

미약한 과압밀상태의 점토지반에 대한 구성모델

A Constitutive Model for Lightly Overconsolidated Clays

이 승 래*¹
Lee, Seung-Rae
오 세 봉*²
Oh, Se-Boong

Abstract

Constitutive relations for lightly overconsolidated state of clayey soils, as well as normally consolidated state of those, play an important role in the analyses of geotechnical structures in clay deposits. For the practical point of view, a constitutive model applicable to lightly overconsolidated soils should be developed to easily evaluate the model parameters, and to precisely predict the various behavior of OC soils. For that purpose, a constitutive model for the lightly overconsolidated soil behavior has been proposed to represent the undrained behavior which can be normalized using equivalent pressure, P_e . Yielding within the initial yield surface is modeled exclusively using the given normally consolidated model parameters only. Furthermore, the proposed model can be applied to consider the effects of overconsolidation, secondary consolidation, and stress relaxation. The measured behavior in undrained triaxial tests has been predicted easily and precisely in comparison with other models.

요 지

연약한 점토지반에서는, 정규압밀상태와 더불어 미약한 과압밀상태에서의 구성관계가 실제 지반구조물의 거동을 해석하는 데 중요한 역할을 한다. 미약한 과압밀상태의 거동에 실용적으로 적용될 수 있는 구성모델은 비교적 간편한 계수만을 사용하여 실제의 다양한 거동을 정확하게 예측할 수 있도록 개발되어야 한다. 이러한 연유로 본 연구에서는 등가응력(p_e)으로 규준화하였을 때 나타나는 지반의 비배수거동을 재현하여 미약한 과압밀상태에 적용할 수 있는 구성모델을 제안하였다. 제안된 모델은 단지 정규압밀상태의 거동으로 도출할 수 있는 모델계수만을 사용하여 초기항복면내부에서 발생하는 항복현상을 표현할 수 있다. 뿐만아니라 제안된 모델은 과압밀상태, 2차압밀, 응력이완등의 영향에 따른 실제의 거동을 기존의 모델들에 비하여 더욱 간편하고 정확하게 예측할 수 있다.

*1 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 조교수

*2 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

1. 서론

최근 들어 해안 매립지에서의 공단조성등으로 국내의 연약한 점토지반에 건설되는 지반구조물이 증가하는 추세에 있어서, 이러한 연약지반의 강도 및 침하특성을 예측하여 지반공학적인 안정성과 사용성에 관련된 문제를 해석하는데 많은 관심이 모아지고 있다. 일반적으로 연약한 점토지반은 과압밀비가 1.0에서 2.5 정도까지인 미약한 과압밀상태에 놓여있는 경우가 많으므로⁽⁹⁾, 정규압밀상태와 더불어 미약한 과압밀상태에 있는 연약지반의 재료 거동에 관한 연구는 실제 지반구조물 건설시 나타나는 문제를 해석할 경우에 필수적으로 수행되어야 한다.

한편 컴퓨터 기술의 진보와 수치해석 방법의 눈부신 발달로 인하여, 실제 지반의 구성관계(constitutive relation)를 적용하여 터널, 굴착, 성토, 관입등의 방법으로 건설된 복잡한 지반구조물을 해석하는 것이 가능하게 되었다. 이 때 사용되는 구성방정식은 다양한 응력-변형률거동을 표현할 수 있는 이론적인 수단이며, 컴퓨터 해석방법을 이용하여 복잡한 지반공학문제를 푸는데 있어서 핵심적인 역할을 하게 된다⁽¹⁾.

그러나 연약한 점토지반의 과압밀상태의 거동을 재현할 수 있는 구성모델에 관한 많은 연구에도 불구하고, 대부분의 제안된 모델들은 과압밀상태의 복잡한 거동을 모델하기 위하여 많은 모델계수를 사용하고 있다. 따라서 과압밀상태의 거동에 적합한 구성모델이 실용적으로 적용되기 위해서는, 비교적 간편한 계수만을 이용하여 과압밀상태의 다양한 거동을 표현할 수 있는 구성모델을 개발하는 것이 절실하게 요구되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 한계상태이론에 근거하여 정규압밀상태의 지반으로부터 도출되는 계수만을 이용하여 미약한 과압밀상태의 점토지반에서 나타나는 비배수 거동을 적합하게 표현할 수 있는 실용적인 구

성모델을 제안하였다.

2. 등가응력(p_e)으로 규준화된 응력 경로 및 구성관계

점토질 흙을 비롯한 지반재료들은 구속응력 및 응력경로뿐만 아니라 과압밀비의 영향에 따라 상이한 구성관계를 나타낸다. 예를 들어, 삼축압축실험장치를 이용한 등방압밀 비배수시험(ICU test)을 수행하면, 과압밀비가 증가할수록 유발되는 과잉간극수압이 감소하여 심한 과압밀상태에서는 부압이 발생하기도 한다. 이러한 경향으로 발생하는 과잉간극수압으로 인하여 동일한 전응력경로를 지닌 비배수시험에서 유효응력 경로가 과압밀비에 따라 상이하게 나타나게 된다.

일반적으로 등방압밀된 점토 지반의 경우, 정규압밀상태 및 미약한 과압밀상태에서는 축차응력이 한계상태에 도달하면 파괴가 일어나는 것으로 알려졌다. 이러한 파괴 양상을 나타내는 과압밀시료에 대하여, ICU 시험을 수행하면 그림 1-a와 같이 과압밀비에 따라 다양한 유효응력경로를 나타낸다(이 때 축대칭시료의 경우 등방응력은 $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$, 축차응력은 $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$ 로 정의되며, 사용된 주응력 σ_1 과 σ_3 은 유효응력이다). 또한 그림 1-b에서 보여지듯이 임의의 과압밀비를 가진 시료에 축차응력이 가해지기 시작하는 초기등방응력, p_1 로부터 파괴가 일어나는 한계상태까지의 유효응력경로는 $p-q$ 평면에 나타냈을 때, 그림 1-a와 같이 과압밀이 심할수록 강도는 다소 감소하고 응력경로의 기울기가 점점 급해지는 경향을 보이고 있다⁽¹⁰⁾. 특히 이때 나타난 응력경로는 정규압밀상태뿐 아니라 과압상태에서도 대체로 곡선형태를 띠고 있다.

한계상태이론에 의하면 그림 1-b에 나타낸 등가압밀응력, p_e (주어진 등방응력의 간극비에 상응하는 정규압밀상태의 압밀응력)가 동일한 정규압밀상태 및 미약한 과압밀상태의 비배수

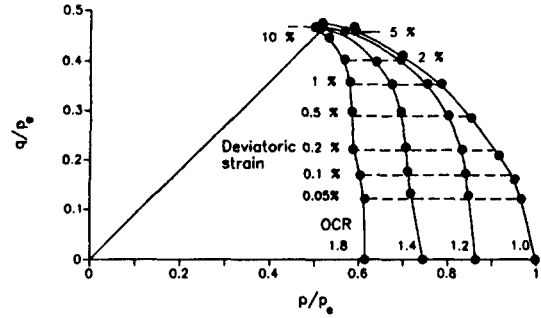
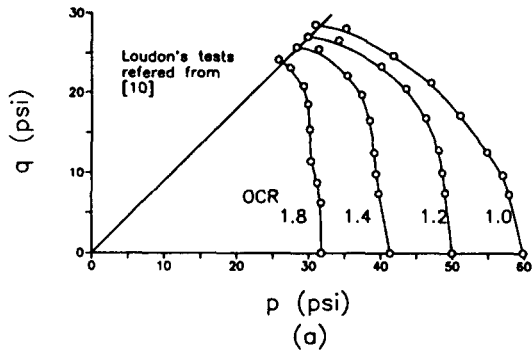


그림2. 등가응력 p_e 로 표준화된 비배수 거동 (12)

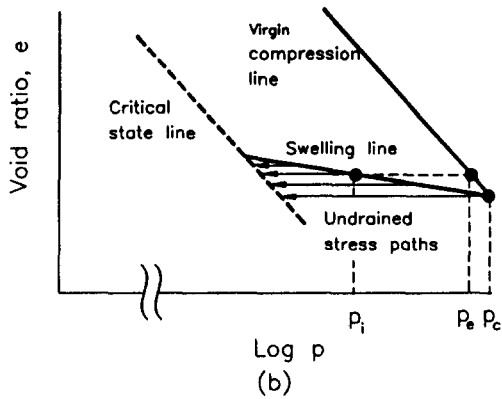


그림1. 과압밀상태의 비배수 유효응력경로

유효응력경로를 나타냈을 때, 파괴시 동일한 응력상태를 가지게 된다. 따라서 그림 1-a의 유효응력경로를 등가응력으로 표준화하여 $p/p_e - q/p_e$ 평면상에 나타내면, 그림 2와 같이 과압밀비와 무관하게 파괴시의 응력상태가 일치하며 과압밀비에 따른 초기응력상태에 의하여 비배수 유효응력경로의 형태가 상이하게 나타난다.

Roscoe와 Burland⁽¹⁰⁾는 그림 1-a에 나타난 비배수 전단거동시 발생하는 변형률이 미약한 과압밀 상태에서는 과압밀비와 상관없이 동일한 축차응력에서는 같은 양의 축차변형률이 발생한다고 보고하였다. 이에 비하여 Wroth⁽¹²⁾에 의하면 등가응력을 이용하여 응력을 표준화시키면 그림 2와 같이 축차응력

q 보다는 표준화된 축차응력 q/p_e 에 따라 등변형률 윤곽선(constant strain contour)이 더욱 정확하게 나타난다. 이러한 실험결과의 해석을 이용하면 과압밀비에 따른 비배수 거동을 등가응력 p_e 로 표준화함으로써 정규압밀상태와 동일한 응력-변형률관계로 표현할 수 있을 것이다.

한편, 점토질 흙으로 이루어진 지반은 시간의존적인(time dependent) 거동을 하므로 크립, 응력이완 및 전단변형률 속도등의 영향에 따라 상이한 구성관계를 나타낸다⁽¹¹⁾. 이 중에서는 크립 및 응력이완현상은 축차응력이 없는 등방압밀상태에서는 각각 2차압밀과 과잉간극수압이 시간이 지남에 따라 계속 유발되는 현상으로 나타난다(과잉 간극수압이 유발되어 유효응력이 이완되는 현상은 등방응력을 일정한 상태로 오랜 시간동안 비배수상태에서 유지시켰을 때 발생한다)⁽¹¹⁾. 뿐만 아니라 전단변형률 속도에 따라 비배수 전단강도등의 강도계수값 및 응력-변형률관계가 영향을 받게 된다⁽¹¹⁾. 이러한 전단변형률 속도의 영향으로 인하여, 현장지반에서는 응력이 가해지는 속도나 지반내의 국부적인 요소가 변형되는 속도등에 따라 실제 지반의 거동이 상이하게 유발될 것이다. 특히 현장지반에서 지반정수를 도출하는 시험이 수행되는 전단변형률 속도가 현장상태 지반이 경험하게 될 속도와 다를 경우에는 실제 지반의 거동을 예측하기에 적합하지 않은

계수를 구하게 된다. 따라서 지반 구조물에 대한 수치해석을 수행할 경우에 실제 지반이 겪는 변형률 속도에 대한 구성관계를 고려함으로써 보다 정확한 해석이 가능하다. 이러한 거동을 표현하기 위하여 이승래등⁽¹⁾은 각 변형률 속도에 적합한 항복면을 설정하여 그 거동을 실제와 매우 근사하게 예측할 수 있었다.

이와 같은 요소들에 의하여 실제의 거동이 달리 나타나므로 앞서 논의한 그림 2의 표준화된 응력경로 및 구성관계는 실험적으로 동일한 속도로 변형된 자료에만 적용되며, 변형률 속도가 서로 다를 경우에는 측정된 표준화된 한계상태에서의 강도가 일치하지 않을 수 있다.

3. 과압밀상태의 거동에 대한 구성모델

3.1. 기존의 구성모델

점토질 흙등에 잘 적용되는 것으로 알려진 기존의 수정 Cam-Clay 모델⁽¹⁰⁾은 선행압밀 응력 (preconsolidation pressure) 또한 최대등방응력 (previous maximum pressure)에 의하여 규정되는 초기항복면내에 응력상태가 존재하는 경우 탄성거동을 하는 것으로 간주하므로, 과압밀상태에서 비배수 전단거동이 발생하면 초기항복면에 도달하기까지는 탄성변형률만이 발생한다⁽²⁾. 이와 같은 경우 비배수상태에서는 체적이 일정한 상태로 유지되므로 초기항복면내에서는 탄성 체적변형량이 발생하지 않게 되며, 탄성론에 의거하여 등방응력은 일정한 채로 축차응력만이 증가하는 비배수 유효응력경로를 예측하게 된다. 그러나 실제로 과압밀 상태에서의 비배수 응력경로는 설정된 초기항복면내에서도 상당히 곡선적인 형태를 띠고 있으며, 탄성거동만으로 예측된 변형률량은 실제의 양을 과소평가하는 문제가 발생하게 된다.

이러한 문제들을 해결하기 위하여 Roscoe와 Burland⁽¹⁰⁾는 실제의 변형률을 정확하게 표현

할 수 있도록, 수정 Cam-clay 모델의 항복면과 더불어 그 내부에 존재하는 축차항복면 (deviatoric yield surface)을 이용하여 과소평가되는 변형률을 실제에 근사하게 예측할 수 있었다. 이 때 축차항복면이란 von-Mises 항복규준처럼 소성 체적변형은 발생하지 않고 소성 축차변형만이 발생하는 등방응력축에 평행한 형태의 항복면이다. 이러한 모델은 그림 2와 같이 실험적으로 관찰된 등변형률 윤곽선의 형태와 유사한 항복면을 설정한 것이며, 소성 변형량은 응력증분이 아닌 응력상태에 의존하기 때문에 동일한 축차응력수준에서 동일한 축차변형률이 발생하도록 모델한 것이다. 단, 실험적으로 제시된 등변형률 윤곽선은 Wroth⁽¹²⁾와는 달리 표준화되지 않은 p-q 평면상에서 나타난 것을 이용하였다.

이 모델을 이용하여 과압밀상태의 비배수 거동을 예측하면 초기항복면 내부에서 발생하는 소성변형률을 고려할 수 있으며, 소성 체적변형률이 발생하지 않으므로 수정 Cam-Clay 모델의 경화함수에 영향을 끼치지 않고 항복이 발생하여 간편하게 수식화할 수가 있다. 그러나 초기 항복면내에서의 유효응력경로는 수정 Cam-Clay 모델과 동일하게 예측되어 실제의 곡선적인 형태를 재현할 수가 없다. 한편 Borja 등⁽⁴⁾은 이러한 축차항복면 모델을 이용하여 과압밀상태의 불교란 시료에 대한 비배수 거동을 예측하였다.

이외에 정규압밀상태와 더불어 과압밀상태의 구성관계를 체계적으로 예측할 수 있는 모델에는 이방 경화 (anisotropic hardening) 또는 운동 경화 (kinematic hardening) 모델이 있다. 이러한 경화모델은 등방 경화모델이 표현할 수 없는 이방성 재료의 거동과 지반재료의 동적거동을 모델하는 데 주로 적용된다⁽⁶⁾. 일반적으로 등방 경화모델은 항복면의 형태나 중심의 위치가 변화하지 않고, 그 크기가 확대되며 경화가 일어나는 반면, 이방 경화모델은 주로 항복면의 중심위치가 이동하며 경화현상이 발생하게 된다. 따라서 이방 경화모델은

Bauschinger 효과나 hysteresis 등의 동적인 구성관계를 모델하는 데 효과적이다.

이러한 이방 경화모델이 점토 지반등의 과압밀 상태에 적용되는 것은, 앞서 언급하였듯이 실제 지반재료에서는 초기 항복면내에서도 소성변형량으로 보여지는 과다한 변형량이 발생하는 것을 표현할 수 있기 때문이다. 이러한 모델을 이용하여 과압밀상태의 구성관계를 예측하면 Bauschinger 효과등을 함께 고려할 수 있는 종합적인 모델(unified model)을 적용할 수 있는 장점이 있기 때문이다. 하지만 과압밀상태의 정적인 구성관계에 한하여 사용되는 모델로는 계수가 지나치게 많고 계수들의 공학적인 의미가 상대적으로 결여되어 있어 실용적으로 적용되기에 적합하지가 않다. 따라서 다음 절에서는 과압밀상태의 구성관계에 대하여 이방 경화모델만큼 정확도를 가지고 예측할 수 있는 등방 경화모델을 개발함으로써 점토지반의 정적인 거동을 나타내고자 할 때 보다 간편하고 실용적으로 사용될 수 있는 모델을 제안하였다.

3.2. 과압밀상태를 고려한 새로운 구성모델

3.2.1. 적응(adaptable) Cam-Clay 모델에서의 변형률

수정 Cam-Clay 모델에 의하면 소성체적변형률은 간극비의 변화로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$\Delta \epsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e} \Delta(\ln p_c) \quad (1)$$

여기서 λ 및 κ 는 $e - \ln p$ 관계에 대한 압축지수와 팽창지수이며, p_c 는 선행압밀응력(preconsolidation pressure)을 의미한다.

한계상태이론에 의하면 선행압밀응력 p_c 는 항복면과 정규압밀상태선의 교점으로 항복면의 크기를 나타낸다. 따라서 (1) 식은 소성체적변형률의 변화에 따라 항복면의 크기가 변화하는 것을 나타내는 경화(hardening) 함수이

며, 이 때 압축지수 λ 및 팽창지수 κ 는 경화 계수로 사용된다. 한편 관련유동칙(associative flow rule)에 의하면, 항복면의 경사에 수직한 방향으로 소성변형률 벡터가 발생하므로 소성변형률비를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\psi = \frac{\Delta \epsilon_v^p}{\Delta \epsilon^p} = \frac{-1}{dq/dp} \quad (2)$$

그러므로 소성축차변형률은 식 (1)과 (2)로부터 경화함수 및 항복면의 형태에 의하여 다음과 같이 구해진다.

$$\Delta \epsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e} \Delta(\ln p_c) \psi \quad (3)$$

이 때 소성변형률비 ψ 는 항복면의 형태에 의하여 산정되므로 원 Cam-Clay 모델 혹은 수정 Cam-Clay 모델에 따라 상이하게 결정된다.

그러나 원 Cam-Clay 모델이나 수정 Cam-Clay 모델은 항복면의 중심(즉 항복면상의 한계상태응력을 p 축에 투사하였을 때 나타나는 응력점)에서의 등방응력이 모든 지반재료에 대하여 각각 $0.368 p_c$ 및 $0.5 p_c$ 와 같다고 가정하므로 다양한 지반의 구성관계를 정확하게 표현하기가 곤란하다. 특히 정규압밀상태의 점토지반일 경우, 상기의 모델들은 비배수상태에서의 응력-변형률관계를 실제와 매우 다르게 예측한다.

한편 이승래등이 제안한 적응(adaptable) Cam-Clay 모델⁽¹¹⁾은 한계상태간격비(s)를 이용하여 항복면의 중심위치를 대상지반의 특성에 따라 합리적이고 간편하게 결정할 수 있었다. 여기서 한계상태간격비(spacing ratio of critical state)는 $p - e$ 평면상에서 팽창곡선위에 나타나는 정규압밀상태에 대한 한계상태의 체적응력비를 의미한다. 이러한 적응 Cam-Clay 모델은 정규압밀상태의 비배수수동을 실제와 매우 근사하게 예측할 수 있었으며, 특히

전단 변형률속도에 따라 나타나는 상이한 거동을 표현하는 데 적합하게 이용되었다. 이 모델은 수정 Cam-Clay 모델과 동일한 경화함수를 사용하며, 항복면함수 F 는 다음과 같이 구해진다.

$$F = q^2/M^2 + \frac{s^2}{(1-s)^2} \{p - (2s-1)p_c\} (p - p_c) \quad (4)$$

또한 적응 Cam-Clay 모델의 축차변형률은 한계상태이론에서와 같이 (3) 식으로 나타나지만, 소성변형률비 ψ 는 원 Cam-Clay 모델 및 수정 Cam-Clay 모델과는 다른 다음과 같은 식으로 나타난다.

$$\psi(\eta) = \frac{(1-s)^2}{M^2 s^2} \frac{\eta}{1-s p_c/p} \quad (5)$$

이 때 η 는 q/p 로 정의되고, p_c/p 는 (4) 식으로부터 구하면 η 의 함수가 되므로 ψ 는 η 만의 함수로 규정된다.

미약한 과압밀상태의 표준화된 비배수 응력-변형률관계가 과압밀비에 상관없이 정규압밀상태와 유사하게 나타나는 거동을 고려하면 3.1. 절에서 논의된 구성모델들(이방경화모델 및 축차항복면 모델)보다 간편하게 실제의 구성관계를 비교적 정확하게 예측할 수 있을 것이다. 더우기 추가적인 계수를 도입하지 않고 정규압밀상태의 거동을 나타내기 위하여 사용된 모델계수만에 의하여 과압밀 상태의 거동을 예측하도록 할 수 있다면 매우 실용적인 것이다.

그런데 한계상태이론을 이용하여 표준화된 축차응력에 따라 동일한 소성축차변형률을 예측하려면, 식 (3)에서 보여지듯이 등가응력 p_e 가 동일한 초기상태에 대하여 소성체적변형률과 항복면의 경사가 과압밀비에 상관없이 일치해야 한다. 이 때 경화함수로부터 구해지는 소성체적변형률은 과압밀비에 따라 상이하게 나

타나는 응력경로로 인하여 정규압밀상태와 일치하도록 모델하려면 초기 과압밀상태에 따라 경화계수 λ, κ 의 값을 적합하게 변화시켜야 한다. 특히 소성변형률벡터의 방향과 관련된 항복면의 경사는 η 의 함수(implicit 한 함수로 나타남)로 정의되므로 표준화된 축차응력에 따라 일치하도록 모델하기가 곤란하다. 따라서 소성체적변형률과 항복면의 경사가 각각 일치하도록 모델하기보다는 두 요인에 의한 영향이 서로 상쇄되어 정규압밀상태의 변형률과 유사하게 예측할 수 있도록 모델하였다.

3.2.2. 제안된 과압밀상태의 구성 모델

본 구성모델에서는 한계상태이론에 근거한 적응 Cam-Clay 모델의 항복면을 이용하며 과압밀비에 상관없이 표준화된 구성관계가 정규압밀상태와 유사하게 나타나는 실제 거동을 모델하였다. 그리고 이러한 과압밀상태의 실제 거동은 시간에 따른 영향들(크립 및 변형률속도등)이 동일하게 작용하는 상태로 간주한다. 이 때 구성모델이 실용적으로 적용될 수 있도록 정규압밀상태에 사용되는 계수이외의 추가적인 계수를 사용하지 않고 과압밀상태의 비배수 응력경로 및 응력-변형률관계를 예측하고자 다음과 같은 가정을 설정하였다.

- ① 초기항복면내에서도 초기상태로부터 탄소성 거동이 발생하며 탄성거동만이 존재하는 경우는 응력제거(unloading)시만 나타난다.
- ② 과압밀상태의 항복면형태는 정규압밀상태와 동일하며, 적응 Cam-Clay 모델을 이용하면 한계상태간격비 s 가 과압밀비에 상관없이 일정한 값을 갖는다.
- ③ 과압밀영역의 항복면은 팽창곡선위에 존재한다.

이 때 ①의 가정은 축차응력수준이 매우 낮은 경우 소성변형률이 탄성변형률에 비하여 큰 영향을 끼치지 않으므로 이방 경화모델에서 이용

하는 순수하게 탄성거동만을 보이는 영역⁽⁵⁾을 무시한 것이다.

먼저 과압밀상태에서의 비배수전단 응력경로는 등방응력 - 간극비 및 등방응력 - 축차응력간의 관계에 따라 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 이 때 일정한 간극비에 대하여 나타나는 한계상태 등방응력(p_{cr})과 초기응력(p_i)의 비를 비배수경로간격비 r 로 정의하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$r = \frac{p_{cr}}{p_i} \quad (6)$$

이 때 상로간격비 r 은 부록 1에서 구해진 것과 같이 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$r = \frac{D_c}{p_i} s \Lambda \quad (7)$$

여기서, $\Lambda = 1 - \kappa/\lambda$

$$p_c = \exp \left\{ \frac{e_a - e}{\lambda} \right\}$$

e_a 는 등방응력이 1 (즉 $\ln p = 0$)일 때의 간극비

이러한 비배수 응력경로의 초기응력 및 최종 응력상태의 비를 나타내는 경로간격비는 과압밀상태의 응력경로를 모델할 수 있는 변수로 사용될 수 있다.

이미 언급한 ①의 가정에 의하여 초기응력 p_i 로부터 항복이 비롯되어 그림 3에 나타난 p_{cr} 상태에 응력경로가 도달할 때까지 ③의 가정에 따라 팽창곡선상에 항복면이 존재하려면, 과압밀상태의 경화현상이 그림 3-b의 λ_{oc} 선을 따라 발생해야한다. 따라서 과압밀상태에 상응하는 새로운 경화함수는 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\Delta \epsilon_v^p = \frac{\lambda_{oc} - \kappa}{1 + e} \ln (p_{co} / p_i) \quad (8)$$

여기서 p_{co} 는 선행압밀응력이 아니라 λ_{oc} 선

을 따라 나타나는 등방응력으로 항복면의 크기를 나타내고 있다. 그리고 λ_{oc} 선은 부록 2에서 유도한 것과 같이 다음과 같이 구해진다.

$$\lambda_{oc} = \frac{\kappa \ln s}{(\kappa/\lambda) \ln s - \ln (p_e/p_i)} \quad (9)$$

이 때 발생하는 항복면은 그림 3-a에서 나타났듯이 정규압밀상태에서의 항복면형태와 동일하게 설정(가정 ②)되었으며, 초기응력상태부터 탄소성거동을 나타내도록 모델되었다.

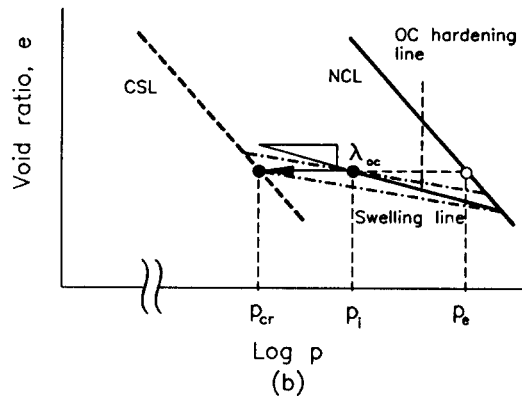
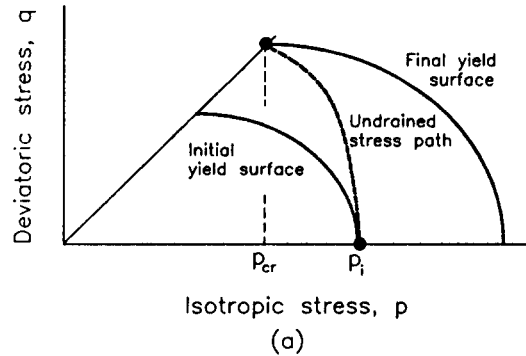


그림 3. 과압밀상태에서의 항복

제안된 모델을 이용하면, λ_{oc} 선을 따라 일어나는 경화현상으로 인하여 유발되는 과압밀상태의 소성 체적변형률 $\Delta \epsilon_v^p$ 는 동일한 규준화된 축차응력 q/p_e 를 가진 정규압밀상태의 경

우에 비하여 다소 작게 발생한다. 하지만 (5)식에 나타난 소성변형률비 ψ 가 q/p_e 가 아닌 η 의 함수이기 때문에 과압밀상태의 항복면에서 발생하는 소성변형률비가 정규압밀상태보다 과다하게 나타나므로, 소성 체적변형률과 소성변형률비로 인한 차이가 상쇄되는 효과를 준다. 따라서 규준화된 구성관계에서 나타나는 소성 축차변형률 $\Delta \epsilon_v^p$ 는 과압밀비와 상관없이 유사하게 예측될 수 있다.

4. 비배수삼축압축시험(ICU) 결과의 해석

4.1. 시간독립 구성관계

지반 재료는 크립, 응력이완 및 변형률속도 등의 시간 효과(time effect)의 영향에 따라 상이하게 거동을 하는데, 이러한 시간효과의 영향이 동일한 조건하에서 나타나는 시간독립 구성관계 삼축압축시험을 통하여 얻어진 실험치와 예측치를 비교하고자 한다. 한계상태이론에서는 등방탄성론에 근거하여 지반의 탄성변형률을 다음과 같이 고려할 수 있다.⁽²⁾

$$d\epsilon_v = \frac{1}{K} dp, \quad d\epsilon_s = \frac{1}{3G} dq \quad (10)$$

$$\text{여기서, } K = \frac{1+e}{\kappa} \cdot p$$

$$G = \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} K$$

이 때 포아송비 ν 는 일정하게 가정하였으며, 경험적으로 점토지반에 적합하다고 여겨지는 0.25를 사용하였다.

한편 소성변형률은 소성 체적변형률을 구한 후 관련응동칙에 의하여 (3) 및 (5)식으로부터 소성 축차변형률을 구하여 산정한다. 이 때 소성 체적변형률은 비배수거동시 총 체적변형률 증분 $d\epsilon_v (= d\epsilon_v^e + d\epsilon_v^p)$ 가 발생하지 않도록 (10)식에서 구해진 탄성 체적변형률에 상응하는 값으로 구할 수 있다. 그리고 축차 소성

변형률을 구할 때는 과압밀상태의 경화현상을 나타내는 λ_{oc} 를 이용한다.

실제치와 예측치를 비교 검증한 여러 점토지반의 시간독립거동에 대하여 사용된 모델계수, 과압밀비 및 초기응력은 표 1 및 2에 나타나 있다. 각 계수들은 문헌에 보고된 값을 사용하거나, 실험자료로부터 직접 구하였다.

표 1. 시간독립거동에 사용된 모델계수

인용된 자료	M	λ	κ	e_a	s
Roscoe ⁽¹⁰⁾	0.90	0.24	0.045	2.375	0.443
Dafalias ⁽⁵⁾	1.05	0.14	0.050	1.744	0.370
Bonarparte ⁽³⁾	1.40	0.37	0.054	2.520	0.440

표 2. 시간독립거동의 과압밀상태에 사용된 경화계수

인용된 자료	σ_c	OCR	p_e	r	λ_{oc}
Roscoe ⁽¹⁰⁾	50 (psi)	1.2	57.98	0.598	0.122
	42.86	1.4	56.34	0.678	0.086
	33.33	1.8	53.74	0.832	0.058
Dafalias ⁽⁵⁾	3042(KPa)	1.2	341.99	0.593	0.105
	193.0	2.0	301.35	0.824	0.062
Donarparte ⁽³⁾	0.667	1.5	0.943	0.701	0.0951
	0.5(kg/cm)	2.0	0.904	0.897	0.0623

그림 2에서 나타난 상이한 과압밀비에 대한 유효응력경로 및 응력-변형률관계(등변형률 윤곽선으로부터 도출)를 제안된 모델은 그림 4에서 보여지듯이 실제와 유사하게 예측하였다. 그림 4-a에서 예측된 응력경로는 등가응력으로 규준화된 비배수강도가 한점으로 일치함을 잘 나타낼 수 있었다. 그리고 과압밀비에 따라 달리 나타나는 초기응력에 의하여 경로의 형태가 상이하게 예측되었으며, 예측된 경로는 실제보다는 다소 심하게 곡선적인 형태를 나타냈다. 예측된 응력-변형률관계는 그림 4-b와 같이 과압밀비가 1.8일 경우에 약간의 오차가 발생하였지만 실제와 매우 근사하게 나타났

다. 이러한 관계는 본모델이 과압밀비에 상관 없이 대체로 일치하는 표준화된 구성관계를 예측할 수 있음을 보여준다.

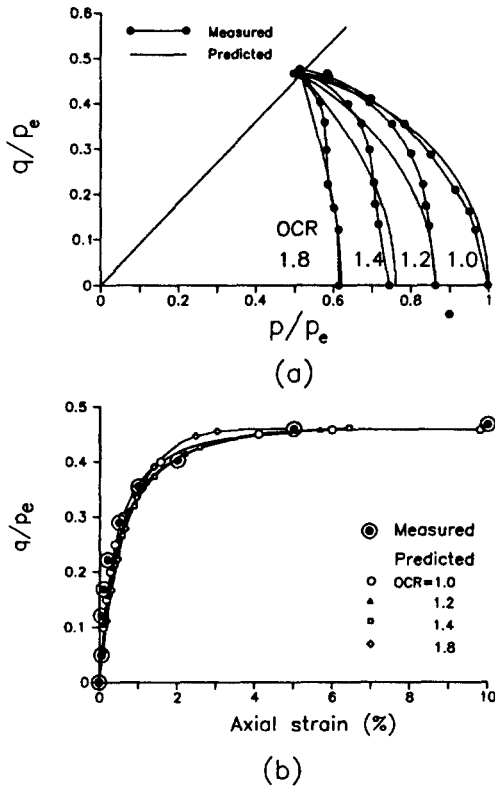


그림4. Roscoe 자료⁽¹²⁾의 비배수거동

대표적인 이방경화모델인 bounding surface 모델⁽⁵⁾은 과압밀상태의 비배수 유효응력경로를 그림 5-a와 같이 예측하였다. 동일한 자료에 대하여 제안된 모델은 bounding surface 모델이 예측할 수 있는 정확도에 뒤지지 않게 응력경로를 예측할 수 있었다. 또한 그림 5-b와 같이 응력-변형률관계를 실제와 매우 근사하게 예측할 수 있었다. 이러한 비교결과는 본 모델이 bounding surface 모델에 비하여 훨씬 적은 계수들을 사용하고 정규압밀상태에 사용되는 계수만으로 과압밀상태의 거동을 예측

함을 고려할 때 매우 간편하게 실제의 비배수 거동을 표현할 수 있음을 알 수 있다.

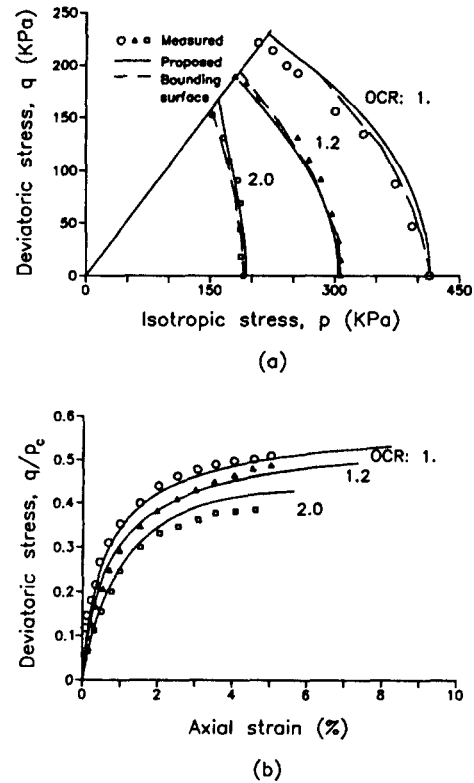


그림5. Dafalias 자료⁽⁵⁾의 비배수거동

Roscoe와 Burland에 의하여 제안된 축차항복면 모델⁽¹⁰⁾을 이용하여 Borja 등⁽⁴⁾은 불교란 시료의 과압밀상태의 거동을 그림 6과 같이 예측하였다. 그림 6-a, b는 제안된 모델, 그림 6-c, d는 축차항복면 모델이 예측한 거동을 실제치와 비교하였다. 이 때 실제의 표준화된 응력경로는 그림 6-a에서 보여지듯이 비배수 전단강도가 일치하지 않고 다소 차이를 보이고 있는데⁽³⁾, 이는 응력조절 삼축실험으로 인하여 전단변형률속도가 동일한 조건하에서 실험이 수행되지 않았기 때문이라고 여겨진다. Borja 등이 구한 계수를 이용하여 예측된 제안된 모

델의 경로는 표준화된 비배수강도가 일치하도록 예측하였으며, 응력 - 변형률관계는 특히 과압밀비가 1.5일 경우에 매우 실제와 유사하게 예측할 수 있었다. 이에 비하여 축차항복면 모델은 비배수강도를 실제보다 과소평가하였으며, 실제 나타난 응력경로 및 구성관계를 만족스럽게 예측할 수 없었다. 단 축차항복면 모델이 실제의 강도를 과소평가하여 강도계수 M 이 대략 1.2일 경우에 나타나는 표준화된 강도를 예측(사용된 계수 M 은 1.4임⁽⁴⁾) 하였는데(그림 6 - c), 높은 응력수준에서 과도한 변형으로 인한 수치적인 오차인지, 모델의 특성인지는 판단하기 곤란하지만 축차항복면 모델은

단지 축차변형률을 증가시켜 실제치와 근사하게 예측하도록 개발되었기 때문에 실제 과압밀 상태의 비배수 유효응력경로를 만족스럽게 표현하기 어렵다고 판단된다. 더우기 이러한 축차항복면모델은 수치해석방법에 적용될 경우, 항복면의 형태가 매끄럽지(smooth) 못하여 발생하는 구석영역(corner region)으로 인하여 알고리즘이 복잡해지는 문제를 유발할 가능성이 있다⁽⁴⁾.

4.2. 시간의존 구성관계

Shen 등⁽¹¹⁾은 정규압밀상태의 흙을 그림 7-a와 같이 2차압밀 및 과잉간극수압을 유발시

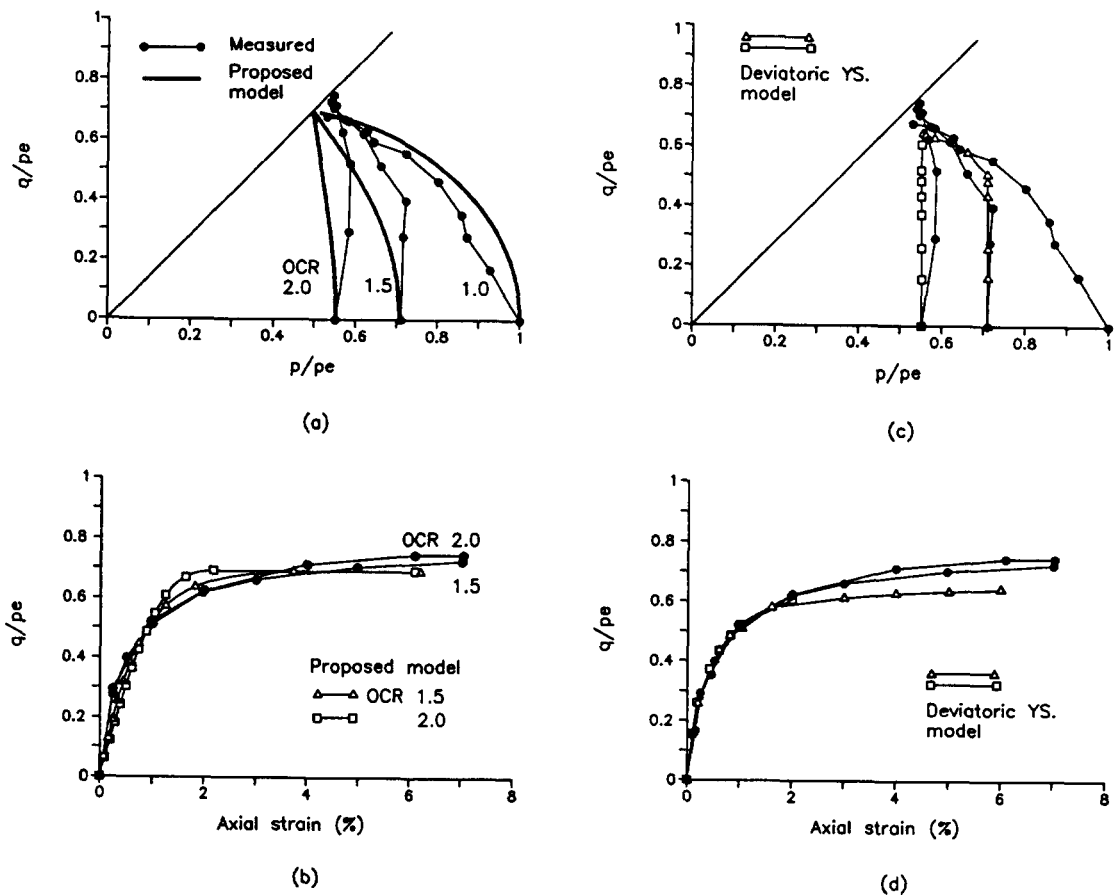


그림 6. Bonarparte 자료⁽³⁾의 비배수거동

켜 전단이전의 초기응력상태를 상이하게 나타내도록 삼축압축시험을 수행하였다. 이러한 그림 7-a의 ①과 ②는 다음과 같은 실험과정으로 나타난 상태이다.

- ① 구속응력 $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 까지 등방압밀시킨 시료를 7일간 2차압밀을 유발시킨 후 응력 조절 삼축기를 이용하여 비배수상태로 축차응력을 가하였다.
- ② ①과 마찬가지로 $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 구속응력에서 7일간 2차압밀을 유발시킨 시료를 비배수상태에서 8일간 과잉간극수압을 유발시킨 후 축차응력을 가하였다.

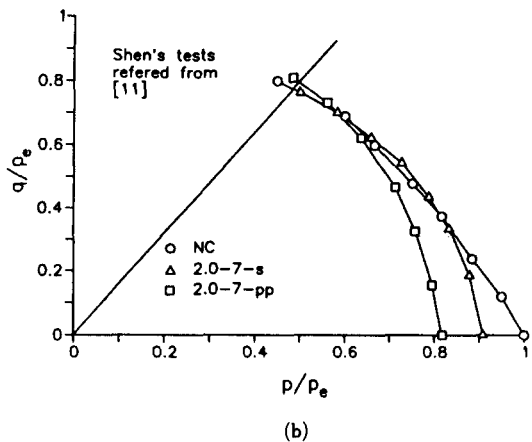
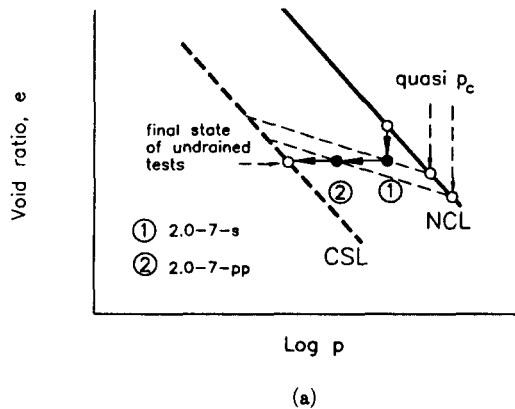


그림 7. 표준화된 시간의존거동

①과 ②의 방법을 통하여 실험한 시료를 각각 2.0-7-s 및 2.0-7-pp로 지칭하였을 때, 발생한 비배수전단(ICU 시험) 유효응력경로는 그림 7-b와 같이 나타났다. Shen 등에 의하면 이러한 2차압밀 및 간극수압유발이후의 거동은 1차압밀이후에 나타나는 미약한 과압밀 상태에서의 비배수 전단거동과 유사하게 나타난다. 특히 그림 7-b에서 보여지듯이 이러한 거동들에 대하여 증가응력으로 표준화된 비배수 응력경로들을 1차 압밀만으로 발생된 정규압밀상태의 경우와 비교할 때, 마치 그림 2와 같이 상이한 과압밀비로 인한 비배수 응력 경로들과 매우 유사한 경향을 보이고 있다.

한편 Kavazanjian과 Mitchell⁽⁸⁾은 첫째로 시간의존 구성관계가 과압밀상태의 시간독립적인 구성관계와 동일하고, 둘째로 과압밀상태의 구성관계는 상응하는 증가압밀응력 p_e 로 구속된 정규압밀상태에서의 거동과 일치한다고 가정하여 쌍곡선(hyperbolic) 모델로 시간의존 구성관계를 해석하였다. 그들은 2차압밀 및 응력이완현상은 모델할 수 있었으나 전단변형률 속도의 영향을 고려하지 않았으며, 과잉간극수압을 모델하기 위하여 추가적인 쌍곡선계수를 사용하였다.

제안된 모델은 이러한 크립효과로 인한 2차압밀 및 과잉간극수압이 유발된 등방압밀시료의 비배수 전단거동을 과압밀상태의 p_e 로 표준화된(시간독립)구성관계와 같이 거동한다고 가정하여 예측할 수 있다. 이 때 과압밀비는 실험적으로 나타난 간극비 및 압밀응력으로부터 그림 3-b처럼 준선행압밀응력(quasi preconsolidation pressure)을 결정하여 구할 수 있다. 이러한 개념을 검증하기 위하여 Shen 등⁽¹¹⁾과 Kavazanjian⁽⁷⁾의 실험결과를 이용하였으며, 사용된 계수 및 가상의 과압밀비는 표 3, 4에 나타나 있다.

그림 7에 나타난 Shen 등의 실험에 대하여 제안된 모델은 그림 8과 같이 예측하였다. 그림 8-b에 나타난 실제의 구성관계는 표준화된 비배수강도가 다소 상이하게 나타났는데,

표 3. 의존독립거동에 사용된 모델계수

인용된 자료	M	λ	κ	e_a	s
Shen ⁽¹¹⁾	1.60	0.32	0.080	1.94	0.397
Kavazanjian ⁽⁷⁾	1.45	0.326	0.0651	1.58	0.463

표 4. 시간독립거동의 과압밀상태에 사용된 경화계수

인용된 문헌	σ_c	OCR	P_e	r	λ_{oc}
Shen ⁽¹¹⁾	2.0(kg/cm ²)	1.142	2.209	0.552	0.2236
	1.805	1.136	2.218	0.615	0.1692
Kavazanjian ⁽⁷⁾	0.5(kg/cm ²)	1.6	0.728	0.787	0.0946

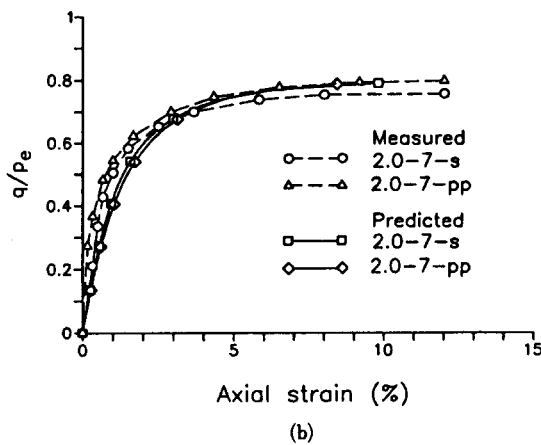
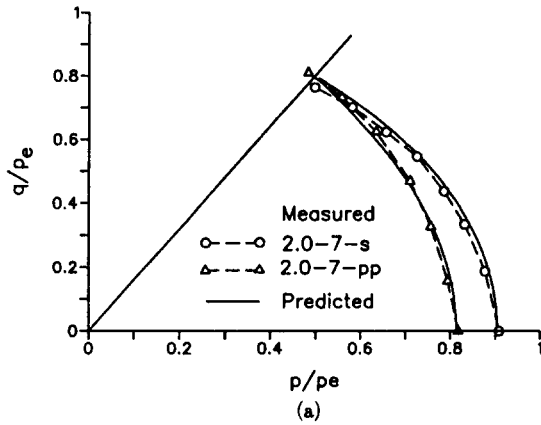


그림8. Shen 자료⁽¹¹⁾의 시간의존거동

이는 앞서 논의된 Bonarparte의 실험결과⁽³⁾와 마찬가지로 전단변형률속도의 차이로 인하여 발생한 것으로 간주된다. 그림 8-a에서 보여지듯이 유효응력경로는 매우 실제와 근사하게 예측할 수 있었으며, 예측된 응력-변형률관계는 실제에 비하여 변형률을 다소 과대평가하여 예측되었으나(그림 8-b) 대체로 시간효과를 과압밀상태로 간주하여 해석하는 것이 가능함을 입증할 수 있었다.

한편 그림 9의 실험결과⁽⁷⁾는 2차압밀의 영향에 따른 것으로 그림 8과 마찬가지로 해석하였으며 비배수강도를 매우 정확히 예측할 수 있었다. 해석된 응력경로 및 구성관계가 실제치와 약간의 차이를 나타내고 있으나, 그림 9-a에서 나타난 2차압밀이후의 응력경로형태가 매우 불규칙하여 모델하기 곤란함을 고려할 때 과압밀상태로 해석하여 시간효과를 대략적으로 고려할 수 있다고 보여진다.

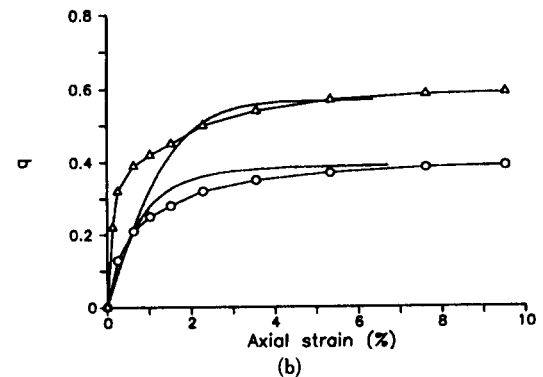
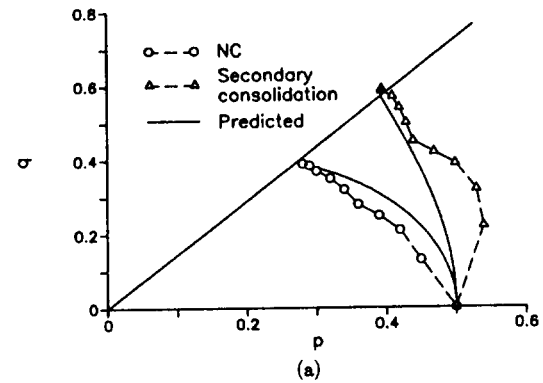


그림9. Kavazanjian 자료⁽⁷⁾의 시간의존거동

5. 결 론

본 연구에서는 등가응력 p_e 로 표준화하였을 때 나타나는 지반의 비배수거동을 재현하여 미약한 과압밀상태에 적용할 수 있는 구성모델을 제안하였다. 제안된 모델은 정규압밀상태의 거동으로부터 도출할 수 있는 모델계수만을 사용하여 초기항복면 내부에서 발생하는 항복현상을 표현할 수 있다. 그리고 제안된 모델은 과압밀상태, 2차압밀, 응력이완등의 영향에 따른 실제의 거동을 기존의 모델들에 비하여 더욱 간편하고 정확하게 예측할 수 있었다.

한편 지반재료의 표준화된 구성관계가 과압밀비에 상관없이 유사하게 발생한다는 실험적인 관찰은 비교된 시료들에 대하여 2차압밀, 응력이완, 전단변형률속도에 따른 영향이 동등하게 작용한 상태에서 가능하다. 따라서 본 집필자들은 국내 점성토를 대상으로 시간에 따른 영향과 과압밀상태의 거동을 관련지어 실험적으로 접근하는 연구를 진행하고 있다.

본 연구에서 논의된 구성모델은 삼축압축실험장치를 통한 정적인 압밀비배수시험에 한하여 적용될 수 있으며, 1차원 압밀에 의한 초기 응력상태 혹은 평면 변형률(plane strain) 조건이나 배수상태에서의 거동등으로 인한 다양한 전단응력경로에 대하여 모델을 검증하고 확장하는 더욱 심화된 연구를 필요로 한다.

참고문헌

1. 이승래, 오세봉, 권기철(1992). "한계상태간격비를 이용한 구성모델," 한국지반공학회지, 8권, 2호, pp. 45 - 47
2. Atkinson, J. H., and Bransby, P. L. (1978). *The Mechanics of Soils*, McGraw Hill
3. Bonarparte, R. (1981). "A Time - Dependent Constitutive Model for Cohesive Soils," Thesis presented to the Univ. of California, at Berkeley, Calif., In partial fulfillment of requirement for the degree of Doctor of Philosophy.
4. Borja, R. I., Hsieh, H. S., and Kavazanjian, Jr., E.(1990). "Double - Yield Surface Cam - clay Plasticity Model. II: Implementation and Verification." *J. Geotech. Engrg., ASCE*, Vol. 116, GT9, pp.1402 - 1421
5. Dafalias, Y. F., and Herrmann, L. R.(1986). "Bounding Surface Plasticity. II: Application to Isotropic Cohesive Soils," *J. Engrg. Mech., ASCE*, Vol. 112, EM12, pp.1263 - 1290
6. Desai, C. S., and Siriwardane, H. J. (1984). *Constitutive Laws for Engineering Materials with Emphasis on Geological Materials*, Prentice - Hall
7. Kavazanjian, Jr., E. (1978). "A Generalized Approach to the Prediction of Stress - Strain - Time Behavior of Soft Clay.," Thesis presented to the Univ. of California, at Berkeley, Calif., In partial fulfillment of requirements for the degree of Doctor of Philosophy.
8. Kavazanjian, Jr., E., and Mitchell, J. K. (1980), "Time - Dependent Deformation Behavior of Clays." *J. Geotech. Engrg., ASCE*, Vol. 106, GT6, pp.611 - 630
9. Parry, R. H. G. and Nadarajah, V.(1974). "Observation on Laboratory Prepared, Lightly Overconsolidated Specimens of Kaolin," *Geotechnique*, Vol. 24, No. 3, pp. 345 - 358
10. 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
11. Shen, C. K., Arulanandan, K., and Smith, W. S.(1973). "Secondary Consolidation and Strength of Clay," *J. Geotech. Engrg., ASCE*, Vol. 99, GT1, pp.95 - 110
12. Wroth, C. P. (1984), "The Interpretation of In - Situ Soil Test." *Geotechnique*, Vol. 34, No. 4, pp.449 - 489

(접수일자 1992. 6. 13)

부록 1

그림 A로부터 간극비변화 de 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$de = \kappa \{ \ln p_c - \ln (s p_c) \} \\ = \lambda \{ \ln (r p_c) - \ln (s p_c) \} \quad (A-1)$$

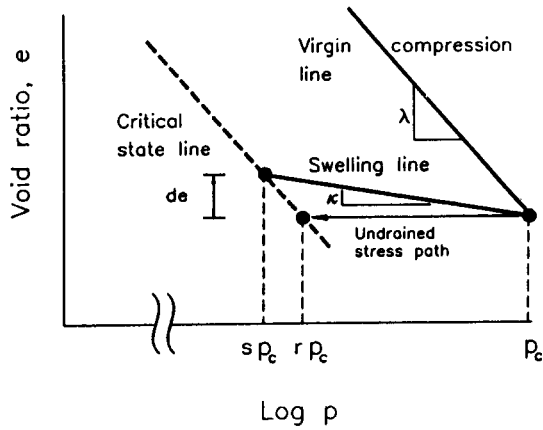


그림 A.

윗 식의 우항들로부터 한계상태간극비와 경로간극비는 다음과 같이 나타난다.

$$s = r^{1/\Lambda} \quad (A-2)$$

$$r = s^\Lambda \quad (A-3)$$

여기서 $\Lambda = 1 - \kappa/\lambda$ 이며, 그림 3으로부터 경로간극비 r 은 정규압밀상태에서는 다음과 같이 나타나고,

$$r = p_{cr}/p_e = s^\Lambda \quad (A-4)$$

과압밀상태일 경우에는 다음과 같이 구해진다.

$$r = p_{cr}/p_i = s^{\Lambda_{oc}} \quad (A-5)$$

여기서 $\Lambda_{oc} = 1 - \kappa/\lambda_{oc}$ 이며 과압밀비에 상관없이 한계상태간극비는 일정하다고 가정하였다. 그리고 (A-4) 식을 (A-5) 식에 대입하면 과압밀상태의 경로간극비는 다음과 같이 구해진다.

$$r = s^\Lambda P_e/P_i \quad (A-6)$$

부록 2

(A-6) 식을 (A-5) 식을 경로간극비에 대입하면,

$$s^{\Lambda_{oc}} = s^\Lambda P_e/P_i \quad (A-7)$$

이므로 κ 가 일정하다는 가정하에 과압밀상태의 경화함수를 정의하는 λ_{oc} 는 다음과 같이 정의한다.

$$\lambda_{oc} = \frac{\kappa \ln s}{(\kappa/\lambda) \ln s - \ln (P_e/P_i)} \quad (A-8)$$