

낙동강 모래의 반복응력이력에 의한 거동

Behaviour of Nak-dong River Sand on Cyclic Stress History

김영수¹⁾, Young-Su Kim, 박명렬²⁾, Myoung-Lyul Park, 김병탁³⁾, Byung-Tak Kim, 이상복⁴⁾, Sang-Bok Lee

- ¹⁾ 정회원 · 경북대학교 토목공학과 교수, Professor. Dept of Civil Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.
²⁾ 경북대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student. Dept of Civil Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.
³⁾ 정회원 · 경북대학교 토목공학과 공학박사, Ph.D. Dept of Civil Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.
⁴⁾ 정회원 · 한국수자원공사 밀양댐, Korea Water Resources Corporation

SYNOPSIS : Earthquakes not only produce additional load on the structures and underlying soil, but also change the strength characteristics of the soil. Therefore, in order to analyze soil structures for stability, the behaviour after earthquake must be considered. In this paper, a series of cyclic triaxial tests and monotonic triaxial tests were carried out to investigate the undrained shear strength and liquefaction strength characteristics of Nak-Dong River sand soils which were subjected to cyclic loading. The sample was consolidated in the first stage and then subjected to stress controlled cyclic loading with 0.1Hz. After the cyclic loading, the cyclic-induced excess pore water pressure was dissipated by opening the drainage valve and the sample was reconsolidated to the initial effective mean principal stress(p_c'). After reconsolidation, the monotonic loading or cyclic loading were applied to the specimen. In the results, the undrained shear strength and liquefaction strength characteristics depended on the pore pressure ratio($U_r=U/p_c'$). The volume change following reconsolidation can be a function of cyclic-induced excess pore water pressure and the maximum double amplitude of axial strain.

Key words : Cyclic and monotonic triaxial tests, Pore pressure ratio, Maximum double amplitude of axial strain.

1. 서 론

일반적으로 지진 발생 때 지반에는 과잉간극수압의 증가가 발생하게 되고 지진 후에는 증가한 과잉간극수압이 재압밀에 의해서 의해서 소산이 이루어지면서 체적변위가 발생하게 되며 침하가 발생한다. 또한 지진에 의하여 지반은 액상화에 의한 파괴가 일어날 수도 있고 그렇지 않을 수도 있으며 지진하중 후의 지반의 강도변화특성은 예측을 하기가 힘든 것으로 알려지고 있다. 액상화후 지반 거동의 예측에서, 지진에 의해 유발된 과잉간극수압의 소산으로 지반은 densification 현상이 일어나서 상대밀도의 증가를 보이나 densification에 의해 형성된 상대밀도를 가진 등방압밀 시료의 반복삼축시험결과에서 densification이 발생하지 않은 동일한 상대밀도의 시료에 비해 더 작은 액상화 저항을 가지는 것으로 나타났으며 이러한 원인의 입자구조의 재배열에 의한 것으로 알려지고 있다(Finn et al.,1970). 이런 현

상들은 Finn et al.(1970)에 의해 처음 연구되었으며 모래의 액상화저항은 strain history에 의존하며 만약에 strain history가 없을 때는 간극비, 상대밀도, 구속응력에 의해 유일하게 결정되어질 수가 있고 cyclic shear strain의 한계치는 반복횟수에 의존한다고 밝히고 있다. Ishihara and okada(1978)는 이런 stress history를 preshearing의 개념으로 인식하였다. 그 이후 Vaid et al.(1989), Krammer and Seed(1988), Yasuhara et al(1991)등에 의해 많은 연구가 이루어지고 있다. 지진동안에 발생한 과잉간극수압의 소산에 따른 지진후의 압축특성은 Lee and Albaisa(1964), Tatsuoka et al.(1984), Nagase and Ishihara(1988), Ishihara and Yoshimine(1990)에 의해 연구가 되었지만 비등방 조건에서의 특성은 거의 연구가 되지 않았다. 이에 본 연구에서는 Precyclic에 의해 발생된 간극수압비(Ur)에 따른 정적전단강도 특성과 액상화강도 특성을 파악하기 위하여 반복하중에 의해 유발된 과잉간극수압의 소산이 재압밀에 의해 이루어진 등방, 비등방압밀시료에 대해서 전단속도 0.1%/min의 비배수-정적전단시험(CIU·CAU)과 등방압밀시료에 대해서 주기가 0.1Hz인 비배수-반복삼축시험을 각각 실시하였다.

2. 응력이력 삼축시험

2.1 시료 물성치

본 연구에서 사용된 시료는 낙동강 모래이며 물리적 특성치와 입도 분포곡선은 표 1 과 그림 1에 나타나 있다.

표 1. 낙동강 모래의 물성치

G_s	D_{50} (mm)	D_{10} (mm)	C_u	C_c	$Dr(\%)$	ϵ_{max}	ϵ_{min}
2.675	0.27	0.14	2.0	1.35	64	1.28	0.81

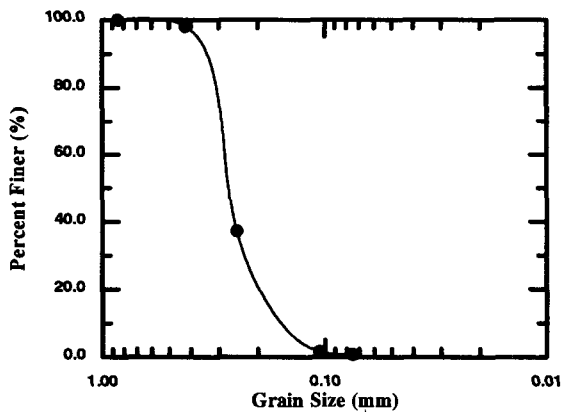


그림 1. 낙동강 모래의 입도 곡선

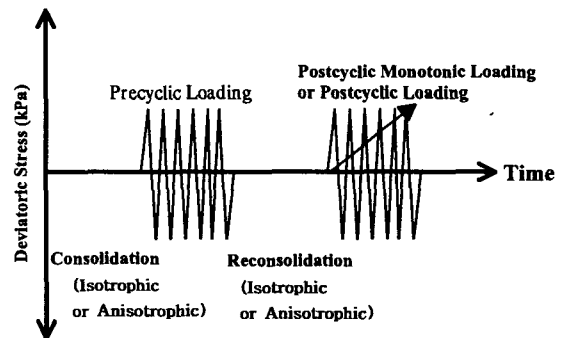


그림 2. 시험 과정

2.2 시험 방법

본 연구에서는 응력제어 반복삼축시험 (Stress-controlled cyclic triaxial test)를 하기 위해서 자동화삼축시험기(Automated Triaxial Testing System)를 사용했다. 시료 성형법은 공중 낙하법(Air Pluviation)에 의해 성형되었으며 시료의 높이는 14cm, 직경 7cm의 시료를 사용하였다. 포화를 시키기 위해서 back pressure를 주었으며 포화상태는 B값이 0.96 이상일 때로 보았다. 100kPa의 초기유효평균주응력

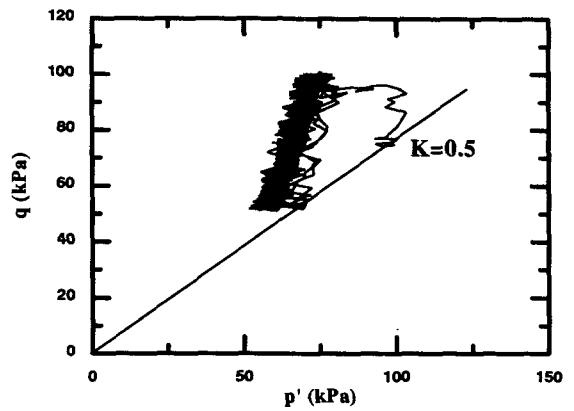
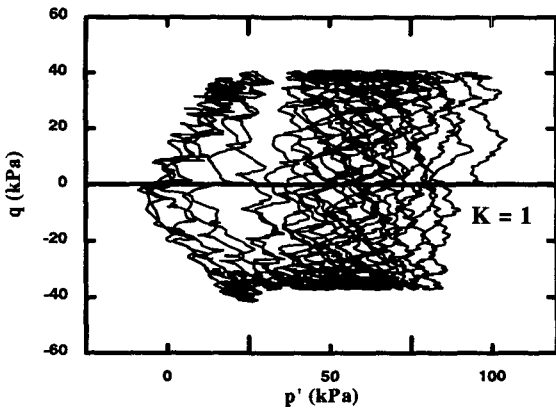
(p_c')에서 등방압밀이 끝난 후 비배수 상태에서 0.1 Hz의 응력제어-반복하중이 시료에 가하였고 응력이력(stress history)의 재현을 위해서 정해진 과잉간극수압까지 도달했을 때 시험을 멈추고 유발된 과잉간극수압을 반복 하중 전과 같은 유효평균주응력(p_c')의 재압밀을 통하여 소산시켰다. 재압밀이 끝난 후 낙동강 모래의 정적전단강도 특성 변화를 파악하기 위하여 비배수 상태에서 0.1%/min 속도의 변위제어-정적삼축압축시험을 실시하였으며 등방압밀인 경우에 한하여 입자 구조와 관련된 액상화강도 특성 변화를 알기 위해서 0.1Hz의 응력제어-반복하중시험을 실시하였으며 그림 2 에 본 연구의 시험 과정이 나타나 있다. 각 시험에 사용된 시료의 상대 밀도는 64% 이고 반복하중에 의해 발생한 과잉간극수압을 초기 유효평균주응력(p_c')으로 정규화한 간극수압비($U_r=U/p_c'$)를 달리하여 시험하였고 각 시험 조건은 표 2 와 같다. 본 연구에서는 Precycle은 응력이력재현을 위해 정해진 과잉간극수압발생을 위해서 가하는 반복 하중을 의미하고 Postcycle은 Precycle에 의해 유발된 과잉간극수압을 재압밀을 통하여 소산시킨 후에 액상화 강도를 측정하기 위하여 가하는 반복하중을 의미한다. 또한 Postcyclic monotonic loading 은 Precycle에 의해 유발된 과잉간극수압을 재압밀을 통하여 소산시킨 후에 정적전단강도 특성 변화를 파악하기 위해서 가하는 정적하중을 의미한다.

표 2. 시험 조건

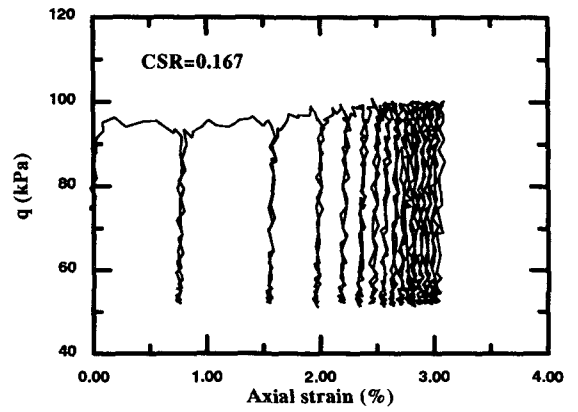
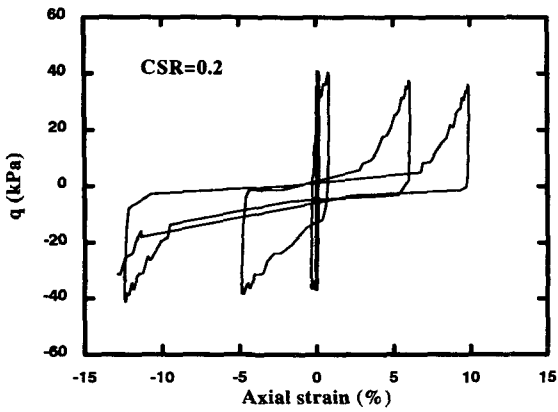
Initial Principal Stress Ratio K (σ_{1c}/σ_{3c}')	Test No.	Cyclic Stress Ratio(CSR) ($\sigma_d / 2\sigma_{3c}'$)	Pore Pressure Ratio ($U_r=U/p_c'$)	Residual Axial Strain ϵ_r (%)	Reconsolidation Volume Change ϵ_v (%)	Loading Type after Reconsolidation
1	Post01	0.20	0.202	0.018	0.084	Monotonic
	Post02	0.16	0.276	0.001	0.115	Monotonic
	Post03	0.20	0.365	0.018	0.16	Monotonic
	Post04	0.16	0.472	0.050	0.192	Monotonic
	Post05	0.20	0.561	-0.102	0.296	Monotonic
	Post06	0.16	0.704	-0.040	0.434	Monotonic
	Post07	0.15	0.738	-0.060	0.473	Monotonic
	Post08	0.15	0.820	-0.370	0.635	Monotonic
	Post09	0.13	1.000	-5.360	4.450	Monotonic
	Post10	0.15	1.000	-8.950	3.823	Monotonic
	Liq01 ~0.6	0.16	0~1.0			Cyclic
Liq07 ~11	0.2	0~1.0			Cyclic	
Liq11 ~16	0.25	0~1.0			Cyclic	
0.7	Post11	0.115	0.300	0.221	0.137	Monotonic
	Post12	0.144	0.431	0.494	0.253	Monotonic
	Post13	0.201	0.600	1.943	0.433	Monotonic
	Post14	0.230	0.713	3.722	0.703	Monotonic
	Post15	0.259	0.850	6.062	0.737	Monotonic
0.5	Post16	0.133	0.199	0.164	0.100	Monotonic
	Post17	0.167	0.345	3.002	0.266	Monotonic
	Post18	0.233	0.430	5.174	0.268	Monotonic
	Post19	0.467	0.459	8.740	0.298	Monotonic
	Post20	0.533	0.650	13.215	0.438	Monotonic

3. 반복응력이력에 의한 거동 분석

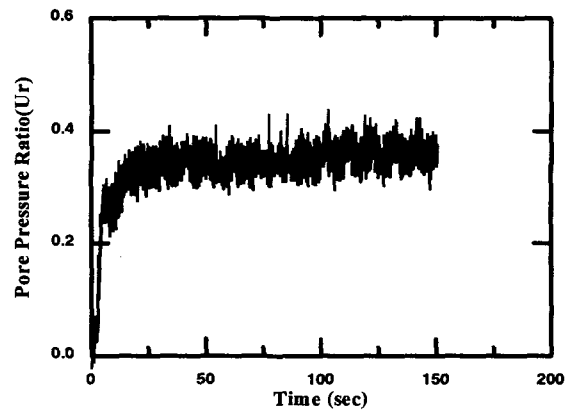
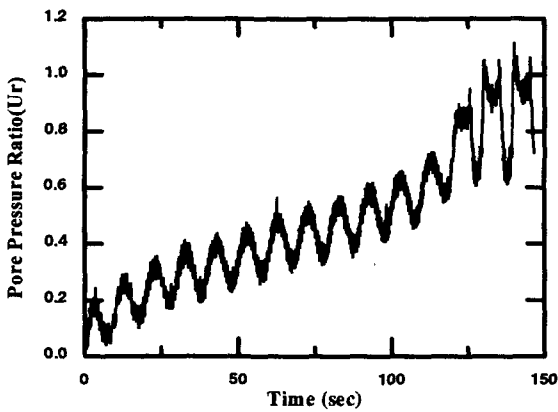
3.1 반복삼축시험(Precyclic loading)



a) 유효응력경로



b) 축차응력과 변형률

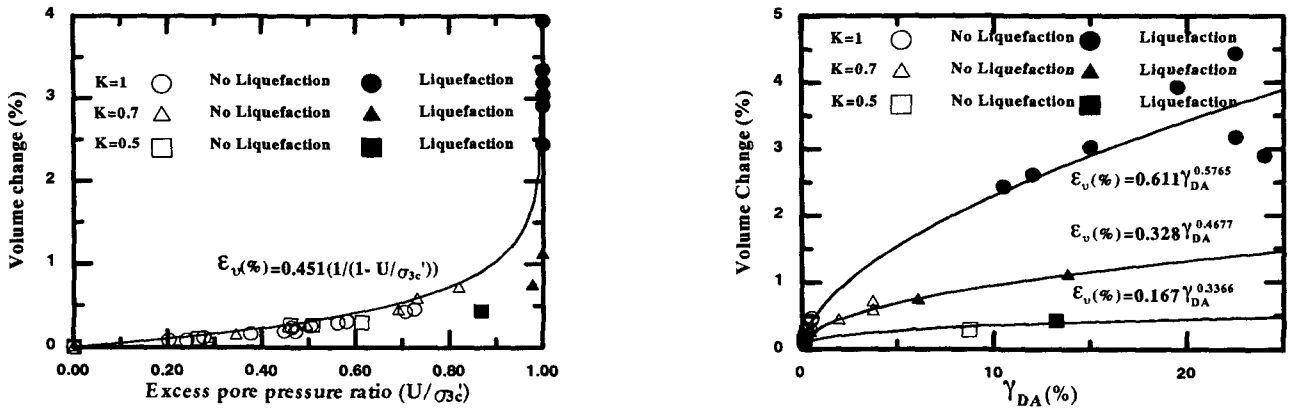


c) 과잉간극수압

그림 3. K 값에 따른 반복삼축시험(Precyclic Loading)

응력의 초기 상태와 Precycle에 의한 유효응력경로, 축차응력-변형률 그리고 과잉간극수압발생의 양상은 그림 3 과 같았다. 그림 3-a)은 각 초기주응력(K)을 달리하고 유효평균주응력(p_c')은 100kPa로 동일하게 압밀한 후 정해진 과잉간극수압에 도달할 때까지 Precycle을 가하는 상태를 나타낸 것이다. 등방압

밀된 시료에서는 0.13이상의 응력비(CSR)에서 모두 액상화발생이 가능하였으나 비등방압밀된 시료에서는 주응력비(K)가 0.7일 때는 응력비(CSR)가 0.259이상일 때 액상화발생이 가능하였고 주응력비(K)가 0.5일 때는 응력비(CSR)가 0.533이상일 때 가능하였다. 비등방압밀된 시료에서는 응력의 반전(Stress reversal)이 있을 때만 액상화가 발생하였고 없을 때는 그림 3-b)와 같이 단지 변위의 누적이 발생하는 것으로 나타났다.



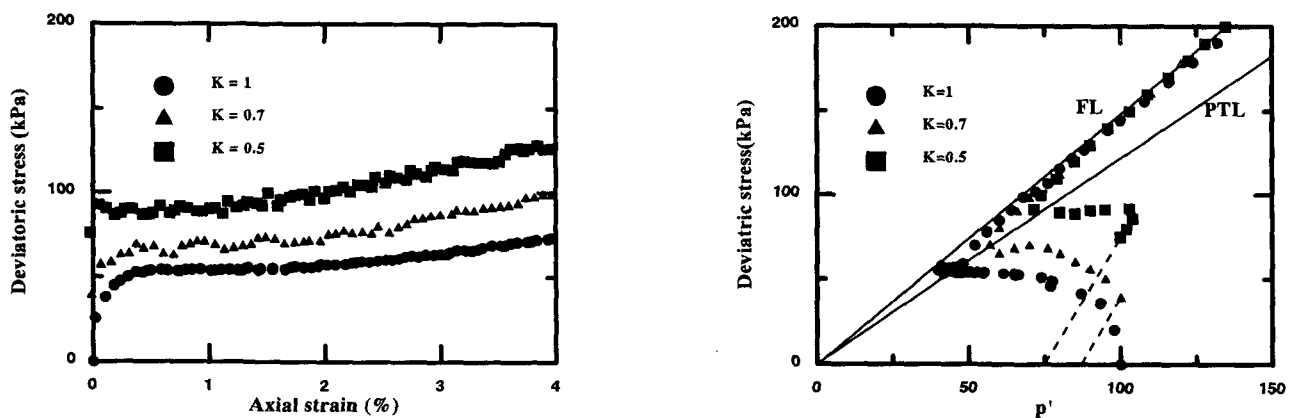
a) 액상화 미발생 부분의 상관식

b) 액상화 발생 부분의 상관식

그림 4. 체적 변화

Precycle에 의해 유발된 과잉간극수압이 재압밀에 의해 소산될 때 나타나는 체적 변화의 특성은 액상화 발생유무에 따라 다른 것으로 나타났다. 그림 4-a)와 같이 간극수압비($U_v=U/\sigma'_{vc}$)가 0.7~0.8 이하에서는 체적변형률이 매우 적은 것으로 나타났으며 액상화 미발생 부분에서는 Precycle에 의해 유발된 과잉간극수압을 초기유효평균주응력(p_c')보다는 초기유효구속응력(σ'_{vc})으로 정규화했을 때 체적변형률(%)와 더 일정한 관계가 있는 것으로 나타났다. 그러나 그림 4-b)에서 확인할 수 있듯이 액상화발생 부분에서는 간극수압비(U_v)보다는 과잉간극수압발생 때의 최대양진폭축변형률(γ_{DA} , Maximum Double Amplitude Axial Strain)과 일정한 관계가 있는 것으로 나타났다. 체적변형률과 간극수압비(U_v) 및 γ_{DA} 의 관계에서 액상화 발생 유무에 따른 낙동강 모래에 대한 체적변형률의 상관식을 찾을 수가 있었으며 그림 4에 포함되어 있다.

3.2 비배수 전단 시험

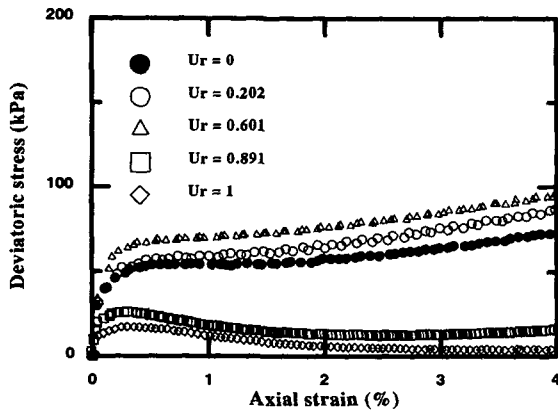


a) 축차응력과 변형률

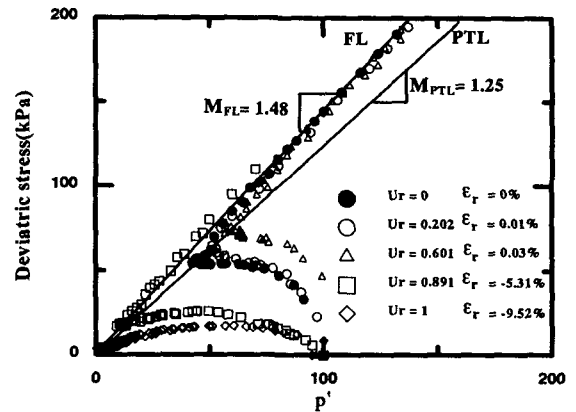
b) 유효응력경로

그림 5. 응력이력이 없을 때의 비배수 전단(CIU · CAU)

그림 5에 응력이력이 없을 때의 비배수 전단 특성이 나타나 있다. 유효응력경로(Effective Stress Path)는 거의 1% 미만의 축변형률에서 빠르게 전단응력이 증가하여 파괴선(Failure Line)에 접근하였다. 또한 시료는 전단중에 체적이 압축에서 팽창으로 변하는 점인 Ishihara에 의해 처음으로 불러이진 Phase Transformation Line(PTL)이 나타났으며, PTL에서의 강도(S_{PTL})크기는 초기주응력비(K)가 작을수록 높았다. 전단 초기 부분(본 시험에서는 4%미만 축변형률)에서의 축차응력의 최고점(peak)은 K가 작을수록 더 작은 축변형률에서 발생을 하였다. 또한 이 최고점(peak)에 축차응력이 도달한 후에 축차응력의 순간적인 연화현상이 발생하였고 PTL을 지나고 난 뒤에는 계속적으로 팽창을 하는 경화 상태의 거동을 나타내었다. 100kPa의 유효평균주응력(p_c')에서 압밀되었을 때 초기주응력비(K)의 크기에 상관없이 파괴선(FL)과 Phase Transformation Line(PTL)의 기울기는 각각 $M_{FL}=1.48$, $M_{PTL}=1.22$ 로 나타났다.



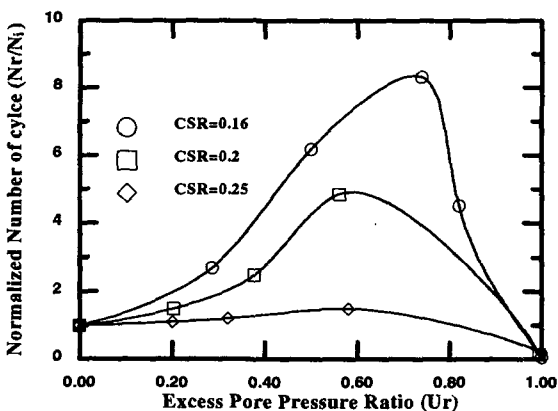
a) K=1 일때의 축차응력-변형률



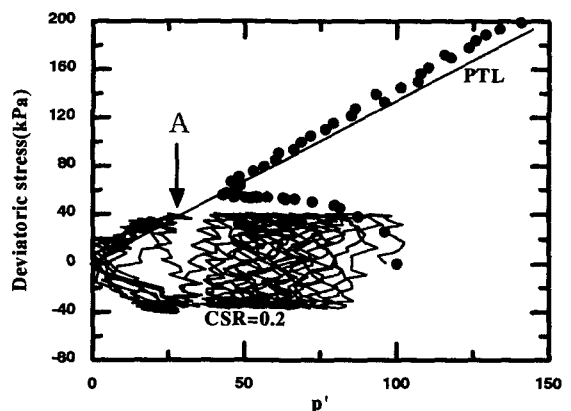
b) K=1 일때의 유효응력경로

그림 6. 응력이력이 있을 때의 등방압밀 비배수 전단(CIU)

그림 6에 등방압밀된 시료에 Precycle에 의해 유발된 과잉간극수압의 소산이 이루어진 뒤에 Postcyclic monotonic loading에 의한 전단 시험결과가 잔류변형률(ϵ_r , Residual Axial Strain)과 함께 나타나 있다. 그림 6-a)에 K=1일 때의 간극수압비(U_r)에 따른 축차응력-변형률관계가 나타나 있으며 간극수압비(U_r)의 크기에 따라 비배수전단저항의 변화가 있었으며 특히 간극수압비(U_r)가 0.6~0.9정도에서 비배수 전단저항이 증가에서 감소로 바뀌는 현상이 발생하였다.



a) 반복횟수에 대한 정규화

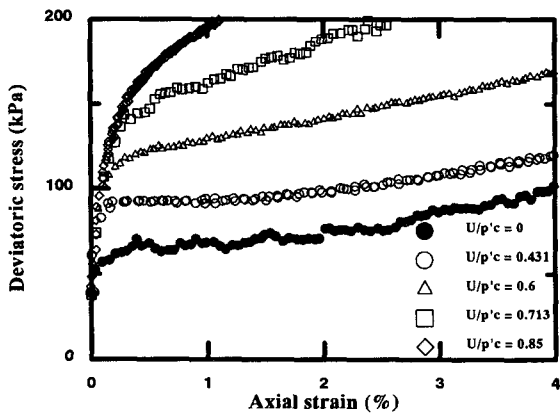


b) PTL과 Precyclic Load에 의한 유효응력경로

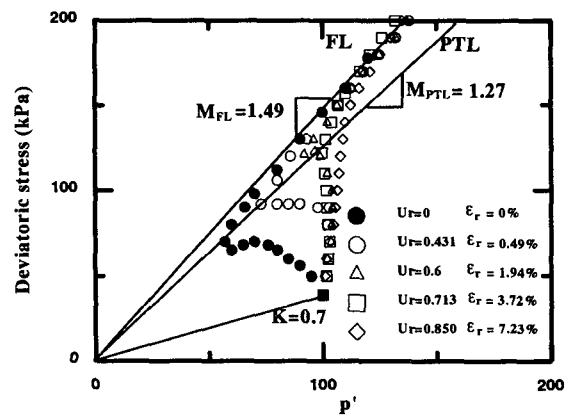
그림 7. 응력이력에 따른 등방압밀때의 액상화강도 특성 변화(Postcyclic Loading)

즉, 액상화를 경험하였거나 액상화발생에 근접했던 시료는 응력이력이 없을 때의 전단저항을 가지지

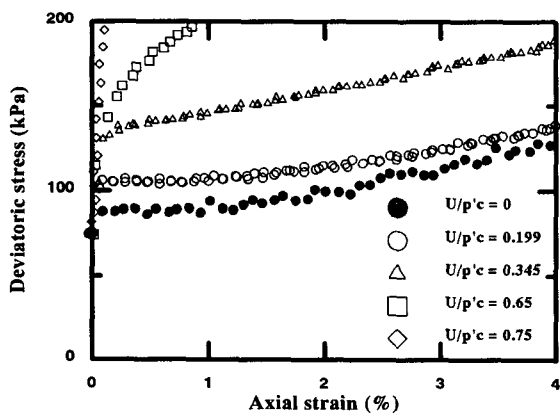
못하였지만 반면에 작은 간극수압비(U_r) (본시험에서 0.6이하)를 가지거나 큰 축변위나 간극수압발생을 가지지 않는 시료는 응력이력을 가진 후에도 전단저항을 잃지 않았다. 이러한 원인은 시료성형과 압밀에 의해 형성된 입자가 재배열되면서 유발된 것이며 유사한 현상이 등방압밀된 시료의 액상화강도에서도 나타나는 것으로 본시험에서 확인하였으며 간극수압비(U_r)에 따른 액상화강도의 변화는 그림 7-a)과 같이 나타났다. 그림 7-a)에서와 같이 간극수압비(U_r)가 0~0.8정도에서는 액상화강도가 증가하는 경향을 보였으나 1에 가까워지면서 감소하는 경향을 볼 수가 있다. 응력이력에 따른 액상화강도의 감소 원인은 비배수 삼축압축시험에서 얻은 PTL과 Precycle때에 발생하는 유효응력경로와 관계를 지을 수가 있으며 Precycle에 의한 응력경로가 PTL을 지날 때(참조, 그림 7-b)에 A점) 시료의 상태는 상당히 느슨해지기 시작하며 이러한 영향이 시료 입자 구조를 변화시켜서 비록 재압밀에 의해서 상대 밀도는 증가하지만 액상화 강도가 감소하는 원인이 된다고 볼 수가 있으며 본 실험에서도 PTL을 지날 때 과잉간극수압비가 크게 증가하였으며 축변형률의 발생도 증가하였다. 위와 같은 결과에서 시료의 형성과 관계된 비등방성(Inherent Anisotropy)을 가지는 초기주응력비(K)가 1일 때는 응력이력에 의한 입자구조의 재배열에 의해서 전단저항의 감소현상이 발생할 수 있으므로 지진 후의 지반의 전단강도 특성변화 연구에서는 응력이력에 따른 시료의 입자 구조 영향을 고려하여야 한다는 것을 알 수가 있다.



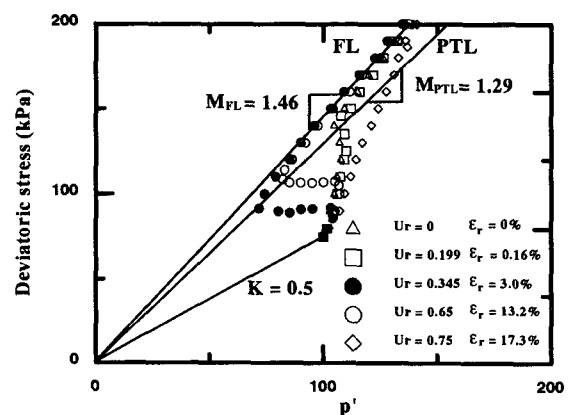
a) K=0.7 일때의 축차응력-변형률



b) K=0.7 일때의 유효응력경로



c) K=0.5 일때의 축차응력-변형률



d) K=0.5 일때의 유효응력경로

그림 8. 응력이력이 있을 때의 비등방압밀 비배수 전단(CAU)

그림 8 에는 비등방압밀 시료에 대한 Postcyclic monotonic loading에 의한 전단시험결과이다. 그림 8-a)와 b)는 K=0.7일 때의 결과이며 등방압밀 시료와는 다른 전단특성을 나타내었으며 간극수압비(U_r)의 크기가 증가할 때 비배수전단저항이 계속적으로 증가하는 경향을 확인할 수가 있었으며 액상화 발생

이후에도 강도의 감소는 나타나지 않았다. 그림 8-c)와 d)는 $K=0.5$ 일 때의 결과이며 $K=0.7$ 일 때와 비슷한 경향이 나타났다. 초기전단응력에 의한 비등방성(Stress induced Anisotropy)을 가지는 초기주응력비(K)가 1 이하인 경우는 응력이력에 의해서 전단저항의 감소에 영향을 받지 않는 것으로 본 시험에서 나타났다. 향후 사면, 댐 또는 제방 등과 같이 초기전단응력이 존재하는 지반이 지진하중을 받은 후의 지반거동 특성을 파악하기 위해서는 지진하중 후에 비배수상태뿐만 아니라 배수후의 지반 거동 특성 연구가 더 수행되어야 할 것으로 사려된다.

4. 결 론

등방과 비등방압밀된 낙동강 모래의 반복응력이력에 따른 압축특성과 비배수강도 특성 변화와 액상화강도 특성 변화에 대한 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 압축특성은 액상화 미발생 부분에서는 체적변형률이 초기유효구속응력(σ_{3c}')에 의해 정규화된 간극수압비(U_v)에 의존하였고 액상화 발생 부분에서는 최대양진폭축변형률(γ_{DA})에 의존하는 관계를 나타내었다.
- 2) 등방압밀시료인 경우에 재압밀 후 정적전단특성은 간극수압비(U_r)가 0.6~0.9정도에서 증가에서 감소로 바뀌는 현상이 발생하였다. 이러한 원인은 Precycle에 의한 응력경로가 PTL을 지날 때 시료 입자 구조의 재배열을 유발시키기 때문인 것으로 볼 수가 있다.
- 3) 비등방압밀시료인 경우는 간극수압비(U_r)의 크기가 증가함에 따라 전단강도저항이 계속적으로 증가하는 경향이 나타났다. 초기전단응력에 의한 비등방성(Stress induced Anisotropy)을 가지는 초기주응력비(K)가 1 이하인 경우는 응력이력에 의해서 전단저항의 감소가 발생하지 않는 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. 김병탁(1993), "낙동강유역 모래의 전단강도 특성에 관한 실험적 연구". 경북대학교 토목공학과 석사논문
2. Finn et al. (1970) "Effect of Strength of Strain History on Liquefaction of Sand", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.9(6), pp.1917~1934
3. Masayuki Hyodo et al. (1994), "Undrained Cyclic and Monotonic Triaxial Behaviour of Saturated Sand", Soil and Foundation, Vol.34, No.1, pp.19~323.
4. N.Toyota et al.(1995), "Post-cyclic triaxial behaviour of Toyora sand", Earthquake Geotechnical Engineering, Balkema, Vol.1, 189-195
5. P. Kvasnicka et al. (1982), "Influence of Cyclic Stress History on Cyclic Behavior of a Sand", Soil Dynamic & Earthquake Engineering Conference pp.55~63
6. Yasuhara et al. (1991), "Recompression of Normally Consolidated Clay after Cyclic Loading", Soil and Foundation, Vol.31, No.1, pp.83~94