

실내 동결 시험 시스템을 활용한 도로 노상토의 동상 특성 분석

Analysis of Frost Heave Characteristics for Subgrade Soil Using Freezing Apparatus System

신은철* · 강신재** · 박정준*** · 강현희****

Shin, Eun Chul · Kang, Sin Jae · Park, Jung Jun · Kang, Hyoun Hoi

1. 서 론

동결기 동결온도가 지속되는 지역의 도로가 동상 민감성 노상에 건설 된 경우 동결융해에 의한 포장구조체 손상에 대한 위험성을 지니게 된다. 일반적으로, 지하수 및 강우에 의한 도로 노상토의 함수비 증가는 모세관 현상을 통하여 노상 지반내의 동상에 대한 활동영역의 함수비를 증가시킨다. 이렇게 상승된 동결영역의 함수비는 동결온도가 지속됨에 따라 아이스렌즈를 형성하여 도로노상토의 불균형 동결팽창을 초래하며 결국 포장 구조체의 손상을 가져오게 되는 것이다.

이러한 피해를 줄이기 위하여 국내에서도 미국 AASHTO 설계법과 일본 T_A설계법을 바탕으로 도로 동상 방지층 설계가 진행되고 있다. 그러나 이와 같은 기존의 설계법에 따르면, 동상방지층은 도로 노상토의 동상 특성이 아닌 온도에 따른 동결깊이에 근거해 일률적으로 결정되고 있다. 이러한 동결깊이를 포장구조설계에 적용하다 보니 포장설계의 부실 또는 과다설계가 우려되고 있다.

따라서 본 연구에서는 도로 동상방지층의 효율성 검증 및 설치기준 확립을 위해 실내 동결 시험 시스템을 활용하여 국내 도로 노상토의 동상 특성에 대한 분석을 실시하였다. 이를 위하여, 서울지방국토관리청과 대전지방국토관리청 산하 고속도로 건설 현장 노상토에 대한 역학적 특성과 실내 동결 시험을 수행하였으며, 외부 동결온도의 지속 조건에 대한 시료의 열전달 속도와 동결팽창압을 측정, 분석함으로써 도로노상토의 동상특성을 분석하였다.

2. 시료의 역학적 특성

도로 노상토의 동결융해 시험을 실시하기 위하여 서울지방국토관리청과 대전지방국토관리청 산하의 고속도로 건설 현장에서 노상토를 채취하였다. 현장 시료의 기본적인 역학적 특성은 표 1과 같으며 두 시료의 비중과 다짐시험을 통한 시료의 특성은 비슷하였다. 그러나 입도 분석 결과, Type B 시료 보다 넓은 범위의 입도분포로 구성되어 있음을 알 수 있다. 또한 Type A과 Type B 모두 비슷한 액성한계값을 나타내었지만 소성지수에서 Type A의 경우 1.35로 약간의 소성을 띤 반면 Type B의 경우 비소성을 띠었다.

시료의 역학적 특성 파악에 있어서 본 시료가 도로 노상토이므로 표준다짐을 사용하지 않고 노상토 다짐관리 시 사용되는 기준인 D-다짐을 사용한 최대건조단위중량과 최적함수비를 산출 하였으며, 이를 바탕으로 한 시료 개량을 실시하였다.

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

** 비회원 · 인천대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정(E-mail : ikinye8318@gmail.com) -발표자

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

**** 비회원 · 인천대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정(E-mail : lastpon1@hanmail.net)

표 1. 시료의 역학적 특성

		Type A	Type B
채취지역		서울지방국토관리청	대전지방국토관리청
비중		2.70	2.68
체분석	균등계수(Cu)	2.94	3.50
	곡률계수(Cg)	1.76	0.73
	#200체 통과율(%)	2.7	1.8
액성한계(LL)		27.3	28.7
소성지수(PI)		1.35	N.P
D-다짐	γ_{dmax} (t/m^3)	2.03	1.97
	최적함수비 (w_{opt} ,%)	10.45	11.2
통일분류법(USCS)		SP	SP

3. 실내 동결 시험 장치

3.1 실내 동결 시험 장치의 구성

실내 동결 시험 장치는 그림 1과 같으며 구성은 동결 조건 구현을 위한 온도 제어장치, 동결용해 챔버, 동결팽창압 측정을 위한 로드셀, 시료 내부 온도와 챔버 내 온도측정을 위한 온도센서, 실제 노상토의 지하수 유입 조건을 구현하기 위한 저수조 그리고 데이터 수집 장치이다.



그림 1. 실내 동결 시험 장치

온도 제어장치는 영상 10℃에서 영하 20℃범위의 온도로 유지 및 제어 할 수 있으며 프로그램을 통하여 동결 지속시간과 온도 감소 범위 및 시간을 조정 할 수 있다. 또한 동결용해 챔버는 실제 노상토의 동결 조건을 구현하기 위하여 시료 상부를 대기 온도에 노출시키고 몰드 주변은 보온재를 이용하여 열전도를 차단하였다. 몰드의 재질은 열전도율이 작은 아크릴 몰드와 PVC 보온재를 사용하였다. 저수조내의 물을 일정한 온도로 유지시키기 위하여 별도의 냉각기를 외부에 설치 후 저수조 내부를 순환 시키는 방법을 선택하였다.

공시체의 상·중·하부에 삽입하는 온도센서는 버넌트(Barnant)사에서 제작된 것으로 E, J, K, T의 4가지 형태 중 $-50^{\circ}\text{C} \sim 1300^{\circ}\text{C}$ 범위까지 측정이 가능한 K형식이 본 연구에 가장 적절하다고 판단되어 사용하였으며, 대기온도는 바람의 영향에 의한 기온의 순간저하를 방지할 수 있는 대기용 온도센서를 동상 시험기 안에 부착하였다. 본 연구에서 사용된 온도센서는 얇은 전선형으로 유연성이 있어 공시체 내부에 설치하여 다짐을 할 수 있다. 표 2는 온도센서에 대한 종류별 측정범위이다.

표 2. 온도센서의 종류와 온도 측정 범위

Type	온도 측정 범위($^{\circ}\text{C}$)
E	$-250 \sim 871$
J	$0 \sim 760$
K	$-50 \sim 1300$
T	$-184 \sim 371$

3.2 실내 동결 시험 장치를 활용한 시험 방법

시료의 성형에 있어서 ASTM D5916-06실험 규격으로 시료 계량 후 공시체를 제작하였다. 실제 도로 노상토의 다짐 조건인 다짐도 95%와 지하수 유입으로 인한 포화 조건을 만족시키기 위하여 포화도 90%로 시료를 개량하였다. 또한 시료의 균일한 다짐과 예정된 위치에 온도센서를 설치하기 위하여 그림 2와 같은 시료 다짐기를 사용하였다. 여기서, 온도센서의 위치는 동결온도 지속에 대한 시료 내 열전달 속도를 확인하기 위하여 그림 3과 같이 시료 상부로부터 5cm, 10cm, 15cm, 20cm 위치에 온도센서를 설치하였다.



그림 2. 시료 다짐기

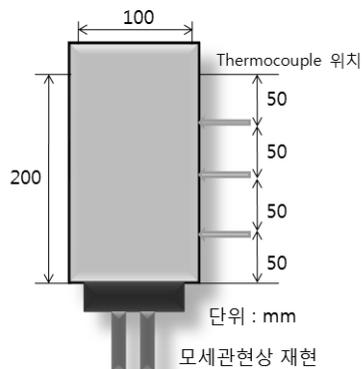


그림 3. 시험용 몰드의 구성

그리고 몰드와 시료 사이의 마찰을 최소화하기 위하여 몰드 내벽에 윤활유를 포설하였으며, 몰드 하부에 다공판과 거즈를 설치하여 실제 노상토의 모세관 현상을 재현하였다. 수분 유입을 위한 저수조의 온도를 겨울철 지하수의 평균 온도인 4.5°C 로 유지 시켰으며, 동결 온도의 유지는 그림 4와 같이 상온에서 시작하여 동결 지속 온도인 -10°C 까지 720분(0.5일) 동안 서서히 냉각시킨 후 -10°C 하에서 7일간 유지한 상태에서 시료의 동결 특성을 파악하였다.

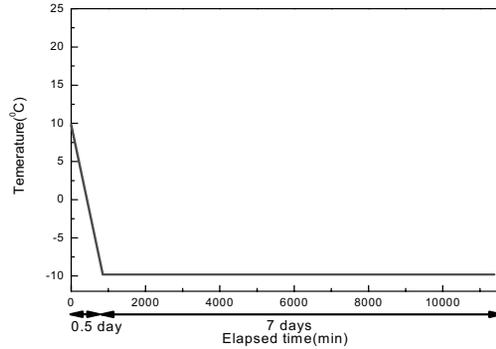
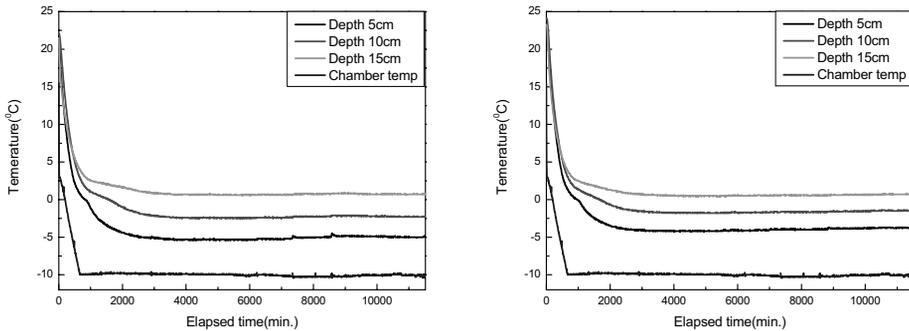


그림 4. 실내 동결 시험 온도 제어 조건

3.3 실내 동결 시험 결과

3.3.1 동결 온도 지속에 따른 시료의 온도 분포



(a) Type A

(b) Type B

그림 5. 동결 시간에 따른 시료의 깊이별 온도 변화

그림 5에 나타난 바와 같이, Type A와 Type B의 동결온도 지속하의 시료의 열 전달속도는 비슷한 양상을 나타냈다. Type A의 경우 시험 시작 약 340분 경과 후 동결 챔버 온도가 -3°C 인 시점부터 시료 상·중·하부의 온도 분포가 급격한 차이를 보이기 시작하였으며, Type B의 경우 약 400분 경과 후 챔버 온도가 -4.5°C 인 시점부터 시료 깊이에 따른 온도 분포가 급격한 차이를 보이기 시작하였다.

표 3. 시료 깊이별 지속 온도 ($^{\circ}\text{C}$)

	안정화 시각(분)	Depth			예상 동결 깊이 (cm)
		5cm	10cm	15cm	
Type A	3300분	-5°C	-2.3°C	0.8°C	13.6
Type B	3100분	-3.9°C	-1.6°C	0.6°C	13.8

Type A의 경우 시험 시작 3200분 후, Type B의 경우 약 3100분 이후로 각 시료의 온도 변화가 일어나지 않았으며 깊이별 지속 온도는 표 3과 같다. 여기서 주목할 점은 시료 하부의 온도이다. 외부온도가 -10°C 로 7일간 지속되는 환경 속에서도 시료 하부의 온도는 0°C 이하로 떨어지지 않았다. 이는 겨울철 지하수의 평균 온도 조건을 구현하기 위해 저수조의 수온을 4.5°C 로 제어한 것에 기인된 것으로 판단된다.

3.3.2 동결팽창압 발생량

동결온도 지속하에서 두 시료의 동결팽창압에 대한 발생은 비슷한 양상을 나타내었다. 그림 6으로부터, 시험 시작과 동시에 초기 압력의 하강 후 Type A은 약 250분, Type B는 약 260분의 경과 후부터 급격한 동결팽창압이 발생 되었으며 이때 시료 상부의 온도는 0°C 이하였다. 이는 시료 상부의 동결과 함께 동결팽창압이 급격하게 증가 한 것으로 판단된다.

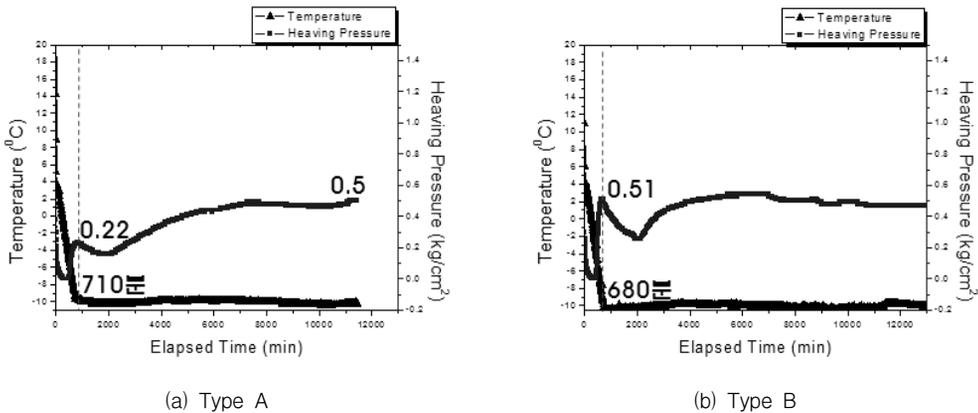


그림 6. 시간에 따른 동결팽창압 발생량

또한 Type A은 시험 시작 250분 이후 710분까지, Type B는 260분 이후 680분까지 급속한 동결팽창압이 발생 된 후 점차 압력이 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 시료 상부가 동결 된 후 시료의 활동영역 내에 아이스렌즈의 형성으로 인한 모관 상승력이 발생하여 시료 상부에 발생하는 동결팽창압에 대한 감소를 유발하였으며 아이스렌즈의 형성 후 시료 내 그 범위가 점차 넓어져 동결팽창압의 증가를 발생 시킨 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 도로 노상토의 동결 특성을 분석하기 위하여 서울지방국토관리청과 대전지방국토관리청 산하의 고속도로 건설 현장 노상토 시료에 대한 실내 동결 시험을 수행하여 다음의 연구결과를 얻었다.

1. 지하수의 영향으로 인해 시료 하부 온도는 영하로 떨어지지 않았다. 또한 시료의 온도분포를 분석 한 결과 공시체 전체 높이 20cm 중 Type A은 13.6cm(68%), Type B는 13.8cm(69%)이 동결된 것으로 판단된다. 이는 노상토의 상부 동결 시 지하수의 영향으로 인하여 하부 지반은 동결되지 않고, 모세관 현상을 통한 수분의 공급경로가 된다는 것으로 판단된다.

2. 최대 동결팽창압 발생량의 경우 두 시료 모두 $0.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 크기를 보였다. 동결 온도, 지속시간 시료의 온도 분포 그리고 동결팽창압 발생량에 대한 비교 분석 결과 시료의 온도 분포는 약 3100분 이후로 안정화 되는 양상을 보였지만 동결팽창압의 발생량은 3100분 이후에도 증가 및 감소하였다. 이는 3100분 이후 시료의 온도가 동일하게 유지되는 조건하에서도 아이스렌즈부분의 증가와 지하수의 유입으로 인한 동결양의 증가로 인한 것으로 판단된다.

3. 1차 최대 동결팽창압의 발생 이후 응력의 감소는 아이스렌즈의 영향이라 판단된다. 시료 상부가 동결된 후 시료의 중반부에 형성 된 것으로 예상되는 아이스렌즈의 범위 증가와 수분 공급을 위한 흡입력 발생



은 시료 상부의 응력 저하와 시료 하부의 수분 유입을 증진시켰을 것이라 판단된다.

4. 본 연구를 통하여 서울지방국토관리청과 대전지방국토관리청 산하의 고속도로 건설 현장 노상토의 동상특성을 분석하였다. 추후 연구에서는 보다 다양한 시료에 대한 시험을 실시하여 도로 노상토의 종류 별 동상 특성의 분석이 요구된다고 판단된다. 더 나아가, 상재하중을 고려한 동상 특성 분석이 이루어져야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 남영국, 조규태, 진정훈(2002), "도로포장의 동상방지층 실효성 검증을 위한 현장계측 및 실내시험 연구", 대한토목학회 논문집, 제22권, 제5D호, pp. 913~921
2. 신은철, 류병현, 박정준(2009), "변형된 동결-융해 시험장치를 이용한 동상민감성흙의 지반공학적 특성", 한국토목섬유학회논문집, 제 8권, 1호, pp. 53~59.
3. 신은철, 박정준(2003), "동결토의 동상팽창압 특성에 관한 실험적 연구", 한국지반공학학회논문집, 제 19권, 2호, pp. 65~74.
4. Hoekstra, P., Chamberlain, E. and Frate, A.(1965), Frost Heaving Pressures, Cold Region Research Engineering Laboratory, Report 176
5. W. S. Guthrie and A. Hermansson(2003). "Frost Heave and Water Uptake Relations in Variably Saturated Aggregate Base Materials.", Paper No. 03-4391, TRB, National Research Council, Washington, D.C.