

포천석분의 응력-변형률 거동특성

Characteristics of Stress-Strain for Pocheon stone sludge

김찬기¹, 박권준², 조원범³, 이종천^{4*}

Chan-Kee Kim¹, Gueon-Jun Bak², Won-Beom Cho³, Jong-Cheon Lee^{4*}

¹Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Daejin University, 1007 hokook-ro, pocheon, Republic of Korea

²Member, Manager, Hanshin Engineering and Construction Co., 65-32 Jamwon-dong Secho-gu, Seoul Republic of Korea

³Member, Korea Institute of Construction Technology, 283 Goyangdae-ro Ilsanseo-gu Goyangsi, Republic of Korea

⁴Member, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering & Landscape Architecture, Dongkang College, 50 Dongmundaero Bukgu Gwangju, Republic of Korea

ABSTRACT

In this study, a series of the isotropic compression-expansion tests and the Undrained triaxial tests were performed on low-plastic silt of Pocheon stone sludge. Using the tests results the characteristic of the parameters of Lade's single hardening constitutive model were investigated. We also observed that predicted values from the Lade's single hardening constitutive model were well consistent with the observed data. In experimental results the deviator stress showed the work hardening behaviour after reaching its yield stress. Therefore practically useful failure criterion for low-plastic silt were required. The stress-strain behavior predicted by 11 soil parameters are compared with the results obtained 9 parameters by correlation between h and η_1 and constant α . They are poor matched each other.

요 지

본 연구는 포천석분을 재성형하여 등방압축-팽창시험과 구속압력을 달리한 일련의 비배수삼축압축시험을 실시하여 Lade 단일 항복면 구성모델의 토질매개변수를 결정하였으며, 실험결과의 역해석을 통하여 단일항복면 구성모델의 적용성과 포천석분의 거동특성을 확인하였다. 그 결과 포천석분은 축변형률이 증가함에 따라 축차응력이 증가하는 경화현상을 보이고 있으며 큰 축변형률에서 파괴되므로 실용적인 파괴기준을 검토할 필요성을 확인하였으며, 구성모델의 11개 토질매개변수를 이용하여 시험치를 역해석한 결과 응력-변형거동을 양호하게 예측하지만 항복함수에 관련된 토질매개변수를 파괴기준에 관련한 상관식과 상수로 역해석한 경우는 다소 상이한 양상을 보이고 있다.

Keywords : Single Work-Hardening Constitutive Model, Pocheon Waste Stone Sludge, Drained Triaxial Test

1. 서 론

탄·소성모델은 이미 지반 구조물의 거동해석에 적용하고 있으며 Kondner(1963)가 개발한 탄성쌍곡선 구성모델은 개념과 구성식이 비교적 단순 하면서도 흙의 비선형거동을 잘 나타낼 수 있기 때문에 흙 구조물의 거동해석에

많이 사용되고 있다. 이 구성모델은 Duncan과 Chang(1970)에 의해 수정되어 널리 사용되었지만 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 항복기준, 비관련 유동칙 그리고 전 소성일을 응력수준의 쌍곡선 함수로 표현하는 일 경화법칙을 수용하고 있으며 두 개의 항복면과 비관련유동칙이 적용되므로 해석상의 어려움이 있어 Kim과 Lade(1988 a, b, c)는 항복면이

Received 30 Aug. 2013, Revised 24 Sep. 2013, Accepted 25 Sep. 2013

*Corresponding author

Tel: +82-10-3656-7068; Fax: +82-63-851-7068

E-mail address: jclee@dkc.ac.kr (J. Lee)

하나인 새로운 구성모델을 제안하였다.

이 단일항복면 구성모델은 현재 제안된 여러 구성모델 중 비선형의 응력-변형 거동을 광범위하게 해석할 수 있고 일경화 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. 이와 같이 많은 장점을 가지고 있는 단일항복면 구성모델의 적용성을 증대시키기 위해 점토와 사질토를 중심으로 많은 연구가 진행되어 왔으나 실트에 관한 연구는 없는 실정이다. 또한 지반공학의 대부분 연구는 점토와 사질토를 중심으로 연구되었고 실트에 대한 연구는 비교적 적은 실정으로 정상섬(1993)에 의해 저소성 실트의 거동특성이 발표한바가 있으며 Thomas(2006)에 의해 저소성 실트의 배수 및 비배수거동특성을 발표한바 있다. 최근에는 김영수 등(2007)에 의해 재성형된 낙동강 모래질 실트의 전단거동특성에 대한 연구 결과가 발표된바 있지만 실트질 지반의 거동 특성을 구성식에 적용하여 해석한 경우는 많지 않다.

본 연구는 석재 가공 중에 발생하는 실트와 같은 저소성 포천석분에 대한 거동특성과 단일항복면의 적용성을 알아보고자 한다. 포천석분슬러지는 적절한 활용방안 없어 산업폐기물로 지정되어 처리되고 있지만 모암의 가공에서 발생한 유해성 없는 자연재료이므로 활용방안만 마련되면 언제든지 자원으로 활용이 가능하다. 따라서 경기도 포천 지역에서 채취한 포천석분을 재성형 하여 등방압축-팽창 시험과 구속압력을 달리한 일련의 비배수삼축압축시험을 실시하고 시험결과로부터 Lade의 단일항복면 구성모델의 토질매개변수를 결정하고 이를 이용하여 역해석함으로써 단일항복면 구성모델의 적용성과 포천석분의 거동특성을 밝힌다.

2. 단일항복면(Single Work-Hardening) 구성모델

현재 개발된 구성모델들 가운데 응력-변형 거동을 광범위하게 해석할 수 있고 일경화 및 연화까지도 설명이 가능하며 입상도 뿐만 아니라 점토까지 해석이 가능하다고 알려져 있는 Lade의 단일항복면 구성모델을 선정하여 포천석분의 거동을 예측하고자한다. 구성모델의 파괴규준을 응력 불변량으로 표현하면 다음과 같다.

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

여기서 η_1 과 m 은 토질매개변수이고 P_a 는 대기압이면 응력불변량 I_1 과 I_3 는 식 (2)와 같다.

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (2)$$

$$I_3 = \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z + \tau_{xy} \cdot \tau_{yz} \cdot \tau_{zx} + \tau_{yz} \cdot \tau_{zy} \cdot \tau_{xz} - (\sigma_x \cdot \tau_{yz} \cdot \tau_{zx} + \sigma_y \cdot \tau_{zx} \cdot \tau_{xz} + \sigma_z \cdot \tau_{xy} \cdot \tau_{yx}) \quad (3)$$

소성 변형률증분은 유동법칙으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$de_{ij}^p = d\lambda_p \cdot \frac{\partial g_p}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4)$$

$$g_p = (\Psi_1 \cdot \frac{I_1^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I_2} + \Psi_2) \cdot (\frac{I_1}{P_a})^\mu \quad (5)$$

여기서 g_p 는 소성포텐셜함수이고 $d\lambda_p$ 는 비례상수이며 I_2 는 식 (6)과 같다.

$$I_2 = \tau_{xy} \cdot \tau_{yx} + \tau_{yz} \cdot \tau_{zy} + \tau_{zx} \cdot \tau_{xz} - (\sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y \cdot \sigma_z + \sigma_z \cdot \sigma_x) \quad (6)$$

항복함수는 경화인 경우와 연화인 경우에 대하여 다음과 같이 각각 나타낸다.

$$f_p = f p(\sigma) - f(W_p) = 0 \quad (7)$$

$$f'_p = (\Psi_1 \cdot I_1^3/I_3 - I_1^2/I_2) \cdot (I_1/P_a)^h \cdot e^q \quad (8)$$

$$f''_p = (1/D)^{1/\rho} \cdot (W_p/P_a)^{1/\rho} \quad \text{경화인 경우} \quad (9)$$

$$f''_p = A \cdot e^{-B \cdot (W_p/pa)} \quad \text{연화인 경우} \quad (10)$$

여기서, $\rho = p/h$ 이고 Ψ_1 과 W_p 는 식 (11), (12)로 표현된다.

$$\Psi_1 = 0.00155 \cdot m^{-1.27} \quad (11)$$

$$W_p = D \cdot P_a \cdot f_p^{(p/h)} \quad (12)$$

Table 1. Chemical components of Pocheon waste stone sludge

Chemical components (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	MnO	FeO	P_2O_5
	55.68	19.63	2.64	0.59	1.08	0.9	0.58	N,D	0.033	2.38	0.23

Table 2. Material Properties of Pocheon waste stone sludge

Gs	2.65
LL (%)	-
PI (%)	N,P
USCS	ML



Fig. 1. Scenes of Triaxial apparatus test

여기서 D 는 식 (13)과 같다.

$$D = \frac{C}{(27\psi_1 + 3)\rho} \quad (13)$$

3. 실험

3.1 시료준비 시료 특성

본 연구에 사용된 포천 석분은 원석을 가공하는 과정에서 발생한 슬러지로 침전조에 자연 침전된 시료를 채취하여 실내에서 자연건조 시킨 후 시험에 이용할 수 있도록 준비하였다. 이 시료의 화학적 조성 분석결과는 Table 1에 나타난 바와 같이 SiO_2 가 55.68%, Al_2O_3 가 19.63%, FeO 가 2.64% 기타 미량의 광물질로 구성되어 있으며, 규소와 알루미늄이 대리석의 주성분으로 나타났다. Table 2는 시험에 사용된 포천석분의 물리적 특성을 나타내고 있으며 Fig. 2는 시료의 입도곡선을 나타내고 있다.

이와 같이 준비된 포천석분을 다짐시험(A다짐법)하여 최대건조밀도를 구하고 이의 90%인 $1.7(g/cm^3)$ 의 건조밀

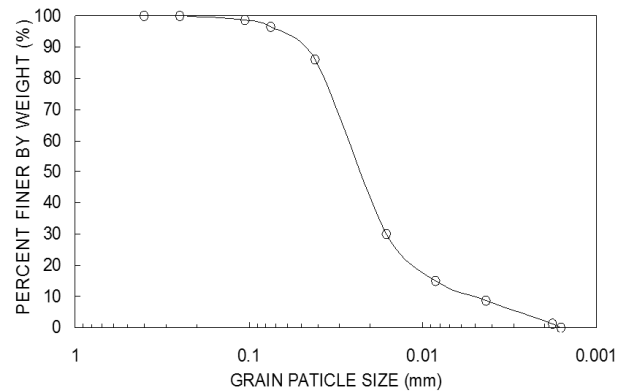


Fig. 2. Grain size distribution curve for Pocheon waste stone sludge

도가 되도록 삼축시험용 공시체를 이용하여 시료를 제작하였다. 다짐은 필요한 시료의 총중량으로부터 각 층의 시료량을 결정한 다음 각층의 Un(percentage of undercompaction)값과 다짐높이를 결정하여 다짐은 Undercompaction방법(Ladd, 1978)을 이용하여 높이 100mm, 직경 50mm로 공시체를 제작하였다(Fig. 1 참조). 삼축시험은 자동화 삼축시험기(미국)를 사용하여 등방압축-팽창시험과 비배수삼축압축시험을 실시하였으며 시료의 포화는 공시체를 삼축실에 안치한 후 하부 배수관으로 이산화탄소(CO_2)를 서서히 20분 정도 주입하여 공시체 속의 공기를 완전히 빠져나가게 한 다음 증류수를 하부배수관으로 유입시켜 공시체내에 있는 이산화탄소를 상부배수관으로 천천히 밀어 올려 시료로부터 빠져나가도록 한다. 이때 시료에 잔류하는 이산화탄소는 체적변화가 없으므로 문제되지 않는다. 그리고 공시체가 완전히 포화될 때까지 구속압력과 배압(back pressure)을 가하며 각각의 간극수압B계수를 측정하여 이 값이 98%이상 도달하면 포화된 것으로 간주하였으며 전단속도는 0.1%/min으로 하였다.

3.2 등방압축-팽창시험

등방압축-팽창시험은 일반 삼축압축시험 시 압밀과정과 동일하게 매 단계 별 50kPa씩 삼축 셀 내의 구속압력을 일정하게 증가 시키며 시료가 등방으로 압축될 때의 체적변형률을 측정한다. 이후 셀 내의 구속압력을 매 단계

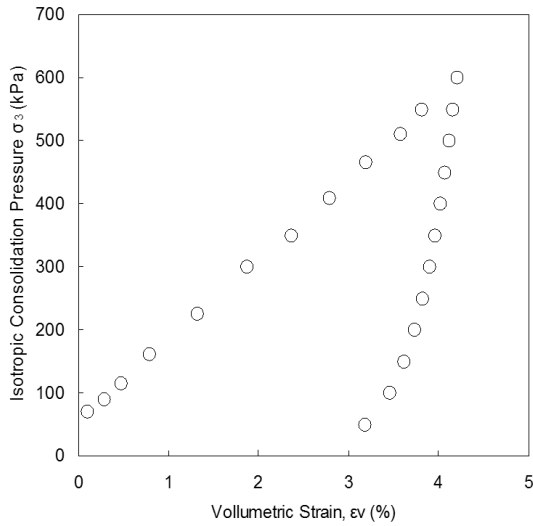
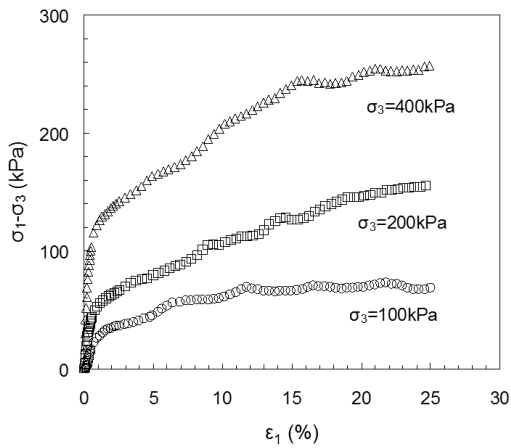


Fig. 3. Isotropic compression tests of Pocheon waste stone sludge

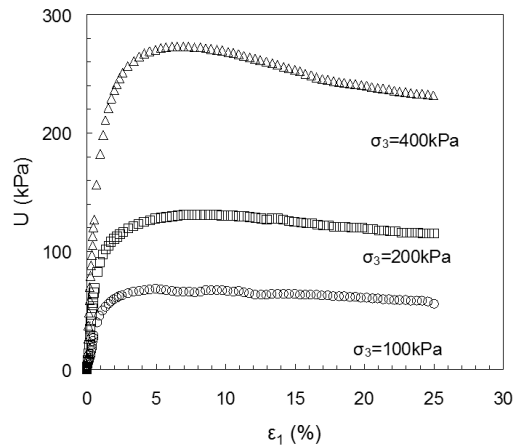
별 50kPa씩 일정하게 제거시키며 시료가 팽창될 때의 체적변형률을 측정하여 구속압력과 체적변형률의 관계를 나타내면 Fig. 3과 같다.

3.3 비배수삼축압축시험

Fig. 4는 포천석분에 대한 구속압력의 변화에 따른 응력



(a) Axial stress vs Strain



(b) Pore pressure vs Strain

Fig. 4. Undrained consolidation triaxial tests of Pocheon waste stone sludge

Table 4. Strain to failure (ϵ_f) from CU test for various failure criteria for Pocheon waste stone sludge

Confining Pressure	Axial strain (%)		
	100 kPa	200 kPa	400 kPa
$(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$	21.6	25.0	25.0
$(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{max}$	5.0	8.5	7.1
\bar{A}	5.0	9.7	7.0
$(U)_{max}$	5.0	8.8	6.7

-변형률 거동 특성을 고찰하기위해 비배수삼축압축시험을 실시하여 구속압력 100, 200, 400kPa일 경우 축변형률에 대한 축차응력, 축변형률에 대한 간극수압의 관계를 나타낸 것이다. 그림에 나타난바와 같이 전체적으로 축변형률이 증가함에 따라 축차응력은 증가하고 구속압력이 증가함에 따라 등가적으로 축차응력이 증가한다. 간극수압 거동도 동일하게 구속압력 100, 200kPa에서는 등가적으로 증가한 뒤 일정한 값을 유지하였지만, 구속압력 400kPa인 경우의 간극수압 거동은 변형률 6%까지 증가한 뒤 감소하는 형상을 보이고 있다. 본 포천석분은 전형적인 실트질 거동특성인 경화현상을 보이고 있으며 이러한 현상은 구속압력이 증가함으로써 시료의 밀도가 조밀해져 전단 중에 체적팽창현상이 발생하기 때문이다.

또한 포천석분과 같은 실트질의 전단특성은 전단 시 체적팽창현상으로 큰 축변형률에서 파괴되므로 실용적인 파괴기준을 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 문헌에 제시된 파괴기준들을 적용하여 파괴 시 축 변형률을 산정하여 Table 4에 나타내었다. 표에 나타난바와 같이 주응력비의 최대, Skempton의 간극수압 A계수=0 그리고 간극수압이 최대일 때의 파괴기준은 유사한 축변형률을 나타내는 반면에 최대축차응력에 의한 방법은 매우 큰 축변형률에서 파괴에 이르는 것으로 나타나고 있다. 본 연구에서는 축변

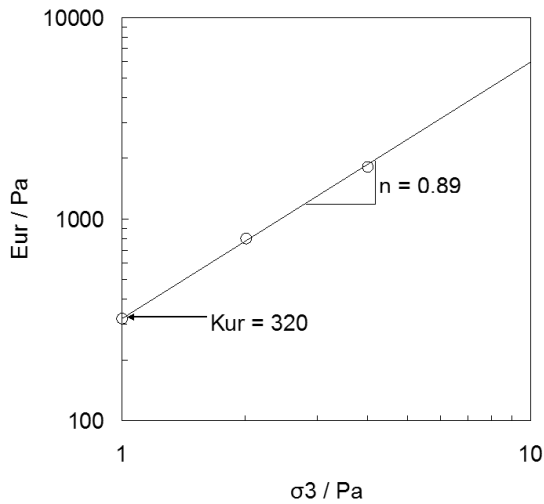


Fig. 5. Determined of elastic parameters (K_{ur} , n) of Pocheon waste stone sludge

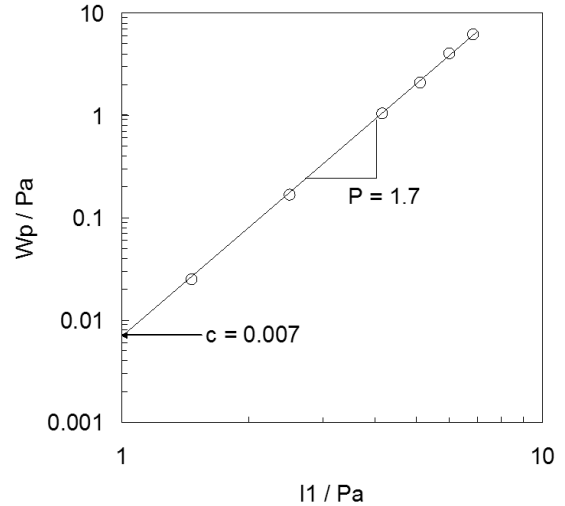


Fig. 6. Determined of Hardening Function (c , P) for Pocheon waste stone sludge

형률 20%내의 최대 축차응력 값을 파괴값으로 정하였다.

4. 토질매개변수 결정 및 특성

단일항복면구성모델은 탄성에 관한 매개변수, 경화함수에 관련된 매개변수, 파괴규준에 관련된 매개변수, 소성포텐셜 및 항복함수에 관련된 매개변수 등 11개 토질매개변수로 구성되어있으며, 각각의 토질매개변수 결정 방법과 특성을 설명하면 다음과 같다.

4.1 탄성성분 (K_{ur} , n)

탄성에 관련된 토질매개변수 K_{ur} 과 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 이용한다.

이 방법은 시험에서 얻어진 응력-변형률 관계를 종축에 $\epsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3)$ 로, 횡축에 ϵ_1 로 나타냄으로서 얻어지는 직선의 절편으로부터 탄성계수(E_{ur})를 결정한다. 이때 탄성계수는 절편의 역수이다. 이와 같이 구한 탄성계수를 구속압력에 따라 양대수지에 도시하면 Fig. 5와 같이 나타나며 그림에서 절편은 K_{ur} 이고 기울기는 n 이다. 이를 구속압력

에 따른 일반식으로 나타내면 식 (14)와 같이 표현된다.

$$E_{ur} = K_{ur} P_a (\sigma_3 / P_a)^n \quad (14)$$

여기서 E_{ur} 은 탄성계수이고 K_{ur} 과 n 은 토질매개변수이며 σ_3 은 구속압력이다. 그리고 P_a 는 E_{ur} 과 같은 압력단위를 갖는 대기압이다. 이와 같은 방법으로 결정된 토질매개변수 K_{ur} 과 n 의 값은 320과 0.89를 얻었다.

4.2 경화함수와 관련된 매개변수 (c , P)

경화함수와 관련되는 토질매개변수 c 와 P 의 경우 등방압축-팽창시험으로부터 구해진다. Fig. 6는 포천석분에 대한 W_p/P_a 와 I_1/P_a 관계를 양대수지에 나타낸 것으로 이들 관계는 식 (15)와 같이 표현된다.

$$\log(W_p/P_a) = \log c + P \cdot \log(I_1/P_a) \quad (15)$$

식 (15)의 양변대수를 제거하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$W_p = c \cdot P_a \cdot (I_1/P_a)^P \quad (16)$$

Fig. 6에서 c 는 $(I_1/P_a) = 1$ 일 경우의 절편 값이고 P 는 직선의 기울기로 c 와 P 의 값은 0.007과 1.7을 얻었다.

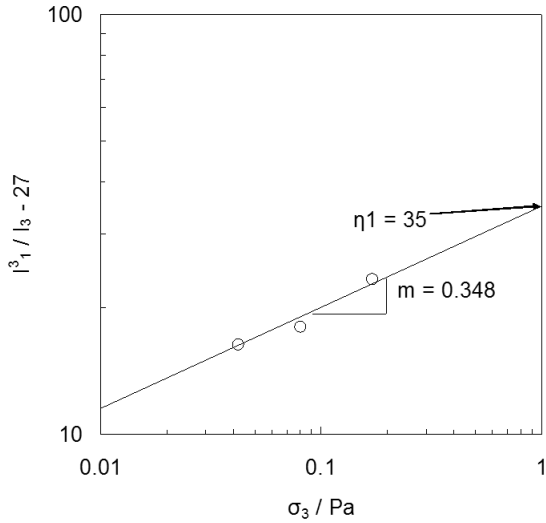


Fig. 7. Determination of Failure Criterion Parameters for Pocheon waste stone sludge

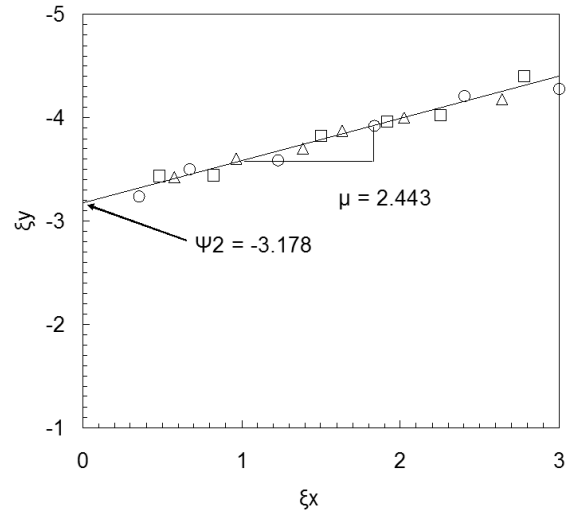


Fig. 8. Determination of Plastic Potential Parameters for Pocheon waste stone sludge

4.3 파괴기준에 관련된 매개변수 (η_1 , m)

Fig. 7은 배수삼축압축시험결과에서 얻은 파괴 시의 응력을 사용하여 계산한 (P_a/I_1) 에 대한 $(I_1^3/I_3 - 27)$ 의 값을 양대수지상에 나타낸 것으로 식 (17)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\log \eta_1 = \log(I_1^3/I_3 - 27) + m \log(P_a/I_1) \quad (17)$$

식 (17)의 양변대수를 제거하면 식 (18)과 같이 표현 된다.

$$\eta_1 = (I_1^3/I_3 - 27) \cdot (P_a/I_1)^m \quad (18)$$

여기서 η_1 은 $P_a/I_1 = 1$ 일 때의 절편 $(I_1^3/I_3 - 27)$ 값이며, m 은 이 직선의 기울기로 η_1 과 m 의 값은 35와 0.348을 얻었다.

4.4 소성포텐셜에 관련된 매개변수 (ψ_2 , μ)

배수삼축압축시험 결과로 얻은 각 시험 자료를 사용하여 식 (19), (20)을 이용하여 ξ_x 와 ξ_y 를 구한다. 여기서 ξ_x 와 ξ_y 는 소성포텐셜 매개변수 ψ_2 와 μ 를 결정하기 위한 값으로 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\xi_x = \frac{1}{1+v_p} \left[\frac{I_1^3}{I_2^2} (\sigma_1 + \sigma_3 + 2v_p \sigma_3) + \psi_1 \cdot \frac{I_1^4}{I_3^2} (\sigma_1 \cdot \sigma_3 + v_p \cdot \sigma_3^2) \right] - 3\psi_1 \cdot \frac{I_1^3}{I_3} + 2 \frac{I_1^2}{I_2} \quad (19)$$

$$\xi_y = \frac{1}{\mu} \psi_x \cdot \frac{I_1^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I_2} \quad (20)$$

Fig. 8은 ξ_x 를 횡축에 ξ_y 를 종축으로 하여 나타낸 것으로 그림에서 보는바와 같이 ξ_x 와 ξ_y 의 관계는 직선으로 나타나며 ξ_x 와 ξ_y 의 관계는 다음의 관계식으로 표현 할 수 있다.

$$\xi_y = \frac{1}{\mu} \xi_x - \psi_2 \quad (21)$$

여기서 $-\psi_2$ 는 이 직선의 절편 값이고 $1/\mu$ 는 기울기이다. 그림에 나타난바와 같이 소성포텐셜 함수의 토질매개변수는 구속압력의 크기와 무관하다는 것을 알 수 있으며 포천석분의 소성포텐셜에 관련된 토질매개변수 ψ_2 와 μ 은 -3.178과 2.443을 얻었다.

4.5 항복함수에 관련된 토질매개변수 (h , α)

항복함수에 관련된 토질매개변수 h 는 배수삼축압축시

Table 3. Parameters value of Pocheon waste stone sludge

parameter	K_{ur}	n	ν	C	P	η_1	m	Ψ_2	μ	h	α
Pocheon waste stone sludge	320.	0.89	0.25	0.007	1.70	33.	0.36	-3.178	2.443	0.88	0.60

험 결과를 사용하여 식 (22)로 구한다. 여기서 I_{1A} 과 I_{1B} 는 등소성 일곡선(same plastic work contour)상에서 정수압 축선 위의 제1응력불변량과 파괴포락선위의 제1응력불변량을 각각 나타내며, e 는 자연대수의 기저이다.

$$h = \ln \frac{\left(\psi_1 \cdot \frac{I_{1B}^3}{I_{3B}} - \frac{I_{1B}}{I_{2B}} \right) \cdot e}{27 \cdot \psi_1 + 3} \cdot \frac{I_{1A}}{L_{1B}} \quad (22)$$

그리고 항복함수에 관련된 토질매개변수 α 는 식 (23)과 같이 표현된다.

$$\alpha = \frac{1-s}{s} \frac{q_s}{1-q_s} = \frac{1}{s} \frac{q_{so}}{1-q_{so}} \quad (23)$$

여기서 응력수준 s 는 식 (24)이며 q 는 식 (25)와 같다. 그리고 식 (24)에서 q_{so} 는 $s=0.8$ 일 때의 q 값이다.

$$S = \frac{f_n}{\eta_1} = \frac{1}{\eta_1} \cdot \left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27 \right) \cdot \left(\frac{I_1}{P_a} \right)^m \quad (24)$$

$$q = \ln \frac{\left(\frac{W_p}{D \cdot P_a} \right)^{1/p}}{\left(\psi_1 - \frac{I_1^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I_2} \right) \cdot \left(\frac{I_1}{p_a} \right)^h} \quad (25)$$

소성포텐셜에 관련된 토질매개변수 h , α 는 구속압력에 무관하다고 생각하여 각각의 구속압력에서 구한 값들을 평균하여 사용한다. 이와 같은 방법으로 결정된 포천석분의 항복함수에 관련된 토질매개변수 h 와 α 값은 0.88과 0.6이다.

5. 응력-변형률 거동 예측

Lade의 단일항복면 구성모델을 이용하여 포천석분의 거동을 예측하기 위해서는 11개의 토질매개변수를 필요로 하며 이 토질매개변수의 결정 과정과 구성모델에서의 역할 및 예민성 등에 관하여 통계적 기법을 이용한 연구결과가 정진섭 등(1992a)에 의해 발표되었다. 이 연구에 의하면 항복함수에 관련된 토질매개변수 h 와 α 는 변동계수가 아주 작으며 응력-변형률거동에 미치는 영향도 비교적 작은 것으로 보고하였다. 그리고 11개의 토질매개변수중 항복함수에 관련된 토질매개변수는 파괴규준에 관련된 토질매개변수와 밀접한 상관성이 있음을 밝혔다. 이를 바탕으로 조원범(2011)은 토질매개변수 h 와 α 를 파괴기준에 관련된 토질매개변수 η_1 과의 관계식을 제안하고 Lade의 Fine Silica Sand 및 Monterrey No.0 Sand 등 기존의 비교 분석을 통하여 거동을 매우 양호하게 예측하는 것을 확인하였다. 이와 같이 토질매개변수를 줄일 수 있다면 구성모델에 의한 지반거동의 예측이 보다 수월해지고 실용적인 해석이 가능할 것이다. 그러므로 본 연구는 항복함수에 관련된 토질매개변수 h 를 η_1 에 관련된 식(26)을 이용하여 구한 값을 사용하고 α 는 상수인 0.1을 사용하여 정진섭 등(1992b)이 개발한 수치해석 프로그램을 이용하여 수치해석을 실시하고 시험결과와 비교하였다.

$$h = 0.0122\eta_1 \quad (26)$$

Fig. 9는 포천석분의 비배수삼축압축시험에 의한 축변형률에 대한 축차응력의 관계와 시험으로부터 구한 토질매개변수를 이용하여 수치해석을 실시한 결과를 나타낸 그림이다. 그림에 나타난바와 같이 시험결과와 비교적 축변형률 증가와 더불어 축차응력이 증가하는 경향을 보이고 있으며 실선으로 표시된 11개의 토질매개변수를 이용하여 수치해석한 결과는 시험결과와 유사한 일 경화현상을 보이고 있다. 그러나 항복함수에 관련된 토질매개변수 h 를 η_1 의 관계식으로 사용하고 α 를 0.1로 사용하여 수치

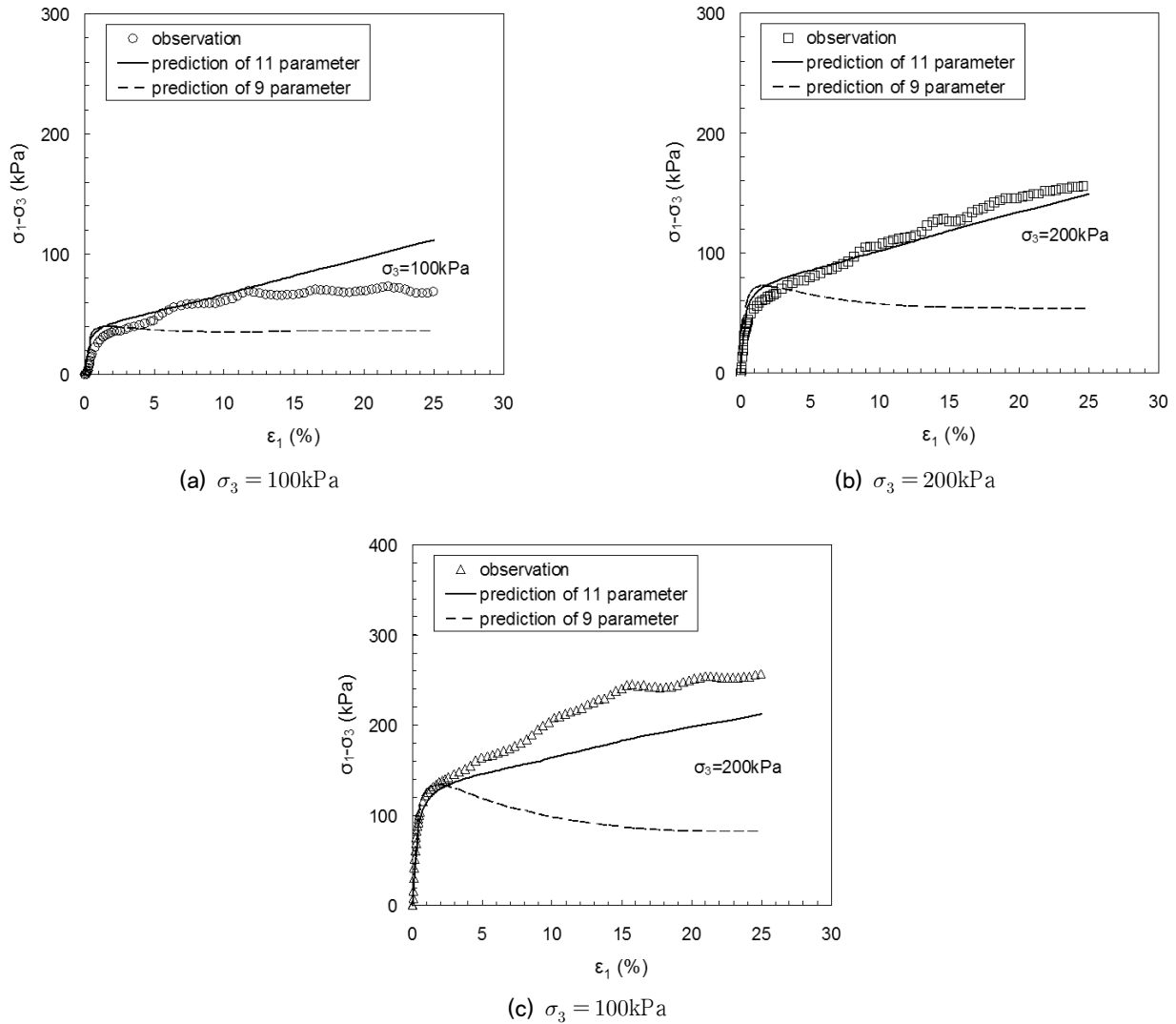


Fig. 9. Comparison of predicted and observed deviator stress behavior of Pocheon waste stone sludge

해석하여 나타낸 점선은 시험치와 응력-변형률 거동 양상이 큰 차이를 보이고 있다. 그러므로 일경화현상이 두드러지게 나타나고 있는 포천석분과 같은 시료의 거동을 해석할 때는 항복함수에 관련된 토질매개변수 결정에 큰 관심을 보여야 할 것으로 판단된다.

Fig. 10은 포천석분의 비배수삼축압축시험에 의한 축변형률에 대한 과잉간극수압의 관계와 시험으로부터 구한 토질매개변수를 이용하여 수치해석을 실시한 결과를 나타낸 그림이다. 그림에 나타난바와 같이 시험결과와 비교적 축변형률 증가와 더불어 과잉간극수압이 감소하는 경향을 보이고 있으며 실선으로 표시된 11개의 토질매개변수를 이용하여 수치해석한 결과는 시험결과와 유사한 현상을 보이고 있다. 그러나 항복함수에 관련된 토질매개변수 h 를 η_1 의 관계식으로 사용하고 α 를 0.1로 사용하여 수치해

석한 점선은 시험치와 다소 상이한 양상을 보이고 있다.

Fig. 11은 포천석분의 비배수삼축압축시험결과를 평균 응력과 축차응력의 유효응력경로를 나타낸 그림이다. 그림에서 \bigcirc 는 구속압력이 100 kPa 인 경우이고 \square 는 구속압력이 200 kPa인 경우이며 \triangle 는 구속압력이 400 kPa인 경우의 시험결과이다. 그리고 그림에서 실선은 11개의 토질매개변수를 이용하여 수치해석한 결과를 나타낸 것이고 파선은 9개의 토질매개변수를 이용하여 수치해석한 결과를 각각 나타낸 것이다. 그림의 유효응력경로를 보면 초기 구속압력이 서로 다른 유효응력경로지만 하나의 유일한 선인한계상태선(critical state line, CSL)에 도달함을 알 수 있으며 수치해석에서 얻은 두 가지 경우의 한계상태선은 시험에서 얻은 결과보다 다소 작게 나타나고 있다. 이러한 현상이 나타나는 이유는 전단 중에 체적이 팽창하고

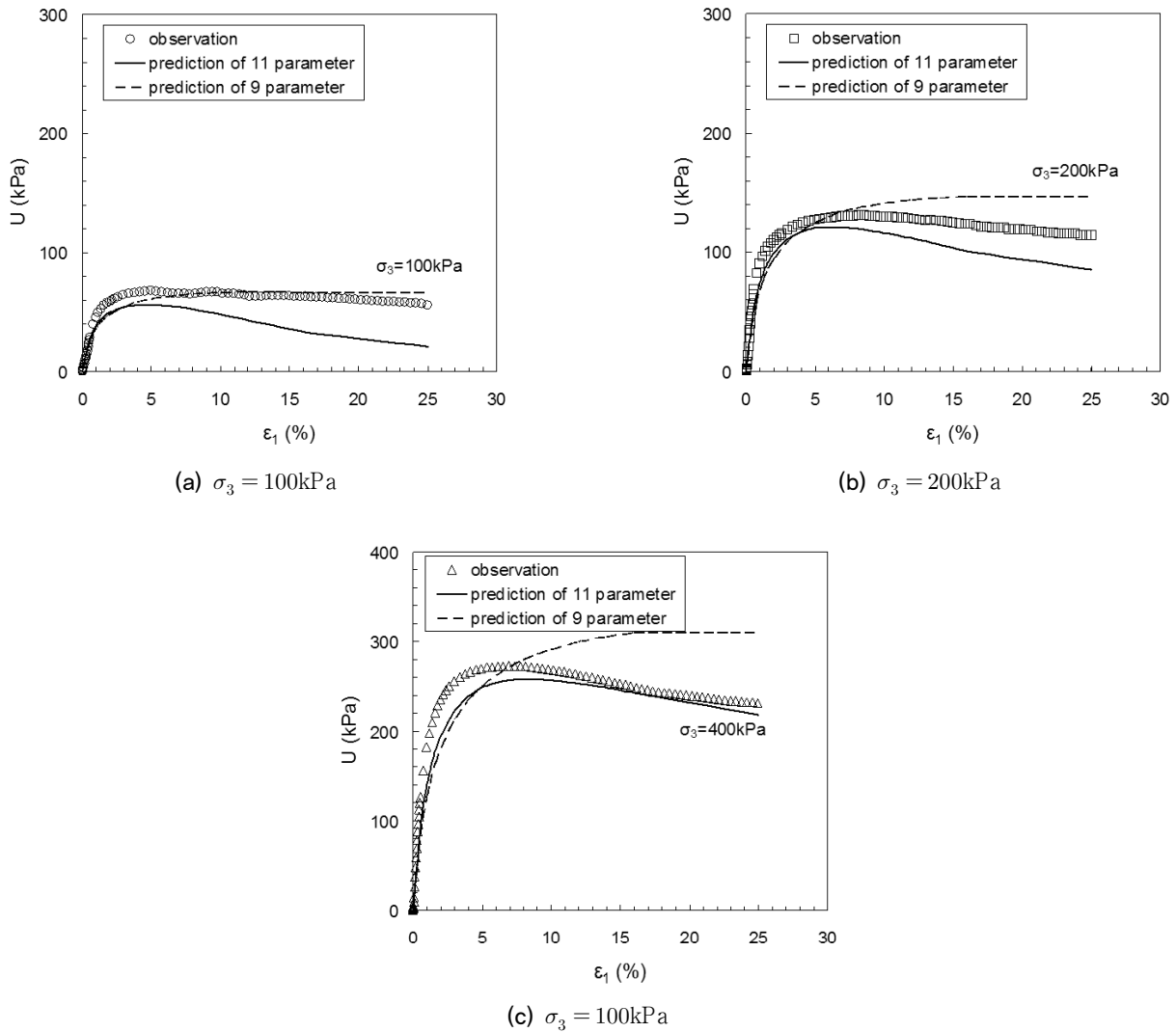


Fig. 10. Comparison of predicted and observed pore pressure behavior of Pocheon waste stone sludge

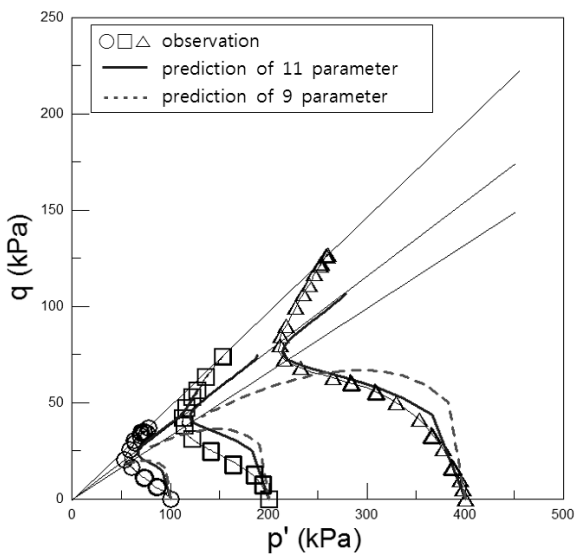


Fig. 11. Effective stress path of Pocheon waste stone sludge

일경화현상이 발생하여 매우 큰 축 변형률에서 파괴에 이르기 때문이다. 이러한 현상이 있는 포천석분과 같은 시료를 수치해석 할 때 일 경화와 연화에 관련된 토질매개변수 결정에 더욱 신중해야 정도 높은 예측치를 기대할 수 있다. 또한 본 시험의 유효응력경로에 대한 특징은 한계상태선에 도달하기 전 체적압축경향이 체적팽창경향으로 바뀌는 상태전이선(phase transformation line, PTL)이 존재함으로써 전단초기에는 평균주응력이 감소하지만 상태전이선에 도달하면 평균주응력이 증가함을 보이고 있다. 또한 시험결과와 두 경우의 수치해석결과를 비교해보면 상태전이점은 세 경우 모두 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구는 석재 가공 중에 발생하는 실트와 같은 저소성 석분에 대한 거동특성과 단일항복면의 적용성을 알아보고자 포천석분을 재성형하여 등방압축-팽창시험과 구속압력을 달리한 일련의 비배수삼축압축시험을 실시하고 시험결과로부터 Lade의 단일항복면 구성모델의 토질매개변수를 결정하고 이를 이용하여 역해석함으로써 단일항복면 구성모델의 적용성과 포천석분의 거동특성을 알아보았다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 포천석분의 축변형률이 증가함에 따라 축차응력은 증가하고 구속압력이 증가함에 따라 등가적으로 축차응력이 증가하는 경화현상을 보였다.
- (2) 포천석분은 전단 시 체적팽창현상으로 25%이상의 큰 축변형률에서 파괴되므로 실용적인 파괴기준을 검토할 필요가 있다.
- (3) 유효응력경로는 초기구속압력이 서로 다른 유효응력 경로지만 하나의 유일한 선인 한계상태선에 도달하고 수치해석에서 얻은 2가지 경우의 한계상태선은 시험에서 얻은 결과보다 다소 작게 나타나고 있으며 한계상태선에 도달하기 전에 상태전이선이 존재한다.
- (4) 단일항복면 구성모델의 토질매개변수 11개를 이용하여 시험치를 역해석한 결과 응력-변형거동을 양호하게 예측하지만 항복함수에 관련된 토질매개변수를 파괴규준에 관련한 상관식과 상수로 역해석한 경우는 다소 상이한 양상을 보이고 있다. 그러므로 일경화현상이 두드러지게 나타나고 있는 포천석분과 같은 시료의 거동을 해석할 때는 항복함수에 관련된 토질매개변수 결정에 신중해야한다.

References

1. Kim, Y. S., Tint, K. S., Kim, D. M. (2007), "Characteristics of shear behaviour of remolded Nak-dong river sandy silt", *Journal of the korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.3,

pp.41-50.

2. Jeong, J. S., Kim, C. K., Lee, M. S. (1992a), "Sensitivity of Parameters for Elasto-Plastic Constitutive Model". *Journal of the korean Geotechnical Society*, Vol.8, No.2, pp.81-94. (In Korean)
3. Jeong, J. S., Kim, C. K., Lee, M. S. (1992b), "Undrained Behaviour of Granular Soil Using Single Work-Hardening Model", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.12, No.2, pp.177-189. (In Korean)
4. Cho, Won-Bum (2011), "A Study on the Characteristics of Soil Parameter of Single Work-Hardening Constitutive Model", Ph. D. Thesis, University of Daejin. (In Korean)
5. Jeong, Sang-Soem (1993), "The stress-strain behaviour of a pure silt compared with sand and clay", *Journal of the korean Geotechnical Society*, Vol.13, No.4, pp.27-35. (In Korean)
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. Kim, M. K. and Lade, P. V. (1988 a), "Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials, I. Plastic potential function", *Computers and Geotechnics*, 5(4), pp.307-324.
9. Kim, M. K. and Lade, P. V. (1988 b), "Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials, II Yield Criterion and Plastic Work Contours", *Computers and Geotechnics*, 6(1), pp.13-29.
10. Kim, M. K. and Lade, P. V. (1988 c), "Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials III. Comparisons with Experimental Data", *Computers and Geotechnics*, 6(1), pp.30-47.
11. Ladd, R. S. (1978), "Preparing Test Specimens Using Under-compaction", *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.1, No.1, pp.16-23.
12. 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.
13. Thomas L. Brandon, Andrew T. Rose, J. Michael Duncan (2006), "Drained and undrained strength interpretation for low-plasticity silts", *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.132, No.2, pp.250-257.