

상대밀도에 따른 구성모델의 토질매개변수 특성 Characteristic of Soil Parameter of Constitutive Model by Relative Density

김찬기¹⁾, Chan-Kee Kim, 조원범²⁾, Won-Bum Cho, 박옥근²⁾, Wook-Keun Park, 김의조³⁾, Eui-jo Kim, 김용철³⁾, Young-Chul Kim

¹⁾ 대전대학교 건설시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Daejin University

²⁾ 대전대학교 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Daejin University

³⁾ 대전대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Daejin University

SYNOPSIS : Several isotropic compression-expansion tests and a series of drained conventional triaxial tests with various confining pressures for relative density of Beakma river sand 25%, 50%, 80% and 100% selecting Lade's Single Work-Hardening constitutive model. This examination materials use regression analysis as a basis, depending on the relative density of soil parameters change statement attributes. Yield fuction represent the soil parameters h and α is not affected by the changes in the relative density. η_1 could be replaced by fomula. And Numerical analysis results predicted very good and could confirm that.

Key words : Single Work-Hardening Constitutive Model, Soil Parameter, Relative Density

1. 서 론

Lade(1988)의 단일항복면 구성모델은 현재 제안된 여러 구성모델 중 비선형의 응력-변형 거동을 광범위하게 해석할 수 있고 일 경화 및 연화까지도 설명이 가능하며, 입상토 뿐만 아니라 점토까지 해석이 가능하다고 알려져 있다. 그리고 어떠한 응력경로에서도 일정한 토질매개변수를 얻을 수 있어 일반 3축압축시험 결과만으로도 광범위한 응력경로 상태의 지반에 대한 거동을 예측할 수 있고 배수조건이 상이한 경우도 동일한 토질매개변수를 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 구성모델 역시 토질매개변수 결정에 임의성이 있고, 일부 토질매개변수는 민감성이 예민하여 응력-변형률의 예측에 큰 오차를 가져오므로 실용상 문제가 있다고 정 등(1992)은 보고한 바 있다. 자연 퇴적된 입상토의 기초지반은 흙의 물리적 성질과 입도분포는 유사하고 상대밀도가 서로 상이한 다층으로 이루어진 경우가 대부분이다. Lade의 단일항복면 구성모델을 이용하여 자연 퇴적층으로 구성된 입상토 기초지반의 거동을 해석하기 위해서는 토질매개변수를 결정하기 위하여 많은 시험이 수행되어야 하고 이로 인하여 예기치 못한 오차가 발생할 우려가 있다. 그러나 물리적 성질과 입도분포가 같은 흙의 거동은 서로 관련성이 있을 것이며 토질매개변수간에도 상관성이 있으리라 생각하여 상대밀도에 따른 토질매개변수의 특성을 밝혀 Lade의 단일항복면 구성모델의 예측정도와 실용성을 높이고자 한다.

2 단일항복면 구성모델

과괴규준은 응력불변량을 사용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\eta_1 = (I_1^3/I_3 - 27) \cdot (I_1/P_a)^m \quad (1)$$

여기서 η_1 과 m 은 토질매개변수이고 P_a 는 대기압이면 응력불변량 I_1 과 I_3 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \\ I_3 &= \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z + \tau_{xy} \cdot \tau_{yz} \cdot \tau_{zx} + \\ &\quad \tau_{yz} \cdot \tau_{zy} \cdot \tau_{xz} - (\sigma_x \cdot \tau_{yz} \cdot \tau_{zx} + \\ &\quad \sigma_y \cdot \tau_{zx} \cdot \tau_{xz} + \sigma_z \cdot \tau_{xy} \cdot \tau_{yx}) \end{aligned} \quad (2)$$

소성변형률증분은 유동측으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda_p \frac{\delta g_p}{\delta \sigma_{ij}} \quad (3)$$

$$g_p = (\Psi_1 \cdot I_1^3/I_3 - I_1^2/I_2 + \Psi_2) \cdot (I_1/P_a)^\mu \quad (4)$$

여기서 g_p 는 소성포텐셜함수이고 $d\lambda_p$ 는 비례상수이며 응력불변량 I_2 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_2 &= \tau_{xy} \cdot \tau_{yx} + \tau_{yz} \cdot \tau_{zy} + \tau_{zx} \cdot \tau_{xz} - \\ &\quad (\sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y \cdot \sigma_z + \sigma_z \cdot \sigma_x) \end{aligned} \quad (5)$$

항복함수는 경화인 경우와 연화인 경우에 대하여 다음과 같이 각각 나타낸다.

$$f_p = fp'(\sigma) - fp''(W_p) = 0 \quad (6)$$

$$f'_p = (\Psi_1 \cdot I_1^3/I_3 - I_1^2/I_2) \cdot (I_1/P_a)^h \cdot e^q \quad (7)$$

$$f''_p = (1/D)^{1/\rho} \cdot (W_p/P_a)^{1/\rho} \text{ (for Hardening)} \quad (8)$$

$$f''_p = A \cdot e^{-B \cdot (W_p/P_a)} \text{ (for Softening)} \quad (9)$$

3 시험 및 결과 고찰

3.1 시험

Lade의 단일항복면 구성모델의 토질매개변수가 상대밀도에 따라 어떠한 특성을 갖고 있는가를 검토하

고자 백마강에서 채취한 모래를 자연건조시킨 후 체가름을 실시하여 #40-60번체 시료 35%, #60-80번체 시료 60%, #80-100번체 시료 5%를 균일하게 혼합하였으며 이 시료의 최대간극비(e_{max}), 최소간극비(e_{min})를 측정하고 상대밀도(D_r)를 100%, 80%, 50%, 25%가 되도록 시료의 초기간극비(e_{spc})값을 0.888, 0.9404, 1.025, 1.0955로 결정하여 시험에 이용할 수 있도록 시료를 준비하였다. 이 시료의 물리적 성질은 표 1과 같다.

표 1. 시험에 사용된 백마강 모래의 물리적 특성

G_s	e_{max}	e_{min}
2.664	1.166	0.884

3.2 시험결과

등방압축시험 결과 상대밀도에 따라 체적변형률만에 차이가 나타나고 있음을 알 수 있다. 배수3축압축시험 결과 축 변형률이 증가함에 따라 상대밀도가 큰 시료의 축차응력이 상대밀도가 작은 시료보다 크게 나타나고 있으며 체적변형률의 관계 또한 상대밀도가 클수록 다이러턴시 현상이 상대 밀도가 작은 경우보다 두드러지게 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 같은 물리적 성질을 갖고 입도분포가 같은 경우 상대밀도에 따라 축차응력 및 체적변형률은 일정하게 증가 또는 감소하는 일관성을 보이고 있다. 그러므로 이들의 토질매개변수 또한 일관성이 있을 것으로 생각된다.

4 항복함수에 관련된 토질매개변수 특성

그림 1은 상대밀도에 따른 h 값의 변화를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 상대밀도가 증가함에 따라 h 값이 다소 증가하는 경향을 보이고 있다.

그림 2는 항복함수에 관련된 토질매개변수 α 값이 상대밀도에 따른 변화를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 α 값은 상대밀도의 증감에도 그 값의 변화가 매우 미세하여 일정한 값으로 간주 할 수 있다. 또한 정 등(1992)의 연구에 의하면 항복함수에 관련된 토질매개변수 h 와 α 는 변동계수가 아주 작으며 응력-변형률거동에 미치는 영향도 비교적 작은 것으로 보고하였다. 그리고 11개의 토질매개변수 중 항복함수에 관련된 토질매개변수는 파괴규준에 관련된 토질매개변수와 밀접한 상관성이 있음을 밝혔다. 본 연구에서는 이와 같은 연구결과를 바탕으로 토질매개변수 h 와 α 를 파괴규준에 관련된 토질매개변수 η_1 에 관한 식으로 식 10과 식 11과 같이 나타내었다.

$$h = 0.0122\eta_1 \quad (10)$$

$$\alpha = 0.0025\eta_1 \quad (11)$$

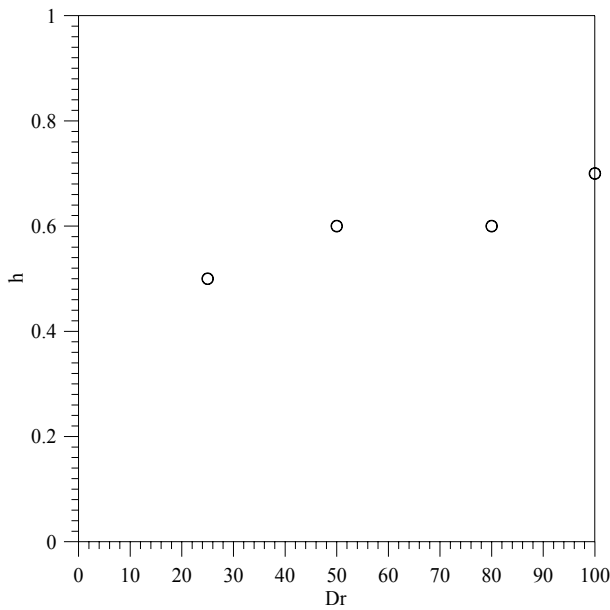


그림 1. 상대밀도에 따른 h값의 변화

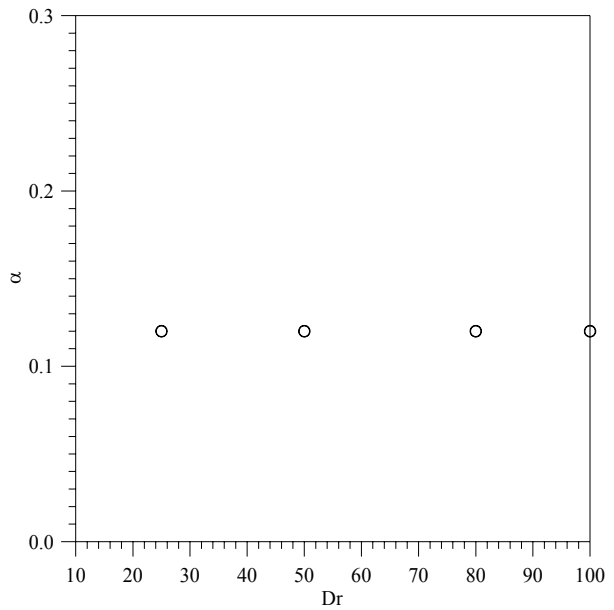
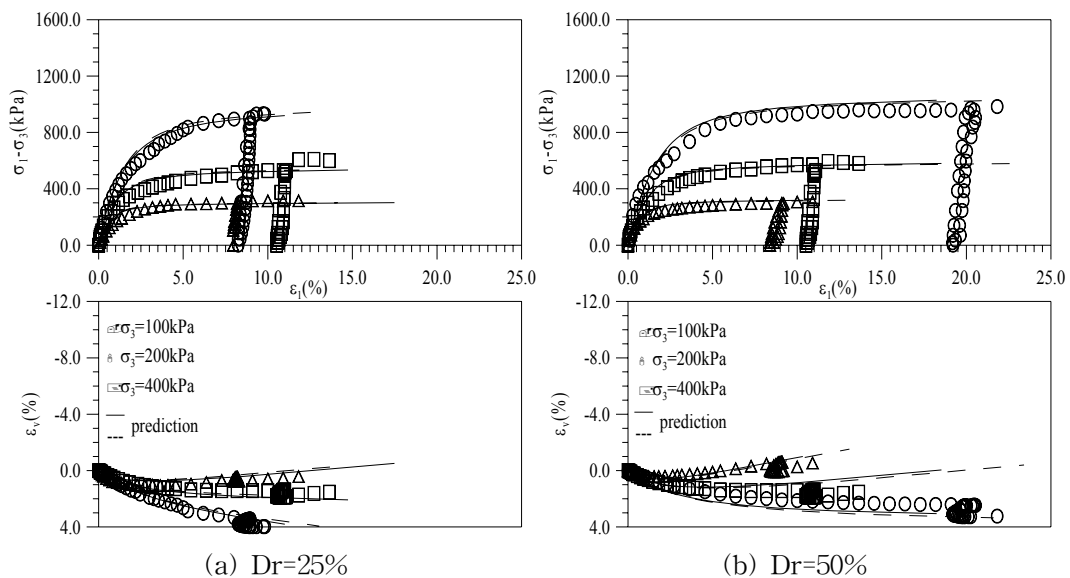


그림 2. 상대밀도에 따른 alpha값의 변화

5 토질매개변수의 검증

본 연구는 토질매개변수 h 와 α 을 식 10과 식 11에서 얻은 값을 사용하여 수치해석하고 시험결과와 비교하였다. 그림 3은 백마강모래를 상대밀도 25%, 50%, 80%, 100%로 각각 달리하여 배수 3축압축시험한 결과와 시험으로부터 구한 토질매개변수를 이용하여 수치해석한 결과를 나타낸 그림이다. 그림에서 표로 나타난 것은 각각의 구속압력에 대한 시험 결과이고 실선은 시험으로부터 구한 11개의 토질매개변수를 이용하여 수치해석한 결과이며 점선은 항복함수에 관련된 토질매개변수를 식 10과 식 11을 이용하여 얻은 결과를 이용하여 수치해석한 결과이다. 그림에 나타난바와 같이 실선과 점선 모두 시험결과와 매우 잘 일치하고 있다. 그러므로 항복함수에 관련된 토질매개변수 h 와 α 는 η_1 에 관련된 식으로 대체하여 Lade의 단일항복면 구성모델의 토질매개변수를 11개에서 9개로 줄일 수 있는 가능성을 보았다.



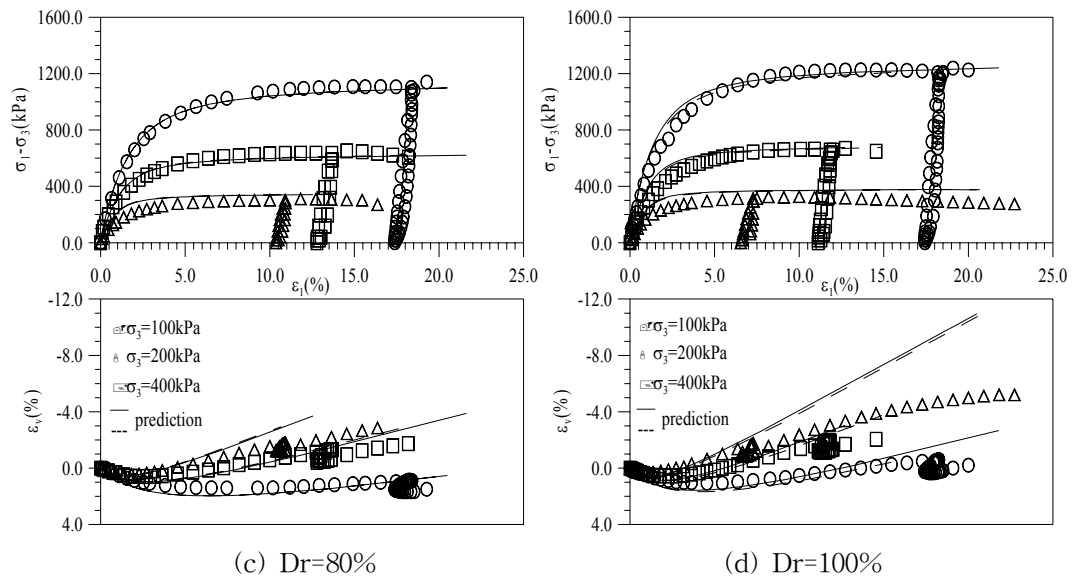


그림 15. 백마강 모래의 배수3축압축시험과 예측모델의 비교

6 결론

본 연구는 백마강 모래에 대하여 등방압축-팽창시험과 구속압력을 달리한 일련의 배수삼축시험을 하였다. 시험 결과 물리적 성질과 입도분포가 같은 흙의 거동은 어떤 일관성이 있을 것이며 토질매개변수간에 상관성이 있으리라 생각하여 상대밀도에 따른 토질매개변수의 특성을 알아보고자 하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 항복함수에 관련된 토질매개변수 α 는 상대밀도의 변화에 따라 일정한 값을 갖으며 h 값은 미세한 증가를 나타낸다.
2. 파괴규준에 관련된 토질매개변수 η_1 은 상대밀도에 따라 일정한 증가를 보이고 있으며, m 의 변화는 상대밀도에 따라 매우 미소하게 감소하는 경향을 보이고 있다.
3. 항복함수에 관련된 토질매개변수 h 와 α 는 η_1 에 관한 상관식으로 대체하여 사용한 결과 매우 양호하게 예측하고 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. 정진섭, 김찬기, 이문수(1992), “탄소성구성모델의 토질매개변수 예민성”, 한국지반공학회지, 제8권, 제2호, pp. 81-94.
2. Lade, P. V. and Duncan, J. M.(1975), "Elastoplastic stress-strain theory for cohesionless soil", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 101, No. GT10, pp. 1037-1053.