

## 동결 사질토의 크리프 거동에 관한 실험적 연구

### An Experimental Study on the Creep Behavior of Frozen Sand

채 덕 호<sup>1)</sup> · 김 영 석<sup>2)</sup> · 이 장 근<sup>2)</sup> · 조 완 제<sup>†</sup>

Deokho Chae · Youngseok Kim · Janguen Lee · Wanjei Cho

Received: November 1<sup>st</sup>, 2013; Revised: November 13<sup>th</sup>, 2013; Accepted: December 17<sup>th</sup>, 2013

**ABSTRACT :** Due to the latitudinal location of Korea, the seasonally frozen ground has been focused on as research topics such as the frost heaving under the asphalt road rather than the permafrost ground. However, the recent construction of the second Korean Antarctic research station, the Jangbogo station and the participation on the development of the natural gas pipeline in Russia arouse the research interests on the behavior of the permafrost ground. At the design process of the geotechnical structures on the permafrost ground, the evaluation of the creep characteristics of the frozen soil is very crucial. Since the domestic specification on the frozen soil testing does not exist currently, it is necessary to evaluate the creep characteristics of frozen soils systematically with regard to the affecting factors. Therefore, the creep characteristics of the frozen specimens of dense Jumoonjin sand were evaluated under various loads at -5 and -10°C. Based on the test results, as the load became close to the strength and the temperature became lower, the duration of the secondary creep became shorter and more distinct tertiary creep responses were observed.

**Keywords :** Permafrost, Creep, Frozen soil, Uniaxial compression

**요 지 :** 계절 동토지역으로 분류되는 우리나라의 동토에 관한 연구는 동상압에 의한 아스팔트 도로 등의 기능 저하 방지에 관한 연구가 대부분이었다. 하지만 최근 제 2 남극 기지인 장보고 기지 건설과 러시아 극동지역의 천연파이프 건설 협약 등이 이루어지면서 영구동토지반에서의 구조물 건설에 대한 관심이 증대되고 있다. 영구동토지반에서 구조물 설계 시 지반의 크리프 특성이 매우 중요한 요소로 알려져 있다. 현재 우리나라에서는 동토에 관한 명확한 시험규정이 없으므로 동토에 영향을 미치는 요소를 시험 변수로 활용하여 크리프 거동 특성을 체계적으로 규명하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 -5°C와 -10°C에서 조밀한 주문진 표준사를 동결시켜 하중비율을 조절하여 일정하중 하에서의 크리프 특성을 살펴보았다. 시험 결과, 온도가 더 낮을수록, 하중비율이 더 클수록 2차 크리프 거동이 짧아지고 3차 크리프의 변형이 더욱 뚜렷이 나타나는 경향을 보였다.

**주요어 :** 영구동토, 크리프 변형, 동결토, 일축압축시험

## 1. 서 론

영구동토란 지층 내 계절의 변화와 상관없이 2년 이상 얼어있는 동결층이 존재하는 지반을 의미하며, 영구동토층(permafrost layer) 위로 계절에 따라 동결 및 융해를 반복하는 활동층(active layer)이 나타난다(U.S Army & Air force, 1983). 영구동토지반은 시베리아, 알래스카, 캐나다 북부, 중국 오지에 널리 분포되어 있고, 그 면적은 2,100 km<sup>2</sup>나 되며, 지구상 전 육지의 23%를 차지하고 있다. 이러한 지역에는 수산자원 및 구리, 크롬, 백금, 석유 등의 지하자원이 상당량 매장되어 있는 것으로 추정되며, 오염되지 않은 지역이기 때문에 순수 과학의 보고로 알려져 있다. 최근 우리나라도 극지 생물과 수산자원 연구에 주력해온 기존의 세종과학기지과 남극 대륙의 동남극 테라 노바 베이에 제 2 남

극기지인 장보고기지를 건설하여 빙하와 기후연구, 남극대륙 지질 및 지구물리학적 탐사, 인공위성 통신 등의 연구를 수행할 예정이다. 또한 러시아와의 외교 수립과 경제 교역의 증대에 편승하여 국내 건설업체 및 자원개발업체의 동토 지역의 진출이 활발해지고 있으며, 2015년부터 러시아로부터 750만 톤 규모의 천연가스를 공급받기로 하는 등 시베리아 에너지 개발이나 알래스카 철도 건설사업 등 동토지반의 토목구조물 설계 및 시공에 대해 관심이 높아지고 있다(Hong et al., 2010).

하지만 영구동토지역에서 토목구조물 설계 및 시공은 기상, 기후조건, 지반의 역학적 특성 등 제반 건설 환경이 국내 또는 현재 진출해 있는 다른 지역과는 판이하게 다르며, 매우 다른 공학적 문제점들이 빈번하게 발생하기 때문에 기존의 토질역학적 기초지식을 그대로 동토에 적용한다는 것

1) Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

2) Korea Institute of Construction Technology

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

은 무리한 결과를 수반할 수 있다. 기존의 토질역학 이론은 토립자, 물, 공기를 포함하고 있는 3상 구조에 대해 정립되어 있는 반면 동토지반은 흙 속의 수분이 동결되면서 발생하는 얼음과 영하의 온도에서 화학적인 작용에 의해 동결되지 않는 부동수분으로 인한 4상 구조의 형태가 되기 때문에 동토지반의 역학적 특성은 비동토 지반과는 판이하게 다르다. 또한 극한지 조건에서 계절이 변화됨에 따라 지반온도가 변화하고 이로 인해 지반의 물리적 및 역학적 성질이 변화되어 문제점이 발생하고 있다.

한편 우리나라는 지리적 특성상 계절 동토지역으로 구분되기 때문에 영구동토지반의 연구보다는 주로 온도 변화에 의해 발생하는 도로 및 철도의 동상방지, 또는 결빙을 방지하기 위한 연구가 주를 이루고 있다(Park et al., 2009; Kim et al., 2007; Lee & Yun, 2012; Shin et al., 2002). 최근 영구동토지역에서 말뚝기초를 설계 시 말뚝표면의 인터페이스에서 발현되는 부착강도인 동착강도와 활동층이 용해에서 동결로 진행될 때 발생하는 동상력의 연구(Ko et al., 2010; Choi & Ko, 2011)가 진행되고 있으나 아직 초기 단계로 동토의 역학적 특성에 대한 연구는 여전히 미미한 수준이다. 반면 상당한 면적의 동토지역을 소유하고 있는 미국, 러시아, 캐나다 등의 여러 나라에서는 이미 동토지반의 역학적 연구가 오래전부터 수행되고 있다. 일반적으로 영구동토지반에 상부구조물을 설계하기 위해 고려되어야 하는 동착강도와 동상력에 관한 연구(Loch, 1981; Obermeier, 1973; Oura et al., 1960; Parameswaran, 1978; Saetersdal, 1981)가 진행되고 있지만, 최근의 연구경향은 부족한 실정이다. 또한 아직도 영구동토지반의 토질역학적 이론은 다른 분야에 비해 흙의 역학적 특성에 관한 해결되지 않은 문제점들이 많다. 영구동토지반에 말뚝기초 설계는 지지력 산정, 안정성 검토, 침하검토의 과정을 거치게 되는데 지지력 산정은 동착강도에 의해 고려할 수 있고 안정성 검토는 동상력과 영구동토층에서의 지지력을 상호 비교·검토하며, 침하는 상부구조물의 생애기간에 걸쳐 발생하는 크리프 변형량을 산정하여 검토한다(Ko et al., 2010). 말뚝기초 설계 시 고려되어야 하는 크리프 변형은 일정한 하중이 영구동토지반에 장시간 가해졌을 때 생기는 변형으로서 영구동토지반에서는 크리프 변형에 의한 장기침하가 구조물에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 보고되고 있다(Freitag & McFadden, 1997). 과거에는 영구동토지반의 크리프침하에 대한 연구(John, 1983; Ladanyi, 1983; Nixon, 1990; Parameswaran, 1979; Wijeweera & Joshi, 1993)가 다양하게 이루어져 왔지만, 최근의 연구는 미비한 실정이다.

동토지반에서 크리프 변형은 장기적으로 침하가 발생하기 때문에 구조물의 안정성에 심각한 영향을 끼치고, 그

침하량은 지반 내에 존재하는 얼음의 양, 온도, 밀도, 그리고 흙의 특성과 관련되어 있다. 하지만 동토지반에 말뚝기초 및 구조물 설계 시 동착강도와 동상력을 고려해주는 반면 크리프 변형에 대한 영향은 고려하지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 영구동토지반의 크리프 거동특성을 알아보기 위해 온도와 하중비율을 달리하여 크리프 시험을 수행하였다. 영구동토지반을 모사하기 위해 주문진 표준사를 동결시켜 시료성형을 하였고 시료의 동결시간을 알아보기 위해 부동수분을 측정하였다. 또한 하중비율에 따른 크리프 거동특성을 알아보기 위해 일축압축시험 결과로부터 하중비율을 산정하여  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서 크리프 시험을 수행하였다.

## 2. 동토의 크리프 거동

일반적인 흙의 구조는 토립자, 수분, 공기로 이루어져 있지만 동토를 이루고 있는 구성 물질은 보통의 흙과는 다르게 토립자, 부동수분, 공기와 얼음인 4상 구조를 이루고 있어 일반적인 흙과는 다른 특성을 보이게 된다. 이와 같은 동토의 4상 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 부동수분(unfrozen water)은 흙의 종류와 동결온도에 따라 달라지며, 이로 인하여 동토의 응력-변형 거동이 크게 영향을 받게 된다(Andersland & Ladanyi, 2004).

흙의 3상 구조와는 달리 동결상태의 4상 구조를 이루는 동토지역에 지반 구조물 축조 시 발생하는 침하는 시간 의존적인 변형을 일으키는 크리프 침하가 가장 큰 원인이 된다. 크리프 침하는 하중의 변화가 없음에도 불구하고 시간에 의존하여 일어나는 회복할 수 없는 변형으로 정의되며, Fig. 2는 동토지반에서 발생하는 크리프 거동을 세 종류로 분류하여 도시한 것이다.

Fig. 2(a)와 같이 동토지반에서 발생하는 크리프 거동은

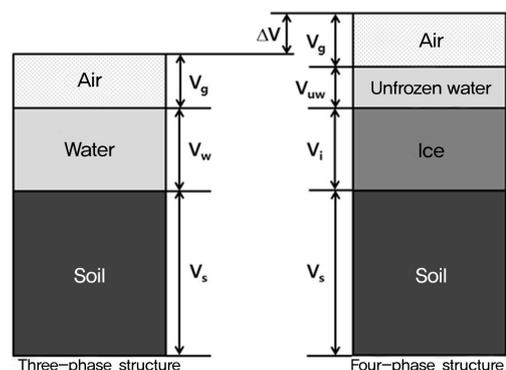
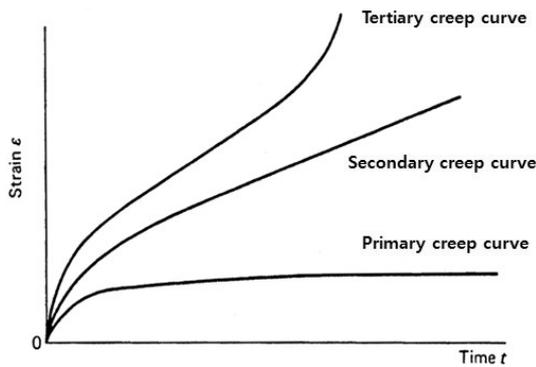


Fig. 1. Mass-volume relationships for frozen and unfrozen soil (Andersland & Ladanyi, 2004)

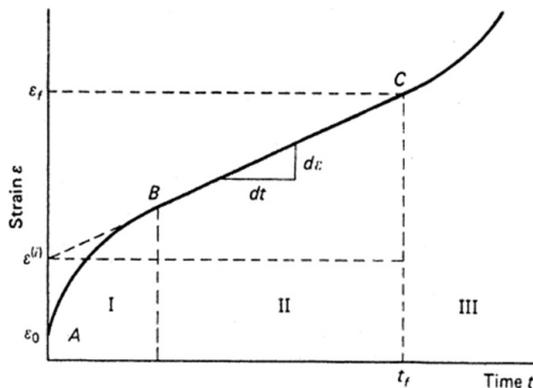
1차 크리프(Primary creep)와 2차 크리프(Secondary creep), 3차 크리프(Tertiary creep)로 구분된다(Ladanyi & Arteau, 1978). 1차 크리프는 순간침하라 하며, 이는 일정한 응력을 받고 있는 상태에서 크리프 속도 또는 변형속도가 시간이 경과함에 따라 감소할 때 나타나는 특성으로 시료의 변형이 더 이상 증가하지 않고 수렴하는 변형곡선을 말한다. 일반적인 비동결토에서 나타나는 크리프 거동의 형상으로 시간이 경과함에 따라 크리프 변형이 점차 수렴하여 작아지는 특성을 가진다. 2차 크리프는 1차 크리프 이후, 크리프 속도

가 시간이 경과함에 따라 일정하게 유지될 때 나타나는 특성으로 시료의 변형이 선형적으로 증가할 때 나타나는 크리프 변형곡선이다. 3차 크리프는 2차 크리프 이후 발생하며, 가속 크리프 속도에 의한 특성으로 시료의 변형이 갑자기 크게 발생할 때 나타나는 크리프 변형곡선이다.

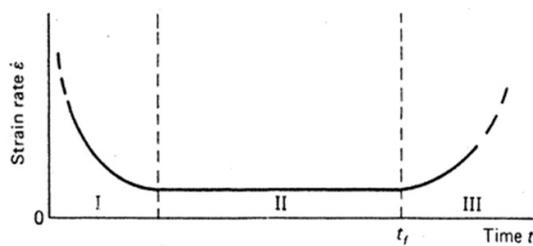
이러한 동토의 세 가지 크리프 변형 양상은 동토의 강도와 재하된 하중의 비율과 온도에 따라 변화하게 되는데, 예를 들어 강도에 비해 상대적으로 작은 하중이 재하된 경우, 온도에 따라 1차 크리프 거동만 나타날 수도 있고, 2차, 3차 크리프 거동이 모두 발현되는 경우도 생길 수 있다. 적절한 동결 온도와 하중 재하로 세 가지 크리프 변형이 모두 발생하게 되는 경우, 앞서 언급된 변형 특성에 따라 Fig. 2(b)와 같은 시간에 따른 변형 특성이 나타나게 된다. 보다 명확한 세 종류 크리프 거동의 구분을 위하여 Fig. 2(c)와 같이 변형률 속도를 산정하여 세 종류 크리프 거동의 지속시간을 산정하기도 한다. 변형률 속도는 1차 크리프 거동을 보이는 I 영역에서 시간에 따라 감소하고, 2차 크리프 거동을 보이는 II 영역에서는 일정한 값을 유지하게 된다. 이를 정류상태 크리프라고 하며, 적절한 응력 조건하에서 얼음 성분을 함유한 동토에서 이러한 거동을 보인다. 또한 3차 크리프 거동을 보이는 III 영역에서는 변형률 속도가 급격하게 증가하는 경향을 보이게 된다.



(a) Creep-curve variations



(b) Basic creep curve



(c) True strain rate versus time

Fig. 2. Constant-stress creep test (Ladanyi & Arteau, 1978)

### 3. 시험 내용

#### 3.1 사용시료

본 연구에서 일축압축시험 및 크리프 시험에 사용한 시료

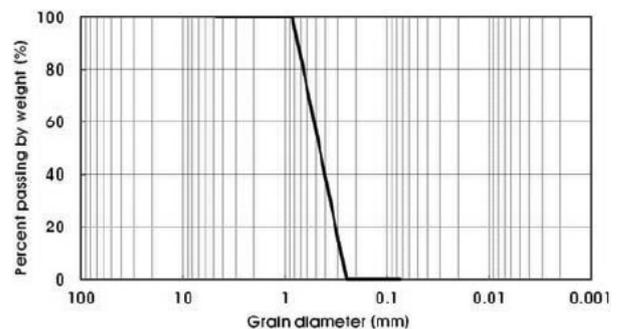


Fig. 3. Grain size distribution of Jumoonjin sand

Table 1. Index properties of Junmoonjin sand

Sample	Specific gravity ( $G_s$ )	Void ratio ( $e$ )	Max. dry unit weight, $\gamma_{dmax}$ ( $\text{KN/m}^3$ )	Min. dry unit weight, $\gamma_{dmin}$ ( $\text{KN/m}^3$ )	Relative density $D_r$ (%)	USCS
Jumoonjin Sand	2.67	0.67	16.7	13.3	77	SP

는 주문진 표준사를 사용하였고 비중 2.67에 최대 건조단위 중량 16.7 KN/m<sup>3</sup>, 최소 건조단위중량 13.3 KN/m<sup>3</sup>로서 통일 분류법상 입도분포가 좋지 않은 빈입도(SP)이다. 시료의 입도분포곡선을 Fig. 3에 나타내었고 기본 물성을 Table 1에 나타내었다.

### 3.2 시료성형

사용시료를 영구동토지반으로 모사하기 위해 몰드를 제작하여 동결시킬 때 사용하였다. 일반적으로 물은 얼음이 되면서 최대 9% 정도의 팽창이 이루어진다는 것을 알 수 있다(Ladanyi, 1981). 제작된 몰드에서는 수분에 의한 체적 팽창을 몰드가 구속해주지 못해 옆면이 벌어지는 현상과 직경이 달라지는 현상이 발견되었고 상부 뚜껑을 덮지 않고 공시체를 제작할 경우 Fig. 4에 보이는 바와 같이 상부에 ice lens가 발생하는 문제점이 발견되었다(Chae et al., 2013). 완전 밀폐된 몰드의 경우 부피 팽창으로 인한 동상압이 발생

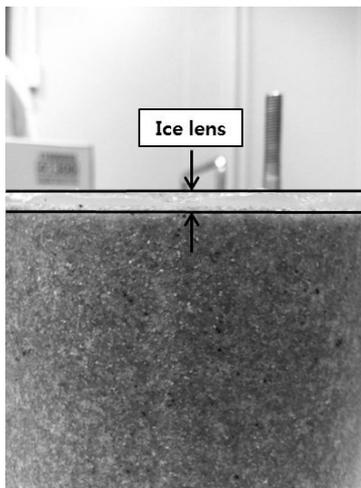


Fig. 4. Formed ice lens of the unconfined specimen

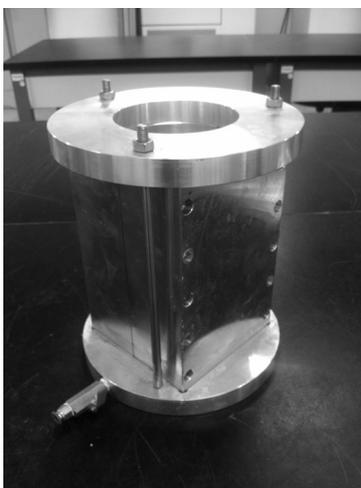


Fig. 5. Mold for frozen specimen

하여 공시체를 추출할 때 구속압의 해방으로 인한 강도 변화가 발생하게 된다.

이를 방지하기 위해 Fig. 5와 같은 형태로 몰드의 상부에 영하의 온도에서도 유동성이 저하되지 않는 실리콘을 삽입하여 ice lens의 발생을 막고 얼음에 의한 부피 팽창을 허용하는 형태의 공시체 몰드를 제작하였다. 또한 실리콘의 사용으로 부피 팽창을 일부 허용함으로써 동상압이 강도 및 크리프 변형거동에 미치는 영향은 줄어들었을 것으로 판단된다.

균질한 시료를 확보하기 위하여 공시체 제작 전 시료는 항온 건조로에서 24시간 동안 완전 건조 상태를 유지하였고, 건조로에서 꺼낸 직후 중량을 측정하여 공기 중의 습윤화를 방지하였다. 시료의 동결을 위해 제작된 공시체 몰드는 직경 70 mm, 높이 140 mm로 공시체 성형 시 상대밀도 77%를 기준으로 3층 다짐을 하여 시료를 성형하였다. 시료 성형을 위해 다짐 시 몰드 상부에 구멍이 있는 원형 링을 고정시켜 몰드의 옆면과 하부의 유동을 방지하고 제작이 완료된 이후에는 구멍이 없는 상부 뚜껑으로 덮어 완전 밀폐 상태가 유지되도록 하였고 성형된 시료를 포화시키기 위해 밀폐된 몰드 하부에 설치된 밸브를 통해서 탈기수를 삽입하였다. 몰드의 조립과 시료의 포화가 완료된 후에는 시료를 동결시키기 위해 영하의 온도가 지속적으로 유지되는 냉동 챔버 안에 밀폐된 몰드를 넣어 동결시켜 시료 내의 함유비 변화를 최소화하였다. 동결상태의 시료를 원활히 추출하기 위하여 몰드의 옆면은 분리가 가능하게 제작하였고, 몰드와 시료 사이에 OHP 필름을 삽입하여 몰드의 틈으로 탈기수의 유출을 방지하였다.

### 3.3 부동수분

부동수는 동토에서 0°C 이하에서도 얼지 않는 수분을 말하며, 동토 중의 부동수의 양은 흙의 비표면적 및 입자 배열 상태, 그리고 온도 등에 따라서 달라지는 것으로 알려져 있다(Hivon & Sego, 1995). 부동수의 발생은 간극수내 용질의 함유량에 의한 응고점 강하와 연속된 구조를 보이는 흙 입자들 사이의 모관의 영향에 의해 저하된 화학능에 의한 것으로 알려져 있다(Hong et al., 2010). 또한 점토입자 표면이 물에 닿으면 표면 이온이 부분적으로 분리되어 음의 전기를 띠게 되는데 이것을 전기확산 2층층(electrical diffuse double layer)이라 하고 이로 인하여 흙 입자 표면에 흡착되어 있는 물의 응고점 강하량은 크게 된다. 이러한 응고점 강하로 인하여 동결된 점토에서의 부동수분이 동일한 상태의 사질토보다 더 크게 나타나게 된다.

흙의 동결은 부동수분이 일정한 양으로 수렴하였을 때를

의미하며, 이는 동일한 동결 온도를 적용하였을 경우에도 시간에 따라 부동수분이 변화하는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 동결시료의 균질성 확보를 위하여  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서의 시간에 따른 부동수분량을 측정하여 동결시간을 결정하였다. 부동수분 측정은 Fig. 6에 나타난 TDR(Time Domain Reflectometry) 장치를 사용하였다. TDR 장치는 토립자, 얼음, 간극수, 공기 등의 유전율이 서로 다른 원리를 이용하여 공시체 내부의 체적함수비를 측정한다(Topp et al., 1980, Patterson & Smith, 1980). TDR probe를 시료 속에 관입 후 동결시키면서 일정 시간마다 발생시킨 전자파의 속도를 계산하여 시간에 따른 흙의 유전 상수 변화를 측정하고 이로부터 공시체 내부의 체적함수비를 산정하게 된다.

본 연구에서는 크리프 시험 시 사용되는 주문진 표준사의 동결시간을 결정하기 위하여 부동수분을 측정하였다. 동결 온도는 사질토의 경우 비표면적의 영향에 의해 발생하는 부동수분의 양이  $-2^{\circ}\text{C}$ 보다 낮은 온도에서 수렴한다는 기존 문헌(Anderson & Morgenstern, 1973)을 통하여  $-5^{\circ}\text{C}$ 로 결정하였다. Fig. 7은  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서 동결한 시료의 시간에 따른 부동수분 측정 결과를 나타낸 것이다.

부동수분 측정 결과,  $-5^{\circ}\text{C}$ 에서는 약 11시간 경과 후 2.77%,  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서는 약 8시간 경과 후 1.51%로 각각 수렴하였다.



Fig. 6. TDR (Time Domain Reflectometry) sensor for unfrozen water content measurement

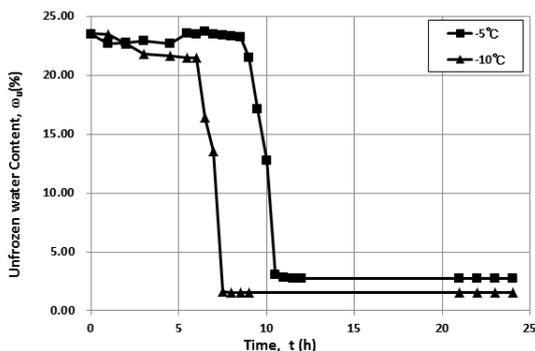


Fig. 7. Unfrozen water content variation with regard to the freezing time at  $-5^{\circ}\text{C}$  and  $-10^{\circ}\text{C}$

초기 함수비가 23% 정도인 것을 생각하면 전체 간극수 체적의 90% 정도가 동결되었으며, 사질토의 경우 전기확산이 증층에 의한 추가적인 응고점 강하를 기대하기 힘들기 때문에 부동수분의 양이 적은 것으로 판단된다. 부동수분의 절대적인 양은 상당히 적은 편이나  $-5^{\circ}\text{C}$ 와  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서 두 배 정도의 차이를 보이기 때문에 이러한 부동수분에 의한 크리프 거동 특성 변화를 관찰하기에는 충분할 것으로 판단하였다. 부동수분 측정 결과를 바탕으로 본 연구에서 사용한 시료는 부동수분이 수렴하는 시간의 두 배가 넘는 시간인 24시간 동안 충분히 동결시켜 시험하였다.

### 3.4 실내시험조건

동토의 크리프 거동을 알아보기 위해 모든 시험은 일정한 온도  $-20^{\circ}\text{C}$ 까지 온도 조절이 가능한 냉동챔버에서 진행하였다. 냉동챔버는 설정 온도의  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 의 차이가 발생 시 가동하고 시험 시의 온도와 습도의 변화를 방지하기 위해 밀폐된 공간이며, 시험 내부의 진행상황은 문의 유리면을 통하여 관찰할 수 있다. 일축압축시험 및 크리프 시험의 모식도를 Fig. 8에 나타내었다.

냉동챔버에 있는 일축압축시험기는 상재하중을 가하는 고강도 frame과 재하속도 및 기계의 작동 및 정지를 조정하는 control box, 시험 시 측정된 시료의 응력-변형률을 기록하는 computer system으로 구성되어 있다. 일축압축시험기의 본체는  $-20^{\circ}\text{C}$ 까지의 온도 조절과 유지가 가능한 냉동챔버 내부에서 하중을 동토에 전달하는 시험을 진행할 수 있다. 본체는 시료를 거치시킬 수 있는 loading plate와 하중 측정이 가능한 load cell이 frame에 장착되어 있는 형태이며, 변위는 시험기의 본체 내부에 설치된 변위계(LVDT)를 이용하여 computer 모니터에 바로 값을 출력해주는 형태로 구성되어 있다. 하중 측정을 위해 장착된 load cell과 변위계는 각각 0.01 kgf, 0.01 mm의 단위까지 측정하고 최대 한계

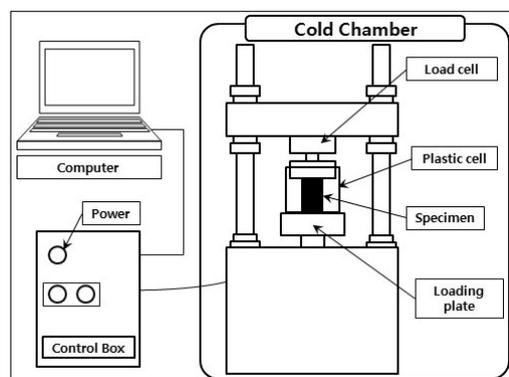


Fig. 8. Schematic diagram of uniaxial compression and creep testing equipment

치는 각각 load cell이 10 tonf, 변위계가 최대 100 mm까지 측정이 가능하다. 공시체를 거치시키는 loading plate 및 상부의 frame은 수평계를 이용하여 편심이 발생하는 것을 방지하였다.

일축압축시험과 크리프 시험은 온도유지를 위해 냉동체 임버에서 진행하였다. 일축압축시험기는 변위제어 방식으로 시험을 수행하였고, 크리프시험은 변위제어방식을 하중 제어방식으로 변환시켜 시험기 본체 상부에 설치된 load cell로 측정되는 하중을 일정하게 유지시켜 동결된 시료의 크리프 시험을 수행하였다.

### 3.5 동토의 크리프 시험

동토의 크리프 시험은 일정한 하중이 가해졌을 때 시간에 따른 변위 발생 여부를 확인하는 시험이다. 크리프 시험에서 적용하는 하중비율은 일축압축시험 결과의 최대강도로부터 얻은 최대강도의 일정 비율로, 비율의 크기는 시험자의 선택에 의해 정하도록 되어있다(ASTM D5520, 1995). 또한 최대강도 산정을 위한 일축압축시험의 재하속도는

1%/min 이상의 속도로 시험하도록 규정되어, 본 연구에서 적용한 재하속도는 ASTM기준에 가장 근접한 1.43%/min(2 mm/min)으로 시험을 수행하였다. 크리프 시험은 최장 100 시간까지 변형을 측정하도록 규정되어 있다.

동토의 크리프 거동에 대한 하중비율은 Chae et al. (2013)의 결과를 활용하였다. 일축압축시험은 냉동체임버 내에서 진행하였고, 성형된 시료는 온도 변화가 발생하지 않도록 냉동체임버 내부에서 추출하였다. 일축압축시험 데이터는 냉동체임버 외부의 컴퓨터에서 확인하였고 시료의 전체 높이가 20%의 변형이 발생하였을 때 시험을 종료하였다. 이와 관련된 자세한 사항은 Chae et al.(2013)에 설명되어 있다. 동결된 시료의 일축압축시험 결과를 통해 응력-변형률 곡선을 Fig. 9와 Table 2에 나타내었다.

온도 변화에 따른 최대 일축압축강도는 -5°C에서 8.18 MPa을 보이고 -10°C에서 12.26 MPa을 보이고 있다. 온도가 낮아질수록 최대 일축압축강도는 증가하는 경향을 보이고 있지만, 잔류강도는 -5°C보다 -10°C가 낮은 경향을 보인다. 크리프 시험의 하중비율을 산정하기 위해 수행된 일축압축시험의 결과로부터 Table 3에 하중비율을 나타내었다.

동토의 크리프 거동에서 설명한 바와 같이 하중비율과 동결 온도에 따라 세 종류의 크리프 거동이 결정되게 된다. 따라서 -10°C에서 하중비율 10%와 20%를 적용하여 시간에 따른 크리프 변형률을 도시한 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

Table 2. Maximum uniaxial compressive strength

Temperature	-5°C	-10°C
Uniaxial compressive strength (MPa)	8.18	12.26

Table 3. Applied loading ratio of frozen soils at creep tests

Temperature	Load ratio				
	10%	20%	40%	50%	60%
-5°C	-	-	12.35 kN	15.44 kN	18.52 kN
-10°C	4.63 kN	9.25 kN	18.49 kN	23.13 kN	27.75 kN

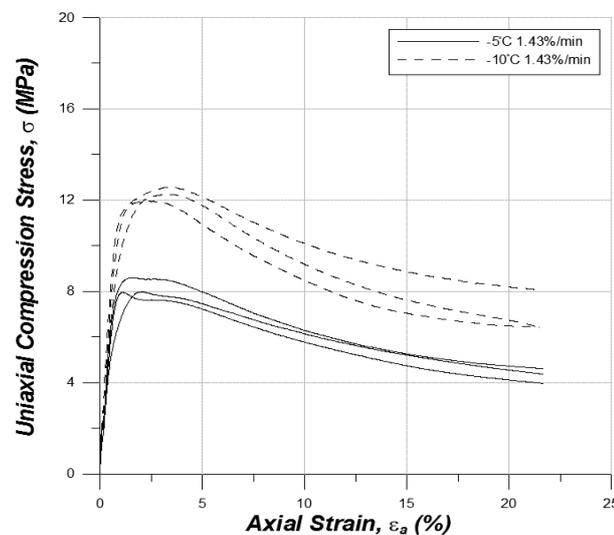


Fig. 9. Uniaxial compressive testing results (Chae et al., 2013)

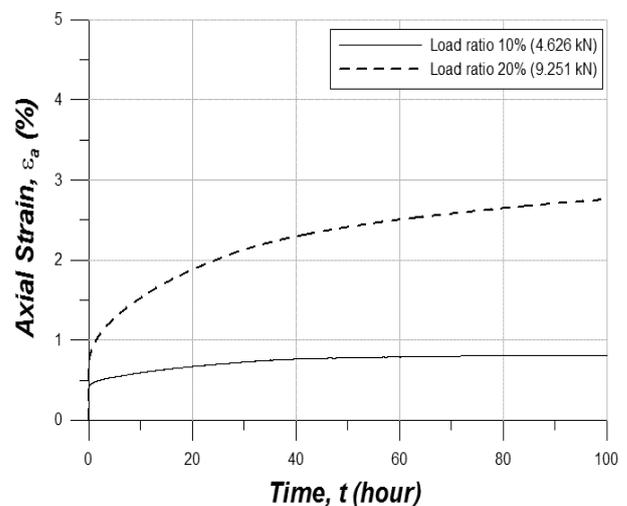


Fig. 10. Time-axial strain relationship at loading ratio of 10% and 20% at -10°C

온도와 하중비율에 따른 1차, 2차, 3차 크리프 거동의 전체적인 특성 파악이 본 연구의 목적으로 ASTM에서 규정한 최장 시험시간인 100시간까지 시험을 수행한 결과, 크리프 변형속도가 수렴하여 일정한 수준까지 도달한 1차와 2차 크리프 거동은 나타나지만 변형률이 급격히 증가하는 3차 크리프 거동은 확인할 수 없었다. 따라서 -5°C와 -10°C에서 하중비율 40%, 50%, 60%에 대해서만 크리프 시험을 수행하였고, 그 결과를 활용하여 하중비율과 온도에 대한 크리프 거동 특성을 분석하였다.

#### 4. 시험 결과 및 분석

-5°C와 -10°C에서 동결된 사질토 시료에 대하여 일축압 축시험으로 획득한 최대강도 40%, 50%, 60%의 하중을 재하하여 시간에 따른 변형률을 측정하였다. 동토의 세 종류 크리프 거동은 변형률 속도에 따라 명확히 구분되는 특성으로 시간에 따른 변형률과 더불어 시간에 따른 변형률 속도를 산정하여 세 종류의 크리프 거동을 구분하였다. 일정한 온도에서 동결된 시료에 대하여 하중비율을 달리한 결과와 일정한 하중비율이 적용된 경우에 온도를 달리한 결과를 도

시하여 하중비율과 온도가 동결된 사질토의 크리프 거동에 미치는 영향을 파악하였다.

#### 4.1 하중비율에 따른 크리프 거동 특성

Fig. 11은 -5°C와 -10°C로 동결된 시료에 하중비율 40%, 50%, 60%를 적용하여 측정된 시간에 따른 축 방향 변형률(위)과 변형률 속도(아래)를 나타낸 것이다.

동결온도 -5°C에서 하중비율 40%일 때 약 75시간, 하중비율 50%일 때 약 29시간, 하중비율 60%에서는 약 7시간이 경과하여 시험이 종료되는 시점인 변형률 20%까지 크리프 변형을 보이고 있다. 하중비율이 증가할수록 변형률 20%까지 도달하는 시간이 단축되는 경향을 보이고 있다. 변형률 속도 그래프에서 하중비율 40%에서는 약 60시간 동안 2차 크리프 거동을 보이지만 변형률 속도가 증가하지 않아 3차 크리프 영역은 나타나지 않은 것으로 판단된다. 하중비율 50%에서는 약 15시간 정도 2차 크리프 거동을 보이고 변형률 속도가 증가함으로써 3차 크리프 거동이 나타났으며, 하중비율 60%에서는 2차 크리프 영역은 나타나지 않고 단시간에 변형률 속도가 증가함으로써 3차 크리프 거동을 보이고 있다.

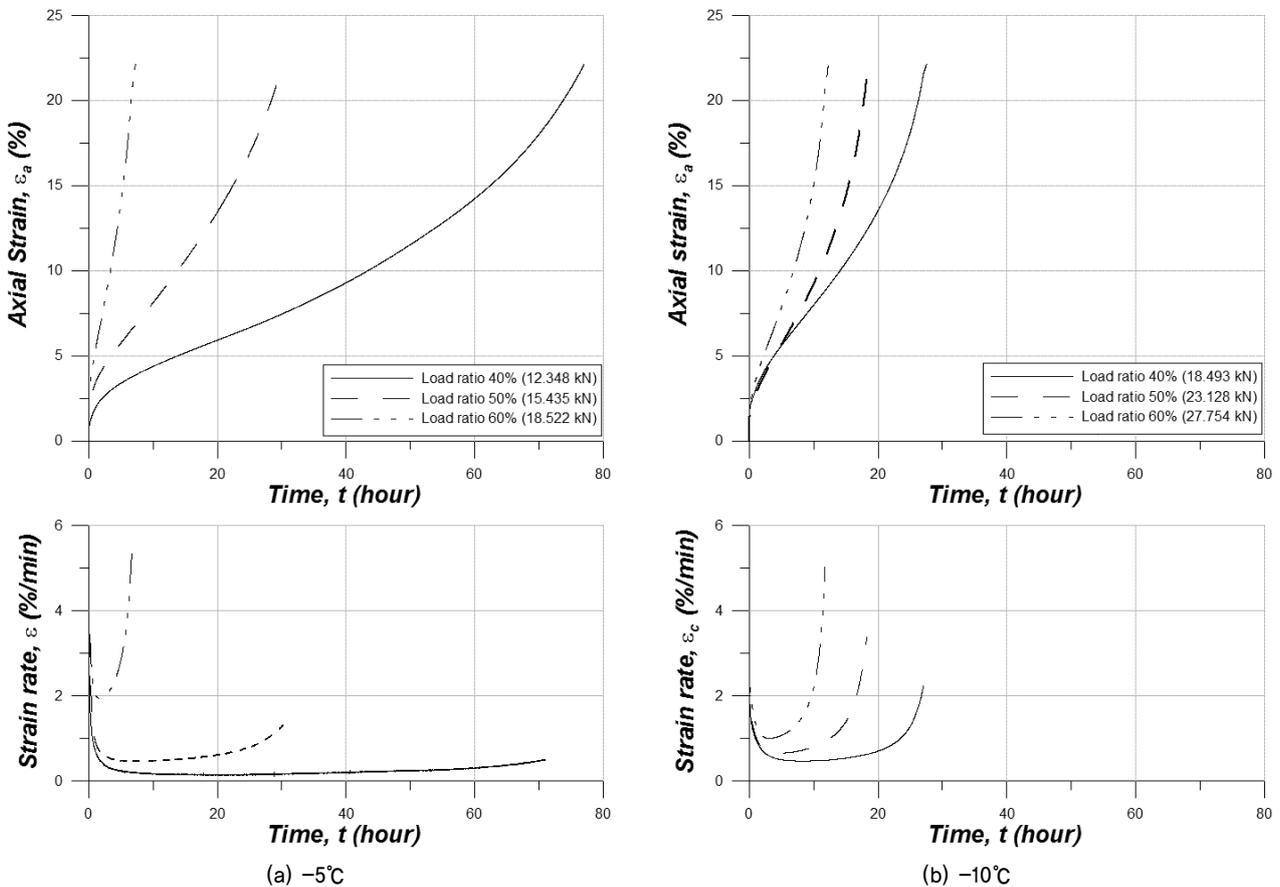


Fig. 11. Creep behaviors under various loading ratio at -5°C (a) and -10°C (b)

또한 온도  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서는 크리프 시험이 종료되는 시점인 변형률 20%까지 하중비율 40%에서 약 28시간, 하중비율 50%에서 약 18시간, 하중비율 60%에서 약 10시간이 경과하였다.  $-5^{\circ}\text{C}$ 의 결과와 마찬가지로 하중비율이 증가할수록 크리프 변형 20%에 도달하는 시간이 단축되는 경향을 보이고 있다. 2차 크리프와 3차 크리프 거동을 확인하기 위한 변형률 속도는 하중비율 40%에서는 약 12시간 정도의 2차 크리프 거동을 보이고 변형률 속도가 증가함으로써 3차 크리프 거동을 보인다. 하중비율 50%에서는 약 10시간 정도의 2차 크리프 거동 후 3차 크리프 거동을 보이며, 하중비율 60%에서는 약 7시간 정도의 2차 크리프 거동을 나타내며, 3차 크리프 거동을 보이고 있다.

따라서 동결온도에 따라 정도의 차이는 있으나, 하중비율이 증가할수록 2차 크리프 발현 기간이 짧아지며, 크리프 변형률 속도가 커지게 된다. 특정 하중비율의 경우 2차 크리프의 발생 없이 3차 크리프 영역을 나타내기도 하였다. 또한 3차 크리프 영역에서는 하중비율이 증가할수록 변형률 속도의 기울기가 커져 변형이 급격히 증가하는 현상을 보였다.

#### 4.2 동결 온도에 따른 크리프 거동 특성

Fig. 12는 동일한 시험 결과에 대하여 Fig. 11과 마찬가지로 시간에 따른 변형률(위)과 변형률 속도(아래)를 최대강도 대비 동일한 비율의 하중 적용 시, 동결 온도  $-5^{\circ}\text{C}$ 와  $-10^{\circ}\text{C}$ 의 시험 결과를 도시한 것이다. 동일한 하중비율에서 온도

가 낮아짐에 따라 크리프 변형 시간이 단축되는 경향을 보이고 있으며, 온도에 따른 크리프 변형시간의 차이는 하중비율이 높아질수록 작아지고 있다. 시험 종료 시점인 변형률 20%에 도달하는 시간이 하중비율 40% 적용 시  $-5^{\circ}\text{C}$  동결시료의 경우  $-10^{\circ}\text{C}$  동결시료에 비해 3배가량 소요되었으나 하중비율 60% 적용 시 이러한 차이는 2배 정도로 줄어들게 된다.

이러한 변형률 20% 도달시간의 차이는 2차 크리프 변형시간의 변화에 의한 것으로 판단되며, 온도의 차이에 따라 2차 크리프와 3차 크리프 거동 특성을 파악하기 위하여 시간에 따른 변형률 속도로 도시한 그래프에서는 온도가 낮아질수록 하중비율에 관계없이 2차 크리프 영역이 짧아지고 3차 크리프 거동이 뚜렷이 나타나는 경향을 보이고 있다.

하중비율 40%에서는  $-5^{\circ}\text{C}$ 일 때 변형률 속도가 수렴하여 약 60시간 동안 2차 크리프 거동이 나타나지만 3차 크리프의 경향은 보이지 않는 반면  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서는 약 12시간 2차 크리프 거동을 보이고 변형률 속도가 증가함으로써 3차 크리프 거동이 나타나고 있다. 이러한 경향은 하중비율 50%에서도 나타났으며, 하중비율 60%에서는 2차 크리프 거동보다는 3차 크리프의 경향이 뚜렷이 나타나고 있다.  $-5^{\circ}\text{C}$ 에서는 2차 크리프의 경향은 보이지 않고 3차 크리프 거동을 보이고  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서는 약 2시간 정도 2차 크리프가 일어나며, 변형률 속도가 증가함으로써 3차 크리프 거동을 보인다. 이러한 차이는  $-5^{\circ}\text{C}$ 에서 2차 크리프가 발현되지 못하고 3차 크리프 거동을 보이는 것으로 판단되며, 변형률 속도의 기울기가  $-5^{\circ}\text{C}$ 보다  $-10^{\circ}\text{C}$ 가 상대적으로 더 크게 나타났다.

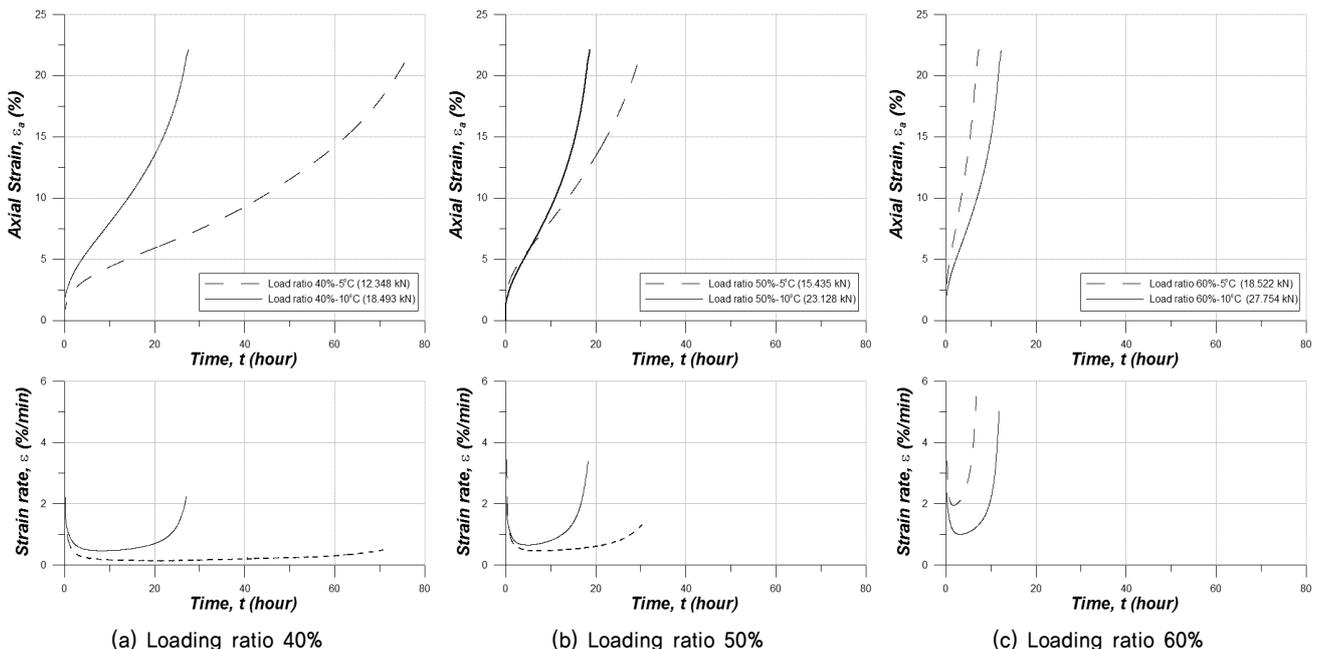


Fig. 12. Creep behavior at  $-5^{\circ}\text{C}$  and  $-10^{\circ}\text{C}$  under constant loading ratio; (a) 40%, (b) 50% and (c) 60%

하중비율이 커짐에 따라 크리프 변형에서 나타났었던 2차 크리프 시간의 감소와 변형률 기울기 증가, 3차 크리프 변형률 속도 기울기 증가와 같은 특징들은 저하된 온도하에서도 관찰되었다. 앞서 언급되었던 바와 같이  $-5^{\circ}\text{C}$ 와  $-10^{\circ}\text{C}$  동결온도에서 부동수분량은 모두 3% 이내이고 그 차이도 1% 정도로 크지 않았음에도 불구하고 이러한 차이를 보인 것은 부동수분량이 크리프 거동에 미치는 영향은 상당히 큰 것으로 판단된다. 온도에 따른 부동수분 변화가 상대적으로 큰 세립질 동결토에 대하여 크리프 거동 특성을 파악하고 부동수분이 크리프 거동에 미치는 영향에 대한 추가적인 연구도 필요할 것으로 생각된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 영구동토지반의 크리프 거동 특성을 알아보기 위하여 온도와 하중비율을 달리하여 크리프 시험을 수행하였다. 부피팽창 및 ice lens의 발생을 방지하기 위해 제작된 몰드에서 균질하게 성형된 시료를 사용하였고 동결시간을 확인하기 위해 부동수분시험을 수행하였다. 하중비율은 일축 압축시험의 결과인 최대강도 10%, 20%, 40%, 50%, 60%에서 크리프 시험을 수행하였고 온도에 따른 크리프 거동 특성을 알아보기 위해  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ 로 크리프 시험을 수행하였다.

- (1) 본 연구에서 사용된 주문진 표준사의 동결시간을 결정하기 위해  $-5^{\circ}\text{C}$ 와  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서 TDR 장치를 사용하여 부동수분을 측정하였다. 부동수분 측정 결과,  $-5^{\circ}\text{C}$ 에서는 약 11시간 경과 후 2.77%,  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서는 약 8시간 경과 후 1.51%로 각각 수렴하였다. 부동수분측정 결과,  $-5^{\circ}\text{C}$ 보다  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서 부동수분량은 동결시간에 따라 수렴하는 시간도 빨라지는 경향을 보였다. 본 연구에서 사용한 시료는 부동수분이 수렴하는 시간의 두 배가 넘는 시간인 24시간 동안 충분히 동결시켜 시험하였다.
- (2) 크리프 거동 특성을 알아보기 위해 하중비율 10%와 20%에서 크리프 시험을 수행한 결과, 1차 크리프의 거동 특성을 보이고 있으며, 크리프 변형 특성인 2차 크리프 영역과 3차 크리프 영역은 나타나지 않았다. 이는 낮은 하중비율로 크리프 거동 특성이 나타나지 않은 것으로 생각된다.
- (3) 동결온도  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서 40%, 50%, 60%의 하중비율을 적용하여 크리프 시험을 수행한 결과, 전체적인 크리프 거동을 파악할 수 있었으며, 하중비율이 증가하고 온도가 낮아질수록 시험 종료 시점인 변형률 20%까지 도달하는 시간이 감소하였다. 이러한 차이는 2차 크리프

변형 시간의 변화에 의한 것으로 판단되며, 하중비율이 증가할수록 동결온도가 낮아질수록 2차 크리프 영역이 짧아지고 변형률 속도가 크게 나타났다. 3차 크리프 거동의 경우 하중비율이 증가하고 온도가 낮아질수록 변형률 속도의 기울기가 커져 변형속도가 급격하게 빨라지는 것을 의미한다.

본 연구는 동토의 크리프 거동에 관한 기초적인 연구로써 세 종류의 크리프 거동을 확인하며, 하중비율과 동결온도가 동토의 크리프 거동에 미치는 영향을 확인하였다. 동토지반에서 구조물 설계 시 적용할 수 있는 연구결과를 얻기 위해서는 보다 다양한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 보다 다양한 동결온도 범위에서의 크리프 시험 혹은 상대적으로 부동수분이 많은 세립질 동결토를 사용하여 세립분 함유량 및 부동수분량에 따른 크리프 거동 특성 파악과 같은 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한 크리프 거동에 대한 연구뿐만 아니라 크리프 변형을 고려한 동토지반의 장기강도 산정 및 지반해석과 같은 분야의 연구도 필요할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(극한지 하부구조 급속시공 플랫폼 기술개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

1. Andersland, O. B. and Ladanyi, B. (2004), Frozen ground engineering second edition, John Wiley & Sons, New York, pp. 20~55.
2. Anderson, D. M. and N. R. Morgenstern (1973), Physics, chemistry and mechanics of frozen ground, National Academy of Sciences, pp. 257~288.
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.
4. 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, Proceedings of International Society of Offshore and Polar Engineering (ISOPE), Anchorage, pp. 501~506.
5. 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 Geotechnical society, Vol. 27, No. 10, pp. 13~23 (in Korean).
6. Freitag, D. R. and McFadden, T. (1997), Introduction to cold regions engineering, New York, ASCE Press, pp. 291~301.
7. Hivon, E. G. and Sego, D. C. (1995), Strength of frozen saline

- soils, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, No. 2, pp. 336-354.
8. Hong, C. H., Kim, T. H. and Bae, G. J. (2010), A study on application methods of satellite images for the construction projects over extreme cold regions, *Journal of The Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 13, No. 4, pp. 148-156 (in Korean).
  9. Hong, S. S., Kim, Y. S., Lee, J. G., Kang, J. M., Kim, H. S. and Bae, K. J. (2010), A Characteristics of the unfrozen water content in antarctic soils, *Proceedings of Korean Geo-Environmental Society*, Seoul, pp. 568-573 (in Korean).
  10. John M. Ting. (1983), Tertiary creep model for frozen sands, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 109, No. 7, pp. 932-945.
  11. Kim, H. S., You, K. H., Cho, G. T. and Kim, N. S. (2007), Laboratory characteristics on frost heave in highway subgrade, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 2, pp. 199-205 (in Korean).
  12. Ko, S. G., Choi, C. H. and Chae, J. G. (2010), Foundation design parameters in cold regions, *Geo-Environmental and Slope Stability Conference*, pp. 93-101 (in Korean).
  13. Ladanyi, B. (1981), Mechanical behaviour of frozen soils, In *Proc. Int. Symp. on Mechanical Behavior of Structured Media*, Calreton Univ., Ottawa. New York, Vol. B, pp. 205-245.
  14. Ladanyi, B. (1983), Shallow foundation on frozen soil, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 109, No. 11, pp. 1434-1448.
  15. Landanyi, B. and Arteau, J. (1978), Effect of specimen shape on creep response of a frozen sand, *International Symposium on Ground Freezing*, pp. 141-153.
  16. Lee D. U. and Yun J. M. (2012), Recycling plan for waste concrete fine aggregate as materials of anti-frost layer and sub-base layer, *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 11, No. 3, pp. 19-25 (in Korean).
  17. Loch, J. P. G. (1981), State of the art report - frost action in soils, *Engineering Geology*, Vol. 18, No. 1-4, pp. 213-224.
  18. Nixon, J. F. (1990), Effect of climatic warming on pile creep in permafrost, *Journal of Cold Regions Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 67-73.
  19. Obermeier, S. F. (1973), Frost heave susceptibility research, *OECD Symposium, Frost Action on Roads, I, Paris*. pp. 257-66.
  20. Oura, H., Usuki, H. and Takada, Y. (1960), On adfreezing force of soil, *Low Temperature Science*. pp. 215-223.
  21. Parameswaran, V. R. (1978), Adfreeze strength of frozen sand to model piles, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, No. 4, pp. 494-500.
  22. Parameswaran. V. R. (1979), Creep of model piles in frozen soil, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 16, No. 1, pp. 69-77.
  23. Park, J. J., Shin, E. C. and Kang, J. G. (2009), Thermal stability in underground structure with ground freezing, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 25, No. 3. pp. 65-74 (in Korean).
  24. Patterson, D. E. and Smith, M. W. (1980), The measurement of unfrozen content by time domain reflectometry, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 18, No. 1, pp. 131-144.
  25. Saetersdal, R. (1981), Heaving conditions by freezing of soils, *Engineering Geology*, Vol. 18. No. 1-4, pp. 291-305.
  26. Shin, E. C., Park, J. J. and Lee, C. S. (2002), The characteristics of frost heaving pressure on the railroad bed materials, *Journal of Korean Society for Railway Conference*, pp. 264-270 (in Korean).
  27. Topp, G. C., Davis, J. L. and Annan, A. P. (1980), Electromagnetic determination of soil water content : measurements on coaxial transmission line, *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 3, pp. 574-582.
  28. U. S. Army and Air force (1983), Artic and subarctic construction foundation for structures, *Department of The Army and The Air Force*, pp. 1-7.
  29. Wijeweera and Joshi, R. C. (1993), Creep behavior of saline fine-grained frozen soil, *Journal of Cold Regions Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 77-89.