

지반동결에 따른 부동수분의 특성 연구

Characteristics of Unfrozen Water Contents with Freezing Soils

신은철* · 문용수** · 박정준*** · 류병현****

Shin, Eun Chul · Moon, Yong Soo · Park, Jeong Jun · Ryu, Byung Hyun

1. 서론

대한민국은 계절 동토지대로 매년 동절기에 영하로 대기의 온도가 떨어지면 지반에 동상현상이 발생하며 이로써 지반이 팽창하여 구조물의 피해 및 인명피해를 가져올 수 있다. 동상현상에 따른 도로에서의 또 다른 파괴형태는 겨울에 동상성 노상토 중에 발생한 빙층이 봄에 융해함에 따라 일어나는 노상, 노반의 지지력 저하로 인한 포장의 파괴이다. 또한 Taber(1929)는 지반이 동결되면 빙편의 발달로 인하여 동상현상이 생기며, 이러한 현상은 수분의 동결팽창과 함께 동결 중 수분이동 때문이라고 발표하였다. 그리고 동상이 발생한 흙에는 아이스렌즈(Ice lens)가 형성되며 토립자는 모관압력에 의해 지하수를 흡수하는데, 이 흡수력은 토립자의 크기에 영향을 받는다고 하였다. 이러한 동결현상이 발생함에 따라 동결토에는 부동수분(영하의 온도에도 얼지 않고 수분으로 남아 있는 물)이 존재하며, 부동수분은 흙의 동결과정에서 중요한 역할을 한다. 아울러 동토층의 부동수분은 온도가 낮을수록 감소한다. 따라서 동결토에서 부동수분은 신중하게 취급되어야 할 것이며, 0°C이하의 겨울철에 기초지반에 외부의 찬 기운이 침투하여 발생하는 동상현상을 정확하게 이해하고 이를 방지하는 공법을 선택하고자 할 때나 연약지반 보강공법의 하나인 인공동결공법을 설계, 시공하고자 할 때에도 부동수의 존재를 염두에 두어야 할 것이다.

동상 피해를 최소화 하고자 국내 전국 도로는 겨울철 도로 포장이 동결·융해 하는 과정에서 지반이 연약해져 파손되는 것을 막기 위해 자갈층을 포설하는 동상방지층을 설치하였다. 이외에 현재까지 동상대책으로 동상성 지반을 비동상성 흙으로 치환하는 치환공법이 주로 채용되어 왔으며, 재료를 얻기 어려운 경우에는 안정처리공법, 단열공법, 차수공법 등도 실시되고 있다. 그러나 현재 건설교통부는 도로포장 방식을 성토고 2m이상인 곳은 동상방지층을 깔지 않도록 변경해 720억원의 예산을 절감하여 실행하고 있다. 이는 동상방지층에 대한 매년 과한 예산의 소모를 최소화 하고자 함이다.

본 연구에서는 동상과 관련된 동결현상에 따른 부동수분의 변화 및 동결토의 동결 및 융해후의 물리적 특성 변화에 대한 이해를 돕고 불필요한 정부 예산 비용을 없애 것에 연구 목적이 있다. 또한 미국 CRREL의 동상 민감성 기준과 비교하여 동상 민감도에 따른 부동수분의 거동을 이해 하고자 한다.

2. 이론적 배경

일반적인 토사는 물을 함유하고 있는 다공성 물질로 0°C이하의 온도에 노출되어서 표면의 일부가 동결할 때 동결된 부분의 흙은 아직 동결되지 않은 부분으로부터 물을 흡입하게 되는데 동결의 진행과 물의 공급이 원활하게 이루어지면 체적 팽창이 일어나게 된다. 동결부분의 토립자 사이의 평균적인 공극은 동결 전

* 비회원 · 인천대학교 토목환경공학과 교수 · 공학박사(E-mail : ecshin@incheon.ac.kr)

** 비회원 · 인천대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정(E-mail : yonglyong5@naver.com)

*** 정회원 · 인천대학교 토목환경공학과 교수 · 공학박사(E-mail : frostjun@incheon.ac.kr)

**** 비회원 · 인천대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정(E-mail : tnt306@daum.net)

에 비하여 확장되며, 확장된 토립자 사이의 간극의 물은 동결된 얼음으로 남아 있게 되는데, 이러한 현상을 동상이라고 한다.

동상은 수분공급, 0℃이하 온도, 흙의 종류 등 세가지 요소의 조합으로 발생하지만, 하나라도 충족되지 않을 경우 동상은 발생되지 않는다.

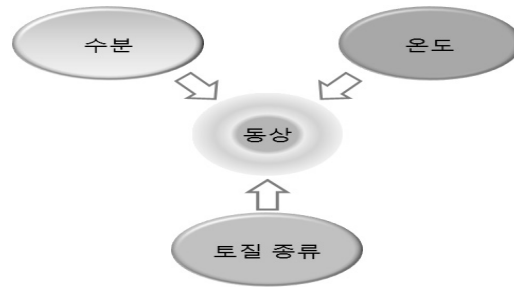


그림 1. 동상 조건

토립자 표면에 흡착된 물은 0℃ 이하에서도 얼지 않으며, 동결 면으로 향하여 흐르는 물은 자유수로서 동결 면에서 얼음층이 된다. 부동수층의 두께는 매우 얇은 층으로 되어있으며, 부동수에 대한 실험적 연구를 한 사람들 중에서 Williams and Smith(1991)는 동상의 비열측정을 통해 부동수의 양을 추정하여, 흙 속의 동결점 강하가 용존 염류에만 의존하지 않는 것을 나타내었다. Olhoeft (1977)는 동상의 유전율의 측정을 통하여 -70℃에서도 토립자에 흡착한 물이 있다는 것을 입증하였다. 또한 동상층을 통하여 물이 이동하며, 흙 속에서 렌즈(lens) 모양으로 얼음이 발생하는 것을 시험을 통하여 입증하였다(홍성완 등, 1992). 신은철과 박정준(2003)은 국내의 흙을 이용하여 흙 속의 부동수분량이 많으면 동상압도 커지는 것을 실내시험을 통하여 증명하였다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실내 동결 시험 시스템

동상현상을 실험실에서 현장을 축소하여 재현하여 현장 조건에 맞게 흙의 동상성을 평가하는 방법으로 실내 동상시험에 의한 방법 ASTM D 5916-06를 기준으로 시험기를 만들어 실험을 수행 하였다. 그림 2는 본 시험에 사용된 실내동결 시험시스템의 모식도 및 시험기 전경이다(신은철 등, 2009).

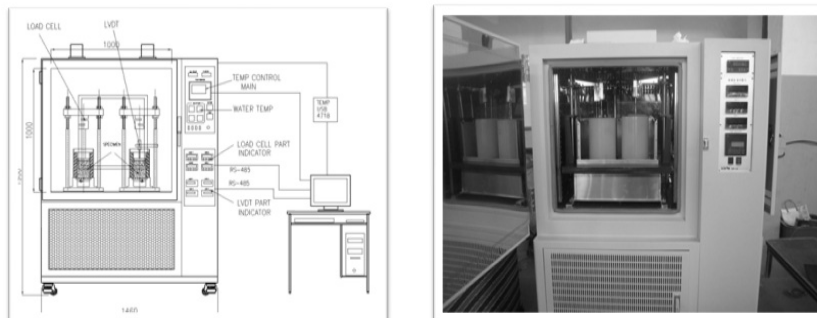


그림 2. 실내동결 시험시스템의 모식도 및 시험기

그림 2와 같은 동상시험기를 이용하여 함수비의 변화와 미립분 함유량에 따른 노상토의 동상특성을 관찰

하였다. 동상실험기는 시료적재부, 물을 공급하는 수조부, 팽창량과 동상압을 측정하는 계측기를 설치한 측정부로 구성되어 있다. 시료를 적재하는 적재부에는 모두 4개의 시료를 실험할 수 있으며, 적재부의 바닥에는 두께 2.0cm, 직경 10cm의 다공판을 놓는다. 측정부는 동상압 측정을 위해 로드셀(load cell)을 장착할 수 있는 거치대와 LVDT(Linear Variable Differential Transformers)를 장착할 수 있는 거치대로 구성되어 있다. 부동수분 측정을 위하여 TDR을 사용하였다. TDR은 독일 IMKO 사의 TDR(Time Domain Reflectometry) 함수량 측정기 모델인 TRIME-FM을 사용하여 노상 시료의 함수비를 깊이에 따라 측정하였다. TDR의 원리는 15cm의 probe를 얇은 플라스틱 관안으로 삽입시켜서 주변의 함수량을 측정하는 장비이다. 계측된 값은 부피에 대한 함수비이기 때문에 흙의 건조밀도로 나누어 주어서 보정을 해야만 한다. 체적함수비로 측정되는 부동수분을 일반적으로 사용하는 질량함수비로 변환하기 위하여 식 (1)을 이용한다.

$$\text{최적함수비와 질량함수비의 관계 : } W_m = W_v \frac{e_w}{e_{tr}} \quad (1)$$

여기서, W_m : 질량함수비(= $\frac{m_w}{m_{tr}} \times 100$)

W_v : 체적함수비(= $\frac{V_w}{V_{ges}} \times 100$)

m_w : 시료속에 포함된 물의 질량

m_{tr} : 건조된 흙의 질량

V_w : 시료속에 포함된 물의 체적

V_{ges} : 시료 전체의 체적

e_w : 물의 질량

e_{tr} : 건조단위질량(= $\frac{m_{tr}}{V_{ges}}$)

TDR의 검증을 위하여 함수비를 조정하여 다짐을 실시하고 TDR을 사용하여 함수비를 측정하여 비교하였다.

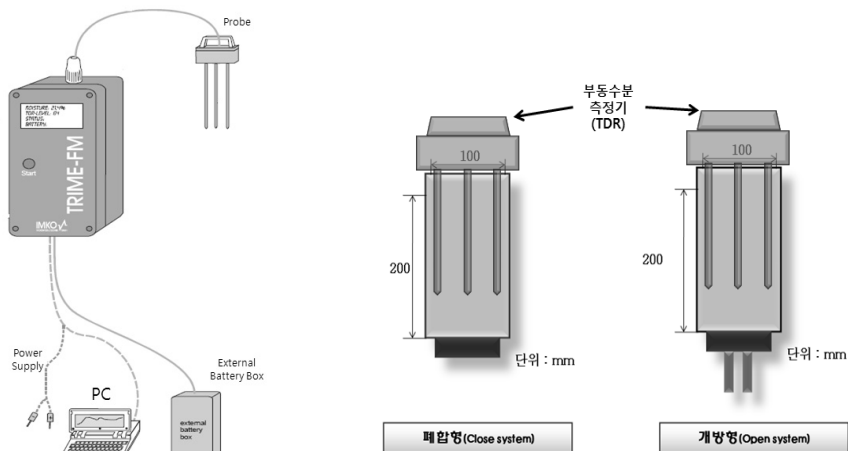


그림 3. TDR 측정장치 및 실험 모식도

3.2 실내 동결 시험 진행방법

본 시험의 계측결과 동결시 시료의 온도변화, 동상팽창압, 동상량, 동상속도, 체적함수비, 부동수분량 등의

계측값을 통하여 동결 용해 전후의 지반공학적 시료의 특성을 평가 하였다. 그림 4 는 실내동결 시험 연구진행 개요이다.

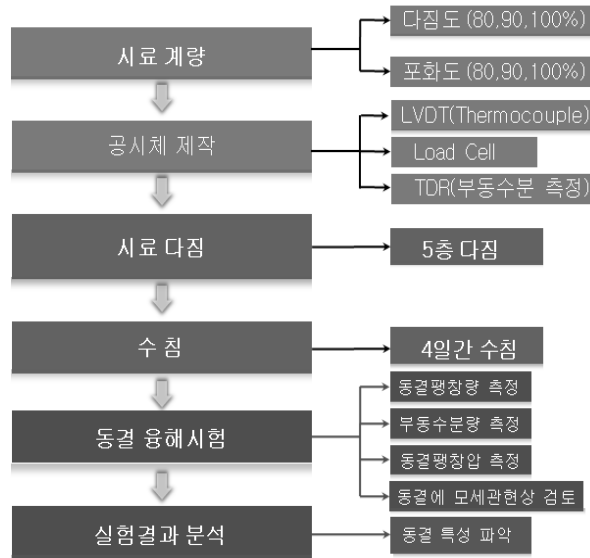


그림 4. 실내동결 시험 연구진행 개요

현재 본 연구는 각 노상토의 다짐도와 포화도에 따른 다양한 변화 조건을 주어 여러 경우의 시료 상태를 고려하여 시험을 진행 하였다. 또한 KS F2312 다짐 시험에 따라 시험을 하였으며 4일 간의 수침 후 동결 용해 시험을 실시하였고, 우리나라 기후를 고려하여 7일간 측정된 동결 팽창량과 부동수분량은 TDS-602 자동 기록 장치에 실시간으로 시료의 상태를 분석할 수 있게 진행되었다.

4. 실험 결과 및 분석

다수의 변화사항을 고려한 시험을 진행하고 있으나, 영하 10℃의 상온 온도 하에 그 중 가장 뚜렷한 값을 보이는 포화도 90%와 다짐도 90%일 경우의 시료 상태로 시험을 실시한 결과값을 분석하였다.

표 1. 노상토 시료의 물성시험 결과

공학적 특성	시료 1	시료 2	시료 3
자연 함수비(%)	10.34	10.55	12.34
비중	2.64	2.70	2.65
균등계수(C_u)	5.0	2.94	3.50
곡률 계수(C_g)	0.8	1.76	0.73
#200체 통과율(%)	4.8	2.7	1.8
액성한계[LL(%)]	30.64	27.31	28.69
소성지수[PI]	N.P	1.35	N.P
최대건조단위중량(t/m^3)	1.95	2.03	1.97
최적 함수비(%)	11.08	10.45	11.2
통일분류법(USCS)	SP	SP	SP

비중, 입도분석, 액·소성한계, 투수시험, D다짐시험 실시하여 현장시료에 대한 기본 물리적 특성을 위 표 1 과 같이 파악하였다.

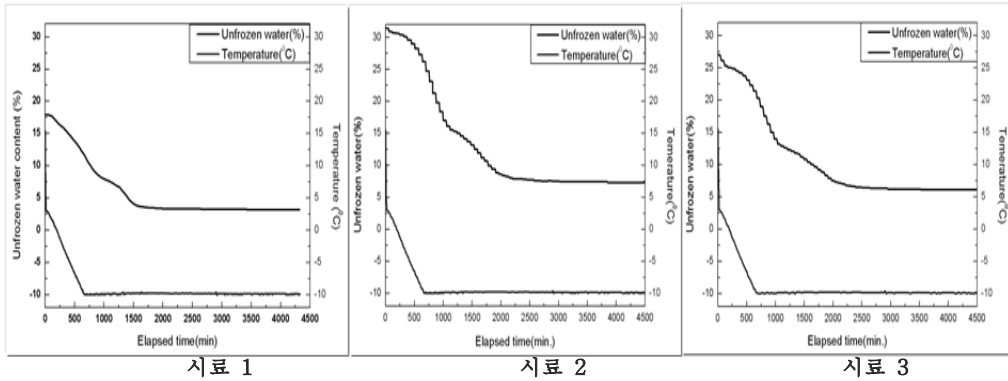


그림 5. -10℃ 동상 시험에 의한 부동수분

그림 5는 동결 온도에 따른 TDR로 계산되는 시료 내 부동수분의 내존량을 %로 나타낸 값이다. 세 시료 모두 -10℃의 대기온도로 제어를 하였다. 부동수분의 내존량은 온도의 변화와 유사한 형태를 보인다. 상온에서 0℃까지 부동수분의 감소율은 급하지만 그 후 감소율이 작아지는 경향을 나타낸다. 부동수분은 시료 동결 후 온도가 낮아짐에 따라 감소하여 -10℃의 대기 온도를 조건으로 시료 1은 4.7%, 시료 2는 7.1%, 시료 3은 5.2%의 양으로 더 이상의 변화 없이 같은 양을 보였다.

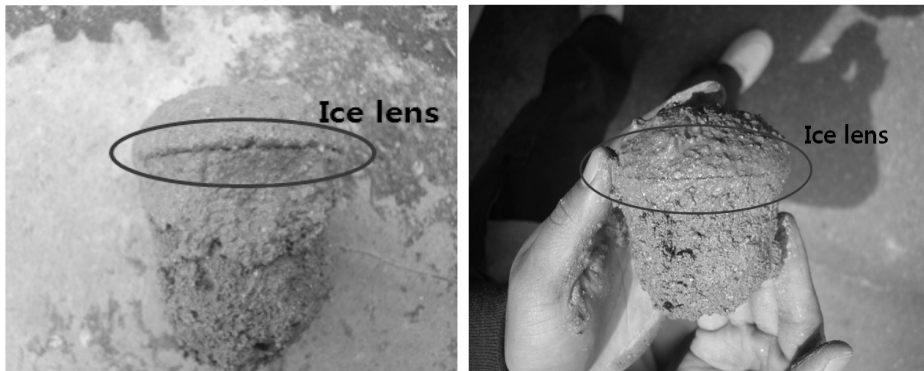


그림 6. Ice lens 전경

동상 시험의 결과 그림 6과 같은 동결에 의한 아이스렌즈 형성을 육안으로 확인 가능하였으며, 아이스렌즈 형성 및 증가로 인하여 시료 내 부동수분 감소가 진행되었다고 판단된다.

표 2. 동상 민감성 기준

동상 민감성 등급	8-hr 동상 팽창율 (mm/day)	8-hr 동상 팽창율 (mm/day)			부동수분(%)		
		시료 1	시료 2	시료 3	시료 1	시료 2	시료 3
무시	< 1	-	-	-	4.7	7.1	5.2
매우 낮음	1-2	1.6	-	1.7			
낮음	2-4	-	-	-			
중간	4-8	-	7.8	-			
높음	8-16	-	-	-			
매우 높음	> 16	-	-	-			



표 2 는 미국 CRREL의 동상 민감성 기준이다. 이 기준에 적용함에 따라 시료 1의 경우 팽창량이 1.6mm로 “매우 낮음”, 시료 2는 “중간”, 시료 3은 “매우 낮음”의 동상 민감성을 판단할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 실내 동상 시스템을 이용하여 0℃이하 온도에서의 도로 노상토 동상 특성을 파악하기 위하여 실험을 하였다. 실험은 동결 온도의 변화에 대한 부동수분의 거동형태와 관계를 파악하였다. 또한 아직 정확한 기준 시방서가 없는 우리나라의 건설표준을 고려하여 미국 CRREL의 동상 민감성 기준과 비교하여 그 관계성을 규명하고자 하였다. 궁극적으로 이러한 관계의 규명으로 우리나라의 기후와 토양조건에 맞는 동상성 민감성 표준을 제안하여 동상에 대한 피해를 줄이고자 한다.

(1) 실내 동결 시스템을 통하여 -10℃로 영하의 대기 온도를 제어하고, 지하수의 충분한 수분을 공급하며, SP 계열의 시료를 사용하여 동결 조건인 온도와 수분 그리고 토질의 조건에 따라 동상이 발생 하였다. 0℃ 이하의 대기 온도를 유지함에 따라 시료의 온도는 차츰 떨어 졌으며 온도의 변화에 따라 토질내 동결 현상과 함께 동상 팽창, 부동수분의 감소 현상이 발생 하였다.

(2) TDR 장비를 이용한 부동수분 측정 결과, 각각의 시료는 온도가 감소할수록 부동수분량이 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 각각의 시료의 부동수분은 동결 온도에 따라 감소를 보인 후 시료 내부 5℃를 전후로 일정한 값을 보이며, 전체적 부동수분의 거동은 비슷한 양상의 변화형태를 보였다.

(3) 미국 Chamberlain (1987, CRREL Report 14-86)의 동상 민감성 기준과 비교하여 시험 결과를 나타낸 것이다. 시료1의 팽창량은 약 1.6mm로 동상 민감성이 매우 낮은 것으로 판별 되었으며, 시료2는 7.8mm의 Medium의 동상 민감성을 나타 낸 것으로 이는 NP의 소성지수를 나타내는 용인지역의 노상토에 비하여 시료2가 1.35의 소성지수를 나타내는 물성특성의 차이 때문으로 판단된다.

(4) 현재 전국 9곳의 현장 시료를 채취하여 동결 온도에 따른 위치별 동결 속도, 동상압, 동상팽창량, 부동수분의 거동에 대한 실험이 진행 중이다. 상재 하중, 영하 온도, 지하수 공급, 시료 포화 상태 등 다양한 변화에 따른 흙의 동결 특성을 분석하여 대한민국의 동결 표준 시방서를 만들어 흙의 특성에 맞추어 최적경제설계에 기준 하는데 목적을 하고 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설기술혁신사업의 연구비지원(08기술혁신C01Q81)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 건설교통부(2000), 도로설계편람 II권, 포장편, pp. 702-1~55.
2. 건설교통부(2003), 한국건설기술연구원, 한국도로공사, “동상방지층 두께 산출”, pp. 1~16.
3. 남영국, 조규태, 진정훈(2002), “도로포장의 동상방지층 실효성 검증을 위한 현장계측 및 실내시험 연구”, 대한토목학회 논문집, 제22권, 제5D호, pp. 913~921
4. 신은철, 강정구, 박정준(2009), “지반동결에 따른 지하구조물의 열적 안정성”, 한국지반공학회 논문집, 제25권, 제3호, pp. 65~74.
5. 신은철, 류병현, 박정준(2009), “변형된 동결-융해 시험장치를 이용한 동상민감성흙의 지반공학특성”, 제8권, 제1호, pp. 53~59
6. 신은철, 박정준(2003), “동결토의 동상 팽창압 특성에 관한 실험적 연구”, 한국지반공학회 논문집 제19권 제2호. pp 65~74.
7. 홍성완, 김영진, 허승범, 공길용(1992), 과학기술처, pp. 40~46, pp. 50~51, pp. 53~83.
8. Beskow, G.(1935), Soil freezing and frost heaving with special applications to roads and railroads, Swedish Geological Society, C, No. 375. In CRREL Special Report 91-23, pp. 41 ~ 157.
9. Taber, S.(1929), Frost heaving, Journal of Geology, Vol. 37, pp. 428~461. In CRREL Special Report 91-23, pp. 9~26.