

실트 함유율에 따른 낙동강 모래의 반복전단거동

Undrained Cyclic Shear Behavior for Nak-Dong River Sand Due to Silt contents

김영수¹⁾, Young-Su Kim, 김대만²⁾, Dae-Man Kim, 신지섭³⁾, Ji-Seop Shin, 나윤영⁴⁾, Yun-Young, Na

¹⁾ 경북대학교 건설공학부 토목공학전공 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Kyungpook Nat. Univ.

²⁾ 경북대학교 건설공학부 토목공학전공 박사, Doctor, Dept. of Civil Eng., Kyungpook Nat. Univ

³⁾ 경북대학교 건설공학부 토목공학전공 박사과정, Doctor Course, Dept. of Civil Eng.,
Kyungpook Nat. Univ.

⁴⁾ 경북대학교 건설공학부 토목공학전공 석사과정, Master Course, Dept. of Civil Engineering,
Kyungpook Nat. Univ.

SYNOPSIS : This study was carried out to improve our understanding about the influence of silt content on the stress-strain of sand under cyclic loading. Soil specimens were prepared by wet-tamping method as same void ratio and specimen's silt contents on total weights was changed from 0% to 20%. Also, effects of the silt contents on the stress-strain response were studied at different anisotropic consolidation ratio, $Kc=1.0, 1.5, 2.0$ condition. As a result, cyclic shear strength decreased as silt contents increased in same stress ratios. In same silt contents, cyclic shear strength increased as Kc increased in lower silt contents, but in higher silt contents, it had reverse results.

Key words : Undrained cyclic shear, silt content, Liquefaction

1. 서 론

액상화 현상은 느슨한 포화 사질토 지반에서 일어날 수 있는 가장 위험한 경우이다. 이러한 현상을 규명하기 위하여 많은 연구자들이 실내시험을 통하여 모래의 액상화 현상을 규명하였고 액상화 강도에 영향을 미치는 많은 인자들을 연구하였다. 그러나 대부분의 연구는 깨끗한 모래에 대하여 수행되었다. 실제 지반의 경우 깨끗한 모래지반으로 존재하기 어렵고 대부분의 경우 세립질을 포함한 상태로 존재한다. 최근 많은 액상화 사례에서도 거의 실트질 모래지반에서 발생되어 세립질 함유율은 액상화를 평가하기 위하여 무시해서는 안되는 중요한 요소이다. 실트나 점토질이 함유된 모래지반의 경우는 반복거동이 아직 분명하게 분석되지는 않았으며 그러한 지반의 세립질 함유율이나 소성지수와 간극비를 이용한 액상화 평가가 제시되지 않고 있다.

이에 본 연구에서는 낙동강 모래와 실트를 이용하여 낙동강 실트질 모래의 액상화 저항강도 특성을 연구하기 위하여 비배수 반복삼축시험을 실시하였다. 대구 근교에 분포하는 낙동강 중류지역의 모래와 실트를 채취한 후 간극비와 건조단위중량을 고정한 상태에서 실트 함유율을 달리하여 입도를 변화시켜 습윤다짐법으로 실내에서 재성형하여 비배수 반복삼축시험을 실시하였다. 그 결과로부터 초기지반조건

이 동일한 경우 실트 함유율의 차이로 인한 비배수 반복전단강도에 대하여 연구 분석하였다. 또한 다양한 응력조건하에서의 결과를 보기 위하여 등방 및 이방압밀상태에서 시험을 실시하였다.

2. 실내시험

2.1 시료특성

본 연구에서는 낙동강 중류 지역의 모래를 채취한 후 깨끗한 모래에 대한 시험을 위하여 #20체~#200체 사이의 잔류모래를 흐르는 물에 씻어서 clean sand로 만들어 시험에 사용하였다. 실트의 경우도 낙동강 중류 지역에서 채취한 후 흐르는 물에 씻어 #200체 위의 시료를 제거한 뒤 남은 시료를 자연건조시켜 사용하였다. 시료 준비 후 실트 함유율의 변화에 따른 실트질 모래의 반복전단강도를 연구하기 위하여 모래와 실트를 섞어 실트질 모래를 인위적으로 구성하였으며 시료에 대한 기본 물성치는 표 1 과 2에 나타내었고 각 시료에 대한 입도는 그림 1에 나타내었다.

표 1. 실트질 모래의 물성치

Index properties	Silt contents			
	0%	5%	10%	20%
Gs	2.637	2.641	2.640	2.638
D ₁₀ (mm)	0.20	0.18	0.08	0.03
D ₃₀ (mm)	0.23	0.22	0.22	0.20
D ₆₀ (mm)	0.25	0.25	0.25	0.24
C _u	1.250	1.389	3.125	8.000
C _z	1.058	1.076	2.420	5.556
USCS	SP	SP	SP	SM

표 2. 실트의 물성치

Gs	LL(%)	PL(%)	PI(%)	Pass #4, (%)	Pass #200, (%)	USCS
2.640	34	26	8	100	100	ML

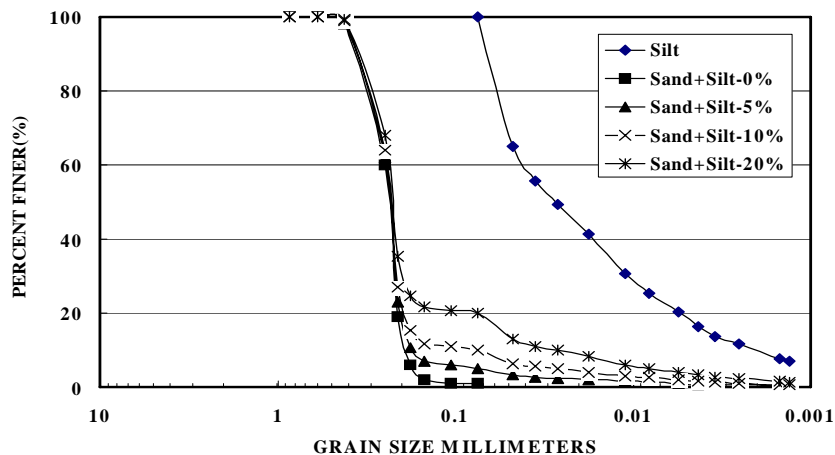


그림 1. 시료의 입도

2.2 시험방법

2.2.1 성형방법

시료의 성형방법은 액상화 거동 및 강도에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있으므로 균질한 시료의 성형은 필수적이며 현장의 퇴적상태에 근접되게 재현하여야만 한다. 본 논문에서 실시된 시험의 모든 시료는 그림 2에 묘사된 습윤다짐법에 의하여 동일한 간극비로 성형되었다. 습윤다짐법은 시료에 물을 첨가하여 겔보기 점착력을 증가시켜 다지므로 시료가 자립이 되므로 가장 느슨한 상태로 성형할 수 있다. 또한 입자 크기의 차이가 큰 경우 다지기 전 미리 물을 첨가하여 시료를 섞기 때문에 입자 분포가 균질한 시료를 만들 수 있다. 그림 3에 성형 후 층별 건조단위중량을 측정된 결과를 나타내었다. 하부층에서 상부층보다 약간 조밀하지만 거의 일정하게 성형이 되었다.

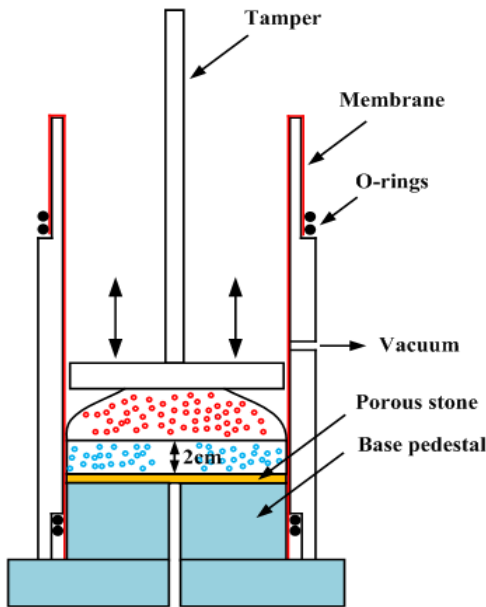


그림 2. 습윤다짐법

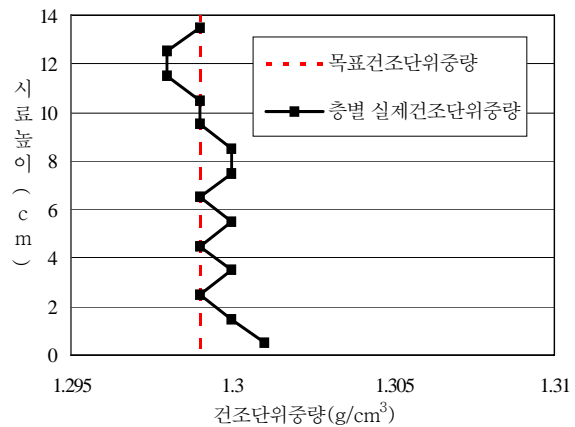


그림 3. 층별 건조단위중량

2.2.2 포화 및 압밀

시료 성형 후 원활한 포화를 위하여 CO₂순환법과 배압법을 사용하여 B value가 0.99이상 되도록 하였다. 시료의 포화가 완료된 후 압밀단계에서는 등방 및 이방압밀조건으로 나누어 압밀을 실시하였는데, 등방압밀조건에서는 같은 크기의 유효수직응력(σ_{1c}')과 유효수평응력(σ_{3c}')을 100kPa 가하여 압밀하였으며, 이방압밀조건에서는 표 3.3과 같이 σ_{3c}' 을 점차적으로 86kPa와 75kPa로 증가시키는 동안 초기정적전단응력, $q_{st}(\sigma_{1c}' - \sigma_{3c}')$ 값도 점차적으로 각각 43kPa, 75kPa만큼 증가시켜 이방압밀비(K_c)가 1.5, 2.0이 되도록 하였으며, 이방압밀시 응력증가는 교란방지를 위해 8단계로 나누었으며 각 단계마다 10분씩 압밀을 실시하였다. 압밀시간 10분은 모래시료내의 과잉간극수압 소산이 충분히 이루어지는 시간이며 그림 4에서 나타난 바와 같이 실트 함유율이 증가하더라도 과잉간극수압 소산이 충분히 이루어짐을 알 수 있다. $K_c = 1.5, 2.0$ 두 가지 경우 모두 평균유효수응력, $p' = (\sigma_{1c}' + 2\sigma_{3c}')/3$ 을 100kPa로 일정하게 하였다.

표 3 압밀응력 조건

K_c	σ_{3c} (kPa)	σ_{1c} (kPa)	σ_b (kPa)	σ_{3c}' (kPa)	σ_{1c}' (kPa)	q_{st} (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

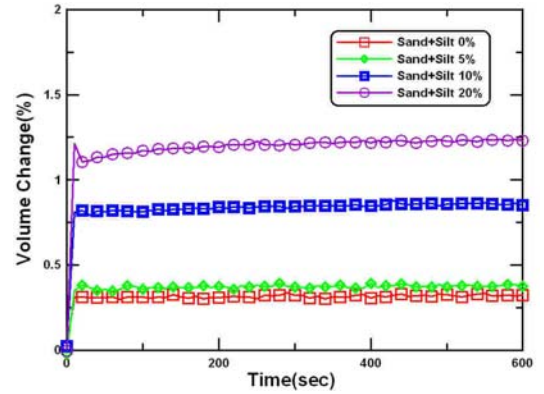


그림 4. 압밀시 시간-체적변형 (등방압밀)

2.2.3 반복전단시험

등방 및 이방압밀 조건으로 압밀을 하였고, 압밀이 완료된 후 응력제어의 비배수 반복삼축시험을 실시하였다. 가하여진 반복응력(q_{cy})은 0.1 Hz 주기의 정현파를 이용하였는데, 정현파는 Silver et al.(1976)의 연구결과에서 권장된 파형으로 현재 모든 반복삼축시험에서 기본으로 사용되는 파형이다.

각 압밀응력비의 시료에 대하여 반복응력(q_{cy})과 초기정적전단응력(q_{st})의 크기에 따라 reversal과 no reversal 그리고 그 중간인 intermediate의 다양한 응력조건으로 시험하였으며 본 연구에서는 파괴기준은 응력반전이 있는 경우는 양진폭 변형률 5%로 그리고 응력반전이 없는 경우 잔류변형률 5%를 파괴기준으로 하여 분석하였다. 표 4에 실시된 반복삼축시험 조건과 파괴시 반복횟수(N)를 나타내었다.

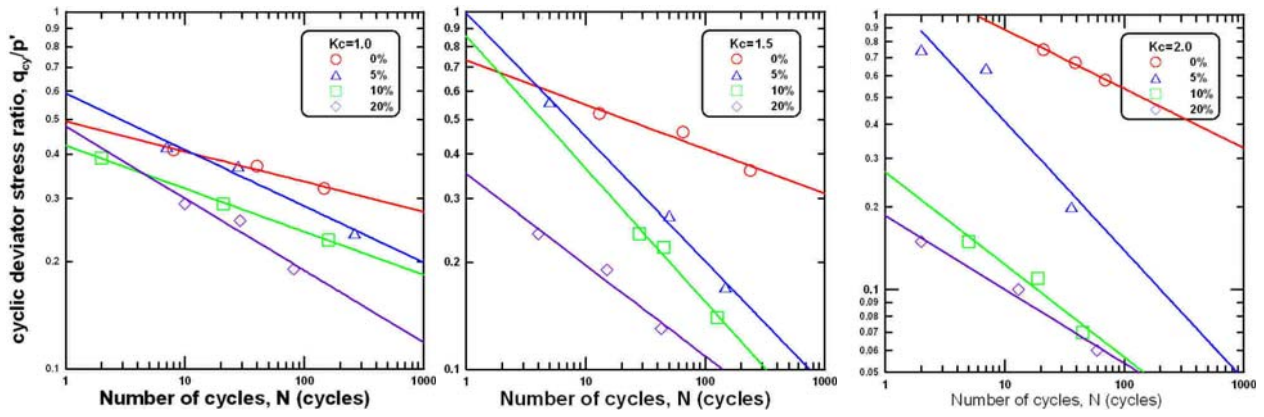
3. 시험결과

표 4의 결과를 이용하여 실트 함유율의 변화에 따른 반복축차응력비(q_{cy}/p')- 반복응력횟수(N)의 관계 그래프와 압밀비의 변화에 따른 q_{cy}/p' -N 관계 그래프를 그림 5와 6에 각각 도시하였다.

그림 5에 나타낸 실트 함유율의 변화에 따른 반복축차응력비(q_{cy}/p')와 반복응력횟수(N)의 그래프를 분석하면 압밀비에 상관없이 실트 함유율이 증가할수록 반복전단강도가 뚜렷히 감소하는 것을 볼 수가 있다. 등방압밀의 경우 실트 함유율의 증가에 따른 전단강도 감소비가 적으나 이방비가 커짐에 따라 감소비가 더 커짐을 볼 수가 있다. 그림 6에 나타낸 이방비에 따른 그래프를 살펴보면 0%에서는 다른 논문과 마찬가지로 K_c 가 클수록 q_{cy}/p' 값이 크게 나타나지만 실트 함유율이 증가할수록 이방비 증가에 따른 강도증가경향이 N=20이하의 작은 N치에서 모호해지며 20%에서는 K_c 가 증가할수록 q_{cy}/p' 값이 감소하여 나타났다. 이는 압밀과정에서 세립분인 실트가 모래사이에서 이동하여 시료 내 입자재배열에 따른 변화로 사료된다.

표 4. 시험 조건 및 반복횟수(N)

Sample state	K_c / q_{st} (kPa)	q_{cy}/q_{st}	q_{cy} (kPa)	Stress reversal	Number of cycles, N ($\epsilon = 5\%$)
Sand+Silt 0%	1.0 / 0	>1	32	Reversal	147
		>1	37	Reversal	40
		>1	41	Reversal	8
	1.5 / 43	0.84	36	Non-reversal	238
		1.07	46	Intermediate	65
		1.21	52	Reversal	13
	2.0 / 75	0.77	58	Non-reversal	69
		0.89	67	Non-reversal	39
		1	75	Intermediate	21
Sand+Silt 5%	1.0 / 0	>1	24	Reversal	264
		>1	37	Reversal	28
		>1	42	Reversal	7
	1.5 / 43	0.40	17	Non-reversal	147
		0.63	27	Non-reversal	50
		1.30	56	Reversal	5
	2.0 / 75	0.27	20	Non-reversal	36
		0.85	64	Non-reversal	7
		1	75	Intermediate	2
Sand+Silt 10%	1.0 / 0	>1	23	Reversal	160
		>1	29	Reversal	21
		>1	39	Reversal	2
	1.5 / 43	0.33	14	Non-reversal	126
		0.51	22	Non-reversal	45
		0.56	24	Non-reversal	28
	2.0 / 75	0.09	7	Non-reversal	45
		0.15	11	Non-reversal	19
		0.20	15	Non-reversal	5
Sand+Silt 20%	1.0 / 0	>1	19	Reversal	81
		>1	26	Reversal	29
		>1	29	Reversal	10
	1.5 / 43	0.30	13	Non-reversal	43
		0.44	19	Non-reversal	15
		0.56	24	Non-reversal	4
	2.0 / 75	0.03	6	Non-reversal	59
		0.13	10	Non-reversal	13
		0.20	15	Non-reversal	2

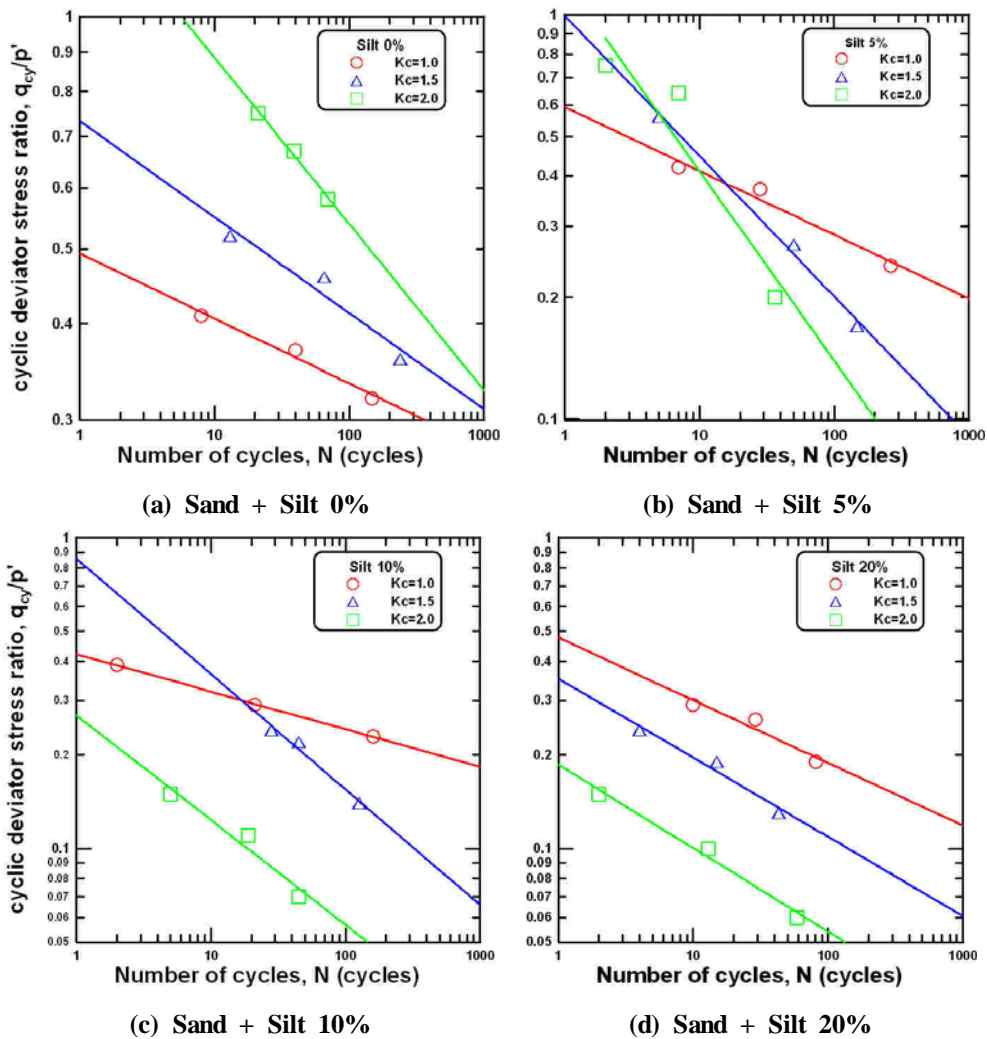


(a) 등방압밀($K_c = 1.0$)

(b) 이방압밀($K_c = 1.5$)

(c) 이방압밀($K_c = 2.0$)

그림 5 압밀비별 q_{cy}/p' 와 N 관계곡선



(a) Sand + Silt 0%

(b) Sand + Silt 5%

(c) Sand + Silt 10%

(d) Sand + Silt 20%

그림 6 실트 함유율의 변화에 따른 q_{cy}/p' 와 N 관계곡선

4. 결론

본 연구에서는 낙동강 유역에 분포하는 모래와 실트를 혼합하여 실트질 모래에 대하여 간극비를 고정된 상태에서 압밀비를 달리하여 비배수 반복삼축시험을 실시하였다. 그 결과 실트 함유율에 따른 모래의 반복전단거동 특성에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 비배수 반복전단강도에 대하여 분석한 결과 이방비에 관계없이 실트 함유율이 증가할수록 비배수 반복전단강도는 대체적으로 감소함을 볼 수 있었다. 그러나 실트 함유율이 높은 10%와 20%의 경우 이방비가 증가할수록 반복전단강도는 감소하여 0%에서의 결과와 반대가 됨을 보여주었다. 이는 모래 골격의 한계와 압밀과정에서 세립분인 실트가 모래사이에서 이동하여 시료 내 입자배열이 크게 변화하여 나타난 결과로 사료된다. 향후 상대밀도를 고정된 상태에서 실트 함유율을 증가시켜 본 연구와 비교할 필요성이 있으며 포화, 압밀, 전단과정에서 모래사이에서 세립분의 이동과 영향에 대하여 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌

1. F. Amini et al. (2000), Liquefaction testing of stratified silty sands, ASCE, Mar. pp 208-217
2. Jerry A. Yamamuro et al.(2001), Monotonic and cyclic liquefaction of very loose sands with high silt content, ASCE, Apr. pp 314-324
3. Kramer, S. L. (1996), "Geotechnical earthquake engineering.", Prentice-Hall, Inc.
4. Tianqiang Guo et al.(1999), Liquefaction of silts and silt-clay mixtures, ASCE, Aug, pp 706-710
5. 김대만 (2004), "Aging 효과에 따른 낙동강 모래의 비배수 전단거동 특성.". 경북대학교 박사학위논문.