

## 모듈러 도로시스템의 동결-융해에 대한 수치해석적 연구

### Numerical Study on Freezing and Thawing Process in Modular Road System

신 호 성<sup>1</sup> Shin, Hosung 김 진 옥<sup>2</sup> Kim, Jinwook  
이 장 근<sup>3</sup> Lee, Jangguen 김 동 규<sup>3</sup> Kim, Dong-Gyou

#### Abstract

In order to understand response of geo-structures to the freezing-thawing process in the ground, it is necessary to consider phase change of the pore water of the ground and also to understand soil interaction with structures. In this study, numerical analysis was carried out for freezing and thawing effect on the modular road system. Neumann's theoretical equation for freezing-thawing processes in porous media can be used to estimate frozen depth and heaving from basic soil properties and ground and surface temperature, but its application is limited to the case for the sediment with fully saturated condition and zero unfrozen water content. Numerical analysis of the modular road system was performed on various soil types and different ground water table as the varying freezing index. The amount of heaving in the silty soil was much larger than those in granite weathered soil or sandy soil, and lowering groundwater level reduced ground heaving induced by freezing. Numerical analysis for temperature history of the ground surface predicted residual heaving near the surface by the freeze-thaw process in silty soil. It ought to reduce stiffness and bearing capacity of the ground so that it will impair stability and serviceability of new road system. However, the amount of residual heaving was insignificant for the road system installed in weathered soil granite and sandy soil. Since modular road system is a pavement structure mounted on the supporting substructure unlike the prevalent road pavement system, strict criteria should be applied for uniform and differential settlement of the pavement system.

#### 요 지

지반의 동결-융해 과정에 의한 지반구조물의 거동 특성을 이해하기 위해서는 지반내 간극수의 상변화와 지반과 구조물의 상호작용에 대한 이해가 필요하다. 본 연구에서는 모듈러 도로시스템의 동결융해의 영향에 대한 수치해석적 연구를 수행하였다. Neumann의 동결-융해 이론식을 이용하여 기본 지반 물성치와 지중과 지표면의 온도조건에 대한 동결심도와 히빙량을 예측할 수 있으나, 지반의 완전포화 및 완전동결의 제한된 경우에만 적용할 수 있다. 동결지수에 따른 모듈러 도로시스템의 수치해석은 다양한 지반조건과 지하수위에 대하여 수행되었다. 동결 히빙량은 화강풍화토 이나 모래지반에 비하여 실트질 지반에서 매우 크게 발생하였으며, 지하수위의 저하는 동결 히빙량을 감소시켰다. 실트질 지반에 설치된 도로시스템의 온도이력에 대한 수치해석은 지표면의 동결-융해 과정을 거치면서 지표면에 잔류 히빙을 예측하였다. 이는 지반의 강성과 지지력을 급격하게 감소시켜 모듈화 도로시스템의 안정성과 사용성을 저해할

1 정희원, 울산대학교 건설환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Univ. of Ulsan, Tel: +82-52-259-1723, Fax: +82-52-259-2629, [shingeo@ulsan.ac.kr](mailto:shingeo@ulsan.ac.kr), Corresponding author, 교신저자)

2 정희원, 울산대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, PhD Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Univ. of Ulsan)

3 정희원, 한국건설기술연구원, 연구위원 (Member, Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

수 있다. 다만, 화강풍화토와 모래지반의 경우는 잔류 히빙량은 미비한 것으로 나타났다. 모듈러 도로시스템은 기존 도로포장 시스템과 달리 지지구조 상부에 설치된 포장 구조물이므로, 포장 구조물의 균등 연직변위와 부등 변형에 대한 엄격한 기준이 적용되어야 할 것으로 사료된다.

**Keywords** : Modular road system, Frozen soil, THM coupling numerical analysis

## 1. 서 론

지반의 동결현상은 대기온도가 0°C 이하로 지속되면서 지반 공극수의 상변화에 의하여 발생한다. 그리고 지반 공극내 얼음과 물의 경계면에 형성된 온도구배는 부의 간극수압인 cryogenic suction을 유발하여 부동지반의 간극수를 동결주변부(frozen fringe)로 끌어들이게 된다(Thomas et al., 2009). 지반 공극이 커질수록, cryogenic suction은 감소하지만 지반의 투수계수는 증가하게 된다. 따라서 유동 가능한 간극수의 양은 지반종류, 즉 지반의 공극 구조에 직접적인 영향을 받게 된다. Cryogenic suction에 의하여 동결주변부로 이동하여 누적된 간극수는 상변화를 통하여 아이스렌즈(ice lens)를 형성하고, 이 아이스렌즈가 성장하여 지반의 팽창 또는 융기현상이 발생한다.

계절 동토지역으로 분류되는 국내에서 동결지반에 대한 연구는 현장실험 및 실내실험을 통하여 진행되었으며, 국내 지반의 동결특성 분석과 동결에 의해 야기되는 문제점들을 해결하기 위한 다양한 실험적 연구들이 주를 이루고 있다. 국내 대표지반에 대한 실내 동상팽창압 시험이 수행되었으며(Shin and Park, 2003), 현장 도로 모형실험에서 포장구조체의 역학적 실험을 통하여 동상민감성에 근거한 개선된 동상 방지층 설계법이 제시되었다(Shin et al., 2010). Yoon(2003)은 화강 풍화토의 동결융해에 의한 전단탄성계수 변화에 대한 반복 삼축 압축 시험을 수행하였으며, Cho(2002)는 도로포장에서 동상 방지층의 실효성을 검증하기 위한 현장계측 및 실내실험을 진행하였다.

동결지반에 설치된 도로의 거동과 안정성을 해석하기 위한 수치해석적인 연구도 진행되어 왔다. Shin 등(2009)은 지반동결 공법에 대한 실내실험과 현장실험, 그리고 수치해석을 통하여 열적 안정성 검토를 수행하였다. 또한 미공병단의 도로 동상시뮬레이션 프로그램인 FROST를 이용한 도로포장의 수치해석적 연구도 수행되었다(Kweon, 2003; Im, 2010). Hong(2010)은 포장도로의 실측값을 활용하여 동결깊이 추정모델을 제안

하였으며, Kim(2010)은 지반의 동결조건을 고려한 열전도에 관한 유한요소 해석을 수행하였다.

도로시스템에서 지반의 동결 및 융해 현상은 노상토의 불균등한 변형을 발생시켜 도로시스템에 손상을 야기한다. 지반 동상에 의한 부등 융기는 도로시스템에 추가적인 하중으로 작용하여 포장체의 손상을 유발하며, 해빙기의 융해에 의한 지반 함수비의 증가는 도로포장 하부지반의 강성과 강도를 감소시키게 된다(Kweon, 2003). 지반 공극수의 외부 소산으로 노상토의 강도가 회복되지 않음(Yi, 2003), 초기의 지반강도가 회복되지 않으며 반복적인 동상융해 작용은 지반강도를 감소시키게 된다(Liu, 2014). 이러한 피해를 줄이고 도로 포장 설계시 노상의 동결을 방지하기 위하여, 도로하부에 노상에 동상방지층을 별도로 시공하도록 하고 있다(국토해양부, 2012).

최근 도로 포장시스템의 급속시공 및 유지보수 최소화를 위한 모듈러 도로시스템이 제안되었다(Lee et al., 2013). 모듈러 도로시스템은 포장 모듈, 슬래브(slab) 모듈, 지지구조 모듈로 구성되어 있다(Fig. 1). 포장 모듈은 주행성 향상, 소음감소, 배수 및 투수성능 확보를 목표로 하며, 슬래브 모듈은 축하중 및 환경하중을 지지하고 지지구조 모듈로 하중을 효과적으로 전달하는 역할을 한다. 크로스빔(cross beam)과 파일로 구성된 지지구조 모듈은 기존 도로의 노상과 보조기층을 대체하며, 상부의 하중을 안정적으로 지지하는 역할을 한다. 모듈러 시스템은 포장층 하부에 동상방지층을 설계하지 않고 크로스빔 모듈 형태로 대처하는 방안이다. 동상에 의한 지반팽창은 포장체 상부의 교통하중과 더불어 도로 시스템에 추가적인 하중을 유발하며, 해빙기 동결지반의 융해는 노상의 역학적 특성치를 저하하고 모듈러 시스템의 지지력을 약화시킬 수 있다. 따라서 모듈러 도로시스템의 설계시, 동결 및 융해에 의하여 발생할 수 있는 문제들에 대한 충분한 검토가 필요하다.

본 논문은 도로 하부지반의 동결 및 융해 작용이 크로스빔 지지모듈에 미치는 열-수리-역학적 영향에 대한 수치해석을 수행하고자 한다. 지반동결에 대한 이론식

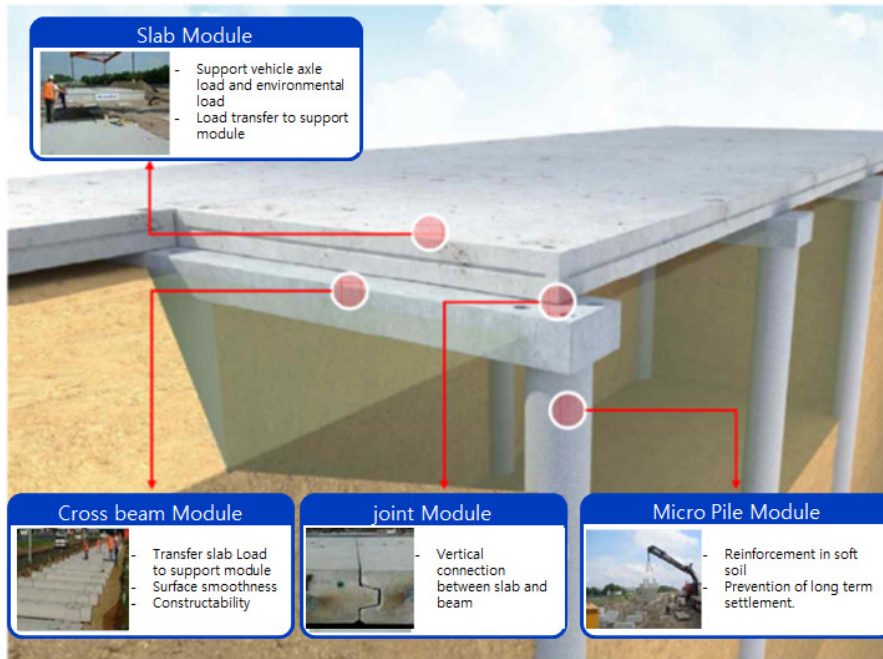


Fig. 1. Modular road system (KICT, 2015)

을 이용하여 동결심도와 히빙량에 대한 지반변수의 영향을 분석하고, 다양한 지반조건(모래, 화강풍화토, 실트)에서 동결지수가 모듈러 시스템과 하부 지반에 미치는 영향을 분석한다. 그리고, 영월 지역의 기상청 온도 자료를 적용하여 동결-융해작용에 의한 모듈러 도로시스템에서 지반변위와 구조물의 부재력에 대한 평가를 수행하고자 한다.

## 2. 동결지반에 대한 열-수리-역학적 해석

### 2.1 동결지반에 대한 지배방정식과 유한요소 수식화

동결지반은 흙, 물, 공기에 의한 3상으로 포화 혹은 불포화 상태이며, 국부적인 온도평형조건을 가정하였다. 동결지반의 열-수리-역학적 거동은 흙/얼음으로 구성된 골격에 의해 전달되는 응력  $\bar{\sigma}$ , 유체압  $P_i$ , 그리고 온도  $T$ 를 주변수로 선정하여 지배방정식을 기술하였다.

흙입자에 대한 질량보존의 법칙은 고체상태로만 존재하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_s(1-\phi)] + \nabla \cdot [\rho_s(1-\phi)\underline{u}] = 0 \quad (1)$$

여기서,  $\rho_s$ 는 흙입자의 단위 질량이며,  $\phi$ 는 흙의 간극률(porosity), 그리고  $\underline{u}$ 는 흙입자의 속도이다. 물은 고체

상태(얼음)와 액체상태로 존재할 수 있으므로, 이에 대한 질량보존의 법칙은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} [\rho_i^w \phi S_i + \rho_l^w \phi S_l + \rho_g^w \phi S_g] \\ & + (\rho_i^w \phi S_i + \rho_l^w \phi S_l + \rho_g^w \phi S_g) \nabla \cdot \underline{u} + \nabla \cdot \underline{q} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $\rho_i^w$ ,  $\rho_l^w$ 와  $\rho_g^w$ 는 단위 체적당 고체, 액체, 기체 상태의 물의 질량을 나타내며,  $S_i$ ,  $S_l$ 와  $S_g$ 는 공극에서 물의 얼음, 액체 그리고 기체 상태의 포화도를 나타낸다. 그리고  $\underline{q}$ 는 액체 상태의 단위면적당 유량이며 Darcy의 법칙으로 정리할 수 있다. 에너지 보존의 법칙은 내부 에너지를 이용하여, 3상의 다공질 재료에 대한 평형 방정식을 이용하여 유도하였다.

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} [(1-\phi)\rho_s^s E_s^s + \phi S_i \rho_i^w E_i^w + \phi S_l \rho_l^w E_l^w + \phi S_g \rho_g^w E_g^w] \\ & + ((1-\phi)\rho_s^s E_s^s + \phi S_i \rho_i^w E_i^w + \phi S_l \rho_l^w E_l^w + \phi S_g \rho_g^w E_g^w) \nabla \cdot \underline{u} \\ & + \nabla \cdot (\rho_l^w E_l^w \underline{q} + \underline{i}) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $E_s^s$ 는 흙입자(고체)의 단위질량당 내부에너지이며,  $E_i^w$ 와  $E_l^w$ 는 물의 얼음상태와 액체상태에서의 단위질량당 내부에너지를 나타낸다. 다공질 재료에서 열

전도 (heat conduction)에 의한 에너지 전달은 Fourier의 법칙( $\dot{q} = -\lambda \nabla T$ )을 이용하여 산정하였다.

그리고, 거시적인 힘평형 방정식으로부터 다음과 같은 전응력에 대한 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \cdot \underline{\underline{\sigma}} + \rho_m \underline{\underline{g}} \quad (4)$$

여기서, 전응력은  $\underline{\underline{\sigma}} \approx \underline{\underline{\sigma}}' + S_i \sigma_i \underline{\underline{1}} + S_l (-P_l) \underline{\underline{1}} + S_g (-P_g) \underline{\underline{1}} = \underline{\underline{\sigma}} - S_l P_l \underline{\underline{1}}$  과 같이 표현할 수 있다.

제시된 상호 의존적 지배방정식들에 Galerkin 수식화를 적용하고, 방정식들에 사다리꼴 법칙의 시간적분 ( $\int_{t^{(n)}}^{t^{(n+1)}} P dt \approx \Delta t [P^{(n)} + \theta \Delta P + \theta \Delta P]$ )과 Newton의 반복과정을 도입하였다. 시간 적분된 지배방정식에 수식화에 공간 보간 함수를 도입하여 주변수들(변위  $\underline{u}$ , 유체압  $P$ , 온도  $T$ )에 대한 행렬 형태의 방정식을 얻을 수 있다. 최종적으로 열-수리-역학 구성모델들과 연계하여, 다공질 재료에서 다상 흐름의 연관된 현상에 대한 수치해석을 위하여 개발된 Geo-COUS(Geo-COUpled Simulator) 유효요소 프로그램과 결합하였다.

## 2.2 포화-불포화 동결지반의 탄성계수의 평가

동토지반의 탄성계수는 온도변화에 매우 민감하며, 불포화 영역에서는 공기 포화도와도 밀접한 관련이 있다. 따라서, 본 연구에서는 탄성계수를 직접적으로 평가하

기 어려우므로, 기존에 수행된 1차원 동결 팽창압 실험 (Shin and Park, 2003)에 대한 역해석을 통하여 불포화 동결토의 탄성계수를 산정하였다(Shin and Park, 2016).

$$E = E_{soil} + m \cdot S_i \cdot (1 - S_g)^{\alpha_E} \quad (5)$$

여기서,  $E_{soil}$ 은 비동결토의 탄성계수,  $S_g$ 는 공극에서 얼음과 물을 제외한 공기의 포화도,  $m$ 는 얼음 포화도  $S_i$ 에 따른 탄성계수의 증가계수(Klar et al., 2010), 그리고  $\alpha_E$ 는 불포화 동결토에서 공기 포화도에 따른 탄성계수의 감소계수이다.

국내 모래, 화강풍화토, 그리 실트 지반에 대한 1차원 동결 팽창압 실험 결과를 이용하여 지반물성치에 대한 역해석을 수행하였다. 역해석을 수행하여 평가된 동토 지반의 탄성계수와 수정계수는 Table 1에 제시하였다. 모래에 비하여 실트지반이 얼음포화도에 대한 탄성계수의 민감도가 80배 정도 큰 것으로 나타났다. 그리고 불포화 상태에서 실트보다 화강풍화토가 공기포화도의 탄성계수에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다.

## 3. 동결지수에 따른 모듈러 시스템에 대한 수치 해석

### 3.1 동결지수에 대한 이론적 해석

지반의 동결심도는 동결지수(FI, freezing index) 뿐만

Table 1. Soil properties from laboratory tests and inversion results (Shin and Park, 2016)

Soil type		Sandy soil	Weathered granite soil	Silty soil
Mechanical	Initial void ratio	0.315	0.583	0.734
	Stiffness modification factor: $m$ [kPa], $\alpha_E$	$3.04 \times 10^3$ 8.0	$9.81 \times 10^4$ 5.6	$2.65 \times 10^5$ 4.3
Hydraulic	Unfrozen water content: $\alpha$ $S_l = [1 - (T - T_0)^\alpha]$	-0.7	-0.4	-0.3
	Water retention curve: $a$ [kPa], $b$ , $c$ $S_e = \left[ \ln \left( e + \left( \frac{P_c}{a} \right)^b \right) \right]^{-c}$	10.0, 2.5, 0.45	6.0, 5.0, 0.5	2.5, 7.0, 0.55
	Intrinsic hydraulic conductivity: $k_i$ [m/s]	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-6}$
	Relative hydraulic conductivity: $\lambda$ $k_{rl} = \sqrt{(S_e)} (1 - (1 - S_e^{1/\lambda})^\lambda)^2$	0.5	0.6	0.7
Thermal	Thermal conductivity [W/m·K]	$\lambda = \lambda_{soil}^{1-\phi} \lambda_{water}^{\phi \times S_i} \lambda_{ice}^{\phi \times S_i}$ (Geometric mean) $\lambda_{soil} = 3.0$ , $\lambda_{water} = 0.6$ , $\lambda_{ice} = 2.2$		
	Specific heat capacity [J/kg·K]	$C_{soil} = 874$ , $C_{water} = 4190$ , $C_{ice} = 2095$		

아니라 지반의 열-수리학적 물성에 크게 의존한다. 지금까지 동결심도 산정법은 지반의 열물성치를 이용한 이론식과 경험식을 이용하여 동결지수와와의 상관관계를 정립하여 간접적으로 산정하고 있다. 지반의 동결 및 융해에 의한 0°C의 동결선(freezing-thawing front)의 이동에 대한 이론식은 Neumann(1860)에 의하여 유도되었으며, Carslaw와 Jaeger(1947)에 의하여 동결깊이는  $z_f = \alpha \sqrt{t}$ 으로 제시되었다. 지표면의 온도하강에 의한 동결깊이 산정을 위한 계수는 식 (6)으로부터 산정한다.

$$\frac{\exp(-\alpha^2/4\kappa_f)}{\operatorname{erf}(\alpha/2\sqrt{\kappa_f})} + \frac{T_g\lambda_u}{T_s\lambda_f} \sqrt{\frac{\kappa_f}{\kappa_u}} \frac{\exp(-\alpha^2/4\kappa_u)}{\operatorname{erf}(\alpha/2\sqrt{\kappa_u})} = -\frac{\sqrt{\pi}L_f}{c_fT_s} \frac{\alpha}{2\sqrt{\kappa_f}} \quad (6)$$

여기서, 하부첨자  $u$ 와  $f$ 는 비동상(unfrozen)과 동상(frozen) 상태를 나타낸다. 그리고  $\lambda$ ,  $\kappa$ ,  $c$ 는 지반의 열전도계수, 열확산계수, 열용량이며,  $L_f$ 는 물의 잠재융해열(latent heat of fusion)이다. Neumann의 동결선 이론

식은 지반이 완전포화상태에서 부동수가 없으며 cryogenic suction 등에 의한 물의 흐름이 없는 가정하에 유도된 이론식이다. 제시된 이론식은 개발된 프로그램을 검증하고 다양한 현장조건에 대한 참고 값으로 사용할 수 있다.

개발된 Geo-COUS 프로그램의 동결 및 융해에 대한 수치적인 정확성을 평가하였다. 초기 지중 온도  $T_g=10^\circ\text{C}$ 의 균등한 온도분포를 갖는 지반에 지표면 온도를  $T_s=-10^\circ\text{C}$ 로 하강하여 유지하였을 때, 0°C의 동결선의 심도를 수치해석으로 산정하였다. 수치해석에 의하여 산정된 동결심도는 식 (6)의 이론식과 매우 유사한 결과를 나타내고 있다(Fig. 2). 또한,  $T_g=-10^\circ\text{C}$ 의 초기 지중 온도 조건에서 지표면 온도를  $T_s=10^\circ\text{C}$ 로 융해하였을 때, 0°C의 동결선의 심도는 이론식과 일치하였다. 동결시보다 해동시에 0°C의 동결도의 침투속도가 빠른 것은 물보다 얼음의 열확산계수가 높기 때문이다.

Neumann의 이론식을 이용하여 지반의 기본 물성치, 열적 물성, 지중 초기 온도조건에 따른 동결심도의 영향을 분석하였다. 초기 지중온도는  $T_g=10^\circ\text{C}$ 로 설정하고 지표면 온도를  $T_s=-5^\circ\text{C}$ 로 지속하면서, 시간경과에 따

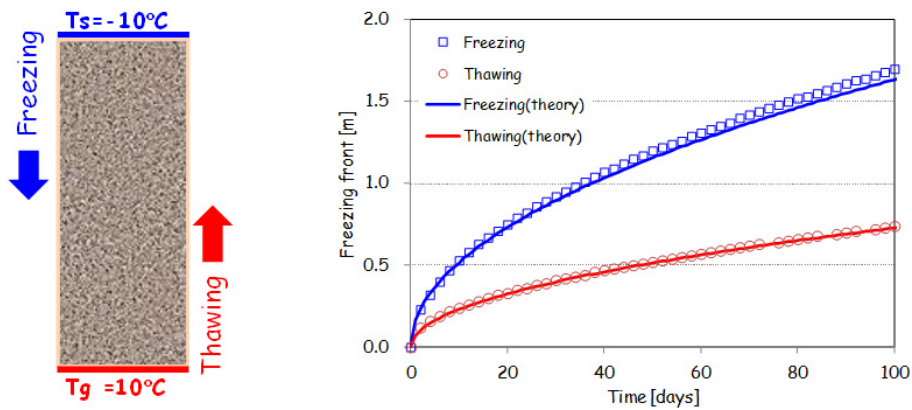


Fig. 2. Propagation of freezing front during freezing and thawing in column simulations

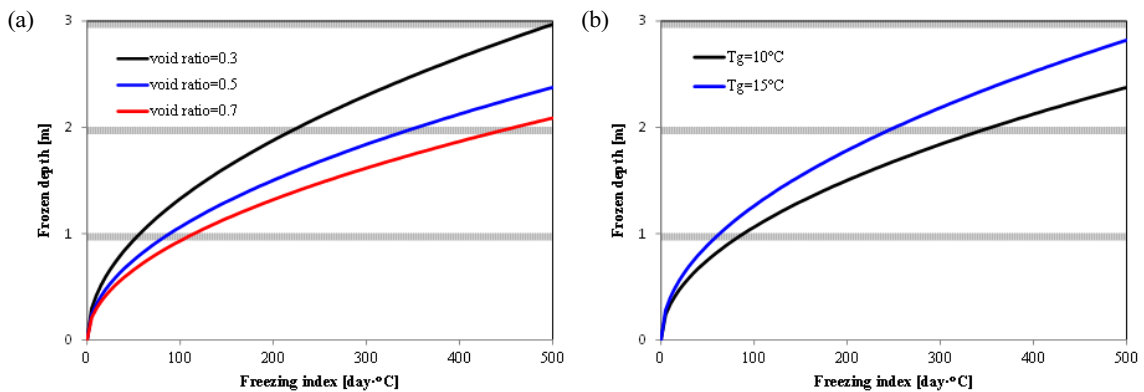


Fig. 3. Theoretical frozen depth. (a) effect of soil void ratio, (b) effect of initial ground temperature  $T_g$

른 동결심도로 산정하였다. Fig. 3(a)는 지반의 간극비 변화에 따른 동결지수에 따른 동결심도를 보여주고 있다. 간극비의 증가는 상변화를 위한 수분 함량의 증가를 의미하며, 간극비의 증가는 동결면의 하강속도를 늦추는 효과가 있다. Fig. 3(b)는 동결심도에 대한 초기 지중 온도의 영향을 보여주고 있다. 높은 초기 지중온도는 지표면 방향으로 높은 열적 경사(thermal gradient)를 형성하여 동결면의 하강속도를 높이는 효과가 있다. 따라서 동결심도를 평가하는데 있어서 외적인 지표면 온도뿐만 아니라, 지중 온도 또한 중요한 인자임을 알 수 있다.

동결지수에 따른 동결선의 깊이를 이용하여 이론적인 지표면 히빙량을 산정할 수 있다. 포화된 지반에서 간극수의 상변화에 의한 체적 팽창이 9%라고 가정하고, 지

반의 간극비와 지중온도에 따른 지표면 히빙량을 산정하였다. Fig. 4(a)는 간극비가 증가할수록 동결심도는 작아지지만 높은 수분 함량으로 인하여 히빙량이 증가함을 알 수 있다. 완전 포화지반에서 부동수와 cryogenic suction에 의한 물의 흐름이 없는 경우, 동결지수 500 day·°C에서 동결에 의한 동상량은 8cm내 외임을 알 수 있다. 초기 지중온도가 높을수록 열적 경사의 증가로 인하여 동상 히빙량이 증가함을 알 수 있다(Fig. 4(b)).

### 3.2 수치해석 해석 단면

모듈러 도로시스템에서 크로스빔 형식 모듈에 대한 지반의 동결 및 융해의 영향을 평가하기 위한 수치해석을

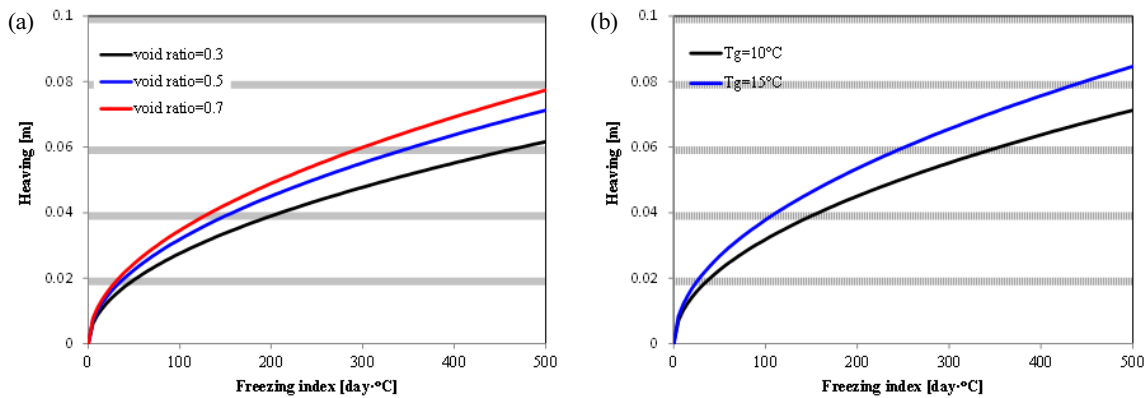


Fig. 4. Ground heaving as a function of FI (freezing index). (a) effect of soil void ratio, (b) effect of initial ground temperature  $T_g$

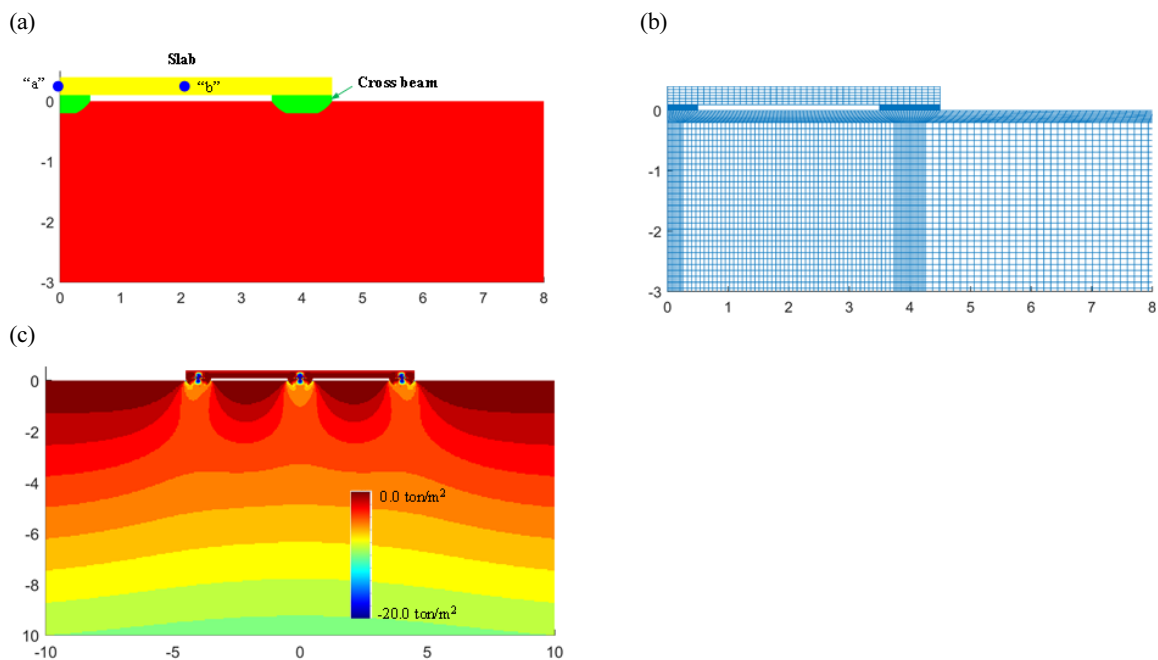


Fig. 5. (a) Analytic domain of crossbeam type modular system, (b) FEM mesh, (c) Vertical stress distribution due to surface traffic load and self-weight of ground and modular system

수행하였다. Fig. 1에서 모듈러 도로시스템은 도로하중을 지지하고 이를 하부 크로스빔으로 전달하는 슬래브 모듈과 전달된 상부 하중을 하부지반으로 안정적으로 지지하는 크로스빔으로 구성되어 있다. 슬래브 모듈은 두께 0.3m, 길이 8m이며, 크로스빔은 상부 폭이 1m이며 하부는 응력의 분산을 위하여 곡선형(반경 R=0.61m)으로 구성되어 있다. 모듈러 도로시스템의 폭을 고려하여 평면 변형 해석조건으로 수치 모델링하였다(Fig. 5). 지중 동결 및 융해 해석에서, 지표면의 온도조건은 공기에 의한 지표면 대류현상을 고려하지 않고 대기온도와 지표면 온도가 동일하다고 가정하였다.

해석영역은 지하 50m, 수평 80m까지 수행하였으며, 초기 및 하부 경계온도 조건은 10°C로 일정하다고 가정하였다. 동결-융해 해석은 열-수리-역학 현상에 대하여 절점수=88,934, 요소수=29,370(8절점 변위, 4절점 온도 및 유체압 요소)를 사용하여 대칭해석을 수행하였다. 지표면의 온도를 -5°C로 일정하게 유지하면서 동결지수에 대한 해석을 수행하였다. 해석 지반조건은 실트질, 확장 풍화토, 그리고 모래지반에 대하여 해석을 수행하였다. 그리고 크로스빔 하부를 모래로 치환한 경우에 대한 추가적인 해석을 수행하였다. 지하수위는 지표면 GWT=0m, -1m, -3m에 대하여 비교해석을 수행하였다.

### 3.3 지반조건에 따른 모듈러 시스템 수치해석

Fig. 6은 실트질 지반에 설치된 모듈러 도로시스템에서 동결지수 600 day·°C일 때 지반 상태변수의 분포를 나타내고 있다. Fig. 6(a)에서 지표면의 온도하강에 의하여 균등한 동결면의 하강을 보여주고 있으며, 크로스빔 하부에서 온도하강이 다소 느리게 진행됨을 알 수 있다. Fig. 6(b)는 동결현상은 의한 지반의 간극비 변화를 보여주고 있다. 지표면 부근에서 상변화와 cryogenic suction에 의한 큰 간극비의 증가를 보여주고 있으며, 특히 크로스빔 측면에서 간극비의 증가가 크게 나타남을 알 수 있다. 다만, 크로스빔 하부에서는 비교적 큰 연직방향 응력으로 인하여 간극비의 증가가 작게 나타난다. Fig 5(c)의 얼음 포화도는 지중 온도에 의한 부동수의 양으로부터 결정되므로, Fig. 6(a)의 경향과 일치하는 분포를 보이고 있다. Fig. 6(d)는 연직방향 변위의 크기를 나타내고 있으며, 상부 상재하중이 없는 자유장 구간에서 최대 동상 히빙량을 보이고 있으며 크로스빔 하부는 상재하중의 영향으로 인하여 다소 작은 히빙량을 보이고 있다.

Fig. 7은 실트질 지반에서 지하수위(GWT) 조건의 변화에 따른 동결작용에 의한 모듈러 시스템과 지반의 변위, 그리고 슬래브에 작용하는 부재력을 나타내고 있다.

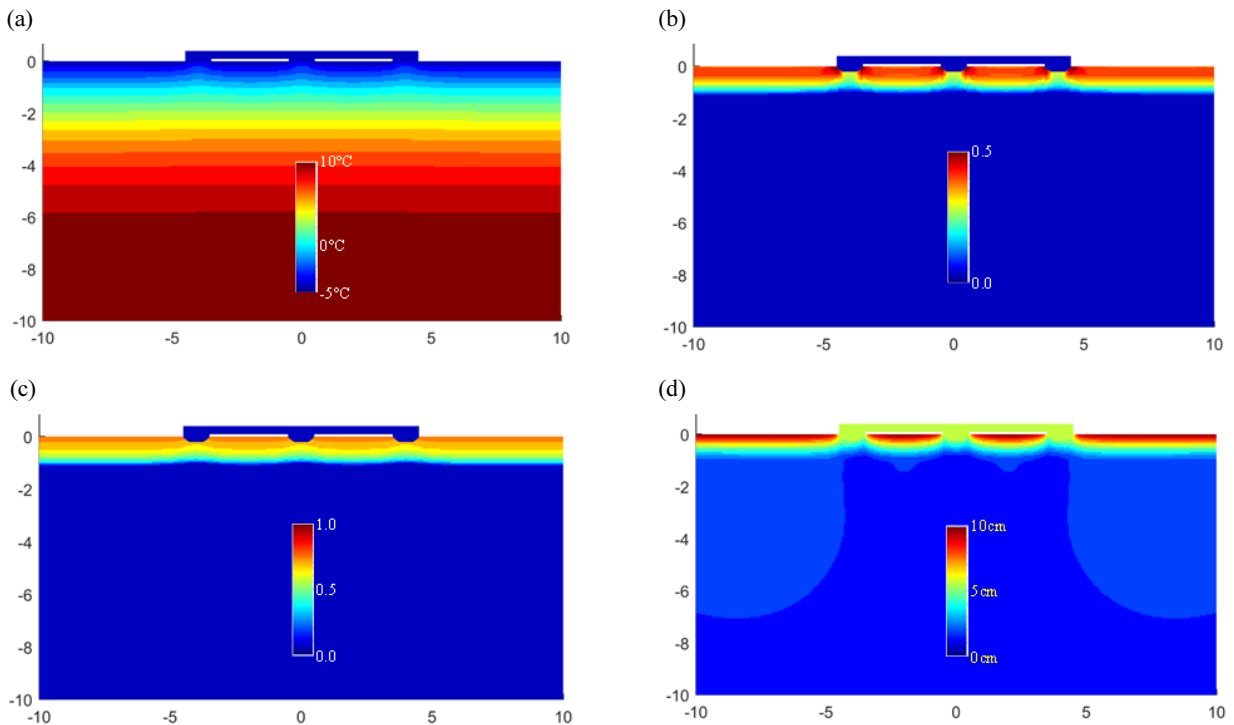


Fig. 6. Numerical result in silty soils with GWT=0m and FI=600 day·°C. (a) Temperature distribution, (b) void ratio, (c) ice saturation, (d) vertical displacement

Fig. 7(a)는 상재하중의 영향이 없는 자유장에서의 연직 방향 변위의 크기를 나타내고 있다. 지하수위가 지표면에 위치하는 경우, 공극수의 상변화와 높은 cryogenic suction에 의한 하부 지하수의 유입으로 인하여 10cm에

근접하는 동상 히빙량을 나타내고 있다. 지하수위가 -1m에 위치하는 경우에도 8cm 정도의 지표면 히빙량을 보이고 있으며, 지하수위가 -3m에 위치하는 경우 히빙량이 상당히 저감되는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 Fig.

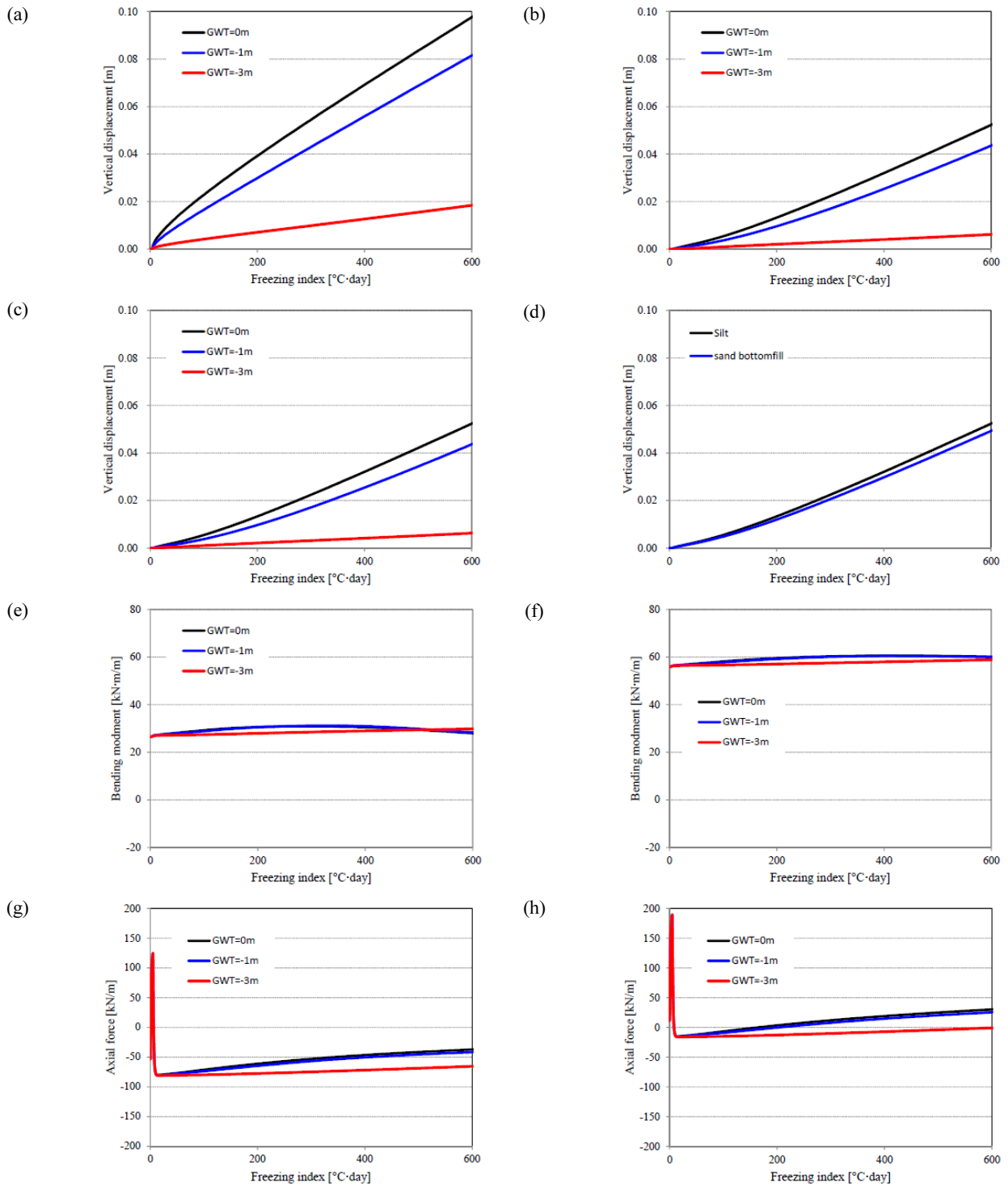


Fig. 7. Numerical summary in silty soils at different GWT. (a) vertical displacement at free field, (b) vertical displacement at the center-top of the slab, (c) vertical displacement at the bottom of crossbeam, (d) vertical displacement of slab under sand replacement at the bottom of crossbeam (GWT=0m), (e) bending moment at slab 'a', (f) bending moment of slab 'a', (g) axial force at slab 'a', (h) axial force at slab 'b'



7(b)와 7(c)의 슬래브 상부와 크로스빔 하부에서의 연직 방향 변위에서도 나타나고 있다. 지하수위가 지표면에 위치하는 경우 동결지수 600 day·°C에서 5.2cm의 히빙량을 보이고 있으며, 지하수위가 낮아질수록 4.4cm, 0.6cm로 감소함을 알 수 있다. 슬래브 상부와 크로스빔 하부의 변위차이는 단순히 크로스빔과 상부 슬래브의 열 수축의 차이에 의한 것으로, 연직 방향 변위 차이는 미비하다. Fig. 7(d)는 크로스빔 하부를 모래로 치환시 동결에 의한 히빙량을 보이고 있다. 동결면까지 치환하지 않는 경우, 모래치환에 의한 히빙량 억제는 미비한 것으로 나타났다. 본 모듈러 도로시스템은 기존의 아스팔트나 콘크리트 포장시스템과 달리 지반에 설치된 지지구조 위에 콘크리트 슬래브가 설치되므로 동결 및 융해에 의한 지반의 부등침하에 의하여 상부구조물이 직접적인 영향을 받게 된다.

지반위에 설치된 2단 연속보에서 지반반력과 슬래브에 작용하는 부재력은 지반 스프링 계수와 매우 밀접한 관련이 있다. 슬래브가 고정된 지지점으로 결속되어 있다면, Fig. 5(a)의 “a” 지점에서의 반력은  $R=5wL/4$ 이며 반력지점에서 (-)모멘트가 발생하게 된다. 하지만, 슬래브(탄성계수 =  $E$ , 단면 2차 모멘트 =  $I$ )가 스프링계수  $K_s$ 를 갖는 지반 위에 설치되는 경우, “a” 지점에서의 반력은  $R=w(5K_sL^4+24EIL)/(4K_sL^3+36EI)$ 이 된다.

따라서 지반 스프링계수  $K_s$ 의 크기에 따라서 반력지점 “a” 지점에서 (+)모멘트가 발생할 수도 있다. Fig. 7(e)와 7(f)는 Fig. 5(a)의 “a”와 “b” 지점에서 동결지수에 따른 모멘트의 변화를 나타내고 있다. 크로스빔 하부 지반의 균등한 히빙량을 보이므로 동결작용에 의한 모멘트의 변화는 미비하게 나타났다. 하지만, “a” 지점에서 (+)모멘트가 발생하고 있으며, 지하수위의 변화와는 무관한 것으로 나타났다. Fig. 7(g)와 7(h)는 동결지수의 변화에 따른 “a”와 “b” 지점에서의 축력의 변화를 나타내고 있다. 온도 재하 초기단계에서는 콘크리트 슬래브내의 열전도에 의하여 인장력이 발생하게 된다. 하지만 시간경과에 의하여 콘크리트 슬래브와 열적 평형상태에 도달하면 인장력이 급격히 감소하게 되며, 크로스빔 하부지반의 동결에 의한 동상으로 인하여 추가적인 부재력이 발생하게 된다.

Fig. 8과 9는 동결지수 600 day·°C일 때, 화강풍화토와 모래지반에 설치된 모듈러 도로시스템의 동결작용에 의한 지반응력 변수의 분포를 나타내고 있다. 동결선의 하강 패턴은 실트질 지반의 경우와 상당히 유사하나, 화강풍화토와 모래지반은 상대적으로 균등한 등온선을 보이고 있다. 지반의 동결작용에 의한 얼음포화도는 지반내 온도에 의하여 결정되므로 지중 온도 분포와 유사한 패턴을 보이고 있다. 동결작용에 의한 간극비의 변화

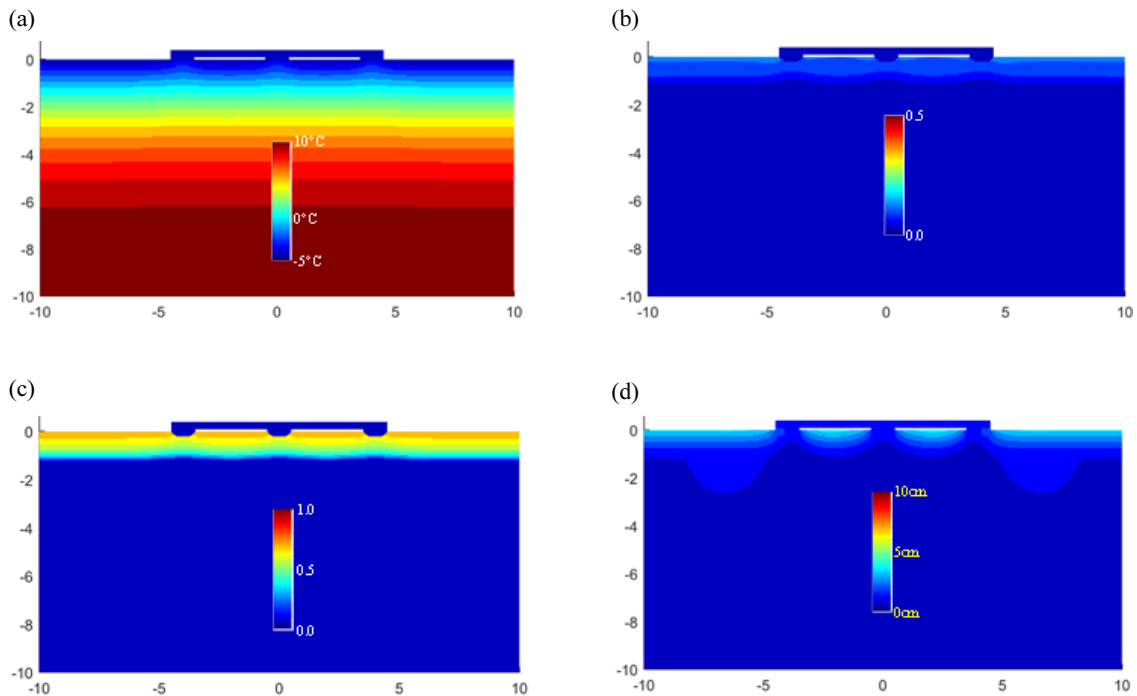


Fig. 8. Numerical result in weathered granite soils with GWT=0m and FI=600 day·°C. (a) Temperature distribution, (b) void ratio, (c) ice saturation, (d) vertical displacement

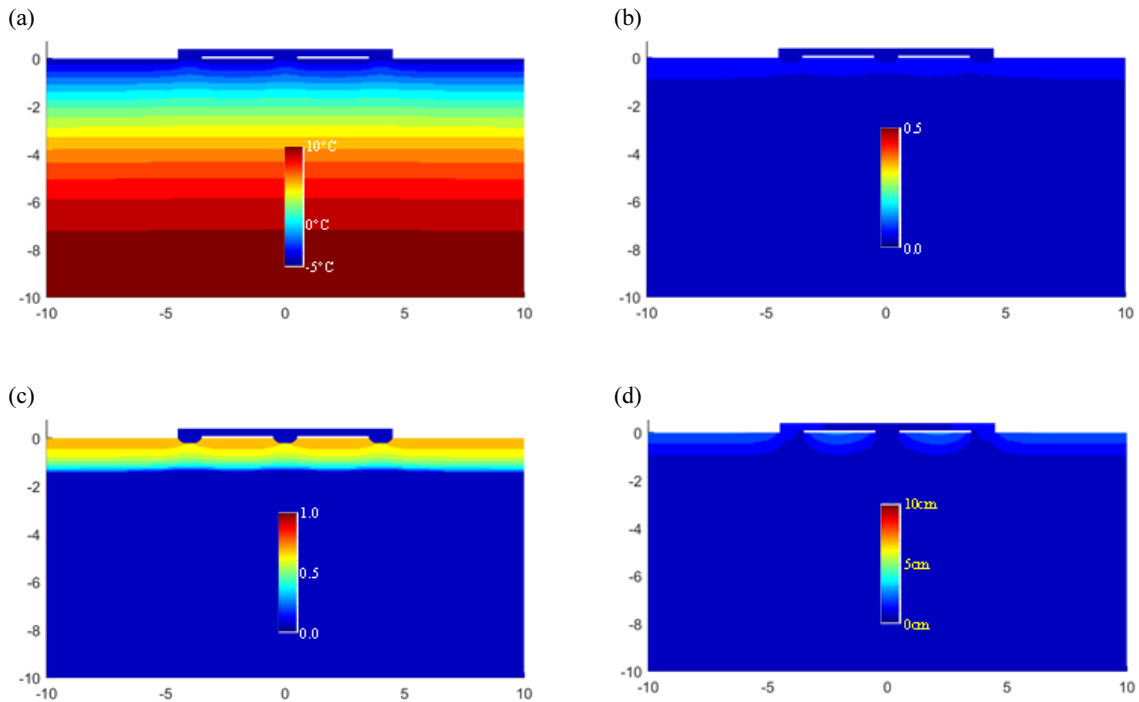


Fig. 9. Numerical result in sandy soils with GWT=0m and FI=600 day·°C. (a) Temperature distribution, (b) void ratio, (c) ice saturation, (d) vertical displacement

와 연직방향 히빙량은 실트질 지반에 비하여 급격하게 감소하였다.

Fig. 10은 연직하중이 없는 자유장과 슬래브 상부에서 지반조건과 지하수위 조건에 따른 동결지수에 의한 연직방향 동결 히빙량을 정리하였다. 자유장 조건에서 실트질 지반의 히빙량은 화강풍화토나 모래지반에 비하여 상당히 큰 값을 나타내고 있으며, 지하수위가 -3m에 도달하면서 히빙량이 감소함을 알 수 있다. 도로시스템 상부 슬래브의 연직 히빙량은 모래지반이나 화강풍화토 지반에 비하여 실트질 지반에서 cryogenic suction에 의한 추가적인 공극수의 이동으로 인하여 큰 연직변위량을 나타내고 있다. 이는 일반적인 도로 포장의 허용침하량 10cm에 비하여 작은 값이다. 하지만, 모듈러 도로시스템은 기존 도로포장 시스템과 달리 지지구조 상부에 설치된 포장 구조물이므로 균등 침하 뿐만 아니라, 부등 변위에 대한 엄격한 기준을 적용해야 할 것으로 판단된다. 지하수위의 저하에 따라 슬래브 상부의 히빙량은 급격하게 감소하나, 실트질의 경우 GTW=-3m에서 여전히 0.6cm의 히빙량을 나타내고 있다.

#### 4. 대표 온도이력에 대한 모듈러 시스템의 수치해석

3절에서는 지표면에 일정한 동결온도를 재하하여 동

결지수에 따른 모듈화 도로시스템과 하부 지반의 동결 히빙량과 응력변수에 대한 수치해석을 수행하였다. 본 절에서는 실제 온도이력을 직접 지표면에 재하하여, 시간경과에 따른 동결 및 용해에 의한 슬래브의 부재력 변화, 지표면의 연직변위의 변화에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 적용된 온도 이력은 영월지역의 기상청 온도 자료를 이용하였으며, 동결지수는 555 day·°C이다.

Fig. 11은 영월지역의 온도이력에 대한 모듈화 도로시스템의 동결과 용해에 따른 변위량과 슬래브의 부재력을 나타내고 있다. Fig. 11(b)은 실트질 지반에 설치된 도로시스템에 대하여 지반의 지하수위 조건에 따른 슬래브 상부의 연직 변위를 나타내고 있다. 지표면의 온도가 본격적으로 영하로 내려가는 170일부터 상변화와 cryogenic suction에 의한 지반 용기가 발생하며 최대 히빙량은 260일에 슬래브 상부에서 3.4cm를 나타내고 있다. 하지만, 260일 이후 지표면 온도가 0°C으로 올라가면서 지반의 용해에 의하여 지반침하가 발생하기 시작한다. 지중온도가 영상으로 평형상태에 도달했을 때 히빙량은 2.2cm 정도 잔류하게 된다. 이는 cryogenic suction에 의하여 유입된 지하수의 동결 용기에 따른 간극비의 증가가 용해를 거치면서 잔류된 것이다. 이러한 동결-용해 과정에 의한 지표면 간극비의 증가는 지반의 강성과 지지력을 급격하게 저하시키게 된다. 지하수위가 GWT=-1m일 때,

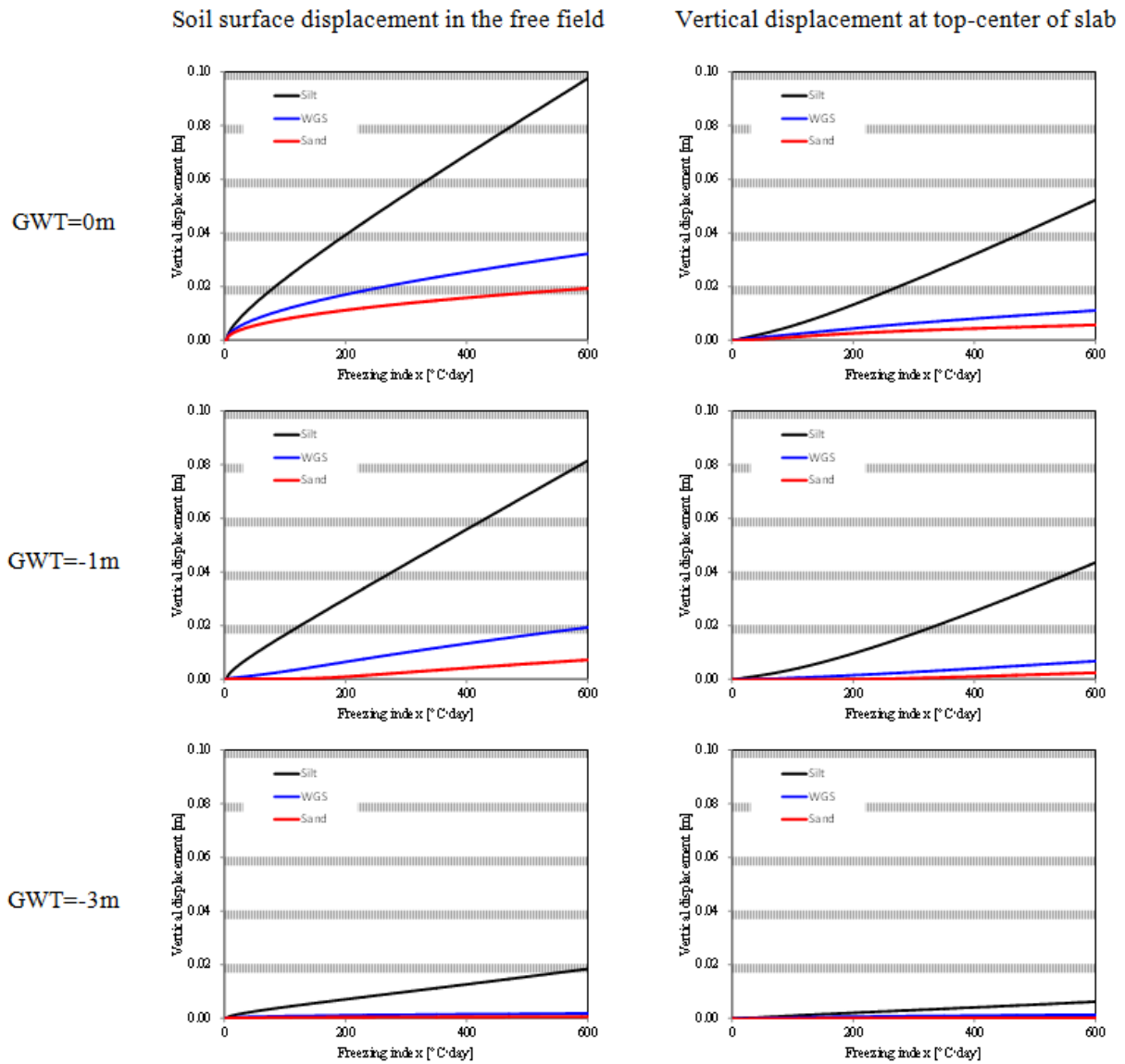


Fig. 10. Vertical heaving displacement in various soil type and GWT

동결에 의한 지반 융기가 시작되는 시점과 연직방향 변위량이 평형상태에 도달하는 시점은 지표면 지하수위 GWT=0m에 대한 해석 결과와 유사하다. 그리고 동결에 의한 최대 히빙량 2.9cm, 잔류 히빙량 1.7cm으로 여전히 동결에 의한 큰 히빙량과 잔류 히빙량을 나타내고 있다. 지하수위가 GWT=-3m로 낮을 때, 동결에 의한 최대 히빙량은 0.5cm이며, 잔류 히빙량은 0.1cm로 동결 및 융해과정에서 슬래브의 연직 변위량은 작게 나타나고 있다.

지하수위 GWT=0m의 화강풍화토에 설치된 도로시스템의 슬래브의 연직변위는 1cm이며(Fig. 11(c)), 모래지반에 설치된 경우는 0.6cm를 나타내고 있다(Fig. 11(d)). 이는 실트질 지반에 비하여 상당히 작은 값이며, 지하수

위 지하에 의하여 급격하게 감소함을 알 수 있다. 그리고 실트질 지반과 달리 cryogenic suction에 유입된 지하수의 양이 적어 잔류 융기량은 미비함을 알 수 있다. 동결 및 융해 작용이 모듈화 도로시스템의 안정성에 추가적인 문제를 유발하지는 않을 것으로 판단된다. 다만, 하부지반의 불균질성에 의하여 발생할수 있는 부등융기와 침하가 상부 슬래브와 포장모듈, 그리고 차량의 주행성에 미치는 영향에 대한 추가적인 구조 검토가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 11(e)와 11(f)는 동결 및 융해 과정에서 상부 슬래브에 작용하는 부재력의 변화를 나타내고 있다. 실트와 화강풍화토 지반에 설치된 슬래브에 발생한 모멘트가 모래지반에 설치된 경우보다 다소 크게 발생하였다. 그리

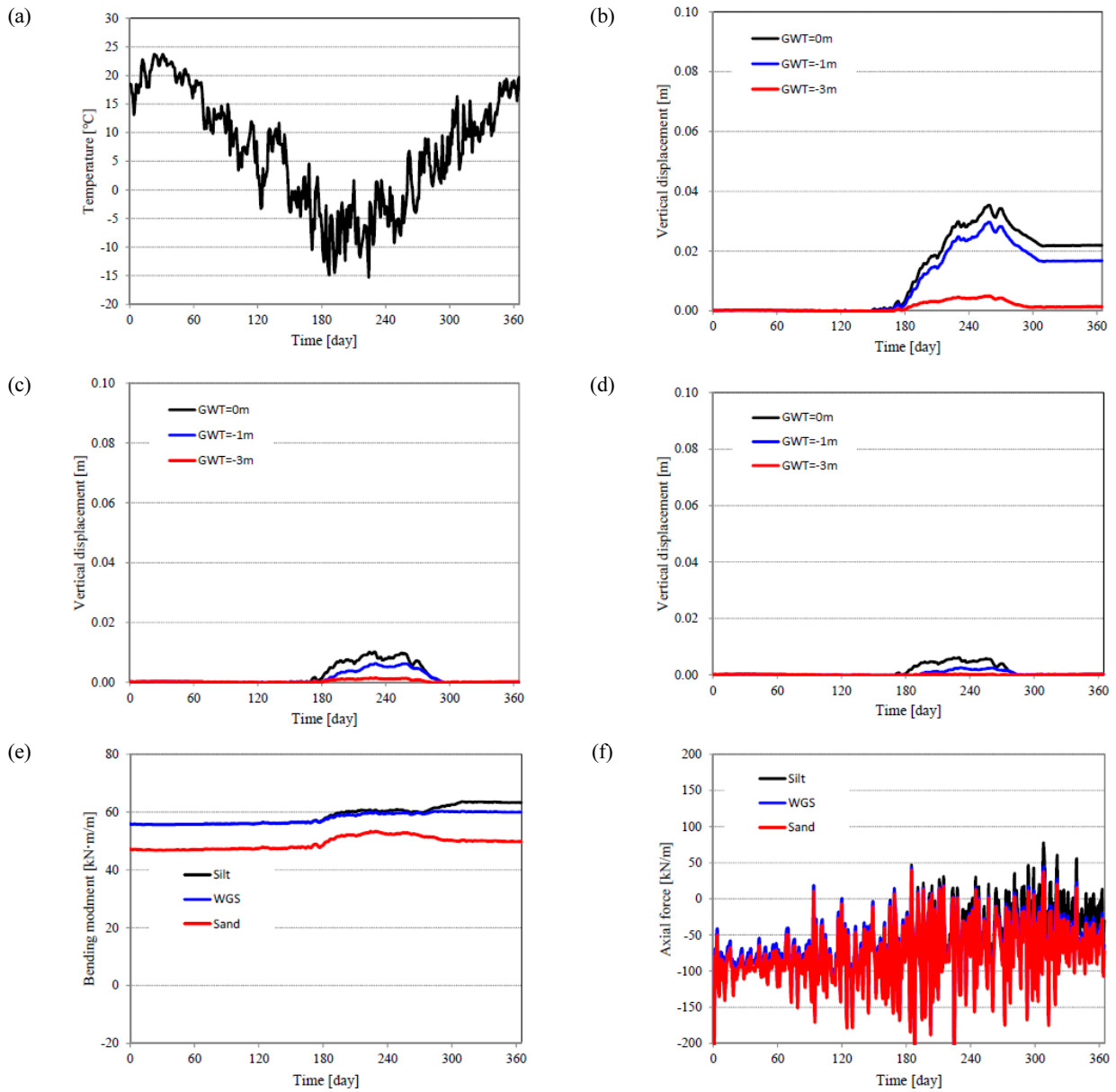


Fig. 11. Numerical results for surface temperature history of Yeongwol (FI=555 day·°C). (a) Temperature history, (b) Vertical displacement of the slab installed in silty soil, (c) Vertical displacement of the slab installed in weathered granite soil, (d) Vertical displacement of the slab installed in sandy soil, (e) Bending moment at slab "b" (GWT=0m), (f) Axial force at slab "a" (GWT=0m).

고 지하수위 낮아질수록 모멘트의 증가량은 감소하였다. 다만, 슬래브에 발생하는 축력은 지표면의 온도가 상온일 때의 변화보다 지표면의 온도가 영하일 때 인장-압축으로 부재력 cycle이 크게 발생함을 알 수 있다. 또한 추가적으로 발생하는 인장-압축력이 대략 20ton/m 정도로 이에 대한 부재력 검토를 수행해야 할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

최근 도로 교통량의 급속한 증가에 부합하고 급속시

공 및 유지보수 최소화하는 모듈러 도로시스템이 제안되었다. 제안된 모듈화 도로시스템은 도로하중을 지지하는 슬래브와 전달된 하중을 하부지반으로 전달하는 크로스빔으로 구성되어 있다. 계절 동토지역인 우리나라는 도로 하부 지반의 지속적인 동결-융해 작용으로 인하여 도로 포장체가 파손되거나 기능이 저하되는 문제가 지속적으로 발생하고 있다. 따라서 지반의 동결 및 융해에 의한 모듈화 시스템의 손상 및 구조물의 사용성에 대한 평가가 필요하다. 이에 본 연구에서는 모듈러 도로시스템에서 크로스빔 지지형식에 대한 열-수리-역

학적 수치해석을 수행하여 지반의 동결 및 융해에 의한 영향을 평가하였다.

- (1) 지반의 동결 및 융해에 대한 Neumann의 이론식을 이용하여, 지반의 간극비와 초기 지중온도가 동결선의 하강속도에 미치는 영향을 분석하였다. 간극비의 증가는 상변화에 위한 수분 함량의 증가시켜 동결선의 하강속도를 늦추지만, 높은 수분 함량으로 히빙량이 증가함을 알 수 있다. 그리고 동결심도를 산정하는데 있어서 외적 인자인 지표면 온도뿐만 아니라, 지중 온도 또한 중요한 인자임을 알 수 있다. 다만, Neumann의 동결심도 이론식은 지반이 완전포화상태에서 부동수가 없으며 cryogenic suction 등에 의한 물의 흐름이 없는 제한된 경우에만 적용할 수 있다.
- (2) 동결지수의 변화에 따른 모듈러 도로시스템이 설치된 지반의 상태변수와 슬래브의 부재력의 변화를 분석하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 지반조건은 실트질, 화강풍화토, 그리고 모래지반에 대하여 수행하였으며, 지하수위 조건별 수치해석을 수행하였다. 실트지반에 설치된 도로시스템에서 지하수위가 지표면에 위치하는 경우, 동결지수  $600 \text{ day}\cdot^{\circ}\text{C}$ 에서 간극수의 상변화와 cryogenic suction에 의한 추가적인 공극수의 이동으로 인하여 5.2cm의 히빙이 발생하였다. 지하수위가 낮아질수록 동결 히빙량은 4.4cm(GWT=-1m), 0.6cm(GWT=-3m)로 급격하게 감소하였다. 예측된 동결 히빙량은 일반적인 도로 포장에 대한 허용 변위량(10cm)보다 작지만, 본 모듈러 도로시스템은 지반에 설치된 지지구조위에 콘크리트 슬래브가 설치되므로, 동결 및 융해에 의한 지반의 부등변위에 의하여 상부구조물이 직접적인 영향을 받게 되어 실트질 지반에 대한 본 공법의 적용은 바람직하지 않은 것으로 판단된다. 화강풍화토 지반에 설치시 슬래브의 동결 히빙량은 1.1cm로 실트질 지반에 비하여 상당히 작은 값을 나타내며, 모래지반에서는 슬래브의 연직 변위량이 0.6cm 이하로 나타나고 있다.
- (3) 온도이력에 의한 모듈러 도로시스템의 동결-융해에 대한 안정성을 평가하기 위하여, 영월 지역(동결지수=555  $\text{day}\cdot^{\circ}\text{C}$ )의 기상청 온도자료를 이용하여 시간이력에 대한 수치해석을 수행하였다, 영월지역의 실트질 지반에 설치된 도로시스템의 슬래브 상부에

서 동결에 의한 최대 히빙량은 3.4cm이고, 잔류 히빙량은 2.2cm으로 나타났다. 도로시스템의 부등변위를 유발할 수 있는 동결 히빙과 동결-융해 과정에서 나타나는 지표면의 잔류 간극비는 지반의 강성과 지지력을 급격히 감소시켜 도로시스템이 안정성과 사용성의 저해 요소가 될 수 있다. 화강풍화토와 모래지반에 설치된 도로시스템에서 잔류 히빙량은 매우 미비한 것으로 나타났다. 또한 지하수위의 저하는 동결에 의한 지반 변형을 크게 감소시킴을 알 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단 개인연구지원사업(KNRF-2016014035)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌 (References)

1. Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C. (1947), Heat conduction in solids, Clarendon press, Oxford.
2. Cho, G.T. (2002), "Anti-frost Layer of Road Pavement for Effectiveness Verification by Site Measure and Laboratory Testes", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, D, 22(5D), pp.913-921.
3. Hong, S.S. (2010), "Development of Prediction Model of Frost Penetration Depth on Pavement in Korea", *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.9, No.3, pp.47-56.
4. Im, J.Y. (2010), "A Study of Frost Depth with the Numerical Model and the Soil Characteristics", *Symposium on Korea Society of Road Engineers*, 12, pp.300-306.
5. KICT (2015), Sustainable-Perpetual-Modular(SPM) road system development, KICT 2015-233-1, pp.227.
6. Kim, Y.S. (2010), "Heat Transfer Equation and Finite Element Analysis Considering Frozen Ground Condition the Cyclic Loading", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.9, No.3, pp.39-45.
7. Klar, A., Soga, K., and Ng, M.Y.A. (2010), "Coupled Deformation-flow Analysis for Methane Hydrate Extraction", *Geotechnique*, Vol.60, No.10, pp.765-776.
8. Kweon, G.C. (2003), "Design of Anti-frost Layer Considering Frost Heaving Characteristics of Subgrade Soils", *Symposium on Korea Society of Civil Engineers*, pp.1786-1791.
9. Lee, J., Baek, D., and Kim, D. (2013), "A Case Study on Designs of base Module for Modular Road System", *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol.14, No.11, pp.47-54.
10. Liu (2014), "Influence of Freeze-thaw Cycles on Resilient Modulus of Different Plasticity Index Subgrade Soil", *Chinese J. Geot. Eng.*, Vol.36, No.4, pp.633-639.
11. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2012), "Design Guide for Anti-Freezing Layer".
12. Neumann, F. (1860), "Die Partiellen Differentialgleichungen", Physik,

- 2, 121.
13. Shin, E.C. (2010), "The Freezing Characteristics of Pavement Layer Using the Field Road Model Test", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.26, No.7, pp.71-80.
  14. Shin, E.C., Kang, J.G., and Park, J.J. (2009), "Thermal Stability in Underground Structure with Ground Freezing", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.25, No.3, pp.65-74.
  15. Shin, E.C. and Park, J.J. (2003), "An Experimental Study on Frost Heaving Pressure Characteristics of Frozen Soils", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.19, No.2, pp.65-74.
  16. Shin, H. and Park, H. (2016), "Numerical Investigation of Freezing and Thawing Process in Buried Chilled Gas Pipeline", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.6, pp.17-26.
  17. 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.
  18. Yi, K.H. (2003), "Freezing and Thawing Characteristics of Compacted Subgrade Soils in Korea", Thesis for Degree of Master., Dong-Eui University.
  19. Yoon, Y.W. (2003), "Dynamic behavior of Weathered Granite Soils After Freezing-thawing", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.19, No.5, pp.69-78.

Received : January 4<sup>th</sup>, 2017

Revised : February 16<sup>th</sup>, 2017

Accepted : March 1<sup>st</sup>, 2017