

남극 및 시베리아 흙의 동토공학적 특성 분석 **Engineering Characteristics of Antarctic and Siberian Frozen Soils**

김영진¹⁾, Young-Chin Kim, 신재원²⁾, Jae-won Shin, 김현기³⁾, Hyun-Ki Kim

¹⁾ 한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실 책임연구원, Research Fellow, Geotechnical Disaster and Environment Research Division, Korea Institute of Construction Technology

²⁾ 한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실 학생연구생, Researcher, Geotechnical Disaster and Environment Research Division, Korea Institute of Construction Technology

³⁾ 국민대학교 건설시스템공학과 전임강사, Full-time Lecturer, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University

SYNOPSIS : In this study, soil samples from the Antarctic and Vladivostok, Siberia were tested in the laboratory, and specific gravity, compaction curve and grain size distribution were determined. The effect of temperature change on the thermal conductivity, unfrozen water content and compressive strength were investigated. Samples for the compressive strength test were prepared in a mold with a fixed volume to prevent swelling and the effect of temperature and water content change on the strength were compared. Results from the thermal conductivity test showed that thermal conductivity values for both soils were larger at temperatures below freezing than above freezing. The unfrozen water content dropped sharply within a temperature range of 0~ -5°C and then gradually decreased further up to -20°C. Compressive strength test results showed various stress/deformation curves with a change in water content. Sandy soil had much larger strength than pure ice at an identical temperature, while clayey soil had a smaller strength than ice near the freezing point, but showed a larger strength at temperatures belows -15°C.

Key words : antarctic soil, thermal conductivity , unfrozen water content, uniaxial compressive strength

1. 서 론

월 평균기온이 영하인 달이 반년이상 계속되어 땅속이 1년 내내 언 상태로 있는 지대를 영구동토라 한다 (두산세계대백과사전 2002). 러시아의 시베리아 자원개발이 본격화되면서, 영구동토지대에 도로 혹은 천연가스, 송유관의 건설이 가시화되고 있다. 또, 극지지역에 과학연구시설의 추가 건설이 추진되고 있다. 또한, 동상에 의한 피해를 방지하기 위해서 보다 안정적인 지지력을 확보하기 위한 특수한 시공이 요구되고 있다(김영진 2007). 이러한 이유로 영구동토지대의 동토 공학적 특성을 연구할 필요성은 절실하다. 본 연구에서는 동토지역의 지반특성 분석을 위하여 극동 지역인 블라디보스토크와 남극 세종기지에서 채취한 흙에 대하여 동토 공학적 특성분석 실험을 하였다. 온도 변화에 따라 열전도실험, 부동수분실험, 압축강도실험, 인장강도실험을 실시하였으며, 일축압축강도는 함수비 변화에 따른 강도변화를 추가로 실험하여 함수비 변화에 따른 파괴양상을 분류하였다.

2. 남극 및 시베리아 시료의 기본성질

2.1 흙 시료의 선정 배경

남극에 2012년까지 제 2 세종과학기지를 건설 계획 중이기 때문에 동토지역 지반의 역학적 특성을 파악하는 것은 매우 중요한 일이다. 또 최근 들어 러시아의 자원개발이 본격화 되면서 극동 지역의 파이프라인 건설시 영구동토, 계절 동토 지역인 시베리아 지역의 동토 공학적 특성파악에 주력해야한다. 이러한 이유로 남극 시료와 러시아 블라디보스토크(시베리아)시료를 선정하여 실험을 실시하였다.



그림 1. 남극 세종기지에서 시료 채취
(한국건설기술연구원, 김영진)

2.2 흙 시료의 물리적 특성

남극 시료, 시베리아 시료에 대하여 KS규정에 준하여 비중, 다짐, 입도분포와 액·소성시험을 하였으며, 통일 분류법에 따라 분류 하였다.

시료의 물리적 특성은 표 1과 같다. 그림 1은 다짐시험결과, 그림 2는 입도분포시험결과이다. 통일 분류법에 의한 분류 결과, 시베리아 시료는 액성한계가 60.5%로 액성한계가 높은 점토(CH), 남극토는 세립분이 1.2%이며, 균등계수가 12.5이므로 입도분포가 좋은 모래(SW)로 분류하였다.

표 1. 시료의 물리적 특성

지역	시베리아	남극
비중	2.502	2.732
최적함수비(%)	19.82	7.46
γ_{dmax} (g/cm ³)	1.53	2.14
액성한계(%)	60.5	-
소성한계(%)	33.1	-
소성지수	28.4	NP
곡률계수	2.727	12.50
균등계수	2.091	0.72
통일분류법	CH	SW

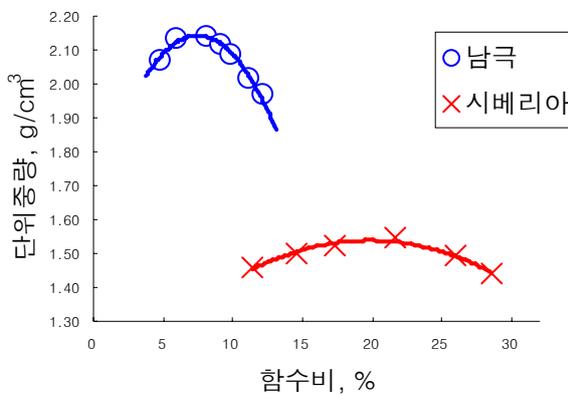


그림 2. 다짐시험결과

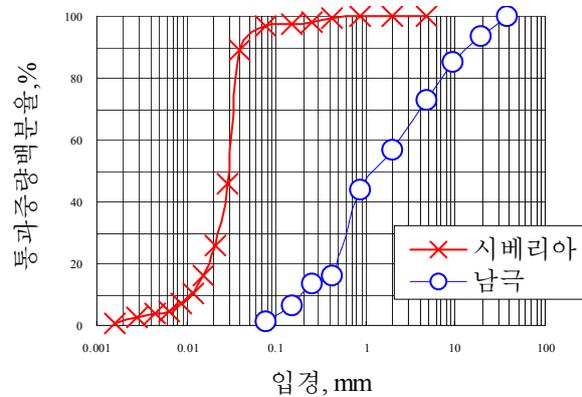


그림 3. 입도분포시험결과

3. 남극 및 시베리아 시료의 부동수분 실험

3.1 부동수분 존재하는 이유

흙은 토립자, 공기, 물로 구분되어 3상으로 구성되어있다. 하지만 0℃이하에서 흙은 토립자, 공기, 얼음에 부동수분을 추가하여 4상으로 구성된다.

공극에서 얼음은 한 가지 형태뿐이다. 하지만 부동수분은 두 가지 형태로 존재한다. 한 가지는 강한 자유수(strongly bound water)이고 다른 한 가지는 약한 자유수(weakly bound water)로 구분할 수 있다. 전자의 경우는 토립자를 얇은 수 막으로 싸고 있으며, 분자들 간에 당기는 높은 힘으로 매우 낮은 온도에서 조차 얼지 않도록 억제한다. 후자는 공극에 남아있는 물이며, 보다 쉽게 동결된다(Dillon and Andersland 1966; Anderson and Morgenstern 1973).

부동수분의 존재이유에 대하여 용질에 의한 응고점 강하, 모관의 영향에 의한 응고점 강하, 흡입자 표면의 흡착력장의 영향으로 설명할 수 있다.(김영진 2005).

3.2 부동수분 실험 방법

부동수분의 양을 측정하기 위해 본 연구에서는 TDR시험법을 사용하였다.(그림 5. 독일의 IMKO사 제

품인 TRIME-FM2) 측정용 probe를 동토 속에 넣고, 시험기에서 전자파를 발생시키면 전자파가 probe의 길이를 따라 왕복하면서 그 속도를 자동적으로 계산하고 시험기는 이를 토대로 흙의 부동수분을 산출해 낸다.



그림 4. TRIME-FM2(부동수분 측정기)

실험시 직경 10cm, 높이 15cm되는 몰드에 열전도실험의 공시체와 같은 조건의 단위중량과 함수비로 시료를 채워넣었다.

먼저 TDR probe와 온도측정용 센서를 공시체 속에 삽입한 후 냉동챔버 속에 넣고, TDR probe 연결선과 온도측정용 센서를 냉동챔버 외부로 연결하여 시료 내부의 온도와 부동수분을 측정한다. 온도센서는 TDR probe와 최대한 근접한 거리에 삽입하였고, 온도센서는 공시체 정중앙에서 온도를 측정할 수 있도록 설치하였다.

공시체의 온도는 상온에서 -20°C 까지 단계별로 변화시키며 부동수분을 측정하였고, 각 단계에서 3회 측정하여 평균값을 사용하였다.

3.3 부동수분 실험 결과

그림 5는 부동수분 실험 결과이다. 초기 온도($0^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$)에서 부동수분이 크게 감소하였다가 그 후의 온도에서는 부동수분의 감소가 상대적으로 작게 나타났다. 그 이유는 공극에 있던 자유수가 얼음으로 변화하는 양이 초기에 많기 때문에 부동수분의 감소양이 많다.

그 후 온도가 하강하며, 그래프의 기울기는 완만해짐을 볼 수 있다. 그 이유는 공극에 있던 자유수가 거의 동결되고 흙 입자 사이의 전기적 성질에 의해 얼지 않는 부동수분만 존재하기 때문이다. 기울기가 완만해진 이후에도 조금씩 부동수분의 양이 감소함을 확인할 수 있는데, 그것은 전기적 성질에 의한 물의 응고점 강하량보다 온도의 하강이 더욱 크기 때문이다.

또한, 흙입자의 세립분이 많은 시베리아 시료의 경우 입자의 비표면적이 크기 때문에 표면에 붙어있는 부동수분의 양이 많고, 비표면적이 작은 남극시료는 상대적으로 부동수분양이 적다.

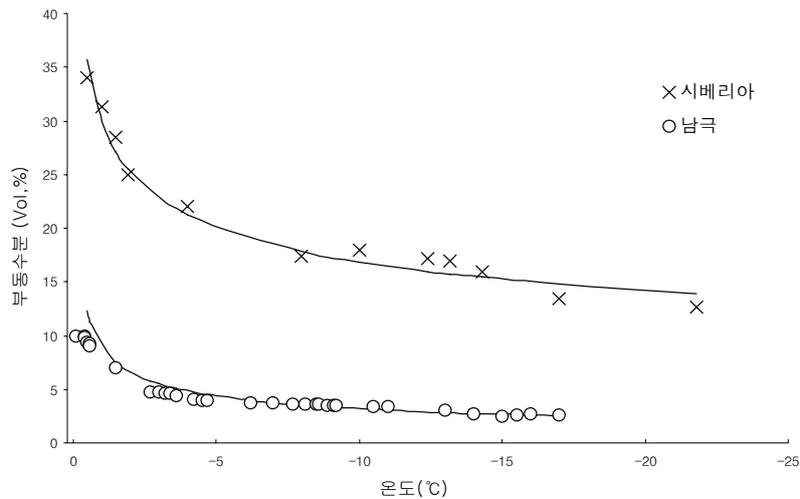


그림 5. 부동수분 실험 결과

4. 남극 및 시베리아 시료의 열전도율 실험

4.1 열전도율 실험 방법

열전도란 물질의 이동을 수반하지 않고 고온부에서 이것과 접하고 있는 저온부로 열이 전달되어 가는 현상을 말한다. 예를 들어 구리나 철과 같은 전기의 양도체에서는 열이 매우 빠르게 전달되지만, 유리나 전나무와 같은 전기적으로 절연체인 물질에서는 늦게 전달된다 (Halliday, 2001).

본 실험에서 사용한 Kemtherm QTM-D3 는 이미 열전도율을 알고 있는 Reference Plates를 이용하여 기준을 정한 후, 프로브(probe)의 가열선을 물질의 표면에 밀착시키면 W/m·K로 단위로 열전도율을 측정된다.

각각의 채취시료는 최적함수비에서 아크릴 재질의 시료적재상자(가로 8cm, 세로 15cm, 높이 8cm)에 다져 넣었다. 다짐이 끝난 후에는 냉동챔버에 넣어 공시체의 온도를 $-20^{\circ}\text{C} \sim -0.1^{\circ}\text{C}$ 까지 단계별로 변화시키면서 열전도율을 측정하였다. 각 단계에서는 열전도율을 3회 측정하여 평균값을 사용하였다.

4.2 열전도율 실험 결과

온도에 따른 열전도율은 그림 3과 같다. 영하의 온도에서 급격히 열전도율이 상승한 후 온도가 하강함에 따라 서서히 증가함을 관찰할 수 있다. 그 이유는 열전도율이 $0.6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 인 물이 $1.88 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (Frank and David 2001)인 얼음으로 변화하기 때문이다. 물과 다르게 얼음은 고체이기 때문에 격자진동 값이 크고, 진동에 의한 에너지 전달이 빨라 열전도율이 커진다. 공극에 있는 자유수가 모두 동결된 후에는 부동수분의 양이 점점 줄어들기 때문에 온도가 내려감에 따라 열전도율이 서서히 증가한다.

모래인 남극 시료에 비해 점토인 시베리아 시료에서 열전도율이 낮음을 알 수 있다. 그 이유는 세립분의 양과 관계있다. 입도분포시험에서 200번체 통과량은 시베리아 시료가 96.6%, 남극 시료가 1.2%이었다. 세립분이 많을수록 비표면적이 크고, 비표면적에 비례하여 부동수분의 양이 많다. 즉, 시베리아 시료가 남극 시료보다 얼지 않는 수분을 많이 함유하고 있기 때문에 열전도율이 남극토에 비해 낮다.

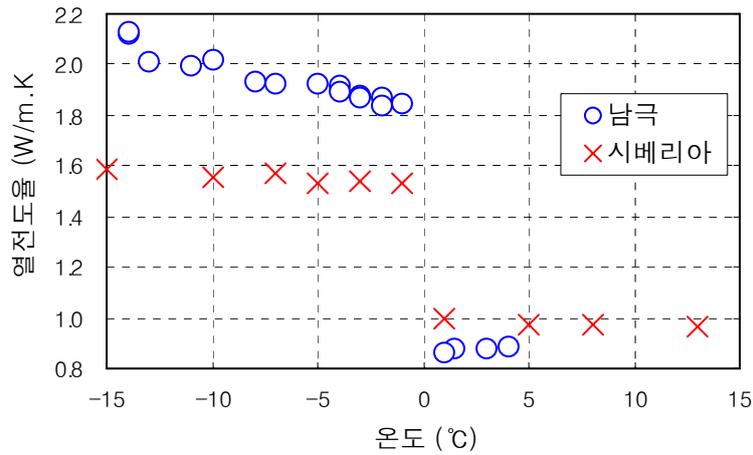


그림 6. 열전도율 시험결과

5. 남극 및 시베리아 흙의 일축압축강도

5.1 실험 장비 및 실험 방법

시험에 사용한 장비는 국내에서 제작한 제품으로 일반 일축압축장비와 동일하다. 상재하중을 가하는 본체부와 재하속도 및 기계의 작동과 정지를 조절하는 조절장치, 응력-변형을 기록하는 자료수집장치로 구성된다. 본 장비는 하중 제어 및 변형률 제어가 가능하며, 최대 10톤의 하중까지 측정이 가능하다. 데이터저장은 매초 변위와 하중 값을 자동으로 수집한다.

온도를 극지 환경과 최대한 유사하고, 시료제작과 운반에 따른 오차를 최소한으로 줄이기 위해 그림 7과 같이 실험기 자체를 극지 환경 냉동챔버 안에 넣어서 실험하였다.

일축압축강도시험은 KS2314에 준하여 실시하였다. 단, 압축변형이 10%에 도달하면 압축을 종료하였다.



그림 7. 일축압축시험기(냉동챔버 내부)

5.2 공시체 제작 방법

공시체는 직경 5cm, 높이 10cm로 제작하였다. 공시체 제작 후 수분의 증발이나 누수에 의한 함수비 변화를 최소화하기 위해 알루미늄몰드 사이에 지수제로 고무킷을 삽입하였다. 또한 상부와 하부는 동상에 의한 팽창압을 방지하기 위해 사진 4와 같이 고정 볼트로 정밀하게 밀착시켰다.

최적함수비상태에서 제작 완료된 공시체는 각각 -20°C , -15°C , -10°C , -5°C , -2°C 상태의 냉동 챔버 속에 48시간 동안 동결시켜, 표면온도와 내부온도의 차이가 없도록 하였고, 그림 9와 같이 공시체 내부에 온도 센서를 설치하여 확인하였다.

공시체 제작시에 함수비가 변화하면 공시체의 무게가 달라지기 때문에, 각각의 함수비에서의 건조밀도를 다짐곡선으로 측정하여 표 2. 공시체 기준 무게에 따라 모든 공시체가 일정한 다짐도를 갖게 하였다.



그림 8. 동결에 의한 팽창 억제



그림 9. 공시체 내부 온도 확인

표 2. 공시체 기준 무게

종류	함수비	γ_d (g/cm^3)	γ_t (g/cm^3)	공시체무게 (g)
남극토	0.05	2.09	2.195	431
	0.075	2.14	2.301	451
	0.10	2.08	2.288	449
	0.15	1.8	2.070	406
	0.20	1.6	1.920	377
	0.25	1.40	1.750	343
시베리아	0.10	1.43	1.573	309
	0.15	1.51	1.737	341
	0.20	1.53	1.836	360
	0.25	1.51	1.888	370
	0.30	1.36	1.768	347
	0.35	1.22	1.647	323

5.3 온도변화에 따른 일축압축강도

5.3.1 온도에 따른 강도 변화

본 시험에서는 -20°C , -15°C , -10°C , -5°C , -2°C 상태에서 실험을 수행하였다. 실험 결과는 그림 5에서 보는 바와 같다.

동토의 강도는 -10°C 보다 -20°C 에서 50~60% 증가한다. 이러한 강도증가의 이유 중 하나는 냉각 온도 강하에 따른 얼음의 강도증가이다. 그런데 이번 시험에서 측정된 50~60%의 강도증가는 Jones(2007)가 실험한 얼음의 강도증가율 33%와 본 실험에서 실제 측정된 얼음의 강도증가율 20%보다 높은 수치이다. 그 이유는 공극에 있는 얼음의 강도증가 뿐만 아니라 얼음과 흙 입자 사이의 부착력 증가 때문이라 추론된다.

남극 공시체(SW)가 시베리아 공시체(CH)보다 강도가 큰 이유는 크게 두 가지이다. 첫째는 부동수분의 양이 적기 때문이다. 흙 입자 사이사이에 수분의 양이 적을수록 입자사이의 마찰력이 증가한다.

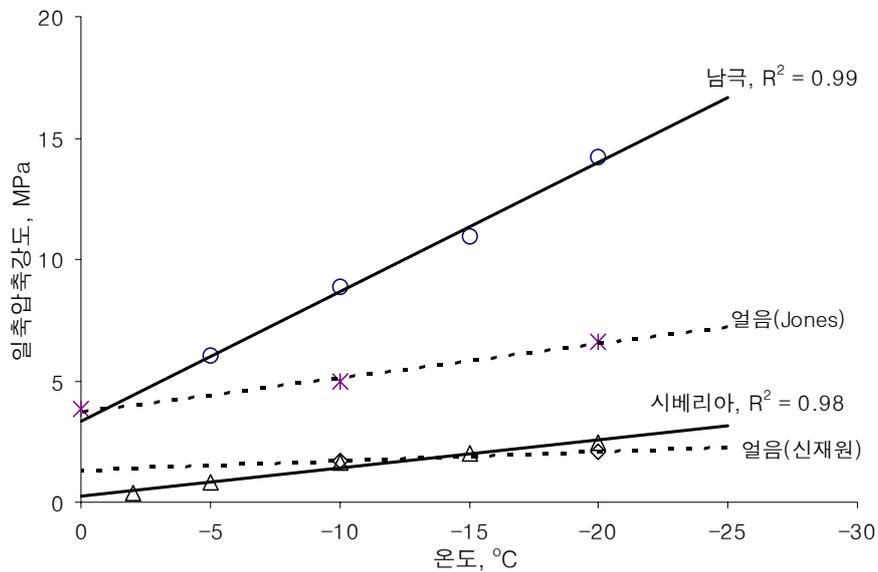


그림 10. 온도에 따른 강도변화

5.4 함수비 변화에 따른 일축압축강도

5.4.1 함수비에 따른 강도 변화

이번 실험은 -10°C 에서 다양한 함수비의 공시체를 제작하여 실험하였다. 실험결과는 그림 6과 같다. 각 흙의 최대강도는 최적함수비 혹은 그 이상의 함수비에서 나왔다. 최적함수비보다 함수비가 큰 공시체의 강도는 일정 값 이상을 갖고 있다. 그 이유는 최적함수비 이상의 공시체는 90%이상의 포화도를 갖고 있기 때문에, 동결이 되며 남아있던 수분이 얼음으로 변하여 100%에 가깝게 포화되어 공극비가 낮아지고, 하중을 단면적 전체에 비교적 균질하게 지지하게 된다. 반면 최적함수비보다 낮은 함수비로 제작된 시료에서는 낮은 포화도에 취성과괴를 보이며, 강도가 최적함수비의 40%이하임을 확인할 수 있다.

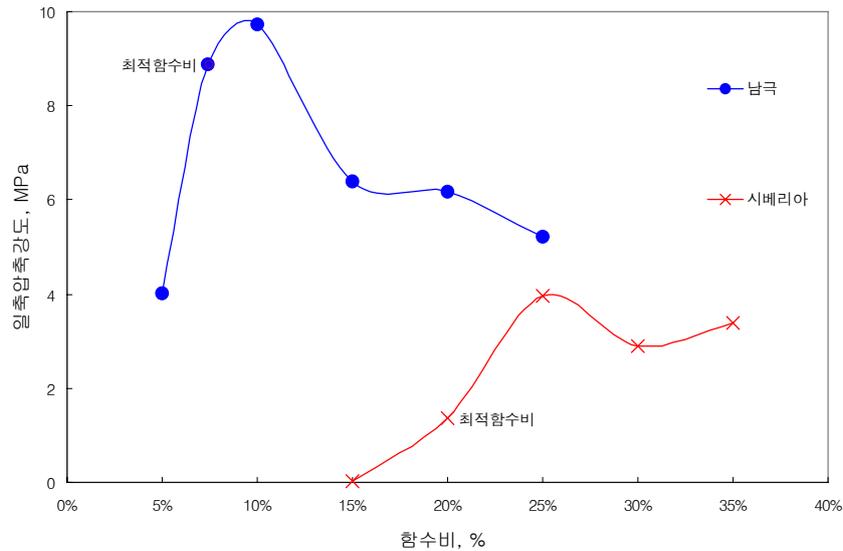


그림 11. 함수비에 따른 강도변화

5.4.2 함수비에 따른 공시체별 파괴 양상

함수비가 낮아지면 취성파괴, 함수비가 높으면 연성파괴가 되는 경향을 확인할 수 있다. 그림 12. 함수비에 따른 공시체별 파괴 양상에서 볼 수 있듯이, 함수비 5% 공시체(a)의 파괴면이 선명하게 취성 파괴하는 반면에, 함수비 20%공시체(c)는 파괴면이 관찰되지 않고, 점토와 같이 압축되어 공시체의 단면적이 늘어났다. 최적함수비인 7.5%공시체(b)는 그 중간 형태를 보여주고 있다.

(1) 그림13. 함수비에 따른 응력-변형을 곡선에서 함수비 5%일때 일축압축강도는 최대값 이후에 빠르게 감소한다. 그림 12.(a)와 같이 파괴면이 선명하다. 강도가 빠르기 감소하는 이유는 함수비가 작기 때문에 흙입자 사이에 부착력이 작아 쉽게 파괴가 발생한다고 설명할 수 있다.

또한, 함수비 5%일때 여러 함수비 중 강도가 가장 작다. 그 이유는 다짐 곡선위에서 최적함수비보다 함수비가 낮기 때문에 같은 다짐도를 갖고 있는 공시체라면, 포화도가 낮아진다. 즉, 상대적으로 많은 공극에 의해 약한 강도에서 쉽게 파괴가 일어난다.

(2) 그림 13의 함수비 15%, 20%, 25%에서는 최대값이 보이지 않으므로, 변형을 10%일때 강도를 일축 압축강도로 정의하였다. 그림 12.(c)와 같이 균열이 관찰되지 않고 압축만 발생하였다. 또, 변형을 10% 이후에서도 강도가 점차 증가함을 알 수 있다. 쉽게 말해, 상온에서 점토의 압축강도 실험 결과와 비슷한 양상이 관찰된다. 이와 같은 연성 파괴양상을 보이는 이유는 포화도가 100%가깝기 때문에, 하중이 단면 전체에 균등하게 분포하고, 공극의 얼음이 흙 입자를 서로 구속하여 인력이 크기 때문이다.

또한 함수비가 많아지며 강도가 약해지는 경향이 관찰된다. 그 이유는 함수비가 많아질수록 동일한 단면적에서 흙 입자가 차지하는 면적이 작아지기 때문이다.

(3) 그림 13의 함수비 7.5%와 10%실험에서는 중간 형태파괴를 보였다. 그림 12.(b)는 7.5%공시체 실험 후 사진이며 (a)와(c)의 중간 정도의 균열이 발생하였다. 함수비 7.5%공시체는 최대값 이후 큰 감소폭을 나타냈다. 10%공시체는 최대값은 나타나지만 7.5%공시체와 비교하여 기울기가 완만함을 알 수 있다. 즉, 10%를 초과하는 함수비에서는 최대값이 나타나지 않고 취성파괴경향이 강해짐을 알 수 있다.



(a) 함수비 5% (b) 함수비 7.5% (c) 함수비 20%

그림 12. 함수비에 따른 공시체의 파괴 양상(남극시료)

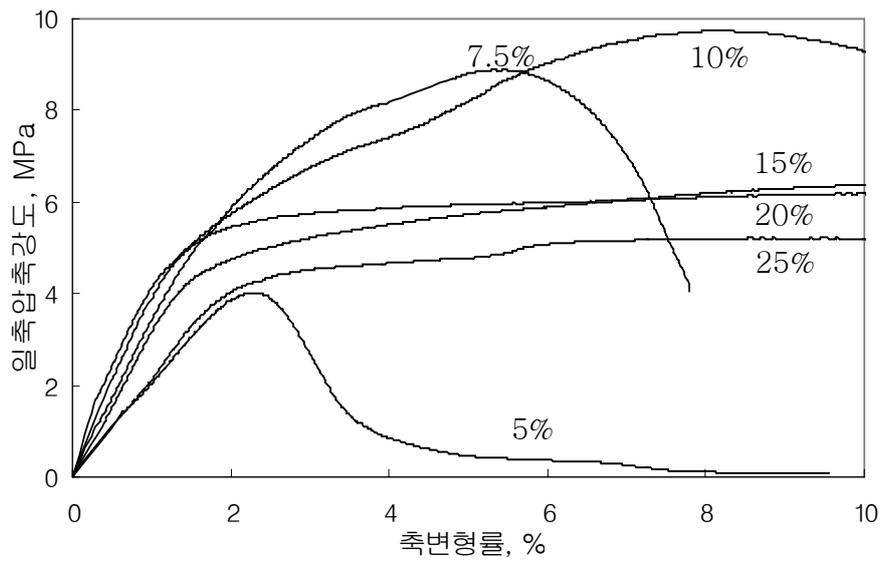


그림 13. 함수비에 따른 응력변형률 곡선(남극시료)

6. 결론

- (1) 온도가 0℃이하로 내려가면서 공극에 있던 수분이 얼음으로 변하며 수분의 양이 빠르게 감소했다. -10℃이하의 온도에서도 부동수분은 존재하였다. 네 가지 시료를 비교한 결과, 흙의 세립분이 많을수록 더 큰 부동수분양을 나타냈다.
- (2) 열전도율은 온도가 영하로 바뀌며 급격히 증가했다. 그 후, 온도 하강에 따라 서서히 열전도율이 증가하였다. 그 이유는 초기에 공극의 수분이 열전도율이 큰 얼음으로 변화하여 열전도율이 급격히 높아진다. 그 후에는 부동수분이 감소하고, 얼음의 열전도율이 높아지기 때문에 열전도율이 서서히 증가했다. 열전도율은 세립분에 많을수록 작아지는 경향이 있음을 확인하였다.
- (3) 일축압축강도는 온도하강에 따라 증가하였다. 온도에 따라 강도가 증가하는 이유는 공극에 있는 얼음의 강도증가뿐만 아니라, 흙 입자와 얼음의 부착강도가 증가된다고 설명할 수 있다.
- (4) 함수비에 따른 일축압축강도 실험에서는 함수비가 높아짐에 따라 취성과 파괴에서 연성파괴양상으로 변화하였다. 공시체의 함수비가 최적함수비 이상에서는 일정강도 이상이 측정되었다. 즉, 실무에서 지반의 강도가 부족할 경우 온도를 하강시켜 지반의 지지력을 확보하는 것보다 함수비를 조절하여 지지력을 보강하고 파괴양상을 변화시키는 것이 보다 안전하고 효율적이라 판단된다.

참고문헌

1. 김영진 (2007), *시베리아 동토지역 진출을 위한 미래건설 기술개발*, 한국건설기술연구원, pp. 170-174
2. 김영진, (2005), “부동수가 동토의 성질에 미치는 영향”, *한국지반공학회지*, 제6권, 제2호, pp. 68-74
3. 두산세계대백과사전, 2002. “영구동토”, 두산동아
4. Anderson, D.M and Morgenstern, N.R. (1973), "Physics, chemistry, and mechanics of frozen ground; A review", *Second International Conference on Permafrost*, National Academy of Sciences, Washington, DC., pp. 257-288.
5. Dillon, H.B. and Andersland, O.B. (1966), "Predicting unfrozen water contents in frozen soils", *Can. Geotech. J.* 3, pp. 53-60
6. Frank P. Incropera and David P. Dewitt (2001), *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Fourth Edition, John Willy & Sons, pp. 904
7. Halliday, D. and Resnick, R., Walker, J. (2001), *Fundamentals of Physics*, Sixth Edition, John Willy & Sons, pp. 304-305
8. Stephen J. Jones (2007), "A review of the strength of iceberg and other freshwater ice and the effect of temperature", *Cold Regions Science and Technology* 47, pp. 256-262