

비선형 이동경화법칙에 기초한 점성토의 거동 특성

A Study on Clay Behavior Characteristics Based on Non-Linear Kinematic Hardening Rule

김 용 성*

Kim, Yong Seong

Abstract

Up to now, many constitutive models for clay have been proposed and studied based on the elasto-plastic or elasto-viscoplastic theory and it has been recognized that the effect of time on the loading process is a salient feature. In the present study, cyclic behavior characteristics of clay was studied with a viscoelastic-viscoplastic constitutive model for clay based on the non-linear kinematic hardening rule. In order to examine the behavior of clay several cyclic untrained triaxial tests and also their numerical simulations were performed. As results of that, it was found that the proposed model can well describe cyclic behaviors of clay such as frequency dependent characteristics, and have the high feasibility of numerical simulation for dynamic analysis.

Keywords : Viscoelastic, Viscoplastic, Constitutive model, Clay

I. 서 론

점성토의 동적 성질에 관한 연구는 1950년대 폭파하중과 교통하중에 의한 변형문제에서부터 시작되었다. 최근에는 하천제방 및 해저 연약지반상의 파랑에 의한 지반변형 문제, 지진시 다층지반의 동적 거동문제, 농경지에서의 농기계 및 건축 중장비 등 농경장비의 반복하중에 의한 경작지반의 거동문

제 등 다양한 분야에서 점성토 지반의 동적거동 문제가 관심의 초점이 되고 있다.^{3),8)}

한편, 우리나라 농업기반 시설을 살펴보면(1999년 통계) 시설물의 70%가 20년 이상된 것이며 특히 중요한 수원공인 저수지는 전체 17,956개소의 54%인 9,706개소가 55년 이상 경과되었으며 양·배수장은 20년 이상 된 것이 전체(6,398개소)의 55%인 3,521개소나 되어 시설노후화가 심각하다.¹¹⁾ 이러한 농업용 대형 수리구조물의 내진안전성을 확보하기 위한 내진대책 수립에 있어 유의해야 할 사항중의 하나는 지반의 구성모델을 어떻게 적용할 것인가 하는 문제이다. 지금까지의 지반의

* 충남대학교 농업과학연구소

* Corresponding author. Tel.: +82-42-821-7865
fax: +82-42-824-0467
E-mail address: dynamicgeotech@yahoo.co.kr

내진평가는 포화된 사질토 지반의 액상화 검토에 주안점을 두어왔으나 대부분의 지반이 사질토 뿐만 아니라 점성토층을 포함하고 있으며, 특히 항만 등 강 하구언 지역이나 간척지역은 해성점토 및 해성점토의 퇴적이 두드러져 이들 지역의 거의 대부분이 다층지반을 형성하고 있다. 따라서 다층지반 상에 축조된 농업용 대형 수리구조물의 내진평가에 있어 각각의 지반재료에 따른 적절한 구성모델을 적용하는 것은 중요한 검토사항일 것이다.

지금까지 점성토에 관한 많은 구성모델이 제안되었고 이들 중 대부분이 탄소성 또는 탄점소성 모델을 근간으로 하고 있으며 점성토의 시간의존성 거동문제 등 중요한 논제가 되어왔다.^{1),2),5),6),8)} 일반적으로 파괴를 포함하는 중·대변형률 영역에서의 지반거동을 모델링 하기 위해서는 소성 모델이 기본으로 되나 시간의존성 거동을 모델링 하기 위해서는 점소성 모델을 필요로 하게 된다.⁷⁾

본 연구는 농업용 대형 수리구조물의 내진대책 수립과 관련한 기초적 연구로서 점성토의 주파수 의존성의 재현을 목적으로 동적 비배수삼축시험을 실시한 후 비선형 이동경화법칙을 기초로 한 점탄-점소성 모델을 이용하여 수치 시뮬레이션을 수행 함으로써 그 모델의 타당성을 검토함과 동시에 대변형률 영역에서의 점성토의 동적 거동특성을 고찰 한다.

II. 점탄-점소성 구성모델의 정식화

본 연구에서는 Fig. 1에서 보여지는 바와 같은 점탄-점소성 모델의 정식화를 수행한다.

1. 정식화에 설정된 가정

본 구성모델의 정식화에 설정된 가정은 다음과 같다.

- (1) 미소변형률 이론의 적용
 - (2) 변형률 충분 가법성의 가정

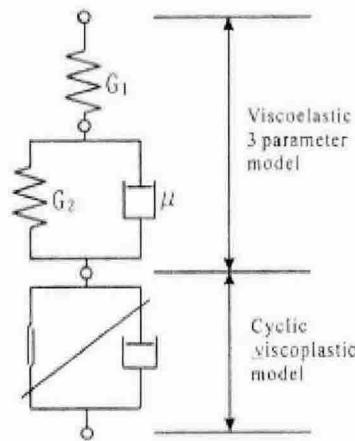


Fig. 1 The structure of a viscoelastic-viscoplastic model

- (3) 비관련 유동법칙의 적용
 - (4) 과압밀 경계면의 도입
 - (5) 비선형 이동경화법칙의 적용

2. 변형률 증분의 각 성분

가. 점탄성 편차변형률 증분 텐서
점성유동법칙으로부터 점성 편차응력 텐서는

Fig. 1에서 제2 전단탄성 성분 G_2 (Voigt spring)과 관련한 Voigt 요소의 편차응력 텐서는 제1 전단탄성 성분 G_1 (Free spring)과 같은 방법으로

Voigt 요소의 점탄성 편차변형률 텐서는 (1)식과 (2)식으로부터

으로 된다.

나. 점소성 편차변형률 증분 텐서

점소성 변형률 증분의 방향을 규정하기 위해 점소성 포텐셜이라 불리는 스칼라 함수를 도입한다. 응력공간상에서 $f_{vp}=0$ 는 연속하는 닫혀진 볼록한 곡면이 된다. 점소성 상태에 있는 응력점 σ_{ij} 에 대하여 점소성 변형률 증분이 $f_{vp}=0$ 의 곡면에 외향 법선벡터로 부여하는 것을 유동법칙이라 하며 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$d\varepsilon_{ij}^{vp} = \langle \phi_{ijkl}(F) \rangle \frac{\partial f_{vp}}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4)$$

점소성 포텐셜함수는

$$\begin{aligned} f_{vp} &= f_{vp}(\sigma_{ij}, \xi_{ij}) = (\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)^{1/2} \\ &+ \tilde{M}^* \ln(\sigma_m / \sigma_{ma}) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $\phi_{ijkl}(F)$ 는 재료함수, 응력비는

$\eta_{ij}^* = s_{ij} / \sigma_m$, 평균유효응력은 $\sigma_m = \frac{1}{3} \sigma_{kk}$ 이다. σ_{ma} 가 주어진 값이라 할 때, (5)식의 우변은 유효응력 텐서 σ_{ij} 와 부하이력을 표시하는 비선형 이동경화 파라메타 χ_{ij}^* 의 함수임을 알 수 있다. 점소성 포텐셜함수를 s_{ij} 로 편미분 하면, $\partial \eta_{ij}^* / \partial s_{ij} = 1 / \sigma_m$ 를 고려하여

$$\frac{\partial \eta_{ij}^*}{\partial s_{ij}} = \frac{1}{\sigma_m} \frac{\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*}{\eta^*} \quad (6)$$

$$\overline{\eta_{(x)}^*} = \{(\eta_{st}^* - \chi_{st}^*)(\eta_{st}^* - \chi_{st}^*)\}^{1/2} \quad (7)$$

이 된다. 식(4)와 식(6)에 의해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$d\varepsilon_{ij}^{vp} = \frac{\langle \phi_{ijkl}(F) \rangle}{\sigma_m} \frac{\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*}{\eta^*} \quad (8)$$

다. 점소성 체적변형률 증분 텐서

(4)식과 같은 형태로 체적변화에 관하여 유동법

칙을 적용하면

$$d\varepsilon_{kk}^{vp} = \langle \phi_{ijkl}(F) \rangle \frac{\partial f_{vp}}{\partial \sigma_{kk}} \quad (9)$$

σ_m 과 s_{ij} 는 σ_{ij} 의 함수이므로 연쇄법칙에 의해

$$\frac{\partial f_{vp}}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\partial f_{vp}}{\partial \sigma_m} \frac{\partial \sigma_m}{\partial \sigma_{ij}} + \frac{\partial f_{vp}}{\partial s_{kl}} \frac{\partial s_{kl}}{\partial \sigma_{ij}} \quad (10)$$

(10)식을 계산하여 정리하면

$$d\varepsilon_{kk}^{vp} = \frac{\langle \phi_{ijkl}(F) \rangle}{\sigma_m} \left\{ \tilde{M}^* - \frac{\eta_{mn}^*(\eta_{mn}^* - \chi_{mn}^*)}{\eta_x^*} \right\} \quad (11)$$

으로 나타낼 수 있다.

3. 점탄-점소성 구성모델

(4)식과 (9)식의 재료함수 $\phi_{ijkl}(F)$ 는 4계 등방 텐서로 확장하여 다음 식과 같이 가정한다.

$$\phi_{ijkl}(F) = C_{ijkl} \phi_{11}(F) \quad (12)$$

재료함수의 형식은 기존의 연구에서 제안된 바와 같이 (13)식으로 표현된다.

$$\frac{\phi_{11}(F)}{\sigma_m} = \exp \left\{ m_0 \{ (\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*) \}^{-\frac{1}{2}} \right\} \quad (13)$$

여기서, m_0 는 점소성 파라메타 그리고 C_{ijkl} 는 4계 등방텐서로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{ijkl} = a \delta_{ij} \delta_{kl} + b (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (14)$$

여기서, a와 b는 재료상수이다. ($C_{01} = 2b$, $C_{02} = 3a + 2b$). 이상의 전개된 식들을 정리하면 비선형 이동경화칙에 기초한 점성토의 점탄-점소성 구성모델의 일반식이 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{ij} &= -\frac{1}{2G_1} \dot{S}_{ij} + \frac{1}{\mu} (S_{ij} - 2G_2 \cdot e_{ij}^{ve}) \\ &+ \frac{x}{3(1+e)} \frac{\sigma_m^*}{\sigma_m} \delta_{ij} + C_{01} \frac{\langle \Phi(F) \rangle}{\sigma_m^*} \frac{(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)}{\eta_x^*} \\ &+ C_{02} \frac{\langle \Phi(F) \rangle}{\sigma_m^*} \left\{ \widetilde{M}^* - \frac{\eta_{mn}^* (\eta_{mn}^* - \chi_{mn}^*)}{\eta_x^*} \right\} \frac{\delta_{ij}}{3} \end{aligned} \quad (15)$$

III. 과압밀 경계면과 비선형 이동경화칙의 적용

1. 과압밀 경계면 f_b

과압밀 경계면은 과압밀영역 ($f_b < 0$)과 정규압밀 영역 ($f_b \geq 0$)과의 경계를 표시하며 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$f_b = \overline{\eta_{(0)}^*} + M_m^* \ln \left\{ \frac{(\sigma_m^* + \sigma_{m2}^*)}{(\sigma_{mb}^* + \sigma_{m2}^*)} \right\} = 0 \quad (16)$$

여기서, $\overline{\eta_{(0)}^*}$ 는 상대응력비로 정의되며

$$\overline{\eta_{(0)}^*} = \left\{ (\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*) (\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*) \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (17)$$

$f_b = 0$ 은 전단과정의 점소성 체적변형률 v^{vp} 의 증감에 의해 변화한다. 응력비 $\eta_{ij(0)}^*$ 의 첨자(0)는 등방압밀 종료시의 값을 표시하며 등방압밀 종료시의 $\eta_{ij(0)}^*$ 의 각 성분은 0으로 $\eta_{ij(0)}^* = (\eta_{ij}^* + \eta_{ij}^*)^{1/2}$ 로 된다. 한편 $\sqrt{2J_2} = \sqrt{S_{ij} \cdot S_{ij}}$, $S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m^* \delta_{ij}$ 로 되고 M_m^* 은 과압밀 경계면 최대치에서의 $\sqrt{2J_2} / \sigma_m^*$ 이며 σ_{m2}^* 는 재료정수이다.

2. 비선형 이동경화 파라메타 x_{ij}^*

비선형 이동경화 파라메타 x_{ij}^* 의 증분은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$dx_{ij}^* = B^* (A^* de_{ij}^{vp} - x_{ij}^* d\gamma^{vp}) \quad (18)$$

여기서, de_{ij}^{vp} 는 점소성 편차변형률 증분텐서이고 $d\gamma^{vp}$ 는 점소성 편차변형률 증분텐서의 제2불변량, 즉

$$d\gamma^{vp} = \sqrt{de_{ij}^{vp} \cdot de_{ij}^{vp}} \quad (19)$$

이다. 여기서 $A^* = M_f^*$ 이고 B^* 는

$$\frac{dB^*}{d\gamma^{vp*}} = -B_t (B^* - B_s) \quad (20)$$

$$B^* = B_s + (B_0 - B_s) \exp(-B_t \gamma^{vp*}) \quad (21)$$

로 나타낸다. B^* 에 대해서는 식(20), 식(21)과 같이 등방경화를 고려한 비선형적인 형태로 부여함으로 해서 전단초기의 재료의 강도와 대변형률 영역에서의 재료의 강도의 차이를 표현하는 것이 가능하다.

3. 파라메타의 영향 분석

Fig. 2~5는 동적 삼축시험의 요소시뮬레이션에서 점소성 정수 B^* 의 영향과 파괴응력비 M_f 의 영향을 나타낸 것이다. 본 수치 시뮬레이션에 사용된 파라메타는 Table 1과 같다. 단, B^* , M_f 에 관계된 파라메타는 Fig. 2~5에 제시된 데이터를 사용하였다.

가. 점소성 정수 B^*

Fig. 2와 3은 점소성 정수의 영향을 나타낸 것으로 점소성 파라메타 B_0 가 각각 15와 35일 때의 요소 시뮬레이션을 표현하고 있다. Fig. 2와 3의 (a)에서 파괴에 이르는 재하횟수는 각각 5회와 12회이다. 따라서 B_0 가 낮을수록 점소성의 영향이 크게되고 응력이력의 영향을 더 받게되어 응력이력곡선이 초기의 재하 1회부터 크게 열려져 있으며,

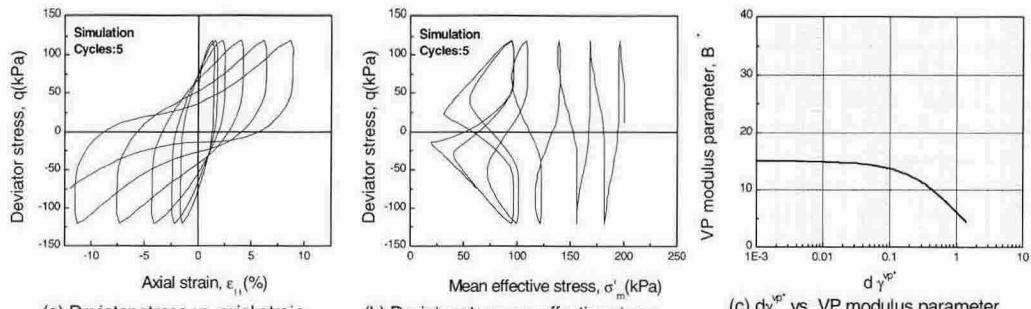


Fig. 2 The effects of viscoplastic modulus parameter B ($B_0=15$, $B_s=1$, $B_t=1$, $M_{fc}=1.2$, $M_{fe}=1.2$)

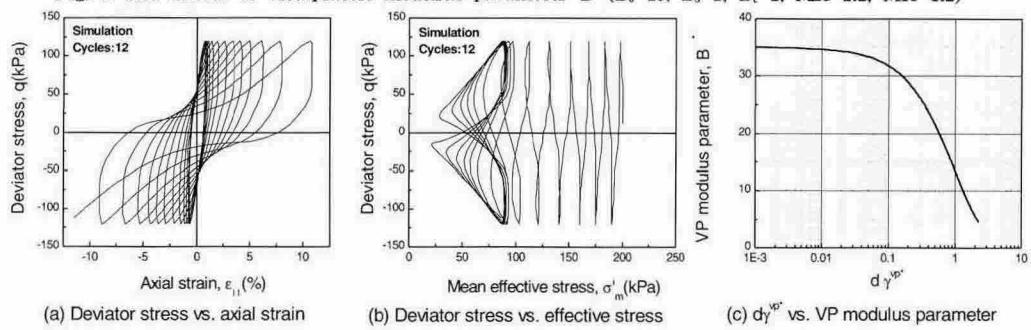


Fig. 3 The effects of viscoplastic modulus parameter B ($B_0=35$, $B_s=1$, $B_t=1$, $M_{fc}=1.2$, $M_{fe}=1.2$)

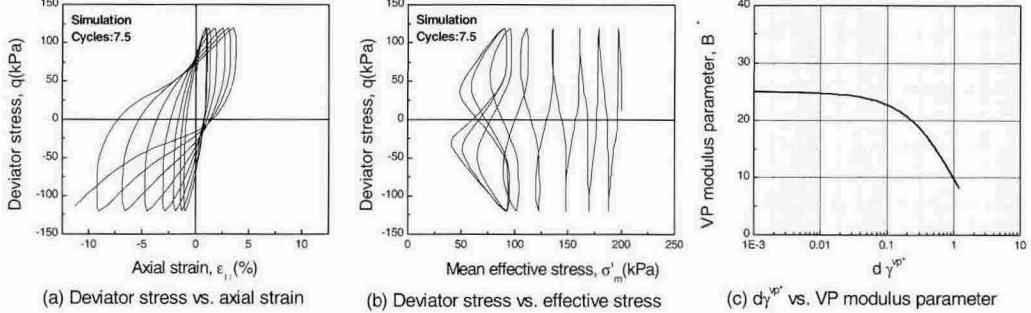


Fig. 4 The effects of stress ratio at failure state Mf ($B_0=25$, $B_s=1$, $B_t=1$, $M_{fc}=1.20$, $M_{fe}=1.10$)

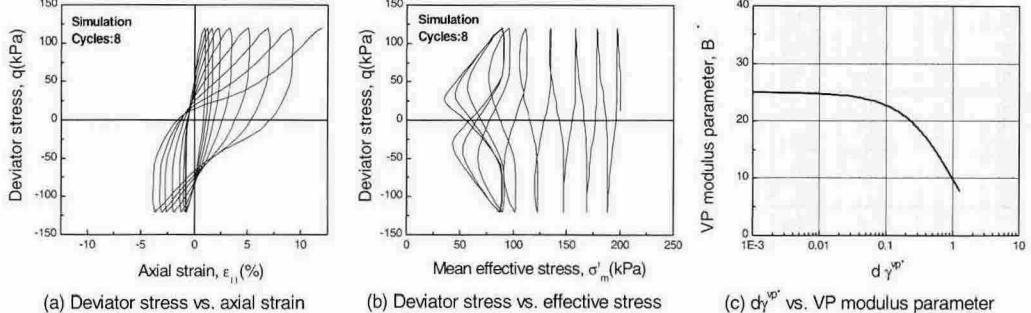


Fig. 5 The effects of stress ratio at failure state Mf ($B_0=25$, $B_s=1$, $B_t=1$, $M_{fc}=1.20$, $M_{fe}=1.30$)

재하횟수가 늘어남에 따라 점소성 특성이 더욱 뚜렷해 짐을 알 수 있다. 즉 B_0 는 점소성의 초기치를 결정하는 파라메타로 생각될 수 있다. Fig. 2~3(b)는 유효응력 경로를 나타낸 것으로 재하횟수에 따른 유효응력의 감소량은 다르나 전단파괴에 이를 때의 과잉공극수압은 거의 비슷함을 알 수 있다. Fig. 2~3(c)는 점소성 정수와 점소성 편차변형률 증분의 제2불변량과의 관계를 그래프로 나타낸 것으로 B_0 는 곡선의 초기치, B_s 는 곡선의 하나 목표치, B_f 는 곡선의 기울기에 관계하는 파라메타이다.

나. 파괴응력비 M_f

Fig. 4~5는 파괴시 응력비의 영향에 대한 수치 시뮬레이션 결과이다. 압축측에 대한 파괴응력비를 1.2로 고정한 상태에서 신장측의 파괴응력비를 각각 1.1과 1.3으로 한 결과 축차응력-축변형률 관계에서 압축측과 신장측의 축변형률의 진행상태가 확연히 다름을 보여주고 있다. 유효응력 경로는 압축측과 신장측의 파괴응력비의 크고 작음에 크게 영향을 받지 않음을 Fig. 4~5(b)를 통해 알 수 있다. Fig. 4~5(c)는 점소성 정수의 거동을 표현한 것으로 Fig. 2~5(c)와 재하횟수와의 관계를 살펴보면 B_0 가 25인 Fig. 4와 5에서는 재하횟수가 각각 7.5회와 8회로서 Fig. 2와 3의 재하횟수 중간정도로 표현하고 있다. 따라서 B_0 는 재하 초기의 점소성 특성을 표현하는 파라메타임을 재확인 할 수 있다. 한편 B_s 와 B_f 는 재하과정, 즉 파괴에 이르기까지의 동적 거동을 표현하는 파라메타이다. Fig. 4~5에서 볼 수 있듯이 점탄-점소성 모델은 적절한 파라메타의 설정을 통해 압축변형율이 인장변형율에 비해 크게 증가하거나 혹은 그 반대인 경우의 모사, 유효응력 경로에서 유효응력의 감소 형태의 다양한 형태의 모사 등 다양한 형태의 점성토의 동적 거동을 표현 가능함을 알 수 있다.

IV. 점성토의 주파수 의존성과 수치 시뮬레이션

점성토의 동적 전단거동에 대한 주파수 의존성의 연구로서는, 먼저 Proctor & Khaffaf (1984)는 주파수가 증대함에 따라 일정의 변형률에 도달하기 위한 동적 재하횟수는 증가되는 것을 증명하였으며, Shibuya (1977) 등은 0.005~0.1Hz의 주파수에는 $\gamma > 10^{-4}$ 에는 전단변형률 속도가 증대함에 따라 이력감쇠율 h 는 연속적으로 감쇠하는 것을 제시하였다. 또한 Hyodo (1994) 등은 0.1~0.1Hz의 주파수를 이용하여 동적 삼축시험을 수행하고 시험종료 후의 공시체 내의 함수비 분포를 계측한 결과에서 주파수 의존성은 공시체 내의 공극수압과 변형률의 불균일성에 일정정도의 원인이 있음을 지적하였다.

본 연구에서 사용된 점토시료는 재성형된 시료로서 액성한계는 62%, 소성지수는 33, 비중은 2.68이었으며, 분말상태의 점토를 0.42 mm체를 통과시켜 중류수를 이용하여 액성한계의 1.7배인 상태에서 잘 혼합이 되도록 한 후, 98 kPa로 예비압밀을 실시하였다.

Fig. 6~8은 재하주파수를 0.1과 0.01, 0.001Hz의 정현파를 사용하여 축변형률 양진폭이 10%에 도달할 때까지 진동재하를 수행한 동적 삼축시험과 수치 시뮬레이션 결과이며 Table 1은 수치 시뮬레이션에 사용된 재료정수를 나타낸다(재료정수 결정 방법은 문헌 5를 참조).

Fig. 6~8에서 주파수 0.1Hz에서는 파괴에 이르는 재하횟수는 12회였으나 0.001Hz에서는 4회에 불과했으며 신장측이 압축측 보다 훨씬 더 많은 변형률을 나타내고 있다. 유효응력경로에서는 세 경우 모두 전단파괴시의 평균유효응력이 60 kPa정도로 일치하고 있다. 주파수가 높을수록 초기 거동에서 탄성적인 형태를 나타내며 반대로 낮을수록 소성적인 특성이 강하고 유효응력의 저하가 두드러짐을 볼 수 있다.

Table 1 Parameters used in the simulation

Parameters	Data	Parameters	Data
Elastic modulus E (MPa)	105	Compression index γ	0.1913
First shear modulus G_1 (MPa)	35	Swelling index k	0.0428
Second shear modulus G_2 (MPa)	11.67	Viscoplastic parameter m^*	21.4
Viscous coefficient μ (kPa · s)	1.0E-07	Initial void ratio $e_{(0)}$	1.18
Viscoplastic parameter C_{01} (1/s)	2.0E-06	Stress ratio M^*_{fc} at compression state	1.2
Viscoplastic parameter C_{02} (1/s)	1.7E-10	Stress ratio M^*_{fe} at extension state	1.13
Viscoplastic modulus parameter, B_0	25	Viscoplastic modulus parameter, B_s & B_t	1

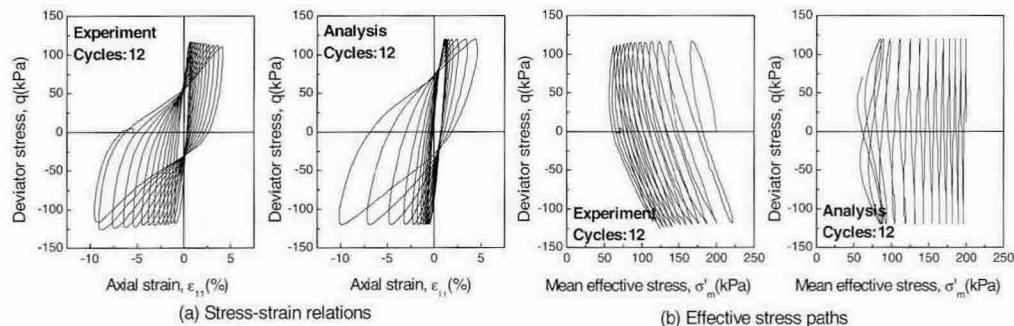


Fig. 6 Strain-stress relations and effective stress paths (0.1Hz)

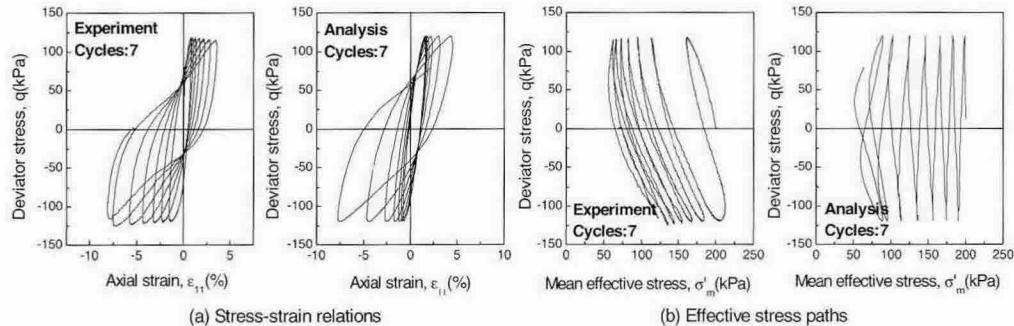


Fig. 7 Strain-stress relations and effective stress paths (0.01Hz)

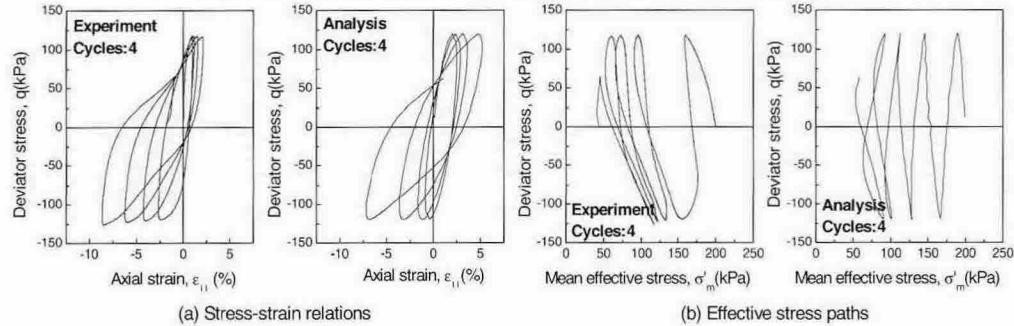


Fig. 8 Strain-stress relations and effective stress paths (0.001Hz)

한편 수치 시뮬레이션의 결과를 살펴보면 근사적으로 실험결과를 잘 묘사하고 있음을 볼 수 있다. 특히 전단파괴에 이르는 양진폭 변형률 10%시의 재하횟수가 실험결과와 일치하고 있으며 각 주파수에 대응하여 응력-변형률 관계도 신장축 및 압축축의 변형률 증가과정이 실험결과와 대략적으로 일치하고 있다. 유효응력 경로에서는 전단파괴시의 평균유효응력이 실험결과와 거의 같은 수치를 나타내고 있다.

이상의 고찰에서 점탄-점소성 모델을 이용한 수치 시뮬레이션은 동적 삼축시험결과의 정도 높은 재현이 가능하며 점성토의 주파수 의존특성을 잘 설명할 수 있음을 알 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 점탄-점소성 모델을 이용한 점성토의 주파수 의존성의 재현을 목적으로 동적 비배수 삼축시험을 실시한 후 비선형 이동경화칙을 기초로 한 점탄-점소성 구조모델을 이용한 수치 시뮬레이션으로 그 모델의 타당성을 검토하였으며 동시에 대변형률 영역에서의 점성토의 거동 특성을 고찰하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 점성토의 동적 거동해석을 위해 비선형 이동경화칙에 기초한 점탄-점소성 모델을 이용하여 수치 시뮬레이션을 실시한 결과 점탄-점소성 모델은 점소성 정수 및 파괴 응력비 파라메터를 이용하여 다양한 형태의 점성토의 동적거동을 표현할 수 있다.

2. 서로 다른 재하주파수 0.1, 0.01, 0.001(Hz)의 정현파를 사용하여 축변형률 양진폭이 10%에 도달할 때까지 동적 삼축시험을 실시한 결과, 서로 다른 재하횟수 및 서로 다른 응력-변형률 거동을 보였으며, 이를 통해 점성토의 주파수 의존성을 확인하였다.

3. 비선형 이동경화칙에 기초한 점탄-점소성 모델을 이용하여 동적 삼축시험에 대한 수치 시뮬레이션 결과 재하횟수 및 응력-변형률 관계, 유효응

력 경로 등 실험결과에 근사적으로 일치함을 보였으며, 제안모델은 점성토의 주파수 의존 특성을 재현 할 수 있음을 확인하였다.

References

1. Adachi T. and F. Oka., 1982. Constitutive Equations for Normally Consolidated Clay Based on Elasto-Viscoplasticity, *Soils and Foundations*, 22(4) : 57-70.
2. Chaboche, J. L., 1977. Viscoplastic Constitutive Equations for the Description of Cyclic and Anisotropic Behavior of Metals, *Bull de l'Acad. Polonaise des Science, Serie Sc. et Tech.*, 25(1) : 33-42.
3. Henkel D. J., 1970. The Role of Wave in Causing Submarine Landslides, *Geotechnique*, 20(1) : 75-80.
4. Hyodo M., M. Sugiyama, Y. Yamamoto, and Y. Kawata, 1994. Evaluation of Pore Pressure and Strain of Normally Consolidated and Overconsolidated Clay Subjected to Cyclic Shear Stress, *Journal of the JSCE*, 487(3) : 79-88.
5. Kim, Y.-S., 2002. Seismic Response Analysis of Layered Ground Based on a Cyclic Viscoelastic-viscoplastic Constitutive Model, *Journal of the KSCE*, 22(1) : 33-44.
6. Oka F., 1982. Elasto-Viscoplastic Constitutive Equation for overconsolidated Clay, *Proc. Int Symp. on Numerical Models Geomechanics*, 147-156. Zurich. : Balkema.
7. Oka, F., 1988. A Cyclic Viscoplastic Constitutive Model for Clay, *Proc. 6th Int. Conf. on numerical Method in Geomechaics*, 293-298. : Balkema.
8. Oka, F., T. Kodaka and Y.-S. Kim., 2001. A Cyclic Viscoelastic-Viscoplastic Model for Clay and Its Application to liquefaction Analysis of Ground, *Proc Int Symp. on Computer*

- Methods and Advances in Geomechanics*, 1028–1031. Arizona. : Balkema.
9. Okayasu T., K. Hashiguchi, S. Tsutsumi, S. Ozaki and M. Ueno 2001. Elastoplastic Finite Element Analysis for Ground Deformation Behavior Subjected to Cyclic Loading, *Journal of the JSAM*, 63(3) : 57– 70. (in Japanese)
10. Proctor, D. C. and Khaffaf, J. H., 1984. Cyclic triaxial tests on remolded clay, *ASCE*, 110(GT10) : 1431–1445.
11. Shibuya, S., Mitachi, T., Fukuda, F. and Hosomi, A., 1997. Modeling of strain-rate dependent deformation of clay at small strains, *Proc. 14Th ICSMFE*, 409–412. : Balkema.
12. Yoon, C.S., 2001. Rehabilitation of Irrigation Facilities, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 43(2) : 10–12. (in Korean)