

## 粘土의 壓密 特性

黃 成 一  
上 木 工 學 科

### 〈要 約〉

粘土의 壓密特性을 觀察하기 爲하여 蔚山地域 粘土에 對하여 標準壓密試驗의 結果를 Rheological Model 理論에 依해서 여러가지 Soil Parameter를 分析하여 서울 近方 金浦地域의 赤色粘土와 馬山地域의 灰色粘土에 對한 結果들과 比較檢討하였다. 이 때 算出된 Soil Parameter는 Soil Skeleton의 一次壓縮성과 二次壓縮성 Parameter와 Dashpot의 粘性係數이다. 또 이들 Parameter에 依하여 一次壓縮성에 對한 二次壓縮성의 相對的 重要性을 나타내는 Compressibility Ratio와 二次壓密이 일어나는 程度를 보여주는 Rate Factor를 求하여 比較檢討 하였다.

## On the Characteristics of Consolidation for Clay

Hwang Sung Il  
Dept. of Civil Engineering

### 〈Abstract〉

The consolidation characteristics of clay were studied in three kinds of samples by the method of one-dimensional consolidation Tests.

Soil samples were tested at the liquid limit. The test results were analyzed by the method of Gibson and Lo's Rheological Model Theory.

### I. 序 論

一般적으로 粘土層의 沈下 現象은 即時沈下, Creep 現象, 單純히 壓密이라고 表現하는 一次壓密과 그리고 二次壓密 等이 累積되어 일어나는 現象이라고 볼 수 있다. 여기서 即時沈下란 荷重의 變化와 同時에 일어나는 剪斷變形으로서 undrained 或은 體積의 變化가 없는 狀態에서 일어나는 彈性的인 壓縮에 依하여 일어나는 沈下 現象이며 Creep 現象<sup>(1)</sup>은 時間의 變化에 따라 일어나는 剪斷變形의 一種이다. 그런데 即時沈下와 Creep 現象으로 인한 沈下는 壓密現象으로 일어나는 沈下와 比較할 때 그 變이 매우 微少하므로 本 試驗 分析에서는 言及하지 않기로 하였다.

粘土層에서의 壓密의 意味는 荷重이 外部로 부터

加해졌을 때의 眞體으로 인한 沈下量과 이 壓縮이 進行되는 速度가 繼續적으로 減少한다는 두 가지의 概念을 內包하고 있으며, 壓密 過程은 繼續적으로 進行되는 過程으로서 一次의인 段階와 二次的인 段階로 나눌 수 있다. 粘土層에 荷重이 加해지면 우선 이 荷重은 土粒子 사이의 間隙水가 支撐할 수 있는 水壓을 超過하게 된다면 間隙內의 間隙水는 間隙 內部로 부터 流出되어 나옴 것이다. 이 間隙水가 流出되는 過程은 過剩間隙水壓이 完全히 消滅될 때 까지 繼續적으로 進行될 것이다. 이 現象이 壓密의 一次의 段階인 一次壓密이다. 二次的인 段階는 一次壓密이 끝난 後 即 過剩間隙水壓이 完全히 消滅된 後에도 繼續적으로 일어나는 沈下現象으로서 二次壓密이라고 부르는 現象이다. 다시 말해서 二次過程으로 일어나는 二次壓密沈下는 壓密過程의 終結狀態를 向해서 一般的인 理論上으로 豫期했던

· 것보다 느린 速度로 體積이 減少하는 附加的인 沈下 現象이다. 二次壓密沈下が 일어나는 原因이 對해기는 많은 學者들이 여러가지 意見을 發表하였으나 이적 滿足한 單純 結論을 얻지 못하고 있다. 다만 Terzaghi의 理論<sup>(2)</sup>이 조금 더 正確한 것이 아닐까 생각되어진다. 卽 Terzaghi는 二次 壓密에 對한 現象은 다음과 같이 說明하였다. 一次壓密이 完了된 後에 Film Bond는 Grain Bond에 依해서 代替되어진다. Terzaghi는 이것을 結束化의 過程이라고 하였다. 이 結束化 作用이 進行되는 中에 Film Bond Stress가 完全히 消滅될 때 까지 Grain Bond Stress는 Film Bond Stress 代身에 漸次로 增加하게 된다. 加해진 荷重의 大部分이 Film Bond Stress로 나타나는 限 粘土의 間隙比는 繼續的으로 減少하게 된다. 이 間隙比의 減少로 因한 沈下를 Terzaghi는 二次壓密이라고 하였다. 本 論文에서는 Gibson과 Lo의 理論에 依해서 結果를 分析하였다. Gibson과 Lo의 理論<sup>(3)</sup>은 上粒子의 應力과 變形의 現象을 Rheological Model로 나타낼 수 있다는 假定下에서 Terzaghi의 一次壓密 理論式은 根據로 誘導된것으로 一次壓密 現象을 包含하여 여러가지의 試驗條件下에서 上粒子 間의 應力과 變形의 關係에 時間關係를 追加 導入하여 誘導된 것이다. Rheological 理論에 依한 方程式을 使用하여 試驗結果를 分析하여 求한 여러가지 Parameter 中 特別한 點은 壓縮性比를 나타내는 Compressibility Ratio  $b/a$ 와, 그리고 Rate Factor  $\lambda/b$ 라고 할 수 있다. Parameter  $b/a$ 는 一次壓密에 對해서 二次壓密에 對한 相對的인 重要性을 나타내고 있다. Parameter  $\lambda/b$ 는 二次壓密이 일어나는 程度를 支配하는 因子라고 할 수 있다.

II. Rheological Model의 解析

Soil Skeleton은 Rheological Model의 基本的인 幾가지 要素에 依하여 代替될 수 있다. 이러한 概念的인 Model로서 一次元壓密現象을 나타내는 方程式을 公式化할 수 있고 그리고 任意의 時間에 있어서의 沈下量을 算出할 수 있도록 하기 爲해서 Fig.1과 같은 Soil Skeleton의 Rheological Model은 提案하였다.

上부의 Spring 'a'는 一次壓密을 나타내는 것이니 複合要素 'b'-' $\lambda$ '는 有效應力을 받았을때 일어

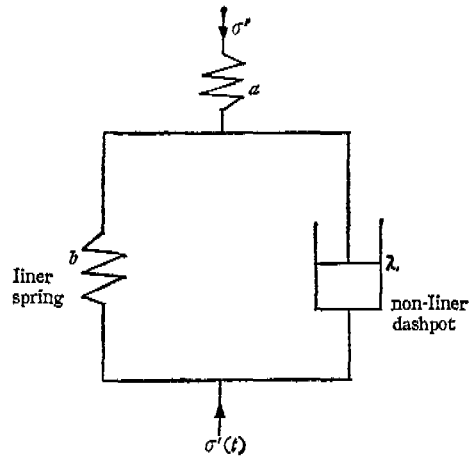


Fig. 1. Model Representation of Soil Skeleton

는 二次壓密을 나타내는 것이다. 흙의 한 各은 要素에 時間에 따라 變하는 應力  $\sigma'(t)$ 가 作用하게 된다니 Spring 'a'는 卽時 壓縮을 일으킬 것이다. 그러나 複合要素 'b'-' $\lambda$ '는 非線形 Dashpot ' $\lambda$ '의 抵抗 때문에 卽時에 變形이 일어나지 않는다. Spring 'a'의 壓縮은 有效應力의 作用으로 漸次的으로 進行되어 完全히 끝나게 된다. 有效應力이 漸漸 增加함에 따라서 荷重은 非線形 Dashpot에 作用하게 되고 그리고 壓縮이 進行되면서 漸漸 線形 Spring 'b'에 傳達되어진다. 이 荷重의 傳達 現象은 一定한 有效應力下에서 일어난다. 二次壓密過程을 說明하는 것이다. 오랜 時間이 經過한 後에는 全有效應力은 Spring 'a'와 線形 Spring 'b'를 通해서 作用되어지고 非線形 Dashpot ' $\lambda$ '는 아무 荷重도 支持하고 있지 않게 된다. 荷重이 加해지고 난 後, 任意의 一定한 時間에 있어서 Model에 作用하고 있는 有效應力은  $\sigma'(t)$ 가 될 것이다. 이 때 要素 'b'와 ' $\lambda$ '에서의 壓縮變形은 같아져야만 한다. 線形 Spring 'b'의 變形은 'b'에 作用하고 있는 荷重에 比例한다. 反面 非線形 Dashpot는 粘性의 程度에 따라 變形이 일어난다. 要素 'b'의 ' $\lambda$ '에서의 應力の 合計가 有效應力  $\sigma'(t)$ 와 같아야 한다는 條件下에서 Gibson과 Lo는 다음과 같은 式을 誘導해내었다.

$$a = \frac{e(t_a)}{\sigma'_a} - b(1 - e^{-\lambda t_a}) \dots \dots \dots (1)$$

$$\log_{10} \frac{e(\infty) - e(t)}{\sigma'_a} = \log_{10} b - 0.434 \frac{\lambda}{b} t \dots \dots \dots (2)$$

時間  $t$ 를 橫軸으로 하고  $\log_{10} \frac{e(\infty)-e(t)}{\sigma'}$ 를 縱軸으로 하는 座標上에 식(2)의 關係를 顯示하면  $t$ 와  $\log_{10} \frac{e(\infty)-e(t)}{\sigma'}$ 의 關係를 나타내는 曲線의 直線部分과 縱軸과의 交點이  $\log_{10} b$ 이므로 이로부터 二次壓縮係數  $b$ 를 求할 수 있고 또 直線部分의 기울기는  $0.434 \frac{\lambda}{b}$ 이므로 Rate Factor  $\frac{\lambda}{b}$ 의 값도 求할 수가 있다. Fig. 2는 試驗 Data로 부터 求할 수 있는 典型의 圖形이다.

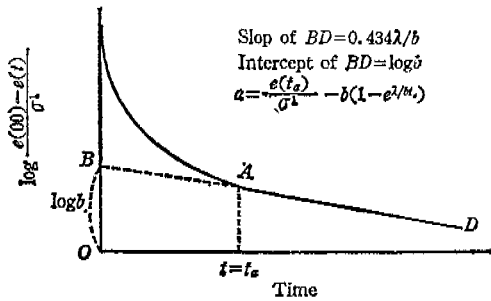
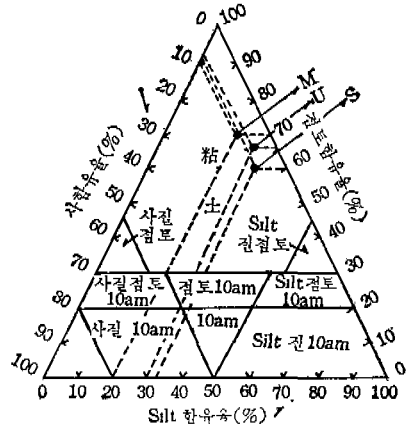


Fig. 2. Determination of Soil Parameters

Fig. 2에서 實線은 試驗 Data로 부터 直接 求한 曲線이고 點線은 萬若 一次壓縮에 의한 遲滯時間이 있다던 假를 수 있는 直線이다. 一次壓縮에 의한 遲滯時間이라는 것은 沈下의 沈下의 速度가 Fig. 1의 Rheological Model에서 Spring 'a'의 壓縮에 의해서 所要되는 時間을 말한다. Fig. 2에서 曲線이 直線으로 變하는 點 A( $t=t_a$ )는 過剩間隙水壓이 實際로 零이 되었다고 생각되는 時間이다. 即 二次壓縮이 始作된다고 하는 時間이다.

### III. 壓密試驗

試料로서 使用한 粘土는 蔚山地域 병영土取場으로 부터 採集한 赤色粘土이다(記號: U). 一般적으로 粘土라고 한다면 0.001 mm ~ 0.005 mm 程度의 土粒了를 가르킨다. 그러나 標準壓密試料를 爲하여 正確하게 粘土粒子만을 收集한다는 것은 거의 不可能한 일이므로 다음과 같은 方法을 使用하였다. 即 採集한 赤色粘土로부터 가능한 限 粘土粒子에 가까운 試料를 造成하기 爲하여 水中에서 100 番체에 通過시킨 後에 室內에서 自然히 乾燥시켜 다시 200 番체에 通過시켜 이것을 試料로 使用하였다. 이렇



(참고) 흙의 삼각화표에 의한 분류

게 收集된 試料를 沈降分析을 하여 粒辰分布를 再確認한 結果 大略 粘土含有率이 60% 程度되었으나 三角分級法에 의하여 粘土라고 보므로 本 標準壓密試驗의 試料로 使用하였다(참고). 一般적으로 흙의 性質은 液性限의 銜接한 關係를 갖고 있으므로 試料는 될 수 있는대로 液性限에 가까운 含水比를 갖도록 造成하였다. 本 試料와 比較를 爲하여 使用된 馬山地方의 灰色粘土(記號: M)와 서울地方의 赤色粘土(記號: S)에 對한 粒辰分布의 線은 Fig. 3과 같다.

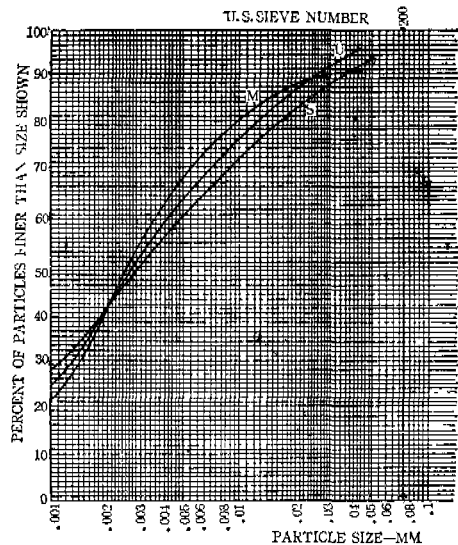


Fig. 3. Grain-Size Analysis

Table 2. Index Properties of Soil Specimen

	比 重	L.L.(%)	P.L.(%)	P.I.(%)	Cu	Clay Activity	$u$ (%)
U	2.70	62	29	33	8.6	0.84	60.6
M	2.76	64	26	38	5.83	0.90	64.5
S	2.66	60	31	29	12	0.71	56.7

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 본 試驗의 試料 U는 粘土含有量이 試料 M과 S의 中間程度이다. 본 試料와 比較試料에 對한 比重, Atterberg Limit, 均等係數 그리고 Clay Activity等 各 試料의 物理的 性質은 Table 1과 같다. 均等係數는 Hazen 公式를 使用하여 有效粒徑 即 加積通過率 10% 粒徑에 對한 加積通過率 60% 粒徑의 比率로 表示한 것이니 Clay Activity란 Skempton<sup>(4)</sup>에 依하여 使用된 用語로서 塑性指數/粘土分으로 表示된다.

以上에서 볼 수 있는바와 같이 細粒의 粒子가 많이 包含되어 있는 試料 M이 液性限界가 크다는 것으로 미루어 볼 때 細粒의 含有量과 液性限界와는 密接한 關係가 있는 것으로 믿어진다.

本 試驗에 使用한 Consolidometer는 本 大學 土質 實驗室의 Fixed Ring Type 으로서 Ring 높이가 0.75in. 이고 直徑이 3in. 인 白銅으로 만들어진 것이다. 壓密試驗時에 Consolidometer Ring의 內部壁과 試料사이에 生기는 摩擦作用과 그리고 溫度의 變化가 壓密作用에 미치는 影響을 生할 수 있겠으나 本 試驗에서는 이러한 點들을 無視하기로 하였다.

壓密試驗方法은, 흙의 Parameter 를 測定하거나 性質을 觀測하기 爲해서 一般적으로 널리 使用되고 있는 標準一次元壓密試驗을 利用하였다. 前述한 바와 같이 液性限界直에 近似한 含水比를 갖도록 들과 混合하여 再成型한 試料에 壓密荷重을 加해 주기 前에, 可能한 限 自然狀態에 가까운 結果值를 얻기 爲하여 Casagrande가 提示한 方法<sup>(6)</sup>에 依하여 算出한 先行荷重 1/16 kg/cm<sup>2</sup>을 24時間동안 加해 주었다. 萬若 先行荷重을 考慮하지 않는다면 一次壓密로 因한 沈下가 先行荷重을 考慮하고 計算한 값 보다 더 크게 나타나게 될 것이다.<sup>(6)</sup> 이외 같이 先行荷重을 加해 주고 난 後에 1/4 kg/cm<sup>2</sup>의 壓密荷重을 約 7日間 繼續 加하여 沈下와 時間과의 關係를 觀測하였다. Leonard와 Ramiah<sup>(7)</sup>에 依하면 荷重을 加해주는 期間이 一次壓密이 일어날 수 있을 程度로 充分히 길고 그리고 二次壓密係數가 特

別히 크지 않다면 荷重이 加해지는 持續期間은 別로 重要한 影響을 미치지 않는다고 하였으므로 壓密現象의 觀測期間은 二次壓密係數를 推定할 수 있을 程度의 期間이면 充分하다고 볼 수 있겠다. 本 試驗에 있어서도 7日間の 試驗結果로 그 後에 일어나는 二次壓密의 進行狀態를 豫測할 수 있으므로 壓密荷重持續期間을 7日間으로 한 것은 無妨한 것으로 思慮된다.

#### IV. 壓密試驗 結果 및 分析

本 壓密試驗 結果를 e-p 曲線 代身에 時間과 Dial Reading 과의 曲線關係를 半對數方眼紙에 整理한 結果는 Fig. 4와 같다.

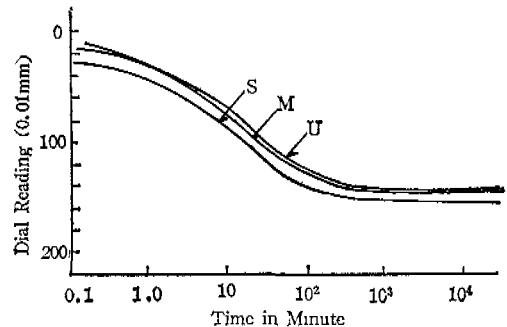


Fig. 4. Dial Reading-Time Relationship Curves

Fig. 4를 利用하여 算出한 이더가지 係數의 數值들은 Table. 2와 같다.

Table 2. Results of Consolidation Test

	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /sec)	$\Delta H/H$	$C_c$	$\gamma_p$	$\gamma_s$	$\gamma_p/\gamma_s$
U	$2.99 \times 10^{-4}$	0.229	0.0041	0.801	0.117	0.146
S	$3.32 \times 10^{-4}$	0.214	0.0022	0.798	0.207	0.253
M	$2.81 \times 10^{-4}$	0.247	0.0048	0.920	0.080	0.087

위의 Table. 2에서 本 蔚山地域 粘土의 一次壓密係數는 試料 S 보다도 작고 試料 M 보다도 크다는

것을 알 수 있다. 이 결과는 Fig. 3과 比較하여 볼 때 本 蔚山粘土試料가 試料 S 보다는 細粒의 土粒子를 더 많이 包含하고 그리고 試料 M 보다는 더 적게 包含하고 있기 때문인 것 같다. 即 粘土의 一次 壓密係數는 細粒의 粘土粒子를 많이 갖고 있을수록 작아지는 것으로 推測되어진다. 本 實驗에서는 荷重變化에 의한 e-p 曲線을 求하는 것이 不可能하였으므로 e-p 曲線에 의한 壓縮指數  $C_c$  代身에 이 것과 類似的한 意味를 갖는다고 볼 수 있는  $\Delta H/H$ 의 값을 求하여 比較하였다. 그 結果  $\Delta H/H$ 는 細粒土가 많이 包含되어 있을수록 크다는 것을 알 수 있었다. 그런데 Skempton<sup>(4)</sup>은 壓縮指數는 液性限界와 直線關係를 갖는다고 主張하였다. 本 實驗에서는 壓縮指數를 求할 수가 없었다는 것을 이미 前述한 바가 있으므로 壓縮指數 代身에  $\Delta H/H$ 와 液性限界와의 關係를 圖示해 본 結果 Fig. 5와 같이 Skempton의 意見과 一致한다는 것을 알 수 있었다. 또한 Henkel<sup>(8)</sup>에 依하면 壓縮指數는  $w(\%)/100$ 의 값을 갖는다고 하였으나 本 實驗의 結果는  $w(\%)/100$  보다 작은 값을 보여준다. 이것은 壓密試驗에 使用된 試料가 原狀의 試料가 아니라 再成型試料이기 때문인 것으로 推測된다. 二次壓密係數는 粘土의 成分보다는 오히려 含水比에 따라 그 값이 變한다<sup>(8)</sup>고 하였으므로 本 實驗 結果에서는 言及하지 않기로 하였다.

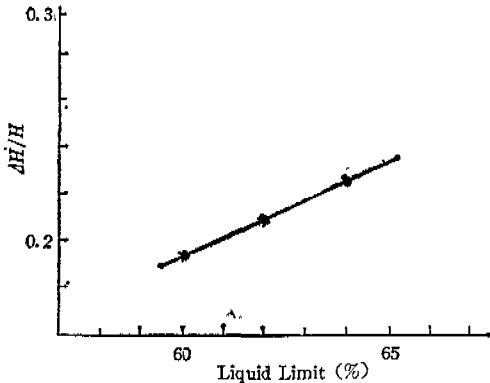


Fig. 5. Relationship of  $\Delta H/H$  and Liquid Limit

本 實驗 結果를 前述한 Gibson과 Lo의 Rheological Model 理論에 依하여 圖示한 結果는 Fig. 6과 같다.

이 그림에서는 間隙比 代身에 Dial-Reading을 直接 代用하였다. Fig. 6.에서 實線은 試驗 Data로부터 實際로 求해지는 曲線으로 時間이 縱軸에 對

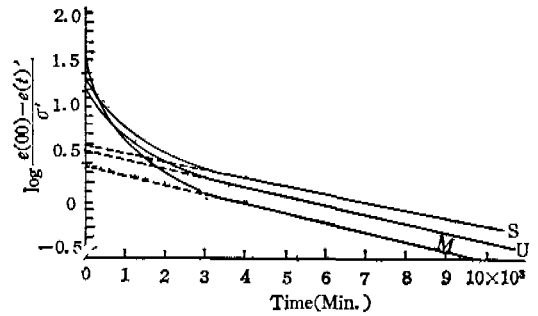


Fig. 6. Determination of Soil Parameters

나 점점 直線에 接近하는 것을 알 수가 있는데 이 曲線部分은 壓密過程의 一次壓密 또는 Hydrodynamic Period 이다.

點線은 Hydrodynamic Time Lag가 있다고 假定하였을 때 인어지는 直線으로 實線의 直線 部分을 延長한 것이다. 實線과 點線의 交點은 過剩間隙水壓이 完全히 消散되었다고 假定되어지는 大略의 時間  $t_a$  이다. 또한 實線과 縱軸의 交點은  $\log b$ 로 表示되며 이 때  $b$ 는 二次壓縮係數를 나타내는 係數이다. Rheological Model의 理論과 公式에 依하여 Fig. 6으로 부터 算出한 各 試料의 Soil Parameter 는 Table 3과 같다.

Table 3. Table for Soil Parameters

	$t_a \times 10^3$ (Min)	$a \times 10^{-1}$ ( $\text{cm}^2/\text{kg}$ )	$b \times 10^{-3}$ ( $\text{cm}^2/\text{kg}$ )
U	3.4	5.43	4.89
S	3.7	5.24	6.71
M	2.7	5.82	3.16
	$\lambda/b \times 10^{-4}$ (1/Min.)	$1/\lambda \times 10^3$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2/\text{Min.}$ )	$b/a$ (%)
U	2.21	9.25	0.90
S	2.10	7.20	1.28
M	2.54	11.9	0.54

Fig 6과 Table 3에서 볼 수 있는 바와 같이 二次壓縮係數  $b$ 의 값은 液性限界가 增加할 수록 減少한다는 것을 알 수 있다.

그런데 液性限界는 細粒土의 含量이 높을수록 그 값이 增加하므로, 細粒土를 많이 包含하고 있는 粘土일수록 二次壓縮係數는 작아진다고 볼 수 있다. Secondary Compression의 程度를 나타내는 Rate

Factor  $\lambda/b$ 는 Fig. 6에서 直線部分의 기울기로 부터  
 求한 것으로서 時間의 指數函數에 있어서의 Para-  
 meter 이디 그 같은 試料 M이 第一 크고 크리크  
 試料 S가 第一 작다는 것으로 비유어 볼 때 細粒土  
 의 粘土일 수록 커진다는 것으로 思慮된다.  $Lo^{(9)}$ 에  
 依하면 Rate Factor  $\lambda/b$ 의 값이 가라는 것은 最終  
 沈下에 到達하는데 더 많은 時間이 所要된다는 것  
 을 意味한다고 하였으므로 本 試驗의 結果, 細粒土  
 일 수록 最終沈下의 到達하는데 더 짧은 時間이 걸  
 린다는 것을 推測할 수가 있다. 一次壓縮性係數  $a$   
 는 위의 값들을 利用하여 式(1)로 부터 算出한 것  
 으로 二次壓縮性係數와는 反對로 粘土가 細粒土는  
 含有한 수록 그 값이 增加한다는 것을 알 수 있다.  
 即 위의 두 가지를 結合해 볼 때 細粒의 粘土일 수  
 두 一次壓縮性은 커지고 二次壓縮性은 가아진다.  
 一次壓密에 對해서 二次壓密의 相對的인 性質을 나  
 다서는 比率  $b/a$ 는 間隙水의 排出에 依한 壓縮과  
 Soil Skeleton의 Creep에 依한 壓縮과 相對的인 크  
 기의 尺度가 되는 것으로서 細粒의 粘土粒子가 많  
 이 包含되어 있을수록 그 값의 變化가 작다는 것을  
 알 수 있다. Dashpot의 粘性係數, 即 Soil Skeleton  
 의 粘性係數  $1/\lambda$ 은 細粒土의 粘土일 수록 커진다는  
 것을 알 수 있으며 이것은 다시 따라서 液性限界가  
 높을 수록 粘性係數도 커진다는 것을 意味한다. 即  
 粘土의 壓密現狀 特別 二次壓密에 作用하는 粘性係  
 數는 液性限界와 密接한 關係를 갖고 있다고 할 수  
 있겠다.

### 參 考 文 獻

1. TAN, T. K., "Consolidation and Secondary Time Effects of Homogeneous Anisotropic, Saturated Clay Strata", Proceedings, 5th ICSMFE Vol. 1, Paris, 1961.
2. TERZAGHI, K., "Undisturbed Clay Sample and Undisturbed Clays", Journal of the Boston Society of Civil Engineers, Vol. 28, No. 3, 1941.
3. GIBSON, R. E. and LO, K. Y., "A Theory of Consolidation for Soils Exhibiting Secondary Compression", Norwegian Geotechnic Institute, No. 41, Oslo, 1961.
4. SKEMPTON, A. W., "The Colloidal Activity of Clay", Proceedings, 3rd ICSMFE Vol. 1, Rotterdam, 1953.
5. CASAGRANDE, A., "The Determination of the Preconsolidation Load and its Practical Significance", Proceedings, 1st ICSMFE Vol. 3, Cambridge, 1936.
6. LEGGET, R. F. and PECKOVER, F. L., "Foundation Performance of a 100-year-old Bridge", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 10, No. 3, 1973.
7. LEONARD, G. A. and RAMIAH, B. K., "Time Effects in the Consolidation of Clays", ASIM, STP, No. 254, 1959.
8. HENKEL, D. J., "Problems Associated with the Construction of the Ebute Metta Causeway over Soft Clays in Lagos, Nigeria", Proceedings, 6th ICSMFE, Vol. 2, Toronto, 1965.
9. LO, K. Y., "Secondary Compression of Clays", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 87, No. SM4, Prcc., Paper 2385, 1961.