한국토목섬유학회논문집 제8권 1호 2009년 3월 pp. 25 ~ 32
J. Korean Geosynthetics Society Vol.8 No.1 March. 2009 pp. 25 ~ 32

상대밀도의 변화에 따른 새만금준설토의 액상화 특성

Liquifaction Characteristics of Saemangeum Dredged Sand Depending on Relative Density

김 유 성[1]* Kim, Yoo-Seong
서 세 관[2] Seo, Se-Gwan

ABSTRACT

In reclaimed loose sandy layer with dredged soil, liquefaction by the small scale earthquake coud be occurred easily. A study has been carried out to investigate the Liquefaction characteristic on Saemangeum dredged sandy soil, and compared with other results from the literature investigation. A series of undrained cyclic triaxial compression tests were performed on dredged sandy soil of Seamangeum area. The tests were performed at the three different initial relative densities(namely 30%, 50%, 70%), different cyclic stress ratio and different consolidation stress condition. The results of this study showed that cyclic stresses (σ_d) increased linearly with increase of consolidation ratio, but the stress ratios ($\sigma_d/2\sigma'_c$) were almost same. The stress ratios were increased almost linearly with increase of relative density. Compared with other sandy soil, Saemangeum dredged sandy soil showed relatively weak liquifaction characteristics.

요 지

느슨한 준설 매립층은 아주 작은 지진동으로 인해 액상화가 발생하는 경우가 있다. 새만금 준설토의 액상화 거동특성을 반복삼축압축시험에 의해 조사하였고, 타 문헌에서의 다른 모래의 액상화 특성과 비교하였다. 조사를 위해 상대밀도의 변화에 따른 일련의 비배수 반복삼축압축시험이 압밀구속압을 달리하여 수행되었다. 연구결과 반복응력은 압밀구속압에 따라 선형적으로 증가하나, 반복응력을 압밀구속압으로 무차원화한 반복응력비는 일정한 값을 보인다. 또한, 상대밀도의 증가에 따라 반복응력비는 선형적으로 증가하나, 문헌조사에 의한 다른 모래에 비해 액상화에 취약한 특성을 보인다.

Keywords **:** Liquifaction, Dredged soil, Cyclic triaxial test, Relative density, Cyclic stress ratio

1. 서 론

Mogami와 Kubu(1953)는 포화된 모래에 진동을 가하는 실험을 통하여 포화모래의 강도가 진동에 의해 크게 감소한다는 것을 확인하였고 이러한 현상을 모래의 액상화라고 정의하였다. 그 후 1964년 Alaska에서 발생한 Good Friday지진(규모 9.2)과 같은 해 일본 Niigata지역에서 발생한 지진(규모 7.5)은 주변 사면과 항만시설 및 구조물들에게 치명적인 피해를 발생시켰다. 이러한 피해의 원인이 액상화 현상이라는 것이 밝혀지면서 액상화 현상에 대한 관심이 높아졌고 이에 대한 많은 연구가 수행되어지는 계기가 되었다. 국내에서는 1978년 홍성지진(규모 5.2)이나 1996년 영월지진(규모 4.5) 및 2003년 백령도지진(규모 5.0)과 2004년 울진지진(규모 5.2)같이 비교적 큰 규모의 지진이 발생하였으며, 2006년 기상청에서 발표한 지진연보를 보면 1978년부터 2006년까지 규모 3.0이상의 지진 발생을 확인해 보면 1990년대부터 규모 3.0이상의 지진이 발생하는 횟수가 뚜렷하게 증가하는 양상을 보이고 있으며, 특히 2006년의 경우 규모 3.0이상의 지진이 발생한 횟수는 연평균 횟수인 24회의 2배에 달하는 50회가 발생하여 우

1* 정회원, 전북대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Chonbuk National Univ., E-mail: yusung@chonbuk.ac.kr)
2 정회원, 건설기술연구원 토질및기초연구실 연구원 (Member, Researcher, Earth Structure & Foundation Engineering Research Division, KICT)

리나라도 지진에 대하여 반드시 안전한 지역이라고 할 수 없게 되었다. 한편, 최근 공업단지나 공항 등의 대규모의 건설부지 마련을 위해 해안을 매립하는 사례가 증가하고 있는데, 특히 느슨한 사질토로 지반을 매립할 경우, 작은 규모의 지진에 의해서도 액상화 현상이 발생하여 큰 피해가 발생할 수 있으므로 연약한 매립지반의 경우 액상화에 대한 연구 및 대책이 필요하고, 이와 같은 이유로 부분적으로 액상화에 대한 연구가 진행되고 있다(정두영, 1994; 최두헌, 2000; 최윤응, 1988; 황대진, 1993). 그러나, 실내 반복삼축압축에 의한 세부적인 액상화특성에 대해서는 그 연구가 충분하다고 할 수 없다. 이와 같은 배경 하에 국내의 대표적 준설매립지반인 새만금 준설토에 대하여 반복삼축시험을 통해 상대밀도와 구속압의 변화에 따른 전단특성을 검토하고 액상화 강도에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 준설토의 물리적 특성

대상토의 비중은 2.672이고, 평균입경(D_{50})은 0.09mm이며, 대상토를 구성하고 있는 점토, 실트, 모래의 구성비는 0.5%, 14.8%, 84.6%이다. 통일분류법으로 실트질모래(SM)에 해당하며, 기본적 물성은 표 1에 나타내었다. Ishihara (1977)가 나타낸 액상화 가능 입도분포범위(그림 1)에 새

표 1. 대상토의 기본시험결과

Specific Gravity G_s	Grain size D_{50} (mm)	Clay fraction (%)	Silt fraction (%)	Sand fraction (%)	USCS
2.672	0.09	0.5	14.8	84.6	SM

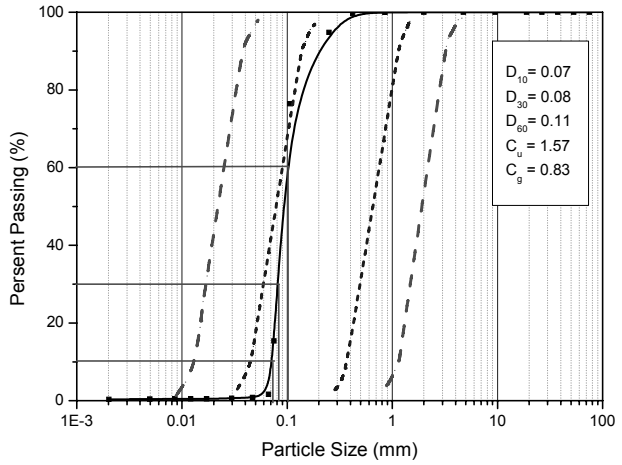


그림 1. 대상토의 입도분포곡선과 입도분포를 통한 액상화판정(Ishihara, 1977)

만금 준설토는 액상화의 가능성이 매우 큰 범위에 속한다. 그림에서 외부의 긴 파선은 액생화 발생 가능성이 큰 범위이고, 내부의 짧은 파선은 액상화의 가능성이 매우 높은 범위를 나타내고 있다. 대상토의 최대·최소 상대밀도는 노건조한 대상토를 조개껍질 등 이물질을 제거하기 위하여 #40번체를 통과한 시료만을 이용하여 비점성토의 상대밀도 시험방법(KSF2345)으로 시험을 실시하였다. 반복삼축시험에 사용한 상대밀도 30%, 50%, 70%의 밀도와 최대·최소밀도를 표 2에 정리하였다.

2.2 반복삼축압축시험 장치

본 연구에 사용한 반복삼축시험장치는 다음과 같은 특징을 갖는다. 비반복 재하시험에서 0.0001%/min 정도의 미세한 축변형률의 속도로 재하가 가능하고, 0.001%/min 정도의 축변형률 진폭으로 반복재하가 가능하며, 시간적 지연 없이 재하 방향의 반전이 가능하다. 또한 컴퓨터에 의한 자동응력 제어가 가능하다. 또한, 국부변형률측정장치(LDT)와 삼축셀 안에 하중계(Load Cell)의 설치로 미소변형률(0.0001%이하)의 측정이 가능하다. 그림 2에 반복삼축시험장치의 개요를 나타내었다.

표 2. 대상토의 최대·최소상대밀도

Relative Density	Density(g/cm^3)
Maximum	1.553
Minimum	1.212
70%	1.548
50%	1.488
30%	1.432

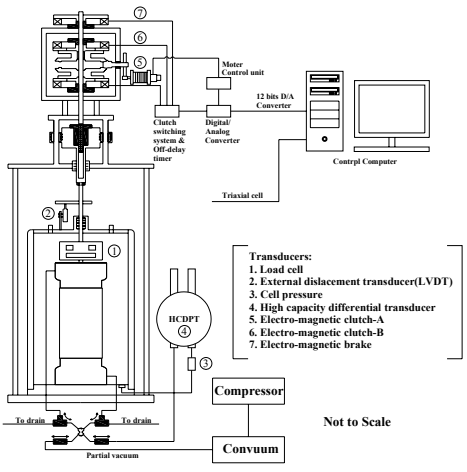


그림 2. 반복삼축시험장치의 개요도

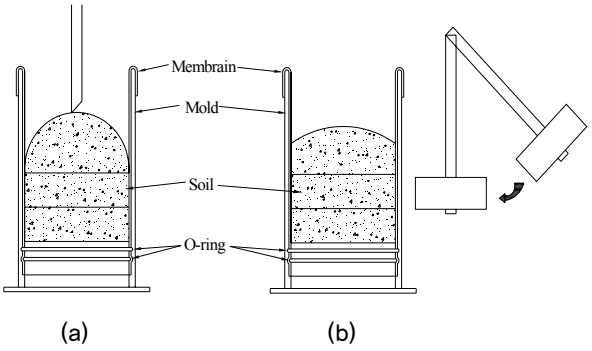


그림 3. 시료제작방법

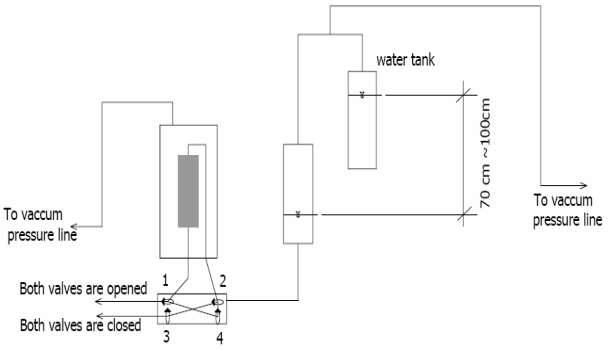


그림 4. 이중부압법에 의한 시료포화 방법

2.3 시험방법

2.3.1 시료제작

대상토를 조개껍질등과 같은 이물질을 제거하기 위해서 #40번체를 통과한 시료만을 사용하였다. 상대밀도실험을 통하여 해당 상대밀도에 대한 시료부피에 대한 질량을 구하여 놓는다. 하부 페디스탈 저부에 고무 멤브레인을 씌우고 O-ring 2개로 봉한 후, 고무 멤브레인으로 한번 더 봉하였다. 고무 멤브레인을 진공성형상자에 씌운 후 진공압을 가해 고무 멤브레인 진공성형상자에 밀착되게 하였다. 시료는 총 5층으로 나누어 각층마다 그림 3과 같이 낙하고가 없이 미리 정해진 질량만큼 퇴적시키고 멤브레인 각층에 미리 표시된 선을 목표로 대칭적으로 성형상자에 미세하게 충격을 가하는 방법으로 필요한 상대밀도로 제작하였다.

2.3.2 포화 및 압밀

필요한 상대밀도를 확인 후 상부페데스탈을 시료의 상부와 밀착시켜 고무 멤브레인으로 상부페데스탈을 감싸, 하부와 마찬가지로 O-ring과 멤브레인으로 시료를 고정시킨다. 시료에 20kPa의 부압을 가한 후 성형상자를 제거하고 압력실을 조립하고 압력실에 물을 채운다. 물이 완전히 시료에 잠기면 그림 4와 같이 이중 부압법을 사용하여 시료를 포화시켰다. 포화가 완료되면 간극수압계수 B값을 측정하고 0.94 이상을 확인하였다. 포화 후 그림 5와 같은 배압과 셀압을 이용하여 등방압밀을 진행하였다. 그림 5는 포화와 압밀시의 압력관계를 나타내 것이며, 여기서 배압이 "0"보다 커지는 시점부터 압밀이 시작되고, 압밀은 최소 1시간 이상 유지하였다.

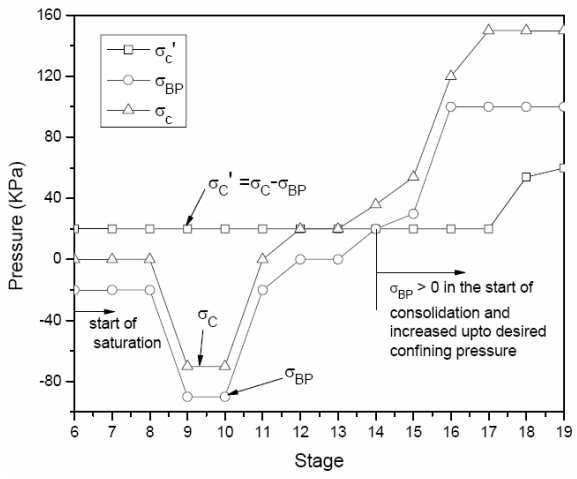


그림 5. 포화단계와 압밀시의 압력관계

2.3.3 반복하중의 재하

압밀이 종료된 후 배수밸브를 잠그고 비배수 반복삼축시험을 실시하였다. 진동주기(Frequency)는 일본 지반공학회(2000)기준(JGS 0541-2000) 0.1～1.0Hz의 범위인 0.1Hz으로 모든 실험을 실시하였으며, 진동하중은 응력제어방식으로 하였고, 사용된 진동파형은 Sine파형이다. 액상화의 발생은 간극수압과 압밀구속압의 비가 95% 이상이고 양진폭 변형률이 5%이상 시점을 액상화 발생 시점으로

표 3. 실시한 시험의 조건

상대밀도(Dr)	유효구속압(σ'_c)	축차응력(σ'_d)
30	100	15
		30
		40
	200	40
		60
		80
	400	100
		120
		150
50	100	20
		30
		40
70	100	40
		50
		50

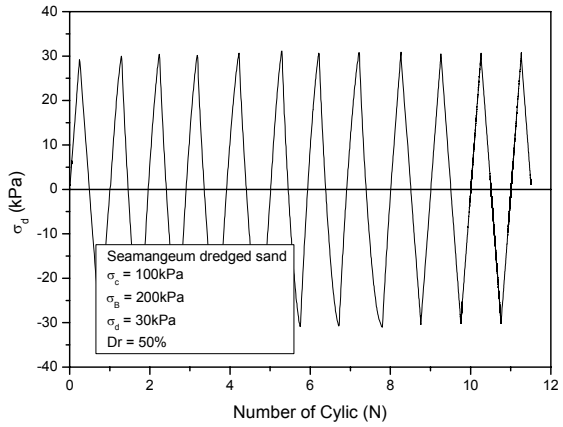


그림 6. 반복횟수와 축차응력 측정결과
(상대밀도 50%, 구속압 100kPa, 축차응력 30kPa)

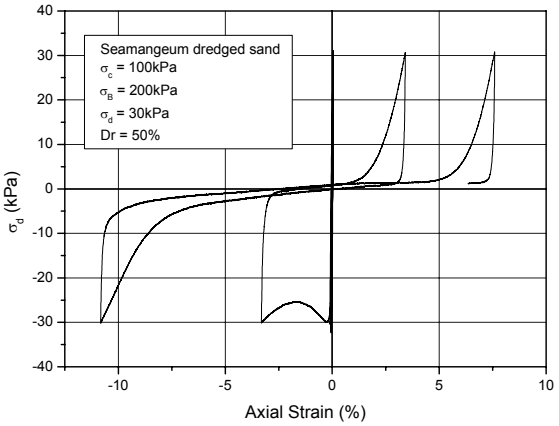


그림 7. 축변형률과 축차응력 측정결과
(상대밀도 50%, 구속압 100kPa, 축차응력 30kPa)

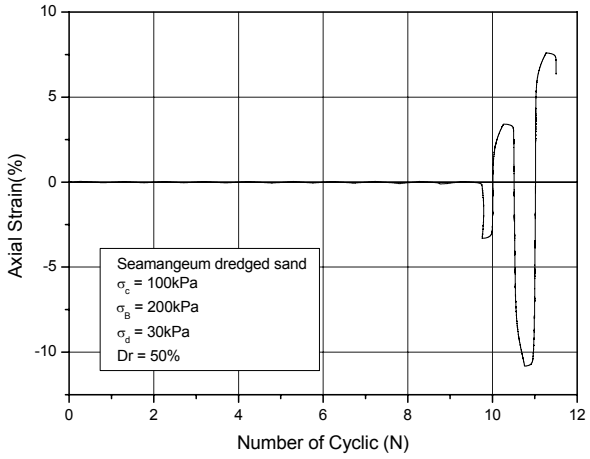


그림 8. 반복횟수와 축변형률 측정결과
(상대밀도 50%, 구속압 100kPa, 축차응력 30kPa)

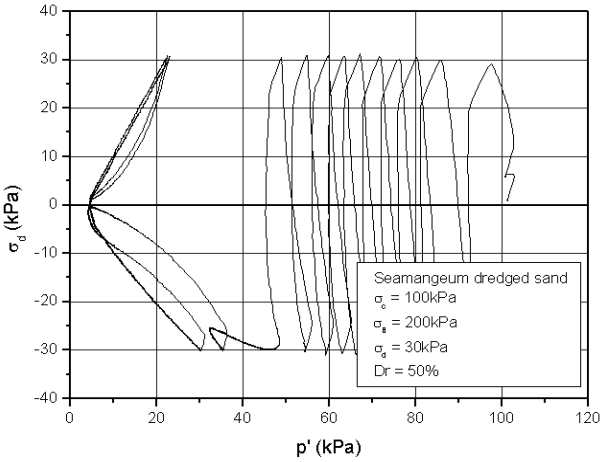


그림 9. 평균유효응력과 축차응력 측정결과
(상대밀도 50%, 구속압 100kPa, 축차응력 30kPa)

결정하였다. 표 3에 이 연구에서 실시한 시험의 조건들을 나타내었다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 시험결과

다음의 그림 6~그림 10은 상대밀도 50%, 구속압 100kPa, 축차응력 30kPa일 때의 전형적인 시험결과를 나타내고 있다. 그림 6는 축차응력과 반복횟수와의 관계를 나타내고 있다. 반복 및 재하방향의 전환에 따른 지연현상은 발견할 수 없고 정확하게 반복하중이 재하되고 있음을 알 수 있다. 그림 7은 축차응력과 축변형률 관계를 나타낸 것이고, 그림 8은 축변형률과 반복횟수와의 관계를 나타낸 것으로 반복횟수가 9회까지는 축변형률이 미소하게 변화하고 있으나, 반복횟수 10회 인장변형일 때로부터 변형

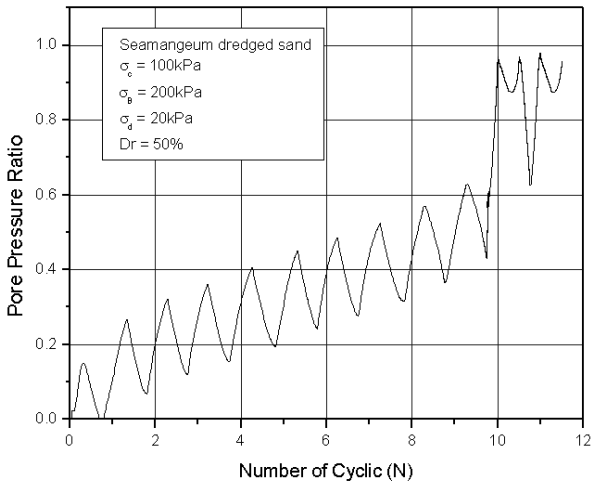
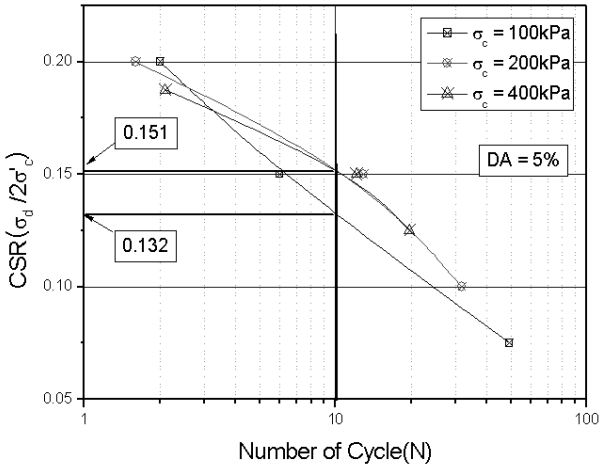
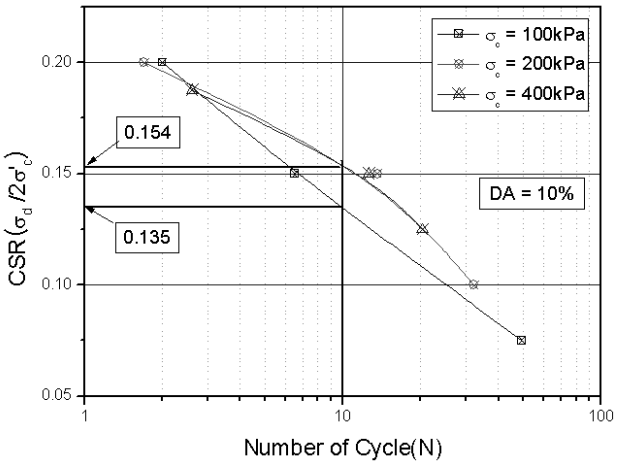


그림 10. 반복횟수와 간극수압비 측정결과
(상대밀도 50%, 구속압 100kPa, 축차응력 30kPa)

률이 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. 그림 9는 축차응력과 평균유효응력과의 관계를 나타낸 것으로 반복횟수 9회

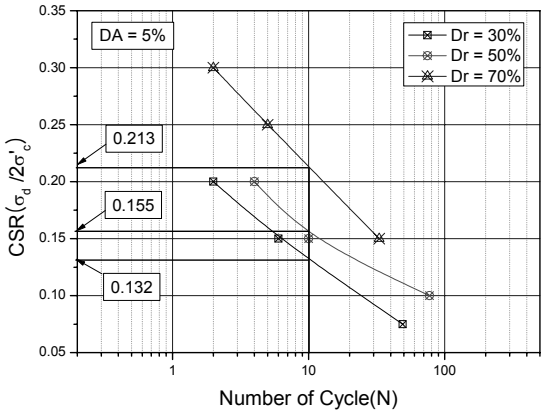


(a) DA=5%

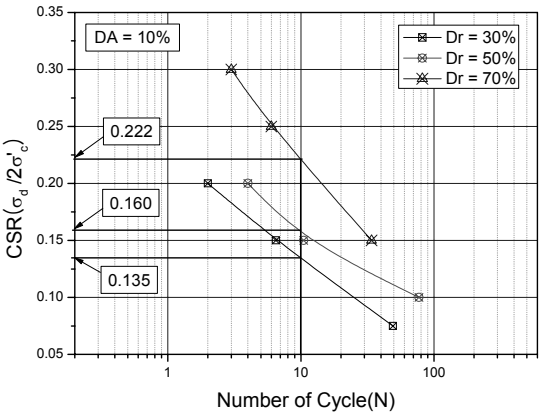


(b) DA=10%

그림 11. 압밀구속압에 따른 반복횟수와 응력비의 관계



(a) DA=5%



(b) DA=10%

그림 12. 상대밀도에 따른 반복횟수와 응력비 관계

까지는 간극수압의 증가에 따라 일정한 형태로 평균유효응력이 감소하고 있으나 반복횟수 10회 부터 과잉간극수압의 급증으로 평균유효응력이 거의 0에 가까워지고 있음을 알 수 있다. 그림 10은 간극수압비(과잉간극수압(Δu)/유효구속압(σ'_c))와 반복횟수와의 관계를 나타낸 것으로 10회 반복시로 부터 과잉간극수압의 급증으로 간극수압비가 급증하고 있고, 12회 반복시 간극수압비가 0.95이상이 되고, 또한 이 때 압축변형률이 5% 이상 발생하여 액상화가 발생된 것으로 판단된다(한국지반공학회, 1997; 한국지진공학회, 1997).

3.2 압밀 변화에 따른 액상화 강도의 변화

포화모래의 액상화는 간극수압의 증가에 따라 유효구속압이 점차 감소하기 때문에 발생한다. 초기 구속압이 크면 클 수록 액상화에 이르기 까지 증가하는 간극수압량이 커지게 되므로 보다 액상화하기 어렵게 된다. 다음의 그림 11은 압밀구속압 변화에 따른 반복응력비($\sigma'_d / 2\sigma'_c$)를 양진폭변형률이 각각 5%, 10%일 때의 반복횟수와의 관계를 나타낸 것이다. 반복응력은 압밀구속압에 따라 선형적으로 증가하게 되나 그림에서와 같이 반복응력을 압밀구속압으로 무차원화하여 나타내면 액상화 강도의 변화는 상대적으로 작다. 이후의 반복응력은 압밀구속압으로 무차원화하여 나타내는 방법에 의해 압밀구속압의 영향을 고려한다.

3.3 상대밀도에 따른 액상화 강도특성

다음의 그림 12는 각각 양진폭변형률이 5%, 10%일 때, 반복응력비($\sigma'_d / 2\sigma'_c$)와 반복횟수와의 관계를 나타낸 것이다. 그림 13은 그림 12에서반복횟수 10회일 때 대응하는 반복응력비의 값을 양진폭변형률 5%, 10%일 때의 상대밀도와 응력비의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 상대

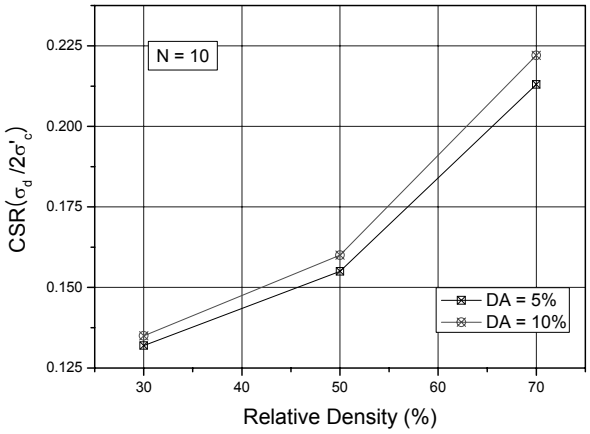


그림 13. 양진폭변형률(DA)에 따른 상대밀도와 응력비의 관계

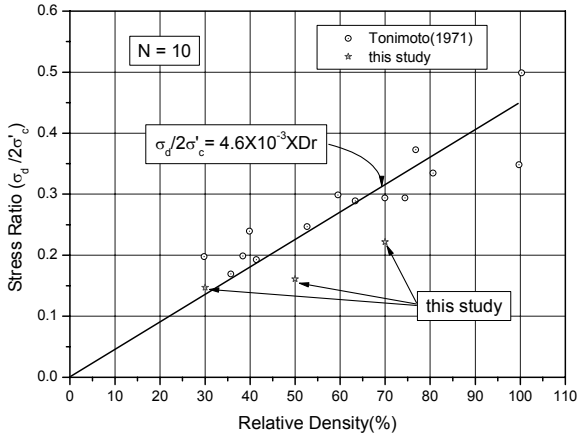


그림 14. 10회 재하시 액상화발생에 필요한 응력비와 상대밀도의 관계(Tanimoto, 1971)

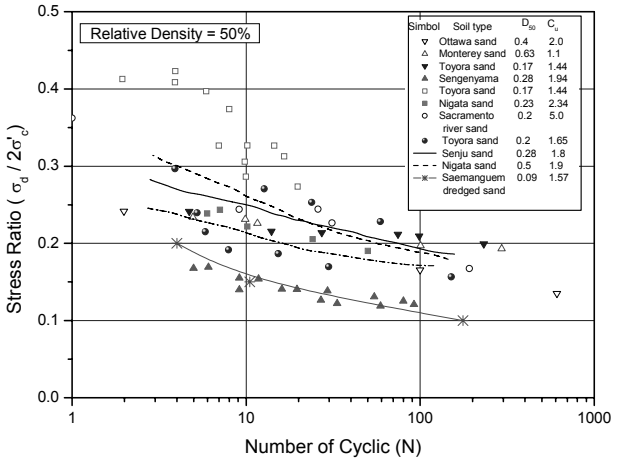


그림 15. 액상화 응력비와 반복횟수의 관계 (상대밀도 50%)(Ishihara, 1980)

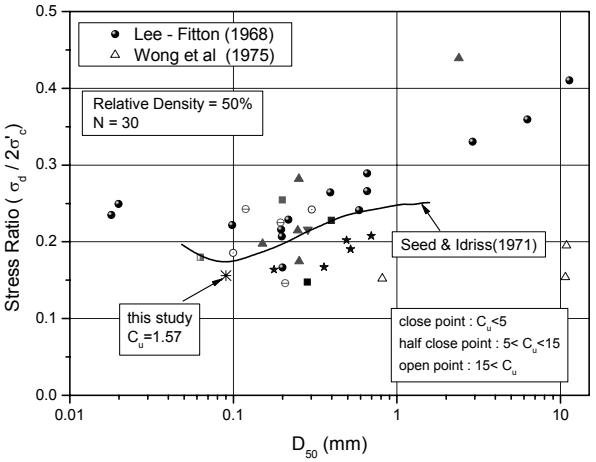


그림 16. 평균입경과 반복횟수 30회일 때의 액상화 응력비 관계 (Seed 등, 1971)

밀도가 클수록 양진폭변형률(DA)이 커질수록 반복응력비가 증가한다는 것을 알 수 있다. 그림 14는 Tanimoto (1971)가 10회 반복재하시 액상화 발생에 필요한 응력비를 상대밀도에 대해 정리한 것이다. Tanimoto는 이 결과가 모래의 종류 및 실험오차에 따라 다르게 나타날 수 있으나, 개략 응력비와 상대밀도와의 관계는 그림에도 표기하였듯이 식 (1)과 같은 선형관계로 나타낼 수 있다고 하였다.

$$\sigma_d / 2\sigma'_c = 46 \times 10^{-3} \times Dr \quad (1)$$

그림 14에서 알 수 있듯이 10회 뿐만 아니라 임의의 반복횟수에서도 응력비와 상대밀도는 거의 선형관계로 나타낼 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 그림 14에서 새만금 준설토는 Tanimoto가 제안한 식보다는 상대밀도가 커질수록 다소 작은 응력비를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 액상화에 필요한 응력비가 단순히 상대밀도만의 문제가 아니라 입도, 세립분함유량의 영향도 크므로 식 (1)을 모든 모래에 적용시키는 것은 적절하다고 할 수 없다. 새마금 준설토가 다른 모래에 비해 다른 경향을 보이는 이유에 대해 현재로서는 명확하게 밝혀진 것이 없으나, 현재로서는 이 그림에서 새만금 준설토의 액상화 강도가 다른 모래에 비해 작다고 말할 수 있는데, 이것은 그림 15에 나타낸 반복횟수와 응력비 관계에서도 알 수 있다. 그림 15는 일정 응력비에서 액상화에 필요한 반복횟수를 구한 실험 중에서 삼축장치를 이용한 실험결과를 石原 (1976)가 정리한 것이다. 이 그림에 나타낸 데이터는 서로 다른 상대밀도에서 구한 결과를 그림 14 또는 식 (1)을 이용하여 모든 데이터를 상대밀도 50%의 값으로 환산한 결과이다. 결과는 상당히 분산되어 있으나, 새만금 준설토는 센겐야마(Sengenyama) 모래의 경우와 유사한 액상화 강도를 갖고 있는 것으로 나타나고 있고, 그림 중 새만금 준설토와 함

께 액상화에 취약한 특성을 보이고 있다. 새만금 준설토가 액상화에 취약한 특성을 보이는 것은 입도분포가 그림 1과 같이 액상화 가능성이 큰 구간에 속해 있다는 점과 그림 16의 평균입경과 액상화에 필요한 응력비 관계에서 알 수 있듯이 균등계수가 5보다 작을 때 평균입경이 약 0.1 부근에서 액상화 응력비가 가장 작게 나타난다는 Seed 등(1971)의 추세선(그림에서 실선)에 있기 때문이라고 해석할 수 있다. 그림 16은 30회의 반복재하에서 액상화에 필요한 응력비를 평균입경에 대해 정리한 것으로 50%의 상대밀도로 환산한 결과이다. 상당히 데이터가 분산되어 있으나 상대밀도가 일정하다고 하더라고 액상화 저항력은 대략적으로 평균입경 D_{50}이 0.1정도의 모래가 가장 작고 이보다 크거나 작은 평균입경에서는 다소 증가하는 경향을 보이고 있다는 것을 알 수 있다. 이 결과는 상대밀도가 일정할 경우 평균적인 입경이 변하면 액상화저항력의 차가 발생한다는 것을 말해주고 있고, 상대밀도 자체가 액상화의 난이도와 관계를 지을 수 있는 모래의 다짐정도를 정확히 표현할 수 있다고 할 수 없음을 보여주고 있다. 石原(1976)는 액상화와 관련된 모래의 다짐정도는 상대밀도보다 여유간극비($e-e_{\min}$)를 이용하는 것이 보다 적절하다고 제안하였다. 이것은 현재의 간극비 e가 최소간극비 $e_{\min}$에 다다를 때 까지의 감소할 수 있는 여유량을 나타낸다. 즉, 여유간극비가 크다고 하는 것은 반복재하 중 과잉간극수압의 발생량이 크다는 것을 의미한다. 일반적으로 동일한 상대밀도라면 조립토가 세립토보다 여유간극비가 작고, 액상화저항력이 크다고 생각할 수 있다. 또한, 여유간극비는 $e-e_{\min}=(1-D_r)(e_{\max}-e_{\min})$로 되고, 이 식의 우변중 $e_{\max}-e_{\min}$은 모래의 특성을 나타내는 것으로 모래의 다짐정도와는 무관계한 값이다. 그러나, $1-D_r$은 다짐정도에 따라 결정되는 값이다. 상대밀도가 같더라도 $e_{\max}-e_{\min}$값은 변하게 되고, $e-e_{\min}$값도 같은 경향으로 변하게 된다. 그림 17은 石原 (1976)가 정리한 그림에 새만금 준설토의 실험결과를 추가한 것이다. 그림에서 여유간극비와 액상화응력비 관계는 일본의 모래와 상당한 차이를 보이고 있는데, 이것은 1980년대 당시의 최대, 최소간극비 측정방법과 현재의 측정방법의 차이에 기인하는 것인지, 아니면 새만금준설토의 취약성을 나타내고 있는지의 여부는 아직 확실하지는 않으나, 전체적으로 새만금 준설토는 액상화 저항력이 다른 모래에 비해 열등하다는 결론은 내릴 수 있다.

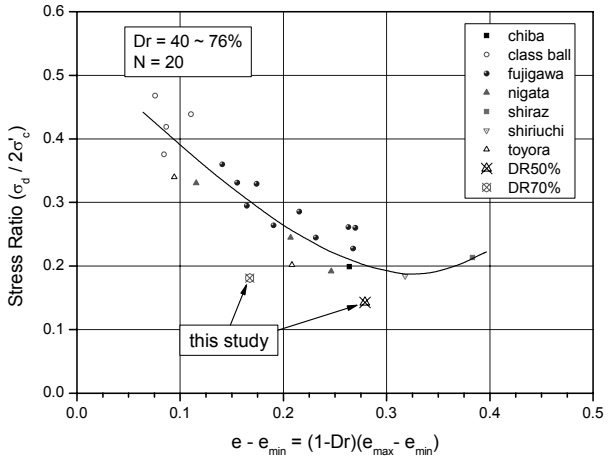


그림 17. 반복횟수 20회일 때 액상화에 필요한 응력비와 여유간극비의 관계

4. 결 론

반복삼축시험을 이용한 새만금준설토의 액상화 거동특성의 연구 결과 도출한 주요 결론은 다음과 같다.

1. 압밀구속압의 변화에 대한 반복응력은 선형적으로 증가하나, 압밀구속압으로 무차원화하면 반복응력비는 거의 변화가 없다.
2. 양진폭변형률 5%, 반복횟수 10회 때의 반복응력비는 상대밀도 30%에서는 0.132, 상대밀도 50%에서는 0.155, 상대밀도 70%에서는 0.213로 나타나, 상대밀도가 커질수록 액상화는 대략적으로 선형적으로 증가하고, 양진폭변형률 10%에서도 유사한 양상을 보인다.
3. 액상화 응력비와의 상대밀도와의 상관관계는 Tanimoto가 제안한 $\sigma_d / 2\sigma'_c = 46\times 10^{-3}\times Dr$보다 다소 완만한 기울기를 보인다.
4. 상대밀도 50%의 경우, 액상화 응력비와 반복횟수와의 관계에서 여러 다른 모래와 비교할 때, 새만금 준설토는 가장 작은 액상화 응력비를 나타낸다.
5. 새만금 준설토는 다른 모래와 비교해 볼 때, 평균입경과 입도분포가 액상화에 가장 취약한 값과 분포를 지니고 있어, 액상화 강도가 상대적으로 작은 것으로 나타나고 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2007년도 건설핵심기술연구 개발사업(과제번호 : R&D/04-A01-02)의 지원으로 수행되었

으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 기상청 (2006), "*지진연보*".
2. 정두영 (1994), *해성실트질 모래지반의 지진시 액상화예측에 관한 연구*, 박사학위논문, 전북대학교.
3. 최두현 (2000). *새만금 준설 모래의 동적 액상화 거동 특성, 석사학위논문*, 원광대학교.
4. 최윤웅 (1988), "모래의 액상화에 대한 실험연구", *1988년도 학술발표회 개요집*, *대한토목학회*, pp.359-362.
5. 한국 지반공학회 (1997), *진동 및 내진설계*, 구미서관.
6. 한국 지진공학회 (1997), *내진설계기준 연구(II)*, 한국건설기술연구원, 건설교통부, pp.29-41.
7. 황대진 (1993), "실트질을 포함하는 모래질 흙의 액상화강도에 관한 연구", *대한토목학회 논문집*, pp.243-252.
8. 石原 研而 (1976), *土質動力学の基礎*, 鹿島出版会
9. 日本 地盤工学会 (2000), *土質試験の方法と解説 第1回改訂版*.
10. Ishihara, K. (1977), "Simple Method of Analysis for Liquefaction of Sand Deposits during Earthquakes", *Soil and Found*., Vol.17, No.3.
11. Mogami, t. and Kubo, K. (1953), "The Behavior of Soil during Vibration", *Proceedings, 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Zurich, Vol.1953, pp.152-155.
12. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971), "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potentail", *Journal of Soil Mechanics and Foundation*, ASCE, Vol.93, No.Sm3, 1971, pp.1249-1273.
13. Tanimoto,K. and Suga, Y. (1971), "Liguefying Process of Saturated Sand Subjected to Dynamic Loading", *4th Asian Regional Conference on Soil Mech. and Found. Eng*, Bankok, Vol.1, pp.235-239.

(논문접수일 2009. 3. 2, 심사완료일 2009. 3. 12)