

응력경로에 따른 단일항복면구성모델의 토질매개변수 특성

Parameters Characteristics of Single Work Hardening Model Dependent on the Stress Path

김 찬 기*
Kim, Chan Kee

Summary

To get accurate results, the realistic stress-strain relationships of soils are dependent on a number of factors such as soil types, density, stress levels and stress path. Such attempts are continuously being made by the development of analytical models for soils incorporating all such factors.

Isotropic compression-expansion test and a series of drained conventional triaxial tests with several stress path for Baekma river sand were performed to investigate parameters characteristics of Lade's single work hardening model dependant on the stress path.

Using the computer program based on the regression analysis, the values of parameters for the model were determined.

In conclusion, the parameters of Lade's model are little influenced by the stress paths. Though yield criterion parameters(h , α) are much influenced by stress level and stress path, the parameters don't have influence on stress-strain behavior.

I. 서 론

흙의 거동을 탄성이론에 의해 서술할 수 있다고 가정하여 왔고 변형은 응력증분의 크기에 의하여 유일하게 결정되어지고 두 응력상태 사이에서의 응력경로는 하나의 응력상태로부터 다른 하나의 응력상태로 변할 때 생기는 변형에 영향을 못 미친다는 것을 의미한다.

그러나 많은 연구가 응력경로의 효과에 대하여 수행되었고 이들 연구 결과는 흙에 있어서 응력의 변화는 탄성과 소성변형이 생기는 것을 보여주고 있으며 어떤 조건에서의 응력경로는 변형률에 큰 영향을 주고 있음이 밝혀졌다¹⁻³⁾

본 연구는 현재 개발된 구성모델들 가운데 탄·소성구성모델로서 비선형의 응력-변형 거

* 대전대학교 공학부

키워드 : 응력경로, 구성모델, 구성모델, 응력-변형률, P Constant, σ_1 Constant.

등을 광범위하게 해석할 수 있고 일경화(work hardening) 및 연화(work softning) 까지도 설명이 가능하며 입상토뿐만 아니라 점토까지 해석이 가능하다고 알려져 있는 Lade의 단일항복면 구성모델을 선정하였다⁴⁻⁷⁾. 이 구성모델은 이미 밝혀진 바와 같이 응력-변형을 예측능력이 매우 우수하지만 토질 매개변수가 너무 예민함이 실용상의 문제점으로 지적된바 있다^{8,9)}. 그러므로 이 구성모델의 토질매개변수가 응력경로가 다른 경우에 어느 정도의 다른 값을 갖으며 응력-변형을 거동에 어느 정도의 영향을 미치는가를 밝힘은 이 구성모델의 실용화를 위해 매우 중요한 과제 일 것이다. 이 구성모델의 실용화를 위한 검토로 응력경로에 따라 토질매개변수가 어떤 특성이 있는가를 밝히고자 백마강에서 채취한 모래를 자연 건조시킨 후 일정한 입도를 갖도록 체가름하여 입도를 조정된 시료를 이용하여 등방 압축팽창시험 구속압력을 달리한 일련의 응력 경로에 대한 배수삼축시험(σ_3 Constant, P Constant, σ_1 Constant)을 각각 수행하여 각각의 토질매개변수를 결정하여 그 특성을 밝힌다. 그리고 각각의 응력경로에 대한 시험으로부터 결정된 토질매개변수를 이용하여 토질 매개변수를 결정시 이용된 시험결과를 역해석 하는 방법으로 해석의 정도를 검토하였다.

II. 시 험

1. 개 요

본 연구는 모래의 응력 경로 의존 특성을 밝히기 위하여 백마강 유역에서 채취한 모래를 자연 건조시킨 후 체가름을 실시하여 균질한 입경을 갖도록하기 위해 #40~60번체 시료 35%, #60~80번체 시료 60%, #80~100번체 시료 5%를 균일하게 혼합하여 시험에 이용할 수 있도록 하였다.

Table-1. Physical Properties of Baekma River Sand

| G_s | e_{max} | e_{min} | e_{spec} | D_r |
|-------|-----------|-----------|------------|-------|
| 2.664 | 1.116 | 0.884 | 0.9404 | 0.80 |

그리고 이 시료의 최대간극비(e_{max}), 최소간극비(e_{min})를 측정하여 상대밀도(D_r)를 80%가 되도록 시료의 초기간극비(e_{spec})값을 결정하여 시험에 이용할 수 있도록 시료를 준비하였으며 시료의 크기는 직경 50mm, 높이 100mm로 하였으며 물리적 특성은 Table-1 같다.

2. 시험종류 및 방법

응력경로에 따른 Lade의 단일항복면 구성 모델의 토질매개변수가 어떻게 변화하는지를 밝히기 위해 C. K. Chan이 개발한 자동화 삼축시험기(Automated Triaxial Testing System)에 준비된 시료를 설치하기전 상, 하판에 실리콘 그리스를 바르고 0.3mm두께의 고무멤브레인을 부착한다. 이 때 배수는 양면배수가 되도록 하였다. 그리고 고무멤브레인을 하부 페디스탈 저부에 펼쳐 두개의 O-ring으로 봉한 후 진공성형상자(forming jacket)를 저판 위의 중앙에 맞추어 놓고 진공압을 가하여 고무멤브레인이 성형상자안에 완전히 밀착하도록 한다. 그리고 시편이 균질한 밀도를 갖도록 하기 위해 성형상자 내부에 알맞은 체를 넣고 준비된 시료의 일정량을 상자 안에 부어 넣은 후 체를 천천히 들어 올려 시편의 밀도가 일정하게 되도록 하였다.

그리고 상판을 시료 위의 중앙에 놓고 멤브레인을 상판에 씌운 다음 O-ring으로 봉한 후 상부배수관을 상판에 연결시키고 시료에 0.2kgf/cm²의 진공압을 가한 후 성형상자를 제거하며 이 때 누기에 의해 진공압이 감소하면 진공압이 일정하게 유지될 때까지 멤브레인에 생고무 액을 발라 누기를 방지한다. 다음에 3

축실을 조립한 후 물을 가득 공급하고 시료의 진공을 제거함과 동시에 축압을 가한 후 일정한 축압을 유지시킨다. 시료에 탄산가스(CO₂)를 하부 배수관으로 주입시켜 시료 속의 공기를 상부 배수관으로 완전히 빠져나가게 한 다음 증류수를 하부 배수관으로 유입시켜 시료 내에 있는 CO₂를 상부 배수관으로 천천히 밀어 올려 시료로부터 빠져나가게 한다. 이 때 CO₂의 체적 변화는 순수 물의 체적변화와 같기 때문에 시료 내에 남아 있는 CO₂는 크게 문제가 되지 않는다.

이와 같은 시료를 이용하여 등방압밀팽창시험과 배수삼축축압시험(① σ_3 를 일정하게 유지시킨 상태에서 σ_1 을 증가하여 전단하는 경우 ② 평균압력 $P=1/3(\sigma_1+2\sigma_3)$ 가 일정하도록 σ_1 을 증가시키고 동시에 σ_3 를 감소하여 전단하는 경우 ③ σ_1 을 일정하게 유지시키고 σ_3 를 감소하여 전단하는 경우 등의 시험을 각각 실시하였다. 그리고 시험 ①, ②는 구속압력(σ_3)을 100, 200, 400kPa 상태에서 각각 시험을 시행하였으며, 시험 ③은 구속압력(σ_3)을 200, 300, 400kPa 상태에서 각각 시험을 하였다. 또한 모든 시험은 응력제어법으로 하였으며 이 때 제어속도는 0.1kPa/min이다.

3. 시험 결과

(1) 등방압밀팽창시험

Fig. 1은 상대밀도 80%로 준비된 시료를 사용하여 구속압력을 50kPa에서 800kPa까지 단계적으로 증가시킨 후 50kPa까지 제하하였을 때 구속압력에 따른 체적변형률의 관계를 나타낸 그림이다. 이 시험은 Lade의 단일항복면구성모델에서 경화함수에 관련되는 토질매개변수(c, p)를 결정하기 위한 시험이다.

(2) 배수삼축시험

백마강 모래를 이용한 일련의 응력경로에 대한 시험을 수행한 결과를 구속압력으로 나누어 표준화하여 축차응력-평균응력으로 나타

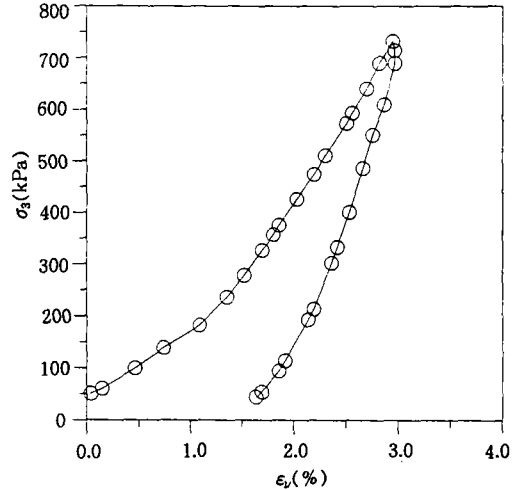


Fig. 1. Isotropic Compression Test for Baekma River Sand

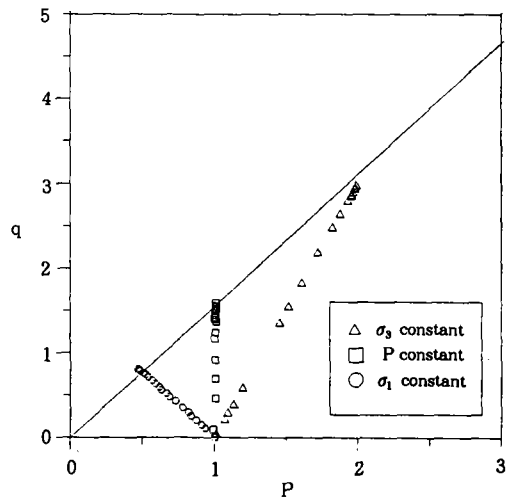
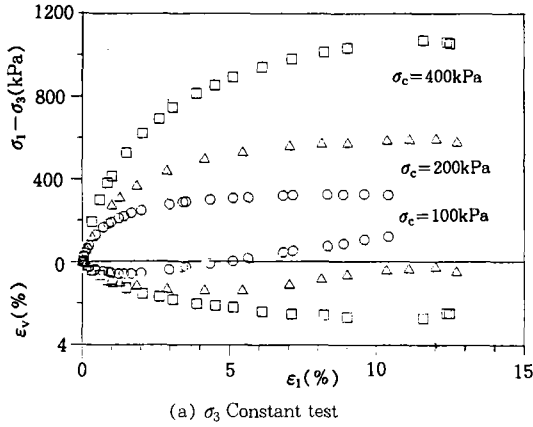


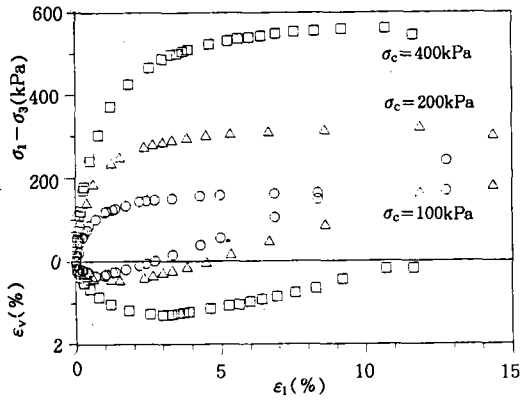
Fig. 2. Stress-Path of Baekma River Sand

내면 Fig. 2와 같다.

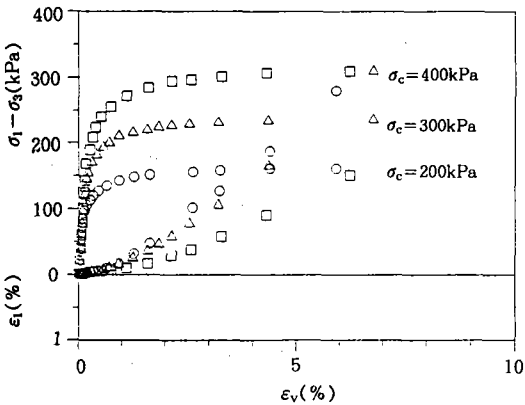
그리고 각각의 응력경로(σ_3 Constant, P Constant, σ_1 Constant)에 대해 Lade의 단일항복면 구성모델에 필요한 토질매개변수를 결정하기 위하여 구속압력을 달리한 일련의 배수삼축시험을 실시하였다. 이 시험 결과를 구속압력의 변화에 따른 축변형률에 대한 축차응력과 축변형률에 대한 체적변형률의 관계로 나타내면 Fig. 3과 같다.



(a) σ_3 Constant test



(b) P Constant test



(c) σ_1 Constant test

Fig. 3. Axial Strain Vs Deviatoric Stress and Volumetric strain of Drained triaxial tests for Baekma River Sand

III. 토질매개변수 결정 및 특성

1. 탄성 토질매개변수(K_{ur} , n)

탄성에 관련된 토질매개변수 K_{ur} , n 을 결정하는 방법은 전단 중에 하중을 제하한 후 다시 재하한 곡선의 기울기로부터 구하는 방법과 응력-변형률곡선의 초기 기울기로부터 구하는 방법이 있다. 본 연구는 후자의 방법을 이용하여 응력경로에 따른 탄성계수를 결정하였으며 시험에서 얻은 응력-변형률 곡선에서 초기기울기를 얻을 때는 개인적인 임의성이 내재되므로 쌍곡선법을 이용한다¹⁰⁾.

이 방법은 시험에서 얻어진 응력-변형률 관계를 종축에 $\epsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 으로, 횡축에 ϵ_1 으로 나타내므로 얻어지는 직선의 절편으로부터 탄성계수(E_{ur})를 결정한다. 이때 탄성계수는 절편의 역수이다. 이와 같이 구한 탄성계수를 구속압력에 따라 양대수지에 도시하면 Fig. 4와 같이 나타나며 그림에서 절편은 K_{ur} 이고 기울기는 n 이다. 이를 구속압력에 따른 일반식으로 나타내면 식 (1)과 같이 표현된다.

$$E_{ur} = K_{ur} \cdot P_a (\sigma_3 / P_a)^n \dots\dots\dots (1)$$

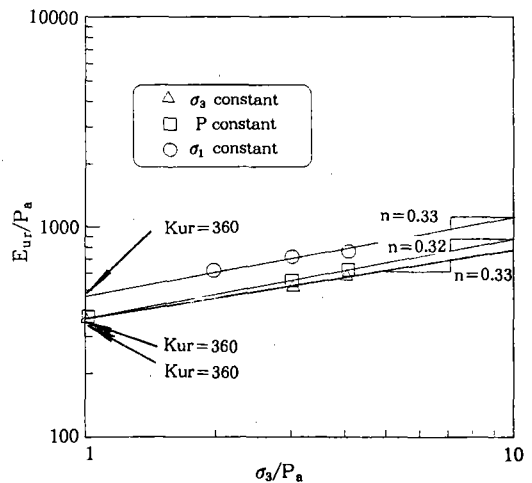


Fig. 4. Determination of Elastic Parameters (K_{ur} , n) with Stress Path

여기서 E_{ur} 은 탄성계수이고 K_{ur} 과 n 은 토질매개변수이며 σ_3 는 구속압력이다. 그리고 P_a 는 E_{ur} 과 같은 압력단위를 갖는 대기압이다.

이와 같은 방법으로 각각의 응력경로에 대한 K_{ur} 과 n 은 σ_3 Constant인 경우는 360, 0.33이고 P Constant인 경우는 400, 0.32이며 σ_1 Constant인 경우는 460, 0.32이다.

2. 경화함수에 관련되는 토질매개변수(C, p)

Fig. 1의 등방압축시험 결과로부터 다음식을 이용하여 소성일(plastic work)을 구한다.

$$W_p = \int \sigma_3 d\epsilon_v^p \dots \dots \dots (2)$$

여기서 $d\epsilon_v^p$ 는 Fig. 1의 등방압축시험결과에서 측정된 전체적 변형률로부터 탄성체적변형률을 감하여 구한 소성체적변형율이다.

한편 등방압축에 대한 I_1 값은 다음 식으로 구한다.

$$I_1 = 3 \cdot \sigma_3 \dots \dots \dots (3)$$

Fig. 5는 백마강 모래에 대한 W_p/P_a 와 I_1/P_a 관계를 양대수지에 나타낸 것이다. 이들 관계는 양대수지상에서 직선 즉 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\log(W_p/P_a) = \log C + P \cdot \log(I_1/P_a) \dots \dots (4)$$

식 (4)의 양변의 대수를 제거하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$W_p = C \cdot P_a (I_1/P_a)^P \dots \dots \dots (5)$$

Fig. 5에서 C 는 $I_1/P_a=1$ 일 때의 W_p 값이고 P 는 이 직선의 기울기이다.

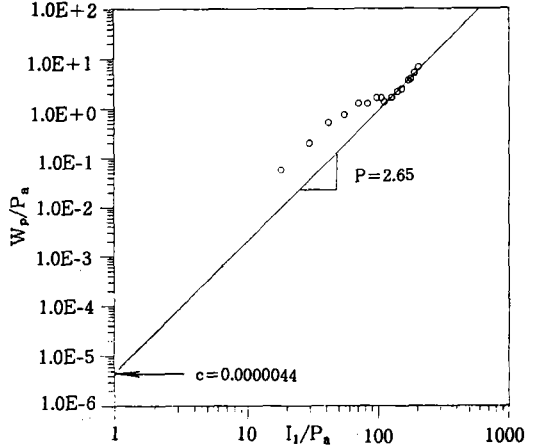


Fig. 5. Determined of Hardening Function Parameters(c, p) with Stress Path

그리고 그림에서 보는 바와 같이 초기부분의 시험 값은 직선 부분에서 약간 이탈되고 있다. 이것은 시료의 성형과정에서 선행 구속압력이 일정하지 못한 결과에 의해 발생하는 오차이므로 매개변수 C , P 값의 정도를 높이기 위하여 초기의 이탈된 값을 제거한 자료를 사용하는 것이 보다 더 정교한 응력-변형률관계를 예측할 수 있었다.

3. 파괴규준에 관련된 토질매개변수 (η_1, m)

Fig. 6은 Fig. 3의 배수삼축압축시험 결과에서 얻은 파괴 때의 응력을 사용하여 계산한 P_a/I_1 에 대한 $I_1^3/I_3 - 27$ 의 값을 양대수지상에 그린 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 양대수지상에서 $I_1^3/I_3 - 27$ 대 P_a/I_1 의 관계는 직선, 즉 다음의 관계식으로 표현할 수 있다.

$$\log \eta_1 = \log(I_1^3/I_3 - 27) + m \cdot \log(P_a/I_1) \dots (6)$$

식 (6)의 양변의 대수를 제거하면 식 (7)과 같이 된다.

$$\eta_1 = (I_1^3/I_3 - 27) (P_a/I_1)^m \dots \dots \dots (7)$$

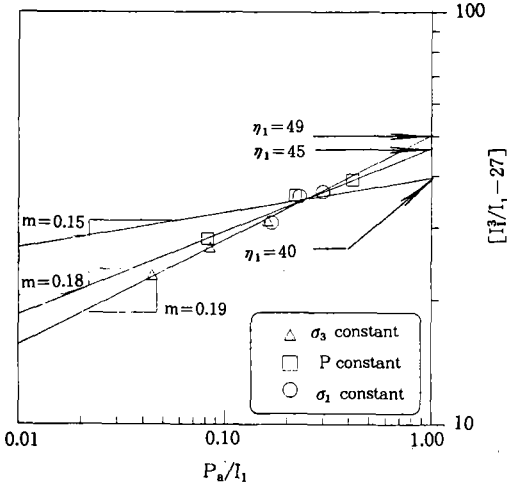


Fig. 6. Determination of Failure Criterion Parameters(η_1, m) with Stress Path

여기서 η_1 은 $P_a/I_1=1$ 일 때 절편 I_3^3/I_1-27 값이며, m 은 이 직선의 기울기이다. 그림에 나타난 바와 같이 응력경로에 따른 η_1 과 m 은 σ_3 Constant인 경우는 49, 0.19이고 P Constant인 경우는 45, 0.18이며 σ_1 Constant인 경우는 40, 0.15이다.

이들 값이 상대적인 차가 적어 응력경로에 큰 영향을 받고 있지 않는 것 같이 보이지만 이 토질매개변수는 이미 밝혀진 바와 같이⁸⁾ 예민성이 크기 때문에 적은 값의 변화도 정교한 응력-변형률 거동을 예측하기 위해서는 간과할 수 없을 것이다.

4. 소성포텐셜에 관련된 토질매개변수 (Ψ_2, μ)

배수삼축압축시험 결과에서 얻은 각 시험 자료를 사용하고 식 (8)과 식 (9)를 이용하여 ξ_x 와 ξ_y 를 구한다.

$$\xi_x = \frac{1}{1+\nu_p} \left[\frac{I_3^3}{I_2^2} (\sigma_1 + \sigma_3 + 2\nu_p \sigma_3) + \Psi_1 \cdot \frac{I_1^4}{I_3^2} (\sigma_1 \cdot \sigma_3 + \nu_p \cdot \sigma_3^2) \right] - 3\Psi_1 \cdot \frac{I_1^3}{I_3} + 2 \cdot \frac{I_1^2}{I_2} \dots (8)$$

$$\xi_x = \Psi_1 \cdot \frac{I_3^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I_2} \dots (9)$$

Fig. 7은 ξ_x 를 횡축에 ξ_y 를 종축으로 하여 나타낸 것이며 ξ_x 와 ξ_y 의 관계는 다음의 관계식으로 표현할 수 있다.

$$\xi_y = \frac{1}{\mu} \xi_x - \Psi_2 \dots (10)$$

여기서 Ψ_2 는 이 직선의 절편 값이며 $1/\mu$ 는 기울기이다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 ξ_x 와 ξ_y 의 관계는 초기와 종기에서 약간의 이탈을 보이고 있으나 구속압력, σ_3 의 크기에 무관하게 하나의 직선상에 나타남을 알 수 있다.

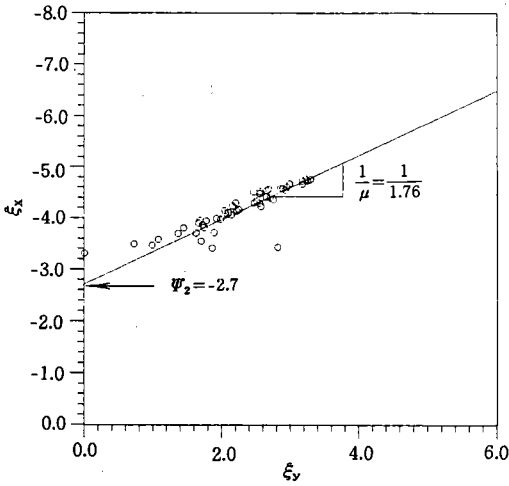
또한 각각의 응력경로에 따른 Ψ_2 와 μ 는 σ_3 Constant인 경우는 -2.70, 1.76이고 P Constant인 경우는 -3.06, 2.00이며 σ_1 Constant인 경우는 -3.42, 2.02이다.

이들 값은 파괴에 관련된 토질매개변수 η_1, m 과 달리 응력경로에 영향을 받고 있으며 이미 밝혀진 바와 같이⁸⁾ 이 토질매개변수는 예민성이 크기 때문에 미소한 변화에도 응력-변형률 거동에 크게 영향을 미치고 있으므로 응력경로에 무관하게 취급될 수 없는 토질매개변수라 생각한다.

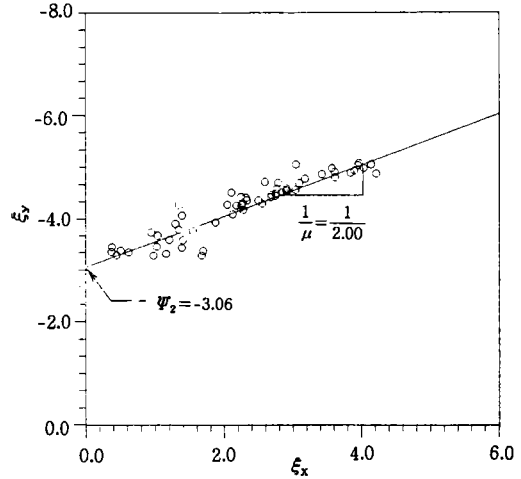
5. 항복함수에 관련된 토질매개변수 (h, a)

항복함수에 관련된 토질매개변수 h 는 배수삼축압축시험 결과를 사용하여 식 (11)로 구한다. 여기서 I_{1A} 과 I_{1B} 는 등소성일곡선(same plastic work contour) 상에서 정수압축선 위의 제1응력불변량과 파괴포락선의 제1응력불변량을 각각 나타내며, e 는 자연대수의 기저이다.

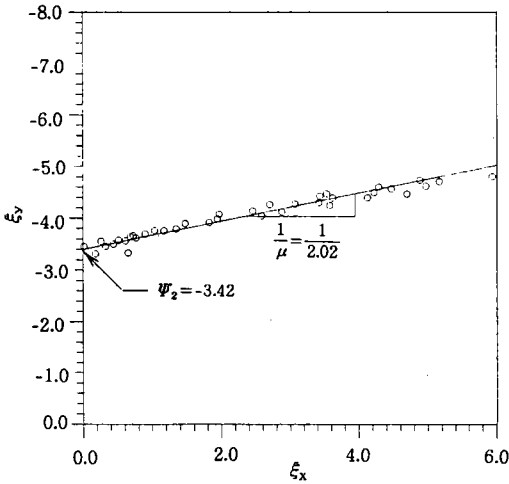
이 구성모델의 제안자는 구속압력(σ_c)과 h 의 관계가 무관하다고 생각하여 각각의 구속



(a) σ_3 Constant test



(b) P Constant test



(c) σ_1 Constant test

Fig. 7. Determination of Plastic Potential Parameters (Ψ_2, μ) with Stress Path

압력에서 구한 h 값을 평균하여 사용하여 왔다.

그러나 Fig. 8에 나타난 바와 같이 σ_3 Constant인 경우는 구속압력의 변화에 따라 h 값의 차가 거의 없으므로 평균 값을 사용하여도 무방할 것으로 판단되나 이 경우를 제외한 다른 응력경로에서는 구속압력이 변화함에 따라 매우 크게 변화하므로 평균값을 이용하는 것

보다 이들을 하나의 함수식으로 변환하여 사용함이 좋을 것으로 생각한다.

그러므로 본 연구에서는 이들 값을 하나의 회귀식으로 표현하여 Fig. 8에 나타내었다. 이 그림에서 파선은 평균값을 나타낸 것이고 실선은 시험에서 얻은 h 값을 대수식으로 회귀분석하여 나타낸 것이다. 그리고 이들의 결과를 비교하고자 구성모델 제안자의 방법에 따라 결정한 값(σ_3 Constant인 경우 0.64, P Constant인 경우 0.52, σ_1 Constant인 경우 0.51)과 구속압력의 대수식으로 회귀분석하여 얻은 함수 값으로 각각의 응력경로 및 구속압력에 따른 응력-변형을 거동을 예측하여 그 정도를 비교한다.

$$h = \ln \frac{(\Psi_1 \cdot \frac{I_{1B}^3}{I_{3B}} - \frac{I_{1B}}{I_{2B}}) \cdot e}{27 \cdot \Psi_1 + 3} \cdot \frac{\ln \frac{I_{1A}}{I_{1B}}}{\dots} \quad \dots \dots \dots (11)$$

그리고 항복함수에 관련된 토질매개변수 α 는 식 (12)와 같이 표현된다.

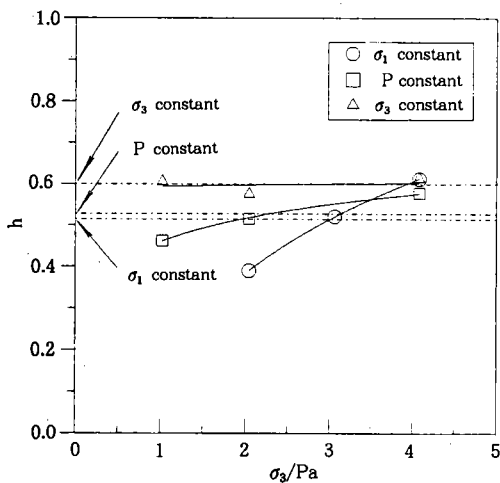


Fig. 8. Determination of Yield Function Parameter h with Stress Path

$$\alpha = \frac{1-s}{s} \frac{q_s}{1-q_s} = \frac{1}{s} \frac{q_{s0}}{1-q_{s0}} \dots\dots\dots (12)$$

여기서 응력수준 S 는 식 (13)과 같으며 q 의 값은 식 (14)와 같다. 그리고 식 (12)에서 q_{s0} 는 $s=0.8$ 일 때의 q 값이다.

$$S = \frac{f_n}{\eta_1} = \frac{1}{\eta_1} \cdot \left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27 \right) \cdot \left(\frac{I_1}{P_a} \right)^m \dots\dots\dots (13)$$

$$q = \ln \frac{\left(\frac{W_p}{D \cdot P_a} \right)^{\frac{1}{\rho}}}{\left(\psi_1 \cdot \frac{I_1^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I_2} \right) \cdot \left(\frac{I_1}{P_a} \right)^h} \dots\dots\dots (14)$$

또한 식 (14)에서 D 와 ρ 는 주어진 재료에 대해서 일정하며 다음과 같이 표현된다.

$$\rho = \frac{p}{h} \dots\dots\dots (15)$$

$$D = \frac{C}{(27\psi_1 + 3)\rho} \dots\dots\dots (16)$$

Fig. 9에 나타난 바와 같이 α 값은 구속압력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있으며 응력수준에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 이 값도 h 값과 마찬가지로 지금까지는 평균값을 사용하였으나 이 경우도 평균값을 사용하는 것보다는 구속압력에 관련한 함수식으로 변환하여 사용함이 좋을 것으로 생각한다.

그러므로 본 연구에서는 이들 값을 하나의 회귀식으로 표현하여 얻은 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 이 그림에서 파선은 평균값을 나타낸 것이고 실선은 시험에서 얻은 α 값을 대수식으로 회귀분석하여 나타낸 것이다. 그리고 이와 같이 구한 값들이 응력-변형을 거동에 어느 정도의 영향을 미치는가를 검토하고자 구성모델 제안자의 방법에 따라 결정한 값 (σ_3 Constant인 경우 0.44, P Constant인 경우 0.62, σ_1 Constant인 경우 1.10)과 대수식으로 회귀분석하여 얻은 함수식의 값으로 각각의 응력경로 및 구속압력에 따른 응력-변형을 거동을 예측하여 그 정도를 비교한다.

이상의 결과로 보아 응력경로에 따른 토질 매개변수의 변화는 큰 차이를 보이고 있지는 않지만 이 구성모델의 토질매개변수는 매우

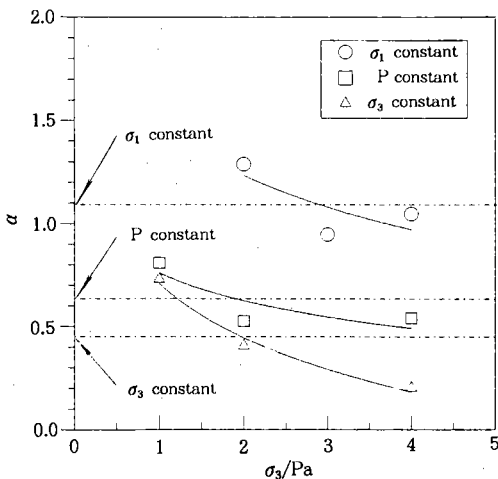


Fig. 9. Determination of Yield Function Parameter α with Stress Path

Table-2. Parametric Value of Baekma River sand with Stress Path

| parameter stress path | K_{ur} | n | ν | η_1 | m |
|--------------------------|----------|------|-------|----------|------|
| σ_3 constant | 360 | 0.33 | 0.25 | 49 | 0.19 |
| P constant | 400 | 0.32 | 0.25 | 45 | 0.18 |
| σ_1 constant | 460 | 0.33 | 0.25 | 40 | 0.15 |

| parameter stress path | c | P | ϕ_2 | n | μ | h |
|--------------------------|-----------|------|----------|------|-------|------|
| σ_3 constant | 0.0000044 | 2.65 | -2.70 | 1.76 | 0.64 | 0.44 |
| P constant | 0.0000044 | 2.65 | -3.06 | 2.00 | 0.52 | 0.62 |
| σ_1 constant | 0.0000044 | 2.65 | -3.42 | 2.02 | 0.51 | 1.10 |

민감하므로 이 구성모델을 이용하여 실제 지반을 해석할 때는 현장 조건에 적합한 시험을 통하여 얻은 토질매개변수로 지반을 해석함이 좋을 것으로 생각된다.

IV. 결과 및 고찰

등방압축시험과 응력경로를 달리한 배수삼축압축시험결과 σ_3 Constant 시험, P Constant 시험, σ_1 Constant 시험)로부터 Lade의 단일항복면 구성모델의 토질매개변수를 결정하였으며 이 결과를 이용하여 각각의 응력경로에 따른 응력-변형을 거동을 해석하여 그 정도를 검토하므로써 이 구성모델의 토질매개변수가 응력경로에 따라 어떤 특성이 있는지를 밝혀 실용성을 검토하고자 한다.

이 구성모델은 11개의 토질매개변수가 필요하며 이들 개개의 결정 방법은 이미 여러차례 소개된바 있고 토질매개변수의 특성 또한 고찰된바 있다. 이 구성모델의 토질매개변수를 각각의 응력경로에 대해 결정한 결과 탄성에 관련된 토질매개변수 K_{ur} , n 은 응력경로에 따라 다소 큰 변화를 보이고 있으며 파괴에 관련된 토질매개변수 η_1 과 m 과 소성포텐셜함수에 관련된 토질매개변수 ψ_2 와 μ 는 응력경로

에 따라 적은 변화를 보이고 있다. 그러나 이 토질매개변수는 이미 밝혀진 바와 같이⁸⁾ 예민성이 크기 때문에 적은 값의 변화도 정교한 응력-변형을 거동을 예측하기 위해서는 간과할 수 없을 것이다.

그리고 항복함수에 관련된 토질매개변수 h 는 구속압력과 무관하다고 생각하여 각각의 구속압력에서 구한 h 값을 평균하여 사용하여 왔다. 그러나 σ_3 Constant인 경우는 구속압력의 변화에 따라 h 값의 차가 거의 없으므로 평균값을 사용하여도 무방할 것으로 판단되나 이 경우를 제외한 다른 응력경로에서는 구속압력이 변화함에 따라 매우 크게 변화하므로 평균값을 이용하는 것보다 이들을 하나의 함수식으로 변환하여 사용함이 좋을 것으로 생각한다.

α 는 구속압력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있으며 응력수준에 따라 큰 차이를 보이고 있으므로 이 값도 h 값과 마찬가지로 지금까지는 평균값을 사용하였으나 이 보다는 구속압력에 관련한 함수식으로 변환하여 사용함이 좋을 것으로 생각한다.

Fig. 10은 구속압력을 100, 200, 400kPa 상태에서 압밀배수삼축압축시험(σ_3 Constant)을 수행한 결과와 등방압축팽창시험결과를 이용하여 구성모델 제안자의 방법에 따라 토질매개변수를 결정한 값으로 응력-변형율을 예측하여 실선으로 나타내었고 항복함수에 관련된 토질매개변수(h, α)를 구속압력에 따른 회귀식에서 얻은 값으로 응력-변형율관계를 해석하여 파선으로 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 두 경우 모두 구속압력에 무관하게 응력-변형을 및 체적변형률을 정도 높게 예측함을 보이고 있다.

Fig. 11은 P Constant 시험에서 얻은 토질매개변수의 타당성을 검토하기 위하여 토질매개변수결정시 이용한 시험 결과를 역해석하여 나타낸 그림이다. 그림에서 $\circ, \triangle, \square$ 는 초기

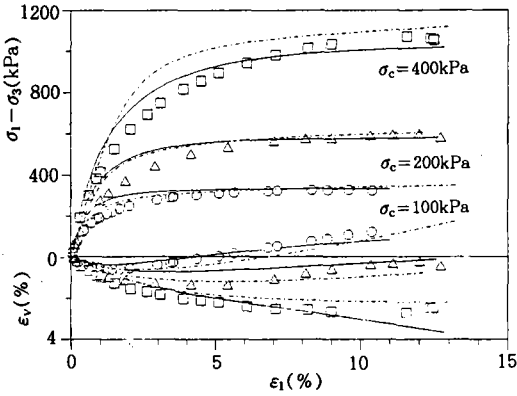


Fig. 10. Comparison of σ_3 Constant Test Result with Prediction Result for Baekma River Sand

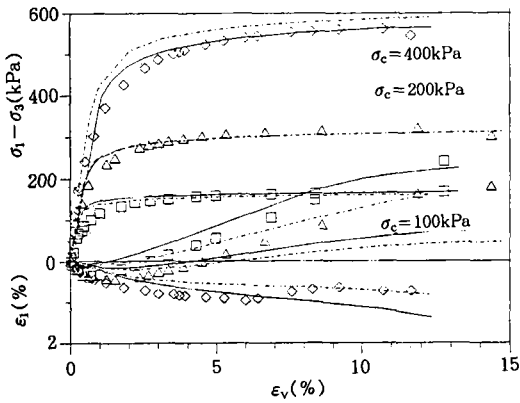


Fig. 11. Comparison of P Constant Test Result with Prediction Result for Baekma River Sand

구속압력이 100, 200, 400kPa로 시험한 결과이고 실선과 파선은 전술한 바와 같은 방법으로 얻은 토질매개변수를 이용하여 각각 수치 해석한 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 축변형율에 대한 축차응력은 구속압력이 작은 경우의 초기부분을 제외하고는 시험치와 해석치가 일치하고 있음을 보여 주고 있다. 그리고 축변형율에 대한 체적변형율은 시험치와 해석치가 다소 차이는 보이지만 서로의 양상은 일치하고 있음을 보여 주고 있다.

그리고 두 경우 중 어느쪽이 예측의 정도가

좋다라고 단언하기는 어렵지만 항복함수에 관련된 토질매개변수(h, α)를 구속압력의 함수로 이용하는 경우가 좀더 예측의 정도가 높아 보인다.

Fig. 12는 앞에서 행한 방법으로 σ_1 Constant 시험에서 얻은 토질매개변수를 이용하여 시험 결과를 역해석하여 나타낸 그림이다. 그림에서 $\circ, \triangle, \square$ 는 초기구속압력이 200, 300, 400kPa로 시험한 결과이고 실선과 파선은 수치해석한 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 축변형율에 대한 축차응력은 축변형율 2% 정도까지는 시험치와 해석치가 약간의 차이를 보이고 있으나 이 이후는 시험치와 해석치가 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 그리고 축변형율에 대한 체적변형율은 시험치와 해석치가 약간의 차이는 있지만 서로의 양상은 일치하고 있음을 보여 주고 있다. 또한 시험 결과를 보면 축변형율 초기의 체적변형율은 체적팽창현상이 초기에는 완만하고 축변형율 1% 이후에 급한 경향을 나타낸다. 그러나 해석결과는 초기에 급하게 체적팽창현상이 나타난 후 완만한 경사가 약 1%정도 지속된 후 다시 체적팽창현상이 크게 발생하고 있다. 이 시험의 경우는 항복함수에 관련된 토질매개변수(h, α)를 구속압력의 변화에 무관한 평균치를 사용한 경우보다 구속압력의 함수로 사용한 경우가 미소하지만 시험치에 더 근접하게 예측하고 있음을 보여주고 있다.

이상의 결과로 보아 Lade의 단일항복면구성 모델의 토질매개변수들은 전반적으로 응력경로에 큰 영향이 없으며 응력-변형율 거동 예측에도 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

그리고 높은 정도의 예측치를 얻기 위해서는 응력경로를 고려한 토질매개변수가 요구되지만 실용성을 고려한다면 통상의 삼축시험(σ_3 Constant 시험)에서 얻은 토질매개변수를 이용하여 기초지반의 응력-변형율 거동을 해석하는 방법도 유용할 것으로 생각된다.

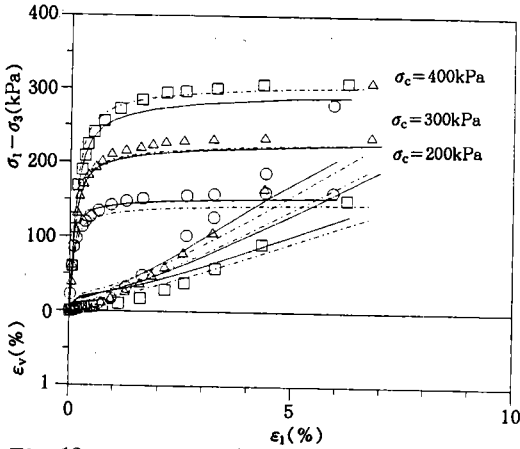


Fig. 12. Comparison of σ_1 Constant Test Result with Prediction Result for Baekma River Sand

V. 결 론

본 연구는 백마강모래를 사용하여 응력경로를 달리한 시험을 실시하고 각각의 응력경로에 대한 Lade의 단일항복면구성모델의 토질매개변수를 결정하여 토질매개변수의 특성을 검토하였으며 이를 이용하여 응력-변형률 거동을 해석하여 이 구성모델의 응력경로 의존 특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 응력경로에 따른 탄성에 관련된 토질매개변수 K_{ur} 의 크기는 σ_3 Constant 시험인 경우보다 P Constant 시험이, 이보다는 σ_1 Constant 시험인 경우가 크게 나타난다.

2. 파괴에 관련된 토질매개변수 (η_1, m)와 소성포텐셜에 관련된 토질매개변수 (ψ_2, μ)는 응력 경로에 큰 영향을 받고 있지 않은 것 같지만 이 토질매개변수는 예민성이 크기 때문에 미소한 변화에도 응력-변형률 거동에 크게 영향을 미치고 있으므로 응력경로에 무관하게 취급될 수 없는 토질매개변수라 생각한다.

3. 항복함수에 관련된 토질매개변수 h 는 σ_3 Constant인 경우는 구속압력의 변화에 따라 h 값의 차가 거의 없으므로 평균값을 사용하여

도 무방할 것으로 판단되며 이 경우를 제외한 다른 응력경로에서는 구속압력이 변화함에 따라 매우 크게 변화하므로 하나의 함수 식으로 변환하여 사용함이 좋을 것으로 생각한다.

4. 항복함수에 관련된 토질매개변수 a 는 모든 응력경로에서 구속압력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있으므로 평균값을 사용하는 것보다는 구속압력에 관련한 함수 식으로 변환하여 사용함이 좋을 것으로 생각한다.

5. 응력경로에 따른 Lade의 단일항복면구성모델의 토질매개변수들은 전반적으로 큰 영향이 없으며 응력-변형률 거동 예측에도 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

이 논문은 1995년도 대전대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

참 고 문 헌

1. Yudhbir and A. Varadarajan, "Stress Path Dependent Deformation Module of Clay", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.101, No. GT3, 1975, pp.315-327.
2. Varadarajan, A., and Mishra, S. S., "Stress-path Dependent Stress Strain Volume Change Behaviour of a Granular Soil", International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading, Swansea, 7-11 January 1980, pp.109-119.
3. Desai, C. S., "Constitutive law for geologic media. In C. S.", Desai and J. T. Christian(ed.), Numerical methods in geotechnical engineering, 1977, pp.65-115, McGrawhill Book Company, New York.

4. Kim, M. K., and Lade, P. V., "Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials, I. Plastic potential function", *Computers and Geotechnics*, 5(4), 1988, pp.307-324.
 5. Kim, M. K., and Lade, P. V., "Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials, II Yield Criterion and Plastic Work Contours", *Computers and Geotechnics*, 6(1), 1988, pp.13-29.
 6. Kim, M. K., and Lade, P. V., "Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials III. Comparisons with Experimental Data", *Computers and Geotechnics*, 6(1), 1988, pp.30-47.
 7. Lade, P. V., "Single Hardening Model with Application to NC Clay", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.116, No.3, 1990. pp.394-414.
 8. 정진섭, 김찬기, 이문수, "탄소성구성 모델의 토질매개변수 예민성", *한국지반공학회지*, 제8권, 제2호, 1992, pp. 81-94.
 9. 정진섭, 김찬기, 이문수, "단일항복면 구성모델에 의한 입상토의 비배수거동해석", *대한토목학회논문집*, 제12권 제2호, 1992, pp.177-189.
 10. Dickin E. A. and King, gG. J. W., "The Behaviour of Hyperbolic Stress-Strain Models in Triaxial and Plane Strain Compression", *International Symposium on Numerical Models in Geomechanics, Zurich*, 13-17 Sep. 1982, pp.303-311.
- (접수일자 : 1996년 1월 29일)