

지반의 동적특성에 기초한 액상화 평가법 (II) : 타당성 검토

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

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 and characteristics of the proposed methodology are verified. The experimental parameter of this methodology, that is, the plastic shear strain trajectory, is compared with the dissipated energy. It is shown that this parameter can express the liquefaction behavior which is generated by excess pore water pressure. This methodology takes advantage of the shear strain time history determined from the site response analysis based on the real time history of earthquake. In this site response analysis, shock type and vibration type records of similar predominant frequency are inputted. The liquefaction safety factors based on the proposed methodology and Korean detailed assessment related to the classical method are calculated from the results of the site response analysis and laboratory dynamic tests. Through this study, it is found that the proposed methodology can not only simulate the liquefaction behavior of saturated soils but also express the seismic characteristics reasonably : loading type, predominant frequency, maximum acceleration, duration time.

요 지

본 연구에서는 진동하중을 받는 지반의 교란정도차이를 통해 액상화 거동을 규명하는 교란상태개념에 기초하여 제안된 액상화 평가법의 타당성을 비교실험을 통하여 검증하였다. 제안된 평가법의 타당성 검토를 위해, 실내진동시험을 토대로 소산에너지 개념에 기초한 해석결과와 비교하였다. 또한, 불규칙한 지진의 시간이력 전부를 고려하는 제안된 평가법의 특성을 분석하기 위하여 임의의 해석대상지반에 대해 2가지 형태의 실지진 시간이력을 입력한 지진 응답해석을 토대로 액상화 평가를 수행하였으며 이용된 액상화 평가법은 Seed의 경험적 평가방법(Seed 등, 1971)을 국내 실정에 부합되도록 수정보완한 방법(김수일 등, 2000)으로 우리나라 해양수산부 주관으로 편찬된 「항만 및 어항 시설의 내진설계 표준서」에 인용된 방법이다. 액상화 저항특성에 관한 타당성 검토결과, 제안된 평가법과 소산에너지 개념에 기초한 해석결과가 과잉간극수압의 누적으로 발생하는 액상화 현상을 신뢰성 높게 표현하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 액상화 평가예를 통해 제안된 평가법에서의 지진력 고려에 대한 특성을 분석한 결과, 제안된 평가법에서는 실지진 시간이력에 대한 지진응답해석을 통해 최대가속도, 탁월주파수, 진동형태, 지속시간 등으로 표현되는 지진특성을 합리적으로 고려되고 있는 반면, 지진에 의한 등가전단응력 산정시 등가의 최대값을 이용하는 액상화 상세예측의 경우, 지진응답해석의 지반 내 지진증폭현상을 단순히 최대가속도만으로 표현함으로써 불규칙한 가속도

*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.)

가 연속재하되는 지진특성을 충분히 반영하지 못하는 것으로 나타났다. 연구결과, 제안된 평가법은 실내진동시험의 수행 및 실지진 시간이력 전부에 대한 고려를 포함하고 있으므로 이를 기초로 한 액상화 평가가 신뢰성이 높다고 판단된다.

Keywords : Dissipate energy, Disturbance, Liquefaction potential, Plastic shear strain trajectory, Site response analysis

1. 서론

1964년 Niigata 지진으로부터 액상화 발생메카니즘에 대한 상세한 연구가 시작된 이후로, 미국 및 일본에서는 자국의 특성상 많은 지진자료 및 지진관련시험자료를 토대로 경험적 평가방법을 계속적으로 수정보완해 오고 있다. 그러나, 기존의 경험적 평가방법에서는 단순히 지진력과 지반저항력의 최대값만을 비교하므로 불규칙한 지진에 대한 지반의 동적거동을 충분히 반영하지 못한다. 또한 강진지진자료를 토대로 제안된 만큼, 별도의 수정보완작업없이 국내와 같은 중약진지진지역에서 이를 이용하는 경우, 보수적인 결과와 함께 비경제적인 내진구조물의 건설을 야기시킬 수 있다. 최근, 국내에서도 이러한 문제점이 여러 지진공학기술자로부터 제시되면서 지진규모, 가속도, 지속시간, 주기특성 등으로 구성되는 설계지반운동에 대한 국내 지진특성의 결정과 더불어 실내진동시험을 통하여 지반의 동적거동을 규명하자는 대안(신윤섭 등, 1999)이 크게 주목받고 있다. 실내진동시험을 이용한 액상화 저항특성 규명은 진동하중의 크기를 달리한 실내진동시험을 통해 액상화 발생시의 정현하중 재하횟수와 진동하중과의 상관관계를 규명하고 이를 토대로 지진규모별 액상화 저항응력비를 산정하는 기존의 응력비교법이 일반적이며 최근, 재료역학적 관점에서 진동하중하의 포화지반의 거동을 소산에너지(dissipated energy)의 변화로 해석하는 이론과 미세구조의 교란도 변화로 해석하는 교란상태개념(disturbed state concept)(Desai, 1992)이 제안된 바 있다.

본 연구에서는 「지반의 동적특성에 기초한 액상화 평가법 (I) : 이론제안」의 교란상태개념에 기초한 액상화 평가법의 타당성과 특성을 검토하기 위해 전변형률수준의 실내진동시험을 토대로 소산에너지 개념에 기초한 액상화 저항특성을 비교하고자 하며, 기존의 응력비교방법에 기초한 액상화 상세예측결과와도 비교 분석하고자 한다.

2. 실내진동시험에 기초한 액상화 해석법

기존의 응력비교방법은 지진력 및 지반저항력의 최대응력비를 비교하는 것으로, 지반의 액상화 저항응력은 진동하중을 달리한 실내진동시험의 수행을 통해 결정한다. 최근에는 토립자와 간극수의 복합거동으로 발생하는 액상화 현상을 재료역학적 관점에서 진동하중을 받는 복합재료의 연화거동(softening behavior)으로 설명하려는 연구가 수행되고 있으며 대표적인 이론으로 소산에너지 개념과 교란상태개념 등이 있다.

본 연구는 교란상태개념에 기초하여 제안된 평가법에 대한 타당성 연구로 교란상태개념에 대한 이론설명 및 이에 기초한 새로운 액상화 평가법에 관한 내용은 「지반의 동적특성에 기초한 액상화 평가법 (I) : 이론제안」에서 자세하게 설명하였으므로 이에 대한 설명은 생략하였다.

2.1 기존의 응력비교 방법

불규칙한 지진력을 등가지진응력(equivalent shear stress)으로 표현하고, 실내진동시험을 통해 산정된 액상화 저항응력비(liquefaction resistance stress ratio)를 비교하는 내용을 포함하고 있는 응력비교의 액상화 평가는 실험적 연구를 중시하는 일본에서 보편화되어 있다. 일반적으로 등가지진응력(Seed and Idriss, 1971)은 정현하중화한 식을 이용하며 액상화 저항응력비 산정은 정현파(sinusoidal)형태의 진동전단응력비 수준을 달리한 3회 이상의 실내진동시험을 통해 산정한다. 특히, 저항응력비 산정의 경우, 액상화 발생시의 정현하중 재하횟수를 통해 지진규모를 고려하는데, 일본에서는 20회로 규정화하여 지진규모 7.5만을 고려하고 있는 반면, Seed 등(1983)는 지진자료분석을 통해 정현하중 $0.65 \tau_{max}$ 에 대한 지진규모별 재하횟수를 다음의 표 1과 같이 제안하였다.

국내의 경우, 김수일 등(2000)이 표 1의 내용을 포함

표 1. 지진규모별 등가진동 재하횟수 (Seed 등, 1983)

지진규모	5.25	6.00	6.75	7.50
진동재하횟수	2-3 회	5-6 회	10 회	15 회

한 Seed와 Idriss의 이론(1971)을 수정보완하여 국내 적합한 액상화 평가법을 제안한 바 있으며 일련의 내용이 해양수산부 주관으로 작성된 국내 「항만 및 어항시설의 내진설계 표준서」에서 인용된 바 있다. 국내 액상화 상세예측법의 내용을 요약 정리하면 그림 1과 같다.

그림 1을 보면, 지진에 의한 등가진동응력비는 지진 응답해석을 통해 산정된 해석지층의 가속도를 이용하여 산정하고 지반의 액상화 저항응력비는 실내진동시험결과를 토대로 작성된 액상화 저항응력비 산정곡선상에서 진동재하횟수 10회시의 값을 적용시켜 산정한다. 여기서, 진동재하횟수 10회는 표 1의 내용을 토대로 중약진 지진대로 구분되는 국내 지진특성을 고려하여 한시적으로 선택한 지진규모 6.5에 해당되는 값이다.

2.2 소산에너지 개념에 기초한 액상화 평가

지진에 의해 발생하는 미세구조의 소산에너지에 기초한 방법으로 Nemat-Nasser와 Shokooch(1979)는 액상화 현상에 있어 간극수압의 변화와 토립자 내부의 소산

에너지와의 관계에 대한 연구결과를 발표하였다. 소산 에너지 개념은 진동전단하중이 재하되는 경우, 포화사질토에서 발생하는 토립자의 미세구조의 재배열과 그에 따른 에너지의 소산에 대한 연구에 기초를 두고 있는 것으로 진동전단에 의한 입자의 재배열은 건조사질토의 경우에는 밀도의 증가를 가져오며, 비배수상태의 포화사질토의 경우에는 액상화 발생의 원인을 제공하는 것으로 정의하고 있다. 이러한 정의를 토대로 단위간극비 변화에 요구되는 단위에너지의 관계를 다음과 같다.

$$dW = -\bar{\nu} \frac{de}{f(1+u_n)g(e-e_{min})} \quad (1)$$

여기서, de 는 단위간극비 변화, dW 는 단위에너지 변화, 그리고, u_n 은 정규화된 간극수압으로써 실제의 간극수압을 유효구속압으로 나누어준 값이며, $\bar{\nu}$ 는 구속압에 따라 좌우되는 음의 매개변수이며, e_{min} 은 최소간극비를 의미한다. 또한, f 와 g 는 각각 무차원화된 구속압과 간극비의 함수로 다음과 같이 나타낸다.

$$f(1+u_n) \equiv (1+u_n)^r, \quad r > 0 \quad (2)$$

$$g(e_0 + e_{min}) \equiv (e_0 + e_{min})^n, \quad n > 1 \quad (3)$$

여기서 n, r 은 시험에 따라 결정되는 상수이며, u_n 과

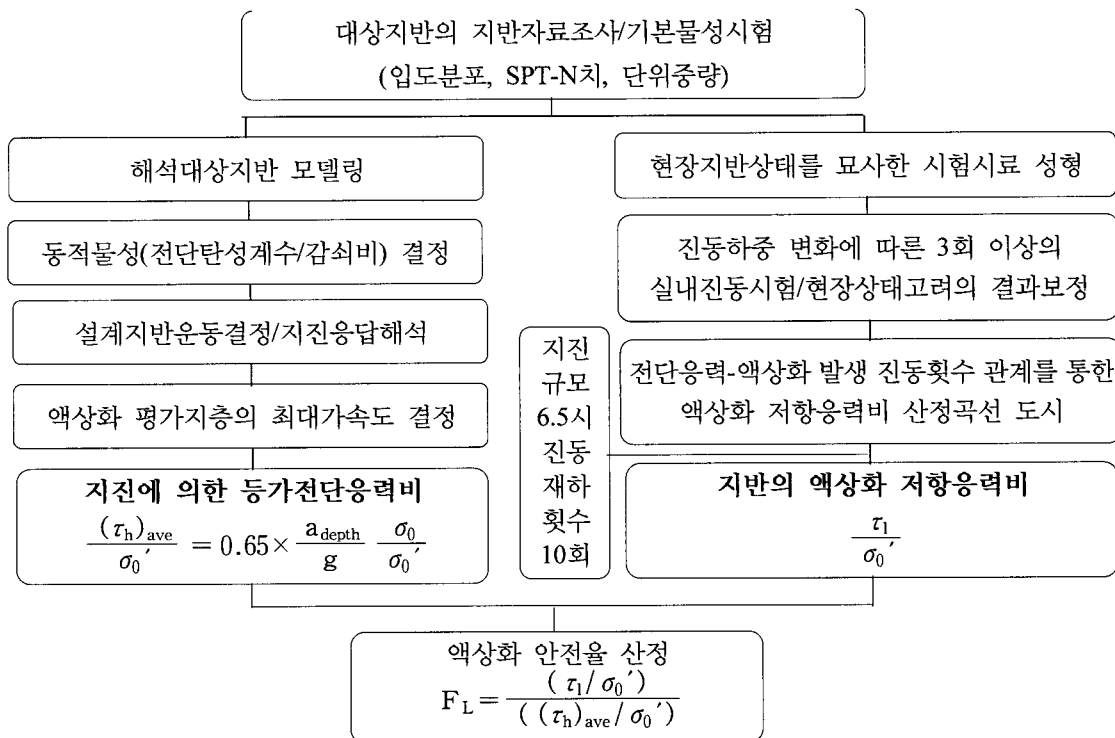


그림 1. 응력비교를 통한 액상화 상세예측법 개요 (한국지진공학회, 1999)

e는 모두 무차원의 항이므로 dW와 ν 는 물리적으로 동일한 차원을 갖는다. 또한, 식 (2)와 식 (3)은 단위체적당 에너지는 구속압과 간극비에 대해 반비례관계에 있음을 나타낸다. 흙을 구성하는 체적을 토립자와 간극으로 구분하여 간극비 증분을 다시 표현하면 식 (4)와 같다.

$$de = \frac{dV_p}{V_s} = \frac{dV_p}{V_p} \frac{V_p}{V_s} = -\frac{1}{\eta_w} \left(-\eta_w \frac{dV_p}{V_p} \right) e$$

$$= -\frac{e}{\eta_w} d\bar{u}_n = -\frac{e\sigma_c du_n}{\eta_w} \quad (4)$$

여기서, 간극의 체적은 V_p 이며 흙입자의 체적은 V_s 이고 η_w 는 물의 체적변형계수이다. 이를 식 (1)에 대입하여 정리하면 식 (5)과 같다.

$$dW = \frac{\nu e du_n}{f(1+u_n)g(e-e_{min})} \quad (5)$$

여기서, $\nu = \bar{\nu} \sigma_c / \eta_w$ 이다.

액상화 발생을 간극수압이 초기유효구속압과 동일해지는 시기로 정의하면 식 (5)에서 u_n 은 1이다. 실제의 경우, 구속압은 690kPa (100psi)를 넘지 않고 u_n 이 1인 경우, 그에 따른 체적변형률은 $-\sigma_c / \eta_w$ 를 넘지 않으며 무시할 정도로 작은 값(일반적으로 10^{-5} 단위)이다.

식 (5)의 간극비를 초기간극비로 가정하면 식 (6)과 같으며 이를 적분하면 식 (7)과 같다.

$$dW = \left[\frac{\nu e_0}{g(e_0 - e_{min})} \right] \left[\frac{du_n}{f(1+u_n)} \right] \quad (6)$$

$$\Delta W = \frac{\nu e_0}{g(e_0 - e_{min})} \int_0^{u_n} \frac{du_n}{f(1+u_n)} \quad (7)$$

여기서, ΔW 는 정규화된 간극수압이 u_n 에 도달하기 까지 소산된 총에너지양을 나타낸다.

소산에너지와 진동하중의 재하회수와와의 관계를 정의하기 위해 i번째 하중 재하시 응력이력곡선의 면적을 A_i 라하고 그에 따른 에너지의 소산량을 ΔW_i 라 하면 총 에너지 소비량은 식 (8)과 같이 나타낸다.

$$\Delta W = \sum_{i=1}^N \Delta W_i = \sum_{i=1}^N \lambda_i A_i \quad (8)$$

여기서, $0 < \lambda_i < 1$ 이다.

Davis와 Berrill(1982)은 포화사질토를 대상으로 액상화 현상과 소산에너지와의 관계에 대한 실험적 연구를 수행하였으며, Law와 Cao(1990)는 사질토에 대한 단순 비틀림시험과 단순전단시험을 통해 과잉간극수압과 진동하중시 발생한 소산에너지사이 존재하는 직접적인 관계성을 규명하면서 현장 지반의 액상화 가능성 평가를 위한 기준을 에너지감쇠 방정식과 조합하여 136개 현장에서 전통적인 응력법과 그 신뢰도를 비교하는 사례연구를 수행하였다. 표 1은 진동하중변화에 따른 3회 이상의 실내진동시험에 기초한 전통적인 액상화 평가법과 에너지개념에 의한 평가방법에 대한 비교연구결과이다.

표 2를 보면, 소산에너지개념에 의한 액상화 평가가 실제 지반의 동적거동을 효과적으로 예측할 수 있음을 나타내고 있다. Okada와 Nemat-Nasser(1994)는 포화사

표 2. 경험적 액상화 평가와 소산에너지법에 의한 액상화 평가 비교 (Law and Cao, 1990)

데이터 획득	통일분류법	현장의 수	소산에너지개념의 예측율	응력법의 예측율
Seed et al. (1975)	Sand	38	89 %	87 %
Xie (1984)	Sand	65	82 %	71 %
Xie (1984)	Silty Sand	33	97 %	66 %

표 3. 실내진동시험시 제반조건 (Toyoura Sand)

입도분포	물성	구분	시험조건
최대입경 D_{max}	0.420 mm	상대밀도(%)	60
최소입경 D_{min}	0.074 mm	초기유효구속압	52 kPa
통과중량 10% 입경 D_{10}	0.170 mm	진동조건	0.1 Hz 정현파 (진동삼축)
통과중량 60% 입경 D_{60}	0.213 mm	제어방식	응력제어방식
평균입경 D_{50}	0.208 mm	진동전단응력비	0.2/0.25/0.28 (진동삼축)
균등계수 C_u	1.250	시료조건	포화비배수 ($B \geq 0.97$)
곡률계수 C_c	0.986	시료성형	수중침강법

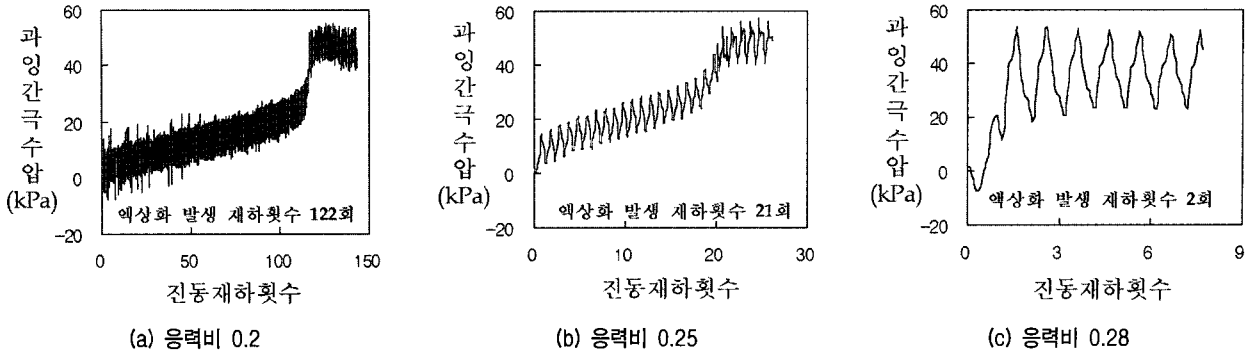


그림 2. 진동삼축시험 결과 (과잉간극수압-진동재하횟수)

질토의 간극수압과 소산에너지의 관계연구를 통해 전단변형률의 시간에 따른 다양한 변화형태는 에너지와 간극수압과의 관계성에 영향을 주지 않음을 연구함으로써 소산에너지개념이 불규칙한 지진하중을 효과적으로 고려할 수 있는 지반의 고유한 동적특성임을 증명하였다. 또한, Figueroa 등(1994)은 에너지법을 기초로 하여 사질토에 대해 다양한 상대밀도, 구속압, 변형률에 대한 단순비틀림시험을 통해 위의 조건들과 간극수압 간의 상관관계에 대한 연구를 수행하였다.

3. 실내진동시험에 기초한 액상화 저항특성 비교

3.1 상세예측법에 기초한 액상화 저항응력비 산정

그림 1의 우편에 나타난 액상화 저항응력비 산정에 관한 내용을 보면, 해석대상지반에 대한 지반조사자료 및 물성시험자료를 토대로 시료를 성형하여 실내진동시험을 수행할 것을 추천하고 있다. 본 연구에서는 일본의 Toyoura 모래를 이용하여 임의로 시험조건을 표 3과 같이 통일하고 진동응력비 수준변화를 달리한 3회의 진

동삼축시험을 수행하였다.

표 3의 시험조건하에서 진동삼축시험을 수행한 결과, 그림 2와 같이 비배수조건하의 진동하중으로 과잉간극수압이 발현하여 초기유효구속압과 같아지는 액상화 현상이 발생하였다.

그림 2의 결과를 토대로 진동전단응력비-액상화 발생 진동재하횟수의 상관관계를 도출하고 이에 대해 현장조건에 대한 보정내용을 적용하여 상관관계를 재도시하면 그림 3과 같다. 현장상태로의 보정은 Seed 등(1983)이 제안한 보정계수, C_d (범위 0.57~0.9)을 곱하여 이루어졌으며, 본 연구에서는 현장상태를 등방압밀하중하에 있는 것으로 고려하여 보정계수 0.9를 곱하였다.

액상화 평가에 이용되는 지진규모별 액상화 저항응력비는 재하횟수에 따라 결정되는데, 본 연구에서는 그림 1에 나타난 바와 같이 국내 「항만 및 어항시설의 내진설계 표준서」에서 한시적으로 제안한 값을 기준으로 하였으며 기준인 진동재하횟수 10회시의 값은 0.232로 그림 3에 나타난 바와 같다.

3.2 소산에너지 개념 및 교란상태개념에 기초한 액상화 거동분석 비교

일반적으로 재료가 하중을 받게 되면, 재료 특성상 탄성, 소성, 그리고 파괴의 단계로 거동변화를 보이게 된다. 지반이 하중을 받게 되면 순간적인 탄성단계를 거쳐 파괴시에 이르기까지 대부분의 상태를 소성거동이 지배하게 되며, 특히, 진동하중하의 포화지반의 경우, 비배수조건하에 발생하는 과잉간극수압의 영향으로 소성연화현상이 크게 지배하여 파괴에 이르게 된다고 알려져 있다. 앞서 언급한 소산에너지와 교란상태개념에서는 응력-변형률 상관관계를 토대로 산정된 소산에너지와 소성 전단변형률 상각궤도를 이용하여 진동하중을

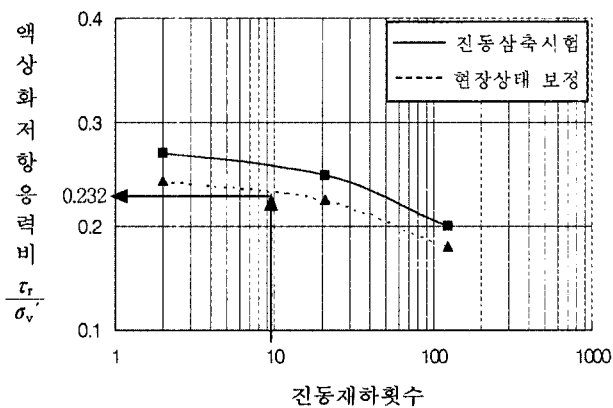
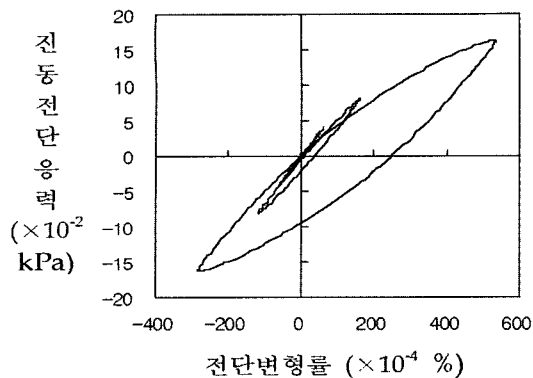
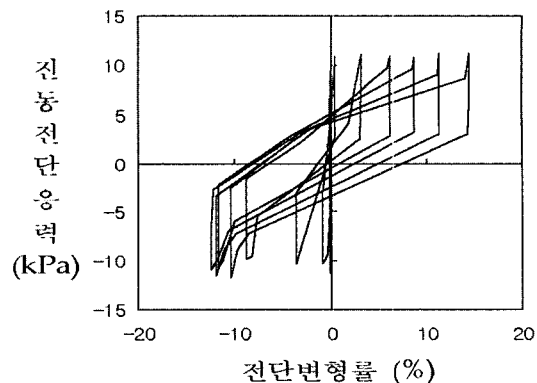


그림 3. 국내 액상화 상세예측법에 기초한 액상화 저항응력비 산정곡선

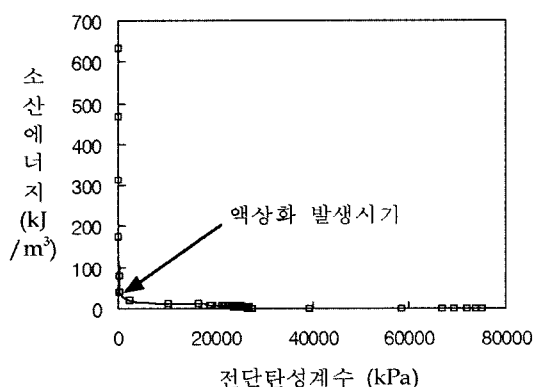


(a) 비틀전단시험

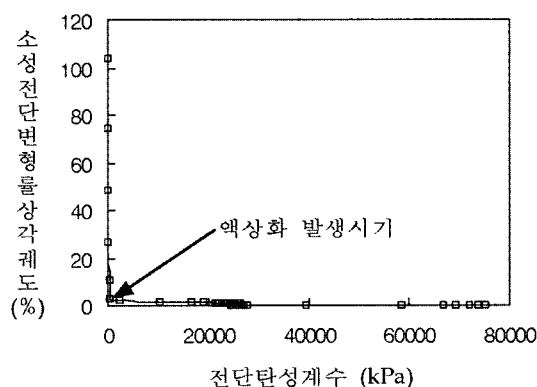


(b) 진동삼축시험 (응력비 0.25)

그림 4. 실내진동시험결과 (전단응력-전단변형률 이력곡선)

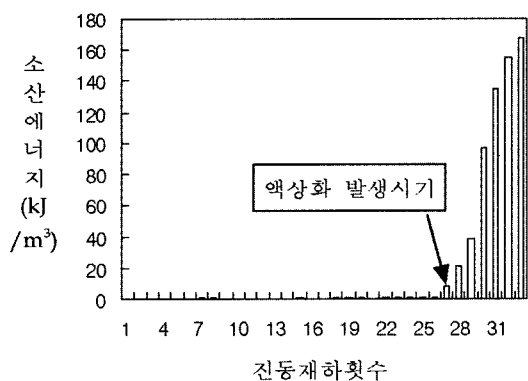


(a) 소산에너지

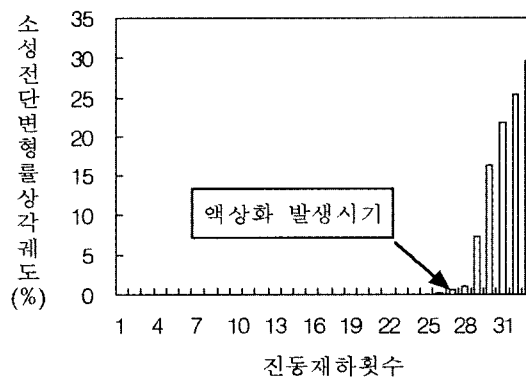


(b) 소성 전단변형률 상각계도

그림 5. 소산에너지 및 소성 전단변형률 상각계도의 변화와 전단탄성계수의 상관관계



(a) 소산에너지



(b) 소성 전단변형률 상각계도

그림 6. 진동재하횟수별 소산에너지 및 소성 전단변형률 상각계도의 변화

받는 지반의 소성 연화거동을 표현하고 있다.

본 연구에서는 진동하중하의 포화지반의 소성거동을 물리적으로 표현하는 소산에너지와 소성 전단변형률 상각계도를 실내진동시험을 통해 산정하고 이에 대한 분석을 통해 액상화 거동을 규명하였다. 전변형률수준의 실내진동시험은 중저변형률 수준의 전자기를 이용한 비틀전단시험과 고변형률 수준의 진동삼축시험으로 구성되는데 비틀전단시험은 한국과학기술원 지반동역

학연구실에서 협조해 주었으며 시험시 제반사항은 표 3의 진동삼축시험 제반조건으로 통일하였다. 앞서 언급한 진동삼축시험 중 진동전단응력비 0.25를 재하한 경우의 시험결과와 전자기를 이용한 비틀전단시험결과를 통해 나타난 전단응력-전단변형률 이력곡선은 그림 4에 나타난 바와 같다.

단위체적당 소산에너지는 그림 4의 이력곡선을 토대로 식 (9)의 사다리꼴 면적법을 이용하였으며 소성 전단

변형을 상각궤도는 각 싸이클의 소성 전단변형률의 합을 통해 산정하였다.

$$\delta W = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\tau_i + \tau_{i+1})(\gamma_{i+1} - \gamma_i) \quad (9)$$

여기서, δW 는 시료에 발생한 단위체적당 누적된 소산에너지이며 n 은 진동재하횟수이다.

각 방법에 기초하여 전단탄성계수의 변화에 따른 진동재하횟수별 소산에너지 및 소성 전단변형률 상각궤도의 변화를 나타내면 그림 5와 같으며 진동재하횟수에 따른 변화는 그림 6과 같다.

그림 5와 그림 6을 보면, 소산에너지 개념 및 교란상태개념에 기초한 해석결과가 거의 유사함을 나타냄에 따라 본 평가법에서 액상화 저항특성치로 제안된 소성 전단변형률 상각궤도가 진동하중 초기부터 누적되는 과잉간극수압의 영향을 합리적으로 고려하여 신뢰성 높게 액상화 거동을 예측하고 있는 것으로 나타났다.

3.3 제안된 평가법에 기초한 액상화 저항특성치 산정

본 연구에서는 「지반의 동적특성에 기초한 액상화 평가법 (I) : 이론제안」를 통해 제안된 평가법에 기초하여 실내진동시험을 수행한 Toyoura 모래에 대해 액상화 저항특성치를 산정하였으며 그 내용을 요약설명하면 다음과 같다. 해석의 편의를 위해 임의로 정한 시험제한 조건을 토대로 실내진동시험을 수행하고 그림 4와 같이 전변형률 수준의 전단응력-전단변형률 이력곡선을 획득한다. 그리고, 이력곡선을 재하횟수별로 구분하여 전단탄성계수와 소성전단변형률을 산정하고 이를 토대로 교란도와 소성 전단변형률 상각궤도의 상관관계를 도

시한 후, 최종적으로 액상화 발생시의 소성 전단변형률 상각궤도를 액상화 저항특성치로 정한다.

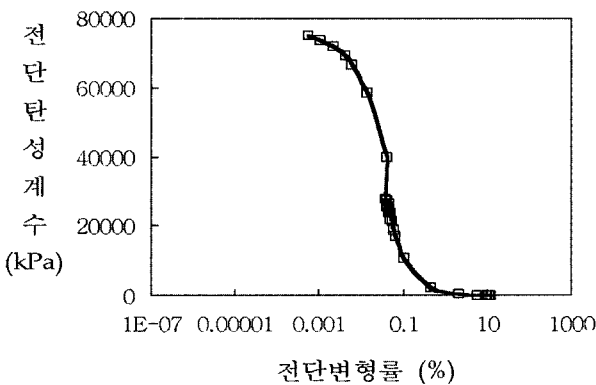
이상의 내용에 기초하여 그림 4의 실내진동시험결과를 토대로 작성된 전변형률수준의 전단탄성계수변화 및 교란도와 소성 전단변형률 상각궤도와의 상관관계는 그림 7의 (a)와 (b)에 나타난 바와 같다.

그림 7의 (b)에 나타난 바와 같이 최종적으로 액상화 저항특성을 표현하는 소성 전단변형률 상각궤도는 3.01으로 산정되었다.

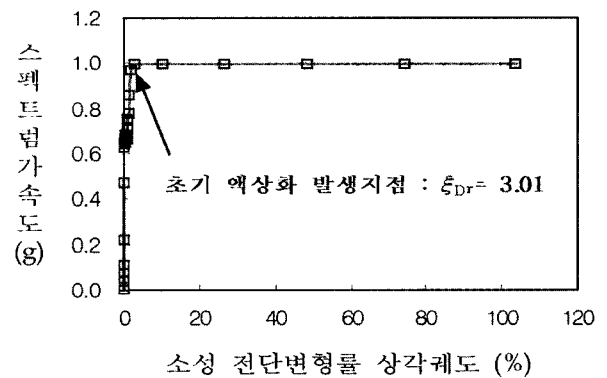
제안된 평가법에서는 액상화 발생저항치 산정에 앞서 지반의 액상화 저항특성 분석과정에서 전단변형률과 소성 전단변형률과의 상관관계를 규명하도록 하고 있는데, 이는 액상화 발생치 산정시 지진응답해석을 통해 획득된 변형률 시간이력과 연계하여 액상화 발생치를 산정하도록 한데 있다. 즉, 지진응답해석을 통해 산정된 변형률 시간이력의 각 싸이클 첨두값을 상관관계를 통해 획득된 최적함수식에 대응시켜 각 재하횟수별 압축/인장부에 대한 소성 전단변형률을 산정하고 이를 누적시켜 최종적으로 전변형률 시간이력에 대한 소성 전단변형률의 합이 액상화 발생특성치가 된다. 실내진동시험을 통해 산정된 재하횟수별 전단변형률과 소성 전단변형률 상관관계를 최적함수로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \gamma_p &= 0 \quad (\gamma \leq 0.01\%) \\ \gamma_p &= \frac{(-0.0003 + 0.319\gamma^{0.753})}{(0.631 + \gamma^{0.753})} \quad (\gamma \geq 0.01\%) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, γ_p 는 소성변형률이다.



(a) 전변형률 수준별 전단탄성계수 변화



(b) 교란도-소성 전단변형률 상관관계

그림 7. 액상화 저항치 산정을 위한 상관도

4. 지진응답해석에 기초한 액상화 평가결과 비교

제안된 평가법에서 액상화 저항특성치는 진동하중초기부터 발생하는 소성변형을 누적하여 산정되는 것으로 단순히 액상화를 유발시키는 진동하중의 크기 및 진동재하횟수를 통해 액상화 저항응력비를 산정하는 상세예측법과는 그 개념이 크게 다를 뿐만 아니라, 지진에 대한 고려사항에서도 지진응답해석의 수행은 공통적이거나 상세예측법에서는 평가지층의 최대가속도 결과만을 이용하는 반면, 제안된 해석법에서는 평가지층의 변형을 시간이력 전부를 액상화 평가에 이용하고 있다.

대부분의 실지진계측시 가속도계를 이용함에 따라 실지진기록은 가속도 시간이력으로 표현하는 것이 일반적이다. 이러한 가속도 시간이력을 제안된 평가법에서 요구하는 전단변형을 시간이력함수로 표현하고자 하면, 가속도, 속도, 그리고, 변위의 함수로 표현되는 운동방정식을 토대로 주파수영역에서의 파 전달함수나 시간영역에서의 운동방정식을 이용하여 지진응답해석을 수행하여야 한다. 주파수영역에서의 파 전달함수를 이용하는 범용 프로그램으로는 1차원 등가선형프로그램 SHAKE(Schnabel, 1972)가 일반적이며 시간영역의 비선형 지진응답해석 프로그램으로는 DESRA, CHARSOIL, YUSAYUSA 등이 있다. 이러한 두 해석영역의 차이가 미치는 영향은 일본 해양연구소에서 발간한 내진설계 가이드라인(PHRI, 1997)에 언급된 바 있는데, 전단응력 시간이력의 결과를 비교한 경우, 등가선형의 SHAKE 프로그램이 시간영역의 비선형해석보다 전단응력 시간이력을 전반적으로 크게 산정하는 경향이 있으며, 전단변형을 시간이력의 경우에는 반대로 작게 산정하는 경

향이 있음을 밝혔다. 또한, 이와 유사한 연구결과를 발표한 Finn 등(1978)의 연구내용도 같이 언급하면서, 이와 같이 보수적으로 산정된 전단응력 시간이력을 이용하는 단순응력비교의 액상화 평가법이 안전측의 평가결과를 도출할 수 있음을 밝혔다.

본 연구에서는 이러한 지진응답해석의 해석영역이 보유하는 해석결과의 차이보다는 지진응답해석을 통해 가속도와 지속시간으로 표현되는 지진 시간이력 모두를 고려하는 제안된 평가법의 특성을 분석하는데 목적을 두고 임의의 해석지반을 대상으로 실지진 시간이력을 입력하여 지진응답해석을 수행하였으며 이용된 프로그램은 Shake91(Idriss and Sun, 1992)이다.

4.1 지진응답해석

제안된 평가법 및 액상화 상세예측법에서는 지진응답해석의 수행이 요구되고 있는데, 지반의 액상화 저항특성은 해석대상지층별로 분석되지만, 지진응답해석은 지반 내 지진거동변화를 포함하고 있기 때문에 해석지반에 대한 모델링이 필요하다. 본 연구에서는 표 3의 실내진동시험시 제반조건을 고려하여 그림 8과 같이 액상화 해석대상지반을 구성하였다.

그림 8의 해석대상지반은 완전포화 모래층으로 구성된 것으로 하였으며 지반고는 15m로 선정하였다. 이는 신윤섭 등(1999)이 임의로 선택한 국내 지진규모 6.5에 대한 액상화 평가결과들에 대한 분석을 통해 제안한 것으로 지진규모 7.5를 적용하는 일본의 평가한계심도기준인 20m보다 작다. 또한, 액상화 평가대상지층은 5m로 정하였으며 이는 실내진동시험시 시험조건 중 유효

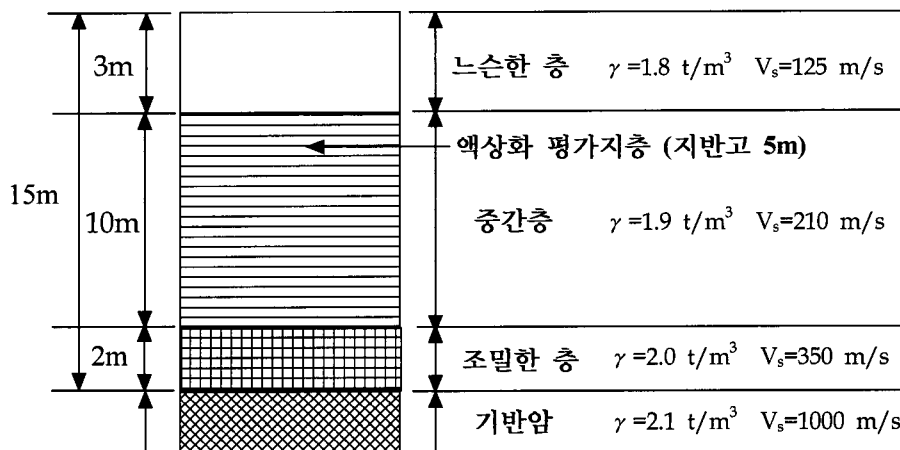


그림 8. 해석대상지반

표 4. 입력지진에 대한 세부내용

구 분	지진규모	지속시간	진 원 지
El Centro	7.1	31.2 초	1940년 미국 캘리포니아주의 Imperial Valley
Loma Prieta	8.1	40.0 초	1989년 10월 17일 미 북부인근의 Loma Prieta

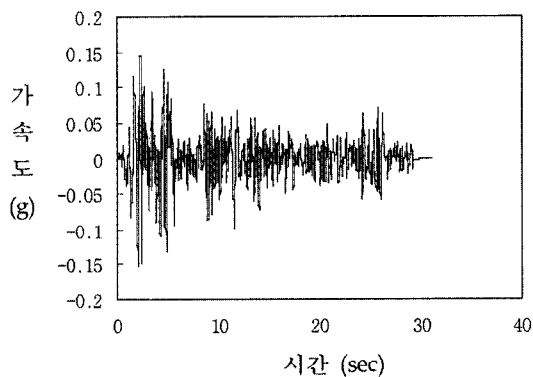
구속압 52kPa을 고려한 것이다.

본 연구에서는 그림 8의 해석대상지반에 대한 모델링을 토대로 1차원 등가선형해석 프로그램인 Shake91을 이용하여 실지진 시간이력의 입력을 통한 지진응답해석을 수행하였다. 지진응답해석에 이용된 시간이력은 El Centro 지진과 Loma Prieta 지진의 가속도 시간이력으로 지진에 대한 세부내용을 요약하면 표 4와 같고 이때, 입력지진의 최대가속도 0.154g로 통일하였으며 기준지진규모는 6.5로 하였다. 그림 9는 지진응답해석시 입력된 실지진 시간이력을 나타내고 있다.

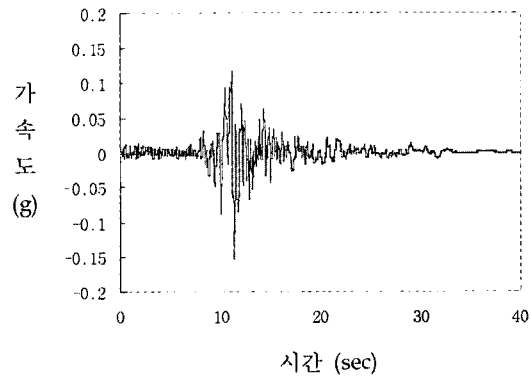
그림 9를 보면, El-Centro 지진은 일정수준 이상의 가속도를 가진 성분이 주를 이루고 있는 진동형의 형태를 나타내고 있으며 Loma-Prieta 지진은 상대적으로 큰 가속도 성분이 많지 않은 충격형의 형태를 보여주고 있다.

지진응답해석을 수행한 결과, 액상화 상세예측법에 이용되는 최대가속도의 지반 내 거동변화는 그림 10에 나타난 바와 같고 제안된 평가법에서 이용하는 해석대상 지반고 5m에서의 변형률 시간이력은 그림 11에 나타난 바와 같다.

그림 10 및 그림 11에 나타난 각 지진 시간이력별 지진응답해석 결과를 보면, 입력지진형태가 차이를 보임에도 불구하고 지반 내 증폭현상은 유사한 것으로 나타났다. 일반적으로 동일한 지반에 대해 동일한 최대가속도를 보유한 실지진 시간이력을 입력한 지진응답해석의 경우, 지반 내 거동특성이 판이하게 다른 경우는 지진 전달함수를 정의하는 지진의 탁월주파수 또는 탁월

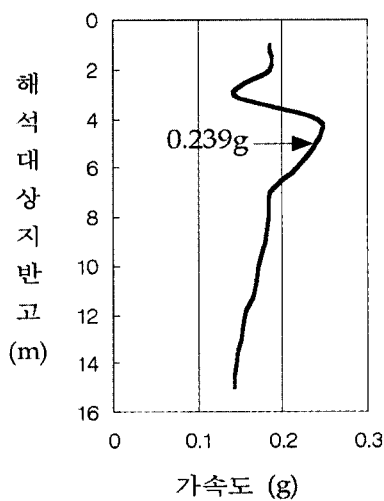


(a) El-Centro

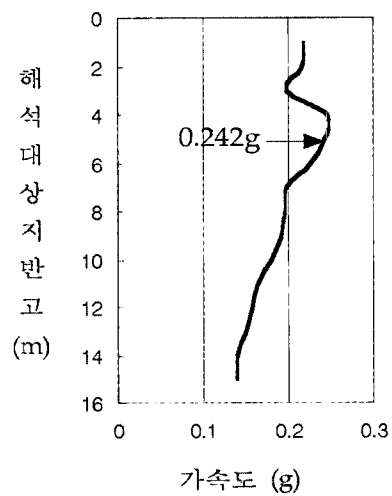


(b) Loma-Prieta

그림 9. 입력지진 시간이력

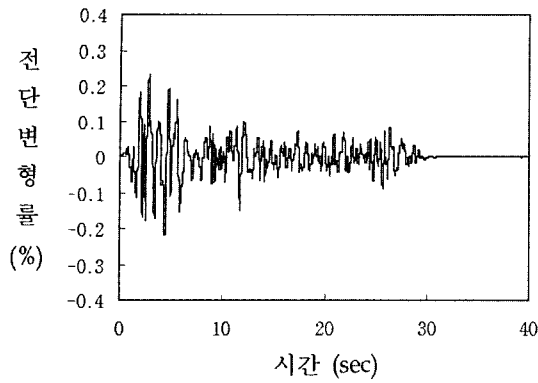


(a) El-Centro

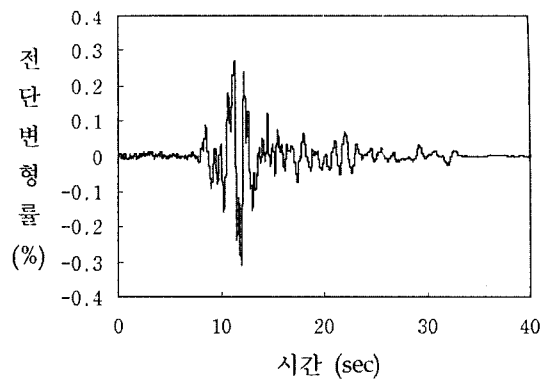


(b) Loma-Prieta

그림 10. 지진응답해석결과 (지층별 최대가속도)

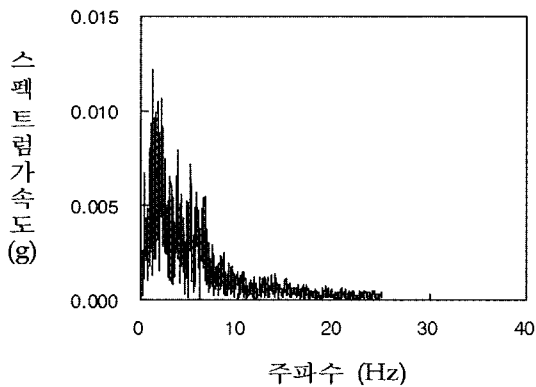


(a) El-Centro

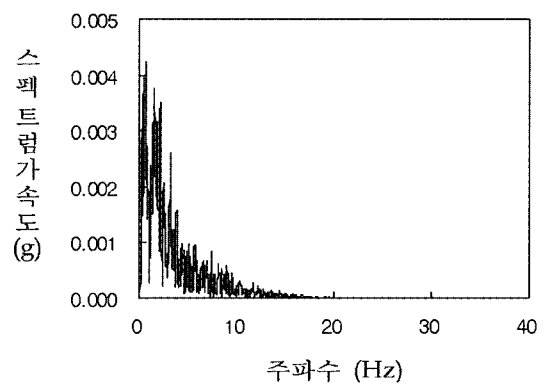


(b) Loma-Prieta

그림 11. 지진응답해석결과 (해석대상 지반고 5m에서의 변형률 시간이력)



(a) El-Centro



(b) Loma-Prieta

그림 12. 입력지진 특성분석 (주파수특성)

주기특성이 다른 경우로 이때, 별도의 지진특성분석을 통해 입력지진특성을 분석하게 된다. 본 연구에서는 그림 10과 그림 11에 나타난 결과를 토대로 두 입력지진 특성이 비슷할 것으로 사료되지만, 이에 대한 검증은 위해 지진특성분석을 별도로 수행하였다. 지진특성분석을 통해 나타난 입력지진의 주파수 특성은 그림 12에 나타난 바와 같다.

그림 12에 나타난 바와 같이, 입력지진별 탁월주파수 (predominant frequency) 특성은 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며 이와 같은 결과가 그림 10과 그림 11의 지진응답해석에 영향을 준 것으로 판단된다.

4.2 액상화 평가

본 연구에서는 그림 8에 나타난 액상화 평가지층 5m에 대해 그림 1에 나타난 액상화 상세예측법 및 「지반의 동적특성에 기초한 액상화 평가법 (I): 이론제안」에서 제안된 평가법을 이용하여 액상화 평가를 수행하고 각 방법의 특성을 비교분석하였다. 액상화 상세예측의 경

우, 그림 10의 해석대상 지반고 5m의 가속도를 그림 1의 산정식을 이용하여 지진에 의한 등가전단응력비를 산정하고 이를 그림 3에 나타난 액상화 저항응력비와 비교하여 액상화 평가안전율을 산정하였다. 제안된 평가법에 기초한 액상화 평가는 그림 11의 변형률 시간이력상의 침투값을 식 (10)의 상관식에 대입하여 산정한 반주기별 소성 전단변형률을 누적하여 액상화 발생저항치를 최종산정하고 이를 그림 7에 나타난 액상화 저항특성치와 비교하여 액상화 평가안전율을 산정하였다.

각 방법에 기초하여 산정된 액상화 평가결과를 요약 정리하면 표 5에 나타난 바와 같으며 이를 그림으로 나타내면 그림 13과 같다.

표 5와 그림 13에 나타난 액상화 평가결과를 보면, 지진과 지반저항특성을 단순한 최대전단응력 비교를 통한 액상화 상세예측결과가 제안된 평가법보다 안전율이 낮은 것으로 나타났다. 또한, 각 방법별 액상화 평가 결과를 살펴보면, 상세예측의 경우, 입력지진의 최대가속도, 주파수, 그리고, 주기특성이 유사한 관계로 동일한 해석지반에 대한 지반 내 지진거동변화양상이 차이

표 5. 액상화 평가결과 (기준지진규모 6.5)

		입력 실지진 시간이력 (기준가속도 0.154g)	EI-Centro 지진	Loma-Prieta 지진
액상화 상세예측법	지진에 의한 등가전단응력비		0.33	0.34
	액상화 전단저항응력비		0.232	
	액상화 평가 안전율		0.69	0.70
제안된 액상화 평가법	액상화 발생특성치		2.89	1.89
	액상화 저항특성치		3.01	
	액상화 평가 안전율		1.05	1.59

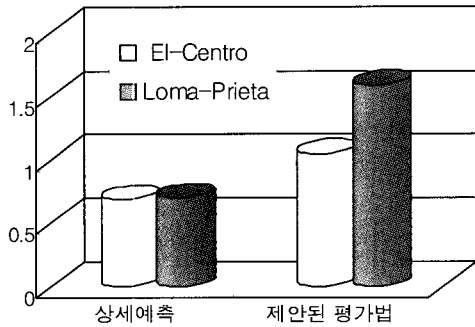


그림 13. 액상화 평가 안전율 비교

를 보이지 않음에 따라 단순히 지진응답해석 결과 중 특정치(평가지층의 최대가속도)만을 이용하는 액상화 상세예측결과도 차이가 없는 것으로 나타났다. 이에 반해, 제안된 평가법에 기초한 액상화 평가결과를 보면, 지진응답해석을 통해 산정된 변형률 시간이력 전부를 고려하는 제안된 평가법의 특성으로 인해 입력지진의 진동형태 및 지속시간을 충분히 고려함에 따라 이로부터 결정되는 액상화 발생특성치가 큰 차이를 보였으며 이 영향으로 액상화 평가결과도 큰 차이를 나타내었다.

이러한 결과로부터, 제안된 평가방법이 가속도, 주기, 주파수, 지속시간, 진동형태 등의 지진특성을 충분히 고려하고 있음을 알 수 있었으며, 지진피해자료가 많지 않은 지역의 구조물 건설시 실내진동시험의 수행과 더불어 많은 입력자료의 이용이 가능하여 내진해석의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 진동하중을 받는 포화사질토 내 재료 역학적 미세구조의 변화를 규명할 수 있는 교란상태개념에 기초하여 액상화 평가법을 제안하였다. 제안된 평가방법에서는 액상화를 포함한 진동하중을 받는 포화

사질토의 응력-변형률의 이력변화를 소성 전단변형률 상각계수와 전단탄성계수의 변화에 따른 교란도로 표현함으로써 지반의 고유한 동적특성을 규명하고 이에 대해 지진의 시간이력 전부를 고려하여 지진특성을 표현하도록 하였다. 제안된 방법의 특성을 검증하기 위해, 변형률수준별 실내진동시험을 수행하고 이를 토대로 소산에너지 개념에 기초한 액상화 거동예측과 비교하였으며 실지진 시간이력을 입력하여 지진응답해석을 수행하고 제안된 평가법 및 기존의 액상화 상세예측법에 기초하여 액상화 평가를 수행하였다.

본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 제안된 평가법과 소산에너지 개념에 기초한 액상화 거동예측결과, 전변형률수준의 실내진동시험을 통해 산정된 소성 전단변형률 상각계수와 전단탄성계수의 변화에 따른 교란도가 액상화를 포함한 지반의 동적거동을 신뢰성 높게 규명하고 있음을 알 수 있었다.
- (2) 최대가속도, 주파수, 주기특성이 유사한 지진 시간이력에 대한 지진응답해석을 토대로 기존의 액상화 상세예측 및 제안된 평가법에 기초한 액상화 평가결과, 제안된 평가법이 최대가속도, 주파수, 주기, 진동형태, 지속시간 등의 지진특성을 합리적으로 고려하고 있는 것으로 나타났다.
- (3) 연구결과, 제안된 평가법은 지진특성 및 지반의 액상화 저항특성에 대한 산정과정과정이 합리적일 뿐만 아니라 해석결과의 신뢰성도 높다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금과 교육부를 통한 두뇌한국21 지원에 의한 것입니다. 또한, 공동으로 실내진

동시험을 수행해 주신 한국과학기술원의 지반동역학연구실 연구원들에게 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 신윤섭, 최재순, 박인준, 김수일 (1999), “국내 지진특성을 고려한 액상화 저항강도 산정”, *한국지반공학회 논문집*, 한국지반공학회, 제15권, 제6호, pp.307~318.
2. 김수일, 박인준, 최재순 (2000), “국내 지진특성을 고려한 액상화 저항강도 산정”, *대한토목학회 논문집*, 대한토목학회, 제20권, 제2-c호, pp.129~140.
3. 한국지진공학회 (1999), *항만 및 어항시설의 내진설계 표준서*, 해양수산부.
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. Figuera, J. L., Saada, A. S., Liang, L., and Dahisaria, N. M. (1994), “Evaluation of Soil Liquefaction by Energy Principles”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.120, No.9, 1994, pp.1554~1569.
6. Finn, W. D. L., Martin, G. R., and Lee, M. K. W. (1978), “Comparison of Dynamic Analysis for Saturated Sands”, *Proceeds of Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, ASCE. Vol.1, pp.472~491.
7. Idriss, I. M., and Sun, J. I. (1992), *User's Manual for Shake91*, NISEE.
8. Law, K. T. and Cao, Y. L.(1990), “An Energy Approach for Assessing Seismic Liquefaction Potential”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.27, pp.320~329.
9. Nemat-Nasser, S. and Shokooh, A. (1979), “A Unified Approach to Densification and Liquefaction of Cohesionless Sand in Cyclic Shearing”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.16, pp.659~678.
10. Okada, N. and Nemat-Nasser, S. (1994), “Energy Dissipation in Inelastic Flow of Saturated Cohesionless Granular Media”, *Geotechnique*, Vol.44. No.1, pp.1~19.
11. Port and Harbor Research Institute (1997), *Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land*, A. A. Balkelma.
12. 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.
13. Seed, H. B., Idriss, I. M., and Arango, I. (1983), “Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.109, No.3, pp.458~482.
14. Schnabel, P. B., Lysmer, J. L., and Seed, H. B. (1972), *SHAKE : A Computer Program for Earthquake Response of Horizontally Layered Sites.*, Report EERC-72/12, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA.

(접수일자 2001. 9. 28, 심사완료일 2002. 2. 8)