한국토목섬유학회논문집 제13권 2호 2014년 6월 pp. 49 ~ 57
J. Korean Geosynthetics Society Vol.13 No.2 June. 2014 pp. 49 ~ 57

DOI: http://dx.doi.org/10.12814/jkgss.2014.13.2.049
ISSN: 1975-2423(Print) ISSN: 2287-9528(Online)

남극 장보고기지 현장시료의 액상화거동 특성 연구

A Study on the Liquefaction Behavior of Soil in Jangbogo Station

박근보[1], 김영석[2]*
Keunbo Park[1], YoungSeok Kim[2]*

[1]*Researcher, Arctic Research Centre, Korea Polar Research Institute, 26 Songdomirae-ro Yeonsu-gu Incheon 406-840, Republic of Korea*
[2]*Member, Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea*

ABSTRACT

In this study, in order to take advantage of samples collected in the Jangbogo station, and to grasp the liquefaction resistance characteristics of the dynamic load was performed cyclic triaxial test. Also, through the comparison with the existing literature. The test results, for the relationship between number of cycles for the same cyclic shear stress ratio and the cyclic shear stress ratio to produce an axial strain of 5%, in all samples, the cyclic shear stress ratio to liquefaction for the specimen, which has been liquefied, was increased, whereas number of cycles were reduced. The cyclic shear stress ratio of samples first decrease up to the fine content of about 10%. After this strength level, there is a little increase in cyclic shear stress ratio with increasing fine content. In addition, the cyclic shear stress ratio between cohesive strength, mean particle size, and friction angle decrease but some time later, there was a tendency that cyclic shear stress ratio is a little increased.

요 지

본 연구에서는 남극 장보고기지 부근에서 채취한 시료를 활용하여 동하중에 대한 액상화 저항특성을 파악하기 위하여 반복삼축시험을 실시하였다. 또한 기존문헌과의 비교를 통하여 남극에서 퇴적된 지반의 동적거동을 규명하였다. 시험결과 동일한 압밀응력비에 대한 반복회수와 축변형률 5%를 발생시키는데 필요한 반복응력비와의 관계는 모든 시료에서 초기액상화를 발생시킬 수 있는 반복응력비가 증가할수록 반복회수가 감소하였다. 세립분 함유량이 10%로 증가할수록 액상화 저항강도가 감소하다가 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 점착력과 액상화 저항강도와의 관계는 세립분 함유량과 액상화 저항강도와의 관계와 같이 점착력이 증가할수록 액상화 저항강도도 감소하지만 어느 시점 이후에는 반복응력비가 증가하는 경향을 보였다. 또한, 마찰각과 평균입경이 증가할수록 반복응력비가 증가하는 경향을 나타내었다.

Keywords **:** Jangbogo station, Cyclic triaxial test, Fine content, Liquefaction, Particle size, Mean particle size

1. 서 론

최근 우리나라를 포함한 선진국들은 국가 주도하에 독립적이면서 전문적인 극지 연구를 통해 자국의 이익을 확보하고 국제 사회에서의 위상을 강화하기 위한 노력을 경주하고 있다. 우리나라는 킹조지섬에 남극 세종기지를 건설하였으나, 실질적인 남극대륙 내의 기지건설을 20년이 지난 시점에서 계획되어 국제 선진국의 연구 인프라가 미비한 수준에 머물고 있다. 그러나 최근 남극 연구의 활성화를 위해 정부에서는 쇄빙연구선 아라온 건조와 더불어 제2기지 건설 사업을 건설 중에 있다. "남극 장보고기지"로 명명된 제2기지 건설은 국제 환경문제 대응 자연과학 기초연구 시험장, 국가과학 활동영역과 극지과학기술의 확장, 그리고 국제적 지속가능한 친환경 기지 위상확립을 목적으로 한다. 남극 장보고기지는 국가 미래 비전으로 전 지구환경변화 연구와 관련 기술 개발, 미래 극지자원 확보

Received *7 May. 2014,* ***Revised*** *6 Jun. 2014,* ***Accepted*** *23 Jun. 2014*
****Corresponding author***
Tel: +82-31-910-0371; Fax: +82-31-910-0211
E-mail address: kimys@kict.re.kr (Y.S. Kim)

를 위한 기반으로 그 역할이 매우 중요하며, 향후 남극대륙에 건설 될 내륙기지 진출을 위한 교두보로써의 활용도가 기대 되는 국가적으로 매우 중요한 시설물이 될 것이다(Korea Institute of Construction Technology, 2012).

액상화현상은 지반공학에 있어서 매우 중요하고 흥미로운 주제 중의 하나이다. 1964년에 발생한 알레스카(Alaska) 지진과 니가타(Niigata) 지진은 그 막대한 피해로 인해 많은 지반공학자들의 관심을 모았다. 위의 두 지진은 모두 사면파괴, 교량 및 건물의 기초 파괴, 지중구조물의 부유등의 액상화로 인해 유발된 피해의 대표적인 예를 보여주었다. 우리나라에서도 19세기 이후 지진활동의 증가로 인해 더 이상 한반도가 지진의 안전지대가 아니라는 인식이 증대되고 있다. 지진으로 인한 피해사례를 보면, 감지된 지진의 크기가 비교적 약진임에도 불구하고 큰 피해가 발생한 사례가 있다. 그 이유로는 피해지역 지반의 대부분이 느슨한 사질토 또는 매립토로 구성된 점을 들 수 있다. 남극에 위치한 장보고기지 지반도 일부 사질토로 구성되어 있어 지진을 대비한 해당지반의 특성에 관한 연구가 필수적이며, 그에 따른 지반의 강도 예측, 평가 및 내진설계에 대한 기준마련이 절실히 요구되고 있다. 남극의 경우는 지진 발생 가능성이 낮다고 보고되고 있으나 최근 지진의 발생횟수가 점차로 증가하고 있어 구조물 설계시 내진에 대한 사항을 고려하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 남극 장보고기지 부근에서 채취한 시료를 활용하여 동하중에 대한 액상화 저항특성을 파악하기 위하여 반복삼축시험을 실시하였다. 또한 기존문헌과의 비교를 통하여 남극에서 퇴적된 지반의 동적거동을 규명하였다.

2. 액상화

액상화란 반복하중 또는 지진 등의 급속하중에 의해 포화사질토가 전단 저항력을 상실하고 마치 유체와 같이 거동하는 현상을 의미한다. 액상화현상을 재료의 역학적 거동특성에 기초하여 설명하면 다음과 같다. 느슨한 사질토가 과잉간극수압이 소산되는 시간보다 빠른 재하속도를 갖는 동하중을 받게 되면 토체는 비배수상태하에 있게 된다. 비배수 상태에 있는 사질토는 일정한 체적을 유지하려는 상태에서 변형을 겪게 된다. 즉, 반복하중하에서 토립자는 변형 및 재배열을 하지만 포화 토체의 일정체적 유지성 때문에 토립자의 변형률 및 재배열량 만큼 과잉간극수압이 발생하게 된다. 이처럼 발생한 간극수압이 토체내의 유효 응력과 같은 수준에 도달하게 되면, 토체내의 전단저항력은 완전히 상실하게 되어 포화 사질토는 액상화에 이른다(Seed and Lee, 1966; Lee and Seed, 1967).

반복하중을 받는 포화된 느슨한 사질토의 액상화 발생 메커니즘을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1은 초기에 퇴적된 모래의 상태와 액상화 과정동안의 변화를 도시한 것이며 상자 안의 저울을 유효응력(effective stress), 상자 밖의 저울을 전응력(total stress)이라고 가정하였다.

반복하중을 받기 전의 지반은 지중의 지반요소 위의 흙의 자중에 의해 구속을 받는다(Fig. 1 (a)). 이러한 구속상태에서 반복응력을 받게 되면 체적이 줄어드려는 경향이 있지만 반복응력이 발생하는 동안에 간극수압이 배수될

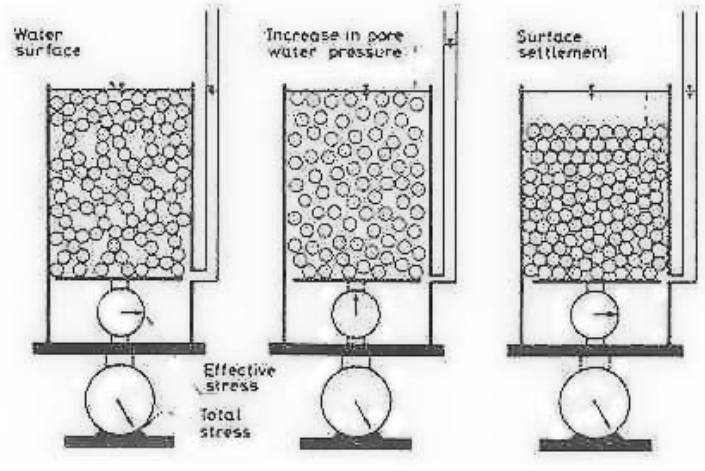

Fig. 1. Transfer of state of deposition via liquefaction (Ishihara, 1985)

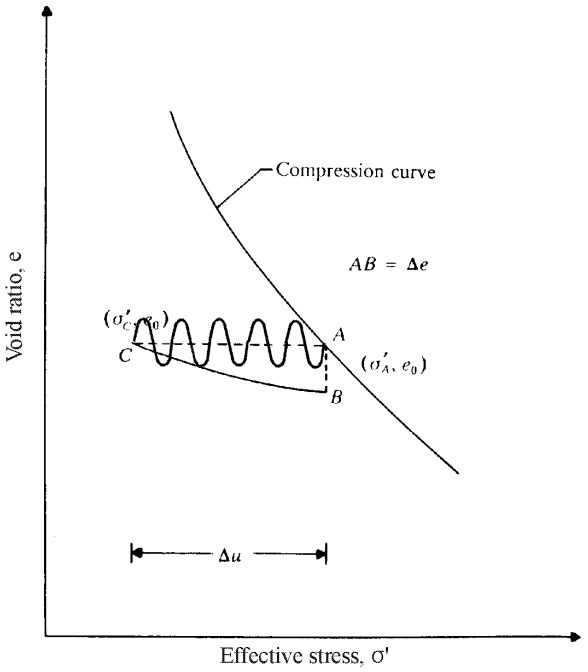

Fig. 2. Mechanism of pore water pressure generation due to cyclic loading in undrained condition (Das, 1993)

수 있는 시간적인 여유가 없어서 체적의 감소가 바로 일어나지 않는다(Fig. 1 (b)). 이렇게 체적이 감소하려는 사질토는 일정한 체적을 유지하기 위해서 과잉간극수압을 발생시키고, 유효응력을 감소시키는 응력 시스템의 변화를 발생시키게 된다. 간극수압이 증가하면서 유효응력은 계속 감소하게 되고 토립자 상호간의 저항력을 잃게 되며 지반은 물처럼 거동하게 되며 이러한 현상을 액상화(liquefaction)라고 한다. 이러한 액상화가 발생된 이후에는 Fig. 1 (c)와 같이 과잉간극수압이 소산되고 입자가 재배열 된다.

이러한 액상화 과정에서 발생하는 반복하중의 메커니즘은 Fig. 2에 간략하게 나타내었다. A는 압축곡선 상에서 간극비 e_0를 나타내는 점이고, 그때 포화된 모래 지반이 임의의 깊이에서 갖는 유효응력을 σ_A'라고 하면 배수가 허용되는 조건하에서 반복하중을 가하게 되면 지반의 간극비는 Δe만큼 감소하게 된다. 그러나 배수가 허용되지 않는다면 e_0의 간극비는 그대로 유지되고 Δu만큼의 과잉간극수압이 증가하면서 동시에 유효응력은 σ_C'로 감소하게 된다. 반복하중횟수의 증가에 따라 충분히 많아지면 간극수압은 더욱 증가되어 과잉간극수압, Δu는 초기 상태의 지반의 유효응력, σ_A'와 같아져서 지반은 액체와 같은 거동을 보이게 된다.

Seed와 Lee(1966)가 처음으로 반복삼축시험기를 이용하여 액상화 현상을 이해하기 위한 실내 시험을 시작한 이후 느슨한 포화 사질토 지반에서 많이 발생하는 액상화에 대한 수 많은 연구를 하였으며 이들의 연구결과에 의하면 액상화의 발생은 상대밀도, 압밀유효구속응력, 반복축차응력, 반복축차응력이 가해진 횟수, 과압밀비 등에 의해서 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히 Lee와 Seed(1967)는 상대밀도가 흙의 액상화에 미치는 영향을 고려하여 반복삼축시험을 수행하였으며 모든 시험에서 과잉간극수압이 압밀유효구속응력과 같아지는 상태, 즉 유효응력이 '0'이 되기 시작할 때를 초기액상화(initial liquefaction)라 하고, 양진폭 축변형률(double amplitude axial strain)이 20%이상이며 외력에 대한 저항을 거의 잃었을 때를 파괴(failure)로 구분해서 정의 하였다.

Ishihara(1993)는 느슨한 모래 공시체의 경우 과잉간극수압이 발생하는 동안 또는 과잉간극수압이 압밀유효구속응력과 같아지게 되면 갑작스러운 강도의 손실과 함께 무한히 큰 변형이 발생하기 때문에 초기액상화는 연화상태(state of softening)로서 발생하며 중간정도의 밀도를 갖는 모래에서 조밀한 모래 공시체의 경우도 마찬가지로 반복하중으로 인하여 과잉간극수압이 거의 초기유효구속응력과 같아지면서 연화상태가 일어나며 약 5% 정도의 양진폭 축변형이 발생된다고 하였다. 그러나 그 후 변형은 명확하게 증가하지는 않으며 초기액상화가 발생한 이후 일지라도 공시체는 강도를 완전히 잃지 않는다고 하였다. 따라서 다양한 범위의 밀도를 갖는 모래에서 반복하중으로 인하여 발생되는 불안정 상태를 판단하기 위한 기준으로서 약 5% 정도의 양진폭 축변형률의 발생 또는 발생된 과잉간극수압이 압밀유효구속응력과 같아지는 시점을 고려하는 것이 일반적인 관례이다. 또한 실트질 모래의 경우에는 과잉간극수압이 완전히 발생되지 않고 압밀유효구속응력의 약 90%~95% 정도까지 발생하지만 연화상태를 발생시키는 상당한 크기의 반복변형이 관찰되고 있으므로 반복삼축시험에서는 5%의 크기의 양진폭 축변형률이 순수한 모래에서 세립토를 포함하는 모래에 이르기까지 반복연화상태(state of cyclic softening) 또는 액상화 상태를 정의하는 기준으로서 사용된다고 하였다.

과거의 액상화에 대한 연구는 순수한 모래에 대한 것이 많았기 때문에 액상화 현상은 입도가 좋지 않은 균질한 모래지반에서 발생한다는 생각이 지배적이었으며 세립토가 많은 지반일수록 액상화가 발생할 가능성이 적다는 의견이 대부분이었다. 그러나 일본 등에서 이미 액상화가 많이

Table 1. The list of the test soils

Test soil	Water content (%)	Gs	Atterberg Limits (%)	
			LL	PI
No1	10.5	2.652	15.4	6.6
No2	8.1	2.642	N.P.	N.P.
No3	3.3	2.684	N.P.	N.P.
No4	3.4	2.662	N.P.	N.P.
No5	0.4	2.658	N.P.	N.P.

발생한 해안매립지의 특성은 점토의 비율이 10%이하인 경우가 대부분인 세립토를 약 10%~30% 가량 포함하고 있는 사질토 지반이었다(Hwang, 1993). 그리고 Yamamuro and Lade(1997)는 이와 같은 실트 입자와 모래입자사이의 다일러턴시 특성으로 인해서 순수한 모래보다 더 높은 상대밀도를 갖는 실트질 모래에서도 훨씬 쉽게 액상화가 발생한다고 하였다. 또한 Singh(1996)도 Hwang(1993)과 유사한 시험을 한 결과 실트 함유율이 20%~30%일 때 가장 낮은 액상화 강도를 갖는 것으로 나타났다.

3. 시 험

3.1 시료 및 공시체

장보고기지 건설 예정지는 동남극 빅토리아랜드 내에 위치한 테라노바만으로 건설지의 남서쪽으로 1.2km 거리에 독일 곤드와나 기지(Gondwana Station)가 위치하고 있으며, 이탈리아 마리오 쥬켈리 기지(Mario Zuchelli Station)가 남서쪽으로 직선거리 8.5km 거리에 이 위치하고 있다. 상설기지인 미국 맥머도 기지(Macmurdo Station)는 북서쪽으로 직선거리 370km 거리에 위치하고 있다. 시료는 건설부지의 계획구조물에 따라 총 5개소에서 실시한 시추로부터 획득하였다. 시료 채취 지점에 대한 개략도는 Fig. 3과 같다. 현장의 표층은 혹독한 남극 기후에 의해 상당히 기계적 풍화로 인해 생성된 암편과 사질토 및 실트성분이 관찰되며 암회색의 흙이 지표에 널리 분포하고 있었으며 건설부지의 지반의 물성과 동결특성을 분석하기 위하여 시추공 No. 1, No. 2, No. 3, No. 4, No. 5에 대하여 각각 50kg씩 총 300kg 흙 시료를 채취하였고 사용된 시료의 입도분포곡선과 물리적 성질은 Fig. 4 및 Table 1과 같다.

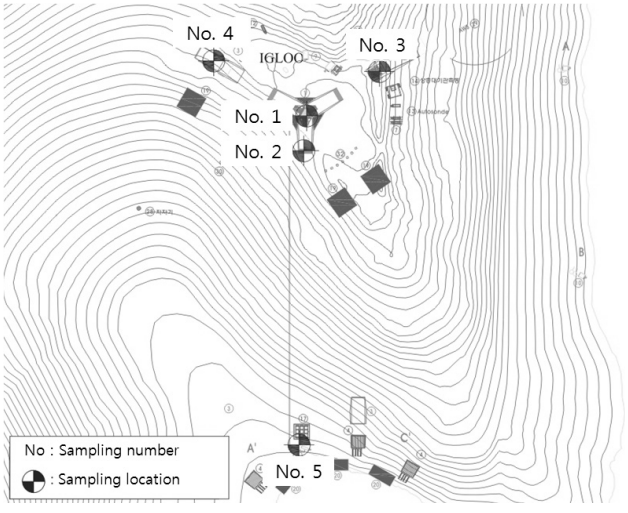

Fig. 3. Sampling locations at Jangbogo station

3.2 시험방법 및 시험종류

본 연구에서 사용한 공시체의 크기는 직경이 50mm, 높이가 100mm 이며 공시체의 제작방법은 건조퇴적방법(dry deposition method)을 사용하였다. 멤브레인(membrane)을 저판(pedestal)에 고무링과 함께 거치 시킨 후에 멤브레인 겉에 몰드(split mould)를 고정시킨 다음 노 건조(oven-dry)시킨 시료를 입구의 직경이 12mm 되는 깔때기 모양의 용기에 담은 후 시료가 용기 입구 끝에서 낙하높이를 갖지 않도록 하면서 일정한 속도로 깔때기 모양의 용기를 위로

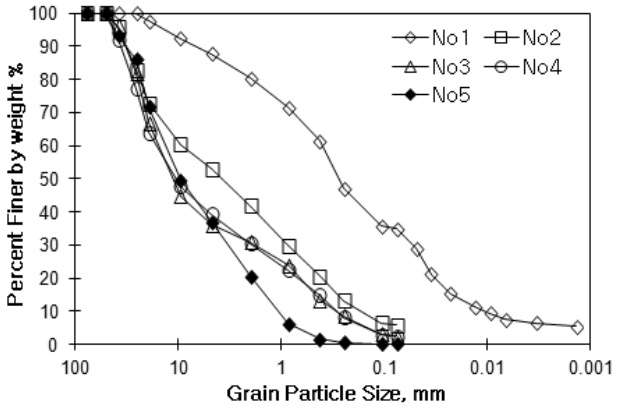

Fig. 4. Grain size distribution

Table 2. The list of the cyclic triaxial tests

Test soil	Consolidation Pressure		γ_d (g/cm^3)	w (%)	Cyclic shear stress ratio
	svc∅ (kPa)	shc∅ (kPa)			
No1	100	100	2.11	8.2	40
	100	100			50
	100	100			70
No2	100	100	2.03	8.6	40
	100	100			45
	100	100			50
No3	100	100	2.07	7.3	50
	100	100			55
	100	100			60
No4	100	100	1.99	8.2	40
	100	100			45
	100	100			60
No5	100	100	2.0	8.7	50
	100	100			70
	100	100			85

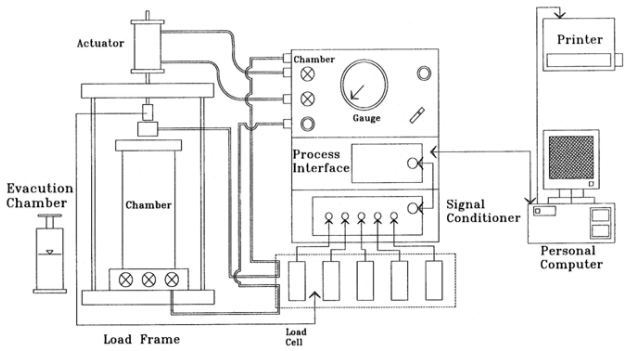

Fig. 5. Composition of the cyclic triaxial testing system

올려 공시체 성형몰드에 시료가 자연스럽게 퍼지도록 하였다. 그리고 시료가 균등하게 다져지도록 공시체 성형몰드의 주위를 상, 하, 좌, 우 대칭으로 두드리면서 원하는 밀도가 얻어지도록 공시체의 높이를 조정하였다.

장보고기지가 완공된 이후에 주변 지반은 강재적인 다짐을 발생시켜 주변부 지반의 강성을 증대시켜 지반의 압축특성을 개선시키거나 투수성을 개선시킬 계획을 가지고 있다. 따라서 본연구에서 사용된 밀도는 다짐시험(KS F 2312)을 이용한 최대 건조단위중량과 최적함수비를 사용하여 공시체를 제작하였다(Table 2). 그리고 몰드를 제거한 후에 공시체가 자립해있지 못할 것을 고려하여 공시체 하단부에 연결된 배수벨브로 진공압을 약 5 in.Hg(»17kPa)를 가하여 부(負)의 압력이 시료에 작용되게 하였다. 공시체의 완전한 포화를 위하여 먼저 약 5kPa이하의 아주 낮은 압력으로 CO_2가스를 약 3시간 30분 동안 순환 시킨 후에 탈기수(deaired water)를 공시체 하단부에 연결된 밸브를 통해서 공시체 상단부에 연결된 밸브로 순환시켜 공시체를 포화시켰다. 공시체를 포함한 삼축셀(Fig. 5)을 삼축기안에 안치한 후에 구속압(cell pressure)와 배압(back pressure)의 차이를 2kPa정도로 하고 약 60분에 걸쳐 100kPa의 배압을 서서히 가하였다. Skempton의 B계수가 0.97이상인 것을 포화로 간주하였다.

포화된 공시체에 미리 정해진 응력경로를 따라서 압밀응력을 서서히 단계적으로 증가시키면서 100kPa까지 등방압밀을 실시하였다. 단계재하시 일차압밀의 완료시기는 과잉간극수압의 발생여부를 확인 함으로서 알 수 있으며 그 방법은 배수밸브를 잠근 후 시그널 컨디셔너(signal conditioner)의 유효응력 전압의 변화량으로부터 판단할 수 있다. 즉 유효응력 변화가 없다면 과잉간극수압이 발생하지 않는다는 것을 의미하므로 이 경우 압밀이 완료되었다고 판단하였다. 압밀이 완료된 이후 반복삼축시험을 수행할 때 사용된 파형은 정현파(sine파)이다. 반복축차응력은 Table 2에서 표시한 반복응력비(cyclic shear stress ratio)로서 시험하였다.

반복삼축시험을 수행할 때 진동주기(frequency)는 ASTM (D5311) 규정에서 0.1Hz에서 2.0Hz 사이의 값으로 하도록 되어 있으며 1.0Hz를 표준으로 권장하고 있으나 본시험에서는 0.1Hz로 시험을 하였으며, 반복비배수시험에서

는 응력제어재하방법을 사용하였다.

4. 시험결과

등방압밀 조건에서 압밀이 완료되면, 비배수반복전단시험을 시행하였으며 제어방법은 응력제어재하방법을 사용하였다. Fig. 6에서 9는 반복회수별 과잉간극수압 곡선, 반복회수에 따른 축변형률 곡선, p-q 곡선 및 응력-변형률곡선(hysteresis loop) 각각 나타내었고 시험결과를 Table 3에 정리하였다.

Fig. 6에서 9는 No1의 시료로 40 kPa의 축차응력으로 반복삼축시험을 수행한 결과를 나타내고 있다. Fig. 6은 반복회수별 과잉간극수압 곡선을 나타내고 있는데 과잉간극수압은 축변형률이 거의 발생하지 않는 초기단계부터 증가하다가 초기액상화가 발생하는 부분에서 급격하게 증가하여 반복회수가 약 18회에서 초기유효구속응력과 같아지게 되었다. Fig. 7은 반복회수에 따른 축변형률 곡선을 나타내고 있다. 시험 초기에는 축변형률의 크기 변화가 거의 없다가 액상화에 도달직전부터 갑자기 축변형률이 증가하여 액상화가 발생하는 경향이 관측되었다. 이 경우 초기 액상화가 발생했을 때 측정된 양진폭 축변형률은 약 5%이다. 축변형률은 초기에는 거의 발생하지 않다가 반복회수가 약 18회에서 초기액상화가 발생하고 잔류변형은 신장측에서 주로 발생하였다.

Fig. 8은 p-q면에 유효응력경로를 나타내고 있다. 초기 압밀응력이 100kPa에서 과잉간극수압의 증가로 인한 유효응력이 감소하여 유효응력이 '0'으로 이동하고 있는 것이 확연히 나타났다. 또한 Fig. 9와 같은 응력-변형률곡선에서는 초기에는 축변형률이 거의 발생하지 않아 응력-변형률 곡선의 내부 면적인 소성에너지가 발생하지 않았지만 반복회수가 증가함에 따라 소성에너지가 증가함을 알 수 있었다.

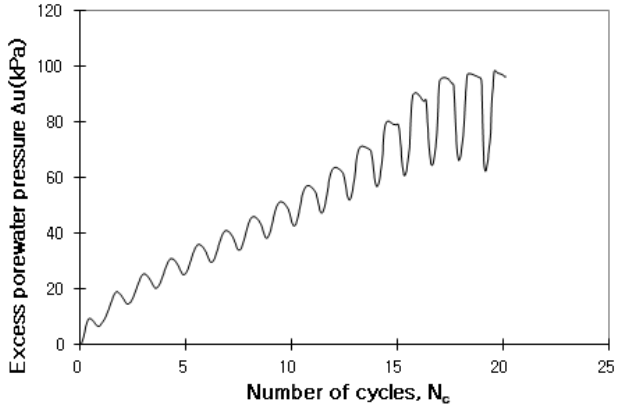

Fig. 6. Typical results of cyclic triaxial test for number of cycles and Δu

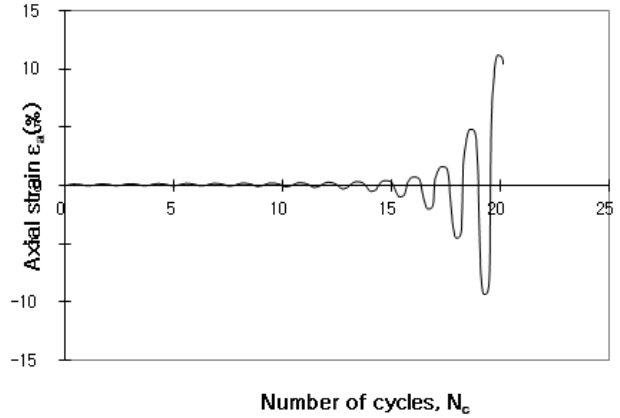

Fig. 7. Typical results of cyclic triaxial test for number of cycles and ε_a

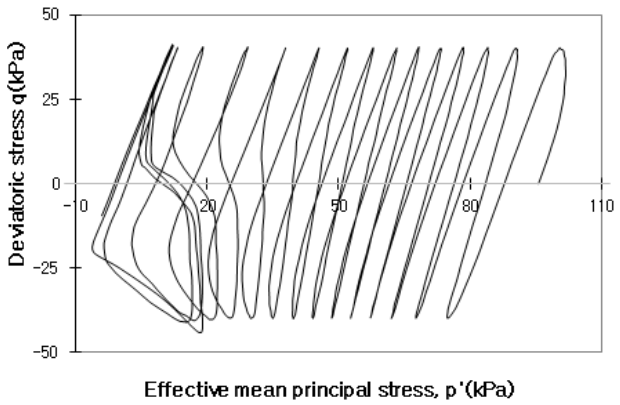

Fig. 8. Typical results of cyclic triaxial test for p' and q

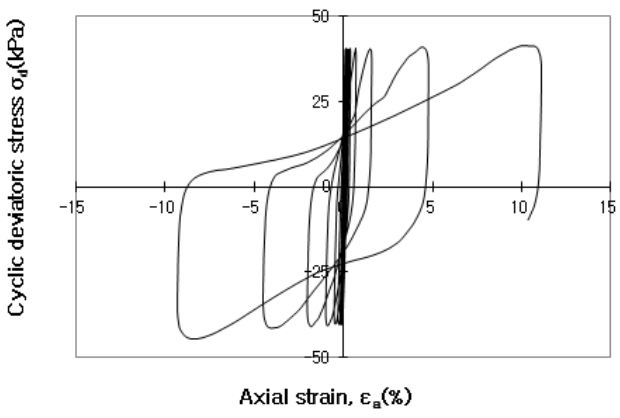

Fig. 9. Typical results of cyclic triaxial test for εa and σ_d'

Table 3. The results of the triaxial and cyclic triaxial tests

Test soil	γ_d (g/cm^3)	w (%)	Cyclic shear stress ratio	Number of cycles for liquefaction, Nc	Fing content (%)	Cohesive strength (kPa)	Frictional angle (°)	Mean grain size (mm)
No1	2.11	8.2	0.200	18	34.77	31.2	29.5	0.27
			0.250	7				
			0.350	1				
No2	2.03	8.6	0.200	60	5.80	9.5	33.1	3.50
			0.225	27				
			0.250	1				
No3	2.07	7.3	0.250	16	2.42	5.5	35.5	11.1
			0.275	8				
			0.300	4				
No4	1.99	8.2	0.200	19	2.39	1.9	37.5	10.3
			0.225	16				
			0.300	6				
No5	2.0	8.7	0.250	64	0.13	0.8	42.8	9.3
			0.350	18				
			0.425	7				

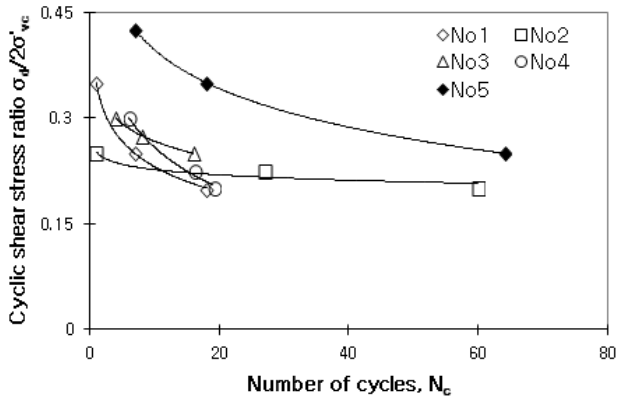

Fig. 10. Relationship between cyclic shear stress ratio and number of cycle at initial liquefaction

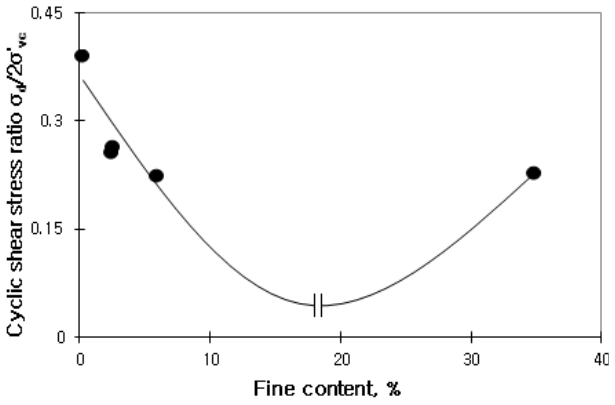

Fig. 11. Relationship between fine content and cyclic shear stress ratio

Fig. 10은 액상화가 발생되기 전의 동일한 압밀응력비에 대한 반복회수와 축변형률 5%를 발생시키는데 필요한 반복응력비와의 관계를 나타내었다. Fig. 10에서 나타난 바와 같이 No. 1에서 No. 5의 모든 시료에서 초기액상화를 발생시킬 수 있는 반복응력비가 반복회수가 증가할수록 감소하였으나 감소하는 기울기는 시료에 따라 다르게 측정되었다. 이는 많은 연구자의 연구결과(Seed and Lee, 1966; Lee and Seed, 1967; Ishihara, 1993)와도 일치한다.

Fig. 11에서 14는 No. 1에서 No. 5의 시료에 대한 양진폭 축변형률 5%일 때의 세립분함유량, 점착력, 평균입경(D_{50}) 및 마찰각과 액상화 저항강도의 관계를 반복응력비에 따라서 나타내었다. Fig. 11은 반복회수 10회 때의 액상화 강도를 세립분 함유량에 대해 나타내고 있다. 세립분 함유량이 10%로 증가할수록 액상화 저항강도가 감소하다가 세립분함유량이 큰 No. 1의 경우에는 다시 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 세립분이 소량 함유할 경우에는 세립분 함유량이 증가할수록 흙의 투수성이 낮아져서 과잉간극수압이 빨리 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 세립분 함유량이 이보다 많은 경우에는 세립분 함유량이 증가할수록 점착력이 증가하기 때문에 액상화 강도가 증가하는 것으로 판단된다. 이전의 연구결과와 비교해 볼 때, Kuwano et, al.(1995)의 소량의 세립분을 함유하는 경우 사질토와 비교하여 더 작은 액상화 강도를 나타내고 이후 점토 함유량의 증가에 따라 액상화 강도가 증가하는 경향은 일치하는 것으로 나타났다. Fig. 12는 점착력과 액상화 저항강도와의 관계를 나타내고 있다. 점착력과 액상

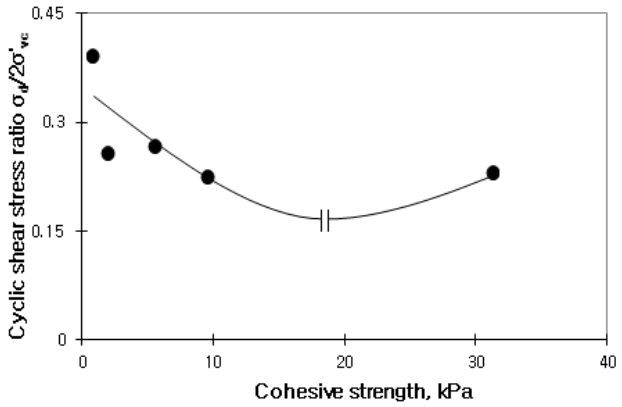

Fig. 12. Relationship between cohesive strength and cyclic shear stress ratio

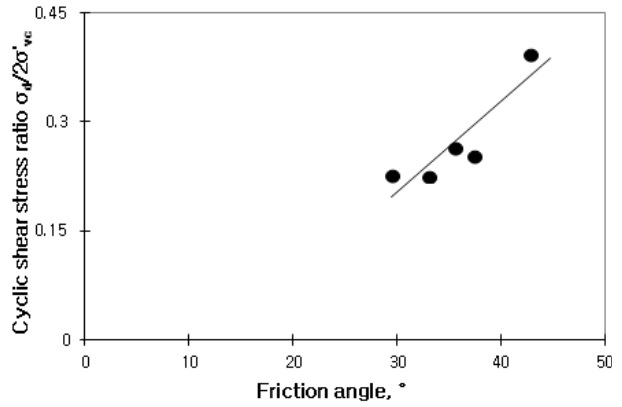

Fig. 13. Relationship between friction angle and cyclic shear stress ratio

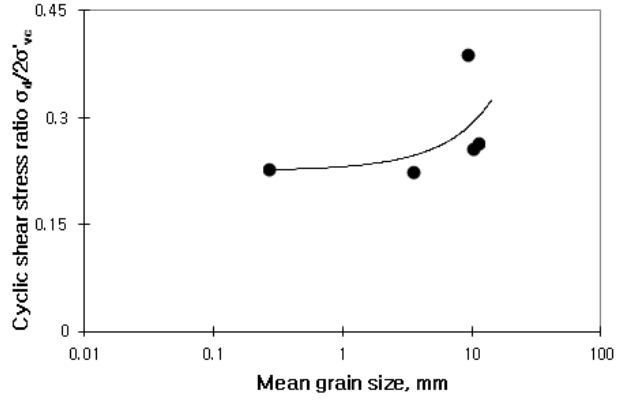

Fig. 14. Relationship between mean grain size and cyclic shear stress ratio

화 저항강도와의 관계는 세립분 함유량과 액상화 저항강도와의 관계와 같이 점착력이 증가할수록 액상화 저항강도도 감소하지만 어느 시점 이후에는 No. 1의 시료와 마찬가지로 반복응력비가 증가하는 경향을 나타내었다. 반면 Fig. 13은 마찰각과 액상화 저항강도와의 관계를 나타내고 있는데 마찰각이 증가하면 증가할수록 반복응력비가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 Law and Ling(1992)의 연구결과와도 일치한다.

Fig. 14는 평균입경과 액상화 저항강도와의 관계를 나타내고 있다. Fig. 14에 나타난 바와 같이 평균입경이 증가할수록 반복응력비가 증가는 것으로 나타났다. 이것은 Townsend (1978)의 결과와도 일치한다.

5. 결 론

본 연구에서는 다양한 종류의 시료에 대하여 마찰각, 평균입경, 세립분함유율, 점착력이 액상화 강도에 미치는 영향과 특성을 파악하기 위해 5종류의 현장시료를 이용하여 반복삼축압축시험을 수행하였다. 본 연구에서 얻어진 주요결과는 다음과 같다.

(1) 동일한 압밀응력비에 대한 반복회수와 축변형률 5%를 발생시키는데 필요한 반복응력비와의 관계는 모든 시료에서 초기액상화를 발생시킬 수 있는 반복응력비가 증가할수록 반복회수는 감소하였으나, 감소하는 기울기는 시료에 따라 다르게 측정되었다.

(2) 세립분함유량이 10%로 증가할수록 액상화 저항강도가 감소하다가 세립분함유량이 큰 No. 1의 경우에는 다시 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 세립분을 소량 함유할 경우에는 세립분 함유량이 증가할수록 흙의 투수성이 낮아져서 과잉간극수압이 빨리 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 세립분 함유량이 이보다 많은 경우에는 세립분 함유량이 증가할수록 점착력이 증가하기 때문에 액상화 강도가 증가하는 것으로 판단된다.

(3) 점착력과 액상화 저항강도와의 관계는 세립분 함유량과 액상화 저항강도와의 관계와 같이 점착력이 증가할수록 액상화 저항강도도 감소하지만, 어느 시점 이후에는 반복응력비가 증가하는 경향을 나타내었다.

(4) 마찰각과 평균입경이 증가할수록 액상화 저항강도가 증가하는 경향을 나타내었으나 마찰각은 선형증가 평균입경은 비선형 증가 형태를 나타내었다.

(5) 장보고기지 지반의 퇴적과정은 일반적으로 보고된 지반과는 다른 퇴적과정을 거치고 있다. 이것은 세립분을 포함한 경우에서의 차별성은 더욱 두드러질 것으로 판단된다. 따라서 남극 시료의 현장 지반 액상화 평가는 세립분, 소성지수, 입도, 마찰각 등을 고려하여

더 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This research was supported by a grant from a Strategic Research Project(Development of Site Investigation and Monitoring System for Extreme Cold Region), funded by the Korea Institute of Construction Technology.

References

1. Das, B. M. (1993), Principles of Soil Dynamics, PWS-KENT, pp.398-411.
2. Hwang, Dae Jin (1993), “A Study on the Liquefaction Strength of Silt Containing Sands”, Journal of Korean Society of Civil engineers, Vol.13, No.2, pp.243-252 (in Korean).
3. Ishihara, K. (1985), “Stability of Natural Deposits During Earthquakes”, Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco.
4. Ishihara, K. (1993), “Liquefaction and flow failure during earthquake”, Geotechnique, Vol.3, No.3, pp.351-415.
5. Korea Institute of Construction Technology (2012), Development of site investigation and monitoring system for extreme cold region (in Korean).
6. Kuwano, J., Iimura, H., Takahara, K. and Nakazawa, H. (1995), “Undrained cyclic and monotonic shear behaviour of sand-kaolin mixture”, Earthquake Geotechnical Engineering, Ishihara (ed.), November, pp.165-170.
7. Law, K. T. and Ling Y. H. (1992), “Liquefaction of granular soils with non-cohesive and cohesive fines”, Earthquake Engineering, Tenth World Conference, Balkema, Rotterdam, pp.1491-1496.
8. Lee, K. L. and Seed, H. B. (1967), “Dynamic strength of anisotropically consolidated sand”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.93, No.SM5, pp.169-190.
9. Seed, H. B. and Lee, K. L. (1966), “Liquefaction of saturated sands during cyclic loading”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.92, No.SM6, pp.105-134.
10. Singh, S. (1996), “Liquefaction characteristics of silts”, Journal of the Geotechnical and Geological Engineering, 14, pp.1-19.
11. Townsend, F. C. (1978), “A review of factors affecting cyclic triaxial tests”, Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP 654, pp.356-383.
12. Yamamuro, J. A. and Lade, P. V. (1997), “Static liquefaction of very loose sand”, Canadian Geotechnical Journal, Vol.34, pp.905-917.