

# 응회암 풍화토의 동결특성에 관한 열역학적 연구 -상재하중과 동결점 저하를 중심으로-

A Thermodynamic Study on Freezing Characteristics of Weathered Tuff Soil  
- Freezing Point Depression with the Variation of Overburden Pressure -

서 상 열\*  
Suh, Sang-Youl

---

---

## Abstract

In this research, the frost heave mechanism of the weathered tuff soil sampled from the area lying between Ulanbator and Beijing was studied. The frost heave tests were carried maintaining the constant temperature at both upper(+5℃) and lower(-5℃) ends of the sample. Here, main emphasis is given on variation of the freezing point depression with the variation of applied overburden pressure. The expansion of ice lens and migration of the pore water towards freezing front were observed in the test. It was found that with the increase in overburden pressure there is decrease in heave rate and increase in the absolute value of a segregation-freezing temperature. Hence the equation between segregation-freezing temperature and overburden pressure could be suggested. Also the water content of the samples at the frozen side was shown to be higher than those at the unfrozen side. Similarly, the water at warmer part of the frozen tuff was found much higher than that of the cooler part.

## 요 지

본 연구에서는 우란바틀(Ulanbator)에서 북경(Beijing)사이의 지역에서 샘플링한 응회암 풍화토의 동상 특성을 규명하기 위해 상재하중 변화에 따른 동결점 저하를 중심으로 양단면 온도 일정(상단 5℃, 하단-5℃)의 동상실험 실시하였다. 본 실험을 통해, 빙편 성장에 따른 체적 팽창과 동결면으로의 수분이동을 확인하였다. 그리고 상재하중과 온도와의 관계식을 제안하였다. 상재하중이 증가함에 따라 동상속도는 비례적으로 감소하였고 빙편발생온도의 절대치는 증가하였다. 또한 동결부분의 함수비가 미동결 부분보다 크게, 특히 동결부분에서도 빙정에 가까울 수록 함수비는 증가하였다.

**Keywords :** Thermodynamic, Frost heave, Weathered tuff soil, Freezing point depression, Overburden pressure, Segregation-freezing temperature, Freezing front

---

\* 정회원, 영남이공대학 토목과 교수

## 1. 서론

일반적으로 암반의 풍화는 물리학적, 생물학적, 화학적 풍화로 구분할 수 있다. 격심한 기후 변화의 영향으로 동결, 융해의 반복으로 인해 상 변화에 따른 체적팽창의 결과 일부 암반들이 작은 입자로 붕괴되어지는 경우는 물리학적 풍화에 해당한다. 특히 기온이 0°C 이하로 일정시간 지속될 경우 지표면 부근의 간극수가 동결이 되고 동결면(freezing front)이 서서히 지중으로 이동하게 된다. 이때, 동결면을 향해서 미동결토에서 동결토로 수분이 이동하고 특정 위치에 빙편(ice lens)이라 불려 지는 얼음층이 지중에 형성되어지고 이것이 수분 공급과 더불어 성장하게 됨에 따라 지표면이 팽창하는 현상이 동상현상(frost heaving)이다. 이러한 동상현상이 암반붕괴에 미치는 영향과 (Fukuda, 1983; Walder와 Hallet, 1985; Miller, 1978; Gilbin, 1980), 흙의 동상 특성에 관해서는 체계적인 연구가 국내외에서 이루어지고 있으나(김 과 홍, 1994; Holden, 1985), 암반이 붕괴되어 다공질체 풍화토로 변한 시료에 대한 동상특성에 관해서는 전무한 실정이다.

특히 21세기 새로운 에너지의 공급원으로 부상되고 있는 천연가스(LNG)의 시베리아 개발 사업이 한, 일, 중, 러시아의 공동사업으로 현재 진행중에 있으며, 일차 대상노선으로 선정된 우스체크토에서 천진까지의 총 2,875km 구간이 2005년부터 본격적인 파이프라인 건설 공사가 시작될 전망이다. 이에 따라 향후 국내의 관련업체의 활발한 진출이 예상된다. 대상 구간 중에서 우란바틀과 북경 사이에 상당한 구간이 응회암이 풍화되어 다공질체 파우더로 존재하고 있음이 1차 지반조사를 통해 확인되었다. 특히 이곳은 계절동토에 해당하는 지역으로 이 곳에 평균 -70°C를 유지하는 냉각 파이프라인(chilled pipeline)이 건설 될 경우 동상작용으로 인한 지반팽창이 파이프라인과 주변

관련 구조물에 어떠한 영향을 미칠지에 관해서는 일반 토질과는 달리, 관련 연구결과나 정보, 기술의 축적이 되어 있지 않는 지금의 상황에서, 암반 풍화토에 대한 동상현상의 지반 공학적인 측면에서의 이용 가능한 연구자료는 거의 없는 실정이다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 1단계 연구로써 샘플링한 다공질체 파우더를 사용하여 동상 시험을 상재하중 변화에 따른 아이스렌즈 형성을 중심으로 분석하였고 동상실험에서 측정된 동결점강하 온도의 실측치를 Clausius-Clapeyron식 (Edlfsen and Anderson, 1943)과, pF시험에 의한 결과의 비교분석을 통하여 다공질체 파우더의 동상특성을 기초적으로 평가하였다.

## 2. Clausius-Clapeyron식의 유도와 동결점 저하

흙내부의 물이 냉각됨으로써 간극표면의 흡착수와 간극내의 얼음이 공존하는 상평형 상태(phase equilibrium)가 이루어진다. 이러한 상평형 상태에서 물, 얼음 2상의 기브스 자유에너지(Gibbs free energy)  $g$ 는 같고, 물과 얼음의 기브스 자유 에너지를  $g_w, g_i$ 로 정의 할 경우, 미소 변형을 한 상평형상태에도 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$dg_i = dg_w \quad (1)$$

$g_i, g_w$ : 얼음과 물의 기브스 자유에너지

식 1을 2상의 기브스 자유에너지와 내부에너지와의 관계로부터 식 2로 나타낼 수 있다.

$$v_i dP_i - S_i dT = v_w dP_w - s_w dT \quad (2)$$

$P_i, P_w$ : 얼음, 물의 압력, T: 절대온도,  $v_i, v_w$ : 얼음, 물의 비용적,  $S_i, S_w$ : 얼음, 물의 비 엔탈피

$$v_w \frac{dP_w}{dT} - v_i \frac{dP_i}{dT} = S_w - S_i \quad (3)$$

얼음의 용해잠열을  $L_w$ 로 나타낼 경우,  $S_i - S_w$ 는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$S_w - S_i = \frac{L_w}{T} \quad (4)$$

식 3, 4 으로부터 식 5의 일반화된 Clausius-Clapeyron 식으로

$$v_w \frac{dP_w}{dT} - v_i \frac{dP_i}{dT} = \frac{L_w}{T} \quad (5)$$

나타낼 수 있다(일본토질공학회, 1994). 본 연구에서는 식 5에서 상평형 상태에서의 조건 ( $dP_i = dP_w$ ) 즉, 포화조건에서와, 불포화 조건( $dP_w = 0$ )에서의 압력과 온도와의 관계를 고려하였다. 다공질체 파우더를 대상시료로 하여, 하중(dP) 변화와 동결점 저하(dT)와의 관계를 동상실험을 통해서 각각의 상재하중 변화에 따른 빙편의 형성온도를 관측 후 식 5의 계산결과와 비교분석 하였다.

### 3. 실험장치 및 실험방법

#### 3.1 실험장치

동상실험장치의 단면을 그림1에 나타내었다. 동상 모듈드는 내경100mm, 높이100mm, 두께 10mm의 투명 아크릴을 사용하였고, 시료의 양단면의 온도는 서모줄(thermodule)에 의해 조절했다. 실험도중 시료와 모듈드 표면 사이의 마찰을 감소하고 시료의 포화를 촉진하기 위해, 시료동결은 하부에서 상부, 수분공급은 상부에서 하부의 방향으로 유도하였다. 상하 플레이트의 배수구와 체적변환계를 연결하여 시료로부터의 흡, 배출량을 측정하였다. 다이알게이지를 상단 플레

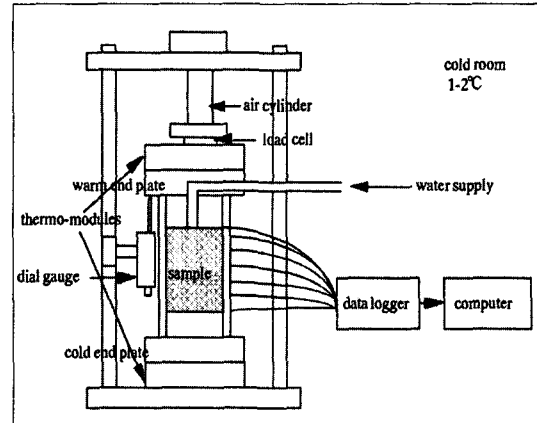


그림 1. 동상실험장치의 단면도

이트에 설치 후 동상량을 측정하였다. 동상중의 시료와 모듈드간의 마찰을 경감시키기 위해 그리스를 도포 하였다. 또한 실험도중 시료내부의 온도변화는 동상모듈드 벽에 10mm간격으로 설치한 열전대(thermocouple)를 7개 설치하여 측정하였다. 상재하중은 벨로프램 실린더(belofram cylinder)를 사용하였다. 모듈드 측면으로부터의 열 확산을 방지하기 위하여 모듈드 주위에 3cm 두께의 스펀지로 에워싸고, 1°C를 유지하는 항온실에서 실험을 수행하였다.

#### 3.2 실험방법

실험에 사용한 시료의 물성치를 표1에 나타내었다. 실험시료는 우란비톨과 북경 사이에 5개 지역에서 샘플링한 시료를 체분석 하여 1mm 이하의 시료를 사용하였다. 동상실험은 시료의 양단면 온도를  $\pm 5^\circ\text{C}$ 를 일정하게 유지하는 방법을 사용하였다. 상재압력을 가하기 전에 동일한 조건에서 시료를 만들기 위해 실험조건으로서 각 시료의 초기 함수비 70%를 기준으로 하였다. 즉 건조상태의 시료에 증류수를 첨가하여 함수비 70%상태에서 진공펌프를 사용하여 24시간 포화시킨 후 모듈드내에 시료를 넣고, 단계적으로 100kPa에서

표 1. 시료의 물리적 특성

% by weight	Clay (<0.005mm)	39 %
	Slit (0.005-0.74mm)	52 %
	Sand (0.074-1.0mm)	9 %
Atterberg limit	LL	38.7 %
	LP	16.3 %
	IP	21.4 %
Specific Gravity		2.59
Specific surface area		17.2 m <sup>2</sup> /g
Permeability		3.6x10 <sup>-8</sup> cm/sec
Average water content of undisturbed sample		23 %

900kPa의 하중으로 압밀 시켰다. 압밀종료후, 실험 목적에 따라 25kPa에서 850kPa로 재하한 다음 초기시료의 길이를 60~65mm의 범위 내에서 동상실험을 수행하였다. 실험개시 후 1시간 간격으로 동상량, 흡수량, 온도분포 등의 데이터를 데이터로거를 통해 컴퓨터에 자동 저장되었다.

## 4. 실험결과

### 4.1 상재하중의 영향

상단 플레이트, 열 조절 판넬, 로드셀 등의 실험 전 표면에 작용하는 하중을 압력으로 환산 할 경우 최소 상재압력 25kPa에 해당된다. 본 장치의 최대 허용압력은 1000kPa이나 실험도중, 동상압이 최대 허용압력 초과 가능성 고려하여 850kPa를 최대 상재압력으로 하였다. 이러한 장치의 조건을 고려하여 본 연구에서는 상면온도 +5℃, 하면온도 -5℃의 조건에서 상재하중 25, 100, 200, 400, 850kPa의 변화에 따른 표면 동상량과 수위계에서 측정된 수량으로부터 계산한 흡수량의 시간경과에 따른 결과를 그림 2, 3에 나타내었다. 상재하중이 증가함에 따라 동상량과 흡수량은 일정량 감소하였고 초기 30시간 이내에서 전 동상량의 약60%가 발생하였다. 경과시간 150시간을 기준으로 각각

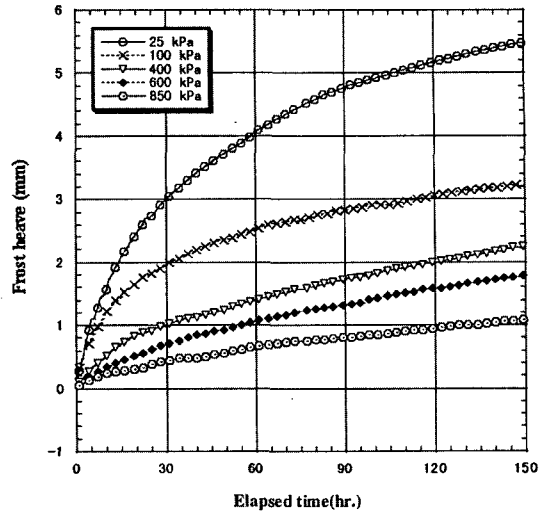


그림 2. 상재하중과 표면 동상량과의 관계

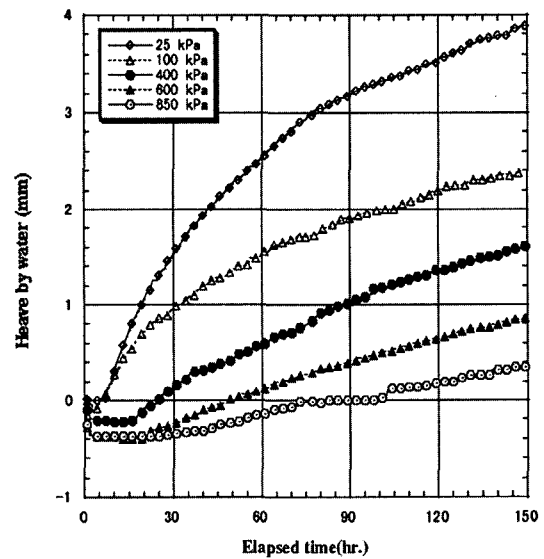


그림 3. 상재하중과 흡수량과의 관계

의 하중단계에 따라 계산한 동상속도는 0.018mm/hour(25kPa)에서 0.005mm/hour(850kPa)로 상재하중의 증가에 비례하여 감소하였다. 동일 하중조건에서 표면 동상량과 흡수량과의 차이는 시료간극에 존재한 수분이 얼음으로 상변화함에 따른 체적팽창의 결과이다.

상재하중이 증가함에 따라 배수에서 흡수로의

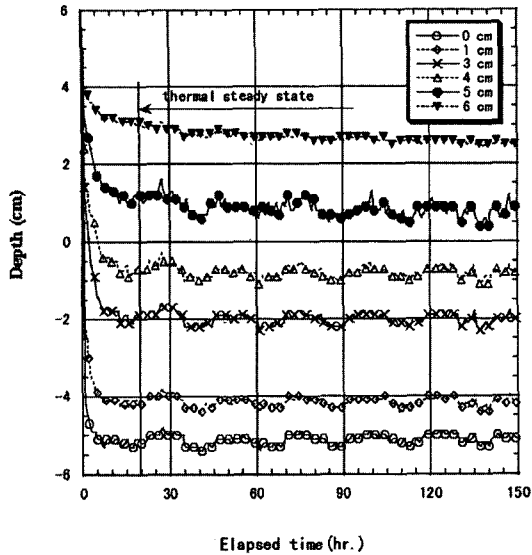


그림 4. 시료내부의 온도분포

전환시간이 점점 길어지고 있다. 이러한 현상은 상온측의 빙편 면에 발생한 석션(suction)이 하중의 증가와 더불어 점차적으로 감소되어진 결과이다(Konrad와 Morgenstern, 1982). 특히 배수기간중에도 표면 동상량의 증가현상은 위에서 언급한 간극수의 팽창결과로 사료된다. 시간경과에 따른 시료내부의 온도변화와 0°C 등온선의 이동을 그림4에 나타내었다. 실험개시후 20시간에서 0°C 등온선이 3.8~4.3 cm 범위에서 일정위치에 멈추기 때문에 그이후의 동상량은 흡수량만에 의해서 발생함을 보여준다. 이것은 전동상량과 흡수량이 평형상태로 직선적으로 변화하고 있는 것으로 명확히 알 수 있다. 또한 전동상량과 흡수량은 직선적 변화는 동결면에 빙편의 성장이 시작되었음을 뜻한다.

#### 4.2 상재하중 조건에 따른 빙편의 형성 위치의 변화

개방형 동상실험을 통해 1.31~1.35°C/cm의 온도구배(temperature gradient) 조건에서 상

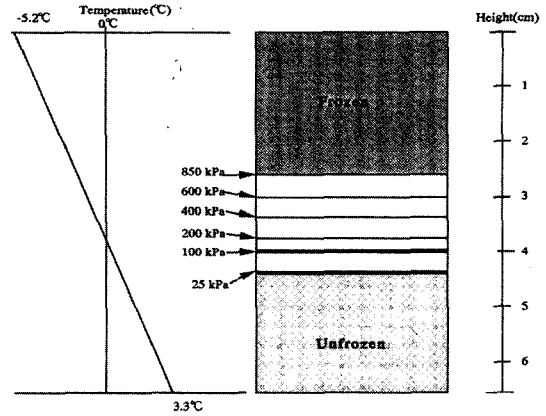


그림 5. 상재하중 변화에 따른 빙편의 위치

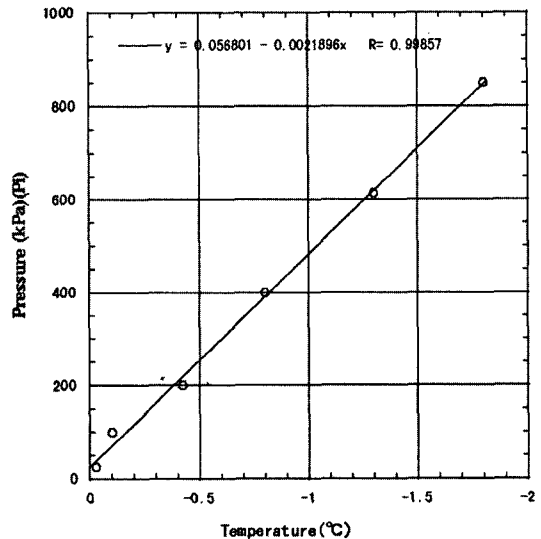


그림 6. 상재하중과 빙편 형성온도

재하중의 변화에 따른 빙편의 발생위치와 빙편의 형성온도 결정 방법을 그림 5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 상재하중이 25kPa에서 850kPa로 증가함에 따라 빙편의 위치가 미동결토에서 동결토측으로 약 1.6cm의 이동되어졌다. 각각의 빙편의 형성온도 결정은 동상실험 종료 직전 먼저 빙정 위치를 기준면으로부터의 거리를 측정 한 후 시료측면에 1cm 간격으로 설치된 열전대로부터 측정된 온도프로파일(temperature profile)로 부

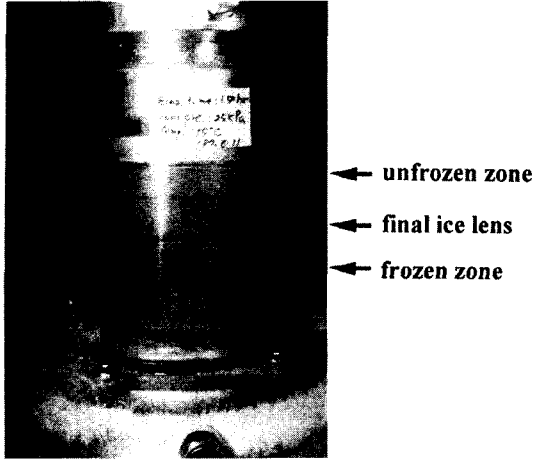


사진 1. 동일 온도구배 하에서의 상재하중 변화에 따른 빙편의 형성

터의 동일거리에 해당하는 온도를 빙정 형성온도로 하였다. 실험결과에 의하면 상재하중이 25~850 kPa의 범위에서 동결진행속도가 0이 되는 시점에서의 빙정 형성온도는  $-0.1 \sim -1.7^{\circ}\text{C}$ 로 거의 선형적으로 변화하였고, 상재하중과 빙정 형성온도와의 관계를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 상재하중 850kPa의 조건에서의 다공질 파우더는 주변의 경계온도가  $-1.7^{\circ}\text{C}$ 보다 높을 경우, 시료내에서는 동상현상은 발생하지 않음을 시사한다. 즉 상재하중의 적용이 지반의 동상억제의 한 방법으로써 이용 가능함을 보여준다.

이러한 결과를 통해서 일반적으로 실트질계 흙에서만 아니라 압반이 붕괴된 다공질 파우더에서도 일정 조건에서는 일반 흙에서와 동상거동이 발생한다는 것을 보여준다. 그림 5의 결과에서의 빙편의 이동은 일반화된 Clausius-Clapeyron 식 5에서 압력(dP)이 증가함에 따라 동결점 저하온도(dT)도 비례해서 감소되어지기 때문에, 동일 온도조건에서 상재하중의 변화에 따라 빙편형성 위치가 달라짐을 뜻한다. 즉 상재하중의 증가는 시료내의 간극수의 결빙온도를 저하시켜, 동결도축으로 빙편이 이동되어 특정위치에 발생되어짐

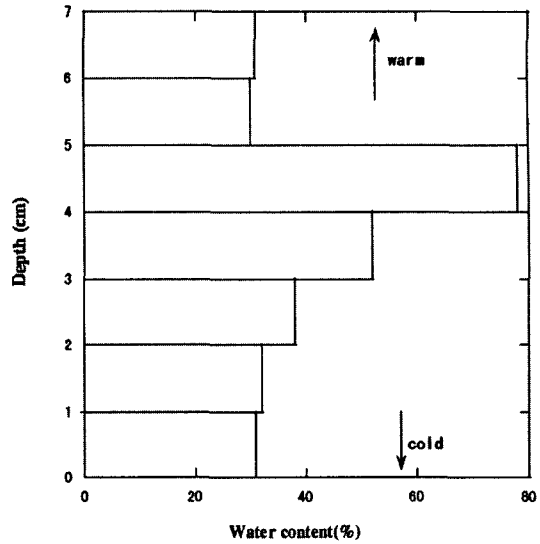


그림 7. 수분이동에 따른 함수비 프로파일의 변화

을 보여준다. 사진 1은 각 하중단계에서 동일 온도구배 하에서의 빙편 형성의 위치를 보여준다.

### 4.3 동결토내의 수분분포

4.1, 4.2에서는 동상실험을 통해, 빙편의 성장은 지속적인 수분이동의 결과이고 형성된 빙편은 압반이 풍화된 다공질체 내에도 발생함을 입증하였다. 본 절에서는 동상에 따른 간극수의 수분 재이동을 상재하중 25kPa을 대상으로 경험적으로 검토하였다. 그림 5, 사진 1에 나타낸바와 같이 동상실험 종료 후 빙편의 관측이 끝난 다음 샘플을 두께 1cm간격으로 절단하고 각각의 함수비를 측정하였다. 함수비 측정 결과를 그림 7에 나타내었다. 예측한대로, 동결부분의 함수비가 미동결 부분보다 크게, 특히 동결부분에서도 빙정에 가까울수록 함수비는 크게 나타났다. 동결전 샘플의 함수비가 거의 균등한 29%를 유지하였으나, 동상실험 후 그림 7의 함수비와의 차이는 미동결 부분에서 동결면으로의 수분이동에 의해 발생하였음을 잘 보여준다.

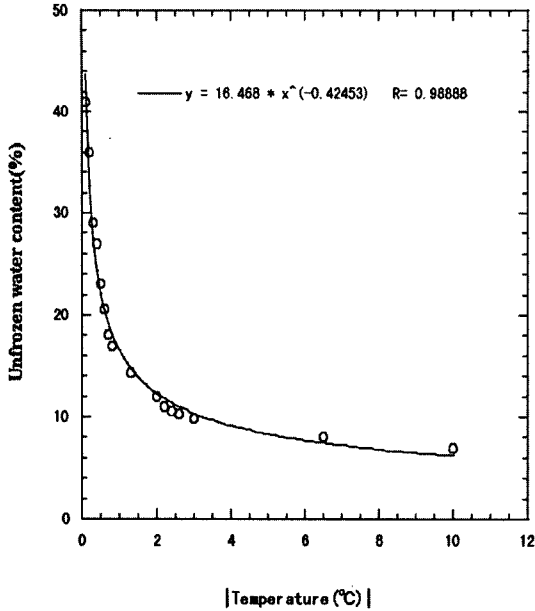


그림 8. 다공질 파우더의 부동수량과 온도와의 관계

#### 4.4 부동수 분포

동상중에 0°C이하에서도 동결되지 않는 물이 존재한다. 이것을 부동수(unfrozen water)라고 불려 진다. 동상중에 부동수가 존재하기 때문에, 흙이 동결할 때 미동결토에서 수분이 부동수막을 통해서 동결면으로 이동되어진다. 본 연구에서 자기공명장치(nuclear magnetic resonance)를 사용하여(Tice, 1982), 부동수량과 온도와의 관계를 그림 8에 나타내었다. -10°C에서 조차, 7.5%의 부동수가 존재하였고 특히 -1°C에서 0°C 사이에서 부동수량이 급격히 증가하였다. 이러한 부동수도 온도와의 관계는 동상에 민감한 흙의 경우와 유사하다(Williams, 1964). 동상성 결정을 중요한 인자중의 하나가 부동수막의 두께이다. 부동수막이 두껍다는 것은 그만큼 동결중 수분이동이 원활히 이루어진다는 것을 뜻한다. 부동수막의 두께는 그림 8의 부동수량( $w_u$ )과 비표면적(S)과의 관계로 다음과 같이 나타낼 수 있다. 식

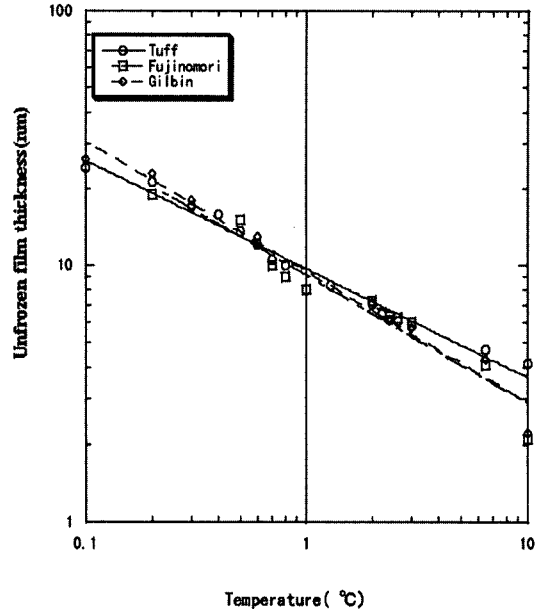


그림 9. 부동수막 두께와 온도와의 관계

6에 의해 온도변화에 따라 계산된 부동수막의 두께를 그림 9에 동상성이 큰 흙(Gilbin, 1979; 石崎, 1994)과 함께 나타내었다. 이 결과에서 다공질 파우더의 부동수막 두께의 온도의존성은 동상성이 큰 흙과 거의 같은 거동을 하고 있음을 보여 준다.

$$T_u(t) = W_u(t)/S \quad (6)$$

#### 5. 고찰

동상현상은 부동수가 동토내 특정위치에 집중적으로 동결이 이루어져 빙편이 형성되어지는 현상이다. 일정시간이 경과 후 빙편의 성장이 멈추어질 경우 물과 얼음은 평형상태에 놓이게 된다. 만약 이때 시료가 포화 상태일 경우 물과 얼음의 경계 면에서 물의 압력( $P_w$ )과 얼음의 압력( $P_i$ )은 동일하게 되고 식 5에서 압력(P)과 빙점저하( $\Delta T$ )사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$P = - \frac{L_w}{(V_i - V_w)} \frac{\Delta T}{T_o} = -13.5 \Delta T (MPa) \quad (7)$$

또한 시료가 불포화의 상태로 존재하는 경우, 얼음이 받은 압력의 전부가 아래의 흡입자에 전달되어 얼음과 공유한 상태로 존재하는 물의 압력( $P_w$ )은 0이 되고, 이때 식 5에서 압력(P)과 빙점저하( $\Delta T$ )사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$P = - \frac{L_w}{V_i} \frac{\Delta T}{T_o} = -1.11 \Delta T (MPa) \quad (8)$$

pF시험의 한 종류인 가압판법(pressure plate method)을 이용하여 간극수압과 함수비의 관계를 그림 10에 나타내었고 그 결과를 회기분석을 통해서 식 9와 같은 경험식을 얻었다. 그림 7의 결과에서 부동수와 온도의 관계는 식 10과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = A \cdot \exp(B \cdot w) \quad (9)$$

$$w = C \cdot T^D \quad (10)$$

$w$ 는 함수비,  $T$ 는 온도( $^{\circ}C$ ),  $P$ 는 간극수압(MPa), A, B, C, D는 실험상수이다(A=416.9, b=-0.3126, C=16.468, D=-0.432). 여기서 포화 동결토의 부동수 함수비는 불포화 비동결토 함수비와 동일하다는 연구결과(Tice, 1988)를 이용하여 식 10을 식 9에 대입하여 온도와 간극수압과의 관계로 나타내면 다음과 같다.

$$P = A \cdot \exp(B \cdot C \cdot T^D) \quad (11)$$

이상의 식 7, 8 11의 결과와, 그림 6의 동결점강하와 상재하중과의 관계를 그림 11의에 나타내었다. 온도가  $-0.5^{\circ}C$  보다 높은 온도에서( $T > -0.5^{\circ}C$ ), 식 11에 의해 계산된 부간극수압이 식 8에의 계산된 결과 보다 낮게 나타났으나,  $-0.5^{\circ}C$ 보다 낮은 온도에서는 식 7과 식 8의 중간 크기로 나타났다.

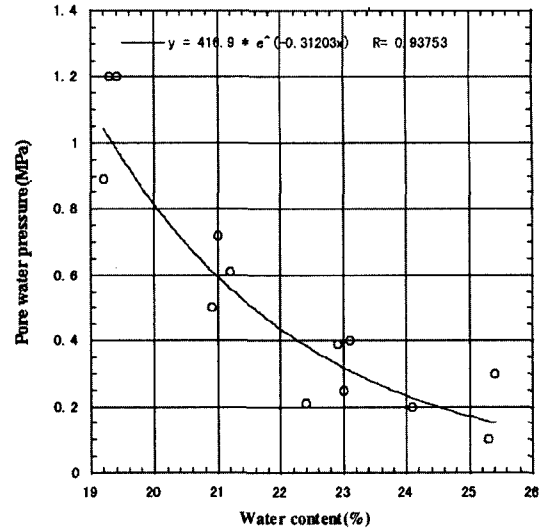


그림 10. 간극수압과 함수비의 관계

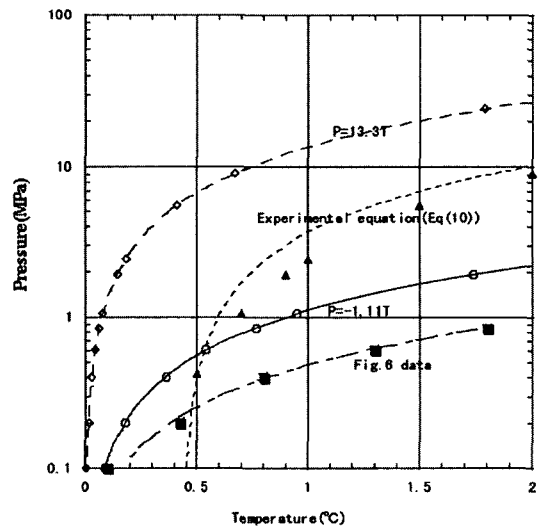


그림 11. 동결점 강하와 압력과의 관계

그러나 그림 6의 동결점강하와 상재하중과의 관계를 식7, 8 11과 비교해 보면(그림 11) 상당한 차이가 있음을 보여준다. 이러한 차이는 식7, 8 11에서는 빙편의 성장이 일어나지 않는 정적인 상평형 상태( $dp_w=0$ )에서 압력과 동결점강하의 관계를 나타낸다. 그러나 본 연구에서 3.2에서의 동결점강하와 상재하중과의 관계에 의하면, 동상



실험(그림 2, 3)에서 약 150시간 경과 후의 상재하중과 온도분포 결과로부터 계산된 것이다. 그림 2, 3에서 알 수 있듯이 실험종료 시점까지 동상이 지속적으로 발생하고 있다는 것은 동결면으로의 끈임 없이 수분이동이 이루어지고 있는 상태, 즉 동적 상태( $dP_w < 0$ )에서의 압력과 동결점강하의 관계를 나타내는 것이다. 식 5를 식 12와 같이  $dT$ 에 관한 식으로 정리 한 후  $dP_w < 0$ 의 경우 실제  $dT$ 는 식 7, 8에 의한  $dT$ 보다 낮은 온도로 계산되어짐을 알 수 있다. 본 연구에서는 사용하지 않았지만 동상시험중 tensiometer를 사용하여 실제의 빙편이 형성되어지는 위치에서 빙편과 미동결토 사이에서 부간극수압을 측정한다면, 식 12에서 계산된  $dT$ 는 그림 6에서 실측치를 회기분석한 식  $dT = A + B \times dP$ 와 유사한 경향으로 나타날 것으로 예상된다.

$$dT = -\frac{T}{L_w} (V_w dP_w - V_i dP_i) \quad (12)$$

## 6. 향후 연구 방향

부간극수압의 측정과 실제 온도변화에 따른 동결토의 인장강도 시험을 통해서 그림 6의 결과의 타당성 검토가 필요하다. 또한 본 연구에서는 실험 여건상 단기간에 상재하중과 동결점 저하와의 관계를 중심으로 분석하였으나, 실제 본 연구의 결과를 동상억제의 한 방법으로 응용하기 위해서는 장기간에 걸친 상재하중과 동결점 저하와의 관련 연구가 수행 되어져야한다.

## 7. 결론

응회암 풍화토를 대상으로한 동상실험과 동상성이 강한 흙에서와 같이 동결면으로의 수분이동에 의해 빙편이 형성되어짐을 확인하였다. 또한 상재하중과 동결점 강하와의 관계를 pF시험과 동

상실험을 통해서 비교 분석한 결과, 부간극수압의 영향을 고려하지 않은 동상실험의 그 결과가 동일한 상재하중의 조건에서 pF시험의 결과 보다 상당히 낮게 측정되었다. 관련된 세부적인 실험결과는 다음과 같다.

- 1) 상재하중이 증가함에 따라 동상속도는 비례적으로 감소하였고 빙편발생온도의절대치는 증가하였다.
- 2) 상재하중과 동결점 저하와의 관계는 정적 상태에서는  $dP = A \cdot \exp(B \cdot C \cdot T^D)$ 와 같이 동적 상태에서는  $dP = A + \text{Temp.} \times B$ 의 관계가 성립하였다.
- 3) 동결부분의 함수비가 미동결 부분보다 크게, 특히 동결부분에서도 빙정에 가까울 수록 함수비는 크게 나타났다.
- 4) 부동수량은  $-1^\circ\text{C}$ 에서  $0^\circ\text{C}$ 사이에서 급격히 증가하였으며 부동수도 온도와의 관계는 동상에 민감한 흙의 경우와 유사하였다.

## 감사의 글

본 논문의 시작에서 마지막까지 면밀한 검토와 귀중한 조언을 해주신 국민대학 토목환경공학과 황성일교수님께 깊은 사의를 표합니다. 아울러 관련 실험장치 및 시료 사용에 적극적으로 지원을 해준 北見工大토목개발공학과鈴木교수이하 토질실험실 여러분께 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 김 영진, 김 학삼, 홍 성환(1994), 동토지역기초구조물의 최적설계, 시공기법개발연구(3차 년도), 과학기술처, p.256.
2. 土質工學會編(1994), 土の凍結—その理論と實際, 土質基礎工學ライブラリ-23, PP.101-1 03.
3. Edlefsen, N.E. and Anderson, A.B.C.(1943), "Thermodynamics of soil moisture", Hilgardia.

15. 2 Univ. California, Berkley
4. Fukuda, M.(1983), "The pore water pressure profile in porous rocks during freezin g" , In Proceedings Fourth International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska. National Academy Press, Washington, D.C., pp.322~327.
  5. Gilbin, R.R.(1980), "A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soi l" ,Water Resources Research, 16, pp.918~930.
  6. Holden, J.T.(1985), "Some development of rigid ice model of frost heave" , Ground Freezing, Balkema, Vol. 1, pp93~100.
  8. Konrad, J.M. and Morgenstern, N.R.(1982), "Effects of applied pressure on freezing soil" , Can. Geotech. J., 19, pp.494~505.
  9. Miller, R.D.(1978), "Frost heaving in non-colloidal soil" , In Proceedings Third International Conference on Permafrost, Edmonton, Canada. National Research Council of Canada, pp.707~713.
  10. Tice, A.R. et al(1982), "The relationship between the ice phase and unfrozen water phase in frozen soil as determined by pulsed nuclear magnetic resonance and physical desorption data" , USA cold region research and engineering laboratory, CRREL report 82-12
  11. Walder, J. and Hallet, B.(1985), "A theoretical model of the fracture of rock during freezing" , Geological Society of America, Bulletin, 96, pp.336~346.
  12. Williams, P.J.(1964), "Unfrozen water content of frozen soils and moisture suction" , Geotechnique, 14, pp.231-241.

(접수일자 1999. 9. 2)