

국내 사질토의 부동수분 실험을 통한 경험적 모델식 산정

Empirical model based on unfrozen water content experiments of sandy soil in Korea

김희원¹, 고규현^{2*}

Hee Won Kim, Gyu-Hyun Go

¹국립금오공과대학교 토목공학과 박사과정, ²국립금오공과대학교 토목공학과 부교수, 교신저자

연구배경

- 지반의 동결과정을 모사하는 수치해석에서 부동수분은 주요 입력인자 중 하나로 평가되며, 신뢰성 있는 모델을 위해서는 다양한 조건에서 부동수분의 거동을 평가하는 것이 중요하다.
- 최근 인공동결공법의 적용 대상이 다변화 되면서 간극수가 담수인 경우 뿐만 아니라 해저지반, 압력층 등 지반의 간극수에 염분이 존재하는 시공 현장 범위가 늘어나면서, 기존의 담수조건에서 산정된 부동수분곡선으로는 염수지반의 동결과정을 모사하기에 정확성이 부족하다는 한계가 있다.

연구목적

- 본 연구에서는 국내 사질토의 부동수분 실험을 수행하고, 이를 바탕으로 예측식을 구하는 것을 목표로 한다. 간극비와 간극수의 염분농도를 달리하여 실내실험을 수행하였으며, 이후 실험결과와 가장 적합한 모델을 선정하였다. 이후 모델 속 매개변수를 간극비, 간극수 염분농도의 함수로 대체하여 기존의 모델 식을 보다 사용하기 간편하도록 수정하였다. 또한, 모델 개발에 관여하지 않은 실험 데이터와의 비교를 통해 제안된 경험식의 예측 적합성을 검증하였다.

부동수분측정 실내 실험

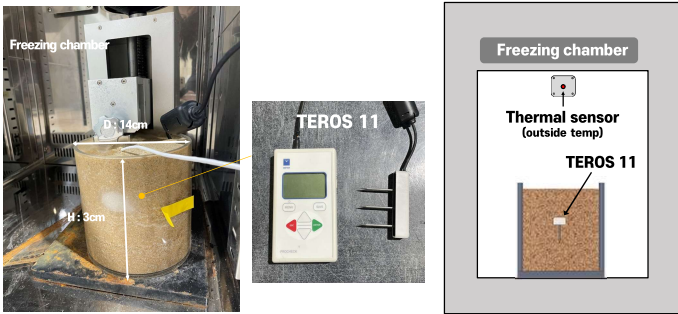


Fig. 1. Experimental setup for the measurement of the unfrozen water content

- 동결에 따른 시료의 부동수분의 변화를 알아보기 위한 실내실험을 위해 직경(D) 14cm X 높이(H) 13cm인 물체에 사질토 재료인 주문진사를 포함시켜 시료를 조성하였으며 TDR 측정 장비(METER사 Teros11)를 이용하여 동결과정에 따른 시료의 부동수분변화를 확인하였다.
- 초기 간극비를 달리한 시료에 대해 동결에 따른 부동수분측정실험을 수행한 결과, 동결 초기 대부분의 자유수가 동결되었으며, 흙의 초기 간극비(e_{mi})가 부동수분곡선의 기울기가 완만해지는 경향이 나타났다 (Fig.2 (a)).
- 또한, 간극수의 염분농도(ζ)를 0% ~ 3.5%로 각각 달리 조성하여 포함시킨 시료에 대해 부동수분을 측정하고, 간극수의 염분농도가 높아질수록 부동수분 곡선의 기울기가 점점 완만해지는 경향이 나타났고 잔류 함수비 또한 낮게 나타났다(Fig. 2 (b)).

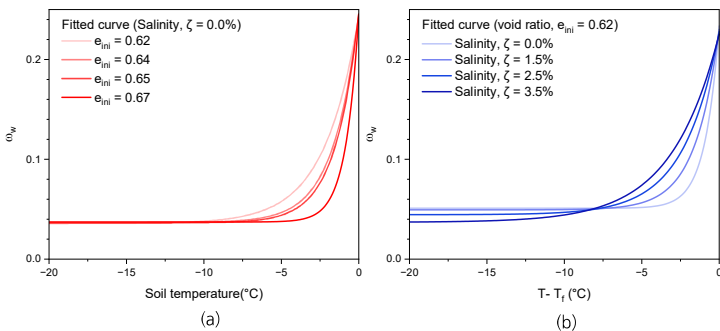


Fig. 2. Curve fitting results of unfrozen water content measurement data

- 본 연구에서는 부동수분곡선 예측을 위해 Michalowski and Zhu 모델[1]을 채택하였고, 모델 속 매개변수를 초기 간극비와 간극수 염분농도의 함수로 대체하여 흙의 기본적인 물리적 특성 정보만으로도 부동수분곡선을 추정할 수 있도록 개선하였다.

$$\omega_u = \begin{cases} \omega_0 & T \geq T_f \\ \omega_r + (\omega_0 - \omega_r) \exp[\mu(T - T_f)] & T < T_f \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu = 82.74 \cdot e_{mi}^{-2} - 93.83 \cdot e_{mi} - 0.3957 \cdot e_{mi} \cdot \zeta + 0.2077 \zeta + 26.87 \quad (2)$$

어는점 내림

- 부동수분곡선을 산정하는데 있어서 흙의 어는점 결정이 요구된다. 하지만 염수지반의 경우 흙의 어는점을 신뢰성 있게 산정하기 어려운 경우가 많다. 이에 염수로 포화된 사질토의 어는점을 산정하기 위한 실내 동결실험을 수행하였다.
- 간극수의 염분농도를 0% ~ 3.5%로 달리 조성하여 시료의 어는점을 각각 측정하였으며, 간극수 농도에 따른 어는점 변화를 Fig.3에 나타내었다. 간극수의 염분농도가 높아질수록 동결 사질토의 어는점이 비선형적으로 낮아지는 경향을 확인하였다. 또한, 실내 실험 결과를 바탕으로 간극수의 염분농도 별로 시료의 어는점을 추정할 수 있는 경험식 식(3)과 같이 제안하였다.

$$T_f = -0.1844 \cdot e_{mi}^{0.661 \cdot \zeta} \quad (3)$$

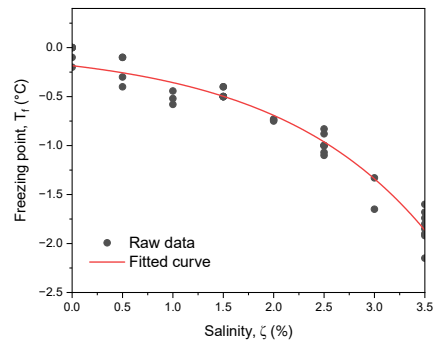


Fig. 3. Curve fitting results of freezing point according to salinity

결과 및 분석

- 본 연구에서 사용한 경험식의 기본적인 형태는 식(1)과 같다. 경험식에 포함된 매개변수 μ 는 식(2)와 같이 초기 간극비와 간극수 염분농도의 함수로 표현할 수 있으며, T_f 는 염분농도에 따라 변하는 식 (3)으로 표현할 수 있다.
- 새롭게 제안된 경험식의 예측 신뢰도를 검증하기 위해 모델 개발에 사용되지 않은 독립된 실험 데이터 결과와 비교하였다. 그 결과, 동일조건에 대해 제안된 경험식의 예측치와 실험데이터의 전반적인 양상이 유사함을 보였다.

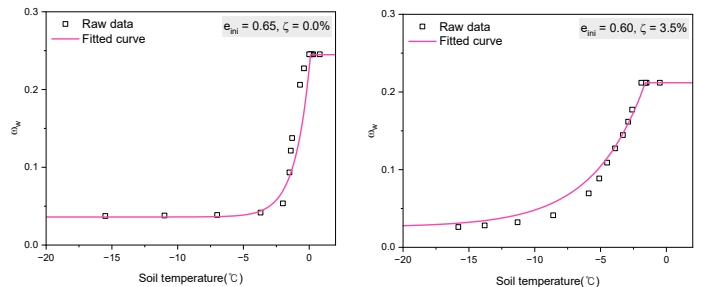


Fig 4. Comparisons between predicted results of empirical model and testing data

결론

- 본 연구에서는 부동수분곡선 모델 속 매개변수를 초기 간극비와 간극수 염분농도의 함수로 대체함으로써 기존 대비 사용성이 용이하도록 개선하였다. 또한, 상관식 도출에 사용되지 않은 독립적인 실험 데이터와의 비교를 통해 개선된 경험식의 예측 신뢰성을 검증할 수 있었다.
- 추후 부동수분측정 실험데이터를 추가적으로 확보하여 경험식의 확장성을 높인다면 보다 다양한 지반재료의 부동수분곡선을 도출하는데 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

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

참고문헌

1. Michalowski, R. L., & Zhu, M. (2006). Frost heave modelling using porosity rate function. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 30(8), 703-722.