

# 이방성 항복경계면 이론을 이용한 점성토의 구성모델

A Constitutive Model using Anisotropic Bounding  
Surface Theory for Cohesive Soils

김 범 상\*<sup>1</sup>  
Kim, Bum - Sang  
정 충 기\*<sup>2</sup>  
Chung, Choong - Ki

## Abstract

In this study, a constitutive model which can describe the anisotropic and plastic behaviors of natural cohesive soils, was developed based on anisotropic bounding surface theory. The model was formulated by the concepts of the improved anisotropic bounding surface function, nonassociated flow rule with new plastic potential function, anisotropic hardening rule, and new mapping rule governing the plastic behavior inside bounding surface. Comparing with the results of  $K_0$  consolidation and triaxial shearing tests, the predictions by the proposed model agree quite well with real soil responses.

## 요 지

본 연구에서는 이방성 항복경계면 이론을 토대로 하여 자연상태의 점성토가 갖는 이방적 특성과 소성적 거동을 고려한 구성모델을 개발하였다. 이 모델은 개선된 이방항복경계면 함수와 새로운 소성포텐셜 함수를 이용한 비관련 유동법칙, 이방경화법칙과 항복면 내의 소성 거동 예측을 위한 새로운 투영법칙 등의 개념을 통하여 개발하였다. 개발된 모델의 검증에 위하여 불교란 점성토에 대한  $K_0$  압밀과 삼축전단 시험결과들을 비교분석한 결과 본 모델은 점성토의 거동을 잘 예측하는 것으로 나타났다.

Keywords : Constitutive Model, Bounding Surface,  $K_0$  Consolidation

## 1. 서 론

자연상태의 흙은 횡방향 변형이 발생하지

않는 1차원 압축상태에서 퇴적하고, 재하되면서 형성되기 때문에 그에 따른 입자배열 상태와 현장 응력조건( $K_0$ 상태)에 의한 이방적 특

\*<sup>1</sup> 정희원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 박사수료

\*<sup>2</sup> 정희원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 조교수

성을 갖게 된다. 따라서 흙의 거동을 예측하기 위한 지반구성모델은 이러한 이방적 특성을 정확하게 묘사할 수 있어야 한다. 현재 점성토의 거동 예측을 위하여 많이 사용되는 Modified Cam Clay(MCC) 모델(Roscoe and Burland, 1968)은 실험실에서 등방압밀된 시험결과를 토대로 모델의 지나친 복잡성을 피하기 위하여 이러한 흙의 이방성을 간과하여 제시되었다.

근래에 들어서 흙이 갖는 이방적 특성을 고려할 수 있는 모델들이 개발되고 있으며 (Atkinson et al., 1987, Dafalias, 1987, Hashash, 1992), 그 중에 하나로 Banerjee와 You-sif(1986)이 제안한 Anisotropic Bounding Surface Model(ABSM)이 있다. ABSM은 항복경계면 소성론을 토대로 한 이방성 항복경계면과 이방경화법칙 그리고 관련 유동법칙에 의해 개발된 모델로서 자연상태 흙의 이방성을 나타낼 수 있을 뿐만 아니라 항복 이전 상태에서의 비탄성적 거동을 묘사할 수 있다. 따라서 흙의 이방적 특성 뿐만 아니라 과압밀 점성토에서 나타나는 항복 이전의 소성 거동을 탄성 거동과 함께 나타냄으로써 흙의 실제적인 거동을 묘사할 수 있게 되었다.

그러나, ABSM은 제시된 항복경계면에 관련 유동 법칙을 적용하기 때문에 부분적으로 부적절한 항복경계면의 형상에서 기인하는 항복 이후 거동예측의 부정확성과 항복경계면 내에서 소성변형의 양을 과도하게 평가하여 파괴가 항복경계면 내부에서도 발생한다는 문제점이 있다. 본 연구에서는 항복경계면 형상의 수정과 비관련 유동 법칙의 적용 그리고 항복경계면 내부의 소성 거동 예측방법의 수정을 통하여 ABSM을 보완한 점성토의 이방 구성모델을 제시하고자 한다.

제시된 모델의 거동 예측의 신뢰성을 분석하기 위하여, 불교란 시카고 점성토를 이용하여 수행된  $K_0$  압밀시험결과 그리고 다양한 과압밀비에 대한  $K_0$  압밀 비배수 삼축압축 및 신장 시험결과(Chung, 1991)를 제시된 모델에 의한

예측 거동 그리고 ABSM, MCC 모델에 의한 예측 거동과 비교 분석하였다.

## 2. 제안 구성 모델

제안된 구성 모델은 ABSM의 항복경계면 함수를 수정하였으며, Dafalias(1987)가 제안한 소성포텐셜 함수를 이용하여 비관련 유동 법칙을 적용하고, 이방성 경화 법칙을 적용한다. 자세한 내용은 아래에서 구체적으로 설명하고자 한다.

### 2.1 항복경계면 함수

등방압밀된 흙과  $K_0$  압밀된 흙의 초기 항복면의 차이가 Tavenas와 Leroueil(1977) 등에 의하여 논의되었다. 기본적인 차이는  $K_0$  압밀 상태에 대한 항복면은 응력공간내의 정수압축보다는  $K_0$  압밀선에 대하여 대칭적인 형상이라는 것이다. 시카고 점성토에 대한 항복경계면의 형상이 그림 1에 나와있다. 항복경계면은 정규압밀 상태에 대해서는 일반적인 소성론에서의 항복면과 같은 의미를 가지고 있으며, 가정된 항복경계면의 형상은  $K_0$  압밀선의 방향을 따른 비틀린 타원체이고 그 크기는 최대 압밀응력의 크기에 따라 결정된다.

본 논문에서 모든 응력은 유효응력을 의미하며, 제안모델의 항복경계면 식을 삼축응력 상태로 나타내면 다음과 같다.

압축축 :

$$f_c = \frac{1}{(A_1 M)^2} \left[ \left( q - \frac{2}{3} \eta_0 p \right)^2 - \frac{1}{9} \eta_0^2 p_0 p \right] - p p_0 + p^2 = 0 \quad (1)$$

신장축 :

$$f_t = \frac{1}{(A_1 M)^2} \left[ \left( q - \frac{2}{3} \eta_0 p \right)^2 - \frac{1}{9} \eta_0^2 p_0 p \right] - p p_0 + p^2 = 0 \quad (2)$$

$$p : \text{평균 주응력} = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_h}{3}$$

- $q$  : 축차응력 =  $\sigma_1 - \sigma_3$
- $A_c$  : 항복경계면의 압축축의 크기에 관계되는 변수
- $A_t$  : 항복경계면의 인장축의 크기에 관계되는 변수
- $p_0$  : 경화변수, 항복경계면의 정점에서의  $p$
- $q_0$  : 경화변수, 항복경계면의 정점에서의  $q$
- $M$  : 한계상태응력비
- $\eta_0$  :  $K_0$  압밀선의 기울기 =  $q_0/p_0$

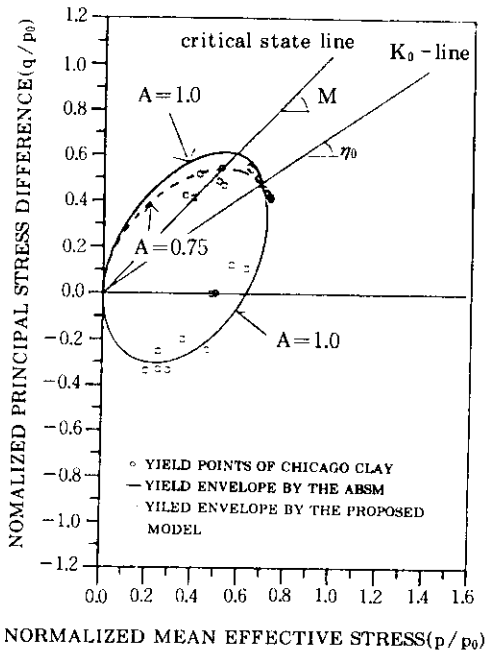


그림 1. 시카고 점성토의 항복면

제안된 항복경계면의 표현식은 Banerjee와 Yousif의 원래의 식에 새로운 변수  $A_c, A_t$ 를 첨가하여 수정된 것이다. 항복경계면의 크기에 관계되는 이 변수들을 보정하여 실제 점성토의 거동 특성에 알맞도록 항복경계면을 유연하게 대응시킬 수 있다.  $K_0$  압밀선과 항복경계면 사이의 폭과 관계되는 이 변수들은 삼축시험을 통하여 함축적으로 결정된다.  $A_c = A_t = 1$  일 경우, 가정된 식은 ABSM의 항복함수와 일치한다. 시카고 점성토에 대하여 이 변수 값들은 각각 0.75, 1.0으로 결정되었다.

## 2.2 소성포텐셜 함수

소성포텐셜 함수는 소성변형을 증분 벡터의 방향을 결정하며, 소성체적변형을 증분과 소성전단변형을 증분은 일반적인 소성론에 따라서 다음과 같이 표시된다.

$$d\epsilon_v^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial p}$$

$$d\epsilon_s^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial q} \quad (3)$$

여기서  $d\lambda$ 는 비례상수이다.

제안모델은 이방성 모델을 위해 Dafalias (1987)가 소성 에너지 소산율에 대한 가정으로부터 유도한 식 (4)와 같은 이론적인 함수를 소성포텐셜로 사용하였으며 따라서 비관련 유동 법칙을 적용한다. 이 함수는 자연상태 점성토의 항복면을 나타내기 위해 사용하기에는 무리가 있으나 한계상태 파괴응력비 조건을 만족시키며, Davies(1993)의 연구에서는 자신이 제안한 항복면에 대하여 이 함수를 소성포텐셜 함수로 이용하였다. 변수  $\beta$ 는 소성전단변형률 증분이 0이 되는 응력비로서 본 연구에서는 변수에 관한 연구를 통해  $2/3 \eta_0$ 의 값을 사용하였다(그림 2).

$$g = p^2 - pp_c + \frac{1}{M^2} (q^2 - 2\beta pq + \beta^2 pp_c) = 0 \quad (4)$$

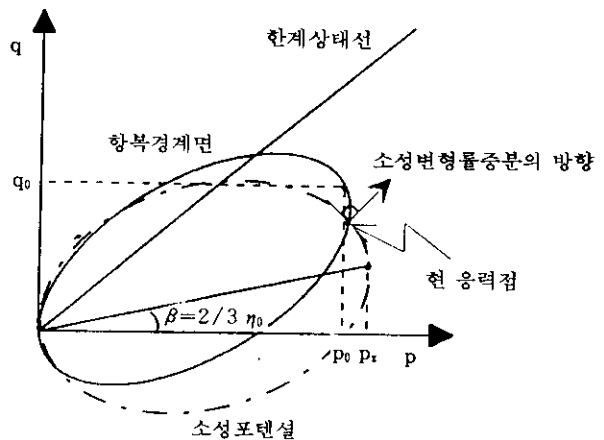


그림 2. 비관련 유동 법칙

여기서,  $p_0$ 는 그림 2의 소성포텐셜 정점에서  
의 평균주응력이며, 소성포텐셜 함수의 편미분  
량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\frac{\partial g}{\partial p} &= p \left[ 1 - \left( \frac{\eta}{M} \right)^2 \right] \\ \frac{\partial g}{\partial p} &= 2p \frac{\eta - \beta}{M^2}\end{aligned}\quad (5)$$

여기서, 응력비  $\eta = \frac{q}{p}$

### 2.3 이방성 경화 법칙

경화법칙은 소성변형에 따른 항복면의 계속  
적인 변화를 나타내며, 제안모델의 이방성 경  
화 법칙은 등방경화 법칙과 운동경화 법칙의  
조합으로써 경화변수  $p_0$ ,  $q_0$ 의 변화는 다음과  
같다.

$$\begin{aligned}dp_0 &= \frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} p_0 d\epsilon_s^e \\ dq_0 &= \frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} p_0 C(\eta) d\epsilon_s^e\end{aligned}\quad (6)$$

여기서,  $C(\eta) = \frac{3}{2} (M^2 - \eta^2)$

$d\epsilon_s^e$ : 소성체적변형률중분 =  $d\epsilon_s^e + 2d\epsilon_s^e$

$d\epsilon_s^e$ : 소성전단변형률중분 =  $\frac{2}{3}(d\epsilon_s^e - d\epsilon_s^e)$

$\lambda, \kappa$ :  $e - \ln p$  압밀선과 팽창선의 기울기

$e_0$ : 초기간극비

위의 경화 법칙을 따를 경우 체적변형계수  
(bulk modulus)  $K$ 는 MCC 모델에서와 마찬가지로 다음과 같이 표시된다.

$$K = \frac{(1+e_0)}{\kappa} p \quad (7)$$

제안 모델의 경화 법칙을 통해 등방압축에  
따른 이방성의 감소와 이방압축이나 전단시의  
이방성의 진전을 나타낼 수 있다. 함수  $C(\eta)$ 은  
응력비가 한계상태응력비에 도달함에 따라 흙  
구조의 재배열 속도가 줄어들어 극한상태에 도  
달할 것이라는 사실에서 선택되었다. 경화변수  
 $p_0$ 의 경화 법칙은 MCC 모델에서와 동일하며,

경화변수  $q_0$ 의 변화가 이방성의 증감을 제어한  
다. 또한,  $K_0$  압밀시 두 경화변수 중분의 비는  
다음과 같다.

$$\frac{dq_0}{dp_0} = C(\eta_0) \frac{d\epsilon_s^e}{d\epsilon_s^e} \quad (8)$$

이때, 소성체적변형률 중분과 소성전단변형  
률 중분은 식 (3)을 이용하여 다음과 같이 쓸  
수 있다.

$$\begin{aligned}d\epsilon_s^e &= d\lambda \left\{ \frac{\partial g}{\partial p} \right\}_{p=p_0} = d\lambda p_0 \left[ 1 - \left( \frac{\eta_0}{M} \right)^2 \right] \\ d\epsilon_s^e &= d\lambda \left\{ \frac{\partial g}{\partial q} \right\}_{q=q_0} = d\lambda 2p_0 \frac{\eta_0 - \beta}{M^2}\end{aligned}\quad (9)$$

위 식을 식 (8)에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{dq_0}{dp_0} = 3(\eta_0 - \beta) = \eta_0 \quad (10)$$

식 (10)으로부터 제안 모델은  $K_0$  압밀시 두  
경화변수 중분의 비가  $K_0$  압밀선의 기울기와  
같게 된다 (Wood, D.M., 1990)는 사실을 알  
수 있다.

### 2.4 주기하중시의 제안 모델의 거동

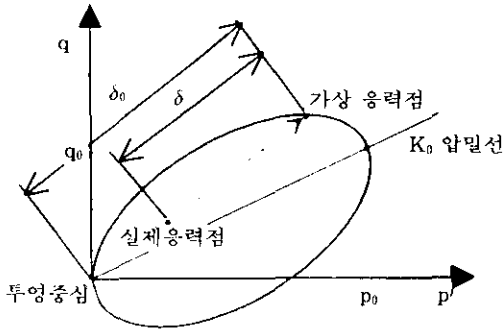
MCC 모델 등과 같은 초기의 모델은 주기하  
중시 항복면 내에서의 탄성변형만을 가정하지  
만, 실험적으로 관찰된 바에 따르면 흙은 거의  
모든 재하단계에서 탄성과 소성변형이 동시에  
나타난다. 주기하중시 소성변형률의 누적으로  
흙구조의 전체적인 붕괴를 가져올 수도 있으므  
로, 항복면내에서의 소성 거동을 모델에 나타  
내야 한다.

최근에 주기하중시의 흙의 거동을 정확하게  
나타내기 위하여 많은 연구자들이 다양한 모델  
들을 개발하고 있으며 이것들은 크게 두 범주  
의 개념으로 나타난다. 첫째는 소성중분론의  
체제안에 많은 실험적인 규칙을 결합시킨  
Mroz의 'nested yield surface' 개념(1982)이고,  
둘째는 주기하중시의 흙의 경화 거동을 간단한  
보간법으로 다룬 Dafalias의 '항복경계면' 개  
념(1982)이다.

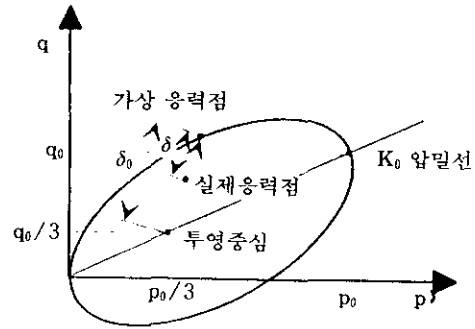
항복경계면 모델의 기본 개념은 응력점이 항

복경계면 내부에 존재할 경우에 항복경계면 상의 적절히 정의된 가상응력점에 대한 실제응력점의 근접도에 의존하여 소성 변형의 정도가 결정된다는 것이다. 제안모델은 ABSM처럼 주기하중시의 흙의 거동을 다루기 위해 일반적인 항복경계면 개념을 사용하였으나 항복경계면 내의 실제의 응력점을 항복경계면 상의 가상응력점으로 대응시키는 투영 법칙(mapping rule)을 수정하였다. ABSM에서 사용되는 방사 투영 법칙은 응력공간내의 원점과 현 응력점을 이은 직선이 항복경계면과 만나는 점을 가상응력점으로 삼는 방법이다. 그러나, 이 경우 건조축의 실제 응력점이 습윤축의 가상 응력점에 대응될 수도 있다는 단점이 있다. 결과

적으로 이 규칙을 따르면 과압밀점성토의 전단시 예측되는 거동은 실험치에서 보이는 응력경로의 양상과 다르게 된다. 제안된 투영 법칙은 응력공간내의 원점이 아니라  $K_0$  압밀선 상의 특정 응력점을 투영의 중심으로 잡고 이 응력점으로부터 실제 응력점을 이은 직선이 항복경계면과 만난 점을 가상 응력점으로 삼는 방법이다(그림 3). 본 연구에서는 평균주응력이  $p_0/3$ , 축차응력이  $q_0/3$ 인 점을 투영 중심으로 삼았으며, 이때 응력이력 등에 따른 투영 중심의 초기 위치와 재하에 따른 그 점의 이동에 대한 추가적인 검토가 필요한 것으로 판단된다.



(a) ABSM의 방사 투영 법칙



(b) 제안 모델의 투영 법칙

그림 3. 항복경계면 내에서의 투영 법칙

비관련 유동 법칙을 따르는 경우의 응력-변형률 증분 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} dp \\ dq \end{bmatrix} = [D^p] \begin{bmatrix} de_1 \\ de_a \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서, 체적변형률 증분  $de_1 = de_1 + 2de_3$

전단변형률 증분  $de_a = \frac{2}{3}(de_1 + de_3)$

$[D^p]$ 는 탄소성 구성 행렬로서 다음과 같다.

$$[D^p] = [D']$$

$$\frac{[D'] \begin{bmatrix} \frac{\partial g}{\partial g} & \frac{\partial p}{\partial q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial p} & \frac{\partial f}{\partial q} \end{bmatrix} [D']}{H_p + \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial p} & \frac{\partial f}{\partial q} \end{bmatrix} [D'] \begin{bmatrix} \frac{\partial g}{\partial g} & \frac{\partial p}{\partial q} \end{bmatrix}}$$

여기서,  $[D']$ 는 탄성 구성 행렬로서 다음과 같다.

$$[D'] = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 3G \end{bmatrix}$$

응력점이 항복경계면 내에 존재할 경우의 소성계수는 다음 식과 같이 된다.

$$H_p = H_r + H_0 \left( \frac{\delta}{\delta_0 - \delta} \right)^\mu \quad (12)$$

여기서,  $\mu$ 는 재료변수

$H_r$ : 항복경계면상의 가상응력점에서의 소성계수

$H_0$ : 항복경계면 정점에서의 기준소

### 성계수

식 (11)에 따라 결정되는 소성계수의 크기에 따라서 항복경계면 내에서의 탄성 변형과 소성 변형의 정도가 결정되며, 실제 응력점이 항복 경계면과 만나는 경우  $H_p$ 는  $H_c$ 과 같게 되고 일반적인 소성론에 따른 거동을 하게 된다. 시카고 점성토에 대하여  $\mu$ 는 1.2의 값을 사용하였으며 일반적으로 1에서 2사이의 값이 바람직한 것으로 판단된다.  $\mu$ 의 값이 그 이상되면 항복경계면 내부에서의 재재하시 정규 압밀 영역으로의 점진적이고 부드러운 변화를 나타낼 수 없으며, 항복경계면내에서 한계상태에 도달하는 문제가 발생한다.

### 3. 제안 모델의 적용

제안 모델의 적용성을 검증하기 위하여 시카고 점성토에 대한  $K_0$  압밀 재하-제하시험 결과와 서로 다른 과압밀비를 갖는 경우의 비배수 삼축 압축, 신장 시험 결과를 제안 모델의 거동과 함께 ABSM, MCC 모델의 거동과 비교하였다.

#### 3.1 $K_0$ 압밀 재하-제하시의 거동

시카고 점성토에 대한  $K_0$  압밀- $K_0$  재하 시험 결과를 제안 모델, ABSM, MCC 모델의 거동과 비교하였다. 이 시료에 대한 물성치는 표 1과 같다.

표 1.  $K_0$  압밀 재하-제하 시료의 물성치

$e_0$	$\lambda$	$\kappa$	$M$	$G$
0.57	0.059	0.012	1.22	15000 kPa

시험은 정규  $K_0$  압밀 상태 이후, 수직응력이 315 kPa이 될 때까지  $K_0$  재하 되었으며, 이후 수직응력이 81 kPa이 될 때까지  $K_0$  제하 되었다.

그림 4로부터  $K_0$  압밀시의 응력경로를 살펴

보면 제안모델은 항복경계면과 만난 이후 시험에서 관찰되는 응력경로를 거의 비슷하게 예측하며 이후 제하시의 응력경로도 근사하게 예측하고 있다. ABSM은 항복경계면에 접한 이후의 계속적인  $K_0$  압밀에 대하여 실험 결과와 차이가 커지는데 이것은 ABSM이 적용하는 관련 유동 법칙이 적절하지 않기 때문인 것으로 보인다. MCC 모델의 응력경로는 실험 결과와 상당한 차이를 보이는데, 이는 MCC 모델이 등방의 항복면을 이용하는데 따른 문제점에서 기인하며, 따라서  $K_0$  압밀 거동을 나타내기에는 무리가 있는 것으로 판단된다.

그림 5로부터 축변형률-축차응력 거동을 살펴 보면, ABSM은  $K_0$  압밀에 따른 축변형률의 크기를 과대하게 예측하였으며 제안 모델은 ABSM의 예측치를 상당히 보완하여 실험에서 관찰되는  $K_0$  압밀시의 변형특성을 근사하게 나타낼 수 있었다. MCC 모델은 실제 흙의 변형특성과는 상당한 차이를 나타낼을 알 수 있다.

또한, 실험에서 관찰된 정지토압계수  $K_0$  값의 변화를 각 모델들에 의한 결과와 함께 Mayne과 Kulhawy(1982)가 다양한 종류의 흙에 대한 실험 결과들을 통계적인 방법을 통하여 분석하고 제안한 다음의 식을 통해 구한 값

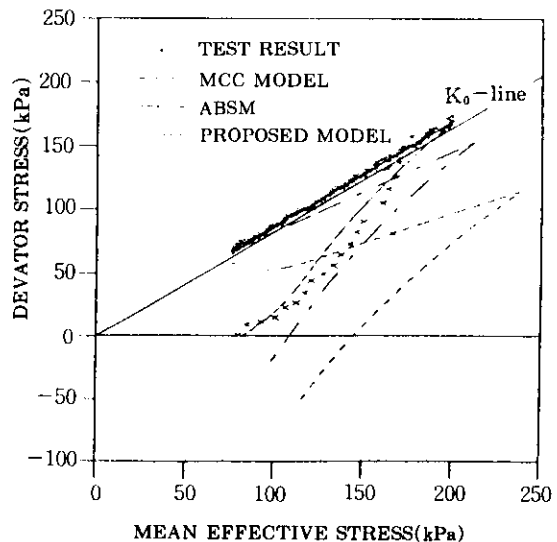


그림 4.  $K_0$  압밀-제하시의 응력경로

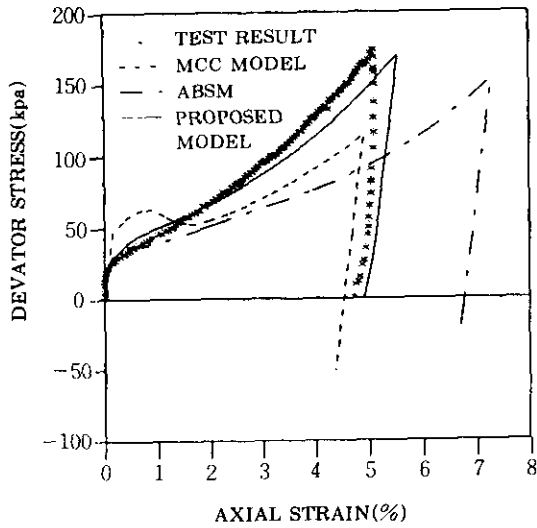


그림 5.  $K_0$  압밀-제하시의 축변형률-축차응력

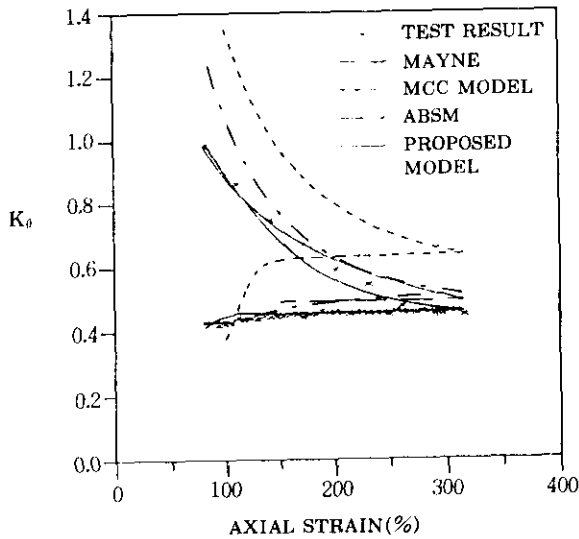


그림 6.  $K_0$  압밀-제하시의 정지토압계수

과 비교하였다(그림 6).

$$K_{0c} \text{ 제하시의 정지토압계수} : K_{0c} = K_{0nc} \text{OCR}^{in\phi} \quad (13)$$

여기서,  $K_{0nc}$ 는 정규압밀 상태에서의 정지토압계수

$\phi$ 는 내부마찰각

그림 6에 나타난 바와 같이 제안 모델은 응

력변화에 따른  $K_0$  값을 근사하게 묘사할 수 있었으며, Mayne과 Kulhawy의 예측치와도 비슷한 양상을 보여주고 있다. 그러나, MCC 모델은 실제 흙의  $K_0$  값을 정확하게 예측하기 어렵다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 비배수 삼축 전단 시험시의 거동

제안모델을  $K_0$ -압밀 시카고 점성토의 비배수 삼축 압축, 신장시험에 대하여 응력경로, 축차응력-변형률, 간극수압-변형률 거동을 예측하기 위하여 사용하였다. 그 결과를 시험 결과와 함께 MCC 모델, ABSM의 결과와 비교하였으며 그 물성치는 표 2와 같다.

표 2. 비배수 삼축 전단 시험의 물성치

$e_0$	$\lambda$	$\kappa$	$M$	$G$
OCR에 따라서 0.65~0.69	0.07	0.015	1.22	OCR에 따라서 6750~34000 kPa

정규압밀 상태에서의 압축 시험의 경우, 제안 모델의 세가지 거동 모두 시험결과에 잘 일치하였다. ABSM은 응력경로가 시험치와 많은 차이를 보이며, 전단강도를 과대하게 평가하고 있으며 한계상태파괴 응력비 조건을 만족시키지 못한다. 제안모델은 ABSM의 항복경계면의 형상을 변수  $A_c$ 를 이용하여 보정하였기 때문에 전단강도를 근사화시킬 수 있었다. MCC 모델에 의한 것은 제안 모델과 비슷한 거동을 보였다.

정규압밀 상태에서의 신장 시험의 경우 MCC 모델에 의한 예측치는 시험에서 관찰되는 응력경로의 양상과 큰 차이를 보이며, 이는 등방의 항복면 내에서 신장축 항복면과 만날 때까지 탄성적인 거동만을 보이기 때문이다. 그로 인하여 전단 강도의 과대 평가와 함께 간극 수압의 예측도 시험결과와 많은 차이를 보이고 있다. 신장축에서 제안 모델과 ABSM은 모두 항복면의 이방성을 고려하였기 때문에 시험치와 근사하였고, 특히 간극수압의 예측에

있어서 제안모델의 거동이 시험치와 상당히 근사하였다.

과압밀 상태(OCR=2, 4)에서의 압축 시험의 경우 제안모델은 응력경로에 있어서 ABSM 보다 개선된 것으로 나타나며, 전단강도 및 간극수압은 시험결과에 근사하였다. ABSM이 보이는 응력경로는 시험치와 전혀 다른 양상을 보이며, 항복경계면 내에서 한계상태에 이르는 단점을 가지고 있다. 이것은 ABSM에서  $\mu$ 를 5로 사용하였기 때문이며, 제안 모델은 경화계수의 보간에 사용되는  $\mu$ 의 값을 적절히 선택하였기 때문에 이러한 단점을 극복하였다. 비록 MCC 모델의 경우 응력경로가 시험치와 가장 근사하였고 전단강도의 예측치도 잘 맞았으나, 항복면과 만나기 전의 탄성거동은 시험에서 관찰되는 점진적인 경화 양상과는 차이가 있었다.

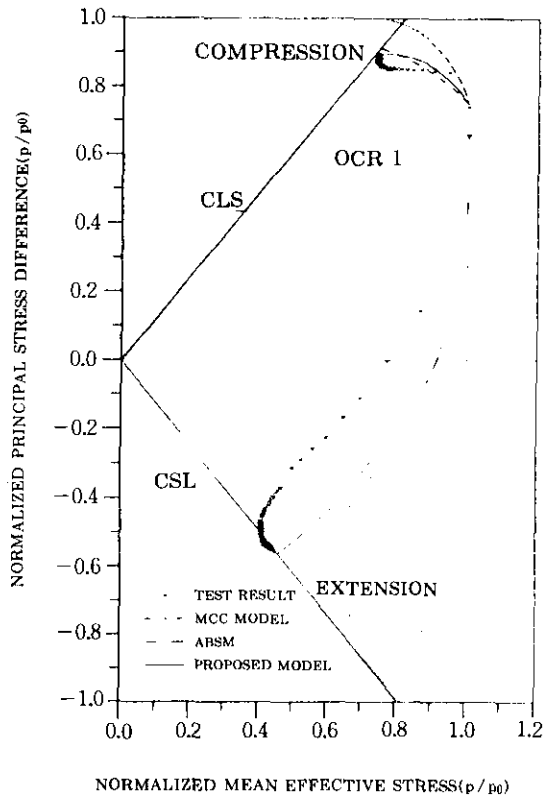


그림 7. OCR=1 일 때의 응력경로

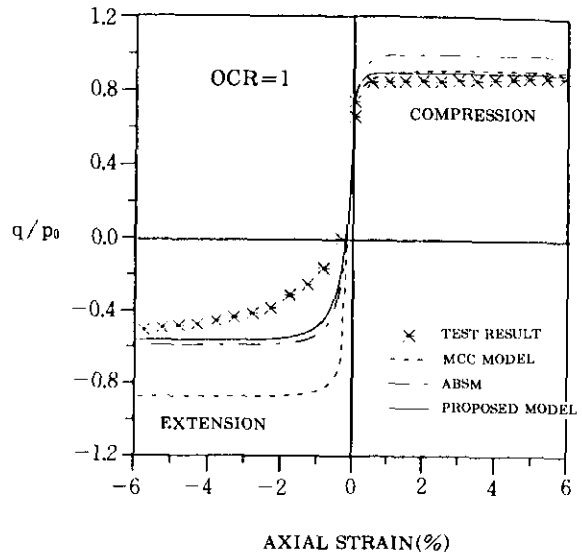


그림 8. OCR=1 일 때의 축변형률-축차응력

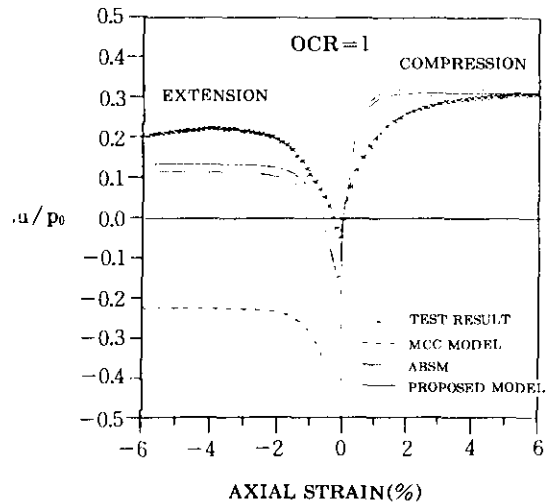


그림 9. OCR=1 일 때의 축변형률-간극수압

과압밀 상태에서의 신장 시험의 경우, 각 모델의 예측치들은 시험결과와 많은 오차를 보인다. 응력경로를 관찰해 보면 응력비가 한계상태응력비에 가까울 때 한계상태선을 따르는 점진적인 경화가 보이는 데 이는 제안 모델이 묘사할 수 없는 사항이다. MCC 모델의 경우도 동방의 과대한 항복면 때문에 전단강도를 과대 평가하며, 항복면과 만나기 전의 탄성거동 등



은 시험에서 관찰되는 양상과 큰 차이를 보인다.

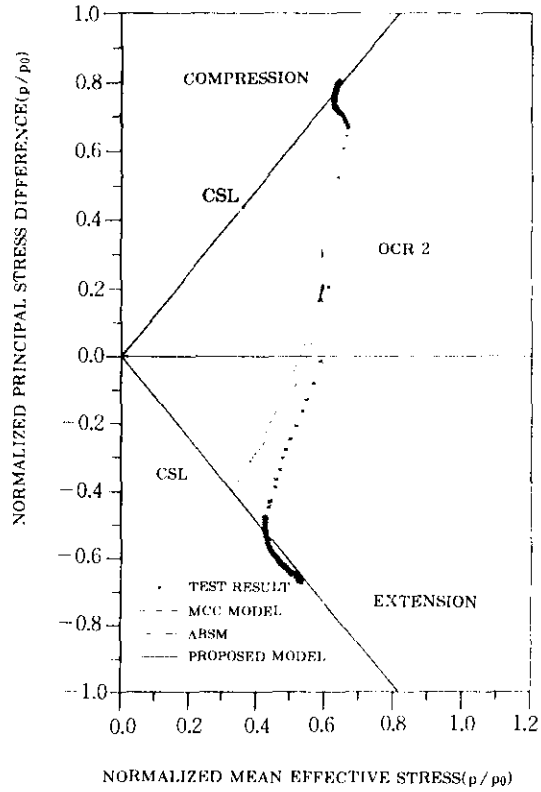


그림 10. OCR=2 일 때의 응력경로

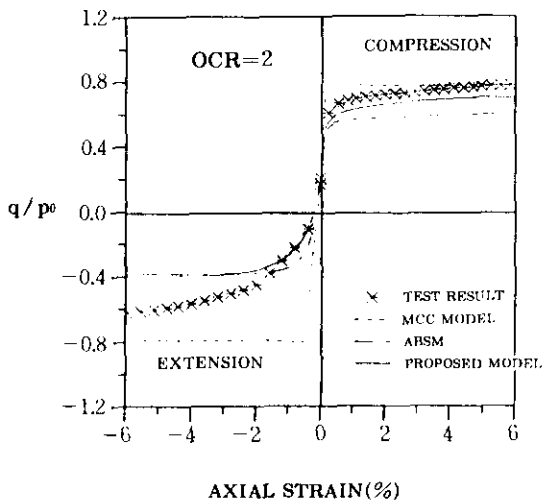


그림 11. OCR=2 일 때의 축변형률-축차응력

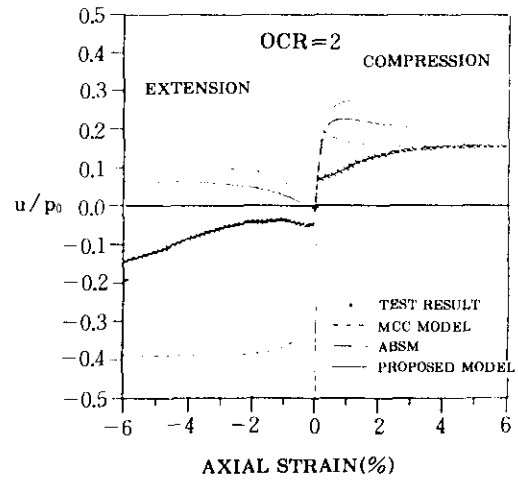


그림 12. OCR=2 일 때의 축변형률-간극수압

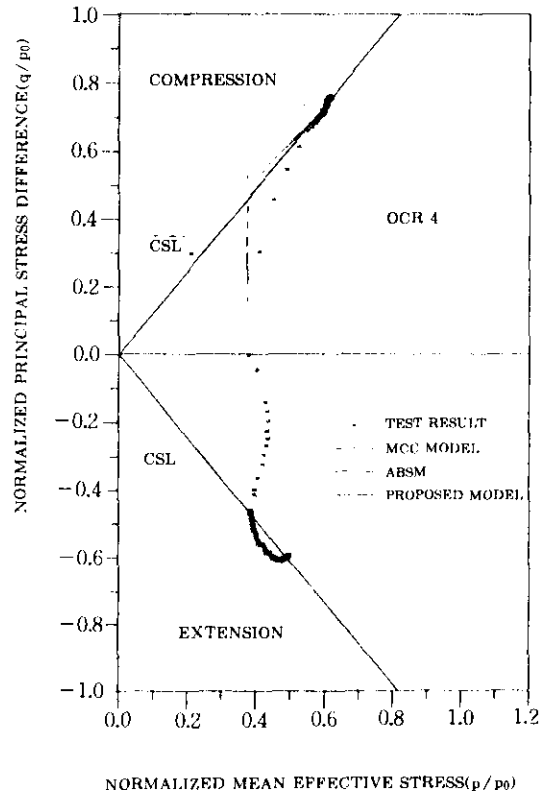


그림 13. OCR=4 일 때의 응력경로

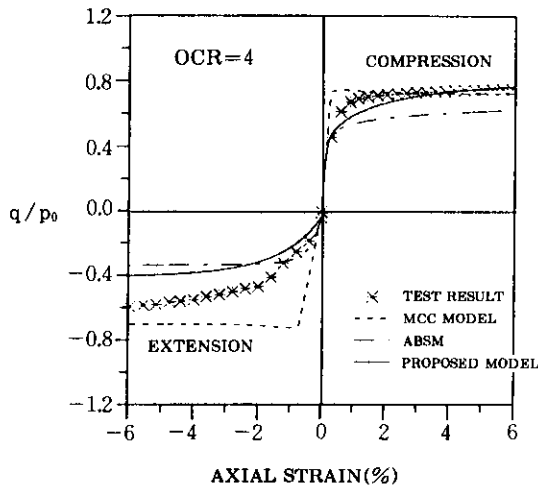


그림 14. OCR=4 일 때의 축변형률-축차응력

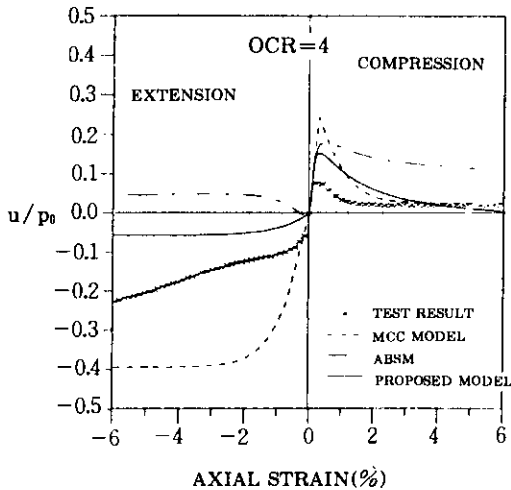


그림 15. OCR=4 일 때의 축변형률-간극수압

전반적으로 제안 모델은 흙의 복잡한 특성 때문에 실제 거동과는 약간의 차이를 보이지만 다양한 과압밀비에 대한 신장 및 압축 전단 거동을 근사하게 예측하는 것으로 나타나며, 등방 항복면과 과압밀 영역에서의 탄성거동이라는 MCC 모델의 가정은 실제 흙이 보이는 이방성 및 탄소성 거동을 적절히 묘사할 수 없는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 이방성항복경계면 이론을 토대로 하여 실제 점성토의 이방적 특성을 적절하게 묘사할 수 있는 구성모델을 제안하였다. 제안된 모델에서는 항복경계면 함수를 실제 흙의 이방적 특성을 반영할 수 있을 뿐만 아니라 흙의 종류에 따라 적절하게 그 형상을 조정할 수 있도록 수정 제안하였으며, 새로운 이방성경화법칙을 적용하여 응력상태의 변화에 따른 거동 특성을 적절히 대응할 수 있도록 하였다. 그리고, 항복경계면 내부에서의 소성거동 예측에 관련된 투영법칙을 수정하고 새로운 소성포텐셜 함수를 이용한 비관련 유동법칙을 적용하여 흙의 소성적 거동을 정확하게 묘사할 수 있도록 하였다.

제안된 모델의 예측 결과들을 기존의 구성모델에 의한 결과와 함께 불교란 시료에 대한  $K_0$  압밀시험과 다양한 과압밀비에 대한  $K_0$  압밀비배수 삼축압축 및 신장시험 결과들과 비교하였을 때 비록 흙의 복잡한 거동 특성 때문에 약간의 차이가 나타나지만 제안된 모델이 흙의 거동을 적절하게 묘사하는 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

이 연구는 서울대학교 발전기금 포철 학술연구비(92-15-2/13) 지원에 의하여 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고 문헌

1. Atkinson, J. H., Richardson, D., and Robinson, P.J.(1987), "Compression and extension of  $K_0$  normally consolidated clay", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 113, No. 12, pp.1468~1482.
2. Banerjee, P.K., and Yousif, N.B.(1986), "A plasticity model for the mechanical behavior of anisotropically consolidated clay", International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 10, pp.521~541.
3. Banerjee, P.K., Kumbhojkar, A., and Yousif,

- N.B.(1987), "A generalized elasto-plastic model for anisotropically consolidated clays", Proceedings of the Second International Conference on Constitutive Laws for Engineering Materials: Theory and Applications, Desai, C.S. et al. eds., Vol. 1, pp.495~504.
4. Chung, C.-K.(1991), Stress-strain-strength behavior of compressible Chicago glacial tills, Ph.D. thesis, Northwestern University, p.153.
  5. Dafalias, Y.F.(1987), "An anisotropic critical state clay plasticity model", Proceedings of the Second International Conference on Constitutive Laws for Engineering Materials : Theory and Applications. Desai, C.S. et al. eds., Vol. 1, pp.513~521.
  6. Dafalias, Y.F., and Herrmann, L.R.(1980), "A generalized bounding surface constitutive model for clays", Proceedings of the Symposium on Limit Equilibrium, Plasticity and Generalized Stress-Strain Applications in Geotechnical Engineering, Yong, R.N. and Selig, E.T. eds., Hollywood, pp.78~95.
  7. Davies, M.C.R., and Newson, T.A.(1993), "A critical state constitutive model for anisotropic soil", Predictive Soil Mechanics, Proceedings of the Wroth Memorial Symposium, Housby, G.T. and Schofield, A.N. eds., London, pp.219~229.
  8. Hashash, Y.M.A.(1992), Analysis of deep excavations in clay, Ph.D. thesis, MIT, pp. 36~46.
  9. Mayne, P.W., and Kulhawy, F.H.(1982), "K<sub>0</sub>-OCR relationships in soil", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 108, No.6, pp.851~872.
  10. Morz, Z., and Norris, V.A.(1982), Elasto-plastic and viscoplastic constitutive models for soils with application to cyclic loading, Soil Mechanics-transient and cyclic loads, Pande, G.N. and Zienkiewicz, O.C. eds., John Wiley & Sons, pp.173~217.
  11. Roscoe, K.H., and Burland, J.B.(1968), On the generalised stress-strain behaviour of wet clay, Engineering Plasticity, Heyman, J. and Leckie, F.A. eds., Cambridge Univ. Press, London, pp.535~609.
  12. Roscoe, K.H., Schofield, A., and Wroth, C.P. (1958), "On the yielding of soils", Geotechnique, Vol.8, pp.22~53.
  13. Tavenas, F., and Lerouiel, S.(1977), "The effects of stresses and time on the yielding of clays", Proceedings 9th ISSMFE Int. Conference, Tokyo, Vol.1, pp.319~326.
  14. Wood, D.M.(1990), Soil behaviour and critical state soil mechanics, Cambridge University Press, London, pp.314~328.

(접수일자 1995. 12. 30)