

Lade의 Double Work-Hardening 구성모델의 土質媒介變數 敏感度 解析

Sensitivity Analysis of Parameters for Lade's Double Work-Hardening Model

정진섭* · 김찬기** · 이문수***

Jeong, Jin Seob · Kim, Chan Kee · Lee, Moon Soo

Abstract

This paper dealt with the statistical values including mean, standard deviation, variance and coefficient of variation for 14 soil parameters available of Lade's double work-hardening model in order to predict the behaviour of granular soil. 27 sets of all 14 parameters for Baekma river sand were determined by regression using raw data acquired from 12 isotropic compression tests and 9 triaxial compression tests with the variation of confining pressure of 1, 2, and 4 kg/cm² respectively 3 times performed during this study. The characteristics of each parameters were investigated. By determining the range of the upper and lower bound dependent on the increase and decrease of the standard deviation from mean value of parameters, sensitivity of all the parameters was scrutinized, by which in turn the influence of experimental error generated inevitably during tests on the determination of soil parameters was also examined.

요 지

본 文은 사질토의 거동을 예측함에 있어서 각 토질매개변수의 민감도를 규명하는데 있다. Lade의 2중일경화구성모델을 선정하여 이 모델에 필요한 14종의 토질매개변수를 시험자료로부터 회귀분석 방법에 의하여 각각 27개 씩 구하였다. 이 때 사용된 자료는 백마강 모래이며, 시험은 12회의 등방 압축시험과 구속압력을 달리한 9회의 배수3축압축시험을 하였다. 또한 이들 토질매개변수의 평균, 분산 및 변동계수 등을 구하여 각 토질매개변수의 특성을 파악하였으며 평균에 표준편차를 증감하여 응력-변형율을 해석하고 그 분산의 범위를 검토하여 민감도를 분석하였다.

1. 序 論

흙의 舉動解析을 위해서는 적절한 흙의 구성식을

* 정희원 · 원광대학교 공과대학 교수

** 정희원 · 원광대학교 대학원 박사과정

*** 정희원 · 전남대학교 농과대학 부교수

선정하게 된다. 이 선정된 구성모델의 신뢰성은 얼마나 정확히 應力-變形率을 예측할 수 있는가에 좌우된다. 또한 모든 구성식에는 다만 한정된 자료에 대한 실내 시험으로부터 얻은 자료를 이용하여 구한 土質媒介變數가 포함되어 있다.

따라서 시험으로부터 정교한 결과를 얻는다는

것은 흙의 거동 예측에 중요한 요소이다. 즉 구성 방정식에서 사용되는 여러 土質媒介變數의 값은 제안된 구성모델의 정도를 나타내는 기본적인 사항이지만 각 土質媒介變數의 결정에는 실제로 상당한 주관적인 판단과 개인적 또는 기계적인 원인으로 발생된 실험오차가 포함되기 마련이다. 또 구성모델을 제안한 학자는 제안된 모델의 타당성을 검증하기 위하여 소수의 시험만을 통하여 주관적으로 결정된 土質媒介變數를 이용하여 흙의 變形舉動을 예측하고 이를 시험치와 비교하므로써 구성모델의 정도를 논의하여 왔다.

그러므로 이미 제안된 구성모델에 대하여 실내시험을 통하여 얻어진 각 土質媒介變數의 통계학적 분석을 하고 이를 이용하여 그 구성식의 확률론에 입각한 정확도를 규명하는 것은 매우 의미있는 연구라고 하겠으나 아직까지 구성모델에 대한 확률론적 접근방식에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 문은 이와 관련하여 이들 오차를 포함한 시험자료를 통계처리하여 각각의 土質媒介變數가 解析結果에 미치는 敏感度解析을 하고자 하였다.

연구 방법으로서의 사질토의 舉動解析에 그 정도가 뛰어나다고 평가되고 있는 Lade의 Double Work-Hardening 구성모델^(1,2,3)을 선정하고 실험으로부터 이 모델에 필요한 土質媒介變數를 회귀분석으로 구하는 전산프로그램을 개발⁽⁴⁾하고 土質媒介變數결정 프로그램을 통하여 얻어진 土質媒介變數를 구성식에 이용하여 應力-變形率관계를 예측하였다.

이 연구에서 사용된 시료는 백마강에서 채취한 모래이며 등방압축 및 배수삼축압축시험 등을 수행하여 土質媒介變數를 회귀분석에 의하여 구하고 이를 통계처리하여 이들의 평균값으로 부터 標準偏差만큼 증감하여 일정수준의 軸變形率에 대한 軸差應力 및 體積變形率에 대한 상계 및 하계의 범위를 구하여 敏感度⁽⁵⁾를 파악하였다. 또한 14종의 土質媒介變數의 標準偏差, 分散 및 變動係數를 검토하여 土質媒介變數의 통계적 특성을 밝혔다.

2. Double Work-Hardening 구성모델^(1,2,3)

소성파쇄항복면의 방정식 f_c 는 다음과 같다.

$$f_c = I_1^2 + 2I_2 \quad (2.1)$$

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

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

소성파쇄 포텐셜함수 g_c 는 소성파쇄항복함수와 같으며 파괴상태에 도달하지 않는다.

$$g_c = I_1^2 + 2I_2 \quad (2.2)$$

그러므로 관련유동법칙이 성립되며, 일의 경화를 표현하는 식은 소성파쇄일의 함수로 다음과 같이 나타낸다.

$$f_c = P_a^2 \cdot \left(\frac{1}{C}\right)^{1/P} \cdot \left(\frac{W_c}{P_a}\right)^{1/P} \quad (2.3)$$

여기서 P_a 는 대기압이고, C , P 는 土質媒介變數이며 W_c 는 소성파쇄일이다.

소성팽창항복면의 방정식 f_p 는 다음과 같다.

$$f_p = (I_1^3/I_3 - 27) (I_1/P_a)^m \quad (2.4a)$$

$$f_p = \eta_1 \text{ at failure} \quad (2.4b)$$

여기서 η_1 과 m 은 토질매개변수이고

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

이다.

소성팽창變形率을 구하는데 비관련유동칙이 사용되며 소성팽창포텐셜함수는 식 (2.5)와 같으며 일의 경화 혹은 연화를 표현하는 식은 소성팽창일의 함수로 식 (2.6)과 같이 나타낸다

$$g_p = I_1^3 - (27 + \eta_2 \cdot (P_a/I_1)^m) \cdot I_3 \quad (2.5)$$

$$f_p = a \cdot e^{-b \cdot W_p} (W_p/P_a)^{1/q} \quad q > 0 \quad (2.6)$$

여기서, a , b , q 는 土質媒介變數이고 e 는 대수의 기저값이다.

3. 실험 및 土質媒介變數결정

3.1 시료 조제

Double Work-Hardening 構成모델의 土質媒介變數의 敏感度를 검토하고자 백마강유역에서 채취한 모래를 자연건조시킨 후 #60을 전부 통과하고

표 1. Physical Properties of Baekma River Sand

비 중	e_{max}	e_{min}	e_{spc}	Dr
2.706	1.255	0.973	1.086	0.60

200에 잔류하도록 시료를 체가름하고 이 시료의 최대간극비(e_{max}), 최소간극비(e_{min})을 측정하여 상대 밀도(Dr)를 60%가 되도록 시료의 초기간극비(e_{spc}) 값을 결정하여 시험에 이용할 수 있도록 시료를 준비하였다. 이 시료의 크기는 직경 50 mm, 높이 100 mm로 하였으며 물리적특성은 표 1과 같다. 그리고 이 준비된 시료를 사용하여 등방압축시험 12회 및 구속압력을 1, 2, 4(kg/cm^2)로 각각 달리한 배수3 축압축시험 9회를 하였다.

3.2 시험방법

준비된 시료를 3축시험기에 설치하기 전에 공시체와 상,하판 사이의 마찰에 의한 구속력을 없애기 위해 상, 하판(직경 6 cm의 아크릴(acryl)판)에 실리콘 그리스(silicon grease)를 바르고 0.3 mm두께의 고무 멤브레인(membrane)을 부착한다. 이는 재하판과 공시체 사이의 剪斷應力이 발생하는 것을 방지하고 공시체 내부의 변형이 균일하게 되도록 하기 위함이며, 이 때 배수는 특수 제작한 상하의 아크릴(acryl)판의 중앙에 직경 5 mm 정도의 구멍을 뚫고 다공질판을 넣어 이 판을 통해 양면배수가 되도록 하였다. 試料를 저판 위에서 직접 다음과 같이 설치한다. 고무멤브레인을 하부좌대(pedestal) 저부에 펼쳐 두개의 O-ring으로 봉한 다음에 진공성형상자(forming jacket)를 저판 위의 중앙에 맞추어 놓고 멤브레인을 성형상자둘레에 완전히 끈게 펼쳐 올리고 진공을 가하여 고무멤브레인이 성형상자에 완전히 밀착 되도록 한다.

그리고 이 성형상자 내부에 알맞은 “체”를 안에 넣고 준비된 시료의 일정량을 상자 안에 부어 넣은 후 체를 천천히 들어 올려 상자 안에 있는 시료의 밀도가 일정하게 유지되도록 하였으며 가끔 모래의 상부면이 성형상자의 상부면보다 약간 올라오는 경우가 있는데 이 때는 손으로 진동을 주어 밀도가 정해진 값에 이르도록 하여 안치한다. 그리고 판단 중에 시료가 편기되는 경우는 밀도가 균일하지 않은 것으로 생각되어 본 시험자료에서 제외하였으므로 이 연구에서 분석된 자료는 밀도가 균일하다고 생각할

수 있다. 그리고 상판(cap)을 試料 위의 중앙에 놓고 가멤브레인을 상판에 씌운 다음 O-링으로 봉한다. 그 다음 상부 배수관을 상판에 연결시키고 시료에 $0.2 kg/cm^2$ 의 진공압을 가한 후 성형상자를 제거하며 이 때 漏氣에 의해 진공압이 감소하면 진공압이 일정하게 유지될 때까지 멤브레인에 생고무액을 발라 누기를 방지한다. 다음에 3軸室을 조립한 다음 물을 가득 공급하고 시료의 진공을 제거함과 동시에 축압을 가한 후 일정한 축압을 유지시킨다. 이 시료에 탄산가스(CO_2)를 하부 배수관으로 주입시켜 시료속의 공기를 상부배수관을 통해 완전히 빠져 나가게 한 다음 증류수를 하부 배수관으로 유입시켜 시료 내에 있는 CO_2 를 상부 배수관으로 천천히 밀어 올려 시료로 부터 빠져 나가게 한다. 이 때 CO_2 의 체적변화는 순수물의 체적변화와 같기 때문에 시료 내에 남아 있는 CO_2 는 크게 문제되지 않는다. 또한 포화정도는 시험 시작전에 간극수압계수 B를 측정하여 점검 하였다. 이 때 B값은 대부분 0.96-1.0 정도이었던므로 완전 포화된 것으로 간주하였다. 이와같이 준비된 시료를 이용하여 등방압밀시험과 배수삼축압축시험을 실시하였다. 이 때 탄성계수(Eur)를 결정하기 위하여 최대하중에 이르렀을 때 연속적으로 재하-제하-재하를 수행하였으며 전단 속도는 0.2 mm/min로 하였다. 이들 시험결과 중 土質媒介變數를 결정할 수 있는 최소 단위의 조합을 택하여 그림 1과 그림 2에 나타냈다.

3.2. 土質媒介變數 결정

실내 시험결과로부터 Double Work-Hardening 구성모델에 필요한 土質媒介變數를 얻는 과정은 매우 복잡하며, 수작업으로 수행할 때는 많은 시간이 소요되며 다소 오차가 유발될 우려가 있다. 따라서, 본 연구에서는 보다 신속하고 더 신뢰할 수 있도록 회귀분석(regression analysis)에 의하여 土質媒介變數 결정을 위하여 전산프로그램을 개발하여 사용하였다. 이 프로그램의 내용을 요약하면 그림 3과 같으며 이 프로그램을 이용하여 백마강 모래에 대한 土質媒介變數를 구한 결과는 표 2와 같다.

4. 土質媒介變數의 통계적 처리 및 銳敏度 분석

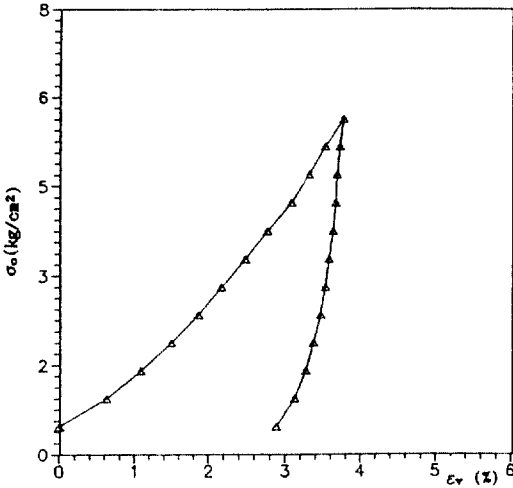


그림 1. Isotropic compression tests for Baekma river sand.

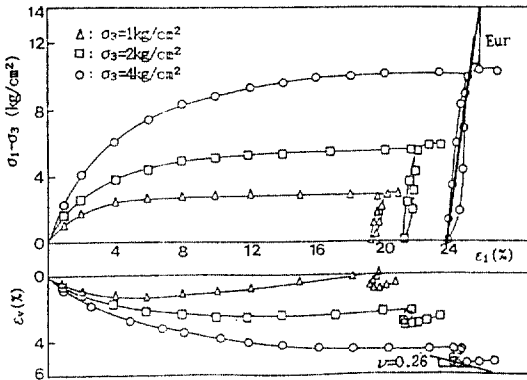


그림 2. Result of drained triaxial compression tests for Baekma river sand.

4.1 土質媒介變數의 통계적 특성

Double Work-Hardening 구성모델^(1,2)의 土質媒介變數는 탄성變形率 성분(Kur, n, v), 소성과쇄變形率 성분(C, p) 및 소성팽창變形率 성분($\eta_1, m, R, S, t, \alpha, \beta, \gamma, \delta$) 등 14개의 土質媒介變數가 필요하며 그림 1의 등방압축시험 및 그림 2와 같은 3조의 배수3축압축시험결과를 이용하여 각 土質媒介變數의 수를 여러개 발생할 목적으로 구속應力이 다른 상태의 실험은 서로 통계적 독립이라 가정하고 조합을 이용하여 가능한 많은수의 土質媒介變數를 구하였다.⁽⁶⁾ 그리고 이들의 통계적특성치는 표 3과 같다.

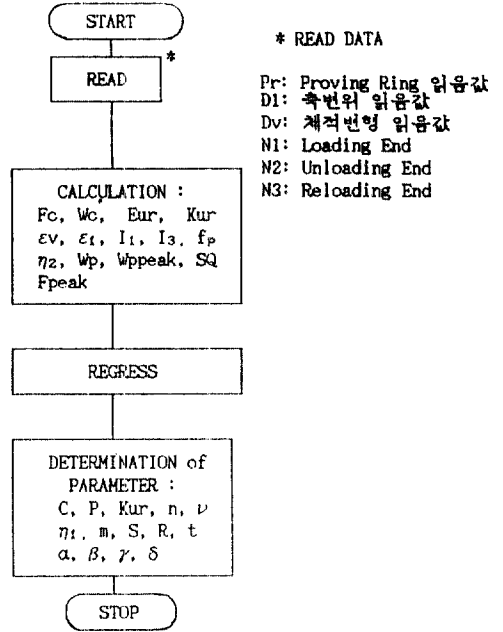


그림 3. Flow chart for determining soil parameters

표 2. Parameters of Double Work-Hardening Model for Baekma River sand

Kur	n	v	C	P	η_1	m
348.	0.741	0.28	0.00153	0.89	33.	0.13
R	S	t	α	β	γ	δ
-0.457	0.516	-2.415	2.597	-0.18	0.369	1.16

표 3에서 알 수 있는 바와 같이 매개변수 m과 β 는 變動係數가 각각 0.843와 0.829로 큰 값을 나타내고 있으며 소성과쇄變形率 성분 p는 0.028로서 가장 작은 값을 보이고 있다.

4.2 土質媒介變數의 銳敏度 분석

4.2.1 분석 방법

Double work-hardening 구성모델에 필요한 14개의 土質媒介變數가 軸變形率(ϵ_1)과 軸差應力($\sigma_1 - \sigma_3$) 및 軸變形率(ϵ_1)과 體積變形率(ϵ_v)에 미치는 영향을 규명하기 위하여 실험결과를 통계처리하여 얻은 土質媒介變數 평균값에 標準偏差 만큼 가감하여 구성식에 대입, 應力-變形率곡선을 구하여 각 土質媒介變數에 대한 銳敏度를 검토하였다.

표 3. Statistic Characteristics for Parameter of Double Work-Hardening Model

Parameter	실험수	E[X]	S.D.[X]	Var[X]	C.O.V.	Strain Component
Kur	27	348.	16.	256.	0.046	Elastic
n	27	0.741	0.086	0.0073	0.111	
n	27	0.28	0.116	0.0134	0.414	
c	12	0.00153	0.0002	0.0000	0.128	Plastic
p	12	0.89	0.247	0.0006	0.028	Collapse
η_1	27	33.	2.620	6.8410	0.079	Plastic Expansive
m	27	0.130	0.035	0.0121	0.843	
S	27	0.516	0.022	0.0005	0.043	
R	27	-0.457	0.159	0.0254	0.340	
t	27	-2.415	0.617	0.380	0.263	
α	27	2.597	0.283	0.080	0.110	
β	27	-0.180	0.149	0.0223	0.829	
γ	27	0.369	0.026	0.0007	0.071	
δ	27	1.160	0.090	0.0080	0.078	

4.2.2 탄성성분(Kur, n, v)

그림 4는 그림 2의 排水三軸壓縮試驗의 제하-재하부분에서 軸變形率(ϵ_1)에 대한 軸差應力($\sigma_1-\sigma_3$)의 기울기로 부터 구한 탄성계수 Eur값을 σ_3 에 대하여 兩對數紙上에 그린 것이다. 試驗結果에서 얻은 Eur값은 直線 즉 다음과 같이 表現할 수 있다.

$$\log(Eur/Pa) = \log Kur + n \log(\sigma_3/pa) \quad (4.1)$$

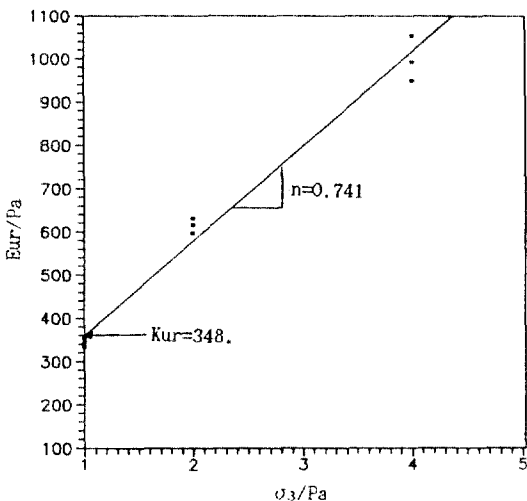


그림 4. Variation of elastic modulus with confining pressure for Baekma river sand.

식 (4.1)의 兩邊의 對數를 除去하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$Eur = Kur \cdot Pa \cdot (\sigma_3/pa)^n \quad (4.2)$$

그림 4에서 정한 Kur은 $\sigma_3=1$ 일 때의 Eur값이고 n은 이 直線의 기울기이다.

이들 土質媒介變數의 평균값은 각각 348, 0.741 이고 變動係數는 0.046 0.111로서 비교적 작은 변화를 보이고 있다. 특히 Kur값은 0.046으로 n의 반정도에 불과하다. 이 土質媒介變數의 평균값에 標準偏差 만큼 증감시켜 軸變形率에 대한 軸差應力과 體積變形率의 관계를 나타낸것이 그림 5와 그림 6이다. 그림에서 보는 바와 같이 土質媒介變數의 평균값에 標準偏差 만큼 증감시켰으나 軸變形率에 대한 軸差應力이나 體積變形率 모두 변화가 거의 없이 같은 곡선에 모여지고 있다. 이와같이 두 土質媒介變數가 증감해도 차이를 나타내지 않는것은 전체 變形率에 대한 탄성變形率성분이 매우 작기 때문에 판단된다. 그림 7은 그림 2의 排水三軸壓縮試驗의 제하-재하부분에서 얻은 $\Delta\epsilon_v/\Delta\epsilon_1$ 를 사용 $v=1/2(1-\Delta\epsilon_v/\Delta\epsilon_1)$ 로 計算한 포아슨비(v)와 σ_3 와의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 포아슨비(v)는 σ_3 의 크기에 무관하며 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 그러므로 본 논문에서는

포아슨비(ν)는 三軸試驗結果에서 얻은 값의 平均値를 사용한다. 平均포아슨비(ν)는 0.28이고 變動係數는 0.414로서 비교적 큰 편차를 보이고 있다. 그림 8은 포아슨비(ν)의 平均값에 標準偏差 만큼 증감시켜 軸變形率에 대한 軸差應力 및 體積變形率 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 體積變形率에 약간의 편차를 보이는 것 이외는 거의 같은 곡선에 모여지고 있다. 포아슨비는 비교적 큰 變動係數에도 불구하고 應力-變形率曲線에 영향이 작은 것은 전체

變形率에 대한 탄성變形率성분이 매우 작은 양이기 때문이며 통상 土質工學에서 사용하여온 바와 같이 적당하게 측정치를 사용하여도 應力-變形率 解析에 중요한 차이가 나타나지 않는 것으로 입증되고 있다.

4.2.3 塑性破碎變形率成分(C, P)

그림 1의 等方壓縮試驗 結果로 부터 다음식을 이용하여 塑性破碎일을 구한다.

$$W_c = \int \sigma_3 \cdot d\epsilon_v^c \quad (4.3)$$

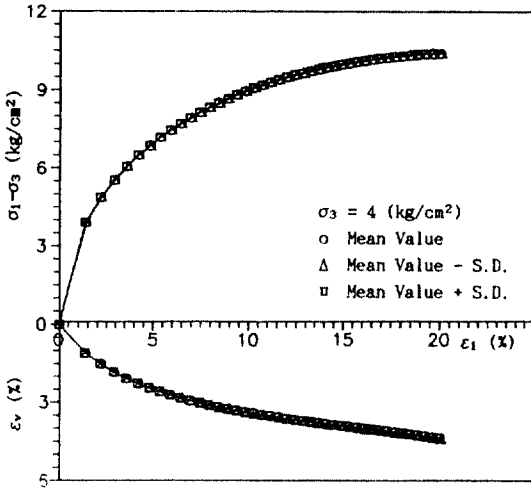


그림 5. Deviatoric stress and volumetric strain vs. axial strain with variation of K_{ur} .

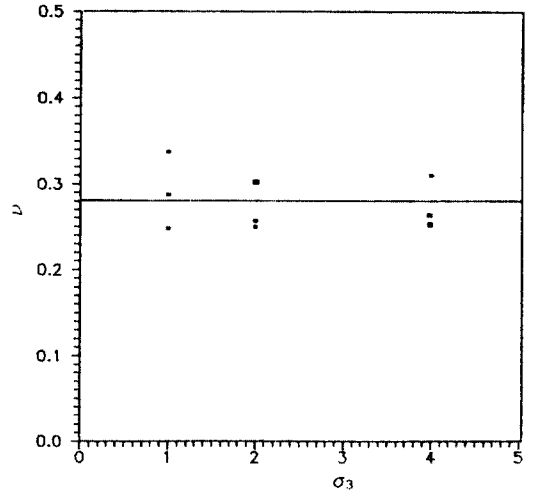


그림 7. Variation of Poisson ratio ν with confining pressure for Baekma river sand.

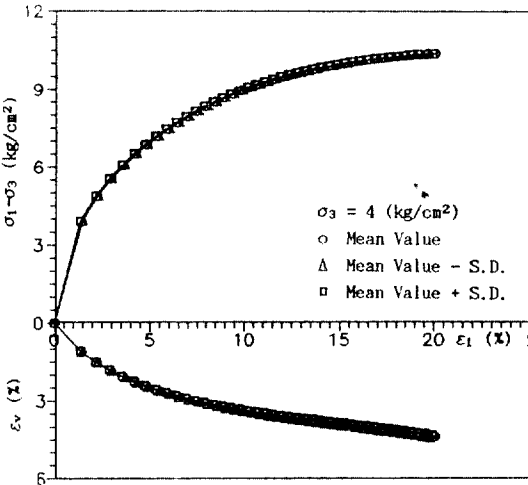


그림 6. Deviatoric stress and volumetric strain vs. axial strain with variation of n .

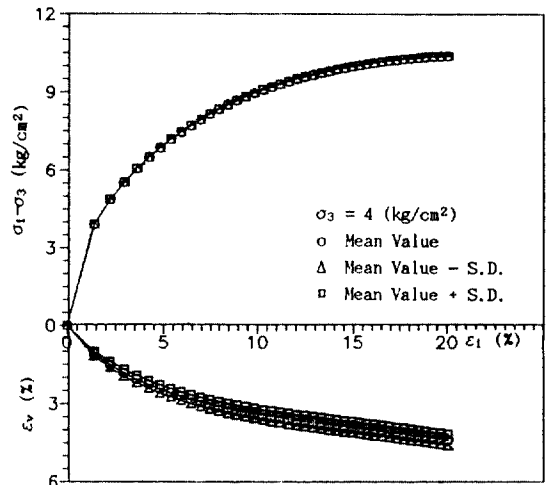


그림 8. Deviatoric stress and volumetric strain vs. axial strain with variation of ν .

여기에서 de_c 는 그림 1의 등방압축시험결과에서 測定된 變形率로 부터 彈性變形率을 감하여 구하였다.

한편 等方壓縮에 대한 f_c 값은 다음식으로 구한다.

$$f_c = 3 \sigma_3^2 \quad (4.4)$$

그림 9는 백마강모래에 대한 W_c 와 f_c 관계를 兩對數紙에 나타낸 것이다. 이들 관계는 兩對數紙上에서 直線 즉 다음과 같이 표현할 수 있다.

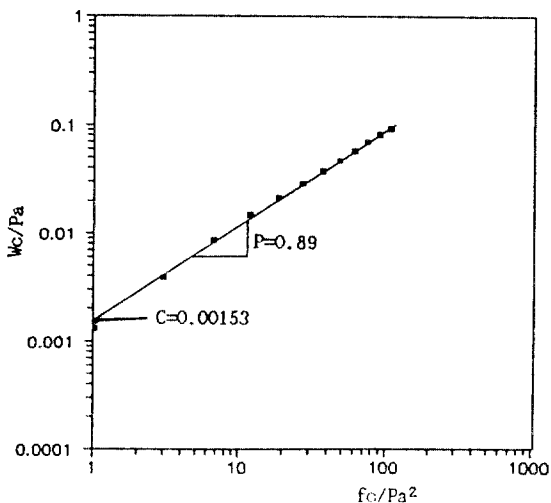


그림 9. Relation between plastic collapse work, W_c , and the value of f_c Baekma river sand.

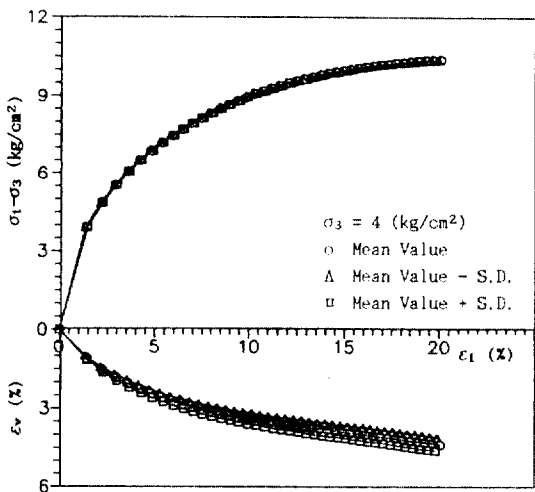


그림 10. Deviatoric stress and volumetric strain vs axial strain with variation of C .

$$\log(w_c/p_a) = \log c + p \cdot \log(f_c/p_a^2) \quad (4.5)$$

식 (4.5)의 兩邊의 代數를 除去하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$W_c = C Pa(f_c/p_a^2)^p \quad (4.6)$$

그림 9에서 C 는 $(f_c/P_a^2)=1$ 일 때의 절편값이고 P 는 이 직선의 기울기이다. 그림 9에서 보는 바와 같이 初期部分의 試驗값은 직선 부분에서 약간 이탈되고

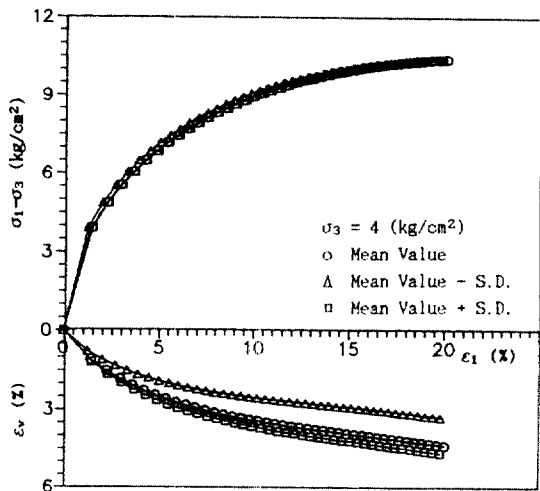


그림 11. Deviatoric stress and volumetric strain vs axial strain with variation of p .

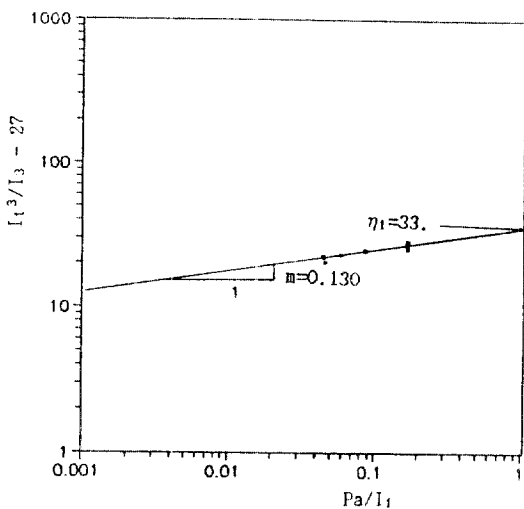


그림 12. Determination of the value of η_1 and m involved in failure criterion for Baekma river sand.

있음을 알 수 있다. 이것은 試料의 성형 과정에서 선행 拘束壓力가 일정하지 못한 結果에 의해 발생되는 誤差이므로 媒介變數 C, P값의 程度를 높이기 위하여 初期의 이탈된 값을 除去한 結果를 使用하는 것이 보다 더 正교한 應力-變形率關係를 豫測할 수 있었다.

그림 10과 그림 11에는 塑性破碎變形率성분에 대한 土質媒介變數 C와 P의 平均값 0.00153과 0.89에 標準偏差 0.00020과 0.247를 가감하여 軸變形率에 대한 軸差應力 및 體積變形率關係를 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 C는 體積變形率에 약간의 편차를 보이고 있으나 P는 變動係數가 가장 작은 0.028임에도 불구하고 體積變形率변화에 민감하게 영향을 미치고 있음을 의미하고 있다. 그러나 두 변수에 대한 軸差應力에 대한 영향은 거의 없으며 이것은 이 土質媒介變數가 소성파쇄성분만을 대표하는 것이기 때문에 판단된다.

4.2.3 塑性膨脹變形率成分

(1) η_1, m (과괴규준)

그림 12는 그림 2의 排水三軸壓縮試驗 結果에서 얻은 破壞 時의 應力을 사용하여 計算한 (Pa/I_1) 에 대한 $(I_1^3/I_3 - 27)$ 의 값을 兩對數紙上에 그린 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 兩對數紙上에서 $(I_1^3/I_3 - 27)$ 대 (Pa/I_1) 의 관계는 直線, 즉 다음의 관계식으로 표현할 수 있다.

$$\log \eta_1 = \log(I_1^3/I_3 - 27) + m \cdot \log(Pa/I_1) \quad (4.7)$$

式 (4.7)의 兩邊의 對數를 除去하면 다음식이 된다.

$$\eta_1 = (I_1^3/I_3 - 27) \cdot (Pa/I_1)^m \quad (4.8)$$

여기서 η_1 은 $Pa/I_1 = 1$ 일 때 절편 $(I_1^3/I_3 - 27)$ 값이며 m 은 이 직선의 기울기이다. 그림 14와 그림 15는 과괴규준을 나타내는 η_1 과 m 의 平均값 33과 0.13에 標準偏差 2.62와 0.035를 가감하여 軸變形率에 대한 軸差應力 및 體積變形率關係를 나타낸 것이다. 그

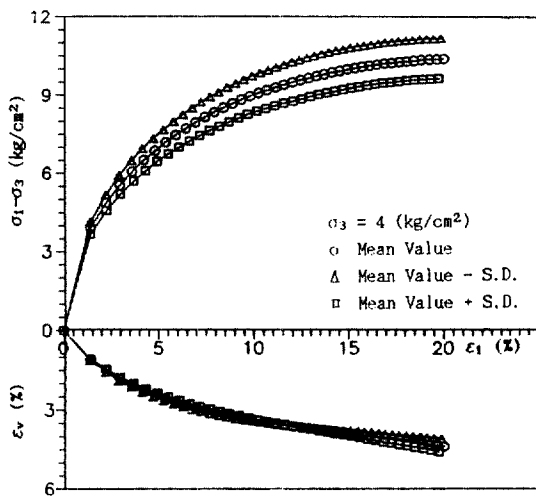


그림 14. Deviatoric stress and volumetric strain vs axial strain with variation of m .

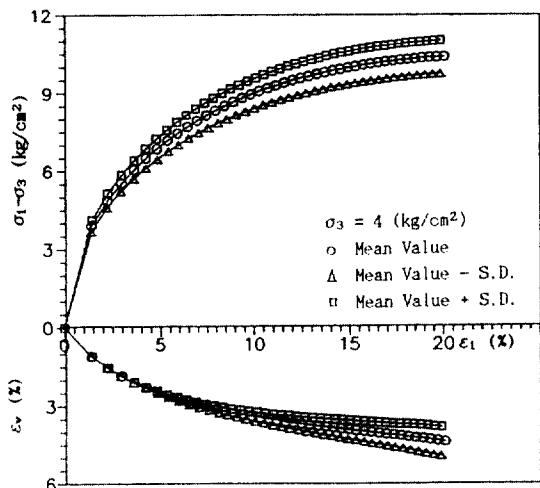


그림 13. Deviatoric stress and volumetric strain vs axial strain with variation of η_1 .

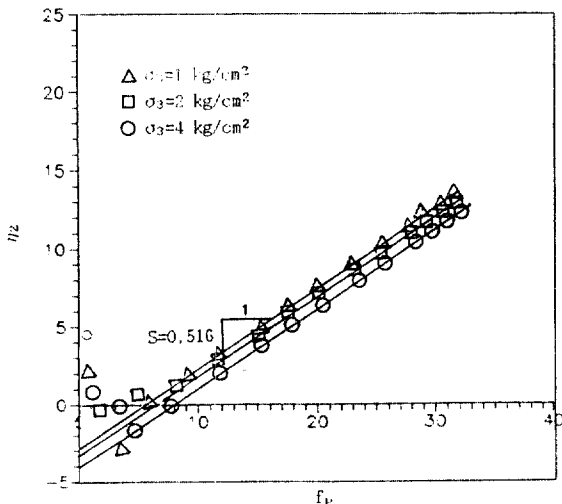


그림 15. Variation of η_2 with f_p for Baekma river sand.

림에서 보는 바와 같이 η_1 과 m 은 파괴규준을 나타내는 土質媒介變數이므로 軸差應力에 크게 영향을 미치고 있는 것은 당연한 것이나 體積變形率에도 다소의 영향을 미치고 있으며, η_1 은 軸差應力 및 體積變形率에 있어서 변형의 초기단계에서는 거의 영향을 미치지 않고 있으나 變形率이 증가함에 따라 큰 편차가 발생하고 있다. 또한 土質媒介變數 m 의 값은 體積變形率에는 별로 큰 차이를 보이지 않고 있으나 軸差應力에는 η_1 과 같은 경향을 나타내고 있으며 m 의 變動係數는 0.848로서 모든 土質媒介變數중에서 가장 큰 값을 나타내고 있지만 편차에 비례하여 應力-變形率관계에 영향을 주고 있지 않음은 주목을 요한다.

(2) S, R, t(η_2-f_p 관계)

그림 15는 백마강모래의 일련의 排水三軸壓縮試驗 結果값을 다음식 (4.9)을 이용하여 얻은 η_2 에 대한 f_p 의 값을 兩對數紙에 그린 것이다.

$$\eta_2 = \frac{3 \cdot (1 + \nu^p) \cdot I_1^2 - 27 \cdot I_0 s_3 (\sigma_1 + \nu^p \cdot \sigma_3)}{(Pa/I_1)^m \cdot [\sigma_3 (\sigma_1 + \nu^p \cdot \sigma_3) - (I_3/I_1) \cdot m \cdot (1 + \nu^p)]} \quad (4.9)$$

이 그림에 나타난 바와 같이 η_2 에 대한 f_p 의 관계는 直線 關係가 있으며 σ_3 에 따라 각각의 기울기는 거의 일정한 값을 유지하고 있으나 초기 부분에서 시험 값이 직선상에서 상당히 이탈되고 있음을 알 수

있다. 이 때 직선상에서 이탈된 값을 포함하여 回歸分析하여 얻은 기울기 및 절편값을 사용하여 應力-變形率關係를 예측한 경우 큰 誤差가 발생하였다. 이 오차의 원인은 공시체와 荷重作用 초기의 접촉 과정에서 발생하는 것으로 생각되어 이것을 제거한 나머지 시험값을 사용하여 回歸分析할 경우 상당히 높은 相關係數를 얻을 수 있었다. 그리고 이 때 각각 다른 σ_3 값에서 얻은 기울기를 평균하여 S값을 정하고 이 S값에 상응하는 각각의 절편값을 얻었다. 이렇게 하여 얻은 절편값은 σ_3 가 클수록 적은 값을 나타내고 있었다. 그림 16은 σ_3 에 따른 절편값을 그린것으로서 그림에 나타난 바와 같이 直線으로 나타낼 수 있다. 이들 그림에 나타난 η_2 와 f_p 및 σ_3 의 關係를 하나의 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\eta_2 = S \cdot f_p + R \sqrt{\sigma_3 / Pa} + t \quad (4.10)$$

여기서 S는 그림 15의 η_2 대 f_p 의 관계에서 直線의 평균기울기이고 R과 t는 그림 16에서 각각 직선의 기울기와 절편값이다.

그림 17, 그림 18 및 그림 19는 η_2 와 항복합수 f_p 의 關係를 나타내는 土質媒介變數 S, R 및 t에 관한 銳敏度를 보인것이다. 세 변수는 모두 軸差應力에는 전혀 영향을 미치지 않고 있으나 體積變形率에는 軸變形率이 클수록 큰 편차를 발생하고 있으며, 영향을 미치는 크기의 순서는 t, S 및 R의 순서이다.

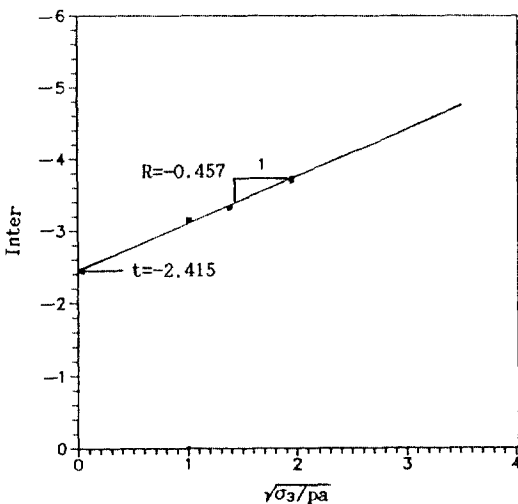


그림 16. Variation of η_2 with f_p for Baekma river sand.

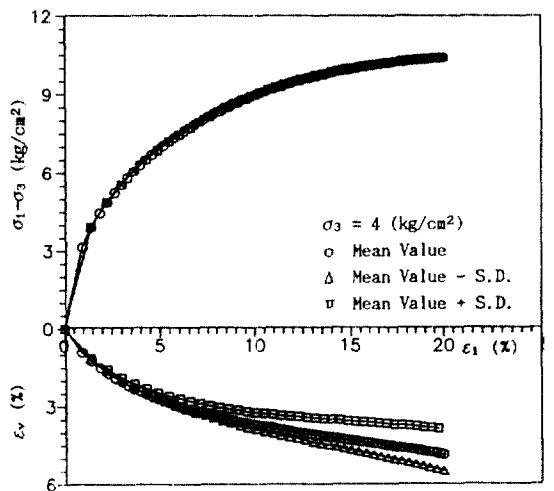


그림 17. Deviatoric stress and volumetric strain vs axial strain with variation of S.

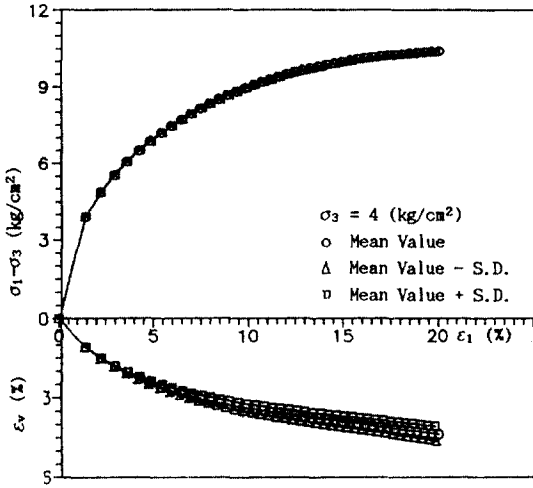


그림 18. Deviatoric stress and volumetric strain vs axial strain with variation of R.

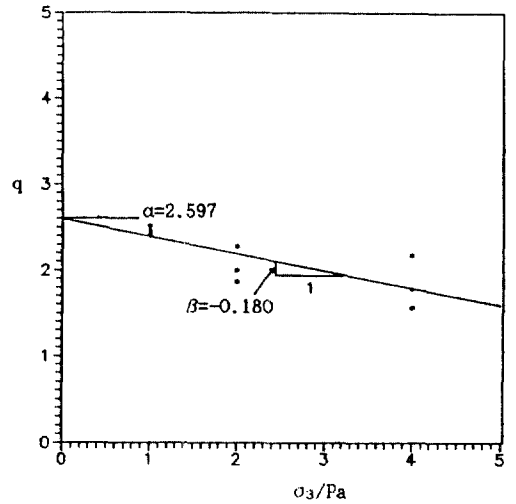


그림 20. Variation of q with confining pressure σ_3 for Baekma river sand.

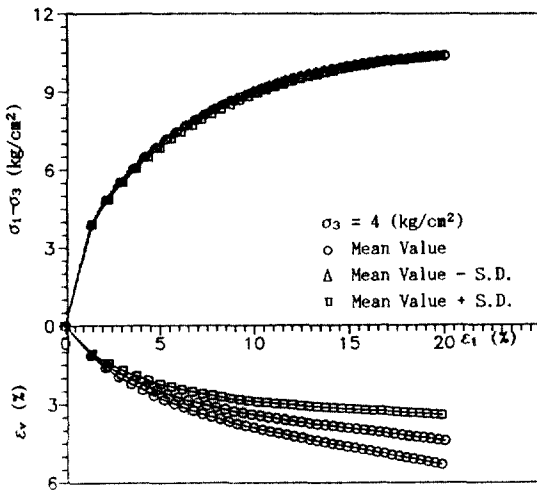


그림 19. Deviatoric stress and volumetric strain vs axial strain with variation of t.

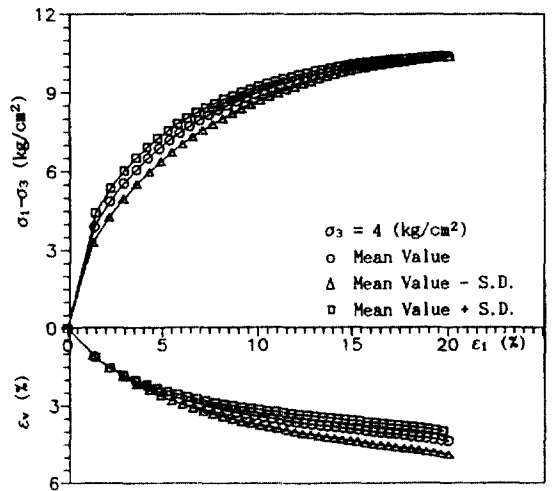


그림 21. Deviatoric stress and volumetric strain vs axial strain with variation of α .

특히 S는 變動係數가 0.043으로 작은 값인데도 體積變形率에 민감한 반응을 보이고 있으므로 S의 결정에는 주의가 요망된다.

(3) $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ ($f_p - W_p$ 관계)

그림 20은 백마강모래의 일련의 排水三軸壓縮試驗 結果를 다음 식 (4.11)에 의해 얻은 q와 拘束壓力(σ_3) 관계를 그린 것이다.

$$q = \frac{\log\{W_{p_{peak}}/W_{p_{60}}\} - \{1 - W_{p_{60}}/W_{p_{peak}}\} \log e}{\log(\eta_1/f_{p_{60}})} \quad (4.11)$$

이 그림에서 보는 바와 같이 σ_3 대 q의 관계는 직선으로 나타나고, 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$q = \alpha + \beta \cdot (\sigma_3/Pa) \quad (4.12)$$

여기서 α 는 그림 20에 나타난 직선의 절편값이며 β 는 기울기이다.

그림 21과 그림 22는 항복함수 f_p 와 소성파쇄일 W_p 와의 관계를 지어주는 土質媒介變數 α, β 의 평

균값 2.597과 -0.18 에 標準偏差 0.283과 0.149를 가감하여 軸變形率에 대한 軸差應力과 體積變形率의 관계를 나타낸 것이다. 두 변수 모두 2종의 물리량 즉 軸差應力 및 體積變形率에 영향을 미치고 있으며 특히 軸變形率이 7% 근방에서 軸差應力에 큰 편차를 보이며 軸變形率이 증가함에 따라 軸差應力은 같은 점에 모이나 體積變形率은 편차가 증가된다. β 는 α 보다는 약 배 정도의 큰 편차를 보이고 있으며 β 의 變動係數가 α 의 약 7.5배 인 것도 주목을 요하는

사항이다. 그러므로 α 및 β 값의 결정에는 신중을 기해야만 할 것이다.

그림 23은 백마강모래의 일련의 排水三軸壓縮試驗 결과에서 얻은 파괴시의 소성팽창일을 나타내는 W_{ppeak} 와 拘束壓力(σ_3) 關係를 兩對數紙에 그린 것이다. 그림에 나타낸 바와 같이 W_{ppeak} 와 拘束壓力(σ_3)의 관계는 兩對數紙面에서 직선 즉 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\log(W_{ppeak}Pa) = \log \gamma + \delta \cdot \log(\sigma_3/Pa) \quad (4.13)$$

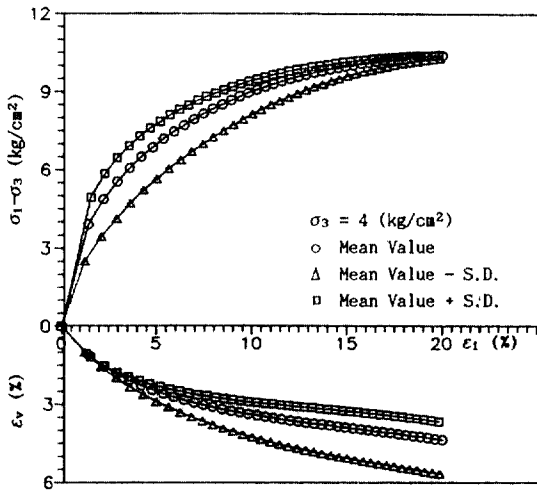


그림 22. Deviatoric stress and volumetric strain vs axial strain with variation of β .

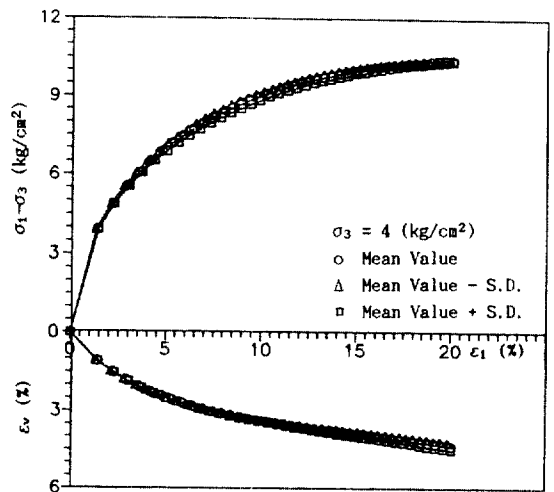


그림 24. Deviatoric stress and volumetric strain vs axial strain with variation of γ .

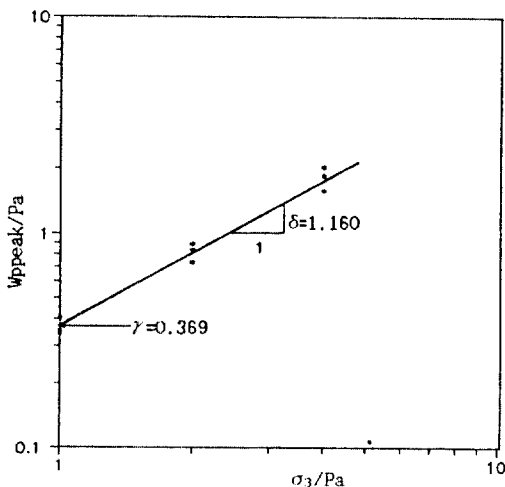


그림 23. Variation of W_{ppeak} with confining pressure σ_3 for Baekma river sand.

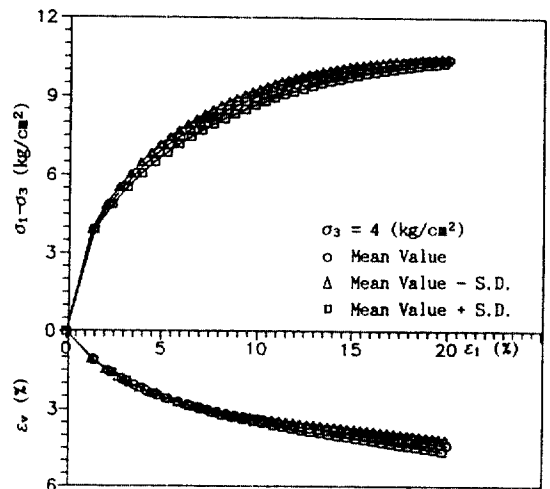


그림 25. Deviatoric stress and volumetric strain vs axial strain with variation of δ .

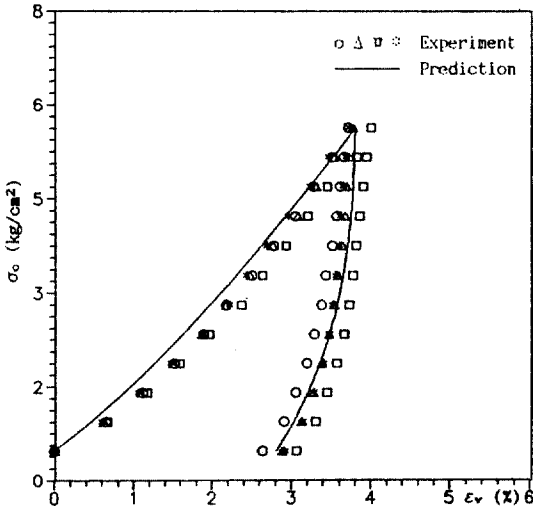


그림 26. Comparison between measured and predicted isotropic compression test for Baekma river sand.

식 (4.13)의 兩邊의 對數를 除去하면 다음과 같다.

$$W_{p_{peak}} = \gamma \cdot Pa \cdot (\sigma_3/Pa)^\delta \quad (4.14)$$

여기서 γ 와 δ 는 그림 4.20에 의해 決定 되어지는 媒介變數로서 γ 는 $(\sigma_3/Pa)=1$ 일 때의 절편이며 δ 는 이 직선의 기울기이다.

그림 24와 그림 25는 구속압력과 파괴상태의 소성일($W_{p_{peak}}$)의 관계를 지어주는 土質媒介變數 γ 와 δ 의 평균값 0.369와 1.16에 標準偏差 0.026과 0.09를 가감하여 軸變形率에 대한 軸差應力 및 體積變形率 관계를 나타낸 것이다. 두 변수 모두 變動係數가 0.071와 0.078로 비교적 작은 값을 나타내고 應力 및 體積變形率 모두에 큰 편차를 보이지 않고 있다. 이와같이 두 土質媒介變數가 증감해도 軸差應力과 體積變形率에 큰 차가 없는 것은 f_p 와 W_p 관계곡선이 σ_3 변화에 따른 규칙적인 양상을 나타내기 때문으로 판단된다.

4.3 Double Work-Hardening 구성모델의 精度

4.3.1 등방압축시험

그림 26은 백마강모래에 대한 등방압축시험결과를 나타낸 것이다. 12개의 등방압축시험 가운데 4개를 선정하여 동일조건으로 시행한 시료에 대하여 시험

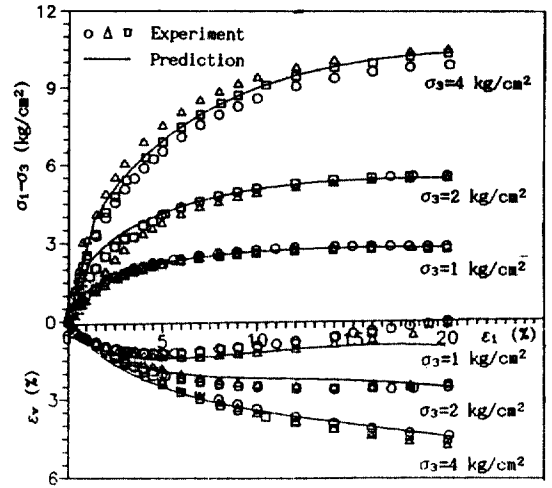


그림 27. Comparison between measured and predicted deviatoric stress and volumetric strain vs axial strain for Baekma river sand.

중에 발생되는 分散의 정도를 알아보기 위한 것이다. 그림에서와 같이 불가피하게 시험중에 약간의 分散이 발생되기 마련이다. 4.1에서 언급한 바에 의거 통계처리하여 구한 土質媒介變數의 평균치를 사용하여 Double Work-Hardening 구성모델에 의하여 얻은 예측치를 이 그림에 함께 나타냈다. 그림에서와 같이 體積變形率과 구속압력관계에 있어 예측치가 탄성부분에서 시험자료의 중심부분에 위치하므로 좋은 결과를 보이고 있으나 全體積變形率과의 관계에서는 예측치가 초기부분이 약간 좌측으로 편기되어 있다. 양자간의 다소의 차이를 보이고 있으나 4.2.3에서 언급한 바와 관련 초기부분을 보정한다면 좋은 일치를 나타낼 것으로 판단된다.

4.3.2 배수삼축압축시험

백마강모래에 대하여 구속압력을 1, 2, 4 kg/cm²로 하여 각 경우에 대하여 3회씩 배수삼축압축시험한 결과를 軸變形率에 대한 軸差應力과 體積變形率 관계를 나타낸 것이 그림 27이다.

이 그림에도 시험치에 피할 수 없는 약간의 分散이 나타나고 있다. 또한 시험치와 이론치의 비교를 위해서 4.3.1과 같이 통계처리한 土質媒介變數의 평균치를 사용하여 Double Work-Hardening 구성모델에 의한 예측치를 함께 나타냈다. 구속압력 2 kg/cm²

의 경우 軸差應力은 軸變形率의 7% 이내에서는 약간 큰 값을 보이고 있는 반면 體積變形率의 7% 이상에서 다소 작은 값을 보인다. 이 부분을 제외하고는 좋은 일치를 보이고 있어 전반적으로 예측치와 시험치 상호간에 좋은 대응성을 나타내고 있다.

이상의 사실로 미루어 보아 土質媒介變數 결정프로그램의 높은 精度와 Lade의 Double Work-Hardening 구성모델의 精巧함을 확인할 수 있었다.

5. 結 論

Double Work-Hardening 構成모델의 精度를 評價하기 위하여 백마강모래를 사용, 14종의 토질매개변수를 각각 27개씩을 決定하여 각 土質媒介變數의 平均과 分散을 구하고 더불어 모델에 대한 土質媒介變數의 銳敏度를 분석한 결과 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 탄성변형률과 소성과쇄변형률에 관련된 매개변수는 變動係數가 비교적 작은 값을 보이고 있으며 이들 변수는 軸差應力 및 體積變形率에 영향을 미치지 않는다.

2) 모든 土質媒介變數 중에서 變動係數가 큰 값은 파괴규준에 관련된 m 과 소성팽창변형률에 관련된 β 로서 각각 0.842와 0.829의 큰 값을 보이고 있으나, m 은 應力-變形率관계에 變動係數에 상응하여 큰 영향을 미치지 않고 있다.

3) 軸差應力에 영향을 미치고 있는 土質媒介變數는 η_1, m, α, β 등이며 이 가운데에서 η_1, m 의 영향이 주목된다.

4) 體積變形率에 영향을 미치고 있는 土質媒介變數는 $p, \eta_1, s, t, \alpha, \beta$ 등이나 이들 土質媒介變數 중에서 t, β 의 영향이 현저하다. 따라서 이들 η_1, m, t, β 의 토질매개변수 결정에는 신중을 기하여 시험오차를 줄여야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Lade, P.V. 1977, "Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surfaces", *Int. J. Solids and Struc.*, Pergamon press Inc. New York, Vol. 13 pp. 1019-1035.
2. Lade, P.V. 1986, "Three-Dimensional behaviour and parameter evaluation of an elasto-plastic soil model", *Geomechanical Modeling in Engineering practice*, pp. 297-311.
3. Lade, P.V. and Nelson, R.B. 1984, "Incrementalization Procedure for elasto-plastic constitutive model with multiple, intersecting yield surfaces", *International Journal for numerical and analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 8, pp. 311-323.
4. 정진섭, 김찬기, 이문순, 1991, "실내시험에 의한 Lade의 토질매개변수 결정", *원광대학교 대학원 논문집*, 제 8집 pp. 163-181.
5. 정진섭, 송용선, 김찬기, 이문순, 1991, "Lade의 Single and Double Work-Hardening 구성모델의 정도비교", *대한토목학회 학술발표개요집* pp. 553-556.
6. Alfredo, H-S. Ang and Wilson H. Tang, 1975, "Probability concepts in engineering planning and design", John Wiley and sons Inc.

(接受 : 1992. 2. 10)