한국지반공학회논문집 제17권 6호 2001년 12월 pp. 235 ~ 244

정적 및 동적 하중에서 모래의 액상화 발생

Occurrence of Sand Liquefaction on Static and Cyclic Loading

양 재 혁* Yang, Jae-Hyouk

Abstract

Liquefaction may be caused by sudden decrease in the soil strength under undrained conditions. This loss of soil strength is related to the development of excess pore pressures. During this study, fines content affects the maximum and minimum void ratios are investigated. The results of static and cyclic triaxial test on silty saturated sands are presented. These tests are performed to evaluate liquefaction strength and static and cyclic behavior characteristics. The samples are obtained from Saemangeum and drying on air. The main results are summarized as follows : 1) The maximum and minimum void ratio lines follow similar trends. 2) Maximum and minimum void ratios are established at 20~30% fines content. 3) As confining pressures and overconsolidation ratio are increased, the resistance to liquefaction are increased. 4) Instability friction angles are increased with increasing initial relative density. 5) The resistance to liquefaction are decreased with increasing effective stress ratio.

요 지

액상화는 비배수조건에서 흙 강도의 갑작스러운 감소에 기인한다. 이러한 흙 강도의 손실은 과잉간극수압의 발현과 관련된다. 본 연구에서는 최대 및 최소간극비에 영향을 미치는 세립분 함유량이 조사되었다. 또한 포화된 실트질 모래에 대한 정적 및 동적 삼축시험의 결과를 제시하였다. 이들 시험은 액상화강도와 정적 및 동적 거동 특성을 평가하기 위해 수행되었다. 시료는 새만금 유역에서 채취되었으며 공기건조되었다. 결과를 요약하면 다음과 같다. 1) 최대 및 최소간극비선은 유사한 경향으로 나타났다. 2) 최대 및 최소간극비는 20~30%의 세립분 함유량에서 얻어졌다. 3) 구속압력과 과압밀비가 증가할수록 액상화에 대한 저항은 증가하였다. 4) 불안정마찰각은 초기상대밀도의 증가와 함께 커졌다. 5) 유효응력비가 증가함에 따라 액상화에 대한 저항은 감소하였다.

Keywords : Confining pressure, Fines content, Liquefaction, Maximum and minimum void ratio, Overconsolidation ratio

1. 서 론

포화된 느슨한 모래의 액상화는 정적 또는 동적 비배수하중에 의해 발생된다. 동적 하중조건에 의한 모래지반의 액상화 발생의 거동에 대한 연구는 상당히 진척되어 있지만, 정적 하중조건에 대한 연구는 크게 부각되지 않은 실정이다. 액상화거동에 대한 초기의 중요한 실험적 연구로서는 Castro(1969), Castro 와 Poulos(1977) 그리고 Poulos 등(1985)에 의한 것을 들 수 있으며, 이들은 액상화 발생에 영향을 미치는 요소와 액상화를 평가하는 과정에 대해 연구하였다.

모래지반의 액상화 현상은 지금까지 주로 입도가 균등한 모래지반에서 발생하는 현상으로 인식되어 왔으나 0.075mm 이하의 세립분을 포함하여 퇴적된 모래는 깨끗한 모래보다 액상화가 훨씬 잘 일어난다는 것이 Yamamuro와 Lade(1997), Zlatovic과 Ishihara(1997)에 의해 밝혀졌다. Kuerbis 등(1988)은 Brenda모래의 세립분 함유량을 변화시킨 삼축 압축 및 인장시험을 실시

* 정회원, 여수대학교 시간강사 (Member, Parttime Instructor Yosu National Univ.)

하여 간극공간에서 세립분의 존재는 흙이 보다 팽창하거나 액상화에 저항하도록 만든다고 결론지었다. 양(1999) 등은 정적 액상화 발생에 미치는 세립분 함유량의 영향을 고찰하였다. Pitman 등(1994)은 파쇄된 비소성 석영 세립분과 kaolinite를 가진 Ottawa모래를 시험하여 비소성 세립분의 영향이 모래가 보다 덜 액상화되는 팽창의 반응을 일으킨다고 결론지었다. 따라서 세립분의 함유량이 액상화 거동에 미치는 영향이 새로운 연구과제로 부각되고 있다. 매립지반 등에 포함되어 있는 세립분 중에는 점토의 비율이 10%이하인 경우가 대부분이다. 따라서 비교적 저소성인 실트질의 세립분이 포함되어 있는 모래질 흙의 액상화 발생에 대한 영향을 살펴보는 것은 매립토의 특성 파악에 매우 중요하다고 할 수 있다.

한편 지금까지 모래지반의 거동 양상은 주로 상대밀도와 관련되며, 이 값은 주어진 모래에 대해 최대, 최소간극비 사이에서의 상대적 위치를 나타내는 값이다. 그리고 모래에 대한 대부분의 공학적 특성은 간극비의 항으로 정의되는 상대밀도와 관련되어졌고, 이러한 상대밀도의 양은 모래의 특성에 대한 하나의 지표로 사용되었다. 그러나 세립분 함유량은 최대 및 최소간극비에 영향을 미치며, 따라서 액상화 가능성에 대해 상대밀도가 유일한 지표로 사용된다는 것은 의문스러운 것이다. Seed 등(1975)은 모래의 액상화 가능성에 대한 과압밀의 영향을 평가하기 위해 수정계수를 도입하였으며, Ishihara 등(1979)은 정규압밀 상태의 모래에 대한 과압밀된 모래의 액상화 강도를 예측할 수 있는 방법을 제시하였다.

따라서 본 연구에서는 새만금 유역에서 채취한 준설모래를 가지고 세립분 함유량을 달리하여 모래의 최대 및 최소간극비의 변화 특성을 알아보았다. 다음으로 초기상대밀도와 구속압력을 달리한 정적 및 동적 비배수 삼축압축시험을 통해, 상대밀도와 구속압력이 정적 및 동적 액상화의 발생에 미치는 영향을 파악하였다. 마지막으로 과압밀비를 달리한 동적 비배수삼축압축시험을 실시하여 과압밀 정도가 액상화저항에 미치는 영향과 Ishihara 등(1979)의 제안식의 액상화강도에 대한 예측정도를 알아보았다.

2. 시 험

2.1 시료준비 및 특성

본 연구의 최대 및 최소간극비시험과 정적 및 동적 삼축시험에서 사용된 시료는 새만금 유역에서 채취한 준설모래이다. Table 1은 새만금 준설모래의 물리적 특성을 보인 것이다. 정적 삼축시험에 사용된 시료의 자연상태에서 세립분 함유량은 10%이고, 동적 삼축시험의 경우 8%이다. Fig. 1은 각각의 시험시료에 대한 자연상태의 입도분포곡선을 보인 것으로서, 입경 크기가 균등한 모래로 판명되었다.

정적 및 동적 비배수 삼축압축시험은 직경 50mm와 높이 110mm인 원통형 공시체에 대해 수행되었다. 정적 및 동적 하중조건에서 액상화된 대부분의 모래가 하상 또는 해저에서 퇴적되었으므로, 이러한 퇴적과정을 재현한 퇴적방법이 반드시 사용되어야 한다. 공시체의 제작방법 중 수중침전퇴적방법은 하부는 조립 부분, 상부는 세립 부분을 가진 불균질한 시료를 만드는 경향이 있다. 건조퇴적방법은 자연적으로 퇴적된 모래와 유사한 입자구조를 만들므로(Oda 등 1978), 공시체의 제작은 세립분과 더 큰 모래입자가 제작 중에 분리되는 현상을 방지하기 위해 건조-깔때기퇴적방법을 사용하였다. 이는 주둥이에 튜브를 붙인 깔때기에 건조모래를 넣는 방법으로 수행되었다. 튜브는 분리된 몰드의 바닥에 위치된다. 튜브는 시료의 대칭축을 따라 천천히 올려졌

Table 1. Physical properties of natural Saemangeum dredged sand

Type	Gs	#200 percent finer(%)	e_{max}	e_{min}
Static loading	2.695	10	1.218	0.835
Cyclic oading	2.695	8	1.237	0.765

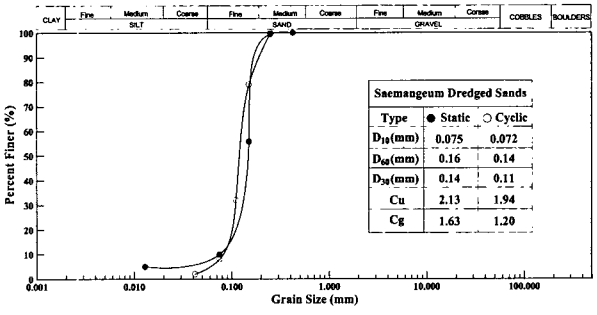


Fig. 1. Particle-size distribution curve on Saemangeum dredged sands

으며, 따라서 흙은 어떠한 낙하높이도 허용되지 않았다. 원하는 초기상대밀도는 대칭적인 양상으로 몰드를 필요에 따라 가볍게 두드려 얻어졌다.

2.2 정적 및 동적 삼축시험 방법

공시체와 상, 하부 캡 사이의 마찰을 없애기 위해 그리스를 바르고 0.3mm두께의 매끄러운 판을 부착하였다. 성형상자 내부에 시료를 위에서 설명한 건조-깔때기 퇴적방법으로 성형하였다. 성형된 공시체에 CO_2를 주입하여 포화도를 높였다. 시험에 사용된 모든 공시체의 B값은 0.97 이상이었다. 정적 삼축시험은 변형률제어방식, 그리고 동적 삼축시험은 응력제어방식으로 수행되었다. 모든 시료는 일정한 구속압력으로 초기에 등방압축되었다. 그 후 비배수상태로 전단을 실시하였으며, 과잉간극수압이 측정되었다. 동적 삼축시험에서 시료가 등방압축된 이후 구속압력을 일정히 유지시키면서 0.1Hz로 축방향응력을 가하였으며, 사용된 동적파형은 정현파(Sine파)이다. 시료는 증가하는 축방향응력 $\sigma_d/2$ 와 동시에 감소하는 수평응력을 받는다. 이러한 비배수 동적삼축시험의 결과는 일반적으로 액상화를 발생시키는 전단응력 $\sigma_d/2$ 와 초기구속압력 σ_3 의 비로 표현된다. 즉, 응력비 $\sigma_d/2\sigma_3$ 이다. 본 연구에서는 초기상대밀도와 구속압력을 변화시켜 정적 비배수삼축시험을 실시하였다. 또한 동적 삼축압축시험은 초기상대밀도와 구속압력 그리고 과압밀비를 변화시켜 수행하였다. 동적 삼축시험의 종료는 간극수압이 초기구속압력과 같게 되거나 축변형률이 일정해지는 시점으로 결정하였다.

3. 최대 및 최소간극비

깨끗한 모래의 거동은 No.200체(0.075mm)를 통과하고 액상한계와 소성한계를 결정할 수 없는 비소성 세립분의 함유량에 영향을 받는다. 모래의 간극비는 크고 작은 입경을 갖는 흙입자 배열형태에 따라 큰 차이가 나며, 세립분이 존재할 경우 세립분 입자의 간극공간의 점유정도에 따라 간극비는 크게 달라진다. 중량으로 비소성 세립분의 함유량을 달리한 깨끗한 준설모래의 최대 및 최소간극비를 결정하여 Fig. 2에 나타내었다. 최소간극비는 메스실린더에 50g의 모래를 넣고, 고무망치로 실린더의 4군데 대응하는 면을 두 번 가볍게 두드려 밀도가 가장 크게 만들었으며, 이 과정을 500g의 모래에 대해 반복하였다. 최대간극비는 실린더의 끝을 덮고 거꾸로 엎은 다음 대략 45~60초 동안 다시 원위치로 매우 천천히 이동시켜 얻었다. 각각의 측정된 체적으로 최대 및 최소간극비를 계산하였다.

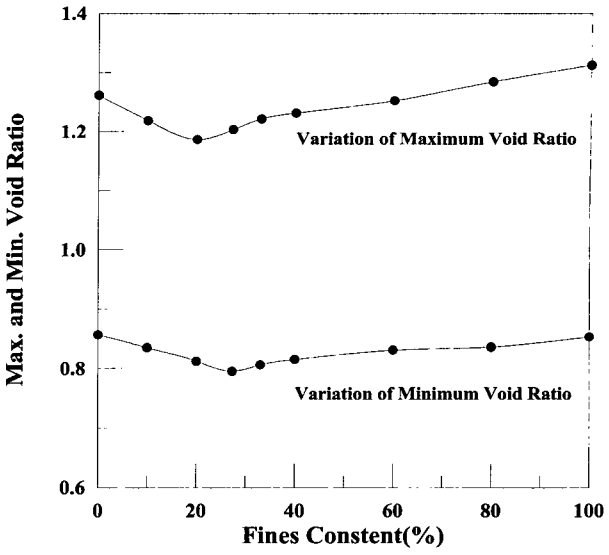


Fig. 2. Variations of maximum and minimum void ratios with fines

Fig. 2에서 보인 바와 같이, 세립분 함유량에 따른 최대 및 최소간극비선은 평행하게 나타났다. 최대간극비는 세립분 함유량이 증가할수록 점차 감소하다가 20% 정도에서 가장 작은 값을 나타내었다. 그 후 점차 간극비가 증가하는 경향을 보였다. 최소간극비선도 30% 정도의 함유량에서 가장 작은 값을 나타낸다는 것을 제외하고는 최대간극비선과 유사한 양상을 보이고 있다. 이는 다음과 같이 설명할 수 있다. 세립분을 함유하지 않은 깨끗한 모래는 밀도가 그리 크지 않게 존재하지만, 점차 세립분이 증가함에 따라 큰 모래입자 사이의 간극공간을 세립의 입자가 점유하게되어 밀도는 점차 증가한다. 그러나 가장 큰 밀도를 나타낸 후에는 더욱 증가된 간극공간 사이의 세립분이 오히려 더 큰 모래입자들을 서로 떨어지게 하여 밀도가 작아지게 된다. 따라서 자연상태로 퇴적된 새만금 준설모래의 밀도는 중량으로 20~30% 범위의 세립분을 포함하였을 때 가장 크다는 것을 알 수 있다.

4. 정적 및 동적 액상화 발생에 대한 구속압력의 영향

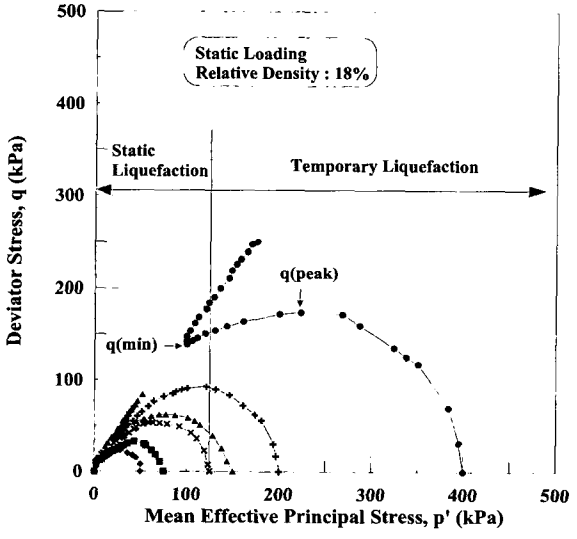
일반적으로 흙의 전단강도는 유효구속압력이 클수록 커진다. 구속압력이 비교적 작은 범위에서 모래나 정규

압밀점토의 정적 전단강도는 유효구속압력에 비례하고, 비례상수가 내부마찰각 ϕ 인 것은 잘 알려져 있는 사실이다. Fig. 3은 초기상대밀도가 18%인 새만금 준설모래에 대한 일련의 정적 비배수 삼축압축시험 결과를 보인 것으로서 초기구속압력은 50～400kPa이다. Fig. 3(a)는 $p'-q$ 응력공간의 유효응력경로를 보인 것이다. 여기서, $p'=(\sigma_1'+2\sigma_3')/3$ 은 평균유효주응력, σ_1' 은 축방향유효주응력, σ_3' 은 유효구속압력이다. 또한 $q=\sigma_1-\sigma_3$ 은 축차응력이다. Fig. 3(b)는 이에 대응하는 응력-변형률 곡선을 보인 것이다. 완전한 불안정 즉, 정적 액상화 파괴는 125kPa 이하의 구속압력에서 발생하였다. 정적 액상화 파괴는 $\sigma_3'=0$ 과 $q=\sigma_1-\sigma_3=0$ 인 응력조건에서 발생되며, 초기구속압력에서 축차응력이 첨두값까지 증가한 후 응력 원점에 도달하여 축차응력이 "0"가 되는 상태이다.

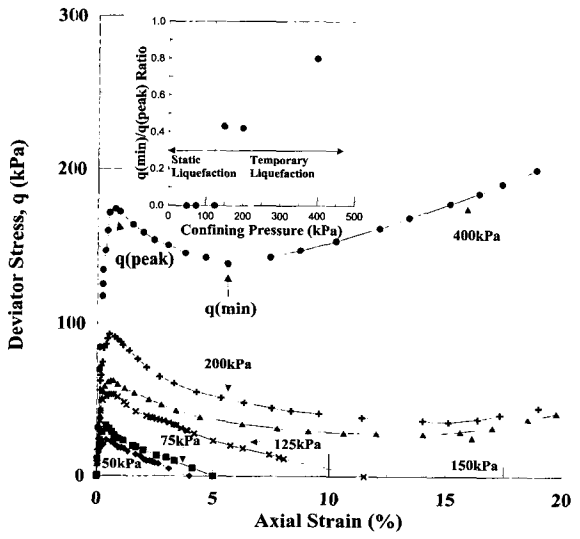
Fig. 3(a)에서 초기구속압력이 150kPa 이상으로 증가했을 때 유효응력경로는 완전한 액상화 파괴에 대한 증가하는 안정 또는 저항의 거동을 나타내고 있다. 이와 같이 일시적 불안정 거동을 보이는 현상을 일시적 액상화라고 한다. 이는 Fig. 3(b)의 응력-변형률곡선에 의해 설명될 수 있다. 즉, 초기구속압력 150, 200, 그리고 400kPa에 대한 응력-변형률곡선은 완전한 액상화를 나타내는 초기구속압력 50～125kPa에서와 같이 축차응력이 "0"에 도달하지 않았다. 축차응력은 전단이 진행됨에 따라 초기 첨두값에 도달한 후 최소값까지 감소한 후, 유효응력을 증가시키고 간극수압을 감소시키는 시료의 팽창에 의해 초기 첨두값 보다 훨씬 위의 값까지 증가하였다. 또한 축차응력의 초기 첨두값과 최소값의 사이의 축변형률 차가 초기구속압력이 증가할수록 적어지고 있다. 따라서 이러한 시험을 통해 동일한 세립분 함유량과 초기상대밀도에서 구속압력을 증가시키면 정적 액상화 파괴에 저항하는 흙의 팽창도 점차 증가하여 dilatancy의 증가나 액상화에 대한 저항은 더욱 커지며, 완전한 정적 액상화 파괴는 상대적으로 낮은 초기구속압력에서 발생한다는 것을 분명히 알 수 있다.

한편 액상화에 대한 저항은 초기 첨두축차응력에 대한 최소축차응력의 비 q(min)/ q(peak)로서 파악될 수 있다. q(min)/q(peak)의 비가 "0"이면 완전한 액상화 파괴를 나타내며, "1"이면 완전히 안정된 거동을 나타낸다. Fig. 3(b)에 삽입된 그림은 초기상대밀도가 18%인 새만금 준설모래의 초기구속압력에 대한 q(min)/q(peak)의 변화를 보인 것이다. 그림에서 보인 바와 같이, 초기구속압력 125kPa 이하에서 이 비는 "0"이며, 완전한 액상화 파괴를 보이고 있다. 또한 150～400kPa의 초기구속압력에서 이 비는 점차 증가하는 경향을 보인다. 이는 등방압밀을 하는 동안 증가하는 구속압력의 영향이 모래의 느슨한 초기상대밀도를 더 크게 만들며, 따라서 전단 동안 체적이 더욱 팽창하여 유효응력을 증가시키기 때문이라고 생각된다.

Fig. 4와 5는 구속압력이 새만금 준설모래의 동적 액상화 거동에 미치는 영향을 알아보기 위해, 상대밀도 30%인 시료에 유효구속압력을 50, 400kPa로 변화시켜



(a) Effective stress paths



(b) Undrained stress-strain curves

Fig. 3. Effective confining pressure affecting static liquefaction behavior (initial relative density 18%)

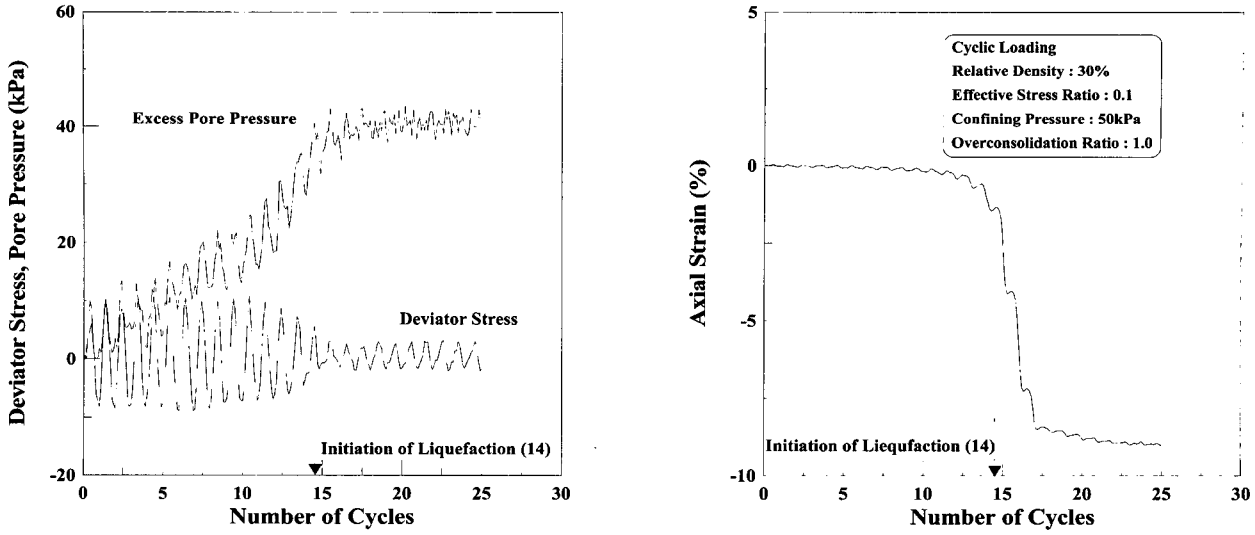


Fig. 4. Effective confining pressure affecting cyclic liquefaction behavior ($\sigma_3 = 50$kPa)

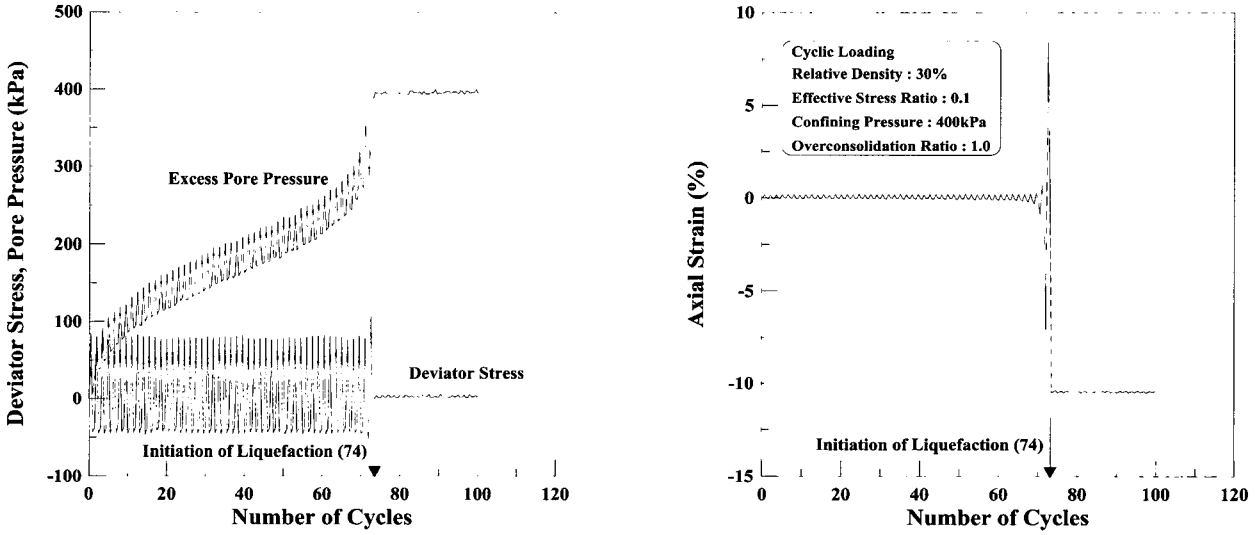


Fig. 5. Effective confining pressure affecting cyclic liquefaction behavior ($\sigma_3 = 400$kPa)

유효응력비 0.1의 동적하중을 가해 액상화의 발생을 비교한 것이다. 비배수 동적 삼축시험의 결과를 나타낼 때는 일반적으로 반복횟수에 대한 축차응력, 과잉간극수압, 축변형률 등으로 표시한다. 그림에서 보인 바와 같이, 동적하중이 가해짐에 따라 과잉간극수압이 점차 증가하고 있으며, 과잉간극수압이 유효구속압력에 가까이 근접할 때를 액상화의 시점으로 결정하였다. 축변형률은 시험초기부터 거의 변화가 없다가 액상화가 발생하는 시점에서 갑자기 증가하는 경향을 보였다. 간극수압의 발현도 액상화의 시점 바로 직전에 갑자기 증가하는 양상이 있으며, 이러한 경향은 본 연구의 모든 동적 삼축시험에서 유사하게 나타났다. 유효구속압력이 커짐에 따라 액상화 시점에 도달하기 위한 동적하중의 재하횟수는 각각 14, 74회로 증가하였다. 따라서 액상화에 저항하는 강도는 유효구속압력의 증가와 함께 점차 커진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 구속압력에 따른 액상화강도의 변화를 유효응력비에 따라 나타낸 것이다. 각각의 점은 초기조건이 다른 비배수 동적 삼축압축시험의 결과이다. 유효응력비가 0.15일 경우 액상화강도에 대한 구속압력의 영향은 그리 크게 나타나지 않지만, 유효응력비가 점차 작아질수록 그 영향은 상당히 크게 나타나고 있다. 또한 유효응력비가 커질수록 액상화강도는 작아지고 있다.

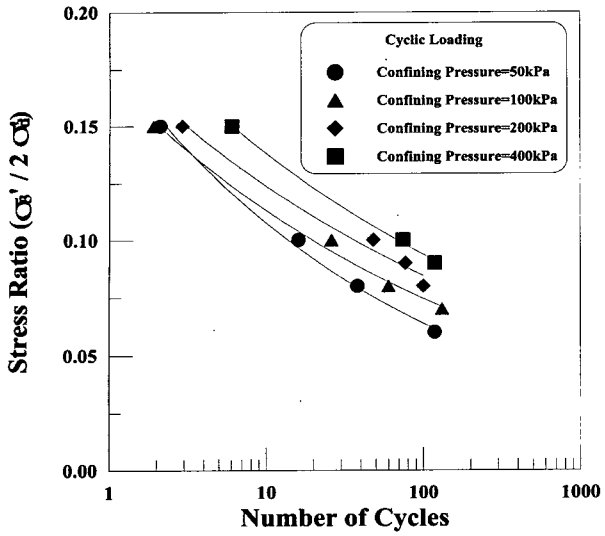
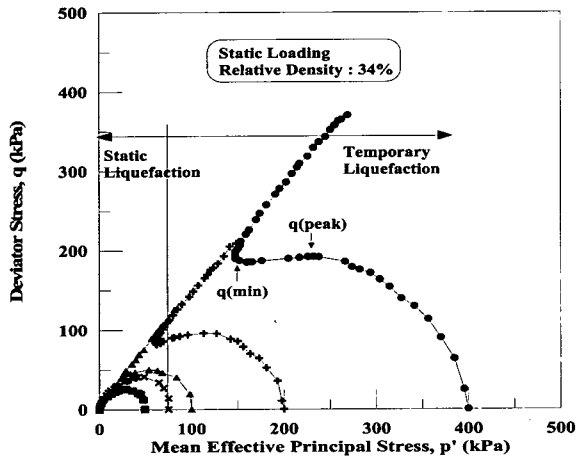


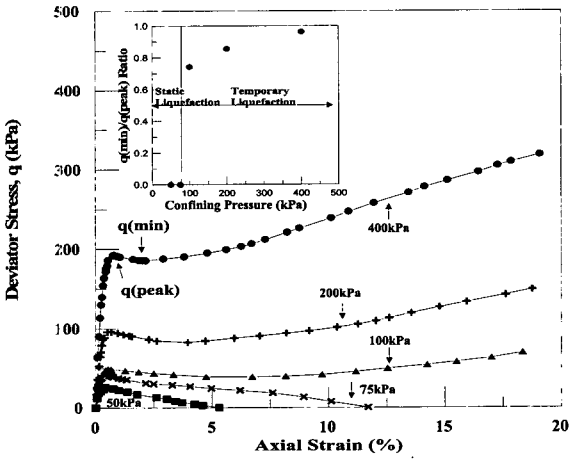
Fig. 6. Confining pressure affecting cyclic liquefaction strength

5. 정적 및 동적 액상화 발생에 대한 상대밀도의 영향

새만금 준설모래의 정적 액상화 발생에 대한 초기상대밀도의 영향을 검토하기 위해 초기상대밀도 34와 50%에 대한 일련의 비배수 삼축압축시험을 실시하였다. 이들 초기상대밀도에 대한 $p'-q$ 응력공간의 유효응력경로와 이에 대응하는 응력-변형률곡선을 Fig. 7과 8에 각각 나타내었다. Fig. 7에서 보인 바와 같이, 초기상대밀도 34%인 경우 정적 액상화 파괴는 75kPa이하의 초기구속압력에서 발생하였으며, 이보다 더 높은 초기구속압력(100, 200, 400kPa)에서는 축차응력이 초기 첨두값 이후 최소값까지 감소하였다가 다시 증가하는 일시적 액상화의 거동을 보이고 있다. 이를 Fig. 3의 초기상대밀도 18%와 비교해보면, 초기상대밀도 34%의 경우 정적 액상화 파괴는 75kPa 이하의 더 낮은 초기구속

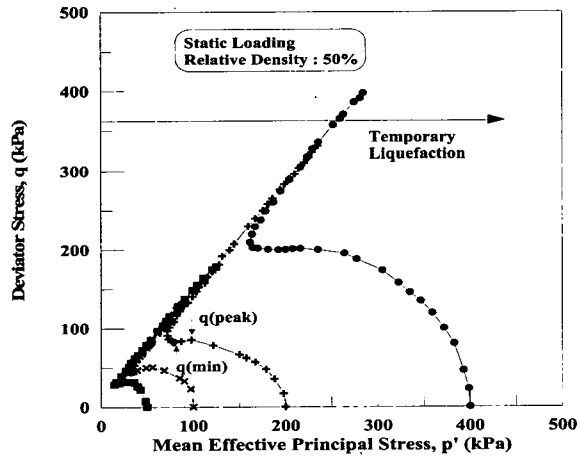


(a) Effective stress paths

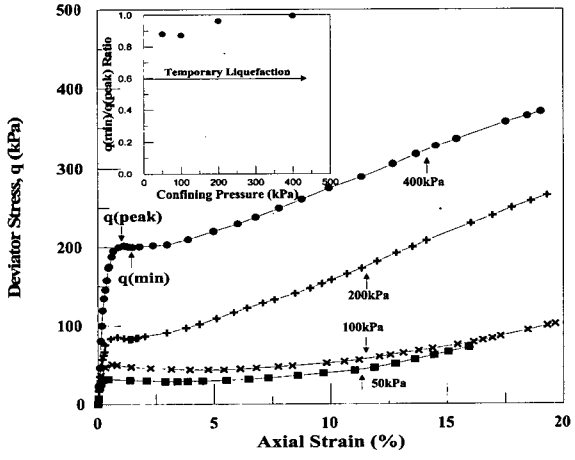


(b) Undrained stress-strain curves

Fig. 7. Effective confining pressure affecting static liquefaction behavior (initial relative density 34%)



(a) Effective stress paths



(b) Undrained stress-strain curves

Fig. 8. Effective confining pressure affecting static liquefaction behavior (initial relative density 50%)

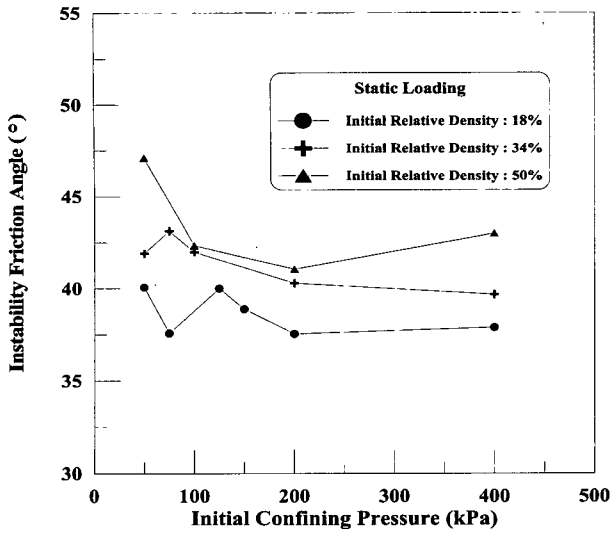


Fig. 9. Static Instability friction angle with initial confining pressure

압력에서 발생하였으므로, 증가하는 초기상대밀도는 흙의 더 큰 체적 팽창을 유발시켜 액상화에 대한 저항을 증가시킨다는 것을 알 수 있다.

이와 같은 경향은 Fig. 8에서 더욱 뚜렷이 나타난다. Fig. 8은 새만금 준설모래의 초기상대밀도를 50%까지 증가시킨 경우이며, 초기상대밀도가 증가할수록 정적 액상화에 대한 저항이 더욱 커진다는 것을 보여주고 있다. 이러한 초기상대밀도에서 심지어 50kPa과 같은 낮은 초기구속압력에서도 정적 액상화 파괴가 발생되지 않았다. 따라서 초기상대밀도가 정적 액상화 거동에 미치는 영향은 대단하다는 것을 알 수 있다. 한편, Fig. 3(b)와 7(b), 8(b)에서 보인 바와 같이, 이와 같은 느슨한 시료들의 응력-변형률곡선은 상대밀도가 큰 시료와는 상이한 거동을 보인다는 것을 알 수 있다. 즉, 정적액상화가 가능한 느슨한 상태의 시료에서는 전단초기에 전

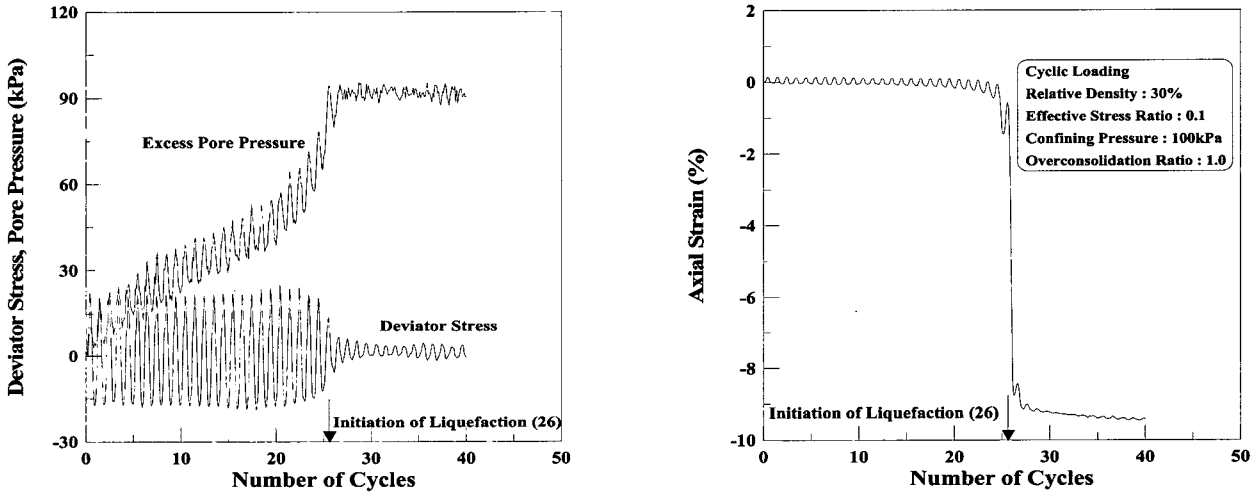


Fig. 10. Relative density affecting cyclic liquefaction behavior (Dr=30%)

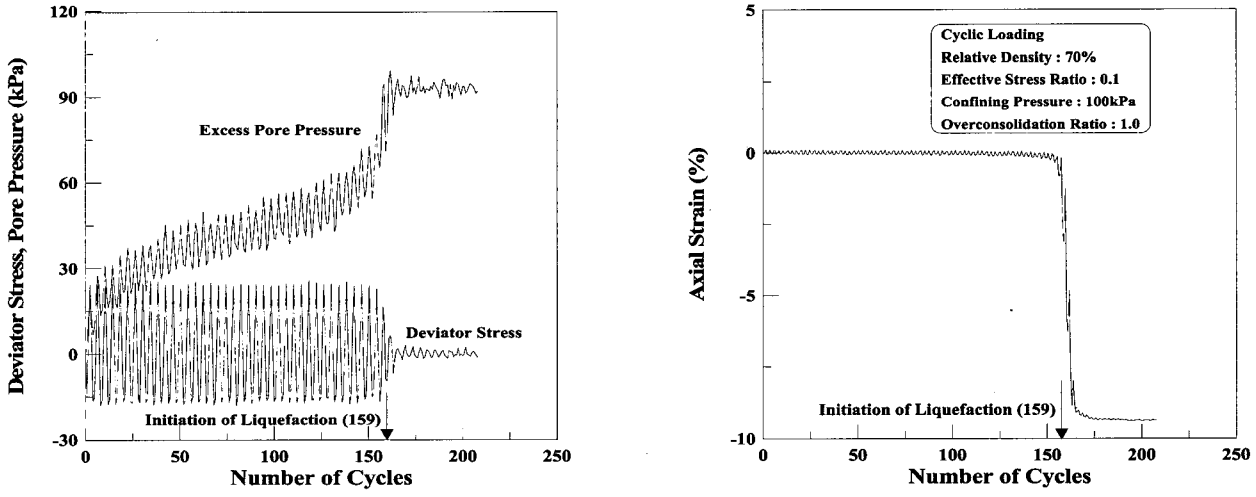


Fig. 11. Relative density affecting cyclic liquefaction behavior (Dr=70%)

단저항력의 급격한 증가 이후, 아주 작은 축변형률인 1%정도에서 체적감소의 경향 때문에 연화(softening)현상이 발생하다가 축변형률이 증가함에 따라 경화(hardening) 현상으로 바뀌고 있다. 이러한 연화현상의 경향은 상대밀도가 증가할수록 적게 나타나고 있다. 이는 Yamamuro와 Lade(1997)의 Nevada모래에 대한 시험결과에서도 유사하게 나타났으며, 연화현상의 발생 이후 상대밀도가 큰 시료일수록 dilatancy현상이 더 빨리 나타나기 때문이다. Fig. 7(b)와 8(b)에 삽입된 그림은 초기상대밀도 34와 50%의 q(min)/q(peak) 비에 대한 초기구속압력의 관계를 보인 것이다. Fig. 7(b)에서 보인 바와 같이, 초기상대밀도 34%에서 q(min)/q(peak)의 비는 75kPa 이하에서 "0"의 값을 보이고 있으며, 그 후 점차 증가하고 있다. Fig. 8(b)는 초기상대밀도 50%에 대한 것으로서 q(min)/q(peak) 비는 점차 증가하는 일시적 액상화의 거동을 나타내었다.

Fig. 9는 정적 삼축압축시험에서 초기상대밀도 18, 34, 그리고 50%의 초기구속압력에 대한 불안정 마찰각의 변화를 보인 것이다. 이러한 불안정 마찰각은 Yamamuro와 Lade(1997)에서와 같이 결정하였다. 즉, $p'-q$ 의 응력공간에서 완전한 정적 액상화를 보이는 시험에서는 최대축차응력에 대한 원점에 대한 각도이며, 일시적 정적 액상화를 나타내는 시험의 경우, 초기 첨두축차응력과 관련된 원점에 대한 각도이다. 그림에서 보인 바와 같이, 각각의 상대밀도에서 초기구속압력의 증가에 대한 불안정 마찰각은 일정한 경향을 보이지 않았다. 그러나 더 높은 초기상대밀도가 더 높은 불안정 마찰각을 보인다는 것이 명확히 나타난다.

Fig. 10과 11은 새만금 준설모래에 대해 상대밀도가 동적 액상화 거동에 미치는 영향을 알아보기 위해 실시한 시험결과로서, 초기상대밀도를 각각 30%, 70%로 변화시킨 시료에 유효응력비 0.1과 구속압력 100kPa을 가하여 수행하였다. 상대밀도가 증가할수록 액상화에 필요한 동적하중 재하의 반복횟수가 각각 26, 159회로 증가하였다. 따라서 상대밀도가 클수록 액상화에 저항하는 강도가 증가함을 알 수 있다. 즉 느슨한 모래에서는 동적하중을 가할 경우 단지 몇 번의 반복재하에서 액상화 파괴가 발생하지만, 조밀한 모래에 있어서는 응력의 크기가 같다 하더라도 훨씬 많은 횟수의 반복재하가 필요하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 동적 액상화 거동에 미치는 상대밀도의 영향을 유효응력비 대 동적하중의 재하횟수로 나타낸 것

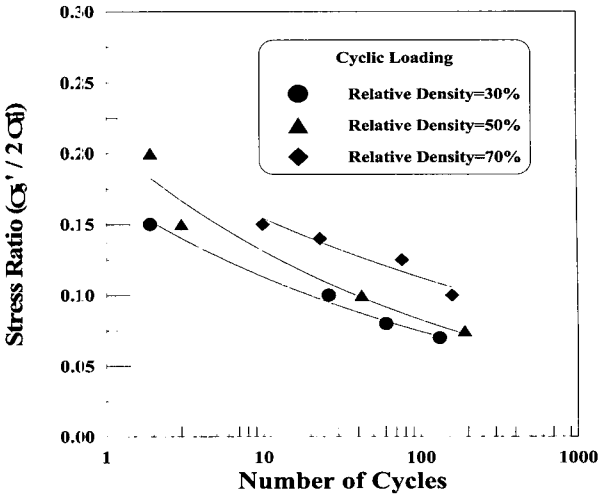


Fig. 12. Relative density affecting cyclic liquefaction strength

이다. Fig. 12에서 보인바와 같이, 상대밀도 30%의 경우 반복횟수 10, 50, 그리고 100에서 액상화 파괴는 유효응력비 0.115, 0.08, 그리고 0.075에서 발생되었다. 또한 상대밀도 50%의 경우 이들에 대한 유효응력비는 각각 0.13, 0.095, 0.08이고, 상대밀도 70%의 경우 0.15, 0.125, 0.12이다. 따라서 앞에서 언급한 바와 같이, 상대밀도의 증가에 따라 액상화강도는 커지고 있으며, 유효응력비가 증가할수록 액상화강도는 감소하고 있다.

6. 동적 액상화 발생에 대한 과압밀비의 영향

수평으로 퇴적된 모래지반에서 과도한 하중의 제거 또는 지하수위의 저하나 상승으로 발생할 수 있는 액상화강도에 대한 과압밀의 효과를 평가하기 위해서는 과압밀된 시료에 대한 비배수 동적삼축시험의 결과를 검토하여야 한다. Fig. 13과 14는 과압밀에 따른 액상화강도의 변화를 알아보기 위해 상대밀도 30%, 유효응력비 0.2, 구속압력 100kPa의 시료에 과압밀비 2.0, 4.0으로 시험한 결과를 보인 것이다. 과압밀비가 증가할수록 액상화 시점에 도달하기 위한 하중반복횟수는 5, 17회로 점차 증가하고 있다. 따라서 액상화에 저항하는 강도는 시료가 과압밀될수록 증가하며 과압밀비의 크기는 액상화강도와 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 모래지반이 과압밀되면 입자간 접촉 사이의 결합정도가 증가하고 흙의 구조가 변화하므로, 결국 액상화강도가 증가된다. 따라서 이와 같은 시험결과는 세립분을 포함한 모래의 액상화강도를 평가하기 위해서는 반드시 선행응력이력을 고려해야 한다는 것을 시사해주고 있다.

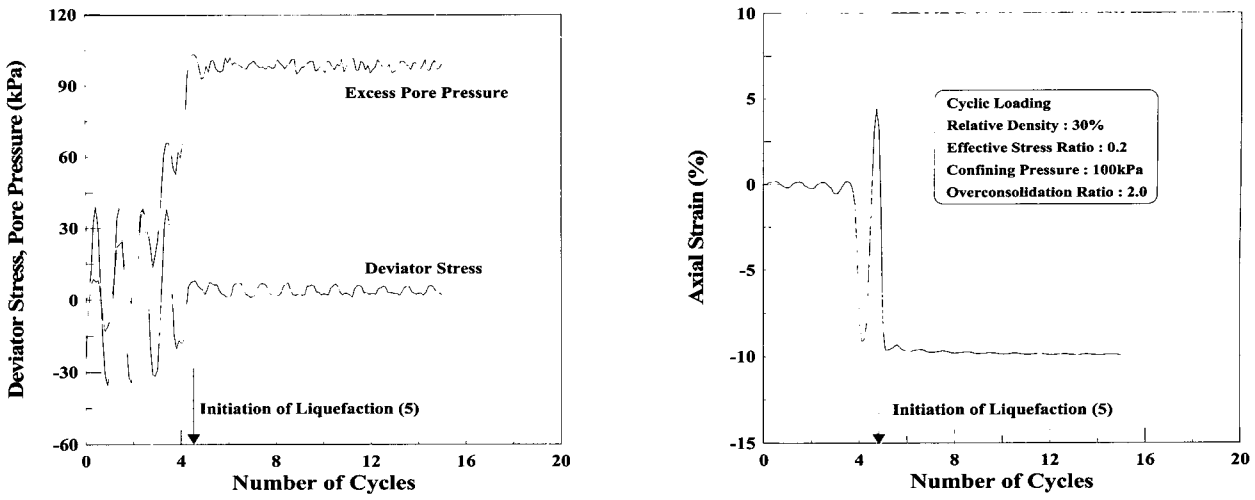


Fig. 13. Overconsolidation ratio affecting cyclic liquefaction behavior (OCR=2.0)

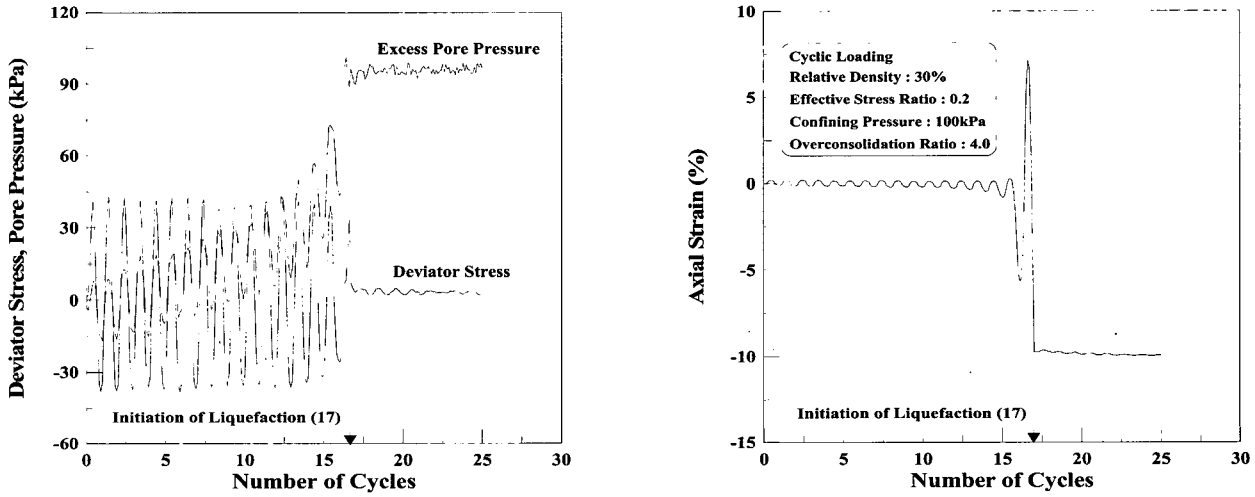


Fig. 14. Overconsolidation ratio affecting cyclic liquefaction behavior (OCR=4.0)

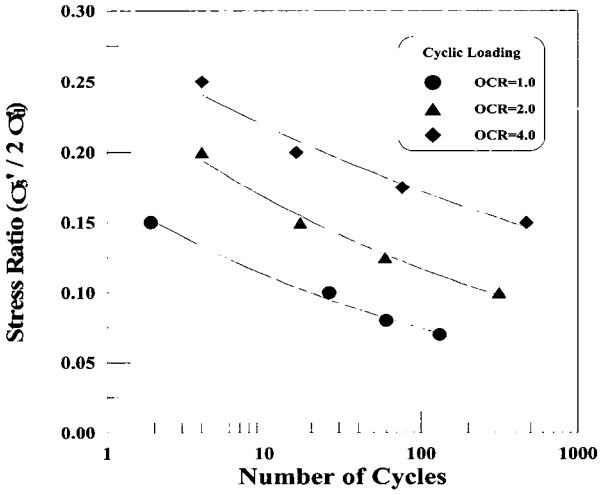


Fig. 15. Overconsolidation ratio affecting liquefaction strength

Fig. 15는 과압밀비가 액상화강도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 상대밀도 30%의 시료에 대해 과압밀비를 1.0, 2.0, 4.0으로 변화시켜 액상화강도를 비교한 결과이다. 과압밀비의 증가에 따라 액상화강도는 유효압밀비의 크기에 관계없이 거의 같은 비율로 증가하고 있다는 것을 알 수 있다.

한편 Ishihara와 Takatsu(1979)는 과압밀상태와 정규압밀상태의 액상화강도를 단순전단시험 결과를 통해 각각 $(\tau_l/\sigma_v')_{OC}$와 $(\tau_l/\sigma_v')_{NC}$로 나타내고 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\left(\frac{\tau_l}{\sigma_v'}\right)_{OC} = \sqrt{OCR}\left(\frac{\tau_l}{\sigma_v'}\right)_{NC} \quad (1)$$

여기서, τ_l은 반복횟수 20회에 초기액상화를 발생시키

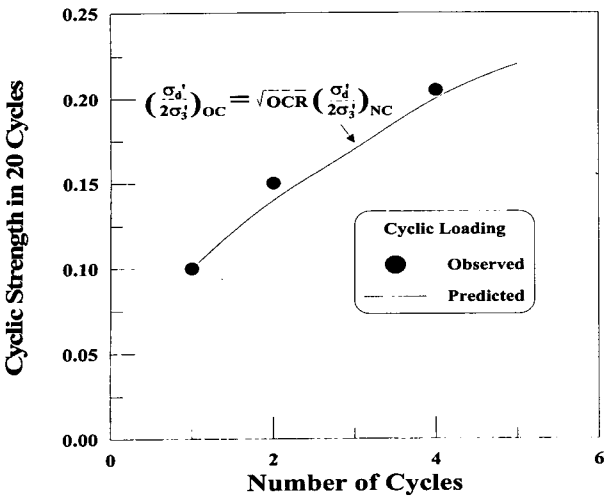


Fig. 16. Cyclic strength increase due to overconsolidation

는데 필요한 전단응력이고, OCR은 과압밀비, σ_v'은 유효연직응력이다. (τ_l/σ_v')를 삼축조건의 응력비 $\sigma_d/2\sigma_3$로 대체할 수 있으며, 이와 같은 식으로부터 과압밀된 시료의 액상화강도는 정규압밀된 시료의 액상화강도에 과압밀비의 평방근을 곱하여 구할 수 있다.

Fig. 16은 과압밀비 1.0, 2.0, 그리고 4.0에 대한 동적 하중 재하횟수 20에서 유효응력비의 실측치와 식 (1)에 의한 예측치를 비교한 것이다. 그림에서 보인 바와 같이, 과압밀에 대한 유효응력비의 실측치는 과압밀비의 평방근에 비례하게 증가하였으며, 예측치와 상당히 일치하는 경향을 보였다. 따라서 새만금 준설모래는 Ishihara 등이 제안한 식 (1)과 유사한 액상화강도의 변화특성을 가지고 있는 것으로 나타났으며, 이 식에 의한 액상화강도의 예측정도는 매우 높다는 것을 알 수 있다.

7. 결 론

본 연구는 새만금 준설모래에 대해 최대·최소간극비시험과 정적 및 동적 삼축시험을 통해 액상화의 발생에 영향을 미치는 요소에 대해 파악하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 보다 큰 모래입자의 간극공간을 세립분이 점유함에 따라 밀도는 점차 증가하는 경향을 보이다가 20~30%의 세립분 함유량 이후 밀도는 작아지는 경향을 보였다. 또한 최대 및 최소간극비의 세립분 함유량에 따른 변화양상은 거의 유사하였다.

(2) 동일한 세립분 함유량과 초기상대밀도에서 구속압력을 증가시킬수록 액상화에 대한 저항은 더욱 커졌다. 이는 전단이 진행됨에 따라 팽창의 증가에 따른 보다 큰 유효응력의 증가에 기인한다. 이와 같은 경향은 초기상대밀도가 증가할수록 동일하게 나타났다.

(3) 정적 삼축시험에서 불안정 마찰각은 초기상대밀도가 커질수록 증가하는 경향을 보였다. 또한 동적 삼축시험에서 유효응력비가 증가할수록 시료의 동일한 초기조건에서 액상화에 대한 저항은 작게 나타났다.

(4) 과압밀비가 증가함에 따라 동적 액상화에 대한 저항은 더욱 크게 나타났으며, 과압밀비에 따른 액상화의 저항에 대한 Ishihara 등(1979)의 예측식은 시험결과와 양호한 대응성을 보였다.

참 고 문 헌

1. 양재혁, 정진섭, 이광범, 최강휘(1999), "실트질 모래의 정적액상화에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회논문집(II), pp.519~522.
2. Castro, G.(1969), "Liquefaction of sands." Harvard Soil Mechanics Series, No.81, Harvard University Press, Cambridge, Mass.
3. Castro, G., and Poulos, S. J.(1977), "Factor affecting liquefaction and cyclic mobility." J.Geotech. engrg. div.,ASCE, 103(GT6), pp.501~506.
4. Ishihara, K., and Takatsu, H.(1979), "Effects of Overconsolidation and K_0 Conditions on the Liquefaction Characteristics of Sands", Soil and Foundations, Vol.19, No.4, pp.59~68.
5. Kuerbis, R., Negussey, D., and Vaid, Y. P.(1988), "Effect of gradation and fines content on the undrained response of sand", Geotechnical Special Publication 21, ASCE, New York, pp.330~345.
6. Oda, M., Koishikawa, I., and Higuchi, T.(1978), "Experimental study of anisotropic shear strength of sand by plane strain test", Soils and Foundations, 18(1), pp.25~28.
7. Pitman, T. D., Robertson, P. K., and Sego, D. C. (1994), "Influence of fines in the collapse of loose sands", Canadian Geotechnical Journal, 31, pp.728~739.
8. Poulos, S. J., Castro, G., and France, J.(1985), "Liquefaction evaluation procedure." J. Geotech. Engrg., 111(12), pp.1380~1394.
9. Seed, H. B., Arango, I., and Chan, C. K.(1975), "Evaluation of soil liquefaction potential during earthquakes", Report No. EERC75-28, University of California.
10. Yamamuro, J. A., and Lade, P. V.(1997), "Effects of non-plastic fines on static liquefaction of sands", Can. Geotech. J., Ottawa, Canada, 34, pp.905~917.
11. Zlatovic, S., and Ishihara, K.(1997), "Normalized behavior of very loose non-plastic soils : effects of fabric", Soils and Foundations, Tokyo, Japan, 37(4), pp.47~56.

(접수일자 2001. 10. 17, 심사완료일 2001. 12. 11)