

## 이방 구속 조건에서 실지진 하중을 이용한 액상화 저항강도 특성 분석 A Study on the Liquefaction Resistance of Anisotropic Sample under Real Earthquake Loading

이재진<sup>1)</sup>, Chae-Jin Lee, 정상섭<sup>2)</sup>, Sang-Seom Jeong, 김수일<sup>3)</sup>, Soo-Il Kim

<sup>1)</sup> 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

<sup>2)</sup> 연세대학교 토목공학과 정교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

<sup>3)</sup> 연세대학교 토목공학과 명예교수, Emeritus Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

**SYNOPSIS :** In this study, cyclic triaxial tests were performed with the samples which were anisotropically consolidated using irregular earthquake loading to consider in-situ condition and seismic wave. The consolidation pressure ratio( $K$ ) was changed from 0.5 to 1.0. The Ofunato and Hachinohe wave are applied as irregular earthquake loading and liquefaction resistance strength was estimated from excess pore water pressure(EPWP) ratio.

As results of the cyclic triaxial tests, buildup of EPWP ratio increased as  $K$  value increased. It shows, that the isotropically consolidated sands is more susceptible to liquefaction than anisotropically consolidated sands under equal conditions such as confining pressure and dynamic loading.

**Keywords :** liquefaction resistance strength, earthquake loading, cyclic triaxial test, anisotropic condition, excess pore water pressure

### 1. 서론

액상화 평가 시 안전율은 실내시험으로 정해지는 액상화 저항강도를 지반응답해석에 의한 전단응력으로 나누어서 산정한다. 액상화 저항강도를 산정하기 위한 실내시험 수행 시 대부분의 경우 등가전단응력으로 표현된 단순한 형태의 정현하중을 사용한다. 이 때 실제 지반상태를 고려하여 액상화 저항강도를 판단하기 위해 보정과정을 거친다. 그 중 많이 사용되는 시험인 진동삼축시험은 등방구속조건상태의 시료에 정현파를 이용하여 수행하고 일정한 보정계수를 사용하여 액상화저항응력비 곡선을 구한다. 그러나 실내시험에서 모사한 구속압과 하중은 실제 지반 내 응력 상태와 실지진 하중과는 차이가 있어 정확한 액상화 저항강도 산정을 위한 적합한 평가방법의 필요성이 대두되고 있다.

본 연구에서는 지반의 응력상태와 동하중을 실제 지반 및 지진하중과 가깝게 모사하기 위하여 다양한 압밀 응력비( $K$ )조건으로 시료를 구속 시킨 후 실지진 하중을 이용하여 진동삼축시험을 수행하였다.

### 2. 이방 구속 조건에서의 액상화 저항강도

액상화 저항강도 산정 시 수행하는 진동삼축시험은 지반의 심도를 고려하여 등방 조건으로 유효구속압을 설정한 후 정현하중을 재하 한다. 현재 액상화 평가 시 지반의 응력 상태를 보정하기 위한 계수로는  $(1+2K_0)/3$ 를 사용하고 있다(PHRI, 1997). 즉 등방구속조건에서의 액상화 저항강도가 이방 구속 조건보다 크다는 전제하에 안전측으로 보정한다. 그러나 몇몇 연구에서 이방 구속 조건의 시료가 더 큰 액

상화 저항강도를 보임을 확인 할 수 있다.

Ishihara와 Li(1972)는 포화된 사질토에서 삼축비틀전단시험을 수행하였다. 압밀 응력비( $K$ )를 변화시키면서, 시료에 횡방향 변위가 일어나지 않게 구속시킨 후(Anisotropically Consolidated Laterally Confined) 하중을 재하 한 결과와 횡방향 변위를 구속시키지 않고 하중을 재하 한(Anisotropically Consolidated) 결과를 그림 1에 나타내었다.

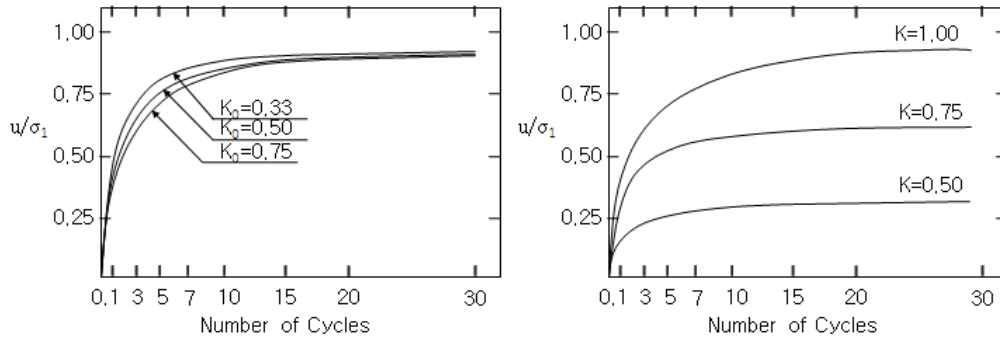


그림 1. Result of Anisotropically Consolidated Laterally Confined and Anisotropically Consolidated Tests (Ishihara, 1972)

압밀 응력비( $K$ )가 작을수록 즉, 등방 조건으로 압밀된 시료보다 이방 조건으로 압밀된 시료가 오히려 더 과잉간극수압비 발현 정도가 작다.

Erguvanli 등(1983)은 사질토에서 초기 응력 조건이 액상화 저항강도에 미치는 영향을 연구 하였다. 그결과 이방 압밀된 시료가 등방 압밀된 시료보다 부피 변형률이 더 적기 때문에 과잉간극수압 발현이 더 작게 나타나고 따라서 액상화 저항강도가 더 크다고 했다.

### 3. 시험 조건

진동삼축시험 시 대상 시료는 주문진 표준사를 이용하였으며 액상화가 발생하기 쉬운 지반심도와 재현가능한 지진파를 고려해서 초기유효구속압 100 kPa, 50 kPa, 상대밀도 50%로 한정하여 시험을 수행 하였다. 시료는 직경 70 mm 높이 135 mm의 원주형 시료를 사용하였다. 시험기기는 불규칙한 전단응력을 재현할 수 있는 정밀한 진동삼축시험기를 사용하였다.

시험 시 사용한 하중은 실지진파는 현재 액상화 평가 시 많이 사용되는 전형적인 단주기파의 특성을 보이는 Ofunato 지진파, 장주기파의 특성을 보이는 Hachinohe 지진파를 사용하여 최대 축 하중을 변화 시키면서 수행하였다. 실제 지반의 응력 조건과 가깝게 모사하기 위하여 지반의 응력상태는 등방 조건 과 여러 이방 조건에 따라 시료를 압밀시켰는데, 이 때 압밀 응력비는 0.5~1.0까지 다양하게 설정하여 시험을 수행하였다. 과잉간극수압의 발현정도를 액상화 저항강도로 판단하여 시험 결과를 분석하였고, 특히 압밀 응력비에 따른 과잉간극수압의 발현정도를 비교하여 이방 조건에서의 액상화 저항강도와 등방 조건에서의 액상화 저항강도를 비교 분석하였다.

### 4. 시험결과 및 분석

그림 2는 Ofunato 지진파를 이용한 실험결과를 나타낸 것이며 압밀 응력비( $K$ )에 따라 발현되는 최대 과잉간극수압비는 선형적으로 증가하는 경향을 보인다. Hachinohe 지진파의 최대 축하중을 45 kPa로 재하 한 결과도 마찬가지로 선형적인 증가를 보인다. 특히 최대과잉간극수압비의 발현은 Ofunato 지진파 나 혹은 Hachinohe 지진파에 관계없이 비슷하게 나타났으며, 세 개의 실험 중 최대과잉간극수압비의 발현은 최대 축하중이 65 kPa일 때 가장 크게 되는 것을 알 수 있다. 압밀 응력비가 증가 할수록 과잉간

극수압비가 증가하는 경향을 보이며 이는 동일 조건에서 압밀 응력비가 증가할수록 액상화에 대한 저항 강도가 감소하는 것을 의미한다.

실험 결과 최대축하중과 지진파에 관계없이 모두 비슷한 기울기를 가지고 있고, 재하 한 최대 축차응력에 따라 발현된 최대과잉간극수압의 크기가 다르기 때문에 하중을 정규화 시켜 하나의 수식으로 나타낼 수 있다. 그림 3은 과잉간극수압비를 최대 축하중과 초기유효구속압으로 나누어 정규화 시킨 후 근사식을 구한결과이다. 이방 조건에서 실시된 하중을 재하 하였을 때 최대과잉간극수압비와 압밀 응력비와의 관계는 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\max r_u = (\sigma_{d,\max}/\sigma_{c0}')^n (AK+B) \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_{d,\max}$ 는 최대 축하중이고,  $\sigma_{c0}'$ 은 초기유효구속압이다. n은 응력보정상수이고 표 1에 A와 B 및  $R^2$  값을 나타내었다.

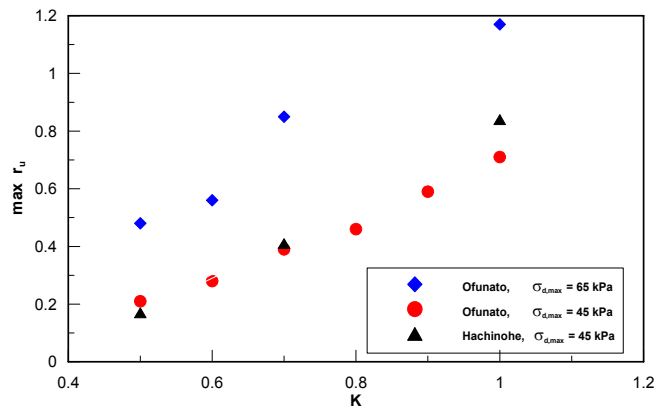


그림 2. 최대간극수압비와 압밀 응력비와의 관계

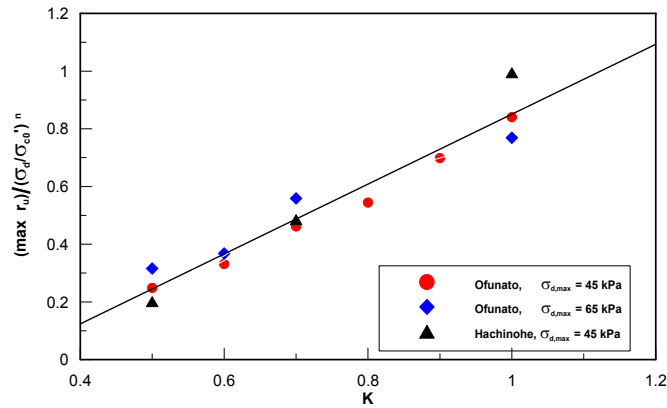


그림 3. 정규화 시킨 최대간극수압비와 압밀 응력비와의 관계

표 1. 상수 값

계수	A	B	R <sup>2</sup>	n
값	1.21	-0.36	0.93	1.6

시험결과 초기유효구속압과 축하중으로 정규화 시킨 최대과잉간극수압비는 압밀 응력비에 선형적인 증가율을 보였다. 이를 바탕으로 지반이 이방 조건일 때, 등방 조건일 때 보다 액상화 저항 강도가 더 크다는 사실을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구는 실제 지반의 응력 상태를 모사하기 위해 여러 압밀 응력비로 압밀된 시료에 실제 지진파 하중을 재하 하여, 액상화 저항강도의 특성을 관찰 분석하였다.

본 연구에서 수행한 진동삼축시험결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 초기유효구속압, 최대 축하중, 시료의 상대 밀도 등 다른 조건이 같을 때, 압밀 응력비( $K$ )가 클수록 과잉간극수압비는 크게 발현되었다. 실지진 하중의 형태가 다른 경우에도 같은 결과를 보여준다. 정현파를 이용한 시험에서도 등방으로 압밀된 시료가 이방 압밀된 시료보다 같은 조건에서 과잉간극수압 발현이 더 크게 되었다. 즉, 이방 조건으로 압밀된 시료가 등방 압밀된 시료보다 액상화 저항강도가 더 크다고 할 수 있다.
2.  $K$ 에 따른 최대과잉간극수압은 지진파의 모양과 관계없이 유사한 기울기의 선형인 형태로 증가했다. 지진파의 종류가 다른 경우와 최대 축하중의 차이가 있는 경우에도 비슷한 경향성을 보였다. 그리고 최대과잉간극수압비는 최대 축하중과 초기유효구속압으로 정규화 시킬 수 있었다. 정규화시킨 최대과잉간극수압비는 시료의 특성에 따른  $K$ 와의 관계를 하나의 식으로 나타낼 수 있었다.

실내시험에 사용된 시료는 주문진 표준사 하나의 시료만을 이용하였고, 상대밀도, 구속압 등 제한된 조건에서 수행되어 본 연구에서 도출된 결론은 범용성이 극히 제한되어 있다고 할 수 있다. 향후에 폭넓은 조건에서의 실내시험이 수행되어 일반적인 결론 도출이 필요할 것이라고 생각되어진다.

## 참고문헌

1. 신윤섭 (1999), "우리 나라 지진특성을 고려한 액상화 평가기법의 개선방안에 관한 연구", 연세대학교 석사학위 논문.
2. Ishihara, K. and Li, S. I. (1972), "Liquefaction of Saturated Sand in Triaxial Torsion Shear Test", Soils and Foundations, Vol. 12, No. 2, pp.19-39.
3. Port and Harbour Research Institute (1997), Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land, A. A. Balkema.
4. Erguvanli, M. A. and Ozaydin, I. K. (1983), "Effect of Initial Stress Conditions on Liquefaction of Sands : Experiments and An Interpretation", Soils and Foundations, Vol. 23, No. 1, pp.102-107.