

세종기지 및 시베리아 흙의 동결특성 시험

An Experimental Study of the King Sejong Station and Siberian Frozen Soils

김 영 진[†] · 신 재 원¹⁾ · 손 승 모¹⁾

Kim, Youngchin · Shin, Jaewon · Son, Seungmo

ABSTRACT : Soil samples from the King Sejong Station in Antarctic and Vladivostok were tested in the laboratory and specific gravity, compaction curve, grain size distribution were determined. The effect of temperature change on the thermal conductivity, unfrozen water content, compressive strength were investigated. In addition, the change of tensile strength with temperature of the soil from Vladivostok was measured. Samples for the compressive strength test and tensional strength test were prepared in a mould with a fixed volume to prevent swelling. Also the effects of temperature and water content change on those strength were compared. Results from the thermal conductivity test showed that thermal conductivity values for both soils was larger at temperatures below freezing than those above freezing. The unfrozen water content dropped rapidly within a temperature range of 0~-5°C and then gradually decreased further -20°C. Compressive strength test results showed various stress/deformation curves with a change in water content. Sandy soil of the King Sejong Station had a much larger strength than ice at an identical temperature, while clayey soil of Vladivostok had a smaller strength than ice in the initial stage, but showed a larger strength at temperatures belows -15°C. Tensile strength tests revealed an increase in the strength with a decreasing temperature.

Keywords : Frozen soil, Thermal conductivity, Unfrozen water content, Uniaxial compression strength, Tensional strength

요 지 : 남극 세종기지 및 시베리아의 블라디보스톡에서 채취한 흙 시료에 대하여 지반공학적인 기본 시험 즉, 비중시험, 다짐시험, 입도시험, 온도변화에 따른 열전도율시험, 부동수분시험, 일축압축강도시험을 수행하였다. 또한 블라디보스톡시료에 대해 온도변화 별 인장강도시험을 수행하였다. 일축압축강도시험과 인장강도 시험시 시료의 동결에 의한 부피의 팽창을 억제하면서 공시체를 만들어 온도 변화 및 함수비 변화에 따른 강도변화를 비교하였다. 열전도율 시험 결과 영하 상태에서 흙의 열전도율은 영상 상태에서의 그것보다 훨씬 높게 나타났다. 온도변화에 따른 부동수분시험 결과 부동수분은 0~-5°C 사이에서 급격히 감소하였으며, -20°C까지도 부동수분이 존재하였다. 압축강도시험 결과 함수비 변화에 따라서 다양한 응력-변형률 곡선을 보였으며, 남극의 사질동결토는 동일 온도의 얼음보다 훨씬 큰 강도를 보였으나, 블라디보스톡의 점성동결토는 초기 영하상태에서는 얼음 보다 작은 강도를 보이다가 -15°C 이하에서 서서히 얼음 보다 큰 강도를 나타내기 시작하였다. 또한 온도저하에 따라 인장강도가 증가하였다.

주요어 : 동결토, 열전도율, 부동수, 일축압축강도, 인장강도

1. 서 론

최근 국내 건설업체 및 자원개발업체가 러시아의 시베리아에서 주택을 건설하거나 유전개발을 추진하고 있고, 정부에서도 시베리아 천연가스 수송관 및 송유관의 건설에 많은 관심을 기울이기 시작하면서 시베리아 동토지역이 우리의 새로운 활동무대로 부각되고 있다.

한편 우리 정부는 남극대륙에 대한민국의 과학기지 건설을 추진하고 있다. 남극이나 시베리아의 동토지대에서는 동결된 지반 위에 토목, 건축 구조물을 축조하여야 하는 경우가 많으므로 동상(frost heave), 융해침하(thawing

settlement) 등의 특성과 함께 동토의 열적, 물리적 강도특성을 연구할 필요성이 크다(김영진, 2007).

본 연구에서는 시베리아의 블라디보스톡과 남극 세종기지에서 채취한 흙에 대하여 동토 공학적 특성분석 실험을 수행하였다. 즉, 온도 변화에 따른 열전도율시험, 부동수분시험, 압축강도시험을 실시하였고, 블라디보스톡 시료에 대하여는 인장강도시험도 실시하였다. 압축강도 및 인장강도시험용 공시체는 동결팽창을 억제하면서 다양한 함수비 상태로 제작하여 온도변화에 따른 강도변화를 시험하였으며, 동일온도에서의 얼음의 강도와 비교하였다. 또한 압축강도 시험시 함수비 변화에 따른 응력-변형률 곡선의 양상을 살펴보았다.

† 정회원, 한국건설기술연구원 책임연구원(E-mail : yckim@kict.re.kr)

1) 비회원, 국민대학교 건설시스템공학과 석사과정

2. 흙 시료의 기본 성질

2.1 물리적 특성

남극 세종기지 시료와 시베리아 블라디보스톡 시료에 대하여 KS규정에 준하여 비중, 다짐, 입도분포와 액·소성 시험을 실시하였으며, 통일 분류법에 따라 분류하였다.

시료의 물리적 특성은 표 1과 같다. 그림 1은 다짐시험 결과, 그림 2는 입도분포시험 결과이다. 통일 분류법에 의한 분류 결과, 블라디보스톡 시료는 액성한계가 60.5%로

표 1. 시료의 물리적 특성

지역	블라디보스톡	세종기지
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

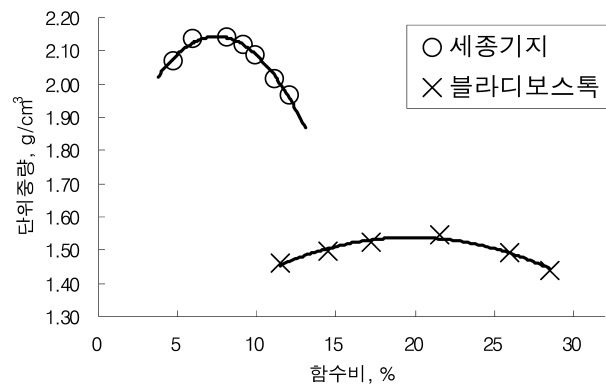


그림 1. 다짐시험결과

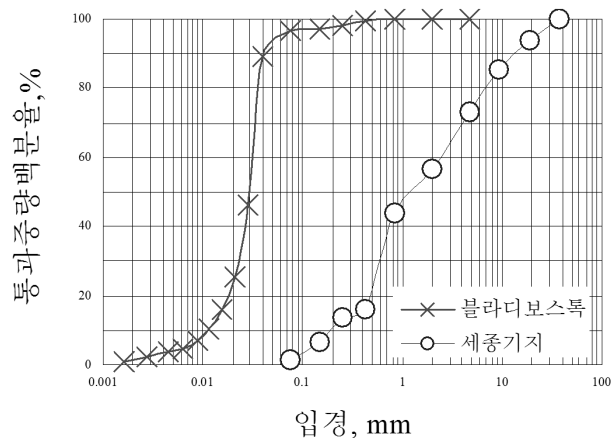


그림 2. 입도분포시험 결과

액성한계가 높은 점토(CH), 세중기지 흙은 세립분이 1.2%이며, 균등계수가 12.5이므로 입도분포가 좋은 모래(SW)로 분류하였다.

3. 열전도율 시험

3.1 열전도율 시험방법

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 등, 2001).

본 실험에서 사용한 Kemtherm QTM-D3 시험기는 이미 열전도율을 알고 있는 Reference Plates를 이용하여 기준을 정한 후, 프로브(probe)를 측정하고자 하는 흙 시료의 표면에 밀착시키면 수분 내에 열전도율이 W/m·K 단위로 측정된다.

각각의 채취시료는 최적함수비에서 아크릴 재질의 시료적재상자(가로 8cm, 세로 15cm, 높이 8cm)에 다져 넣었다. 다짐이 끝난 후에는 냉동챔버에 넣어 공시체의 온도를 -15℃ ~ -0.1℃까지 단계별로 변화시키면서 열전도율을 측정하였다. 각 단계에서 열전도율을 3회 측정하여 평균값을 사용하였다.

3.2 열전도율 시험결과

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 W/m·K인 물이 1.88 W/m·K(Frank and David 2001)인 얼음으로 변화하기 때문이다. 물과 다르게 얼음은 고체이기 때문에 격자진동 값이 크고, 진동에 의한 에너지 전달이

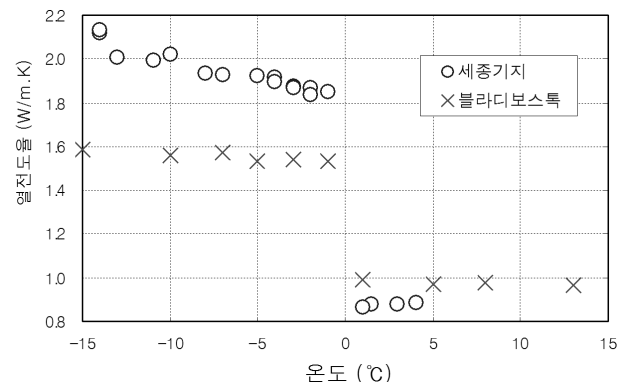


그림 3. 열전도율 시험 결과

빨라 열전도율이 커진다. 공극에 있는 자유수가 모두 동결된 후에는 부동수분의 양이 점점 줄어들기 때문에 온도가 내려감에 따라 열전도율이 서서히 증가한다.

모래인 세종기지 시료에 비해 점토인 블라디보스톡 시료에서 열전도율이 낮음을 알 수 있다. 그 이유는 세립분의 양과 관계가 있다. 입도분포시험에서 200번체 통과량은 블라디보스톡 시료가 96.6%, 세종기지 시료가 1.2%이었다.

4. 부동수분 시험

4.1 부동수분이 존재하는 이유

흙은 토립자, 공기, 물로 구분되어 3상으로 구성되어 있다. 하지만 0°C 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 얽은 수막으로 싸고 있으며, 분자들 간에 당기는 높은 힘으로 매우 낮은 온도에서조차 얼지 않도록 억제한다. 후자는 공극에 남아있는 물이며, 보다 쉽게 동결된다(Dillon and Andersland, 1966; Anderson and Morgenstern, 1973).

국내에서는 김영진(2005)이 부동수분의 존재 이유에 대하여 용질에 의한 응고점 강하, 모관의 영향에 의한 응고점 강하, 흡입자 표면의 흡착력장의 영향으로 설명하였다.

4.2 부동수분 시험방법

본 시험에서는 TDR(Time Domain Reflectometry) 시험기(그림 4)를 사용하였다. 시험시 측정용 probe를 동토 속



그림 4. Trime FM2(부동수분 측정기)

에 넣고, 시험기에서 전자파를 발생시키면 전자파가 probe의 길이를 따라 왕복하면서 그 속도를 자동적으로 계산하고 시험기는 이를 토대로 흙의 부동수분을 산출해 낸다.

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°C까지 단계별로 변화시키며 부동수분을 측정하였고, 각 단계에서 3회 측정하여 평균값을 사용하였다.

4.3 부동수분 시험 결과

그림 5는 부동수분 시험 결과이다. 초기 온도(0°C ~ -5°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, 흡입자의 세립분이 많은 블라디보스톡 시료의 경우 입자의 비표면적이 크기 때문에 표면에 붙어있는 부동수분의 양이 많고, 비표면적이 작은 세종기지 시료는 상대적으로 부동수분양이 적다.

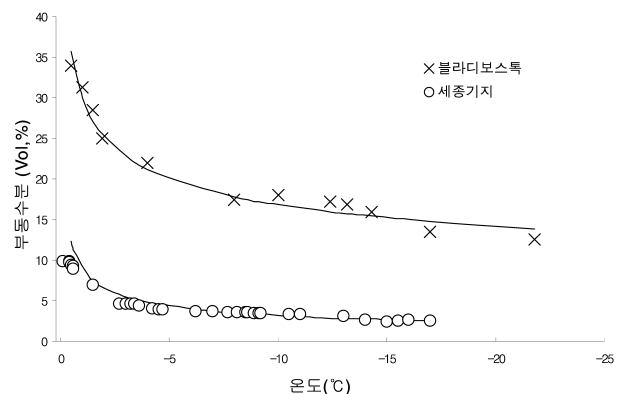


그림 5. 부동수분 실험 결과

5. 일축압축강도시험

5.1 시험 장비 및 시험 방법

시험에 사용한 장비는 한국에서 제작한 제품으로 일반 일축압축장비와 동일하다. 상재하중을 가하는 본체부와 재



그림 6. 일축압축시험기(냉동챔버 내부에 설치)

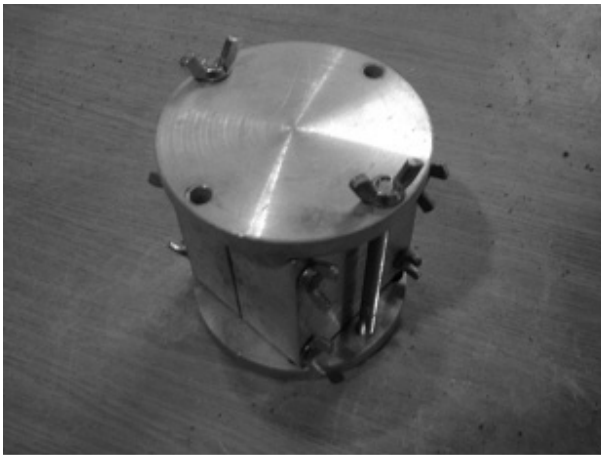


그림 7. 동결에 의한 팽창 억제 물드

하속도 및 기계의 작동 및 정지를 조정하는 조절장치, 응력-변형을 기록하는 자료수집장치로 구성된다. 본 장비는 하중 제어 및 변형을 제어 가능하며, 최대 10톤의 하중까지 측정이 가능하다. 데이터는 매초 변위와 하중 값을 자동으로 수집한다. 온도를 극저 환경과 최대한 유사하게 하고, 시료제작과 운반에 따른 오차를 최소한으로 줄이기 위해 사진 3과 같이 시험기 자체를 냉동챔버 안에 넣고 시험을 하였다. 일축압축강도시험은 KS2314에 준하여 실시하였다. 단, 압축변형이 10%에 도달하면 압축을 종료하였다.

5.2 공시체 제작 방법

공시체는 직경 5cm, 높이 10cm로 제작하였다. 공시체 제작 후 수분의 증발이나 누수에 의한 함수비 변화를 최소화하기 위해 알루미늄몰드 사이에 지수재로 고무킷을 삽입하였다. 또한 상부와 하부는 동상에 의한 팽창압을 방지하기 위해 사진 3과 같이 고정 볼트로 정밀하게 밀착시켰다.

제작 완료된 공시체는 각각 -20°C , -15°C , -10°C , -5°C , -2°C 상태의 냉동 챔버 속에 48시간 동안 동결시켜, 표면온



그림 8. 공시체 내부 온도 측정

표 2. 공시체 기준무게

종류	함수비 (%)	γ_d (g/cm^3)	γ_t (g/cm^3)	공시체부피 (cm^3)	공시체무게 (g)
세종기지 시료	5	2.09	2.195	196.25	431
	7.5	2.14	2.301	196.25	451
	10	2.08	2.288	196.25	449
	15	1.8	2.070	196.25	406
	20	1.6	1.920	196.25	377
	25	1.40	1.750	196.25	343
블라디보스톡 시료	10	1.43	1.573	196.25	309
	15	1.51	1.737	196.25	341
	20	1.53	1.836	196.25	360
	25	1.51	1.888	196.25	370
	30	1.36	1.768	196.25	347
	35	1.22	1.647	196.25	323

도와 내부온도의 차이가 없도록 하였고, 사진 4와 같이 공시체 내부에 온도 센서를 설치하여 확인하였다.

공시체 제작시에 함수비가 변화하면 공시체의 무게가 달라지기 때문에, 각각의 함수비에서의 건조밀도를 다짐곡선으로 측정하여 표 3. 공시체 기준 무게에 따라 모든 공시체가 일정한 다짐도를 갖게 하였다.

5.3 온도변화에 따른 일축압축강도

5.3.1 온도에 따른 강도 변화

본 시험에서는 -20℃, -15℃, -10℃, -5℃, -2℃ 상태에서 최적함수비로 실험을 수행하였다. 실험 결과는 그림 5에서 보는 바와 같다. 온도가 하강함에 따라 동토의 강도가 증가하며, 그 이유는 얼음의 강도증가, 토립자와 얼음사이의 부착력증가로 설명할 수 있다. 동토의 강도는 -10℃보다 -20℃에서 50~60% 증가한다. 이는 본 실험에서 실제 측정된 얼음의 강도증가율 20%보다 높은 수치이다. 그 이유는 공극에 있는 얼음의 강도증가 뿐만 아니라 얼음과 흙 입자사이의 부착력 증가 때문이라 추론된다.

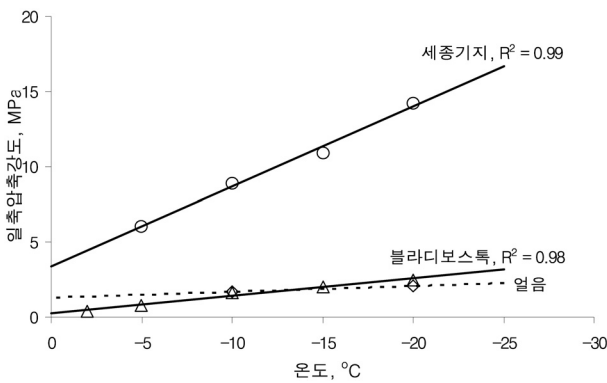


그림 9. 온도에 따른 압축강도변화

세종기지 흙시료(SW)가 블라디보스톡 흙시료(CH)보다 강도가 큰 이유는 크게 두 가지이다. 첫째는 부동수분의 양이 적기 때문이다. 흙 입자 사이사이에 수분의 양이 적을수록 입자사이의 마찰력이 증가한다. 두 번째 이유는 세종기지 공시체의 입자크기가 크기 때문이다. 입자의 크기가 클수록 단면적에서 흙 입자가 차지하는 비율이 높아지기 때문에 세종기지 시료가 블라디보스톡 시료보다 강도가 크다.

5.4 함수비 변화에 따른 일축압축강도

5.4.1 함수비에 따른 강도 변화

이 실험은 -10℃에서 다양한 함수비의 공시체를 제작하여 실험하였다. 실험결과는 그림 10과 같다. 각 흙의 최대 강도는 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 되면 남아있던

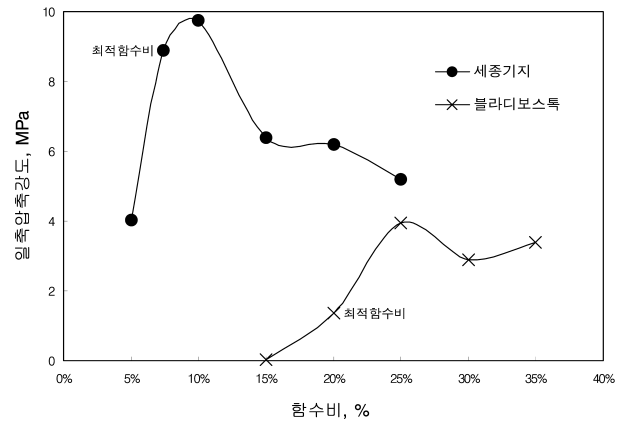


그림 10. 함수비에 따른 압축강도변화



(a) 함수비 5%



(b) 함수비 7.5%



(c) 함수비 20%

그림 11. 함수비에 따른 공시체 파괴양상(세종기지시료)

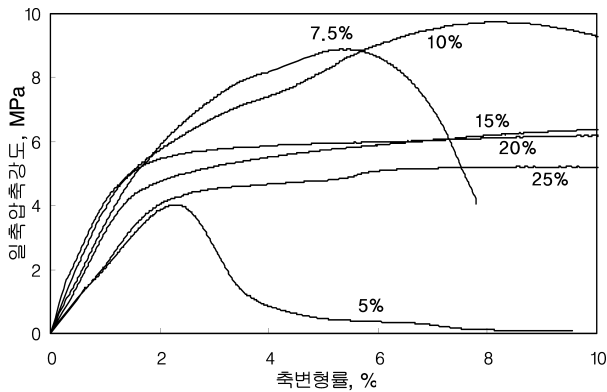


그림 12. 함수비에 따른 응력-변형을 곡선(세종기지시료)

수분이 얼음으로 변하여 100%에 가깝게 포화되어 공극비가 낮아지고, 단면적 전체가 하중을 비교적 균질하게 지지하게 된다. 반면 최적함수비보다 낮은 함수비에서는 큰 공극비 때문에 취성파괴를 보이며(그림 11, 12 참조), 강도가 최적함수비에서의 강도의 40% 이하임을 확인할 수 있다.

5.4.2 함수비에 따른 공시체별 파괴 양상

그림 11, 12는 함수비가 낮아지면 취성파괴, 함수비가 높으면 연성파괴가 나타나는 모습을 보여 준다. 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 보여 주고 있다. 그림 12에서 관찰된 사실을 요약하면 다음과 같다.

(1) 그림 12의 함수비에 따른 응력-변형을 곡선에서 함수비 5%일 때 일축압축강도는 최대값 이후에 빠르게 감소한다. 그림 11(a)와 같이 파괴면이 선명하다. 강도가 빠르게 감소하는 이유는 함수비가 작기 때문에 흙입자 사이의 부착력이 작아 쉽게 파괴가 발생한다고 설명할 수 있다.

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

(2) 그림 12의 함수비 15%, 20%, 25%에서는 최대값이 보이지 않으므로, 변형율 10%일때 강도를 일축압축강도로 정의하였다. 그림 11(c)와 같이 균열이 관찰되지 않고 압축만 발생하였다. 또, 변형율 10% 이후에서도 강도가 점차 증가함을 알 수 있다. 쉽게 말해, 상온에서 연약 점토의 압축강도 실험 결과와 비슷한 양상이 관찰된다. 이와 같은 연성 파괴양상을 보이는 이유는 포화도가 100%에 가깝기 때문에, 하중이 단면 전체에 균등하게 분포하고, 공극의

얼음이 흙 입자를 서로 구속하여 인력이 크기 때문이다.

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

(3) 그림 12의 함수비 7.5%와 10% 실험에서는 중간 형태파괴를 보였다. 그림 11(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.

6. 인장강도시험

6.1 시험 장비 및 시험방법

인장강도 시험장비는 압축강도 시험장비를 사용하되, 그림 13에서 보여 주는 바와 같이 흙의 공시체를 아령 모양으로 만들어 상하로 직접 잡아 당겨 파괴하는 직접인장강도 시험법을 택하였다. 지금까지 많은 연구자들이 동토의 인장강도시험시 암석이나 콘크리트의 쪼갬인장강도 시험법을 택하였지만 동토의 경우 선하중이나 점하중 재하시 공시체가 관입파괴될 가능성이 높고, 측정값의 신뢰도가 낮아질 것을 우려하여 본 시험에서는 직접인장강도 시험을 택하였다.

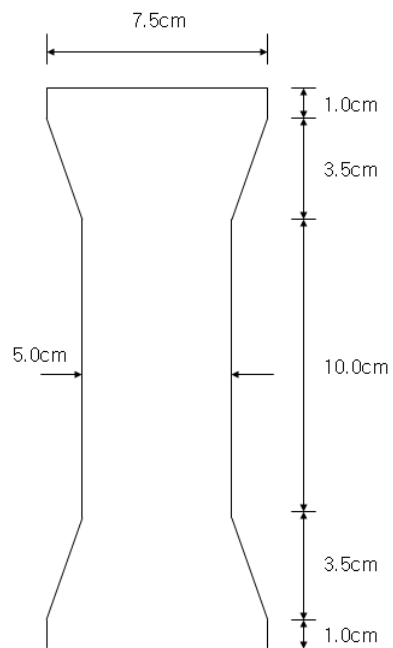


그림 13. 인장강도시험용 공시체의 치수

인장강도 시험용 공시체 제작시도 압축강도 시험용 공시체 제작시와 마찬가지로 수분의 증발이나 누수에 의한 함수비 변화를 최소화하기 위하여 알루미늄 몰드 사이에 지수용 고무킷을 삽입하였다(그림 14 참조). 또한 공시체가

최대단위중량을 갖도록 최적함수비의 시료를 준비한 후, 몰드를 제작하였다. 예를 들어 블라디보스톡 점토의 최적 함수비상태에서 최대건조단위중량은 1.84g/cm^3 이고, 공시체의 체적은 466cm^3 이므로 모든 공시체의 무게를 857g 으



(a) 인장 몰드 준비



(b) 몰드 조립



(c) 최적함수비의 시료준비



(d) 다짐 작업



(e) 인장강도용 공시체 삽입 모습



(f) 인장강도 공시체의 파괴된 모습

그림 14. 인장강도 시험용 시료 준비 및 인장강도시험 방법

로 동일하게 제작하였다.

소형다짐기를 사용하여 모든 시료가 동일한 다짐도를 갖도록 성형한 후(그림 14 참조), 무게를 확인하고 냉동챔버에 넣기 전에 상부와 하부의 동상에 의한 팽창압을 방지하기 위하여 고정볼트로 정밀하게 밀착시켰다. 제작 완료된 공시체는 각각 -5℃, -10℃, -15℃, -20℃ 상태의 냉동챔버 속에서 48시간 동안 동결시켰다. 공시체 내부에 온도센서를 설치하여 공시체의 표면온도와 내부온도의 차이가 없는지를 확인한 후 시험을 실시하였다. 인장강도시험도 압축강도시험과 동일하게 분당 1mm의 변형속도로 인장을 하였으며, 공시체가 파괴되거나 10% 변형에 도달하면 인장을 종료하였다.

6.2 온도변화에 따른 인장강도

그림 15에서는 블라디보스토크 흙 시료의 온도변화에 따른 인장강도를 보여 주고 있다. 압축강도시험 결과와 같은 경향을 보이는데, 단지 온도저하에 따라 인장강도가 증가하는 비율은 온도저하에 따라 압축강도가 증가하는 비율 보다 약간 더 큰 기울기를 보이며 증가하였다. 즉, 온도가 낮아질수록 토립자와 간극수가 강하게 밀착하여 인장강도가 크게 나타났다.

6.3 압축강도와 인장강도의 비교

동일온도에서 압축강도/인장강도의 비율을 비교하여 보면 -5℃에서는 압축강도가 인장강도 보다 약 13배 정도 컸고, -10℃에서는 약 11배 가량 컸으며, -15℃에서는 약 8.7배 그리고 -20℃에서는 약 8.48배 큰 값을 보였다. 초기 온도에서 압축강도/인장강도의 비율이 더 크게 나타난 것은 초기 온도에서 인장강도가 상대적으로 매우 작게 나타났기 때문이다. 본 시험의 범위에서 압축강도는 인장강도보다 8~13배 큰 값을 보였다.

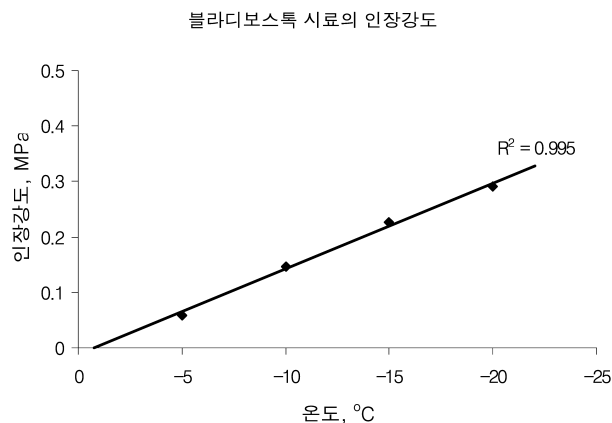


그림 15. 함수비에 따른 인장강도 변화

7. 결론

본 연구에서는 세종기지와 시베리아 흙시료에 대한 동결특성에 대해 분석을 하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 부동수분은 영상의 온도에서는 변화가 없었다. 반면에 온도가 0℃ 이하로 내려가면서 공극에 있던 수분이 얼음으로 변하며 수분의 양이 빠르게 감소했다. -10℃ 이하의 온도에서도 부동수분은 존재하였다. 또한 흙의 세립분이 많을수록 더 큰 부동수분량을 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 높아지기 때문이다. 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 증가되기 때문인 것으로 판단된다.
- (4) 함수비에 따른 일축압축강도 실험에서는 함수비가 높아짐에 따라 취성파괴에서 연성파괴양상으로 변화하였다. 공시체의 함수비가 최적함수비 이상에서는 일정 강도 이상이 측정되었다.
- (5) 동토의 인장강도 역시 온도 하강에 따라 크게 증가하였으며, 동일온도에서 압축강도에 비해 약 1/8~1/13의 값을 보였다.

참고 문헌

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. 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.
4. Dillon, H.B. and Andersland, O.B. (1966), Predicting unfrozen water contents in frozen soils, *Can. Geotech. J.* 3, pp. 53~60.
5. Frank P. Incropera and David P. Dewitt (2001), *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Fourth Edition, John Wiley & Sons, pp. 904.
6. Halliday, D., Resnick, R. and Walker, J. (2001), *Fundamentals of Physics*, Sixth Edition, John Wiley & Sons, pp. 304~305.
7. 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.

(접수일: 2008. 4. 4 심사일: 2008. 4. 18 심사완료일: 2008. 12. 12)