

동상시험장비의 실험적 검증 및 시료크기의 영향에 관한 연구

Experimental Assessment and Specimen Height Effect in Frost Heave Testing Apparatus

진 현 우¹⁾ · 유 병 현²⁾ · 이 장 근[†]

Hyunwoo Jin · Byunghyun Ryu · Janguen Lee

Received: November 11th, 2018; Revised: November 27th, 2018; Accepted: December 27th, 2018

ABSTRACT : Frost heave is one of the representative engineering characteristics in cold regions. In South Korea, which is located in seasonal frost area, structural damage caused by frost heave and thaw happens and the need for research on the frost heave is increasing. In this paper, newly developed transparent temperature-controllable cell is used to focus on the frost heave. Frost susceptible artificial soil is used to analyze water intake rate which is one of the important factors in frost susceptibility criteria. Frost heave rate and water intake rate have similar behavior after heave by freezing of pore water converges. O-ring installed in the upper pedestal to measure water intake rate generates side friction between the inner wall of the freezing cell and O-ring, thereby hindering frost heave. Therefore, the frost susceptibility criteria using the water intake rate is not reliable. It is appropriate to use frost heave rate which has similar behavior with water intake rate. Frost heave tests were performed under two different specimen heights. Overburden pressure, temperature gradient and dry unit weight were set under similar state. Based on laboratory testing results, frost heave is independent on the specimen height.

Keywords : Frost heave, Frost susceptibility, Transparent temperature-controllable cell, Frost heave rate, Specimen height

요 지 : 동상은 동토지역에서 발생하는 대표적인 공학적 특성이다. 계절동토(seasonal frost area)에 해당하는 우리나라는 동결영해에 의한 구조적 피해가 발생하고 동상에 관한 연구의 필요성이 증대되고 있는 실정이다. 본 논문에서는 새롭게 개발한 투명 온도제어형 셀을 활용하여 동상에 관한 연구를 수행하였다. 동상에 민감한 흙을 인공적으로 조성하여 동상민감성 판정에 있어 중요한 인자 중 하나인 물 주입속도(water intake rate)에 관한 분석을 실시하였다. 간극수 동결에 의한 부피팽창(heave by pore water)이 수렴하는 시점 이후에 동상속도(frost heave rate)와 물 주입속도는 거의 유사하게 나타났다. 그러나 물 주입속도를 측정하기 위해 상부 페더스탈에 설치한 O-ring은 몰드 내벽과의 마찰을 발생시켜 동상발생을 저하시켰다. 따라서 물 주입속도를 활용한 동상민감성 판정 기준은 신뢰하기 힘들다고 판단되었으며, 유사한 거동을 보이는 동상속도를 활용하는 것이 적절하다는 결론을 내렸다. 또한, 동상민감성 흙을 활용해 시료크기가 동상에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 시료크기가 다른 2가지 경우에 대해 동상시험을 수행하였으며 상재하중, 온도구배, 그리고 건조단위중량을 동일하게 설정하였다. 실험결과를 토대로 시료크기는 동상에 영향을 미치지 않는다는 것을 발견하였다.

주요어 : 동상, 동상민감성, 온도제어형 셀, 동상속도, 시료크기

1. 서 론

동상(frost heave)에 관한 실험적 연구는 지반에서 얼음분리(ice segregation) 메커니즘에 관한 개념이 발표되면서부터 시작되어 한 세기에 걸쳐 진행되고 있다(Taber, 1929; Beskow, 1947). Konrad & Morgenstern(1980; 1981)은 세립분을 함유한 흙에서 아이스렌즈(ice lens)가 형성되는 메커니즘에 관해 상세한 연구를 수행하였으며, 이 과정에서 segregation potential이라는 새로운 개념의 이론을 도출하였다. 현재 segregation potential은 동상속도(frost heave rate)와 더불어 동상민감성

판정 기준으로 가장 활발하게 쓰이고 있는 개념으로 발전하였다.

동상이 발생하기 위해서는 3가지 필요조건이 존재한다. 동상에 민감한 흙, 일정 시간 동안 지속되는 영하의 온도, 그리고 지속적인 물의 공급이다. 물은 분자의 양극성으로 인해 동결(freezing)될 때 9.00%의 부피팽창이 발생하는데(Lackner et al., 2005), 3가지 필요조건을 갖춘 지반을 동결시킬 수 있는 온도조건(0.0°C, frost front)이 지반으로 침투하면서 토립자 사이에 존재하는 간극수의 상변화로 인해 1차적인 부피팽창이 발생한다(in-situ freezing). 이때 눈에 보이지 않

1) Ph.D Student, Department of Smart City & Construction Engineering, Korea University of Science & Technology

2) Research Specialist, Future Technology and Convergence Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

† Research Fellow, Future Technology and Convergence Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (Corresponding Author : jlee@kict.re.kr)

는 수많은 얇은 아이스렌즈들(invisible ice lenses)이 형성된다. 경계조건에 의해 동결온도의 침투가 한계점에 다르면 마지막 아이스렌즈에서 얼음분리(ice segregation)가 발생하게 된다. 모세관압이 작용하여 미동결수분이 마지막 아이스렌즈를 두껍게 형성하여 2차적인 부피팽창을 발생시킨다(Penner & Ueda, 1977). 동상에 의한 지반의 부피팽창은 얼음분리(ice segregation) 층의 존재에 의해 발생하며, 이 층은 순수한 얼음으로 구성된다(Konrad, 1994). 이러한 특징을 가진 동상은 동토지반의 대표적인 공학적 특성으로, 계절 동토지역(seasonal frost area)으로 분류되고 있는 우리나라에서도 영하의 온도가 지속되는 겨울철에 크고 작은 피해가 발생한다. 그럼에도 불구하고 아직까지 동상에 관한 실험적 연구가 미미한 실정이다. 최근 동상현상 분석을 위한 실내실험의 필요성이 증대되고 있으며 동상현상 분석을 위한 실내실험 장비인 투명 온도제어형 셀이 개발 및 검증되었고(Ryu et al., 2016), 이 동결셀을 활용해 동상민감성 판정 기준 신뢰성에 관한 연구가 수행되었다(Jin et al., 2017).

본 논문에서는 투명 온도제어형 셀을 활용하여 동상시험을 수행하였다. 이 과정에서 기존 해외 동상 실내시험법에서 발생할 수 있는 실험적 오차에 관한 연구결과를 발견하였으며, 이를 바탕으로 보다 간편한 방법으로 동상민감성 판정을 적용할 수 있는 방안을 제시하였다. 또한 시료의 크기가 동상에 미치는 영향에 대해 파악하기 위한 동상시험을 수행하였다.

2. 투명 온도제어형 셀

본 논문에서는 최근 개발된 투명 온도제어형 동결셀을 사용하였다. 시험장비의 개략도는 Fig. 1과 같으며, Table 1에 셀의 특성 및 시험법을 간략히 정리하였다. 내경 100.00mm의 동결셀은 투명한 아크릴 재질로, 2중관 형태로 구성되어 관과 관 사이에 부동액을 순환시킴으로써 외부로부터 단열되어 일방향 동결 구현이 가능하도록 하였다. 상부와 하부 페더스탈 역시 부동액을 순환시켜 시료의 상·하부 온도를 조절할 수 있도록 하였으며 상부, 하부, 그리고 주변부 온도를 개별적으로 조절할 수 있도록 각각의 냉각펌프에 연결하였다. 상·하부 페더스탈에 배수관 및 온도계(thermocouple)를 설치하여 배수조절 및 온도측정이 가능하도록 하였다. 본 장비를 활용하여 동상시험을 수행할 때는 동결토와 몰드 간 발생하는 동착강도(adfreeze bond strength)를 제거하기 위해 동결방향을 하부에서 상부로 설정하였다. 상부 페더스탈에 설치된 배수관으로 지속적으로 물이 공급되도록 하였고 유량계를 설치하여 시간에 따른 물 주입량을 측정하였다. 상부 페더스탈에 변위계(LVDT, Linear Voltage Displacement Transducer)를 설치하여 시간에 따른 동상발생을 측정하였다(Ryu et al., 2016; Jin et al., 2017; 2019). 본 장비는 주변부 온도 설정을 통해 일방향 동결이 가능토록 함으로써, 기존에 제시된 표준 시험법들(Croney & Jacobs, 1967; Jones, 1980; JGS 0172, 2003; ASTM D5918, 2013)에서 냉동챔버 설비로 인한 고비용의 문제점을 해결하였다. 또한 투명 몰드를 사용하여 동상발생 과정을 육안으로 관찰할 수 있다는 장점이 있다.

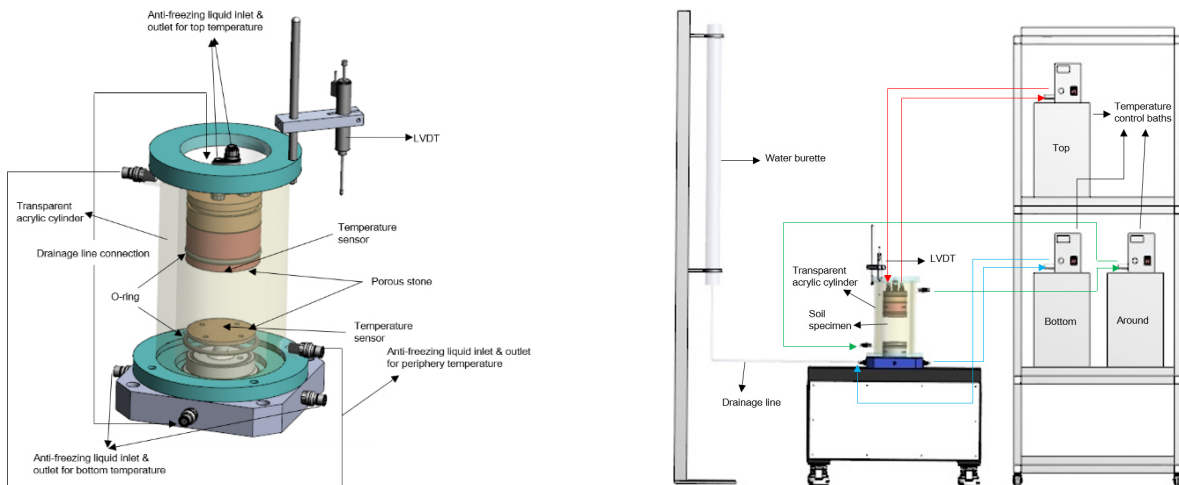


Fig. 1. Testing apparatus including the transparent temperature-controllable cell (Jin et al., 2019)

Table 1. Characteristics and freezing method using the transparent temperature-controllable cell

Inner diameter of mold	Material of mold	Freezing type	Freezing direction	Drainage condition
100.00 mm	Acrylic double tube system	Unidirectional freezing	Bottom → Top	Drained

3. 동상시험

본 장의 내용은 이미 발표된 논문(Jin et al., 2019)의 시험결과 중 하나를 발췌하여 시험결과에 대해 보다 상세하고 다른 방법으로 해석 및 접근하고 있다.

3.1 시료물성

인공토양(artificial soil)은 주문진표준사와 카올리나이트를 중량비로 9:1의 비율로 혼합한 흙으로, Fig. 2와 같은 입도분포를 보이고 있으며, 10.00%의 세립분을 함유하여 동상에 민감하다는 특징이 있다. Table 2에 나타낸 바와 같이 비중은 2.62이며 통일분류법(USCS)에 의해 실트질을 함유한 모래(SM)로 분류된다.

3.2 동상시험

3.2.1 동상시험 조건

본 동상시험의 경계조건은 Table 3에 나타낸 바와 같다. 건조상태의 인공토양을 높이 100.00mm, 건조단위중량 16.00 kN/m³에 맞춰 준비하고자 하였으며, 실제로 높이 102.98mm, 건조단위중량 15.86kN/m³의 시료가 준비되었고 포화 및 온

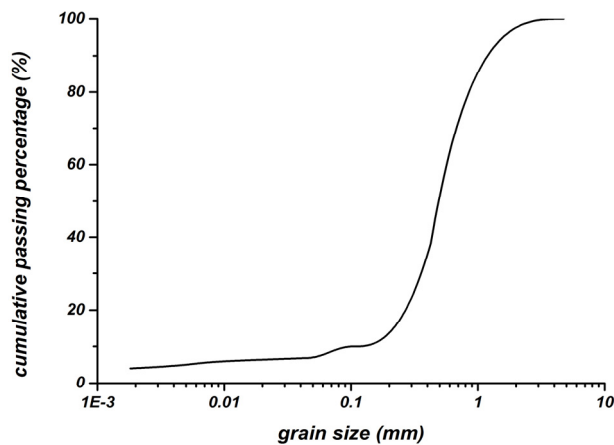


Fig. 2. Grain size distribution curve of artificial soil

Table 2. Engineering properties of Joomunjin standard sand

D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	Uniformity coefficient, C _u	Coefficient of curvature, C _c	Specific gravity, G _s	USCS
0.25	0.39	0.48	1.92	1.27	2.62	SM

Table 3. Boundary conditions for frost heave test (Jin et al., 2019)

Specimen height (mm)	Dry unit weight, γ_d (kN/m ³)	Temperature (°C)			O-ring
		Measured		Setting periphery	
		Top	Bottom		
102.98	15.86	2.7	-9.5	1.0	O

도속성(3.0°C) 단계를 거쳐 동상시험이 수행되었다. 1차원 동결을 위해 시험이 진행되는 동안 주변부 온도를 1.0°C로 설정하였고 하부 및 상부온도는 각각 -9.5°C, 2.7°C로 측정되었으며, 부동액으로 가득 찬 1.3kg(1.62kPa)의 상부 페더스탈 무게만이 상재하중으로 작용하고 있다(Jin et al., 2019).

3.2.2 동상시험 결과

동상시험에서 얻을 수 있는 일반적인 동상시험 결과 그래프는 Fig. 3과 같다. 상부 페더스탈에 설치된 변위측정 장치(LVDT)로부터 얻어지는 동상발생량(Fig. 3에서 total heave), 물 주입량을 높이 단위로 환산하여 나타내는 물 주입에 의한 부피팽창(Fig. 3에서 heave by water intake), 그리고 동상발생량에서 물 주입에 의한 부피팽창을 뺀 간극수 동결에 의한 부피팽창(Fig. 3에서 heave by pore water)이다. 위 값들 중 간극수 동결에 의한 부피팽창은 실험으로부터 얻어진 값으로 추가적인 검증이 필요하다. 높이가 상대적으로 작은 시료의 경우에 내부 온도 프로파일은 상·하부 페더스탈에 설치된 온도 측정 장치(thermocouple)로부터 측정된 온도를 일직선으로 연결하여 예측할 수 있다(Jin et al., 2019). 따라서 Fig. 4와 같은 시료 내부 온도 프로파일을 얻을 수 있으며, 이 시료의 동결 깊이(frozen depth)는 90.50mm라는 것

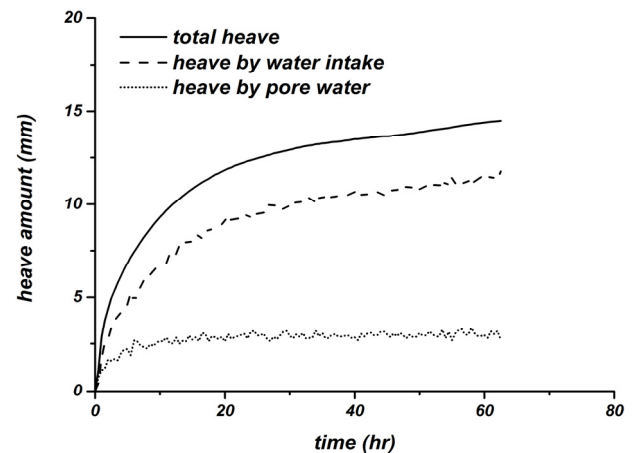


Fig. 3. Laboratory frost heave testing results including water intake (Jin et al., 2019)

Table 4. Calculated and measured heave by pore water (Jin et al., 2019)

Heave by pore water (mm)		Error (%)
Calculated value	Experimental value	
2.74	2.96	7.81

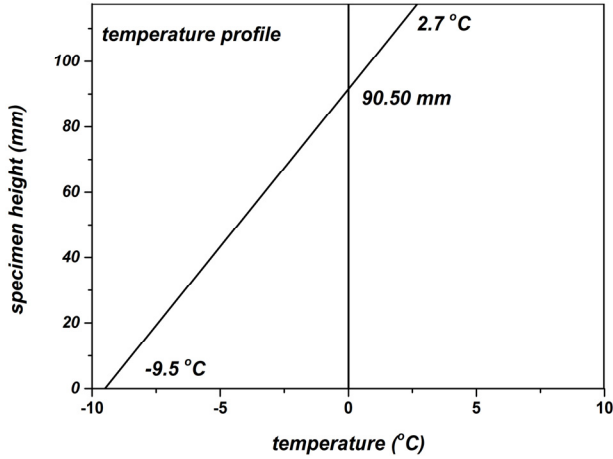


Fig. 4. Temperature profile of the tested artificial soil

을 확인할 수 있다. 동결 깊이까지 존재하는 간극수 상변화에 따른 9.00%의 부피팽창을 계산한 결과 2.74mm로 계산되었으며, 실험으로부터 얻어진 종료 시점에서의 간극수에 의한 부피팽창은 2.96mm다. 두 값의 오차는 7.81%로 실험적 오차는 미미하다고 판단되어 간극수 동결에 의한 부피팽창(Fig. 3에서 heave by pore water) 그래프의 타당성을 검증하였다(Table 4)(Jin et al., 2019).

3.3 물 주입속도

물 주입에 의한 부피팽창(Fig. 3에서 heave by water intake)은 동상현상 분석 및 동상민감성 판정에 있어 매우 중요한 의미를 가지는 인자다. Konrad & Morgenstern(1981)로부터 제안된 segregation potential 이론은 동상민감성을 판정하는 대표적인 기준 중 하나로, Eq. (1)과 같이 정의되고 있다.

$$SP = \frac{V}{gradT} \quad (1)$$

여기서 V 는 물 주입속도(10^{-6} mm/s), $gradT$ 는 frozen fringe 의 온도구배($^{\circ}$ C/cm)이다.

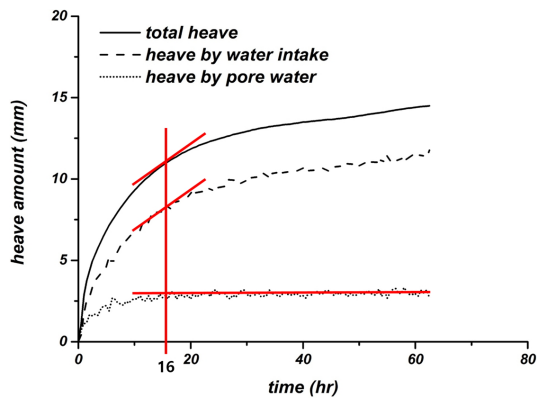
물 주입속도는 시간에 따라 달라지는 값으로 segregation potential 값을 활용해 동상민감성을 판정하기 위해서는 특정 시점에서의 값을 활용하여야 한다. segregation potential 이론에서는 시료 내부온도가 수렴하는 시점에서의 물 주입

속도를 기준값으로 사용하는 것으로 정의하고 있다(Konrad & Morgenstern, 1981). 서론에서 언급했던 바와 같이 동결 온도의 침투에 의한 1차 동결(in-situ freezing) 후 얼음분리(ice segregation)가 발생하는데 이 시점이 동결온도가 침투 한계에 도달하는 시점이다. 따라서 이때 부터 시료 내부온도가 수렴하는 것으로 판단되며, 이는 간극수 동결에 의한 부피팽창(Fig. 3에서 heave by pore water)이 수렴하는 시점과 동일한 시점으로 판단된다. 간극수 동결에 의한 부피팽창(Fig. 3에서 heave by pore water)이 수렴하는 시점을 먼저 육안으로 예측한 뒤(Fig. 5a), 정밀한 판단을 위해 시간에 따른 간극수 동결에 의한 부피팽창의 속도를 구하였으며 측정 장비의 노이즈로 인해 추세를 활용한 결과 16시간 부터는 기울기가 0에 가까운 곡선으로 나타나 간극수 동결에 의한 부피팽창의 수렴을 확인할 수 있다(Fig. 5b). 16시간 이후부터의 동상속도(frost heave rate) 및 물 주입속도(water intake rate)는 시험이 지속되는 시간 동안 유사한 거동을 나타내고 있으며, 특히 16시간일 때의 속도는 각각 18.25×10^{-6} mm/s, 18.67×10^{-6} mm/s로 유사한 값을 발생시켰다(Fig. 5c, 5d). 이 결과는 기존의 논문(Konrad, 1987)에서 두 값을 활용하여 계산한 segregation potential 값의 차이가 미미하다는 내용을 뒷받침하고 있다.

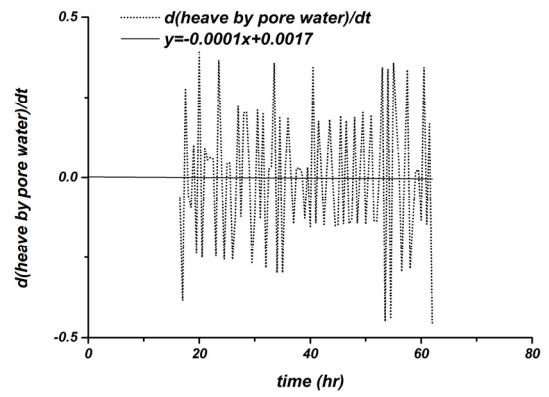
3.4 실험적 오차

물 주입에 의한 부피팽창(Fig. 3에서 heave by water intake)을 측정하기 위해서는 상부 페더스탈에 O-ring을 설치하여 물의 누수를 방지하여야 하며, 기존의 시험법들도 같은 방법으로 물 주입속도를 측정하고 있다(JGS 0172, 2003; ASTM D5918, 2013). O-ring과 몰드 내벽과의 마찰이 발생할 수 있을 것으로 판단하여 빈 몰드에 O-ring을 설치한 상부 페더스탈을 다양한 속도로 변위를 발생시켜 그때 발생하는 압력(마찰력)변화를 측정하였다(Fig. 6a). 그 결과 변위에 따른 압력변화가 Fig. 6b와 같이 발생하였고, 어떤 경향성을 나타내지는 않고 있다.

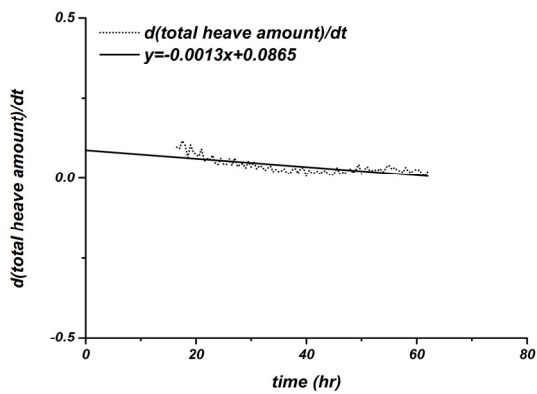
O-ring과 몰드 내벽 사이에서 발생한 마찰력이 동상발생량에 차이를 발생시키는지 확인하기 위해 Table 5와 같이 기존의 실험조건과 유사한 경계조건에서 O-ring만을 제거하여 추가적인 동상시험을 수행하였다. O-ring이 없는 경우에는 시간에 따른 동상발생량만이 측정 가능하며, 이 값을 O-ring이 있는 경우와 비교하여 Fig. 7a에 나타냈다. O-ring이 없는 경우 시험 종료시간(62hr)을 기준으로 35.12 mm의 동상이 발생했으며, 14.49mm가 발생한 O-ring이 있는 경우와 비교했을 때 약 2.5배만큼 더 발생하였다. 앞 절에서 확인한 바와 같이 인공토양의 간극수 동결에 의한 부피팽창이



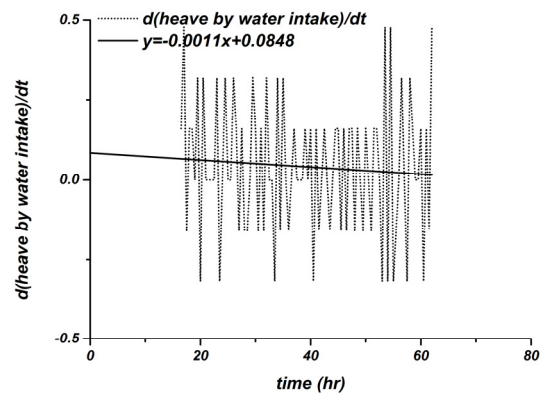
(a) Visual decision for thermal equilibrium



(b) Estimated and extrapolated heave rates by pore water after 16hour

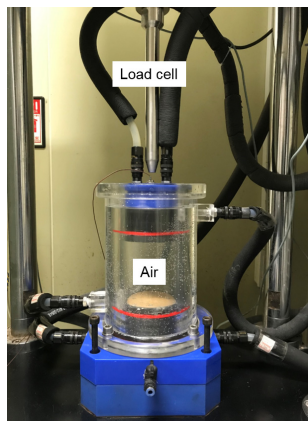


(c) Estimated and extrapolated heave rates by total heave

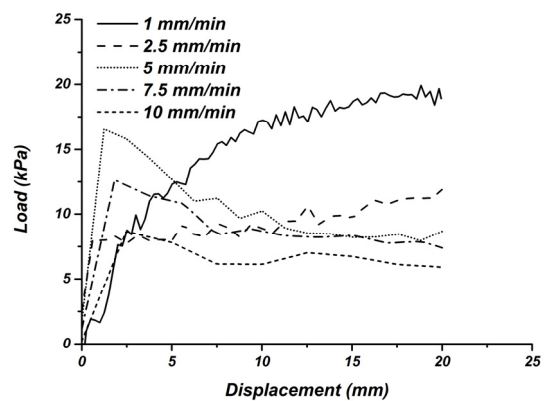


(d) Estimated and extrapolated heave rates by water intake

Fig. 5. Decision process for thermal equilibrium and heave rate



(a) Photo of test method



(b) Measurement of side friction

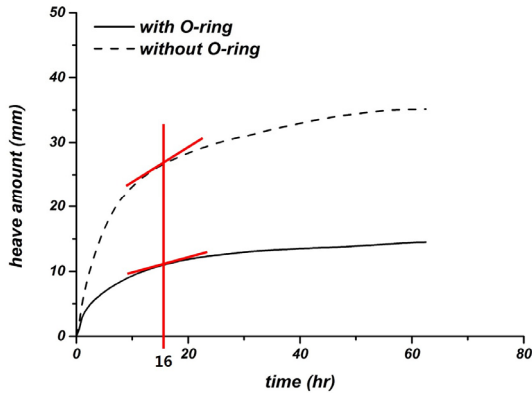
Fig. 6. Measurement of side friction without soil

Table 5. Boundary conditions for frost heave test without O-ring

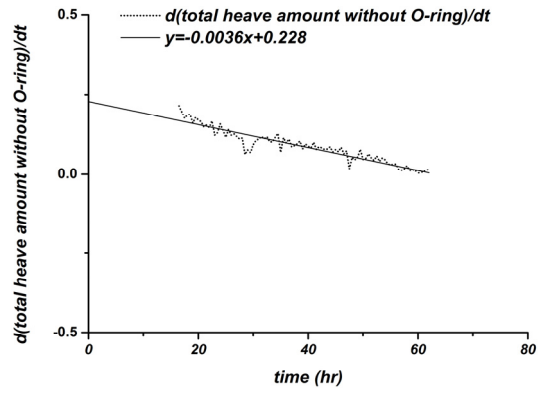
Specimen height (mm)	Dry unit weight, γ_d (kN/m ³)	Temperature (°C)			O-ring
		Measured		Setting periphery	
		Top	Bottom		
104.22	15.67	2.7	-9.0	1.0	X

수렴하는 시간은 16시간으로, 이 시점에서 O-ring이 없는 경우의 동상속도는 47.33×10^{-6} mm/s, O-ring이 있는 경우(18.25×10^{-6} mm/s)와 비교했을 때 약 2.6배만큼 빨랐다(Fig. 7b). 즉,

본 실험을 통해 동상발생이 O-ring에 의해 저하되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 동상민감성 판정 기준을 위해 사용하고 있는 물 주입속도를 구하기 위해서는 O-ring을 설치해



(a) Total heave curves with and without O-ring



(b) Estimated and extrapolated heave rates by total heave without O-ring

Fig. 7. Frost heave testing results with and without O-ring

야 하나, 이는 동상발생을 저해하기 때문에 O-ring을 설치했을 때의 물 주입속도를 활용해 동상민감성을 판정하는 것은 실험적으로 어려울 뿐만 아니라 상당한 오차를 포함한다.

4. 시료크기가 동상에 미치는 영향

4.1 시료물성

동상시험 시에 시료의 크기가 동상 발생에 미치는 영향을 파악하기 위해 추가적인 동상시험을 수행하였다. 이때 사용한 흙은 동상에 민감한 흙으로 알려진 노르웨이의 대표 실트인 Halden silt를 활용하였다. Halden silt의 입도분포곡선은 Fig. 8과 같으며 실험할 때는 0.05mm 이하의 흙만을 사용하였다. Table 6에 나타낸 바와 같이 Halden silt의 비중

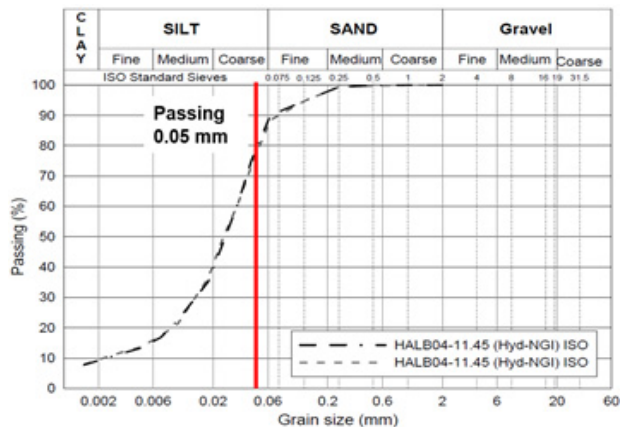


Fig. 8. Grain size distribution curve of Halden silt

Table 6. Engineering properties of Halden soil

D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	Uniformity coefficient, C _u	Coefficient of curvature, C _c	Specific gravity, G _s	USCS
0.002	0.01	0.032	16	1.56	2.65	SC

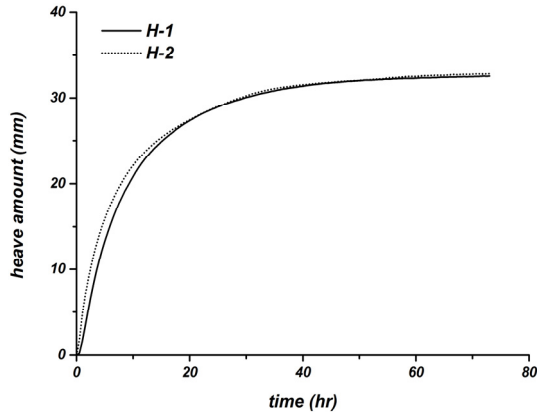
은 2.65이며 통일분류법(USCS)에 의해 점토질 모래(SC)로 분류된다.

4.2 시험조건 및 결과

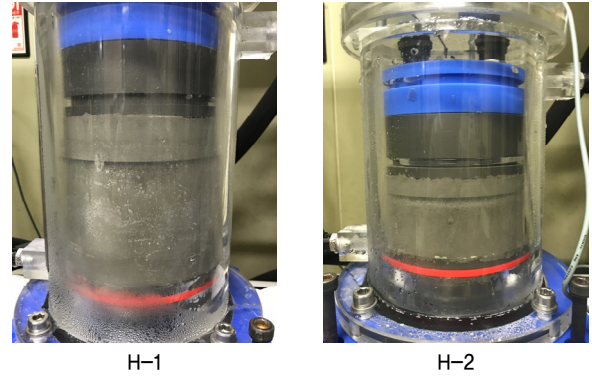
100.00mm, 30.00mm 높이의 건조시료를 건조단위중량 15.00kN/m³에 맞춰 준비하고자 하였으며, 실제로 측정된 높이는 97.94mm(건조단위중량 14.75kN/m³)와 29.07mm(건조단위중량 14.91kN/m³)의 2개 시료가 준비되었다. 인공토양의 시료준비과정과 같은 방법으로 시료 포화 및 내부온도설정을 실시하였다. 앞 장에서 발견한 실험적 오차를 방지하기 위해 상부 페더스탈의 O-ring은 제거하였으며, 시료높이와 같은 비율로(약 10:3) 초기시료 온도를 각각 3.0℃ 및 0.9℃로 설정한 뒤 24시간 후에 동결을 시작하였다. 동결시험은 유사한 온도구배로 수행하였으며, 각각 0.240℃/mm(상부온도 2.7℃, 하부온도 -20.8℃)와 0.255℃/mm(상부온도 0.7℃, 하부온도 -6.7℃)로 온도구배를 유지시켰다. 동결깊이(frozen depth)는 상·하부 페더스탈에 설치된 온도 측정 장치(thermocouple)로부터 측정된 온도를 일직선으로 연결하여 계산하였으며(Jin et al., 2019), 하부로부터 각각 86.69mm(초기 시료의 88.49%) 및 26.32mm(초기 시료의 90.54%)까지 동결되었다(Table 7). 시간에 따른 동상량은 Fig. 9a와 같이 나타났다. 실험적 오차 발생을 허용하지 않기 위해 O-ring을 제거했기 때문에 동상발생량만을 실험을 통해 직접적으로 얻을 수 있으며, 그 결과 온도구배가 유사할 때 시료 높이와는 상관없이 동상속도 및 동상발생량이 유사한 거동을 보였다. 실험종료 후의 시료의 상태는 Fig. 9b와 같다.

Table 7. Boundary conditions for frost heave test of Halden silt

No.	Initial height (mm)	Temperature gradient (°C/mm)	Temperature (°C)			Dry unit weight, γ_d (kN/m ³)	Frozen depth (mm)
			Measured		Temperature conditioning		
			Top	Bottom			
H-1	97.94	0.240	2.7	-20.8	3.0	14.75	86.69
H-2	29.07	0.255	0.7	-6.7	0.9	14.91	26.32



(a) Frost heave curves of Halden silt for H-1 and H-2



(b) Photos after freezing test

Fig. 9. Frost heave testing results with different specimen heights

4.3 고찰

동상특성을 이야기 할 때 동상비(frost heave ratio, ξ)라는 개념이 사용되고 있으며 일본과 러시아에서는 Eq. (2)와 같이 정의되고 있다(JGS 0172, 2003; GOST 28622, 2012).

$$\begin{aligned}
 & \text{Frost heave ratio}(\xi) \\
 &= \frac{\text{frost heave amount}}{\text{initial specimen height (or frozen depth)}} \quad (2)
 \end{aligned}$$

계산된 동상비는 분모의 초기 시료 높이나 동결 깊이(frozen depth)와는 상관없이 시료의 크기에 따라 다르게 관측되었다(Table 8). 즉, 동일한 시료임에도 불구하고 실내실험을 통해 얻어진 동상비는 전혀 다른 값을 나타내기에 동상 민감성을 판정하기 위해서는 시료의 크기에 대한 정의가 반드시 선행되어야 한다.

5. 결론

본 논문에서는 새롭게 개발된 투명 온도제어형 셀을 활용하여 기존의 시험법에서 발생할 수 있는 실험적인 오차의 검증에 관한 연구를 수행하였다. 또한 실험적 오차를 제거한 후 시료크기라는 경계조건이 동상발생에 미치는 영향을 파악하고자 했으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 동상에 민감한 인공토양을 조성하여 동상시험을 수행하였고 그 결과로 동상발생량(total heave)과 물 주입에 의한 부피팽창(heave by water intake)을 직접적으로 얻을 수 있었다. 동상시험 결과의 신뢰성을 확보하기 위해서는 실험에 사용되는 시료의 상·하부 페더스탈에 설치된 온도 측정 장치(thermocouple)로부터 측정된 온도를 일직선으로 연결하여 간극수 동결에 의한 부피팽창(heave by pore water)을 계산하고, 이렇게 계산된 결과

Table 8. Frost heave ratio (ξ)

No.	Initial height (mm)	Frozen depth (mm)	Final frost heave amount (mm, t=72hr)	Frost heave ratio (ξ)	
				$\frac{\text{frost heave amount}}{\text{initial specimen height}}$	$\frac{\text{frost heave amount}}{\text{frozen depth}}$
				(JGS 0172, 2003)	(GOST 28622, 2012)
H-1	97.94	86.69	32.55	0.332	0.376
H-2	29.07	26.32	32.80	1.128	1.247

를 동상발생량(total heave)과 물 주입에 의한 부피팽창(heave by water intake)의 차이 값과 비교하여 실험적 오차 검증이 가능하다.

- (2) 실험결과로부터 간극수 동결에 의한 부피팽창 값이 수렴하는 시점(시료내부 온도분포가 수렴하는 시점)이 1차적인 동상(in-situ freezing)의 종료이고 2차적인 부피팽창 원인인 얼음분리(ice segregation)가 시작되는 시점으로 간주될 수 있음을 발견하였다. 이 시점에서 동상속도(frost heave rate) 및 물 주입속도(water intake rate)는 거의 유사하게 나타났으며, 실험 종료까지 일정한 값으로 유지되는 것을 발견하였다. 따라서 동상민감성 판정 기준의 인자로 사용되는 물 주입속도(water intake rate)는 동상속도(frost heave rate)와 치환 가능하다.
- (3) 동상민감성 판정 기준에 활용되는 인자인 물 주입속도(water intake rate)를 측정하기 위해 상부 페더스탈에 O-ring을 설치하였으며, 이는 기존의 해외 시험법에서도(JGS 0172, 2003; ASTM D5918, 2013) 같은 방법으로 측정하고 있다. 그러나 O-ring을 제거한 동상시험 결과를 O-ring을 설치한 결과와 비교하였을 때, O-ring이 몰드 내벽과의 마찰을 발생시켜 동상을 방해한다는 것을 발견하였다. 따라서 상대적으로 실험적 측정이 어려운 물 주입속도(water intake rate) 대신 동상발생량(total heave)을 토대로 계산이 가능한 동상속도(frost heave rate)를 활용하여 동상민감성을 판정하는 것이 더욱 신뢰성 높은 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 동상을 저해하는 요인(O-ring)을 제거한 뒤, 시료의 크기가 동상에 미치는 영향을 파악하고자 97.94mm, 29.07mm의 시료를 준비하였다. 시료 크기를 제외한 나머지 경계조건, 즉, 상재하중, 건조단위중량, 그리고 온도구배는 유사하게 유지하여 동상시험을 수행하였으며, 그 결과 시료의 크기와는 상관없이 동상속도 및 동상발생량이 유사한 동상 거동을 나타냈다. 이를 통해 시료의 크기는 동상시험에 있어 영향을 미치지 않는 인자로 판단되었다. 동상민감성 판정 기준 중 하나인 동상비(frost heave ratio, ξ)를 활용하기 위해서는 시료의 크기에 대한 정의가 반드시 선행되어야 하며, 시료의 크기에 영향을 받지 않는 동상속도(JGS 0172, 2003; ASTM D5918, 2013) 및 동상발생량(Croney & Jacobs, 1967; Jones, 1980)으로 동상민감성을 판정하는 것이 더욱 신뢰할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “극한지 동토 지반구조물 설계를 위한 열-수리-역학 복합해석모델 개발(20180340)” 및 “극한건설 환경 구현 인프라 및 TRL6 이상급 극한건설 핵심기술 개발(20180010)” 과제의 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

References

1. ASTM D5918 (2013), Standard Test Methods for Frost Heave and Thaw Weakening Susceptibility of Soils, American Society for Testing Materials International, West Conshohocken, pp. 1~13.
2. Beskow, G. (1947), Soil freezing and frost heaving with special application to roads and rail roads, Technological Institute, Northwestern Univ, pp. 1~145.
3. Croney, D. and Jacobs, J. C. (1967), The frost susceptibility of soils and road materials, No. LR 90, Road Research Laboratory, Crowthorne, pp. 1~68.
4. GOST 28622 (2012), Standard test methods for frost heave susceptibility of soils, Standard Inform, Moscow, pp. 1~12.
5. JGS 0172 (2003), Test Method for Frost Susceptibility of Soils, Japan Geotechnical Society, Tokyo, pp. 1~6.
6. Jin, H. W., Ryu, B. H. and Lee J. (2017), Evaluation on the reliability of frost susceptibility criteria, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 18, No. 12, pp. 37~45.
7. Jin, H. W., Ryu, B. H. and Lee J. (2019), Simple frost heave testing method using a temperature-controllable cell, Cold Regions Science and Technology, Vol. 157, pp. 119~132.
8. Jones, R. H. (1980), Frost heave of roads, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, Vol. 13, pp. 77~86.
9. Konrad, J. M. (1987), Procedure for determining the segregational potential of freezing soils, Geotechnical Testing Journal, Vol. 10, No. 2, pp. 51~58.
10. Konrad, J. M. (1994), Frost heave in soils: concepts and engineering, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, pp. 223~245.
11. Konrad, J. M. and Morgenstern, N. R. (1980), A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 17, pp. 473~486.
12. Konrad, J. M. and Morgenstern, N. R. (1981), The segregation potential of a freezing soil, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 18, pp. 482~491.
13. Lackner, R., Amon, A. and Lager, H. (2005), Artificial ground freezing of fully saturated soil, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 131, No. 2, pp. 211~220.
14. Penner, E. and Ueda, T. (1977), The dependence of frost heaving on load application, Proceedings of an International Symposium on Frost Action in Soils, Vol. 1, pp. 92~101.
15. Ryu, B. H., Jin, H. W. and Lee J. (2016), Experimental study of frost heave using temperature controlled triaxial cell, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 17, No. 6, pp. 22~31.
16. Taber, S. (1929), Frost heaving, The Journal of Geology, Vol. 37, No. 5, pp. 428~461.