

실트를 포함하는 모래질 흙의 액상화강도에 관한 연구

A Study on the Liquefaction Strength of Silt Containing Sands

황 대 진*
Hwang, Dae Jin

Abstract

Undrained cyclic simple shear tests and undrained cyclic triaxial tests were performed on silt containing sand in order to investigate the effects of silt contents on the liquefaction strength and shear characteristics of the sand. From the view that the difference of liquefaction strength for different content of silt stems from dilatancy characteristics of the sand, stress-dilatancy relation of the sand was obtained from drained triaxial test in which the mean stress was kept constant. Considerations on liquefaction behaviors were made by comparing the drained and undrained behaviors of sands during static shear test. It is concluded that λ -value of the stress-dilatancy relation will be closely related to the liquefaction strength.

요 지

본 연구에서는 실트를 포함하는 모래의 액상화강도 및 전단특성을 검토하기 위하여 비배수상태에서 동적 단순전단시험 및 동적 삼축압축시험을 행했다. 그 결과 실트를 포함하는 모래의 액상화강도는 일정한 상대밀도의 조건에서는 실트 함유율 30%정도에서 가장 약한 것으로 판명되었다. 그 원인은 실트 함유량에 따른 DILATANCY 특성의 차에 있는 것으로 판단되며 실트를 포함하는 모래의 DILATANCY 특성을 조사하기 위해 정적 배수 및 비배수 전단시험을 행하였다. 그 결과 액상화강도 특성은 배수 및 비배수 전단특성과 밀접한 상관관계를 나타냈으며, 응력-DILATANCY 관계의 기울기인 λ 치와 액상화강도 사이에는 깊은 관련성이 있음이 판명되었다.

1. 서 론

포화된 모래지반의 지진에 의한 액상화 현상으로 인한 피해는 최근 많이 늘어나고 있다. 액상화 현상에 대해 관심을 갖기 시작한 것은 1964년 일본의 니이가타 지진에서 액상화현상에 의한 피해가 두드러지면서부터 라고 할 수 있다. 특히 최근의 사례로서는 1987년 일본 千葉縣 東方沖 지진으로 동경반

내의 매립지반 및 인공섬등에서 액상화현상이 발생한 것⁽¹⁾을 비롯해 1989년 SANFRANCISCO의 LOMA PRIETA 지진에 있어서도 매립지반의 액상화현상이 현저하게 드러났다⁽²⁾.

우리나라에서는 한반도가 지진에 대한 안전지대로 인식되어 있는 관계로 액상화현상에 의한 피해에 대해 크게 연구가 부족한 상태이다. 그러나 발생빈도는 적지만 분류상 강진에 속하는 지진이 간혹 발생하고 있고, 근래의 경제발전에 따른 건설부지의

* 정회원 · 삼성종합건설 기술연구소 선임연구원

확보가 어려워 좋지않은 지반에서의 건설이 증가하고 있기 때문에 대형 공사에 있어서는 액상화현상에 대한 대책이 필요하다고 할 수 있다. 특히, 우리나라의 경우 국토가 좁고 한정되어 있는 관계로 급후 WATER FRONT개발이 급무화 되어지고 있으며 따라서 매립지반의 경우 지진발생시 크게 문제화되고 있는 액상화 대책에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

본 연구에서는 매립지반에 많이 포함되어있는 세립분이 액상화강도에 미치는 영향을 조사하기위해 세립분을 포함하는 모래질 흙에 대해 반복단순전단 시험 및 반복삼축시험을 행하였다. 또한 그 결과를 검증하기위해 정적삼축압축시험을 배수및 비배수 상태에서 행하여 정적전단특성과 액상화강도 사이의 상호관련성을 검토했다.

2. 액상화 강도시험

2.1 실험장치

액상화강도 시험에는 NGI형 단순전단시험장치와 반복삼축시험장치를 이용하여 비배수상태에서 반복전단시험을 행했다. 여기서 단순전단시험장치를 사용한 이유는 보다 실제지반에 가까운 상태를 재현하기 위해서이다. 공시체의 높이는 3cm, 직경 7cm로 응력상태는 수평방향으로 변형률이 구속되는 평면변형률 상태이다. 단순전단을 행하는 경우 K_0 압밀을 하는 것이 보통이지만 NGI형 단순전단시험장치의 경우는 K_0 치가 미지수이며, 액상화한 시점에서 응력상태가 불균일한 것을 고려하여 등방압밀상태에서 실험을 행하였다. 실험장치는 공기압 제어방식으로 시험시의 아날로그 신호는 디지털신호로 변환하여

레코더를 이용하여 기록하는 방식을 사용했다. 또한 실험장치의 응력상태에 기인한 강도의 차를 조사하기 위해 반복삼축시험도 행했다. 삼축시험장치는 높이 12.5cm, 직경 5cm의 표준공시체를 사용하였다.

한편, 평균주응력을 일정하게 한 점증재하 시험에서도 표준공시체를 사용하였는데 응력회로내에 비례조정 압력조절기 및 컴퓨터 제어장치를 설치하여 각종 응력경로를 핸들 하나로 조작가능케 하였다. 때문에 재하오차를 최소로 줄이는 것이 가능하였다.

2.2 시험시료

시료는 豊浦표준사의 제조중에 생긴 세립분중에서 실트분만을 채취하여 豊浦표준사와 혼합함으로써 실트를 포함하는 모래를 인공적으로 만들었다. 표-1에 시료의 물리적 성질을 나타냈다. 본 시험에 사용한 실트는 앞서 말한 바와 같이 豊浦표준사 제조중의 세립분으로부터 점토분을 제거한 것으로 입자의 구성광물 및 비중등이 豊浦표준사와 거의 일치하고 있음을 알 수있다. 실트와 점토의 분리는 입자의 직경에 따른 침강속도의 차이 즉, Stoke's

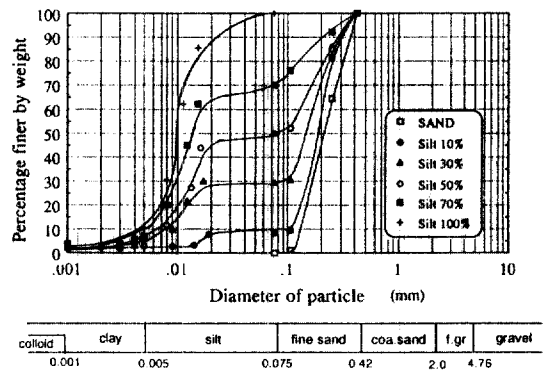


그림 1. 각 시료의 입도분포곡선.

표 1. 시료의 물리적 성질

Sample	D_{50} (mm)	Gs	γ (g/cm ³)	P. I.	e_{max}	e_{min}	e_{50}
SAND	0.21	2.643	1.51-1.52	NP	0.9567	0.5772	0.767
SILT10%	0.19	2.64	1.53-1.55	NP	0.9393	0.5227	0.731
SILT30%	0.17	2.647	1.55-1.59	NP	0.9061	0.4381	0.672
SILT50%	0.074	2.643	1.54-1.55	NP	0.9973	0.4796	0.737
SILT70%	0.012	2.643	1.52-1.54	NP	1.1962	0.5775	0.887
SILT100%	0.009	2.644	1.52-1.53	NP	0.5209	0.7445	1.133

Theory 를 이용하였으며 점토분 함유율이 5%이하로 될 때까지 반복시행 하였다. 그림-1에는 각 시료의 입도분포곡선을 표시하였다. 혼합시료의 각 함유율은 의도한 대로 되어 있음을 알 수 있다. 시료의 밀도는 상대밀도를 사용하였으며 각 시료의 소성지수를 구하기위해 컨시스턴시 한계시험을 행하였지만 소성한계를 구할 수 없었기 때문에 모든 시료는 비소성(NP)으로 간주되었다.

2.3 세립분을 포함하는 모래의 밀도

모래의 밀도를 나타내는 매개변수로는 간극비 e , 상대밀도 D_r , 여유간극비등이 많이 사용되어지고 있다. 액상화강도시험의 경우에는 상대밀도를 PA-RAMETER로서 사용하는 것이 일반적이며 이것은 느슨한 모래질 흙에서는 상대밀도와 액상화저항의 관계가 거의 직선적으로 비례하는 것에 근거하기 때문이다.

세립분을 포함하는 모래의 경우 원지반에 있어서 세립분이 많을수록 간극비가 커지는 경향이 있다. 그림-2에 본 실험에 사용한 실트를 포함하는 각 시료의 최대간극비, 최소간극비, 상대밀도 50%의 간극비, 및 여유간극비를 나타냈다. 여기에서 여유간극비(Volume decrease potential)라고 하는 것은 이시하라등⁽³⁾이 제안한 밀도를 나타내는 파라미터로서 $e - e_{min}$ 으로 나타내어지며 e 와 e_{min} 은 각각 현상태의 간극비와 최소 간극비를 말한다. 그림에서 알 수 있듯이 각 시료의 간극비를 일정하게 하면 실트 함유율 30%의 시료는 상대적으로 느슨한 상태가 되고, 실트 100%의 시료는 조밀한 상태가 된다. 예를들어 간극비가 0.8정도일 때를 생각해 보면 실트

함유율 30%의 시료는 최대 간극비에 가까운 반면, 실트 100%의 시료는 최소 간극비에 가까운 값을 알 수 있다. 이와 같은 것은 다음과 같은 이론에 근거한다.

가장 조밀한 상태 혹은 가장 느슨한 상태의 실트에 가장 조밀한 혹은 가장 느슨한 상태의 모래가 혼합된 경우, 또는 그 역을 생각하므로써 모래와 실트의 최대,최소간극비로부터 실트를 포함하는 모래의 간극비를 추정할 수 있다.

모래 및 실트의 최대, 최소간극비를 각각 $(e_{max})_{sand}$, $(e_{max})_{silt}$ 및 $(e_{min})_{sand}$, $(e_{min})_{silt}$ 라고 하면 느슨한 실트에 P%의 모래입자가 간극을 갖지 않는 상태로 혼합되어 있을때 전체의 간극비 e_p 는

$$e_p = \left(1 - \frac{P_{sand}}{100}\right) \cdot (e_{max})_{silt} \quad (1)$$

가 되고 가장 조밀한 상태의 모래가 혼합된 경우의 e_p 는

$$e_p = \frac{P_{sand}}{100} \cdot (e_{min})_{sand} + \left(1 - \frac{P_{sand}}{100}\right) \cdot (e_{max})_{silt} \quad (2)$$

로 된다.

또한 가장 느슨한 모래의 간극(최대 간극비)에 가장 조밀한 상태의 간극(최소 간극비)을 갖는 실트가 P% 가해졌을 때를 가정하면 다음과 같은 계산이 성립한다.

$$e_p = (e_{max})_{sand} + ((e_{min})_{silt} - (e_{max})_{sand}) \cdot \frac{P_{silt}}{100} \quad (3)$$

한편, 가장조밀한 상태의 실트에 간극을 갖지않는 모래입자가 P% 가해졌을 경우는 다음과 같다.

$$e_p = \left(1 - \frac{P_{sand}}{100}\right) \cdot (e_{min})_{silt} \quad (4)$$

그에 반해 가장 조밀한 상태의 모래에 간극을 갖지않는 실트입자가 P% 가해졌을 경우의 식은 다음과 같다.

$$e_p = \left(1 - \frac{P_{silt}}{100}\right) \cdot (e_{max})_{sand} \quad (5)$$

윗 식을 이용하여 실트분함유량의 변화에 따르는 간극비의 변화를 구하여 그림-3에 나타낸 것과 같이

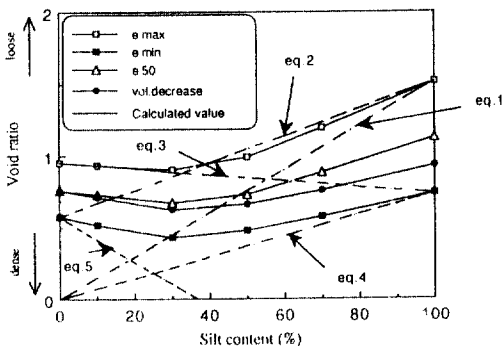


그림 2. 각 시료의 간극비.

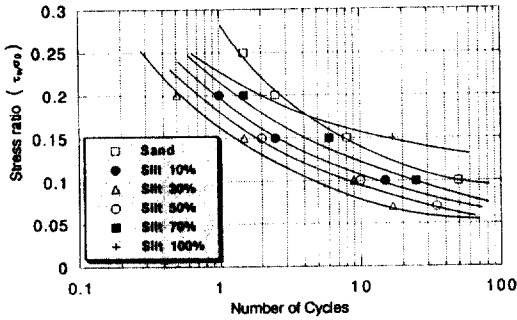


그림 3. 상대밀도 50%에서의 액상화강도곡선.

실험결과와 비교한 결과 최대간극비의 경우 식-2, 식-3의 교차점 약 32%가 최소치가 되며 최소간극비의 경우는 식-4와 식-5의 교차점 약 25%에서 최소치가 됨이 확인되었다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 실험치에서는 조밀한 상태의 경우 30% 정도에서 가장 조밀한 것으로 나타나나 계산상에는 25%정도에서 가장 조밀하게 나타나는 등 실험치와 상당히 잘 부합되었다. 따라서 실트와 같은 비소성의 세립분을 포함하는 모래의 경우 각각의 최대 및 최소간극비를 구할 수 있다면 윗 식에 의해 혼합토의 최대간극비 및 최소간극비를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

세립분을 포함하는 모래에 있어서 모든 혼합비에 대해 밀도가 일정한 공시체를 제작하는 것은 거의 불가능하며 따라서 이시하라등을 비롯해 대부분의 세립분에 관한 연구^(3,5,7)는 상대밀도를 일정하게 하여 실험을 행하였다. 또한 느슨한 상태를 나타내는 지표로서 상대밀도 50%가 많이 쓰이고 있는 바⁽⁴⁾, 기존의 데이터⁽⁵⁾와의 비교도 고려하여 본 실험에서는 상대밀도 50%의 경우를 중심으로 검토를 하였다.

2.4 공시체작성 및 실험순서

공시체의 작성은 250g정도의 램머로 가볍게 다지면서 상대밀도를 조정했다. 공시체는 완전 포화시키기 위해 먼저 CO₂를 순환시킨후 탈기수(Deaired Water)를 순환시켜 시료를 포화시켰다. 그 다음 1.0 kgf/cm²의 압력으로 압밀시켰다. 상대밀도 50%의 시료는 Back Pressure를 1.0kgf/cm²의 압력으로 가했으나 상대밀도 70%의 시료는 완전포화되지 않을 것을 고려하여 Back Pressure를 2.0kgf/cm²까지 가했다. 압밀시간은 3~36시간에 걸쳐 충분히 압밀시

켰으며 Skempton의 B치는 0.96이상의 것 만을 완전포화상태로 간주했다. 실험종료후 공시체중의 실트분이 균등하게 분포하였는지를 살펴보기위해 공시체를 3등분하여 각각의 실트분 함유량을 측정한다. 결과 거의 균등하게 분포하고 있음을 알 수 있었다.

3. 반복전단시험

3.1 실트를 포함하는 시료의 액상화강도

그림-3에 각 시료의 반복단순전단시의 액상화응력비*와 반복회수의 관계를 나타냈다. 일반적으로 액상화강도(일반적으로 실험상에서는 반복회수 20회에서 액상화가 발생할 때의 액상화응력비를 말함)를 구하는 경우에는 간극수압이 상승하여 구속압과 같아진 시점을 초기액상화로 판단하는데, 본 연구에서는 실트 함유율을 바꾸었을 경우의 초기액상화 판단이 어려운 점을 고려하여 전단변형률의 양진폭 변형률 5%일때를 초기액상화로 판단하였다. 또한 반복하중의 주파수는 0.1Hz, 파형은 Sine파로 재하하였다. 이 그림에는 豊浦표준사부터 실트 100%까지의 액상화강도곡선을 각각 나타내고 있으며 실트를 포함하지 않는 모래의 경우는 기존의 연구결과⁽⁶⁾(일본 토질공학회등의 단순전단시험결과)와 거의 일치하고있어 시험장치상의 문제는 없음이 확인되었다.

한편 세립분을 포함하는 모래의 경우는 세립분의 비율이 커질수록 간극수압이 증가하기 어렵게되어 액상화강도가 높아지며, 低塑性의 실트를 90%이상 포함하는 모래의 경우 순수한 모래와 비슷한 정도의 액상화강도를 나타내는 것으로 알려져왔다. 그러나 본 연구에서는 실트분함유율 30%까지는 액상화강도가 서서히 감소하고 실트분함유율 30%이상부터는 재차 증가하는 경향이 나타났다. 이와같은 결과를 보다 알기쉽게 그림-4에 나타냈다. 그림-4는 반복하중회수 20회에서 액상화에 필요로 하는 전단응력비 R₂₀과 실트분함유율의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 실트분함유율의 변화에 따른 액상화강도의 변화가 파악가능하다. 액상화강도는 실트분함유율 30%에서 가장 작게 나타나고 있으며, 그

*액상화강도는 구속응력(Confining Pressure)에 비례하므로 전단응력을 구속응력으로 나눈 값을 액상화응력비라고 하여 액상화강도 표시에 사용함.

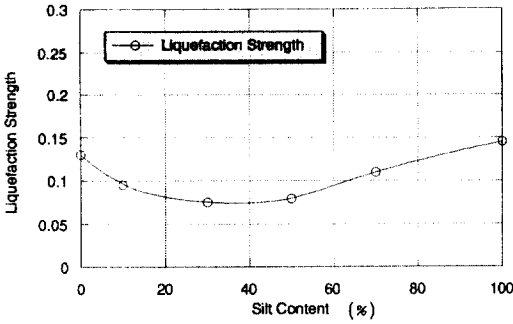
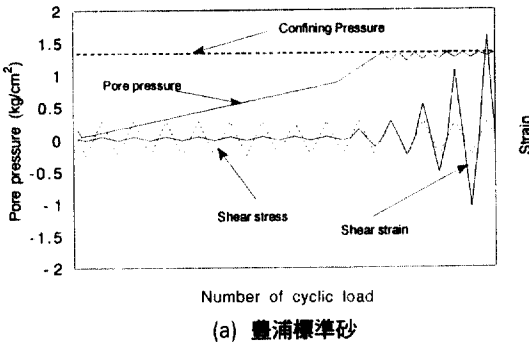
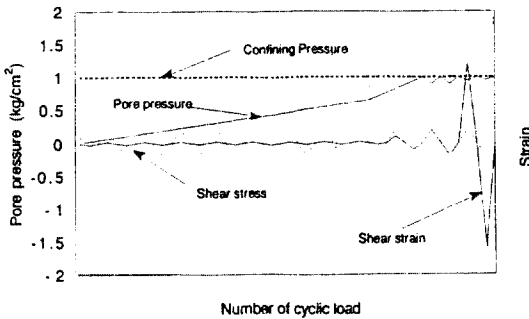


그림 4. 액상화강도와 실트함유율의 관계.



(a) 豊浦標準砂



(b) 실트 30%를 포함하는 모래

그림 5. 전단변형률의 발생형태.

원인으로서 다음과 같은 이유를 들 수 있다. 첫째 세립분함유율의 증가에 따라 액상화강도가 증가하는 현상은 입자간의 점착력에 기인하는 것으로 설명되고 있으나 본 연구에서 사용한 세립분은 극히 低塑性 또는 非塑性이라 할 수 있는 실트이므로 점착력에 의한 액상화강도의 증가는 그다지 없을 것으로 판단되어 진다. 둘째는 세립분함유율의 증가에 따른 DILATANCY 특성의 차이에 그 원인이 있다고 판단되어 진다. 즉, 모래입자 사이에 모래보다 작은 실트입자가 적당량 포함되어 있으면 입자간의 맞물

림(Interlocking)이 풀어지기 쉽게 되어 액상화강도가 저하되는 것으로 판단되어 진다. 하지만 실트분함유율 30% 이상이 되면 모래입자 사이의 실트분에 의한 효과가 약해짐과 동시에 실트입자끼리의 맞물림이 생겨 액상화강도가 약간 상승하는 것으로 추측되어 진다.

그림-5는 반복하중에 의한 간극수압의 상승과 전단변형률의 발생을 나타내고 있다. 그림-5(a)는 豊浦표준사, (b)는 실트분함유율 30%의 경우이다. 어느 경우도 반복하중이 가해짐에 따라 간극수압이 증가하는 것은 같으나 간극수압이 구속응력과 같아져 유효응력이 零이 되었을 때의 전단변형률에 차이가 있음을 알 수 있다. 다시말해 豊浦표준사의 경우는 유효응력이 零에 접근한 곳에서 전단변형률의 증가폭이 완만한 데에 비해 실트30%의 경우는 초기액상화 지점에서 급격한 증가를 보이고 있다. 이것은 앞서말한 DILATANCY 효과를 뒷받침하는 것으로 생각되어 진다.

3.2 상대밀도 및 과압밀비를 변화시킨 경우의 액상화강도

밀도를 바꿔서 상대밀도 70%에서 반복단순전단 시험을 행한 결과를 그림-6에 나타냈다. 그림-5의 상대밀도 50%의 결과에 비해 전체적으로 액상화강도는 증가하고 있으나 역시 실트함유율 30%의 시료가 가장 낮은 것으로 나타났으며 상대밀도 50%의 시료에 비해 급격한 기울기를 가지고 있다.

다음으로 과압밀상태에 있어서의 실트를 포함하는 모래의 액상화강도 증가 경향을 살펴보기 위해 상대밀도 50%의 시료에 대해 과압밀비 2.0의 반복단순전단시험을 행했다. 그 결과를 그림-7에 나타냈다. 액상화강도곡선의 경향은 상대밀도 70%의 결과와 거의 같으며 실트분함유율 30%의 시료가 가장 낮은 액상화강도를 나타내는 것에는 변함이 없었다.

한편, 이시하라등⁽⁷⁾은 富士川砂를 가지고 반복단순전단시험을 행해 다음과 같은 식을 유도했다.

$$\left(\frac{\tau_1}{\sigma'_v}\right)_{0.C} = \sqrt{OCR} \left(\frac{\tau_1}{\sigma'_v}\right)_{N.C.} \quad (6)$$

이 (6)식에 의하면 모래의 액상화강도는 과압밀비의 평방근에 비례하여 증가함을 나타내고 있다.

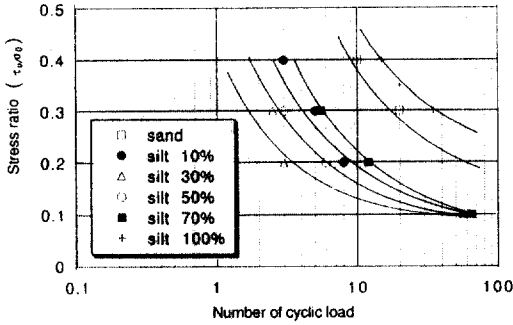


그림 6. 상대밀도 70%에서의 액상화강도곡선.

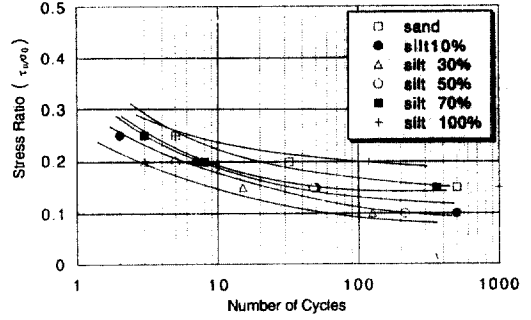


그림 9. 반복삼축시험에서의 액상화강도 곡선.

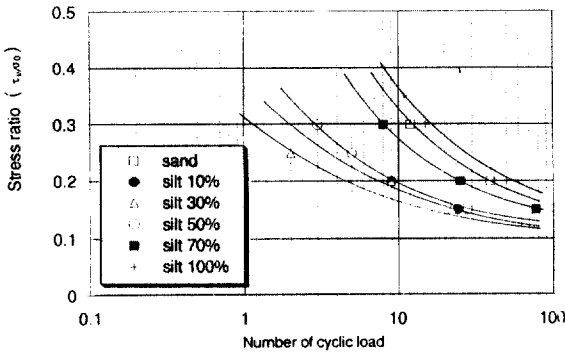


그림 7. 과압밀비 2.0에서의 액상화강도곡선.

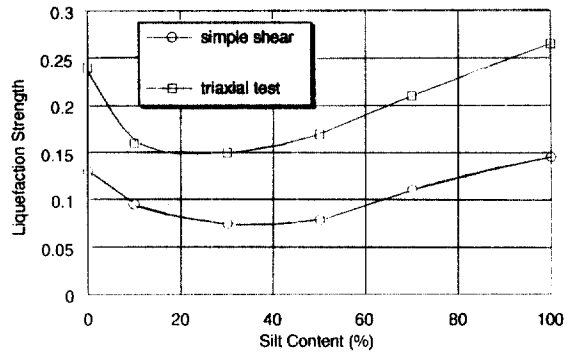


그림 10. 단순전단과 삼축시험의 비교.

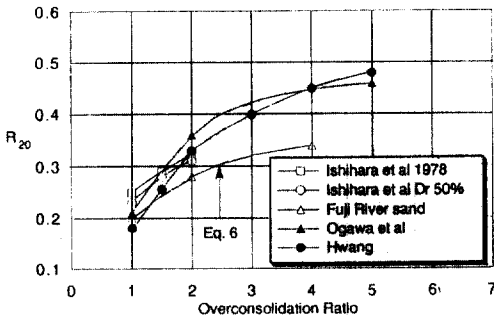


그림 8. 과압밀비의 증가에 따른 액상화강도의 변화.

본 연구에서는 상대밀도 50%의 豊浦표준사에 대해 과압밀비를 변화시켜 반복단순전단시험을 행하여 액상화저항응력(R_{20})과 과압밀비의 관계를 그림-8에 나타냈다. 이 결과에 의하면 R_{20} 은 $(OCR)^{0.88}$ 에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 값은 이시하라등이 구한 값보다 약간 큰 것이며, 이런 결과로 미루어 볼 때 과압밀비의 비례정수는 흙의 종류에 따라 변화하는 것으로 추정되어 진다.

3.3 반복단순전단 과 반복삼축시험

NGI型 또는 Cambridge型 단순전단시험장치에 있어서는 공시체에 주어지는 응력분포가 일정하지 않은 것으로 많이 알려져 있으며⁽⁸⁾, 한편으로는 공시체의 응력상태의 유한요소해석으로부터 표면의 80% 이상에서는 응력분포가 균일하다고도 발표되어 있다⁽⁹⁾.

본 연구에서는 앞서말한 실트를 포함하는 모래에 대한 반복단순전단시험의 결과가 응력분포의 불균일에 기인했을 가능성을 고려하여 반복삼축시험결과와 비교했다. 그림-9는 각 실트함유율에 대한 반복삼축시험결과를 나타내고 있다. 이 그림과 그림-3의 단순전단시험결과를 비교해 보면, 액상화강도는 삼축시험이 전반적으로 높게 나타나고 있으나 실트분함유율 30%의 시료가 가장 낮은 액상화강도를 나타내는 것은 변함이 없었다.

그림-10에는 반복단순전단시험결과와 반복삼축시험결과를 실트분함유율에 따른 (액상화저항 응력비) R_{20} 의 변화를 가지고 비교했다. 초기액상화의 판단은

삼축시험의 경우는 축변형률이 5%일 때로 판단했다. 곡선의 형태는 각 시료의 증가 및 감소의 경향이 유사함이 주목할 만하다.

4. 정적삼축시험

4.1 배수시험

앞서말한 각 시료의 액상화강도의 차이를 검증하기 위해 동일한 상대밀도, 동일한 구속응력하에서 정적삼축압축시험을 실시했다. 특히, 입자간의 DILATANCY 특성을 조사하기 위해 평균주응력 일정한 조건하에서 행했다. 그림-11에 전단응력-전단변형률의 관계를 나타냈다. 실트분함유율 50%의 값이 약간 경향을 달리하기는 하나 액상화강도와 같이 정적강도에서도 30%일 때 가장 약한 경향이 보이며, 30%이상에서의 재증가의 경향도 나타나고 있다. 이와 같은 결과로부터 액상화강도 뿐만 아니라 정적강도에 있어서도 상대밀도 일정한 조건하에서는 실트분함유율 30%일 때 가장 낮다고 말할 수 있다. 그림-12에는 전단응력과 체적변형률의 관계를 나타냈는데

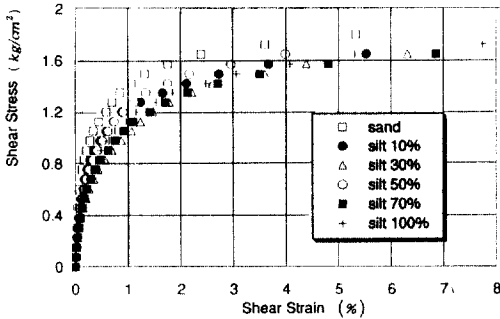


그림 11. 전단응력과 전단변형률의 관계.

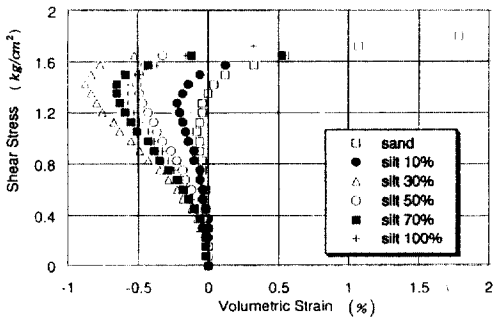


그림 12. 전단응력과 체적변형률의 관계.

여기에서도 실트분함유율 30%일 때 체적압축변형률이 가장 큰 값을 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 평균주응력 일정조건하에서의 결과이기 때문에 체적변형률량은 전단만에 의한 체적변화 즉, 負의 DILATANCY량을 나타낸다. 액상화강도가 가장 작은 실트함유율 30%의 모래가 체적변형률이 가장 크게 나타나는 결과는 액상화의 매카니즘에 있어서 負의 DILATANCY가 액상화강도에 큰 영향을 미치는 것을 시사하고 있다. 이 그림에서 또 한가지 주목해야 할 점은 체적변형률의 증가가 현저하게 나타나는 전단응력에 차이가 있다는 것이다. 즉 실트분을 포함하는 모래가 순수한 모래보다 작은 전단응력에서 입자간의 미끄러짐이 발생하기 쉽다는 것을 의미한다.

4.2 비배수시험

다음으로 평균주응력 일정한 조건하에서 정적 비배수시험을 행하여 간극수압의 변화상황을 조사했다. 그림-13에 각 시료의 유효응력경로를 나타냈다. 그림에는 변상선과 파괴선도 나타내고 있는데 각 시료의 변상점을 연결한 변상선이 거의 직선으로 나타내어 짐을 알 수 있다. 또한 변상점에서의 응력 이른바 변상응력을 각 시료 마다 비교해 보면 순수한 모래가 축차응력 1.0kgf/cm²정도에서 가장 높고 실트분함유율 10%는 0.75kgf/cm²정도, 실트분함유율 30% 이상의 시료는 0.5kgf/cm²로서, 실트분함유율 30%이하의 범위에서는 액상화강도가 낮은 시료일수록 낮은 변상응력을 나타냈다. 이와 같은 결과도 입자간의 DILATANCY에 의한 저항력의 차이에 기인하는 것으로 판단되어 진다. 그림-12에 나타낸 것과 같이 배수시험에서의 전단응력-체적변형률도

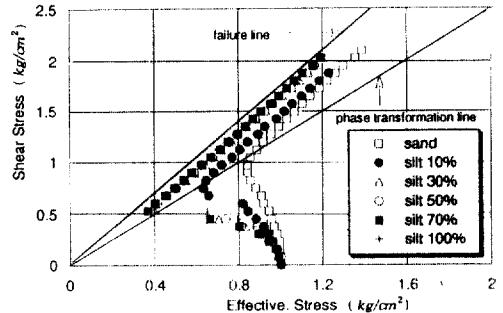


그림 13. 유효응력경로도.

에서는 실트분함유율30%의 시료가 가장 큰 체적변형률을 나타내고 그 이상의 함유율에서는 다시 작아졌으나 비배수시험의 유효응력도에서는 실트분함유율 30% 이상의 변화는 그다지 보이지 않았다.

4.3 정적시험 과 반복재하시험결과의 비교

전술한 시험결과로부터 같은 시료에 대한 동적및 정적시험 결과에 공통점이 있음을 알 수있다. 그것은 비배수 반복시험강도와 정적삼축배수, 비배수강도 양쪽다 실트분함유율 30%의 시료가 가장 낮다는 것이다. 이와같은 결과를 종합해보면 실트분을 포함하는 모래가 DILATANCY에 의한 저항력이 작음을 추정할 수 있다. 이것을 검증하기 위해 마쓰오카등⁽¹⁰⁾이 제안한 입자간의 활동에 근거한 응력-DILATANCY식에 적용시켜 각 시료의 DILATANCY에 의해 부담되어지는 전단저항에 관한 계수 λ 치와 액상화강도의 관계를 조사했다.

마쓰오카등은 전단시의 흩입자의 DILATANCY에 대한 미시적인 해석을 통해 MOBILIZE면상의 응력-변형률간의 관계식을 유도했다. 다음에 나타낸 식은 그 대표적인 식이다.

$$\frac{\tau}{\sigma_N} = \lambda \left(- \frac{de_N}{dy} \right) + \mu \quad (7)$$

여기에서 λ 와 μ 는 각각 DILATANCY와 마찰에 의해 부담되어지는 전단저항성분에 관한 계수이다.

표준사의 배수전단시험결과를 종축에 τ/σ_N , 횡축에 de_N/dy 를 취해 플로트하면 데이터가 약간 분산되기는 하지만 거의 직선적으로 나타나는 것을 알 수 있다. 실트를 포함하는 경우도 $\tau/\sigma_N \sim de_N/dy$ 의

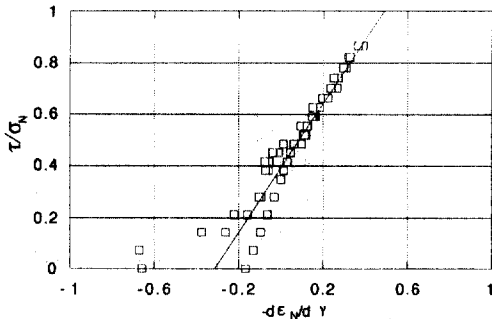


그림 14. 응력~DILATANCY 관계.

관계는 직선의 기울기나 위치에 약간 차이는 있으나 직선관계가 성립함을 알 수 있었다.

$$R_{20} = 0.154\lambda - 0.09 \quad (8)$$

각 시료의 시험결과로부터 λ 치와 실트분함유량의 관계를 그림-15(a)에 나타냈다. 액상화강도나 정적강도와 같이 실트분함유율 30%의 시료가 가장 낮다. 이 결과로부터 실트분함유율 30%의 DILATANCY에 의한 저항력이 가장 작음을 말할 수 있고 액상화강도는 DILATANCY에 의한 저항력과 밀접한 관계가 있다고 판단할 수 있다.

한편, 식 (7)에 있어서의 또하나의 계수 μ 와 실트분함유율의 관계를 나타낸 것이 그림-15(b)인데 실트분이 많을수록 큰 값을 나타냈다. 이것은 계수 μ 가 입자간마찰각 ϕ 의 함수이므로 실트분함유량이 많아질수록 공시체의 단위면적당의 입자간의 접하는 면적이 커지기 때문으로 판단된다.

그림-16은 λ 치와 비배수 반복단순전단시험의 R_{20} 과의 관계를 나타낸 그림인데 그림으로도 알 수 있듯이 매우 좋은 직선관계를 나타내고 있다. 즉 액상화강도는 DILATANCY에 의한 저항력과 비례

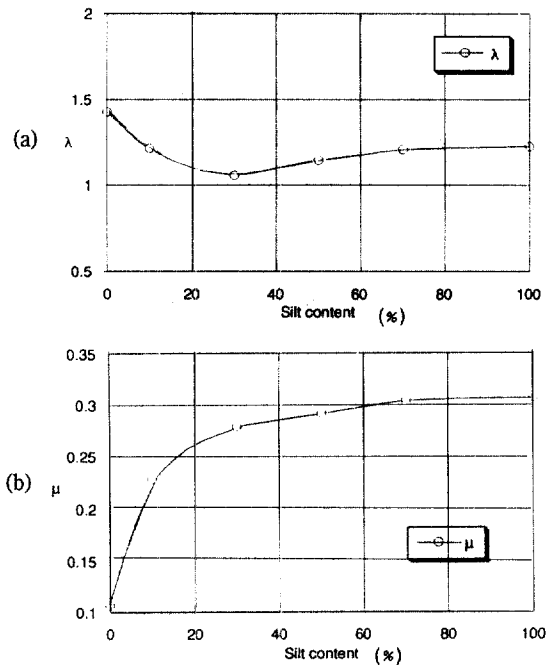


그림 15. DILATANCY계수 λ 와 μ 의 관계.

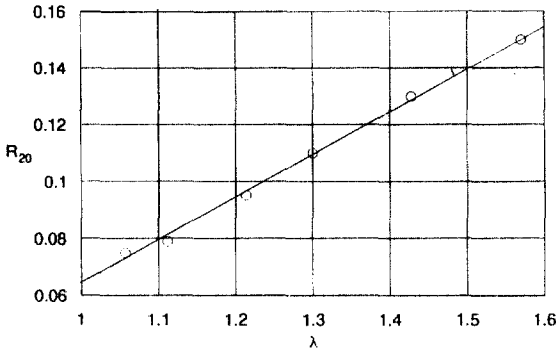


그림 16. DILATANCY계수 λ 와 액상화강도의 관계.

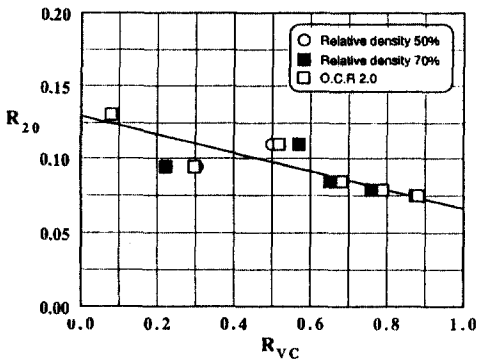


그림 17. 체적변형률비와 액상화강도의 관계.

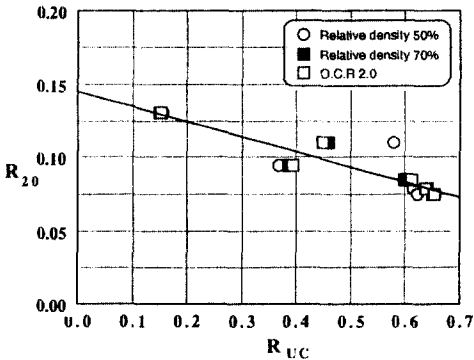


그림 18. 간극수압비와 액상화강도의 관계.

하며 다음과 같은 식으로 표현되어질 수 있다.

윗 식으로부터 λ 치를 이용하여 액상화강도를 어느정도 추측할 수 있을 것으로 판단되어 진다.

다음으로 배수상태에 있어서의 체적변형률 곡선 또는 비배수시험에 있어서의 유효응력 경로로부터 액상화강도를 예상하는 방법에 대하여 검토해 보았다. 그림-14에 나타낸 각 시료의 체적변형률, 최대

압축변형률이 생기는 시점의 전단응력에 대한 변형률량의 비를 최대체적변형률비 R_{VC} 로 정의하고, R_{VC} 와 반복단순전단시험의 R_{20} 의 관계를 그림-17에 나타냈다. 이 그림에 따르면 R_{20} 은 R_{VC} 의 증가에 따라 감소하고 R_{20} 과 R_{VC} 의 관계는 직선관계를 나타내며 (9)식과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{20} = -0.06R_{VC} + 0.129 \quad (9)$$

이와 같은 관계로부터 액상화강도가 작을수록 체적변형률 즉, 負의 DILATANCY가 크며 또한 최대 압축점에서의 전단응력이 크다는 것을 알 수 있다.

그림-13에 나타낸 비배수시험의 유효응력경로에 있어서 최대간극수압이 발생하는 시점에서의 전단응력에 대한 간극수압의 비를 최대간극수압비 R_{UC} 로 정의하고, R_{UC} 와 반복단순전단시험의 R_{20} 의 관계를 구하여 그림-18에 나타냈다. R_{UC} 는 R_{20} 의 증가에 따라 감소하고 (9)식과 같이 직선관계를 나타내며 (10)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{20} = -0.1R_{UC} + 0.145 \quad (10)$$

여기에서 기울기는 밀도에 의해 변하는 계수이다. 이 식은 실트를 포함하는 모래에 대한 실험결과로부터 유도한 관계식으로 전 시료에 적용되어 진다고는 말할 수 없으나 액상화강도가 정적전단적인 체적압축비에 관련되어 진다는 것은 중요한 정보가 될 수 있다고 판단되어 진다.

5. 결 론

본 연구에서는 실트분을 포함하는 모래에 대하여 비배수반복단순전단시험 및 반복삼축시험을 실시하여 실트분함유량이 액상화강도에 미치는 영향을 조사했다. 더우기 평균주응력 일정의 조건에서 정적삼축시험을 행하여 정적시험결과와 비배수반복시험 결과의 관련성을 검토했다. 본 연구로부터 얻어진 주요한 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 세립분을 포함하는 모래의 액상화특성을 검토하기위해 제1단계로서 低塑性의 실트를 포함하는 모래에 대하여 혼합비를 변화시켜 최대, 최소간극비 모두 혼합비가 30%의 경우가 가장 작음이 판명되었다.

2) 액상화강도에 미치는 실트분함유량의 영향은 상당히 크며 상대밀도가 같은 경우 실트분함유율 30%의 시료가 가장 낮은 액상화강도를 나타낸다.

3) 과압밀비 및 상대밀도를 변화시킨 경우도 실트분함유율 30%의 시료가 가장 낮은 액상화강도를 나타낸다.

4) 실트분함유율 30%의 시료가 가장 낮은 액상화강도를 나타내는 것은 입자간의 DILATANCY에 의한 저항력이 가장 작음에 그 원인이 있다.

5) 동적시험결과와 정적평균주응력 일정의 시험 결과간에는 깊은 관련성이 있으며 액상화강도와 최대체적변형률비 R_{vc} 및 최대간극수압비 R_{uc} 는 직선관계가 성립하여 액상화강도는 R_{vc} , R_{uc} 의 증가에 따라 저하한다.

참 고 문 헌

1. 森 伸一郎, 沼田淳紀, 境野典夫, 長谷川昌弘, “埋立地の液狀化で生じた噴砂の諸特性”, 土と基礎, Vol. 39-2, No. 397, pp. 17~22, 1991.
2. 柳澤榮司, 森 伸一郎, “1989年 Loma Prieta 地震における液狀化現象について”, 제45회년차학술강연회개요집/III, pp. 690~691, 1990.
3. Ishihara, K., Yamazaki, F., “Cyclic Simple Shear Tests on Saturated Sand in Multi-Directional

- Loading”, *Soils and Foundations*, Vol. 20, No. 1, pp. 45~59, 1980.
4. De Alba, P., Seed, H. B., Chan, C. K., “Sand liquefaction in Large-Scale Simple Shear Tests”, *Jour. of Geotech. Eng. Div., ASCE*, Vol. 102, No. GT9, pp. 909~927, 1976.
5. 草野 郁, 阿部 博, “細立分を含む砂質地盤の液狀化強度の推定法”, 第24回土質工學研究發表會講演集, pp. 745~748, 1989.
6. 土岐祥介, 三浦清一, “飽和豐浦砂の共通仕様に基づく全國一齊非排水繰返し三軸試驗の結果について”, 土の非排水繰返し三軸試驗に關するシンポジウム發表論文集, pp. 1~35, 1988.
7. Ishihara, K., Takatsu, H., “Effect of Overconsolidation and K_0 Conditions on the Liquefaction Characteristics of Sand”, *Soils and Foundations*, Vol. 19, No. 4, pp. 60~68, 1979.
8. Lucks, A., Christian, J., Brandow, G., H eg. K., “Stress Conditions in NGI Simple Shear Test, *Jour. of Soil Mech. and Foundation Eng. Div., ASCE*, Vol. 98, No. SM1, pp. 155~160, 1972.
9. Shen, C. K., Sadigh, K., Herrmann, L. R., “An Analysis of NGI Simple Shear Apparatus for Cyclic Soil Testing, *Dynamic Geotechnical Testing*”, ASTM STP654, pp. 148~162, 1978.
10. 松岡 元, “3主應力下の土の應力~ひずみ關係について”, 京大防災研年報 16-B, pp. 711~733, 1963. (接受: 1992. 10. 16)