

# 正規壓密 飽和粘性土의 應力經路에 따른 變形特性

Stress Path Dependent Deformation Characteristics of  
A Normally Consolidated Saturated Cohesive Soil

權 五 曄\*  
Kwon, O-Yeob

鄭 寅 峻\*\*  
Chung, In-Joon

---

---

## Abstract

The influence of stress path on the deformation characteristics of clay has been studied through a series of stress-path controlled triaxial tests on artificially sedimented and normally consolidated Kaolinite.

It has been found that there exists a critical stress increment ratio,  $K_c'$ , in which stress-strain characteristics possesses a linear relationships and beyond  $K_c'$ , strain hardening. A modified hyperbolic constitutive model for the strain hardening behavior has been formulated based on the Drnevich's hyperbolic function. And, a method of settlement analyses has been proposed wherein the effect of stress path during consolidation is taken into account.

## 要 旨

正規壓密 粘性土의 應力-變形 舉動은 應力經路에 의하여 어떠한 影響을 받게 되는가를 규명하기 위하여, 實驗室에서 人爲的으로 壓密한 Kaolin 粘性土 供試體를 사용하여 現位置 應力狀態인  $K_c$  應力狀態로 壓密하고, 여러가지 서로 다른 應力經路를 따라 三軸壓縮 排水試驗을 행하였다.

그 結果, 應力增加比가 特定한 값, 곧 臨界應力增加比를 가질 때 應力-變形 舉動은 거의 線形의 形態로 나타나고, 그 以後는 應力의 增加와 더불어 材料의 性質이 強化되는 變形硬化 現象을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 본 研究에서는, 이러한 變形硬化 現象을 보이는 應力-變形 舉動을 Drnevich의 雙曲線 函數의 概念을 적용하여 모델화 하였으며, 이를 軸對稱 荷重을 받고있는 地盤의 應力經路를 고려한 壓密沈下 계산에 적용하는 方法을 提示하였다.

---

---

## 1. 序 論

본 研究는 正規壓密 粘性土가 排水狀態下에서

다양한 應力經路를 따르는 壓縮力을 받을 때 應力經路에 따른 應力-變形 舉動은 어떠한 特性을 보이는가를 三軸壓縮 排水試驗을 통하여 규명한 것이다.

\* 正會員, 建國大學校 工科大學 土木工學科 副教授

\*\* 正會員, 서울大學校 工科大學 土木工學科 教授

橫方向으로 變位가 구속되어 있는 K. 應力狀態하에서의 應力-變形 舉動은 Terzaghi<sup>24)</sup>의 一次元 壓密理論이나, Skempton과 Bjerrum<sup>23)</sup>의 修正 壓密理論에 의하여 그 예측이 가능하다. 그러나, 橫方向으로 變位를 수반하는 二次元 또는 三次元 變形이 발생할 때의 應力-變形 舉動을 解析하기 위한 方法으로 이러한 一次元 壓密理論을 적용함은 적절한 方法으로 볼 수 없다.<sup>11, 21)</sup>

Lambe<sup>16, 17, 18, 19)</sup>은 載荷時에 地盤내의 흙의 要素가 받게 되는 應力經路가 變形에 미치는 影響은 대단히 중요하다고 하였으며, 地盤의 沈下 解析 方法으로 應力經路法(stress path method)을 제안한 바 있다. 그 후 Simon과 Som<sup>21)</sup> 및 Gangopadhyay<sup>11)</sup> 등도 橫方向 變位 또는 應力經路가 沈下에 미치는 影響을 고려하여 地盤의 沈下 解析을 위한 새로운 方法을 제안한 바 있다.

Lambe<sup>16)</sup>의 應力經路法은, 供試體의 初期 應力狀態를 現位置 應力狀態로 제현하고, 또한 載荷후에 地盤내의 흙의 要素가 받게될 應力經路를 따라 試驗하여 흙의 變形特性을 규명하고, 이를 沈下計算에 반영한다는 原理에 입각하고 있는데, 이는 흙의 變形 mechanism을 적절히 반영하고 있는 沈下 解析方法으로 볼 수 있다. 그러나, 이 方法은 복잡한 試驗節次가 포함되어 있어 실용적인 측면에서 문제가 되고 있으며,<sup>11)</sup> 또한 軸方向變形도와 體積變形도 관계를 等方彈性論으로 규정하므로써,<sup>8)</sup> 作用하는 應力의 方向이나 體系에 따라서 그 性質을 달리하는 흙의 異方性에 의한 變形 特性은 고려하지 않고 있다.

Simon과 Som<sup>21)</sup> 및 Gangopadhyay<sup>11)</sup> 등은 壓密沈下 도중에 발생하는 全應力의 變化를 고려하여 이를 應力經路에 반영하고 있으며, 또한 흙의 異方性을 고려하여 應力-變形 관계를 橫異方性(cross anisotropic)의 彈性論으로<sup>3, 4, 25)</sup> 규정하므로써, 흙의 舉動을 보다 적절히 설명하고 있다. 그런데, 이 方法에서는 橫異方性 應力-變形 관계를 규정함에 있어서 軸方向變形도와 體積變形도 관계를 이용하고 있는데, 이는 體積變形도의 정확한 측정자료가 그 근거가 된다는 점에서 볼 때 試驗상의 문제가 제기되고 있다.

이러한 점을 고려하여, 본 研究에서는 몇가지

의 應力經路試驗에 의하여 軸方向變形도 측정단으로도 構成모델에 필요한 土質定數를 얻을 수 있고, 또한 현재 數値解析의인 方法에서 흙의 構成方程式으로 흔히 사용되고 있는 雙曲線모델의 概念을 導入하여 應力經路에 따른 應力-變形 관계를 규명하였으며, 이를 軸對稱 荷重을 받고 있는 地盤의 載荷 中心線 아래에서의 壓密沈下 解析에 적용하는 方法을 제시하였다.

## 2. 文獻考察

### 2.1. 壓密시의 有效應力經路

飽和된 粘性土 地盤에 荷重이 작용하면, 순간적으로는 非排水 조건하에서 即時沈下가 발생하고, 장시간적으로는 발생된 過剩間隙水壓의 消散과 더불어 有效應力이 증가하면서 壓密沈下가 발생하게 된다.

그림 2.1은 이러한 沈下過程과 관련된 有效應力經路를  $p'-q$  Diagram을 이용하여 圖示한 것이며, 이 때 經路 1-2는 非排水 조건하에서의 即時沈下와 관련된 應力經路이다.

壓密沈下와 관련된 應力經路로서, Terzaghi는 그림 2.1의 經路 1-6을, 그리고 Skempton과 Bjerrum은 발생된 過剩間隙水壓의 크기를 고려하여 經路 5-6을 각각 壓密도중의 有效應力經路로 보았다.<sup>11)</sup> 그러나, 이러한 經路들은 공통적으로 壓密도중에 變形은 一次元적으로만 발생하고 있다는 것을 그 전제로 하고 있으며, 二次元 또는 三次元的 變形이 발생되는 경우의 應力經路는 이와 달라진다.<sup>11, 21)</sup>

Lambe<sup>16)</sup>은 그의 應力經路法에서, 壓密도중에 全應力의 變化가 없다는 전제하에 經路 2-3을 壓密시의 應力經路로 제안하였다. 그러나, 실제로는 壓密이 진행되면서 地盤의 剪斷強度, 應力-變形 係數 및 포아손 비 등이 변화하게 되므로 말미암아 橫方向의 全應力이 감소하게 되는데<sup>22)</sup> Gangopadhyay<sup>11)</sup> 등은 이를 고려하여 經路 2-4를 壓密시의 有效應力經路로 제안하였다.

地盤의 壓密沈下量을 보다 정확하게 추정하기 위해서는, 이러한 應力經路의 特性을 고려하여 供試體를 試驗하고 이를 沈下 解析에 반영함이 가장 바람직한 方法이 되겠으나, 이는 복잡한

試驗節次가 포함되어 있어 실용적인 측면에서 문제가 된다.

Som<sup>22)</sup>은 壓密시의 橫方向 全應力の 감소를 고려한 有效應力增加比는  $K_0$ 와 1 사이의 값을 가진다고 하였으며, 또 Gangopadhyay<sup>11)</sup> 등의 研究에 의하면, 壓密도중의 有效應力增加比가 1에 접근하면 經路 2-4 나, 經路 5-7의 경우에서 그 變形特性은 서로 유사함을 實驗的으로 밝히고 經路 2-4의 代案으로 經路 5-7을 제시하였다. 본 研究에서는 이러한 實驗的 研究結果를 근거로,  $K_0$  선상을 출발하여 임의의 應力增加比를 가지는 應力經路試驗으로 應力經路에 따른 應力-變形 舉動 特性을 규명하고, 이를 흙의 構成方程式으로 모델화하였으며, 壓密沈下量을 계산하기 위한 應力條件으로는 經路 2-4를 그 기준으로 하였다.

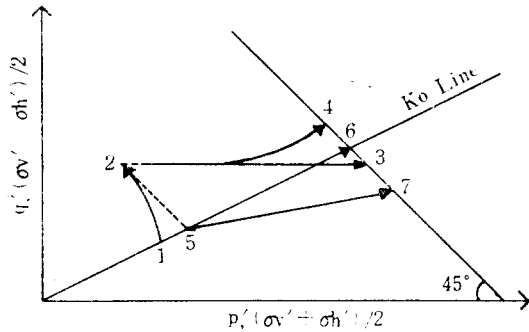


Fig. 2.1 Stress paths related to consolidation settlement

## 2.2. 應力-變形에 대한 雙曲線 函數

非線形 應力-變形度 曲線을 函數化하기 위한 方案의 하나로는, Kondner<sup>13)</sup>가 제안하고 그 후 Duncan과 Chang<sup>10)</sup> 및 Kulhawy<sup>14)</sup> 등에 의하여 有限要素法에 적용된 雙曲線모델이 있다. 그런데, 이는 應力-變形 舉動이 變形이 증가함에 따라 材料가 軟弱화되는 應力體系하에서의 變形 軟化(strain softening) 現象에 적용되는 모델이다.

반면, 材料의 性質이 變形이 증가함에 따라 強化되는 變形硬化(strain hardening) 現象을 나타내는 應力體系하에서의 非線形 應力-變形 舉動을 函數化하는 方法으로는, Drnevich<sup>9)</sup>가

次元壓密에 적용한 雙曲線函數式이 있다. 그런데, Drnevich의 雙曲線式은 橫方向으로 變位가 구속되어 있는  $K_0$  應力條件에 적용되는 函數式이다. 이를 임의의 應力增加比  $K'$ 를 가지는 應力條件으로 확장하고, 또 平均有效應力의 개념을 사용한다면 다음과 같은 식으로 표시할 수 있다(그림 2.2 참조).

$$\Delta\sigma_m' = \frac{S_i \cdot \Delta\varepsilon_1}{1 - (\Delta\varepsilon_1/\varepsilon_m)} \dots \dots \dots (2.1)$$

- 여기서,  $\Delta\sigma_m'$  ; 平均有效應力
- $\Delta\varepsilon_1$  ; 鉛直變形度
- $\varepsilon_m$  ; 雙曲線의 漸近變形度
- $S_i$  ; 初期 應力-變形 係數

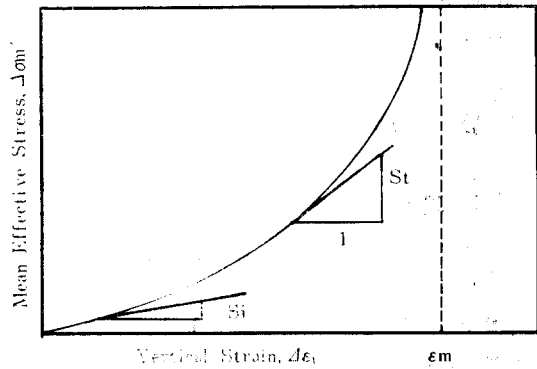


Fig. 2.2 Hyperbolic stress-strain curve

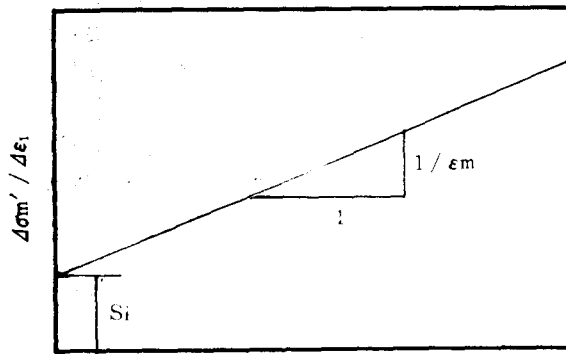
그림 2.2에서  $S_i$ 는 임의의 應力水準  $\Delta\sigma_m'$ 에서의 接線 應力-變形 係數를 의미하는데, 이는 平均有效應力  $\Delta\sigma_m'$ 를 鉛直變形度  $\Delta\varepsilon_1$ 에 대하여 微分하면 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$S_i = \frac{S_i \cdot \varepsilon_m^2}{(\varepsilon_m - \Delta\varepsilon_1)^2} \dots \dots \dots (2.2)$$

식(2.1)로 표시되는 雙曲線函數式은, 그 좌표 축을  $\Delta\sigma_m'/\Delta\varepsilon_1$ 와  $\Delta\sigma_m'$ 축으로 변환하면 다음과 같은 直線形態의 函數式이 된다(그림 2.3 참조).

$$\Delta\sigma_m'/\Delta\varepsilon_1 = S_i + (\Delta\sigma_m'/\varepsilon_m) \dots \dots \dots (2.3)$$

여기서,  $S_i$ 는 直線의 절편을, 그리고  $1/\varepsilon_m$ 은 直線의 기울기를 의미한다.



Mean Effective Stress,  $\Delta\sigma_m'$

Fig. 2.3 Transformed stress-strain curve

본 연구에서는, 變形硬化 現象을 보이는 흙의 舉動을 식(2.3)으로 표시되는 線形化函數로 표현할 수 있는가를 검토하고, 이를 이용하여 應力經路를 고려한 地盤의 壓密沈下를 推定하는 方法을 제안하였다.

### 3. 實 驗

#### 3.1. 試料의 造成

實驗에 사용된 試料은 Kaolin 실트질 粘土이며, 이는 Kaolin 粘土를 공기중에 자연상태로 건조시키고 난 다음 200번체를 통과시켜 모래질 성분을 제거하고 얻어진 것이며, 이 試料의 物理的 性質은 표 3.1 과 같다.

Table 3.1 Physical properties of testing material

Specific gravity	Liquid limit	Plastic limit	Plasticity index	Clay content	Soil classification
2.69	37%	22%	15	27.25%	CL

試料의 造成을 위하여서는, 그림 3.1 과 같은 內徑 40cm, 높이 30cm 및 두께 1cm 의 아크릴 원통으로 된 大型壓密槽를 제작하였으며, 이러한 壓密槽내에서 粉末狀態의 건조된 Kaolin 실트질 粘土를 증류수와 혼합하여, 含水比가 液性限界의 약 2배(70%)가 되는 슬러리상태가 되도록 하였다.<sup>20)</sup> 이러한 슬러리 상태의 試料에 壓密壓力을 단계적으로 가하여 최종 壓密壓力이 10N/cm<sup>2</sup>가 되도록 하고, 直徑 35 mm, 높이

약 70 mm 를 가진 21 개의 균질한 供試體를 동시에 얻었다.

#### 3.2. 實驗裝置 및 實驗內容

본 연구에 사용된 三軸壓縮試驗機는 노르웨이 의 GEONOR 사 제품으로 三連式으로 되어 있다. 非等方으로 壓密荷重을 가하기 위해서 레버 비가 1:5인 非等方 載荷裝置를 三軸室에 부착하고, 이를 이용하여 應力制御 試驗方法으로 예정된 應力經路를 따라 非等方으로 壓力을 가하였으며, 三軸試驗시 단부구속의 영향은 고려하지 않았다.

試驗의 종류는 (1) 靜止土壓係數  $K_0$  를 구하는 試驗 및 (2) 예정된 應力經路를 따르는 三軸壓縮 排水試驗으로 구분되는데, 구체적인 試驗의 내용은 다음과 같다.

##### (1) 靜止土壓係數 $K_0$ 를 구하기 위한 試驗

靜止土壓係數를 결정하는 方法은, 室內試驗으로 직접 결정하는 方法<sup>5)</sup> 및 內部摩擦角<sup>12)</sup> 또는 塑性指數<sup>2,7)</sup>로부터 간접적으로 결정하는 方法이 있다.<sup>1,6)</sup> 본 연구에서는 부렛을 이용하는 直接測定法으로 이를 결정하였다.<sup>5)</sup>

##### (2) 예정된 應力經路를 따르는 三軸壓縮 排水試驗

예정된 應力經路를 따르는 三軸壓縮 排水試驗은 應力制御 試驗方法으로, 非等方 載荷裝置를 이용하여 軸方向 壓縮力을 가하는 동시에 예정된 應力經路를 따라 橫方向의 拘束壓力을 가하였다. 각 載荷段階가 완료되면 측정된 軸變形量 및 體積變化量으로부터 斷面補正을 하고, 이를 근거로 예정된 應力經路를 따르는 다음 단계의 壓力增加量을 결정하고 試驗을 행하였으며, 試驗에 적용된 應力經路는 그림 3.2에 圖示하였다.

### 4. 實驗結果의 分析 및 考察

#### 4.1. 三軸壓縮 排水試驗 結果

본 試驗에 사용된 Kaolin 粘土 供試體의 靜止土壓係數  $K_0$ 는 시험결과 0.5로 나타났으며, 이는 塑性指數를 이용하여 간접적으로 추정된 Alpan<sup>2)</sup>의 경험식과 대체적으로 일치하였다.

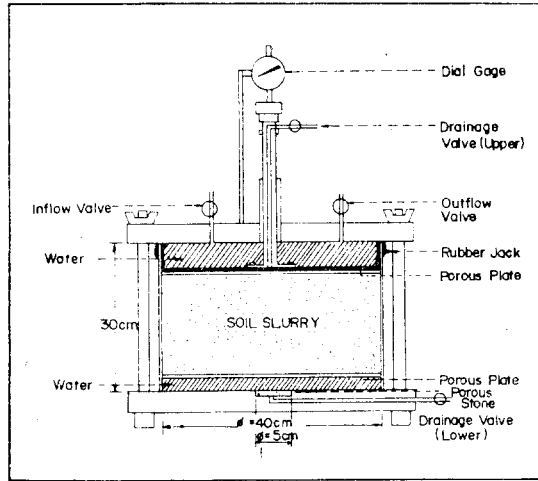


Fig. 3.1 Schematic diagram of consolidation device

표 4.1은 본 시험에 사용된 Kaolin 粘土 供試體의 壓密전의 初期狀態,  $K_0$  應力狀態로 壓密한 후 및 三軸壓縮 排水試驗이 완료되고 난 다음의 含水比와 間隙比를 나타낸 것이다.

그림 4.1은,  $K_0$  壓密應力狀態에서 鉛直壓密壓力이  $15.06\text{N/cm}^2$  일 때 應力經路에 따른 平均有效應力-軸方向變形度 關係를 圖示한 것이다.

鉛直 壓密壓力이  $21.19$  및  $27.01\text{N/cm}^2$  일 때에도 이와 유사한 경향이 나타났는데, 이들을 각각 부록 A·1 및 A·2에 수록하였다.

그림에서 보면, 應力增加比  $K'$ 가 어떤 臨界值를 초과하면서부터 應力이 증가함에 따라 材料의 性質이 強化되는 變形硬化 現象이 나타남을 알 수 있다. 특기할 現象은,  $K'$ 가 어떤 臨界值를 가질 때 軸方向變形度는 平均有效應力の 증가에 따라 거의 線形的 關係를 유지하고 있다는 점이다.

여기서, 이러한 應力增加比를  $K'_c$  곧 臨界應力增加比(critical stress increment ratio)로 규정하면, 이는 應力經路를 표시하는  $p'-q$  Diagram(그림 4.2)에서  $K_0$  선상의 임의의 점에서 출발하여  $K_f$  선과 나란한  $K_c$  선상의 應力增加比로 定義된다. 그 이유는, 임의의 應力增加比  $K'$ 가  $K'_c$  보다 작을 경우에는, 材料는 應力の 증가와 더불어 점차 破壞抱落線을 의미하는  $K_f$  선에 접근하면서 破壞狀態에 도달되는 變形軟化 現象을 보일 것이며, 또한  $K'$ 가  $K'_c$  보다 클 경우에는 應力の 증가와 더불어 破壞抱落線에서 멀어지며 그 性質이 점차 強化되는 變形硬化 現象을

Table 4.1 Conditions of soil specimens before and after  $K_0$  consolidation and after drained triaxial tests

Specimen No. *	$\sigma'_{v0}$ (N/cm <sup>2</sup> )	$K_0$	Before consolidation		After $K_0$ consolidation		After drained test	
			$w_i$ (%)	$e_i$	$w_c$ (%)	$e_c$	$w_f$ (%)	$e_f$
15-0.2	15.06	0.50	39.92	0.95	35.87	0.87	30.12	0.83
15-0.4		0.50	39.81	0.98	36.70	0.90	29.46	0.84
15-0.6		0.50	39.70	0.95	37.11	0.88	31.19	0.81
15-0.8		0.50	39.25	0.99	35.94	0.90	30.48	0.82
21-0.2	21.19	0.50	41.31	1.01	37.24	0.90	29.65	0.80
21-0.4		0.50	38.79	0.97	35.25	0.87	27.84	0.78
21-0.6		0.50	41.52	1.01	37.76	0.91	27.96	0.79
21-0.8		0.50	39.64	0.95	35.89	0.85	28.37	0.82
27-0.2	27.01	0.50	40.83	0.91	36.48	0.79	29.54	0.81
27-0.4		0.50	39.95	0.99	35.10	0.89	29.08	0.79
27-0.6		0.50	40.21	0.94	35.96	0.82	29.01	0.80
27-0.8		0.50	39.26	0.96	35.63	0.86	28.33	0.80

\* 供試體의 번호 중 앞 숫자는  $K_0$  壓密시의 鉛直壓密壓力을, 뒷 숫자는 應力增加比  $K'$  ( $K' = \Delta\sigma'_h / \Delta\sigma'_v$ ) 를 의미한다.

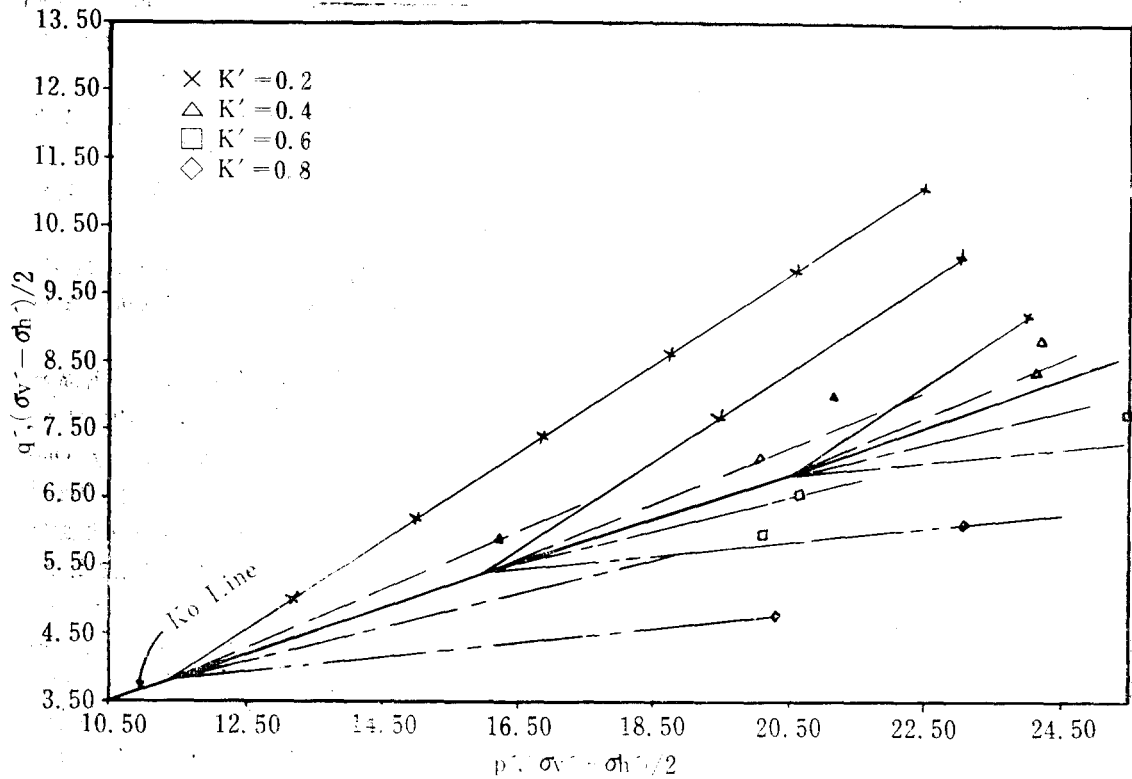


Fig. 3.2 Stress paths for drained triaxial tests

보이고, 따라서 이들의 경계가 되는  $K_c$  선상에서는 應力-變形 舉動이 이들의 中立이 되는 線形의 관계를 보일 것으로 推定되기 때문이다. 本 試驗에 사용된 粘性土 供試體의 三軸壓縮 排水試驗에서의  $K_f$  선의 경사각은  $32.05^\circ$ 로 나타났으며,<sup>26)</sup> 이를 근거로  $K_f$ 를 구하면 0.23을 얻게 된다. 이 값은 應力-變形 관계가 거의 線形의 형태로 나타나는 本 試驗에서의 有效應力增加比 0.20과 매우 근접된 값이며, 이는 臨界應力增加比  $K_c'$ 가  $K_f$  선의 경사각과 같다는 사실을 입증하여 주는 결과이다.

이와같이 특정한 應力增加比( $K_c'$ )하에서 흙의 應力-變形 舉動이 거의 線形을 보이고 있다는 사실은, 흙의 舉動 特性을 파악하기 위한 주요한 지침으로 활용될 수 있을 것이다.

#### 4.2. 壓密壓力과 應力-變形 舉動의 關係

正規壓密 粘性土의 壓密壓力과 應力-變形 관계는, 그 舉動을 初期 拘束壓密壓力으로 나누어

표시하였을 때 서로 유사한 성질을 나타내는 正規化特性(normalised behavior)이 있음은 이미 잘 알려진 사실이다.<sup>15)</sup> 그런데, 이는 拘束壓力이 일정한 상태에서 軸方向의 壓縮力 또는 伸張力을 가하였을 경우에 나타난 現象이었다.

鉛直 및 橫方向應力이 일정한 比率로 동시에 변화되는 應力條件하에서 서로 다른 初期壓密壓力을 가지는 供試體의 舉動은 어떠한가를 검토하기 위하여, 應力經路에 따른 平均有效應力-軸方向變形度 曲線을 初期 平均壓密壓力으로 나누어 圖示하였으며, 이는 그림 4.3에 수록하였다 여기서,  $\Delta\sigma_m^*$ 는 平均有效應力  $\Delta\sigma_m'$ 을 初期 平均壓密壓力  $\sigma_{m0}'$ 로 나눈값을 의미한다.

그림에서 보면, 동일한 應力經路를 가지는 경우 이들은 서로 매우 유사한 형태로 표시되는 正規化特性이 있음을 알 수 있으며, 이는 初期 壓密壓力을 고려하는 構成모델에서 흙의 舉動을 설명하기 위한 지침이 될 수 있다.

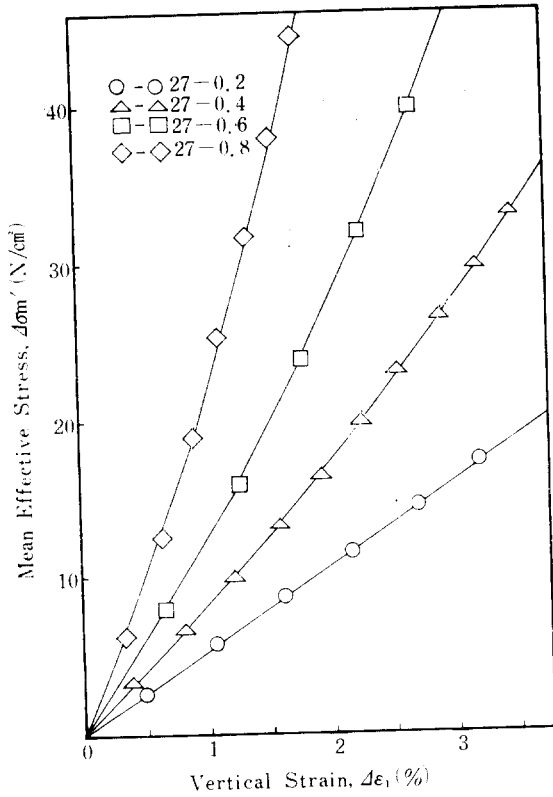


Fig. 4.1 Mean effective stress-vertical strain curve ( $\sigma_{vo}' = 15.06 \text{ N/cm}^2$ )

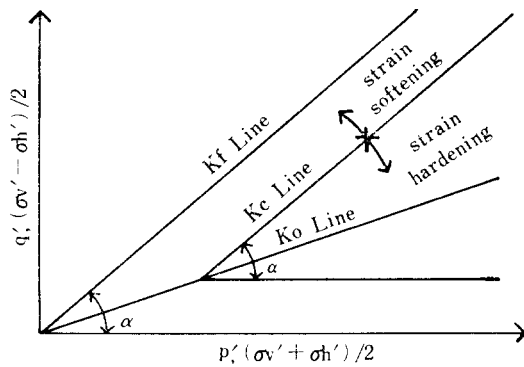


Fig. 4.2 Definition of  $K_c$  in  $p'$ - $q$  diagram

#### 4.3. 應力經路를 고려한 應力-變形 舉動의 雙曲線 모델

應力增加比  $K'$  가 臨界應力增加比  $K_c'$  보다 큰 應力經路하에서 變形硬化 현상을 보이는 非線形 應力-變形 舉動은 Drnevich<sup>9)</sup>가 제안한 雙曲線 函數의 개념에 의하여 線形化될 수 있는가를 검

토했었다.

그림 4.4는, 平均有效應力-軸方向變形度 關係를 正規化方法으로 표시한 그림 4.3의 좌표 축을 각각  $\Delta \sigma_m^*/\Delta \epsilon_1$  과  $\Delta \sigma_m^*$  축으로 변환하여 도시한 것이다. 그림에서 보면, 이들은 應力增加比  $K'$  에 따라 자기 하나의 직선의 형태로 수렴되고 있음을 알 수 있으며, 이는 Drnevich<sup>9)</sup>의 雙曲線函數 개념에 의하여 非線形 應力-變形 舉動의 線形化 표시가 가능함을 말해주는 결과이다.

그런데, 이들 직선의 형태를 살펴보면, 初期 應力-變形 係數를 의미하는 직선의 절편이나 漸近變形도와 관련되는 직선의 기울기는 應力經路에 의존한다는 사실을 알 수 있다. 여기서, 이들이 應力經路和 구체적으로 어떠한 상관성을 가지게 되는가를 검토하였다.

그림 4.5는 應力增加比  $K'$  와 正規化 직선의 절편  $S_0^*$ 의 關係를 반대수지상에 도시한 것이다 그림에서 보면, 이들 사이에는 반대수지상에서

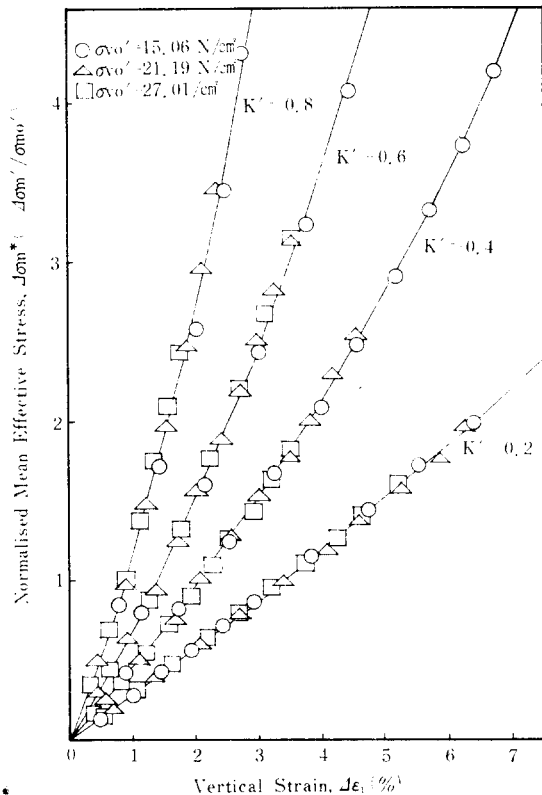


Fig. 4.3 Normalised mean effective stress-vertical strain curve

적선적인 관계가 있음을 알 수 있으며, 이는 다음과 같은 경험식으로 표시된다.

$$S_i^* = \alpha \cdot e^{\beta \cdot K'} \dots \dots \dots (4.1)$$

여기서,  $S_i^*$ ; 正規化直線의 절편,  
 $\alpha, \beta$ ; 實驗에 의하여 결정되는 재료의  
 常數,

또, 그림 4.6은 應力增加比  $K'$ 와 漸近變形度  $\epsilon_m^*$  사이의 관계를 전대수지상에 도시한 것인데, 여기에서도 이들은 線形的인 관계가 있음을 알 수 있으며, 이는 다음과 같은 경험식으로 표시된다.

$$\epsilon_m^* = a \cdot K'^b \dots \dots \dots (4.2)$$

여기서,  $\epsilon_m^*$ ; 正規化直線 기울기의 逆數,  
 $a, b$ ; 試驗에 의하여 결정되는 재료의  
 常數,

식(4.1) 및 식(4.2)에서 필요한 常數  $\alpha, \beta$  및  $a, b$ 는 應力增加比  $K'$ 가 臨界應力增加比  $K'_c$ 보다 큰 임의의 두가지 應力經路를 가지는 排水試

驗(일례로,  $K'$ 가  $K_c$ 인 壓密試驗 및  $K'$ 가 1인 等方壓縮試驗)에 의하여 平均有效應力과 軸方向 變形度를 측정하면, 그 값이 결정된다.

여기서, Drnevich의 雙曲線函數의 개념을 확장한 식(2.1)에 應力增加比와, 初期 壓密壓力의 크기를 고려한 正規化 개념을 적용하면, 다음식(4.3) 및 (4.4)와 같은 雙曲線函數式을 얻게 된다.

$$\Delta \sigma_m^* = \frac{S_i^* \cdot \Delta \epsilon_1}{1 - (\Delta \epsilon_1 / \epsilon_m^*)} \dots \dots \dots (4.3)$$

$$\Delta \epsilon_1 = \frac{\Delta \sigma_m^*}{S_i^* + (\Delta \sigma_m^* / \epsilon_m^*)} \dots \dots \dots (4.4)$$

따라서, 임의의 初期 壓密壓力 및 應力增加比  $K'$ 를 가지는 흙의 임의의 應力水準하에서의 鉛直變形度는, 식(4.1)과 식(4.2)를 식(4.4)에 代入한 雙曲線 모델에 의하여 그 값이 결정된다.

그림 4.7은 본 研究에서 제시된 모델을 검증하기 위하여, 應力經路에 따른 正規化 應力-變形 곡선(그림 4.3)과, 그림 4.5 및 그림 4.6에서 구한 媒介變數를 식(4.4)에 적용하여 구한

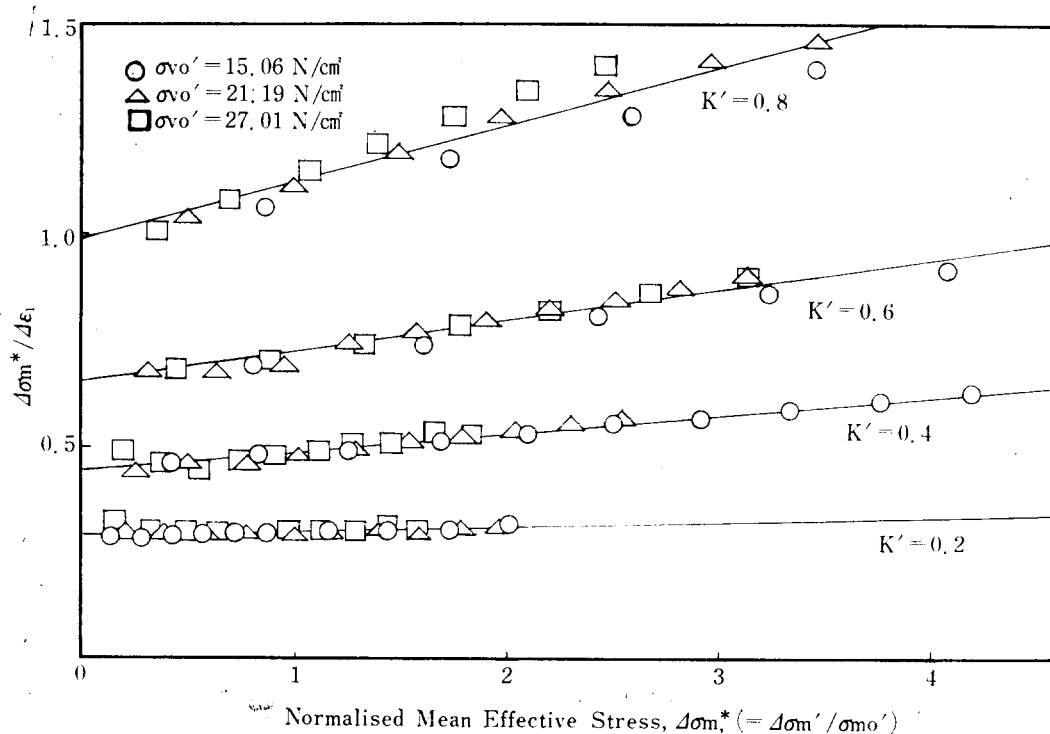


Fig. 4.4 Normalised transformed stress-strain curve



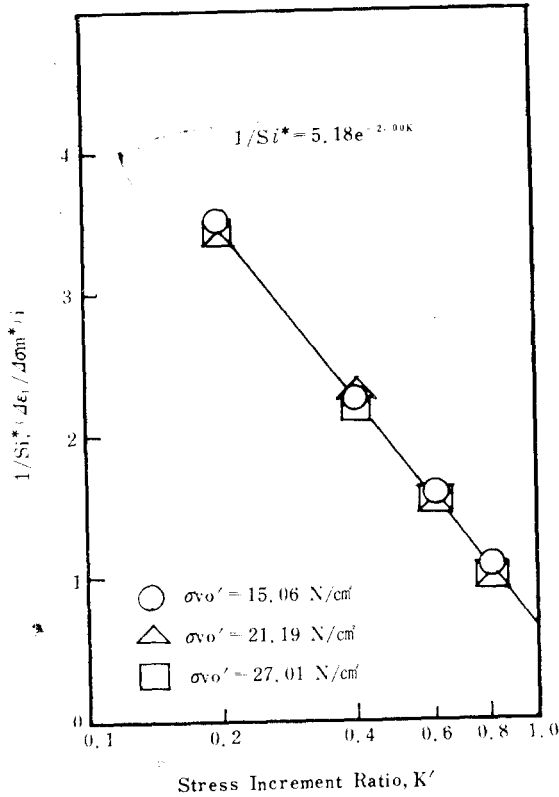


Fig. 4.5 Variation of  $1/S_i^*$  with stress increment ratio,  $K'$

계산치를 비교한 것이다. 그림에서 보면 계산치와 실험치가 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 다만 이러한 모델이 타 종류의 점성토에도 적용될 수 있는가에 대해서는 후후의 研究課題가 될 것이다.

#### 4.4 應力經路를 고려한 壓密沈下量 計算方法

본 研究에서 제안한 雙曲線 모델은, 應力增加比  $K'$ 가 臨界應力增加比  $K'_c$ 보다 큰 임의의 두 가지 應力經路 試驗에 의하여 平均有效應力-軸方向變形度 관계를 알게되면 모델설정 에 필요한 土質定數가 결정된다. 따라서, 이 방법은 Lambe<sup>16)</sup>의 應力經路法에서 처럼 복잡한 試驗節次가 포함되어 있거나, Gangopadhyay<sup>11)</sup> 등의 방법에서 처럼 모델설정 에 필요한 土質定數가 體積變形度 측정자료에 근거를 둔 것과 같은 단점들이 보완되어 있는 특징을 가지고 있다.

이 모델에 의하여, 軸對稱 荷重을 받고 있는

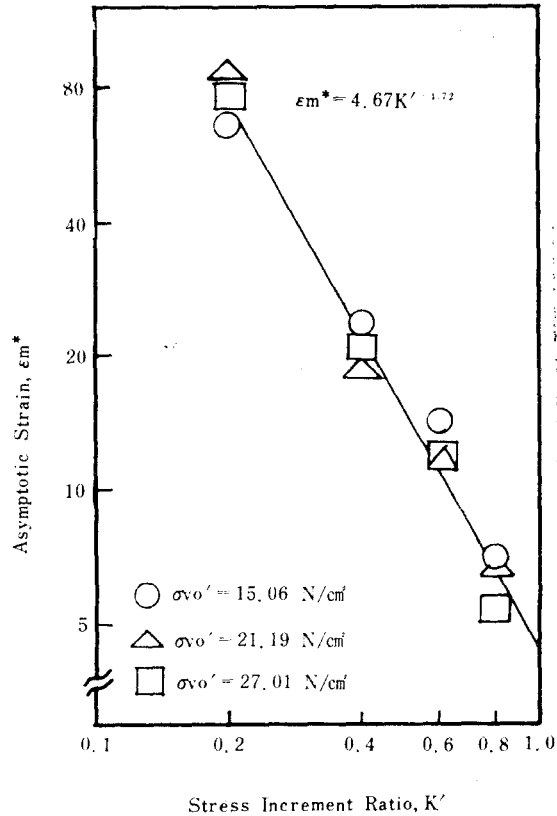


Fig. 4.6 Variation of asymptotic strain  $\epsilon_m^*$  with stress increment ratio,  $K'$

地盤의 應力經路를 고려한 壓密沈下量의 구체적인 계산절차를 기술하면 다음과 같다.

(1) 壓密을 일으키는 地盤을 여러 층으로 분할하고, 각 층의 중앙점에서 鉛直( $\Delta\sigma_v$ ) 및 橫方向 全應力의 增加量을 彈性論을 이용하여 계산한다. 이 때, 橫方向 全應力의 증가량은 非排水剪斷強度를 고려한 수정된 값( $\Delta\sigma_{h1}$ )을 취한다.<sup>11)</sup>

(2) (1)의 결과를 근거로, 각 층 중앙점에서 발생하는 初期 過剩間隙水壓( $\Delta u$ )을 계산한다.<sup>23)</sup>

$$\Delta u = \Delta\sigma_{h1} + A(\Delta\sigma_v - \Delta\sigma_{h1})$$

(3) 壓密 완료시의 鉛直 및 橫方向 有效應力의 증가량을 계산한다. 이 때, 鉛直有效應力  $\Delta\sigma_v'$ 는 過剩間隙水壓  $\Delta u$ 와 같으나, 橫方向有效應力  $\Delta\sigma_h'$ 는 壓密도중에 발생하는 橫方向 全應力의 감소를 고려하여 계산하고,<sup>11)</sup> 이를 근거로 각 층에서의 應力增加比  $K'$ 를 결정한다.

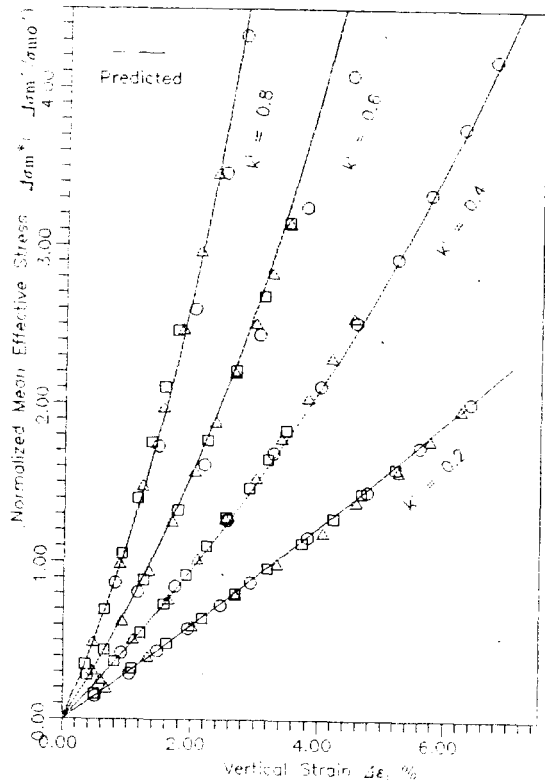


Fig. 4.7 Comparison of measured and predicted value from the proposed model

(4) 각 층에서의 初期 平均壓密壓力와 壓密 완료시의 平均有效應力( $\Delta\sigma_m'$ )을 구하고, 이를 근거로  $\Delta\sigma_m^*$ 를 결정한다. 이 때, 初期 平均壓密壓力( $\sigma_{m0}'$ )은 발생된 初期 過剩間隙水壓  $\Delta u$ 를 고려하여 계산한다.

$$\Delta\sigma_m^* = \Delta\sigma_m' / \sigma_{m0}', \quad \Delta\sigma_m' = (\Delta\sigma_v' + 2\Delta\sigma_h') / 3$$

(5) 임의의 두가지 서로 다른 應力增加比를 가지는 排水試驗을 통하여 모델 설정에 필요한 土質定數를 구하고, 이를 근거로  $S_v^*$ 와  $\epsilon_m^*$ 를 결정한다.

(6) (5)의 결과를 식(4.4)에 대입하면, 각 층에서의 鉛直變形度가 결정되며, 여기에 각 층의 두께  $dH$ 를 곱하고 이를 합산하면, 壓密沈下量이 결정된다.

$$\Delta\rho_c = \Delta\epsilon_1 \cdot dH, \quad \rho_c = \sum \Delta\rho_c$$

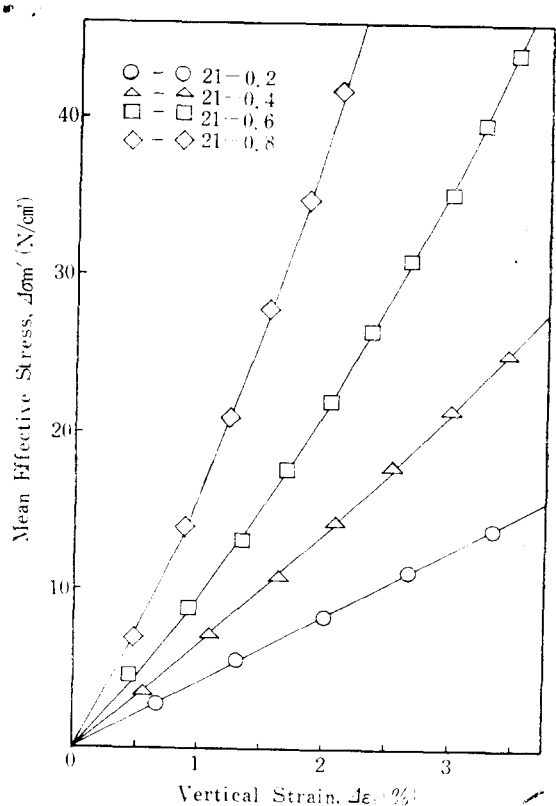


Fig. A.1 Mean effective stress-vertical strain curve ( $\sigma_{v0}' = 21.19 \text{ N/cm}^2$ )

## 5. 結 論

正規壓密 粘性土의 排水條件하에서의 應力-變形 舉動은 應力經路에 의하여 어떠한 影響을 받게 되는가를 규명하기 위하여, 實驗室에서 人爲的으로 壓密한 Kaolin 粘性土 供試體를 사용하여 現位置 應力狀態인  $K_0$  應力狀態로 壓密하고, 여러가지 서로 다른 應力經路를 따라 三軸壓縮 排水試驗을 행한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다

- (1) 應力增加比가 臨界應力增加比보다 클 경우, 應力經路에 따른 非線形 應力-變形 舉動은 Drnevich의 雙曲線函數의 概念에 의하여 모델화될 수 있으며, 이는 軸對稱 荷重을 받고있는 地盤의 應力經路를 고려한 壓密沈下 解析에 유용하게 사용되어질 수 있다.
- (2) 應力增加比가 동일한 경우, 初期 壓密壓力에 따른 平均有效應力과 軸方向 變形度 關

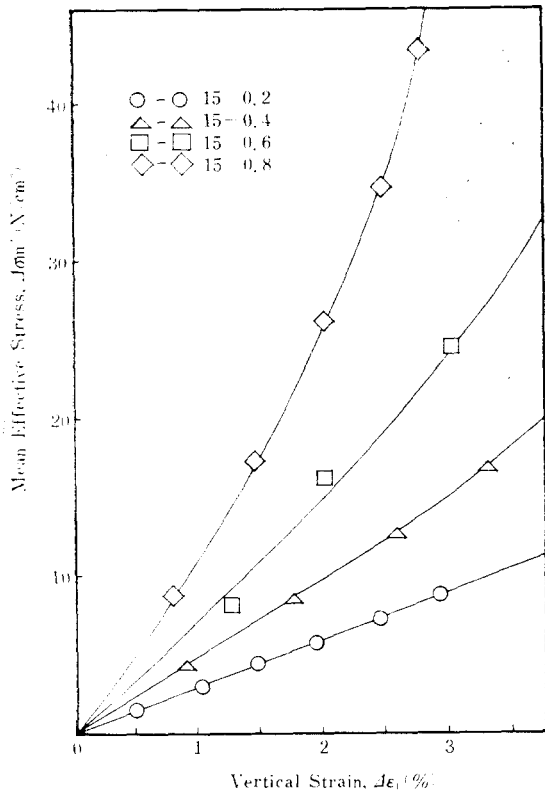


Fig. A.2 Mean effective stress-vertical strain curve ( $\sigma_{v0}' = 27.01 \text{N/cm}^2$ )

계는 正規化特性을 가진다.

- (3) 排水條件하에서의 應力經路에 따른 應力-變形 舉動은, 臨界應力增加比를 境界로 應力增加比가 그 이상이 되면 變形硬化 現象을 보이는 特性이 있다.
- (4) 臨界應力增加比하에서는, 平均有效應力과 軸方向 變形度 관계가 거의 線形의 形態로 나타나는 特性이 있으며, 이의 方向은  $p'-q$  Diagram에서 破壞抱落線을 意味하는  $Kf$  선의 方向과 같다.

#### 感謝의 글

이 論文은 1987年度 文教部 學術研究助成費에 의한 自由公募課題로 選定되어 研究되었으며, 이에 感謝 드립니다.

#### References

1. Abdelhamid, M. and Krizek, R.J., "At-Rest

Lateral Earth Pressure of Consolidating Clay," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 102, No. GT7, 1976, pp. 721~738.

2. Alpan, I., "The Coefficient of Earth Pressure at Rest," Soils and Foundations, JSMFE, Vol. 7, No. 1, 1967, pp. 31~40.

3. Barden, L., "Stresses and Displacements in a Crss-Anisotropic Soil," Geotechnique, Vol. 13, No. 3, 1963, pp. 198~210.

4. Bhattacharyya, R.K., "Stresses and Displacements in Crss-Anisotropic Layered Elastic Half Space due to Axi-Symmetric Loadings on the Top Surface," Ph. D. Thesis, Univ. of Wisconsin, 1968.

5. Bishop, A.W. and Henkel, D.T., *The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test*, Edward Arnold, 1976.

6. Brand, E.W. and Brenner, R.P., *Soft Clay Engineering*, Elsevier Scientific Publishing Co., 1981.

7. Brooker, E.Q. and Ireland, H.O., "Earth Pressure at-Rest Related to Stress History," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 2, No. 1, 1965, pp. 1~15.

8. Das, B.M., *Advanced Soil Mechanics*, McGraw-Hill Co., 1983.

9. Drnevich, V.P., "Constrained and Shear Modulus for Finite Elements," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 101, No. GT5, 1975, pp. 459~473.

10. Duncan, J.M. and Chang, C.Y., "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, No. SM5, 1970, pp. 1629~1653.

11. Gangopadhyay, C.R., Das, S.C. and Som, N.N., "Stress-Path Influence on Drained Deformations of Clay," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 106, No. GT11, 1980, pp. 1243~1260.

12. Jaky, J., "The Coefficient of Earth Pressure at Rest," Jour., Soc. of Hungarian Architects and Engineers, 1944, pp. 355~358.

13. Kondner, R.L., "Hyperbolic Stress-Strain Response, Cohesive Soils," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE,

- Vol. 99, No. SM1, 1963, pp. 115~143.
14. Kulhawy, F.H., Duncan, J.M. and Seed, H.B., "Finite Element Analysis of Stresses and Movements in Embankments during Construction," Contract Report No. S-69-8, USAEWES, 1969.
  15. Ladd, C.C., Foott, R., Ishihara, F. and Poulos, H.G., "Stress-Deformation and Strength Characteristics," State-of-the-Art Report, Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, 1977, pp. 421~494.
  16. Lambe, T.W., "The Stress-Path Method," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 93, No. SM6, 1967, pp. 309~331.
  17. Lambe, T.W., "Methods of Estimating Settlement," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 90, No. SM5, 1964, pp. 43~67.
  18. Lambe, T.W. and Marr, W.A., "Stress Path Method: Second Edition," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 105, No. GT6, 1979, pp. 727~738.
  19. Lambe, T.W. and Whitman, R.V., *Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, Inc., 1969.
  20. Rowe, P.W. and Barden, L., "A New Consolidation Cell," *Geotechnique*, Vol. 16, No. 2, 1966, pp. 162~171.
  21. Simons, N.E. and Som, N., "The Influence of Lateral Stresses on the Stress-Deformation Characteristics of London Clay," Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, 1969, pp. 369~377.
  22. Som, N.N., "The Effect of Stress-Path on the Deformation and Consolidation of London Clay," Ph.D. Thesis, London Univ., 1968.
  23. Skempton, A.W. and Bjerrum, L., "A Contribution to the Settlement Analysis of Foundations on Clay," *Geotechnique*, Vol. 7, No. 4, 1957, pp. 166~178.
  24. Terzaghi, K., *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage*, Franz Deuticke, Leipzig und Wien, 1925.
  25. Yong, R.N. and Silvestri, V., "Anisotropic Behavior of a Sensitive Clay," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 16, No. 2, 1979, pp. 335~350.
  26. 權五曄, 正規壓密 粘性土의 應力經路에 따른 應力變形舉動, 서울대학교 박사학위논문, 1988.  
(접수일자 1989. 5. 2)