# 새만금 준설모래의 비배수 거동

## Undrained Behavior on Saemangeum Dredged Sands

정 상 국* 강 권 수** 양 재 혁***

Jeong, Sang-Guk Kang, Kwon-Soo Yang, Jae-Hyouk

**Abstract**

The results of an experimental study on Saemangeum dredged sands are presented. Undrained triaxial compression tests were performed with three different initial relative densities, namely 18, 34, and 50%, intend to evaluate undrained behavior. All undrained triaxial compression tests were performed under static loading conditions. Undrained triaxial compression tests were exhibited complete static liquefaction, zero effective confining pressure and zero stress difference at lower confining pressures. As confining pressures were increased, the effective stress paths indicated increasing resistance to static liquefaction by showing increasing dilatant tendencies. The isotropic consolidation before shearing was identified as the likely cause of this behavior. The fines and larger particles create a particle structure with high compressibility at lower confining pressures. The effect of increasing the relative density was to increase the resistance of the sand against static liquefaction by making the sand more dilatant.

**keywords** : Saemangeum Dredged Sand, Initial Relative Density, Static Liquefaction, Confining Pressure, Isotropic Consolidation, Dilatant Tendency

## 1. 서 론

흙의 불안정은 비배수상태에서 흙의 강도가 갑자기 감소하는 역상화와 유사한 현상이다. 이러한 강도의 손실은 흙의 유효응력을 감소시키는 큰 간극수압에 의한 것과 관련된다. 역상화란 지반에 외력이 작용할 때

* 정회원, 충원대학 철도시설토목과 교수

** 정회원, 서남대학교 토목공학과 교수

*** 정회원, 목포대학교 해양시스템학부 시간강사

E-mail : jungeo@hanmail.net 017-407-6583

* 본 논문에 대한 토의를 2002년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2002년 7월호에 토론회답을 게재하겠습니다.

간극수압의 상승으로 인해 유효응력이 감소되어 외력에 대한 전단저항을 잃게 되는 현상을 말한다. 이러한 현상은 주로 포화된 느슨한 사질토 지반에 지진이나 강한 충격력과 같은 외력이 작용할 때 빈번히 발생되며, 정적 하중 상태에서도 일어날 수 있다. 최근 우리나라는 사회간접자본 확충에 있어서 건설부지 확보의 어려움을 겪고 있다. 이로 인해 액상화가 예상되는 해안지역에 대형구조물이 축조될 뿐만 아니라 해안지역을 준설, 매립하여 공단, 공항 등으로 이용하고 있다. 이러한 지반은 액상화 발생에 충분한 요건을 갖추고 있으므로 액상화의 발생에 영향을 미치는 요소에 대한 연구가 시급히 필요한 실정이다.

흙의 불안정에 대한 과거의 연구들은 서로 다른 구속압력에서 조밀하거나 느슨한 흙에 대한 시험을 통해 체적압축성의 모래가 비배수상태로 전단되었을 때 흙의 불안정이 나타난다는 것을 밝혔다(Castro 1969; Casagrande 1979; Vaid와 Chern 1985; Sladen 등 1985; Ishihara 1993; Yamamuro와 Lade 1997). Pitman 등(1994)은 파쇄된 비소성 석영 세립분과 Kaolinite를 가진 Ottawa모래를 시험하여 비소성 세립분을 함유한 모래가 보다 액상화에 저항한다고 결론지었다. Oda 등(1978)은 정적 및 동적 하중 조건에서 액상화된 대부분의 모래지반의 퇴적과정을 재현할 수 있는 방법 중 건조퇴적방법이 자연적으로 퇴적된 모래지반과 유사한 입자구조를 만든다는 것을 밝혔다.

Terzaghi(1956)는 해저유동사면을 설명하기 위해 실트질 모래에서 존재하는 "준안정"구조를 큰 입자와 세립분 입자 사이의 변화하기 쉬운 입자구조의 형태로서 제안하였다. 또한 Hanzawa(1980)는 Arabian 실트질 모래의 분사거동을 설명하기 위해 이러한 형태의 흙 구조를 제안하였다. 한편 국내에서는 황(1993)이 실트질 함유량이 정적 및 동적 액상화강도에 미치는 영향을 조사하였으며, 양 등(1999)이 정적 액상화가 발생하는 여러 가지 조건에 대한 시험을 실시하였다. 대부분의 자연상태의 흙은 0.075mm 보다 작은 입자인 세립분을 약간 포함하고 있으며, 이에 따라 양호한 입도를 갖는 경우도 있다. 세립분은 응력-변형률 거동에 중대한 영향을 줄 수 있는 흙 구조를 만들 수 있다.

따라서 본 연구에서는 새만금 유역에서 채취한 준설모래를 사용하여 자연상태에서 정적 하중에 의한 세립분을 함유한 모래의 비배수거동 특성을 파악하기 위해, 자연시료를 체가름하여 일정한 입도를 갖도록 조정한 후, 서로 다른 초기구속압력과 초기상대밀도, 그리고 세립분 함유량을 변화시켜 일련의 비배수 삼축압축시험을 실시하였다.

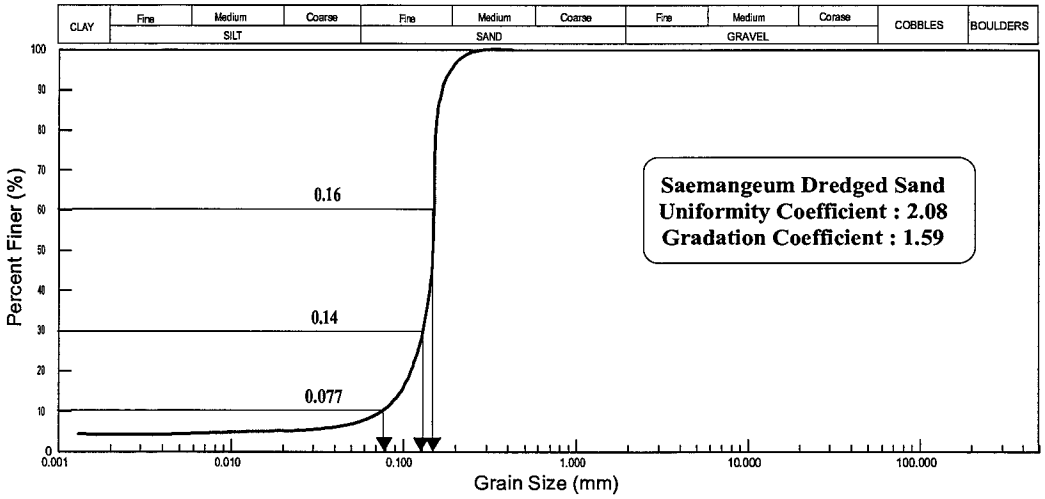



Fig. 1 Particle size distribution curve on Saemangeum dredged sand

## 2. 시료준비 및 시험방법

### 2.1 삼축압축시험 시료의 준비

본 연구에서는 정적 하중조건에서 모래의 비배수 거동을 파악하기 위해, 새만금 유역에서 채취한 모래를 자연 건조시킨 후 체가름 시험을 실시하여 No.60체를 통과한 시료에 No.200체를 통과한 비소성 세립분(0.075mm 이하)의 함유량을 변화시켜 시험 시료로 사용하였다. Table 1은 새만금 준설모래의 물리적 특성을 보인 것이다. Fig. 1의 입경가적곡선에서 보인 바와 같이, 새만금 준설모래는 균등계수와 곡률계수에 의해 입도가 균등하다는 것을 알 수 있다.

비배수 삼축압축시험은 직경 50mm와 높이 110mm인 원통형 시료에 대해 수행되었다. 공시체의 제작방법으로는 공중낙하법, 수중낙하법, 그리고 다중낙하법 등 여러 가지 방법이 있지만, 본 연구에서는 모래입자와 세립분이 공시체 제작 중에 분리되는 현상을 방지하기 위해 건조-깔때기퇴적방법으로 공시체를 성형하였다. 이는 주둥이에 튜브를 붙인 깔때기에 건조모래를 넣는 방법으로 수행되었다. 튜브는 분리된 볼드의 바닥에 위치된다. 튜브는 시료의 대칭축을 따라 천천히 올려졌으며, 따라서 흙은 어떠한 낙하높이도 허용되지 않았다. 원하는 초기상대밀도는 대칭적인 양상으로 볼드를 필요에 따라 가볍게 두드려 얻어졌다.

### 2.2 삼축압축시험 방법

삼축실에 준비된 시료를 설치하기 전 공시체와 상, 하관 사이의 마찰에 의한 구속을 덜 받기 위해 상, 하관에 그리스를 바르고 0.3mm 두께의 매끄러운 관을 부착한다. 이 때 배수는 상하의 아크릴관의 중앙에 직경 10mm 정도의 구멍을 뚫고 다공석을 넣어 양면배수가 되도록 하였다. 그리고 멤브레인을 하부페디스탈 저부에 펼쳐 두 개의 O-ring으로 봉한 후 성형상자를 저관 위의 중앙에 맞추어 놓는다. 멤브레인을 성형상자 둘레에 완전히 곧게 펼쳐 올리고 진공을 가하여 멤브레인이 성형상자 안에 완전히 밀착하도록 한다.

Table 1 Physical properties of natural Saemangeum dredged sand

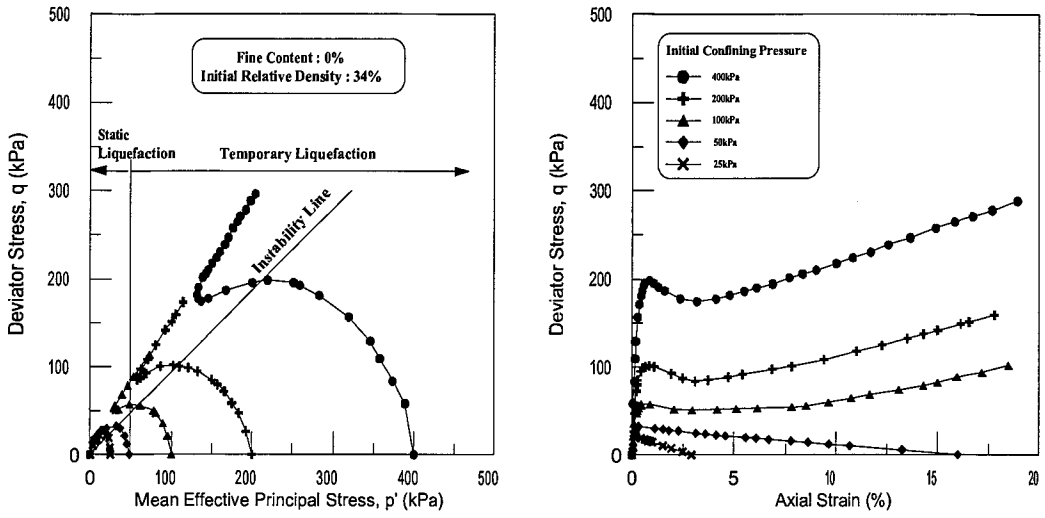
| Type | Gs | #200 percent finer(%) | $e_{max}$ | $e_{min}$ |
|---|---|---|---|---|
| Saemangeum dredged sand | 2.695 | 10 | 1.218 | 0.835 |

이러한 성형상자 내부에 직경 50mm, 높이 110mm의 시료를 건조-깔때기퇴적방법으로 성형하였다. 그리고 상관을 시료 위의 중앙에 놓고 멤브레인을 상관에 씌운 다음 O-ring으로 봉한 후 상부배수관을 상관에 연결시키고 시료에 20kPa의 진공압력을 가한 후 성형상자를 제거한다. 다음에 삼축실을 조립한 후 물을 가득 공급하고 시료의 진공을 제거함과 동시에 구속압력을 가한 후 일정히 유지시킨다.

시료의 포화도를 높이기 위해 배압으로 $CO_2$를 하부배수관으로 주입시켜 시료 속의 공기를 상부 배수관으로 완전히 빠져나가게 한 다음 증류수를 시료 내에 있는 $CO_2$를 상부 배수관으로 천천히 밀어 올려 시료로부터 빠져나가게 한다. 이 때 $CO_2$의 체적 변화는 순수 물의 체적변화와 같기 때문에 시료 내에 남아있는 $CO_2$는 크게 문제되지 않는다. 이와 같이 준비된 시료에 일정한 구속압력으로 등방압밀을 수행한 후 비배수 상태에서 시료를 전단하였다. 전단속도는 0.01cm/min의 일정한 축변형률을 유지하였다.

## 3. 비배수거동에 대한 구속압력의 영향

Fig. 2는 초기상대밀도 34%인 세립분 함유량을 포함하지 않은 깨끗한 새만금 준설모래에 대한 일련의 비배수 삼축압축시험의 결과를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 $p'-q$ 응력공간의 유효응력경로를 보인 것이다. 여기서, $p'=(\sigma_1'+2\sigma_3')/3$는 평균유효주응력, $\sigma_1'$는 축방향유효주응력, $\sigma_3'$는 유효구속압력이다. 또한 $q=\sigma_1-\sigma_3$는 축차응력이다. Fig. 2(b)는 이에 대응하는 응력-변형률곡선을 보인 것이다. 그림에서 보인 바와 같이, 서로 다른 유효응력의 정점의 궤적은 불안정선이라 불리우는 유일한 선 위로 접하고 있으며, 이 선은 응력 원점과 교차하고 있다.




(a) Effective stress paths (b) Undrained stress-strain curves

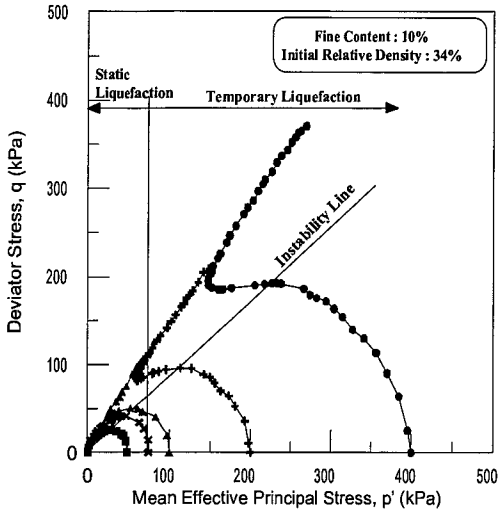
Fig. 2 Undrained triaxial compression tests for Saemangeum dredged sands (fine content 0%, initial relative density 34%)

완전한 불안정 즉, 정적 액상화 파괴는 50kPa 이하의 낮은 구속압력에서 발생하였다. 정적 액상화 파괴는 $\sigma_3'=0$ 과 $q=\sigma_1-\sigma_3=0$인 응력조건에서 발생되며, 초기구속압력에서 축차응력이 첨두값까지 증가한 후 응력 단절에 도달하여 축차응력이 '0'이 되는 상태이다.

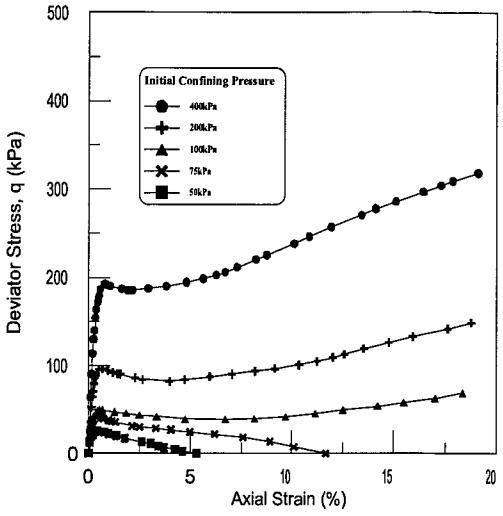
Fig. 2(a)에서 초기구속압력이 100kPa의 범위 이상으로 증가했을 때의 유효응력경로는 완전한 액상화 파괴에 대한 증가하는 안정 또는 저항의 거동을 나타내고 있다. 이와 같이 일시적 불안정 거동을 보이는 현상을 일시적 액상화라고 한다. 이는 Fig. 2(b)의 응력-변형률곡선에 의해 설명될 수 있다. 초기구속압력 100, 200, 그리고 400kPa에 대한 응력-변형률곡선은 완전한 액상화를 나타내는 시험(초기구속압력 25, 50kPa)에서와 같이 축차응력이 '0'에 도달하지 않았다. 축차응력은 선단이 진행됨에 따라 초기 첨두값에 도달하여 유효응력을 감소시키는 급속히 증가하는 간극수압에 의해 최소값까지 감소하였다. 그 후 흙입자 배열이 변화되어 Dilatancy현상에 기인한 유효응력을 증가시키고 간극수압을 감소시키는 시료의 팽창에 의해 초기 첨두값 보다 훨씬 위의 값까지 증가하였다. 따라서 이러한 시험을 통해 동일한 세립분 함유량과 초기상대밀도에서 구속압력을 증가시키면 정적 액상화 파괴에 저항하는 흙의 팽창도 증가됨을 알 수 있다.

한편, 일련의 비배수 삼축압축시험을 세립분 함유량을 10% 포함한 상대밀도 34%와 새만금 준설모래에 대해 수행하였으며, 유효응력경로와 이에 대응하는 응력-변형률곡선을 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 보인 바와 같이, Fig. 2와 세립분을 포함하지 않은 시료에 의해 보여진 동일한 거동양상이 세립분 함유량 10%의 시험에 대해서도 나타났다. 완전한 정적 액상화 파괴는 75kPa의 초기구속압력 이하에서 발생했다.

더 높은 초기구속압력(100kPa 이상)에서 시료는 완전한 정적 액상화 파괴를 보이지 않았으며, 더욱 큰 Dilatancy나 액상화에 대한 저항을 나타냈다. 따라서 Fig. 2와 3에서 설명한 바와 같이, 완전한 정적 액상화 파괴는 상대적으로 낮은 초기구속압력에서 발생한다는 것을 분명히 알 수 있다. 이보다 초기구속압력이 증가하게 되면, Dilatancy의 증가나 액상화에 대한 저항은 더욱 커진다.

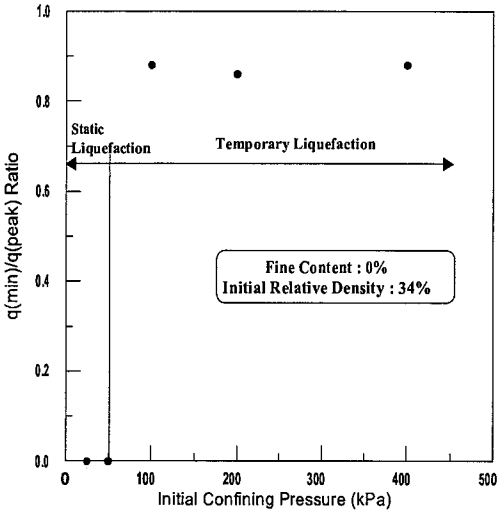



(a) Effective stress paths

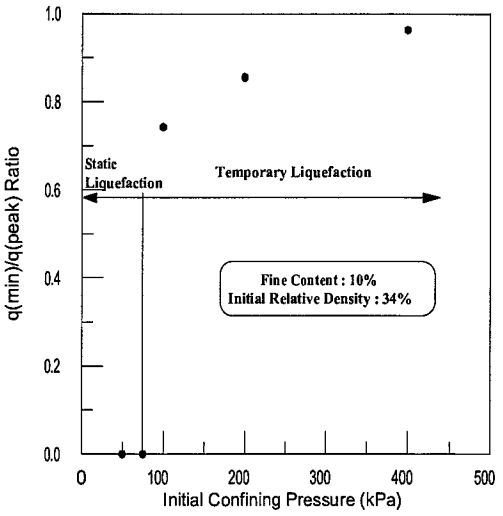



(b) Undrained stress-strain curves

Fig. 3 Undrained triaxial compression tests for Saemangeum dredged sands (fine content 10%, initial relative density 34%)




(a) Fine content 0%, relative density 34%




(b) Fine content 10%, relative density 34%

Fig. 4 Initial confining pressures vs. q(min)/q(peak) ratios

Dilatancy의 증가나 액상화에 대한 저항은 초기 정수축자유력에 대한 최소축자유력의 비 q(min)/q(peak)를 지표함으로서 파악될 수 있다. q(min)/q(peak)의 비가 "0"이면 완전한 액상화 파괴를 나타내며, "0"과 "1" 사이에서는 일시적 액상화, "1"이면 완전히 안정된 거동을 나타낸다. Fig. 4(a)와 (b)는 Fig. 2와 3의 세립분 함유량이 각각 0, 10%이고 초기상대밀도가 31%인 새만금 준설모래의 초기구속압력에 대한 q(min)/q(peak)의 변화를 보인 것이다. Fig. 4(a)에서 보인 바와 같이, 세립분 함유량이 없는 깨끗한 모래의 초기구속압력 50kPa 이하에서 이 비는 "0"을 나타내며, Fig. 2(a)의 유효응력경로에서 축차응력 "0"에 대응한다. 100~400kPa까지의 초기구속압력에서 이 비는 일정한 경향을 보이고 있으며, 이는 시료가 증가하는 Dilatancy와 가지고 액상화에 더욱 저항함을 나타낸다. 한편, Fig. 4(b)의 세립분 함유량 10%에 대한 q(min)/q(peak)의 비도 50kPa 이하에서는 "0"값을 보였지만, 그 이상의 초기구속압력에는 점차 "1"을 향해 증가하는 값을 보였다. 이는 깨끗한 모래보다는 세립분을 함유한 모래의 밀도가 더 커져서 전단 동안 더욱 큰 팽창거동을 보이기 때문이라고 생각된다.

앞에서 설명한 바와 같이, 새만금 준설모래는 더 큰 초기구속압력에서 액상화에 대한 저항이 더욱 증가하는 경향을 보였다. 이는 등방압밀을 하는 동안 증가하는 구속압력의 영향이 모래의 느슨한 초기상대밀도를 더 크게 만들며, 따라서 전단 동안 체적이 더욱 팽창하여 유효응력을 증가시키기 때문이다. 이러한 영향은 세립분이 함유될수록 더욱 커진다는 것을 Fig. 4(a)와 (b)를 비교하면 알 수 있다.

Fig. 5는 일정한 초기상대밀도, 25%에서 세립분 함유량을 달리한 새만금 준설모래와 등방압밀시험 결과를 보인 것이다. 그림에서 보인 바와 같이, 시료가 압축됨에 따라 흙의 체적 압축성은 초기에 크게 증가하고 있으며, 구속압력이 증가할수록 체적 압축성은 점차 감소한다. 이와 같은 경향은 세립분 함유량이 커질수록 더욱 뚜렷이 나타난다. 구속압력이 작은 경우의 높은 체적 압축성은 흙 입자의 낮은 강성을 의미하며, 이는 팽창하거나 물러선한 흙입자의 접촉 결과에 기인한다.

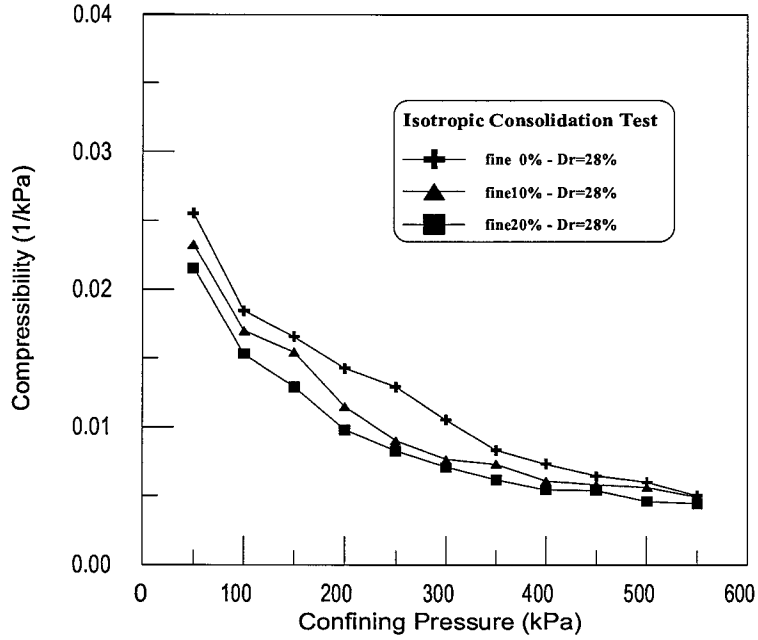
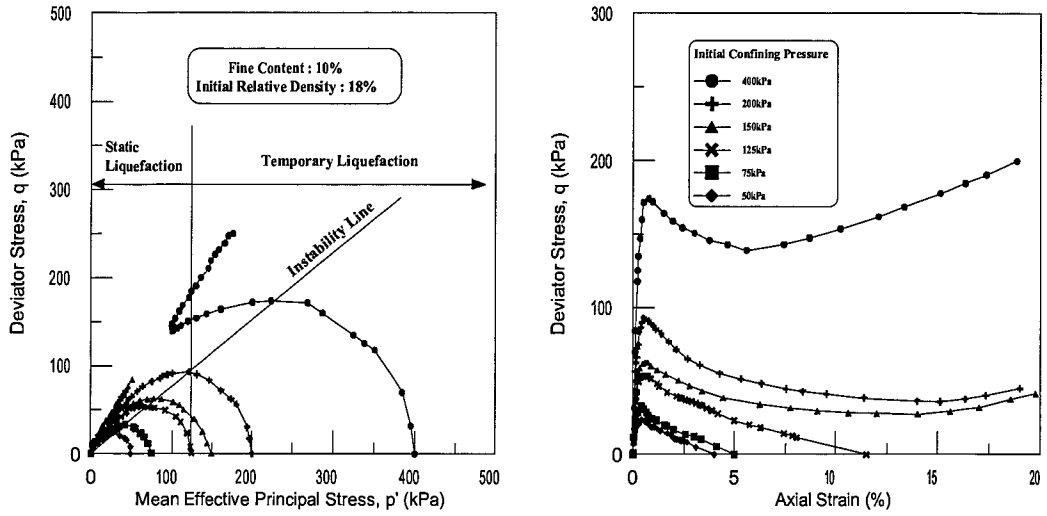
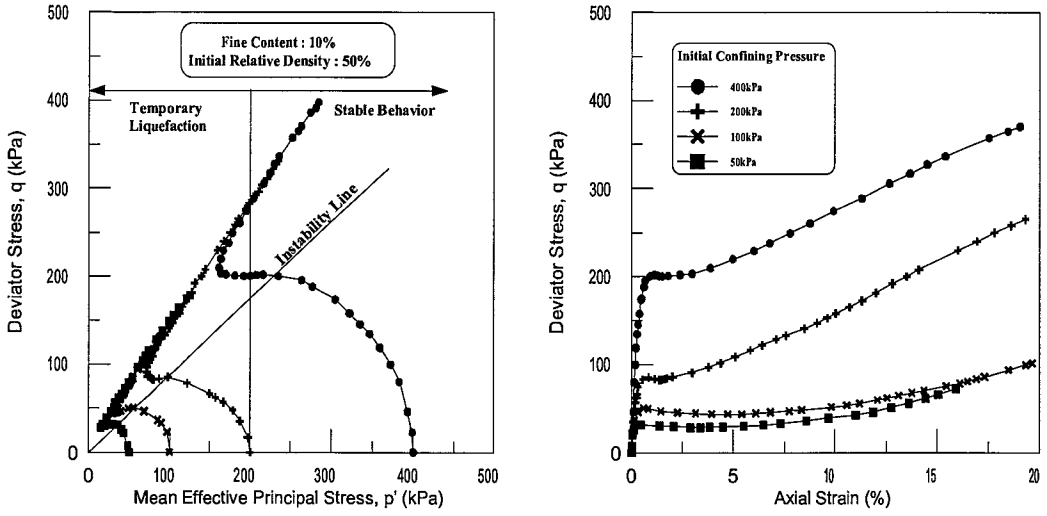



Fig. 5 Isotropic compression tests on different fine contents of Saemangeum dredged sands



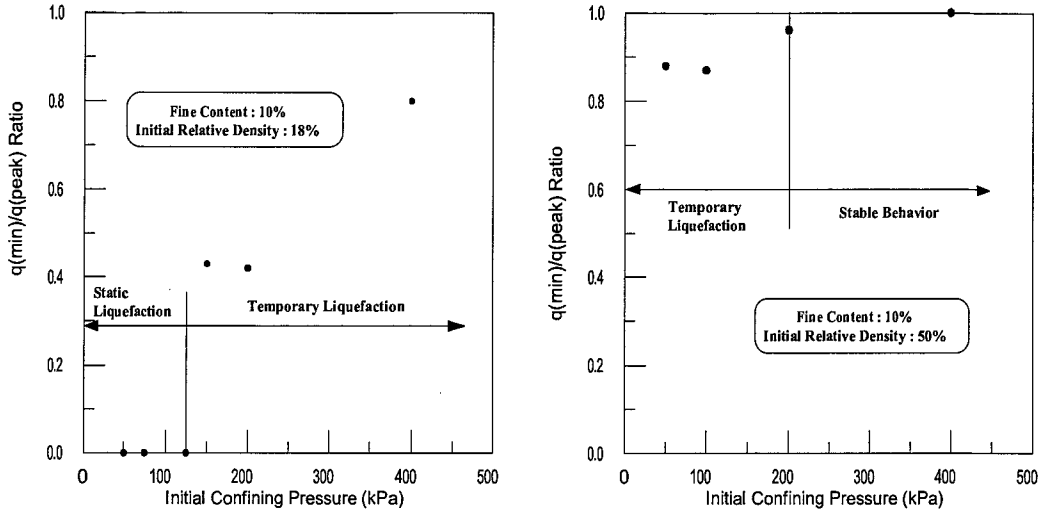

(a) Effective stress paths (b) Undrained stress-strain curves

Fig. 6 Undrained triaxial compression tests for Saemangeum dredged sands (fine content 10%, initial relative density 18%)



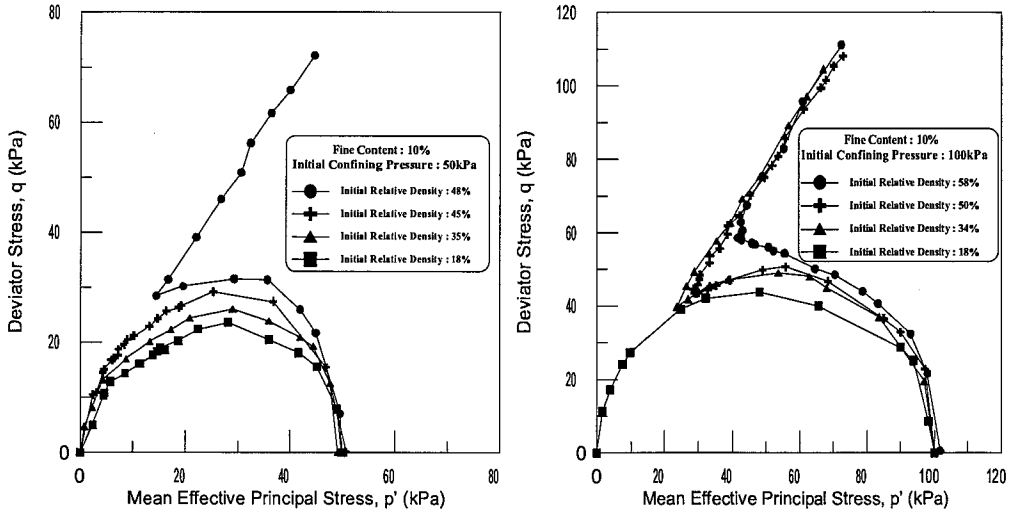

(a) Effective stress paths (b) Undrained stress-strain curves

Fig. 7 Undrained triaxial compression tests for Saemangeum dredged sands (fine content 10%, initial relative density 50%)




(a) Fine content 10%, relative density 18%　　(b) Fine content 10%, relative density 50%

Fig. 8 Initial confining pressures vs. q(min)/q(peak) ratios




(a) 50kPa　　(b) 100kPa

Fig. 9 Undrained effective stress paths for initial confining pressures

그러나, 구속압력이 점차 증가함에 따라, 각각의 세립분 함유량에 대한 체적 압축성은 가장 높은 구속압력, 550kPa에서와 같으로 급속히 감소하여 수렴된다.

체적 압축성과 이러한 급속한 감소는 현저한 고밀도화와 관련되며, 비배수 전단 동안 Dilatancy 경향을 더욱 증가시킬 것이다. 이와 같이 감소된 체적 압축성은 더 높은 흙 골격의 강성을 나타내며, 이는 흙입자 사이의 양호한 접촉의 결과에 기인한다. 따라서 등방 압밀시험 결과를 통해, 세만큼 순설모래의 낮은 초기 구속압력에서 정적 액상화 파괴에 도달하는 큰 압축성 등과 더욱 높은 초기구속압력에서 전단 동안 체적압축의 감소와 Dilatancy 경향에 따른 증가된 정적 액상화의 저항이 설명되어질 수 있다.

## 4. 비배수거동에 대한 상대밀도의 영향

서로 다른 초기상대밀도가 세만큼 순설모래의 비배수거동에 미치는 영향을 평가하기 위해, 세립분 함유량 10%와 초기상대밀도 18, 34 그리고 50%에 대한 일련의 비배수 삼축압축시험과 결과가 검토되었다.

이들 초기상대밀도에 대한 $p'-q$ 응력공간의 유효응력경로와 이에 대응하는 응력-변형률곡선을 34%에 대해서는 Fig. 3 그리고 18과 50%에 대해서는 각각 Fig. 6과 7에 나타내었다. Fig. 6에서 보인 바와 같이, 정적 액상화 파괴는 125kPa이하의 초기구속압력 범위에서 발생하였으며, 이보다 더 높은 초기구속압력(150, 200, 400kPa)에서는 일시적 액상화의 거동을 보이고 있다. 이와 같은 결과를 Fig. 3과 비교해보면, 초기상대밀도 34%의 경우 정적 액상화 파괴는 75kPa 이하와 더 낮은 초기구속압력에서 발생하였으므로, 증가하는 초기상대밀도는 흙의 더 큰 체적 팽창을 유발시켜 액상화에 대한 저항을 증가시킨다는 것을 알 수 있다.

이와 같은 경향은 Fig. 7에서 더욱 뚜렷이 나타난다. Fig. 7은 세만큼 순설모래의 초기상대밀도를 50%까지 증가시킨 경우이며, Dilatancy와 정적 액상화에 대한 더 큰 저항의 경향을 유발시킨다는 것을 보여주고 있다. 이러한 상대밀도에서 모래는 심지어 50kPa과 같은 낮은 초기구속압력에서도 정적 액상화 파괴가 발생되지 않았다. 또한 일시적 액상화가 발생되는 최대 초기구속압력은 200kPa 이하까지 증가되었다.

이 범위를 넘은 초기구속압력에서 모래는 축차응력이 처음부터 선형 감소하지 않는 안정된 거동양상을 나타내었다. 그러나, Fig. 3과 Fig. 6에서 보인 바와 같이, 18%와 34%의 초기상대밀도에서 일시적 액상화 거동의 영역은 400kPa 이상의 초기구속압력까지 확장되었다. 따라서 초기상대밀도가 정적 액상화 거동에 미치는 영향은 대단하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 초기상대밀도 18%와 50%의 q(min)/q(peak) 비에 대한 초기구속압력의 관계를 보인 것이다.

Fig. 8(a)에서 보인 바와 같이, 초기상대밀도 18%에서 q(min)/q(peak)의 비는 125kPa 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 초기구속압력 50-200kPa의 범위에서 점차 증가하는 일시적 액상화의 거동을 나타내었다. 그 후 초기구속압력 200kPa 이상에서 충분히 안정된 거동으로 전이하는 경향을 보였다.

## 5. 구속압력과 상대밀도의 영향에 대한 종합

세만큼 순설모래의 비배수거동에 대한 초기구속압력과 초기상대밀도의 영향을 각각 50kPa과 100kPa의 초기구속압력의 네 가지 초기상대밀도에 대해 $p'-q$ 응력공간의 유효응력경로로 정리하여 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9(a)는 완전한 정적 액상화 파괴가 50kPa의 초기구속압력에서 더 낮은 세 가지 초기상대밀도(18%, 35% 와 45%)에서 발생된다는 것을 보이고 있다. 초기상대밀도 48%에서는 일시적 액상화의 거동을 나타냈다. Fig. 9(b)는 100kPa의 초기구속압력의 초기상대밀도 18%에서 정적 액상화 파괴가 발생한 것을 보여준 반면, 일시적 액상화는 초기상대밀도 34와 50%에서 발생했다. 초기상대밀도 56%에서는 안정된 거동을 나타냈다.

따라서 이들 그림들을 종합해보면, 초기구속압력과 초기상대밀도가 증가할수록 정적 액상화에 대한 저항은 더욱 커진다는 것을 명확히 알 수 있다. 한편, Fig. 9(a)와 (b)에서 보인 바와 같이, 유효응력경로 등의 초기기울기는 초기상대밀도가 증가할수록 더욱 커진다는 것이 관찰되었다. 이는 다양한 초기상대밀도에서 발생한 간극수압의 크기와 관련될 수 있다. 즉, 초기상대밀도가 커질수록 등방압밀 이후 체적 팽창의 경향이 커져 유효응력이 증가하기 때문으로 생각된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 새만금 유역에서 채취한 순성모래를 가지고 서로 다른 초기구속압력에서 초기상대밀도를 변화시켜 정적 하중조건에 의한 액비수거동 특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 상대밀도가 크지 않은 낮은 초기구속압력에서 축차응력은 초기 첨두에 도달한 후 더 이상 증가하지 않고 $p'-q$ 응력공간의 원점에 도달하는 정적 액상화 파괴가 발생되었다. 그러나 이러한 영역을 이후의 더 큰 초기구속압력에서 축차응력이 초기 첨두 이후 감소하다가 급격히 증가하는 일시적 액상화 현상이 발생되었다. 이는 시료의 팽창에 의해 유발된 간극수압의 감소 때문이다. 따라서 더 높은 초기구속압력에서는 더 큰 Dilatancy나 액상화 파괴에 대한 저항을 나타냈다.
2) 더 높은 초기구속압력에서 액상화 파괴에 대한 저항의 증가는 등방압밀 동안 시료의 체적 압축성 감소에 기인한다. 이와 같이 체적 압축성이 감소하면 흙입자는 더욱 양호하게 접촉하여 더 높은 흙 골격의 강성을 나타내게 되며, 따라서 전단 동안 더 크게 정적 액상화에 저항하는 것으로 생각된다.
3) 상대밀도를 증가시킬수록 액상화에 대한 저항은 커지는 것으로 나타났으며, 매우 큰 초기구속압력과 상대밀도에서는 축차응력이 처음부터 파괴에 도달할 때까지 감소하지 않는 안정된 거동을 보였다. 또한 상대밀도가 커짐에 따라 팽창의 경향이 커지므로 유효응력경로의 초기기울기는 점차 증가하였다.

### 참 고 문 헌


1. 방재혁, 정진섭, 이광범, 최강희, "실트질 모래의 정적액상화에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표 회논문집(II), 1999, pp.519-522.
2. 황대진, "실트를 함유하는 모래질 흙의 액상화강도에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제13권, 제2호, 1993, pp.243-252.
3. Casagrande, A., "Liquefaction and Cyclic deformation of sands", Proceedings of the 5th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Lima, Peru, 1979.
4. Castro, G., "Liquefaction of sands," Harvard Soil Mechanics Series, No. 81, Harvard University Press, Cambridge, Mass, 1969.
5. Hanzawa, H., "Undrained strength and stability analysis for a quick sand", Soils and Foundations, 20(2), 1980, pp.17-29.
6. Ishihara, K., "Liquefaction and flow failure during earthquakes", Geotechnique, 43(3), 1993, pp. 351-415.
7. Oda, M., Koishikawa, I., and Higuchi, T., "Experimental study of anisotropic shear strength of sand by plane strain test", Soils and Foundations, 18(1), 1978, pp.25-28.
8. Pitman, T. D., Robertson, P. K., and Sego, D. C., "Influence of fines in the collapse of loose sands", Canadian Geotechnical Journal, 31, 1994, pp.728-739.
9. Sladen, J. A., D'Hollander, R. D., and Krahn, J., "The Liquefaction of sands a collapse surface approach", Canadian Geotechnical Journal, 22, 1985, pp.564-578.
10. Terzaghi, K., "Varieties of submarine slope failures", Proceedings of the 8th Texas Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, University of Texas, Austin, Reprint, Harvard Soil Mechanics Series No.52, 1956.
11. Vaid, Y. P., and Chern, J. C., "Cyclic and monotonic undrained response of saturated sands", In Advances in the art of testing soil

under cyclic conditions. Edited by V. Khosla., American Society of Civil Engineering. New York. 1985. pp.120-137.
12. Yamamuro, J. A., and Lade, P. V., "Instability of granular materials at high pressures", Soils and Foundations. 37(1). 1997. pp.41-52.

(접수일자 : 2001년 8월 10일)