

# 포화사질토의 동적거동규명을 위한 수정 교란상태개념 Modified Disturbed State Concept for Dynamic Behaviors of Fully Saturated Sands

최재순\*                      김수일\*\*  
Choi, Jae Soon              Kim, Soo Il

---

## ABSTRACT

There are many problems in the prediction of dynamic behaviors of saturated soils because undrained excess pore water pressure builds up and then the strain softening behavior is occurred simultaneously. A few analytical constitutive models based on the effective stress concept have been proposed but most models hardly predict the excess pore water pressure and strain softening behaviors correctly. In this study, the disturbed state concept (DSC) model proposed by Dr. Desai was modified to predict the saturated soil behaviors under the dynamic loads. Also, back-prediction program was developed for verification of modified DSC model. Cyclic triaxial tests were carried out to determine DSC parameters and test result was compared with the result of back-prediction.

Through this research, it is proved that the proposed model based on the modified disturbed state concept can predict the realistic soil dynamic characteristics such as stress degradation and strain softening behavior according to dynamic process of excess pore water pressure.

---

## 1. 서론

내진설계시 지반에 대한 안정성 확보는 액상화 발생여부에 대한 검토를 통하게 되며 지반-구조물의 안정성 확보는 동적 수치해석을 통하는 것이 일반적이다. 액상화 검토는 구조물의 건설여부와 관계없이 지반응답해석을 이용하여 간편해석하여 내진보강여부를 설계에 반영하게 되며 지반-구조물의 안정성 검토는 액상화 검토 및 대책시공후 지반과 그 위에 건설될 구조물을 모델링하여 동적 수치해석을 수행하게 된다. 이때, 교량구조와 같이 하부구조가 상부구조보다 상대적으로 작은 부분을 차지하는 경우를 제외하고는 1차적으로 지진하중의 영향을 받는 지반의 동적변화가

---

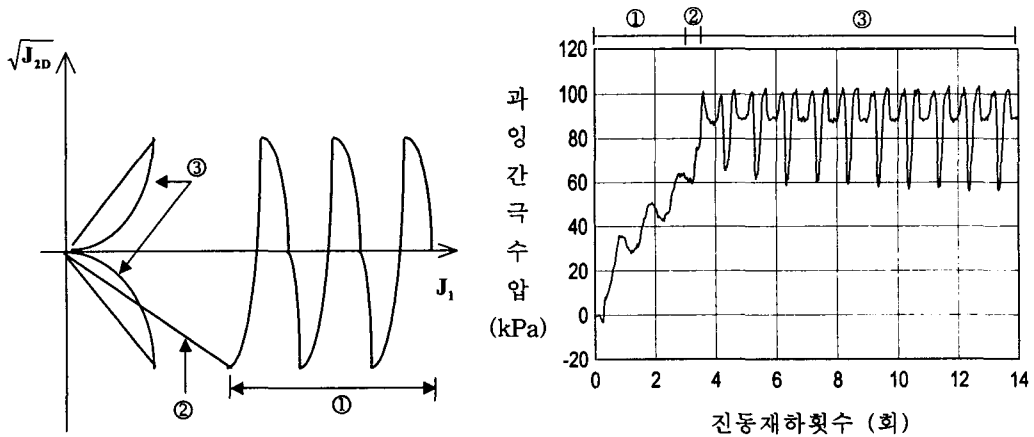
\* 연세대학교 건설공학연구소, 전임연구원  
\*\* 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부, 교수

구조물에 큰 영향을 미치게 되므로 이에 대한 거동예측이 무엇보다도 중요하다. 특히, 토립자 내부의 간극수 거동이 큰 변화를 일으키는 포화 사질토 및 매립토 지반은 과잉간극수압의 영향을 고려할 수 있는 유효응력개념의 구성모델로 표현해야 한다. 그러나, 선진지진연구국가인 미국 및 일본에서도 이에 대한 연구가 큰 진전이 없을 정도로 흙과 간극수의 동적복합거동은 모델링하기가 매우 어렵다. 1970년대 후반, 최초로 간극수압을 배수상태의 체적변형과 관련시킨 구성모델(Finn 등, 1977)이 제안되었으나, 간극수압의 누적 및 이에 따른 액상화 등을 정확하게 모사하고 있지 못하며 (최재순 등, 2003) 90년대부터 일본 방재연구소의 Iai (1992) 및 미국 아리조나대학의 Desai (2001) 등이 진동하중하의 흙의 소성변형과 간극수압을 상호관련시킨 구성모델을 제안하고 이에 기초한 범용 수치해석 프로그램의 개발을 위해 지속적인 연구를 수행하고 있다. 특히, Desai가 제안한 구성모델인 교란상태개념(Disturbed State Concept: DSC)은 기준상태와 실제 진동하중 작용시 응력과 소성변형을 통해 토립자의 동적연화현상을 표현하고 있는데, 현재까지의 DSC 모델은 응력-변형을 상관관계에 있어서 연화현상의 표현에만 중점을 두어 말뚝의 항타, 도로포장구조체, 다짐효과 등의 지반동역학적 문제에는 여러 차례 실험적 검증이 수행된 반면, 액상화 현상과 같이 과잉간극수압이 급작하게 변화하는 거동에 대해서는 검증연구가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 과잉간극수압의 발생, 누적, 그리고 초기 액상화 발생과 같은 일련의 동하중하에 거동변화를 나타내는 지반을 정확하게 표현할 수 있는 구성모델 개발을 위해 기존의 교란상태개념을 수정완화하고자 하고 실내진동시험의 수행과 이를 입력한 역해석기법을 통해 제안된 구성모델을 검증하고자 한다.

## 2. 수정 교란상태개념(DSC) 모델

### 2.1 진동하중하의 지반거동변화메카니즘

일반적인 실내진동시험에 있어서 등방압밀하중하의 토립자 내부의 응력변화 및 과잉간극수압의 동적 거동변화를 살펴보면 다음과 같으며 그림에 나타난 바와 같이 거동변화를 3부분(①점진적 응력감소, ②급진적 응력감소, ③액상화 후 파괴거동)으로 구분할 수 있다.



(a) 유효응력경로

(b) 과잉간극수압

그림 1 진동하중을 받는 등방구속하의 포화사질토의 거동

기존의 교란상태개념의 개념은 그림 2에 나타난 바와 같이 응력-변형률 상관관계로부터 응력감소의 연화현상만을 정의함에 따라 그림 1의 ②부분(급진적 응력감소)을 간과하여 ①부분(점진적 응력감소)에 포함하게 되어 있어 초기 액상화 현상과 같이 과잉간극수압이 급증하는 현상을 고려하기 힘들다. 또한, 기존의 교란상태개념은 기준상태인 상대적으로 교란되지 않은(Relative Intact) 상태와 완전파괴(Fully Adjusted)상태에 대해 소성경화모델 HiSS  $\delta_0$  모델(Desai, 2001)과 한계상태이론을 각각 적용하고 FA상태 매개변수 또한 실제적인 파괴에 도달하지 못한 정적시험으로부터 산정하였다. 그러나, 실제 실내진동시험에서는 그림 1의 ③부분과 같이 액상화 후 파괴 또는 극한상태를 나타내게 되므로 이를 통해 완전파괴상태를 정의하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 앞서 언급한 기존의 DSC 모델의 미흡한 점을 수정보완하여 보다 정확하게 포화사질토의 동적거동을 예측할 수 있도록 하였다. 수정 DSC 모델은 그림 1에서 동적하중하의 완전 파괴상태가 선형변화거동을 보이는 점을 고려하여 Drucker-Prager 모델을 적용하였으며 정적파괴시의 상태변환선이 점진적 응력감소에서 급진적 응력감소로 변환하는 시점을 표현가능하다는 연구사례(최재순 등, 2003)에 기초하여 이를 고려하도록 하였으며 DSC모델에서 진동하중하의 동적거동을 정의하는 교란도함수도 그림 3과 같이 3부분으로 구분하여 적용하였다. 이때, 그림 1과 그림 3으로부터 급진적 응력감소와 함께 큰 소성변형이 발생하는 ②부분에서 초기 액상화가 발생하는 것으로 하였다. 즉, 그림 3의 응력경로에서 나타난 바와 같이 급진적 응력감소의 상태변화를 나타내는 시점부터 실제적인 초기 액상화가 발생하는 것으로 정의하였다.

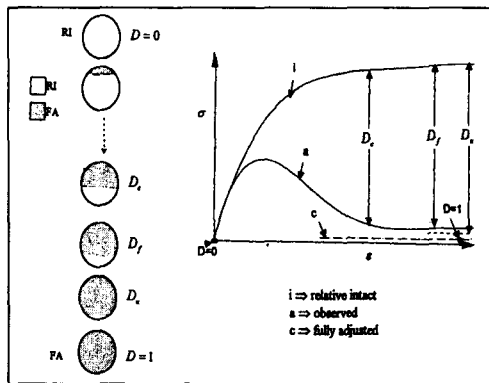


그림 2. 교란상태개념 (Desai, 2001)

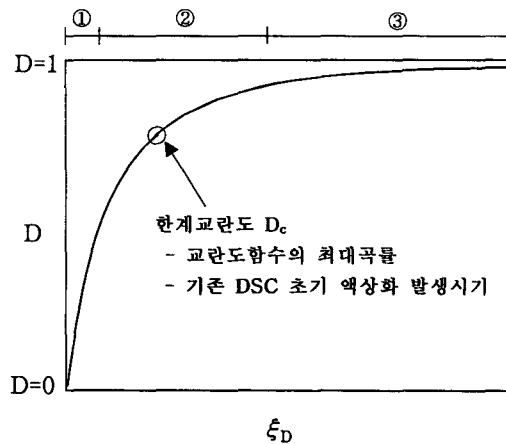


그림 3. 포화사질토의 교란도함수 (Desai, 2001)

그림 2의 기존 교란상태개념에서 유효응력을 통해 진동하중 재하에 따른 재료내부의 교란도 변화를 나타낸 것과 달리, 수정 교란상태개념 모델에서는 교란도를 식 (1)과 같이 정의하였으며 진동하중하의 재료거동을 표현하는 교란도함수는 식 (2)에 나타난 바와 같이 기존 교란상태개념의 교란도함수와 동일하게 정의하였다.

$$D = \frac{\frac{\bar{\sigma}^{(i)} - \bar{\sigma}^{(a)}}{\bar{\sigma}^{(i)} - \bar{\sigma}^{(c)}}}{\bar{\sigma}^{(i)} - \bar{\sigma}^{(c)}} = \frac{J_1^{(i)} - J_1^{(a)}}{J_1^{(i)} - J_1^{(c)}} \quad (1)$$

여기서,  $J_1$ 은 유효응력텐서의 1차 불변량이며, 윗첨자  $i$ 와  $c$ 는 RI상태와 FA상태를 나타내고  $a$ 는 관측상태(Observed State)를 나타낸다.

$$D = D_u [1 - e^{(-A \xi_D)}] \quad (2)$$

여기서, A, Z는 재료매개변수,  $D_u$ 는 한계교란도로 포화사질토의 경우, 0.99의 값을 적용하며  $\xi_D$ 는 축차 소성변형률 상각궤도(deviatoric plastic strain trajectory)로 식 (3)과 같이 정의된다.

$$d\xi_D = \sqrt{dE_{ij}^p dE_{ij}^p} \quad (3)$$

여기서,  $dE_{ij}^p$ 는 소성변형률(deviatoric plastic strain)증분으로 총소성변형에서 소성체적변형을 감안 값으로 방향성을 보유하게 되지만, 축차 소성변형률 상각궤도는 식 (3)에 나타난 바와 같이 항상 (+)의 값을 갖게 된다.

### 1) 상대적으로 교란되지 않은 상태 (RI 상태)

본 연구에서는 그림 2의 RI 상태를 초기 압축 또는 인장하중 재하후 재하중이 작용되지 않은 상태로 간주하고 이때, 일반적으로 소성경화현상이 지배적인 점을 고려하여 등방경화(Isotropic hardening)에 기초한 단일 항복면(Hierarchical Single Yield Surface; HiSS)  $\delta_0$  모델(Desai et al., 1988)을 적용하였으며 이 모델의 항복면 함수(Yield Function)는 다음과 같다.

$$F = \frac{J_{2D}}{p_a} - \left[ -\alpha \left( \frac{J_1}{p_a} \right)^n + \gamma_u \left( \frac{J_1}{p_a} \right)^2 \right] (1 - \beta S_r)^{\bar{m}} \quad (4)$$

여기서,  $J_{2D}$ 는 전단응력텐서의 2차 불변량,  $p_a$ 는 대기압,  $\beta$ 는  $\pi$ 평면 상의 형상을 결정하는 매개변수,  $\alpha$ 는 운동경화를 표현하는 경화함수로 지반재료 매개변수  $h_1$ 과  $h_2$ 를 통해 정의( $\alpha = h_1 / (\xi_d)^{h_2}$ )되며,  $n$ 은 전단하중 재하시 재료내부의 체적팽창(dilatancy)후 체적압축(compression)으로 변화하는 상태변화선(phase change line)을 규명하기 위한 매개변수,  $\gamma_u$ 는 지반재료의 파괴상태를 기준 짓는 매개변수, 그리고,  $S_r$ 은 응력비(stress ratio)로 명칭된 매개변수로 주응력 방향의 각(Lade's angle)을 정의하며 일반적으로 1축 압축인 경우에는 1의 값을, 1축 인장의 경우에는 -1의 값을 갖는다. 또한,  $\bar{m}$ 은 파괴기준에 관한 재료의 매개변수로 지반재료에 대해서는 -0.5을 적용한다.

### 2) 완전파괴상태 (FA 상태)

반복진동하중을 받아 액상화된 토체는 그림 1 (a)에 나타난 바와 같이 일정한 응력경로를 계속적으로 반복하게 된다. 기존의 교란상태개념에서는 이와같이 진동하중으로 액상화된 토체의 거동을 FA상태로 규명하지 않고, 정적하중하의 토체거동을 FA상태로 규명하는 해석적 오류를 탈피하여 본 연구에서는 액상화 후 토체의 거동을 일정한 경향을 띤 파괴거동으로 간주하고 이를 효과적으로 정의할 수 있도록 식 (5)와 같은 파괴기준을 보유한 Drucker-Prager 모델을 교란상태개념 모델에 적용하였다.

$$F = J_{2D} - mJ_1 + k \quad (5)$$

여기서, m와 k는 그림 1의 액상화 후 파괴거동(㉓부분)을 선형화했을 때 기울기와 y절편이다.

### 3) 수정 교란상태개념에 기초한 구성방정식

구성방정식은 응력-변형률 상관관계를 구성텐서로 구성하는 것으로 수치해석으로의 이용을 위해 응력 증분과 변형률 증분에 대한 상관관계를 수식화하여 구성방정식으로 나타내는 것이 일반

적이다. 응력-변형을 상관관계에 대한 수정 교란상태개념의 구성방정식은 식 (1)을 이용하여 식 (6)과 같이 정의되었으며 수치해석에 이용될 각 층분에 대한 구성관계는 식 (7)과 같다.

$$\bar{\sigma}^{(a)} = (1-D) \bar{\sigma}^{(i)} + D \bar{\sigma}^{(c)} \quad (6)$$

$$d\sigma_{ij}^a = (1-D)d\sigma_{ij}^i + Dd\sigma_{ij}^c + dD(\sigma_{ij}^c - \sigma_{ij}^i) \quad (7)$$

식 (7)에서  $d\sigma_{ij}^i$ 와  $d\sigma_{ij}^c$ 는 HiSS 모델과 Drucker-Prager 모델의 구성관계를 통해 정의된다.

## 2.2 수정 교란상태개념 모델의 입력매개변수 및 실내시험

기존 교란상태개념 모델에서는 총 14개의 매개변수 중 실제로 미지의 매개변수는 11개였으나 수정 교란상태개념 모델에서의 매개변수는 총 13개의 매개변수로 줄었으며 특히 미지의 매개변수는 8개로 대폭 줄었다. 이는 실제로 HiSS 모델에서 극한상태 매개변수  $\gamma_u$ 가 Drucker-Prager 모델의 파괴선 기울기를 나타내는 매개변수  $m$ 과 같은 의미를 갖기 때문이며 사질토의 경우, 일반적으로 점착력을 거의 보유하고 있지 않은 점을 고려하여 매개변수  $k$ 의 값을 0으로 간주하였기 때문이다. 표 1은 수정 교란상태개념 모델의 매개변수에 대해 요약정리한 것이다.

표 1. 수정 교란상태개념 모델의 매개변수

구 분	세부구분	매개변수	세 부 내 용	실내시험	
Relative Intact State	탄성매개변수	E	Young 계수	의사정적전단시험	
		$\nu$	포아송비	등방압축시험	
	소성매개변수	$\beta (=0)$	극한상태 매개변수		진동삼축시험
		$\gamma_u$			
		$\bar{m}$	-0.5	-	
		$n$	상태변화(phase change) 매개변수	의사정적전단시험	
		$h_1$	$\alpha = \frac{h_1}{\xi^{h_2}}$	의사정적전단시험	
$h_2$					
Fully Adjusted State	Drucker-Prager 매개변수	$m (= \sqrt{\gamma_u})$	극한상태 매개변수 $\gamma_u$ 를 이용하여 산정	진동삼축시험	
		$k (=0)$			
Disturbed State	교란도 함수 매개변수	$D_u (=0.99)$	$D = D_u [1 - \text{Exp}(-A \xi_D^Z)]$	진동삼축시험	
		Z			
		A			

본 연구에서는 표 1의 매개변수 산정을 위한 실내시험을 수행하였다. 시험시 상대밀도 40 %와 60 %로 포화사질토를 재성형하고 초기 유효구속압은 100 kPa과 150 kPa으로 하였으며 시험시 축차응력 재하조건은 그림 4와 같이 통일하였다.

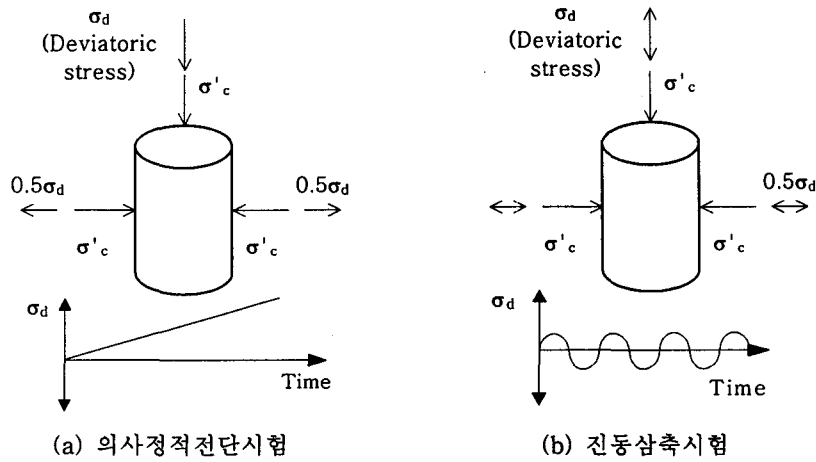


그림 4 실내시험시 축차응력재하조건

### 2.3 역해석 및 비교분석

수정 교란상태개념 모델의 타당성 평가를 위해 그림 5와 같이 역해석 프로그램을 개발하고 앞서 실내시험을 통해 표 2와 같이 산정된 매개변수를 입력하여 역해석을 수행하였다.

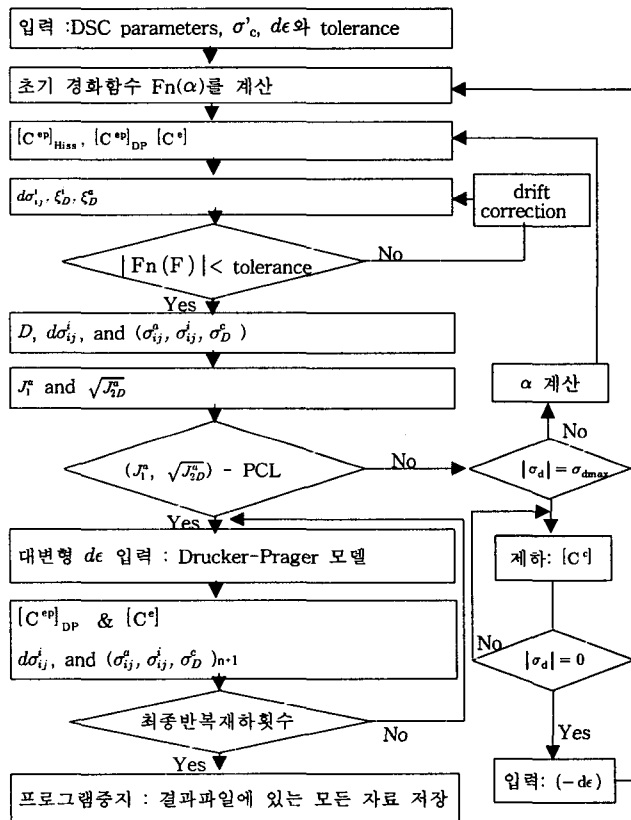
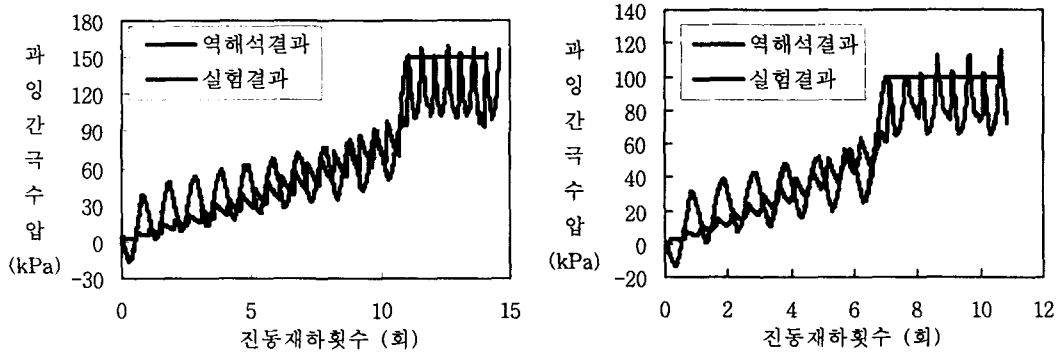


그림 5. 역해석 알고리즘

표 2. 입력매개변수

매개변수	$D_r=40\%$	$D_r=60\%$
E	175000 kPa	210000 kPa
$\nu$	0.38	0.38
$\beta$	0	0
$\gamma_u$	0.203	0.250
$\bar{m}$	0.5	0.5
n	2.795	2.667
$h_1$	0.0588	0.1515
$h_2$	0.0163	0.0922
m ( $= \sqrt{\gamma_u}$ )	0.45	0.5
k	0	0
$D_u$	0.99	0.99
Z	1.107	1.771
A	0.671	0.882

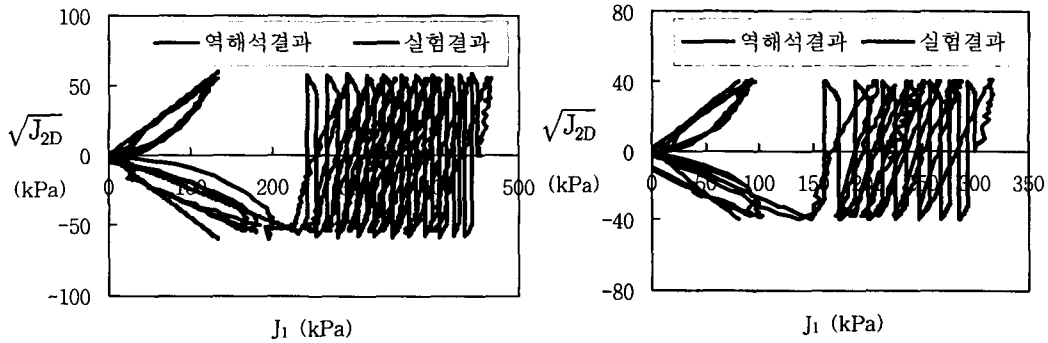
역해석을 통해 과잉간극수압의 변화, 유효응력경로, 그리고 응력-변형률 이력에 대한 결과를 획득하고 이를 진동삼축시험 결과와 비교하였으며 이를 그림 6 ~ 그림 8에 나타내었다. 그림에 나타난 결과 중 과잉간극수압의 변화와 유효응력경로에 대한 역해석은 점진적 응력감소, 급진적 응력감소, 그리고 액상화후 거동으로 구분되는 동적거동을 신뢰성 높게 예측하고 있는 것으로 나타난 반면, 응력-변형률 이력은 큰 차이를 보이고 있는데 이는 미소변형률에 적합한 구성모델을 액상화후 파괴거동과 같은 대변형 예측부분에 적용함에 따라 실제보다 과소하게 변형을 산정하는데 기인한 것으로 향후 이에 대한 수정보완이 필요할 것으로 판단된다.



(a) 상대밀도 40% 유효구속압 150 kPa

(b) 상대밀도 60% 유효구속압 100 kPa

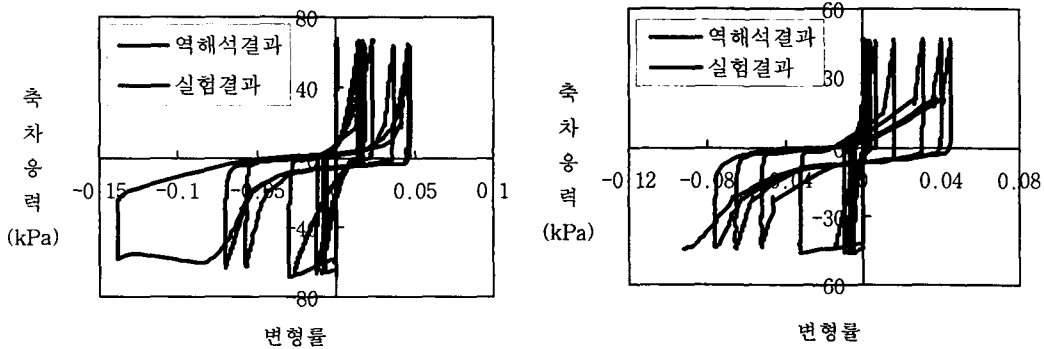
그림 6. 역해석결과 비교분석 (과잉간극수압)



(a) 상대밀도 40% 유효구속압 150 kPa

(b) 상대밀도 60% 유효구속압 100 kPa

그림 7. 역해석결과 비교분석 (유효응력경로)



(a) 상대밀도 40% 유효구속압 150 kPa

(b) 상대밀도 60% 유효구속압 100 kPa

그림 8. 역해석결과 비교분석 (응력-변형률 이력)

### 3. 결 론

본 연구에서는 진동하중을 받는 포화 사질토의 동적거동을 보다 정확하게 규명할 수 있도록 기존의 교란상태개념 모델을 수정보완하였다. 기존의 교란상태개념 모델에서 간과한 유효응력경로가 동적변화를 실제적으로 모사할 수 있도록 하였으며 이를 위해 진동하중을 받는 포화사질토의 거동을 점진적 응력감소, 급진적 응력감소와 초기 액상화, 그리고 액상화후 파괴거동의 3단계로 구분하였다. 또한, 진동하중을 받는 포화사질토의 완전파괴상태는 액상화 후 거동이라는 점을 고려하여 완전파괴(FA)상태 매개변수를 실내진동시험 결과로부터 산정하였으며 상대적으로 손상받지 않은(RI) 상태 매개변수 중 극한상태 매개변수를 이와 관련시켜 매개변수를 간략화하였다. 제안된 모델의 타당성 검토를 위해 진동삼축시험에 대한 역해석 프로그램을 개발하고 실험을 통해 산정된 매개변수를 입력하여 역해석을 수행하였으며 이 결과를 진동시험결과와 비교하였다.

본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 진동하중을 받는 포화사질토의 동적거동단계를 유효응력경로에 따라 3단계로 구분하는 것이 매우 합리적이며 이를 통해 초기 액상화 발생메카니즘이 정확하게 규명할 수 있음을 알 수 있었다. 수정 교란상태개념 구성방정식에 기초하여 진동삼축시험을 역해석한 결과, 유효응력경로 및 과잉간극수압 등 응력변화에 대한 동적거동예측은 매우 우수한 것으로 나타났다.
- 2) 제안된 수정 교란상태개념모델이 액상화 후 파괴거동시 응력-변형을 상관관계에 대한 규명은 신뢰성이 일정수준에 미치지 못하지만, 미소변형을 수준에서의 동적거동들을 매우 정확하게 예측함으로써 액상화를 포함한 내진해석을 포함한 여러 지반동역학적 문제해결에 유효적절하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원에 의한 것입니다.

### 참고문헌

1. 최재순, "교란상태개념에 기초한 포화사질토의 비배수 동적거동 예측기법 개발", 연세대학교, 2002.
2. 최재순, 박근보, 서경범, 김수일, "포화사질토의 동적거동규명을 위한 교란상태개념의 이용", 2003년도 춘계 한국지진공학회 학술발표회, 2003, pp.140-147.
3. Choi, J. S., Park, I. J. and Kim, S. I., "Numerical Analysis of Saturated Sand under Dynamic Loads", Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Paper No.9-17, 2001.
4. Desai, C. S., "Mechanics of Materials and Interfaces, CRC Press", 2001.
5. Finn, W. D. L., Lee, K. W. and Martin, G. R., "An Effective Stress Model for Liquefaction". Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.103, No.GT6, 1977, pp.517-533.
6. Iai, S., and Matsunaga, Y. and Kaneoka, T., "Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility", Soil and Foundation, JSSMFE, Vol.32, No.2, 1992, pp.1-15.