

## 풍화토의 $K_0$ 조건하 거동에 대한 구성모델

### A Constitutive Model on the Behavior under $K_0$ Condition for Weathered Soils.

오세봉<sup>1)</sup>, Seboong Oh, 김욱<sup>2)</sup>, Wook Kim, 정강복<sup>3)</sup>, Gahng-Bok Jeong

1) 영남대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Yeungnam Univ.

2) 영남대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yeungnam Univ.

3) 영남대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yeungnam Univ.

**SYNOPSIS** : Undrained triaxial tests were performed under  $K_0$  condition for a weathered soil, which includes local measurement using LVDT. An anisotropic hardening model based on effective stress concept could predict the stress-strain relationship under  $K_0$  condition reasonably, which makes it possible to analyze geotechnical problems for the weathered soil.

**Key words** : stress-strain relationship, weathered soil,  $K_0$  condition, anisotropic hardening

## 1. 서론

지반공학문제 해석시에는 대상문제에 따라 미소변형률 영역 및 대변형률영역의 거동을 합리적으로 모델하는 것이 요구된다. 특히 국내에 널리 분포된 풍화토의 경우, 응력해석시 미소변형률에서 파괴에 도달한 대변형률까지의 거동을 모델할 수 있는 구성관계가 필요한 실정이다. 이러한 연구에서 핵심적인 부분 중 하나는  $K_0$  조건의 거동을 획득하고 모델하는 것이라고 판단된다 (김동수 등 1997, 오세봉 등 2000).

본 연구는 지반재료의 구성관계와 관련하여 (1) 미소변형에서 대변형에 이르는 전체변형률 영역의 거동과 (2)  $K_0$  압밀시 유효응력 거동을 실험적으로 획득하고 이론적으로 모델하는 데 초점을 두었다. 국내에 산재하는 풍화토의 경우에는 이러한 거동을 실험적으로 획득하는 데 어려움을 겪고 있다. 따라서 유효응력 거동을 적절하게 모델하는 구성관계를 개발하는 기초적인 연구를 수행하였다.

이를 위하여 먼저 삼축시험장비를 이용하여  $K_0$  조건 삼축시험을 수행하였다. 그리고 다짐 풍화토 시료에 대하여 전체변형률 영역의 응력-변형률 관계를 구하였다. 이를 토대로 제안된 구성관계는 개념적으로 비등방경화규칙과 유효응력개념에 의거한 항복면을 포함한다.

## 2. 삼축압축시험 개요

통상적인 삼축압축시험에서 수행하는 외부변위측정법은 양단의 안착오차(bedding error), 단부구속등으로 인한 시료변형의 불균일성을 제거하기 어렵다. 본 연구에서는 미소변형률수준에서 정확한 변위 계측을 확보할 뿐만 아니라 파괴규준을 포함하는 대변형률까지의 변형률 측정을 위해서 LVDT를 이용한 시스템을 이용하였다. 국부변위는 그림 1과 같이 시료의 양쪽 헨지에 설치된 LVDT에서 측정된다. 미소 변위를 측정하기 위하여 LVDT를 설치하고 내부변위 측정이 가능하도록 하였다. 또한 파괴에 이르는 대

변형 수준까지 변위 계측이 가능하므로 전체 변형을 수준의 거동을 획득할 수 있다.

또한  $K_0$  압밀시 전체 변형률 영역의 거동을 수행할 수 있도록 반력 시스템을 구축하였다. 압밀시 액추에이터 (actuator)와 셀압력으로 조건을 구현하였다. 압밀완료후 재하봉을 잠금장치로 고정한다. 전단과정에서 재하봉을 유압 액추에이터와 분리하고 전단용 반력대에 고정한다. 재하대의 하부 저면에서 수동기어방식으로 상향으로 변위를 발생시키며 수직 응력을 증가하게 한다 (그림 1).

시료는 풍화토를 정적다짐으로 재성형하였으며 다짐함수비 9.8%, 건조단위중량 1.91t/m<sup>3</sup>조건을 맞추었다. 이후 충분히 포화를 시킨 후 삼축시험을 수행하였다.

### 3. 유효응력 구성모델

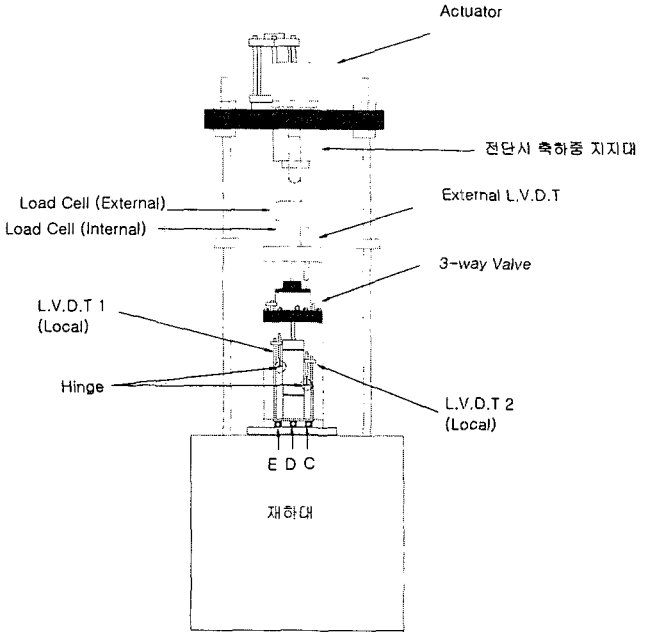


그림 1.  $K_0$  압축 삼축시험시스템

삼축시험의 경우에는  $\Pi$ 면에서 응력원점으로부터 방사적인 응력경로(즉  $s_{ij}/\sqrt{s_{kl}s_{kl}} = \alpha_{ij}/\sqrt{\alpha_{kl}\alpha_{kl}}$ )를 나타낸다. 이 때 항복면은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = (q - \alpha)^2 - r^2 = 0 \quad (1)$$

여기서,  $q = \sqrt{1.5s_{ij}s_{ij}}$ 로 삼축시험조건에서는  $q = \sigma_1 - \sigma_3$ 이다. 그리고  $\alpha$  및  $r$ 은 각각  $q$ 축상에 나타나는 항복면의 중심 및 크기로 체적응력  $p$ 에 따라 변화하는 내부변수이다.

항복면의 크기가 소성축차변형률에 의하여 지배된다고 가정하여 경화함수를 다음과 같이 설정하였다.

$$\bar{\epsilon}^p = a \frac{(r/R)^b}{(1 - r/R)^c} \quad (2)$$

$$\bar{\epsilon}^p = \sqrt{2/3} \{ (\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})^2 + (\epsilon_{yy} - \epsilon_{zz})^2 + (\epsilon_{zz} - \epsilon_{xx})^2 + 3/2(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) \}^{1/2} \quad (3)$$

여기서, 소성 축차변형률  $\bar{\epsilon}^p = \int d\bar{\epsilon}^p$  이고 적분범위는 하나의 역재하 과정 내에서 규정된다. 계수  $a$ ,  $b$  및  $c$ 는 경화함수에 사용되는 재료계수들이다.  $R$ 은 경계면의 크기를 나타낸다. 유효응력모델에서 경계면의 크기를 정의하는 파괴규준은 다음과 같이 정의된다.

$$R = mp + n \quad (4)$$

그리고 상동응력은  $K_0$  선상에서 가정한다.

$$q_0 = kp \quad (5)$$

여기서  $m$ 과  $n$ ,  $k$ 는 계수이다. 그리고 일반등방경화에 대한 기하학적 관계(그림 2)로부터

$$\frac{r}{R} = \frac{q - q_0}{q_f - q_0}, \quad \frac{r}{R} = \frac{q - \alpha}{q_f} \quad (6)$$

이다.

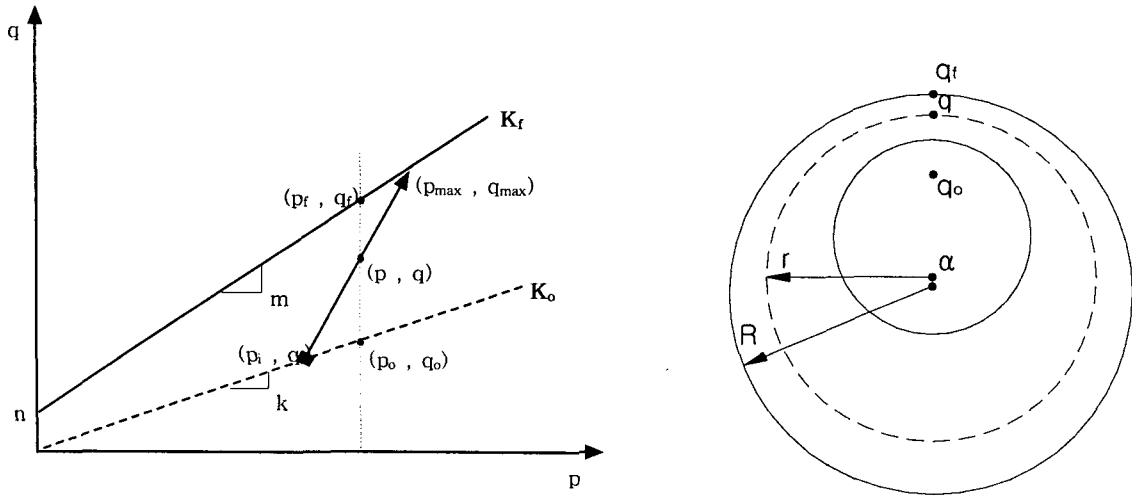


그림 2 항복면과 경계면

그림 2에서 보여지듯이 항복면은  $K_0$  선상에서 점으로 비롯되어 파괴규준  $K_f$  선상에 응력이 도달하면 경계면과 일치한다. 이러한 경로를 따라 항복면의 크기와 중심은 식 (6)의 관계로부터 정의할 수 있다. 항복면은 콘형태를 띠는데 소성체적변형률은 무시하였다. 일종의 비관련 유동규칙으로 볼 수 있다. 소성체적변형과 연화거동을 모델하기 위해서는 구성모델이 매우 까다로와지는 단점이 있다.

탄성 축차변형률은 삼축시험에서 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{\epsilon}^e = \frac{q - q_i}{3G_{\max}} \quad (7)$$

삼축시험시 불가피하게 횡변위를 측정하지 못하였으므로 실험치에서 횡변위는  $\epsilon_3 \doteq -\nu\epsilon_1$ 로 가정한다. 이 때  $\nu = 0.25$ 이다. 따라서 축차변형률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{\epsilon} = \frac{2}{3} (\epsilon_1 - \epsilon_3) \doteq \frac{2}{3} (1 + \nu)\epsilon_1 \quad (8)$$

항복면의 경화함수는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi \equiv \bar{\epsilon}^b \left(1 - \frac{r}{R}\right)^c = a \left(\frac{r}{R}\right)^b \quad (9)$$

식(9)에서 소성 축차변형률과 항복면 크기를 결정하면  $\Psi$ 와  $r/R$ 의 대수축에서 계수 a, b를 결정할 수 있으며, 이때 c는 대수축상에 나타난 실험자료가 선형적으로 나타나도록 0.3이 경험적으로 적당한 것으로

판단된다(오세봉 등, 2000). 이로부터  $\Psi \sim r/R$  관계를 실험치로부터 그림 3과 같이 구할 수 있다.

그림 4에서는 초기 구속응력에 따른 계수 a와 b,  $G_{\max}$ 를 나타내고 있다. 실험치에서는 항복함수에 필요한 a와 b가 증가하는 양상을 보이는데 이는 대상시료가 취성에서 연성으로 전이되는 거동을 나타내기 때문으로 판단된다. 즉 구속압이 작은 경우에는 취성이 크고 과압밀상태 마냥 거동하고 큰 경우에는 연성거동을 보인다. 한편  $G_{\max}$ 는 구속압이 187kPa일 경우를 제외하고

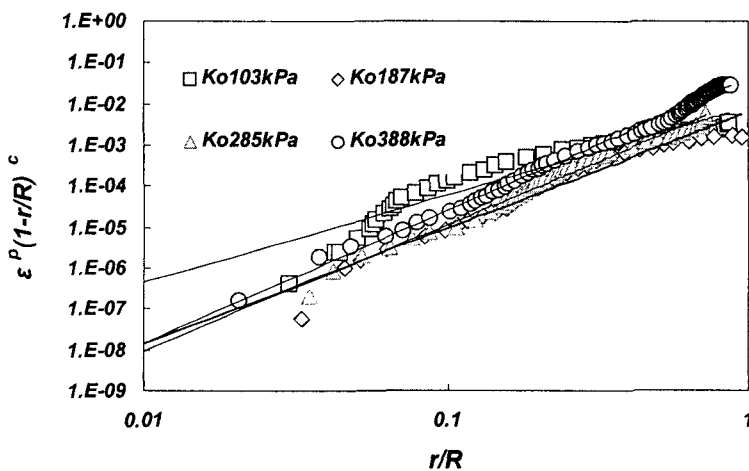
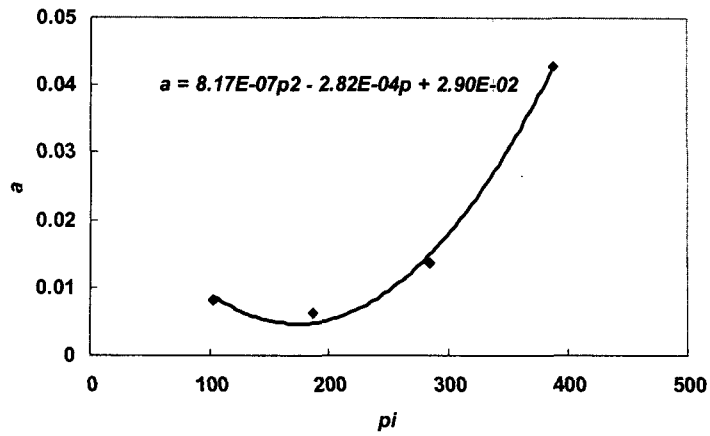
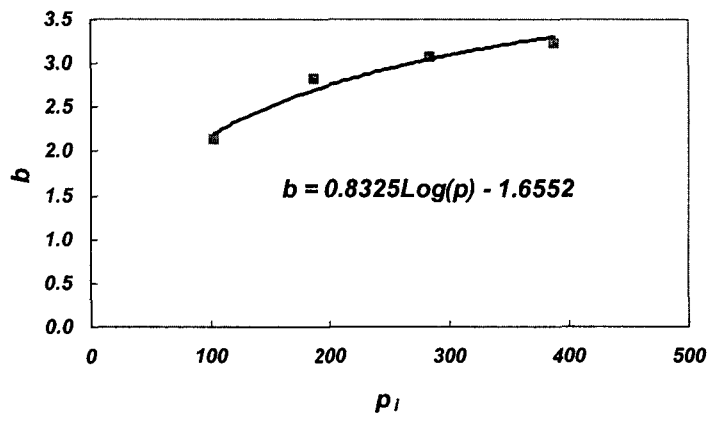


그림 3 항복함수에 필요한 계수 결정과정

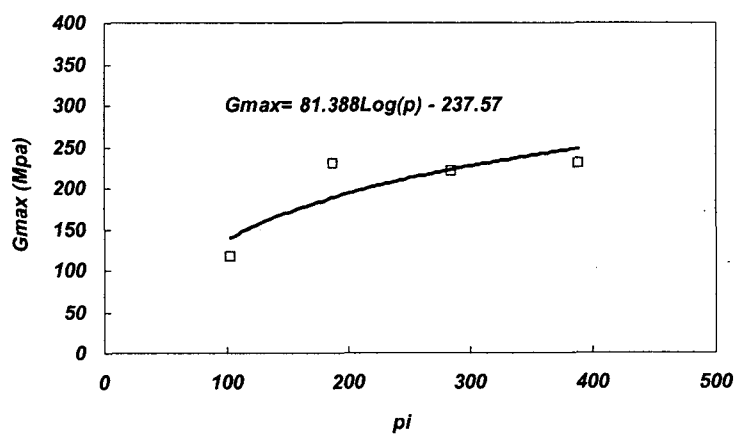
증가하는 양상을 보이고 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 4 재료계수  $a$ ,  $b$ ,  $G_{\max}$

그림 5에서는 실험적으로 나타난 유효응력 경로와 모델에 적용할 경로를 나타내고 있다. 이러한 관계로부터 식 (4)와 (5)에 나타난 경계면 및 상동응력 관계식을 구할 수 있었다. 필요한 관계식을 정리하면 표 1과 같다.

표 1 입력 관계식

$G_{max} = 81.388 \log p_i - 237.57$ $R = 1.4661p + 90$ $q_0 = 1.374p$
$a = 8.17 \cdot 10^{-7} p_i^2 + 2.82 \cdot 10^{-4} p_i + 2.9 \cdot 10^{-2}$ $b = 0.8325 \log p_i + 1.6552$ $c = 0.3$

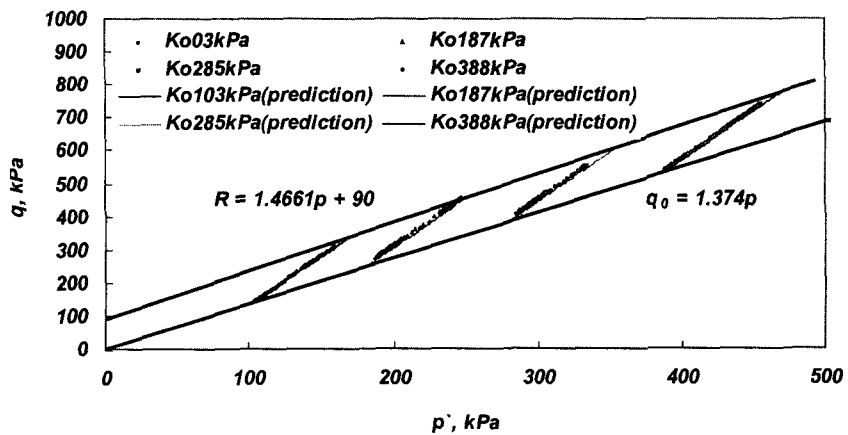


그림 6에서는 응력-변형률 관계를 비교하였다. 실험치의 경우에 구속압이 작은 경우에는 취성이 나타나고 있으며 큰 경우에는 연성을 나타낸다. 이에 비하여 해석치는 취성을 모델할 수 없었지만 전반적인 거동을 적합하게 모델할 수 있었다. 특히 구속압이 큰 경우에는 응력-변형률 관계를 매우 정확히 계산할 수 있었다.

그림 5 응력경로

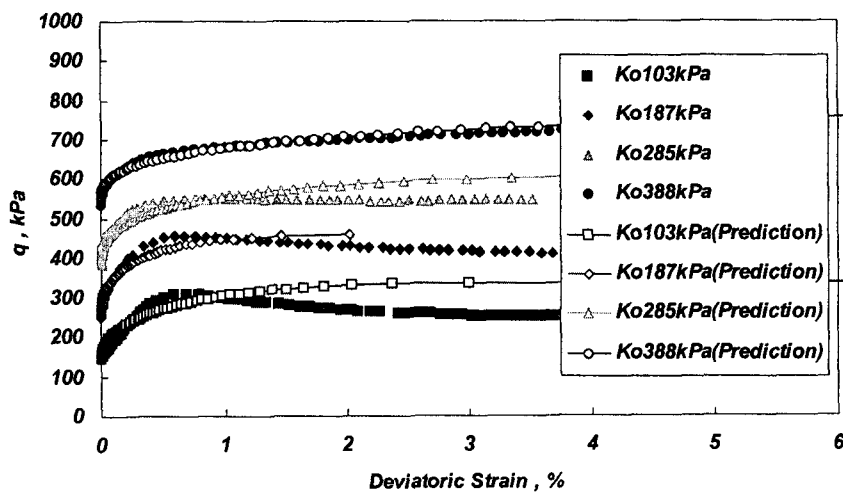


그림 6 응력-변형률 관계

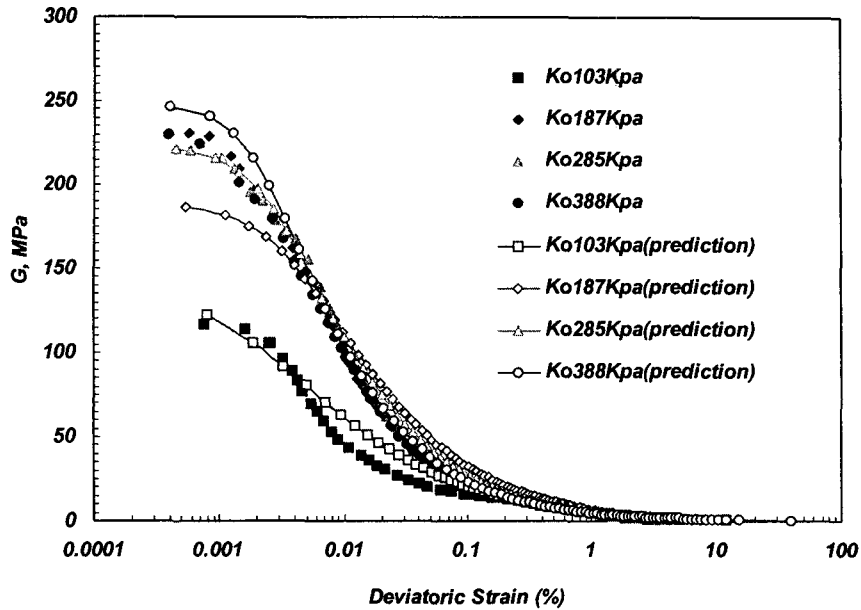


그림 7. 전단계수 관계

그림 7에 나타난 실험치의 활선 전단계수는 구속압이 103kPa인 경우를 제외하고 유사하게 나타났다. 특히 최대전단계수가 그림 4 (c)에서 보여지듯이 187kPa인 경우에 평가치보다 벗어나는 경향을 보인다. 반면 모델의 경우에는 구속압에 따라 증가하도록 입력하였으며 구속압 187kPa인 경우를 제외하고는 전반적인 경향을 적절하게 모델할 수 있었다.

#### 4. 결론

- (1) 본 연구는 국부변위측정을 이용한 풍화토의  $K_0$  조건 삼축압축시험을 수행하였다. 시료는 입자파쇄를 최소화하면서 현장밀도로 재성형하기 위하여 정적다짐을 이용하였다.
- (2) 유효응력개념과 비등방경화규칙을 적용한 탄소성구성모델을 제안하였으며 수행된 삼축시험결과와 비교하였다.
- (3) 제안된 비등방경화 구성모델을 통하여 대상시험결과와 비교를 하였으며,  $K_0$  조건하의 거동을 일관되게 예측할 수 있음을 확인하였다.

#### 참고 문헌

1. 김동수, 권기철, 정순용, 박재영(1997), "실내시험 및 현장시험을 통한 지반의 비선형 변형특성 평가," 한국지반공학회지, 제13권, 제5호, pp.89~100
2. 오세봉, 권기철, 김동수, 정순용(2000), "미소변형률 및 대변형률 조건의 거동에 대한 비등방경화 탄소성