

## 정적하중 상태에서 포화된 실트질 모래의 액상화 거동

### Liquefaction Behaviour of Saturated Silty Sand Under Monotonic Loading Conditions

이 달 원\*

Lee, Dal Won

#### Abstract

This study was carried out to investigate the liquefaction behaviour of saturated silty sand under monotonic loading conditions. The undrained soil tests were conducted using a modified triaxial cell and specimens were prepared using the moisture tamping method. Undrained triaxial compression tests were performed at different confining pressures, void ratios and overconsolidation ratios and the samples were sheared to axial strains of about 20% to obtain monotonic loading conditions. It is shown that increasing confining pressures, void ratios and overconsolidation ratios increases the deviator stress, but it has no effect on increasing the dilatant tendencies. It is shown that complete static liquefaction was observed regardless of increases in the confining pressure, void ratio and overconsolidation ratio. Therefore, the confining pressure, void ratio and overconsolidation ratio does not provide significant effects on the liquefaction resistance of the silty sand. The presence of fines in the soil was shown to greatly increase the potential for static liquefaction and creates a particle structure with high compressibility for all cases.

*Keywords : Liquefaction, Monotonic loading, Confining pressures, Void ratio, Overconsolidation ratio*

#### I. 서 론

방조제, 흙댐, 성토 및 절토사면, 기초지반 및 흙 구조물 등은 액상화의 원인으로 많은 파괴가 발생된다. 특히 방조제와 같은 포화된 수중사면에서의

액상화 현상은 매우 빈번하게 발생되고, 해안구조물의 안전에 매우 큰 영향을 미치고 있기 때문에 중요한 연구대상이 되고 있다. 포화된 비점착성토에서 액상화 활동으로 수중사면은 매우 큰 변형이 발생되고 결국 많은 양의 토립자를 유실시키게 된다. 이러한 액상화 현상에 영향을 미치는 요소는 지진활동, 급격한 퇴적활동, 공극속의 가스의 존재, 급격한 조류 변화 등으로서 이들 요소들은 체적수축변형과 유효응력을 감소시켜 액상화를 유발하는 원인이 된다. 포화된 비점착성토에서 액상화 현상

\* 충남대학교 농업생명과학대학 지역환경토목전공  
\* Corresponding author. Tel.: +82-42-821-5793  
Fax: +82-42-821-8877  
E-mail address: dwlee@cnu.ac.kr

은 동적 및 정적하중에서 발생되는데, 정적액상화 현상은 일반적으로 느슨한 모래가 비배수 정적 하중을 받을 때 전단저항이 급격히 감소하여 발생한다. 포화된 비점착성토가 비배수 하중하에서 연성 변형거동이 나타나면 액상화 가능성이 높다고 판단되고 결국 유효응력의 감소로 인하여 파괴가 발생된다. 액상화 거동에 관한 실트양의 영향과 비소성 세립토는 순수모래와는 다른 거동을 나타내지만 그 결과에 대해서는 그 동안 많은 논란이 되어 왔다 (Kramer et al., 1988; Vaid et al., 1995, 1998; Lade et al., 1997; Grozic et al., 1999; Amin et al., 2000; Polito et al., 2001).

세립양이 액상화 가능성을 감소시키거나 비소성 세립토는 거의 영향을 미치지 않는다는 연구결과가 발표되기도 하였는데, Pitman 등(1994)은 비소성 세립분의 영향은 모래보다도 약간 더 팽창반응을 일으키고 액상화 가능성이 작다고 하였다. Ishihara (1993)도 비소성 세립토는 액상화에 매우 작은 영향을 미친다고 하였다. Yamamuro 등(1997, 1998, 1999, 2001)은 구속응력이 증가함에 따라 일반적인 흙에서는 팽창성이 감소되지만 세립분이 포함된 흙에서는 팽창성이 오히려 증가함으로써 액상화에 저항한다고 하였다. 또한 서로 다른 초기공극비와 구속응력관계에서 한계상태선은 항상 하나로 나타나지 않고, 밀도가 높을수록 낮은 구속응력에서 액상화 되며, 느슨한 상태에서는 높은 구속응력에서 안정된 거동을 나타낸다고 하였다.

실내시험결과를 현장에 적용할 때에는 액상화 거동이 과소평가되므로 액상화 분석시 과압밀과 크리이프 영향을 고려하여야 하고, 자연적으로 퇴적된 실트질 모래는 인위적으로 성형한 모래보다도 더 큰 상대밀도에서 액상화 가능성이 크므로 설계시에 이의 영향을 고려하여야 한다.

지금까지 정적 액상화 연구는 대부분 세립분이 작거나 거의 없는 균등하고 순수한 모래 또는 자갈과 같은 조립토에 대해 수행되어 왔다. 그리고 액상화가 발생되었던 흙댐, 성토사면 등은 순수 모래

보다는 실트양이 많이 포함된 흙이고, 기존의 연구들에서는 실트질 모래의 액상화 거동은 모래거동과 유사하다고 가정하여 설계하였지만, 실트질 모래는 순수모래와는 전혀 다른 액상화 거동을 나타내고, 항복상태에서 유효응력개념도 다르게 나타날 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 포화상태의 실트질 모래에서 구속응력, 공극비, 과압밀비 등이 정적 액상화 거동에 미치는 영향을 실험을 통하여 비교분석하고 액상화 거동 해석시 기초자료를 제공하고자 한다.

## II. 재료 및 실험방법

### 1. 사용시료

사용된 시료는 호주 시드니 근교의 Lyell Dam 지역에서 채취한 실트질 모래로서 그의 입도분포곡선 및 물리적 성질은 Fig. 1 및 Table 1과 같다. 사용된 시료는 균등한 입경과 밀도상태에서 재성형하기 위해 50번체(0.3 mm)를 통과한 시료를 사용하였다.

Table 1 Properties of soil used.

Gs	PI(%)	Maximum dry density, ( $\gamma_{dmax}$ )	Optimum moisture content (%)	USCS
2.61	N.P	1.963	10.1	SM

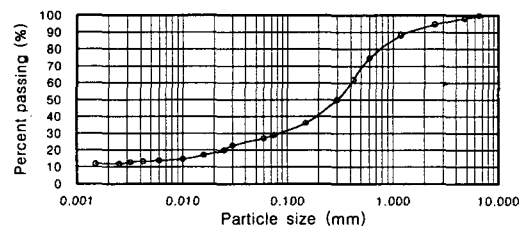


Fig. 1 Grain size distribution curve.

## 2. 시료 성형 및 포화

밀도가 낮은 상태에서 시료의 성형방법은 습윤다짐방법(moist tamping method)과 자연침전방법(funnel deposition method)이 사용되지만, 본 연구에는 습윤다짐방법을 적용하였다. 시료성형은 함수비 7%에서 요구된 공극비를 얻기 위하여 split 몰드에 멤브레인을 씌우고 다짐봉을 1 cm 높이에서 자유낙하시켜 10층으로 나누어 성형하였다. 시료의 포화는 CO<sub>2</sub>를 이용하여 약 15 kPa 압력으로 30분정도 가해 시료속의 공기를 대체한 후 증류수를 시험장치 하부에 연결하여 천천히 시료속으로 공급하였다. 시료내에서 배수된 물은 상부배수 장치를 이용하여 비이커로 측정하고, 시료내의 공기 체적( $v_a$ )과 같아질 때까지 배수를 허용하였다. 시료를 완전히 포화시키기 위해서 back pressure를 300 kPa까지 가한 후 Skempton의 B값 측정하였고, 모든 시험동안의 B값은 0.95이상으로 측정되었다. Back pressure를 가하는 동안 구속응력과 압력차는 항상 10 kPa를 유지하도록 하였다. 포화된 시료는 전단전에 요구된 구속응력에서 등방압밀시키고, 전단은 크리프 영향을 배제하기 위하여 곧바로 시험을 시작하였다. 포화와 압밀동안에 시료는 체적변화가 발생되는데 시료외부의 셀 체적변화량과 시료 체적변화량을 뷰렛을 이용하여 측정후 시료의 단면적을 보정하였다. 전단시 전단속도는 0.05 mm/min으로 조절하였고 전단변형율은 20%까지 측정하였다.

## 3. 실험장치

삼축압축시험기는 포화 및 불포화도에 대하여 실험할 수 있도록 제작되었고, 최대 구속응력을 1,000 kPa 까지 측정할 수 있다.

삼축 셀 실린더는 시료의 포화 및 압밀과정에서 구속응력의 증가로 인한 실린더 팽창을 보정하여 사용하였고, 축하중 작용시의 피스톤 단면적은 체

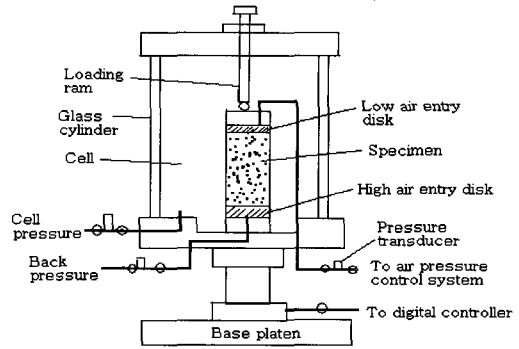


Fig. 2 Modified triaxial test apparatus.

적변화량과 시료 단면적을 함께 보정하여 축차응력을 구하였다. 체적변화장치는 뷰렛을 이용하였고, 수직변위, 구속응력, 로드 셀, 공극수압, 공기압력 등의 모든 측정 장치는 데이터 변환 시스템을 통하여 컴퓨터에 연결되어 있다. 사용된 시험장치는 Fig. 2와 같다.

## III. 결과 및 고찰

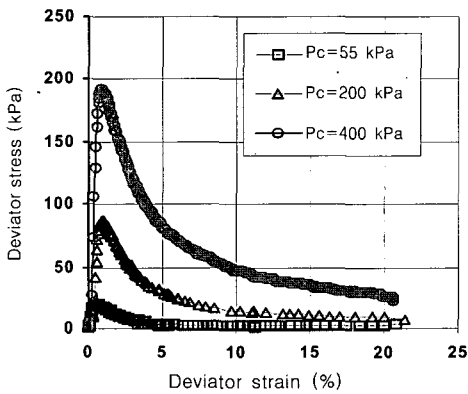
### 1. 구속응력이 정적 액상화에 미치는 영향

정적 액상화 거동에 관한 기본적인 메카니즘은 입자구조의 상호작용과 관련이 있다. 일반적으로 모래사이의 공극에 존재하는 실트의 양은 순수모래와는 기본적으로 다른 입자구조를 가지고 있기 때문에 액상화 거동도 다르게 나타난다. 실트입자가 압축되고 전단되는 동안 큰 공극사이로 미끄러지면서 붕괴가 발생되고, 이러한 붕괴는 초기에 큰 체적수축 변형을 유발하게 되며, 비배수 조건하에서 이러한 거동은 액상화 가능성을 더욱 크게 증가시키게 된다. 정적액상화의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중의 하나는 구속응력으로서 이 응력의 크기에 따라 모래와 실트질 모래의 액상화 거동은 다르게 나타난다. 따라서 서로 다른 형태의 구속응력의 변화가 비배수 응력경로와 액상화에 어떠한 영향을 미치는가를 실험을 통하여 고찰하고자

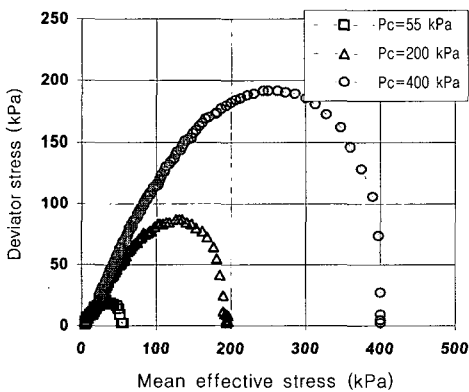
한다.

Fig. 3 (a)는 실트질 모래에서 비배수 초기 유효 응력 경로가 액상화에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 구속응력을 변화시키면서 축차변형[ $\epsilon = 2/3(\epsilon_1 - \epsilon_3)$ ]과 축차응력( $q = \sigma_1 - \sigma_3$ )과의 관계를 나타낸 것이다.

축차응력은 매우 작은 3%미만의 변형에서 최대치에 도달된 후 급격히 감소하며, 변형이 증가함에 따라 한계평형상태를 나타내고 있다. 이와 같은 현상은 전단시 공극수압의 증가로 유효응력이 급격히 감소하기 때문이고 이러한 경향으로 완전한 액상화



(a)  $\epsilon - q$



(b)  $p' - q$

Fig. 3 Undrained stress-strain curves and effective stress path with initial effective confining pressures.

현상이 발생되었음을 판단할 수 있다.

유효응력이 증가하면 순수한 모래와 실트양이 작은 느슨한 상태에서는 공극수압이 감소하기 때문에 팽창화 현상이 발생되고 축변형에 따라서 축차응력이 다시 증가하는 일시적인 액상화 거동이 나타나는데 본 연구에서는 완전한 액상화 현상만 나타났다.

Fig. 3 (b)는 비배수 삼축압축시험에서 평균유효응력 [ $p' = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ ]과 축차응력 ( $q = \sigma_1 - \sigma_3$ )과의 관계를 나타낸 것이다.

정적 액상화는 유효응력이 zero( $\sigma_3' = 0$ )이고, 최대축차응력이 zero( $\sigma_1 - \sigma_3 = 0$ )일 때 발생하는데 일반적인 모래에서는 구속응력이 증가함에 따라 체적수축이 증가되는 경향을 나타낸다. 순수모래와 실트양이 적은 흙에서는 전단중에 실트입자는 모래입자를 더 조밀하게 접촉시켜 흙의 강성구조를 연속적으로 증가시키고 응력과 변형이 증가하면서 팽창화 현상이 발생된다.

그러나 본 연구에서는 구속응력이 증가함에 따라 팽창화 현상과 일시적인 액상화 거동이 나타나지 않고 모래와는 반대인 완전한 정적액상화 현상이 발생되었다. 이와 같은 현상은 많은 실트양이 전단중에 큰 입자 공극사이로 미끄러지고 큰 입자는 서로 이동하려고 하기 때문에 점점 더 입자구조를 더 조밀하게 하고 결국은 체적을 크게 수축시켜 쉽게 액상화 현상이 발생된 것으로 판단된다.

정적 또는 일시적인 액상화 거동에서 체적수축현상은 전단동안에 입자가 재배열되기 때문에 다양한 형태로 나타나게 되는데, 자연적으로 퇴적된 실트질 모래는 인위적으로 성형한 모래보다도 더 큰 상대 밀도에서 액상화 가능성이 크므로 설계시에 이의 영향을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

Kramer 등(1988)은 느슨하고 포화된 모래의 정적 액상화 저항성은 상대밀도와 구속응력이 증가함에 따라 증가하고, 초기전단응력의 증가에 따라서는 감소한다고 하였다. Yamamuro 등(1997, 1999, 2001)도 구속응력이 증가함에 따라 다일레이턴시 현상과 액상화 저항성이 증가하고, 완전한

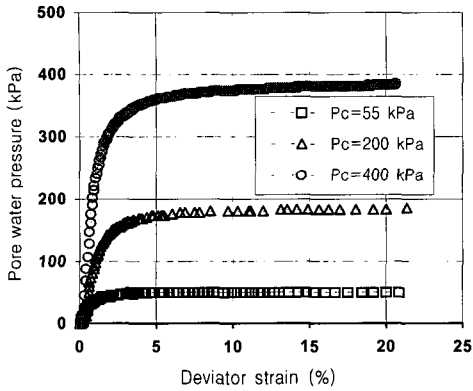


Fig. 4 Pore pressure behaviour with initial effective confining pressures.

정적 액상화 현상은 낮은 구속응력과 매우 낮은 밀도에서 발생하며, 유효응력경로 ( $p' - q$ ) 관계에서도 액상화 영역과 불안정 영역이 뚜렷이 구별되는 현상을 나타낸다고 하였다. 또한 액상화가 발생된 깊이는 대부분 20 m 이하이므로 낮은 구속응력에서 (0-250 kPa) 수행되어야 하며, 매우 느슨한 순수 모래 또는 느슨한 실트질 모래에서의 정적 액상화 거동을 cambridge 응력-변형으로 표시하고, 그 형태는 정적 액상화, 일시적인 액상화, 일시적인 불안정, 불안정의 4가지로 구성된다고 하였다.

Fig. 4는 실트질 모래에서 축차변형에 따른 공극수압의 변화를 나타낸 것이다.

공극수압은 구속응력이 증가함에 따라 매우 큰 증가현상을 나타내며, 초기 변형에서 최대치에 도달된 후 평형상태를 나타내고 있다. 이와 같이 공극수압의 증가는 유효응력이 급격히 감소시키고 결국은 초기에 완전한 액상화 현상을 유발시키게 된다.

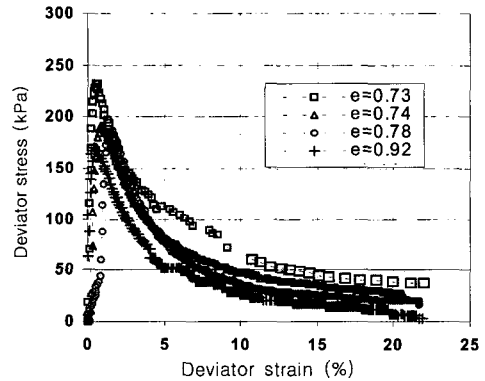
## 2. 공극비가 액상화에 미치는 영향

정적 액상화에 대한 흙의 물리적인 특성은 입도와 밀도에 따라 다르게 나타난다. 느슨하게 침전된 상태에서 실트입자는 모래 공극속으로 이동되며 밀도를 증가시키지만, 공극이 완전하게 채워지지 않아 모래입자를 약간 떨어지게 할뿐 전체적인 흙의

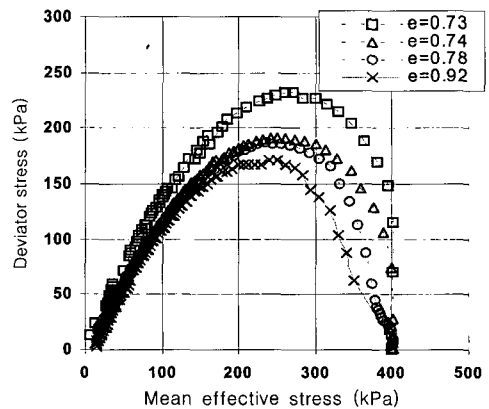
거동에는 영향을 미치지 않는다. 이러한 사실은 자연적으로 느슨하게 충전된 실트모래가 순수모래보다 더 큰 상대밀도에서 쉽게 액상화 되는가를 설명할 수 있다.

공극비의 증가, 즉 상대밀도의 감소는 세립양에 따라 액상화 거동에 큰 영향을 미친다. 공극비의 조절은 시료성형방법에 따라 약간씩 다른 액상화 거동을 나타내는데, 본 연구에서는 습윤다짐방법을 사용하여 성형할 수 있는 가장 느슨한 상태의 공극비와 가장 조밀한 상태의 공극비로 성형하여 액상화 거동을 비배수 시험을 통하여 고찰하였다.

Fig. 5 (a) (b)는 초기유효응력이 400 kPa 일



(a)  $\epsilon - q$



(b)  $p' - q$

Fig. 5 Undrained stress-strain curves and effective stress path with void ratio.

때 초기공극비에 따른 응력-변형과 평균유효응력-축차응력( $p' - q$ )면에서의 응력경로를 나타낸 것이다.

축차응력은 매우 낮은 3% 미만의 변형에서 최대치에 도달한 후 급격하게 감소하는 현상을 나타냈고, 모든 공극비에서 액상화 현상이 발생되었다. 공극비가 감소함에 따라 일반적으로 모래와 실트양이 적은 흙에서는 팽창화 경향을 나타내며 액상화 저항성이 증가하는데 본 연구에서는 반대적인 결과를 나타냈다. 따라서 매우 높은 실트양을 포함한 흙에서는 공극비의 변화에 따라 액상화 거동에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 실트질 모래에서 초기공극비에 따른 공극수압의 변화를 나타낸 것이다.

공극수압은 초기변형에서 매우 급격한 증가현상을 나타낸 후 평형상태에 도달되었고, 공극비가 감소함에 따라 뚜렷한 차이는 나타나지 않았다.

Pitman 등(1994)은 일반적인 흙에서는 세립양이 많아짐에 따라 액상화 가능성이 크고, 완전한 액상화는 상대밀도가 60%보다 큰 밀도에서 발생된다고 하였다. Vaid 등(1995)은 포화된 모래에서 정적 비배수 거동은 가장 느슨한 밀도에서도 팽창 반응을 나타내며, 액상화 현상이 발생된 후의 응력-변형은 연화 거동을 나타낸다고 하였다.

Lade 등(1997)은 초기유효응력이 일정할 때 액상화 거동은 상대밀도가 증가함에 따라 증가한다고

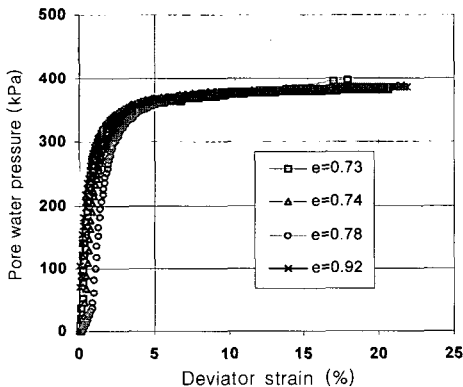


Fig. 6 Pore pressure behaviour with void ratio.

하였다. Yamamuro 등(1997, 1998)도 액상화 현상은 낮은 상대밀도에서는 초기유효응력이 클 때 발생하고, 높은 상대밀도에서는 작은 유효응력에서 발생된다고 하였다.

### 3. 과압밀비가 액상화에 미치는 영향

현장에서의 흙은 응력이력에 따라 액상화 거동이 다르게 나타나고, 이전에 과압밀되었거나 입자구조 생성시기에 따라 크립 특성을 나타낸다. 자연적으로 퇴적되었거나 인공적으로 다져진 제방이나 흙댐에서 상류사면의 수위 급강하나 강우에 의한 사면이 포화된 상태에서의 액상화 거동은 사면안정해석에 큰 영향을 미친다.

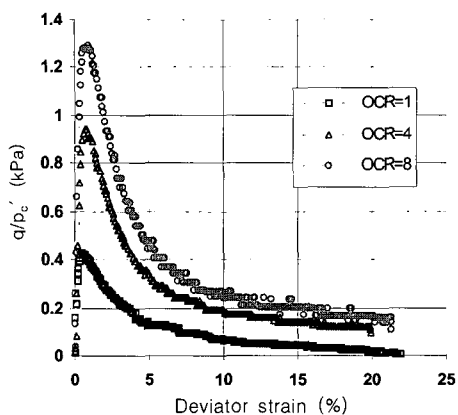
Fig. 7 (a)는 정규압밀과 과압밀된 실트질 모래에서 유효과압밀비( $OCR = p'_c / p'_o$ )를 변화시켰을 때 정규화된 응력변형( $\epsilon_v - a/p'_c$ )을 나타낸 것이다.

비배수 삼축압축시험은 같은 공극비에서 구속응력을 700 kPa, 공극수압을 300 kPa로 압밀시킨 후에 전단시 구속응력을 각각 700, 400, 350 kPa 즉, 유효과압밀비를 각각 1.0, 4.0, 8.0으로 조절하여 시험하였다.

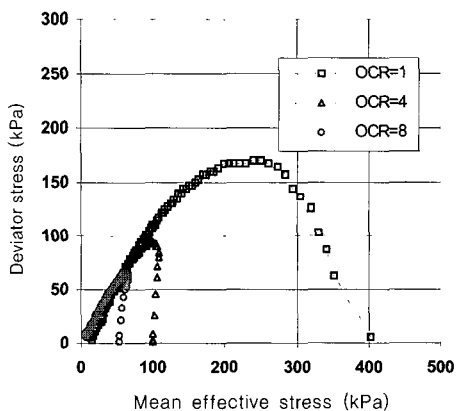
유효과압밀비가 증가하면서 정규화된 축차응력은 급격하게 증가하고, 2%의 낮은 변형에서 최대치에 도달한 후 급격하게 감소하였으며, 모든 유효 과압밀비에서 액상화 상태를 나타냈다.

Fig. 7(b)는 유효과압밀비( $OCR = p'_c / p'_o$ )를 변화시켰을 때 응력경로를 나타낸 것이다. 유효응력경로는 정규압밀 상태에서는 공극수압의 급격한 증가원인으로 그래프가 왼쪽으로 이동하는 경향을 나타내지만, 유효 과압밀 상태에서는 공극수압이 약간씩 증가하기 때문에 유효응력이 커지면서 전응력 경로와 유사하게 그래프가 오른쪽으로 이동되고, 최대치에 도달된 후 급격히 감소하는 현상을 나타냈다.

과압밀된 흙은 밀도가 높고 공극비가 작기 때문에 전단중에 실트입자가 큰모래 입자와 섞여 이동



(a)  $\epsilon - q/p'_c$



(b)  $p' - q$

Fig. 7 Undrained stress-strain curves and effective stress path with effective overconsolidation ratio.

되면서 팽창화 현상이 나타나고, 안정한 상태로 나타날 것으로 판단되었지만, 본 연구에서는 과압밀비의 크기에 관계없이 최대 축차응력에 도달된 후 축차응력이 zero로 감소하는 완전한 정적액상화 현상을 나타냈다.

Fig. 8은 유효과압밀비( $OCR = p'_c / p'_o$ )를 변화시켰을 때 공극수압 거동을 나타낸 것이다. 공극수압은 초기변형에서 급격하게 증가한 후 5%부터는 평형상태를 유지하였고, 유효 과압밀비가 작은 경우에는 초기변형에서 매우 높은 공극수압의 증가현

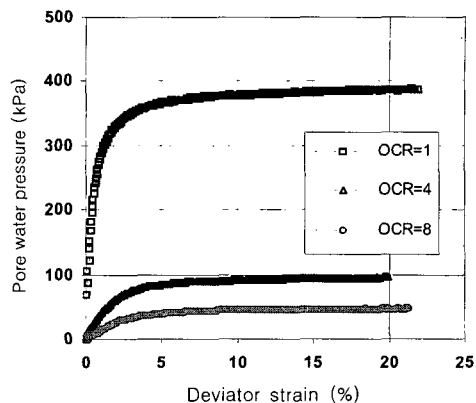


Fig. 8 Pore pressure behaviour with various effective overconsolidation ratio

상을 나타냈고, 과압밀비가 증가함에 따라 공극수압은 크게 감소하였다.

Lade(1993, 1994)는 실내시험결과를 현장에 적용할 때에는 액상화 거동이 과소평가되므로 제방과 수중사면 등에서의 액상화 분석시에는 과압밀과 크리이프 영향을 고려하여야 한다고 하였다. Amin 등(2000)은 균일하고 여러층으로 만들어진 실트질 모래에서는 습윤다짐 방법과 침전방법이 액상화에 큰 영향을 미치지 않는다고 하였다.

Atigh 등(2004)은 수중사면에서 액상화 거동을 배수 삼축시험을 실시하고 탄소성 모델을 이용하여 사면의 파괴가능성을 예측하고 실측치를 비교한 결과, 수중사면에서는 공극수압이 일정하지 않고, 조류변화로 유효응력이 감소되고 부분적인 배수조건 때문에 액상화 현상이 발생된다고 하였다.

#### IV. 결 론

포화상태의 실트질 모래에서 구속응력, 공극비, 과압밀비 등이 정적 액상화 거동에 미치는 영향을 실험을 통하여 비교분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 구속응력의 변화에 따라 축차응력은 매우 작은 변형에서 최대치에 도달된 후 급격하게 감소하였고, 구속응력이 증가함에 따라 팽창화 현상과 일

시적인 액상화 거동이 나타나지 않고 모래와는 반대인 완전한 정적액상화 현상만이 발생되었다.

2. 공극비의 변화에 따라 축차응력은 매우 낮은 3% 이내의 변형에서 최대치에 도달한 후 급격하게 감소하고 평형상태를 유지되는 연성거동을 나타냈다. 또한 모든 공극비에서 팽창화 현상이 나타나지 않았으며, 실트양이 많은 흙에서는 공극비의 변화가 액상화 거동에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

3. 유효과압밀비가 증가하면서 정규화된 축차응력은 급격하게 증가하고, 과압밀비의 크기에 관계없이 최대 축차응력에 도달된 후 zero로 감소하는 완전한 정적액상화 현상을 나타냈다.

### References

1. Amini, F. and G. Z. Oi, 2000, Liquefaction testing of stratified silty sands, *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 126(3): 208-217.
2. Atigh, E. and P. M. Byrne, 2004, Liquefaction flow of submarine slopes under partially undrained conditions: an effective stress approach, *Can. Geotech. J.* 41(1): 154-165.
3. Grozic, J. L., P. K. Robertson and N. R. Morgenstern, 1999, The behavior of loose gassy sand, *Can. Geotech. J.* 36(3): 482-492.
4. Ishihara, K., 1993, Liquefaction and flow failure during earthquakes, *Geotechnique*. 43 (3): 351-415
5. Kramer, S. L. and H. B. Seed, 1988, Initiation of soil liquefaction under static loading conditions, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 114 (4): 412-430.
6. Lade, P. V., 1993, Initiation of static instability in the submarine Nerlerk berm, *Can. Geotech. J.* 30: 895-904.
7. Lade, P. V., 1994, Creep effects on static and cyclic instability of granular soils, *J. of Geotech. Engrg. ASCE*, 120(2): 404-419.
8. Lade, P. V. and J. A. Yamamuro, 1997, Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands, *Can. Geotech. J.* 34(6): 918-928.
9. Pitman, T. D., P. K. Robertson and D. C. Sego, 1994, Influence of fines on the collapse of loose sands, *Can. Geotech. J.* 31: 728-739.
10. Polito, C. P. and J. R. Martin II, 2001, Effect of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands, *J. of Geotech. and Geoenviron. Engrg. ASCE*, 127(5): 408-415.
11. Vaid, Y. P. and J. Thamas, 1995, Liquefaction and postliquefaction behavior of sand, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 121(2): 163-173.
12. Vaid, Y. P. and A. Eliadorani, 1998, Instability and liquefaction of granular soils under undrained and partially drained states, *Can. Geotech. J.* 35(6): 1053-1062.
13. Yamamuro, J. A. and P. V. Lade, 1997, Static liquefaction of very loose sands, *Can. Geotech. J.* 34(6): 905-917
14. Yamamuro, J. A. and P. V. Lade, 1998, Steady-state concepts and static liquefaction of silty sands, *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 124(9): 868-877.
15. Yamamuro, J. A. and P. V. Lade, 1999, Experiments and modeling of silty sands susceptible to static liquefaction. *Mech. of Cohesive-Frictional Mat.* 4(6): 545-564.
16. Yamamuro, J. A. and K. M. Covert, 2001, Monotonic and cyclic liquefaction of very loose sands with high silt content, *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 127(4): 314-324.