

## 凍結・融解を受けた粘性土の微視的構造変化

青山清道\*・風間秀彦\*\*・福田 誠\*\*\*

Microstructural change of cohesive soils subjected to freezing and thawing  
by

Kiyomichi AOYAMA, Hidehiko KAZAMA and Makoto FUKUDA

(Abstract)

This paper is concerned with the change in soil structure on specimens subjected to freezing and thawing.

The samples used for the experiments were undisturbed volcanic ash cohesive soils collected from below the frost depth at Karuizawa Plateau, Nagano Prefecture, where various types of frost damage have occurred.

Results obtained indicate significant change in soil structure as evidenced by the scanning electron micrographs taken on soil samples after freeze-thaw cycles.

Key words : volcanic ash cohesive soil, micro structure, freeze-thaw

キーワードズ : 火山灰質粘性土, 微視的構造, 凍結・融解

### I ま え が き

近年, 太平洋側の大都市の地価高騰も手伝って, 積雪寒冷地や山岳地帯でのリゾート施設の建設や宅地造成などが活発に行われている。車の普及により, 山間地の道路でも完全除雪が当然になった今日, 雪の断熱作用が失われ, 凍上による被害が続発している。

冬期に外気温が0℃以下になると, 地表面付近の間隙水が凍結し始め, 凍結面が時間とともに土中に進行する。その際, 土質, 地下水等の条件により, 凍結面に向かって水が移動したり, 凍結することによって, アイスレンズと呼ばれる氷層が地表面に水平に形成される。このように未凍結部分から凍結面に水分を吸収したり, 土中の水が凍結することにより, 自重等の外圧に抗して地盤の膨れ上がる現象が凍上であり, 道路の舗装面等に亀裂を生じさせる原因となる。また, 春期には凍結した地盤も融解作用によって軟弱化する。

土の低温特性については, 凍上による災害防止や凍結工法などの関係から理論的にも実験的にもある程度明らかにされてきている。しかしながら, これらの研究は凍上や凍結に伴う土の物理的, 力学的な性質の変化を土質工学的な現象面から究明したものが多く, ミクロ的には肉眼レベルによるアイスレンズの成長程度であり,  $\mu\text{m}$ オーダーの研究はほとんど見あたらない。ここでは, 凍結・融解に伴う粘性土の微視的構造変化を明らかにするとともに, 凍結による物理的性質の変化についてもミクロ的な面から検討したのでその概要を報告する。

\*新潟大学積雪地域災害研究センター \*\* 埼玉大学工学部建設基礎工学科 \*\*\*三井建設技術研究所

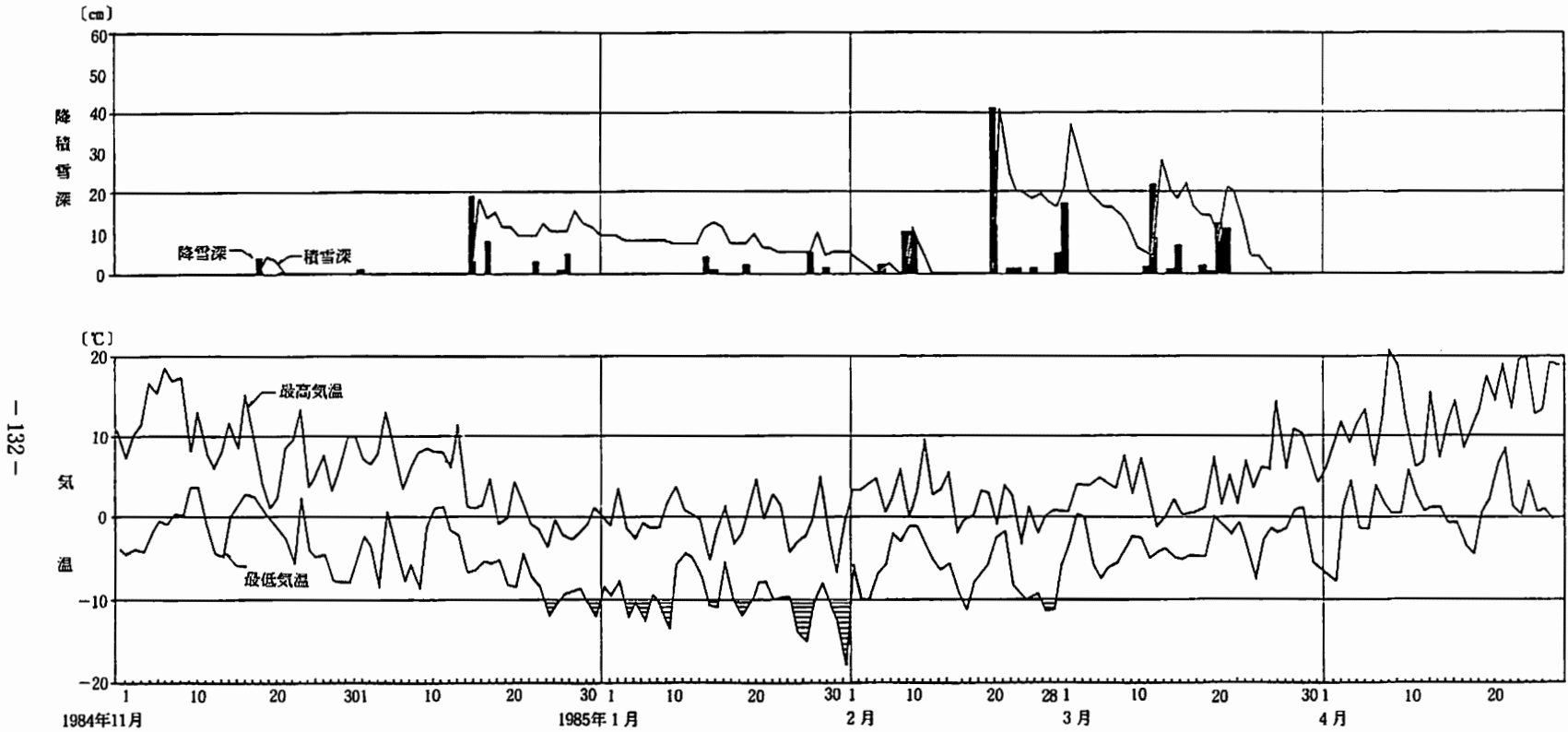


図-1 実験期間の気象（軽井沢測候所）

Fig. 1 Meteorological elements observed at Karuizawa Meteorological Station (1984-1985).

## II 試料及び実験概要

長野県軽井沢町の標高約1,000 mの山麓地域に広範囲にわたって分布する火山灰質粘性土（ローム）は冬期間の凍結と春期の融解の影響を強く受けて凍上被害を生じている。図-1に、1984年11月から1985年4月までの軽井沢測候所の気温ならびに降積雪深の経時変化を示した。測候所は当該実験地の近くにあり、北緯36°20′、東経138°33′に位置し、その標高は999 mであるため、実験場所の気象条件に類似と考えて解析の参考にした。

実験に使用した試料は、別荘地建設現場で、凍結・融解作用を受けていないと考えられる地表面下2 m付近の火山灰質粘性土をシンウォールサンプラーを用いて不攪乱状態で採取した。

この試料を実験室内で24時間凍結した後、恒温恒湿室で24時間融解する。この行程を1サイクルとした。凍結時の温度は、この付近の最低気温を想定して、-15℃凍結とし、人工的に数回の凍結・融解を繰り返した試料を用いた。室内の凍結方法は熱源をほぼ一次的に与え、水の供給をオープンシステムとした。凍結・融解を繰り返した試料と未凍結の試料について、走査型電子顕微鏡を用いて微視的構造の変化を調べた。

なお、比較参考のために、実験地に分布している黒ボクや他所の沖積シルトの乱さない試料についても同様の実験を行った。

## III 微視的構造

乱さない試料と凍結・融解作用を数回繰り返した後の試料の顕微鏡写真を比較する。一般に乱さない粘性土の微視的構造は個々の粒子が単独で存在することはまれであり（写真-1、写真-3参照）、複数の土粒子が集まってベッドを形成している。そして、自然に堆積した土は比較的丸みをもったベッドが多く、その配列は整然として安定な構造のことが多い。これを繰り返すとベッドも破壊されて小さなベッドが散乱した構造になるのが大きな特徴である。

凍結・融解後の試料を肉眼で見ると、ロームと黒ぼくはアイスレンズ生成による大きく開いた隙間がないが、ヘアークラックを多数生じ、外観的に粗粒化したように見受けられる。一方、シルトは $\mu\text{m}$ オーダーのオープクラックが顕著に発生している。凍結後の微視的構造は乱さない試料に比較して局部的に大きく変化する。すなわち、写真-2、写真-5に顕著に見られるように直径数 $\mu\text{m}$ ~40 $\mu\text{m}$ 程度のパイプ状の孔が多く発生し、この細孔の周りに数 $\mu\text{m}$ の隙間が発達することが多い。この傾向はシルトに明瞭に見られるが、黒ぼくはごくわずかに認められる程度であり、また、ロームは両試料の中間程度である。黒ぼくは透水係数が非常に大きく、ロームは火山灰であるので潜在的に隙間が多く、凍上に伴いシルトのような顕著な現象が生じにくいと思われる。このような細孔と隙間は水分移動の水みち、あるいはアイスレンズのために生じたと考えられ、これらの発生程度は凍結環境、凍結条件、さらに透水係数などに大きく依存しているといえる。凍結前と凍結後の顕微鏡写真を比較するとわかるように、凍結によってベッドが破砕されてより小さく、しかも固

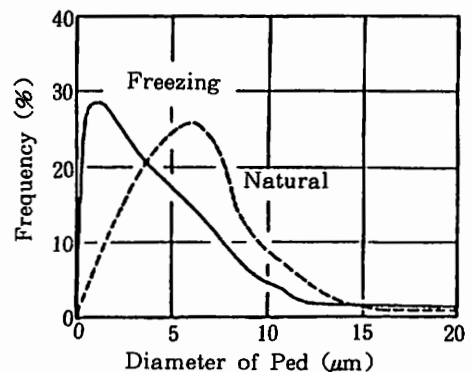


図-2 ロームの平均ベッド径変化  
Fig. 2 Relationship between frequency and diameter of ped.

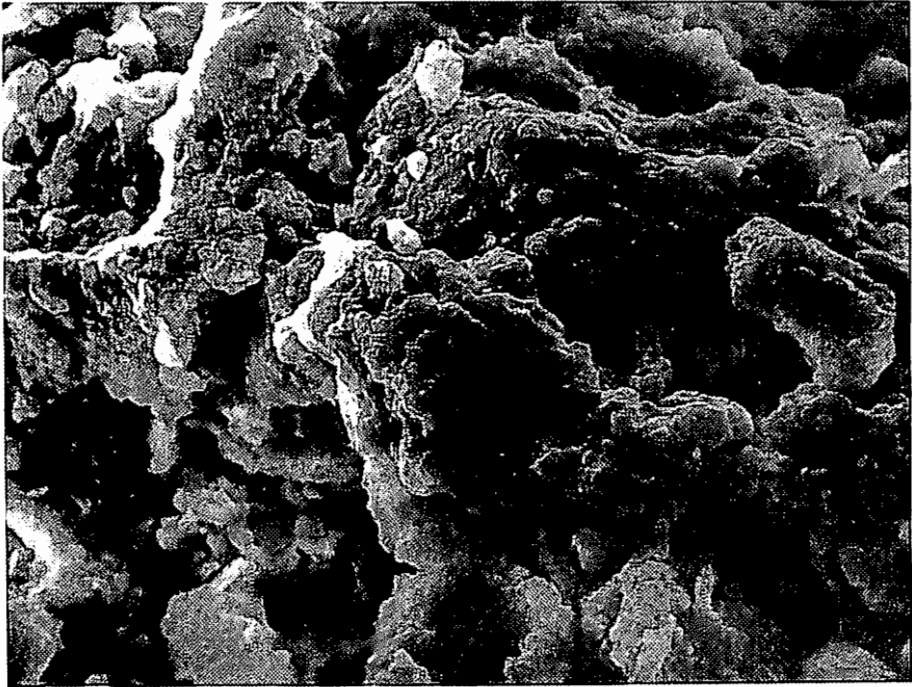


写真-1 火山灰質粘性土の電子顕微鏡写真(未凍結) ×1000  
Photo. 1 Electron microscop photograph of volcanic ash cohesive soil  
(before freezing).

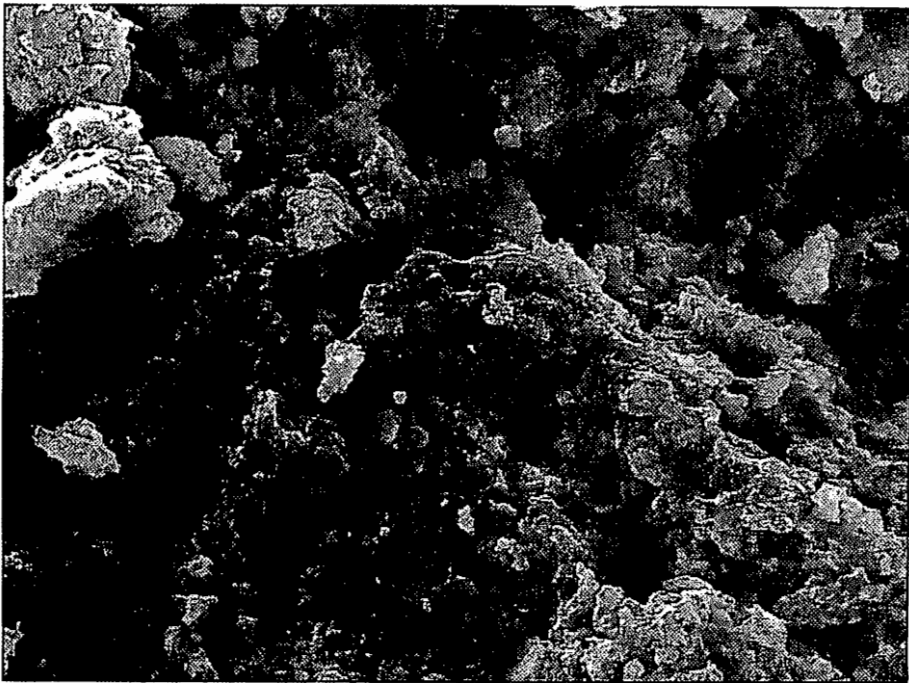


写真-2 火山灰質粘性土の電子顕微鏡写真(凍結・融解後) ×1000  
Photo. 2 Electron microscop photograph of volcanic ash cohesive soil  
(after freezing and thawing).

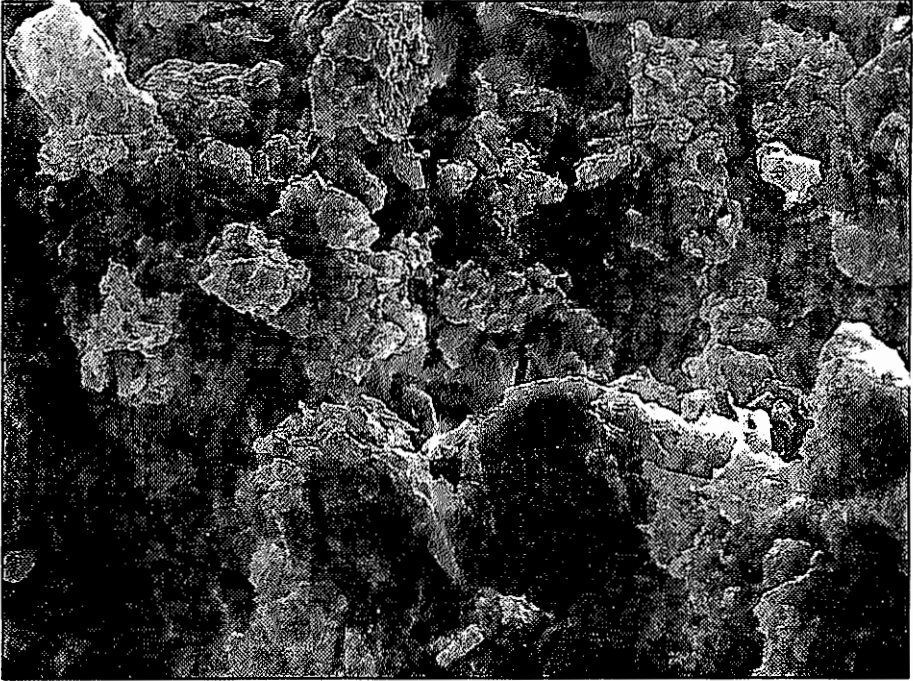


写真-3 黒ぼくの電子顕微鏡写真(未凍結) ×1000  
Photo. 3 Electron microscop photograph of Kuroboku soil (organic cohesive volcanic ash soil), (before freezing).

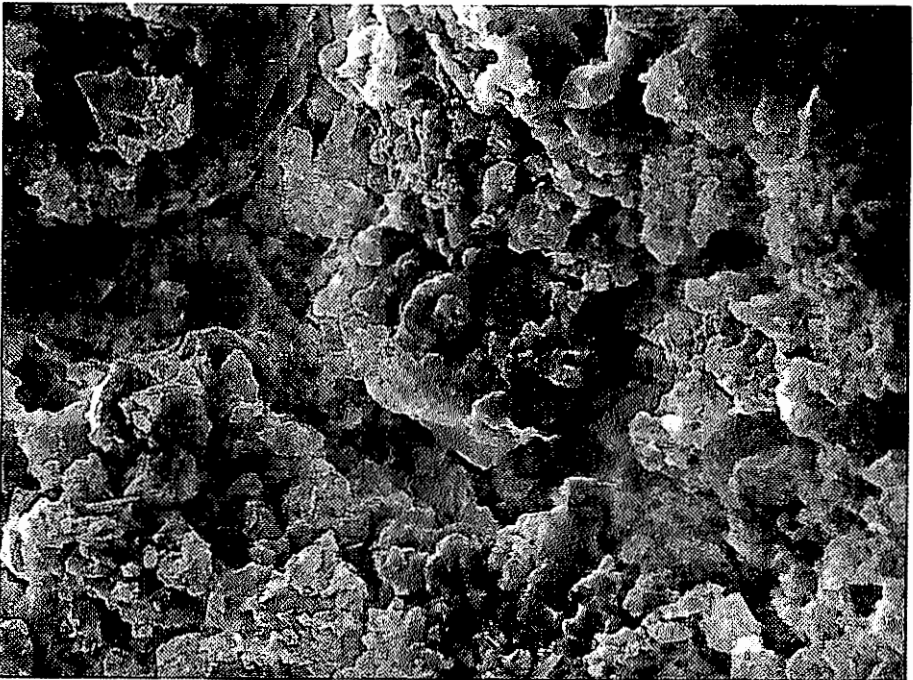


写真-4 黒ぼくの電子顕微鏡写真(凍結・融解後) ×1000  
Photo. 4 Electron microscop photograph of Kuroboku soil (organic cohesive volcanic ash soil), (after freezing and thawing).

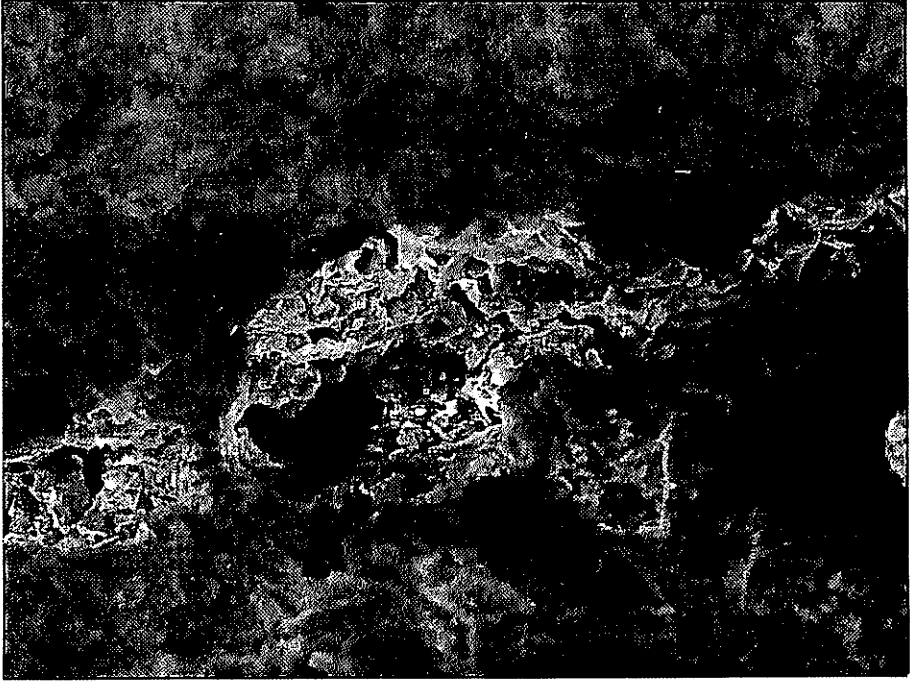


写真-5 シルトの電子顕微鏡写真(凍結・融解後)×300  
Photo. 5 Electron microscop photograph of silt  
(after freezing and thawing).

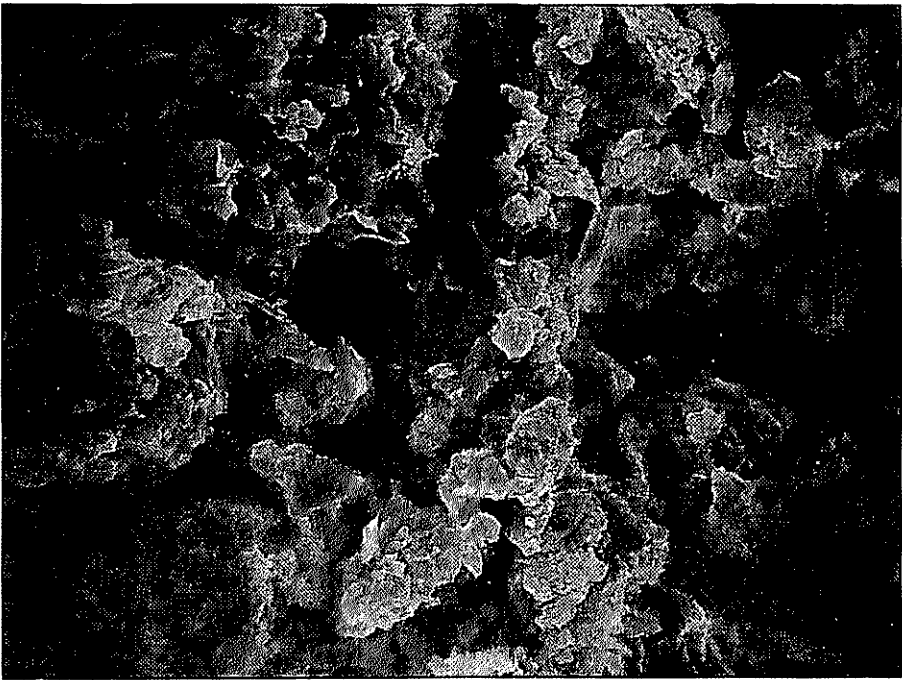


写真-6 シルトの電子顕微鏡写真(凍結・融解後)×1000  
Photo. 6 Electron microscop photograph of silt  
(after freezing and thawing).

結したように扁平な形状のものが多くなり、局部的には繰り返した試料と同様な構造になる。これらのことは細孔や隙間の周辺に顕著に生じるが、それ以外ではあまり変化が見られない部分もある。凍結前後の写真を用いて、数百個のベッドの平均直径を求めた結果が図-2である。ロームでは5~7 $\mu$ mのベッドが減少し、1~3 $\mu$ mのベッドがかなり増加している。実際には測定が難しいかなり微少なベッドが増加しているようである。ロームと粒度組成が異なる黒ぼくとシルトは当然破碎されるベッド径と破碎の程度が違うが、同様な傾向が認められ、破碎の程度は粘土分が多い試料の方が著しいといえる。

#### IV コンシステンシーと構造

凍結・融解を受けた蓼科ロームの液性限界と凍結温度との関係（青山他，1985）は図-3である。液性限界が凍結温度や繰り返回数によって低下するのは風乾効果と同様に、土粒子の粗粒化に伴う比表面積の低下や拘束水の脱水などに起因すると考えられている。数回までの凍結・融解の繰り返しでは繰り返回数とともに比表面積が減少し、また、2 $\mu$ m以下の含有量は分散剤を使用した場合には増加し、使用しないと逆になる（YONG et al, 1985）。また、凍結を受けると土の水分保持力が低下する（梅田他，1974）と報告されている。

一方、電子顕微鏡写真や図-2からは構造の粗粒化よりもむしろベッドの細粒化が進んでいる。これらの点を考え合わせると、液性限界の低下は拘束水の非可逆的脱水が支配的であり、そのためにベッドの固結化が進行していると考えられる。

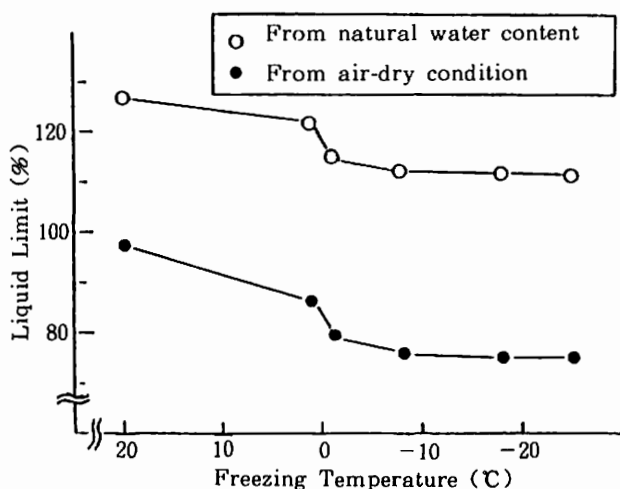


図-3 凍結温度と液性限界との関係  
Fig. 3 Liquid Limit and freezing temperature.

#### V ま と め

これまで論述した結果を要約すると次のようになる。

- (1) 凍結により数~数10 $\mu$ mの微少な細孔や隙間が多く発生し、この傾向は透水性が小さいほど顕著である。
- (2) 細孔や隙間が生じた部分の周辺はベッドが細粒化して固結した状態になる。
- (3) 液性限界の低下は拘束水の脱水が支配的であり、固結による影響も考えられる。

#### 謝 辞

本研究をするにあたり、試料採取等に御協力いただいた、三井建設軽井沢作業所の関係各位に対し謝意を表す。

文 献

AOYAMA, K., OGAWA, S. & FUKUDA, M.(1985) : Temperature dependencies of mechanical properties of soils subjected to freezing and thawing, Proceedings of the 4 th International Symposium on Ground Freezing, Vol.1 , 217-222.

梅田安治, 長沢徹明 (1974) : 凍結融解土の水分特性とせん断強さ, 農業土木学会論文集, 54, 6-10.

YONG, R.N., BOONSINSUK, P. & YIN, C.W.P.(1985) : Alteration of soil behaviour after cyclic freezing and thawing, Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing, Vol.1 , 187-195.