

## 포천 화강토의 건조단위중량에 따른 Lade의 단일항복면 구성모델의 토질매개변수 특성

### Characteristics of Soil Parameter for Lade's Single Work-Hardening Constitutive Model with Dry Density of Pocheon Granite Soil

조 원 범<sup>1</sup> Cho, Won-Beom

김 찬 기<sup>2\*</sup> Kim, Chan-Kee

#### ABSTRACT

In this study, a series of the isotropic compression-expansion tests and the drained triaxial tests were performed on Pocheon granite soil with various the dry densities of 16.67 kN/m<sup>3</sup>, 17.26 kN/m<sup>3</sup> and 17.65 kN/m<sup>3</sup>. Using the tests results the characteristic of the parameters of Lade's single hardening constitutive model were investigated. The soil parameters such as  $k_{ur}$  and  $n$  related to elastic behavior,  $m$  and  $\eta_1$  related to failure criterion,  $c$  and  $p$  related to hardening function and  $\psi_2$  and  $\mu$  related to plastic potential show in a positive linear relationship with the dry density. Since the soil parameters  $h$  and representing yield function do not change much to relative density and also are closely related to failure criterion, they can be replaced by failure criterion. We also observed that predicted values from the Lade's single hardening constitutive model were well consistent with the observed data.

#### 요 지

본 연구는 포천 화강토의 건조단위중량을 16.67 kN/m<sup>3</sup>, 17.26 kN/m<sup>3</sup>, 17.65 kN/m<sup>3</sup>으로 각각 변화시켜 등방압축-팽창시험과 구속압력을 달리한 일련의 배수삼축시험을 하였다. 그리고 이 시험자료를 이용하여 회귀분석을 근거로 건조단위중량의 변화에 따른 Lade의 단일항복면 구성모델의 토질매개변수의 변화 특성을 알아보았다. 그 결과 탄성성분, 파괴규준, 경화함수, 소성포텐셜에 관련된 토질매개변수는 상대밀도의 증가에 따라 선형적인 증감현상을 보이고 있다. 그리고 항복함수에 관련된 토질매개변수  $h$ 와  $\alpha$ 는 상대밀도에 따른 변화가 미세하고 파괴규준에 관련된 토질매개변수와 관련성이 매우 높아  $\eta_1$ 에 관한 식으로 대체할 수 있으며, 이 식을 이용한 수치해석 결과 양호하게 예측하고 있는 것을 확인 할 수 있었다.

**Keywords** : Single work-hardening constitutive model, Soil parameter, Dry density, Drained traxial test

#### 1. 서 론

1950년대 후반에 Drucker 등(1957)에 의해 제안된 흙의 탄·소성모델은 이미 실제문제에 적용까지 하고 있으며 쌍곡선 응력-변형률모델은 그 개념과 구성식이 비교적 단순하면서도 흙의 비선형거동을 잘 나타낼 수 있기 때문에 흙 구조물의 거동해석에 많이 사용되고 있다.

Kondner(1963)가 개발한 탄성쌍곡선 구성모델은 Duncan

과 Chang(1970)에 의해 수정되어 널리 사용되었지만 이 모델은 모든 탄성모델과 같이 전단응력 아래서 체적변화가 일어나는 것을 설명하지 못하는 단점을 가지고 있다. 이 단점을 극복하기 위하여 Lade와 Duncan(1973)은 입방체형시험기를 이용한 모래의 시험결과를 기본으로 새로운 모델을 제안하였다. 이 모델은 항복규준, 비관련 유동칙 그리고 전 소성일을 응력수준의 쌍곡선 함수로 표현하는 일 경화법칙을 수용하고 있으며 두 개의 항복면과 비관련

1 비회원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 Post-Doc. (Non-Member, Post-Doc., Geotechnical Engrg. Research Division, KICT.)

2\* 정회원, 대전대학교 건설시스템공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg. Daejin Univ., E-mail: ckkim@daejin.ac.kr)

유동칙이 적용되므로 해석상의 어려움이 있어 간편한 단일항복면 구성모델을 새로이 제안하였다.

Lade(1990)의 단일항복면 구성모델은 현재 제안된 여러 구성모델 중 비선형의 응력-변형 거동을 광범위하게 해석할 수 있고 일 경화 및 연화까지도 설명이 가능하며 어떠한 응력경로에서도 일정한 토질매개변수를 얻을 수 있어 일반삼축압축시험 결과만으로도 광범위한 응력경로 상태의 지반에 대한 거동을 예측할 수 있고 배수조건이 상이한 경우도 동일한 토질매개변수를 얻을 수 있는 장점이 있다. 정진섭 등(1989)은 Antelope Valley 모래를 이용하여 응력 수준에 따라 탄성거동 및 소성거동에 대하여 연구를 하였고, 박병기 등(1990)은 입방체형 삼축압축 시험장치를 사용하여 압축성 모래의 3차원 변형거동특성에 대하여 연구를 하였으며, 홍원표 등(1994)은 모래의 배수 시험을 통하여 응력-변형률 관계를 분석하여 11개의 토질매개변수를 통한 모래지반의 응력-변형률 관계를 예측하였다.

본 연구는 물리적 성질과 입도분포가 같은 흙의 거동은 서로 관련성이 있을 것이며 토질매개변수간에도 상관성이 있으리라 생각하여 포천 화강토의 건조단위중량에 따른 토질매개변수의 특성을 밝히고자 한다.

## 2. 단일항복면(Single Work-Hardening) 구성모델

일반적인 단일항복면 구성모델의 응력-변형률 증분식을 간단히 표현하면 다음과 같다.

일반적인 3차원 파괴기준은 응력텐서의 제1불변량과 제3불변량의 항으로 식 (1)과 같이 표현한다.

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

여기서  $\eta_1$ 과  $m$ 은 토질매개변수이고  $P_a$ 는 대기압이면 응력불변량  $I_1$ 과  $I_3$ 는 식 (2)와 같다.

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

소성변형률 증분은 유동법칙으로부터 식 (3)과 같이 계산된다.

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

여기서  $g_p$ 는 소성포텐셜함수이고,  $d\lambda_p$ 는 비례상수이다. 이 함수는 항복함수와 다르므로 비관련 유동법칙이 성립된다. 그리고 이 소성포텐셜함수는 3개의 응력불변량으로 표현하면 식 (4)와 같다.

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

여기서  $I_2$ 는 응력불변량으로 식 (5)와 같이 표현된다.

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

항복면은 소성일로부터 유도되며, 등방항복함수는 식 (6)과 같이 표현된다.

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

여기서  $f_p'$ 은 식 (7)과 같이 표현된다.

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

여기서  $h$ 는 토질매개변수이고  $q$ 는 정수압축을 따라 “0”에서부터 변한다.

경화함수는 식 (8)과 같이 표현된다.

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

소성일이 증가함에 따라 현재의 응력이 파괴면에 도달할 때까지 등방항복면은 팽창한다.  $f_p$ 와  $W_p$ 사이의 관계는 소성일이 증가함에 따라 경사가 감소하는 단조 증가함수로 나타난다. 항복면의 연화함수는 식 (9)와 같이 표현된다.

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

## 3. 시험 및 결과 고찰

### 3.1 시료조제 및 시험방법

Lade의 단일항복면 구성모델의 토질매개변수가 건조단위중량에 따라 어떠한 특성을 가지고 있는가를 검토하고자 포천시 왕방산에서 채취한 화강토를 이용하여 다짐시

표 1. 시험에 사용된 포천 화강토의 물리적 특성

비중	간극비	건조단위중량( $kN/m^3$ )
2.670	0.571	16.67
2.670	0.517	17.26
2.670	0.483	17.65

험을 실시하였다. 다짐시험은 동일한 함수비조건내에서 시료의 양을 조절하며 건조단위중량을 변화시켰으며, 그때의 간극비를 측정하였다. 이 시료의 물리적 성질은 표 1과 같으며 준비된 시료를 이용하여 등방압축-팽창시험과 배수삼축압축시험을 실시하였다.

등방압축-팽창시험 및 배수삼축압축시험에 사용되는 공시체는 다짐시험에서 얻은 건조단위중량과 동일한 밀도가 되도록 하며, 이 때 필요한 시료의 총중량으로부터 각 층의 시료량을 결정한 다음 각층의 다짐값과 다짐높이를 결정하여 다지는 다짐방법(Ladd, 1978)을 이용하여 공시체를 제작한다.

공시체의 상부와 하부 그리고 측면에 여과지를 부착한 뒤 삼축시험기 하판(pedestal)에 다공판을 부착한 다음 여과지로 감싼 시료를 놓은 뒤 시료 상부에 다공판을 부착하고 상부캡을 엮는다. 고무멤브레인으로 시료를 감싼 뒤 상판과 하판에 오-링을 돌려 고무멤브레인과 상판, 하판을 고정시키고 상판에 배수관을 연결한다. 다음에 삼축셀을 조립한 다음 물을 채우고 일정 측압을 가한다. 이 시료에 이산화탄소를 하부 배수관으로 주입시켜 시료속의 공기를 상부배수관을 통해 완전히 빠져 나가게 한 다음 증류수를 하부 배수관으로 유입시켜 시료 내에 있는 이산화탄소를 상부 배수관으로 천천히 밀어 올려 시료로부터 빠져 나가게 한다. 이후 증류수로 시료를 포화시키는데 포화도는 시험을 시작할 때 간극수압계수, B를 측정하여 검토하였으며 대부분의 경우 B값은 0.97-1.00을 나타내었다. 이와 같이 준비된 시료를 이용하여 등방압축-팽창시험과 배수삼축압축시험을 실시하였으며 전단속도는 0.2mm/min로 하였다.

### 3.2 등방압축-팽창시험

등방압축-팽창시험은 일반삼축압축시험 시 압밀과정과 동일하게 셀 내의 구속압력을 일정하게 증가 시키며 시료가 등방으로 압축될 때의 체적변형률을 측정한다. 이후 셀 내의 구속압력을 일정하게 제거시키며 시료가 팽창될 때의 체적변형률을 측정하게 된다. 그림 1은 등방압축-팽창

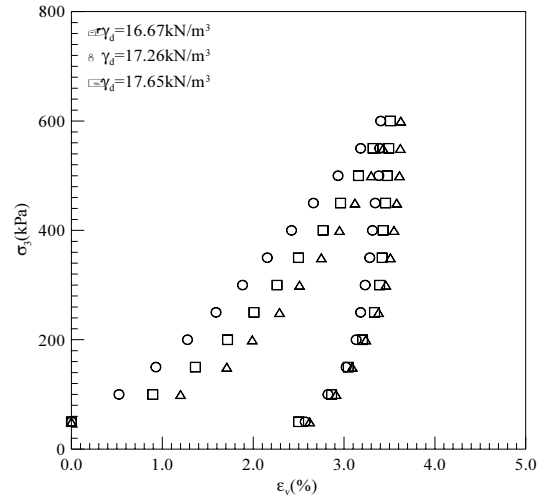


그림 1. 건조단위중량에 따른 포천 화강토의 등방압축시험결과

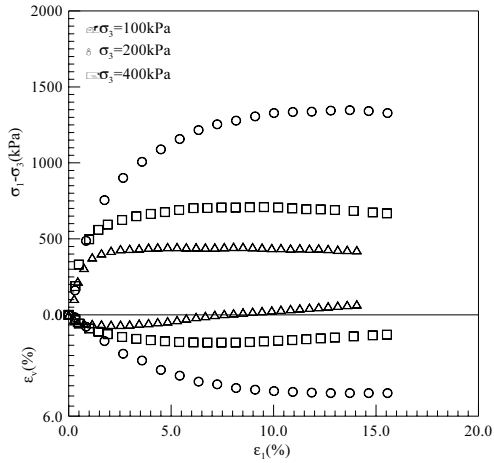
시험 결과를 나타낸 그림이며, 이 결과 형상은 일정하며 건조단위중량에 따라 체적변형률만에 차이가 나타나고 있음을 알 수 있다.

### 3.3 배수3축압축시험

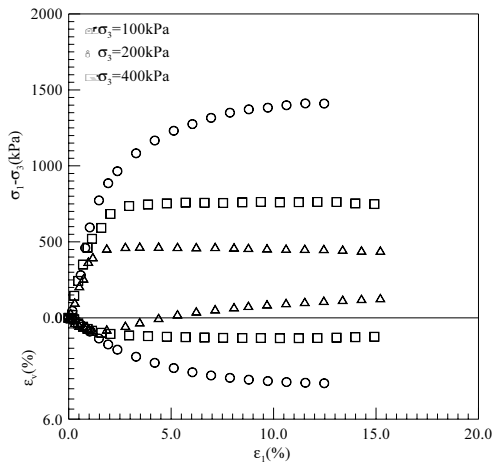
건조단위중량에 따라 구속압력 100kPa, 200kPa, 400kPa인 경우를 축 변형률에 대한 축차응력과 체적변형률의 관계를 그림 2에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 축 변형률이 증가함에 따라 건조단위중량이 큰 시료의 축차응력이 건조단위중량이 작은 시료보다 크게 나타나고 있으며 체적변형률의 관계 또한 건조단위중량이 클수록 다 이러한 현상이 건조단위중량이 작은 경우보다 두드러지게 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 같은 물리적 성질을 갖고 입도분포가 같은 경우 건조단위중량에 따라 축차응력 및 체적변형률은 일정하게 증가 또는 감소하는 일관성을 보이고 있다. 그러므로 이들의 토질매개변수 또한 일관성이 있을 것으로 생각된다.

### 4. 토질매개변수 특성

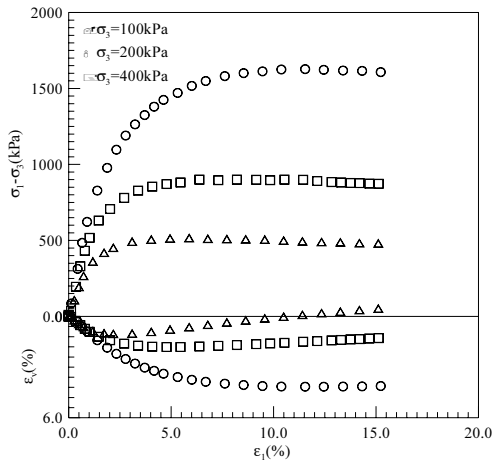
Lade의 단일항복면 구성모델의 토질매개변수는 탄성계동성분, 경화함수에 관련된 변수, 파괴규준에 관련된 변수, 소성포텐셜 및 항복함수에 관련된 변수 등 12개지만 사질토의 경우  $a=0$ 이므로 11개에 대한 검토를 하게 된다. 정진섭 등(1992)은 단일항복면 구성모델에 필요한 11개의 토질매개변수가 축변형률( $\epsilon_1$ )과 축차응력( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) 및 축변형률( $\epsilon_1$ )과 체적변형률( $\epsilon_v$ )에 미치는 영향을 규명하기 위하



(a)  $\gamma_d=16.67kN/m^3$



(b)  $\gamma_d=17.26kN/m^3$



(c)  $\gamma_d=17.65kN/m^3$

그림 2. 포천 화강토의 배수삼축압축시험결과

여 실험결과를 통계 처리하여 얻은 토질매개변수의 평균 값에 표준편차만큼 가감하여 구성식에 대입, 응력-변형률 곡선을 구하여 각 토질매개변수에 대한 예민도를 검토하였다. 그 결과 각각의 토질매개변수가 해석에 미치는 영향

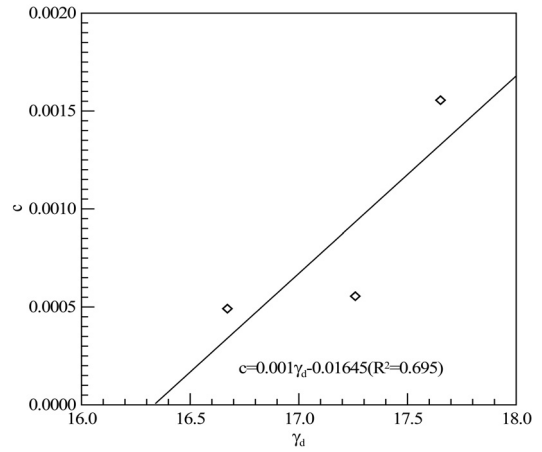


그림 3. 건조단위중량에 따른 포천 화강토의 c의 변화

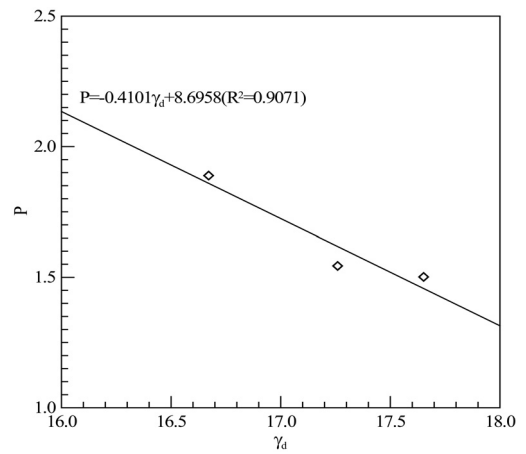


그림 4. 건조단위중량에 따른 포천 화강토의 P의 변화

이 각기 다르며 항복함수와 관련된 변수는 해석에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다. 건조단위중량에 따른 등방압축시험 및 배수삼축압축시험결과가 서로 일정비의 증감현상이 있으므로 이들로 부터 결정하는 토질매개변수 또한 서로 관련성이 있으리라 생각한다. 이와 같은 이유에서 앞에서 언급한 방법으로 각각의 토질매개변수를 구한 뒤 건조단위중량에 따른 상관성을 비교하여 보았다.

#### 4.1 경화함수와 관련되는 토질매개변수(c, P)

그림 3과 4는 토질매개변수 c 및 P를 건조단위중량의 변화에 따라 나타내었고 이들의 관계를 선형적인 상관식으로 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 c는 건조단위중량이 증가함에 따라 작은 값의 증가현상을 보이고 있으며 p는 건조단위중량이 증가함에 따라 일정한 감소하는 경향을 나타내고 있다.

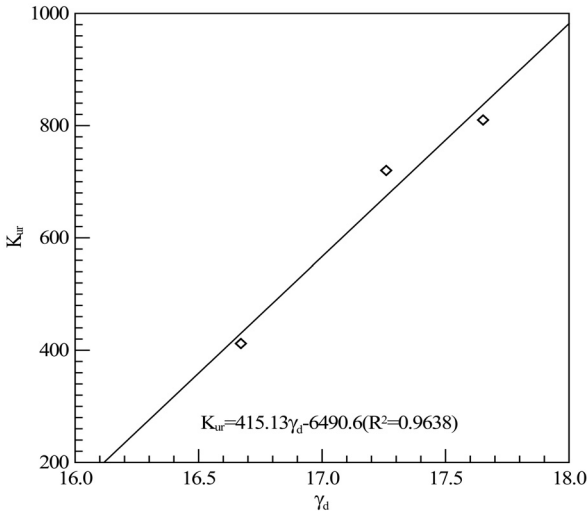


그림 5. 건조단위중량에 따른 포천 화강토의  $K_{ur}$ 의 변화

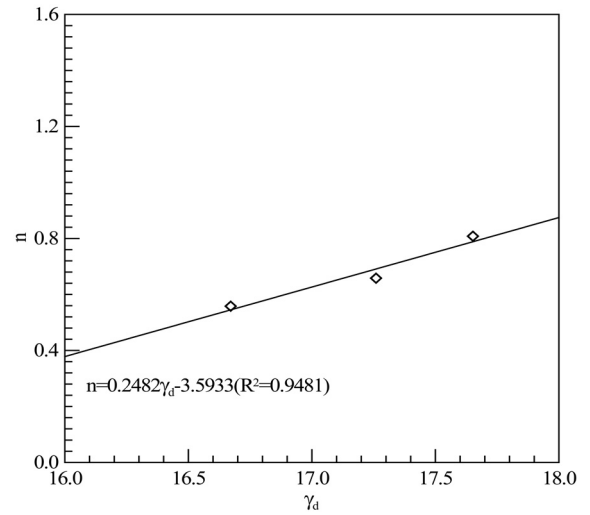


그림 6. 건조단위중량에 따른 포천 화강토의 n의 변화

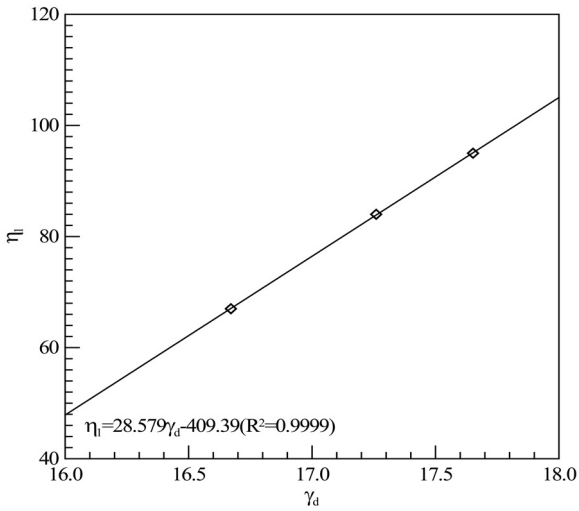


그림 7. 건조단위중량에 따른 포천 화강토의  $\eta_1$ 의 변화

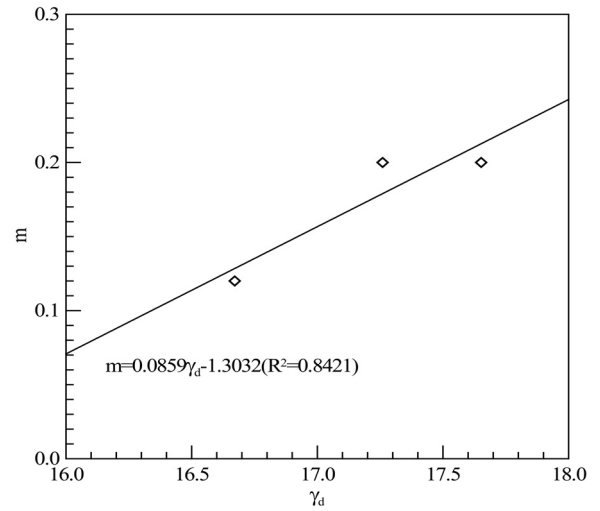


그림 8. 건조단위중량에 따른 포천 화강토의 m의 변화

#### 4.2 탄성성분( $K_{ur}$ , n)

그림 5와 6은 건조단위중량에 따른  $K_{ur}$ 과 n의 변화를 나타내었으며 이들의 관계를 선형적인 상관식으로 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 건조단위중량에 따라 미세하게 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

#### 4.3 파괴규준에 관련된 토질매개변수( $\eta_1$ , m)

그림 7과 8은 건조단위중량에 따른  $\eta_1$ 과 m의 변화를 나타내었으며 이들의 관계를 선형적인 상관식으로 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이  $\eta_1$ 과 m은 건조단위중량의 증가에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4.4 소성포텐셜에 관련된 매개변수( $\psi_2$ , $\mu$ )

그림 9와 10은 토질매개변수  $\psi_2$ 과  $\mu$ 의 건조단위중량에 따른 변화를 나타내었고 이들의 관계를 선형적인 상관식으로 나타내었다.  $\psi_2$ 는 건조단위중량이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며,  $\mu$ 는 매우 미소하게 감소하는 경향을 보이고 있다.

#### 4.5 항복함수에 관련된 토질매개변수(h, $\alpha$ )

그림 11과 12는 h와  $\alpha$ 를 건조단위중량에 따른 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 건조단위중량에 따라 h는 다소 증가하는 경향이 나타나고 있으며,  $\alpha$ 는

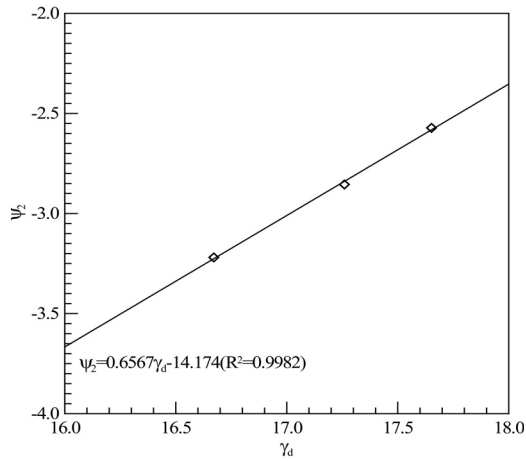


그림 9. 건조단위중량에 따른 포천 화강토의  $\psi_2$ 의 변화

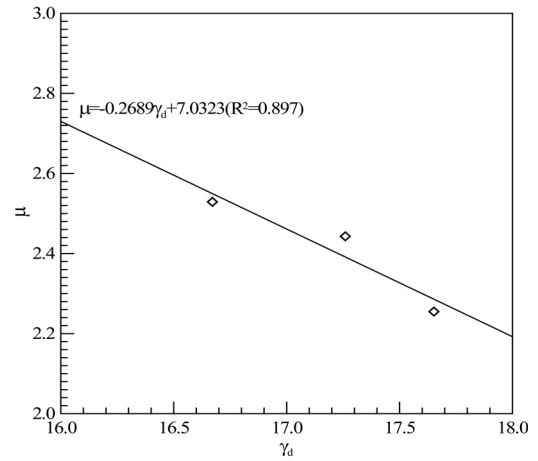


그림 10. 건조단위중량에 따른 포천 화강토의  $\mu$ 의 변화

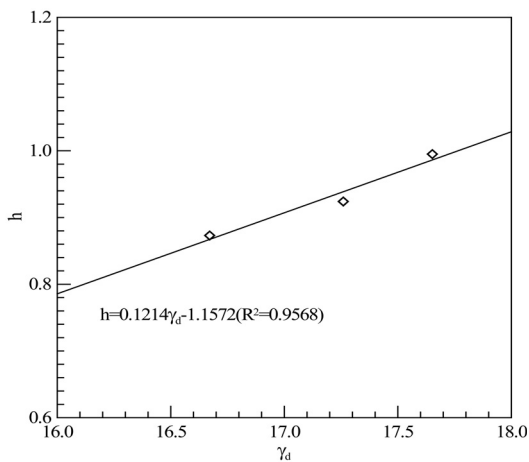


그림 11. 건조단위중량에 따른 포천 화강토의 h의 변화

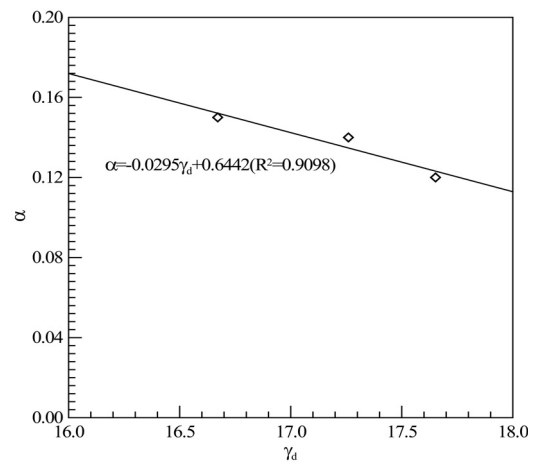


그림 12. 건조단위중량에 따른 포천 화강토의  $\alpha$ 의 변화

건조단위중량에 따라 미소하게 감소하는 것을 확인 할 수 있었다.

표 2는 본 연구에서 수행한 포천 화강토의 토질매개변수를 건조단위중량에 따라 정리한 것이다.

#### 4.6 항복함수와 파괴기준에 관련된 토질매개변수의 상관성

정진섭 등(1992)의 연구에 의하면 항복함수에 관련된 토질매개변수  $h$ 와  $\alpha$ 는 변동계수가 아주 작으며 응력-변형률거동에 미치는 영향도 비교적 작은 것으로 보고하였다. 그리고 11개의 토질매개변수 중 항복함수에 관련된 토질매개변수는 파괴기준에 관련된 토질매개변수와 밀접한 상관성이 있음을 밝혔다. 그래서 본 연구에서도 항복함수와 파괴기준에 관련된 토질매개변수의 상관성을 검토하였다. 그림 13은 표 2의 건조단위중량에 따른 토질매개변수의

표 2. 포천 화강토의 시험결과

	$\gamma_d$ ( $kN/m^3$ )		
	16.67	17.26	17.65
$K_{ur}$	412	720	810
n	0.558	0.658	0.808
c	4.914E-04	5.552E-04	1.555E-03
p	1,889	1,544	1,502
$\eta_1$	67.0	84.0	95.0
m	0.120	0.200	0.200
$\psi_2$	-3.220	-2.855	-2.572
$\mu$	2,529	2,443	2,255
h	0.873	0.924	0.995
$\alpha$	0.150	0.140	0.120

변화를 이용하여 항복함수와 관련된 토질매개변수  $h$ 와 파괴기준에 관련된 토질매개변수  $\eta_1$ 의 관계를 나타낸 그림으로 식 (10)과 같이  $h$ 와  $\eta_1$ 의 관계를 1차식으로 나타낼 수 있었다. 그림 14는 항복함수와 관련된 토질매개변수  $\alpha$

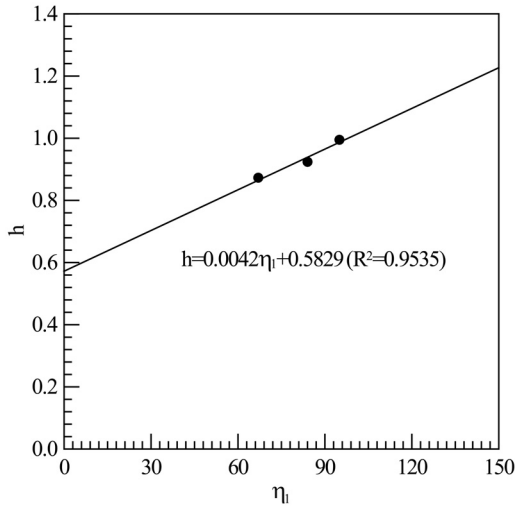


그림 13. 포천 화강토의  $\eta_1$ , h 관계

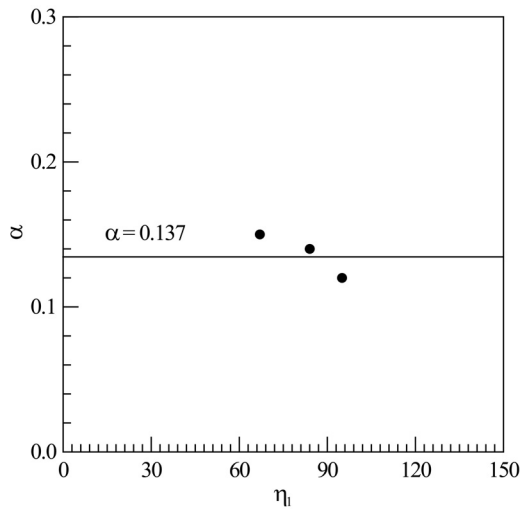


그림 14. 포천 화강토의  $\eta_1$ ,  $\alpha$  관계

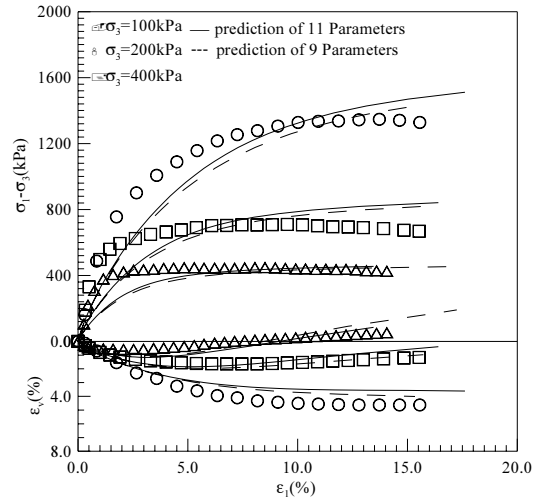
와 파괴기준에 관련된 토질매개변수  $\eta_1$ 과의 관계를 나타낸 그림으로 그 범위가 0.12-0.15이며 평균 0.137로 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 단일항복면 구성모델에 사용되는 토질매개변수 중 재료가 점착력이 없는 사질토일 경우 파괴기준에 관련된 토질매개변수  $\alpha$ 를 0으로 사용하는 것과 마찬가지로  $\alpha$ 의 값을 평균값인 0.137을 상수로 사용하여 응력-변형률 거동을 비교하여 예측한 뒤 실용성에 대하여 알아보하고자 한다.

$$h = 0.0042\eta_1 + 0.5829 \quad (10)$$

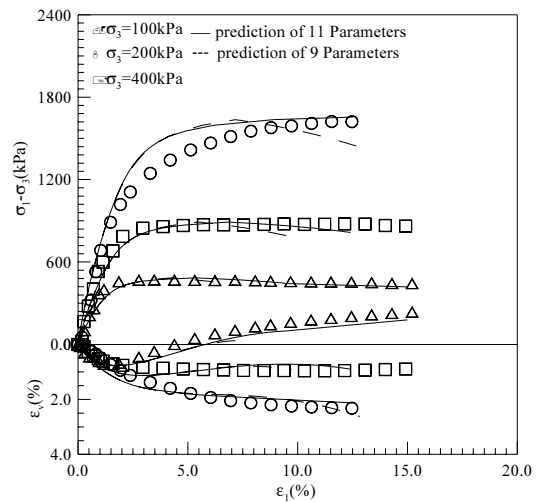
$$\alpha = 0.137 \quad (11)$$

## 5. 토질매개변수의 검증

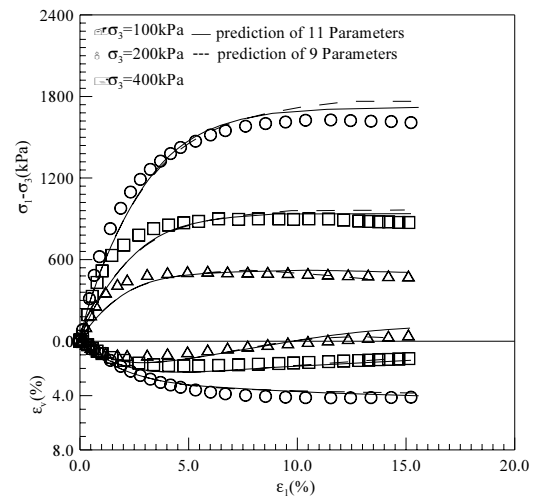
Lade의 단일항복면 구성모델을 이용하여 지반 거동을



(a)  $\gamma_d = 16.67 \text{ kN/m}^3$



(b)  $\gamma_d = 17.26 \text{ kN/m}^3$



(c)  $\gamma_d = 17.65 \text{ kN/m}^3$

그림 15. 포천 화강토의 배수삼축압축시험과 예측모델의 비교

예측하기 위해서는 11개의 토질매개변수를 필요로 한다. 하지만 이 모든 변수를 구하기 위해서는 많은 실험이 수행되어야 하고 시험 중에 발생하는 기계적 오차 및 인위적인

오차가 발생할 수 있다. 토질매개변수의 수를 줄일 수 있다면 구성모델을 이용하여 지반 거동의 예측이 보다 수월해지고 실용적인 해석이 가능할 것이다. 그러므로 본 연구는 토질매개변수  $h$ 를  $\eta_1$ 에 관련된 식 (10)으로  $\alpha$ 를 상수 값인 0.137로 사용하여 정진섭 등(1992)이 개발한 회귀분석을 통한 수치해석 프로그램을 이용하여 수치해석을 실시하고 시험결과와 비교하였다.

그림 15은 포천 화강토를 건조단위중량  $16.67kN/m^3$ ,  $17.26kN/m^3$ ,  $17.65kN/m^3$ 로 각각 달리하여 배수삼축압축 시험 결과와 시험으로부터 구한 토질매개변수를 이용하여 수치해석을 실시한 결과를 나타낸 그림이다. 그림에서 표로 나타낸 것은 각각의 구속압력에 대한 시험 결과이고 실선은 시험으로부터 구한 11개의 토질매개변수를 이용하여 수치해석을 실시한 결과이며 점선은 항복함수에 관련된 토질매개변수를 식 (10)과 식 (11)을 이용하여 얻은 결과를 이용하여 수치해석을 실시한 결과이다. 그림에 나타난바와 같이 실선과 점선 모두 시험결과와 매우 잘 일치하고 있다. 그러므로 항복함수에 관련된 토질매개변수  $h$ 와  $\alpha$ 는  $\eta_1$ 에 관련된 식으로 대체하여 Lade의 단일항복면 구성모델의 토질매개변수를 11개에서 9개로 줄일 수 있는 가능성을 보았다.

## 6. 결론

본 연구는 포천 화강토의 건조단위중량을  $16.67kN/m^3$ ,  $17.26kN/m^3$ ,  $17.65kN/m^3$ 로 각각 변화시켜 등방압축-팽창시험과 구속압력을 달리한 일련의 배수삼축압축시험을 실시하고 이 시험자료를 이용하여 회귀분석을 근거로 상대밀도의 변화에 따른 Lade의 단일항복면 구성모델의 토질매개변수의 변화 특성을 알아보았다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 탄성성분을 나타내는 토질매개변수  $K_{ur}$ ,  $n$ 은 건조단위중량의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 경화함수에 관련된 토질매개변수  $p$ 와  $c$ 의 변화는 건조단위중량에 따라 일정한 편차와 선형적으로 기울기가 변화함을 알 수 있다.
- (2) 파괴규준에 관련된 토질매개변수  $\eta_1$ ,  $m$ 은 건조단위중량에 따라 일정한 증가를 보이고 있으며, 소성포텐셜에 관련된 토질매개변수  $\psi_2$ 는 건조단위중량의 증가에 따라 일정비로 증가하는 경향을 보이고 있으며,  $\mu$ 는

건조단위중량의 증가에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

- (3) 항복함수에 관련된 토질매개변수  $h$ 와  $\alpha$ 는 건조단위중량에 따른 변화가 미세하고 파괴규준에 관련한 토질매개변수와 관련성이 매우 높아 파괴규준,  $\eta_1$ 에 관한 식과 상수로 대체할 수 있으며, 이 식을 이용하여 수치해석을 실시한 결과 양호하게 예측하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

이 논문은 2011학년도 대전대학교 학술연구비지원에 의한 것임.

## 참고문헌

1. 박병기, 정진섭, 임성철 (1990), “압축성 모래의 3차원 변형특성”, *대한토목학회논문집*, 제10권, 제3호, pp.107-113.
2. 정진섭, 김찬기 (1989), “압축성 모래의 변형거동에 관한 연구”, *공업기술개발연구지*, 제9권, pp.99-112.
3. 정진섭, 김찬기, 이문수 (1992), “단일항복면 구성모델에 의한 입상토의 비배수거동해석”, *대한토목학회논문집*, 제12권, 제2호, pp.177-189.
4. 홍원표, 남정만 (1994), “등방단일경화구성모델에 의한 모래의 3차원 거동 예측”, *한국지반공학학회논문집*, 제10권, 제1호, pp.103-116.
5. Druker, D. C., Gibson, R. E. and Henkel, D. J. (1957), “Soil mechanics and work-hardening theories of plasticity”, *Trans*, Vol.122, pp.333-345.
6. Duncan, M. J. and Chang, C. Y. (1970), “Nonlinear analysis of stress and strain and strain in soil”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.96, No. SM5, pp.1629-1653.
7. Kondner, R. L. (1963), “Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.89, No.SM1, pp.115-143.
8. Ladd, R. S. (1978), “Preparing Test Specimen Using Undercompaction”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.1, No.1, pp.16-23.
9. Lade, P. V. (1990), “Single-Hardening Model with Application to NC Clay”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.116, No.3, pp.394-414.
10. Lade, P. V. and Duncan, J. M. (1973), “Cubical Triaxial Tests on Cohesionless Soil”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.99, No.SM10, pp.793-812.

(논문접수일 2011. 10. 25, 심사완료일 2011. 12. 12)