

낙동강 모래의 실트함유량 변화에 따른 반복전단응력비 특성

Characteristics of Cyclic Shear Stress Ratio by Silt Content for Nak-Dong River Sand

김영수* · 김대만**

Kim, Young-Su · Kim, Dae-Man

Abstract

A series of undrained cyclic triaxial tests were carried out to investigate the cyclic shear stress strength characteristics of sands with respect to the silt content. Silty sand was collected around the basin of Nak-Dong River and remolded in laboratory with the range of silt content 0~50% in sand located. As results, with the change of silt content cyclic shear stress ratio (CSR) at $N=10$ showed the maximum value at 5% and the minimum at 20% in all relative density. The development tendency of the pore water pressure analyzed by the relationship cyclic ratio and pore water pressure ratio is unrelated the change of CSR varying silt content. Comparing the results of the void ratio and skeleton void ratio after consolidation, CSR varying silt content was much affected by skeleton void ratio which is known to affect shear behavior of silty sand.

Keywords : cyclic triaxial test, Nak-Dong River silty sand, silt content, cyclic shear stress ratio, skeleton void ratio

요 지

실트함유량 변화에 따른 낙동강 모래의 반복전단강도 특성을 살펴보고자 낙동강 유역에 분포하는 모래와 실트를 채취하여 실트함유량 0~50%의 범위로 실내에서 재성형된 실트질 모래시료에 대하여 일련의 비배수 반복삼축실험을 실시하였다. 실험 결과, 실트함유량 변화에 따른 반복횟수(N) 10에서의 반복전단응력비(CSR)는 모든 상대밀도에서 실트함유량 5%에서 최대였고, 20%에서 최소를 보였다. 반복비(N/N_c)에 따른 간극수압비($\Delta u/p'$) 관계로 부터 분석된 간극수압의 발달 경향은 실트함유량에 따른 CSR 크기변화와는 무관하였다. 압밀 후 간극비(e)와 skeleton 간극비(e_s)를 비교해 본 결과, 전반적으로 실트함유량에 따른 CSR의 변화 경향과 일치하여 실트함유량에 따른 CSR은 실트질 모래의 전단거동에 영향을 미치는 모래단의 간극비인 skeleton 간극비(e_s)에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 반복삼축실험, 낙동강 실트질 모래, 실트함유량, 반복전단응력비, skeleton 간극비

1. 서 론

액상화에 대한 대부분의 이전 연구는 세립질이 거의 없거나 조금 포함하는 균질하고 깨끗한 모래에 대하여 중점적으로 연구되었다. 그러나 과거에 발생된 수많은 액상화 현상은 균질하고 깨끗한 순수 모래지반이 아니라도 발생할 수 있다는 것을 보여주었으며, 최근 많은 현장사례에서 찾아볼 수 있다. Poran & Rodriguez(1989)에 의하면 1985년 칠레 중부에서 발생된 지진을 수력댐이 파괴되었는데, 그 원인분석 결과 순수 모래층 아래에 있는 실트질 모래층에서 부분적으로 액상화가 발생되었음을 확인하였다. 그리고 Tuttle et al.(1989)은 1988년 캐나다 Quebec주의 Saguenay 지진에서 실트질 모래와 모래질 실트의 액상화에 대한 확실한 증거를 보였고, 또한 1987년 미국 California주의 Superstition Hills 지진으로 남부 야생지역의 실트질 모래지반에 액상화가 발생되었다고 하였다.

전 세계적으로 매년 100만개 이상의 지진이 발생하고 있으며, 이중에 약 20여개의 지진이 심각한 피해를 주는 것으로 발표되고 있다. 최근에 큰 피해를 입은 지진으로는 2009년 4월에 발생한 이탈리아 중부 라퀼라 지역의 지진규모 6.3 지진으로 약 300여명이 사망하였다. 이와 같이 전 세계적으로 크고 작은 지진이 발생되고 있으며, 이탈리아와 지형적으로 비슷한 반도국가인 한반도에서도 지진규모 2~5의 크고 작은 지진이 2007년 42회, 2008년 46회 그리고 2009년 3월까지 17회 발생하여 더 이상 지진 안전지대가 아님이 입증되고 있다.

지진에 의한 액상화 피해를 최소화하기 위하여 현재 국내 외적으로 활발한 연구가 진행되고 있는데, 본 연구에서는 이러한 연구의 일환으로 모래지반에서 실트함유량 변화에 따른 반복전단강도의 특성을 규명해 보기 위하여 일련의 반복삼축실험을 실시하였다. 시료 채취장소인 낙동강 유역은 영남지방의 중앙저지를 흘러 부산 을숙도에 이르는 모래와 실

*정회원 · 경북대학교 공과대학 건설공학부 토목공학전공 교수 (E-mail : kimysu@knu.ac.kr)

**정회원 · 교신저자 · 경북대학교 공과대학 건설공학부 연구원 (E-mail : ksmans11@hanmail.net)

트의 층상지반이 넓은 지역에 걸쳐 분포되어있다. 이러한 지역에 크고 작은 제방, 댐 그리고 교량을 비롯한 많은 토목 구조물뿐만 아니라 대단위 주택단지를 포함한 건축 구조물들이 건설되어 있고, 더욱이 2012년까지 약 22조원을 투입해 낙동강을 포함한 4대강 정비 사업을 실시할 계획이어서 앞으로 많은 구조물의 시공이 예상되는 지역이다.

2. 이론적 배경

최근 많은 연구자들이 모래에 다양한 함유량으로 실트를 혼합하여 반복강도에 대한 실험을 실시하였다. Lee와 Fitton(1969)를 비롯한 여러 연구자들은 연구를 통하여 많은 양의 세립질 특히 점착성이 있는 세립질의 존재는 반복변형 동안 입자의 재정렬을 방해하여 액상화 가능성을 감소시킨다고 하였으며, Kaufman(1981)은 실트질 모래의 액상화 연구에서 적당한 소성 세립질의 존재로 시료의 반복전단저항력이 상당히 증가하는 것을 발견하였다. 또한 Tokimatsu와 Yoshimi(1984)는 10% 이상의 세립질을 포함한 모래는 같은 N치를 갖는 순수 모래에 비하여 액상화 저항력이 훨씬 크다고 지적하였다. 그들은 N치가 20 이상이고 세립질을 10% 이상 포함한 실트질 모래 또는 20% 이상의 실트가 포함되어 있는 모래질 실트는 액상화가 발생하지 않는다고 하였다. 그리고 Seed et al.(1985)은 현장데이터에 기반하여 실트질 모래지반에서 동일 (N₁)₆₀치일 때 실트함유량의 증가에 따라 액상화 저항력이 증가함을 보여주었는데, (N₁)₆₀치는 국제표준에너지비의 장비를 사용하여 측정된 N치를 수정한 값이다. Amini와 Qi(2000)도 상대밀도를 고정된 상태에서 다양한 실트의 함유량에 대한 반복삼축실험을 실시하여 실트함유량이 증가할수록 액상화 저항력이 커지는 것을 밝혔다. 또한 황대진(1993)은 일본 豊浦표준사에 비소성 실트함유량을 달리하여 상대밀도를 50%로 고정된 상태로 비배수 반복단순전단시험을 실시한 결과 실트함유량 30%까지 액상화강도가 감소하였으며, 30%이상에서 다시 액상화강도가 증가하는 것을 관찰하였다.

그러나 이와 반대로 Troncoso(1990)은 간극비를 0.85로 고정하여 실트함유량을 0~30%범위로 변화시켜 모래의 반복강도를 비교하였는데, 반복강도는 세립토인 실트함유량이 증가함에 따라 감소한다고 하였다. 또한 Koester(1993)은 Chang(1990)의 자료를 이용하여 0.48의 일정한 간극비로 성형된 중간상태의 재성형된 모래실트 혼합토 시료로 실험한 결과 세립토 함유량 20% 이하에서 반복응력비는 감소하여

Troncoso(1990)의 결과와 비슷하였다. 국내 연구결과로 김영수와 김대만(2008)은 압밀 전 시료 간극비를 1.028로 고정하여 실트함유량을 0~20%로 등방 및 이방압밀시킨 시료에 대하여 반복삼축실험을 실시한 결과, 전반적으로 모든 시료에서 실트함유량 증가에 따라 반복전단응력비가 감소하였고, 이방성이 클수록 더 큰 감소가 발생된다고 하였다.

이들과 달리 Kuerbis et al.(1988)는 고정된 모래의 Skeleton 간극비 상태에서 세립질 함유량에 따른 영향을 연구한 결과, 실트 함유량의 증가는 고정된 모래의 Skeleton 간극비에서 고정된 반복횟수로 발생하는 액상화에 대한 반복응력비를 다소 증가시킨다는 것을 확인하였다.

3. 시료성형 및 실험방법

3.1 시료 특성

본 연구에서는 낙동강 중류지역의 모래를 채취한 후 #20 체~#200체 사이의 잔류모래를 흐르는 물에 씻어서 clean sand로 만들어 실험에 사용하였다. 실트의 경우 모래채취장소 주변에서 채취하여 #200체 통과시료를 건조시켜 사용하였다. 시료 준비 후 실트함유량에 따른 실트질 모래의 반복전단거동을 살펴보기 위하여 순수모래에 실트함유량을 0~50%로 혼합하여 실내에서 인위적으로 실트질 모래로 성형하였다. 실트함유량에 따른 각 시료의 기본 물성치와 입도곡선은 표 1 및 그림 1과 같다.

3.2 최대 및 최소 간극비의 결정

실트함유량에 따른 각 시료에서 ASTM D 4253, 4254, JIS A 1224(2000) 규정에 따라 최소 및 최대 간극비를 결정하였으며, 사진 1은 ASTM과 JIS 규정의 실험기구이다. 그림 2는 ASTM과 JIS 규정으로 결정된 실트함유량에 따른 최소 및 최대 간극비를 나타낸 것으로 최대간극비는 두 규정에 의한 결과가 비슷하였으나 최소간극비에서는 JIS에 의한 결과가 ASTM 결과보다 아주 크게 나타나, 본 연구에서는 ASTM에 의한 결과를 사용하였다.

3.3 시료 성형방법

시료 성형방법으로 많은 방법이 있으나 가장 중요한 것은 균질한 시료의 성형과 다양한 범위의 상대밀도를 얻을 수 있어야 한다. Vaid와 Negussey(1988)은 세립질이 없는 순수 모래시료에서는 초기 균질한 포화모래시료를 만들 수 있고 반복적인 시료성형에서 편리한 점으로 공기분사법(air

표 1. 실트함유량에 따른 각 시료의 기본 물성치

Index properties	Sand	Silt 5%	Silt 10%	Silt 20%	Silt 30%	Silt 40%	Silt 50%	Index properties	Silt
Specific gravity	2.637	2.641	2.640	2.638	2.638	2.638	2.641	Specific gravity	2.640
D ₁₀ (mm)	0.190	0.180	0.080	0.023	0.010	0.008	0.006	Liquid limit	34
D ₃₀ (mm)	0.222	0.220	0.218	0.200	0.120	0.058	0.040	Plastic limit	26
D ₆₀ (mm)	0.250	0.248	0.243	0.240	0.232	0.225	0.212	Plastic index	8
C _u	1.316	1.378	3.038	10.435	23.200	28.125	35.333	Pass #4, %	100
C _z	1.038	1.084	2.445	7.246	6.207	1.869	1.258	Pass #200, %	100
USCS	SP	SP	SP	SM	SM	SM	ML	USCS	ML

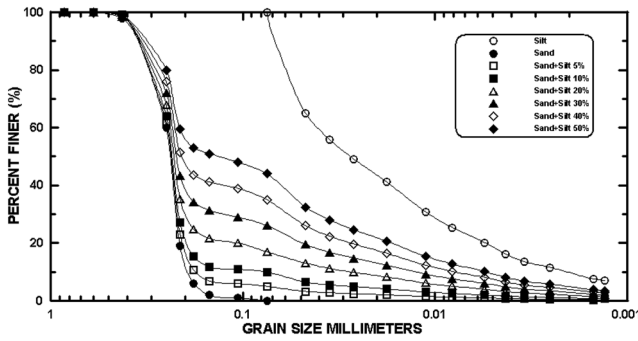


그림 1. 시료의 입도곡선



(a) ASTM



(b) JIS

사진 1. 최소 및 최대간극비 실험기구

pluviation)과 물분사법(water pluviation)을 선호하였으나, 만약 양입도의 모래나 세립질이 포함된다면 성형과정 중 세립질의 낙하가 늦은 관계로 분사법으로 성형된 시료는 균질하지 않을 수 있다고 하였다. 세립질이 포함된 모래시료의 성형시 가장 많이 사용되는 방법으로는 습윤다짐법(moist tamping)이 있다. 습윤다짐법은 시료에 물을 첨가하여 겔보기 점착력을 증가시켜 다지므로 시료가 자립이 가능하게 되므로 가장 느슨한 상태로 성형할 수 있는 방법으로 알려져 있다. Dobry et al.(1985), Baziar(1987), Koester(1992) 등 많은 연구자들은 세립질을 포함한 흙의 액상화 거동에 대한 연구로 균질한 시료를 만들기 위하여 습윤다짐법을 사용하였다. 그러나 습윤다짐법은 각 층의 높이를 일정하게 다지기 때문에 하부층으로 갈수록 밀도가 커지는 경향이 나타난다. 이를 개선하기 위하여 Ladd(1978)는 세립질이 포함된 시료에서 undercompaction의 개념을 이용한 수정습윤다짐법(modification of moist tamping)을 제안하였는데, 이 방법은 각 지층에서 미리 결정된 양으로 하부층은 다짐높이를

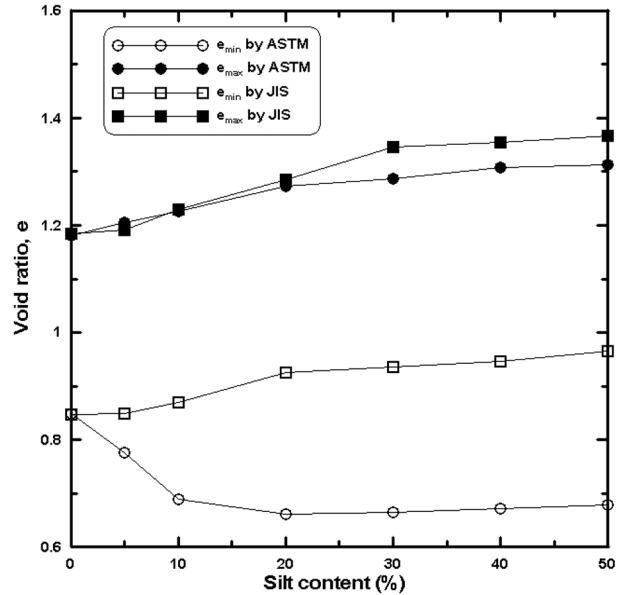


그림 2. 실트함유량에 최소 및 최대간극비

목표높이보다 조금 높게 하여 느슨하게 다지고, 위층으로 올라가면서 목표높이로 다져 최종적으로 전체 지층이 균질한 밀도가 되도록 하는 방법이다. Vucetic와 Dobry(1988)는 액상화성 실트질 모래의 변위제어실험의 결과를 바탕으로 Ladd가 제안한 수정습윤다짐법은 균질한 시료를 만드는데 양호한 방법이라고 하였다.

본 연구에서 시료성형은 직경 70mm, 높이 140mm의 크기로 7층으로 나누어 수정습윤다짐법으로 이용하여 성형하였으며, 시료자립을 위해 10%의 함수비로 물을 첨가하였다. 각 지층은 최종적으로 모두 동일한 높이가 되도록 초기지층 높이를 시행착오를 거쳐 결정하였으며, 사진 2와 같이 시료 성형 후 각 지층의 균질성을 평가하기 위하여 아크릴 재질로 제작된 성형몰드로 지층간에 석회를 넣어 구분되도록 하였다. 이와 같은 방법으로 모든 시료에서 층별 높이가 일정한 균질한 시료를 얻을 수 있었다. 시료성형 초기의 상태가 같더라도 압밀 후의 간극비와 상대밀도가 달라지므로 실트함유량에 따른 정확한 반복전단강도의 변화를 살펴보기 위하여 압밀 후 동일한 상대밀도를 갖도록 하였다. 압밀 후 목표상대밀도를 느슨상태 45%, 중간상태 65%, 조밀상태 85%로 하고, 동일상태로 3회 이상 압밀 후 목표상대밀도에 모두 근접하는 시료초기상태를 결정하였다. 실트함유량은 0-50%의 범위로 하였는데, 느슨한 상태는 실트함유량 20%까지 중간상태로는 실트함유량 40%까지 그리고 조밀상태에서는 실트함유량 50%까지 성형이 가능하였으며, 그 이상의 실트함유량에서는 자립이 되지 않아 성형이 불가능하였다.

3.4 실험 방법

본 연구의 실내실험에 사용된 실험기기는 Clarence K. Chan(CKC)이 개발한 자동화 삼축실험기로 정적 및 동적 실험이 모두 가능한 형식이다. 시료 성형 후 포화 단계에서는 CO₂를 순환시킨 후 탈기수를 순환시켜 배압을 300kPa까지 점차적으로 서서히 가하면서 B value가 0.97 이상이 되도록 하였다. 시료의 포화가 완료된 후 압밀단계에서는 압밀응력(p)을 100kPa로 등방압밀을 실시하였다. 압밀이 완료된 후



사진 2. 성형 후 시료사진

응력제어(stress control)의 비배수 반복삼축실험을 실시하였으며, 가하여진 반복응력(q_{cy})의 주파수는 0.1Hz의 정현(sine) 파를 이용하여 한 시료당 3가지 크기의 반복응력을 가하였다. 본 연구에서 실시한 실험조건과 압밀 전후 변화된 건조단위중량(r_d)과 간극비(e) 그리고 상대밀도(D_r)는 표 2와 같다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 응력경로와 축변형

그림 3은 조밀상태($D_r=85\%$)의 실트함유량 0, 20, 그리고 50%에 대한 응력경로와 축변형을 나타낸 것으로 나머지는 지면상 생략하였다. 본 연구에서 실시된 모든 실험은 응력반전(stress reversal)조건으로 압축측과 인장측을 오가면서 응력이 가하여졌다. 그림 3에서 보듯이 초기 반복전단이 가하여질 때는 큰 변형 없이 진행되다가 양진폭 변형률(double amplitude strain) 5%에 가까이 도달할 때 인장측에서 유동 액상화(flow liquefaction)의 파괴가 발생되었다. 이와 같은 거동은 상대밀도와 실트함유량에 상관없이 모든 등방압밀조건에서 나타나는 일반적인 거동이며, 실트함유량이 증가함에 따라 순수한 모래의 반복거동에 비하여 더욱 큰 유동변형이 뚜렷하게 발생되면서 파괴되었다.

4.2 반복전단강도 특성

액상화 저항은 반복응력에 의하여 흙의 파괴시 변형률을 정의하는 것으로 응력반전이 있는 경우는 양진폭 변형률(double amplitude strain) 5%정도로 보며, 대부분 이 시점에서 $p'=0$ 의 초기액상화가 발생한다. 그림 4는 양진폭 변형률 5%를 파괴기준으로 하여 파괴시의 반복응력횟수(N)를 구하여 반복전단응력비(CSR, cyclic shear stress ratio, q_{cp}/p')와 도시하여 나타낸 것이다. 결과에서 보듯이 실트함유량 5%일 때의 CSR이 전반적으로 비교적 크게 나타났는데, 좀 더 자세히 관찰하게 위하여 =10일 때의 CSR를 구한 후 실트함유량에 따른 그래프를 도시하여 그림 5에 나타내었다.

그림 5에서 실트함유량 5%까지 모든 상태에서 CSR이 증가하였으며, 느슨상태보다는 중간 및 조밀상태의 시료에서 증가가 더 크게 나타났다. 그리고 실트함유량 5%를 지나서

표 2. 시료의 압밀 전후 상태

Sample state	Silt content (%)	q_{cy} (kPa)	Before consolidation			After consolidation		
			γ_d (kgf/m ³)	e	D_r (%)	γ_d (kgf/m ³)	e	D_r (%)
Loose	0	40	1290	1.044	41.2	1297	1.033	44.5
		37				1296	1.035	44.0
		30				1300	1.028	45.9
	5	40	1306	1.022	42.6	1312	1.013	44.7
		36				1314	1.010	45.4
		24				1310	1.016	44.0
	10	37	1315	1.008	40.7	1329	0.986	44.6
		30				1331	0.983	45.2
		25				1332	0.982	45.5
	20	28	1312	1.011	42.9	1327	0.988	46.6
		24				1323	0.994	45.6
		19				1321	0.997	45.1
Medium	0	52	1332	0.980	60.6	1341	0.966	64.6
		42				1342	0.965	65.0
		38				1344	0.962	65.9
	5	66	1354	0.951	59.3	1374	0.922	65.9
		59				1373	0.924	65.6
		53				1375	0.921	66.2
	10	59	1387	0.903	60.1	1411	0.871	66.2
		51				1409	0.874	65.7
		42				1411	0.871	66.2
	20	36	1379	0.913	58.8	1412	0.868	66.1
		30				1410	0.871	65.7
		22				1408	0.874	65.3
	30	36	1385	0.905	61.4	1405	0.878	65.8
		31				1402	0.882	65.1
		23				1407	0.875	66.2
	40	40	1375	0.919	61.2	1395	0.891	65.5
		37				1401	0.883	66.7
		31				1397	0.888	65.9
Dense	0	57	1379	0.912	80.9	1388	0.900	84.6
		54				1391	0.896	85.8
		46				1392	0.894	86.3
	5	79	1425	0.853	81.9	1435	0.840	84.9
		64				1438	0.837	85.8
		59				1436	0.839	85.2
	10	64	1478	0.786	82.0	1491	0.771	84.9
		52				1493	0.768	85.3
		45				1494	0.767	85.6
	20	40	1481	0.781	80.4	1509	0.748	85.8
		34				1511	0.746	86.1
		27				1507	0.750	85.4
30	43	1485	0.776	82.1	1503	0.755	85.5	
	37				1500	0.759	84.9	
	33				1501	0.757	85.1	
40	42	1479	0.784	82.3	1496	0.763	85.5	
	37				1499	0.760	86.1	
	30				1495	0.765	85.3	
50	44	1481	0.783	83.4	1493	0.769	85.7	
	36				1497	0.764	86.4	
	31				1494	0.768	85.9	

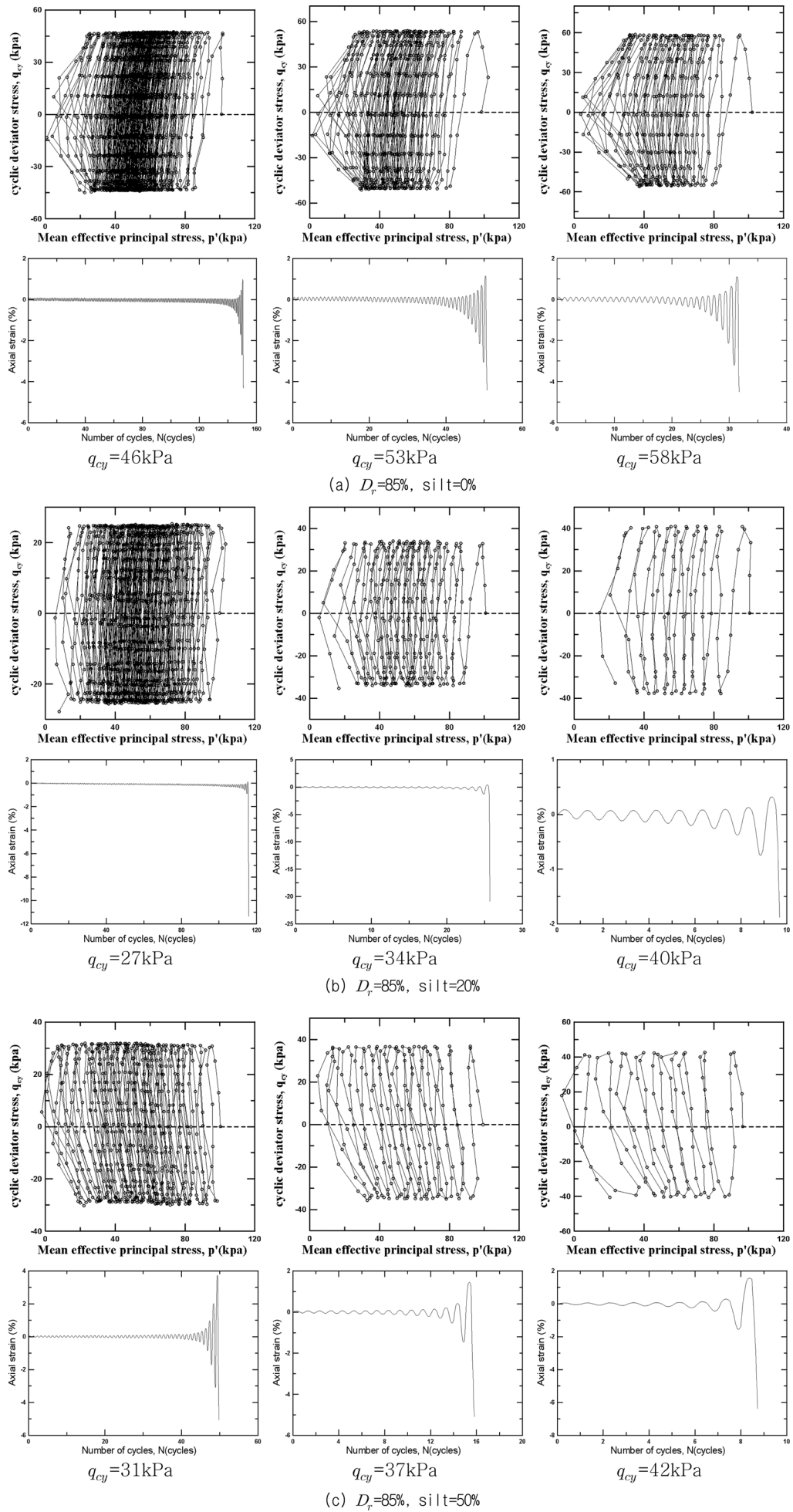
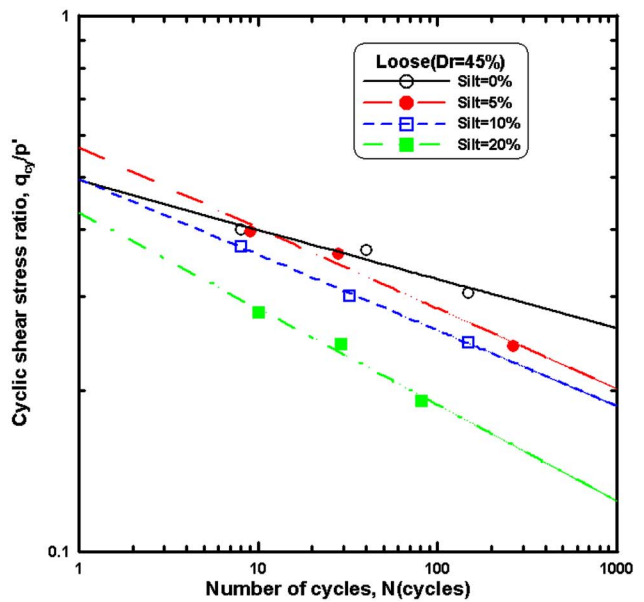


그림 3. 조밀상태에서 실트함유량에 따른 응력경로 및 축변형

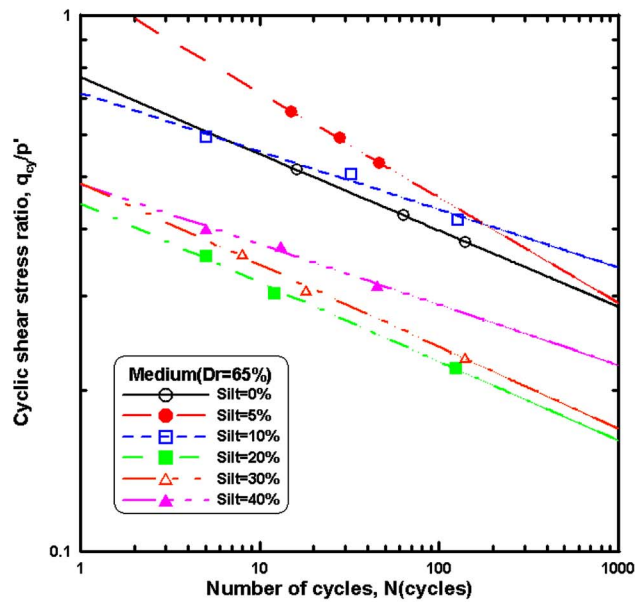
20%까지 CSR은 급격하게 감소하였으며, 그 후 실트함유량 20%를 넘어서는 다시 CSR이 조금씩 증가하는 것을 볼 수 있다. 김영수와 김대만(2008)은 실트함유량을 0~20%의 범위로 변화시켜 이방성을 달리한 비배수 반복삼축실험결과, 모든 이방성압밀시료에서는 실트함유량 20%까지 CSR이 감소하였으나, 등방압밀시료에서는 실트함유량 5%까지 조금 증가했다가 5% 이후부터 실트함유량 20%까지 감소하여 본 연구와 동일한 결과를 보였다. 또한 황대진(1993)은 豊浦표 준사에 비소성 실트함유량을 0, 10, 30, 50, 70, 100%로 달리하여 상대밀도 50%의 평균주응력이 일정한 상태에서 실시된 반복단순전단시험 및 반복삼축시험 결과 실트함유량 30%까지 N=20에서 구한 CSR은 감소하였고, 30% 이상의 실트함유량에서 다시 CSR이 점차 증가하는 현상을 관측하였다. 그리고 Koester(1992)는 그의 실내실험결과를 바탕으로 모래시료에 실트와 점토 크기의 세립토를 추가하게 되면, 세립토 함유량 24~30% 범위의 하한경계(lower bound)까지 CSR이 감소하며, 이 함유량을 넘어서 CSR은 세립토의 추가에 따라 다시 증가한다는 것을 알게 되었다. 본 연구결과에서도 Koester의 연구결과와 동일한 경향을 보였으며, 실트함유량을 좀 더 세분화한다면 하한경계가 달라지겠지만 본 연구에서 실시한 실트함유량 범위에서 낙동강 실트질 모래의 실트함유량 하한경계는 20%로 나타났고, 이 후 하한경계 이상의 실트함유량에서 중간상태와 조밀상태 실트질 모래의 CSR은 약 6~15%정도 증가하였다.

4.3 간극수압

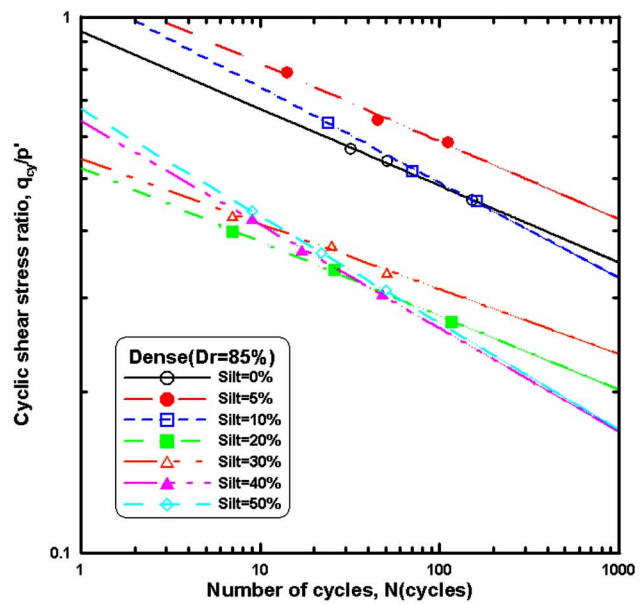
그림 6은 각 상대밀도에서 실트함유량에 따른 간극수압비(pore water pressure ratio, $\Delta u/p'$)와 반복비(cyclic ratio, N/N_L)로 정규화시켜 나타낸 것이다. 간극수압비($\Delta u/p'$)는 반복응력(q_{cy})에 의하여 발생하는 간극수압(Δu)을 등방압밀응력(p')으로 나눈 비이고, 반복비(N/N_L)는 응력제어의 반복횟수(N)를 액상화 발생시의 반복횟수(N_L)나눈 비이다. 각 조건마다 가하여진 반복응력이 다름에 따라 액상화가 발생하는 반복횟수가 달라 이를 비교하기 위해서는 이와 같은 방법으로 정규화시켜 표현하였다. 그림 6에서 보듯이 모든 경우에서 간극수압의 발달진행과정이 초기에 반복비 0.2까지 크게 발생되다가 중간부분인 반복비 0.2~0.8까지는 증가량이 다소 작아졌으며, 반복비 0.8이상에서 간극수압 다시 크게 발생되면서 액상화가 유발되는 S자 형태로 나타났다. Tianqiang과 Shamsher(1999)는 El-Horis et al.(1984)의 실험결과자료를 이용하여 간극수압비($\Delta u/p'$)와 반복비(N/N_L) 그래프에서 간극수압의 발달경향을 분석한 결과 점토질 모래시료의 초기간극수압이 순수모래시료보다 더 크게 나타난다고 하였다. 본 연구에서도 모래시료의 간극수압이 실트질 모래에 비하여 전반적으로 가장 작게 나타났으며, 조밀상태를 제외하고는 CSR이 가장 작았던 실트함유량 20%에서 간극수압이 가장 크게 발생되었다. 그러나 조밀상태에서는 실트함유량 0, 5, 50%에서 간극수압이 비교적 작게 발생되었으며, 그에 비하여 실트함유량 10, 30%에서 간극수압이 가장 크게 발생되었다. Amini와 Qi(2000)는 실트질 모래에서 간극수압 발생 특징과 액상화 저항력은 시료의 구조에 의해서는 큰 영향을 받지 않았다고 하였는데, 본 연구에서도 간극수압 발생



(a) 느슨상태



(b) 중간상태



(c) 조밀상태

그림 4. 반복횟수-반복전단응력비

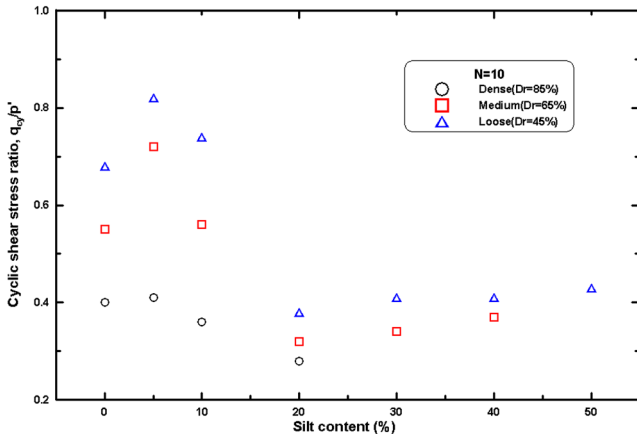


그림 5. 실트함유량에 따른 반복전단응력비 변화(N=10)

과 CSR의 크기에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 시료 조밀화에 따른 간극수압의 변화를 살펴보면 상대 밀도 증가에 따라 발생하는 간극수압이 전반적으로 조금 더 크게 나타났다.

4.4 원인 분석

기존의 연구에서 원인분석으로 황대진(1993)은 동일한 초기상태로 성형된 시료를 사용하여 정적재하시험과 반복재하시험을 실시한 결과를 비교 검토하여 실트함유량에 따른 CSR의 변화원인으로 dilatancy에 의한 저항력과 밀접한 관계가 있다고 하였다. 또한 Kuerbis et al.(1988)은 모래의 비배수 반복시험에서 입도와 세립질 함유량에 대한 영향을 연구한 결과, 일정한 skeleton 간극비에서 고정된 반복횟수로 비배수 반복전단을 실시할 경우 실트함유량 증가는 액상화에 대한 CSR를 다소 증가시켜 실트함유량에 따른 skeleton 간극비의 변화를 원인으로 분석하였다. 본 논문에서는 앞에서 살펴본 실트함유량 증가에 따른 반복전단응력비(CSR)의 변화에 간극수압은 큰 영향은 미치지 않는 것으로 분석되었고, 동일한 초기상태로 정적재하시험이 실시되지 않은 관계로 Kuerbis et al.(1988)이 주장했던 시료 압밀 후의 skeleton 간극비(e_s)를 산정해서 원인분석을 실시하였다. Kuerbis et al.(1988)은 모래에 실트를 첨가할 경우 실트는 모래의 간극에 들어가게 되므로 전단거동에 영향을 미치는 모래만의 간극비를 식 (1)로 제안하였고, 식 (1)을 이용하여 각 조건에서 세 가지 반복전단응력에 대한 시료의 압밀 후 평균 간극비(e)와 평균 skeleton 간극비(e_s)를 산정하여 그림 7에 비교하여 나타내었다.

$$e_s = \frac{V_T G_s \rho_w - (M_t - M_f)}{(M_t - M_f)} \quad (1)$$

여기서, e_s : skeleton 간극비

V_T : 시료의 총체적(cm^3)

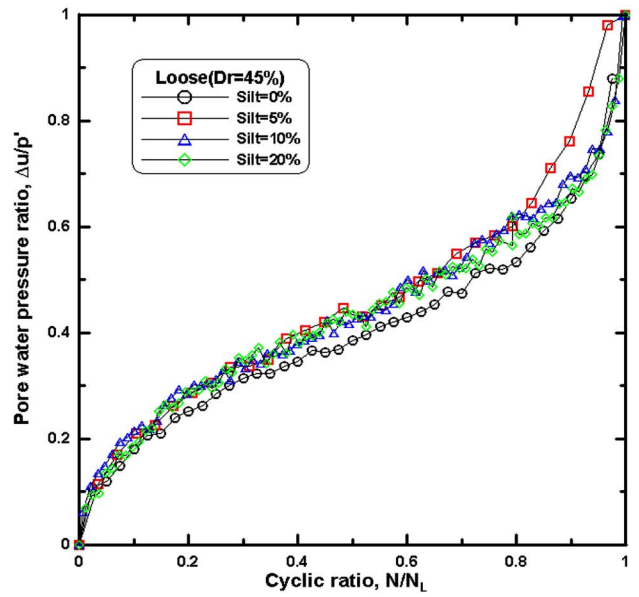
ρ_w : 물의 단위중량(g/cm^3)

G_s : 모래의 비중

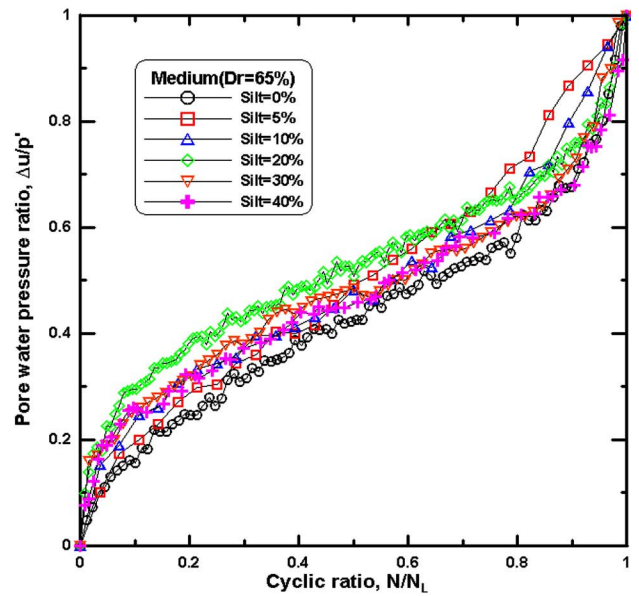
M_t : 모래와 세립토의 전체 중량(g)

M_f : 세립토의 중량(g)

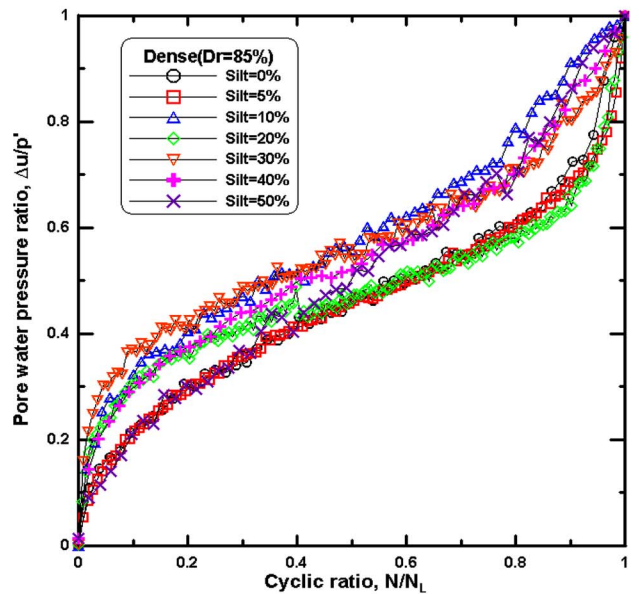
그림 7에서 상대밀도와 상관없이 모든 경우에서 실트함유



(a) 느슨상태



(b) 중간상태



(c) 조밀상태

그림 6. 반복비-간극수압비의 변화

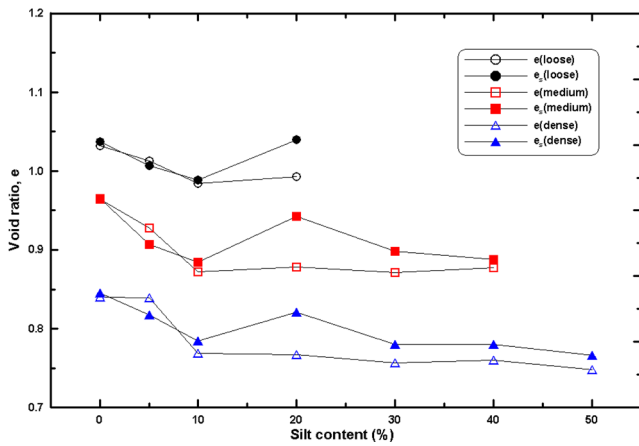


그림 7. 압밀 후 간극비와 skeleton 간극비의 비교

량 0%에서 압밀 후 간극비(e)는 skeleton 간극비(e_s)와 비슷하게 나타났으나, 5%에서 e_s 는 e 보다 감소하여 모래입자사이 간극 속에 실트가 채워져 조밀하게 된 것을 확인할 수 있다. 그러나 실트함유량 10%부터는 e_s 가 e 보다 점차 크게 나타나 20%에서 e_s 는 e 보다 상당히 크게 증가하였는데, 이는 모래입자 사이 간극의 체적보다 더 많은 실트가 첨가됨에 따라 모래입자끼리 맞물려있는 공간에 실트가 채워져서 일어나는 현상으로 이로 인하여 모래입자 사이의 맞물림(interlocking)에 의한 강도가 감소하게 되어 CSR이 감소되는 것으로 생각된다. 20% 이후부터 e_s 는 e 에 근접하였는데, 이 단계에서 실트가 점착력을 발휘할 수 있는 양이 되어 CSR이 조금씩 증가되는 것으로 판단되며, 전반적으로 실트함유량에 따른 CSR의 변화 경향과 일치하였다. 따라서 실트함유량에 따른 실트질 모래의 CSR 변화의 주된 원인으로는 실트질 모래의 전단거동에 영향을 미치는 모래만의 간극비인 skeleton 간극비(e_s)로 분석되었다.

5. 결론

본 연구에서는 실트함유량 변화에 따른 낙동강 모래의 반복전단강도 특성을 살펴보고자 낙동강 유역에 분포하는 모래와 실트를 채취하여 실트함유량 0~50% 범위로 실내에서 재성형된 시료에 대하여 일련의 비배수 반복삼축실험을 실시하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 시료성형은 수정습윤다짐법(modification of moist tamping)을 이용하여 압밀 후 일정한 목표상대밀도가 되도록 성형하였으며, 반복응력(q_{cy})은 응력반전(stress reversal)조건으로 압축측과 인장측을 오가면서 응력이 가하여졌다. 모든 시료에서 초기 반복전단이 가하여질 때는 큰 변형 없이 진행되다가 양진폭 변형률(double amplitude strain) 5%에 가까이 도달할 때 인장측에서 유동변형(flow deformation)의 파괴가 발생되었으며, 실트함유량이 증가함에 따라 순수모래의 반복거동에 비하여 더욱 큰 유동변형이 뚜렷하게 발생되면서 파괴되었다.
2. $N=10$ 일 때 실트함유량에 따른 반복전단응력비(CSR)의 변화는 실트함유량 5%까지는 CSR이 조금 증가하였으며, 실트함유량 5%를 지나서 20%까지 CSR은 급격하게 감소하였고, 그 후 실트함유량 20%를 넘어서는 다시 CSR이

조금씩 증가하였다. 낙동강 실트질 모래의 실트함유량 하한경계는 20%로 나타났으며, 이 하한경계를 지나서는 중간상태와 조밀상태 실트질 모래의 CSR은 약 6~15%정도 증가하였다.

3. 반복비(N/N_L)에 따른 간극수압비($\Delta u/p'$)의 변화는 모든 경우에서 초기에 반복비 0.2까지 크게 발생되다가 반복비 0.2부터 0.8까지는 증가량이 다소 작아졌으며, 반복비 0.8 이상에서 간극수압 다시 크게 발생되면서 액상화가 유발되는 S자 형태로 나타났다. 간극수압의 발달 경향을 전반적으로 검토한 결과 실트함유량에 따른 CSR 크기변화에 큰 영향을 미치지 않았다.
4. 압밀 후 간극비(e)와 skeleton 간극비(e_s)를 비교해 본 결과, 모든 상대밀도에서 실트함유량 0%에서의 e_s 와 e 는 비슷하게 나타났으나, 5%에서 e_s 는 e 보다 감소하고, 10%부터는 e_s 가 e 보다 점차 크게 나타나 20%에서 e_s 는 e 보다 상당히 크게 증가하였다. 20% 이후부터 e_s 는 e 에 근접하여 전반적으로 실트함유량에 따른 CSR의 변화 경향과 일치하였다. 따라서 실트함유량에 따른 실트질 모래의 CSR은 실트질 모래의 전단거동에 영향을 미치는 모래만의 간극비인 skeleton 간극비(e_s)에 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- 김영수, 김대만(2008) 실트 함유량 증가에 따른 낙동강 모래의 반복전단거동 특성. **한국지반공학회는문집**, 한국지반공학회, 제 24권, 제11호, pp. 79-89.
- 황대진(1993) 실트를 포함하는 모래질 흙의 액상화강도에 관한 연구. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제13권, 제2호, pp. 243-252.
- Annual Book of ASTM Standards (2007), Section Four Construction, Soil and Rock(I-1): D 420-D 5611, Vol. 04.08, pp. 518-541.
- Amini, F. and Qi, G.Z. (2000) Liquefaction testing of stratified silty sands. *Jour. of Geotechnical and Geoenvironmental Engrg.*, ASCE, Vol. 126, No. 3, pp. 208-217.
- Baziar, M.H. (1987) *Influence of the testing technique on the steady state lines of sand*. MS thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York.
- Chang, N.Y. (1990) Influence of fines content and plasticity on earthquake-induced soil liquefaction. *Contract No. DOCW3988-C-0078, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.*
- Dobry, R., Vasquez-Herrera, A., Ramli, M., and Vucetic, M. (1985) Advances in the art of testing soils under cyclic conditions. *Session Sponsored by Geotech. Engrg. Div., ASCE Convention*, ASCE, New York, pp. 39-50.
- El Hosri, M.S., Biarez, H., and Hicher, P.Y. (1984) Liquefaction characteristics of silty clay. *Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engrg.*, San Francisco, California, 3, pp. 277-284.
- Japanese Industrial Standards (2000), Japanese Geotechnical Society, Division A(Civil Engineering and Architecture) 1224.
- Kaufman, L.P. (1981) *Percentage silt content in sands and its effect on liquefaction potential*. PhD Thesis, University of Colorado, Denver.
- Koester, J.P. (1992) *Cyclic strength and pore pressure generation characteristics of fine-grained soils*. PhD Thesis, University of Colorado, Denver.

- Koester, J.P. (1993) Effects of fines type and content on liquefaction potential of low-to-medium plasticity fine-grained soils. *Proceedings of the 19th National Earthquake Conference*, Central United States Earthquake Consortium Memphis, Tennessee, 1, pp. 67-75.
- Kuerbis, R., Negussey, D., and Vail, Y.P. (1988) Effect of gradation and fines content on the undrained response of sand. *Geotechnical Special Publication No. 21*, pp. 330-345.
- Ladd, R.S. (1978) Preparing test specimens using undercompaction. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 1, No. 1, pp. 16-23.
- Lee, K.L. and Fitton, J.A. (1969) Factors affecting the cyclic loading strength of soil. *ASTM STP 450*, ASTM, pp. 71-95.
- Poran, J.C. and Rodriguez, J.A. (1989) Large ground deformations induced by the 1985 earthquake in Port Facilities in Chile. *Proceedings from the 2nd US-Japan Workshop on liquefaction*, Technical report NCEER-89-0032, pp. 118-130.
- Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., and Chung, R.M. (1985) Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Jour. of Geotechnical Engrg. Div.*, ASCE, Vol. 3, No. 12, pp. 1425-1445.
- Tianqiang, G. and Shamsheer, P. (1999) Liquefaction of silts and silt-clay mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engrg.*, ASCE, Vol. 125, No. 8, pp. 706-710.
- Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y. (1984) Criteria of soil liquefaction with SPT and fines content. *Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engrg.*, San Francisco, California, 3, pp. 255-262.
- Troncoso, J.H. (1990) Failure risks of abandoned tailings dams. *Proceedings of International Symposium on Safety and Rehabilitation of Tailing Dams*, Paris, pp. 82-89.
- Tuttle M., Law, T., Seeber, L., and Jacop, K. (1989) Liquefaction and ground failure in Ferland, Quebec triggered by the 1988 Saguenay earthquake. *Proceedings from the 2nd US-Japan Workshop on liquefaction*, Technical report NCEER-89-0032, pp. 102-117.
- Vaid, Y.P. and Negussey, D. (1988) Preparation of reconstituted sand specimens. *Advanced triaxial testing of soil and rock*, R. T. Doaghe, R. C. Chaney, and M. L. Silver, eds., ASTM, West Conshohocken, Pa., pp. 405-417.
- Vucetic, M. and Dobry, R. (1988) Cyclic triaxial strain-controlled testing of liquefiable sands. *Advanced triaxial testing of soil and rock*, R. T. Doaghe, R. C. Chaney, and M. L. Silver, eds., ASTM, West Conshohocken, Pa., pp. 475-485.

(접수일: 2009.6.22/심사일: 2009.8.5/심사완료일: 2009.9.16)