

粘土의 Creep 變動에 관한 流變學的 研究

A Rheological Study on Creep Behavior of Clays

李 鍾 珪*
Lee, Chong Kue

鄭 寅 峻**
Chung, In Joon

Abstract

Most clays under sustained load exhibit time-dependent deformation because of creep movement of soil particles and many investigators have attempted to relate their findings to the creep behavior of natural ground and to the long-term stability of slopes.

Since the creep behavior of clays may assume a variety of forms depending on such factors as soil plasticity, activity and water content, it is difficult and complicated to analyse the creep behavior of clays.

Rheological models composed of linear springs in combination with linear or nonlinear dashpots and sliders, are generally used for the mathematical description of the time-dependent behavior of soils.

Most rheological models, however, have been proposed to simulate the behavior of secondary compression for saturated clays and few definitive data exist that can evaluate the behavior of non-saturated clays under the action of sustained stress.

The clays change gradually from a solid state through plastic state to a liquid state with increasing water content, therefore, the rheological models also change.

On the other hand, creep is time-dependent, and also the effect of thixotropy is time-function. Consequently, there may be certain correlations between creep behavior and the effects of thixotropy in compacted clays. In addition, the states of clay depend on water content and hence the height of the specimen under drained conditions.

Futhermore, based on present and past studies, because immediate elastic deformation occurs instantly after the pressure increment without time-delayed behavior, the factor representing immediate elastic deformations in the rheological model is necessary.

The investigation described in this paper, based on rheological model, is designed to identify the immediate elastic deformations and the effects of thixotropy and height of clay specimens with varying water content and stress level on creep deformations.

For these purposes, the uniaxial drain-type creep tests were performed.

* 正會員 · 檀國大學校 工科大學 教授

** 正會員 · 서울大學校 工科大學 教授

Test results and data for three compacted clays have shown that a linear top spring is needed to account for immediate elastic deformations in the rheological model, and at lower water content below the visco-plastic limit, the effects of thixotropy and height of clay specimens can be represented by the proposed rheological model not considering the effects.

Therefore, the rheological model does not necessitate the other factors representing these effects.

On the other hand, at water content higher than the visco-plastic limit, although the state behavior of clays is visco-plastic or viscous flow at the beginning of the test, the state behavior, in the case of the lower height sample, does not represent the same behavior during the process of the test, because of rapid drainage. In these cases, the rheological model does not coincide with the model in the case of the higher specimens.

要 旨

持續荷重下の 粘土地盤 또는 斜面을 形成하고 있는 粘土는 時間依存變形을 일으키고 어떤 경우 破壞에 이르기도 하는데 그 原因은 粘土의 Creep 舉動 때문이라는 報告가 大部分이다.

Creep 舉動은 많은 要素에 관련될 뿐 아니라 특히 含水比 및 應力水準에 큰 影響을 받기 때문에 매우 複雜하며 따라서 그 舉動을 解析 하기도 어려운 일인데 Creep 이 窮極的으로 是 粘土 粒子間의 微視的인 舉動에서 비롯되기 때문이다.

應力-變形-時間 關係로서의 Creep 舉動을 數學的으로 表現하기 위하여 여러 形態의 流變學的 모델이 提案 되었다.

流變學的 모델은 線形 스프링, 非線形 Dashpot 및 Slider 를 組合한 것인데 粘土의 變形에 關한 彈性的, 塑性的 및 粘性的 成分을 區分 하는데 매우 有用하다. 그러나 大部分의 경우, 流變學的 모델은 飽和된 粘土에 對하여 主로 2次 壓密 舉動을 밝히기 위하여 提案된 것으로 非飽和 粘土에 對한 報告는 매우 드문 것 같다.

한편, Creep 舉動은 時間依存變形이므로 흐트러진 粘土를 다져서 試驗하는 경우, 時間經過에 따라 Thixotropy 問題가 提起될 것이고 排水條件과 關한 하여서는 供試體의 높이가 問題될 수 있다. 그뿐 아니라 많은 研究結果에 依하면 應力增加初期에는 時間遲滯가 없는 初期彈性變形이 發生된다고 하므로 流變學的 模型에는 이를 나타내는 要素가 반드시 必要하게 될 것이다.

本 研究은 이러한 面에 焦點을 두고 含水比와 應力水準을 여러 가지로 變化시켰을 때의 Creep 舉動을 流變學的 模型로 解析함에 있어 塑性이 比較的 큰 3種의 粘土를 使用하여 初期彈性變形 舉動을 밝히고 Thixotropy 效果 및 供試體의 높이가 Creep 舉動에 끼치는 影響을 究明하며 아울러 流變學的 模型의 어떤 要素에 관련 되는가 를 알아내기 위하여 다져서 成형한 供試體로서 一軸排水形式의 Creep 試驗을 施行 하였다.

實驗結果 및 檢討에 依하면 應力載荷 및 增加初期에는 時間遲滯가 없는 彈性的 初期變形이 發生하고 따라서 流變學的 模型에는 이를 나타내기 위한 上部스프링을 設置해야 하며 Thixotropy 效果를 考慮한 경우, Creep 變形은 緩慢하게 되나 含水比 및 應力水準에 따른 狀態舉動은 같으므로 그 差異는 모델常數의 크기에만 관련됨을 알아 내었고 따라서 同一한 流變學的 模型로 그 舉動을 나타낼 수 있다는 事實을 밝혀 냈다.

또 供試體 높이를 작게 한 경우에는 含水比가 比較的 작아서 粘-塑-彈性 및 粘-彈性일 때

단 높이가 클 때와 같은 狀態舉動을 나타내어 同一한 流變學的 모델로 나타낼 수 있고 含水比가 큰 粘-塑性 및 粘性流일 때는 그 狀態舉動이 排水問題와 相關하여 달라지게 되고 따라서 流變學的 모델도 달라지게 된다는 事實을 發見 하였다.

1. 序 論

持續荷重(sustained load)을 받고 있는 粘土地盤 또는 地盤滑動地帶에서 斜面을 形成하고 있는 粘土는 時間이 經過함에 따라 實驗室 또는 現場試驗으로 求한 破壞強度보다 작은 應力下에 變形이 계속되고 變形이 커지면 어떤 경우 破壞에 이르기도 한다. 이러한 舉動은 매우 빠른 速度로 일어나기도 하고 아주 천천히 일어나기도 하는 등 그 舉動을 豫測하기가 어려워 基礎地盤 또는 斜面의 安定을 解析하려는 데 있어 土質工學者가 當面하는 大端히 重要한 問題點中の 하나이다.

그 原因을 時間依存舉動(time-dependent behavior) 即 應力-變形-時間의 關係로부터 解析하려는 試圖가 많은 土質工學者^{(6), (8), (20), (21), (25), (36)}에 의하여 이루어져 왔는데 現在까지의 研究結果에 따르면 이러한 舉動은 Creep 때문에 일어난다는 報告가 大部分이다.

粘土의 應力-變形-時間 關係로서의 Creep 舉動은 매우 複雜한데 粘土의 種類, 活性度, 塑性指數 및 排水條件에 影響을 받을뿐 아니라 특히 含水比 및 應力水準(stress level)에 크게 支配되기 때문이다^{(18), (26), (35)}.

따라서 Creep에 關한 定義도 그 解析方法에 따라 여러가지 뜻으로 說明할 수 있으나 여기서 말하는 Creep이란 飽和粘土에 있어서는 1次壓密을 除外한 時間依存 變形을 뜻하고 非飽和粘土에 있어서는 時間依存變形은 모두 Creep으로 着做한다.

여러 形態의 流變學的 모델(rheological model)이 粘土의 應力-變形-時間 關係의 Creep 舉動을 數學的으로 表現하기 위하여 提案 되었다. 流變學的 모델은 그림 1-1 과 같이 線形 스프링, 非線形 Dashpot 및 Slider를 組合한 것인데 Geuze와 Tan⁽¹⁴⁾, Schiffman⁽³²⁾, Murayama와 Shibata^{(27), (28)}, Christensen과 Wu⁽⁹⁾ 및 Abdel-Hady와 Herrin⁽¹⁵⁾ 등은 주로 Maxwell,

Voigt(또는 Kelvin) 및 Bingham의 3個 基本 모델을 利用하여 持續荷重下 飽和된 粘土의 流變學的 舉動을 合理的으로 豫測하였고^{(18), (26), (35)} Lo와 Gibson⁽²²⁾, Barden^{(2), (3), (4)}, Christensen과 Kim⁽¹⁰⁾, Poskitt⁽³⁰⁾ 등은 특히 이 모델을 使用하여 주로 2次 壓密舉動을 究明하는 데 널리 利用 하였다.

流變學的 모델은 變形의 彈性的, 塑性的 및 粘性的 成立을 區分 하는데 매우 有用하며 Creep이나 應力弛緩(stress relaxation) 舉動을 모델 常數를 써서 數學的으로 展開할 수가 있다. 그러나 大部分의 경우 이 數學的關係는 매우 複雜하고 特定한 應力에는 妥當하지 않기 때문에 모델 常數들은 반드시 評價한 후에 應用되어야 한다⁽²⁶⁾. 또 上記한 모델들은 壓密舉動 특히 2次 壓密舉動을 解析하려는 目的下에 飽和된 粘土에 對하여 提案된 것이며 따라서 含水比, 應力水準 등이 限定된 狀態에서의 研究結果이다.

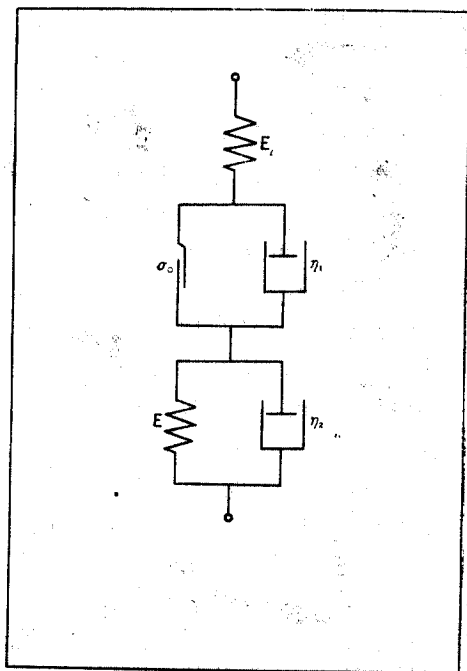


그림 1-1. Rheological Model with Top Spring

Komamura 와 Huang⁽¹⁸⁾은 應力水準, 含水比, 經過時間 等이 滑動地帶의 粘土와 같이 限定되지 않은 여러 條件下의 Creep 舉動을 表現하기에 上記한 모델들은 매우 不充分하다고 보고 應力水準 및 含水比에 따른 Creep 舉動을 밝히기에 適合한 流變學的 모델을 提示하였다. 粘土의 變形은 應力の 增加가 있는 후 時間經過에 따라 增加하지만 결국은 한 直線에 漸近할 것이므로 Creep 試驗으로 모델常數들을 결정할 수 있고 또 含水비가 커서 粘性流로 되는 경우에는 Creep 試驗이 不可能하므로 粘度計(viscometer)를 使用하여 모델常數를 결정하였다.

Komamura 와 Huang⁽¹⁸⁾의 流變學的 모델은 그림 2-1(f)와 같이 基本 모델로서 Bingham 모델과 Voigt 모델을 組合한 것인데 含水比와 應力水準에 따른 Creep 舉動을 나타내기에 매우 適合하다. 그러나 많은 文獻에 依하면 應力載荷 및 增加 初期에는 初期彈性變形(Immediate elastic deformation)이 發生하고 滑動地帶의 흐트러진 흙을 一定한 높이로 다져서 試驗하는 경우에는 載荷時間에 따라 Thixotropy 效果를 받게 될 것이다^{(3), (4), (8), (24)}.

따라서 流變學的 모델을 써서 時間依存變形을 解析하기 위하여는 Thixotropy 效果가 반드시 考慮 되어야 하며 Komamura 와 Huang⁽¹⁹⁾도 이를 是認 하였다.

또 흙이 粘性流가 될 때에는 粘度計로 모델常數를 決定 하였는데 이 경우 非排水狀態가 되므로 만일 含水비가 작을 때와 같이 粘性流에 대하여도 一軸排水狀態(uniaxial drain type)로 Creep 試驗을 施行한다면 그 舉動은 달라질 수도 있다.

따라서 本研究에서는 初期彈性變形을 豫測하여 그림 1-1과 같이 線形스프링을 設置 하였고 應力載荷時間은 60分을 基準으로 하고 Thixotropy 舉動을 考察키 위하여서는 같은 含水比와 應力水準에서 載荷時間만을 試料에 따라 各各 120分, 150分, 180分으로 延長하여 試驗하였다.

또 Creep 舉動을 Creep 試驗만으로 考察할 수 있는가를 알기 위하여는 含水비가 커서 供試體의 成形이 不可能한 粘性流의 狀態에서는 小型 물드름을 製作하여 試驗 하였다. 이때 載荷應力은

排水를 考慮하여 아주 작은 應力을 載荷 시켰으나 壓密과의 關係는 역시 問題가 될 것이고 따라서 供試體의 높이도 問題가 될 것이다. 이러한 理由와 含水비가 작은 경우라 하더라도 供試體높이가 流變學的 모델에 어떤 影響을 끼칠 것인가를 比較, 檢討하기 위하여 供試體 높이는 12.5 cm를 基準으로 하고 大略 40%의 높이인 5.0 cm로 製作하여 同一含水比, 同一應力水準으로 實驗하여 이들 舉動을 比較하였다.

上記한 바와 같이 應力載荷初期 및 增加初期의 彈性變形을 考慮하여 Komamura 와 Huang⁽¹⁸⁾의 모델에 上部스프링을 設置함이 妥當한가를 究明하고 Thixotropy 效果가 이 모델에 어떤 影響을 끼칠 것인가를 알아내며 供試體 높이가 다른 때에도 이 모델이 適用될 수 있는지의 與否를 比較, 檢討하는 것이 本研究의 主目的이다.

II. Creep 舉動에 관한 理論的 考察

2.1 Creep 舉動

Creep 舉動은 關聯要素가 많고 複雜하여 이를 表現하기란 매우 어려우나 Mitchell⁽²⁶⁾에 依하면 흙構造의 粘性抗抗(vicous resistance)에 依하여 일어나는 時間依存 剪斷 또는 體積變形(volumetric strain)이며 排水 또는 非排水의 어떤 條件下에서나 發生하는 것으로 定義하고 있다. 따라서 排水 Creep은 偏差應力的(deviatoric) 및 體積變化的 要素를 가지고 一定한 有効應力下에 發生되는 것으로 볼 수 있고 2次壓密은 排水 Creep의 한 形態라고 볼 수 있다⁽²⁰⁾. 이에 反하여 非排水 Creep은 剪斷變形과 有効應力の 變化를 일으키며 一定한 體積下에 過剩間隙水壓을 發生 시키며 全應力下에서 發生한다⁽²⁰⁾.

時間依存 剪斷 및 體積變形 即 Creep 舉動을 解析 하기는 매우 어려운 일인데 그 理由는 주로 2次壓密에 관한 것이지만 Creep 舉動이 흙構造骨格의 變形, 粒子의 미끄러짐(slippage)과 再配列, 二重層 두께의 變化, 吸着水膜의 뒤틀림(distortion)中 어느 것에 依한 것이든 構造粘度(structural viscosity)^{(2), (3), (4), (20)}, 跳躍結合(jumping bond)^{(4), (9), (25), (28)}, 微細間隙(micropores)^{(16), (37)} 등의 理論으로 說明되고 있어서 窮極의으로는 粘土 粒子間的 電氣的, 化學的關係

에서 일어나기 때문이며 또 이러한 微視的인 舉動을 Creep 破壞, 작은應力下 變形의 계속, 非排水狀態에서는 間隙水壓의 發生 및 그 複合된 影響等 巨視的 舉動의 原因으로 解析하여야 하기 때문이다.

Creep에 관한 最近의 傾向은 Galenger^{(13), (26)}와 같이 1次壓密과 Creep을 連結 하려는 學者도 있으나 이를 分離하여 解析하려는 것이 一般의이다⁽²⁰⁾. 이때의 問題點은 1次壓密 終了時期이며 따라서 通常的인 H^2 -scaling 法則과 관련하여 粘土層의 두께가 問題된다.

또 比較的 두께가 두꺼운 粘土로 施行한 Komamura와 Huang⁽¹⁸⁾의 流變學的 모델이 두께가 얇은 粘土에 있어 어떠한 舉動을 나타낼 것인지는 매우 의문이다.

實際로 通常의으로 쓰이는 얇은 壓密供試體로 2次壓密 舉動을 밝히기는 어려우며 또 높이가 큰 供試體일수록 1次壓密마저도 Terzaghi 理論과는 一致하지 않는다고 한다⁽⁹⁾.

따라서 本研究에서는 供試體 높이가 Creep 舉動 및 流變學的 모델에 끼치는 影響을 밝히기 위하여 12.5 cm 및 5.0 cm로 높이가 다른 供試體를 製作, 實驗하여 이들 舉動을 比較, 檢討 하였다.

한편, Creep 舉動을 밝히는데 있어 考慮하여야 할 또 하나의 問題는 應力載荷 即時 일어나는 初期彈性變形에 關한 것이다.

많은 文獻^{(1), (6), (12), (19), (21)}에 依하면 應力增加로 因한 載荷初期에는 時間遲滯가 없는 初期變形이 發生된다고 하며 飽和粘土에서는 一定한 體積下의 剪斷變形이고 非飽和粘土에서는 一定한 體積下 空氣의 壓縮과 剪斷變形이라 보았으며⁽²⁶⁾ 上載荷重을 有效하게 支持하여 平衡에 이를 때까지의 間隙比만의 減少라고 보아 遲滯壓縮과 區分하고 있다⁽⁷⁾. 또 載荷應력이 어떤 限界應力보다 작을 때에는 그 變形量은 매우 작고 彈性的이라고 한다⁽⁷⁾.

따라서 이러한 初期彈性變形이 含水比 및 應力水準의 變化에 따라 어떤 舉動을 나타내며 또 流變學的 모델의 어떤 要素로 表現할 수 있는지의 問題도 究明 되어야 할 것으로 思料된다.

따라서 本研究에서 初期彈性變形을 나타내기

위하여 上部 線形스프링을 設置하려는 理由는 위의 事實에 그 根據를 두고 있다.

2.2 Thixotropy

Thixotropy는 原來 코로이드 懸濁液中에서 觀測되었는데 一定한 含水比下의 可逆的 溶-겔變換(sol-gel transformation)으로 定義된다. 또 自然흡수에 있어서는 흡의 銳敏性이 回復되는 것으로 생각할 수 있다고 하며⁽²⁹⁾ 되비빔한 粘土에 있어서는 一定한 含水比下에 時間의 經過에 따라 強度를 다시 回復하는 現狀인데 粘土粒子가 最少에너지로 놓여지는 場所를 찾는 傾向때문에 일어나는 것으로 推測하고 있다⁽²⁵⁾. 大部分의 粘土에 있어 이러한 傾向은 綿毛構造의 配列이 됨을 뜻한다고 하는바 이를 다시 되비빔하면 分散構造의 配列로 變하여 粒子間의 引力은 減少되고 그 結果 強度가 減少하게 된다고 한다⁽²⁹⁾.

Thixotropy 效果는 다진 粘土에 있어 더 크게 나타나는데 時間經過에 따라 一定한 含水比에서 剪斷強度가 增加 된다고 하며 또 이러한 效果는 變形이 작을수록 매우 커진다고 하므로 이는 다진 粘土의 Creep 舉動에 있어 Thixotropy를 考慮해야 할 理由가 된다.

Seed, et al⁽³⁴⁾은 다진 粘土는 載荷후 100分以上이 될 때부터 Thixotropy에 依한 強度의 增加가 생긴다고 報告하고 있는데 이는 Casagrande와 Wilson⁽⁶⁾이 載荷후 80~90分에서 Thixotropy 效果가 생긴다는 結果와 一致한다.

本實驗에서 載荷時間을 基準 60分으로 하고 Thixotropy 舉動을 究明하기 위하여는 120分, 150分, 180分으로 延長한 理由는 위와 같은 報告에 根據하고 있다.

한편, Creep 및 Thixotropy는 모두 時間遲滯의 現象이므로 이 두 舉動은 時間函數가 될 것이며 어떤 連關性을 갖게 될 것이다. 따라서 本研究에서와 같이 다진 粘土로 Creep 舉動을 解析하는 경우 이들 關係의 究明은 매우 重要하다고 思料된다.

2.3 流變學的 모델

時間依存 變形問題를 解析하기 위하여 通常의으로 쓰이는 모델은 1次壓密과 Creep으로 大別할 수 있는데 Creep 모델을 數學的으로 가장 適切하게 表現하기 위하여 提案된 모델이 流變學

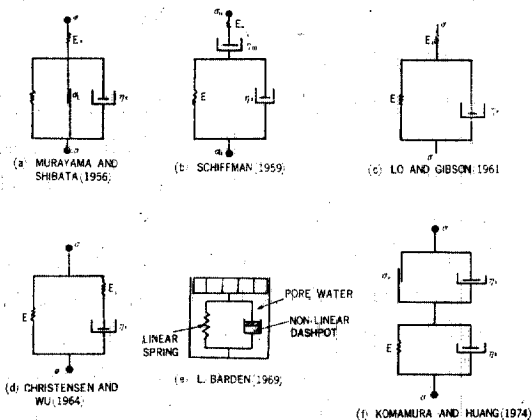


그림 2-1. Some Rheological Models Proposed for Characterization of the Stress-Strain-Time Behavior of Soils

의 모델이다. 勿論 이 以外의 Creep 모델로서는 Singh 과 Mitchell^{(35), (36)}의 Creep Potential 에 관한 報告, Christain 과 Watt⁽⁴⁴⁾의 有限要素法에 의한 提案, 그리고 Poulos, et al⁽³¹⁾의 “發展된 應力經路法”(extended stress path method) 등이 發表되었으나 流變學의 모델만큼 一般化되어 있지는 않다.

그림 2-1은 여러 形態의 流變學의 모델을 나타낸 것인데 Murayama 와 Shibata^{(27), (28)}, Christensen 과 Wu⁽⁹⁾, Abdel-Hady 와 Herrin⁽¹⁵⁾의 모델은 移動速度論(rate process theory)에 依據한 것으로 Murayama 와 Shibata^{(27), (28)}의 理論을 說明하면 다음과 같다.

그림 2-1(a)의 Voingt 모델중 E_0 , E 는 彈性係數, Dashpot는 非線形 構造粘度를 나타낸 것인데 載荷應力 σ 에 依하여 Dashpot에 傳達되는 變形速度 $\dot{\epsilon}$ 는 다음과 같다고 한다.

$$\dot{\epsilon} = A(\sigma - \sigma_L) \sinh \frac{B\sigma}{\sigma - \sigma_L} \quad (2.1)$$

여기서 $\sigma = 2\tau$ 인데 τ 는 剪斷應力, σ_L 는 下限 降伏值이고 또 A , B 는 Boltzmann 常數, Plank 常數, 活性에너지 및 分子의 平衡位置間 平均距離에 관련된 係數이다.

또 그림 2-1(b)의 Schiffman⁽³²⁾의 모델은 1次元 壓密에 對하여 體積變化的 要素와 偏差應力의 要素를 分離 하여야 한다고 最初로 主張한 모델이며 그림 2-1(c)는 Lo 와 Gibson⁽²²⁾의 모델로서

上部스프링은 1次元 壓密을, Voigt 모델은 2次元 壓密을 나타내는 것으로 보았다.

한편, 그림 2-1(e)는 Barden^{(2), (3), (4)}의 2次元 壓密에 관한 모델인데 Bond 理論에 移動速度論을 代入하여 2次元 壓密을 解析한 것으로서 μ 를 無次元의 壓密度, u 를 無次元의 間隙水壓, T_v 를 Terzaghi의 時間係數라 할 때 構造物骨格의 舉動은 다음과 같이 나타낼 수 있다고 하였다.

物質의 連續性에 對하여;

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = - \frac{\partial \mu}{\partial T} \quad (2.2)$$

鉛直方向의 平衡條件을 考慮하면;

$$\frac{1}{MA} \sinh A(1 - \mu - u) \quad (2.3)$$

여기서 $M = \frac{T_v}{T_s}$ 인데 T_s 는 無次元의 時間係數이고 Z 는 無次元의 space 變數이다.

한편, Komamura 와 Huang⁽¹⁸⁾은 다진 粘土로 施行한 Creep 試驗의 結果로부터 應力-變形-時間關係를 解析하였는데 應力水準과 含水比에 따라 그 狀態舉動이 달라진다고 하였다. 變形은 應力增加後 指數函數의 形式으로 增加하다가 결국은 한 漸近線에 따라 계속되거나 끝나므로 漸近部分은 그림 2-1(f)의 Bingham 모델로, 指數函數的 部分은 Voigt 모델로 表示하면 應力-變形-時間關係는 載荷應力이 어떤 限界應力 보다 클 때 에는 다음과 같다고 한다.

$$\epsilon = \frac{1}{\eta_1} (\sigma - \sigma_0)t + \frac{\sigma}{E} [1 - e^{-(E/\eta_2)t}] \quad (2.3)$$

이때의 狀態舉動은 粘-塑-彈性으로 보아 그림 2-1(f)의 모델을 粘-塑-彈性모델(visco-plasto-elastic model)이라 하였다.

한편, $\sigma < \sigma_0$ 일 때는 漸近線의 勾配 $a=0$ 일 때 인데 Bingham 모델은 作動되지 않고 따라서 應力-變形-時間은 다음과 같은 關係에 있다고 하였다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} [1 - e^{-(E/\eta_2)t}] \quad (2.4)$$

이때의 狀態는 粘-彈性(visco-elastic) 모델이라 하였다.

또 Creep 曲線中 指數函數部分 即 Voigt 모델의 常數를 決定하여 E 는 彈性係數, η_1 는 粘度係數로 나타내었고 彈性係數 $E=0$ 되는 含水比를 粘-塑性限界(visco-plastic limit)라 하여 狀態

舉動의 境界 含水比로 定하였다.

粘土의 含水比가 粘-塑性限界를 넘고 液性限界보다 작으면 粘-塑性狀態가 되며 이때의 應力-變形-時間關係는 다음과 같다고 하였다.

$$\epsilon = \frac{(\sigma - \sigma_0)}{\eta_1} t + \frac{\sigma}{\eta_2} t \quad (2.5)$$

또 含水比가 커서 液性限界를 넘으면 이때는 粘性流가 되므로 供試體의 成形이 不可能하므로 粘度計에 依하여 모델常數를 決定하여 應力-變形-時間關係를 다음과 같이 나타낼 수 있다고 하였다.

$$\epsilon = \frac{1}{\eta} \sigma t \quad (2.6)$$

以上에서 論議한 바를 要約하면 粘土의 應力-變形-時間 關係는 그 含水比 및 應力水準에 따라 그 舉動을 달리하며 그에 따라 流變學的 모델도 變한다는 主張이 Komamura와 Huang⁽¹⁸⁾의 流變學的 모델이다.

III. 實 驗

3.1 試 料

試料은 液性限界 및 塑性指數가 큰 3種의 粘土로 試驗하였는데 江原道 墨湖($\omega_L=31.5\%$, $I_p=11\%$), 溟州郡 江東面($\omega_L=40\%$, $I_p=15\%$) 및 京畿道 素砂($\omega_L=49\%$, $I_p=28\%$)의 粘土로서 모두 統一分類法上 CL이었다. 試料記號는 墨湖 M, 江東 K, 素砂 S로 表記 하였다.

3.2 實驗裝置

Marui社製品의 3軸壓縮試驗機와 壓密試驗機를 供試體에 맞도록 一部 改造하여 使用하였다.

3.3 實驗方法

1) 供試體

供試體는 1個 含水比에 對하여 特別히 製作한 小型 다짐器具로서 成形이 될 程度의 에너지인 $3.02 \text{ kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$ 을 3層으로 나누어 加하였으며 直徑 5.0 cm, 높이 12.5 cm로 2個, 直徑 5.0 cm, 높이 5.0 cm로 1個를 만들어 短·長期 載荷 및 높이를 작게한 試驗에 使用 하였다.

2) 含水比

含水比는 塑性限界에 가까운 含水比로부터 3~4%씩 增加시켜 液性限界를 약간 넘는 含水比가 될 때까지 各 含水比에 있어서 供試體를 製作 하였는데 墨湖試料은 17.4~32.6%의 6種,

江東 15.9~44.2%의 9種, 素砂 22.1~55.5%의 9種으로 모두 24種의 含水比로 供試體를 3個씩 만들었다. 含水比 記號는 增加에 따라 A, B, C... 등의 Alphabet 順으로 表記하였다.

3) 應力水準

含水比가 작아 供試體의 成形이 可能한 경우에도 (뎀부레인 사용) 試驗中 破壞가 일어나서는 안된다는 點과 橫變形이 可及의 생기지 않도록 한다는 前提아래 $0.025 \text{ kg}/\text{cm}^2 \sim 1.0 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 의 比較的 작은 應力을 應力水準에 따라 段階的으로 增加시켰다.

應力水準은 첫번째 載荷應力을 基準으로 ①, ②, ④...⑥으로 表記 하였고 그 段階는 墨湖, 素砂 5段階, 江東 4段階로 하여 試驗하였다.

4) 試驗種類 및 方法

① 短期載荷 試驗(an hour loading test)

本實驗에 使用한 試料가 Komamura와 Huang⁽¹⁸⁾의 流變學的 모델과 一致하는가의 與否, 含水比가 큰 粘性流일때 몰드를 使用하여 Creep 試驗이 可能한가를 밝히고 初期彈性變形을 究明하려는 目的에 直徑 5.0 cm, 높이 12.5 cm인 供試體로 載荷時間을 60分으로 하여 含水比 및 應力水準에 따라 施行한 試驗이다. 本試驗의 記號는 含水比 記號뒤에 -1로 表記하였다.

② 長期載荷 試驗(long-duration loading test)

Thixotropy 效果가 Creep 舉動 및 流變學的 모델에 끼치는 影響을 밝히고 이 結果를 短期載荷 試驗의 結果와 比較, 檢討키 위하여 모든 條件을 同一하게 試驗하되 載荷時間만을 60分에서 2~3倍로 增加시켜 施行한 試驗이다. 載荷時間은 墨湖 120分, 江東 180分, 素砂 150分으로 延長하여 試驗하였으며 記號는 含水比 뒤에 -2로 表記하였다(M-A-2, K-B-2 등).

③ 供試體높이를 작게 한 試驗

(lower specimen height test)

모든 치수 및 試驗條件을 短期載荷試驗과 同一하게 試驗하되 높이만을 5.0 cm로 작게한 試驗이다. 이 試驗의 記號는 含水比 뒤에 -3으로 表記하였다(S-A-3, M-A-3 등).

IV. 結果 및 檢討

4.1 應力-變形-時間

應力水準, 含水比에 의한 時間依存變形은 應力水準增加에 따른 影響과 含水比 增加에 의한 影響의 크기에 따라 달라지는데 含水比 增加로 인한 變形量이 初期載荷應力の 크기 및 應力水準 增加에 의한 變形量보다 클 때에는 含水比의 增加에 따라 時間依存變形은 커지고 만일 應力水準 增加에 의한 影響이 보다 클 때에는 含水比가 작아도 時間依存變形은 커진다.

그림 4-1과 그림 4-2가 이러한 예인데 그림 4-1은 短期載荷試驗에 의한 粘-塑-彈性일 때의 實驗結果이고 그림 4-2는 長期載荷試驗에 의한 粘性모델일 때의 實驗結果이다. 이 結果를 分析하면 같은 載荷時間으로 應力水準이 增加할 때의 時間依存變形量은 含水比 및 應力水準의 增加에 따라 增加하거나 減少한다고 볼 수 있다.

한편, 그림 4-3은 Thixotropy 效果를 考慮하여 載荷時間을 120分으로 길게 했을 때와 供試體의 높이를 5.0 cm로 작게 했을 때의 時間依存變形을 短期載荷試驗의 結果와 比較하기 위하여 作成한 것인데 이 結果를 分析하면 다음과 같다

그림 4-3에서 같은 含水比, 같은 應力水準으로 載荷時間만을 2배로 延長한 M-B-2의 경우 時間依存變形은 應力水準 5段階를 例로 들때 短期載荷試驗일 때의 變形率 1.48×10^{-2} 에 比較하여 1.57×10^{-2} 로서 약간 많으나 時間增加에 比例하지 않고 있으며 그 變形速度 a 는 10.6×10^{-8} 1/sec에 比較하여 $a=5.3 \times 10^{-8}$ 1/sec로 현저히 減少함을 알 수 있는데 그 理由는 Thixotropy에 의한 強度의 增加때문으로 思料되며 또한 이 結

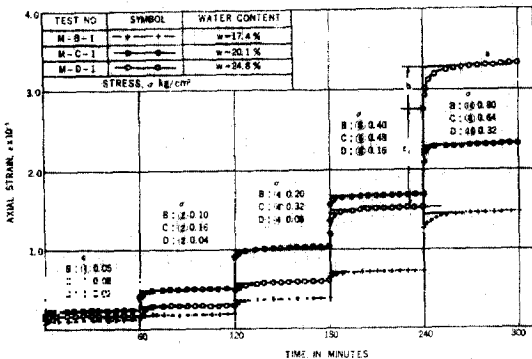


그림 4-1. Strain Versus Time with Stress and Water Content for An Hour Loading Test of Mukho Clay (Viso-Plasto-Elastic Model)

果는 含水比가 커서 粘性流가 되는 경우에도 같은 結果로 나타났다.

한편, 같은 條件下에 높이만을 5.0 cm로 작게 한 試驗의 結果는 應力水準 5段階까지의 變形率이 1.79×10^{-2} 으로서 12.5 cm인 供試體로 試驗했을 때의 變形率 1.48×10^{-2} 보다 더 크게 일어난다. 따라서 두께가 얇은 粘土는 同一試驗條件

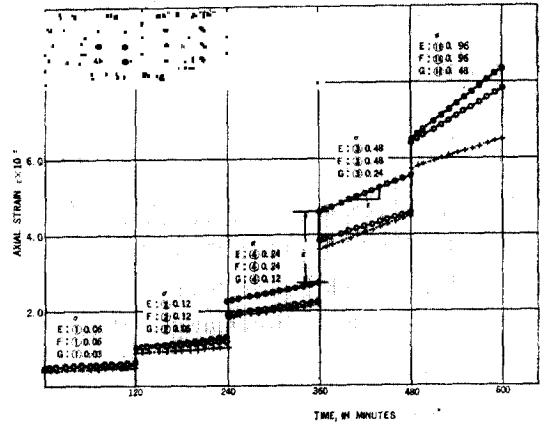


그림 4-2. Strain Versus Time with Stress and Water Content for Long-Duration Loading Test of Mukho Clay (Visco-Plastic & Viscous Model)

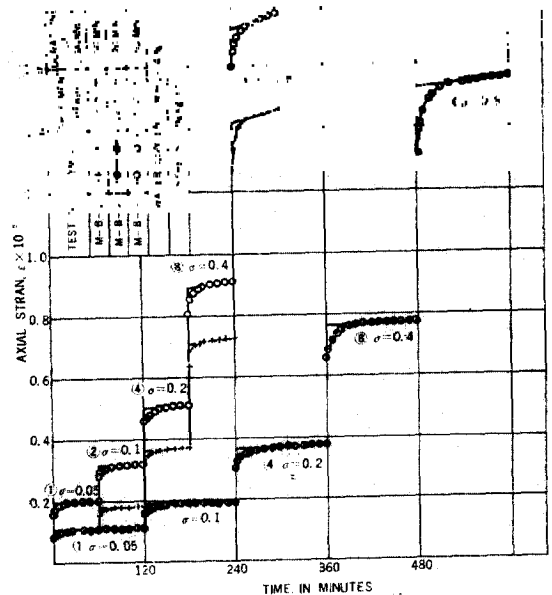


그림 4-3. Strain Versus Time for An Hour Loading, Long-Duration Loading and Lower Specimen Height Test of Mukho Clay (Visco-Plastic-Elastic Model)

下라 하더라도 두꺼운 粘土에 比하여 時間依存 變形은 매우 커진다는 사실을 알 수 있다.

4.2 初期彈性變形

初期彈性變形(ϵ_i)은 그림 4-1과 그림 4-2에서 應力增加와 同時에 일어났음은 明白한데 直線的 이므로 彈性變形임을 알 수 있는데 載荷後 15~30 秒 사이에서 일어났다.

一般으로 應力-變形의 關係는 接線係數 또는 割線係數로 表示하는데 本 實驗結果에서의 應力-變形 關係는 連續的이 아니므로 各段階 應力에 對한 初期變形率의 合計를 直線化 시키고 그 勾配를 初期彈性變形係數(immediate deformation modulus of elasticity) E_i 로 表示하였다.

그림 4-4는 初期彈性變形係數 E_i 와 含水比의 關係를 나타낸 것인데 같은 試驗에 있어서는 彈性變形係數 E_i 값이 含水比가 增加함에 따라 減少하고 있는데 그 理由는 다음과 같이 說明 될 수가 있다. 含水比가 작으면 間隙中 물의 量이 充分치 못하여 完全한 二重層을 形成할 수 없게 되고 따라서 粒子間 反撥力은 減少하고 引力이 支配的이 된다. 그 結果 다진후 粒子는 綿毛化 하려는 傾向이 생기고⁽³⁴⁾ 따라서 初期彈性變形은 작아지며 그 係數 E_i 값은 커지게 된다. 反對로 含水比가 增加하면 粒子間 反撥力이 增大되어 分散化(dispersed)하려 하고 그 結果 初期彈性變形은 커지고 그 變形係數 E_i 값은 減少한다고 볼 수 있다. 이들 結果는 Seed, et al⁽³⁴⁾의 報告와 一致한다.

粘性流에 있어서도 그 舉動은 같으나 이때는 含水比가 크므로 粒子는 모두 分散化 되어 있을 것이므로 主로 間隙中 空氣의 壓縮에만 支配되므로 含水比 差異에 따른 初期彈性變形係數의 減少幅은 매우 작게 된다고 判斷된다.

한편, 載荷時間이 길어서 Thixotropy 效果를 받은 粘土는 強度가 增加되어 같은 含水比에서 初期彈性變形係數가 큰 結果를 보이고 있고 높이가 작은 경우에는 初期變形率이 매우 커서 初期彈性係數 E_i 값은 작게 된다고 思料된다.

4.3 粘-塑-彈性모델

(visco-plasto-elastic model)

1) 應力-變形-時間

그림 4-1에서 變形-時間關係는 比較的 應力

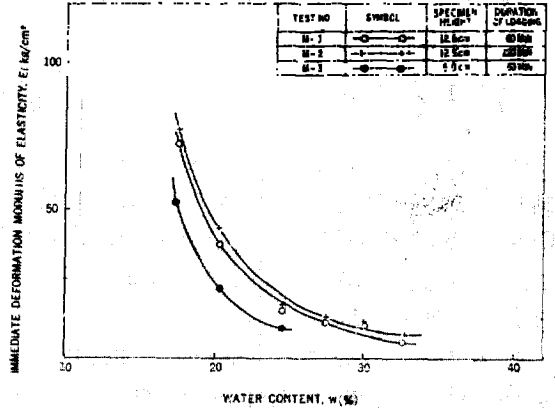


그림 4-4. Immediate Deformation Modulus of Elasticity Versus Water Content of Mukho Clay

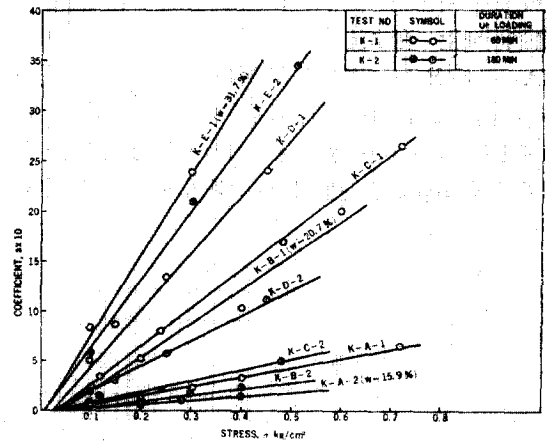


그림 4-5. Relationship Between Stress and Coefficient a for An Hour Loading and Long-Duration Loading Test of Kangdong Clay

水準이 클 때에는 時間의 經過에 따라 變形은 더 繼續되거나 減少되며 漸近線 $\epsilon_a = at + b + \epsilon_i$ 에 接近하는 指數函數로 表示할 수 있다.

$$\epsilon = \epsilon_i + at + b(1 - e^{-at}) \quad (4.1)$$

여기서 a 는 漸近線의 勾配, b 는 變形軸에서의 切片이며 이때 係數 a 와 應力 σ 의 關係는 그림 4-5와 같이 直線的인 關係에 있음을 알 수 있다.

지금 m 을 $\sigma-a$ 曲線의 勾配, n 을 a 軸의 切片이라면 a 는 다음과 같다.

$$a = m \left(\sigma - \frac{n}{m} \right) \quad (4.2)$$

여기서 $1/m = \eta_1$, $\frac{n}{m} = \sigma_0$ 라면 식 (4.2)의 a 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a = \frac{1}{\eta_1} (\sigma - \sigma_0) \quad (4.3)$$

식 (4.3)에서 η_1 의單位는 $\text{Kg} \cdot \text{s} / \text{cm}^2$ 이므로 粘度係數로 볼 수 있고 σ_0 는 應力の單位이므로 Creep 變形이 일어나는 限界應力(critical stress)으로 보면 식 (4.3)은 그림 1-1의 Bingham 모델로 表示할 수 있다.

또 限界應力 σ_0 는 그림 4-5에서 含水比가 增加함에 따라 減少되며 높이가 12.5 cm로 같은 경우 그 크기가 서로 같다는 事實을 보여준다.

또 그림 4-5는 短期載荷試驗(K-1)의 結果와 Thixotropy를 考慮한 試驗(K-2)의 結果를 比較하여 나타내고 있는데 直線勾配 m 은 같은 試驗일 때는 含水比의 增加에 따라 增加하고(K-A-1, K-B-1의 順) 載荷時間을 길게 한 경우에는 同一條件아래 작은값을 나타내고 있다. 그 理由는 Thixotropy 效果에 依하여 強度가 增加되어 Creep 變形速度가 減少하기 때문에 볼 수

있다.

한편, 높이를 5.0 cm로 작게한 경우에도 $\sigma - a$ 曲線의 勾配 m 은 마찬가지로 含水比 增加에 따라 增加하며 短期試驗일때 보다는 더 크게 되어 Creep 變形速度가 매우 빠르다는 事實을 알 수 있었다.

위의 結果로 미루어 보아 어느 경우거나 식 (4.3)이 成立하며 따라서 Thixotropy를 考慮한 경우거나 높이가 작은 供試體로 試驗한 경우에도 그 影響은 粘度係數 η_1 의 크기에만 關係되고 따라서 係數 a 에 관한한 그림 1-1의 Bingham 모델로 充分히 表現할 수 있다고 判斷된다.

다음, 應力 σ 와 係數 b 의 關係를 그림 4-6의 對數方眼紙에 表示하여 最少 自乘法으로 直線化하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\log \sigma = \log E + k \log i \quad (4.4)$$

또는 $\sigma = E \cdot b^k$ 인데 實驗結果 $k = 0.8 \sim 1.25$ 이므로 $k \approx 1$ 로 보면 다음과 같이 된다.

$$b = \frac{\sigma}{E} \quad (4.5)$$

式 (4.5)의 係數 b 는 變形率이므로 E 값은 彈

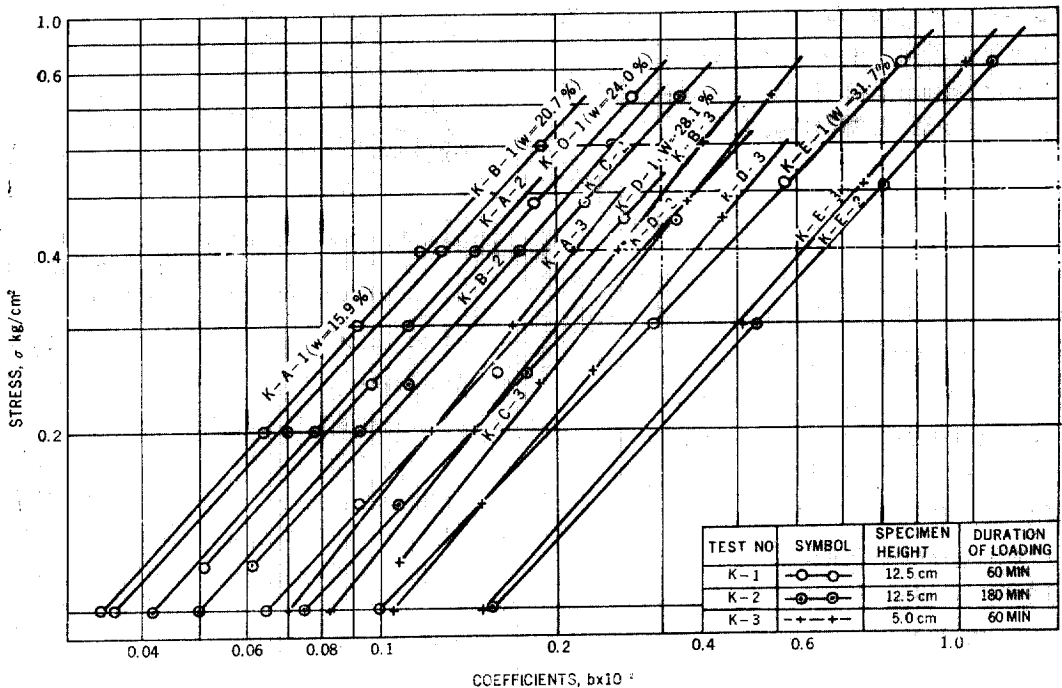


그림 4-6. Relationship Between Stress and Coefficient b for An Hour Loading, Long-Duration Loading and Lower Specimen Height Test of Kangdong Clay

性係數로 생각할 수 있다. 또式(4.1)의指數函數的變形 $b(1-e^{-ct})$ 는 $b=\frac{\sigma}{E}$ 이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$b(1-e^{-ct}) = \frac{\sigma}{E}(1-e^{-ct}) \quad (4.6)$$

式(4.6)은 Voigt 모델을 나타내는 식이고 따라서 $c=\frac{E}{\eta_2}$ 로 볼 수 있어式(4.3),式(4.6) 및 初期彈性變形 $\epsilon_i=\frac{\sigma}{E_i}$ 임을考慮하면式(4.1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_i} + \frac{1}{\eta_1}(\sigma - \sigma_0)t + \frac{\sigma}{E} [1 - e^{-(E/\eta_2)t}] \quad (4.7)$$

式(4.7)은 粘土가 粘-塑-彈性을 나타낼 때의 應力-變形-時間의 關係式이므로 $\frac{\sigma}{E_i}$ 를 線形스프링으로 表示하면式(4.7)은 그림 1-1의 流變學的 모델로 表示할 수가 있다.

式(4.7)中 Voigt 모델로 表示한 第3項은指數函數的變形이며 이를 支配하는 要素는 E , η_2 및 t 이며 Creep 擧動中 매우 複雜한 部分이다.

또 그림 4-6을 보면 載荷時間을 길게 한 경우거나(K-2), 또는 높이를 작게한 경우(K-3)에도 短期載荷試驗의 結果(K-1)와 같다는 事實을 알 수 있고 그 값만 달라지게 되므로式(4.7)의 Voigt 모델은 어느 경우거나 滿足 된다고 判斷 된다.

2) 粘-塑性 限界(visco-plastic limit)

그림 4-6과 그림 4-7을 보면 Voigt 모델의 彈性係數 E 값은 같은 試驗의 경우에는 含水比의 增加에 따라 減少하며 이러한 擧動은 長期載荷試驗 및 높이를 작게한 試驗에서 같은 結果로 나타났음을 보여준다. 彈性係數 E 값이 含水比의 增加에 따라 減少하는 理由는 혹은 어떤 含水比를 넘으면 彈性擧動을 나타내지 않을 것임을 뜻한다. 그림 4-7에서 短期載荷試驗 結果인 K-1은 含水比 15.9%일 때 彈性係數 E 값이 767.3 kg/cm^2 인데 含水比가 20.7%로 增加된 경우 586.3 kg/cm^2 로 減少되었음을 보여주며 含水比가 34.6%로 되었을 때는 彈性係數 E 값이 零이 되었음을 알 수 있다.

한편, 주어진 含水比에 있어 短期載荷試驗의 結果와 比較할때 Thixotropy를 考慮한 경우 彈性係數 E 값은 작고 높이를 작게한 경우에는 k

값이 커서 彈性係數 E 값도 큰 것으로 나타났다 (K-A-3, K-A-2, K-A-1).

그러나 어느 경우거나 彈性係數 E 값이 零이 되는 含水比는 34.6%로 서로 같으며(墨湖 25.5%, 素砂 32.6%) 따라서 Thixotropy 效果나 供試體높이에 관계없이 粘土의 狀態擧動은 含水比에만 支配됨을 알 수 있다. Komamura와 Huang⁽¹⁸⁾은 이 彈性係數가 零이 되는 含水比를 粘-塑性 限界라 하여 狀態擧動의 境界 含水比로 定하였다.

3) 粘度 係數

그림 1-1中 Voigt 모델의 粘度係數 η_2 를 구하기 위하여式(4.7)을 變形하고 漸近線을 $\epsilon_a = \frac{\sigma}{E_i} + \frac{1}{\eta_1}(\sigma - \sigma_0)t + \frac{\sigma}{E}$ 로 表示하여 양변에 對數를 取하여 整理하면 다음과 같이 된다.

$$\log(\epsilon_a - \epsilon) = \log\left(\frac{\sigma}{E}\right) - 0.4343 \frac{E}{\eta_2} t \quad (4.8)$$

여기서 $\log(\epsilon_a - \epsilon) - t$ 曲線의 勾配를 i 라 하면

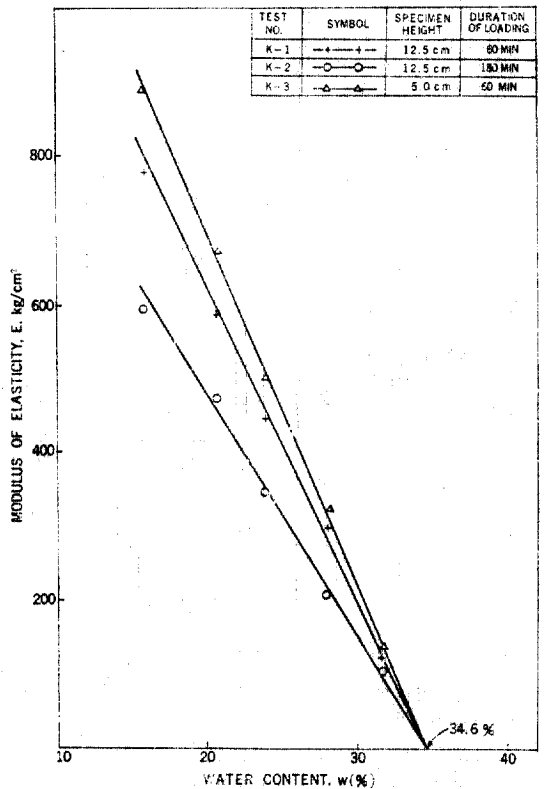


그림 4-7. Modulus of Elasticity Versus Water Content Relationship of Kangdong Clay

η_2 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\eta_2 = -0.4343 \frac{E}{\dot{\epsilon}} \quad (4.9)$$

이러한 관계는 Thixotropy 효과를考慮하였거나 높이가 작은 경우에도 完全히 一致하며 粘度係數 η_2 의 크기에만 關係 되므로 어느 경우거나 Voigt 모델은 充分히 그 影響을 表示할 수 있다고 思料된다.

4.4 粘-彈性 모델(visco-elastic model)

載荷應力이 限界應力보다 작을때는 그림 4-1, 그림 4-2에서 $a=0$ 일 때 이므로 그림 1-1의 모델 중 Bingham 모델은 作動치 않고 그림 4-6의 $\log\sigma - \log b$ 曲線中 初期의 應力水準에 b 값만 表示된 경우이다. 따라서 應力-變形-時間 關係는 다음과 같이 된다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_i} + \frac{\sigma}{E} [1 - e^{-(E/\eta_2)t}] \quad (4.10)$$

이때의 舉動은 粘-彈性狀態가 되며 流變學的

모델은 表 1에 表示하였다.

4.5 粘-塑性 모델(visco-plastic model)

含水比가 液性限界 보다는 작고 粘-塑性限界 보다는 클 때의 舉動으로서 彈性係數가 零이므로 Voigt 모델의 스프링은 作動하지 않는다. 또 그림 4-2의 結果로부터 初期彈性變形이 일어난다는 事實은 明白하므로 應力-變形-時間 關係式은 다음과 같음을 알 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_i} + \frac{1}{\eta_1} (\sigma - \sigma_0) t + \frac{\sigma}{\eta_2} t \quad (4.11)$$

이 式은 時間 t 에 關하여 直線變化를 하고 있음이 分明하며 이때의 流變學的 모델은 表 1에 나타낸 바와 같다.

한편, Creep 變形速度 $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$ 은 다음과 같이 表示된다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{\eta_1} (\sigma - \sigma_0) + \frac{\sigma}{\eta_2} \quad (4.12)$$

式 (4.11)과 式 (4.12)는 載荷應力 σ 가 限界

表 1. Change of Rheological Model based on States of Water Content and Stress Level with Top Spring

WATER CONTENT	$W < W_{wp}$	$W_{wp} \leq W < W_L$	W_L	$W \geq W_L$
STRESS LEVEL	$\sigma > \sigma_0$	$\sigma \leq \sigma_0$	$\sigma > \sigma_0$	$\sigma_0 = 0$
RHEOLOGICAL MODEL				
DEFORMATIONAL EQUATION	$\epsilon = \frac{\sigma}{E_i} + \frac{1}{\eta_1} (\sigma - \sigma_0) t + \frac{\sigma}{E} [1 - e^{-(E/\eta_2)t}]$	$\epsilon = \frac{\sigma}{E_i} + \frac{\sigma}{E} [1 - e^{-(E/\eta_1)t}]$	$\epsilon = \frac{\sigma}{E_i} + \frac{1}{\eta_1} (\sigma - \sigma_0) t + \frac{\sigma}{\eta_2} t$	$\epsilon = \frac{\sigma}{E_i} + \frac{\sigma}{\eta} t$
STATE OF SOIL	VISCO-PLASTO-ELASTIC	VISCO-ELASTIC	VISCO-PLASTIC	VISCOUS
TEST METHOD	CREEP			

應力 σ_0 보다 클 때에만 成立하는 式인데 粘度係數의 逆數 $\frac{1}{\eta_1}$ 및 $\frac{1}{\eta_2}$ 을 比例常數로 하는 直線式이다.

그림 4-8을 보면 粘-塑性인 S-E-1, S-E-2, S-G-1 및 S-G-2는 限界應力이 2個씩 생기는데 載荷應力 σ 가 限界應力 σ_{u_0} 및 σ_{u_0} 보다 작고 σ_{L_0} 및 σ_{L_0} 보다 크다면 變形速度는 比例常數 $\frac{1}{\eta_2}$ 에만 比例하는 緩慢한 勾配의 直線을 이루고 載荷應力 σ 가 限界應力 σ_{L_0} 및 σ_{L_0} 보다 작다면 Creep 變形은 일어나지 않을 것이다. 이 σ_u 및 σ_L 은 Murayama 와 Shibata⁽²⁸⁾에 依하여 報告된 上限降伏值(upper yield value, σ_u)와 下限降伏值(lower yield value, σ_L)로 判斷되며 따라서 式(2.5), 式(4.11) 및 式(4.12)의 限界應力 σ_0 는 下限降伏值 σ_L 을 使用하여야 할 것이다.

또 含水比가 36.4%인 供試體에 對하여 短期 載荷試驗을 한 S-E-1의 경우 比例常數 $\frac{1}{\eta_1} = 101.8 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{kg} \cdot \text{s}$ 이고 $\frac{1}{\eta_2} = 266.7 \text{cm}^2/\text{kg} \cdot \text{s}$ 인데 比하여 長期 載荷試驗을 한 S-E-2의 경우, 比例常數 $\frac{1}{\eta_1} = 64.8 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{kg} \cdot \text{s}$ 이고 $\frac{1}{\eta_2} = 102.9 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{kg} \cdot \text{s}$ 로 크게 減少되어서 變形速度가 크게 減少됨을 알 수 있는데 時間經過에 따른 綿毛化 過程에서의 Thixotropy 效果로 생각된다.

4.6 粘性 모델(viscous model)

含水比가 커서 液性限界와 같거나 크다면 粘土는 粘性流의 狀態가 되고 이때의 應力-變形-時間 舉動은 다음과 같으며 따라서 流變學의 모델은 表 1에 表示한 바와 같아지게 된다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_i} + \left(\frac{1}{\eta_1} + \frac{1}{\eta_2} \right) \sigma t \quad (4.13)$$

또 含水比가 커지면 粘度係數 η_1, η_2 는 매우 작은 값이 되므로 含水比가 液性限界를 넘으면 $\eta_1 = \eta_2 = \bar{\eta}$ 로 볼 수 있어 式(4.13)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_i} + \frac{2}{\bar{\eta}} \sigma t = \frac{\sigma}{E_i} + \frac{1}{\bar{\eta}} \sigma t \quad (4.14)$$

또 應力과 變形速度의 관계는 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{\sigma}{\bar{\eta}} \quad (4.15)$$

式(4.15)는 그림 4-8의 S-H 및 S-J의 관계를 나타낸 것인데 같은 試驗에 있어 變形速度는

含水比의 增加에 따라 增加함을 알 수 있는데 含水比가 커지면 粘度係數는 작아지고 따라서 粘性抵抗도 減少되기 때문인 것으로 볼 수 있다

粘性모델에 있어 가장 큰 問題點은 本 研究가 排水 Creep 試驗이므로 間隙水의 排出에 따른 體積壓縮의인 1次壓密現象과 관련된 問題이다.

높이가 큰 試料의 載荷初期에는 分散狀態의 粒子가 綿毛化되려는 過程에서 粒子間의 間隔은 빠른速度로 減少할 것이고 間隙中 包含된 空氣의 壓縮도 初期에는 別 抵抗없이 일어날 것이다. 이것이 初期彈性變形이다.

時間이 經過함에 따라 粒子는 더욱 綿毛化 되려고 할 것이나 粒子間의 反撥力과 粘性에 의하여 抵抗을 받게 되고 또 含水比가 커서 間隙中의 空氣도 連續의 이 아닐 것이므로 壓縮된 間隙 空氣도 排出되지 못하고 時間的 遲滯現象을 誘發하려 할 것이다. 이때 供試體 上下面에서 少量의 排水가 있다 하여도 이러한 舉動은 1次壓密이라고 보기는 어려우며 壓密이라 하더라도 供試體의 높이가 커서 壓密終了時까지는 長期間을 要할 것이므로 初期部分에 지나지 않을 것이므로 이들 舉動은 粘性流로 생각함이 妥當 하다고 할 수 있다.

그러나 높이가 작은 供試體는 排水時間이 높이의 自乘에 比例한다는 通常의 法則에 따르면 이때의 舉動은 壓密이 될 것이다.

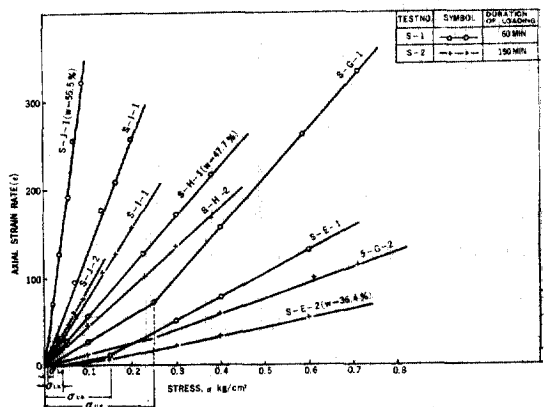


그림 4-8. Axial Strain Rate Versus Stress Relationship for An Hour Loading and Long-Duration Loading Test of Sosa Clay.

本實驗의 結果에서도 높이가 12.5 cm 로 큰 경우에는 粘性流의 舉動을 나타내는데 比하여 높이를 5.0 cm 로 작게 한 경우 Creep 變形速度가 크게 減少할뿐 아니라 排水量도 많아서 粘性流의 舉動을 나타내지 않았다. 따라서 높이가 작은 경우 含水比가 큰 供試體의 試驗結果는 本研究의 比較, 檢討에서 除外 시켰다.

또 載荷時間을 길게 했을때 變形速度가 減少되는 것은 그림 4.8의 結果, 明白한데 이러한 舉動은 粘性流의 變形速度는 載荷速度에 따라 減少한다는 Murayama 와 Shibata⁽²⁸⁾의 見解와 一致한다. 또 粘性流의 變形速度가 載荷時間의 增加에 따라 減少되는 理由는 솔-겔 變換論에 依한 Thixotropy 效果가 생긴 때문이라고 解析할 수 있다.

V. 結 論

粘土의 Creep 舉動을 流變學의 모델로 解析함에 있어 初期 彈性變形舉動을 밝히고 Thixotropy 效果 및 供試體의 높이가 이 모델에 끼치는 影響을 究明하기 위하여 一軸排水形式의 Creep 試驗을 施行한 結果 다음과 같은 事實을 發見하였다.

1) 粘土는 應力載荷初期에 時間的 遲滯 및 體積變化가 없는 初期彈性變形이 생기며 이를 나타내기 위하여는 流變學의 모델에 上部 線形스트링을 設置하여야 한다.

2) 粘土의 Creep 舉動을 流變學의 모델로 解析하려 할 때 Thixotropy 效果는 모델常數의 크기에만 關聯되므로 이 效果를 考慮하지 않은 경우와 같은 모델로 表示할 수 있다.

3) 粘土 供試體의 높이가 流變學의 모델에 끼치는 影響은 含水比가 작은 粘-塑性限界 以內일 때는 높이에 관계없이 같은 모델로 나타낼 수 있으나 含水比가 큰 粘-塑性 및 粘性狀態에서는 같은 含水比下에 같은 應力水準으로 載荷시켜도 높이에 따라 流變學의 모델은 다르게 된다.

4) 時間依存 變形은 같은 含水比에서는 應力水準의 增加에 따라 增加하게 되나 含水比가 다른 경우 첫段階 載荷應力의 크기 및 應力水準의 增加比에 따라 增加하거나 減少한다.

5) 時間依存 變形은 含水比 및 應力水準이 같은 경우에도 載荷時間이 길면 Creep 變形速度가 時間의 經過에 따라 크게 減少하는데 그 理由는 Thixotropy 效果로 생각되며 粒子의 配列, 粘土의 構造 等に 關連되는 것으로 判斷된다.

6) 粘土는 供試體 높이가 작으면 높이가 큰 供試體에 比하여 같은 含水比, 같은 應力水準 및 같은 載荷時間으로 Creep 試驗을 施行하여도 時間依存 變形은 매우 크고 Creep 變形速度도 크게 된다.

7) 初期彈性變形係數(E_i)는 載荷時間과 높이가 같으면 含水比의 增加에 따라 減少하고 載荷時間을 길게 하면 Thixotropy 의 效果로 같은 含水比에서 그 크기는 增加하며 또 높이가 작은 粘土供試體는 높이가 큰 供試體에 比하여 같은 含水比 및 같은 載荷時間인 경우에도 그 값이 減少한다.

8) Voigt 모델의 彈性係數(E)의 크기는 供試體의 높이가 같고 載荷時間이 같은 경우에는 含水比에 따라 減少하고 높이가 작을수록 커지며 같은 含水比와 같은 높이일 때는 載荷時間이 길어서 Thixotropy 效果를 받은 경우 減少된다.

9) 粘土의 狀態舉動을 決定하는 粘-塑性限界는 Thixotropy 效果를 받았거나 높이가 다를 때에도 서로 같으며 粘土의 狀態舉動은 含水比에 만 支配된다.

10) 粘-塑-彈性 및 粘-彈性 모델에서의 限界應力(σ_0)은 含水比의 增加에 따라 大體로 直線的으로 減少하며 供試體의 높이가 같을 때에는 서로 같고 높이가 작을수록 減少된다.

11) 粘-塑性狀態에 있어서의 Creep 變形速度와 應力의 關係는 下限降伏值(σ_L) 以下에서는 Creep 變形이 생기지 않고 上限降伏值(σ_U)까지는 緩慢하게 일어나며 이값을 넘는 應力에서는 Creep 變形速度가 크게 增加한다.

12) 含水比가 커서 粘性流인 粘土는 높이가 클 때만 작은 應力水準에서의 Creep 試驗이 可能하고 供試體의 높이가 작을 때에는 작은 應力水準에서도 試驗中 그 狀態舉動이 달라지게 된다.

以上の 研究結果로 미루어 Creep 舉動은 매우 複雜하다는 事實을 알 수 있는데 含水比, 應力

水準 等の 主된 要素以外에도 載荷時間 및 이에 따른 粒子의 配列과 構造, 그 結果로 일어나는 Thixotropy 問題, 供試體의 높이, 排水問題, 試驗의 種類 및 形式에 따라 달라진다는 것은 確實하고 이러한 舉動을 狀態別로 表現하기에 流變學의 모델이 매우 適合하다는 事實을 알게 되었다.

그러나 Creep 舉動은 그외에도 보다 많은 要素에 관련될 것임을 本研究의 結果는 暗示하고 있는데 應力體系問題, 다짐效果, 應力歷史 및 塑性等과의 관련에 있어 流變學的 모델에 끼치는 影響은 더욱 比較, 檢討되어야 할 것이고 앞으로의 보다 많은 研究를 通하여 究明되어야 할 것으로 생각된다.

參 考 文 獻

1. Amir, J.M., "Discussion". Proc. paper 11398, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 101, No. GT-7, 1975, p. 697.*
2. Barden, L., "Consolidation of Clay with Non-linear Viscosity", *Géotechnique, Vol. 15, No. 4, 1965, pp. 413-429.*
3. Barden, L., "Primary and Secondary Consolidation of Clay and Peat", *Géotechnique, Vol. 18, 1968, pp. 1-24.*
4. Barden, L., "Time-Dependent Deformation of Normally Consolidated Clays and Peats", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 95, SM-1, 1969, pp. 1-31.*
5. Berre, T. and Iversen, K., "Oedometer Tests with Different Specimen Heights on a Clay Exhibiting Large Secondary Compression", *Géotechnique, Vol. 22, No. 1, 1972, pp. 53-70.*
6. Bishop, A. and Lovenbury, H.T., "Creep Characteristics of Two Undisturbed Clays", *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, Vol. 1, 1969, pp. 29-37.*
7. Bjerrum, L., "Engineering Geology of Norwegian Normally Consolidated Marine Clays as Related to Settlement of Buildings", *7th Rankine Lecture, Géotechnique, Vol. 17, 1967, pp. 81-118.*
8. Casagrande, A. and Wilson, S.D., "Effect of Rate of Loading on Strength of Clays and Shales at Constant Water Content", *Géotechnique, Vol. 2, No. 3, 1951, pp. 251-263.*
9. Christensen, R.W. and Wu, T.H., "Analysis of Clay Deformation as a Rate Process", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 90, SM-6, 1964, pp. 125-157.*
10. Christensen, R.W. and Kim, J.S., "Rheological Studies in Clay", *Clay and Clay Minerals, Vol. 17, 1964, pp. 83-92.*
11. Christian, J.T. and Watt, B.J., "Undrained Visco-Elastic Analysis of Soil Deformation", *Proceedings, Symposium on Applications of Finite Element Method in Geotechnical Engineering, U.S Army Engineers Water ways Experiment Station, Vichburg, MS, 1972, pp. 533-580.*
12. D'Appolonia, D.J. and Lambe, T.W., "Method for Predicting Initial Settlement", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, SM-2, 1970, pp. 523-544.*
13. Garlanger, J.E., "The Consolidation of Soils Exhibiting Creep under Constant Effective Stress", *Géotechnique, Vol. 22, No. 1, 1972, pp. 71-78.*
14. Geuze, E.C.W. and Tan, T.K., "The Mechanical Behavior of Clays", *Proceedings, 2nd International Congr. Rheology, 1954, p. 247.*
15. Abdel-Hady, M. and Herrin, M., "Characteristics of Soil Asphalt as Rate Process", *Journal of the Highway Division, ASCE, Vol. 92, No. HW-1, 1966, pp. 49-69.*
16. de Jong, G. and Verruizt, A., "Primary and Secondary Consolidation of Spherical Clay Sample", *6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, 8-15, Canada, Vol. 2, 1965, pp. 254-258.*
17. Kavanzanjian, E. Jr. and Mitchell, J.K., "Time-Dependent Deformation Behavior of Clays", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 106, No. GT-6, 1980, pp. 611-630.*
18. Komamura, F. and Huang, R.J., "New Rheological Model for Soil Behavior", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE,*

Vol. 100, GT-7, 1974, pp.807-824.

19. Komamura, F. and Huang, R.J., "Discussion"-Closure, Proc. Paper 12163, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE Vol. 102, No. GT-6, 1976, p.649.*
20. Ladd, C.C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F. and Poulos, H.G., "Stress-Deformation and Strength Characteristics", *9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State of the Art Reports, 1977, pp.421-458.*
21. Leonards, G.A. and Altschaeffle, A.G., "Compressibility of Clay", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 90, SM-5, 1964, pp.133-154.*
22. Lo, K.Y. and Gibson, R.E., "A Theory of Consolidation of Soils Exhibiting Secondary Compression," Norwegian Geotechnical Institute, Publication No. 32, 1961, pp.1-5.
23. Mitchell, J.K., "Fundamental Aspects of Thixotropy in Soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 86, SM-3, 1960, pp.19-52.*
24. Mitchell, J.K., "Shearing Resistance of Soils as a Rate Process", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 90, SM-1, 1964, pp.29-61.*
25. Mitchell, J.K., Campanella, R.G. and Singh, A., "Soil Creep as a Rate Process", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 94, SM-1, 1968, pp.231-253.*
26. Mitchell, J.K., "Fundamentals of Soil Behavior," John Wiley and Sons, 1976, pp.184-185, p.274, pp.291-296, pp.303-305, pp.320-333,
27. Murayama, S. and Shibata, T., "Rheological Properties of Clays", *5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, Vol. 1, 1961, pp.269-273.*
28. Murayama, S. and Shibata, T., "Flow and Stress Relaxation of Clays", (Theoretical Studies on the Rheological Properties of Clay. Part 1) *Rheology and Soil Mechanics Symposium of the International Union of Rheological and Applied Mechanics, Grenoble, France, 1964, pp.99-129.*
29. Perloff, W.H. and Baron, W., "*Soil Mechanics-Principles and Applications*", John Wiley, 1976, pp.412-413.
30. Poskitt, T.J., "Consolidation of Clay and Peat with Variable Properties", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97, SM-6, 1971, pp.841-880.*
31. Poulos, H.G., De Ambrosis L.P. and Davis, E. H., "Method of Calculating Long-Term Creep Settlement", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 102, No. GT-7, 1976, pp.787-804.*
32. Schiffman, R.L., "*The Use of Visco-Elastic Stress-Strain Laws in Soil Testing*", ASTM Special Technical Publication, No. 254, Papers on Soils, 1959 Meetings, pp.131-155.
33. Seed, H.B. and Chan, C.K., "Thixotropic Characteristics of Compacted Clays", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 83, No. SM-4, 1957, pp.1-35.*
34. Seed, H.B., Mitchell, J.K. and Chan, C.K., "The Strength of Compacted Cohesive Soils", *Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, ASCE, University of Colorado, Boulder, Colorado, 1960, pp.920-927.*
35. Singh, A. and Mitchell, J.K., "General Stress-Strain-Time Function for Soils," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 94, SM-1, 1968, pp.21-46.*
36. Singh, A. and Mitchell, J.K., "Creep Potential and Creep Rupture of Soils", *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, Vol. 1, 1969, pp.379-384.*
37. Wilson, N.E., Radforth, N.W., Macfarlane, I. C. and Lo, M.B., "The Rate of Consolidation for Peat", *6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, Canada, Vol. 1, 1965, pp.407-411.*
38. Wu, T.H., Resendiz, D. and Neukirchner, R.J., "Analysis of Consolidation by Rate Process Theory," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 92, SM-6, 1966, pp.229-248.*

(接受: 1981. 11. 16)