

# 실트질 함유량에 따른 낙동강 모래의 비배수 반복전단거동 특성

## Characteristics of Undrained Cyclic Shear Behavior of Nak-Dong River Sand by Silt Contents

김 영 수<sup>1</sup> Kim, Young-Su

김 대 만<sup>2</sup> Kim, Dae-Man

### Abstract

In this study, a series of undrained cyclic triaxial tests were performed with three different consolidation stress ratios ( $K_c=1.0, 1.5, 2.0$ ) to investigate the undrained shear strength characteristics of sands with respect to the amount of contained silt located around the basin of Nak-dong River. The test results show that the more the sand has silt, the lower is cyclic shear stress ratio (CSR) in all  $K_c$ , and that the higher  $K_c$  goes, the larger CSR decreases due to the increase of contained silt. The excessive pore pressure caused during shearing has an influence on the decrease of CSR by the high initial pore pressure in proportion to the amount of contained silt regardless of the  $K_c$  value. After consolidation, the analysis of the skeleton void ratio of the sample reveals that the main cause of the decrease of CSR as well as the increase of the initial excessive pore pressure is the increase of the skeleton void ratio in proportion to the amount of contained silt.

### 요 지

본 연구에서는 낙동강 유역에 분포하는 모래와 실트를 대상으로 실트 함유량에 따른 모래의 비배수 반복전단강도 특성을 파악하기 위하여 이방압밀비( $K_c=1.0, 1.5, 2.0$ )를 달리하여 일련의 비배수 반복삼축시험을 실시하였다. 시험결과 모든  $K_c$ 에서 실트 함유량이 증가함에 따라 반복전단응력비(CSR)가 감소하였으며,  $K_c$ 가 증가할수록 실트 함유량 증가에 의한 CSR의 감소가 더 크게 나타났다. 전단시 발생하는 과잉간극수압은  $K_c$ 에 관계없이 실트 함유량 증가에 따라 초기 과잉간극수압이 크게 발생되어 CSR의 감소에 영향을 미쳤으며, 또한 압밀 후 시료의 skeleton 간극비를 산정하여 분석한 결과 실트 함유량 증가에 비례하여 전반적으로 skeleton 간극비가 크게 증가하여 초기 과잉간극수압의 증가와 더불어 CSR 감소의 주요원인으로 파악되었다.

**Keywords** : Consolidation stress ratio, Cyclic stress ratio (CSR), Cyclic triaxial test, Silt content, Skeleton void ratio

### 1. 서 론

액상화에 대한 과거의 대부분 연구는 세립질이 거의 없는 균질하고 깨끗한 모래에 대하여 중점적으로 언

구되었다. 그러나 과거에 발생된 수많은 액상화 현상은 이들 세립질이 없는 균질하고 깨끗한 모래가 아닌 흙에서도 액상화가 발생할 가능성이 있다는 것을 보여주었으며 최근 많은 현장사례에서 찾아볼 수 있다. Poran &

1 정희원, 경북대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ.)

2 정희원, 경북대학교 토목공학과 연구원 (Member, Researcher, Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., ksmans11@hanmail.net, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Rodriguez(1989)에 의하면 1985년 칠레 중부에서 발생한 지진으로 수력댐의 파괴되었는데, 그 원인분석결과 순수 모래층 아래에 있는 실트질 모래층에서 부분적으로 액상화가 발생하였음이 확인되었다. 또한 Tuttle et al.(1989)은 1988년 캐나다 Quebec주의 Saguenay 지진에서 실트질 모래와 모래질 실트의 액상화에 대한 확실한 증거를 보였으며, 1987년 미국 California주의 Superstition Hills 지진시 남부 야생지역의 실트질 모래지반의 액상화를 발생시켰다. 그리고 Chang(1987)의 1976년 중국 Tangshan 지진 조사에 따르면 세립질 흙에서도 액상화 현상이 발생하였다고 하였다.

이와 같이 세계 곳곳에서 지진으로 인한 실트질 모래 지반이나 모래질 실트지반에서 액상화가 발생하였으며, 더 이상 지진의 안전지대라 할 수 없는 우리나라에도 하천유역에 많은 실트질 모래가 형성되어 있어 이에 대한 연구가 절실한 현실이다. 시료 채취장소인 낙동강 유역은 영남지방의 중앙저지를 흘러 부산 을숙도에 이르는 모래 지반이 넓은 지역에 걸쳐 분포되어 있다. 이러한 지역에 크고 작은 제방, 댐 그리고 교량을 비롯한 많은 토목 구조물뿐만 아니라 대단위 주택단지를 포함한 건축 구조물들이 건설되어 있고, 더욱이 건교부는 2011년까지 낙동강 수계에 7개의 댐을 추가로 건설한다는 계획을 발표하여 앞으로도 많은 구조물의 시공이 예상되는 지역이다. 이와 같이 구조물 아래 존재하는 모래 지반의 경우 작은 규모의 지진 혹은 진동하중과 정적하중에 의해서도 액상화 피해의 가능성이 존재하므로 이러한 지반에 대한 정적 및 반복전단강도의 평가가 필요하며, 또한 입도의 변화에 따른 이들 특성의 변화에 대한 평가도 동시에 요구된다.

따라서 본 연구에서는 대구 근교에 분포하는 낙동강 중류지역의 모래와 실트를 이용하여 간극비와 건조단위중량을 고정한 상태에서 실트의 함유량을 달리하여 실트질 모래시료를 습윤다짐법으로 실내에서 성형하여 비배수 반복삼축시험을 실시하였다. 또한 다양한 응력 조건하에서의 결과를 보기 위하여 등방 및 이방압밀상태로 시험을 실시하였다.

## 2. 이론적 배경

최근 많은 연구자들이 모래에 다양한 함유율로 실트를 혼합하여 반복강도에 대한 실험을 실시하였다. Lee & Fitton(1969) 등은 그들의 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 Tokimatsu & Yoshimi(1984)는 10% 이상의 세립질을 포함한 모래는 같은 N치를 갖는 순수 모래에 비하여 액상화 저항력이 훨씬 크다고 지적하였다. 그들은 N치가 20이상이고 세립질을 10% 이상 포함한 실트질 모래 또는 20% 이상의 실트가 포함되어 있는 모래질 실트는 액상화가 발생하지 않는다고 하였다. 그리고 Seed et al.(1985)은 현장데이터를 기반으로 하여 실트질 모래지반에서 동일  $(N_1)_{60}$ 치일 때 실트 함유량의 증가에 따라 액상화 저항력이 증가함을 보여주었고, Amini & Qi(2000)도 상대밀도를 고정한 상태에서 다양한 실트의 함유량에 대한 반복삼축시험을 실시하여 실트 함유량이 증가할수록 액상화 저항력이 커지는 것을 밝혔다.

그러나 Troncoso(1990)는 간극비를 0.85로 고정하고 실트 함유량을 0~30%범위로 변화시켜 모래의 반복강도를 비교하였는데 반복강도는 세립토인 실트 함유율이 증가함에 따라 감소한다고 하였다. 또한 Koester(1993)는 Chang(1990)의 자료를 이용하여 0.48의 일정한 간극비로 성형된 중간상태의 재성형된 모래실트 혼합토 시료로 시험한 결과 세립토 함유량 20%이하에서는 반복응력비가 감소하여 Troncoso(1990)의 결과와 비슷하였으나 세립토 함유량이 20%를 초과하면서 반복응력비가 다시 증가하는 것으로 나타났다. 그리고, Erten & Maher(1995)도 간극비를 고정하여 비소성 실트와 저소성 실트를 함유한 모래에 대하여 느슨한 상태와 중간상태를 재현하여 변형율제어의 반복삼축시험을 실시한 결과 비소성 실트의 경우 실트의 함유량이 증가할수록 분명한 간극수압의 증가를 발견하였다. 그리고 저소성의 실트의 경우 60%까지는 간극수압의 증가를 관찰하지 못하고 60% 이상에서 간극수압이 감소하는 것을 관찰하였다.

이와 같이 여러 학자들의 연구에서 대표적으로 Seed et al.(1985)과 Troncoso(1990)의 연구결과는 서로 상이하게 나타났다. 그 차이점은 그들의 연구에서 사용된 시료의 차이에서 비롯되는데, Troncoso의 연구에서 모래의 반복전단강도는 일정한 간극비에서 실험되었는데 이와 달리 Amini & Qi(2000)의 연구에서는 상대밀도를 고정한 상태로 그리고 Seed et al.의 연구에서는 동일한 SPT의  $(N_1)_{60}$ 치에서 반복응력비가 조사되었다는 점이다.

그들과 달리 Kuerbis et al.(1988)은 고정된 모래의 Skeleton 간극비 상태에서 비배수 시험으로 입도와 세립질 함유량의 영향을 연구하였는데, 이 연구에서 실트 함유량의 증가는 고정된 모래의 Skeleton 간극비에서 고정된 반복횟수로 발생하는 액상화에 대한 반복응력비를 다소 증가시킨다는 것을 확인하였다.

### 3. 시험 방법

#### 3.1 시료 특성

본 연구에서는 낙동강 중류 지역의 모래를 채취한 후 균질한 모래에 대한 시험을 위하여 #20체~#200체 사이의 잔류모래를 흐르는 물에 씻어서 clean sand로 만들어

시험에 사용하였다. 실트의 경우 모래채취장소의 주변에서 채취한 후 흐르는 물에 씻어 #200체 잔류시료를 제거한 뒤 통과시료를 건조시켜 사용하였다. 시료 준비 후 입도의 변화에 따른 실트질 모래의 액상화에 대한 반복전단강도를 살펴보기 위하여 모래에 실트 함유량을 0~20%로 혼합하여 인위적으로 실트질 모래를 성형하였다. 실트 함유량에 따른 각 시료의 기본 물성치와 입도 곡선은 표 1, 그림 1과 같고, 또한 각 실트질 모래 혼합도의 입자배열과 구조를 파악하기 위하여 SEM(scanning electron micrograph) 사진을 촬영하여 그림 2에 나타내었으며, 실트함유량이 증가함에 따라 더 많은 실트입자가 모래입자 주변에 붙어서 구성되어 있음을 볼 수 있다. 이는 반복전단시 모래입자간의 마찰력에 영향이 미칠 것으로 생각된다.

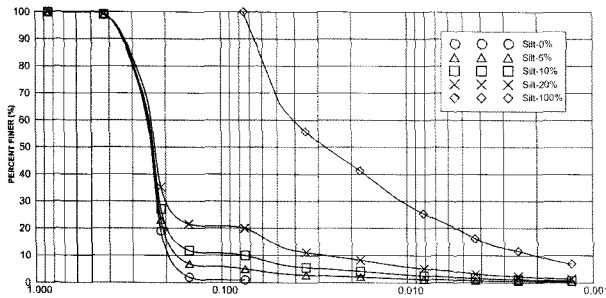


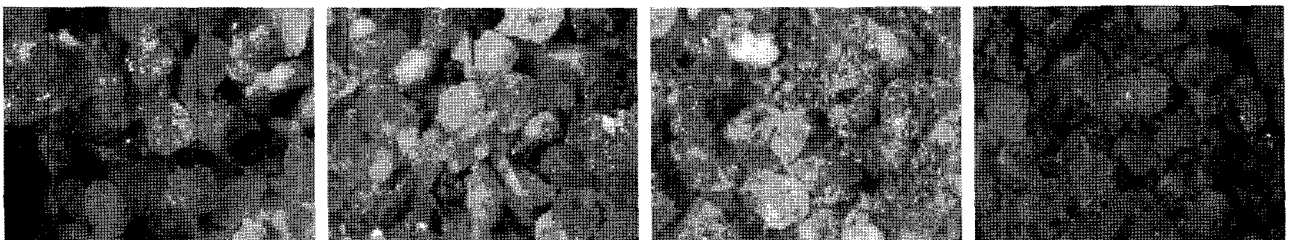
그림 1. 실트 함유량에 따른 각 시료의 입도곡선

#### 3.2 시험방법

본 연구의 실내시험에 사용된 시험기기는 Clarence K. Chan(CKC)이 개발한 자동화 삼축시험기로 정적 및 동적 시험이 모두 가능한 형식이다. 본 연구에서 실시된 시험의 시료는 직경 70mm, 높이 140mm이고 모두 습윤 다짐법(moist tamping)에 의해 동일 건조단위중량 1300 kg/m<sup>3</sup>과 동일 간극비 1.028로 성형되었다. 그림 3은 본

표 1. 실트 함유량에 따른 각 시료의 기본 물성치

Index properties	Silt-0%	Silt-5%	Silt-10%	Silt-20%	Index properties	Silt-100%
Specific gravity	2.637	2.641	2.640	2.638	Specific gravity	2.640
D10(mm)	0.20	0.18	0.08	0.03	Liquid limit	34
D30(mm)	0.23	0.22	0.22	0.20	Plastic limit	26
D60(mm)	0.25	0.25	0.25	0.24	Plastic index	8
Cu	1.250	1.389	3.125	8.000	Pass #4, %	100
Cz	1.058	1.076	2.420	5.556	Pass #200, %	100
Roundness	Subangular or Subrounded	Subangular or Subrounded	Subangular or Subrounded	Subangular or Subrounded	USCS	ML
USCS	SP	SP	SP	SM		



(a) 0%

(b) 5%

(c) 10%

(d) 20%

그림 2. 실트 함유량에 따른 각 시료의 SEM 사진

연구에서 사용된 습윤다짐법에 의한 시료성형방법을 나타낸 것으로 습윤다짐법은 시료에 물을 첨가하여 겔 보기 점착력을 증가시켜 다지므로 시료가 자립이 가능하게 되므로 가장 느슨한 상태로 성형할 수 있는 방법으로 알려져 있다. 또한 입자의 크기의 차이가 큰 경우 다지기 전 건조상태에서 균일하게 섞은 뒤 다시 물을 첨가하여 시료를 섞기 때문에 입자의 분포가 균질한 시료를 만들 수 있다. 보통 자연 상태에서는 퇴적에 의하여 모래와 실트가 층상을 이루고 있으나 본 연구에서는 혼합하여 균질한 상태로 성형하였다. 그 이유는 Vasquez-Herrera & Dobry(1989), Amini & Qi(2000) 등의 연구결과에 따르면 습윤다짐법에 의한 균질 실트질 모래시료와 침전법(sedimentation)에 의한 층상 실트질 모래시료의 액상화에 대한 저항력은 두드러진 차이를 나타내지 않았다고 결론을 내렸기 때문이다. Ladd(1978)는 층의 높이가 높아질수록 흙의 무게를 감소시키는 수정습윤다짐법(modification of moist tamping)을 통하여 균질한 시료를 얻었으나 본 연구에서는 시료를 7층으로 나누어 각층에 동일한 무게의 시료로 최종 층높이가 2cm가 되도록 각 층별 다짐

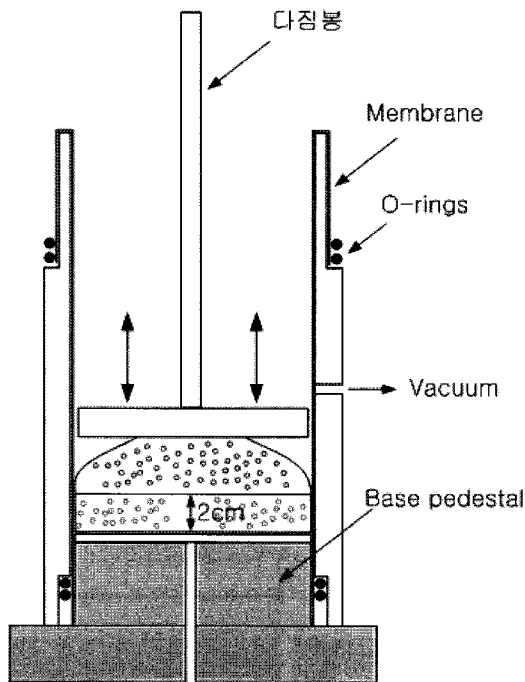
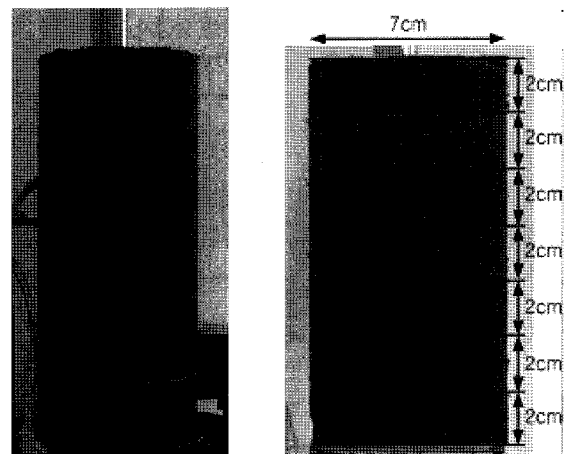


그림 3. 습윤다짐법에 의한 시료성형

수를 조절하여 성형하였다. 시료의 균질한 상태를 파악하고자 격층에 유성잉크 염색으로 층별 색을 달리하여 시료를 성형하였으며, 그림 4에서 보듯이 각 층별로 높이가 비교적 일정한 균질한 시료를 얻을 수 있었다. 시료 성형 후 포화 단계에서는 CO<sub>2</sub>를 순환시킨 후 탈기수를 순환시켜 배압을 300kPa까지 점차적으로 서서히 가하면서 B value가 0.99이상이 되도록 하였다.

시료의 포화가 완료된 후 압밀단계에서는 등방압밀조건( $K_c = \sigma_{1c}' / \sigma_{3c}' = 1.0$ ) 및 이방압밀조건( $K_c = \sigma_{1c}' / \sigma_{3c}' = 1.5, 2.0$ )으로 나누어 압밀을 실시하였다. 등방압밀조건에서는 같은 크기의 유효수직응력( $\sigma_{1c}'$ )과 유효수평응력( $\sigma_{3c}'$ )을 가하여 압밀을 실시하였으나, 이방압밀조건에서는 표 2와 같이  $\sigma_{3c}'$ 을 점차적으로 86kPa과 75kPa로 증가시키는 동안  $q_s' (= \sigma_{1c}' - \sigma_{3c}')$ 값도 점차적으로 각각 43kPa, 75kPa만큼 증가시켜 최종적으로 이방압밀비( $K_c = \sigma_{1c}' / \sigma_{3c}'$ )의 값이 1.5, 2.0가 되도록 하였으며, 이방압밀시 응력증가는 교란방지를 위하여 8단계로 나누었으며 각 단계마다 시료내의 과잉간극수압 소산이 충분히 이루어지도록 하였다. 이때 모든 압밀응력비에서 평균유효주응력,  $p_c' = (\sigma_{1c}' + 2\sigma_{3c}') / 3$ 은 100kPa로 일정하게 하였다. 압밀이 완료된 후 응력제어의 비배수 반복삼축시험을 실시하였으며, 가하여진 반복응력( $q_{cy}$ )은 0.1Hz 주기의 정현(sine)파를 이용하였다. 각각의 시료는 반복



(a) 시료성형 후

(b) 시료단면

그림 4. 시료의 균질성 확인

표 2. 압밀응력 조건

$K_c$	$\sigma_{3c}$ (kPa)	$\sigma_{1c}$ (kPa)	$\sigma_b$ (kPa)	$\sigma_{3c}'$ (kPa)	$\sigma_{1c}'$ (kPa)	$q_s$ (kPa)
1.0	400	400	300	100	100	0
1.5	386	429	300	86	129	43
2.0	375	450	300	75	150	75

표 3. 시험조건 및 압밀 전후의 간극비

Sample state	$K_c$	$q_{st}$ (kPa)	$q_{cy}$ (kPa)	$q_{cy}/q_{st}$	Stress reversal	Before consolidation		After consolidation	
						Dry unit weight ( $kgf/m^3$ )	Void ratio, e	Dry unit weight ( $kgf/m^3$ )	Void ratio, e
Silt 0%	1.0	0	32	>1	Reversal	1300	1.032	1302	1.028
		0	37	>1	Reversal	1300	1.032	1301	1.029
		0	41	>1	Reversal	1300	1.032	1302	1.027
	1.5	43	36	0.84	Non-reversal	1300	1.032	1304	1.025
		43	46	1.07	Intermediate	1300	1.032	1303	1.026
		43	52	1.21	Reversal	1300	1.032	1304	1.024
	2.0	75	58	0.77	Non-reversal	1300	1.032	1307	1.020
		75	67	0.89	Non-reversal	1300	1.032	1305	1.022
		75	75	1	Intermediate	1300	1.032	1305	1.022
Silt 5%	1.0	0	24	>1	Reversal	1300	1.032	1302	1.028
		0	37	>1	Reversal	1300	1.032	1302	1.028
		0	42	>1	Reversal	1300	1.032	1302	1.027
	1.5	43	17	0.40	Non-reversal	1300	1.032	1307	1.020
		43	27	0.63	Non-reversal	1300	1.032	1307	1.020
		43	56	1.30	Reversal	1300	1.032	1303	1.025
	2.0	75	20	0.27	Non-reversal	1300	1.032	1322	0.997
		75	64	0.85	Non-reversal	1300	1.032	1309	1.018
		75	75	1	Intermediate	1300	1.032	1309	1.017
Silt 10%	1.0	0	23	>1	Reversal	1300	1.032	1303	1.026
		0	29	>1	Reversal	1300	1.032	1305	1.023
		0	39	>1	Reversal	1300	1.032	1305	1.022
	1.5	43	14	0.33	Non-reversal	1300	1.032	1310	1.016
		43	22	0.51	Non-reversal	1300	1.032	1312	1.012
		43	24	0.56	Non-reversal	1300	1.032	1313	1.011
	2.0	75	7	0.09	Non-reversal	1300	1.032	1326	0.991
		75	11	0.15	Non-reversal	1300	1.032	1329	0.987
		75	15	0.2	Non-reversal	1300	1.032	1323	0.995
Silt 20%	1.0	0	19	>1	Reversal	1300	1.032	1306	1.021
		0	26	>1	Reversal	1300	1.032	1304	1.024
		0	29	>1	Reversal	1300	1.032	1305	1.023
	1.5	43	13	0.30	Non-reversal	1300	1.032	1326	0.991
		43	19	0.44	Non-reversal	1300	1.032	1318	1.004
		43	24	0.56	Non-reversal	1300	1.032	1317	1.005
	2.0	75	6	0.03	Non-reversal	1300	1.032	1368	0.930
		75	10	0.13	Non-reversal	1300	1.032	1366	0.932
		75	15	0.2	Non-reversal	1300	1.032	1336	0.977

응력( $q_{cy}$ )과 초기정적전단응력( $q_{st}$ )의 크기에 따라 응력 반전(reversal) 조건과 응력비반전(non-reversal)조건, 그리고 그 중간인 응력준반전(intermediate) 조건의 다양한 응력조건으로 시험하였다. 본 연구에서 실시한 시험 조건과 압밀 전후 변화된 건조단위중량과 간극비를 표 3에 나타내었다.

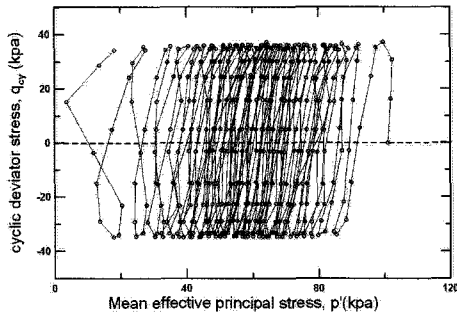
#### 4. 시험결과 및 분석

##### 4.1 응력경로와 축변형

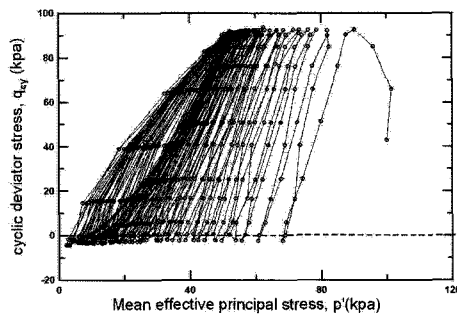
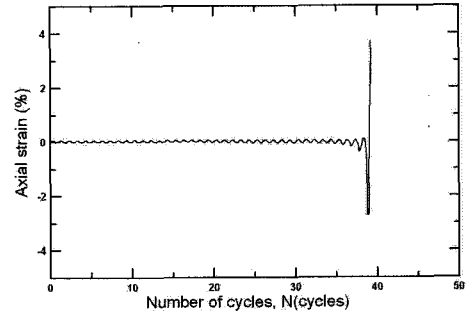
본 연구에서 실시된 모든 실험에서 파괴유형은 크게 그림 5와 같이 크게 4개의 유형별로 나눌 수 있다. 그림 5(a)는 reversal 조건에서 나타나는 거동으로서 초기 반

복전단이 진행될 때는 잔류변형률(RS, residual strain)이 나 양진폭변형률(DAS, double amplitude strain) 없이 진행되다가 인장측에서 유동변형(flow deformation)이 발생하여 파괴가 된다. (a)의 패턴의 경우 실트함유율에 상관없이 모든 등방압밀조건에서 나타난 거동이다. (b)의 경우는 intermediate reversal 조건 및 intermediate

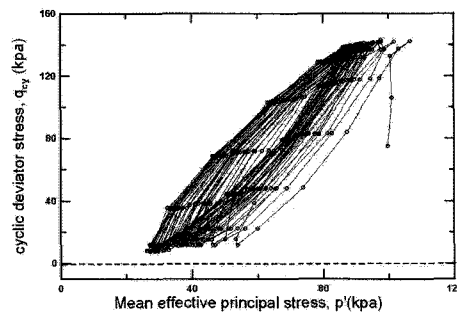
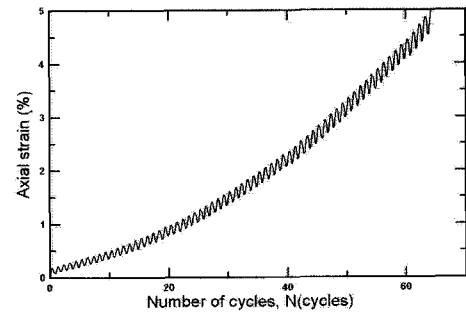
reversal 조건에 가까운 non-reversal 조건에서 나타나는 형태로 유동 액상화가 발생되지 않고 RS에 의해 파괴되는 형태로 응력경로에서도 (a)의 경우보다 기울어짐을 알 수 있다. (c)는 non-reversal 조건에서 나타나는 형태로 (b)와 유사하나 초기 반복횟수에서 큰 변형이 일어난 뒤 변형이 점차 줄어들어 초기에 작은 변형을 보인다



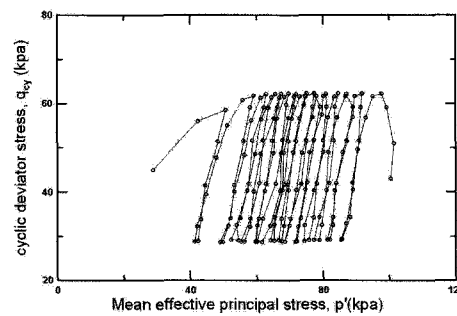
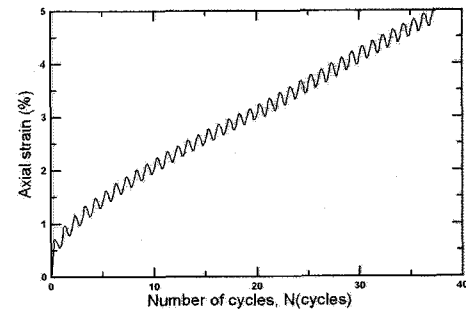
(a) Silt=0%,  $K_c=1.0$ ,  $q_{cy}=37$ kPa



(b) Silt=0%,  $K_c=1.5$ ,  $q_{cy}=46$ kPa



(c) Silt=0%,  $K_c=2.0$ ,  $q_{cy}=67$ kPa



(d) Silt=20%,  $K_c=1.5$ ,  $q_{cy}=19$ kPa

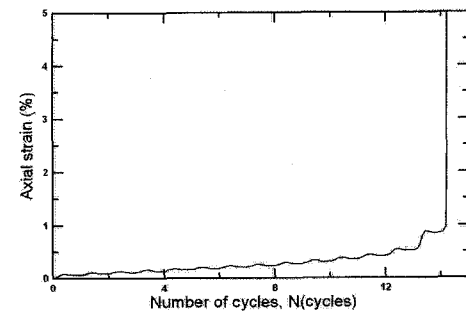


그림 5. 파괴유형별 응력경로와 축변형

반복횟수 증가에 따라 변형이 커지는 (b)의 경향과 차이를 보인다. 따라서 (b)는 축변형률 곡선의 기울기가 증가 형태이고 (c)는 감소형태를 나타내게 된다. 응력경로에서도 (b)의 경우보다 곡선의 기울기가 더 기울어지게 된다. (d)는 초기정적전단응력( $q_{st}$ )이 아주 큰 non-reversal 조건에서 볼 수 있는 형태로 반복횟수 초기에는 축차적으로 축변형율이 일어나다가 후에 큰 유동변형이 발생되어 파괴되는 형태이다. 앞에서 설명한 다른 3가지 형태의 파괴는 실트 함유량이 증가하더라도 같은 조건의 모래 거동과 유사하게 나타났으나 (d)와 같은 파괴형태는 같은 조건에서 모래의 거동과 달리 실트 함유량이 증가함에 따라 더욱 뚜렷하게 큰 유동변형이 발생되면서 파괴되었다.

#### 4.2 반복전단강도

포화 모래지반의 비배수 반복전단강도는 상대밀도, 초기정적전단응력( $q_{st}$ ), 그리고 파괴시점변형률의 정의 즉, 액상화 저항의 정의에 의존하는 것이 많은 학자들의 연구에 의하여 밝혀졌다. 여기서 액상화 저항의 정의는 반복응력에 의한 흙의 파괴시 변형률을 정의하는 것으로 응력반전(reversal)이 있는 경우는 양진폭 변형률(D.A.S) 5%정도로 보며, 대부분 이 시점에서  $p' = 0$ 의 초기액상화가 발생한다. 응력반전이 없는 경우는 잔류변형률의 증가로 인하여 파괴에 도달하는데, Mohamad & Dorby(1986) 등은 잔류변형(R.S) 5%를 기준으로 보았으며, Uchida & Hasegawa(1986) 등은 잔류변형 10%를 파괴기준으로 보는 등 연구자들에 따라 각각 다르게 정의되었다. 본 연구에서는 파괴시 변형률을 응력반전이 있는 등방압밀 조건( $q_{st} = 0$ )에서는 양진폭 변형률 5%, 응력반전이 없는 이방압밀조건( $q_{st} \neq 0$ )에서는 Mohamad & Dobry(1986) 등이 제안한 잔류 변형률 5%를 파괴기준으로 하여 파괴시의 반복응력횟수(N)를 구하였으며, 그 결과를 표 4에 나타내었다.

표 4의 결과로 실트 함유량 변화에 따른 반복전단응력비( $q_{cy}/p'$ )와 반복횟수(N)의 관계 그래프를 그림 6에 이방비에 따라 각각 도시하였다. 결과에서 볼 수 있듯이 모든 이방비에서 전반적으로 실트 함유량이 증가함에 따라 반복전단응력비가 감소하여 Troncoso(1990)의 결과와 같은 경향을 나타냈다. 이방비에 따른 결과를 보면 순수모래시료(silt 0%)에서는 일반적인 경향대로 이방비가 증가할수록 반복전단응력비가 크게 증가되는 것

을 알 수 있으나, 실트질 모래시료에서는 이방비가 증가할수록 실트 함유량 증가에 따른 반복전단응력비는 크게 감소하였으며, 감소폭 또한 더 크게 나타났다. 따라서 본 결과로부터 이방비가 증가할수록 실트 함유량 증가에 의한 반복전단응력비의 감소가 더 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

위 결과의 경향을 좀 더 자세히 관찰하기 위하여 그림 7에서는 그림 6을 이용하여 N=10일 때의 반복전단

표 4. 파괴시 반복횟수

Sample state	$K_c$	$q_{cy}$ (kPa)	Number of cycles, N ( $\epsilon = 5\%$ )	Axial strain
Silt 0%	1.0	32	147	D.A.S
		37	40	
		41	8	
	1.5	36	238	R.S
		46	65	
		52	13	
	2.0	58	69	
		67	39	
		75	21	
Silt 5%	1.0	24	264	D.A.S
		37	28	
		42	7	
	1.5	17	147	R.S
		27	50	
		56	5	
	2.0	20	36	
		64	7	
		75	2	
Silt 10%	1.0	23	160	D.A.S
		29	21	
		39	2	
	1.5	14	126	R.S
		22	45	
		24	28	
	2.0	7	45	
		11	19	
		15	5	
Silt 20%	1.0	19	81	D.A.S
		26	29	
		29	10	
	1.5	13	43	R.S
		19	15	
		24	4	
	2.0	6	59	
		10	13	
		15	2	

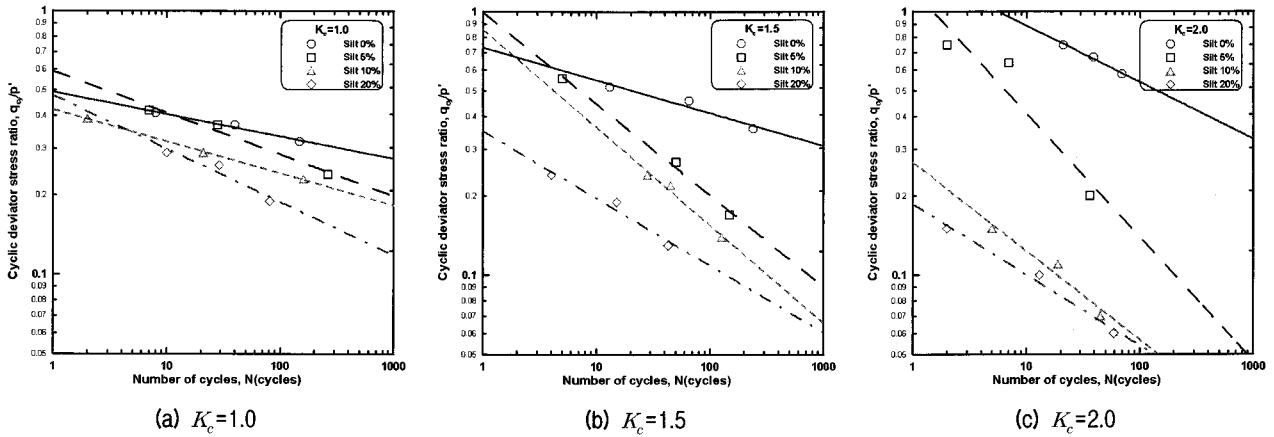


그림 6. 실트 함유량에 따른 반복전단응력비( $q_{cy}/p'$ )와 반복횟수(N) 관계

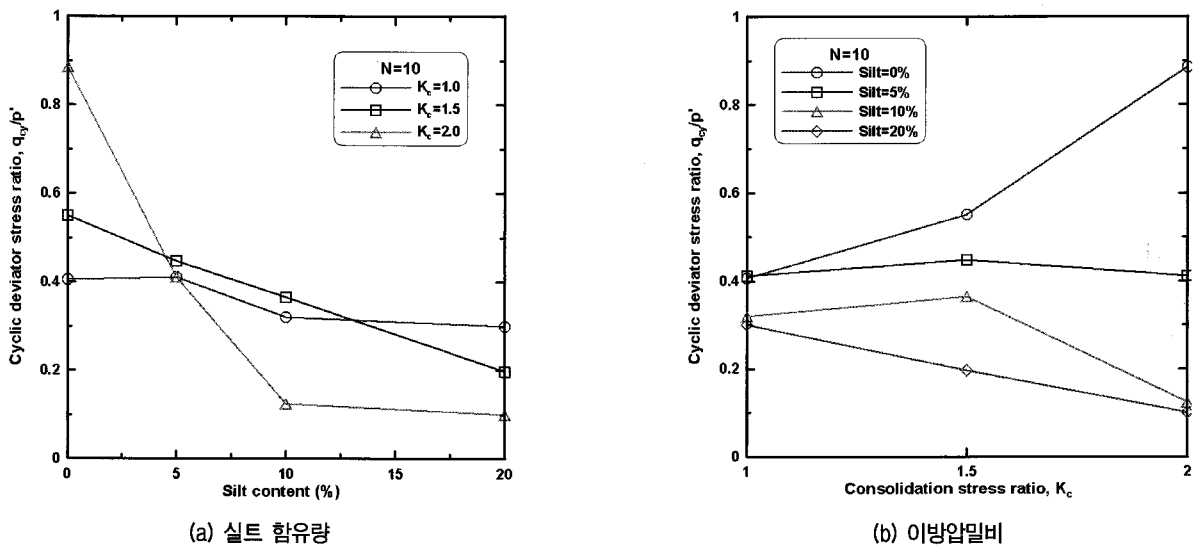


그림 7. 실트 함유량과 압밀이방비에 따른 반복전단응력비(N=10)의 변화

응력비를 구한 후 실트 함유량과 압밀이방비에 따라 그래프를 도시하여 나타내었다. 그 결과 그림 7(a)에서 실트 함유량에 따라 반복전단응력비가 감소하였으며,  $K_c = 1.0$ 의 등방압밀시료보다는  $K_c = 1.5, 2.0$ 의 이방압밀시료에서 더 큰 감소를 보였다. 그림 7(b)에서는 실트가 없는 순수모래시료에서는 이방비 증가에 따라 반복전단응력비가 뚜렷이 증가하였으나 실트 함유량이 5, 10, 그리고 20%까지 증가에 의하여 이방비가 증가할수록 반복전단응력비가 점점 감소함을 볼 수 있었다.

#### 4.3 간극수압

실트 함유량에 따른 반복전단강도의 감소 원인을 분석하고자 반복전단시 발생되는 과잉간극수압( $u$ )을 반복전단응력( $q_{cy}$ )로 나누어 정규화시켰다. 보통 정규화는 구속응력으로 나누는 것을 말하나 본 연구에서는 구속

응력은 모든 조건에서 일정하였고 반복전단응력을 달리하였으므로 반복전단응력이 클수록 과잉간극수압이 커져 비교분석하기 힘든 이유로 반복전단응력으로 과잉간극수압을 나누어 정규화시켰다. 그림 8은 반복횟수에 따른 정규화된 과잉간극수압( $u/q_{cy}$ )을 나타낸 것이다. Tianqiang & Shamsheer(1999)는 El-Hosri et al.(1984)의 결과와 시험을 통하여 간극수압비(pore pressure ratio)와 반복횟수비(cyclic ratio)의 관계 그래프에서 순수모래와 점토모래 혼합토의 간극수압 발달경향을 분석하여 점토모래 혼합토에서 초기의 간극수압 발달이 순수모래시료보다 더 큼을 언급하였다. 본 연구에서도 모든 이방비에서 실트 함유량 증가에 따라 초기 과잉간극수압이 크게 발생하는 것을 볼 수 있었으며, 등방시료보다는 이방시료에서 초기 과잉간극수압이 더 크게 발생하였다. 하지만 이방시료에서 실트 5, 10, 20% 함유시료는 서로 비슷한 경향을 보여 CSR의 결과와 상이하게 나타났다.



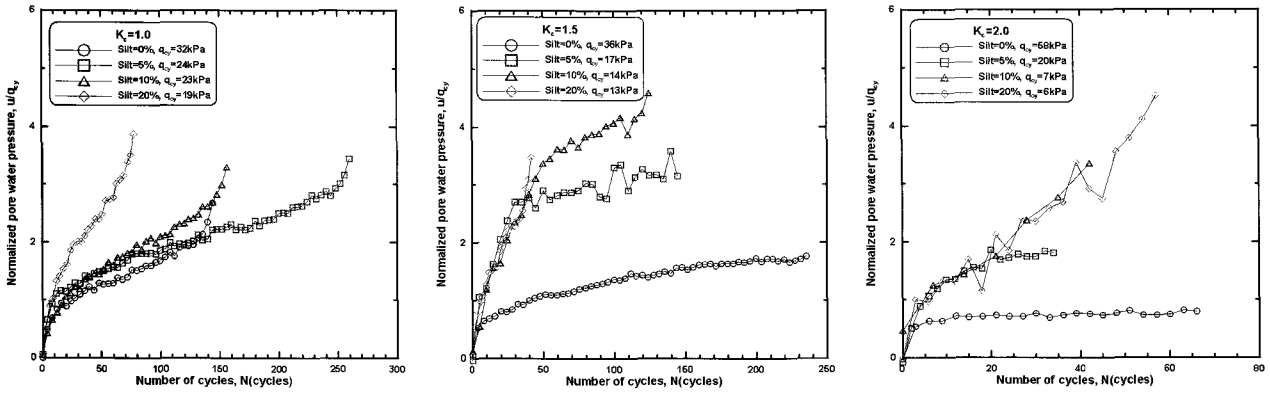


그림 8. 실트 함유량에 따른 정규화된 과잉간극수압

그러나 실트 함유량에 따른 초기 과잉간극수압의 증가로 인하여 CSR 감소에 영향을 미쳤음을 알 수 있다.

#### 4.4 간극비의 영향

등방 및 이방압밀시험에서 실트 함유량에 따른 반복전단응력비의 감소원인으로 전단시 발생하는 간극수압의 효과는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다. Kuerbis et al.(1988)은 모래의 비배수 반복시험에서 입도와 세립질 함유량에 대한 영향을 연구하였는데, 이들 연구에서 일정한 skeleton 간극비의 시험에서 일정한 반복횟수로 비배수 반복전단을 실시할 경우 실트 함유량의 증가는 액상화에 대한 반복전단응력비를 다소 증가시킨다고 하였다. 따라서 Kuerbis et al.(1988)의 연구결과와 실트 함유량에 따른 반복전단응력비는 skeleton 간극비와 관련 있는 것으로 생각되어 성형시험의 압밀 후 skeleton 간극비를 산정해서 원인분석을 하였다.

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 통하여 각 조건에서 세 가지 반복전단응력에 대한 시험의 평균 skeleton 간극비를 계산하여 표 5에 나타내었다.

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

여기서,  $e_s$  : Skeleton void ratio

$V_T$  : 시험의 총체적( $m^3$ )

$\rho_w$  : 물의 단위중량( $kg/m^3$ )

$G_s$  : 모래의 비중

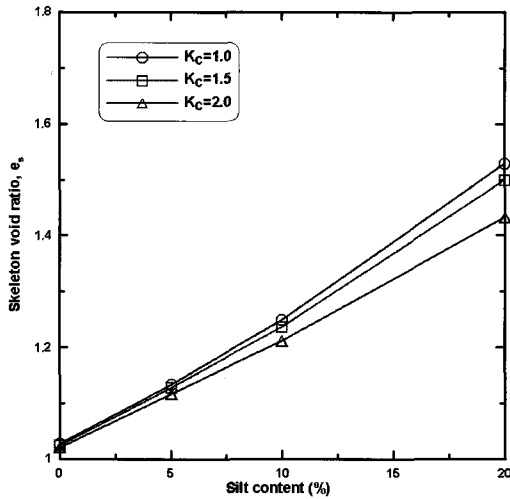
$M_t$  : 모래와 세립토의 전체 중량( $kg$ )

$M_f$  : 세립토의 중량( $kg$ )

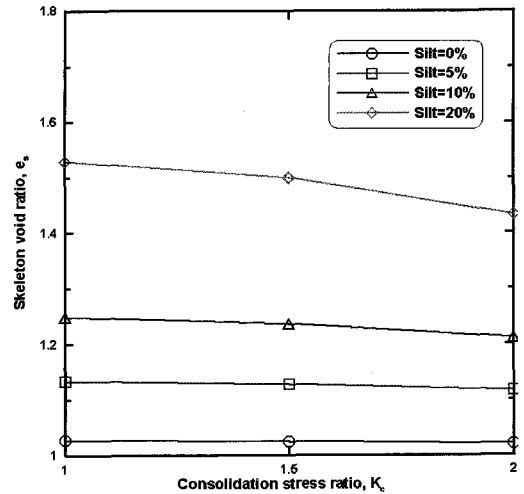
표 5. 압밀 후 skeleton 간극비

Silt content	$K_c$	Skeleton void ratio( $e_s$ ) after consolidation	Cyclic stress ratio, CSR (N=10)
0%	1.0	1.028	0.406
	1.5	1.025	0.550
	2.0	1.021	0.886
5%	1.0	1.134	0.411
	1.5	1.128	0.448
	2.0	1.117	0.411
10%	1.0	1.249	0.320
	1.5	1.237	0.365
	2.0	1.212	0.124
20%	1.0	1.528	0.300
	1.5	1.500	0.196
	2.0	1.433	0.100

그림 9는 표 5를 이용하여 실트 함유량 증가와 이방압밀비에 따른 skeleton 간극비의 변화를 도시하였다. 그림 9(a)에서 실트 함유량의 증가에 비례하여 전반적으로 skeleton 간극비가 크게 증가함을 볼 수 있으며 이방압밀비가 클수록 skeleton 간극비의 증가가 다소 작게 나타났다. 또한 그림 9(b)에서 순수모래에서 실트가 첨가될수록 skeleton 간극비가 크게 증가되었으며 이방압밀비 증가에 따라서는 skeleton 간극비가 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 결과는 이방압밀비가 클수록 skeleton 간극비의 증가가 다소 작게 나타나는 것과 마찬가지로 앞서 언급하였던 반복전단응력비의 결과와 다소 상이하였는데, 그 이유로는 가해진 반복응력의 반전(reversal), 비반전(non-reversal)조건에 의한 파괴기준이 상이하기 때문인 것으로 생각된다. 즉 응력반전 조건에서는 시험이 유동액상화(flow liquefaction)에 의해서 파괴가 되었고 그때의 반복횟수를 파괴반복횟수로 규정하였으나 응력비반전조건에서는 주로 반복변동



(a) 실트 함유량



(b) 이방압밀비

그림 9. Skeleton 간극비의 변화

(cyclic mobility)에 의해 변형이 점차 진행되어 파괴 변형률 5%일 때의 반복횟수를 파괴반복횟수로 규정하여 응력조건에 의한 차이라고 생각된다. 따라서 Kuerbis et al.(1988)의 연구와 같이 동일한 skeleton 간극비에서 동일한 응력조건과 반복횟수로 실트 함유량의 증가에 따른 반복전단거동을 연구하는 것이 필요할 것으로 생각된다. 그러나 본 연구에서 전반적으로 실트 함유량에 따라 skeleton 간극비 증가가 아주 크게 되었으며, 그에 따라 반복전단응력비의 감소가 발생되었음을 알 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 낙동강 유역에 분포하는 모래와 실트를 대상으로 실트 함유량에 따른 모래의 반복전단강도 특성을 파악하기 위하여 일련의 비배수 반복삼축시험을 실시하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 세 가지 이방압밀비( $K_c=1.0, 1.5, 2.0$ ) 모두에서 실트 함유량이 증가함에 따라 반복전단응력비(cyclic stress ratio, CSR)가 감소하였다. 또한 이방압밀비( $K_c$ )에 따른 결과를 보면 순수모래시료(silt 0%)에서는 일반적인 경향대로  $K_c$ 가 증가할수록 CSR이 크게 증가되는 것을 알 수 있으나, 실트질 모래시료에서는  $K_c$ 가 증가할수록 실트 함유량 증가에 따른 반복전단응력비는 크게 감소하였으며, 감소폭 또한 더 크게 나타났다. 따라서 본 결과로부터 이방비가 증가할수록 실트 함유량 증가에 의한 반복전단응력비의 감소가 더 크게 나타났다.

- (2) 실트 함유량에 따른 반복전단강도의 감소 원인을 분석하고자 반복전단시 발생하는 과잉간극수압( $u$ )을 반복전단응력( $q_{cy}$ )로 나누어 정규화시켰다. 그 결과  $K_c$ 에 관계없이 실트 함유량 증가에 따라 초기 과잉간극수압이 크게 발생하는 것을 볼 수 있으며, 등방시료보다는 이방시료에서 초기 과잉간극수압이 더 크게 발생하였다. 따라서 실트 함유량에 따른 초기 과잉간극수압의 증가로 인하여 CSR 감소에 영향을 미쳤음을 알 수 있다.
- (3) 실트 함유량 증가에 비례하여 전반적으로 skeleton 간극비가 크게 증가하여 그 결과로 CSR의 감소가 발생되었음을 알 수 있었다. 그러나  $K_c$  증가에 따라서는 skeleton 간극비가 다소 감소하는 경향을 나타내어 반복전단응력비의 결과와 다소 상이하였는데, 그 이유는 반복응력의 반전(reversal), 비반전(non-reversal) 조건에 의한 파괴기준의 상이함에서 온 결과로 유추되었다.
- (4) 본 연구를 통하여 실트 함유량 증가에 따른 모래의 액상화 저항력에 대한 정확한 특성을 파악하기 위해서는 압밀 후 동일한 skeleton 간극비에서 동일한 응력조건과 반복횟수로 비배수 반복삼축시험을 실시하여 비교분석이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

## 참고 문헌

1. 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.

2. Chang, N. Y. (1987), "Liquefaction susceptibility of fine-grained soils preliminary study report", *Contract No. DACW3984-M-4230*, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
3. 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.
4. 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.
5. Erten, D., and Maher M. H. (1995), "Cyclic undrained behavior of silty sand", *Soil Dynamics and Earthquake Engrg.*, Vol.14, No.2, pp.115-123.
6. Kaufman, L. P. (1981), "Percentage silt content in sands and its effect on liquefaction potential", PhD Thesis, University of Colorado, USA.
7. 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.
8. Kuerbis, R., Negusse, 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.
9. Ladd, R. S. (1978), "Preparing test specimens using undercompaction", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.1, No.1, pp.16-23.
10. Lee, K. L., and Fitton, J. A. (1969), "Factors affecting the cyclic loading strength of soil", *ASTM STP 450*, ASTM, pp.71-95.
11. Mohamad, R., and Dobry, R. (1986), "Undrained monotonic and cyclic triaxial strength of sand", *Journal of Geotechnical Engrg. Div.*, ASCE, Vol.112, No.10, pp.941-958.
12. Poran, J. C., and Rodriguez, J. A. (1989), "Large ground deformations induced by the 1985 earthquake in Port Facilities in Chile", *Proceedings form the 2nd US-Japan Workshop on liquefaction*, Technical report NCEER-89-0032, pp. 118-130.
13. 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.
14. Tianqiang, G., and Shamsher, P. (1999), Liquefaction of silts and silt-clay mixtures, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engrg.*, ASCE, Vol.125, No.8, pp.706-710.
15. 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.
16. 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.
17. Tuttle M., Law, T., Seeber, L., and Jacop, K. (1989), "Liquefaction and ground failure in Ferland, Quebec triggered by the 1988 Saguenay earthquake", *Proceedings form the 2nd US-Japan Workshop on liquefaction*, Technical report NCEER-89-0032, pp.102-117.
18. Uchida, K., and Hasegawa, T. (1986), "Strength-deformation characteristics of a soil subjected to initial shear stress", *Soils and Foundations*, Vol.26, No.1, pp.11-24.
19. Vasquez-Herrera, A., and Dobry, R. (1989), "The behavior of undrained contractive sand and its effects on seismic liquefaction flow failures of earth structures", *Contract No. 86-003*, Department of Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.

(접수일자 2008. 7. 23, 심사완료일 2008. 10. 20)