

등방 및 비등방 압밀된 다짐풍화화강토의 항복곡선

Yielding Curve of Isotropic and Anisotropic Consolidated Compacted Weathered Granite Soil

정진섭* · 양재혁**

Jeong, Jin Seob · Yang, Jae Hyouk

Abstract

During this study, various stress path tests in previous isotropic and anisotropic (compression and tension) stress histories are performed on weathered granite soil sampled at Iksan, Jeonbuk. Yielding points are determined from various stress-strain curves(stress ratio-shear strain, volumetric strain, normalized energy and dissipated total energy curves). The shape and characteristics of isotropic and anisotropic yielding curves are examined. The main results are summarized as follows : 1) Yielding curves defined from stress ratio - normalized energy and dissipated total energy curves show almost perfect ellipse. 2) Directions of plastic strain incremental vector are not perpendicular to yielding curve. 3) Normalized energy and dissipated total energy spread with similar tendency with respect to yielding curve in stress space.

Keywords : Weathered granite soil, Stress path test, Isotropic stress history, Yielding curve, Anisotropic stress history, Yielding point, Stress-strain curve

I. 서론

토목공사의 대형화와 더불어 대규모의 절·성토가 불가피해짐에 따라 풍화화강토로 이루어진 사면 및 기초구조물의 불안정 등 여러 문제점들이 발생하고 있다. 최근 이와 같은 문제점을 극복하기 위

해 풍화화강토에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 이러한 연구의 대부분은 풍화화강토의 응력-변형률 거동이 풍화도, 함수상태 그리고 구속압력의 차이에 의해 더욱 변화한다는 것을 지적하고 있다.

그러나 지금까지의 풍화화강토에 대한 연구는 등방응력이력을 받은 시료에 국한되었다. 이는 실제 현장에서 풍화화강토를 성토 재료로 사용하여 다짐을 실시할 경우 응력이력은 비등방적이라는 사실을 간과한 것으로 실제 응력-변형률 거동에 미치는 과거의 비등방 응력이력의 영향이 고려되지

* 원광대학교 토목환경공학과 교수

** 여수대학교 시간강사

* Corresponding author. Tel.: +82-63-850-6719

fax: +82-63-850-6719

E-mail address: jsjeong@wonkwang.ac.kr

않았다.

응력-변형률 곡선에서 결정한 항복점을 가지고 항복곡선의 형상을 평가하는 지금까지의 연구는 주로 등방의 응력이력을 받은 점성토와 사질토에 국한되어 왔다. Poorooshasb 등(1966, 1967, 1971)은 복잡한 응력경로시험 결과를 바탕으로 모래의 항복곡선이 축차응력과 평균유효주응력공간에 있어서 응력비 일정의 직선으로 표현되고, 소성포텐셜 곡선의 형상과는 일치하지 않는 것을 밝혔다. 그리고 Barden 등(1969)은 모래에 대한 평면변형률시험을 수행하여 Poorooshasb 등(1966, 1967, 1971)과 거의 동일한 결과를 얻었다. 더욱이 Poorooshasb는 편평한 Cap형의 항복곡선을 표현하는 항복함수를 제안하여, 결과적으로 응력비일정시험에서 생기는 소성변형률의 표현을 가능하게 하였다.

Tatsuoka 등(1974)도 Poorooshasb와 유사한 직선상 항복곡선의 존재를 실험적으로 확인하여, 그 형상은 공시체의 초기밀도에는 다소 영향을 받으나, 과거에 받은 응력이력에는 의존하지 않는다는 것을 나타냈다. 그러나 그들 자신과 Nova 등(1978)이 지적하는 바와 같이 그러한 항복곡선의 형상에서는 특히 응력비가 낮은 영역이나 압밀과정에 있어서 모래의 항복특성을 충분히 표현하지 못한 감이 있다. 그 후 Tatsuoka 등(1983)은 이러한 문제를 해결하기 위해, 압밀에 의한 변형과 전단에 의한 변형의 혼합효과를 고려한 항복곡선에 대한 실험적 검토를 수행하였다. Miura 등(1982)과 Murata 등(1987)은 압밀과 전단을 포함하는 다양한 응력경로에 대한 항복곡선과 항복곡선과는 별도로 소성포텐셜곡선이 존재하는 것을 실험을 통해 확인하였다. 또한 Yasufuku 등(1991a, 1991b)은 저압 및 고압에서 비등방압밀된 모래의 항복곡선이 소성포텐셜곡선과 일치하지 않음을 실험을 통해 확인한 후 소성포텐셜곡선을 고려한 구성모델을 제안하였다.

한편 Schofield 등(1968)은 금속소성이론에서와 같이 응력공간에서 소성포텐셜면과 항복면과 일치

한다는 가정을 비점착성 흙의 소성변형에 대한 이론을 발전시키는데 있어서 도입하였다. 따라서 풍화화강토의 응력-변형률거동을 정도높에 예측할 수 있는 구성모델을 개발하기 위해서는 항복곡선과 소성포텐셜곡선의 일치여부를 확인할 필요가 있다. 그러나 풍화화강토의 선행재하이력을 고려한 항복곡선의 특성에 대한 연구는 미비한 실정이며, 더욱이 비등방의 선행재하이력을 받은 풍화화강토의 항복곡선 특성에 대해서는 거의 연구가 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 응력비를 달리한 등방 및 비등방 선행압밀을 실시한 후 일정한 응력경로를 갖도록 배수삼축시험을 실시하여 현장의 응력상태와 유사한 비등방 선행재하(압축 및 인장)의 응력이력에 영향을 받은 항복곡선의 특성을 파악하였다. 또한 과압밀 및 정규압밀된 경우의 응력-변형률 거동을 비교, 검토하였으며, 여러 가지 응력-변형률곡선 중 선행재하에 대응하는 항복응력을 결정하는데 있어서 합리적인 방법을 선정하였다.

II. 시료준비 및 응력경로시험방법

1. 시료준비

전북 익산에서 채취한 교란시료 중 No.4 체(4.75mm) 통과분을 균일하게 혼합하여 시험시료로 사용하였다. Table 1은 시료의 물리적 특성을 나타낸 것이다. 공시체가 초기에 과압밀되는 것을 피하기 위해 최대건조단위중량의 85% 정도인 건조단위중량 $\gamma_d = 1.54 \text{gf/cm}^3$, 포화도를 높이기 위해 최적함수비의 습윤측인 함수비 18%를 공시체의 초기상태로 결정하였다. 공시체는 함수비 18%의 시험시료가 일정한 건조단위중량이 유지되도록 직경 50mm, 높이 110mm의 원통형시료의 체적에 대응하는 시료의 무게 $W = 392.5 \text{gf}$ 를 tamper로 정적인 압력을 이용하여 3층으로 성형하였다. 변수위투수시험으로 결정한 투수계수는 $7.3 \times 10^{-5} \text{cm/s}$

Table 1 Physical properties of decomposed granite soil in Iksan, Jeonbuk

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

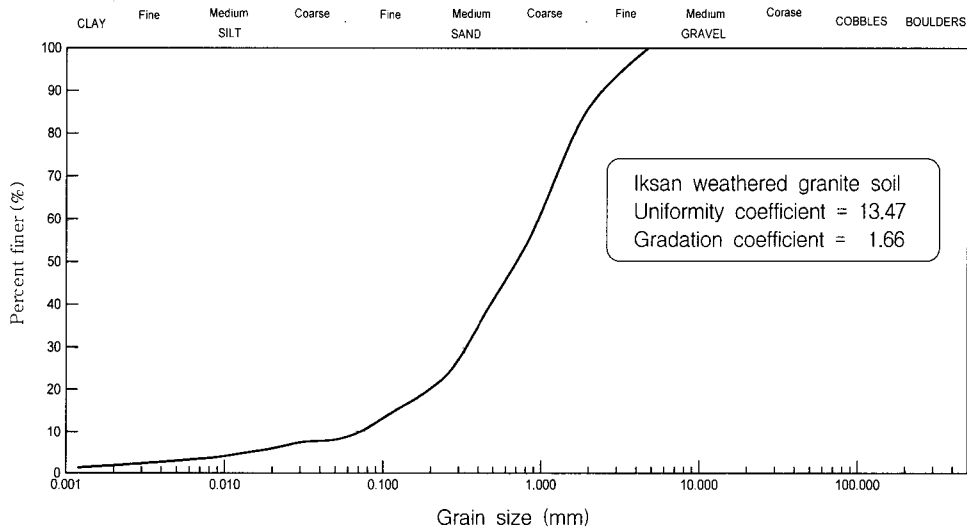


Fig. 1 Grain size distribution of Iksan weathered granite soil

이다. Fig. 1은 입도분포곡선을 보인 것이며, 균등 계수 $Cu = 13.47$ 과 곡률계수 $Cz = 1.66$ 에 의해 입도가 양호한 시료라는 것을 알 수 있다.

2. 응력경로시험방법

본 연구에서는 전북 익산지역의 채취한 다짐풍화 화강토에 대해 등방 및 비등방(압축 및 인장) 선형 압밀을 가한 각종 비례적 응력경로시험을 실시하였으며, 선형압밀응력에 대응하는 항복점을 결정하여 항복곡선의 형상을 검토하였다. Fig. 2는 본 연구에서 실시한 3가지 형태의 선형압밀과 이에 따른 응력경로를 보인 것이다. 모든 시험은 Chan(1990)이 개발한 자동화 삼축시험기로 실시되었다. 축차 응력과 구속압력이 가해지는 동안 배수량이 측정되었으며, 전단은 응력제어방식으로 수행되었다. 응력

의 증가량은 2 kPa/min이고 전단속도는 과잉간극수압이 발생하지 않도록 0.01%/min 이하로 유지하였다. 또한 압축응력과 압축변형률을 (+), 인장응력과 인장변형률을 (-)로 취하였다.

Fig. 2(a)에 보인 Type I에 대한 1~8의 응력경로시험에서 모든 공시체는 응력비 $\eta = 0.8$ 을 일정히 유지하면서 먼저 점 A까지 비등방 선형압밀된 후 점 B까지 하중이 제거되었다. 다만 재하경로가 0에서부터 시작하지 않고 30kPa에서 $\eta = 0.8$ 인 점까지 p' 일정으로 올라간 것은 공시체의 포화도를 파악하기 위한 B값 측정 때문이며, 이때부터 $\eta = 0.8$ 의 비례적 응력재하가 시작된다. 그 후 공통적인 원점 B로부터 8가지 응력경로시험(O-A-B-1~8)이 수행되었고, 점 A에 대응하는 항복점이 각각의 응력경로에 대해 결정되었다. 400kPa이 점 A에서의 p' 값으로 선택되었고 200kPa이 점

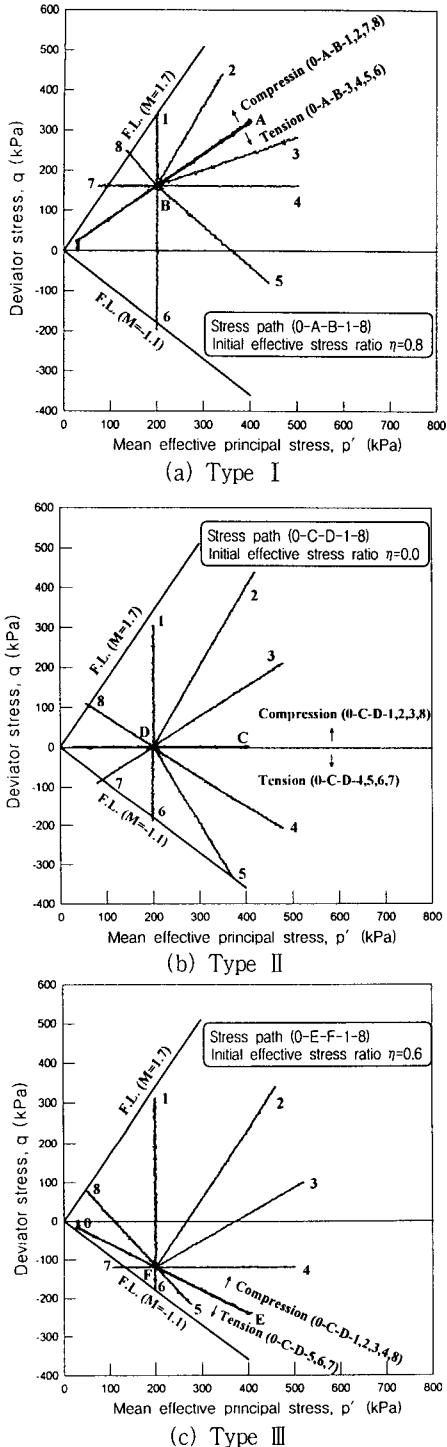


Fig. 2 Stress paths for determination of yield points corresponding to point A, C, E

B에서의 p' 값으로 선택되었다. 따라서 각각의 응력경로시험에서 과압밀비는 $OCR=2$ 이다.

통상적으로 다짐시료로 삼축시험을 실시하는데 있어서 공시체의 건조단위중량은 최대건조단위중량의 90%이상으로 결정한다. 그러나 본 연구에서 사용된 다짐공시체를 $\gamma_{dmax}=1.8gf/cm^3$ 의 90%인 $\gamma_d=1.62gf/cm^3$ 보다 큰 건조단위중량으로 제작하면 선행압밀응력 $p'=400kPa$ 보다 공시체가 더 큰 압력을 받아 과압밀상태가 되므로 응력경로에서 탄성거동만 하게 되어 항복점을 결정하는데 적합하지 않다. 따라서 공시체의 초기상태를 정규압밀상태로 만들기 위해 시행착오를 거쳐 최대건조단위중량의 85%정도인 $\gamma_d=1.54gf/cm^3$ 로 결정하였다. 다만 삼축시험기의 용량이 본 연구에 사용된 것보다 커서 공시체의 초기조건을 다짐도 85%가 아닌 90%이상으로 할 경우, 결정된 항복곡선의 형상은 변화하지 않고 항복곡선의 크기만 커질 것으로 생각된다.

한편, 점 A까지 비등방 압밀을 시키지 않고 점 B에서 바로 응력경로를 따르는 처녀재하에 대한 동일한 형태의 각종 응력경로시험(O-B-1~8)이 실시되었는데, 이는 과압밀된 응력경로(O-A-B-1~8)에 대한 공시체의 응력-변형률거동을 비교하기 위해 실시되었다.

Fig. 2(b)와 (c)에서 보인 바와 같이, Type II와 III의 응력경로시험은 Type I과 같은 압축방향의 비등방 선행압밀이 있는 경우의 항복특성과의 비교, 그리고 항복곡선 상의 비례적인 재하경로의 영향을 검토하기 위해 등방 및 비등방(인장)의 선행압밀을 가하여 수행되었다. Type II의 시험에서 모든 공시체는 먼저 점 C ($p'=400kPa$)까지 등방적으로 선행압밀 ($\eta=0.0$) 된 후, 점 D ($p'=200kPa$)까지 하중을 제거하였다. 그 후 비례적 재하경로를 따라 배수시험이 실시되었다(O-C-D-1~8). Type III의 시험에서 공시체는 먼저 인장부분 상의 점 E ($p'=400kPa$)까지 비등방적으로 선행압밀 ($\eta=-0.6$) 된 후 동일한 응력비를 유지하면서 점 F ($p'=200kPa$)까지 하중이 제거된 후 각각의 비례적 재하경로를 따라 응력

경로시험이 실시되었다(O-E-F-1~8).

Type I에서와 마찬가지로 Type II, III의 시험에서 과압밀비 OCR=2가 선택되었으며, 처녀재하에 대한 각종 비례적 재하경로에 대한 응력경로시험(O-D-1~8, O-F-1~8)이 실시되었다.

III. 응력-변형률곡선에서 항복응력의 결정

본 연구에서는 등방 및 비등방(압축 및 인장) 선

행압밀점(Fig. 1에서 점 A, C, E)를 가지는 Type I, II, III의 각각의 응력경로에 대한 응력-변형률곡선에서 명확한 항복점을 결정하기 위해 $\eta-\epsilon$, $\eta-\nu$ 그리고 $\eta-k$ 및 $\eta-W$ 의 4가지 곡선을 이용하였다. 이는 특정의 응력경로에 대해서는 어느 한가지 응력-변형률곡선만으로는 항복점이 쉽게 결정되지 않으며, 응력경로를 취하는 것에 따라 임의의 변형성분이 생기지 않는 경우도 있기 때문이다. 현재로서는 명확한 항복점의 결정방법이 확립

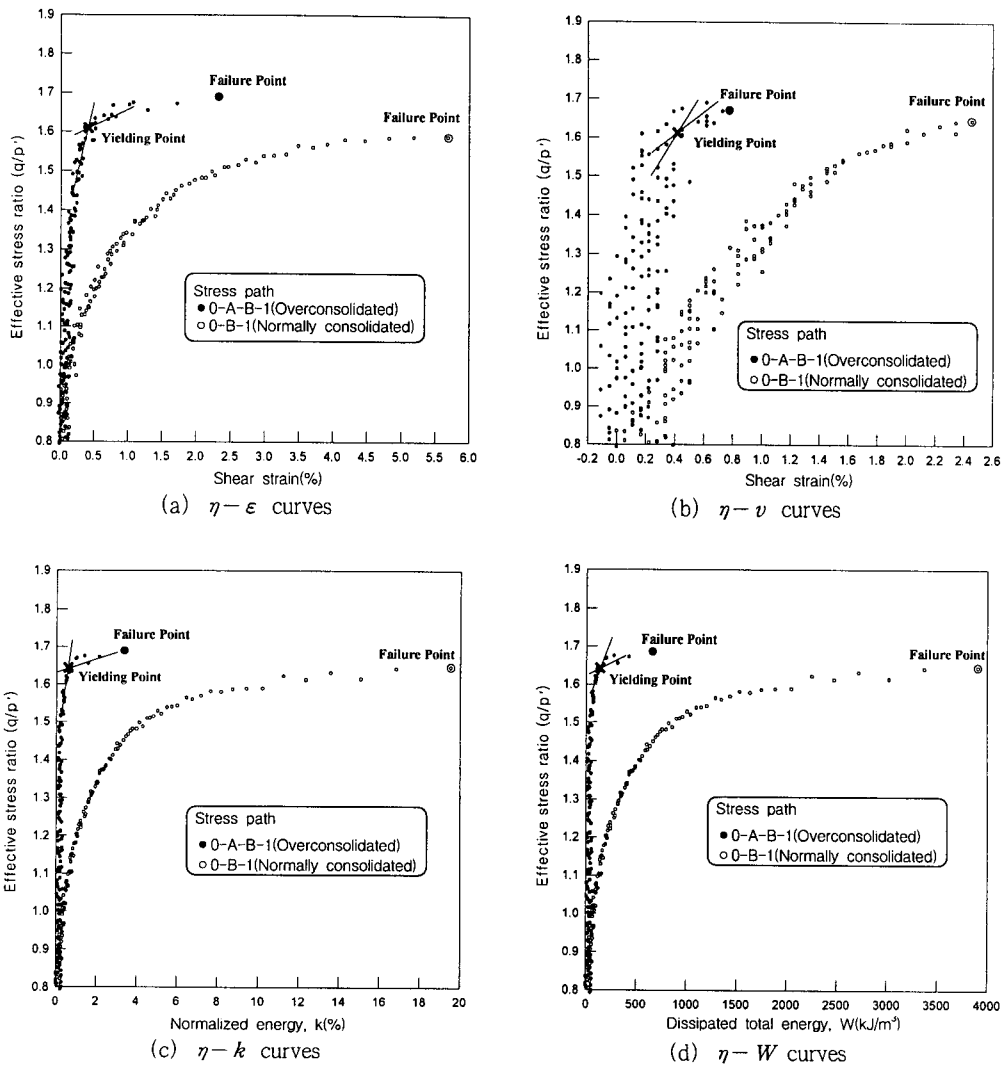


Fig. 3 Stress-strain curves for O-A-B-1 and O-B-1

되지 않았으므로 Yasufuku 등(1991a)이 모래에 대해 수행한 것과 같이 각각의 응력-변형률곡선에서 최대곡률점을 항복응력을 나타내는 항복점으로 결정하였다.

여기서, $\eta = q/p'$ 는 응력비로서 $p' = (\sigma_a + 2\sigma_r)/3$ 은 중간주응력, q 는 축차응력이다. σ_a 는 축방향유효응력이고 σ_r 은 반경방향유효응력이다. 또한 전단변형률 $\varepsilon = 2(\varepsilon_a - \varepsilon_r)/3$ 로서, ε_a 는 축방향변형률, ε_r 는 반경방향변형률이다. 체적변형률

$v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r$ 이다. k 는 Moroto(1976)가 제안한 상태매개변수로서 종종 규준화에너지로 불리우며 $k = \int \frac{dW}{p} = \int dv + \eta \cdot d\varepsilon$ 과 같다. W 는 전단과 정에서 소산된 전체에너지로서 모래에 대한 구성모델에서 경화매개변수로 사용되었으며, $W = \int dW = \int p \cdot dv + q \cdot d\varepsilon$ 와 같다.

Fig. 3~5는 Type I, II, III의 응력경로 중 대표적인 응력-변형률곡선을 보인 것이다. 각각의

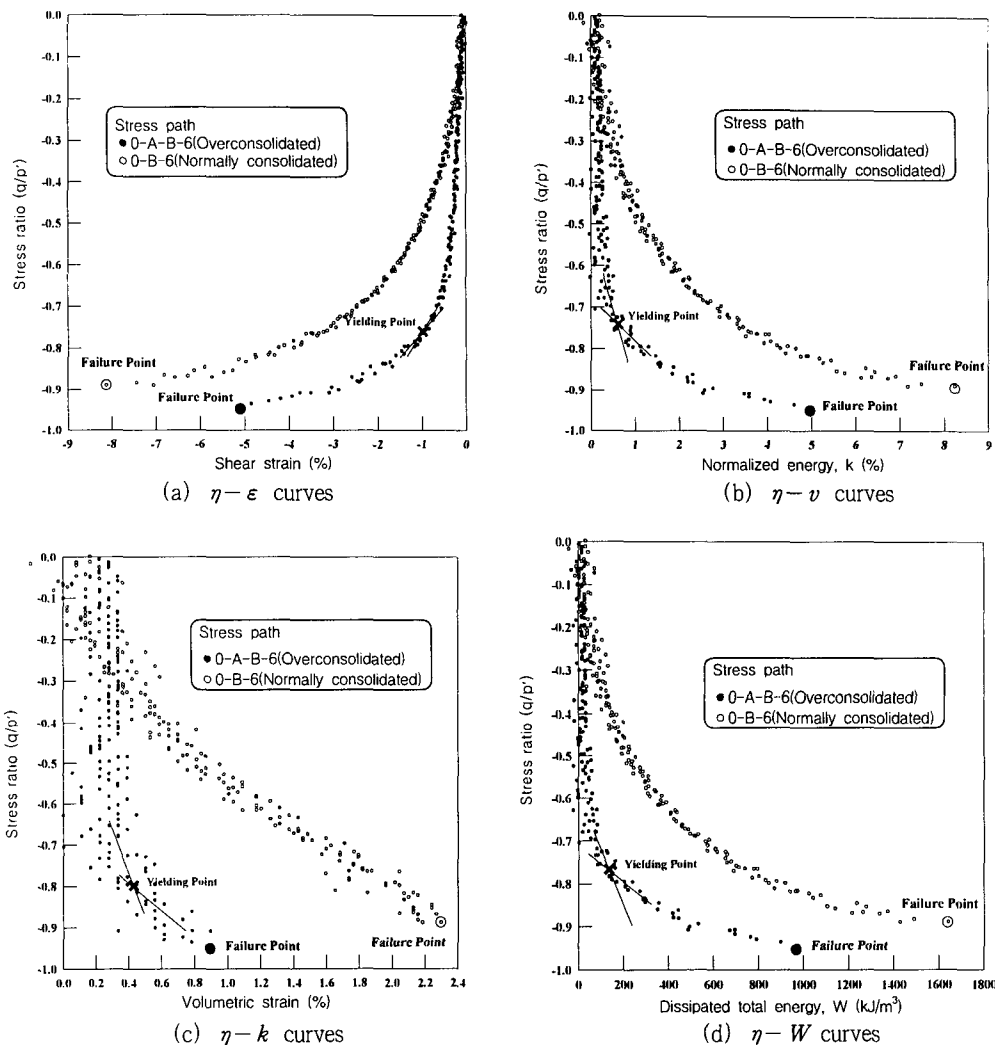


Fig. 4 Stress-strain curves for O-C-D-6 and O-D-6

응력-변형률곡선의 변형률의 시작은 선행재하의 존재 여부와 상관없이 점 B, D, F에서의 변형률을 0으로 하여 나타내었다. Fig. 3은 압축방향의 비등방 선행압밀을 받은 경우(O-A-B-1)와 처녀재하하일 경우(O-B-1)의 $\eta-\epsilon$, $\eta-v$, $\eta-k$, $\eta-W$ 곡선을 보인 것이다.

그림에서 보인 바와 같이, 축차응력 q 은 증가하고 평균유효주응력 p' 가 일정한 응력경로에서는

데이터의 분산이 큰 $\eta-v$ 곡선을 제외한 나머지 응력-변형률곡선에서 비교적 명확하게 항복점을 결정할 수 있었다. 항복은 압밀과 전단의 혼합효과에 의해 발생하므로 O-A-B-1의 경우는 응력경로의 특성상 압밀보다는 전단이 항복을 크게 좌우하게 된다. 따라서, $\eta-v$ 보다는 $\eta-\epsilon$ 곡선이 명확한 항복점이 결정되었다.

한편 선행압밀과정이 있는 O-A-B-1의 응력-

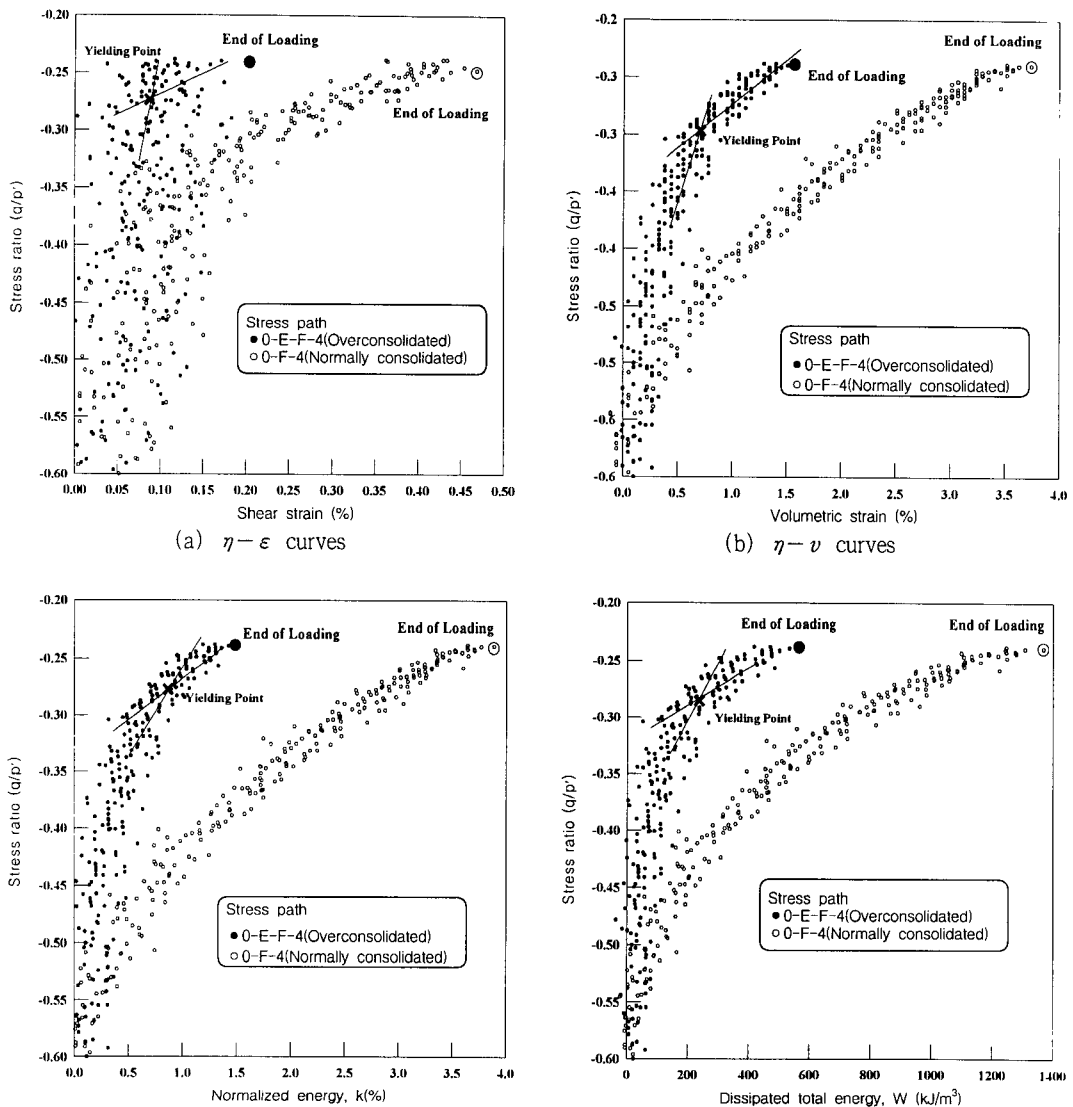


Fig. 5 Stress-strain curves for O-E-F-4 and O-F-4

변형률곡선의 초기접선기울기는 선행압밀과정이 없는 O-B-1에 비해 급하고, O-B-1이 O-A-B-1에 비해 더 큰 변형률에서 파괴된다는 것을 보여주고 있어, 과압밀의 영향이 크게 나타나고 있다. 이와 같은 경향은 Type I, II, III의 모든 응력경로에서 동일하게 나타났다.

Fig. 4는 일정한 평균유효주응력 p' 과 감소하는 축차응력 q 를 가진 Type II의 O-C-D-6와

O-D-6에 대한 4가지 응력-변형률곡선을 보인 것이다. Fig. 3(b)에서와 마찬가지로 $\eta-v$ 곡선은 시험데이터의 분산이 커서 명확한 항복점이 나타나지 않고 있다. 이러한 경향은 Type I, II, III의 응력경로 중 모든 p' 일정의 응력경로에서 공통적으로 나타나며, p' 일정의 응력경로에서는 압밀 보다 전단이 항복에 더 큰 영향을 미치기 때문이다.

이는 Fig. 5에서 보인 바와 같이, 축차응력 q 가

Table 2 Test results and obtained yield stress ratios

Test type	Stress path	Final strain*				Yielding stress ratio			
		ϵ (%)	ν (%)	k (%)	W (kJ/m ³)	ϵ (%)	ν (%)	k (%)	W (kJ/m ³)
I	O-A-B-1	2.3 (5.7)	0.8(2.5)	3.3(19.5)	660(3900)	1.61	1.61	1.64	1.64
	O-A-B-2	0.6 (4.2)	1.0(5.1)	1.6 (9.6)	470(2680)	1.24	1.25	1.26	1.26
	O-A-B-3	-0.3(-0.2)	1.7(4.7)	1.5 (4.6)	550(1610)	0.60	0.61	0.60	0.60
	O-A-B-4	-0.5(-0.4)	2.0(4.0)	1.7 (3.8)	660(1300)	0.42	0.41	0.40	0.40
	O-A-B-5	-1.3(-2.3)	3.2(6.7)	3.0 (6.4)	1300(2160)	0.03	-0.01	0.00	0.00
	O-A-B-6	-2.2(-3.7)	2.4(3.2)	3.4 (5.1)	680(1300)	-0.56	-0.56	-0.60	-0.60
	O-A-B-7	1.4 (2.1)	-2.0(-1.2)	0.6 (1.8)	20 (190)	1.90	1.95	1.92	1.94
	O-A-B-8	1.2 (6.8)	-1.3(-1.0)	0.7 (9.8)	100(1550)	1.79	1.70	1.79	1.80
II	O-C-D-1	8.5(10.2)	0.5(2.2)	12.0(14.3)	2400(2900)	1.29	1.25	1.30	1.31
	O-C-D-2	2.1 (4.8)	4.1(6.7)	5.8 (9.7)	2000(2900)	0.75	0.74	0.73	0.73
	O-C-D-3	0.4 (1.1)	3.9(4.7)	3.8 (4.9)	1470(1680)	0.35	0.34	0.34	0.34
	O-C-D-4	-1.3(-2.1)	2.7(5.1)	3.1 (5.7)	1180(1910)	-0.32	-0.34	-0.33	-0.33
	O-C-D-5	-6.7(-7.1)	2.8(4.6)	6.9 (9.1)	2250(2550)	-0.57	-0.53	-0.56	-0.56
	O-C-D-6	-5.1(-8.1)	0.9(2.3)	5.0 (8.4)	1000(1690)	-0.76	-0.80	-0.74	-0.75
	O-C-D-7	-2.0(-3.7)	-1.3(-0.7)	0.1 (3.2)	-30 (260)	-0.95	-0.89	-0.97	-0.97
	O-C-D-8	3.5 (2.8)	-3.7(-1.8)	2.2 (1.7)	80 (90)	1.56	1.70	1.60	1.60
III	O-E-F-1	9.5(14.2)	1.1(3.1)	12.9(18.5)	2500(3700)	1.32	1.41	1.32	1.31
	O-E-F-2	3.3 (3.7)	2.9(5.0)	4.2 (5.9)	1430(1960)	0.01	0.20	0.24	0.25
	O-E-F-3	1.3 (1.7)	2.3(3.5)	2.3 (3.5)	870(1200)	-0.12	0.01	-0.02	-0.01
	O-E-F-4	0.2(0.47)	1.5(3.8)	1.5 (3.9)	550(1350)	-0.27	-0.30	-0.26	-0.27
	O-E-F-5	-0.9(-6.8)	0.3(3.0)	0.7 (8.1)	200(2100)	-0.77	-0.78	-0.77	-0.77
	O-E-F-6	-0.7(-4.1)	0.5(1.0)	0.7 (4.0)	150 (800)	-0.87	-0.87	-0.87	-0.87
	O-E-F-7	-0.8(-2.8)	-1.3(-1.1)	0.3 (2.2)	10 (280)	-1.03	-1.03	-1.09	-1.09
	O-E-F-8	5.0 (8.5)	-2.4(-3.5)	3.5 (4.8)	150 (240)	1.51	1.46	1.24	1.26

Final strain : () is primary loading.

일정하고 평균유효주응력 p' 이 증가하여 항복에 이르는 응력경로 O-E-F-4의 $\eta-\epsilon$ 곡선과 비교해 보면 쉽게 알 수 있다. 즉, 이와 같은 q 일정의 응력경로에서는 전단보다는 압밀이 항복에 더 크게 관여하므로 체적변형률 v 가 전단변형률 ϵ 보다 항복점을 결정하기가 더 용이하다. 또한 응력경로가 더 길어진다면 이러한 과압밀 및 정규압밀상태의 응력-변형률곡선의 궤적은 결국 수렴된다는 것을 그림을 통해 알 수 있다. 결국 이와 같은 p' 일정과 q 일정의 특정 응력경로에서는 항복의 어느 한가지 항 즉, 압밀 또는 전단이 결여되어 있으므로 압밀과 전단을 모두 포함하고 있는 표준화에너지 k 와 소산된 전체에너지 W 로 항복점을 결정하는 것이 타당하다고 생각된다.

Table 2는 Type I, II, III의 응력경로에 대한 최종변형률 및 항복시의 응력비를 요약한 것이다. 표에서 나타낸 바와 같이, k 와 W 로 결정한 항복 응력비가 v 와 ϵ 로 결정한 것과 비교해볼 때 항복 응력비의 차이가 더 적으므로, $\eta-k$ 및 $\eta-W$ 곡선으로 항복점을 결정하는 것이 더욱 합리적이라는 것을 알 수 있다.

IV. 등방 및 비등방 선행압밀에 따른 항복곡선

Fig. 6은 Type I, II, III와 같은 등방 및 비등방(압축 및 인장) 선행압밀을 가지는 각종 응력경로의 응력-변형률곡선($\eta-\epsilon$, $\eta-v$, $\eta-k$, $\eta-W$)에서 결정한 각각의 항복점을 $p'-q$ 의 응력공간에 도시하여 항복곡선을 나타낸 것이다. 또한 Miura 등(1984)이 제시한 방법에 의해 각각의 항복점 근처에 실험으로 결정한 소성변형률 증분벡터(dv^p/de^p)를 항복곡선상에 화살표로 나타내었다.

그림에서 보인 바와 같이, 등방적으로 선행압밀된 Type II 그리고 비등방적으로 선행압밀된 Type I(압축), Type III(인장)의 응력경로에 대한 항복곡선의 모양은 Yasufuku 등(1991a)이 모래에

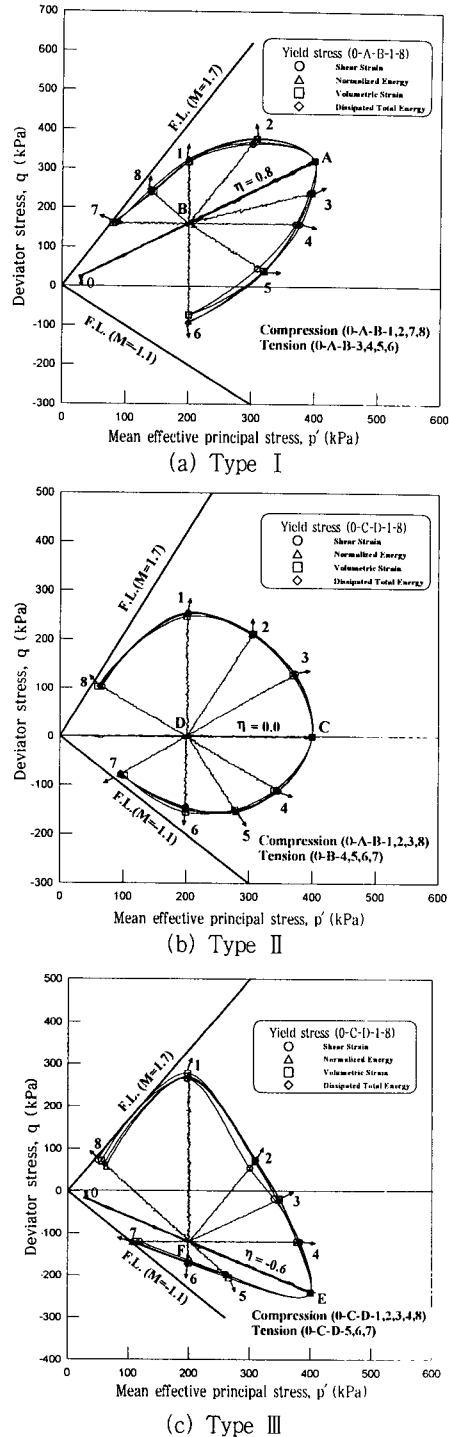


Fig. 6 Experimental yield curves obtained from stress path tests

대해 실험한 것과 유사하게 대략 타원형이지만, 선행압밀의 응력경로에 대해 비대칭적이다. 또한 이들 각각의 항복곡선은 꽤 다른 형상을 보이고 있으며, 특히 Type III의 경우는 형상이 독특하다. 다만 이들 항복곡선은 비례적 재하경로의 방향에 비스듬히 나아가고 있으며, 이는 다짐풍화화강토의 항복곡선의 형상은 등방 및 비등방(압축 및 인장) 비례적 재하경로의 응력이력에 상당히 의존한다는 것을 나타내고 있다. Fig. 6의 각각의 응력경로에서 항복점 근처에 화살표로 표시한 소성변형률 증분벡터(dv^p/de^p)의 방향은 항복곡선에 연직하지 않는다. 따라서 다짐풍화화강토의 응력-변형률거동은 비관련유동법칙을 따르며, 다짐풍화화강토의 정교한 지반거동을 예측하기 위해서는 별도의 소성포텐셜함수가 필요하다는 것을 알 수 있다.

V. 규준화에너지 k 와 소산된 전체에너지 w 의 등에너지선

앞에서 언급한 바와 같이, 규준화에너지 k 와 소산된 전체에너지 w 는 다짐풍화화강토의 항복응력을 결정하는데 있어서 적당한 매개변수이며, 이들 매개변수는 탄·소성 구성모델에서 경화매개변수로서 자주 채용된다. 따라서 규준화에너지 k 와 소산된 전체에너지 w 의 등에너지선을 Type I, II, III의 항복곡선과 함께 나타내어 검토하였다.

Fig. 7은 등방 및 비등방(압축 및 인장)의 비례적 재하이력을 갖는 Type I, II, III 각각의 응력경로에 대한 등 k 선과 결정된 항복곡선을 보인 것이다. Fig. 7(a)는 Type I의 경우로서 응력경로의 초기점 B로부터 각각의 응력경로(O-A-B-1~8)에 대한 1.5, 2.5, 4.0%에 대응하는 등 k 선을 나타낸 것이고, Fig. 7(b)와 (c)는 Type II, III의 경우로서 응력경로의 초기점 D, F로부터 각각의 응력경로(O-C-D-1~8, O-E-F-1~8)에 대해 2.5, 4.0, 6.0%에 대응하는 등 k 선을 나타낸 것이다.

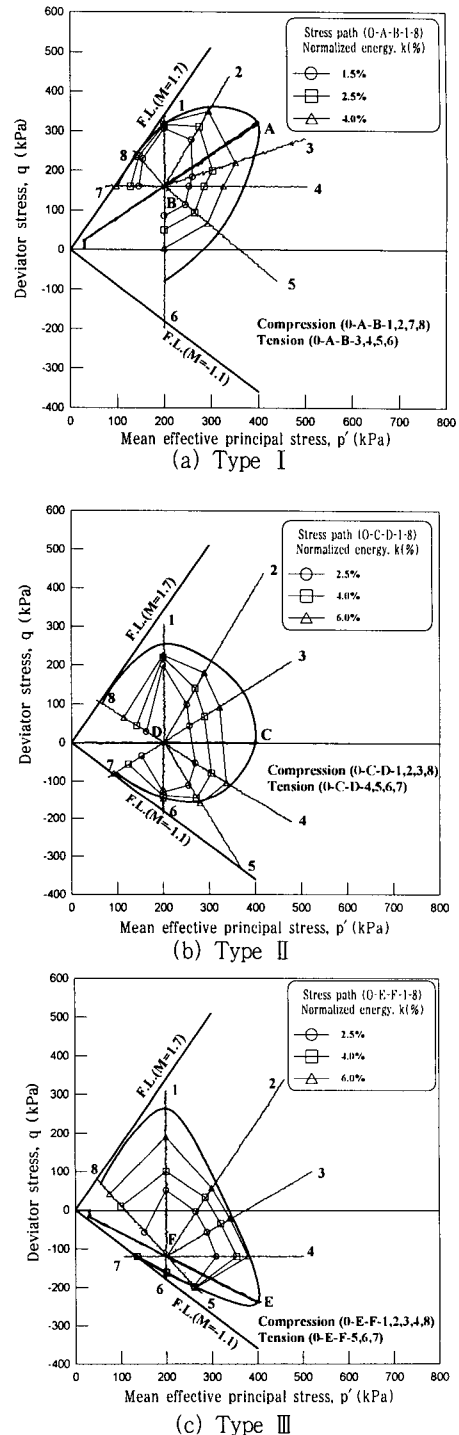


Fig. 7 Contours of equal normalized energy and observed yield curve

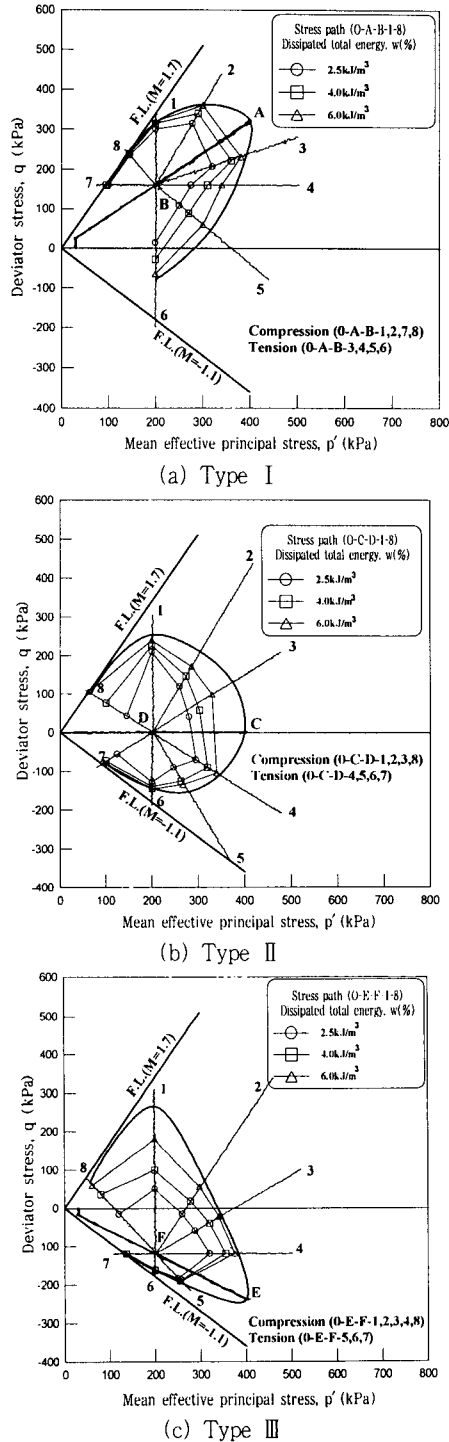


Fig. 8 Contours of equal dissipated total energy and observed yield curve

그림에서 보인 바와 같이, 각각의 시험형태에 대한 등 k 선은 $p'-q$ 의 응력공간에서 유사한 경향으로 펼쳐지는 경향이 있다. 그러나 Type I, II, III에 대한 등 k 선은 각각 등방 및 비등방(압축 및 인장)의 비례적 선행재하의 이력에 의존하여 형상이 상당히 다르다. 이는 다짐풍화화강토에 대한 등 k 선의 형상이 결정된 항복곡선에서 관찰된 것과 유사하게 비등방적이라는 것을 알 수 있다.

더욱이 등 k 선과 각각의 시험형태에 대한 항복곡선의 형상은 거의 유사하게 펼쳐지는 경향이 있으며, 이는 $p'-q$ 의 응력공간에서 다짐풍화화강토의 항복은 체적변형률과 전단변형률의 크기에 의존하여 발생된다는 것을 의미한다. 그러나 자세히 관찰해보면, 각각의 시험형태에 대해 항복점에 대응하는 기준화에너지의 값은 어느 정도 다르며, 따라서 항복곡선은 등 k 선과 정확히 일치하지 않는다는 것은 명확하다.

한편 Fig. 8은 Type I, II, III의 비례적 재하이력을 갖는 응력경로에 대한 등 W 선을 결정된 항복곡선과 함께 나타낸 것이다. 등 k 선과 같이 등 W 선도 응력경로의 초기점 B, D, F로부터 각각의 응력경로에 대해 소산된 전체에너지 W 의 2.5, 4.5, 6.0kJ/m³에 대응시켜 결정하였다. 등 W 선도 $p'-q$ 의 응력공간에서 유사한 경향으로 펼쳐지는 경향이 있으며, 비례적 선행재하에 의존하여 형상이 상당히 다르다. 또한 등 W 선과 항복곡선들의 형상은 거의 유사하게 펼쳐지며, 항복곡선은 등 W 선과 정확히 일치하지 않는다.

VI. 결 론

본 연구에서는 전북 익산지역의 다짐풍화화강토에 대해 응력경로시험을 실시하여, 등방 및 비등방 선행응력이력에 대한 항복점을 결정하여 등방 및 비등방 항복곡선의 특성을 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 평균유효주응력 p' 가 일정한 응력경로에서는

전단이 그리고 축차응력 q 가 일정한 응력경로에서는 압밀이 항복의 발생에 큰 영향을 미치므로 응력비-전단변형률 그리고 체적변형률($\eta-\epsilon$, $\eta-\nu$) 곡선보다도 체적변형과 전단변형을 모두 포함하는 응력비-규준화에너지, 소산된 전체에너지($\eta-k$, $\eta-w$)곡선이 응력경로의 방향과 관계없이 보다 명확한 항복점을 보였다.

2) 등방 및 비등방의 선행재하를 가진 각각의 항복곡선의 모양은 $p'-q$ 의 응력공간에서 대략 타원형을 나타냈지만, 선행재하 동안의 응력경로에 대해 비대칭적인 형상을 보였다. 또한 이들 항복곡선은 비례적 재하경로의 방향에 비스듬히 나아가므로 다짐풍화화강토의 항복곡선의 형상은 등방 및 비등방 비례적 재하경로의 응력이력에 상당히 의존한다.

3) 소성변형률 증분벡터(dv^p/de^p)의 방향은 항복곡선에 연직하지 않았으므로 다짐풍화화강토는 비관련유동법칙(Non-associative flow rule)을 따른다. 따라서 다짐풍화화강토의 정교한 지반해석을 위해서는 별도의 소성포텐셜함수가 필요하다고 생각된다.

4) 규준화에너지와 소산된 전체에너지의 등에너지선은 $p'-q$ 의 응력공간에서 유사한 경향으로 펼쳐지는 경향을 보였다. 그러나 등 k 선과 등 w 선은 등방 및 비등방의 비례적 선행재하의 이력에 의존하여 비등방적 특성을 보여 형상이 상당히 다르게 나타났다.

References

1. Barden, L., Ismail, H. and Tong, P., 1969, Plane Strain Deformation of Granular Material at Low and High Pressure, *Geotechnique*, Vol.19, No.4, pp.441-452.
2. Chan, C. K., 1990, Automated Triaxial Testing Manual.
3. 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.
4. Miura, N., Yasufuku, N. and Yamamoto, T., 1982, Yielding Characteristics of Sand under Triaxial Compression and Extension Stresses, *Technology Reports on the Yamaguchi University*, Vol. 3, No.1.
5. Moroto, Y., 1976, A New Parameter to Measure Degree of Shear Deformation of Granular Material in Triaxial Compression Tests, *Soils and Foundations*, Vol.16, No.4, pp.1-10.
6. Murata, H. and Yasufuku, N. 1987, Mechanical Properties of Undisturbed Decomposed Granite Soils, *Proc. of the 8th Asian Regional Conference on SMFE*, Vol.1, pp. 193-196.
7. Nova, R. and Wood, D. M., 1978, An Experimental Programme to Define the Yield Function for Sand, *Soils and Foundations*, Vol.18, No.4, pp.77-86.
8. Poorooshasb, H. B., 1971, Deformation of Sand in Triaxial Compression, *4th ARCSMFE*, Vol.1, pp.63-66.
9. Poorooshasb, H. B., Holubec, I. and Sherbourne, A. N., 1966, Yielding and Flow of Sand in Triaxial Compression, Part I, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.3, No.4, pp.179-190.
10. Poorooshasb, H. B., Holubec, I. and Sherbourne, A. N., 1967, Yielding and Flow of Sand in Triaxial Compression, Part II and III, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.4, No.4, pp.376-398.
11. Schofield, A. N. and Wroth, C. P., 1968, *Critical State Soil Mechanics*, McGraw-Hill Book Company, New York.
12. Tatsuoka, F. and Ishihara, K., 1974, Yielding of Sand in Triaxial Compression, *Soils and Foundations*, Vol.14, No.2, pp.63-67.
13. Tatsuoka, F. and Molenkamp, F., 1983, *Discussion on Yield Loci for Sands, Mechanics of Granular Materials : New Models*

- and Constitutive Relations, Ed. Jenkins, J. T. and Satake, M., Elsevier Science Publishers, pp.75-87.
14. Yasufuku, N., Murata, H. and Hyodo, M., 1991, Yield Characteristics of Anisotropically Consolidated Sand under Low and High Stress, Soils and Foundations, Vol. 31, No. 1, pp.759-764.
15. 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.