

## 조립재료에 대한 MD 구성모델 캘리브레이션 연구

### A Study of MD Constitutive Model Calibration for Coarse-grained Soils

최창호<sup>1\*</sup>, 신동훈<sup>2</sup>

Choi, Changho<sup>1\*</sup>, Shin, Dong-Hoon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Member, Research Fellow, Dept. of Geotechnical Engineering, Korea Institute of Construction Technology, (Daehwa-Dong)283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

<sup>2</sup>Member, Director, Infrastructure Research Center, K-water Institute, 1689 beon-gil, Yoosungdae-ro, Yoosung-gu, Daejeon 305-730, Republic of Korea

#### ABSTRACT

The structural stability of fill dam largely depends on the engineering behavior of rock materials used as main zone for dam construction and it is necessary to understand well the stress-strain characteristics of fill materials as well as shear strength property. In addition, the numerical analysis of fill dam requires a thorough study for calibrating material properties and parameters of a coarse-grained soil constitutive model. In this paper, large triaxial test results for Buhang-dam fill materials are analyzed and constitutive model parameters are calibrated based on the test results. It is shown that MD constitutive model is capable to predict the stress-strain behavior of dense and loose coarse-grained soils used for Buhang-dam construction based on the comparison study between the experimental test result and numerical simulation.

#### 요 지

필댐의 안정성은 댐 축조시 주재료로 활용되는 조립재료인 암석존(rock zone)의 공학적 거동에 의존하므로 조립재료인 rockfill 재료의 전단강도 뿐만 아니라 하중-변형 특성(stress-strain characteristics)을 보다 정확히 이해하여야 한다. 또한, 댐 체체의 거동을 예측하고 수치해석적으로 분석하기 위해서는 조립재료의 거동을 모사하기에 적합한 구성모델을 활용하기 위한 물성값 분석 및 모델 파라미터의 캘리브레이션 연구가 필요하다. 본 논문에서는 부항댐 체체 재료에 대한 대형삼축압축 실험결과를 분석하고 이를 기반으로 조립재료에 대한 구성모델 파라미터들을 분석하였다. 부항댐 체체 재료를 고밀도와 저밀도로 구분하여 시료를 제작하고 다양한 구속압으로 수행된 실험결과와 캘리브레이션 된 구성모델 시뮬레이션 결과를 상호 비교한 결과 MD 모델이 조립재료의 응력-변형률 거동을 효과적으로 모사할 수 있음을 파악하였다.

**Keywords :** Constitutive model, Parameter calibration, Triaxial test, Coarse-grained soil

#### 1. 서 론

표면차수벽형석괴댐을 포함한 필댐의 안정성은 댐 제방 축조를 위해 활용되는 조립재료인 암석존(rock zone)의 공학적 거동에 의존하므로 조립재료인 rockfill 재료의 전

단강도 뿐만 아니라 하중-변형 특성(stress-strain characteristics)을 보다 정확히 이해하여야 한다(Shin, 2002). 동 반논문인 Choi(2013)에서 자세히 기술한 바와 같이 조립재료에 대한 다수의 구성모델 중에서 Manzari and Dafalias(1997) 모델은 조립재료의 상태 및 배수조건에 따라 경화(hardening) 및 연화(softening)현상을 모사할 수 있는 특징을 가지고 있으며, 한 세트의 모델 정수를 활용하여, 배수 조건, 구속압, 간극비에 상관없이 조립재료의 거동을 구현할 수 있는 장점을 지니고 있다. 조립재료의

Received 11 Mar. 2013, Revised 23 Mar. 2013, Accepted 25 Mar. 2013

\*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0785; Fax: +82-31-910-0211

E-mail address: [chchoi@kict.re.kr](mailto:chchoi@kict.re.kr) (C. Choi)

거동을 예측하기 위해서 구성모델이 모사해야 할 가장 큰 특징은 응력에 따른 팽창(stress-dilatancy), 응력의 방향이 변화할 때 간극수압의 변화 예측, 응력 경로에 따른 재료 거동 특성 등이며 Manzari and Dafalias(1997) 모델은 이러한 거동 양상을 정성적으로 예측할 수 있다.

본 연구에서는 조립재료에 대한 구성모델을 정확히 활용하기 위하여 화강암질의 댐 재료에 대하여 수행된 대형 삼축압축시험 결과를 분석하여 MD(Manzari and Dafalias, 1997) 모델을 캘리브레이션 하였다. 이를 위해 조립재료에 대한 실험결과를 분석하고 모델 파라미터들을 캘리브레이션하기 위한 연구를 수행하였다. 캘리브레이션된 모델정수를 바탕으로 구성모델을 시뮬레이션하여 실험결과와 해석결과를 상호 비교하였다. 본 논문에서는 실험결과를 바탕으로 각 모델 파라미터들의 캘리브레이션 절차 및 각 파라미터들이 모델의 응력-변형률 거동에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. Manzari-Dafalias 모델 개요

Choi(2013)에서 기술한 MD모델의 기본 개념은 소성 계수(plastic modulus)를 찾는 데 있어서 현재 응력상태(current state of stress)와 bounding surface에 투영된 이미지 응력상태(image state of stress)간의 거리를 활용하며, 한계상태(critical state) 개념하에 상태 변수인  $\psi = e - e_{cs}$ 를 활용하여 체적변형을 예측하고 응력-변형률 관계를 모사한다. 여기서,  $e$ 와  $e_{cs}$ 는 각각 토사의 간극비(void ratio)와 한계상태 간극비(critical void ratio)를 나타낸다. 모델 내에서 bounding surface 개념은 축차응력비 공간(deviatoric stress-ratio space)에서 이미지 응력상태(image state of stress)를 추정하는 역할을 수행하고, 상태변수  $\psi = e - e_{cs}$ 는 조립재료의 체적변형 거동을 규명하는 역할을 수행한다(Choi, 2013). MD모델은 토사의 상태 및 배수조건에 따

라 경화 및 연화 현상을 모사할 수 있는 특징을 가지고 있으며, 한 세트의 모델 정수를 활용하여, 배수 조건, 구속압, 간극비에 상관없이 조립재료의 거동을 구현할 수 있는 장점을 지니고 있다. 모델에 관한 자세한 사항 및 각 모델 파라미터들에 대한 민감도 분석결과는 동반논문인 Choi (2013)을 참조한다.

## 3. 댐체 재료의 모델 파라미터 캘리브레이션

본 절에서는 K-water 연구원에서 보유하고 있는 대형삼축압축 시험기를 이용한 부항댐 조립재료의 실험결과 및 MD 모델을 정의하기 위한 모델 파라미터들의 캘리브레이션 방법과 실험결과를 바탕으로 한 재료의 물성값 파악에 대하여 논의한다.

### 3.1 삼축압축 실험결과 분석

댐 축조를 위한 조립재료는 원입도의 최대입경이 600~800mm 정도인 화강암질이며, 대형삼축압축 실험을 위한 시험입도는 상사입도 조정법으로 시료를 준비하였다. 이때 원입도에 대한 상사율(similarity ratio)은 대략  $1/\alpha = 1/(12 \sim 16)$  (50.8mm/(600~800mm)) 정도로 하였다 (Shin, et al., 2001). 대형삼축압축실험은 상사율에 따라 준비된 조립재료를 직경 30cm, 높이 62cm의 공시체로 만들어 수행되었다. 실험은 각 재료에 대하여 고밀도인 경우와 저밀도인 경우에 대하여 구속압  $p_0 = 100, 200, 400 kPa$ 을 재하하며 수행되었다. 대상 조립재료의 최대밀도는  $22.7 kN/m^3$ 이며 고밀도 공시체의 경우 상대밀도가 약 90% 저밀도 공시체의 경우 상대밀도가 약 50%로 제작되었다. Table 1은 각 공시체에 대하여 구속압  $p_0 (kPa)$ , 초기간극비  $e_0$ , 재하 구속압하에 간극비  $e_c$ , 초기건조밀도  $\gamma_{d0}$ , 재하 구속압하에 건조밀도  $\gamma_{dc}$ , 재료의 비중  $G_s$ , 포아송비  $\nu$ 와

Table 1. Large triaxial test specimens subjected conventional triaxial compression loading

no	Specimen	$p_0 (kPa)$	$e_0$	$e_c$	$\gamma_{d0}$	$\gamma_{dc}$	$G_s$	$\nu$	$G (MPa)$
1	H100	100	0.229	0.210	2.132	2.165	2.62	0.49	46
2	H200	200	0.224	0.201	2.141	2.181	2.62	0.44	69
3	H400	400	0.223	0.186	2.143	2.209	2.62	0.44	100
4	L100	100	0.320	0.310	1.985	2.001	2.62	0.41	20
5	L200	200	0.327	0.302	1.974	2.012	2.62	0.38	30
6	L400	400	0.327	0.286	1.978	2.025	2.62	0.34	37

\* $\nu, G$  are obtained from linear regression until  $\epsilon_1 = 1.0\%$

전단탄성계수  $G(kPa)$ 의 값을 보여준다. 공시체명은 각 재료의 밀도와 전단 시험시 구속압을 나타내며, 그 예로 “H100”에서 H는 고밀도, 100은  $p_0 = 100(kPa)$ 을 지칭한다.

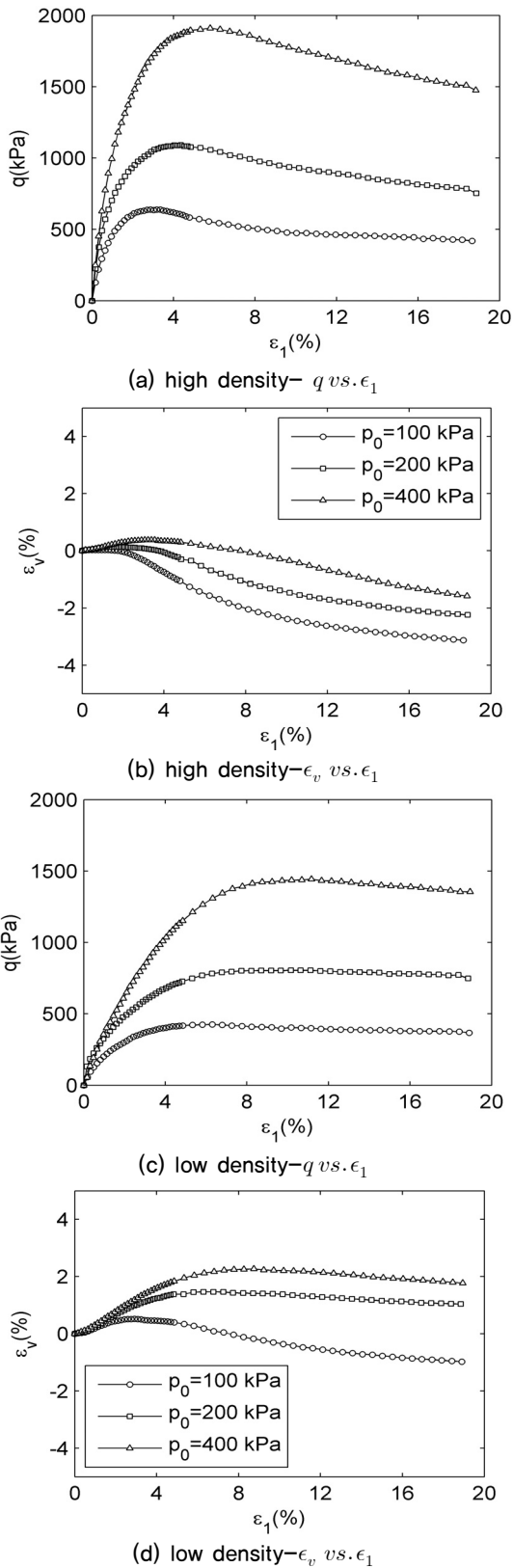


Fig. 1. Drained triaxial compression test results

Fig. 1은 고밀도 및 저밀도 시료의 실험결과를 보여준다. 고밀도 시료에 대한 실험결과는 Fig. 1(a) 전단응력  $q$ 와 수직변형률  $\epsilon_1$ , Fig. 1(b) 체적변형률  $\epsilon_v$ 와 수직변형률  $\epsilon_1$ , 저밀도 시료에 대한 실험결과는 Fig. 1(c) 전단응력  $q$ 와 수직변형률  $\epsilon_1$ , Fig. 1(d) 체적변형률  $\epsilon_v$ 와 수직변형률  $\epsilon_1$ 의 결과로 제시된다. 각 결과로부터 부항댐 재료가 고밀도인 경우 응력경화 및 연화 현상이 발생함을 파악할 수 있고, 구속압과 상관없이 전단하중 하에서 체적이 팽창하는 것을 볼 수 있다. 저밀도 시료의 경우 응력연화 현상이 고밀도 시료보다 적게 발생하고, 구속압이 높은 경우는 하중재하시 체적이 감소하는 현상을 보이나, 구속압이 낮은 경우 하중재하시 체적이 감소하다가 팽창하는 현상을 파악할 수 있다.

한계상태는  $q$  vs.  $p$ 공간뿐만 아니라  $e$  vs.  $\ln p$ 공간에서도 정의되어야 한다. 한계상태는 전단응력의 증가없이 소성변형이 지속적으로 진행되는 상태로 정의되어지며, 일반적으로 실험결과의 체적변형이 더 이상 발생되지 않는 시점에서 한계상태 파라미터를 구할 수 있다. Fig. 2는 고밀도 및 저밀도 시료에 대한 밀도별  $e - \ln p$ 공간에서의 한계상태를 보여주고 있다. 그림에서 한계상태선(CSL)은 실

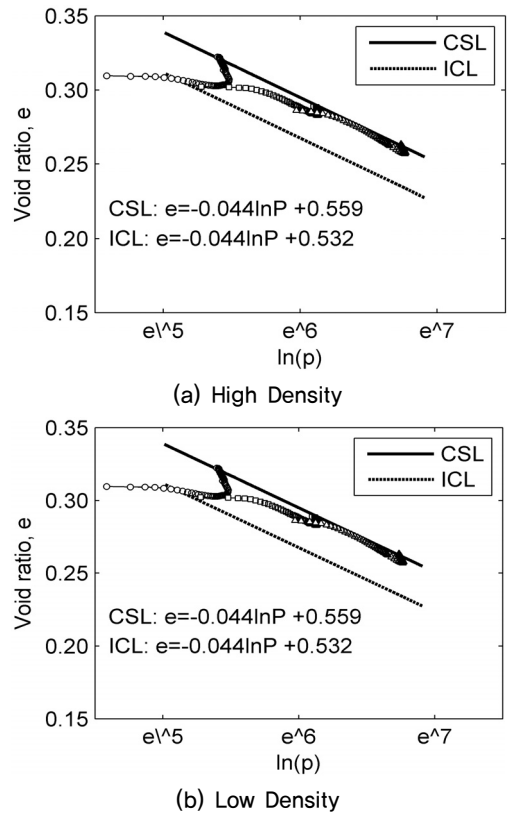


Fig. 2. Void ratio  $e$  vs.  $\ln p$

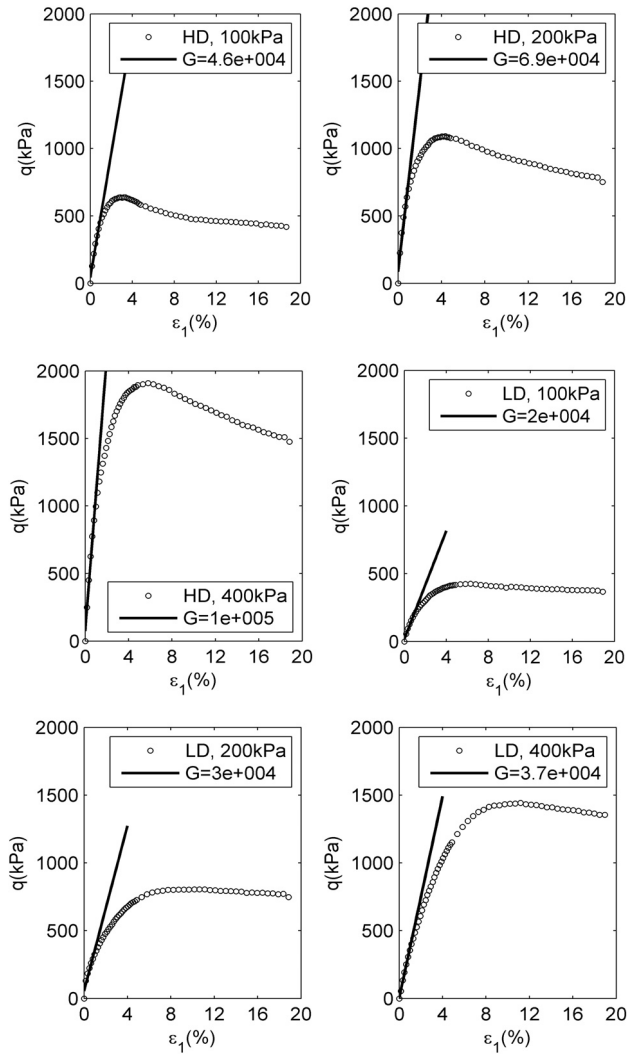


Fig. 3. Shear Modulus  $G$  (In figures, HD and LD represent “High Density” and “Low Density”, respectively)

험이 완료된 상태에서 공극비와 유효평균응력의 값을 선형회귀분석을 통하여 추정하였다. 또한, 초기상태선을 나타내는 등방압밀선(ICL)은 등방압밀 실험결과의 부재로 인하여, CSL의 기울기를 기본값으로 가정하고 초기간극비 데이터에 대한 선형회귀분석 결과로  $y$ 절편 간극비를 추정하였다. 일반적으로 ICL과 CSL의 기울기는 유사한 것으로 알려져 있다(Wood, 1990).

탄성영역에서의 물성값은 전단변형계수(shear modulus)  $G$ 와 포아송비  $\nu$ 로 나타낼 수 있으며, 일반적으로 미소변형실험결과 분석을 통하여 구하여질 수 있다. 일반적인 삼축압축 실험결과는 미소변위의 탄성영역에서 물성값을 구하는데 적합하지는 않지만, 본 실험에서 얻어진 결과에서 수직변형률  $\epsilon_1 < 1\%$  경우의 평균 기울기를 구하고 식 (1)로부터 추정하였다(Bardet, 1997).

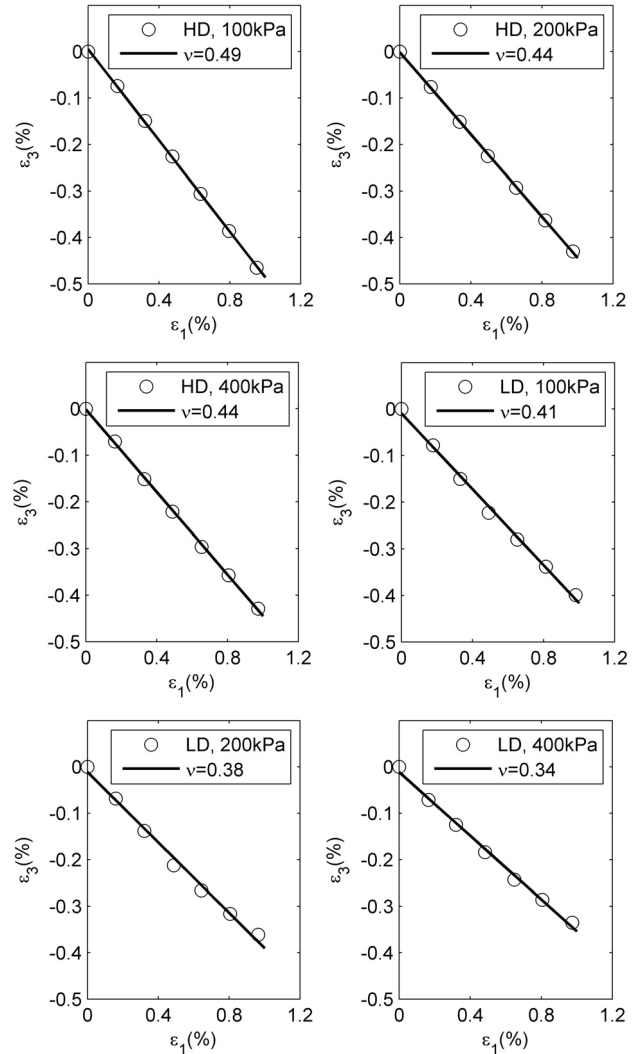


Fig. 4. Poisson's ratio  $\nu$  (In figures, HD and LD represent “High Density” and “Low Density”, respectively)

$$G = \frac{1}{3} \frac{\Delta q}{\Delta \epsilon_1} \quad (1)$$

포아송비의 경우 또한 미소변형실험결과 분석을 통하여 구하여지므로, 실험결과의 수직변형률  $\epsilon_1 < 1\%$  영역에서  $\epsilon_3/\epsilon_1$  값을 평균하여 추정하였다.  $\epsilon_3$  값은 체적 변형량이  $\epsilon_v = \epsilon_1 + 2\epsilon_2$  라는 가정으로부터 계산되었다. Fig. 3은 각 시료에 대한 전단변형계수(shear modulus)  $G$ 의 계산과정을 보여주며, Fig. 4는 포아송비  $\nu$ 의 산출과정을 나타낸다.

실험결과 분석에 있어서 peak응력비와 체적팽창(dilation)이 발생할 때의 응력비는 구성모델을 정의하는데 중요한 재료 물성값이 된다. 이를 위해 각 세트의 실험결과 즉 밀도별로  $p_0 = 100, 200, 400kPa$ 인 경우의 실험결과를 응력비로 나타내어 각 세트에서의 peak 응력비 “ $M_c^{pb}$ ” 를 구하

였다. 이와 더불어  $\epsilon_v - \epsilon_1$  실험결과에서  $\Delta\epsilon_v$ 가 “+”에서 “-”로 변화하는 시점을 파악하여 이 때의 응력비를 추정하였으며, 이 값은 체적팽창응력비(dilatancy stress ratio) “ $M_c^d$ ”로 지칭된다. Fig. 5와 Fig. 6은 각각 고밀도 및 저밀도 시료에 대한  $M_c^b$ ,  $M_c^d$ ,  $M_c$  값의 계산과정을 보여준다.  $M_c$

값은  $\epsilon_1 = 15\%$  일 때의 값을 산정하여 각 세트의 실험결과를 평균하였다.  $M_c^b$ 와  $M_c^d$ 의 추정값으로부터  $M_c$ 는 실험결과를 바탕으로 얻어질 수 있는 재료 물성값으로 판단되어지나, 본 연구에서  $M_c^d$  값의 계산상 가정인  $\Delta\epsilon_v$ 가 “+”에서 “-”로 변화하는 바탕으로 응력비를 산정하는데 문제점이

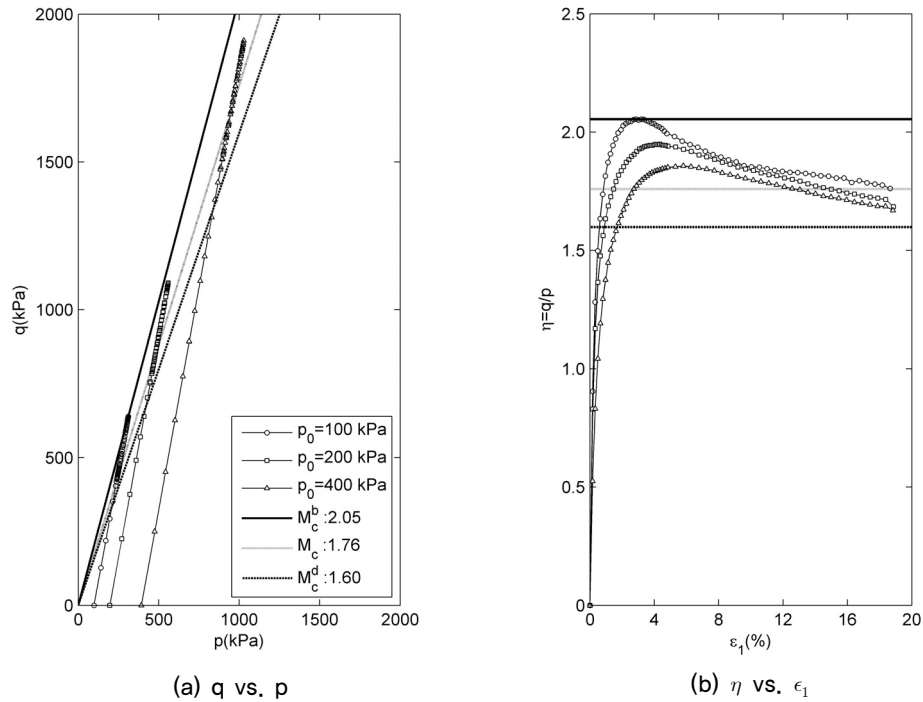


Fig. 5. Peak stress ratio  $M_c^b$  and dilatancy stress ratio  $M_c^d$  ratio for High Density material

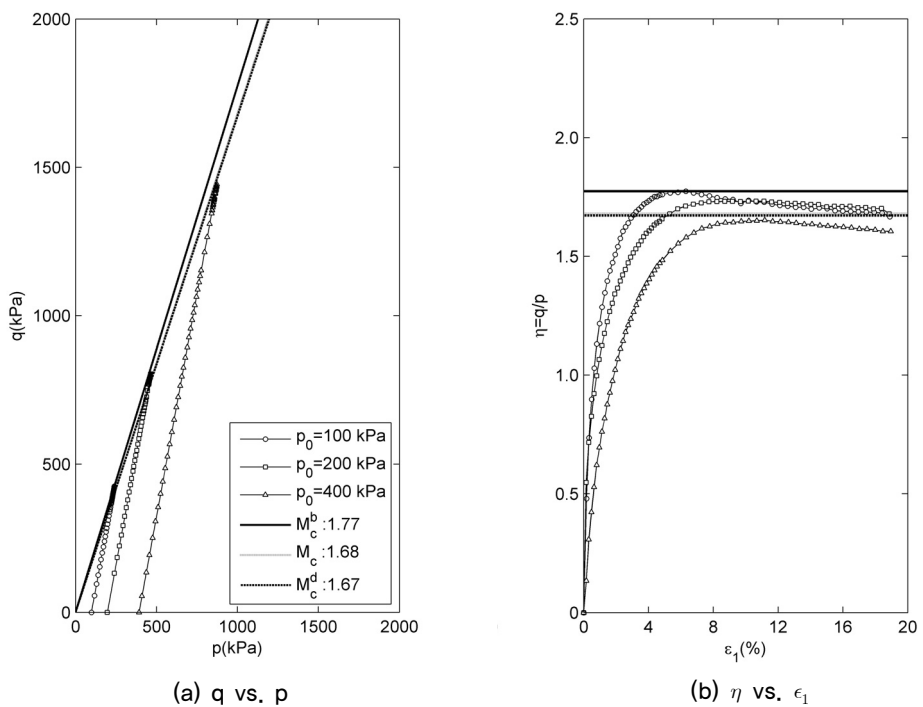


Fig. 6. Peak stress ratio  $M_c^b$  and dilatancy stress ratio  $M_c^d$  ratio for Low Density material

있는 것으로 파악된다. 일반적으로 조립재료의 체적팽창은 응력비가 매우 낮은 단계( $M_c^d \ll M_c$ )에서 시작되는 것으로 알려져 있으나, Fig. 6의 경우  $M_c^d \approx M_c$  것으로 분석되었다. 이는 조립재료의 삼축압축시험시 발생하는 멤브레인 관입(membrane penetration)의 영향에 의하여 체적변형의 값이 부정확하게 분석되기 때문인 것으로 판단된다 (Kramer et al., 1990). 조립재료에 대한 삼축압축시험시 멤브레인 관입의 영향은 공시체의 경계에서 시료의 체적이 팽창하려고 할 때 공시체 표면 조립재료의 입자사이의 공극으로 멤브레인이 빨려들어가 계속되는 체적팽창을 감소시키고, 또한  $\Delta\epsilon_v$ 가 “+”에서 “-”로 변화시점을 지연시키게 된다. 결과적으로 재하실험시 공시체 내부에서 체적 거동과 응력거동이 시그널 확보시각에 동시에 발생되지 않는 시간지연을 발생시키게 된다.

### 3.2 MD 모델 파라미터 캘리브레이션

앞서 3.1절은 부항냄 재료로 사용된 조립재료에 대한 대형삼축압축 실험결과에 대하여 정리하였다. 실험결과로부터 부항냄에 사용된 재료는 일반적인 조립재료로서 응력-변형률과 체적변형률-수직변형률의 관점에서 서로 유사한 역학적 거동을 나타내었다. 가장 대표적인 것이 체적팽창 거동으로 모든 공시체에서 응력-체적팽창(stress-dilatancy) 경향을 파악할 수 있었다. 본 절에서는 MD 모델 파라미터의 보정(calibration) 단계에 대하여 설명한다. MD 모델 파라미터 캘리브레이션은 압축응력상태와 정적하중 모델 거동에 관련된 파라미터에 관하여 수행되었다.

구성모델을 활용하여 토사의 거동을 예측하기 위하여 적절한 모델 파라미터의 선정은 매우 중요하며, 구성 모델에 적용되는 파라미터는 초기 상태, 배수조건, 모델의 전개와 관련된 값들이다. 토사의 초기상태는 초기 응력 상태와 재료 밀도로 정의된다. 토질역학 관점에서의 초기상태는 유효 구속압( $p_0$ )과 간극비( $e_0$ )로 결정되어지며, 3차원 MD 탄소성 구성모델은 3그룹의 파라미터들을 통해 정의

된다. MD 모델내에서 각 파라미터의 역할은 동반논문 Choi(2013)을 참조한다. 3개 그룹의 파라미터들은 다음과 같이 분류되어진다.

- 탄성 파라미터 :  $G_0, \nu, b$
- 한계상태 파라미터 :  $M_{c,e}, \lambda, e_{c,ref}, p_{ref}$
- Manzari-Dafalias 모델 파라미터 :  $k_{c,e}^b, k_{c,e}^d, h_0, c_m, m, A$

본 절에서는 위에서 분류된 3개 그룹 파라미터에 대하여 캘리브레이션 절차를 설명하며, 위의 파라미터 중 아래 첨자 'c'는 압축상태, 'e'는 인장상태에서의 모델정수를 나타내며, 본 논문에서는 실험결과에 바탕하여 압축상태의 파라미터를 중점적으로 논의한다.

#### 3.2.1 탄성 파라미터(elastic parameters)

MD모델에 적용된 탄성이론은 hypoelasticity로서 참조 전단탄성계수인  $G_0$  또는 참조팽창계수  $K_0$ , 지수  $b$ 로부터 정의된다. 참조전단계수  $G_0$ 와 지수  $b$ 는 실험결과로부터 추정된 각 시료의 전단탄성계수  $G$ 를 trial-and-error 방식의 회귀분석을 통해 구하여 질 수 있다. Fig. 7은 대상 조립재료의  $G_0$ 과  $b$ 의 추측과정을 보여준다. 포아송비  $\nu$ 는 미소변형률 영역에서  $\epsilon_3$ 와  $\epsilon_1$ 의 비로부터 구하여질 수 있으며 각 시료에 대한 값은 Fig. 4에 제시되었다. 하지만, 실험결과로부터 구하여진  $\nu$ 는 일반적인 토사의 값에 비해 상당히 크게 나타나므로 본 모델 시뮬레이션에서는 조립재료의 일반적인 값인  $\nu=0.25$ 를 사용하였다. 참조팽창계수  $K_0$ 은 탄성계수 관계식인  $K_0 = \frac{3G_0(1-2\nu)}{2(1+\nu)}$ 를 통하여 구하여질 수 있다.

#### 3.2.2 한계상태 파라미터(critical state parameters)

한계상태(critical state) 파라미터는 토사의 고응거동을 정의하며, MD모델 내에서  $M_{c,e}, \lambda, e_{c,ref}, p_{ref}$ 로 구분된다.  $M_{c,e}$ 는  $q-p$ 공간에서 한계상태선의 기울기이며 아래첨자

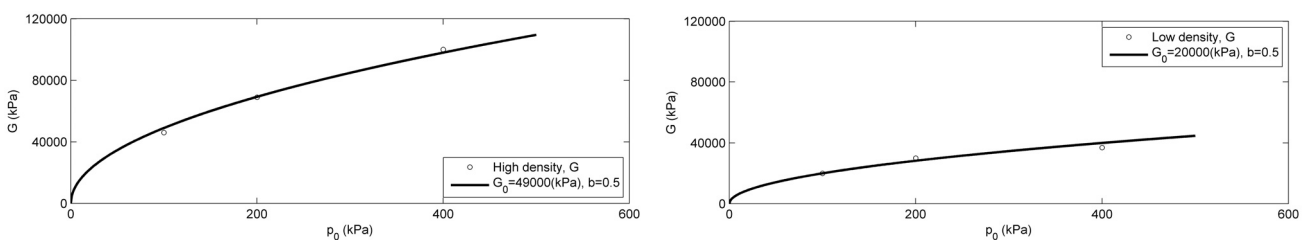


Fig. 7. Hypoelastic parameters,  $G_0$  and  $b$ , calibration

Table 2. Critical state parameters and  $M_c^b, M_c^d$

Density	Critical state parameters				Bounding surface stress ratio	Dilation surface stress ratio
	$M_c$ ( $@\epsilon_1 = 15\%$ )	$\lambda$	$e_{ref}$	$p_{ref}$	$M_b$	$M_d$
High	1.76	0.033	0.275	100	2.05	1.60
Low	1.68	0.044	0.356	100	1.77	1.67

'c'와 'e'는 각각 압축상태와 인장상태의 값을 나타낸다. 간극비  $e - \ln(p)$  공간내에서 한계상태는 기울기  $\lambda$ 와 참조 값인  $e_{c,ref}$  및  $p_{ref}$ 로 정의된다. 한계상태 파라미터는 실험 결과를 이용하여 직접적으로 보정된다. 대상 조립재료의 한계상태 파라미터들은 Table 2에 제시되었다.

### 3.2.3 MD모델 파라미터(MD model specific parameters)

본 그룹은 MD 모델을 정의하기 위한 파라미터들로 1) bounding과 dilatancy 곡면을 정의하기 위한 파라미터,  $k_{c,e}^b$ 와  $k_{c,e}^d$  2) 초기 탄성항복 곡면정의를 위한 파라미터,  $m$  3) 경화 상태 전개를 정의하기 위한 파라미터,  $c_m$ 와  $h_0$  4) 재료의 체적 변화를 예측하기 위한 파라미터,  $A$ 로 구성되어진다.

- 곡면 파라미터  $k_c^b, k_c^d$  : 곡면 파라미터들의 보정은 Bounding 과 Dilation 곡면의 응력비인  $M_c^b$ 와  $M_c^d$ 값을 필요로 하며, 대상 조립 재료에 관한 값은 실험결과를 분석하여 산정하였으며, Table 3과 Fig. 5 및 Fig. 6에 나타나 있다. 이와 더불어  $e - \ln p$  공간에서 CSL과 ICL간의 y절편의 차이인 재료상태변수  $\psi_0$ 가 필요하며, 각 재료에 대한  $\psi_0$ 값은 Fig. 2로부터 계산할 수 있다. 예로서 “고밀도”재료에 대한  $k_c^b$ 와  $k_c^d$  보정단계는 다음과 같다.

$$\psi_0 = e_{ICL} - e_{CSL} = 0.371 - 0.427 = -0.056$$

$$M_c^b = M_c + k_c^b \langle -\psi \rangle$$

$$k_c^b = \frac{M_c^b - M_c}{\langle -\psi \rangle} = \frac{2.05 - 1.76}{\langle 0.056 \rangle} = 5.2$$

$$M_c^d = M_c + k_c^d \psi$$

$$k_c^d = \frac{M_c^d - M_c}{\psi} = \frac{1.06^* - 1.76}{-0.056} = 30.4$$

(\*  $M_c^d$ 는  $M_c$ 의 60% 값을 사용함)

Table 3. Calibrated MD model parameters

Group	Parameter	High density	Low density
Elastic parameters	$G_0$ (kPa)	49,000	20,000
	$\nu$	0.25	0.25
	$b$	0.5	0.5
Critical state parameters	$M_c$	1.76	1.68
	$\lambda$	0.033	0.044
	$e_{ref}$	0.275	0.356
	$p_{ref}$ (kPa)	100	100
Model specific parameters	$k_c^b$	5.2	3.3
	$k_c^d$	30.4	37.3
	$h_0$	250	200
	$c_m$	0	0
	$m$	0.05	0.05
	$A$	0.2	0.3

- 탄성영역 응력비  $m$ 과 등방경화 파라미터  $c_m$ : 파라미터  $m$ 은 순수 탄성영역의 응력비를 나타내고, 파라미터  $c_m$ 은  $m$ 값의 전개함수를 정의하며 모델 내에서 등방경화를 발생하게 한다. 일반적으로 토사재료는 순수탄성영역이 매우 작으므로 본 연구에서는  $m = 0.05$ 로 가정하였고,  $c_m = 0$ 로 설정하여 등방경화가 발생되지 않는 것으로 가정하였다.
- 이동경화 파라미터  $h_0$  : 파라미터  $h_0$ 는 응력비 경로내에서 응력상태를 나타내는 대비응력의 전개를 정의한다. 대비응력의 전개는 모델이 bounding surface 모델군의 하나임을 나타내며,  $h_0$ 는 현재 응력상태와 bounding surface에 투영된 “image”상태의 거리를 파악하여 소성계수를 결정하는데 이용된다.  $h_0$ 값의 증가는 소성계수의 증가와 소성 변형률의 감소를 야기시키게 된다. 이동경화 전개에 활용되는 파라미터  $h_0$ 은 trial-and-error 방식을 통하여 추정될 수 있는 모델 정수이다. 본 해석에서는  $h_0 = 100 \sim 300$  사이의 값을 설정하여 해석결과를 실험결과와 비교하며 값을 추정하였다.  $q - \epsilon_1$  거동과 관련하여  $h_0$ 값의 증가는 응력-변형률 거동을 보다 경직되게 하는 결과를 발생시키고 소성계수의 증가와 소성변형률을

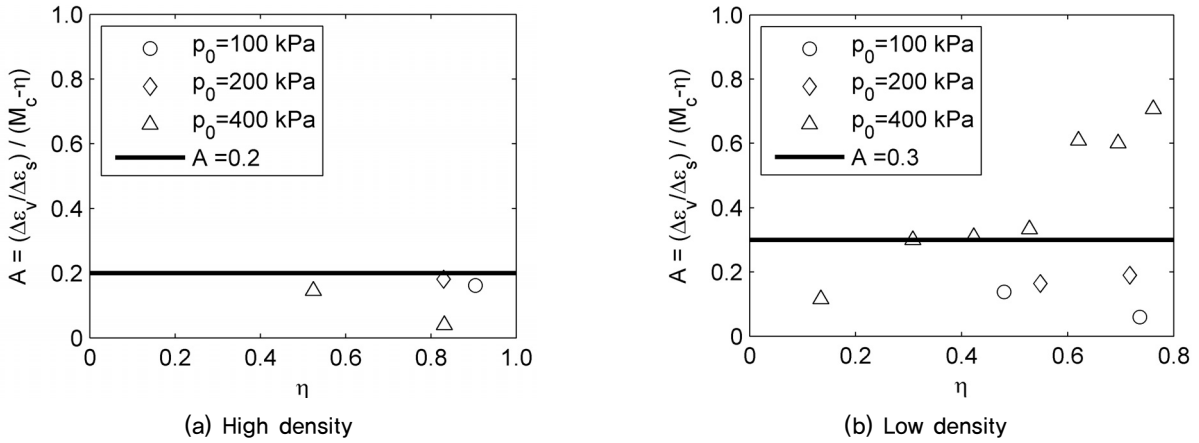


Fig. 8. Dilatancy parameter  $A$  calibration

감소시키는 역할을 한다(Choi, 2013). 또한,  $\epsilon_v - \epsilon_1$  거동에 있어서  $h_0$  값의 증가는 체적팽창의 양이 증가되게 한다.

- 체적팽창 파라미터  $A$  : 조립재료의 체적거동 모델링은 구성모델의 중요한 요소로서 MD모델 내에서 체적거동은 비관계유동법칙과 체적팽창 변수의 전개에 따라 변화하게 된다.  $A=1$ 일 경우 MD 모델의 체적거동은 Rowe의 stress-dilatancy 이론에 부합된다(Wood et al. 1994).  $A$ 는 실험결과에서 stress-dilatancy 결과를 바탕으로 보정된다. Fig. 8은 대상재료의 실험결과를  $A = \frac{\Delta\epsilon_v/\Delta\epsilon_s}{M_c^t - \eta}$  vs.  $\eta$  공간에 나타내며, 이 값은 Rowe의 dilatancy 이론을 바탕으로 제시된 값이다. 응력에 의해 발생한 체적팽창(stress-induced dilatancy) 거동은 응력비가 작은 영역에서 시작된다는 점에서  $A$ 값은 응력비  $\eta$ 가 작은 영역에서 추정되었다.

앞서 제시한 모델 파라미터의 캘리브레이션 방법은 MD 모델을 통해 조립재료의 거동을 예측하거나, 실험결과와 모델 시뮬레이션 결과를 상호 비교하는데 활용될 수 있는 기본적인 가이드라인을 제시한다. 그러나, 실험결과의 불확실성, 공시체 준비과정에서 비균질성, 실험의 경계조건 미흡 등에서 발생하는 오차로 인하여 모델자체의 수치적 파라미터가 아닌 재료 물성값인 경우도 때로는 trial-and-error 방식을 통해 보다 정밀하게 보정되어질 수 있다. 대표적인 실험결과의 오차로 제시될 수 있는 사항은 Fig. 2에 제시된  $e - \ln p$  공간내에서의 한계상태라인(CSL)과 등방압밀라인(ICL)이다. 이론적으로 재료의 각 밀도별 3개 공시체들의 시작점은 항상 ICL에 위치하여야 하며, 재료가 한계상태에 이르렀을 경우 CSL에 위치하여야 한다. 또한, ICL의 기울기와 CSL의 기울기는 서로 같은 값이다.

하지만, 실험결과들로부터 ICL과 CSL의 정의에 부합하는 정확한 기울기  $\lambda$ 와  $y$ 절편, 즉 참조 공극비  $e_{ref}$ 를 분석하는 것은 많은 오차를 내포하고 있으며, 이는 MD-모델 거동에 핵심적인 역할을 하는 초기상태 물성값인  $\psi_0$ 에 큰 영향을 주게 된다.

Table 3은 재료 물성 및 모델 파라미터들의 캘리브레이션 결과를 보여준다. 기본적으로 탄성파라미터와 한계상태 파라미터는 실험결과를 바탕으로 보정되었으나, 모델 파라미터 중  $h_0$ ,  $A$ ,  $k_c^b$ ,  $k_c^d$ 는 실험결과와 비교하여 trial-and-error방식을 통해 보정되었다.

#### 4. MD 모델 시뮬레이션과 실험결과의 비교

Table 3의 파라미터들을 활용하여 MD모델 시뮬레이션을 수행하였다. 모델 시뮬레이션에서는 Table 1에 제시된 배수상태에서 각 시료의 초기응력  $p_0$ 과 초기 간극비  $e_c$ 를 적용하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 각각 “고밀도” 및 “저밀도” 시료의 실험결과와 모델 시뮬레이션 결과를 비교하여 보여준다. 위쪽은 실험결과를  $q-p$ ,  $q-\epsilon_1$ ,  $\epsilon_v - \epsilon_1$  공간내에서 보여주고, 아래쪽은 시뮬레이션 결과를 같은 공간 내에서 제시한다. 각 결과는 초기 구속압이  $p_0 = 100, 200, 400\text{kPa}$  경우의 결과를 보여주고 있으며, 한 세트의 시뮬레이션은 Table 3의 파라미터들을 활용하여 수행되었다. 비교결과로부터 MD-모델이 조립재료의 특징인 응력-체적팽창(stress-dilatancy) 거동과 변형을 연화/경화(strain-hardening/softening) 거동을 정성적으로 구현할 수 있음을 알 수 있다.



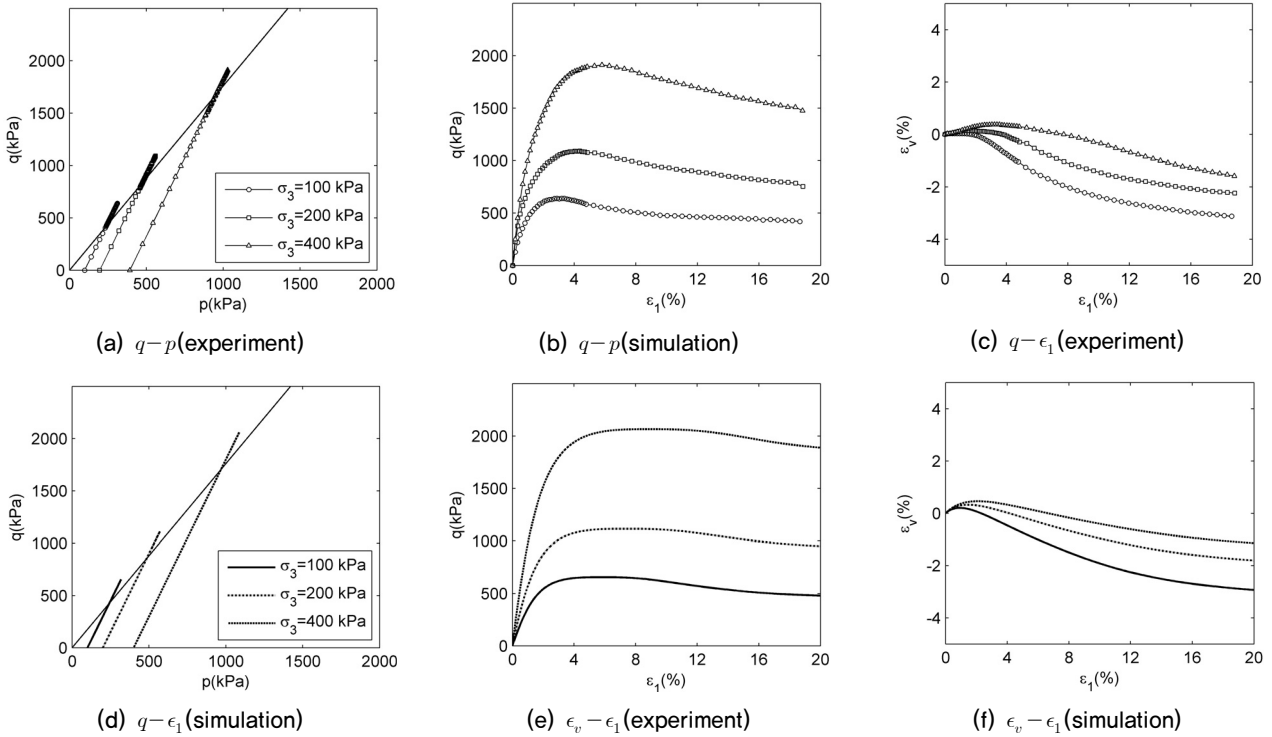


Fig. 9. High Density – Experimental results and model simulation

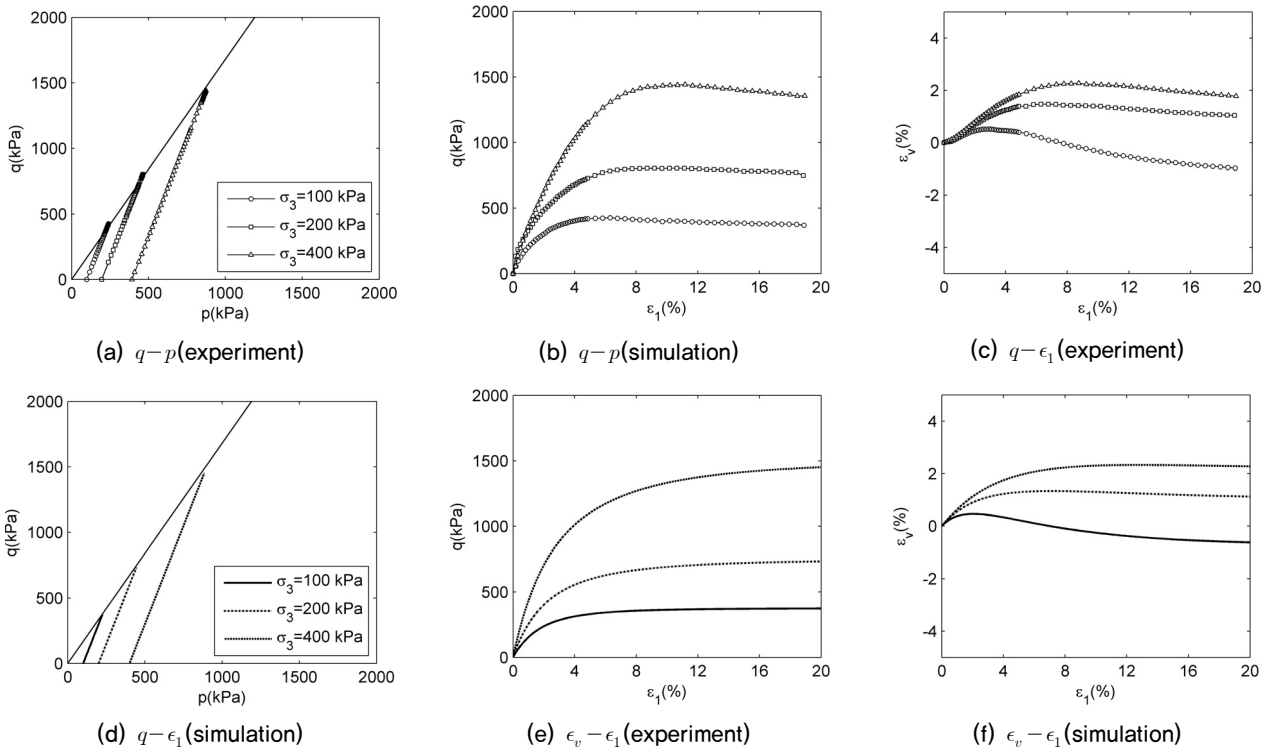


Fig. 10. Low Density – Experimental results and model simulation

## 5. 결론

본 논문에서는 조립재료(자갈)의 공학적 거동특성을 묘사할 수 있는 Manzari-Dafalias 구성모델을 활용하여 부하

담 재료의 대형삼축 압축실험결과를 시뮬레이션하였다. 구성모델의 시뮬레이션을 위해 삼축압축실험 결과를 분석하였으며 이로부터 재료의 한계상태 물성값인  $M_c$ ,  $\lambda$ ,  $e_{ref}$ ,  $p_{ref}$ 와 탄성 물성값인  $G$ 와  $\nu$ 를 산정하였다. 또한, 실험에

사용된 조립재료의 응력-변형률과 체적 팽창/수축 거동을 파악하였다. 실험결과는 MD 모델 파라미터 캘리브레이션 및 시뮬레이션 결과비교에 활용되었다. 모델의 곡면파라미터인  $k_c^b$ 와  $k_c^d$ 는  $e - \ln p$  공간에서의 실내실험결과로부터 구하여진 재료상태변수  $\psi_0$ 를 기반으로 분석되었고, 탄성영역 응력비  $m$ 과 등방경화 파라미터  $c_m$ 은 순수 탄성영역이 매우 작은 토사의 특징으로부터  $m=0.05$ 로 가정하였고,  $c_m = 0$ 으로 설정하여 등방경화가 발생되지 않는 것으로 설정하였다. 체적팽창 파라미터  $A$ 는 응력에 의해 발생하는 체적팽창 거동은 응력비가 작은 영역에서 시작된다는 점에서 실험결과의 응력비  $\eta$ 가 작은 영역에서 분석되었으며, 이동경화 전개에 활용되는 파라미터  $h_0$ 은 trial-and-error 방식을 통하여 추정되었다.

캘리브레이션된 파라미터와 각 공시체의 초기상태를 활용하여 MD 모델 시뮬레이션을 수행하여 실험결과와 시뮬레이션 결과를 상호비교하였다. 비교 결과로부터 MD-모델이 조립재료의 특징인 응력-체적팽창 거동과 변형을 연화/경화 등의 역학적 거동을 정성적으로 구현할 수 있음을 파악하였다. 해석결과로부터 MD 모델은 조립재료가 활용되는 구조물 뒤채움재 및 댐 재료의 역학적 거동을 수치해석적으로 예측하기 위해 다양하게 활용이 가능할 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

This study was co-supported by grants from “Development of pre-loading method for reinforcement piles of apart-

ment remodeling” and “A study for the change of principal stress direction due upon complex loading condition” funded by Korea Institute of Construction Technology.

## References

1. Bardet, J-P. (1997), *Experimental Soil Mechanics*, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.
2. Choi, C. (2013), “Parametric Study of MD Constitutive Model for Coarse-grained Soils”, *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.12, No.1, in press (in Korean).
3. Kramer, S. L., Sivaneswaran, N., and Davis, R. O. (1990) “Analysis of membrane penetration in triaxial test”, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol.116, No.4, pp.773-789.
4. Manzari, M. T. and Dafalias, Y. F. (1997), “A critical state two-surface plasticity model for sands”, *Geotechnique*, Vol.47, No.2, pp.255-272.
5. Shin, D. H., Lee, J. W., Lee, H. C. (2001), *Shear Strength Characteristics of Rockfill Materials using Large Triaxial Testing Apparatus*, Research report, K-water research center (in Korean).
6. Shin, D. H. (2002), “Dependency of Internal Friction Angle of Rock Materials on Confining Pressure”, *Proceeding of KGS Fall Seminar, Korean Geotechnical Society*, pp.253-258 (in Korean).
7. Wood, D. M. (1990), *Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, New York, Melbourne, Sydney.
8. Wood, D. M., Belkheir, K. and Liu, D. F. (1994), “Strain softening and state parameter for sand modeling”, *Geotechnique*, Vol.44, No.2, pp.335-339.