

국내 지진규모를 고려한 중진 지역에서의 액상화 평가방법에 관한 연구

A Study on Liquefaction Assessment of Moderate Earthquake Region concerning Earthquake Magnitude of Korea

김수일¹⁾ · 박근보²⁾ · 박성용³⁾ · 서경범⁴⁾

Kim, Soo-Il · Park, Keun-Bo · Park, Seong-Yong · Seo, Kyung-Bum

국문 요약 >> 기존의 액상화 평가방법은 대부분 미국, 일본 등 지진 발생빈도가 높고 그로 인한 액상화 피해가 빈번한 국가에서 주도적으로 연구가 진행되었으며, 개발된 액상화 평가방법들은 큰 지진규모(M=7.5)에 기초하고 있다. 국내에서도 1997년 실제적인 내진연구가 시작된 이래 액상화 평가의 구체적 규정이 제정되었으나, 내진설계기준에서는 실지진하중을 등가의 전단응력으로 간편화한 경험적인 방법과 실내진동실험에 의한 액상화 상세평가 방법을 통해 액상화 평가를 수행하도록 되어있다. 그러나 이러한 경우 실제 지진하중의 특성을 평가과정에서 반영하지 못하는 문제점이 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 실제 지진파 고유의 특성을 적용한 진동삼축실험을 통하여 상대밀도와 실트질함유량의 변화에 따른 액상화 저항강도를 산정하였다. 실험결과를 토대로 국내의 대표적인 항만지역의 지진응답해석 결과와 비교 분석하여 중진지역에 적합한 액상화 평가 생략기준을 제시하였다. 또한 액상화 평가시 정현하중 사용의 문제점을 개선하기 위하여 켄기하중 및 선형증가켄기하중 실험을 수행하여 하중 변화에 따른 액상화 저항강도 특성을 분석하였다.

주요어 액상화 평가방법, 실지진하중, 액상화저항강도, 지진규모 보정계수, 액상화 평가 생략기준, 선형증가켄기하중

ABSTRACT >> Conventional methods for the assessment of liquefaction potential were primary for severe earthquake regions ($M \geq 7.5$) such as North America and Japan. In Korea, an earthquake related research has started in 1997, but most contents in the guidelines were still quoted from literature reviews of North America and Japan, which are located in strong earthquake region. Those are not proper in a moderate earthquake regions including Korea. Also the equivalent uniform stress concept (Seed & Idriss, 1971)⁽¹⁾ using regular sinusoidal loading which is used, in a conventional method for the assessment of liquefaction potential, can't reflect correctly the dynamic characteristics of real irregular earthquake motions. In this study, cyclic triaxial tests using irregular earthquake motions are performed with different earthquake magnitudes, relative densities, and fines contents. Assessment of liquefaction potential in moderate earthquake regions is discussed based on various laboratory test results. From the results, screening limits in seismic design were re-investigated and proposed using normalized maximum stress ratios under real irregular earthquake motions. Also from the tests using constant wedge loading and incremental wedge loading, the characteristics of liquefaction resistance of saturated sand under irregular ground motions are investigated.

Key words assessment of liquefaction potential, irregular earthquake motions, liquefaction resistance ratio, screening limits, incremental wedge loading

1. 서론

최근 발생한 고베지진(Hyogoken-Nanbu, 1995), 캘리포니아지진(Northridge, 1994) 등의 피해사례를 살펴보면, 진

원과의 거리가 멀어짐에 따라 지진의 영향력이 약해짐에도 불구하고 느슨한 사질토 또는 매립토 지반에서 액상화 피해가 크게 발생한 것을 알 수 있다. 이러한 지진피해가 발생한 미국이나 일본에서는 실내실험 및 현장모델실험 등을 병행하여 액상화 현상을 연구하여 자국의 지진 및 지반 특성을 고려한 액상화 평가기술을 개발하고 있다. 지진 발생 가능성이 작다고 알려져 왔던 우리나라에서도 최근 지진발생에 대한 우려와 함께 범국가적인 차원에서 지진공학에 대한 연구가 시작되었다. 최근 들어 중진 규모의 지진 발생 여건을 고려하여 지진규모별 보정계수 제안 등 국내 실정에 적합한

¹⁾ 정회원·연세대학교 사회환경시스템공학부 교수
(대표저자: geotech@yonsei.ac.kr)

²⁾ 비회원·연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정

³⁾ 비회원·연세대학교 사회환경시스템공학부 석박사통합과정

본 논문에 대한 토의를 2006년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 5. 10 / 심사종료일 : 2006. 5. 19)

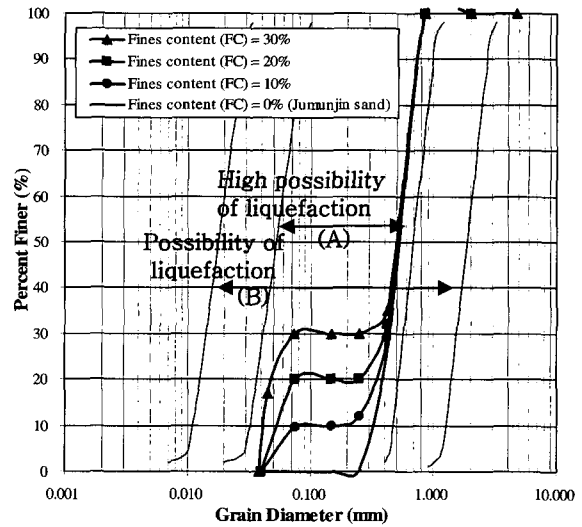
지진특성을 고려하도록 액상화 평가방법을 수정보완하고 있으나 이를 검증할 액상화 피해자료가 전무하여 이와 같은 수정보완의 적합 여부를 판단하기가 쉽지 않다. 또한 기존 방법의 경우 실내진동실험을 수행하여 액상화 저항특성에 관한 다양한 결과들을 획득함에도 불구하고 단순히 액상화 발생시의 최대전단응력만을 이용하여 액상화 상세평가를 수행하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 국내 지진자료의 부족 및 위에서 언급한 문제점들을 개선하기 위해 기존의 정현하중을 이용하는 실내진동실험이 아닌 실지진파를 모사할 수 있는 실내진동실험을 통해 중진규모의 지진을 이용하여 국내지반의 액상화 저항강도 특성을 분석하고, 국내에 적합한 액상화 평가방법을 제시하였다. 또한 다양한 입력 하중을 이용한 삼축실험을 통하여 하중형태에 따른 액상화 거동 특성을 분석하였다.

2. 실지진하중을 이용한 진동삼축실험

본 연구에서 사용된 실험기는 영국의 ELE사가 개발한 진동삼축실험기이다. 이 장비는 사용자가 임의의 진동하중을 작성하여 입력할 수 있고, 70Hz의 높은 진동수까지 재하가 가능하여 실제 지진 하중을 구현할 수 있는 장비이다. 본 연구에서는 실트질 함유량이 0%, 10%, 20%, 30%인 주문진 표준사를 제작하여 진동삼축실험을 수행하였다. 그림 1은

실험에 사용된 주문진 표준사의 입도분포를 나타낸 것으로, Tsuchida(1970)⁽²⁾가 제시한 액상화 가능성 영역과 함께 도시하였다. 그림 1로부터 모든 대상시료가 액상화 가능성이 높은 영역에 속해 있음을 알 수 있다. 각각의 시료에 대한 기본 물성실험 결과를 표 1에 정리하여 나타내었다. 진동삼축 실험 대상 시료의 직경은 70mm, 높이는 140mm 이며, 수중침강법을 이용하여 시료를 성형하였다. 실험과정은 시료거치 후 간극수압계수 B값이 0.97 이상이 되었을 때를 완전포화



〈그림 1〉 시험 대상시료의 입도분포곡선

〈표 1〉 대상시료의 물성

세립분 함유량 FC (%)	최대전조 단위중량 $\gamma_{d \max}$ (g/cm ³)	최소전조 단위중량 $\gamma_{d \min}$ (g/cm ³)	평균입경 D ₅₀ (mm)	균등계수 C _u	곡률계수 C _c	최대 간극비	최소 간극비	소성지수
0	1.60	1.39	0.52	1.35	1.14	0.885	0.638	NP
10	1.76	1.46	0.51	7.30	3.11	0.795	0.489	NP
20	1.86	1.51	0.50	10.39	6.07	0.748	0.419	NP
30	2.06	1.56	0.50	12.44	0.58	0.692	0.282	NP

〈표 2〉 진동삼축실험에 사용된 지진가속도 기록

지진파	지진규모	유효지속시간(초)	계원
Parkfield	6.1 (M _w)	6.4	1966, California, USA
Ormond*	6.2 (M _w)	21.4	1993, New Zealand
Kamitsuki	6.3 (M _w)	16.3	2000, Kamitsuki, Japan
Baja-California	6.4 (M _w)	19.7	1934, Mexico
BigBear*	6.5 (M _w)	10.2	1992, California, USA
Alaska	6.6 (M _w)	15.2	2001, Alaska, USA
Hyogo-Ken Nanbu*	6.9 (M _w)	8.1	1995, Kobe, Japan
Loma Prieta	7.0 (M _w)	7.8	1989, California, USA
El Centro	7.2 (M _w)	23.8	1940, California, USA
Ofunato	7.4 (M _w)	3.6	1978, Miyagi-ken-oki, Japan
Hachinohe	8.2 (M _w)	7.7	1968, Tokachi-oki, Japan

상태로 가정하여 포화 과정을 거치고 유효구속압 100kPa에서 등방압밀 과정을 수행한 후 진동하중을 시료에 가하였다.

진동삼축실험에 사용된 입력하중은 정현하중과 11개의 실지진하중(지진규모 6.1~8.1)을 이용하였다. 표 2는 실험에 사용된 실지진하중의 제원을 나타낸 것이다. 표 2에서 유효지속시간(Abrahmson과 Silva, 1996)⁽³⁾은 5-95% RMS(Root-Mean-Square) 지속시간을 나타낸다. 액상화 생략기준에 대한 분석을 하기 위해 Ormond, Bigbear, Hyogo-Ken Nanbu 지진 기록을 사용하였다.

3. 실험결과

3.1 정현하중과 실지진하중 결과 비교

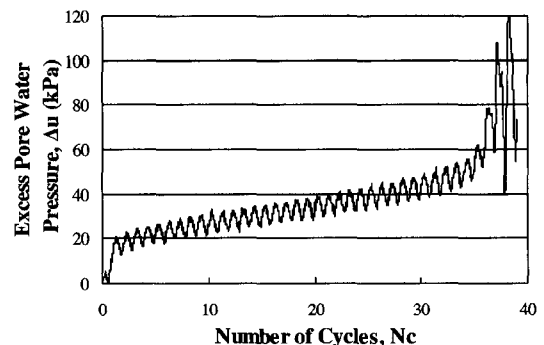
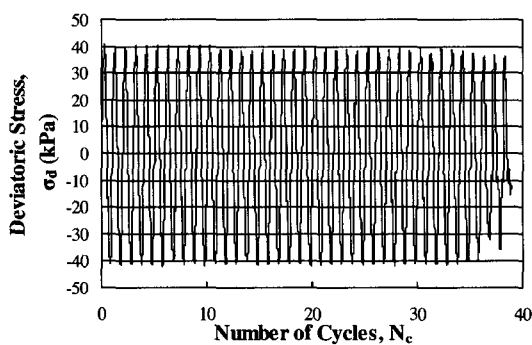
일반적인 진동삼축실험에서는 액상화가 일어나기 전까지 일정한 크기의 정현하중이 시료에 가해진다. 그러나 실지진하중을 이용하는 경우는 가속도 수준을 높여가면서 하중을 가하여 액상화가 발생할 때까지 실험을 반복 수행하여 그때의 응력을 산정한다. 그림 2는 정현하중과 실지진하중을 적용하여 획득한 액상화 발생시의 실험 결과를 나타낸 것이다. 규칙적인 정현하중을 이용한 경우를 살펴보면, 재하 횟수가 증가함에 따라 간극수압이 점차적으로 증가하여 최종적으로 초기유효구속압과 같아져서 액상화가 발생함을 알

수 있다. 한편 실지진하중의 경우에는 간극수압이 초기 단계부터 증가하지 않고 최대 축차응력에 도달할 때 순간적으로 증가하여 액상화가 발생함을 알 수 있다.

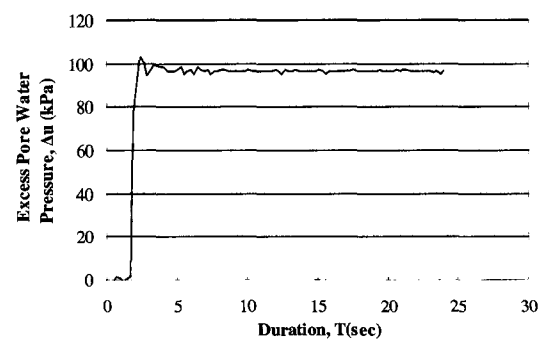
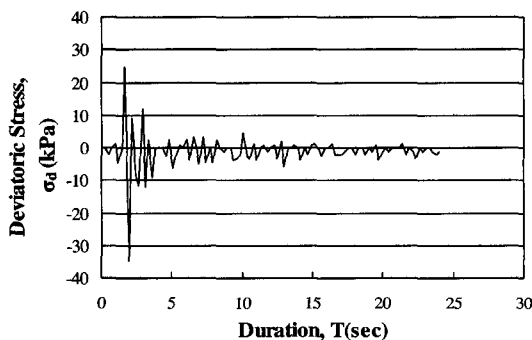
실지진하중을 이용하여 액상화가 발생하는 순간의 최대 축차응력을 찾기 위한 실험방법은 다음과 같다. 먼저 임의의 최대축차응력으로 실험을 수행하여 잔류간극수압을 측정하고 잔류간극수압이 초기 유효구속압에 미치지 못할 경우 다시 시료를 재성형한 후 최대축차응력을 조금씩 증가시켜가며 실험을 반복한다. 반복실험을 통해 잔류간극수압이 초기유효구속압과 같아질 때의 최대축차응력을 액상화 발생 최대축차응력으로 정의한다. 잔류간극수압은 초기유효구속압에 대한 비로 나타내었다. 이와 같은 과정에 따라 액상화를 일으키는 최대축차응력을 구하는 과정을 그림 3에 나타내었다.

여러 실지진기록을 이용하여 위와 같은 과정에 의해 획득한 실험결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 확인할 수 있듯이 각 지진파 별로 3~5번의 실험을 통하여 액상화 발생 최대전단응력비를 구할 수 있음을 알 수 있다.

정현하중을 이용한 액상화 간이평가에서는 불규칙한 지진하중을 등가의 전단응력과 등가반복 재하횟수로 표현한다. 등가전단응력개념은 Seed 등(1975)⁽⁴⁾에 의해 제안된 것으로, 그림 5는 지진규모 5.3에서 7.7 사이의 지진에 대한 등가반



(a) 정현하중

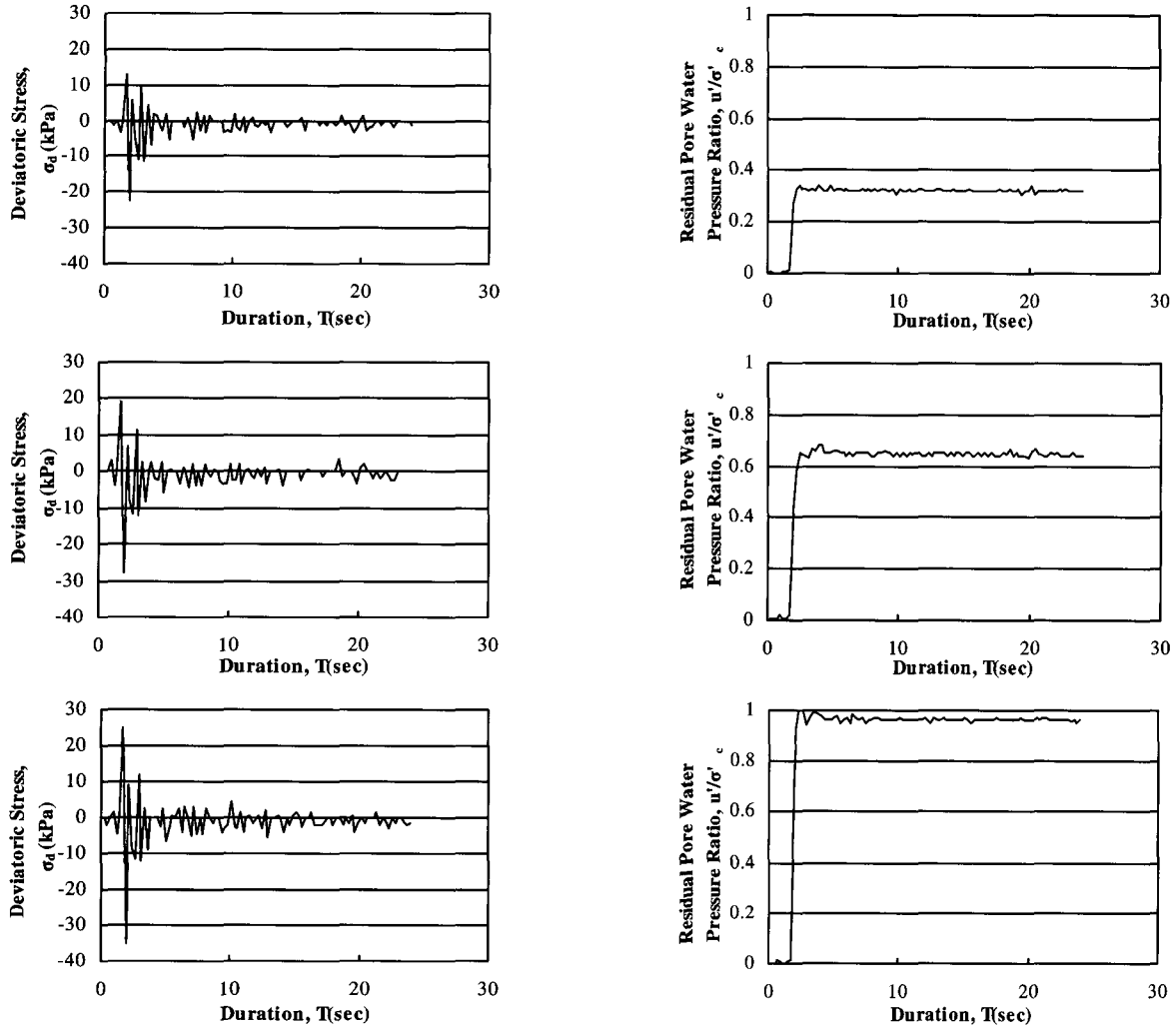


(b) 실지진하중

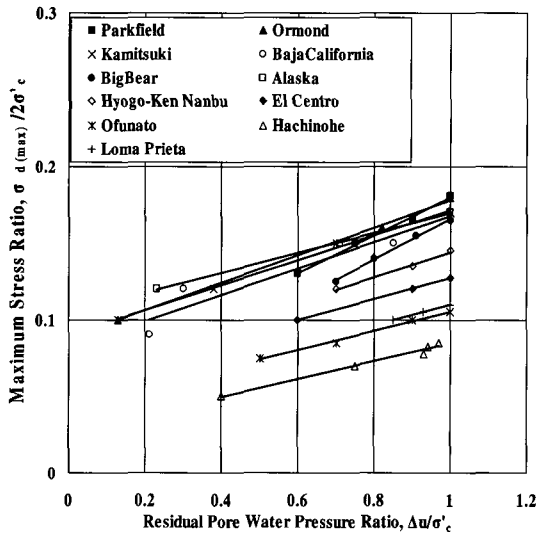
〈그림 2〉 정현하중과 실지진하중 적용시의 축차응력과 과잉간극수압

복재하횡수를 나타낸 것이다. 본 연구에서 사용된 지진파 또한 그림 5에 함께 도시하여 나타내었다. 그림 5를 살펴보면 본 연구에서 사용된 지진파들은 평균에서 표준편차 밖의 범위에

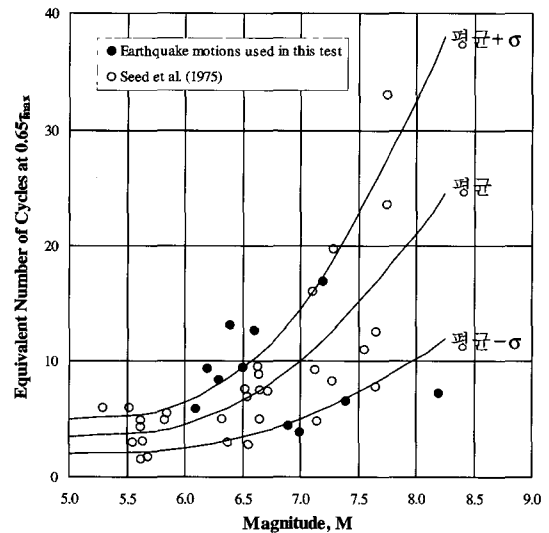
존재하는 것을 알 수 있다. 특히 지진규모 6.5 주변의 지진인 경우 등가반복재하횡수는 10회 주변의 값을 보임을 알 수 있다.



〈그림 3〉 실지진하중 재하시 액상화 발생 최대축차응력을 구하는 과정

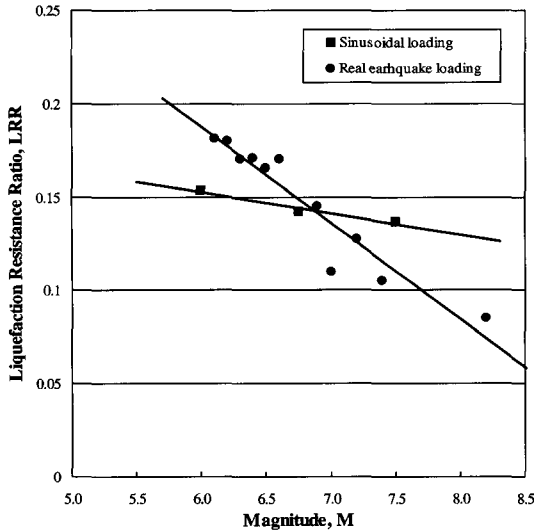


〈그림 4〉 잔류간극수압비와 최대전단응력비와의 관계



〈그림 5〉 지진규모에 따른 등가반복재하횡수

불규칙한 지진하중과 정현하중에 의한 액상화 저항강도를 비교하기 위하여 추가적인 실험을 수행하였다. 유효구속

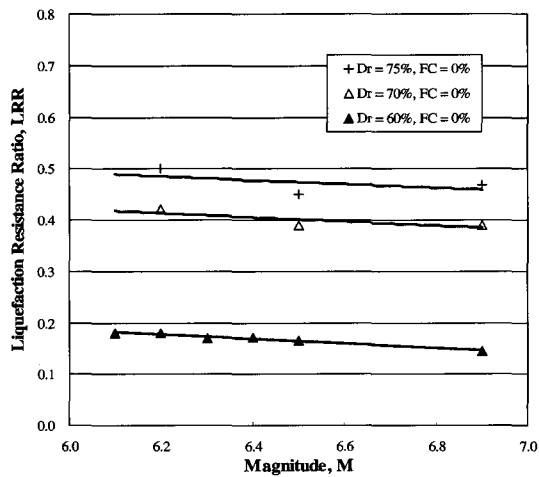


〈그림 6〉 정현하중과 실지진하중을 이용한 경우의 액상화 저항강도비

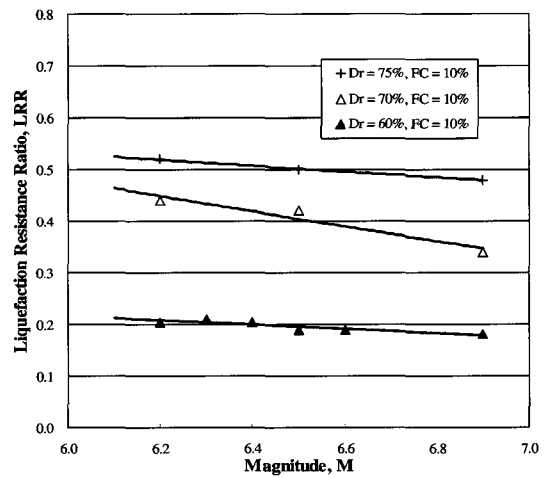
압 100kPa, 상대밀도 60%의 조건에서 실트질을 함유하지 않은 주문진 표준사를 대상으로 실험을 수행하였다. 실험에 적용된 액상화 저항강도비는 0.19, 0.23, 0.26이다. 지진규모와 등가반복재하횟수와와의 관계를 살펴보면 지진규모 6.0은 반복재하횟수 5회, 지진규모 6.75는 재하횟수 10회, 지진규모 7.5는 재하횟수 20회에 해당된다. 그림 6은 정현하중과 불규칙한 지진하중 사이의 액상화 저항강도비 관계를 나타낸 것이다. 그림 6을 살펴보면, 지진규모 6.8주변에서 불규칙한 지진하중에 의한 액상화 저항강도와 정현하중에 의한 액상화 저항강도가 일치하며, 그 외의 지진규모에서는 상이한 값을 나타냄을 알 수 있다.

3.2 불규칙한 지진하중입력시 상대밀도와 실트질 함유량의 영향

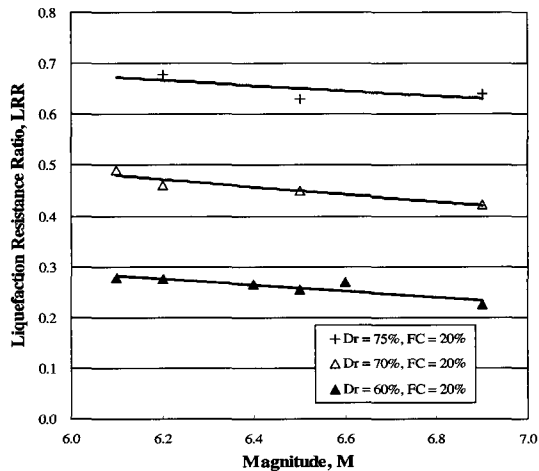
그림 7은 중진규모인 지진규모 6.1~6.9 사이의 다양한 지진하중을 입력하중으로 하여 서로 다른 세 개의 상대밀도 60,



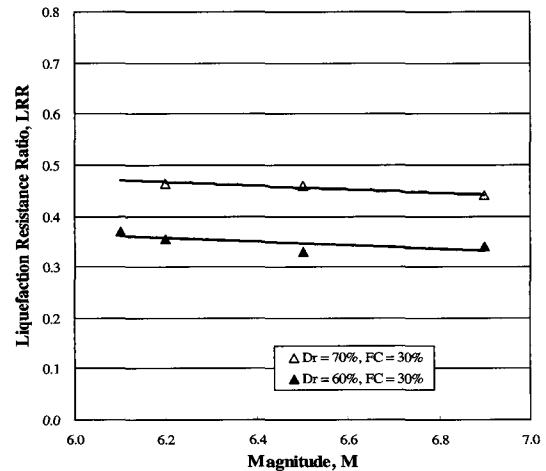
(a)



(b)



(c)



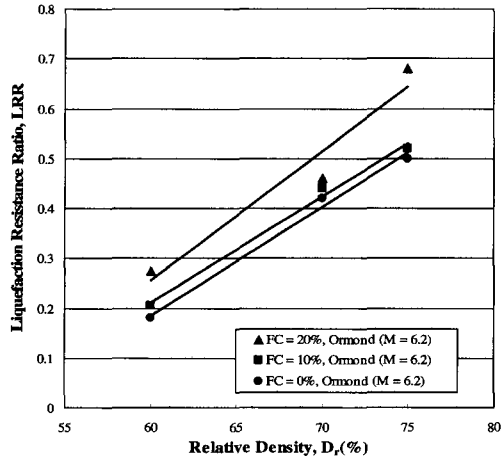
(d)

〈그림 7〉 지진규모 변화시 액상화 저항강도에 대한 상대밀도의 영향

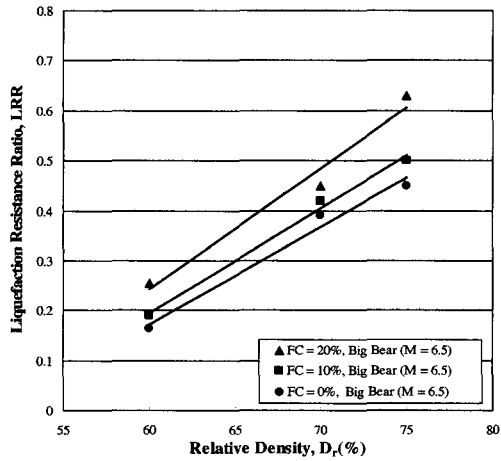
70, 75%에서의 액상화 저항강도를 나타낸다. 상대밀도가 클수록 액상화 저항강도가 증가함을 알 수 있다. 그림 8은 실트질 함유량이 0, 10, 20%인 시료에 대한 실험을 통하여 상대밀도 변화가 액상화 저항강도에 미치는 영향을 보여준다. 상대밀도가 클수록 액상화 저항강도가 크게 나타났으며 순수모

래와 실트질을 함유한 모래 모두 상대밀도에 대한 영향이 크다는 사실을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 순수 모래에 대한 이전의 연구결과(Mulilis, 1975; Vaid와 Sivathayalan, 1996)^(5,6)와 유사한 결과를 보여준다.

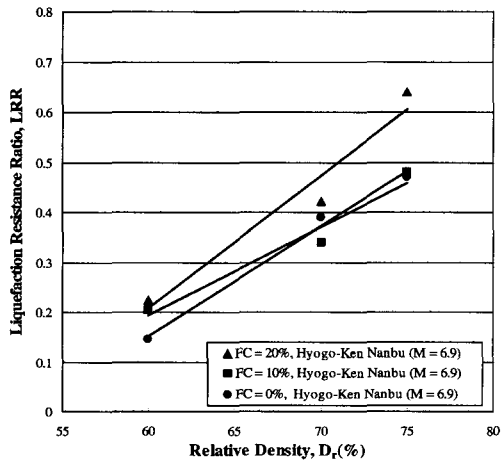
그림 9와 10은 실트질 함유량이 액상화 저항강도에 미치는



(a)

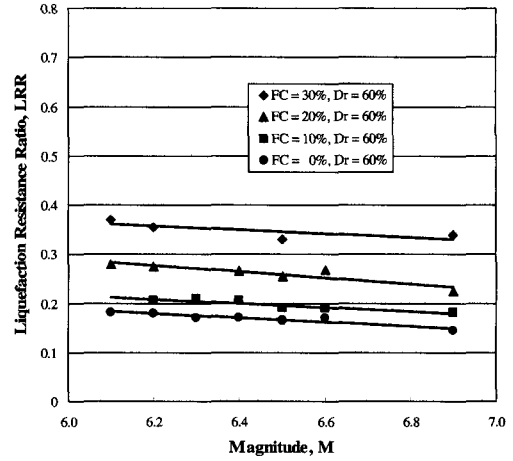


(b)

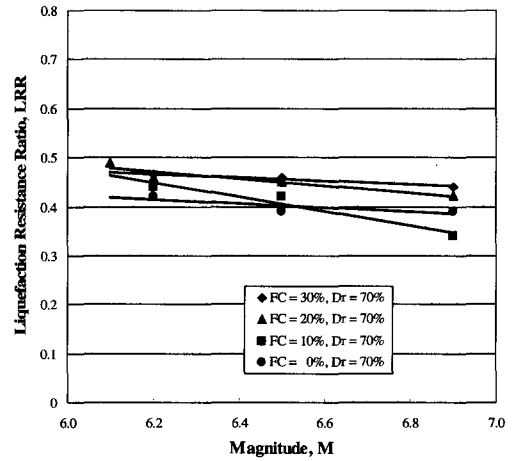


(c)

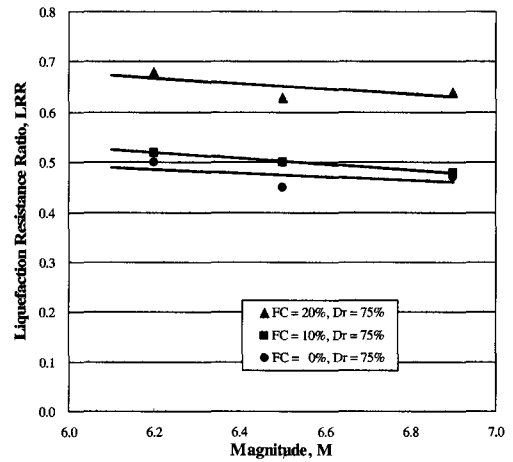
〈그림 8〉 실트질 함유량 변화시 액상화 저항강도에 대한 상대밀도의 영향



(a)



(b)



(c)

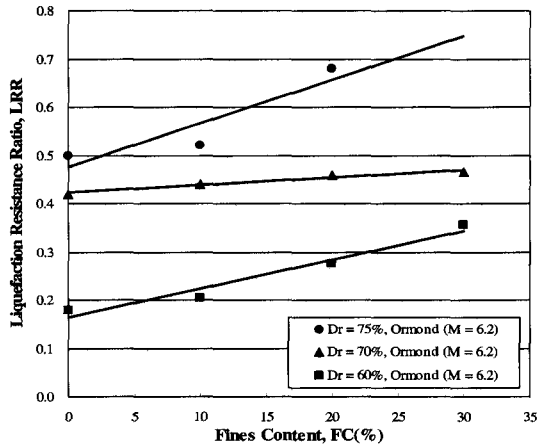
〈그림 9〉 지진규모 변화시 액상화 저항강도에 대한 실트질함유량의 영향

영향을 보여준다. 실트질 함유량이 증가할수록 실트질모래의 액상화 저항강도는 증가하는 경향을 나타냈다. 그림 9를 살펴보면, 실트질 함유량이 0에서 30%로 증가할 때 상대밀도 60%인 경우는 90%의 액상화 저항강도 증가를, 상대밀도 70%인 경우는 30%의 액상화 저항강도 증가를 나타냈다. 상대밀도가 75%인 경우는 실트질 함유량이 0에서 20%

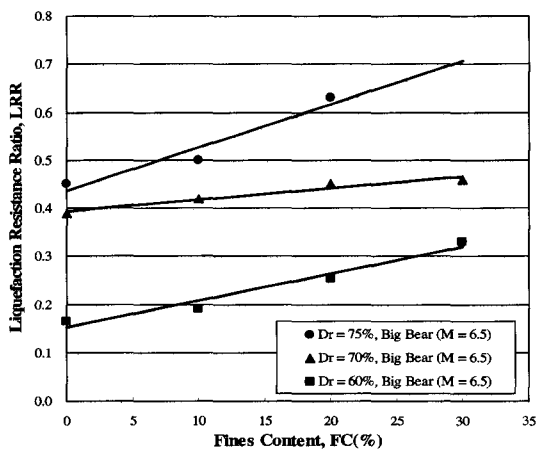
로 증가할 때 액상화 저항강도가 70% 증가하였다. 이러한 결과는 실트질을 함유한 경우 액상화 저항강도가 증가한다는 기존의 연구결과(Chang 등, 1982; Dezfulian 1982)^(7,8)와 잘 일치한다. 이러한 원인은 실트질 사이의 부착력이 모래가 액상화를 일으키려고 할 때 각각의 입자 분해를 방해하기 때문이며, 실트 함유량이 증가할수록 모래 입자는 실트에 의해 둘러싸이게 되며, 모래입자간의 접촉이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 그림 10은 실트질 함유량 증가에 따른 액상화 저항강도 증가를 나타낸다. 세 개의 상대밀도에 대한 결과로부터 실트질 함유량이 증가할수록 액상화 저항강도가 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

3.3 액상화 평가 생략기준

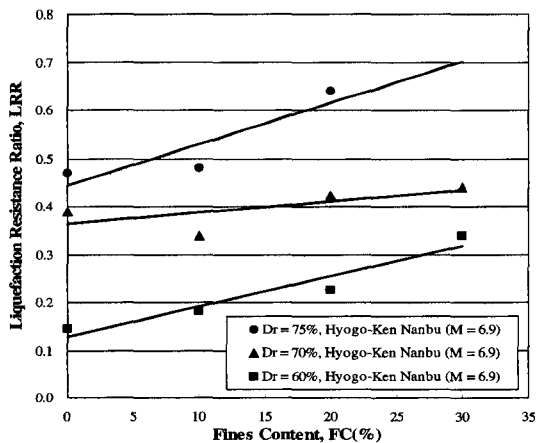
국내에 적합한 액상화 평가 생략기준을 조사하기 위하여 지진규모 6.5 주변의 불규칙한 지진파를 이용한 실험결과와 1차원 지진응답해석 프로그램인 SHAKE91(Schnabel 등, 1972)⁽⁹⁾을 이용하여 산정한 전단응력을 비교하였다. 만약 어느 지진규모에서 전단응력이 액상화 저항응력보다 크다면 그 높은 액상화를 일으킬 것이다. 다양한 조건에서의 전단응력을 계산하기 위해서 국내 9개 항만 지역 132개의 시추공에 대해서 지진응답해석을 수행하였으며, 이 때 사용된 입력지진파는 국내의 지진규모를 고려하여 지진규모 6.4, 6.5, 6.6의 세 개의 지진파를 이용하였다. 입력지진파의 최대 가속도 수준은 0.11g로 하였다. 그림 11은 132개 시추공에 대한 지진응답해석을 수행하여 깊이 3~20m 사이의 전단응력비를 나타낸 것이다. 대부분의 전단응력비는 0.5 이하의 값을 나타냈다. 그림 12는 그림 11의 결과와 불규칙한 지진하중을 이용한 진동삼축실험을 통해 산정된 액상화 저항응



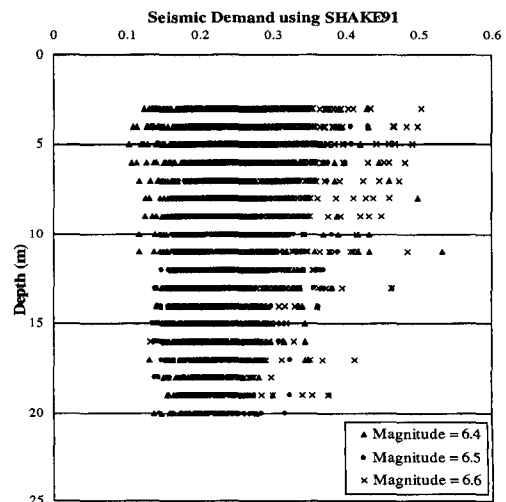
(a)



(b)



(c)



(그림 11) 여러 1차원 지진응답해석에 의한 전단응력비

(그림 10) 상대밀도 변화시 액상화 저항강도에 대한 실트질함유량의 영향

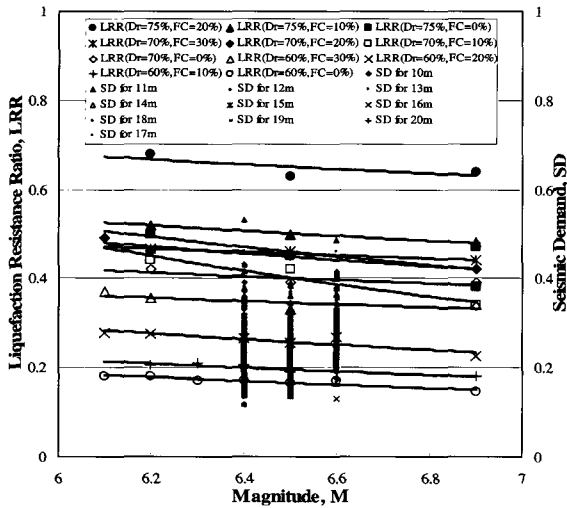
력비를 함께 도시한 것이다. 그림을 보면 대부분의 전단응력비가 액상화 저항강도보다 작은 값을 나타냄을 확인할 수 있다. 서로 다른 상대밀도와 실트질 함유량에 대한 실험결과와 국내 항만 지역에 대한 지진응답해석 결과를 고려할 때, 실트질 함유량 0%, 상대밀도 75% 조건 이상인 경우 액상화가 발생하지 않았으며, 따라서 이러한 지반의 경우 액상화 평가를 생략할 수 있다고 판단된다. 또한 실트질 함유량 20%,

상대밀도 70%인 경우도 위와 유사한 경향을 나타내었다. 비록 추가적인 조사가 필요하지만, 본 연구를 통해 얻은 결과는 국내의 액상화 평가 생략기준에 사용될 수 있을 것이다.

4. 하중형태에 따른 액상화 거동특성 분석

4.1 썩기하중과 선형증가 썩기하중을 이용한 진동삼축실험

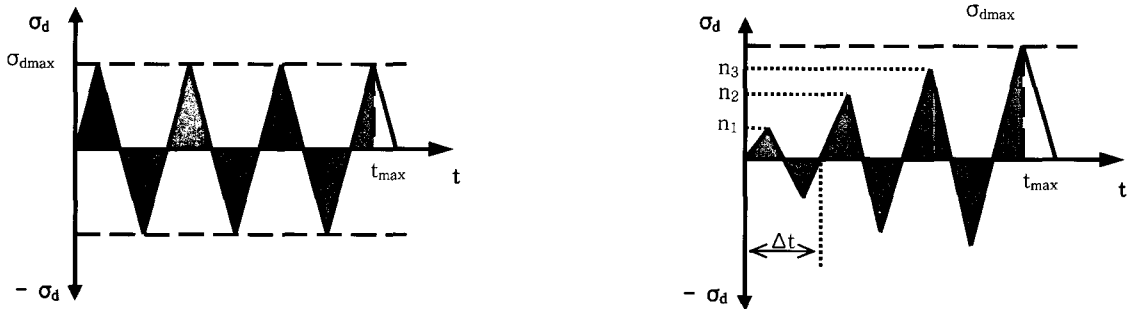
다양한 축하중에 따른 액상화 발생 특성을 비교하기 위해 썩기하중과 선형증가 썩기하중을 이용하여 진동삼축실험을 수행하였다. 그림 13은 본 연구에서 사용된 썩기하중과 선형증가 썩기하중의 모식도를 나타낸 것이다. 썩기하중은 정현하중과 같은 방법으로 일정한 크기의 축차응력을 반복재하하여 액상화를 일으키는 반면 선형증가 썩기하중은 실지진하중과 같은 방법으로 하나의 입력파에서 최대, 최소축차응력의 크기를 변화시켜 액상화를 일으켰으며 선형증가 썩기하중의 경우 하중작용시간차, Δt 를 0.2, 0.4, 1.0초로 바꿔 총 지속시간을 달리하여 실험하였다.



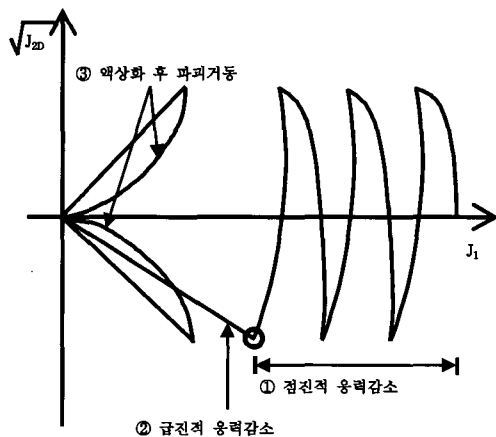
〈그림 12〉 지진규모에 따른 액상화저항강도비와 지진발생 전단응력 비교

4.2 축하중에 따른 상태변환선의 비교

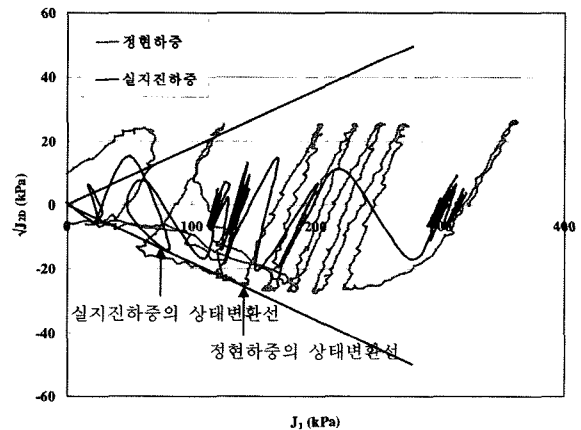
일반적인 실내진동실험에 있어 등방압밀하중하의 거동변



〈그림 13〉 썩기하중과 선형증가 썩기하중



〈그림 14〉 진동하중을 받는 등방구속하의 포화사질토의 거동(최재순 등, 2003)



〈그림 15〉 상태변환선의 각도비교

화를 살펴보면 그림 14와 같이 3부분(①점진적 응력감소, ②급진적 응력감소, ③액상화 후 파괴거동)으로 구분할 수 있다(최재순 등, 2003).⁽¹⁰⁾ 본 연구에서는 급진적 응력감소를 보이며 큰 소성변형으로 초기액상화가 발생하는 ②부분의 시작점을 상태변화시작점으로 정의하였다. 그림 15는 정현 하중과 실지진하중을 이용하여 얻은 유효응력 경로 및 상태 변환선의 각도를 나타낸 그림이다. 그림 15에 나타난 바와 같이 응력경로가 상태변환선에 가까워질수록 압축부에서 인장 부로 전환되는 명확한 지점을 파악할 수 있다. 또한 액상화가 발생한 지점 근처에서 상태변환선에 닿은 이후 급격한 응력 감소구간을 보이는 인장거동을 확인할 수 있다. 상태변환선의 각도는 모든 실험결과에서 대략 26.5°로 나타났다.

4.3 축하중에 따른 액상화 저항강도 특성

실지진하중을 이용한 액상화 저항특성은 정현하중을 이용한 액상화 저항특성과 상이하게 나타났으며, 실지진하중을 이용한 결과를 정현하중을 이용한 결과와 직접 비교하는 것은 쉽지 않다. 따라서 다양한 동적 하중의 특성을 보다 더 효과적으로 반영하기 위하여, 새로운 응력-시간이력 무차원계수 κ 를 다음과 같이 제안하였다.

$$\kappa = \frac{1}{T_{max} \cdot \sigma_{dmax}} \left(\sum_0^{T_{max}} |\sigma_d \cdot t| \right) \quad (1)$$

여기서, T_{max} = 액상화 발생시까지의 시간
 t = 시간

식 (1)에서 summation은 그림 13에서 음영으로 표시된 전체면적을 나타낸다. 충격하중이 가해지는 동안 흙은 매우 짧은 시간 동안에 최대 축차응력을 받게 되며, κ 값은 0에 가깝게 된다. 사각형 형태의 하중이 작용하는 경우, 흙은 액상화 발생시까지의 시간 T_{max} 동안 최대 축차응력을 받게 되며, κ 값은 1에 가깝게 된다. κ 값의 물리적 의미는 값이 클수록 액상화 발생시 까지 흙에 작용한 외력(시간에 따른 축차응력의 합계)이 크다는 것을 의미한다. 제안된 파라미터 κ 의 타당성을 검증하기 위하여, κ 값을 누적에너지와 비교하였다. 누적에너지는 응력-변형률곡선의 면적으로부터 계산된다. 단위 체적당 누적에너지, $w(t)$ 는 아래의 식으로 정의된다.

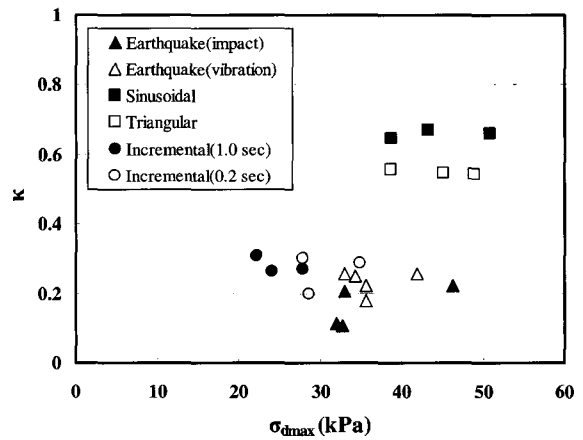
$$w(t) = \sum_0^{T_{max}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (2)$$

여기서, T_{max} = 액상화 발생시까지의 시간
 σ_{ij} = 응력벡터

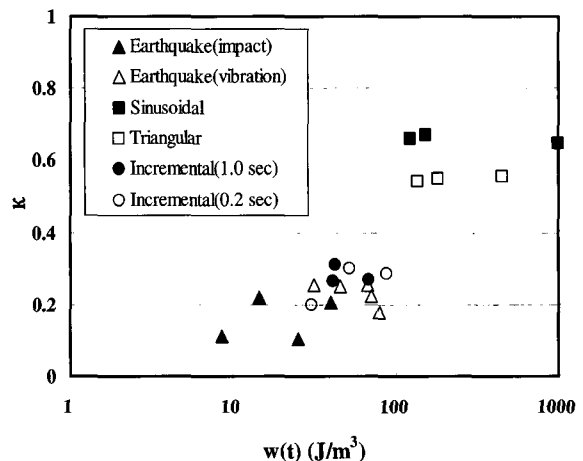
$$\varepsilon_{ij} = \text{변형률벡터}$$

본 연구에서는 초기 액상화 시점을 상태변환선(PTL)을 이용하여 정의하였다. 그림 16(a)와 (b)는 각각 최대축차응력 및 누적에너지에 따른 κ 값을 나타낸다. 그림 16에서 정현하중 및 썰기하중의 경우 κ 값은 각각 0.66 및 0.55로 나타난 반면, 선형증가썰기하중 및 실지진하중을 이용한 실험결과 κ 값은 각각 0.20-0.31 및 0.11-0.26의 범위를 나타내어 정현하중 및 썰기하중 형태의 파의 경우와 비교하여 큰 차이를 보임을 확인할 수 있다. 또한 누적에너지의 경우에도 비정현하중을 가한 경우 100미만의 값을 보이나, 정현하중의 경우 100보다 큰 값을 보인다. 이러한 결과들에 근거하여, 정현하중을 이용한 경우 실제 지진하중을 이용한 경우보다 큰 누적에너지를 산출함으로써 액상화 저항강도를 과다산정하는 문제점을 내포할 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 17은 각각의 하중형태에 따른 누적에너지를 나타낸 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 κ 값이 동일한 경우 최대축

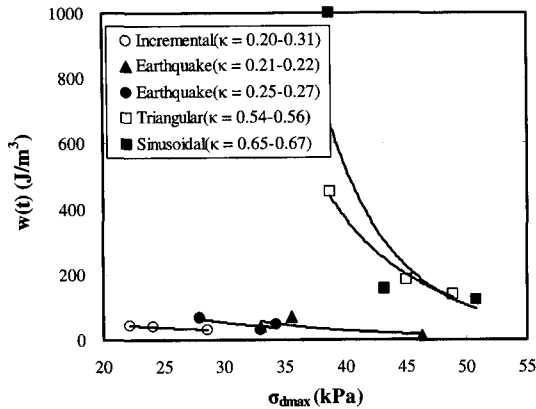


(a) 최대축차응력에 따른 κ 값



(b) 누적에너지에 따른 κ 값

(그림 16) 최대축차응력 및 누적에너지에 따른 κ 값 비교



〈그림 17〉 최대축차응력에 따른 누적에너지

차응력이 증가할수록 액상화 발생시까지의 누적에너지는 감소함을 확인할 수 있다. 이는 축차응력의 크기가 큰 경우 액상화 도달까지의 시간이 짧기 때문이다. 또한 κ 값이 비슷한 경우 하중형태에 따른 액상화 발생시까지의 누적에너지를 분석해보면, 정현하중 및 썰기하중을 이용한 실험의 경우 누적에너지의 크기가 비정현하중의 결과와 큰 차이를 보이며, 선형증가썰기하중을 이용한 실험결과가 실지진하중을 이용한 결과와 유사함을 확인할 수 있다. 그림 17로부터 액상화 발생시까지의 누적에너지는 최대 축차응력이 증가함에 따라 감소하며 최대축차응력에 따른 누적에너지가 감소함에 따라 κ 값은 증가함을 확인할 수 있다. 이런 사실들에 근거하여 다양한 하중의 형태에 따른 거동 차이를 설명할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

국내의 액상화 평가 방법을 개선하기 위하여 불규칙 지진하중을 입력하중으로 하여 상대밀도와 실트질 함유량을 변화시켜가며 진동삼축실험을 수행하였다. 또한 다양한 하중형태의 진동삼축실험을 통하여 과잉간극수압의 발현 및 축차응력, 응력경로 등의 실험결과로부터 동적거동을 분석하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 국내의 액상화 생략기준을 개정하기 위하여 지진응답해석을 수행하여 진동삼축실험 결과와 비교하였다. 실트질 함유량 0%, 상대밀도 75%인 경우 액상화 평가가 필요하지 않은 것으로 나타났으며, 실트질 함유량 20%, 상대밀도 70%인 경우 또한 액상화 평가가 필요하지 않은 것으로 나타났다.
- (2) 응력-시간이력의 무차원계수 κ 를 제안하였고, 제안된 κ 와 누적에너지를 통한 분석 결과 정현하중을 이용한 액상화 저항강도 산정의 경우 저항특성치를 과다 산정함을

확인할 수 있었다.

- (3) 액상화 발생시까지의 누적에너지를 분석한 결과 선형증가썰기하중을 이용한 실험결과와 실지진하중을 이용한 실험결과가 비슷한 경향을 나타냈으며, 이를 통해 정현하중을 이용한 실험결과보다 선형증가썰기하중을 이용한 액상화 해석이 보다 더 합리적임을 확인할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터(Korea Earthquake Engineering Research Center)를 통한 한국과학재단 우수 연구센터 지원에 의한 것입니다.

참고 문헌

1. Seed, H. B. and Idriss, I. M., "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential," *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, Vol. 97, No. 9, 1971, pp. 1249-1273.
2. Tsuchida, H., "Prediction and remedial measures against liquefaction of sandy soil," *Annual Seminar of Port and Harbor Research Institute*, No. 3, 1970, pp. 1-33(in Japanese).
3. Abrahamson, N. and Silva, W., *Empirical ground motion models*, Draft Rep., Brookhaven National Laboratory, 1996.
4. Seed, H. B., Idriss, I. M., Makdisi, F. and Banerjee, N., "Representation of irregular stress time histories by equivalent uniform stress series in liquefaction analysis," *Report*, No. EERC 75-29, Earthquake Engineering Research Center, Univ. California, Berkeley, 1975.
5. Mulilis, J. P., "The effects of method of sample preparation on the cyclic stress strain behavior of sands," *Report*, No. EERC 75-18, Earthquake Engineering Research Center, Univ. California, Berkeley, 1975.
6. Vaid, Y. P. and Sivathayalan, S., "Static and cyclic liquefaction potential of Fraser Delta sand in simple shear and triaxial tests," *Can. Geotech. J.*, Vol. 33, No. 2, 1996, pp. 281-289.
7. Chang, N. Y., Yeh, S. T. and Kaufman, L. P., "Liquefaction potential of clean and silty sands," *Proc., 3rd Int. Earthquake Microzonation Conf.*, 1982, pp. 1017-1032.
8. Dezfulian, H., "Effects of silt content on dynamic properties of sandy soils," *Proc., 8th World Conf. on Earthquake Engrg.*, 1982, pp. 63-70.
9. Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B., "A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites," *Report*, No. EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, Univ. California, Berkeley, 1972.
10. 최재순, 박근보, 서경범, 김수일, "포화사질토의 동적거동규명을 위한 교란상태개념의 이용", *한국지진공학회 2003년도 춘계학술대회 논문집*, 2003, pp. 140-147.