

# 凍結土의 壓縮強度에 관한 實驗的 研究

## Experimental Studies on the Compressive Strength of the Frozen Soils

柳 能 桓\* · 崔 重 暎\* · 柳 瑩 善\*\* · 曹 永 澤\*\*\*  
Ryu, Neung Hwan · Choi, Joong Dae · Ryu, Young Sun · Jo, Young Tack

### Summary

Upon freezing a soil swells due to phase change and its compression stress increase a lot. As the soil undergo thawing, however, it becomes a soft soil layer because the soil changes from a solid state to a plastic state. These changes are largely dependent on freezing temperature and repeated freezing-thawing cycle as well as the density of the soil and applied loading condition. This study was initiated to describe the effect of the freezing temperature and repeated freezing-thawing cycle on the unconfined compressive strength. Soil samples were collected at about 20 sites where soil structures were installed in Kangwon provincial area and necessary laboratory tests were conducted. The results could be used to help manage effectively the field structures and can be used as a basic data for designing and constructing new projects in the future.

The results were as follows :

1. Unconfined compressive strength decreased as the number of freezing and thawing cycle went up. But the strength increased as compression speed, water content and temperature decreased. The largest effect on the strength was observed at the first freezing and thawing cycle.
2. Compression strain went up with the increase of deformation speed, and was largely influenced by the number of the freezing-thawing cycle.
3. Secant modulus was responded sensitively to the material of the loading plates, increased with decrease of temperature down to  $-10^{\circ}\text{C}$ , but was nearly constant below the temperature.

\* 江原大學校 農科大學

\*\* 忠北大學校 農村熱에너지 研究所

\*\*\* 農漁村振興公社

키워드 : 凍上, 割線係數, 凍結-融解土, 水晶分離,  
強度回復比, 延性破壞, 脆性破壞, 壓縮變形,  
一軸壓縮強度

Thixotropic ratio characteristic became large as compression strain got smaller and was significantly larger in the controlled soil than in the soil treated with freezing and thawing processes

4. Vertical compression strength of ice crystal(development direction) was 3 to 4 times larger than that of perpendicular to the crystal. The vertical compression strength was agreed well with Clausius-Clapeyrons equation when temperature were between 0 to 5°C, but the strength below -5°C were different from the equation and showed a strong dependency on temperature and deformation speed. When the skew was less then 20 degrees, the vertical compression strength was gradually decreased but when the skew was higher than that, the strength became nearly constant. Almost all samples showed ductile failure.

As considered above, strength reduction of the soil due to cyclic freezing-thawing prosses must be considered when trenching and cutting the soil to construct soil structures if the soil is likely subject to the processes. Especially, if a soil no freezing-thawing history, cares for the strength reduction must be given before any design or construction works begin. It is suggested that special design and construction techniques for the strength reduction be developed.

## I. 緒 論

흙은 地質學的 循環過程을 거쳐 岩石이 보통 흙으로 변하고 이 흙이 다시 장시간의 運搬 堆積 高熱 및 壓縮作用을 받아서 岩으로 변하여 소생된 自然 資源中의 하나이다. 따라서, 그 구성은 매우 복잡하고 특히 흙은 氣壓, 水分, 빙하 등의 自然 環境條件에 따라서 그의 性質이 변화된다.

이와 같은 성질의 다양성 때문에 흙은 다른 土木材料와는 달리 內的 및 外的 영향인자가 매우 복잡하며 그의 構造變化와 역학적 특성은 다양하게 표출된다.

凍上土의 基本構成 요소는 土粒子, 氷, 空氣 및 土粒子 表면에 흡착된 不凍結 水分이며 이중 不凍結 水分은 이동성이 매우 강하여 흙의 동상에 가장 큰 영향을 미치며, 흙의 比表面積이 클수록 不凍結 水分의 양은 많아지고 凍上土 크게 된다.

이러한 地域에서는 凍上 및 凍上에 대처하기 위한 기술이 필요하게 된다. 특히, 최근에는

냉동기술의 발달로 지하구조물 설치를 위한 軟弱地盤의 凍結, LNG나 LPG와 같은 低溫液體를 저장하기 위한 지하탱크 시설 주변 지반의 동결 등 人工凍土와 관련된 문제, 그리고 寒帶地方에서의 鋪裝道路의 동상, 융해로 인한 路面沈下의 문제 및 凍結-融解의 반복으로 인한 山地斜面的 붕괴, 경지의 風乾化, 農業用排水路 시설물의 崩落 등 각종 토질구조물의 파괴문제를 수반하고 있다.

凍結土의 강도에 관한 연구는 구소련에서 1930년대부터 시작되었으며, 凍結土의 역학적 성질에 대한 본격적인 연구는 구소련의 시베리아 지방 철도공사의 凍上對策에서 부터 시작되었고, 미국, 캐나다 및 북부지방에서도 오래전 부터 흙의 凍結에 관한 연구가 행해지고 있으나, 1950년대에 진입해서야 그 연구의 기초가 마련되었다. 4, 5, 8, 11, 45, 46)

이와 關聯된 先行研究의 예로는 일찌기 眞井<sup>28)</sup>는 土壤의 凍結強度 및 融解에 따른 風乾現象을 구명한 바 있고, 高志<sup>13)</sup>는 凍結土의 強度에 영향을 주는 인자에 관한 연구를 한 바

있으며, 粘性 凍結土의 壓縮強度에 대한 온도, 13, 39) 反復荷重, 10, 15, 29) 凍結融解 依存性에 대한 研究<sup>1, 2, 21, 49)</sup> 및 凍結壁體의 耐熱強度 측정 실험을 한 바 있으며, 그외에도 路盤의 凍結-融解로 인한 지지력의 변화과정을 측정한 바 있다. 2, 30) 國內의 研究로는 柳<sup>37~39)</sup>을 비롯하여, 단편적인 研究<sup>24)</sup>가 있으나 砂質土에 關한 研究는 아직 發表된 바가 없다.

이상과 같이 흙의 凍結에 미치는 여러가지 내적 및 외적 요인에 관한 연구는 오래전부터 연구되어 왔다. 특히 각종 농업기반 조성사업이나 토질 구조물의 설계 시공, 현장유지관리상 凍結로 인한 피해의 최소화 측면에서 볼 때 이에 대한 연구는 앞으로 계속해야 할 필연적인 과제이므로, 이러한 관점에서 볼 때 본 연구의 학문적 의의는 지대하다고 하겠다.

## II. 材料 및 方法

### 1. 使用 材料

본 실험에서 사용된 재료는 강원도 지역 일원에 걸쳐 이미 시공된 토질구조물 설치지구에서 채취한 것으로서, 이들 시료의 대표적 토질특성은 Table-1과 같다.

### 2. 試驗方法

시료는  $\phi 50\text{mm} \times h 100\text{mm}$ 의 원주형 공시체 제작을 위해 底板이 부착된 아크릴 실린더에 시료를 물과 함께 넣고 다진 후  $-30^\circ\text{C}$ 까지 단계적으로 동결시켰다. 凍結-融解는 폐쇄식 장치로  $-30^\circ\text{C}$ 에서 72시간 凍結後 恒溫水槽에서 72, 昇化作用을 방지하기 위해서 공시체를 비닐종이로 밀봉한 후 72시간 이상 양생시킨 것을

1주기로 하였다.

凍結-融解 反復은 1, 2, 4, 8회의 4단계로 실시하고 각 단계마다 非凍結土와 비교하기 위하여 시료조건을 일정하게 조정하였다.

壓縮試驗은 재하속도 1%/min을 기준으로 하였으며 비교를 위해 여러가지로 변경실험하였다. 이 밖에 試驗은 KSF에 준하여 실시하였다. 또 壓縮試驗時에는 공시체와 접하는 재하 부분에 3cm 두께의 아크릴판을 부착하여 열전도에 의한 영향을 최소화하였다. 시료조건은 흙층( $r_t=1.600\sim 1.700$ ), 보통( $r_t=1.500\sim 1.600$ ), 느슨( $r_t=1.400\sim 1.500\text{t/m}^3$ )의 3종류로 조제하고 흙층의 경우에는 미리 침수시킨 흙을 물과 함께 조금씩 넣으면서 기포가 발생하지 않도록 충분한 다짐과 진동을 주었다.

## III. 實驗結果 및 考察

### 1. 凍結-融解 反復作用과 흙의 一軸壓縮強度와의 關係

凍結-融解作用에 의한 흙의 강도 손실은 주로 凍結前線으로 이동하는 수분의 동결로 析出氷晶이 발생하기 때문이다. 이와 같은 현상을 실험적으로 구명하기 위하여 실내에서 흙의 凍結 상태와 融解 상태를 인위적으로 반복하여 이들 결과를 상호 비교분석하였다.

#### 가. 凍結 및 凍結-融解土의 壓縮強度와 變形特性

흙의 凍結-融解에 따른 변형 특성을 구명하기 위하여 凍結-融解作用을 받았던 흙과 非凍結土의 一軸壓縮 特性和 變형과의 관계를 Fig. 1에 표시하였다. 凍結-融解土는 非凍結土에 비하여 완만한 곡선으로 되어 침단응력도 확실하게 나

Table-1. Properties of soil used

Consistency(%)			Specific gravity	Natural state of Moisture content (%)	Unit weight ( $\text{g/cm}^3$ )	Triaxial test	
LL	PL	PI				C( $\text{kg/cm}^2$ )	$\theta$
21	10	11	2.71	18	1.460	0.21	16

다나지 않아서 이 경우에는 변형율 10%일 때의 하중을 첨단응력으로 취하였다. 非凍結土에서 첨단응력 2.15kg/cm<sup>2</sup>에 대하여 1회의 凍結-融解로 약 18%의 강도가 감소하였고, 변형율이

0.5%까지는 매우 급속하게 강도 증가를 보이다가 그 이후에는 서서히 변화되고 1.5% 이상에서는 거의 일정하게 나타났다.

이는 析出氷晶의 성장으로 흙의 구조 자체가

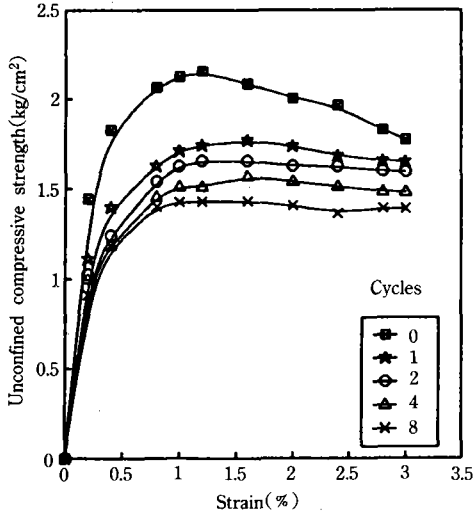


Fig. 1. Relationship between unconfined compressive strength and strain as a function of freeze-thaw cycle

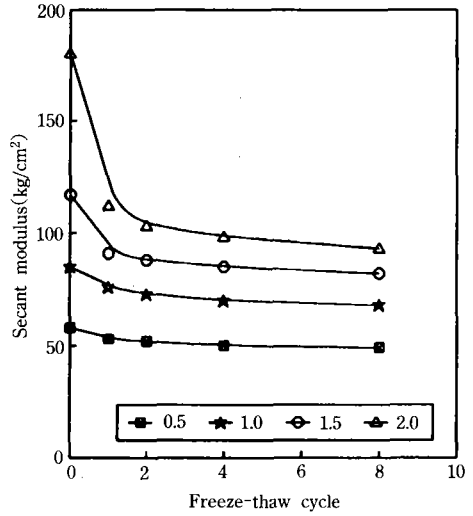


Fig. 2. Relationship between secant modulus and freeze-thaw cycle at 0.5%/min strain of frozen soil

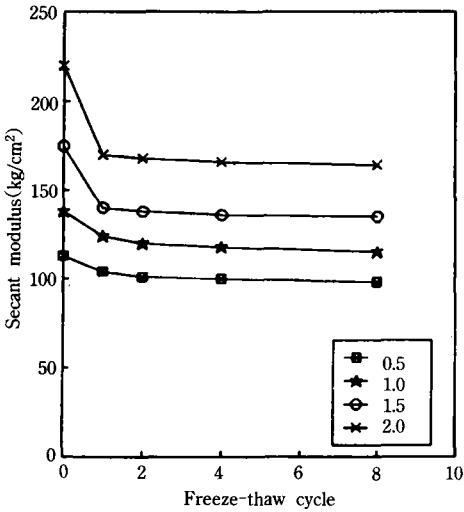


Fig. 3. Relationship between secant modulus and freeze-thaw cycle at 1.0%/min strain of frozen soil

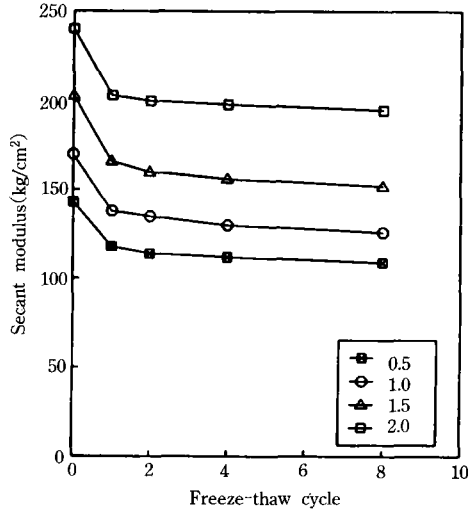


Fig. 4. Relationship between secant modulus and freeze-thaw cycle at 2.0%/min strain of frozen soil

변화되기 때문이다. 즉, 凍結中에 성장된 氷晶이 土粒子 주변에 2重層으로 구성된 吸着水膜을 끌어당겨서 氷晶은 점점 크게 발달<sup>28)</sup> 되고, 상대적으로 吸着水膜은 얇아져 粒子間의 전기적 포텐셜(potential)이 저하되고 또 氷晶分離 작용으로 土粒子 사이의 空隙이 증대되어 粒子間의 결합력이 약화되기<sup>31)</sup> 때문이다.

또한, 凍結-融解 작용을 받았던 흙은 非凍結土에 비하여 壓縮時에 剪斷面이 확실하게 나타났으며 파괴가 脆性化되는 경향을 보였으며, 이는 凍結時에 氷晶分離 현상 때문에 粒子間의 상대적 변위로 土粒子 간격이 벌어져서 공시체 내부에 미세한 균열이 발생하였기 때문이라 판단된다.

Fig. 2,3,4는 壓縮試驗에서 얻은 荷重-變位 곡선상에서 구한 割線係數와 凍結-融解 반복회수와 의 관계를 壓縮荷重별로 표시한 것이다. 이들 값은 壓縮速度를 크게 함에 따라 증가되었고 凍結-融解를 받은 흙은 非凍結土에 비하여 割線係數의 값이 매우 작게 나타났다. 또한 최초의 凍結-融解 작용으로 인하여 割線係數의 감소가 顯著하게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 5는 凍結-融解 작용이 강도 저하에 미치는 영향을 나타낸 것으로 含水比가 높을 수록 強度 低下量은 크게 나타났다. 이는 含水比가 높을수록 析出氷晶量도 많으며, 공시체 내부의 미세 균열도 상대적으로 많아지며, 또한 拘束水의 自由化가 非可逆的으로 일어나므로 自由水의 양이 많아지기 때문이라고 생각된다.

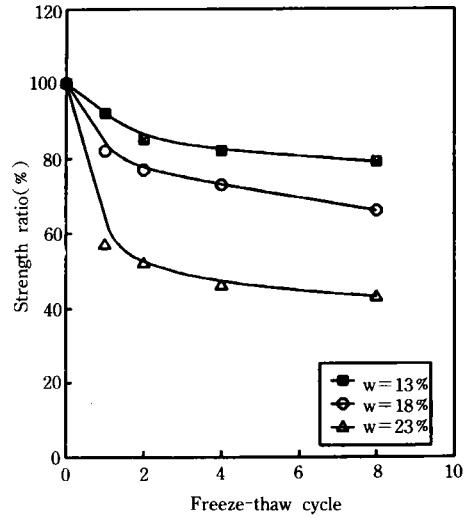


Fig. 5. Effect of freeze-thaw cycles on strength decrease as a function of moisture content

나. 凍結-融解土 内部의 水分移動 現象

凍結-融解 작용이 반복됨에 따라서 흙속의 물은 [土-水]系  $\xrightarrow{\text{凍結}}$  [土-氷]系  $\xrightarrow{\text{融解}}$  [土-水]系로 相變化<sup>8)</sup>가 일어나서, 공시체 내부에는 수분이동이 발생된다. 이와 같은 상황을 관찰하기 위하여 凍結後와 融解後에 있어서 수분분포 상황을 공시체의 중심부와 외곽부로 나누어서 측정하였던 바 그 결과는 Table-2와 같다.

凍結前에는 모두 균일한 含水比를 나타냈으나, 凍結後에는 외곽부의 含水比가 약간 증가되었다. 특히 凍結-融解 後에는 원상태로 되돌아가는 경향을 보였으며, 高含水比의 시료에서

Table-2. Comparison of moisture content between freeze and thaw state soil

Moisture	Treated Position	After freeze (%)	After Freeze-thaw (%)	Expansion rate after 1 cycle (%)
13%	Exterior	14.2	13.1	0.7
	Interior	12.09	13.1	
18%	Exterior	19.7	18.2	0.8
	Interior	16.20	18.1	
23%	Exterior	25.3	23.4	1.1
	Interior	21.8	23.1	

수분 이동량도 많았다.

이와 같은 수분 이동은 溫度勾配, 氷晶分離時에 발생하는 흡입력에 의하여 일어나는데,<sup>1, 2)</sup> 凍結時에는 중심에서 외곽부로, 融解時에는 반대로 양측의 함수비 차가 주로 기동력을 일으켜 외측에서 중심측으로 이동되는 것으로 생각된다.

흙이 평형상태인 [土-水]系를 유지하다가 凍結 작용이 일어나면 [土-水]系로 相變換이 발생된다. 이 때 최초에는 土中水 가운데 외측의 自由水가 凍結되고, 이어서 비교적 구속도가 낮은 拘束水가 자유화<sup>28,31,43)</sup> 된다. 土中水가 凍結됨에 따라 공시체내의 空隙도 팽창되고, 이 膨脹 정도는 최초의 1 사이클에서 가장 크게 된다. 이는 高含水比일수록 커지며, 이어서 融解作用에 의하여 재차 [土-水]系の 상태로 되돌아간 공시체 내부의 상태는 二重層의 변화, 체적 팽창, 미세균열의 발생 및 土粒子 구조 배열의 변화 등으로 역학적 특성이 변화를 초래하는 것으로 생각된다.

다. 凍結-融解土의 強度 回復

흙은 다른 土木材料와 달리 느슨한 상태의 흙에서도 시간이 경과함에 따라 강도가 증가되며, 특히 凍結-融解土에서도 저하된 강도가 시간이 경과함에 따라 回復된다고 하였다.<sup>16)</sup>

흙의 성형과 양생 단계에서 일어나는 강도 회복 특성을 고찰하기 위하여 함수비에 따른 強度 回復比와 養生日數와의 관계를 나타내 보면 Fig. 6, Fig. 7과 같다. 여기서 強度回復比 (Thixotropic strength ratio)는 양생후의 강도와 성형직후의 강도와의 비를 의미한다. 強度回復比는 변형율이 작을수록 크게 나타났으며, 養生日數의 경과에 따라서 증가하였다. 그리고 10주까지는 그 증가율이 크게 되고 그 이후는 어느 일정치에 수렴하는 경향을 보였다. 非凍結土가 凍結-融解土보다 強度 回復比가 현저하게 컸다.

또 함수비에 따른 凍結土와 非凍結土의 強度

回復 상태를 비교하기 위하여 養生日數 70일에서 強度 回復比를 Fig. 8, Fig. 9에 나타내었다. 함수비가 낮을 때에는 凍結土와 非凍結土가 비슷하였으나, 함수비가 높아짐에 따라서 현저한 차이를 보였다. 따라서 凍結-融解 작용에 의하여 粒子間에 물리-화학적 특성 변화를 초래하여

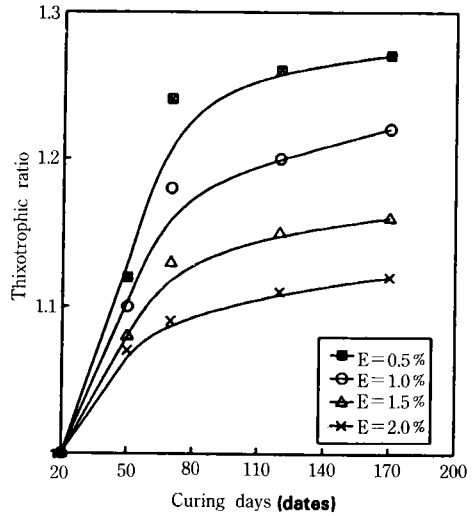


Fig. 6. Thixotropic strength ratio of unfrozen soils

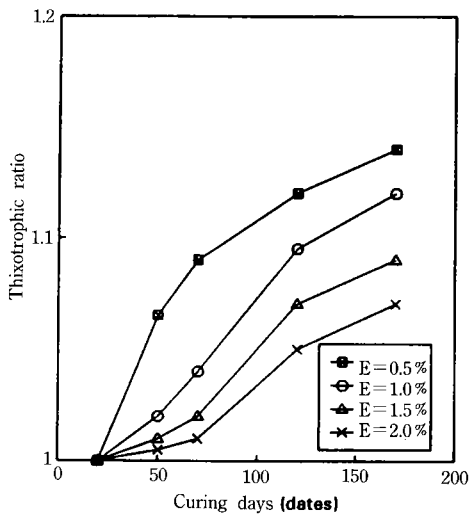


Fig. 7. Thixotropic strength ratio of frozen soils

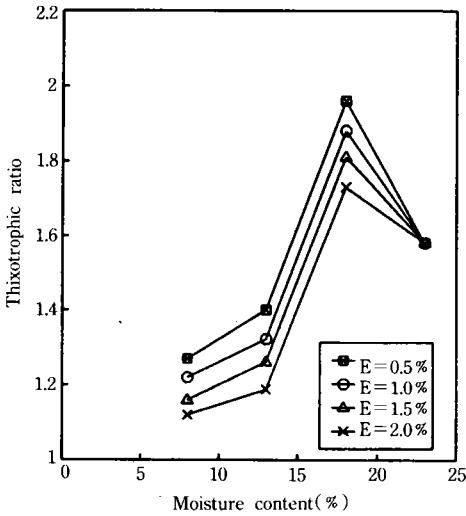


Fig. 8. Relationship between thixotropic strength ratio and moisture content of unfrozen soils as a function of strain rate

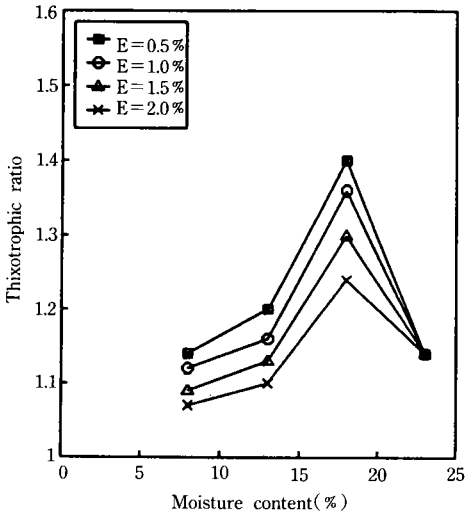


Fig. 9. Relationship between thixotropic strength ratio and moisture content of freeze-thaw soils as a function of strain rate

상은 특히 압축강도에 크게 반영되어 凍結土의 強度 回復比도 작게 나타났음을 알 수 있었다. 뿐만아니라 최적 함수비의 건조측에서는 함수비가 증가함에 따라 強度 回復比가 증가되는 경향을 보였으나, 습윤측에서는 감소되는 경향을 나타냈고 또 어느 일정한 값에 수렴하는 경향을 보였다.

## 2. 凍結溫度와 一軸壓縮強度의 關係

Fig. 10은 밀도 변화에 따른 一軸壓縮強度와 온도와의 관계를 표시한 것이다. 一軸壓縮強度는 온도가 낮아짐에 따라 증가되었다. 대략 0~ $-5^{\circ}\text{C}$  사이에서는 온도저하에 따라 급격히 증가되나 그 이하에서는 완만하게 증가되었다. 이때 一軸壓縮強度의 평균치는  $-5^{\circ}\text{C}$ 에서  $133.20\text{ kg/cm}^2$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서  $171.70\text{ kg/cm}^2$ , 그리고  $-30^{\circ}\text{C}$ 에서는 약  $264.50\text{ kg/cm}^2$ 으로서 이들 값은 촘 촘 > 보통 > 느슨의 순으로 되었다.  $-5^{\circ}\text{C}$  이하에서는 3경우가 모두 비슷한 경향을 보였으며,  $0^{\circ}\text{C}$  근처에서는 어느 일정치에 수렴하는 경향을

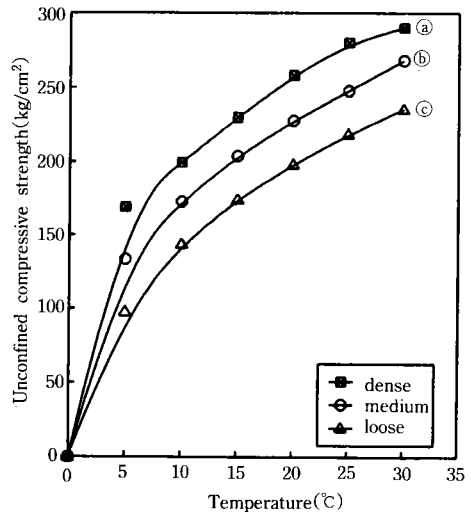


Fig. 10. Relationship between unconfined compressive strength and temperature of frozen soil as a function of strain rate

혹 속에 미세한 균열의 발생<sup>1,2)</sup>으로 養生日數가 경과하여도 회복이 둔화되었다. 이와 같은 현

보였다.

Tsytoich<sup>47)</sup>는 다음과 같은 一軸壓縮強度와 온도와의 관계식을 발표하였다.

$$q_u = a + b(-\theta)^n \dots\dots\dots(1)$$

여기서, a, b, n : 상수

(n=0.5 : 구소련 과학원의 연구치)

$\theta$  : 동결온도(°C)

비교를 위하여 최소자승법으로 구한 일축압축 강도는  $q_u = 8 + 42(-\theta)^{0.5}$ 으로 표시되었다. 즉 저온에서는 위식과 거의 일치되나 고온으로 갈수록 편차가 발생되었다. Fig. 11은 本試驗 결과와 n=0.5로 取한 (1)식과의 關係를 비교하기 위하여 종축에는 一軸壓縮強度, 횡축에는  $(-\theta)^{0.5}$ 를 取하고, 一点 쇄선은 시험결과이고 실선은 ①식의 값을 3가지 시료조건에 따라서 평행이동 시킨 것으로 느슨한 경우가 이론치와 근사값으로 되었으며 이에 대하여는 더 많은 資料의 보완이 필요하다.

### 3. 凍結方向과 壓縮強度와의 관계

Fig. 12는 析出氷晶의 성장방향에 따른 壓縮強度와 온도와의 關係를 나타낸 것으로서 氷晶의 성장방향의 一軸壓縮強度가 성장방향의 직각방향보다 3~4배 정도 크게 나타났다. 어느 경우에도 온도저하에 따라 一軸壓縮強度는 증가되었고, 같은 온도에서도 변형율에 따라 一軸壓縮強度는 큰 차이가 나며, 0° 근처에서는 Clausius-Clapeyron의 식에 의한 값과 거의 일치하였다.<sup>26)</sup> 또 변형율이 낮을 때와 직각방향에 대해서는 파괴시에 脆性破壞 현상이 나타나고, 변형율이 큰 성장 방향에 대해서는 대부분 延性破壞 현상이 나타났으며, 이와 같은 현상은 고온 부근에서 현저하였다. 즉, 온도가 저하됨에 따라 성장방향에 대해서는 증가기울기가 작으나 직각방향에 대해서는 거의 비슷한 증가현상을 보였는데, 모두 변형율과 방향성에 크게 의존하였다.<sup>14, 15)</sup>

또 이들 방향성의 의존도를 구체적으로 고찰하기 위하여 氷晶의 성장방향에 대하여 경사각

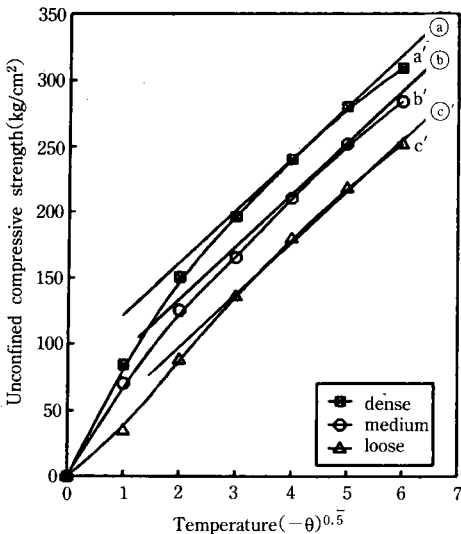


Fig. 11. Relationship between unconfined compressive strength and temperature

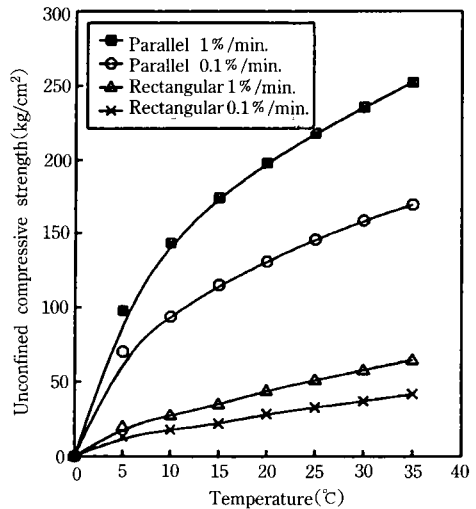


Fig. 12. Relationship between unconfined compressive strength and temperature as a function of ice crystal growing direction



을  $10^{\circ}\sim 90^{\circ}$  사이에서 시료를 조제하여 경사각과 一軸壓縮強度와의 관계를 나타낸 바 Fig. 13과 같다. 경사각이  $0^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 까지는 경사각의 크기에 따라 一軸壓縮強度가 감소되는 경향을 보였으나,  $20^{\circ}$  이상으로 되면 거의 일정하게 되었다.  $0^{\circ}$ 일 경우 즉 성장방향일 때는 모두脆性破壞 현상을 나타냈고, 그 이외에는 모두延性破壞 현상을 보였다.

이 경우 延性破壞는 변형상태와 균열의 결과로, 粒界面 滑動(sliding)에 의한 것이 지배적이라고 판단되며,  $20^{\circ}$ 를 경계로 하여 一軸壓縮強度의 양상이 뚜렷하게 구분되는 것은 粒界面 滑動의 각도, 마찰(힘, 면적, 방향)이 이 값을 한계로 하여 크게 변화되기 때문이다.

이 때, 氷晶을 구성하는 단위요소가 단면 결정체에서 다면 결정체로 넘어가는 한계(분계)점이  $20^{\circ}$ 임을 알 수 있다.<sup>11)</sup> 따라서 일차원 동결을 편광사진 관찰 결과 경사각이( $0^{\circ}\sim 20^{\circ}$ )에서는 각주상의 多面結晶 斷面을 갖는 큰 횡단면으로 되어 있고, ( $20^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ) 사이에서는 單面結晶 斷面을 가지는 작은 단면으로 되어

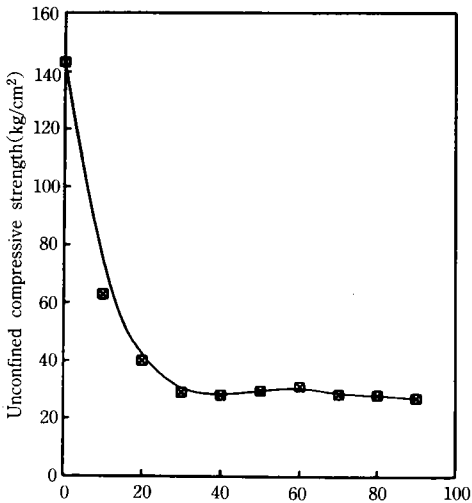


Fig. 13. Relationship between unconfined compressive strength and slope angle measured from the growing direction of ice crystal

있어 一軸壓縮強度는 일차원 동결의 경우가 훨씬 크게 됨을 유추할 수 있다. 이는 柱狀多結晶 氷의 一軸壓縮強度는 結晶의 크기의 평방근에

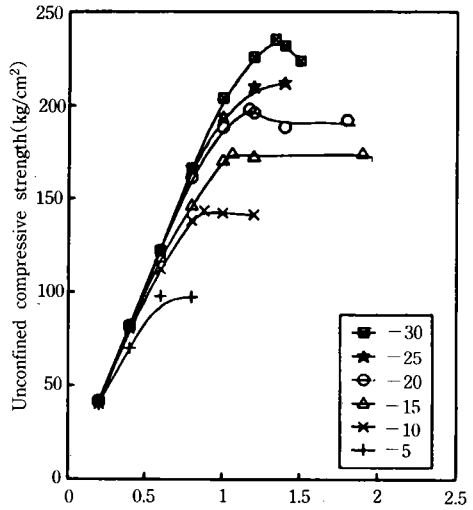


Fig. 14. Unconfined compressive strength and strain measured at the growing direction of ice lens as a function of temperature

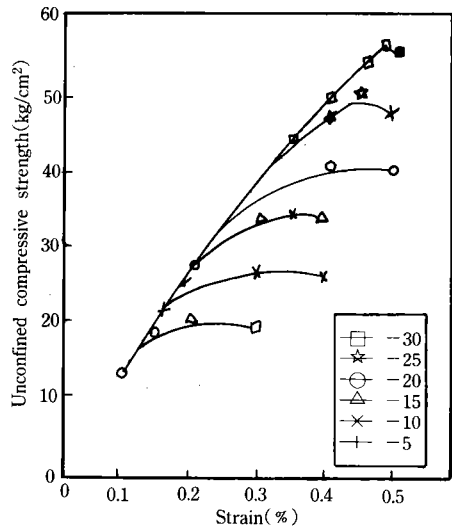


Fig. 15. Unconfined compressive strength and strain measured perpendicularly to the growing direction of ice lens as a function of temperature

비례한다는 선행 연구의 결과<sup>35)</sup>와도 일치된다.

Fig. 14, 및 Fig. 15는 온도변화에 따른 一軸壓縮強도와 변형율과의 관계를 나타낸, Fig. 14는 氷晶의 성장방향이고, Fig. 15는 성장방향에 직각방향의 변형을 나타낸 것이다. 성장방향에서는 온도저하에 따라 침단력의 값이 뚜렷하게 나타났다. 특히 비교적 큰 영하의 높은 온도에서는 침단부분에서 큰 폭발음을 내며 파괴되었고, 성장방향의 직각방향에서는 다소 완만한 변형을 나타낸다. 이들 현상을 대별하면 전자는脆性破壞를, 후자는 延性破壞를 나타내며 이와 같은 현상을 Fig. 12에서도 고찰된 바 있다.

#### IV. 結 論

本 研究는 이미 施工된 土質構造物의 설치지 구에서 시료를 채취하여 이 시료에 대한 凍結溫度 및 凍結-融解 反復作用이 흙의 一軸壓縮強度에 미치는 영향을 실험적으로 究明한 것으로 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 一軸壓縮強度는 凍結-融解 反復回數가 증가함에 따라 감소되고, 壓縮強度, 含水比 및 溫度低下에 따라 증가되었는데, 최초 1 사이클의 凍結-融解에서 그 영향이 가장 컸다.

2. 壓縮變形은 壓縮荷重強度가 증가함에 따라 크게 되고, 凍結-融解 反復回數에 크게 영향을 받았다.

3. 強度回復 특성은 壓縮變形率이 작을수록 크게 나타났다. 그리고, 非凍結土가 凍結-融解 土 보다 현저히 컸으며, 最適含水比 전후에서 가장 큰 값을 나타내었다.

4. 氷晶의 성장방향의 壓縮強度는 이와 직각방향 강도의 3~4배 정도 크고, 0~5°C 부근에서는 Clausius-Clapeyron의 식과 거의 일치하였다. 그러나 그 이하로 되면 이들 식과의 차이가 컸고, 溫度 및 變形速度의 의존성이 강하게 나타났다. 그리고, 경사방향이 20° 이하에서는 漸減되나 그 이상으로 되면 거의 일정하며 대

부분의 延性破壞 현상을 나타냈다.

이상과 같이 凍結-融解를 받기 쉬운 흙에서 凍結深 이하로 掘鑿을 하거나 切取工事時에 특히 과거에 凍結-融解 이력을 받지 않은 흙을 대상으로 할 때에는 凍結-融解로 인한 강도저하를 충분히 고려해야 하며, 土質構造物의 설계 및 시공시의 강도저하에 따른 대책공법을 강구해야 할 것이다.

本 研究는 1992년도 學術振興財團 自由公募課題 研究造成費에 의하여 研究되었음.

#### 參 考 文 獻

1. 青山清道, 小川正三. 1977. 凍結-融解を受けた土の性質, 土と基礎, Vol. 25, No. 7, pp. 41-46.
2. 青山清道, 1982. 凍結-融解を受けた土の應力と變形特性, 新潟大研究報告書, Vol. 4, pp. 111-120.
3. Beskaw, G. 1935, Soil freezing and frost heaving with special application to roads and railroads, Swedish Geology Society, No. 375, pp. 1-144.
4. Butkovich, T. R. 1954. Ultimate strength of ice, SIPRE, Research Paper 11, pp. 12.
5. Brams, B. B. 1963. The bearing capacity of flexible pavement subject to frost action, H. B. R., Vol. 258, pp. 138-140.
6. Brams, B. B. 1964. Shear strength of soil after freezing-thawing, J. of SMFU., Vol. 90, No. SM4, pp. 1-25.
7. Bernard, D. A. 1980. A mechanism for predicting the effect of cyclic freeze-thaw on soil behaviour, The 2nd Intl. Cont. Sym. on Ground Freezing, pp. 285-296.
8. Chamberlain, E. J. and C. Groves. 1972. The mechanical behaviour of frozen earth materials under high pressure triaxial test con-

- ditions, Geotechnique, Vol. 22, No. 3, pp. 469-483.
9. Chamberlain, E. J. 1773. A model for predicting the influence of freeze-thaw on the strength of clay, OCEO Sym. on frost action on road, Vol. 3, pp. 39-46.
  10. Gastro, G., and J. J. Christian. 1976. Shear strength of soil and cyclic loading, Journal of the Geot. E. GED. ASCE, Vol. 2, GT. 9, pp. 887-894.
  11. 高志勳, 山本英夫. 1979. 土の凍結に伴う析出氷晶の一軸壓縮強度, 第14回土質工學研究發表會, pp. 661-664.
  12. 高志勳. 1970. 凍土, 沈下と施工對策, 施工技术, Vol. 3, No. 3, pp. 12-18.
  13. 高志勳, 生頼孝傳, 山本英夫. 1981. 均質な粘土の一軸壓縮強度に関する實驗的研究, 土木學會 論文報告書, No. 315, pp. 83-93.
  14. 高志勳, 山本英夫. 1981. 均質な粘土-凍土の一軸壓縮強度に関する實驗的研究, 土木學會 論文報告書, No. 35, pp. 83-93.
  15. 高志勳, 山本英夫. 1981. 砂凍土の繰返し載荷による一蹴壓縮強度, 日本雪氷學會講演集, pp.141-142.
  16. Gray, D. H. and N. A. Kasheeri. 1877. Thixotropic Behaviour of Compacted clay SMFD. ASCE, Vol. 97, No. SM, pp. 193-207.
  17. Gandahl, R. 1979. Plastic form insulation of roads, VTI, Report 214A, pp. 17-18.
  18. Hayner, H. L. and D. Carbee. 1970. Influence of frost action on the bearing capacity of soils, H. R. B., HBR304, pp. 14-26.
  19. Hoekstra, B. and M. McNeil. 1973. Electromagnetic probing of permafrost, North Am. Contib. Proc. 2nd Intl. Conf. Permafrost, pp. 517-526.
  20. 福田正己, 井上正則. 1973. 凍土の動的性質について(I), 低溫科學, A-31, pp. 245-259.
  21. 古谷, 武井輝國. 1977. 凍結-融解が土壌の團粒に與える影響について, 農土聯誌, Vol. 60, pp. 13-21.
  22. Haynes, F. D. 1977. Effect of temperature on the strength of frozen silt, CRREL, Report Vol. 77, No. 3, pp. 27.
  23. Hukuda, M. 1986. Effectiveness of frost heave prevention method in road prevention method in road pavement at high mountainous arc, JSSMFE, Vol. 36, No. 40, pp. 25-30.
  24. 洪成完, 김영진. 1992. 흙의 同上物質에 관한 실험연구, 大韓土木學會, 학술발표회 논문집 제1권 99, 425-428.
  25. 井上正則. 1975. 凍土の壓縮強度と 動的特性, 低溫科學, 物理論, Vol. 33, pp. 243-253.
  26. 生頼孝傳, 古誌勳. 1982. 土の凍結に伴う析出氷晶の一軸壓縮強度, 雪氷學會誌, Vol. 43, No. 2, pp. 83-96.
  27. Isida, H. 1986. Prevention of frost damage by mixing calcic, Sym. on Ground Freezing, JSSMFE, pp. 89-92.
  28. 眞井. 1957. 凍土の強度について, 北大工學部研究論文集, No. 16, pp. 45-68.
  29. Kaplar, C. W. 1971. Some strength properties of frozen soil and effect of loading, CRREL, Special Report(159), pp. 27.
  30. 木下誠一, 福田正己. 1977. 冷蔵倉庫床下の多年凍結について, 低溫科學, 物理論, No. 35, pp. 295-306.
  31. 小川深典. 1978. 純氷及びKCLを含む多結晶氷の破壊強度, 低溫科學, 物理論, No. 36, pp. 1-9.
  32. Karlov, V. D. 1978. Determination of relative settlement of thawing frozen clay soils, SMFD, Vol. 15, No. 4, pp. 254-255.
  33. Kubo, H. 1986. Control of frost penetration in road shoulders loads, Geot. Eng., TRR.

- 1089, pp. 28-30.
34. Muguruma, J. 1969. Effects of surface condition on the mechanical properties of ice crystals, *British J. Appl. Phgs. Ser. 2.*, pp. 1517-1525.
  35. MacMaster, J. B. 1987. The role of extruded expanded polystyrene in Ontario's provincial transportation system, spanning in cold area, Report Session 3, Ottawa, pp. 93-104.
  36. Nixon, J. E. and N. R. Morgen. 1974. Thaw-consolidation tests on undisturbed from grained permafrost, *Con. Geot. Jo., Vol. II*, pp. 202-214.
  37. 류능환 외 2인. 1990. Polystyrene 材를 이용한 凍上性地盤의 斷熱, *한국농공학회지* 32-2, pp. 53-59.
  38. 류능환 외 2인. 1991. 동결 및 동결·융해 작용을 받는 점성토의 강도와 그의 변형거동, *한국농공학회지* 33-2, pp. 112-119.
  39. 류능환 외 2인. 1992. 반복하중, 온도변화 및 초기조건의 충전점토의 구조변화와 역학적 특성에 미치는 영향, *한국농공학회지* 34-4, pp. 69-79.
  40. 長澤徹明. 1983. 農業土木における凍害とその對策(その2), *農業土木學會誌*, Vol. 51, No. 3, pp. 237-244.
  41. Porkhaev, G. V. 1961. Some data on the permeability coefficient of thaw ground matter, *Lab. Issled, Merzlykh. Gruntoved, Sg. Vol. 4*, pp. 100-103.
  42. Stephen, F. 1930. Frost and thawing of soils as fasten of destruction of road pavements, *Public Road, Vol. II, No. 6*, pp. 120-136.
  43. Sayles, F. H. 1966. Low temperature soil mechanics, *U. S. Army Cold Reg. Tech Note*, pp. 39-47.
  44. Schwarz, J. 1970. The pressure of floating ice-fields, *I. A. HR. Symposium, Paper 6, No. 3*, pp. 1-12.
  45. Taber, S. 1929. Frost heaving, *J. of Geology*, No. 37, pp. 428-461.
  46. Tsytoich, N. A. 1969. Bases and foundation on frozen soils, *H. R. B. Special Paper, No. 58*, pp. 28.
  47. Tsytoich, N. A. 1975. The mechanics of frozen ground, *McGraw-Hill*, pp. 79-85.
  48. Vialov, S. S. 1962. The strength and creep of frozen soils and calonlations for ice-soil retaining structures, *U. S. Army Tech. Paper, No. AD-484093, CRREL*.
  49. Young, R. N. and S. P. Boonsin. 1982. Alter-nation of soil behavior after cyclic freezing and the thawing, *4th Intl. Sym. on Ground Freezing*, pp. 187-195.