

限界狀態 間隔比를 利用한 構成모델

A Constitutive Model Using the Spacing Ratio of Critical State

李 勝 來*¹

Lee, Seung-Rae

吳 世 鵬*²

Oh, Se-Boong

權 琦 哲*³

Kwon, Gi-Chul

Abstract

An elasto-plastic constitutive model for geological materials, which satisfies the flexibility and stability at the same time, can be used in a number of geotechnical problems. Using the spacing ratio of critical state, a flexible model is proposed based on the stability of modified Cam-clay model. The spacing ratio of critical state can be simply evaluated, and practically used in describing the undrained shearing behavior of clay. The proposed model has precisely predicted the stress paths and stress-strain relationships, compared with the modified Cam-clay model, with respect to undrained triaxial test results. Besides, the effects of strain rate, creep, and relaxation can also be considered. Using the quasi-state boundary surface, the constitutive relations are well predicted. Therefore, it is found that the assumption of associative flow rule is well posed for undrained behavior of normally consolidated clay.

요 지

지반재료의 탄소성 구성 모델은 유연성과 안정성을 동시에 만족하여야 공학적으로 의미를 가지며 실용적으로 사용될 수 있다. 본 연구에서는 안정성이 있는 계수를 사용하는 수정 Cam-clay 모델을 근간으로, 한계상태 간격비를 계수로 도입하여 더욱 유연성이 있는 모델을 제안하였다. 한계상태 간격비는 추가적인 실험없이 간편하게 구할 수 있으며 특히 비배수 전단거동에 대하여 실용적으로 사용될 수 있다. 제안된 모델은 비배수전단 삼축압축시험에 대하여 응력경로 및 응력-변형률관계를 수정 Cam-clay 모델에 비하여 매우 정확하게 예측할 수 있었다. 뿐만 아니라 전단변형률 속도, 크리프 및 응력이완의 영향을 고려할 수 있었다. 특히 실제의 상태경계면을 표현 탄성-완전소성모델, 사용해야 삼축압축시험중 비배수시험이 W W 삼축압축시험시 전단시험을

*¹ 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 조교수

*² 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

*³ 한국도로공사 연구원

논문에서 해석한 점토질 지반의 거동에 대하여 관련유동칙을 따른다는 가정이 잘 적용되기 때문이라고 판단된다.

1. 서 론

컴퓨터 기술의 진보와 수치해석 방법의 눈부신 발달로 인하여, 실제 지반의 거동을 적절하게 나타낼 수 있는 구성 관계(constitutive relationship)를 이용하면 터널, 굴착, 성토, 관입 등의 복잡한 지반 구조물문제를 해석하는 것이 가능하게 되었다. 이 때 사용되는 구성 방정식은 다양한 상태의 응력-변형률거동을 해석하고 표현할 수 있는 이론적인 수단이며, 대형 컴퓨터 프로그램을 이용하여 복잡한 지반공학문제를 해석하는 데 있어서 핵심적인 역할을 하게 된다.³⁾

흙을 비롯한 지반재료들(geological materials)은 일반적으로 비선형 응력-변형률관계를 지니고 있으며 초기 응력상태 및 응력경로 등에 따라 그 거동이 상이하게 발생한다. 뿐만 아니라 역학적으로 규명되지 못한 불확실한 요인들이 존재하기 때문에 구성 관계를 정확하게 예측하는 것은 매우 어려운 문제이다. 이러한 지반재료의 복잡하고 다양한 거동에 대한 구성 모델들은 비선형 탄성모델, 탄성-완전소성모델, 탄소성모델, 점탄소성모델등 여러 종류들이 개발되어 왔다. 이 중에서 비선형 탄소성(nonlinear elastoplastic)모델은 시간에 대하여 독립적인 지반의 정적인 거동을 복잡한 응력상태 및 경로에 따라 비교적 근사하게 표현할 수 있으며, Cam-clay 모델^{2, 9)}과 Cap 모델³⁾등을 비롯하여, Desai 모델⁶⁾, Lade 모델⁷⁾등 많은 모델들이 제안되었다.

지반재료의 비선형 탄소성 구성 모델들은 일반적으로 관련유동칙(associative flow rule)과 등방경화법칙(isotropic hardening law)을 따른다고 가정^{2, 3, 9)}하지만, 실제 지반재료의 거동에서 나타나는 비관련유동칙(nonassociative

flow rule)^{6, 7)}과 이방경화(anisotropic hardening) 또는 운동경화(kinematic hardening)현상⁸⁾을 고려할 수 있는 모델들도 개발되고 있다. 뿐만아니라 모델함수를 3차원 응력장에서 일반화^{6, 7)}함으로써, 재료의 보편적인 응력경로에 대한 거동들을 비교적 정확하게 예측할 수 있게 되었다. 이와 같이 여러 실제 현상들을 고려하여 개발된 모델들은 구성방정식의 함수가 매우 복잡해졌고, 지반의 다양한 초기상태 및 응력경로에 대한 거동을 더욱 근사하게 예측할 수 있게 되었다.

하지만 비선형 탄소성 모델들이 개선되는 과정에서 실험치를 정확하게 예측하기 위하여 구성방정식이 더욱 복잡해졌기 때문에⁸⁾, 필요한 계수(parameter)들의 수가 증가되었고 통상적인 실내실험만으로는 계수들의 값을 구하기가 곤란해졌다. 더구나 복잡해진 구성 모델들은 대부분 물리적인 개념과는 무관하게 계수들이 개발되었기 때문에, 기존의 지반공학과 관련된 역학적인 성과를 반영할 수가 없고 예측된 해석 결과의 물리적 개연성을 추리하기가 곤란하다. 따라서 이러한 모델들은 대부분 지반공학문제를 해석하는 데 실용적으로 적용되기가 어렵다.

이러한 특성들을 감안하여 공학적으로 의미를 가지는 구성 모델을 규정지을 수 있는 기준을 다음과 같이 고려하고자 한다. 첫째, 다양한 초기응력상태 및 응력경로에 대하여 응력-변형률관계가 실제와 근사하게 표현될 수 있어야 한다. 이러한 모델들은 유연성(flexibility)이 확보되었다고 정의할 수 있다. 둘째, 실용적으로 사용될 수 있는 구성모델은 모델계수들이 물리적인 의미를 내포하고 있고, 실험을 통한 결정과정이 간편하며 적은 수의 계수들을 사용하여야 한다. 이러한 안정된 계수들을 사용하면 안정성(stability)이 있는 모델이라고 간주

할 수 있다.

위의 관점으로 여러 탄소성 모델들을 비교할 때, 근래에 보고된 모델일수록 유연성은 뛰어나고 안정성을 떨어지는 경향이 있다. 여러 모델들의 안정성을 유사한 조건하에서 고찰하기 위하여 표 1에서는 Cam-clay 모델, Cap 모델, Desai 모델 및 Lade 모델이 사용하는 계수들을 비교하였다.

표 1. Parameters of the elasto-plastic constitutive models

Model	Used parameters			Number
	Yield surface	Hardening	Elastic	
Cam-clay	M	λ, e_a	κ, ν	5
Cap	$\gamma, \beta, \theta, \alpha, R$	D, W	K_1, K_2	9
Desai	α, γ, n	b_1, b_2, A	E, ν	8
Lade	a, m, η_1, h, l	c, p	n, ν, K_{ur}	10

* Basic assumption: associative flow rule, isotropic hardening

비교된 탄소성 모델들로 관련유동칙과 등방경화법칙에 의거하여 지반의 응력-변형률 거동을 예측한다면, Cam-clay 모델에 비하여 나머지 모델들은 1.6-2.0배의 계수들을 사용해야 한다. 또한 3차원 응력장에서의 거동을 고려하지 않을 경우(Lade 모델은 3차원 응력장계수를 포함한 것임), 대부분의 모델들은 전형적인 실험을 통하여 그 계수들을 결정할 수 있다. 하지만 Cam-clay 모델만이 마찰각 ϕ , 압축지수 C_c , 팽창지수 C_r 등과 같은 통상적인 토질정수와 관련된 계수들을 사용하므로 이미 밝혀진 지반재료의 역학적 특성을 고려할 수 있다. 따라서 Cam-clay 모델의 안정성이 다른 모델들에 비하여 우수하다고 판단된다.

뿐만아니라, Cam-clay 모델은 등방압력과 간극비관계를 이용하여 경화함수를 정의하므로 과압밀상태를 재현하는 것이 이론적으로 가능하지만 나머지 모델들은 단지 소성변형률로 경화함수를 정의하기 때문에 초기응력상태에

따라 경화계수(hardening parameter)가 다르게 결정된다. 따라서 다른 모델들은 경화계수를 결정한 응력상태이후의 등방압력 제거로 인한 과압밀 상태는 재현할 수 있지만 그 이전의 상태를 예측할 수는 없다. 만일 지반의 응력상태가 깊이에 따라 과압밀비가 변화하는 초기상태를 고려하고자 한다면 Cam-clay 모델과 같이 총체적상태 즉 간극비의 변화를 나타낼 수 있는 모델이 실용적으로 사용되기에 유리하다.

그러나 Cam-clay 모델은 주로 정규압밀상태 혹은 미약한 과압밀상태의 점토질지반에 대하여 비교적 근사하게 거동을 예측할 수 있으며⁹⁾ 체적팽창이 발생하는 영역이나 비배수전단경로에서는 오차가 큰 경향이 있다. 따라서 본 연구에서는 안정성을 침해하지 않는 한도내에서 새로운 계수를 도입하여, Cam-clay 모델의 유연성을 개선하고자 한다.

2. 한계상태 간격비(spacing ratio of critical state)를 이용한 구성 모델

2.1 한계상태 간격비

Roscoe 등⁹⁾에 의하여 제안된 수정 Cam-clay 모델은 상태경계면(state boundary surface)에서 항복이 발생하고 한계상태에 도달하여 파괴를 일으키는 지반의 탄소성 거동을 예측한다. 이때 한계상태파괴(critical state failure)란 체적변형률이 일정한 상태에서 축차변형률이 과다하게 발생하는 파괴상태를 의미한다. 또한 상태경계면은 간극비에 따른 지반재료의 응력상태가 존재할 수 있는 경계이며, 그 내부에서는 탄성거동만이 일어나는 것으로 가정한다. 이러한 가정에 의하여 상태경계면상에 항복면이 존재하고, 그 때의 응력상태 및 경로에서 소성변형률이 발생되게 된다.

이러한 개념들을 토대로 수정 Cam-clay 모델은 한계상태와 정규압밀상태에서의 변형률 벡터방향을 고려하여 p-q 평면상에서 원점을 지나는 타원으로 항복면을 설정하였다. 그 항복면함수 F와 경화함수 Δp_c 는 다음과 같이 나

타난다.

$$F = q^2 / M^2 + p(p - p_c) \quad (1-1)$$

$$\Delta p_c = \theta p_c \Delta \epsilon_v^p \quad (1-2)$$

여기서, $\theta = (1+e) / (\lambda - \kappa)$ 이고, $e = e_a - (\lambda - \kappa) \ln p_c$ 이다.

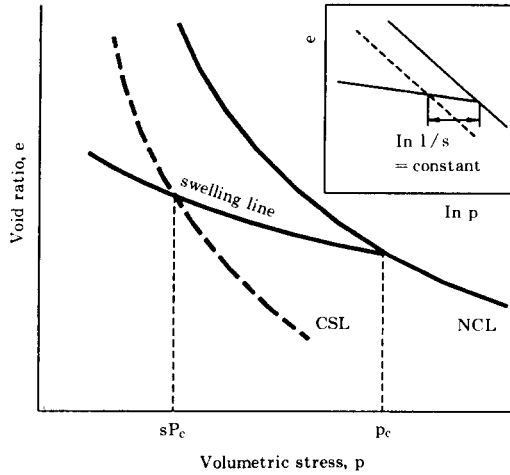


그림 1. Spacing ratio of critical state

한계상태선을 간극비와 등방 압밀응력간의 관계를 나타내는 $p-e$ 평면상에 투사시키면 그림 1과 같이 정규압밀선의 내측에 나타나고, $\ln p-e$ 관계에서는 정규압밀선에 평행한 직선으로 나타난다. 이 때 팽창곡선을 따라 정규압밀선에 대한 한계상태의 상대위치는 간극비와 상관없이 일정하게 나타나는 데, 이를 한계상태 간격비 (spacing ratio of critical state)라고 규정하고 ¹¹⁾s 값으로 나타낼 수 있다. 한계상태 간격비는 원(original) Cam-clay 모델에서는 0.368 이고 수정 Cam-clay 모델에서는 0.5인 일정한 값을 가지게 되므로, 다양한 종류의 흙에 대하여 동일한 형태의 항복면을 적용하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 한계상태 간격비를 이용하여 다양한 흙의 특성 및 상태에 적합한

항복면을 설정할 수 있는 모델을 제안하고자 한다. 이때 항복면의 형태를 수정 Cam-clay 모델과 마찬가지로 타원이라고 가정하면 한계상태 간격비를 고려하여 항복면함수가 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$F = q^2 / M^2 + s^2 / (1-s)^2 \times [p - (2s-1)p_c][p - p_c] \quad (2)$$

제안된 모델식(2)는, s가 0.5일 경우에는 수정 Cam-clay 모델과 동일하며, 한계상태 간격비 s를 사용하여 새로운 항복면함수와 상태경계면을 그림 2와 같이 개념적으로 나타낼 수 있다. 한편 경화함수는 Cam-clay 모델과 동일하게 사용하며, s값은 추가적인 실험없이 그림 1로부터 간편하게 구할 수 있다.

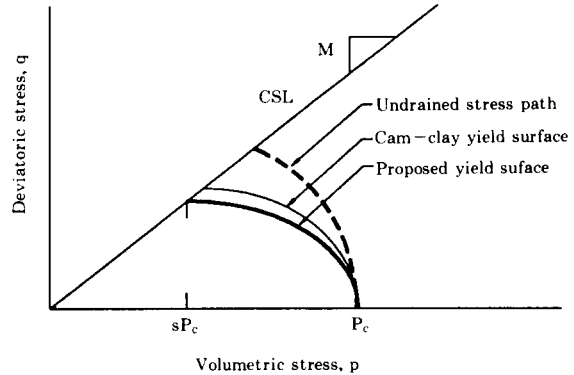


그림 2. Comparative scheme of yield surfaces

2.2 제안된 모델의 증분 분산에너지(incremental dissipation energy)

수정 Cam-clay 모델은 증분 소성에너지(plastic energy)와 증분 분산에너지의 평형을 다음과 같이 가정하고 있다.⁹⁾

$$p \Delta \epsilon_v^p + q \Delta \epsilon_d^p = p [(\Delta \epsilon_v^p)^2 + (M \Delta \epsilon_d^p)^2]^{1/2} \quad (3)$$

이에 비해 제안된 모델은 식 (4)와 같이 구해지며 자세한 유도과정은 부록에 서술되어 있다.

$$[(p_c - p_{cr})^2 - (p - p_{cr})^2]^{0.5} \Delta \epsilon_v^p + [q_{cr}^2 - q^2]^{0.5} \Delta \epsilon_d^p = 0 \quad (4)$$

여기서 한계상태의 응력 $p_{cr} = sp_c$, $q_{cr} = M s p_c$ 이고, 제안된 모델의 증분 에너지식에서는 한계상태에 대한 상대적인 응력에 의하여 증분에너지의 공급이 평형을 이루고 있다. 만일 s 값이 0.5일 경우, 즉 Cam-clay 모델과 동일하게 항복면을 설정하게 되면 에너지식은 식 (5)와 같이 유도되는데, 분산 증분에너지가 한계상태에서 $Mp \Delta \epsilon_d^p$ ($p = sp_c$)이고 정규압밀상태에서 $p \Delta \epsilon_v^p$ ($p = p_c$)라는 수정 Cam-clay 모델의 에너지식 조건⁷⁾을 충족시킬 수 있다.

$$p^2 (\Delta \epsilon_v^p)^2 + q^2 (\Delta \epsilon_d^p)^2 = p p_c (\Delta \epsilon_v^p)^2 + (1/2 M p_c) (\Delta \epsilon_d^p)^2 \quad (5)$$

2.3 비배수 전단강도와 한계상태간격비

Wroth¹³⁾에 의하면 흙의 비배수 전단강도는 한계상태이론으로부터 삼축압축시험중 ICU (isotropic consolidated undrained shearing) 시험에 대하여 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$S_u / \sigma_{vo} = \frac{M}{2} (s \text{ OCR})^\Lambda \quad (6)$$

여기서, $\Lambda = 1 - \kappa / \lambda$
 σ_{vo} = 초기 등방 구속응력

이로부터 간격비 s 값은 식(7)과 같이 구할 수 있다.

$$s = \left[\frac{2}{M} (S_u / \sigma_{vo}) \text{NC} \right]^{1/\Lambda} \quad (7)$$

여기서, $(S_u / \sigma_{vo}) \text{NC} = \text{NC}$ 상태의 표준화된 비배수 전단 강도(normalized undrained strength)

점토질 지반에서는 때때로 배수상태보다는 비배수 전단거동이 공학적으로 중요한 의미가 있고, 실내실험을 수행하기도 비배수시험이 편리하다. 따라서 비배수 전단강도로부터 간격비를 구하는 것은 매우 실용적이라고 할 수 있다. 그리고 비배수거동을 예측하려면 배수, 비배수 강도간의 실험적인 차이를 고려할 때 그림 1로부터 s 값을 구하기보다는 정규압밀상태의 비배수전단강도를 통하여 구하는 것이 합리적이라

고 여겨진다.

여러 문헌에 보고된 점토질 지반의 비배수전단강도를 이용한 계수도출은 표 2와 같으며, 수정 Cam-clay 모델에 비하여 s 값이 2.29%가량 차이를 나타낸다. 이러한 상이한 간격비로 인한 항복면의 형태는 한계상태 강도계수 M 과 증가하중 p_e 로 표준화(normalizing)하였을 때 그림 3과 같이 다양하게 나타난다. 이 때 증가하중 p_e 는 정규압밀상태의 비배수 시험시에는 초기 구속응력과 동일하다. 단 본 연구는 정규압밀상태 및 미약한 과압밀상태에서의 탄소성 거동에 대하여 한정되었으므로 전조영역이라고 불리우는 과다한 과압밀영역⁹⁾에서의 항복면 형태는 고려하지 않았다.

표 2. Spacing ratio of various clay*

Data	M	λ	κ	e_0	S_u / σ_{vo}	s	R**
A ₁	1.50	0.10	0.02	0.720	0.446	0.525	5%
A ₂					0.378	0.425	15%
S ₁	1.49	0.32	0.08	1.651	0.420	0.450	10%
S ₂				1.662	0.490	0.560	12%
B ₁	1.40	0.37	0.054	2.200	0.251	0.422	16%
B ₂				2.215	0.395	0.510	2%
W	0.95	0.093	0.035	0.592	0.285	0.443	12%
K ₁	1.40	0.0714	0.0125	0.619	0.297	0.354	29%
K ₂					0.331	0.404	19%

* A₁, A₂: data from Adachi et al¹⁾

S₁, S₂: data from Shen et al¹⁰⁾

B₁, B₂: data from Bonaparte³⁾

W : data from Scofield et al⁹⁾

K₁, K₂: remoulded Ildo clay

** R = $| (s - 0.5) / 0.5 | \times 100$: 수정 Cam-clay 모델에 대한 간격비의 차이

점토질 지반의 삼축압축시험시 압밀이후 비배수 전단시험을 수행하면 전단응력 경로를 통하여 p-q평면상에서 일정한 간격비 e 에 대한 상태경계면의 형태를 관찰할 수 있다. 한계상

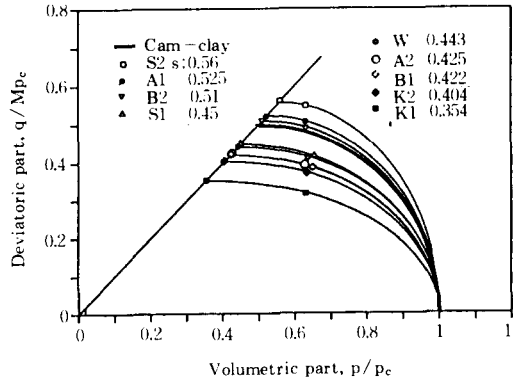


그림 3. Yield surfaces of proposed model

태이론에 의하면 소성거동으로 인하여 발생하는 항복이 상태경계면을 따라 일어난다.²⁾ 그러므로 만일 탄소성 구성 모델을 통하여 지반의 상태경계면을 근사하게 예측할 수 있으면, 사용된 항복면이 실제의 지반을 구성하는 재료의 항복규준과 유사하게 표현되었다고 판단할 수 있다. 이 때 지반 재료가 '관련유동칙에 의하여 소성변형률이 발생한다'는 가정을 따른다면, 그 응력-변형률관계를 실제와 유사하게 예측할 수 있을 것이다. 따라서 다음 절에서의 실험 자료 해석에서는 비배수 전단 응력경로로부터 상태경계면을 실험치와 유사하게 예측하였을 때, 지반 재료의 실제 구성 관계와 예측치를 비교하여 관련유동칙을 따르는지를 검토하였다.

3. 비배수전단(CU) 삼축압축시험의 해석

3.1 정규압밀 점토 지반의 거동

탄소성 응력-변형률관계중 탄성거동은 식 (8)과 같은 관계를 이용하여 체적 및 축차변형률을 고려할 수 있다.²⁾

$$d\epsilon_v^e = 1/K dp, d\epsilon_a^e = 1/3G dp \quad (8)$$

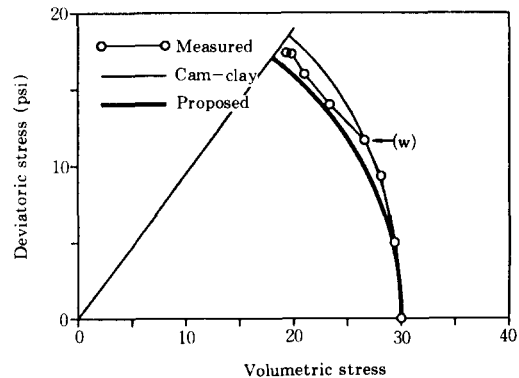
여기서, $K = (1+e)/\kappa$, $G = [3(1-2\nu)/2(1+\nu)] K$ 이며, e 는 현재의 간극비이고 κ 는 모델계수이다. 포아송비 ν 는 응력상태 및 간극비에 따라 변화하는 것으로 알려졌지만²⁾ 탄성변형률이 소성변형률에 비하여 전체 거동에 큰 영향

을 미치지 않으므로 일정하게 가정하였다. 위와 같은 식(8)의 탄성거동은 경험적으로 포아송비가 점토질 지반에서는 0.25, 사질토에서는 0.33을 사용하면 탄성거동의 영향이 크게 발생하는 낮은 응력수준(low stress level)에서 비교적 일관되게 예측된다. 그리고 탄소성 모델에 의한 총변형률은 식(9)와 같이 가정하였다.

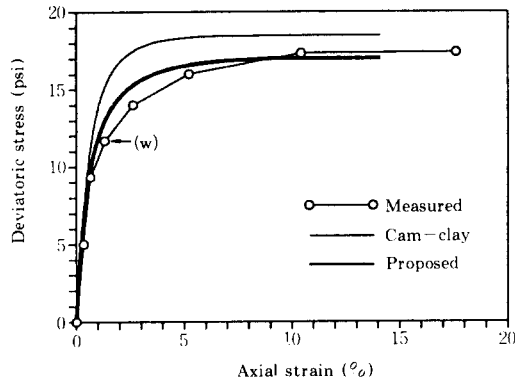
$$d\epsilon = d\epsilon^e + d\epsilon^p \quad (9)$$

이 때, 비배수 전단경로의 삼축압축시험에서 발생하는 소성변형률은 상태경계면을 따라 증가하는 응력증분에 대하여 응력상태를 결정하고, 그 상태에 상응하는 항복면에서 관련유동칙을 적용하여 구하였으며 이러한 과정은 여러 문헌^{2,9)}에 자세히 보고 되어 있다.

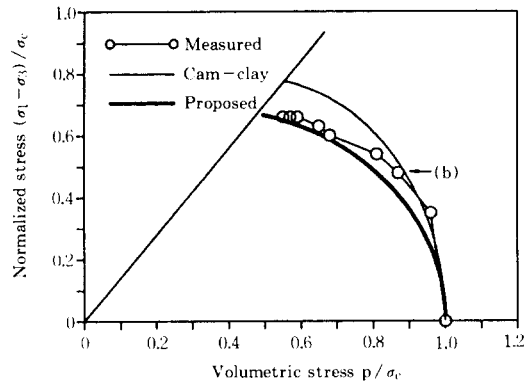
그림 4에서는 Weald clay를 재성형한 시료의 거동^{4,11)}에 대하여 실험치와 예측치를 비교하였다. 그림 4-a에서 보여지듯이 (w)지점 이후의 응력경로는 제안된 모델이 비교적 근사하게 예측하였으며, 특히 경로의 기울기는 대체로 유사하게 나타났다. 그림 4-b의 실험치는 상태경계면이 갑자기 완만해지는 (w)지점 이후의 변형률증가량이 이전보다 급하게 발생하며, 이는 항복면이 완만해지면서 소성축차변형률이 크게 생기는 때문으로 판단된다. 따라서 (w)지점이후의 경로 및 그 기울기를 잘 예측한 제안된 모델이 수정 Cam-clay 모델보다 근사하게 응력-변형률관계를 나타낼 수 있었다.



(a) Undrained stress path



(b) Stress-strain relationship



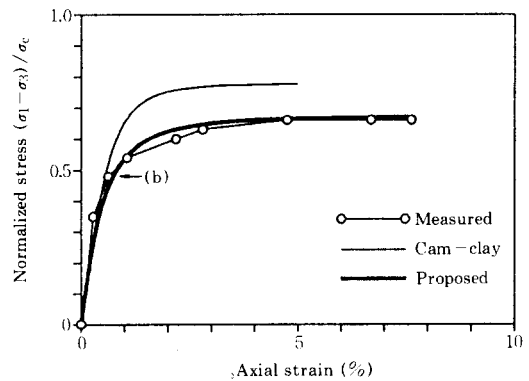
(a) Undrained stress path

그림 4. Undrained behavior of Weald clay

Bonaparte⁴⁾의 비교란 시료의 실험자료중에서 구속응력이 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 인 정규압밀 상태의 비배수전단시험의 거동을 그림 5와 같이 해석하였고, 사용된 계수값들은 표2의 B_1 과 같다. 제안된 모델의 응력경로는 그림 4-a와 마찬가지로 급격하게 기울기가 완만해지는 (b)지점 이후의 거동을 잘 예측할 수 있었다. 그림 5-b에서 보여지듯이 (b)지점까지의 변형률은 두 모델이 유사하며, 실험적으로 기울기가 큰 경로까지는 변형률이 크게 발생하지 않는 것으로 보여진다.

이 자료에 사용한 계수는 Borja등⁵⁾이 구한 것을 사용하였고, (b)지점이후의 응력경로를 잘 예측한 제안된 모델이 수정 Cam-clay 모델에 비하여 실제의 응력-변형률 거동을 매우 정확하게 예측하였다. 한편 Borja등은 Cam-clay 모델 항복면내에 수평항복면이 존재한다고 가정하여 정규압밀상태의 지반을 해석하였는데, 제안된 모델에 의한 해석이 실제에 유사한 결과를 예측하면서도 더욱 간편하게 구할 수 있었다.

Adachi와 Oka¹⁾는 서로 다른 전단변형률 속도(4.98, 0.48%/hour)에 대하여 그림 6과 같은 거동을 관찰하였다. 제안된 모델은 수정 Cam-clay 모델과 달리 여러 항복면형태를 설정할 수 있기 때문에, 상태경계면을 따르는 비배수



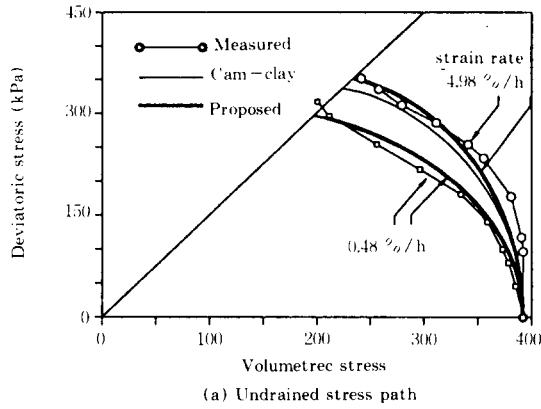
(b) Stress-strain relationship

그림 5. Undrained behavior of Bonaparte data set #1

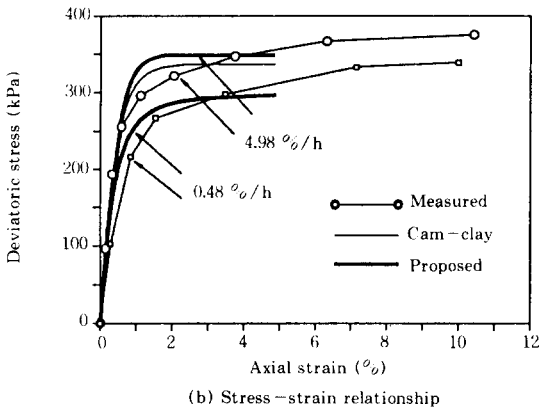
경로를 상이한 전단변형률 속도에 대하여 적합하게 예측할 수 있었다. 그림 6을 보면 수정 Cam-clay 모델은 상이한 응력경로와 응력-변형률관계를 고려할 수 없었지만 제안된 모델에 의한 해석에서는 두 실험치의 변형률거동을 차이나게 예측할 수 있었다.

한편 그림 6은 Adachi와 Oka에 의하여 주어진 모델계수들을 이용하여 해석하였으며, 예측치가 한계상태에 도달한 이후의 응력-변형률관계에서는 실제와 다르게 나타났다. 그러나 상이한 전단변형률 속도에 의한 응력-변형률관계의 경향을 일관되게 표현할 수 있었다.

비배수 구성관계에 대한 전단변형률 속도의 실험적인 차이의 영향을 정확한 계수를 결정하



(a) Undrained stress path

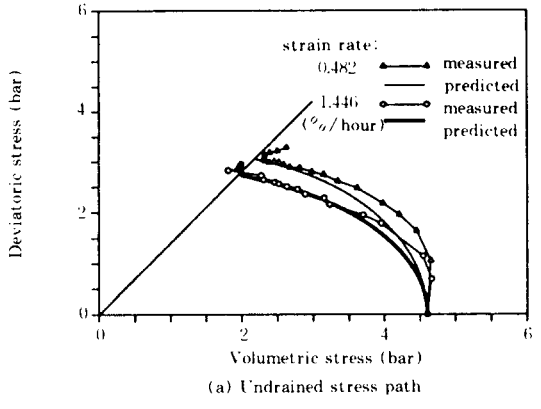


(b) Stress-strain relationship

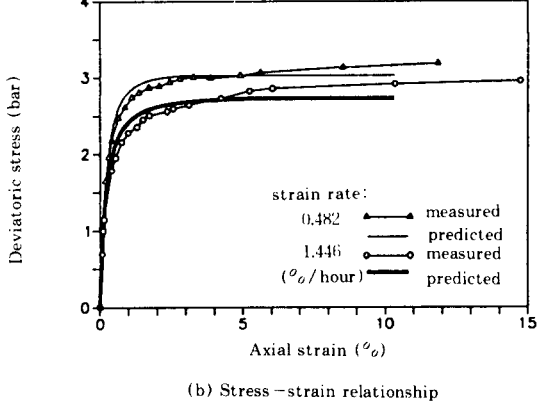
그림 6. Undrained behavior of Adachi et al. data

여 고려하기 위하여, 인천 일도에서 채취한 시료를 실험실에서 재성형하여 삼축시험을 수행하였다. 이때 전단변형률 속도가 0.482, 1.446%/hour에 대한 계수값들이 각각 표 2의 K_1 , K_2 와 같이 구해졌다. 특히 s값은 변형률 속도의 영향을 크게 받는 것으로 나타났으며, 수정 Cam-clay 모델의 경우와는 매우 다르게 항복면이 설정됨을 알 수 있다.

그림 7은 이 때의 실험치와 예측치를 비교하였으며 응력-변형률 관계를 매우 정확하게 예측할 수 있었다. 물론 응력경로는 낮은 응력 수준에 대하여 실험치와 예측치간에 차이가 있었지만 많은 변형을 유발시키는 높은 응력 수준에서 비교적 정확하게 예측되었음을 알 수 있다.



(a) Undrained stress path



(b) Stress-strain relationship

그림 7. Undrained behavior of remoulded Ildo clay

위의 결과들로부터 정규압밀상태의 여러 점토질 지반은 상이한 형태의 항복면을 가지고 있음을 알 수 있었으며, 비배수 전단강도 및 압축특성들로부터 그 영향을 간편하고 합리적으로 고려할 수 있었다. 특히 동일한 흙에서는 항복면의 형태가 전단변형률 속도에 의하여 영향을 받고 있었으며, 한계상태 간격비를 이용하여 상이한 거동을 나타낼 수 있었다.

3.2 2차압밀 및 간극수압 이완이후의 전단거동

Shen 등¹²⁾에 의하면 일정한 구속응력하에서 오랜시간 압밀을 수행하면 2차압밀에 의하여 크리프(creep)가 발생하고 응력-변형률관계가

더욱 급한 경사(stiff)를 나타낸다고 알려졌다. 또한 간극비와 구속응력이 일정한 상태에서 시간이 경과됨에 따라 간극수압이 유발(build-up)되어 유효응력이 이완(relaxation)되는 현상을 실험적으로 입증하였다. 한편 Shen 등이 이 현상들 이후의 전단거동을 모델하기 위하여, 초기상태를 과압밀상태로 가정하고 원 Cam-clay 모델에 의하여 해석하였다.

하지만 시간에 따른 크리프와 응력이완 현상은 비가역적(irrecoverable)인 거동으로 사료된다. 따라서 초기상태를 과압밀 상태로 가정하여 그 직후의 거동을 탄성적으로 해석하는 것은 불합리하며, 오히려 탄소성거동으로 고려하는 것이 바람직하다고 판단된다. 그림 8과 같이 시간에 따른 초기상태의 변화에 의하여 설정되는 새로운 상태경계면을 준상태경계면(quasi state boundary surface)이라고 규정짓고 그 면상에서 응력경로가 존재한다고 가정하면, 이후의 전단거동을 준상태경계면을 따라 발생하는 탄소성관계로 해석할 수 있다. 이 때 준상태경계면은 상태경계면처럼 응력 및 간극비상태의 경계를 나타내는 것이 아니라 단지 비가역적인 변형률이 발생하는 응력경로를 규정짓는 면이다.

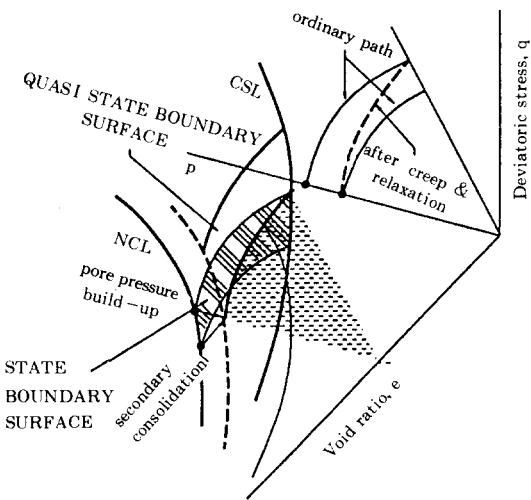
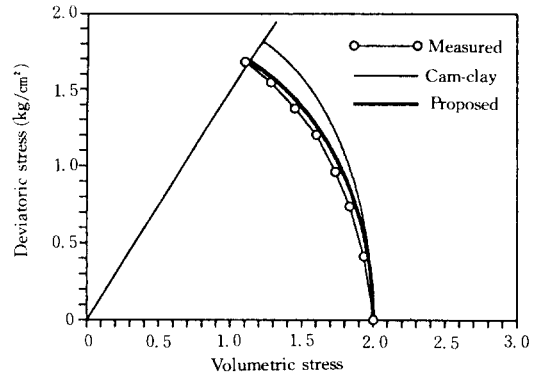
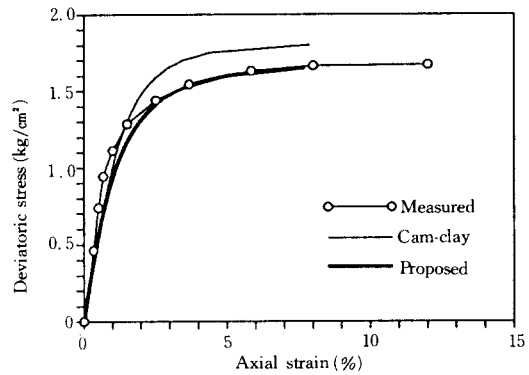


그림 8. Quasi state boundary surface

그림 9에서 보여지듯이 7일동안 압밀시켜 2차압밀을 유발시킨 후의 전단거동을 제안된 모델을 이용하여 준상태경계면상에서 해석하였다. 제안된 모델의 준상태경계면은 비배수응력 경로를 근사하게 예측하였고, 이때의 응력-변형률관계가 수정 Cam-clay 모델을 이용한 해석에 비하여 매우 정확하게 구해졌다.



(a) Undrained stress path

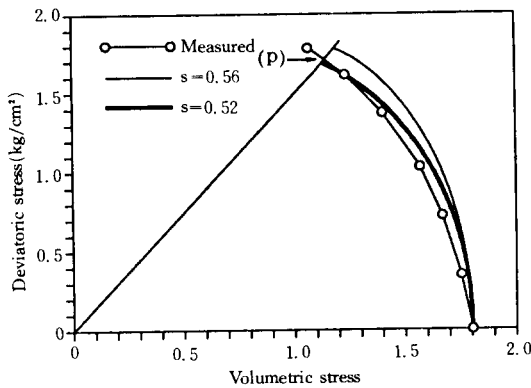


(b) Stress-strain relationship

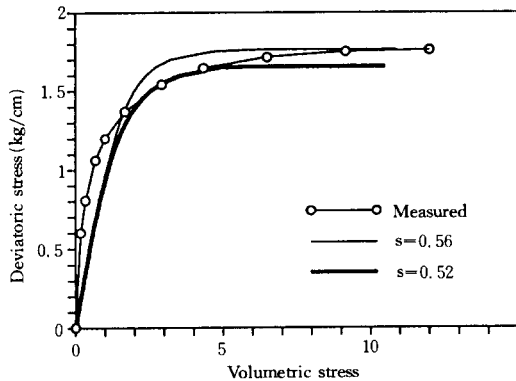
그림 9. Undrained behavior after secondary consolidation

또 그림 10에서는 실험적으로 구한 간극수압이 유발된 초기상태에 대하여 구한 준상태경계면으로부터 응력-변형률거동을 예측할 수 있었다. 비배수강도로부터 구한 s 값 0.56은 경로의 최종점에 대한 값이므로 파괴이전의 경로에 대하여 오차가 상당히 발생하였다. 제안된 모

델에서는 항복면을 타원의 형태로 단순화시키므로 이러한 오차의 가능성을 배제할 수는 없지만, 본 구성 모델의 특성을 미루어 보건데 평균 한계상태 강도 M 직선과의 교점(p) (그림 10-a)에서 비배수 전단강도를 구하고 s 값(0.52)을 표 2의 과정을 통하여 구하는 것이 상태경계면의 형태를 보다 정확히 표현할 수 있다. 이에 대하여 그림 10-a와 같이 비교적 경로를 잘 예측할 수 있었을 때, 변형거동을 그림 10-b와 같이 예측할 수 있었다.



(a) Undrained stress path



(b) Stress-strain relationship

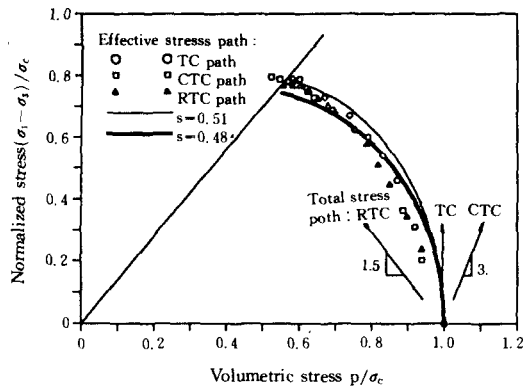
그림 10. Undrained behavior after pore pressure build-up

그림 10-b의 구성관계에 대한 예측은 매우 정확히 근사화된 한계상태면에 비하여 만족스러운 결과는 보여주지 못하였다. 이러한 결과는 탄성변형률을 산정할 때 포아송 비 ν 가 일정하게 0.25라는 경험적인 가정이 매우 개략적이어서 모든 흙에 대하여 일관적으로 적용되기에 한계가 있기 때문에 발생한 것으로 여겨진다. 그림 10의 응력이완에 대한 해석은 2차 압밀이후의 거동(그림 9)에서도 다소 보여지듯이 특히 낮은 응력수준에서 실제의 응력-변형률관계와는 상당한 차이를 보여준다. 따라서 실제 상태를 대표할 수 있는 포아송비를 이용한다면 실험치와 더욱 근사한 결과를 보일 것이며, 이를 위해서 탄성변형률량에 대한 더욱 합리적이고 실용적인 산정을 위한 연구가 요구된다.

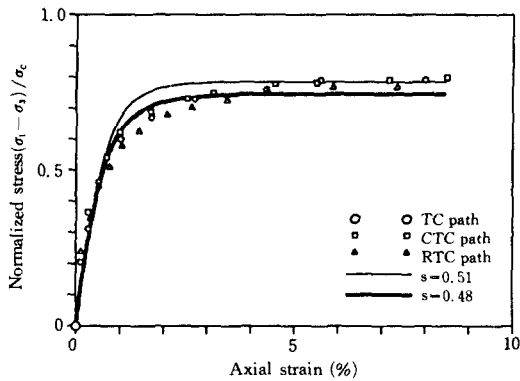
위의 결과들로 미루어 보아 제안된 모델은 실험시 하중을 가하는 시간조건들, 즉 2차압밀과 응력이완의 영향들에 대하여 상태경계면을 적절하게 설정할 수 있었고, 응력-변형률관계를 탄소성적으로 비교적 근사하게 예측하는 것이 가능하였다. 특히 크리프 및 응력이완현상을 점소성모델이 이용되지 않고 고려할 수 있었으며, 오랜시간에 따른 영향을 일관되게 일반화할 수 있는 더욱 심화된 연구가 필요하다고 여겨진다.

한편 Bonaparte는 2차압밀을 유발시킨 후 상이한 총응력경로에 대하여 압밀응력 1 kg/cm^2 으로 구속시킨 후 비배수전단 삼축시험을 수행하였다.⁴⁾ 과잉 간극수압을 소산시키기 위한 압밀시간의 차이에 의하여 실험적으로 B_2 의 비배수 응력경로는 B_1 의 경로와 상이하게 나타났으며, 표 2의 B_1 , B_2 계수값들에서 보여지듯이 이러한 2차압밀은 간극비 e_0 보다는 항복면의 형태를 설정하는 s 값에 더욱 큰 영향을 주었다. 그리고 그림 11-a와 같이 실험치는 약간의 차이는 있지만 총응력경로에 무관하게 유효응력경로가 대체로 일치하였으며, 예측치는 모두 일치하는 것으로 해석하였다.

비배수강도로 부터 구한 한계상태 간격비



(a) Undrained stress path



(b) Stress-strain relationship

그림 11. Undrained behavior of Bonaparte data

0.51은 수정 Cam-clay와 유사하며, 그림 11-a와 같이 0.48일 경우에 중간응력수준에서 경로를 비교적 정확하게 예측할 수 있었다. 그림 11-b에서 보여지듯이 강도에 도달하기 이전의 구성거동을 s 값이 0.48일 때 비교적 정확히 예측하였고, 강도는 약간 과소평가하였다.

특히 축방향 변형률이 4.5% 정도까지는 중간 응력수준에서의 응력경로를 잘 예측한 0.48 (s 값)의 경우가 응력-변형률관계를 잘 나타냈고, 그 이후에는 0.51의 경우에 매우 근사하게 나타냈다. 만일 전체 응력경로를 일관되게 고려할 수 있는 타원이 아닌 항복면 형태를 이용한다면 응력-변형률관계가 매우 정확하게 예측될 것이다. 따라서 다양한 총응력경로의 비

배수거동은 상태경계면 혹은 비배수 전단응력 경로를 정확하게 설정할 수 있다면, 관련유동칙을 따른다는 가정을 적용하여 응력-변형률 관계를 매우 근사하게 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

7. 결론 및 요약

본 연구에서는 모델의 안정성을 저해하지 않는 계수인 한계상태 간격비를 이용하여 Cam-clay 모델의 유연성을 확장시킬 수 있었다. 제안된 모델은 정규압밀상태의 점토질 지반에서 한계상태 간격비를 이용하여 일정한 간격비에서의 상태경계면, 즉 비배수 응력경로를 매우 정확하게 근사화 할 수 있었다. 이는 상태경계면을 따라 일어나는 응력상태에서의 항복을 적합하게 표현할 수 있었기 때문이라고 판단된다. 따라서 본 모델은 습윤영역(주어진 항복면에서 한계상태 체적응력보다 큰 체적응력상태)에서 지반재료의 항복면을 실제와 매우 유사하게 설정할 수 있었다.

이 때 발생한 응력-변형률관계를 유사하게 예측한 것으로 미루어 보아 본 논문에서 인용된 점토질 지반은 제안된 항복면을 기준으로 볼 때, 관련유동칙을 따른다는 가정을 만족하는 것으로 보여진다. 본 연구를 통해서 얻을 수 있는 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 한계상태 간격비를 이용하여 수정 Cam-clay 모델에 비하여 다양한 항복면을 간편하게 설정할 수 있었다.

(2) 제안된 모델의 증분분산에너지는 수정 Cam-clay 모델의 에너지 조건을 충족시킬 수 있었고, 비배수 전단강도로부터 편리하게 간격비를 구할 수 있었다.

(3) 비배수전단 삼축압축시험자료들을 해석한 결과, 더욱 실제에 근사한 비배수 응력경로를 구할 수 있었고, 이는 제안된 모델이 실제의 상태경계면을 잘 나타낼 수 있음을 의미한다.

(4) 제안된 모델은 수정 Cam-clay 모델에

비하여 실제와 유사하게 응력-변형률관계를 나타낼 수 있었다.

(5) 크리프 및 응력이완이후의 전단거동이 준상태경계면상에서 발생한다고 가정하여 탄소성관계로 해석하였으며, 제안된 모델은 크리프 및 응력이완이후의 거동을 유사하게 재현할 수 있었다.

제안된 모델의 유연성을 더욱 향상시키기 위하여 비등방성, OC상태의 응력-변형률거동과 시간에 따른 거동등에 대하여 더욱 심화된 연구가 필수적으로 요구된다. 본 집필자들은 한계상태 간격비의 시간에 따른 변화를 고려하여 전단변형률 속도, 크리프 및 응력이완에 따른 영향을 일관되게 표현할 수 있는 구성모델에 대한 연구를 계속적으로 수행하고 있다. 제안된 모델은 수정 Cam-clay 모델을 확장시켰기 때문에 건조영역(dry side)으로 지칭되는 과다한 과압밀(heavily overconsolidated)상태에 적용하기는 곤란하다.

그리고 본 연구는 축대칭 실내실험을 이용한 정규압밀상태이후의 전단거동에 한정되었으나, 현장 지반의 복잡한 구성관계를 나타내기 위하여 K₀ 압밀상태 및 3차원응력장에서의 거동에 대한 심화된 연구가 필요하다. 하지만 현장지반의 응력과 변형거동을 예측하려면 미지의 원지반 초기응력과 실내실험을 통한 모델계수의 도출로 인한 문제들을 해결하기 위한 연구가 필수적으로 병행되어야 한다. 따라서 본 기관에서는 DMT, PMT, CPT등의 현장시험들을 통하여 모델계수들을 도출하고 초기응력상태를 설정하는 연구를 구성 모델의 유연성을 확장하려는 노력과 관련지어 수행하고 있다.

참고문헌

1. Adachi, T., and Oka, F.(1982). "Constitutive Equations for Normally Consolidated Clay

Based on Elasto-viscoplasticity," Soils and Foundations, Vol. 22, SM4, pp.57-70

2. Atkinson, J. H., and Bransby, P. L.(1978). The Mechanics of Soils, McGraw Hill

3. Baladi, G. Y., and Rohani, B.(1979). "Elasto-plastic Model for Saturated Sand", J. Geotech. Engrg., ASCE, Vol.105, GT4, pp. 465-480

4. Bonaparte, R.(1981). "A Time-dependent Constitutive Model for Cohesive Soils," Thesis presented to the Univ. of California, at Berkeley, Calif. in partial fulfillment of requirements for the degree of Doctor of philosophy.

5. Borja, R. I., Hsieh, H. S., and Kavazanjian, E. Jr.(1990). "Double-yield-surface Cam-clay Plasticity Model. II: Implementation and Verification," J. Geotech. Engrg., ASCE, Vol. 116, GT9, pp.1402-1421

6. Desai, C. S., Somosundaram, S.M., and Frantziskonis, G.(1986). "A Hierarchical Approach for Constitutive Modeling of Geologic Materials," Int. J. Num. Analyt. Meth. Geom., Vol.10, pp.225-257

7. Lade, P. V.(1990). "Single-Hardening Model with Application to NC Clay," J. Geotech. Engrg., ASCE, Vol.116, GT3, pp.394-414

8. Nova, R., and Wood, D. M.(1979). "A Constitutive Model for Sand in Triaxial Compression", Int. J. Num. Analyt. Meth. Geom., Vol.3, pp.255-278

9. Roscoe, K. H., and Burland, J. B.(1968). "On the Generalized Stress-strain Behavior of 'Wet' Clay," in Engineering Plasticity, J. Heyman and Leckie(Eds). Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp.535-609

10. Sandler, I., DiMaggio, F., and Baladi, G. Y. (1976). "Generalized Cap Model for Geological Materials," J. Geotech. Engrg., ASCE, Vol.102, GT7, pp.683-699

11. Scofield, A. N., and Wroth, C. P.(1968). Critical State Soil Mechanics, McGraw Hill

12. Shen, C. K., Arulanandan, K., and Smith, W. S.(1973). "Secondary Consolidation and Strength of Clay," J. Geotech. Engrg., ASCE, 99, GT1, pp.95-110

13. Wroth, C. P.(1984). "The Interpretation of In Situ Soil Test" Geotechnique, Vol.34, No.4, pp. 449-489

부 록

제안된 모델의 항복면의 식은 다음과 같다.

$$\frac{(p-p_{cr})^2}{(p_c-p_{cr})^2} + \frac{q^2}{q_{cr}^2} = 1 \quad (A-1)$$

여기서 $p_{cr}=s p_c$, $q_{cr}=M s p_c$

식 A-1의 양변을 미분하면,

$$dp/dp = -\frac{q_{cr}^2}{(p_c-p_{cr})^2} \frac{p-p_{cr}}{q} \quad (A-2)$$

이므로,

$$\psi = \frac{d\epsilon_d^p}{d\epsilon_v^p} = -\frac{1}{dq/dp} = \frac{(p_c-p_{cr})^2}{q_{cr}^2} \frac{q}{p-p_{cr}} \quad (A-3)$$

이다. 식 A-3에 A-1을 풀어서 대입하면,

$$q_{cr} \{1 - q^2/q_{cr}^2\}^{1/2} d\epsilon_d^p + (p_c - p_{cr}) \{1 - (p - p_{cr})^2 / (p_c - p_{cr})^2\}^{1/2} d\epsilon_v^p = 0 \quad (A-4)$$

이다. 그리고 s 가 0.5일 경우 $p_{cr}=1/2 p_c$, $q_{cr}=1/2 M p_c$ 이고, Cam-clay 모델과 동일한 항복면을 설정하게 되며 그 에너지식은 다음과 같다.

$$p^2 (d\epsilon_v^p)^2 + q^2 (d\epsilon_d^p)^2 = p p_c (d\epsilon_v^p)^2 + (1/2 M p_c)^2 (d\epsilon_d^p)^2 \quad (A-5)$$

한계상태일 경우 $d\epsilon_v^p=0$ 이 되어 식 A-4는

$$q d\epsilon_d^p = q_{cr} d\epsilon_d^p \quad (A-6)$$

이므로, 정규압밀상태에서는 $d\epsilon_d^p=0$ 이 되어

$$p d\epsilon_v^p = p_c d\epsilon_v^p \quad (A-7)$$

가 된다.

(접수일자 1991.11.18)