

준설매립지반의 세립토가 액상화 강도에 미치는 영향

Effect of Liquefaction Resistance of Fine-Grained Soils on the Reclaimed Land

김종국¹⁾, Jong-Kook Kim, 윤원섭²⁾, Won-Sub Yoon, 박상준³⁾, Sang-Jun Park, 채영수⁵⁾, Young-Su Chae

- 1) 한국건설품질시험원 지반공학센터 팀장, Chief of Geo-Team., Institution of Korea Construction Quality Test&Analysis.
- 2) 수원대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.
- 3) 수원대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.
- 4) 수원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.

SYNOPSIS: Vibration triaxial compression test was put in influence for liquefaction strength of fine grained soil of dredged and reclaimed ground and consideration for fine fraction content, relative density, overconsolidation ratio and plasticity index in this study. By the results of these test, the liquefaction strength increased with fine fraction content and the relative density, overconsolidation ratio increased with liquefaction strength too. However, in the case of nonplastic silt was the smallest liquefaction strength which influenced by dilatancy and interlocking when silt content was 34.7%(average grading 0.12mm). Therefore, liquefaction strength of fine grained soil of dredged and reclaimed ground increased with fine fraction content so it will help to make lower liquefaction.

Key words : Fine-Grained Soils, Liquefaction Resistance, Reclaimed Land, Dilatancy, Interlocking

1. 서론

근대에 들어 세계적으로 여러 곳에서 크고 작은 지진이 빈번히 발생하고 있으며 중국의 경우 가장 최근에 발생한 쓰촨성 지진(2008)을 비롯해 칸슈 지진(1920년), 상하이 지진(1927년), 탕산 지진(1976년) 등의 강진으로 많은 인명피해와 재산피해가 발생하였다. 일본의 경우에도 니가타 지진(1964년), 고베 지진(1965년)의 강진을 비롯해 1995년 간사이 지진 등의 강진이 발생하여 수천명의 인명피해를 내기도 했다. 특히 지진이 많이 발생하고 있는 미국의 경우에는 알래스카의 Good Friday 지진(1964년), LA 지진(1989년, 1993년) 등으로 많은 인명피해를 낸 바 있다. 중국의 쓰촨성 지진(2008년)은 인도판과 유라시아판의 충돌로 리히터 규모 7.8의 대규모 지진이 발생하였으며, 이처럼 판구조 이론(plate theory)에 따라 지진의 대부분이 판의 경계에서 발생한다. 한편 지진 피해에 의하면 일본의 Niigata 지진(1964년)과 미국의 Good Friday 지진(1964년)의 경우에는 모래지반의 액상화가 발생하여 큰 피해를 입은 것으로 보고되었다. 멕시코 지진(1986년)은 대양에서 발생하여 대륙까지 전달되는 동안 지진의 힘이 다소 감소됨에도 불구하고 전달된 장주기의 지진파가 멕시코시티의 매립지반에서 매우 크게 증폭되어 큰 피해를 발생하였다. 1994년 캘리포니아의 Northridge 지진과 일본의 고베 지진은 성토지반에서의 비탈면파괴, 교량 및 건물의 기초파괴, 지중구조물의 부유 등 액상화 현상으로 인한 많은 피해가 발생하여 액상화 피해의 심각성과 연구의 필요성이 부각되었다. 또한 1989년 미국 Loma Prieta 연구소에서 세립분을 함유한 흙의 액상화 및 그 후의 측방유동에 대한 관측이 보고되었다. 터키의 Kocaeli 지진(1999)은 Adapazari 지역에서 비소성 실트 및 실트질 모래지반 발생 후 약 20일 동안 건물이 이동한 사례도 보고되고 있

다. 2000년 일본 토티리현 서부지진에서는 비소성 실트 지반에서 일어난 액상화에 의한 피해 사례가 보고되었다.

우리나라 주변에서 발생하고 있는 강진과 더불어 한반도에서 발생하는 약진의 지진에서 볼 때 더 이상 한반도가 지진에 대한 안전지대가 아니라는 것을 일깨워 주고 있다. Kyung and Atsumasa(1995)는 지질학적 관점에서 액상화의 발생사례를 역사지진과 관련시켜 발표하였다. 이들은 경주와 울산시의 중간에 위치한 말방리에서 액상화의 흔적인 사맥과 분사현상을 발견하였고 과거에 발생한 진도 9이상의 지진 중 최소한 8개의 지진 발생 시 액상화 현상이 일어난 것으로 추정하고 있다.

이처럼 우리나라도 신공항 및 신항만을 비롯한 많은 공업단지 등의 해안 지역을 준설패립하여 부지를 조성하는 사례가 늘어나고 있는 실정으로 지진에 대한 우려가 높아지면서 점차 액상화 현상에 대한 문제가 중요하게 대두하고 있다. 느슨한 사질토로 지반을 패립할 경우 작은 규모의 지진에 의해서도 액상화 현상이 발생하여 지반의 침하 및 구조물의 붕괴 등의 큰 지진피해가 발생할 수 있기 때문이다. 특히, 연약한 패립지반에 구조물을 축조할 경우 지진이 발생하게 되면 패립지반에 액상화가 발생하여 지진피해가 우려되는 바와 같이 대상지반의 지진 및 지역특성을 고려하여 액상화 현상을 예측하고 이에 대한 안전성을 검토하는 등의 내진설계 및 내진성능을 강화할 필요가 있다.

따라서 본 연구는 인천 송도신도시에 일괄 패립된 준설패립지반에 대하여 패립토의 순수모래와 실트질 모래 및 세립분이 많이 함유된 비소성 실트를 대상으로 진동삼축시험을 수행하였으며 그 결과를 토대로 세립토가 액상화 저항강도에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 패립지반의 지반특성

준설패립지반은 그림 1과 같이 지표면에서부터 패립층, 퇴적층, 잔류토층, 풍화암층 순으로 구성되었다. 패립층은 3.5m~12m 두께로 일괄 패립한 지층으로 대부분 자갈섞인 모래, 실트질 모래 및 모래질 실트층로 통일분류법으로 SM, ML층이 주를 이루고 있고 부분적으로 실트층(ML 또는 CL-ML)과 점토층(CL)이 밴드형으로 잔존하였다. 모래층의 N치는 9/30~17/30, 실트층은 3/30~10/30, 점토층은 1/30~2/30정도를 보이고 있다. 이러한 세립토의 경우 양호한 모래에서부터 빈입도인 세립질 모래가 대부분으로 액상화 현상이 발생하기 쉬운 조건을 가지고 있다.

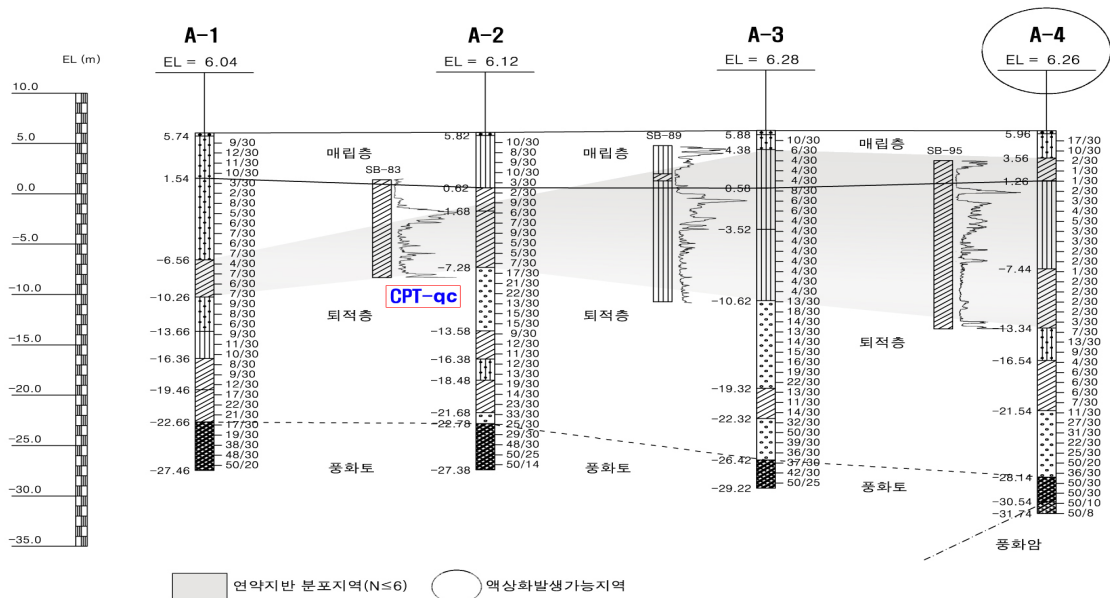


그림 1. 준설패립지반의 전형적인 지반 특성 (송도 ○공구)

3. 액상화 강도시험

3.1 시험시료 및 시험조건

시료채취 지역은 인천 송도신도시의 준설패립지반으로 준설토의 매설고는 3.5m~12m이고, 지하수위의 위치는 지반조사 자료를 토대로 준설토 표층하 3m지점으로 통일하였다. 본 연구에 사용된 시험시료는 패립지반내 분포하는 준설토로 세립분 함유량(F.C) 분포에 따라 위치를 선정하여 교란시료를 채취하였다. 준설토의 세립분 함유량은 5.4%, 12.6%, 34.7%, 54.5%, 74.3%, 94.4% 6개군으로 변화시켰다. 이 들 시료의 입도분포곡선 및 물리적 성질은 그림 2와 표 1과 같다.

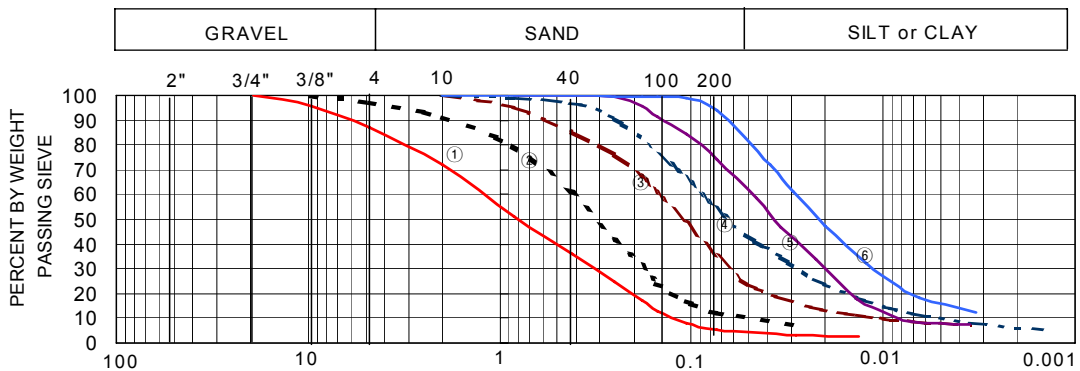


그림 2. 준설패립지반의 대표적인 지반 특성

표 1. 시험시료의 물리적 성질

구 분	no.1 (①)	no.2 (②)	no.3 (③)	no.4 (④)	no.5 (⑤)	no.6 (⑥)
함 수 비	24.3	25.8	26.1	27.3	34.7	34.3
비 중	2.661	2.658	2.668	2.671	2.673	2.695
액성 한계	NP	NP	NP	26.1	26.6	33.5
소성 지수	NP	NP	NP	1.8	4.9	9.6
r_{dmax}	1.801	1.745	1.665	1.654	1.637	1.517
r_{dmin}	1.459	1.408	1.348	1.332	1.326	1.258
평균입경(D50)	0.80	0.32	0.12	0.063	0.038	0.022
균등계수(Cu)	8.1	8.2	10.0	15.5	5.7	23.3
#200체 통과량	5.4	12.6	34.7	54.5	74.3	94.4
통일분류(U.S.C.S)	SM	SM	SM	ML	ML	CL

흔히 액상화는 사질토 층에서 발생하며 지하수위 상부지반, 주상도상의 표준관입저항치(N)가 20이상인 지반, 지반심도가 20m이상인 지반, 소성지수(PI)가 10이상이고 점토성분이 20%이상인 지반, 세립토 함유량이 35%이상인 경우 및 상대밀도가 80%이상인 지반, 지층분류가 S_a , S_b , S_c , S_d 인 지반은 액상화에 대해 안전한 것으로 보고 액상화 평가를 생략할 수도 있다(구조물기초 설계기준, 2003). 그러나 표 1과 그림 2의 준설패립토의 경우에서와 같이 순수 모래와 실트질 모래 및 비소성 실트로 구성되어 있고, 그림 3의 균등계수(C_u) 3.5를 기준으로 구분하면 액상화 가능성이 있는 흙의 입도분포를 보인다. 그림 3에서 A , B_f , B_c 의 영역에 해당하는 입도분포를 갖는 지반의 경우 액상화 가능성이 없으며 액상화 평가를 생략할 수 있다. 그러나 본 준설패립지반의 준설토의 입도분포가 그림에 정의된 두 영역에 걸쳐있을 경우로 액상화 가능성에 상당한 차이를 보일 수 있으므로 보다 상세한 시험을 통해 적절한 공학적 판단을 해야 한다. 이에 따라 준설패립지반의 세립토가 액상화 저항강도에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 진동삼축시험을 수행하였다.

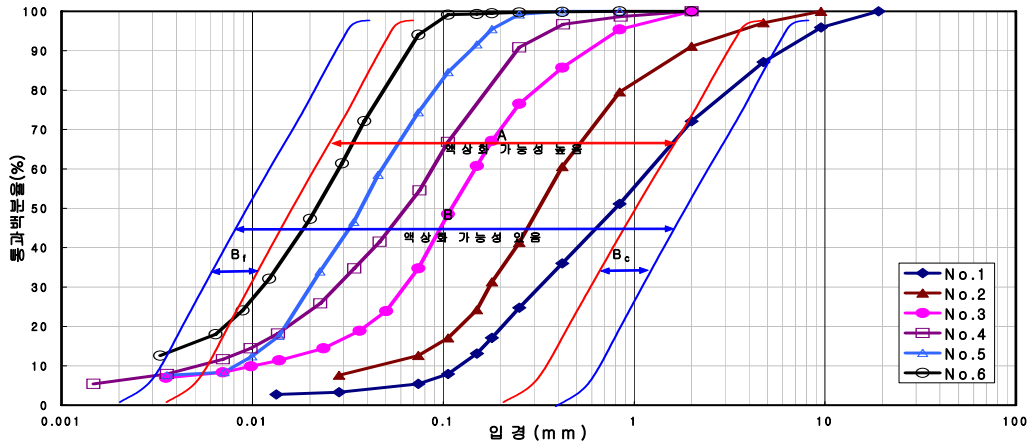


그림 3. 준설패립토의 입도분포에 따른 액상화 가능성($C_u > 3.5$)

진동삼축시험의 액상화 강도에 영향을 미치는 요소는 주로 흙의 입도분포, 상대밀도, 입자구조 등의 지반조건과 유효주응력, 과압밀비 등의 응력조건, 구속압력, 최대 축차응력 등의 하중조건을 비롯해 시료의 크기, 간극수압비 등의 실험조건 등이 있으나, 재성형시료의 실험 시 흙입자들의 분포형태, 퇴적구조, 장기압력 및 2차압축 등은 사라지게 된다.

표 2. 진동삼축시험의 시험조건

초기 유효구속압	세립분 함유량 (%)	상대 밀도 (D_r)	과압밀비 (OCR)	하중 제어 방식	진동수	하중 종류	응력비 ($= \frac{\sigma_d}{2\sigma_v}$)	시료 조건
100kPa 등방압	5.4~94.4	40~70%	1~4	응력 제어	1Hz	정현파	0.2~0.3	포화 비배수

본 연구에서는 세립토가 액상화 강도에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 표 2와 같이 세립분 함유량에 따른 응력비와 진동재하횟수와 관계의 비로써 상대밀도, 소정지수, 과압밀비에 따른 응력비와 진동재하횟수와 관계의 비를 살펴보았다. 실내시험 시 주 영향인자인 상대밀도는 40%를 기준으로 50%, 60% 70%로 변화시켜 시험을 수행하였고 구속압은 준설패립지반이 약 5m~12m인점을 감안하여 초기 유효상재압 100kPa를 기준으로 통일하였다. 또한 과압밀비(OCR)은 상대밀도 40%를 기준으로 구속압력을 200kPa, 300kPa, 400kPa로 선행 등방압 밀 시킨 후 과압밀비(OCR)를 1, 2, 3, 4로 전단시켜 액상화 강도를 살펴보았다.

3.2 시험방법

실내 진동삼축시험은 지진이 발생했을 경우 생길 수 있는 포화 사질토지반의 액상화 현장을 재현할 수 있는 대표적인 실내시험이다. 그러나 사질토 지반은 불교란 사질토의 채취가 어려울 뿐만 아니라 경제적 부담이 크게 소요되며, 상대밀도 및 입도를 토대로 시료를 재성형하여 시험을 수행하는 등의 시험조건 및 재료조건 등이 비배수 거동에 미치는 영향이 다양하기 때문에 실내시험 수행 시에는 이에 대한 충분한 고려가 필요하다. 진동삼축시험기의 제원은 그림 4와 같고, 시험기기의 구성은 수직하중재하를 위한 load trac 장치, 셀과 시료에 하중을 재하하는 flow trac, 유압을 이용한 압력장치와 아날로그신호를 디지털신호로 바꾸는 read-out 박스 및 컴퓨터로 이루어져 있다. 컴퓨터를 이용하여 시료의 포화조건 및 압밀조건을 입력하면 load trac과 flow trac의 작동이 제어되어 진동하중이 가해지기 직전단계까지 전자동으로 이루어지며 시험기의 가능 최대진동재하 주파수는 2Hz이다.

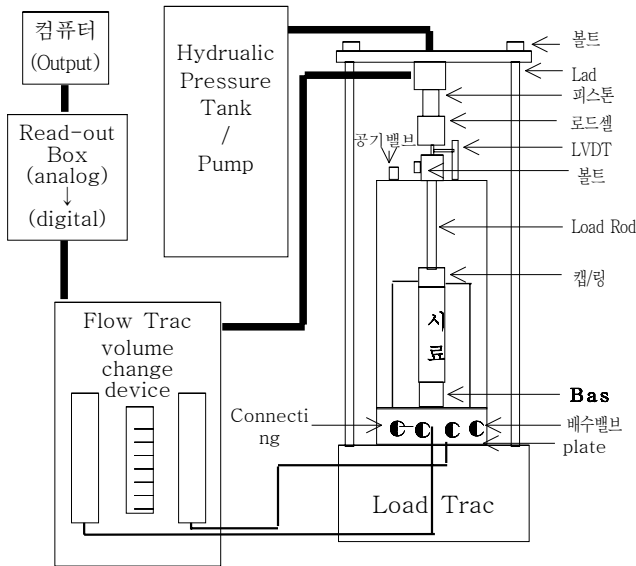


그림 4. 진동삼축시험기 구성도

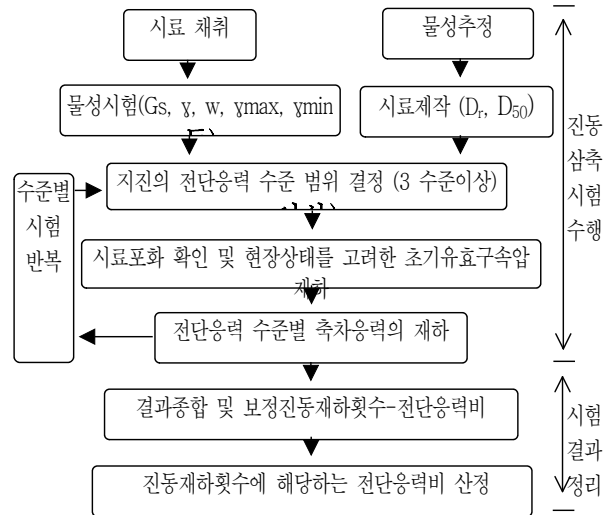


그림 5. 진동삼축시험에 의한 액상화 평가

진동삼축시험 시 시편의 성형방법은 공기 중 낙하다짐, 습윤층 다짐, 진동층 다짐 등의 다양한 방법들이 있으며, 재성형시료의 성형법에 따라 액상화 평가결과에 다소 차이가 있는 것으로 발표하였다(Chan and Seed, 1975, 이익호 등, 2003). 본 연구에서는 수중침강법으로 시료를 포화시킨 후 B값이 0.97이상인 경우를 완전포화로 간주하였다. 또한 일반적으로 알려진 지진의 주기는 0.02Hz~10Hz의 범위이나 1996년 Kramer는 지진이 가장 잘 표현할 수 있는 주기는 1Hz임을 밝힘에 따라 본 연구에서는 1Hz를 진동재하주기로 설정하였다. 진동삼축시험에서는 일반적으로 정현파의 진동하중을 주기적으로 재하하며 응력수준에 따라 액상화가 발생하는 하중재하횟수가 변화한다. 따라서 그림 5와 같이 일정수준의 지진규모를 고려한 액상화 전단저항응력비는 적정수준의 전단응력비를 포함한 3회 이상의 진동삼축시험을 통해 산정하였다. 또한 국내 지진규모를 고려하여 발생 예상 최대지진규모를 6.5로 정하고 액상화 발생 진동재하횟수를 10회로 설정하였다.

4. 시험결과 분석 및 고찰

일반적으로 사질토의 거동은 주로 구속압력과 상대밀도로 모래의 상태를 설명하지만 모래의 역학적 거동을 충분히 설명하지 못하는 것으로 알려져 있으며, Seed and Peacock(1971)은 상대밀도 외에도 흙의 구조, 퇴적 이력, 과압밀비 등과 같은 요소 역시 액상화 강도에 큰 영향을 미치는 것을 보고하였다. Eeten and Maher(1995)는 모래에 실트질 함유량과 소성도를 변화시킨 실트질 모래 역시 순수 모래와 같은 한계전단변형율을 갖고 있음을 증명하였다. 본 연구에서는 준설패립지반의 세립토에 대하여 진동삼축시험을 수행하였다. 진동삼축시험에서 표 2의 시험조건을 고려하여 진동수와 반복횟수 10회를 기준으로 현장의 유효응력을 감안하여 반복전단 응력비를 산정하였다. 그림 6은 준설토의 세립분 함유량 5.4%, 상대밀도 40%일 때의 진동하중 재하 횟수에 축차응력, 과잉간극수압, 축변형률 등의 진동삼축시험결과의 예이다. 그림 6에서 보면 과잉간극수압이 초기유효구속압 100kPa이고 같아지는 시점과 축변형률의 한계는 ±5%의 변형률이 급격히 변화될 때의 진동하중 재하횟수 67회이다. 초기유효구속압은 평균유효구속압을 구하는 식 (1)을 바탕으로 산정된다(PHRI, 1997).

$$\sigma'_m = \frac{1 + 2K_0}{3} \sigma'_v \quad (1)$$

여기서, σ'_m : 평균유효구속압, σ'_v : 유효상재압

진동삼축시험결과는 실내시험이 갖는 가정사항을 극복하고 실제 현장조건을 표현하기 위해 실내시험결과를 보정하는 작업이 필요하며, Iwasaki의 방법(PHRI, 1997) 등으로 현장상태로 보정한다. 이러한 결과를 바탕으로 세립토의 세립분 함유량에 따른 응력비와 액상화 발생 재하횟수(N_L)와의 관계를 통해 액상화 강도를 살펴보고 상대밀도, 과압밀비, 소성지수와의 관계도 살펴보았다.

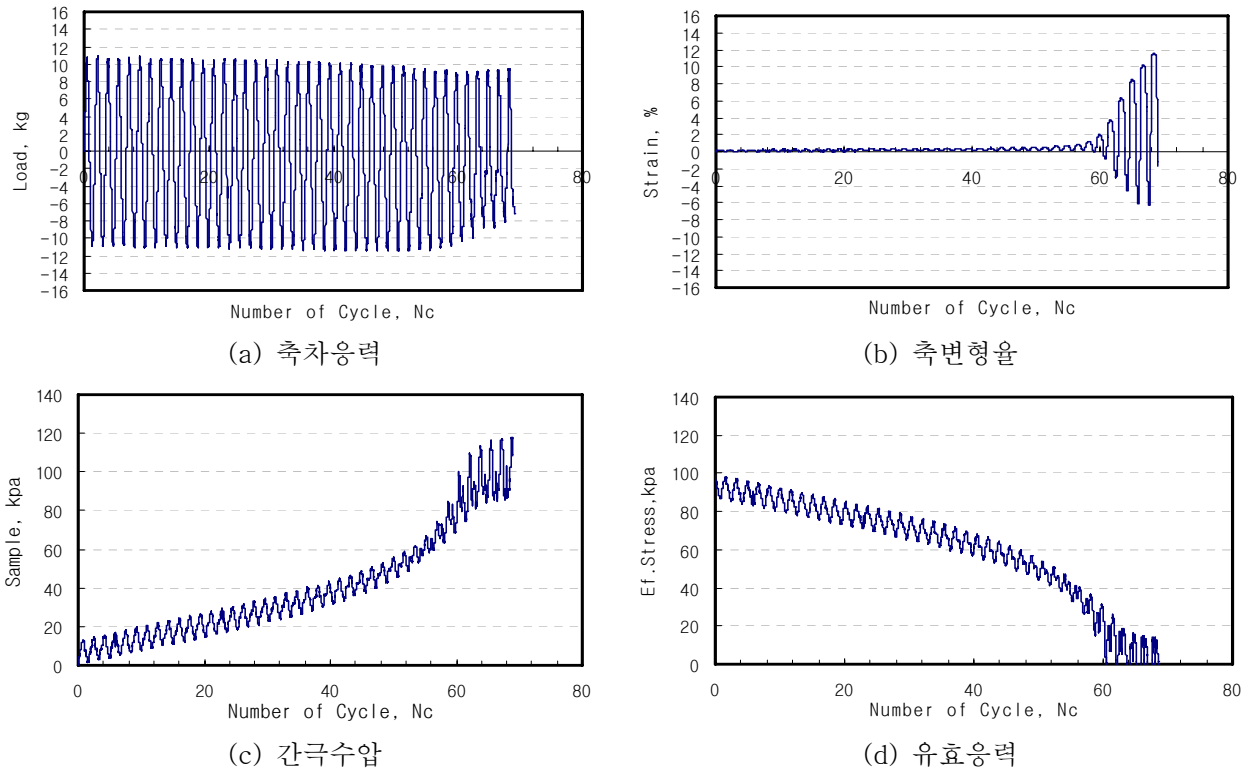


그림 6. 세립토의 진동삼축시험결과 예

4.1 세립분 함량의 영향

본 연구의 준설패립지반의 준설토는 순수한 사질토만으로 이루어져 있지 않고 세립분을 포함하고 있다. 이에 따라 준설토의 세립분 함유량 증가에 따른 액상화 저항강도에 미치는 영향을 살펴보고자 상대밀도 40%일 때의 전단저항응력비와 액상화 발생 재하횟수(N_L)와의 관계는 그림 7과 같다.

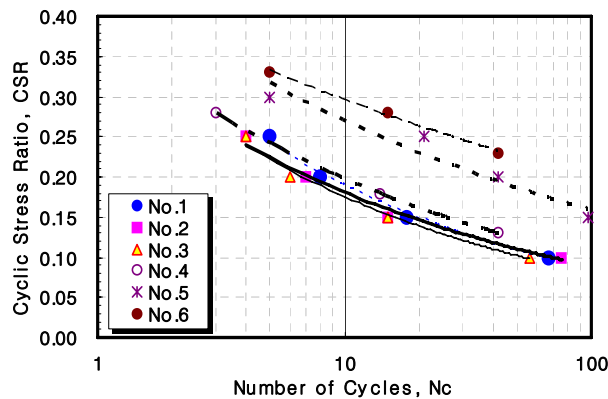


그림 7. 세립분 함유량에 따른 응력비와 반복재하횟수(N_L)와의 관계

일반적으로 세립분을 포함하는 모래의 경우 세립분 함량이 증가할수록 액상화강도가 증가하는 것으로 알려져 왔다. 그러나 실트분 함유량이 많아지는 경우의 액상화 강도는 그림 8과 같이 실트분 함유량 34.7%일 때의 액상화 강도가 가장 작아지다가 세립분 함량이 증가함에 따라 액상화강도는 다시 커졌다. 그리고 그림 9에서도 전반적으로 평균입경이 작을수록 액상화 강도는 커지는 경향을 보이며, 평균입경 0.12mm에서 가장 값을 보인다.

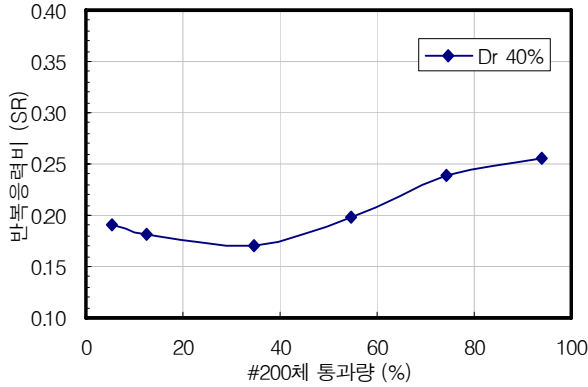


그림 8. 세립분 함유량에 따른 액상화강도

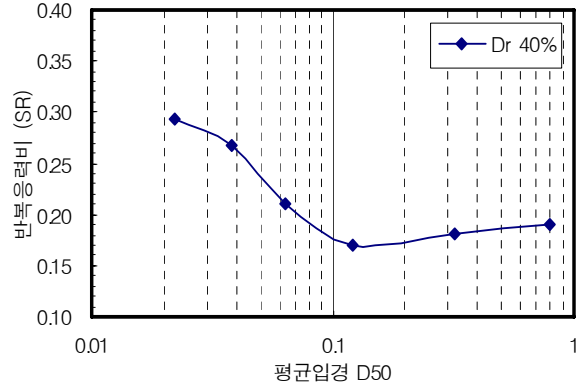
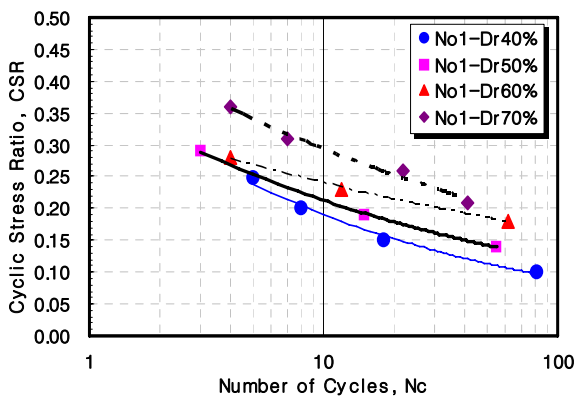


그림 9. 평균입경에 따른 액상화강도

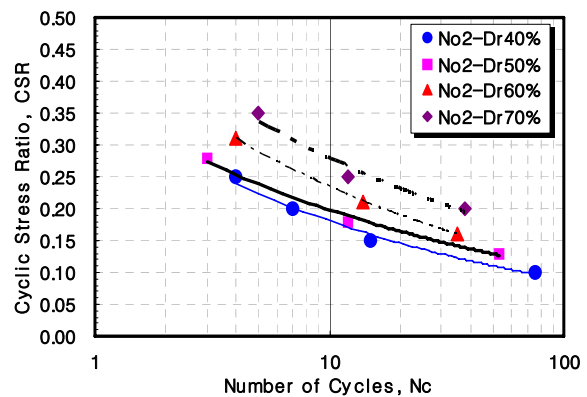
이와 같이 세립분 함유량에 증가에 따라 액상화 강도는 증가하는 경향을 보이나, 비소성 실트의 경우 다일러턴시(dilatancy) 특성의 영향으로 모래입자와 모래보다 작은 실트입자가 입자간 맞물림(interlocking)이 풀어져 강도가 저하되는 것으로 설명하고 있다. 하지만 실트분 함유량 30%이상이 되면 모래입자 사이의 실트분에 의한 효과가 약해짐과 동시에 실트입자끼리의 맞물림이 생겨 액상화 강도가 상승하는 것으로 추측된다(황대진, 1993). 본 연구에서도 실트분 함유량 34.7%일 때의 액상화 강도가 가장 작았으며, 이와 일치하는 경향을 보인다. 그리고 평균입경에 따른 액상화 강도 역시 실트분 함유량 34.7%일 때의 평균입경 0.12mm에서 가장 액상화 강도값을 보여 다일러턴시 효과에 기인한 것으로 사료된다.

4.2 상대밀도 영향

매립지반의 세립토가 상대밀도 변화에 따른 액상화 강도에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 세립분 함유량 5.4%, 12.6%, 34.7%, 54.5%의 시료에 대하여 상대밀도 40%을 기준으로 50%, 60% 70%로 변화시켜 시험을 수행하였으며 그 결과는 그림 10과 같다.

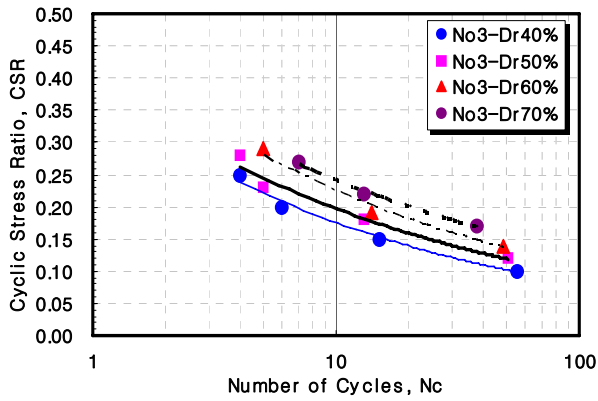


(a) 세립분 함유량 5.4%

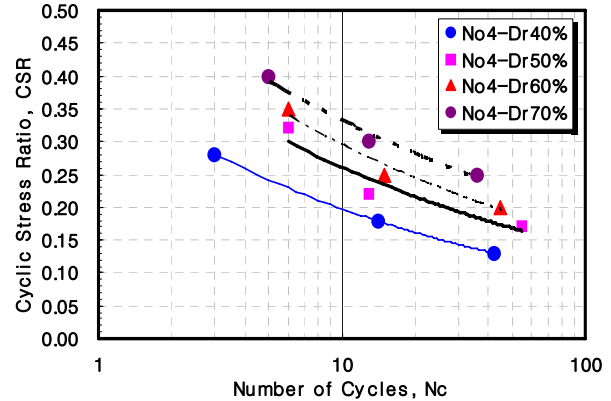


(b) 세립분 함유량 12.6%

그림 10. 상대밀도에 따른 응력비와 재하횟수(N_L)와의 관계



(c) 세립분 함유량 34.7%



(d) 세립분 함유량 54.5%

그림 10. 상대밀도에 따른 응력비와 재하횟수(N_L)와의 관계(계속)

그림 10과 같이 세립분 함유량에 상관없이 상대밀도가 증가할수록 액상화강도가 커졌다. 느슨한 상태의 상대밀도 40%, 50%에서의 액상화강도보다 조밀한 상태의 상대밀도 60%, 70%에서의 액상화 강도가 급격히 커지고 있다. 이는 축변형률이 갑자기 변화되는 동안에 상대밀도 40%의 경우 시료는 압축이 발생하는 반면에 상대밀도가 큰 70%경우에는 시료가 팽창하려는 경향으로 인하여 액상화강도가 더 크게 나타났다. 특히 그림 10(c)의 세립분 함유량 34.7%경우에는 상대밀도가 증가에 따른 액상화강도의 증가 폭이 더 작은 것으로 보아 다일러턴시(dilatancy)의 영향으로 판단된다.

4.3 과압밀비 및 소성지수의 영향

준설패립지반의 과하중이나 지하수위 변화에 따른 과압밀의 영향을 살펴보기 위하여 세립토에 과압밀비를 고려하여 액상화강도를 산정하였다. 그림 11은 세립분 함유량 34.7%, 54.5%, 74.3%, 94.4%의 시료에 대하여 과압밀비 1, 2, 3, 4로 변화시켜 얻은 응력비와 반복 재하횟수와의 관계를 나타냈다.

그림에 보듯이 세립토의 과압밀비에 따른 액상화강도 변화는 과압밀비가 증가할수록 액상화강도는 점차 증가하고 있다. Ishihara and Takatsu(1979)에 의하면 과압밀상태와 정규압밀상태의 액상화강도를 각각 $(\tau_1/\sigma'_v)_{OC}$ 와 $(\tau_1/\sigma'_v)_{NC}$ 로 나타내고 식 (1)을 제안하였다.

$$\left(\frac{\tau_1}{\sigma'_v} \right)_{NC} = \sqrt{OCR} \left(\frac{\tau_1}{\sigma'_v} \right)_{OC} \quad (1)$$

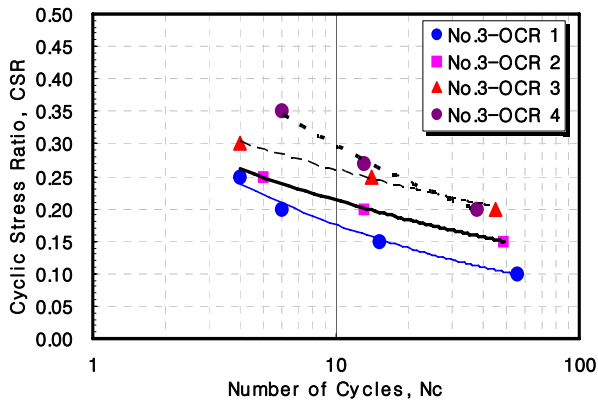
여기서, τ_1 = 반복회수에 따른 초기액상화를 발생시키는데 필요한 전단응력,

OCR = 과압밀비,

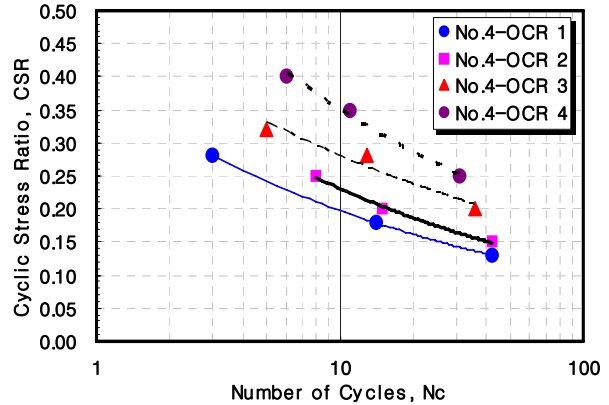
σ'_v = 유효연직응력

따라서 과압밀된 시료의 액상화강도에 과압밀비의 평방근을 곱하여 구할 수 있다.

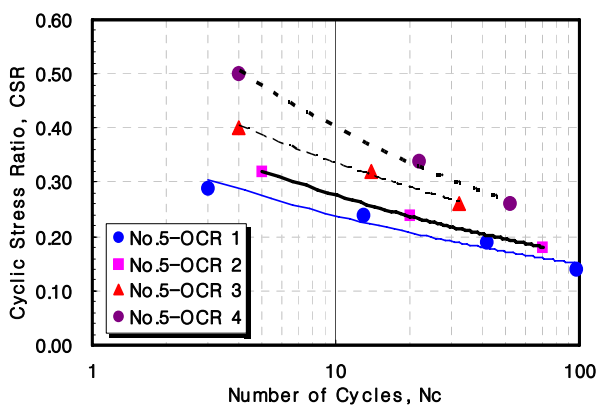
세립토의 세립분 함유량과 소성지수 등을 감안한 과압밀비에 따른 액상화강도는 Ishihara 등(1979)이 제안한 식 (1)과 유사하며 모래의 액상화강도의 변화특성을 가지고 있다.



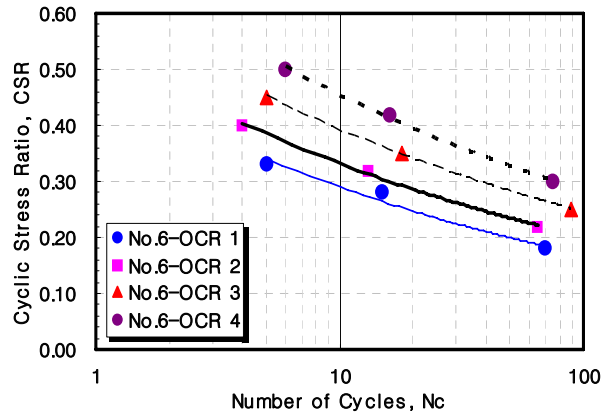
(a) 세립분 함유량 34.7%



(b) 세립분 함유량 54.5%



(c) 세립분 함유량 74.3%



(d) 세립분 함유량 94.4%

그림 11. 과압밀비에 따른 응력비와 재하횟수(N_L)와의 관계

그림 12는 과압밀비(OCR)의 증가에 따른 액상화강도 변화를 나타낸 것으로 액상화강도는 거의 같은 비율로 증가하고 있다. 즉, 세립토의 시료에 과압밀비가 커질수록 액상화강도도 증가하는 것으로 볼 때 과압밀비 증가에 따른 액상화강도와 매우 밀접한 관계가 있다. 이는 사질토가 과압밀되면 입자간 접촉 사이의 결합정도가 증가하고 흙의 구조가 변화하게 됨에 따라 액상화강도가 증가되었다.

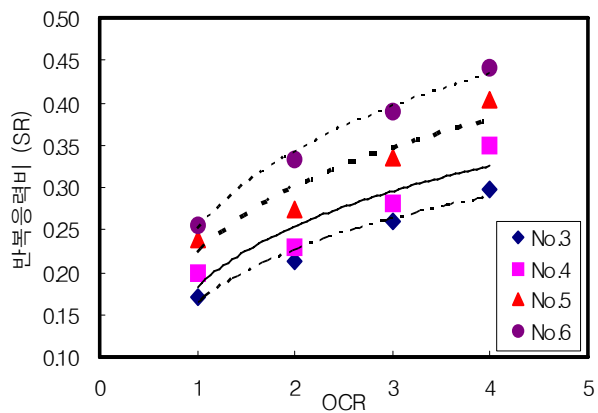


그림 12. 과압밀비에 따른 액상화강도의 변화

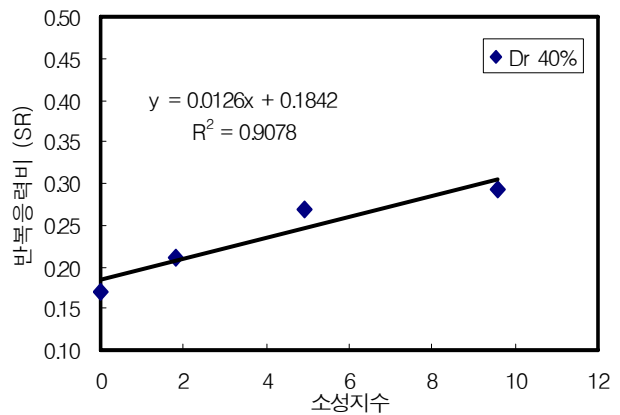


그림 13. 소성지수에 따른 액상화 강도의 변화

그림 13은 비소성 실트(F.C=34.7%)의 소성지수는 0으로 표현하였으며 세립분 함유량별 소성지수 1.8(F.C=54.5%), 4.8(F.C=74.3%), 9.4(F.C=94.4%)을 이용하여 소성지수에 따른 액상화강도의 변화를 표현하였다. 그림에서 보면 소성지수(PI)의 증가에 따라 반복전단응력비도 증가하였다. 이는 Ishihara and Yasuda(1980)에 의한 동적강도비는 소성지수의 증가에 따라 증가하는 것 것과 일치하였다. 이와 같이 세립토의 소성지수가 증가할수록 액상화강도도 증가하였으며 세립분 함유량이 증가할수록 반복응력의 재하횟수도 증가하고 이에 대하여 소성지수가 커지고 이에 따른 흙의 강도저하가 작았다.

5. 결론

본 연구에서는 준설매립지반의 세립토가 액상화 저항강도에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 진동삼축시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 세립분 함유량에 증가에 따라 액상화 강도는 증가하였으며 비소성 실트의 경우 다일러턴시(dilatancy) 특성 및 맞물림(interlocking)의 영향으로 실트분 함유량 34.7%일 때의 액상화 강도가 가장 작았으며 이때의 평균입경 0.12mm 전·후에서 가장 작은 액상화 강도값을 보였다.
- 2) 세립토에 대한 상대밀도는 D_r 40%의 경우 시료는 압축이 발생하는 반면에 D_r 이 70%경우에는 시료가 팽창하려는 경향으로 인하여 액상화강도가 더 컸다. 특히 세립분 함유량 34.7%경우에는 상대밀도가 증가에 따른 액상화강도의 증가 폭이 더 작았다.
- 3) 과압밀비(OCR)의 증가에 따른 액상화강도는 세립토의 과압밀될수록 액상화강도가 증가하며 과압밀비 증가에 따른 액상화강도와 매우 밀접한 관계가 있다.
- 4) 세립토의 소성지수가 증가할수록 액상화강도는 증가하였고 세립분 함유량이 증가할수록 반복응력의 재하횟수의 증가하고 이에 대하여 소성지수가 커지고 이에 따른 흙의 강도저하가 작았다.

이와 같이 준설매립지반에 분포하는 세립토는 세립분 함유량이 증가할수록 액상화강도가 증가하여 매립지반의 액상화 발생가능성 저하에 크게 도움이 될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김종국, 채영수, (2006), “동다짐공법이 적용된 준설매립지반의 개량효과평가에 관한 연구”, 한국지반공학회 논문집, 22(5), pp.13~26.
2. 황대진, (1993), “실트를 포함하는 모래질 흙의 액상화강도에 관한 연구”, 대한토목학회, 논문집 13(2), pp.243~252.
3. 건설교통부, (2003), “구조물기초설계기준 해설”, 한국지반공학회, pp.681~711.
4. Erten, D., Maher, M.H., (1995), "Cyclic Underdrained Behavior of Silty Sand", Journal of Geotechnical and Earthquake Engineering, 14, pp.115~123.
5. Ishihara, K., Yamazaki, F., (1980), "Cyclic Simple Shear Tests on Saturated Sand in Multi-Directional Loading", Soils and Foundations, 20(1), pp.45~59.
6. Ishihara, K., (1993), "Liquefaction and Flow Failure During Earthquake", Geotechnique, 43(3), pp.351~451.
7. Ishihara, K., (1996), "Soil Behavior in Earthquake Geotechnics", Oxford University Press Inc., New York, pp.282~315.
8. Ishihara, K., Takatsu, H., (1979), "Effect of Overconsolidation and Ko Conditions on the Liquefaction Characteristics of Sand", Soils and Foundations, 19(4), pp.60~68.