

에너지 개념에 기초한 액상화 평가방법에 관한 연구 Evaluation of Liquefiable Soils by Energy Concept

김수일¹⁾, Soo-Il Kim, 유정선²⁾, Yu-Jung Sun, 박근보³⁾, Keun-Bo Park, 박성용⁴⁾, Seong-Yong Park

¹⁾ 연세대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University, geotech@yonsei.ac.kr

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

^{3,4)} 연세대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

SYNOPSIS : In this study, Liquefaction characteristics of saturated sand under various dynamic loadings such as sinusoidal loading, increasing wedge loading, and real earthquake loading were investigated focusing on the dissipated energy. From the results of cyclic triaxial test, liquefaction resistance strength was calculated by the concept of energy according to the type of input loading. Liquefaction resistance strength was expressed in accumulated dissipated energy calculated from stress-strain curve(hysteresis loop). The dissipated energy according to loading type was compared and the energy-based evaluation was proposed. The procedures are presented in terms of normalized energy demand(NED), normalized energy capacity(NEC), and factor of safety, where NED is the load imparted to the soil by the loading(both amplitude and duration), NEC is the demand required to induce liquefaction, and factor of safety is defined as the ratio of NEC and NED.

Key words : Cyclic triaxial test, Earthquake loading, Increasing wedge loading, Liquefaction evaluation, Normalized energy capacity, Normalized energy demand

1. 서 론

일반적으로 액상화 평가는 지반응답해석에는 실내시험으로 정해지는 액상화 저항강도를 지반응답해석에 의한 진동전단응력으로 나눈 안전율을 산정하여 이루어진다. 이때 액상화 저항강도를 산정하기 위한 실내 시험 수행시 대부분의 경우 시험 수행의 용이성을 이유로 실지진력을 이용하기 보다는 등가전단응력으로 표현된 단순한 형태의 정현파 하중을 사용한다(Seed와 Idriss, 1975). 이러한 응력법에 의한 평가 방법은 적용이 용이하고 간단하다는 장점을 가지고 있지만, 지속시간, 주파수 특성 등 실지진하중의 특성을 고려하지 못한다는 단점이 있다. 따라서 실지진하중을 고려할 수 있는 합리적인 평가방법이 필요하다.

본 연구에서는 동적 실내시험 시 입력하중에 따른 액상화 저항강도를 에너지 개념에 의하여 산정하고자 한다. 에너지 개념에 기초한 방법으로 액상화 평가를 수행하고 기존의 정현하중 대신에 불규칙한 지진파의 특성을 반영할 수 있는 선형증가 썩기하중이 보다 합리적인 대안이 될 수 있음을 보이고자 한다.

2. 실내 진동시험에 기초한 액상화 해석

2.1 응력 비교법에 의한 액상화 평가

현재 국내의 액상화 평가는 불규칙한 지진력을 등가지진응력(equivalent shear stress)으로 표현하고, 실내진동시험을 통해 산정된 액상화 저항응력비(liquefaction resistance stress ratio)를 지반응답해석

에 의해 발생한 진동전단응력비와 비교하는 방법이 일반적이다. 그러나 등가전단응력과 그에 따른 등가 반복 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 대한 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. 에너지 개념에 기초한 액상화 평가

3.1 소산에너지 개념

에너지개념에 기초한 액상화 평가방법은 지진에 의해 발생하는 미세구조의 소산에너지에 기초한 방법으로, 액상화 현상에 있어 간극수압의 변화와 토립자 내부의 소산에너지와의 관계에 대한 연구를 수행한 Nemat-Nasser와 Shokooh에 의해 처음으로 시작되었으며, Desai는 이러한 에너지개념과 교란상태 개념의 상관성에 대한 연구를 수행하여 교란상태개념에 의한 액상화 평가가 미세구조의 자기조정에서 발생하는 소산에너지를 효과적으로 나타낼 수 있다는 것을 확인하였다. Nemat-Nasser와 Shokooh(1979)가 제안한 소산에너지개념은 진동전단이 가해질 때 사질토에서 발생하는 토립자의 미세구조의 재배열(rearrangement)과 그에 따른 에너지의 소산에 대한 연구에 기초를 두고 있다.

3.2 응력-변형률 이력곡선(hysteresis loop)

응력-변형률 이력곡선(hysteresis loop)에 의하여 둘러싸인 면적은 토립자 사이에서 소산된 에너지양을 나타낸다. 그림 1은 전단응력(τ)과 전단변형률(γ)에 의해서 표현된 전형적인 응력-변형률 이력곡선을 보여주고 있다.

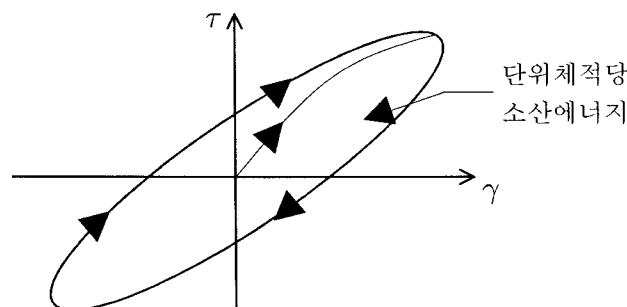


그림 1. 전형적인 응력-변형률 이력곡선(hysteresis loop)

3.3 정규화 에너지 발생치(Normalized Energy Demand)

3.3.1 정규화 에너지 발생치(Normalized Energy Demand) 산정

정규화 에너지 발생치는 지진응답해석에 의한 변형률 수준별 동적 물성의 변화를 통해 산정될 수 있다. 지진응답해석은 1차원 다층반사모델을 이용한 전응력해석 프로그램인 SHAKEVT를 이용하여 수행하였다. SHAKEVT는 Green(2001)이 각층의 소산에너지를 산정하기 위하여 SHAKE91(Idriss와 Sun, 1992)을 수정 보완한 프로그램이다. 실지진하중과 선형증가쇄기하중의 발생치를 산정하기 위해 SHAKEVT(Green, 2001)를 수행하여 얻은 대상 심도의 응력-변형률 곡선으로부터 액상화 시점까지 발생한 누적에너지를 계산하였다. 식 (1)은 정규화 에너지 발생치(NED)를 나타낸 식이다.

$$\frac{\Delta W}{\sigma_{m0}} = \frac{1}{2\sigma_{m0}} \sum_{i=1}^n (\sigma_{d,i+1} + \sigma_{d,i}) (\epsilon_{a,i+1} - \epsilon_{a,i}) \quad (1)$$

여기서, ΔW = 진동삼축시험에서 소산된 에너지

σ_{m0} = 평균유효구속압

$\sigma_{d,i}$ = i 번째 축차응력 증분량

$\epsilon_{a,i}$ = i 번째 축변형률 증분량

본 연구에서는 임의 지반을 대상으로 지반응답해석을 수행하여 액상화 발생치를 산정하였다. 선정된 지진이력에 대한 최대가속도는 붕괴방지 1등급 수준의 값인 0.154g로 하여 그 최대값을 조정하여 입력하였다. 이들 지진가속도는 선정기준으로 암반노두(outcropping)의 측정기록인 것을 기준으로 하였다.

3.3.2 지진응답 대상지반의 구성

느슨한 사질토지반에서 발생하는 액상화 현상을 평가하기 위해서 실내 진동삼축시험 수행 시 제반조건을 고려하여 그림 2와 같은 대상지반을 구성하였다. 대상지반은 주문진 표준사로 이루어진 것으로 가정하였으며, 그 밀도를 느슨, 중간, 조밀하게 한 비균질한 층으로 구성하였다. 지진응답해석에 사용되는 지층의 물성치를 정리하면 표 1과 같다. 해석대상지반은 완전포화된 모래층으로 구성하였으며 기반암까지 지반의 두께는 15m로 선정하였다. 이는 신윤섭(1999)이 선택한 국내 지진규모 6.5를 고려한 액상화 평가들에 대한 분석을 통해 제안한 것으로 지진규모 7.5를 적용하는 일본의 평가한계심도기준인 20m보다 작다. 평가대상지층의 심도는 10m로 정하였으며 이는 실내진동시험시 시험조건 중 유효구속압 100kPa을 고려하여 선정한 것이다.

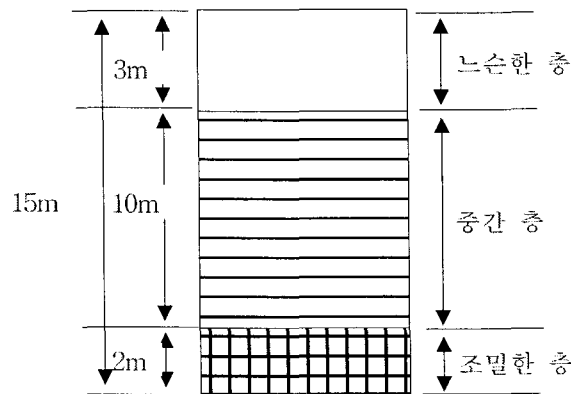
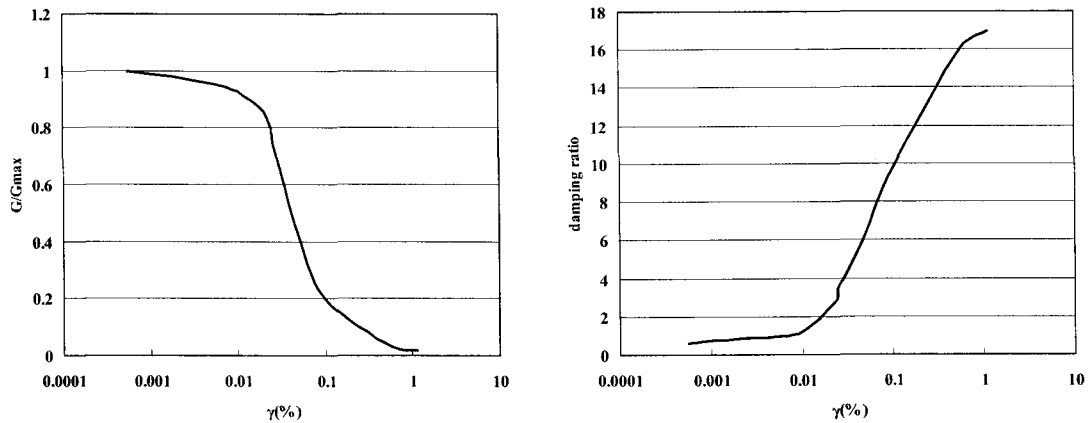


그림 2. 대상지반의 구성

표 1. 대상지반의 일반물성치

층 구성	층두께 (m)	전체단위중량 (kN/m ³)	Vs (m/s)
느슨한 층	3	18.0	125
중간 느슨한 층	10	19.0	210
조밀한 층	2	20.0	350
기반암(rock)	Infinite	21.0	1000

전응력 입력 데이터로 액상화 저항 시 획득한 정규화 전단탄성계수 감소곡선과 이에 따른 감쇠비곡선을 입력한다. 그림 3은 실내시험과 동일한 조건인 상대밀도 60%, 유효구속압 100kPa일 때 주문진표준사의 전단변형률에 따른 정규화 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비곡선을 나타낸 것이다(강한수, 2003).



(a) 정규화 전단탄성계수 감소곡선

(b) 감쇠비 곡선

그림 3. 주문진 표준사 (초기유효구속압 100kPa, 강한수 2003)

3.4 정규화 에너지 저항치(Normalized Energy Capacity)

진동삼축시험(cyclic triaxial test)을 수행하여 산정된 누적소산에너지는 초기 평균유효구속압으로 나누어 정규화 시킬 수 있으며, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta W}{\sigma_{mo}} = \frac{1}{2\sigma_{mo}} \sum_{i=1}^n (\sigma_{d,i+1} + \sigma_{d,i})(\epsilon_{a,i+1} - \epsilon_{a,i}) \quad (2)$$

여기서, ΔW = 진동삼축시험에서 소산된 에너지

σ'_{mo} = 초기 평균유효구속압

$\sigma_{d,i}$ = i 번째 축차응력 증분량

$\epsilon_{a,i}$ = i 번째 축변형률 증분량

Green(2001)은 전응력해석 프로그램인 SHAKEVT(Green, 2001)가 간극수압의 발현으로 인한 변형

연화 효과를 고려할 수 없기 때문에 에너지비를 이용하여 저항에너지를 산정하였다. Ishibashi와 Zhang(1993)의 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비곡선을 사용하여 에너지비(ER)를 산정하였다. 등방압밀 조건에서 CSR(cyclic stress ratio)이 0.1, 구속압 100kPa, 상대밀도 40%, 70%인 조건에서 진동삼축 시험을 수행하여 에너지비(ER)를 각각의 평균유효구속압에 대한 함수로 표현하였다. 실험으로 얻은 함수는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta W_1 = \frac{\Delta W_2}{ER}$$

$$\approx \Delta W_2 \cdot \left(\frac{\sigma'_{m2}}{\sigma'_{m1}} \right)^{1.65} \quad (3)$$

여기서: ER = 에너지 비

ΔW_1 = 1번째 응력-변형률 곡선의 단위체적당 소산에너지

ΔW_2 = 2번째 응력-변형률 곡선의 단위체적당 소산에너지

σ'_{m1} = 1번째 루프의 평균 유효구속압

σ'_{m2} = 2번째 루프의 평균 유효구속압

간극수압의 발현으로 인한 변형연화 효과를 제거한 정규화 저항 에너지를 산정하기 위해 식 (3)에 에너지비(ER)를 적용하여, 식 (2)를 다시 정리하면 정규화 에너지 저항치(Normalized Energy Capacity)는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$NEC = \frac{\Delta W_{\sigma'_{mo}}}{\sigma'_{mo}}$$

$$= \frac{1}{2\sigma'_{mo}} \sum_{i=1}^{n-1} (\sigma_{d,i+1} + \sigma_{d,i}) (\epsilon_{a,i+1} - \epsilon_{a,i}) \left(\frac{\sigma'_{m,i+1} + \sigma'_{m,i}}{2\sigma'_{mo}} \right)^{1.65} \quad (4)$$

여기서: $\Delta W_{\sigma'_{mo}}$ = 유효 구속압이 σ'_{mo} 로 남아있는 경우에 소산된 에너지

$\sigma'_{m,i}$ = i번째 하중증분에 대한 평균유효구속압

식 (3)에 의한 소산에너지를 평균유효구속압으로 정규화시킨 결과는 비선형적이다. 따라서 선형적인 SHAKEVT(Green, 2001)와 직접적으로 비교하기 위하여, 식 (4)에 의한 에너지비를 적용하여 정규화 에너지 저항치(NEC)를 산정하였다.

3.5 에너지 접근에 의한 액상화 안전을 산정

3.4절에서 산정한 정규화 에너지 저항치(NEC)와 3.3절에서 산정한 에너지 발생치로부터 식 (5)를 이용하여 안전율을 산정하였다.

$$FS = \frac{NEC}{NED} \quad (5)$$

4. 에너지 발생 및 저항에너지 비교 분석

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 2와 같으며 이때의 축하중은 그림 4와 같다. 이 때 기본 물성 시험은 ASTM을 참고하여 수행하였다. 진동삼축시험을 통하여 정현하중, 실지진하중으로 진동삼축시험을 수행하여 시험결과를 선택하여 분석하였다. 또한 지반의 동적거동을 보다 정확히 파악하기 위해 실제 지진력과 유사한 0.5Hz, 1.5Hz, 2Hz 및 2.5Hz의 선형증가쇄기하중에 대한 진동삼축시험을 수행하였다.

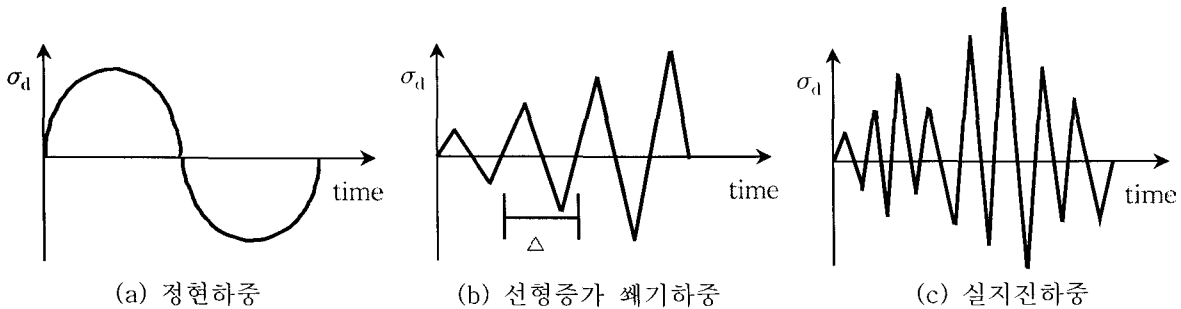


그림 4. 진동삼축.시험 입력 축하중

표 2. 실내진동시험 시 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	선형증가쇄기하중
균등계수, C_u	1.35	제어방식	응력제어방식
곡률계수, C_c	1.14	정현하중 시험시 진동수(Hz)	1.0
통과중량백분율 10% 입경, D_{10} (mm)	0.37	선형증가 쇄기하중 시험시 하중 작용 시간차(sec)	2.0, 0.7, 0.5
통과중량백분율 60% 입경, D_{60} (mm)	0.50	실지진하중 시험시 지속시간 Δt (sec)	각 지진파의 유효지속시간
최소건조단위중량 γ_{dmin} (t/m^3)	1.39	시료조건	포화, 비배수
최대건조단위중량 γ_{dmax} (t/m^3)	1.60	시료성형방법	수중침강법

4.2 하중에 따른 간극수압발생특성

그림 5는 지진파형별로 하중에 따른 과잉간극수압의 발생 경향을 나타내고 있다. 실지진하중이 가해질 경우의 과잉간극수압 발생 형태를 살펴보면 초기에는 간극수압의 변화가 없다가 일정 수준 이상의 축하중력이 가해지는 순간 과잉간극수압이 급증하여 유효응력이 상실함을 알 수 있다. 이에 비해 정현하중이 가해질 경우의 간극수압 발생 형태는 시간에 따라 간극수압이 점증적으로 증가함을 확인 할 수

있다. 반면 썰기하중의 경우에는 실지진하중과 아주 근사한 형태는 아니지만 어느 정도 실지진하중 재하시의 과잉간극수압 발생형태를 따라가고 있음을 알 수 있다. 이상의 결과를 살펴보면 정현하중은 실지진하중과 선형증가하중 재하시의 과잉간극수압 발생 형태와 현저히 다름을 알 수 있다. 이는 일정 크기의 하중이 반복됨으로써 액상화에 도달하는 정현하중에 비해 처음에는 작은 하중으로 시작하다가 순간의 큰 외력에 의해 액상화에 도달하는 지진하중의 거동을 선형증가썰기하중이 보다 잘 모사하고 있음을 보여주는 결과이다.

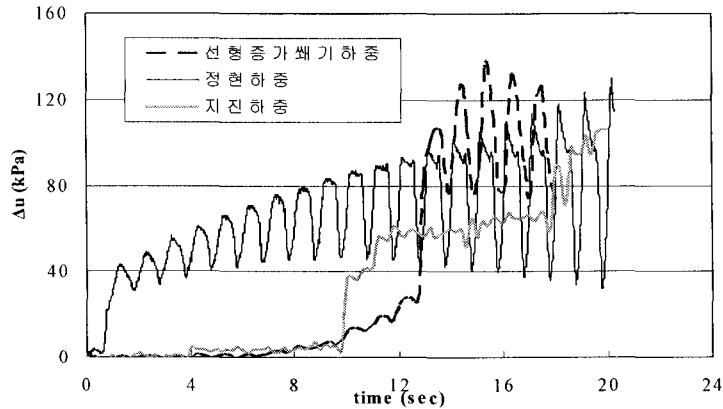


그림 5. 축하중에 따른 과잉간극수압 발생경향

4.3 정규화 에너지 발생치(Normalized Energy Demand) 산정

그림 6은 최대축차응력에 대한 SHAKEVT로 지반응답해석을 수행하여 산정한 에너지 발생치를 나타낸 것이다. 산정된 에너지 발생치는 정규화 시 등방조건인 실내시험으로부터 산정된 에너지 저항치와는 다르게 현장상태를 고려하여야 한다. 따라서 표 3은 SHAKEVT(Green, 2001)로부터 얻은 누적에너지를 K_0 를 고려한 평균유효구속압으로 나누어준 정규화 에너지 발생치(Normalized Energy Demand)를 나타낸 것이다. 정규화 에너지 발생치를 살펴보면 실지진하중 및 선형증가썰기하중에 비해 정현하중의 발생 에너지가 과다하게 산정된 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 지반 내의 정규화 에너지 발생치(NED)가 과다하게 산정된다는 것을 확인할 수 있다. 이는 지반응답해석 수행 시 불규칙한 지진하중을 단순화 시킨 등가전단응력 개념의 정현하중은 지반 내에서 지진하중 특성변화가 지반에 미치는 영향을 효과적으로 반영하고 있지 못하다는 점을 확인할 수 있다.

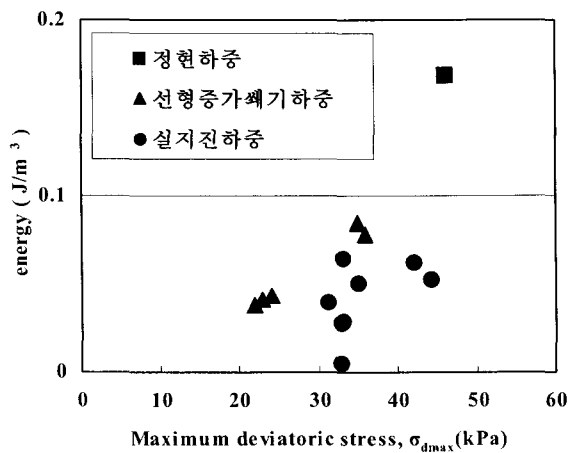


그림 6. 최대축차응력에 따른 발생에너지

표 3. 하중에 따른 정규화 에너지 발생치(Normalized Energy Demand)

하중형태	NED	하중형태	NED
Parkfield	0.00049	Ormond	0.00079
Baja california	0.00076	Inc.(0.5Hz_3n)	0.00057
Costarica	0.00044	Inc.(2.5Hz_2.5n)	0.00116
Bigbear	0.00042	Inc.(2.5Hz_3n)	0.00126
Cass	0.00094	Inc.(2.5Hz_3n)	0.00064
Michoacan	0.00097	Inc.(2Hz_2n)	0.00061
Elcentro	0.00087	Sine wave	0.00231

4.4 정규화 에너지 저항치(Normalized Energy Capacity) 산정

그림 7은 최대축차응력에 따른 진동삼축시험 결과에서 액상화 시점까지 계산한 누적소산에너지를 나타낸 것이다. 누적소산에너지를 식 (4)에 의해 계산한 정규화 에너지 저항치(Normalized Energy Capacity)로 정리하여 표 4에 나타내었다. 표 4를 살펴보면, 액상화가 유발되는 저항에너지는 실지진하중과 선형증가쇄기하중의 경우는 그 크기가 비슷하나 정현하중의 경우에는 현저하게 크게 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 액상화에 도달하기 위해 필요한 외력이 실지진하중이나 선형증가쇄기하중에 비해 정현하중 재하 시 더 큰 외력이 필요함을 의미한다. 따라서 기존의 정현하중에 의한 저항력 산정방법은 실제 실지진력에 의한 지반의 전단저항력을 과대평가하고 있음을 의미한다.

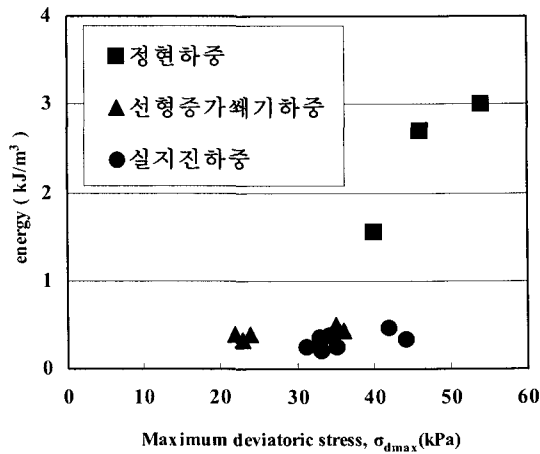


그림 7. 최대축차응력에 따른 누적소산에너지

표 4. 하중에 따른 정규화 에너지 저항치(Normalized Energy Capacity)

하중형태	NEC	하중형태	NEC
Parkfield	0.000412	Inc.(0.5Hz_3n)	0.000681
Baja california	0.000397	Inc.(2.5Hz_2.5n)	0.000948
Costarica	0.000417	Inc.(2.5Hz_3n)	0.000958
Bigbear	0.000565	Inc.(1.5Hz_3n)	0.000892
Cass	0.000769	Inc.(2Hz_2n)	0.000798
Michoacan	0.000781	Sine(40kPa)	0.005112
Elcentro	0.000519	Sine(46kPa)	0.008512
Ormond	0.000505	Sine(54kPa)	0.009103

4.5 에너지 접근에 의한 액상화 안전을 산정

4.3절에서 산정한 정규화 에너지 발생치(NED)와 4.4절에서 산정한 정규화 에너지 저항치(NEC)로부터 식 (5)를 이용하여 안전율을 산정하였다. 표 5를 살펴보면 하중에 따라 산정된 액상화 안전율을 나타내었다. 표 5를 살펴보면, 정현하중의 안전율 값은 3.69로 높게 산정이 되었고 실지진하중의 안전율 평균값은 0.81이고 선형증가쇄기하중의 안전율은 평균값은 1.06이다. 정현하중이 가해질 때 액상화 안전율은 실지진하중 및 선형증가쇄기하중의 경우에 비해 상대적으로 큰 값을 나타내고 있다. 정현하중의 안전율이 높게 나온 이유는 앞에서 언급했듯이 정규화 에너지 저항치(NEC)가 매우 과다하게 산정이 되었기 때문에 안전율이 매우 높아진 결과로 볼 수 있다. 하지만 선형증가쇄기하중이 가해질 때의 안전율은 실지진하중이 가해질 때의 안전율과 큰 차이를 보이지 않는다. 이는 등가전단응력개념에 기초한 정현하중을 이용하여 액상화 평가를 수행하는 데는 문제가 있으며, 선형증가쇄기하중을 통한 액상화 평가가 실제 지진과에 의한 액상화 거동을 보다 잘 평가하고 있음을 보여준다.

표 5. 하중에 따른 안전율 산정

하중형태	NED	NEC	FS
Parkfield	0.00049	0.000412	0.85
Baja california	0.00076	0.000397	0.53
Costarica	0.00044	0.000417	0.97
Bigbear	0.00042	0.000565	1.31
Cass	0.00094	0.000769	0.82
Michoacan	0.00097	0.000781	0.81
Elcentro	0.00087	0.000519	0.60
Ormond	0.00079	0.000505	0.64
평균			0.81
Inc.(0.5Hz_3n)	0.00057	0.000681	1.11
Inc.(2.5Hz_2.5n)	0.00116	0.000948	0.81
Inc.(2.5Hz_3n)	0.00126	0.000958	0.76
Inc.(2.5Hz_3n)	0.00064	0.000812	1.25
Inc.(2Hz_2n)	0.00061	0.000798	1.30
평균			1.06
Sine wave	0.00231	0.008512	3.69

5. 결론

본 연구에서는 액상화 저항강도 산정시 가장 기본적으로 사용되는 등가전단응력 개념에 기초한 정현하중에 의한 저항특성과 실제 지진과 같은 불규칙한 전단응력 및 선형증가쇄기하중에 의한 저항특성을 소산에너지 개념에 의거 비교하였다.

본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 정현하중에 따른 과잉간극수 발생 형태를 살펴보면 시간에 따라 간극수압이 점진적으로 증가함을 확인 할 수 있다. 하지만 실지진하중과 선형증가쇄기하중에 나타난 과잉간극수압 발생 형태를 살펴보면 초기에는 간극수압의 변화가 없다가 일정 수준 이상의 축차응력이 가해지는 순간 과잉간극수압이 급증함을 알 수 있다. 따라서 선형증가쇄기하중이 재하 될 경우 과잉간극수압증가형태가 정현하중의 경우에 비해 실지진하중 재하 시의 거동에 훨씬 근접함을 알 수 있다.

- (2) 액상화 저항 에너지를 비교한 결과 액상화가 유발되는 정현하중의 저항에너지는 실지진하중 및 선형증가쇄기하중이 가해질 때 보다 높게 산정되었으나, 선형증가쇄기하중의 저항에너지는 실지진하중과 그 크기가 비슷하였다. 이는 기존의 정현하중에 의한 저항력 산정방법은 실제 실지진력에 의한 지반의 전단저항력을 과대평가하고 있음을 의미한다.
- (3) 진동하중이 지반 내 가해질 때, 정현하중에 의한 발생 에너지가 실지진하중 및 선형증가쇄기하중이 가해질 때 보다 높게 산정되었으나, 선형증가쇄기하중에 의한 에너지는 실지진하중과 그 크기가 비슷 하였다. 이는 정현하중을 이용한 지반 내에서 특성변화가 지반에 미치는 영향을 효과적으로 반영 하고있지 못하다는 점을 확인 할 수 있었다.
- (4) 정현하중이 가해질 때 액상화 안전율은 실지진하중 및 선형증가쇄기하중의 경우에 비해 상대적으로 큰 값을 나타냈으나 선형증가쇄기하중이 가해질 때의 안전율은 실지진하중이 가해질 때의 안전율과 큰 차이를 보이지 않는다. 따라서 등가전단응력개념에 기초한 정현하중을 이용해 액상화 평가를 수행하는 데는 문제가 있으며, 선형증가쇄기하중을 통한 액상화 평가가 실제 지진파에 의한 액상화 거동을 보다 잘 평가하고 있음을 보여준다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금과 교육부를 통한 두뇌한국 21 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

1. 강한수 (2003), “수정 교란상태개념에 기초한 포화사질토의 액상화 평가기법의 개발”, 연세대학교 석사학위 논문.
2. 박성용 (2002), “실지진하중을 이용한 중진 지역에서의 액상화 저항강도에 관한 실험적 연구”, 연세대학교 석사학위 논문.
3. 신윤섭 (1999), “우리 나라 지진특성을 고려한 액상화 평가기법의 개선방안에 관한 연구”, 연세대학교 석사학위 논문.
4. 심재욱 (2001), “실지진하중을 이용한 포화사질토의 액상화 저항강도 산정에 관한 실험적 연구”, 연세대학교 석사학위 논문.
5. Green, R. (2001), *Energy-Based Evaluation and Remediation of Liquefiable Soils*, Ph.D. Dissertation, Earthquake Engineering Research Institute, University of Blacksburg, Virginia.
6. Liang, L. (1995), "Liquefaction under Random Loading : Unit Energy Approach," *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 8084, pp.776-781.
7. 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.
8. Seed, H. B., Idriss, I. M., Makdisi, F., and Bamerjee, N. (1975), "Representation of Irregular Stress Time Historics by Equivalent Uniform Stress Series in Liquefaction Analysis", *Report No. EERC 75-29*, UCB.