

## 應力經路에 따른 異方性 粘性土의 變形特性

## Stress-Path Dependent Deformation Characteristics of Anisotropic Cohesive Soil

權 五 曄\*  
Kwon, Oh Yeob

## Abstract

Lightly overconsolidated clays are commonly anisotropic, and exhibit substantial ranges of approximately linear behavior at stress levels which do not produce yielding. The theory of cross-anisotropic elasticity is adopted to predict the stress-strain behavior of such an anisotropic soil. Equivalent elastic parameters  $A^*$  and  $B^*$  which express the relationships of stress and strain in the theory have been proposed. It is shown that constitutive relationships derived from the theory represents well the mechanical response of anisotropic soil.

## 要 旨

過壓密性 粘性土의 應力-變形 舉動은 일정한 應力水準에 이르기까지 거의 線形의 關係를 유지하는 경우가 많다. 본 研究에서는, 이러한 地盤의 應力-變形 舉動을 추정하기 위하여 橫異方性 彈性論을 도입하고, 이 理論에 필요한 彈性定數를 等價媒介變數로 代置하는 새로운 方法을 提案하였다. 이 方法은, 等方堆積面과 鉛直方向의 供試體로 임의의 두가지 應力經路 排水試驗에 의한 鉛直變形度 측정만에 의해서도 媒介變數가 결정되는 特성을 가지고 있으며, 이 方法으로 결정된 等價媒介變數를 橫異方性彈性論에 적용하여 추정한 應力-變形 舉動을 實驗値와 比較한 결과 대체로 부합된 결과를 얻었다.

## 1. 序 論

過壓密성을 가진 粘性土의 應力-變形 特性은 일정한 應力水準에 이르기까지 거의 線形의 形態를 유지하는 경우가 많다<sup>(3, 16, 20)</sup>. 이러한 特性을 보이는 地盤에서 應力-變形 舉動을 推定하기 위한 지금까지의 보편적인 解析方法은, 흙을 等方的 彈性體로 간주하고 等方彈性論을 適用하는 것이었다.

그러나, 실제적인 흙의 應力-變形 特性은 作用하는 應力의 方向이나 體系에 따라서 그 性質을 달리하는 異方性으로 밝혀져 있으며, 이러한 異方性이 흙의 應力-變形 舉動에 미치는 영향은 매우 중요한 것으로 알려져 있다<sup>(8, 9, 11, 21, 22)</sup>.

흙의 異方性を 고려하여 應力-變形 舉動을 推定하기 위한 方案의 하나로는, 흙을 橫異方性(cross-anisotropic 또는 transversely isotropic)의 彈性

\*正會員·建國大學校 工科大學 副教授, 土木工學科

體로 간주하고 橫異方性彈性論을 적용하는 방법이 있다. 이는 오랜 地質學的 年代를 거치면서 堆積되어 형성된 粘性土 地盤의 성질이 堆積層에 평행한 방향으로는 等方性을 나타내고, 堆積層에鉛直인 방향으로는 異方性을 보이는 橫異方性에 가깝다는 많은 學者들의 研究結果에 그 근거를 두고 있다.<sup>(13, 14, 16)</sup>

최근에 이르기까지 橫異方性彈性論을 적용하여 地盤의 應力-變形 問題를 解析한 異論의 研究는 상당수 발표된 바 있다<sup>(4, 8, 14, 15, 18, 22, 24)</sup>. 그러나, 彈性定數를 구하여 이 理論에 적용하고 추정된 應力-變形 關係를 실제 實驗値와 비교 검토한 實驗的 研究<sup>(3, 12, 25, 26, 27)</sup>가 발표된 것은 많지 않으며<sup>(7)</sup>, Ladd 등<sup>(21)</sup>은 이 分野에 대한 보다 많은 研究의 필요성을 지적하고 있다.

橫異方性彈性論을 이용하여 흙의 應力-變形 舉動을 추정함에 있어서 가장 문제가 되는 것은, 이 이론에 적용되는 彈性定數를 實驗的으로 구하기가 용이하지 않다는 점이다. 지금까지 발표된 實驗的 研究를 보면, Yong 과 Silvestri<sup>(28)</sup>, Zeng 과 Gong<sup>(27)</sup> 및 Atkinson<sup>(3)</sup>은 等方堆積面과 각각 0° 및 90°로 준비된 供試體로 一軸壓縮試驗 또는 等方壓密 三軸壓縮 排水試驗으로 彈性定數를 구하고 있는데, 이는 供試體를 준비하는 절차가 복잡할 뿐만 아니라, 흙의 異方性에 따른 彈性定數를 구하기 위한 試驗方法으로도 적절하다고 볼 수 없다.

本 研究에서는, 橫異方性彈性論에 적용되는 彈性定數를 새로이 제안된 等價媒介變數 (equivalent elastic parameter)로 대체하고, 이를 現位置 應力狀態인  $K_0$  壓密應力狀態로 부터 試驗한 자료에 의하여 구하므로써 흙의 異方性에 따른 變形特性을 고려하였다. 또한, 이 방법에 의하여 추정된 應力-變形關係를, 實驗室에서 인위적으로 壓密한 Kaolin 粘性土 供試體를 이용한 應力經路 三軸壓縮 排水試驗의 결과와 비교하여 그 타당성을 검토하였다.

## 2. 理論的 背景

### 2.1 橫異方性 彈性論에 의한 應力-變形 關係

橫異方性 彈性體의 應力-變形度 關係를 有效主應力에 관한 식으로 표시하면 다음식 (1)과 같다<sup>(5, 26)</sup>.

$$\Delta \epsilon_1 = \frac{1}{E_v'} \Delta \sigma_1' - \frac{\nu_{hv}'}{E_h'} \Delta \sigma_2' - \frac{\nu_{hv}'}{E_h'} \Delta \sigma_3' \quad (1.a)$$

$$\Delta \epsilon_2 = -\frac{\nu_{vh}'}{E_v'} \Delta \sigma_1' + \frac{1}{E_h'} \Delta \sigma_2' - \frac{\nu_{hh}'}{E_h'} \Delta \sigma_3' \quad (1.b)$$

$$\Delta \epsilon_3 = -\frac{\nu_{vh}'}{E_v'} \Delta \sigma_1' - \frac{\nu_{hh}'}{E_h'} \Delta \sigma_2' + \frac{1}{E_h'} \Delta \sigma_3' \quad (1.c)$$

여기서,

$\Delta \epsilon_1, \Delta \epsilon_2, \Delta \epsilon_3$ : 각각 最大, 中間 및 最小主變形度,

$\Delta \sigma_1', \Delta \sigma_2', \Delta \sigma_3'$ : 각각 最大, 中間 및 最小有效主應力,

$\nu_{vh}'$ : 橫方向 有效主應力에 의한 等方彈性面에서의 Poisson 比,

$\nu_{hv}'$ : 橫方向 有效主應力에 의한 鉛直變形度/橫方向變形度,

$\nu_{hh}'$ : 鉛直 有效主應力에 의한 橫方向變形度/鉛直變形度

$E_v'$ : 鉛直方向의 Young 계수,

$E_h'$ : 橫方向의 Young 계수.

橫異方性 彈性體의 應力-變形 關係를 완전히 규정하기 위해서는 5개의 독립된 彈性定數가 필요하다. 그러나, 식 (1)에서 처럼 이를 有效主應力에 관한 식으로 표시하면, 식에 포함된 5개의 彈性定數중 종속關係를 고려하여 4개의 독립된 彈性定數에 의하여 應力-變形 關係가 규정된다.

### 2.2 橫異方性彈性論에서의 彈性定數의 결정

(1) 軸對稱 應力條件 (Axi-Symmetric Stress Condition)

三軸試驗에서의 應力條件은  $\Delta \sigma_2' = \Delta \sigma_3'$  이고 變形條件은  $\Delta \epsilon_2 = \Delta \epsilon_3$  이므로, 식 (1)은 다음과 같이 표시된다<sup>(16)</sup>.

$$\Delta \epsilon_1 = \frac{1}{E_v'} \Delta \sigma_1' - \frac{2\nu_{hv}'}{E_h'} \Delta \sigma_2' \quad (2.a)$$

$$\Delta \epsilon_3 = -\frac{\nu_{vh}'}{E_v'} \Delta \sigma_1' + \frac{1-\nu_{hh}'}{E_h'} \Delta \sigma_3' \quad (2.b)$$

또, 橫異方性 彈性體의 성질로 부터 다음과 같은 關係가 성립하며<sup>(4, 17)</sup>,

$$\frac{\nu_{vh}'}{E_v'} = \frac{\nu_{hv}'}{E_h'} \quad (3)$$

有效應力增加比  $K'$ 가  $K_0$ 인 경우  $\Delta \epsilon_3$ 가 0이 되므로, 이를 식 (2. b)에 대입하면,

$$\frac{1-\nu_{hh}'}{E_h'} = \frac{1}{K_0} \frac{\nu_{vh}'}{E_v'} \quad (4)$$

여기서,  $K_0$ : 靜止土壓係數.

식 (3)과 식 (4)를 식 (2)에 대입하고 정리하면, 다음식 (5)를 얻게 된다.

$$\Delta \epsilon_1 = A \Delta \sigma_1' + 2B \Delta \sigma_3' \quad (5. a)$$

$$\Delta \epsilon_3 = B \Delta \sigma_1' - (B/K_0) \Delta \sigma_3' \quad (5. b)$$

여기서,

$$A = 1/E_v' \quad (6. a)$$

$$B = -\nu_{vh}'/E_v' = -\nu_{hv}'/E_h' \quad (6. b)$$

따라서, 橫異方性 彈性體의 軸對稱 荷重 조건하에서의 應力-變形 관계는, 靜止土壓係數  $K_0$ 를 알고 있는 경우, 等價媒介變數  $A$ 와  $B$ 의 2개의 媒介變數에 의하여 그 예측이 가능하다. 이 때, 等價媒介變數  $A$ 와  $B$ 는  $K_0$  壓密 應力狀態에서 임의의 應力增加比  $K'$ 를 가지는 應力經路 三軸壓縮 排水試驗에 의하여 鉛直變形度 및 體積變形度を 측정하든가, 또는 임의의 應力增加比  $K'$ 를 가지는 두가지 종류의 應力經路 試驗에 의하여 鉛直變形度を 측정하면, 그 값이 결정된다.

(2) 眞三軸 應力條件(True Triaxial Stress Condition)

眞三軸 應力條件에서, 橫異方性 彈性體의 應力-變形 관계를 有效主應力에 관한 行列式으로 표시하면 다음과 같다<sup>(16)</sup>.

$$\begin{Bmatrix} \Delta \epsilon_1 \\ \Delta \epsilon_2 \\ \Delta \epsilon_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & B \\ B & C & C \\ B & D & C \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \sigma_1' \\ \Delta \sigma_2' \\ \Delta \sigma_3' \end{Bmatrix} \quad (7)$$

여기서, 彈性定數  $A$ 와  $B$ 는 식 (6)에서 표시된 값과 같으며, 彈性定數  $C$ 와  $D$ 를 구하기 위하여  $\nu_{hh}' = \nu_{vv}'$ 로 가정하면<sup>(26, 27)</sup> 다음과 같이 그 값이 구하여진다.

$$C = \frac{1}{E_h'} = -\frac{(K_0+1)B}{K_0} \quad (8)$$

$$D = -\frac{\nu_{hh}'}{E_h'} = -\frac{\nu_{vv}'}{E_h'} = B \quad (9)$$

따라서 眞三軸 應力條件일 경우에도 橫方向 彈性係數  $E_h'$ 를 직접 구하지 않고 等價媒介變數  $A$ ,  $B$  및 靜止土壓係數  $K_0$ 에 의하여 다음 식 (10)으로 應力-變形 관계를 규정할 수 있을 것이다.

$$\begin{Bmatrix} \Delta \epsilon_1 \\ \Delta \epsilon_2 \\ \Delta \epsilon_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} A & B & B \\ B & -\frac{(K_0+1)B}{K_0} & B \\ B & B & -\frac{(K_0+1)B}{K_0} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \sigma_1' \\ \Delta \sigma_2' \\ \Delta \sigma_3' \end{Bmatrix} \quad (10)$$

### 3. 實驗

#### 3.1 試料의 造成

實驗에 사용된 試料은 Kaolin 실트질 粘土이며, 이 試料의 物理的 性質은 표 1과 같다.

表 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 1과 같은 內徑 40cm, 높이 30cm 및 두께 1cm의 大型壓密槽<sup>(28)</sup>를 제작하여 含水比가 液性限界의 약 2배가 되는 슬러리상태의 시료에 壓密壓力을 단계적으로 가하고 最終壓密壓力이 10N/cm<sup>2</sup>가 되도록 하였으며, 直徑 35mm 높이 약 70mm가 되는 21개의 均질한 供試體를 얻었다.

#### 3.2 實驗裝置 및 實驗內容

본 試驗에 사용된 三軸壓縮 試驗機는 노르웨이



그림 1. Consolidation Device

表 2. Conditions of Soil Specimens before and after  $K_0$  Consolidation and after Drained Triaxial Tests

Specimen No.*	$\sigma_{vo}'$ (N/cm <sup>2</sup> )	$K_0$	Before Consolidation		After $K_0$ Consolidation		After Drained Test	
			$w_i$ (%)	$e_i$	$w_c$ (%)	$e_c$	$w_f$ (%)	$e_f$
15-0.0	15.06	0.50	39.80	0.99	38.42	—	31.61	0.89
15-0.2		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
21-0.0	21.19	0.50	40.70	1.04	38.98	—	31.02	0.88
21-0.2		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
27-0.0	27.01	0.50	39.71	0.99	37.12	—	28.39	0.74
27-0.2		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 번호의 앞 숫자는  $K_0$  壓密시의 鉛直壓密壓力을, 뒷 숫자는 排水試驗중의 應力增加比  $K'$ 를 의미한다.

의 GEONOR 사 제품으로 三連式으로 되어 있으며, 非等方 載荷裝置를 이용하여  $K_0$  應力狀態로 壓密하고, 예정된 應力經路를 따라 應力制御 試驗方法으로 排水試驗을 행하였다.

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 구분된다. 靜止土壓係數  $K_0$ 는 變形速度 0.008%/min 를 가지는 變形制御 시험으로 軸變形量과 體積變化量을 동시에 측정하면서 橫方向變形이 발생하지 않도록 壓力을 조절하는 뷰렛시험<sup>6)</sup>에 의하여 결정되었다. 應力經路 三軸試驗에서는 鉛直壓密壓力이 각각 15.06, 21.19, 및 27.01 N/cm<sup>2</sup>가 되는  $K_0$  壓密應力상태로 壓密하고, 각각의 경우 排水試驗시의 有效應力增加比  $K'$ 가 0, 0.2, 0.4, 0.6, 및 0.8 이 되도록 應力制御 試驗方法으로 시험하였으며, 이 중 等價媒介變數 A, B를 결정하기 위한 자료로는  $K'$ 가 0 및 0.2인 시험을 택하였다.

#### 4. 試驗結果의 考察 및 檢討

##### 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는  $K_0$ 는 시험결과 0.5로 나타났으며, 이는 塑性指數를 이용하여 간접적으로 추정한  $Al_{pan}^{(1)}$ 의 경험식과 대체적으로 근접된 값을 보였다.

표 2는 kaolin 粘性土 供試體의 壓密 전의 初期狀態,  $K_0$  應力狀態로 壓密한 후 및 排水試驗이 완료되고 난 다음의 含水比와 間隙比를 나타낸 것이다. 표를 보면, 供試體의 초기 含水比는 평균 40.05%로 개별 供試體의 含水比와 비교하여 볼 때 그 차이가 미소하며, 이는 大型壓密曹내에서 試料가 상당히 균질한 상태로 壓密되었음을 알 수 있다.

그림 2와 그림 3은 鉛直有效應力-鉛直變形度 및 平均有效應力-體積變形度 관계를 각각 초기 鉛直壓密壓力( $\sigma_{vo}'$ ) 및 초기 平均壓密壓力( $\sigma_{mo}'$ )으로 나누어 正規化 방법으로 도시한 것이다. 그림에서 보면, 이들은 應力增加比가 동일한 경우 서로 매우 유사한 곡선의 형태로 나타나는 正規化 特性을 가지고 있음을 알 수 있다. 또, 鉛直變形度 및 體積變形度は 應力增加比  $K'$ 가 특정한 값을 가질 때 應力の 증가에 따라 거의 線形的 應力-變形 관계를 유지하고 있음을 알 수 있다.

여기서, 이러한 應力增加比를 臨界應力增加比(critical stress ratio)

tical stress increment ratio,  $K_c'$ )로 규정하면, 이는  $p'-q'$  Diagram에서  $K_0$  선상의 임의의 점에서 출발하여 破壞包絡線을 의미하는  $K_f$  선과 평행한 직선에서의 應力增加比로 정의된다. 본 시험에 사용된 粘性土 供試體의 경우,  $K_f$  선의 傾斜角은  $32.05^\circ$ 로 나타났으며, 이를 이용하여  $K_c'$ 를 구하면  $(1 - \tan 32.05^\circ) / (1 + \tan 32.05^\circ)$ 로 부터 0.23을 얻게 되며, 이는 본 시험에서의 應力增加比 0.20과 비교하면 매우 근접된 결과를 보이고 있다.

#### 4.2 應力經路에 따른 초기 等價彈性係數 및 等價體積係數

그림 2와 그림 3에서, 應力增加比  $K'$ 가 臨界應力增加比  $K_c'$ 인 경우를 제외하고는 應力經路에 따른 초기 等價彈性係數(Equivalent Young's Modulus,  $E_i, e_q$ ) 및 초기 等價體積係數(Equivalent Bulk Modulus,  $K_i, e_q$ )를 구하기는 용이하지 않다. 여기서, 이들 값을 결정하기 위하여 非線形 應力-變形 곡선을 線形化하기 위한 雙曲線函數의 개념을 이용하였다.

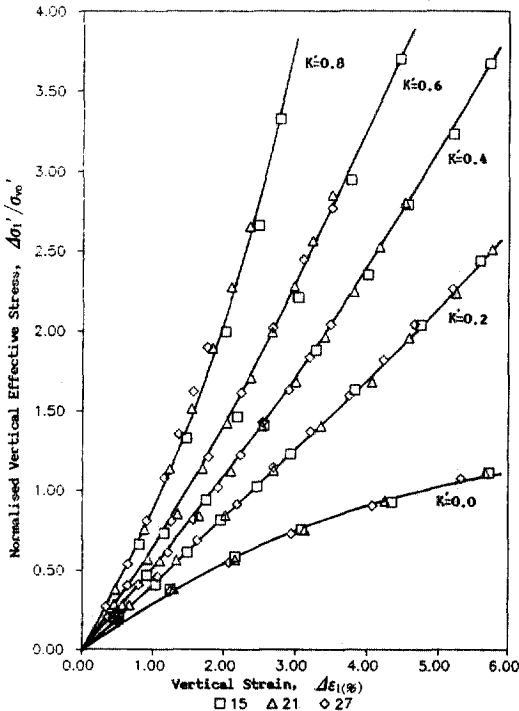


그림 2. Normalised Vertical Effective Stress-Vertical Strain Curve

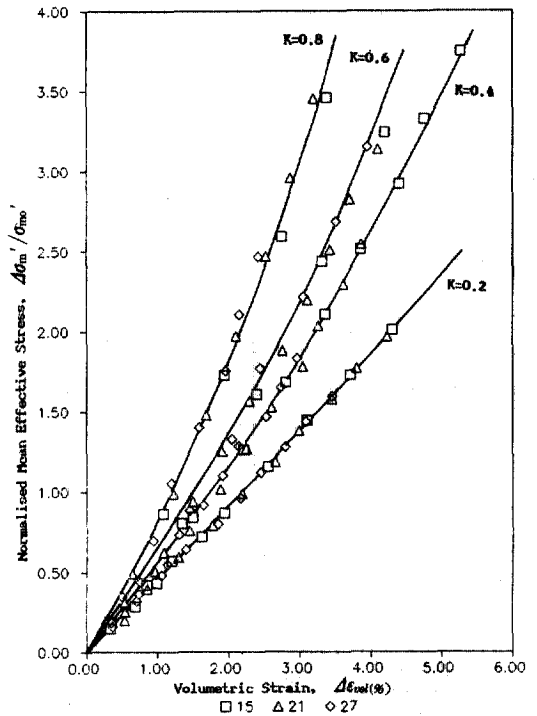


그림 3. Normalised Mean Effective Stress-Volumetric Strain Curve

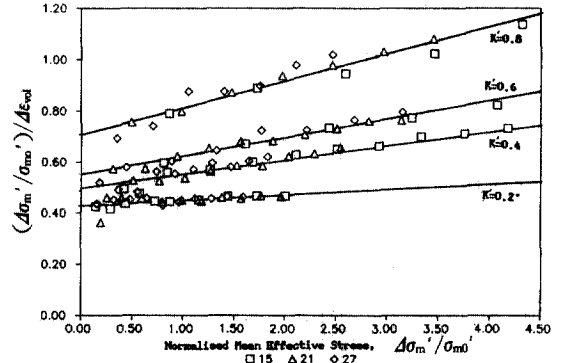


그림 4(a). Transformed Normalised Vertical Stress-Vertical Strain Curve

그림 4(a)와 그림 5는 鉛直變形度 및 體積變形도가 應力の 증가에 따라 變形特性이 強化되는 變形硬化 현상을 보이는 영역에서 Drnevich<sup>(10)</sup>의 雙曲線函數의 개념을 도입하여 非線形 應力-變形 곡선을 線形化하여 도시한 것이다. 그리고, 그림 4(b)는 鉛直變形도가 應力の 증가에 따라 變形特性이 軟化되는 變形軟化 현상을 보이는 영역에서 Kondner<sup>(19)</sup>

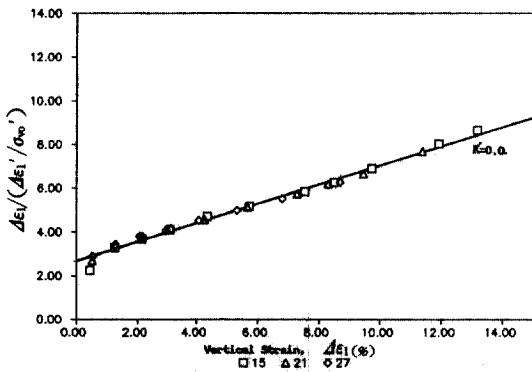


그림 4(b). Transformed Normalised Vertical Stress-Vertical Strain Curve

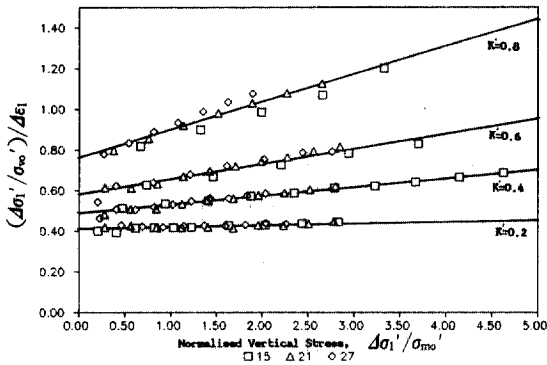


그림 5. Transformed Normalised Mean Stress-Volumetric Strain Curve

표 3. Normalised Equivalent Young's Modulus and Bulk Modulus

K'	0	0.2	0.4	0.6	0.8
$\frac{E_i, eq}{\sigma_{vo}'}$	0.3750	0.4264	0.4913	0.5848	0.7627
$\frac{K_i, eq}{\sigma_{mo}'}$	-	0.4653	0.4869	0.5529	0.7095

의 變曲線函數의 개념을 도입하여 線形化한 것이다.

그림 4(a)에서 正規化된 초기 等價彈性係數는 직선부분의 절편값을, 그리고 그림 4(b)에서는 절편의 역수를 의미한다. 또 그림 5에서 正規化된 초기 等價體積係數는 직선부분의 절편값을 의미한다. 여기서, 應力增加比  $K'$ 가 應力增加比  $K_c'$ 인 경우

에는 應力-變形 관계가 명확하게 규정되는 그림 2 및 그림 3에서의 값을 각각 초기 等價彈性係數 및 초기 等價體積係數로 취하였으며, 應力經路에 따른 이들의 正規化 값을 구한 결과는 표 3에 수록하였다.

#### 4.3 橫異方性彈性論에 의한 彈性定數의 決定 및 實驗值와의 比較

軸對稱 荷重條件하에서 橫異方性 彈性體의 應力-變形 舉動은, 식 (5)에서 等價媒介變數  $A$ 와  $B$ 를 결정하면 그 예측이 가능하다. 이들 媒介變數는 1) 두가지 종류의 應力經路 三軸壓縮 排水試驗에 의한 鉛直有效應力-鉛直變形度 측정, 또는 2) 임의의 應力經路 시험에 의한 鉛直有效應力-鉛直變形度 측정 및 平均有效應力-體積變形度 측정에 의하여 그 값이 결정된다.

본 시험에서는 鉛直變形度 측정자료에 의해서도 等價媒介變數를 결정할 수 있는 전자의 방법을 택하였는데, 이는 體積變形度 측정과 관련된 시험 결과의 신뢰성을 고려한 때문이었다. 이 때, 等價媒介變數 결정에 필요한 두가지 종류의 應力經路 試驗으로는 應力增加比  $K'$ 가 0인 표준 三軸壓縮 排水試驗 및 鉛直有效應力-鉛直變形度 관계가 가장 명확하게 규정되는,  $K'$ 가  $K_c'$ 인 臨界應力增加比를 가지는 應力經路試驗을 택하였다.

橫異方性 彈性論에서 應力-變形 관계를 규정하는 等價媒介變數  $A$ 와  $B$ 는, 正規化 개념으로 표시하면 각각  $A^*$ 와  $B^*$ 로 변환된다. 이를 이용하여 鉛直有效應力-鉛直變形度 및 平均有效應力-體積變形度 관계를 正規化 개념으로 표시하면 다음 식 (11) 및 식 (12)와 같다. 표 4는 두 종류의 應力經路 시험자료를 이용하여 식 (11)로 부터 구한 等價媒介變數를 수록한 것이다.

$$\frac{\Delta \epsilon_1}{\Delta \sigma_1^*} = A^* + 2K' \cdot B^* \quad (11)$$

$$\frac{\Delta \epsilon_{vol}}{\Delta \sigma_m^*} = \frac{1+2K_0}{1+2K'} A^* + \frac{2(1+2K_0)}{1+2K'} \times \frac{K_0 + (K_0 - 1)K'}{K_0} \cdot B^* \quad (12)$$

여기서,

$\Delta \sigma_1^*$ : 正規化된 鉛直有效應力( $=\Delta \sigma_1'/\sigma_{vo}'$ ),

$\Delta \sigma_m^*$ : 正規化된 平均有效應力( $=\Delta \sigma_m'/\sigma_{mo}'$ ),

$\Delta \epsilon_{vol}$ : 體積變形度,

$A^*, B^*$ : 正規化된 等價媒介變數,

$K'$ : 有效應力增加比(= $\Delta\sigma_3'/\Delta\sigma_1'$ ),

$K_0$ : 靜止土壓係數.

表 4. Normalised Equivalent Elastic Parameters  $A^*$  and  $B^*$

$K_0$	$K'$	$\frac{\Delta\epsilon_1}{\Delta\sigma_1^*}$	$A^*$	$B^*$
0.5	0	2.6669	2.6669	-0.8043
	0.2	2.3452		

따라서, 임의의 초기 壓密壓力 및 應力增加比  $K'$  하에서 초기 等價彈性係數 및 초기 等價體積係數는, 표 4에서 구한 等價媒介變數  $A^*$ 와  $B^*$ 를 식(11) 및 식(12)에 대입하여 구할 수 있으며, 이를 실험에 의하여 얻어진 값과 비교한 것은 그림 6 및 그림 7에 도시하였다.

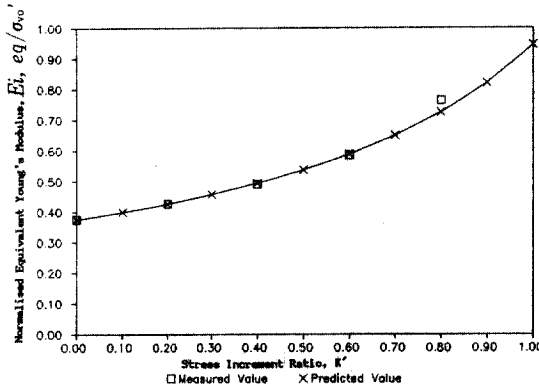


그림 6. Comparison of Predicted and Measured Equivalent Young's Modulus

그림 6은 橫異方性 彈性論으로부터 구한 正規化된 等價彈性係數와 실험에 의한 값을 비교한 것인데, 전반적으로 거의 일치된 결과를 얻었다. 그리고, 그림 7은 彈性論에 의한 等價體積係數의 正規化 값과 실험에 의한 값을 비교한 것이다. 여기에서도 비교적 양호한 상관관계를 얻을 수 있었으며, 다만  $K'$ 가 0.8인 경우에는 상당한 오차를 포함하고 있는데, 이는 초기 부분에서 線形化函數의 불일치 및 排水試驗에서 體積變形度 측정치의 신뢰성이 원인인 것으로 사료된다.

이러한 점을 전반적으로 고려하여 볼 때, 본 연구에서 제안한 等價媒介變數를 적용한 橫異方性 彈性論은 軸對稱 荷重 조건하에서 異方性 地盤의

彈性沈下를 계산하기 위한 방법으로 유용하게 사용될 수 있을 것으로 보이며, 아울러 이러한 실험적 결과를 근거로 有效主應力을 받고 있는 眞三軸

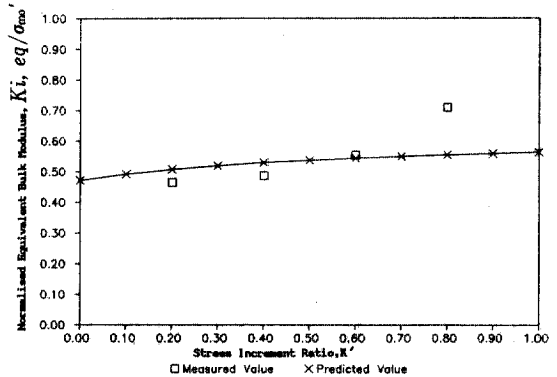


그림 7. Comparison of Predicted and Measured Equivalent Bulk Modulus

應力體系하에서의 應力-變形 舉動도, 본 研究에서 제안한 식(10)에 의하여 그 추정이 가능할 것으로 판단된다.

## 5. 結 論

過壓密性 粘性土의 應力-變形 舉動은 일정한 應力水準에 이르기까지 거의 線形의 관계를 유지하는 경우가 많다. 본 研究에서는 이러한 地盤의 應力-變形 舉動을 추정하기 위하여 橫異方性 彈性論을 도입하고, 이 理論에 필요한 2개의 等價媒介變數를 數式的으로 정의한 다음 이를 특정한 應力經路를 가지는 三軸實驗을 통하여 구하였으며, 이를 橫異方性 彈性論에 적용하여 추정한 應力-變形 舉動과 實驗值를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 正規化 개념에 의하여 표시된 等價媒介變數  $A^*$ 와  $B^*$ 를 橫異方性 彈性論에 적용하여 추정한 임의의 壓密壓力 및 應力經路에 따른 應力-變形 舉動은 實驗에 의한 값과 대체로 일치하였으며, 이는 異方性 地盤의 彈性沈下를 추정하기 위한 유용한 한 방법으로 간주된다.

(2) 軸對稱 荷重 조건하에서 橫異方性 彈性論에 적용되는 等價媒介變數  $A$ 와  $B$ 는 靜止土壓係數  $K_0$ 를 알고 있는 경우 이 理論에 필요한 媒介變數의 수를 저감하고 시험의 편의성을 증대시키는 효

과가 있음은 물론,  $K_0$  壓密應力상태로부터 구해지므로 인하여 媒介變數에 應力의 異方性이 고려된 특징을 가지고 있다.

(3) 橫異方性 彈性論에 적용되는 彈性定數를 적절히 가정하면, 본 研究에서 제안된 방법은 有效主應力을 받고있는 眞三軸 應力條件하에서의 應力-變形 舉動의 추정에 확장적용이 가능할 것으로 판단된다.

#### 感謝의 글

本 研究는 1988년도 建國大學校 校費 研究支援에 의하여 수행되어 이에 感謝드리며, 아울러 大學院生 김종필군, 박은영군과 자료처리를 위해 진력한 최지훈군에게 고마움을 표합니다.

#### 參考文獻

1. Alpan, I., "The Coefficient of Earth Pressure at Rest," *Soils and Foundations, JSMFE*, Vol. 7, No. 1, 1967, pp. 31-40.
2. Arthur, J. R. F., Bekenstein, S., Germaine, J. T. and Ladd, C. C., "Stress Path Tests with Controlled Rotation of Principal Stress Directions," ASTM, STP 740, Laboratory Shear Strength of Soil, 1981, pp. 516-540.
3. Atkinson, J. H., "Anisotropic Elastic Deformations in Laboratory Tests on Undisturbed London Clay," *Geotechnique*, Vol. 25, 1975, pp. 357-374.
4. Barden, L., "Stresses and Displacements in a Cross-Anisotropic Soil," *Geotechnique*, Vol. 13, No. 3, 1963, pp. 198-210.
5. Bhattacharyya, R. K., "Stresses and Displacements in Cross-Anisotropic Layered Elastic Half Space due to Axi-Symmetric Loadings on the Top Surface," Ph. D. Thesis, Univ. of Wisconsin, 1968.
6. Bishop, A. W. and Henkel, D. T., "The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test," Edward Arnold, 1976.
7. Bowles, J. E., "Foundation Analysis and Design", McGraw-Hill Co., 1982.
8. Chowdhury, R. N., "Deformation Problems in Anisotropic Soil-Application of the Finite Element Method," *Conference on Finite Element Method in Civil Engineering, 1972*, pp. 653-675.
9. Donaghe, R. T. and Townsend, F. C., "Effects of Anisotropic versus Isotropic Consolidation in Triaxial Compression Tests of Cohesive Soils," *Geotechnical*

- Testing Journal*, Vol. 1, No. 4, 1978, pp. 173-189.
10. 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.
11. Duncan, J. M. and Seed, H. B., "Anisotropy and Stress Reorientation in Clay," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 92, No. SM5, 1966, pp. 21-50.
12. 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.
13. Gazetas, G., "Stresses and Displacements in Cross-Anisotropic Soils," *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 108, No. GT4, 1982, pp. 532-553.
14. Gazetas, G., "Strip foundations on a Cross-Anisotropic Soil Layer Subjected to Dynamic Loading," *Geotechnique*, Vol. 31, No. 2, 1981, pp. 161-179.
15. Gibson, R. E., "The Analytical Method in Soil Mechanics," *Geotechnique*, Vol. 24, No. 2, 1974, pp. 115-140.
16. Graham, J. and Houlsby, G. T., "Anisotropic Elasticity of a Natural Clay," *Geotechnique*, Vol. 33, No. 2, 1983, pp. 165-180.
17. Hearmon, R. F. S., "An Introduction to Applied Anisotropic," Oxford University Press, 1961.
18. Hooper, J. A., "Elastic Settlement of Circular Raft in Adhesive Contact with a Transversely Isotropic Medium," *Geotechnique*, Vol. 25, No. 4, 1975, pp. 691-711.
19. Kondner, R. L., "Hyperbolic Stress-Strain Response, Cohesive Soils," *Journal of the Soil, Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 99, No. SM1, 1963, pp. 115-1543.
20. Ladd, C. C., "Stress-Strain Behavior of Anisotropically Consolidated Clays," *Pro. of the 6th Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng.*, Vol. 1, 1965, pp. 282-286.
21. Ladd, C. C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F. and Poulos, H.G., "Stress-Deformation and Strength Characteristics," *State-of-Art Report, Pro. of the 9th Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng.*, Vol. 2, 1977, pp. 421-494.
22. Pickering, D. J., "Anisotropic Elastic Parameters for Soil," *Geotechnique*, Vol. 20, No. 3, 1970, pp. 271-276.
23. Rowe, P. W. and Barden, L., "A New Consolidation Cell," *Geotechnique*, Vol. 16, No. 2, 1966, pp. 162-171.
24. Saada, A. S. and Ou, C. D., "Stress-Strain Relations



- and Failure of Anisotropic Clays," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 99, No. SM12, 1973, pp. 1091-1111.
25. Simon, N. E. and Som, N., "The Influence of Lateral Stresses on the Stress-Deformation Characteristics of London Clay," *Pro. of the 7th Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng.*, Vol. 1, 1969, pp. 369-377.
26. Yong, R. N. and Silvestri, V., "Anisotropic Behavior of a Sensitive Clay," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 16, No. 2, 1979, pp. 335-350.
27. Zeng, G. X. and Gong, X. N., "Consolidation Analysis of the Soft Ground beneath Large Steel Oil Tank," *Pro. of the 5th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics*, Vol. 1, 1985, pp. 613-620.

(接受: 1989. 5. 22)