

동결토의 일축압축강도와 전단강도 상관관계 분석에 관한 연구

Analysis of the Relationship between Unconfined Compression Strength and Shear Strength of Frozen Soils

강재모¹, 이장근^{2*}, 이준용³, 김영석⁴

Jae-Mo Kang¹, Jang-Guen Lee^{2*}, Joonyong Lee³, YoungSeok Kim⁴

¹Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea

²Member, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea

³Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea

⁴Member, Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea

ABSTRACT

The mechanical behavior of frozen soils is different from that of unfrozen soils due to the phase change between water and ice. The strength characteristics of frozen soils are governed by the intrinsic material properties such as grain size, ice and water content, air bubbles, and by externally imposed testing conditions such as temperature, freezing time, and strain rate. Especially, the strength of the frozen soils is generally higher than that of unfrozen soils due to ice binding capacity with soil particles, and is strongly affected by a highly complex interaction between the solid soil skeleton and the pore matrix, composed of ice and unfrozen water. In this study, the direct shear test and unconfined compression test are carried out inside of a large-scaled freezing chamber, and the relationships between cohesion and unconfined compression strength under various freezing temperature conditions are discussed.

요 지

동결토는 물과 얼음의 상변화에 따라 일반적인 흙과는 다른 거동을 보이며, 동결토의 강도는 온도, 함수비, 시간, 토질 특성 등 다양한 인자에 의해 영향을 받는다. 특히 지반이 동결되는 경우, 얼음과 흙 입자의 결합력에 의해 높은 강도 특성을 보이며, 이때의 전단강도는 흙의 구조적 결합에 영향을 미치는 얼음과 세립분의 함량에 따라 달라지며, 이로 인해 점착력이 동결토의 전단강도에 미치는 영향은 증가한다. 본 논문에서는 동결조건에서 직접전단시험과 일축압축강도시험을 실시하여 온도에 따른 흙의 강도 특성을 확인하였으며, 점착력과 일축압축강도와의 상관관계를 확인하였다.

Keywords : Frozen ground, Unconfined compressive strength, Shear strength, Cohesion

1. 서 론

최근 들어 국내에서는 남극 제2과학기지(장보고 기지)

건설과 시베리아 천연가스 공급 등과 같은 영구동토를 포함하고 있는 극한지를 대상으로 한 건설 사업에 대한 관심이 고조되고 있다. 영구동토지역이란 계절과 상관없이 2년 이상 동결되어 있는 지층(영구동토층, permafrost layer)이 존재하는 지반을 말하며(Esch, 2004), 이러한 영구동토 지역에서 건설되는 구조물의 기초를 설계하기 위해서는 동결지반을 구성하는 흙의 물리적, 역학적 특성을 파악해

Received 6 Aug. 2013, Revised 11 Sep. 2013, Accepted 16 Sep. 2013

*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0791; Fax: +82-31-910-0211

E-mail address: jlee@kict.re.kr (J.G. Lee)

야 한다. 특히 동결토의 경우는 흙 시료를 구성하는 공기 (air), 물(water), 흙 입자(soil grain)에 더하여 온도조건에 따라 물(water)이 얼음(ice)으로 상변화 하는 과정에서 발생하는 흙의 구조 변화와 이에 따른 역학적 특성의 변화를 고려하여야 한다.

동결 지반의 역학적 특성은 온도와 시간의 영향을 고려한 압축강도(compression strength), 인장강도(tensile strength), 전단강도(shear strength), 크리프 강도(creep strength)에 대한 연구가 필요하다. 동결토의 강도특성을 파악하기 위한 많은 선행연구가 진행되어 왔으며, 이러한 연구들을 통해 동결토의 강도가 온도, 변형율, 구속압, 함수비 등 다양한 인자들에 의해 영향을 받는다는 것이 밝혀졌다. Sayles and Haines(1974)는 일정 변형율 조건에서 온도변화에 따른 동결된 실트의 일축압축강도를 측정하고, 온도조건에 따른 실트의 동결 강도특성에 대해 연구하였으며, Haynes and Karalius(1977)는 일축압축시험에서 하중재하 속도를 달리하여 동결된 실트에 미치는 온도의 영향을 확인하였다. 이외에도 Bragg and Andersland(1981), Bourbonnais and Ladanyi(1985), Wu et al.(1994)도 동결토의 강도에 미치는 온도의 영향에 대한 연구를 수행한바 있다. 실제 동결지반 현장의 적용 사례를 통한 보다 실용적인 연구들도 진행되고 있다. 얼음의 함량이 높은(ice-rich) 지역인 Qinghai-Tibetan 철도와 the Qinghai-Tibetan 고속도로의 현장 시공을 통한 연구 결과들이 활발하게 발표되고 있으며(Wu et al., 2007; Zhang et al., 2004), 동결토의 전단강도를 활용하여 기초구조물과 지반의 동착강도를 추정하는 연구들도 진행되고 있다(Choi and Ko, 2011).

동결토의 전단강도는 동결 시료의 구조적인 결합에 영향을 미치는 얼음과 세립토의 함량에 따라서 달라진다. 일반적으로 동결토의 전단강도는 일반 흙 시료와 비교하여 마찰각의 영향을 작게 받으며, 특히 동결 시료의 얼음 함량이 부피기준으로 30% 이상(ice-rich)인 경우에는 동결토의 강도가 점착력에 의해 좌우되는 것으로 알려져 있으며, Arenson et al.(2004), Sayles and Carbee(1981) 등은 동결토에서 얼음의 함량에 따른 강도 특성 변화를 실험을 통해 확인한 바 있다. Jessberger(1981)은 토질의 종류에 따른 동결토의 마찰각에 대해 알아보하고자 사질토와 점성토를 -10°C 의 온도조건에서 동결시킨 후 삼축시험을 실시하였으며, 동결된 사질토의 마찰각은 $22^{\circ}\sim 28^{\circ}$, 점성토의 마찰각은 약 3° 정도인 것을 확인하였다. 따라서 동결된 세립토일수록 마찰각이 전단강도에 미치는 영향은 작아진다는

것을 확인 할 수 있었다.

본 논문에서는 동결지반의 역학적 특성을 결정하는 가장 중요한 설계정수인 전단강도를 구하기 위해 국내 화강 풍화토를 대상으로 직접전단시험과 일축압축시험을 실시하였다. 일반적으로 일축압축시험을 통한 압축강도 절반($q_u/2$)의 평균값은 전 파괴지역의 파괴면에 대한 비배수 전단강도를 잘 대변한다는 사실(Nakase, 1967 ; Matsuo and Asaoka, 1976)과 세립토가 동결되는 경우 얼음이 흙 입자와 결합하여 점착력을 증가시키고 마찰각은 감소시키는 거동을 보인다는 Jessberger(1981)의 실험 결과에서 착안하여 일축압축강도(q_u) 값으로 전단강도를 예측하는 보다 실용적인 방안을 제시하고자 하였으며, 직접전단시험과 일축압축시험을 통해 온도에 따른 강도 특성을 확인하고, 점착력(C)과 일축압축강도(q_u)의 상관성을 확인하였다.

2. 직접전단시험과 일축압축강도시험

2.1 시험재료

본 연구에서는 동결토 지반에서 온도변화에 따른 강도 특성을 확인하고 직접전단시험의 점착력과 일축압축시험을 통해 도출된 일축압축강도의 상관관계를 도출하기 위해 -5°C , -10°C , -15°C 의 온도조건에서 동일 흙 시료를 대상으로 직접전단시험과 일축압축시험을 실시하였다. 실험에 사용된 흙 시료는 우리나라 전역에 가장 넓게 분포하고 있는 화강풍화토를 이용하였다. 본 실험에 사용한 화강풍화토는 서울대학교 인근 관악산 지역에서 채취하였으며, 통일분류상 SW에 해당하며 비중은 2.67이다. Fig. 1은 화강풍화토의 입도분포곡선을 나타내고 있으며, 5%의 세립

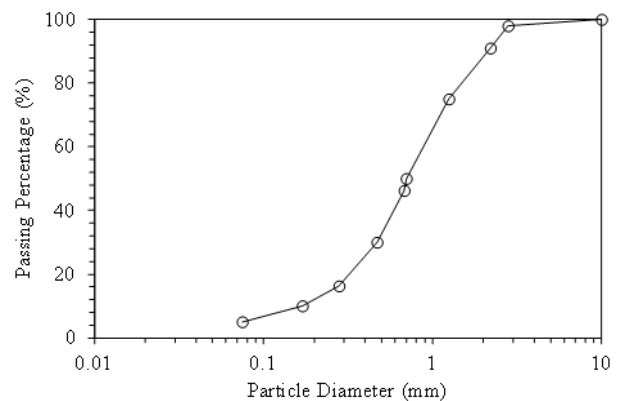


Fig. 1. Grain size distribution curve of weathered granite soil

Table 1. Physical properties of weathered granite soil

Physical Property	Weathered Granite
Gs	2.67
emax	1.227
emin	0.418
D50	0.71
Cu	6.07
Cc	1.29
USCS	SW

분을 포함하고 있다. Table 1은 본 연구에서 사용한 화강 풍화토의 기본 물성치를 나타내고 있다.

2.2 직접전단시험

2.2.1 시험장비

동결토 전단시험기는 동토지역의 저온환경을 모사하기 위한 대형 냉동챔버 내에 설치되어있으며, -30°C 에서 작동이 가능하도록 특수 제작되었다(Lee & Choi, 2012). 본 연구에서 활용한 냉동챔버의 규모는 $3000\text{mm(W)} \times 3000\text{mm(L)} \times 3000\text{mm(H)}$ 이며, $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 의 온도분포 조절을 통하여 -20°C 까지 온도제어가 가능하도록 설계되어졌다. 동결토 전단시험기는 전단박스, 수평하중 재하 장치, 수직하중 재하 장치, 로드셀, 수평 변위계 및 수직 변위계로 구성된 시험기 본체와 직접전단시험 시 전단속도를 제어하며 측정결과를 저장하기 위한 제어계측시스템으로 구성되어 있다. 시험기 본체를 구성하는 각각의 구성장비에 대한 제원 및 측정 정밀도는 Table 2와 같으며, 동결된 시험공시체에 가해지는 전단속도는 기어박스과 모터를 통하여 최소 0.01mm/min 에서 최대 10mm/min 으로 제어할 수 있도록 설계되었다. 또한 제어계측시스템은 실험결과분석이 용이하도록 직접전단시험시 수평 및 수직변위계를 통한 실험 공시체의 변형량과 로드셀을 통한 전단하중을 최소 0.1초에서 최대 60초의 간격으로 계측할 수 있도록 설계되었다.

2.2.2 공시체 제작 및 시험 방법

-5°C , -10°C , -15°C 온도조건에서 동결토의 전단강도를 확인하기 위하여 직접전단시험을 실시하였다. 시험공시체는 너비와 두께의 비가 KSF 2343(2007)에 의거 2:1이 되도록 제작하였으며, 상·하부 전단박스사이의 이격거리는 0.5mm 를 유지하도록 하였다. 함수비는 15.5%가 되도록 하였으며, 화강풍화토와 물을 잘 혼합한 뒤 각각 비닐팩을 이용하여 함수량의 손실을 막고 함수비가 균일하게 퍼지도록 약 24시간동안 보관하였다. 24시간 이후 전단박스 몰드 내에 시료를 삽입한 후 3층 다짐을 통하여 상대밀도 76%의 기준으로 공시체를 제작한 후 각각의 온도조건에 따라 24시간 동결 시켰다.

냉동챔버 내에서 24시간 동결된 실험공시체에 대하여 전단시험 시 수평변위로 인해 감소되는 실제 전단면의 면적에서 작용하는 전단응력을 측정하기 위하여 각 수평변위에 대하여 전단 면적을 보정하였다. 일반적으로 상온 직접전단시험에서는 0.1mm/min 에서 3mm/min 사이에서의 전단속도는 흙의 마찰각에 영향을 끼치지 않는다고 알려져 있으나, 동결온도 조건에서의 전단속도는 동결토의 강도에 영향을 미친다고 알려져 있다(Fitzsimons et al., 2001; Yasufuku et al., 2003). 따라서 모든 시험공시체의 전단시험에 적용한 전단속도는 시험의 일관성을 위하여 0.5mm/min 로 고정하였다. 기존의 연구를 통해 보고되고 있는 동결토 전단시험결과를 살펴보면 동결토의 최대 전단응력은 약 10%이상의 과대한 수평변위 발현 이후에 나타나는 것으로 보고되었다(Christ et al., 2009). 따라서 전단속도를 과다하게 느리게 설정하면 현실적으로 원활한 실험의 진행이 불가능할 것으로 판단되며, 기존의 연구에서 활용한 전단속도를 참고하여 기존의 연구에 활용되었던 전단속도의 범위 내에서 비교적 빠른 속도인 0.5mm/min 을 실험에 적용하였다(Parameswaran, 1978). 수직응력에 따른 전단강도 시험에서 고정된 조건은 상대밀도(76%), 함수비(15.5%), 전단속도(0.5mm/min)이며, 동결온도(-5°C , -10°C , -15°C)

Table 2. Size and measurement precision of direct shear apparatus(Lee & Choi, 2012)

Components	Size	Measurement Precision
Shear Box	100 mm (W) × 100 mm (L) × 60 mm (H)	
Vertical Loading System	Vertical loading = Weight × 10	
Lateral Loading System	Max. applied loading = 9.5 ton	0.01 mm/min
Load Cell	Max. measurement = 9.5 ton	0.01 kg
LVDT for Vertical Displacement	Stroke = 10 cm	0.01mm
LVDT for Lateral Displacement	Stroke = 20 cm	0.01mm

와 수직응력(100kPa, 200kPa, 300kPa)을 변수조건으로 적용하여 실험을 수행하였다.

2.3 일축압축시험

2.3.1 시험 장비

동토 실험용 일축압축시험의 실험장비는 상재하중을 가하는 고강도 frame과 재하속도 및 기계의 작동 및 정지를 조정하는 제어박스, 실험 시 측정된 시료의 응력-변형을 기록하는 computer system으로 구성되어 있다. 본 일축압축시험기의 본체는 직접전단시험기와 함께 대형 냉동챔버 내부에 보관되어 있다. 본체는 시료를 거치시킬 수 있는 loading plate와 하중 측정이 가능한 로드셀이 상부 고정단에 장착되어 있는 형태이며, 변위는 시험기의 본체 내부에 설치된 변위계(LVDT)를 이용하여 측정하는 형태로 구성되어 있다. 하중 측정을 위해 장착된 로드셀과 변위계는 각각 0.01kgf, 0.01mm의 단위까지 측정하고 최대 한계치는 로드셀이 10tonf, 변위계가 최대 100mm까지 측정이 가능하다. 본 장비는 하중 제어 및 변형을 제어가 가능하다.

2.3.2 공시체 제작 및 실험 방법

일축압축시험에 사용된 시료는 직접전단시험과 유사하게 제작되었다. 시료의 깊이에 따른 상대밀도의 편차가 발생하는 것을 방지하기 위하여 KSF 2312 표준 다짐시험 시 사용되는 2.5kg 래머를 이용하여 3층 다짐법으로 시료를 제작하였고, 몰드는 직경 70mm, 높이 140mm로 제작되었다(Fig. 2). 공시체 제작을 위한 다짐 시에는 몰드의 상부에 원형 링을 고정시켜 몰드의 옆면과 하부의 유동을 방지하고 제작이 완료된 이후에는 상부 뚜껑을 덮어 완전 밀폐상태가 유지되도록 하였다. 동결 시료를 제작하기 위

하여 영하의 온도가 지속적으로 유지되는 냉동챔버 내부에 밀폐된 몰드를 넣어 동결시켜 시료 내의 함수비 변화를 최소화 하였다.

제작 완료된 공시체는 각각 -15°C, -10°C, -5°C 상태의 냉동챔버 속에서 48시간 동안 동결시켰다. 여분의 공시체 내부에 온도센서를 설치하여 공시체의 표면온도와 내부온도의 차이가 없는지를 확인한 후 시험을 실시하였다. 압축압축시험은 1mm/min의 변형속도로 압축을 하였으며, 공시체가 파괴되거나 15% 변형에 도달하면 압축을 종료하였다.

3. 실험결과 분석

온도 변화에 따른 동결토의 강도특성을 확인하기 위해 실시한 직접전단시험과 일축압축강도 시험의 결과는 Fig. 3~4와 같다. 화강풍화토의 전단강도는 온도가 낮아짐에 따라 증가하는 것을 확인하였으며, 일축압축강도도 유사

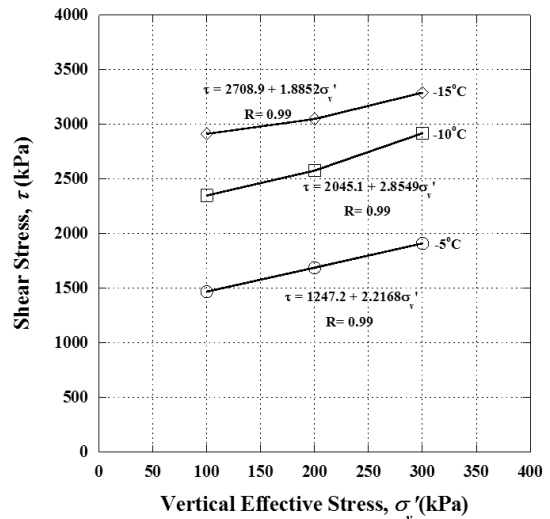


Fig. 3. Direct shear test results with respect to temperature variation

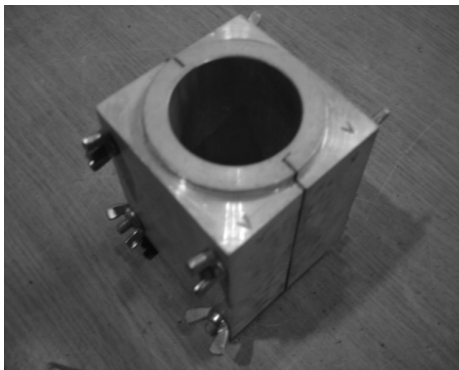


Fig. 2. Specimen Preparation Mold for Unconfined Compressive Strength Tests

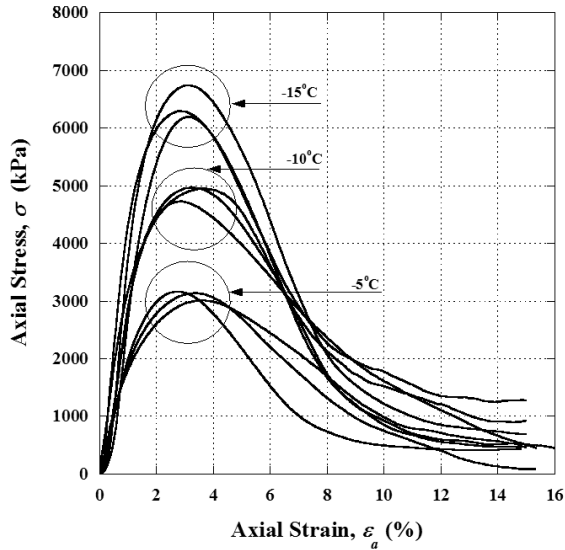


Fig. 4. Unconfined compressive strength test results with respect to temperature variation

Table 3. 온도조건에 따른 화강풍화토의 강도 시험 결과

		-5°C	-10°C	-15°C
Uniaxial Strength (q_u , kPa)		3,322	4,970	6,193
Shear Strength (τ_f , kPa)	σ'_v : 100 (kPa)	1,469.3	2,350	2,915.6
	σ'_v : 200 (kPa)	1,689.7	2,577.1	3,049.6
	σ'_v : 300 (kPa)	1,912.7	2,921	3,292.6

하계 온도가 낮아짐에 따라 강도가 증가하는 경향을 확인할 수 있었다(Table 3). 이는 선행연구(Choi, 2011)를 통해 밝혀진 동결토의 강도는 온도가 낮을수록 증가한다는 연구결과에 부합하는 것으로 동결토의 강도는 온도에 큰 영향을 받는다는 것을 검증할 수 있었다.

Fig. 5~7은 각각의 온도조건에서 일축압축시험과 직접전단시험의 결과를 비교한 그래프이며 동일 온도조건에서 3회의 일축압축시험 결과와 1회의 직접전단시험 결과를 도시하였다. -15°C, -10°C, -5°C 온도조건에 따른 직접전단시험에서 측정된 점착력(c)은 각각 1247kpa, 2045kpa, 2709kpa이며, 일축압축강도의 절반값($q_u/2$)은 1661kpa, 2485kpa, 3097kpa로 점착력(c)보다 일축압축강도의 절반값($q_u/2$)이 크게 나오는 경향을 보여주고 있다. Jessberger (1981)도 직접전단시험과 일축압축시험을 수행하였으며 사질토의 실험 데이터를 비교하면, 본 연구 결과와 유사한 경향을 확인할 수 있다(Table 4).

점착력과 일축압축강도는 함수비가 높은 Jessberger(1981)의 실험이 더 큰 값을 보이는 것을 확인 할 수 있었으며, 점착력(c)과 일축압축강도 절반값($q_u/2$)의 오차는 Jessberger

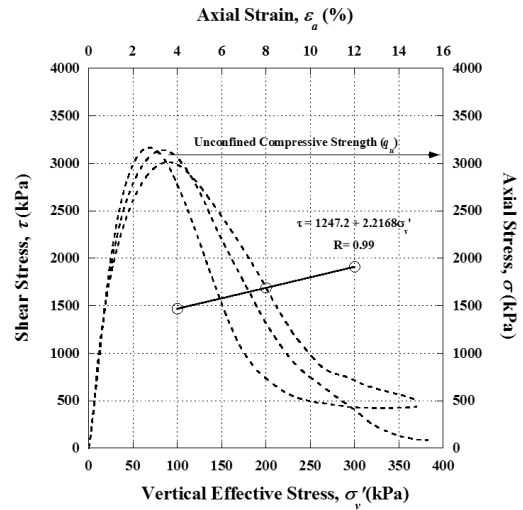


Fig. 5. Direct shear and unconfined compressive test results in -5°C

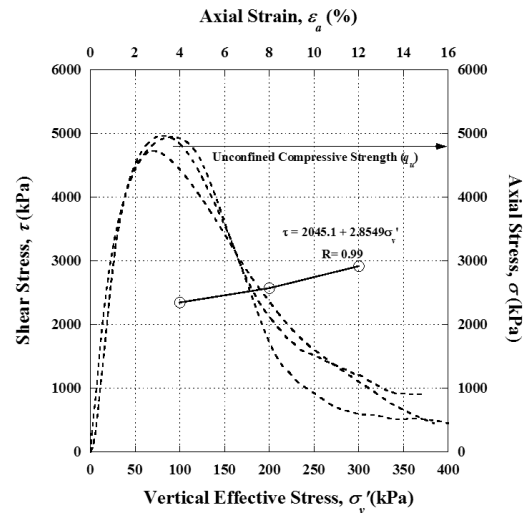


Fig. 6. Direct shear and unconfined compressive test results in -10°C

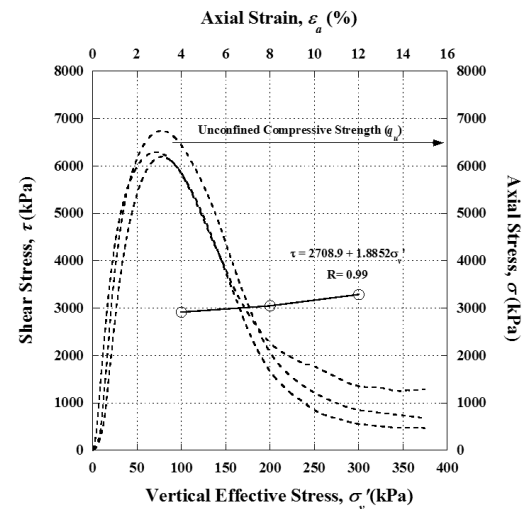


Fig. 7. Direct shear and unconfined compressive test results in -15°C

Table 4. Discrepancy between cohesions from direct shear tests and from Unconfined Compressive Strength (UCS) tests

		-5℃	-10℃	-15℃
Sand, $\omega=15.5\%$	c (kPa)	1,247	2,045	2,709
	$q_u/2$ (kPa)	1,661	2,485	3,097
	Error (%)	25	18	13
Sand, $\omega=28\%$ Data from Jessberger (1981)	c (kPa)	2,100	3,200	3,700
	$q_u/2$ (kPa)	3,500	5,000	6,000
	Error (%)	40	36	38

(1981) 실험의 경우 약 40% 정도, 본 연구에서의 경우는 13%~25% 정도로 나타남을 확인하였다. c 와 $q_u/2$ 값의 차이는 입자가 큰 사질토의 경우 마찰각이 전단강도에 일정부분 영향을 미치기 때문으로, 세립토의 함유량이 높아 질수록 전단강도는 점착력에 의해 결정될 것으로 판단된다. 또한, 실험결과에서는 온도가 낮을수록 c 와 $q_u/2$ 값의 상관관계가 높아지는 것을 확인 할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 온도조건에 따른 동결토의 강도특성을 확인하기 위해 직접전단시험과 일축압축시험을 실시하였으며, 본 논문에서 도출된 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 동결시료는 온도가 낮을수록 강도는 더 커지는 것을 확인하였다. 본 연구결과는 온도가 낮을수록 얼음의 강도가 증가하고 흙 입자와 얼음과의 구조적 결합이 더욱 견고해짐에 따라 동결토의 강도가 증가한다는 기존 연구결과에 부합된다.
- (2) 국내에서 널리 분포되어 있는 화강풍화토를 대상으로 동결토의 전단강도를 도출하기 위해 점착력과 일축압축강도를 비교하였다. 그 결과 점착력(c)과 일축압축강도 절반값($q_u/2$)은 25% 내의 오차를 확인 할 수 있었다. 기존 연구에서 사질토를 대상으로 추정된 점착력(c)과 일축압축강도 절반값($q_u/2$)은 40% 내의 오차를 보여주고 있다. 따라서 화강풍화토의 미미한 세립분 함유량(5%)은 점착력(c)과 일축압축강도 절반값($q_u/2$)에 상당한 영향을 미치는 것으로 판단된다. 점착력(c)과 일축압축강도 절반값($q_u/2$)의 상관관계는 온도가 낮을수록 더 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.
- (3) 본 연구에서는 일축압축시험을 통해 측정된 일축압축

강도를 이용하여 동결토의 전단강도를 예측하는 방법이 직접전단시험에서 측정된 점착력(c) 보다 전단강도를 더 크게 평가하는 측면이 있다. 그러나 흙 입자가 작은 세립토 지반의 영구동토 지역에서는 그 차이가 미비할 것으로 판단된다.

본 논문에서는 국내 화강풍화토를 대상으로 온도변화에 따른 동결토의 전단강도를 예측함에 있어 일축압축시험 결과의 활용성을 검토하였다. 향후 다양한 세립토의 동결에 따른 마찰각의 영향과 함수비에 따른 강도 변화에 대한 추가적인 연구를 통해 구조물 기초설계에 일축압축강도를 이용한 동결토의 전단강도를 추정하는 방법을 정립할 필요가 있다.

Acknowledgement

This research was supported by a grant from the Strategic Research Project Development of Extreme Cold Region Ground Stabilization Technology funded by the Korea Institute of Construction Technology (KICT).

References

1. Arenson, L. U., Johansen, M. M., and Springman, S. M. (2004), "Effects of volumetric ice content and strain rate on shear strength under triaxial conditions for frozen soil specimens", *Permafrost and Periglacial Processes*, 15, pp. 261-271.
2. Bourbonnais, J., and Ladanyi, B. (1985), "The Mechanical Behavior of Frozen Sand Down to Cryogenic Temperatures", *4th International Symposium on Ground Freezing*, Sapporo, pp.235-244.
3. Bragg, R. A., and Andersland, O. B. (1981), "Strain Rate, Temperature, and Sample Size Effects on Compression and Tensile Properties of Frozen Sand", *Engineering Geology*,

- Vol.18, pp.35-46.
4. Choi, C. H., and Ko, S. G. (2011), "A Study for Predicting Adfreeze Bond Strength from Shear Strength of Frozen Soil", *Journal of the Korean Geo-environmental Society*, Vol.27, No.10, pp.13-23.
 5. Christ, M., Kim, Y. C., and Park, K. B. (2009), "Shear strength of frozen sand", *Conference Co-Hosted by KISTEC & KGES*, pp.394-399.
 6. Esch, D. C. (2004), Thermal Analysis, Construction and Monitoring Methods for frozen Ground, The Technical Council on Cold Regions Engineering, ASCE.
 7. Fitzsimons, S. J., McManus, L. J., Sirota, P., and Lorrain, R. D. (2001), Direct shear tests of materials from a cold glacier: Implications for Landform Development, Quaternary International, Vol.86, No.1, pp.129-137.
 8. Haynes, F. D., and Karalius, J. A. (1977), Effect of temperature on the strength of frozen silt, USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL Report 77-3, pp.1-21.
 9. Jessberger, H. L. (1981), "A State-Of-The-Art Report, Ground Freezing", *Engineering Geology*, 18, pp.5-30.
 10. Lee, J., and Choi, C. (2012), "A study for shear strength characteristics of frozen soils under various temperature conditions and vertical confining pressures", *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol.13, No.11, pp.51-60.
 11. Matsuo, M., and Asaoka, A. (1976), "A Statical Study on a Conventional Safety Factor Method", *Journal of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.16, No.1, pp.75-90.
 12. Nakase, A. (1967), "The $\phi_u = 0$ Analysis of Stability and Unconfined Compression Strength", *Soils and Foundations*, Vol.7, No.2, pp.35-50.
 13. Parameswaran, V. R. (1978), "Adfreeze Strength of Frozen Sand to Model Piles", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.15, No.4, pp.494-500.
 14. Sayles, F. H., and Carbee, D. L. (1981), "Strength of frozen silt as a function of ice content and dry unit weight", *Engineering Geology*, Vol.18, pp.55-66.
 15. Sayles, F. H., and Haines, D. (1974), Creep of Frozen Silt and Clay, Tech. Rep. 252, U.S. Army, CRREL.
 16. Wu, Z. W., Ma, W., Zhang, C. Q., and Sheng, Z. Y. (1994), "Strength characteristics of frozen sandy soil", *Journal of Glaciology and Geocryology*, Vol.16, No.1, pp.15-20.
 17. Wu, Q., Zhao, S., Ma, W., and Zhang, L. (2007), "Qinghai-Xizang Railroad Construction in Permafrost Regions", *Journal of Cold Region Engineering*, Vol.21, pp.60-67.
 18. Yasufuku, N., Springman, S. M., Areson, L. U., and Ramhold, T. (2003), "Stress-dilatancy behavior of frozen sand in direct shear", *Proc. of the Eighth International Conference on Permafrost*, Zurich, Switzerland, pp.1253-1258.
 19. Zhang, X. F., Lai, Y. M., Yu, W. B., and Wu, Y. P. (2004), "Forecast and analysis of refreezing in FengHuoShan Permafrost tunnel", *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, Vol.23, No.24, pp.4170-4178.