세립분을 포함하는 모래질 흙의 액상화강도에 미치는 재하속도의 영향

The Effect of Cyclic Load Frequency on the Liquefaction Strength of Fine Containing Sands

황 대 진*
Hwang, Dae - Jin

Abstract

Undrained cyclic triaxial tests were performed on silt contained in the sand in order to investigate the effect of silt contents on the liquefaction strength and shear characteristics of the sand. As the result of this experiment, the weakest percentage of silt contained in the sand was 30% for all the relative density considered in the test. Also, the same tests were performed to find the effect of cyclic speed applied ranging from 0.1Hz to 5Hz on the liquefaction strength. The more the silt is contained in the sand, the greater the liquefaction strength was affected by cyclic speed, While the silt-containing sand was far less influenced by the cyclic speed than clay-containing sand. These results are believed to be caused by the change of pore water pressure of the effective stress path.

요 지

본 연구에서는 실트를 포함하는 모래의 액상화강도 및 전단특성을 검토하기 위하여 비배수상태에서 동적 삼축압축시험을 행했다. 그 결과 실트를 포함하는 모래의 액상화강도는 상대밀도 일정의 조건에서는 실트 함유율 30% 정도에서 가장 약한 것으로 판명되었다. 또한 동적 삼축압축시험의 재하속도를 0.1Hz에서 5 Hz까지 변화시켜 실트를 포함하는 모래질 흙의 액상화강도에 미치는 재하속도의 영향을 살펴본 결과 실트의 함유량이 많을수록 재하속도의 영향을 많이 받으나 점토를 함유한 모래질 흙에 비해서는 그 영향이 현저하게 적음을 알 수 있다. 이러한 결과의 원인에 대해서는 유효응력 경로에 있어서의 간극수압의 변화상황으로부터 설명될 수 있다.

1. 서 론

모래질 지반의 액상화현상은 지진에 의한 지반피해의 주요한 원인으로서 널리 알려져있다. 액상화현상은 지금까지 주로 입도가 좋지 않은 균질한 모래질 지반에서 발생하는 현상으로 인식되어 왔으나 최근에는 매립지반과 같이 세립분을 포함하는 모래지반에서도 액상화현상에

* 정회원, 삼성건설 기술연구소 선임연구원

의한 피해가 확인되는 등, 세립분의 함유율이 액상화강도에 미치는 영향평가가 새로운 과제로 부각되고 있다.[1]

흙의 동적강도의 문제는 사질토의 동적강도와 점성토의 동적강도의 문제로 크게 나눌 수 있다. 전자의 주된 것은 지진시의 액상화현상이며 후자의 문제로서는 지진시의 사면의 안정성이나 해양구조물의 파랑에 대한 안정성의 문제 등이 있다. 일반적으로 점성토의 경우는 입자간의 점착력 등으로 인해 액상화의 가능성은 거의 없는 것으로 판단되고 있으나, 매립지반 등지에 포함되어 있는 세립분중에는 점토의 비율이 10%이하인 경우가 대부분이다.[2] 따라서 비교적 저소성인 실트분이 포함되어 있는 모래질 흙의 특성을 살펴보는 것은 매립토의 특성 파악에 매우 유효하다고 할 수 있다. 흙의 동적강도를 말할 때는 재하속도 혹은 변형률속도의 영향을 의미하는 경우도 있는 데, 여기서는 재하주파수의 영향을 논하는 것으로 한다.

본 연구에서는 매립지반에 많이 포함되어있는 세립분의 함유량이 액상화강도에 미치는 영향을 조사하기 위해 세립분을 포함하는 모래질 흙에 대해 반복삼축압축시험을 행하였다. 또한 실트를 포함하는 모래질 흙의 액상화강도에 미치는 재하속도의 영향을 살펴보기 위해 주파수를 0.1Hz에서 5Hz까지 변화시켜 가면서 유효응력의 변화상황을 검토해 보았다.

2. 반복 삼축압축 시험

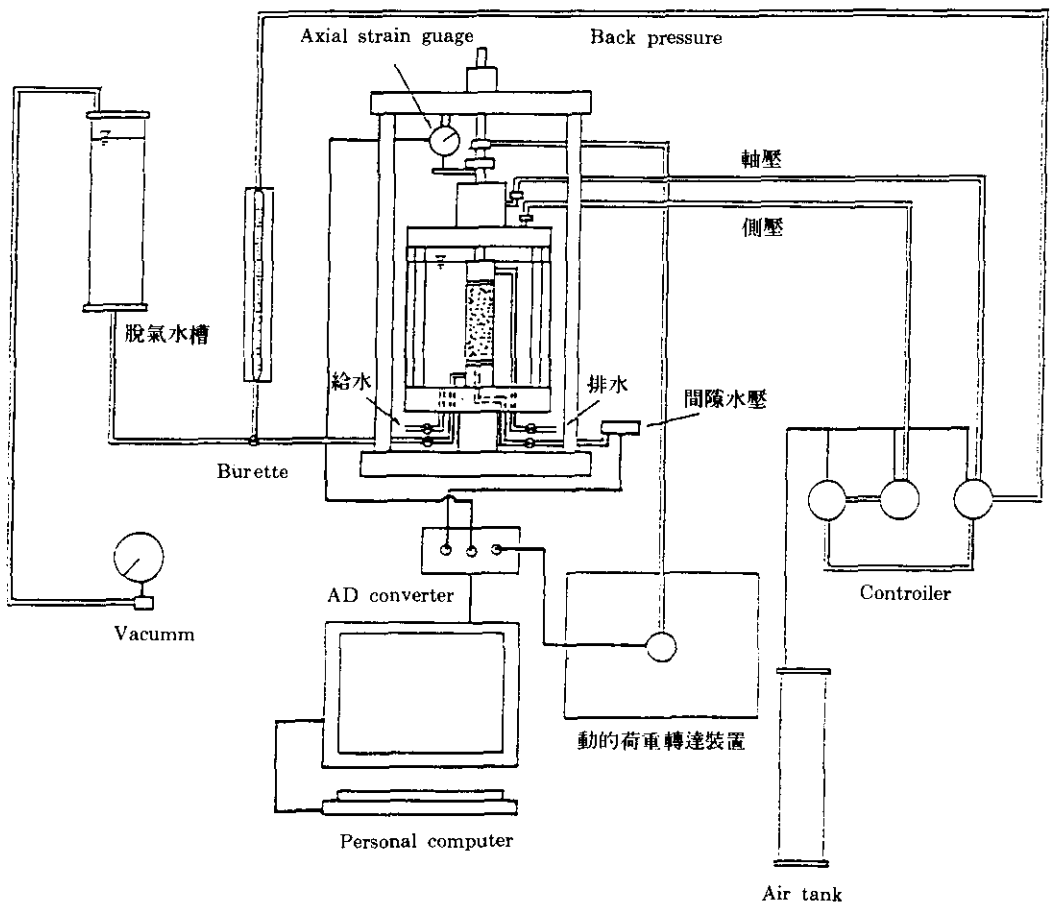


그림1. 실험장치의 개략도

2.1 실험장치

세립분을 포함하는 모래질 흙의 거동을 조사하기 위한 실험으로서 삼축압축 시험장치를 이용하였으며 비배수상태에서 반복삼축시험을 실시했다. 공시체의 높이는 12.5cm, 직경 5cm의 표준공시체를 사용하였으며, 실험장치는 공기압 제어방식으로 시험시의 아날로그 신호는 디지탈신호로 변환하여 레코더를 이용하여 기록하는 방식을 사용했다. 반복삼축시험시의 재하중의 유효응력을 변화상황을 보다 상세히 알아내기 위하여 실험으로부터 얻어지는 데이타를 컴퓨터의 입력자료로 변환시키는 AD Converter를 이용하여 한 주기동안 50개의 유효응력 값을 읽어들일 수 있었다. 그림1에 실험장치의 개략도를 나타내었다.

2.2 시험시료

시료는 일본의 豊浦(토요우라)표준사의 제조중에 생긴 세립분중에서 실트분만을 채취하여 豊浦표준사와 혼합함으로써 실트를 포함하는 모래를 인공적으로 만들었다. 표1에 시료의 물리적 성질을 나타냈다. 본 시험에 사용한 실트는 앞서 말한 바와 같이 豊浦표준사 제조중의 세립분으로부터 점토분을 제거한 것으로 입자의 구성광물 및 비중 등이 豊浦표준사와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 실트와 점토의 분리는 입자의 직경에 따른 침강속도의 차이 즉, Stoke's Theory를 이용하였으며 점토분 함유율이 5%이하로 될 때까지 반복시행 하였다. 그림2에는 각 시료의 입도분포곡선을 표시하였다. 혼합시료의 각 함유율은 의도한 대로 있음을 알 수 있다. 시료의 밀도는 상대밀도를 사용하였으며 각 시료의 소성지수를 구하기 위해 컨시스턴시 한계시험을 행하였지만 소성한계를 구할 수 없었기 때문에 모든 시료는 비소성(NP)으로 간주되었다.

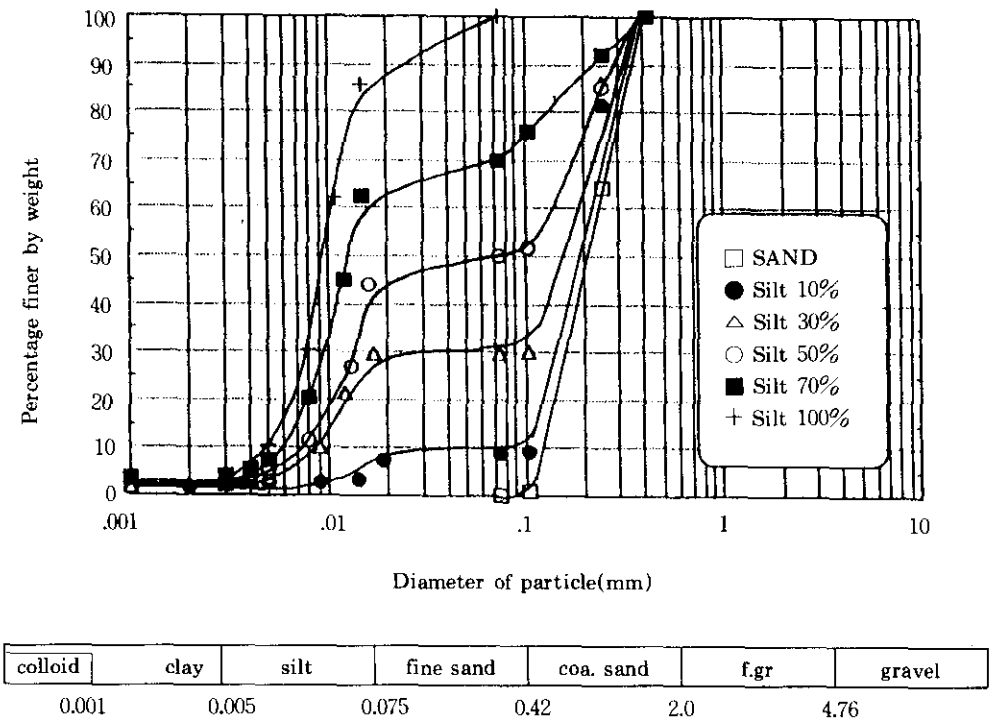


그림2. 각 시료의 입도분포곡선

표1. 각 시료의 물리적 성질

sample	D50(mm)	Gs	γ(kgf/cm^3)	plasticity index	e_{max}	e_{min}	e_{50}
sand	0.21	2.643	1.51~1.52	np	0.9567	0.5772	0.767
silt 10%	0.19	2.640	1.53~1.55	np	0.9393	0.5227	0.731
silt 30%	0.17	2.642	1.55~1.59	np	0.9061	0.4381	0.672
silt 50%	0.074	2.643	1.54~1.55	np	0.9973	0.4796	0.737
silt 70%	0.012	2.643	1.52~1.54	np	1.1962	0.5775	0.887
silt 100%	0.009	2.644	1.52~1.53	np	1.5209	0.7445	1.133

모래의 밀도를 나타내는 매개변수로는 간극비 e, 상대밀도 D_r, 여유간극비 등이 많이 사용되어지고 있다. 액상화강도 시험의 경우에는 상대밀도를 토질정수로서 사용하는 것이 일반적이며 이것은 느슨한 모래질 흙에서는 상대밀도와 액상화저항의 관계가 거의 직선적으로 비례하는 것에 근거하기 때문이다.[3]

2.3 공시체작성 및 실험순서

공시체의 작성은 250g정도의 램머로 가볍게 다지면서 상대밀도를 조정했다. 공시체의 작성방법으로는 공중낙하법, 수중낙하법, 다중낙하법 등 여러가지 방법이 알려져 있으나 여기에서는 모래입자와 세립분이 공시체 제작중에 분리되는 현상을 방지하기 위해 Dry Tamping법으로 작성하였다. 공시체를 완전 포화시키기 위해 먼지 CO_2를 순환 시킨 후 탈기수(deaired water)를 순환시켜 시료를 포화시켰다. 그 다음 1.0kgf/cm^{2}의 압력으로 압밀시켰다. 상대밀도 50%의 시료에는 Back Pressure를 1.0kgf/cm^{2}의 압력으로 가했으나 실트분 함유율 70%이상의 시료는 완전포화되지 않을 것을 고려하여 Back Pressure를 2.0kgf/cm^{2}까지 가했다. 압밀시간은 3~36시간에 걸쳐 충분히 압밀시켰으며 Skempton의 B치는 0.96이상의 것 만을 완전포화상태로 간주했다. 실험종료후 공시체중의 실트분이 균등하게 분포하였는지를 살펴보기 위해 공시체를 3등분하여 각각의 실트분 함유량을 측정한 결과 거의 균등하게 분포하고 있음을 알 수 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 실트를 포함하는 시료의 액상화강도

그림3에 각 시료의 반복단순전단시의 액상화응력비와 반복회수의 관계를 나타냈다. 일반적으로 액상화강도를 구하는 경우에는 간극수압이 상승하여 구속압과 같아진 시점을 초기액상화로 판단하는데, 본 연구에서는 실트 함유율을 바꾸었을 경우의 초기액상화 판단이 어려운 점을 고려하여 양진폭변형률 5%일 때를 초기액상화로 판단하였다. 또한 반복하중의 주파수는 0.1Hz, 파형은 sine파로 재하하였다.

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.[4] 그러나 본 연구에서는 실트분함유율 30%까지는 액상화강도가 서서히 감소하고 실트분함유율 30%이상부터 재차 증가하는 경향이 나타났다. 이와 같은 결과를 보다 알기쉽게 그림2에 나타냈다. 그림 2는 반복하중회수 20회에서의 액상화에 필요로 하는 전단응력비 R_{20}과 실트분함유율의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 전단응력비는 구속압에 대한 전단응력의 비를 말한다. 이 그림으로부터 실트분함유율의 변화에 따른 액상화강도의 변화가 파악가능하다. 액상화강도는 실트분함유율 30%에서 가장 작게 나타나고 있으며, 그 원인으로서 다음과 같은 이유를 들 수 있다. 첫

째 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 크게 없을 것으로 판단 되어 진다. 둘째는 세립분함유율의 증가에 따른 다이러턴시 특성의 차이에 그 원인이 있다고 판단 되어 진다. 즉, 모래입자 사이에 모래보다 작은 실트입자가 적당량 포함되어 있으면 입자간의 맞물림(interlocking)이 풀어지기 쉽게 되어 액상화강도가 저하되는 것으로 판단 되어 진다. 하지만 실트분함유율 30%이상이 되면 모래입자사이의 실트분 영향이 약해짐과 동시에 실트입자끼리의 맞물림이 생겨 액상화강도가 약간 상승하는 것으로 추측되어 진다.

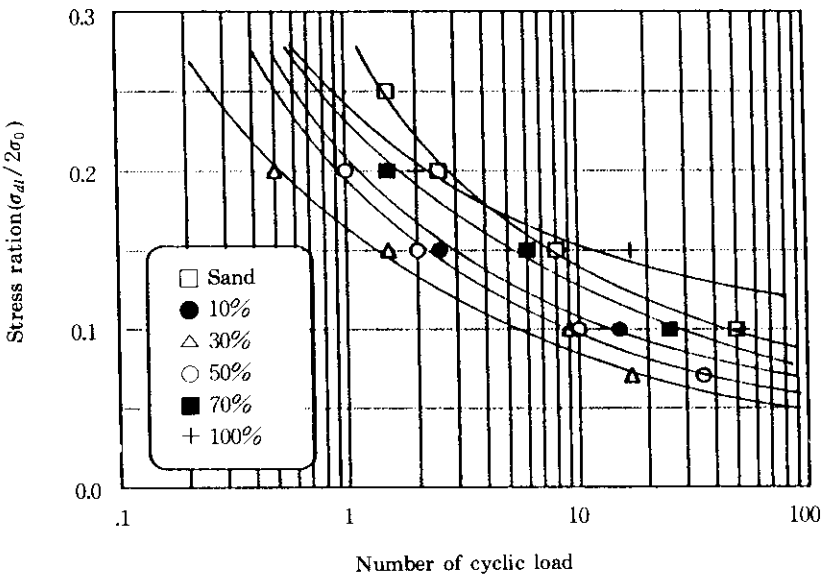
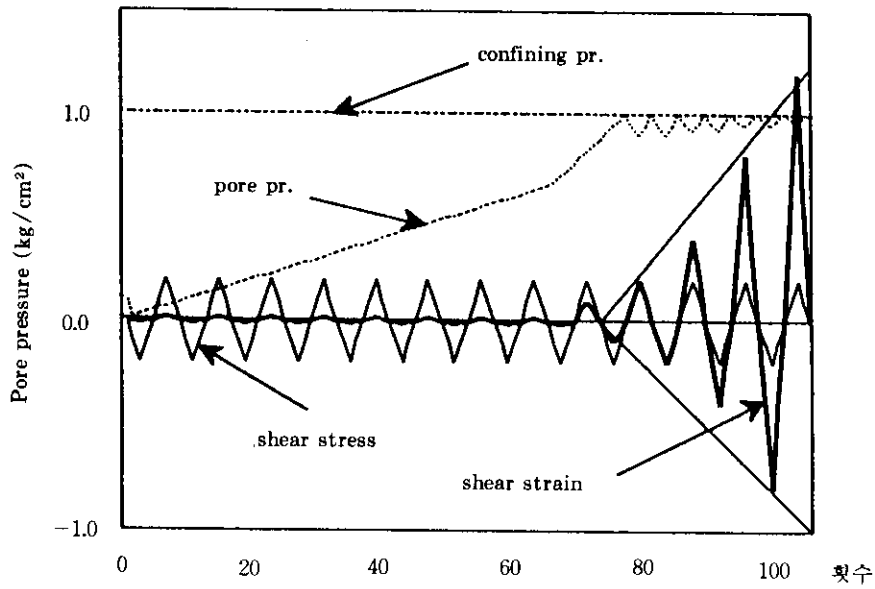


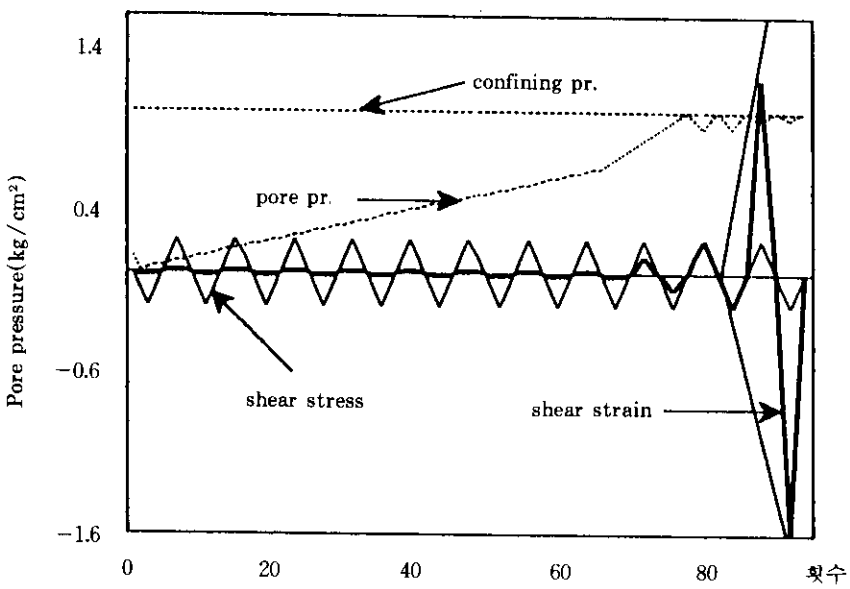
그림3. 각 시료의 액상화강도 곡선

그림4는 반복하중에 의한 간극수압의 상승과 전단변형률의 발생예를 나타내고 있다. 그림 4(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 다이러턴시 효과를 뒷받침하는 것으로 생각되어 진다.

그림 5는 순수한 모래, 그림 6은 실트를 포함하는 모래의 상대밀도 50%일 때의 유효응력 경로를 나타내고 있는데, 그림 5의 경우는 유효응력 약 0.15kgf/cm² 까지는 한번의 반복하중에 0.12kgf/cm²씩 감소함을 알 수 있다. 그러나 약 0.3kgf/cm²를 넘어서는 급격하게 감소하고 있다. 그후 유효응력이 영에 접근하여 일단 영이 되고난 후, 전단응력의 증가와 함께 약간 회복하여 어느정도의 유효응력을 갖는다. 이와 같이 유효응력이 영이 된 후 다시 회복하는 현상은 입자간의 정의 다이러턴시에 기



(a) 순수한 모래



(b) 실트를 30% 함유한 모래

그림4. 전단변형률의 발생양상

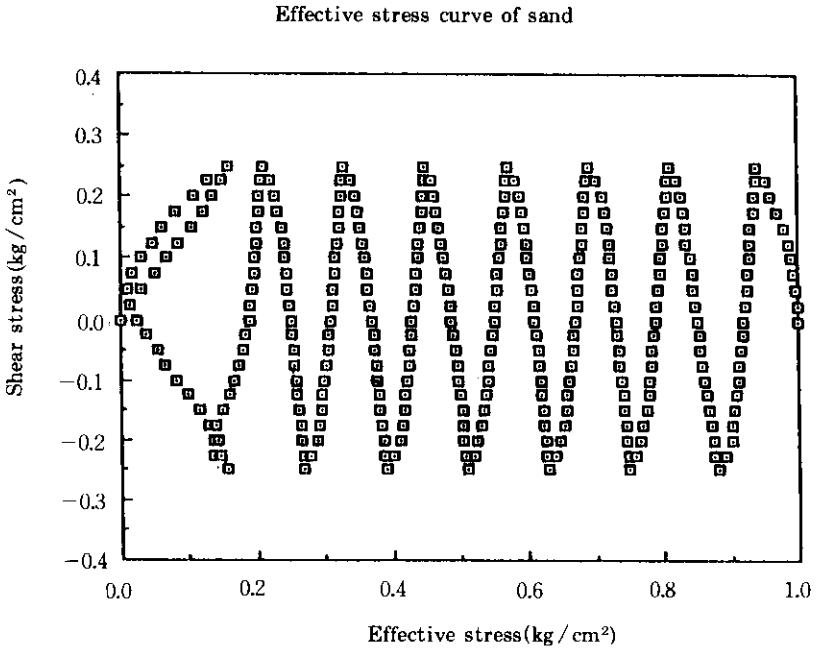


그림5. 반복하중을 받는 모래의 유효응력 경로도

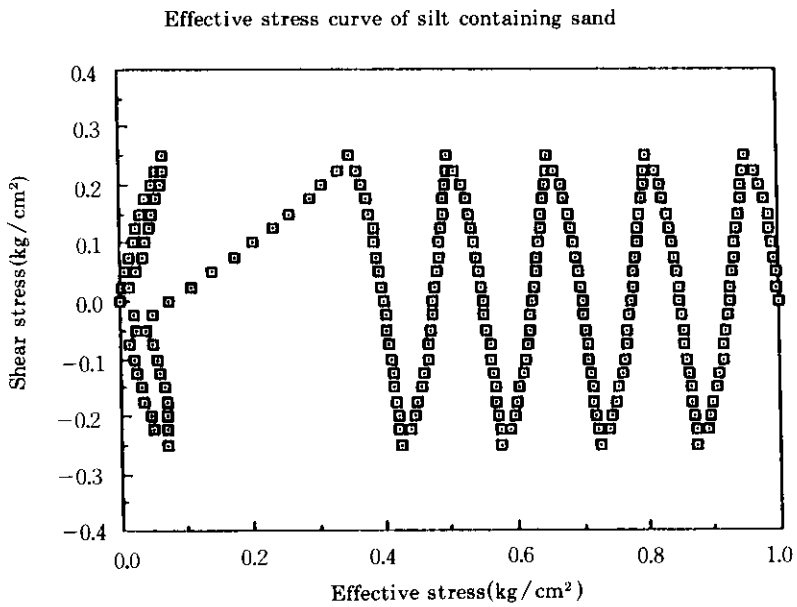


그림6. 반복하중을 받는 실트 30% 모래의 유효응력 경로도

인하는 현상으로 시료의 밀도와 깊은 관계를 갖고 있다.

한편, 실트를 30% 포함하는 모래의 경우는 순수한 모래의 경우와 비교하여 간극수압의 급증점까지는 거의 비슷한 경로를 보이나 간극수압 급증점의 유효응력이 크다는 것이 특징이다. (그림 6) 또한 유효응력이 한때 영으로 되고난 후 회복도 순수한 모래의 경우 0.2kgf/cm²정도인 것에 비하여 실트를 포함하는 모래의 경우에는 0.1kgf/cm²정도 였다. 이와 같은 결과로 부터 밀도가 일정한 경우에는 입경이 작은 입자가 적당량 포함되어 있는 경우가 정의 다이리턴시가 작은 것으로 예상된다.

3.2 재하속도를 변화시켰을 때의 액상화 강도

그림 7은 재하속도의 변화에 따른 실트를 함유한 모래의 액상화강도(액상화를 일으키는데 필요한 전단응력의 크기)와 점토를 함유한 모래의 액상화강도를 나타낸 것이다. 전체적으로 액상화강도가 증가하는 현상은 세립분의 함유량에 근거하는 것으로 판단되어지며, 입자간의 소성지수에 비례할 것이다. 여기서 사용하고 있는 세립분은 실트이며, 점토의 경우에 있어서의 기존의 결과와 비교해 볼 때 재하속도의 증가에 따른 강도의 증가폭이 더 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

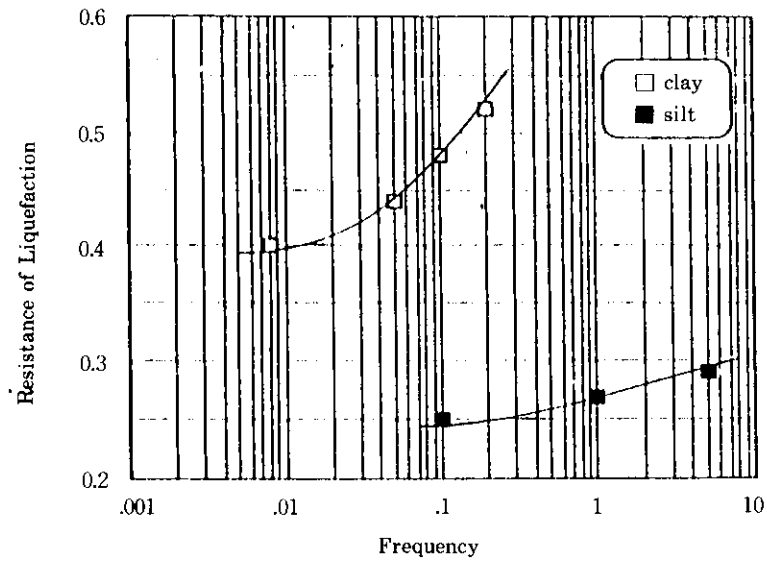


그림7. 실트와 점토에 미치는 재하속도의 영향

재하속도의 증가에 따라 강도가 변화하는 현상은 반복하중을 재하하는 동안의 유효응력 경로의 변화상황으로 부터 설명되어질 수 있다.[5] (그림 8)부터 (그림 10)은 0.1Hz, 1Hz 및 5Hz에서의 유효응력 경로를 나타내고 있다. 순수한 모래의 경우의 유효응력 경로는 재하속도에 관계없이 같은 응력경로를 나타냈다. 실트를 포함하는 모래의 경우는 압축측에서는 크게 변화가 없었으나, 신장측에서는 전단응력의 최대점 부근에서의 간극수압의 발생량이 현저하게 다르다. 그림 8은 0.1Hz일 때의 실트분함유율 30%의 시료에 대한 유효응력 경로도인데, 신장측의 전단응력비 0.2에서 0.3까지는 급격히 증가하고, 한 사이클당 0.2kgf/cm²정도의 증가를 보였다. 그러나 그림 9에서 나타나는 것처럼 1Hz에서는 전단응력비 0.25로 부터 커지며, 한 사이클당의 간극수압의 증가도 0.05 kgf/cm²정도이다. 한편 그림 10은 주파수

5Hz의 경우인데 압축측의 경우와 마찬가지로 신장측의 간극수압의 급격한 증가는 전혀 나타나지 않고 변상점까지 평균적인 증가를 보였다. 이러한 결과로 부터 실트를 포함하는 모래에 대한 재하속도의 영향은 전단응력의 피크부근의 급격한 간극수압의 증가에 의한 것으로 판단되며, 신장측의 유효응력의 변화는 다음과 같이 설명될 수 있다.

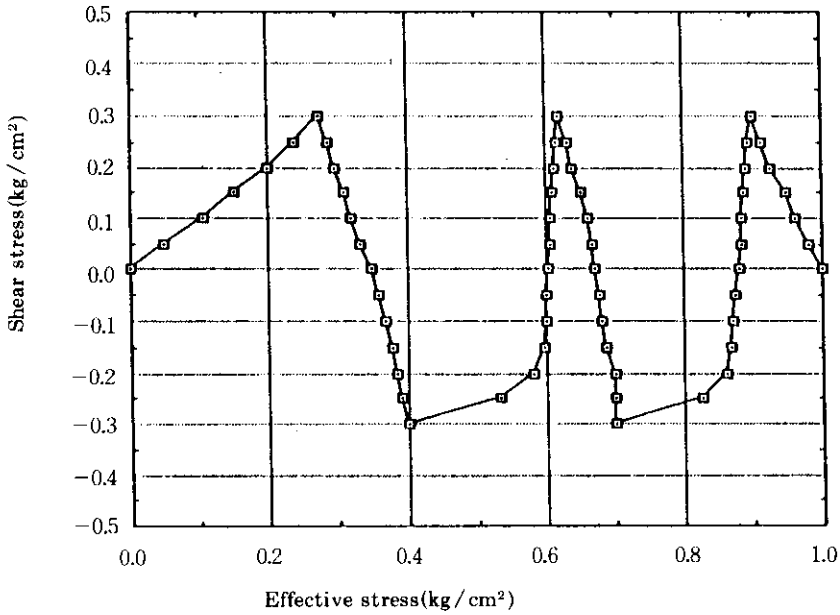


그림8. 실트 30% 모래의 유효응력 경로도(0.1Hz)

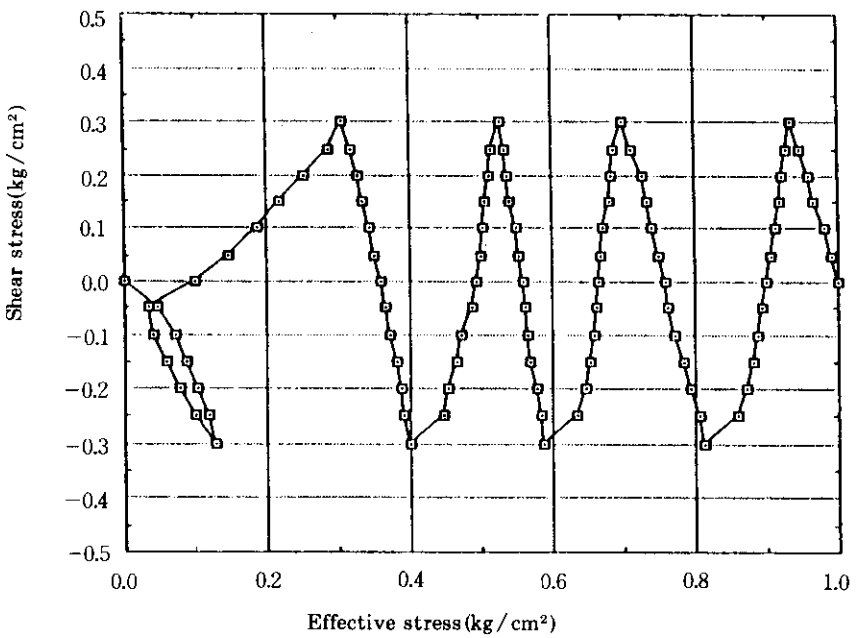


그림9. 실트 30% 모래의 유효응력 경로도(1Hz)

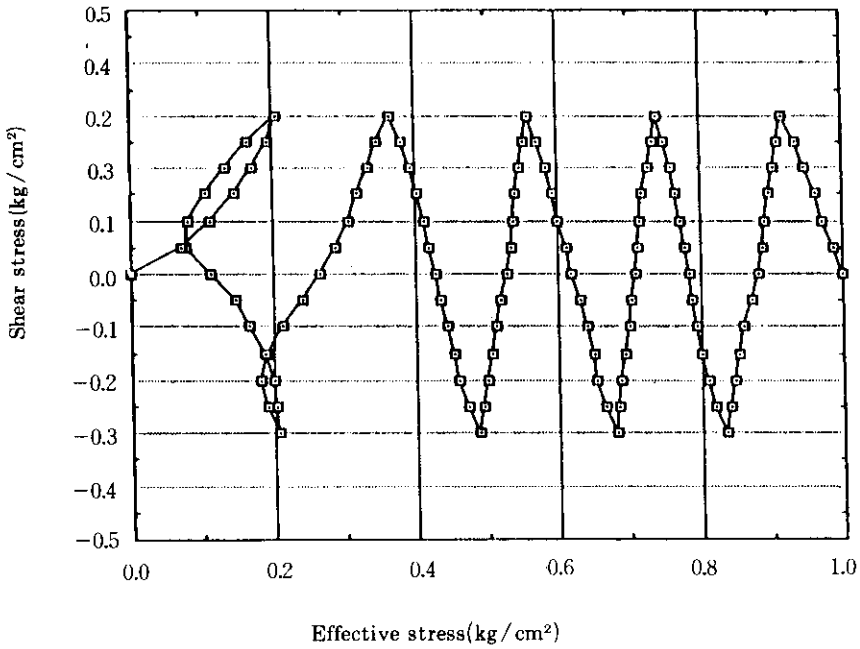


그림10. 실트 30% 모래의 유효응력 경로도(5Hz)

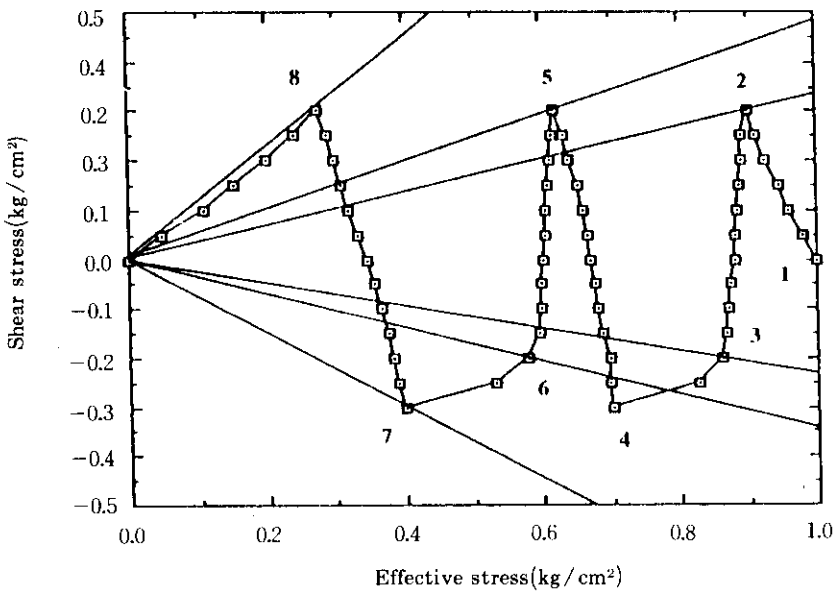


그림11. 실트 30% 모래의 유효응력 경로도에 항복곡선을 적용시킨 예

아래의 식1로부터 압축측과 신장측의 기울기는 이론상 거의 3:2.5의 비례관계이므로 직선으로 근사할 수 있다고 하면 그 직선의 확장은 그 비율로 발생한다고 생각할 수 있다.

$$M = \frac{6\sin\phi'}{3-\sin\phi'} \quad \cdots\cdots(1)$$

여기서 ϕ는 유효전단저항각이다.

그림 11은 압축측에서의 각 응력점에서의 항복응력을 0.1Hz의 실트분함유율 30%의 시료의 유효응력 경로도에 넣은 것이다. 그림의 점2에서의 압축측의 항복응력에 대응하는 신장측의 항복응력은 점3을 통과하는 직선인데 점3에서 급격히 간극수압이 증가하는 현상과 좋은 일치를 보이고 있다. 마찬가지로 점5와 점6에 대해서도 신장측의 항복응력과 간극수압의 급증시기는 매우 잘 일치하고 있다.

3.3 반복전단을 받을 때의 간극수압 발생상황

실트분의 함유량이 다른 각 시료의 간극수압 발생의 차이를 살펴보기 위해 한 사이클당의 간극수압의 증분을 읽어들여 반복회수와의 관계를 나타낸 것이 그림 12이다. 이 그림은 횡축에 현재의 반복하중 횟수 N을 액상화까지의 반복하중 횟수 N_l로 정규화 한 값(N/N_l)을 취하고, 종축을 구속응력 σ_0에 대한 현재의 간극수압비(U_g/σ_0)를 잡아 액상화까지의 간극수압의 증가상황을 나타낸 것이다. 윗 곡선으로부터 간극수압 발생의 초기상태에서는 실트분 함유율 30%의 시료가 가장 큰 비율로 증가하고 있다. 그후(N/N_l)의 값이 0.1에서 0.9정도까지는 각 시료 모두 거의 직선적으로 간극수압이 증가하고 있다. 간극수압이 구속응력의 90%를 넘어선 시점에서는 각 시료 모두에서 급격한 증가를 보였다. 이 결과로 부터 최초의 몇 번의 반복하중에 의한 각근 수압의 증분의 크기가 액상화강도와 밀접한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

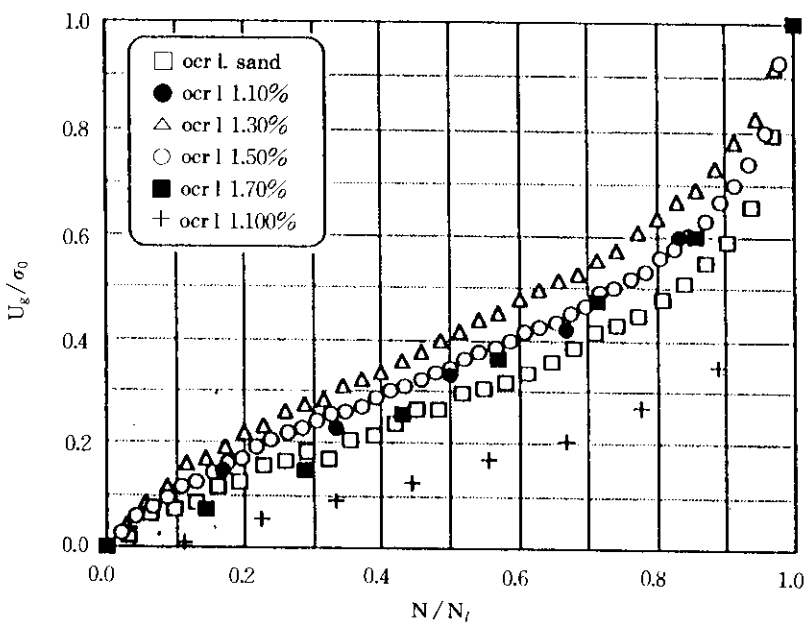


그림12. 각 시료의 간극수압 증가곡선(정규압밀 상태)

한편 이와 같은 간극수압의 상승은 Seed 등이 제안한 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.[6]

$$\frac{U_g}{\sigma'_0} = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{N}{N_l}\right)^{1/2\alpha}$$

여기서 α는 모래의 성질과 시험조건에 의해 결정되는 계수인데, 본 실험결과의 각 시료의 간극수압 상승곡선과 가장 유사한 곡선의 α치를 구하여 나타낸 것이 표 2이다. 정규압밀시의 간극수압 상승곡선과 과압밀시의 간극수압 상승곡선을 비교해보면 과압밀시의 간극수압 상승은 전반적으로 정규압밀의 경우보다 낮으며, 그 증가의 경향이 정규압밀시의 실트분 100%의 경우와 유사하다. 그림 13에 과압밀시의 간극수압 상승곡선을 나타냈다.

표 2. Seed 모델의 계수 α치

시료	α
sand	3
silt 10%	1.8
silt 30%	1.4
silt 50%	1.6
silt 70%	2
silt 100%	4

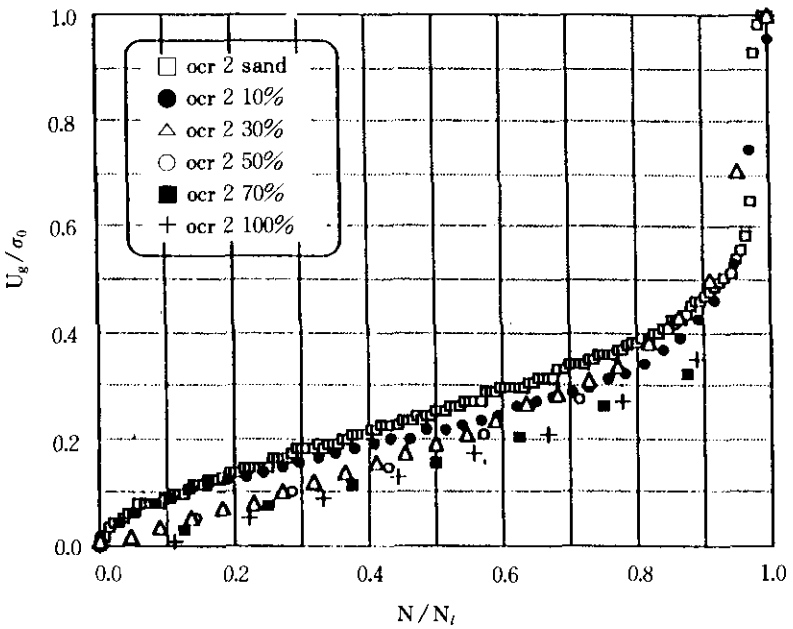


그림13. 각 시료의 간극수압 증가곡선(과압밀 상태)

본 연구에서는 실트분을 포함하는 모래에 대하여 비배수반복압축시험을 실시하여 실트분 함유량이 액상화강도에 미치는 영향을 조사했다. 본 연구로부터 얻어진 주요한 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 세립분을 포함하는 모래의 액상화특성을 검토하기위해 低塑性의 실트를 포함하는 모래에 대하여 혼합비를 변화시켜 실험한 결과 최대, 최소간극比 모두 혼합비가 30%의 경우가 가장 작으며, 상대밀도가 같은 경우 실트분함유율 30%의 시료가 가장 낮은 액상화강도를 나타냄이 판명되었다.
2. 실트분함유율 30%의 시료가 가장 낮은

액상화강도를 나타내는 것은 입자간의 다이러턴시에 의한 저항력이 가장 작음에 그 원인이 있다.

3. 실트를 포함하는 모래질 흙의 경우 재하속도의 영향은 실트의 함유량이 많을수록 커지나 점토질 흙에 비해서는 훨씬 작게 나타난다.
4. 간극수압의 증가는 신장측의 항복응력을 넘어선 순간부터 급증하여 이 부분이 재하속도의 변화에 따른 액상화강도의 변화를 야기시킨다.
5. 실트를 포함하는 흙의 액상화강도는 반복하중의 초기상태에서의 간극수압의 증가량에 비례하여 나타난다.

참 고 문 헌

1. 吉見吉昭 "砂地盤の液狀化" 技報堂出版 156p.
2. 柳澤榮司, 森 伸一郎,(1990) "1989年 Loma Prieta 地震における液狀化現像について", 第45回年次學術講演會概要集 / Ⅲ, pp.690~691
3. De Alba, P., Seed, H.B.,Chan, C.K.,(1976) "Sand liquefaction in Large-Scale Simple Shear Tests", Jour. of Geotech. Eng.Div., ASCE, Vol.102, No.GT9, pp.909-927.
4. 森 伸一朗, 沼田淳紀, 境野典夫, 長谷川昌弘, (1991) "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.
5. Ishihara, K., S.Okada, "Effects of Stress History on Cyclic Behavior of Sand, Soils and Foundations, Vol. 18, No.4, pp.31~45.
6. Seed, H.B., R.M.Pyke, G.R.Martin(1978) "Effects of Multidirectional Shaking on Pore Pressure Development in Sands", Journal of ASCE Vol.93, No.SM4, pp325-353
7. 黃 大振, 柳澤榮司, 菅野, 高弘,(1993) "シルトを含む砂のせん斷特性について, 日本土木學會論文集, No.463 Vol. 111-22, pp25~33.
8. 黃 大振, 柳澤榮司, 菅野 高弘, 川邊 英昭(1992), "シルトを含む砂の液狀化強度に及はす載荷速度の影響", 第27回土質工學 研究發表會概要集, Vol.1/2-308, pp.849~850.

(접수일자 1994. 9. 26)