

凍結—融解を受けた土の応力と変形特性

青山清道*

Stress—Deformation characteristics of a soil after freezing and thawing.

by

Kiyomichi AOYAMA

(Abstract)

The phenomena of frost heave and loss of strength on thawing produce serious road and other earthwork engineering damages at many places of Tateshina plateau in Nagano prefecture.

The reduction in shearing strength causes a decrease, for example, of the bearing capacity of flexible and rigid pavement, a decrease of the slope stability for embankments or cuts.

The mechanical properties of soils, such as shear strength and deformation characteristics, are affected by freezing and subsequent thawing of the soil.

This paper discusses the results of experimental investigation of a cohesive soil (Tateshina loam) that has been subjected to freezing and thawing.

The soils used for this investigation were undisturbed samples.

Consolidated undrained triaxial tests were conducted on the thawed soil at one and several freeze and thaw cycles.

The results are summarized in several graphs showing stress—deformation characteristics.

いまえがき

近年、経済の発展により寒冷地や山岳地帯の開発、高所山岳地帯を通過する道路の建設が行われ、さらに積雪地帯でも冬期間の完全除雪区間が飛躍的に増加し、凍害を受ける範囲が全国的に拡大している。これら気温の低下に伴う地盤への凍結線の侵入による自然凍害の他に、液化ガス貯蔵用地下タンクの建設や凍結工法に付随する人工凍害の問題も生じている。

凍害の中でも、凍上現象、凍結時の水分移動あるいは凍土の物理的、力学的性質に関しては、従来より多くの研究が行われてきている。しかしながら、支持力の低下と密接に関係する融解後の土の力学的性質についての研究は比較的少ない。

従来、凍結—融解作用による土の強度低下は、主に下方からの水分供給とそれに伴う氷晶析出に起因していると考えられてきたが、著者らは下方からの水分供給が無い“Closed-System”(閉式)の条件でも、

* 新潟大学積雪地帯災害研究センター

凍結-融解による土の強度低下が生じることを解明してきた。

ここでは、凍結-融解後の土の力学的性質を把握するため、不攪乱粘性土試料について、不凍結状態と凍結-融解状態の圧密非排水三軸圧縮試験（CU試験）を行い、両者の強さと変形特性を比較、検討してみたのでその概要を報告する。

II 実 験 用 土

長野県蓼科高原は高含水比の火山灰質粘性土で覆われており、不等凍上による舗装表面のクラック（写真-1）、凍着凍上によるマンホールの浮き上がり（写真-2）、融解期の路床、路盤支持力低下や切り取り斜面の崩壊（写真-3）など各種の凍害が発生している。

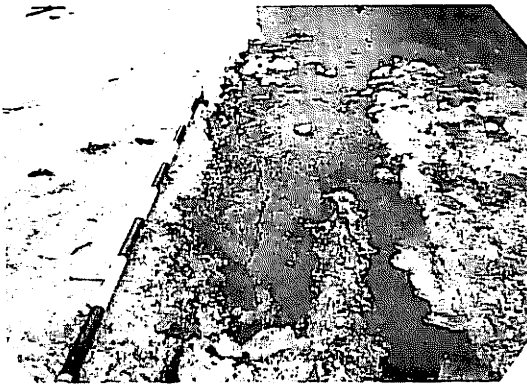


写真-1 凍上による舗装の損傷

Photo.1 Damage of flexible pavement due to frost heave.

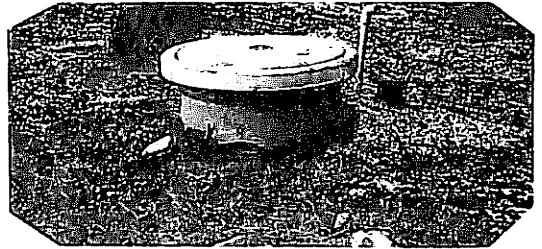


写真-2 凍着凍上によるマンホールの浮き上がり
Photo.2 Uplift of manhole due to adfreeze force.



写真-3 凍害による切り取り斜面の崩壊
Photo.3 Failure of the cutting slope due to frost damage.

実験に使用した試料は、蓼科高原（茅野市広見）の標高1,300m付近において、凍結深以下まで地盤を掘り下げ、凍結-融解の履歴が全くないと思われる部分から、シンウオールサンブラーで不攪乱試料を採取した。当地の最低気温は -20°C 前後、メチレンブルー凍結深度計で実測した凍結深さは約70cmである。

この火山灰質粘性土の粒度分析の結果を示したものが図-1であり、図中には凍害を受けやすい土質の粒度範囲も示した。日本工業規格（JIS）や土質工学会基準（JSF）にもとづいた土質試験法で求めた試料の土性値は表-1に示すとおりである。これより、この試料はシルト分の多い、含水比の高い粘性土であることから凍害を受けやすい土質であることがわかる。

III 実 験 概 要

採取時の試料は不飽和であったため、2週間注水して飽和度を高めた。これらの試料を1, 3, 5, 7サイクルの凍結-融解の繰り返しを与えた後に供試体を作成した。

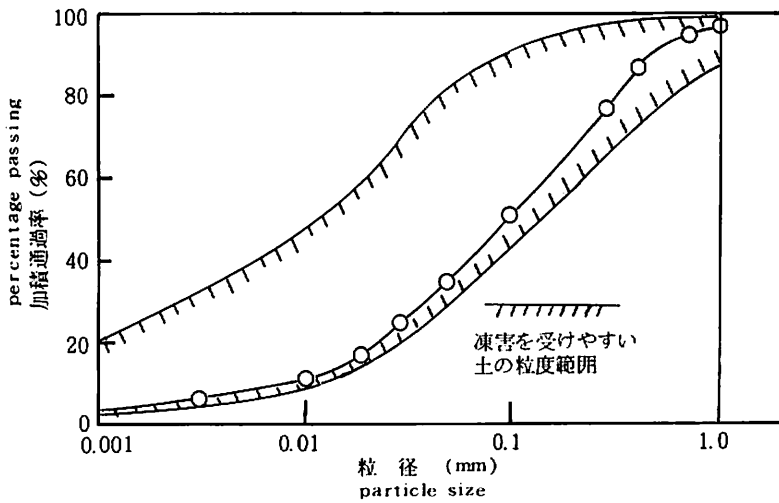


図-1 試料の粒径加積曲線
Fig.1 Grain-size accumulation curve of the sample.

表-1 試料の土性値
Table .1 Geotechnical properties.

比重 G_s	液性限界 W_L	塑性限界 W_p	自然含水比 W_n	湿潤密度 γ_t	間隙比 e	透水係数 k
2.66	80.7%	56.7%	90~100%	1.3~1.4 g/cm ³	2.5~3.0	cm/sec 4.4×10^{-5}

この供試体を三軸圧縮試験機にセットし、等方圧密した後、非排水状態でせん断した。圧密終了後、B-係数の平均値が0.95以上になるようにバックプレッシャーをかけた。なお、比較のために不凍結試料についても同様のせん断試験を行った。

凍結-融解を与える方法は、試料を外部からの水分の供給がないようにして、-18°Cで24時間凍結し、その後20°Cに保った恒温恒湿槽で24時間融解する。この行程を1サイクルとした。

IV 実験結果及び考察

凍結-融解を受けた供試体と受けない供試体の圧密非排水試験による軸差応力~ヒズミ曲線の一例を示すと図-2のようになる。

不凍結供試体はピーク値を持つ脆性破壊を示すのに対して、凍結-融解を受けた供試体はピーク値が不明瞭な塑性破壊を示すことがわかる。

したがって、凍結-融解を受けた過圧密粘性土の応力~ヒズミ曲線は、正規圧密粘土や繰り返された粘性土の応力~ヒズミ曲線に類似している。

また、ピーク強度とその時のヒズミの関係を求めてみると、ピーク値に至るヒズミ量は不凍結供試体の方が凍結-融解を受けた供試体よりも小さいことがわかる。

全応力表示、有効応力表示で求めた土の粘着力と内部摩擦角をサイクル数との関係で示したものが図-

3, 図-4である。

両表示とも、凍結-融解作用による粘着力の低下は1サイクル目において顕著にあらわれ、以後サイクル数が増してもその値はほとんど変化しない。内部摩擦角は凍結-融解の影響を受けずほぼ一定である。

この凍結-融解後の土の強度低下は、閉式内での氷晶析出と氷晶の成長による土の構造変化に原因し、その構造変化は以下のようなことが考えられる。

- 1) 土中の微小クラックの発生
- 2) 土粒子配列の変化
- 3) 土粒子の周りの吸着水の厚さの変化

氷晶析出は、間隙水や吸着水を吸引し、土粒子の周囲の二重層を形成する吸着水膜を土粒子より分離させ成長する。したがって、土粒子の周囲の吸着水膜は薄くなり、土粒子間の電気ポテンシャルの低下が生じ、粒子間結合力は弱まる。また、氷晶析出によって形成される氷晶は、土中に微小クラックを発生させ、土粒子配列の変化を生じさせる。そして、これら凍結時に生じた構造変化は融解後も残存するため、土の強度低下が生じると考えられる。

土の圧縮強さと変形の関係を知るために、三軸圧縮試験から求めた応力-ひずみ曲線を用いて変形係数を求めてみた。軸ひずみ $\epsilon = 0.5, 1.0, 2.0\%$ に対する変形係数はそれぞれ、図-5、図-6、図-7のようになる。

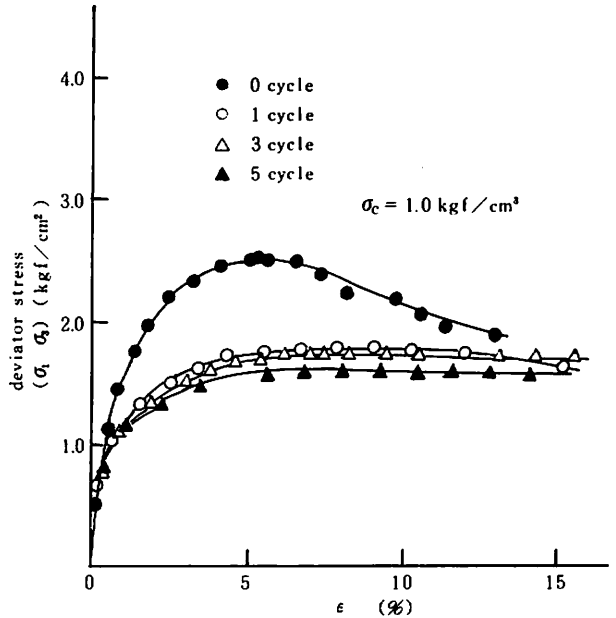


図-2 軸差応力とヒズミの関係

Fig.2 Relationship between deviator stress and strain.

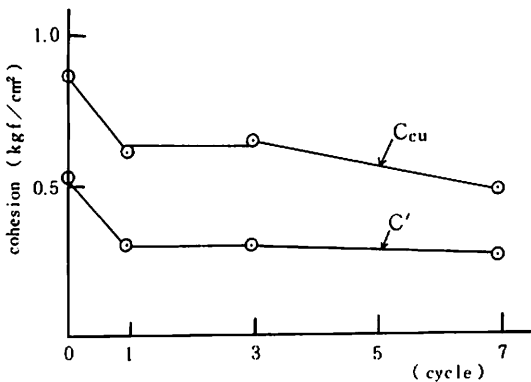


図-3 粘着力とサイクル数の関係

Fig.3 Relationship between cohesion and thaw cycles.

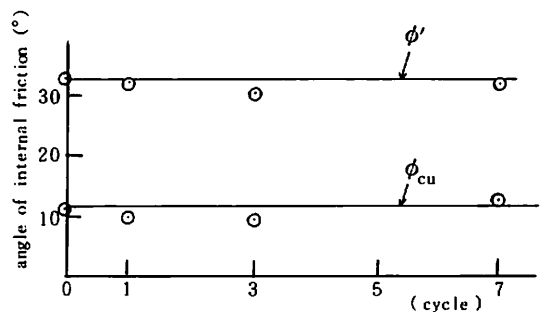


図-4 内部摩擦角とサイクル数の関係

Fig.4 Relationship between angle of internal friction and thaw cycles.

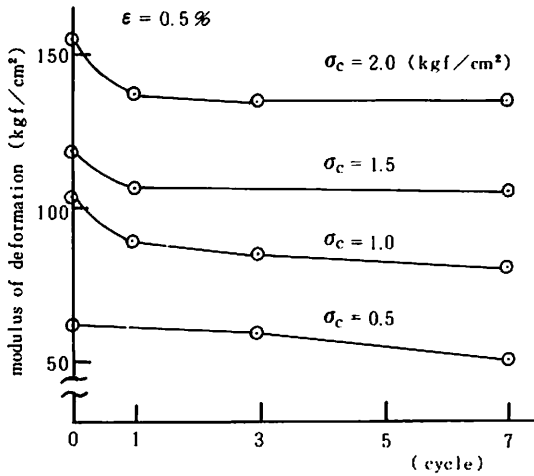


図-5 変形係数とサイクル数の関係
(ヒズミ 0.5%)

Fig.5 Relationship between modulus of deformation and thaw cycles.
(at strain 0.5%)

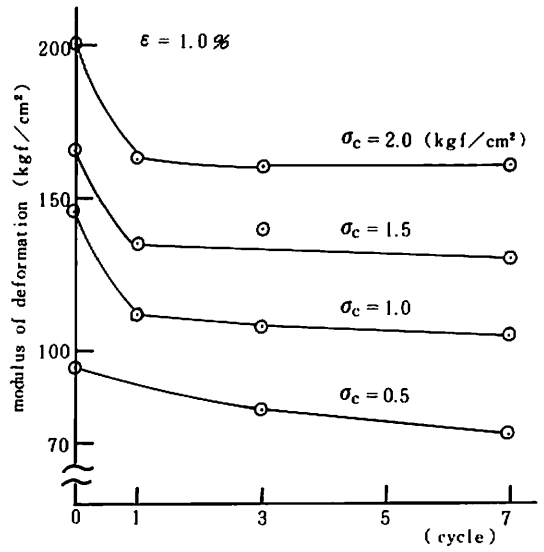


図-6 変形係数とサイクル数の関係
(ヒズミ 1.0%)

Fig.6 Relationship between modulus of deformation and thaw cycles.
(at strain 1.0%)

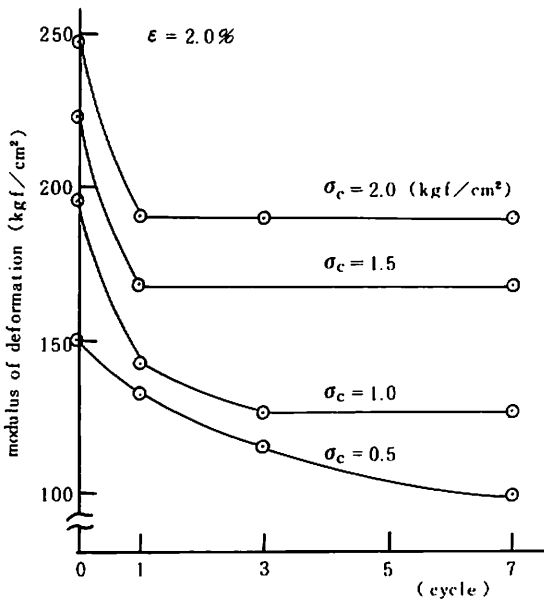


図-7 変形係数とサイクル数の関係
(ヒズミ 2.0%)

Fig.7 Relationship between modulus of deformation and thaw cycles.
(at strain 2.0%)

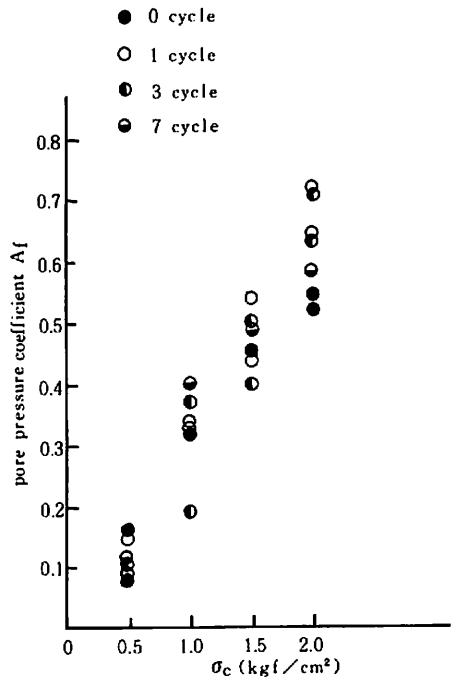


図-8 間隙圧係数 A_f と圧密圧力 σ_c の関係
Fig.8 Relationship between pore pressure coefficient A_f and consolidated pressure σ_c

凍結-融解を受けた土の変形係数は、不凍結土のそれに比べ、値が小さくなり、凍結-融解のサイクル数が増すほどその値は低下する。変形係数の低下の割合は1サイクル目が特に顕著であることがわかる。

それぞれの供試体における最大軸差応力、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ 時の間隙圧係数 A_f を求め、各圧密圧力ごとにプロットしたものが図-8である。

圧密圧力の上昇とともに A_f 値は増加しており、多少のバラツキはあるがその値は不凍結土より、凍結-融解土の方が大きくなっている。これは、過圧密状態の土が凍結-融解の履歴を受けることにより、正規圧密状態へ移行していく過程であると現象的には考えることができる。

V あ と が き

以上のことを要約すると次のようになる。

1) 凍結-融解作用により粘着力は低下するが、内部摩擦角はほとんど変化しない。このことは有効応力表示、全応力表示の両者について言える。

2) 粘着力の低下は1サイクル目が特に顕著であり、その後の凍結-融解の繰り返しによる低下はごくわずかである。

3) 間隙圧係数 A_f の比較から、過圧密状態にある試料は凍結-融解作用により正規圧密状態へ移行していく。

4) 変形係数は、ヒズミの初期において、凍結-融解土の方が不凍結土より小さい。

5) 応力~ヒズミ曲線より、不凍結土はピーク値を持つ脆性破壊を示すが、凍結-融解土はピーク値が不明瞭な塑性破壊を示す。

これらのことより、凍結-融解の影響を受けやすい土質で、凍結深以下の切り取りや掘削によって、これまで凍結-融解の履歴を受けていない土を対象とするときは、凍害すなわち、将来の強度低下を十分に考慮して設計、施工するか、強度低下を防止する方法を講じなければならない。

末筆ながら、本研究を継続するにあたり懇切なる御助言と御援助をいただいている新潟大学中俣三郎教授、長岡技術科学大学小川正二教授に深甚なる感謝の意を表します。また、凍害調査ならびに実験用試料採取にあたり御協力、御支援をいただいている三井建設技術研究所、川澄 脩副所長、福田 誠主任研究員に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 青山清道・小川正二・川澄 脩・田村富雄・福田 誠(1977)：凍結-融解を受けた土の力学的性質，土質工学会誌，「土と基礎」，25-7，41-46。
- R. N. Yong 著，青山清道・中村 勉訳(1977)：土の凍結と永久凍土に関する諸問題，土質工学会誌，「土と基礎」，25-7，1-4。
- 青山清道(1981)：凍害と防止対策に関する文献目録，土質工学会誌，「土と基礎」，29-2，59-63。
- 青山清道・古賀康之(1982)：地域別に見る世界の土質関係基準とその運用-カナダ-，土質工学会誌，「土と基礎」，30-6，41-44。