

# 凍結·融解反復作用이 花崗岩風化土의 物理的性質에 미치는 影響(II)

## The Influence of Freeze-Thaw Process on the Physical Properties of Weathered Granite Soils (2)

柳 能 桓\*· 柳 然 澤\*\*  
Ryu, Neung Hwan · Ryu, Yeon Taek

### Summary

In this research program, special triaxial compression tests and dehydration-swelling tests under the condition of freeze-thaw process were conducted to show the effects of freeze-thaw process on the physical properties of weathered granite soil, and their results as follows :

1. Consolidation settlement of weathered granite soil mass was increased due to freeze-thaw process, and the initial tangent coefficient of dense state was higher than that of loose state.

2. Compression behaviour of soil was increased according to the decrease of freezing temperature, and when the freezing temperature was reached under  $-10^{\circ}\text{C}$ , the compression rate was not influenced by change of freezing temperature.

3. The experiments showed that the void ratio and permeability of soil were converged into their values of shrinkage limit, and the permeability was higher due to the freeze-thaw process and as the lower the freezing temperature.

4. The decrease of liquid limit was indicated as the lower the freezing temperature, and as more the freeze-thaw cycles, the moisture content was shown the lower side.

5. It was shown that the shrinkage was decreased by freeze-thaw process and not influenced by way of freezing temperature, but dehydration rate was higher.

### I. 序 論

土粒子 사이에 있는 空隙水の 溫度가 降下 되면 空隙水는 狀態變化가 일어나서 흙이 凍上作用을 일으킨다. 이때 얼음 포텐셜은 물보다 작기 때문에 水分의 上昇作用에 의하여 빙

층은 더욱 두껍게 成長되고 空隙水中的의 未凍結水分은 土粒子 周邊에 波狀으로 存在하면서, 土粒子 移動과 構造變化에 強力한 影響을 미치고있다. 이와같은 高密度의 組織構造는 一般的으로 塑性狀態로 되어있기 때문에 흙의 構造는 解水後에도 原狀態로 回復되지 않는다.

\* 江原大學校 農科大學

\*\* 農學振興公社 江原道支社

따라서 우리나라와 같이 冬季와 非冬季가, 뚜렷하게 區別되는 地方에서는 季節이 바뀔때 따라서 地表面의 流失및 乾燥에 따른 風蝕現象을 혼히볼수 있고, 凍結融解 作用의 反復에 따라서, 地盤의 凍上및 沈下로 土質構造物等에 重大한 結果를 招來한다. 即 農業工學上의 觀點에서 볼때, 흙의 凍結融解로 인한 土工水路 傾斜面의 崩壞, 傾斜農地의 土壤浸蝕, 圃場周邊의 交通便宜施設의 劣化, 其他水利施設物의 沈下및 破損等 많은 問題點을 惹起시킨다. 이와 같은 點을 勘案하여 今回研究에서는 江原道地方에 널리 散在한 花崗岩風化土를 對象으로하여 그의 凍結融解反復作用이 흙의 諸般物性에 미치는 影響을 辨明하여, 各種 農業基盤造成事業이나, 土質構造物의 設計및 施工, 維持管理의 指針으로 活用코져 한다. 凍結融解作用의 被害를 最少化 하기위한, 研究는 오래前부터 實施되어왔고,<sup>18, 21, 32, 36)</sup> 그 最初의 研究는 1925년에 소련에서부터 시작된 것으로 推測되고 있다. 이웃 일본에서는 1940年頃부터 寒冷地의 道路및 鐵道工學에 關聯된 研究가 이루어졌고<sup>21, 22, 23, 32, 37)</sup> 凍結融解作用에 對한 研究는 主로 地盤의 土質工學的 問題에 關한 研究가 主題를 이루었고, 熱的平衡에 의한 融解및 沈下로 傾斜地나 河床의 大規模 崩壞 對策에 對한것도 많았다. 其他 캐나다를 비롯한 스칸디비아의, 凍土地方에서도, 凍結問題의 重要性을 認識하여, 1960年代에 들어와서, 이에 關한 本格的인 研究가 시작되었다.<sup>25, 49)</sup>

이와關聯하여 溫度變化에 따른 흙의 彈性係數測定法이 開發되었고<sup>23)</sup> Hoekstra<sup>24)</sup>는, 凍結土의 非抵抗性과 溫度와의 相關性을 發表하였고, 古谷<sup>22)</sup>은 이와 類似한 研究를 한바 있으며, Tsytoich<sup>52)</sup>는 砂質土와, 粘性土의 凍結融解에 따른 壓縮舉動을 研究하였다. 最近에는

各種建設工學와, 터널굴착, 地下液化가스貯藏 및 地下鐵建設工學에 凍結工法을 利用한 예도 있으며<sup>50)</sup> 凍結에 따른 地表面의 上昇, 融解에 따른 沈下,<sup>53)</sup> 凍結土의 크리프 現象및 凍結浸入深<sup>24)</sup> 等에 對한 理論的 研究가 活潑하게 進行되었다. 또, 基礎地盤土의 物理的 觀點에서 도, 예컨대 不凍結空隙水와 그의 凍結에 따른 移動<sup>30)</sup>, 흙의 單位構造破壞<sup>7)</sup> 및 凍結土의 電氣的性質에 關한 研究結果도 많이 있다.<sup>49, 50)</sup> 八구<sup>21)</sup>는 火山灰土의 融解로 인한 地表面流失量 및 地溫等を 觀測하여, 土壤侵蝕을 檢討한바 있고, Nixon<sup>38)</sup>은 不攪亂土의 融解壓縮은 凍結時의 密度와 密接한 關係가 있다고 하였으며, Karlov<sup>29)</sup>는 融解沈下量을 規定하는 因子로써, 凍結土의 密度와 Atterberg 한계와의 相關性을 發表하였다. Donomarev<sup>41)</sup>도 類似한 方法으로 永久凍土의 融解沈下量을 測定하는 經驗式을 求한바 있다. 最近에 이르러 이와 關聯된 研究가<sup>8, 10, 13, 26, 43, 58)</sup> 많이 있으며 1989년 3월에는 Helsinki에서 흙의 凍結融解作用에 關한 國際 Symposium이 開催되어 많은 研究結果가 發表되었으나 우리나라에서는 아직도 이에 關한 研究가 거의 이루어지지 않고 있다. 특히 冬季와 非冬季가 交叉하는 우리나라의 氣候條件下에서는 凍結融解로 인한 地盤의 沈下및 凍上에 對한 Mechanism을 正確하게 파악하여, 經濟的 損失과 人命被害者의 災害對策을 確立해야 한다.

## II. 材料 및 方法

本研究에 使用된 試料는 代表的인 花崗土로써(地下 1.80m) 그의 性質은 Table-1 및 Fig. 1에 表示되어있다. 또 이들 試料는 特殊措置를 하여 運搬中攪亂되지 않도록 하여, Strathclyde

Table-1. Physical properties of soil used.

natural moisture content(%)	liquid limit (%)	specific gravity	mechanical analysis				percent passing # 200(%)	coefficient of uniformity	coefficient of curvature	USCS
			gravel	sand	silt(%)	clay				
15	13	2.6	29	40	25	6	11	180	2	SM

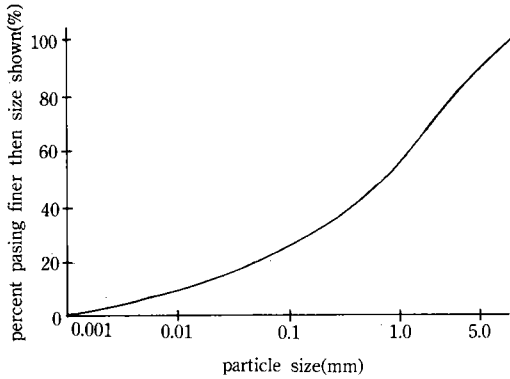
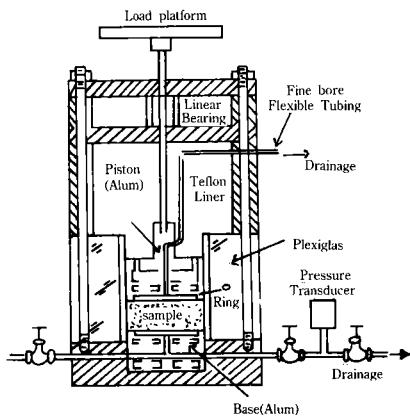


Fig. 1. Grain size accumulation curve of Soil.

大學 및 Nottingham大學의 凍結室에서 동결을 해를 반복처리한 三軸壓縮試驗과, 風乾處理 및 濕潤處理에 대한 乾燥-收縮-膨脹試驗을 實施하였다. 凍結融解壓密試驗은 Fig. 2와 같이, 내경 63.5mm의 Teflon plexiglas cylinder와 空隙水壓測定用 Burette에 連結시켜 實施하였으며, 上下盤과 piston에는 凍結融解作用을 調節하기 위한 電熱機 冷却裝置를 附着하고 溫度 및 融解와 凍結浸入深은 밀판과 試料表面에 附着된 Thermocouples에 의하여 測定하고, 浸入率은 5mm/hr, 溫度勾配는 0.3°C/mm로 調整하고 凍結後에는 試料의 兩端에 물을 自由로 接近시켜 30°C에서 融解시켰다. 乾燥-收縮-膨脹試驗은 試料를 充分히 空氣乾燥시킨후 다



- A. Heat Exchange chamber for water circulation
- B. Thermoelectric Cooling Devices
- C. No volume change saline

Fig. 2. Consolidometer for freezing and thawing.

시 수분을 加한 후 液性限界狀態로 반죽하여 閉鎖系의 Stenless用器를 使用하고, 凍結溫度는 0°C, -5, -10, -15, -20, -30°C를 1Cycle로 하여 凍結시키고, 乾燥는 +30°C, 濕度는 60%로 調整한 恒溫恒濕槽에서 實施하였다.

### III. 實驗結果 및 考察

#### 1. 凍結融解作用과 應力 및 變形과의 關係

흙의 壓縮舉動은 土粒子의 骨格構造 變化에 基因되는 부분이 크며, 따라서 構造單位의 接觸單位라든가 氣相의 消散 및 「土~水」系의 水理學의 條件에 左右된다.

Fig. 3은 凍結融解作用에 對한 壓縮舉動을 表示한 것으로 凍結融解作用에 의하여, 變形量이 增加되었고, 融解期에 있어서의 構造物의 沈下나 人工凍土의 融解에 다른 地盤의 沈下 現象을 充分히 豫測할 수 있다.

凍結融解作用에 의하여 土粒子의 構造가 再配列이 되고, 이때 接觸面은 水平方向이나 또는 凍結方向에 垂直으로 位置하게 된다.<sup>19)</sup> 따라서 Fig. 4와 같이 凍結土는 不規則한 接觸面을 갖는 非凍結土보다, 體積變化가 크게 되고, 조밀한 試料는 느슨한 상태의 것보다, 初期接線

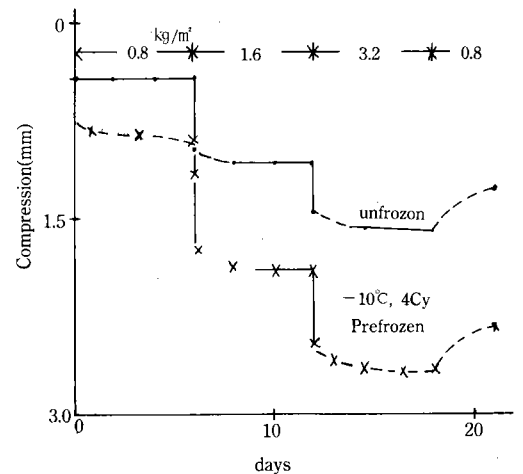


Fig. 3. Compression behaviour of the unfrozen and pre-frozen soil.

係數도 월등히 크게 나타났다. 이는, 凍結前線에서 空隙水壓이 減少되고 이에따라 有效應力이 增加되어, 흙의 構造的變形을 統制하고 또 凍結融解界面의 負壓은 空隙의 函數이므로 느슨한 경우보다 조밀한 狀態가 膨脹性이 크게 된다. 또한 그의 變形量이 2.5%에 達할때까지는 類似彈性變形을 하고 그 이후에는 緩慢한 塑性變形을 나타냈다. 이와같은 現象을 앞에서 論한 바와같이 흙의 構造配列性에 關係가 있는 것으로 Alkire<sup>1)</sup>와 其他研究者들도<sup>15, 34, 53, 54)</sup> 이와 類似한 實驗結果를 發表한바있다.

또 Fig. 5와 같이 凍結溫度에 따라서도 壓縮의 樣相이 變化되어 凍結溫度가 낮아 짐에 따

라서 空隙水의 相變換이 急速度로 進行되어 系全體의 氷晶量이 增大되고, 0°C ~ -10°C 사이에서 急速히 이루어지고, 그 以後에는 거의 一定하며 長澤<sup>50)</sup> 등도 실트질점토의 實驗에서 이와같은 結果를 얻은바 있다. Fig. 6은 壓密荷重과 壓密係數와의 關係를 表示한 것으로 壓密壓力이 높을때에는 凍結融解에 의한 影響이 認定되었으며, 凍結溫度가 낮고 凍結融解反復回收가 많을수록 현저하게 나타났다. 外力에 의해서 흙이 壓縮될때, 土粒子는 粒子間의 相互作用에 의하여 어느 配列을 保持하는 單位를 構成하며, 이들 基礎單位群은 다시 離合集散하여, 高度의 單位群을 形成한다. 이와같은 構造單位는 重層的 Model로 說明할 수 있고,

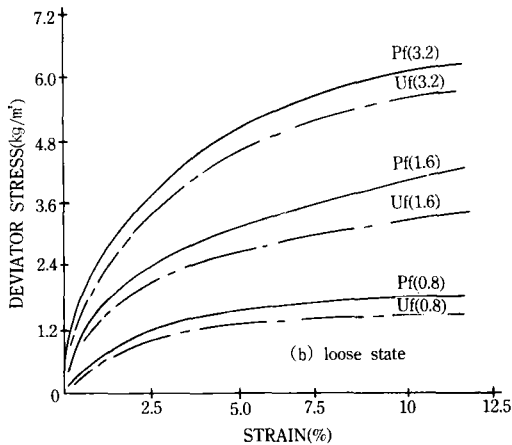
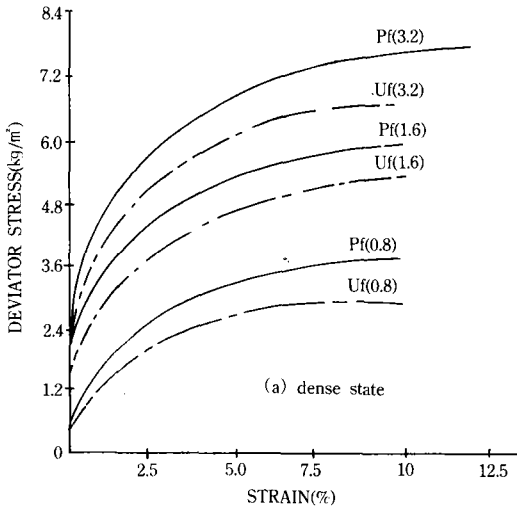


Fig. 4. Average Stress-Strain curves of Soil.

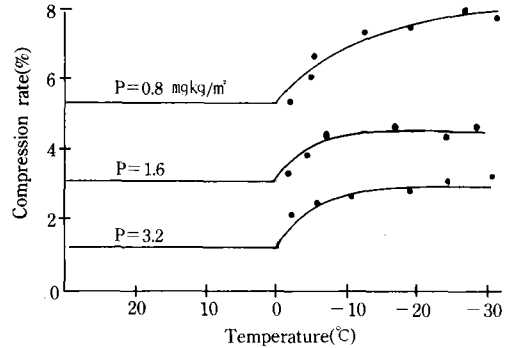


Fig. 5. Compressibility of soil by freezing temperature.

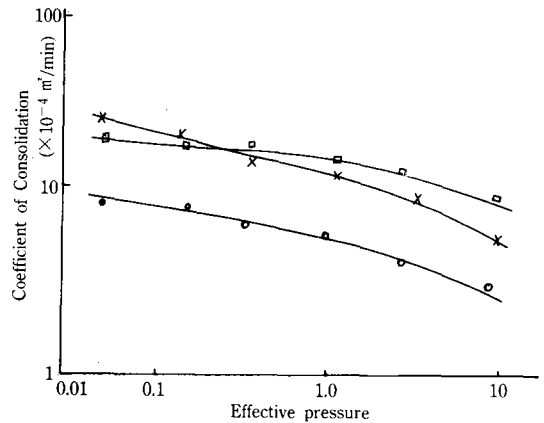


Fig. 6. Consolidation behaviour with freezing history.

그의 最少單位인 domain에서→cluster→ped의 段階로 發達된다.<sup>50)</sup> 構造가 잘發達된 흙은, 各段階의 單位構造가 重層的으로 構成되며 各單位構造內外에 保水 및 通水의 機能을 調節하는 空隙을 包含하여, 壓縮에 의한 構造變化 過程은, 壓縮初期에는 粗大空隙이 壓縮되고, 다음에 低次的 構造單位內空隙의 壓縮이 進行된다. 特히 凍結融解土에서는 凍結融解界面의 空隙水壓의 減少로 有效應力이 增加되었고, 氷核의 繼續的인 增加에 따라서, 土粒子는 氷晶사이에서, Cluster構造로 發達되고, 이때 氷晶內의 非凍結水는 cluster構造로부터 排出된다. 이와같은 應力增加와 排水로 因하여, 흙은 壓密이 더욱 促進되며, 계속하여, 融解가 시작되면, cluster는 融解水를 兩次吸收하여, 元來의 土壤條件보다 過壓密 狀態로 되고, 陽의 空隙水壓으로 轉換된다. Fig. 7은 凍結融解作用이 二次元 壓密에 미치는 影響을 表示한 것으로, 凍結融解作用에 의하여 二次壓密은 增加되고, 溫度에 의한 影響도 顯著하게 나타났다. 壓密過程에서 初期에는 高次的 構造單位間的 變化가 일어나

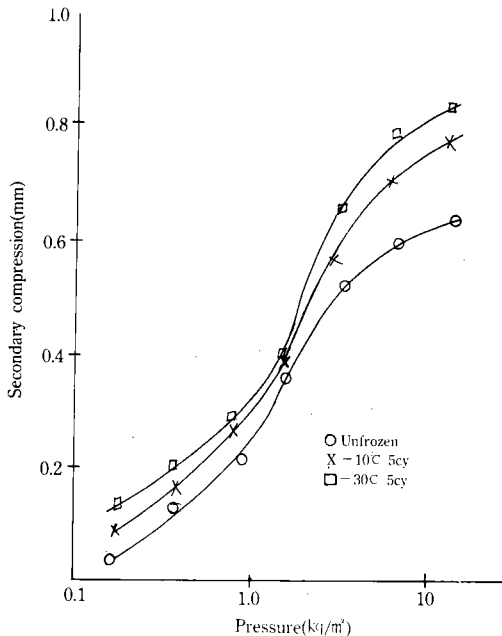


Fig. 7. Change of apparent secondary consolidation by freezing and thawing.

고 漸次로 低次的 構造單位壓密이 進行되며, 特히 二次壓密은 低次的 構造單位壓縮에 該當, 되므로 有機質土와 같은 塑性이 매우 높은 흙에서 二次壓密은 크게 發達된다.

## 2. 凍結·融解作用과 흙의 透水性

凍結融解後의 흙의 構造變化가 透水性에 미치는 影響을 究明하기 爲해서 有效應力下에서 的空隙水의 變化(Fig. 8)를 觀察할 必要가 있다. 有效應力이 作用應력과 같은 處女壓密曲線上의 "a"點에서는 흙이 壓密되었다가 試料가 凍結됨에 따라서, 물과 自由롭게 接觸되고, 全應力條件下에서, 吸收된물이 얼음으로 變化되어, 體積膨脹을 일으켜 "b"點까지 空隙比가 增加된다. 또 凍結中에 發達되는 負의 空隙水壓은 凍結前線바로 下部分의 有效應力을 增加시키고 이에 따라서 土粒子和 氷核의 不連續帶가 形成되어, b'點까지 過壓密된다. 이 領域을 "Rhythmically band"<sup>33)</sup>라 하며, 融解即時 不連續帶內의 有效應力經路는 b'에서 C로 되어 空隙水壓은 作用應력과 平衡狀態로 되고 a에서 c까지 空隙水壓은 急激히 減少된다. Fig. 9는 透水係數와 空隙比와의 關係를 나타내는 것으로 凍結融解作用에 의하여 試料가 過壓密되므로 透水係數는 減少될 것으로 推測되었으나 오히려 增加되었다. 이는 凍結中에 發生되는 負의 空隙水壓 때문에 垂直方向의 收縮龜裂이 發生되었다가 試料가 融解될때 本龜裂에

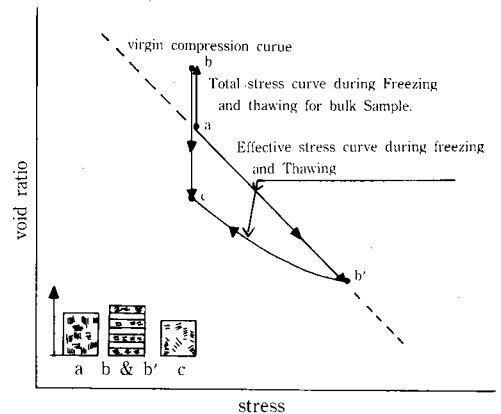


Fig. 8. Theorized thaw consolidation process.

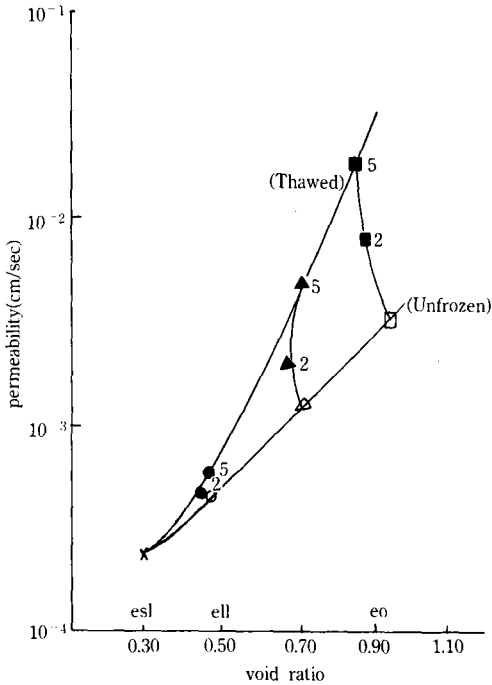


Fig. 9. Relationship between permeability and void ratio.

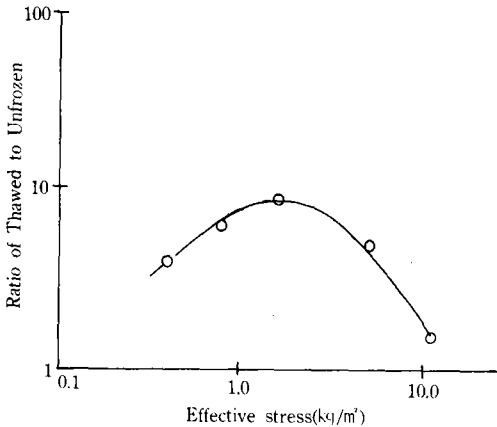


Fig. 10. Ratio of thawed to unfrozen permeability of soil.

따라서 移動하는 물의 流動抵抗性이 낮아지기 때문이며, 또 透水係數는 凍結融解反復回收가 增加됨에 따라서 크게 나타났고 그의 增加率은 有效應力이 1.6kg/cm<sup>2</sup> 근처에서 가장크게 되었고 이때 凍結侵入率은 3mm/hr에서 15mm/hr로 변하여 水分移動도 비교적 크게 이루어

지고 있었음을 알 수 있었다.

앞에서 論한바와 같이, 凍結融解反復에 따른 土壤構造變化는 空隙水의 狀態나 凍結要素에 左右됨을 알수있으며, Fig. 11은 凍結溫度에 따른 透水性的 變化를 表示한 것으로 透水係數는 凍結溫度가 낮아짐에 따라서 增加되었다. 이는 溫度가 減少됨에 따라서, 結氷境界面에서의 空隙水의 포션설이 낮아지고, 土粒子 組織單位사이의 外的空隙이 增加되어 氷晶量이 더욱 많아져서 土壤構造에 큰 影響을 미치게 되기 때문이다. 또한 凍結溫度가 0°C ~ -10°C 사이에서는 溫度가 낮아짐에 따라서 透水係數의 增加現像이 뚜렷하였으나, 그 以下の 溫度에서는 큰 變化가 나타나지 않았다. 이와같은 사실은 Fig. 5의 壓縮變化에서도 立證된바 있다.

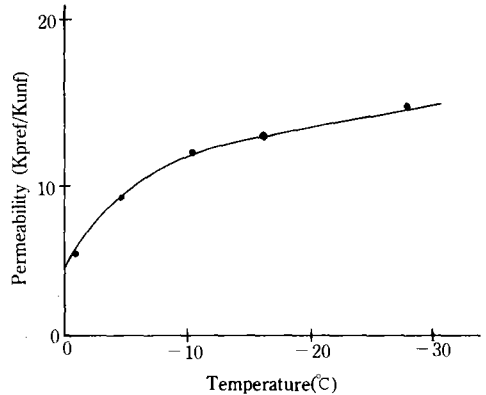


Fig. 11. Change of water permeability by freezing temperature.

### 3. 凍結融解作用과 液性限界

液性限界는 「土~水」系의 狀態를 反映하는 常數로써, 흙의 分類, 路床土로써의 適否判定 및 土壤의 風乾效果를 檢討하기 爲한 手段으로 使用되며, 흙이 凍結融解作用을 받으면 그의 「土~水」系에도 影響을 받으므로 液性限界도 變化된다고 생각할 수 있다.

Fig. 12는 液性限界와 溫度와의 關係를 表示한 것으로 液性限界는 凍結融解作用을 받아 減少되는 傾向을 보였고, 이와같은 傾向은 凍結溫度가 낮을수록 크게 나타났다. 이는 흙이

凍結되면, 「土~水」系内に 氷相이 形成되는 過程에서, 非自由水の 自由化가 이루어져, 系の 相變化에 따라서, 比表面積이 減少되어, 融解後에도, 原狀態로 復歸 되지 못하기 때문에, 「土~水」系은 初期狀態에 比하여, 疎水的으로 되므로, 液性限界는 低下되는 것으로 判斷된다. 이와같은 現象은 Fig. 13에서 凍結融解의 反復回收가 增加될수록 低含水比例으로 移行되는 것에서도 立證되고 있다. Fig. 14는 空隙比의 差異에 의한 影響을 排除하기 위하여 構造項( $E = \frac{e^3}{1+e}$ )을 導入하여, 물의 移動性과 液性限界와의 關係를 表示한 것으로 凍結融解에 따른 粗大構造의 形成은 液性限界가 큰 흙에서 比較적 낮게 나타났다.

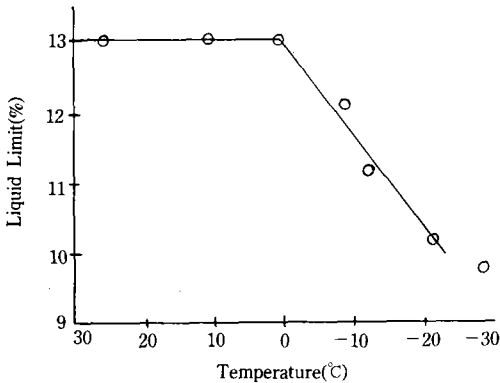


Fig. 12. Liquid limit of thawy soil for freezing temperatures.

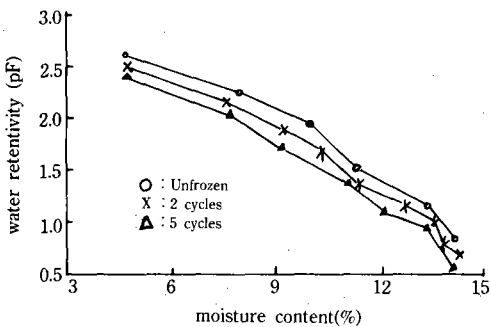


Fig. 13. The change of water retentivity by repetition of Freeze and thaw process.

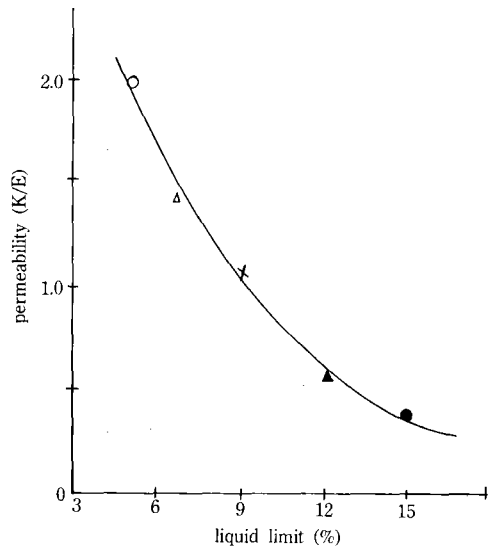


Fig. 14. The change of permeability by the nature of soil.

#### 4. 凍結·融解作用과 收縮舉動

흙이 凍結融解作用을 받으면, 保水力이 低下되고, 液性限界가 減少되며, 「土~水」系의 組織은 相對的으로 疎水的으로 되므로<sup>50)</sup> 이와 같은 「系」의 狀態變化는 흙의 收縮舉動에도 큰 影響을 미칠것으로 생각된다.

Fig. 15는 原地盤土와 반죽하여 風乾處理後 凍結融解反復한 흙의 收縮舉動을 測定한 것으로, 凍結溫度에 따른 收縮舉動은 認定되지 않으나 凍結融解作用에 의하여, 收縮舉動이 크게 減少되었고, 또 風乾攪亂의 境遇가 收縮量이 작았다. 따라서 風乾作用은 初期의 「土~水」系을 보다, 疎水的인 狀態로 變化시켜서 凍結融解作用에도 이와 類似한 影響을 미치고 있다. 凍結融解作用을 받은 흙은 空隙水의 脫水過程에서, 土粒子의 行動單位와 空隙水사이의 相互作用이 低下되고, 또 土粒子를 連行移動시키는 作用이 弱화되어 그의 收縮量도 작아 진다고 생각된다.

Fig. 16은 凍結融解狀態를 調査하기 爲해서 時間의 經過에 따른 含水比의 變化를 測定한 것으로 非凍結土보다, 凍結土의 脫水 速度가 빠르고, 凍結溫度에 의한 差異는 나타나지 않

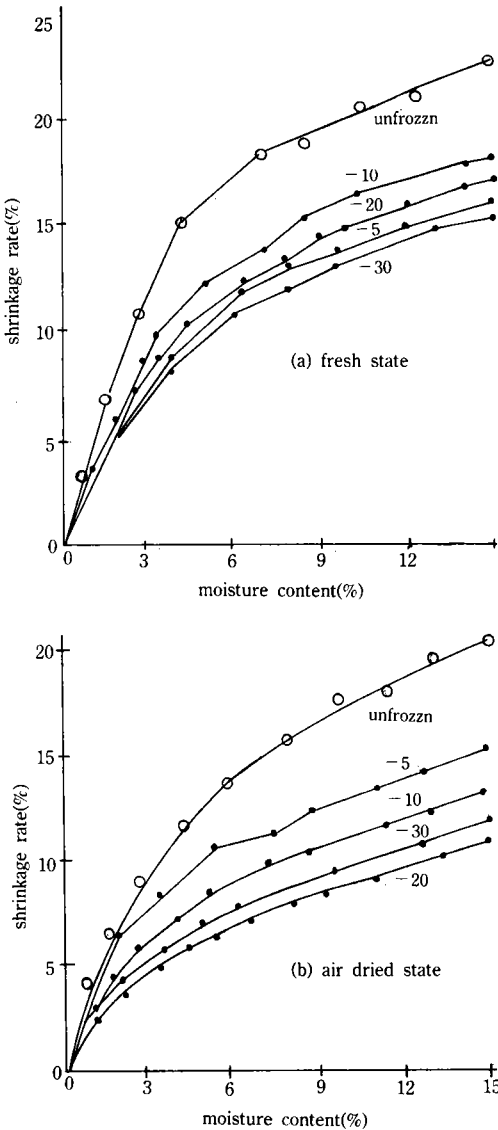


Fig. 15. Shrinkage curves for dehydration.

았다. 이는 Fig. 13에서도 論한바와같이 凍結融解土가 低含水比側에 屬하며, 따라서, 同一「土~水」系内에서도 空隙水의 拘束狀態가 弱화되기 때문이다.

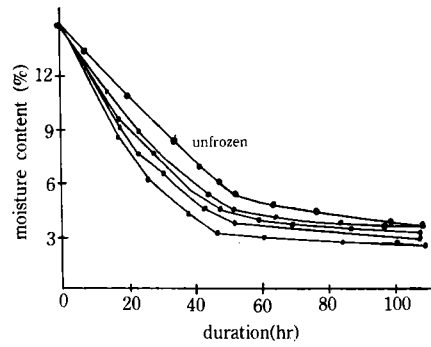


Fig. 16. Relationship between moisture content and time by way of dehydration.

#### IV. 結 論

凍結-融解作用이 花崗土의 物理的性質에 미치는 影響을 調査하기 爲해서 特殊構造로된 凍結融解測定用 三軸壓縮試驗과 乾燥-收縮-膨脹 試驗을 實施하여, 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 凍結融解作用에 의하여, 壓密은 增加되고 조밀한 狀態는 느슨한 경우보다 初期接線係數가 增加되었다.

2. 壓密量은 凍結溫度에 따라서 變하여 -10℃를 境界로하여 變化率은 거의 一定하게 되었고, 二次壓密量도 凍結融解反復作用에 의하여 增加되었으며, 溫度에 의한 影響도 顯著하였다.

3. 空隙比와 透水係數는 收縮限界의 값에 수렴되며, 凍結融解作用에 의하여, 透水係數는 增加되고 凍結溫度가 낮을수록 그의 값은 크게 나타났다.

4. 液性限界는 凍結溫度가 낮을수록 減少되었고, 凍結融解 反復回收가 많을 수록 低含水比比例로 되었다.

5. 收縮舉動은 凍結融解作用에 의하여 減少되고, 凍結溫度에는 影響을 받지 않으나 脫水速度에는 큰 影響을 미친다.



## 參 考 文 獻

1. Alkire, B. D., Morrison, J. M., Comparative "esponse of Soils to Freeze-thaw and repeated loading, Proc. 3rd Intl. Sym. on Groun Freezing, pp. 85-95, 1982.
2. Acyanu, K., Temperature dependencies of mechanical properties of soils subjected to freezing and thawing., Fourth Intl. Sym. on groun freezing, 1985 pp. 217-222.
3. Bouyoucos, C. J., A study of the causes of forst occurrence in muck soils, Soil science vol. 1922, pp. 39-42.
4. \_\_\_\_\_, Movement of soil moisture from small capillaries to large capillaries of soil upon freezing, Jour. of agricultural researc, vol. 5, 1923, pp. 79-84.
5. Broms, B. B., The bearing capacity of flexible pavements subject to frost action, H. B. R., vol. 258, pp. 138-140, 1963.
6. Broms, B. B., Yao, Y. C., Shear strength of a soil after freezing and thawing. Jour. of SMFD, vol. 90, No. SM4, pp. 1+25, 1964.
7. Benoit, G. R., Bornstein, J., Freezing and Thawing effects on drainge, Proc. soil science soc. A., vol. 34, No. 4, pp. 551-557, 1970.
8. 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.
9. 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. 389-393, 1981.
10. Chamnarlain, 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.
11. 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 fost action on roads, Oslo, vol. 3, pp. 39-46, 1973.
12. Chamberlain, E. J., Blouin, S. E., Frost action as a factor in enhancement of the drainage a and consolidation of fined-grained dredged materials, U. S. army, Eng. water, Res. program, tech. rep., D-77-16, pp. 59-63, 1977.
13. Castro, G., Christian, J. J., Shear strength of soils and cyclic loadings, Jour. of the geo. technical engineering division, ASCE, vol. 2, GT9, pp. 887-894, 1976.
14. Carbee, D. L., Yuanlin, Z., Triaxial compressive atrength of frozen soils under constant strain rates, proc. fifth Intl. conf. on groun freezing, vol. 1, pp. 1200-1205, 1988.
15. Czeratzki, W., Frese, H., Importance of Water in Foundation of Soil Structure, HBR, Symp. Vol. 40, pp. 200-211, 1958.
16. Everett, D. H., Haynes, J. M., Capillary properties of some model pore systems with special reference to frost damage, RL-LRMC, bull. new ser. vol. 27, pp. 31-38, 1965.
17. Frese, H., Czeratski, W., Importance of water in formation of soil structure, H. R. B., special rep., vol. 40, pp. 200-211, 1958.
18. Gardner, R., Some Effects of Freezing and Thawing on the Aggregation and Permeability of dispersed Soils, Soil. Vol. 60, pp. 437-443, 1945.
19. Gow, A. T., Williamson, T., Rheological Implications of the Internal Structure and Crystal Fabrics of the West Antarctic Ice Sheets as revealed by deep Core drilling at Ryrd Station, CEEEL, Rep. 35-76, pp. 29-38. 1978.
20. 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.
21. 八秋利助, 藤井重人, 融雪水及び凍土の融解水による土壤侵蝕について, 北大農學部, 邦文紀要 1-3, pp.216-221, 1953.
  22. 古各, 武井輝國, 凍結融解が土壤の田粒ル与ある影響について農土復系 6P, pp.13-21, 1977.
  23. 福田正己・井上正則: 凍土の動的性質について I. 低温科學, A 31, pp.245-259(1973)
  24. Hoekstra, B., McNeil, D., Electromagnetic Probing of Permafrost, North Am. Contrib., Proc. 2d Int. Conf. Permafrost, Washington, pp.517-526, 1973.
  25. Hayness, F. D., Karalius, Effect of Temperature on the Strength of Frizen Silt, CRREL, Report Vol.77, No. 3, pp.27, 1977.
  26. , H. L., Carbee, D., Influence of frost action on the bearing capacity of soils, H. R. B., HBR 304, pp.14-26, 1970.
  27. Jones, R. H., Frost heave of roads, Quarry-erly jour. of engineering geology, vol. 13, pp.77-86, 1980.
  28. , R. H., Frost heave damage and its prevention, In, Pell. P. S.(ed), DHPE, pp.43-77, 1978.
  29. Karlov, V. D., Determination of Relative Settlements of Thawing Frozen Caly Soils, SMFD, Vol. 15, No. 4, pp.254-255, 1978.
  30. 木下眞一; 土の凍結に伴う水分移動を求め三つの方法, 第12回自然災害科學總合シンポジウム要旨集, pp.313-314(1975)
  31. Koopmans, R. W. R., Miller, R. D., Soil freezing and soil water characteristics curves, Soil science society of America, vol. 30. pp.685-690, 1966.
  32. 三原筏秋: 降雨と土壤侵蝕, 農技研報告 A-1, pp.1-51(1951)
  33. Morgenter, N. R., Nixon, J. F., One dimensional Consolidation of Thawing, Canadian, Geot. Jour. Vol. 8, No. 4, pp.558-565, 1971.
  34. Martin, R. T., Rhythmic Ice Banding in Soil, Highw. Res. Board, Vol. 218, pp.11-23.
  35. Miller, R. R., Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils, Highway research record, vol.393. pp.1-11, 1972.
  36. 中谷宇吉郎・孫\*長\*: 凍土の實驗的研究. 低温科學 1. pp.37-51(1944)
  37. 同上: 凍土の\*\*について, 同上 pp.1-9(1944)
  38. Nixon, J. F., Morgenstern, N. R., Taw-consolidation Tests on Undisturbed Finegraded Permafrost, Can, Geot, J., Vol.11, pp.202-214, 1974.
  39. Nagasawa, T., Umeda, Y., Effects of the freezing-thawing process on soil structure, Fourth ISGE, pp.219-223, 1985.
  40. Oda, M., The Mechanism of Fabric Changes during Compressed Deformation of Sand, JSSMFE, Vol. 12, No. 2, pp.1-8, 1972.
  41. Porkhaev, G. V., Some data on the Permeability Coefficient of Thaw Ground, Mater. Lab. Issled, Merzlykh Gruntoved, Sg., Vol. 4, pp.100-103, 1961.
  42. Ponomarev, V. D., Sorokin, V. A., Determination of Settlement due to Thawing Out of Permafrost Soil, SMFE, Vol. 16, No. 6, pp.328-331.
  43. Penner, E., Frost heaving in soils, Proc. intl. conf. on permafrost, pp.197-202, 1963.
  44. Penner, E., Umeda, T., The independence of frost heaving on load application, preliminary results, Proc. of intl. syop. frost act in soil, vol. 3, pp.92-101, 1977.
  45. Qurvy. J. F., Results of triaxial compression test and triaxial creep test on an arti-

- ficially frozen stiff clay, Pros. of the 4th intl. sym. on ground freezing vol. 11, pp. 207-212, 1985.
46. Ruckli, R. F., Two and three dimensional ground flow towards the ice lenses formed in frozen ground, 2nd intl. conf. SMFE, vol. 111, pp. 297-3-4, 1984.
  47. Strphen, F. Frost heave, Jour. of geology, vol. 37, no. 5, pp. 221-229, 1929.
  48. \_\_\_\_\_, Frost and thawing of soils as factors in destruction of road pavements, Public roads, vol. 11, No. 6, pp. 120-136, 1930.
  49. Sayles, F. H., Low Lemperature Soil Mechanics, U. S. Army cold Reg. Eng. Lab. Tech. Note, Nanover, N. H. pp. 39-47, 1966.
  50. 長澤徹明, 凍結融解土の 2, 3の 物理的 性質について, 農土研 vol. 74, pp. 7-11, 1978.
  51. Smith L. B., Thaw consolidation tests on remoulded clays, M. Sc., Thesis of Alberta univ. Edmonton, pp. 24-32, 1972.
  52. Tsytoovich, N. A., The Mechanics of Frozen Ground, p. 116, McGraw-Hill, pp. 79-85, 1975.
  53. 高志勤; 凍土・沈下と施工対策, 施工技術 3(3), pp. 12-18(1970).
  54. Wood, J. L., Influence of Repetitions Freeze-thaw on Structure and Shear Strength of Leda Clay, Clarkson College of Tech, PH. D. Dissertation, p. 152, 1976.
  55. Williams, P. J, Pore pressure at a penetrating frost line and their prediction, Geotec. vol. 16, No. 3, pp. 187-208, 1966.
  56. Young, R., et al, Soil properties and behaviour, Elsier, pp. 79-82, Amstteldam, 1975.
  57. Young, R. N., Murply, D., Short-term cyclic freeze-thaw effects on strength properties of a sesitive clay, 3rd, intl. sym. on ground freezing, pp. 256-346, 1982.
  58. 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.