

# 彈・塑性構成式에 의한 粘土地盤의 舉動解析 (I)

—Lade의 모델, 立方體 三軸試驗 및 土質媒介變數 決定—

## A Behavior of Clayey Foundation Using Elasto-plastic Constitutive Model

—On the Lade's Model, Cubical Triaxial Test  
and the Determination of Soil Parameters—

李 汶 樹\* · 李 光 東\*\* · 吳 在 和\*\*  
Lee, Moon Soo · Lee, Kwang Dong · Oh, Jae Hwa

### Summary

It has long been pursued to estimate precisely the behavior of soft foundation subjected to earth load like embankment. In order to perform this project successfully, refined constitutive model and numerical technique should be developed. Accurate soil parameters for the constitutive model should be determined by using raw data obtained from laboratory tests.

In this study among various elastic, elasto-plastic or elasto-viscoplastic model proposed, double surface work-hardening model proposed by Lade was selected and the validity of that model for clayey soils was examined.

Lade's model has been considered to give good results for sandy soils. However through this study to secure satisfactory results for the prediction of soft clayey foundation, a cubical triaxial test apparatus, which was originally developed by Lade himself, was newly made and improved. With this test results soil parameters were determined to be used in Lade's model for Mooan normally consolidated clay. Good results were obtained from the cubical triaxial test in which intermediate principal stress is able to be controlled for the exact simulation of actual foundation. Finally, the mechanics of cubical test apparatus was explained.

\* 全南大學校 農科大學

\*\* 全南大學校 大學院

키워드 : Constitutive model, Soil parameter, Cylindrical triaxial test, Cubical triaxial test, Double surface work-hardening model, Normally consolidated clay, Yield function, Associated flow rule, Plastic potential function, Non-associated flow rule.

Continuously the second part of this study will deal with the behavior of 2-dimensional model foundation.

Besides another set of soil parameters was also obtained by using data from cylindrical triaxial compression(CTC) tests for comparison between two test results.

## I. 緒 論

점성토로 구성된 기초지반위에 성토 구조물 등의 외력이 작용할 때 기초지반 내에 어떠한 응력이 발생하고, 또 구조물 등이 안전하게 유지될 수 있는가를 검토하기 위해서는 현장 상태에 따른 경계조건 아래서 지반거동 해석을 하여야 한다. 그리고 현장상태에 맞는 경계조건 문제에 대한 변형이나 간극수압 분포의 해석은 유한요소법을 사용하여 수행하는 것이 편리하다. 이러한 해석방법에 사용되고 있는 해석적인 표현에서 가장 열악한 부분중의 하나가 재료거동에 관한 구성모델이다. 그러므로 실내시험에서 관측할 수 있는 응력-변형을 및 강도특성의 여러가지면들 을 충분하고도 정확하게 표현할 수 있는 흙의 거동에 대한 구성식이 절실하게 요구되고 있다.

이와 관련된 기존의 연구로서는 1950년대 후반에 Drucker 등<sup>1)</sup>에 의해 흙의 탄.소성모델이 제시된 수년 후 Roscoe<sup>2,3,4)</sup>를 중심으로 하는 이른바 Cambridge학파에 의해 Cam-clay모델<sup>5,6,7)</sup>이 제안된 이래, 지금까지 수 많은 구성모델이 제안되었다. 최근에는 흙의 이방성<sup>8)</sup> 및 시간의존성<sup>9,10)</sup>을 고려한 모델화도 실행중에 있고 탄.소성이론과 탄.점소성이론을 실제 문제에 적용하고 있다. 이 연구의 동기는 입상토의 변형해석에 실용성이 뛰어난 Lade의 복합항복면 구성식을 재검토하고 이를 다시 점토에 적용할 수 있도록 확장하여 점토지반의 거동을 정확하게 예측하는 데 있다.

많은 구성법칙들 가운데에서 쌍곡선 응력-변형율모델은 그 개념과 구성식이 비교적 단순하면서도 흙의 비선형반응을 잘 나타낼 수 있기

때문에 흙 구조물의 거동해석에 많이 사용되어 왔으며, 그 구성식에 관한 연구 또한 여러 단계의 발전을 거듭하여 왔다. Kondner<sup>11)</sup>가 개발한 탄성 쌍곡선모델을 Duncan과 Chang<sup>12)</sup> 및 Clough와 Duncan<sup>13)</sup>에 의해 수정되어 널리 사용하여 왔다. 이 모델은 축대칭조건에서 축차응력은 최소주응력의 어떤 값에 대한 축변형율에 의한 쌍곡선함수로써 표현되는 것이다.

그러나 이 모델은 모든 탄성 모델과 같이 전단응력 아래서 체적변화가 일어나는 것을 설명하지 못하는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위한 시도로서 보다 정교한 모델이 Lade와 Duncan<sup>14)</sup>에 의하여 제안되었다. 이 모델은 Lade형이라 불리워지는 입방체형시험기를 이용한 모래의 시험결과를 기본으로 해서 조합한 것이다. 그 후 이 모델의 문제점 즉 연화과정을 설명할 수 없고, 등방응력에 대해서 소성압축이 고려되어 있지 않은 것에 대해서, 전단에 의한 항복면 이외에 소성압축에 의한 항복면과 경화, 연화과정을 통일적으로 표현한 경화칙 및 소성포텐셜면을 포함한 새로운 구성 모델이 Lade<sup>15)</sup>에 의해 제안 되었다.

이 비선형구성모델은 항복기준, 비관련유동칙 그리고 전 소성일을 응력수준의 쌍곡선 함수로 표현하는 일경화법칙을 수용하고 있다. 이 모델을 정의하는데 요구되는 매개변수들은 일련의 통상적인 원통삼축압축시험결과로부터 결정할 수 있다. 그러나 입방체삼축압축시험이 실제지반 거동을 잘 재현할 수 있으므로 Lade 유형의 입방체삼축압축시험을 수행하여 이들 시험자료로부터 구성식에 필요한 10종의 토질 매개변수를 구하여, 이를 통상의 원통삼축시험결과와 비교하였다. 수치해석기법의 타당성을

검증하기 위하여 모형지반의 수치해석결과와 실제 관측치를 비교하였으며 이를 장차 실제지반의 거동 추정에 활용하고자 한다. 또한 이 모델은 두개의 항복면과 비관련유동칙이 적용되므로 해석상의 어려움이 있어 실제지반의 거동해석에 있어 실용화하지 못한 상태에 있었다. 그러므로 이 연구에서는 이 모델을 사용하여 모형기초지반의 거동을 해석할 수 있는 유한요소법에 의한 수치해석 알고리즘을 개발하고 삼축시험을 통해 전남 무안군 해재면의 점토에 대한 비선형구성식의 매개변수를 결정했다. 이 연구에 계속된 연구로서는 매개변수를 이용하여 수치해석한 결과와 시험에서 관측한 결과를 비교하여 개발된 수치해석방법의 정도를 검증하는 것이다. 모형지반(길이; 218cm, 폭; 40cm, 높이; 136cm)을 사용한 2차원 모형토조에 재하시험을 하여 평면변형율조건의 기초지반거동특성을 밝히고 그 재하시험관측 결과를 수치해석결과와 비교하므로써 기초지반의 거동을 정확하게 예측하여 경제적이고 안전한 설계 및 시공이 가능한 자료를 확보하고자 한다.

## II. 複合降伏面 構成式

### 1. 概說

Lade의 복합항복면(Double Work-hardening) 구성모델은 탄·소성이론에 의한 흙의 응력-변형률 거동을 모델링할 목적으로 전변형율증분( $d\epsilon_{ij}$ )을 탄성성분( $d\epsilon_{ij}^e$ ), 소성파쇄성분( $d\epsilon_{ij}^c$ ) 그리고 소성팽창성분( $d\epsilon_{ij}^p$ )으로 나누고, 이들 변형율증분 성분가운데서 탄성변형률 성분은 Hooke의 법칙을 이용하여 계산하고 소성파쇄 변형률과 소성팽창변형률은 소성이론을 적용하여 계산한다.<sup>15,16,17)</sup> 그림 1은 구속압력을 일정하게 한 배수삼축압축시험에서 축차응력( $\sigma_1 - \sigma_3$ )과 체적변형률( $\epsilon_v$ )을 종축으로 하고 축변형률( $\epsilon_1$ )을 횡축으로 한 관계를 나타내고 있으며 또한 이 그림에서 각각의 변형성분을 보여주고 있다.

### 2. 彈性變形率

하중의 제하-재재하시에 회복 가능한 탄성변형률은 Hooke의 법칙으로 부터 계산한다. 탄성계수(Eur)는 에너지 보존법칙으로 유도되며, 응력함수와 무차원상수로 다음과 같이 표현한다.<sup>18)</sup>

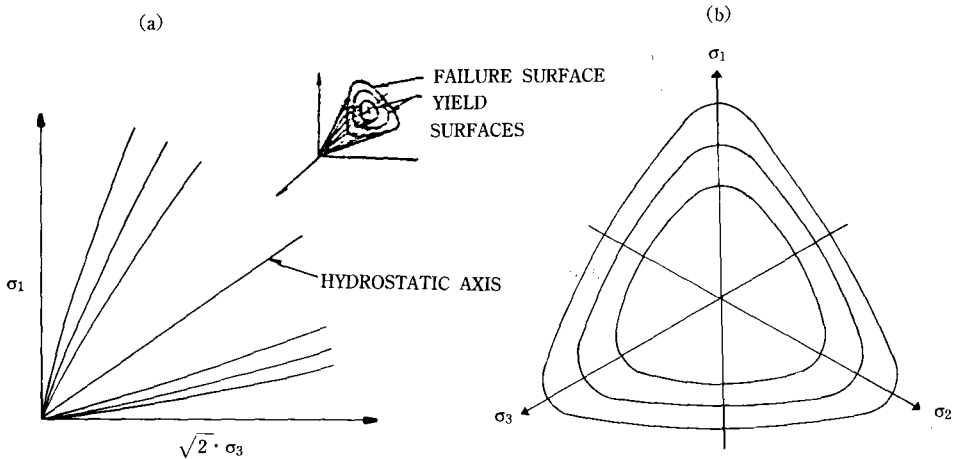


Fig. 1. Traces of failure and yield surface in (a) Triaxial plane; (b) Octahedral (Lade., 1977)

$$E_{ur} = K_{ur} \cdot P_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^n \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $P_a$ 는 탄성계수( $E_{ur}$ ), 구속압력( $\sigma_c$ )과 같은 단위로 취한 대기압이고  $K_{ur}$ ,  $n$ 는 토질 매개변수이다.

또한 Poisson비는 배수삼축압축시험의 제하-재하부분에서 얻은  $\Delta\varepsilon_v/\Delta\varepsilon_1$ 를 사용  $\nu = 1/2(1 - \Delta\varepsilon_v/\Delta\varepsilon_1)$ 를 계산한다.

### 3. 塑性膨脹變形率

소성팽창항복면의 방정식은 다음과 같다.

$$f_p = (I_1^3/I_3 - 27) (I_1/P_a)^m \text{ (비과괴시)} \dots (2a)$$

$$f_p = \eta_1 \text{ (과괴시)} \dots\dots\dots (2b)$$

여기서

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \dots\dots\dots (3)$$

$$I_3 = \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z + \tau_{xy} \cdot \tau_{yx} \cdot \tau_{yz} + \tau_{yx} \cdot \tau_{xy} \cdot \tau_{zx} + \tau_{zx} \cdot \tau_{xz} \cdot \tau_{zy} + \tau_{zy} \cdot \tau_{yz} \cdot \tau_{zx} \dots\dots\dots (4)$$

여기서  $\eta_1$ 과  $m$ 은 요구된 밀도에 따라 결정된 토질매개변수이다.

소성팽창변형율을 구하는데 비관련유동칙이 사용되며 이 때의 소성팽창포텐셜함수는 다음과 같다.

$$g_p = I_1^3 - (27 + \eta_2 \cdot (P_a/I_1)^m) \cdot I_3 \dots\dots\dots (5)$$

여기서  $\eta_2$ 는 구속압력 ( $\sigma_c$ )과  $f_p$ 의 주어진 값에 대하여 결정되는 매개변수이다. 일의 경화 혹은 연화를 표현하는 식은 소성팽창일의 함수로 다음과 같이 나타낸다.

$$f_p = a \cdot e^{-bW_p} (W_p/P_a)^{1/q} \quad q > 0 \dots\dots\dots (6)$$

여기서,  $a$ ,  $b$ ,  $q$ 는 토질매개변수이고  $e$ 는 자연대수의 기저이다.

### 4. 塑性破碎變形率

소성파쇄항복면의 방정식은 다음과 같다.

$$f_c = I_1^2 + 2I_2 \dots\dots\dots (7)$$

여기서

$$I_2 = \tau_{xy} \cdot \tau_{yx} + \tau_{yz} \cdot \tau_{zy} + \tau_{zx} \cdot \tau_{xz} - (\sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y \cdot \sigma_z + \sigma_z \cdot \sigma_x) \dots\dots\dots (8)$$

소성파쇄포텐셜함수는 소성파쇄항복함수와 같으며 계속하여 경화만 하고 결코 파괴상태에 도달하지 않는다.

$$g_c = I_1^2 + 2I_2 \dots\dots\dots (9)$$

그러므로 관련유동법칙이 성립되며, 일의 경화를 표현하는 식은 소성파쇄 일의 함수로 다음과 같이 나타낸다.

$$f_c = P_a^2 \cdot \left(\frac{1}{C}\right)^{1/p} \cdot \left(-\frac{W_c}{P_a}\right)^{1/p} \dots\dots\dots (10)$$

여기서  $C$ 와  $p$ 는 토질매개변수이다.

### III. 應力-變形率 增分式<sup>17)</sup>

비선형구성모델에서 전변형율증분은 다음과 같이 세 부분으로 표시된다.

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^c + d\varepsilon_{ij}^p \dots\dots\dots (11)$$

그리고 탄성응력-변형율 증분관계는 Hooke의 법칙에 따라 다음과 같다.

$$d\sigma_{ij} = C^e (d\varepsilon_{ij} - d\varepsilon_{ij}^c - d\varepsilon_{ij}^p) \dots\dots\dots (12)$$

소성파쇄항복면함수( $f_c$ )와 소성팽창항복면함수( $f_p$ )의 전미분을 취하면 다음과 같다.

$$df_c = \frac{\partial f_c}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{\partial f_c}{\partial W_c} \cdot \frac{\partial W_c}{\partial \varepsilon_{ij}^c} d\varepsilon_{ij}^c = 0 \quad (13)$$

$$df_p = \frac{\partial f_p}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{\partial f_p}{\partial W_p} \cdot \frac{\partial W_p}{\partial \varepsilon_{ij}^p} d\varepsilon_{ij}^p = 0 \quad (14)$$

한편 소성변형율 증분은 직교조건에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d\varepsilon_{ij}^c = \lambda_c \frac{\partial g_c}{\partial \sigma_{ij}} \dots\dots\dots (15)$$

$$d\varepsilon_{ij}^p = \lambda_p \frac{\partial g_p}{\partial \sigma_{ij}} \dots\dots\dots (16)$$

식(14)와 식(15)을 식(12)에 대입하면 다음과 같다.

$$d\sigma_{ij} = C^e \left[ d\varepsilon_{ij} - \lambda_c \frac{\partial g_c}{\partial \sigma_{ij}} \right] - \lambda_p \frac{\partial g_p}{\partial \sigma_{ij}} \dots (17)$$

여기서  $\lambda_c$ ,  $\lambda_p$ 은 비례상수이며 이 값을 구하는 과정은 다음과 같다. 식(13)과 식(14)에 식(12)를 대입하여 다음 식을 얻는다.

$$\frac{\partial f_c}{\partial \sigma_{ij}} \cdot C^e (d\varepsilon_{ij} - d\varepsilon_{ij}^c - d\varepsilon_{ij}^p) + \frac{\partial f_c}{\partial w_c} \frac{\partial w_c}{\partial \varepsilon_{ij}^c} d\varepsilon_{ij}^c = 0 \dots\dots\dots (18)$$

$$\frac{\partial f_p}{\partial \sigma_{ij}} \cdot C^e (d\varepsilon_{ij} - d\varepsilon_{ij}^c - d\varepsilon_{ij}^p) + \frac{\partial f_p}{\partial w_p} \frac{\partial w_p}{\partial \varepsilon_{ij}^p} d\varepsilon_{ij}^p = 0 \dots\dots\dots (19)$$

식(18)과 식(19)에 각각 식(15)와 (16)을 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial f_c}{\partial \sigma_{ij}} C^e (d\varepsilon_{ij} - \lambda_c \frac{\partial g_c}{\partial \sigma_{ij}} - \lambda_p \frac{\partial g_p}{\partial \sigma_{ij}}) + \frac{\partial f_c}{\partial w_c} \frac{\partial w_c}{\partial \varepsilon_{ij}^c} \lambda_c \frac{\partial g_c}{\partial \sigma_{ij}} = 0 \dots\dots\dots (20)$$

$$\frac{\partial f_p}{\partial \sigma_{ij}} C^e (d\varepsilon_{ij} - \lambda_c \frac{\partial g_c}{\partial \sigma_{ij}} - \lambda_p \frac{\partial g_p}{\partial \sigma_{ij}}) + \frac{\partial f_p}{\partial w_p} \frac{\partial w_p}{\partial \varepsilon_{ij}^p} \lambda_p \frac{\partial g_p}{\partial \sigma_{ij}} = 0 \dots\dots\dots (21)$$

위 식을 정리하면 다음과 같다

$$\lambda_c L_{11} + \lambda_p L_{12} = T_1 \dots\dots\dots (22)$$

$$\lambda_c L_{21} + \lambda_p L_{22} = T_2 \dots\dots\dots (23)$$

여기서

$$L_{11} = \left\{ \frac{\partial f_c}{\partial \sigma_{ij}} \right\}^T [C^e] \left\{ \frac{\partial g_c}{\partial \sigma_{ij}} \right\} + \left\{ \frac{\partial f_c}{\partial w_c} \right\} \left\{ \frac{\partial g_c}{\partial \sigma_{ij}} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

$$L_{22} = \left\{ \frac{\partial f_p}{\partial \sigma_{ij}} \right\}^T [C^e] \left\{ \frac{\partial g_p}{\partial \sigma_{ij}} \right\} + \left\{ \frac{\partial f_p}{\partial w_p} \right\} \left\{ \frac{\partial g_p}{\partial \sigma_{ij}} \right\} \dots\dots\dots (25)$$

$$L_{12} = \left\{ \frac{\partial f_c}{\partial \sigma_{ij}} \right\}^T [C^e] \left\{ \frac{\partial g_p}{\partial \sigma_{ij}} \right\} \dots\dots\dots (26)$$

$$L_{21} = \left\{ \frac{\partial f_p}{\partial \sigma_{ij}} \right\}^T [C^e] \left\{ \frac{\partial g_c}{\partial \sigma_{ij}} \right\} \dots\dots\dots (27)$$

$$T_1 = \left\{ \frac{\partial f_c}{\partial \sigma_{ij}} \right\}^T [C^e] \{d\varepsilon\} \dots\dots\dots (28)$$

$$T_2 = \left\{ \frac{\partial f_p}{\partial \sigma_{ij}} \right\}^T [C^e] \{d\varepsilon\} \dots\dots\dots (29)$$

$\lambda_c$ 와  $\lambda_p$ 값을 구하기 위하여 식(20)과 식(21)을 연립하여 풀면 다음과 같다.

$$\lambda_c = \frac{L_{22} T_1 - L_{12} T_2}{L_{11} L_{22} - L_{12} L_{21}} \dots\dots\dots (30)$$

$$\lambda_p = \frac{L_{11} T_2 - L_{21} T_1}{L_{11} L_{22} - L_{12} L_{21}} \dots\dots\dots (31)$$

그리고 식(30)과 식(31)을 식(17)에 대입하면 다음과 같이 탄·소성응력-변형률증분식이 얻어진다.

$$d\sigma_{ij} = C^{ep} d\varepsilon_{ij} \dots\dots\dots (32)$$

여기서

$$[C^{ep}] = [C^e] - \frac{[C^2]}{A} \left( \left\{ \frac{\partial g_c}{\partial \sigma_{ij}} \right\} \{ \beta_c \}^T + \left\{ \frac{\partial g_p}{\partial \sigma_{ij}} \right\} \{ \beta_p \}^T \right) [C^e] \dots\dots\dots (33)$$

여기서

$$A = L_{11} L_{22} - L_{12} L_{21} \dots\dots\dots (34)$$

$$\{ \beta_c \} = L_{22} \left\{ \frac{\partial f_c}{\partial \sigma_{ij}} \right\} - L_{12} \left\{ \frac{\partial f_p}{\partial \sigma_{ij}} \right\} \dots\dots (35)$$

$$\{ \beta_p \} = L_{11} \left\{ \frac{\partial f_p}{\partial \sigma_{ij}} \right\} - L_{21} \left\{ \frac{\partial f_c}{\partial \sigma_{ij}} \right\} \dots\dots (36)$$

위 방정식에 사용되는 개별적인 성분은 평면

변형을 및 축대칭조건에 맞도록 다음과 같이 유도된다.

$$\left\{ \frac{\partial f_c}{\partial \sigma_{ij}} \right\} = \left\{ \frac{\partial g_c}{\partial \sigma_{ij}} \right\} = 2 \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ 2\tau_{xy} \\ \sigma_z \end{bmatrix} \dots\dots\dots (37)$$

$$\frac{\partial f_c}{\partial w_c} = \frac{P_a}{C \cdot P} \left[ \frac{f_c}{P_a^2} \right]^{1-p} \dots\dots\dots (38)$$

$$\{\sigma\}^T \left\{ \frac{\partial g_c}{\partial \sigma_{ij}} \right\} = 2 \cdot I_1^2 + 4 \cdot I_2 = 2 \cdot g_c \dots (39)$$

$$\left\{ \frac{\partial f_p}{\partial \sigma} \right\} = \frac{I_1^2}{I_3^2} \cdot \left( \frac{I_1}{P_c} \right)^m \begin{bmatrix} 3I_3 - \sigma_y \sigma_z \cdot I_1 \\ 3I_3 - \sigma_z \sigma_x \cdot I_1 \\ 2I_1 \sigma_x \tau_{xy} \\ 3I_3 - (\sigma_x \sigma_y - \tau_{xy}^2) \cdot I_1 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \left( \frac{I_1^3}{I_3} - 27 \right) \frac{m}{P_a} \left( \frac{I_1}{P_a} \right)^{m-1} \dots (40)$$

$$\left\{ \frac{\partial g_p}{\partial \sigma_{ij}} \right\} = - \left( 27 + \eta_2 \left( \frac{P_a}{I_1} \right)^m \right) \begin{bmatrix} \sigma_y \sigma_z \\ \sigma_z \sigma_x \\ -2(\sigma_z \tau_{xy}) \\ \sigma_x \sigma_y - \tau_{xy}^2 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \left( 3I_1^2 + \left( \frac{I_3}{I_1} \right) m \eta_2 \left( \frac{P_a}{I_1} \right)^m \dots (41)$$

$$\frac{\partial f_p}{\partial W_p} = \frac{f_p}{P_a} \left[ \frac{P_a}{qW_p} - bP_a \right] \dots\dots\dots (42)$$

$$\{\sigma\}^T \left\{ \frac{\partial g_p}{\partial \sigma_{ij}} \right\} = 3 \cdot g_p + m \cdot \eta_2 \cdot \left( \frac{P_a}{I_1} \right)^m \cdot I_3 \dots\dots\dots (43)$$

IV. 立方體 三軸壓縮 試驗<sup>18,19)</sup>

1. 試驗目的 및 範圍

본 실험은 연약점토 지반위에 성토나 구조물 등으로 인하여 하중이 재하되었을 때 발생하는

응력 및 변형특성을 Lade모델의 구성방정식에 기초한 유한요소 프로그램을 이용하여 수치해석함으로써 연약지반의 침하나 변위에 대해 사전예측이나 시공관리를 위한 기초연구를 하고, 또한 입방체 삼축시험기를 제작하고 이 시험결과를 사용하여 토질매개변수를 결정하여 Lade 모델의 무안해성점토에 대한 적용성을 확인하고자 하는 일환으로서 다음과 같은 시험과정과 범위에 따른다.

- ① 시료의 조제 및 재성형
- ② 변형해석을 위하여 입방체 삼축시험기를 통한 토질매개변수 결정
- ③ 2차원 모형재하 시험결과와 Lade모델에 의한 지반변형의 수치해석 결과의 비교

2. 試驗裝置의 特性 및 製元

가. 試驗裝置의 特性

일반적인 삼축시험은 원통형 공시체에 의한 축대칭 삼축시험을 일컫는데 이 원통형삼축시험은 원통형 공시체를 사용하므로 작용하는 주응력이 같기 때문에( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) 축대칭상태가 된다. 그러므로 이러한 원통형 삼축시험에 의한 시험결과는 중간주응력( $\sigma_2$ )의 영향을 고려한 3차원적인 지반의 거동을 예측할 수 없게 된다.

최근의 연구결과들에 의하면 중간주응력이 점성토 및 입상토의 응력-변형을 거동과 강도 특성에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.<sup>11,12,13,14)</sup> Lade 등은 서로다른 세 주응력을 각각 제어할 수 있는 입방체삼축시험기(cubical triaxial test apparatus)를 제작하여 입상토의 입방체 시료에 서로 다른 주응력을 작용시키므로써 3차원적인 거동해석을 하였고 점성토에 대해서도 그 구성식의 적용성을 시사한 바 있다. 전남대의 지반공학 실험실은 이 입방체 삼축시험기를 평면변형율조건에서 시험을 할 수 있도록 제작하여 Lade모델의 무안점토에 대한 적용성을 확인하고 원통삼축시험에 의한 매개변수와 평면

변형을조건하에서의 토질매개변수를 결정하여 평면변형률조건에서의 실제 모형재시험을 통한 지반거동을 관측하고 이를 수치해석결과와 비교하여 Lade모델의 실제 점성토 지반에 대한 적용성을 검토하기 위하여 다음과 같은 조건으로 시험을 하였다.

1) 시료내의 비균질한 응력 및 변형률 상태를 유발시키지 않고 파괴할 수 있게 충분한 변형률을 가할 수 있도록 한다.

2) 시료표면에 전단응력을 일으키지 않고 균일한 응력을 줄 수 있도록 한다.

3) 서로 다른 세개의 주응력은 각각의 작용기구(mechanism)에 간섭받지 않고 시료에 가해지도록 한다.

나. 試驗裝置의 製元

3차원 응력상태에서의 흙의 응력 및 변형률, 강도특성 등을 규명하기 위하여 다음과 같은 조건을 만족하도록 제작하였으며 주요제원으로서서는 재하장치, 중간주응력 제어장치, 삼축실, 응력 및 변형률 측정장치 등으로 구성된다.

본 연구에서 사용된 입방체 삼축시험기의 개략도(그림 2) 및 공시체 설치후 시험직전의 사진(Photo.2)을 다음에 나타낸다.

본 연구에서 사용된 입방체 삼축시험기는 모래 및 점토의 3차원적 거동을 해석하기 위한 것으로서 입방체 공시체를 설치한 것을 사진 2에 나타냈으며 이때 공시체의 크기는 76mm \* 76mm \* 76mm로서 그림 2에 보는 바와 같이 상부[cap(load cell)]와 저부(base)사이의 고무막(membrane(두께 0.3 mm))으로 둘러싸여 있으며 또한 고무막과 시료벽 사이에는 배수를 위한 여과지(filter paper)를 부착하였다. 최소주응력  $\sigma_3$ 는 수평방향으로 작용하도록 구속응력(cell pressure)으로 가하며 연직하중은 변형제어 방식으로 재하하고 최대주응력  $\sigma_1$ 은 축차응력(deviator stress), 즉( $\sigma_1 - \sigma_3$ )를 측정하므로서 얻을 수 있다. 중간주응력  $\sigma_2$ 는  $\sigma_3$ 와 직교하게 작용할 수 있도록 별도로 제작된 수평재하장치(horizontal loading system)를 삼축실내에 설

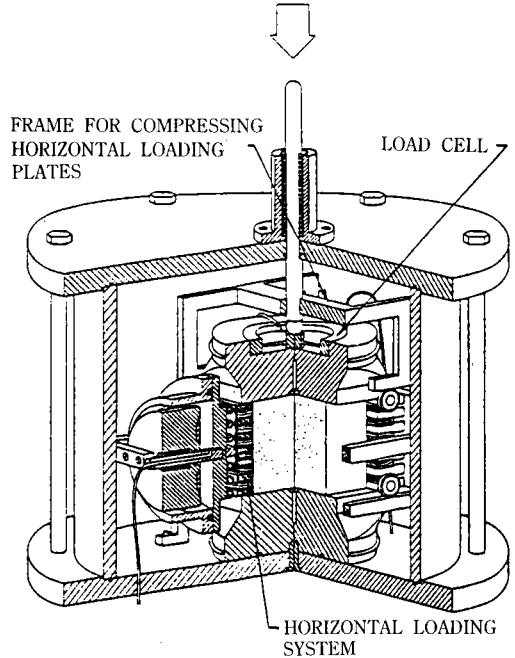


Fig. 2. Cubical triaxial test apparatus

치하여 축차응력을 응력제어방식으로 측정하여 얻을 수 있다.

한편, 간극수압(최대용량 10kg/cm<sup>2</sup>)은 삼축실 밖에 설치한 간극수압 게이지(gage)에 의하여 양면배수로 측정하며 연직방향의 변형률( $\epsilon_1$ )은 재하장치의 피스톤에 부착된 다이얼 게이지에 의해 삼축실 밖에서 측정하고 중간주응력방향의 변형률( $\epsilon_2$ , 최대변위 20mm)은 사진 2에서 보는 바와 같이 수평재하장치에 부착된 포텐셜메타에 의해 측정하고 최소주응력 방향의 변형률(최대변위 35.6mm)은 중간주응력방향의 변형률측정용 포텐셜메타에 직각으로 설치된 또 하나의 포텐셜메타에 의해 측정할 수 있다.

기본적으로는 Lade형의 시험기를 모델로 한 것이지만 중간주응력  $\sigma_2$ 의 작용은 피스톤 타입으로 개량하여 외부에서 수압 혹은 공기압을 이용하여 제어할 수 있도록 하였고  $\epsilon_2$ ,  $\epsilon_3$  등의 축방변위는 포텐셜 메타(수중 측정용 변위계, 사진 2)를 이용하여 측정하고 이들을 바로 읽을 수 있는 외부의 디지털 장치(사진 1)에 연결

한다. 이들은 모두 삼축실내에 정착하도록 고안되어 있다.

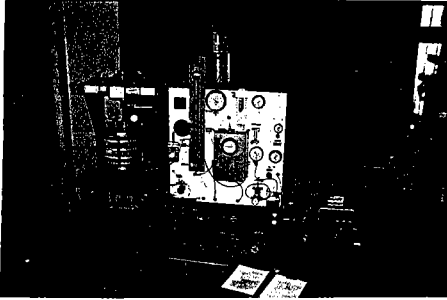


Photo. 1. Cubical triaxial test apparatus

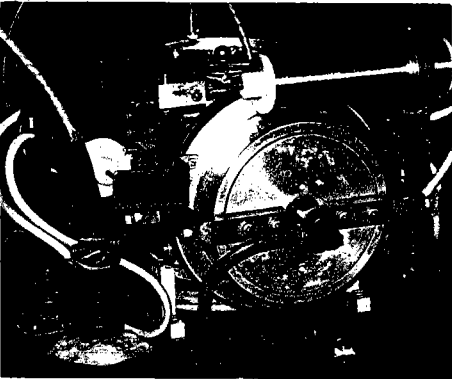


Photo. 2. Clay specimen between cap and base & Horizontal loading system

### 3. 試料의 調製 및 性質

본 연구에 사용된 시료는 영산강 하류(무안군 해제면)에서 채취 반입한 해성 충적토로서 수조에 투입하여 완전히 교반시킨후 120번체를 통과시켜 반죽(slurry)상태에서 2차원 재하시험용 토조에 넣어 0.5kg/cm<sup>2</sup>의 압력으로 정규압밀되고 재성형한 점토로서 약 3개월간 압밀시킨것을 시험에 사용한 것으로서 그 물리적 특성은 표 1과 같다.

### 4. 試驗方法

입방체 점토시료를 삼축실내에 설치하기에 앞서 시료와 상부[cap(loadcell, max.2500kg)] 및 저부(base)사이의 마찰을 없애기 위하여 상부와 저부면에 실리콘 그리스(silicon grease)를 바르고 공시체 면적 크기의 고무막을 부치는데 이는 재하판 즉 로드 셀(load cell)과 공시체 사이에서 전단응력의 발생을 억제시키고 공시체 내에 응력이 불균일하게 분포되는 것을 방지시킨다.

정규압밀, 재성형된 입방체 시료가 다음 절차에 따라 준비된다. 상판과 저판에 마찰이 없이 배수관과 다공질석판에 공기가 제거된 물을 가득 채운다. 시료의 고무막을 진공에 의해 정 위치에 정착시키고 가는 필터를 알맞은 치수로 자른 후 입방체 형상으로 성형된 시료는 하단 위의 중심부에 놓고 상부 뚜껑을 시료위에 올려 놓는다. 젖은 여과지가 상판과 저판의 측면에 다공질을 덮도록 하기 위하여 시료의 측면에 놓는다. 시험때 작용되는 최소 주응력면은 여과지를 가지고 덮으며 고무막들을 장치주위에 정착시키고 고무막을 판과 시료 끝 주위에 달라붙도록 하기 위하여 진공을 천천히 제거한다. 공기가 제거된 물은 이 때 상판과 저판 배수관을 통해서 시료와 고무막 사이의 공간을 가득 채우기 위해서 주입한다. 때때로 이러한 절차는 물병으로부터 추가의 물을 조심스럽게 주입하므로써 진전시킨다. 물로 가득찬 고무막은 상판과 고무막 사이의 위아래의 모든 공기 거품을 제거하기 위해 가볍게 흔든다. 변형율관(strain tube)의 가구에서 물과 공기거품이 새어 나올 수 있도록 하기 위한 출구를 제공하기 위해 상판과 고무막 사이에 놓는다. 눈에 보이는 공기 거품이 멤브레인과 시료 사이의 공간으로부터

Table-1 Physical properties of Moan marine clay

Gs	LL(%)	PL(%)	PI(%)	USCS	Activity	w(%)	q <sub>u</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	γ <sub>i</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
2.68	56	23	33	CH	0.7	43.8	0.21	1.7



제거된 후 멤브레인은 2개의 0자링을 가지고 상부덮개를 봉한다.

공시체를 설치하고 로드셀 및 변위측정장치와 중간주응력 제어장치를 설치한 후 삼축실을 조립하고 삼축실내에  $\sigma_3$ 의 가압에 의하여 물을 채운다음 시료를 충분히 포화시키고( $\sigma_3$ 와 배압을 동시에 작용시킴) 다시  $1\text{kg/cm}^2$ 로 압밀시킨다. 압밀완료후 삼축시험을 할 때는 시료와 고무막사이의 공기를 충분히 제거하기 위하여 시료에 탄산가스( $\text{CO}_2$ )를 하부 배수관으로 유입시켜 시료속의 공기를 상부 배수관을 통해 완전히 빠져 나가게 한 다음 증류수를 하부 배수관으로 유입시켜 시료내에 있는  $\text{CO}_2$ 를 상부 배수관으로 천천히 밀어 올린다. 이 때  $\text{CO}_2$ 가스의 체적변화는 순수한 물의 체적변화와 같기 때문에 상부덮개안과 시료내에 남아있는  $\text{CO}_2$ 가스는 크게 문제되지 않는다. 또한 포화정도는 각 시험 시작전에 간극수압계수 B를 측정하여 점검한다. 이 때 B값은 대부분 0.97~1.0정도 이므로 완전 포화된 것으로 볼 수 있다. 평면 변형율조건에서 시험할 때는 중간주응력제어용 피스톤에 비압축성 오일을 충전시켜 재하시 이 유압으로부터 중간주응력을 측정하고 다시 단면보정을 하여 사용한다.

## V. 모델에 使用될 土質媒介變數 決定

### 1. 概說

II에서 살펴본바와 같이 Lade모델에 이용될 매개변수는 입상도의 경우 14종이며 점성토의 경우는 10종이다. 이를 다시 변형율성분과 관련하여 분류하면 다음과 같다.

- ① 탄성 변형율과 관련된 kur, n 및  $\mu$
- ② 소성 파쇄변형율과 관련된 C 및 P
- ③ 소성 팽창변형율과 관련된 R, S, t,  $\alpha$ ,  $\beta$ , pl 및 l
- ④ 파괴규준과 관련된  $\eta_i$  및 m 등이다.

이들 자료를 이용하여 필산으로 결정할 수 있으나 본 연구에서는 프로그램(그림 3)에 의하여 신속하고 정확하게 구할 수 있도록 하였다.

## 2. Lade모델에 利用될 務安粘土의 土質媒介變數 決定<sup>20,21,22)</sup>

이들 매개변수를 결정하기 위해서는 입방체 삼축시험과 원통형삼축시험 등 실내시험을 수행하였다. 실내 시험결과로 부터 복합 항복면 일 경화(Double Work-Hardening)구성모델에 필요한 토질매개변수를 얻는 과정은 매우 복잡하며, 필산으로 수행할 때는 많은 시간이 소요되며 오차의 유발을 배제할 수 없다. 본 연구에서는 보다 신속하고 신뢰할 수 있도록 회귀분석(regression analysis)에 의하여 토질매개변수 결정을 위한 전산프로그램을 개발하여 사용하였으며 이 프로그램의 흐름도는 그림 3과 같다.

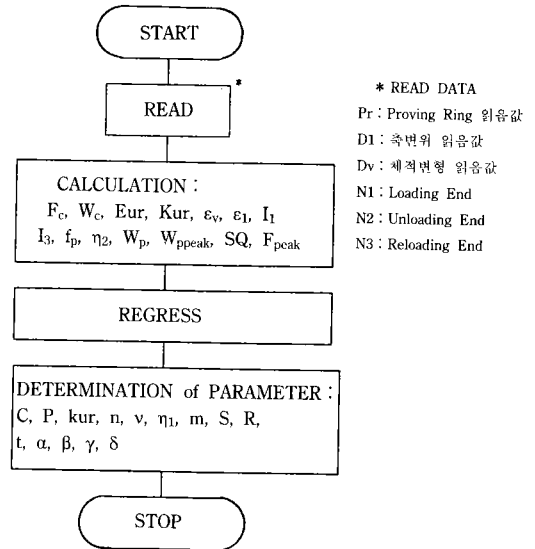


Fig. 3. FLOW CHART for determining soil parameters

3. 立方體 三軸壓縮試驗

토질매개변수를 결정하기 위하여 프로그램에서 필요한 자료는 입방체 삼축압축시험을 통하여 얻었고 등방압밀시험과 비배수삼축압축시험의 결과를 도식화하여 다음의 그림 4와 그림 5에 나타냈다.

이 프로그램의 흐름도는 그림 3과 같으며 무안점토에 대한 토질매개변수를 구한 결과는 표 2과 같다.

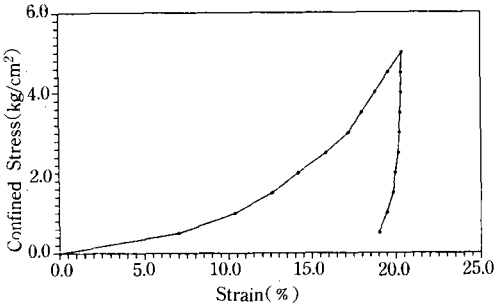
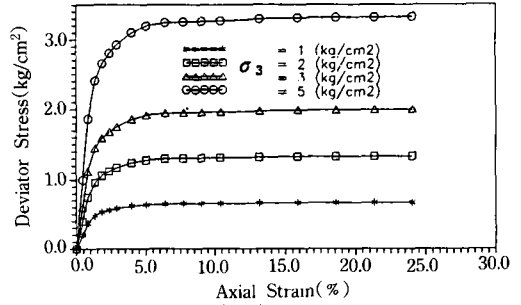
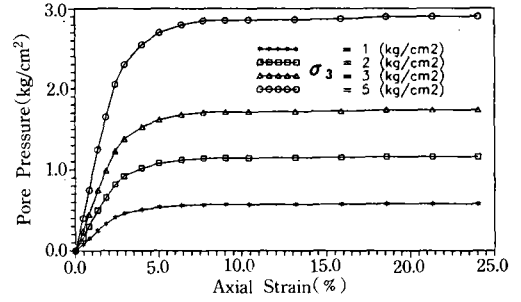


Fig. 4. Cubical isotropic compression tests for Mooan clay



(a) Deviator stress vs axial strain



(b) pore pressure vs axial strain

Fig. 5. Cubical triaxial test for Mooan clay

Table-2 Soil parameters of Mooan clay obtained from cubical triaxial tests

Soil parameters	Value	Strain component	Remarks
Modulus No., kur	293	Elastic	
Exponent, n	0.9		
Poisson's Ratio, v	0.35		
<sup>1</sup> Collapse Modulus, C	—	Plastic	
Collapse Const., P	0.038	Collapse	
Yield Const., $\eta_1$	11		Failure criterion
Yield Exponent, m	0.02		
<sup>2</sup> P1. Potent, Const., R	0.00		
P1. Potent. Const., S	0.75		
P1. Potent, Const., t	-3.12		
Work-Hard. Const., $\alpha$	1.58		
<sup>2</sup> Work-Hard. Const., $\beta$	0.00		
Work-Hard. Const., p1	0.33		
<sup>2</sup> Work-Hard. Exponent, l	1.00		

1: C는 소성파쇄증분에서 사용되지 않음.

2: 정규압밀점토에 대해서는 상수로 결정되어 있음.

4. 圓筒 三軸壓縮試驗

등방압밀시험과 1, 2, 3, 5kg/cm<sup>2</sup>의 비배수 압축시험의 결과값으로 토질매개변수를 결정하고 실험결과를 도식화하여 그림 6과 7에 나타냈다.

이 프로그램의 흐름도는 그림 3과 같으며 무안점토에 대한 토질매개변수를 구한 결과는 표 3과 같다.

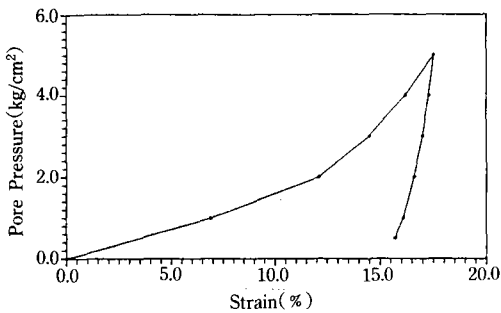
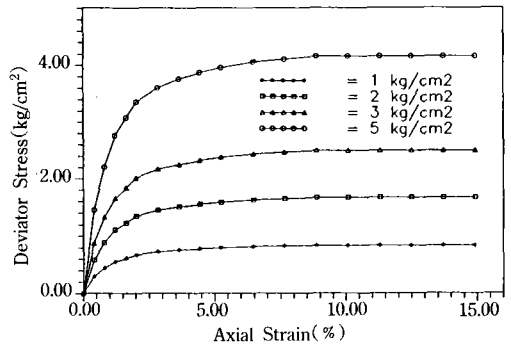
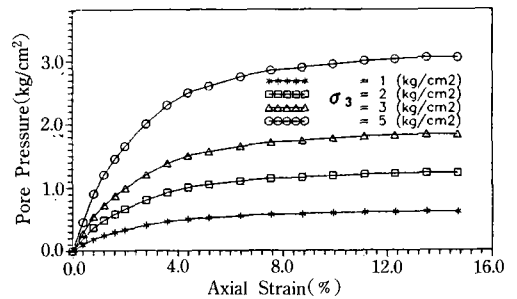


Fig. 6. Cylindrical Isotropic compression tests for Moosan clay



(a) Deviator stress vs axial strain



(b) Pore Pressure vs axial strain

Fig. 7. Cylindrical triaxial test for Moosan clay

Table-3 Soil parameters of Moosan clay obtained from cylindrical triaxial tests

Soil parameters	Value	Strain component	Remarks
Modulus No., kur	265	Elastic	
Exponent, n	1.00		
Poisson's Ratio, v	0.35		
<sup>1</sup> Collapse Modulus, C	-	Plastic	
Collapse Const., P	0.037	Collapse	
Yield Const., η <sub>1</sub>	19	Failure	Failure criterion
Yield Exponent, m	0.01	criterion	
<sup>2</sup> Pl. Potent, Const., R	0.00	Plastic Expansive	
Pl. Potent. Const., S	0.44		
Pl. Potent, Const., t	-0.98		
Work-Hard. Const., α	2.25		
<sup>2</sup> Work-Hard. Const., β	0.00		
Work-Hard. Const., p <sub>1</sub>	0.29		
<sup>2</sup> Work-Hard. Exponent, 1	1.00		

1: C는 소성파쇄증분에서 사용되지 않음.

2: 정규압밀점토에 대해서는 상수로 결정되어 있음.

## VI. 結 論

점토지반의 거동해석을 위하여 선택한 Lade의 복합항복면 구성모델에 필요한 10종의 토질 매개변수를 설명하였다. 이들 매개변수를 결정하기 위해서는 일련의 동방압축시험과 구속응력을 달리한 3~5회의 압밀비배수시험을 해야 한다. 또한 동일 시료를 사용하여 입방체 삼축시험과 통상의 원통삼축압축시험을 수행하고 이들 자료로부터 토질매개변수 결정 프로그램을 개발하고 토질매개변수를 결정하였다.

이들 두시험결과에 의한 해석을 비교한 결과, 첫째, 소성평창변형률과 관련된 매개변수( $t, \alpha$ )가 상당한 차이를 나타내고 있다. 이는 시험기구(experimental mechanism)의 차이와 시험오차 등에 기인한 것으로 판단된다. 어느 시험이 더욱 정확한 매개변수를 생성할 수 있는가를 알아보기 위하여 모형지반이나 실제지반의 수치해석을 통하여 규명해야 할 것이다. 둘째, 입방체시험기의 제작 결과 중간주응력( $\sigma_2$ )방향의 변형을 억제하도록 중간주응력을 조절하여 주요 토질 구조물의 현장조건인 평면변형률을 재현할 수 있음을 확인하였다.

또한 토질매개변수결정에 모호(fuzzy)이론을 도입하여 시험중 발생하는 오차, 시료의 대표성문제 등에 관한 신뢰성해석도 지속적인 연구 과제로 고려할 수 있을 것이다.

이 논문은 1992년도 교육부 지원 한국학술진흥재단의 자유공모(지방대육성) 과제 · 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

## 參 考 文 獻

1. Druker, D. C., Gibson, R. E. & Henkel, D. J. 1957. Soil mechanics and work-hardening theories of plasticity. Trans, Vol. 122 : 333~345.
2. Roscoe, K. H., Schofield, A. N., and Worth, C. P. 1958. On the yielding of soil. Geotechnique, London, England, Vol. 8, No. 1 : 22~52.
3. Roscoe, K. H. and Poorooshasb, H. B. 1963. A theoretical and experimental study of strain in triaxial tests on normally consolidated clays. Geotechnique, London, England, Vol. 13 : 12~38.
4. Roscoe, K. H. & Schofield, A. N. 1963. Mechanical behaviour of an idealized 'wet' clay. Proc. 2nd European conf. soil mech., Wiebaden, Vol. 1 : 47~54.
5. Roscoe, K. H. & Schofield, A. N. and Thrairajah, A. 1963. Yielding of clays in states wetter than critical. geotechnique, Vol. 13 : 210~240.
6. Roscoe, K. H. & Burland, J. B. 1968. On the generalized stress strain behaviour of 'wet' clay. Engineering Plasticity, Cambridge University Press : 535~609.
7. Schofield, A. N. and Wroth, C. P. 1986. Critical state soil mechanics. McGrawHill Book Co. Ltd. London.
8. Ohta, H. & Hata, S. 1971. On the state surface of anisotropically consolidated clays. proc. of JSCE, No.196, DEC. : 117~124.
9. Sekiguchi, H. 1977. Rheological characteristics of clays. proc. 9th ICSMFE, Tokyo. : 289~292.
10. Sekiguchi, H., and Ohta, H. C. 1977. Induced anisotropy and time dependency in clays. Proc. Speciality session 9, 9th, ICSMFE, Tokyo. : 229~238.
11. Kondner, R. L. 1963. Hyperbolic Stress-Strain Response : Cohesive Soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 89, No. SM1. : 115~143.

12. Duncan, M. J., & Chang, C. Y. 1970. Nonlinear analysis of stress and strain in soil. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.96 No. SM5. : 1629~1653.
13. Duncan, J. M., & Clough, R. W. 1971. Finite element analysis of retaining wall behavior. *Journal of the soil mechanics Division, ASCE*, Vol. 97, No. SM12. : 1657~1673.
14. Lade. P. V. & Duncan, J. M. 1975. Elastoplastic stress-strain theory for cohesionless soil. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 101, No. GT10. : 1037~1053.
15. Lade, P. V. 1977. Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surfaces. *Int. J. Solids and Structs*, Pergamon press Inc. New York, Vol.13. : 1019~1035.
16. Lade. P. V. 1978. Prediction of undrained behavior of sand. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. GT6. : 721~735.
17. Lade. P. V. & Nelsion, R. B. 1984. Incrementalization procedure for elasto-plastic constitutive model with multiple, intersecting yield surfaces. *International Journal for numerical and analytical Methods in Geomechanics*. Vol. 8. : 311~123.
18. 강 권수, 이 문수, 정 진섭, 박 병기. 1992. 입방체 삼축압축기의 시험. *대한토목학회 학술발표회 강연집*. : 442~445.
19. 강 권수. 1988. 2차원 모형지반의 변형해석. - 모형재하장치의 시작- 전남대학교대학원.
20. 정 진섭, 김 찬기, 이 문수. 1992. Lade의 복잡항복면 모델에 사용될 토질매개변수의 민감도 해석. *대한 토목학회 논문집 12권 2호*. : 191~204.
21. 정 진섭, 김 찬기, 이 문수. 1991. 실내시험에 의한 Lade의 토질매개 변수 결정. *원광대학교 대학원 논문집, 제 8집 1991*. : 163~181.
22. 이 문수, 이 광동. 1993. 탄소성모델에 의한 점토지반의 수치해석. *한국농공학회 학술발표 초록집*. : 219~223