

## 일본 동상성판정기준을 적용한 시료의 동상예측 및 동상성 평가 Evaluation of Frost Heave Prediction and Frost Susceptibility in Sample using JGS Test Method

김영진<sup>1)</sup>, Young-Chin Kim, 홍승서<sup>2)</sup>, Seung-Seo Hong

<sup>1)</sup> 한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실 책임연구원, Research Fellow, Geotechnical Disaster and Environment Research Division, Korea Institute of Construction Technology

<sup>2)</sup> 한국건설기술연구원 지반방재·환경연구실 연구원, Researcher, Geotechnical Disaster and Environment Research Division, Korea Institute of Construction Technology

**SYNOPSIS :** This paper show two different standardized test methods(Japanese Geotechnical Society; JGS 2003). One test is a 「Test Method for Frost Heave Prediction Test, JGS 0171-2003」, and the other test is a 「Test Method for Frost Susceptibility, JGS 0172-2003」. The purpose of this test is to obtain the freezing rate(freezing speed), frost heave ratio(heave to sample height), frost heave rate(heaving speed), and other parameters to be used for frost heave prediction and determine the frost susceptibility by freezing test with water intake. This method shall be used to predict the frost heave in frozen ground and evaluate the frost susceptibility of natural and replacement materials.

**Key words :** frost heave test, freezing rate, frost heave ratio, frost heave rate, frost susceptibility

### 1. 서론

동결토의 동상 예측방법(일본 JGS 0171-2003)에 따라 일본 북해도 000에서 채취한 시료를 이용하여 동상실험을 실시하였고 동상성 판정기준(일본 JGS 0172-2003)에 따라 동상성의 높음, 중간, 낮음을 평가하였다. 동상실험에서 시간경과에 따른 물의 흡수량, 동상 변위량, 동결공시체 내부 온도변화를 측정하였고 동결토의 빙정(ice lens)의 변화를 측정하였다.

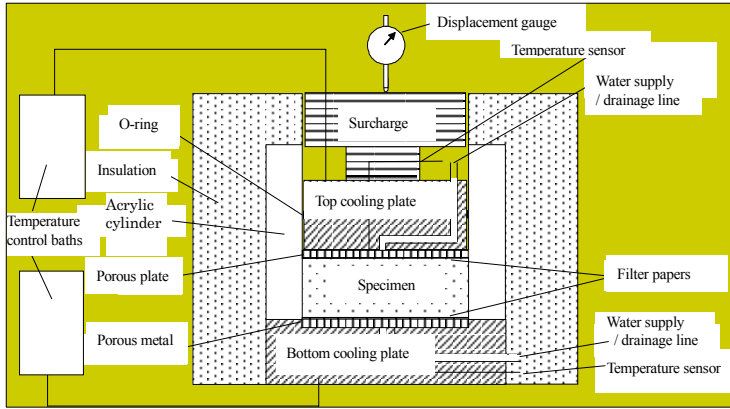
상기와 같은 실험결과로부터 동결속도(freezing rate,  $U$ ), 동상률(frost heave ratio,  $\xi$ ), 동상속도(frost heave rate,  $U_h$ ) 등과 같은 변수들을 도출하였다. 도출된 결과를 이용하여 사용한 시료의 동상량을 예측하고 동상성 여부를 판정하였다.

### 2. 동상실험

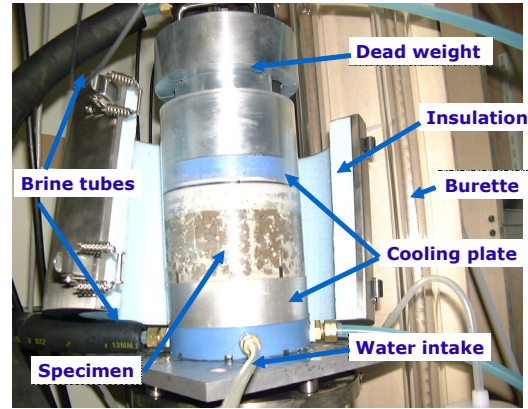
#### 2.1 실험장비

동상실험장치의 단면을 그림 1에 나타냈다. 실험장비는 i)동상몰드, ii)온도제어장치, iii)온도센서, iv)변위계, v)흡배수 측정장치, vi)하중재하장치로 구성된다. 동상몰드는 내경 60mm, 높이 100mm 두께 10mm의 투명 아크릴을 사용하였고, 몰드 양단에 냉매(brine)가 통과할 수 있는 냉각판(cooling plate)을 설치하였다. 냉각조절장치는 몰드 양단의 냉각판을 냉매가 순환하는 방식으로 공시체의 동결은

상부에서 하부로 유도하며 원하는 온도(+50℃~-30℃)로 조절이 가능하다. 실험 중에 공시체의 온도변화를 측정하기 위해 공시체 상하부에 열전대(thermocouple)를 설치하였다. 또한 상부 냉각관에 변위계를 설치하여 시간변화에 따른 공시체의 동상량을 측정하였다. 상부 냉각관은 피스톤형식으로 부드럽게 상부로 이동이 가능하여 공시체의 동상량을 정확히 측정할 수 있다. 수분공급은 하부에서 상부의 방향으로 공급하도록 설치하였다. 실험 도중 공시체에서 발생하는 열확산을 방지하기 위하여 몰드측면에 3cm 두께의 단열재로 몰드를 덮었으며 실험은 1℃를 유지하는 대형챔버에서 수행하였다.



(a) 동상실험장치 단면도



(b) 동상실험장치 실제 모습

그림 1. 동상실험장치

## 2.2 사용시료 및 동결방법

### 2.3.1 사용시료

실험에 사용한 시료는 점성토로 기본특성은 표 1과 같다.

표 1. 사용시료의 기본특성

시료의 구성 성분 (%)	clay(<0.002mm)	44%
	silt(0.002~0.074mm)	43%
	sand(0.074~2mm)	13%
아터버어그한계	LL	54%
	LP	28%
	IP	26%
비중, $G_s$		2.51
건조밀도, $\rho_d$		2.76g/cm <sup>3</sup>
투수계수, K		1.88×10 <sup>-7</sup> cm/s

### 2.3.2 동결방법

동상실험의 실험조건은 표 2와 같으며 일반적인 표준동상실험에서 사용하는 조건이다(Akagawa at al., 1985). 표 2와 같이 몰드 상부 냉각관에는 -10℃, 하부 냉각관은 0℃ 상태로 일정하게 유지하였다. 본 실험에 앞서 상하부 냉각관의 1분 동안 온도를 -10℃로 빠르게 낮추어 공시체 상하부에 빙핵(ice nucleus)을 형성시킨다. 이는 공시체가 온도의 급격한 저하에 의해 초냉각 상태(super cooled state)를 방지(thermal shock)하기 위해서 상부냉각관에 접지된 공시체 상부에 빙핵을 형성시킨 후 동상실험

을 진행하기 위함이다(JGS 0171-2003). 공시체에 빙핵이 형성되면 '0℃' 는 빙핵이 존재하는 온도로 녹지 않는 상태를 의미한다. 빙핵형성이 완료되면 빙핵이 녹지 않을 한계까지 온도를 올린 다음 본격적인 동결실험을 진행하였다. 실험이 시작되면 공시체의 변위  $\Delta H(\text{mm})$ 와 공시체 상부온도( $T_w$ ), 하부온도( $T_c$ ), 물의 흡배수량( $\Delta V_d$ )은 데이터로거에 지속적으로 기록된다.

표 2. 실험조건

Preconsolidation pressure (kPa)	pressure during freezing (kPa)	Bottom side temperature (°C)	Top side temperature (°C)	Specimen	
				Length (cm)	Diameter (cm)
210	110	0	-10	8.4	6.0

### 3. 결과 및 분석

#### 3.1 결과정리

단위면적에 따른 흡수량은  $\Delta H_w$ 는 다음의 식으로 정의된다.

$$\Delta H_w = \frac{\Delta V}{A} \times 10 \text{ (mm)} \quad (1)$$

여기서,  $\Delta H_w$  : 단위면적당 흡수량(mm),  $\Delta V$  : 동결시험 동안의 총 흡수량( $\text{cm}^3$ ),  $A$  : 시료의 단면적( $\text{cm}^2$ )

동결속도(freezing rate)는 그림 2 (a)와 같이 미동결 상태의 공시체가 동결되는 속도를 의미한다. 또한 동상률(frost heave ratio)은 공시체 높이에 대한 동상량 높이의 비를 말하며 지반의 동상을 예측하는데 사용한다. 동상속도(frost heave rate)는 그림 2 (b)와 같이 공시체가 동상 융기되는 속도를 뜻한다.

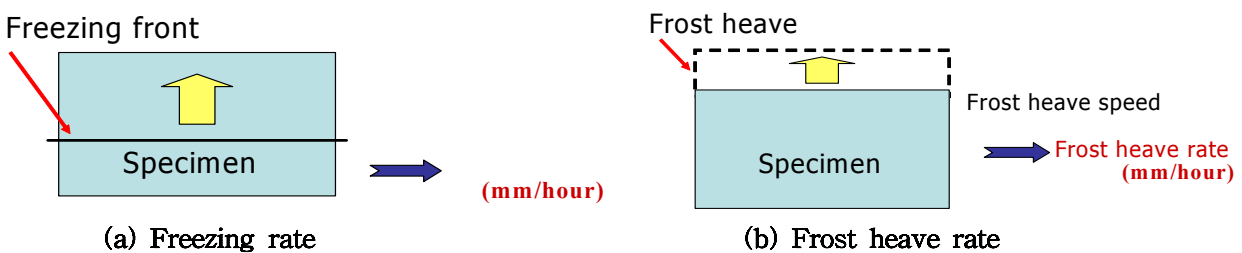


그림 2. Freezing rate와 Frost heave rate의 원리

$$U = \frac{H_1}{t_f} \text{ (mm/h)} \quad (2)$$

여기서,  $U$  : 동결속도(mm/h),  $H_1$  : 동결전의 공시체 높이(mm)

$t_f$  : 공시체의 동결이 완료될 때까지의 후의 경과시간(h)

$$\xi = \frac{\Delta H_f}{H_1} \text{ (%) } \quad (3)$$

여기서,  $\xi$  : 동상률(%),  $\Delta H_f$  : 동결종료후의 총 동상량(mm),  $H_1$  : 동결전의 공시체 높이(mm)

$$U_h = \frac{\Delta H'}{\Delta t'} \text{ (mm/h)} \quad (4)$$

여기서,  $U_h$  : 동상속도(mm/h),  $\Delta H'$  : 동상량(mm),  $\Delta t'$  : 경과시간(h)

### 3.2 실험결과 및 분석

#### 3.2.1 경과시간에 따른 양단면 온도변화, 동상량, 흡수량

시간경과에 따른 흡수량, 동상량, 온도변화를 그림 3과 같이 도시하였다. 실험은 100시간 동안 진행되었으며 공시체 상하부의 온도는 표 2에서 언급한 바와 같이  $-10^{\circ}\text{C}$ 와  $0^{\circ}\text{C}$ 로 유지하였다. 공시체 상단부는 초기 온도는  $-0.314^{\circ}\text{C}$ 이고 100시간 후에는  $-5.332^{\circ}\text{C}$ 로 측정되었다. 또한 하단부의 초기온도는  $3.375^{\circ}\text{C}$ 이고 100시간 후에는  $-1.524^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다. 그림 3을 살펴보면 상부와 하부의 온도감소추세는 거의 동일하게 감소하였다. 특히 70시간이 경과한 후에는 하단부의 온도가  $-0.043^{\circ}\text{C}$ 로 이는 70시간이 경과한 후에 공시체 전체가 동결된 것을 뜻한다. 또한 동상량은 70시간까지는 14.084mm로 증가하였으나 70시간부터는 증가세가 뚜렷하게 감소하여 100시간 후에는 동상량이 14.204mm로 나타났다. 흡수량의 변화도 70시간까지는 11.102mm로 증가하다가 70시간 이후부터는 증가세가 크게 감소하여 100시간에서는 11.133mm로 나타났다. 즉 동결이 완료된 70시간 이후부터는 공시체의 동상량과 수분공급이 거의 발생하지 않았다.

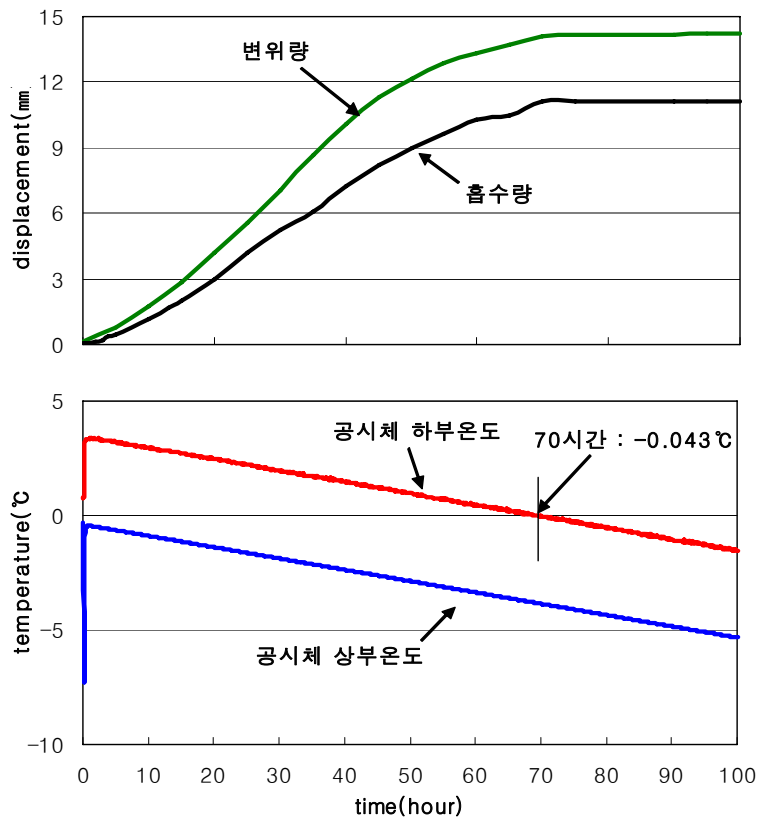
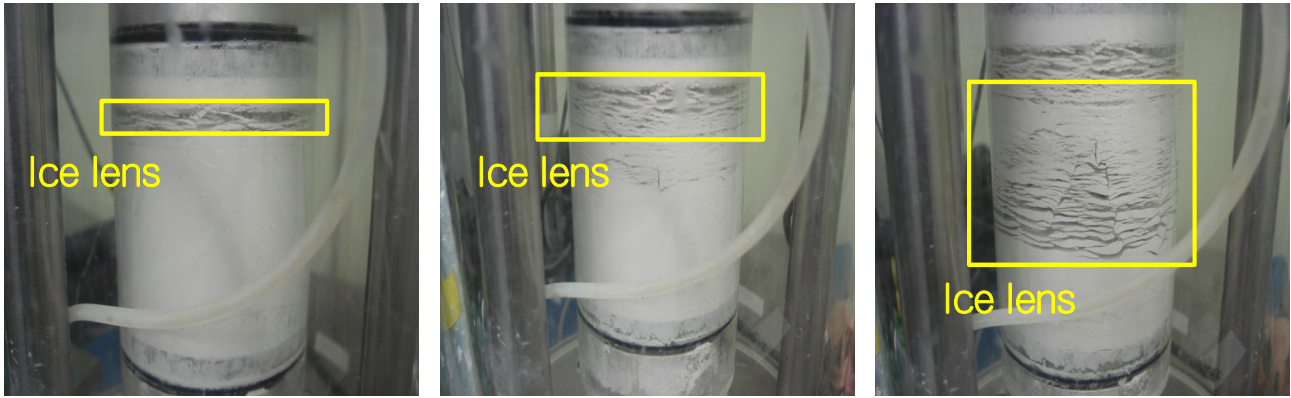


그림 3. 동상실험 결과



(a) 10시간 경과

(b) 20시간 경과

(c) 75시간경과

그림 4. 경과시간에 따른 빙정의 성장모습

### 3.2.2 결과분석

실험결과로부터 동결속도, 동상률, 동상속도를 산정하였으며 그 결과는 표 3과 같다.

표 2. 동결속도, 동상률, 동상속도 산정 결과

Freezing rate, $U$	1.20mm/h	식 (2)
Frost heave ratio, $\xi$	16.8%	식 (3)
Frost heave rate $U_h$	0.31mm/h	식 (4)

동상속도는 그림 5와 같이 시간경과( $\Delta t'$ )에 따른 동상량( $\Delta H'$ )의 관계곡선에서 직선 표시부분의 기울기를 의미한다. 도출된 동상속도(Frost heave rate)는 0.31mm/h로 나타났다.

일본 지반공학회에서는 동상속도에 따른 흙의 동상성 여부를 판정 기준을 표 3과 같이 제시하였다. 본 실험의 결과를 표 3과 비교하면 사용한 시료는 동상성이 비교적 높은 것으로 판명되었다.

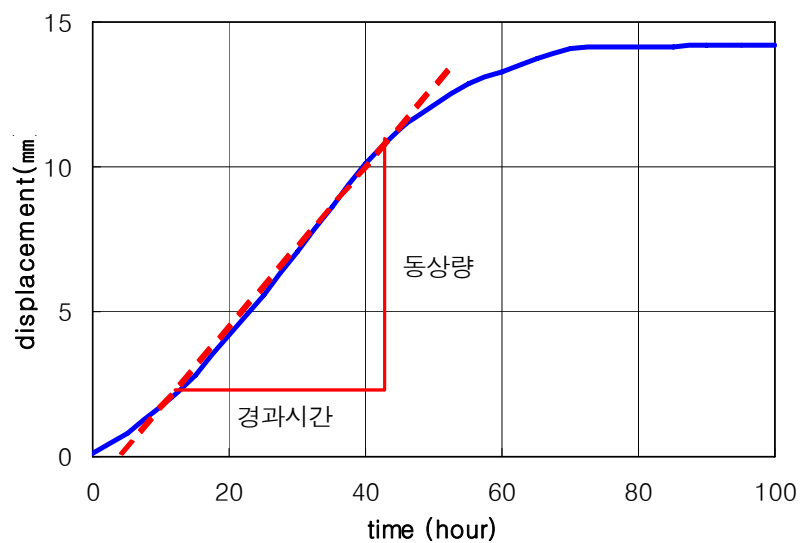


그림 5. Frost heave rate 산정결과

표 4. 동상속도에 따른 동상성 판정 기준(일본지반공학회, 2003)

Frost heave rate	Frost susceptibility
Less than 0.1	Low
0.1 ~ 0.3	Midium
Over 0.3	High

#### 4. 결론

동결토의 동상예측 및 동상성 판정기법에 관한 동상실험을 수행하였으며 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1. 동결이 진행되는 동안의 온도의 변화는 선형으로 일정하게 감소하였다. 또한 상부와 하부의 온도감소 추세는 거의 동일하게 감소하였다.
2. 70시간이 경과한 후에는 공시체 전체가 동결되었으며 그 이후부터는 공시체의 동상량과 흡수량의 증가는 발생하지 않았다.
3. 실험결과로부터 동결속도, 동상률, 동상속도는 각각 1.20mm/h, 16.8%, 0.31mm/h로 나타났다. 동상속도에 따른 동상성 판정기준과 비교할 때 사용한 점토시료는 동상성이 비교적 높은 것으로 나타났다.
4. 향후 동일한 시료에 대해 상재하중을 달리하여 동상성을 평가해 보고자 한다.

#### 참고문헌

1. 日本地盤工學會 (2003), 新規制定地盤工學會基準·同解説 VII(JGS 0171-2003), pp.39~44.
2. 日本地盤工學會 (2003), 新規制定地盤工學會基準·同解説 VII(JGS 0172-2003), pp.45~50.
3. Akagawa, S., Y. Yamamoto and Hashimoto (1985), "Frost heave characteristics and scale effect of stationary frost heave", *4th Int. Symp. on Ground Freezing*, Sapporo. pp.137~143.
4. Akagawa, S. (1988), "Experimental study of frozen fringe characteristics", *Cold Resign Science Technology*, 15, pp.209~223.