

동적단순전단 시험기를 이용한 매립지반 거동특성에 관한 연구 A study of dynamic peoperties in cyclic simple shear test

김성진¹⁾, Sung-Jin Kim, 유정호²⁾, Jeong-Ho Ryu, 박요환³⁾, YoHwan Park, 김진만⁴⁾, JinMan-Kim

¹⁾ 부산대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng, Pusan National University

²⁾ 부산대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng, Pusan National University

³⁾ 부산대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng, Pusan National University

⁴⁾ 부산대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Eng, Pusan National University

SYNOPSIS : Cyclic simple shear test apparatus was used to investigate the dynamic response of liquefiable soils as reclamation material. The specimen were reclamation using simple air-pluviation method. The confining stress was applied the range of 100 kpa to 200 kpa. The resulted strain was in the range of 10^{-3} ~ 5 %. Based on these test results modulus reduction curve, damping curve and cyclic strength curve were developed. The developed curves were compared to those already available in literature. The obtained curves can be applied to FEM or equivalent linear analysis such as SHAKE for ground response analysis.

Key words : reclamation material, dynamic laboratory test apparatus, modulus reduction curve, damping curve

1. 서론

최근 해안공간의 필요성 증대에 따라 매립지반 조성이 활발히 이루어지고 있다. 그러나 매립지반의 내진성능 확보에 대해서는 연구가 부족한 실정이며 이에 대한 연구가 필요한 시점이다.

본 연구의 목적은 DSS(direct simple shear)를 이용하여 사질토가 포함된 해안 매립지반의 동적거동 특성을 조사하는데 있으며 동적시험기를 개량하여 보다 정확한 실험결과를 도출해 내는 것을 주된 목표로 한다. 이를 통하여 실제 시공시의 육상/해상 연약지반 개량공법에 의한 내진성능 보강기술을 확보하는데 필요한 내진설계 가이드라인을 제시하고자 한다.

본 연구에서는 해안 매립재로서의 동적특성 연구를 위한 실험대상지반을 사질토 지반으로 조성하였으며 반복 단순전단시험기를 이용하여 동특성을 파악하였다. 사질토지반의 전단계수, 탄성계수, 그리고 감쇄비 등을 다양한 상대밀도에 따라 시험을 수행하였다.

시험 제작시 진동다짐법(DIN18126)을 적용하였으며 공시체를 전단링의 직경과 높이에 맞게 성형하였다. 전단링을 사용하는 기존의 DSS시험기에 NGI(Norwegian Geotechnical Institute) 타입의 보강 멤브레인을 장착시킬 수 있도록 개선함으로써 동일한 시험에 대하여 SGI(Swedish Geotechnical Institute)타입과 NGI타입의 실험결과를 비교할 수 있도록 하였다. 특히 SGI 타입을 이용한 사질토 실험에 있어서 시험과 전단링 사이에 공간을 줄이기 위하여 멤브레인 자켓을 제작하였다. 시료의 높이를 일정하게 조성하기 위하여 진공을 이용한 높이가 조절 가능한 흡입장치를 설치하였고, 흡입시 사질토 시료가 진공펌프내로 유입되는 것을 방지하기 위하여 필터를 설치하였다.

SGI 타입은 기존 NGI 타입과는 달리 constant volume control을 통해 시험을 수행하는 동안 실시간으로 수직유효응력을 확인하여 체적을 조절하는 시스템이다. 체적의 변화를 이용하여 간극수압을 측정

하기 때문에 사질토나 점성토 시험시에 따로 간극수압계를 설치할 필요가 없다.

기존 SGI 타입은 사질토 시료의 공시체 제작이 어려워 주로 점성토 등에서 사용되었다. 또한 SHEAR TRAC 자체가 전단시험용으로 개발되었기 때문에 반복시험에서는 여러 가지 문제점이 있었다. 그러나 많은 시험을 통하여 문제점을 해결하였고, 동적시험장치들을 개선함으로써 사질토에서도 만족할만한 결과를 얻어낼 수 있었다.

2. 시험장비

본 시험에 사용된 시험장치는 Shear Trac II-DSS로서 GEOCOMP사에서 개발된 SGI 타입의 시험장비이다(그림 1). DSS 장비는 압밀시의 정적 전단 시험과 동적 반복전단시험에 대한 완전 자동화 시스템을 갖추고 있으며 압밀단계와 전단단계의 제어로 이루어져 있다.

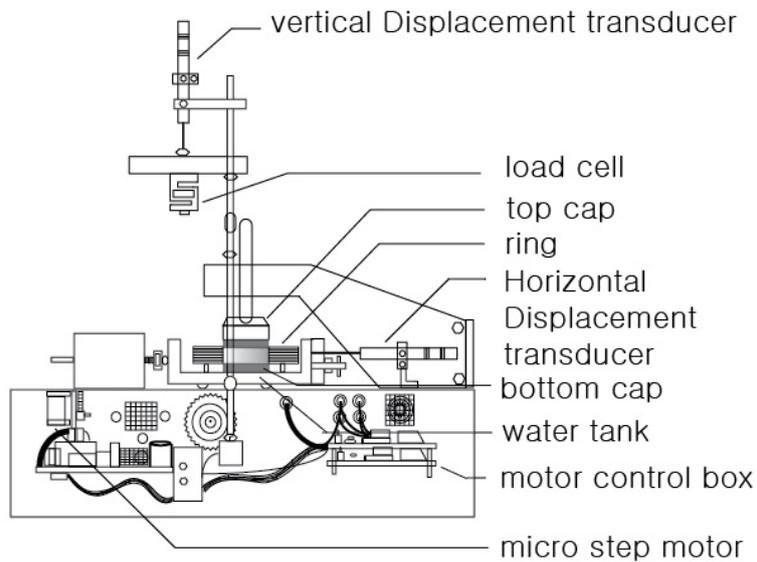


그림 1. Direct simple shear 장비의 개요

이 시스템은 1966년 Bjerrum과 Landva에 의해 만들어진 NGI(Norwegian Geotechnical Institute) 타입을 바탕으로 개발되었으며, 흙의 단순전단시험 및 액상화시험의 수행이 가능하다. 공시체에 대해 초기응력과 응력경로를 삼축시험과 같은 간접시험보다 현장조건에 가깝도록 시험을 수행할 수 있다는 장점이 있다. 균일한 전단응력을 공시체에 전달하며, 시험중에 변화하는 연직하중 축변형, 전단하중을 일정하게 제어하여 보다 안정적인 실험을 결과를 제공한다.

연직하중과 수평하중은 속도조절이 가능한 마이크로 스텝모터에 의해 가해지며 기계내에 설치된 motor controller에 의해 조절된다. 이 시스템은 압밀하중에 대하여 총 32단계의 조절이 가능하며 또한 수평하중에 대한 변화율의 범위 지정비율과 내부응력 하중단계에 대한 적용이 가능하며 반복 단순전단 동안 일정한 체적의 피드백을 통하여 수직변위감지기에 의한 폐회로 컴퓨터 통제장치로 유지한다. 또한 시험중의 전단과 수직하중의 상태가 실시간으로 그래픽으로 표시되고 모니터링이 가능하다. 시스템의 시험단계별 과정 및 조건을 설정가능하며 기계적 전자적 과정 수행과정에서 나온 공학적 데이터는 자동적으로 그래프화 및 파일화 되어 저장된다(ASTM standard D 6528).

3. 시편 제작

3.1 낙동강 모래의 입도분포

시편의 성형에 앞서 현장지반의 함수비와 단위중량 및 입도의 분포를 알아보기 위하여 기본 물성시험을 수행하였다. 공시체 제작용 시료로는 낙동강 하류에서 직접 채취한 낙동강 모래를 사용하였다. 낙동강 모래의 입도분포는 그림2와 같으며 균질한 모래이다.(그림 2).

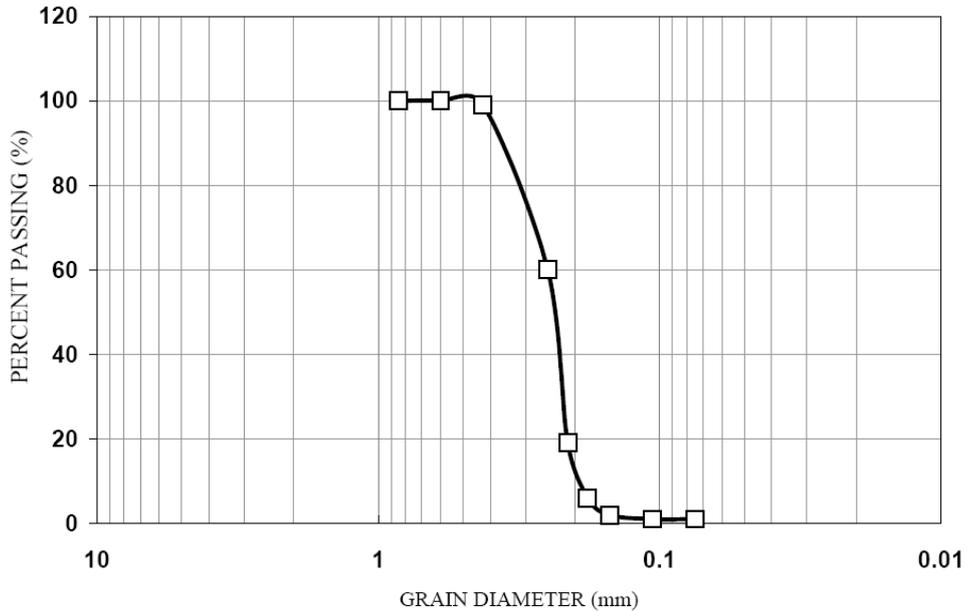


그림 2. 낙동강 모래의 입도분포

3.2 상대밀도

사질토 지반의 역학적 특성은 입자의 상대밀도에 따라 달라지며 이를 위하여 최대간극비와 최소간극비를 실내시험으로 구하였으며 표1과 같다.

표 1. 낙동강 모래의 상대밀도 특성

최대간극비 (e_{max})	1.350
최소간극비 (e_{min})	0.671
비중 (G_s)	2.66

상대밀도별 시료의 동적특성을 알아보기 위한 시험으로써 최대건조밀도 시험을 수행하였다. 최대건조밀도 시험시 다짐방법으로는 과소다짐법을 적용하였으며, DIN 규정에 준하여 진동다짐기를 사용하였으며 그림 3과 같다.

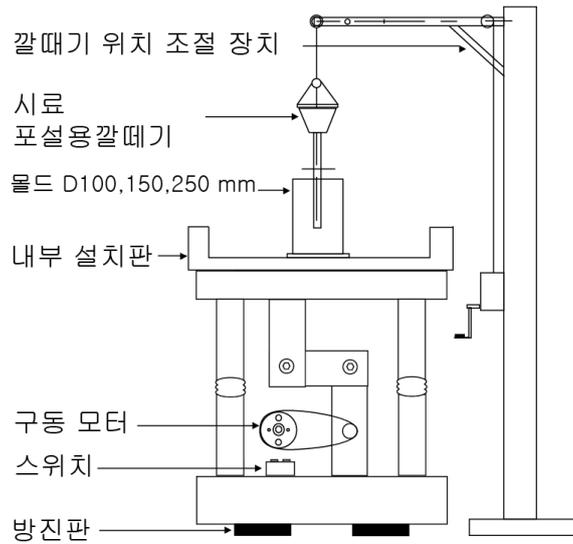


그림 3. 시료다짐을 위한 진동다짐기

DIN 규정에 따르면 진동다짐기의 경우 몰드 직경이 100, 150, 250mm 인 몰드를 사용하여 1회에 최소한 50, 60, 120mm씩 시료높이를 높여가면서 그림과 같은 장치를 이용하여 10 kN/m^2 의 상재 하중을 가한 상태로 다진다. 진동테이블은 50Hz 주기로 상하 진동하고 몰드 고정 장치가 있어야 하며 2.5kN을 가할 수 있어야 한다. 상하진폭은 초기에 1.4mm 이어야 하고 진동 중에는 1.7mm 를 초과하지 않아야 한다. 이 진폭은 직경 250mm 몰드기준이며 직경 100,150mm몰드는 보정해서 적용해야 한다. 진동기는 중단명령 후 1.5초 내에 진동을 중단할 수 있어야 한다. 저울은 시료무게의 0.01g감도의 저울을 사용하였고 내부 설치판은 두께 40mm, 직경100mm이고 시료포설용 깔때기는 60° 각으로 관경이 12~50mm 인 것을 사용한다.

3.3 시편성형

시편 성형시에는 현장지반조건에 맞추어 시료를 조성하고 5층 과소 다짐법(under-compaction method) 을 이용하여 시료를 성형하였다. 과소다짐법은 시료높이에 차이를 두어 다짐을 함으로써 아래 층과 윗 층이 동일한 건조 단위중량을 확보할 수 있는 방법이다(Ladd, 1978).

본 연구에서는 유효연직응력에 따른 동적거동특성을 파악하고 또한 매립지반의 동적특성을 파악하기 위하여 유효연직압밀응력이 100kpa인 상태에서 느슨하고 조밀한 지반조건에 해당되는 상대밀도 약40% 와약80%에 대하여 SGI 타입의 반복단순전단시험을 수행하였다.

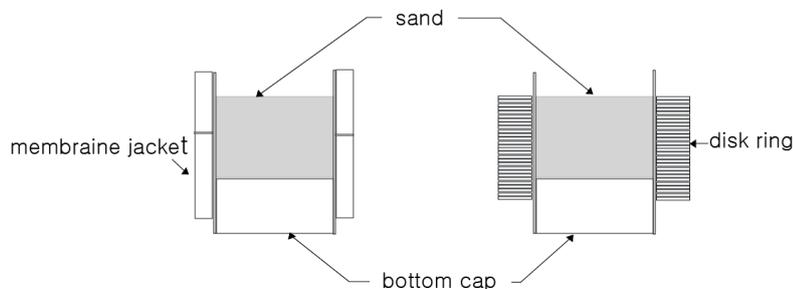


그림 4. 시료성형

반복단순전단시험에 있어서의 가장 중요한 고려사항은 시험용 시편의 제작이며 불교란 시료를 이용한 시험용 시편은 사실상 매우 어렵기 때문에 교란된 시료를 이용하여 시편을 성형하였다. 시료 성형방법이 시험 결과에 영향을 미친다는 것은 잘 알려져 있다(Mulilis, 1977). 그러나 국내의 사질토에 대한 연구결과는 부족한 실정이며 시료의 공시체 제작방법이 연구자 마다 상이하고 KSF(한국토목산업규격)등의 규정에도 동적시험시에 대한 규정이 없기 때문에 DIN(18126) 규정을 기본으로 시편을 제작하였다. 그리고 SGI형 단순전단시험기의 결과를 NGI 타입과 비교하기위해 GEOCOMP사의 shear trac에 전단 링 타입과 보강멤브레인 타입을 같이 장착하여 실험하였다.

(a) (b) (c)

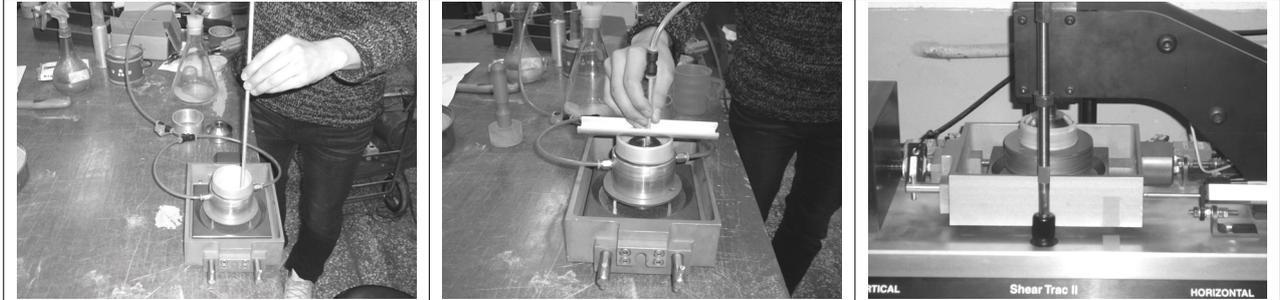


그림 5. a)사질토성형(dense); b)사질토성형 (loose);c)시료 셋팅 완료

특히 SGI형 단순전단시험기의 경우 디스크를 사용하기 때문에 디스크안의 내경과 멤브레인을 씌운 후의 사질토 공시체 외경이 디스크의 내경과 양쪽으로 1mm 오차 이내로 근접하여야하고 디스크 내형이 원형이므로 공시체 또한 bottomcap 과 topcap 이 완전히 일치하여야 한다. 조밀한 사질토의 경우 멤브레인 자켓 안에서 원형 강철관을 이용하여 높이 50cm에서 모래를(그림5(a)) 낙하시킨 후 진동을 주어 조성하였고 느슨한 사질토의 경우 자켓안에서 5cm낙하 시킨후 원시료 높이보다 조금 높게 조성한 후 진공관과 필터를 이용한 진공펌프 형식을 이용하여 빨아들여 시료높이를 맞추는 방법으로 조성하였다. 사질토 상대밀도는 무게로 조정하였으며 CSR(축응력대전단응력비) 값은 GEOCOMP SHEAR CYCLIC 프로그램을 이용해 조절하였다.

4. 시험결과

4.1 시험방법

구속응력은 100kpa와200 kpa중에 일반적으로 100kpa에서 실험하며 일정체적제어를 유지한다.최대전단변형률은 삼축시험은 5%일때 초기액상화가 일어나기 시작했다고 판단하지만 단순전단의 경우 7.5%에서 반복하중의 작용으로 인해 초기 액상화로 판단하기 때문에 void등(1996)이 제안한 7.5%를 적용하여 시험하였다. CSR(축응력대전단응력비) 값은 느슨할때와 조밀한 조건에 따라 각각 다른값을 적용하였다

표 2. 일정체적 정적 단순전단시험 느슨한 사질토의 시험조건

Sample No	Relative Density D_{rc} (%)	Strain Rate (%strain/hour)	Initial Vertical Consolidation Pressure σ'_{vc} (kPa)	Sample Preparation Method
1	40	10	100kpa	Air-Pluviation
2	40	10	100kpa	Air-Pluviation with external tapping

표 3. 일정체적 동적단순전단시험 느슨한 사질토의 시험조건

Test Series No.	Initial Vertical Consolidation Pressure σ'_{vc} (kPa)	Relative Density D_{rc} (%)	Cyclic Shear Stress Ratio (τ_{cyc}/σ'_{vc})
A1	100	40	0.15, 0.2, 0.25, 0.3

표 4. 일정체적 동적단순전단시험 조밀한 사질토의 시험조건

Test Series No.	Initial Vertical Consolidation Pressure σ'_{vc} (kPa)	Relative Density D_{rc} (%)	Cyclic Stress Ratio (τ_{cyc}/σ'_{vc})
E1	100	80	0.35, 0.4, 0.45, 0.5

5.2 동적단순전단시험 결과

표 5. 시료의 조성조건과 형상

Sample Type	Drain condition
Compaction	Vibro-compaction
Diameter	63.500
Initial Height	24.060
After Height	24.013
Area	3166.9
Initial Volume	76196.14
After Volume	76047.29

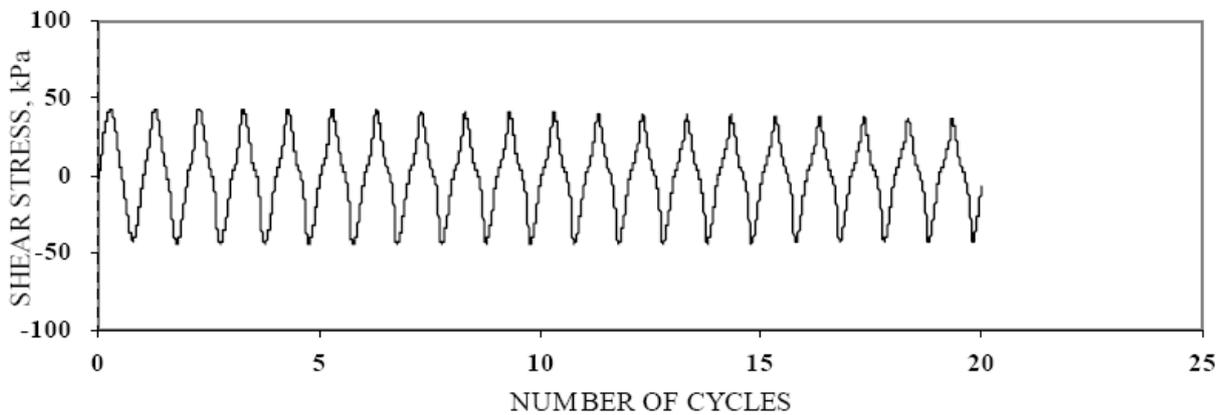


그림 8. 정현파 가진응력 진동주기는 14초당1회 주파수 0.7Hz

그림 8과 같이 일정한 amplitude 45kPa sine파의 가진응력을 가할 때 일정한 가진응력이 가해지는 것을 확인하였다. 마이크로 스텝모터를 사용하기 때문에 일어나는 언더슈팅과 오버슈팅은 느슨한 사질토

와 조밀한 사질토에서 각각 step multiplier 와 PID 값을 조정함으로써 모터와 반복단순전단시험기의 링의 진행방향에 대한 관성 및 시차를 조정하여 일정한 결과를 얻을 수 있었다.

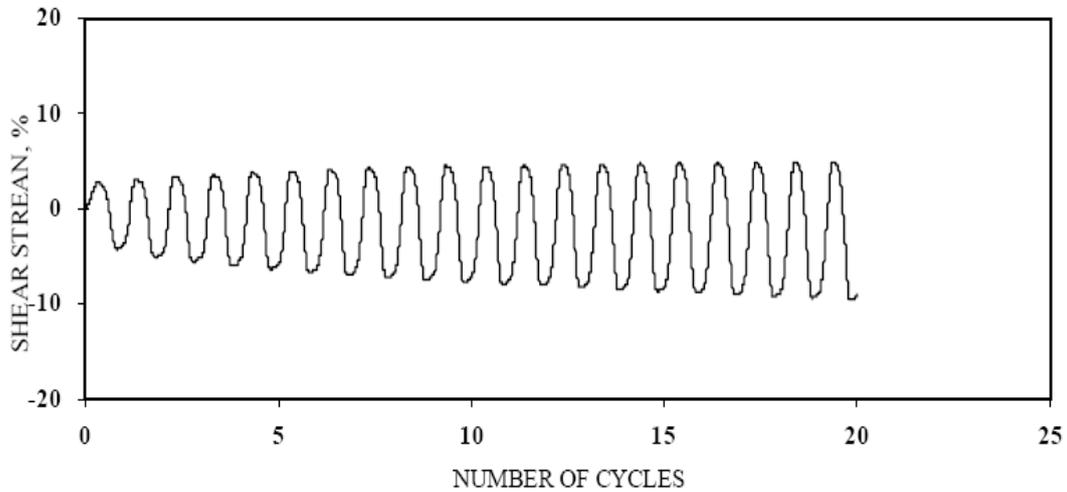


그림 9. 진동주기에 따른 전단변형률

그림 9는 진동주기에 따른 전단변형률을 나타내고 있으며 조밀한 시료의 전단변형률이 완만하게 증가하였다. 또한 정적실험과 동적실험에서 스텝모터의 속도제한을 달리 조정함으로써 중대변형률에서 일정한 수평하중을 가할 수 있었다. 그러나 스테이크 링 타입의 경우 CSR 값이 큰 경우에는 보강멤브레인 처럼 복원력이 없기 때문에 변형이 일정이상 진행하면 링 자체가 한쪽으로 기울는 현상이 발생하고 전단링 자체의 하중이 있으므로 보강멤브레인 보다 조금 높은 값에서 결과를 얻을 수 있었다.

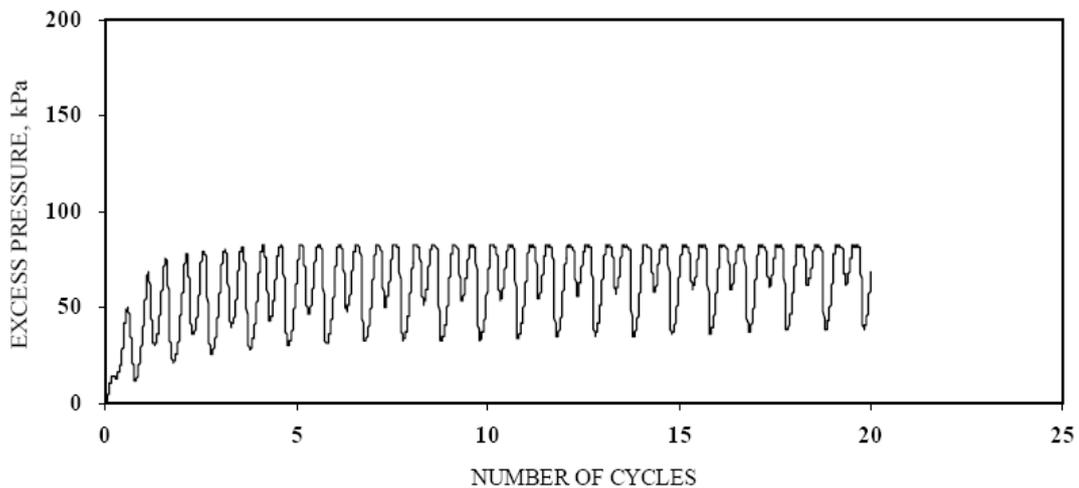


그림 10. 조밀한 시료의 과잉간극 수압

그림 10에서 볼수 있듯이 조밀한 시료의 과잉간극 수압이 증가하였다. 과잉간극수압의 경우 꾸준히 증가하여 유효압밀하중과 동일한 값을 가지게 되지만 일반적으로 80%선을 액상화가 일어나는 선으로 보고 SGI 타입의 경우 과잉 간극수압을 반복전단시 걸리는 하중을 체적으로 계산하여 역으로 산출하는 형식이므로 80%선이 적정한 한계선 이라고 보았다.

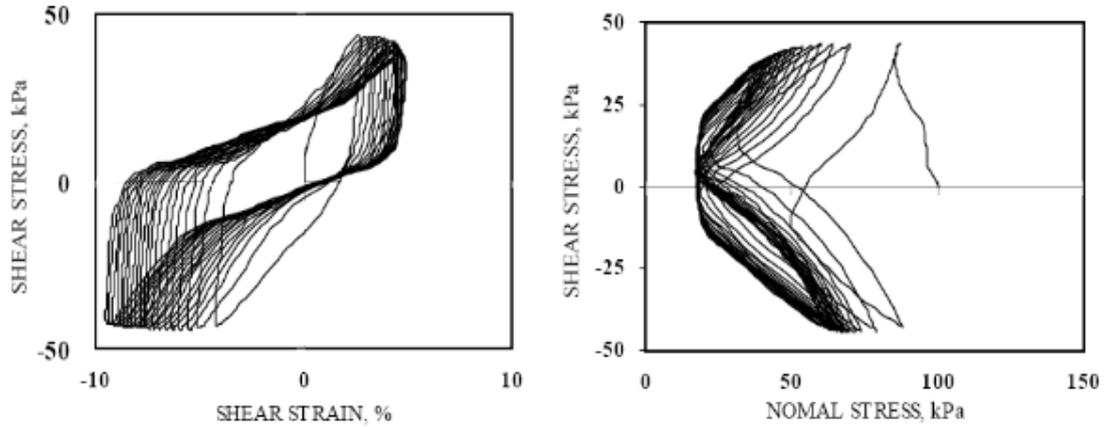


그림 11. (a)전단응력과 전단변형률(b)전단응력 과 축응력

그림 11은 조밀한 시료의 반복단순전단시험 결과(a)전단응력과 전단변형률과의 관계이며(b)전단응력 과 축응력과의 관계이다. (b)의 경우 점점 감소하며 일정한 기울기를 보이는 것을 알수 있다.

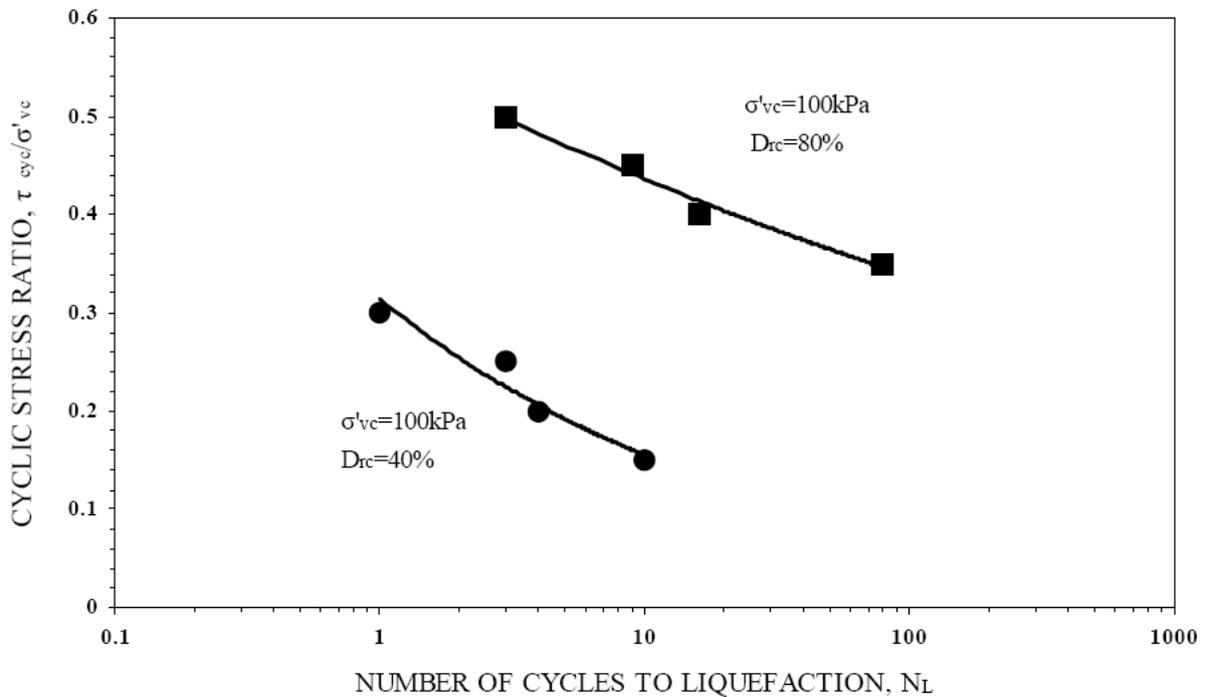


그림 12. CSR과 변형률 5%에서의 액상화발생 반복하중횟수

그림12에서는 CSR과 변형률 5%에서의 액상화발생 (cyclic mobility)반복하중횟수의 관계이며 100kpa에서 상대밀도별로 나타내었다.

6. 결 론

단순전단의 경우 7.5%까지에서 반복하중의 작용으로 인해 초기 액상화로 판단 void등(1996) 7.5%를 적용했을 때 전단 변형이 급격히 증가 하였으며 상대밀도 80%의 공시체에 100kpa의 압밀 후 반복횟수 증가에 따른 경향은 상대밀도 40%보다 비교적 완만하게 증가 하였다. 이러한 경향은 과거 seed와 lee(1996)의 결과와 유사한 경향을 보이며 상대밀도가 증가 할수록 액상화 저항값이 증가하였다. 그리고 실험 결과를 통해 앞으로 실트질 함유량과 구속응력별에 따른 추가적인 연구가 더 필요한 것으로 판단된다.

감사의글: 본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술 평가원에서 위탁시행한 2005년도 지역 특성화 연구개발사업(과제번호B-04-01)의 지원으로 이루어 졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이상덕(1997) 기본토질시험 ,새론,pp.54~71.
2. Kramer, S.L. and Seed, H.B., “Initiation of soil liquefaction under static loading conditions”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 114, No. 4, 1988, pp. 412~430
3. Kramer, S. L., Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, 1996, pp. 348~422
4. Ishibashi, I., Kawamura, M. and Bhatia, S.K., “Effect of Initial Shear on Cyclic Behavior of Sand ”, Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.111, No.12, 1985, pp.1395- 1410.
5. Lee, K. L. and Seed, H. B.(1967), “Drained strength characteristics of sands”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 93, No. 6, pp. 117 ~141