

다짐풍화화강토에 대한 Yasufuku 구성모델의 평가

Evaluation of Yasufuku's Constitutive Model for Compacted Weathered Granite Soil

정진섭^{*1}
Jeong, Jin-Seob

이광찬^{*2}
Lee, Kwang-Chan

李光范^{*3}
Li Guang Fan

Abstract

This study evaluated Yasufuku's constitutive model in terms of its capability to accurately consider the observed behavior of Iksan compacted weathered granite soil for various stress-paths. The strains calculated from the model are in reasonable agreement with those measured, but some discrepancies occur. The largest differences between measured and calculated strains occur for axial strain of proportional loading with increasing stress. Yasufuku's constitutive model can consider the observed behavior of Iksan compacted weathered granite soil with accuracy for conventional triaxial compression and for p' -constant loading with increasing stress ratio.

요 지

본 연구는 익산다짐풍화 화강토를 사용하여 여러가지 응력경로 시험을 실시하고 관측된 거동을 정확하게 예측할 수 있는 능력으로서 Yasufuku 구성모델을 평가하였다. Yasufuku 구성모델로 계산된 변형률은 측정치와 대부분 잘 일치하지만 약간의 차이를 나타내기도 하였다. 측정된 변형률과 계산한 변형률 사이에 가장 큰 차이를 보인곳은 증가하는 응력을 갖는 비례하중이 작용할 때 축변형률에 대하여 일어났다. Yasufuku

*1 정희원, 원광대학교 공과대학 토목환경공학과 교수

*2 정희원, 전남대학교 공기연 특별연구원

*3 中國 延邊水利水電設計研究院 高級工程師

구성모델은 익산다짐풍화 화강토의 거동을 일정 구속압력하에서 축하중이 작용할 때와 p' -일정하중이 작용할 때 정확하게 추정할 수 있었다.

Keywords : Stress-strain behavior, Stress-path, Yasufuku's constitutive model, Compacted weathered granite soil, Yield surface.

1. 서론

우리나라 지반의 대부분은 화강암이나 편마암이 기반암으로 구성되어 있으며 이들은 오랜 기간 동안 물리적, 화학적 작용에 의해 풍화되어 화강토로 존재하고 있다. 따라서 필연적으로 많은 경우 구조물 기초 또는 성토재료로서 폭넓게 이용하고 있다. 그러나 풍화화강토가 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 일반삼축압축이나 직접전단시험의 결과에 의존하고 있다(이광찬, 1998). 이와 같이 풍화화강토의 역학적 성질은 일반 흙과는 다르기 때문에 응력-변형률관계를 이용한 지반거동의 해석이나 예측은 더욱 어렵다. 지반거동을 해석 또는 예측하기 위해서는 현장의 경계조건이나 역학적 거동을 정확하게 표현할 수 있는 구성모델이 필요하다.

풍화화강토와 같은 입상재료에 대한 구성모델을 만드는데 있어서 중요한 요소중의 하나는 소성항복과정의 조건이다. 일반적으로 처녀응력비 증가하중을 받는 동안 풍화화강토의 변형은 회복할 수 없을 만큼 크고, 변형크기 또한 응력경로나 과거의 응력이력에 의존하는 경향이 대부분이다. 그리고 외력에 의해 흙은 입자와 입자 사이의 미끄러짐에 의해서 주로 발생하는 고유한 비탄성 거동

을 하게되며 응력이력의 영향은 어떤 조건에서는 흙의 거동을 지배하는 중요한 역할을 하게된다(Lade & Duncan, 1976, Varadarajan & Mishra, 1980). 흙에 있어서 응력경로의 영향에 대한 많은 연구결과는 응력변화가 탄성변형과 소성변형을 일으키며 어떤 조건에서는 응력경로가 변형률에 큰 영향을 미칠수 있는 반면 또다른 조건에서는 응력경로의 영향을 무시할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 이와 같은 관점에서 본 연구에서는 다짐풍화화강토에 대한 거동특성을 찾아내어 이에 적합한 구성모델을 개발할 목적의 일환으로 여러 가지 응력경로에 따른 거동특성을 알아보기 위하여 다양한 응력경로시험을 실시하고 현재 개발된 탄·소성구성모델 가운데 다짐풍화화강토의 거동을 잘 표현한다고 생각되는 Yasufuku 구성모델(Murata et al., 1987, 1988, 1990, Yasufuku et al., 1988)을 선택하여 응력경로별 예측능력을 비교·평가하면서 익산화강토의 구성특성을 조사하였다.

2. Yasufuku 구성모델

2.1 구성관계

구성식은 통상 해석이나 실험적인 고찰을 위해서 삼축압축 또는 인장시험의 경우로 제한하여 식(1), (2)의 응력-변형률 증분 매개변수를 사용하였으며 이러한 매개변수는 Cam-clay 모델에서도 사

용하였다(Roscoe and Burland 1968, Schofield and Wroth 1968).

$$p' = (\sigma_a' + 2\sigma_r')/3 : d\varepsilon_v = d\varepsilon_a + 2d\varepsilon_r \quad (1)$$

$$q = \sigma_a' - \sigma_r' : d\varepsilon_s = 2(d\varepsilon_a - d\varepsilon_r)/3 \quad (2)$$

또한 다일러턴시(dilatancy) 특성을 평가하기 위한 응력비 η 와 매개변수 Ψ 는 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$\eta = q/p' : \Psi = d\varepsilon_v^p/d\varepsilon_s^p \quad (3)$$

여기서 σ_a' 와 σ_r' 은 축방향과 반경방향의 유효 응력이며, $d\varepsilon_a$ 와 $d\varepsilon_r$ 은 축방향과 반경방향의 변형률증분이고, $d\varepsilon_v$ 와 $d\varepsilon_s$ 는 체적변형률증분과 전단변형률증분이다. 전체적변형률과 전단변형률은 다음과 같이 탄성성분과 소성성분으로 나누어지며 탄성체적변형률증분과 탄성전단변형률증분은 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$d\varepsilon_v = d\varepsilon_v^e + d\varepsilon_v^p : d\varepsilon_s = d\varepsilon_s^e + d\varepsilon_s^p \quad (4)$$

$$d\varepsilon_v^e = \frac{1}{K'} dp' : d\varepsilon_s^e = \frac{1}{3G'} dq \quad (5)$$

여기서 K' 는 유효체적탄성계수이고 G' 는 유효전단탄성계수이다.

2.2 항복함수와 소성 포텐셜함수

등방항복함수는 다음식으로 표현한다.

$$f = \eta^2 + 2N^2 \ln p'/p_0 = 0 \quad (6)$$

여기서 N 은 $dq/dp' = 0$ 일 때의 η 값을 나타내는 매개변수이고 p_0 는 등치등방압밀응력으로 다

음 식과 같다.

$$p_0 = p' \cdot \exp\left(-\frac{\eta^2}{2N^2}\right) \quad (7)$$

항복곡선의 기울기는 다음 식으로 나타낸다.

$$\frac{dq}{dp'} = \frac{\eta^2 - N^2}{\eta} \quad (8)$$

특히 풍화 화강토에 대한 응력과 다일러턴시(dilatancy) 관계를 가정하는 식은 다음과 같다.

$$dW^p = p' \sqrt{(d\varepsilon_v^p)^2 + (Md\varepsilon_s^p)^2 + (2-c)\eta d\varepsilon_v^p d\varepsilon_s^p} \quad (9)$$

$$\frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_s^p} = \frac{M^2 - \eta^2}{c\eta} \quad (10)$$

소성 포텐셜함수는 다음과 같이 유도된다.

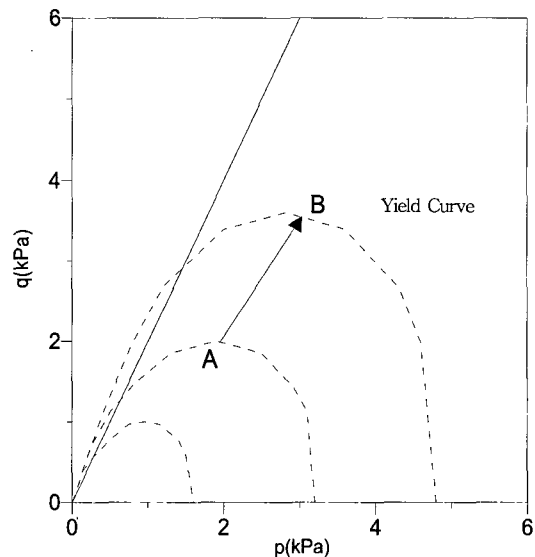


Fig. 1. Schematic Illustration of Yielding Process for Yasufuku's Constitutive Model shown in p' - q plane

$$c \neq 1 : g = \ln p' + \frac{c}{2(c-1)} \ln \left(\eta^2 + \frac{M^2}{c-1} \right) \quad (11.a)$$

$$c = 1 : g = \ln p' + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta}{M} \right)^2 \quad (11.b)$$

여기서 M 은 $\Psi=0$ 일 때 η 의 값이고, c 는 $\eta=M$ 일 때 η 와 $d\varepsilon_v^p/d\varepsilon_s^p$ 곡선의 접선기울기에 기초하여 결정된 쌍곡선의 형상을 평가하기 위한 매개변수이다. 그림 1은 p' - q 평면에서 점 A로부터 점 B까지의 응력변화에 따른 항복면의 변화를 모식적으로 나타내었다.

2.3 첨두강도의 특징

응력-변형률관계는 첨두(Peak)강도값을 갖고 입상재료에 대한 첨두강도에서의 Mohr의 파괴포락선의 기울기가 일반적으로 구속압력의 증가와 더불어 감소한다는 경험적인 증거를 기초로 하여 파괴때 축차응력을 다음과 같이 가정한다.

$$q_p \neq q_r : q_p = \alpha_p p_a \left(\frac{p'}{p_a} \right)^b \quad (12.a)$$

$$q_p = q_r : q_p = M p \quad (12.b)$$

여기서 q_p 와 q_r 은 q 의 첨두(Peak)와 잔류(Residual)강도 값이다. 그리고 매개변수 α_p 는 $p' = p_a$ 일 때 η 의 값이고 p_a 는 대기압이며 b 값은 $\ln p' - \ln q$ 좌표에서 $p' < p_l$ 일 때 직선의 기울기이다. 또한 p_l 은 첨두강도선과 잔류강도선 교차점의 p' 값이다. 즉 $q_p = q_r$ 일 때의 p' 값이다. p_l 값은 다음과 같은 식으로 구해진다.

$$p_l = p_a \left(\frac{M}{\alpha_p} \right)^{1/(b-1)} \quad (13)$$

식 (12)와 식 (13)을 이용하여 응력비 η 에 대한 파괴규준은 다음과 같다.

$$\eta_p = \alpha_p \left(\frac{p'}{p_a} \right)^{b-1} \quad 0 < p' < p_l \quad (14.a)$$

$$= M \quad p' > p_l \quad (14.b)$$

상대적으로 낮은 응력 수준 즉, $p' < p_l$ 에서 식 (14)는 p 를 증가시키는 것과 함께 지수 함수적으로 감소하는 η_p 를 나타낸다. 그리고 결국 p_a 값이 p_l 값에 도달할 때 η_p 는 잔류상태선과 일치하게 된다. 식 (14)를 이용함으로써 구속압력에 따른 첨두강도의 변화를 알 수 있다.

2.4 경화매개변수

항복곡선의 크기에 대한 변화를 표현하기 위한 k^p 에 대한 전개방정식을 식 (15) ~ (17)에 나타내었다.

$$dk^p = d\varepsilon_v^p + X d\varepsilon_s^p = \Lambda \left(\frac{\partial g}{\partial p} + X \frac{\partial g}{\partial q} \right) = \Lambda \bar{k} \quad (15)$$

$$X = x \eta \quad (16.a)$$

$\eta = \eta_p$ 일 때

$$\frac{\bar{k}}{\left\{ \left(\frac{\partial g}{\partial p} \right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial q} \right)^2 \right\}^{1/2}} = \frac{c(\eta_p - M)}{\{(M^2 - \eta_p^2)^2 + (c\eta_p)^2\}^{1/2}} \quad (16.b)$$

$$x = \frac{(\eta_p - M)(c + \eta_p + M)}{c\eta_p^2} \quad (17)$$

여기서 매개변수 x 는 식 (14)에 의해 주어진 η_p 항을 포함한다는 것을 알 수 있고 경화매개변수 k^p 는 p' 와 η 의 함수가 된다. 그리고 경화거동의 확장에 대한 두 개의 변형률증분 ($d\varepsilon_v^p, d\varepsilon_s^p$)의 기여도가 p' 의 증가와 함께 점진적으로 변화한다. 여기서 매개변수 x 가 $\eta_p = M$ 인 경우 즉, $p' > p_l$ 일 때 0이 되므로 상대적으로 높은 응력에서 경화

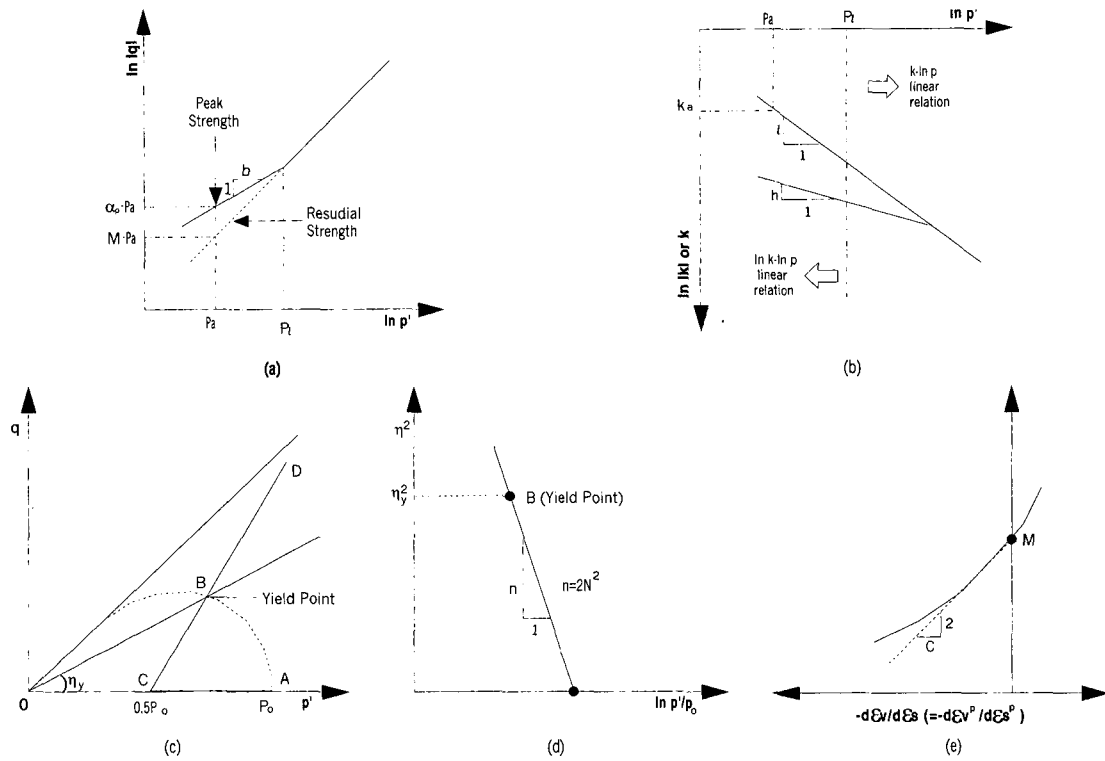


Fig. 2 Methods for Determination of Experimental Parameters

매개변수는 Cam-clay 모델의 매개변수와 같아진다. 또한, 식 (15)에 있는 X 를 0으로하여 모델화된 연화의 진행 (η_p 에서 M 까지의 응력범위 안에서의 거동)은 침투 응력비인 η_p 에 도달할 때 시작한다. 식 (18)에 의해 정의된 $\partial p_o / \partial k^p$ 항은 낮은 응력 영역 ($p' < p_l$)에서는 $\ln k$ 과 $\ln p$ 관계가 직선에 가깝고 높은 응력영역 ($p > p_l$)에서는 k 과 $\ln p'$ 관계가 보다 더 직선적이라는 관찰결과로부터 구했다.

$$\frac{\partial p_o}{\partial k^p} = \frac{p_o}{(l-h)k_a} \left(\frac{p_a}{p_o}\right)^l \quad 0 < p' < p_l \quad (18.a)$$

$$= \frac{p_o}{(l-h)k_a} \left(\frac{p_a}{p_l}\right)^l \quad p' > p_l \quad (18.b)$$

2.5 Yasufuku 구성모델의 토질 매개변수

Yasufuku 구성모델에서는 8개의 매개변수가 사용된다. 각각의 매개변수 결정과정은 그림 2(a)~(e)에 나타내었다. 강도 매개변수 α_p 와 b 는 그림 2(a)에 보여진 것처럼 몇 개의 삼축압축시험으로부터 얻어진 피크(Peak)강도로부터 결정된다. 그리고, 압밀 매개변수 l , h 및 k_a 는 그림 2(b)에 보여진 것과 같이 등방압밀팽창시험으로부터 얻어진다. 다일러턴시(dilatancy) 매개변수 M 과 c 는 그림 2(e)에 나타낸 것과 같이 배수삼축압축시험으로부터 얻어진 응력-다일러턴시 관계에서 얻을 수 있다. 또한, 항복특성과 관련된 매개변수 N 는 그림 2(d)의 $\eta^2 - \ln p'/p_o$ 축에 나타낸 직선의 기울기로부터 나타난다. 이 매개변수는 응력-변형률 거동을

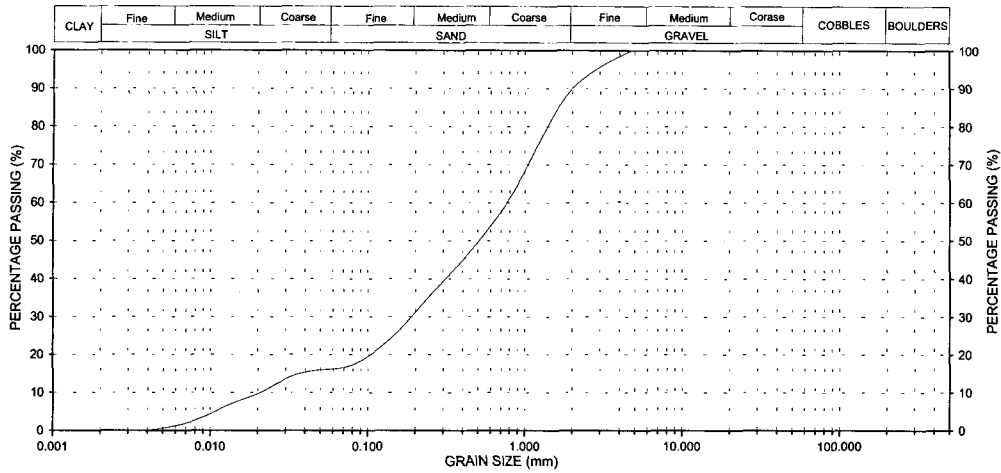


Fig. 3. Grain Size Distribution of Iksan Compacted Weathered Granite Soil

예측하는데 매우 중요하다. 이 직선은 그림 2(c)에서 처럼 응력경로 O-A-C-D를 갖는 과압밀 화강토에 대한 배수삼축압축시험으로부터 결정된 응력점 A에 대응하는 항복점 B를 얻으셔서 쉽게 표현된다. 따라서, 8개의 매개변수는 몇 개의 삼축압축배수시험과 등방압밀팽창시험을 통해서 쉽게 얻을 수 있다.

3. 시험

3.1 시료준비 및 특성

시험에 사용한 풍화화강토는 전라북도 익산시 여산지방의 우회도로 공사현장에서 채취하였다. 현장에서 채취한 화강토를 자연 건조시킨 후 #4

체를 통과한 시료를 균일하게 혼합하여 시험에 이용하였다. KSF-2312에 따라 A-1방법으로 매회 시료를 바꿔가며 다짐시험을 시행한 결과 최적함수비는 15%, 최대건조밀도 $\gamma_{d \max} = 1.78 \text{g/cm}^3$ 이고, 시험시료의 $\gamma_d = 1.53 \text{g/cm}^3$, $w = 13\%$ 로 준비하였다. 이렇게 준비된 시료를 시료 제작용 몰드에 복층다짐하여 균일한 밀도를 갖도록 조제하였으며 시험에 사용한 공시체의 셀(cell)압력은 25kPa 이고 사용한 공시체크기는 직경 50mm, 높이 110mm이다. 연구에 사용된 다짐풍화화강토의 물리적 특성을 표 1에 나타내고 입도분포 곡선은 그림 3과 같다.

3.2 토질매개변수 결정

그림 2의 방법으로 Yasufuku 구성모델에 대한 8개의 매개변수를 구하여 표 2에 나타내었다.

Table 1. Physical Properties of Iksan Compacted Weathered Granite Soil

Gs	γ_d (g/cm^3)	USCS	다짐시험 (A다짐)	
			$\gamma_{d \max}$ (g/cm^3)	O.M.C (%)
2.62	1.53	SM	1.78	15

4. 시험결과 및 고찰

4.1 단순응력경로의 시험

4.1.1 배수삼축압축 시험

그림 4는 구속압력을 달리한 배수삼축압축 시

Table 2. Soil Parameters Employed at Yasufuku Model Analysis for Iksan Compacted Weathered Granite Soil

Consolidation Parameters			Strength Parameters		Dilatancy and Yield Parametrs		
l	h	ka	α_p	b	C	M	N
1.156	0.071	0.0266	1.56	1.05	2.62	1.58	1.11

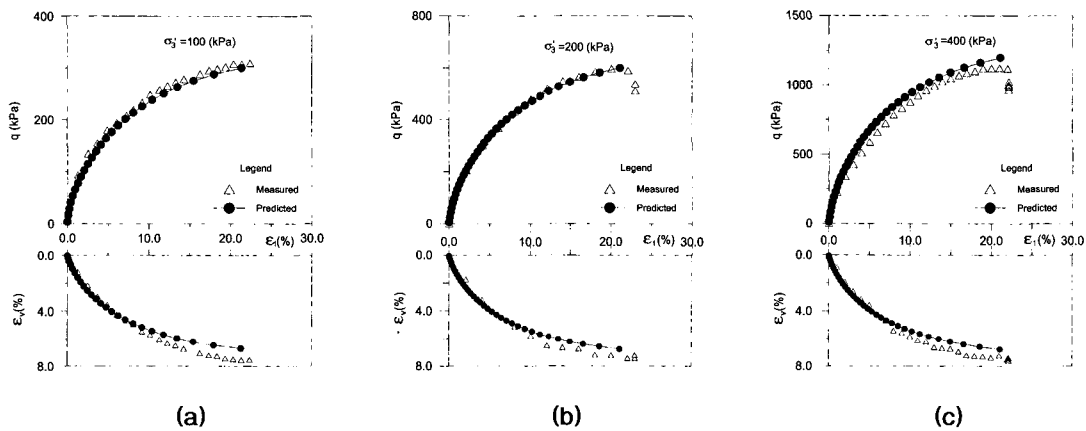


Fig. 4. Comparison between Measured and Predicted Deviatoric Stress and Volumetric Strain vs Axial Strain for Iksan Compacted Weathered Granite Soil

험결과를 Yasufuku 구성모델로 예측하여 함께 나타낸 것이다. 구속압력을 일정하게하고 축차응력을 증가시키는 것으로 응력비(응력수준)를 증가하는 방향으로 하중을 가하는 단순한 경우이다. Yasufuku 구성모델에 사용된 매개변수 값은 유사한 시험결과로부터 얻었으며 비록 높은 응력수준에서 체적변형률이 약간 과소평가 되지만 계산된 축변형률대 축차응력과 체적변형률곡선은 측정값을 아주 정확하게 예측하고 있다.

4.12 단순응력경로 시험

그림 5는 응력비를 일정하게 하여 점 1에 이르게 한 후, 구속압력을 일정하게하고 축차응력을 증가시켜 파괴점 A에 도달하도록 한 응력경로 시험결과인데 이를 Yasufuku구성모델로 예측하여

비교한 것이다. 이 시험은 모델 매개변수결정 시험과 비슷한 응력경로이므로 예측 정도가 양호하

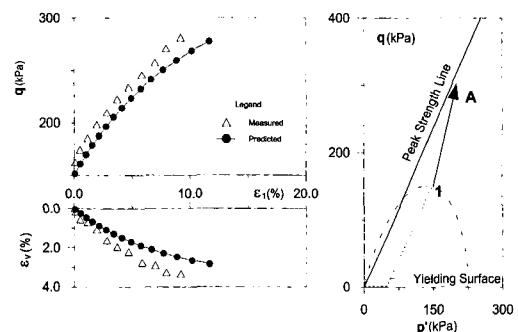


Fig. 5. Stress-Path with Increasing Deviatoric Stress and Constant Confining Pressure : Conventional Primary Loading ; Increasing Stress Level

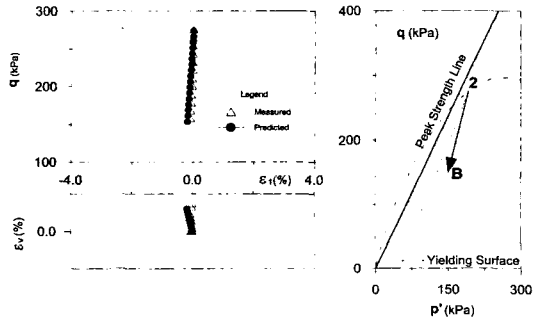


Fig. 6. Stress-Path with Decreasing Deviator Stress and Constant Confining Pressure : Conventional Unloading ; Decreasing Stress Level

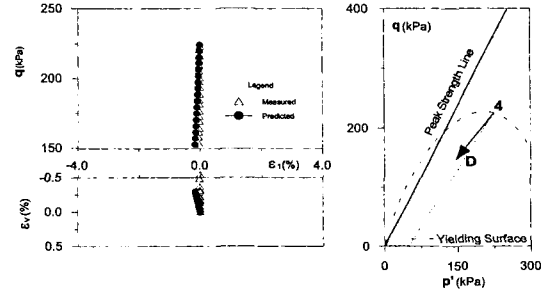


Fig. 8. Stress-Path with Decreasing Deviator Stress and Decreasing Confining Pressure ; Constant Stress Level

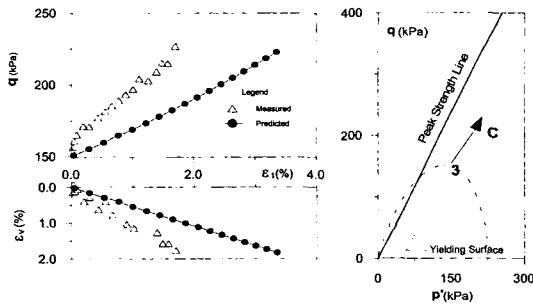


Fig. 7. Stress-Path with Increasing Deviator Stress and Increasing Confining Pressure ; Constant Stress Level

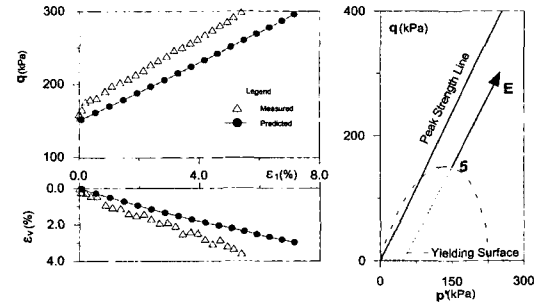


Fig. 9. Stress-Path with Increasing Deviator Stress and Increasing Confining Pressure ; Increasing Stress Level

험과 비슷한 응력경로이므로 예측 정도가 양호하다. 다만 축변형률을 약간 크게 예측하고 있으나 이것은 시험오차 범위에 속한다고 생각된다. 그림 6은 그림 5와 대조적인 경우인데 항복면 내부로 향하는 응력경로로서 이론상 탄성거동만 하게 된다. 시험결과는 예측치와 좋은 대응관계를 보인다.

그림 7은 응력비를 일정하게 유지하면서 항복면 외부로 향하는 응력경로이다. 축변형률의 예측치는 시험결과보다 크게 나타나고 있다. 그 이유는 다짐화강토에서는 응력비(η)선이 항복면의 특징을 강하게 갖고 있는데, Yasufuku 구성모델의 항복면은 응력수준이 낮을수록 응력비(η)선과 거의 직교

하고 파괴에 가까운 응력수준에 이르면 응력비선과 평행하게 된다. 따라서 응력비가 일정한 응력경로의 경우(비례하중이 작용할 때) Yasufuku 구성모델은 소성거동을 보이며 변형률을 과대 평가하는 경향이 있다.

그림 8은 항복면 내부로 향하는 응력경로로서 이론상 탄성거동만을 하게 된다. 시험결과는 체적 변형률의 회복량이 예측치 보다는 약간 크게 나타나지만 거의 비슷한 값을 보이고 있다. 이는 Yasufuku 구성모델의 탄성거동 예측 능력이 좋다는 것을 보여주고 있다.

그림 9는 응력경로의 방향이 항복면 외부로 향하므로 이론상 탄·소성 변형이 발생한다. 예측치

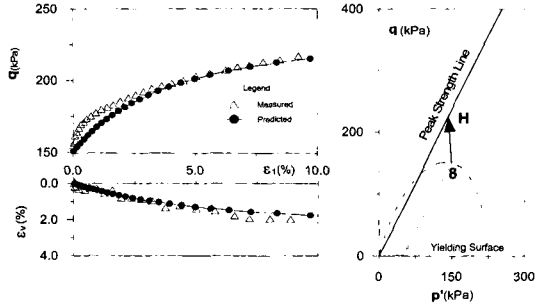


Fig. 10. Stress-Path with Increasing Deviator Stress and Decreasing Confining Pressure ; Increasing Stress Level

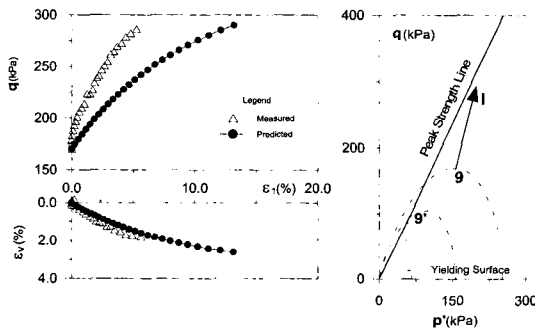


Fig. 11. Stress-Path with Decreasing Deviator Stress and Confining Pressure after Previous Loading to Higher Stress Level

를 시험결과와 비교할 때 축변형률이 약간 크게 나타나며 체적변형률은 다소 작게 나타나는 경향을 볼 수 있다.

그림 10의 응력경로는 항복면 외부로 향하면서 평균주응력은 일정하게하고 축차응력을 증가하는 것으로 이론상 탄·소성 거동을 나타내며 소성 변형이 증가하여 파괴에 이르고 있음을 알 수 있다. 축차응력의 관계에서 예측치는 초기에 다소 과소평가되고 있지만 대체적으로 실험치와 비슷한 값을 나타낸다.

그림 11은 점 9'까지 응력비를 가하고나서 응력비를 감소한 점 9에서 구속압력은 일정하게하고 축차응력을 증가하여 파괴에 이르는 응력경로 시험결과를 Yasufuku 구성모델로 예측하여 비교

한 것이다. 예측치는 시험치보다 큰 축변형률이 발생하고 있다. 그 이유는 실제에는 점 9'의 선형 응력비의 영향이 상당히 큰 반면 Yasufuku 구성 모델은 항복면 형상이 점 9'의 선형응력비 영향이 이론상 없는 것으로 되어있기 때문이다.

4.2 p' - 일정시험

일반적으로 흙 요소에 작용하고 있는 응력은 등방성분과 전단성분으로 나눌 수 있으며 등방탄성체에서는 등방응력의 변화에 따른 체적변형과 전단응력 변화에 따른 전단변형만이 발생하므로 서로 독립하여 응력-변형을 관계가 있다. 그러나 흙과 같은 입상체에서는 전단응력이 변화하여도 체적변화 또는 간극수압의 변화가 발생한다. 이와같은 특성을 알아보기 위한 직접적인 시험은 p' - 일정시험이다. 본 연구에서는 p' 값을 100kPa,

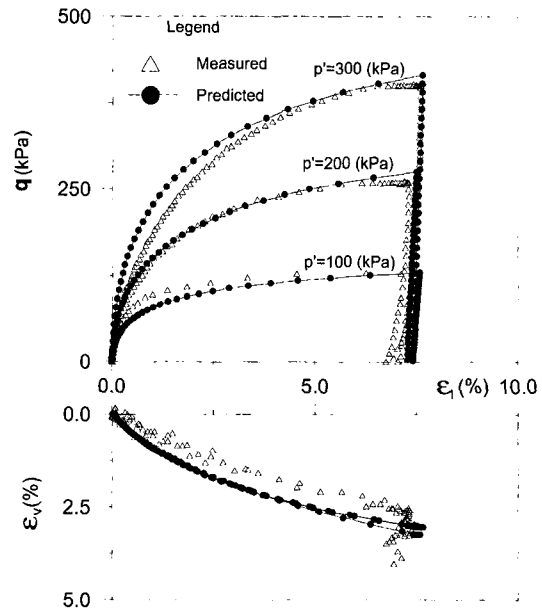


Fig. 12. Comparison between Measured and Predicted Shear Strain and Volumetric Strain vs. Stress ratio for Weathered Granite Soil

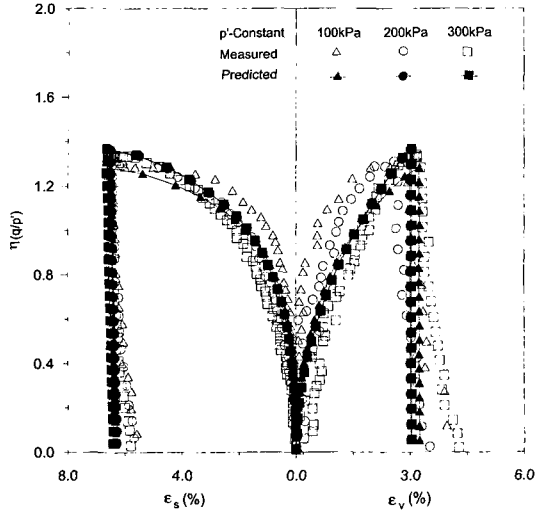


Fig. 13. Comparison between Measured and Predicted Shear Strain and Volumetric Strain vs Stress Ratio for Granite Soil

200kPa, 및 300kPa로 일정하게 유지하고 q 값을 증가시키다가 파괴전에 q 값을 감소한 시험결과를 Yasufuku구성모델로 예측하여 거동특성을 파악하였다.

그림 12는 p' 값을 100kPa, 200kPa 및 300kPa로 한 p' -일정시험결과를 Yasufuku구성모델로서 예측·비교한 것이다. 시험결과 체적변형률은 p' 값이 다르더라도 거의 비슷하게 나타나고 있으며 예측치와도 일치한다. 이와 같은 이유는 체적변화를 일으키는 p' 값의 변화가 없이 응력비만의 변화에 의하여 체적변형이 일어나고 응력비 변화가 비슷하기 때문으로 생각된다.

그림 13은 p' -일정시험결과에 대한 응력비 (q/p')와 전단변형률 그리고 체적변형률의 관계를 Yasufuku 구성모델로 예측·비교하여 나타낸 것이다. 전단 변형률과 응력비의 관계에서 예측치는 거의 유사한 예측을 보이며 체적변형률과 응력비의 관계에서 실험치는 p' 값이 클수록 체적변형률이 커지는 반면 예측치는 거의 같은 값을 나

타내고 있다.

4.3 η - 일정시험

그림 14는 η -일정시험 결과를 평균 주응력과 체적변형률의 관계로 나타내고 예측치와 비교하였다. 시험결과는 응력비(η 값)가 증가하면 할수록 체적변형률이 증가하며 η 값이 0.0 ~ 0.5보다 0.5 ~ 1.0사이에서 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. 그리고 Yasufuku 구성모델의 예측결과도 이와 비슷한 경향을 보이고 있다. 이와 같은 현상은 소성체적 변형률이 응력비의 함수로 구해지기 때문으로 생각된다.

그림 15는 η -일정시험 중에서 응력비(η 값)가 0.5 와 1.0의 경우를 축변형률에 대한 축차응력과 체적변형률의 관계를 Yasufuku 구성모델로서 예측 비교하여 나타낸 것이다. 시험결과는 응력비 (η 값)가 증가함에 따라 축변형률은 증가한 반면 체적변형률은 거의 같은 값을 보이고 있다. 이와

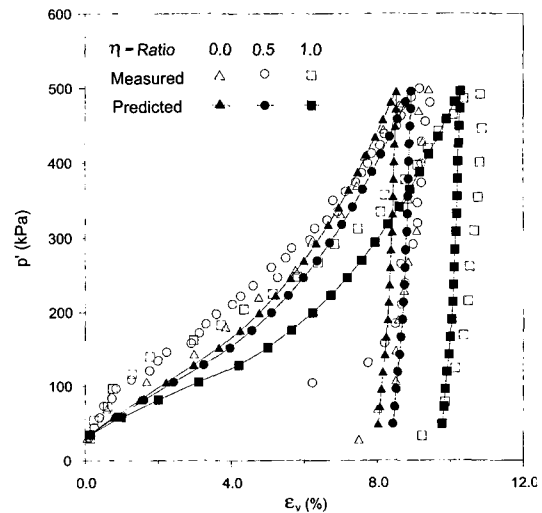


Fig. 14. Comparison between Measured and Predicted Volumetric Strain vs Mean Principal Stress for Compacted Weathered Granite Soil

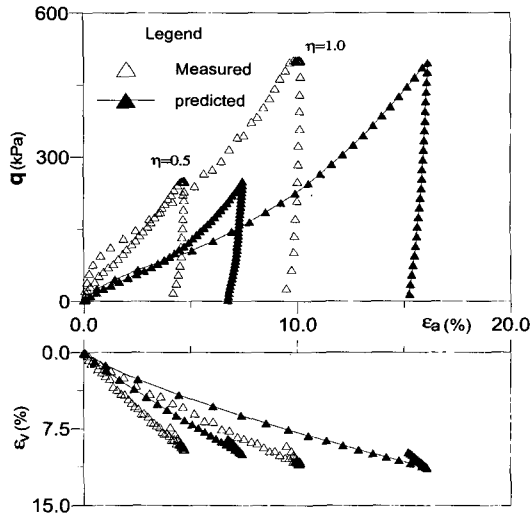


Fig. 15. Comparison between Measured and Predicted Deviatoric Stress and Volumetric Strain vs Axial Strain for Compacted Weathered Granite Soil

같은 현상은 응력비는 달라도 p' 값이 두 경우 비슷하게 변화하기 때문에 체적변형률은 비슷한 값을 보인다. 예측결과 또한 실험치와 같은 경향이 지만 축변형률은 매우 과대평가 하고 있다. 이것은 Yasufuku 모델의 다일러턴시와 항복 매개변수 C, M, N에 의한 영향 때문으로 생각된다.

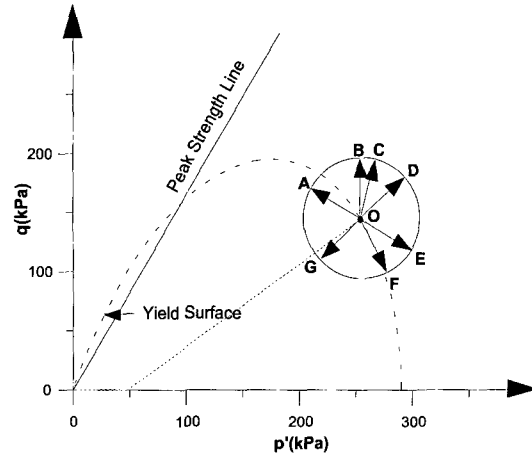


Fig. 16. Schematic Illustration of Stress-Path Direction in p' - q Coordinate System

5. 응력경로에 따른 변형률 거동

변형률의 크기와 방향에 미치는 응력경로의 영향을 알아보는 것은 매우 중요하다. 그리하여 한 점에서 여러방향으로 같은 크기의 응력 증가 시험을 하여 얻은 소성변형률 증분벡터를 Yasufuku 구성모델로 예측·비교하였다. 그림 16은 p' - q 좌표에서 O점을 기준으로 하여 각각 A, B, C, D, E,

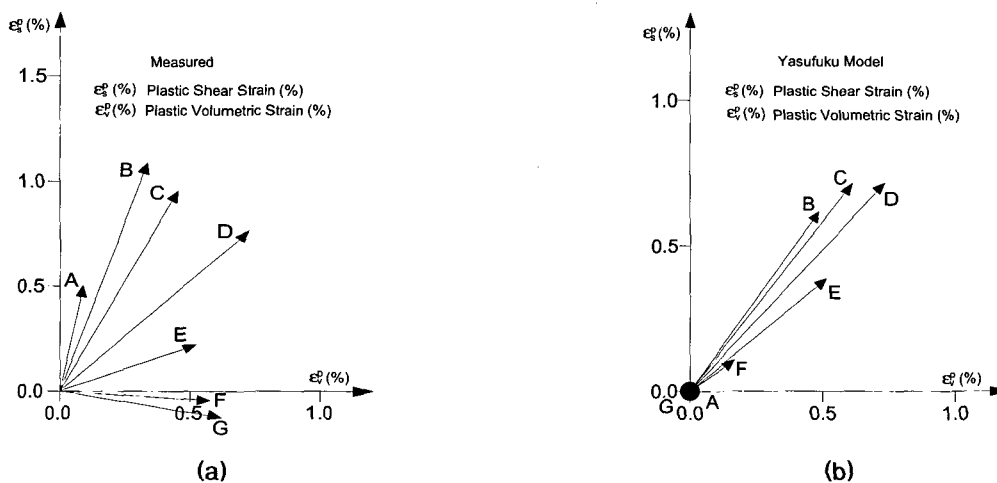


Fig. 17 Measured Strain Increment Vectors

F, G로 같은 크기의 응력을 변화하였다. 시험 후 각 지점의 전 변형률 증분값에서 Hooke의 이론에 의한 탄성변형률 증분값을 감하여 소성변형률 증분값을 구하고, 이와 같은 응력경로를 Yasufuku 구성모델로 예측하여 소성변형률 벡터를 비교하여 그림 17(a), (b)에 나타내었다.

Yasufuku 구성모델은 이론상 항복면 내부로 향하는 A와 G의 응력 변화에 대하여서는 소성변형률은 없이 탄성변형만이 발생한다. 그러나 실험치에서 보는 바와 같이 소성변형이 발생하고 있는데 이는 항복면 내부에서도 소성변형이 발생함을 의미하고 있다. 그리고 B, C, D, E 및 F점의 경우에는 항복면 외부로 향하는 응력경로로서 실험치와 예측치의 소성변형률 증분벡터의 크기와 방향에 많은 차이를 보이고 있다.

이와 같이 항복면 내부로 향하는 응력경로(A, G)에서 소성변형이 나타나고 항복면 외부로 향하는 응력경로(B, C, D, E, F)에서는 소성변형률 증분벡터의 크기와 방향에 많은 차이를 보여 다짐화강도에 대한 Yasufuku 구성모델의 항복면의 표현에 대한 개선이 요구되고 있다.

6. 결 론

본 연구는 전북 익산 지방의 풍화화강토를 채취하여 다짐 재생형한 시료에 대하여 다양한 응력경로 시험을 실시하고, 그 시험결과를 Yasufuku 구성모델로 예측·비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 다짐풍화화강토에 대한 응력경로 시험결과에 의하면 응력비가 일정하거나 감소하는 하중을 작용하는 경우에 변형량이 비교적 작은 탄성거동을 보이고 응력비가 증가하는 하중을 작용할 때는 변형이 비교적 큰 탄소성거동을 하는 것으로 미루어 응력비가 일정한선이 하나의 항복면

의 성질을 갖는다고 생각된다.

2) Yasufuku 구성모델의 항복면은 응력수준이 낮을수록 응력비선에 거의 직교하나 파괴에 가까운 높은 응력수준에 이르면 응력비선과 평행하게 된다. 따라서 응력비는 일정하게 하면서 응력이 증가하는 응력경로에서는 Yasufuku 구성모델은 탄소성거동을 보이며 변형률을 과다 평가하게 된다.

3) p' -일정 응력경로시험에서 축변형률과 축차응력 관계에서는 상당히 양호한 예측을 보여 주고, 축변형률-체적변형률곡선의 시험결과는 p' 값의 크기에 따라 변화가 약간 있으나 예측결과는 p' 값의 크기에 따라 변화가 거의 나타나지 않았다. 이는 Yasufuku 구성모델이 다이러턴시(dilatancy) 특성의 표현정도가 낮기 때문으로 생각된다.

4) η -일정 응력경로 시험에서 응력비(η 값)가 크면 클수록 체적변형률도 큰값을 갖으며 동일한 η 값에 대해서는 체적변형률을 다소 크게 예측하였으며 축차응력-축변형률관계에서는 축변형률을 매우 크게 예측하였다.

감사의 글

본 연구는 '95년도 한국과학재단 특정기초(95-0600-02-01-3)연구비 지원에 의해 수행되었으며 당 재단에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 이광찬 (1998). "풍화도에 따른 화강토의 토질공학적 특성", 전남대학교 박사학위 논문
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.
4. 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.
5. Murata, H., Hyodo, M., and Yasufuku, N. (1990). "Prediction of Mechanical Behaviour of Undisturbed "Masdo" ", Residual Soils in Japan, Research Committee on Physical and Mechanical Properties of Residual Soil Ground, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 111-118
 6. 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
 7. Schofield, A. N., and Wroth, C. P.(1968). "Critical State Soil Mechanics", McGraw- Hill Book Company, New York.
 8. 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, pp. 109-119.
 9. 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.

(접수일자 1999. 2. 13)