

실지진하중을 이용한 포화사질토의 액상화 저항강도에 관한 실험적 연구

An Experimental Study for the Liquefaction Resistance Strength of Saturated Sand Using Real Earthquake Loading

| | | | |
|-------------------|----------------|-------------------|---------------|
| 심재욱 ^{*1} | Sim, Jae-Uk | 박근보 ^{*2} | Park, Keun-Bo |
| 최재순 ^{*3} | Choi, Jae-Soon | 김수일 ^{*4} | Kim, Soo-Il |

Abstract

Based on the equivalent uniform stress concept presented by Seed and Idriss, sinusoidal cyclic loads which simplified the earthquake loads have been applied in evaluating the liquefaction resistance strength experimentally. However, the liquefaction resistance strength of soil based on the equivalent uniform stress concept can not exactly reflect the dynamic characteristics of the irregular earthquake motion. In this study, 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 liquefaction behaviors of saturated sand and earthquake characteristics such as magnitude or time-duration were determined. Magnitude scaling factors to determine the soil liquefaction resistance strength in seismic design were also proposed.

요 지

최근까지 지반의 액상화 저항강도를 산정하기 위한 실내시험의 대부분은 실지진하중을 재하하기보다는 Seed와 Idriss(1975)가 제안한 등가전단응력 개념에 기초하여 지진이 발생시키는 최대전단응력의 65%를 최대진폭으로 한 정현하중을 반복재하시켜왔다. 이러한 정현하중이 정확하게 실제 지반에 작용하는 불규칙한 지진력을 모사하고 있다고 볼 수 없으나, 시험상의 편의성으로 인해 현재까지도 이용이 빈번한 실정이다. 본 연구에서는 실제 지진하중 하에서 포화 사질토의 거동변화를 규명하고자 정현하중이 아닌 불규칙한 지진하중을 이용한 실험적 연구를 수행하였다. 다양한 지진규모의 실지진 시간이력을 진동하중으로 작용시킨 진동삼축시험을 통해 지진규모 및 지속시간의 변화에 따른 포화사질토의 동적 특성을 실험적으로 규명하고 기존의 등가전단응력 개념에 기초한 액상화 저항강도와 비교분석하였다. 또한, 중약진 지진대로 구분되는 국내 실정을 고려하여 다양한 지진규모에 적용가능한 수정계수를 제시하고 이를 기존의 연구결과와 비교분석하였다.

Keywords : Duration, Earthquake loading, Liquefaction resistance strength, Magnitude

1. 서 론

국내·외에서 수행되는 액상화 평가방법을 보면, 경

험적으로 작성된 도표 또는 진동삼축시험과 같이 지진 하중을 모사한 실내진동시험에 기초하여 지반의 액상화 저항강도를 산정한다. 실험적으로 지반의 액상화 저

*1 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ., ssims@yonsei.ac.kr)

*2 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

*3 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사 후 과정 (Member, Post Doc., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

*4 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

항강도를 산정하는 경우, 불규칙한 지진력을 Seed와 Idriss 등(1975)이 제안한 단순한 정현(sinusoidal)형태의 등가전단응력과 진동 재하횟수로 묘사하는 경우가 일반적이다. 일본의 경우, 이와 같이 실내진동시험에 기초하여 액상화 저항강도를 산정하는 것이 매우 일반화되어 있는 실정이며, 진동대시험(shaking table test)도 활발하게 수행되고 있다. 특히, 최근에는 실지진 시간이력을 재하한 진동대 시험의 수행을 통해 실제 지진하중하의 지반거동특성을 정확하게 규명하기 위한 실험적 연구가 심도있게 진행되고 있다.

본 연구에서는 정현하중이 아닌 실제 지진파 고유의 특성을 적용한 진동삼축시험에 기초하여 액상화 저항강도를 산정하고 이를 기존의 등가전단응력 개념을 통해 산정한 액상화 저항강도와 비교하고자 한다. 또한, 지진규모 및 지속시간의 변화에 따른 실지진 시간이력의 진동삼축시험을 통해 다양한 지진규모를 고려할 수 있는 지진규모별 수정계수(MSF, Magnitude Scaling Factor)를 제시하고 이를 최근 연구와 비교하고자 한다.

2. 등가전단응력 개념

일반적으로 지진 발생시 지반의 액상화 발생 가능성은 다음의 두 가지 사항을 비교함으로써 평가한다. 첫째, 지진에 의해 발생하는 전단응력을 산정하기 위한 지반응답해석과 둘째, 지반의 전단저항력을 산정하기 위해 임의의 지반심도를 나타내는 구속압에 대해 액상화를 발생시키는 다양한 반복변형 또는 반복응력의 실내 실험이다. 액상화 가능성은 현장에서 액상화가 발생할 때의 전단응력과 실내실험에서 재현한 시료가 액상화를 일으키거나 허용범위 내의 반복 변형률이 발생할 때의 전단저항력을 비교하여 평가한다. 이 비교에 있어서 기본적 문제는 전단저항력을 산정하기 위한 실내시험시 사용하는 하중은 등가의 진동하중인 반면, 실제 지반에서 발생하는 응력은 다양한 크기를 가지는 불규칙한 응력이라는 점이다. 이러한 불규칙한 지진하중을 일정한 진동전단응력으로 나타내는 것이 등가반복응력 개념으로 이는 지진에 의해 발생하는 불규칙한 전단응력 중에서 최대전단응력의 65%를 정현하중으로 적용하는 것이다. Seed와 Idriss 등(1975)은 그림 1에서와 같이 여러 지진기록의 분석을 통하여 지진규모에 따른 진동 재하횟수를 개략적으로 산정하였다. 이처럼 등가전단응력 개념에 의한 액상화 저항강도의 실험적 산정은 실험방

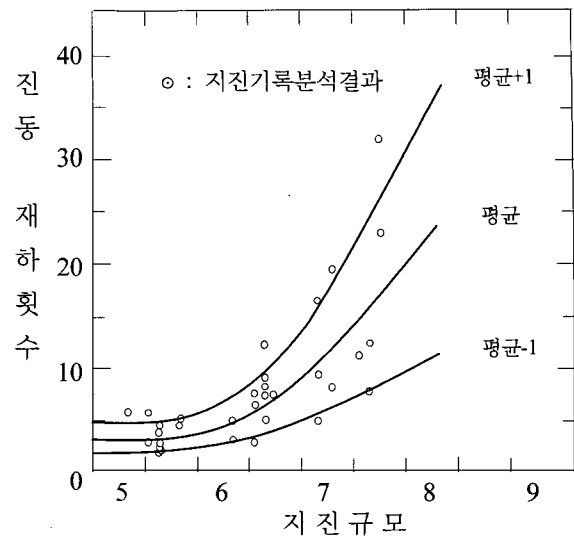


그림 1. 지진기록에 기초한 진동 재하횟수(Seed와 Idriss 등, 1975)

법의 간편성과 적용의 편리함으로 인해 일반적으로 사용되고 있지만 지진규모나 지속시간 등의 지진파가 가지고 있는 특성을 반영하지 못하고 있기에 지진 발생시 지반의 실제 동적거동을 파악할 수 없다는 단점이 있다. 현재는 실험기구의 발달과 함께 진동대 시험, 원심분리모형 실험 등과 같은 실내진동시험에 불규칙한 실제 지진하중을 적용한 실험이 수행되고 있지만 실험방법의 어려움으로 인해 실내 진동시험시 일반적으로 기존의 등가전단응력 개념을 사용하고 있다. 본 연구에서는 진동삼축시험에 실제 지진하중을 재하한 실험을 수행하였다.

3. 진동삼축시험

3.1 진동삼축시험기의 구성

본 연구에 사용된 시험기는 영국의 ELE사가 개발한 진동삼축시험기이다. 이 장비는 사용자가 임의의 진동하중을 작성하여 적용할 수 있고 70Hz의 높은 진동수까지 재하가 가능하여 실제 지진하중을 충분히 구현할 수 있는 장비이다. 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. 본 진동삼축시험기는 모든 제어를 컴퓨터로 수행하며, 결과를 자동으로 저장하는 자동화시

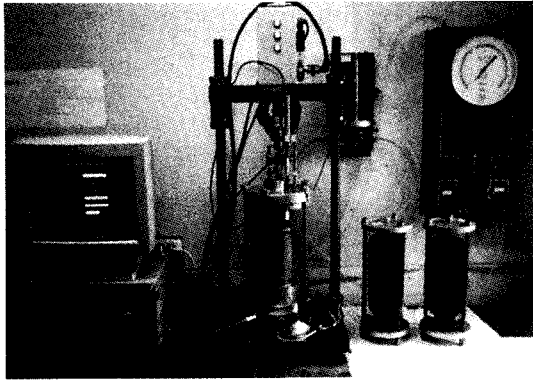


그림 2. ELE 진동삼축시험기

스텝으로 시험기의 모습은 그림 2와 같다.

3.2 기본물성 시험

3.2.1 상대밀도 시험

사질토 지반의 비배수 거동특성은 입자의 조밀한 정도 즉, 상대밀도에 따라 많은 차이를 보이게 된다. 지반의 상대밀도를 재현하기 위해서는 가장 느슨한 상태와 가장 조밀한 상태의 건조단위중량을 알아야 한다. 본 연구에서는 주문진 표준사를 이용하여 현장의 상대밀도를 재현하기 위해서 주문진 표준사의 최소 건조단위중량과 최대 건조단위중량을 산정하였다. 시험을 통해 산정된 결과는 표 1에 나타내었다.

3.2.2 입도분포 시험

과거 액상화 발생자료를 근거로 작성된 입도분포에 따른 액상화 가능성 영역에 주문진 표준사의 입도분포를 나타낸 결과 그림 3에서 보는 바와 같이 주문진 표준사의 입도분포는 빈입도이며 입자가 균질하여 액상화 현상이 발생하기 쉬운 조건을 가지고 있다. 그림 중 액상화 발생가능성과 관련된 한계선들은 Ishihara(1997)가 제안한 범위이다.

3.3 진동삼축시험 조건

본 연구에서 수행된 진동삼축시험의 제반조건은 표 2와 같다. 실내시험시 액상화가 발생하기 쉬운 현장상

표 1. 최소 건조단위중량과 최대 건조단위중량

| 최소건조단위중량 $\gamma_{d \min}$ (g/cm^3) | 최대건조단위중량 $\gamma_{d \max}$ (g/cm^3) |
|--|--|
| 1.39 | 1.60 |

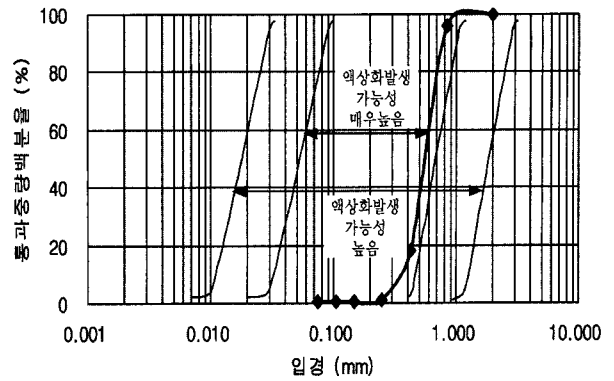


그림 3. 주문진 표준사의 입도분포 곡선

태를 재현하기 위해서 주문진 표준사를 대상으로 초기 상대밀도를 60%, 초기유효구속압을 100kPa로 정하였다. 시료의 거치방법으로는 수중에서 시료를 침강시켜 시료를 성형하는 수중침강법을 사용하였으며 이 방법은 재료의 분리 없이 연속적인 시료를 성형할 수 있는 방법이다. 수중침강법을 통해 시료를 거치하는 경우 초기상대밀도가 60%보다 낮아지면 시료의 상태가 불안정하여 실험이 어려워지므로 초기상대밀도는 중간정도의 조밀도를 나타내는 60%로 정하였다. 축하중은 과거 역사지진의 가속도 시간이력을 실험기에 맞게 변환하여 입력시킨 실지진파를 응력제어방식으로 재하하였다. 또한 지진파의 지속시간에 따른 영향을 알아보기 위해 지속시간을 8초, 16초, 그리고 24초로 변화시켜가며 시험을 수행하고 이때의 시간에 따른 축변형률의 변화를 분석하였다.

3.4 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

표 2. 진동삼축시험의 제반조건

| 종류 | 시험 조건 |
|----------|----------------|
| 하중종류 | 실지진파형(8개), 정현파 |
| 제어방식 | 응력제어방식 |
| 지속시간 (초) | 8, 16, 24 |
| 시료조건 | 포화, 비배수 |
| 시료성형방법 | 수중침강법 |

표 3. 진동삼축시험에 사용된 지진가속도 기록

| 지진파 | 지진규모 (M) | 지속시간 (sec) | 제 원 |
|-----------------|------------------------|------------|-------------------------|
| Loma Prieta | 8.1(M _w) | 40 | 1989년 미국 Loma Prieta |
| Tokachi-oki | 7.9(M _{JMA}) | 15 | 1968년 일본 Tokachi |
| Miyagi-ken-oki | 7.4(M _{JMA}) | 14 | 1978년 일본 Miyagi |
| El-Centro | 7.1(M _w) | 31 | 1940년 미국 Imperial Vally |
| Hyogo-Ken Nanbu | 6.9(M _{JMA}) | 26 | 1995년 일본 고베 |
| Big Bear | 6.5(M _w) | 35 | 1992년 미국 Big Bear Lake |
| Parkfield | 6.1(M _w) | 24 | 1966년 미국 Parkfield |
| Coyote Lake | 5.7(M _w) | 28 | 1979년 미국 San Martin |

지진규모의 실지진 시간이력을 선택하였다. 진동삼축시험시 사용된 지진파의 지진규모, 지속시간 및 제원은 표 3에 나타내었다. 표 3에서 M_w는 모멘트 규모, M_{JMA}는 일본 기상청에서 사용하는 지진규모를 나타낸다.

본 실험에서 사용된 지진파형 중 Tokachi-oki 지진파형과 Miyagi-ken-oki 지진파형은 편의상 각각 Hachinohe 지진파형과 Ofunato 지진파형으로 명명하였다.

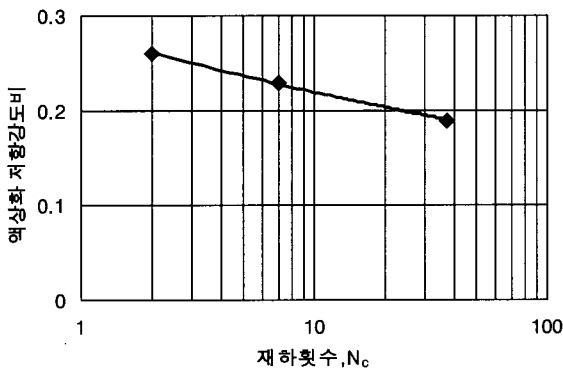


그림 4. 정현파형 시험시 재하횟수에 따른 액상화 저항강도비

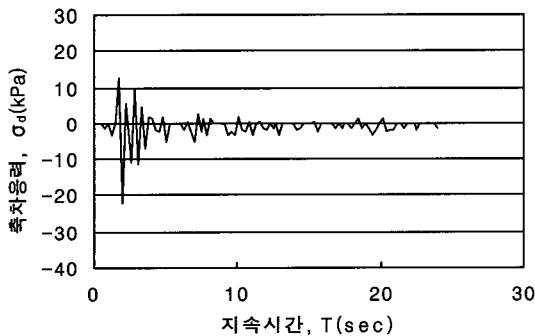


그림 5. Coyote lake 지진파형 (최대축차응력 22kPa)

4. 실험결과

본 연구에서는 기존의 정현파를 이용한 진동삼축시험 및 지진규모와 지속시간의 지진특성변화가 액상화 저항강도에 미치는 영향을 산정하기 위해 실지진하중을 이용한 진동삼축시험을 수행하였다.

4.1 정현파형 진동삼축시험 결과

주문진 표준사를 사용하여 초기상대밀도 60%, 초기 유효구속압 100kPa의 조건 하에서 정현파형 진동삼축시험을 수행하였다. 그림 4는 축하중의 크기를 변화시키면서 액상화 발생 재하횟수와 액상화 저항강도의 관계를 나타낸 것이다. 진동삼축시험과 같은 동적실험을 통해 지반의 액상화 저항강도비를 산정할 때에는 현장상태를 나타내기 위해 많은 보정을 실시한다. 그러나 본 연구에서는 실제 지진으로 인한 불규칙한 전단응력과 일정한 진동전단응력의 비교를 동일한 실험조건에서 수행하므로 이와 같은 보정은 시행하지 않았다.

4.2 지진규모에 따른 진동삼축시험 결과

본 실험에서는 지진규모 5.7에서 8.1 사이에 있는 8개의 지진가속도 기록을 선택하여 입력하중으로 작용시켰다. 지진규모와 지속시간의 지진특성 변화와 액상화 저항강도의 관계를 규명하기에 앞서 실지진하중 작용시 최대축차응력과 초기액상화 발생시점의 관계를 찾기 위한 시험을 수행하였다. 먼저 임의의 최대축차응력으로 실험을 수행하여 그 때의 잔류간극수압을 측정한다. 잔류간극수압이 초기유효구속압에 미치지 못할 경우 최대축차응력을 조금씩 증가시켜가며 반복시험을

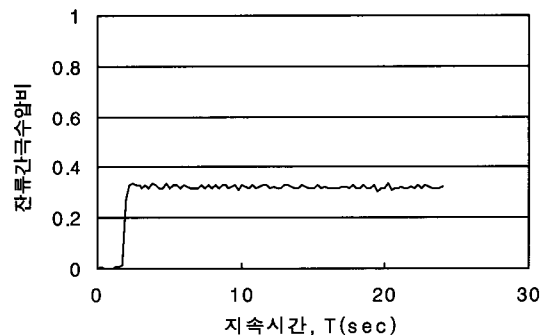


그림 6. 잔류간극수압비 (최대축차응력 22kPa)

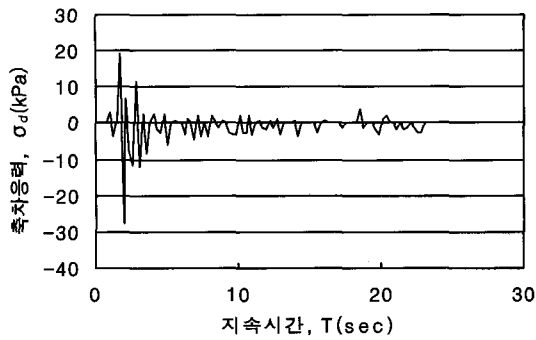


그림 7. Coyote lake 지진파형 (최대축차응력 28kPa)

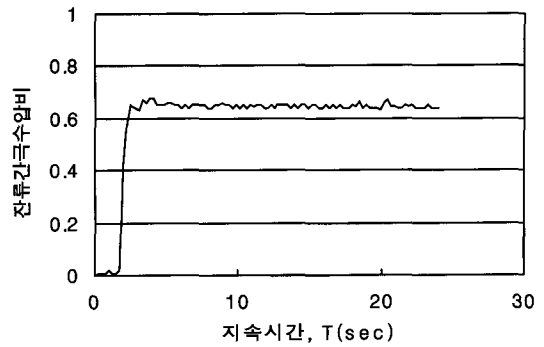


그림 9. 잔류간극수압비 (최대축차응력 28kPa)

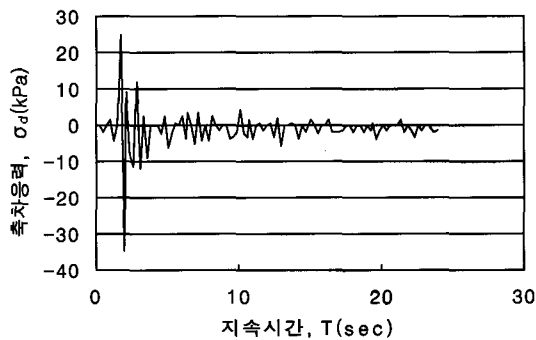


그림 8. Coyote lake 지진파형 (최대축차응력 35kPa)

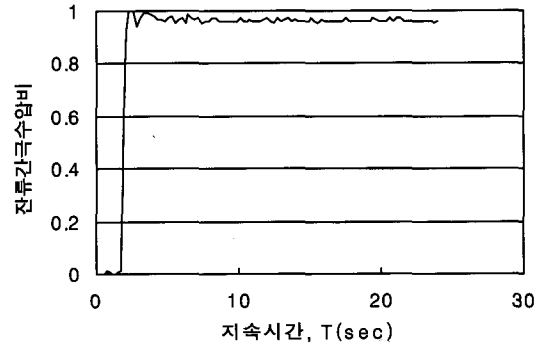


그림 10. 잔류간극수압비 (최대축차응력 35kPa)

수행하고 잔류간극수압이 초기유효구속압과 같아질 때의 최대축차응력을 액상화 발생 최대축차응력으로 정의한다. 이와 같은 과정에 따라 지진규모 5.7의 Coyote Lake 지진파형 실험을 시행한 결과, 지속시간에 따른 축차응력과 잔류간극수압비를 그림 5~10에 나타내었다. 축차응력은 양의 값이 압축응력, 음의 값이 인장응력을 나타낸다.

그림 5와 6은 최대축차응력을 22kPa로 했을 때 잔류간극수압이 31kPa임을 나타내고, 그림 7과 9는 28kPa의 최대축차응력을 작용시켰을 때 65kPa의 잔류간극수압이 발생됨을 나타낸다. 마지막으로 그림 8과 10은 35kPa의 최대축차응력을 작용시킨 결과 과잉간극수압이 100kPa에 이르러 액상화가 발생함을 알 수 있다. 이와 같은 과정에 의해 8개의 실지진파형 진동삼축시험 수행시 액상화 발생 최대전단응력비를 그림 11에 나타내었다.

그림 11에서 액상화가 발생할 때의 최대축차응력을 정리한 결과 지진규모가 증가할수록 액상화 발생 최대축차응력은 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구에 사용된 시험기는 지진파를 하중으로 작용시킬 때 최대 24초의 지속시간까지 시험이 가능하기 때문에 8개의 실지진

파형을 작용시킨 진동삼축시험시 지진파의 실제 지속시간에 상관없이 지속시간을 24초로 고정시키고 시험을 수행하였다. 8개의 실지진파형 진동삼축시험 결과에서 지진규모에 따른 액상화 발생 최대축차응력을 정리하여 표 4와 그림 12에 나타내었다.

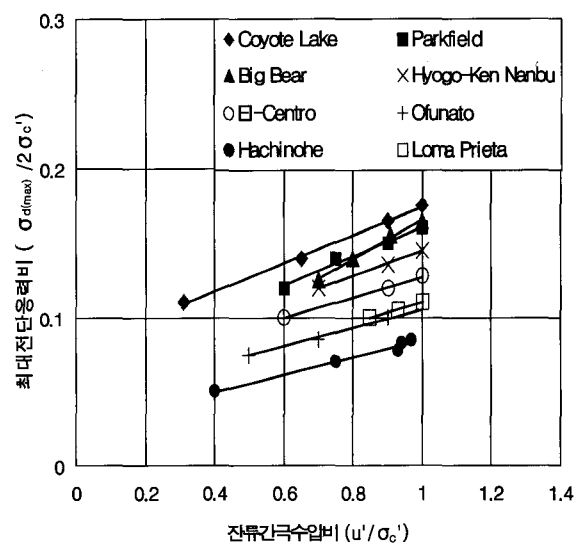


그림 11. 잔류간극수압비에 따른 최대전단응력비

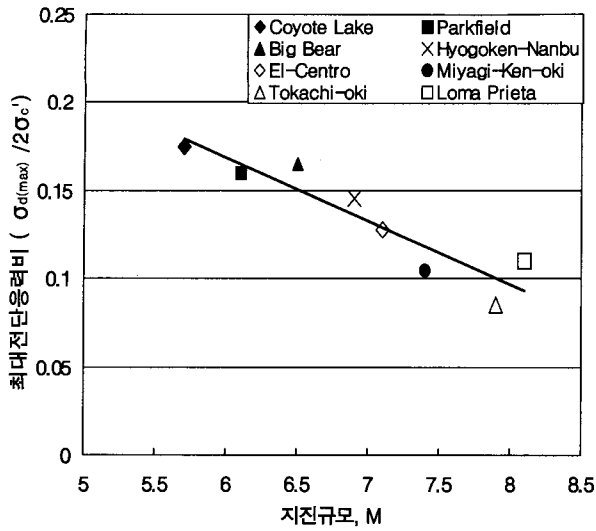


그림 12. 지진규모에 따른 액상화 발생 최대전단응력비

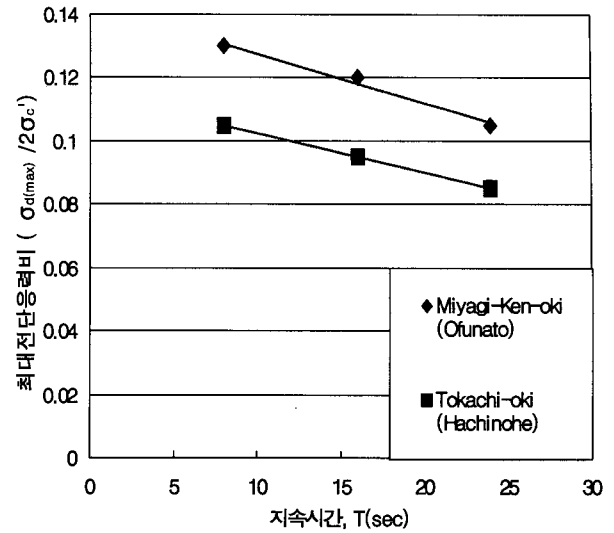


그림 13. 지속시간에 따른 액상화 발생 최대전단응력비

표 4. 지진규모에 따른 액상화 발생 최대축차응력

| 지진파 | 지진규모 | 액상화 발생 최대축차응력, $\sigma_{d(max)}$ (kPa) |
|-----------------|------|--|
| Loma Prieta | 8.1 | 22.0 |
| Hachinohe | 7.9 | 17.0 |
| Ofunato | 7.4 | 21.0 |
| El-Centro | 7.1 | 25.5 |
| Hyogo-Ken Nanbu | 6.9 | 29.0 |
| Big Bear | 6.5 | 33.0 |
| Parkfield | 6.1 | 32.0 |
| Coyote Lake | 5.7 | 35.0 |

표 5. 지속시간에 따른 액상화 발생 최대축차응력

| 지속시간 | 액상화 발생 최대축차응력, $\sigma_{d(max)}$ (kPa) | |
|------|--|--------------|
| | Hachinohe 지진파형 | Ofunato 지진파형 |
| 8 | 21 | 26 |
| 16 | 19 | 24 |
| 24 | 17 | 21 |

4.3 지속시간에 따른 진동삼축시험 결과

지속시간이 액상화 저항강도에 미치는 영향을 알아보기 위한 실지진파형 진동삼축시험을 수행하였다. 지속시간에 따른 액상화 발생 최대축차응력을 산정하기 위해 8개의 지진파형 중에서 Ofunato 지진파와 Hachinohe 지진파를 선택하여 지속시간을 8초, 16초로 변화시켜가며 실험을 수행하여 그에 따른 액상화 발생 최대축차응력을 산정하였다. 앞 절의 실험결과인 지속시간 24초일 때의 액상화 발생 최대축차응력까지 정리한 결과, 액상화 발생 최대축차응력은 지속시간이 8초가 증가할 때 약 2kPa 작아지는 것을 알 수 있었다. 이와 마찬가지로 Hachinohe 지진파형을 사용한 진동삼축시험에서도 지속시간이 8초가 증가할 때 액상화 발생 최대축차응력이 약 2kPa 작아짐을 알 수 있었다. 지속시간의 변화에 따른 액상화 발생 최대축차응력을 표 5에 정리하였고 이

결과를 다시 최대전단응력비로 환산하여 그림 13에 나타내었다.

앞 절의 지진규모에 따른 실지진파형 진동삼축시험은 지진파의 실제 지속시간에 상관없이 지속시간을 모두 24초로 고정시켜 수행한 실험결과이다. 따라서 지속시간을 24초로 고정시키고 수행한 실험결과에 실제 지속시간의 영향을 고려하여 실험결과를 다시 산정하였다. 표 6과 그림 14는 지진파의 실지속시간을 고려하여 산정된 실험결과를 나타낸다. 그림 14에서 보면 실지속

표 6. 실지속시간을 고려한 액상화 발생 최대축차응력

| 지진파 | 지진 규모 | 지속 시간 | 액상화 발생 최대축차응력, $\sigma_{d(max)}$ (kPa) | |
|-----------------|-------|-------|--|----------|
| | | | 지속시간 24초 | 실지속시간 고려 |
| Loma Prieta | 8.1 | 40 | 22.0 | 18.00 |
| Hachinohe | 7.9 | 15 | 17.0 | 19.25 |
| Ofunato | 7.4 | 14 | 21.0 | 23.50 |
| El-Centro | 7.1 | 31 | 25.5 | 23.75 |
| Hyogo-Ken Nanbu | 6.9 | 26 | 29.0 | 28.50 |
| Big Bear | 6.5 | 35 | 33.0 | 30.00 |
| Parkfield | 6.1 | 24 | 32.0 | 32.00 |
| Coyote Lake | 5.7 | 28 | 35.0 | 34.00 |

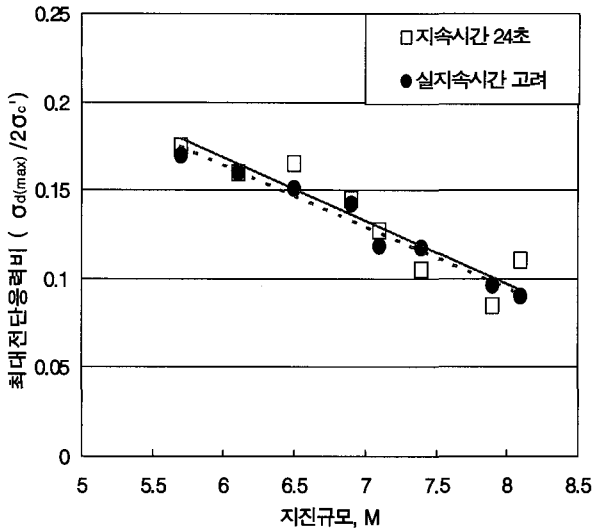


그림 14. 실지속시간을 고려한 액상화 발생 최대전단응력비

시간을 고려하여 산정된 결과와 고려하지 않은 실험 결과의 추세선은 큰 차이가 없지만 실지속시간을 고려하여 다시 산정한 결과가 추세선에 더욱 근접해 있는 것을 알 수 있다.

4.4 실지진파형 실험결과와 등가전단응력과의 비교

그림 15는 실지속시간을 고려한 실지진파형 진동삼축시험 결과와 등가전단응력 개념에 의해 산정된 액상화 저항강도비에 0.65를 곱한 것을 함께 나타낸 것이다. 그림 15에서 보면 정현파형을 사용했을 때의 액상화 저항강도비와 실지진파형을 작용시켰을 때의 액상화 발

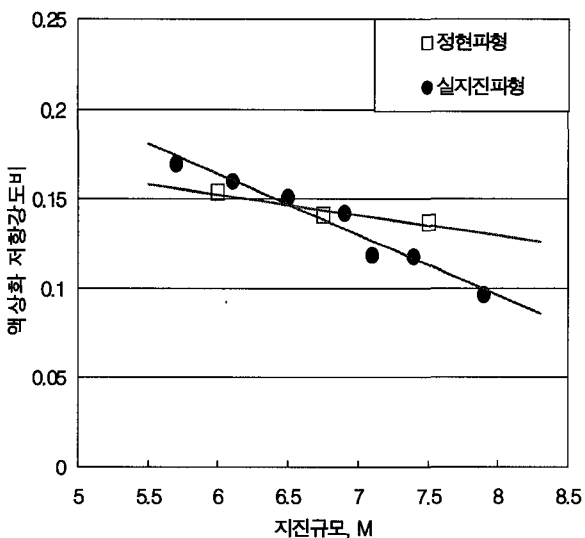


그림 15. 정현파형과 실지진파형 진동삼축시험결과의 비교

생 최대전단응력비는 지진규모 6.5에서 거의 일치하고 6.5보다 작은 지진규모에서 액상화 저항강도는 실지진파형 진동삼축시험 결과가 정현파형 진동삼축시험 결과보다 크게 산정되었다. 또한 6.5 이상의 지진규모에서 실지진파형을 사용했을 때의 액상화 저항강도는 정현파형을 사용했을 때보다 작은 값이 나왔다. 따라서 지진규모 6.5 이상에서 기존의 등가전단응력 개념을 사용한 진동삼축시험 결과는 액상화 저항강도를 실제 지진력이 작용했을 때보다 높게 산정하고 있음을 알 수 있다.

4.5 지진규모별 적정 수정계수의 산정

진동삼축시험과 같은 실내시험 외에 SPT, CPT와 같은 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 문헌조사를 통해 여러 지진특성을 고려한 지진규모별 수정계수를 산정하였다. 그림 16은 그림 14의 실지속시간을 고려한 지진규모에 따른 액상화 발생 최대전단응력비를 사용하여 지진규모별 적정 수정계수를 산정한 결과를 다른 연구자들의 결과와 함께 보여주고 있다.

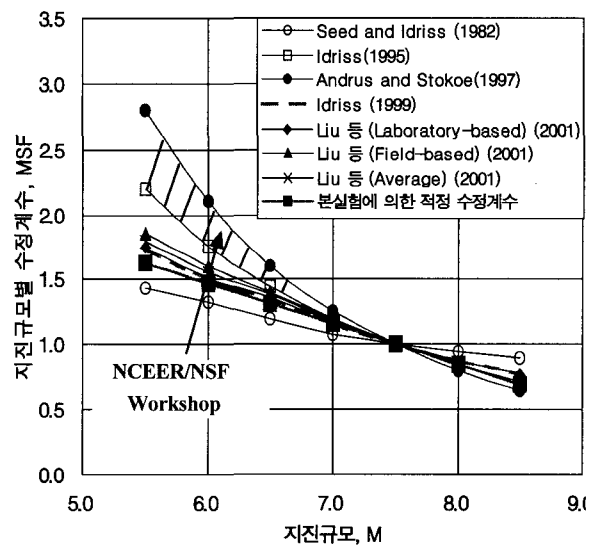


그림 16. 지진규모별 수정계수

그림 16에서 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.

5. 결론

본 연구에서는 액상화 저항강도 산정방법 중 가장 기본적으로 사용하는 등가전단응력 개념에 의한 액상화 저항강도의 산정에 대하여 검토하고 실제 지진과 같은 불규칙한 전단응력을 고려한 액상화 저항강도의 실험적 산정방법을 제안하였다. 지진규모 5.7에서 8.1 사이의 8개 지진가속도 기록을 입력하중으로 작용시킨 진동삼축시험을 수행하여 지진규모와 지속시간의 변화에 따른 포화사질토의 액상화 저항강도를 산정하였다. 또한 실험결과를 이용하여 액상화 평가시 사용하는 지진규모별 적정 수정계수를 제안하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 지진규모에 따른 실지진파형 진동삼축시험 결과, 지진규모가 증가할수록 액상화 발생 최대전단응력비는 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 지반에 큰 규모의 지진이 발생할수록 지반의 액상화 저항강도는 작아진다는 것을 의미한다. 지속시간에 따른 실지진파형 진동삼축시험 결과, 지속시간이 증가할수록 액상화 발생 최대전단응력비는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 지진규모의 증가와 마찬가지로 지진의 지속시간이 증가함에 따라 지반의 액상화 저항강도가 감소한다는 것을 의미한다. 또한 실제 지진규모와 지속시간을 모두 고려하여 산정한 결과 지진의 특성변화에 따른 액상화 저항강도의 경향이 보다 정확하게 나타남을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 수행한 실지진파형 진동삼축시험이 지진특성을 합리적으로 반영하고 있음을 확인하였다.
- (2) 실지진파형 진동삼축시험 결과에서 산정한 액상화 저항강도와 기존의 등가전단응력 개념에 기초한 액상화 저항강도를 비교해 본 결과, 지진규모 6.5 이상에서는 등가전단응력 개념에 기초한 액상화 저항강도가 크게 산정되었다. 이것은 지진규모 6.5 이상에

서 등가전단응력 개념에 의한 액상화 평가가 지반의 전단저항력을 실제보다 크게 산정하여 액상화 안전율이 과대평가되고 있음을 의미한다. 또한 지진규모 6.5 이하에서는 등가전단응력 개념에 의한 액상화 저항강도가 실지진력을 작용시켰을 때보다 낮게 산정되었고, 따라서 액상화 안전율을 실제보다 낮게 산정하는 비경제적 평가임을 확인할 수 있었다.

- (3) 실지진파를 적용시킨 진동삼축시험 결과를 이용하여 지진규모별 수정계수를 산정한 결과, 일반적으로 사용하고 있는 지진규모별 수정계수들보다 낮은 값이 산정되었다. 그러나 지진규모 등의 지진특성을 고려하여 산정된 지진규모별 수정계수들과는 유사함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 지진규모별 적정수정계수가 지진의 불규칙한 특성을 정확히 반영하고 있고 일반적인 지진규모별 수정계수를 사용하는 것은 지반의 액상화 저항강도를 실제보다 크게 산정하여 위험한 설계를 하고 있음을 알 수 있다.
- (4) 본 연구에서는 하나의 시료를 대상으로 지진파 고유의 지속시간이 아닌 수정된 지속시간을 적용하여 실험을 시행하였다. 현재 추가적인 연구를 수행중이며 시료의 종류, 상대밀도, 유효구속압, 입력지진파 등의 여러 변수들을 적용한 실험을 수행할 예정이다.

참고 문헌

1. Annaki, M. and Lee, K. L.(1977), "Equivalent Uniform Cyclic Concept for Soil Dynamics", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.103, pp.549-563.
2. Ishihara, K.(1993), "Liquefaction and Flow Failure during Earthquake", *Geotechnique*, Vol.43, No.3, pp.351-451.
3. Ishihara, K. and Yasuda, S.(1975), "Sand Liquefaction in Hollow Cylinder Torsion under Irregular Excitation", *Soils and Foundations*, Vol.15, No.1, pp45-59.
4. Liu, A. H., Stewart, J. P., Abrahamson, N. A., and Moriwaki, Y.(2001), "Equivalent Number of Uniform Stress Cycles for Soil Liquefaction Analysis", *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.127, No.12, pp.1017-1026.
5. Port and Harbour Research Institute, *Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land*, A. A. Balkema, 1997, pp.239-243.
6. Seed, H. B. and Idriss, I. M.(1971), "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.97, pp.1248-1272.
7. 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.
8. Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G.,

Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder, L. F., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson III, W. F., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B., and Stokoe II, K. H.(2001), "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 Engineering Division*, ASCE, Vol.127, No.10, pp.817-833.

(접수일자 2002. 6. 20, 심사완료일 2002. 8. 14)