

교란상태개념에 기초한 새로운 액상화 평가 방법

A New Method of Liquefaction Evaluation Based on Disturbed State Concept

박 인 준* 김 수 일**
Park, Inn Joon Kim, Soo Il

국문요약

액상화 가능성을 예측하기위해 많은 방법들이 제안되어왔지만, 재료의 미세구조의 특성을 이용한 방법은 거의없다. 본 연구에서는, 동하중을 받는 재료의 전체 응력-변형률의 특징에 대해 통합적 구성방정식을 제공하는 교란상태개념(DSC)모델에 이론적 기초를 두며, 포화 사질토의 액상화 가능성을 평가하기위한 새로운 방법을 제안한다. DSC이론으로부터, 미세구조의 변형시 재료내부 상태의 급격한 변화가 일어나는 시점의 교란도(한계교란도; D_c)를 초기 액상화 시기로 정의한다. 본 방법은 포화 Ottawa모래를 이용한 진동 실상속시험 결과로부터 얻은 자료를 이용하여 적합성이 검토되었다. 또한 본 연구로부터, 액상화와 초기 구속압사이의 관계가 D_c 의 개념으로부터 밝혀졌다. 본 연구에서 제안한 새로운 액상화 평가방법은 액상화 거동을 예측할 수 있으며, 결론적으로 기존의 경험적 방법보다 향상된 방법이라고 사료된다.

주요어 : 교란상태개념, 액상화, 한계교란도, 진동 실상속시험

ABSTRACT

Although a number of methods have been proposed to predict the liquefaction potential, few methods have been developed by using the characteristic of material's microstructure. In this research, fundamental procedure is proposed for the assessment of liquefaction potential in saturated soils based on the Disturbed State Concept(DSC) model which can provide a unified constitutive model for the characterization of entire stress-strain behavior under cyclic loading. From this concept, the value of disturbance at threshold state (Critical Disturbance, D_c) in the deforming microstructure provides the basis for initial liquefaction. This method is verified with respect to data from Cyclic Truly Triaxial test for saturated Ottawa sand. Also, the relationship between liquefaction and initial confining stress is defined using definition of D_c . It is believed that the new procedure for identifying liquefaction based on the DSC model can capture the behavior of liquefaction, and as a result, it is shown to be an improvement over the available empirical procedures.

Key words : *disturbed state concept, liquefaction, critical disturbance, cyclic truly triaxial test*

1. 서 론

지진 또는 발파와 같이 진동하중이 순간적으로 가해질 때, 상대적으로 느슨한 포화 사질토는 순간 액체와 같은 현상을 나타낸다. 이와 같은 현상을 액상화라고 한다. 이런 액상화는

기초 지반, 상부구조물, 옹벽, 해안구조물 등에 치명적인 손상을 입힌다고 보고되어지고 있다. 지진에 의한 액상화 피해 사례는 광범위하게 보고되어졌다. 그 기록을 살펴보면 Niigata, El Centro, Chile, Mexico, 그리고 최근의 Kobe, Loma Prieta, 와 Northridge 지진에서 액상화의 피해사례를 볼 수 있다.

지진시 구조물에 심각한 피해를 입히는 액상

* 정회원 · 연세대학교 산업기술연구소 전문연구원

** 정회원 · 연세대학교 토목공학과 교수

화현상을 미리 예측하여 피해를 줄이기 위한 연구가 지난 30년간 꾸준히 지속되어왔다. 이런 연구의 결과로 가장최근까지 크게 세 범주의 액상화 평가 방법이 개발 이용되고 있다. 첫 번째 범주는 경험적 분석방법으로써 체분석과 표준관입실험을 통해 액상화 발생 가능성의 등급을 정하는 방법으로 액상화 등급 및 표준관입치 방법(Gradation/SPT-N value method)이라 알려져있다(Seed and Idriss⁽¹⁾, Ishihara⁽²⁾, Iwasaki *et al.*⁽³⁾). 두 번째 방법은 진동삼축시험의 결과를 이용하여 액상화를 평가하는 방법이다. 본 방법은 진동삼축시험 방법(Cyclic Triaxial Method)이라고 불리어 진다 (Seed and Lee⁽⁴⁾, Finn *et al.*⁽⁵⁾). 세 번째 범주에 속하는 액상화 평가 법은 진동 전단시험을 통해 변형을 에너지를 계산하여 액상화를 평가하는 법이다 (Berrill and Davis⁽⁶⁾), Law *et al.*⁽⁷⁾, Figueroa *et al.*⁽⁸⁾). 본 방법은 에너지법(Energy Method)이라 한다.

본 연구에서는 앞에서 약술한 액상화 평가 방법들과 상이한 교란상태개념 (Disturbed State Concept; DSC)을 이론적 바탕으로 한 새롭고 간편한 액상화 평가방법을 제안하고자 한다 (Desai *et al.*⁽⁹⁾, Park⁽¹⁰⁾). 본 방법은 진동 하중하의 포화사질토의 교란상태(Disturbed State)를 수치모형화 하여 재료 내부의 파괴 특성을 밝히므로써 가능하다.

2. 액상화 거동의 메커니즘

일반적으로 액상화는 진동하중 또는 지진에 의해 포화사질토가 전단 저항력을 상실하고 마치 점성액과 같이 거동할 때를 말한다. 이 상태의 역학적 거동특성을 좀더 자세히 설명하면 다음과 같다. 비배수 진동하중을 받는 사질토의 경우(과잉간극수압이 소산되는 시간보다 빠른 재하속도를 갖는 동하중이 작용한 경우), 본 사질토는 일정한 체적을 유지하려는 상태에서 변형을 경험하게된다. 즉, 진동하중하에서 토립자는 변형 및 재배열을 하지만 포화

토체의 일정체적 유지성 때문에 토립자의 변형을 및 재배열량 만큼 과잉간극수압이 발생하게된다. 이처럼 발생한 간극수압이 토체내의 유효 응력과 일치하게 되면, 토체내의 전단저항력은 완전히 상실하게 되어 포화 사질토는 액상화에 이른다. 결국 액상화에 이른 흙은 불안정하게 되며 그때의 교란도(Disturbance)를 이용하여 액상화를 평가할 수 있다.

동하중 또는 지진에 의해 포화사질토가 액상화되는 과정을 임의의 한 재료가 외부 하중에 의해 교란(불안정)되는 과정으로 가정하여 새로운 액상화 평가방법을 개발했다.

3. 교란상태개념 이론

본 연구에서는 동하중을 받는 완전 사질토의 거동 특성을 모델화 하기 위해 통합적으로 이론이 정립된 교란상태 모델을 개선, 이용하였다. DSC모델의 기본가정은 다음과 같다. 임의 하중을 받는 재료의 거동특성은 두 개의 기준 상태를 이용하여 표현되어 진다. 즉, 상대적으로 손상되지 않은 상태(Relative Intact State; RI)와 완전 파괴상태(Fully Adjusted State; FA)를 정의하여 실제거동 특성을 표현한다. 본 이론을 자세히 고찰하면 아래와 같다.

동하중을 받고있는 어떤 재료의 미세구조(Microstructure) 특성은 초기조건, 재료의 기하학적 특성, 재료의 비균질성, 그리고 재하하중의 조건 등을 고려할 때 앞에서 언급한 두 기준상태가 복합되어 있다고 가정한 상태를 이용하여 표현할 수밖에 없다. 결론적으로, 하중을 받기 전의 재료의 미세구조는 RI 상태에 있다고 가정하며, 외부에서 재료에 동하중이 가해지면 재료내부에서는 미세구조의 자체조정(Self-adjustment)기능에 의해 FA상태로 진행한다 (Desai⁽¹¹⁾, Desai⁽¹²⁾, Park⁽¹⁰⁾). 하중을 받는 재료내의 자체조정기능은 토립자간의 미끄러짐, 회전, 미소균열, 점착, 분열 등에 의해 이루어진다. 이런 복잡한 과정을 통해 포화사질토는 RI상태에서 연속적으로 FA상태의 불안

정하고 액상화 되는 단계에 이른다 (그림 1). 본 개념을 바탕으로, 재료의 실제 거동은 RI상태와 FA상태의 응력상태를 이용하여 표현할 수 있다. 여기서 RI상태의 응력수준과 실제응력 수준의 차를 해석대상 재료의 교란도 (Disturbance)라고 한다 (그림 2). 본 이론의 개념적 이해를 위해 예를 들어 설명을 하면 다음과 같다.

얼음이 가득한 용기가 있다고 가정하자. 그 용기에 얼을 가하면, 시간이 경과할수록 얼음은 녹아서 물만이 가득한 용기가 될 것이다. 여기서 얼음은 RI상태의 재료라고 표현할 수 있다. 그리고 얼음이 녹은 물은 FA상태의 재료로써 상징되어진다. 용기에 얼음과 물이 함께 있는 상태를 재료의 교란상태로 이해하므로써 전반적인 이론의 개념을 설명할 수 있다.

본 연구에서는 재료내의 RI상태를 탄소성 경화 모델로써 표현하였다. 본 연구에서 이용한 탄소성 경화 모델은 Desai and Wathugala⁽¹³⁾가 발표한 계층적 단일 항복곡면 모델(Hierarchical Single Yield Surface Model; HiSS Model)중 기초단계인 관련유동법칙(Associative Flow Rule)과 등방 경화(Isotropic Hardening)를 포함한 HiSS- δ_0 를 이용하여 RI상태를 표현하였다. 그리고 FA상태는 Roscoe⁽¹⁴⁾ 등이 정의한 한계상태(Critical State, CS) 이론을 이용하여 표현하였다. 이렇게 정의된 RI상태, FA상태, 그리고 교란상태를 이용하여 동하중하의 토체의 연화 또는 액상화를 수치모델 할 수 있다.

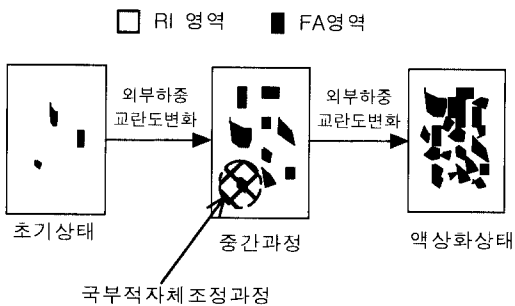


그림 1 DSC모델의 RI와 FA상태의 개념도

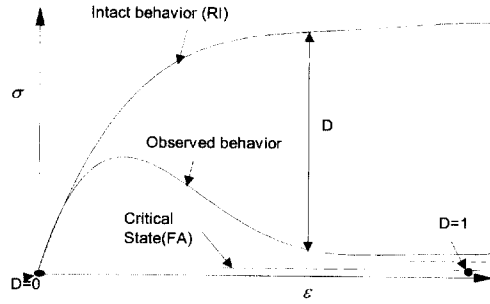


그림 2 응력-변형률 관계도상의 교란도(D) (Park, 1997)

3.1 RI 상태

교란도(D)를 산정하기 위해서 RI상태를 정의하는 것은 필수적이다. 본 연구에서는 앞에서 밝힌 바와 같이 탄소성 경화모델중의 하나인 HiSS- δ_0 모델을 이용하여 RI상태를 표현하고자한다. 본 모델의 항복함수(F)를 정의하면,

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

여기서 $S_r = \frac{\sqrt{27}}{2} \frac{J_{3D}}{J_{2D}^{3/2}}$ 이며, J_1 은 응력텐서의 일차 불변량(First Invariant of the Stress Tensor), 그리고 J_{3D} 는 축차응력 텐서(S_{ij})의 삼차 불변량 (Third Invariant of the Deviatoric Stress Tensor)이다. γ 는 재료의 파괴상태를 정의하는 매개변수이며, β 는 재료의 항복면을 모양을 정의하는 매개변수이다. 또한 n 은 재료의 상태의 변화와 관련된 매개변수이다. 끝으로 α 는 경화 함수(Rigby and Desai⁽¹⁵⁾)이며,

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

여기서 h_1 과 h_2 는 경화함수 매개변수이며, ξ 는 소성변형률 상각궤도(Plastic Strain Trajectory) $= \int \sqrt{de_{ij}^p de_{ij}^p}$ 이며, de_{ij}^p 는 소성변형률 텐서이다. 결론적으로 HiSS- δ_0 모델을 이용하여 응력-변형률 증분 방정식을 찾아내면 다음과 같다.

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

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

3.2 FA상태

본 연구에서는, 재료가 연속적으로 전단을 받아 최대응력을 발휘한 후 부피 변화가 그 이상 생기지 않고 전단변형률만이 누적해 가는 상태, 즉 한계상태(CS)를 이용하여 FA상태를 정의하였다. FA상태의 재료거동은 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. 교란함수

포화 사질토의 재료 특성에 기초한 교란도, D , 는 일반적으로 다음과 같이 정의한다.

$$D = \frac{M_s^c}{M_s} \quad (5)$$

여기서 M_s^c 는 FA상태의 흙만의 질량이며 M_s 는 초기상태의 흙만의 질량이다. 만약 흙의 단위 중량이 시간과 장소에 상관없이 일정하다면 식(5)는 다음과 같이 정리된다.

$$D = \frac{V_s^c}{V_s} = \frac{A_s^c}{A_s} \quad (6)$$

여기서 V 와 A 는 체적과 일정한 두께를 갖는 면적을 각각 나타낸다. 그리고, 교란도, D , 는 포화 사질토가 하중을 받기 전의 초기상태에는 재료전체가 완전 RI상태로 가정하여 $D=0$ 이며, 액상화가 발생하여 완전 파괴에 이르는 상태는 재료가 FA상태에 있다고 가정한다. 그리고 그때의 교란도는 D_u 이며 그 범위는 $D=D_u \leq 1$ 이다.

교란도를 전단 시험을 이용하여 정의하면 식(7)과 (8)와 같다.

$$D = \frac{e^i - e^a}{e^i - e^c} \quad (7)$$

$$D_\sigma = \frac{\frac{\bar{\sigma}^{(i)}}{\sigma^{(i)}} - \frac{\bar{\sigma}^{(a)}}{\sigma^{(a)}}}{\frac{\bar{\sigma}^{(i)}}{\sigma^{(i)}} - \frac{\bar{\sigma}^{(c)}}{\sigma^{(c)}}} \quad (8)$$

여기서 윗 첨자 i, c , 그리고 a 는 각각 RI상태, FA상태, 그리고 시료의 실제 거동상태를 표시한다. 또한 e 는 간극비를 나타내며, $\bar{\sigma}$ 는 평균 유효응력을 표현하고 있다. 식(8)은 본 연구에서 진동 실삼축 시험결과를 이용하여 교란도를 정의 할 때 이용할 식이다.

포화 사질토의 경우 체적 변형률보다는 전단 변형률이 교란도를 지배한다고 판단되므로, D 는 전단소성변형률 상각궤도(Deviatoric Plastic Strain Trajectory), ξ_D , 의 함수로 식(9)와 같이 나타낸다.

$$D = D_u (1 - e^{-A \xi_D^Z}) \quad (9)$$

여기서 A 와 Z 는 매개변수이며, 초기 유효구속압 ($\bar{\sigma}_0'$), 초기 밀도 (ρ_0), 그리고 진동수 (N) 등의 영향을 받는다. 그리고 ξ_D 를 정의하면 식(10)과 같다.

$$\xi_D = \int \sqrt{dE_{ij}^p dE_{ij}^p} \quad (10)$$

여기서 dE_{ij}^p 는 축차 소성변형률의 증분이다.

진동하중을 받는 재료의 경우, ξ_D 는 매회 진동수(N)의 최대응력에 해당하는 dE_{ij}^b 를 계산하여 정의한다. 그림 3은 식(9)와 식(10)을 이용하여 D를 도식적으로 표현한 것이다.

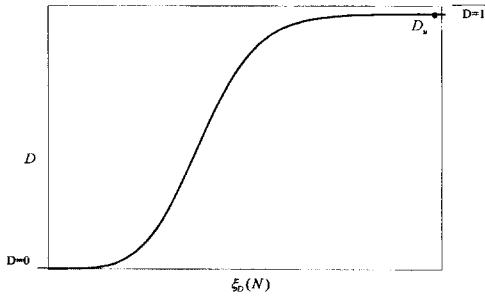


그림 3 교란도(D)의 개념도(Park⁽¹⁰⁾)

4. 진동 실삼축시험 및 결과

액상화 해석을 위해 본 연구에서 사용한 실내 시험기는 진동 실삼축시험기(Cyclic Truly Triaxial Test Device)이다. 본 시험장비의 특징은 삼차원 진동삼축시험 장비이며 삼면의 응력을 요구하는 수준에 맞게 조정할 수 있다. 이런 기능을 이용하여 세 주응력(σ_1 , σ_2 그리고 σ_3)을 임의로 조정하여 다양한 응력경로를 재현할 수 있다(그림 4). 진동 실삼축시험기는 다음과 같은 부분으로 이루어져있다. 알루미늄 프레임, 삼면 조립벽체, 응력조정 장비, 멤브레인, 공급수압과 부피변화 자동입력기 그리고 컴퓨터를 이용한 시험자료 획득시스템 등이 통합 체계적으로 구성되어있다.

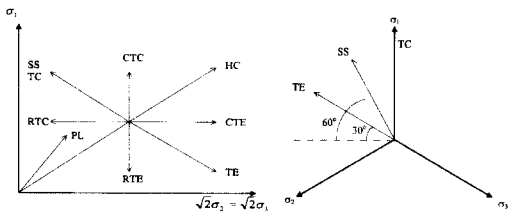


그림 4 전단시험을 이용한 응력 경로

본 시험장비를 이용하여 액상화를 재현하기 위해 사용된 재료는 완전 포화된 Ottawa모래이며, 본 모래의 역학적 특성은 표1에 정리하였다.

표 1 Ottawa모래의 역학적 특성

흙의 비중 (G_s)	2.64
극률 계수 (C_c)	1.60
균등 계수 (C_u)	2.00
최대간극비 (e_{max})	0.77
최소간극비 (e_{min})	0.46
전체단위중량(γ_t)	19.9(kN/m ³)

표1에서 정리한 물리적 특성을 지닌 포화 Ottawa모래를 주파수(Frequency) 0.1Hz의 반복 응력 조절법(Cyclic Stress Controlled Method)을 이용하여 시험하였다. 본 시험은 상대밀도 60%를 유지하며 세 종류의 다른 초기 유효구속압($\bar{\sigma}'_o=69, 138, 207\text{kPa}$)을 작용하여 시험을 수행하였다. 그림5 와 그림 6은 진동 실삼축시험을 수행하여 얻은 결과이다. 그림 5는 시간별 축차응력(σ_d), 축방향 변형률(ϵ_1) 그리고 과잉간극수압 변화량(u_e)을 각기 다른 구속압별로 나타낸 그림이다. 그리고 각기 다른 구속압조건에서 축차응력과 축방향 변형률 관계를 시험을 통해 도식화한 것이 그림 6이다. 그림 5와 6의 자료로부터 액상화 발생시기(진동수)를 산정할 수 있다. 즉 외부에서 가해지는 진동하중에 의해 포화 사질토 내의 과잉간극수압이 증가하여 초기 유효구속압과 일치하면 포화 사질토내의 전단 응력이 소멸하여 결국 그 시점에서 액상화가 발생하며 동시에 상대적으로 큰 변형이 발생하여 파괴에 이른다(Seed and Lee⁽⁴⁾). 이런 액상화현상의 이해를 바탕으로 시험결과를 분석하면 각 시험의 액상화시기를 판별할 수 있다.

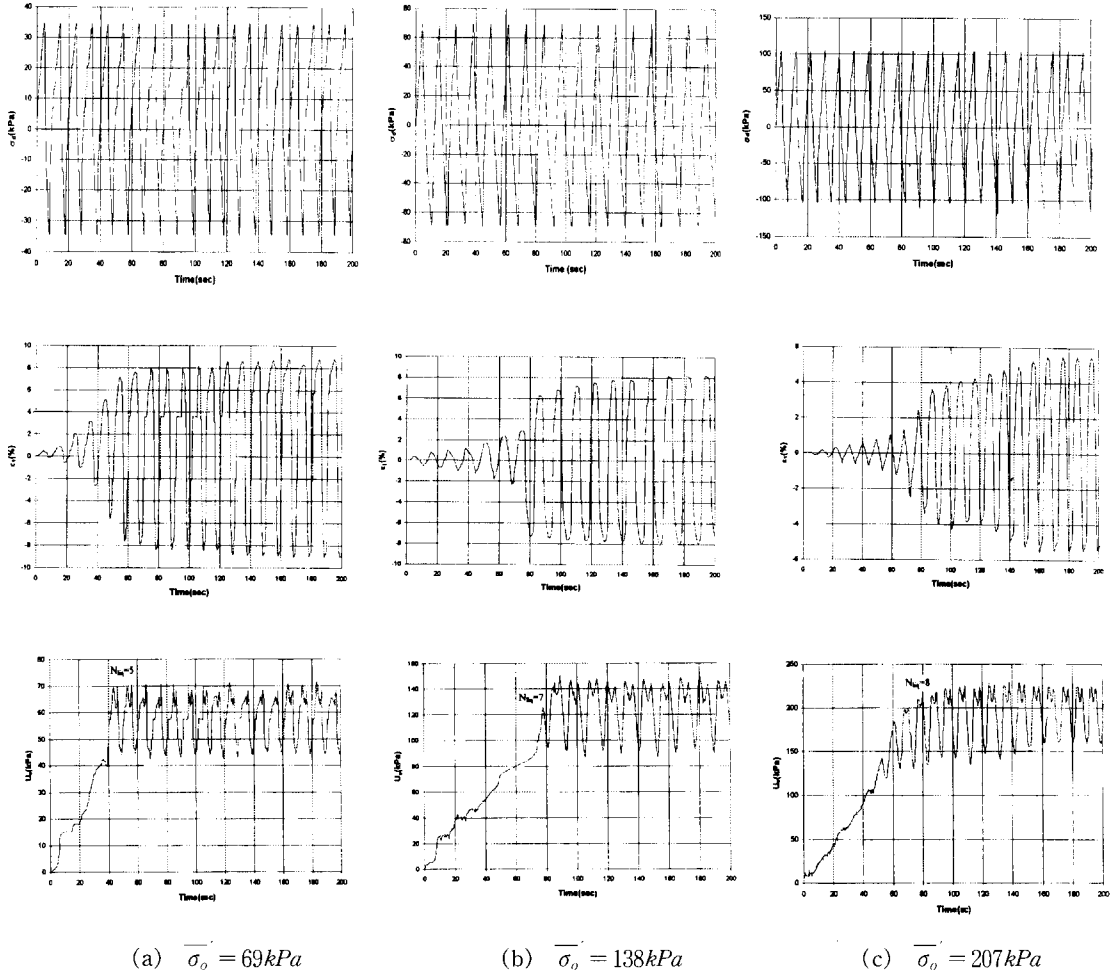


그림 5 구속압변화에 따른 축차응력, 변형률 그리고 과잉간극수압(Ottawa모래)

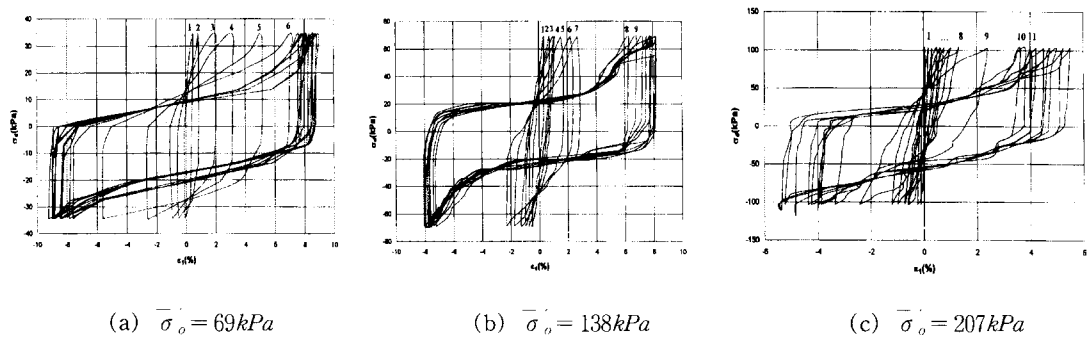


그림 6 축차응력과 변형률 관계도(Ottawa모래)

본 시험에서 판정한 액상화 시기는 표2에 정리하였다. 표2의 정리된 결과를 통해서 초기 구속압이 작을수록 액상화 발생이 용이하다는 것을 알 수 있다. 이렇게 시험을 통해서 판별한 액상화 시기(N_{liq} 진동수)를 본 연구에서 제안한 방법을 이용하여 예측한 액상화 발생시기(N_c 진동수)와 비교 검토하였다.

표 2 시험결과를 이용한 액상화 발생시기

$\bar{\sigma}_o$ (kPa)	N_{liq} (진동수)
69	5
138	7
207	8

5. 액상화 해석에 필요한 매개변수

진동실삼축시험의 결과 자료를 바탕으로 DSC모델에 필요한 각 상태별 매개변수를 선정했다. DSC모델에 필수적인 매개변수는 크게 세 그룹으로 나뉘어진다. 그 첫째 그룹이 RI상태를 구현하는데 필요한 매개변수(탄성계수와 소성계수) 7가지이다. 두 번째 그룹은 FA상태를 표현하는데 필수적인 매개변수(한계상태계수) 3가지이다. 끝으로 세 번째 그룹은 DSC함

표 3 DSC모델에 필요한 매개변수

그룹분류	그룹명	매개변수 기호	매개변수 값	매개변수 명
그룹1	탄성계수	E	193000(kPa)	탄성계수
		ν	0.380	포아송비
		γ	0.123	극한계수
	소성계수	β	0.000	극한계수
		n	2.450	상태변환계수
		h_1	0.8450	경화계수
		h_2	0.0215	경화계수
그룹2	한계상태 계수	\bar{m}	0.150	한계상태기울기
		λ	0.020	한계상태 계수
		e_o^c	0.601	한계상태 초기간극비
그룹3	DSC함수 계수	D_u	0.99	극한교란도
		Z	0.43	DSC함수 계수
		A	4.22	DSC함수 계수

수에 필요한 3가지 매개변수를 들 수 있다. 본 연구에서 사용한 매개변수를 찾는 방법은 Park⁽¹⁰⁾에 의해 자세히 발표되어있다. 표3에는 완전 포화된 Ottawa모래에 대한 실내 실험의 결과를 이용하여 산정한 매개변수와 각 변수에 대해서 약술하고 있다.

6. DSC이론을 기초로한 액상화 평가방법

DSC모델에 기초한 액상화평가 방법을 본 장에서 제안하고자한다. 그림7에는 본 연구에서 새롭게 제안하는 액상화평가 방법의 절차를 간략하게 나타내고 있다. 그림7에 설명된 액상화 평가 과정을 따라가며 기술하면 다음과 같다.

과정1: 지진하중에 의해 발생한 액상화 현상을 모델링 할 수 있는 진동전단시험을 수행하여 포화 사질토의 응력과 변형률을 찾는다. 본 연구에서는 진동전단시험의 하나인 진동 실삼축시험의 결과를 이용하였다. 본 시험결과를 이용하여 필요한 매개변수를 찾는다. 그러나, 매개변수를 찾는 과정은 현장 기술자들에게 어려우므로 최소 매개변수(A 와 Z)만을 이용한 간편법을 제안하였다.

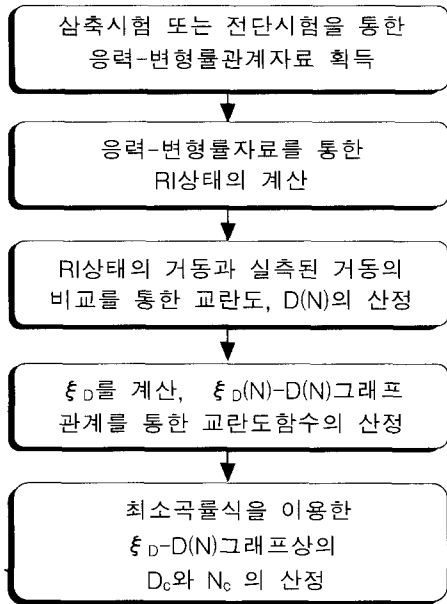
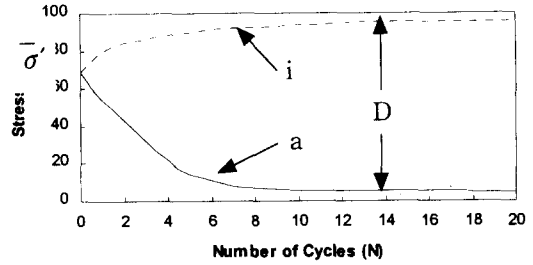


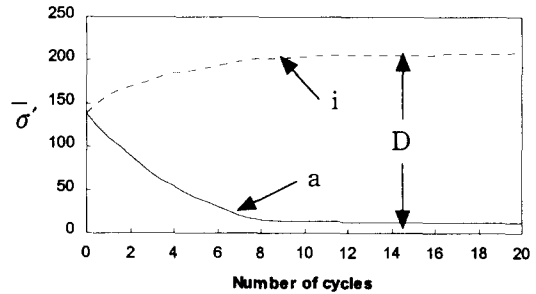
그림 7 액상화평가 방법의 흐름도

과정2: 과정1에서 찾은 매개변수를 식(3)대입하고, 적분하여 RI상태의 응력-변형률 산정한다. 또는 진동 전단시험 결과의 첫 번째 주기의 응력-변형률 관계로부터 RI상태를 대표하는 응력-변형률도로 확장한다(간편법); 본 간편법의 경우는 첫 번째 주기의 하중재하에 따른 시료의 반응을 RI상태의 경화거동으로 가정한다. 그림8에서 $\bar{\sigma}^{(i)} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ 는 RI상태의 평균 유효응력이다.

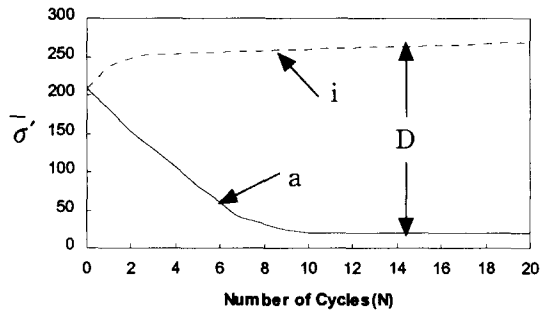
과정3: 시험결과로부터 평균 유효응력 $\bar{\sigma}^{(a)}$ 를 계산한다. 과정2에서 구한 $\bar{\sigma}^{(i)}$ 와 과정3에서 구한 $\bar{\sigma}^{(a)}$ 를 그림8에서 동시에 도시하였다. 그림8의 a는 시험결과로부터 구한 $\bar{\sigma}^{(a)}$ 의 평균값이며, i는 $\bar{\sigma}^{(i)}$ 를 나타내고 있다. 또한 FA상태의 평균 유효응력 ($\bar{\sigma}^{(c)}$)은 영으로 가정한다.



(a) $\bar{\sigma}_o = 69kPa$



(b) $\bar{\sigma}_o = 138kPa$



(c) $\bar{\sigma}_o = 207kPa$

그림 8 평균유효응력 과 RI상태 응력(Ottawa모래)

과정4: 식(8)과 그림8로부터 교란도(D)를 진동수(N)별로 계산한다.

과정5: 식(10)을 이용하여 $\xi_D(N)$ 를 계산한다. Park(1997)에 의해 $\xi_D(N)$ 을 계산하는 자세한 방법이 소개되어있다. 과정4와 과정5를 바탕으로, 그림9에서 D와 $\xi_D(N)$ 의 관계를 각각 다른 초기구속압에 따라 도시하고 있다. 그림들에 표기된 D_c 는 한계 교란도(Critical Disturbance)라고 부르며 그 점의 물리적 의미는 다음과 같다.

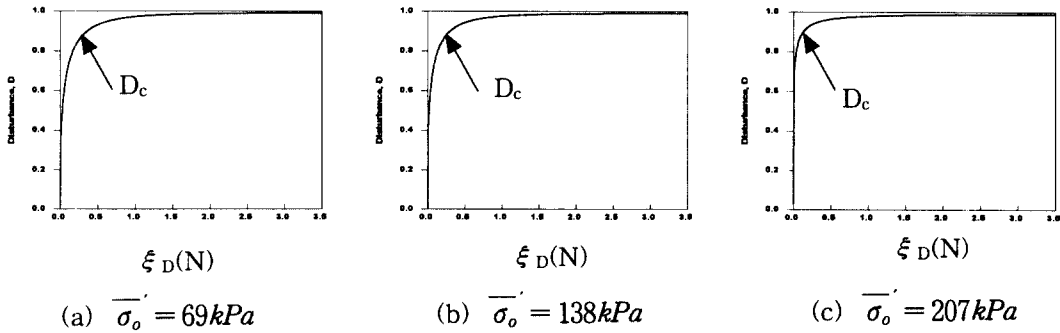


그림 9 교란도(D)와 $\xi_D(N)$ 그래프

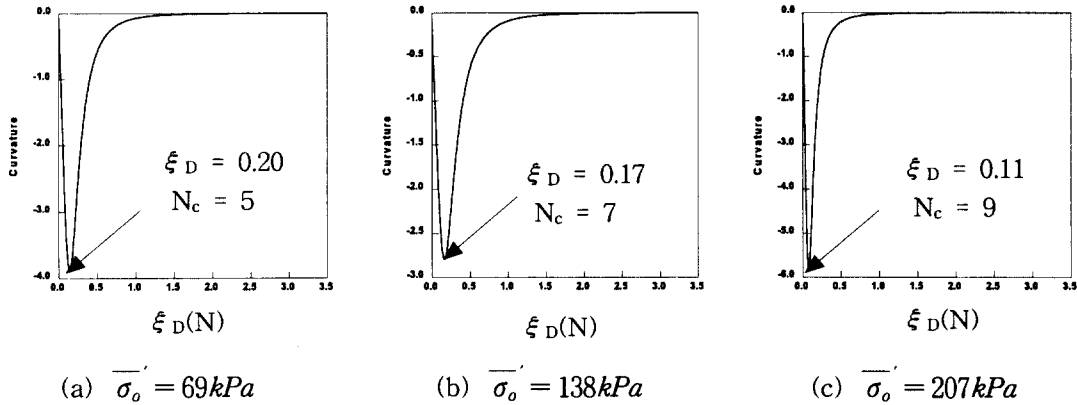


그림 10 곡률반경(R)과 ξ_D 그래프

D의 변화는 재료가 RI에서 FA로 변화하는 것과 밀접한 연관이 있다. 이런 관점에서 D의 변화율이 급격히 바뀐 점(D_c)을 재료의 미소구조의 상태변화 시점(Threshold Transition)으로 정의할 수 있다. 그러므로, 포화사질토의 D_c 는 사질토 내에 액상화가 발생하여 사질토 입자구성 상태가 급격히 변하는 시점과 일치한다고 가정한다.

과정6: 액상화 시기를 판정하는데 필수적인 D_c 를 찾는 방법에 대해서 기술하면 다음과 같다. 과정5에서 구한 D와 $\xi_D(N)$ 의 관계 그림으로부터 D의 곡률반경(Curvature; R)이 최소인 점을 D_c 로 정의한다.

$$R = \frac{D''}{(1+D'^2)^{3/2}} \quad (11)$$

여기서 D' 와 D'' 는 ξ_D 에 대한 1차 그리고 2차 미분을 나타내며, D는 식(9)을 이용하였다.

$$D' = \frac{dD}{d\xi_D} = AZ\xi_D^{Z-1} - \text{Exp}(-A\xi_D^Z) \quad (12)$$

그리고

$$D'' = \frac{d^2D}{d\xi_D^2} = AZ\xi_D^{Z-2}\text{Exp}(-A\xi_D^Z)(Z-1-AZ\xi_D^Z) \quad (13)$$

식(12)와 식(13)을 식(11)에 대입하여 R을 계산한 후, R과 ξ_D 관계 그래프(그림10)로부터 R이

최소인 점의 ξ_D 를 찾아내며 그 값의 D_c 와 한계진동수(N_c)을 찾아낸다(그림9).

과정1부터 과정6의 방법으로 계산한 D_c 와 N_c 는 각각 액상화 발생초기의 포화사질토의 한계 교란도와 한계주기로 정의한다. 표4에서, 실험을 통해 찾은 액상화시기(N_{liq} 진동수, 표2)와 제안 모델로부터 계산한 액상화 시기(N_c 진동수)는 비교적 일치하고 있음을 알 수 있다. 그리고 표4는 초기구속압과 액상화 발생가능성의 관계를 확연히 보여주고 있다. 즉, 초기구속압이 증가하면 액상화발생에 더많은 진동수(진동/지진 에너지)가 필요하며, 그의 재료역학적 증거로써 D_c 의 값이 증가하고 있음을 알 수 있다.

표 4 N_c 와 N_{liq} 의 비교

	N_{liq} (시험으로 부터)	N_c (DSC 모델로 부터)	D_c
$\sigma = 69kPa$	5	5	0.82
$\sigma = 138kPa$	7	7	0.83
$\sigma = 207kPa$	8	9	0.85

7. 결 론

본 연구에서는 DSC모델을 이론적 바탕으로 동하중을 받는 포화 사질토의 액상화가능성을 예측할 수 있는 새롭고 간편한 방법을 제안했다.

제안 방법은 외부의 하중에 의해 재료의 상태가 급격히 변화되는 시점인 한계 교란상태(D_c)를 포화 사질토의 액상화 시기로 가정함으로써 액상화 시기의 예측을 가능하게 하였다. 이렇게 제안된 방법의 검증을 위해 진동삼축 시험을 이용하여 얻은 결과로부터 찾은 액상화 시기(N_{liq})와 DSC모델을 기초로 본 연구에서 제안한 방법을 이용해서 산정한 액상화 시기(N_c)를 비교하였다. 비교 결과 본 연구에서 제안한 방법은 시험결과와 만족스러운 수준으로 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한, 두방법

모두에서 초기구속압이 액상화 발생가능성에 영향을 주는 인자로서 밝혀졌다. 즉, 초기구속압의 증가에 따라 액상화 발생에 필요한 외부진동하중(진동에너지)은 증가한다.

이 연구를 통해 제안된 액상화 가능성 평가 방법은 다른 기존의 방법에 비해 간편하고 신뢰성이 우수하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. Seed, H.B. and Idriss, I.M., "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential," *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 97, No. 9, 1971, pp. 1249-1273.
2. Ishihara, K., "Simple method of analysis for liquefaction of sand deposits during earthquakes," *Soils and Foundations, JSSMFE*, Vol. 17, No. 104, 1977, pp. 1-9.
3. Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K., and Yasuda, S., "A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan," *Proceedings of 5th Japan Earthquake Engineering Symposium*, 1978, pp. 641-648.
4. Seed, H.B. and Lee, K.L., "Liquefaction of saturated sands during cyclic loading," *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 92, No. SM6, 1966, pp. 105-134.
5. Finn, W.D.L., Lee, K.W., and Martin, G.R., "An effective stress model for liquefaction," *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 103, No. GT9, 1977, pp. 517-533.
6. Berrill, J.B. and Davis, R. O., "Energy dissipate and seismic liquefaction of sands: Revised model," *Soils and Foundations*, Vol. 25, No. 2, 1985, pp. 106-118.
7. Law, K.T., Cao, Y.L., and He, G.N., "An

- energy approach for assessing seismic liquefaction potential," *Can. Geotech. J.*, Vol. 278, 1990, pp. 320-329.
8. Figueroa, J.L., Saada, A.S., Liang, L., and Dahisaria, N.M., "Evaluation of soil liquefaction by energy principles," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 120, No. 9, 1994, pp. 1154-1569.
 9. Desai, C.S., Shao, C., and Rigby, D.B., "Discussion to evaluation of soil liquefaction by energy principles," by Figueroa et al., *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 122, No. 3, 1996, pp. 241-242.
 10. Park, I.J., "Disturbed State Modeling for Dynamic and Liquefaction Analysis," Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, University of Arizona, Tucson, Arizona, 1997.
 11. Desai, C.S., "The disturbed state as transition through self-adjustment concept for modeling mechanical response of materials and interfaces," *Report, Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics*, University of Arizona, Tucson, Arizona, 1992.
 12. Desai, C.S., "Chapter 8: Constitutive modeling using the disturbed state as microstructure self-adjustment concept," *Continuum Models for Material with Microstructure*, H.B.Muhlhaus, ed., John Wiley & Sons, U.K., 1995.
 13. Desai, C.S. and Wathugala, G.W., "Hierarchical and unified models for solids and discontinuities (Joints/Interfaces)," *Short Course Notes, Workshop on Implementation of Constitutive Laws of Engineering Materials*, Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, University of Arizona, Tucson, Arizona, 1987, pp. 9-10, 31-124.
 14. Roscoe, K.H., Schofield, A., and Wroth, C.P., "On the yielding of soils," *Geotechnique*, Vol. 8, 1957, pp. 22-53.
 15. Rigby, D.B. and Desai, C.S., "Testing, modeling, and application of saturated interfaces in dynamic soil-structure interaction," *Report, Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics*, University of Arizona, Tucson, Arizona, 1995.