

실내시험에 의한 흙의 함수비 변동과 다짐도에 따른 동상특성

김 낙 석(공학박사, 경기대학교 토목공학과 교수)

조 규 태(공학박사, 인천대학교 토목공학과 연구교수)

김 동 식((주)KCC건설, 수원대학교 대학원 토목공학과 박사과정)

진 정 훈(공학박사, (주)도화종합기술공사 기술개발연구원 수석연구원)

Laboratory Characteristics on Frost Heave under Various Moisture Contents and Compaction Efforts in Pavement Subgrade Soils

Kim, Nak-seok · Cho, Gyu-tae · Kim, Dong-sik · Jin, Jung-hoon

ABSTRACT

This study presents the laboratory properties on the frost heave under various moisture contents and compaction efforts in pavement subgrade soil. Many researches were conducted on the frost heave. However, the researches with the domestic soils have not been so active until now. In particular, the evaluation of the frost heave in pavement subgrade soils was not established by many researchers. The problems relating with the frost heave have been serious causes in the distresses of pavements. The study was performed using an appropriate field simulation. The research results revealed that the drainage conditions in earth work should be treated cautiously.

[Key words : Frost Heave, Subgrade Soil, Freezing, Moisture Contents, Drainage]

I. 서 론

도로의 건설에는 토공이 매우 중요한 역할을 하고 있다. 도로의 구조물의 하나인 교량을 제외하고는 대부분이 도로에서 사용되고 있는 재료인 흙과 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. 국내에서는 도로의 포장을 겨울철 동상으로부터 보호하기 위하여 동상방지층을 설계 및 시공하고 있다. 또한 그 밖의 도로구조물에서는 동상에 대한 영향을 고려하고 있으며, 도로의 배수용 파이프 및 암거에서도 동상의 영향을 받지 않기 위하여 동상방지층을 사용하고 있고, 채움재들은 배수가 잘되는 재료들을 사용하고 있다.

해외의 시방서(Army TM 5-852-2 1985, Army TM 5-852-6 1988)에 근거하여 많은 부분들을 발취하여 국내의 시방서(건설교통부 2000)에 기술하여서 국내의 설계 및 시공시에 사용하고 있지만, 최근에 도로의 포장에서는 동상에 의한 도로의 포장파손이 보고되지 않았지만, 암거에서는 동상의 영향을 받아서 도로가 파손된 사례가 발생하였다.

최근 국내의 도로동상과 관련된 연구로는 도로의 노상도 및 동상방지층에 대한 연구한 자료들(조규태 등 2002, 진정훈 2004)과 실내동상시험(조규태 등 2002, 권기철 2002)이 있다. 본 연구는 도로의 건설에서 사용되고 있는 흙의 포화에 따른 동상특성에 대한 연구로 흙의 포화에 따른 동상특성과 흙의 다짐도에 따른 동상특성 및 지속적인 물의 공급에 따른 동상특성을 분석하기 위하여 실내동상시험을 통하여 현장조건을 모사하여 연구를 진행하였다.

II. 실내동상시험

1. 현장조건의 모사

도로의 현장에서 겨울철동안 온도저하를 모사하기 위하여 그림 1과 같이 동상시험을 할 수 있는 모형시험기를 사용하였다. 국내에 소개된 많은 동상시험기의 모델들이 있지만, 본 연구에서는 국내의 동상시험을 모사하기 위하여 일정한 영하의 온도대를 유지시킬 수 있으며, 또한 현장의 조건과 동일하게 수분공급을 원활하게 할 수 있는 장치와 수분을 차단할 수 있는 장치를 장착하였다. 또한 흙의 동상의 압력을 측정하기 위하여 로드셀(load cell)을 장착하였으며, 팽창량을 측정하기 위하여 LVDT(linear variable differential transformers)를 장착하였다.

동상의 관입은 상부로부터 냉각될 수 있게 하기 위하여 시료주변은 열선을 사용하여 영상의 온도를 유지할 수 있는 장치를 하였으며, 국내의 최저기온을 모사할 수 있게 하기 위하여 -20°C 까지 냉각시킬 수 있는 냉매를 사용하였다.

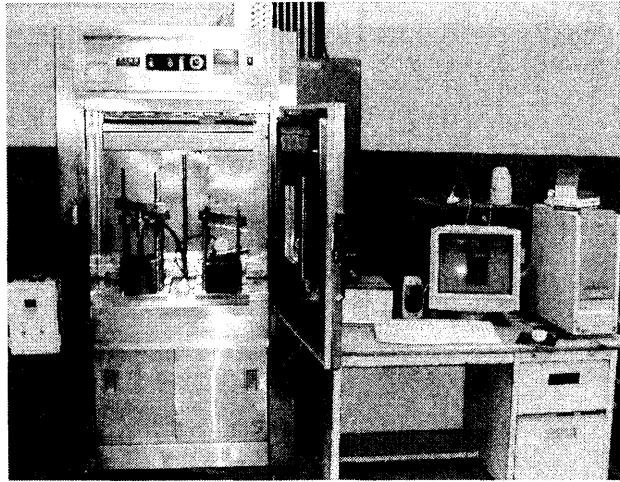


그림 1. 실내동상 시험기

현장의 흙이 물의 공급이 차단되는 상태에서 기온의 냉각에 의한 동상을 모사하기 위하여 폐쇄식(closed system)실내동상시험과 수분의 공급이 지속적으로 계속되는 개방식(open system)실내동상시험을 실시하기 위하여 시료하부에 투수판(porous)을 설치하였으며, 투수판 하부에는 물탱크에서 물을 공급하거나 차단할 수 있게 하였다.

2. 동상시험요소

1) 시료제작

실내동상시험을 하기 위한 시료의 제작을 위하여 다짐방법으로 AASHTO T274-82(1996)에 규정되어있는 다짐방법(kneading, gyratory, static compaction)중에서 정적다짐(static compaction)을 사용하였다. 시료의 성형은 내경이 15cm이고, 높이는 12.5cm인 몰드를 사용하였다.

2) 실험방법

실내동상시험의 실험방법은 ASTM D 5918-96(1996)의 실험방법을 기초로 하였으며, 시험용 몰드는 이 기준에 의하여 제작하였다.

동상의 실내시험에서 일반적으로 측정하는 것은 동상이 발생하였을 때의 동상팽창량과 동상압력이다. 흙속에 함유하고 있는 토립자의 입경과 수분의 양과 영하의 온도 및 지속시간에 의해서 동상의 팽창량과 팽창압력을 좌우하게 된다. 따라서 본 연구에서는 냉각온도를 최대 -2

0℃까지 적용하였으며, 현장조건에서 가장중요한 수분의 공급조건에 따른 동상의 특성을 분석하기 위하여 수분을 공급할 수도 있고 차단할 수 있게 하였다.

실내동상 시험에서 동상팽창압과 팽창량은 동상발생요인의 중요한 변수인 수분, 온도, 흙의 입경의 영향을 받으므로 본 연구에서 특성을 고려하여 실내동상시험조건에 반영하였다.

3) 실험 온도

국내의 도로가 건설되어있는 현장의 온도조건을 모사하기 위하여 -5~-20℃까지 실험기 내부의 온도를 조절하여 시험을 실시하였으며, 온도의 오차범위는 ±0.5℃이며, 아이버튼(i-button)과 버넌트(Barnant)사의 온도센서(thermocouple)를 사용하여 내부온도가 유지되는지를 검증하였다.

4) 다짐도 및 수분공급조건

도로의 토공에 사용하는 흙들은 현장에서 다짐장비에 의해서 다져지게 되며, 일정한 다짐도를 가지게 된다. 흙의 다짐도에 따른 영향을 분석하기 위하여 다짐도를 조절하였으며, 또한 수분의 공급 및 차단에 의한 실내동상시험을 실시하였다.

5) 시료

실내동상시험에서 사용한 시료는 표 1과 같은 특성을 가지고 있는 시료를 사용하였다. 도로 현장의 시료를 채취하였으며, 연약지반에서 채취한 시료도 사용하였다.

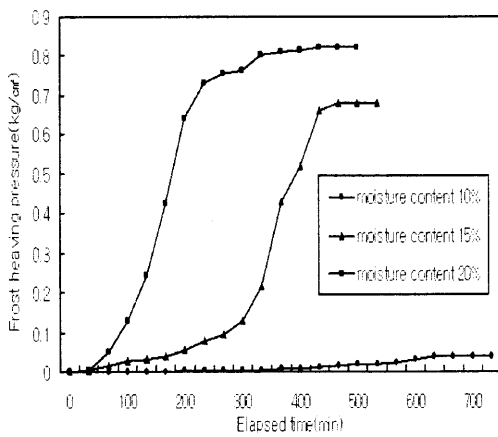
표 1. 실내시험용 시료

Classification		A	B	C
Specific gravity		2.70	2.67	2.68
Sieve analysis (% passing)	#4(4.75mm)	66.8	74.2	100
	#10(2.0mm)	46.5	66.8	100
	#40(0.425mm)	26.5	36.9	91
	#200(0.075mm)	13.0	23.5	52
Atterberg limit	LL (%)	32.0	30.0	34.0
	PI	N.P	7.0	N.P
Compaction test	γ _{dmax} (t/m ³)	1.90	1.85	1.69
	OMC(%)	10.7	14.6	16.7
Modified CBR (%)		25.7	10.7	-
USCS		SM	SC	ML

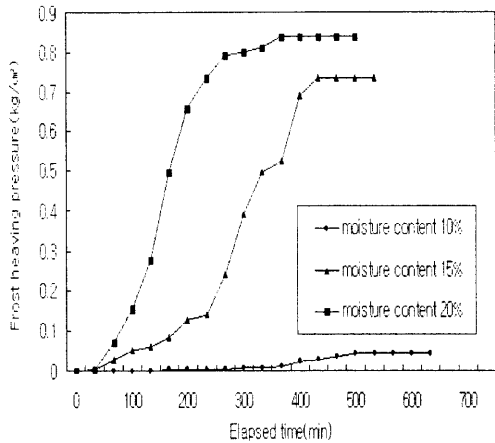
3. 실험 결과

1) 함수비의 영향

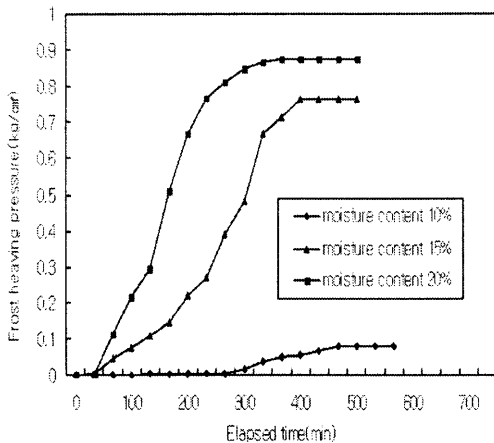
수분이 공급되지 않는 조건인 폐쇄식 동상시험을 실시하였으며, 그림 2과 그림 3은 표 1의 A시료에 대한 함수비를 임의 적으로 10, 15, 20%로 조절하여 $-5 \sim -20^{\circ}\text{C}$ 까지 4개의 온도대에서 동상팽창압과 동상팽창량을 측정하였다. A시료는 최적함수비가 10.7%로 함수비가 15, 20%일 때 동상압과 동상량이 갑자기 커지는 것을 볼 수 있었다.



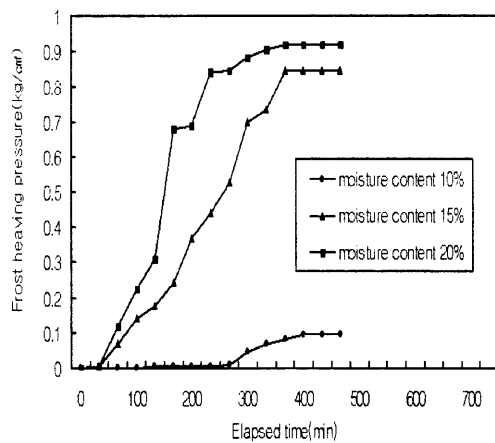
(a) 동상압 (-5°C)



(b) 동상압 (-10°C)

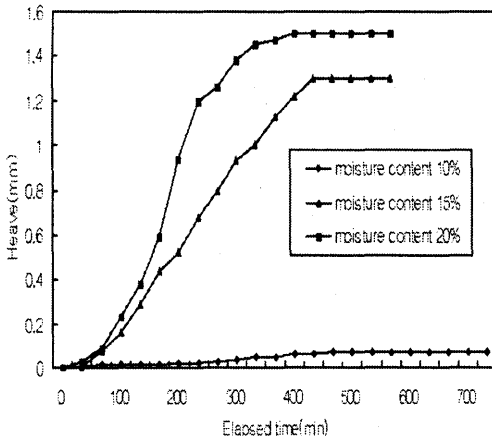


(c) 동상압 (-15°C)

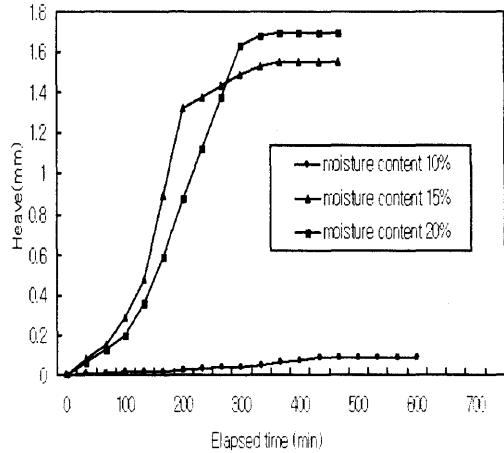


(d) 동상압 (-20°C)

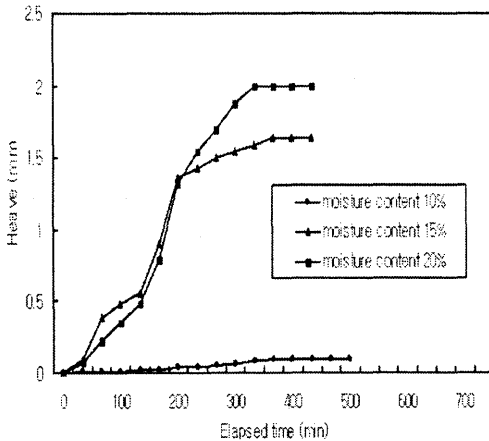
그림 2. 시료A의 실내동상팽창압



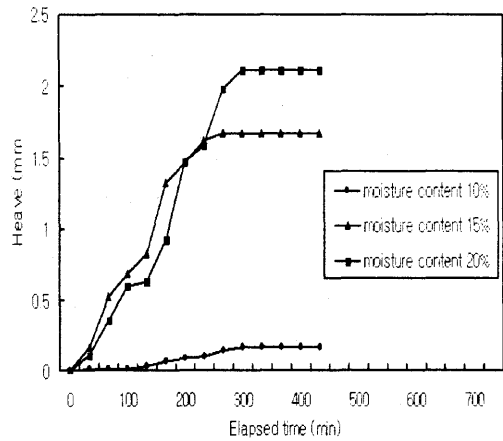
(a) 동상량 (-5°C)



(b) 동상량 (-10°C)



(c) 동상량 (-15°C)

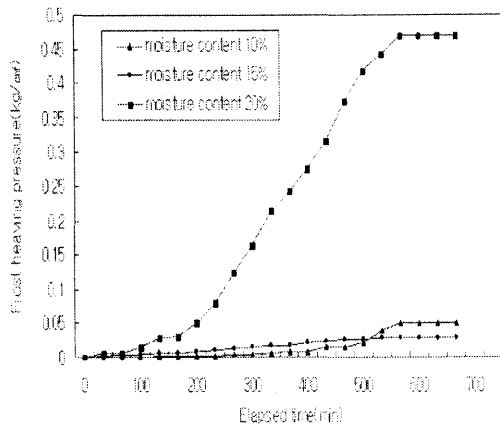


(d) 동상량 (-20°C)

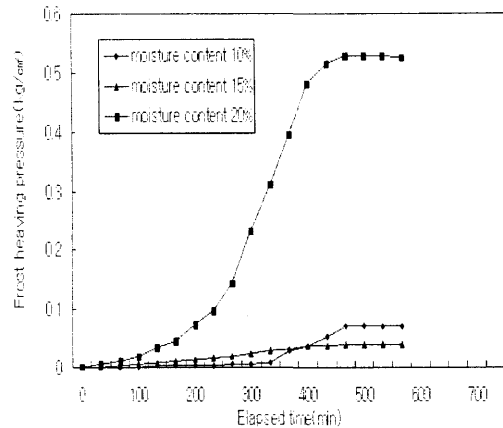
그림 3. 시료A의 실내 동상팽창량

그림 4와 5는 시료 B의 함수비를 임의로 10, 15, 20%로 조절하여 동상의 팽창량과 팽창압을 측정하였다. 최적함수비가 14.6%의 시료로 함수비가 20%로 증가할 때 갑자기 동상압과 동상량이 증가하였다.

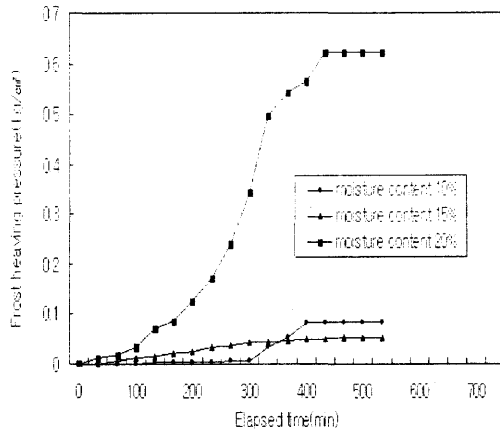
시료 A와 B의 공통적이 특성은 온도가 낮아질수록 최대동상압과 최대동상량이 발생하는 시간이 짧아지는 것을 볼 수 있었다. 또한 최적함수비대를 넘어가는 순간 동상량과 동상압이 갑자기 증가하는 것을 볼 수 있었다. 시료의 최적함수비에서는 동상의 영향이 적음을 알 수 있었다.



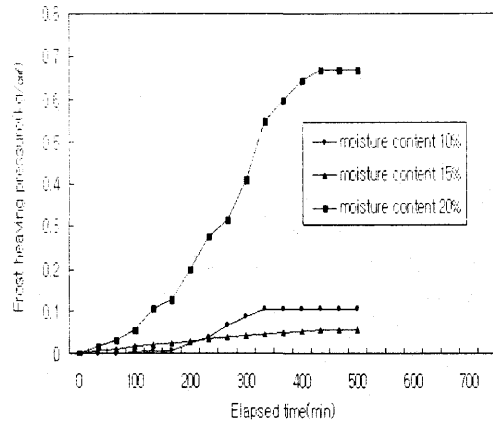
(a) 동상압 (-5°C)



(b) 동상압 (-10°C)

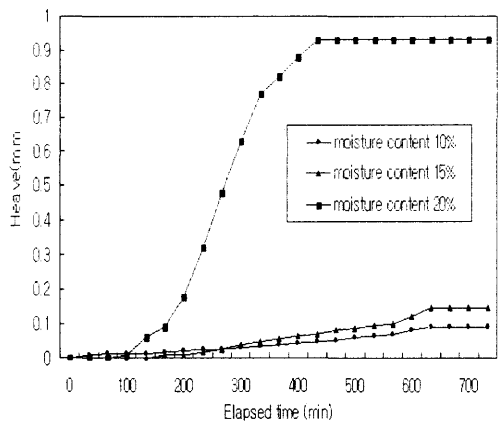


(c) 동상압 (-15°C)

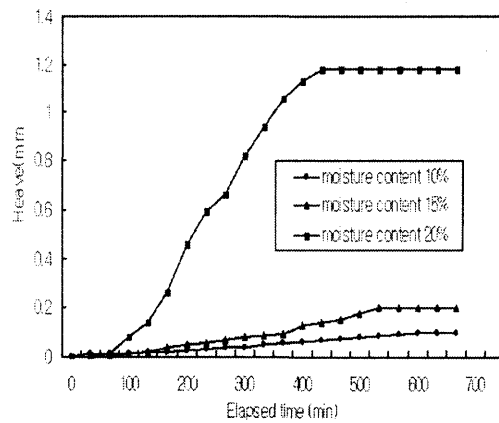


(d) 동상압 (-20°C)

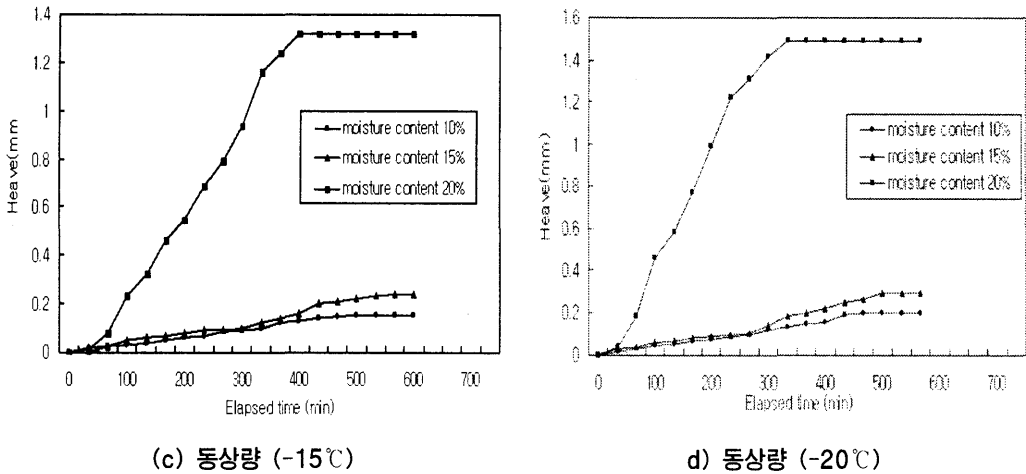
그림 4. 시료B의 실내동상팽창압



(a) 동상량 (-5°C)



(b) 동상량 (-10°C)



(c) 동상량 (-15°C)

d) 동상량 (-20°C)

그림 5. 시료B의 실내 동상팽창량

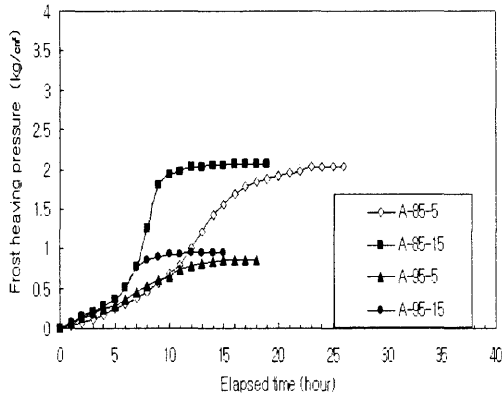
2) 다짐도에 따른 동상의 특성

흙의 다짐에 의한 동상의 영향을 평가하기 위하여 최적함수비대에서 85%의 다짐도와 95%의 다짐도를 사용하여 실내동상시험을 실시하였다.

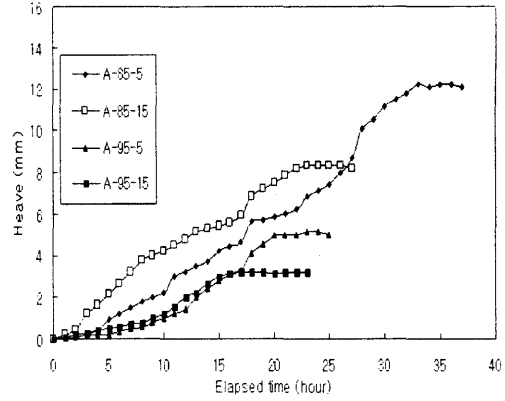
표 1의 시료를 사용하였으며, 온도조건은 -5°C, -15°C를 사용하였고, 48시간에 걸쳐서 시험을 진행하였다. 수분조건은 폐쇄식 동상조건을 사용하였으며, 물의 공급이 차단된 상태에서 실내동상시험을 실시하였다. 그림 6~8은 표 1의 시료 A~C에 대한 다짐도 85%와 95%에 대한 -5°C와 -15°C에서의 동상의 팽창압과 팽창량을 측정한 자료이다.

다짐도에 따른 동상의 특성분석을 위하여 실내동상시험을 실시한 결과 최적함수비가 적은 시료일수록 최대동상압과 팽창량이 발생하는 시간이 적게 걸렸다. 또한, 다짐도가 동상의 팽창압과 팽창량에 관여하고 있음을 알 수 있었다.

동상발생에 관여하는 온도의 영향은 -5°C와 -15°C에 실시한 결과 온도는 최대동상팽창압과 팽창량이 발생하는데 걸린 시간에만 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 따라서 동상에 관여하는 요소 중에서 다짐도가 매우 중요함을 알 수 있었다. 현장에서 토공에서의 다짐관리가 매우 중요하며, 동상의 영향을 미칠 수 있는 것을 실내시험을 통하여 규명하였다.

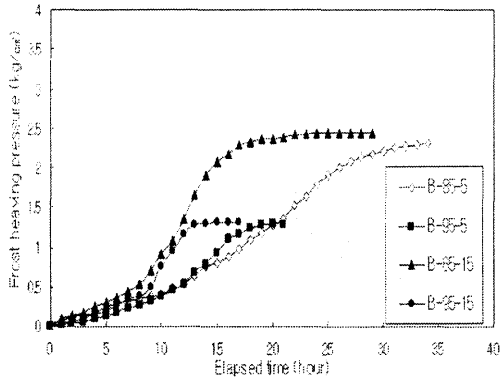


(a) 동상팽창압(-5℃, -15℃)

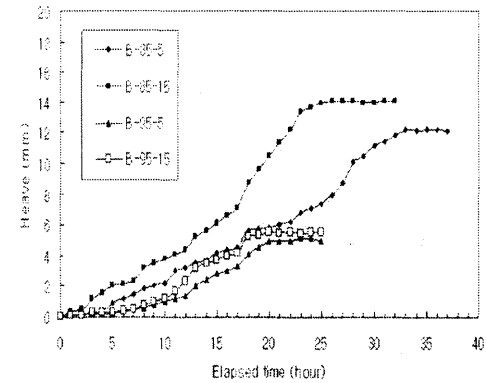


(b) 동상팽창량(-5℃, -15℃)

그림 6. 시료A의 다짐도와 온도에 따른 동상팽창압과 팽창량

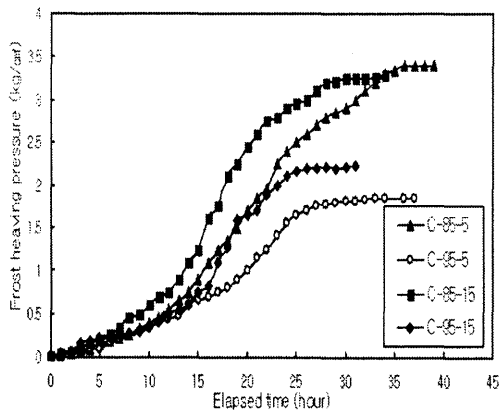


(a) 동상팽창압(-5℃, -15℃)

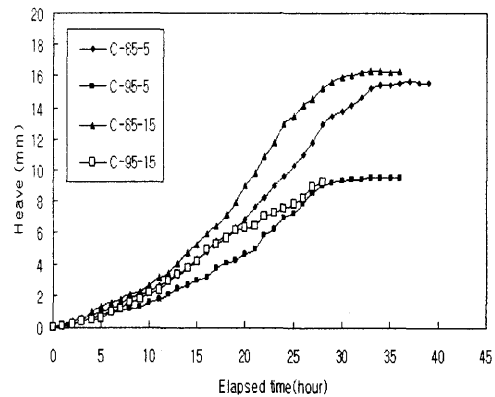


(b) 동상팽창량(-5℃, -15℃)

그림 7. 시료B의 다짐도와 온도에 따른 동상팽창압과 팽창량



(a) 동상팽창압(-5℃, -15℃)



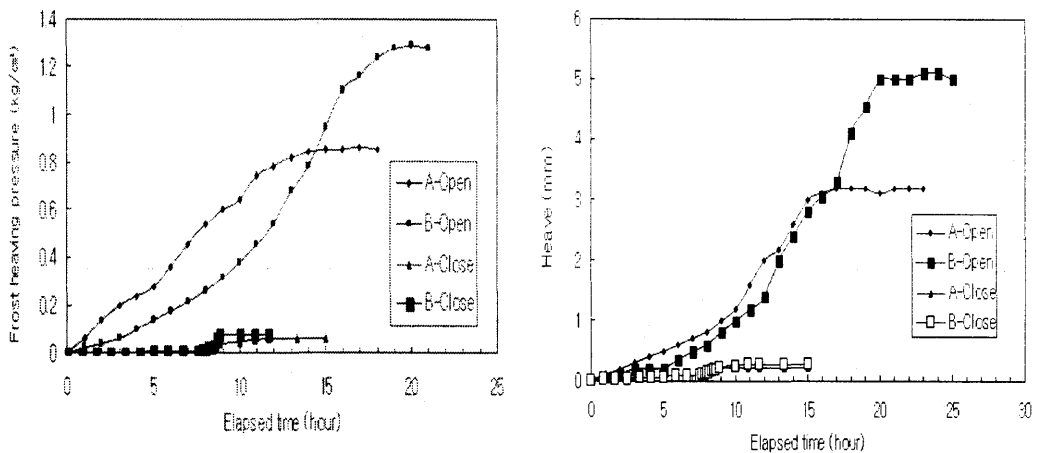
(b) 동상팽창량(-5℃, -15℃)

그림 8. 시료C의 다짐도와 온도에 따른 동상팽창압과 팽창량

3) 수분의 공급조건에 따른 동상특성

도로의 토공에서 다져진 흙은 최적의 함수비대에서 공사가 진행되기 때문에 건설 당시에 최적의 다짐도 및 최적의 함수비를 가지고 있으며, 지지력도 최적의 상태를 유지한다. 이러한 상태에서 수분이 공급되고 동결될 때 어떠한 현상이 발생할수 있는지를 모사하여 본 연구에서 동결되는 시료에 대하여 수분을 공급하거나 공급을 차단한 조건에서 시험을 실시하였다.

그림 9는 표 1의 시료 A와 B에 대하여 폐쇄식 실내동상시험과 개방식 실내동상시험을 실시하여 동상의 팽창압과 팽창량을 측정된 결과이다. 최적함수비대에서 다짐된 시료가 수분이 공급이 되는 동상을 받게 되면 동상압과 동상량이 급격하게 증가되는 것을 알 수 있었다.



(a) 동상팽창압 (-5°C)

(b) 동상팽창량 (-5°C)

그림 9. 수분의 공급조건에 따른 동상팽창압과 팽창량

Ⅲ. 결론 및 향후과제

2006년 봄에 국내의 고속도로의 암거가 동상의 피해를 입어서 파손되었다. 많은 연구자들의 원인분석결과 동상에 의한 영향임을 밝혀내었지만, 철저한 원인규명과 새로운 대안을 제시하기에는 국내의 기초연구가 부족하여 국내의 조건을 고려한 합리적인 시방안을 마련하기에는 한계가 있었다. 본 연구에서는 국내의 도로현장에서 토공에 사용하고 있는 흙에 대하여 겨울철에 흙이 포화된 상태에 있을 경우에 발생하는 동상의 특성과 다짐도에 따른 동상특성과 토공부에 침투된 수분이 지속적으로 공급될 경우에 발생하게 될 동상의 특성을 분석하기 위하여 실내 동상시험을 실시하여서 다음과 같은 연구결과를 도출하였다.

- 1) 동상에 관여하는 많은 요소가 있지만 본 연구결과 흙의 최적함수비에서는 동상의 영향을 적게 받지만 최적함수비를 넘어서는 순간부터는 동상의 영향이 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 도로 구조물 주변의 토공 및 되메움시에 최적함수비대에서 적은 쪽으로 시공하는 것이 동상의 영향을 적게 받을 것으로 사료된다.
- 2) 온도의 강도 즉 영하의 기온은 최대동상팽창량과 팽창압의 발생하는 시간을 줄이는 역할을 하고 있지만, 최대동상팽창량과 팽창압에 미치는 영향은 적은 것으로 나타났다. 그러나 동상을 일으키기 위해서는 일정한 기간 동안 영하의 온도는 지속적으로 유지될 때 동상이 발생하게 된다.
- 3) 최적함수비대에서는 동상의 영향을 적게 받지만 다짐도에 의해서 동상의 영향이 달라지는 것을 알 수 있었다. 따라서 토공시 다짐도에 대한 관리가 매우 중요하며, 도로의 구조물 주변의 다짐도에 따라서 동상의 영향을 받는 것으로 사료된다.
- 4) 도로의 구조물 주변의 토공부에 수분이 공급될 경우에 겨울철에 동상을 매우 심하게 받게 되지만, 수분이 차단될 경우에는 동상을 적게 받게 된다. 따라서 동상의 영향을 적게 받기 위해서는 구조물 주변의 배수를 원활하게 하는 것이 매우 중요하며, 동결심도를 두 겹께 하는 것보다도 배수층을 설치하거나, 맨암거의 크기를 증가시켜서 구조물 주변에 물을 제거하는 것이 동상의 피해를 줄일 수 있을 것을 사료된다.

본 연구는 국내도로현장에서 일반적으로 사용되고 있는 토공용 흙을 사용하여 실내시험을 실시하여 동상의 특성을 분석하였다. 실험조건으로 함수비 변화, 기온의 강도, 토공의 다짐도 조건, 수분의 침투 및 차단을 기초로 실내동상시험을 실시하여 동상의 영향을 연구하였다. 국내에서는 동상과 관련한 연구가 부족한 관계로 지속적으로 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(2000), “도로설계편람” II권, 포장편, pp. 702-1~55.
2. 권기철(2002), “노상토의 종류에 따른 동결-융해 특성”, 『한국도로포장공학회지』, 제4권 제1호, pp.33~39.
3. 조규태, 진정훈, 남영국(2002), “도로포장의 동상방지층 실효성 검증을 위한 현장계측 및 실내시험 연구”, 『대한토목학회 논문집』, Vol 22. No. 5-D, pp.913-921
4. 진정훈(2004), “도로노상토의 동결깊이 예측모델 개발”, 『박사학위논문』, 인천대학교 대학원
5. America Society for Testing and Material(1996), “Standard Test Methods for Frost Heave and Thaw Weakening Susceptibility of Soils”, Annual Book of ASTM Standard Designation : D 5919-96, pp. 823~834.
6. Departments of The Army and The Air Force(1985), “Pavement Design for Seasonal Frost Conditions”, Army TM 5-818-2, Air Force AFM 88-6.
7. Departments of The Army and The Air Force(1988), “Arctic And Subarctic Construction Calculation Methods for Determination of Depths of Freeze And Thaw in Soils”, Army TM 5-852-6, Air Force AFR 88-19.

논문접수일 : 2006년 10월 20일
심사의뢰일 : 2006년 10월 28일
심사완료일 : 2006년 12월 5일