51	0.71
UPSC	0.91	0.56	0.52	0.93

Note: * r_{uf} is the average Δu_{sf} values divided by σ_c , when Δu_{sf} is Δu_s at failure.

** $R_{uf} = \Delta u_{sf} / \Delta u_{su} = r_{uf} / r_{uu}$

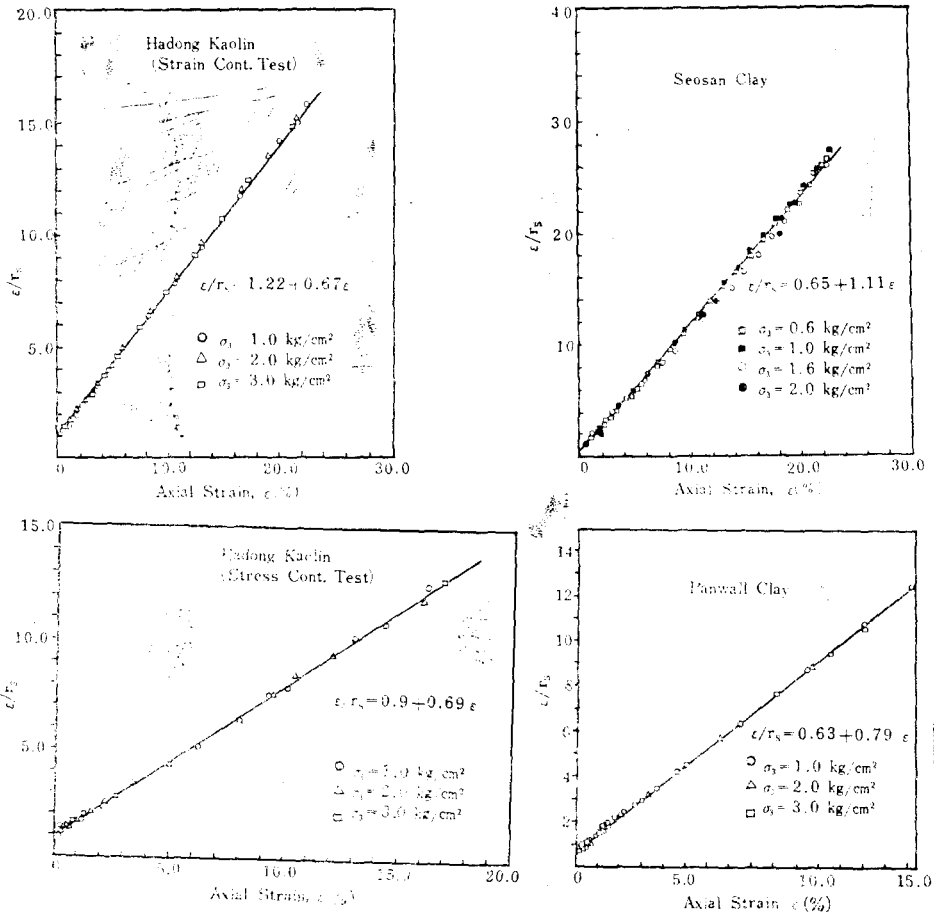
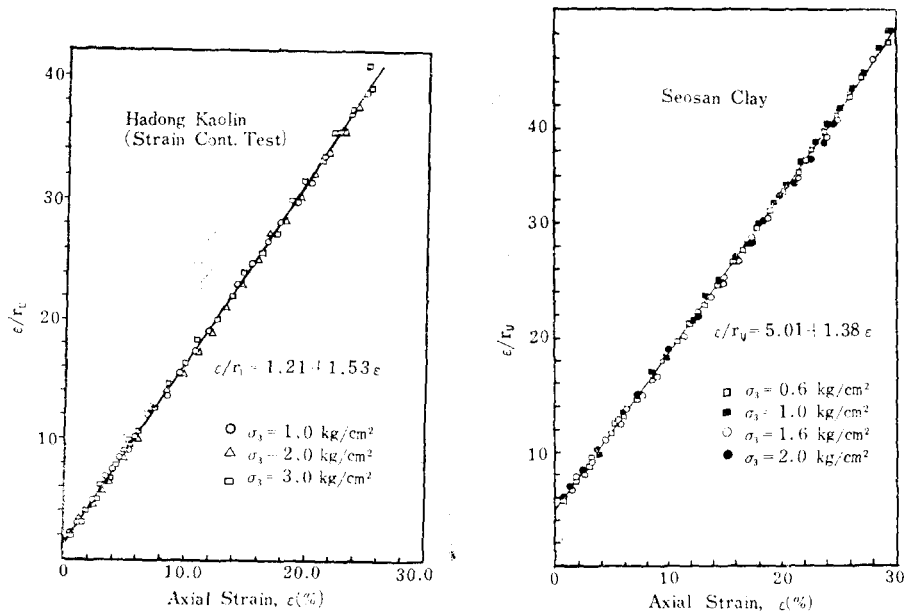


Fig. 8. Transformed hyperbolic functions for Stress vs. Strain.



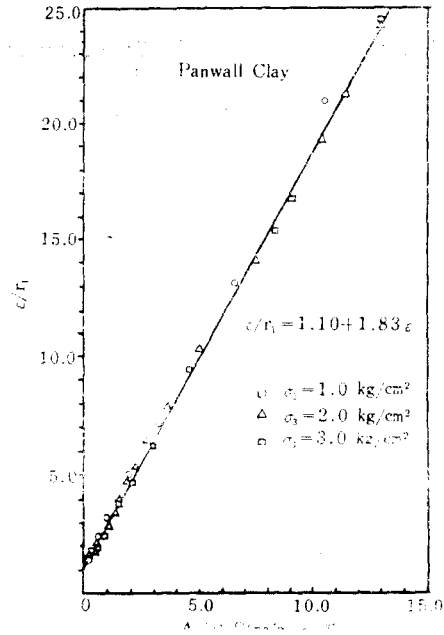
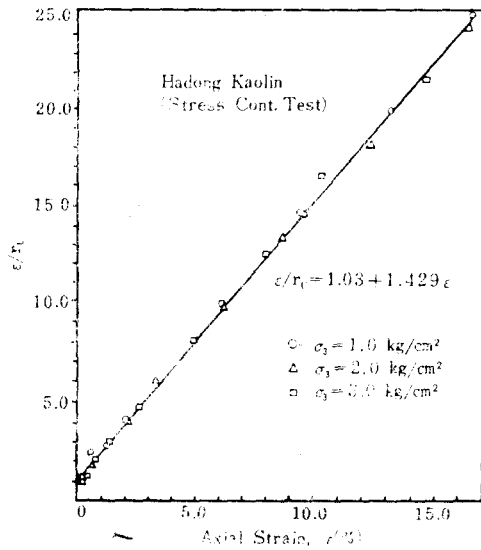


Fig. 9. Transformed hyperbolic functions for Pore Pressure vs. Strain.

에서 보여 주는 것은 ϵ_1/r_u 와 ϵ_1 이 훌륭히 直線에 收斂되며 따라서, 앞의 (2.2)節에서 假定한 式(8)이 成立되고 이어서 式(8)의 雙曲線 形態인 式(6)도 成立된다는 것이다. 結果적으로 間隙水壓과 變形이 應力과 變形 關係에 對한 Kondner의 雙曲線 函數와 같은 形態의 雙曲線 函數 關係로 表現될 수 있음을 나타낸 것이다. 이로써 Lo¹⁴⁾가 提案한 間隙水壓—變形 函數의 具體的 形態를 다음과 같이 整理할 수 있다.

$$r_u = \Delta u_s / \sigma_c = f(\epsilon_1) = \frac{\epsilon_1}{1/U_{in} + (1/r_{uu})\epsilon_1} \quad (10)$$

또, $r_{uf} = \Delta u_s / \sigma_c$ 이고 Δu_s 는 破壞時의 間隙水壓이라 할때,

$$R_{uf} = r_{uf} / r_{uu} \text{라 하면} \quad (11)$$

$$r_u = \Delta u_s / \sigma_c = \frac{\epsilon_1}{1/U_{in} + (R_{uf}/r_{uf})\epsilon_1} \quad (12)$$

이 된다.

따라서 任意의 壓密應力 σ_c 에서의 剪斷에 依한 過剩間隙水壓의 크기는,

$$\Delta u_s = \sigma_c \cdot r_u \quad (13)$$

이다. (그림·9)에서 求해진 雙曲線函數의 係數들을 (表-5)에 整理하여 收錄하였다.

5.4 間隙水壓—變形 函數의 係數에 對한 考察

本 研究에서 遂行한 等方—正規壓密된 粘土 試料에 對한 三軸壓縮試驗 結果로부터 求해진 間

隙水壓—變形 函數의 係數들과 文獻에 나타난 다른 實驗結果를 比較하기 爲하여 비슷한 條件에서 實驗된 三軸壓縮試驗 結果를 蒐集하여 (表-6)에 整理하였다. 이들 資料는 數値로 記錄된 것이 아니고 그림으로 提示된 것을 方眼紙로 透視 復寫하여 再生한 後 雙曲線 函數를 代入하여 그 係數들을 求한 것이므로 그 값이 正確하지는 못 하지만 大略의 傾向을 把握하는데 큰 誤差는 없을 것이다. 이들 文獻上에 提示된 實驗結果에서도 最小自乘法로 ϵ_1/r_u vs. ϵ_1 를 나타내는 直線의 係數를 求하였다. 이들 實驗 結果들에서도 間隙水壓과 變形의 關係는 本 研究의 實驗 結果와 같이 雙曲線 函數에 依해서 훌륭히 表現될 수 있었다. 다만, (表-6)에서 볼 수 있듯이 雙曲線 係數들의 變化幅이 매우 크다.

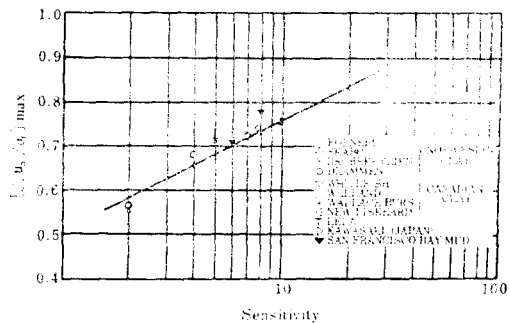


Fig. 10

Table 6. Summary of the Pore Pressure-Strain Relation Data for Isotropically Normally Consolidated Clays.

(1)	Soils	LL %	PI %	(2) S_t	$E_{in} \times 10^{-2}$	r_{su}	$U_{in} \times 10^{-2}$	r_{uu}	$\frac{U_{in}}{E_{in}}$	Remarks
R	Hadong Kaolin	48	9		1.22	1.49	0.83	0.65	0.68	Strain controlled Test
R	Hadong Kaolin	48	9		1.11	1.45	0.97	0.70	0.87	Stress controlled Test
R	Seosan Clay	44	22		1.43	0.94	0.20	0.72	0.14	Strain controlled Test
U	Panwall Clay	34	13	3	1.58	1.27	0.91	0.56	0.58	Stress Controlled Test
Data from other Researches										
										Reference No.
R	Burgess Piegment No. 10 Kaolin	65	35		1.67	0.24	1.25	0.78	0.75	12
R	Edgar Plastic Kaolin	57	26		2.04	0.74	1.11	0.78	0.54	19
R	Fire Clay Flour	33	10		1.33	0.79	0.99	0.69	0.74	19
R	Kaolinite	57	26				0.42	0.76		20
R	Grundite	37	11				0.50	0.55		20
R	Detroit Silty Blue Clay	40	15		2.50	1.01	0.32	0.56	0.13	20
U	Skabo Clay	52	22	5			0.98	0.77		15
U	St. Thuribe Clay	32	10	>20			1.11	0.86		15
U	Luisville Clay	60	36	13			0.96	0.74		15
U	Kawaski Clay	80	38	10	3.33	0.84	1.11	0.193	0.33	26
U	Boston Blue Clay	33	15	5~10	4.00	0.65	1.60	0.77	0.40	26
U	Brobekkveien Clay	37	16	7			1.00	0.79		15

(1) R=Remoulded, U : Undisturbed

(2) S_t =Sensitivity

이들 계수와 시험의塑性度와의 관계를 검토하였으나 何等의 관계를 갖고 있지 않다는 것을 알았다. 다만 Lo^{25} 에 의하면 (그림·10)에 보인 것과 같이 間隙水壓과 흙의 銳敏比와의 사이에 半對數 方眼紙 上에서 大略 直線 關係가 있다고 하였으나 이것에 對해서는 앞으로 充分한 實驗을 通하여 더 研究해 보아야 할 것이다.

本 研究의 實驗 結果만 가지고는 間隙水壓과 變形의 關係가 雙曲線 函數로 表現될 수 있다는 것과 그 雙曲線 函數의 係數들은 壓密-非排水 三軸壓縮 試驗을 通하여 구해진다는 것 외에 間隙水壓-變形 關係에 影響을 주는 다른 要素들을 찾아내지는 못하였다.

5.5 Skempton의 間隙水壓係數 A와 變形的 關係

Skempton의 間隙水壓係數 A가 應力이나 變形水準에 따라 變하는 값이라는 것은 잘 알려져 있으면서도 A와 變形的 關係를 函數로 表現하지는 못하고 있었으나 間隙水壓-變形 函數를 使

用하면 그것이 可能해진다. 標準 三軸壓縮 試驗에서 Skempton의 A係數는,

$$A = \frac{\Delta U_s}{\Delta \sigma_1} = \frac{\sigma_c \cdot r_u}{\sigma_c \cdot r_s} = \frac{r_u}{r_s} = \frac{a + b\varepsilon_1}{c + d\varepsilon_1}$$

여기서, $a=1/E_{in}$, $b=1/r_{su}$, $c=1/U_{in}$ 그리고 $d=1/r_{uu}$ 이다. (그림·11)에는 세계의 試料에서 의 A와 ε_1 의 關係가 圖示되었다.

5.6 有效 應力經路의 豫測

지금 飽和된 正規壓密 粘土의 非排水 剪斷時의 正規化된 有效應力經路 上의 한 點의 座標을 (\bar{p}, q) 라 하면,

$$\begin{aligned} \bar{p} &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) / \sigma_c - \Delta u_s / \sigma_c \\ &= \frac{1}{2} \{2\sigma_3 + (\sigma_1 - \sigma_3)\} / \sigma_c - \Delta u_s / \sigma_c \\ &= \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + \frac{r_s}{2} - r_u \\ &= 1 + \frac{r_s}{2} - r_u \end{aligned}$$

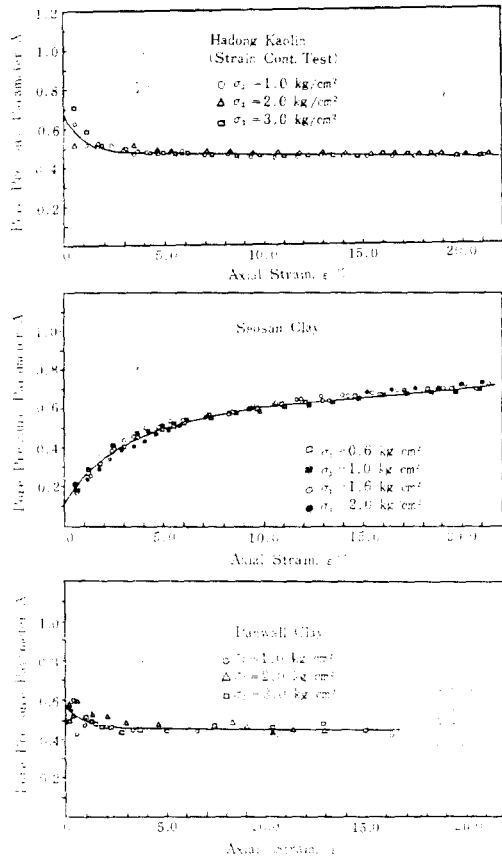


Fig. 11. Relationship between Skempton's Pore Pressure Parameter A and Strain.

$$q = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_c = r_v \frac{\sigma_c}{2}$$

이다. 따라서, 任意的 壓密應力 σ_c 에서의 有效應力 經路上의 한 點의 座標은 $(\sigma_c \cdot \bar{p}, \sigma_c \cdot q)$ 가 된다. 여기서 r_u 와 r_v 는 變形的 函數이므로 變形的 發生에 따른 有效應力 經路의 變化를 豫測할 수 있다.

6. 結 論

本 研究에서는 飽和된 等方—正規壓密 粘土에 對한 壓密—非排水 三軸壓縮 試驗을 通하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

가. 非排水 剪斷時에 飽和된 等方—正規壓密 粘土內에 發生하는 過剩間隙水壓과 軸方向 變形과의 關係는 Kondner의 應力—變形에 對한 雙

曲線 函數와 같은 形態의 函數로 表現할 수 있으며 그때 間隙水壓—變形에 對한 雙曲線 函數에 使用되는 두개의 係數는 壓密—非排水 三軸壓縮 試驗으로 구할 수 있다.

나. 上記한 雙曲線 函數를 利用하여 Skempton의 間隙水壓係數 A를 變形的 函數로 表示할 수 있으며 非排水 剪斷時의 正規壓密 粘土에 對한 有效應力 經路를 豫測할 수 있다.

異方壓密된 粘土의 境遇나, 剪斷時의 應力 體系, 粘土의 銳敏比等과 過剩間隙水壓의 發生舉動과의 關係에 對한 研究는 앞으로 더 研究되어야 할 課題일 것이다.

參 考 文 獻

1. Skempton, A.W. The Effective Stresses in Saturated Clays Strained at Constant Volume. Proc. 7th Inter. Congr. Appl. Mech., Vol. 1, 1948, pp. 378~392.
2. Skempton, A.W., The Pore Pressure Coefficient A and B, Géotechnique, Vol. 4, 1954, pp. 143~147.
3. Skempton, A.W., Corepondance, The Pore-Pressure Coefficient in Saturated Soils. Géotechnique Vol. 10, 1960, pp. 186~187.
4. Henkel, D.J., The Shear Strength of Saturated Remould Clays, Research Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils. ASCE, Boulder, Cololado, 1960, pp. 533~554.
5. Henkel, D.J. and Wade, N.H., Plane Strain Tests on a Saturated Remoulded Clay. Jour. Soil Mech. and Found. Eng. Div., ASCE, Vol. 92, No. SM6, 1966, pp. 67~80.
6. Juarez-Badillo, E., Pore Pressure Functions in Saturated Soils. Laboratory Shear Testing of Soils. ASTM, Spec. Tech. Publ. No. 361, 1963, pp. 226~240.
7. Tinoco, F.H., Pore Pressure Parameters and Sand Liquefaction. Proc. of the 9th Inter. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Vol. 2, 1977, pp. 409~420.
8. Parry, R. G.H., Triaxial Compression and Extension Tests on Remoulded Saturated Clay. Géotechnique, Vol. 10, No.4, 1960, pp. 166~180.
9. Parry, R.G.H. and Worth, C.P., Pore Pressure

- in Soft Ground under Surface Loading. U.S. Army Eng. Waterway Experiment Station Contr. Rep.
10. Schofield, A. and Wroth, P., *Critical State Soil Mechanics*, Chap. 6, McGraw-Hill Book Company, London, 1968.
 11. Togrol, E. The Effect of Overconsolidation on the Development of Pore Pressure in Saturated Clays. proc. of the 6th Inter. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Vol. 1, 1965, pp.382~384.
 12. Olson, J.P., Volume Change-Pore pressure Relations for Saturated Cohesive Soils. ph. D. Thesis, North Carolina State University at Raleigh, 1969.
 13. Yoshida, S., Relationship between Dilatancy Characteristics and the Changes in Effective Stress and Pore Water Pressure under Undrained Conditions. Trans. Japan Soc. Irr. Drain and Reclam. Eng., 1979, pp.42~49.
 14. Lo, K.Y., The Pore Pressure-Strain Relationship of Normally Consolidated Clays. Part I. Theoretical Considerations. Can. Géotechnical Jour., Vol. 6, No. 4, 1969, pp.383~394.
 15. Lo, K. Y., The Pore Pressure-Strain Relationship of Normally Consolidated Undisturbed Clays. Part II. Experimental Investigation and Practical Applications. Can. Geotechnical Jour., Vol. 6, No. 4, 1969, pp.395~415.
 16. Scott, R.F., *Principles of Soil Mechanics*, Chap. 6, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., London, 1963.
 17. Chen, J.C.F., Nonlinear Pore Pressure Equation. Jour. of Soil Mech. and Found. Eng. Div., ASCE, Vol.98, No. SM6, 1972, pp.649~651.
 18. Papadopoulos, H.I., Pore Water Pressures in Saturated Clays. Wayne State University, Ph. D. Thesis, 1974.
 19. Sayek, T.F., Pore Pressure in Isotropically and Anisotropically Consolidated Clays. Wayne State University, Ph. D. Thesis, 1975.
 20. Chivalak, S., Pore Pressure Function for Preconsolidated Saturated Clay. Wayne State University, Ph. D., Thesis. 1975.
 21. Kondner, R.L., Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils. Jour. of Soil Mech. and Found. Eng. Div., ASCE, Vol. 89, No. SM1, 1963, pp.115~143.
 22. Henkel, D.J., The Relationships between the Effective Stress and Water Content in Saturated Clays. Géotechnique, Vol. 10, No. 1, 1960, pp.41~54.
 23. Ladd, C.C., Fott, R., Ishihara, K., Schlosser, F., and Poulos, H.G., Stress-Deformation and Strength Characteristics. State-of-the-Art Report. Proc. of the 9th Inter. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Vol. 2, 1977, pp.421~494.
 24. Christian, J.T. and Desai, C.S., Constitutive Laws for Geologic Media. *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*. McGraw-Hill Book Company, New York, 1977, pp.65~115.
 25. Lo, K. Y., Effects of Pile Driving on Soil Properties. Discussion, Jour. Soil Mech. Found. Eng. Div., ASCE, Vol. 94, No. SM2, 1968, pp.606~608.
 26. Ladd, C.C., Stress Strain Behaviour of Anisotropically Consolidated Clays during Undrained Shear. Proc. of 6th Inter. Conf. on Soil Mech. Found. Eng. Montreal, Vol. 1, pp.282~286.