

# 凍結—融解作用이 흙의 諸強度特性에 미치는 影響(I)

## Effects of the Freeze/Thaw Process on the Strength Characteristics of Soils(1)

柳 能 桓\* · 朴 承 範\*\*  
Ryu, Neung Hwan · Park, Seung Bum

### Summary

In this research programs, a series test was conducted to show the effects of freeze/thaw process on the various soil properties. The tests were carried out taken from the west sea shore of Korean peninsular and the wast sea shore of Scotland, and their results are as follows ;

1. There was a positive total heave in a freezing run, although water may be expelled for the sample initially. The water flow must be reverse from expulsion to intake.

2. The confining pressure had an overriding influence on the heave and frost penetration, a sudden change of the axial strain at failure with strain rate was observed occurring at a strain rate between  $10^5$  and  $10^6$ , and the initial friction angle of frozen clay was appeared zero.

3. There was shown a significant decrease in liquid limit of soil which was subjected to freeze/thaw process for the initial value of about 20% because of soil particles aggregation.

4. The cyclic freeze/thaw caused a sinificant reduction in shear strength and its thixotropic regain. The frozen/thawed soil exhibited negative strength regain, particularly at high freeze/thaw cycles.

5. The freezing temperature greatly influenced on the failure strength of soils and this trend was more pronounced the lower the freezing temperature and shown the ductile failure with indistinct peaks.

### I. 緒 論

흙의 凍結作用은 어느 限定된 地域에서의 特殊한 現象으로써, 地盤이 凍結되는 所謂 永久凍土 地盤은 約 2,100萬km<sup>2</sup>이고 部分的으로 凍結되는 곳까지 합하면 地球陸地面積의 70%에 이른다 고 한다.

이와같은 곳에서는 地盤狀態가 凍結融解에 따라서 상당히 變化되고, 이는 주로 土~水系內의 構造變化에 의한 것이다.

흙속에서의 凍結融解作用은 여러가지 副作用을 일으키며, 所謂 凍上效果를 나타낸다. 이문제는 아직도 正確한 메커니즘(Mechanism)이 밝혀지지 않는 것임은 가장 큰 問題는 흙의 強

\* 江原大學校 農科大學

\*\* 忠南大學校 工科大學

度低下이다.

흙이凍結되면 一般적으로 매우 強하고 또 거의 不透性으로 된다.<sup>10, 16)</sup> 이와 같은 理由 때문에 凍結工法이 擁壁工事, 基礎地盤處理 터널, 地下鐵工事 및 其他 軟弱地層으로된 構造物의 基礎地盤處理工法으로 利用되고 있다.

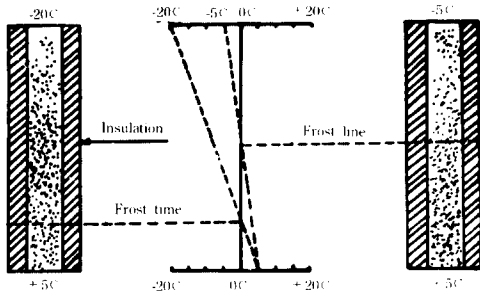
그러나 一端 흙이 凍結되면, 土粒子는 그의 粘着力을 發揮하지 못하고, 凍結中에 發生되는 負의 間隙水壓<sup>20)</sup> 때문에, 土粒子의 構造變化和 水晶分離 現象이 發生된다. Benoit<sup>6)</sup>에 의하면 凍結~融解作用은 土粒子를 粉碎시키고 透水性을 減少시키는 한편 Smith<sup>20)</sup>와 Frese<sup>15)</sup>는 土粒子를 크게 攪亂시킨다고 했다. 또 Chamberlain<sup>11)</sup> 등은 細粒土가 凍結되었다가 다시 融解되면 土粒子의 離合 및 龜裂이 發生되어 透水性이 增加되고, 특히 이 龜裂은 흐름의 抵抗性을 減少시키고, 이를 爲한 通路役割을 한다고 했다. 이와같이 흙의 凍結融解作用은 흙의 透水性, 強度 및 變形 特性에 큰 影響을 미치고 있다.<sup>15)</sup> 예컨대 흙의 剪斷強度의 減少로 軟性 및 剛性鋪裝의 支持力이 減少되고<sup>4)</sup> 흙댐, 堤防, 防潮堤, 盛土 및 切土斜面的 安定盛의 減少는 勿論, 擁壁이나 矢板의 壁體에 作用하는 水平土壓을 增加시킨다. 이와같은 構造物의 安定問題를 다루기 爲해서는 凍結融解中에 있는 土粒子의 構造特性을 把握할 必要가 있고 一般적으로, 흙이 粘土質인 境遇에는, 土粒子가 서로 獨立되어 있는 것이 아니라 組織單位를 形成하고, 그 單位는 微細粒子가 서로 모여서 高單位로 發達된 複合單位構造이며, Young<sup>31)</sup>에 의하면 그 最少單位는 Domain이고, 더메인(Domain)의 集合體를 클러스터(Cluster)가 모여서 페드(ped) 構造體를 形成한다고 하였다. 따라서 이들 흙의 構造는 間隙으로 評價되고, 構造적으로 잘 발달된 흙은 内部間隙과 外部間隙을 包含하고 있으며<sup>22)</sup> 이들 無數한 間隙이 保水性和 透水盛을 調節하며, 壓縮, 乾燥 및 凍結等에 의하여, 土壤構造는 수시로 變化된다. 이와같이 흙의 凍結融解作用을 받는 동안 흙의 構造, 含水比 間隙比 등이 흙의 凍上 및 強度에 상당한 影響을 미치고 있음이 밝혀졌다.

本 研究에서는, 凍結融解裝置를 갖춘 三軸壓

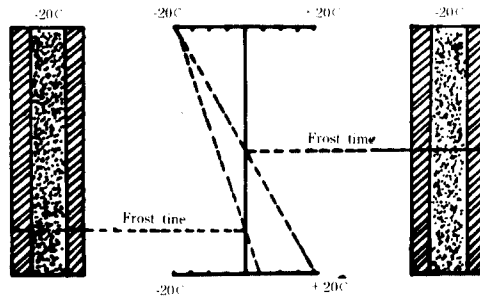
縮試驗器를 使用하여, 우리나라 西海岸 및 英國의 Scotland Oban 地方의 粘性土 대한 凍結融解作用이 諸般強度에 미치는 影響을 比較調査하였다.

## II. 凍結機構

凍結溫度가 繼續되는 동안, 地表에서의 凍結降下比率는 大氣의 溫度變化에 左右되고, 이때 凍結前線의 移動은 처음에는 若干 上向하다가 다시 下向하여 結氷板을 形成하고 繼續인 下向變動을 通하여 두꺼운 氷層을 形成하여 凍上을 誘發한다. 이와같은 結果는 下部에서 물이 適當히 供給되면, 어느 種類의 흙에서나 일어날 수 있음을 의미하며, Stephen<sup>2, 3, 27, 28)</sup>에 의하면 凍上은 凍結點으로 물이 移動되어, 結氷層을 形成하기 때문에 發生된다고 하였고 또한 흙속의 물이 凍結에 의하여 體積이 變化되는 現象으로써, 空氣의 溫度가 長期間 氷點以下에 머물러 있으면 깊게 얼어 붙은 凍結土壤은 地球의 内部로부터, 熱의 上向傳導作用으로 아래부분에서 徐徐히 融解作用이 일어난다. Fig. 1은 凍結前線 및 等溫線의 移動을 實驗室內에서 調節하는 方法을 圖解적으로 表示한 것이다. Fig. 1(a)는 -20°C에서 +5°C로 下向移動시키는 것이고 Fig. 1(b)는 하부에서 +5°C에서 -20°C로 變更시키는 境遇로 이두가지는 同一한 結果를 얻을 수 있다. 後者は 人爲적으로 凍結效果를 調整하는 것인데 反하여 前者는 自然的인 凍結效果를 나타내며 本 그래프의 發達課程에서 흙속에서의 溫度勾配가 一定하다고 假定하면 本 그래프는 直線을 나타내며 自然狀態에서는 周邊으로부터의 熱의 吸水作用과 放出作用이 恒常 一定하지는 않기 때문에 圖解적으로 表示한 勾配는 어느 形態의 曲線으로 될수도 있다. 이와같이 흙의 凍結이 繼續되는 동안에 漸次로 成長하는 水晶과 土粒子 사이에 있는 間隙水의 一部는 不凍結狀態로 남아있고 이때 그의 溫度는 매우 낮다. 이 部分의 凍結前線의 壓力에 의하여 不凍結水의 自由에너지(Energy)와 地下水의 自由에너지의 差(熱力學的 Potential)로 因하여 水晶과 土粒子사이의



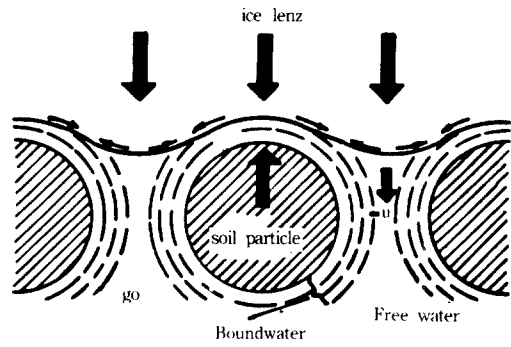
(a) Effect of external temperature change



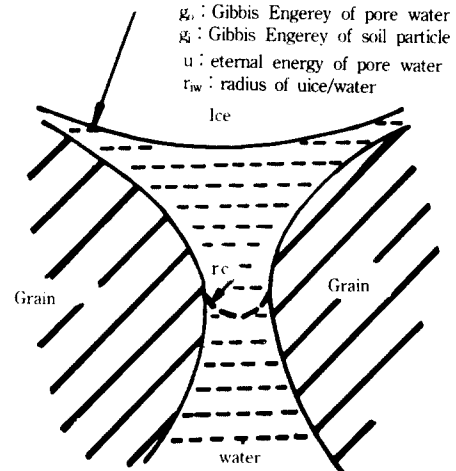
(b) Effect of internal temperature change

Fig. 1. Theoretical analysis of temperature movement in soil.

間隙속으로 물이 移動되어 凍上作用을 일으키게 된다. 氷晶이 繼續해서 成長하려면 拘束水의 溫度가  $0^{\circ}\text{C}$  以下로 되어야 하고, 氷晶의 아랫부분에서 上昇력이 作用해야하며 이때 氷晶(ice lens)과 물의 接觸面에서는 表面張力 때문에 어느 限界內에서는 이들 垂直方向의 힘의 和는 零(0)<sup>14, 19, 21, 23</sup>으로 된다.(Fig. 2-(a) 참조) 이와 같은 原理에 의하여 間隙水는 毛管力에 의하여 維持 되고 實際로 吸着水膜의 두께는 土粒子의 粒徑에 包含되고, 물이 完全히 土粒子 周圍에 吸着되었을 때에는, 空隙속을 채우고 있는 水分이 并목을 通過하기 위해서 凍結前線의 曲線半徑( $\gamma_{iw}$ )이 어느 限界值( $\gamma_c$ ) 보다 작아야 한다.<sup>17, 18, 20</sup>(Fig. 2-(b) 참조) 一般的으로 얼음의 壓力( $P_i$ )은 매우작은 過載荷重으로 作用하기 때문에, 물의 壓力은 負壓이며, 물을 繼續의으로 上向으로 끌어올리는 것은 吸上力이고 얼음의



(a) Mechanical forces



(b) Ideal capillary model

Fig. 2. Mechanical forces acting on the surface of an ice lens.

重이 包含되지 않았으며, 처짐에는 剪斷에 의한 반경이 空隙并목의 有效半徑과 같거나 그보다 작을때에만 얼음은 空隙속으로 侵入하고 그렇지 않으면, 이렌즈는 充分히 降下하여 必要한 曲面( $\gamma_c$ )을 만들때까지 下向形成된다. 따라서 吸上력이 그리 크지 못하면 얼음과 물의 界面半徑은 어느 限界值보다 크게되어 凍結侵下를 妨害하고 그 結果 氷晶을 形成하게 된다.

### III. 材料 및 方法

#### 1. 材料

使用된 試料은 우리나라 西海岸 錦江 河口(k)와 英國 Scotland Oban(u)海岸 地下 120 cm에서

採取하였고, 室内溫度에서 乾燥시킨후 最適水比 前後로 하여 密閉된 鐵製箱子속에 넣어 一週日間 保管하여 水比가 均一하게 되도록 하였다. 이들 흙의 粒度分布와 物理的 性質은 Fig. 3과 Table-1과 같고 이들 두가지 흙은 대략 비슷한 性質을 띄고 있다.

試料準備用 soil bean 바닥에는 10 cm 程度の 모래를 布設하고 그 밑에는 銅線코일을 設置하여, 물이 이 銅線 코일을 通過되도록 하여 흙의 溫度와 凍結率을 調整할 수 있도록 하였다. 凍結中에 貯水槽의 水位는 容器의 바닥에서 10 cm 程度로 하였고, 다진흙의 上부분에는 凍結코일과 不凍液을 넣은 凍結板을 設置하고, 이를 溫度調節裝置에 連結하였다. 또 凍結板 위에는 上載荷重에 해당되는 鐵板을 올려놓고 soil bean 주변에는 斷熱材를 使用하여 絶緣시키고 内面에는 凍結中 鐵板과 흙사이의 摩擦을 減少시키기 위

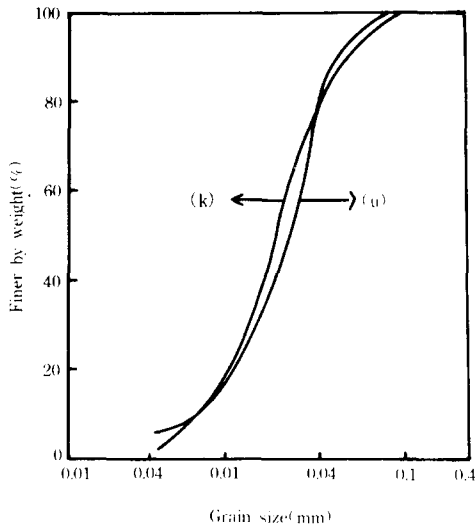


Fig. 3. Grain size distribution curves of soil samples.

Table-1. Physical properties of soils used.

soil	liquid limit (%)	plastic index (%)	moisture content of natural state (%)	specific gravity (%)	organic content	specific surface area (in <sup>2</sup> /gf)	soil classification (U. S. C)
K	34.6	18.3	35.2	2.57	5.5	34.0	CL-ML
U	49.5	24.5	34.7	2.62	5.8	36.0	CL-ML

해서 실리컨 그리이스(silicon grease)를 布하고, 最適水比와 最大乾燥密度로 다진 흙속에는 Thermocouples을 連結하여 溫度를 調節할 수 있도록 計劃하였다.(Fig. 4)

試驗用 試料는 高强度 아크릴프라스틱으로된 多段모울드를 使用하여 準備하였고, 한번에 10 個를 採取할 수 있는 構造로 되어있다. 試料의

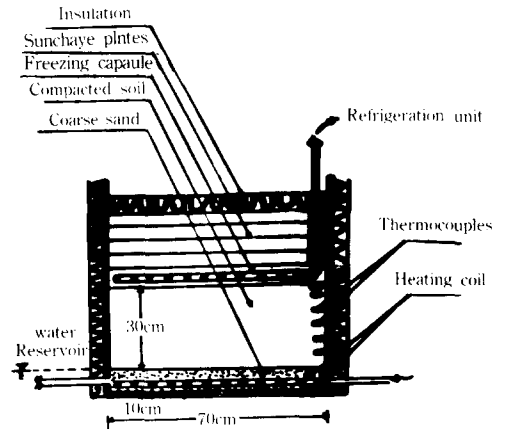


Fig. 4. Freezing-Thawing test set.

크기는 70(φ)×150(H)mm로 하여 拘束力을 주는 液體의 浸透를 防止하기 위해서 얇은 고무막을 씌워 眞空飽和시스템에 連結한후 所要의 拘束壓力, 荷重 및 凍結融解 試驗을 實施하였다.

## 2. 實驗機具 및 方法

Fig. 5는 本實驗裝置로써, Permode는 直徑 10 cm의 Tetlo on 실린더로 되어있고 실린더 壁에 Thermocouple을 設置하여 흙試料의 溫度分布狀態를 測定할 수 있었다. 試料에 作用하는 軸方向壓力은 0.5%의 精度를 가진 多段로드셀을 使用하였고 그의 變形量은 DCDT를 使用해서, 測

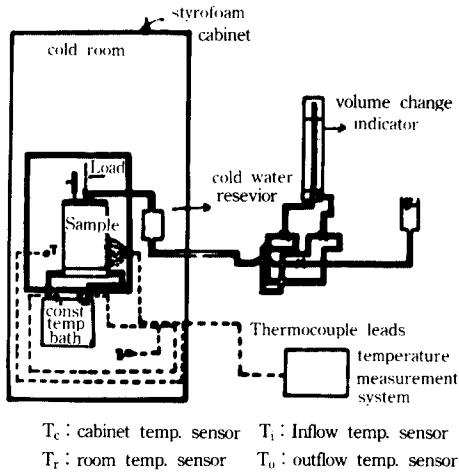


Fig. 5. Test configuration.

定하였으며 凍結融解 循環은 24時間으로 하고, 凍結中에 凍結藉의 溫度는  $-10^{\circ}\text{C}$ 까지 낮추고 融解는  $20\sim 23^{\circ}\text{C}$ 에서 24時間維持하였고, 또 凍結-融解中 排水의 調節은 開放系와 閉鎖系로 나누워 實施하였다. 載荷方法은 單一荷重과 反復荷重을 加하여 凍結 및 融解狀態에서 實施하였다.(Fig. 5 참조)

#### IV. 實驗結果 및 考察

##### 1. 凍結中의 水分移動

凍結中에 各應力水準에서의 水分移動과 凍上量을 測定한 結果는 Table-2 및 Fig. 6과 같다.

先行荷重을  $0.5\text{kgf}/\text{cm}^2$ 加하고, 凍結中에 拘束力을 여러가지로 變更하여 實驗한 結果 開放系에서는 물의 移動現象이 經過時間 1,000分以後에 이루어졌고, 이때에 물의 移動은 排水에서 吸水로 바뀌었으며, 各荷重水準에서 모두 類似하게 나타났다.

또 凍上率이 一定하도록 維持한 結果, 水分

Table-2. Soil test condition.

pre-load (kgf/cm <sup>2</sup> )	temperature chamber (°C)	initial height (mm)	initial void ratio	initial moisture content(%)	temperature of cold side (°C)
0.5	2	150	0.42	20	-10

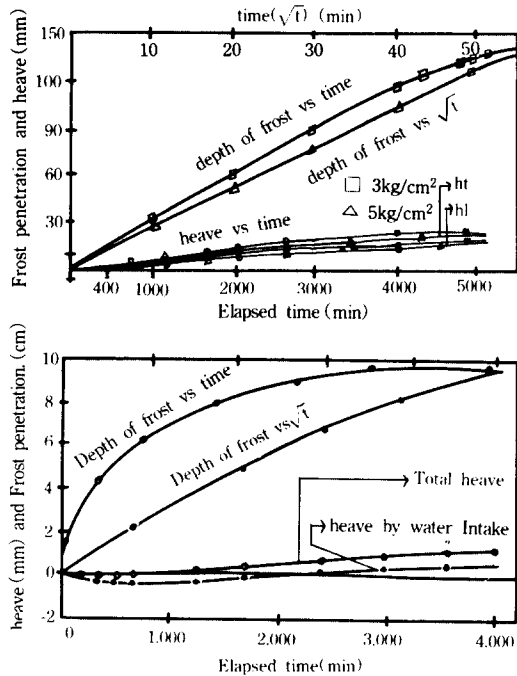


Fig. 6. Frost penet ration and heave amont of soil.

吸水에 의한 凍上은 물의 흐름이 排水에서 吸水로 轉換된 後에 發生되었으며, 한가지 興味있는 現象은 물의 逆水現象이 일어난 時間( $t_0$ ) 및 排水된 全體水分량과 吸水한 全體水分량이 同一하게 되는 時間( $t_1$ )을 豫測할 수 있다는 것이다. 即

Stephen<sup>27, 28)</sup>의 式을 適用하여

$$X = \alpha \cdot \sqrt{t} \dots \dots \dots (1)$$

여기서, X : 凍上量, (mm)

t : 시간, (min)

$\alpha$  : 상수, (mm/min<sup>1/2</sup>)

Fig. 6에서 全體凍上量  $h_T$ 는 2가지成分 即 原地盤의 間隙水에 의한 凍上量과( $h_i$ ) 水分吸水로 因한 凍上量( $h_e$ )으로 區分되며

$$h_T = h_T - h_i \dots \dots \dots (2)$$

萬一 凍結深과 凍結時間과의 關係가 (1)式과 같이 直線關係가 成立된다면 全體 凍上  $\alpha_T$ 은 一定하며 方程式(2)는 다음 式으로 표시 할 수 있다.

$$h_1 = \alpha_1 t - \alpha_2 \cdot \alpha \sqrt{t} \dots \dots \dots (3)$$

여기서,

$$\alpha_2 = \frac{h_T - h_1}{X}$$

$$\alpha_1 = \frac{h_T}{t}$$

(3)식을 시간에 대하여 微分하면,

$$\frac{dh_1}{dt} \alpha_1 - \frac{\alpha_2 \cdot \alpha}{2\sqrt{t}} \dots \dots \dots (4)$$

吸水에 의한 凍上量  $h_1=0$ 하고 (3)식을  $t$ 에 대하여 풀면,

$$t_1 = \frac{(\alpha_2 \cdot \alpha)^2}{\alpha_1} \dots \dots \dots (5)$$

즉  $t_1$ 은  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$  값으로 推定할 수 있고  $\alpha$ 는 初期段階의 實驗에서 얻을 수 있다. 같은 方法으로 (4)式에서

$$\frac{dh_1}{dt} = 0 \text{으로 하면}$$

$$t_1 = \frac{(\alpha_2 \cdot \alpha)^2}{2\alpha_1} \dots \dots \dots (6)$$

Table 3은 (5)식과 (6)式을 利用하여 求한 理論値와 관측치의 比較값이다. 따라서 凍結이 運行中에 全凍上量이 陽(+)으로 나타나면, 初期段階의 荷重에서 물이 試料에서 排出되고 있더라도 물의 흐름은 排水에서 吸水로 바뀌게 되며, 拘束壓力은 凍上率에 상당한 影響을 미친다는 것을 알 수 있다. 또 관측치는 理論値보다 약간 크게 나타났고 stephen의 式에서  $\sqrt{t}$ 에 對한 凍上量의 直線關係는 拘束壓力이 클수록 더 오래 繼續되며, 따라서 排水에서 吸水로 轉換되는

時間도 短縮되고 있음을 알 수 있다.

## 2. 凍結土의 壓密變形特性

變形率을 여러가지로 變更하여 各應力水準에서 壓密試驗한 凍結土의 實驗結果를 Fig. 7에 表示하였다.  $\sigma - \sigma_3$ 대  $\epsilon_1$  곡선의 頂點을 試料破壞點을 나타내고 이 頂點에 該當되는 強度( $(\sigma_1 - \sigma_3)_m$ )에서의 軸方向變形과 經過時間( $t_m$ ), 그리고 接線係數( $E_s$ )와의 關係를 Table-4에 表示하였다. 變形率과 拘束應力에 對한 軸差應力 曲線은 大略비슷하였고 이는 拘束應力이 凍結土의 應力-變形거동에 크게 影響을 미치지 않는다는 것을 의미하며, 曲線이 全體적으로 平平하게 되어, 拘束應力에 對하여 塑性破壞現象을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 初期壓力段階에서는, 多少의 類似彈性變形(3%以下)을 한후에, 塑性變形을 하였고, 軸放向變形이 3%에 達할 때까지 試料의 表面에 龜裂이 發生되지 않았다. 그러나 Carbee<sup>13)</sup>에 의하면 모래試料인 境遇에는 拘束應力은 變形應力 舉動에 크게 影響을 미친다고 하였으며, Fig. 8와 같이 變形率에 對한 破壞時의 軸應力變化率은  $10^{-5}$  및  $10^{-6}$ 의 크기에서 갑자기 變化되고 있는데 이는 本粒性土 試料의 變形모우드가 上記 變形率에서 集中的으로 發生되고 있음을 의미한다. 또한  $(\sigma_1 - \sigma_3)_m$ 은 拘束應力과 無關함을 의미하며, 破壞強度는 變形率이 增加함에 따라서 減少됨을 뜻하며, 또 變形率이 增加될수록 破壞되는 瞬間까지의 時間은 減少됨을 알 수 있다.

Fig. 9는 여러가지 變形率에 對한 모어의 應力원을 表示한 것이며, 흙의 내부마찰각은 零(0)

Table-3. Comparison of calculated and observed based on the equation.

Pressure	$a_1$	$a_2$	a	$h_1$ at time indicated		$t_0$		$t_1$	
				cal.	obs.	cal.	obs.	cal.	obs.
kgf/cm <sup>2</sup>	mm/min	cm/t	mm	mm		min		min	
0.5		0.00008						396	400
1.0		0.00023						364	387
3.0	0.0032	0.00058	3.6	0.26	0.30	98	100	336	369
4.0	0.0047	0.087	2.42	11.52	12.432	37.42	39.542	223	237
5.0	0.00514	0.06	1.84	17.82	18.802	3.20	4.00	31.20	32.50

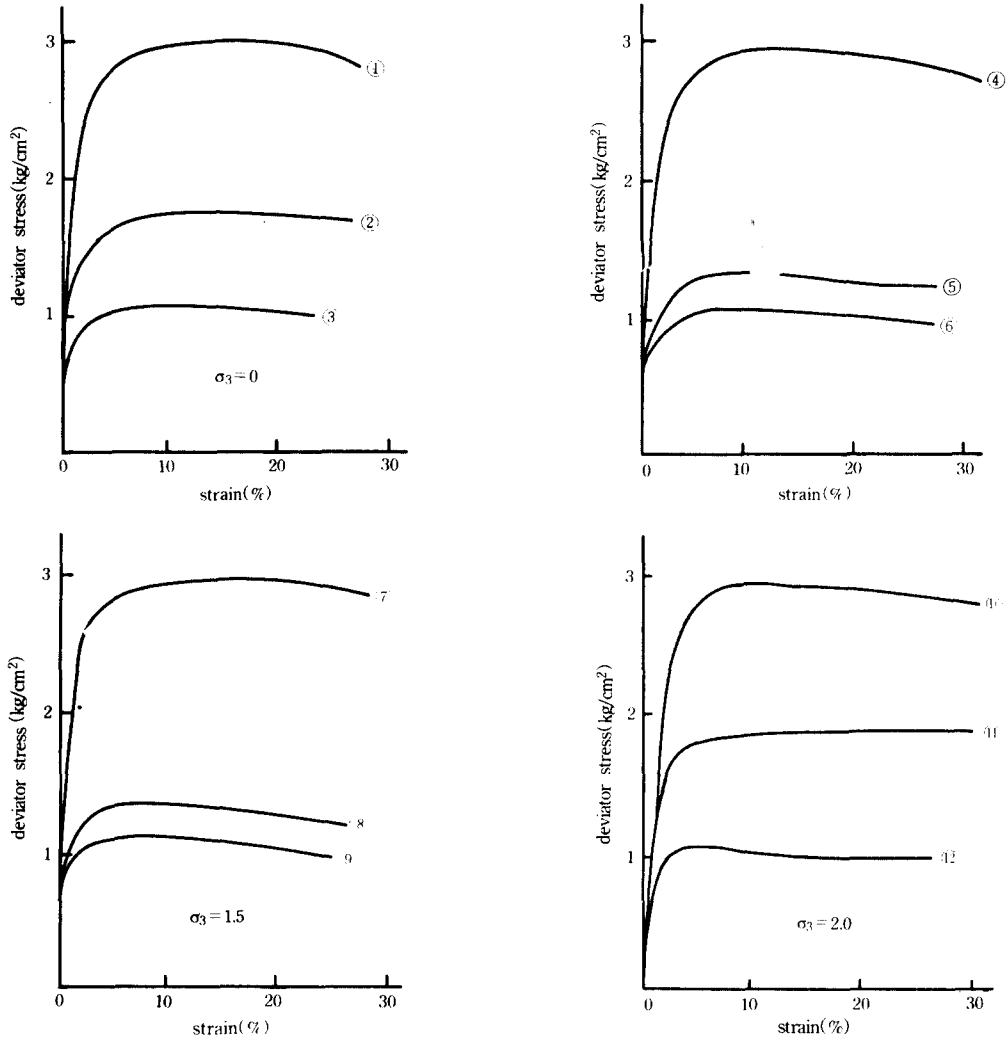


Fig. 7. Curves of deviatoric stress vs axial strain for various confined stress under The condition of 10 cycles of Frost-Thaw.

이며 따라서 Coulomb의 方程式은

$$\tau = c + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_m}{Z} \text{으로 表示할 수 있다.}$$

即 凍結粘土의 剪斷強度( $\tau$ )는 粒着力과 같고, 이는 最大軸差應力의 半에 該當된다.<sup>9, 25)</sup> 또한 變形率에 따라서도 差異가 나며, 接線係數는 變形에 無關하고 오히려 拘束壓力의 增加에 따라서, 약간 減少되는 傾向을 나타내고 있으며 이와같은 事實은 ice pressure melting 現象에 의하여 土粒子를 둘러싸고 있는 不凍結水膜의 두

께가 增大되어 土粒子間의 摩擦力和 粒着力을 減少시키기 때문이라고 推測된다.

### 3. 凍結融解反復과 흙의 性質

Fig. 10은 液性限界와 凍結融解反復回數와의 關係를 表示한 것으로, 첫 4~5회의 凍結-融解反復時驗에서는 液性限界가 크게 減少되는 傾向을 보였고, 凍結-融解의 反復回數를 增加시킴에 따라서 큰 變化는 일어나지 않았다. 또 閉鎖系와 開放系의 差異는 크게 인정되지 않았

Table-4. Test results under the various load condition.

sample number	applied strain rate(%)	confined stress (kgf/cm <sup>2</sup> )	axial strain at failure (%)	time to failure (min)	initial tangent modulus (kgf/cm <sup>2</sup> )	maximum deviator stress (kgf/cm <sup>2</sup> )	remarks
1	1.04 10 <sup>-4</sup>	0	10.42	1.95	470	2.80	
2	1.04 10 <sup>-5</sup>	0	10.53	17.4	540	1.75	
3	1.04 10 <sup>-6</sup>	0	4.34	580	510	0.95	
4	1.04 10 <sup>-4</sup>	1.0	9.54	1.92	500	2.75	
5	1.04 10 <sup>-5</sup>	1.0	9.62	16	500	1.85	
6	1.04 10 <sup>-6</sup>	1.0	4.16	106	420	0.92	
7	1.04 10 <sup>-4</sup>	1.5	10.52	1.93	520	2.64	
8	1.04 10 <sup>-5</sup>	1.5	3.87	62.4	490	1.93	
9	1.04 10 <sup>-6</sup>	1.5	3.52	518	370	0.97	
10	1.04 10 <sup>-4</sup>	2.0	12.15	2.74	470	2.86	
11	1.04 10 <sup>-5</sup>	2.0	3.76	52.4	490	1.74	
12	1.04 10 <sup>-6</sup>	2.0	4.25	676	392	0.92	

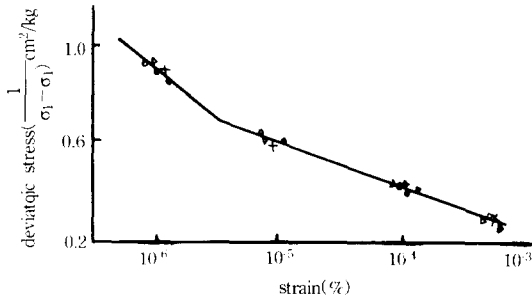


Fig. 8. Relationship between deviatoric peak strength ratio and strain rate of freeze-thaw soils.

고, 두 試料 모두 비슷한 경향을 나타냈다.

이와같은 現象은 凍結-凍解反復에 의하여 誘發된 土粒子的 애그리게이션(Aggregation)作用 때문이며, 塑性指數가 약간 높은 U-試料에서 뚜렷하게 나타나고 있었다.<sup>2)</sup>

또 土粒子的 애그리게이션으로 인한 安定性問題를 觀察하기 위해서, 凍結融解 反復土에 對하여 沈降分析을 實施하고 이들 結果를 Fig. 11에 表示하였다. 分散劑를 使用하지 않았을 때에는 4~5回 凍結-融解反復時의 粘土에 該當되는 粒子的 量이 15%程度 減少되었고 10回程度 以後에는 애그리게이션 現象이 일어나지 않고 있다. 그러나 開放系에서는 약간의 애그리게이션

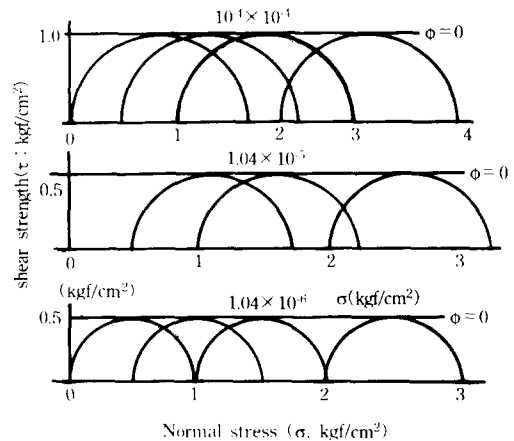


Fig. 9. Mohr's circle and envelope freeze-thaw soils.

現象이 繼續되고 20回 以後에는 상당히 安定化되었다. 이들 粘土分의 組織單位減少現象은 開放系에서 더욱 심하고, 分散劑 使用時에 5日程度의 凍結融解 反復후에서 20%程度로 增加되었으며 이와같은 相反된 土粒子 構造의 分布變動은 Fig. 10에서 立證된 바와같이 5回程度의 凍結-融解反復試驗에서 不安定 狀態의 새로운 粒子組織單位가 形成되고 있음을 의미하는 것이다.

Fig. 12는 溫度變化에 따른 軸差應力과 變形



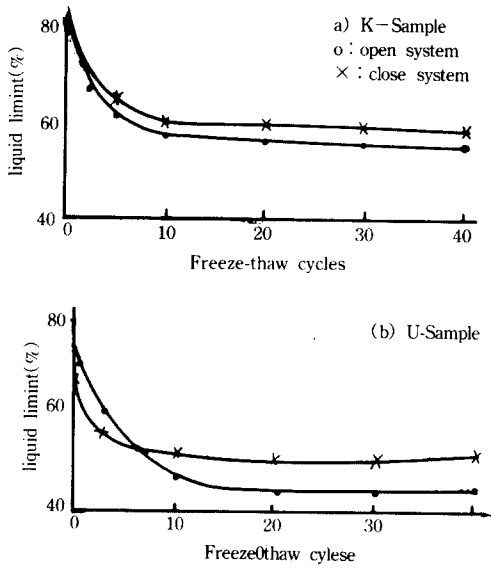


Fig. 10. Relationship between liquid limit and freeze-thaw cycles.

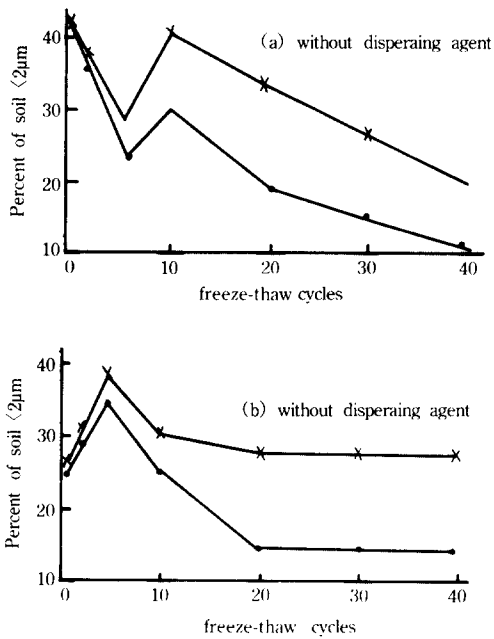


Fig. 11. Relationship between percent of soil, 2mm and freeze-thaw cycles.

率과의 關係를 나타내며 不凍結試料에서는 頂點強度부근에서 硬性破壞現象을 나타내는데 反하여 凍結된 試料에서는 軟性破壞를 하여 그의

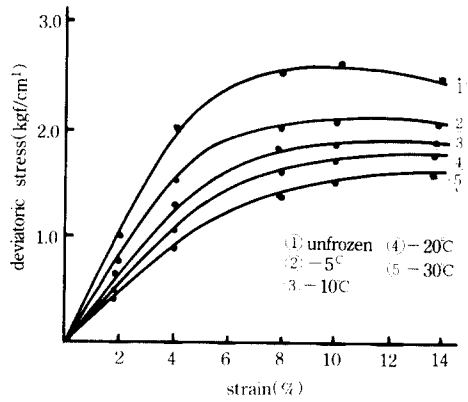


Fig. 12. Deviatoric stress and strain for various temperature.

頂點이 確實하게 나타나지 않고 있으며, 이와같은 現象은 온도가 낮을 수록 더욱 현저하게 나타났다.<sup>1)</sup>

Fig. 13은 非排水強度와 養生日數와의 關係를

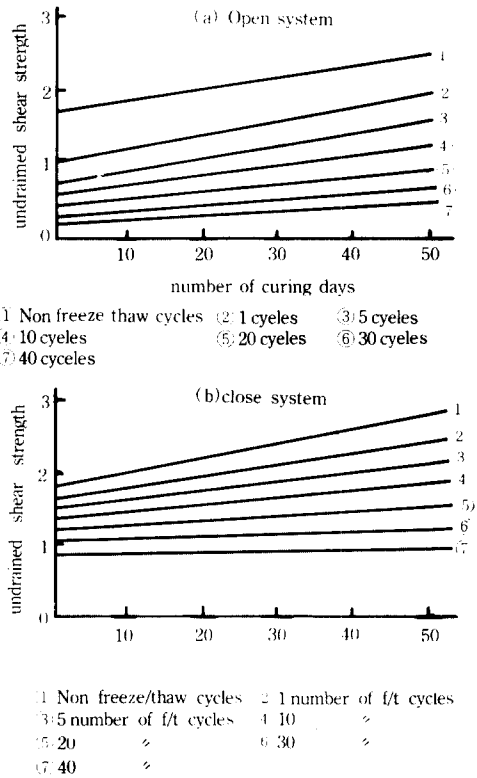


Fig. 13. Relationship between undrained shear strength and number of curing days for various temperature.

凍結融解反復回數에 對하여 表示한 것으로 凍結融解反復回數는 흙의 剪斷 強度를 크게 變化시키고 또 時間이 經過함에 따라서 텍소트로피 현상이 크게 나타나고 있으며<sup>33)</sup> 凍結融解反復回數가 增加함에 따라서 強度 回復現象은 아주 輕微하게 나타나고 있다. 또 閉鎖系는 開放系보다 回復現象이 약간 예민하게 나타났으며 이는 間隙水內에 용해되어 있는 土粒子의 이온 結合에 의한 것으로 따라서 間隙水內의 化學的成分과 間隙水의 電荷는 土粒子의 結合력에 影響을 미치고 있는 것으로 알려진 事實<sup>33)</sup>과 一致된다고 할 수 있다.

### V. 結 論

흙의 凍結-融解反復, 荷重 및 凍結條件이 흙의 性質에 미치는 影響을 究明하기 爲해서 몇 가지 實驗을 實施하여 다음과 같은 結果를 얻었다.

1. 凍結中에 全體凍上量이 陽(+ )으로 나타나면 물의 흐름은 排水에서 吸水로 轉換되며, 拘束應力은 凍上率에 큰 影響을 미치고 拘束壓力이 클수록 排水에서 吸水로 轉換되는 時間이 短縮되었다.

2. 拘束壓力은 凍結土의 應力-變形曲線에 크게 影響을 미치며 파괴시에는 변형률이  $10^{-5}$ 와  $10^{-4}$  사이에서 크게 변화되며 凍結土의 内部摩擦角은  $0^\circ$ 이다.

3. 土粒子의 에그리게이션 現象은 첫 5회의 凍結融解 反復試料에서 크게 나타났으며, 液性限界를 20%程度 減少시키고, 塑性指數가 큰 흙에서 더욱 뚜렷하게 나타났다.

4. 凍結融解反復回數는 흙의 剪斷強度에 크게 影響을 미치며 反復回數가 클수록 텍소트로피 現象은 減少되었다.

5. 凍結程度는 흙의 破壞強度에 크게 影響을 미치며 凍結溫度가 낮을수록 軟性 破壞現象이 뚜렷하게 나타났다.

### 參 考 文 獻

1. Aoyama, K., Temperature dependencies of

mechanical properties of soils subjected to freezing and thawing., Fourth Intl. sym. on ground freezing, pp.217-222. 1985.

2. Bouyoucos, G. J., A study of the causes of frost occurrence in muck soils, Soil science vol. 5 pp.39-42. 1922.

3. \_\_\_\_\_, Movement of soil moisture from small capillaries to large capillaries of soil upon freezing, Jour. of agricultural reserch, vol. 5, pp. 79-84 1923.

4. Broms, B. B., The bearing capacity of flexible pavements subject to frost action, H. B. R., vol. 258, pp. 138-140, 1963.

5. Brom, B. B., Yao, Y. C., Shera strength of a soil after freezing and thawing, Jour. of SMFD, vol. 90, No. SM4, pp. 1-25, 1964.

6. Benoit, G. R., Bornstein, J., Freezing and Thawing effects on draing, Proc. soil science soc. Am., vol. 34, No. 4, pp. 551-557, 1970.

7. Bernard, D. A., A mechanism for predicting the effect of cyclic freeze-thaw on soil behaviour, The 2nd Intl. conf. sym. on ground freezing., pp. 285-296, 1980.

8. Baker, T. H. W., Jones, S. J. and Parameswaran, V. R., Cofined and unconfined compression test on frozen sand, Pros. of fourth Can. permafrost conf. pp. 385-396, 1981.

9. Chamberlain, E. J., Groves, C., Perham, R., The mechanical behaviour of frozen earth materials under high pressure triaxial test conditions, Geotechnique, vol. 22, No. 3, pp. 469-483, 1972.

10. Chamberlain, E. J., A model for predicting the influence of closed system freeze-thaw on the strength of clays, O C E O sym. on frost action on roads, Oslo, vol. 3, pp. 39-46, 1973.

11. Chamberlain, E. J., Blouin, S. E., Frost action as a factor in enhancement of the drainage a and consolidation of fined-grained dredged matewrials, U. S. army, Eng. water, Res. program, tech. rep., D-77-16, pp. 59-63, 1977.

12. Castro, G., Christian, J. J., Shear strength of

- soils and cyclic loadings, Jour. of the geo. technical engineering division, ASCE, vol. 2, GT 9, pp. 887-894, 1976.
13. Carbee, D. L., Yuanlin, Z., Triaxial compressive strength of frozen soils under constant strain rates, proc. fifth Intl. conf. on ground freezing, vol. 1, pp. 1200-1205, 1988.
  14. Everett, D. H., Haynes, J. M., Capillary properties of some model pore systems with special reference to frost damage, RILRMC, bull. new ser. vol. 27, pp. 31-38, 1965.
  15. Frese, H., Czeratski, W., Importance of water in formation of soil structure, H. R. B., special rep., vol. 40, pp. 200-211, 1958.
  16. Jessberger, H. L., Carbee, D., Influence of frost action on the bearing capacity of soils, H. R. B., HBR304, pp. 14-26, 1970.
  17. Hurt, K. G., The prediction of the frost susceptibility of limestone aggregates with reference to road construction, Ph. D. thesis, university of Nottingham pp. 27-36, 1976.
  18. Jones, R. H., Frost heave damage and its prevention. In. Pell. P. S.(ed), DHPE, pp. 43-77, 1978.
  19. Jones, R. H., Frost heave of roads, Quarryerly jour. of engineering geology, vol. 13, pp. 77-86, 1980.
  20. Koopmans, R. W. R., Miller, R. D., soil freezing and soil water characteristics curves, Soil sciences society of America, vol. 30, pp. 685-690, 1966.
  21. Miller, R. R., Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils, Highway research record, vol. 393, pp. 1-11, 1972.
  22. Nagasawa, T., Umeda, Y., Effects of the freezing-thawing process on soil structure, Fourth ISGF, pp. 219-223, 1985.
  23. Penner, E., Frost heaving in soils, Proc. intl. conf. on permafrost, pp. 197-202, 1963.
  24. Penner, E., Umeda, T., The independence of frost heaving on load application, preliminary results, Proc. of intl. sym. frost act in soil, vol. 3, pp. 92-101, 1977.
  25. Qurvy, J. F., Results of triaxial compression test and triaxial creep test on an artificially frozen stiff clay, Pros. of the 4th intl. sym. on ground freezing vol. 11, pp. 207-212, 1985.
  26. Ruckli, R. F., Two and three dimensional ground flow towards the ice lenses formed in frozen ground, 2nd intl. conf. SMFE, vol. 111, pp. 297-304, 1984.
  27. Strphen, F. Frost heave, Jour. of geology, vol. 37, no. 5, pp. 221-229, 1929.
  28. \_\_\_\_\_, Frost and thawing of soils as factors in destruction of road pavements, Public roads, vol. 11, No. 6, pp. 120-136, 1930.
  29. Smith, L. B., Thaw consolidation tests on remoulded clays, M. Sc., Thesis of Alberta univ. Edmonton, pp. 24-32, 1972.
  30. Williams, P. J., Pore pressure at a penetrating frost line and their prediction, Geotec. vol. 16, No. 3, pp. 187-208, 1966.
  31. Young, R., et al, Soil properties and behaviour, Elsier, pp. 79-82, Amstteldam, 1975.
  32. Young, R. N., Murply, D., Short-term cyclic freeze-thaw effects on strength properties of a sensitive clay, 3rd, intl. sym. on ground freezing pp. 256-346, 1982.
  33. Young, R. N., Boonsin suk, P., Alternation of soil behaviour after cyclic freezing and the thawing, fourth intl. sym. on ground freezing, pp. 187-195, 1985.