

개선된 탄·소성 구성모델을 이용한 사질토의 응력-변형을 거동예측

A Prediction of Behavior of Granular Soils Based on the
Advanced Elasto-Plastic Model

박 병 기*¹

Park, Byong-Kee

임 성 철*²

Lim, Sung-Chul

이 강 일*³

Lee, Kang-Il

Abstract

Based on the close investigation of Lade elasto-plastic model, this study proposes a new elasto-plastic constitutive model for foundation composed of granular soils. The new model contains 1st stress invariant in plastic potential function as well as yield function, which is different from Lade original model. Both these functions called a correction function include a correction term.

To validate the new analytical model, it was compared with some previous models. Comparison between the test results and numerical results using Lade and new model was carried out concerning Sacramento River sand, U.S.A and Backma River sand. The conclusion was obtained that more refined model well be developed throughout this research.

요 지

본문은 현재 제안되고 있는 Lade모델을 분석하여 같은 관점에서 Lade 모델과는 다른 개선된 탄·소성 모델을 제안하고자 한 것이다. 이 제안모델의 소성포텐셜함수(g_p)는 항복함수(f_p)에 다른 응력불변량(I_1)을 부가시킨 형태로 제안하였으며, 이를 교정함수(Correction Function)라고 정의하여 전단항복면을 결정할 때 소성포텐셜함수가 독립적으로 기능하여 구성식의 확장이나 변화에 대응 하도록 하였다.

본 연구는 일종의 해석적 연구이므로 그 결과는 기존의 연구이론과 비교되어야 하므로 Sacramento River Sand의 시험결과와 백마강모래의 시험결과의 매개변수를 이용하여 Lade모

*¹ 정회원, 전남대학교 공과대학 토목공학과 교수

*² 정회원, 두산엔지니어링(주) 전무이사

*³ 정회원, 전남대학교 대학원 토목공학과 박사과정

델과 제안모델의 결과를 상호비교 하여 검증을 시도 하였다. 결과적으로 본 제안모델은 더 정확한 응력-변형 관계의 예측이 가능한 구성식으로서의 전개가 가능할 것으로 판단된다.

1. 서 론

본 연구는 지반의 응력-변형률 관계를 탄·소성론적 관점에서 정교하게 수식화한 Lade 모델을 분석하여 이 모델의 단점을 비판하고 개선된 구성모델을 제안하고자 한 것이다. 탄·소성론에 입각한 구성식은 매우 다양하고 또한 복잡하여 그 수도 많다. 이 가운데서 Lade 모델은 실험결과를 잘 설명해주고 특히 사질토에 있어서는 그 어느 모델보다도 정확하다는 것은 잘 알려진 사실이다. 따라서 최근에 이에 관한 연구가 매우 활발하게 진행되고 있다. 그러나 14개나 되는 매개변수의 결정이 매우 어렵고 번잡스러우며 실험이 까다로와 실용화되지 못하고 연구 위주로 논의되어 왔다.

본 연구에서는 이 점에 착안하여 실용화를 위한 전산프로그램 연구로부터 시작하여 이를 해석하는 과정에서 토질매개변수가 응력경로에 의존하지 않음을 발견하였다. 또한 구성식에 있어서 어떤 수준을 나타내는 항복면함수 f_b 와 소성포텐셜함수 g_s 가 동일한 형태의 식을 취하고 있어 추후 구성식 확장이나 개선된 구성식의 개발에 구속조건이 되므로 비관련 유동칙의 적용을 받는 모델로서 전단항복면을 결정하기 위한 소성포텐셜함수와 항복함수가 연동되지 않는 새로운 형태의 함수형을 고려하였다. 이 곡면은 위쪽으로 오목한 형태이고 함수형은 항복함수에 1차응력불변량을 첨가하는 형식을 취하여 앞으로의 구성식의 확장이나 변화에 대응하도록 제안하여 이를 Correction Function(교정함수, 영향함수)이라고 명명하였다. 따라서 이 교정함수는 더 다양한 형태의 항복곡면을 설명할때 제2항이 그 역할을 맡게 되며 이 교정함수의 조정여하에 따라 여러가지 형태의 소성포텐셜함수를 설명할 수 있

도록 하였다.

그리고 이 제안모델을 검증하기 위하여 Lade^(6,7,8,10) 등에 의하여 연구된 Sacramento River Sand의 느슨한 모래와 조밀한 모래의 매개변수를 이용하여 예측을 시도 하였고, 정⁽²⁾ 등에 의해 연구된 백마강 모래의 시험결과를 이용하여 구한 토질매개변수를 통해서 Lade 모델과 제안모델의 시험결과를 상호 비교하였다.

2. 제안모델⁽¹⁾

본 모델은 제1응력불변량(I_1)과 제3응력불변량(I_3)을 사용하여 파괴면함수(동시에 하나의 항복면함수) 및 소성포텐셜함수를 정의하였으며, 이 모델의 특징은 소성포텐셜함수 g_s 의 구성이 항복면 및 파괴면함수 f_b 에 또 하나의 불변량인 교정함수를 부가시킨 점에 있으며 추후 적절한 교정함수를 사용할 경우 보다 더 다양한 형태의 소성포텐셜함수를 규정하여 보다 유연한 응력-변형관계의 예측을 위한 구성식으로서의 전개가 가능하도록 고려된 것이다.

따라서 재료의 종류(모래 및 점토)에 무관하게 적용할 수 있고 나아가 단일항복면을 갖는 구성식으로서의 적용이 가능할 것으로 판단된다. 본 장에서는 기존의 Lade 모델과 상이한 파괴규준 및 소성포텐셜 함수를 중심으로 설명한다.

2.1 파괴규준

구성식의 가장 필수적인 기본조건으로서는 파괴면을 곡면으로 나타낼 수 있어야 하며 파괴면 함수의 상수는 중간주응력비에 영향을 받지 않아야 한다. 새로이 제안하는 탄·소성모델의 항복면 및 파괴면 함수 f_b 는 식(1)과 같이

제 1 및 제 3 응력 불변량으로 표현된다.

$$f_p = \frac{I_1}{p_a} \cdot \left\{ \frac{I_3^{1/3}}{p_a} \right\}^m \quad (1)$$

$$f_p = \eta_1 (\text{파괴시}) \quad (2)$$

상기 구성식의 상수 η_1 및 m 은 각각 파괴면 함수의 절편 및 기울기를 나타내며 중간 주응력비에 영향을 받지 않는 상수이다.

그 예로서 그림 1은 Sacramento Loose Sand의 토질매개변수를 통해서 구한 항복면 함수 f_p 의 값이 $b=0$ 에서부터 $b=1.0$ 까지 변화할 때의 함수 f_p 를 구성하는 응력불변량인 I_1 및 $I_3^{1/3}$ 의 값을 도시한 것으로 하나의 직선상에 있다. 따라서 토질매개변수 η_1 및 m 은 중간주응력비에 영향을 받지 않는 상수이다.

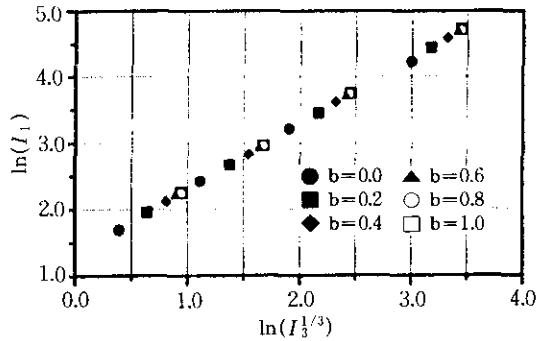


Fig.1 Relationship Between $\ln(I_1)$ and $\ln(I_3^{1/3})$ for Sacramento River Sand

2.2 소성포텐셜 및 유동법칙

대부분의 토질은 비관련 유동법칙을 따르고 있어 소성포텐셜함수 g_p 는 항복면함수 f_p 와 같지 않아야 한다. 따라서 개선된 탄·소성 모델의 소성포텐셜함수 g_p 는 식 (3)과 같이 표현한다.

$$g_p = f_p + A \cdot F(I_i) \quad (3)$$

식 (3)과 같이 소성포텐셜함수 g_p 는 항복함수 f_p 에 Correction Function $F(I_i)$ 를 부가시

킨 형태로 표현되며, 여기서 A 는 응력수준에 따라 결정되는 상수이다. 따라서 식 (4)와 같이 표현된다.

$$g_p = f_p + \eta_2 \ln \left\{ \frac{I_1}{p_a} \right\} \quad (4)$$

$$= \frac{I_1}{p_a} \cdot \left\{ \frac{I_3^{1/3}}{p_a} \right\}^m + \eta_2 \cdot \ln \left\{ \frac{I_1}{p_a} \right\}$$

응력-변형의 관계는 식 (5)를 통해서 구한다.

$$\Delta \epsilon_{ij}^p = \Delta \lambda_p \cdot \frac{\partial g_p}{\partial \sigma_{ij}} \quad (5)$$

여기서, $\Delta \lambda_p$ 는 비례상수이고 g_p 는 식 (4)와 같다.

즉, 소성팽창 변형률증분 $\Delta \epsilon_{ij}^p$ 는 소성포텐셜의 도함수에 비례하여 증가한다. 소성포텐셜함수의 각 응력 성분에 대한 도함수를 삼축면에서 고려할 때 다음과 같이 유도된다.(편의상 대기압 p_a 는 표기 생략)

$$\frac{\partial g_p}{\partial \sigma_1} = (I_3^{1/3})^m + I_1 \cdot m (I_3^{1/3})^{m-1} \cdot \frac{1}{3\sigma_1} + \eta_2 \frac{1}{I_1} \quad (6)$$

$$\frac{\partial g_p}{\partial \sigma_2} = (I_3^{1/3})^m + I_1 \cdot m (I_3^{1/3})^{m-1} \cdot \frac{1}{3\sigma_2} + \eta_2 \frac{1}{I_1} \quad (7)$$

$$\frac{\partial g_p}{\partial \sigma_3} = (I_3^{1/3})^m + I_1 \cdot m (I_3^{1/3})^{m-1} \cdot \frac{1}{3\sigma_3} + \eta_2 \frac{1}{I_1} \quad (8)$$

따라서 식 (9)를 얻는다.

$$\{\sigma_{ij}\}^T \left\{ \frac{\partial g_p}{\partial \sigma_{ij}} \right\} = I_1 (I_3^{1/3})^m \cdot (1+m) + \eta_2 \quad (9)$$

식 (9)에서 η_2 의 값을 결정하기 위하여

$$\mu_p = - \frac{\Delta \epsilon_3^p}{\Delta \epsilon_1^p} \text{라 하면}$$

$\eta_2 =$

$$\frac{-I_1 (I_3^{1/3})^m \left[(1+\mu^2) + \frac{m \cdot I_1}{3} \cdot \left\{ \frac{1}{\sigma_3} + \frac{\mu^2}{\sigma_1} \right\} \right]}{(1+\mu^2)} \quad (10)$$

결국 η_2 는 식 (10)과 같이 표현되며, 소성포텐셜함수 g_p 의 미지수인 η_2 와 f_p 의 관계는 식 (11)

에 의해 간단히 나타낼 수 있다.

$$\eta_2 = S \cdot f_p + t \quad (11)$$

여기서, S 는 기울기이며 t 는 절편 상수이다.

2.3 Lade 모델과 제안모델의 구성식 비교

Lade 모델 및 제안모델을 구성식의 가장 중요한 요소인 항복면함수 및 소성포텐셜함수를 중심으로 비교하면 표1과 같다.

표 1에서 나타낸 Lade의 항복함수식 f_p 는 다음과 같이 정리하여 나타낼 수 있다.

$$\ln \left\{ \frac{I_1^3}{I_3} - 27 \right\} = m \cdot \ln \left\{ \frac{p_a}{I_1} \right\} + \ln(C),$$

C: 상수 (12)

식 (12)에서 \ln 을 제거하고 양변에 I_3 을 곱한후 정리하면 다음과 같다.

$$g_p = I_1^3 - \left[27 + C \cdot \left\{ \frac{I_1}{p_a} \right\}^m \right] \cdot I_3 = 0 \quad (13)$$

Lade 모델은 이 식을 소성포텐셜함수 g_p 로 정의하고 상수 C 값의 처리만을 달리하였다. 따라서 f_p 와 g_p 는 동시에 연동되는 특징을 가지고 있다. 이와같은 점은 항복면함수와 소성포텐셜함수가 종속되는 것을 의미한다. 또한 Lade 모델의 가장 중요한 조건으로서 응력불변량의 조합이 중간주응력의 변화에 무관하게 일정한 값을 가질수 있어야 한다. 이와 같은 구성식의 조

건은 매우 까다로운 것으로서 이 모델의 확장이나 발전에 큰 제한요소로서 작용하게 된다. 그러나 이 모델이 갖는 정교함과 정밀성에 비추어 이 조건은 준수하지 않으면 정도가 떨어질 수 밖에 없다. 따라서 본 연구는 위의 조건을 존중하면서 Lade 모델이 갖는 정밀도를 저하시키지 않는 범위내에서 앞에서 설명한 Lade 모델의 단점을 보완한 구성모델이 표 1에서 나타낸 제안모델이다.

3. 제안모델의 토질매개변수 결정과정

본 모델의 경우 응력-변형률 관계를 예측하고 설명하기 위한 토질매개변수가 필요한데 Lade 모델과 상이한 파괴면 함수와 소성팽창 변형률에 관련된 매개변수만을 설명하고자 한다.

3.1 파괴면 함수와 관련된 토질매개변수(η_1 및 m)

구성식의 가장 기본이 되는 기준으로서 파괴면과 응력 수준을 규정할 수 있는 항복면 함수는 응력 경로에 관계 없이 항상 일정한 상수, 계수 및 기울기를 가져야 하며 본 모델의 경우 전술한 파괴기준에서 보인 바와 같이 파괴점에서 응력 불변량 I_1 및 $I_3^{1/3}$ 이 구속압의 크기 및 중간 주응력의비에 무관하게 양대수 좌표 ($\log - \log$)상에 직선식으로 표현되어 항상 일

Table 1 Comparison of Yield Surface Function and Plastic Potential Function

function Model	Yield Surface Function	Plastic Potential Function
Lade Model	$f_p = \left\{ \frac{I_1^3}{I_3} - 27 \right\} \cdot \left\{ \frac{I_1}{p_a} \right\}^m$ $f_p = \eta_1 \text{ (at failure)}$	$g_p = I_1^3 - \left[27 + \eta_2 \left\{ \frac{p_a}{I_1} \right\}^m \right] \cdot I_3$
Proposed Model	$f_p = \frac{I_1}{p_a} \cdot \left\{ \frac{I_1^3}{I_3} \right\}^m$ $f_p = \eta_1 \text{ (at failure)}$	$g_p = f_p + \eta_2 \ln \left\{ \frac{I_1}{p_a} \right\}$ $= \frac{I_1}{p_a} \cdot \left\{ \frac{I_1^3}{I_3} \right\}^m + \eta_2 \cdot \ln \left\{ \frac{I_1}{p_a} \right\}$

정한 절편 상수 및 기울기를 갖게된다.(그림 1) 여기서, 절편상수는 상기 응력불변량의 비로서 η_1 으로 표기 하였으며 이 값은 항복면 함수의 최대치이다. 또한 m은 기울기로서 항복면 곡면의 정도를 나타낸다.

3.2 소성팽창 변형률과 관련된 토질매개변수 (R, S, t, α , β)

1) 항복함수 $f_p - \eta_2$ 관련식

소성포텐셜 함수의 상수인 η_2 는 소성포텐셜함수의 도함수 형태로 표현되는 소성팽창 변형률의 최대주응력 방향의 변형률과 최소주응력 방향의 변형률의 비, μ 를 도입하여 미지수인 η_2 를 결정한다. 다시 f_p 와 η_2 관련식의 절편상수 및 기울기를 구하기 위한 필요토질매개변수 R, S, t가 결정되고 그 관계식은 다음과 같다.

$$\eta_2 = R + f_p \cdot (S \cdot 4\sqrt{\sigma_3} + t) \quad (14)$$

따라서 토질 매개변수 R, S, t에 의하여 η_2 가 구해지고 아래식으로서 소성팽창변형률이 계산된다.

그림 2는 느슨한 Sacramento River Sand의 토질매개변수를 통해서 구한 결과를 각각의 구속압에 따라 η_2 와 f_p 의 관계를 나타낸 것이다. 본 그림에 의하면 각각의 구속압에 따라 η_2 와 f_p 는 기울기가 동일한 직선상에 있음을 알 수 있다.

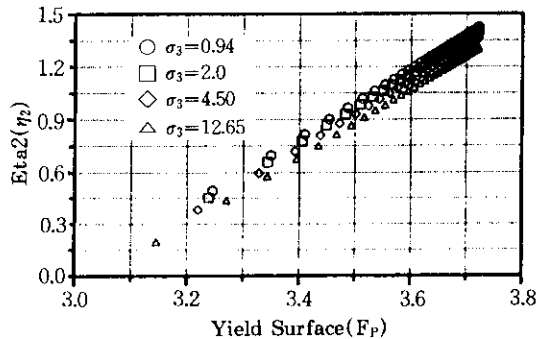


Fig.2 Relationship Between f_p and η_2 for Sacramento River Sand

$$\Delta \epsilon_{ij}^p = \Delta \lambda_p \frac{\partial g_p}{\partial \sigma_{ij}} \quad (5)$$

$$W_p = f\{\sigma_{ij}\}^T \{d\epsilon_{ij}^p\} \quad (15)$$

$$\therefore \Delta \lambda_p = \frac{\Delta W_p}{\{\sigma_{ij}\}^T \left\{ \frac{\partial g_p}{\partial \sigma_{ij}} \right\}} \quad (16)$$

상기식에서 소성일의 증분으로서 상수 $\Delta \lambda_p$ 를 결정하고 소성포텐셜 함수의 각 응력성분의 도함수로서 소성팽창 변형률을 계산할 수 있다.

$$q = \frac{\ln\left\{ \frac{W_{p(peak)}}{0.2 \cdot W_{p(peak)}} \right\} - \left\{ 1 - \frac{0.2 \cdot W_{p(peak)}}{W_{p(peak)}} \right\} \ln(e)}{\ln\left\{ \frac{\eta_1}{f_{px}} \right\}} \quad (17)$$

여기서, f_{px} 는 파괴시의 소성일 $W_{p(peak)}$ 의 0.2배의 소성일 일때의 항복함수 f_p 의 값이다.

$$a = \eta_1 \left\{ \frac{e \cdot p_a}{W_{p(peak)}} \right\}^{\frac{1}{q}} \quad (18)$$

$$b = \frac{1}{q \cdot W_{p(peak)}} \quad (19)$$

따라서 상기식중 미지수인 q 는 구속압 σ_3 의 함수로 나타나며 아래식과 같이 α , β 가 결정된다.

$$q = \alpha + \beta(\sigma_3/p_a) \quad (20)$$

파괴시의 소성일 $W_{p(peak)}$ 는 구속압의 증가에 따라 증가하므로 양대수 좌표상에 구속압 σ_3 의 함수로 표현되며 아래식에서와 같이 P_i 로 결정된다.

$$W_{p(peak)} = P_i \cdot p_a \cdot (\sigma_3/p_a)^i \quad (21)$$

2) 소성팽창일 $W_p - f_p$ 관련식

응력-변형률 관계의 예측에 가장 중요한 관계식으로서 파괴 발생전의 일경화(Work Hardening)의 설명은 물론 파괴후 일연화(Work Softening) 재료의 거동을 설명하기 위해서는

적절한 W_p-f_p 관련식의 채택 여부에 게 좌우된다.

상기의 관련식에 필요한 토질 매개변수는 파괴시의 소성일(여기서는 $W_{p,peak}$ 으로 표시)과 구속압의 관계에서 P_i 및 l_i 가 필요하며 또한 파괴이전 및 파괴후의 W_p-f_p 의 관계식을 위한 토질매개변수인 α, β 가 필요하게 된다. 수립된 W_p-f_p 관계식은 아래와 같으며 이 관계식을 W_p 로서 편미분하여 증분의 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$f_p = a \cdot \exp(-b \cdot W_p) \left\{ \frac{W_p}{p_a} \right\}^q, q > 0 \quad (22)$$

$$dW_p = \frac{df_p}{f_p} \cdot \frac{1}{\left\{ \frac{1}{q \cdot W_p} - b \right\}} \quad (23)$$

$$f_p = I_1 \cdot (I_3^{1/3})^m = \eta_1 \text{ (파괴시)} \quad (24)$$

$$g_p = I_1 \cdot (I_3^{1/3})^m + \eta_2 \ln(I_1) \quad (25)$$

그림 3은 느슨한 Sacramento River Sand의 토질매개변수를 이용하여 구한 결과를 각각의 구속압에 따라 f_p 와 W_p 사이의 관계를 나타낸 것이다. 본 그림에 의하면 전소성일은 응력수준의 증가와 더불어 계속 증가하지만 파괴시 응력(f_p)은 응력수준에 관계없이 일정한 값을 유지하고 있음을 알 수 있다.

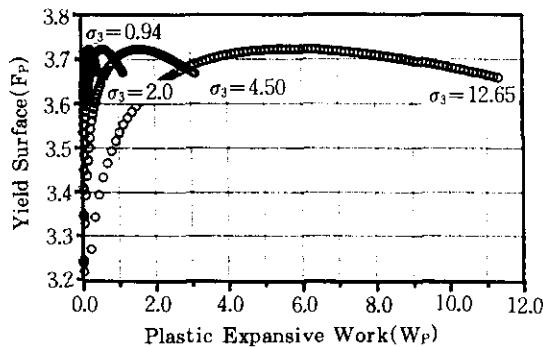


Fig.3 Relationship Between w_p and f_p for Sacramento River Sand

3.3 토질매개변수 요약

제안모델에 필요한 토질매개변수는 Lade 모델과 같이 14개의 변수가 필요하나 탄성변형률 및 소성과쇄변형률과 파괴함수에 관련된 매개변수인 $\eta_1, m, R, t, \alpha, \beta$ 의 값만이 상이한 값을 갖게 된다. 표 2는 Sacramento River Sand와 백마강모래의 토질매개변수를 Lade 모델과 제안모델의 매개변수를 정리하여 나타낸 것이다.

4. 매개변수를 이용한 응력-변형률 검증

4.1 Sacramento River Sand의 예

본 절은 Lade에 의해 연구된 Sacramento River Sand의 매개변수를(표 2) 이용하여 Loose Sand와 Dense Sand의 예측치와 새로운 제안모델의 예측치를 상호비교 하였다.

그림 4(a), (b)는 축변형률(ϵ_1)-축차응력($\sigma_1 - \sigma_3$), 그림 5(a), (b)는 축변형률(ϵ_1)-주응력비(σ_1/σ_3)의 느슨한 모래와 조밀한 모래의 곡선을 나타낸다. 본 그림에 의하면 축차응력 및 주응력비 모두 느슨한 모래의 경우 초기접선기울기 부분에서 Lade 모델에 비해 제안모델의 예측치가 약간 적게 나타나지만 그 이후의 거동은 거의 일치하며, 특히 조밀한 모래의 경우는 두 모델의 결과가 거의 일치하고 있다.

그림 6(a), (b)는 축변형률(ϵ_1)-최소주변형률(ϵ_3)의 관계를, 그림 7(a), (b)는 축변형률(ϵ_1)-체적변형률(ϵ_v) 관계인 느슨한 모래와 조밀한 모래의 관계를 나타낸다. 본 결과에 의하면 느슨한 모래의 경우 최소주변형률 및 체적변형률 모두 구속압이 0.94, 2.0, 4.4kgf/cm²인 상태에서는 Lade 모델의 예측치에 비해 제안모델의 예측치가 약간 크게 나타나고 있지만 구속압이 12.65kgf/cm²인 상태에서는 반대로 제안모델이 약간 적게 나타나고 있다. 또한 조밀한 모래의 최소주변형률 및 체적변형률은 모두 구속압이 20kgf/cm² 일때만 Lade 모델에 비해 제안모델의 예측치가 약간 적게 산정되지만 그 이외의 구속압상태의 결과는 두모델이

Table 2 Summary of parameters on Sacramento River Sand and Backma River Sand

Model Parameter	Soil Parameters		Sacramento River Sand				Backma River Sand	
			Loose Sand		Dense Sand		Lade	Proposed
			Lade	Proposed	Lade	Proposed		
Elastic	Modulus Number	K_w	960		1680		348	
	Exponent	n	0.57		0.57		0.741	
	Poisson's Ratio	μ	0.2		0.20		0.28	
Plastic Collapse	Collapse Modulus	C	0.00028		0.00023		0.00153	
	Collapse Constant	P	0.94		0.86		0.89	
Failure Criterion	Yield Constant	η_1	28.0	3.725	80.0	4.355	33.0	3.795
	Yield Exponent	m	0.093	-0.987	0.23	-0.958	0.13	-0.98
Plastic Expansive	Plastic Potential Constant	R	-1.0	-6.023	-2.95	-6.598	-0.457	-4.530
		S	0.43	-0.021	0.44	-0.05	0.516	-0.009
		t	0.0	2.209	8.45	2.007	-2.415	1.562
	Work Hardening Exponent	α	3.0	21.137	3.0	14.852	2.597	17.138
		β	-0.076	-0.324	0.06	0.715	-0.18	-0.689
		P_1	0.24		0.12		0.369	
		ℓ	1.25		1.16		1.16	

상호 잘 일치하고 있다. 결국 그림 6의 경우는 구속압에 관계 없이 최소주변형률은 압축현상을 잘 반영해주고 있으며 그림 7의 경우는 압

축 및 팽창현상을 잘 설명해주고 있음을 알 수 있다.

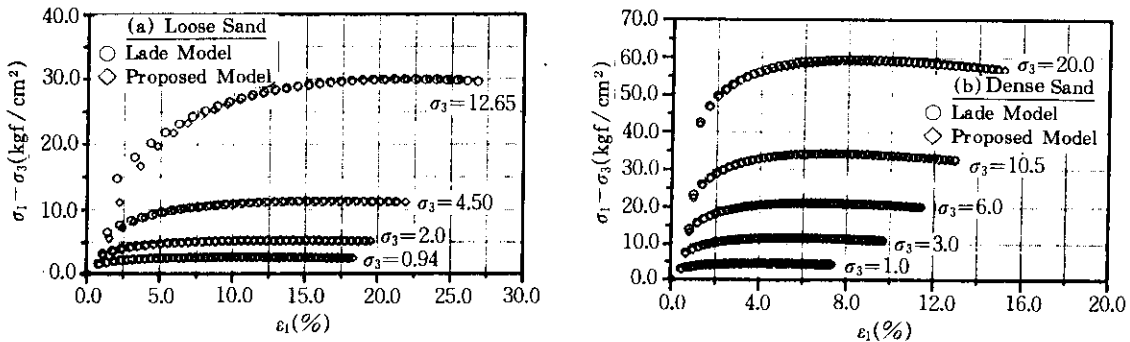


Fig.4 Comparison Between Lade Model and Proposed Model for Deviatoric Stress and Axial Strain

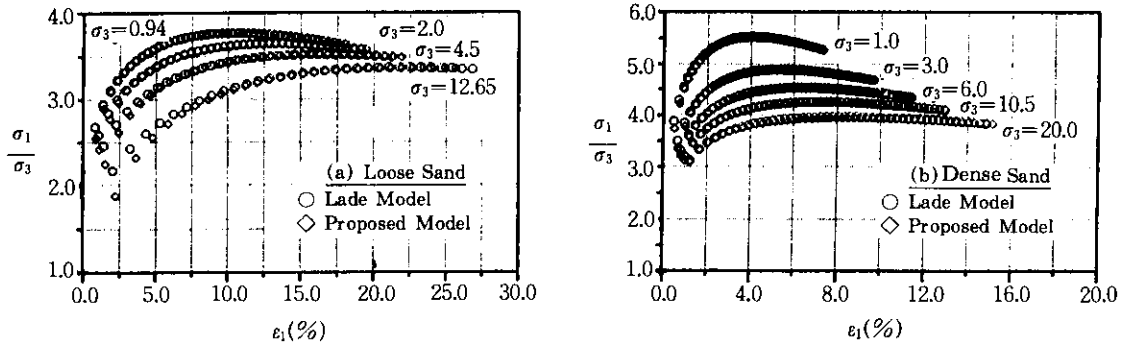


Fig.5 Comparison Between Lade Model and Proposed Model for Effective Stress Ratio and Axial Strain

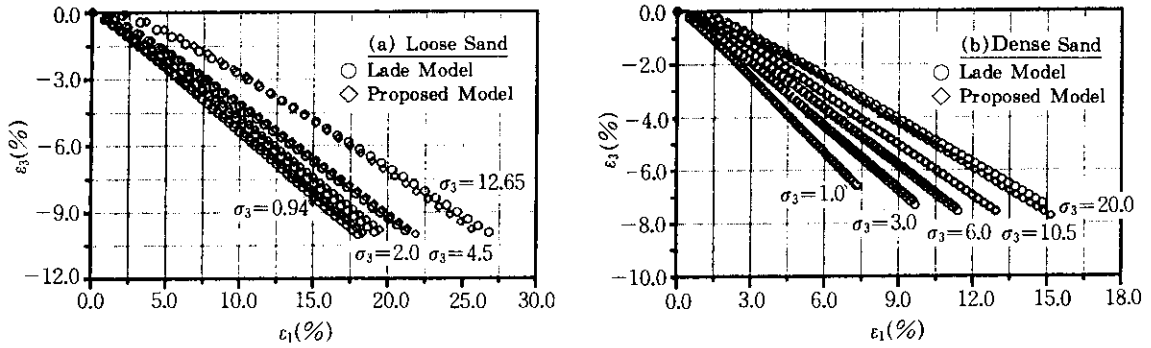


Fig.6 Comparison Between Lade Model and Proposed Model for Minor Principal Strain and Axial Strain

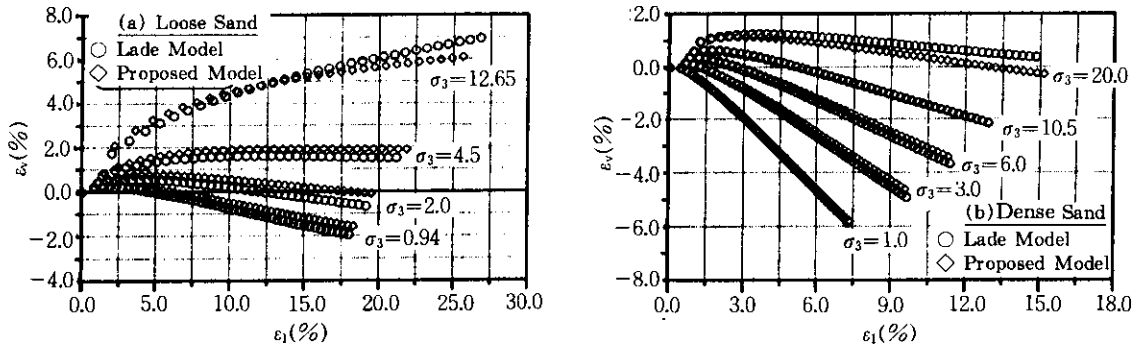


Fig.7 Comparison Between Lade Model and Proposed Model for Volumetric Strain and Axial Strain

4.2 Backma River Sand의 예

새로운 탄소성 모델의 실측치에 대한 검증

을 위하여 백마강 유역에서 채취한 모래에 대하여 일련의 실내시험을 수행했으며 이러한 시험결과로부터⁽¹¹⁾ Lade 모델 및 제안모델의 토

질매개변수를 결정하고(표 2) 결정된 매개변수를 이용하여 Lade 모델 및 제안모델을 실측치와 함께 비교하였다. 백마강유역에서 채취한 모래는 건조시킨 후 #60을 통과하고 #200에 잔류시킨 모래를 상대밀도가 60%가 되도록 시료를 준비했으며, e_{max} 은 1.255, e_{min} 은 0.973에 해당하는 시료이다.

그림 8, 9, 10은 구속압이 1, 2 및 4kgf/cm²로 달리한 배수전단시험으로서 축변형률에 대한 축차응력, 주응력비, 체적변형률의 관계를 나타낸다. 이 때 ○은 Lade 모델을, ◇은 제안 모델을, 실선은 시험치에 해당한다. 그림 8 및 9는 축변형률에 대한 축차응력 및 주응력비 관계로서 Lade 모델 및 제안모델 그리고 실측치가 상호 잘 일치하고 있다. 그러나 체적변형률

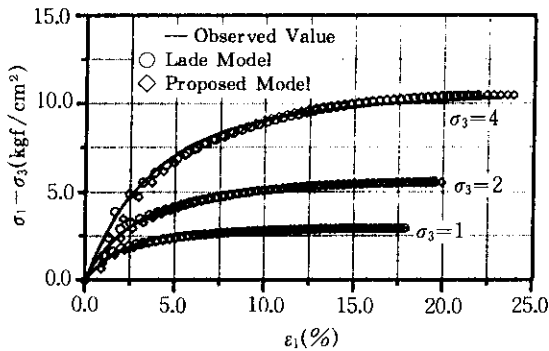


Fig.8 Comparison Between Lade Model and Predicted Value for Deviatoric Stress and Axial Strain

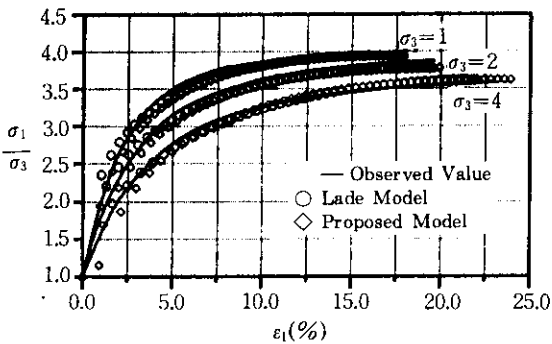


Fig.9 Comparison Between Lade Model and Predicted Value for Effective Stress Ratio and Axial Strain

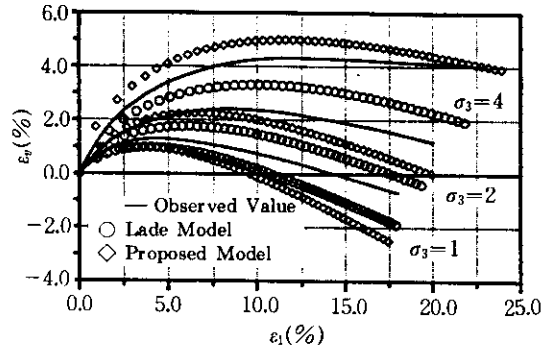


Fig.10 Comparison Between Lade Model and Predicted Value for Volumetric Strain and Axial Strain

관계를 나타내는 그림 10은 양자의 모델의 차이도 있지만 실측치와의 차이도 크게 나타나고 있다. 그러나 구속압이 증가함에 따라 실측치가 Lade 모델의 예측치에 비해 제안모델의 예측치로 더 근접해 감을 알 수 있다. 특기할 사항은 토질매개변수를 회귀분석을 통해서 결정되므로 적어도 구속압이 3조 이상의 시험자료가 필요하며 곡면의 파괴면을 보다 정확히 결정하기 위해서는 구속압 크기의 선택이 중요하다는 사실이다.

5. 결 론

본 연구는 Lade의 복합항복면 구성식을 검토하여 개선된 탄·소성 모델을 제안하였다. 제안모델의 적용성을 검증하기 위하여 Sacramento River Sand와 백마강 모래의 매개변수를 이용하여 구성식을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제안된 새로운 탄·소성 모델은 Lade 모델의 장점을 유지하면서 항복면함수에 교정함수를 부가시킨 형태의 소성포텐셜 함수를 채택함으로써 기존의 Lade 모델의 경직성에서 벗어나 교정함수 결정 여하에 따라 구성식을 정의하도록 하는 유연성을 갖는 모델의 개념이다.

2. Sacramento River Sand의 느슨한 모래와 조밀한 모래의 시험결과로부터 구한 토질매개

변수를 이용하여 Lade 모델과 제안모델과의 예측을 시도해 본 결과, 응력-변형률, 주변형률 및 체적변형률 모두 양자의 모델이 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

3. 백마강 모래의 시험치를 가지고 예측해 본 결과는 이 제안모델이 현재로서 응력-변형률 예측의 정도는 실측 및 Lade 모델과도 잘 일치하고 있지만 체적변형률 예측부분에서 양자 모두 실측결과에 비해 정도가 약간 떨어지고 있다. 그러나 새로운 개념을 사용함으로써 추후 더욱 개선된 특히, 하나의 항복면 함수를 구성식으로서의 전개가 용이해 질 것으로 판단된다.

4. 새로운 탄·소성모델은 재료의 종류(모래, 점토)에 무관하게 적용할 수 있어 추후 단일항복면 구성식으로서의 적용이 가능하며 또한 개선된 모델의 해석 결과가 Lade 모델의 결과와 매우 좋은 일치를 보이고 있어 장차 이 모델을 이용한 유한요소 프로그램을 개발하여 지반해석에 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 임성철(1992). "기초지반의 탄·소성 변형해석 -새 구성모델의 제안-", 전남대학교 대학원 박사학위 논문.
2. 정진섭·김찬기·이문수(1992). "Lade의 Double Work-Hardening 구성모델의 토질매개변수 민감도 해석," 대한토목학회지 제12권 제2호, pp.191~203.
3. Desai, C.S., Siriwardane, H.J.(1984) "Constitutive Laws for Engineering Materials with Emphasis on Geologic Materials," Prentice-Hall, Inc.
4. Dickin, E.A., King, J.W.(1982) "The Behavior of Hyperbolic Stress-Strain Models in Triaxial & Plane Strain Compression," *Inc. Sym. on Numerical Model in Geomechanics, Zurich*, pp.303~311.
5. Kim, M.K., Lade, P.V.(1988) "Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials, I, II, III," *Computers and Geotechnics*, Vol. 5, No.4.
6. Lade, P.V.(1972) "The Stress-Strain and Strength Characteristics of Cohesionless Soil," *Thesis Presented to the University of California, at Berkeley, Calif.*, in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.
7. Lade, P.V.(1975) "Elasto-Plastic Stress-Strain Theory for Cohesionless Soil with Curved Yield Surfaces," *Rep., UCLA-Eng. 7593*, Univ. of Calif., Los Angeles, Nov.
8. Lade, P.V.(1977) "Elasto-Plastic Stress-Strain Theory for Cohesionless Soil with Curved Yield Surfaces," *Int. J. Soils and Struct.*, Vol.13, pp.1019~1035.
9. Lade, P.V.(1984) "Failure Criterion for Frictional Materials," *Mechanics of Engineering Materials*, C.S. Desai and R.H. Gallagher, eds., John Willey and Sons, Inc., New York, N.Y., pp.385~402.
10. Lade, P.V.(1986) "Three-Dimensional Behavior and Parameter Evaluation of an Elastoplastic Soil Model," *Geomechanical Modeling in Engineering Practice*, pp. 297~311.
11. Lade, P.V., Duncan, J.M.(1973) "Cubical Triaxial Tests on Cohesionless Soil," *ASCE, J. Soil Mech. Found. Div.*, 99, pp.793~812.
12. Lade, P.V. and Duncan, J.M.(1975) "Elasto Plastic Stress-Strain Theory for Cohesionless Soil", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 101, No.GT10, Proc. Paper 11670, Oct., pp.1037~1053.

(접수일자 1995. 5.10)