

수조에서의 인공동결 거동에 대한 실험적 고찰 및 수치해석

Experimental study and numerical analysis for artificial freezing behavior in a water tank

주민지*, 김희원**, 고규현***

Min Ji Ju, Hee Won Kim, Gyu-Hyun Go

*국립금오공과대학교 건축토목환경공학부 학사과정, ** 국립금오공과대학교 건축토목환경공학부 박사과정, *** 국립금오공과대학교 건축토목환경공학부 부교수

서론

- 토사지반의 터널 굴착 시 연약지반의 안정화는 중요한 과제이며, 이를 위한 다양한 안정화 공법이 연구되고 있다.
- 그 중, 인공동결공법(Artificial Ground Freezing, AGF)은 연약지반을 일시적으로 동결시켜 강성을 증가시키고 지하수 유입을 차단하는 효과적인 방법이다.

연구 목적

- 본 연구에서는 지반의 인공동결공법의 동결 거동을 평가하기 전 유속 조건에서의 동결구간의 형성과정을 육안으로 확인하기 위해 모형 수조를 이용한 물 동결 실험을 수행하였으며, 실험을 통해 유속의 유무가 동결구간 및 동결 벽체 형성에 미치는 영향을 분석하였다.

연구 방법

- 본 연구에서는 지반의 인공동결공법의 동결 거동을 평가하기 위해 지반동결을 모사하는 실내모형 토조 시스템을 제작하였다. 토조 시스템은 유량 제어 시스템, 항온수조, 냉동 칩러, 고성능 모니터링 장비 등으로 구성되었으며, 토조 내에 온도센서를 설치하여 동결과정 중 내부에서 형성되는 온도분포를 실시간으로 관측할 수 있도록 하였다(그림1).
- 토조의 규격은 밀면(D) 204cm x 높이(H) 490cm이며, 토조 밀면에서 항온 처리된 특정 유량의 물이 주입되도록 설계되었다. 토조 시스템의 궁극적인 활용목적은 흙의 인공동결을 모사하는 것이지만, 본 연구에서는 동결벽체 형성과정을 육안으로 확인하기 위해 물을 이용한 동결실험을 우선적으로 수행하였다. 이 때, 수직방향의 물의 흐름이 있는 조건과 흐름이 없는 조건으로 구분하여 실험을 수행하여 그 결과를 비교 분석하였다.

인공동결공법 모형 토조

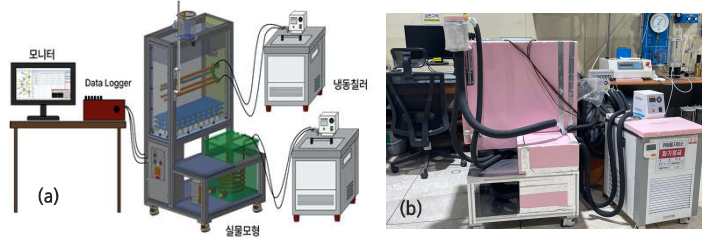


그림1. 인공동결 모사를 위한 실내모형 토조시스템 (a) 모식도 (b) 실험 장비 사진

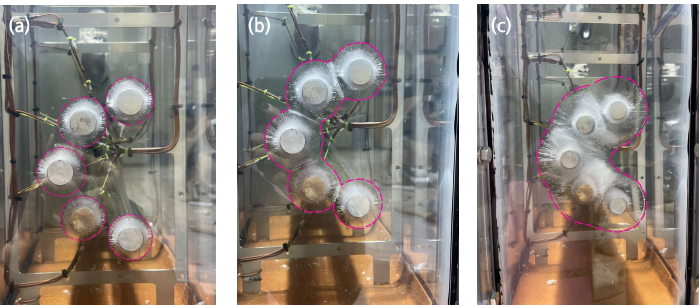


그림2. 물의 흐름이 없는 조건 (a)0.5h (b)1.0h (c) 3.0h

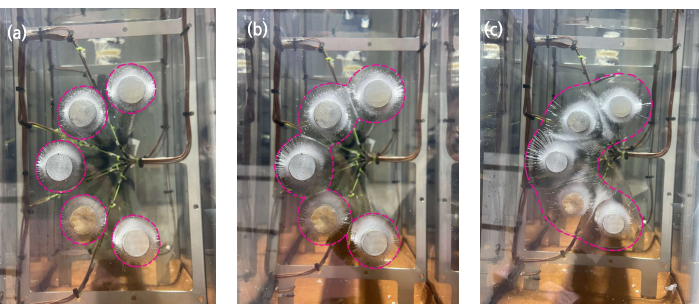


그림3. 물의 흐름이 있는 조건 (a)0.5h (b)1.0h (c) 3.0h

결과 및 분석

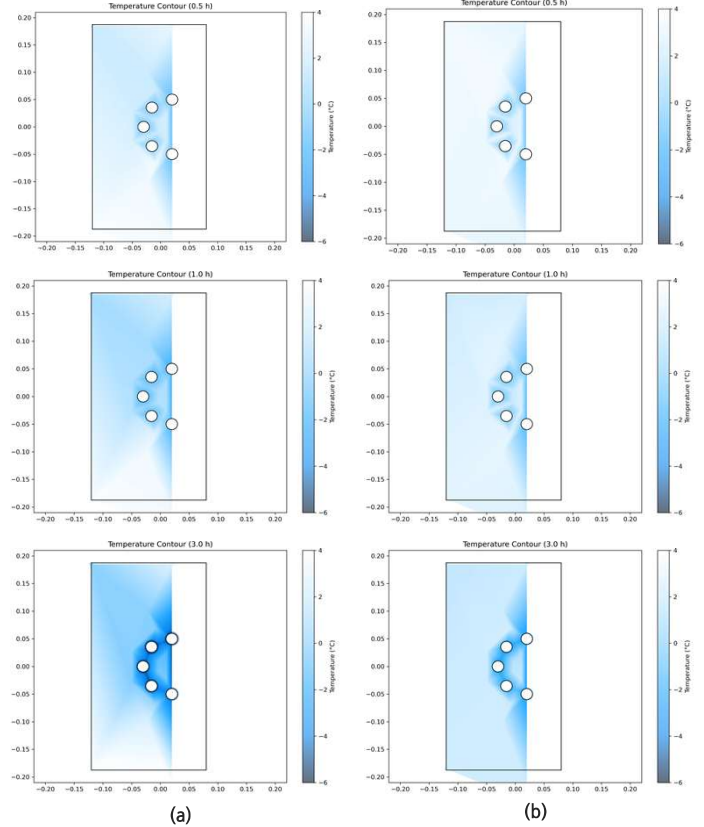


그림4. 수조 내 온도 변화 시각화 결과 (a) 물의 흐름이 없는 조건 (b) 물의 흐름이 있는 조건

- 그림 2와 그림 3은 수조 내 물의 흐름 유무에 따른 동결 거동을 관측한 결과를 보여준다. 실험 결과, 유속이 없는 경우 동결 기둥이 비교적 빠르게 균일하게 형성된 반면, 유속이 존재할 경우에는 동결 기둥의 접합이 지연되며 동결벽체 형성이 더딘 경향을 보였다. 특히, 지하수 유입 방향에서 유량을 직접적으로 맞이하는 영역에서는 동결 기둥의 접합이 더욱 지체되는 것으로 확인되었다.

- 그림 4는 수조 내에서 계속된 온도 데이터를 기반으로 시각화한 결과를 보여준다. 데이터 시각화에는 자체 구축한 Python 코드를 활용하였으며, 시간에 따른 온도 변화를 자동으로 확인할 수 있도록 구현하였다.

- 실험 결과, 수조 동결 실험에서 육안으로 확인된 동결벽체의 형성 양상과 시각화된 온도 분포가 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이를 통해, 육안 관찰이 어려운 토조 실험에서도 본 연구에서 구축한 시각화 기법을 활용하면 온도 분포를 간접적으로 확인할 수 있을 것으로 기대된다.

결론

- 본 연구에서는 수조 내 물의 흐름 유무가 동결벽체 형성에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였으며, 특정방향의 유속이 지속적으로 작용할 경우 동결 기둥의 접합이 지연되고 동결 벽체 형성이 느려지는 경향을 확인하였다. 특히, 지하수 유입 방향에서는 동결 기둥 접합이 더욱 지체되는 것으로 나타났다.

- 또한, Python을 활용한 온도 데이터 시각화를 통해 동결 과정에서의 온도 변화를 효과적으로 분석할 수 있음을 보였다. 이를 바탕으로, 향후 육안 관찰이 어려운 토조 동결실험 환경에서도 온도 계속 및 시각화 기법을 활용하여 동결 과정의 특성을 보다 신뢰성 있게 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

- 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No.2022R1C1C1006507)로 이에 감사드립니다.