

복합항복면 일-경화구성 모델을 이용한 지반거동해석 The Analysis of Soil Behaviour by Double Surface Work-hardening Constitutive Model

윤일로^{1*}, 오세욱²
Il-Ro Youn^{1*}, Se-Wook Oh²

<Abstract>

Decomposed granite soils are in a wide range of conditions depending on the degrees of weathering. This paper is intended to examine laboratory tests such as consolidation tests and conventional triaxial compression tests conducted in order to find out the mechanical properties of Cheongju granite soil. Along with the foregoing, the results of basic physical tests conducted in order to grasp the physical properties of Cheongju granite soil were described and based on the results, methods to calculate the mechanical parameters of numerical approaches using Lade's double surface work-hardening constitutive model were examined. Finally, it is intended to explain the stress properties of Cheongju granite soil used as a geotechnical material based on its shear behavior and critical state concept using the results of isotropic consolidation tests and triaxial compression tests. As a conclusion, it can be seen that in the relationship between confining stress and maximum deviator stress, the slope is maintained at a constant value of 2.95. In the drained CTC test, maximum deviator stress generally existed in a range of axial strain of 6~8% and larger dilatancy phenomena appeared when confining stress was smaller. Finally, based on the results of the CTC tests on Cheongju granite soil, although axial strain, deviator stress and pore water pressure showed mechanical properties similar to those of overconsolidated soil, Cheongju granite soil showed behavior similar to that of normally consolidated soil in terms of volumetric strain.

Keywords : *Decomposed granite soil, Behaviour of stress-strain relation, Lade model, Soil parameters, Elasto-plastic model*

1. 서 론

구성모델은 1950년대 후반에 Drucker 등에 의해 흙의 탄소성모델화 지침이 제시된 후 Roscoe등을 중심으로 이른바 Cambridge학과에 의해 Cam-clay모델이 제안된 이래로 흙의 연

속적인 항복개념을 기본으로 한 Cap모델등 지금까지 많은 구성모델이 제안되었다. 그러나 현재까지 구성모델의 평가는 대상지반의 시료에 대한 실험실 실험으로부터 얻은 자료를 이용하여 토질매개변수를 결정하고 결정된 토질매개변수를 이용하여 흙의 변형거동을 예측하며 예

¹ 정회원, 교신저자, 경북대학교 이공대학 토목공학과, 교수^{*}Corresponding Author, Dept. of Civil Engineering, Kyungpook National University prof., Ph.D.

工博, E-mail :youn@knu.ac.kr

² 정회원, 경북대학교 이공대학 토목공학과, 工博

²Dept. of Civil Engineering, Kyungpook National University., prof., Ph.D.

측치와 시험에서 얻은 실험치를 비교하는 방법으로 구성모델을 평가하고 있다. 이러한 측면에서 구성모델의 예측능력은 정확한 토질매개변수의 결정여하에 좌우됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 여러 구성모델 가운데 탄소성모델로서 비선형의 응력-변형을 거동을 광범위하게 해석할 수 있고 일 경화 및 연화까지도 설명이 가능하며, 입상도 뿐만 아니라 점토까지 해석이 가능하다고 알려져 있는 Lade의 복합 항복면 구성모델을 선정하여 이 모델의 특성과 실용화를 위한 기초연구를 다짐화강토를 대상으로 시행한 것이다. 이 단일 항복면 구성모델은 광범위한 구속압력을 수용할 수 있어 재료에 구애받지 않고 적용되며, 어떠한 응력경로에서도 일정한 토질매개변수를 얻을 수 있어 일반삼축압축시험결과만으로도 토질매개변수를 결정하여 지반거동을 예측할 수 있는 장점이 있다. 그러나 토질매개변수 결정과정이 복잡할 뿐만 아니라 소성포텐셜 함수와 항복면이 일치하지 않는 비관련유동칙(non-associative flow rule)이 적용되므로 해석상 어려움이 있어 실제지반의 변형해석에는 실용화되지 못한 상태이다.

본 연구에서 선정된 Lade의 복합 항복면 구성모델은 탄,소성이론이 기본개념으로 되어 있고 비선형의 응력-변형을 거동을 일경화 및 일 연화까지도 해석할 수 있으며 다른 탄,소성 구성모델보다도 예측능력이 뛰어나다고 평가되고 있다. 그리고 어떠한 응력경로에서도 일정한 토질매개변수를 구할 수 있어 일반삼축압축시험 결과만으로도 광범위하게 지반거동을 예측할 수 있으며 상이한 배수조건에서도 토질매개변수가 동일하므로 어떤 조건이든 결정된 하나의 토질매개변수로 배수 및 비배수 거동을 예측할 수 있게 되어있다. 본 논문에서의 응력-변형을 거동해석은 필요한 토질매개변수를 결정하고 이를 이용하여 배수 및 비배수의 일반삼축압축 시험의 결과를 복합 항복면 구성식을 이용한 예측치와 상호 비교를 하였다.

거동예측에 필요한 토질매개변수는 복합 항복면 구성모델이 14개이며, 이 모델에 필요한 탄성변형을 및 파괴규준에 관련된 토질매개변수는 서로 같은 값이다. 이를 결정하기 위하여

실시한 실내실험은 등방압밀시험과 일반삼축압축시험이며 이때의 구속압을 2가지 즉, 1, 3 kg/cm^2 으로 실시하였다. 그러나 토질매개변수 결정과정이 매우 복잡하여 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라 응력-변형을 예측에 민감하게 작용하는 토질매개변수를 결정함에 있어서 임의성을 배제할 수 없고 오차가 발생할 수 있으므로 선형 및 비선형 회귀분석법을 이용한 결정 프로그램을 사용하여 결정하였다.

2. 복합 항복면 구성모델의 매개변수

2.1 탄성변형을

탄성계수 E_{ur} 값은 응력-변형곡선의 제하초기단계 및 재하-재제하 곡선의 기울기로부터 구하며 E_{ur} 값을 구속압(σ_3)에 대하여 양대수지상에 그린 것이며 다음 식(1)과 같다.

$$\log(E_{ur}/P_a) = \log K_{ur} + n \log(\sigma_3/P_a) \quad (1)$$

식(1)의 양변의 대수를 제거하면 다음 식(2)를 얻는다.

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

시험결과 값을 이용하면 Fig. 1과 같이 직선관계를 나타내는데 이때의 기울기가 n 값이고 $\frac{\sigma_3}{P_a}$ 가 1인 지점이 K_{ur} 값으로 나타낸다. 결정된 K_{ur} 값은 514이고 기울기 n 값은 0.5이다. 포아슨비(ν)는 σ_3 의 크기에 무관하며 거의 일정한 값을 나타내고 있어서 삼축시험 결과에서 얻은 평균 포아슨비 0.25로 결정하였다.

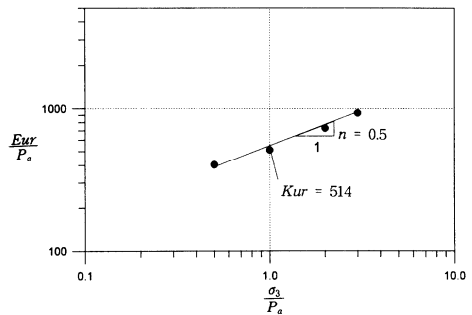


Fig. 1. Determination of K_{ur} and n on Confining Pressure(σ_3).

2.2 파괴규준

비배수삼축압축시험 결과에서 얻은 파괴때의 응력을 사용하여 계산한 $\frac{P_a}{I_1}$ 에 대한 $\frac{I_1^3}{I_3}-27$ 의 값을 양대수지에 그린 것이 Fig. 2이다. 여기서, η_1 는 $\frac{P_a}{I_1}$ 이 1일 때, 절편 $\frac{I_1^3}{I_3}-27$ 값이며 m 은 이직선의 기울기이다. 복합 항복면 구성모델과 같이 결정된 η_1 는 22.35이며 m 은 0.34이다.

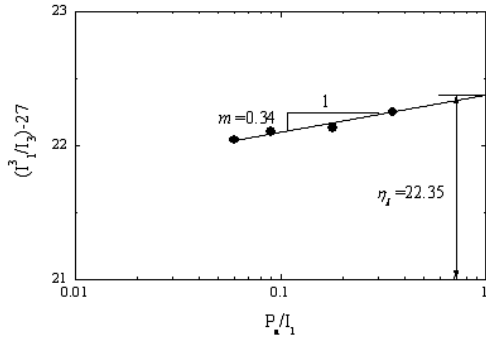


Fig. 2. Estimation of η_1 and m on failure criterion.

2.3 소성파쇄변형률

소성파쇄율은 등방압축시험 결과를 이용하여 구하며 다음과 같다.

$$W_c = \int \sigma_3 \cdot d\epsilon_v^c \quad (3)$$

여기서 $d\epsilon_v^c$ 는 등방압축시험에서 구한 변형률로부터 탄성변형률을 감하여 구하며 등방압축에 대한 f_c 값은 다음식으로부터 구한다.

$$f_c = 3\sigma_3^2 \quad (4)$$

Fig. 3은 W_c 와 f_c 관계를 양대수지에 나타낸 것이며 이들 관계를 다음과 같이 표현된다.

$$\log\left(\frac{W_c}{P_a}\right) = \log c + p \cdot \log\left(\frac{f_c}{P_a^2}\right) \quad (5)$$

식(5)의 양변의 대수를 제거하면 다음의 식을 얻는다.

$$W_c = C \cdot P_a \left(\frac{f_c}{P_a^2}\right)^p \quad (6)$$

Fig. 3에서 보는 바와 같이 C 는 $\left(\frac{f_c}{P_a^2}\right)=1$ 일 때의 절편값이고 p 는 이직선의 기울기이며 여

기에서 C 값은 0.0097이고, 기울기 p 값은 0.587이다.

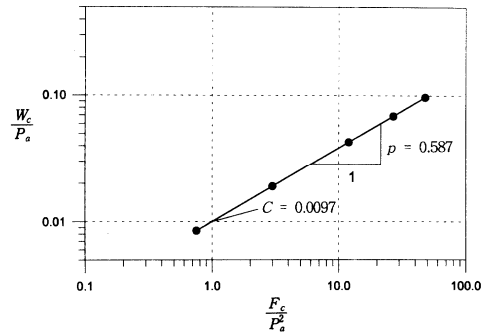


Fig. 3. Determination of parameters C and p on the relation of W_c with f_c .

2.4 소성팽창변형률

1) S, R, t 결정 ($\eta_2 - f_p$ 관계)

Fig. 4는 비배수 삼축압축시험 결과를 이용하여 얻은 η_2 에 대한 f_p 값을 그린 것이다.

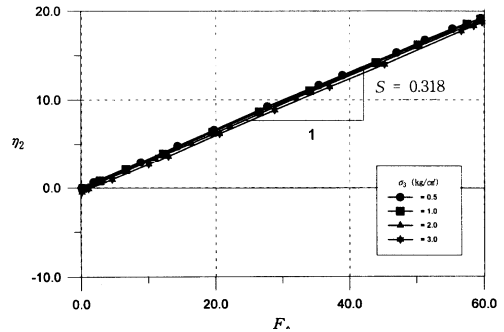


Fig. 4. Variation of η_2 with f_p for granite soil.

η_2 에 대한 수식은 다음과 같다.

$$\eta_2 = \frac{3 \cdot (1+\nu^p) \cdot I_1^2 - 27 \cdot \sigma_3 (\sigma_1 + \nu^p \cdot \sigma_3)}{\left(\frac{P_a}{I_1}\right)^m \cdot [\sigma_3 (\sigma_1 + \nu^p \cdot \sigma_3) - \left(\frac{I_3}{I_1}\right) \cdot m \cdot (1+\nu^p)]} \quad (7)$$

Fig. 4에 나타난 바와 같이 η_2 에 대한 f_p 의 관계는 직선관계가 있으며 η_2 와 f_p , σ_3 의 관계를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\eta_2 = S \cdot f_p \cdot R \sqrt{\frac{\sigma_3}{P_a}} + t \quad (8)$$

여기서 S는 직선의 기울기이며 결정된 값은 0.318이다.

R과 t의 값은 Fig. 4의 η_2 에 대한 절편값을 $\sqrt{\frac{\sigma_3}{P_a}}$ 에 대하여 그린 그림에서의 기울기와 절편값이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 R은 -0.393이고 t는 0.275이다.

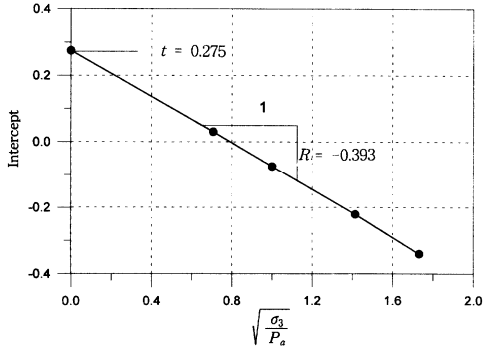


Fig. 5. Determination of Parameters R and t.

2) α, β, pl, l 의 결정 (fp-Wp관계)

Fig. 6은 비배수 삼축압축 시험결과를 이용하여 얻은 q와 구속압력 σ_3 의 관계를 나타낸 것이다.

여기서 q를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$q = \frac{\log\left(\frac{W_{ppcak}}{W_{p60}}\right) - \left(1 - \frac{W_{p60}}{W_{ppcak}}\right)\log c}{\log\left(\frac{\eta_1}{f_{p60}}\right)} \quad (9)$$

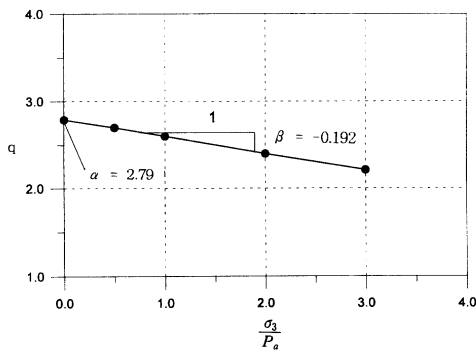


Fig. 6. Determination of Parameters α and β .

σ_3 와 q의 관계는 직선으로서 다음과 같이 수식으로 표현된다.

$$q = \alpha + \beta \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right) \quad (10)$$

여기서, α 는 직선의 절편값이며 β 는 기울기이다. 결정된 절편 α 는 2.79이고 기울기 β 는 -0.192이다.

Fig. 7은 파괴시의 소성팽창일을 나타내는 W_{ppcak} 와 구속압력(σ_3)관계를 양대수지에 그린 것으로서 직선관계이며 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\log\left(\frac{W_{ppcak}}{P_a}\right) = \log pl + l \cdot \log\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right) \quad (11)$$

양변의 대수를 제거하면

$$W_{ppcak} = pl \cdot P_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^l \quad (12)$$

Fig. 7에서 결정된 매개변수 pl 은 0.176이며 l 은 0.344이다.

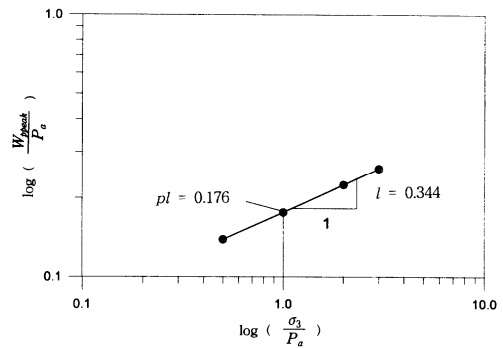


Fig. 7. Determination of Parameters pl and l .

2.5 토질매개변수 요약

Lade의 복합 항복면 구성모델에 필요한 토질 매개변수 14가지를 결정한 값으로서 유효응력 개념을 갖는 비배수 삼축압축시험의 결과와 등방압밀시험으로 결정하였고 모든 변수값은 대기압 P_a 을 사용하여 무차원화한 값이며 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Summary of parameter values for double work hardening model

Strain Component	Parameters	Value
Elastic Strain	Modulus No. Kur	514
	Exponent, n	0.5
	Poisson's Ratio v	0.25
Plastic Collapse	Collapse Modulus, C	0.0097
	Collapse Const. p	0.587
Failure Criterion	Yield Const. n_1	61
	Yield Expoent m	0.01
Plastic Expasive	pl.Potent Const. R	-0.393
	pl.Ponent Const. S	0.318
	pl.Potent Const. t	0.275
	Work-hard. Const. α	2.79
	Work-hard. Const. β	-0.192
	Work-hard. Const. pl	0.176
	Work-hard.Exponent. l	0.344

3. 배수 및 비배수 거동예측

다짐화 강토 지반에 대한 탄소성 응력-변형률 이론의 단일 항복면 및 복합 항복면 구성모델의 배수 및 비배수 거동을 예측하기 위하여 일반삼축압축시험 결과와 같이 결정된 토질매개변수를 이용하여 유한요소법의 의한 수치해석 결과를 비교하였으며 또한 단일 항복면 구성모델과 복합 항복면 구성모델을 비교하였다. 본 연구에서 단일 항복면 및 복합 항복면 구성모델로서 비배수 거동예측을 함에 있어서 하중증가가 있을때는 체적변화가 생기지 않는다는 조건에서 간극수압 증가량을 계산하였다.

3.1 비배수 거동예측

1) 응력-변형률관계와 간극수압 거동예측

다짐화 강토에 대한 응력-변형률 거동 예측을 함에 있어서 복합 항복면 구성모델에 대한 수치해석 결과와 실측치에 대한 비교를 Fig. 8에 나타내었다. 이는 축변형률(ϵ_1)과 축차응력(q)의 관계로 시료에 대한 구속압을 각각 1, 3 kg/cm^2 의 2가지로 비배수 삼축압축시험 결과인 실측치와 예측치를 비교하여 나타낸 것이다. 거동예측 결과로서 전체적으로는 거의 일치하고 있음을 보여주고 있으나 복합 항복면 구성모델은 초기 응력상태가 실측치보다 크게 나타나고 있으며 단일 항복면 구성모델은 초기 응력상태가 작게 나타나고 있지만 두 모델 모두

가 파괴때의 축변형률은 4~6%안에 있음을 알 수 있다. 또한 실측치의 응력상태가 최대 축차응력점에 도달한 후에는 일 연화과정에 있어 축차응력이 약간 감소하고 있으나 두 예측치는 일정하게 나타나고 있다.

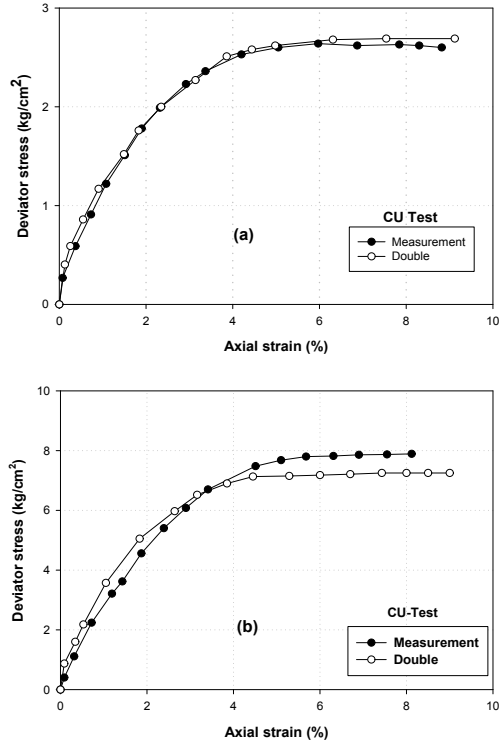


Fig. 8. Comparison of measured and predicted stress-strain behaviour for decomposed granite soil ((a) $\sigma_3 = 1.0$, (b) = 3.0 kg/cm^2).

2) 간극수압 거동예측

응력-변형률 거동예측과 같은 조건으로 간극수압과 축변형률관계를 비배수 삼축압축시험에 의한 실측치와 단일 항복면 및 복합 항복면 구성모델에 의한 예측치의 비교를 Fig. 9에 나타내었다. 거동예측 결과로서 두모델에 의한 예측치가 실측치보다 초기 간극수압이 크게 나타나고 있으며 간극수압 발현정도도 구속압의 약 50 %정도의 실측치보다 큰 약 60 %정도로서 약 10 %정도 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 두 모델간의 비교에서 단일 항복면 구성모델은 초기 간극수압이 축변형률 약 2~3 % 안

에서 최고치를 보이는 반면 복합 항복면 구성 모델은 초기 기울기가 실측치와 가깝지만 축변형율 약 4~6 %에서 최고치를 나타내고 있다. 또한 복합 항복면 구성모델의 예측치는 간극수압의 최고치 이후에 일정하게 나타내고 있으나 단일 항복면 구성모델의 예측치는 간극수압이 감소하고 있음을 알 수 있다.

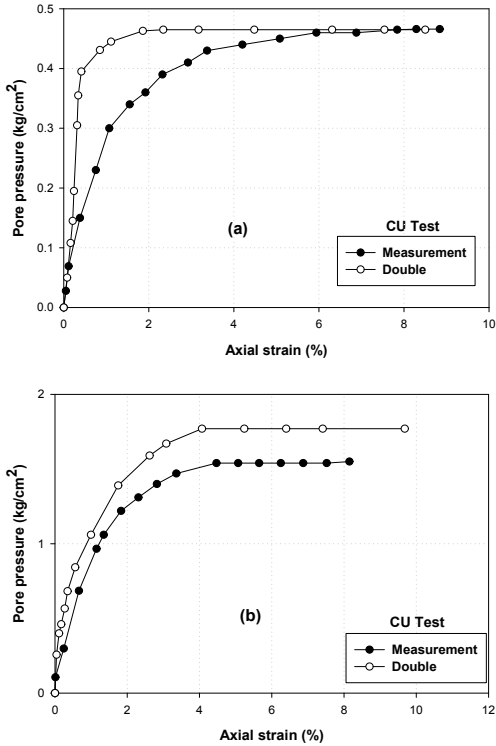


Fig. 9. Comparison of measured and predicted pore pressure for decomposed granite soil ((a) $\sigma_3 = 1.0$, (b) = 3.0 kg/cm^2).

3.2 배수 거동예측

구속압을 각각 $1.0, 3.0 \text{ kg/cm}^2$ 의 2가지로한 배수 삼축압축시험 결과중에 축변형율(ϵ_1)과 체적변형율(ϵ_v)의 관계를 단일 항복면 및 복합 항복면 구성모델로 거동예측을 한 것으로 Fig. 10에 나타내었다. 실측치는 구속압이 1.0 kg/cm^2 인 경우 체적팽창율이 보다 크게 나타나고 있으며 구속압 3 kg/cm^2 에서는 체적팽창이 발생하지 않았지만 단일 항복면 및 복합 항복면 구성모델의 예측 결과는 체적 팽창이 거의 일

어나지 않았다. 그리고 체적변형율의 초기 경사는 구속압이 클수록 예측치와 차이가 크게 나타나고 있으며, 두 가지 구성모델 중에서는 복합 항복면 구성모델이 더 큰 체적 변형율 초기 경사를 이루고 있음을 알 수 있다. 또한 최대 체적 변형율 이후에는 두 모델이 일정한 값을 유지하고 있다.

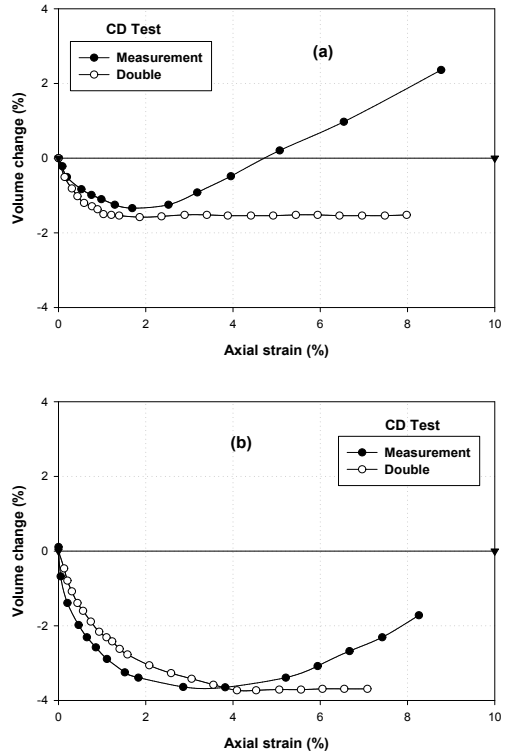


Fig. 10. Comparison of measured and predicted volume change behaviour for decomposed granite soil ((a) $\sigma_3 = 1.0$, (b) = 3.0 kg/cm^2).

4. 결론

1) 비배수 거동예측에 있어서 예측치는 실험결과인 실측치와 거의 일치하고 있음을 보여주고 있으나 복합 항복면의 초기 응력상태의 기울기가 단일 항복면 보다 더 크게 나타난 반면 파괴 때의 축차 응력값은 단일 항복면이 크게 나타났다. 또한 두 모델의 예측치는 최대축차 응력값 이후 일정하지만 실측치는 일 연화과정을 보이고 있다.

- 2) 비배수 거동예측에 있어서 간극수압에 대한 거동은 두 모델의 최고 간극수압 값이 구속압의 약 60 %정도 발현을 하고 있어 실측치보다는 약 10 %정도 차이를 보이고 있다. 두 모델간의 비교에서 단일 항복면이 초기 간극수압이 축변형을 약 2~3 %안에서 최고치를 보이는 반면 복합 항복면은 초기 기울기가 실측치와 가깝지만 축변형을 약 4~6 %에서 최고치를 나타낸다. 또한 간극수압의 최고치 이후 실측치와 복합 항복면의 예측치는 일정하나 단일 항복면의 예측치는 감소하고 있음을 알 수 있다.
- 3) 배수 거동예측에 있어서 두 모델의 예측치와 실험치 간의 거의 일치한 관계를 보이고 있으나 두 모델을 비교하면은 복합 항복면이 초기 응력상태의 기울기가 더 급하지만 최대 축차응력 값은 적게 나타났다. 파괴후의 일연화과정에 있어서는 실측치와 단일 항복면의 예측치는 일정하지만 복합 항복면은 축차응력 값이 감소하고 있다.
- 4) 배수 거동예측에 있어서 체적변형율의 실측치는 최대 체적변화 이후에 체적팽창현상이 일어났으나 두 모델의 예측치는 거의 발생하지 않았지만 체적 변형율의 초기경사는 구속압이 커질수록 작아졌으며 단일 항복면의 예측치가 복합 항복면의 예측치보다 체적변화가 적게 나타나고 있음을 알 수 있다.

감사의 글

「이 논문은 2010학년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음」

참 고 문 헌

- 1) 이광동 : 탄소성모델의 의한 점성토지반의 수치해석", 석사학위논문, 전남대학교 대학원. (1994)
- 2) Lade, P. V. : Model and Parameters for the Elastic Behaviour of Soils", Numerical Methods in Geomechanics, Rotterdam, pp. 359~364, (1983)
- 3) Lade, P. V. and Duncan, James M. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 102, GT1, 51, (1976)
- 4) Lade, P. V., and Kim, M. K. : Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials, III, Comparisons with Experimental Data." *Computers and Geotechnics*, 6(1), pp. 13~29, (1988)
- 5) Lade, P. V., *J. Solids and Structs*, 13, 311 (1977)
- 6) Lade, P. v. *J. Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 104, GT6, 721 (1978)

(접수:2011.12.07. 수정:2012.01.18. 게재 확정:2012.02.24)