

지진하중 주파수에 따른 액상화 거동 특성

Characteristics of Liquefaction Behavior with Earthquake Load Frequency

윤원섭*

Won-Sub Yoon*

〈Abstract〉

In this study, cyclic triaxial tests were performed for liquefaction characteristics according to earthquake loading frequency. The test period was tested for 0.1Hz, 0.2Hz, 0.5Hz, 1.0Hz, 1.5Hz. It was analyzed that the number of earthquake loading increases as the test result frequency increases. Therefore, additional study of the liquefaction evaluation method was needed considering the local characteristics of the high frequency earthquakes in Korea and the cyclic triaxial test frequency(0.1Hz), which is mainly used in the design.

Keywords : Cyclic triaxial tests, Liquefaction, Earthquake, Earthquake load frequency

* 교신저자, 정회원, 창신대학교 토목공학과 교수
E-mail: totoma13@cs.ac.kr

* Dept. of Civil Engineering, Chang-Shin University

1. 서론

최근 들어 대규모의 지진이 빈번히 발생되면서 지진에 대해 안전한 지역으로 평가받던 국내의 경우에도 지진에 대해 정부 및 국민들 모두가 지진에 대한 불안감을 느끼고 있다. 이러한 불안감의 원인은 지진계측기가 설치된 1978년 이후 발생한 지진 중 2016년 울산지진(규모 5.0), 경주지진(규모 5.8), 작년 포항지진(규모 5.4) 등 국내에서 발생되기 힘든 규모의 지진이 비교적 짧은 기간 내에 연속적으로 발생되어 정부 및 국민들이 지진에 대해 공포감을 가지게 되는 계기가 되었기 때문이다.

특히, 2017년 11월에 발생한 포항지진의 경우 계측기가 설치된 이후 발생한 지진 중 가장 많은 시설물 피해가 발생되어 지진에 대한 공포가 증폭되었으며, 내가 살고 있는 주택, 공공시설물, 학교, 원자력 시설물 등 내 주위의 주요 시설물의 지진에 대한 안정성을 국민 각자가 다시 한번 생각하고, 지진에 대비해야 된다는 국민적 의식이 고취되는 큰 계기가 되는 지진이였다. 또한 포항지진의 경우 시설물의 피해가 심각한 원인은 연약한 사질성 지반에서 발생하는 액상화 현상으로 인한 지반 침하가 원인으로 지목되고 있다. 지진 발생 이후 현장조사가 현재 진행 중이지만 허부 느슨한 모래지반에서 발생한 액상화 현상으로 비교적 강도가 큰 상부 지반의 균열 면을 따라 지표면으로 솟아 오른 현상을 봤을 때 액상화가 확실한 것으로 추정된다.

포항지진은 국내에서 액상화를 발생시킨 첫 사례가 되는 것으로 그 의미가 크다. 국내의 경우 액상화에 대한 많은 연구는 없는 편이며, 일본과 미국의 액상화 평가방법을 반영하여 국내 지반에서의 액상화 특성 위주의 연구가 주를 이루고 있다. 하지만 미국과 일본의 경우 액상화가 발생한

지역은 주로 연약지반구간이며, 국내의 연약지반보다 심도와 강도가 차이가 있어 그 기준을 그대로 적용하기에는 액상화 발생 안전성에 대한 평가 방법에 결과의 차이를 보이는 문제가 있을 것으로 판단된다. 특히, 미국, 일본에 비해 지반의 강도가 크고, 연약지반 심도가 얇아 지진이 발생되면서 진원에서 전달되는 지진파의 주기가 고주파수의 지진파의 특성으로 연약지반에 전달되기 때문에 미국과 일본에서 발생한 지진파와는 차이를 보이게 된다.

이러한 액상화 발생 대상 지반에서 액상화 평가는 간편예측과 상세예측으로 나뉘며, 간편예측에서 액상화 발생 가능성이 있는 지반 또는 내진 1등급 구조물인 경우 지진응답해석과 반복삼축시험을 이용하여 액상화 상세 평가를 수행한다. 액상화 저항능력비(반복전단저항능력비, Cyclic Stress Ratio, CSR)는 반복재하횟수에 따른 전응력으로 나타내는 액상화 저항능력비 특성곡선을 이용하여 산정한다[1].

액상화 저항능력비는 반복삼축시험에서 sine파 주기로 재하와 제하를 반복한 시험결과인 반복하중횟수와 시험조건인 구속압 등으로 결정되며, 시험 조건인 구속압과 반복하중 등의 응력수준에 따라 액상화 발생이 변화한다. 따라서 지진규모를 고려한 액상화 저항능력비는 적정수준의 전단응력비(축차응력의 0.5 / 초기유효구속압)를 포함한 4회 이상의 반복삼축시험을 통해 산정하는 것이 바람직하다. 저항능력비 곡선의 보정은 반복삼축시험에서 지진 및 현장상태의 표현을 위해 몇 가지 사항을 가정하고, 시험을 수행하므로 특성곡선에 이용되는 반복삼축시험 결과에 현장상태를 고려하기 위한 보정작업이 필요하다[2].

국내에서 액상화 상세 평가에 주로 이용되는 반복삼축시험의 경우 국내 기준은 없으며, 일반적으로 일본과 미국의 시험방법을 반영하여 시험하고 있다. 일본의 반복삼축압축시험규정³⁾에서 반복

하중 주기는 0.1Hz에서 1Hz사이로 제안하고 있으며, 국내의 경우에도 이 반복하중 주기의 범위 내에서 공압에 의한 하중을 제하하는 장비 특성상 장비에 무리가 가지 않는 반복하중 주기인 0.1Hz를 적용하여 시험하고 있다. 하지만, 국내의 지진과 발생특성을 고려하여 국내에서도 액상화 반복하중 주기에 따른 별도의 연구 진행은 필요하다. 또 국내의 지진파는 고주파수로 1Hz 이상의 주기를 고려한 경우의 거동 특성에 대한 연구도 추가로 필요하며, 이에 대한 연구는 현재 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 액상화 평가방법 중 상세예측방법에 대해 연구하고자 한다. 상세예측에 이용되는 결과값은 액상화저항능력비로 이 결과는 반복삼축압축시험에 의해 결정되며, 국내의 경우 일반적으로 반복삼축압축시험에서 반복하중 주파수는 0.1Hz를 주로 사용하고 있다. 0.1Hz를 사용하는 이유는 반복삼축시험의 경우 공기압을 이용하여 반복하중을 가하는데, 주기가 크면 장비에 무리가 많이 가기 때문에 국내에서는 주로 0.1Hz를 사용하고 있는 실정이다. 0.1Hz의 경우 10초의 간격으로 반복하중을 주는 경우로 국내의 지진의 경우 고주파수의 지진 발생이 일반적인 특징으로 저주파수의 반복삼축압축시험 결과를 이용한 액상화 상세예측은 국내 지진 특성에 맞지 않은 액상화 예측결과를 도출할 가능성이 있다.

이에 액상화저항능력비 값을 다양한 주파수 크기에 따라 분석할 예정이다. 액상화저항능력비의 경우 기존 연구에서 결과값의 차이가 없다는 0.1Hz에서 1Hz 사이의 값 중(0.1Hz, 0.2Hz, 0.5Hz)을 이용하여 주기에 따른 액상화저항능력비의 변화를 분석하였으며, 주기에 따른 반복하중 횟수 크기에 따른 분석은 0.1Hz에서 1.5Hz사이의 주기 값(0.1Hz, 0.2Hz, 0.5Hz, 1.0Hz, 1.5Hz)를 이용하여 동일한 상대밀도와 구속하중에서 반복하중 횟수 크기의 변화에 대해 분석하였다. 이 결과를 토대

로 주기에 따른 액상화 발생 특성을 비교 분석할 것이다.

2. 시험내용

본 연구에서는 반복하중 주기에 따른 액상화 저항 특성을 파악하기 위해 주문진 표준사 시료를 이용하여 주기에 따른 거동 특성을 비교하였다. 시험항목으로는 상대밀도시험과 반복삼축시험을 실시하였다. 표준사는 사질토로 상대밀도에 따라 특성이 달라질 수 있어 상대밀도 조건을 통일하여 시험을 실시하였다. 연구에 사용된 표준사는 Fig. 1과 같다.



Fig. 1 Sample view of standard sand

2.1 상대밀도시험

사질토 지반의 물리·역학적 특성은 입자의 조밀한 정도인 상대밀도에 따라 많은 차이를 보이게 된다. 지반의 상대밀도를 재현하기 위해서는 가장 느슨한 상태와 가장 조밀한 상태의 건조단위중량을 알아야 한다. 현장의 상대밀도를 재현하기 위해서는 최소 건조단위중량과 최대 건조단위중량을 ASTM D4254-91, ASTM D4253-93의 방법에 기초하여

시험을 실시한다. 본 연구에서는 최대 상대밀도 3회, 최소 상대밀도 3회를 측정하여 평균한 값으로 최대 상대밀도, 최소 상대밀도 값을 각각 결정하여 50%의 상대밀도에 해당하는 건조단위중량을 계산하여 반복삼축시험에 사용하였다.

Table 1은 상대밀도시험의 결과이며, Fig. 2는 시험에 사용된 표준사의 입도분포곡선이다. Table 1의 상대밀도시험 결과 최대건조단위중량은 15.4 kN/m³이며, 최소건조단위중량은 12.49kN/m³으로 나타났다. 최대건조단위중량과 최소건조단위중량을 이용하여 50%에 해당하는 표준사의 건조단위중량을 계산하면 13.80kN/m³의 결과로 도출하였으며, 이 값을 반복삼축시험에 적용하였다. Fig. 2는 시험에 사용된 표준사의 입도분포곡선으로 SP에 해당하는 입도로 나타났다.

Table 1. Relative density test results

| division | γ_{dmax} (kN/m ³) | γ_{dmin} (kN/m ³) | $\gamma_d(50\%)$ (kN/m ³) |
|---------------|---|---|--|
| Standard sand | 15.42 | 12.49 | 13.80 |

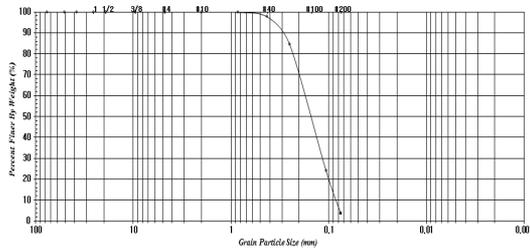


Fig. 2 Grain size distribution curves

2.2 반복삼축시험

대상지반의 액상화 간이평가 시 액상화에 취약한 지반인 경우 또는 내진 1등급 구조물인 경우 지진응답해석과 실내 반복삼축시험을 이용하여 액상화 상세 평가를 수행한다.

액상화 저항능력비(반복전단저항능력비, Cyclic Stress Ratio, CSR)는 진동재하횟수에 따른 진응력으로 나타내는 액상화 저항능력비 특성곡선을 이용하여 산정한다. 액상화 저항능력비 특성곡선은 3수준 이상의 반복 전단응력비(τ_d/σ'_v)를 변화시켜 수행된 실내 반복삼축시험결과를 토대로 도시하며, 특성곡선에 이용되는 실내 반복삼축시험 결과는 현장지반조건 및 지진특성 등을 고려한 보정작업이 수행되어야 한다. 액상화 저항능력비는 특성곡선에서 지진규모 6.5에 해당하는 진동재하횟수 10회 시의 값으로 정한다. $0.65\tau_{max}$ 는 불규칙한 지진하중을 실내시험에 사용하는 정현하중으로 변환하는 방법으로 여기서 τ_{max} 는 실제 지진의 최대 전단응력이다. Seed and Idriss는 지진기록과 등가진동재하횟수, 지진규모와 등가진동재하횟수의 관계를 Fig. 3와 같이 제안하였다(Seed et al., 1975).

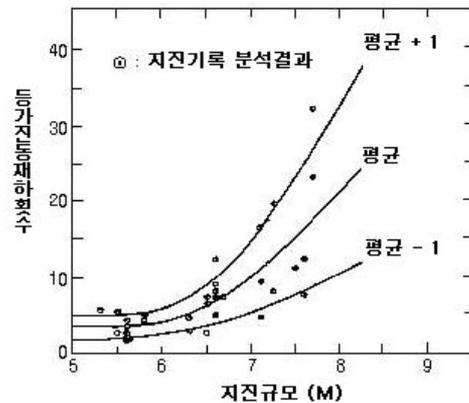
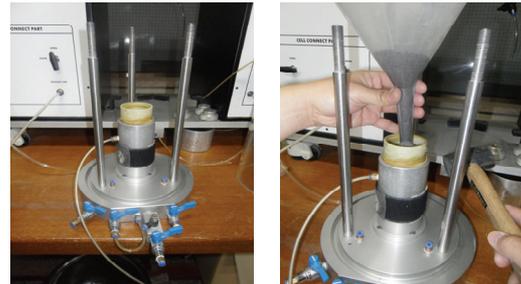
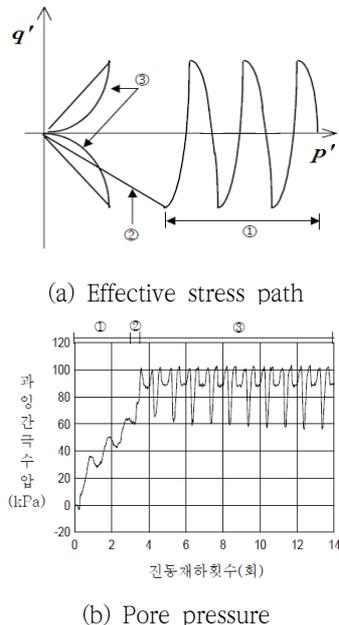


Fig. 3 Earthquake records and equivalent cyclic loads(Seed et al., 1975)

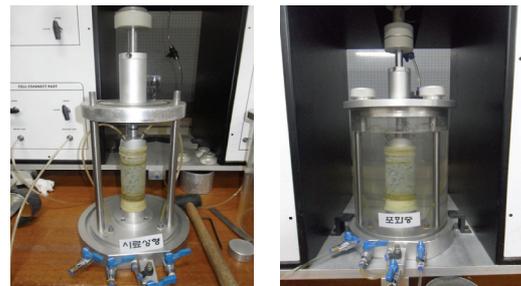
액상화 저항능력비의 산정은 반복삼축시험에서 일반적으로 정현파의 반복하중을 주기적으로 재하하며, 응력수준에 따라 액상화 발생시기가 변화한다. 따라서 지진규모를 고려한 액상화 저항능력비

는 적정수준의 전단응력비(축차응력의 0.5 / 초기 유효구속압)를 포함한 4회 이상의 반복삼축시험을 통해 산정하는 것이 바람직하다. 저항응력비 곡선의 보정은 반복삼축시험에서 지진 및 현장상태의 표현을 위해 몇 가지 사항을 가정하고, 시험을 수행하므로 특성곡선에 이용되는 반복삼축시험 결과에 현장상태를 고려하기 위한 보정작업이 필요하다. Fig. 4는 반복삼축시험 시의 거동상태로서 Fig. 4(a)는 유효응력경로이며, Fig. 4(b)는 반복하중재하횟수에 따른 간극수압의 증가를 보여주고 있다. 일반적인 반복삼축시험에 있어서 등방압밀 하중하의 토립자 내부의 응력변화 및 과잉간극수압의 동적 거동변화를 살펴보면 Fig. 4과 같이 거동변화를 3부분(①점진적 응력감소, ②급진적 응력감소, ③액상화 후 파괴거동)으로 구분할 수 있으며, 응력경로에서와 같이 급진적응력감소의 상태 변화를 나타내는 시점부터 실제적인 초기 액상화가 발생하는 것으로 정의하였다(Choi, 2003).

일반적으로 반복삼축시험은 사질토의 액상화 저항력을 판단하기 위해 사용되는데, 본 연구에 사용한 반복삼축시험장치는 GEO TM사의 반복삼축 시험장치를 사용하였다. 시험에 사용된 시료의 상대밀도는 표준사 상대밀도시험의 결과를 이용하여 상대밀도 50%에 해당하는 시료의 양을 사용하였으며, 재하 주파수는 0.1Hz, 0.2Hz, 0.5Hz, 1.0Hz, 1.5Hz에 대해 실시하였다. 액상화저항응력비의 변화를 분석하기 위해서 0.1Hz, 0.2Hz, 0.5Hz의 반복주기하중에 구속압밀하중은 40kPa, 50kPa, 60kPa를 적용하여 시험하였다. 반복하중 주기에 따른 거동특성을 분석하기 위해서는 구속압밀하중 50kPa에 0.1Hz, 0.2Hz, 0.5Hz, 1.0Hz, 1.5Hz의 반복하중주기를 적용하였다.



(a) Membrane setting (b) Sample forming



(c) Sample molding complete (d) Sample saturation complete

Fig. 4 Behavior of saturated sand soil under isotropic constraints subjected to cyclic loading(Choi, 2003)



(e) Sample consolidation (f) Cyclic loading

Fig. 5 Cyclic Triaxial Test Process

반복삼축시험 과정은 Fig. 5와 같다. 시험과정은 시료성형 후 포화, 압밀, 반복하중재하의 과정을 거치며, 시료의 성형은 시료의 직경과 높이를 측정하여 상대밀도에 해당하는 시료의 중량을 산정하여 시료 성형을 실시하였다. 반복삼축시험장치는 크게 하중을 재하하고, 제거하는 부분인 기어부분과 시료가 거치되고, 압력을 가하는 압력실과 기기의 제어 및 각종 결과 data를 수집하는 컴퓨터로 구분된다. 기어부분은 메인모터 부분과 서브모터로 구분되며, 서브모터는 작은 기어가 모여있는 형태를 가지고 있어 축변위의 속도를 빠르게 하거나 느리게 하는 등의 축변위 속도의 조절할 수 있다.

3. 시험 결과 분석

본 연구에서는 가장 일반적인 모래시료인 표준사를 이용하여 반복하중 주기에 따른 액상화저항응력비와 액상화 발생 반복하중 횟수에 대해 분석하였으며, 결과는 다음과 같다.

3.1 주기에 따른 액상화저항응력비

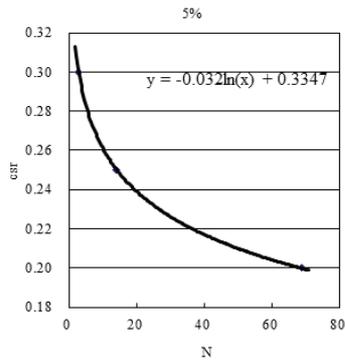
Table 2, Fig. 6, Fig. 7은 반복하중주기(0.1Hz, 0.2Hz, 0.5Hz)에 따른 액상화저항응력비 결과이다. Fig. 5는 변형률 5%에 해당하는 액상화저항응력비이며, Fig. 6은 변형률 10%에 해당하는 액상화저항응력비이다. 시험결과 일반적으로 액상화 발생 변형률인 5%에서는 0.1Hz에서 0.5Hz까지 액상화저항응력비의 차이는 없었으나, 일반적인 허용범위 이내의 변형률인 10%의 결과에서는 0.1Hz보다 0.2Hz와 0.5Hz에서 0.005정도 액상화저항응력비가 증가되었다.

Table 2. Result of Cyclic Stress Ration

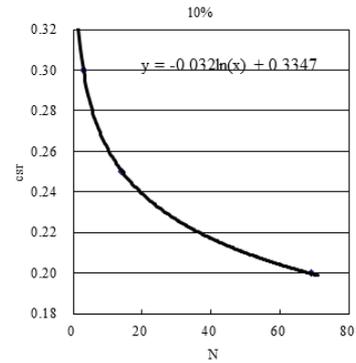
| division | | Cyclic Stress Ration, CSR(N=10) | Cyclic Stress Ration, CSR(N=20) |
|----------|-----|---------------------------------|---------------------------------|
| 0.1Hz | 5% | 0.261 | 0.239 |
| | 10% | 0.261 | 0.239 |
| 0.2Hz | 5% | 0.260 | 0.238 |
| | 10% | 0.265 | 0.240 |
| 0.5Hz | 5% | 0.262 | 0.240 |
| | 10% | 0.266 | 0.243 |

큰 차이는 없으나 일본의 기준을 준용하고 있는 국내의 반복삼축시험 특성상 0.1Hz에서 1.0Hz의 범위에서는 결과의 차이가 없어 이 범위 내의 어떤 주기로 시험을 해도 무방하다는 일본 기준³⁾의 재검토와 함께 국내 적용 시 주기가 필요하였다. 또 결과값의 변화가 작지만 실무에서 액상화저항응력비는 0.005의 결과로 현장의 조건에 따라 액상화 안전율에 문제가 발생할 수 있다. 따라서 액상화 주기에 따른 액상화저항특성을 고주파수의 지진이 주로 발생하는 국내 지진 발생특성에 따른 추가 연구가 필요하였다.

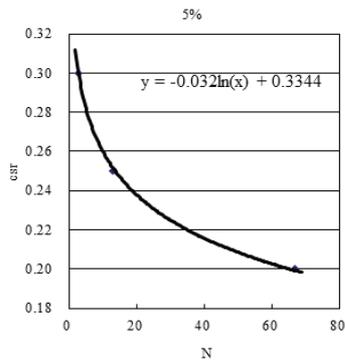
반복하중횟수 20회에 해당하는 액상화저항응력비



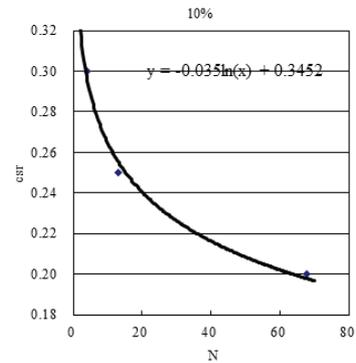
(a) 0.1Hz



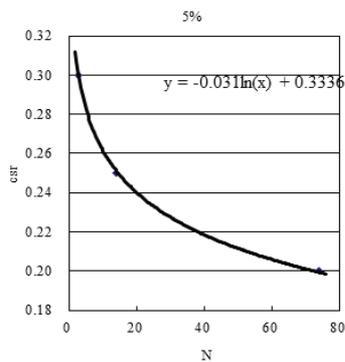
(a) 0.1Hz



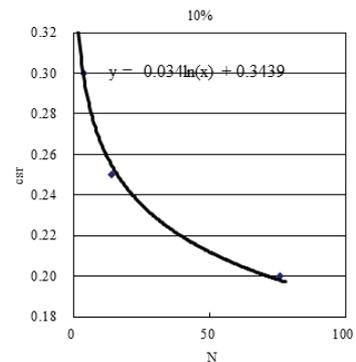
(b) 0.2Hz



(b) 0.2Hz



(c) 0.5Hz



(c) 0.5Hz

Fig. 6 Cyclic Resistance Ratio(5%)

결과 변형율 5%에서는 주기가 증가할수록 0.001의 액상화저항응력비 증가가 나타났으나, 10%의 변형율에서는 0.004정도의 액상화저항응력비 차이가 나타났다. 10회의 결과보다는 0.001정도 작게 발생되었으

Fig. 7 Cyclic Resistance Ratio(10%)

나, 주기가 증가할수록 액상화저항응력비는 증가되는 것으로 분석되었다. 국내의 경우 지진규모 6.5의 반복 하중인 10회의 결과를 주로 사용하기 때문에 20회의 결과보다 액상화 평가에 주의가 필요하였다.

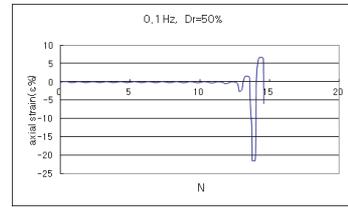
3.2 주기에 따른 반복하중 횟수

Table 3, Fig. 8, Fig 9는 반복하중 주기 0.1Hz, 0.2Hz, 0.5Hz, 1.0Hz, 1.5Hz와 상대밀도 50%, 구속하중 50kPa에서의 반복삼축시험 결과이다. 시험결과 반복하중주기는 0.1Hz에서 0.5Hz에서는 반복하중주기는 약 13회로 차이는 없었으나, 1.0Hz이상에서는 반복하중주기가 15회 이상으로 급격히 증가하였다. 특히 1.5Hz에서는 약 19회로 반복삼축시험에서 국내의 지진특성을 고려하여 높은 주기를 적용하기에는 결과의 차이가 발생할 것으로 분석되었다. 또한, 이는 일본 토질공학회에서 제안한 반복삼축시험 규정³⁾ 내용과도 상이한 결과였다. 따라서, 반복하중주기가 증가할수록 반복하중의 횟수가 증가하여 최종적인 액상화저항응력비가 상이하게 나타나기 때문에 국내 지진 주기에 따른 액상화저항응력비의 수정 및 실무 적용 방안에 대한 추가적인 연구가 필요하였다.

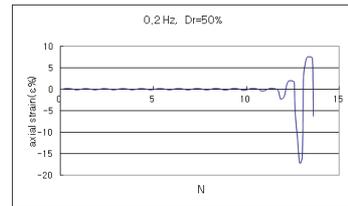
3.3 비교분석

국가에서 표준으로 정하고 있는 모래시료인 표준시료를 대상으로 반복하중 주기에 따른 액상화저항특성에 대해 연구하였으며, 시험결과를 종합·비교하면 다음과 같다. 국내의 반복삼축시험 기준이 정립되지 않아 일본의 기준을 준용하고 있는 국내의 액상화저항응력비 산정에서 반복하중 주기에 따른 추가적인 연구는 필요하였다.

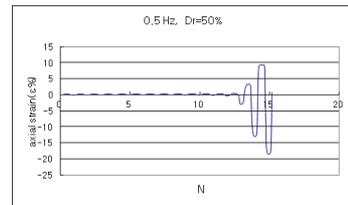
국내에서는 주로 액상화저항응력비 산정을 위해 주로 0.1Hz의 반복하중을 재하고 있는데, 이는 고주파수의 지진하중이 발생되고 있는 국내 지진 특성을 고려하지 않은 시험방법으로 액상화저항응력비 산정 및 실무 적용 시 정확한 액상화 발생 예측과 평가는 반복하중 주기에 따라 상이한 결과



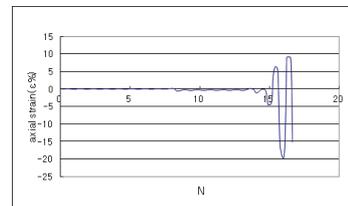
(a) 0.1Hz



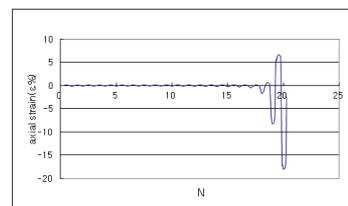
(b) 0.2Hz



(c) 0.5Hz

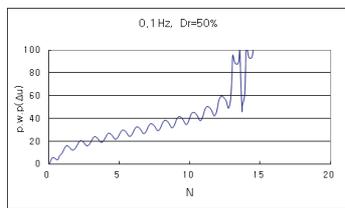


(d) 1.0Hz

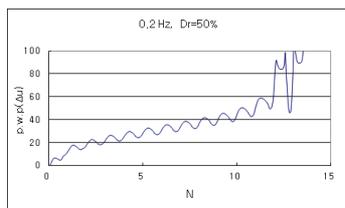


(e) 1.5Hz

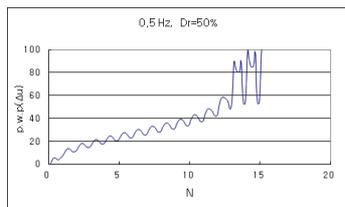
Fig. 8 Number of Cycles(Axial strain-dev)



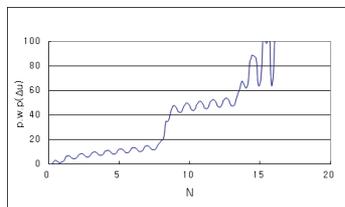
(a) 0.1Hz



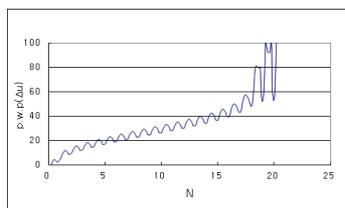
(b) 0.2Hz



(c) 0.5Hz



(d) 1.0Hz



(e) 1.5Hz

Fig. 9 Number of Cycles(Pore Pressure)

를 도출할 수 있다. 따라서 반복하중주기에 대한 명확한 기준과 방법을 제안하기 위한 다양한 추가적인 연구의 진행이 필요하였다.

반복하중주기에 따른 액상화저항응력비 산정결과 낮은 반복하중 주기에서는 액상화 발생 반복횟수는 차이가 없었다. 그러나 높은 반복주기에서는 액상화가 발생하는 시점의 반복하중 횟수가 급격히 증가하였다.

이는 표준사 시료에 국한되는 결과이지만, 액상화저항응력비 산정 시 국내 특성에 맞는 보정방법의 제안이나, 일본의 기준에 대한 보정 혹은 액상화저항응력비 산정에 대한 별도의 적용식의 제안도 필요한 것으로 판단되었다. 또 본 연구의 경우 장비에서 재하가 가능한 주파수 범위로 제한하여 시험하였기 때문에 추가적인 시료 종류, 반복하중주기, 시료 조건 등에 따른 시험과 해석 연구는 필요하였다.

Table 3. Result of Number of Cyclic loads

| division | | Number of Cycles, N | Cyclic deviator stress (kPa) | Cyclic Stress Ration, CSR |
|----------|-----|---------------------|------------------------------|---------------------------|
| 0.1Hz | 5% | 12 | 50 | 0.250 |
| | 10% | 12 | | |
| 0.2Hz | 5% | 13 | | |
| | 10% | 13 | | |
| 0.5Hz | 5% | 13 | | |
| | 10% | 14 | | |
| 1.0Hz | 5% | 15 | | |
| | 10% | 15 | | |
| 1.5Hz | 5% | 18 | | |
| | 10% | 19 | | |

4. 결론

본 연구에서는 다양한 반복하중 주기(0.1Hz, 0.2Hz, 0.5Hz, 1.0Hz, 1.5Hz)에 따른 반복삼축압

축시험을 실시하였으며, 국가에서 표준으로 정한 모래시료인 표준사에 대한 반복삼축압축시험의 결과를 분석한 내용은 다음과 같다.

1. 반복하중 주기에 따른 액상화저항응력비 산정결과 5% 변형율에서는 결과 차이가 없었으나, 10% 변형율에서는 반복하중횟수 10회의 경우 0.2Hz, 20회의 경우 0.5Hz에서 액상화저항응력비 값이 증가하는 것으로 분석되었다.
2. 또한, 반복하중주기에 따른 액상화 발생 반복하중횟수를 분석한 결과에서도 0.5Hz까지는 반복하중횟수의 증가가 없었으나, 1.0Hz 이상에서는 반복하중횟수가 급격히 증가하여 액상화저항응력비 산정 시 그 결과가 상이할 것으로 분석되어 시험에 적용되는 반복하중주기에 대한 명확한 기준과 방법 제안이 필요하였다.
3. 일반적으로 기존의 규정에서 0.1Hz에서 1.0Hz의 반복하중주기에서는 시험의 결과가 크게 차이가 없어 이 범위에서 선택적으로 반복하중주기를 사용되어도 무방하였으나, 고주파수의 지진 발생특성을 보이는 국내에서는 반복하중주기에 대한 기준 및 보정방안 등의 추가적인 연구가 필요하였다.

본 연구는 특정 반복하중주기와 시료의 조건에

서 액상화저항응력비와 반복하중횟수의 시험결과로 국내의 지진특성이 고려되는 액상화저항응력비 산정을 위해서는 시료조건, 주기조건, 규정조건 등을 고려한 추가 연구가 필요하였다.

사 사

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2018R1D1A1B07043961).

참고문헌

- [1] Seed, H.B., Idriss, I.M., Makdisi, F., Banerjee, N., Representation of Irregular Stress Time Histories by Equivalent Uniform Stress Series in Liquefaction Analyses, University of California, Berkeley, EERC Report No.UCB/EERC, pp. 75~29, 1975.
- [2] Choi, J. S., Development of new analytical methods for the dynamic behavior of fully saturated sands based on the Disturbed State Concept (DSC), Ph.D. Thesis, Yon-Sei University, 2003. (in Korean with English abstract)
- [3] The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, JSF T 541-1990, 1990.

(접수: 2019.10.25. 수정: 2019.11.22. 게재확정: 2019.12.05.)