

포화사질토의 동적거동규명을 위한 교란상태개념의 이용
Applications of Disturbed State Concept
for the dynamic behaviors of fully saturated soils

최재순* 박근보** 서경범*** 김수일****
Choi, Jae Soon Park Keun Bo Seo Kyung Bum Kim, Soo Il

ABSTRACT

There are many problems in the prediction of soil dynamic behaviors because undrained excess pore water pressure builds up and then the strain softening behavior is occurred simultaneously. A few analytical methods based on the dynamic constitutive model have been proposed but the model hardly predict the excess pore water pressure directly. In this study, the verification on the disturbed state concept (DSC) model, proposed by Dr. Desai was performed. Some laboratory tests such as conventional triaxial tests and cyclic triaxial tests were carried out to determine DSC parameters and then disturbance values are determined by the proposed equation.

Through this verification, it is proved that the disturbed state concept can express reliably the soil dynamic characteristics such as excess pore water pressure and strain softening behavior. It is also found that the critical disturbance which is determined at the minimum curvature of disturbance function can be a the specific index.

1. 서론

1997년 국내 내진연구가 본격적으로 시작된 이래로, 설계시공시 지반동역학에 관한 큰 관심이 집중되고 있으며 특히, 액상화 연구는 미국 및 일본 등 선진지진연구국가에서도 계속적으로 연구되어 오고 있다. 일반적인 구조물 중심의 정적설계와는 달리, 액상화 현상은 급작한 진동하중으로 인해 발생하는 과잉간극수압이 주원인이 되어 토체의 저항력을 상실하는 것으로 토립자와 간

* 연세대학교 사회환경시스템공학부, 박사후연구원
** 연세대학교 사회환경시스템공학부, 박사과정
*** 연세대학교 사회환경시스템공학부, 박사과정
**** 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부, 교수

극수의 복합거동을 표현해야 하기 때문에 이에 대한 모사가 어려운 것으로 알려져 있다. 몇몇 연구자들이 과잉간극수압으로 발생하는 토립자의 연화현상(strain softening)을 모사하기 위한 수치 모델을 제안한 바 있으나, 대부분의 경우, 변형특성 중 체적변형과 과잉간극수압의 실험적 상관관계를 통해 제안된 것으로 응력으로 표현되는 비배수조건에 과잉간극수압을 정확하게 모사하고 있다고 보기 어렵다. 본 연구에서는 기준상태와 실제 진동하중 작용시 응력비교를 통해 토립자의 동적연화현상을 규명한 교란상태개념(Disturbed State Concept ; DSC)을 기초로 하여 응력경로를 통해 관련파라미터를 산정하고 이를 통한 비배수 과잉간극수압의 동적거동변화를 분석함으로써 교란상태개념의 적용성을 검토하고자 한다.

2. 액상화 이론

2.1 액상화 기본이론

등방압밀하중하의 진동하중을 받는 토립자를 예를 들어 유효응력경로를 통해서 액상화를 포함한 상태변화를 살펴보면, 그림 1과 같이 설명할 수 있다. 최초 등방압밀을 받는 토립자는 그림에서 0의 상태로 볼 수 있으며, 1과 같이 초기 진동하중(압축하중 또는 인장하중)이 재하되는 경우에는 소성경화(plastic hardening)만을 고려하는 것이 일반적이다. 이후, 진동의 4가지 상태인 압축-제하-인장-제하가 반복적으로 계속되면 비배수조건에 과잉간극수압으로 인해 2의 상태와 같이 유효응력이 감소되며 3의 상태변환선(phase change line)에 닿게 되면 급작스럽게 파괴되는 현상(액상화 현상)을 나타내어 이후에는 극한상태선(파괴상태선)을 따라 움직이게 된다. 그러므로 진동하중이 크게 되면, 많지 않은 진동에도 지반의 유효응력경로가 상태변환선에 일찍 닿게 되어 빨리 파괴에 이르게 될 수 있으며 비등방압밀을 받는 지반, 예를 들면, 사면의 양측단과 같이 정적전단하중을 받고 있는 경우에도 상태변환선과 닿은 경로가 짧은 관계로 파괴에 이르기 쉽다.

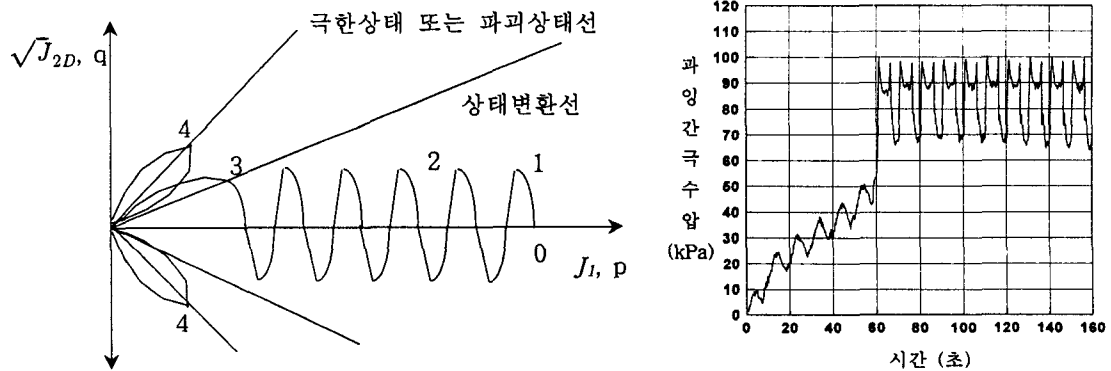


그림 1. 진동하중을 받는 토립자의 일반적인 유효응력경로 및 과잉간극수압

그림 1의 진동하중을 받는 비배수 과잉간극수압의 거동은 누적되어 나타나는 것이 특징이며 비배수 과잉간극수압이 초기유효구속압과 같아지는 시점을 초기 액상화 발생으로 간주한다.

2.2 교란상태개념

재료가 외부로부터 하중을 받게 되면 재료내부의 미세구조는 그로 인해 변화를 일으키게 된다.

교란상태개념(Desai, 1992)은 하중을 받는 재료의 거동을 이러한 미세구조의 변화에 대해 표현할 수 있다는 가정에 기초하고 있다. 교란상태개념에서는 하중을 받는 재료의 거동을 정의하기 위해 두 개의 기준상태를 도입하였다. 첫 번째는 RI(relative intact)상태로 재료가 외력을 받기 전의 초기 상태에는 미세한 결함들을 포함하더라도 재료가 상대적으로 손상되지 않은 상태로 볼 수 있다. 두 번째는 FA(fully adjusted)상태로 재료의 초기상태에 미세하게 존재했던 손상된 부분이 외력에 의해 점차로 확산되어 재료가 전단저항력을 완전히 잃은 상태, 즉 완전파괴상태를 말한다. 그리고, 진동하중을 받는 재료가 파괴에 이르기까지는 RI상태와 FA상태의 사이에 존재하게 된다. 이와 같은 재료의 상태변화를 응력-변형을 상관관계로 표현하면 그림 2와 같다.

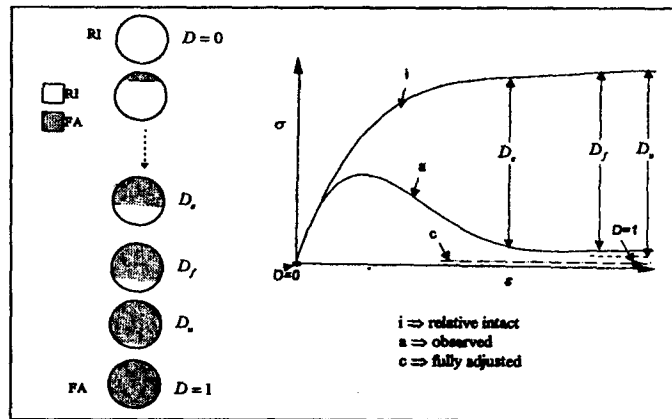


그림 2. 응력-변형을 관계도 상의 교란도 (Desai, 2001)

그림 2에 나타난 바와 같이 재료가 하중을 받는 초기에는 RI상태의 거동과 유사한 거동을 보인다. 그러나 지속적인 하중으로 인해 재료의 미세구조가 자기조정(self-adjustment)과정을 거치면서 재료는 점차 FA상태에 도달하게 된다. 재료의 완전교란정도에 대한 교란정도를 나타내는 교란도, D는 두 개의 기준상태에 대한 응력수준의 차이를 통해 정의한다. 다시 말하면, 교란상태개념은 두 가지 상태기준을 통해서 진동하중하의 재료상태를 교란도로 표현하는 것으로 상대적으로 손상되지 않은 RI상태는 일반적으로 재료의 거동변화를 예측하는 탄성 모델 또는 탄소성 모델 등을 통해 나타낼 수 있으며, FA상태는 파괴상태를 규명할 수 있는 응력상실의 완전파괴(fully failure), 한계간극비(critical void ratio), 한계상태개념(critical state concept)의 이용이 가능하다. 교란상태개념에서 임의 하중을 받는 재료는 RI상태에 있는 부분과 FA상태에 있는 부분이 혼합되어 있다고 정의한다. 그림 2에서 보면, 초기상태시 재료는 전혀 교란된 부분이 존재하지 않는 RI상태라고 가정하면, 이때 교란도는 0이다. 재료가 완전히 교란된 상태를 FA상태라고 보면, 교란도는 1이 되나 실제로 대부분의 재료는 교란도가 1에 도달하기 전에 파괴에 이르므로 실제의 경우 FA상태의 교란도는 1보다 작은 값을 가진다. 그림 2의 응력-변형을 관계에서 변형률이 동일하다는 조건아래 교란도를 정의할 경우, 근사적으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, $\bar{\sigma}'^{(i)}$, $\bar{\sigma}'^{(c)}$ 그리고 $\bar{\sigma}'^{(a)}$ 는 각각 초기(initial)상태인 RI상태, 한계(critical)상태인 FA상태,

그리고 시험을 통해 얻은 재료의 평균(average) 유효응력이며 $\bar{\tau}^{(i)}$, $\bar{\tau}^{(c)}$, 그리고 $\bar{\tau}^{(a)}$ 는 각 상태에서의 평균 전단응력이다. Amaleh와 Desai(1990)는 교란도를 소성변형의 누적에 의해 발생됨에 기초하여 상관관계를 식 (2)와 같이 나타내었다.

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

여기서, A, Z는 재료매개변수, D_u 는 한계교란도로 포화사질토의 경우, 0.99의 값을 갖는다. ξ_D 는 축차 소성변형률 상각궤도(deviatoric plastic strain trajectory)로 다음과 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 값이며 식 (3)에서 축차 소성변형률 상각궤도는 압축 및 인장에 관계없이 항상 (+)의 값을 갖게 된다. 사질토 및 점토의 일반적인 교란도함수의 형태는 그림 3에 나타낸 바와 같다.

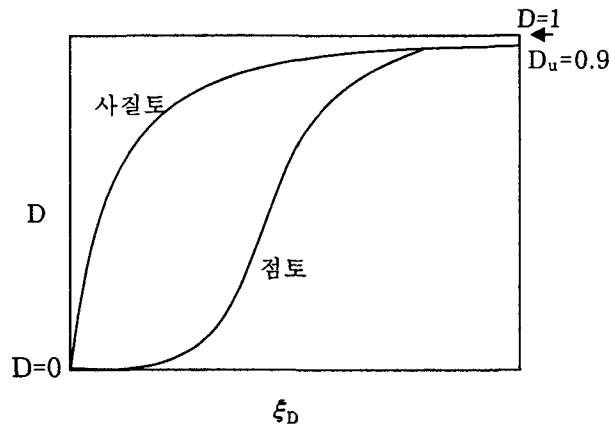


그림 3. 교란도 함수의 도식적인 형태 (Desai, 2000)

교란상태개념의 응력부분의 경우, 교란도의 변화를 통해 그림 3과 같은 소성연화현상을 나타내고 있으며 실제적인 거동을 모사하는 교란도 함수의 경우, 누적특성의 축차 소성변형률 상각궤도를 이용함으로써 응력-변형 상관관계가 함께 고려될 수 있다.

3. 실내시험

본 연구에서는 교란상태개념의 RI상태와 교란도함수를 포함한 진동하중 재하시의 거동변화분석을 목적으로 정적삼축압축시험과 진동삼축시험을 수행하였다. 표 1은 시험시료인 주문진표준사의 기본물성과 시험시 제반조건을 설명하고 있고 그림 4와 그림 5는 정적삼축압축시험결과이다.

표 1. 시험대상시료의 기본물성과 실내시험 제반조건

주문진 표준사 기본물성		실내시험조건	
곡률계수, C_c	1.23	초기유효구속압 (kPa)	60, 100 (진동삼축)
균등계수, C_u	1.17	상대밀도(%)	40, 60
최대전조단위중량, V_{dmax}	1.60 kg/cm ³	진동수(Hz)	1
최소전조단위중량, V_{dmin}	1.39 kg/cm ³	진동하중용력비	0.2(40%), 0.25(60%)
시료 포화 방법	under compaction	재하하중 및 제어방식	정현파 / 용력제어

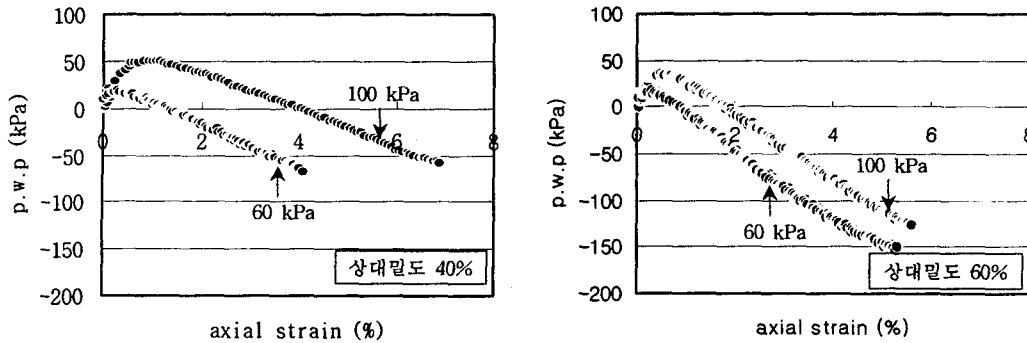


그림 4. 정적삼축압축시험결과 (축방향변형률-과잉간극수압)

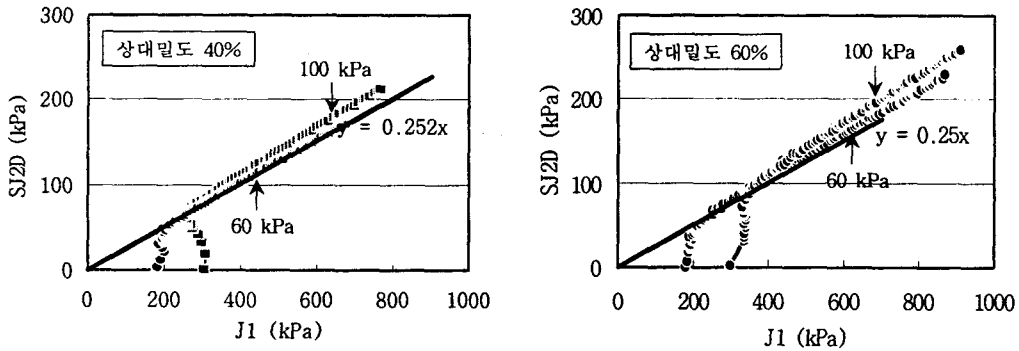


그림 5. 정적삼축압축시험결과 (유효응력경로)

그림 4와 그림 5를 보면, 팽창거동(dilatancy)특성이 비배수조건으로 인해 초기 과잉간극수압이 발생하였으며 그로 인해 초기응력경로에도 영향이 미쳤으며 과잉간극수압이 소산되어가는 순간부터 압축거동(compression)특성으로 옮기는 상태변환이 이루어 졌다. 그림 5에서 x축의 J_1 는 주응력 성분(J_1)이며 y축 SJ2D는 전단응력성분($\sqrt{J_{2D}}$)이고 그림에서 직선은 팽창거동에서 압축거동을 변환하는 상태변환선을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 동일한 제반 시험조건하에서 진동삼축시험을 수행하였으며 이용된 기기는 C. K. Chan이 개발한 시험기이다. 그림 6과 그림 7은 실제 시간별로 측정된 응력, 변형률, 과잉간극수압을 표시하였으며 그림 8은 그림 5와 같이 진동삼축시험결과를 이용하여 유효응력의 동적경로를 나타낸 것이다.

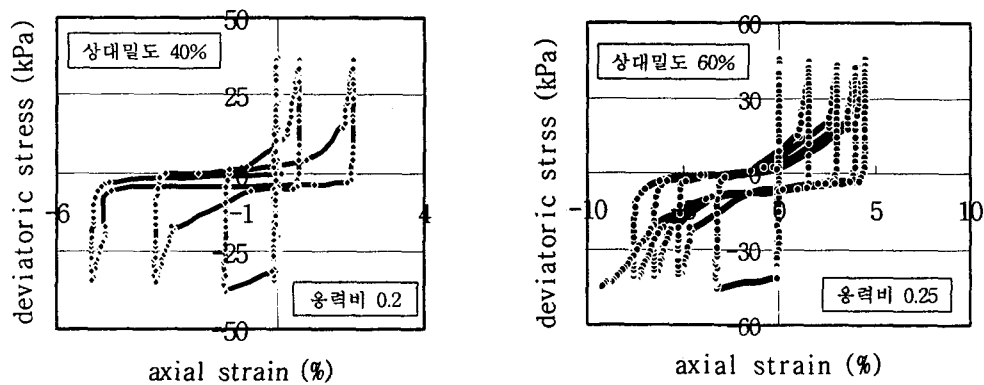


그림 6. 유효구속압 100kPa시 진동삼축시험결과 (응력-변형률)

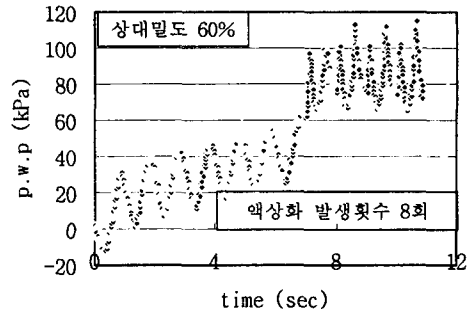
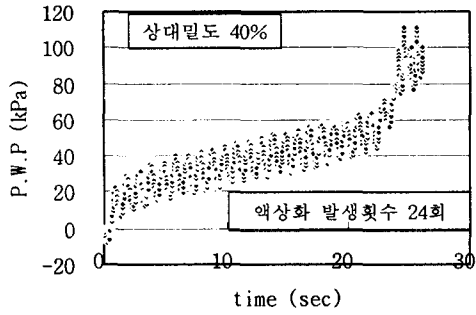


그림 7. 유효구속압 100kPa시 진동삼축시험결과 (과잉간극수압-시간)

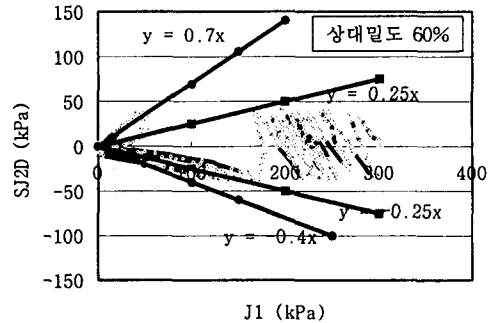
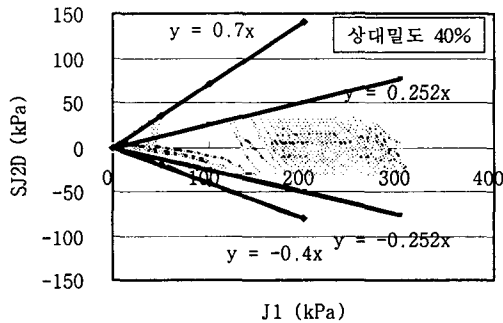


그림 8. 유효구속압 100kPa시 진동삼축시험결과 (유효응력경로)

그림 7을 보면, 초기 유효구속압 100kPa과 과잉간극수압이 같아지는 시기는 응력비 0.2의 상대 밀도 40%와 응력비 0.25의 상대밀도 60%에 대해 각각 24초와 8초(24회와 8회)인 것으로 나타났으며 그림 1의 액상화 발생메카니즘에 기초하여 그림 8의 동적 유효응력경로를 분석해 보면, 23회와 7회에서 그림 5의 정적삼축압축시험에서 결정된 상태변환선에 닿아 파괴상태인 액상화 상태로 급작스럽게 상태이동을 하였으며 이때, 그림 7에 나타난 바와 같이 과잉간극수압도 급작스럽게 증가하는 경향을 나타내었다. 이상의 결과로부터, 정적파괴시의 상태변환선이 과잉간극수압이 급작스럽게 액상화 상태로 전이하는 동적특성 또한 정확하게 표현가능함으로써 과잉간극수압과 팽창거동간의 상관관계가 토립자의 고유특성임을 알 수 있었다. 그림 8의 파괴시 거동을 살펴보면, 압축부에서 인장부보다 큰 기울기의 파괴선을 나타내었는데 이는 일반적으로 토체가 압축보다는 인장에 약한 특성에 기인한 것으로 향후 인장특성에 관한 추가적인 분석이 필요할 것으로 판단된다.

4. 적용성 연구

지반동역학분야에 이용된 기존 교란상태개념 연구에서는 수치모델개발을 위해서 그림 2에 나타난 바와 같은 교란도의 변화를 소성연화특성규명에만 국한하여 적용하여 왔다. 본 연구에서는 교란도와 초기유효구속압에 대한 비배수 과잉간극수압비가 동일하게 한계범위 0~1을 가지는 특성과 교란상태개념의 동적변형을 결정짓는 축차 소성변형을 상각레도의 특성을 분석함으로써 향후 수치모델뿐만 아니라, 기타 간편해석 및 액상화 평가법 등에서의 적용가능성을 검토하고자 한다.

현재까지 지반동역학에 적용된 교란상태개념 모델에서는 1/2주기 및 1주기의 실내시험결과를 식 (1)의 교란도 산정식에 이용하여 왔으나, 본 연구에서는 3장에 실험적으로 검증된 응력경로에 따른 분석을 통해 교란상태개념의 특성을 분석하였으며 이를 위해 식 (1)을 다음과 재정의하였다.

$$D = \frac{J_1^{(i)} - J_1^{(a)}}{J_1^{(i)} - J_1^{(c)}} \quad (4)$$

그림 9는 그림 7의 진동삼축시험시 과잉간극수압을 초기유효구속압으로 나눈 과잉간극수압비와 1/4주기(압축-제하-인장-제하)시 시험결과를 식 (4)의 첫 번째 식에 적용하여 결정된 교란도로 RI 상태는 그림 5를 표현하는 등방압밀소성경화모델을 이용하였으며 FA상태의 경우, 기존에는 그림 5를 통해 파괴상태를 가정하여 산정하였으나 본 연구에서는 실제 실험상에서 나타난 파괴시의 거동을 그림 8에서 나타난 파괴시의 기울기를 이용하였다.

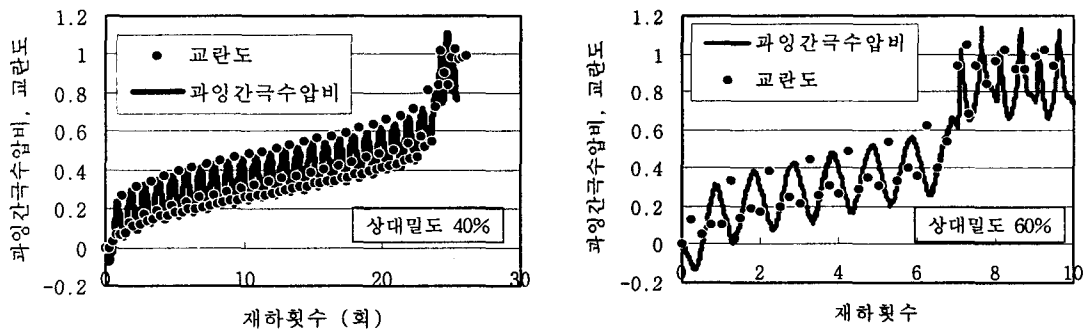


그림 9. 과잉간극수압비와 교란도 비교

그림 9에 나타난 바와 같이 식 (4)를 이용하여 교란도를 산정한 경우, 산정된 교란도가 진동하중재하에 따른 과잉간극수압비의 증가현상을 신뢰성 높게 표현하는 것으로 나타났다. 그림 9에 나타난 1/4주기별 교란도는 함수형태로 나타낼 수가 없으므로 실제 적용시에는 평균값 또는 특정치(최대값 또는 기존의 재하횟수별 해당치)를 사용하여 교란도함수를 구성해야 하는데 본 연구에서는 평균값을 통해서 식 (2)의 교란도 함수를 결정하였다. 또한, 식 (2)의 교란도함수 주매개변수인 축차 소성변형률 상각계도는 그림 6의 응력-변형률 상관관계를 통해 압축-제하 그리고 인장-제하시의 변형률차의 절대값을 1/2주기별 소성변형률로 결정하고 이를 계속적으로 누적시킴으로써 재하횟수별 축차 소성변형률 상각계도를 산정하였다. 그림 10은 재하횟수별 교란도와 축차 소성변형률 상각계도 및 이를 최적함수화한 교란도 함수를 나타내고 있으며 표시된 최소곡률점은 다음의 곡률반경식을 통해 산정하였다. 식에서 D' 와 D'' 는 교란도함수의 1차, 2차미분항이다.

$$R = \frac{D''}{(1 + D'^2)^{3/2}} \quad (5)$$

$$D' = \frac{dD}{d\xi_D} = 0.99 \times AZ\xi_D^{Z-1} \text{Exp}(-A\xi_D^Z) \quad (6)$$

$$D'' = \frac{d^2D}{d\xi_D^2} = 0.99 \times AZ\xi_D^{Z-2} \text{Exp}(-A\xi_D^Z) (Z - 1 - AZ\xi_D^Z) \quad (7)$$

그림 11은 교란상태개념의 내부 소산에너지 변화를 나타내는 축차 소성변형률 상각계도를 재하횟수별로 나타낸 것이며 그림에서 직선으로 나타낸 부분은 최소곡률반경시의 축차 소성변형률 상각계도를 나타낸 것이다.

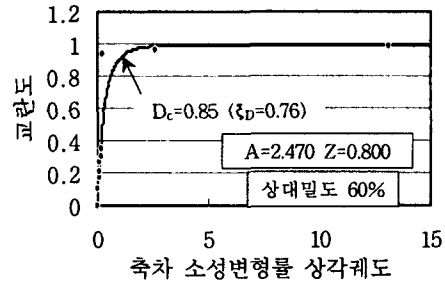
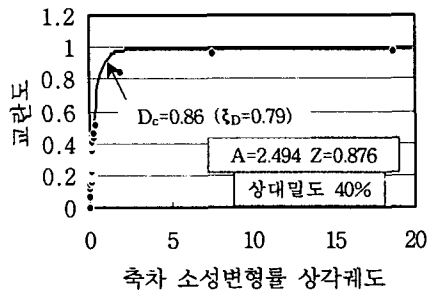


그림 10. 재하횟수별 교란도와 축차 소성변형률 상각계도를 최적화한 교란도 함수의 결정

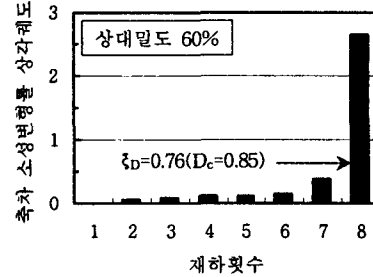
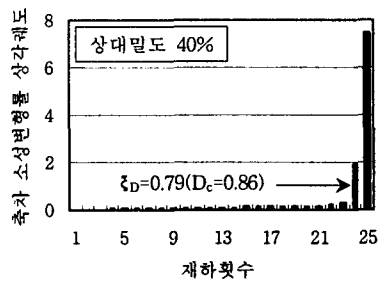


그림 11. 재하횟수별 축차 소성변형률 상각계도

그림 10의 최소곡률점 상의 교란도는 그림 8에서의 상태변환선을 지나 초기 액상화 상태로 이동하는 과정상에 결정된 것으로 이때의 교란도와 축차 소성변형률 상각계도를 지반의 액상화 한 계특성치로 정의하여 액상화 평가법 등에 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 동적수치해석, 간편동해석, 그리고 액상화 평가법 등의 개발에 이용가능한 교란상태개념의 기본적인 동적특성을 분석하고 그 적용성을 검토하였다. 연구결과, 교란상태개념의 교란도와 축차 소성변형률 상각계도가 진동하중으로 발생하는 연화거동 및 과잉간극수압의 거동을 신뢰성 높게 정의하고 있는 것으로 나타나 이에 기초한 다양한 해석기법의 개발이 기대된다.

참고문헌

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. 최재순, "교란상태개념에 기초한 포화사질토의 비배수 동적거동 예측기법 개발", 연세대학교, 2002.
2. Desai, C. S., "Mechanics of Materials and Interfaces, CRC Press", 2001.