

불포화 지반의 동결 팽창을 예측을 위한 기법 연구

Evaluation Method of Frost Heave for Unsaturated Soils

강재모¹, 김영석^{2*}, 이장근³

Jae-Mo Kang¹, YoungSeok Kim^{2*}, Janguen Lee³

¹Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, SOC Research Institute, Korea Institute of Construction Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea

²Member, Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Division, SOC Research Institute, Korea Institute of Construction Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea

³Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, SOC Research Institute, Korea Institute of Construction Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea

ABSTRACT

Frost heave occurs when ground temperature decreases under 0°C and soil volume expands, which causes roadway and buried pipe line failure due to differential heaving. There are several models to predict volumetric strain caused by frost heave, but they requires expertises who have professional background and experience related to numerical analysis. This study presents an evaluation method to predict volumetric strain caused by frost heave with fundamental physical properties of soils. The evaluation method is assessed with experimental results.

요 지

동결 지반에서 발생하는 동상(frost heave)은 지반의 부동용기를 야기하고, 이때 발생하는 동결하중에 의해 동절기 도로 및 기초 구조물에 피해를 가져온다. 이러한 동결 피해를 방지하기 위해 동상 예측이 필요하다. 대부분의 동상 예측 방법은 경험과 지식을 갖춘 전문가의 수치해석에 의존하고 있어 현장에서 활용성이 낮다. 본 논문에서는 동결지반 피해의 주요 원인인 지반의 동상량을 예측하기 위해 기본적인 지반 물성 데이터를 이용해 동상량을 계산할 수 있는 방안을 제시하였으며, 실내 동상 실험결과와의 비교 분석을 통해 제안된 계산식의 신뢰성을 검토하였다.

Keywords : Frost heave, Prediction, Volumetric strain, Evaluation method, Unsaturated soil

1. 서 론

최근 국내 건설업체 및 자원개발업체가 러시아의 시베리아에 진출하여 주택을 건설하거나 유전개발 등에 참여하고 있다. 정부에서도 시베리아 천연가스 수송관 및 송유관 건설에 많은 관심을 기울이기 시작하면서 동토지역이 새로운 건설 활동 무대로 부각되고 있다. 또한, 극지인프라 구축사업의 일환으로 남극대륙에 대한민국 제2의 과학

기지(장보고 과학기지) 건설을 추진 중에 있어 극한지(동토)를 대상으로 하는 건설기술 개발에 관심이 증대되고 있다(Kim et al., 2012).

남극이나 시베리아와 같은 동토지대에서는 지반 상부에 위치한 활동층이 외부의 온도변화에 따라 동결과 융해를 반복하게 된다. 동결은 흙의 종류, 온도, 지하수위 등의 인자에 의해 지반이 팽창하는 동상현상(frost heave)을 유발한다. 이러한 동상현상은 지반의 불균등한 용기와 동결하중을 야기하여 기초 및 상부 구조물 파괴의 원인이 된다(Sellmann, 1989).

우리나라는 계절동토 지역에 속하는 관계로 겨울철 일

Received 12 Mar. 2013, Revised 25 Mar. 2013, Accepted 25 Mar. 2013

*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0371; Fax: +82-31-910-0211

E-mail address: kimys@kict.re.kr (Y. S. Kim)

부 남쪽 지방을 제외하고는 표층 지반이 동결된다. 이때 발생하는 동상으로 도로, 철도, 매설관 등에 피해를 유발하고 있어 동상피해를 방지하기 위한 방안으로 동상성(frost susceptibility)인 흙을 비동상성 재료인 자갈이나 쇄석으로 치환하는 방법을 이용하고 있다(Kang et al., 2009). 최근에는 기존의 동상방지 재료를 대체할 수 있는 페타이어, 페비닐, 흡수성 재료 등을 활용하는 연구도 진행되고 있다(Gandahl, 1985; Kang et al., 2010).

본 논문에서는 불포화 지반의 동결에 따른 지반거동을 예측할 수 있는 계산식을 제안하고자 한다. 제안식에는 최근 들어 동상 방지를 위해 흙 이외의 동상방지 재료를 사용하는 것을 감안하여 동상방지 재료가 포함된 경우도 고

려하고 있다. 또한, 제안된 계산식은 실제 실내 실험결과와 비교를 통해 신뢰성을 검증하였다.

1.1 흙의 열 특성 및 동결 팽창의 기본 개념

동결 전 흙 시료는 공기(air), 물(water), 흙 입자(soil grain) 3상(phase)으로 구성된다. 기존의 흙 시료에 동상 방지를 위한 별도의 재료를 혼합할 경우에는 흙의 기본 구성에 동상방지 재료(material)를 고려하여야 하며, 이에 대한 구성 상태를 이상화한 모델을 Fig. 1에 나타내었다.

동상 방지재료가 혼합된 흙 시료가 동결되는 경우에는 기존의 물은 온도의 변화에 따라 얼음으로 상변화(phase

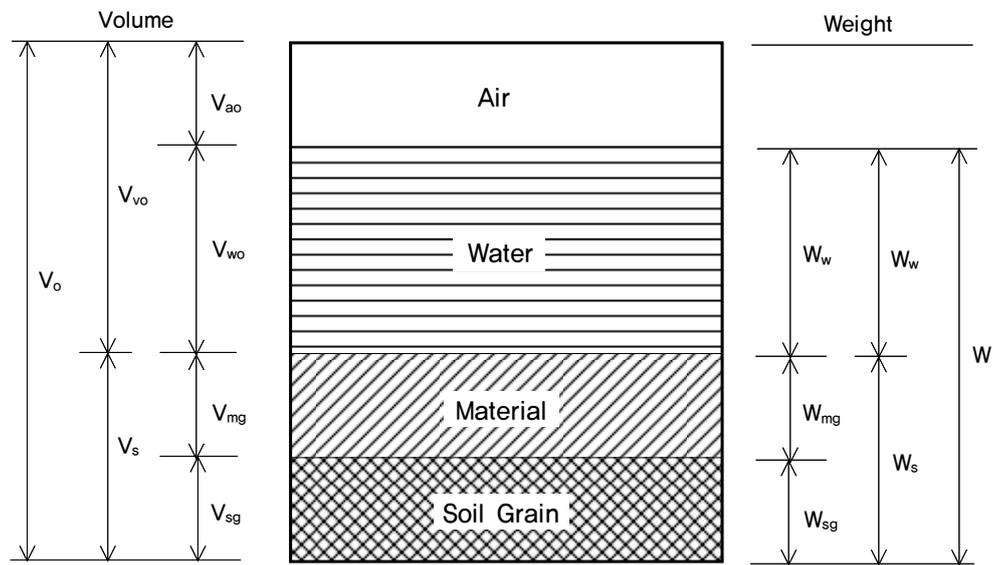


Fig. 1. Initial configuration of unsaturated soils

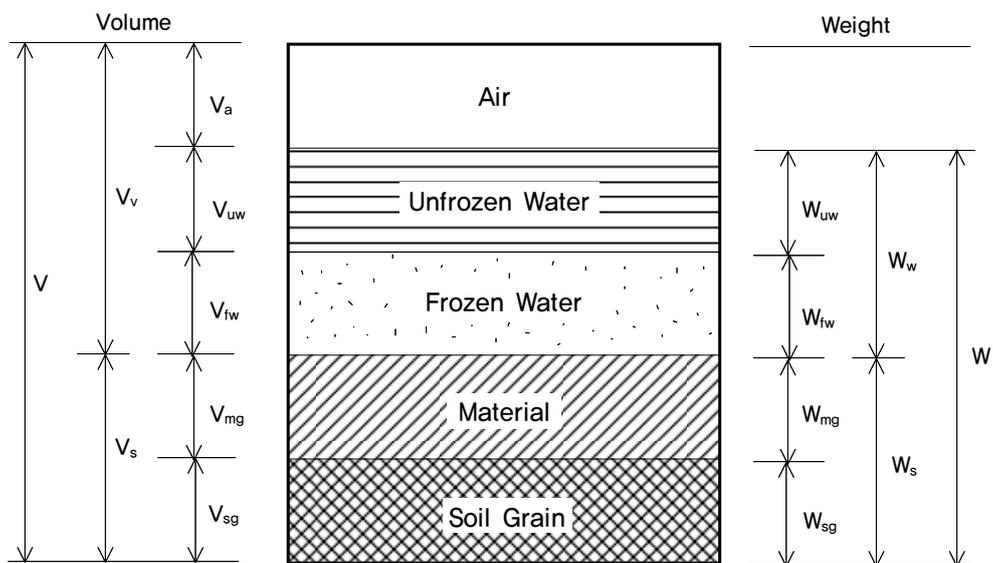


Fig. 2. Final configuration of frost unsaturated soils

change)를 일으키며, 일부 얼지 않은 물이 존재하게 되므로 혼합토의 거동을 이해하기 위해서는 5상 거동을 이해해야 한다(Freitag and Mcfadden, 1997). 동결된 지반에는 영하의 온도에서도 얼지 않는 수분이 존재하는데 이를 부동수분(unfrozen water)이라 하며, 얼음사이의 수막의 형태로 형성된 부동수분을 통하여 동결되지 않은 지하로부터 모세관 현상에 의해 물이 흡수되어 얼음 결정(ice lens)의 크기를 키우는 역할을 한다. Fig. 2는 동결 후 혼합토의 구성 상태를 나타낸 그림으로 얼음(frozen water)과 부동수(unfrozen water)로 물의 상태를 구분하여 정의하였다.

실제 흙에서 얼음이 형성되는 거동은 흙의 종류, 다짐, 상재하중, 물의 유입 등에 따라 복잡한 양상을 띄며, 이러한 얼음의 형태를 구분하기 위해서 Johnston(1981)은 얼음층의 두께, 얼음층의 방향과 패턴 등에 따라 8개의 그룹으로 분류한 바 있다. 또한, 동결 상태에서도 얼지 않은 상태로 존재하는 부동수의 해석은 동결 지반해석에 중요한 요소이며 흙의 종류에 따라 온도 변화에 따른 부동수분량은 달라진다. Smith and Tice(1988)는 20여 종류의 동상성 시료를 대상으로 흙이 동결됨에 따라 부동수의 양이 변하는 과정을 확인하였으며, 시료의 종류에 따라 부동수분량(unfrozen water content)의 변화를 예측하기 위한 경험식을 제시한 바 있다.

2. 혼합토의 동결팽창을 계산식

흙의 동상을 규명하기 위해서는 부동수와 얼음의 상변화를 고려한 모델개발이 필요하다. 물의 상변화는 지중온도 변화와 밀접한 관계를 갖고 있어 해석과정에 지중온도 예측이 포함되어야 한다. 이러한 모델은 일반적으로 다양한 입력변수를 결정해야 하며, 매우 복잡하여 전문가만이 사용할 수 있다. 따라서 부동수와 얼음의 상변화를 단순화하고 혼합토의 동결팽창율을 현장에서도 간단하게 계산할 수 있는 방법이 제안되어야 한다.

본 논문에서는 불포화 지반의 동결팽창율의 최대 최소 범위를 예측하는 방안을 제시하였으며, 이에 사용되는 기본적인 입력변수는 문헌조사와 간단한 실험을 통해 구할 수 있는 것으로 한정하였다(Table 1 참조).

Table 1의 입력변수들을 이용해 혼합토의 동결팽창율을 계산하기 위해 별도의 가정 사항을 설정하였으며 다음과 같다.

Table 1. Input parameters to calculate frost heave for frozen soils

No	Parameter	Component	Unit
1	Total Unit Weight	Soil (γ_{to})	kN/m ³
2	Water Content	Soil (ω)	
3	Porosity	Soil (η_o)	
4	Saturation Degree	Soil (S_o)	
5	Specific Gravity	Soil Particle (G_{sg}), Material (G_{mg}), Ice (G_{fw})	
6	Ratio of material to soil grain weight	Soil Particle and Material (a)	

- (1) 동결 전과 동결 후의 각 성분의 질량변화는 없다.
- (2) 동결 후 간극수는 얼음과 부동수분의 두 성분으로 구분하였으며, 모든 성분의 온도변화에 따른 밀도 변화는 무시한다.
- (3) 동결에 따른 혼합토의 체적증가는 물에서 얼음으로 상전이에 기인한다.
- (4) 최소 체적 팽창을 계산(lower bound expansion) : 동결과정에서 공기의 압축성에 따른 체적변화를 고려한다. 얼음의 체적증가량이 동결 전 공기의 체적보다 작을 경우, 얼음의 체적증가량은 공기의 수축으로 인해 혼합토의 체적변화는 없다. 반면에 얼음의 체적증가량이 동결 전 공기의 체적보다 클 경우, 동결 후 공기가 차지하는 공간을 채운 여분의 체적증가량이 혼합토의 체적증가량이 된다.
- (5) 최대 체적 팽창을 계산(upper bound expansion) : 공기를 비압축성으로 가정하면 동결 전과 동결 후에 공기의 체적변화는 없다. 따라서 혼합토의 체적증가량은 얼음의 체적증가량과 동일하다.

2.1 동결 전 혼합토(초기상태)

본 논문에서는 동상방지재를 포함한 혼합토의 동결현상에 대해 분석하고자 한다. 동결 전 혼합토는 Fig. 1과 같이 공기, 물, 동상방지 재료, 흙입자로 구성되어 있다.

계산식에 사용될 입력 변수들을 각 구성 성분의 체적 및 중량으로 표현하면 식 (1)~식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\gamma_{to} = \frac{W}{V_o} \quad : \text{Wet unit weight} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \quad : \text{Water content} \quad (2)$$

$$a = \frac{W_{mg}}{W_{sg}} : \text{Ratio of material to soil grain weight} \quad (3)$$

$$\eta_o = \frac{V_{vo}}{V_o} : \text{Porosity} \quad (4)$$

$$S_o = \frac{V_{wo}}{V_{vo}} : \text{Degree of saturation} \quad (5)$$

물의 중량(W_w)은 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 정의할 수 있으며, 식(6)과 같다.

$$W_w = \gamma_w \cdot V_{wo} = \gamma_w \cdot S_o \cdot V_{vo} = \gamma_w \cdot S_o \cdot \eta_o \cdot V_o \quad (6)$$

흙과 동상방지재의 체적 V_{sg} 와 V_{mg} 는 식 (7)과 식 (8)에서 각각 나타냈으며, 두 체적의 합인 V_s 는 식 (9)에 나타내었다.

$$V_{sg} = \frac{W_{sg}}{G_{sg} \cdot \gamma_w} \quad (7)$$

$$V_{mg} = \frac{W_{mg}}{G_{mg} \cdot \gamma_w} = \frac{a \cdot W_{sg}}{G_{mg} \cdot \gamma_w} \quad (8)$$

$$V_s = V_{sg} + V_{mg} = V_o - V_{vo} = (1 - \eta_o) \cdot V_o \quad (9)$$

식 (7)~식 (9)를 이용해 흙 입자의 중량 W_{sg} 을 식 (10)과 같이 나타낼 수 있으며, 흙 입자와 동상방지재의 중량 합은 식 (11)에 나타내었다.

$$W_{sg} = a_o \cdot \gamma_w \cdot V_o \quad (10)$$

$$\text{여기서, } a_o = \frac{(1 - \eta_o) \cdot G_{sg}}{(1 + a) \cdot (G_{sg}/G_{mg})}$$

$$\begin{aligned} W_s &= W_{sg} + W_{mg} = (1 + a) \cdot W_{sg} \\ &= (1 + a) \cdot a_o \cdot \gamma_w \cdot V_o \end{aligned} \quad (11)$$

식 (6)과 식 (11)을 이용하면 함수비 ω 는 식 (12)와 같이 표현될 수 있으며, 습윤 단위중량 γ_{to} 과 간극율 η_o 은 식 (13)과 식 (14)와 같이 표현할 수 있다.

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} = \frac{S_o \cdot \eta_o}{(1 + a) \cdot a_o} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{to} &= \frac{W_s + W_w}{V_o} = \frac{(1 + \omega) \cdot W_s}{V_o} \\ &= (1 + \omega) \cdot (1 + a) \cdot a_o \cdot \gamma_w \end{aligned} \quad (13)$$

$$\eta_o = 1 - \frac{(1 + a \cdot (G_{sg}/G_{mg})) \cdot \gamma_{to}}{(1 + \omega) \cdot (1 + a) \cdot (G_{sg} \cdot \gamma_w)} \quad (14)$$

Fig. 1에서 나타낸 혼합토의 중량 및 체적과 공기의 체적을 흙 입자의 체적(V_{sg})으로 표현한 계산식을 식 (15)~식 (17)에 나타내었으며, 이러한 과정은 혼합토의 각 성분 용적비를 좀 더 간편한 형태로 표현하기 위해 진행되었다.

$$W = a_1 \cdot G_{sg} \cdot \gamma_w \cdot V_{sg} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } a_1 &= 1 + a + \omega \cdot (1 + a) = (1 + a) \cdot (1 + \omega) \\ V_o &= V_{sg} + V_{mg} + V_{wo} + V_{ao} = a_2 \cdot V_{sg} + V_{ao} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } a_2 &= 1 + a \cdot \left(\frac{G_{sg}}{G_{mg}} \right) + \omega \cdot (1 + a) \cdot G_{sg} \\ V_{ao} &= a_3 \cdot V_{sg} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\text{여기서, } a_3 = a_1 \cdot G_{sg} \cdot \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_{to}} \right) - a_2$$

혼합토의 각 성분별 용적비는 식 (18)~식 (21)에 나타내었으며, η_{sgo} (흙 입자의 용적비), η_{mgo} (동상방지재의 용적비), η_{wo} (물의 용적비), η_{ao} (공기의 용적비)로 표기하였다.

$$\eta_{sgo} = \frac{V_{sg}}{V_o} = \frac{1}{(a_2 + a_3)} \quad (18)$$

$$\eta_{mgo} = \frac{V_{mg}}{V_o} = a \cdot \left(\frac{G_{sg}}{G_{mg}} \right) \cdot \eta_{sgo} \quad (19)$$

$$\eta_{wo} = \frac{V_{wo}}{V_o} = \omega \cdot (1 + a) \cdot G_{sg} \cdot \eta_{sgo} \quad (20)$$

$$\eta_{ao} = \frac{V_{ao}}{V_o} = a_3 \cdot \eta_{sgo} \quad (21)$$

2.2 동결 후 혼합토의 체적 팽창량

동결 후의 혼합토의 구성 상태는 Fig. 2에 나타내었으며, 얼음의 체적 팽창량 ΔV_{fw} 는 전술한 계산식의 조합을 통해 식 (22)와 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta V_{fw} = V_{fw} - V_{fwo} = a_4 \cdot V_{sg} \quad (22)$$

여기서, $a_4 = \left(\frac{1}{G_{fw}} - 1 \right) \cdot G_{sg} \cdot (\omega - \omega_u) \cdot (1 + a)$,

V_{fw} : Volume of ice

V_{fwo} : Volume of water from ice (phase change)

G_{fw} : Specific gravity of ice

ω_u : Unfrozen water content ($= W_{uw}/W_s$)

2.2.1 혼합토의 최소 체적팽창(Lower Bound Expansion)

본 계산은 가정 사항 (4)를 적용하므로 혼합토 체적팽창의 하한값이다. 동결에 따른 물에서 얼음으로 상전이에 따른 체적증가량이 동결 전 공기 체적보다 클 경우는 동결 후 공기 공간은 얼음으로 채워져서 동결 후 공기의 공간은 없어지고, 동결 전 공기의 체적보다 작을 경우는 동결 후 공기의 공간은 얼음의 체적증가로 채워지고 여분의 증가분을 체적팽창으로 가정하였다.

얼음의 체적 팽창량 ϵ_{fw} 은 전술한 계산식으로부터 식 (23)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{fw} = \frac{\Delta V_{fw}}{V_0} = \frac{a_4}{(a_2 + a_3)} \quad (23)$$

혼합토 내에 얼음의 체적 팽창이 공기의 체적보다 작은 경우($\epsilon_{fw} < \eta_{a0}$)는 혼합토의 체적증가율(volumetric strain) ϵ_v 는 0으로 볼 수 있다. 얼음의 체적 팽창이 공기의 체적보다 큰 경우($\epsilon_{fw} \geq \eta_{a0}$), 체적증가율 ϵ_v 는 공기의 공간이 없어지고 남은 체적 증가량이 되며, 식 (24)와 같이 표현된다.

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V_{fw} - V_{a0}}{V_0} = \frac{(a_4 - a_3)}{(a_2 + a_3)} \quad (24)$$

2.2.2 혼합토 최대 체적팽창(Upper Bound Expansion)

가정 사항 (5)를 적용하여 혼합토의 체적팽창의 상한값

을 구할 수 있으며, 이때 혼합토의 동결 후 체적증가율은 동결에 따른 얼음의 상전이에 의한 체적증가율이 되며, 식 (25)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_v = \epsilon_{fw} = \frac{a_4}{(a_2 + a_3)} \quad (25)$$

3. 동결팽창 실험 및 해석

앞에서 제안한 흙 시료의 동결에 따른 체적증가율 계산식의 신뢰성을 확인하기 위하여 별도의 동결팽창 실험을 수행하였다. 시료의 물리적 특성을 파악하기 위해 입도분포, 애터버그한계(atterberg limits), 비중 및 다짐 시험 등을 수행하였다.

Fig. 3과 Fig. 4는 시료의 입도분포와 다짐시험 결과를 나타낸 그래프이며, 시료의 기본 물성치는 Table 2에 정리되어 있다. 실험에 사용된 시료는 통일분류법(USCS)에 따르면 SM이다. 계산식의 신뢰성 검토에는 동상방지 재료를 제외한 흙 시료만으로 검토하였다($V_{mg} = W_{mg} = 0$).

동결팽창 실내실험은 직경이 100 mm, 높이 150 mm인

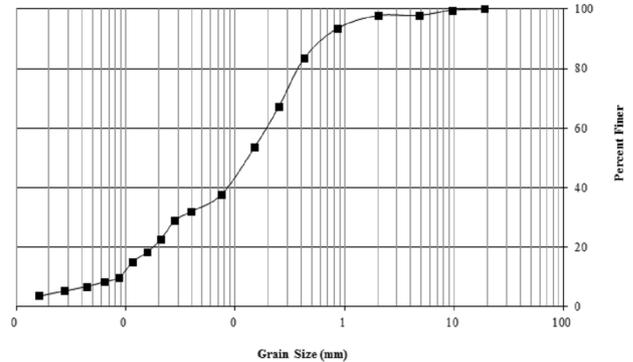


Fig. 3. Grain size distribution curves of tested specimen

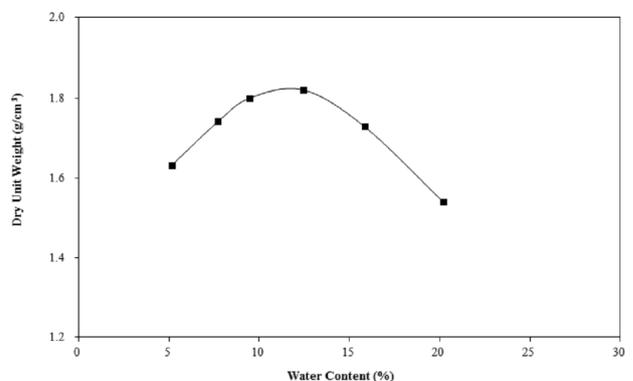


Fig. 4. Compaction curves for tested specimen

Silty-Sand 시료를 바닥과 주변부를 단열시킨 폐쇄형(물 공급이 없는) 동상 몰드에 넣고 상부에서만 냉기가 유입되도록 하였다. 동상 몰드에 들어간 시료는 초기 함수비를 조절하여 90% 다짐을 하였다. 동결팽창 시험기는 하부와 측면부를 고정하여 상부로부터 동상이 발생하도록 1차원 동결팽창 실험을 수행하였으며, 동상량은 상부의 변위계(LVDT)를 이용하여 측정하였다(Fig. 5 참조).

실험 중에 몰드와 시료의 부착에 의한 주변부 마찰력이 발생하지 않도록 몰드 측면부에는 얇은 유지(waxed paper)를 사용하였다. 시료가 채워진 몰드는 온도조절이 가능한 냉동챔버 내부에서 -12.5°C 까지 급속하게 동결시

Table 2. Physical Properties of tested specimen

Soil properties	
G_s	2.65
γ_d (kN/m^3)	18.2
ω_{opt} (%)	11.7
Liquid Limit (%)	35.2
Plastic Limit (%)	22.8
Soil Type	Silty-Sand
USCS Classification	SM

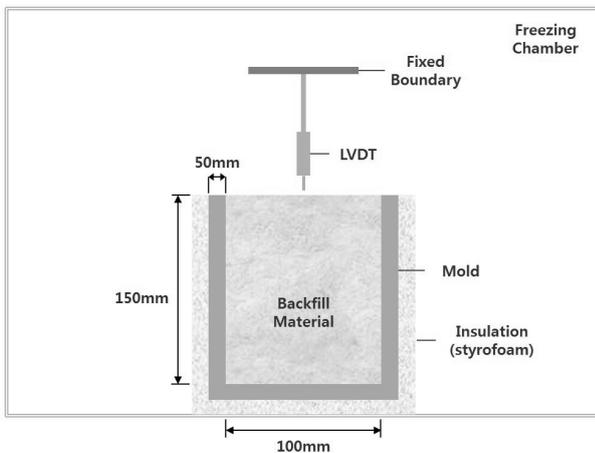


Fig. 5. Experimental apparatus for frost heave testing

Table 3. Summary of experimental frost heave testing results

Test No.	HXD (mm)	$\gamma_{t0}(\gamma_d)$ (g/cm^3)	ω (%)	e	S (%)	Volumetric strain (%)
1	150×100	1.78(1.64)	8.93	0.616	36.73	0.4
2	150×100	1.90(1.65)	14.82	0.606	66.25	1.3
3	150×100	1.98(1.64)	21.25	0.616	89.21	2.5
4	150×100	1.81(1.61)	12.31	0.646	50.96	0.5
5	150×100	1.88(1.63)	17.03	0.626	64.95	2.2
6	150×100	1.98(1.63)	21.89	0.626	90.93	2.8

ω_u (at $T = -6^{\circ}\text{C}$) = 0.11

켜 동결시험을 수행하였다.

동결팽창 실험에 앞서 계산식의 중요인자인 중량 부동 함수비(w_u)를 측정하기 위해 총 4개의 초기 함수비(w)가 다른 시료를 이용하여 측정하였다. 시료 내부의 온도는 시료 중앙에 설치한 온도센서를 이용하여 계측하였으며 Fig. 6에서 보는 바와 같이 초기 함수비가 10%인 시료를 제외한 나머지 시료에서 온도에 따라 일정 값에 수렴하는 거동을 보여주고 있다. 따라서 중량 부동 함수비(w_u)는 동결 전 시료의 초기 함수비에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

동결팽창 실내실험은 Table 3과 같이 다양한 초기 함수비와 건조단위중량으로 총 6번 수행되었다. 시료가 채워진 몰드는 냉동챔버로 이동하여 동결시험을 수행하였고 최종적으로 외기온도는 -12.5°C 에 도달하였으며 실험은 시료내부 온도가 수렴하는 기간 동안(약 1일) 동결 팽창을 관찰하였다. 시료 내부의 온도는 -6°C 로 수렴하였다.

Fig. 7은 동결팽창 실험을 통해 확인한 시료의 시간에 따른 동결 팽창량을 나타낸 그래프로, 시간에 따라 팽창량

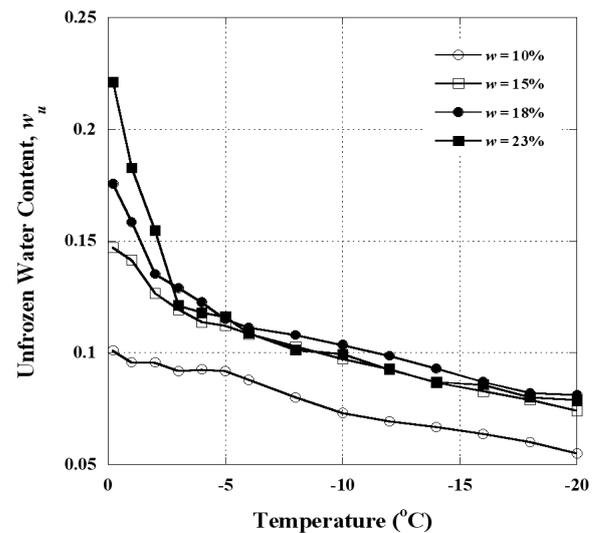


Fig. 6. Unfrozen water content (w_u) curves with respect to temperature variation

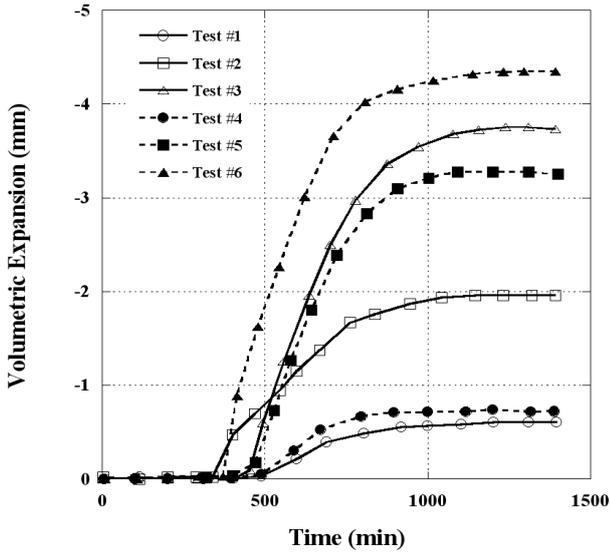


Fig. 7. Measured volume change caused by frost heave

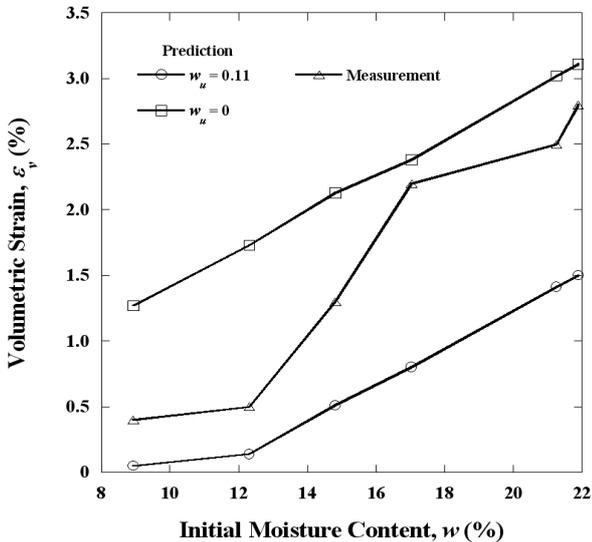


Fig. 8. Measured and calculated volumetric strains caused by frost heave

이 증가하다 일정시간에 도달하면 그 값이 수렴하는 것을 확인하였다. 실험조건에서 외부로부터 물의 공급이 없는 상태(비배수조건)로 실험이 진행되었다. 따라서 동결 팽창량은 초기함수비에 따라 결정된다. 실험결과에 따르면 초기함수비가 높을수록 동결 팽창량이 증가하는 것으로 나타나고 있어 본 실험의 일관성과 신뢰성은 높은 것으로 판단된다.

동결팽창을 계산에 사용된 입력변수는 Table 2와 Table 3의 시료의 기본 물성과 Fig. 6에서 시료 내부온도를 반영한 동결 후 중량 부동함수비($w_u=0.11$)를 사용하였다. 동결 팽창 시험을 통해 초기함수비의 변화에 따른 체적증가율과 계산식을 통해 도출된 결과 값을 비교 분석하였다. Fig.

8에서 보는 바와 같이 실험결과는 중량 부동함수비(w_u) 0.11을 적용한 최대 체적팽창 값보다 크고, 중량 부동함수비를 0으로 계산한 최대 체적팽창 값보다 작게 나타났다. 이는 중량 부동함수비 측정 장비의 오차에 기인하고 체적증가율이 중량 부동함수비에 민감하다는 사실을 보여주고 있다.

4. 결론

본 논문에서는 동상 팽창율을 예측하기 위한 계산식을 유도하고, 신뢰성을 평가하기 위해 실내 실험결과와 비교하였다. 본 논문에서 도출된 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 일반적으로 수행되는 토질실험 결과를 이용하여 동상 팽창을 예측이 가능한 계산식을 제안하였다. 따라서 별도의 입력변수 산정을 위한 실내실험이 필요치 않아 현장에서 적용성이 높을 것으로 판단된다.
- (2) 실험조건은 국내 성토도로의 특성을 감안하여 다짐도 90%, 지하수 공급이 없는 상태(비배수조건)로 실험을 진행하였다. 실험결과에 따르면 초기함수비가 높을수록 동결 팽창량이 증가한다. 실험에 사용된 시료(SM)의 경우, 최적함수비 대비 함수비 3% 증가에 따른 동상팽창율은 1.3%로 현장에서 동상에 대한 영향을 검토할 필요가 있다. 따라서 현장 다짐에서 초기함수비 조절에 주의가 필요하다.
- (3) 제안된 계산식은 중량 부동함수비에 민감하다. 실제 현장에 적용할 경우, 본 논문에서 사용된 시료와 유사한 사질토의 지반에서는 중량 부동함수비를 0으로 간주하고 최대 체적팽창을 예측하는 것이 안전하다고 판단된다.

향후 다양한 중량 부동함수비의 세립토를 대상으로 제안식의 신뢰성을 분석할 필요가 있다.

Acknowledgement

This research was supported by a grant from the Strategic Research Project Development of Extreme Cold Region Ground Stabilization Technology funded by the Korea Institute of Construction Technology (KICT).

References

1. Kang, J. M., Hong, S. S., and Kim, Y. S. (2009), "A Study on Frost Heave Susceptibility of Soil Mixed with Waste Glass", *JSSI&JSSE Joint Conference*, Sapporo, pp.74.
2. Kang, J. M., Kim, H. S., Kim, Y. S., Lee, J. G., and Hong, S. S. (2010), "Mechanical Behavior of Buried Pipe Line with Frost Prevention Materials", *KGS Fall National Conference*, pp. 546-552. (in Korean)
3. Kim, K. J., Kim, Y. S., and Hong, S. S (2012), "Physical and Mechanical Characteristics so the Antarctic Rocks Exposed to the Extreme Environment", *Korean Society of Civil Engineering*, Vol.32, No.6C, pp. 275-284. (in Korean)
4. Freitag D. R. and Mcfadden T. T. (1997), *Introduction to cold region engineering*, ASCE, p.141.
5. Gandahl, R. (1985), "Polystyrene Foam as a Frost Protection Measure on National Roads in Sweden", *Transportation Research Record*, 1146, pp.1-9.
6. Johnston, G. H. (1981), *Permafrost Engineering Design and Construction*, Toronto, Wiley
7. Sellmann, P. V. (1989), "Strength of soils and rocks at low temperatures", *Cold Regions Science and Technology*, 17, pp.189-190.
8. Smith, M., and Tice. A. (1988), "Measurement of unfrozen water content of soils", In *Proc. 5th Int. Conf. on permafrost*, Trondheim, Vol.1, pp.473-477.