

# 입상토의 응력경로 의존거동

## Stress-Path Dependent Behavior of Granular Soil

정진섭\* · 권원식\*\*  
Jeong, Jin Seob · Kwon, Won Sik

### Summary

The nature of stress-path dependency, the principle that governs deformations in granular soil, and the use of Lade's double work-hardening model for predicting soil response for a variety of stress-paths have been investigated, and are examined. The test results and the analyses presented show that under some conditions granular soils exhibit stress-path dependent behavior. For stress-paths involving unloading or reloading, the stress-path with the higher average stress level produces the larger strains, whereas all stress-paths having the same initial states of stress, and involving only primary loading conditions, produce strains of similar magnitudes. Experimental evidence indicates that the stress-path dependent response obtained from the double work-hardening model is also observed for real soils. It is concluded that the influence of stress history on the friction angle is negligible and the strains increment direction is uniquely determined from the state of stress but is not perpendicular to the yield surface. The strains calculated from Lade's double work-hardening model are in reasonable agreement with those measured.

### I. 서론

탄성응력-변형률 모델을 사용하여 지반구조물의 응력과 변형을 해석하는데 있어, 지반거동의 몇 가지 중요한 특징을 모델링하는 어려움 때문에 심각한 한계에 직면하여 왔다. 또한, 일반적인 응력-변형률의 비선형성을 탄성 모델로서 만족할 정도로 해석하려 할 때, 응

력경로 의존성과 Dilatancy에 관련된 특징을 취급하는데 있어서도 어려움이 많았다. 흙은 하중이 작용하는 동안에 응력경로 의존거동이 있다는 것은 오랜동안 알려진 사실이다. 탄성 해석에서 흙의 응력경로 의존특성을 모델링하려는 시도가 합리적으로 이루어졌고, 실제로 많은 문제를 해석할 수 있었다. 그러나, 이러한 해석의 결과는 일반성의 부족과 흙의 변형

\* 원광대학교 공과대학  
\*\* 원광대학교 대학원

키워드 : stress-path, stress level, primary loading, double work-hardening model

특성을 결정하는데 복잡한 시험방법이 요구되어 왔었다<sup>3,4)</sup>. 최근들어 많은 연구자들은 흙의 거동에 관한 모든 특성을 설명할 수 있는 구성모형을 개발하는데 관심을 기울여왔다. 그러나 구성모형의 복잡성 때문에 제안된 모든 모델이 유한요소법에 의한 공학적인 문제해석에 쉽게 적용될 수는 없었다. 아직도 실제문제에 대한 적용성이 모델의 가치를 평가하는데 있어서 가장 중요한 기준이 된다. 이러한 관점에서 보면 Lade에 의해서 제안된 복합항복면 구성모형은 유망한 모델로 평가받고 있다<sup>1,2,5,6)</sup>.

일반적으로 흙은 처음하중(primary loading)을 받는 동안 흙의 변형은 회복할 수 없을 만큼 크고, 변형크기 또한 구속압력에 의존하므로 흙의 응력-변형을 거동은 응력경로와 과거의 응력이력에 의존한다. 흙입자 사이의 미끄러짐에 의해서 주로 발생하는 흙의 고유한 비탄성거동으로 인하여 응력이력의 영향은 어떤 환경 하에서는 매우 중요하게 된다<sup>7)</sup>. 흙에 주어진 응력증분으로 인한 변형률은 응력수준, 구속압력 그리고 응력상태의 변화 등 어느 것을 포함하는가에 따라 점진적으로 변화하므로 토질구조물을 설계할 때와 기초 지반의 응력-변형을 거동을 알고자 할 경우, 현실적인 결과를 얻기 위해서는 현장의 조건과 동일한 시료를 사용하여 실내시험으로부터 얻어진 응력-변형을 거동을 지반해석에 고려하여야 한다. 따라서, 응력변화로 인한 모든 응력상태를 해석할 수 있는 구성모형이 요구되고 있다.

본 연구는 입상도에 있어서 변형을 지배하는 원리인 응력경로 의존특성을 밝히고, 현재 개발된 탄·소성구성모형 가운데 입상도의 응력-변형을 해석 정도가 높은 Lade의 복합항복면 구성모형을 사용하여 흙의 거동을 예측하고 그 적용성을 연구하였다.

## II. 탄·소성 응력 변형을 관계

소성파쇄 항복면의 방정식  $f_c$ 는 다음과 같다.

$$f_c = I_1^2 + 2I_2 \dots\dots\dots (1)$$

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

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

소성파쇄포텐셜함수  $g_c$ 는 소성파쇄항복함수와 같으며 파괴상태에 도달하지 않는다.

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

그러므로 관련유동법칙이 성립되며, 일경화(work hardening)를 표현하는 식은 소성파쇄일함수로 다음과 같이 나타낸다.

$$f_c = P_a^2 \cdot \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{1}{P}} \cdot \left(\frac{W_c}{P_a}\right)^{\frac{1}{P}} \dots\dots\dots (3)$$

여기서,  $P_a$ 는 대기압이고,  $C, P$ 는 토질매개변수이며  $W_c$ 는 소성파쇄일이다.

소성팽창항복면의 방정식  $f_b$ 는 다음과 같다.

$$f_b = \left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27\right) \cdot \left(\frac{I_1}{P_a}\right)^m \dots\dots\dots (4)$$

$$f_b = \eta_1 \text{ at failure} \dots\dots\dots (5)$$

여기서,  $\eta_1$ 과  $m$ 은 토질매개변수이고,

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

이다.

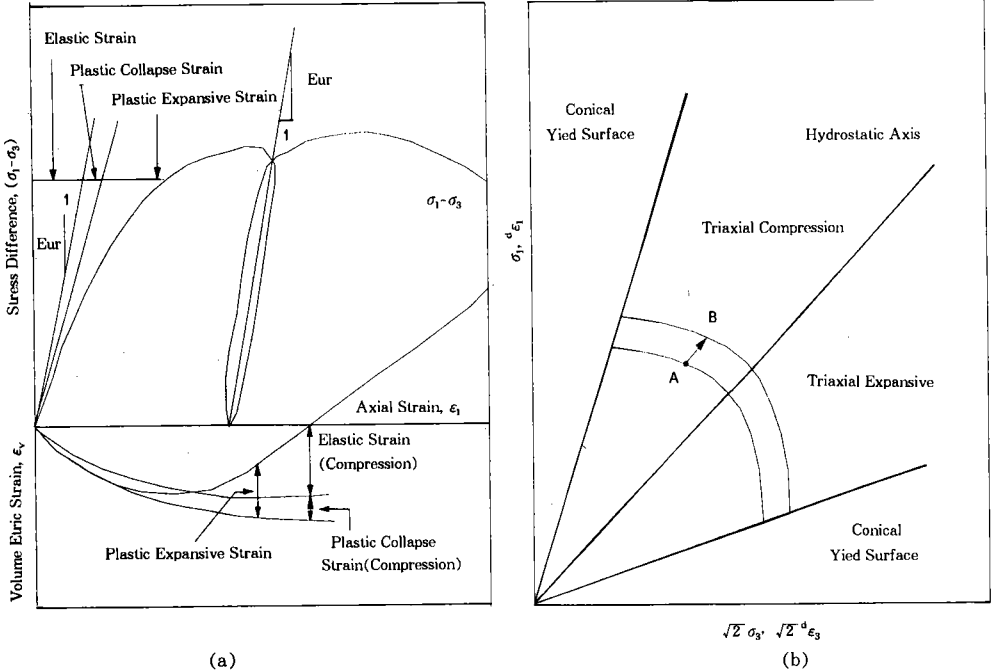
소성팽창변형률을 구하는데 비관련유동칙이 사용되며 소성팽창포텐셜함수는 식 (6)과 같으며, 일경화(work hardening) 혹은 연화(softening)를 표현하는 식은 소성팽창일함수로 식 (7)과 같이 나타낸다.

$$g_p = I_1^3 - (27 + \eta_2 (P_a / I_1)^m) \cdot I^3 \quad \dots\dots (6)$$

$$f_p = a \cdot e^{-b \cdot W_p} (W_p / P_a)^{\frac{1}{q}} \quad q > 0 \dots\dots\dots (7)$$

여기서,  $a$ ,  $b$ ,  $q$ 는 토질매개변수이고  $e$ 는 대수의 기저값이다.

Fig. 1(a)는 배수삼축압축시험에서 탄성, 소성파쇄, 소성팽창변형을 성분들의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 1(b)는 원추항복면과 구형의 캡(cap) 항복면을 삼축면에 나타낸 것으로, 점 A의 응력상태로부터 점 B의 응력상태로 응력이 변할 때, 항복면의 변화를 보인 것이다.



**Fig. 1. 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**

### III. 시 험

#### 1. 시료

본 연구는 입상토의 탄·소성 거동을 밝히기 위하여 백마강 유역에서 채취한 모래를 자연 건조시킨 후 체가름시험을 실시하여 #60~80번체 시료 25(%), #80~100번체 시료 25(%), #100~140번체 시료 25(%), #140~200번체 시료 25(%)를 균일하게 혼합하여 시험에 이용할 수 있도록 하였다. Fig. 2는 그에 따른 입경가적곡선을 나타낸 것이다.

이 시료의 상대밀도( $D_r$ )를 결정하기 위하여 최대간극비( $e_{max}$ )와 최소간극비( $e_{min}$ )를 측정하였으며, 시료의 초기간극비( $e_{spc}$ )값을 결정하여 삼축압축시험용 시료를 준비하였다. 시료의 비중( $G_s$ )은 2.67, 최소간극비( $e_{min}$ )는 0.667, 최대간극비( $e_{max}$ )는 1.087이다. 또한 공시체의 측압(cell pressure)은 25(kPa) 일 때 상대밀도는 60(%)이고, 이 때의 초기간극비( $e_{spc}$ )는 0.877이며, 이 시험에 사용한 공시체는 직경 50mm, 높이 110mm이다.

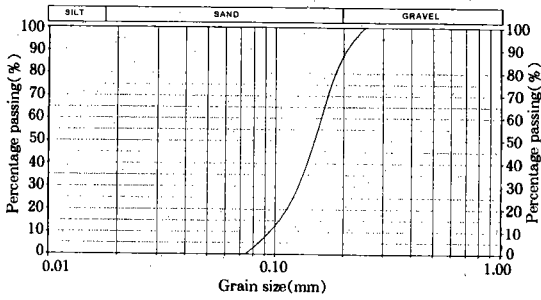


Fig. 2. Grain size distribution of baekma river sand

## 2. 시험방법

Chan이 개발한 자동화 삼축시험기(automated triaxial testing system)에 준비된 시료를 설치하기 전에 공시체와 상·하판사이의 마찰에 의한 구속을 없애기 위해 상·하판에 실리콘 그리스를 바르고 0.3(mm)두께의 고무 membrane을 부착한다. 이 때 배수는 상하의 아크릴판의 중앙에 직경 10(mm)정도의 구멍을 뚫고 다공질판을 넣어 이 판을 통해 양면 배수가 되도록 하였다. 그리고 고무 membrane을 하부페테스탈 저부에 펼쳐 두 개의 O-ring으로 봉한 후 진공성형상자(forming jaket)를 저판 위의 중앙에 맞추어 놓고 membrane을 성형상자 둘레에 완전히 크게 펼쳐 올리고 진공을 가하여 고무 membrane이 성형상자안에 완전히 밀착하도록 한다. 이 성형상자 내부에 알맞은 체를 넣고 준비된 시료의 일정량을 상자 안에 부어 넣은 후 체를 천천히 들어 올려 상자 안에 있는 시료의 밀도가 일정하게 유지되도록 안치한다. 공시체의 제작방법으로는 공중낙하법, 수중낙하법, 다중낙하법 등 여러가지 방법이 알려져 있으나 본 연구에서는 공시체 제작 중에 입자가 분리되는 현상을 방지하기 위해 dry tamping 법으로 성형하였다.

전단 중에 시료가 기울어지는 경우는 밀도가 균일하지 않는 것으로 판단되어 본 시험

자료에서는 제외시켰다. 그리고 상판을 시료 위의 중앙에 놓고 membrane을 상판에 씌운 다음 O-ring으로 봉한 후 상부배수관을 상판에 연결시키고 시료에 20(kPa)의 진공압을 가한 후 성형상자를 제거하며, 이 때 누기에 의해 진공압이 감소하면 진공압이 일정하게 유지될 때까지 멤브레인에 생고무액을 발라 누기를 방지한다. 다음에 삼축실을 조립한 후 물을 가득 공급하고 시료의 진공을 제거함과 동시에 측압을 가하여 일정하게 유지시킨다. 시료에 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)을 하부 배수관으로 주입시켜 시료 속의 공기를 상부 배수관으로 완전히 빠져나가게 한 다음, 증류수를 하부 배수관으로 유입시켜 시료 내에 있는 CO<sub>2</sub>를 상부 배수관으로 천천히 밀어 올려 시료로부터 빠져나가게 한다. 이 때 CO<sub>2</sub>의 체적 변화는 순수 물의 체적변화와 같기 때문에 시료 내에 남아있는 CO<sub>2</sub>는 크게 문제되지 않는다. 이와 같이 준비된 시료를 이용하여 배수삼축압축시험을 실시하였으며, 제어방식은 응력제어방식을 사용하였고 전단속도는 충분히 배수되어 시료내부에 과잉공극수압이 발생하지 않도록 0.02(%) / min의 축변형률을 갖도록 하였다.

## 3. 토질매개변수의 결정

실내시험 결과로부터 Lade의 복합항복면 구성모델에 필요한 토질매개변수를 얻는 과정은 매우 복잡하며, 수작업으로 수행할 때는 많은 시간이 소요되며 다소 오차가 발생할 우려가 있다. 따라서 신속하고 보다 신뢰할 수 있도록 선형회귀분석(linear regress analysis)과 비선형회귀분석(non-linear regress analysis)을 사용하였으며, 정도 높은 토질매개변수를 얻기 위해 상관계수( $\gamma^2$ )가 0.6이하의 자료는 제거하였다.

본 프로그램은 삼축시험에서 얻은 자료를 입력하여 각각의 필요한 계산을 수행한 후 계

**Table 1. Summary of parameters on Lade's double work-hardening model for Baekma sand**

Soil parameters		Value	
Elastic behavior	Modulus number $K_{ur}$	416	
	Exponent $n$	0.78	
	Poisson's ratio $\nu$	0.28	
Plastic collapse	Collapse modulus $C$	0.00118	
	Collapse constant $P$	0.965	
Failure criterion	Yield constant $\eta_1$	32	
	Yield exponent $m$	0.085	
Plastic expansive	Plastic potential constant	$R$	-0.457
		$S$	0.495
		$t$	-2.145
	Work-hardening exponent	$\alpha$	2.597
		$\beta$	-0.180
		$\gamma$	0.369
		$\delta$	1.160

산결과를 회귀분석하여 토질매개변수를 결정하였으며 Table 1에 나타내었다.

#### IV. 시험결과 및 고찰

##### 1. 토질매개변수 결정시험의 역해석

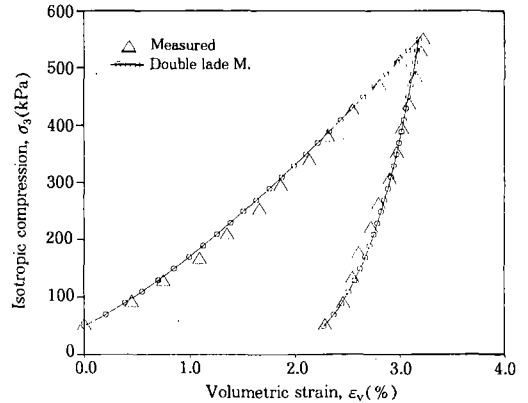
###### 가. 등방압축팽창시험(Isotropic Compression-Expansion Test) 결과의 예측

백마강 모래에 결정된 토질매개변수의 신뢰성을 검증하고자 결정된 토질매개변수를 사용하여 Lade의 복합항복면 구성모델로서 등방압축팽창 시험결과를 역해석하였다.

Fig. 3은 백마강 모래에 대한 등방압축팽창 시험 결과를 Lade의 복합항복면 구성모델로서 예측하여 나타낸 것으로 정도 높은 예측결과를 보이고 있다. 이와 같은 역해석의 결과로서 결정된 경화함수의 토질매개변수는 신뢰성이 높다고 판단된다.

###### 나. 배수삼축압축시험 결과의 예측

백마강모래에 결정된 토질매개변수의 신뢰성



**Fig. 3. Comparison between measured and predicted isotropic compression**

을 검토하고자 구속압력을 100kPa, 200kPa, 400kPa로 달리한 일련의 배수삼축압축 시험 결과를 Lade의 복합항복면 구성모델로서 역해석하였다.

Fig. 4는 Lade의 복합항복면 구성모델로서 시험결과와 예측결과를 비교하여 나타낸 것이다. 복합항복면 구성모델에서 구속압력(100 kPa, 200kPa, 400kPa)을 달리한 예측결과는 아주 좋은 결과를 나타내었다.

따라서 복합항복면에서의 파괴규준에 관련한 토질매개변수인( $\eta_1, m$ )의 결정에 신뢰성이 있음을 의미하며, 체적변형률의 예측결과에 있어서 항복함수( $f_p$ )의 관계를 나타내는 토질매개변수인( $S, R, t$ )에 대한 결정도 신뢰성이 있음을 보이고 있다.

단지 제하-재제하(unloading-reloading) 탄성부분의 체적변형률에 대한 예측을 잘못하고 있음을 알 수 있다. 이것은 제하-재제하의 탄성영역에서 소성변형이 발생하고 있기 때문이라고 판단된다.

전반적으로 제하-재제하 부분을 제외한 예측결과와 시험결과 상호간의 좋은 대응성을 나타내고 있으며 Lade의 복합항복면 구성모델의 예측결과는 매우 정교함을 나타내었다.

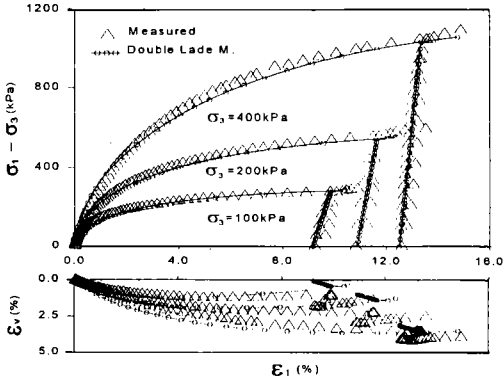


Fig. 4. Comparison between measured and predicted deviatoric stress and volumetric strain vs axial strain for Baekma river sand

## 2. 응력비 일정 시험

본 연구에서는 응력비를 0.0, 0.5, 1.0, 1.25로 달리한 응력비 일정시험을 실시하고 백마강 모래의 비등방압밀특성을 고찰하기 위하여, 시험결과를 복합항복면 구성모델로 예측하고 비교하였다.

Fig. 5는 응력비일정시험 결과의 평균주응력과 체적변형률의 관계를 복합항복면 구성모델로서 예측한 결과와 함께 나타내었다.

복합항복면 구성모델의 예측결과, 응력비가 0인 경우에는 시험결과와 유사한 결과를 나타내고 있으나 응력비가 증가할수록 초기하중재하(primary loading)부분은 체적변형률을 점점 더 크게 예측하는 반면, 제하(unloading)부분은 체적변형률 감소가 점점 더 크게 나타나고 있다.

Fig. 6의 예측결과는 Lade의 복합항복면 구성모델의 토질매개변수( $E_{ur} = K_{ur} \cdot P_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^n$ )  $E_{ur}$  결정시 구속압( $\sigma_3$ ) 대신  $p$ (mean principal stress)의 함수로 수정하여 예측한 결과와 시험결과를 비교하여 나타낸 것이다. 이 결과 비교적 좋은 대조를 이루고 있음을 알 수 있다.

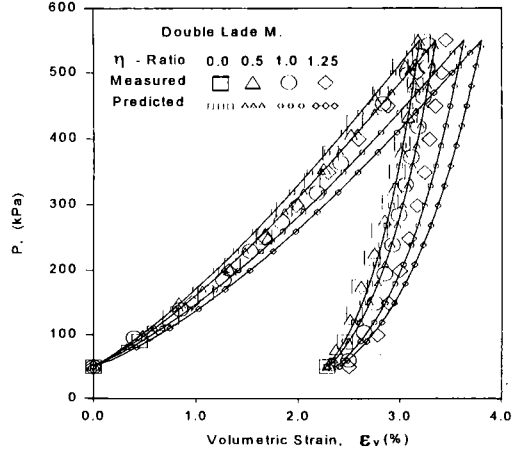


Fig. 5. Comparison between measured and predicted volumetric strain vs mean principal stress for Baekma river sand(double Lade M.)

Fig. 7은 응력비(0.5, 1.0, 1.25) 각각의 경우를 축변형률에 대한 축차응력과 체적변형률의 관계를 나타내고 복합항복면 구성모델로서 예측하여 나타낸 것이다.

체적변형률과 축차응력의 크기는 거의 일치하고 있으나 축변형률에 있어서는 시험결과와 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 예측결과는 복합항복면 이론에 의하면, 응력비가 일정하게 유지되는 비례하중 작용동안 탄성변형과 소성파쇄 변형률만이 발생한다. 그러나 시험결과 실제로는 소성팽창성 변형도 어느정도 발

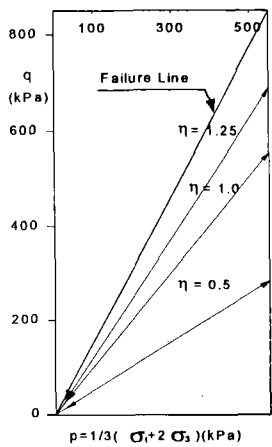
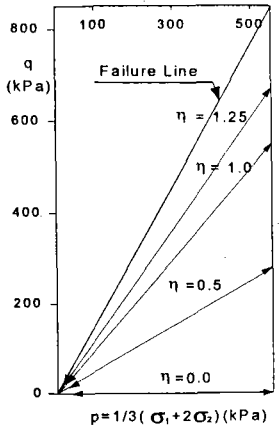
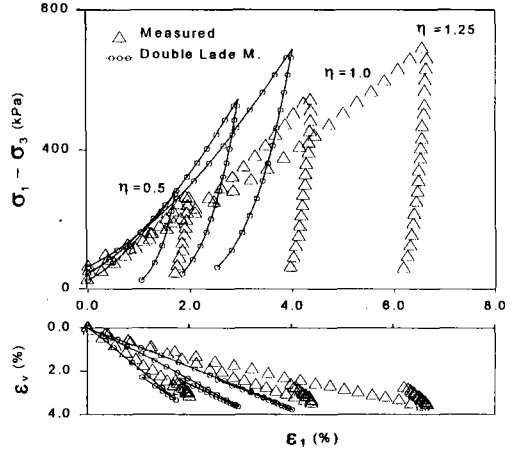
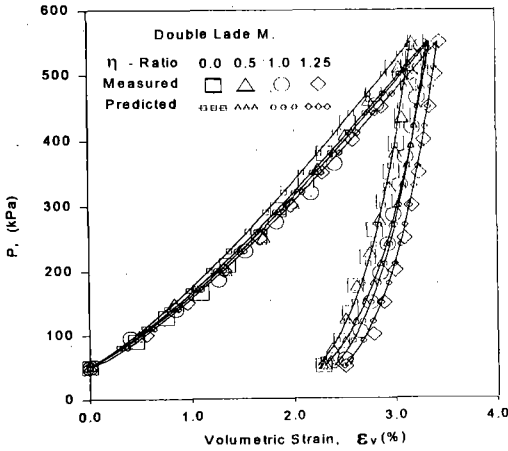


Fig. 6. Comparison between measured and modify predicted volumetric strain vs mean pincipal stress for Baekma river sand

Fig. 7. Comparison between measured and predicted deviatoric stress and volumetric strain vs axial strain for Baekma river sand

생하고 있기 때문에 생각되며 복합항복면 구성모델의 소성팽창성 변형을 표현하는 부분의 취약점으로 생각된다.

3. 평균주응력 일정시험

일반적으로, 흙 요소에 작용하고 있는 응력은 등방성분과 전단성분으로 나눌 수 있으며 등방탄성체에서는 등방응력의 변화에 의해서 체적변형만이 발생하므로 이와 같이 서로 독립되어 있다. 그러나, 흙과 같은 입상체에서

는 서로 상호관계가 있으며 전단응력만 변화하여도 체적변화가 발생한다. 이러한 것은 Dilatancy현상으로, 그러한 특성을 알아보기 위한 직접적인 시험이 평균주응력 일정시험이다.

백마강 모래의 Dilatancy특성을 고찰하기 위하여 초기구속압(100kPa, 200kPa, 300kPa)으로서 각각 평균주응력 일정시험을 실시하고 시험결과를 복합항복면 모델로 예측하여 비교하였다.

Fig. 8은 복합항복면 구성모델로서 예측하

여 나타낸 것으로 축차응력과 체적변형률을 잘 예측하고 있다. 복합항복면 구성모델은 평균주응력을 일정하게 하고 축차응력을 줄이는 동안에는 이론상으로 탄성전단변형만이 발생한다. 하지만 실제로는 항복면내에서도 소성체적변형이 일어나고 있기 때문에 큰 차이를 보이고 있다.

Fig. 9는 평균주응력 일정시험 결과를 응력비와 전단변형률과 체적변형률의 관계를 나타내고 복합항복면 구성모델로서 예측한 결과를 함께 나타낸 것이다. 복합항복면 구성모델에

서는 전단변형률이 초기에 응력비에 따라 일정하게 증가하다가 시료의 내부마찰각( $\phi$ )의 차이로 인하여 어느 정도의 분산이 발생하고 있음을 알 수 있다. 그리고 응력비에 따른 체적변형률은 제하(unloading)부분을 제외하면 매우 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

$p$ 를 일정하게 하고  $q$ 을 감소하는 동안에 복합항복면 구성모델의 이론에서는 탄성전단변형만이 발생한다. 그러나 실제 소성체적도 발생한다는 것은 명백하지만 그러한 소성변형률을 예측하기 위해서는 보다 복잡한 응력-변형

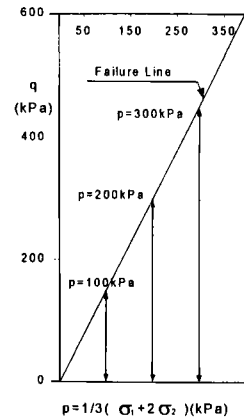
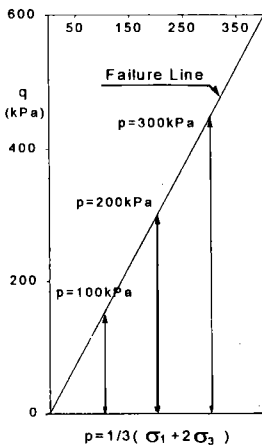
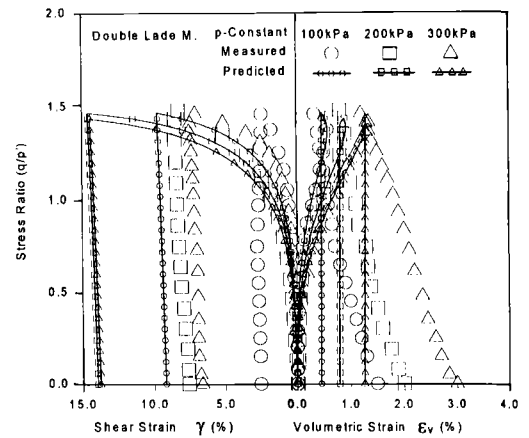
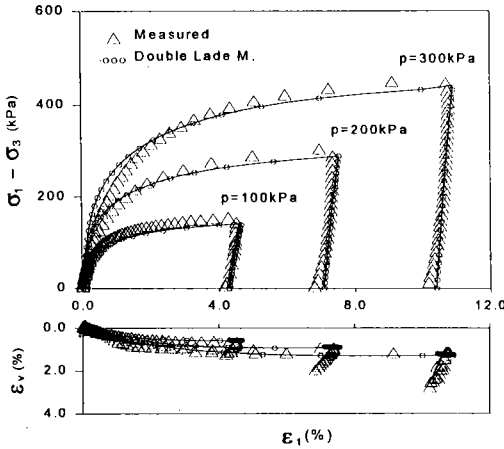


Fig. 8. Comparison between measured and predicted deviatoric stress and volumetric strain vs axial strain for Baekma river sand(double Lade M.)

Fig. 9. Comparison between measured and predicted shear strain and volumetric strain vs stress ratio for Baekma river sand(double Lade M.)



를 이론이 요구됨을 알 수 있다.

#### 4. 복잡한 응력경로

초기상태로부터 최종상태로의 응력변화에 의해 발생한 변형률은 응력변화동안의 중점뿐 아니라 응력경로의 모양에도 의존한다. 이는 Fig. 10, 11에 나타나 있으며, 이 그림들은 상이한 응력경로에 따른 동일한 초기응력조건(A)으로부터 동일한 최종응력조건(B)으로 응력변화에 의한 같은 모래공시체의 시험결과를 보인 것이다.

Fig. 10에서 보인 두가지 응력경로에서의 흙의 거동을 비교하면 더 높은 응력수준과 관련된 응력경로가 축변형률 값이 더 크다는 것을 보이고 있다. 이러한 경우와 같이 하중의 제거(제하)부분이 있는 응력경로와 하중제거가 없는 응력경로에서의 변형률을 비교하였을 때의 과거 연구결과와도 일치하고 있다.

두개의 응력경로에 대한 최종체적변형률은 동일한 것같이 보인다. Fig. 10에서 보인 선은 Lade의 복합항복면 구성모델을 사용하여 예측된 거동을 나타낸 것이다. 두 응력경로에 있어서 예측된 변형률은 시험결과와 그 크기와 변화가 꽤 잘 일치하고 있다.

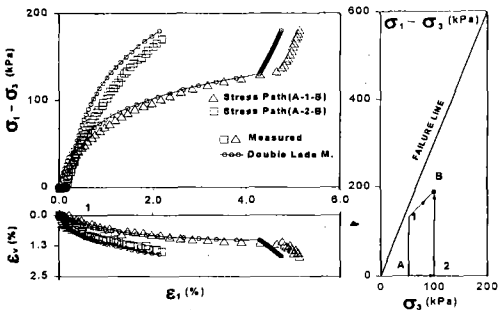


Fig. 10. Comparison of soil behavior for two stress-paths : involving primary loading and unloading (A-1-B) ; involving proportional loading and primary loading (A-2-B)

Fig. 11은 두가지 다른 응력경로에 있어서 변형률에 대한 다른 비교를 보인 것이다. 이 그림에서 어떠한 응력경로도 하중의 제거(unloading)나 하중을 다시 가하는(reloading) 경우가 없는 두가지 응력경로의 최종 축변형률은 점 B에서 단지 약간의 차이를 보이고 있다. 비록 2-B에 대한 축차응력이 차이를 보였지만, 예측된 복합항복면 구성모델로 예측

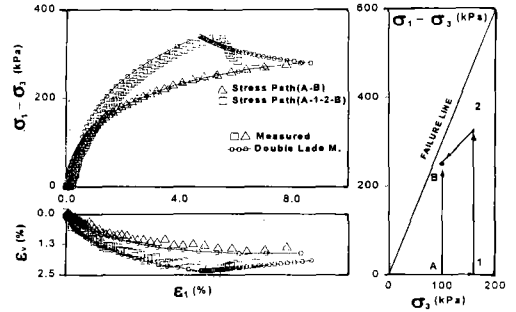


Fig. 11. Comparison of soil behavior for two stress-paths : involving primary loading (A-B) ; involving proportional loading and primary loading (A-1-2-B)

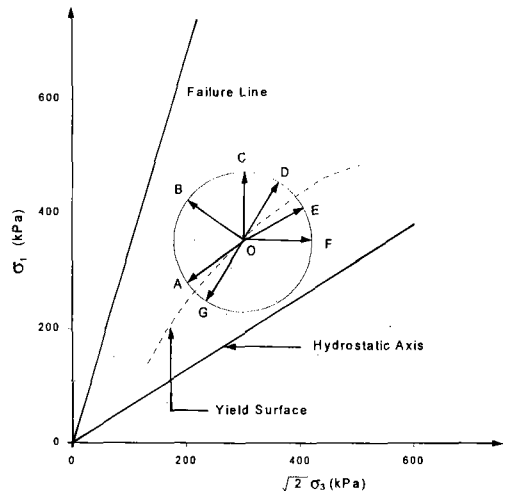


Fig. 12. Schematic illustration of stress-path direction in triaxial plane

한 응력-변형률 거동은 이렇게 나타난 반응을 꽤 정확히 반영하고 있다.

### 5. 응력경로에 따른 변형률 거동

변형률에 영향을 미치는 응력경로 방향의 효과를 알아보기 위하여 삼축면에서 일정한 응력증분( $\Delta\sigma$ )을 갖는 응력경로시험을 실시하였다. 시험은 Fig. 12에 모식적으로 나타낸 바와 같이 삼축면에서 O점을 기준으로 하여

각각 A, B, C, D 그리고 E, F, G까지 이동한 후 다시 각각 O점으로 되돌아 오도록 하였다.

시험결과를 각 지점의 전 변형률증분에서 탄성변형률 증분을 감하여 소성변형률 증분을 구하였다.

Lade의 복합항복면으로 시험결과를 예측하여 Fig. 13(a)~(d)에 나타내었다. 여기서, 전 변형률 증분벡터는 탄성변형률 증분벡터와 소성변형률 증분벡터를 포함한 것을 나타낸다.

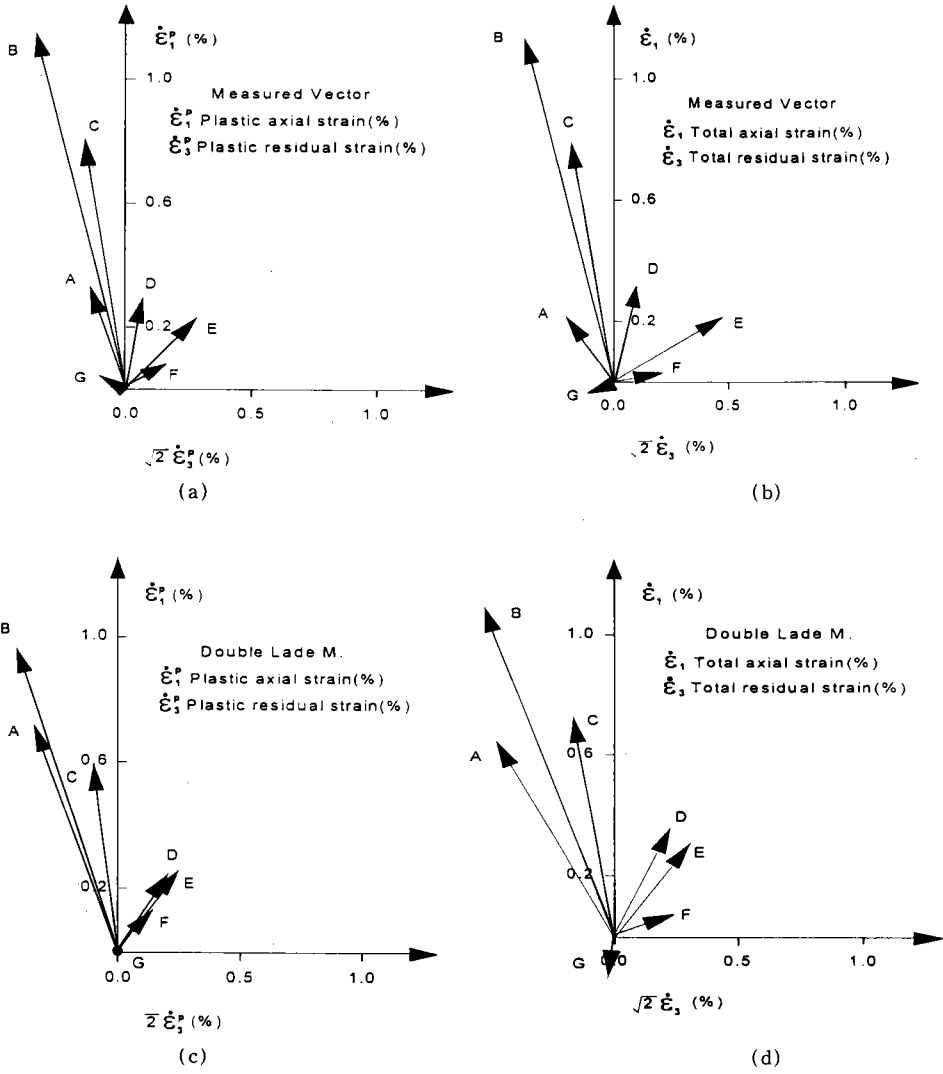


Fig. 13. Stress-path dependent behavior observed in Baekma river sand(a~d)

Fig. 13에서 보는 바와 같이 Lade의 복합항복면모델은 소성변형을 증분벡터의 방향이 구형 항복면과 원추형 항복면에서 구해진 소성변형을 증분벡터의 합벡터로 나타내므로 실제 지반의 소성변형을 증분벡터의 거동을 잘 나타내고 있다.

### 6. 파괴면에서의 변형률 특성

시료가 파괴점에 달하면 응력의 증분은 없고 변형만이 증가한다. 따라서 이 때의 변형률증분은 거의 소성변형률 증분만이 발생한다고 할 수 있다. Fig. 14는 세가지의 서로 다른 응력경로를 Case 1, Case 2와 Case 3의 경우로 하여 시험하고 결과를 이용하여 파괴시의 소성변형률 증분벡터와 내부마찰각( $\phi$ )을 구하였다.

백마강 모래로서 응력증분으로 인한 파괴시 응력-변형률 거동을 고찰한 결과, Fig. 15에 보인 바와 같이 파괴면에 둔각을 이루고 세계

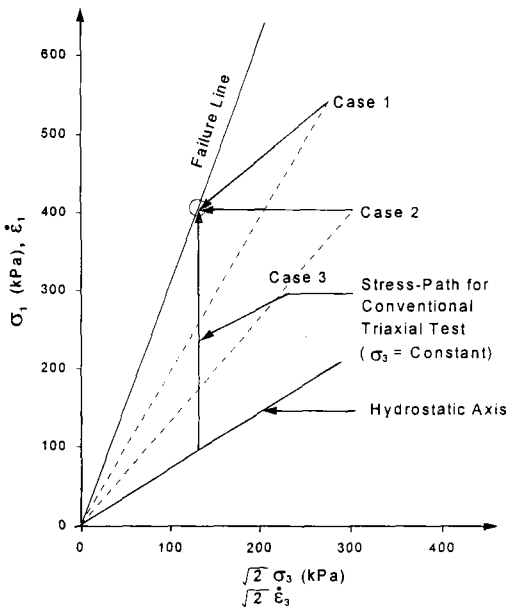


Fig. 14. Different stress-paths in triaxial plane

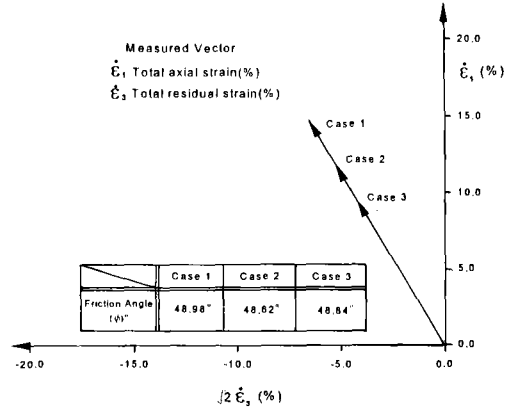


Fig. 15. Strain increment vectors predicted for different stress-paths

의 소성변형률 증분벡터가 모두 유일하게 한 방향을 나타냈다. 따라서 서로 다른 응력경로의 방향에서 구한 소성변형률 증분벡터는 응력경로의 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 또한 세 경우의 내부마찰각( $\phi$ )을 비교한 결과 거의 같은 값을 보이고 있다.

이와 같은 결과는 시료가 과거에 어떠한 응력이력이나 응력경로를 가지고 있다 하더라도 입상도에 있어서, 파괴시의 소성변형률 증분벡터는 현재의 응력상태로부터 유일하게 결정되어 진다는 것을 알 수 있었다.

### V. 결 론

입상도의 응력경로 의존특성을 규명하고자 백마강 모래를 사용 다양한 응력경로를 갖는 삼축시험을 실시하여, Lade의 복합항복면 구성모델을 사용하여 응력-변형률 거동을 예측하고 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제하(unloading) 및 재제하(reloading)을 포함한 응력경로의 시험결과, 탄·소성이론에서 가정한 바와 달리 항복면 안에서 탄성변형뿐만 아니라 소성변형도 발생함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

2. 제하하중(unloading)과 재재하하중(re-loading)을 포함하는 응력경로를 갖는 입상토의 시험 결과가 최종적으로 같은 응력수준이라 하더라도 높은 응력수준을 갖는 응력경로는 낮은 응력수준의 응력경로에서 보다 큰 축변형률을 발생시킨다. 한편 초기상태와 최종상태가 같은 응력경로를 갖는 최초하중을 재하(primary loading)한 응력경로 시험결과는 같은 크기의 축변형률을 나타내었다.

3. 응력비 일정시험결과의 역해석을 통하여 Lade의 복합항복면 구성모델의 탄성계수( $E_{ur}$ ) 결정시 구속압력( $\sigma_c$ ) 대신 평균주응력( $p$ )를 사용한 수정된 탄성계수식( $E_{ur} = K_{ur} \cdot P_a \cdot \left(\frac{p}{P_a}\right)^n$ )를 사용하므로써 예측능력이 개선되었다.

4. Lade의 복합항복면 구성모델을 사용하여 응력-변형률 관계를 해석한 결과 응력반전의 경우를 제외하고는 상당한 정도의 정확성을 나타냈다.

5. Lade의 복합항복면 모델은 소성변형률 증분벡터의 방향이 구형 항복면과 원추형 항복면에서 구해진 소성변형률 증분벡터의 합벡터로 나타내므로 실제지반의 소성변형률 증분벡터의 거동을 잘 나타내고 있다.

6. 파괴시에는 흙입자의 변형은 매우 커서 응력이력에 대한 기억이 사라지므로 과거의 응력이력은 입상토의 응력-변형률 거동에 영향을 주지 않으며, 내부마찰각( $\phi$ )에도 영향을 미치지 않고 단지 현재의 응력상태와 간극비만이 강도에 영향을 준다.

1. 정진섭, 김찬기, 이문순, "탄-소성 구성 모델의 토질매개변수 예민성", 한국지반공학회지, 제8권, pp. 81-94 (1992).
2. 정진섭, 김찬기, 이문순, "Lade의 Double Work-Hardening 구성모델의 토질매개변수 민감성해석", 대한토목학회논문집 제 12권, pp. 191-203 (1992).
3. Fumio Tatsuoka, and Kenji Ishihara., "Yielding of Sand in Triaxial" Compression", Soils and Foundations, Vol. 14, No. 2, 1974, pp. 63-76 (1974).
4. Nova, R., and Wood, D. M., "An Experimental Programme to Define The Yield Function for Sand," Soil and Foundations, Vol. 18, No. 4, pp. 77-86 (1978).
5. Yudhbir and Varadarajan A., "Stress Path Dependent Deformation Module of Clay", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 101, No. GT3, pp. 315-327 (1975).
6. Tobita, Y., and Yanagisawa. E., "Stress Strain Relationship of Sand and Its Application to FEM Analysis," International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading, Swansea, 7-11, pp. 653-664 (1980).
7. Lade, P. V., and Duncan, J. M., "Stress-Path Dependent Behavior of Cohesionless Soil", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 99, No. SM10, pp. 793-812 (1973).

이 논문은 1997년도 원광대학교의 교  
비지원에 의해서 연구됨