

# 모래의 응력경로에 따른 Lade의 단일항복면 구성모델의 응력-변형거동 특성

## Characteristics of Stress-Strain Behavior for Lade's Single Work-Hardening Constitutive Model with Stress Path of Sands

김 찬 기 <sup>1</sup>	Kim, Chan-Kee	이 중 천 <sup>2*</sup>	Lee, Jong-Cheon
조 율 범 <sup>3</sup>	Cho, Won-Beom	박 옥 근 <sup>4</sup>	Park, Wook-Geun
김 환 옥 <sup>5</sup>	Kim, Hwan-Wook		

### ABSTRACT

In order to review the utility of Lade's single hardening constitutive model, a series of isotropic compression-expansion tests and consolidated drained triaxial tests including as CTC, TC, RTC, and OSP were performed by Baekma river sand with various of stress path. Parameters required in model were determined using these tests. The accuracy of analysis was reviewed by back analysis of test results used to determine the 11 parameters of soil property through the test of each stress path. Also, for verifying the accuracy of prediction for the stress-strain behavior using failure criterion related 9 parameters with correlational equation and constant and yield criterion related parameters  $h$ ,  $\alpha$  and  $\eta_1$ , when stress path is different with each other, it has been obtained in the review result of stress path dependent characteristics of the constitutional model through the analyzing results of CTC, TC, RTC, OSP, and fine silica sand tests.

### 요 지

본 연구는 이 구성모델의 실용화를 위한 검토로 응력경로에 따라 어떤 특성이 있는가를 밝히기 위하여 백마강 모래를 이용하여 등방압축팽창시험과 응력경로를 달리한 일련의 배수삼축시험(CTC, Conventional triaxial compression test), TC(Triaxial compression test), RTC(Reduced triaxial compression test), OSP(Optional stress path))을 각각 수행하여 각각의 토질매개변수를 결정한다. 그리고 각각의 응력경로에 대한 시험으로부터 결정된 토질매개변수 11개를 이용하여 토질매개변수를 결정시 이용된 시험 결과를 역해석한다. 그리고 항복함수에 관련된 토질매개변수  $h$ 와  $\alpha$ 를 파괴기준에 관련된 토질매개변수  $\eta_1$ 의 상관식과 상수로 결정한 9개의 토질매개변수를 이용하여 응력경로가 다른 경우의 응력-변형률 거동에 대한 예측의 정도를 밝히기 위하여 CTC시험, TC시험, RTC시험, OSP시험 및 Fine Silica Sand시험의 결과를 각각 해석하여 단일항복면 구성모델의 실용성을 검토한다.

**Keywords :** Single work-hardening constitutive model, Soil parameter, Stress path, CD test

## 1. 서 론

1950년대 후반에 Drucker 등(1957)에 의해 제안된 흙의 탄·소성모델을 시작으로 Kondner(1963)의 탄성쌍곡선

구성모델, Roscoe(1958)를 중심으로 하는 Cambridge학과의 Cam-clay모델 등 지금까지 수많은 구성모델이 제안되었다. 그러나 많은 구성모델들을 이용하여 기초지반의 거동을 해석할 때 대부분이 통상의 삼축압축상태에서 얻은

1 정회원, 대진대학교 건설시스템공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Daejin Univ. )  
2\* 정회원, 동강대학교 토목조경학부 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg. & Landscape Architecture, Dongkang College, E-mail: jcleee@dkc.ac.kr)  
3 비회원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 박사후연구원 (Non-Member, Post-Doc., Geotechnical Engrg. Research Division, KICT.)  
4 비회원, 대진대학교 토목환경공학과 박사과정 (Non-Member, Graduate student, Dept. of Civil Engrg., Daejin Univ.)  
5 비회원, 대진대학교 토목환경공학과 석사과정 (Non-Member, Graduate student, Dept. of Civil Engrg., Daejin Univ.)

자료만을 이용하여 기초지반의 거동을 해석하고 있다. 하지만 기초지반의 응력상태는 삼축압축상태인 지역과 삼축인장상태인 지역이 공존하고 있으며 삼축압축상태에서 삼축인장상태로 변화해 가는 많은 응력경로가 있다. 또한 Yudhbir 등(1975), Varadarajan 등(1980), Christian(1977)의 연구에 따라 흙에 관한 응력-변형률 관계는 흙의 종류, 밀도, 응력수준 및 응력 경로 등 많은 요인에 의존한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 이러한 많은 응력경로가 공존하는 지반을 해석하기 위해서는 구성모델이 삼축압축상태만으로 모든 응력경로를 설명할 수 있는지 아니면 지반조건에 맞는 시험자료만으로 그 기초지반의 거동을 해석하는 가는 분명하게 밝혀져야 한다.

본 연구는 현재 개발된 구성모델들 가운데 탄소성구성모델로서 비선형의 응력-변형 거동을 광범위하게 해석할 수 있고 일경화 및 연화까지도 설명이 가능하며 입상토 뿐만 아니라 점토까지 해석이 가능하다고 알려져 있는 Lade(1990)의 단일항복면 구성모델을 선정하였다. 이 구성모델의 예측능력은 우수하지만 토질매개변수가 12개로 너무 많아 토질매개변수 결정에서 인위적 오차가 우려되고 서로의 상관성에 의한 오차가 발생할 수 있다고 정진섭 등(1992, 1994)은 보고하고 있다. 그리고 김찬기 등(2011)은 항복함수에 관련된 토질매개변수를 파괴기준에 관련된 토질매개변수의 상관식과 상수로 제안하여 이 구성모델의 실용성을 강조하였다.

본 연구는 이 구성모델의 실용화를 위한 검토로 응력경로에 따라 어떤 특성이 있는가를 밝히기 위하여 백마강 모래를 이용하여 등방압축팽창시험과 응력경로를 달리한 일련의 배수삼축시험(CTC, Conventional triaxial compression test), TC(Triaxial compression test), RTC(Reduced triaxial compression test), OSP(Optional stress path))을 각각 수행하여 각각의 토질매개변수를 결정한다. 그리고 각각의 응력경로에 대한 시험으로부터 결정된 토질매개변수 11개를 이용하여 토질매개변수를 결정시 이용된 시험 결과를 역해석한다. 그리고 항복함수에 관련된 토질매개변수  $h$ 와  $\alpha$ 를 파괴기준에 관련된 토질매개변수의 상관식과 상수로 결정한 9개의 토질매개변수를 이용하여 응력경로가 다른 경우의 응력-변형률 거동에 대한 예측의 정도를 밝히기 위하여 CTC시험, TC시험, RTC시험, OSP시험 및 Lade 등(1988)의 연구에서 사용된 Fine Silica Sand 실내 시험 결과를 각각 해석하여 단일항복면 구성모델의 실용성을 검토한다.

## 2. 단일항복면 구성모델

Lade 단일항복면구성모델의 파괴기준을 응력 불변량으로 표현하면 다음과 같다.

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

여기서  $\eta_1$ 과  $m$ 은 토질매개변수이고  $P_a$ 는 대기압이며  $I_1$ 과  $I_3$ 는 응력불변량으로 식 (2), 식 (3)과 같다.

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

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

소성변형률 증분은 유동법칙으로부터 식 (4)와 같이 계산된다.

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda_p \frac{\delta g_p}{\delta \sigma_{ij}} \quad (4)$$

여기서  $g_p$ 는 소성포텐셜함수로서 식 (5)와 같이 3개의 응력불변량항으로 표현되고,  $d\lambda_p$ 는 비례상수이다. 그리고  $I_2$ 는 응력불변량으로 식 (6)과 같이 표현된다.

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

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

항복면은 소성일로부터 유도되는 등방항복함수는 식 (7)과 같이 표현된다.

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

여기서  $f_p'$ 은 식 (8)과 같이 표현된다.

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

여기서  $h$ 는 토질매개변수이고  $q$ 는 식 (9)와 같이 표현되며 정수압축을 따라 “0”에서부터 변한다.

$$q = \ln (W_p/D \cdot P_a)^{1/\rho} / [(\psi_1 \cdot I_1^3/I_3 - I_1^2/I_2) (I_1/P_a)^h] \quad (9)$$

소성일이 증가함에 따라 현재의 응력이 파괴면에 도달 할 때까지 등방항복면은 팽창한다. 항복함수는 경화인 경우는 식 (10)와 같이 표현되고 연화인 경우는 식 (11)과 같이 표현된다.

$$f''_p = (1/D)^{1/\rho} \cdot (W_p/P_a)^{1/\rho} \text{ (for Hardening)} \quad (10)$$

$$f''_p = A \cdot e^{-B \cdot (W_p/P_a)} \text{ (for Softening)} \quad (11)$$

여기서  $\rho$ 는  $p/h$ 이고  $p$ 와  $h$ 는 토질매개변수이며  $\psi_1$ 과  $W_p$ 는 식 (12), 식 (13)로 표현된다. 그리고  $D$ 는 식 (14)와 같이 표현되며  $C$ 는 토질매개변수이다.

$$\psi_1 = 0.00155 \cdot m^{-1.27} \quad (12)$$

$$W_p = D \cdot P_a \cdot f_p^{(p/h)} \quad (13)$$

$$D = \frac{C}{(27\psi_1 + 3)\rho} \quad (14)$$

### 3. 실험 및 토질매개변수 결정

#### 3.1 시료조제

본 연구는 모래의 응력 경로 의존 특성을 밝히기 위하여 백마강 유역에서 채취한 모래를 자연 건조시킨 후 체가름을 실시하여 균질한 입경을 갖도록하기 위해 #40~60번체 시료 35%, #60~80번체 시료 60%, #80~100번체 시료 5%를 균일하게 혼합하여 시험에 이용할 수 있도록 하였다.

그리고 이 시료를 KS F 2345에 따라 최대간극비( $e_{max}$ ), 최소간극비( $e_{min}$ )를 측정하여 상대밀도( $D_r$ )를 80%가 되도록 시료의 초기간극비( $e_{spec}$ )값을 결정하여 시험에 이용할 수 있도록 시료를 준비하였으며 시료의 크기는 직경 50mm, 높이 100mm로 하였으며 물리적 특성 및 입도분포는 표 1 및 그림 1과 같다.

#### 3.2 실험방법

준비된 시료를 삼축시험장치의 상부 캡과 저판에 마찰

표 1. 백마강 모래의 물리적 특성

$G_s$	$e_{max}$	$e_{min}$	$e_{spec}$	$D_r$
2,664	1,116	0,884	0,9404	0,80

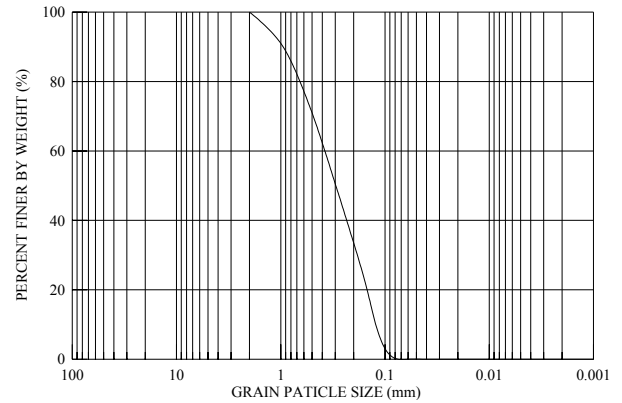


그림 1. 백마강 모래의 입도곡선

을 줄이기 위하여 윤활제를 바른 후에 고무막을 저판둘레에 펴서 두르고 오-링으로 감는다. 진공원통성형상자를 저판 위에 올린 뒤 고무막을 상자의 내부 둘레에 접촉시킨 뒤 진공을 가한다. 성형상자 내부에 들어갈 수 있는 체를 설치하고 일정량의 모래를 체에다 부어 밀도를 맞춘다. 상부 캡은 시료중앙에 오도록 하고 고무막은 상부 캡을 싸서 감아올린 뒤 오-링을 사용하여 상부 캡을 봉한다. 상부 배수관을 상부 캡에 연결하고 진공을 가한 뒤 성형상자를 제거한다. 삼축압축실을 조립하여 물을 채우고 시료속의 진공을 빼 내면서 동시에 구속압력을 가한다. 이산화탄소를 하부 배수관을 통하여 유입시켜 시료내의 공기를 상부 캡과 배수관을 통하여 밀어낸 뒤 이산화탄소로 공극을 대치되도록 한다. 이후 증류수로 시료를 포화시키는데 포화도는 시험을 시작할 때 간극수압계수,  $B$ 를 측정하여 검토하였으며 대부분의 경우  $B$ 값은 0.97-1.00을 나타내었다.

이와 같이 준비된 시료를 이용하여 등방압밀팽창시험과 응력경로를 달리한 4가지의 배수삼축압축시험을 실시한다. 첫째,  $\sigma_3$ 를 일정하게 유지시킨 상태에서  $\sigma_1$ 을 증가하여 전단하는 CTC시험, 둘째, 평균압력  $P (= 1/3(\sigma_1 + 2\sigma_3))$ 가 일정하도록  $\sigma_1$ 을 증가시키고 동시에  $\sigma_3$ 를 감소하여 전단하는 TC시험, 셋째,  $\sigma_1$ 을 일정하게 유지시키고  $\sigma_3$ 를 감소하여 전단하는 RTC시험 넷째,  $\sigma_1$ 을 증가시키며 동시에 구속압력을  $\Delta\sigma_1$ 만큼 감소시켜 전단한 OSP를 실시하였다. 그리고 이들의 응력경로를 삼축면상에서 살펴보면 그림 3과 같으며 CTC시험, TC시험과 OSP시험은 구속압력( $\sigma_3$ )을 100, 200, 400kPa상태에서 각각 시험을 시행하였으며,



그림 2. 삼축압축시험장치 조립과정

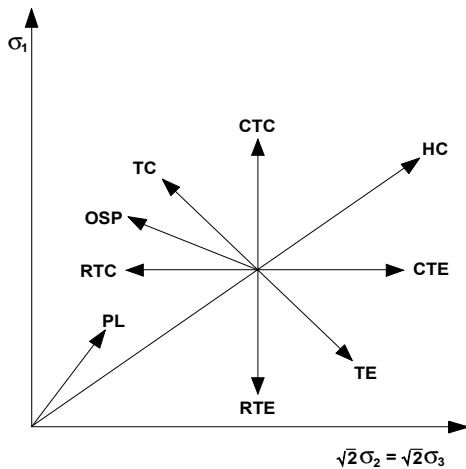


그림 3. 삼축면상의 응력경로

RTC시험은 구속압력( $\sigma_3$ )을 200, 300, 400kPa 상태에서 각각 시험을 하였다. 모든 시험은 응력제어방법으로 시험하였으며 전단속도는 0.1kPa/min으로 하였다.

### 3.3 실험결과

등방압밀팽창시험은 일반삼축압축시험 시 압밀과정과 동일하게 셀 내의 구속압력을 일정하게 증가 시키며 시료가 등방으로 압축될 때의 체적변형률과 이후 구속압력을 일정하게 감소시켜 시료가 팽창될 때의 체적변형률을 측정한다. 그림 4는 등방압축-팽창시험 결과를 나타낸 것이며 단일항복면구성모델에서 경화함수에 관련되는 토질매개변수(c, P)를 결정하기 위한 시험이다.

그림 5는 각각의 응력경로에 따른 배수삼축압축시험결과를 축변형률에 따른 주응력비와 체적변형률의 관계로 나타내었다. 그림에 나타난바와 같이 바와 같이 인장시험인 RTC시험의 경우 가장 작은 축변형률에서 파괴가 일어

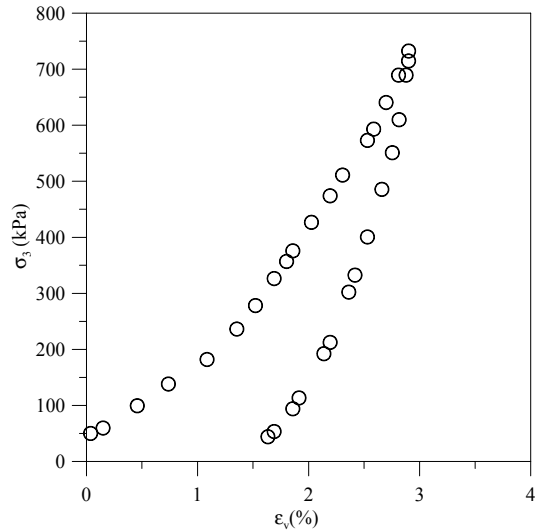
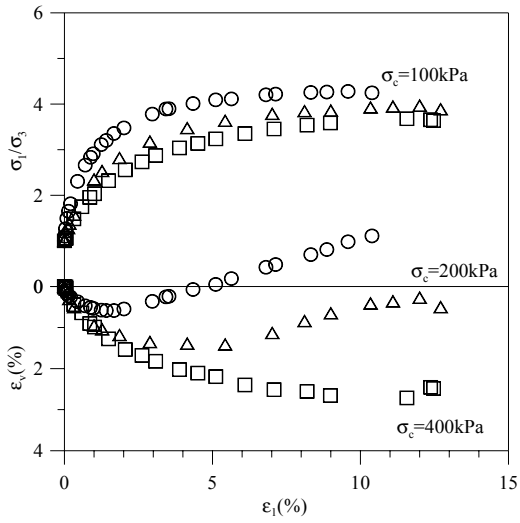


그림 4. 백마강모래의 등방압축팽창시험 결과

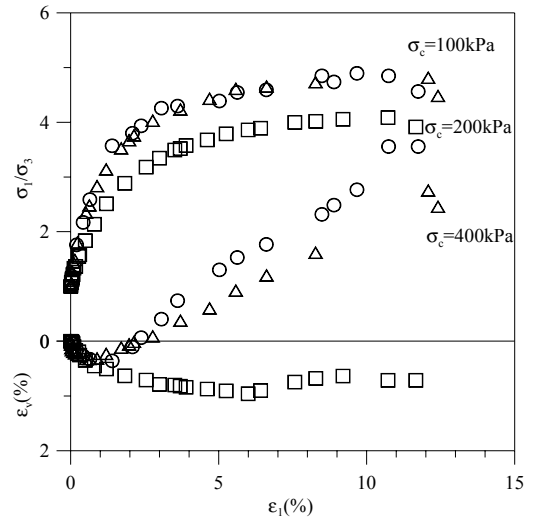
나고 있으며, OSP시험, TC시험, CTC시험 순으로 파괴에 이르는 것을 확인할 수 있다. 그리고 주응력비는 RTC시험인 경우가 가장 크게 나타나고 OSP시험, TC시험, CTC시험 순으로 나타나며 체적변형률 역시 응력경로에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 또한 그림 6은 이들의 응력경로를 나타낸 그림으로서 일련의 시험 결과를 표준화하여 p - q면에 나타낸 것이다.

### 3.4 토질매개변수 결정

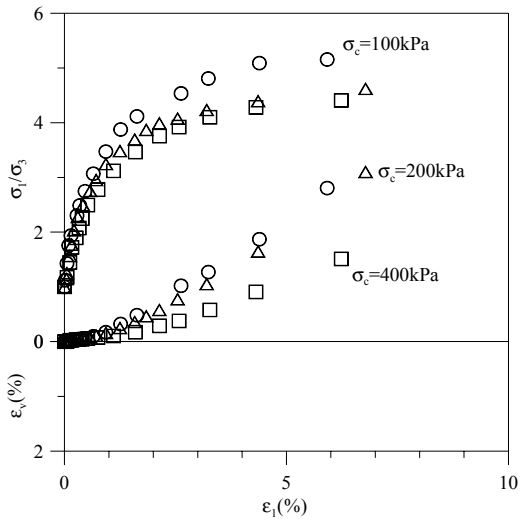
Lade의 단일항복면 구성모델의 토질매개변수는 탄성거동성분과 관련된 토질매개변수( $k_{ur}$ , n,  $\nu$ ), 경화함수에 관련된 토질매개변수(a, c, P), 파괴규준에 관련된 토질매개변수( $\eta_1$ , m), 소성포텐셜에 관련된 토질매개변수( $\psi_2$ ,  $\mu$ ) 및 항복함수에 관련된 토질매개변수(h,  $\alpha$ ) 등 12개지만 사질토의 경우 a=0이므로 11개에 대한 검토를 하게 된다. 하지만 정진섭 등(1992)은 시험 결과로부터 단일항복면 구성모델에 필요한 토질매개변수를 결정하는 작업은 매우 복잡한 과정을 거쳐야 하며, 또한 수작업으로 결정할 때는 많은 시간이 소요되고 다소 오차가 유발될 우려가 있어 신속하고 보다 더 신뢰할 수 있는 토질매개변수를 결정하기 위해 시험자료를 사용하여 회귀 분석(regression analysis)으로 각각의 응력경로에 대한 토질매개변수를 결정하는 프로그램을 개발하였다. 토질매개변수결정 프로그램의 흐름도는 그림 7과 같으며 이 프로그램에 의하여 결정된 각각의 응력경로에 대한 토질매개변수의 값들은 표 2에 나타난 바와 같다.



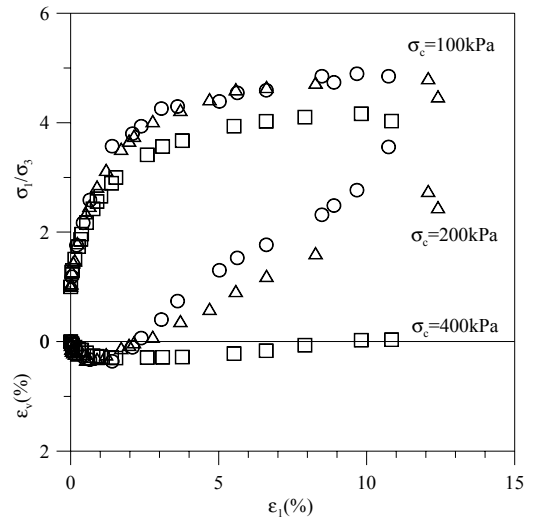
(a) CTC 시험



(b) TC 시험



(c) RTC 시험



(d) OSP 시험

그림 5. 응력경로에 따른 배수삼축압축시험 결과

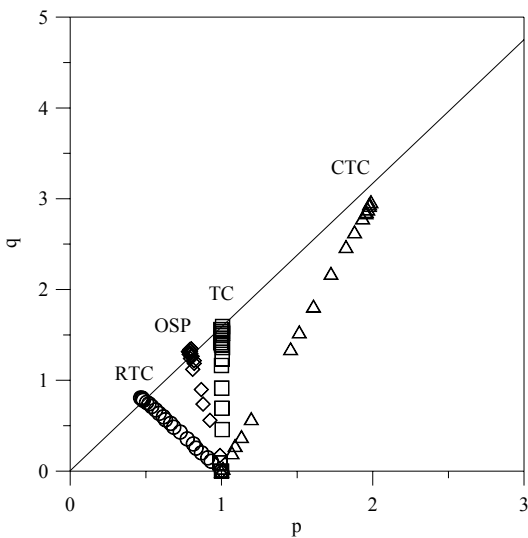


그림 6. 백마강모래의 응력경로

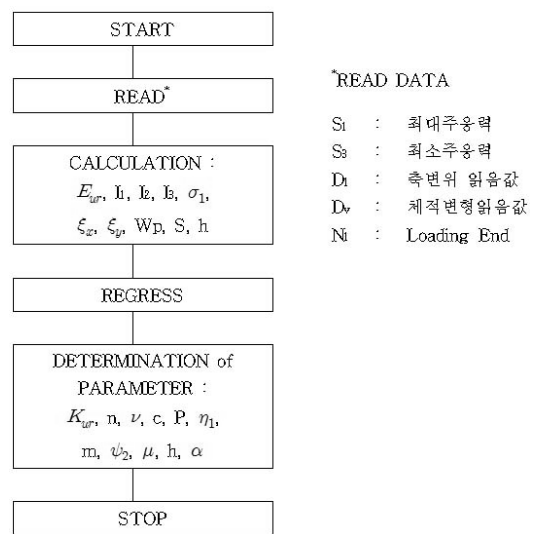
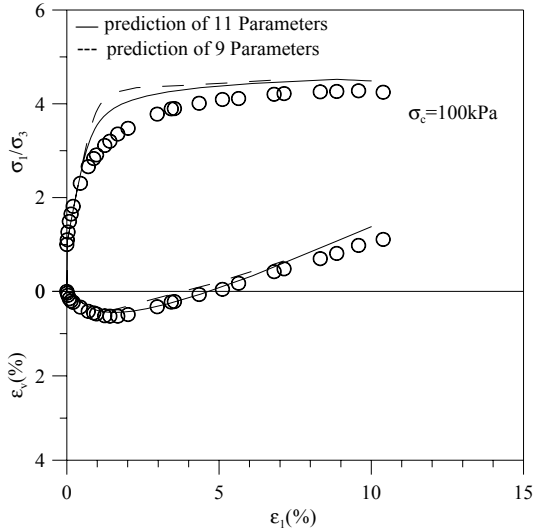


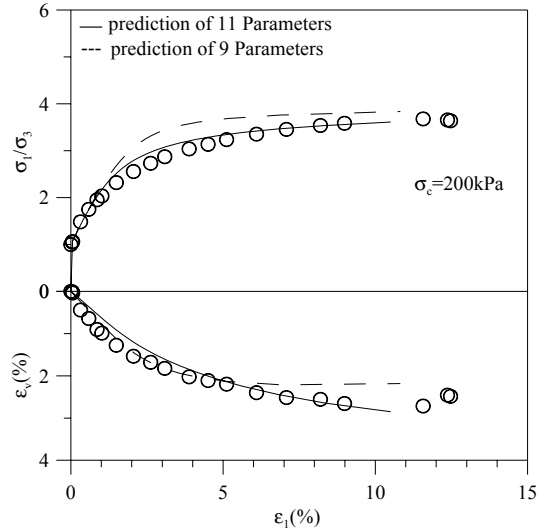
그림 7. 토질매개변수결정 프로그램의 순서도

표 2. 응력경로에 따른 백마강모래의 토질매개변수

Stress path	Parameter										
	$K_{ur}$	$n$	$\nu$	$\eta_1$	$m$	$\psi_2$	$\mu$	$c$	$P$	$h$	$\alpha$
CTC	360	0.33	0.25	49	0.19	-2.70	1.76	0.0000044	2.65	0.64	0.44
TC	400	0.32	0.25	45	0.18	-3.06	2.00	0.0000044	2.65	0.52	0.62
RTC	460	0.33	0.25	40	0.15	-3.42	2.02	0.0000044	2.65	0.51	1.10



(a)  $\sigma_c = 100kPa$



(b)  $\sigma_c = 400kPa$

그림 8. 배수삼축압축시험과 수치해석결과 비교(CTC시험)

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. 또한 김찬기 등(2011)은 항복함수에 관련된 토질매개변수와 파괴기준에 관련된 토질매개변수의 상관성을 통하여  $h = 0.0122\eta_1$ 를 제안하였고, 사질토의 경우 항복함수에 관련된 토질매개변수  $\alpha$ 는 0.1의 상수화를 제안하였다.

#### 4. 구성모델의 예측 능력 비교

Lade의 단일항복면 구성모델을 이용하여 지반 거동을 예측하기 위해서는 11개의 토질매개변수를 필요로 한다. 이 모든 변수를 구하는 과정에서 인위적인 오차가 발생할 수 있어 정진섭 등(1992)은 토질매개변수의 특성과 서로의 상관성에 대하여 연구하였고, 정진섭 등(1994)은 이 구성모델을 확률론에 의해 변형률예측정도를 평가하여 토질매개변수를 줄일 수 있음을 보고하였다. 그러므로 본 연구

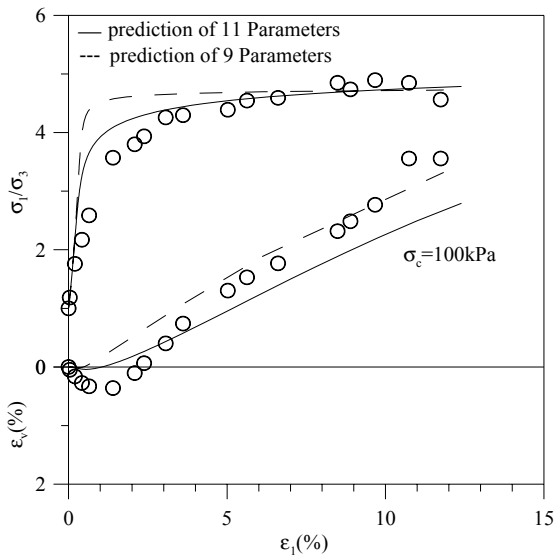
는 토질매개변수  $h$ 와  $\alpha$ 를  $\eta_1$ 에 관련된 식을 수치해석을 실시하고 시험결과와 비교하였다. 또한 Lade 등(1988)에 의해 단일항복면 구성모델의 제안을 위하여 연구되었던 Fine Silica Sand와의 비교를 통하여 9개의 토질매개변수를 이용한 예측의 정도를 밝히고자 한다. 그림 8은 백마강 모래의 응력경로에 따른 CTC 시험결과와 시험결과로부터 결정한 토질매개변수를 이용하여 구속압력 100kPa와 400kPa에 대하여 수치해석한 결과를 나타낸 그림이다. 그림 8(a)는 구속압력 100kPa에 대한 시험결과로 실선은 시험으로 구한 11개의 토질매개변수를 이용하여 수치해석한 결과이며, 점선은 항복함수와 관련된 토질매개변수  $h$ 와  $\alpha$ 를  $\eta_1$ 에 관련된 식과 상수화한 9개의 토질매개변수로 수치해석한 결과이다. 그림과 같이 구속압력이 작은 100kPa에서는 축변형률 초기에 응력비를 조금 크게 예측하고 있으며, 축변형률 5% 이후는 두 경우 모두 같은 정도의 응력비를 예측하고 있다. 그리고 체적 변형률의 예측정도는 두 경우 모두 시험결과와 아주 유사하게 예측하고 있다. 또한 그림 8(b)와 같이 구속압력이 큰 400kPa에서도 구속압력이 작은 경우와 유사한 경향을 보이고 있다.

그림 9는 TC 시험결과와 시험결과로부터 결정한 토질

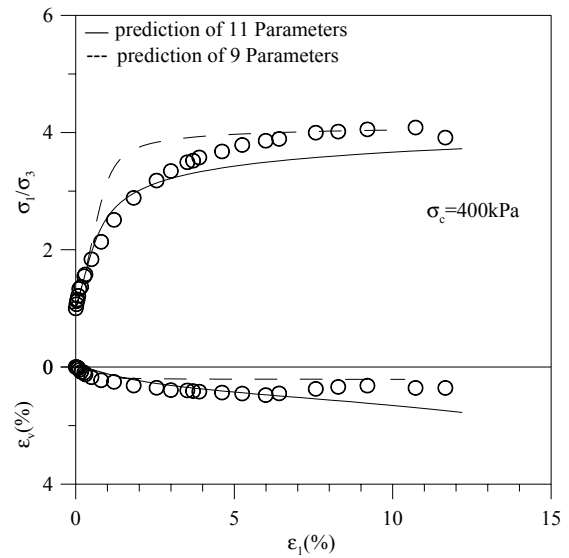
매개변수를 이용하여 구속압력 100kPa와 400kPa에 대하여 수치해석한 결과를 나타낸 그림이다. 그림에서 실선은 TC시험 결과로부터 구한 11개의 토질매개변수를 이용하여 수치해석한 결과이고 점선은 CTC와 같은 방법으로 9개의 토질매개변수를 이용하여 수치해석한 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 축변형률에 대한 응력비는 구속압력이 작은 경우의 초기부분을 제외하고는 시험치와 해석치가 유사한 경향을 보이고 있다. 그리고 축변형률에 대한 체적변형률은 11개의 토질매개변수를 이용하여 예측한 결과보다 9개의 토질매개변수를 이용하였을 경우 시험치

에 더욱 가까운 양상이 나타났다.

그림 10은 RTC시험결과와 CTC시험, TC시험과 같은 방법으로 나타낸 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 축변형률에 대한 축차응력 및 체적변형률의 시험치와 해석치가 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 그러나 항복함수에 관련된 함수를 파괴규준에 관련된 함수로 관련지으므로 인하여 축 변형률 초기부분 예측의 정도가 다소 떨어지고 있음을 보여주지만 파괴에 이르는 축변형률 부근에서는 예측의 정도가 두 경우 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 그리고 이 체적변형률의 예측정도는 값의 크기는 다

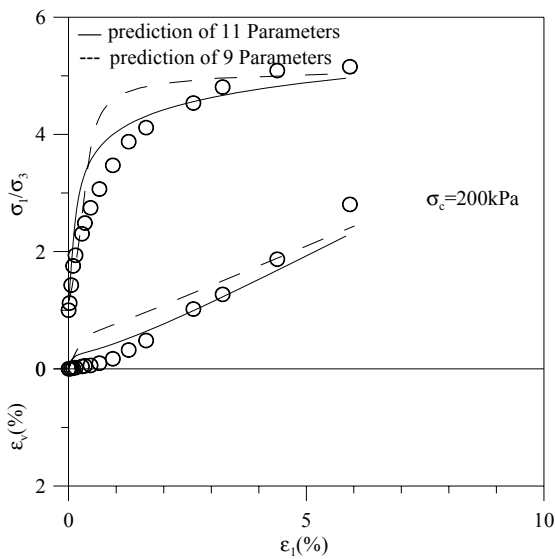


(a)  $\sigma_c = 100kPa$

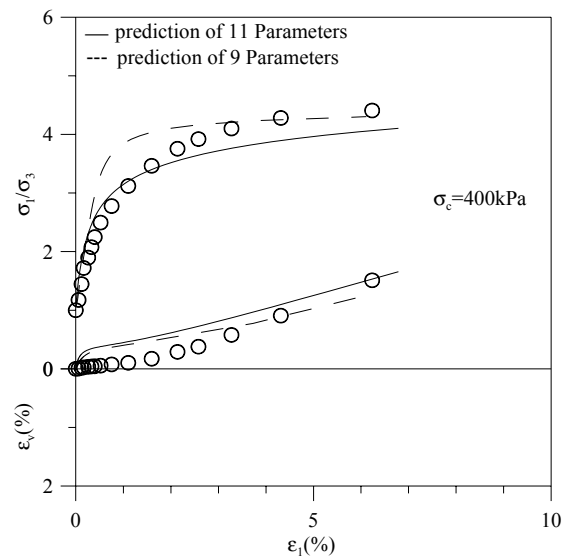


(b)  $\sigma_c = 400kPa$

그림 9. 배수삼축압축시험과 수치해석결과 비교(TC)



(a)  $\sigma_c = 200kPa$



(b)  $\sigma_c = 400kPa$

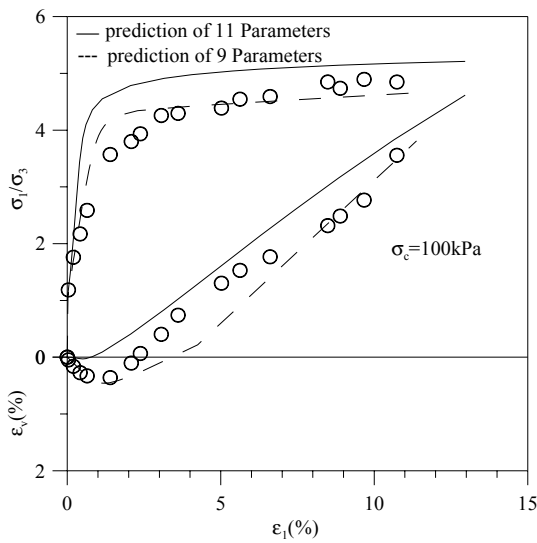
그림 10. 배수삼축압축시험과 수치해석결과 비교(RTC)

소 차이가 있으나 두 경우 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

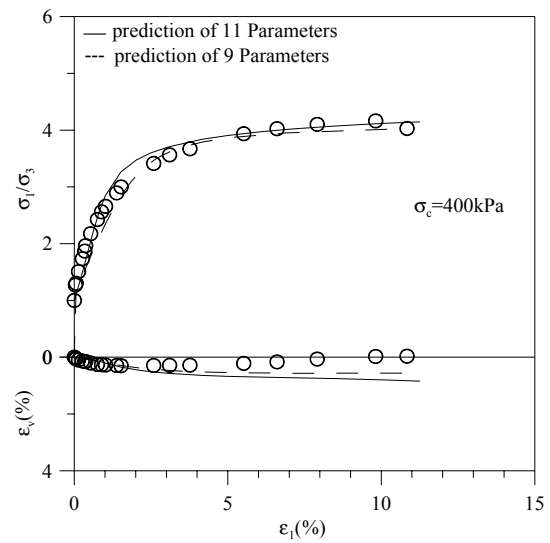
그림 11은  $\sigma_1$ 을 증가시키며 동시에 구속압력을 증가한  $\sigma_1$ 만큼 감소시켜 전단한 임의의 응력경로 상태에서의 시험결과와 CTC시험결과를 이용하여 수치해석한 결과를 나타낸 그림이다. 그림에서 실선은 CTC시험 결과로부터 구한 11개의 토질매개변수를 이용하여 수치해석한 결과이고 점선은 9개의 토질매개변수를 이용하여 수치해석한 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 CTC시험결과에서 얻은 토질매개변수를 이용하여 OSP시험결과를 예측할 때 구속압력이 작은 경우는 다소 큰 오차를 보이고 있으나 구

속압력이 큰 경우는 시험치와 실선 점선 모두 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 이상의 결과로 보아 구속압력이 작은 경우는 시험조건과 토질매개변수에 큰 영향을 받지만 구속압력이 커지면 다소 이러한 영향이 감소하는 경향을 보이고 있다.

그림 12는 Lade 등(1988)의 연구 중 Fine Silica Sand에 대한 배수삼축압축시험결과를 실내시험 결과를 통하여 얻은 11개의 토질매개변수를 이용하여 축변형률에 따른 응력비와 체적변형률의 관계를 예측한 결과와 9개의 토질매개변수를 이용하여 축변형률에 따른 응력비와 체적변형률의 관계를 예측하여 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바

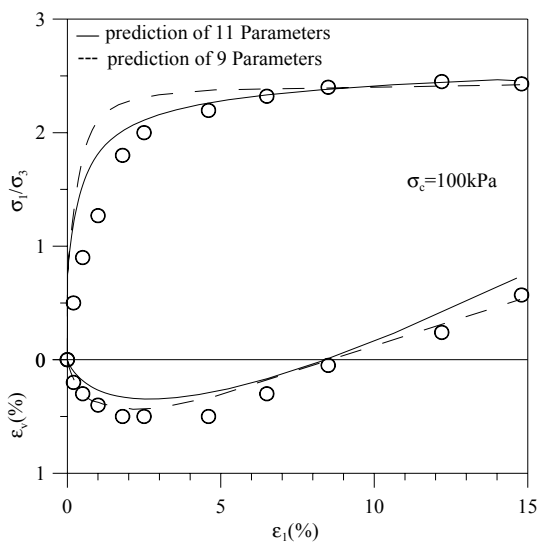


(a)  $\sigma_c = 100kPa$

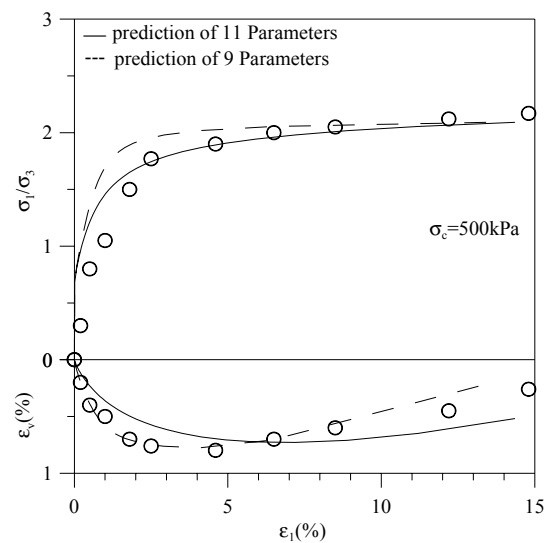


(b)  $\sigma_c = 400kPa$

그림 11. 배수삼축압축시험과 수치해석결과 비교(OSP)



(a)  $\sigma_c = 100kPa$



(b)  $\sigma_c = 500kPa$

그림 12. 배수삼축압축시험과 수치해석결과 비교(Fine Silica Sand)



와 같이 예측의 정도가 서로 매우 유사함을 알 수 있다. 이상의 결과로 보아 Lade의 단일항복면 구성모델의 항복 함수에 관련된 토질매개변수  $h$ 를 파괴기준에 관련된 토질 매개변수로 관련지어 사용할 수 있으며  $\alpha$ 는 상수화하여도 좋을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구는 Lade의 단일항복면 구성모델의 실용화를 위한 검토로 백마강 모래를 이용하여 등방압축시험과 응력 경로를 달리한 일련의 배수삼축시험을 수행하였다. 그리고 응력경로가 변화함에 따라 이 구성모델이 어떤 특성이 있는지를 밝히기 위해 같은 구속압력하에서 응력경로에 따라 응력-변형률 거동 특성을 고찰하였다. 그리고 각각의 응력경로에 대한 시험으로부터 결정된 토질매개변수를 이용하여 토질매개변수를 결정시 이용된 시험 결과를 역해석하는 방법으로 해석의 정도를 검토하였다. 또한 기존의 연구로부터 결정된 9개의 토질매개변수를 이용하여 응력 경로가 다른 경우의 응력-변형률 거동에 대한 예측의 정도를 밝히기 위하여 CTC시험, TC시험, RTC시험, OSP시험 및 Fine Silica Sand시험의 결과를 각각 해석하여 이 구성 모델의 응력경로 의존 특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 초기구속압력이 같은 경우 파괴에 이르는 축변형률은 RTC시험인 경우가 가장 작고 OSP시험, TC시험, CTC시험 순이며 CTC시험은 RTC시험 보다 2배 이상의 큰 축변형률에서 파괴가 일어난다.
- (2) 단일항복면 구성모델의 11개의 토질매개변수 및 상관식과 상수를 이용하여 구한 9개의 토질매개변수를 이용하여 응력경로에 따른 수치해석을 실시한 결과 실내시험결과에 따른 응력-변형 거동을 양호하게 예측하는 것을 확인하였다.
- (3) CTC시험에서 얻은 토질매개변수를 이용하여 OSP시험에 대한 응력비-축변형률, 체적변형률-축변형률에 대한 예측보다 9개의 토질매개변수를 이용하여 예측한 결과가 양호한 것을 확인할 수 있었다.
- (4) 제안된 상관식을 이용하여 Fine Silica Sand의 응력-변형률 거동을 예측한 결과 매우 양호하게 예측하므로 Lade의 단일항복면 구성모델의 항복함수에 관련된

토질매개변수  $h$ 를 파괴기준에 관련된 토질매개변수로 관련지어 사용할 수 있으며  $\alpha$ 는 상수화하여도 좋을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2012학년도 대전대학교 학술연구비지원에 의한 것임.

## 참고문헌

1. 정진섭, 김찬기, 이문수(1992), “탄소성구성모델의 토질매개변수 예민성”, *한국지반공학회 논문집*, 제8권, 제2호, pp.81-94.
2. 정진섭, 송용선, 김찬기(1994), “확률론에 의한 Single Surface 구성모델의 변형률 예측능력 평가”, *대한토목학회 논문집*, 제14권, 제1호, pp.163-172.
3. 김찬기, 조원범, 김중철(2011), “백마강모래의 상대밀도에 따른 Lade의 단일항복면 구성모델의 토질매개변수 특성”, *대한토목학회 논문집*, 제31권, 제1C호, pp.11-17.
4. Christian, J. T. (1977), *Numerical methods in geotechnical engineering*, McGraw hill Book Company, NewYork, pp. 65-115.
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. Kondner, R. L. (1963), “Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.89, No.Sml, pp.115-143.
7. Lade, P. V. and Kim, M. K. (1988), “Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials, III. Comparisons with Experimental Data”, *Computers and Geotechnics*, Vol.6, No.1, pp.30-47.
8. Lade, P.V. (1990), “Single Hardening Model with Application to NC Clay”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.116, No.3, pp.394-414.
9. 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.
10. Varadarajan, A. and Mishra, S. S. (1980), “Stress-path Dependent Stress Strain Volume Change Behaviour of a Granular Soil”, *International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading*, Swansea, 7-11 january, pp.109-119.
11. Yudhbir and A. Varadarajan (1975), “Stress Path Dependent Deformation Module of Clay”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.101, No.GT3, pp.315-327.

(논문접수일 2012. 4. 11, 심사완료일 2012. 5. 10)