한국농공학회지
제45권 제2호

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS MAR. 2003, pp. 86-95

비등방 압밀된 다짐화강풍화토의 응력-변형률 거동 예측

Prediction of Stress-strain Behavior for Anisotropic Consolidated Compacted Decomposed Granite Soil

정 진 섭* · 양 재 혁**
Jeong, Jin Seob · Yang, Jae Hyouk

Abstract

During this study, constant stress ratio tests with previous compression anisotropic stress history are performed on compacted decomposed granite soil sampled at Iksan, Jeonbuk. Yielding points are determined from stress-strain curves. The shape and characteristics of compression anisotropic yield curves is examined. In addition, the measured value of yielding curve and stress-strain behavior is predicted by Yasufuku's anisotropic constitutive model based on non-associated flow rule. The main results are summarized as follows : 1) Shape of yielding curves shows almost ellipse but asymmetry with respect to stress path during previous consolidation stress. 2) Yasufuku's anisotropic constitutive model is suitable in evaluation of yielding curves on anisotropic consolidated decomposed granite soil. 3) The predicted stress-strain curve shows reasonable agreement to measured behaviours.

Keywords : Stress-constant test, Anisotropic stress history, Stress path, Yielding Curve, Stress-strain Curve, Yasufuku model

I. 서 론

수치해석에 의해 지반의 항복거동과 파괴에 이르기까지의 거동을 정도 높게 평가하기 위해서는 흙의 응력-변형률거동을 적절하게 표현할 수 있는 구성식이 필요하다. 실제지반에서 가정할 수 있는 응력상태는 등방에서 비등방까지 여러 가지 조건을 생각할 수 있다. 따라서 지반의 다양한 응력상태에 적절히 대응할 수 있는 흙의 응력-변형률 거동에 관한 구성모델이 필요하게 된다.

모래나 자갈 등의 입상재료에 있어서 그 응력-변형률 특성은 구속압에 의해 변화한다는 것이 Vesic 등(1968)을 시작으로 과거의 연구에 의해 밝혀졌다. 흙의 응력-변형률 관계를 표현하는 유효한 수단 중 하나인 탄·소성 구성모델에 관한 연구

* 원광대학교 토목환경공학과 교수
** 서남대학교 시간강사
* Corresponding author. Tel.: +82-63-850-6719
fax: +82-63-850-6719
E-mail address: jsjeong@wonkwang.ac.kr

는 Roscoe 등(1968)을 중심으로 Cambridge학파를 통해 많이 이루어졌다. 모래의 거동 평가에 주안을 둔 대표적인 모델은 Poorooshasb(1971)의 단일항복면모델, 압밀에 따른 항복면과 전단에 의한 항복면을 가지는 Lade(1977)의 모델, 그리고 경계곡면에 기초한 Adachi 등(1982)의 모델이나 경화계수장의 이론에 바탕한 Mroz 등(1979)의 복합항복면모델을 들 수 있다. 이러한 모델은 주로 반복재하를 포함한 복잡한 응력이력에 대한 거동의 평가에 주안을 두어 만들어졌다. 그러나, 이러한 모델은 총체적으로 한정된 응력영역에서 응력-변형률 거동을 평가하기 위한 것이고, 광범위한 응력영역을 대상으로 한 경우에서 적용성은 충분하다고는 할 수 없다. Miura 등(1984)은 Roscoe 등이 제시한 방법에 새로운 소산에너지의 가정을 도입하고, 입자파쇄가 현저히 생기는 고압영역에 있어 비등방압밀조건에서 모래의 항복특성을 포괄적으로 표현할 수 있는 구성식을 제안하였으며, 이 구성모델은 항복함수와 소성포텐셜함수가 일치하지 않는다는 비관련유동법칙을 따른 것이다.

한편 Yasufuku 등(1991)은 비등방압밀된 모래에 대한 저압 및 고압영역의 응력-변형률 거동을 그들이 개발한 탄·소성구성모델로 예측하여 그 정교함을 입증해 보였다. 한편 국내에서는 정 등(1999)이 등방의 선행압밀을 받은 다짐화강풍화토의 다양한 응력경로시험을 통해 Yasufuku 등(1991)이 개발한 구성모델로 응력-변형률 거동을 정교히 예측할 수 있다는 것을 확인하였다. 그러나 아직까지 다짐 화강풍화토에 관한 비등방의 선행압밀에 따른 응력-변형률 거동을 Yasufuku모델로 예측한 예는 없다.

따라서 본 연구에서는 이러한 관점에서, 다짐화강풍화토의 압축 및 인장의 비등방 선행응력이력을 가지는 각종 응력비 일정의 응력경로에 대한 항복점을 결정한 후 이를 바탕으로 항복곡선의 특성을 평가하였다.

Ⅱ. Yasufuku의 비등방 구성모델

기본개념은 소성체적변형률과 전단변형률 모두에 의존하는 비등방경화를 나타내고 있다는 가정에 근거하였다. 제안된 모델은 항복함수, 소성포텐셜 그리고 경화계수로 이루어졌다. 또한 비등방압밀조건에서의 항복특성과 조립토의 응력-변형률 거동을 적절히 표현할 수 있는 Yasufuku의 비등방 구성모델로 예측 정도를 검토하였다.(Yasufuku. et al. (1991)) 이는 몇 개의 기본가정과 실험적 결과를 근거로 만들어진 것이며, 모델은 삼축시험으로부터 결정되는 실험적 매개변수를 포함하고 있다.

1. 구성관계

비관련유동법칙에 기초하여 소성체적변형률 증분과 소성전단변형률 증분을 예측하기 위해서는 응력상태의 함수로서 비례적 계수 Λ, 항복함수 f, 소성포텐셜 g, 경화계수 H가 반드시 필요하며 식 (1) 및 (2)에 나타내었다.

$$d\nu^p = \Lambda\frac{\partial g}{\partial p} \quad : \quad d\varepsilon^p = \Lambda\frac{\partial g}{\partial q} \cdots\cdots (1)$$

$$\Lambda = \frac{1}{H}\left(\frac{\partial f}{\partial p}dp + \frac{\partial f}{\partial q}dq\right) \cdots\cdots (2)$$

식 (3)의 f는 내부변수들을 가지는 항복함수이다. 소성변형률 증분을 예측하기 위해서는 항복함수 f, 응력상태의 함수로서 식 (1)과 (2)의 소성포텐셜 g, 경화계수 H를 공식화하는 것이 필요하다.

$$f(p,\ q,\ k^p,\ \alpha) = 0 \cdots\cdots (3)$$

여기서, k^p는 항복곡선의 크기 변화를 평가하는 경화계수이고, α는 응력공간의 원점 주위의 항복곡선(항복면)의 회전과 비틀림의 정도를 표현하는 비등방변수이다.

2. 항복함수

Murata, Hyodo 그리고 Yasufuku(1987)는 다음과 같은 등방항복함수를 제안하였다.

$$f=\eta^2+2N^2\cdot\ln(p/p_o)=0 \quad \cdots\cdots (4)$$

여기서, N은 항복곡선의 경사 $dq/dp=0$ 일 때 응력비 η를 나타내는 실험적 매개변수이고, p_o는 등가등방압밀압력이다.

항복곡선의 접선기울기 dq/dp는 식 (5)과 같이 응력비 η와 내부변수 α에 의해 대략 표현되어질 수 있다. α는 항복곡선의 접선경사가 무한대 ($dq/dp=\infty$)가 되는 η에 의해 정의되며, 현재의 응력상태와 응력경로의 이력에 의존하는 매개변수이다.

$$\frac{dq}{dp}=G(\eta,\ \alpha) \quad \cdots\cdots (5)$$

Yasufuku 등(1991)은 위 식을 다음과 같은 단순한 쌍곡선함수로 제안하였다.

$$\frac{dq}{dp}=\frac{(\eta-\alpha)\eta-(N-\alpha)N}{(\eta-\alpha)} \quad |M|>|\alpha| \quad \cdots\cdots (6)$$

비등방항복함수는 다음과 같으며, p_o는 $\eta=\alpha$ 일 때 p 값과 같이 정의된다. $\alpha=0$ 일 때, 식 (7)는 식 (4)의 등방항복함수와 같다.

$$f=(\eta-\alpha)^2+2N(N-\alpha)\ln(p/p_0)=0 \quad \cdots\cdots (7)$$

3. 소성포텐셜

응력-Dilatancy관계에 대한 일반적인 형태의 식은 다음과 같다.

$$\frac{dv^p}{d\varepsilon^p}=\frac{[M-(2-c)\alpha]-[\eta-(2-c)\alpha]\eta}{c(\eta-\alpha)} \quad \cdots\cdots (8)$$

여기서, M은 $\psi=0$ 일 때(일반적으로 $M>N$), η 값에 의해 정의되는 실험적 매개변수이다. c는 포물선의 형상을 평가하는 매개변수로서 $\eta=M$ 일 때 $\eta-dv^p/d\varepsilon^p$ 곡선의 접선기울기에 기초하여 결정된다.

식 (8)을 재정리하면 다음과 같은 소산 소성일이 유도된다.

$$dw^p=p[(dv^p)^2+(M^2-\alpha(2-c)(M-\eta))(d\varepsilon^p)^2 +((2-c)\eta+c\alpha)dv^p d\varepsilon^p]^{\frac{1}{2}} \quad \cdots\cdots (9)$$

식 (8)에 직교법칙을 적용하면 소성포텐셜은 다음과 같이 유도된다.

$$c\neq 1 : g=\ln p+\frac{c}{2(c-1)}\ln[(\eta-2\alpha)\eta +\frac{1}{c-1}(M-(2-c)\alpha)M]=\text{const.} \quad (10)$$

$$c=1 : g=(\eta-\alpha)^2+2M(M-\alpha)\ln p=\text{const.} \quad (11)$$

Table 1 Physical properties of decomposed granite soil used

Location	Gs	k (cm/s)	Cu	Cz	No. 200 percent finer(%)	Proctor test		Sample	
						γ_{dmax}(gf/cm^3)	OMC(%)	γ_d(gf/cm^3)	w(%)
Iksan. Jeonbuk	2.63	7.3×10^{-5}	13.47	1.66	10.30	1.80	14.00	1.54	18.00

Ⅲ. 응력비 일정시험

1. 시료준비 및 특성

전북 익산에서 채취한 화강풍화토 중 No. 4체 (4.75 mm) 통과분을 균일하게 혼합하여 응력비일정시험에 사용하였다. Table 1은 시료의 물리적, 역학적 특성을 보인 것이다. 투수계수는 7.3×10^{-5} cm/s이며, 초기공시체는 최대건조단위중량 1.80 gf/cm^{3}의 85% 정도인 γ_d = 1.54 gf/cm^3, 그리고 포화도를 높이기 위해 최적함수비의 습윤측인 w = 18%로 tamper를 이용하여 3층으로 포화성형하였다.

2. 시험방법

본 연구에서는 비등방 선행압밀응력 상태에서 각종 응력비 일정시험을 실시하였다. Fig. 1은 압축의 비등방 선행압밀응력을 가진 2가지 응력비 일정시험의 여러 가지 비례적 재하경로를 보인 것이다. 시험은 완전한 배수조건이고, 응력제어방법으로 실시하였다. 응력증가율은 2 kPa/min이고 전단속도는 0.01 %/min 이하로 유지하였다. 또한 압축응력과 압축변형률을 (+)로 취하였다.

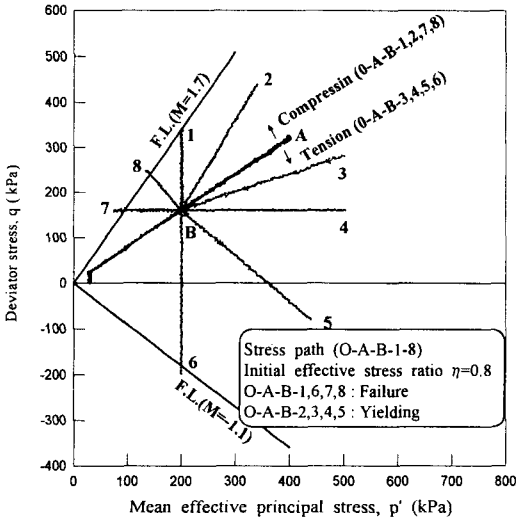
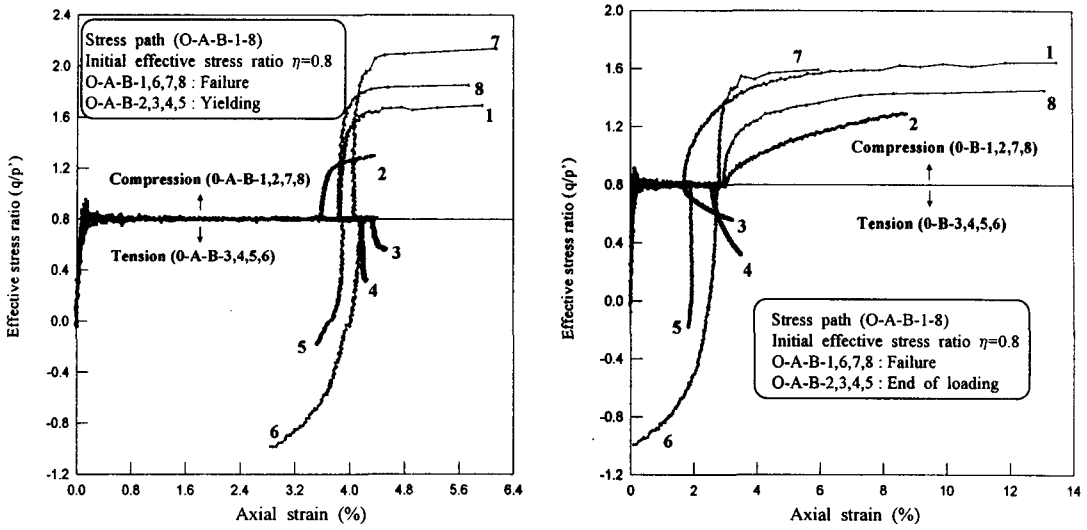


Fig. 1 Stress paths for anisotropic overconsolidation

Fig. 1에서 보인 바와 같이, O-A-B-1~8의 응력비 일정경로에서 공시체는 먼저 압축방향의 응력비 η=0.8 을 일정히 유지하면서 점 "A"까지 비등방 선행압밀된 후 점 "B"까지 제하되었다. 여기서, 응력비 $\eta=q/p'$ 이고 $p'=(\sigma_a+2\sigma_r)/3$ 은 평균유효주응력, q 는 축차응력이다. 그 후 공통적인 원점 "B"로부터 응력비 일정시험이 수행되었고, 점 "A"에 대응하는 항복점이 각각의 응력경로에 대해 결정되었다. 점 "A"에서 p' = 400 kPa 이고 점 "B"에서 p' = 200 kPa 이므로 OCR=2이다.

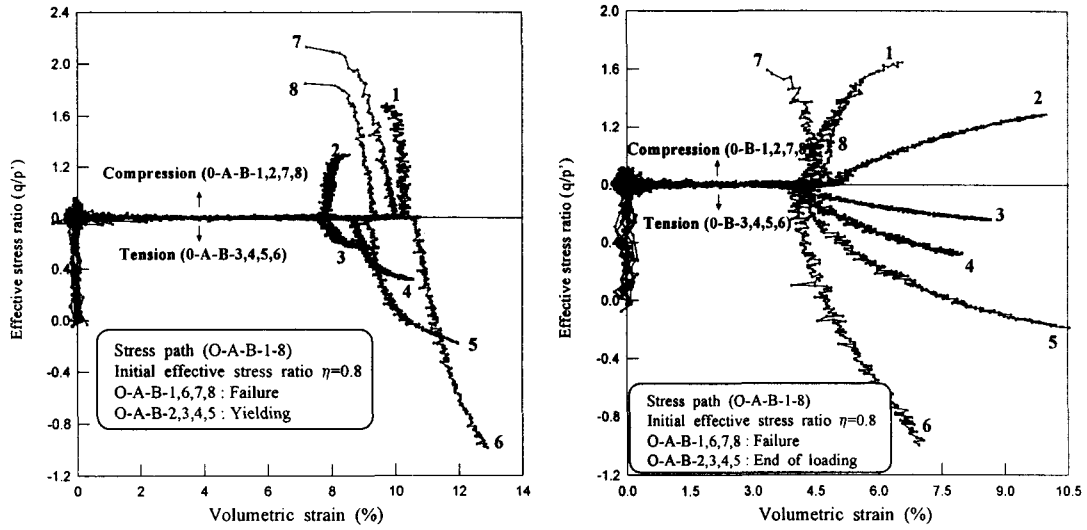
3. 시험결과

본 연구에서는 응력비가 일정한 경로에 대해 응력-변형률곡선 상의 항복점으로 다짐풍화화강토의 항복곡선을 형상화하였다. 편의상 축방향변형률 ε_a 와 체적변형률 v 을 점 "B"에서 초기값으로 결정하였으며, 이들 초기값의 차이에 따라 결정된 항복점의 신뢰성을 평가해 볼 수 있다. Fig. 2는 압축방향의 비등방 선행압밀응력의 유무에 따른 각각의 응력경로 O-A-B-1~8와 O-B-1~8에 대한 축방향변형률 ε_a 와 체적변형률 v 을 보인 것이다. 응력경로 O-A-B-1~8의 경우, 응력비는 η=0.0 으로부터 간극수압계수 B값을 측정하는 동안 η=0.8 까지 이동한 후 점 "A"까지 일정한 응력비 η=0.8 을 유지하면서 비등방 선행압밀압력을 가한 후 점 "B"까지 제하한 상태가 각각의 응력-변형률곡선의 초기변형률이 된다. O-A-B-1~8의 η 에 따른 ε_a 의 초기값은 최대 1% 정도의 차이를 보이며, v 는 3% 정도의 차이이다. 응력경로 O-B-1~8는 선행재하가 있는 경우와 같이 η=0.8 까지 이동한 후 "B"까지 일정한 η=0.8 으로 압축을 가한 상태가 각각의 응력-변형률 곡선의 초기변형률이 된다. O-B-1~8의 축방향변형률 ε_a 가 시작되는 초기값은 1.3% 정도, 체적변형률 v 는 1%



$\eta(=q/p') - \varepsilon_a$ (0-A-B-1~8 and 0-B-1~8)

Fig. 2 $\eta - \varepsilon_a$ Relationship observed from stress path(0-A-B-1~8 and 0-B-1~8)



$\eta(=q/p') - v$ (0-A-B-1~8 and 0-B-1~8)

Fig. 3 $\eta - v$ Relationships observed from stress path(0-A-B-1~8 and 0-B-1~8)

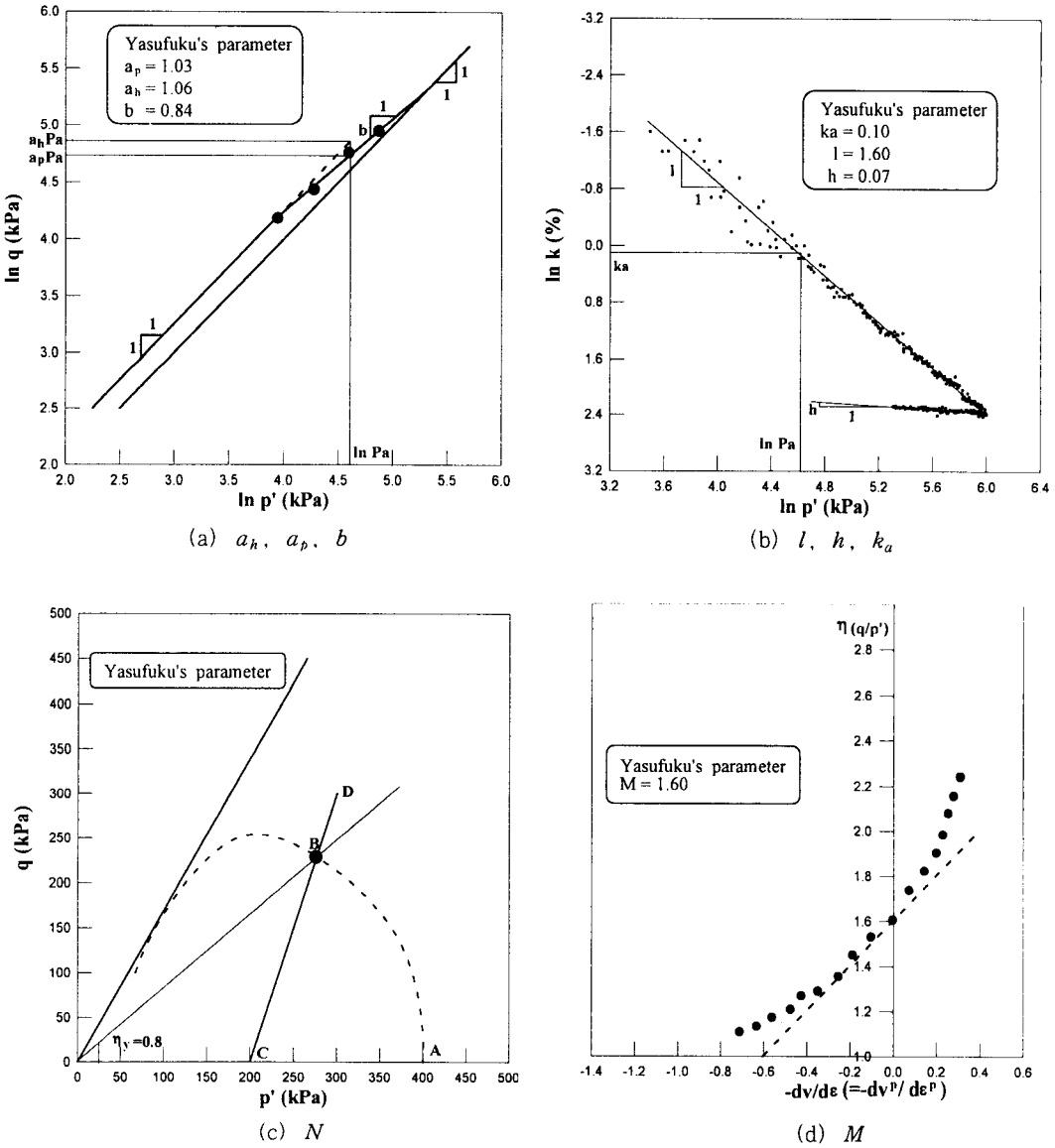
정도의 차이를 보이고 있다.

이와 같이 각각의 응력경로의 초기변형률이 동일하지 않은 것은 다짐화강풍화토가 이상적인 재료가 아니기 때문이다. 이는 다짐시 발생하는 인위적인 오차, 각각의 공시체 마다 미소한 투수계수의 변화에서 오는 압밀배수량의 차이 때문에 발생된다. 그러나 이러한 초기변형률의 차이는 그리 크지 않고 또한 불가피한 현상으로 생각된다. 따라서 이들 변형률의 초기값이 다소의 불균일하더라도 항복점을 결정하는 데 큰 영향을 주지 않을 것이라 생각된다.

Ⅳ. 항복곡선과 응력-변형률 거동의 예측

1. 토질매개변수의 결정

본 연구에서는 Yasufuku 비등방구성모델의 토질매개변수를 일련의 등방압밀 및 비등방압밀시험 그리고 몇 가지 배수삼축시험의 결과를 가지고 도해법을 통하여 결정하였으며, Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보인 바와 같이, 매개변수 a_h, a_p 그리고 b는 일련의 삼축시험으로부터 얻어진 첨두강도 특성으로부터 얻어진다. 본 연구에서는 50 kPa을 p_h 값으로 사용하였으며, a_h는 식 (4)에 의해 계



(a) a_h, a_p, b (b) l, h, k_a

(c) N (d) M

Fig. 4 Determination of parameters for Yasufuku's model

산되어질 수 있다. l, h 그리고 k_a는 등방압밀시험에 의해 결정된다. N은 항복특성과 관련된 매개변수로서 응력경로 O-A-C-D를 갖는 등방 선행압밀된 다짐화강풍화토에 대한 배수삼축시험에서 응력점 "A"에 대응하는 항복점 "B"로부터 결정된다. M은 배수삼축시험에서 얻은 응력-Dilatancy 관계에 의해 평가된다. 매개변수 α는 등방 및 비등방 선행압밀된 다짐화강풍화토에 대한 항복곡선의 특성으로부터 결정된다. 실험적 매개변수 c_1은 비등방이 전개되는 속도를 제어한다. 본 연구에서는 항복곡선의 회전속도를 고려하여 통상적으로 추정된 값인 10을 사용하였다.(Yasufuku et al (1991)

그리고 c_2는 비등방이 전개되는 정도를 제어하는 매개변수로서 다음과 같으며, $\eta_{initial}$은 선행압밀 동안의 η값이다.

$$\eta_{initial} = c_2 \cdot \alpha \quad \cdots\cdots (12)$$

다음으로 ν값은 Jaky(1944)에 의한 정지토압계수 K_o에 의해 $\nu = K_o/(1+K_o)$ 으로 결정된다. Table 2는 결정된 매개변수를 요약한 것이다.

2. 항복곡선의 특징과 예측

Fig. 5는 응력-변형률 곡선에서 결정한 항복점으로 형상화한 항복곡선과 Yasufuku의 비등방 구성모델의 비등방항복함수식 (7)에 의해 예측한 항복곡선을 등가등방압밀응력 p_o로 규준화시킨 공간에 나타낸 것이다. Table 2에 나타낸 바와 같이, 항복곡선의 예측을 위해 사용한 Yasufuku의 비등방 구성모델의 매개변수는 항복매개변수 N= 1.13, 비등방매개변수 α는 0.5를 사용하였다.

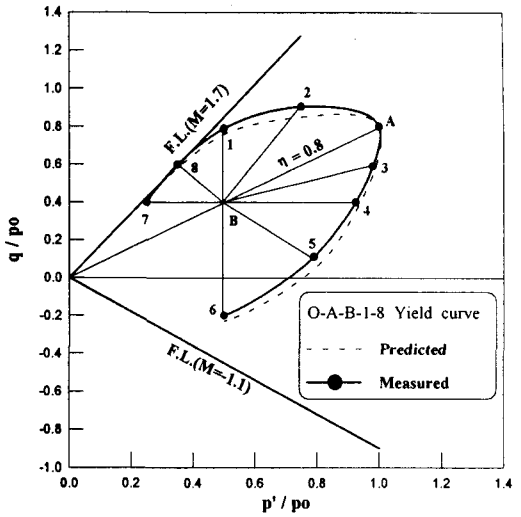


Fig. 5 Comparison of observed and predicted yield curves

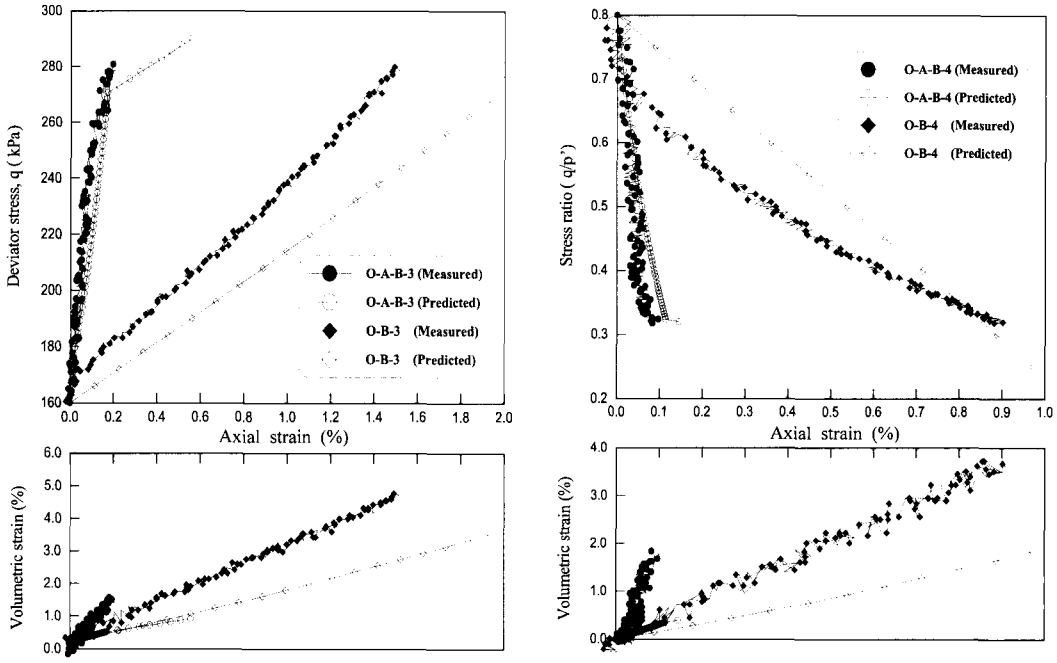
그림에서 보인 바와 같이, 실험으로 결정한 항복곡선은 타원형을 보이고 있다. 한편 식 (7)에 의해 예측된 항복곡선은 실험으로 결정된 항복곡선을 비교적 양호하게 예측하고 있다. 따라서, Yasufuku의 비등방구성모델의 항복함수는 다짐화강풍화토의 항복곡선을 평가하는데 있어 적절하게 표현 할 수 있다는 것을 알 수 있다.

3. 응력-변형률거동의 예측

Fig. 6은 Yasufuku의 비등방 구성모델에 의한 예측치와 압축방향의 응력경로인 O-A-B -3, 4, 7, 8 그리고 O-B-3, 4, 7, 8의 응력-변형률 곡선을 보인 것이다. 즉, η=0.8로 점 "A"까지 비등방 선행압밀된 경우와 처녀압밀된 경우인 O-A-B-3, 4, 7, 8과 O-B-3, 4, 7, 8에 대한 축변형률에 대

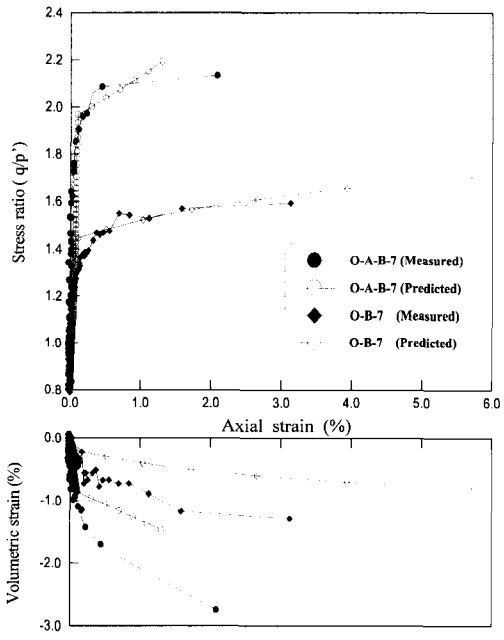
Table 2 Soil parameters for Yasufuku's anisotropic constitutive model analysis

a_h	a_p	b	l	h	k_a	N	M	α	c_1	c_2	ν
1.06	1.03	0.84	1.60	0.07	0.10	1.13	1.60	0.5	10	1	0.25

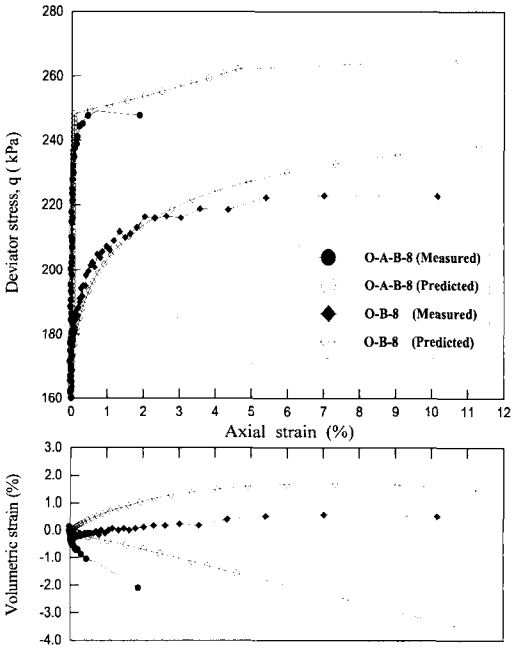


(a) O-A-B-3, O-B-3

(b) O-A-B-4, O-B-4



(c) O-A-B-7, O-B-7



(d) O-A-B-8, O-B-8

Fig. 6 Comparison of measured and predicted stress-strain curves

한 축차응력 또는 응력비, 그리고 축변형률에 대한 체적변형률의 예측치를 실측치와 비교한 것이다.

그림에서 보인 바와 같이, 전반적으로 Yasufuku의 비등방 구성모델에 의한 예측치는 실측치와 거의 유사한 경향을 보이고 있으며, 특히 과압밀된 응력경로인 O-A-B-3, 4, 7, 8의 응력-변형률 거동의 실측치를 정도 높게 예측하고 있다. 다만 처녀압밀의 응력경로인 O-B-3, 4, 7, 8에 대한 응력-변형률 거동은 응력경로에 따라 실측치가 약간 과소평가되는 경향이 있으나 대체로 잘 대응하고 있다. 그러나 축변형률에 따른 체적변형률은 과압밀과 처녀압밀의 경우 모두 실측치가 과소평가되는 경향이 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 비등방 선행압밀응력을 가한 각종 응력비일정시험을 전북 익산의 다짐화강풍화토에 대해 실시하였으며, 항복곡선과 응력-변형률 거동을 Yasufuku의 비등방구성모델로 예측·비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 실험으로 결정한 항복곡선의 모양은 타원형으로 나타나고 선행압밀응력의 응력경로에 대해 비대칭적인 형상을 보였다.

2) Yasufuku의 비등방항복함수는 압축 및 인장의 비례적인 재하경로의 이력과 관계없이 실험으로 결정된 항복곡선을 비교적 정도 높게 예측하였다.

3) Yasufuku의 비등방구성모델은 과압밀된 응력경로의 응력-변형률 거동을 매우 정교하게 예측하는 반면, 축변형률에 따른 체적변형률은 과압밀과 처녀압밀의 경우 모두 실측치가 과소평가되는 경향이 있다.

이 논문은 2002년도 원광대학교의 교비지원에 의해서 연구됨.

References

1. Adachi, T. and Oka, F., 1982, Constitutive Equations for Sands and Over consolidated Clay, and Assigned Works for Sand, Int. *Workshop on Constitutive Relations for Soils, Grenoble*, pp.141-157.
2. Dafalias, Y. F., 1987, An Anisotropic Critical State Clay Plasticity Model, 2nd Int. Conf. on Constitutive Laws for Engineering Materials : *Theory and Applications*, Vol.1, Tucson, pp.513-521.
3. Jaky, J., 1944, The Coefficient of Earth Pressure at Rest, *Magyar Mernok es Epitesz Egylet Koslonye*, pp.355-358.
4. Lade, P. V., 1977, Elasto-plastic Stress-strain Theory for Cohesionless Soils with Curved Yielding Surfaces, Int. J. *Soils and Structure*, Vol.13, pp.1019-1035.
5. Jeong, J. S., K. C. Lee and J. H. Yang, 1999, Comparison of Yasufuku's single Hardening Constitutive Model and Lade's Double Hardening constitutive Model for compacted weathered Granite soil, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 41(3), pp.91-100. (in Korean)
6. Murata, H., Hyodo, M. and Yasufuku, N., 1987, Yield Character of Dense Sand under Low and High Pressure" *Proc. of JSCE*, No.3, pp.183-192.
7. Miura, N., Murata, H. and Yasufuku, N., 1984, Stress-strain Characteristics of Sand in a Particle-crushing Region, *Soils and Foundations*, Vol.24, No.1, pp.77-89.
8. Mroz, Z. and Norris, V. A. and Zienkiewicz, O. C., 1979, Application of Anisotropic Hardening Model in the Analysis of Elasto-plastic Deformation of Soils, *Geotechniqe*, Vol.29, pp.1-34.
9. Poorooshasb, H. B., 1971, Deformation of Sand in Triaxial Compression, *4th ARCSMFE*,

Vol.1, pp.63-66.

10. Roscoe, K. H., and Burland, J. B., 1968, *On the Generalized Stress Strain Behaviour of 'Wet' Clay, Engineering Plasticity*, Cambridge University Press., pp.535- 609.
11. Vesic, A. S. and Clough, G. B., 1968, Behavior of Granular Materials under High Stresses, Proc. *ASCE*, Vol. 94, No. SM3, pp.661-688.
12. Yasufuku, N., Murata, H., and Hyodo. M., 1988, Application of Elasto-plastic Constitutive Model to Undisturbed Soil 'Masado', Proc. *of Int. Conf. on Engineering Problems of Regional Soils*, Vol. 1, pp.759-764.
13. Yasufuku, N., Murata, H., Hyodo, M. and Hyde, A. F. L., 1991, A Stress-strain Relationship for Anisotropically Consolidated Sand over a Wide Stress Region, *Soils and Foundations*, Vol. 31, No. 4, pp.75~92.