

일본 동상민감성 판정 기준에 관한 고찰

Experimental Evaluation on JGS Frost Susceptibility Testing Method

이 장 근[†] · 진 현 우¹⁾ · 공 정²⁾

Janguen Lee · Hyunwoo Jin · Zheng Gong

Received: May 21st, 2024; Revised: May 22nd, 2024; Accepted: June 3rd, 2024

ABSTRACT : Frost heave, a significant engineering aspect of frozen ground, leads to various damages in Korea during the winter. Both the United States and Japan, encompassing regions with frozen ground, have actively researched frost heave and possess standardized experimental methods. Particularly, the Japanese Geotechnical Society (JGS) has introduced a frost heave standard testing method, offering the advantage of relatively simple specimen preparation and experimental procedures. However, issues persist regarding the ambiguous engineering interpretation of frost heave test results and the lack of clear criteria for frost heave susceptibility assessment. This paper presents laboratory testing results following the JGS testing method on sand and silt mixtures using a triaxial temperature-controllable cell, and thoroughly analyzes the frost heave rate calculation process. Furthermore, it evaluates the applicability of frost heave susceptibility criteria proposed in the United States to frost heave rates based on the JGS testing method.

Keywords : Frozen ground, Frost heave, Frost susceptibility criteria, Frost heave test

요 지 : 동상은 동토지반의 중요한 공학적 특성 중 하나로, 겨울철에 국내에서는 동상으로 인한 다양한 피해가 발생한다. 미국과 일본은 동토지역을 포함하고 있어 동상에 대한 연구가 활발히 이루어졌으며, 표준화된 실험법을 보유하고 있다. 특히, 일본 동상 실험법은 시료 준비와 실험 과정이 비교적 간단하다는 장점이 있다. 그러나 동상 실험 결과의 공학적 해석이 모호하며, 동상 민감성 판정 기준이 제시되지 않아 실제 활용에 문제가 있다. 본 논문에서는 모래-실트 혼합토를 대상으로 일본 동상 실험법에 따라 온도제어형 셀을 활용한 실내실험을 수행하고, 동상속도 산정 과정을 면밀히 분석하였다. 더불어, 일본 동상 실험법으로 산정된 동상속도가 미국에서 제시한 동상 민감성 판정 기준에 적용 가능한지 검토하였다.

주요어 : 동토지반, 동상, 동상민감성, 동상민감성 판정 기준, 동상 실험

1. 서 론

동상은 동토지반의 가장 대표적인 공학적 특성으로 계절 동토지역(seasonal frozen area)으로 분류되고 있는 우리나라에서도 영하의 온도가 지속되는 겨울철에 크고 작은 피해가 발생한다. 동상은 영하의 온도가 지속될 때 0°C 인근의 비동결 지반층(frozen fringe)에 모세관 현상으로 유입되는 간극수가 얼음으로 상변화(phase change)하며 성장(ice segregation)하는 부피 팽창을 의미한다(Taber, 1930). 국내에서는 지중매설 파이프라인과 상수관의 동상으로 인한 피해에 대한 연구를 비롯하여(Song & Kim, 2004; Shin et al., 2014), 동상 팽창률을 평가하는 수치해석 및 실험적 연구가 다수 수행되었다(Choi, 2011; Kang et al., 2013; Shin et al., 2009; 2013; Jin et al., 2019; Lee et al., 2023b). 그럼에도 불구하고 국내에서는 아직까지 동상현상에 대한 표준화된 동상민감성 실험법

과 판정 기법은 존재하지 않는 실정이다.

동상으로 인한 구조물의 피해를 방지하고자 세계 100여 개의 국가에서는 토양의 동상민감성을 판정하는 실내실험법에 대해 연구를 진행하였다. 미국과 일본은 동상 실험 방법을 표준화하여 제시하고 있으며, 일본 실험법(JGS 0172, 2009)은 미국 실험법(ASTM D5918, 2013)에 비해 점진적 온도 강하가 가능한 고비용의 냉동펌프가 필요하다는 단점을 제외하고 시료 준비 및 실험 방법에 있어 비교적 간단한 장점을 보유하고 있다. 다만, 동상 실험의 결과를 분석함에 있어 공학적인 해석이 부족하고 논리가 모호한 부분이 여전히 존재하고 있으며, 동상 민감성 판정기준에 대해서는 명확히 제시되어 있지 않아 활용에 제약이 따른다.

본 논문에서는 국내에서 개발한 온도제어형 셀을 이용하여 일본 실험법(JGS)에 따른 실내 동상 실험을 수행하고, 동상 실험 결과를 토대로 JGS에서 제시한 동상 속도(frost heave

† Research Fellow, Department of Future & Smart Construction Engineering, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), University of Science & Technology (Corresponding Author : jlee@kict.re.kr)

1) Senior Researcher, Department of Future & Smart Construction Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT)

2) PhD Candidate, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), University of Science & Technology

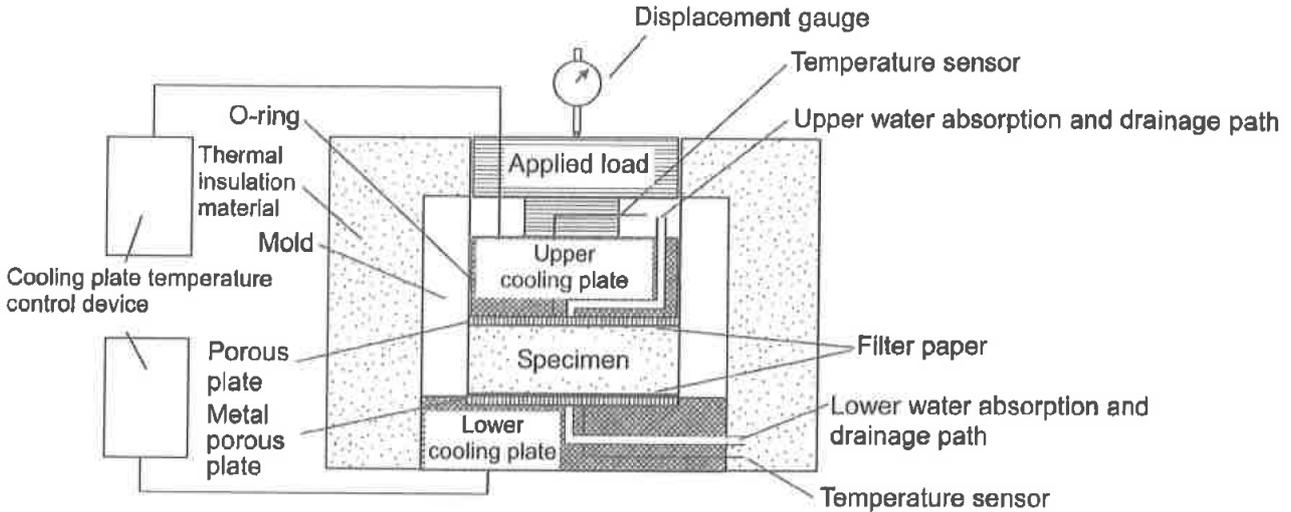


Fig. 1. Schematic diagram of JGS frost heave testing apparatus (JGS 0172, 2009)

rate) 산정 기법을 면밀히 분석하였다. 이를 기반으로 명확한 동상 민감성 판정에 필요한 동상 속도 산정 방안을 제시하고 국제적으로 널리 통용되는 미국 동상민감성 판정 기준의 적용성에 대해서도 추가로 검토하였다.

2. 일본 동상민감성 판정 실내실험법 (JGS 0172)

JGS 실험법에 따르면 시료(D=100mm, H=50mm)는 10mm 이상 두께의 내부가 매끈한 아크릴 몰드에 준비한다. 아크릴 몰드는 상부 온도제어용 판을 수용 가능하도록 충분한 높이로 제작한다. 상하부에서 배수가 가능하도록 다공성 판을 설치한다. 상부 온도제어용 판에 고무 O-ring을 설치하여 수분의 이동은 상부의 배수 시스템을 통해서만 가능하도록 제작한다. 온도센서(±0.1°C)는 상부와 하부에 각각 설치하고 온도변화를 관측한다. 상재압력은 10kPa을 재하하고 상하부 배수 조건에서 시료에 유출입 되는 유량을 측정하고 포화도 80% 이상을 확인한다. 준비가 완료된 시료는 상하부 온도조절 장치를 이용하여 0~1°C 범위에서 6 시간 이상 내부온도가 균일해 지도록 안정화시킨다. 시료 내부온도 안정화가 완료되면, 하부 냉각펌프의 온도를 순간적으로 급격히 낮추어 하부 빙결(ice nucleus)을 생성 시킨 후 다시 0°C 인근으로 10분 이내 상승시키고 본격적인 동상 실험을 진행한다. 이 때 온도 상승으로 인한 하부 빙결이 녹지 않도록 주의한다. 동상 실험은 하부 온도를 지속적으로 낮추며 최종적으로 시료 전체가 동결이 완료될 때까지 실험을 수행한다. 실험을 수행하며 유입되는 물의 양을 관측한다.

실험이 완료된 후, 시료 내부의 동결 속도(freezing rate, U)

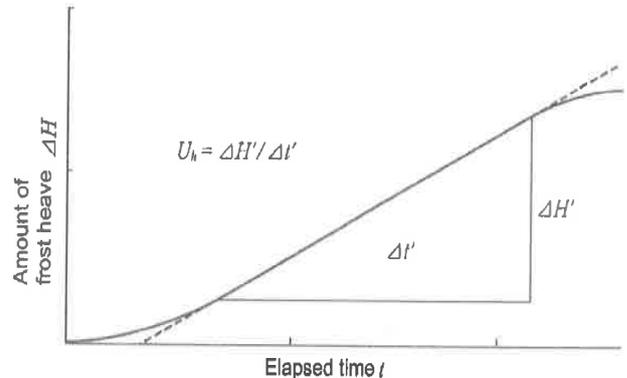


Fig. 2. Example to estimate frost heave rate (U_k) with frost heave curve

가 1~2mm/h 이내로 동결되는지 확인한다. 동결 속도는 Eq. (1)을 이용하여 구한다.

$$U = \frac{10H_0}{t_f} \quad (1)$$

여기서, H_0 은 초기 시료 높이(cm), t_f 는 시료가 완전히 동결되는 시간(h)을 의미한다. JGS에서는 최초 하부 온도를 0.1°C/h로 낮추며 동상실험을 진행하도록 권장하고 있으며, 동결 속도가 1~2mm/h 범위를 벗어날 경우에는 하부의 온도 강하 속도를 조정하여 다시 실험을 수행하도록 제시하고 있다. 실험이 완료되면 시간에 따른 유입된 물의 양을 이용하여 동상 속도를 계산하고, 추가적으로 동상비(frost heave ratio)도 계산한다. 동상 속도 산정 시, Fig. 2에 나타난 바와 같이 초기 동상 구간을 제외하고 최대 동상 속도를 대푯값으로 제시한다.

3. 동상 실내실험

3.1 시료준비

본 연구에서는 동상 민감도를 조절하기 위해 주문진 표준사(Joomunjin sand)와 동상에 가장 민감한 실트(silt)를 중량비로 혼합한 시료를 사용하였다. 실험에 사용된 실트는 현무암을 파쇄하여 #200(0.075mm) 통과한 세립분으로 준비하였다. Casagrande(1931)는 물 공급이 충분한 조건에서 0.02mm보다 작은 입자가 10% 이상 함유된 경우 동상에 민감하다고 간주하였다. 따라서, 실트 중량비 10%를 기준으로 20%와 30% 함량에 따른 동상 속도의 변화(동상 민감도)를 관측하고자 시료를 준비하였다.

3.2 온도제어형 셀을 이용한 동상 실험

동상 실험에 사용된 동결셀은 투명 아크릴 재질의 이중관으로 구성되어 있으며, 관과 관 사이에 냉각액을 순환시켜 냉동챔버 내에서 실험하는 효과를 간편하게 구현하고 있다. 상부, 하부, 주변부 온도를 독립적으로 조절할 수 있도록 각각 냉각펌프를 연결하여 사용하고 있다(Jin et al., 2022). 시료 동결 시 실시간으로 동상량을 측정하기 위해 상부 페데스탈 위에 변위계(Linear Voltage Displacement Transducer, $\pm 0.0001\text{mm}$)를 설치하였고, 몰드 내벽에는 5mm 간격으로 총 32개의 온도센서($\pm 0.5^\circ\text{C}$)를 포함하고 있는 온도센서 모듈을 설치하였다. 시료 크기는 직경($D=100\text{mm}$) 대 높이 비가 약 2:1을 유지하도록 높이는 약 50mm가 되도록 준비하였다(Fig. 3). 시료 상부는 상시 물 공급이 원활하도록 증류수로

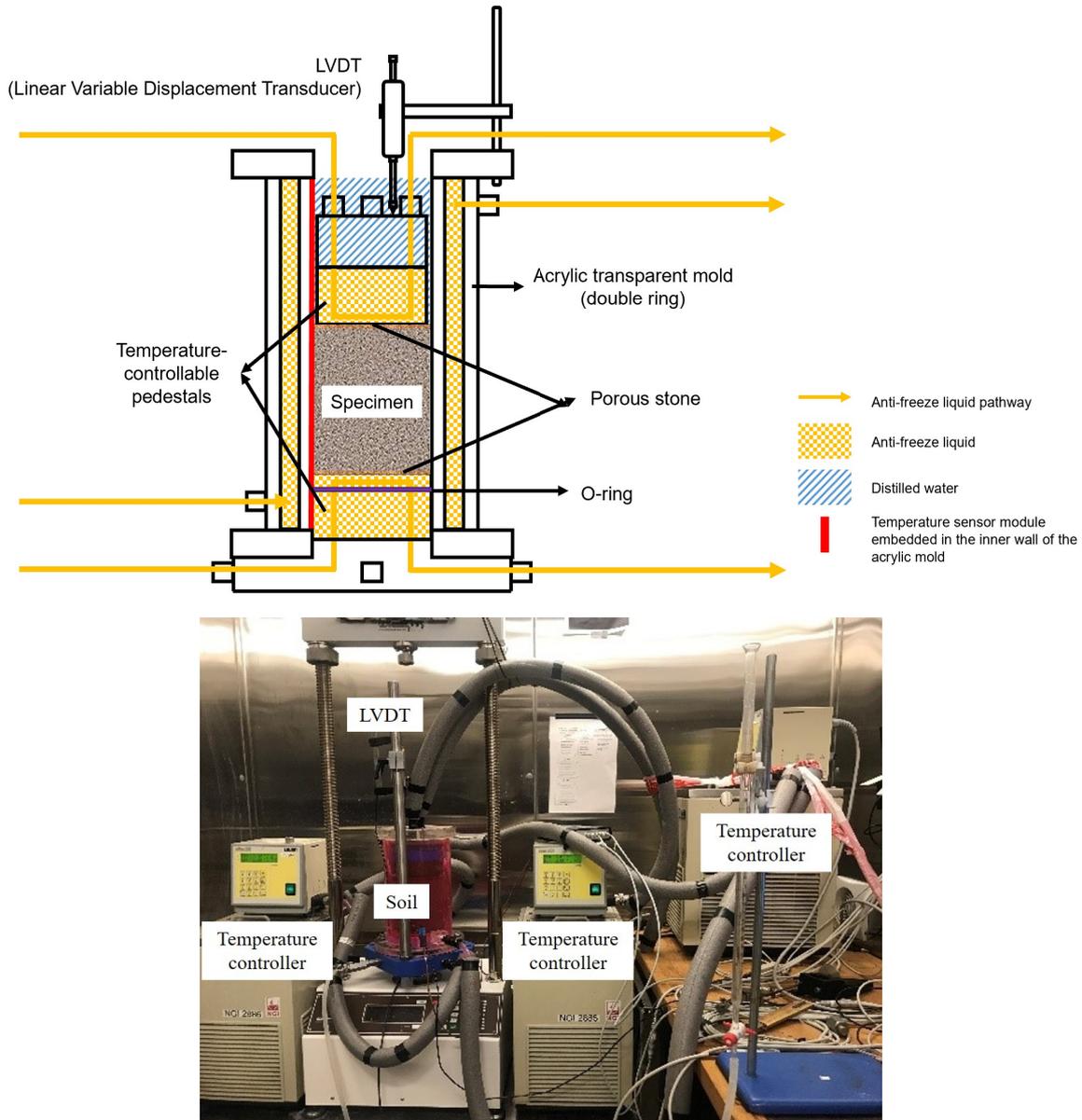


Fig. 3. Schematic diagram and photograph of a temperature controllable cell (Jin et al., 2022)

Table 1. Specimen preparation and initial conditions

	Weight fraction (%)		Initial height (mm)	Initial porosity	Dry Unit Weight (kN/m ³)	Initial Temp. (°C)
	sand	silt				
CASE I	90	10	51.9	0.380	15.88	0.69
CASE II	80	20	47.5	0.346	17.36	0.59
CASE III	70	30	44.8	0.310	18.40	0.61

채워 시료가 잠겨 있도록 조치하여 동상 과정에서 충분한 물 공급이 가능하다.

시료 준비가 완료되면 JGS에 따라 상하부 냉각펌프를 이용하여 초기 온도를 0~1°C로 6시간 이상 유지하며 내부 온도가 상하부 초기 온도조건과 유사하게 균질해지도록 유지하였다. 냉매 순환을 포함한 상부 가압관은 약 1.62kPa의 상재압력으로 작용하여 JGS에서 제시한 10kPa보다 상당히 미미하다. 상재압력은 동상 발현을 방해(Konrad, 1994)하므로 동상 민감성 판정을 위해서는 가급적 적은 상재압력으로 실험을 수행하였다. 미국과 달리 JGS는 외기 온도 조건에 대해서는 명확히 제시되어 있지 않다. 본 연구에서는 외기 온도의 영향을 최소화 하고자 주변부 온도는 1°C로 유지하며 시료 내부 온도를 조절하였다. 내부 온도 조절이 완료되면, 하부 냉각펌프를 가동시켜 영하 -2°C로 급격히 냉각시켜 변위계를 통해 물-얼음 상변화에 따른 부피 팽창으로 빙결(ice nucleus) 생성을 확인한 후 다시 0°C 인근으로 10분 이내 상승시키고 하부온도를 지속적으로 낮추며 동상 실험을 수행하였다.

4. 결과 분석

4.1 동상 속도 산정

Fig. 4는 동상 실험 중 변위계를 통해 관측된 시료의 부피 팽창(동상) 결과를 보여주고 있다. JGS에서는 동상량을 유입

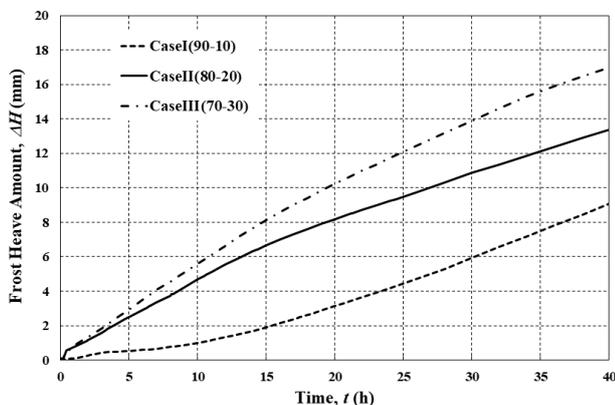
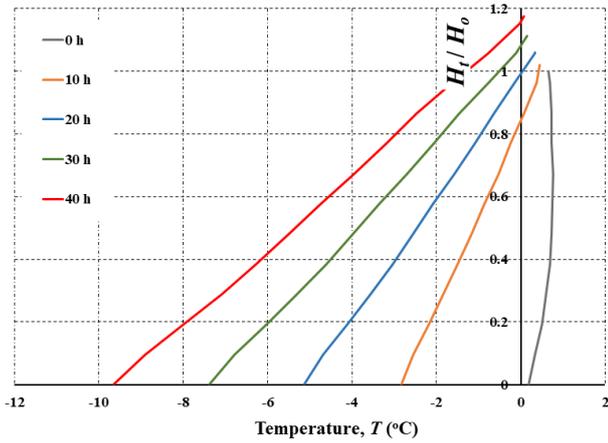


Fig. 4. Measured frost heave based on JGS 0172

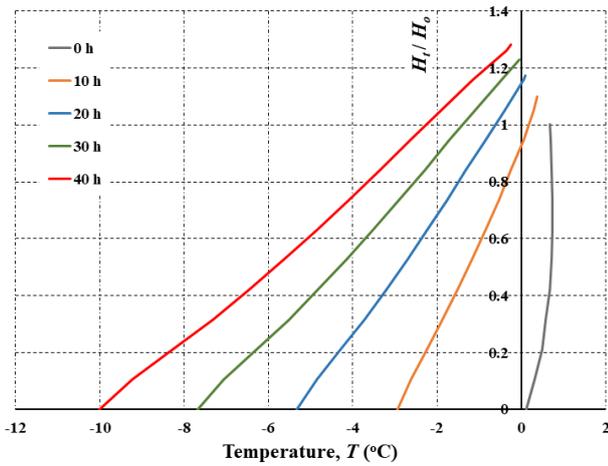
되는 물의 양으로 제시하고 있다. 기존 연구에 따르면, 유입되는 물의 양을 관측하기 보다는 동상 곡선을 이용하여 추정하는 방식이 실험적 오차를 줄이고 동상 거동을 분석하기에 적절하다(Konrad, 1987; Jin et al., 2019; Lee et al., 2023a). 실트 함량이 증가할수록 동상량과 초기 동상 속도는 증가하지만, 시간이 경과함에 따라 동상률은 감소하다 일정하게 수렴하고 있는 경향이 있다. 실트 함량이 10%인 경우에만 시간이 경과함에도 불구하고 동상 속도가 점진적으로 증가하고 있다.

Fig. 5는 시료 내부에서 관측된 시간에 따른 온도변화를 보여주고 있다. 동결 속도(freezing rate, U)는 시료 내부의 온도가 0°C가 되는 동결면(frozen front)의 이동속도로 시료 동결이 유발되는 하부에서 상부로 초기에 빠르게 이동하지만, 점차 상부에 가까워지며 이동속도가 줄어들고 있다. 상대적으로 동상이 많이 발생하는 20%와 30%의 실트 함량을 가진 혼합토는 동결면이 시료 상부에 가까워지며 동결 속도와 동상 속도가 함께 감소한다(Fig. 5(b) & 5(c)). 실트 함량 10%의 혼합토는 동결 속도가 감소함에도 불구하고 동상 속도는 증가하고 있다(Fig. 5(a)). JGS에서는 동상 실험의 완료 조건을 시료 전체가 동결이 완료되는 시점으로 정의하고 있으며, 시료 동결이 완료되는 시점은 유입되는 물의 양이 미미(동상 변화가 미미)하거나 상부 온도가 0°C 이하가 될 경우로 제시하고 있다. Fig. 4는 보는 바와 같이 동상은 지속적으로 발생하고 있어 동상 변화로 시료 동결이 완료되는 시점을 판별하기에는 어려움이 있다. 시료 내부 온도 관측 결과(Fig. 5)에 따르면, 실트 함량 10% 시료만 약 40시간에 동결이 완료되고, 실트함량 20%와 30% 혼합토는 30시간이 경과하면 시료 전체가 동결되는 것으로 확인되었다. Eq. (1)을 이용하여 계산한 동결 속도는 1.30mm/h(실트 10%), 1.58mm/h(실트 20%), 1.49mm/h(실트 30%)로 JGS에서 제시한 동결 속도 1~2mm/h를 만족하고 있다.

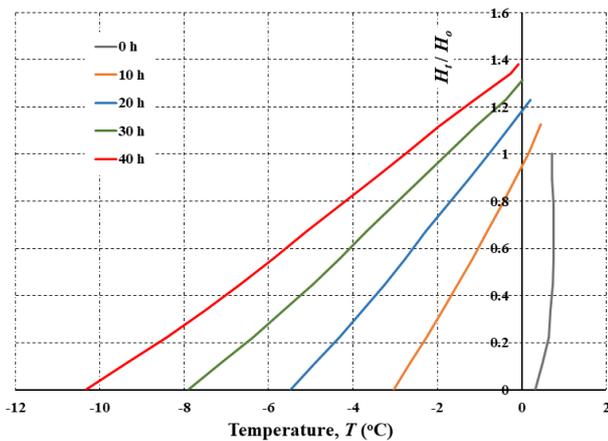
본 연구에서는 시료 내부의 온도변화 관측 결과를 이용하여 시간에 따른 시료의 동결 높이를 추정하고, 이를 기반으로 시간에 따른 동결 속도를 산출하였다(Fig. 6). Fig. 6에서 보는 바와 같이 동결 속도는 초기에 빠르고 점진적으로 줄어드는 경향을 볼 수 있다. 이러한 현상은 하부의 온도경계조건과 내부 온도차에 기인한다. 초기 하부 온도 강하에 따른



(a) Case I (90-10)



(b) Case II (80-20)



(c) Case III (70-30)

Fig. 5. Measured temperature profiles during frost heave tests

시료 내부의 온도구배는 급격히 상승하여 열 흐름이 가속되지만, 시간이 경과함에 따라 시료 내부의 온도구배는 감소하여 결과적으로 열 흐름이 느려진다. 하부 냉각 속도가 충분히 빠르면 동결 속도도 빨라지지만 JGS에서 제시하고 있는 동결 속도(1~2mm/h)보다 빠르게 동결되어 동상 재현에 문제가 있다. 동결 속도는 비정상 열흐름(transient heat flow)

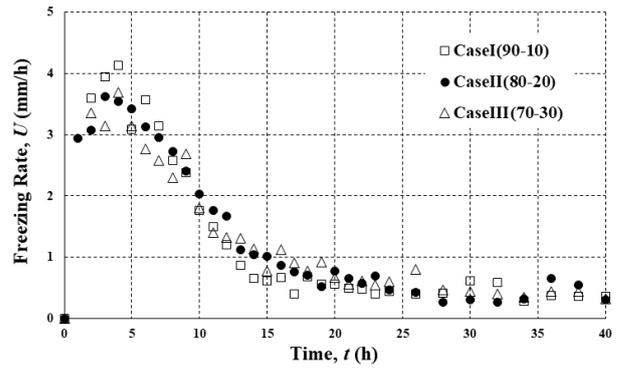


Fig. 6. Calculated freezing rate based on measured temperature profiles

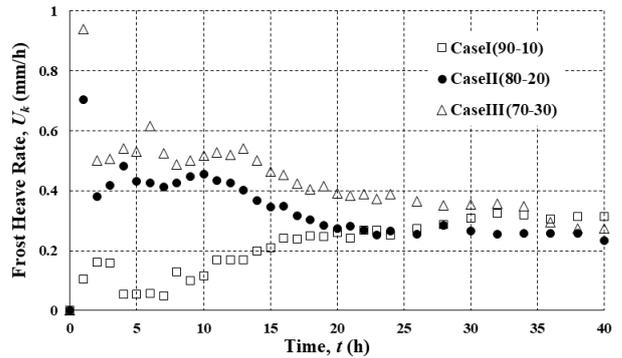


Fig. 7. Calculated frost heave rate based on measured frost heave curves

으로 1~2mm/h의 동결 속도는 특정 시간범위에서만 발생하고 있다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 실트 함량에 상관없이 약 10~15시간에 1~2mm/h의 동결 속도가 발생하는 것으로 확인되었다.

Fig. 7은 실험에서 관측된 동상 곡선(Fig. 4)을 이용하여 동상 속도를 시간에 따라 계산한 결과를 보여 주고 있다. 미국 ASTM 동상 판정법은 동상 실험이 진행되는 8시간 인 근에서의 동상 속도로 동상 민감성을 판정하고 있다. JGS는 특정 시간 범위를 제시하지 않고 시료 전체가 동결이 완료되면, 동상 판정을 위해 동상 곡선에서 초기 구간을 제외한 기울기가 최대가 되는 동상 속도를 대푯값으로 정의하고 있다. 실트 함량이 20%와 30%인 혼합토의 경우 최대 동상 속도는 15시간 이내에서 발생하고 실트 함량이 10%인 혼합토는 15시간 이후에 발생하고 있다(Fig. 7). 실트 함량이 높은 혼합토는 동결 속도가 1~2mm/h가 발현되는 구간인 약 10~15시간으로 최대 동상 속도가 발현되는 시간은 JGS에서 제시한 동상 속도와 발현되는 시점과 유사하다. 그러나 실트 함량 10%의 혼합토의 경우, 동결 속도 발현 시간 구간과 JGS에서 제시한 최대 동상 속도 발현 시간 구간이 서로 상이하다.

Table 2. Frost susceptibility judgement according to ASTM D5918

ASTM D5918 (2013)		JGS 0172 (frost heave rate, mm/day)	Frost heave rate based on 1~2mm/h freezing rate (frost heave rate, mm/day)
Classification	Heave rate (mm/day)		
Negligible	< 1		
Very low	1 - 2		
Low	2 - 4		Case I (3.84)
Medium	4 - 8	Case I (6.24)	
High	8 -16	Case II (11.28), Case III (12.48)	Case II (9.36), Case II I (12.48)
Very high	> 16		

4.2 동상민감성 판정 기준 적용

JGS는 동상 실험을 통해 동상 속도 산정만을 제시하고 있으며, 동상 민감성을 판정하는 기준에 대해서는 제시된 바가 없다. 따라서, 동상 실험을 통해 동상의 위험 정도를 판별하기에는 한계가 있다. 미국의 경우, 일본과 실험 방법에서는 차이가 있으나 동상 민감성을 동상 곡선에서 산정된 동상 속도로 판정이 가능하다. 본 연구에 사용된 모래-실트 혼합토의 동상 실험 결과를 토대로 JGS 방식으로 동상 속도를 계산하면, 0.26mm/h(실트 10%), 0.47mm/h(실트 20%), 0.52mm/h(실트 30%)로 실트 함량이 증가함에 따라 동상 속도도 증가하고 있다. 본 연구에서 검토한 시료 내부의 동결 속도가 1~2mm/h에서 발생하는 동상 속도를 대푯값으로 정의하고 산출하면 실트 함량에 따라 0.16mm/h, 0.39mm/h, 0.52mm/h로 평가된다. Table 2에서 보는 바와 같이 미국 ASTM 동상 민감성 판정 기준을 준용할 경우, 동상에 민감한 실트 함량 20%와 30% 혼합토는 JGS와 본 연구에서 제안한 방식에서 서로 유사하게 판정된다. 다만, 실트 함량 10%의 경우 서로 상이한 결과를 보여주고 있어 주의가 필요하다.

5. 결 론

본 논문에서는 일본 동상 실험법에 따른 실내 실험을 수행하고 실험 결과를 토대로 동상 속도 산정 방법에 대해 면밀히 분석하였다. 또한, 동상 민감성을 판정하기 위해 미국 ASTM 판정 기준의 적용성을 검토하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과는 다음과 같다.

- (1) 일본 동상 실험법은 시료 준비과정과 실험 방법에 있어 비교적 간단한 장점을 보유하고 있다. 일본 동상 실험법은 동상 실험의 일관성을 검토하기 위해 하부에서 일정 속도로 온도를 낮추며, 최종적으로 시료 동결이 완료되는 시점을 이용하여 동결 속도가 1~2mm/h 범위를 만족하는지 검토하도록 제안하고 있다. 시료가 완전 동결되는

시점은 동상 발현이 미미하거나 상부 온도가 0°C 이하인 경우로 제시하고 있다. 본 연구에서 관측된 동상 실험 결과에 따르면, 동상은 지속적으로 발생하고 있어 동결 완료 시점을 판별하기에는 부적합하다. 동결 완료 시점은 시료 상부 온도만으로 확인이 가능하다.

- (2) 본 연구에서는 시료 내부의 온도변화를 관측하고, 시간에 따른 동결 속도를 산출하였다. 산출된 동결 속도는 시간 함수로 시간이 경과함에 따라 느려지는 경향을 확인하였다. 이러한 동결 속도 변화는 시료 내부의 온도구배에 기인한다. 실트 함량에 따라 시간에 따른 동결 속도를 산출한 결과에 따르면 10~15시간에 1~2mm/h의 동결 속도가 발현되는 것을 확인하였고, 주어진 시간 범위에서 동상 속도를 계산하였다. 실트 함량이 많은 20%와 30%의 경우에는 본 연구에서 제안한 동상 속도 산정 방식과 JGS 방식으로 산출된 동상 속도가 유사한 결과를 보여 주고 있다. 실트 함량이 비교적 적은 10%의 경우, 각각의 방식으로 산출된 동상 속도는 약 1.5배의 상당한 차이가 발생한다.
- (3) 미국과 일본은 동상 민감도를 동상 속도로 판정하고 있으나, 미국과 달리 일본은 동상 민감성 판정 기준을 명확히 제시하지 않고 있다. 일본 동상 실험법과 본 연구에서 제안한 방법으로 산출한 동상 속도를 미국 ASTM 동상 민감성 판정 기준에 도입한 결과, 실트 함량이 20% 이상의 동상에 민감한 흙은 동상 민감도가 High로 동일하게 판정된다. 다만, 실트 함량 10%의 혼합토는 동상 민감도가 low와 medium으로 서로 상이한 결과를 보여 주고 있어 주의가 필요하다. 향후 일본 동상 실험법으로 동상 민감성을 판정하기 위해서는 다양한 토양에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연

구운영비지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다(과제번호 20241084-001, 극한건설 환경 구현 인프라 및 TRL6 이상급 극한건설 핵심기술 개발).

References

1. ASTM D5918 (2013), Standard test methods for frost heave and thaw weakening susceptibility of soils, American Society for Testing Materials, pp. 1~13.
2. Casagrande, A. (1931), Discussion of frost heaving, Highway Research Board, Proceedings, Vol. 11, pp. 163~172.
3. Choi, C. H. (2011), Development and verification of high efficiency experimental apparatus to evaluate freezing phenomenon of soils, Journal of the Korean Geosynthetics Society, Vol. 10, No. 4, pp. 93~103.
4. JGS 0172 (2009), Test method for frost susceptibility of soils, Japan Geotechnical Society, pp. 1~6.
5. Jin, H., Lee, J., Ryu, B. H. and Akagawa, S. (2019), Simple frost heave testing method using a temperature-controllable cell, Cold Regions Science and Technology, Vol. 157, pp. 119~132.
6. Jin, H., Lee, J., and Ryu, B. H. (2022), Investigation of the ASTM international frost heave testing method using a temperature-controllable cell, Geomechanics and Engineering, Vol. 31, No. 6, pp. 583~597.
7. Kang, J. M., Kim, Y. S., and Lee, J. G. (2013), Evaluation method of frost heave for unsaturated soil, Journal of the Korean Geosynthetics Society, Vol. 12, No. 1, pp. 93~100.
8. Konrad, J. M. (1987), Procedure for determining the segregation potential of freezing soils, Geotechnical Testing Journal, Vol. 10, No. 2, pp. 51~58.
9. Konrad, J. M. (1994), Sixteenth Canadian geotechnical colloquium: Frost heave in soils: Concepts and engineering, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, pp. 223~245.
10. Lee, J., Jin, H., and Ryu, B. H. (2023a), Review of frost-susceptibility testing methods and criteria, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 39, No. 7, pp. 39~48.
11. Lee, J., Gong, Z., Jin, H., and Ryu, B. H. (2023b), Numerical model with segregation potential on frost heave and reliability assessment for silty soils, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 24, No. 9, pp. 41~46.
12. Shin, E. C., Ryu, B. H., Kang, H. H., and Hwnag, S. G. (2014), Behavior characteristics of water supply pipeline due to freezing temperature, Journal of the Korean Geosynthetics Society, Vol. 13, No. 4, pp. 1~10.
13. Shin, E. C., Ryu, B. H., and Park, J. J. (2009), Geotechnical characteristics of frost-susceptibility soil using modified freeze-thaw apparatus, Journal of the Korean Geosynthetics Society, Vol. 8, No. 1, pp. 53~59.
14. Shin, E. C., Ryu, B. H., and Park, J. J. (2013), The frost heaving susceptibility evaluation of subgrade soils using laboratory freezing system, Journal of the Korean Geosynthetics Society, Vol. 12, No. 2, pp. 13~23.
15. Song, W. K. and Kim, M. K. (2004), An assesment of fatigue life cycle for buried pipelines in consideration for corrosion and frost heave of a geotechnical medium, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 24, No. 2004, pp. 267~275.
16. Taber, S. (1930), The mechanics of frost heaving, Journal of Geology, Vol. 38, pp. 303~317.