

# 등방단일경화구성모델에 의한 정규압밀점토의 거동 예측

A Prediction of the Behavior in Normally Consolidated Clay with Application of Isotropic Single-Hardening Constitutive Model

홍 원 표* <sup>1</sup>	Lade, Poul V.* <sup>2</sup>
Hong, Won-Pyo	
남 정 만* <sup>3</sup>	김 태 형* <sup>4</sup>
Nam, Jung-Man	Kim, Tae-Hyung

---

## Abstract

The results of a series of triaxial compression tests on remolded normally consolidated clay are compared with the predictions by the isotropic single-hardening constitutive model, which incorporates eleven parameters. The parameters can be determined from undrained triaxial compression tests on isotropically consolidated specimens of remolded clay. The model with the determined parameters is applied to predict the stress-strain and pore pressure behaviors for undrained triaxial compression tests on anisotropically consolidated specimens. Also the model is utilized to predict the stress-strain and volumetric strain behavior for drained triaxial compression tests on both isotropic and anisotropic specimens.

The predicted response agrees well with the measured behavior for undrained triaxial compression tests on not only isotropically but also anisotropically consolidated specimens. The initial volumetric strain is, however, predicted to be less than the measured value from drained triaxial compression tests, while the predicted volumetric strain close to failure is greater than the measured value. Nevertheless, it may be stated generally that overall acceptable predictions are produced. Therefore, the results of this study indicate that the applicability of the model on prediction of the behavior of normally consolidated clay is achieved sufficiently.

## 요 지

실험실에서 재 성형한 정규압밀점토에 대하여 실시된 일련의 삼축압축시험 거동결과를 등방단일경화구성모델에 의한 예측치와 비교검토한다. 이 모델사용에 필요한 열한개의 계수는 등방

---

\*<sup>1</sup> 정희원, 중앙대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*<sup>2</sup> Professor, Department of Civil Engineering, The Johns Hopkins University

\*<sup>3</sup> 정희원, 제주대학교 해양과학대학 해양토목공학과 조교수

\*<sup>4</sup> Graduate student, The Johns Hopkins University, 전 중앙대학교 토목공학과 대학원생

압밀공시체에 대한 비배수삼축압축시험 결과로부터 간단히 결정된다. 이렇게 결정된 계수를 활용한 이 모델로 이방압밀공시체를 대상으로 한 비배수삼축압축시험시의 응력-변형률 및 간극수압의 거동이 예측된다. 또한 등방압밀공시체 및 이방압밀공시체를 대상으로 실시한 배수삼축압축시험의 응력-변형률 및 체적변형률 거동예측에도 이 모델을 적용하였다.

예측치와 시험치의 비교결과 비배수삼축압축시험의 경우는 등방압밀공시체와 이방압밀공시체 모두에 좋은 일치율을 보이고 있다. 그러나 배수삼축압축시험의 경우는 초기 체적변형률의 예측치가 시험치보다 약간 작게 나타나다가 파괴점에 근접함에 따라서는 예측치가 시험치보다 커지는 경향을 보이고 있다. 그러나 전반적인 응력-변형률거동은 좋은 일치율을 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구결과 이 모델은 정규압밀점토의 거동예측에 적용성이 충분히 있다고 생각된다.

Keyword : Normally Consolidated Clay, Anisotropic Consolidated Specimen, Triaxial Test, Stress-Strain, Pore Pressure, Anisotropy

## 1. 서론

정규압밀점토의 응력-변형률 거동은 점토속의 배수조건, 압밀상태 및 이방성에 주로 영향을 받고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서, 이들 영향의 정도를 조사하기 위하여 여러가지 시험방법에 의한 실내삼축압축시험이 실시되어 오고 있다.

배수조건에 대하여는 현장에서 가하여지는 하중의 재하속도에 따라 배수시험과 비배수시험의 두가지 실내삼축시험이 사용되고 있다. 즉 과잉간극수압의 소멸이 가능한 속도로 재하속도가 완만할 경우는 배수시험을 실시하여 현장의 배수조건을 실험실에서 재현시키는 시험방법을 사용하고 있으며 재하속도가 빨라 과잉간극수압의 소멸이 불가능한 경우는 비배수 시험을 실시하게 된다.

압밀상태에 대하여는 등방압밀과 이방압밀(K<sub>0</sub>압밀이 주로 실시된다)의 두가지로 크게 구분하여 실내삼축시험이 실시되어 오고 있다.

한편, 이방성에 대한 영향을 조사하기 위하여 시료성형방향을 조정하여 실내삼축시험을 실시하고 있다. 최근에 세 주응력을 서로 독립적으로 조절할 수 있는 입방체형삼축시험기를 이용하여 이방성의 영향을 조사할 수도 있다. (홍원표, 남정만, 1994)

필자는 이미 실험실에서 재성형한 EPK

(Edgar Plastic Kaolinite)점토를 사용하여 이러한 영향을 실험적으로 조사한 바 있다.(홍원표, 1987 a, b) 즉, 등방압밀 및 이방압밀로 재성형한 공시체의 비배수삼축압축시험을 실시하여 압밀방법이 정규압밀점토의 거동에 미치는 영향을 검토하였으며(홍원표, 1987a) K<sub>0</sub>압밀이력이 정규압밀점토의 비배수 및 배수 거동 특성 및 강도에 미치는 영향과 이방성이 강도에 미치는 영향을 조사한 바 있다.(홍원표, 1987b)

본 연구는 이와 같은 정규압밀점토의 거동특성을 조사하기 위한 일련의 연구로서 특히 본 논문에서는 응력-변형률 거동을 해석적으로 예측하여 이 예측결과를 정리하여 보고자 한다. 즉 배수조건, 압밀상태 및 이방성의 영향을 조사하기 위하여 실시된 각종 삼축압축시험의 응력-변형률거동, 간극수압거동 및 체적변형률 거동을 등방단일경화구성모델(홍원표등 1994, 1989a, Lade et al. 1987, 1988a,b, 1990)로 예측한 예측결과와 비교분석하여 보고자 한다.

## 2. 삼축압축시험

삼축압축시험에 사용된 시료 및 시험방법에 대한 상세한 설명은 이미 이전의 논문에서 소개된 바 있으므로(홍원표, 1987 a, b) 자세한 내용은 참고문헌을 참조하기로 하고 여기서는 개

략적인 사항만 설명하기로 한다.

본 연구에 사용된 점토는 40%의 실트분과 60%의 점토분으로 구성된 분말상태의 EPK점토를 120%의 함수비(액성한계의 두배) 상태하에서 반죽성형하여 사용하였다. 사용된 EPK 점토의 액성한계와 소성한계는 각각 60 및 30이며 비중은 2.62이고 활성도는 0.5인 비활성점토이다.

반죽된 점토현탁액을 양면배수가 가능한 대형압밀장치에 넣어 2kg/cm<sup>2</sup>의 연직압밀응력으로 일차원압밀을 실시한 후 높이와 직경이 모두 7.1cm인 원통형공시체를 만들어 사용하였다. 이 공시체를 삼축시험기 내에서 유효측압  $\sigma_3$ 가 2kg/cm<sup>2</sup>, 3kg/cm<sup>2</sup> 및 5kg/cm<sup>2</sup>인 상태로 재차 압밀을 실시한 후 일련의 삼축압축시험을 표1과 같이 실시하였다. 실시된 삼축압축시험은 등방압밀공시체와 이방압밀(K<sub>0</sub>)공시체에 대하여 비배수시험 및 배수시험을 13회 실시하였다. 이중 구속측압이 3kg/cm<sup>2</sup>인 등방압밀비배수시험의 경우는 이방성의 영향을 조사하기 위하여 연직으로 시료성형한 경우(ICU-3-V)와 수평으로 시료성형한 경우(ICU-3-H)의 두가지를 실시하였다.

표 1. 삼축압축시험

시험번호		구속측압 $\sigma_3$ (kg/cm <sup>2</sup> )	압밀방법
비배수시험	배수시험		
ICU-2	ICD-2	2.0	등방압밀
ICU-3-V	ICD-3	3.0	
ICU-3-H			
ICU-5	ICD-5	5.0	이방압밀
ACU-2	ACD-2	2.0	
ACU-3	ACD-3	3.0	
ACU-5	ACD-5	5.0	

### 3. 등방단일경화구성모델

본 연구에 적용되는 등방단일경화구성모델은 모래, 점토, 콘크리트, 암 등과 같은 마찰물

질에 적용가능하도록 제안된 흙의 구성모델이다.(Lade et al. 1987, 1988a, b, 1990) 이 모델은 일경화(work hardening)시 하나의 항복면을 가진다는 점과 비관련흐름법칙(non-associated flow rule)을 적용하는 것이 특징이라 할 수 있다.

하중이 작용하여 변형이 발생하면 시간에 의한 영향을 고려하지 않을 경우 이 변형은 탄성변형과 소성변형의 두가지 성분으로 구성되므로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$d\epsilon_v = d\epsilon_v^e + d\epsilon_v^p \quad (1)$$

식(1)에서 탄성거동은 Hook의 법칙을 따르고 소성거동은 파괴규준, 비관련흐름법칙, 항복규준 및 일경화법칙으로 구성된 소성법칙을 따른다.

이 모델에 적용되는 모든 법칙과 규준은 응력불변량  $I_1, I_2, I_3$ 의 향으로 나타내며 11개의 계수를 포함하고 있다. 이 모델에 포함된 11개의 계수는 통상적으로 축대칭공시체를 사용한 비배수삼축압축시험 및 등방압축시험으로부터 간단히 구하여 질 수 있다. 본 모델에 대한 자세한 설명은 참고문헌(Lade et al. 1987, 1988 a, b 1990)을 참조하기로 하고 여기서는 사용된 EPK점토시료의 계수결정에 필요한 사항만 설명하기로 한다.

#### 3.1 탄성거동

우선 포아송비  $\nu$ 는 축변형률  $\epsilon_1$ 에 대한 체적 변형률  $\epsilon_v$ 의 관계인 식(2)로부터 0.38로 결정하였다.

$$\nu = -\frac{\dot{\epsilon}_3}{\dot{\epsilon}_1} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{\dot{\epsilon}_v}{\dot{\epsilon}_1}\right) \quad (2)$$

응력수준에 대응하는 탄성계수의 비선형 변화에 대한 모델로 제시된 식(3)에 의거하여 탄성계수 E를 구할 수 있다.(Lade 1988, Lade and Nelson, 1987)

$$E = MP_o \left[ \left(\frac{I_1}{P_o}\right)^2 + R \frac{J_2'}{P_o^2} \right] \quad (3)$$

여기서  $R=6(1+\nu)/(1-2\nu)$ 이고  $I_1$ 은 제1응

력불변량,  $J_2'$ 은 축차응력의 제2불변량,  $P_e$ 는 응력의 단위로 표시된 대기압이다.

그림1은 식(3)의 계수  $M$ 과  $\lambda$ 를 결정하기 위하여  $[(I_1/P_e)^2 + R J_2'/P_e^2]$ 의 값을 횡축에 삼축압축시험으로부터 구한 탄성계수의 무차원 값인  $E/P_e$ 를 종축에 정하여 도시한 그림이다. 이 그림으로부터 탄성거동 특성을 나타내는 계수  $M$ 과  $\lambda$ 를 각각 71.4와 0.515로 결정하였다.

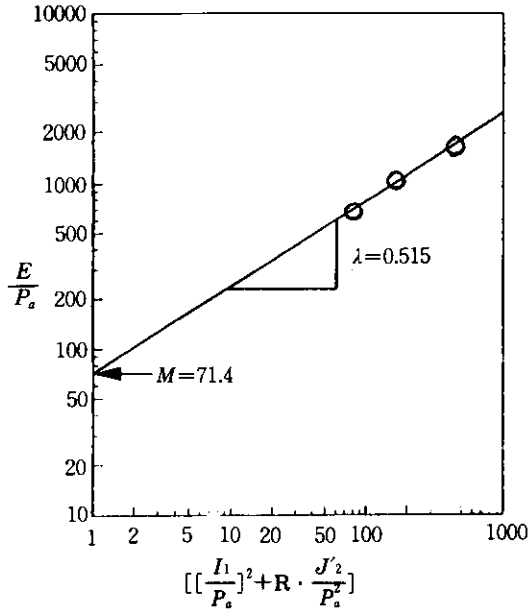


Fig. 1 Determination of  $M$  and  $\lambda$  for Young's modulus

### 3.2 파괴기준

식(4)로 제시된 파괴기준에 포함된 계수  $\eta_1$ 과  $m$ 은 파괴시의  $(I_1^3/I_3 - 27)$ 과  $(P_e/I_1)$ 의 관계를 양면대수상에 도시함으로써 구할 수 있다. 그림2에 정리된 시험치를 회귀분석한 직선의 절편과 기울기로서  $\eta_1$ 과  $m$ 을 각각 27.1과 0.42로 결정하였다.(홍원표, 1988 a, b)

$$\left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27\right) \left(\frac{I_1}{P_e}\right)^m = \eta_1 \quad (4)$$

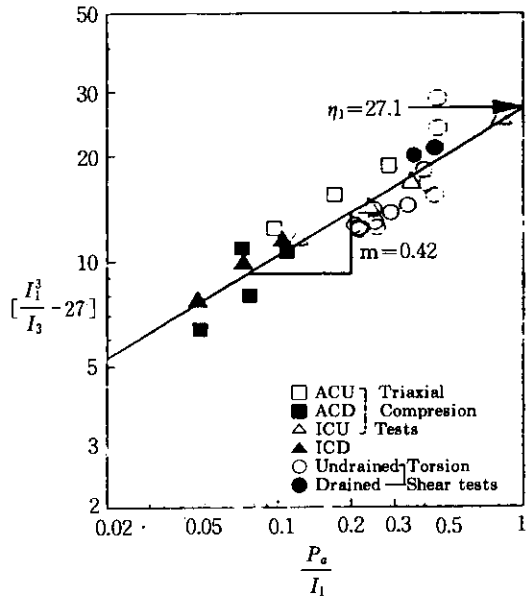


Fig. 2 Determination of  $\eta_1$  and  $m$  for failure criterion

### 3.3 소성포텐셜 함수

소성포텐셜함수  $g_p$ 는 식(5)와 같다.(Kim and Lade, 1988)

$$g_p = \left[ \Psi_1 \cdot \frac{I_1^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I_2} + \Psi_2 \right] \cdot \left[ \frac{I_1}{P_e} \right]^m \quad (5)$$

여기서 계수  $\Psi_1$ 은 식(6)과 같이 파괴기준으로부터 구한  $m$ 을 이용하여 구할 수 있으며  $\Psi_2$ 와  $\mu$ 는 삼축압축시험 결과를 식(7)에 의거 정리하여 구할 수 있다.(Kim and Lade, 1988)

$$\Psi_1 = 0.00155 \cdot m^{-1.27} \quad (6)$$

$$\xi_y = \frac{1}{\mu} \xi_x - \Psi_2 \quad (7)$$

여기서  $\xi_x$ 와  $\xi_y$ 는 식(8) 및 식(9)와 같다.

$$\xi_x = \frac{1}{1 + \nu_p} \times$$

$$\left[ \frac{I_1^3}{I_2^2} (\sigma_1 + \sigma_3 + 2\nu_p \sigma_3) + \Psi_1 \frac{I_1^4}{I_3^2} (\sigma_1 \sigma_3 + \nu_p \sigma_3^2) \right] - 3\Psi_1 \frac{I_1^3}{I_3} + 2 \frac{I_1^2}{I^2} \quad (8)$$

$$\xi_y = \Psi_1 \cdot \frac{I_1^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I^2} \quad (9)$$

여기서  $v_p = -d\xi_3/d\xi_1$ 이다.

$\Psi_1$ 은 식(6)에서 0.00466으로 결정되었고  $\Psi_2$ 와  $\mu$ 는  $\xi_x$ 와  $\xi_y$ 의 관계를 도시한 그림3에서 각각 -0.3124와 2.93으로 결정되었다.

### 3.4 항복함수와 일경화법칙

정수압축상에서 일경화법칙은 식(10)과 같이 표현된다.(Lade and Kim, 1988a)

$$W_p = C \cdot P_a \cdot \left[ \frac{I_1}{P_a} \right]^p \quad (10)$$

여기서 계수  $C$ 와  $P$ 는 그림4와 같이 등방압 밀시험결과를 이용하여 구하여 질 수 있다. 즉 제1응력불변량 ( $I_1/P_a$ )에 대한 소성일( $W_p/P_a$ )의 관계로부터  $C$ 는 0.013  $P$ 는 0.12로 구하여진다.

한편, 항복함수는 식(11)과 같으며  $h$ 와  $q$ 의 두개의 계수를 포함하고 있다.(Lade and Kim, 1988a)

$$f'_p = \left[ \Psi_1 \cdot \frac{I_1^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I_2} \right] \cdot \left[ \frac{I_1}{P_a} \right]^h \cdot e^q \quad (11)$$

먼저  $h$ 는 상수이며 동일한 항복면 상에서 소성일은 일정하다는 점에 의거하여 결정되어 질 수 있다. 따라서, 정수압축상의 A점과 파괴면상의 B점의 두응력점에 대하여  $h$ 는 식(12)와 같이 유도된다. 삼축압축시험결과로부터  $h$ 의 평균값으로 1.01을 얻었다.

$$h = \frac{\left[ \Psi_1 \cdot \frac{I_{1B}^3}{I_{3B}} - \frac{I_{1B}^2}{I_{2B}} \right] \cdot e}{\ln \frac{I_{1A}}{I_{1B}}} \quad (12)$$

한편, 식(11)의 지수  $q$ 는 응력수준  $S(=f_p/\eta_1)$ 와 식(13)과 같은 쌍곡선함수로 표현된다.

$$q = \frac{\alpha S}{1 - (1 - \alpha)S} \quad (13)$$

여기서  $\alpha$ 는 상수이며  $S=0.8$ 의 응력수준에서의  $\alpha$ 값이 가장 바람직하며(Lade and Kim, 1988a) 식(14)와 같이 쓸 수 있다.

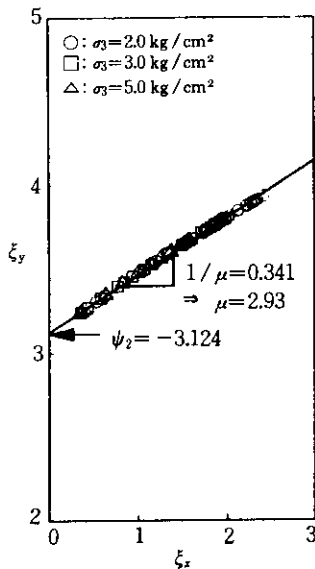


Fig. 3 Determination of  $\psi_2$  and  $\mu$  for plastic potential function

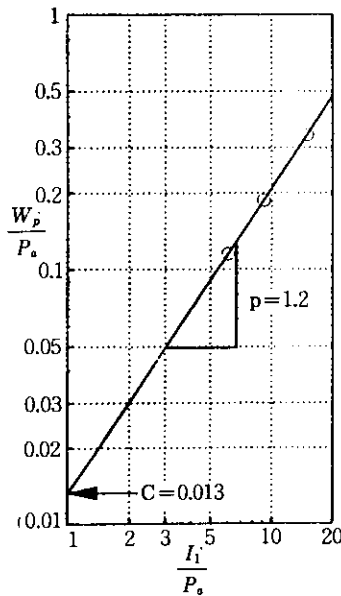


Fig. 4 Determination of  $C$  and  $p$  for work-hardening relation

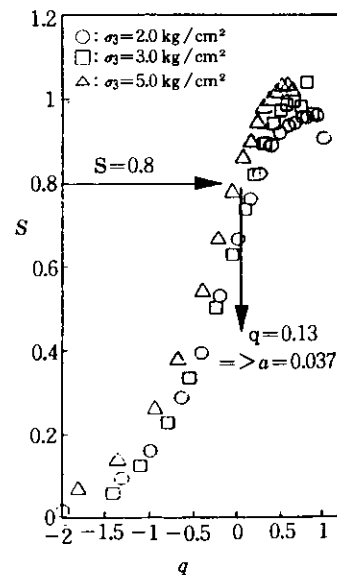


Fig. 5 Determination of  $a$  for yield criterion

$$\alpha = \frac{1-S}{S} \cdot \frac{q_s}{1-q_s} = \frac{1}{4} \cdot \frac{q_{(0)}}{1-q_{(0)}} \quad (14)$$

따라서  $\alpha$ 는 그림 5에서 구한  $q=0.13$ 을 식 (14)에 대입하여 0.037로 결정하였다.

### 3.5 사용시료의 계수정리

이상에서와 같이 EPK점토의 등방압축시험

표 2. EPK점토에 대한 등방단일경화구성모델의 계수

탄성거동			파괴규준		소성포텐셜함수		항복규준		경화함수	
M	$\lambda$	$\nu$	m	$\eta$	$\Psi_2$	$\mu$	h	$\alpha$	C	p
71.4	0.515	0.38	0.42	27.1	-3.124	2.93	1.01	0.037	0.013	1.20

## 4. 해석치와 시험치의 비교

### 4.1 비배수시험

#### 4.1.1 등방압밀비배수시험(ICU Test)

그림6은 등방압밀공시체에 실시한 비배수삼축압축시험 결과를 등방단일경화구성모델에 의한 예측치와 비교한 결과이다. 즉 표1의 ICU-2, ICU-3-V 및 ICU-5의 시험결과이며 사용된 등방압밀응력은 각각  $2\text{ kg/cm}^2$ ,  $3\text{ kg/cm}^2$  및  $5\text{ kg/cm}^2$ 였다. 축차응력( $\sigma_1 - \sigma_3$ ), 유효응력비  $\sigma'_1/\sigma'_3$  및 간극수압  $u$ 가 축변형률

과 압밀비배수삼축압축시험에서 구한 11개의 계수를 정리하면 표2와 같다. 이들 계수는 모두 무차원의 값이며 EPK 점토가 받는 여러가지 하중조건에서 발생할 수 있는 변형률을 산정하는데 사용될 수 있다.

$\epsilon_1$ 에 대한 관계로 도시되어 있으며, 그림중 검은점(원, 사각형 및 삼각형)은 시험으로 얻은 거동을 표시하고 선(직선, 파선 및 1점쇄선)은 모델에 의한 예측치로 표시하고 있다.

그림6에서 보는바와 같이 삼축압축시험에 의한 응력-변형률거동 및 간극수압 거동은 모델에 의한 예측치와 아주 좋은 일치를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 표2의 모델에 적용된 계수가 대부분 등방압밀비배수삼축압축시험결과로 결정되었기 때문에 당연한 결과일 것이다.

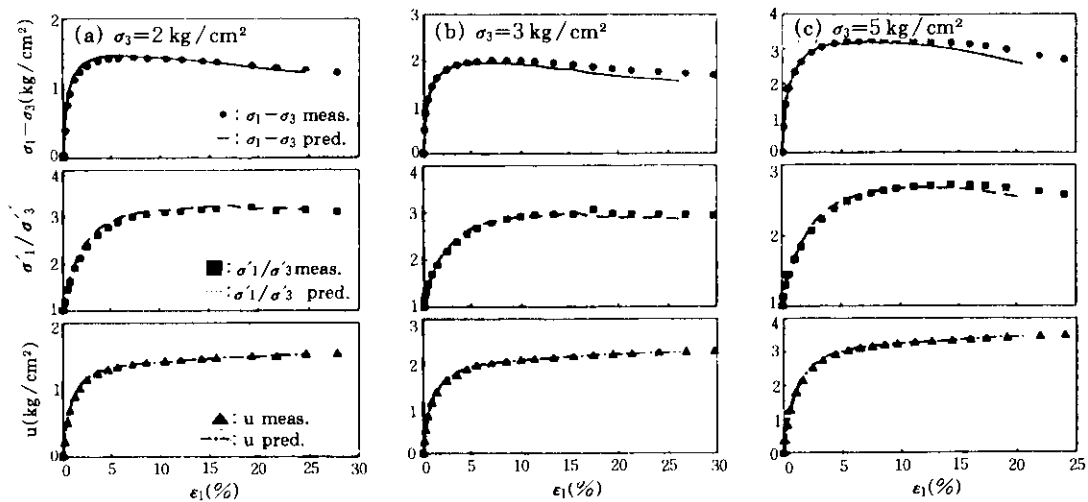


Fig. 6 Comparison of measured and predicted behavior for undrained triaxial compression tests on isotropically consolidated specimens

#### 4.1.2 이방압밀비배수시험(ACU Test)

그림7은  $K_0$ 압밀공시체에 실시한 비배수삼축 압축시험결과를 등방단일경화구성모델에 의한 예측치와 비교한 결과이다. 즉 표1의 ACU-2, ACU-3 및 ACU-5의 시험결과이며 사용된 구속측압은 각각  $2\text{kg/cm}^2$ ,  $3\text{kg/cm}^2$  및  $5\text{kg/cm}^2$ 였다. 삼축압축시험에 의한 응력-변형률 거동 및 간극수압거동은 등방압밀공시체의 시험과 같이 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

우선 축차응력( $\sigma_1 - \sigma_3$ )은 최대축차응력 이전까지는 실측치거동이 예측치와 잘 일치하나 그 이후에는 예측치가 약간 낮게 나타나고 있다. 유효주응력비의 경우도 최대치부근에서 예측치가 다소 적게 나오고 있다. 그러나 간극수압 거동은 예측치와 시험치가 아주 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 모델은  $K_0$ 압밀과 같은 이방압밀로 형성된 공시체의 비배수거동에측에도 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

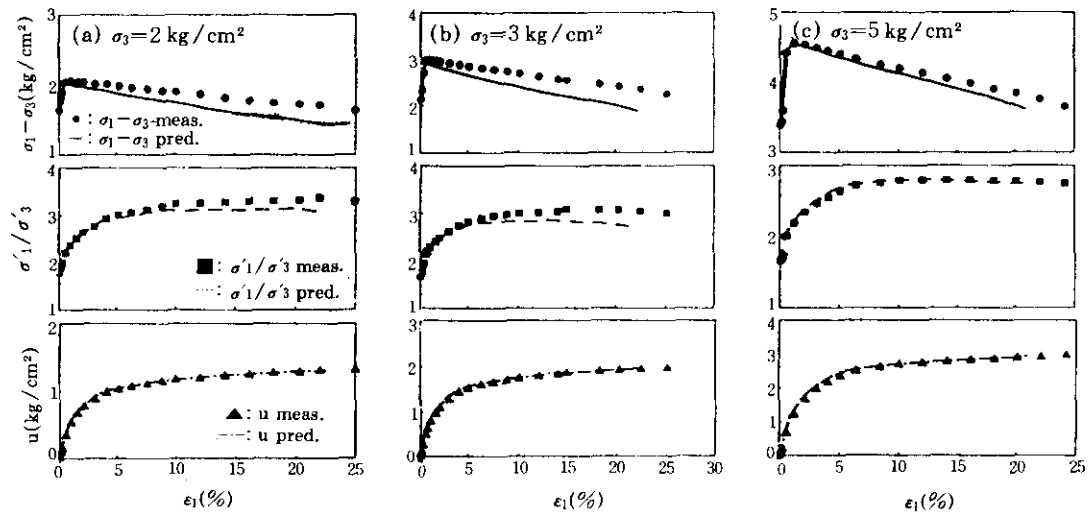


Fig. 7 Comparison of measured and predicted behavior for undrained triaxial compression tests on anisotropically consolidated specimens

## 4.2 배수시험

### 4.2.1 등방압밀배수시험(ICD Test)

그림8은 등방압밀공시체에 실시한 배수삼축 압축시험결과를 등방단일경화구성모델에 의한 예측치와 비교한 결과이다. 즉 표1의 ICD-2, ICD-3 및 ICD-5의 시험결과이며 사용된 등방압밀응력은 그림6의 경우와 동일하다. 축차응력( $\sigma_1 - \sigma_3$ ), 유효응력비  $\sigma'_1 / \sigma'_3$  및 체적변형률  $\epsilon_v$ 가 축변형률  $\epsilon_1$ 과의 관계로 도시되어 있

다.

그림8의 결과에 의하면 응력-변형률 거동의 예측치는 시험결과와 약간의 차이를 보이는 경우도 있으나 실용적인 면에서는 거의 지장이 없는 정도로 잘 일치하고 있다. 그러나 체적변형률의 예측치는 시험거동에 비하여 초기체적변형률이 적게 산정되다가 파괴점에 근접하면서 체적변형률이 커지는 경향을 보이고 있다.

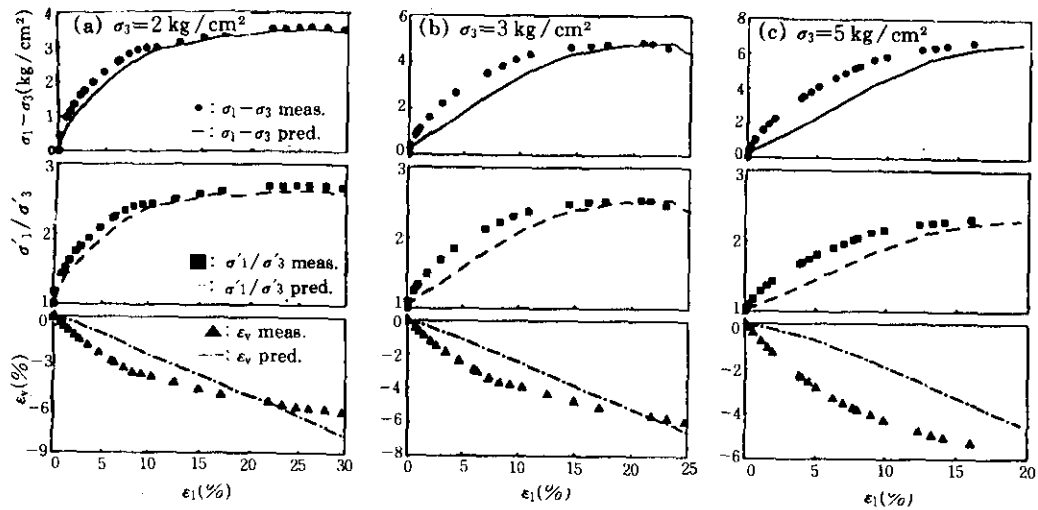


Fig. 8 Comparison of measured and predicted behavior for undrained triaxial compression tests on isotropically consolidated specimens

#### 4.2.2 이방압밀배수시험(ACD Test)

그림9는  $K_0$  압밀공시체에 실시한 배수삼축압축시험결과를 등방단일경화구성모델에 의한 예측치와 비교한 결과이다. 즉 표1의 ACD-2, ACD-3 및 ACD-5의 시험결과이며 사용된 구속수압은 그림7의 경우와 동일하다.

이 결과에 의하면 응력-변형률거동의 예측

치는 시험결과와 잘 일치하고 있다. 그러나 체적변형률의 경우는 그림8의 등방압밀공시체에 대한 배수시험과 동일한 경향을 보이고 있다. 즉, 모델에 의한 예측치는 시험거동에 비하여 초기체적변형률이 적게 산정되다가 파괴점에 근접하면서 체적변형률이 커지는 경향을 보이고 있다.

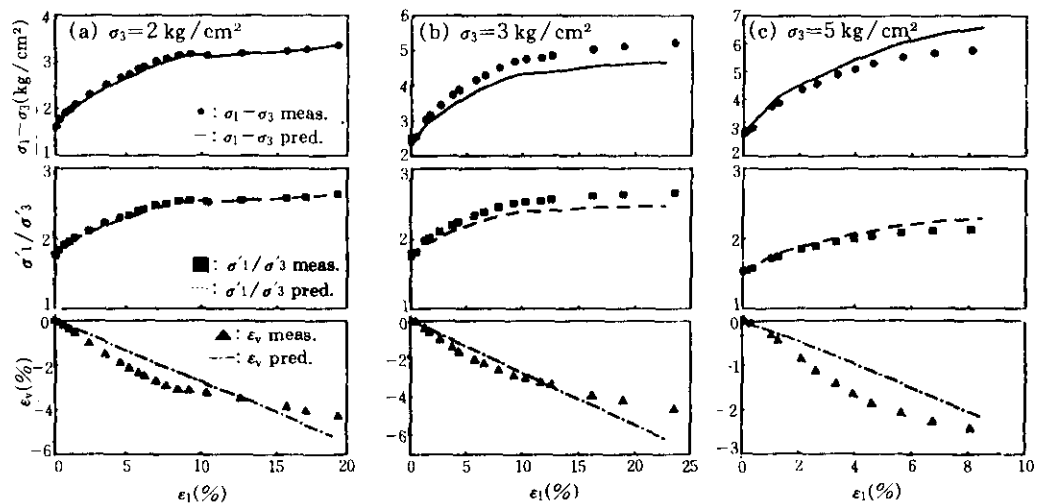


Fig. 9 Comparison of measured and predicted behavior for drained triaxial compression tests on anisotropically consolidated specimens



### 4.3 등방단일경화구성모델의 적용성

그림6에서 그림9까지의 검토결과 등방단일경화구성모델은 삼축시험시 배수조건이나 압밀방법이 다른 여러경우의 응력-변형률거동, 간극수압 혹은 체적변형률거동을 예측한 경우에 적용성이 양호한 것으로 생각된다. 다만 배수시험의 경우 이 모델에 의한 초기체적변형률이 시험치보다 적게 산정되다가 파괴점에 근접하면서 시험치보다 커지는 경향이 있어 체적변형률 거동예측에는 다소 개선의 점이 있다고 본다.

### 5. 이방성영향

그림10은 흙의 이방성이 거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여  $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 일차원 압밀한 시료에서 연직공시체(ICU-3-V)와 수평공시체(ICU-3-H)를 만들어  $3\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 등방압밀을 실시한 후 비배수삼축압축시험을 실시한 결과이다. 환원과 검은원은 각각 수평공시체 및 연직공시체에 대한 시험치를 나타내고 실선과 이점쇄선은 각각의 경우의 예측치를 나타내고 있다.

압밀응력에 대한 비배수강도증가율  $c_u/\sigma_{1c}$ 는 연직공시체와 수평공시체가 각각 0.32와 0.33으로 별차이가 없다. 결국 본 점토공시체의 비배수강도에는 이방성이 두드러지게 나타나지 않음을 알 수 있다. 이는 초기에는 일차원압밀이력의 영향으로 이방성을 지니고 있었으나 일차원압밀이력보다 큰 압력으로 등방압밀을 하는 과정에서 공시체가 이방성을 많이 상실하고 등방성을 가지게 되었다고 생각된다.

그림10에서도 볼 수 있는 바와 같이 수평공시체와 연직공시체에 대하여 각각 실선과 이점쇄선으로 나타낸 모델에 의한 예측치도 실측치와 동일한 경향을 보이고 있다. 예측치에서 시험치보다 더 이방성의 영향이 나타나고 있지 않다.

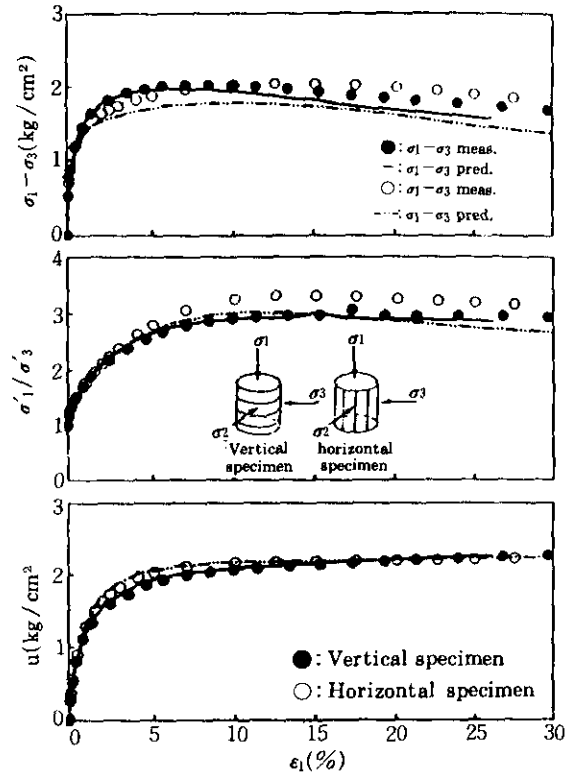


Fig. 10 Comparison of measured and predicted behavior for undrained triaxial compression tests for vertical and horizontal specimens

### 6. 결론

EPK점토로 재성형한 정규압밀점토에 대한 등방압밀비배수삼축압축시험결과를 이용하여 등방단일경화구성모델에 필요한 열한개의 계수를 결정하였다. 이 계수를 활용하여 압밀방법 및 배수조건이 다른 여러가지 삼축압축시험의 응력-변형률거동, 간극수압거동 혹은 체적변형률거동을 이 모델로 예측하여 보았다. 이 예측결과를 시험거동과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 이 모델은 삼축시험시 배수조건이나 압밀방법이 다른 여러 경우의 흙의 거동을 예측할 경우 적용성이 양호하다.
- (2) 배수시험의 경우 이 모델에 의한 초기체

적변형률이 시험치보다 작게 산정되나 파괴점에 근접하면서 시험치보다 커지는 경향이 있다. 따라서 본 모델로 점토의 체적변형률을 예측하기 위하여는 모델을 다소 개선할 필요가 있다.

- (3) 이 모델에 의한 예측치에는 공시체의 이방성영향이 시험치보다 더 적게 나타난다.

### 감사의 말씀

본 연구는 한국과학재단(KOSEF)과 미국과학재단(NSF)에서 공동지원하는 1993년도 한미국제공동연구의 연구결과임을 밝히며 상기 재단에 사의를 표하는 바이다.

또한 본 논문의 정리에 수고를 하여준 중앙대학교 대학원의 이재호군에게도 감사를 드리는 바이다.

### 참고 문헌

1. 洪元杓(1987a). "正規壓密粘土의 非排水剪斷強度에 미치는 壓密方法의 影響", 大韓土質工學會誌, 第3卷 第2號, pp.41~53.
2. 洪元杓(1987b). "正規壓密粘土의 強度에 미치는  $K_0$ -壓密效果", 大韓土木學會論文集, 第7卷 第3號, pp.183~193.
3. 洪元杓(1988a). "비틀림剪斷試驗에 의한  $K_0$ -壓密粘土의 舉動", 大韓土木學會論文集, 第8卷 第1號, pp.151~157.
4. 洪元杓(1988b). " $K_0$ -壓密粘土의 主應力回轉效果", 大韓土木學會論文集, 第8卷 第1號, pp.159~164.
5. 홍원표, 남정만(1994). "등방단일경화구성모델에 의한 모래의 3차원거동 예측". 한국지반공학학회지, 제10권, 제1호. pp.103~116.

6. 홍원표, 남정만, 김태형, 이재호(1994a). "등방단일경화구성모델에 의한  $K_0$ -압밀점토의 거동예측". 대한토목학회 학술발표회 논문집(I), pp.475~478.
7. Hong, W.P. and Lade, P.V.(1989). "Elasto-Plastic Behavior of  $K_0$ -Consolidated Clay in Torsion Shear Tests "Soils and Foundations, Vol. 29, No.2, pp.127~140.
8. Hong, W.P. and Lade, P.V.(1989a). "Strain Incremental and Stress Directions in Torsion shear Tests." Journal of Geotechnical Engrg. ASCE, Vol. 115, No.10, pp.1388~1401.
9. Kim, M.K., and Lade, P.V.(1988). "Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials I.: Plastic Potential Function." Computers and Geotechnics, Vol.5., pp.307~324.
10. Lade, P.V.(1988). "Model and parameters for the elastic behavior of soils," Proc. 6th Int. Conf. Numerical Methods Geomechanics, pp.359~364 Innsbruck, Austria.
11. Lade, P.V.(1990). "Single-Hardening Model with Application to NC Clay", Journal of Geotechnical Engrg., ASCE, Vol.116, No.3, March, pp.394~414.
12. Lade, P.V. and Kim, M.K.(1988a). "Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials, II, Yield Criterion and Plastic Work Contours", Computers and Geotechnics, Vol.6, p.13~29.
13. Lade, P.V. and Kim, M.K.(1988b). "Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials III.: Comparisons with Experimental Data." Computers and Geotechnics, Vol.6, pp.31~47.
14. Lade, P.V. and Nelson, R.B.(1987). "Modeling the elastic behavior of granular materials" Int. J. Number. Anal. Methods Geomech. Vol. 11, pp.521~541.

(접수일자 1995. 4. 10)