

Segregation Potential 기반 동상 예측 모델 및 실트질 토양을 이용한 동상해석 신뢰성 평가

Numerical Model with Segregation Potential on Frost Heave and Reliability Assessment for Silty Soils

이 장 근[†] · 공 정¹⁾ · 진 현 우²⁾ · 유 병 현³⁾

Jangguen Lee · Zheng Gong · Hyunwoo Jin · Byunghyun Ryu

Received: August 11th, 2023; Revised: August 14th, 2023; Accepted: August 24th, 2023

ABSTRACT : Numerical analysis of frost heave is challenging due to the influence of soil and environmental factors. Thermo-hydro-mechanical coupled analysis relies heavily on excessive input variables and primarily focuses on validating clayey soils, so it is limited to frost susceptible silty soils. An empirical approach based on thermodynamics offers relatively simple frost heave analysis and the advantage of linking constitutive equations with frost heave to enable geomechanical interpretations. In this paper, we introduce an empirical numerical model using the Segregation Potential (SP) and evaluate reliability through comparative analysis with experimental results of frost susceptible silty soils. While the SP model enables frost heave analysis for the given silty soils, further investigation on various silty soils is necessary to gather data on key input variables.

Keywords : Frost heave, Numerical analysis, Frost susceptible, Segregation potential, Experimental, Silt

요 지 : 동상은 토양과 외부 환경적 영향으로 인해 수치해석적 평가에 어려움이 있다. 열-수리-역학 연계 해석은 입력변수가 과도하고 주로 점토성 토양에 대한 검증에 국한되어 실제 동상에 민감한 실트질 토양에 적용하기에는 한계가 있다. 열역학 관점의 경험적 접근 방법은 비교적 간단하게 동상 해석이 가능하고, 구성방정식과 동상 해석 결과를 연계하여 역학적 해석도 가능하다는 장점을 보유하고 있다. 본 논문에서는 Segregation Potential(SP)을 이용한 동상 해석 모델을 소개하고 실트질 함유량에 따른 동상 실험 결과와 비교 분석을 통해 신뢰성을 평가하고 있다. SP 모델은 본 연구에서 검토된 실트질 토양의 동상 해석이 가능하지만, 다양한 실트질 토양에 대한 추가적인 검토를 통해 핵심 입력변수에 대한 자료수집이 필요하다.

주요어 : 동상, 수치해석, 동상민감성, Segregation Potential, 실험, 실트

1. 서 론

지반이 동결되며 발생하는 동상(frost heave)은 도로, 기초구조물 등의 안전에 영향을 미친다(Bilodeau et al., 2008; Sheng et al., 2013; Hendry et al., 2016; Zhou et al., 2022). 동상 문제를 해결하고자 세계 100여 개의 국가에서는 토양의 동상 민감성을 판정하는 기법에 대해 연구하였으며(Chamberlain, 1981), 특히 미국과 일본에서는 지반을 구성하는 토양의 동상 민감성을 판정하는 표준시험법을 제시하고 있다. 실내 실험은 토양의 동상에 민감한 정도를 정성적으로 판정하는데 한정되어 있다. 동상은 토양의 열-수리 특성(thermal hydraulic characteristics), 온도구배, 상재하중 등에 영향을 받아 정량적

으로 예측하기에는 한계가 있다(O'Neill, 1983).

동상 현상을 예측하고자 열-수리-역학 연계 해석에 대한 다양한 연구가 진행되었다. 유체 역학적(hydrodynamics) 관점에서 동상 발생은 0°C 인근의 동결층(frost fringe)에서 발생하는 삼투 효과(osmotic effect)를 Generalized Clapeyron Equation(GCE)을 이용하여 지속적인 물 공급에 따른 얼음 성장을 재현한다(Henry, 2000). 다만, 수치해석에 필요한 입력변수가 과다하며, 동상과 용해 침하에 대한 해석에 어려움이 있다(Zhu, 2006; Zhang, 2014). 또한, GCE를 이용한 이론적 모델은 주로 투수계수가 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ m/s를 가지는 점토성 토양에 대한 동상 거동을 예측하고 검증하였다(Konrad, 1994; Thomas et al., 2009; Bronfenbrener & Bronfenbrener,

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

1) Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology

2) Senior Researcher, Postdoctoral Researcher, Department of Future & Smart Construction Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

3) Research Specialist, Department of Future & Smart Construction Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

2010; Zhou & Li, 2012). 동상은 주로 실트질 함량이 높은 비교적 투수가 원활한 토양에서 많이 발생하기에 GCE를 이용한 모델로 동상을 예측하기에는 한계가 있다고 판단된다.

GCE를 활용한 모델과 같이 순수 이론적 접근의 한계점을 개선하고자 열역학(thermodynamics) 관점의 경험적 접근 방법을 이용한 다양한 연구도 시도되었다. 기존에 발표된 다양한 모델 가운데 Porous Rate Function(PRF)을 이용한 경험적 모델은 비교적 간단하게 동상 해석이 가능하고 구성 방정식(constitutive function)과 동상 해석 결과를 연계하여 역학적 해석도 가능하다(Michalowski & Zhu, 2006). 그럼에도 불구하고 PRF 모델의 핵심인 PRF에 대한 상세 연구가 부족하여 실제 다양한 동상 거동 예측에 활용이 미흡하다.

본 논문에서는 최근 동상 연구에서 동상 민감성 평가에 많이 활용되고 있는 Segregation Potential(SP)(Konrad & Morgenstern, 1981)를 이용하여 보다 간단하게 동상 해석이 가능한 경험적 모델을 제시하고자 한다. SP 모델의 핵심은 동상으로 발생하는 얼음성장을 경험적으로 예측하고 있어 별도의 수리 해석이 필요치 않다. 즉, 열 해석을 통해 지반의 온도변화를 예측하고 동결이 발생하는 지점에 SP를 이용하여 얼음성장을 계산하는 방식으로 동상 해석이 가능하다. 본 논문에서는 SP를 이용한 수치해석 기법을 소개하고 실트 함량에 따른 동상 실험 결과를 이용하여 동상에 민감한 실트질 토양에 대한 적용성을 검토하고자 한다.

2. 동상 예측 모델

2.1 에너지 평형 방정식(Energy Conservation)

동상을 해석하기 위해서는 열전달 해석이 반드시 필요하다. 지반의 열전달은 열전도만 고려한 열평형 방정식으로 Eq. (1)과 같이 표현된다.

$$C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(\lambda_m \nabla T) - L \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

여기서, C는 흙의 단위체적당 비열용량, λ_m 은 흙의 열전도계수, L은 잠열, ρ_i 는 얼음의 밀도를 나타낸다. 동상 해석은 흙 입자, 얼음, 그리고 간극수의 영향을 동시에 고려하기에 비열용량과 열전도계수는 Eq. (2)와 같이 표현된다(Michalowski & Zhu, 2006).

$$C = \rho_s c_s \theta_s + \rho_w c_w \theta_w + \rho_i c_i \theta_i, \quad \lambda_m = \lambda_s^{\theta_s} \lambda_w^{\theta_w} \lambda_i^{\theta_i} \quad (2)$$

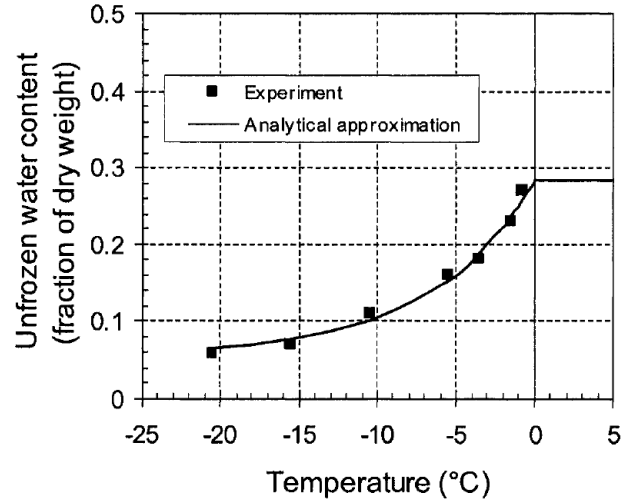


Fig. 1. Characteristic curve of unfrozen water content (Zhu, 2006)

여기서, c와 λ 는 흙 입자(s), 간극수(w), 얼음(i)의 단위질량당 비열 및 열전도계수를 의미한다. 흙 입자, 간극수, 얼음의 체적분율은 Eq. (3)과 같이 표현된다.

$$\theta_s = \frac{V_s}{V} = 1 - n, \quad \theta_w = \frac{V_w}{V} = \frac{\rho_s}{\rho_w} w (1 - n),$$

$$\theta_i = \frac{V_i}{V} = 1 - \theta_s - \theta_w \quad (3)$$

여기서, w는 부동수분을 의미한다. 간극수와 얼음의 체적분율을 구하기 위해서는 온도에 따른 비동결된 간극수의 함수비가 필요하다. Michalowski(1993)의 연구에 따르면, Fig. 1에서 보는 바와 같이 온도에 따른 함수비를 Eq. (4)와 같이 표현하고 있다.

$$w = w^* + (\bar{w} - w^*) \exp[\alpha(T - T_o)] \quad (4)$$

여기서, w^* 는 동결이 완료된 시점에서 최종 부동수분 함수비, \bar{w} 는 초기 함수비, α 는 온도 강하에 따른 부동수분의 감소율로 정의된다.

2.2 Segregation Potential (SP)

SP는 동상이 발생하는 토양 내부의 0°C 인근에 존재하는 frozen fringe의 온도구배로 인해 간극수가 이동하며 얼음이 성장하는 속도로 정의되고 있다. Frozen fringe에서 얼음이 성장하는 속도는 Eq. (5)와 같다(Konrad & Morgenstern, 1981).

$$v(t) = SP \times grad(T) \quad (5)$$

여기서, v 는 동상이 발생하는 얼음의 성장 속도(또는 물의 유입 속도)이며, $grad(T)$ 는 frozen fringe의 온도 구배로 정의된다. SP는 동상이 발생하는 토양 고유의 대표값으로 얼음의 성장속도는 frozen fringe의 온도 구배만 예측이 가능하다면 간단히 동상 거동 평가가 가능하다. 기존 연구에 따르면 frozen fringe 내부 온도는 $-1.5 \sim 0^\circ\text{C}$ 범위에서 분포하고 있으며, 실제 평균 온도가 -0.8°C 로 관측되었다(Akagawa, 1988; Azmatch et al., 2011). Eq. (5)를 이용하여 시간에 따른 동상이 발생하는 부피 팽창을 증가분($d\epsilon_{t+dt}^v$)은 다음과 같이 계산이 가능하다.

$$\Delta V = v \times dt \times A, \quad d\epsilon_{t+dt}^v = \frac{\Delta V}{V_t} \quad (6)$$

Fig. 2에서 보는 바와 같이, 얼음성장으로 인한 전체 체적이 변화되고 공극률은 이러한 전체 체적 대비 부동수분과 얼음의 체적으로 구해야 한다. 따라서, 공극률은 Eq. (7)과 같이 시간에 따라 표현된다(Zhang, 2014).

$$n_{t+dt} = \frac{V_{v,t}/V_t + \Delta V/V_t}{1 + \Delta V/V_t} = \frac{n_t + d\epsilon_{t+dt}^v}{1 + d\epsilon_{t+dt}^v} \quad (7)$$

SP 모델을 간략히 정리하자면, 온도경계 조건에 따른 토양 내부의 온도변화는 SP를 이용한 부피 팽창을 증가분(Eq. (6))과 부동수분(Eq. (4))의 변화를 유발시킨다. 시간에 따른 부피 팽창을 증가분은 Eq. (7)과 같이 공극률 계산에 활용

되어 Eq. (1)~(3)은 변화된 입력변수를 이용하여 지속적으로 동상을 평가하게 된다.

3. 모델 검증

SP 모델의 검증을 위해 비교적 동상에 민감한 시료를 대상으로 일본 JGS(Japanese Geotechnical Society)의 표준화된 실험법(JGS 0172, 2009)을 따라 동상 실험을 수행하였다. 동상 실험에 사용된 동결셀은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 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). 실험에 사용된 시료는 모래와 실트를 건비빔하여 제작하였으며, 건조상태에서 혼합시료를 강사한 후 다짐하여 직경($D=100\text{mm}$) 대 높이 비가 약 2:1를 유지하도록 높이 약 50mm로 준비하였다. 시료의 포화를 위해 하부로부터 물을 주입하고 있으며, 시료동결 시 원활한 물 공급을 위해 시료 상부까지 증류수에 의해 잠기도록 하고 있다. 시료 동결 시 실시간으로 동상량을 측정하기 위해 상부 페테스탈 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. 동상 실험은 하부에서 상부로 동결하는 일정한 온도 강하 경계 조건 실험법(Ramped-freezing method)으로

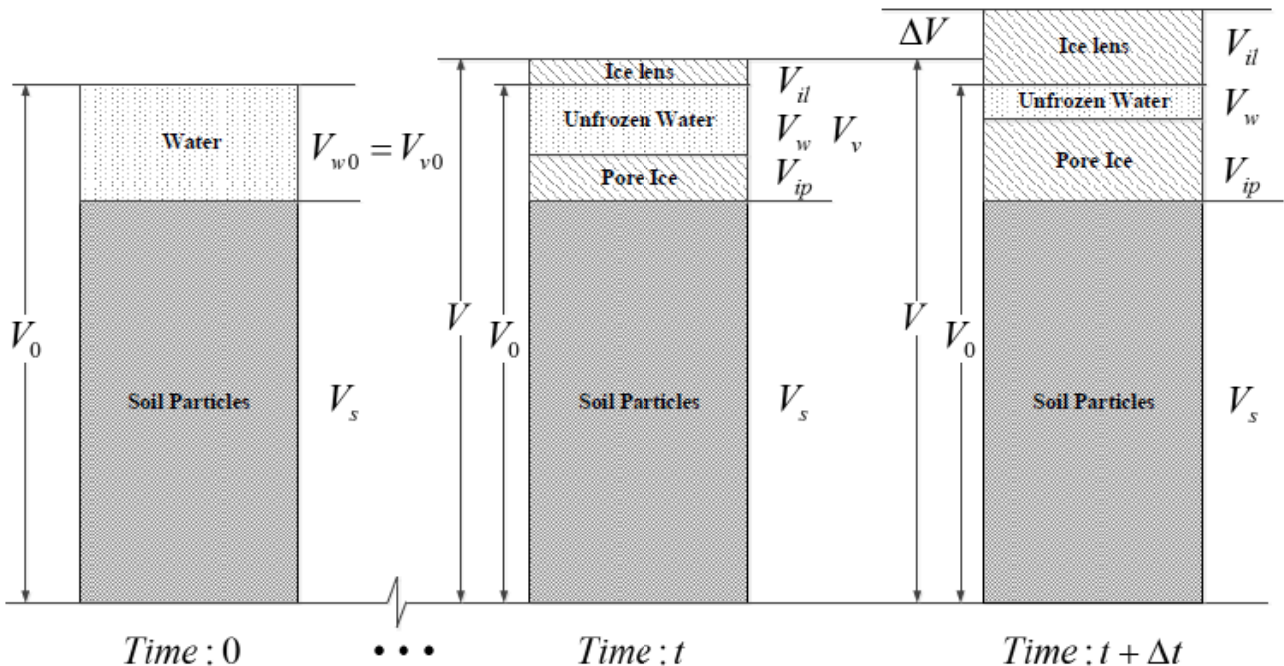


Fig. 2. Growth of ice lens and volume increment (Zhang, 2014)

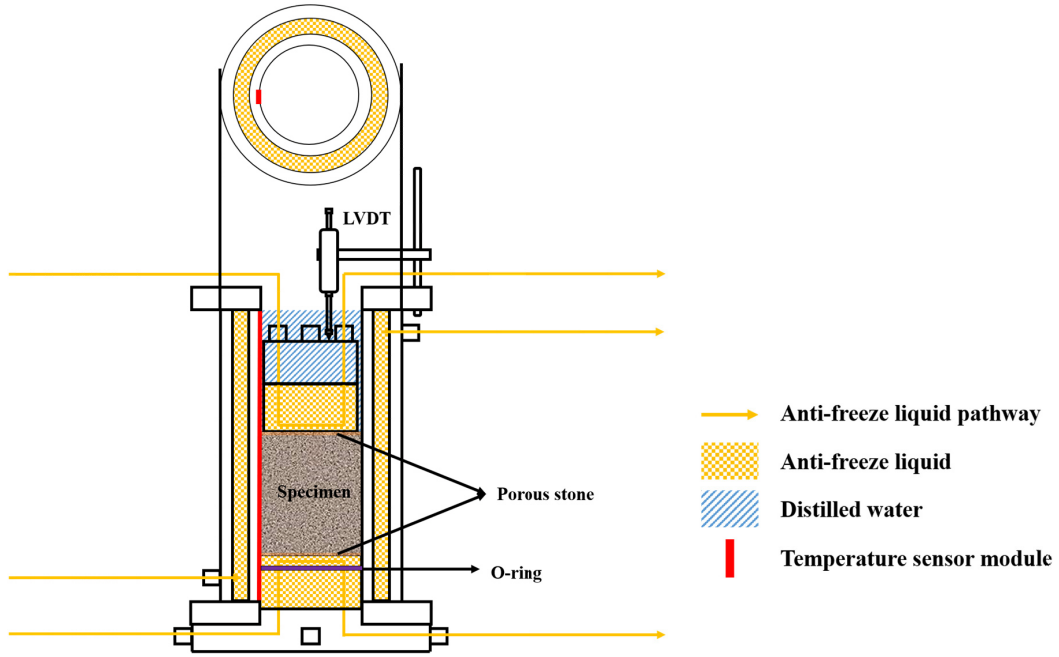


Fig. 3. Frost heave testing apparatus (Jin et al., 2022)

수행하였다(Table 1).

SP 모델은 유한요소해석 상용 프로그램인 COMSOL을 이용하여 구현하였다. SP 모델에 필요한 입력변수는 기존 연구결과(Williams & Smith, 1989; Zhang, 2014)를 토대로 Table 2에 정리되어 있다. 흙 입자의 열전도계수는 주문진 표준사의 석영 함량(76.4%)과 Eq. (8)을 이용하여 산출하였다(Chen, 2008; Park et al., 2021).

$$\lambda_s = 7.7^{0.764} \times 2.0^{1-0.764} \quad (8)$$

추가적으로 SP 모델은 온도에 따른 부동수분 곡선(Eq. (4))이 필요하다. 실트질 토양에 대해서는 알래스카 실트 실험 결과(Tice et al., 1989)를 활용하여 w^* 이 0.08, α 는 1.8°C^{-1} 을 적용하였다. \bar{w} 는 Table 1에 정리된 초기 함수비를 각각 적용하였다.

Table 1. Laboratory testing for frost heave

	Weight fraction (%)		Initial height (mm)	Initial porosity	Initial water content (%)	Dry density (kN/m ³)	Temperature (°C)	
	Sand	Silt					Initial & Top	Bottom (°C/h)
CASE I	90	10	48.85	0.380	22.31	16.71	0.79	-0.230
CASE II	80	20	47.68	0.346	19.27	17.63	0.81	-0.238
CASE III	70	30	45.13	0.310	16.30	18.62	0.79	-0.243

Table 2. Input parameters for the verification of SP model

Thermal property	Particle	ρ_s (kg/m ³)	2,750
		c_s (J/kg·°C)	900
		λ_s (W/m·°C)	5.6
Water	Water	ρ_w (kg/m ³)	1,000
		c_w (J/kg·°C)	4,180
		λ_w (W/m·°C)	0.56
		L (J/kg)	333,000
Ice	Ice	ρ_i (kg/m ³)	917
		c_i (J/kg·°C)	2,000
		λ_i (W/m·°C)	2.24
		L (J/kg)	333,000

Fig. 4는 실험 결과와 SP 모델을 비교한 결과를 보여주고 있다. 실트 함량이 증가할수록 동상량과 동상률은 증가하는 경향을 보여주고 있으며, SP 모델은 실험 결과와 상당히 유사하게 동상 거동을 평가하고 있다. 실트 함량이 증가할수록 수치해석으로 도출한 SP값도 증가하고 있다(Table 3). 일본 JGS 동상 실험법에 따르면 시간에 따라 동상량이 일정하게 증가하는 동상률을 이용하여 동상 민감성 판정이 가능

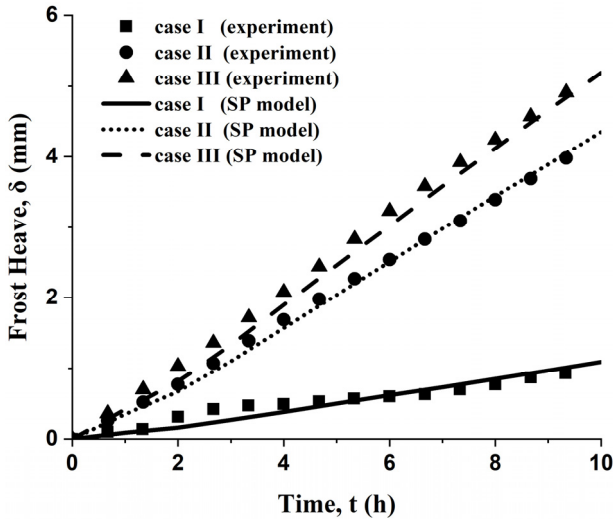


Fig. 4. Curve fittings based on experimental results using SP model

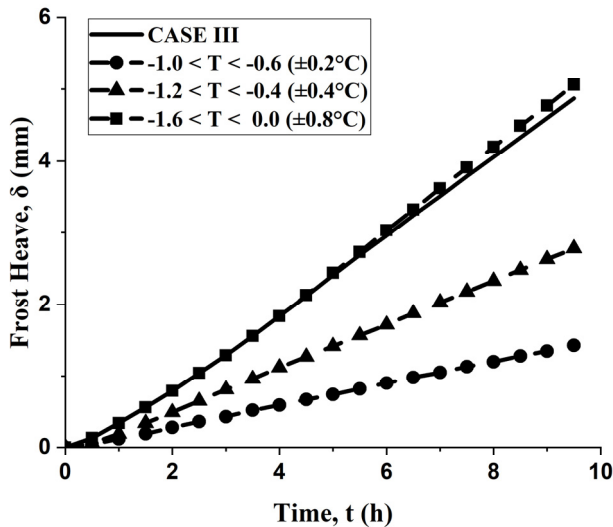


Fig. 5. Frozen fringe effect on frost heave

하다. 그 결과, 실트 함량이 10% 이상부터 동상에 상당히 민감한 것으로 확인되었다. 향후 SP 모델은 동상에 민감한 토양에도 적용이 가능할 것으로 예상된다.

SP 모델은 frozen fringe 내부에서의 얼음 성장을 이용한 경험적 모델로 frozen fringe의 온도범위가 필요하다. Fig. 5는 frozen fringe 내부의 평균 온도(T)를 -0.8°C 로 간주하고 $\pm 0.2, \pm 0.4, \pm 0.8^{\circ}\text{C}$ 의 3가지 frozen fringe 온도 범위에 따른 동상 거동을 Case III과 비교하여 보여주고 있다. Frozen fringe의 온도 범위가 넓어질수록 동상량과 동상속도는 증가하고 있으며, 최종 동상량은 상당한 차이를 보여주고 있다. SP 모델은 경험적 접근 방식으로 개발된 모델로 향후 다양한 토양에 대한 적용성 검토를 통해 frozen fringe의 온도 범위와 SP 대표값에 대한 추가적인 검토가 필요하다.

4. 결 론

경험적 모델을 포함한 기존 동상 해석 모델은 주로 점토질 토양에 대한 검토 결과만을 제시하고 있어 실제 동상에 민감한 토양에 적용하기에는 한계가 있다. 본 연구에서는 일본 JGS 실험법으로 평가한 동상에 민감한 실트질 토양을 대상으로 경험적 접근 방식으로 개발된 SP 모델의 신뢰성을 검토하였다. 동상 실험과 모델 해석 결과를 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) SP 모델은 동상 연구에서 국제적으로 통용되는 Segregation Potential을 이용한 동상 해석 모델이다. SP 모델은 열 해석만으로 간단하게 동상 해석이 가능하다는 장점을 보유하고 있으며, SP를 이용한 동상 연구에도 적용이 가능하여 실용적 측면과 학술적 측면에서 활용도가 높을 것으로 예상된다.
- (2) 실험 결과와 비교하여 SP 모델은 동상에 상당히 민감한 토양에 대해서도 동상 평가가 충분히 가능하다. 경험적 접근 방식으로 개발된 SP 모델은 SP와 frozen fringe의 온도 범위가 동상 거동 평가에 지배적이다. 본 연구에서는 모든 실험의 경우에 대해 frozen fringe의 온도 범위가

Table 3. JGS frost susceptible criteria and SP based on curve fitting

	JGS 0172 (2003) Classification			SP ($\text{mm}^2/\text{C}/\text{h}$)
	Low	Medium	High	
	< 2.4 mm/d	2.4-7.2 mm/d	> 7.2 mm/d	
Case I		2.4		3.79
Case II			10.17	16.43
Case III			12.69	17.82

±0.8°C에서 해석과 실험결과가 가장 유사하게 평가되었다. 다만, 제한된 실험결과를 기반으로 frozen fringe의 온도 범위를 ±0.8°C로 제한하기에는 한계가 있다. SP 모델의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 frozen fringe의 온도 범위에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업) 사업으로 수행되었습니다(과제번호 20230081-001, 극한건설 환경 구현 인프라 및 TRL6 이상급 극한건설 핵심기술 개발).

References

- Akagawa, S. (1988), Experimental study of frozen fringe characteristics, *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 15, pp. 209~223.
- Azmatch, T. F., Segoo, D. C., Arenson, L. U. and Biggar, K. W. (2011), Tensile strength and stress-strain behaviour of Devon silt under frozen fringe conditions, *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 68, pp. 85~90.
- Bilodeau, J. P., Doré, G. and Pierre, P. (2008), Gradation influence on frost susceptibility of base granular materials, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 9, No. 6, pp. 397~411.
- Bronfenbrener, L. and Bronfenbrener, R. (2010), Modeling frost heave in freezing soil, *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 61, No. 1, pp. 43~64.
- Chamberlain, E. J. (1981), Frost susceptibility of soil, review of index tests, *Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH, Hanover*
- Chen, S. X. (2008), Thermal conductivity of sands, *Heat Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 1241~1246.
- Hendry, M. T., Onwude, L. U. and Segoo, D. C. (2016), A laboratory investigation of the frost heave susceptibility of finegrained soil generated from the abrasion of a diorite aggregate, *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 123, pp. 91~98.
- Henry, K. S. (2000), A review of the thermodynamics of frost heave, *Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH, Hanover*, pp. 1~111.
- JGS 0172 (2003, 2009), Test method for frost susceptibility of soils, *Japan Geotechnical Society; Tokyo, Japan*, pp. 1~9.
- Jin, H, Ryu, B. H. and Lee, J. (2022), Assessment of the effect of fines content on frost susceptibility via simple frost heave testing and SP determination, *Geomechanics and Engineering*, Vol. 30, No. 4, pp. 393~399.
- Konrad, J. M. and Morgenstern, N. R. (1981), The segregation potential of a freezing soil, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 18, pp. 482~491.
- Konrad, J. M. (1994), Sixteenth Canadian geotechnical colloquium: Frost heave in soils: Concepts and engineering, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, pp. 223~245.
- Michalowski, R. L. (1993), A constitutive model of saturated soils for frost heave simulations, *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 22, No. 1., pp. 47~63.
- Michalowski, R. L. and Zhu, M. (2006), Frost Heave Modelling Using Porosity Rate Function, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.30, pp. 703~722.
- O'Neil, K. (1983), The physics of mathematical frost heave models: a review, *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 6, No. 3, pp. 275~291.
- Park, D. -S., Shin, M. -B. and Seo, Y. -K (2021). Development of Numerical Analysis Model for the Calculation of Thermal Conductivity of Thermo-syphon, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 37, No. 1, pp. 5~15 (In Korean).
- Sheng, D., Zhang, S., Yu, Z. and Zhang, J. (2013), Assessing frost susceptibility of soils using PCHeave, *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 95, pp. 27~38.
- Thomas, H. R., Cleall, P., Li, Y.-C., Harris, C. and Kern-luetschg, M. (2009), Modelling of cryogenic processes in permafrost and seasonally frozen soils, *Geotechnique*, Vol. 59, No. 3, pp. 173~184.
- Tice, A. R., Black, P. B. and Berg, R. L. (1989), Unfrozen water contents of undisturbed and remolded alaskan silt, *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 17, No. 2, pp. 103~111.
- Williams, P. J. and Smith, M. W. (1989), *The frozen earth: fundamentals of geocryology*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 1~306.
- Zhang, Y. (2014), *Thermal-hydro-mechanical model for freezing and thawing of soils*, the University of Michigan, Michigan, pp. 1~217.
- Zhou, J. and Li, D. (2012), Numerical analysis of coupled water, heat and stress in saturated freezing soil, *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 72, pp. 43~49.
- Zhou, J., Pei, W., Zhang, X., Liu, W. and Wei, C. (2022), An easy method for assessing frost susceptibility of soils: the freezing ring test, *Acta Geotechnica*, Vol. 17, pp. 5691-5707
- Zhu, M. (2006), *Modeling and simulation of frost heave in frost-susceptible soils*, the University of Michigan, Michigan, pp. 1~232.