

실지진하중의 액상화 발생특성에 기초한 액상화 상세평가법

A New Detailed Assessment for Liquefaction Potential Based on the Liquefaction Driving Effect of the Real Earthquake Motion

최 재 순¹ Choi, Jae-Soon

강 한 수² Kang, Han-Soo

김 수 일³ Kim, Soo-Il

Abstract

The conventional method for assessment of liquefaction potential proposed by Seed and Idriss has been widely used in most countries because of simplicity of tests. Even though various data such as stress, strain, stress path, and excess pore water pressure can be obtained from the dynamic test, especially, two simple experimental data such as the maximum deviatoric stress and the number of cycles at liquefaction have been used in the conventional assessment. In this study, a new detailed assessment for liquefaction potential to reflect both characteristics of real earthquake motion and dynamic soil resistance is proposed and verified. In the assessment, the safety factor of the liquefaction potential at a given depth of a site can be obtained by the ratio of a resistible cumulative plastic shear strain determined through the performance of the conventional cyclic test and a driving cumulative plastic shear strain calculated from the shear strain time history through the ground response analysis. The last point to cumulate the driving plastic shear strain to initiate soil liquefaction is important for this assessment. From the result of cyclic triaxial test using real earthquake motions, it was concluded that liquefaction under the impact-type earthquake loads would initiate as soon as a peak loading signal was reached. The driving cumulative plastic shear strain, therefore, can be determined by adding all plastic shear strains obtained from the ground response analysis up to the peak point. Through the verification of the proposed assessment, it can be concluded that the proposed assessment for liquefaction potential can be a progressive method to reflect both characteristics of the unique soil resistance and earthquake parameters such as peak earthquake signal, significant duration time, earthquake loading type, and magnitude.

요 지

본 연구에서는 지진시 지반의 안정성 평가시, 진동시험에 기초하여 액상화 발생가능성 여부를 판정하는 상세평가법을 개발하였다. 개발된 평가법에서는 기존의 평가법이 지진을 단순히 정현하중화하는 등가전단응력개념에 기초한 접근과는 달리, 지진의 최대가속도, 유효지속시간, 지진형태, 그리고 지진규모 등 다양한 지진영향인자가 고려될 수 있도록 실지진기록 입력의 지반응답해석을 포함하도록 하였다. 지반의 고유한 저항특성을 응력-변형률 시험결과로부터 액상화 전환시점까지의 누적 소성 전단변형률로 하였으며 이와 연계하여 지진의 액상화 발생특성을 지반응답해석을 통해 획득가능한 전단변형률 시간이력곡선에 기초하도록 하였다. 이때, 액상화를 유발시키는 실지진기록의 특성분석을 위해 실지진하중 재하의 진동삼축시험을 수행하였다. 시험결과, 충격형 지진인 경우, 지진기록의 최대하중이 재하된 직후, 과잉간극수압이 급진적으로 발전하며 액상화가 발생하는 것으로 나타났으며 진동형 지진의 경우에는

1 정회원, 연세대학교 공과대학 건설공학연구소 박사후연구원 (Member, Civil Engrg. Research Institute, Yonsei Univ., geocjs@yonsei.ac.kr)

2 정회원, 삼성엔지니어링 사원 (Member, Samsung Engrg. Co.)

3 정회원, 연세대학교 공과대학 사회환경시스템공학부 교수 (Member, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

최대하중이 재하된 경우, 눈에 띄는 과잉간극수압의 변화가 관찰되었으며 이후, 일정수준 이상의 큰 하중재하시 액상화가 발생하였다. 이로부터 액상화 발생에 가장 큰 영향인자는 최대하중인 것을 알 수 있었으며 진동형 지진형태의 경우, 일정수준 이상의 후속하중에 대한 고려가 필요함을 알 수 있었다. 이상의 결과로부터 본 평가법에서는 우선적으로 충격형 지진에 한하여 사용할 것을 제안하며 이때, 최대 전단변형률까지의 시간이력곡선으로부터 소성 전단변형률을 누적계산하여 이를 해당입력지진의 액상화 발생특성치로 정하였다. 기존의 등가응력개념에 기초한 상세평가법과의 비교를 통한 타당성 분석결과, 본 평가법은 기존의 상세평가법보다 유효응력경로 및 응력-변형률 상관곡선 등 실제적인 지반거동변화에 관한 진동시험결과에 기초하여 지반의 고유특성을 결정하고 지반응답해석을 통해 증폭현상을 포함한 지반 내 지진거동변화와 지진시간이력이 보유하고 있는 지진특성을 충분히 반영하고 있으므로 신뢰성 높은 액상화 상세평가가 가능할 것으로 판단된다.

Keywords : Critical resistible value, Driving cumulative plastic shear strain, New detailed assessment, Real earthquake records, Shear strain time history

1. 서론

90년대 중반, 미국 및 일본의 연안지역에서 발생한 액상화 피해로 인해 기존의 내진설계에 이용되었던 강도에 대한 안전율(factor of safety) 개념과 의사정적설계(pseudo-static design)를 대신하여 허용변위(allowable displacement based design)와 성능수준에 따른 내진설계(performance based design concept)가 크게 주목받고 있으며 실제 미국 및 일본의 내진설계기준들이 이와 관련하여 개정되고 있는 실정이다. 이와 같은 설계개념의 변화는 컴퓨터의 계속된 업그레이드를 통한 수치해석시간의 단축과 비주얼화된 프로그램의 개발에 힘입어 수치해석기법을 이용한 설계사례가 증가한 데 기인한 것이다. 최근 이와 같은 수치해석기법의 이용증대로 인해 무엇보다도 중요시되는 것이 해석결과의 정확도에 가장 큰 영향을 미치는 수치해석모델의 선정이다. 일반적으로 최근까지 소성론에 기초한 전응력 해석모델이 동해석에도 이용되었으나, 이러한 해석모델은 비배수조건으로 발생하는 과잉간극수압의 영향을 고려할 수 없을 뿐만 아니라 이로 인해 지진시 지반-구조물의 동적거동을 평가절하하여 안전측의 결과를 나타낼 가능성이 높기 때문에 내진설계를 위한 동해석의 경우에는 유효응력개념의 해석모델이 적용되어야 한다는 연구결과가 크게 주목받고 있으며 미국 및 일본 등 선진지진연구국가에서는 이에 대한 개발연구에 큰 비중을 두고 있는 실정이다. 또한, 성능수준에 따른 내진설계에서 눈에 띄는 중점사항은 지역의 지진특성이 충분히 고려된 설계지반운동의 입력과 적절한 지반-구조물의 지진발생후 기능수행 및 보수보강 수

준의 결정을 토대로 내진구조물의 경제적인 건설을 도모하고 있다는 점이다. 즉, 최근 내진설계는 점차 모델링된 지반에 대해 지역특성을 최대한 고려한 여러 개의 설계지반운동을 입력하여 지반-구조물의 동적거동을 비교해 보는 것으로 요약설명할 수 있다. 이와 같이 내진설계에는 커다란 변화가 있는 반면, 액상화 평가에 있어서는 등가전단응력개념(Seed 등, 1971)에 기초한 액상화 간편법이 국내외 내진시방서의 대부분 이용되고 있으며 상세평가에 있어서도 지진하중모사의 어려움 및 실내진동시험의 용이한 수행을 이유로 들어 현재까지도 정현파를 이용하는 경우가 일반적이다. 물론, 액상화 저항특성에 관하여서는 소산에너지(Okada와 Nemat-Nasser, 1994), 소성 일(Iai 등, 1992), 그리고, 재료내부의 교란(Desai, 1992) 등으로 표현하는 여러 이론들이 제안된 바 있으나 지진에 의한 영향은 최대값만을 고려하는 기존의 평가범주를 벗어나지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 지진하중을 정현화하여 단순히 최대진폭만을 고려하는 등가전단응력개념의 평가법의 부적합성을 보완하고자 지진시간이력의 최대값, 유효지속시간, 지진규모, 그리고 지진하중형태 등 다양한 지진특성을 고려할 수 있는 지반응답해석을 도입하고 기제안된 지반의 동적저항특성인 한계 누적 소성전단변형률과 관련하여 새로운 개념의 액상화 상세평가법을 제안하고자 한다.

2. 새로운 액상화 평가법의 제안

기존의 액상화 평가방법은 지진하중을 최대값의 65%를 진폭으로 하는 정현하중으로 간주하기 때문에 지진

의 불규칙성, 지속시간, 규모 등의 지진특성을 합리적으로 고려하지 못하는 물론 지반의 저항특성 또한 지진규모별로 다르게 산정하여 비교하도록 되어 있다. 이러한 기존의 평가법이 보유한 불합리성을 개선하고자 본 연구에서는 새로운 액상화 평가법을 제안하였다. 제안된 평가법은 실제 지진발생시 지반의 거동특성을 염두에 두고 지반의 액상화 저항특성은 소성 일과 개념을 같이 하는 누적 소성변형량에 기초하여 재료의 고유한 특성으로 간주하였으며 지진에 의한 액상화 발생특성은 지반 내 증폭현상을 포함한 지진의 다양한 특성을 고려할 수 있도록 지반응답해석에 기초하도록 하였다.

2.1 정현하중재하의 실내진동시험에 기초한 액상화 저항특성치

공학적으로 지진은 발생, 전달, 그리고 지반 내 거동변화 등 다양한 특성을 보유하고 있으나 지진계측장비와 관련하여 가속도 또는 속도의 시간함수로 표현된 지진기록을 이용하게 되며, 실제 시설물과 관련하여서는 자국의 설계지반운동 규정, 해당 지역의 지진특성, 그리고 지역의 지반특성을 고려한 증폭현상 등이 적절하게 반영되어야 한다. 그러나, 고가의 시험장비 등으로 인해 실제 지진 하중 입력을 통한 거동분석은 연구용으로 이용되며 실제 액상화 평가에서는 범용적으로 이용가능한 정현하중 재하의 진동시험을 이용하는 것이 합리적일 것으로 사료되어 본 연구에서는 진동하중의 크기가 재료의 소성일 및 누적 소성 전단변형에 크게 영향을 미치지 않는다는 Okada와 Nemat-Nasser(1994) 및 최재순 등(2002)의 연구결과를 토대로 정현하중으로 인해 결정되는 지반의 한

계 저항특성치는 고유하다는 가정아래 새로운 액상화 상세평가법을 제안하였다. 특히, 본 평가법에서 액상화 저항특성치는 소성일개념을 효과적으로 표현할 수 있는 누적 소성 전단변형률을 이용하여 정의하였으며 이때, 한계 저항특성치를 실내진동시험으로부터 획득한 유효응력경로 상에서 뚜렷하게 구분되는 액상화 상태변환점(phase change point)으로부터 산정하게 된다. 즉, 본 평가법의 액상화 저항특성치는 우선적으로 유효응력경로를 통해 액상화 상태변환점을 선정한 후, 응력-변형률 상관곡선을 이용하여 이 시점까지의 소성 전단변형률을 누적계산함으로써 산정된다. 이때, 제안된 평가법에서는 정현하중이 압축-제하-인장-재제하의 순서로 재하되는 점을 고려하여 1/4 주기별로 소성 전단변형률을 산정하고 이를 누적계산하게 되며 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\xi_{yr} = \sum_{i=0}^n \sqrt{E_{ij}^p E_{ij}^l} \quad (n = \text{액상화 전환시점의 진동수}) \quad (1)$$

여기서, ξ_{yr} 는 소성 전단 변형률 상각궤도(plastic shear strain trajectory) 또는 누적 소성 전단변형률이라고 하며, E_{ij}^p 는 소성 전단변형률(plastic shear strain)로 총 소성 변형률에서 소성 체적변형률(plastic volumetric strain)을 감하여 산정한다. 그러나, 비배수조건인 경우, 체적 변형이 발생하지 않으므로 소성 전단변형률은 총 소성 변형률의 값이 된다. 누적 소성 전단변형률은 식 (1)에 나타난 바와 같이 항상 (+)의 값을 계속적으로 누적하기 때문에 진동하중을 받는 지반 내부의 과잉간극수압 변화를 효과적으로 표현할 수 있다.

그림 1은 정현하중재하 진동삼축시험으로부터 획득가능한 유효응력경로와 누적 소성 전단변형률 산정에 이용

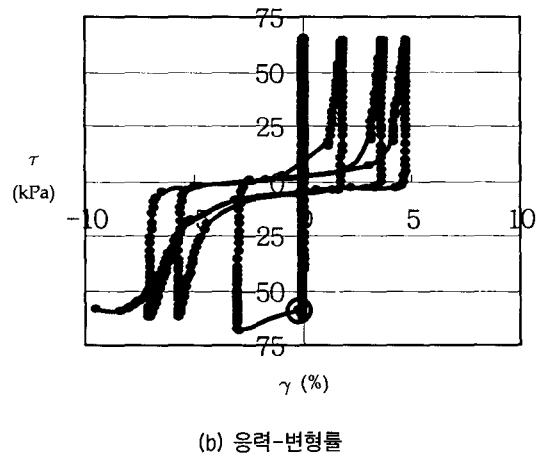
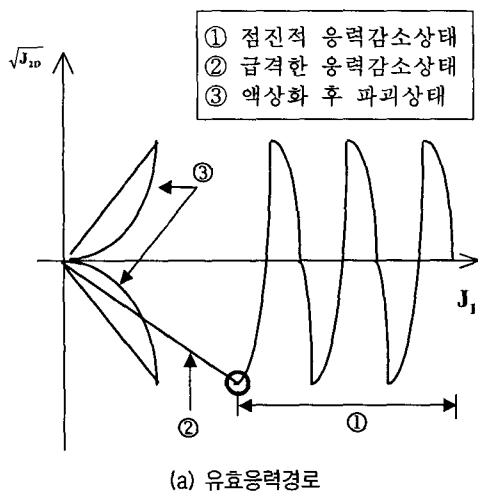


그림 1. 실내진동시험결과에 기초한 액상화 저항특성치 결정

된 응력-변형률 상관곡선을 나타내고 있다. 그림에서 원으로 표시된 부분이 과잉간극수압의 급격한 증가와 함께 상대적으로 큰 변형이 발생하는 시점으로 본 연구에서는 이때부터 실제 액상화로의 상태변환이 시작되는 것으로 정의하고 이 시점까지의 누적 소성 전단변형률을 액상화 저항특성치로 결정하게 된다. 여기서, 1/4주기별 소성 전단변형률은 시험결과로 획득된 전변형률에서 탄성변형률을 감하여 산정되며 이때, 탄성변형률은 제하 및 재제하시 접선기울기, 최초하중재하시 초기접선계수, 할선계수, threshold strain 등의 여러 방법들을 통해 정의될 수 있다. 본 연구에는 동적물성 산정시 전변형률 수준에 따른 전단탄성계수의 변화곡선으로부터 탄성변형률을 산정하는 것으로 하였으며 이는 후속된 액상화 발생특성치 산정을 위해 수행되는 지반응답해석에서 전단탄성계수의 변화곡선이 입력되는 점을 고려한 것이다.

2.2 액상화 발생특성치 및 평가안전율

지진에 의한 발생특성치, $\xi_{\gamma d}$ 는 평가지층에서의 지진 영향을 평가하는 것으로 기반암에 입력된 지진의 지반 내 증폭현상을 고려하기 위해 지반응답해석을 통하는 것으로 하였으며 응답해석결과 중 저항특성치와의 연관성을 위해 변형률 시간이력을 이용하는 것으로 하였다. 이때, 지진정보가 풍부한 지역은 지역특성에 적합한 지진을 입력하는 것이 적절하며 우리 나라와 같이 지진

기록이 풍부하지 못한 경우에는 설계지반운동수준에 준하는 지진들을 수집한 후, 발생가능성이 있는 지진을 대상으로 하는 것이 바람직하다.

최종 액상화 평가는 다음의 식과 같이 안전율(factor of safety; F.S.)을 산정함으로써 수행되며 발생특성치를 결정하는 내용을 요약설명하면 그림 2와 같다. 그림 2는 본 연구에 선행된 연구에서 발표한 내용(최재순 등, 2002)을 요약정리한 것으로 이때, 발생특성치 산정은 지반응답해석을 통해 획득된 변형률 시간이력 전부를 고려하도록 하였다.

$$F.S. = \xi_{\gamma r} / \xi_{\gamma d} \quad (F.S. \geq 1 : \text{안전}) \quad (2)$$

대부분의 실지진 시간이력을 보면, 미세한 진동으로 시작되어 실제 단층현상을 표현하는 강한 진동, 그리고 진동후 여진으로 크게 구분되는데 이러한 실지진 시간이력내의 모든 시간정보가 액상화 발생에 영향을 주고 있다고 가정하는 최재순 등(2002)의 방법은 보수적인 결과를 발생시킬 가능성이 높다. 본 연구에서는 이러한 점을 보완하기 위해 실험적으로 실지진하중 시간이력에 대한 특성분석연구를 수행하였다.

3. 실지진하중에 의한 액상화 발생특성

본 평가법에서 지반의 액상화 저항특성치는 정현하중의 크기에 관계없이 고유하다는 가정아래 1회의 정현

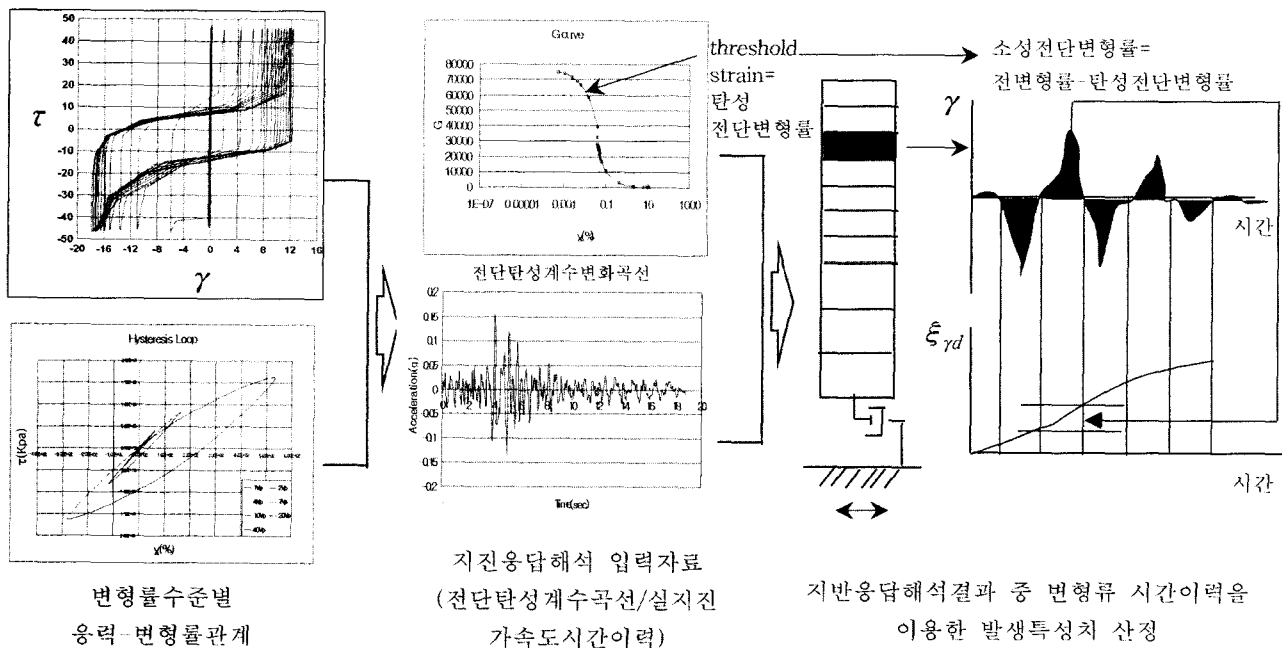


그림 2. 지진에 의한 발생특성치 산정모식도

하중재하의 실내진동시험으로부터 결정하며 지진에 의한 액상화 발생특성치는 지반응답해석을 통해 획득된 변형을 시간이력을 통해 결정하는 것으로 되어 있다. 이때, 전시간이력 정보를 이용하는 것이 아니고, 전체 시간이력 내에서 액상화 발생에 영향을 미치는 정보들을 선택하여 이용하게 되며 이러한 선택과정이 평가결과에 중요한 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 실지진 시간이력 내의 정보들이 액상화 발생에 미치는 영향을 분석하기 위해 다양한 실지진 시간이력을 수집하여 실지진하중 재하의 진동삼축시험에 이용하였다.

3.1 실지진하중재하의 진동삼축시험

본 연구에 사용된 시험기는 영국의 ELE사가 개발한 진동삼축시험기이다. 이 장비는 불규칙한 진동하중을 최대진동수 70Hz와 최대지속시간 24초내에서 임의로 사용자가 직접 입력가능한 장비로 실제 지진하중을 충분히 구현할 수 있는 장점이 있다. 시험기는 압력, 변위, 체적변화, 축하중 및 간극수압 등의 자료값을 변환기(transducer)로 측정하여 컴퓨터로 자동 저장시키고 얻어진 자료값에 따라 다시 컴퓨터에서 압력을 조절하여 축압과 축차응력을 제어하는 부분, 즉 제어 및 데이터

획득 시스템(control and data acquisition system)과 실제로 시험이 실시되는 실행부분으로 구성되어 있다. 그리고, 본 진동삼축시험기는 모든 제어를 컴퓨터로 수행하며, 결과를 자동으로 저장하는 자동화시스템으로 시험기의 대략적인 개요도는 그림 3과 같다. 현재 본 연구진이 보유한 시험기기는 등방압밀상태에서의 연직축차응력의 재하만이 가능한 상태이며 추가 장비설치를 통해 이방압밀 및 횡방향 축차응력의 재하가 가능하도록 시험기를 보완하고 있다. 향후 이러한 성능이 구비되면 일반적인 진동삼축시험과 동일한 응력제어가 가능하여 정량적인 시험결과의 비교가 가능할 것으로 기대된다.

3.2 기본물성 시험

3.2.1 상대밀도 시험

사질토의 경우, 불교란시료의 채취가 어려우므로 대부분의 실내시험에서는 상대밀도를 이용하여 현장상태를 표현하며 재성형시료의 상대밀도는 가장 느슨한 상태와 가장 조밀한 상태의 건조단위중량을 이용하여 산정된다. 본 연구에서는 주문진 표준사를 대상으로 최소 건조단위중량과 최대 건조단위중량을 산정하고 이를 토대로 재성형시료를 제작하였다. 최소 건조단위중량을

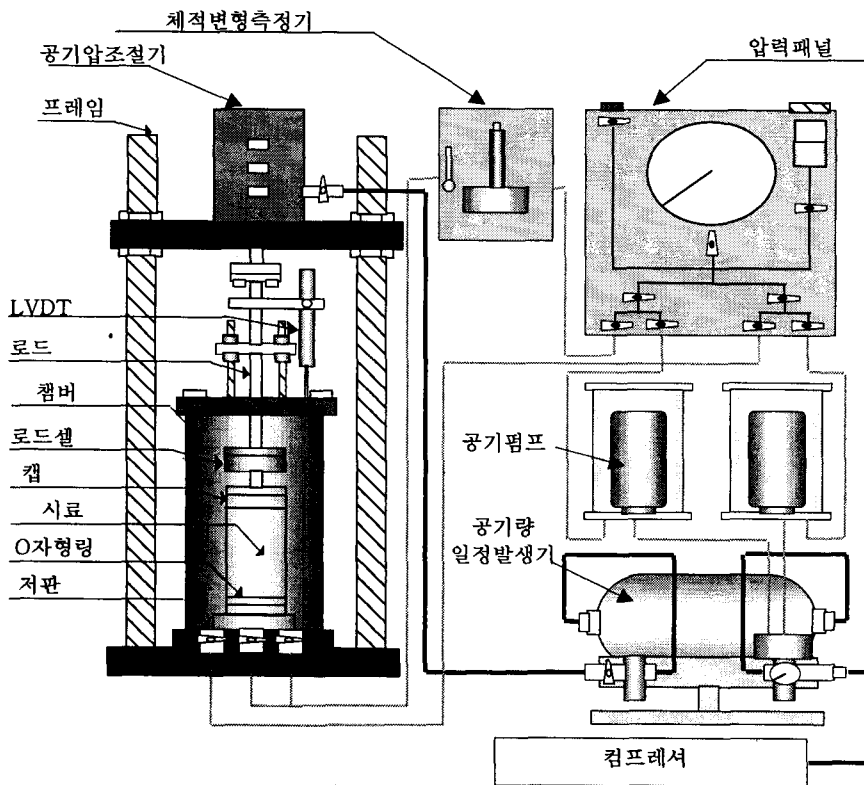


그림 3. 실지진하중재하의 진동삼축시험기

산정하기 위한 시험은 ASTM D4254-91에 기초하였으며 본 연구에서는 깔대기식 강사기구나 부삽을 이용하여 몰드 내에 시료를 최대한 느슨하게 형성하는 방법을 이용하였다. 최대 건조단위중량을 산정하기 위한 시험법은 ASTM D4253-93에 기초하였으며 본 연구에서는 전자기식 수직진동테이블을 사용하는 방법을 선택하였으며 이때, 진동주기 60Hz로 8분 동안 진동을 가하여 최대 건조단위중량을 산정하였다. 시험을 통해 산정된 최소 및 최대 건조단위중량은 $1.39t/m^3$ 및 $1.60t/m^3$ 이다.

3.2.2 입도분포 시험

과거 액상화 발생자료를 근거로 작성된 입도분포에 따른 액상화 가능성 영역에 주문진 표준사의 입도분포를 나타낸 결과 그림 4에서 보는 바와 같이 주문진 표준사의 입도분포는 빈입도이며 입자가 균질하여 액상화 현상이 발생하기 쉬운 조건을 가지고 있다. 그림에서 액상화 발생가능성과 관련된 한계선들은 1971년 일본 항만 및 어항시설 설계기준에 수록된 이래 계속적으로 이용되고 있는 설계시방이다(PHRI, 1997).

3.3 진동삼축시험 조건

본 연구에서 수행된 진동삼축시험의 제반조건은 표

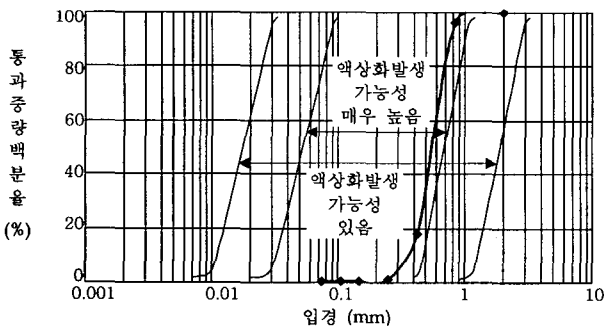


그림 4. 주문진 표준사의 입도분포곡선

표 1. 진동삼축시험의 제반조건

종류	시험 조건
상대밀도(%)	40
초기유효구속압 (kPa)	100
하중종류	정현파 & 실지진파형 (충격형 7개, 진동형 7개)
제어방식	응력제어방식
정현파시 진동수 (Hz)	1.0
실지진파시 지속시간 (초)	각 지진파의 유효지속시간
시료조건	포화, 비배수
시료성형방법	수중침강법

1과 같다. 실내시험시 액상화가 발생하기 쉬운 현장상태를 재현하기 위해서 주문진 표준사를 대상으로 상대 밀도를 40%, 초기유효구속압을 100kPa로 정하였다. 진동하중은 실지진 가속도 시간이력을 전단응력 시간이력의 형태로 변환하여 재하하였다.

본 실지진하중재하 진동삼축시험시 축차응력은 그림 5(a)에 나타난 바와 같다. 앞서 언급한 바와 같이 현재 보유하고 있는 실지진하중재하 진동삼축시험기는 그림 5(b)와 같이 일반적인 액상화 시험에서의 횡방향 축차응력을 재하하지 못하기 때문에 그림 5(a)와 같은 하중 조건으로 시험을 수행하였다. 그림 5(b)와 같은 일반적인 진동삼축시험에서는 축차응력의 0.5배를 전단응력으로 가정할 수 있기 때문에 응력비교의 등가전단응력 개념에 기초한 액상화 상세평가에서는 용이하게 횡방향 지진하중을 산정한다. 이에 반해, 그림 5(a)의 실지진하중 재하의 진동삼축시험에서는 축차응력으로 인한 전단응력의 작용방향이 45° 보다 크기 때문에 이러한 가정을 적용할 수 없다. 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 정량적인 결과의 이용보다는 불규칙한 실지진하중 시간이력이 액상화 발생특성에 미치는 영향을 정성

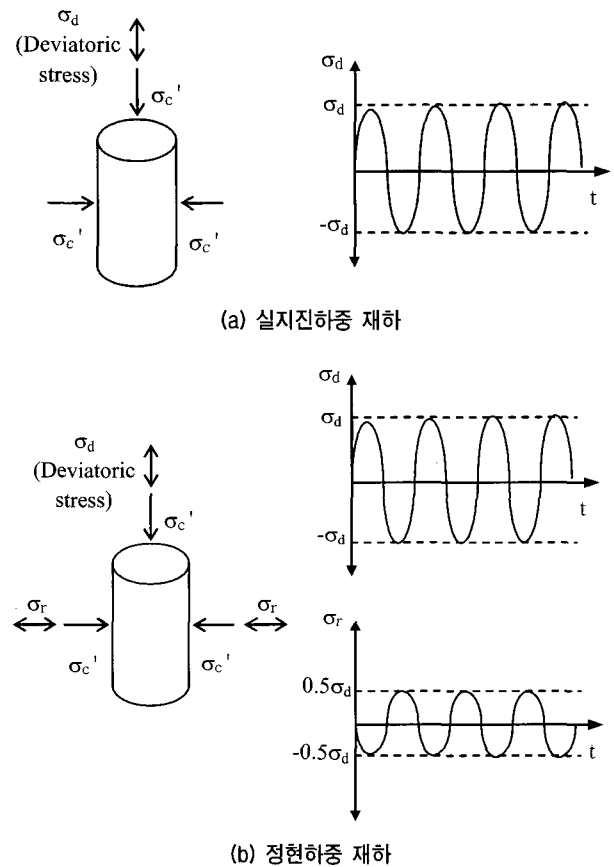


그림 5. 진동삼축시험시 축차응력 비교

적으로 분석하는데 연구초점을 맞추었다.

3.4 입력하중에 따른 액상화 발생현상

본 실험에서 이용된 실지진 가속도 시간이력은 다양한 지역에서 수집된 지진기록으로 노두에서 계측된 기록만을 시험에 이용하였다. 실지진하중재하 진동삼축시험에 이용된 지진들의 세부 제원을 요약하면 표 2에 나타난 바와 같고, 표에서 M_w 는 모멘트 규모, M_{JMA} 는 일본 기상청에서 사용하는 지진규모를 나타낸다.

표 2에서 유효지속시간은 Trigunac과 Brady(1975)의 연구결과에 기초하여 5~95% RMS (Root Mean Square)의 값만을 고려한 시간이며 진동형태는 Ishihara와 Yasuda(1975)의 연구내용을 인용한 일본 항만 내진설계 시방내용(PHRI, 1997)에 준하여 충격형과 진동형으로 구분하였다. 충격형과 진동형 구분에 대한 세부내용을 요약하면 표 3과 같다.

본 연구에서는 액상화 발생에 미치는 실지진하중의 영향을 고려하고자 표 2의 다양한 지진형태를 모사하여 최대값을 기준으로 점차 형태를 비례적으로 키워가며 시험을 반복하였으며 액상화가 발생한 시험을 끝으로 개별 입력지진에 대한 시험을 종료하였다. 각 입력지진에 대한 시험결과 중 표 3에 기초하여 분류된 충격형

지진형태인 Parkfield 지진하중과 진동형인 Valpraiso 지진하중 재하시 시간에 따른 축차응력과 과잉간극수압 변화는 그림 6와 그림 7에 나타난 바와 같다.

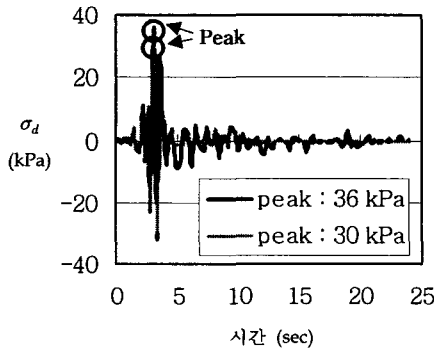
그림 6의 충격형 지진하중 재하의 경우, 최대하중 재하시에 과잉간극수압이 크게 증가한 후 후속된 하중의 크기가 상대적으로 크게 작아 후속된 과잉간극수압은 계속된 진동에 의해서도 거의 변화가 없는 반면, 그림 7의 진동형 지진하중 재하의 경우에는 액상화가 발생하지 않은 시험에서는 충격형과 같은 경향을 보였으나 액상화가 발생한 시험에서는 최대하중 재하후 후속된 하중에 의해서 과잉간극수압이 계속적으로 증가하여 액상화가 발생하였다. 본 연구에서는 그림 1에 나타난 바와 같이 액상화 발생이 진동하중으로 인해 유효응력경로가 액상화 상태변환선(phase change line)과 교차하는 순간부터 시작되는 것으로 정의하기 때문에 최대하중이 작용할 때, 이 선에 닿을 가능성이 가장 크지만, 최대하중 재하시에 이 선에 닿지 않더라도 일정수준이상 유효응력이 감소한 상태가 되므로 일정수준이상의 후속된 진동하중으로 인해 이 선에 닿을 수 있기 때문에 그림 7과 같은 결과가 나타났다. 이러한 결과로부터 액상화 상태변환선을 통해 액상화 발생시점을 결정하는 본 평가법의 기본가정이 타당한 것으로 밝혀졌으며 표 3과 같이 최대하중 이전의 시간이력을 토대로 충격형과 진

표 2. 진동삼축시험에 사용된 지진가속도 기록

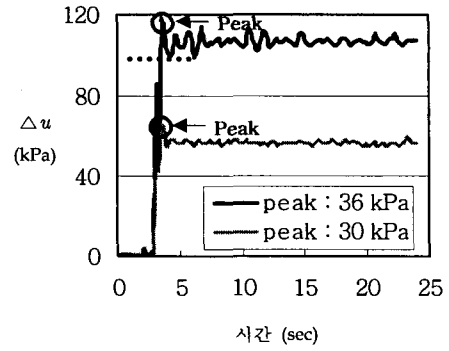
지진파	지진규모	지속시간(D_i)	유효지속시간(D_e)	진동형태
Cass	6.2 M_w	48.4 초	10 초	진동형
BajaCalifornia	6.4 M_w	90.2 초	18 초	진동형
Coalinga	6.5 M_w	58.1 초	20 초	진동형
Alaska	6.6 M_w	51.0 초	13 초	진동형
Valpraiso	7.2 M_w	28.0 초	13 초	진동형
Michoacan	8.1 M_w	62.9 초	23 초	진동형
Tamaranui	6.6 M_w	48.0 초	20 초	진동형
Parkfield	6.1 M_w	24.0 초	7 초	충격형
Ormond	6.2 M_w	126.4 초	20 초	충격형
Japan 2000.07.30	6.3 M_{JMA}	120.0 초	15 초	충격형
BigBear	6.5 M_w	60.0 초	10 초	충격형
Ofunato	7.4 M_{JMA}	14.0 초	14 초	충격형
Costarica	7.5 M_w	80.0 초	28 초	충격형
Hachinohe	7.9 M_{JMA}	15.0 초	15 초	충격형

표 3. 지진파형의 분류와 보정계수(Ishihara와 Yasuda, 1975)

지진파형	정의	보정계수, C_k
충격형	최대전단응력 전 최대전단응력의 60%이상 전단응력재하가 2회 이하	0.55
진동형	최대전단응력 전 최대전단응력의 60%이상 전단응력재하가 3회 이상	0.70

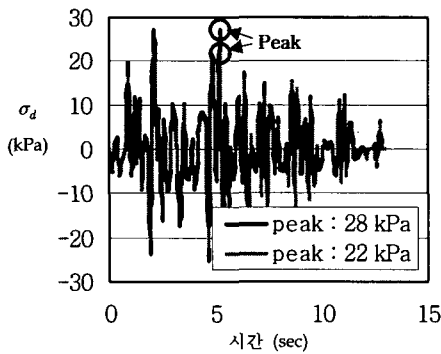


(a) 진동축차응력

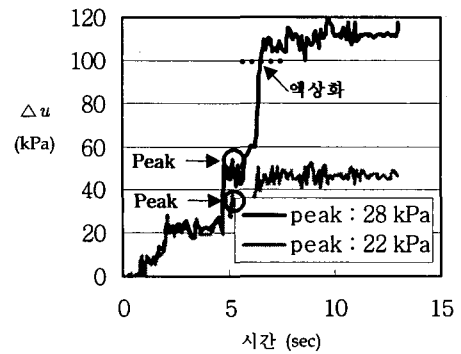


(b) 과잉간극수압비

그림 6. 충격형 실지진 하중재하 진동삼축시험(Parkfield 지진하중)



(a) 진동축차응력



(b) 과잉간극수압비

그림 7. 진동형 실지진 하중재하 진동삼축시험(Valpraiso 지진하중)

동형으로 구분하는 Ishihara와 Yasuda(1975)의 지진형태 분류법이 재검토되어야 할 필요가 있는 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터, 제안된 평가법은 우선적으로 최대하중 재하시 액상화가 발생하는 충격형 지진에 국한하여 적용할 것을 추천하며 향후, 진동형 지진에 대해서는 최대하중 재하 후 후속된 지진하중에 대한 영향평가 분석을 통해 적절한 적용방안을 제안하고자 한다.

4. 해석사례비교를 통한 제안된 평가법의 타당성 검토

본 연구에서는 제안된 새로운 평가법의 타당성 검토를 위해 가상의 액상화 평가대상지층을 구성하여 기존 등가전단응력개념에 기초한 액상화 평가와 비교하였으며 이를 위해 진동전단응력비를 달리한 3회의 진동삼축시험을 수행하였다.

4.1 액상화 평가대상지층 선정 및 지반응답해석

본 연구에서는 유효구속압 100kPa의 실내시험조건을 고려하여 그림 8과 같이 임의로 액상화 평가대상지반을 선정하고 평가깊이를 12m로 정하였다. 국내 액상화 상세평가에서 지진에 의한 전단응력비 산정시 지반응답 해석을 이용하는 점과 제안된 평가법에서도 지반응답 해석으로부터 획득된 변형률 시간이력을 이용하는 점을 고려하여 그림 8의 지반을 대상으로 지반응답 해석을 수행하였다. 이때, 표 2의 충격형 지진 중 그림 9에 나타난 4개의 지진가속도 시간이력을 선정하여 지반응답 해석을 수행하였으며 입력지진의 내진성능수준은 국내 내진설계기준에서 액상화 상세평가가 요구되는 붕괴방지 1등급으로 통일하였다. 여기서, 붕괴방지 1등급 수준의 최대 설계지반운동수준은 0.154g이다.

일반적으로 액상화 평가시 실지진 시간이력은 자국의 설계지반운동수준에 맞추어 이용된다. 그러므로, 실제 진앙거리, 변위로부터 결정되는 지진규모는 다소 차이를 나타내게 된다. 본 연구에서는 이러한 국내 붕괴방

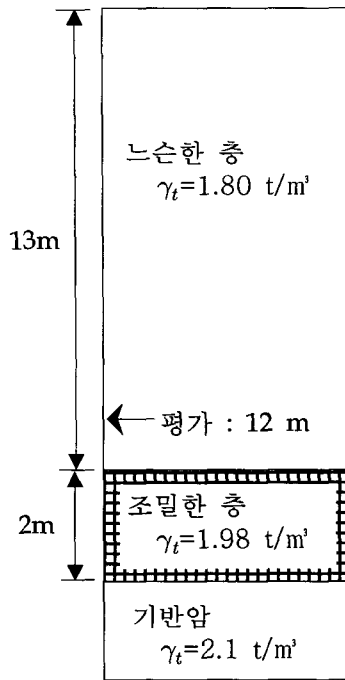


그림 8. 평가대상지반

지 1등급 설계지반운동수준으로 수정된 그림 9의 입력 가속도 이력곡선의 에너지를 비교하므로써 입력지진의 크기를 비교하였다. 지진에너지, TE는 Vanmarcke와 Lai

(1980)에 의해 제안된 식을 이용하여 산정하였으며 이는 1질점계 진동 모델을 기본으로 한 것으로 지진계로 측정된 가속도 시간이력에 기초하여 산정된다. 그림 10은 식 (3)을 통하여 산정된 입력지진의 에너지들을 비교하여 나타내고 있다.

$$TE(t) = \int_0^t [a(t)]^2 dt \quad (3)$$

여기서, $a(t)$ 는 가속도 시간이력이다.

그림 10에서 총에너지는 그림 9의 시간이력 전부를 고려한 것이며 유효에너지는 시간이력 중 최대가속도 재하시까지의 값들만을 고려한 것이다. 전반적인 총에너지는 최대가속도 0.154g로 통일되었음에도 불구하고 표 2에 나타난 지진규모를 효과적으로 표현하여 Parkfield, BajaCalifornia, BigBear, Costarica 순인 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터 액상화 평가 및 내진해석시 실시된 시간이력을 이용할 경우, 지역특성에 적합한 지진을 선택하는 것이 중요함을 알 수 있었다.

본 연구에서는 1차원 등가선형해석 프로그램인 Pro-Shake를 이용하여 지반응답해석을 수행하였다. Shake 프로그램의 입출력부를 강화한 Pro-Shake 프로그램은

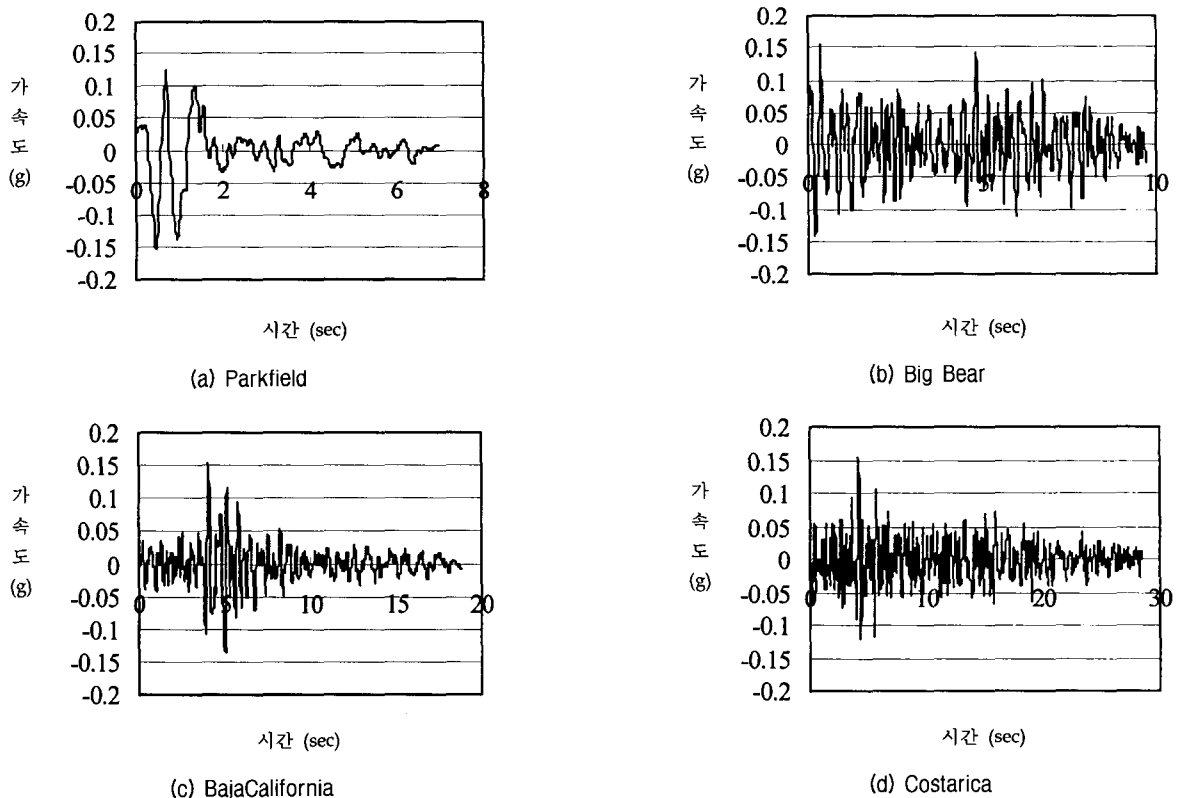


그림 9. 지반응답해석에 이용된 가속도 시간이력

주파수영역으로 Fourier변환을 이용하고 전응력개념에 기초하기 때문에 문제점이 있을 수 있다는 지적이 있지만, 그 사용이 편리할 뿐만 아니라 등가전단응력의 산정이 액상화 평가시 보수적인 결과를 주는 것으로 알려져 현재까지도 전세계적으로 이용이 빈번하다. 본 연구에서도 등가전단응력개념에 기초한 액상화 상세평가와 제안된 평가법에 기초한 상세평가를 비교하기 위해 Pro-Shake 프로그램을 선택하였으며 향후 Shake를 포함한 다양한 지반응답해석기법들의 비교연구를 수행하여 제안된 평가법에 적합한 지반응답해석기법을 도입하고자 한다.

Pro-Shake를 이용한 지반응답해석에서는 입력지반물성으로 변형률 수준별 전단탄성계수의 변화곡선을 입력하도록 되어 있는데, 본 연구에서는 전자기를 이용한 비틀전단시험을 통해 결정된 변형률 수준별 전단탄성계수 변화곡선을 입력하였다. 비틀전단시험은 그림 8의 평가 대상지반을 해당깊이별로 지반심도 10m 이내, 10~13m, 그리고 13~15m로 구분하여 수행되었으며 시험시 유효구속압은 각각 60, 100, 150kPa으로 하였다. 그

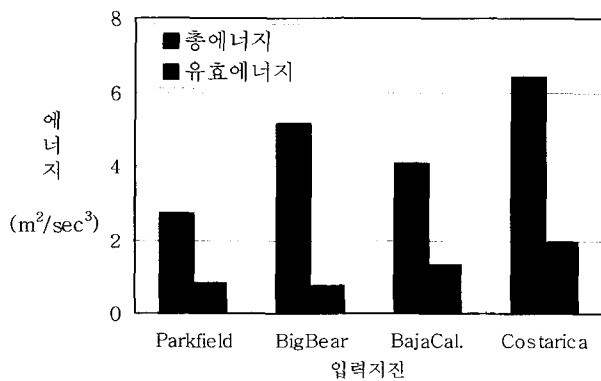


그림 10. 최대가속도 0.154g로 수정된 입력지진의 에너지 비교

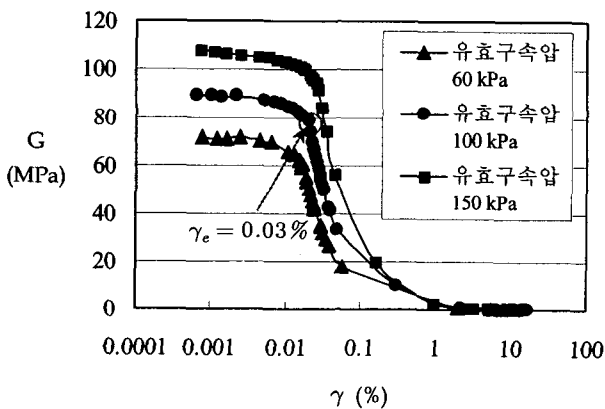


그림 11. 탄성 전단변형률 산정 및 응답해석에 이용된 전단탄성계수곡선(상대밀도 40%)

림 11은 유효구속압에 따른 비틀-전단시험을 통해 획득한 변형률 수준별 전단탄성계수 변화곡선을 나타내고 있다.

본 연구에서는 등가전단응력개념에 기초한 액상화 상세평가가 미국 및 일본에서는 지진규모 7.5를 기준으로 수행되며 국내에서는 지진규모 6.5를 기준으로 하는 점을 고려하여 2가지 경우에 대해 상세평가를 각각 수행하였으며 지진규모가 입력자료로 사용되는 Pro-Shake를 이용한 지반응답해석에서도 이를 반영하였다.

4.2 등가전단응력개념에 기초한 액상화 상세평가

등가전단응력개념의 액상화 상세평가시 액상화 저항응력비를 산정하기 위해 이용된 진동삼축시험기기는 C. K. Chan이 개발한 것으로 응력비교의 액상화 상세평가에 이용가능하도록 그림 5(ب)와 같은 축차응력재하가 가능하다. 이때, 시료조건 및 구속조건은 기수행한 실지진하중재하 진동삼축시험조건과 동일하게 상대밀도 40% 및 유효구속압 100kPa로 통일하였다. 그림 12는 진동삼축시험을 통해 산정된 액상화 저항응력비 산정곡선을 나타낸 것으로 세로축의 액상화 저항응력비는 최대축차응력에 대한 초기유효구속압의 비로 정의되며 가로축인 액상화 발생 등가진동재하횟수는 3회의 액상화 발생시험에서 초기유효구속압과 과잉간극수압이 같아지는 시점의 진동재하횟수를 나타낸 것이다. 또한, 그림 12에서 실선은 주문진 표준사를 대상으로 상대밀도 40%, 유효구속압 100kPa의 동일시험조건에서 진동크기를 달리한 3회의 진동삼축시험결과를 나타낸 것이며 점선은 표 4의 현장상태 보정내용을 토대로 보정계수 0.9를 적용하여 작성한 최종 액상화 저항응력

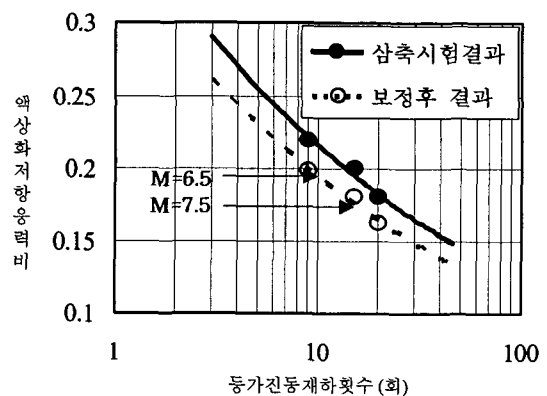


그림 12. 액상화 저항응력비 산정곡선(상대밀도 40%, 유효구속압 100kPa)

비 산정곡선이다. 이때, 적용된 0.9는 일본 항만 및 어항시설 내진설계에 일반적으로 이용하는 값이다(PHRI, 1997).

그림 11에서 지진규모 6.5와 7.5로 표시된 것은 Seed 등(1983)이 등가전단응력개념에 기초하여 제안한 지진 규모별 등가진동재하횟수에 해당하는 값을 나타낸 것이다. 미국에서는 지진규모 7.5 기준으로 15회를 사용하고 국내에서는 항만 및 어항시설 내진설계표준서에서 한시적으로 제안된 설계지진규모 6.5에 해당하는 10회의 사용을 추천하고 있다. 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 액상화 상세평가를 지진규모 6.5와 지진규모 7.5를 기준으로 평가를 수행하였다.

등가전단응력개념에 기초한 액상화 상세평가의 경우, 국내 항만 및 어항시설 내진설계표준서(지진공학회, 1999)에서는 지반응답해석결과를 통해 평가지층의 최대가속도를 산정한 후, 다음의 식을 이용하여 지진에 의한 전단응력비를 산정하도록 되어 있다.

$$\frac{\tau_e}{\sigma_v'} = 0.65 \times \frac{a_{\text{depth}}}{g} \times \frac{\sigma_v}{\sigma_v'} \quad (4)$$

여기서, a_{depth} 는 지반응답해석을 통해 산정된 평가대상 지층의 최대가속도이다.

그림 12의 액상화 저항응력비와 식 (4)를 통해서 산정된 지진에 의한 전단응력비를 비교하여 산정한 최종 액상화 상세평가안전율은 표 5에 나타낸 바와 같다.

4.3 제안된 평가법에 기초한 액상화 상세평가

기존의 등가전단응력개념에 기초한 액상화 상세평가에서는 3회 이상의 시험결과를 토대로 산정된 액상화 저항응력비 산정곡선을 이용하여 설계지진규모별로 저항응력비를 산정하는 반면, 제안된 평가법에서는 정현하중의 최대진폭이 다르더라도 재료내부의 소산에너지 및 누적 소성변형에는 큰 변화가 없다는 Okada와 Nemat-Nasser(1994) 및 최재순 등(2002)의 연구결과를 토대로 1회의 정현하중재하의 진동시험결과만을 이용하여 액상화 저항특성치를 산정한다. 저항특성치 산정에 이용되는 진동삼축시험결과는 유효응력경로와 응력-변형률 상관곡선이며 유효응력경로를 이용하여 액상화 상태변환시점을 결정하고 응력-변형률 상관곡선을 이용하여 이 시점까지 1/4주기별로 소성 전단변형률을 누적하여 최종 액상화 저항특성치를 결정한다. 여기서, 1/4주기별 소성 전단변형률은 응력-변형률 상관곡선상의 전단변형률에서 탄성 전단변형률을 감하여 산정하며 이때, 탄성 전단변형률은 그림 11에 원으로 표시된 바와 같이 최대곡률에서의 변형률인 threshold 변형률로 정의된다. 그림 11에서 나타난 탄성 전단변형률은 0.03%이고 그림 13은 본 평가법의 액상화 저항특성치 산정에 이용된 유효응력경로 및 응력-변형률 상관관계를 도시한 것이며 그림에서 원표시는 급격한 응력감소 및 대변형이 발생하는 액상화 상태변환시점을 나타내고 있다. 이상의 평가과정에 준하여 원표시된 부분까지

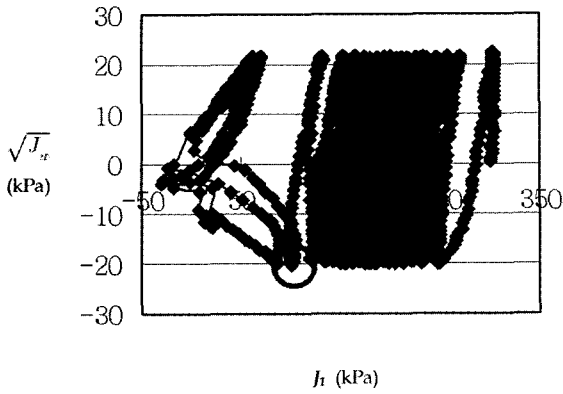
표 4. 진동삼축시험결과 보정(김수일 등, 2000)

구분	Seed와 Idriss	일본(Ishihara & Iwasaki)
보정계수	보정계수 = $C_r / 0.65$ [C_r : 0.57 ($K_0=0.4$) ~ 0.9 or 1.0 ($K_0=1.0$)]	보정계수 = $0.9 / C_k \times (1+2K_0) / 3$ 1. Ishihara : $C_k = 0.55$ (충격형) / 0.7 (진동형) 2. Iwasaki : $C_k = 0.63$
내용	내부마찰각 30° 고려시 보정계수범위는 0.92~0.95 수준	내부마찰각 30° 고려시 보정계수범위는 0.86~1.09 수준(Ishihara), 0.95(Iwasaki)

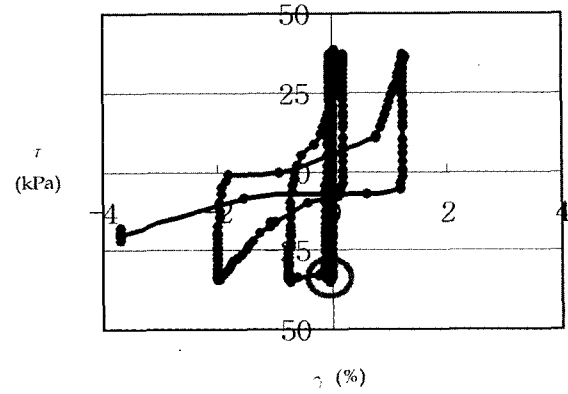
* Jacky 식 : $K_0=1-\sin\phi$ (ϕ : 내부마찰각, 일반적인 사질토의 내부마찰각은 25°~35°)

표 5. 등가전단응력개념에 기초한 액상화 상세평가(상대밀도 40%, 유효구속압 100 kPa)

구분	평가지층 최대가속도		지진에 의한 전단응력비		액상화 저항응력비		평가안전율	
	M=6.5	M=7.5	M=6.5	M=7.5	M=6.5	M=7.5	M=6.5	M=7.5
Parkfield	0.277	0.249	0.389	0.349	0.195 (재하횟수 10회기준)	0.178 (재하횟수 15회기준)	0.50	0.51
BigBear	0.262	0.212	0.327	0.297			0.59	0.60
BajaCal.	0.194	0.183	0.273	0.257			0.71	0.69
Costarica	0.210	0.265	0.295	0.373			0.66	0.48
최소							0.50	0.48

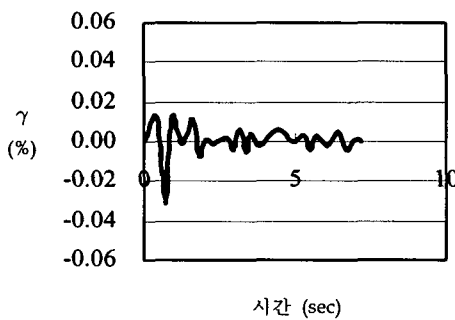


(a) 유효응력경로

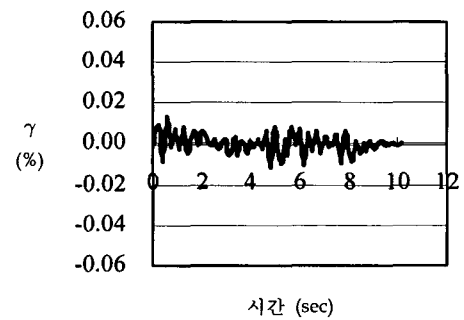


(b) 응력-변형률 상관곡선

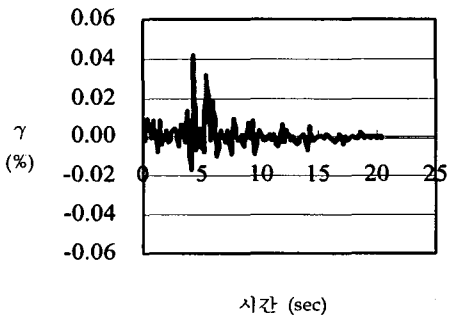
그림 13. 제안된 평가법에 이용된 진동삼축시험결과(상대밀도 40%, 유효구속압 100kPa)



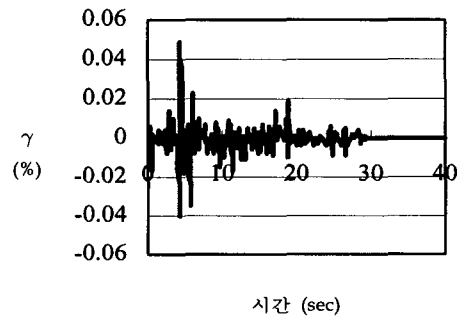
(a) Parkfield



(b) BigBear



(c) BajaCalifornia



(d) Costarica

그림 14. 지반응답해석을 통해 획득한 변형률 시간이력(지진규모 6.5기준, 지반심도 12m)

1/4주기별 응력-변형률 상관관계로부터 누적계산된 액상화 저항특성치는 0.71이다.

지진에 의한 전단응력비 및 발생특성치 산정의 경우, 두 방법 모두 지반응답해석 결과를 이용하고 있으나, 실제 이용내용을 살펴보면, 큰 차이가 있다. 등가전단응력 개념에 기초한 기존의 상세평가법의 경우, 지진에 의한 전단응력비를 산정하기 위해 지반응답해석으로부터 획득된 가속도 시간이력 중 최대가속도만을 이용하는 반면, 제안된 평가법에서는 획득된 변형률 시간이력에서

최대하중재하시까지의 값들을 모두 고려한다. 제안된 평가법에서 액상화 발생특성치 산정을 위해 이용된 지진규모 6.5에 대한 평가지층 12 m에서의 변형률 시간이력은 그림 14에 나타낸 바와 같다. 액상화 발생특성치는 최대값 재하시까지 변형률 시간이력의 첨두값(전변형률)들에 대해 탄성 전단변형률을 감하여 산정된 소성 전단변형률을 누적하여 계산된다.

이상의 내용을 요약하여 제안된 상세평가결과를 나타내면 표 6과 같다.

표 6. 제안된 평가법에 기초한 액상화 상세평가(상대밀도 40%, 유효구속압 100kPa)

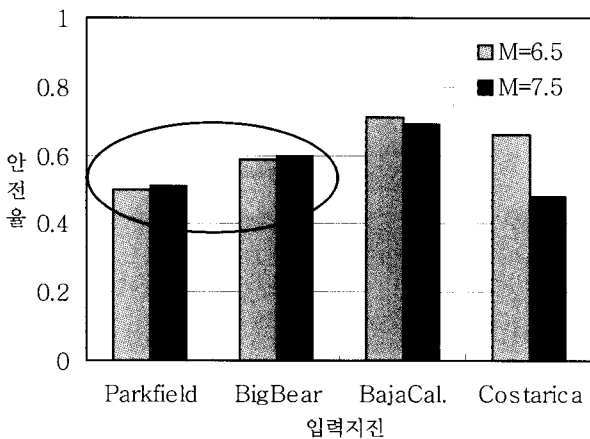
구분	지진에 의한 발생특성치		액상화 저항특성치		액상화 평가안전율	
	M=6.5	M=7.5	M=6.5	M=7.5	M=6.5	M=7.5
Parkfield	0.793	0.886	0.71		0.90	0.80
BigBear	0.717	0.771			0.99	0.92
BajaCal.	1.039	1.239			0.68	0.57
Costarica	1.715	1.781			0.41	0.40
최소					0.41	0.40

4.4 상세평가 결과비교

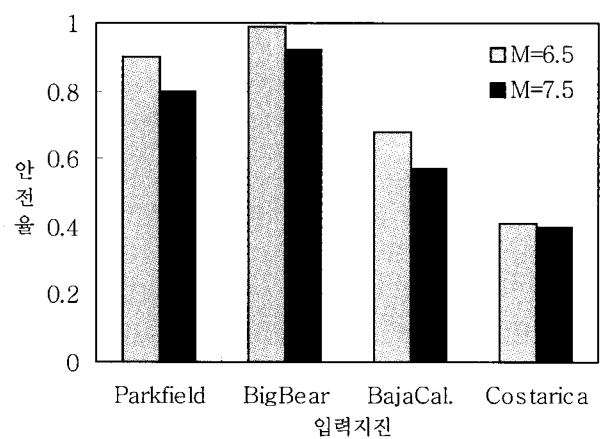
표 5의 등가전단응력개념에 기초한 상세평가결과와 표 6의 제안된 상세평가결과를 비교하여 나타내면 그림 15와 같다.

그림 15(a)의 등가전단응력개념에 기초한 상세평가결과를 보면, 지진규모에 따라 지반의 저항응력비는 진동 재하횟수 15회 및 10회를 적용하여 지반의 저항응력비가 지진규모에 따라 감소함을 나타냈으며 지진에 의한 전단응력비의 경우, BajaCalifornia 및 Costarica 지진의 경우에는 평가기준 지진규모가 6.5에서 7.5로 증가함에 따라 평가안전율이 감소되는 합리적인 결과가 획득된 반면, 그림 15의 타원으로 표시된 Parkfield 지진 및 BigBear 지진에 대한 액상화 평가안전율은 평가기준 지진규모 증가에도 불구하고 평가안전율이 거의 같은 수준으로 산정되는 비합리적인 결과가 도출되었다. 이는 지반의 저항응력비가 0.195에서 0.178로 약 10% 정도 감소함에도 불구하고 지진규모 증가에 따라 증폭된 최대값이 오히려 역전되어 나타났기 때문이다. 이러한 현상은 Pro-Shake 프로그램의 1차원 등가선형해석에 기인

한 것으로 주기영역의 응답해석과정 중 유효전단변형을 산정시 지진규모가 고려되어 다른 증폭현상을 나타낼 수 있기 때문이며 이러한 비합리적인 결과의 획득이 Pro-Shake 프로그램의 이용에 따른 것으로 간주할 수도 있지만, 대부분의 응답해석 프로그램들도 지진의 지반 내 다양한 변화를 완벽하게 반영할 수 없기 때문에 최대 가속도라는 하나의 값만을 이용할 경우, 다른 응답해석에서도 이와 같은 비합리적인 결과가 도출될 수 있다. 이에 반해 그림 15(b)의 제안된 평가법에 기초한 결과를 보면, 한계저항특성이 고유하다는 재료역학적 이론에 기초하여 지진규모에 관계없이 저항특성치가 일정함을 나타내고 있으며 평가기준 지진규모가 6.5에서 7.5로 증가함에 따라 지진에 의한 발생특성치도 함께 증가하여 최종 산정된 액상화 평가안전율이 감소하는 합리적인 경향을 보이고 있다. 이는 제안된 평가법에서는 다양한 주기를 보유하고 있는 시간이력 상의 정보들이 상당 부분 이용되어 효율적으로 지진의 지반 내 증폭특성이 반영된 데 기인한 것을 판단된다. 또한, 입력지진별 결과들은 그림 10의 최대하중 재하시점까지 누적계산된 각 입력지진별 유효에너지와 유사한 경향을 나타냄으로



(a) 기존의 평가법에 기초한 결과 비교



(b) 제안된 평가법에 기초한 결과 비교

그림 15. 액상화 상세평가결과 비교(상대밀도 40%, 유효구속압 100kPa)

제안된 평가법이 지진특성을 합리적으로 표현가능함을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 실지진하중 재하 진동삼축시험으로부터 액상화 발생특성을 분석하고 이를 기초로 하여 새로운 액상화 상세평가법을 개발하였다. 개발된 상세평가법에서는 진동하중의 크기가 재료내부의 소산에너지 및 한계 누적 소성변형특성에 큰 영향이 없다는 기존의 연구발표에 기초하여 정현하중을 이용한 진동삼축시험으로부터 지반의 액상화 저항특성치를 산정하도록 하였으며 지진에 의한 액상화 발생특성치는 실지진시간 이력 입력의 지반응답해석을 이용하도록 하였다. 또한, 제안된 평가법의 타당성 검토를 위해 기존의 상세평가와 비교연구도 병행하였다.

본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 실지진하중의 액상화 발생특성을 분석하기 위해 충격형 및 진동형 실지진하중 재하 진동삼축시험을 수행한 결과, 충격형 지진하중 재하시에는 최대하중 재하시점에서 액상화가 발생한 반면, 진동형 지진하중의 경우에는 전반적으로 최대하중에 의해 큰 과잉간극수압의 변화를 나타낸 후, 후속된 큰 하중으로 인해 액상화가 발생하였다. 이상의 결과로부터 액상화를 발생시키는 영향인자는 시간이력 중 최대하중임이 밝혀졌으며 이러한 점을 고려하여 제안된 상세평가법은 우선적으로 충격형 지진에 국한하여 적용할 것을 추천하였다.
- (2) 지반응답해석결과 중 가속도 시간이력내 최대가속도만을 이용하는 등가전단응력개념의 상세평가법이 갖는 불합리한 점을 개선하기 위해 제안된 평가법에서는 지반응답해석결과로 획득된 변형률 시간이력에서 최대하중 재하시까지의 모든 시간이력들을 고려하도록 하였으며 지반의 저항특성치가 1/4 주기별 소성 전단변형률을 누적계산하는 점을 고려하여 지진에 의한 액상화 발생특성치도 변형률 시간이력을 토대로 소성 전단변형률을 산정하여 누적계산하도록 하였다. 이는 실지진하중 재하 진동삼축시험결과를 통해 밝혀진 충격형 지진의 액상화 발생특성을 충분히 반영한 것으로 제안된 평가법에서는 지반응답해석결과를 효율적으로 이용하여 지

진의 증폭현상과 불규칙한 실지진 시간이력의 영향을 합리적으로 고려하고 있다고 판단된다.

- (3) 등가전단응력개념에 기초한 기존의 평가법과의 비교를 통해 제안된 평가법의 타당성을 검토한 결과, 제안된 평가법은 실지진 시간이력 정보의 일정부분을 고려하는 특징으로 인해 단 하나의 최대가속도만을 이용하는 기존의 평가법보다 불규칙한 지진의 다양한 특성을 충분히 반영하고 있는 것으로 나타났다. 또한 액상화 저항특성 또한 고유의 재료특성으로 간주하여 지진규모에 따라 변화하는 기존의 평가법보다 합리적인 것으로 나타났다. 그러므로, 제안된 상세평가법을 이용하는 경우, 액상화 평가결과와 신뢰성이 더욱 향상되어 지진시 지반의 안정성 확보에 크게 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참고 문헌

1. 김수일, 박인준, 최재순 (2000), 국내 여건에 적합한 액상화 평가 기법 연구, *대한토목학회 논문집*, Vol.20, No.2-c, pp.129-139.
2. 김수일, 최재순, 강한수 (2004), 진동시험에 기초한 액상화 상세에 측정법 개발, *한국지반공학회 2004 불확실대회*, 한국지반공학회.
3. 최재순, 홍우석, 박인준, 김수일 (2002), 지반의 동적특성에 기초한 액상화 평가법 (I): 이론제안, *한국지반공학회 논문집*, 제18권, 1호, pp.91-99.
4. 최재순, 홍우석, 박인준, 김수일 (2002), 지반의 동적특성에 기초한 액상화 평가법 (II): 타당성 검토, *한국지반공학회 논문집*, 제18권, 1호, pp.101-112.
5. 한국지진공학회, *항만 및 어항시설의 내진설계 표준서*, 해양수산부, 1999.
6. 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.
7. Iai, S., Matsunaga, Y. and Kaneoka, T. (1992), "Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility", *Soil and Foundation*, JSSMFE, Vol.32, No.2, pp.1-15.
8. Ishihara, K. and Yasuda, S. (1975), "Sand Liquefaction in Hollow Cylinder Torsion under Irregular Excitation", *Soil and Foundations*, Vol.15, No.1, pp. 45-59.
9. 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.

10. Port and Harbor Research Institute (1997), Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land, A.A.Balkema.
11. 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.
12. 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.
13. Trifunac, M. D. and Brady, A. G. (1975), "A study of Time Duration of Strong Earthquake Ground Motion", *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.65, pp.581-626.
14. Vanmarcke, E. H. and Lai, S. P. (1980), "Strong Motion Duration and RMS Amplitude of Earthquake Records", *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.70, pp.1293-1307.

(접수일자 2004. 5. 31, 심사완료일 2004. 7. 5)