

옹벽 배면 토사지반의 동상으로 인한 옹벽 구조물의 탄소성 거동 평가

Evaluation of the elastoplastic behavior of reinforced soil retaining wall

due to frost heave action

우현재*, Van-Hoa Cao*, 고규현**

Woo, Hyeon Jae, Go, Cao, Van-Hoa, Gyu-Hyun

*금오공과대학교 토목공학과 박사과정, **금오공과대학교 토목공학과 부교수

서론

- 지반의 동상 현상은 동토 지반에서 발생하는 대표적인 현상이며, 도로 노면의 균열, 사면 파괴, 지반 구조물의 손상, 하수관거의 파괴 등 다양한 공학적 문제들을 야기한다.
- 최근 이상기후로 인하여 계절 동토 지역으로 분류되는 국내에서도 동상 현상으로 인한 피해가 발생할 가능성이 증가하고 있는 반면, 동상의 발생 메커니즘과 피해 예측에 관한 연구는 미진한 실정이다.
- 향후 국내 기업들이 극동 지역으로 진출하여 사회 기반 시설을 구축할 경우, 동상 피해 예측과 동상 방지를 위한 최적 설계는 필수적인 과제가 될 것으로 예상된다.

연구방법

- 본 연구에서는 대표적인 지반 구조물인 옹벽 구조물과 지반의 동상 현상의 상호작용을 고려하여 2차원 수치해석을 수행하였고, 이를 통해 동상에 의한 옹벽 배면 토사 지반의 체적 팽창이 옹벽 구조물의 거동에 미치는 영향을 평가하였다.
- 이를 위하여 Michalowski (1993)가 제안한 Porosity rate function을 활용하여 지반과 콘크리트 옹벽 구조물에 대한 열-역학 (Thermal-Mechanics) 연계해석을 수행하였다.
- 또한, Abaqus CDP (Concrete Damaged Plasticity) 모델을 적용하여 지반의 동상압에 따른 콘크리트 옹벽 구조물의 탄소성 거동을 평가하였다.

수학적 모형

- 지반에서의 상변화와 잠열, 시간에 따른 온도 변화를 고려한 열 전달 과정을 다음과 같은 방정식을 통해 묘사할 수 있다(Michalowski, 1993).

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

- 여기서 C는 물, 얼음, 흙입자의 밀도, 질량 열용량, 체적률이 반영된 체적 열용량이며, L은 물의 단위질량당 잠재 융해열(J/kg)을 의미한다. 또한, 식(1)의 두번째 항은 동결 시 간극수의 상변화로 인한 에너지 방출을 고려한다.
- 지반의 동결 과정에 관여하는 흙의 부동수분곡선은 Michalowski (1993)가 제안한 식(2)를 사용하였다.

$$w = w^* + (w - w^*) e^{-\alpha(T-T_0)} \quad (2)$$

- 한편, 동결수반층에서 발생하는 동상에 의한 부피팽창을 고려하는 수식은 식(3)과 같으며, 지반 냉각에 따른 간극률 변화를 수식화함으로써 동상변위를 묘사할 수 있다(Zhu, 2006).
- 동결팽창에 의한 변형을 증분은 Abaqus에 내장된 UMATH, UEXPAN 등의 User Subroutine을 사용하여 구현되었고, Subroutine은 Zhu(2006)가 제공한 코드를 기반으로 수정 응용하여 사용하였다.

$$\dot{n} = \dot{n}_m \left(\frac{T - T_0}{T_m} \right) \cdot e^{-1 \left(\frac{T - T_0}{T_m} \right)^2} \cdot \left| \frac{\partial T}{\partial t} \right| \cdot e^{-\frac{|\sigma_{sk}|}{\zeta}} \quad (3)$$

- 여기서, \dot{n}_m 은 최대 간극률 변화율, T_m 은 최대 간극률 변화율이 발생하는 온도(°C), T_0 은 어는점(°C), $\left| \frac{\partial T}{\partial t} \right|$ 은 온도경사 (°C/m)를 의미한다.
- 콘크리트 옹벽에서 발생하는 탄소성 거동은 Concrete Damaged Plasticity model을 사용하여 묘사할 수 있으며, 압축, 인장 응력에 따른 소성 변형률은 식 (4)와 같다.

$$\epsilon_c^{pl} = \epsilon_c^{in} - \frac{d}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad \epsilon_t^{pl} = \epsilon_t^{ck} - \frac{d}{(1-d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (4)$$

- 여기서, ϵ_c^{pl} 과 ϵ_t^{in} 은 각각 압축 소성 변형률과 압축 비선형 변형률을 나타내며, ϵ_t^{pl} 와 ϵ_t^{ck} 는 각각 인장 소성 변형률과 인장 균열 변형률을 나타낸다. d_c 와 d_t 는 각각 압축, 인장 상태의 damage parameter를 의미한다.

수치해석 및 결과분석

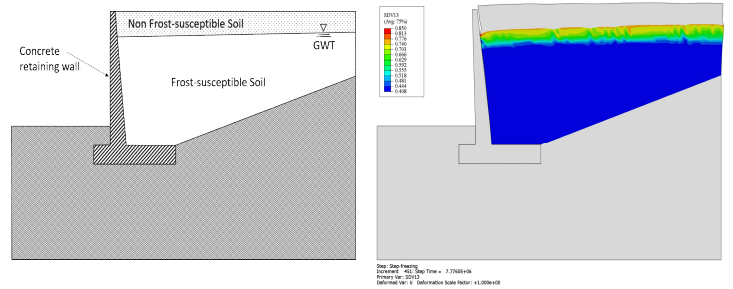


그림1. 동결에 따른 지반의 동상 변위 및 공극률 분포 영상

- 그림 1은 옹벽 배면 지반의 지표에 영하 10도의 온도조건을 90일 간 부여하여 지반의 동상 현상을 묘사한 결과로, 지반의 동상 변위 및 공극률 분포를 나타낸다. 옹벽의 배면 지반 내부에 지하수위가 존재한다고 가정할 후, 지하수위 아래의 포화지반에서만 동상이 발생하는 것으로 간주하였다.
- 일반적으로 옹벽의 배면에는 투수성이 높은 배수재를 시공하지만, 본 연구에서는 풍화, 열화 (fouling) 현상 등의 이유로 배수재의 기능이 상실된 배면 지반으로 간주하였다.

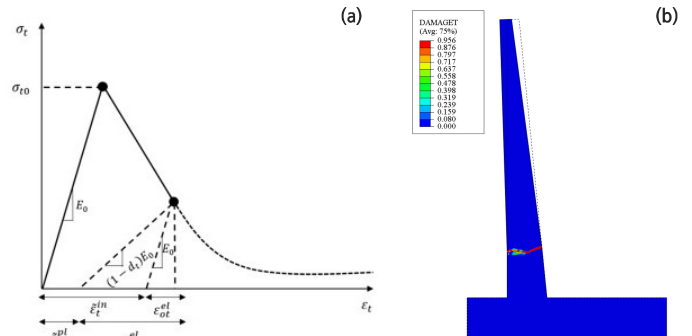


그림2. CDP Model의 응력-변형률 특성 곡선 및 동상에 의한 옹벽 손상도 해석 결과

- 그림 2(a)는 Concrete Damaged Plasticity model에 적용된 인장응력-변형률 특성 곡선을 나타내며, 그림 2(b)는 배면 지반의 동상 팽창압에 의해 발생한 옹벽의 인장 균열 및 손상도 영역을 보여준다.

결론

- 본 연구에서는 열-역학이 연계된 복합해석 모델을 적용한 지반의 동상 현상에 따른 옹벽의 탄소성 거동 및 손상도를 평가하였다.
- 옹벽 배면의 동상 민감성 지반에서 발생한 동상에 의해 지반이 팽창함에 따라 옹벽에 가해지는 수평 응력이 점차 증가하였고, 이로 인해 옹벽 내부에서 발생하는 인장 균열의 위치 및 양상을 확인할 수 있었다.

감사의 글

- 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2022R1C1C1006507).

참고문헌

1. Michalowski, R.L. (1993), "A constitutive model of saturated soils for frost heave simulations", Cold Region Sci. Technol. Vol.22, No.1, pp.47-63.
2. Zhu, M. (2006), "Modeling and simulation of frost heave in frost-susceptible soils", University of Michigan.
3. Dassault Systems, (2014) Abaqus user's manual, version 6.14.