

凍結砂土の一軸圧縮性について

広部良輔*・五十嵐高志*

国立防災科学技術センター雪害実験研究所

Unconfined Compression Test of Frozen Sandy Soil

By

R. Hirobe and T. Ikarashi

*Institute of Snow and Ice Studies,
National Research Center for Disaster Prevention
Nagaoka, Niigata-ken 940*

Abstract

With the progress of the removal of snow in snow-clad areas, soil surfaces are often bared in winter seasons. It has been judged that soil under snow cover is not frozen in winter on account of the small heat conductivity of snow. Nowadays, the freezing of soil is becoming an important problem in snow-clad areas.

In this experiment frozen sandy soil was tested by an unconfined compression apparatus. The compression strength was tested at different ice contents and compression rates. At high ice contents and high compression rates many cracks developed and the strength decreased.

Water molecules adsorbed on the surface of solid lose their mobility; so hydrated layers on the solid do not freeze below zero degree. It is conceivable that frozen soil has a thin water film at contact points between soil and ice.

Frozen soil particles can roll and move at contact points at low ice contents but cannot roll and move at high ice contents owing to the losing of free volume.

Frozen soil has viscous properties at low ice contents and has rigid properties at high ice contents.

1. まえがき

積雪寒冷地においては、積雪層の熱伝導率が極めて小さいため、地盤の凍上や凍結はほとんど発生しないと考えられてきた。近年これらの地域でも開発が進み、都市化や流通系統が拡大し、除雪が進むにつれ、積雪層を伴わない地盤の区域が増えつつある。このため地盤の凍上や凍結による被害も生じてくるものと思われる。凍上や凍結は土層だけでなく泥岩のよ

* 第1研究室

うな岩石にも生じ、凍上の力学的作用による道路や構築物の破壊だけでなく、周辺より土中水を集める作用のため、融雪期に様々な問題を生じている。岩石の風化を促進したり、地すべりの原因になったり、荷重支持力の低下をもたらしたりしている。土層が粘土層であるか砂層だけであるかによって、凍結現象のみに終るか二次的に凍上現象を伴うかの差異が生じるが、相互の関連は不可分のものである。これまで土の凍結は工法として役立ってきた。地盤の施工に当って厄介な水を一時的に凍結することによって工事を容易にした。また近年、液化天然ガスの貯蔵の際に付随的に凍結を生じ問題となっている。これら被害から利用に到るまで多岐にわたっているが、現象の本質は異なるものではなく、共通した部分を大きく含んでいる。

この研究においては凍結および凍上現象を解明するに当り、可能な限り単純化した現象から取扱うこととし、砂の凍結を扱い、圧縮強度に着目した。さらに同一条件で凍結してない砂の試験も行ない、比較から凍結砂土の内部構造を探求し、レオロジー・モデルを考察した。

2. 実験装置および方法

2.1 試料の作成

標準砂（豊浦砂）を用い内径 49 mm、高さ 51 mm のスチール円筒の中に水を満たし、砂 130 gr を自然沈降させ沈積させた。これにより毎回、同じ密度の試料を作成することができた。円筒底の石膏板を通して負圧を作用させて円筒内の水分を引抜いた。種々の負圧に相応した含水比の試料を作成することができた。試料は円筒に入れたまま、 -5°C の低温室に 24 時間放置し、円筒から取出して凍結試料とした。

2.2 一軸圧縮試験機

電動ギヤ駆動式のひずみ制御型の試験機で、最大容量 5 ton である。上側固定式になっており、下側のロード・セルを所定の圧縮速度で上昇するようになっている。凍結してない試料には容量 50 kg のロード・セルを用い、凍結した試料については 5 ton のロード・セルを使用した。圧縮速度を 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0 (mm/min) の 5 段階に変化させた。含水比および相当含水比を変化させる試験では、凍結してない試料については圧縮速度 1.0 mm/min、凍結した試料については圧縮速度 0.5 mm/min で行なった。圧縮試験は -5°C の低温室内で行なわれ、ひずみ-応力曲線が求められた。試料の側面は非拘束状態が保たれた。

3. 実験結果の考察

3.1 計算式

ひずみ-応力曲線のピーク値より一軸圧縮強さ q_u (kg/cm^2) を求めた。変形係数 E_{50} (kg/cm^2) は、

$$E_{50} = (q_u \cdot 1/2) / \{(q_u \text{ の } 1/2 \text{ に相当するひずみ}) / 100\} \quad (1)$$

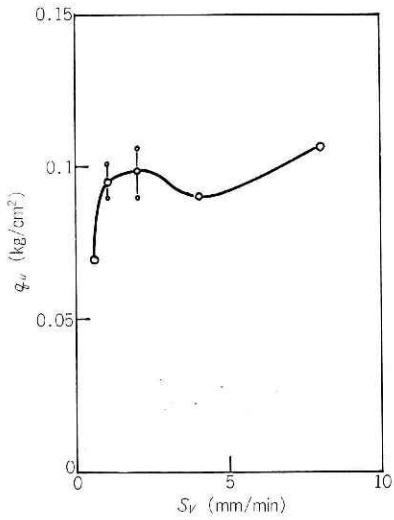


図 1 不凍結試料の圧縮速度 S_v と圧縮強度 q_u の関係

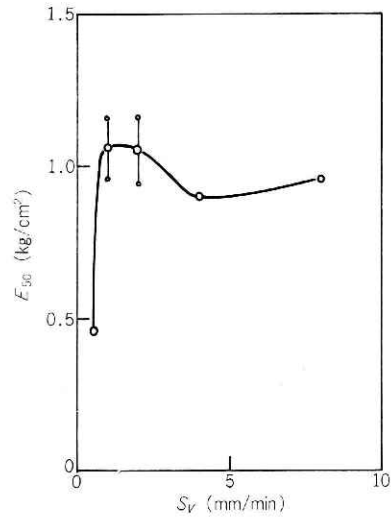


図 2 不凍結試料の圧縮速度 S_v と変形係数 E_{50} の関係

圧縮ひずみ ϵ (%) は、

$$\epsilon = (\Delta L / L_0) \cdot 100 \quad (2)$$

ΔL は圧縮量 (cm), L_0 は元の長さ (cm) である。含水比 W (%) は、

$$W = (\text{土中の水の重量}) / (\text{乾燥土の重量}) = (W_w / W_s) \cdot 100 \quad (3)$$

3.2 凍結していない試料

3.2.1 圧縮速度変化

第 1 図に圧縮速度と圧縮強度の関係を示し、第 2 図に圧縮速度と変形係数の関係を示す。

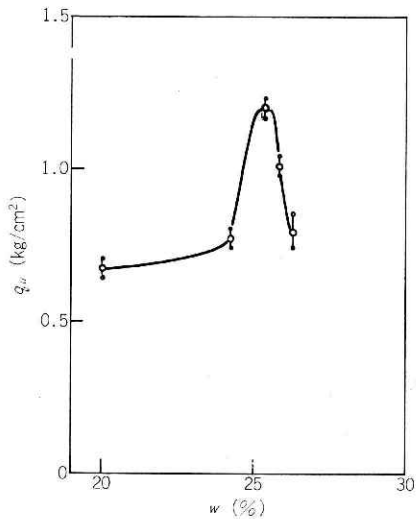


図 4 不凍結試料の含水比 W と変形係数 E_{50} の関係

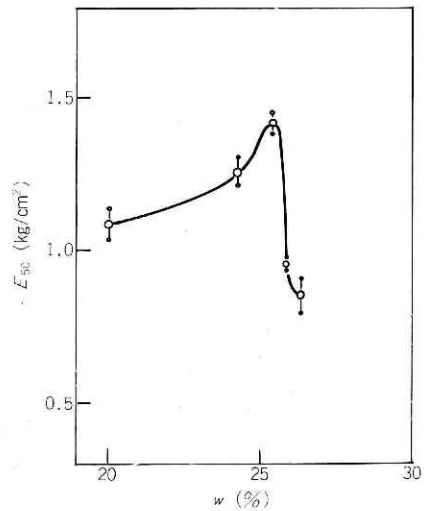


図 3 不凍結試料の含水比 W と圧縮強度 q_u との関係

圧縮速度が 0.5 mm/min から 1.0 mm/min になる過程で圧縮強度および変形係数は大きくなるが、それ以上圧縮速度が増大しても大きな変化はみられない。試料の構造を形成するのに役立っている粒子間結合力は、粒子同士の接触点に形成されるリング状水の表面張力である。粒子同士は接触点で凝着しているようなことはなく、水和層または薄い水の層を介在しているものと思われる。粒子相互の摩擦力は境界摩擦 (boundary friction) または流体摩擦 (fluid friction) であり、相互の移動や回転が比較的自由である。このため圧縮速度が変化しても圧縮応力の全体への伝播に差異を生じることが少なく、したがって圧縮強度も変化が小さいものと思われる。

3.2.2 含水比の変化

第3図に含水比と圧縮強度の関係、第4図に含水比と変形係数の関係を示す。いずれも 25% 近傍でピーク値を生じている。粒子間の接触点に形成されるリング状水の表面張力はリング水の量が分子サイズの微量になるまで作用し、結合力はリング水の量が少ないほど大きな値を示すことが理論式によれば確認される。しかし実験的には広部 (1978) が示したように、分子サイズに達する以前のある含水比で結合力は最大になり、それ以上含水比が小さくなると結合力は小さくなる。この試験においても同じことが実証されている。

3.3 凍結した試料

3.3.1 圧縮速度変化

第5図に圧縮速度と圧縮強度の関係を示すが、圧縮速度を増大させて行くと圧縮強度は大きくなる傾向を示す。粒子同士の接触点のリング状水は凍結して氷になっているから、回転や移動が不凍結試料のように円滑にいかない。したがって応力の伝播は圧縮速度によって影響をうける。圧縮強度は不凍結試料に比し大きな値を示し、粒子間の移動や回転の自由度が減少するために、粒子や氷の強度も関与してくるものと思われる。

圧縮速度がある値をこえると、試料内部に細かなクラックが多数発生し、さらに圧縮速度

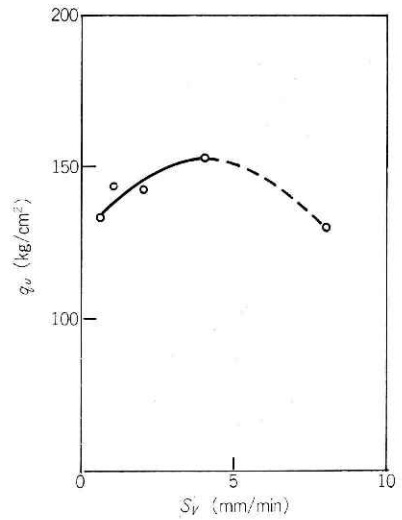


図5 凍結試料の圧縮速度 S_v と圧縮強度 q_u の関係

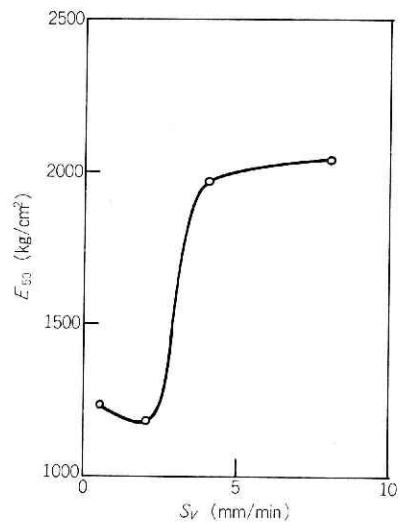


図6 凍結試料の圧縮速度 S_v と変形係数 E_{50} との関係

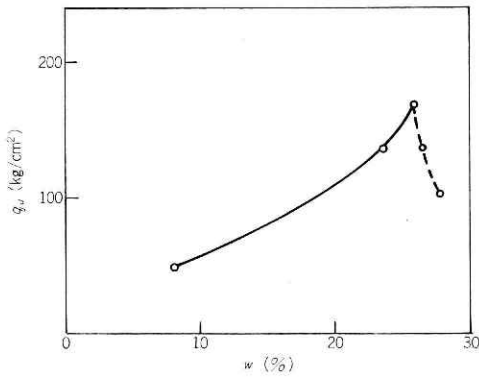


図 7 凍結試料の相当含水比 W と圧縮強度 q_u の関係

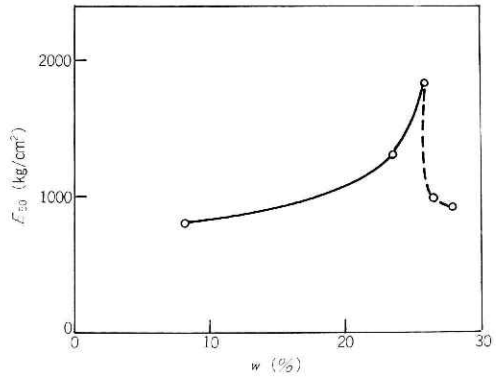


図 8 凍結試料の相当含水比 W と変形係数 E_{50} の関係

を大きくすると大クラックが音を立てて瞬間的に発生し、圧縮強度を結果的に低下させる。この領域では剛性を示すようになる。第 6 図に圧縮速度と変形係数の関係を示すが、クラックの発生する領域で第 5 図と同じ傾向を示さない。変形係数は変化がなく、一方、圧縮強度は圧縮速度の増大につれ低下する傾向を示す。すなわち材料学的性質が異なっていることを示している。

3.3.2 相当含水比の変化

圧縮速度を一定にし、相当含水比を増大させた場合の圧縮強度を第 7 図に示す。含水比の増大により圧縮強度は増大するが、ある値に達すると小さなクラックが多数発生し、さらに含水比を増大させると大クラックが発生して、圧縮強度は低下する。この傾向は第 8 図の含水比と変形係数の関係でも同じである。相当含水比と圧縮速度とクラック発生の間には密接な関係があり、相当含水比が小さければ大きな圧縮速度に達してクラックを生じ、相当含水比が大きければ、小さな圧縮速度でクラックを発生する。凍結した試料は砂-氷-空隙より成り、相当含水比が増大することは空隙に占める氷の割合が増大することを意味し、それだけ粒子の回転や移動の自由度が低下し、砂や氷の材料学的性質が試料の圧縮強

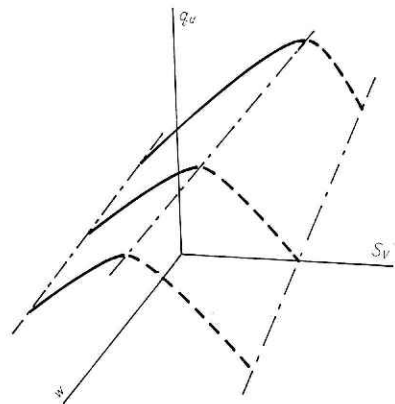


図 9 圧縮強度 q_u ・圧縮速度 S_v ・相当含水比 W の相互関係

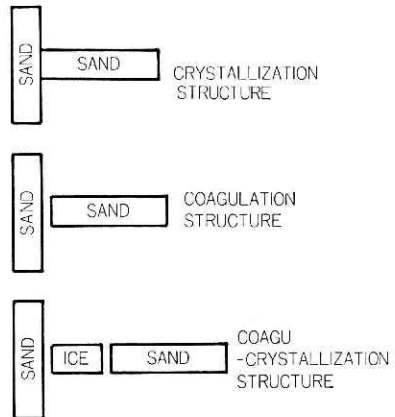


図 10 粒子凝集体のレオロジー・モデル

度に関与してくる。第9図に圧縮強度-圧縮速度-相当含水比の関係を模式的に示す。実線の登り斜面は剛性の小さい領域で、破線の下り斜面は剛性の大きな領域と言える。凍結砂土は含水比によって、このように二つの異なった性質の領域をもっている。

3.4 レオロジー・モデル

第10図に示すように、Rehbinder (1966) は粒子集合体の凝集構造を二つに大別した。1) 粒子間の接触点が固結して相互の回転や移動が不可能で、圧縮応力が加わると粒子自体の材料強度と接触点の結合力の双方が強度に関与する。これを *crystallization structure* とよんでいる。2) 粒子間の接触点は固結してなく、水和層または薄い水の層を介在し相互の移動や回転が可能で、圧縮応力が加わると粒子間の接触点の結合力のみが関与し、粒子自体の材料強度は関与してこない。これを *coagulation structure* とよんでいる。凍結していない試料において、接触点は水の層を介在し、結合力はリング状水の表面張力のみである。これは *coagulation structure* と考えられる。Nakaya (1954) によると -7°C において氷の表面に液体層を確認しており、Hosler (1957) によると水蒸気飽和の状態でも -30°C まで不凍結水を確認している。凍結した試料において、氷と砂の間には不凍結水が存在するものと考えられ、したがって原理的には砂と氷の間には回転および移動の自由度は存在する。このため相当含水率の小さい場合には、氷や砂の材料強度が圧縮強度に関与する割合も小さく、剛性も小さく、第9図における登り斜面に相応する性質を有する。この領域は *coagulation structure* の性格が大きい。相当含水率が大きくなると、氷の占める体積割合も大きくなり、空隙は小さくなり体積関係から粒子間の回転や移動の自由度は低下する。このため粒子や氷の性質が試料の性質に関与し、剛性が大きくなってくる。第9図の下り斜面の領域に相応する。このように凍結した砂土は、原理的には *coagulation structure* であるが、体積関係の自由度の低下から *crystallization structure* の性質も有するようになる。*coagu-crystallization structure* とでも言うべきであろう。

4. あとがき

不凍結試料と凍結試料の対比から、凍結砂土は固体的性質と液体的性質の両方を有することがわかった。相当含水比が小さいと液体的性質も多少有しているが、相当含水比が増大すると、固体的性質が顕著になる。この結果、大クラックの生成が容易になり、圧縮強度はかえって低下することになった。圧縮速度に相応した最適の含水比において最大の圧縮強度を示し、相当含水比の大きいことが圧縮強度の大きいことにはならない。

この実験では側面は非拘束の状態であったが、側面拘束によってクラックの発生はさらに複雑な影響をうけるものと考えられる。

謝 辞

この研究を推進するに当り、第3研究室磯部室長、小林研究員に御助力を賜わり厚く御礼申上げる。

参 考 文 献

- 1) 広部良輔・古谷 保・中山 康 (1978): 斜面の安定に関する総合的研究. 国立防災科学技術センター研究報告, 第19号, 65-78.
- 2) C. L. Hosler, C. D. C. Jensen and P. L. Goldshlak (1957): On the Aggregation of Ice Crystal to Form Snow, *J. Meteorol.*, **14**, 415.
- 3) U. Nakaya and A. Matsumoto (1954): Simple Experiment Showing the Existence of Liquid Water Film on the Ice Surface, *J. Colloid, Sci.*, **9**, 41.
- 4) P. Reh binder (1966): Formation of Structures in Disperse System, *Pure & Applied Chemistry*, **10**, 337.

(1979年5月24日 原稿受理)