

석탄회의 상대밀도에 따른 Lade 단일항복면 구성모델의 토질매개변수 특성

Characteristics of Soil Parameter for Lade's Single Work-Hardening Constitutive Model with Relative Density of Bottom ash

김찬기¹, 이종천^{2*}

Chan-Kee Kim¹, Jong-Cheon Lee^{2*}

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

²Member, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering & Landscape Architecture, Dongkang College, 50 Dongmundaero Bukgu Gwangju, Republic of Korea

ABSTRACT

This study was performed a series of the isotropic compression-expansion tests and the drained triaxial tests with various the relative densities 40%, 60%, 80% and 95% for bottom ash. Using the tests results the characteristic of the parameters of Lade's single hardening constitutive model were investigated. The soil parameters K_{ur} and n representing elastic behavior are not much affected by the change of the relative density. The other parameters such as failure criterion(m, η_1), hardening function(c, p) and plastic potential(ψ_2, μ) are in a positive linear relationship with the relative density. Since the soil parameters h and α representing yield function do not change much to the change of relative density and also closely related to failure criterion, they can be replaced by failure criterion η_1 . 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 석탄회의 상대밀도를 40%, 60%, 80%, 95%로 각각 변화시켜 등방압축팽창시험과 구속압력을 달리한 배수삼축시험을 하였다. 그리고 이 시험자료를 이용하여 Lade의 단일항복면 구성모델의 토질매개변수의 변화 특성을 알아보았다. 그 결과 탄성성분을 나타내는 토질매개변수 K_{ur} 과 n 은 상대밀도의 변화에 따른 영향이 미소하고 파괴규준, 경화함수, 소성포텐셜에 관련된 토질매개변수는 상대밀도의 증가에 따라 선형적인 증감현상을 보이고 있다. 그리고 항복함수에 관련된 토질매개변수 h 와 α 는 상대밀도에 따른 변화가 미세하고 파괴규준에 관련한 토질매개변수와 관련성이 매우 높아 파괴규준, η_1 에 관한 식으로 대체할 수 있으며, 이 식을 이용하여 수치해석한 결과 양호하게 예측하고 있다.

Keywords : Relative density, Single Work-Hardening Constitutive model, Soil parameter, Drained triaxial test

1. 서 론

현재 우리나라는 대단위 해안 매립 등의 국토개발이 진행되고 있어 다량의 매립, 성토 등의 건설재료가 필요한

실정이다. 그렇지만 일부 천연자원은 고갈되고 있고 자연환경의 훼손을 줄이기 위해 대체자원의 개발이 필요하다. 전력산업 부산물인 석탄회는 저탄소 녹색성장과 맞물려 재활용이라는 큰 의미와 함께 다양한 용도로 쓰일 수 있는 큰 가능성을 내포하고 있다. 하지만 현재 국내 화력발전소에서 발생하는 석탄회는 시멘트 원료와 건축자재로 극히 일부분 재활용되고 있으며 대부분 매립 처리되고 있다.

우리나라의 석탄회 이용에 관한 연구로는 1940년대부

Received 20 Nov. 2013, Revised 22 Dec. 2013, Accepted 23 Dec. 2013

*Corresponding author

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

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

터 추진되어 1970년대 석유과동 이후 석유의 대체에너지로 석탄이 각광받기 시작하면서 석탄회에 대한 환경오염 문제와 매립지 부족현상으로 석탄회 재활용을 위한 연구가 활발하게 진행되었다. 1990년대부터 본격적으로 연구가 시작되어 도로성토재 및 노상재로서의 활용 시 강도특성, 재령에 따른 강도특성 및 지지력 검토에 관한 연구(Chun & Koh, 1992) 등이 발표되었다. 최근에는 Lee et al.(2001)에 의해 변형률제어 진동삼축시험법을 이용한 석탄회가 혼합된 모래시료의 액상화 평가에 대한 연구와 Kim et al.(2007)에 의해 매설토와 석탄회 재활용을 위한 복합지반의 재료개발에 관한 연구들이 활발하게 이루어지고 있다.

또한 이와 같은 기초지반의 거동을 해석하기 위해 많은 상용화된 프로그램의 발달과 더불어 수치해석방법의 눈부신 개발로 인하여 이제는 실제 지반거동을 적절하게 나타낼 수 있는 구성식이 사용되고 있다. 1950년대 후반 Drucker et al.(1957)에 의해 흙의 탄.소성 모델화의 이론이 제시된 뒤 Roscoe et al.(1958, 1968)를 중심으로 하는 이른바 캠 브리지학파에 의해 Cam-clay모델이 제안된 이래 지금까지 수많은 구성모델이 제안 되었다. Kondner(1963)가 개발한 탄성쌍곡선모델을 Duncan et al.(1970) and Clough et al.(1971)에 의해 수정되어 널리 사용되었는데 이 모델은 축대칭조건에서 축차응력은 최소주응력의 어떤 값에 대한 축변형률에 의한 쌍곡선함수로써 표현한 것이다. 그러나 이 모델 또한 다른 탄성모델과 마찬가지로 전단응력 아래서 체적변화가 일어나는 것을 설명하지 못하는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 Lade et al.(1973)은 일반삼축압축시험기와 입방체형시험기를 이용한 모래의 실험결과를 바탕으로 보다 정교한 모델을 제안 하였다. 그 후 전단에 의한 항복면 이외에 소성압축에 의한 항복면과 경화, 연화과정을 통일적으로 표현하면서 경화법칙 및 소성포텐셜면을 포함한 새로운 모델이 Lade (1978)에 의해 제안 되었다. 그러나 이 모델은 두개의 항복면을 갖고 있어 수치해석 시 응력상태의 판단 등의 해석 상 어려움이 있어 이를 개선한 단일항복면구성모델(Kim & Lade, 1988a, b, c)을 제안하기에 이르렀다. 또한 국내에서 Jeong et al.(1992a, b)은 주문진 표준사를 이용하여 단일항복면 구성모델의 토질매개변수의 변화를 연구하였으며 Hong et al.(1994)은 모래의 배수실험을 통하여 응력 변형률 거동특성을 보고하였으며 Cho(2011)은 단일항복면 구성모델의 11개 토질매개변수를 9개로 줄여 실용성을

증대하고자 하였다. 본 연구는 석탄회로 매립된 기초지반의 거동특성을 밝히기 위해 석탄회의 상대밀도를 40%, 60%, 80%, 95%로 각각 변화시켜 등방압축-팽창시험과 구속압력을 달리한 일련의 배수삼축시험을 하였다. 그리고 이 시험자료를 이용하여 회귀분석을 근거로 상대밀도의 변화에 따른 Lade의 단일항복면 구성모델의 토질매개변수의 변화 특성을 알아보았다.

2. 단일항복면 구성모델

Lade의 단일항복면 구성식에서 전변형률 증분($d\epsilon_{ij}$)은 다음과 같이 탄성성분($d\epsilon_{ij}^e$)과 소성성분($d\epsilon_{ij}^p$)으로 나누어진다.

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p \quad (1)$$

여기서 탄성변형률성분은 Hooke의 법칙에 의해 계산되고 소성변형률성분은 소성이론에 의하여 계산된다. 탄성계수(E_{ur})는 에너지 보존법칙으로 유도되며, 응력함수와 무차원상수로 다음과 같이 표현한다.

$$E_{ur} = K_{ur} \cdot P_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^n \quad (2)$$

여기서 P_a 는 탄성계수(E_{ur})를 구속압력(σ_3)과 같은 단위로 하기 위한 상수 대기압이고 K_{ur} , n 은 토질매개변수이다. 일반적인 3차원 파괴기준은 다음과 같이 표현한다.

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

여기서 η_1 과 m 은 토질매개변수이고 I_1 과 I_3 는 제1불변량과 제3불변량으로 다음과 같다.

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (4)$$

$$I_3 = \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z + \tau_{xy} \cdot \tau_{yz} \cdot \tau_{zx} + \tau_{yz} \cdot \tau_{zy} \cdot \tau_{xz} - (\sigma_x \cdot \tau_{yz} \cdot \tau_{zx} + \sigma_y \cdot \tau_{zx} \cdot \tau_{xz} + \sigma_z \cdot \tau_{xy} \cdot \tau_{yx}) \quad (5)$$

소성 변형률증분은 유동법칙으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda_p \cdot \frac{\partial g_p}{\partial \sigma_{ij}} \quad (6)$$

$$g_p = (\Psi_1 \cdot \frac{I_1^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I_2} + \Psi_2) \cdot (\frac{I_1}{P_a})^\mu \quad (7)$$

여기서 g_p 는 소성포텐셜함수이고 $d\lambda_p$ 는 비례상수이며 I_2 는 응력불변량으로 다음과 같이 표현된다.

$$I_2 = \tau_{xy} \cdot \tau_{yx} + \tau_{yz} \cdot \tau_{zy} + \tau_{zx} \cdot \tau_{xz} - (\sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y \cdot \sigma_z + \sigma_z \cdot \sigma_x) \quad (8)$$

항복함수는 경화인 경우와 연화인 경우에 대하여 다음과 같이 각각 나타낸다.

$$f_p = f_p(\sigma) - f(W_p) = 0 \quad (9)$$

$$f'_p = (\Psi_1 \cdot I_1^3 / I_3 - I_1^2 / I_2) \cdot (I_1 / P_a)^h \cdot e^q \quad (10)$$

$$f''_p = (1/D)^{1/\rho} \cdot (W_p / P_a)^{1/\rho} \text{ 경화인 경우} \quad (11)$$

$$f''_p = A \cdot e^{-B \cdot (W_p / P_a)} \text{ 연화인 경우} \quad (12)$$

여기서 ρ , Ψ_1 , W_p 는 식 (10), 식 (11), 식 (12)로 나타낸다.

$$\rho = p/h \quad (13)$$

$$\Psi_1 = 0.00155 \cdot m^{-1.27} \quad (14)$$

$$W_p = D \cdot P_a \cdot f_p^{(p/h)} \quad (15)$$

여기서 D 는 식 (16)과 같다.

$$D = \frac{C}{(27\Psi_1 + 3)\rho} \quad (16)$$

식 (11)에서 D 와 ρ 는 주어진 재료에 대해서 일정하다.

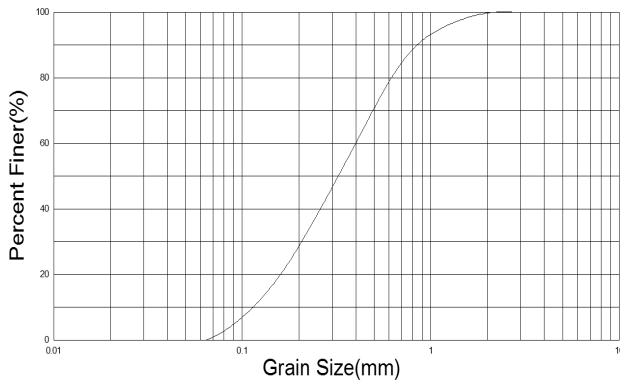


Fig. 1. Grain size distribution curve of bottom ash

여기서 c 와 P 는 등방압축 동안에 소성일을 표현하며 다음과 같이 표현된다.

$$W_p = c \cdot Pa \left(\frac{I_1}{Pa} \right)^P \quad (17)$$

3. 시험

3.1 시료조제 및 방법

준설 매립재로 활용되고 있는 석탄회가 상대밀도에 따라 어떤 특성을 갖고 있는가를 검토하고자 자연건조 시킨 후 체가름을 실시하여 상대밀도(D_r)를 95%, 80%, 60% 40%가 되도록 시료의 초기간극비(e_{spc})를 결정하여 실험에 이용할 수 있도록 시료를 준비하였다. 시료의 최대입경은 2.0mm이고, 200체에 모두 잔류하는 시료로 비교적 양호한 입도분포형상을 나타내고 있으며 입도분포곡선은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 그리고 시료의 물리적 특성으로 비중은 2.24이고 최대 간극비는 1.593이고 최소 간극비는 1.113이다. 본 실험에 사용한 상대밀도에 따른 실험 간극비(e_{lab})는 Table 1에 나타난 바와 같다.

이와 같이 준비된 시료는 Fig. 2와 같이 높이 100mm, 직경 50mm로 공시체를 제작하였으며 삼축압축시험은 자동화삼축시험기를 사용하여 등방압축-팽창시험과 배수삼

Table 1. Void ratio of bottom ash with relative density

Relative density	e_{lab}
95%	1.137
80%	1.218
60%	1.309
40%	1.409



Fig. 2. Scenes of triaxial apparatus test

축압축시험을 실시하였다. 시료의 포화는 공시체를 삼축 실에 안치한 후 하부 배수관으로 이산화탄소(CO_2)를 서서히 20분 정도 주입하여 공시체 속의 공기를 완전히 빠져나가게 한 다음 증류수를 하부배수관으로 유입시켜 공시체 내에 있는 이산화탄소를 상부배수관으로 천천히 밀어 올려 시료로부터 빠져나가도록 하였다. 이때 시료에 잔류하는 이산화탄소는 체적변화가 없으므로 문제가 되지 않으며 공시체가 완전히 포화될 때까지 구속압력과 배압(back pressure)을 가하며 각각의 간극수압B계수를 측정하여 이 값이 95% 이상 도달하면 포화된 것으로 간주하였다. 전단 중 재하에 의한 공시체 내에 과잉간극수압이 충분히 소산될 수 있도록 충분히 낮은 속도로 재하 하였으며 재하속도는 $0.1mm/min$ 로 하였다.

3.2 등방압축시험

Fig. 3은 등방압축시험 결과를 나타낸 그림으로서 압밀 과정과 동일하게 매 단계 별 50kPa씩 삼축 셀 내의 구속 압력을 일정하게 증가 시키며 시료가 등방으로 압축될 때의 체적변형률을 측정한다. 이후 셀 내의 구속압력을 매 단계 별 50kPa씩 일정하게 제거시키며 시료가 팽창될 때의 체적변형률을 측정하였다. 이 결과 형상은 일정하며 상대밀도에 따라 체적변형률만 차이가 나타나고 있음을 알 수 있다.

3.3 배수삼축압축시험

상대밀도에 따라 구속압력 100kPa, 200kPa, 400kPa인 경우를 축 변형률에 대한 축차응력과 체적변형률의 관계

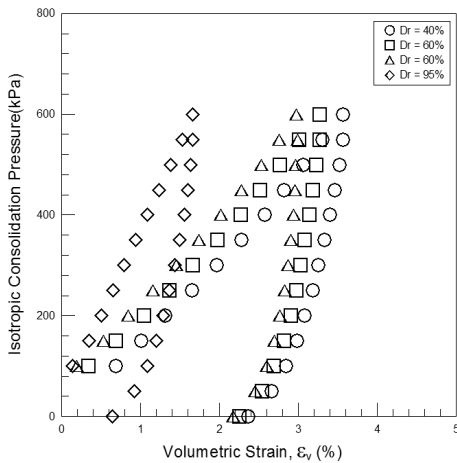
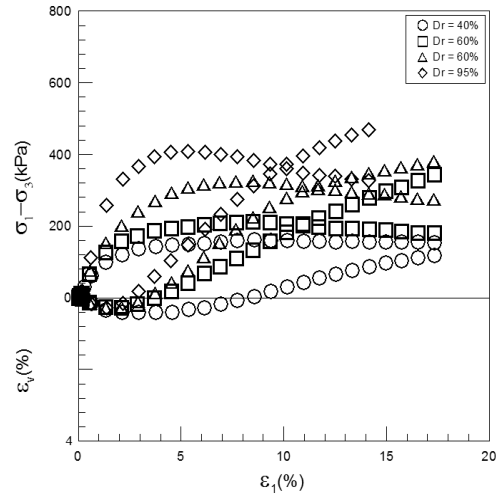
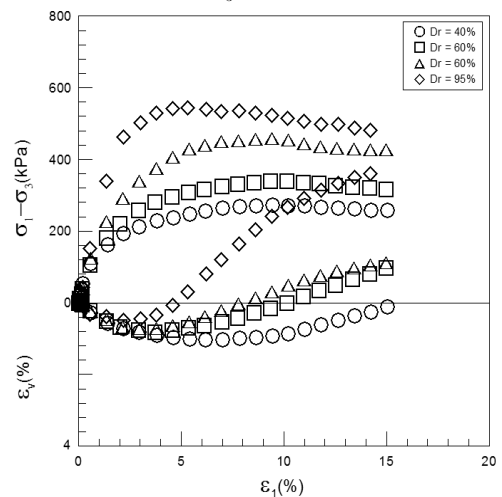


Fig. 3. Result for isotropic compression tests on bottom ash

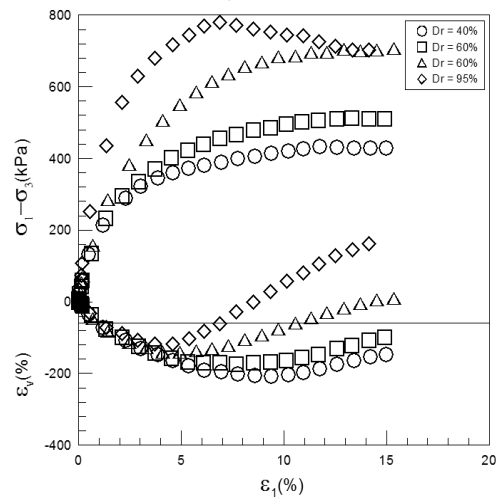
를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 축 변형률이 증가함에 따라 상대밀도가 큰 시료의 축차응력이 상대밀도가 작은 시료보다 크게 나타나고 있으며 체적변형



(a) $\sigma_3 = 100kPa$



(b) $\sigma_3 = 200kPa$



(c) $\sigma_3 = 400kPa$

Fig. 4. Result for drain triaxial compression tests on bottom ash

률의 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. 토질매개변수 특성

Lade의 단일항복면 구성모델의 토질매개변수는 탄성저동성분, 경화함수에 관련된 변수, 파괴규준에 관련된 변수, 소성포텐셜 및 항복함수에 관련된 변수 등 12종이지만 사질토의 경우 $a=0$ 이므로 11종에 대한 검토를 하게 된다. Jeong et al.(1992a)은 단일항복면 구성모델에 필요한 11개의 토질매개변수가 축변형률(ϵ_1)과 축차응력($\sigma_1 - \sigma_3$) 및 축변형률(ϵ_1)과 체적변형률(ϵ_v)에 미치는 영향을 규명하기 위하여 실험결과를 통계 처리하여 얻은 토질매개변수의 평균값에 표준편차만큼 가감하여 구성식에 대입, 응력-변형률곡선을 구하여 각 토질매개변수에 대한 예민도를 검토하였다. 그 결과 각각의 토질매개변수가 해석에 미치는 영향이 각기 다르며 항복함수와 관련된 변수는 해석에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다. 상대밀도에 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 상대밀도에 따른 상관식을 비교하여 보았다.

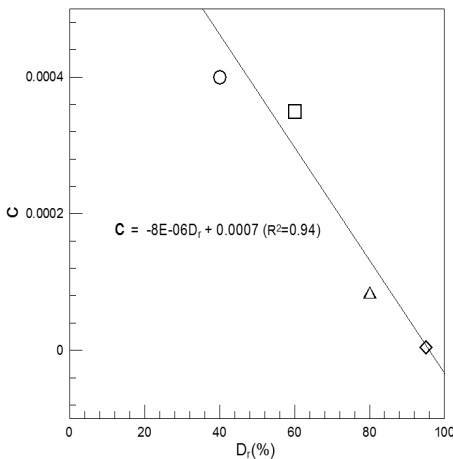


Fig. 6. Variation of c with relative density for bottom ash

4.1 경화함수에 관련된 토질매개변수(c, P)

식 (11)의 경화함수에 관련되는 토질매개변수 c, P 는 등방압축시험 결과로부터 소성일(W_p)과 응력 제1불변량(I_1)을 구하여 이들 관계를 양대수지에 나타내어 구한다. Fig. 5는 상대밀도 95%, 80%, 60%, 40%에 대한 토질매개변수 c, P 의 변화를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 상대밀도에 따라 일정한 편차를 갖은 등기율기의 선형적 분포를 나타내고 있다. 그러므로 기율기를 나타내는 토질매개변수 P 는 일정한 기율기를 갖는다고 할 수 있을 정도로 그 차가 미소함을 알 수 있다. 그리고 절편으로 나타내어지는 c 값 또한 일정한 편차를 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 토질매개변수 c 와 P 를 상대밀도의 변화에 따라 나타낸 그림이다. 그림에 나타난바와 같이 c 는

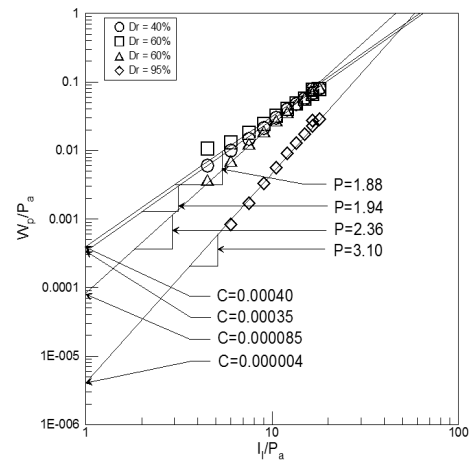


Fig. 5. Determination of parameter c and p in hardening law for bottom ash

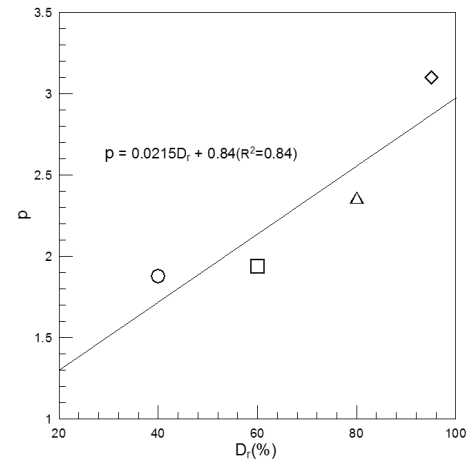


Fig. 7. Variation of P with relative density for bottom ash

상대밀도가 증가함에 따라 감소하는 현상을 보이고 P는 상대밀도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 이들의 관계를 상관관계식으로 나타내면 식 (18), 식 (19)와 같다.

$$c = -0.000008Dr + 0.0007 \quad (18)$$

$$P = 0.0215Dr + 0.84 \quad (19)$$

4.2 탄성성분에 관련된 토질매개변수 (K_{ur} , n)

탄성성분에 관련된 토질매개변수 K_{ur} 과 n 은 배수삼축 압축시험으로 부터 축변형률(ϵ_1)에 대한 축차응력($\sigma_1 - \sigma_3$)의 기울기로 부터 구한 탄성계수 E_{ur} 값과 σ_3 의 관계를 양대수지에 나타내어 구한다. Fig. 8은 상대밀도에 따른 K_{ur} 과 n 의 관계를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 상대밀도의 변화에 따라 비교적 증감의 폭이 작게 나타나고 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 토질매개변수 K_{ur} 과 n 을 상대밀도의 변화에 따라 나타낸 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 K_{ur} 과 n 은 상대밀도가 증가함에 따라 작은 값의 증가 현상을 보이고 있다. 이들의 토질매개변수의 민감도는 매우 적은 것으로 밝혀진바 있어 상대밀도에 관계없이 일정한 값을 사용하여도 좋을 것으로 생각한다. 그리고 이들의 관계가 선형적 증가를 보이고 있어 식 (20), 식 (21)과 같은 상관관계식으로 나타내었다.

$$K_{ur} = 0.6495Dr + 252.6 \quad (20)$$

$$n = 0.0061Dr + 0.02 \quad (21)$$

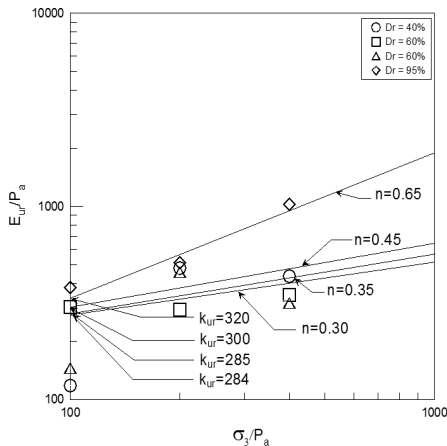


Fig. 8. Determination of K_{ur} and n with relative density for bottom ash

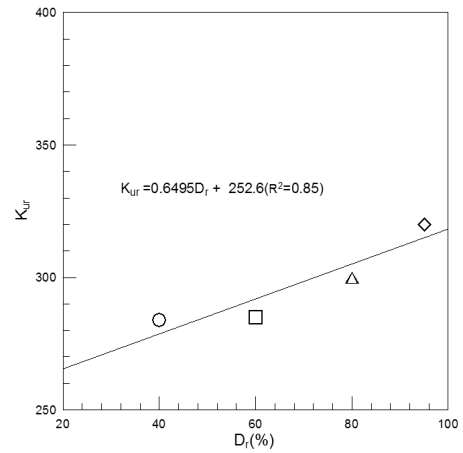


Fig. 9. Variation of K_{ur} with relative density for bottom ash

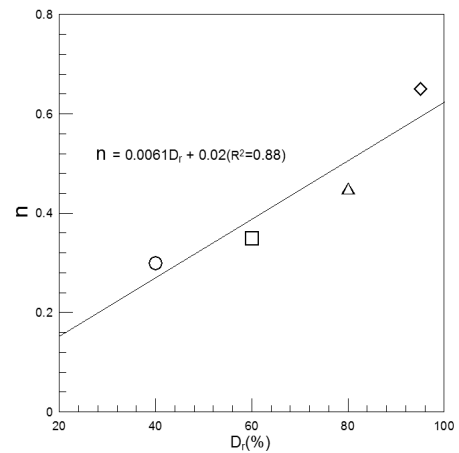


Fig. 10. Variation of n with relative density for bottom ash

4.3 파괴기준에 관련된 토질매개변수 (η_1 , m)

Fig. 11은 파괴기준에 관련된 토질매개변수 η_1 과 m 을 얻기 위해 배수삼축압축시험결과에서 얻은 파괴시의 응력

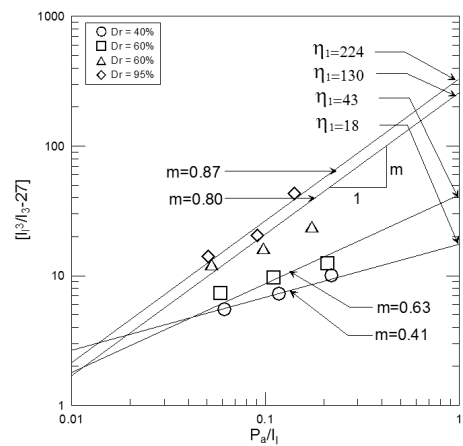


Fig. 11. Determination of η_1 and m with relative density for bottom ash

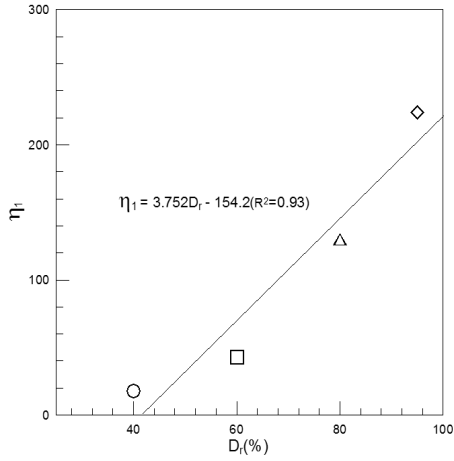


Fig. 12. Variation of η_1 with relative density for bottom ash

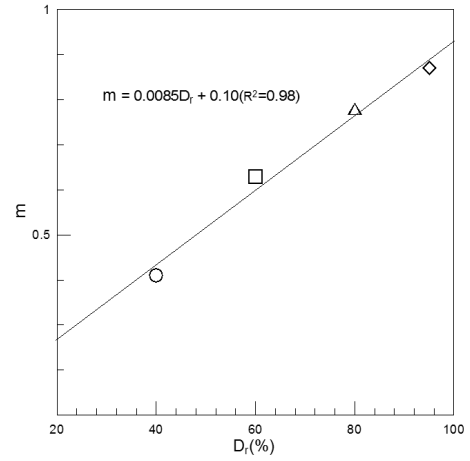


Fig. 13. Variation of m with relative density for bottom ash

을 사용하여 제1, 3응력불변량을 계산하고 (Pa/I_1) 에 대한 $(I_1^3/I_3 - 27)$ 의 값을 양대수지상에 그린 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 상대밀도에 따라 이들은 일정량의 비율로 증가하는 경향을 보이고 있으며 기울기는 거의 같은 값을 유지하고 있다.

Fig. 12와 Fig. 13은 토질매개변수 η_1 과 m 를 상대밀도의 변화에 따라 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 η_1 과 m 은 상대밀도가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있어 식 (22), 식 (23)와 같은 상관관계식으로 나타내었다.

$$\eta_1 = 3.752D_r - 154.2 \quad (22)$$

$$m = 0.0085D_r + 0.10 \quad (23)$$

4.4 소성포텐셜에 관련된 매개변수(ψ_2 , μ)

식 (7)의 소성포텐셜함수에 관련된 토질매개변수 ψ_2 와 μ 는 배수삼축압축시험 결과로부터 식 (24)과 식 (25)을 이용하여 ξ_x 와 ξ_y 를 구하고 Fig. 14와 같이 ξ_x 를 횡축에 ξ_y 를 종축으로 그린 그림에서 절편과 기울기이다.

$$\xi_x = \frac{1}{1+v_p} \left[\frac{I_1^3}{I_2^2} (\sigma_1 + \sigma_3 + 2v_p \sigma_3) + \psi_1 \cdot \frac{I_1^4}{I_3^2} (\sigma_1 \cdot \sigma_3 + v_p \cdot \sigma_3^2) \right] - 3\psi_1 \cdot \frac{I_1^3}{I_3} + 2 \frac{I_1^2}{I_2} \quad (24)$$

$$\xi_y = \frac{1}{\mu} \psi_x \cdot \frac{I_1^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I_2} \quad (25)$$

여기서 ψ_1 은 항복규준의 곡률매개변수 m 에 따라 결정

되는 값이고 $\nu_p (= \frac{de_3^p}{de_1^p})$ 는 소성 변형률 증분비이며 I_2 는 제2응력불변량이다.

Fig. 14에 나타난바와 같이 ξ_x 와 ξ_y 의 관계는 선형적인 관계를 보이고 있으며 상대밀도의 증가에 따라 일정량의 비율로 증감하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 15와 Fig. 16은 토질매개변수 ψ_2 와 μ 를 상대밀도의 변화에 따라 나타낸 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 ψ_2 와 μ 는 상대밀도가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 현상을 보이고 있다. 이들의 관계를 선형적인 상관관계식으로 나타내면 식 (26), 식 (27)과 같다.

$$\psi_2 = 0.0022D_r - 3.1 \quad (26)$$

$$\mu = 0.0029D_r + 1.52 \quad (27)$$

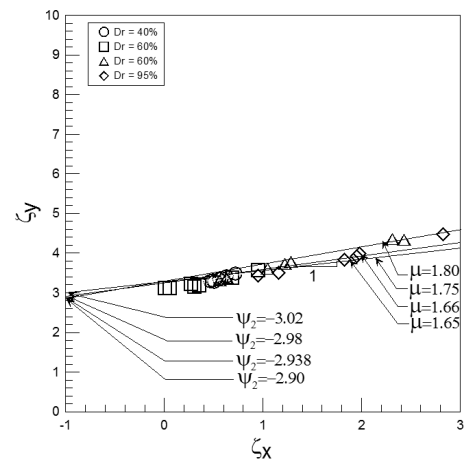


Fig. 14. Determination of ψ_2 and μ with relative density for bottom ash

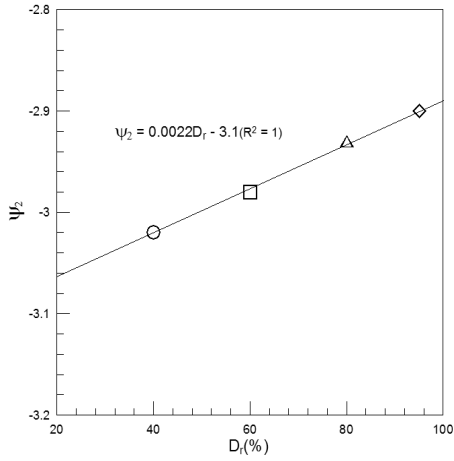


Fig. 15. Variation of ψ_2 with relative density for bottom ash

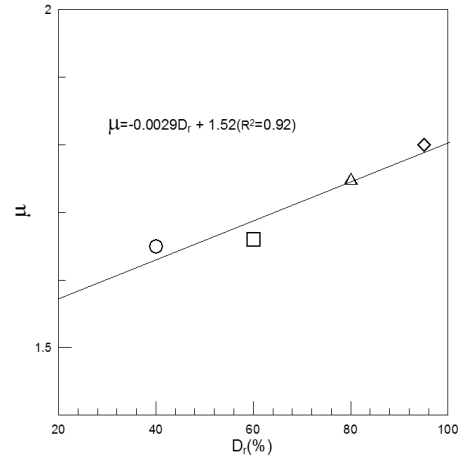


Fig. 16. Variation of μ with relative density for bottom ash

4.5 항복함수에 관련된 토질매개변수(h, α)

항복함수에 관련된 토질매개변수 h 는 배수삼축압축시험 결과를 사용하여 식 (28)로 구한다. 여기서 I_{1A} 과 I_{1B} 는 등소성일곡선(same plastic work contour)상에서 정수압 축선 위의 제1응력불변량과 파괴포락선위의 제1응력불변량을 각각 나타내며, e 는 자연대수의 기저이다.

$$h = \ln \frac{\left(\psi_1 \cdot \frac{I_{1B}^3}{I_{3B}} - \frac{I_{1B}}{I_{2B}} \right) \cdot e}{27 \cdot \psi_1 + 3} \cdot \frac{\ln \frac{I_{1A}}{L_{1B}}}{\ln \frac{I_{1A}}{L_{1B}}} \quad (28)$$

그리고 항복함수에 관련된 토질매개변수 α 는 식 (29)와 같이 표현된다.

$$\alpha = \frac{1-s}{s} \frac{q_s}{1-q_s} = \frac{1}{s} \frac{q_{s0}}{1-q_{s0}} \quad (29)$$

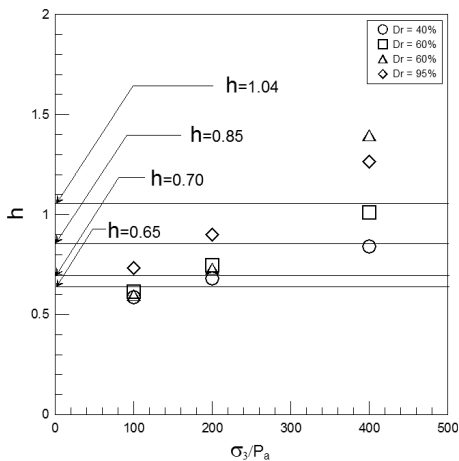


Fig. 17. Variation of h with confining pressure for bottom ash

여기서 응력수준 s 는 식 (30)이며 q 는 식 (31)과 같은 식 (29)에서 q_{s0} 는 $s = 0.8$ 일 때의 q 값이다.

$$S = \frac{f_n}{\eta_1} = \frac{1}{\eta_1} \cdot \left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27 \right) \cdot \left(\frac{I_1}{P_a} \right)^m \quad (30)$$

$$q = \ln \frac{\left(\frac{W_p}{D \cdot P_a} \right)^{1/p}}{\left(\psi_1 - \frac{I_1^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I_2} \right) \cdot \left(\frac{I_1}{P_a} \right)^h} \quad (31)$$

Fig. 17은 항복함수와 관련된 토질매개변수 h 의 구속압력에 따른 변화를 각각 나타낸 것이다. 그림에 나타난바와 같이 구속압력이 증가하면 h 는 다소 증가하는 경향을 보이고 있다. Fig. 18은 토질매개변수 h 를 상대밀도의 변화에 따라 나타낸 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 h 는 상대밀도가 증가함에 따라 다소 증가현상을 보이고 있다.

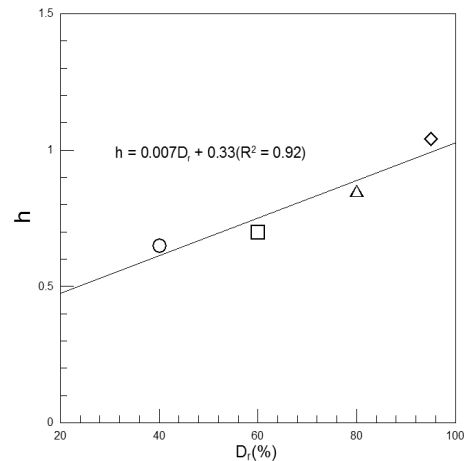


Fig. 18. Variation of h with relative density for bottom ash

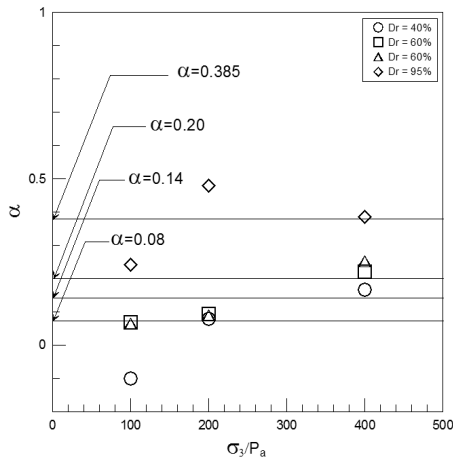


Fig. 19. Variation of α with confining pressure for bottom ash

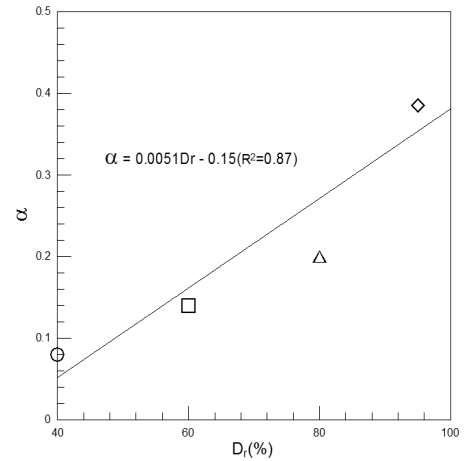


Fig. 20. Variation of α with relative density for bottom ash

이들의 관계를 선형적인 상관관계식으로 나타내면 식 (32)과 같다.

$$h = 0.007Dr + 0.33 \quad (32)$$

Fig. 19는 항복함수와 관련된 토질매개변수 α 의 구속압력에 따른 변화를 각각 나타낸 것이다. 그림에 나타난바와 같이 구속압력이 증가하면 α 는 다소 증가하는 경향을 보이고 있다. Fig. 20은 토질매개변수 α 를 상대밀도의 변화에 따라 나타낸 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 α 는 상대밀도가 증가함에 따라 미세한 증가현상을 보이고 있다. 이들의 관계를 선형적인 상관관계식으로 나타내면 식 (33)과 같다.

$$\alpha = 0.0051Dr - 0.15 \quad (33)$$

Table 2는 석탄회의 토질매개변수를 상대밀도에 나타낸 것으로 경화함수에 관련된 토질매개변수 h 와 α 는 구속압력에 따라 증가하는 경향을 보이지만 제안자의 결정 방법에 따라 각각의 구속압력에서 얻은 값의 평균으로 결정하였다.

이와 같이 상대밀도의 변화에 따른 토질매개변수의 특성을 살펴 본 바 상대밀도에 따라 토질매개변수값은 선형적인 상관관계를 보이고 있다. 그러므로 상대밀도가 다른 여러 층으로 구성된 기초지반해석 시 시험 수를 정량화하고 임의의 상대밀도에 대한 토질매개변수는 이에 관련된 식에서 추론하여 사용하여도 좋을 것으로 생각한다.

5. 토질매개변수의 검증

Lade의 단일항복면 구성모델을 이용하여 지반 거동을 예측하기 위해서는 11개의 토질매개변수를 필요로 한다.

Table 2. Summary of Parameter values for bottom ash

Relative density parameter	95 (%)	80 (%)	60 (%)	40 (%)
K_{ur}	320	300	285	284
n	0.65	0.45	0.35	0.3
c	0.000004	0.000085	0.00035	0.00038
p	3.10	2.36	1.94	1.58
η_1	224	130	43	18
m	0.87	0.80	0.63	0.41
ψ_2	-2.9	-2.938	-2.98	-3.02
μ	1.8	1.75	1.66	1.65
h	1.04	0.85	0.7	0.65
α	0.385	0.20	0.14	0.08

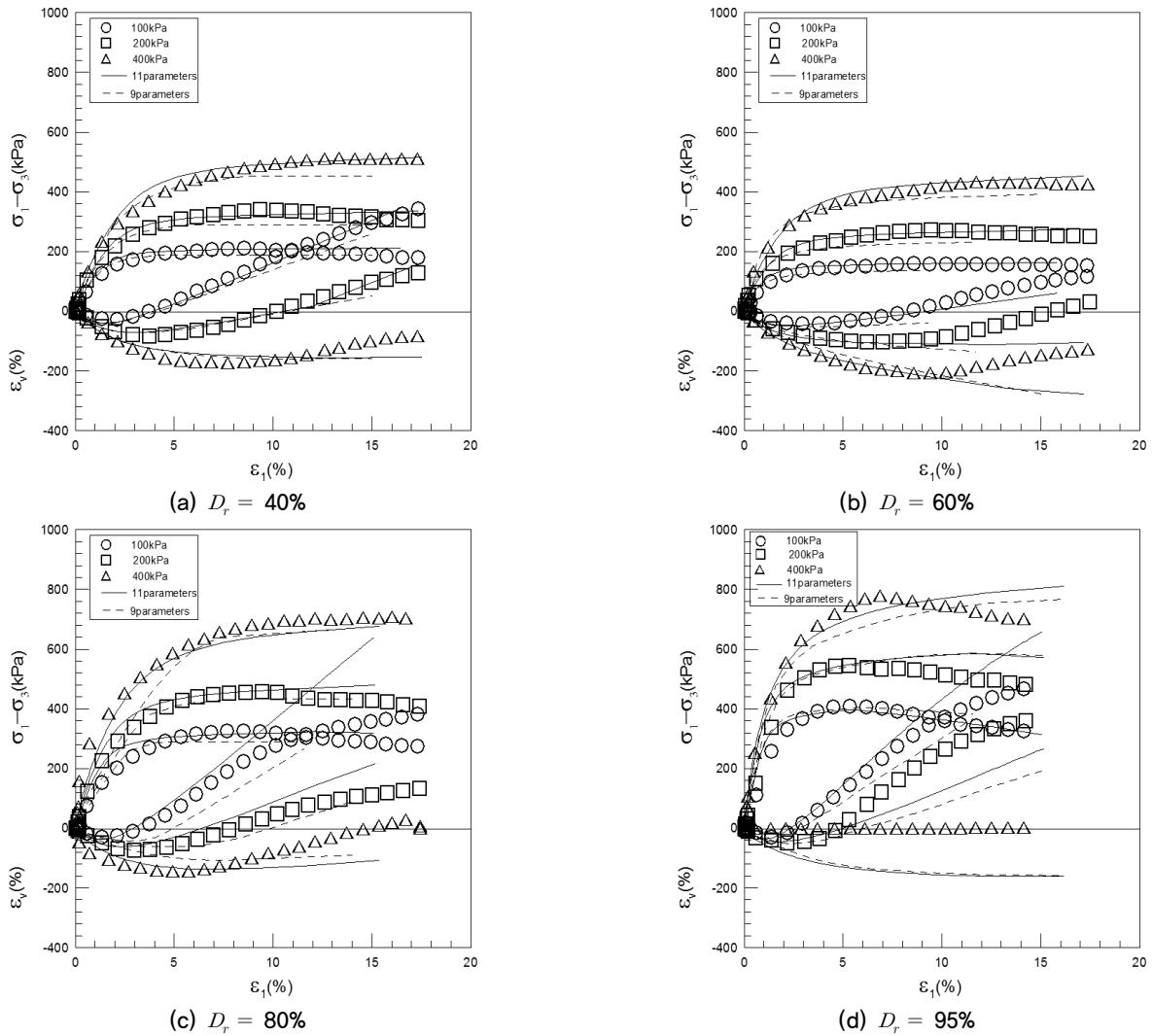


Fig. 21. Comparison of measured and predicted from CD test on bottom ash

이 모든 토질매개변수를 구하기 위해서는 많은 실험이 수행되어야 하고 이로 인하여 예기치 못한 오차가 발생할 수 있다. 토질매개변수의 수를 줄일 수 있다면 본 구성모델을 이용한 지반거동 예측이 보다 실용적일 것이다.

Jeong et al.(1992a)의 연구에 의하면 항복함수에 관련된 토질매개변수 h 와 α 는 변동계수가 아주 작고 응력 변형률거동에 미치는 영향도 비교적 작은 것으로 보고하였으며 파괴규준에 관련된 토질매개변수와 밀접한 상관성이 있음을 밝혔다. 그리고 Cho(2011)은 사질토 지반의 토질매개변수 h 를 파괴규준에 관련된 토질매개변수 η_1 과의 관계식을 식 (34)로 제안하였고 α 는 0.1로 제안하였으며 그 적용성이 모래 및 사질토 지반의 거동을 양호하게 예측하는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구는 11개의 토질매개변수를 이용한 수치해석과 Cho(2011)가 제안한 9개의 토질매개변수를 사용하여 Jeong et al.(1992b)이 개발한 수치

해석 프로그램을 이용하여 해석을 실시하고 시험결과와 비교함으로써 제안식의 효율성을 검증한다.

$$h = 0.0122 \eta_1 \quad (34)$$

Fig. 21은 상대밀도 40%, 60%, 80%, 95%로 각각 달리 하여 배수삼축압축시험한 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 제안한 식과 값을 사용하여 9개의 토질매개변수를 이용하여 수치해석한 결과이다. 그림에 나타난바와 같이 실선과 점선 모두 시험결과와 매우 잘 일치하고 있다. 그러므로 항복함수에 관련된 토질매개

변수 h 는 η_1 에 관련된 식으로 대체하고 α 는 0.1을 사용하여 Lade의 단일항복면 구성모델의 토질매개변수를 11개에서 9개로 줄일 수 있는 가능성을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 연구는 석탄회를 상대밀도 40%, 60%, 80% 95%로 각각 변화시켜 등방압축팽창시험과 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) 상대밀도가 클수록 축차응력이 크게 나타나고 다이러턴시 현상이 두드러지게 크게 나타나고 있으며 상대밀도에 따라 축차응력 및 체적변형률은 일정하게 증감하는 일관성을 보이고 있다.
- (2) 탄성성분을 나타내는 토질매개변수 Kur , n 은 상대밀도의 변화에 따른 영향이 매우 작음을 알 수 있고, 경화함수에 관련된 토질매개변수 p 와 c 의 변화는 상대밀도에 따라 일정한 편차와 선형적으로 기울기가 변화함을 알 수 있다.
- (3) 파괴규준에 관련된 토질매개변수 η_1 은 상대밀도에 따라 일정한 증가를 보이고 있으며, m 의 변화는 매우 미소하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 그리고 소성포텐셜에 관련된 토질매개변수 ψ_2 와 μ 는 상대밀도의 증가에 따라 일정비로 증가하는 경향을 보이고 있으며 기울기는 일정한 값을 유지하고 있다.
- (4) 항복함수에 관련된 토질매개변수 h 와 α 는 상대밀도에 따른 변화가 미세하고 파괴규준에 관련한 토질매개변수와 관련성이 매우 높아 파괴규준, η_1 에 관한 식과 상수로 대체할 수 있으며 이 식을 이용하여 수치해석한 결과 양호하게 예측하고 있다.

References

1. 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)
2. Chun, B. S. and Koh, Y. I. (1992), "The Proper Mixing Ratio of Fly Ash to Bottom Ash for Use of Highway Embankment and Subgrade Materials", *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol.12, No.1, pp.177-186.
3. Clough, R. W. and Duncan, J. M. (1971), "Finite Element Analysis of Retaining Wall Behaviour". *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.97, No. SM12, pp.1657-1673.
4. 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.
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. 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)
7. 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 Engineering*, Vol.12, No.2, pp.177-189. (In Korean)
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. Kim, Y. T., Han, W. J. and Jung, D. H. (2007), "Development of Composite Geo-Material for Recycling Dredged Soil and Bottom Ash", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.11, pp.77-85.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Lade, P. V. (1978), "Prediction of Undrained Behaviour of Sand", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.104, No. GT6, pp.721-735.
16. Lee, B. S. and Jeong, K. S. (2001), "Liquefaction Potential for Coal Ash Mixed Sand by Strain-Controlled Cyclic Triaxial Test", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.17,

No.5, pp.129-136.

17. Roscoe, K. H. & Burland, J. B. (1968), "On the Generalized Stress Strain Behaviour of Wet Clay". *Engineering Plasticity*, Cambridge University Press, Cambridge University, London, pp.535-609.
18. Roscoe, K. H., Schofield, A. N., and Worth, C. P. (1958), "On the Yielding of soil". *Geotechnique*, London, England, Vol.8, No.1, pp.22-52.
19. Hong, W. P. and Nam, J. M (1994), "Prediction of Three-Dimensional Behavior of Sand by Isotropic Single-Hardening Constitutive Model" *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.10, No.1, pp.103-115.