

사질토의 체적팽창을 고려한 비등방경화 구성모델 : II. 검증

An Anisotropic Hardening Constitutive Model for Dilatancy of Cohesionless Soils : II. Verification

오 세 봉 ¹	Oh, Se-Boong	박 현 일 ²	Park, Hyun-Il
신 동 훈 ³	Shin, Dong-Hoon	김 욱 ⁴	Kim, Wook
권 오 균 ⁵	Kwon, Oh-Kyun		

Abstract

In the companion paper, a constitutive model was proposed in order to represent brittleness and dilatancy for cohesionless soils. An optimized design methodology was proposed on the basis of real-coded genetic algorithm in order to determine parameters for the proposed model systematically. The material parameters were then determined by that algorithm. In order to verify the proposed model, triaxial tests were performed under K_0 conditions for weathered soils. In addition, the results of isotropic compressed triaxial tests for granular materials verified the proposed model. For those results the brittle stress-strain relationship and the dilatancy could be modeled reasonably by the proposed model. As a result it was found that the proposed model can appropriately represent the behavior on weathered soil and granular soil.

요 지

동반논문에서는 사질토의 취성적 응력-변형을 관계와 전단시 팽창을 고려할 수 있는 구성모델을 제안하였다. 본 연구에서는 제안된 모델의 계수를 체계적으로 결정하기 위하여 실수형 유전자 알고리즘에 근거한 최적화 기법이 적용되었으며, 이를 통하여 구성모델에 필요한 주요 계수값들을 결정할 수 있었다. 본 연구에서는 제안된 모델을 검증하기 위하여 풍화토시료에 대한 K_0 압밀 삼축시험을 수행하였다. 또한 조립토에 등방압축 삼축시험결과를 이용하여 제안된 모델을 검증하였다. 이러한 시험자료들에 대하여 제안된 모델은 취성적 응력-변형을 관계 및 체적의 팽창과 같은 실제 유효응력 거동을 합리적으로 모델하는 것이 가능하였다. 이로부터 제안된 모델이 풍화토 및 조립토와 같은 사질토의 거동에 적합한 것으로 판단된다.

Keywords : Constitutive model, Genetic algorithm, Granular soils, Triaxial tests, Weathered soils

1. 서 론

동반논문(오세봉 등 2004)에서는 사질토의 구성모델을 제안하였다. 이 구성모델은 (1) 일반 등방경화규칙

(generalized isotropic hardening rule)에 근거한 비등방경화규칙을 적용하여 비선형적인 응력-변형을 관계를 모델하였고 (2) 상태변수에 의존하는 침투응력비를 적용하여 취성적인 거동을 모델하였다. 그리고 (3) 팽창율을

1 정회원, 영남대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Yeungnam Univ., sebungoh@yu.ac.kr)
 2 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과, 연수 연구원 (Member, Post-Doc. Fellow, Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST)
 3 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원 댐안전연구소 책임연구원 (Chief Researcher, Dam Safety Research Center, WRI, KOWACO)
 4 영남대학교 토목공학과 석사 (Dept. of Civil Engrg., Yeungnam Univ.)
 5 정회원, 계명대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Keimyung Univ.)

상태변수에 의존하는 함수로 정의하여 체적변형의 압축 및 팽창을 모델할 수 있도록 유도규칙을 단순화하였다.

제안된 비등방경화 구성모델은 입력계수를 산정하는 것이 매우 까다로운 실정이다. 특히 취성을 표현하는 점 두응력비와 관련된 계수 및 팽창률과 관련된 계수들은 상호간에 연동되어 있어서 실험적 결과에 대한 회귀분석으로 명확하게 추정하기가 곤란하다. 더욱이 입력 계수의 수가 12개에 이르기 때문에 계수를 합리적이고 체계적으로 추정하는 기법을 적용할 필요가 있다.

유전자 알고리즘(genetic algorithms; GA)은 최근 여러 분야에서 대두되고 있는 다변수 최적화 문제에 널리 적용되고 있으며, 지반공학분야에도 점차 적용되고 있는 것으로 알려져 있다(Surajit 등 1996, Arfiad와 Hadi 2001, 박현일과 이승래 2003). 유전자 알고리즘은 유전자들(chromosomes)로 구성된 모집단이 무작위로 생성되어 유전자 조작(genetic operator)을 통하여 보다 정해에 근접한 개체군으로 발전한다는 개념에 근거하고 있다. 또한 생물학적 진화 이론 개념에 근거한 확률론적 최적화 기법으로 구분될 수 있으며, 전역적(global)이며 견고한(robust) 해를 구할 수 있는 장점을 갖고 있다 (Goldberg 1989, Holland 1975).

따라서 본 연구에서는 구성관계에 대한 실험치와 계산치간의 오차에 대한 목적함수를 설정하고 이를 최소화할 수 있는 최적 입력계수를 찾도록 하였다. 이를 통하여 체계적으로 도출한 계수를 이용하여 제안된 구성모델을 검증하였다. 대상자료는 풍화토의 K_0 압축 삼축시험 및 조립토의 등방압축 대형삼축시험 결과를 이용하였다.

2. 제안된 구성모델의 계수 산정 절차

본 연구의 대상이 되는 거동은 사질토나 풍화토에서 나타나는 비선형적인 응력-변형률 관계로 K_0 압축 후 전단거동을 포함한다. 이러한 거동의 특징으로는 (1) 구속압과 응력경로에 따른 강도의 변화를 나타내고 (2) 미소 변형률 영역의 거동도 역시 비선형적이며 (3) 초기조건에 따라 취성과 연성이 잠재되어 있을 뿐 아니라 (4) 체적의 팽창과 압축이 모두 가능하다는 것이다. 이러한 거동을 모델하기 위하여 동반논문(오세봉 등 2004)에서는 새로운 비등방경화 탄소성 구성모델을 제안하였다. 제안된 모델을 구현하기 위하여 삼축시험을 수행하였을 경우에 필요한 자료는 축차응력-축차변형률 관계, 체적변형률-축차변형률 관계 및 간극비-체적응력 관계 등이다. 이 모델에

필요한 입력계수와 관련된 함수를 정리하면 다음과 같다. 경계면의 크기는 다음 식으로 정의한다.

$$R = M^* p \quad (1)$$

여기서 M^* 가상 점두응력비
 p 체적응력

가상 점두응력비 M^* 는 다음과 같이 정의된다(Li와 Dafalias, 2000).

$$M^* = M e^{-n\psi}, \quad \psi = e - e_{cr}, \quad (2)$$

여기서 n 은 계수이며 M 은 한계상태 강도정수이다. 그리고 한계상태 간극비 e_{cr} 은

$$e_{cr} = \lambda p^{-l} \quad (3)$$

이며 λ 와 l 은 계수이다.

팽창율(dilatancy)은 소성 체적변형률과 축차변형률의 증분 비율을 나타내는 것으로 다음과 같이 정의된다 (Li와 Dafalias 2000).

$$D = \frac{d_d}{M} (m_d - \eta), \quad m_d = M e^{m\psi} \quad (4)$$

이 때 d_0 와 m 은 팽창율을 조절하는 계수이다.

식 (2)에 나타난 가상 점두응력비 M^* 는 점두강도를 나타내는 변수로 계수 n 과 한계상태 강도정수 M 이 필요하다. 이러한 계수들은 η - ψ 축에서 나타나는 실험적인 경로의 상부를 수렴하는 곡선으로부터 결정한다. 그리고 한계상태 간극비 e_{cr} 은 한계상태 간극비와 체적응력 관계에서 계수 λ 와 l 을 구한다(식 (3)). 팽창율(dilatancy) D 를 정의하기 위해서는 계수 d_0 와 m 이 필요하다(식 (4)), 실험치에서 나타나는 소성체적변형률과 소성축차변형률의 증분 비율로부터 구한다.

하지만 점두강도는 M^* 와 D 는 연동되어 있어서 관련된 계수를 실험치에 상응하도록 명확하게 결정하는 것이 매우 어렵다. 특히 실험치에서 나타나는 D 가 증분의 비율이므로 분석하기 까다로운 실정이다. 또한 사질토에서 e_{cr} 은 과다한 변형이후에나 발생하므로 실험적으로 구하기가 곤란한 실정이다.

경화규칙(hardening rule)은 다음과 같다(오세봉 등 2000).

$$\bar{\varepsilon}^p = a \frac{(r/R)^b}{(1-r/R)^c} \quad (5)$$

$\bar{\varepsilon}^p$ 는 단순재하(monotonic loading)구간내에서 식 (6)의 $\dot{\varepsilon}^p$ 를 적분한 양이며 a, b, c 는 소성 축차변형률과 관련된 계수이다.

$$\dot{\varepsilon}^p = \sqrt{\frac{2}{3}} \|\dot{\varepsilon}^p - \frac{1}{3} \dot{\varepsilon}_v^p \mathbf{1}\|, \quad \dot{\varepsilon}_v^p = \text{tr}(\dot{\varepsilon}^p) \quad (6)$$

전단계수 G 는 G_{\max} 로부터 구하며 식 (7)과 같이 나타낸다.

$$G \equiv G_{\max} = g_0 + g_1 p_i \quad (7)$$

여기서 g_0 와 g_1 는 일정하며 p_i 는 압밀후 체적응력이다. 포아송비 ν 는 일정하다고 가정하였다.

경화규칙(hardening rule)은 항복면 크기와 경계면 크기의 비율로 나타나며 소성 축차변형률과 관련된 계수 a, b, c 를 구해야 한다. 따라서 시험조건에 따라 항복면 크기의 비와 소성 축차변형률을 구한 후 회귀분석하여 구할 수 있다. K_0 압축 삼축시험시 항복면 및 경계면의 크기는 다음과 같다.

$$r = q - q_0, \quad q_0 = kp, \quad k = \frac{3(1 - K_0)}{1 + 3K_0} \quad (8)$$

여기서, k 는 K_0 압축 완료시 축차응력과 체적응력의 비 $\eta_i \equiv q_i / p_i$ 로부터 결정하며 일정하다고 가정하며, 등방 압축시에는 0이 된다. 그리고 축차변형률은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\bar{\varepsilon}^p = \bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}^e, \quad \bar{\varepsilon} = \frac{2}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3), \quad \bar{\varepsilon}^e = \frac{q - q_0}{3G} \quad (9)$$

따라서 요구되는 계수는 $\lambda, l, M, n, d_0, m, a, b, c$ 및 탄성계수와 관련된 g_0, g_1 과 포아송비 ν 가 있다. 이러한 계수들은 수가 많을 뿐더러 M^* 와 D, e_{cr} 를 구하는데 겪는 어려움으로 대안이 필요하다. 이에 본 연구에서는 유전자 알고리즘을 채택하여 입력계수를 체계적으로 산정하고자 하였다.

3. 유전자 알고리즘(genetic algorithm)

유전자 알고리즘은 유전자들(chromosomes)로 구성된 모집단이 무작위로 생성되어 재생산(reproduction) 및 돌

연변위(mutation)와 같은 유전자 조작(genetic operator)을 통하여 보다 정해에 근접한 개체군으로 발전된다는 개념이다 즉 다음 세대의 새로운 집단(population)은 이전 세대로부터 재생산과 돌연변이 과정을 거친 후 선택(selection) 과정을 거쳐서 생성된다. 유전자 알고리즘(GA)은 이와 같이 자연 선택 및 자연 유전자와 같은 생물학적 진화 이론 개념에 근거한 확률론적 최적화 기법으로 전역적이며 견고한 해를 구할 수 있다(Goldberg 1989, Holland 1975).

본 연구에서는 순위적합선별(rank-based fitness assignment) 방법이 확률론적 비례 추출(stochastic universal sampling)방법과 연계되어 사용되었다. 즉 각 세대에서의 개체들은 순위적합선별을 통하여 무작위로 선별된 이후 재생산과 돌연변이 과정을 거친 후에 다음 세대에 포함되게 된다. 이러한 과정을 거친 후에 최종 세대의 최적 개체가 최적화 문제의 최종 해로서 채택된다. 실수형 유전자 알고리즘에는 다양한 여러 변수들이 존재하지만, 기본적인 유전자 알고리즘은 다음과 같다.

설계변수를 표현하기 위하여 이진수를 사용하는 이진수형 유전자 알고리즘에 비해 실수형 유전자 알고리즘은 설계변수를 나타내는 개수를 표현하기 위하여 실수 벡터를 사용한다. 본 연구에서와 같이 n 개의 설계변수를 갖는 q 개의 개체군을 사용할 경우 다음 식 (10)과 같은 개체수의 모집단이 생성될 수 있다(초기 개체군의 생성, creation of initial individuals).

$$\begin{aligned} P^1 &= [x_1^1 \quad \dots \quad x_n^1] \\ P^2 &= [x_1^2 \quad \dots \quad x_n^2] \\ &\vdots \\ P^q &= [x_1^q \quad \dots \quad x_n^q] \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, P 는 개체군에 존재하는 각 개체를 의미하며, x_j^i 는 i 번째 개체의 j 번째 설계변수를 의미한다.

최적화되는 목적함수는 각 개체를 평가하는 메커니즘을 제공한다. 이 때 각 개체의 적합도에 근거하여 유전적 처리과정(genetic manipulation process)에 사용될 개체들을 선택(selection)하게 된다. 동일한 개체수를 갖는 다음 세대를 생산하기 위하여 개체들이 각 적합도에 근거하여 선정되므로, 이전 세대보다 평균적으로 해에 보다 근접된 개체들로 구성될 수 있다. 이를 위해 여러 선택방법들이 개발되어 있으며, 본 연구에서는 순위적합선별법이 사용되었다(Back와 Hoffmeister, 1991). 순위적합선별법에서는 개체들이 목적함수의 순위에 따라

정렬되는데, 각 개체의 적합도는 실질적인 목적함수의 값보다는 개체군의 순위로서 표현된다.

재생산(reproduction)은 선택된 개체군에서 무작위로 두 개체(parents)를 선택하는 것을 포함한다. 이와 같이 선택된 두 개체(parents)는 다음 세대에 적용될 새로운 개체(offspring)를 생산하기 위하여 교배된다. 본 연구에서는 중간 재조합(intermediate recombination) 방법을 사용하여 두 개체(parents) 즉, P_1 및 P_2 로부터 새로운 개체(offspring)를 다음 식 (11)과 같이 생산하게 된다 (Muhlenbein과 Schlierkamp-Voosen, 1993).

$$offspring = P_1 + \alpha \cdot (P_2 - P_1) \quad (11)$$

여기서, *offspring*은 다음 세대에 적용될 새로운 개체를 의미하고, α 는 구간 $[-d, 1+d]$ 에서 무작위로 균일하게 선택하는 비례계수를 의미한다.

다른 영역에 존재하는 해에 가장 근접한 개체가 현 세대의 개체군에 포함되어 있지 않은 경우에는 재생산 과정을 거치더라도 해에 보다 근접한 개체로 발전될 수 있는 가능성은 매우 낮다. 이 경우에 돌연변이(Mutation) 과정을 통하여 개체군과 다른 영역에 존재하는 개체를 생성시킴으로써 유전자 알고리즘의 조기 수렴을 방지할 수 있다.

선택, 재생산 및 돌연변이 과정은 매 세대에서 반복적으로 수행되며, 마지막 세대에서의 최적 개체가 해로 선정되며, 본 연구에서 사용된 GA 과정은 다음과 같이 정리될 수 있다.

- ① 실수형 개체군을 생성
- ② 각 개체의 적합도를 평가
- ③ 순위적합선별 및 확률론적 보편추출(stochastic universal sampling)에 의하여 교배에 적용될 개체들을 선별
- ④ 새로운 개체군의 생성을 위해 선별된 개체들에 대하여 재생산과 돌연변이 과정을 수행하여 새로운 개체들을 생성
- ⑤ 현 개체군의 순위가 낮은 개체들에 대하여 생성된 개체들로서 무작위로 교체
- ⑥ 최종적으로 만들어진 개체군에 대한 적합도 평가

③~⑥ 단계의 과정을 세대(generation)라 표현하며, 주어진 기준이 만족될 때까지 세대를 반복하거나 혹은 주어진 최대 세대 수까지 과정을 반복할 수 있다. 본 연구에서는 최대 세대수를 지정하는 방법을 사용하였다.

그림 1과 같이 응력-변형을 관계에서의 계산치와 실험치간의 오차를 최소화할 수 있도록 최적화문제 해석

이 수행되었다. 본 연구에서 사용된 유전자 변수들이 표 1에 나타나 있으며, 예제에서 최적화되는 목적함수는 식 (12)와 같다.

$$E(x) = \alpha \cdot \frac{\int |q - q^*| d\epsilon_a}{\Delta q^* \Delta \epsilon_a} + \beta \cdot \frac{\int |\epsilon_v - \epsilon_v^*| d\epsilon_a}{\Delta \epsilon_v^* \Delta \epsilon_a} \quad (12)$$

여기서, $E(x)$ 는 최소화할 목적함수이며 x 는 변수집합으로 구성모델의 계수들이다. 제안된 구성모델에서는 $\lambda, l, M, n, d_0, m, a, b, c$ 등 9개 계수를 설정하였다. 탄성계수와 관련된 g_0, g_1 과 포아송비는 유전자 알고리즘을 적용하지 않았다. q 와 ϵ_v 는 계산된 축차응력 및 체적변형률이며 q^* 와 ϵ_v^* 는 실험치에 해당된다. $\Delta q^*, \Delta \epsilon_v^*, \Delta \epsilon_a$ 는 실험치에서 나타난 축차응력, 체적변형률, 축변형률의 대상구간을 나타낸다. 또한, 목적함수 값에서 축차응력-축변형률과 체적변형률-축변형률 관계로부터 각각 구해진 값들에 의한 편향된 영향을 배제하고자 $\alpha (=1.0)$ 와 $\beta (=0.3)$ 와 같이 가중치를 적용하였다.

실험치와 계산치간의 오차를 나타내는 목적함수를 최소화할 수 있는 재료계수를 구하기 위하여 유전자 알고리즘에 근거한 최적화 과정이 수행되었다. 본 연구에서 사용된 유전자 알고리즘에 관한 설계변수들이 표 1에 정리되어 있다.

4.1절에서 기술할 K_0 조건에 대한 실험자료 대하여

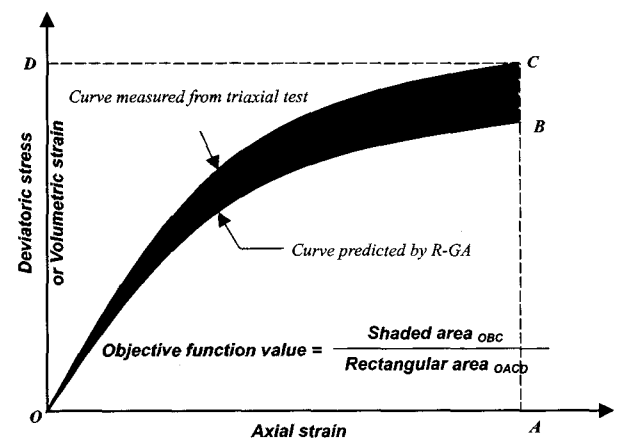


그림 1. 목적함수의 정의

표 1. 유전자 알고리즘에 사용된 변수 값

변수	값
개체군의 수	2000
재생산 확률	70%
돌연변이 확률	0.5%
최대 세대 수	100

제안된 구성모델에 근거한 최적화 기법을 적용할 경우 목적함수 값이 최적화되는 과정이 그림 2에 구해져 있다. 개체수 2000인 경우에 세대수가 50에 가까워 짐에

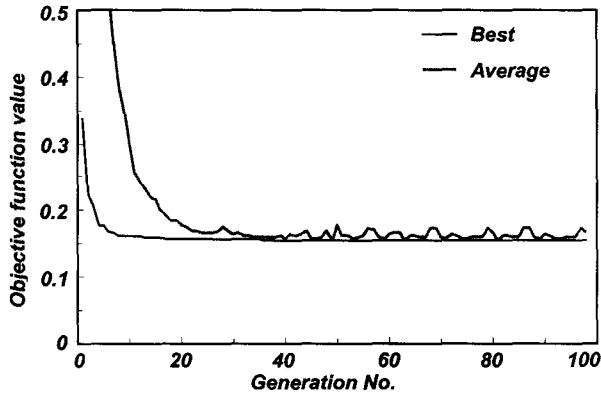


그림 2. 각 세대에 대한 목적함수값의 변화

따라 각 세대에서의 최적(best)의 개체에 대한 목적 함수 값은 0.155로 거의 수렴하는 경향을 보이며, 각 세대의 모든 개체에 대한 목적함수의 평균값도 세대수가 50을 넘어감에 따라 거의 수렴되는 양상을 보이고 있다.

그림 3에는 세대의 증가에 따른 모델 계수값들의 변화가 나타나 있으며, 세대수 60을 전후하여 거의 수렴되는 양상을 보이고 있다. 따라서, 본 논문에서는 개체수 2000에 대하여 80번째 세대에서의 최적의 개체값을 최종 수렴해로 간주하였다.

4. 구성모델의 검증

4.1 풍화토의 K_0 압축 삼축시험

본 연구의 대상지반은 경기도 이천에서 채취한 노상

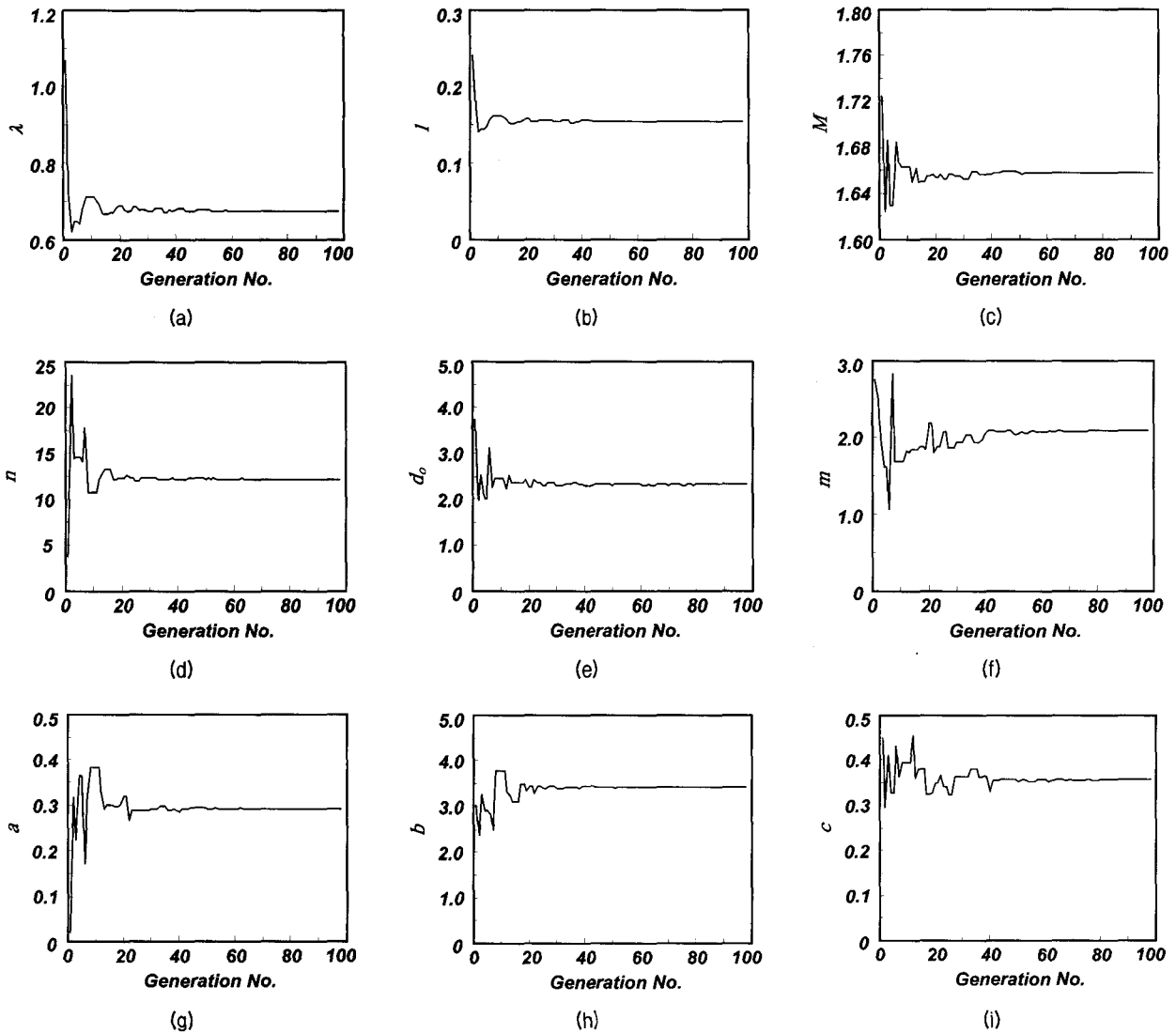


그림 3. 각 세대에 대한 설계변수값의 변화

토 시료를 대상으로 하였다. 이 지층은 화강풍화토로 통일분류상 SW에 해당되었으며 AASHTO 분류법에 의하여 A-1-b로 분류되었다. 다짐시험결과 최적함수비는 9.7%, 최대 건조단위중량은 2.01t/m³이었다. 삼축압축시험의 시료는 ϕ 50mm, 높이100mm로 현장지반의 함수비(9.8%)와 단위중량(1.91t/m³)을 동일하게 하여 정적 다짐법으로 성형하였다. 시료의 비중은 2.63이었다.

삼축시험시 셀 외부에서 측정된 축변형률의 오차를 줄이기 위해 내부 LVDT를 이용한 국부변위를 측정하였다(오세봉 등 2000). 국부변위측정을 위한 시험장치는 시료의 양쪽에 설치된 힌지위의 LVDT에서 변위가 측정이 되며, 시료의 양단에 정착오차(bedding error) 및 단부구속을 피하기 위하여 시료의 상하부에 20mm정도 이격시켜 설치하였다.

시료 성형 후, 시료를 포화 시키기 위해 배압(back pressure)을 가한다. 시료에 가해지는 구속압과 배압의 유효응력 차는 10kPa로 유지한다. 단계별로 일정한 시간이 경과한 후 배압을 증가시키는 방법으로 시료의 포화도를 증가시켜 일정수준의 포화도를 맞춘다. 그러나 시험의 어려움으로 인하여 완전 포화는 이루어지지 않았으나 시험결과의 일관성에는 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 판단되었다.

공기압을 이용하여 K₀ 압밀과정에 들어갔다. K₀값은 예비실험을 참조하여 0.3으로 결정한 후 K₀ 압밀 완료시 최종 응력값과 압밀 시간을 미소변형 삼축기를 제어하는 컴퓨터 프로그램에 입력시킨다. 압밀시 100, 200, 300 및 400kPa의 구속압을 받는 응력수준에서 실험을 수행하였으며, 각각의 구속압에 대해서 180분동안 K₀압밀을 수행하였다. 압밀후 초기 응력 및 간극비는 다음 표 2에 정리되어 있다.

표 2. 풍화토 삼축시험의 압밀후 응력 및 간극비

구분	체적응력(kPa)	축차응력(kPa)	압밀간극비
KO100	98.7	125.0	0.247
KO200	191.0	267.0	0.244
KO300	282.0	412.0	0.238
KO400	382.0	543.0	0.236

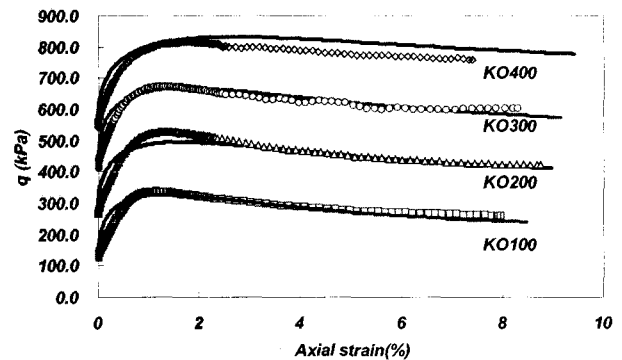
표 3. 최적화 과정을 통하여 산정된 계수(풍화토)

λ	l	M	n	d_0	m	a	b	c	R_1^2	R_2^2
0.675	0.154	1.658	12.24	2.309	2.080	0.292	3.416	0.357	135000	270

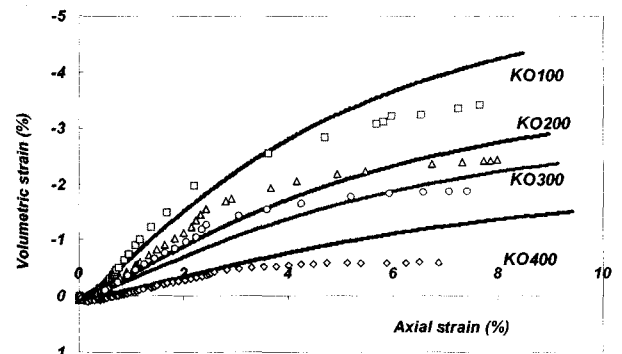
*최적화 과정에 적용되지 않은 계수, $\nu=0.3$

압밀 완료 후 배수가 충분히 일어나도록 0.05%/min의 전단속도로 변형률을 제어하며 전단시험을 수행하였다. 전단과정이 진행되는 동안 축방향 변형률 및 배수되는 간극수의 체적변화로부터 체적 변형률을 측정할 수 있었다.

모델계수 추정과정은 3절에서 소개한 것과 동일하며 계수는 표 3에 나타내었다. 그림 4(a)에서는 축차응력-변형률 관계를 비교하였다(점은 실험치를 선은 모델치를 나타냄). 실험치의 경우에는 구속압이 높을수록 응력-변형률 관계가 취성에서 연성으로 전이되는 거동을 보인다. 제안된 모델은 이러한 경향을 포함하여 전반적인 응력-변형률 관계를 매우 정확하게 예측하였다. 그림 4(b)에서는 축변형률에 따른 체적변형률의 변화를 나타낸다. 체적변화가 압축적이다가 팽창적으로 전환하는 경향을 정확하게 계산하였다. 또한 체적변형률의 크기



(a) 응력-변형률 관계



(b) 체적변형률-축변형률 관계

그림 4. 풍화토의 K₀ 압축 삼축시험 결과 비교(점은 실험치이며 선은 해석치임)

는 대체로 정확하게 계산하였다. 그러나 KO100 및 KO400의 경우 최종 체적변형률이 다소 과대평가되었고 KO200 및 KO300의 경우 초기부의 경향에서 오차가 발생하였다.

그러나 그림 4(a)에서 보여지듯이 변형률 수준이 낮은 경우에는 계산치가 실제 응력을 과대평가하는 경향이 나타난다. 이는 유전자 알고리즘에 의한 계수 추정과정에서 사용된 목적함수가 대략 0~10%에 해당하는 전체 축변형을 영역에서의 실험치와 예측치 간의 오차값으로 정의 되기 때문에, 대략 0.1% 미만의 미소변형률 영역의 거동은 목적함수 값에 충분히 고려되기 어렵다. 이러한 부분은 추가적인 연구를 통하여 개선해야 할 사항으로 판단된다.

그림 5에서는 풍화토시료에서 η 와 ψ 축에서 나타나는 경로에 대하여 실험치와 모델을 비교하였다. 점두강도 M^* 는 ψ 에 따라 감소하고 실험적인 경로의 상부를 수렴하는 곡선의 형태로 나타난다. ψ 가 0보다 작은 영역에서 η 가 증가함에 따라 팽창이 일어난다. $\psi \rightarrow 0$ 이면 η 가 감소하며 한계상태 강도에 수렴한다. 전반적으로 실험치에서 나타난 경로를 매우 적절하게 모델할 수 있었다. 이는 비등방경화 모델이 응력의 변화에 따른 취성과 체적변화를 적절하게 모델하고 있음을 의미한다. m_d 는 팽창을 D 가 압축에서 팽창으로 전환되는 시점을

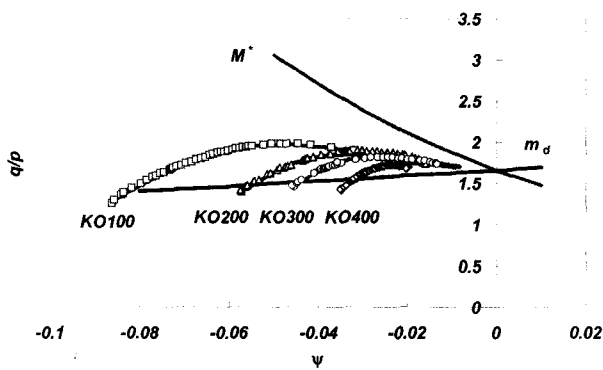


그림 5. 풍화토의 K_0 압축 삼축시험시 η - ψ 경로(점은 실험치이며 선은 해석치임)

표 5. 최적화 과정을 통하여 산정된 계수(조립토)

Soils	λ	l	M	n	d_0	m	a	b	c	g_1^*	g_2^*
z2-1	0.396	0.182	1.760	12.13	2.324	1.141	0.190	3.634	0.424	400.0	70.0
z2-2	0.352	0.254	1.736	14.89	2.428	1.714	0.197	4.123	0.411	176.9	70.0
z3-1	0.367	0.145	1.715	14.24	1.993	1.907	0.249	3.716	0.429	292.3	86.5
z3-2	0.445	0.202	1.680	15.00	2.150	1.940	0.192	3.180	0.407	292.3	86.5

*최적화 과정에 적용되지 않은 계수, $\nu=0.3$

나타낸다.

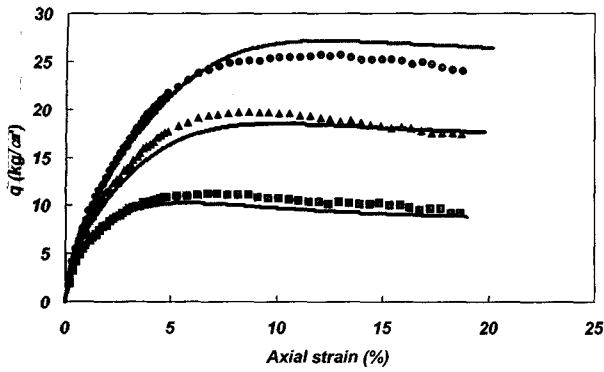
4.2 조립토의 등방압축 삼축시험

본 절에서는 한국수자원공사에서 평화의 댐 축조재료를 대상으로 수행한 삼축압축시험(등방압축CD시험) 결과에 대하여 제안된 구성모델을 검증하였다. 공시체 시료의 최대 입경이 50.8mm이며 댐을 구성하는 영역에 상응하도록 상사입도를 적용하여 성형하였다. 이 때 대상 시료의 영역은 다음과 같이 구분되었다. ZONE II는 최대입경이 150mm로 성형 밀도에 따라 z2-1(고밀도)과 z2-2(저밀도)로 구분하였다. ZONE III는 최대입경이 800mm이며 성형 밀도에 따라 z3-1(고밀도)과 z3-2(저밀도)으로 구분하였다. 이러한 시료들은 포화조건하에서 배수 삼축압축시험을 수행하였으며 공시체의 크기는 직경 300mm이고 높이 620mm이다. 각각의 세트는 구속압의 크기는 2, 4, 6kg/cm²이다. 각 시료의 압밀 후 초기 조건은 다음 표 4와 같다.

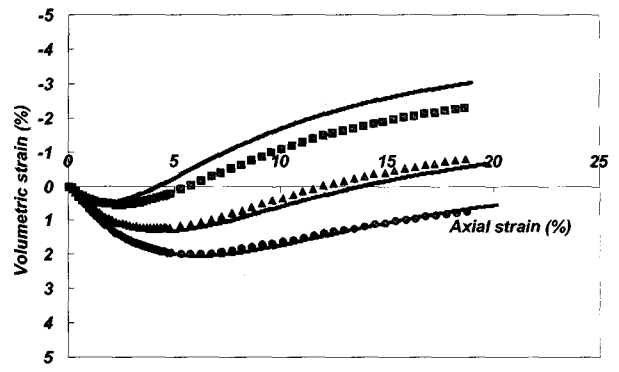
모델계수 추정과정은 3절에서 소개한 것과 동일하다. 각 영역별 계수는 표 5에 나타내었다.

표 4. 조립토의 초기조건

구분	구속압 (kg/cm ²)	γ_d (kg/cm ³)	압밀간극비 e_c	
ZONE II	z2-1	2	2.057	0.241
		4	2.075	0.219
		6	2.080	0.205
	z2-2	2	2.178	0.241
		4	2.180	0.236
		6	2.177	0.232
ZONE III	z3-1	2	2.00	0.332
		4	2.009	0.308
		6	2.013	0.291
	z3-2	2	2.137	0.272
		4	2.148	0.253
		6	2.148	0.250

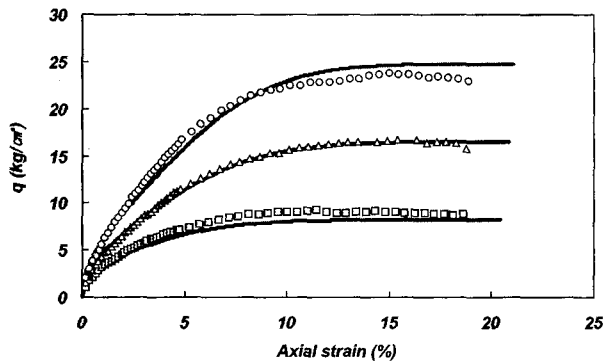


(a) 응력-변형을 관계

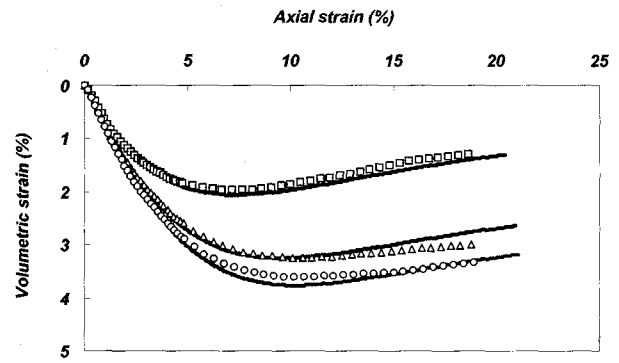


(b) 체적변형을-축변형을 관계

그림 6. 조립토 z2-1의 삼축시험 결과 비교(점은 실험치이며 선은 해석치임)



(a) 응력-변형을 관계



(b) 체적변형을-축변형을 관계

그림 7. 조립토 z2-2의 삼축시험 결과 비교(점은 실험치이며 선은 해석치임)

그림 6(a)에서는 z2-1의 축차응력-변형을 관계를 비교하였다(점은 실험치를 선은 모델치를 나타냄). 세 가지 구속압 조건 2, 4, 6kg/cm²에 대하여 응력-변형을 관계는 높아지는 경향을 보이므로 범례는 생략하였다. z2-1의 경우에는 구속압이 높은 6kg/cm²의 응력-변형을 관계가 다소 과대 평가 되었지만 취성을 포함하여 전반적인 응력-변형을 관계를 매우 정확하게 예측하였다. 그림 6(b)에서는 축변형률에 따른 체적변형률의 변화를 나타낸다. 구속압이 감소록 체적변화가 압축적이다가 팽창적으로 전환하는 경향을 매우 정확하게 계산하였다. 뿐만 아니라 체적변형률의 크기를 매우 정확하게 계산하고 있음을 알 수 있다.

그림 7(a)에서는 z2-1과 동일한 입도분포를 가지되 성형시 밀도가 상대적으로 느슨한 z2-2에 대한 축차응력-변형을 관계를 비교하였다. z2-2의 경우에는 실험적인 응력-변형을 관계가 거의 연성적으로 나타났으며 제안된 모델은 이러한 응력-변형을 관계를 매우 정확하게 예측하였다. 그림 7(b)에 나타난 체적변형률은 압축적으로 나타났다. 제안된 모델은 이러한 경향과 체적변형률

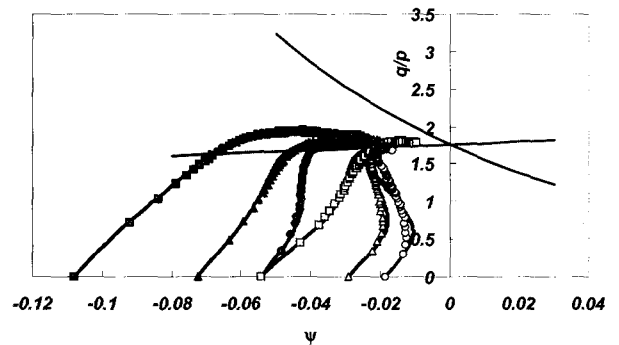
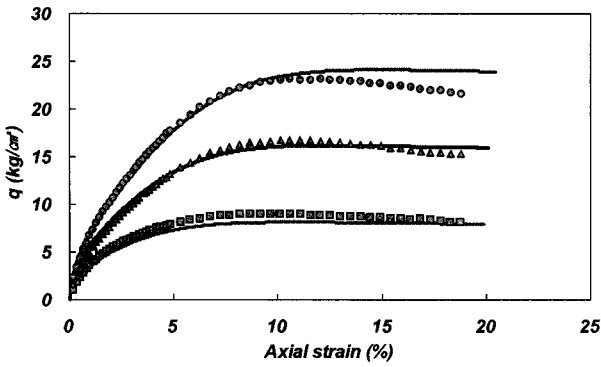


그림 8. 조립토 ZONE II의 삼축시험 τ - ψ 경로 비교(점은 실험치이며 선은 해석치임)

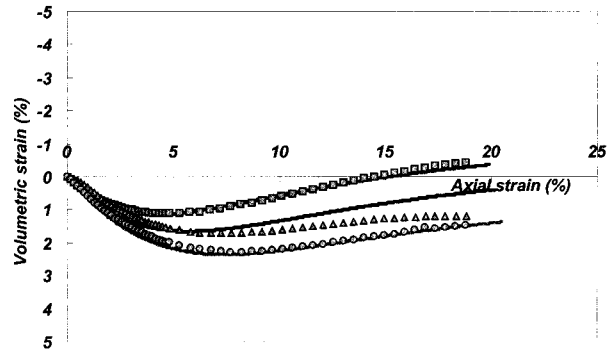
의 크기를 매우 정확하게 계산하였다.

그림 8은 ZONE II에서 τ 와 ψ 축에서 나타나는 경로에 대하여 실험치와 모델을 비교하였다. 첨두강도 M^* 는 ψ 에 따라 감소하고 실험적인 경로의 상부를 수렴하는 곡선의 형태로 나타난다. $\psi \rightarrow 0$ 이면 τ 가 한계상태 강도에 수렴한다.

ψ 가 0보다 작은 영역에서 τ 가 증가함에 따라 팽창이 일어나고 ψ 가 전반적으로 증가하는 거동을 나타내

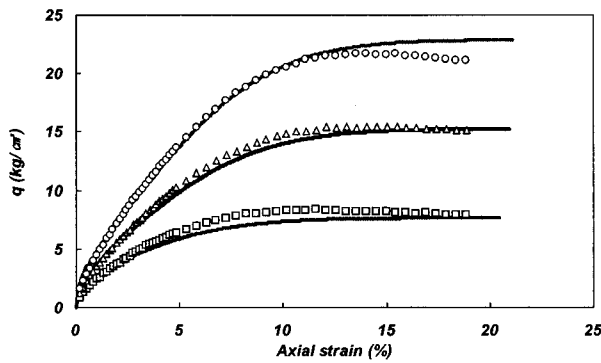


(a) 응력-변형률 관계

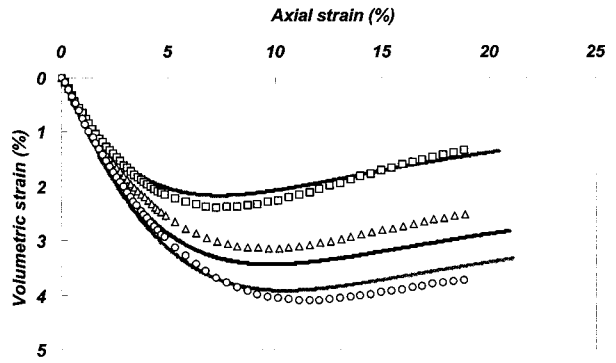


(b) 체적변형률-축변형률 관계

그림 9. 조립토 z3-1의 삼축시험 결과 비교



(a) 응력-변형률 관계



(b) 체적변형률-축변형률 관계

그림 10. 조립토 z3-2의 삼축시험 결과 비교

고 있다. 그러나 경로가 S자 형태를 띠는 경우에는 가 증가하다가 감소하고 다시 증가하는 거동을 나타내고 있다. 이 경우에는 체적의 압축이 지배적인 경우에 해당한다. 전반적으로 실험치에서 나타난 경로를 매우 적절하게 모델할 수 있었다. 이는 비등방경화 모델이 응력의 변화에 따른 취성거동과 체적변화를 적절하게 모델하고 있음을 의미한다.

그림 9(a)에서는 z3-1의 축차응력-변형률 관계를 비교하였다. 이 경우에는 실험적인 관계가 취성이 미약하게 나타났으며, 제안된 모델은 취성을 포함하여 전반적인 응력-변형률 관계를 매우 정확하게 예측하였다. 그림 9(b)에서는 축변형률에 따른 체적변형률의 변화를 나타낸다. 체적변화가 압축적이다가 팽창적으로 전환하는 경향을 매우 정확하게 계산하였으며, 체적변형률의 크기를 매우 정확하게 계산하고 있음을 알 수 있다.

그림 10(a)에서는 z3-1과 동일한 입도분포를 가지되 성형시 밀도가 상대적으로 느슨한 z3-2에 대한 축차응력-변형률 관계를 비교하였다. z3-2의 경우에는 실험적인 응력-변형률 관계가 거의 연성적으로 나타났으며 제

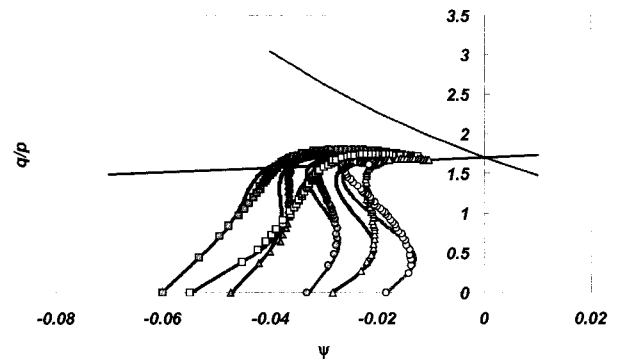


그림 11. 조립토 ZONE III의 삼축시험 $q-p$ 경로 비교

안된 모델은 이러한 응력-변형률 관계를 매우 정확하게 예측하였다. 그림 10(b)에 나타난 체적변형률은 압축적으로 나타났지만 후반부에 다소 팽창이 발생하였다. 제안된 모델은 이러한 경향과 체적변형률의 크기를 매우 정확하게 계산하였다.

그림 11은 ZONE III에서 q 와 ψ 축에서 나타나는 경로에 대하여 실험치와 모델을 비교하였다. q 가 증가함에 따라 팽창이나 압축이 일어난다. 전반적으로 실험치에서 나타난 경로는 S자 형태를 띠고 있는데, 제안된 모

델은 이러한 경향을 매우 적절하게 모델할 수 있었다. 이는 비등방경화 모델이 응력의 변화에 따른 취성과 체적변화를 적절하게 모델하고 있음을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 동반논문(오세봉 등 2004)에서 제안한 구성모델에 대한 검증은 하였다. 제안된 모델의 경우 추정해야 하는 모델계수값들의 양이 많고 일부 중요 모델 계수 값들은 상호간에 연동되어 있으므로, 이를 체계적으로 결정하기 위하여 실수형 유전자 알고리즘에 근거한 최적화 기법을 적용하였다. 이를 통하여 실험치와 계산치간의 오차를 최소화할 수 있는 제안된 구성모델의 입력계수값들을 획득할 수 있었으며, 얻어진 모델값계수들을 이용하여 구성모델을 검증한 결과를 다음과 같이 정리하였다.

- (1) 풍화토시료에 대한 K_0 압밀 삼축시험을 수행하여 제안된 모델과 비교한 결과 K_0 압밀 시험에서 나타나는 취성적 응력-변형률 관계 및 체적의 팽창과 같은 실제 유효응력 거동을 합리적으로 모델하는 것이 가능하였다.
- (2) 댐 축조시 사용되는 조립토에 대한 기존의 등방압축 대형삼축시험결과를 이용하여 제안된 모델을 검증하였다. 제안된 모델은 조립토에서 나타나는 취성적 응력-변형률 관계 및 체적의 팽창과 같은 실제 유효응력 거동을 합리적으로 모델하는 것이 가능하였다.

이로부터 제안된 모델이 풍화토 및 조립토와 같은 사질토의 거동에 적합한 것으로 판단된다. 제안된 모델은 미소변형 영역의 거동을 표현할 수 있는 모델이

지만 목적함수에서 0.1%미만의 변형률 수준 거동이 반영되기 어려웠다. 추후 이러한 부분에 대한 보완이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학재단 목적기초 연구과제 “전체 변형률 범위($10^{-4} \sim 10\%$)에서 풍화토 지반구조물 변형거동 평가를 위한 실험·해석 통합시스템 연구”의 일부로 재단의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 박현일, 이승래 (2003), “장비하중을 받는 매립지 사면 차수 시스템 설계를 위한 유전자 알고리즘의 적용”, 한국지반공학회지, 제19권, 제6호, pp.99-106.
2. 오세봉, 권기철, 김동수, 정순용 (2000), “미소변형률 및 대변형률 조건의 거동에 대한 비등방경화 탄소성 구성모델”, 한국지반공학회지, 제16권, 제1호, pp.65-73.
3. 오세봉, 박현일, 권오균 (2004), “사질토의 체적팽창을 고려한 비등방경화 구성모델 : I. 정식화”, 한국지반공학회지, 제20권, 제6호, pp.75-83.
4. Arfiadi, Y. and Hadi, M.N.S. (2001), “Optimal direct (static) output feedback controller using real coded genetic algorithms”, *Computers and Structures*, pp.1625-1634.
5. Back, T. and Hoffmeister, F. (1991), “Extended Selection Mechanisms in Genetic Algorithms”, 4th Int. Conf. of Genetic Algorithms, San Mateo, California, USA, pp.92-99.
6. Goldberg, D.E. (1989), “Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning”, New York: Addison-Wesley.
7. Holland, J. J. (1975), *Adaptation in natural and artificial systems*, The University of Michigan Press.
8. Li, X. S. and Dafalias, Y. F. (2000), “Dilatancy for Cohesionless Soils”, *Geotechnique*, 50, pp.449-460.
9. Muhlenbein, H. and Schlierkamp-Voosen, D. (1993), “Predictive Models for the Breeder Genetic Algorithm : I. Continuous Parameter Optimization”, *Evolutionary Computation*, 1 (1), pp.25-49.
10. Surajit, P. G., Wathugala, W., and Kundu, S. (1996), “Calibration of a Constitutive Model Using Genetic Algorithms”, *Computers and Geotechnics*, Vol.19, No.4, pp.325-348.

(접수일자 2004. 3. 12, 심사완료일 2004. 7. 20)