

다양한 입력하중에서의 액상화 발생 특성 비교 연구

An Experimental Study on the Liquefaction Behavior under Various Loading Conditions

김수일¹⁾, Soo-Il Kim, 황선주²⁾, Seon-Ju Hwang, 박근보³⁾, Keun-Bo Park, 최재순⁴⁾, Jae-Soon Choi

¹⁾ 연세대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

²⁾ 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

³⁾ 연세대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

⁴⁾ 교토대학교 방재연구소 연구원, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Uji, Japan

SYNOPSIS : Liquefaction characteristics of saturated sand under various dynamic loadings such as sinusoidal, wedge, increasing wedge and real earthquake loading are investigated focusing on the excess pore water pressure build up instead of liquefaction resistance strength in this paper. There are large differences between two types of earthquake loading - impact and vibration in liquefaction characteristics. The angle of phase change line of sinusoidal loading is very close to the vibration type, whereas the cumulative deviator stress and cumulative plastic strain are larger than two types of real earthquake loadings. On the other hand, the liquefaction characteristics of increasing wedge loadings are located in the range between vibration and impact earthquake loadings. It is concluded that the sinusoidal loading overestimates the resistance of soil under real earthquake loading. Based on results obtained, the increasing wedge loading can reflect the liquefaction behavior under real earthquake loadings more efficiently than sinusoidal loading based on equivalent uniform stress concept.

Key words : angle of phase change line, cumulative plastic strain, cumulative deviatoric stress, liquefaction characteristics

1. 서 론

1964년 Niigata 지진으로부터 액상화 발생 메카니즘에 대한 상세한 연구가 시작된 이후로, 미국 및 일본에서는 자국의 특성상 많은 지진자료 및 지진관련 시험자료를 토대로 경험적 평가방법을 계속 수정 보완하고 있다. 그러나 기존의 경험적 평가방법은 지진력과 지반의 저항력의 최대값만을 비교하므로 불규칙한 지진력에 의한 실제 지반의 동적거동을 충분히 반영하지 못하고 있다. 현재 실내시험 수행시 대부분의 경우 실지진력을 이용하기보다 등가전단응력과 등가반복 재하횟수로 표현된 정현파의 진동하중을 사용하여 이를 토대로 지진규모별 액상화 저항응력비를 산정하는 기존의 응력비교법이 일반적이다. 이는 실내진동시험을 통해 얻을 수 있는 시간에 따른 간극수압의 변화 및 변형률 등의 다양한 실험 결과를 효율적으로 이용하지 못하는 것이다. 최근 실험기기의 발전으로 실지진하중을 이용한 포화사질토의 액상화 저항강도 산정에 관한 연구가 계속되고 있다. 또한 재료역학적 관점에서 진동하중하의 포화지반의 거동을 소산에너지(dissipated energy)(Okada 등, 1994)의 변화로 해석하는 이론과 미세구조의 교란도 변화로 해석하는 교란상태개념(disturbed state concept)(Desai, 1992)이 제안된 바 있다.

본 연구는 다양한 동적 축하중에 따른 포화사질토의 동적 거동을 기존의 저항강도 측면이 아닌 과잉

간극수압의 증가에 따른 응력경로의 변화 및 이에 따른 액상화 발생 특성을 중심으로 비교·분석하여 기존의 등가전단응력개념에 기초한 정현하중 진동삼축시험의 적절성을 판단하고자 한다.

2. 실내 진동시험에 기초한 액상화 해석

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

2.1 응력 비교를 통한 액상화 판정

현재 국내의 액상화 평가는 불규칙한 지진력을 등가지진응력(equivalent shear stress)으로 표현하고, 실내진동시험을 통해 산정된 액상화 저항응력비(liquefaction resistance stress ratio)를 비교하는 방법이 일반적이다. 이때 일반적으로 등가지진응력(Seed and Idriss, 1975)은 정현하중화한 식을 이용하여 액상화 저항응력비 산정은 정현파(sinusoidal)형태의 진동전단응력비 수준을 달리한 3회의 실내진동시험을 통해 산정한다. 특히 저항응력비 산정시 액상화 발생시점의 정현하중 재하횟수를 통해 지진규모를 고려하는데 일본의 경우 재하횟수 20회로 규정화하여 지진규모 7.5를 고려하는 반면, 국내의 경우 Kim(2004)이 국내 지진특성을 고려하여 지진규모 6.5에 해당하는 지진규모 보정계수(MSF, magnitude scale factor)를 제안한 바 있다. 그러나 등가전단응력과 그에 따른 등가반복 재하횟수를 통해 불규칙한 지진을 단순화시키는 것은 지진규모나 지속시간 등에 따른 지진특성 변화가 지반에 미치는 영향을 반영하지 못하는 것으로 나타났다.

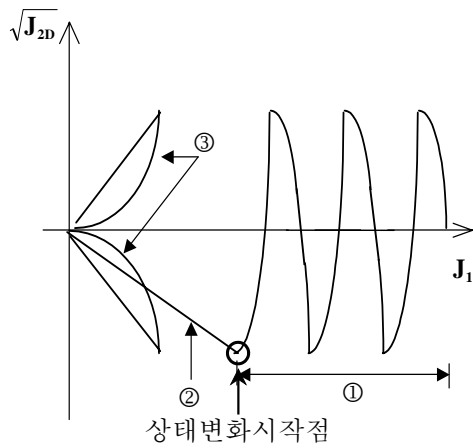
2.2 과잉간극수압을 고려한 액상화 발생 특성

근래에 들어 지진에 의한 액상화 현상에 있어 간극수압의 변화 및 토립자 내부의 소산에너지 변화 관계에 관한 연구가 계속되고 있다. 소산에너지 개념은 진동전단하중이 재하되는 경우, 포화사질토에서 발생하는 토립자의 미세구조의 재배열과 그에 따른 에너지 소산에 대한 연구에 기초를 두고 있다. 일반적으로 재료가 하중을 받게 되면, 재료 특성상 탄성, 소성, 그리고 파괴의 단계로 거동변화를 보이게 된다. 지반이 하중을 받게 되면 순간적인 탄성단계를 거쳐 파괴시에 이르기까지 대부분 소성거동을 하게 되며 특히 진동하중하의 포화지반의 경우, 비배수상태에서 발생하는 과잉간극수압의 영향으로 소성연화현상이 크게 지배하여 파괴에 이르게 된다고 알려져 있다.

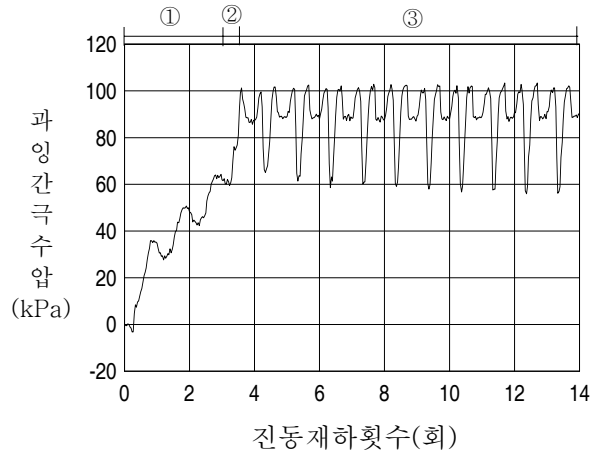
3. 축하중에 따른 액상화 발생특성치

3.1 유효응력경로 상의 상태변화선

일반적인 실내진동시험에 있어 등방압밀하중하의 거동변화를 살펴보면 그림 1과 같이 3부분(①점진적 응력감소, ②급진적 응력감소, ③액상화 후 파괴거동)으로 구분할 수 있다(최재순 등, 2003). 본 연구에서는 급진적 응력감소를 보이며 큰 소성변형으로 초기액상화가 발생하는 ②부분의 시작점을 상태변화시작점으로 정의하였다. 정의된 지점을 원점과 연결한 상태변화선(phase transformation line)을 도시하여 축하중에 따라 그 기울기를 비교하였으며 상태변화시작점을 지반이 저항력을 잃은 후 발생하는 큰 소성변형을 포함하지 않은 경계점으로 간주하여 액상화 발생 특성치 산정시 상태변화시작점까지 누적소성변형률 및 누적축차응력을 계산하였다.



(a) 유효응력경로

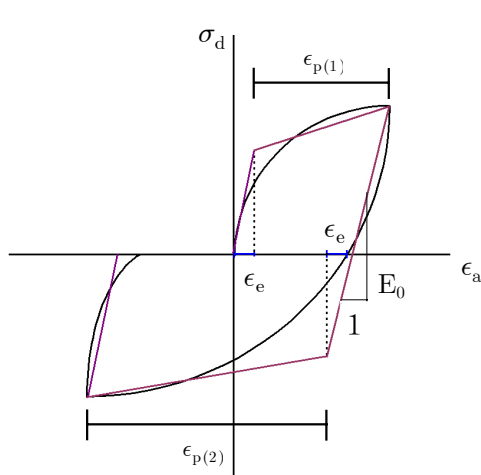


(b) 과잉간극수압

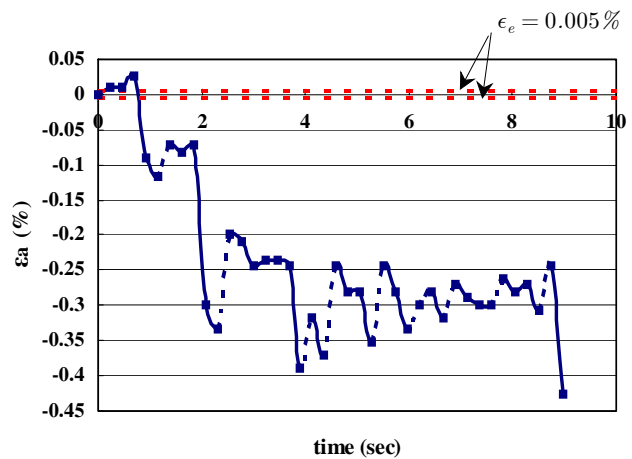
그림 1. 진동하중을 받는 등방구속하의 포화사질토의 거동(최재순 등, 2003)

3.2 누적소성변형률

정현하중 및 켜기하중을 이용한 경우 그림 2(a)와 같이 응력-변형률 관계를 단순화하여 소성변형률을 산정하였으며 불규칙한 하중으로 인하여 응력-변형률 관계곡선이 그림 2(a)와 같이 폐합곡선을 형성하지 않는 실지진하중 및 선형증가 켜기하중의 경우는 그림 2(b)와 같이 ϵ_e 값을 넘는 실선부분의 변형률을 누적하여 계산하였다. 여기서 탄성변형률의 경계 값은 상대밀도 60%, 유효구속압 100 kPa에서의 공진주 시험기기를 이용한 비틀전단시험(강한수, 2003)을 통해 얻은 전단탄성계수곡선에서 저변형률의 경계가 되는 전단변형률 0.01%를 이용하여 ϵ_e 값을 0.005%, E_0 값을 $2.9 \cdot 10^5$ kPa를 이용하여 탄성변형률과 소성변형률을 계산하였다.



(a) 정현하중 및 켜기하중



(b) 실지진하중 및 선형증가 켜기하중

그림 2. 누적소성변형률 계산 예

3.3 액상화 발생 유도 누적축차응력

상태변화시작점까지 시료에 작용한 외력을 계산하기 위해 그림 3의 시간-축차응력 이력의 면적을 적분하였다. 이 때 유효응력을 완전히 상실한 액상화 지점까지의 외력이 아닌 급격한 응력 감소를 보이기 직전의 상태변화시작점까지의 외력을 계산한 이유는 이미 지반은 액상화 발생에 필요한 충분한 외력을 받아 작은 축하중의 영향으로 액상화에 도달하기 때문이며 지반이 저항력을 상실한 소성상태에서 발생한 큰 소성변형을 포함하고 있기 때문이다. 가속도 시간이력을 알고 있는 실지진하중의 경우 가속도의 제곱의 합으로 지진의 에너지 계산이 가능하나 시험 목적에 맞게 입력데이터를 생성하여 최대, 최소축차응력 값을 조절하여 액상화를 일으키는 실지진하중 및 선형증가 췌기하중과의 비교를 위해 실제 실험 기기에서 시료에 작용한 축차응력의 합으로 상태변화시작점까지 작용한 외력을 계산하였다.

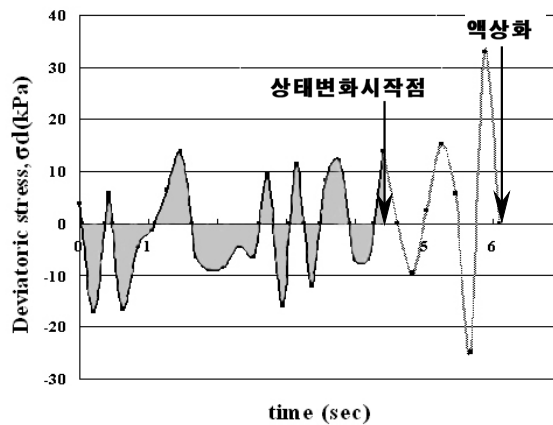


그림 3. 누적축차응력 계산 예

4. 실내진동시험에 기초한 축하중에 따른 액상화 발생 특성 비교

4.1 실내진동시험 제반조건

다양한 축하중에 따른 액상화 발생 특성을 비교하기 위해 주문진 표준사를 대상으로 진동삼축시험을 수행하였다. 주문진 표준사의 기본 물성 및 진동삼축시험시 제반조건은 표 1과 같으며 이 때의 축하중은 그림 4와 같다. 이 때 기본 물성 시험은 ASTM을 참고하여 수행하였다. 등가전단응력 개념에 기초한 정현하중 진동삼축시험과의 비교를 위해 췌기하중을 같은 방법으로 시험하였으며 선형증가 췌기하중 및 다양한 지진규모의 실지진을 이용한 진동삼축시험을 수행하였다. 이 때 실지진 진동삼축시험에 사용된 지진가속도 기록은 표 2와 같다. 그림 4의 (a), (b)의 정현하중 및 췌기하중은 일정한 크기의 축차응력을 반복재하하여 액상화를 일으키는 반면 그림 4의 (c), (d)의 실지진하중 및 선형증가 췌기하중은 하나의 입력파에서 최대, 최소축차응력의 크기를 변화시켜 액상화를 일으켰으며 선형증가 하중의 경우 하중 작용시간차, Δt 를 0.2, 0.4, 1.0초로 바꿔 총 지속시간을 달리하여 실험하였다.

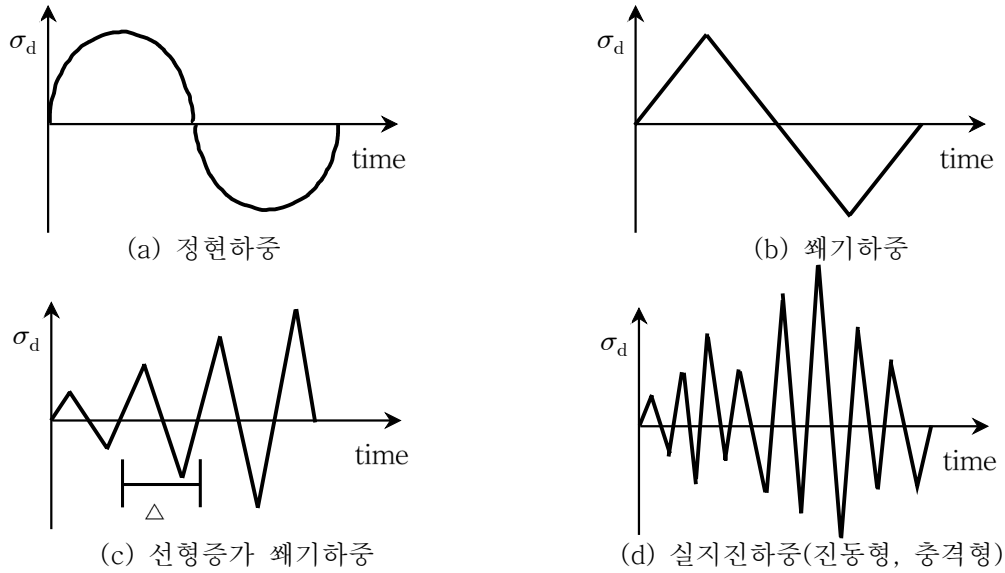


그림 4. 진동삼축시험 입력 축하중

표 1. 실내진동시험시 제반조건(주문진 표준사)

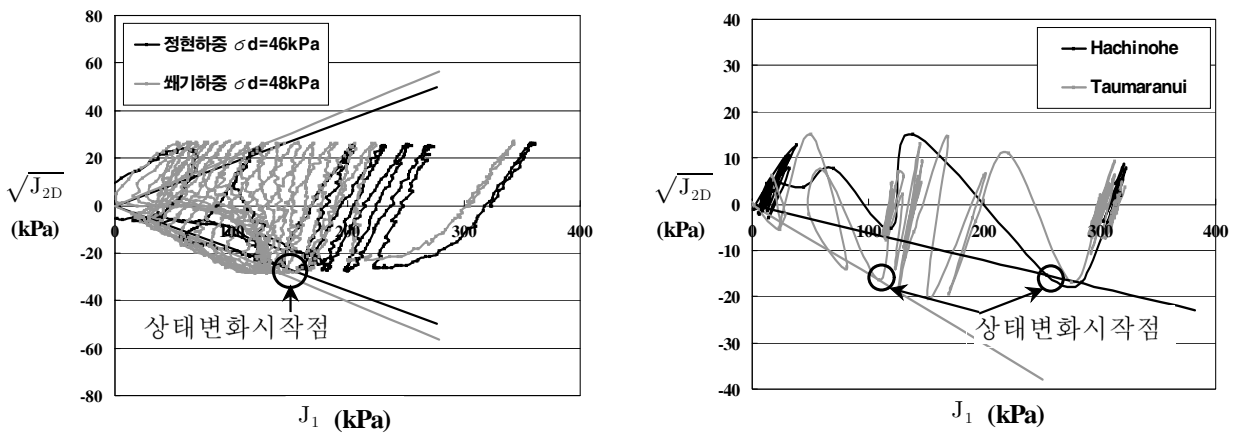
입도분포	물성	종류	시험 조건
최대입경, D_{max} (mm)	0.84	상대밀도(%)	60
최소입경, D_{min} (mm)	0.07	초기유효구속압(kPa)	100
평균입경, D_{50}	0.49	하중종류	실지진파형(충격형 8개, 진동형 4개) 정현파형, 썰기파형
균등계수, C_u	1.35	제어방식	응력제어방식
곡률계수, C_c	1.14	정현하중 및 썰기하중 시험시 진동수(Hz)	1.0
통과중량백분율 10% 입경, D_{10} (mm)	0.37	선형증가 썰기하중 시험시 하중 작용 시간차(sec)	0.2, 0.4, 1.0
통과중량백분율 60% 입경, D_{60} (mm)	0.50	실지진하중 시험시 지속시간 Δt (sec)	각 지진파의 유효지속시간
최소건조단위중량 $\gamma_{d min}$ (t/m ³)	1.39	시료조건	포화, 비배수
최대건조단위중량 $\gamma_{d max}$ (t/m ³)	1.60	시료성형방법	수중침강법

표 2. 진동삼축시험에 사용된 지진가속도 기록

지진파 (충격형)	지진 규모	지진파형	유효지속 시간(D_e)(sec)	지진파 (진동형)	지진규 모	지진파형	유효지속 시간(D_e)(sec)
Parkfield	6.1	충격형	24	Hachinohe	7.9	충격형	15
Big Bear	6.5	충격형	24	Loma Prieta	8.1	충격형	24
Hyogo-Ken Nanbu	6.9	충격형	24	Cass	6.2	진동형	11
El Centro	7.1	충격형	24	Baja California	6.4	진동형	18
Ofunato	7.4	충격형	14	Alaska	6.6	진동형	13
Costarica	7.5	충격형	21	Taumaranui	6.6	진동형	20

4.2 축하중에 따른 액상화 발생 특성 비교

그림 5는 정현하중 및 췌기하중을 이용한 실험 결과의 상태변화선과 실지진 하중 중 충격형 지진인 Hachinohe와 진동형 지진인 Taumaranui 지진파를 이용한 경우의 상태변화선을 도시한 것이다. 정현하중 및 췌기하중의 경우 일정한 크기의 축차응력이 반복됨에 따라 액상화에 도달하기까지 그림 1과 같이 점진적 응력감소, 급진적 응력감소, 액상화 후 파괴거동의 3부분 거동변화가 확실히 나타나는 반면 실지진하중에서는 그 구분이 다소 모호하나 불규칙한 진동하중 하에서 유효응력이 급격히 감소하며 응력 경로의 방향이 바뀌며 응력 거동의 변화를 일으키는 지점이 존재한다. 그림의 원으로 표시한 부분은 그림 1의 급진적 응력감소가 일어나기 시작하는 초기 액상화 시점으로, 이 점을 상태변화점으로 정하고 상태변화시작점까지 작용한 최대축차응력에 따른 기울기를 그림 6에 나타내었다. 모든 입력하중에 대해 최대축차응력이 커짐에 따라 상태변화선의 기울기가 커지는 경향을 보이고 있다. 지진파의 형태에 따라 그 기울기의 범위가 매우 큰 차이를 보이는데 진동형의 경우 약 9°로 정현하중 및 췌기하중의 기울기 10°에 가까우나 충격형은 3° 미만의 매우 작은 값을 보이며 하중 작용 시간차를 달리한 선형증가 췌기하중의 기울기가 3~8° 사이에 분포하며 충격형과 진동형 지진파의 중간값을 보이고 있다.



(a) 정현하중 및 췌기하중

(b) 실지진하중

그림 5. 축하중에 따른 상태변화선

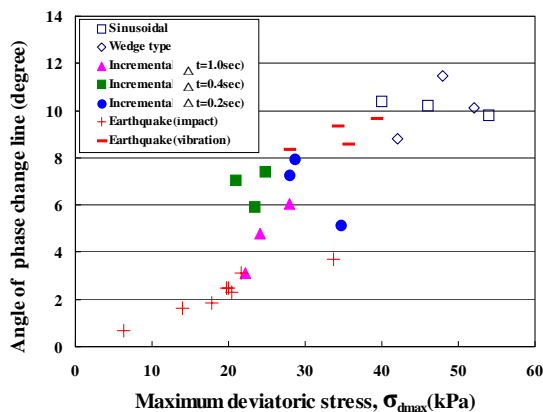
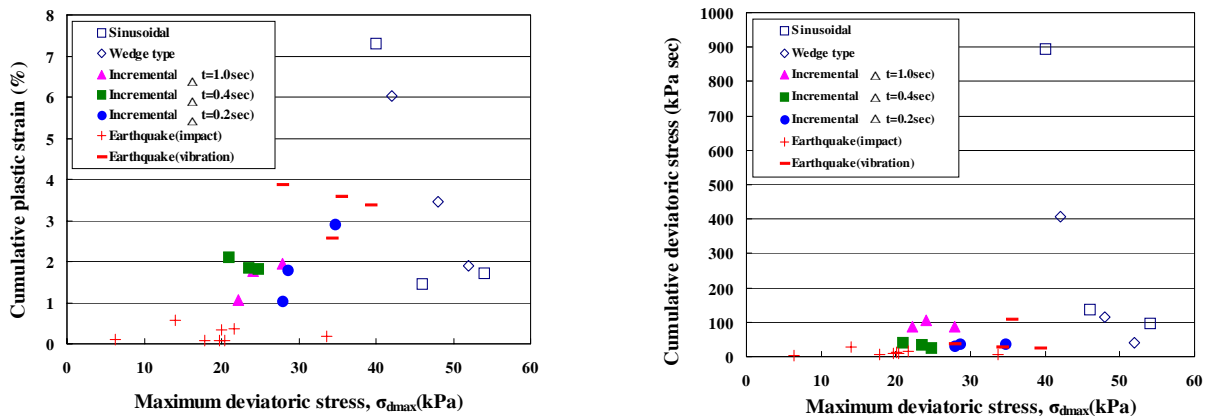


그림 6. 최대축차응력에 따른 상태변화선의 기울기

그림 7은 상태변화시작점까지의 누적소성변형률과 누적축차응력을 상태변화시작점까지 작용한 최대축차응력에 따라 도시한 것으로 등가전단응력 개념에 기초한 정현하중의 결과가 실지진하중에 의한 결과와 매우 다른 경향을 보이고 있다. 반복재하를 통해 액상화를 일으키는 정현하중 및 썰기하중의 경우 최대축차응력이 커짐에 따라 누적소성변형률 및 누적축차응력이 모두 급격히 감소하는 경향을 보이거나 실지진하중 및 선형증가 썰기하중의 경우 최대축차응력뿐만 아니라 하중작용시간차 및 하중지속시간 등의 여러 요소의 영향을 받아 각 하중별로 일정한 범위의 값을 보인다. 또한 액상화 발생시 작용한 최대축차응력의 범위를 보면 정현하중 및 썰기하중의 경우 40 kPa 이상이나 실지진하중 및 선형증가 썰기하중의 경우 40 kPa 이하의 값을 보인다. 정현하중에서의 누적소성변형률 및 누적축차응력이 실지진하중에 비해 전반적으로 큰 값을 보이는데 이를 통해 등가전단응력 개념에 기초한 정현하중 진동삼축시험이 불규칙한 실지진력에 의한 지반의 거동을 효율적으로 반영하고 있지 못하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) 누적소성변형률

(b) 누적축차응력

그림 7. 축하중에 따른 액상화 발생 특성

5. 결론

본 연구에서는 액상화 저항강도 산정시 사용되는 등가전단응력 개념에 기초한 정현하중의 액상화 발생 특성과 실제 지진과 같은 불규칙한 전단응력 및 썰기하중에 의한 액상화 발생 특성을 기존의 응력 비교 개념이 아닌 시간에 따른 과잉간극수압의 증가 및 변형률 등의 특성을 중심으로 비교 분석하였다. 또한 다양한 지진규모의 지진기록을 대상으로 지진과의 형태에 따른 액상화 발생 특성을 분석하였다.

본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 정현하중 및 실지진하중 액상화 발생 특성을 비교한 결과 정현하중에서의 누적축차응력이 실지진하중에 비해 매우 큰 값을 보였다. 이는 등가 전단응력 개념에 의한 액상화 평가시 실지진력에 의한 지반의 전단 저항력을 과대평가하고 있음을 확인할 수 있다.
- (2) 실지진하중 시험 결과 지진과형에 따라 액상화 발생 특성이 다름을 확인 할 수 있었다. 충격형 지진하중에서의 상태변화시작점까지의 누적소성변형률 및 누적축차응력이 진동형에 비해 작은 값을 보였으며 상태변화선의 기울기 역시 충격형 지진하중에서 작은 값을 보였다. 이는 진동형 지진하중 작용시 점진적으로 유효응력을 상실하는 반면 충격형 지진하중 작용시 최대축차응력에 의해 순간적으로 액상화에 도달하기 때문이다.

- (3) 정현하중 액상화 발생 특성이 충격형 지진하중 보다는 진동형 지진하중의 액상화 발생 특성에 근접한 결과를 보였으나 오히려 선형증가 쉐기하중의 액상화 발생 특성이 진동형과 충격형의 사이의 값을 보여 등가전단응력 개념의 정현하중 진동삼축시험에 비해 지진력에 의한 지반의 실제 거동을 보다 효율적으로 나타내고 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금과 교육부를 통한 두뇌한국 21

참고문헌

1. 강한수 (2003), “수정 교란상태개념에 기초한 포화사질토의 액상화 평가기법의 개발”, **연세대학교 석사학위 논문**.
2. 최재순, 김수일 (2003), “포화사질토의 동적거동규명을 위한 수정 교란상태개념”, **2003년도 추계 학술발표회 논문집**, 한국 지진공학회, pp. 107~114.
3. Desai, C. S. (1992), "The Disturbed State as a Phase Transformation through Self-Adjustment Concept for Modelling of Mechanical Response of Materials and Interface", *Report to the National Science Foundation, Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, University of Arizona, Tuscon, Arizona.*
4. Kim, S. I. (2004) "Liquefaction Potential in Moderate Earthquake Regions," *12th Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Leung et al. (eds), World Scientific Publishing Co., Vol. 2, pp. 1109~1138.
5. 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.
6. Seed, H. B., Idriss, I. M., Makdisi, F. and Bamerjee, N. (1975), "Representation of Irregular Stress Time Histories by Equivalent Uniform Stress Series in Liquefaction Analysis," *Report No. EERC 75-29*, UCB.