

## 토사의 동상량 및 동상력 측정을 위한 실내 실험장치 개발 Development of experimental apparatus to evaluate frost heave and pressure

고성규<sup>1)</sup>, Sung-Gyu Ko, 최창호<sup>2)</sup>, Changho Choi, 채종길<sup>2)</sup>, Jong-Gil Chae

<sup>1)</sup> 과학기술연합대학원대학교(한국건설기술연구원 캠퍼스) 석사과정, Graduate Student, University of Science and Technology

<sup>2)</sup> 한국건설기술연구원 수석연구원, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology

**SYNOPSIS** : 'Frost heave' is volumetric extension behavior of soil due to freezing. It could have a bad effect to foundations of infrastructures like building, road, railroad and bridge. Therefore, it is considered as a primary design parameter with 'adfreeze bond' and 'creep deformation' for foundation design in cold region. In some countries, studies for analyzing frost heave in many ways have being performed, however, only a few studies for evaluating frost susceptibility of soils by measuring frost heave rate of frozen soils in Korea. For analyzing frost heave as a foundation design parameter, both frost heaving rate and heaving pressure are should be addressed in study. Hence, in this study, development of experimental apparatus to evaluate frost heave and pressure is suggested.

**Keywords** : frost heave, heaving pressure, frozen ground, cold region

### 1. 서 론

동상이란 0°C이하의 기온에 장시간 노출된 흙의 간극수가 얼어 토사 내 빙정(ice lens)이 형성되고, 계속적으로 수분을 흡수하여 체적이 팽창되는 현상으로, 동토지반에서 공통적으로 발견되는 대표적인 공학적 특성이다(김영진 등, 1992). 동상현상에 의한 지반의 상향거동은 빌딩, 도로, 철도 및 교량 등 사회 기반시설에 구조적으로 부정적인 영향을 끼칠 수 있기 때문에 그로인한 피해를 줄이기 위한 노력의 일환으로 동상의 특성을 학문적으로 분석하기 위한 연구가 다각도로 이루어져 왔다(Loch, 1981). 국외의 경우 1960년대부터 흙의 동상에 대한 민감성, 즉, 동상성을 판단하기위한 실험적 연구가 수행되어 왔고(Saetersdal, 1981), 이를 바탕으로 현재는 실내 동상실험을 통하여 흙의 동상성을 정량적으로 분석 및 판단 할 수 있는 기준들을 미국 ASTM (American Society for Testing ad Materials)이나 일본 JGS (Japanese Geotechnical Society) 등에서 제시하고 있다. 이와 더불어 흙의 동상성에 관한 연구뿐 아니라 동상에 의한 용기특성, 지반의 동상력 측정 등에 관한 연구가 활발하게 진행되어 온 해외 동상 연구현황과는 달리(木下, 1973; Penner, 1974; Kujala, 1991; Szuki et al., 1993, 1994), 기후적으로 계절 동토 지역에 속하는 우리나라의 경우, 동상에 대한 연구는 주로 도로에서 발생하는 동상의 방지대책 연구를 위한 기초 연구적 성격으로 일부 특정 분야 내에서 국한적으로 진행되어 왔으며, 아직까지 동상현상을 정량적으로 분석/판단하기 위한 실내 실험기준은 제시되지 않은 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 동상현상에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있는 흙의 종류, 동결온도, 상재하중 및 지하수 조건에 따라 발견되는 토사의 동상량과 동상력의 관계를 분석할 수 있는 실내 실험장치를 제안하였다(진정훈 등, 2004).

## 2. 기존 실험장치

동상의 특성을 분석하기 위한 연구는 다양한 동상 실험 장치들의 개발을 통하여 수행되어 왔다. 대표적인 실험 장치로는 가장 고전적인 동상실험장치인 TRRL(Transport and Road Research Laboratory) 동상시험기와 현재 미국 ASTM과 일본 JGS 기준에서 제안하고 있는 각각의 실내 실험 장치 등을 들 수 있다. 본 절에서는 국내외 대표적인 실험연구 사례 및 기준에서 제안하고 있는 실내외 동상실험 장치들의 특성을 살펴보고 이를 바탕으로 새롭게 제안될 동상량/동상력 측정 실험장치의 개발 방향을 제시하고자 한다.

### 2.1 TRRL 동상시험기

앞서 언급한 바와 같이 1960년대 이후 Kaplar(1965), Croney and Jacobs(1967), Zoller(1973), Aguirre-Puente et al.(1974), Loch(1979)등에 의해 다양한 실험장치와 이를 활용한 동상 실험방법이 제안되었다. 개발된 동상실험법 중 TRRL에서 개발한 동상시험기와 이를 이용한 실험방법은 CRREL(U. S. Army Cold Region Research and Engineering Laboratory)의 동상실험법과 함께 가장 널리 활용되어 온 대표적인 실내 동상 실험방법이다(Jones and Dudek, 1979). TRRL에서 제안한 동상시험기는 그림 1과 같은 구조를 갖으며, 온도를 조절할 수 있는 소형 냉동고에 시료를 넣고 지하수를 공급하는 개방형 조건으로 시료를 동결시키는 방식으로 실험을 진행한다.

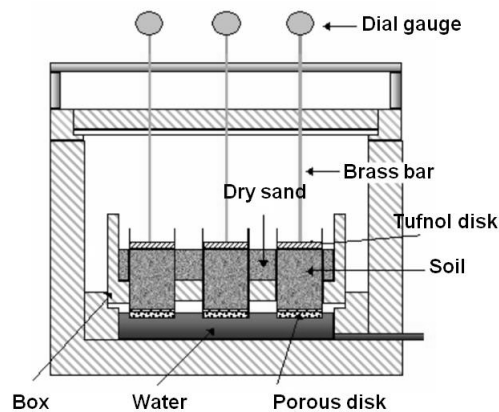


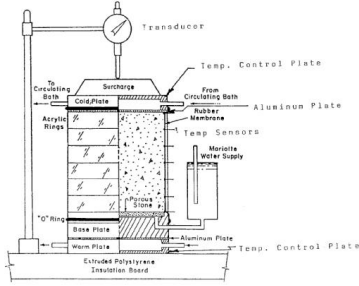
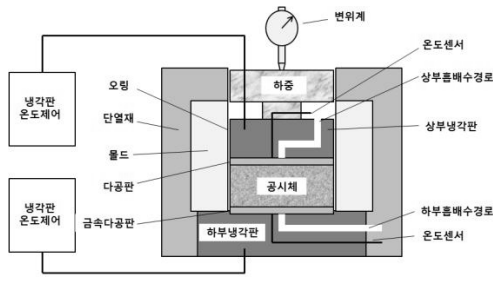
그림 1. TRRL 동상시험기(홍성완 등, 1992)

TRRL 동상시험기는 다수의 시료를 한번에 동결시킬 수 있다는 장점이 있으나, 시료의 동결 진행 상황을 확인할 방법이 없다는 단점이 있다. 또한, 시료동결의 방향성이 일정치 못하고, 상재하중에 의한 영향을 반영치 못하므로 실제 지반의 동결 메커니즘을 충분히 묘사하기에 어려움이 있는 것으로 판단된다.

### 2.2 ASTM과 JGS 기준 동상실험장치

동상에 관한 오랜 실험적 연구를 바탕으로 미국 ASTM(D5918-06)과 일본의 JGS(0171, 0172) 기준은 흙의 동상율을 측정하여 이를 바탕으로 흙의 동상성을 판단할 수 있는 실내 실험 기준을 제안하였다. 두 실험 기준에서 제안하고 있는 실험장치는 포화된 시료를 한쪽 면에서부터 서서히 동결시켜 그에 따라 발현되는 동상량을 측정하는 방식으로 전체적인 원리에 있어서는 큰 차이점이 없으나, 실험에 사용되는 시료의 크기, 시료의 동결방향, 지하수 조건 등에서 차이점이 나타난다. 실험기준들의 특성을 비교/정리하면 표 1과 같으며, 미국 ASTM 기준의 경우 현장에서 채취한 시료의 동상성 평가를 위한 실험에 적합한 반면, 일본 JGS 기준은 토사의 동상특성을 분석하기 위한 요소 실험에 알맞은 것으로 사료된다.

표 1. 실내 동상실험의 미국 ASTM과 일본 JGS 기준 비교

기 준	ASTM(D5918-06)	JGS(0171,0172)	
동결방식	편면온도강하식	편면온도강하식	
동결방향	상부 → 하부	하부 → 상부	
물드재료	투명한 아크릴	투명한 아크릴	
시료크기	직경 146mm, 높이 150mm	0171	직경 60mm, 높이 20-40mm
		0172	직경 100mm, 높이 50mm
지하수조건	폐쇄형	개방형	
실험장치			

### 2.3 국내 동상실험사례

아직까지 기준화된 실내동상 실험장치가 제안되어 있지 않은 국내의 동상실험 사례 및 각 연구를 위해 활용된 실험장치의 특성을 요약하면 다음과 같다. 김영진 등 (1992)은 영국 TRRL 동상시험기를 직접 제작하여 흙의 입경변화, 간극수의 화학성분 변화, 상재하중 작용 등에 따른 동상특성을 분석하였다. 신은철 등 (2002)은 직경 100mm, 높이 130mm 크기 시료를 동결·융해 시킬 수 있는 실험장치를 그림 2와 같이 직접 고안/제작하여 동결온도, 속도, 포화도 등의 영향에 따른 동상압의 특성을 분석하고 동결·융해를 경험한 흙의 물리적 특성 변화를 분석하였다. 또한 동결·융해 실험장치를 그림 3과 같이 개량하여 동상 민감성 흙의 공학적 특성을 분석 하였다(신은철 등, 2009).

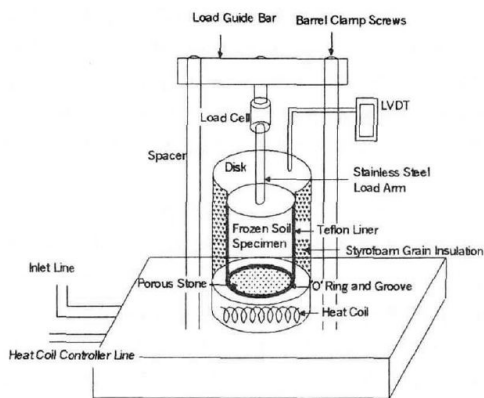


그림 2. 동결·융해 실험장치 모식도 (신은철 등, 2002)

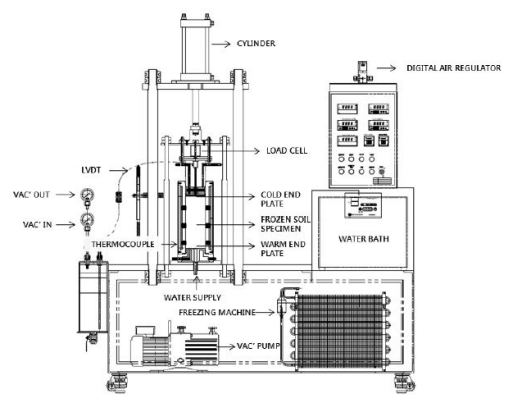


그림 3. 개량된 동결·융해 실험장치 모식도 (신은철 등, 2009)

진정훈 등 (2004)은 미립분 함유량, 초기 함수비, 수분 공급조건이 동상량과 동상압에 미치는 영향을 분석하였다. 예대호 등 (2007)은 그림 4와 같이 직접 고안한 동상 측정장비를 현장에 설치하여 약 8년여

에 걸친 측정실험을 실시하였고 이를 바탕으로 자연지반의 동상력을 정량적으로 파악하고 그 특성을 분석하였다. 김학삼 등 (2010)은 그림 5와 같이 일본 JGS 기준에서 제안하고 있는 실내 동상 실험 장치와 흡사한 실험장치를 활용하여 부동수, 열전도율, 동상량에 관한 실내실험을 수행하여 페타이어 파우더 혼합토의 동상억제 특성을 분석하였다.

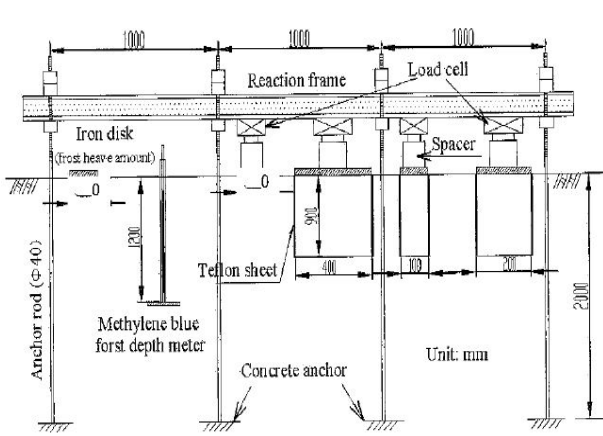


그림 4. 현장 동상 측정장치  
(예대호 등, 2007)

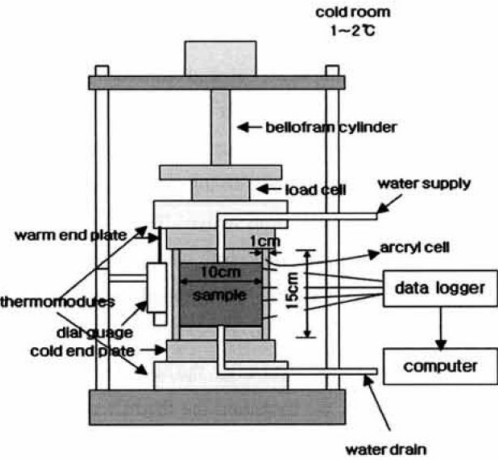


그림 5. 동상 실험장치 모식도  
(김학삼 등, 2010)

### 3. 실험장치 개발

앞서 정리한 동상 실험 관련 기준들과 연구사례들에서 제안하고 있는 장치들은 토사를 동결시키고 그에 따라 발현되는 동상량 혹은 동상압을 측정하는 방식의 거시적인 작동원리는 비슷하지만, 동결방식, 시료조건, 하중조건 등의 세부적인 조건의 반영방법에서 차이가 나타나고 있다. 이에 본 연구에서는 각 기준 및 사례들에서 제안되고 있는 실험 장치들의 특성을 바탕으로 1)상·하부 개별 냉각 제어방식, 2) 시료 주변온도 보냉(保冷)시스템, 3)동상량/동상력 상부 측정시스템, 4)압전소자(Bender Element)장착의 4가지 주요 특성을 가진 새로운 동상실험장치의 개발을 제안한다.

#### 3.1 상·하부 개별 냉각 제어방식

동상 실험방법은 시료를 동결하는 방법에 따라 1)토사의 상부와 하부로 부터 동시에 온도를 낮추는 ‘양단면온도강하식’, 2)상부와 하부의 온도를 일정하게 유지하는 ‘양단면온도일정식’, 3)한 면의 온도를 일정하게 유지한 채 다른 한 면의 온도를 낮추는 ‘편면온도강하식’으로 구분될 수 있다(小野 丘 등, 2003). 앞서 살펴본 미국 ASTM과 일본 JGS기준, 그리고 신은철 등(2009)이 제안한 실험장치의 경우 모두 시료를 동결시키는 방법으로 ‘편면온도강하식’을 활용하고 있으며, 이는 시료를 동결하는 방법 중 실제 지반이 동결되는 메커니즘을 가장 유사하게 모사할 수 있는 방법으로 판단된다. 그러므로 본 연구에서 제안하는 동상량/동상력 측정 실험장치에도 ‘편면온도강하식’을 적용할 수 있도록 시료의 상·하 단면의 온도를 개별적으로 제어할 수 있는 냉각시스템을 그림 6과 같이 설계하였다.

#### 3.2 시료 주변온도 보냉(保冷)시스템

일반적으로 동상실험은 포화된 시료를 인공적으로 영하의 환경조건에 노출시켜 시료가 동결하며 발생하는 동상량을 측정하는 방식으로 진행된다. 이때, 시료를 동결시키는 진행방향 및 온도 조건 등에 의해

동상현상의 발현양상이 영향을 받을 수 있다. 특히, 시료의 측면에서 외부 온도에 영향을 받게 되면 시료의 동결이 지연되거나, 혹은 측면에서부터 동결이 일어나는 현상이 발생할 수 있다. 현재까지 제안되어 온 실험 장치들은 이를 방지하기 위해 몰드 주변에 단열재를 설치하거나 대형 냉동 챔버 내부에서 실험을 실시할 것을 권하고 있으나, 단열재를 설치하면 시료의 변화 양상을 눈으로 확인할 수 없다는 단점이 있으며, 대형 챔버 내에서의 실험은 경제적으로 비효율적일 것으로 사료되므로, 본 연구에서 제안하는 동상량/동상력 측정 실험장치는 그림 7과 같은 시험셀 온도유지커버와 공랭식 온도조정장치로 구성된 보냉(保冷)시스템을 설치함으로써 시료의 주변온도를 일정하게 유지할 수 있도록 한다.

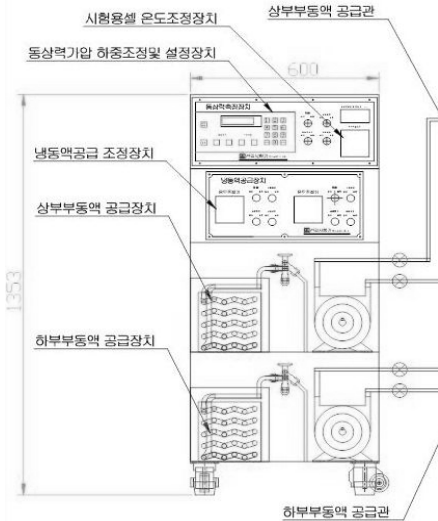


그림 6. 상·하부 개별 냉각 제어시스템

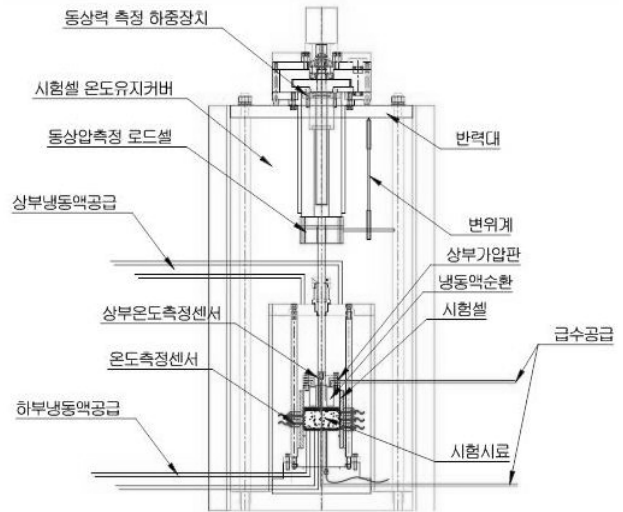


그림 7. 시료 주변온도 보냉(保冷)시스템

### 3.3 동상량/동상력 측정시스템

동상현상은 일반적으로 동상량 판정을 통해 평가되는 경향이 있다(예대호, 2007). 하지만 동상이 구조물에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 동상량 뿐 아니라 동상력, 즉 동상현상에 의한 체적 변형을 구속했을 때 발현되는 힘에 대한 평가가 함께 이루어져야 할 것으로 판단된다. 그러므로 본 연구에서 제안하는 동상량/동상력 측정 실험장치는 일정한 하중을 유지한 상태에서 상부 측정시스템을 고정하거나 풀어둠으로써 동상량과 동상력을 선택적으로 측정할 수 있도록 한다.

### 3.4 압전소자(Bender Element)

본 실험장치를 통해 시료의 동상량과 동상력을 모두 측정하기 위해서는 같은 조건으로 준비된 두 개의 시료를 사용하여 동상량과 동상력 측정실험을 개별적으로 실시해야 하고 결과에 대한 상호 비교분석을 수행하여야 한다. 그러므로 토사의 물성이 동일한 두 개의 공시체가 준비되어야 하며, 본 실험장치에서는 실험체 몰드 상하부에 압전소자를 설치하고 두 시료의 강성평가를 통하여 시료간의 역학적 동일성을 확인할 수 있도록 한다. 또한, 압전소자를 활용하여 시료를 동결시키는 과정에서 주기적으로 강성평가를 실시하여 토사의 동결로 인한 체적 팽창이 토사의 강성에 미치는 영향을 파악할 수도 있다.

여기서, 비파괴 강성평가란 토사의 상·하부에 연결된 압전소자를 이용하여 탄성파를 전달하는 전단파의 속도,  $V_s$  값을 측정하여 이를 바탕으로 토사의 전단 탄성계수,  $G$  값을 산정하고 이를 바탕으로 토사의 강성을 평가하는 방법을 뜻한다(조계준 등, 2002). 토사의 전단파 측정을 위한 압전소자는 전단파를 발생시키는 Function Generator와 그 결과값을 읽어 들이는 오실로스코프를 함께 설치한다.

## 4. 결 언

토사의 동결에 의한 체적 팽창 현상인 동상현상을 분석하기 위한 실내 실험장치들은 국내외 적으로 실험기준이나 연구 사례들을 통하여 다양하게 제시되어 왔다. 미국이나 일본, 영국과 같은 국가에서는 그에 대한 기준화된 실험방법이나 대표적인 실험장치가 제안되어 있는 것과는 달리 국내의 경우 실내 동상 실험을 위한 장치나 실험 방법이 아직까지 기준화되어 있지는 못한 상황이다. 본 연구에서는 현재 까지 제시되어 온 실내 동상 실험장치들의 특성을 분석하고 이를 바탕으로 ‘편면온도강하식’의 시료동결 방법을 적용할 수 있는 1)상·하부 개별 냉각 제어 시스템, 주변 온도의 영향을 배제하기 위한 2)시료 주변온도의 보냉(保冷)시스템, 선택적 실험이 가능한 3)동상량/동상력 측정시스템, 시료의 동일성 확인 및 증명을 위한 4)압전소자(Bender Element)의 장착이라는 4가지 주요 특성을 가진 새로운 실내 동상 실험장치의 개발을 제안한다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 기관고유사업인 “극한지 하부구조 급속시공 플랫폼 기술개발\_극한지 지반거동을 고려한 변위대응형지시 시스템 개발”의 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 김영진, 허승범, 홍성완 (1992), “흙의 동상특성에 관한 실험연구”, **대한토목학회 학술발표회 개요집**, 제1권, pp. 425-428.
2. 김학삼, 서상열, Nakamura, D., Fukuda, M., Yamashita, S., Suzuki, T. (2010), “페타이어 파우더 혼합토의 동상특성”, **한국지반공학회논문집**, 제26권, 제4호, pp. 15-26.
3. 신은철, 박정준, 이창섭 (2002), “철도노반재료의 동상 팽창압 특성에 관한 연구”, **한국철도학회 춘계 학술대회논문집**, pp. 264-270.
4. 신은철, 류병현, 박정준 (2009), “변형된 동결-융해 시험장치를 이용한 동상민감성 흙의 지반공학적 특성”, **한국토목섬유학회논문집**, 제8권, 제1호, pp. 53-59.
5. 예대호, 鈴木 輝之, 김영수 (2007), “지반의 동상력과 구조물의 피해대책”, **한국지반공학회논문집**, 제23권, 제5호, pp. 43-51.
6. 조계춘, 이인모 (2002), “탄성파를 이용한 흙의 특성연구”, **한국지반공학회논문집**, 제18권, 제6호, pp. 83-101.
7. 진정훈, 양봉집, 조규태, 남영국 (2004), “실내시험을 통한 현장노상토의 동상성 연구”, **한국도로학회 학술발표회 논문집**, 제6권, pp. 35-38.
8. 홍성완, 김영진, 허승범, 공길용 (1992), **동토지반 기초구조물의 최근 설계·시공기법개발연구 1차년도**, 과학기술원
9. 木下 (1973), “凍上力實驗”, **低溫科學**, 第30期, pp. 191-201.
10. 小野 丘, 山本英夫, 伊豆田久雄 (2003), 土の凍結と地盤工學 4. “凍上試驗法”, 日本地盤工學會, 土と基礎(講座). pp. 47-53.
11. 地盤工學會基準, JGS 0171 (2003), 凍上量子予測のための土の凍上試験方法.
12. 地盤工學會基準, JGS 0172 (2003), 凍上性判定のための土の凍上試験方法.
13. Aguirre-Puente, J., Dupas, A. and Philippe, A. (1974), “Frost heaving and the classification of soils in accordance with their frost susceptibility”, *Frost Action in Soils*, No. 14, Oslo, pp. 41-47.
14. ASTM D5918-06 (2006), “Standard Test Methods for Frost Heave and Thaw Weakening Susceptibility of Soils”, American Society for Testing Materials.
15. Croney, D. and Jacobs, J. C. (1967), “The frost susceptibility of soils and road materials”, TRRL,

rep. LR 90, Crowthorne, 68 pp.

16. Jones, R. H. and Dudek, S. J. M. (1979), "A precise call compared with other facilities for frost heave testing", 58th Annual TRB Meeting, Washington, 28 pp.
17. Kapler, C. W. (1965), "A laboratory freezing test to determine the relative frost susceptibility of soils", CRREL, Lab-Tech. Note, Hanover, 17 pp.
18. Kujala, K. (1991), "Factors affecting frost susceptibility and heaving pressure in soils", ACTA University of Oulu.
19. Loch, J. P. G. (1979), "Suggestions for an improved standard laboratory test for frost heave susceptibility of soils. *Frost Action in Soils*, No. 20, The Norwegian Committee on Permafrost, Oslo, pp. 33-38.
20. Loch, J. P. G. (1981), "State of the art report - Frost action in soils", *Engineering Geology*, Vol. 18, pp. 213-224.
21. Penner, E. (1974), "Uplift forces on foundations in frost heaving soils, *Canadian Geotechnical*, Vol. 11, No. 3, pp. 238-338.
22. Saetersdal, R. (1981). "Heaving Conditions by Freezing of Soils", *Engineering Geology*, 18. pp. 291-305.
23. Szuki, T., Swada, S., Liu, C. (1993), "Field and laboratory tests on adfreeze strength of ground to model pile", *Proc. 2th Int. Symp. on Frost Geotechnical Engineering*, pp. 103-109.
24. Szuki, T., Swada, S. (1994), "Full-scale test on frost heaving pressure in a reinforced retaining wall", *Proc. 7th Int. Symp. on Ground Freezing*, pp. 311-316.
25. Zoller, J. H. (1973), "Frost heave and the rapid frost heave test", *Public Road*, Vol. 37, No. 6, pp. 211-220.