

실지진하중의 진동삼축시험에 기초한 액상화 저항강도 산정 Evaluation of Liquefaction Resistance Strength based on the Cyclic Triaxial Tests using Real Earthquake Loading

심재욱* 김수일** 최재순*** 박근보****
Sim, Jae-Uk Kim, Soo-Il Choi, Jae-Soon Park, Keun-Bo

ABSTRACT

An experimental assessment on the dynamic behavior of saturated sand which can consider the irregular characteristics of earthquakes was proposed.

The equivalent uniform stress concept presented by Seed and Idriss has been applied to evaluate the liquefaction resistance strength to simplify earthquake loading. However, it was known that the liquefaction resistance strength of soil based on the equivalent uniform stress concept can't exactly mirror the dynamic characteristics of the irregular earthquake motion. In this study, estimation of the criterion of the liquefaction resistance strength was determined by applying real earthquake loading to the cyclic triaxial test. From the test results, relationships between excess pore water pressure and the earthquake characteristics such as magnitude or duration were determined. Magnitude scaling factors to determine the soil liquefaction resistance strength in seismic design were also proposed.

1. 서론

지진은 발생한 장소나 시간이력에 따라 지진강도, 주파수 특성, 지속시간 등의 특성이 모두 다르기 때문에 불규칙한 지진력이 가지고 있는 특성 및 지반운동을 명확히 정의하기 위한 연구가 현재까지도 계속 수행되고 있다. 특히 액상화 평가시 진동삼축시험에 기초한 지반의 액상화 저항강도는 불규칙한 지진력을 Seed와 Idriss⁽¹⁾에 의해 제안된 단순한 형태의 등가전단응력과 진동 재하횟수로 환산하는 경우가 일반적이다.

* 연세대학교 토목공학과 박사과정
** 연세대학교 토목공학과 교수, 정회원
*** 연세대학교 토목공학과 박사후과정
**** 연세대학교 토목공학과 박사과정 수료

진동삼축시험에 기초한 지반의 액상화 저항강도는 주기적으로 재하한 정현파의 진동하중과 응력수준에 따라 발생된 과잉간극수압과의 관계로 표현된다⁽²⁾. 일본의 경우 역시 정현파를 이용한 진동삼축시험 결과에 현장지반의 초기전단응력 상태와 지진파의 특성에 따른 보정계수를 적용하여 액상화 저항강도를 산정한다⁽³⁾. 그러나 이러한 방법들은 지진력을 단순한 정현파로 간략화한 것으로서 불규칙한 지진파의 특성과 지반의 현장상태를 정확히 반영하지 못한다.

본 연구에서는 실제 지진파의 불규칙한 특성을 적용한 실내 진동삼축시험의 수행을 통해 지진 규모와 지속시간의 지진특성 변화가 지반의 액상화 저항강도에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 또한 지진규모별 수정계수(MSF, Magnitude Scaling Factor)에 대한 최근 연구와 비교하여 중앙진 정도의 지진규모를 고려할 수 있는 적정 수정계수를 제시하고자 한다⁽⁴⁾⁽⁵⁾.

2. 실지진하중을 입력한 진동삼축시험

2.1 대상시료 및 시험조건

본 연구에 사용된 시험기는 영국의 ELE사가 개발한 진동삼축시험기이다. 이 장비는 사용자가 임의의 진동하중을 작성하여 적용할 수 있고 70Hz의 높은 진동수까지 재하가 가능하여 실제 지진 하중을 충분히 구현할 수 있는 장비이다.

본 연구에서는 주문진 표준사를 대상으로 진동삼축시험을 수행하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 주문진 표준사의 입도분포는 빈입도이며 입자가 균질하여 액상화 현상이 발생하기 쉬운 조건을 가지고 있다. 또한 진동삼축시험 수행시 시험의 제반사항은 표 1에 나타내었다. 그림 중 액상화 발생가능성과 관련된 한계선들은 Ishihara가 제안한 범위이다⁽⁶⁾.

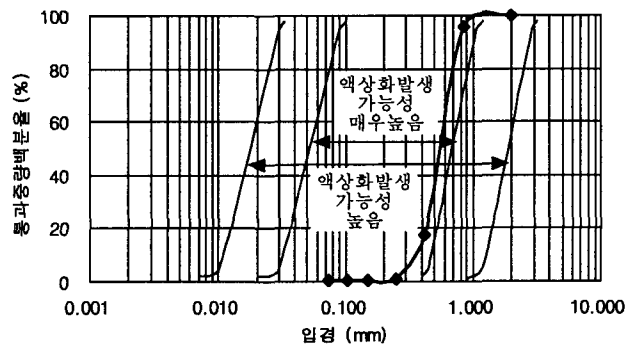


그림 1. 주문진 표준사의 입도분포 곡선

표 1. 진동삼축시험의 제반사항

종류	시험 조건
초기유효구속압 (kPa)	100
하중종류	실지진파형(8개)
제어방식	응력제어방식
지속시간 (초)	8, 16, 24
시료조건	포화, 비배수
시료성형방법	수중침강법

2.2 입력하중

본 실험에서 실지진파를 이용한 진동삼축시험시 사용한 가속도 시간이력은 과거 역사 지진들의 가속도 시간이력을 입력하중으로 사용하였다. 우리나라는 액상화 피해가 발생한 지진기록을 보유하고 있지 않기 때문에 본 실험에는 미국 및 일본의 지진기록을 이용하였으며 우리나라와 같은 중약진 지역의 적용을 위하여 다양한 지진규모의 실지진 시간이력을 선택하였다. 진동삼축시험시 사용된 지진파의 지진규모, 지속시간 및 제원은 표 2에 나타내었다.

표 2. 진동삼축시험에 사용된 지진가속도 기록

지진파	지진규모	지속시간	제 원
Loma Prieta	8.1 (M_w)	40	1989년 10월 17일 미국 Loma Prieta
Tokachi-oki (Hachinohe)	7.9 (M_{JMA})	15	1968년 3월 16일 일본 Tokachi 앞바다
Miyagi-ken-oki (Ofunato)	7.4 (M_{JMA})	14	1978년 6월 12일 일본 Miyagi현의 앞바다
El-Centro	7.1 (M_w)	31	1940년 미국 캘리포니아주 Imperial Vally
Hyogo-Ken Nanbu	6.9 (M_{JMA})	26	1995년 일본의 고베지역
Big Bear	6.5 (M_w)	35	1992년 미국 캘리포니아주 Big Bear Lake
Parkfield	6.1 (M_w)	24	1966년 미국 캘리포니아주 Parkfield
Coyote Lake	5.7 (M_w)	28	1979년 미국 캘리포니아주 San Martin

주) M_w 는 모멘트 규모, M_{JMA} 는 일본 기상청에서 사용하는 지진규모를 나타낸다.

3. 실험결과

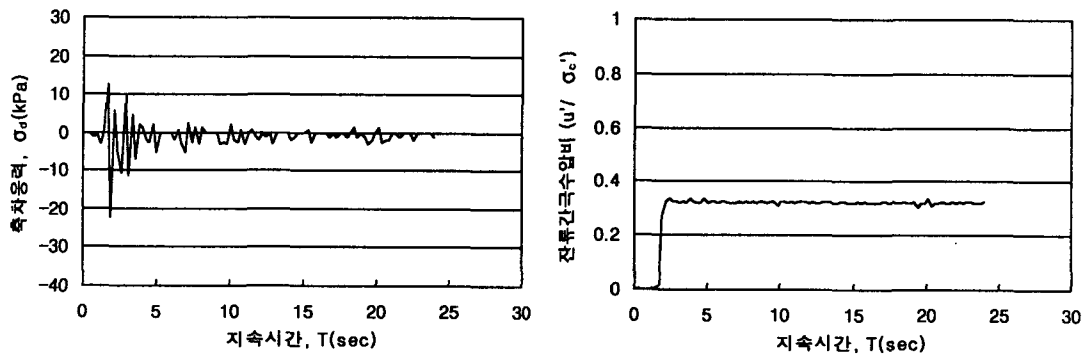
본 연구에서는 지진규모와 지속시간의 지진특성 변화와 액상화 저항강도의 관계를 규명하기 위한 시험을 수행하였다.

3.1 지진규모에 따른 진동삼축시험 결과

지진규모와 지속시간의 지진특성 변화와 액상화 저항강도의 관계를 규명하기에 앞서 실지진하중 작용시 최대축차응력과 초기액상화 발생시점의 관계를 찾기 위한 시험을 수행하였다.

액상화가 발생하는 최대축차응력을 찾기 위한 실험방법은 다음과 같다. 먼저 임의의 최대축차응력으로 실험을 수행하여 잔류간극수압을 측정하고 잔류간극수압이 초기유효구속압에 미치지 못할 경우 다시 시료를 재성형하고 최대축차응력을 조금씩 증가시켜가며 시험을 반복한다. 반복시험을 통해 잔류간극수압이 초기유효구속압과 같아질 때의 최대축차응력을 액상화 발생 최대축차응력으로 정의한다. 잔류간극수압은 초기유효구속압에 대한 비로 나타내었다. 이와 같은 과정에 따라 지진규모 5.7의 Coyote Lake 지진파형 실험을 초기유효구속압 100kPa에서 수행한 결과, 지속시간에 따른 축차응력과 잔류간극수압비를 그림 2~4에 나타내었다. 그림에서 축차응력은 양의 값이 압축응력, 음의 값이 인장응력을 나타내며 실지진파형을 적용시킨 진동삼축시험 결과, 과잉간극수압은 최대축차응력보다 작은 축차응력에는 상관없이 최대축차응력이 작용할 때 최대로 발현하고 그 후

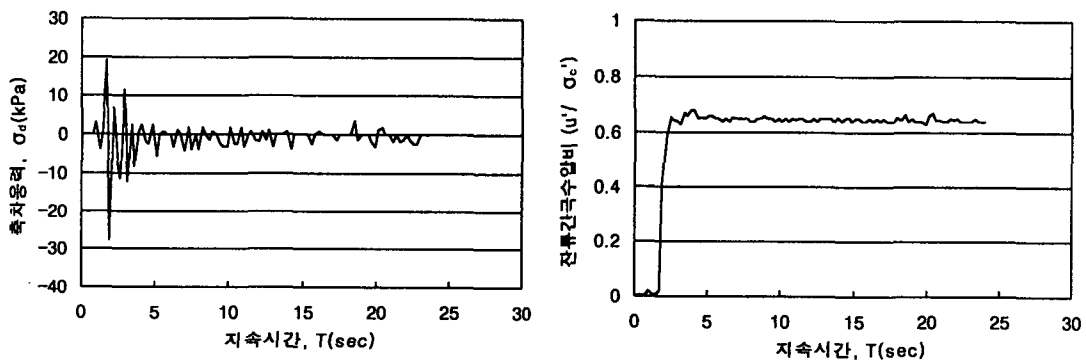
에는 일정하게 유지되는 것을 알 수 있었다. 그림 2는 최대축차응력을 22kPa로 했을 때 잔류간극수압비가 0.31임을 나타내고, 그림 3은 28kPa의 최대축차응력을 작용시켰을 때 잔류간극수압비가 0.65임을 나타낸다. 마지막으로 그림 4는 35kPa의 최대축차응력을 작용시킨 결과 잔류간극수압비가 1.0, 즉, 과잉간극수압이 100kPa에 이르러 액상화가 발생함을 알 수 있다.



(a) 축차응력

(b) 잔류간극수압비 = 0.31

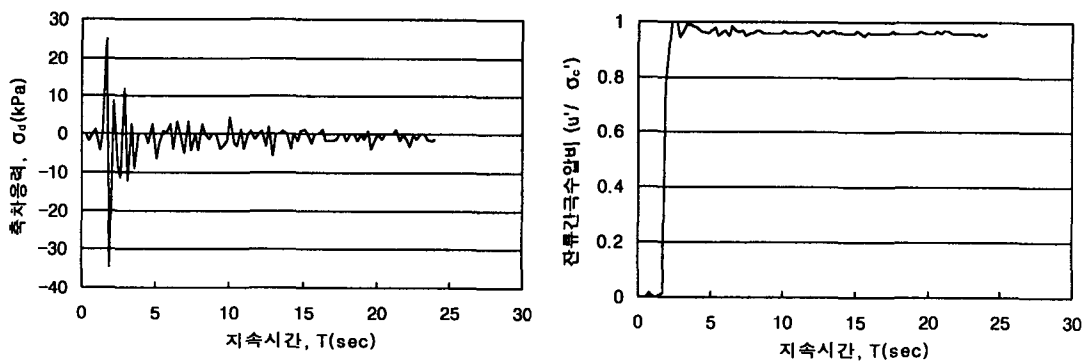
그림 2. Coyote Lake 지진파형 (최대축차응력 22kPa)



(a) 축차응력

(b) 잔류간극수압비 = 0.65

그림 3. Coyote Lake 지진파형 (최대축차응력 28kPa)



(a) 축차응력

(b) 잔류간극수압비 = 1.00

그림 4. Coyote Lake 지진파형 (최대축차응력 35kPa)

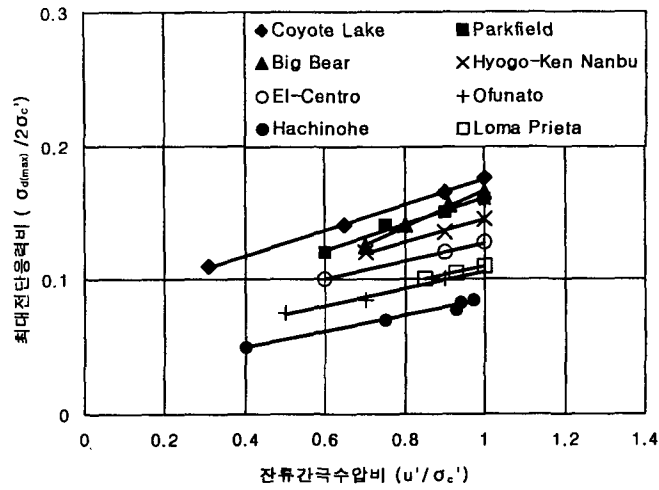


그림 5. 잔류간극수압비에 따른 최대전단응력비

주문진 표준사를 상대밀도 60%, 초기유효구속압 100kPa의 조건 하에서 8개의 실지진파형을 적용한 진동삼축시험 결과를 통해 액상화 발생 최대전단응력비를 산정한 결과는 그림 5와 같다. 본 연구에 사용된 시험기는 지진파를 하중으로 작용시킬 때 최대 24초의 지속시간까지 시험이 가능하기 때문에 8개의 실지진파형을 작용시킨 진동삼축시험시 지진파의 실제 지속시간에 상관없이 지속시간을 24초로 고정시키고 시험을 수행하였다. 그림 5에서 잔류간극수압비가 1인 경우가 초기 액상화 발생시점이며 이에 대한 결과를 지진규모에 따라 그림 6에 나타내었다. 그림 6에 나타난 바와 같이 지진규모가 증가함에 따라 액상화 발생 최대전단응력비가 감소함을 알 수 있다.

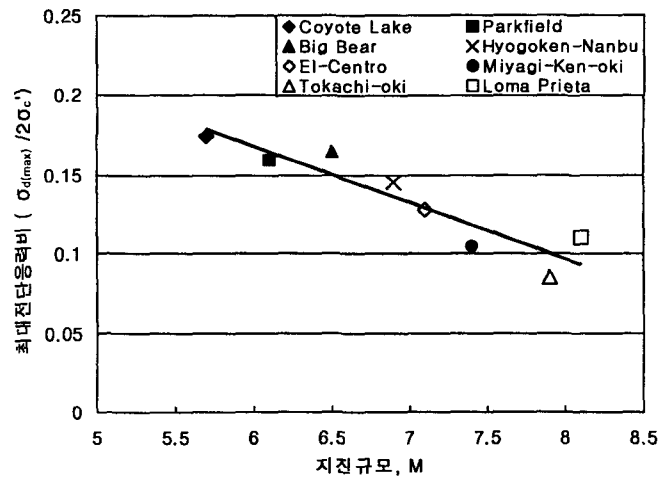


그림 6. 지진규모에 따른 액상화 발생 최대전단응력비

3.2 실지속시간을 고려한 액상화 발생 최대전단응력비의 산정

지속시간에 따른 액상화 발생 최대축차응력을 산정하기 위해 8개의 지진파형 중에서 Ofunato

지진파형과 Hachinohe 지진파형을 선택하여 지속시간을 8초, 16초로 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 지속시간의 변화에 따른 액상화 발생 최대축차응력은 지속시간이 8초 증가할 때 약 2kPa 작아지는 것을 알 수 있었다. 그림 7은 지속시간의 변화에 따른 액상화 발생 최대축차응력을 최대전단응력비로 환산하여 나타낸 것이다. 지진규모의 증가에 따른 액상화 발생 최대전단응력비의 감소와 마찬가지로 지속시간이 증가할수록 액상화 발생 최대전단응력비는 감소함을 알 수 있다.

그림 6의 지진규모에 따른 실지진파형 진동삼축시험은 지진파의 실제 지속시간에 상관없이 지속시간을 모두 24초로 고정시켜 수행한 것이다. 그러나 각각의 지진파는 그 지속시간이 모두 다르기 때문에 지진규모에 따른 실지진파형 진동삼축시험 결과에 그림 7의 지속시간에 따른 실지진파형 진동삼축시험 결과를 적용하여 실험결과를 산정하였다. 지진파의 실제 지속시간을 고려하여 산정한 실험결과는 그림 8과 같다.

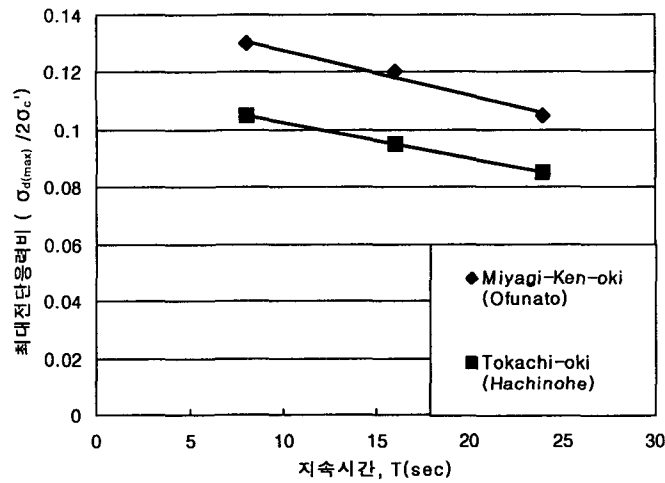


그림 7. 지속시간에 따른 최대전단응력비

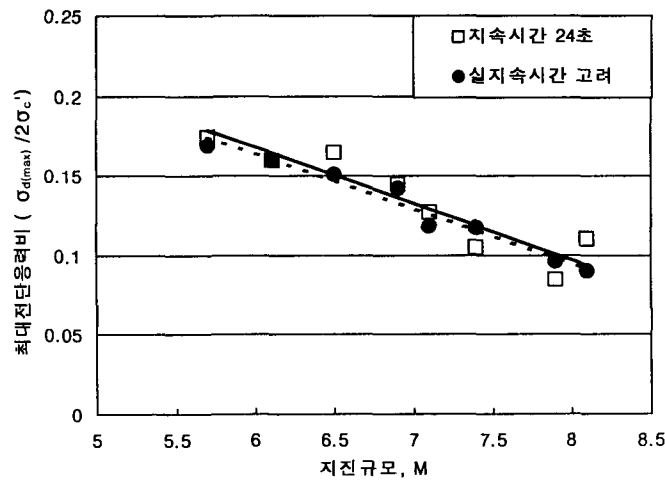


그림 8. 실제 지속시간을 고려한 액상화 발생 최대전단응력비

3.3 지진규모별 적정 수정계수의 산정

진동삼축시험과 같은 실내시험 외에 현장시험에 의해 제안된 액상화 저항강도는 모두 지진규모 7.5를 기준으로 산정되어 있다. 그러므로 지진규모 7.5 이외의 액상화 저항강도 산정을 위한 지진규모별 수정계수가 연구되었고, 1996년 NCEER과 1998년 NCEER/NSF Workshop에서는 Idriss가 제안한 수정계수를 하한선으로 정하고 Andrus와 Stokoe가 제안한 수정계수를 상한선으로 정하여 그 범위 안에서 지진규모별 수정계수를 결정할 것을 제안하고 있다. 현재까지도 지진규모별 수정계수에 관한 연구는 계속되고 있으며 2001년 Liu 등은 여러 지진특성을 고려한 지진규모별 수정계수를 산정하였다. 그림 9는 그림 8의 실지속시간을 고려한 지진규모에 따른 액상화 발생 최대전단응력비를 사용하여 지진규모별 적정 수정계수를 산정한 결과를 다른 연구자들의 결과와 함께 보여주고 있다. 그림 9에서 보면 본 연구에서 산정된 지진규모별 수정계수의 값이 NCEER/NSF Workshop에서 제안한 지진규모별 수정계수의 범위보다 낮음을 알 수 있다. 그러나 지진규모를 고려한 Idriss의 지진규모별 수정계수와 지진규모, 진앙지로부터의 거리, 지진으로 인한 파괴양상 등의 여러 지진특성을 이용한 Liu 등의 지진규모별 수정계수와 유사한 결과가 산정되었다.

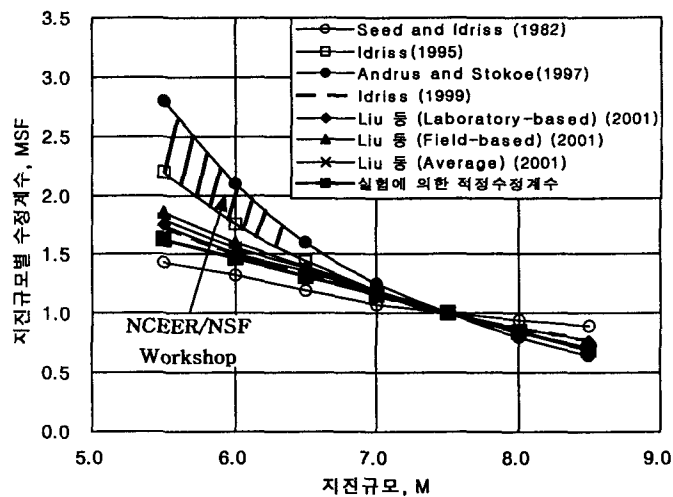


그림 9. 지진규모별 수정계수

4. 결론

본 연구에서는 실제 지진과 같은 불규칙한 전단응력을 적용한 액상화 저항강도의 실험적 산정 방법을 제안하였다. 지진규모 5.7에서 8.1 사이의 8개 지진가속도 기록을 입력하중으로 작용시킨 진동삼축시험을 수행하여 지진규모와 지속시간의 변화에 따른 포화사질토의 액상화 저항강도 및 지진규모별 수정계수를 산정하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 지진규모에 따른 실지진파형 진동삼축시험 결과, 지진규모가 증가할수록 액상화 발생 최대전단응력비는 감소하는 것으로 나타났다. 또한 지속시간에 따른 실지진파형 진동삼축시험 결과, 지속시간이 증가할수록 액상화 발생 최대전단응력비는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 지진의

규모와 지속시간이 증가함에 따라 지반의 액상화 저항강도가 감소한다는 것을 의미한다.

- 2) 실제 지진규모와 지속시간을 모두 고려하여 액상화 발생 최대전단응력비를 산정한 결과 지진의 특성변화에 따른 액상화 저항강도의 경향이 보다 정확하게 나타남을 알 수 있었다. 그러므로 본 연구에서 수행한 실지진파형 진동삼축시험이 지진특성을 합리적으로 반영하고 있음을 확인하였다
- 3) 실지진파를 적용시킨 진동삼축시험 결과를 이용하여 지진규모별 수정계수를 산정한 결과, 일반적으로 사용하고 있는 지진규모별 수정계수들보다 낮은 값이 산정되었지만 지진규모 등의 지진 특성을 고려하여 산정된 지진규모별 수정계수들과는 유사함을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서 제안한 지진규모별 적정 수정계수가 지진의 불규칙한 특성을 정확히 반영하고 있고 일반적인 지진규모별 수정계수를 사용하는 것이 지반의 액상화 저항강도를 실제보다 높게 산정하여 위험한 설계를 하고 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 두뇌한국21사업과 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원에 의한 것입니다.

참고 문헌

1. 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, UCB, 1975.
2. Annaki, M. and Lee, K. L., "Equivalent Uniform Cyclic Concept for Soil Dynamics", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, 1977, pp.549-563.
3. Ishihara, K. and Yasuda, S., "Sand Liquefaction in Hollow Cylinder Torsion under Irregular Excitation," Soil and Foundations, Vol. 15, No. 2, 1975, pp.45-59.
4. Youd, T. L. and Idriss, I. M., "Liquefaction Resistance of Soils : Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils", Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 4, 2001, pp.297-313.
5. Liu, A. H., Stewart, J. P., Abrahamson, N. A., and Moriwaki, Y., "Equivalent Number of Uniform Stress Cycles for Soil Liquefaction Analysis", Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 12, 2001, pp.1017-1026.
6. Port and Harbour Research Institute, Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land, A. A. Balkema., 1997, pp.239-243.