진동삼축시험을 통한 실트질 모래의 액상화 강도에 대한 연구

Liquefaction Strength of Silty Sand through Dynamic Triaxial Tests

박 종 관*1
Park, Jong-Kwan
김 상 규*2
Kim, Sang-Kyu
한 성 길*3
Han, Sung-Gil

Abstract

Samples of silty sands and hydraulic fill ground were investigated by dynamic triaxial tests in order to evaluate the liquefaction strengths. In the tests, (1) undisturbed and disturbed samples were prepared, (2) dynamic shear strengths were measured under isotropic and anisotropic condition, and (3) the test results were compared with the other results which were tested by domestic and foreign researchers. The liquefaction shear strengths under isotropic test condition were presented in terms of the relative densities. The amount of silt under 30% hardly influenced on the liquefaction strength. In the test results of anisotropically consolidated samples the liquefaction strength was dependent on the magnitude of the effective consolidation ratio. These test results show that the liquefaction strength of the silty sand in Korea west coast exists within the boundary of the values suggested by Seed and Peacock(1971).

요 지

국내 해안에 퇴적된 실트질 모래와 hydraulic fill한 지반에서 채취한 시료의 액상화 강도 측정을 위해 응력제어 진동삼축압축시험을 수행하였다. 이를 위해 1) 불교란시료와 교란시료의 액상화 강도 산정과 2) 등방 압밀된 시료와 비등방 압밀된 시료의 반복삼축시험결과 비교, 3) 본 시험결과와 국내 다른 시험자료 및 외국의 결과를 비교하였다. 등방 압밀 시료의 액상화 강도는 시료의 상대밀도에 따라 나타내었다. 실트질 함유량이 30%이하의 경우 액상화 강도는 실트질 영향을 거의 받지 않음이 나타났다. 비등방 압밀된 시료의 액상화 강도는 수직응력을 구속응력으로 나눈 유효압밀비에 영향을 받는다. 본 연구의 시험결과 한국 서해안의 실트질 모래의 액상화 강도는 Seed and Peacock(1971)가 제안한 범위에서 내에 있음을 알 수 있다.

*1 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 교수
*2 정회원, 동국대학교 공과대학 토목공학과 교수
*3 정회원, 동국대학교 대학원 박사과정

Keywords : Dynamic triaxial tests, Liquefaction, Anisotropic consolidation, Effective consolidation ratio

1. 서 론

지진에 의한 지반의 액상화 현상에 대한 연구는 1964년 일본 Niigata 지진에 의해 지반에 발생된 액상화 현상이 규명되면서 본격적으로 시작되었다. 그후 70년대에 들어서 지반의 액상화 강도 산정과 액상화 가능성평가를 위한 체계적인 절차가 마련되었고, 현장 시험을 이용한 경험적인 방법들도 제시되었다. 실내시험은 초기에는 진동삼축시험기를 이용한 액상화 강도 평가를 해왔으며 반복단순전단시험기나 진동대와 같은 시험기로 응용이 되었다.

현재 지진으로 인한 지반의 액상화 현상을 예측하는 방법은 주로 Seed et al.(1971, 1975, 1979)에 의하여 제안되었다. 반복전단응력을 받는 포화된 사질토에서의 간극수압의 증가현상은 지반의 상대밀도와 초기유효전단응력에 영향을 받는다. 최근 많은 진동시험 결과, 상대밀도 외에도 흙의 입자구조(fabric), 선행변형(prior straining), 퇴적의 이력(aging), 과압밀비 등과 같은 인자 역시 액상화 강도에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다(Mulilis et al., 1977; Seed and Peacock, 1971). 또한 순수한 모래뿐이 아닌 세립이 함유된 모래나 자갈을 포함하고 있는 시료에 대한 액상화 강도시험이 실시되었다. Erten and Maher(1995)는 모래에 실트질 함유량과 소성도를 변화시키며 시험한 결과 실트질 모래 역시 순수한 모래와 같은 한계전단변형율을 갖고 있음을 증명하였다. Evans and Zhou(1995)는 모래-자갈 혼합물의 액상화 저항을 정량화하기 위해 자갈함량을 증가시키면서 비배수 반복삼축시험을 수행하여, 자갈함량이 증가하면 액상화 저항강도가 증가됨을 나타내었다. 또한 사면이나 댐, 제방 등과 같이 초기전 단응력을 갖는 지반이 지진하중을 받을 경우 액상화 강도에 미치는 영향은 비등방시험을 통하여 연구되었다. 초기전단응력이 지반의 액상화에 미치는 영향에 대한 연구결과도 연구자와 사용된 시험기에 따라 서로 다르다.

국내에서는 황(1993), 이(1994) 등이 진동삼축압축시험을 수행한 자료를 발표하였다. 특히, 황(1993)은 일본에서 모래에 실트질의 함유량을 변화시켜가며 단순전단과 진동삼축압축시험을 하여 액상화강도를 측정하였다. 그 결과 같은 상대밀도일 경우 실트질 함유율이 30% 정도에서 강도가 작게 나타났다. 이(1994)는 서해안의 해성 실트질 모래를 이용하여 반복삼축시험을 수행하였으며, 세립자가 포함된 해성 실트질 모래 역시 순수한 모래와 유사한 액상화 경향을 보임을 설명하였다.

액상화 평가를 위한 기존의 자료가 많음에도 불구하고 국내에 가장 많이 분포하고 있는 실트질 사질토 지반에 적용할 수 있는 정량화된 자료는 거의 없는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 국내 서해안 해안에 퇴적된 실트질 모래와 준설매립(hydraulic fill)한 지반에서 채취한 시료를 이용하여 진동삼축압축시험을 실시하여 액상화판별을 위한 동적전단강도를 나타내고 이를 기존의 자료와 비교하고자 한다. 또한 비등방 진동삼축시험을 통하여 그에 대한 영향을 검토 하고자 한다. 특히 국내연안에 주로 분포하고 있는 실트질 모래에 대한 평가를 통하여, 액상화판별을 위한 기존의 설계자료에 대한 적용성 여부를 검증하고자 한다.

2. 실트질 모래의 진동삼축시험시험

2.1 시험장비 및 시료

시험에 사용된 장비는 GDS(UK)에서 개발한 진동삼축압축시험기(2Hz Triaxial Testing System, 농어촌진흥공사 농공기술연구소)를 이용하였다. 이 진동삼축압축시험기는 응력재

와 변위제어시험이 모두 가능하며, B값 측정, 등방 및 Ko 압밀, 응력경로시험, 크리프(Creep) 시험 등을 수행할 수 있다. 진동하중은 셀 아래에 위치한 축 제어기(axial controller)에서 램(ram) 축이 상하로 움직이면서 가하도록 되어 있다. 이 시험기의 특징으로는 평형램(balanced ram)이라 하여 진동하중 작용시 램축의 유입으로 인해 셀에 가해지는 구속압력의 변화를 없앨 수 있도록 되어있다. 즉 램이 셀로 들어갈 때는 그 부피만큼 셀 안의 물이 램 아래로 빠지며 반대로 램이 내려올 때에는 그 부피만큼 물이 셀로 유입되도록 설계되어 있다.

시험에 사용된 시료는 인천 신공항의 준설매립(hydraulic fill)한 지반과 북남측 방조제의 표층에서 교란시료를 채취하고 이들의 시료를 각각 Sand A 그리고 Sand B로 하였다. 또한 방조제 아래에서 시료채취튜브(thin wall tube)를 이용하여 불교란 시료를 채취하고, 이 시료를 Sand C로 정하였다. 위의 시료에 대해 입도시험한 결과는 그림 1과 같다. 준설 매립한 지반에서 채취한 시료인 Sand A는 매우 균일한 입도를 보이고 있으며 불교란 시료인 Sand C가 세립분을 가장 많이 함유하고 있다. 특히 Sand C는 1~2cm 간격으로 점토와 실트가 번갈아 층을 형성하고 있는 것이 특징이다. 각 시료의 상대밀도는 KS F 2345-76(1987)에 따라 시험을 하였다. 시험결과 Sand A와 Sand B는 같은 최대 및 최소건조밀도를 갖는 것으로 나타났다. Sand C에 대해서는 시료 부족으로 상대밀도 시험을 하지 못했다. Sand C의 경우, 입도 분포를 볼 때 세립자를 A, B시료에 비해 다소 많이 함유하고 있는 것을 제외하고 비슷한 분포를 보이고 있기 때문에 최소 및 최대 건조밀도는 A, B시료와 동일한 것으로 가정하였다. 각 시료별 물성에 대한 특성은 표 1과 같다.

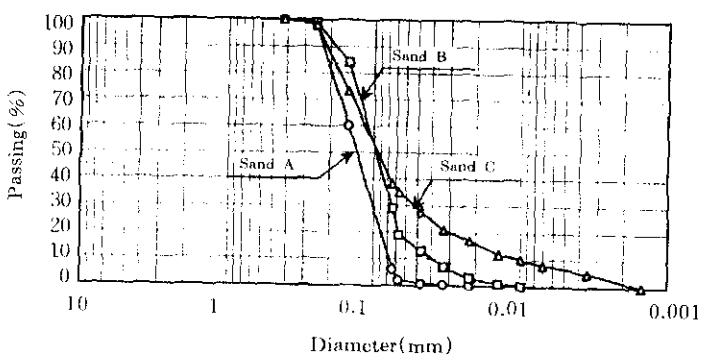


그림 1. 시료별 입도시험 결과

표 1. 시험에 사용된 시료의 입도분석 결과

시료종류	Fine Content (%)	G_s	C_u	D_{50} (mm)	D_{10} (mm)	γ_{dmin} (t/m³)	γ_{dmax} (t/m³)	USCS
Sand A(Hydraulic Fill한 지반)	6	2.66	2.0	0.13	0.08	1.30	1.62	SM
Sand B(표토층)	29	2.66	2.4	0.10	0.04	1.30	1.62	SM
Sand C(불교란시료)	38	2.68	11.0	0.10	0.01	1.30(가정)	1.62(가정)	SC

2.2 시험절차

(1) 시료의 성형과 포화

시료의 크기는 직경이 70mm, 높이가 140mm이며 시료 성형 방법을 약술하면 다음과 같다. 우선 몰드에 물을 채운 후 서서히 시료를 침강시키면서 성형하였다. 성형된 시료는 시료내의

유효응력이 0에 가깝기 때문에 몰드를 제거하면 시료가 자립해 있지 못한다. 그래서 시료의 성형을 위해서 시료 하단부에 연결된 간극수압측정용 튜브를 통해 물을 배수시킴으로써 부(−)의 간극수압이 시료에 작용하게 하였다. 시료의 부간극수압은 시료가 교란되거나 파괴되는 것을 방지한다. 진동삼축시험에는 반복하중으로 인하여 시험기의 로드셀(load cell)에 인장력이 걸리므로, 시료의 윗부분(top cap)과 연결시켜 주기 위한 장치가 필요하다. 본 시험에서는 인장슬리브(extension sleeve 또는 vilystic sleeve)를 씌워 탑캡(top cap)과 로드셀(load cell)을 부착시켰다. 시료가 성형되면 약 30분에서 1시간 정도 포화를 시켰다. 포화는 배압법을 사용하였으며 cell pressure와 back pressure를 10kPa의 차이를 두고 낮은 압력부터 원하는 포화도가 될 때까지 수행하였다. 각 압력증가 단계는 간극수압이 back pressure를 가하는 동안 일정해지는 정도를 주기적으로 측정하여 경험적으로 증가 주기와 크기를 조절하였다. 포화도가 0.97 이상이면 완전포화로 가정하였다.

액상화 시험과 같이 조립질 흙을 시료로 이용할 때에는 멤브레인의 관입으로 인한 영향을 고려해 주어야 한다. 멤브레인 관입 영향은 비배수 삼축시험과 같이 고무 멤브레인으로 시료를 구속하여 시험하는 조립질 흙의 모든 비배수 시험에 나타난다. 이 현상은 압밀시 시료주변 입자 사이의 간극으로 멤브레인이 관입하기 때문에 일어난다. 비배수 전단시, 간극수압이 이 관입된 멤브레인을 밀어내고 시료의 횡방향으로 부분적인 배수가 생기게 된다. 따라서, 시험이 완전 비배수가 아니기 때문에 간극수압 값은 정확하지 않고 멤브레인 관입 영향이 없을 때 보다 더 작은 값을 나타낼 수 있다. 본 시험에 사용된 시료의 경우 D_{50}이 약 0.1~0.13mm정도이므로 멤브레인의 관입 영향은 무시할 수 있다(Baldi and Nova, 1984).

(2) 진동삼축시험 방법

시험에 사용된 3가지 시료에 대해 등방압밀 비배수 진동삼축시험(Cyt−$\overline{CIU}$)과 비등방압밀 비배수 진동삼축시험(Cyt−$\overline{CAU}$)을 모두 66회 실시하였다. 진동주기(frequency)는 ASTM(D5311) 규정에 0.1Hz에서 2.0Hz 사이의 값으로 하도록 되어 있으며 1.0Hz를 표준으로 권장하고 있다. 본 시험에서는 0.1Hz 상태로 7회 그리고 그 나머지 59회는 1.0Hz로 시험하였으며, 진동하중은 응력제어 방식으로 하였다. 각 시료별 시험횟수는 다음 표 2와 같다.

본 시험에서는 필요한 진동하중, 즉 시료에 가해지는 하중, p_c는 다음과 같이 계산하였다.

$$p_c = 2 \times \sigma'_c \times SR \times A_c \quad (1)$$

여기서, σ'_c는 유효구속압력, SR는 요구하는 응력비, 그리고 A_c는 압밀 후 시료의 면적이다. 처음 시료를 성형할 때 시료성형 방법상의 문제로 초기의 밀도는 알 수가 없으므로, 시료의 밀도를 측정하기 위해 시험종료 후 흙입자의 유실이 없도록 주의하여 받아두어야 한다. 시료의 함수비와 건조중량을 측정하여 시험 후 중량을 계산하였고, 압밀전 초기조건의 시료 중량은 시험종료 후의 중량에 압밀시 체적변화의 양을 더하여 산정하였다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 등방 압밀 시료에 대한 시험

진동삼축시험에서 결과를 나타낼 때 통상적으로 반복횟수에 대한 축차응력, 과잉간극수압, 축변형률 등으로 표시한다. 그림 2는 시험

표 2. 시료별 시험 종류

시험종류	Sand A(hydraulic fill 지반)	Sand B(남측방조제 원지반)	Sand C(UD 시료)
Cyt−$\overline{CIU}$	18	10	20(교란시료 3)
Cyt−$\overline{CAU}$	−	18	−

에 대한 예로, 응력비(stress ratio)가 0.25이고, 유효구속압력이 100kPa인 경우의 결과를 나타내고 있다. 그림 2(b)와 같이 반복하중이 가해짐에 따라 과잉간극수압이 발생한다. 여기서, 액상화 시점은 과잉간극수압, △u가 유효구속압력, σ'_3와 같아질 때로 선택하였다.

실트질 함유량에 따른 영향을 알아보기 위하여 다른 연구자들의 결과와 비교하였다. 이(1994)는 인천 송도 앞바다의 실트질 모래를 채취하여 시험을 하였다. 사용장비는 CK. Chan type(Soil Engineering Equipment Co.)의 시험기를 이용하였다. 습윤 다짐법으로 시료를 성형하였으며 시료의 크기는 높이가 125mm, 직경이 50mm이다. 하중주기는 0.1Hz이다. 황(1993)은 일본 豊浦표준사에 실트 함유량을 바꾸어 가며 시험을 하였다. 시료성형은 250g의 해머로 다져서 성형을 하였고 시료크기는 높이 125mm, 직경 50mm이다. 실트 함유량에 따라 6가지의 시료를 만들어 시험하였다. 그림 3은 본 연구의 시료와 비교하기 위하여 대표적인 다른 연구자들의 시료 입경을 함께 나타낸 것이다. 여기서 이(1994)의 시료는 본 연구의 시료 Sand C와 거의 같은 입도 분포를 나타내고 있으며 황(1993)의 시료는 인위적으로 실트질의 함유량을 50%와 100%로 증가시켜 시료를 성형하였기 때문에 다른 시료와는 뚜렷한 입도의 차이를 보이고 있다.

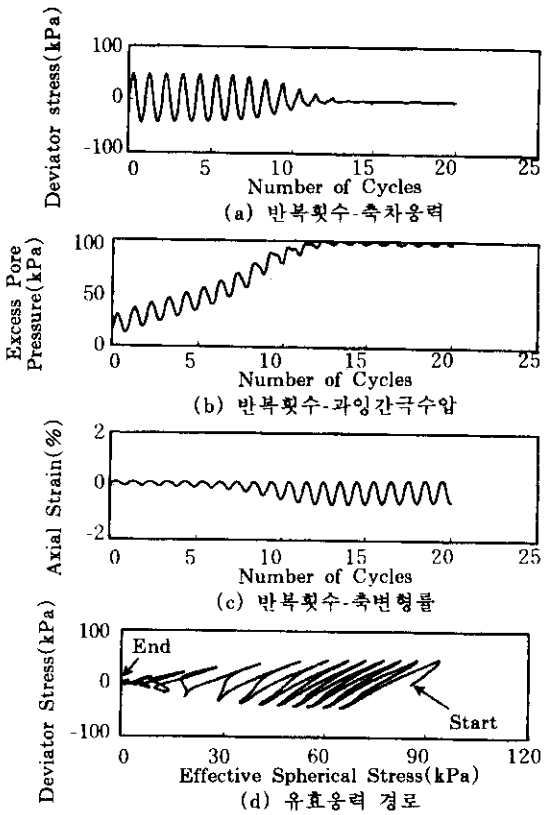


그림 2. 등방 압밀 시료의 시험결과
(K_c=1.0, Stress Ratio=0.25, σ'_3=100kPa)

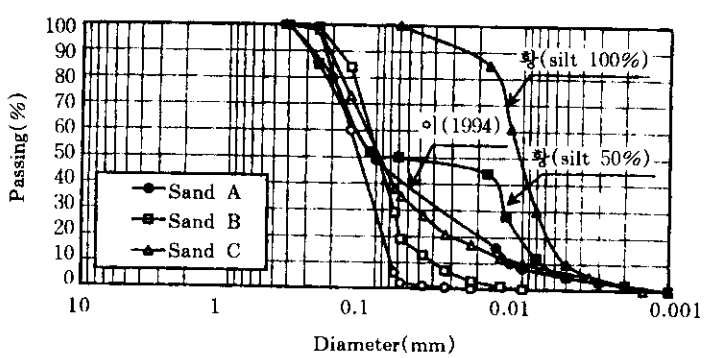


그림 3. 본 연구 및 기타 실트질 시료에 대한 입경의 비교

그림 4는 교란시료 Sand A 와 Sand B에 대하여 유효구속압력과 진동하중에 따른 액상화 발생시점의 반복진동수를 나타낸 것이다. 유효구속압력과 진동하중이 크면 클수록 진동수는 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 실트질 함유량이 시료 Sand A는 6% 그리고 Sand B는 29%를 가지고 있으나 이에 대한 차이는 거의 없는 것처럼 보인다. 그림 5는 입도가 비슷한 모든 시료에 대하여 교란시료(Sand A와 B)의 상대밀도 40%와 50%, 그리고 불교란 시료(Sand C)의 상대밀도 70%에 따른 액상화 발생시의 응력비와 진동수를 나타낸 것이다. 시료의 입경 D_{50}이 0.1mm 내외의 시료에서 점토의 함유율이 30% 이내의 경우에는 실트질 함유량에 대한 액상화 강도에 큰 영향을 미치지 못하고 있다. 이는 이(Dr=51%)의 시험 결과도 본 시험결과와 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 그리고 시료 Sand C중 불교란 시료 상대밀도 70%에 대한 액상화 강도는 다른 상대밀도보다 큰 경향을 보이고 있다. 이는 불교란 시료의 채취 심도가 대부분 10m 이하로 비교적 깊은 심도에서 채취하였기 때문에 강도가 크게 나온 것으로 생각된다. 또 다른 큰 이유는 불교란 시료의 경우 점토와 실트가 호상으로 서로 섞여 있어서 점토가 과잉간극수압의 증가를 억제시키는 역할을 해주기 때문인 것으로 판단된다.

그림 6은 본 시료 Sand A와 B에 대하여 상대밀도 40%에서 45%의 시료에 대한 액상화 강도비를 나타내고, 이를 황(1993)의 시험 결과와 비교하였다. 그림 3에서 보는바와 같이 실트 성분이 50% 되는 시료의 D_{50}은 본 시료의 D_{50}과 거의 같은 0.1mm로, 실트질 100%의 D_{50}은 거의 0.01mm로 D_{50}의 입경이 약 10배 정도 차이가 나는 시료이다. 그림 6에서 보는 바와 같이 이렇게 시료의 실트질 함유량이 많을 경우 액상화 강도에 영향을 주고 있다. 특히 실트질 성분이 50% 되는 시료의 액상화 강도는 실트질 함유량이 적은 시료에 비하여 작지만 실트질 함유량이 100% 되는 시료의 액상화 강도는 실트질 함유량이 50% 되는 시료의 강도보다 큰 경향을 나타내고 있다.

Seed and Peacock(1971)는 10회 반복하중에서 액상화가 발생할 때의 응력비를 평균입경에 따라 나타내었다. 그림 7은 평균입경은 약 0.05mm~1.0mm범위에서 그림 5와 그림 6에서 나타낸 결과를 입경에 따라 나타낸 것이다. 일반적으로 입경이 작아질수록 액상화 강도 역시 감소하는 경향을 보이고 있으나, 응력비는 시험자에 따라 값의 차이가 커서 일정한 추세선

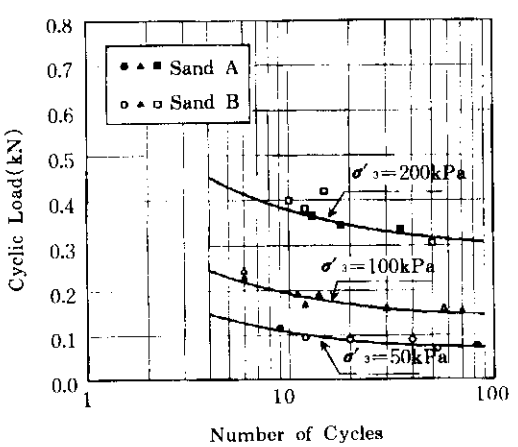


그림 4. 유효구속압력과 진동하중에 따른 액상화 발생시점의 진동수(교란시료 Sand A와 B)

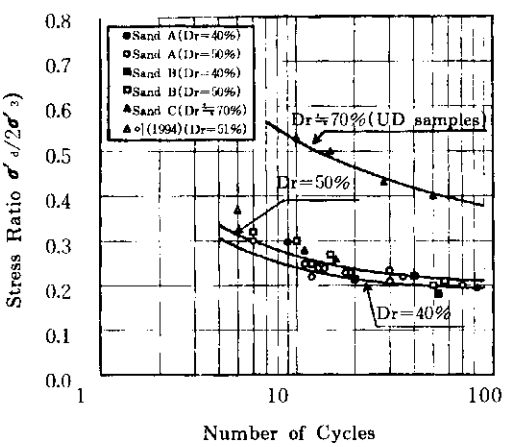


그림 5. 상대밀도에 따른 액상화 발생 응력비와 진동수(교란시료 Sand A와 Sand B, 불교란 시료 Sand C)

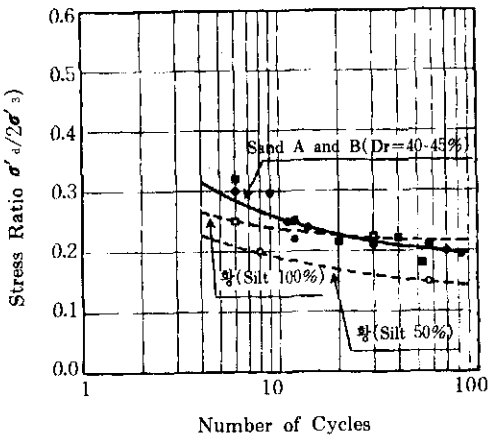


그림 6. 상대밀도 40%~45%에서 실트질 함유량에 따른 액상화 강도의 비교(시료 Sand A와 Sand B, 실트 함유량 평균 10%)

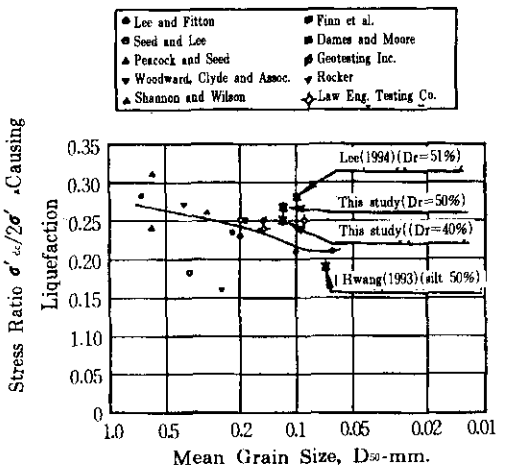


그림 7. 평균입경이 약 0.05mm~1.0mm범위에서 액상화 강도에 따른 응력비의 분포(시료의 상대밀도는 약 50%, 액상화 발생시의 진동수 10회)(Seed and Peacock, 1971)

을 그리기가 어렵다. 이러한 차이는 각 연구자들이 시험을 수행한 시험장비나 시료성형방법, 시료의 크기 등 여러 요인에 의해 발생한 것으로 볼 수 있다. 그림 7은 사질토에 대한 액상화 판정에 대한 검토에 일반적으로 가장 많이 참고되는 자료로써, 본 연구결과 비록 입경에 대한 분산은 크나 국내의 지반에 대한 액상화 강도를 평균입경에 따라 개략적으로 산정하는데 충분한 자료가 된다고 생각한다.

3.2 비등방 압밀 시료에 대한 시험

비등방 압밀 시료에 대한 진동삼축압축시험은 사면, 댐 그리고 제방 등과 같이 초기전단응력이 존재하는 지반이 지진하중을 받을 경우, 초기전단응력이 액상화 강도에 미치는 영향에 검토하기 위하여 연구되었다. 초기전단응력이 액상화에 미치는 영향에 대한 연구결과는 연구자와 사용된 시험기에 따라 서로 다르다. 반복삼축시험기를 이용한 Seed et al.(1973)은 초기전단응력이 크면 클수록, 전단변형을 일으키는데 필요한 반복축차응력의 진동수가 크다고 결론지었다. 또한 시료는 반복하중을 받을수록 계속 변형하려는 경향이 있지만, 간극수압은 액상화를 일으킬 정도로 충분히 증가하지 않음을 보였다. 이러한 결론은 Selig and Chang (1981)이 수행한 반복삼축압축시험에서도 나타나 있다. 이들은 시료에 반복하중이 가해졌을 때 발생되는 변형을 그림 8과 같이 반복변형(cyclic strain)과 영구변형(permanent strain)으로 구분하고, 이 영구변형이 어느 한계에 도달할 때 시료가 파괴되는 것으로 보았다. 그림9는 비등방 압밀된 시료에 대해 반복삼축시험결과 파괴의 유형을 나타내고 있다. 그림 9(a)는 축차응력과 응력반전에 대한 정의로써, 축차응력이 (−)값을 갖는 경우, 즉 초기전단응력, $\frac{\sigma_{ds}}{2}$가 축차응력, $\frac{\sigma_{dy}}{2}$ 보다 작은 상태를 응력반전(stress reversal)이라 정의하고 있다. 또한, 그림 9(b)는 만일 응력반전(stress rev-

ersal)이 발생하지 않으면($\sigma_{dy} < \sigma_{ds}$), 영구변형이 반복변형 보다 크고, 축차응력에 응력반전이 발생한다면($\sigma_{dy} \geq \sigma_{ds}$) 반복변형이 영구변형보다 크다는 것을 나타내고 있다. 다시 말하면,

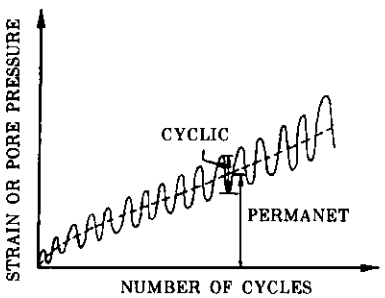
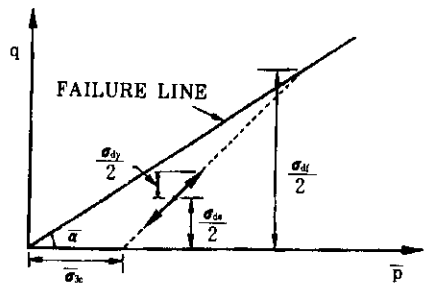


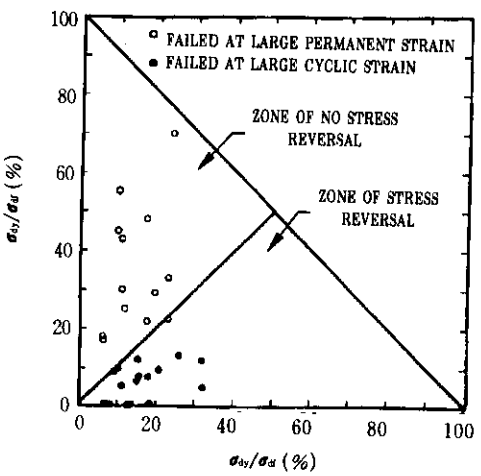
그림 8. 반복변형과 영구변형에 대한 정의 (Selig and Chang, 1981)

비등방 압밀시료의 경우 응력반전이 생기면 큰 반복변형에 의해 시료가 파괴되고 반전이 없으면 큰 영구변형에 의해 파괴됨을 나타낸 것이다.

Vail and Chern(1983)은 위의 연구자들과 달리, 시료가 초기전단응력을 받는 경우 간극수압증가는 초기전단응력이 없는 시료에 비해 클 수도 작을 수도 있고, 상대밀도와 초기전단응력의 크기에 의존한다고 하였다. 하지만, 반복삼축시험을 수행한 연구자들의 공통된 결론은 비등방 압밀시료는 전단변형과 간극수압 발생이 지속적으로 나타나지만 간극수압 발생은 초기구속압력까지 도달하지 않는다는 것이다. 진동하중에 대한 시료의 파괴유형을 조사하기 위해 반복삼축시험 이외에도 여러 가지 시험기가 이용되었다. 표 4는 여러 연구자들이 사용한 장비와 주요결론을 Ishibashi et al.(1985)가 정리한 것에 Ishibashi et al.(1985)과 Selig and Chang(1981)의 시험결과를 추가한 것이다. 단순전단시험기나 진동대, 회전전단시험기를 이용한 시험들은 반복삼축시험의 결과와 동일한 결론을 내린 Ishihara and Takatsu의 시



(a) 축차응력에 대한 정의



(b) 응력반전에 따른 파괴유형

그림 9. 축차응력에 따른 파괴유형 (Selig and Chang, 1981)

험만 제외하면 모두 초기전단응력과 액상화 강도와는 무관하다는 결론을 내렸다(Ishibashi et al., 1985).

본 시험에서는 비등방 압밀된 시료의 진동시험을 통하여, 액상화강도와 파괴유형이 등방압밀시료의 결과와는 어떻게 다른가를 알아보기 위해 시험을 실시하였다. 비등방 압밀시험은 σ'_1과 σ'_3의 비로 표시되는 유효압밀비, K_c가 1보다 큰 경우이다. 이 시험에서는 Sand B시료에 대하여 상대밀도 45%정도에서 실시되었으며, 각 압밀압력과 유효 압밀비에 따른 시험 횟수는 아래 표 4와 같다.

표 3. 정적 전단응력이 액상화에 미치는 영향에 관한 연구의 비교(Ishibashi et al., 1985)

연구자	사용장비	시료의 밀도	주요결론
Lee and Seed(1967) Seed and Lee(1969) Seed et al.(1973)	Cyclic triaxial	Medium-dense and dense	주어진 수직유효응력이 작용하는 면에 초기전단응력이 클수록 고정된 반복회수의 변형량에 이르는데 요구되는 최대반복축차응력이 커진다.
Vaid and Chern (1983)	Cyclic triaxial	Loose, mediumdense, and dense	초기정적전단응력을 받는 모래의 반복변동에의한 액상화 저항은 초기전단이 없는 모래보다 작거나 클수 있고, 상대밀도와 초기정적전단응력의 수준에 의존한다.
Yoshimi and Oh-oka(1975)	Ring torsional shear	Loose	반복응력크기로 측정한 액상화 저항은 초기정적전단응력이 증가함에 따라 감소하거나 변하지 않는 것으로 나타났다.
Vaid and Finn(1979)	Cyclic simple shear	Medium-dense and dense	초기정적전단응력에 따른 액상화저항은 증가하거나 감소할 수 있으며 상대밀도, 정적전단의 크기, 액상화의 정의에 의존한다.
Yoshimi and Tokimatsu(1978)	Shaking table	Loose	초기정적전단응력의 증가에 따라 액상화 저항은 감소할 수도 있고 변하지 않을 수도 있다.
Ishihara and Takatsu(1977)	Torsional shear	Medium-dense	초기전단응력이 증가하면 모래시료의 간극수압증가에 대한 저항이 커지는 경향이 있다.
Ishibashi et al.*(1985)	Torsional shear	Loose and dense	초기전단응력의 유무에 관계없이 일정반복전단변형을 가한 경우 간극수압분포에 차이가 없다.
Selig and Chang*(1981)	Cyclic triaxial	Loose, medium-dense, and dense	초기전단응력이 없을 경우 간극수압비가 100%까지 발휘될 수 있지만 초기전단이 있는 경우에는 반복축차응력의 반전이 없으면 100%까지 도달하지 않는다.

*본 연구에서 추가된 자료

표 4. 비등방 압밀 시험 종류 및 시험 수

구속압력 / 유효압밀비	σ'_3=50kPa	σ'_3=100kPa	σ'_3=200kPa
K_c=1.0	6	11	6
K_c=1.2	3	3	3
K_c=1.5	3	3	3

그림 10은 구속압이 100kPa, 유효압밀비가 1.5, 그리고 진동하중 15회에서 액상화에 대한 응력비가 0.33인 비등방 압밀시료의 시험결과를 나타낸 것이다. 비등방 압밀된 시료에 대한 시험결과의 가장 큰 특징은 등방 압밀 시료와는 달리 작은 변형률에서 갑작스런 간극수압 증가가 일어나지만 일정한 증가량에 도달하면 100%의 간극수압은 나타나지 않고 점차적으로 증가하는 양상을 보인다. 따라서 유효응력이 영(zero)이 되지 않고 등방 압밀 시료에 비해 상당히 큰 잔류강도를 갖는다. 비등방 압밀시료의 액상화는 간극수압의 증가가 급격히 일어난 후 간극수압이 일정해지는 시점으로 정하였다. 그림 10(c)에 보는바와 같이 진동수 15회에서 시료에 초기액상화가 발생된 이후에도 축방향 변형률이 계속 증가하고 있다. 그림 10(d)는 유효응력경로를 보인 것으로 하중이 가해진 초기 단계에는 축차응력이 (−)값을 갖는 응력반전현상이 있었지만 반복하중이 계속 가해질수록 응력반전의 양이 점차 줄어들고 변형이 커짐에 따라 축차응력이 압축력만을 받는 것을 볼 수 있다.

이러한 결과는 본 시험에서 수행된 모든 비등방 압밀 시료에서 같은 경향을 나타낸다. 등방 압밀 시료는 초기액상화가 발생한 직후 유

효응력이 거의 영(zero)으로 감소하여 흐름파괴(flow failure)가 일어나지만 비등방 시료는 변형은 계속되지만 잔류강도를 계속 유지하고 있다. 이러한 시험결과는 표 3에서 Seed et al. (1973)나 Vail and Finn(1979), Selig and Chang(1981) 등이 반복삼축시험을 통해 내린 결론과 거의 비슷한 것으로 나타났다.

그림 11은 구속압력으로 정규화한 응력비로 나타낸 것이다. 여기서 보는 바와 같이 유효압밀비가 증가하면 액상화 강도가 증가하는 것으로 나타났다. 구속압으로 정규화된 경우 액상화 강도는 진동수 10회를 기준으로 하면 Kc가 1.2와 1.5일 때 각각 약 20%, 50% 정도 증가되는 것으로 나타났다.

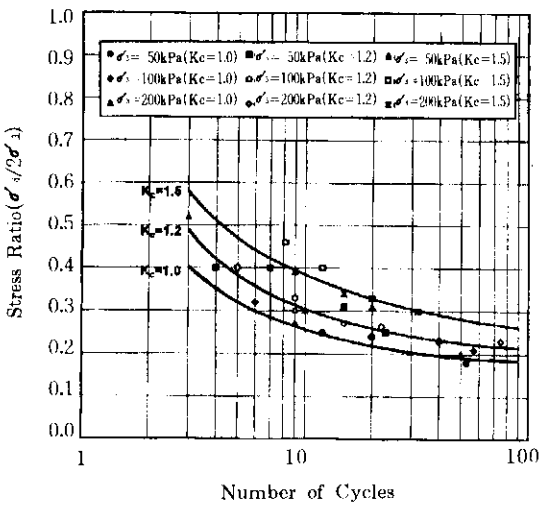


그림 11. 비등방 시료의 결과를 구속압력으로 정규화한 응력비

5. 결 론

본 연구에서는 국내 서해안 해안에 퇴적된 실트질 모래와 준설매립(hydraulic fill)한 지반에서 채취한 시료를 이용하여 진동삼축압축시험을 실시하여 액상화판별을 위한 동적전단강도를 나타내고 이를 기존의 자료와 비교하였다. 또한 비등방 진동삼축시험을 통하여 그에 대한 영향을 검토하였다. 특히 국내연안에 주로 분포하고 있는 실트질 모래에 대한 평가를 통하여, 액상화판별을 위한 기존의 설계자료에 대한 적용성 여부를 검증하고자 비배수 응력제어 진동삼축시험을 하였다. 이에 대한 시험결과를 정리하면 아래와 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 교란시료의 경우 반복횟수 N이 10회 일 때 액상화 강도(stress ratio)는 0.26으로 나타 났으며, 불교란 시료 경우 0.51로 교란시료에 비해 약 두 배정도 크게 나왔다. 이는 불교란 시료가 10m이상의 비교적 깊은 위치에서 채취한 시료이며, 얇은 점토층과 실트층이 번갈아 존재하여 반복하중으로 인한 간극수압 증가를 감소시키는 효과가 있기 때문인 것으로 판단된다.
2) 국내 실트질 모래의 경우 실트질 함유량

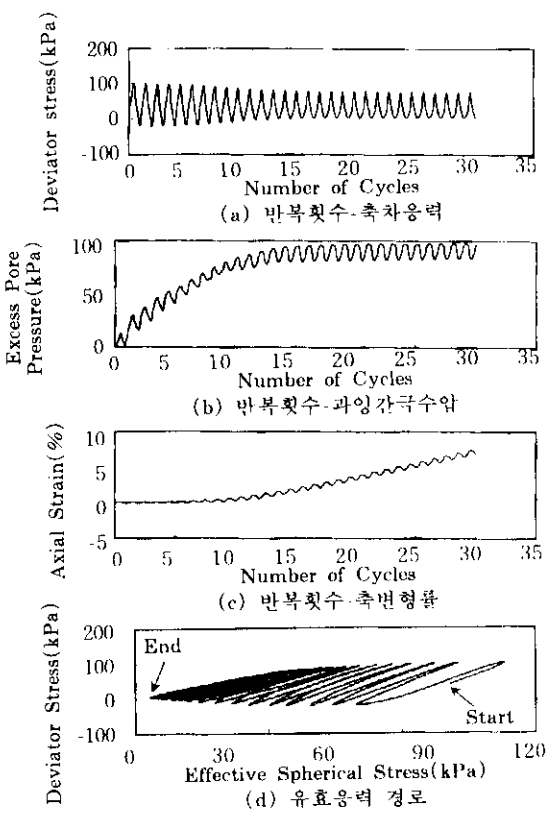


그림 10. 비등방 압밀시료의 시험결과
(K_c=1.5, Stress Ratio=0.33, σ'_3=100kPa)

이 약 30% 이하가 되는 시료에 대해서는 유효입경, D_{50}을 기준으로 실트질 성분이 액상화 강도에 거의 영향을 미치지 않고 있다.

3) 본 연구와 국내 다른 연구자들의 시험결과를 상대밀도 50%인 시료가 10회 반복하중을 받을 경우 평균유효입경 D_{50}에 따른 강도를 정리하였다. 입경과 액상화 강도에 대한 정확한 추세선을 나타내기가 어렵지만, 국내 실트질 모래의 액상화 강도는 Seed and Peacock(1971)가 제시한 결과의 범위 내에 있다.

4) 비등방 압밀된 시료에 대해 진동삼축시험을 통해 구한 액상화 강도는 K_c가 증가함에 따라 증가한다. K_c가 1.2와 1.5인 경우 K_c가 1인 경우의 강도 값에 비해 진동수 10회를 기준으로 각각 20%와 50%의 강도증가율을 보이고 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 : 95-06-00-09-02-3) 연구비 지원에 의해 이루어진 것으로 동재단에 감사의 뜻을 표하며, 시험기 사용에 적극 지원을 해주신 농어촌진흥공사 토질실험실 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 이의명(1994), 해성실트질 모래지반의 지진시 액상화예측에 관한 연구, 전북대학교 대학원 토목공학과, 박사학위논문.
2. 황대진(1993), "실트를 포함하는 모래질 흙의 액상화강도에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, pp.24~252.
3. ASTM, "Standard Test Method for Load controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil", D5311, USA.
4. Baldi, G. and Nova, R.(1984), "Membrain Penetration Effects in Triaxial Testing", *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.110, No.3, pp.403~420.
5. Erten, D. and Maher, M.H.(1995), "Cyclic Undrained Behavior of Silty Sand", *Journal of Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, Vol.14, pp.115~123.
6. Evans, M.D. and Zhou, S.(1995), "Liquefaction Behavior of Sand-Gravel Composites", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.121, No.3, pp.287~298.
7. Ishibashi, I., Kawamura, M. and Bhatia, S. K.(1985), "Effect of Initial Shear on Cyclic Behavior of Sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.111, No. 12, pp.1395~1410.
8. KS F 2345-76(1987), "비점성토의 상대밀도 시험".
9. Mulilis, J.P., Seed, H.B., Chan, C.K., Mitchell, J.K. and Arulanandan, K.(1977), "Effects of Sample Preparation on Sand Liquefaction", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.103, No.GT2, pp.91~108.
10. Seed, H.B, and Idriss, I.M.(1971), "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.93, No.SM3, pp.1249~1273.
11. Seed, H.B.(1979), "Considerations in the Earthquake-Resistant Design of Earth Dams", *Geotechnique*, Vol.29, No.3, pp.215~263.
12. Seed, H.B., Lee, K.L., Idriss, I.M. and Makdisi, F.I.(1975), "The Slides in the San Fernando Dams during the Earthquake of February 9, 1971", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.101, No.GT7, pp. 651~689.
13. Seed, H.B., Lee, K.L., Idriss, I.M., and Makdisi, F.(1973), "Analysis of the Slides in the San Fernando Dams During the Earthquake of February 9, 1971", *Report No. EERC 73-2*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.
14. Seed, H.B., and Peacock, W.H.(1971), "Test Procedure for Measuring Soil Liquefaction Characteristics", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 97,

SM8, pp.1099~1119.

15. Selig, E.T. and Chang, C.S.(1981), "Soil Failure Modes in Undrained Cyclic Loading", *Journal of Getechnical Engineering Division,* ASCE, Vol.107, No. GT5, pp.539~551.
16. Vaid, Y.P., and Chern, J.C.(1983), "Effect of Static Shear on Resistance to Liquefaction", *Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering,* Vol.23, No.1, pp.47~60.
17. Vaid, Y.P. and Finn, W.D.L.(1979), "Static Shear and Liquefaction Potential", *Journal of Getechnical Engineering Division,* ASCE, Vol. 105, No. GT10, pp.1233~1246.

(접수일자 1997. 11. 12)