

지반의 동적특성에 기초한 액상화 평가법 (I) : 이론제안

A New Methodology for the Assessment of Liquefaction Potential Based on the Dynamic Characteristics of Soils (I) : A Proposal of Methodology

최 재 순 ^{*1}	Choi, Jae-Soon	홍 우 석 ^{*2}	Hong, Woo-Suk
박 인 준 ^{*3}	Park, Inn-Joon	김 수 일 ^{*4}	Kim, Soo-II

Abstract

In this study, a new methodology for the assessment of liquefaction potential is proposed. Since there is no data on the liquefaction damage in Korea, the dynamic behavior of fully saturated soils is characterized through laboratory dynamic tests. There are two experimental parameters related to the soil liquefaction resistance characteristics ; the one is the index of disturbance determined by G/Gmax curve and the other is a plastic shear strain trajectory evaluated from stress-strain curve. The proposed methodology takes advantage of the site response analysis based on real earthquake records to determine the driving effect of earthquake. In the evaluation of liquefaction resistance characteristics, it is verified experimentally that the magnitude of cyclic shear stress has no influence on the critical value of plastic shear strain trajectory at which the initial liquefaction occurs. Cyclic triaxial tests under the conditions of various cyclic stress ratios and torsional shear tests are carried out for the purpose of verification. Through this study, the critical value at the initial liquefaction is found unique regardless of the cyclic stress ratio. It is also found that liquefaction resistance curve drawn with disturbance and plastic shear strain trajectory can simulate the behavior of fully saturated soils under dynamic loads.

요 지

본 연구에서는 변형률 수준별 실내진동시험 및 지진응답해석의 수행을 기초로 하는 새로운 액상화 평가법을 제안하였다. 제안된 평가법에서는 비배수조건 하에서 진동전단하중으로 야기된 과잉간극수압의 누적으로 액상화가 발생하는 점을 고려하여 진동하중을 받는 포화지반의 액상화 거동을 실내진동시험결과와 전단응력-전단변형률 이력곡선을 토대로 산정한 교란도와 소성 전단변형률 상각궤도의 변화로 정의하였으며, 이를 실지진 시간이력의 지반 내 거동변화와 연계시킴으로써 지진이 보유한 연속성 및 불규칙성을 합리적으로 고려하도록 하였다. 또한, 제안된 평가법에서는 진동하중의 변화에 관계없이 액상화 발생시 포화사질토의 동적특성은 일정하다는 일련의 연구사례를 토대로 내진 해석시 이용되는 전변형률 수준의 동적물성 획득시험만으로도 액상화 평가가 가능하도록 하였으며 정현하중의 크기를 달리한 진동삼축시험에서 산정된 액상화 발생시의 소성 전단변형률 상각궤도를 비교함으로써 이에 대한 검증연구를 수행하였다. 연구결과, 진동정현하중의 크기에 관계없이 액상화 발생시 지반의 동적특성치가 유일한 값을 나타내

*1 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사 후 과정 (Member, Post Doc., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ., geocjs@yonsei.ac.kr)

*2 정회원, (주)삼성물산 건설부문, 사원 (Member, Engineer, Samsung Engrg. & Construction)

*3 정회원, 한서대학교 공과대학 토목공학과 전임강사 (Member, Full Time Lecturer, Dept. of Civil Engrg., Hanseo Univ.)

*4 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

었다. 그러므로, 제안된 평가법은 변형률 수준별 실내진동시험을 통해 지반의 동적물성 획득과 액상화 평가 수행이 가능할 뿐만 아니라, 지진응답해석을 통해 불규칙한 실지진 시간이력 전부를 고려하는 특징으로 액상화 평가결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Disturbance, Dynamic tests, Liquefaction potential, Plastic shear strain trajectory

1. 서론

국내외 내진설계기준을 살펴보면, 모든 구조물 내진 설계시 지반의 액상화에 대해 안전해야 함을 규정으로 두고 있다. 이는 1차적으로 지진하중의 영향을 받는 지반의 안정성 확보를 통해 지상의 구조물 및 사회 구성원의 안전을 도모하는데 그 목적이 있는 것으로 대부분의 설계기준에서는 액상화 평가지침을 별도의 장으로 구분하여 설명하고 있다. 수록된 내진설계기준에서 액상화 평가에 관한 사항들을 살펴보면, 많은 지진자료 및 실내/현장시험을 토대로 제안된 Seed의 경험적 평가 방법(Seed 등, 1971)을 기초로 한 것이 일반적이며, 일본에는 이와 병행하여 실내진동시험의 수행을 적극 추천하고 있다. 그러나, 단순응력비교의 경험적 평가방법에서는 단순히 등가지진력과 지반저항력의 최대값만을 비교하므로 불규칙한 지진에 대한 지반의 동적거동을 충분히 반영하지 못하고 있을 뿐만 아니라, 강진피해자료 분석을 토대로 제안된 만큼, 국내와 같은 중약진 지진대에서의 이용시 과도한 안전성 확보로 인해 비경제적인 내진구조물이 건설될 가능성이 높다. 최근, 국내에서는 이러한 이유를 근거로 실내진동시험의 수행을 통해 지반의 동적특성을 규명하는 대안이 대두되고 있으며, 선진지진연구국가에서도 액상화 발생원인인 비배수조건으로 발생하는 과잉간극수압의 영향을 고려한 유효응력 개념의 동적 예측기법을 개발하는데 많은 연구력을 집중시키고 있다. 특히, 재료역학적 관점에서 진동하중을 받는 포화사질토 내부의 응력-변형률 거동

변화를 재료 내부의 교란에 의해 발생된 내부응력 및 과잉간극수압과 누적된 소성변형의 변화로 나타낸 교란 상태개념(Disturbed State Concept) (Desai, 1992)이 크게 주목받고 있다.

본 연구에서는 지진자료부족으로 인해 경험적 평가법에 대한 검증이 용이치 않은 국내 여건을 고려하여 실내진동시험의 수행을 기초로 지반의 동적 저항특성을 산정하고 실지진 시간이력에 대한 지진응답해석과의 연계를 통해 외력으로 작용하는 지진특성을 합리적으로 고려할 수 있는 새로운 액상화 평가법을 제안하고자 한다.

2. 교란상태개념에서의 지반 동적거동 모사

교란상태개념은 진동하중하의 포화사질토의 거동이 동역학적인 소성연화거동에 지배를 받고 있는 점을 고려할 수 있도록 제안되었다. 상대적으로 손상되지 않은 상태(Relative Intact State ; RIS)와 재료가 파괴되는 완전파괴상태(Fully Adjusted State ; FAS)의 2가지 기준 상태를 정의하고 진동하중이 재하되고 있는 거동상태(Observed State ; OS)를 초기 외부에서 하중 등의 영향을 받지 않은 상태(RI)의 재료가 외부하중으로부터 발생하는 재료내부의 미세구조 자체조정에 의해 점차적으로 파괴상태(FA)로 진행한다고 정의함으로써 액상화를 포함한 포화사질토의 연화거동을 표현하였다. 이러한 교란상태개념의 개요를 그림으로 나타내면 다음과 같다.

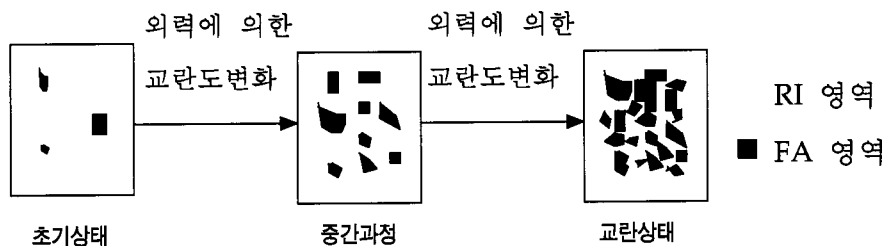


그림 1. 교란도의 변화에 따른 재료 내부의 상태변화 모식도 (Park, 1997)

Desai(1992)는 진동하중을 받는 포화사질토의 재료특성변화에 기인한 교란도를 식 (1)과 같이 정의하였으며 Park(1997)는 지반-구조물 상호작용에 있어서 토체와 상호접촉면의 진동하중에 관한 거동을 교란상태개념으로 설명하는 연구를 수행하였다.

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

여기서, 윗 첨자 i, c, 그리고 a 는 각각 시료의 RI상태, FA상태, 그리고 실제거동상태를 표시하며, $\bar{\sigma}$ 는 평균 유효응력이고 $\bar{\tau}$ 는 평균전단응력이다. 이에 관한 응력-변형률 관계를 도시하면 그림 2와 같다.

또한, 포화사질토 및 포화점성토에 대한 여러 실내진동시험을 통해서 재하횟수별로 식 (1)에 나타난 바와 같이 응력변화에 따른 교란도와 응력-변형률 상관도로부터 산정한 소성변형이 누적된 양을 표현하는 매개변수, 소성 전단변형률 상각계도의 관계가 그림 3과 같음을 밝히고 이에 관한 상관식을 식 (2)와 같이 정의하였다.

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

여기서, A, Z 그리고 D_u (≈ 0.99)는 재료의 매개변수이며, ξ_D 는 소성 전단변형률 상각계도이다. 소성 전단변형률 상각계도는 우선, 식 (3)을 이용하여 소성변형률 증분을 산정하고 식 (4)와 같이 소성변형률 증분에서 체적변형률 부분만을 감함으로써 전단변형률 부분을 산정한 후, 식 (5)와 같이 3축의 각 전단변형률의 제곱의 합에 대한 제곱근을 취함으로써 소성 전단변형률 상각계도의 증분을 구할 수 있으며, 이를 적분하면 식 (6)의 소성 전단변형률 상각계도를 산정할 수 있다.

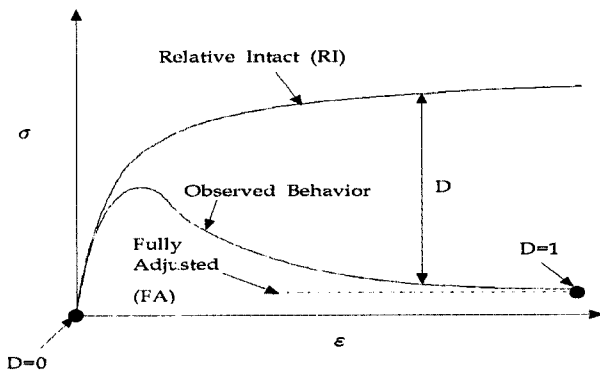


그림 2. 응력-변형률관계도상의 교란도 (Park, 1997)

$$d\varepsilon_i^p = d\varepsilon_i - d\varepsilon_i^e, \text{ 여기서, } d\varepsilon_i^e = \frac{d\sigma_i}{E_i} \quad (3)$$

여기서, 아래첨자 i는 주응력방향, 위첨자 e는 탄성, p는 소성을 의미하며 E는 탄성계수로서 진동삼축시험 또는 실삼축시험결과의 응력-변형률 관계로부터 산정할 수 있다.

$$dE_p^p = d\varepsilon_i^p - \frac{1}{3} d\varepsilon_v^p, \text{ 여기서, } d\varepsilon_v^p = \sum_{i=1}^3 d\varepsilon_i^p \quad (4)$$

여기서, dE_p^p 는 소성 전단변형률 증분이며, $d\varepsilon_v^p$ 는 소성 체적변형률 증분이다.

$$d\xi_D = \sqrt{(dE_p^p)^2 + (dE_p^p)^2 + (dE_p^p)^2} \quad (5)$$

$$\xi_D = \int d\xi_D = \sum_{N=1}^N (d\xi_D)_N = \int \sqrt{dE_p^p dE_p^p} \quad (6)$$

즉, 전단 소성변형률 상각계도는 소성 전단변형률 절대값의 누적된 양을 나타내고 있다.

국내에서는 김경환 등(1998)이 주문진 표준사를 대상으로 한 진동삼축시험을 통해 소산에너지 개념 및 교란상태개념이 진동하중을 받는 포화사질토의 액상화 발생시기를 신뢰성 높게 표현할 수 있음을 발표한 바 있으며, Desai(2000)는 교란상태개념과 에너지개념의 액상화 평가시 미세구조 고려의 상관성에 관해서 연구를 수행하였다.

3. 새로운 액상화 평가법 제안

본 연구에서는 진동재하시 토립자의 미세구조변화를 신뢰성 높게 예측할 수 있는 교란상태개념에 기초하여 실내진동시험을 통해 액상화 평가를 수행할 수 있는 방법을 개발·제안한다.

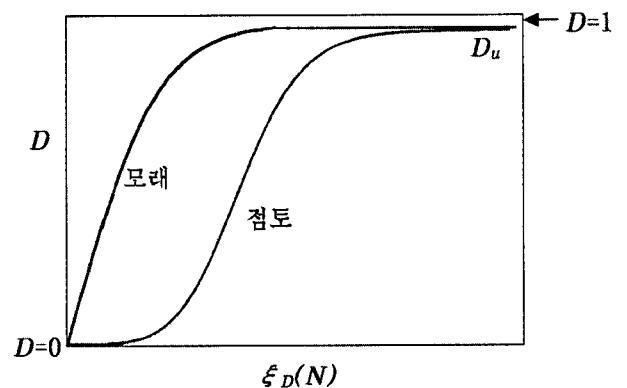


그림 3. 교란도 함수의 도식적인 형태 (Desai, 2001)

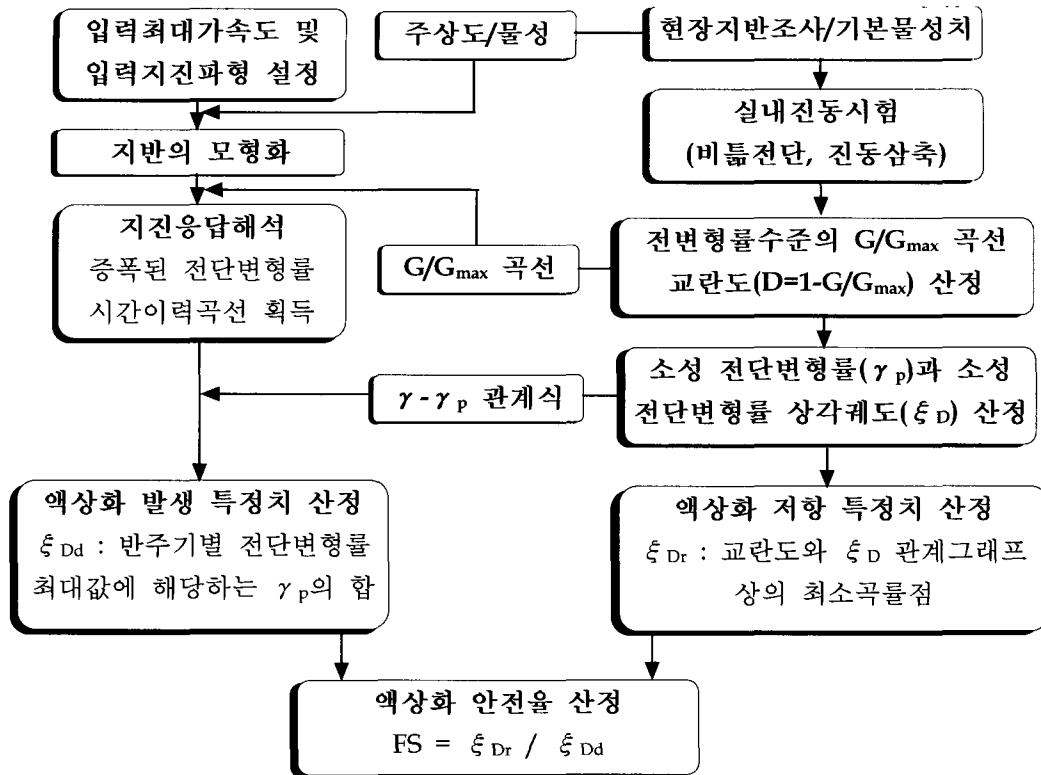


그림 4. 재료의 교란도 및 동적특성치에 기초한 액상화 평가법 개요

제안된 방법은 아래와 같이 지반의 액상화 저항특성 산정부분과 외력으로 작용하는 지진의 불규칙한 특성을 고려하여 개발되었다. 본 평가법의 개요를 요약하여 나타내면 그림 4와 같다.

그림 4를 보면, 왼쪽의 내용은 지진특성을 고려한 내용이며, 오른쪽의 내용은 실내진동시험에 기초한 지반의 저항특성을 고려한 내용으로 액상화 평가는 해당지반의 고유한 동적특성인 소성 전단변형률 상각계도를 통해 액상화 저항특성치를 산정한 후, 지진자료의 입력에 따른 지진응답해석을 통해 액상화 발생치를 산정비교함으로써 평가가 수행된다.

3.1 지반의 액상화 저항특성치

본 평가법에서는 지진하중을 받는 지반이 전단거동에 지배되는 점과 액상화를 발생시키는 과잉간극수압이 하중의 방향성에 크게 좌우되지 않고 누적되어 나타나는 점을 고려하여 응력-변형관계를 교란도와 누적된 소성변형량인 소성 전단변형률 상각계도로 표현한다.

지반이 전단거동에 지배되는 점을 간편하게 고려하기 위하여 식 (1)의 전단응력으로 표현된 식을 식 (7)과 같이 나타낸다. 이때, 교란도 산정시 3가지 기준상태시

의 전단변형률($\gamma_i = \gamma_a = \gamma_c$)이 동일함에 기초한다.

$$D = \frac{\frac{\tau^{(i)}}{\gamma_i} / \gamma_i - \frac{\tau^{(a)}}{\gamma_a} / \gamma_a}{\frac{\tau^{(i)}}{\gamma_i} / \gamma_i - \frac{\tau^{(c)}}{\gamma_c} / \gamma_c} = \frac{G_{\max} - G_a}{G_{\max} - G_c} \quad (7)$$

여기서, G_{\max} 는 최대전단탄성계수로 RI상태를 탄성 거동으로 고려한 것이며 G_c 는 한계상태에서의 전단탄성계수로 FA상태에서의 값을 의미하고, G_a 는 거동상태에서의 전단탄성계수를 의미한다. 식 (7)을 G_{\max} 로 나누고, 일반적으로 파괴시의 G_c/G_{\max} 의 값이 0에 근접함을 이용하면 다음의 식 (8)과 같이 나타낸다.

$$D = \frac{1 - G_a/G_{\max}}{1 - G_c/G_{\max}} = 1 - \frac{G_a}{G_{\max}} \quad (8)$$

여기서, G_a/G_{\max} 는 일반적인 내진해석시 실내진동시험 또는 경험식 등을 통해 우선적으로 산정되어야 하는 지반의 동적물성으로 전단변형률과의 상관관계를 통해 나타내는 것이 일반적이다. 식 (8)은 전변형률에서의 실내진동시험을 통해 획득된 재하횟수별 응력-변형률 이력결과로부터 도출된 전단변형률 수준별 전단탄성계수의 변화로부터 지반의 동적거동 변화를 교란도로 나타낸 것이다.

식 (8)에 나타난 바와 같이, 내부응력의 변화를 표현

하고 있는 교란도는 액상화 발생여부를 표현하는 지표로 간주될 수 있다. 즉, 액상화 발생과 같은 재료내부의 급격한 상태변화는 교란도와 누적된 소성변형량의 상관관계에 큰 영향을 주게 되어 그림 3의 포화사질토에 대한 곡선에 나타난 바와 같이 최초 선형적 거동을 보이다가 일정부근에서 상태변화를 나타내게 되고 이후, 교란도의 변화는 둔감한 반면, 누적 소성변형은 계속 증가한다. Park(1997)는 액상화 발생이 큰 상태변화를 나타내는 것으로 그림 3에 나타난 곡선의 최소곡률점에서 초기 액상화가 발생한다고 하였으며 이를 Ottawa모래를 대상으로 수행한 진동실삼축시험을 통해 규명한 바 있다. 제안된 평가법에서도 그림 3과 같은 상관도를 작성하고 액상화 발생을 곡선 상의 최소곡률점으로 간주하였으며 이때, 재하횟수별 교란도와 연계하여 산정된 소성 전단변형을 상각궤도를 액상화 저항특성치로 고려하도록 하였다.

제안된 평가법의 액상화 저항특성치 산정에 관한 특성을 요약 정리하면 다음과 같다.

- 1) 지진하중을 받는 지반은 전단거동에 지배를 받는다는 점을 고려하여 실내진동전단시험을 통해 포화사질토의 응력-변형을 상관관계로부터 응력변화에 따른 교란도와 이와 연계된 누적된 소성변형(식 (6)의 소성 전단 변형을 상각궤도)으로 표현.
- 2) 그림 3의 모래지반을 표현한 곡선이 진동하중을 받는 포화사질토 지반의 과잉간극수압 변화거동과 유사함을 이용하여 포화사질토의 거동변화를 ①의 응력-변형을 상관관계로부터 응력변화에 따른 교란도와 이와 연계된 누적된 소성변형(식 (6)의 소성 전단 변형을 상각궤도)으로 표현.
- 3) 액상화 발생은 재료가 급격한 상태변화를 일으키는 것으로 정의하고 교란도와 소성 전단변형을 상각궤도의 상관곡선의 최소곡률점에서 액상화가 발생한 것으로 고려.
- 4) 진동하중의 다양한 변화형태는 재료 내부에서 발생한 소산에너지에 영향을 주지 않는다는 의 연구내용(Okada and Nemat-Nasser, 1994)을 실험적으로 검토하고 이에 준하여 액상화 발생시의 소성 전단변형을 상각궤도가 유일함을 이용.

3.2 지진에 의한 액상화 발생특성치

기존의 액상화 평가법들을 살펴보면, 지반의 액상화 저항특성은 해당지층의 지반특성(상대밀도, SPT-N치, 세립분함유량, 평균입경, 유효구속압 등)에 기초하여 분석되는 반면, 지진에 의한 전단특성은 불규칙한 진동하중으로의 지진특성을 고려하지 않고 최대가속도 또는 등가전단응력과 같이 특정한 값만을 이용하여 하는 것이 일반적이다. 1970년 이후, 지반 내 지진거동변화에 대한 연구가 시작된 이후, 실지진 시간이력을 입력한 지진응답해석을 통해 지반 내 지진거동변화를 분석하는 연구에 많은 연구력이 집중되고 있지만, 이와 연계한 액상화 평가법 연구는 전무한 상태이다.

제안된 평가법에서는 불규칙한 진동하중으로의 지진특성을 합리적으로 고려하고자 실지진 시간이력의 입력을 통한 지진응답해석을 이용하도록 하였다. 특히, 액상화 저항특성치 산정에서 지반의 동적물성 산정도 가능함을 염두에 두었으며 이를 지진응답해석과 연계하여 해석대상지반 내의 지진거동변화도 함께 분석가능하도록 하였다. 또한, 지반의 액상화 저항특성이 변형특성으로 표현되는 점을 고려하여 실지진 시간이력을 입력한 지진응답해석으로부터 변형을 시간이력을 획득하여 이를 지진특성고려에 이용하도록 하였다.

지진에 의한 액상화 발생특성치 산정에 관한 특성을 요약 정리하면 다음과 같다.

1) 지진응답해석의 이용

기존의 경험적 평가법에서 등가전단응력개념(equivalent shear stress concept)에 기초하여 지진하중을 정현하중(sinusoidal loads)으로 단순화하고 최대값만을 이용함으로써 간편성이 크게 강조된 반면, 지진의 불규칙성을 적절하게 표현하기 어렵다. 그러므로, 제안된 평가법에서는 지진을 단순화한 특정치가 아닌 불규칙한 연속진동으로의 지진특성고려를 위해 지진응답해석의 수행을 포함하도록 하였다. 또한, 액상화 평가는 연직분포의 지반조사자료를 대상으로 깊이별로 수행하는 것이 일반적이며 정확한 지진의 지반 내 거동도 지진응답해석을 통해 예측하게 되는 점도 고려되었다.

2) 누적 소성변형특성 비교

일반적으로 지진응답해석을 통해 획득가능한 결과는 변위, 변형률, 속도, 가속도, 전단응력 등에 관한 시간이

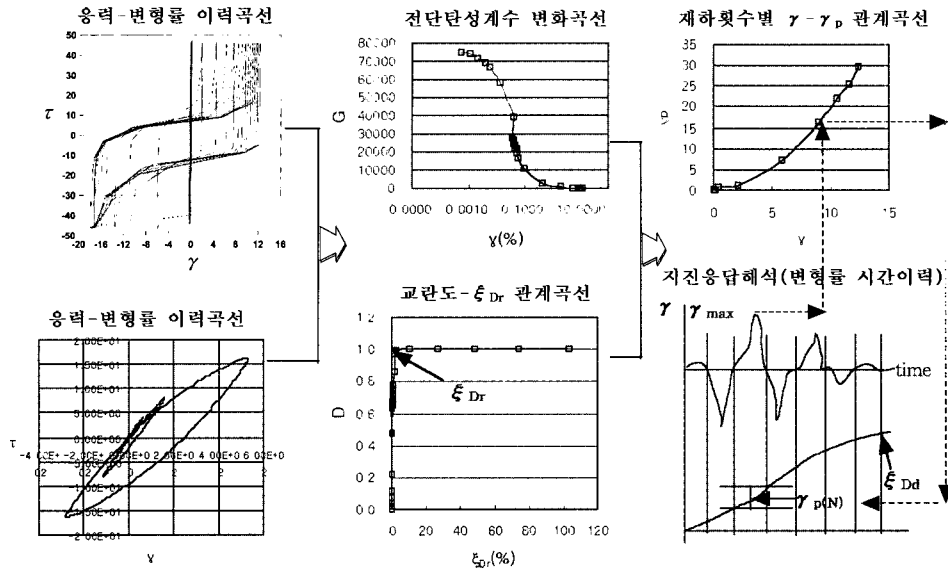


그림 5. 제안된 평가법에 의한 평가절차 산정 모식도

력이다. 1)의 지반의 저항특성이 실내진동전단시험을 통해 산정된 소성변형에 관계된 점을 고려하여 지진응답해석을 통해 변형률 시간이력을 획득하고 이를 소성 변형특성과 연관시킴으로써 단순응력비교의 기존 평가법과 차별하여 시간이력 모두를 고려하여 산정한 누적 소성변형량을 지반의 저항특성으로 표현한 1)의 누적된 소성변형량과 비교함으로써 액상화 평가를 수행하도록 하였다.

3.3 제안된 평가법의 평가절차

이상의 내용을 토대로 제안된 평가법의 평가절차를 요약하여 나타내면 그림 5와 같다.

그림 5의 내용을 평가순서에 간략하게 설명하면 다음과 같다.

- 1) 해석지반심도에 대한 지반조사자료를 토대로 시료를 성형하여 변형률 수준별 실내진동시험을 수행하고 전단응력-전단변형률 상관관계를 분석한다. 변형률 수준별 실내진동시험으로는 저변형률수준의 경우, 전자기력을 이용한 비틀전단시험이 있으며, 고변형률수준에서는 진동삼축시험, 진동비틀전단시험, 진동전단시험 등이 있다.
- 2) 응력-변형률 관계곡선으로부터 전단탄성계수의 변화를 도출하고 이를 토대로 교란도를 산정함과 동시에

식 (3)~식 (6)을 이용하여 재하횟수에 따른 소성 전단변형률 상각계도를 산정한다. 이때, 소성 전단변형률 상각계도 산정시 소성 전단변형률(γ_p)은 peak to peak 방법을 이용하여 산정한다. 재하횟수별 교란도는 식 (8)을 이용하여 산정하며 이때, 최대전단탄성계수(G_{max})는 threshold strain으로 간주되는 $10^{-3}\%$ 의 값으로 한다.

- 3) 교란도-소성 전단변형률 상각계도로 표현되는 액상화 저항특성함수를 정의하고 함수에서의 최소곡률시의 값을 액상화 저항특성치(ξ_{Dr})로 산정하며 액상화 발생치 산정을 위하여 재하횟수별 전단변형률과 소성 전단변형률과의 상관관계를 토대로 최적함수식을 구성한다.
- 4) 해석지반 전단면에 대한 지반조사자료 및 실내진동시험 수행을 통해 산정된 지반의 동적특성을 입력하여 지진응답해석을 한다. 해석시 입력최대가속도는 「어항 및 항만시설의 내진설계 표준서」(한국지진공학회, 1999)에 의거, 실내진동시험에 기초한 액상화 상세예측의 수행이 필요한 내진 1등급 수준의 $0.154g$ 이다.
- 5) 지진응답 해석결과 중 변형률 시간이력에서의 각 싸이클별 첨두변형률을 지반의 액상화 저항특성치 산정시 규명된 전단변형률-소성 전단변형률과의 관계

식에 대입함으로써, 각 사이클별 소성 전단변형률을 산정하고 이를 계속적으로 누적시켜 시간이력 전체에 대한 소성 전단변형률 상각궤도인 액상화 발생특성치(ξ_{Dd})를 산정한다. 산정시 주의사항은 실내진동 시험결과는 정현하중 1 사이클에 대한 결과이므로 액상화 발생특성치 산정시에는 압축 및 인장부의 첨두변형률값에 대해 1/2의 값을 적용한다.

6) 3)의 액상화 저항특성치와 5)의 액상화 발생특성치를 비교하여 액상화 평가를 수행한다.

4. 실내진동전단시험을 통한 액상화 저항특성치의 고유성 검증

본 연구에서는 진동하중으로 재하된 전단변형률의 시간에 따른 다양한 변화형태는 진동하중에 의해 발생한 소산에너지에 영향을 주지 않는다는 연구내용(Okada and Nemat-Nasser, 1994)의 검증을 위해 진동하중의 크기를 달리한 3회의 진동삼축시험을 통해 소성 전단변형

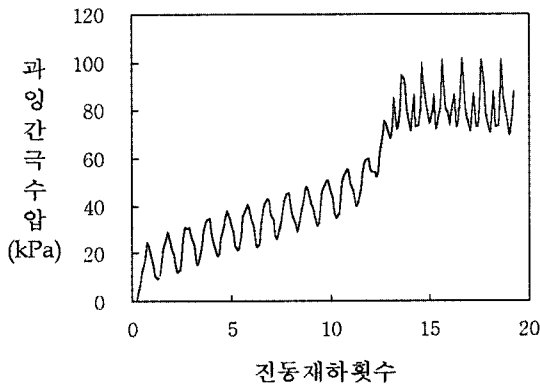
표 1. 평가방법 검증을 위한 실내진동시험시 제반조건

입도분포	물성	구분	시험조건
평균입경 D_{50} (mm)	0.208	제어방식	응력제어방식
상대밀도(%)	50	진동전단응력비	진동삼축시험 : 0.2, 0.25, 0.3
초기유효구속압	100 kPa	시료조건	포화비배수 ($B_{값} \geq 0.97$)
진동조건	0.1 Hz 정현파	시료성형	수중침강법

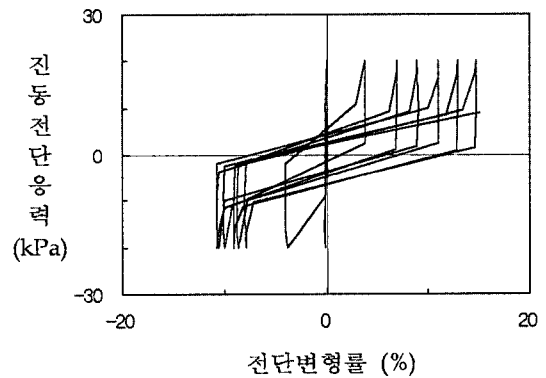
률 상각궤도의 변화를 분석하였다. 표 1은 진동삼축시험시 시험조건 및 제반사항을 나타내고 있으며 그림 8~그림 10은 실내시험을 통해 획득된 간극수압의 변화 및 응력-변형률 이력곡선이다.

그림 6~그림 8의 응력-변형률 상관도로부터 그림 5의 평가과정에 준하여 각각의 소성 전단변형률 상각궤도를 산정한 내용을 나타내면 그림 9와 같다.

그림 9를 보면, 소성 전단변형률 상각궤도의 변화가 진동응력비의 변화에 변화정도가 미미한 것으로 나타났으며 특히, 액상화 발생시의 값은 거의 동일한 것으로

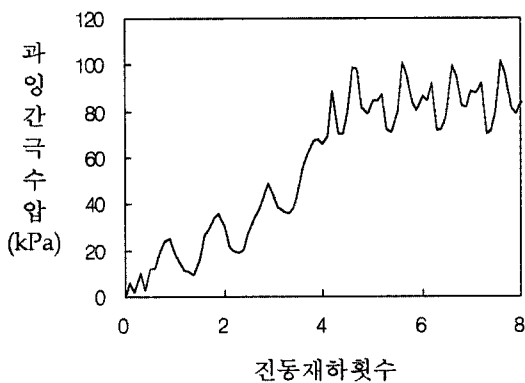


(a) 간극수압의 변화

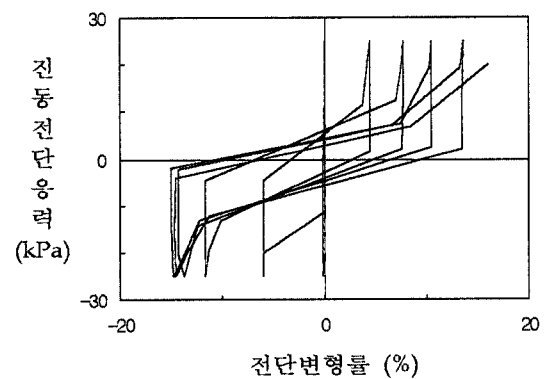


(b) 전단응력-변형률 이력곡선

그림 6. 전단응력-전단변형률 이력곡선 (전단응력비 0.2)

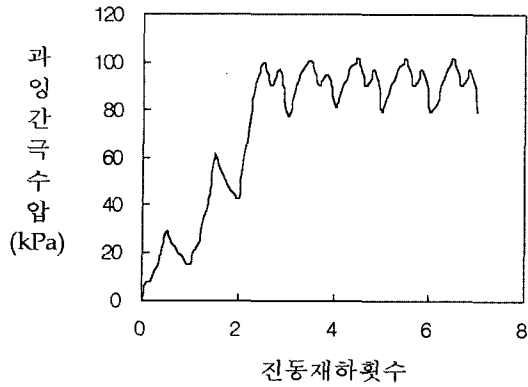


(a) 간극수압의 변화

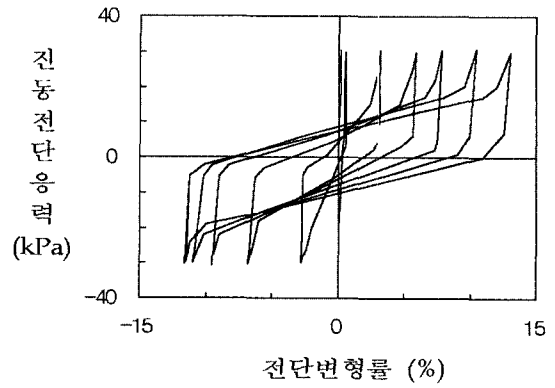


(b) 전단응력-변형률 이력곡선

그림 7. 전단응력-전단변형률 이력곡선 (전단응력비 0.25)

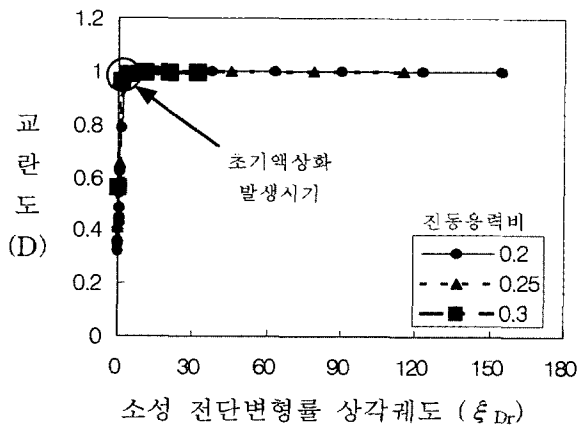


(a) 간극수압의 변화

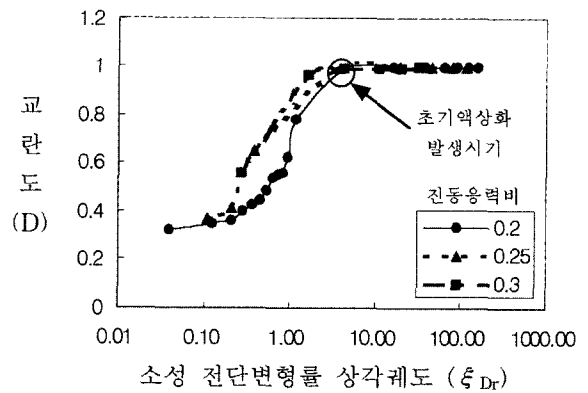


(b) 전단응력-변형률 이력곡선

그림 8. 전단응력-전단변형률 이력곡선 (전단응력비 0.3)



(a) 일반눈금



(b) 로그눈금

그림 9. 초기액상화 시기에서의 소성 전단변형률 상각계도

나타났다. 그러므로, 제안된 방법에서 이용되는 주매개 변수인 소성 전단변형률 상각계도는 액상화를 포함한 지반의 동적특성을 잘 표현하고 있을 뿐만 아니라 액상화 발생시의 값은 지반의 고유한 동적특성치로 간주해도 무방함을 알 수 있다. 또한, 변형률 수준별 실내진동 시험은 내진해석시 정확한 지반의 동적물성(G/G_{max} 곡선 및 감쇠비 곡선) 획득을 위해 수행되는 시험일 뿐만 아니라, 국내 내진 1등급 구조물에 대해서는 변형률 수준별 실내진동시험에 기초하여 동적물성을 산정할 것을 추천하고 있음을 고려할 때, 본 평가법은 액상화 평가와 더불어 지반의 동적물성에 대한 시험자료를 확보할 수 있는 장점을 보유하고 있는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 진동하중을 받는 포화사질토 내 재료 역학적 미세구조의 변화를 규명할 수 있는 교란상태개

념을 응용하여 실험적 액상화 평가법을 제안하였다. 제안된 평가방법에서는 진동하중을 받는 포화사질토의 응력-변형률 이력변화를 이용하여 소성 전단변형률 상각계도와 전단탄성계수의 변화에 따른 교란도로 액상화 거동을 규명하고 이와 더불어 실시된 시간이력을 입력한 지진응답해석을 통해 불규칙하게 변화하는 지진 특성 전부를 고려하도록 하였다.

본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 진동응력비를 달리한 실내진동시험결과들을 토대로 주매개변수인 교란도와 소성 전단변형률 상각계도의 변화를 분석한 결과, 각각의 시험에서 액상화가 발생된 시기의 값들이 거의 일정하게 나타남에 따라 액상화로 표현되는 지반의 한계 소성 전단변형률 상각계도는 지반이 갖는 고유한 특성이며, 이를 액상화 평가시 한계기준으로 채택가능함을 알 수 있었다.
- (2) 제안된 평가법에서는 변형률 수준별 실내진동시험

을 통해 액상화 평가 및 지반의 동적물성 획득이 가능할 뿐만 아니라, 실내진동시험의 수행과 불규칙한 실지진 시간이력 전부를 고려하는 방법상의 특징으로 인해 신뢰성 높은 액상화 평가가 수행될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금과 교육부를 통한 두뇌한국21 지원에 의한 것입니다.

참고 문헌

1. 김경환, 박인준, 김수일 (1998), "재료의 역학적 거동특성에 기초한 액상화 평가방법," *한국지반공학회 논문집*, 한국지반공학회, 14권, 11호, pp. 205~218.
2. 한국지진공학회, *항만 및 여항시설의 내진설계 표준서*, 해양수산부, 1999.

3. 홍우석 (2001), *교란상태개념에 기초한 액상화 상세예측법 제안*, 석사학위논문, 연세대학교.
4. Desai, C. S. (1992), "The Disturbed State as a Phase Transformation Through Self-Adjustment Concept for Modelling of Mechanical Response of Materials and Interfaces", *Report to the National Science Foundation*, Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, University of Arizona, Tuscon, Arizona.
5. Desai, C. S. (2000), "Evaluation of Liquefaction Using Disturbed State and Energy Approaches", *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 7, pp. 618~631.
6. Desai, C. S. (2001), *Mechanics of Materials and Interfaces ; The Disturbed State Concept*, CRC Press.
7. Okada, N. and Nemat-Nasser, S. (1994), "Energy Dissipation in Inelastic Flow of Saturated Cohesionless Granular Media", *Geotechnique*, Vol. 44, No. 1, 1994, pp. 1~19.
8. Park, I. J. (1997), *Disturbed State Modelling for Dynamic and Liquefaction Analysis*, Ph.D. Dissertation, Univ. of Arizona, Tuscon, Arizona.
9. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971), "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 97, No. SM9, pp. 1249~1274.

(접수일자 2001. 9. 28, 심사완료일 2002. 2. 8)