

이방 구속 조건에서 실지진 하중을 이용한 포화사질토의 액상화 저항강도 특성

A Study on the Liquefaction Resistance of Anisotropic Sample under Real Earthquake Loading

이 재 진¹ Lee, Chae-Jin
김 수 일² Kim, Soo-Il
정 상 섬³ Jeong, Sang-Seom

Abstract

In this study, cyclic triaxial tests were performed under anisotropically consolidated condition by using irregular earthquake loading to consider in-situ condition and seismic wave. Jumunjin sand with a relative density 50 percent was used in the tests. The consolidation pressure ratio (K) was changed from 0.5 to 1.0. The Ofunato and Hachinohe wave were applied as irregular earthquake loadings and liquefaction resistance strengths of each specimen were estimated from the excess pore water pressure (EPWP) ratio. As a results of the cyclic triaxial tests, EPWP ratio increased with increased K value. It shows that isotropically consolidated sand is more susceptible to liquefaction than anisotropically consolidated sand under equal confining pressure and dynamic loadings. From the test results, the relationship between K and EPWP ratio normalized by effective confining pressure and deviator stress was proposed. And a new factor which corrects the liquefaction resistance strength for the in-situ stress condition is proposed.

요 지

본 연구에서는 지반의 응력상태와 동하중을 실제 지반 및 지진하중과 가장 가깝게 모사하기 위하여 여러 압밀 응력비(K) 조건으로 시료를 구속시킨 후 실지진 하중을 이용해 진동삼축시험을 수행하였다. 시험시 시료는 액상화가 발생 가능한 상대밀도 50%의 주문진 표준사를 사용하였다. 시험은 K 를 0.5~1.0까지 변화 시키며 구속된 시료에 Ofunato 지진파와 Hachinohe 지진파를 사용하여 축하중을 변화 시키며 진동삼축시험을 수행하여 과잉간극수압비의 발현 정도에 따라 액상화 저항강도를 판단하였다. 연구 결과 K 값이 클수록 과잉간극수압비의 발현이 크게 되었고, 다른 조건이 같을 때 등방구속된 시료에서 과잉간극수압비의 발현이 가장 잘되었다. 즉, 등방 구속된 시료가 이방 구속된 시료보다 동일 조건에서 액상화 저항강도가 더 크다는 사실에 반하는 것을 알 수 있었다. 시험 결과 값을 이용하여 K 에 따른 최대과잉간극수압비를 유도할 수 있었고, 그것을 유효구속압과 축차 하중을 이용하여 선형으로 정규화 하였으며, 등방 구속된 시료의 액상화 저항강도로부터 이방 구속된 시료의 액상화 저항강도를 구할 수 있는 보정계수를 제안하였다.

Keywords : Anisotropic condition, Cyclic triaxial test, Earthquake loading, Excess pore water pressure, Liquefaction resistance strength

1 연세대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

2 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 명예교수 (Member, Emeritus Prof., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

3 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 정교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ., soj9081@yonsei.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

액상화 평가 시 안전율은 실내시험으로 정해지는 액상화 저항강도를 지반응답해석에 의한 전단응력으로 나누어서 산정한다. 액상화 저항강도를 산정하기 위한 실내시험 중 많이 사용되는 진동삼축시험에서 액상화 저항강도 산정은 등방 구속 시료에 대하여 정현파를 이용하여 지진력과 같은 불규칙한 전단응력을 일정한 보정계수를 사용하여 단순한 형태의 반복전단응력과 등가반복재하횟수로 환산하여 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 제기되고 있다. 특히 Ishihara와 Li(1972)는 포화된 사질토에서 삼축비틀전단시험을 수행한 결과 이방 구속 조건의 시료에서 과잉간극수압비의 발현이 등방 구속 조건의 시료보다 더 적게 발현됨을 보였다. Erguvanli 등(1983)은 이방 구속 조건에서의 액상화 저항강도가 등방 구속 조건에서보다 크다고 하였고, Vaid와 Chem(1983)도 정현하중을 이용한 진동삼축시험에서 이방 구속 조건에서 보다 등방 구속 조건에서 과잉간극수압이 더 크게 발현된다고 하였다. 강병희(2000)는 이방압밀이 흙의 강도에 미치는 영향에 관해서 연구하였고, 이송 등(2003)은 사질토의 액상화 저항에 대한 이방압밀의 영향에 관해 정현파를 이용한 진동삼축시험을 수행하여 연구하였다. 김방식 등(2005)은 이방압밀된 혼합토의 액상화 거동에 관하여 연구를 수행하였다. 액상화 평가시 실내시험 수행 후 액상화 저항응력비 곡선에서 보정계수 $(1+2K_0)/3$ 을 이용하여 지반내 응력상태를 보정(PHRI, 1997) 하는 것은 등방 구속 조건의 시료에서 액상화 저항강도가 이방 구속 조건보다 크기 때문이다. 그러나 이방 구속 조건에서 과잉간극수압이 더 작게 발현된 상기 연구결과들은 기존의 액상화 저항강도가 이방 구속 조

건 시료보다 등방 구속 조건의 시료에서 더 크다는 사실에 반한다. 본 연구는 이를 바탕으로 보다 사실적으로 실제 지반내 응력 상태를 재현하기 위해 여러 이방 구속 조건에서 실지진하중을 이용한 시험을 통해 액상화 저항강도에 관한 특성을 연구하고자 한다.

2. 액상화 저항강도

2.1 액상화 현상

액상화가 주로 발생하는 포화 사질토에서, 외력이 작용하기 전 토립자는 상호접촉상태에 있으며 입자간의 접촉을 통해 외력이 전달된다. 사질토 지반은 이와 같은 원리로 전단 저항력을 가지게 되며 지진과 같은 급속재하 하중에 의해 발생된 전단력은 사질토체에 변형을 일으키며 본래 수직방향으로 지지하던 접촉점들이 분리되며 간극수압이 발생하게 된다. 이와 같은 현상은 특히 반복하중의 재하 시 전단응력의 방향이 변화할 때 발생하며 그 원인은 하중이 가해졌을 때 증가했던 과잉간극수압이 재하 시 완전히 소산되지 않고 축적되기 때문이다. 이 상태가 되면 전단저항을 잃은 사질토는 포화사질토의 단위중량을 가지는 액체와 같이 거동하게 된다. 액상화가 발생한 이후, 토립자는 재구성되고 간극수압은 감소하여 토체는 다시 안정화를 이룬다(post-liquefaction). 이때 체적 변화는 소산된 간극수의 체적과 같다. 이와 같은 변화과정을 그림 1에 도시하였다. 그림 1(a)는 지진력이 가해지기 전의 느슨한 사질토지반을 나타내고 있으며 그림 1(b)는 지진력이 가해졌을 때 지반에 전단변형이 일어나며 과잉간극수압이 발생하는 순간, 즉 액상화가 발생한 순간의 모습을 나타낸 그림이다. 그림 1(c)는 액상화 발생 후 과잉간극수압이 소산되고 지반침하가 발생하여 다시 강도를 회복한 상태를 나타낸다. 이와 같이 액상화 현상이란 느슨한 사질토지반에 지진 등과 같은 동적하

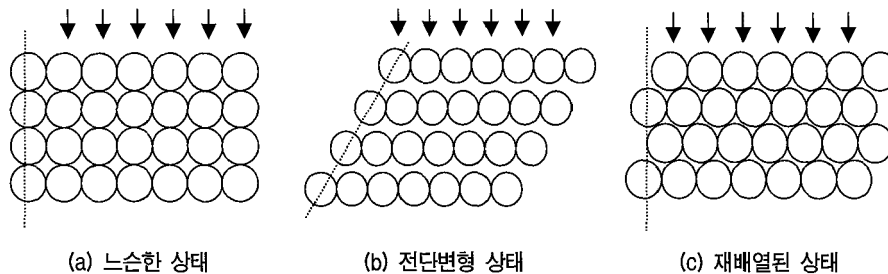


그림 1. 액상화 발생과정에 따른 사질토 입자배열변화 모식도(Port and Harbour Research Institute, 1997)

중이 급속히 재하 될 때 발생하는 과잉간극수압으로 인해 지반이 유효응력을 잃고 액체화되는 현상을 말한다.

2.2 간극수압에 의한 액상화 저항강도

액상화 발생과정을 간극비와 유효응력간의 관계로 설명할 수 있다. 그림 2는 자유배수가 허용된 상태에서 진동하중을 재하하게 되면 초기상태의 응력과 간극비 상태를 나타내는 압축곡선상의 점 A는 간극수의 배수로 인해 Δe 만큼의 부피감소가 발생하여 점 B로 이동하나 비배수 상태로 간주하면 부피감소가 없으므로 과잉간극수압의 증가로 인해 유효응력은 점차 감소하여 응력상태는 점 C로 이동한다. 즉 액상화는 급속한 하중을 받아 발생하게 되는 과잉간극수압이 초기응력과 같아짐에 따라 유효응력이 0이 된 상태에서 발생한다고 할 수 있다. 특히 Law 등(1990)은 액상화를 정의할 때 과잉간극수압비 $ru = \Delta u / \sigma'_c$ 값을 사용하였다. 이는 이방으로 구속된 시료($K \leq 1$)의 진동삼축시험시 수직유효구속압보다 작은 수평유효구속압에 의해 과잉간극수압비가 먼저 1이 되어 액상화가 발생하는 현상에 의한 것이기 때문이다. 본 연구에서는 과잉간극수압의 발현됨에 따라 유효응력이 감소하는 원리에 의해 간극수압을 초기수평유효구속압으로 정규화 시킨 과잉간극수압비의 발현 정도로 액상화 저항강도를 판단하였다. 과잉간극수압이 초기수평유효구속압과 같아져 과잉간극수압비가 1이 되면 유효응력은 0이 되므로 액상화에 의한 파괴가 일어난 것이다.

3. 시험방법 및 구성

본 연구에서는 불규칙한 실지진 하중에 의한 포화 사질토의 동적 거동을 분석하기 위하여 진동삼축시험을 수행하였다. 액상화 저항강도는 과잉간극수압의 발현정

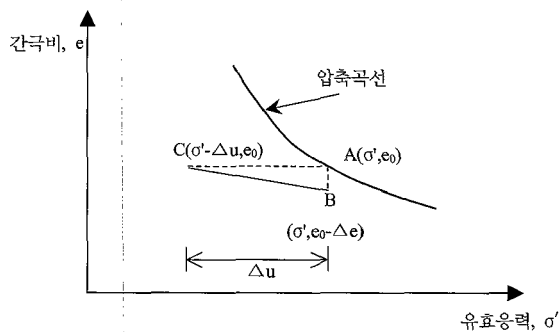


그림 2. 반복하중에 의한 간극수압 발생개념도

도에 따라 판단하고 실제 지반의 응력 상태를 고려하기 위해 다양한 이방 구속 조건에서 시험을 수행하고 결과를 분석하였다. 진동삼축시험은 주문진 표준사를 대상으로 액상화가 발생하기 쉬운 조건 하에서 지진파와 같은 불규칙한 동하중을 재현 할 수 있는 ELE 진동삼축시험기를 이용하였다.

전술한 과정의 연구목적을 효율적으로 수행하기 위하여 주문진 표준사를 이용할 때 액상화가 발생하기 쉬운 지반심도와 재현가능한 지진파를 고려해서 초기 유효 구속압 50kPa, 상대밀도 50%로 한정하여 시험을 수행하였다. 시료는 직경 70mm, 높이 135mm의 원주형 시료를 사용하였다. 시험 시 사용한 실지진파는 현재 액상화 평가 시 많이 사용되는 전형적인 단주기파의 특성을 보이는 Ofunato 지진파, 장주기파의 특성을 보이는 Hachinohe 지진파를 사용하였다. 실제 지반의 응력 조건과 가깝게 모사하기 위하여 지반의 응력상태는 등방 조건과 여러 이방 조건에 따라 시료를 압밀시켰는데, 압밀 응력비 (k)는 0.5~1.0까지 다양하게 설정하여 시험을 수행하였다. 과잉간극수압의 발현정도를 액상화 저항강도로 판단하여 시험 결과를 분석하였고, 특히 압밀 응력비 (k)에 따른 과잉간극수압의 발현정도를 비교하여 이방 조건에서의 액상화 저항강도와 등방 조건에서의 액상화 저항강도를 비교 분석하였다.

3.1 진동삼축시험기의 구성

ELE 진동삼축시험기는 영국의 ELE사가 개발한 진동삼축시험기(Cyclic triaxial testing system)이다. 시험기는 압력, 변위, 체적변화, 축 하중 및 간극수압 등의 자료 값을 변환기(transducer)로 측정하여 컴퓨터로 자동 저장시키고 얻어진 자료 값에 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 자동화시스템이다. 사용자가 임의의 반복하중을 작성하여 적용할 수 있고 70Hz의 높은 진동수까지 재하가 가능하므로 지진하중을 충분히 구현할 수 있다.

이러한 삼축기의 계통도를 보면 컴퓨터의 제어에 의해 발생된 신호를 제어 및 데이터 획득 시스템(CDAS)에서 변조하여 각각의 측정기기에 연결되어 있는 전기-

압력 변환기(E/P transducer)로 보낸다. 그리고 축응력 장치(actuator)와 압력제어장치(pressure panel)를 제어하여 축하중과 구속압을 가하게 된다. 압력이 가해짐에 따라 시료와 셀에 발생된 축하중과 축변위, 구속압, 간극수압, 체적변화를 로드셀, LVDT, 압력측정장치, 체적변화 측정장치에서 각각 전기신호로 읽어 다시 제어 및 데이터 획득 시스템(CDAS)을 통해 신호를 컴퓨터에 보내게 된다. 그림 3은 이러한 ELE 진동삼축시험기의 제원을 나타낸 것이다.

3.2 시험방법 및 대상 시료

진동삼축시험을 수행하기 위해 시료의 공학적인 기본물성을 파악하는 것이 중요하다. 본 연구에서 사용된 주문진 표준사는 우리나라의 대표적인 사질토로 이미 많은 시험 연구의 시험재료로 사용되었다. 주문진 표준사의 기본적인 물성치는 아래 표 1과 같다.

진동삼축시험은 간단하게 시료성형, 포화, 압밀, 하중 재하의 네 단계로 구분할 수 있다. 특히 각각의 시험을 수행하는 중에 하중 재하 전 압밀 단계까지 시료를 유사

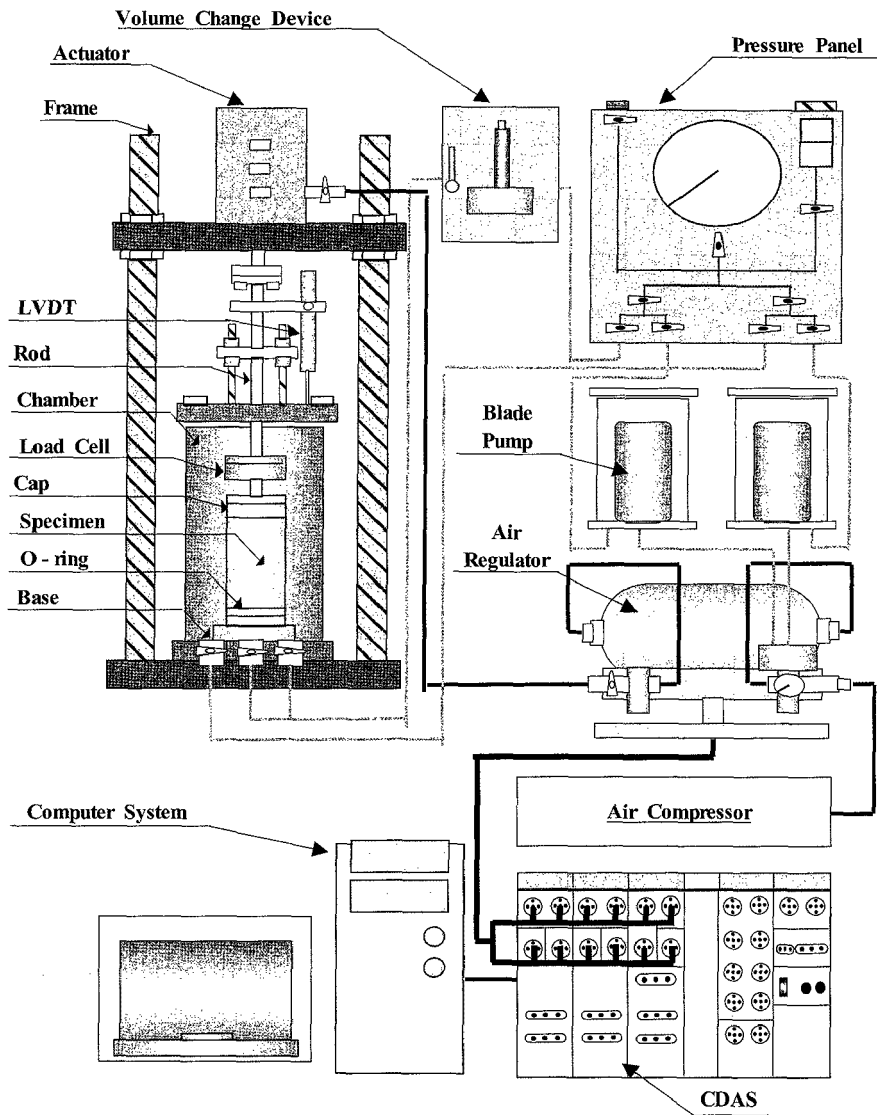


그림 3. ELE 진동삼축시험기 제원

표 1. 주문진 표준사의 물성치(황선주, 2004)

D_{max} (mm)	D_{min} (mm)	D_{10} (mm)	D_{60} (mm)	C_u (mm)	C_c (mm)	γ_{dmin} (kN/m^3)	γ_{dmax} (kN/m^3)
0.84	0.07	0.37	0.50	1.35	1.14	13.63	15.69

하게 준비하는 것이 중요하다.

첫 번째 시료성형단계는 우선 상대밀도 50%의 시료를 성형하기 위해 앞서 기술한 기본물성시험에서 구한 최대건조단위중량 및 최소건조단위중량과 몰드의 부피를 고려하여 시료의 무게를 정하여 시료를 준비하였다. 이어 준비된 시료를 멤브레인을 거치시킨 몰드에 탈기수를 넣은 채 탈기수 위로 깔때기를 이용하여 수면 위에서 자유낙하시켜 시료를 성형하였다. 이 때 시료가 균일하게 다져지도록 몰드 주위를 상, 하, 좌, 우 대칭으로 가볍게 두드리면서 원하는 상대밀도가 얻어지도록 공시체의 높이를 조정하였다. 수중침강법은 액상화가 일어나기 쉬운, 즉 지하수위가 높은 사질토 지역의 지반을 적절하게 모사할 수 있는 시료 성형방법(Vito Nicola Ghionna, 2006)이고 재료의 분리 없이 연속적인 시료를 성형할 수 있는 방법이다.

두 번째 단계는 시료의 포화단계이다. 시료의 포화방법은 측방향 하중(Cell Pressure)과 배압(Back Pressure)을 5~10kPa 차이가 나게 설정하여 배압을 단계적으로 늘렸다. 이때 배압은 80~120kPa 까지 가하였으며, 하중과 동시에 간극수압의 증가량을 측정하여 Skempton 간극수압 계수, B 값을 검토하여 0.97이상이 되면 완전 포화된 시료로 간주하여 다음 단계를 진행하였다.

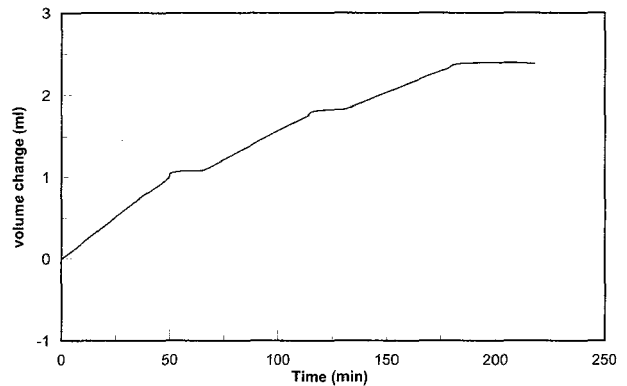
세 번째 단계는 압밀단계이다. 압밀은 등방압밀과 이방압밀의 두 가지 방법으로 수행 했는데, 등방압밀은 횡방향과 축방향에 같은 응력을 재하 하여 압밀하는 과정으로 원하는 초기유효구속압을 설정하고 체적변형률이 일정하게 될 때까지 압밀을 수행한다. 이방 압밀과정은 등방 압밀 과정 보다 복잡한 과정을 거치면서 수행된다. 진동삼축시험기에서 1축방향 하중은 $\sigma_1 = \sigma_d + \sigma_3$ 의 원리이다. 시료를 원하는 압밀 응력비와 초기유효구속압으로 압밀시키기 위해서 식 (1)과 식 (2)을 이용하여 축하응력(σ_d)과 압력실에 가해질 측압(σ_3)을 사전에 계산한다.

$$\sigma_d' = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} \quad (1)$$

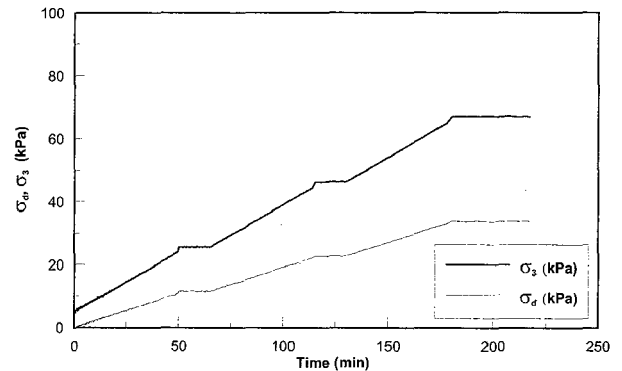
$$K = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} \quad (2)$$

여기서, σ_d' 는 초기유효구속압이고, K 는 압밀 응력비이다. 이렇게 계산된 σ_d 와 σ_3 은 하중의 크기와 재하시간을 조절하며 1~5단계로 나누어 압밀 시킬 수 있다. 본 연구에서는 시료의 파괴와 지속적인 하중 증가로 인한 변형을 막기 위해 3단계로 나누어 하중을 재하 하였다. 사질

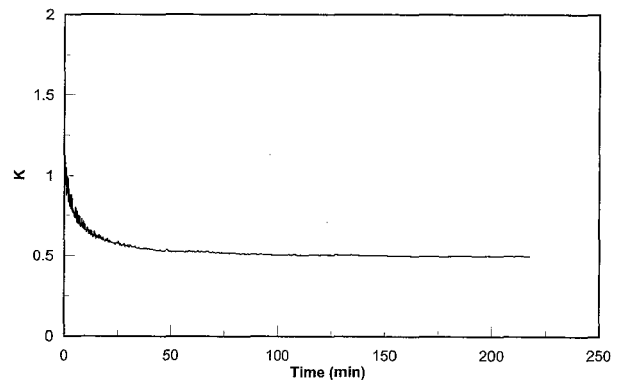
토의 특성상 압밀 시작 후 비교적 빠른 시간 안에 대부분의 부피변형이 끝나 압밀이 거의 완료된다는 것을 알 수 있다. 그래서 각 단계 마다 하중 유지시간은 약 15분 정도로 설정하여, 최대한 안정되게 시료가 압밀되도록 했다. 하중 재하 속도는 약 0.5kPa/min 이하가 되도록 하였다. 그림 4(a)는 초기유효구속압 100kPa, 압밀 응력비(K) 0.5를 목표로 이방 압밀 시킨 시료의 시간-부피변화 그래프이다. 그림 4(b)는 시간-유효구속압(σ_1' 와 σ_3') 그래프로 재하한 축방향 하중과 측방향 하중을 나타낸다. 3단계로 나누어서 압밀과 유지를 반복하여 부피변화량이



(a) 시간-부피변화



(b) 시간-유효구속압



(c) 시간-압밀 응력비(K)

그림 4. $\sigma_{d0}' = 100\text{kPa}$, $K = 0.5$, 이방압밀

그에 비례하여 증가와 유지를 반복한다. 그림 4(c)는 시간-압밀 응력비(K) 그래프를 나타낸 것이다. K 는 초기 값 1에서 급격히 변화하여 목표 값인 0.5에 25분 전후에 도달함을 알 수 있다. 즉 K 는 첫 번째 재하단계가 끝나기 전에 거의 목표 값인 0.5에 이르렀음을 알 수 있다.

압밀이후 부피 변화에 따른 상대밀도의 차이를 검토하기 위해 매 시료마다 압밀이 완료된 후 부피변화를 검토 했다. 초기 몰드 부피를 고려했을 때 부피변화는 최대 약 0.8%정도가 발생했고 이에 따라 상대밀도는 최대 50.2%에서 최소 54.9% 까지 변화였다. Ishihara(1985)는 상대밀도가 평균에서 $\pm 3.5\%$ 범위 안에서는 시험결과에 큰 영향을 끼치지 않는다고 했기 때문에 본 연구에서 상대밀도의 차이에 의한 시험결과 신뢰성에는 별 무리가 없는 것으로 간주할 수 있다.

네 번째 단계는 압밀된 시료에 하중을 가하는 단계이다. 가해진 축응력은 시료에 전단력을 가하여 지진력을 재현하게 된다. 이와 같은 시험과정을 통해 시료의 간극수압, 변위, 응력 및 응력-변형률관계 곡선 등에 대한 자료를 얻을 수 있다.

4. 결과분석

4.1 시험결과

본 연구에서는 13건의 시료에 대하여 실험을 수행하였으며 시험 종류 및 조건과 결과는 표 2와 같다. 압밀 응력비(K)에 따른 과잉간극수압비의 발현 정도를 알아보기 위해 압밀 응력비(K)를 0.5~1.0까지 변화 시키면서 최대 축하중 45kPa인 Ofunato 지진파를 이용하여 진동삼축시험을 수행하였다. 그리고 최대축하중 변화에 의한 영향을 분석하기 위해 동일한 조건에서 최대 축하중을 65kPa로 변화 시킨 후 Ofunato 지진파를 재하 하여

시험하였다. 마지막으로 지진파 변화에 의한 영향을 분석하기 위해 Hachinohe 지진파를 이용하여 최대 축하중 45kPa를 재하 하여 시험을 수행하였다.

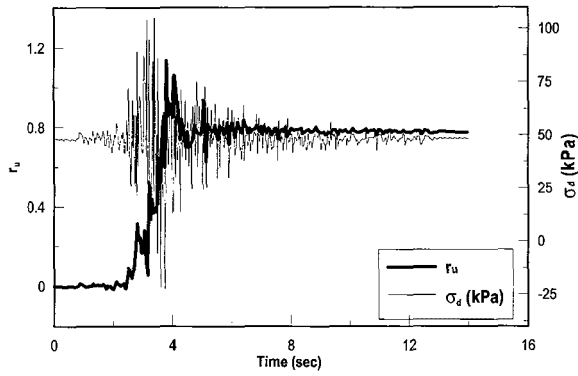
그림 5는 Of-10에 대한 결과를 나타낸 것이다.

그림 5(a)에는 재하시간과 초기유효구속압으로 정규화 시킨 과잉간극수압비와 재하 하중인 Ofunato 지진파를 같이 나타내었는데, 과잉간극수압비가 1이 넘었기 때문에 액상화가 일어나 시료가 파괴된 것으로 판단할 수 있다. 입력 지진파 모양과 비교해 보았을 때, 최대 축하중이 재하 되는 시점에 과잉간극수압비가 급격히 발현되었다. 이는 점진적으로 과잉간극수압비가 증가하며 발현되는 정현하중을 이용한 시험결과와는 차이가 있다. 그림 5(b)는 유효응력경로(p' - q)와 전응력경로(p - q)를 나타냈는데 p' 은 평균유효주응력으로 $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ 이고 q 는 축차응력으로 $(\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$ 이다. 하중이 재하 됨에 따라 과잉간극수압이 증가되고 이에 따라 유효응력은 감소한다. 그래서 응력경로는 지진파형태에 따라 아래위로 진동하며 왼쪽으로 이동되는 것을 확인할 수 있다. 그림 5(c)는 응력-변형률 이력곡선(hysteresis loop)으로 실지진파에 의한 불규칙한 거동을 보여준다. 그림 5(d)는 시간-변형률 곡선인데 최대 변형률이 약 1%, 영구 잔류 변형률은 0.5% 발생하였다. 정현파인 sine파를 이용하여 진동삼축시험을 수행했을 때 변형률은 액상화 파괴가 일어난 시점부터 크게 변하기 시작하여 무너지기 시작하지만, 실지진 하중을 이용한 시험에서는 그림 5(d)에서 보듯이 축하중이 크게 작용한 시점에서 변형률이 가장 크게 변하고, 그 후 일정하게 유지되는 경향을 보인다.

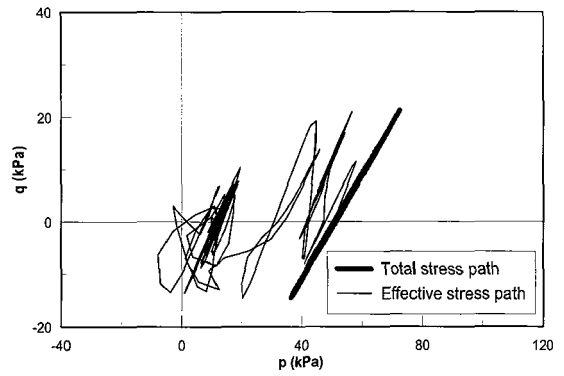
그림 6은 초기유효구속압을 50kPa, 압밀 응력비를 0.7로 압밀 후 최대 축하중을 45kPa로 Ofunato 하중을 재하한 것이다. 과잉간극수압비가 약 0.39정도 발현되었고 변형률도 0.1%에 못 미치며 영구 변형률은 거의 발생하

표 2. 응력 압밀비(K)에 따른 최대과잉간극수압

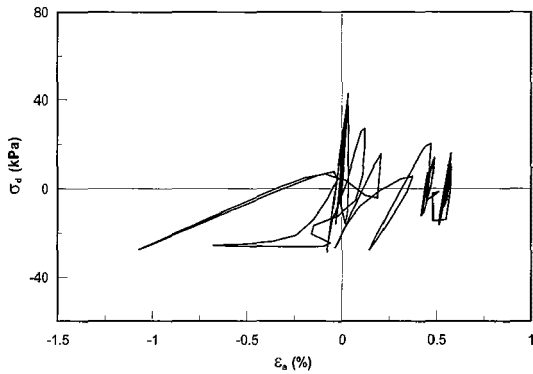
시험 종류	최대축하중 (kPa)	압밀 응력비 (K)	최대과잉 간극수압비	시험 종류	최대축하중 (kPa)	압밀 응력비 (K)	최대과잉 간극수압비
Of-1	45	0.5	0.21	Of-8	65	0.6	0.56
Of-2	45	0.6	0.28	Of-9	65	0.7	0.85
Of-3	45	0.7	0.39	Of-10	65	1.0	1.17
Of-4	45	0.8	0.46	Ha-1	45	0.5	0.17
Of-5	45	0.9	0.59	Ha-2	45	0.7	0.41
Of-6	45	1.0	0.71	Ha-3	45	1.0	0.84
Of-7	65	0.5	0.48				



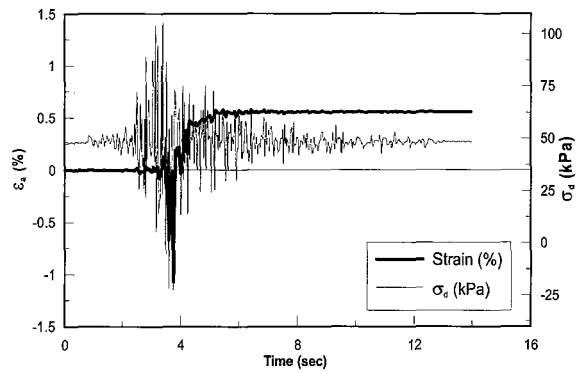
(a) 시간-과잉간극수압비



(b) 평균유효주응력-축차응력 곡선(p'-q)

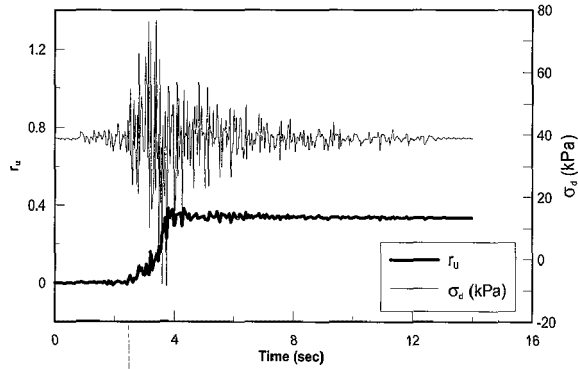


(c) 축방향 변형률-축차 응력

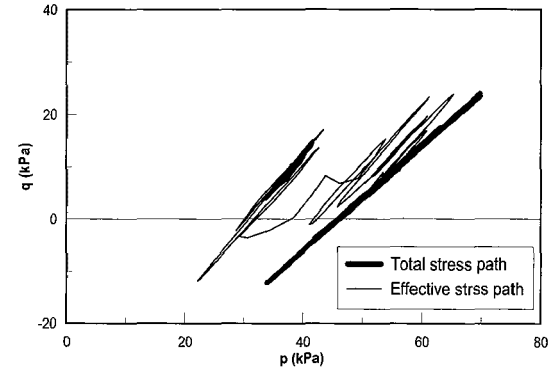


(d) 시간-축방향 변형률

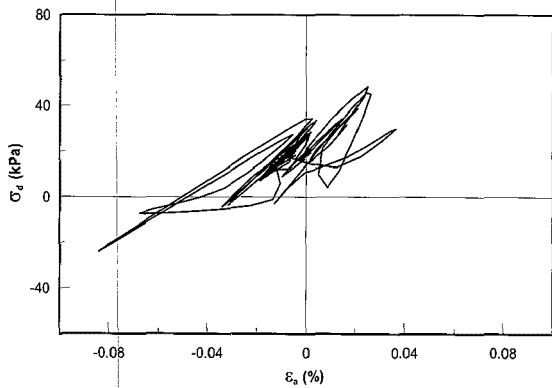
그림 5. 진동삼축시험결과($\sigma_{co}' = 50\text{kPa}$, $K = 1$, $\sigma_{d,max} = 65\text{kPa}$, Ofunato 지진파)



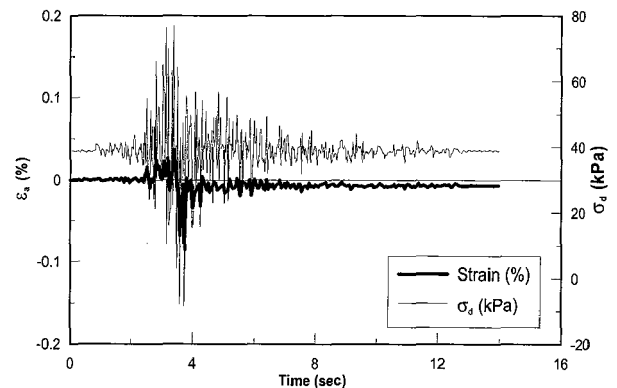
(a) 시간-과잉간극수압비



(b) 평균유효주응력-축차응력 곡선(p'-q)



(c) 축방향 변형률-축차 응력



(d) 시간-축방향 변형률

그림 6. 진동삼축시험결과($\sigma_{co}' = 50\text{kPa}$, $K = 0.7$, $\sigma_{d,max} = 45\text{kPa}$, Ofunato 지진파)

지 않았다. 특히 그림 6(b)의 p'-q 곡선의 응력경로를 보면, 응력경로가 왼쪽으로 이동하는 정도가 크지 않은 것을 알 수 있다. 이는 압밀 응력비(K)가 0.7인 경우 압밀 응력비(K)가 1.0인 경우에 비해 최대과잉간극수압비가 0.39로 작게 발생하여 유효응력경로의 감소가 작게 나타나기 때문이다. 이것은 전응력 곡선과 비교했을 때 발견된 과잉간극수압비에 따라 응력경로의 이동 정도를 보고 판단 할 수 있다.

4.2 압밀 응력비(K)에 따른 액상화 저항강도

시험 결과를 바탕으로 압밀 응력비(K)와 최대과잉간극수압의 관계를 알아보기 위해 표 2의 결과를 그림 7에 도시하였다.

그림 7에서 Ofunato 지진파를 이용한 시험결과는 압밀 응력비(K)에 따라 발견되는 최대과잉간극수압비가 선형적으로 증가하는 경향을 보인다. Hachinohe 지진파를 재하 한 결과도 유사한 경향을 보인다. 특히 최대과잉간극수압비의 발현은 Ofunato 지진파나 혹은 Hachinohe 지진파에 관계없이 비슷하게 나타났으며, 시험 중 최대과잉간극수압비의 발현은 최대 축하중이 65 kPa일 때 가장 크게 되는 것을 알 수 있다. 압밀 응력비(K)가 증가할수록 과잉간극수압비가 증가하는 경향을 보이며 이는 동일 조건에서 압밀 응력비(K)와 액상화에 대한 저항강도의 관계가 비례하지 않음을 알 수 있다.

시험 결과 최대축하중과 지진파에 관계없이 모두 비슷한 기울기를 가지고 있고, 재하 한 최대 축하중력에 따라 발견된 최대과잉간극수압의 크기가 다르기 때문에 하중을 정규화 시켜 하나의 수식으로 나타낼 수 있다. 그림 8은 과잉간극수압비를 최대 축하중과 초기유효구속압으로 나누어 정규화 시킨 후 근사식을 구한 결

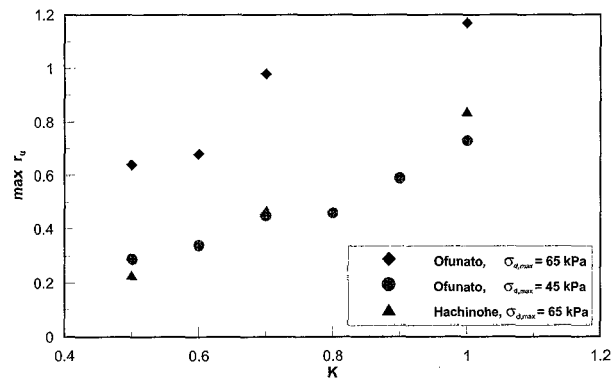


그림 7. 압밀 응력비(K)와 최대과잉간극수압비와의 관계

과이다. 이방 조건에서 실지진 하중을 재하 하였을 때 최대과잉간극수압비(max ru)와 압밀 응력비(K)와의 관계는 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\max r_u = (\sigma_{d,\max}/\sigma_{3c0}')^n (AK+B) \quad (3)$$

여기서, $\sigma_{d,\max}$ 는 최대 축하중이고, σ_{3c0}' 은 초기수평유효 구속압이다. n은 응력보정상수이고 표 3에 A와 B 및 R² 값을 나타내었다. 그리고 이와 비교하여 식 Vaid와 Chern (1983)이 최대과잉간극수압(max Δu)에 대하여 다음과 같은 식 (4)를 제안하였다.

$$\max \Delta u = \sigma_{3c}' \left(1 - \frac{K_c - 1}{2} \cdot \frac{\sin \phi'}{1 - \sin \phi'}\right) \quad (4)$$

여기서, K_c 는 1/K 즉, σ_1'/σ_3' 이고 ϕ' 은 유효내부마찰각이다. 이식은 가해지는 하중과 관계없이 흙의 내부 마찰각과 압밀 응력비에 그리고 초기 유효구속압에 따라 발견될 수 있는 최대과잉간극수압을 나타냈다. 그리고 본 논문에서 실제 수행된 실험의 결과에서는 이방 구속 조건에서 과잉간극수압비가 1이 넘는 결과를 얻었지만, 위 식에서 K_c 가 1이 아닌 값에서는 과잉간극수압비가 1이 나올 수 없음을 알 수 있다.

시험결과 초기유효구속압과 축하중으로 정규화 시킨 최대과잉간극수압비는 압밀 응력비(K)에 선형적인 증가율을 보였다. 2절에서 언급했듯이 지반내 과잉간극수압의 증가로 인해 유효응력이 점차 감소하므로, 과잉간극수압의 발현정도가 액상화 저항 강도 판단의 하나의 기준이 될 수 있다. 이를 바탕으로 지반이 이방 조건일

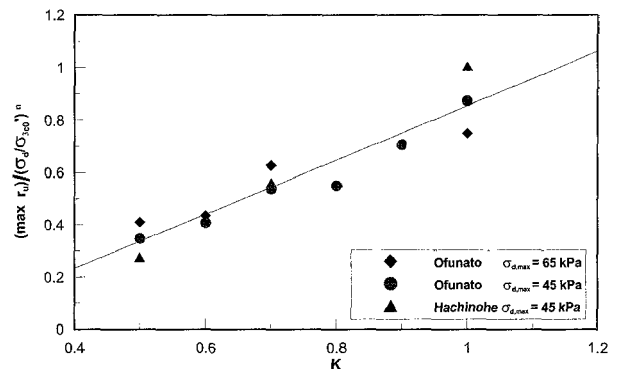


그림 8. 압밀 응력비(K)와 정규화 시킨 최대과잉간극수압비와의 관계

표 3. 상수 값

계 수	A	B	n	R ²
값	1.04	0.17	1.7	0.88

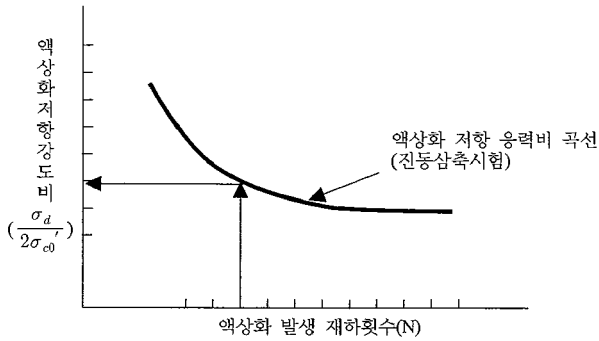


그림 9. 진동삼축시험에 기초한 액상화 평가(PHRI, 1997)

때, 등방 조건일 때 보다 액상화 저항 강도가 더 작지 않다는 사실을 알 수 있다.

그림 9는 액상화 저항 강도를 구하기 위해서 등방 압밀 시킨 시료에 정현하중을 재하 하는 진동삼축시험을 3회 이상 수행하여, 파괴 시 재하횟수와 그에 따른 저항 강도 값을 구하여 액상화 저항응력비 곡선을 구하는 것을 보여준다. 액상화 저항강도를 산정할 때, 파괴 시 재하 횟수에 해당하는 저항응력비를 구한 후 지반의 응력 상태에 따라 K_0 조건으로 보정하기 위하여 보정계수 $(1+2K_0)/3$ 를 사용했지만, 본 연구의 시험결과 보정계수를 다시 고려해 볼 필요가 있으며 보정계수는 다음의 과정을 통하여 구할 수 있다.

등방 조건($K=1$)일 때 액상화 파괴가 일어났다면 과잉간극수압비(r_u)는 1이다. 즉, 이때의 저항 응력비($\sigma_{d,max}/\sigma_{c0}$)_i는 식 (3)에서 유도할 수 있다.

$$1 = (A \cdot 1 + B) \left(\left(\frac{\sigma_{d,max}}{\sigma_{3c0}} \right)_i \right)^n \quad (5)$$

양변에 log를 취해 저항 응력비에 관하여 정리하면,

$$n \log \left(\frac{\sigma_{d,max}}{\sigma_{3c0}} \right)_i = -\log(A+B) \quad (6)$$

$$\log \left(\frac{\sigma_{d,max}}{\sigma_{3c0}} \right)_i = -\frac{1}{n} \log(A+B) \quad (7)$$

$$\left(\frac{\sigma_{d,max}}{\sigma_{3c0}} \right)_i = (A+B)^{-\frac{1}{n}} \quad (8)$$

이방 조건일 때 저항 응력비($\sigma_{d,max}/\sigma_{c0}$)_a를 다시 식 (3)에서 구하면,

$$\left(\frac{\sigma_{d,max}}{\sigma_{3c0}} \right)_a = (AK_0 + B)^{-\frac{1}{n}} \quad (9)$$

새로운 보정계수(η)를 구하기 위해 $(\sigma_{d,max}/\sigma_{3c0})_i$ 에 대한 $(\sigma_{d,max}/\sigma_{3c0})_a$ 비는 식 (8)과 식 (9)을 통해 구할 수 있다.

$$\eta = \frac{\left(\frac{\sigma_{d,max}}{\sigma_{3c0}} \right)_a}{\left(\frac{\sigma_{d,max}}{\sigma_{3c0}} \right)_i} = \left(\frac{A+B}{AK_0+B} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (10)$$

보통 지반의 K_0 값이 0.35~0.65이므로 보정계수(η)는 1보다 큰 값을 가진다. 즉 기존의 지반내 응력상태 보정계수인 $(1+2K_0)/3$ 과 반대로 액상화 저항 응력비 곡선을 보정한다.

5. 결론

액상화 저항강도 산정 시 널리 사용되는 진동삼축시험은 등방 압밀 조건에서 정현하중을 사용하여 수행된다. 이는 실제 지반 조건과 지진하중을 정확히 모사하지 못하므로, 결과값을 보정하여 사용한다. 본 연구는 실제 지반의 응력 상태를 모사하기 위해 여러 압밀 응력비(K)로 압밀된 시료에 실제 지진파 하중을 재하 하여, 액상화 저항강도의 특성을 관찰 분석하였다.

본 연구에서 수행한 진동삼축시험 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 불규칙한 실지진 하중을 재하하여 진동삼축시험을 수행한 결과 정현하중을 재하한 결과와 액상화 발생 특성이 다름을 확인 할 수 있었다. 과잉간극수압비가 반복 횟수에 따라 점차 증가하는 양상을 보이는 정현하중과 달리 실지진 하중일 경우 하중이 가장 큰 시점에서 과잉간극수압이 급격히 발현되어 유지되는 경향을 보인다.
- (2) 초기유효구속압, 최대 축하중, 시료의 상대 밀도 등 다른 조건이 같을 때, 압밀 응력비(K)가 클수록 과잉간극수압비는 크게 발현되었다. 정현파를 이용한 시험에서도 등방으로 압밀된 시료가 이방 압밀된 시료보다 같은 조건에서 과잉간극수압 발현이 더 크게 되었다. 과잉간극수압의 발현이 액상화 파괴를 판단하는 하나의 기준이 될 수 있으므로, 이방 조건으로 압밀된 시료와 등방 압밀된 시료의 액상화 저항 강도의 비교는 추가적인 실험과 연구가 필요할 것으로 판단된다.

- (3) 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. 정규화 시킨 최대과잉간극수압비는 시료의 특성에 따른 K 와의 관계를 하나의 식으로 나타낼 수 있다.
- (4) 정규화 시킨 최대과잉간극수압비와 K 의 관계를 수식으로 표현할 수 있다. 이를 통하여 등방 조건에서의 액상화 저항강도를 이방 조건으로 보정할 수 있는 보정계수를 유도할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 강병희 (2000), “이방압밀이 흙의 강도에 미치는 영향”, *한국지반공학회 2000 가을 학술발표회 논문집*, pp.3-14.
2. 김방식, 윤여원, 이승훈 (2005), “이방압밀된 자갈-모래 혼합토의 액상화 거동”, *한국지반환경공학회 학술발표회 논문집*, pp.279-284.
3. 박성용 (2002), “실지진하중을 이용한 중진 지역에서의 액상화 저항강도에 관한 실험적 연구”, *연세대학교 석사학위 논문*.
4. 신윤섭 (1999), “우리 나라 지진특성을 고려한 액상화 평가기법의 개선방안에 관한 연구”, *연세대학교 석사학위 논문*.
5. 이송, 구자갑, 윤광현, 정기문 (2003), “사질토의 액상화 저항에 대한 이방압밀의 영향”, *한국구조물진단학회 2003년도 봄 학술발표회 논문집*, pp.183-194.
6. 한국지반공학회 (2006), “지반구조물의 내진설계”, 구미서관, pp. 343-347.
7. 황선주 (2004), “다양한 입력하중에서의 액상화 발생 특성 비교 연구”, *연세대학교 석사학위 논문*.
8. 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.
9. Ghionna, V. N. and Porcino, D. (2006), “Liquefaction Resistance of Undisturbed and Reconstituted Samples of a Natural Coarse Sand from Undrained Cyclic Triaxial Tests”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.132, Issue 2, pp.194-202.
10. 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.
11. Ishihara, K. and Yamazaki, A. and Haga, K. (1985), “Liquefaction of K_0 -Consolidated Sand Under Cyclic Rotation of Principal Stress Direction with Lateral Constraint”, *Soils and Foundations*, Vol.25, No.4, pp.63-74
12. Law, K. T. and Cao, Y. L. (1990), “An Energy Approach for Assessing Seismic Liquefaction Potential”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.23, 19, pp.320-329.
13. Port and Harbour Research Institute (1997), *Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land*, A. A. Balkema.
14. Vaid, Y. P. and Chern, J. C. (1983), “Effects of Static Shear on Resistance to Liquefaction”, *Soils and Foundations*, Vol.23, No.1, pp.47-60.

(접수일자 2009. 8. 17, 심사완료일 2010. 2. 25)