

# 다짐화강토에 대한 Yasufuku의 단일항복면 구성모델과 Lade의 복합항복면 구성모델의 비교

## Comparison of Yasufuku's Single Hardening Constitutive Model and Lade's Double Hardening Constitutive Model for Compacted Weathered Granite Soil

정진섭\* · 이광찬\*\* · 양재혁\*\*\*  
Jeong, Jin Seob · Lee, Kwang Chan · Yang, Jae Hyouk

### Abstract

Two constitutive models for weathered granite soil, Yasufuku's constitutive model with a single yield surface and Lade's constitutive model with two intersecting yield surface are compared in terms of their capabilities to accurately capture the observed behavior of compacted weathered granite soil for various stress-paths. Both the single surface and the double surface models capture the experimentally observed behavior at a variety of stress-paths with good accuracy. The double surface model may model the observed compacted weathered granite soil behavior with better accuracy for proportional loading with increasing stress, but the single surface model may model dilatancy property with better accuracy for  $p$ -constant loading with increasing stress ratio.

### I. 서 론

우리나라 지반의 대부분은 화강암이나 편마암이 기반암으로 구성되어 있으며 이들은 오랜 기간동안 물리적, 화학적 작용에 의해 풍화되어 화강토로 존재하고 있다. 따라서 필연적으로 많은 경우 구조물기초 또는 성토재료로서 폭넓게 이용하고 있다. 그러나 화강토가 모암의 조성성분이나 풍화도, 그리고 교란과 불교란에 따라 그 성질이 다르다는 토질역학적 특성 때문에 모래나 점토질 흙에

비해 활발한 연구가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 실제 경우에 있어서도 토질매개변수의 결정이나 변형해석을 할 때 아무런 검증없이 일반삼축 압축이나 직접전단시험의 결과에 의존하고 있다. 이와같이 화강토의 역학적 성질은 일반흙과는 다르기 때문에 응력-변형을 관계를 이용한 지반거동의 해석이나 추정은 더욱 어렵다. 지반거동을 해석 또는 추정하기 위해서는 현장의 경계조건이나 역학적 거동을 정확하게 표현할 수 있는 구성모델이 필요하다.

\* 원광대학교 공과대학

\*\* 전남대학교 공업기술연구소(특별연구원)

\*\*\* 원광대학교 대학원(박사과정)

키워드 : Dilatancy 특성, 응력경로, Yasufuku 구성모델, 다짐화강토, Lade의 복합항복면 구성모델, 비례하중

화강토와 같은 입상재료에 대한 구성모델을 만드는데 있어서 중요한 요소 중의 하나는 소성항복 과정의 조건이다. 일반적으로 처음으로 응력비 증가하중을 받는 동안 화강토의 변형은 회복할 수 없을만큼 크고, 변형크기 또한 응력경로나 과거의 응력이력에 의존하는 경향이 대부분이다. 그리고 외력에 의해 흙은 입자와 입자 사이의 미끄러짐에 의해서 주로 발생하는 고유한 비탄성거동을 하게 되며 응력이력의 영향은 어떤 조건에서는 흙의 거동을 지배하는 중요한 역할을 하게된다.<sup>1,2)</sup> 흙에 있어서 응력경로의 영향에 대한 많은 연구결과와는 응력변화가 탄성변형과 소성변형을 일으키며 어떤 조건에서는 응력경로가 변형물에 큰 영향을 미칠 수 있는 반면 또 다른 조건에서는 응력경로의 영향을 무시할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 이와 같은 관점에서 본 연구에서는 다짐화강토에 대해 현재 개발된 탄·소성구성모델 가운데 항복면의 형상이 서로 다른 하나의 항복면을 갖는 Yasufuku 구성모델<sup>3-6)</sup>과 두 개의 항복면을 갖는 Lade의 복합항복면 구성모델<sup>7,8)</sup>을 사용하여 다짐화강토의 거동을 추정하고 두 모델의 추정능력을 비교, 평가하였다.

## II. Yasufuku 구성모델과 Lade의 복합항복면 구성모델

### 1. Yasufuku 구성모델

#### 가. 구성관계

구성식은 통상적인 해석이나 실험적인 고찰을 위해서 삼축압축 또는 인장시험의 경우로 제한하여 식 (1)~(4)의 응력-변형을 증분매개변수를 사용하였으며 이러한 매개변수는 Cam-Clay 모델에서도 사용되었다.

$$p = (\sigma_a + 2\sigma_r)/3 \dots\dots\dots(1)$$

$$q = \sigma_a - \sigma_r \dots\dots\dots(2)$$

$$d\varepsilon_v = d\varepsilon_a + 2d\varepsilon_r \dots\dots\dots(3)$$

$$d\varepsilon_s = 2(d\varepsilon_a - d\varepsilon_r)/3 \dots\dots\dots(4)$$

또한 Dilatancy특성을 평가하기 위한 응력비  $\eta$  와 매개변수  $\psi$ 는 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$\eta = q/p \dots\dots\dots(5)$$

$$\psi = d\varepsilon_v^p/d\varepsilon_s^p \dots\dots\dots(6)$$

여기서,  $\sigma_a$ 와  $\sigma_r$ 은 축방향과 반경방향의 유효 응력,  $d\varepsilon_a$ 와  $d\varepsilon_r$ 은 축방향과 반경방향의 변형률 증분,  $d\varepsilon_v$ 와  $d\varepsilon_s$ 는 체적변형률 증분과 전단변형률 증분이다. 전체적변형률과 전전단변형률은 식 (7), (8)과 같이 탄성부분과 소성부분으로 나뉘어진다. 탄성체적변형률 증분과 탄성전단변형률 증분은 식 (9), (10)과 같다.

$$d\varepsilon_v = d\varepsilon_v^e + d\varepsilon_v^p \dots\dots\dots(7)$$

$$d\varepsilon_s = d\varepsilon_s^e + d\varepsilon_s^p \dots\dots\dots(8)$$

$$d\varepsilon_v^e = \frac{1}{K} dp \dots\dots\dots(9)$$

$$d\varepsilon_s^e = \frac{1}{3G} dq \dots\dots\dots(10)$$

여기서,  $K$ 는 체적탄성계수이고  $G$ 는 전단탄성계수이다.

#### 나. 항복함수와 소성포텐셜

등방향복합수는 다음의 식 (11)로 표현된다.

$$f = \eta^2 + 2N^2 \ln p/p_0 = 0 \dots\dots\dots(11)$$

여기서,  $N$ 은  $dq/dp = 0$ 일 때  $\eta$ 값을 나타내는 매개변수이고  $p_0$ 는 등치등방압밀압력으로 다음과 같다.

$$p_o = p \cdot \exp\left(-\frac{\eta^2}{2N^2}\right) \dots\dots\dots(12)$$

그리고 항복곡선의 기울기는 다음의 식 (13)과 같다.

$$\frac{dq}{dp} = \frac{\eta^2 - N^2}{\eta} \dots\dots\dots(13)$$

여기서,  $N = \sqrt{n/2}$

특히 화강토에 대한 응력-Dilatancy 관계를 가 정하는 식은 다음과 같다.

$$dW^p = p\sqrt{(d\varepsilon_v^p)^2 + (M d\varepsilon_s^p)^2} + (2-c)\eta d\varepsilon_v^p d\varepsilon_s^p \dots\dots\dots(14)$$

$$\frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_s^p} = \frac{M^2 - \eta^2}{c\eta} \dots\dots\dots(15)$$

소성포텐셜은 다음과 같이 유도된다.

$c \neq 1$ 일 때

$$g = \ln p + \frac{c}{2(c-1)} \ln\left(\eta^2 + \frac{M^2}{c-1}\right) = const. \dots\dots\dots(16.a)$$

$c = 1$ 일 때  $g = \ln p + \frac{1}{2}\left(\frac{\eta}{M}\right)^2 = const. \dots\dots\dots(16.b)$

여기서,  $M$ 은  $\psi=0$ 일 때  $\eta$ 값에 의해 정의되 고,  $c$ 는  $\eta = M$ 일 때  $\eta$ 와  $d\varepsilon_v^p/d\varepsilon_s^p$ 곡선의 접 선기울기에 기초하여 결정된 쌍곡선의 형상을 평 가하기 위한 매개변수이다. Fig. 1은  $p-q$ 평면에서 점 A로부터 점 B까지의 응력변화에 따른 항복 면의 변화를 보이고 있다.

## 2. Lade의 복합항복면 구성모델

### 가. 항복과정

Lade의 복합항복면 구성모델은 전소성변형률

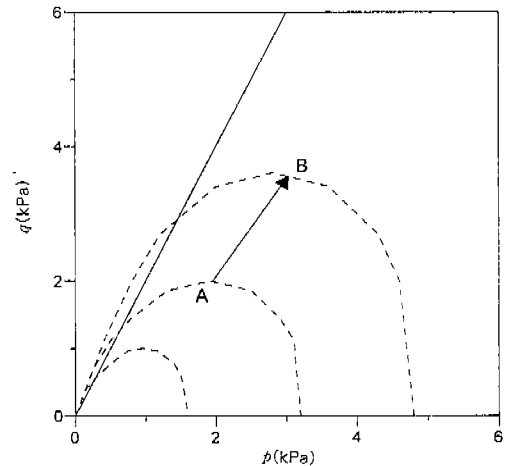


Fig. 1. Schematic illustration of yielding process for Yasufuku's single hardening model shown in  $p-q$  plane

증분을 발생시키는데 있어서 두 항복면의 상호작용 여부에 따른 두 가지 메카니즘을 갖는다. Fig. 2(b)에 나타난 원추형항복면은 응력공간의 원점에서 정점을 갖는 비대칭의 총알모양을 하고 있다. 이러한 원추형항복면에서 발생된 소성팽창변형률 증분은 비관련유동법칙으로부터 계산된다. 소성과쇄변형률 증분에 대응하는 항복면은 Fig. 2(b)에서 원추형 항복면의 열린 끝에 씌운 도자모양을 형성하고 있으며, 주응력공간의 원점에서 중심점을 가진 구형의 형태로 되어 있다. 소성과쇄변형률 증분은 관련유동법칙으로부터 계산된다.

응력변화의 결과를 Fig. 2(b)의 삼축면에 나타 내었다. 소성과쇄변형률 증분과 소성팽창변형률 증분은 모두 점 A에서 점 B로의 응력변화에 기인 하며, 이러한 결과는 두 가지 항복면이 모두 확장 되어지기 때문이다. 변형률 증분의 크기는 벡터의 길이에 의해 나타내며, 전소성변형률 증분은 두 가지 성분의 벡터 합에 의해 얻어진다.

### 나. 탄성거동

하중의 제하-재제하시 회복가능한 탄성변형률 증분은 Hooke 법칙으로 계산된다. Fig. 2(a)에서와 같이 탄성계수( $E_{ur}$ )는 다음과 같이 계산된다.

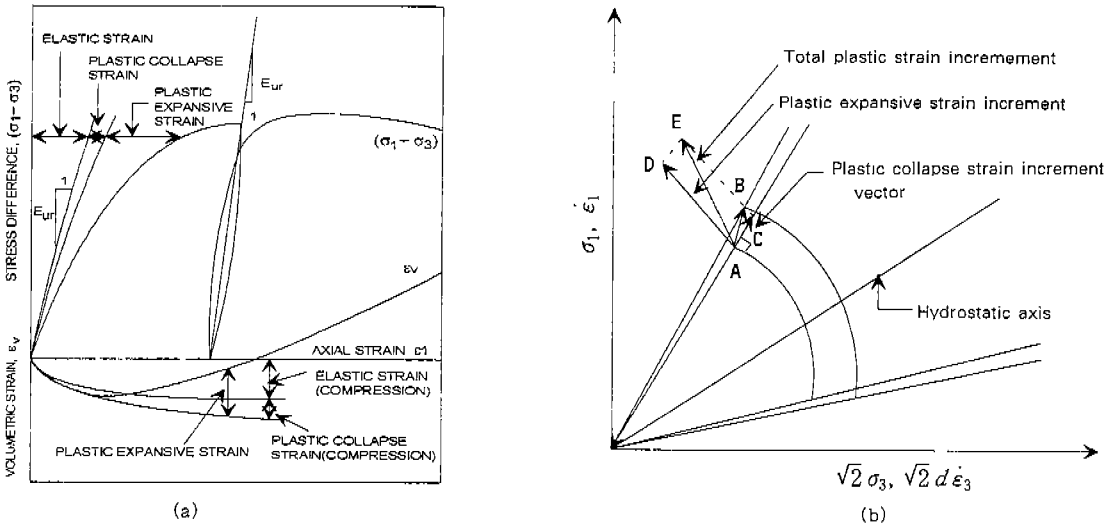


Fig. 2. Schematic illustration of (a) elastic, plastic collapse, and plastic expansive strain components in drained triaxial compression test, (b) conical and spherical cap yield surfaces in triaxial plane

$$E_{ur} = K_{ur} \cdot p_a \cdot \left( \frac{\sigma_c}{p_a} \right)^n \dots\dots\dots(17)$$

여기서,  $p_a$ 는 탄성계수를 구속압과 같은 단위로 하기 위한 상수로서 대기압과 같고  $K_{ur}$ 과  $n$ 은 토질매개변수이다.

또한 Poisson 비 ( $\nu$ )는 삼축압축시험결과에서 다음 식을 사용하여 구한다.

$$\nu = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\Delta \epsilon_v}{\Delta \epsilon_1} \right) \dots\dots\dots(18)$$

다. 소성파쇄변형률

소성파쇄항복면의 방정식  $f_c$ 는 다음과 같다.

$$f_c = I_1^2 + 2I_2 \dots\dots\dots(19)$$

여기서,  $I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$

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

또한 소성파쇄포텐셜함수  $g_c$ 는 소성파쇄항복함

수와 같으며 다음과 같이 나타낸다.

$$g_c = I_1^2 + 2I_2 \dots\dots\dots(20)$$

따라서 관련유동법칙이 성립된다.

라. 소성팽창변형률

$$f_b = \left( \frac{I_1^3}{I_3} - 27 \right) \cdot \left( \frac{I_1}{P_a} \right)^m \dots\dots\dots(21)$$

$$f_b = \eta_1 \text{ at failure} \dots\dots\dots(22)$$

여기서,  $\eta_1$ 과  $m$ 은 토질매개변수이다.

소성팽창변형률을 구하기 위해서는 비관련유동법칙이 사용되며 소성팽창포텐셜함수는 다음과 같다.

$$g_b = I_1^3 - (27 + \eta_2(P_a/I_1)^m) \cdot I_3 \dots\dots\dots(23)$$

Fig. 2(a)는 구속압이 일정한 배수삼축압축시험을 실시하여 탄성, 소성파쇄, 소성팽창변형률 성분들의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 2(b)는 점 A로부터 점 B까지의 응력변화에 의해 두 소성파쇄와 소성팽창변형률이 발생한 것을 보여주고 있다.

### III. 시 험

#### 1. 시료준비 및 특성

시험에 사용한 시료는 전북 익산에서 채취한 화강토를 공기건조시킨 다음 No.4체를 통과한 시료를 균일하게 혼합한 후 건조단위중량  $\gamma_d=1.53 \text{ kgf/cm}^3$ , 함수비  $w=13\%$ 로 일정하게 조제하여 시험에 이용하였다. 또한 삼축시험용 공시체는 직경 50mm, 높이 110mm이다.

#### 2. 토질매개변수 결정

준비된 다짐화강토를 등방압축팽창시험과 구속압을 100, 200, 400 kPa으로 한 일련의 배수삼축압축시험을 실시한 후 회귀분석을 통해 토질매개변수를 결정하였으며 결정된 토질매개변수를 각각

Table 1. Soil parameters employed for Yasufuku's single hardening model

Consolidation parameters			Strength parameters		Dilatancy and yield parameters		
l	h	ka	$\alpha_p$	b	C	M	N
1.156	0.071	0.0266	1.56	1.05	2.62	1.58	1.11

Table 2. Soil parameters employed for Lade's double hardening model

Model Parameter	Soil parameters	Value
Elastic behavior	Modulus Number, $K_{wr}$	257
	Exponent, n	0.865
	Poisson's Ratio, $\nu$	0.25
Failure criterion	Intercept, $\eta_1$	38
	Exponent, m	0.248
Plastic potential	Intercept, $\Psi_2$	-2.81
	Exponent, $\mu$	1.71
Yield function	Exponent, h	1.1
	Constant, $\alpha$	0.398
Hardening function	Intercept, c	0.0098
	Exponent, p	1.13

Table 1과 Table 2에 나타내었다.

### IV. 시험결과 및 고찰

#### 1. 단순응력경로

Fig. 3은 일정하게 응력수준을 증가시켜 1에 이르게 한 후 구속압력은 일정하게 유지하고 축차응력은 증가시켜 파괴점(A)에 도달하도록 한 응력경로시험으로서 측정치를 추정치와 비교하여 나타낸 것이다. 그 결과, Yasufuku 구성모델은 항복면 외부로 향하는 일이므로 탄·소성거동을 보이고 축변형률이 측정치보다 약간 크게 나타나며, 축변형률과 체적변형을 관계는 다소 작게 추정하고 있다. 그러나 Lade의 복합항복면 구성모델도 탄·소성거동을 보이고 축차응력에서 양호한 추정을 보이는 반면 체적변형률은 Yasufuku 구성모델보다 작게 평가하고 있다.

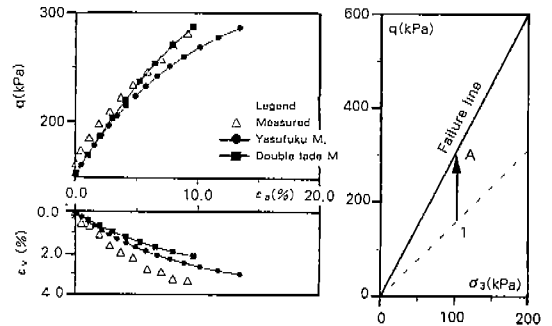


Fig. 3. Stress-path with increasing deviator stress and constant confining pressure: conventional primary loading; increasing stress level

Fig. 4는 Fig. 3과 대조적인 경우인데 파괴점 2에서 B까지 내려오는 응력경로시험을 추정하여 나타낸 것이다. 두 모델은 모두 항복면 내부의 일이므로 탄성거동을 보이고 Yasufuku 구성모델이 Lade의 복합항복면 구성모델보다 탄성거동을 정확하게 추정하고 있다.

Fig. 5는 응력비를 일정하게 유지하면서 응력의 크기를 증가시키는 응력경로시험결과를 추정, 비

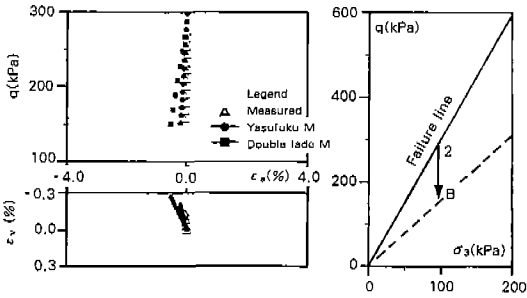


Fig. 4. Stress-path with decreasing deviator stress and constant confining pressure: conventional unloading; decreasing stress level

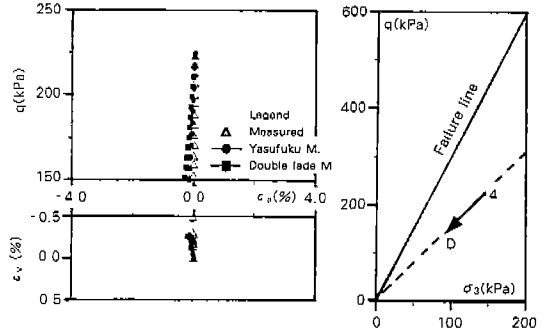


Fig. 6. Stress-path with decreasing deviator stress and decreasing confining pressure: increasing stress level

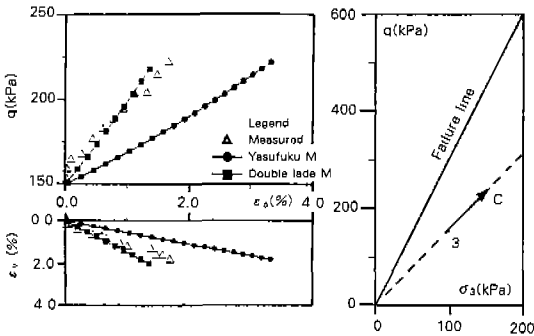


Fig. 5. Stress-path with increasing deviator stress and increasing confining pressure: constant stress level

복면 구성모델은 모두 항복면 내부의 일이므로 탄성거동만을 하게 된다. 두 구성모델의 추정결과도 역시 탄성거동만을 보이고 축변형률과 체적변형률의 회복량 관계에서 측정치가 추정결과보다 약간 크게 나타나고 있는데, 이는 응력반전 동안 생기는 현상 중 하나라고 판단된다.

Fig. 7은 축차응력과 구속압력을 증가시키면서 높은 응력비에 이르게 하는 응력경로시험결과를 두 구성모델로 추정하여 나타낸 것이다. Yasufuku 구성모델은 항복면이 크게 확장되므로 이러한 응력경로에서는 축변형률을 실제보다 크게 추정하는 경향이 있다. 그러나 Lade의 복합항복면 구성모델은 응력증분의 방향이 구형항복면과 원추형항복면을 동시에 증가시키는 방향으로 두 종류의 소성변

교하여 나타낸 것이다. 이러한 응력경로에 대한 Yasufuku 구성모델의 항복면형태는 계속 증가하여 탄소성변형이 크게 발생하므로 축변형률이 측정치보다 상당히 크게 나타난다. 이러한 응력경로에 대한 Yasufuku 구성모델의 응력-변형률 추정 능력은 다소 부족하다고 할 수 있다. 그러나 Lade의 복합항복면 구성모델의 응력비를 나타내는 원추형항복면의 크기는 일정하게 유지되고 구형항복면만이 증가하여 구형항복면이 상대적으로 작은 소성과쇄변형률과 탄성변형률이 발생하고 있으며 추정결과는 대체로 양호하다.

Fig. 6은 비례하중을 일정하게 하고 응력을 감소시키는 응력경로 시험결과를 추정하여 비교하였다. 이 경우 Yasufuku 구성모델과 Lade의 복합항

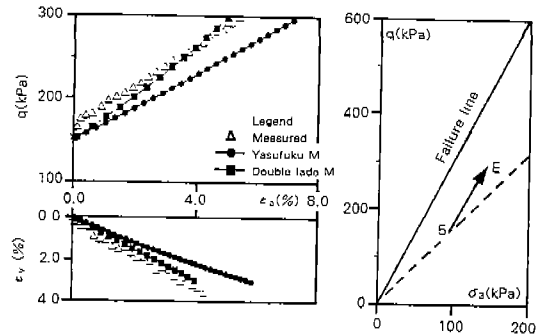


Fig. 7. Stress-path with increasing deviator stress and increasing confining pressure: increasing stress level

형이 발생하면서 다짐화강토의 변형거동을 잘 나타내고 있다.

Fig. 8은 높은 응력비에서 축차응력과 구속압을 증가시키며 낮은 응력비로 이동하는 응력경로시험 결과를 두 구성모델로 추정, 비교하여 나타낸 것이다.

Yasufuku 구성모델의 추정결과는 축변형률이 실측치보다 매우 크게 나타나고 있으며 높은 구속압력( $p > p_l$ 일때)에서는 경화거동의 발전에 따른 변형률 증분의 기여도가 감소하므로 축변형률 감소현상을 보이고 있다. 이러한 현상은 Yasufuku 구성모델의 항복면이 점 6에서 점 F로 크게 확장되므로 큰 소성변형이 발생하고 있으나 실제로는 화강토에서 응력비선이 항복면 역할을 하고 있으므로 이와 같이 응력비를 감소하는 응력경로에서는 Yasufuku 구성모델의 항복면 형상이 잘 맞지 않은 듯하다. 그러나 Lade의 복합항복면 구성모델의 추정치는 응력증분방향이 소성팽창항복면의 내부로 향하므로 소성팽창변형률은 증가하지 않고 소성파쇄항복면이 확장되어 소성파쇄변형률의 증가로 소성변형이 발생하고 있으며, Yasufuku 구성모델의 추정치에 비해 양호한 추정능력을 보인다.

Fig. 9는 축차응력을 감소시키면서 구속압을 증가시키는 응력경로시험으로서 응력비가 낮은 방향으로 이동하는 응력경로시험결과를 두 구성모델로 추정하여 비교한 것이다.

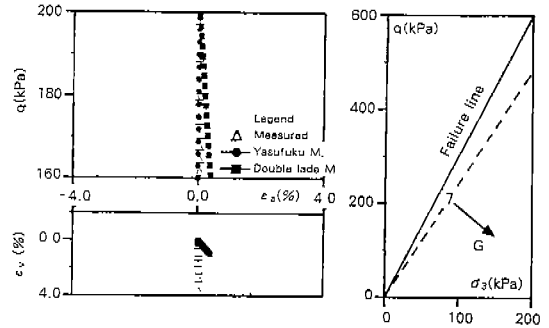


Fig. 9. Stress-path with decreasing deviator stress and increasing confining pressure; decreasing stress level

두 모델은 모두 응력증분방향이 항복면 내부로 향하므로 탄성변형만 발생하고 Lade의 복합항복면 구성모델이 Yasufuku 구성모델보다 탄성변형률을 크게 추정한다. 그리고 시험결과는 축하중을 감소하는데도 불구하고 축변형률은 거의 변화하지 않은 반면, 구속압증가에 의해서 생기는 체적변형률은 마치 소성거동을 하는 것처럼 큰 변형률이 발생하고 있다.

Fig. 10은 축차응력은 증가시키고 구속압력을 감소시켜 응력비를 높은 방향으로 이동하는 응력경로시험결과를 두 구성모델로 추정, 비교하여 나타낸 것이다. 두 모델은 모두 변형률을 초기에 다소 과대평가하지만 대체적으로 측정치와 거의 비슷한 거동을 보이고 있다. 그리고 Yasufuku 구성

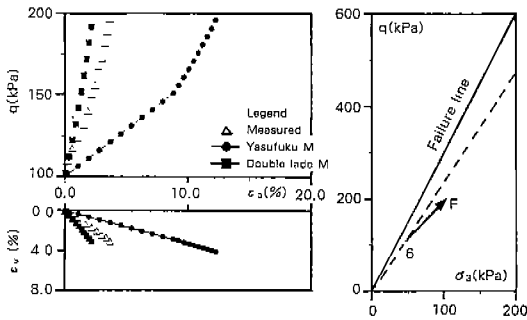


Fig. 8. Stress-path with increasing deviator stress and increasing confining pressure; decreasing stress level

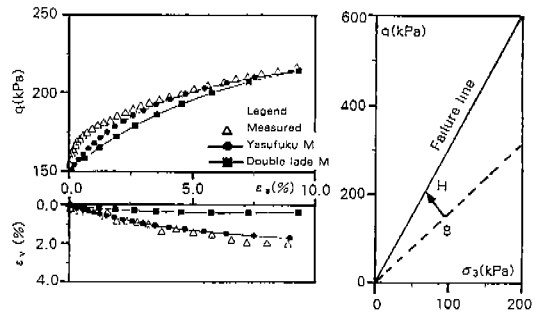


Fig. 10. Stress-path with increasing deviator stress and decreasing confining pressure; increasing stress level

모델은 체적변형률을 추정하는 능력이 좋은 반면 Lade의 복합항복면 구성모델은 이와 같은 응력경로에서는 소성팽창변형만이 발생하므로 압축변형률을 상당히 작게 추정하는 경향이 있다.

Fig. 11은 과거에 9' 지점까지 선행응력비 증가 하중을 가하고 나서 응력비를 감소한 점 9에서 구속압력을 일정하게 하고 축차응력을 증가하여 파괴에 이르는 응력경로시험결과를 두 모델로 추정, 비교하여 나타낸 것이다.

Yasufuku 구성모델의 추정결과는 측정치보다 축변형률에서 상당히 많은 차이를 보이는데 이는 시험결과가 점 9'에서 선행응력비증가의 영향이 상당히 큰 반면 추정결과는 점 9'에서 선행응력비증가의 영향이 이론상 없다는 결과로 나타나는 현상이다. 그러나 Lade의 복합항복면 구성모델의 추정결과가 Yasufuku 구성모델보다 모든 면에서 대응성이 좋다. 그 이유는 다짐화강토는 응력비선이 일종의 항복면 역할을 하고 있고, 이는 마치 Lade의 복합항복면 구성모델의 소성팽창항복면과 거의 비슷한 역할을 하기 때문에 점 9'의 선행응력비 영향이 점 9에서 점 G까지 응력변화 동안에 소성 팽창변형률이 없는 것으로 되기 때문이다.

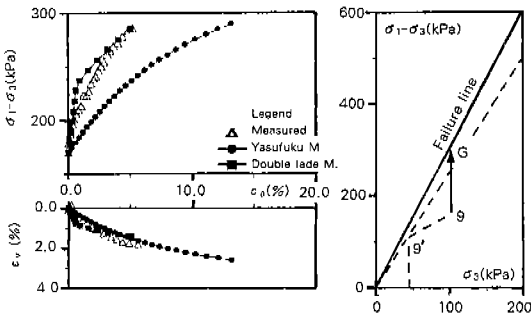


Fig. 11. Stress-path with decreasing deviator stress and constant confining pressure after previous loading to higher stress level

## 2. p-일정시험

일반적으로 흙 요소에 작용하고 있는 응력은 등방성분과 전단성분으로 나눌 수 있으며, 등방탄성

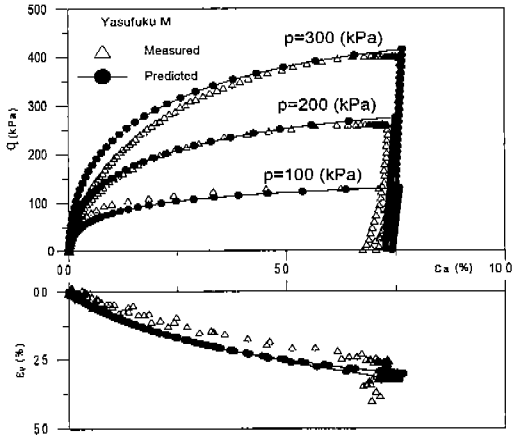
체에서는 등방응력변화에 따른 체적변형 그리고 전단응력변화에 따른 전단변형만이 발생하므로 서로 독립된 응력-변형을 관계가 있다. 그러나 흙과 같은 입상체에서는 전단응력이 변화하여도 체적변화 또는 간극수압의 변화가 발생한다. 이를 Dilatancy 현상이라 하며 이와같은 특성을 알아보기 위한 직접적인 시험이 p-일정시험이다. 본 연구에서는 p 값을 100, 200, 300kPa로 일정하게 유지하고 q 값을 증가시키다가 파괴전에 q 값을 감소시키는 시험을 실시하였다.

Fig. 12는 p-일정시험결과를 전단변형률 대 축차응력과 체적변형률의 관계를 두 개의 구성모델로 추정, 비교하여 나타낸 것이다. 축차응력과 축변형률의 관계에서 측정치와 Yasufuku 구성모델에 의한 추정결과는 좋은 대응성을 보이며, 축변형률과 체적변형률의 관계에서 p값이 크면 클수록 체적변형률이 약간 커지나 추정치는 p의 변화에 관계없이 거의 유사한 거동을 보인다. 대체로 Yasufuku 구성모델은 p값이 일정한 응력경로의 변형률을 정확하게 추정하고 있다. 따라서 Yasufuku 구성모델은 다짐화강토의 Dilatancy거동을 잘 표현할 수 있다고 생각된다. 한편 Lade의 복합항복면 구성모델은 축변형률을 다소 크게 추정하고 있다.

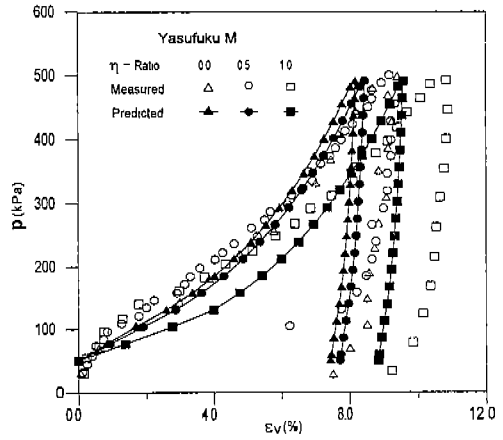
## 3. η-일정시험

Fig. 13은 η-일정시험의 결과를 체적변형률과 평균주응력의 관계로서 두 개의 모델로 추정한 결과를 함께 비교한 것이다. 시험결과에 있어 응력비가 크면 클수록 체적변형률이 큰 값이 되고 있다. Yasufuku 구성모델에 의한 추정결과는 시험결과보다 약간 작은 체적변형률의 값을 나타내지만 비슷한 경향을 보이고 있다. 그러나 Lade의 복합항복면 구성모델에 의한 체적변형률은 약간 크게 추정된다. 즉, 응력비가 0에서 0.5로 증가할 때 약간 증가하고나서 0.5에서 1.0으로 증가할 때 체적변형률이 크게 증가하는 시험결과와는 다소 차이를 보이고 있다.

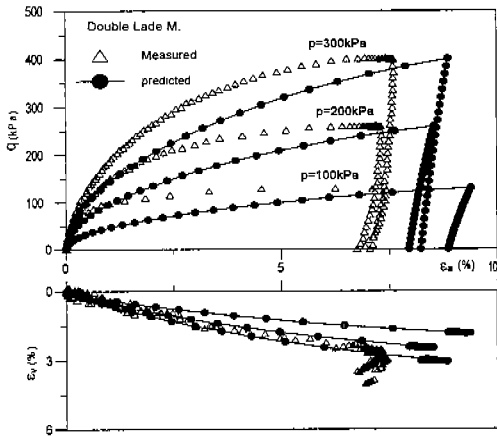




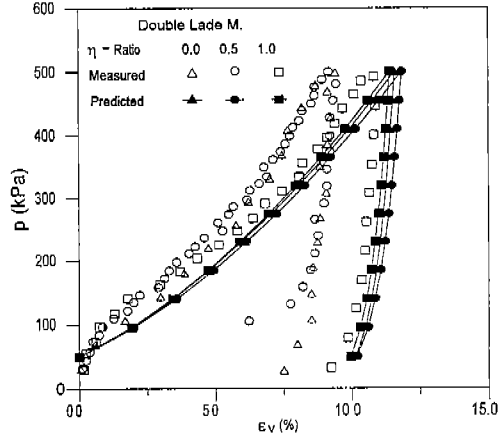
(a) Yasufuku's single hardening model



(a) Yasufuku's single hardening model



(b) Lade's double hardening model



(b) Lade's double hardening model

Fig. 12. Comparison between measured and computed shear strain and volumetric strain vs. stress ratio for Iksan decomposed granite soil

Fig. 13. Comparison between measured and computed volumetric strain vs. mean principal stress for iksan compacted decomposed granite soil

## V. 결 론

본 연구에서는 전북 익산의 화강토를 채취하여 다양한 응력경로시험을 실시한바 응력비가 일정하거나 감소하는 하중이 작용하는 경우 변형량이 비교적 작은 탄성거동을 보이며, 응력비가증가하는 하중이 작용할 때는 변형이 비교적 큰 탄·소성거동을 하는 것으로 미루어 응력비가 일종의 항복면 성질을 갖는다고 생각된다.

시험결과를 Yasufuku의 단일항복면 구성모델과

Lade의 복합항복면 구성모델로 추정, 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Lade의 복합항복면 구성모델의 소성팽창항복면은 응력비선과 비슷하며 다짐화강토의 소성팽창 변형을 잘 나타내고 있다.

2. Yasufuku의 단일항복면 구성모델의 항복면은 응력수준이 낮을수록 응력비선에 거의 직교하나 파괴에 가까운 높은 응력수준에 이르면 응력비선과 평행하게 된다. 따라서 응력비를 일정하게 하면서 응력이 증가하는 응력경로에서 Yasufuku의

단일항복면 구성모델은 탄·소성거동을 보이며 변형률을 과대평가하게 된다.

3.  $p$ -일정 응력경로시험에서 Yasufuku의 단일항복면 구성모델은 Lade의 복합항복면 구성모델보다 양호한 추정결과를 보여주고 있다. 이는 Yasufuku의 단일항복면 구성모델이 Dilatancy 특성의 표현정도가 높기 때문으로 생각된다.

4.  $\eta$ -일정응력경로시험에서 Yasufuku 구성모델은 체적변형률의 값을 약간 작게 추정하지만 비슷한 경향을 나타내며, Lade의 복합항복면 구성모델은 체적변형률을 약간 크게 추정하면서 응력비가 0에서 0.5로 증가할 때 약간 증가하고 나서 0.5에서 1.0으로 증가할 때 체적변형률이 크게 증가하는 시험결과와는 다소 차이를 보이고 있다.

본 연구는 '95년도 한국과학재단 특정기초(95-0600-02-01-3)연구비 지원에 의해 수행되었음.

### 참 고 문 헌

1. 이광찬, (1998). "풍화도에 따른 화강토의 토질공학적 특성", 전남대학교 박사학위 논문, pp. 193-212.
2. Lade, P. V. and Duncan, J. M., (1976) "Stress-Path Dependent Behavior of Cohesionless Soil". Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 102, No. GT1, pp. 51-68.
3. Varadarajan, A and Mishra, S. S. (1980), "Stress-Path Dependent Stress Strain-Volu-

- me Change Behaviour of a Granular Soil", International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading, Swansea, 7-11, pp. 109-119.
4. Murata, H., Hyodo, M. and Yasufuku, N. (1987) "Yield Character of Dense Sand under Low and High Pressure" Proc. of JSCE, No. 382, pp. 183-192.
5. Murata, H., Hyodo, M. and Yasufuku, N. (1988) "Compression and Shear Characteristics of Undisturbed Weathered Residual Soil 'Masado'" Proc. of Int. Conf. on Engineering Problems of Residual Soils, Vol. 1, pp. 643-648.
6. 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.
7. Lade, P. V., (1977) "ElastoPlastic Stress-Strain Theory for Cohesionless Soil with Curved Yield Surfaces", Int. J. Solids and Structs, Pergamon Press Inc. New York, Vol. 13, pp. 1019-1035.
8. Nishida, K. and Aoyama, C. (1988) "Physical Properties and Strength of Decomposed Granite Soil" Proc. of 1st Conf. on Geomechanics in Tropical, Lateritic and Saprolitic Soils, Vol. 1, pp. 371-382.