

세립분 함유량에 따른 동결 사질토의 응력-변형률-강도 특성

Stress-Strain-Strength Characteristics of Frozen Sands with Various Fine Contents

채 덕 호¹⁾ · 황 범 식¹⁾ · 조 완 제[†]

Deokho Chae · Bumsik Hwang · Wanjei Cho

Received: March 23rd, 2015; Revised: April 1st, 2015; Accepted: May 15th, 2015

ABSTRACT : Recently, the participation on the development of the natural gas pipeline in Russia as well as the recent construction of the second Korean Antarctic research station, the Jangbogo station provide the research interests on the behavior of the permafrost ground. To investigate the effect of fines on the mechanical responses of frozen sands, unconfined compression tests were performed on the frozen sands with 0, 5, 10 and 15% of fine contents at -5, -10 and -15°C. The poorly graded (SP) Joomunjin sand and kaolinite, silt with low plasticity (ML) were used for the preparation of the frozen soil specimens. The mechanical responses of the tested soils were investigated via unconfined compression tests in the temperature controlled laboratory and analyzed in terms of peak unconfined compressive strength and secant modulus at 50% of the peak strength. As the fine contents increase, the unfrozen water contents increase and thus the strength and stiffness of frozen soils decrease. The increment of the stiffness and strength due to the temperature decrease vary with the fine contents.

Keywords : Permafrost, Frozen soil, Uniaxial compression, Fine contents

요 지 : 최근 우리나라는 러시아 극동 지역의 천연파이프 건설과 제2남극기지인 장보고 기지건설이 이루어지면서 영구동토지반에서의 구조물 건설에 대한 관심이 증대되고 있다. 세립분 함유량이 동결된 사질토의 역학적 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 온도 -5, -10, -15°C의 조건에서 세립분 함유량 0, 5, 10, 15%의 시료에 대해 일축압축시험을 수행하였다. 동결 사질토를 성형하기 위해 입도가 균일한(SP) 주문진 표준사와 소성성이 낮은 실트(ML)인 카올리나이트를 사용하였다. 성형된 동결 사질토를 사용하여 온도를 제어할 수 있는 냉동 챔버에서 일축압축시험을 수행하였고 강도 및 강성특성을 파악하기 위해 최대 일축압축강도와 변형계수를 분석하였다. 그 결과 동결 사질토의 강도 및 강성은 세립분 함유량이 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 온도가 낮아짐에 따라 증가하는 경향을 보였다.

주요어 : 영구동토, 동결토, 일축압축강도, 세립분 함유량

1. 서 론

우리나라는 극지에 관한 연구의 중요성을 인식하고 1988년 남극 세종과학기지 준공을 시작으로 2014년 제2장 보고 기지를 건설하는 등 극한지 건설에 대한 관심을 보이고 있으며, 또한 최근 러시아 극동 지역의 천연파이프 건설 계약 체결을 통하여 극지 개발에 직접 참여하고 있다.

동토지반에서 구조물 건설은 기상 및 기후조건과 지반의 역학적 특성에 따라 비동결 상태의 지반과는 다른 특성을 가지고 있어 이에 대한 이해가 필요한 상황이다. 비동결 상태의 흙은 토립자, 물, 공기로 이루어진 3상 구조를 갖는 반면 동토는 토립자, 공기, 수분이 영하에서 동결된 얼음, 지반

이 동결되었음에도 불구하고 얼지 않는 수분인 부동수분의 4상 구조가 나타난다. 부동수분의 존재는 동토의 역학적 거동에 영향을 미치게 되며 흙의 종류 및 온도에 따라 다른 경향을 보인다. 이러한 특성으로 인하여 국내·외에서 많은 연구가 이루어졌다(Andersland & Ladanyi, 2004; Anderson & Morgenstern, 1973; Dillon & Andersland, 1966; Uhlmann & Jackson, 1978). 동토지반은 온도 변화에 따라 지반 내 얼음의 양, 함빙비에 영향을 주고 이러한 함빙비에 따라 동토의 역학적 특성인 강도 및 강성에 영향을 미치게 된다. 또한 동토는 동일한 온도에서 흙의 종류에 따라 강도 및 강성 특성이 다르게 나타난다. 온도 변화뿐만 아니라 흙의 종류에 따라라도 동토의 역학적 특성은 달라지기 때문에 동토에서

1) Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

† Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University (Corresponding Author : jei0421@dankook.ac.kr)

의 강도 및 강성의 변화에 미치는 요소를 파악하고자 많은 연구가 수행되어왔다(Bourbonnais & Ladany, 1985; Bragg & Andersland, 1982; Freitag & McFadden, 1997; Haynes & Karalius, 1977; Hivon & Sego, 1995; Ting, 1983; Wolfe & Thieme, 1964). 이러한 연구들은 강도 및 강성에 영향을 미치는 요소들을 파악하고 각 요소들에 대한 영향 정도를 평가하는 연구들이 주를 이루고 있다.

따라서 본 연구에서는 동결된 사질토 지반에서의 강도 및 강성 특성을 알아보기 위해 세립분 함유량과 온도조건을 달리하여 일축압축시험을 수행하였다. 세립분 함유량에 따른 동토의 강도 및 강성특성을 알아보기 위해 조립질의 주문진 표준사와 세립질의 카올리나이트 0, 5, 10, 15%를 혼합하여 시료를 성형하였고, 온도에 따른 강도 및 강성특성을 알아보기 위해 -5, -10, -15°C의 온도조건에서 일축압축시험을 수행하였다.

2. 동토의 일축압축 거동

동토의 경우 토립자, 공기, 영하의 온도에서도 얼지 않는 수분인 부동수분, 얼음의 4상 구조를 보이며 이에 따라 일반적인 흙의 강도 및 강성특성과는 다른 특성을 보인다. 일반적인 사질토는 내부마찰각과 점착력으로 강도 발현을 하지만 동토의 강도 발현은 공극 내 얼음의 강도, 흙의 강도, 얼음의 결합으로 인한 얼음의 부착력 증가, 흙과 얼음구조의 강도 상승효과가 지배적으로 나타난다.

동결된 사질토의 강도 발현은 사질토의 부피에 따라 다양한 혼합요소를 보인다. 이를 사질토의 부피 비와 상대밀도에 따른 일축압축강도로 도식화하여 Fig. 1에 나타내었다(Ting, 1983).

Fig. 1에 나타나듯이 동결된 사질토는 상대밀도가 증가할수록 얼음의 강도가 증가하고 얼음의 결합으로 인해 흙 입자와 얼음간의 부착력이 증가한다. 또한 얼음의 경우 강도

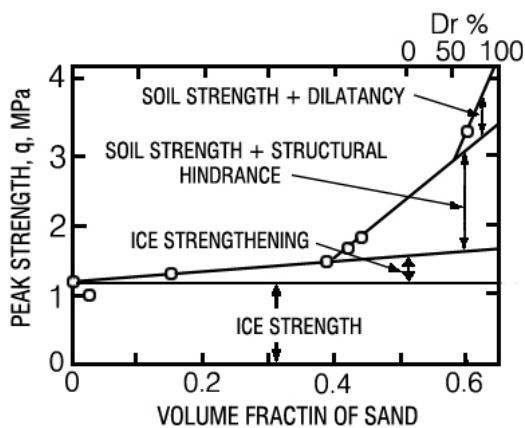


Fig. 1. Mechanism of frozen soils (Ting, 1983)

가 한계에 도달하면 파괴가 일어나지만, 동토에서는 얼음이 파괴되면서 흙 입자의 파쇄나 변형이 일어나지 않기 때문에 얼음의 강도만큼 동토의 강도가 증가하지는 않는다. 동토는 흙 입자 간의 결합과 흙과 얼음의 결합으로 이루어져 흙 입자 사이의 마찰력이 동토의 강도증가에 영향을 미치고 있으며 흙의 전단과정 중에는 다일레턴시(Dilatancy)가 발생하지만, 동토에서는 흙 입자의 이동을 얼음이 구속시켜주기 때문에 강도 증가가 발생한다(Hivon & Sego, 1995).

또한 동토는 온도의 변화와 흙의 종류에 따라 강도 발현과 강성에 영향을 미치게 되는데 이를 규명하기 위해 국내·외에서 많은 연구들이 이루어졌다. 국외의 경우 Freitag & McFadden(1997)은 일축압축시험을 통해 온도가 낮아질수록 강도는 증가하며, 흙의 종류에 따라서 강도 및 강성특성이 달라지는 것을 확인하였다. Fig. 2에 나타내었듯이 동일한 온도에서의 일축압축강도는 조립질의 모래에서 가장 큰 일축압축강도를 보이며 세립질의 점토에서 가장 작은 일축압축강도를 보인다. 또한 같은 종류의 흙에서는 온도가 낮아질수록 일축압축강도는 증가하는 경향을 보인다.

조립질의 흙에서는 흙의 간극안의 물이 동결되면서 단위 중량은 증가하는 경향을 보이고 이러한 흙은 약한 콘크리트의 강도를 가진다고 한다. 동토에서 동결되는 물의 양은 흙의 종류 및 온도에 따라 변화하며 온도는 얼음의 강도에 영향을 준다. 반면 세립질의 흙에서는 소성 거동을 보이며 층상의 아이스 렌즈를 형성하여 단기적으로 지반의 강도를 증가시킨다(Freitag & McFadden, 1997). 또한 국내에서는 동결된 사질토에 대한 온도에 따른 강도변화를 파악하기 위해 일축압축시험을 수행하였다. 사질토의 경우 온도가 낮아질수록 최대 일축압축강도 및 변형계수가 증가하는 경향을 보이며 잔류강도는 작아지는 것으로 나타났다(Chae et al., 2013).

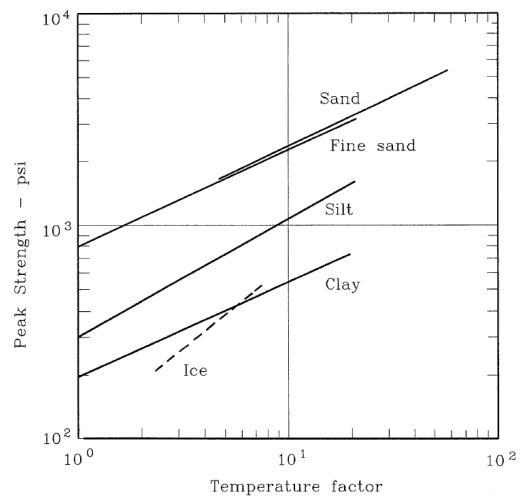


Fig. 2. Peak strength of various frozen soils with temperatures (Freitag & McFadden, 1997)

3. 시험 내용

3.1 사용시료

본 연구에서 일축압축시험에 사용한 시료는 조립질 재료인 주문진 표준사에 세립질의 카올리나이트를 0, 5, 10, 15%로 혼합하여 사용하였다. 조립질인 주문진 표준사는 비중 2.67에 최대 건조 단위중량 16.7kN/m^3 , 최소 건조단위중량 13.3kN/m^3 로서 통일분류법상 입도 분포가 좋지 않은 빈입도(SP)로 나타났다. 세립질인 카올리나이트는 비중 2.49에 소성지수(PI) 16.13으로 소성성이 낮은 실트(ML)로 나타났다. 세립분 함유량 0, 5, 10, 15%의 입도 분포곡선을 Fig. 3에 나타내었으며, 기본물성 시험결과를 Table 1, 2에 나타내었다.

사용시료인 사질토 시료들은 현장상태의 단위중량을 측정 및 추정하여 동일 재료로 현장상태의 단위중량과 동일하게 재성형 시료를 제작하는 것이 일반적이나 특정 지역의 시료로 연구를 진행하는 것이 아니기 때문에 시험의 편리성 및 시험목적에 부합되는 시료를 제작하고자 하였다. 따라서 시료 성형의 편리성 및 동결 시 체적변형을 최소화 할 수 있는 시료의 상대밀도를 결정하여 이를 바탕으로 시료를 성형 및 동결하여 일축압축시험에 필요한 직경 70mm, 높이 70mm의 공시체를 제작하였다.

영구동토지역의 동결된 지반을 모사하기 위해 주문진 표준사와 세립분 함유량 0, 5, 10, 15%를 혼합하여 시료를 성

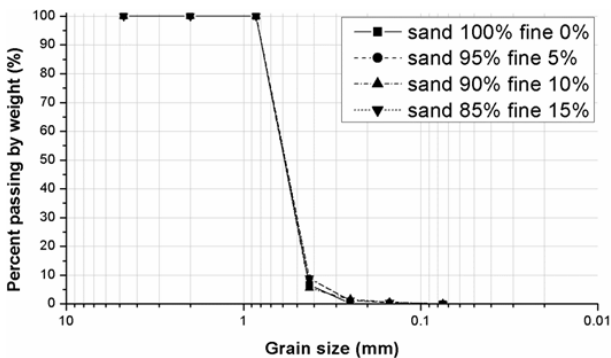


Fig. 3. Grain size distribution of Jumunjin sand

Table 1. Index properties of Kaolinite

Sample	Specific gravity (G_s)	Liquid limit, LL	Plastic limit, PL	Plasticity index, PI	%finer by #200 (%)	USCS
Kaolinite	2.49	44.88	32.75	16.13	99.86	ML

Table 2. Index properties of Junmunjin sand

Sample	Specific gravity (G_s)	Void ratio (e)	Max. dry unit weight, γ_{dmax} (kN/m^3)	Min. dry unit weight, γ_{dmin} (kN/m^3)	Relative density D_r (%)	USCS
Jumunjin sand	2.67	0.67	16.7	13.3	77	SP

형하였고 자세한 시료 성형과정은 Chae et al.(2013)에 서술되어 있다.

사용시료는 온도에 따른 강도 및 강성특성을 알아보기 위해 -5, -10, -15 $^{\circ}\text{C}$ 로 동결하였고 시료의 동결을 확인하기 위하여 부동수분양을 모든 시료에서 측정하였다. Fig. 4(a)에는 부동수분 시험 장비를 나타내었고, Fig. 4(b)에는 부동수분 측정 모습을 나타내었다. 또한 Fig. 5와 Table 3에는 부동수분 시험 결과를 나타내었다.

부동수분 시험 결과를 보면 시료의 간극수가 얼기 시작하면서 함수비의 양이 급격히 감소하게 되고, 일정 시간이 지난 후에는 함수비가 수렴하는 경향을 보이고 있다. 함수비가 수렴한다는 것은 시료의 동결을 의미하며, 이때의 함수비를 부동수분이라 말할 수 있다. 부동수분의 양은 평균 약

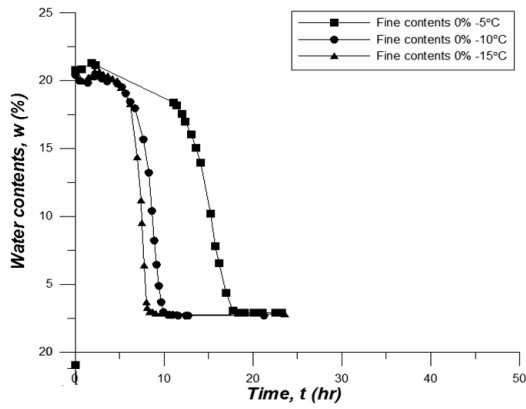


(a) Equipment of unfrozen water content

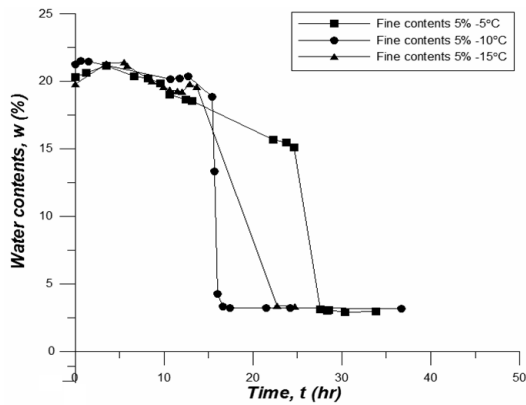


(b) Unfrozen water content testing

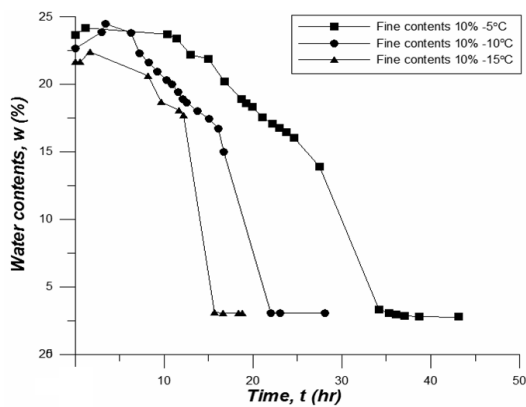
Fig. 4. Unfrozen water contents testing



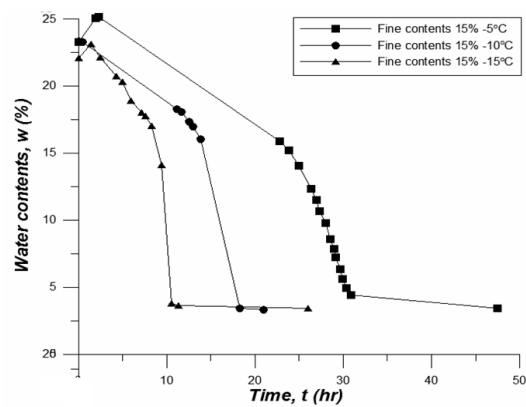
(a) Fine contents 0%



(b) Fine contents 5%



(c) Fine contents 10%



(d) Fine contents 15%

Fig. 5. Results of unfrozen water contents

3%가 존재하는 것으로 나타났으며, 함수비가 수렴하는 시간은 최소 8시간에서 최대 34시간까지 차이를 보이는 것으로 나타났다. 온도가 높아지거나 세립분 함유량이 증가할수록 함수비가 수렴하는 시간이 증가하는 경향을 보이고 있다.

이에 따라 부동수분이 수렴하는 구간을 함수비의 변화가 없는 구간으로 판단하였다. 따라서 본 실험에서는 시료의 동결시간을 부동수분 시험결과를 바탕으로 하여 약 48시간으로 결정하였다.

3.2 냉동체임버 및 시험장비

동토의 강도 및 강성특성을 알아보기 위해 모든 시험은 극한지의 온도를 모사할 수 있는 냉동체임버에서 수행하였다. 냉동체임버는 -20°C 까지 온도 조절이 가능하며 설정 온도의 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 의 오차범위 내에서 가동하도록 제작되었다. 시험시의 온도와 습도의 변화를 방지하기 위해 밀폐된 공간으로 제작되었으며, 시험 진행 시 내부의 진행 상황은 문의 유리면을 통하여 관찰할 수 있도록 제작되었다. 본 연구에서 사용한 일축압축시험 장비의 모식도를 Fig. 6에 나타내었다.

냉동체임버에 있는 일축압축시험기는 상재하중을 가하는

Table 3. Unfrozen water contents

Sample	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Converge time (hour)
Fine contents 0%	-5	18.4
	-10	9.92
	-15	8.12
Fine contents 5%	-5	27.53
	-10	16.67
Fine contents 10%	-5	34.17
	-10	22
Fine contents 15%	-5	48.5
	-10	30.92
	-15	10.53

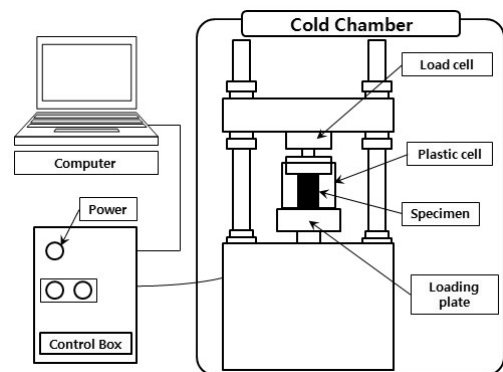


Fig. 6. Schematic diagram of uniaxial compression and creep testing equipment (Chae et al., 2013)

고강도 Frame과 재하속도 및 기계의 작동 및 정지를 조정하는 Control box, 시험 시 측정된 시료의 응력-변형률을 기록하는 Computer system으로 구성 되어 있다. 일축압축시험은 온도유지를 위해 냉동챔버에서 진행하였으며 시험방식은 변위 제어 방식으로 시험을 수행하였다.

일축압축시험의 재하속도는 ASTM(1995)과 Chae et al. (2013)에 따라 1%/min 이상의 속도로 시험하도록 규정되어 있으며 본 연구에서는 이를 고려하여 일축압축시험을 수행하였다. 일축압축시험은 냉동챔버 내에서 진행하였고, 성형된 시료는 온도 변화가 발생하지 않도록 냉동챔버 내부에서 추출하였다. 일축압축시험 데이터는 냉동챔버 외부의 컴퓨터에서 확인하였고 시료 전체 높이의 20%에 해당하는 변형이 발생되었을 때 시험을 종료하였다. 이와 관련된 자세한 사항은 Chae et al.(2013)에 설명되어 있다.

4. 시험 결과 및 분석

온도조건 -5, -10, -15°C에서 세립분 함유량 0, 5, 10, 15%의 동결된 사질토 시료에 대해 일축압축시험을 수행하였다. 동토의 강도특성을 분석하기 위해 일축압축시험의 결과인 응력-변형률 곡선으로부터 최대 일축압축강도를 산정하여 온도조건 및 세립분 함유량에 따라 비교·분석하였고, 강도특성을 알아보기 위해 응력-변형률 곡선으로부터 할선탄성계수(Secant modulus of elasticity, E_{50})를 산정하여 비교·분석하였다.

4.1 응력-변형률 거동 특성

일축압축시험 시 모든 시료는 성형 및 동결된 시료이기 때문에 시험결과의 신뢰성을 높이기 위해 각 시료에 대해 3번의 시험을 수행하였다. -5°C에서 주문진 표준사로 수행한 일축압축시험 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

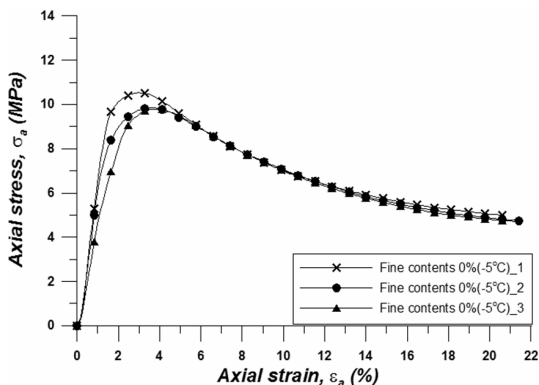


Fig. 7. Stress-strain responses of sands only specimens at -5°C

세립분 함유량 0%인 주문진 표준사의 일축압축시험 결과를 보면 동일한 시험에 대해 최대 일축압축강도와 잔류강도는 ±5% 범위 내에서 유사한 거동을 보이고 있다. 동일한 시료에서 응력-변형률 곡선이 유사한 거동을 보이는 것은 시료가 균질하게 성형 및 동결된 것을 의미한다. 온도 -5, -10, -15°C에서 세립분 함유량 0, 5, 10, 15%의 일축압축시험 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

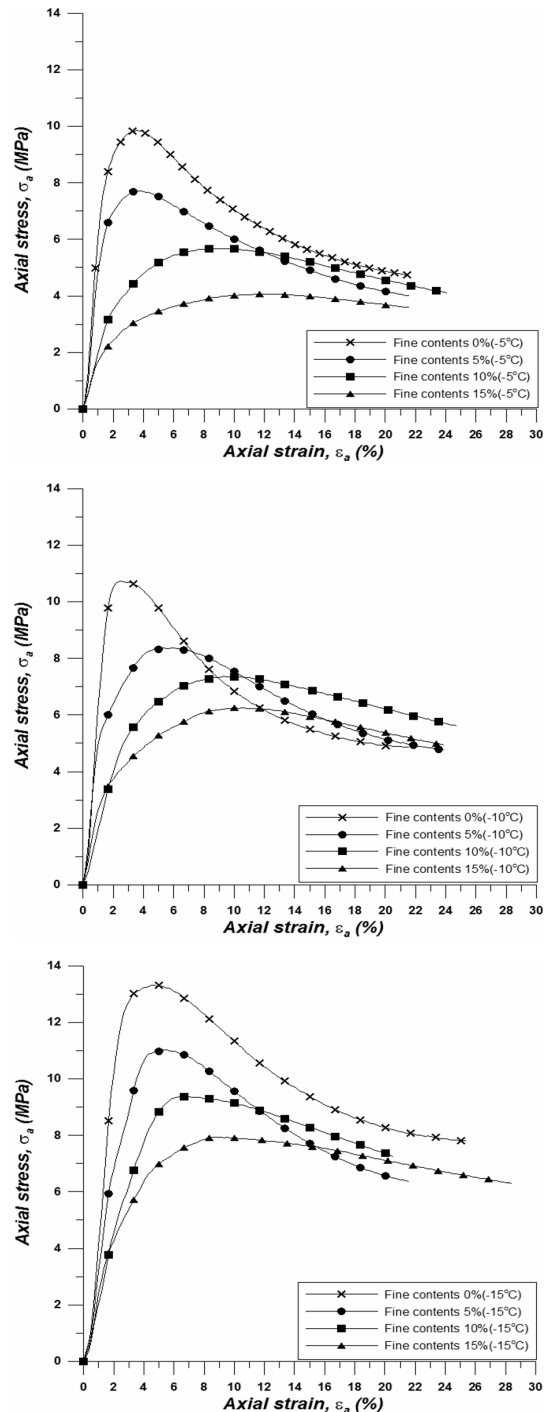


Fig. 8. Stress-strain responses of the frozen sands with 0, 5, 10, and 15% of fine contents at -5 (upper), -10 (middle) and -15°C (lower)

동토의 응력-변형률 거동 특성을 보면 일정한 온도에서 세립분 함유량이 증가할수록 최대 일축압축강도는 감소하는 경향을 보인다. 세립분 함유량 0%와 5%의 시료에서는 작은 변형률에서 첨두강도(Peak strength)를 발현한 후 강도가 급격히 감소하여 일정한 변형률 후에는 강도가 수렴하여 잔류강도에 도달하는 경향을 보인다. 세립분 함유량 10%와 15%에서는 뚜렷한 첨두강도를 보이지 않았으며 상대적으로 세립분 함유량 0%와 5%보다 첨두강도가 작은 경향을 보인다. 모든 시료의 첨두강도는 뚜렷한 경향을 보이지만 잔류강도는 경향이 없는 것으로 나타났다. 세립분 함유량 0, 5, 10, 15%에 대해 온도에 따른 최대 일축압축강도를 비교하기 위해 Fig. 9와 Table 4에 정리하였다.

온도가 낮아질수록 최대 일축압축강도는 선형적으로 증가하는 경향을 보이며 세립분 함유량이 증가할수록 일축압축강도는 낮아지는 경향을 보인다. 이를 통해서 온도 및 세립분 함유량이 일축압축강도에 영향을 미치는 것으로 생각된다.

세립분 함유량 0, 5, 10, 15% 시료의 최대 일축압축강도는 -5°C에서 -15°C 범위에서 온도가 낮아질수록 강도는 선형적으로 증가하는 경향을 보이며 세립분 함유량이 증가할수록 강도는 작아지는 것으로 나타났다. 이전에 언급하였던 동토의 메커니즘과 비교해보면 동토 시료의 온도 저하에 따

른 강도 증가는 일부 얼음의 강도 증가에 의한 것이고, 추가적으로 얼음의 강도 증가로 인하여 흙 입자 간의 결합과 흙과 얼음의 결합으로 발생된 마찰력이 증가하게 되어 강도가 증가하는 것으로 설명될 수 있다.

또한 세립분 0% 시료의 일축강도가 모든 온도에서 가장 크게 나타났으며 각각의 온도에서 세립분 함유량이 증가할수록 일축압축강도는 선형적으로 작아지는 경향을 보이고 있다. 이는 세립분으로 사용된 카올리나이트(ML)의 비표면적이 상대적으로 주문진 표준사보다 크기 때문에 시료의 입자 간의 결합력이 감소하여 세립분 함유량이 증가할수록 강도는 감소하는 것으로 생각된다.

동결된 사질토의 경우 온도가 낮아짐에 따라 일축압축 시 파괴 거동은 연성파괴 거동에서 취성파괴 거동을 보이는 것으로 나타났다(Chae et al., 2013). 이는 일축압축시험이 종료된 시료에 대한 파괴 형상을 나타낸 Fig. 10에서 확인할 수 있다.

시료의 파괴 형상을 보면 동결된 사질토 시료는 -5°C에서 연성파괴 현상을 보이며 온도가 낮아질수록 공시체에 균열이 발생하면서 취성파괴 거동을 보이는 것으로 나타났다. 또한 세립분 함유량이 증가할수록 가운데가 볼록해지는 연성 파괴 거동을 보이고 있다.

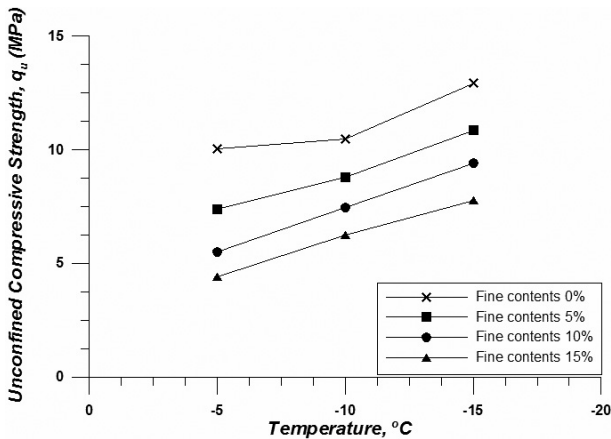


Fig. 9. Peak unconfined compressive strength of frozen sands with 0, 5, 10 and 15% of fine contents at -5, -10 and -15°C

Table 4. Peak unconfined compressive strength of frozen sands with 0, 5, 10 and 15% of fine contents at -5, -10 and -15°C

Samples	Unconfined compression strength (MPa)		
	-5°C	-10°C	-15°C
Fine contents 0%	10.05	10.46	12.96
Fine contents 5%	7.37	8.80	10.87
Fine contents 10%	5.49	7.46	9.41
Fine contents 15%	4.41	6.25	7.78

$$SRR(\%) = \frac{q_u(\text{peak}) - q_u(\text{residual})}{q_u(\text{peak})} \times 100 \quad (1)$$

여기서 SRR : 강도감소율(Strength reduction ratio)
 $q_u(\text{peak})$: 최대 일축압축강도(MPa)
 $q_u(\text{residual})$: 축 변형률 24%에서의 잔류강도(MPa)

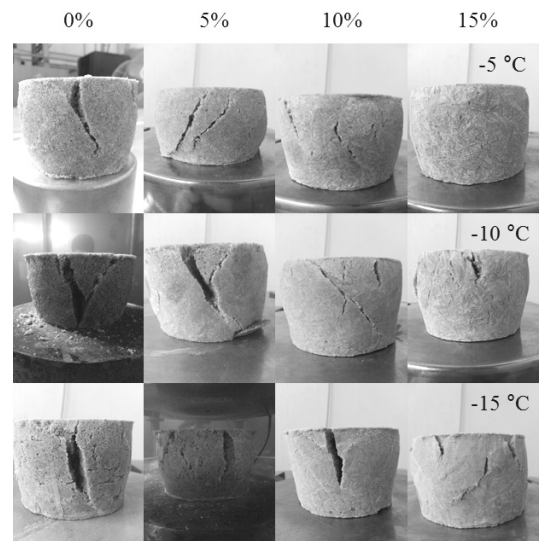


Fig. 10. Failure modes of the tested frozen sands

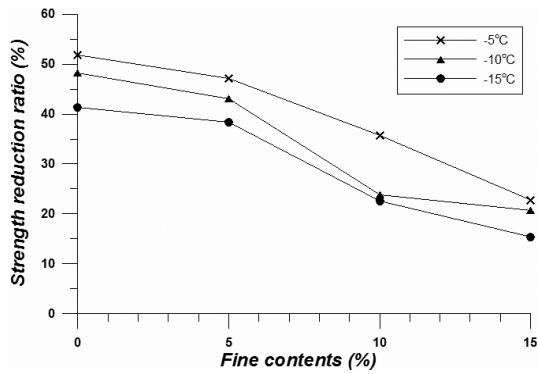


Fig. 11. Strength reduction ratio of the tested frozen sands with 0, 5, 10 and 15% of fine contents at -5, -10 and -15°C

세립분 함유량이 증가함에 따라 동토의 거동을 확인하기 위해 Eq. (1)과 같이 강도감소비(SRR)를 산정하여 Fig. 11에 나타내었다. 온도 -5, -10, -15°C에서 강도감소율은 세립분 함유량이 증가할수록 감소하는 경향을 보이며 온도가 낮아질수록 강도감소율 또한 낮아지는 것으로 나타났다. 강도감소율이 낮아지는 것은 동토의 강도에 온도 및 세립분 함유량이 영향을 미치는 것으로 생각된다.

또한 동토의 강도에 미치는 영향요소는 온도 및 세립분 이외에도 영하의 온도에서도 얼지 않는 수분인 부동수분과 온도가 낮아질수록 증가하는 얼음의 강도도 영향을 미칠 수 있다. 일반적으로 얼음의 강도 증가가 동토의 강도에 미치는 영향은 일정한 영하의 온도에서 부동수분 양이 수렴한 후에 지배적인 요인으로 작용한다. 순수한 모래의 경우 부동수분의 양은 약 -10°C에서 수렴(Anderson & Morgenstern, 1973)하며, 동토의 강도는 얼음의 강도와 부동수분의 양이 중요한 인자로 알려져 있다(Andersland & Ladanyi, 2004). 동결된 사질토의 부동수분의 양은 약 -10°C에서 수렴하기 때문에 -10°C, -15°C에서는 부동수분이 강도에 미치는 영향은 무시되고 강도의 증가가 얼음의 강도에 전적으로 기인한다고 할 수 있다. 또한 세립분 함유량이 증가할수록 부동수분의 양이 증가함에 따라 -10°C에서 수렴되지 않을 수 있기 때문에 강도에 영향을 미칠 수 있을 것으로 생각된다. 이러한 이유로 좀 더 명확한 동토의 강도특성을 파악하기 위해서는 추후에 세립분 함유량에 따른 부동수분을 측정하여 비교·분석해야 할 것으로 생각된다.

4.2 동토의 강성특성

동토의 강성특성을 알아보기 위해 일축압축시험의 결과인 응력변형률 곡선으로부터 변형계수(Secant deformation modulus, E_{50})를 산정하였다. 변형계수는 Eq. (2)와 같이 산정하였고, 그 결과를 Fig. 12에 나타내었다.

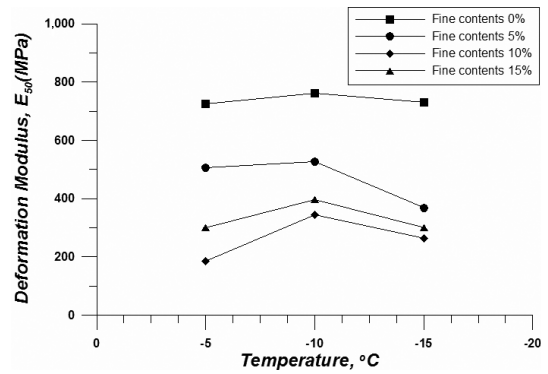


Fig. 12. Deformation moduli of the frozen sands with 0, 5, 10 and 15% of fine contents at -5, -10 and -15°C

$$E_{50} = \frac{1}{2} \times \frac{\sigma_{\max}}{\epsilon_{50}(\%)} \times 100 \quad (2)$$

여기서 E_{50} : 변형계수(MPa)

σ_{\max} : 최대 일축압축강도(MPa)

ϵ_{50} : 최대 일축압축강도에 도달한 변형률의 50% 변형률(%)

동결된 사질토의 변형계수는 세립분 함유량이 증가할수록 감소하는 경향을 보이며 온도가 낮아질수록 증가하는 경향을 보인다. 이는 세립분 함유량에 따라 부동수분의 양이 증가하기 때문으로 생각되며, 세립분 함유량이 증가함에 따라 시료의 파괴 거동이 취성 거동에서 연성 거동을 보이며 응력-변형률 거동에 영향을 미친 것으로 판단된다.

그러나 최대 일축압축강도와는 달리 온도가 -10°C에서 -15°C로 낮아짐에 따라 변형계수는 증가하지 않는 것으로 나타났다. -5°C에서 -10°C로 온도가 낮아지면 변형계수는 증가하지만 -10°C에서 -15°C로 온도가 낮아질 경우 변형계수는 감소하는 경향을 보인다. 일정한 온도에서 변형계수는 최대 일축압축강도와 마찬가지로 세립분 함유량이 증가할수록 작아지는 경향을 보이지만, 명확하게 온도에 대한 영향은 나타나지 않았다. 이는 일축압축시험의 부정확성에 기인할 수 있으며 추가적으로 부동수분시험 및 삼축압축시험이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 온도 및 세립분 함유량에 따라 동결된 사질토의 강도특성을 알아보기 위해 일축시험을 수행하였다. 세립분 함유량 0%의 시료로 부동수분 시험을 하여 시료의 동결시간을 확인하였으며 온도가 동토에 미치는 영향을 파

악하기 위해 -5, -10, -15°C에서 일축압축시험을 수행하였다. 또한 세립분 함유량 0, 5, 10, 15%의 시료로 일축압축시험을 수행함으로써 세립분이 사질토에 혼합되었을 경우에 강도 특성을 비교하였다.

- (1) 동결 사질토의 온도 및 세립분 함유량에 따른 강도특성을 알아보기 위해 일축압축시험을 수행하였다. 일축압축시험 결과인 응력-변형률 거동특성에서는 일정한 온도에서 세립분 함유량이 증가할수록 최대 일축압축강도는 감소하는 경향을 보이며 온도가 감소할수록 최대 일축압축강도는 증가하는 경향을 보이고 있다.
- (2) 세립분 함유량이 동일한 시료는 온도가 낮아질수록 최대 일축압축강도는 선형적으로 증가하는 경향을 보이지만 세립분 함유량이 증가할수록 강도는 감소하는 것으로 나타났다. 시료의 파괴형상을 비교한 결과, -5°C에서는 연성파괴 거동을 보이지만 온도가 낮아짐에 따라 공시체에 균열이 발생하면서 취성파괴 거동을 보이고 있다. 이는 온도의 변화와 세립분 함유량의 변화가 동결된 사질토의 강도에 영향을 주는 것으로 생각된다.
- (3) 동결 사질토의 강성 거동을 파악하기 위해 일축압축시험의 결과로부터 변형계수를 산정하여 비교·분석하였다. 동결 사질토의 변형계수는 세립분 함유량이 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 그러나 강도특성과는 달리 -5°C에서 -10°C로 온도가 낮아짐에 따라 변형계수는 증가하는 경향을 보이지만, -10°C에서 -15°C로 온도가 낮아질 경우 변형계수가 감소하는 경향을 보이고 있다.

본 연구는 동결 사질토의 강도특성에 관한 기초적인 연구로서 온도 및 세립분 함유량에 따른 강도 및 강성특성을 확인하였다. 동토지반에서의 설계 및 시공 시 적용할 수 있는 결과를 얻기 위해서는 응력의 영향을 파악할 수 있는 삼축압축시험을 수행하고 보다 다양한 세립분 함유량을 가진 시료들과 그에 따른 부동수분 양의 관계를 파악하는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 2014년 국토교통기술촉진사업 창의도전연구 창조형 모험과제 및 한국연구재단의 이공분야기초연구사업의 연구비 지원(NRF-2014R1A1A1002401)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Anderson, D. M. and Morgenstern, N. R. (1973), Physics, chemistry and mechanics of frozen ground, National Academy of Sciences, pp. 257~288.
2. Andersland, O. B. and Ladanyi, B. (2004), Frozen ground engineering second edition, John Wiley & Sons, New York, pp. 20~55.
3. ASTM (1995), Laboratory determination of creep properties of frozen soil samples by uniaxial compression (D 5520), In 1995 Annual Book of ASTM Standards, sec. 4, Vol. 04.08. ASTM, Philadelphia: ASTM, pp. 1~7.
4. Bourbonnais, J. and Ladanyi, B. (1985), The mechanical behavior of frozen sand down to cryogenic temperatures, Proceedings, 4th International Symposium of Ground Freezing, Sapporo, Japan, pp. 235~244.
5. Bragg, R. A. and Andersland, O. B. (1982), Strain rate, temperature and sample size effects on compression and tensile properties of frozen sand, Developments in Geotechnical Engineering, Vol. 28, pp. 35~46.
6. Chae, D. H., Oh, M. Y., Lee, H. Y. and Cho, W. J. (2013), Loading rate effects on the stress-strain responses of frozen soils, International Society of Offshore and Polar Engineering (ISOPE), Anchorage, pp. 501~506.
7. Dillon, H. B. and Andersland, O. B. (1966), Predicting unfrozen water contents in frozen soils, Journal of Canadian Geotechnical, Vol. 3, No. 2, pp. 53~60.
8. Freitag, D. R. and McFadden, T. (1997), Introduction to cold regions engineering, New York: ASCE Press, pp. 291~301.
9. Haynes, F. D. and Karalius, J. A. (1977), Effect of temperature in the strength of frozen silt, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory Research Report 350, pp. 6~25.
10. Hivon, E. G. and Sego, D. C. (1995), Strength of frozen saline soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 32, No. 2, pp. 336~354.
11. Ting, J. M. (1983), Tertiary creep model for frozen sands, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 109, No. 7, pp. 932~944.
12. Uhlmann, D. R. and Jackson, K. A. (1978), Frost heave in soils, Physics of Snow and Ice, Vol. 1, Part 2, pp. 1361~1373.
13. Wolfé, L. H. and Thieme, J. O. (1964), Physical and thermal properties of frozen soil and ice, Society of Petroleum Engineering Journal, Vol. 4, No. 01, pp. 67~72.