응력경로에 따른 단일항복면구성모델의 응력-변형률 거동 특성

Stress-Strain Behavior Characteristics of Single Work Hardening Model Dependant on the Stress Path

정 진 섭* · 김 찬 기** · 박 을 축***
Jeong, Jin Seob · Kim, Chan Kee · Park, Eul Chuk

Summary

Solutions of geotechnical engineering problems require predictions of deformation and stresses during various stages of loading. Powerful numerical methods are available to make such predictions even for complicated problems. To get accurate results, realistic stress-strain relationships of soils are dependent on a number of factors such as soil type, density, stress level and stress path. Attempts are continuously being made to develope analytical models for soils incorporating all such factors.

Isotropic compression-expansion test and a series of drained conventional triaxial tests with several stress path for Baekma river sand were performed to investigate stress-strain and volume change characteristics of Lade's single work hardening model dependant on the stress path.

In order to predicted of stress-strain and volumetric strain behavior were determined the values of parameters for the mode by the computer program based on the regression analysis.

Predicted stress-strain behavior of triaxial compression tests and optional stress path tests for increasing confining pressure with parameters obtained conventional triaxial compression tests agreed with several test results but the prediction results for decreasing confining pressure reduced triaxial compression tests make a little difference with test results.

* 원광대학교 공과대학
** 대진대학교(공학부)
*** 도화종합기술공사

키워드 : 응력경로, 구성모델, 응력-변형률, Conventional Triaxial Compression, Triaxial Compression, Reduced Triaxial Compression

I. 서 론

지반공학의 복잡한 많은 문제를 해결을 하기 위하여서는 다양한 형태의 하중이 작용하는 동안에 발생하는 응력과 변형을 정도 높게 예측할 수 있어야 한다. 그리고 정도 높은 예측 결과를 얻기 위해서는 실제 지반의 거동을 적절하게 나타낼 수 있는 구성식과 강력한 수치해석 기법의 활용이 요구된다. 이와 같은 요구에 부응하여 Drucker[1]는 흙의 탄·소성모델화의 이론을 제시하였고 Roscoe[2]를 중심으로 하는 Cambridge학파는 Cam-clay모델[3,4]을 제안하였으며 지금까지 수많은 구성모델이 제안되었다. 그리고 구성모델 중 어떤 구성모델을 이용하여 대상 구조물의 응력-변형률 거동을 해석할 것인가는 매우 중요한 문제이며 선정된 구성모델이 어느 정도의 예측 능력을 갖고 있는지 어떤 문제점이 있는지를 사전에 밝히고 개선함으로써 구성 모델의 예측 능력을 증대시킬 수 있고 정도 높은 해석치를 얻을 수 있을 것이다.

그러나 많은 구성모델들을 이용하여 기초지반의 거동을 해석할 때 대부분이 통상의 삼축압축상태에서 얻은 자료만을 이용하여 기초지반의 거동을 해석하고 있다. 하지만 기초지반의 응력상태는 삼축압축상태인 지역과 삼축인장상태인 지역이 공존하고 있으며 삼축압축상태에서 삼축인장상태로 변화해 가는 많은 응력경로가 있다. 또한 흙에 관한 응력 변형률 관계는 흙의 종류, 밀도, 응력수준 및 응력 경로 등 많은 요인에 의존한다는 것은 잘 알려진 사실이다[5-7]. 이러한 많은 응력경로가 공존하는 지반을 해석하기 위해서는 구성모델이 삼축압축상태만으로 모든 응력경로를 설명할 수 있는지 아니면 지반조건에 맞는 시험자료만으로 그 기초지반의 거동을 해석해야 하는가를 분명하게 밝혀져야 한다.

본 연구는 현재 개발된 구성모델들 가운데 탄·소성구성모델로서 비선형의 응력-변형 거동을 광범위하게 해석할 수 있고 일경화 및 연화까지도 설명이 가능하며 입상토 뿐만 아니라 점토까지 해석이 가능하다고 알려져 있는 Lade의 단일항복면 구성모델[8-10]을 선정하였고 이 구성모델의 실용화를 위한 검토로 응력경로에 따라 어떤 특성이 있는가를 밝히기 위하여 백마강 모래를 이용하여 등방압축팽창시험과 응력경로를 달리한 일련의 배수삼축압축시험(CTC(Conventional triaxial compression test, TC(Triaxial compression test), RTC(Reduced triaxial compression test), OSP(Optional stress path test))을 수행하고 이를 이용하여 각각의 응력경로에 대한 토질매개변수를 결정하였으며 같은 구속압력하에서 응력경로에 따라 응력-변형률 관계의 변화 특성을 고찰하였다. 그리고 각각의 응력경로에 대한 시험으로부터 결정된 토질매개변수를 이용하여 토질매개변수를 결정시 이용된 시험결과를 역해석하는 방법으로 예측의 정도를 검토하였다. 또한 통상배수삼축압축시험인 CTC시험으로부터 결정한 토질매개변수를 이용하여 응력경로가 다른 경우의 응력-변형률 거동에 대한 예측의 정도를 밝히기 위하여 TC시험과 RTC시험 및 OSP시험의 결과를 각각 예측하여 이 구성모델의 응력경로 의존 특성을 고찰한다.

II. Lade의 단일항복면구성모델[8-11]

파괴규준을 응력 불변량으로 표현하면 다음과 같다.

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

여기서 η_1과 m은 토질매개변수이고, I_1, I_3는 응력 불변량으로 식(2), (3)과 같다.

$$I_1=\sigma_x+\sigma_y+\sigma \quad \cdots\cdots (2)$$

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

소성 변형률증분은 유동칙으로부터 다음과 같이 계산된다.

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

$$g_p=\left(\Psi_1\cdot\frac{I_1^3}{I_3}-\frac{I_1^2}{I_2}+\Psi_2\right)\cdot\left(\frac{I_1}{P_a}\right)^{\lambda} \cdots (5)$$

여기서 g_p는 소성 포텐셜함수이고 $d\lambda_p$는 비례상수이며 I_2는 식(6)과 같다.

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

항복함수는 경화인 경우와 연화인 경우에 대하여 다음과 같이 각각 나타낸다.

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

$$f_p'=\left(\Psi_1\cdot\frac{I_1^3}{I_3}-\frac{I_1^2}{I_2}\right)\cdot\left(\frac{I_1}{P_a}\right)^{h}\cdot e^{q} \cdots (8)$$

$$f_p''=\left(\frac{1}{D}\right)^{\frac{1}{b}}\cdot\left(\frac{W_p}{P_a}\right)^{\frac{1}{b}} \text{ 경화인 경우} \cdots (9)$$

$$f_p''=A\cdot e^{-B(W_p/P_a)} \text{ 경화인 경우} \cdots (10)$$

여기서, $\rho=p/h$이고 Ψ_1과 W_p는 식(11), (12)로 표현된다.

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

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

D는 식(13)과 같다.

$$D=\frac{C}{(27\Psi_1+3)\rho} \cdots (13)$$

Ⅲ. 시험 및 토질매개변수결정

1. 시료 조제

본 연구는 모래의 응력경로 의존특성을 밝히기 위하여 백마강 유역에서 채취한 모래를 자연 건조시킨 후 체가름을 실시하여 #40~60번체 시료 35%, #60~80번체 시료 60%, #80~100번체 시료 5%를 균일하게 혼합하여 시험에 이용할 수 있도록 하였다.

그리고 이 시료의 최대간극비(e_{max}), 최소간극비(e_{min})를 측정하여 상대밀도(D_r)를 80%가 되도록 시료의 초기간극비($e_{spc.}$)값을 결정하여 시험에 이용할 수 있도록 시료를 준비하였으며 시료의 크기는 직경 50mm, 높이 100mm로 하였으며 물리적 특성은 Table-1과 같다.

Table-1. Physical Properties of Baekma River Sand

G_1	e_{max}	e_{min}	e_{spc}	D_r
2.664	1.116	0.884	0.9404	0.80

2. 시험 내용

백마강 모래의 응력경로에 따른 응력-변형률-체적변형률의 거동특성을 밝히기 위해 C. K. Chan이 개발한 자동화 삼축시험기(Automated Triaxial Testing System)를 이용한다[12].

준비된 시료를 이용하여 등방압축팽창시험과 배수삼축시험, ① σ_3를 일정하게 유지시킨 상태에서 σ_1을 증가하여 전단하는 CTC시험 ② 평균압력 $P=1/3(\sigma_1+2\sigma_3)$가 일정하도록 σ_1을 증가시킴과 동시에 σ_3를 감소하여 전단하는 TC시험 ③ σ_1을 일정하게 유지시키고 σ_3를 감

소하여 전단하는 RTC시험 ④ σ_1을 증가하며 동시에 증가한 σ_1만큼 구속압력을 감소하여 전단하는 OSP시험(이 응력경로는 RTC와 TC사이의 응력경로로서 본 연구에서는 OSP (Optional stress path)시험이라 한다)을 각각 실시하였다. 그리고 시험 ①, ②는 초기구속압력(σ_{ic})을 100, 200, 400kPa상태에서 각각 시험을 시행하였고, 시험 ③은 구속압력을 200, 300, 400kPa상태에서 각각 시험을 하였으며 ④는 구속압력을 100, 200, 400kPa상태에서 각각 시험을 시행하였다. 그리고 이들의 응력경로를 삼축면상에서 살펴보면 Fig. 1과 같다. 또한 모든 시험은 응력제어법으로 하였으며 이 때 제어 속도는 0.1kPa/min이다. Fig. 2는 등방압축팽창시험결과를 나타낸 것이며 Fig. 3은 각각의 응력경로에 대한 삼축시험결과를 나타낸 것이다.

또한 Fig. 4는 이들의 응력경로를 나타낸 그림으로서 일련의 시험 결과를 규준화하여 p-q면에 나타낸 것이다.

Fig. 5는 응력경로에 따라 백마강 모래의 응력-변형률 거동이 어떤 특성이 있는가를 살펴보기 위해 초기구속압력이 같은 경우만을 선택하여 축변형률에 따른 주응력비와 체적변형률의 관계로 나타내었다. 그림에 나타난바

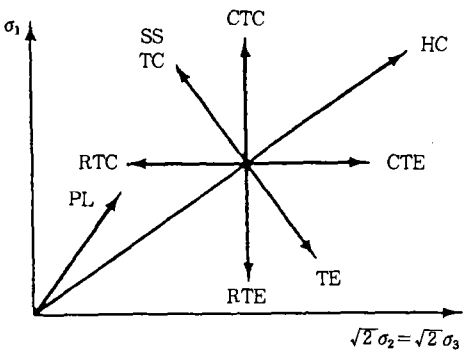


Fig. 1. Projections of stress paths on triaxial plane

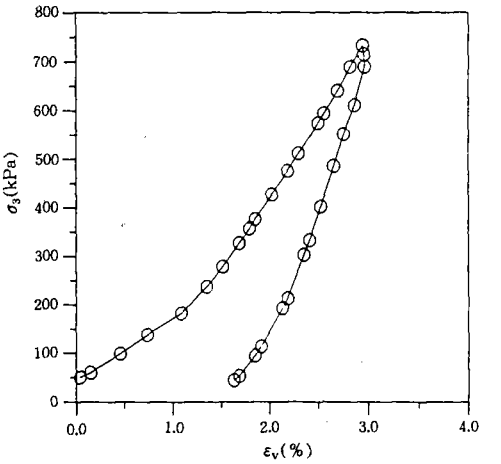
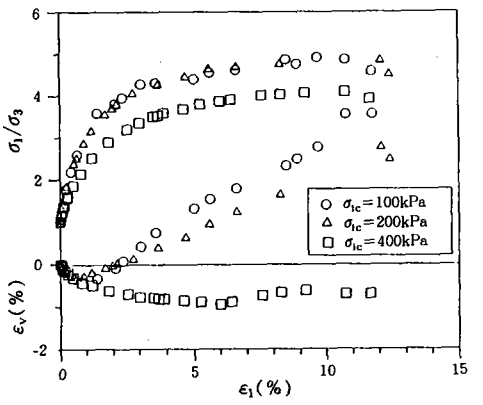
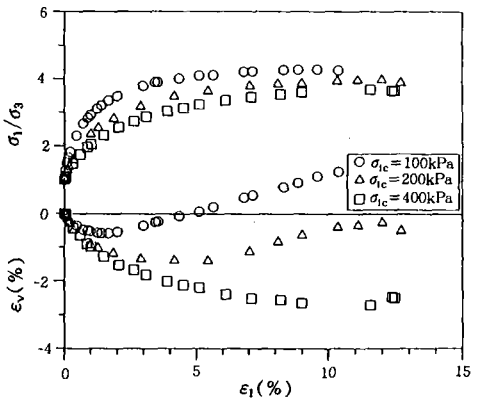


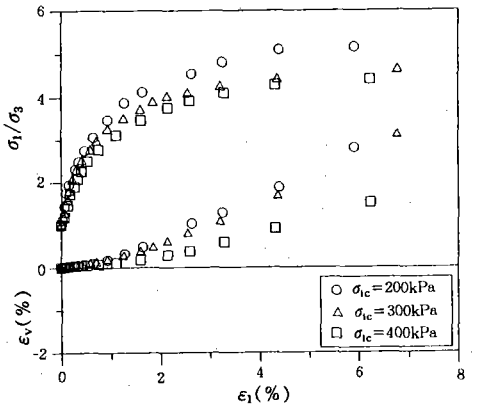
Fig. 2. Isotropic Compression Test for Baekma River Sand



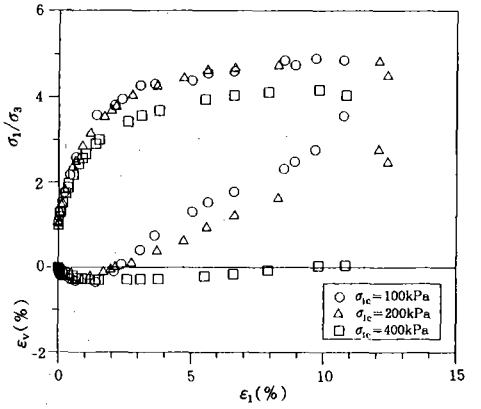
(a) CTC Tests



(b) TC Tests



(c) RTC Tests



(d)OSP Tests

Fig. 3. Stress-Strain and Volumetric strain of Baekma River Sand for Stress Paths

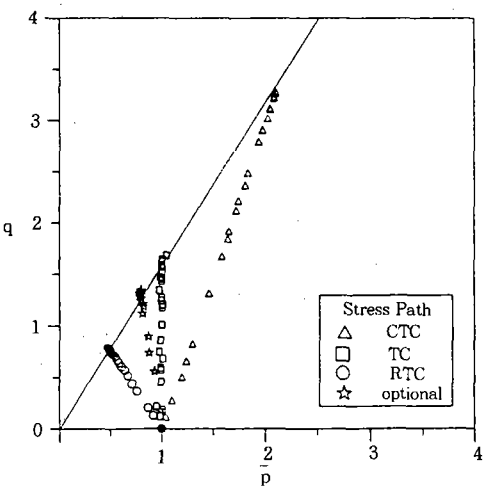


Fig. 4. Stress-Path Dependent for Baekma River Sand

와 같이 RTC시험인 경우가 가장 작은 축변형률에서 파괴되고 있으며 TC시험, CTC시험 순으로 파괴에 이른다. 그리고 주응력비는 RTC시험인 경우가 가장 크게 나타나고 TC시험, CTC시험 순으로 나타나며 체적변형률 역시 응력경로에 따라 큰 차이를 보이고 있다.

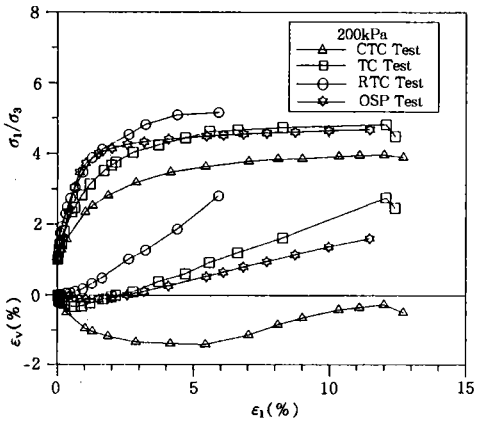
이와 같이 응력경로에 따라 흙은 전혀 다른 상태의 거동을 나타내고 있으므로 구성모델을 이용하여 기초지반의 거동을 해석할 경우는 지반의 응력상태를 충분히 고려한 시험이 요구된다.

3. 토질매개변수 결정

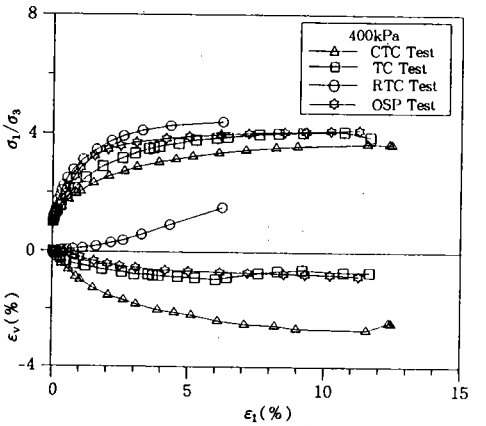
Lade의 단일항복면 구성모델의 토질매개변수를 결정하기 위해서는 등방압축팽창시험과 구속압력을 달리한 3조의 삼축시험이 요구된다. 본 연구에서는 동일 시료와 동일 시험기를 이용하고 있으므로 등방압축팽창시험결과는 같은 결과가 예상되므로 1회만을 실시하고 각각의 응력경로에 대한 삼축시험은 구속압력을 달리하여 각각 3회를 실시하였으며 이들 결과를 이용하여 각각의 응력경로에 대한 이 구성모델의 토질매개변수를 결정한다.

시험 결과로부터 단일항복면 구성모델에 필요한 토질매개변수를 결정하는 작업은 매우 복잡한 과정을 거쳐야 하며, 또한 수작업으로 결정할 때는 많은 시간이 소요되고 다소 오차가 유발될 우려가 있다[13].

따라서 본 논문에서는 신속하고 보다 더 신뢰할 수 있는 토질매개변수를 결정하기 위해 시험자료를 사용하여 회귀 분석(regression analysis)으로 각각의 응력경로에 대한 토질매개변수를 결정하는 프로그램을 개발하였다.

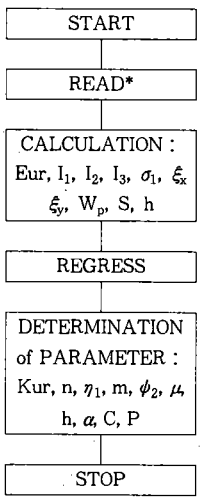


(a) Confining Pressure σ_c=200 kPa



(b) Confining Pressure σ_c=400 kPa

Fig. 5. Stress-Path Dependent for Baekma River Sand



*READ DATA
S1 : 최대주응력
S3 : 최소주응력
D1 : 축변위 읽음값
Dv : 체적변형 읽음값
N1 : Loading End

Fig. 6. Flow chart of program to determine parameters

Table-2. Table 2 Parameters of Baekma River Sand with stress path

Model Component	Parameter		Values of Parameter ETC Tests	TC Tests	RTC Tests
Elastic behavior	Modulus number	Kur	360	400	460
	Exponent	n	0.33	0.32	0.33
	Poison's ratio	ν	0.25	0.25	0.25
Failure criterion	Intercept	η_1	49	45	40
	Exponent	m	0.19	0.18	0.15
Plastic potential	Intercept	ϕ_2	-2.70	-3.06	-3.42
	Exponent	μ	1.76	2.00	2.02
Yield criterion	Exponent	h	0.64	0.52	0.51
	Constant	α	0.44	0.62	1.10
Hardening function	Intercept	C	0.0000044	0.0000044	0.0000044
	Exponent	p	2.65	2.65	2.65

본 토질매개변수결정 프로그램의 흐름도는 Fig. 6과 같으며 이 프로그램에 의하여 결정된 각각의 응력경로에 대한 토질매개변수의 값들은 Table-2에 나타낸 바와 같다.

IV. 구성모델의 예측 능력 비교

1. 서론

등방압축팽창시험과 응력경로를 달리한 배수삼축압축시험결과(CTC시험, TC시험, RTC시험, OSP시험)로부터 Lade의 단일항복면 구성모델의 토질매개변수를 결정하였으며 이 결과를 이용하여 각각의 응력경로에 대한 시험결과를 예측한다. 그리고 통상의 삼축압축시험결과(CTC시험)로 모든 응력경로를 해석할 수 있는지를 검토하기 위해 CTC시험에서 얻은 토질매개변수를 이용하여 다른 응력경로에 대한 시험 결과를 예측하여 이 구성모델의 응

력경로에 대한 의존 특성을 검토한다. 이 때 각각의 응력경로로 시험한 결과에서 얻은 각각의 토질매개변수를 이용하여 각기 시험치를 예측한 경우를 Case 1로 하고 CTC시험에서 얻은 토질매개변수를 이용하여 각각의 응력경로에 대한 시험 결과를 예측한 경우를 Case 2로 하였다.

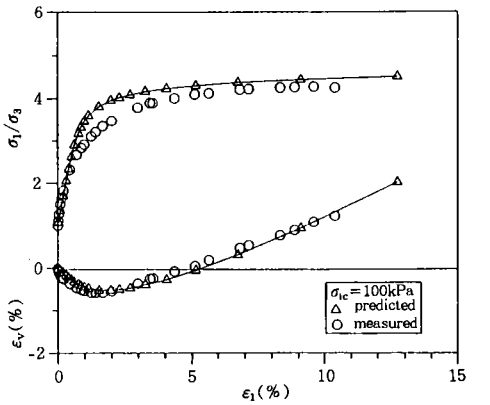
2. CTC 시험

이 시험은 토질역학에서 가장 일반적인 시험으로서 통상적으로 이 시험만으로 모든 응력경로를 해석하고 있다. 이 시험의 구속압력은 100, 200, 400kPa이며 이 시험 결과와 등방압축팽창시험결과를 이용하여 Lade의 단일항복면구성모델의 토질매개변수 구하고 이 토질매개변수를 이용하여 응력-변형률관계를 예측하여 Fig. 7에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 구속압력에 무관하게 응력-변형률 및 체적변형률의 예측이 정교함을 보이고 있다. 이는 다른 문헌에서도 이미 많은 입증이 있었으며 이 구성모델의 예측능력은 매우 우수하다 할 수 있다.

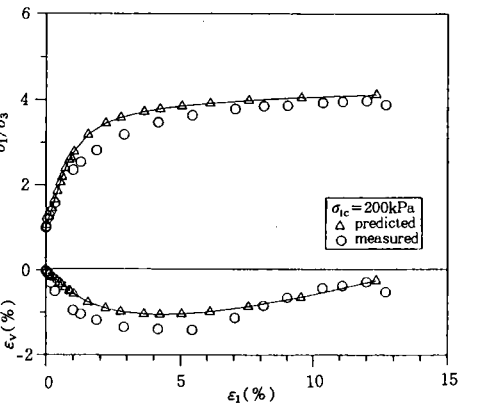
3. TC 시험

앞에서 언급한 바와 같이 CTC시험에서 얻은 토질매개변수를 이용하여 CTC시험 결과를 예측한 경우 매우 정교한 예측 결과를 보였다. 또한 본 구성모델의 제안자는 CTC시험에서 얻은 토질매개변수를 이용하여 모든 응력경로의 응력-변형률 관계를 예측할 수 있는 장점을 갖고 있음을 강조하여 왔다.

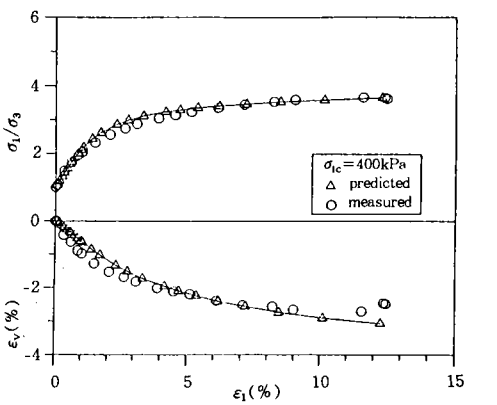
본 연구에서 이를 확인 검토하고자 TC시험을 행하여 이 결과로부터 토질매개변수를 결정하고 이들 값을 이용하여 수치해석을 수행하였으며 이 결과를 Case 1로 표현하였다. 아울러 CTC시험에서 얻은 토질매개변수를 이용하여 TC시험 결과를 예측하고 이를 Case 2



(a) Confining Pressure σ_c=100 kPa

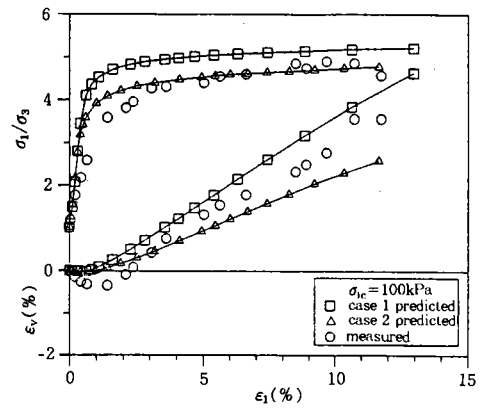


(b) Confining Pressure σ_c=200 kPa

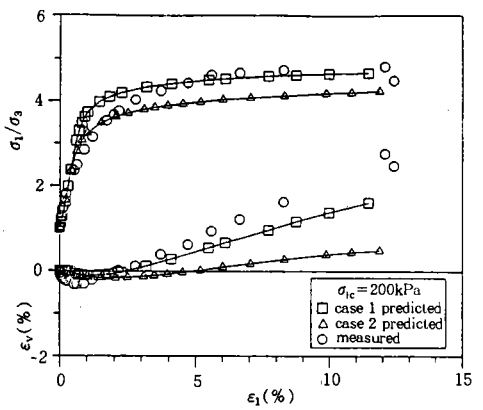


(c) Confining Pressure σ_c=400 kPa

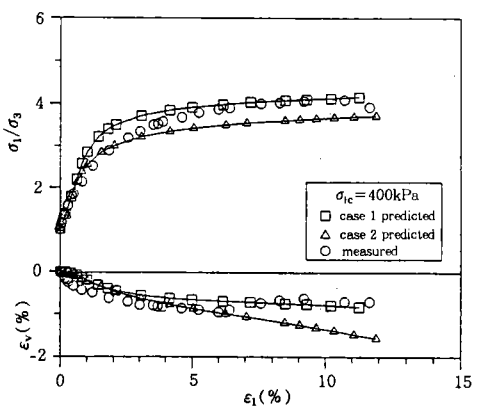
Fig. 7. Comparison of Predicted and Measured Stress-Strain and Volume Change Behavior of Baekma River Sand in CTC Tests



(a) Confining Pressure σ_{ic}=100 kPa



(b) Confining Pressure σ_{ic}=200 kPa



(c) Confining Pressure σ_{ic}=400 kPa

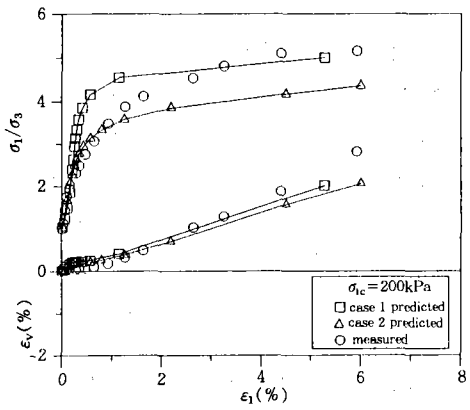
Fig. 8. Comparison of Predicted and Measured Stress-Strain and Volume Change Behavior of Baekma River Sand in TC Tests

라 표현하여 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a)은 초기 구속 압력이 100kPa인 상태에서 TC시험을 행한 결과와 이를 Case 1과 Case 2로 해석한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 ○는 시험결과이고 -□-는 Case 1이며 -△-은 Case 2이다. 그림에 나타난 바와 같이 축변형률에 대한 축차응력 및 체적변형률의 관계는 Case 1의 경우가 Case 2의 경우보다 시험치에 더욱더 근접하고 있음을 알 수 있다. 이는 CTC시험에서 얻은 토질매개변수를 이용하여 응력경로가 다른 TC시험 결과를 예측하는 것보다 TC시험에서 얻은 토질매개변수를 이용하여 TC 응력상태를 예측하는 것이 더욱더 정도 높은 예측결과를 얻을 수 있음을 보여주고 있다. Fig. 8 (b), (c)는 Fig. 8(a)과 같은 방법으로 각각 구속 압력이 200kPa인 경우와 400kPa인 경우를 나타낸 것이며 결과 또한 마찬가지임을 보여주고 있다.

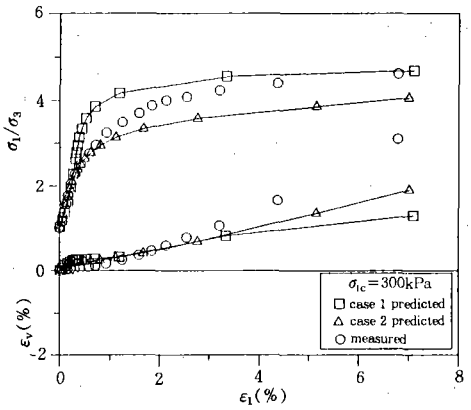
그러므로 TC시험에서 얻은 토질매개변수를 이용하여 수치해석한 결과가 CTC시험에서 얻은 토질매개변수를 이용하여 수치해석한 결과보다 시험치에 더 근접한 예측을 하고 있다. 그러나 CTC시험에서 얻은 토질매개변수를 이용하여 TC시험 결과를 예측하여도 오차의 정도가 크지 않기 때문에 시험의 난이도를 고려한다면 이 방법도 유효하다고 할 수 있다.

4. RTC 시험

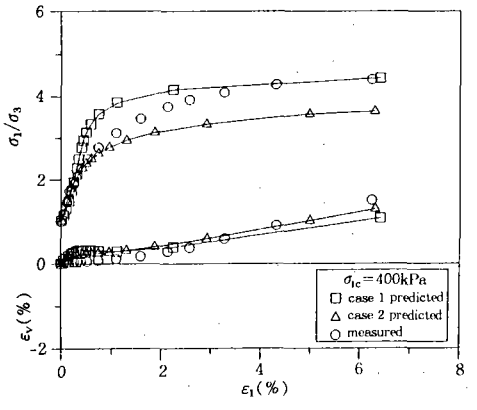
앞에서 언급한 바와 같은 방법으로 RTC시험을 행하였으며 이 시험으로 토질매개변수를 결정하고 이를 이용하여 시험 결과를 예측하였다. 아울러 CTC시험에서 얻은 토질매개변수를 이용하여 RTC시험 결과를 예측하고 이를 각각 비교 검토하여 Fig. 9에 나타내었다. 그리고 그림에서 Case 1은 RTC시험 결과로부터 결정한 토질매개변수를 이용하여 수치해석한 경우이고 Case 2는 CTC시험에서 얻은 토질매개변수를 이용하여 RTC시험 결과를 예측한



(a) Confining Pressure σ_{3c}=200 kPa



(b) Confining Pressure σ_{3c}=300 kPa



(c) Confining Pressure σ_{3c}=400 kPa

Fig. 9. Comparison of Predicted and Measured Stress-Strain and Volume Change Behavior of Baekma River Sand in RTC Tests

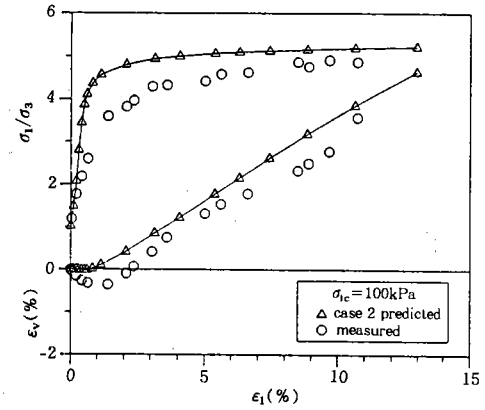
경우이다.

Fig. 9(a)는 초기구속압력이 200kPa에서 RTC시험을 행한 결과와 이를 Case 1과 Case 2로 해석한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 ○는 시험 결과이고 -□-는 Case 1이며 -△-은 Case 2이다. 그림에 나타난 바와 같이 축변형률에 대한 축차응력 및 체적변형률의 관계는 Case 1의 경우가 Case 2의 경우보다 시험치에 더욱더 근접하고 있음을 알 수 있다. Fig. 9(b), (c)는 Fig. 9(a)와 같은 방법으로 각각 구속압력이 300kPa인 경우와 400kPa인 경우를 나타낸 것이며 결과 또한 마찬가지임을 보여주고 있다.

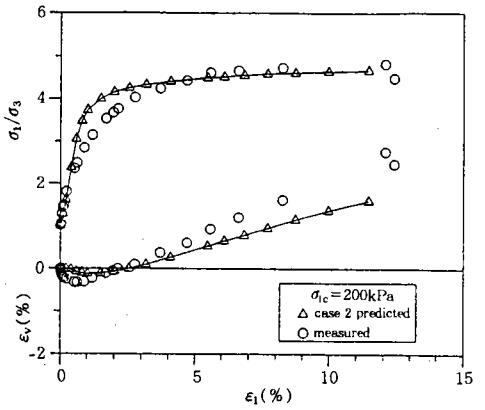
RTC시험에서 얻은 토질매개변수를 이용하여 RTC시험 결과를 예측한 결과가 CTC시험에서 얻은 토질매개변수를 이용하여 예측한 결과보다 더 시험치에 더 근접하고 있다. 그리고 CTC시험에서 얻은 토질매개변수를 이용하여 인장 시험인 RTC시험을 예측하면 주응력비와 체적변형률이 과소하게 예측되고 있다.

5. OSP 시험

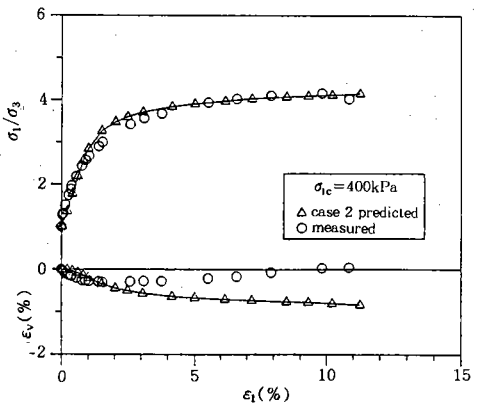
Fig. 10은 σ_1을 증가하며 동시에 구속압력을 증가한 σ_1만큼 감소시켜 전단한 임의의 응력경로 상태(OSP시험)에서의 시험 결과를 CTC시험에서 얻은 토질매개변수를 이용하여 수치해석하여 나타낸 그림이다. Fig. 10에서 (a)는 초기구속압력이 100kPa인 상태, (b) 초기구속압력이 200kPa인 상태, (c)는 초기구속압력이 400kPa인 상태에서 각각 시험한 결과와 이를 예측한 결과를 축변형률에 대한 주응력비 및 체적변형률의 관계로 나타낸 것이다. 그림에서 ○는 시험 결과이고 -□-는 수치해석결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 구속압력이 작은 100kPa를 제외한 모든 경우의 축변형률에 대한 주응력비 관계는 시험치에 해석치가 근접한 예측을 보이고 있다. 그리고 축변형률에 대한 체적변형률의 관계는 다소 시험치와 차이



(a) Confining Pressure σ_{ic}=100 kPa



(b) Confining Pressure σ_{ic}=200 kPa



(c) Confining Pressure σ_{ic}=400 kPa

Fig. 10. Comparison of Predicted and Measured Stress-Strain and Volume Change Behavior of Baekma River Sand in Optional Constant Tests

는 있으나 비교적 좋은 대응성을 보이고 있다.

이상의 결과로 보아 Lade의 단일항복면 구성모델은 각각의 응력경로에서 삼축시험한 결과로부터 얻은 토질매개변수를 이용하여 같은 응력경로의 시험험결과를 예측할 때는 비교적 충실히 설명하고 있음을 알 수 있다.

그러나 CTC시험에서 얻은 토질매개변수를 이용하여 TC, RTC, OSP등의 응력경로에 대한 응력-변형률 거동을 예측한 결과 구속압력이 증가하는 TC시험과 OSP시험의 경우는 비교적 예측의 정도가 만족할 만하지만 구속 압력을 감소시켜 전단하는 RTC시험에 대한 예측 결과는 비교적 큰 오차를 수반하고 있다. 즉 압축시험(CTC시험)에서 얻은 토질매개변수를 이용하여 인장(RTC시험)상태의 응력-변형률 거동의 예측에는 다소 한계가 있음을 보여주고 있다.

그러므로 삼축압축시험(CTC시험)만으로 모든 응력경로를 해석함에는 무리가 따르는 것으로 판단되며 실제 지반의 거동을 예측함에 있어 인장측을 고려할 때는 인장에 관련된 시험을 병행함이 더 좋은 예측의 결과를 얻을 수 있을 것이다.

V. 결 론

본 연구는 Lade의 단일항복면 구성모델의 실용화를 위한 검토로 백마강 모래를 이용하여 등방압축시험과 응력경로를 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 CTC시험으로부터 결정된 토질매개

변수를 이용하여 응력경로가 다른 경우의 응력-변형률 거동에 대한 예측의 정도를 밝히기 위하여 TC시험, RTC시험 및 OSP시험의 결과를 각각 해석하여 이 구성모델의 응력경로 의존 특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초기구속압력이 같은 경우 파괴에 이르는 축변형률은 RTC시험인 경우가 가장 작고 TC시험, CTC시험 순이며 CTC시험은 RTC시험 보다 2배 이상의 큰 축변형률에서 파괴가 일어난다.

2. 주응력비는 RTC시험인 경우가 가장 크게 나타나고 TC시험, CTC시험 순으로 나타나며 체적 변형률 역시 응력경로에 따라 큰 차이를 보이고 있다.

3. 특정한 응력경로에서 얻은 토질매개변수를 이용하여 해당 응력경로에 대한 시험 결과를 예 측할 때는 비교적 충실히 설명하고 있으나 다른 응력경로에 대한 응력-변형률 거동 예측의 정도는 시험치와 다소 차이를 보이고 있으므로 이 구성모델을 이용하여 기초지반의 거동을 해석할 경우는 지반의 응력상태를 충분히 고려한 시험이 요구된다.

4. CTC시험에서 얻은 토질매개변수로 구속압력이 증가하는 TC시험과 OSP시험에 대한 응력-변 형율 거동의 예측은 비교적 만족할만하지만 구속압력을 감소시켜 전단하는 RTC시험에 대한 예측결과는 다소의 오차를 수반하고 있다.

참 고 문 헌

1. Druker, D. C., Gibson, R. E. and Henkel, D.J., "Soil Mechanics and Work Hardening Theories of Plasticity", Trans, Vol. 122, 1957, pp. 333-345.
2. Rescore, K. H., Schofield, A. N., and Worth, C. P., "On the Yielding of soil", Geotechnique, London, England, Vol. 8, No. 1, 1958, pp. 22-52.
3. Roscoe, K. H., and Schofield, A. N., "Mechanical behaviour of an idealized 'wet' clay", proc. 2nd European Conf. soil mech., Wiebaden, Vol. 1, 1963, pp. 47-54.
4. Roscoe, K. H., and Burland, J. B., "On the Generalized Stress Strain Behaviour of 'Wet' Clay", Engineering Plasticity, Cambridge University Press., 1968, pp. 535-609.
5. Yudhbir and A. Varadarajan, "Stress Path Dependent Deformation Module of Clay", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 101, No. GT3, 1975, pp. 315-327.
6. Varadarajan, A., and Mishra, S. S., "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 1980, pp. 109-119.
7. Desai, C. S., 2Constitutive laws for Geologic Media", C. S. Desai and J. T. Christian(Eds.), In Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Mcgraw-hill Book Company, New York, 1977, pp. 65-115.
8. Kim, M. K., and Lade, P. V., "Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials, I. Plastic potential function", Computers and Geotechnics, 5(4), , 1988, pp. 307-324.
9. Kim, M. K., and Lade, P. V., "Single Hardening Constitutive Model for Fric tional Materials, II Yield Criterion and Plastic Work Contours", Computers and Geotechnics, 6(1), 1988, pp. 13-29.

10. Kim, M. K., and Lade, P. V., "Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials Ⅲ. Comparisons with Experimental Data", Computers and Geotechnics, 6(1), 1988, pp. 30-47.
11. Lade, P. V., "Single Hardening Model with Application to NC Clay", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 3, 1990. pp. 394-414.
12. 정진섭, 김찬기, 김기황, 박을축, "모래의 응력경로 의존특성" 1995년도 한국농공학회 학술발표회 발표논문집, 1995, pp. 225-230.
13. 정진섭, 김찬기, 이문수, "탄소성구성모델의 토질매개변수 예민성", 한국지반공학회지, 제8권, 제2호, 1992, pp. 81-94.

(접수일자 : 1996년 3월 9일)