

DSC이론을 기초로 한 액상화 영향인자들에 관한 연구 A Study on the Influence Factors for Liquefaction Based on the Disturbed State Concept

박인준*
Park, Inn-Joon

김정환**
Kim, Kyung-Hwan

김수일***
Kim, Soo-II

ABSTRACT

The purpose of this study is to find out the factors affecting liquefaction potential by using DSC(disturbed state concept) method and to verify these results through cyclic shear test (truly triaxial test and cyclic triaxial test) on saturated sandy soil.

Based on this reserch, the DSC method predictions were found to provide satisfactory correlation with the cyclic shear test. And the relationship between the factors affecting liquefaction characteristics--relative density(D_r) and initial effective confining pressure ($\bar{\sigma}_c'$)--and physical properties of the saturated sand-- ξ_D and D_c --is found. If the relative density and the initial effective confining pressure increase, the number of cyclic grows up. This means that D_c is increased and ξ_D is decreased. Therefore, the liquefaction potential can be evaluated and the factors affecting liquefaction potential can be investigated by using on DSC method.

Finally, it is shown that the DSC method can capture the liquefaction mechanism.

1. 서론

1994년 캘리포니아 지진과 1995년에 발생한 고베지진은 액상화로 인해 발생하는 여러 가지 피해양상을 보여주었다. 이와같은 결과는 액상화현상이 지반공학에 있어 매우 중요한 연구과제임을 다시금 일깨워 주었다. 최근 국내에서도 많은 곳에서 항만 및 매립지등의 대규모 공사가 진행되는 실정이므로 액상화에 관한 대책 마련이 필수적으로 요구되는 실정이다. 본 연구에서는 그동안 국내에서는 소개된 바 없는 교란상태개념을 액상화현상에 적용하고 이를 통해 액상화에 영향을 주는 영향인자에 찾고자 한다. 액상화에 영향을 주는 영향인자는 크게 하중조건, 지반조건, 응력조건등으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 위의 영향인자중 지반조건에 해당하는 상대밀도와 응력조건에 해당하는 초기유효구속압에 대한 연구를 수행하였다. 교란상태개념은 재료의 역학적 거동 특성에 관한 연구를 기초로 하며, 그 적용성 및 합리성 검증을 위해 반복삼축시험과 실삼축시험을 수행하여 비교, 분석하였다.

* 연세대학교 토목공학과 박사후 연수과정, 정회원

** 연세대학교 토목공학과 석사과정, 학생회원

*** 연세대학교 토목공학과 교수, 정회원

2. 액상화 현상

액상화란 진동하중 또는 지진동의 급속하중에 의해 포화사질토가 전단 저항력을 상실하고 마치 유체와 같이 거동하는 현상을 의미한다. 액상화현상을 재료의 역학적 거동특성에 기초하여 설명하면 다음과 같다. 느슨한 사질토가 과잉간극수압이 소산되는 시간보다 빠른 재하속도를 갖는 동하중을 받게되면 토체는 비배수상태하에 있게된다. 비배수 상태에 있는 사질토는 일정한 체적을 유지하려는 상태에서 변형을 겪게 된다. 즉, 진동하중하에서 토립자는 변형 및 재배열을 하지만 포화 토체의 일정체적 유지성 때문에 토립자의 변형을 및 재배열량 만큼 과잉간극수압이 발생하게 된다. 이처럼 발생한 간극수압이 토체내의 유효 응력과 같은 수준에 도달하게 되면, 토체내의 전단저항력은 완전히 상실하게 되어 포화 사질토는 액상화에 이른다.

3. 교란상태개념(DSC) 이론

교란상태개념에서는 하중을 받는 재료의 거동을 정의하기 위해 두 개의 기준상태를 도입하였다. 첫 번째는 상대적으로 손상되지 않은(relatively intact ; RI)상태로써 재료가 외력을 받기 전의 초기 상태에는 미세한 결함이 존재하더라도 RI상태에 가깝다고 볼 수 있다. 두 번째는 완전파괴(fully adjusted ; FA)상태로써 재료의 초기상태에 미세하게 존재했던 손상된 부분이 외력에 의해 점차로 확산되어 재료가 전단저항력을 완전히 잃은 상태를 말한다. 하중을 받는 재료가 파괴에 이르기까지는 RI상태와 FA상태의 사이에 존재하게 된다. 이와 같이 재료의 상태변화를 그림 1에 도시하였다.

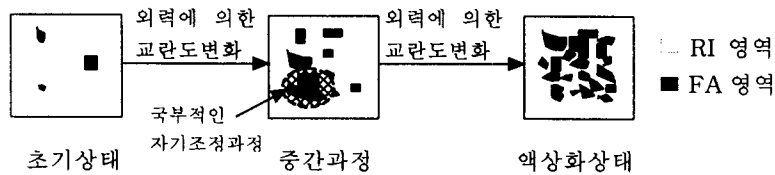


그림 1. 교란도의 변화에 따른 재료 내부의 상태변화 모식도

3.1 RI 상태

RI상태는 재료의 경화거동(hardening behavior)을 나타낼 수 있는 탄소성모델을 사용하여 표현할 수 있다. 그에 대한 모델로써 계층적 단일 항복곡면 모델(Hierarchical Single Yield Surface model ; HiSS model)중 가장 기본이 되는 탄소성 경화모델인 δ_0 모델을 통해 항복함수(F)를 정의하면 다음의 식(1)과 같다(Desai et al, 1986; Desai and Wathugala, 1987).

$$F = \frac{J_{3D}}{p_a^2} - \left[-\alpha \left[\frac{J_1}{p_a} \right]^n + \gamma \left[\frac{J_1}{p_a} \right]^2 \right] (1 - \beta S_r)^{-0.5} \quad (1)$$

여기서 $S_r = (\sqrt{27} J_{3D}) / (2J_{2D}^2)$ 이며, J_1 은 응력텐서의 1차 불변량(The first invariant of the stress tensor), 그리고 J_{3D} 는 축차응력텐서(S_{ij})의 3차 불변량(The third invariant of the deviatoric stress tensor)이다. γ 는 재료의 파괴상태를 정의하는 매개변수이며, β 는 재료의 항복면 형상을 정의하는 매개변수이다. 또한 n 은 재료의 상태변화에 관한 매개변수이다. α 는 경화 함수(Rigby and Desai, 1995)이며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha = \frac{h_1}{\xi^{h_2}} \quad (2)$$

여기서 h_1 과 h_2 는 경화함수 매개변수이며, ξ 는 소성변형률 상각궤도(plastic strains trajectory) $= \int \sqrt{d\epsilon_{ij}^p d\epsilon_{ij}^p}$ 이며, $d\epsilon_{ij}^p$ 는 소성변형률 텐서이다. δ_0 모델을 통해 RI상태의 응력-변형률 증분에 관한 방정식을 표현하면 식(3)과 같다.

$$d\sigma_{ij}^{RI} = C_{ijkl}^{ep} d\epsilon_{kl}^{RI} \quad (3)$$

여기서 $d\sigma_{ij}^{RI}$ 는 RI상태의 응력의 증분이며, $d\epsilon_{ij}^{RI}$ 는 RI상태의 변형률의 증분, 그리고 C_{ijkl}^{ep} 는 탄소성 구성 벡터이며 식(1)에 의해 결정된다.

3.2 FA상태

FA상태는 한계상태(critical state)를 이용하여 정의할 수 있다. FA상태에 있는 재료의 거동은 다음 식(4)와 같이 정의한다.

$$\sqrt{J_{2D}^c} = \bar{m} J_1^c \quad (4.a)$$

$$J_1^c = 3p_a \times e^{\left(\frac{e_0^c - e^c}{\lambda}\right)} \quad (4.b)$$

여기서 \bar{m} 과 λ 는 재료의 매개변수, 그리고 e_0^c 는 $J_1^c = 3p_a$ 일 때의 간극비이다. p_a 는 대기압이며 단위는 kPa이다.

3.3. 교란도함수

진동삼축시험 또는 실삼축시험등의 실내시험을 통해 교란도함수를 정의할 경우 근사적으로 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_a = \frac{\frac{\bar{\sigma}^{(c)} - \bar{\sigma}^{(a)}}{\sigma} - \frac{\bar{\sigma}^{(c)}}{\sigma}}{\frac{\bar{\sigma}^{(c)}}{\sigma} - \frac{\bar{\sigma}^{(a)}}{\sigma}} \quad (5)$$

여기서 위 첨자 i, c, 그리고 a 는 각각 RI상태, FA상태, 그리고 시료의 실제 거동상태를 표시한다. 또한 $\bar{\sigma}$ 는 평균 유효응력을 의미한다.

포화 사질토의 경우 체적 변형률보다는 전단 변형률이 교란도를 지배한다고 판단되므로, D는 전단소성변형률 상각궤도(deviatoric plastic strains trajectory), ξ_D 의 함수로 식(6)과 같이 나타낸다 (Amaleh and Desai, 1990).

$$D = D_u(1 - e^{-A\xi_D^Z}) \quad (6)$$

여기서 A와 Z는 매개변수이며, 초기 유효구속압 ($\bar{\sigma}_0$), 초기 밀도 (ρ_0), 그리고 진동회수(N) 등의 영향을 받는다. 그리고 ξ_D 를 정의하면 식(7)과 같다.

$$\xi_D = \int \sqrt{dE_{ij}^p dE_{ij}^p} \quad (7)$$

여기서 dE_{ij}^p 는 축차소성변형률의 증분이며 $dE_{ij}^p = d\epsilon_{ij}^p - d\epsilon_v^p/3$ 와 같다. 여기서 $d\epsilon_{ij}^p$ 와 $d\epsilon_v^p$ 는 각각 소성변형률증분과 체적소성변형률증분을 나타낸다. 진동하중을 받는 재료의 경우, ξ_D 는 매 회 진동주기의 최대응력에 해당하는 dE_{ij}^p 를 계산하여 정의한다.

4. 진동삼축시험

상대밀도의 변화가 사질토의 액상화에 미치는 영향을 연구하기 위해 본연구에서는 주문진 표준사를 대상으로 상대밀도를 변화시켜 가며 진동삼축시험을 수행하였다. 시험에 사용된 장비는 C. K. Chan Type의 자동화 삼축시험기이다. 주문진 표준사의 기본적인 물성치는 표 1과 같다. 본 연구에서 수행된 진동삼축시험조건을 표 2에 도시하였다. 시료의 형상은 직경 50mm, 높이 10mm의 원주형이며, 작용하중의 형태는 정현하중이다. 본 시험에서 구속압에 대한 축차응력의 비율은 약 0.5이다.

본 시험과정은 크게 네 단계로 구분할 수 있다. 첫 번째단계는 시료의 준비과정으로 원하는 상대밀도의 시료를 셀에 거치시키는 과정이다. 본 연구에서는 수중침강법(water sedimentation method ; Ishihara, 1996)을 통해 시료를 거치하였다. 두 번째 단계는 시료의 포화단계이다. 시료

의 포화방법은 배압포화법을 사용하였다. 시료의 포화도는 간극수압계수, B의 값을 확인하여 0.97이상의 값을 가질 때 완전포화된 것으로 간주하였다. 세 번째 단계로 완전포화된 시료에 등방압밀과정을 통해 체적변형률이 일정해지는 시기까지 압밀과정을 수행하였다. 네 번째 단계는 완전포화된 시료에 축차응력을 반복적으로 가하는 단계이다. 여기서 시료에 가해지는 축차응력의 구속압에 대한 비율은 약 0.5이다. 위에 설명한 시험과정은 실삼축시험의 경우에도 동일하다. 그림 2는 각각 시료의 상대밀도가 40%, 50%, 60%인 경우의 시간에 따른 간극수압의 변화와 축차응력과 축변형률의 관계를 도시한것이다. Seed는 과잉간극수압이 초기 유효구속압(initial effective confining pressure)에 도달한 시점을 액상화의 발생시점으로 보았다. 이를 액상화 발생시기의 기준으로 보아 액상화발생 재하회수(N_i)를 살펴보면 상대밀도 40%, 50%, 60%의 상대밀도에 대해 각각 1회, 4회, 6회의 재하회수에서 액상화가 발생하였다.

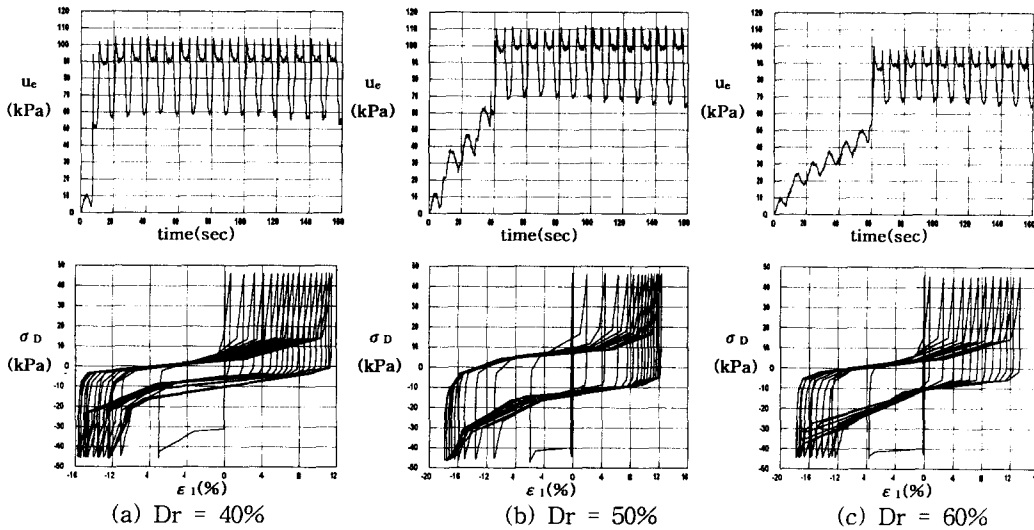


그림 2. 상대밀도의 변화에 따른 과잉간극수압과 응력-변형률관계

표 1. 주문진 표준사의 기본적인 물성치

곡률계수, C_c	1.23
균등계수, C_u	1.17
최대건조단위중량, γ_{dmax}	1.60
최소건조단위중량, γ_{dmin}	1.39

표 2. 진동삼축시험의 제한조건

초기유효구속압 (kPa)	100
상대밀도(%)	40, 50, 60
진동수 (Hz)	0.1
하중종류	정현파형
시료조건	포화, 비배수
하중제어방식	응력제어

5. 진동 실삼축시험 및 결과

본 연구에서 재료의 초기유효구속압이 액상화에 미치는 영향을 연구하기 위해 사용한 실내 시험기는 진동 실삼축시험기(Cyclic Truly Triaxial Test Device)이다. 본 시험장비의 특징은 삼차원 진동삼축시험 장비로써 삼면의 응력을 임의로 조정할 수 있다. 이러한 기능을 이용하여 세 주 응력(σ_1 , σ_2 그리고 σ_3)을 임의로 조정하여 다양한 응력경로를 재현할 수 있다(그림 3). 진동 실삼축시험기는 다음과 같은 부분으로 이루어져 있다. 알루미늄 프레임, 삼면 조립벽체, 응력조정 장비, 멤브레인, 공급수압과 부피변화 자동입력기 그리고 컴퓨터를 이용한 시험자료 획득시스템 등이 통합 체계적으로 구성되어있다. Ottawa 샌드의 기본적인 물성치는 표 3과 같다.

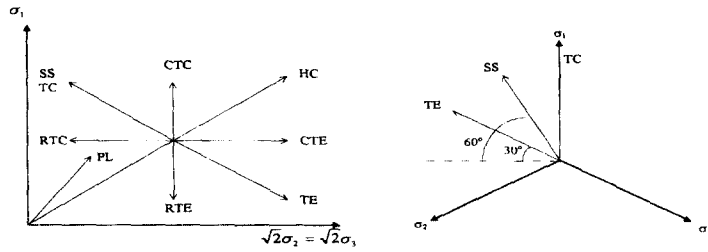


그림 3. 전단시험을 이용한 응력 경로

표 3. Ottawa모래의 역학적 특성

곡률 계수 (C_c)	1.60
균등 계수 (C_u)	2.00
최대간극비 (e_{max})	0.77
최소간극비 (e_{min})	0.46

표 4. 실삼축시험의 제반조건

초기유효구속압 (kPa)	69, 138, 207
상대밀도(%)	60
진동수 (Hz)	0.1
하중종류	톱니파형
시료조건	포화, 비배수
하중제어방식	응력제어

본 연구에서 수행된 실삼축시험조건을 표 4에 도시하였다. 시료의 형상은 변의 길이가 4.5인 치의 정방형이며 작용하중의 형태는 정현하중이다. 본 시험에서 구속압에 대한 축차응력의 비율은 약 0.5이다. 본 시험은 상대밀도 60%를 유지하며 세 종류의 다른 초기 유효구속압($\bar{\sigma}_0=69, 138, 207\text{kPa}$)을 작용하여 시험을 수행하였다. 그림 4는 각각 시료의 초기유효구속압 69, 138, 207 kPa의 경우의 시간에 따른 간극수압의 변화를 도시한 것이며 그림 4는 축차응력과 축변형률의 관계를 도시한것이다. Seed는 과잉간극수압이 초기 유효구속압(initial effective confining pressure)에 도달한 시점을 액상화의 발생시점으로 보았다. 이를 액상화 발생시기의 기준으로 보아 액상화 발생 재하회수(N_f)를 살펴보면 상대밀도 40, 50, 60%의 상대밀도에 대해 각각 5회, 7회, 8회의 재하회수에서 액상화가 발생하였다.

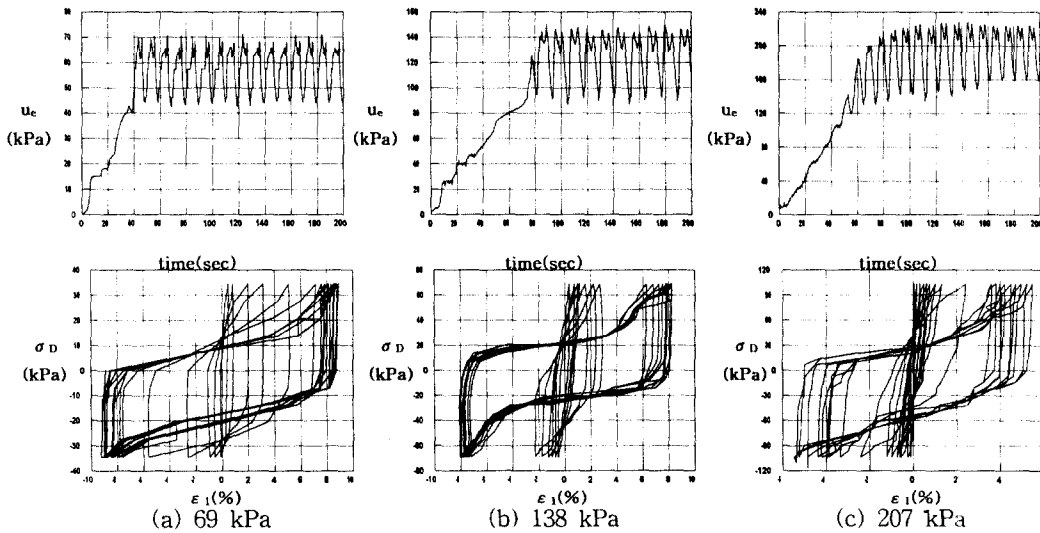


그림 4. 초기유효구속압의 변화에 따른 과잉간극수압과 응력-변형률의 관계

6. 교란상태개념을 기초로한 액상화 평가결과

본 연구에 적용된 DSC법은 기존 액상화 평가방법들보다 합리적이며 간편화된 이론으로 이를 통한 액상화평가의 개략적인 과정은 다음과 같이 다섯 단계로 나눌 수 있다.

일 단계는 지진하중으로 인한 액상화현상을 재현할 수 있는 진동전단시험(진동삼축시험, 진동실삼축시험, 진동비틀림전단시험)등을 통해 포화사질토에 대한 응력-변형을 관계자료를 얻는 것이다.

이 단계는 RI상태의 응력-변형률의 산정이다. 본 연구에서는 진동삼축시험 및 실삼축시험결과 첫 번째 하중재하시의 재료의 응력-변형률 거동을 그 재료의 RI상태 거동으로 가정하였다. 여기서 구한 재료의 RI상태의 거동은 세 주응력방향에 대한 평균유효응력의 향으로 나타내며, 이를 $\bar{\sigma}^{(i)}$ 로 표현한다. 이와 같이 구한 RI상태의 응력-변형률 관계를 이용하여 매 주기별로 축차응력이 최고값에 도달한 시점의 변형률에 대한 응력을 산정한다.

삼 단계는 하중재하에 따른 교란도를 구하는 것이다. 먼저 시험결과를 통해 얻은 시료의 실측된 평균유효응력, $\bar{\sigma}^{(a)}$ 를 산정한다. 위에서 구한 $\bar{\sigma}^{(i)}$ 와 $\bar{\sigma}^{(a)}$ 를 식(5)에 적용하여 매 재하회수(N)에 대한 교란도 D_N 을 산정한다(그림 5). 여기서 매 재하회수에 대한 교란도는 매 주기별로 축차응력이 최고값에 도달한 시점의 교란도를 사용한다. 본 연구에서 FA상태의 평균유효응력, $\bar{\sigma}^{(c)}$ 는 0으로 가정한다.

사 단계는 교란도함수의 산정이다. 위에서 구한 교란도와 그시점에서의 ξ_D 와의 관계를 이용하여 식(6)을 통해 교란도 함수를 산정할 수 있다. (그림 6).

오 단계는 위에서 구한 교란도함수로부터 최소곡률점(그림 7)에서의 교란도인 한계교란도(critical disturbance; D_c)와 액상화발생 재하회수를 구하는 것이다(그림 8). 여기서 한계교란도의 물리적인 의미는 재료내부의 교란도의 변화가 가장 급격한 시점을 의미하므로 이 시점을 포화사질토의 액상화발생시점으로 가정하였다. 임의의 함수에 대한 곡률을 구하는 식은 식(8)과 같다.

$$R = \frac{D''}{(1 + D'^2)^{3/2}} \quad (8)$$

여기서 D' 와 D'' 는 각각 교란도함수 D 의 ξ_D 에 대한 1차미분항과 2차미분항이며 식(9)와 같다.

$$D' = \frac{dD}{d\xi_D} = 0.99 \times AZ \xi_D^{Z-1} \text{Exp}(-A\xi_D^Z), \quad D'' = \frac{d^2D}{d\xi_D^2} = D' \xi_D^{-1} (Z - 1 - AZ\xi_D^Z) \quad (9)$$

이와 같은 방법으로 구한 한계교란도 D_c 에서의 ξ_D 와 매 재하회수에 대한 ξ_D 를 비교하여 DSC법을 통한 액상화발생 재하회수인 N_c 를 구할 수 있다. 전체적인 해석결과를 표 5~6에 도시하였다.

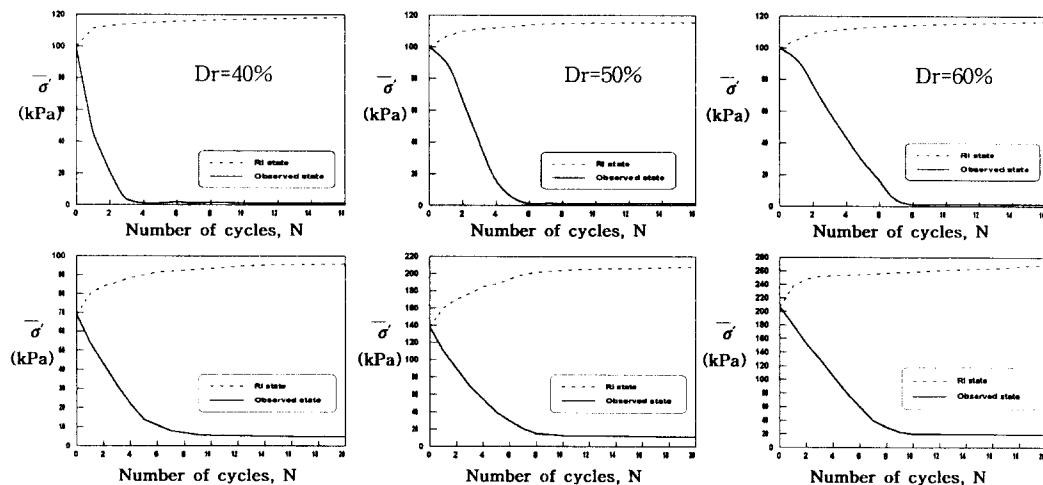


그림 5. 재하회수에 따른 RI 상태와 시험결과의 평균유효응력

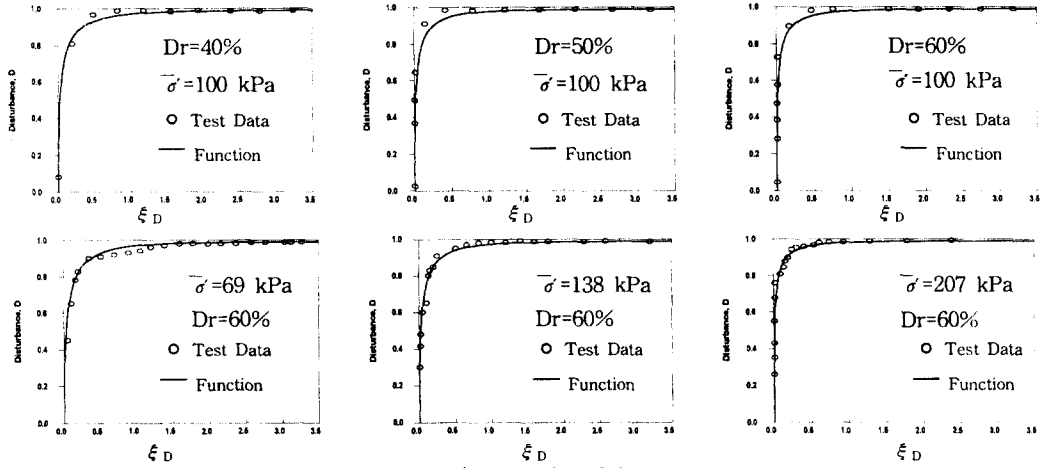


그림 6. 교란도함수

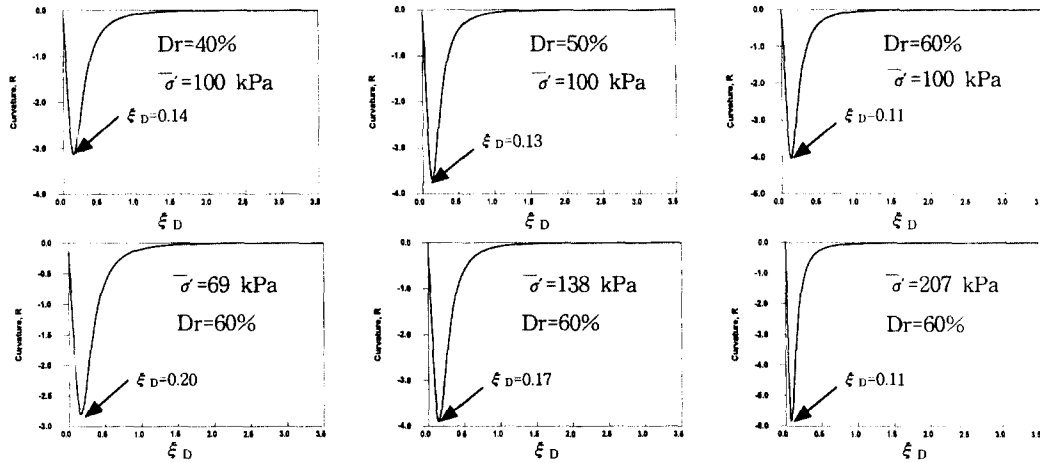


그림 7. ξ_D 에 따른 교란도함수의 곡률

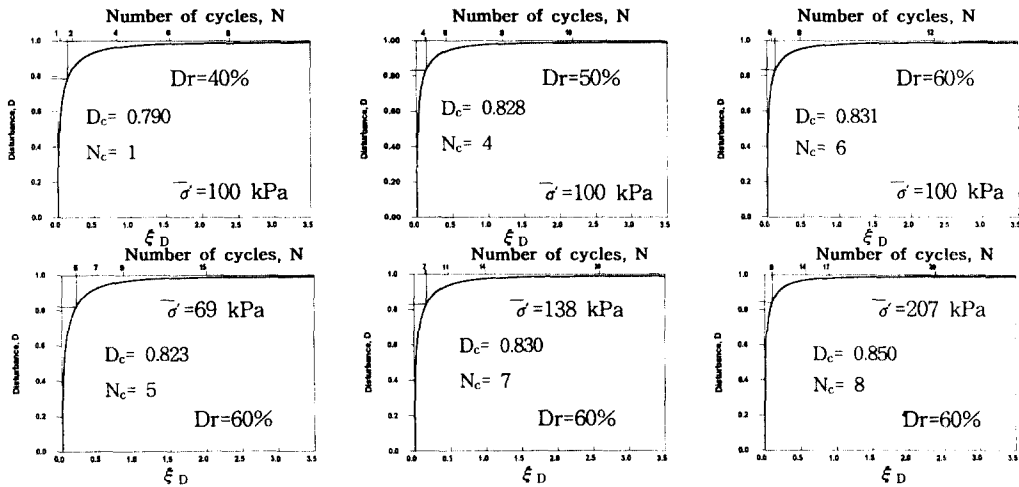


그림 8. 교란도함수상의 한계교란도

표 5. DSC법을 통한 해석결과(진동삼축시험) 표 6. DSC법을 통한 해석결과(실삼축시험)

Dr	교란도합수	D _c	$\xi_D(N_c)$	N _c	N _i
40%	$0.99[1 - e^{(-3.935 \xi_D^{0.69})}]$	0.789	0.14	1	1
50%	$0.99[1 - e^{(-4.444 \xi_D^{0.41})}]$	0.828	0.13	4	4
60%	$0.99[1 - e^{(-4.483 \xi_D^{0.14})}]$	0.831	0.11	6	6

초기유효구속압	교란도합수	D _c	$\xi_D(N_c)$	N _c	N _i
69 kPa	$0.99[1 - e^{(-3.979 \xi_D^{0.51})}]$	0.823	0.20	5	5
38 kPa	$0.99[1 - e^{(-4.200 \xi_D^{0.47})}]$	0.830	0.17	7	7
207 kPa	$0.99[1 - e^{(-4.480 \xi_D^{0.31})}]$	0.850	0.11	9	8

6. 결론

본 연구에서는 교란상태개념을 이용하여 포화사질토의 액상화평가에 대한 새로운 방법을 제안하였다. 본 방법을 검증하기 위해 교란상태개념을 통해 구한 액상화 발생시기와 반복삼축시험 및 실삼축시험 결과 얻은 액상화 발생시기를 비교하였다. 본 방법을 통해 액상화의 영향인자인 상대밀도와 초기유효구속압에 대한 분석을 수행한 결과 상대밀도 및 초기유효구속압은 포화사질토의 액상화발생에 있어 결정적인 영향을 미치는 인자임을 알 수 있었다. 또한 두 인자가 액상화 발생에 미치는 영향이 매우 유사함을 알 수 있었다. 재료의 상대밀도 또는 초기유효구속압이 증가함에 따라 액상화발생에 요구되는 반복하중의 재하회수는 증가하였다. 이에 대한 역학적 증거로 상대밀도 또는 초기유효구속압이 증가함에 따라 액상화발생에 요구되는 한계교란도, D_c의 값은 증가하였으며, 액상화발생시점에서의 ξ_D 는 감소하고 있다. 이와 같은 결과는 상대밀도 또는 초기유효구속압이 증가함에 따라 재료가 보다 견고해지므로 액상화 발생에 있어 보다 많은 교란, 즉 보다 많은 외부하중(에너지)이 요구되며 또한 액상화에 도달한 시기에 발생한 소성변형률은 보다 작게 나타남을 말해주는 물리적인 의미를 가진다. 위의 결과로 볼 때, 재료의 상대밀도가 포화사질토의 비배수 반복전단거동에 미치는 영향은 초기유효구속압이 이에 미치는 영향과 유사한 효과를 가진다고 판단된다. 이에 대한 상관관계는 보다 많은 시험을 통해 규명이 가능하리라고 판단된다.

본 연구를 통해 제안된 액상화 평가방법은 재료의 역학적 거동특성을 고려했다는 점에서 큰 의미를 가지며 보다 합리적이고 신뢰성있는 결과를 보여준다고 판단된다.

감사의 글 : 본 논문은 STEPI 과제 관계자 여러분의 도움으로 완성된 것으로 관련된 분들께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 김경환(1998), 액상화가능성 평가방법에 관한 연구, 연세대학교 토목공학과 석사학위논문.
2. Park, I. J.(1997), "Disturbed State Modelling for Dynamic and Liquefaction Analysis", *Ph.D. Dissertation*, Dept. of Civil Engineering and Engineering Mechanics, Univ. of Arizona, Tuscon, Arizona.
3. Seed, H. B. and Idriss, I. M.(1967), "Analysis of Soil Liquefaction : Niigata Earthquake," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 93, No. SM6, pp.83-108.
4. Norris, G., Siddharthan, R., Zafir, Z., and Madhu, R.(1997), "Liquefaction and Residual Strength of Sands from Drained Triaxial Tests," *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division*, ASCE, Vol. 123, No. 3, pp.220-228.
5. Desai, C. S. and Wathugala, G. W.(1987), "A Hierarchical and Unified Models for Solids and Discontinuities (Joints/Interfaces)," Short Course Notes, *Workshop on Implementation of Constitutive Laws of Engineering Materials*, Dept. of Civil Engineering and Engineering Mechanics, University of Arizona, Tuscon, Arizona, pp. 9-10, 31-124.