

自然寒冷下での凍結融解過程における高含水比土の水分挙動

佐藤厚子¹，中村 大²，鈴木輝之²，西本 聡¹

1 土木研究所・寒地土木研究所・寒地地盤チーム

2 北見工業大学・工学部・社会環境工学科

概 要

地盤が地表面から冷やされて凍結が下方に進行していくとき、未凍土中の水分は凍結面すなわち上部に移動していく。この現象によって、凍結した部分は移動してきた水分により高含水状態になるが、水分が移動した未凍結部分は低含水比となる。この原理を利用して高含水比土の水分を低下させることができれば、低コストの土質改良が可能となる。本研究では、屋外凍結実験土槽を用いて、地盤中の温度と含水比分布、さらに冬期間の凍結性状の計測を2年間に渡って継続した。その結果、未凍結期における乾燥とそれに続く凍結期における水分移動の特性を明らかにすることができた。さらに、屋外土槽に投入した網走湖浚渫底質の含水比低下は、凍結期を挟んだ1年でその大部分が発生し、含水比は300%から150%程度にまで低下するなどの結果が得られた。

キーワード：凍上，凍結脱水，高含水不良土，改良

1. はじめに

河川や湖沼の浚渫工事で発生する土砂は、含水比が高く強度が低いため、そのままの状態では土木材料として使用することができない。一方で、資源の有効利用、循環型社会構築への関心の高まり、廃棄処分できる場所が限られることなどから、このような不良な土砂であっても改良して地盤材料などへ活用しなければならない社会情勢にある。

高含水の不良土砂を改良するために以下のような方法が、状況に応じて採用される。

1) 乾燥による含水比低下¹⁾

天日乾燥や強制乾燥があるが、必要な含水比とするまでには一般に時間あるいはエネルギー(費用)が必要となる。また、効率的に含水比を低下させるために、ある程度の広さを持つヤードが必要となる。

2) 圧縮による強制的脱水²⁾

設備とエネルギーを必要とするため、経済性が課題となる。

3) 粒度調整³⁾

良質土との混合が必要となり、見方によっては良質土の質を低下させることにもなる。

4) 固化材による改良⁴⁾

セメント系の固化材あるいは石灰を用いるのが一般的であり、確実な改良効果が得られるが、土の性質によっては固化材添加量が多くなる場合がある。また、固化材によっては環境上の課題が残る。

地盤が凍上するとき、地表面から冷却されることにより

未凍土側の水分を凍結面に吸い上げてアイスレンズを生成させていくことが知られている⁵⁾。このとき水分が吸い上げられた未凍土側すなわち地盤の下部では含水比が低下する。特に、凍結面直下では、乾燥状態に近くなるとされている。この原理により北海道の冬期の寒冷な気候を利用して、高含水比の浚渫土砂の含水比を低下させることができれば、高含水比土をそのまま改良するよりかなりコストの低い改良が期待される。

これまで、地盤が凍結するときの現象を応用した技術として、凍結融解現象を利用した土工実験^{6) 7)}、凍結融解作用と鉛直ドレーン工法を組み合わせた圧密促進工法により圧密を促進し土中の水分を抜くことに着目した技術^{8) 9)}、凍結融解を利用したフリージングベッドによる汚泥の脱水システム¹⁰⁾などが紹介されている。また、凍結融解を繰り返すことにより、地盤材料の透水係数、特に縦方向の透水係数が変化するという報告もなされている^{11) 12) 13)}。このほか、北海道では室内および屋外実験で、高含水比の浚渫土砂を凍結融解させる過程での含水比を測定した例¹²⁾が報告されている。

しかし、凍結による高含水比不良土の改良に着目して実際の気象条件下で厳冬の昇華現象による含水比低下、凍結部分の含水比、凍結による深さ方向の含水比分布などを詳細に調べた例は見当たらない。本研究では、自然の凍結を利用することにより、一般的な乾燥だけによる脱水よりもより効率的な水分低下を期待して、自然の寒冷環境下での凍結融解過程における含水比変化を測定した。本報告は、これらの実験と凍上を利用した不良土の改良に関する検

討結果をとりまとめたものである。

2. 凍上にもなう水分移動の原理

気温が低下して、地盤の間隙水が凍結して土が固結することを土の凍結という。拘束力が小さくしかも水を自由に吸水できる条件のもとで凍上性の土が凍結する場合には、アイスレンズと呼ばれる析出氷晶が生じる⁵⁾。この現象が地表面で起きてできるものが霜柱である（写真 1(a)）。凍結の進行にともなって土中の凍土と未凍土の境界すなわち凍結面付近でアイスレンズ（写真 1(b)）が成長し、土の体積が増加して地盤が隆起することを凍上という。

礫や砂は氷晶を析出する性質を持たないので、地盤が凍結するときもアイスレンズが形成されることなく、凍上は発生しない。さらに既存間隙水の凍結による 9%の体積増加は大部分が未凍結部に吸収されるため、凍上をもたらさない。

一方、凍上性の細粒土を含む地盤が凍結する場合は、未凍土側から移動してくる水分によって凍結面付近でアイスレンズが形成される。また、寒さが厳しくなると、熱的バランスが崩れて、凍結面が地中に進行して行くため、アイスレンズが層状に形成されて凍土中に残される（図 1）。



写真 1(a) 自然地盤の表面にできた霜柱

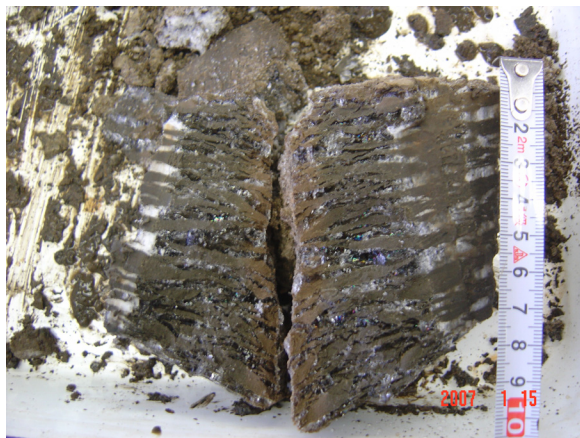


写真 1(b) 本実験で見られた土中アイスレンズ

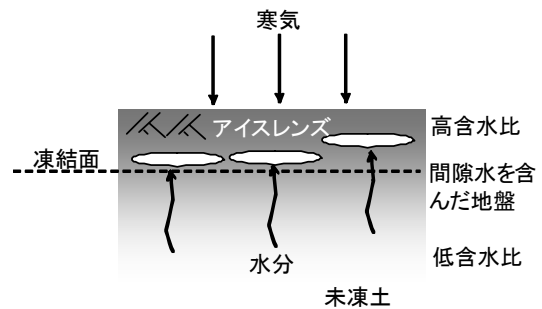


図 1 凍上の原理

アイスレンズが形成されるとき、それより下の未凍土部の水分は減少し、非常に低い含水比となる¹⁴⁾。

次に融解沈下過程に着目すると、いったん凍結の履歴を受けた土の透水係数は大きくなるとされている^{11) 12)}。また、シルト、粘土に分類される細粒土では、自然含水比の土をいったん低含水比にすると土粒子の保水能力が変化し、再び加水しても、もとの状態まで水分を吸収しなくなる傾向がある¹⁵⁾。

これらに加えて、フリーズドライに応用されるように、湿度の低い氷点下の状態では氷（アイスレンズ）は低速であるが昇華する。

以上のように、北海道のような寒冷地の冬期の低い気温を利用して、高含水比の地盤を凍結させてアイスレンズを発生させることにより未凍土部の含水比は低下する。さらに、地表付近では、アイスレンズあるいは霜柱が昇華することにより、含水比が低下する。その後、融解期に気温が上昇して昇華しなかったアイスレンズが融解するときには、水分は蒸発していく成分と、速やかに地盤下方へ移動していく成分に分かれると考えられる。このどちらかの成分が多くなるかについては後でも触れるが、いずれにしても寒冷地における凍結・融解の過程は、高含水比土の脱水改良に応用できる可能性が高い。このことを明らかにしていくためには、凍結・融解の過程における含水比分布の推移を正確に捉える必要があり、本実験の目的もそこにある。

3. 実験方法

3.1 実験に用いた材料

実験に用いた試料の基本物性値を表 1 に示す。秋から初冬にかけて網走湖女満別湾より浚渫され、翌年の 6 月まで排泥池で沈澱保管された高含水粘性土（以後底質と呼ぶ）である。沈澱のための凝集剤は用いていない。ちなみに女満別湾は、トマップ川が流入する湾であるが、水深が 3m 程度と浅く淡水域に相当する。また、流れが停留しているため、ヘドロ状の底質が 50～60cm 程度の厚さで堆積している。このため、水質改善のための底質の浚渫が年次計画で行われている。本実験で用いた試料はここで浚渫された底質である。底質は自然含水比が高く、粒度組成の 92.4 % が細粒分であり、高液性限界シルトに分類される。試料採

表 1 高含水比土の基本物性値

試料名		トマップ
浚渫後経過時間		7ヶ月
土粒子密度 $\rho_s(t/m^3)$		2.260
採取時含水比 $w_n(\%)$		332.44
粒度特性	2mm 以上 (%)	0.0
	75 $\mu m \sim 2mm(\%)$	7.6
	75 μm 以下 (%)	92.4
液性限界 $w_L(\%)$		231.0
塑性限界 $w_P(\%)$		105.6
地盤材料の分類記号		MH
コーン指数 $qc(kN/m^2)$		測定不能
平均湿潤密度(8/9 測定 t/m^3)		1.18

取時の含水比は液性限界を超えており, さらにコーン指数は測定不能で, 建設機械の走行は全く不可能な超軟弱土である¹⁶⁾。

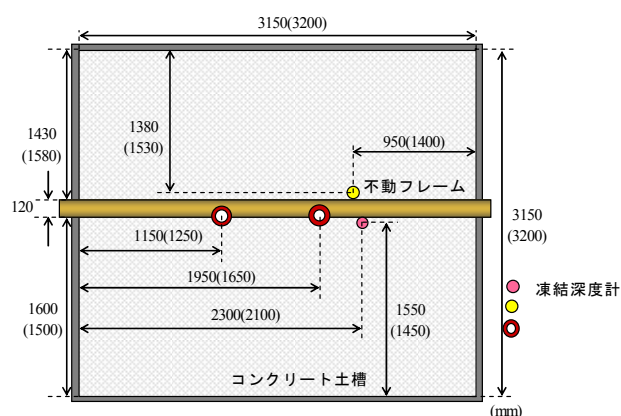
3.2 実験土槽

実験では, 図2に示す屋外実験土槽を2基使用した。土槽は, 厚さ15cmの鉄筋コンクリート製で, 土を入れたときの表面積が10 m^2 になるように作られ, 土槽底部には排水のための水抜きが設置されている。

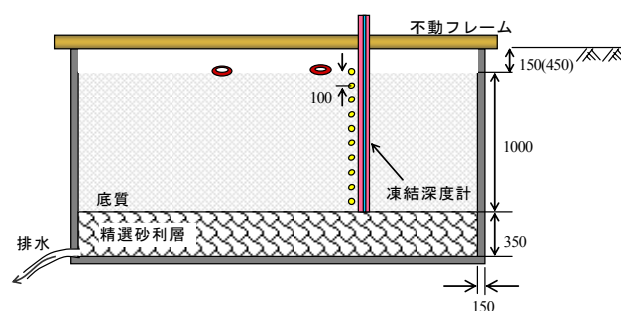
平成17年度に実施した, 層厚70cmの底質による人工地盤を用いた屋外凍結実験¹⁷⁾では, 凍結面より下方20cm程度の範囲での含水比低下は認められたが, 凍結面が深くなると原地盤から水分が移動して来るため最終的には層全体の試料の含水比低下は小さくなるのが分かった。今回の実験で用いた土槽では底面からの水分供給を遮断するために, 土槽の底面に35cmの厚さで径10~30cmの精選砂利を敷設し, この上に不織布を挟んで試料(底質)を1mの深さで投入した。砂利層は, 上方からの重力水は下方へと通過させるが, 毛管水の上昇は防げる性質を持つ¹⁸⁾。このために, 凍上の発生によってアイスレンズとして原地盤から凍土側に移動しようとする水分は, 砂利層で止められ, 底質層内で移動した水分は融解時には速やかに下方に移動し, 土層外へ排出される。用いた土槽はA, Bの2つとし, B槽は降雨の影響を避けるために土槽上部に屋根を設置した。

6月下旬の試料投入後から, 沈下および凍上による試料表面の変位量, 凍結深さ, 外気温, 土中温度, および土中含水比を, 表2に示す方法で測定した。沈下量および凍上量は, 土槽の側壁天端に不動フレームを置き, これを基準として, 地表面との距離の変化から求めた。このとき, 地表面には直径100mm, 厚さ5mmの変位測定盤を置き, この動きをとらえた。

土中温度は塩ビ管に熱電対を10cm間隔ではり付け, 自動計測した。各温度測定点の位置(高さ)は地表面からの深さになるようにした。凍結深さは, メチレンブルー凍結深度計によって測定した。含水比はボーリングにより採取したコア試料を厚さ5cmで輪切りにして, 各槽毎に測定した。これらの測定は平成18年7月から平成20年10月までの2年間に渡って継続した(以後1年目の測定を1シ



(a) 平面図



(b) 側面図

図2 屋外試験土槽

表2 屋外実験測定項目と測定間隔

測定項目	測定機器	測定方法	測定間隔
地表面変位	変位計	自動	2時間
	定規	人力	1日
土中温度	熱電対	自動	5分
外気温			
凍結深さ	メチレンブルー深度計	人力	1日
含水比	ボーリング採取	人力	1か月

ーズン目, 2年目の測定を2シーズン目と呼ぶ)。

4. 実験結果と考察

4.1 外気温, 地中の温度変化

B土槽における外気温と地中温度の変化を図3に示す。ここで, 外気温の測定はB土槽表面から約1.5mの高さに固定した百葉箱(写真2)中で測定した。地表面温度は外気温の短期的な変化の影響を敏感に受け変動が著しい。深度が20cmよりも大きくなると, 日々の気温の短期的な変動の影響はほとんど現れなくなる。地盤の凍結は地表面から始まり, 融解は地表面と凍結面の両方から進行する。したがって凍結温度を0 $^{\circ}C$ とすると, 凍結の開始は, 地表面土槽内に設置した熱電対が連続してマイナスを示すようになった初日, 凍土の消失は各深さの熱電対がすべて連続してプラスを示すようになった初日と判断される。たとえば,

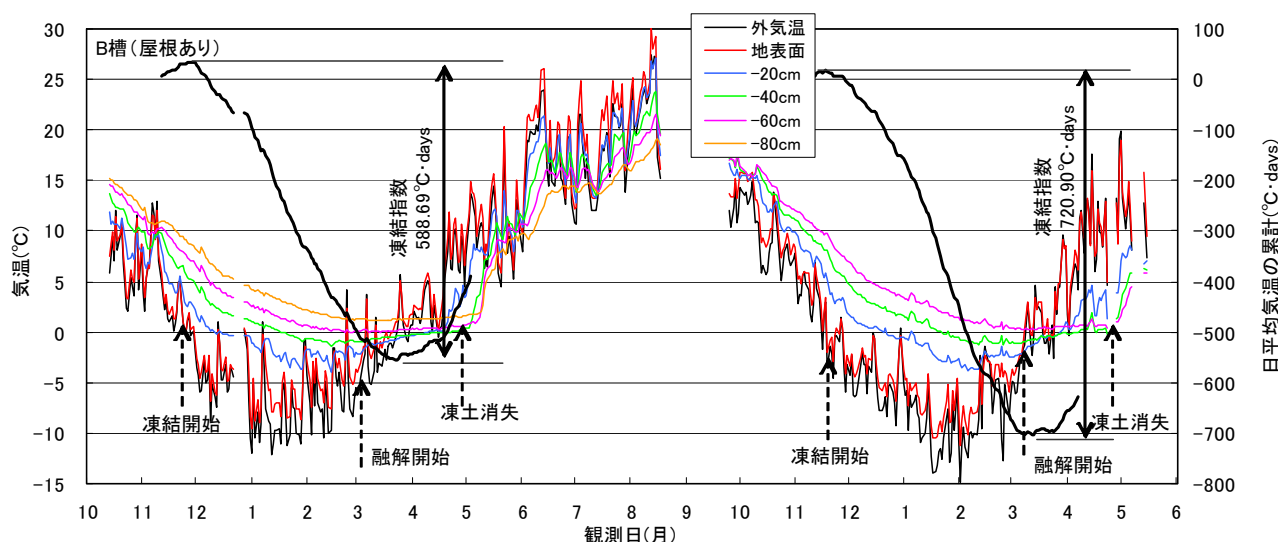


図3 外気温、地中の温度

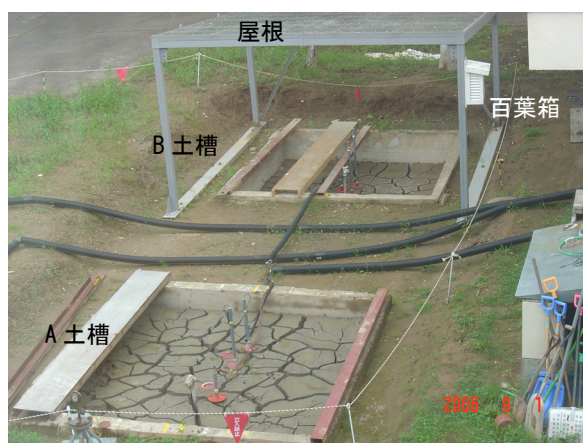


写真2 地表面にできたひびわれ

図3の1シーズン目では、地表面温度から凍結の開始は11月末であり、融解の開始は3月上旬であることが分かる。また、土中温度から融解期の凍土消失は、5月上旬であることも分かる。このような地盤凍結の開始と終了の時期は測定年度や場所によって異なるが、図3の値は、実験場所で例年見られる地盤凍結時期と大差はない。

4.2 地表面の変動

(1) 測定過程と地表面性状

平成18年6月29日に底質を土槽に投入した。乾燥収縮と自重圧密により地表面の沈下、ひび割れが発生した。地表面のひび割れは、写真2に示すようにA槽では深さ30～40cm程度、B槽では深さ25～35cm程度であり、その最大幅は50mm程度に達した。凍結が始まる前の10月16日に、水分の移動と熱流を上下方向のみとして解析を簡易にするために、ひび割れ部分を埋めて、表面を平らに均した。その後、凍結－融解過程での持ち上がりや沈下を測定した。以上の過程を1サイクルとして2シーズンに渡って2サイクル測定した。なお、2シーズン目のひび割れ発生

はほとんど見られず凍結期前のひび割れの均し作業は不要であった。

(2) 1シーズン目の地表面変動

平成18年から20年の外気温と底質表面の沈下・凍上量、凍結深さの関係を図4に示す。図4には、日平均気温の累計も合わせて示した。1シーズン目の6月29日の底質投入から約4か月でA槽で21.5cm、B槽で22.5cmの沈下が認められた。のあるB槽の沈下が1cm大きい、この差は、全沈下量に対する割合で見ると、小さいといえる。11月下旬で日平均外気温が氷点下となるころから凍上による持ち上がりが現れ始めて、凍結深さも進行し、特に地表面から10cmくらいまでは急速に進行している。最終的な凍上量はA槽で14cm、B槽で12.5cmであった。また、融解による沈下は、A槽で22cm、B槽で20cmとなり、結果的には設置時から融解沈下後までの地表面の変動量はA槽とB槽とで1cm程度しか違わなかった。1シーズン目では、沈下－凍上－融解沈下の過程にA槽とB槽とに大きな差がなく、屋根の有無すなわち降雨の有無は地盤の表面変動特性にはあまり影響していないことが分かる。凍上量は日平均気温が0℃を上回るころから減少に転じており、土槽にできたアイスレンズが融解し始めたことを示している。

(3) 2シーズン目の地表面変動

2シーズン目に入ると、6月～10月の未凍結期の沈下は、屋根のあるB槽では現れるが屋根のないA槽ではほとんど沈下していない。

また11月下旬からの凍結期には、A土槽では最大8cmの凍上による持ち上がりがあったが、B土槽の持ち上がりは2cm程度と明らかな差が認められた。

(4) 降雨の影響

写真2で見られるように、B土槽では屋根をかけているため、未凍結期の降雨は土槽内には入らない。また、凍結期の降雪は常に除雪した。したがってA土槽とB土槽の

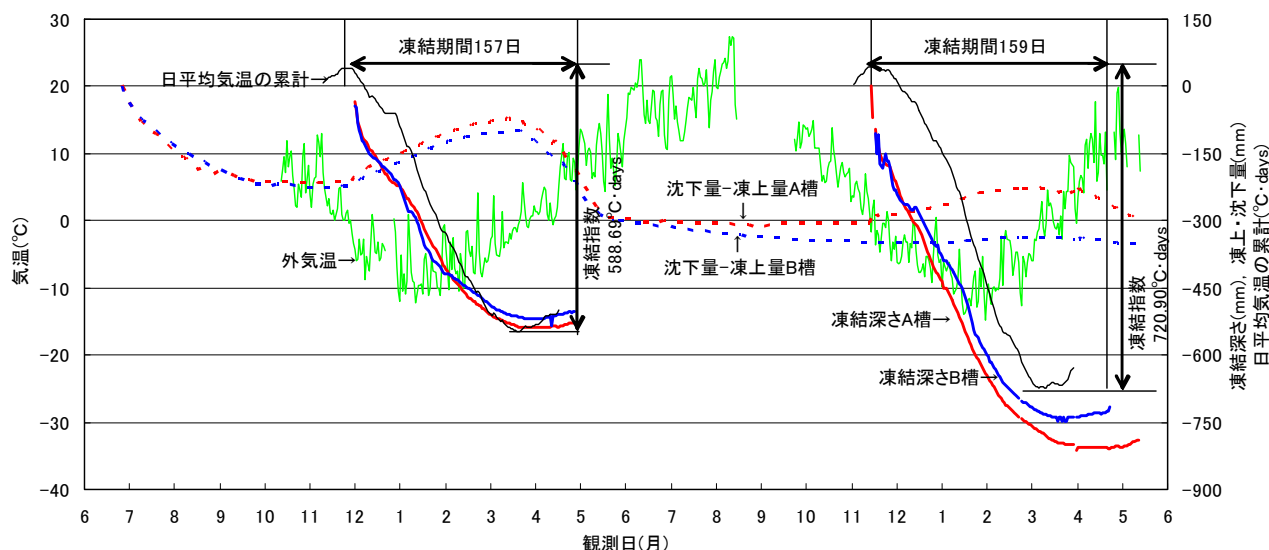


図4 気温と凍上量、凍結深さの関係

自然条件の違いは、未凍結期(4月～11月)の降雨が土槽に入るかどうかだけである。ちなみに、1シーズン目の設置時～11月末までの総降雨量は708mmであり、2シーズン目の4月～11月の総降雨量は516mmであった。

このような降雨の有無の違いが、A土槽とB土槽との間にあるにもかかわらず、この違いの影響は、とくに1シーズン目の地表面変位には、あまり現れていない点は注目される。これらの降雨の有無の影響については次項以降の含水比変化のところで詳述する。

図4に示すA、B両土槽の沈下―持ち上がりの過程に着目する。300%という高い含水比から測定を開始した。1シーズン目では、乾燥、圧密による沈下、凍上による持ち上がり、および融解による沈下ともにその値は大きい。A、B両土槽の違いは相対的に無視できる程度に小さい。

一方、ある程度含水比が低下した2シーズン目では、未凍結期の沈下はB土槽で大きく、凍結期の凍上による持ち上がりはA土槽の方が大きい。以上の結果は、降雨の影響を受けるA土槽では1シーズン目で定常的な含水比に近づき、降雨の影響を受けないB土槽では2シーズン目以降も乾燥による含水比の低下が進行していることを示している。

今、図4に示すA土槽の地表面をもとに、シーズンを通しての地表面の動きについて考察してみる。A土槽では、設置後から凍結が始まる11月までの間に22cm沈下している。この沈下の原因として乾燥による収縮と、自重による圧密沈下の2つが考えられる。この2つを定量的に分けることは困難である。しかし、初期層厚は1mであり算出される平均圧密圧力は5.9kPaと非常に小さいこと、さらに写真2に見られるように幅30～50mm程度、深さ300～500mm程度の乾燥クラックが多く見られることさらには、深さ30～40cmより下の下層部での含水比は、深さ方向へ

の変化はほとんど認められないことから、未凍結期の沈下は圧密による成分は小さく主として、乾燥収縮によるものと見なして大過ないと思われる。

4.3 凍結前の含水比変化

土槽に投入した底質は、凍結期前までに乾燥を受けて含水比が低下する。図5に6月27日の試料投入時から、凍結開始直前の11月14日までの間における、含水比の変化を示す。A、B土槽ともに試料投入時の含水比は300%である。屋根を持たないA土槽の含水比分布に注目してみると次のことが分かる。

- 1) 表面10cmの含水比は試料投入後1か月で300%から190%弱まで低下し、その後10月までの約3か月間の含水比は170～190%程度のせまい範囲で増減している。
- 2) 表面部分の10cmを除いて、8月までの2か月間は日数経過に比例して含水比が低下し、その後11月までの3か月間は、含水比分布に大きな変化は現れていない。
- 3) 試料投入時に均一な含水比分布であっても、表面からの乾燥の影響を強く受けて、深さ30cm程度までは、深さとともに含水比は大きく変化する。しかし、深さ30cm以下では、深さによる含水比変化はほとんど見られない。このような含水比分布は、深さ30～40cmの乾燥収縮クラック(写真2)の発生と降雨の影響によると考えられる。

一方、屋根を持ち降雨の影響を受けないB土槽では以下のような特徴が認められる。

- 1) 含水比の低下は6月27日の試料投入から、9月26日までの3か月間に著しく認められ、その後11月14日までの約2か月の間の含水比分布の変化はほとんど見られない。

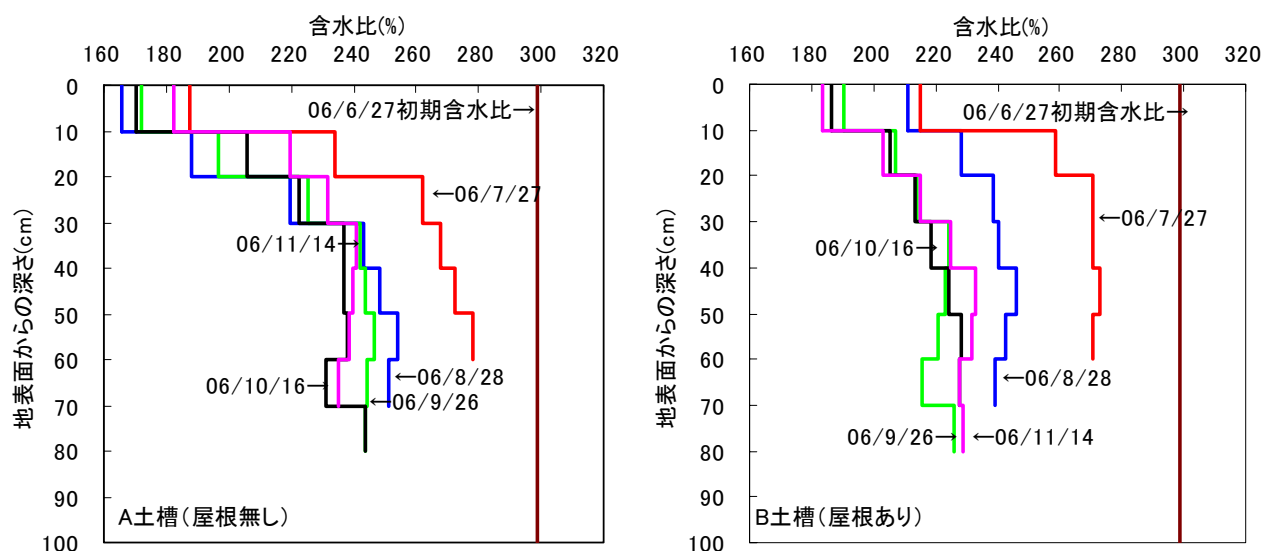


図5 凍結前の土層の含水比分布

- 2) 含水比分布の形状は A 土槽の場合と類似であるが、含水比の値自体は屋根付きの B 土槽の方が小さめになっている。たとえば、深さ方向への含水比変化がほぼなくなる 20~30cm 以下の含水比を比較すると、A 土槽で 240%程度、B 土槽で 220%程度である。
- 3) 含水比分布は、試料投入 3 か月後の 9 月 26 日で落ち着いている。ちなみに、屋根のない A 土槽では、試料投入 2 か月後の 8 月 28 日で含水比分布は定常化している。この結果は、特に降雨の影響を受ける A 土槽のような条件下では、自然乾燥による含水比低下に限界があることを示唆している。

前述のように屋根の有無による外的条件の違いは、未凍結期(4~11 月)の降雨の有無と言える。ちなみに、1 シーズン目の試料投入時点から 11 月までの間の全降水量は、708mm である。この雨水がすべて土槽の中に留まったと仮定すると、土槽の中の試料の平均含水比は計算上 218%増加することになる。これに対して、A 土槽と B 土槽の試料の平均含水比の差は 20%程度である。すなわち、屋根のない A 土槽において未凍結期に供給された雨の大部分は土中に留まることなく短期間のうちに土槽底部の砂利層を通して排出されたことを示している。表 1 に示す試料土の物性から類推すると、雨水が土槽中を速やかに通り抜けることは考え難いが、写真 2 に見られるクラックの発生や、凍結・融解後の土の透水性の増加^{11) 12) 13)}の影響が現れたと考えられる。また、この結果は前出の図 5 において、1 シーズン目の沈下量において屋根の有無による差が相対的に小さいことも一致する。

4.4 凍結期の含水(氷)比変化

図 6 に凍結期の深さ方向の含水比分布を、測定日ごとに示す。図 6 には比較として未凍結期のデータもあわせて示している。凍結期の含水比分布は、ボーリングにより 1

シーズン目は 12/14, 1/15, 2/20, 4/25 の 4 回、2 シーズン目は 12/26, 1/21, 2/26 の 3 回測定した。図 6 にはボーリングコアから測定された凍結面位置もあわせて示している。

未凍結期は、地表面からの乾燥によって、深さが増すとともに含水比が高くなる形の分布を示すが、凍結期の含水比分布は凍結前とは異なっている。1 シーズン目の 12/14, 1/15, 2/20, 4/25 は、いずれも凍結面より上、すなわち凍土部で含水比が高くなり、凍結面で急変してそれよりも下で著しく低くなっている。前出の写真 1(b)は 1 シーズン目の 2007 年 1 月 15 日の A 土槽の凍土部ボーリングで採取されたコア断面であるが、多くのアイスレンズが認められる。A 土槽、B 土層ともに凍結期間の 12 月から 2 月の間は時間の経過とともに凍結面が深くなっている。この傾向は 2 シーズン目の 12/26, 1/21, 2/26 も同じである。

(1) 1 シーズン目の含水(氷)比分布

図 6(f), (g)に示す厳冬期の 1/15, 2/20 では、凍結面より上、すなわち凍土部で含水比が高く、これより深い箇所すなわち未凍結部では含水比は低くなっている。凍結面より深い未凍結土側で含水比が低いのは、凍上により凍結面への水分移動(上昇)があったためである。

2/20 では、1/15 よりも凍結面が深くなった分だけ含水比の高い部分が厚くなっている。凍結面が深くなることにより、凍上による水分移動が深いところにまで及ぶことを示している。また、このことは未凍土側のさらなる含水比低下をもたらしているが、この点は後述する。

図 6(h)の 4/25 では、地表面 20cm 程度での含水比低下が明瞭になっている。これは地表面の融解が進んでいるためである。図 6(h)の結果は、凍結した地盤が融解するとき、地表面から徐々に融解すると同時に融解した水分の大部分は地表面から蒸発していくことを示唆している。このこ

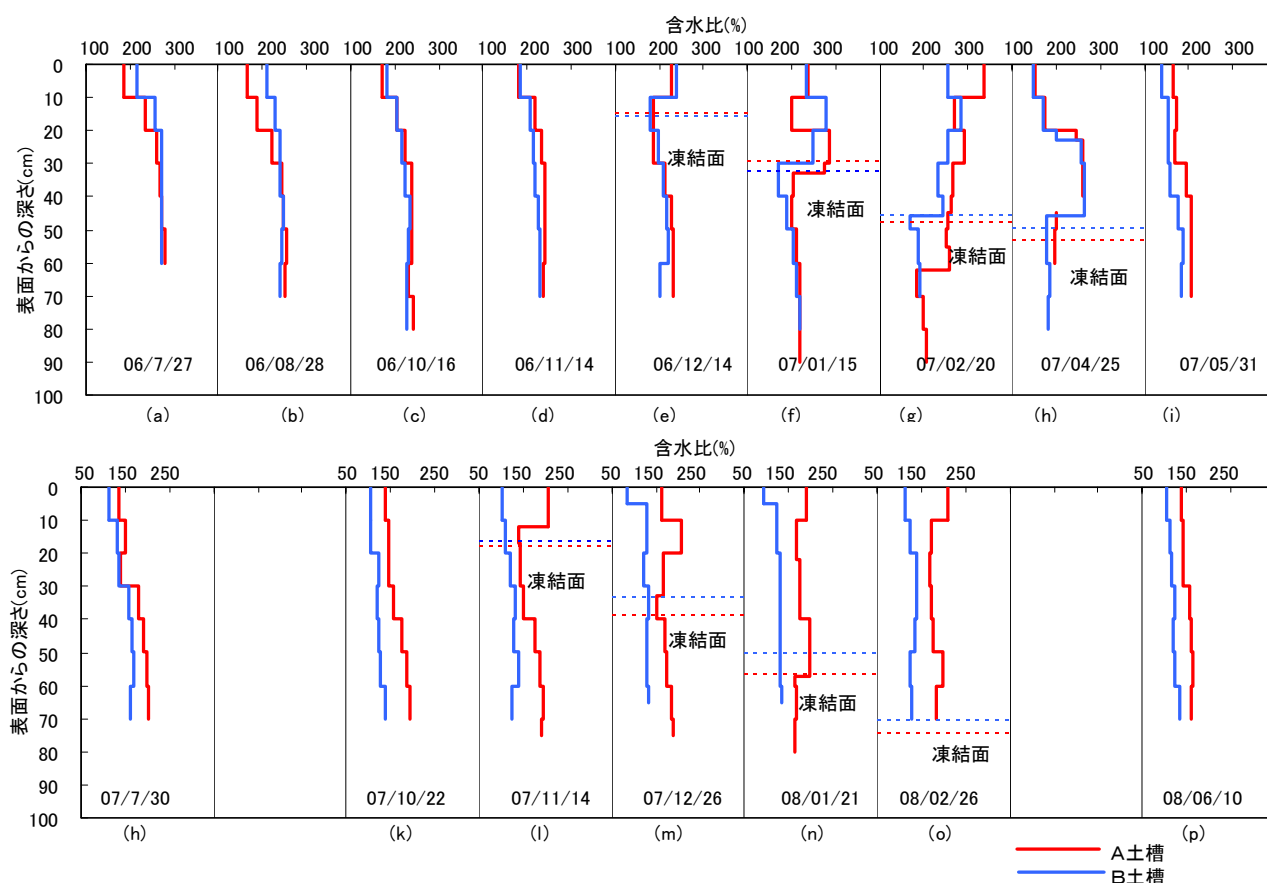


図6 土槽の含水比変化

とは、融解した層の下に、含水比の高い凍土層が存在していること、さらに凍土層の下の未凍結層の含水比はほとんど変化しておらず、むしろ低下気味であることから伺える。

凍上の発生によって、凍土中にアイスレンズとして閉じこめられた水分は、融解時にどこへ行くかについては、あまり解明されていないことである。いずれにしても、上方へ蒸発していくか、下方へ浸透していくかのどちらかであることは、間違いないのであるが、本実験ケースのように、地表面が開かれた自然地盤では、融解した水分の大部分は上方へ蒸発している可能性が高い。すなわち、4.4で述べたように凍結前の時期には乾燥によって地表面から20cm程度の含水比が著しく低下する。一方、凍上により土槽の下部から地表面に大きく移動した水分は融解後にもいったん低下した下層部の含水比を高くすることなく、その大部分は地表からの蒸発により消失したと解釈される。

(2) 2シーズン目の含水(氷)比分布

図6(i)～(p)に2シーズン目の含水比分布の変化を示している。これらの図から次の4点が挙げられる。

- 1) 屋根のないA土槽と屋根のあるB土槽の含水比分布の差は、2シーズン目より明瞭に現れている。
- 2) 未凍結期の含水比分布(図6(i)～(k))は、A、B土槽いずれも深さとともに含水比が大きくなるように分布

している。このとき上層と下層の含水比の差は大きくても50%程度であり、70%を超える差の認められた1シーズン目より小さい。

- 3) 未凍結期のA、B土槽の含水比の差は5/31(図6(i))の30%程度から10/22(図6(k))の70%程度に広がっている。また、屋根を持たず降雨の影響を受けるA土槽の含水比はほとんど変わらないのに対して、屋根のあるB土槽では含水比が低下している。
- 4) 凍結の進入による水分の移動(図6(m)～(o))の影響は、土槽下部の含水比の低下と、表面10cm程度の含水(氷)比の増加に認められるが、1シーズン目に比べて、その効果は小さい。

以上の結果を全体的に見れば、屋根を持たずに降雨の影響を受けるA土槽の含水比低下は、1シーズン目でほぼ落ち着くのにに対して、屋根を持つB土槽でも同様の傾向が認められるものの、乾燥による含水比の低下は2シーズン目以降も緩やかに継続する。

4.5 含水比の時間的推移

凍結することにより、凍結部分の含水比は高くなり、これよりも深い未凍結部では含水比が低くなることがわかった。また、未凍結期には乾燥により地表面付近で含水比が低くなることを確認した。図7は、土槽を未凍結期の0～30cm、および凍結期の凍結部分に相当する上層部と、

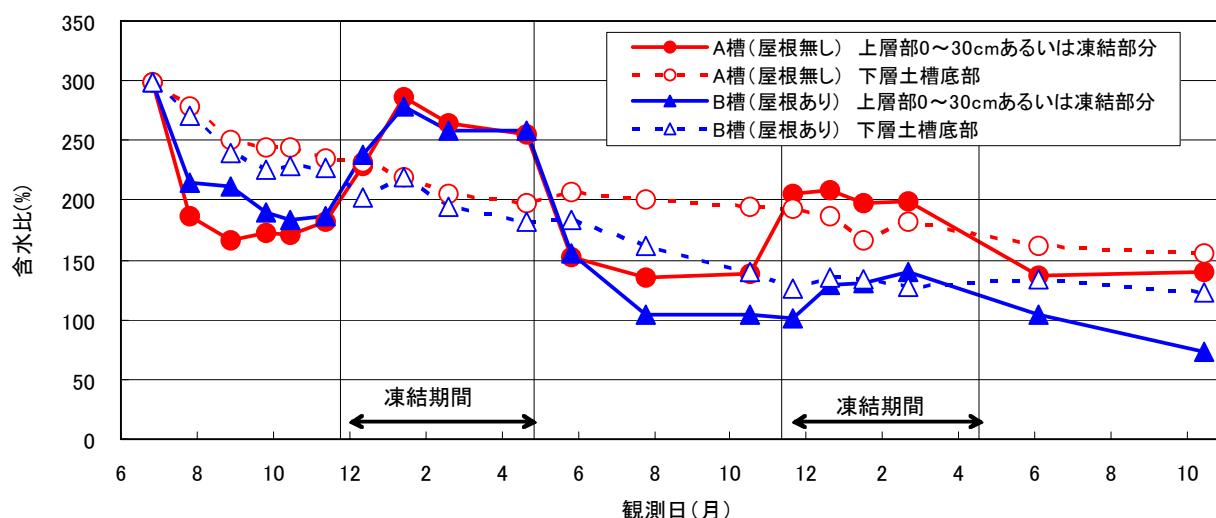


図7 底質の含水比変化

未凍結期における30cmより下層および凍結期における未凍結部分に相当する下層部に分け、各々の層の平均含水比の推移を示している。

(1) 1シーズン目の含水比変化

気温が氷点下になる前の11月までの上層部の平均含水比は、A層、B層ともに底質を土槽に投入した6月の時点で約300%であったが1か月後には約200%に低下し、その後時間の経過とともに徐々に低下し11月下旬には約180%になった。これに対して、下層部では、底質を土槽に投入したときから、徐々に含水比は低下し11月の時点でも上層部より約50%高い230%であった。

1シーズン目の気温が氷点下になる12月の中旬からは凍結部分の含水比が急増して、1月には約280%まで上昇した。この間下層部の含水比はA槽、B槽ともにほぼ同じ値で推移し凍結部より約60~80%低い値をとりながら、30%程度減少した。この含水比の変化は、凍上発生によって、凍結部へ水分が異動したために起きた変化である。

また、12月14日から1月15日にかけて、凍結部の含水比が、20%程度低下している。これは表層部のアイスレンズの昇華によるものと考えられる。上層部の含水比は、凍土が完全に消失した5月以降は、再び低くなっている。

(2) 2シーズン目の含水比変化

2シーズン目の凍結が終了した6月以降も屋根を持つB土槽下部の含水比は時間の経過とともに低下している。しかし、屋根を持たず降雨の影響を受けるA土槽では上下層ともに7月下旬以降含水比の低下は少なく、自然乾燥による脱水には限界があることを示している。一方、この間も屋根のあるB槽の含水比は徐々に低下している。このように、屋根の有無の影響は含水比がある程度低下した2シーズン目以降に顕著になることが分かる。

気温が氷点下になり、凍結が再び始めると、A土槽上層の含水比は60%程上昇し、B土槽上層でも30~40%程の含水比の上昇が見られる。この含水比上昇は1シーズン目

に見られたものと同じ凍上の発生によるものであるが、含水比上昇量は、少なくなっていることが分かる。

以上のように、初期含水比が300%と非常に高い1シーズン目では、未凍結期、凍結期ともに含水比の変化が大きく屋根の有無すなわち、降雨の影響は相対的に小さいことが分かる。一方2シーズン目に入ると、1シーズン目の融解が終了した時点で土槽の平均含水比は、A土槽で170%、B土槽で160%程度まで低下し、その後2シーズン目の凍結が終了した時点での平均含水比はA土槽で150%、B土槽で120%程度であった。この違いは、降雨の影響を受けるA土槽の含水比低下は1シーズン目で落ち着くのに対して、降雨の影響を受けないB土槽では2シーズン目以降も含水比の低下が続くことによって現れる。

5. まとめ

高含水比不良土の自然凍結融解過程における水分挙動を確認するために以下のような実験を行った。3.15m四方で深さ1.5mのコンクリート製の屋外凍結実験土槽2基に、網走湖で浚渫された初期含水比300%の底質を深さ1mまで投入した。また、一方の土槽には屋根を設けて未凍結期の降雨の影響が現れないようにした。この2期の土槽中の浚渫底質について、平成18年6月からスタートして、2回の冬期シーズンを経過した平成20年10月までの2年間にわたって凍結状況と含水比変化の推移を追跡した。測定の結果分かったことをまとめると次のようになる。

(1) 実験開始後の1年目(1シーズン目)には、主として乾燥収縮による22cm程度の沈下、凍上による13cm前後の持ち上がり、さらに21cm程度の融解沈下を経過し、結果的に1年後の6月には全層厚の3割に相当する30cmの沈下となった。この結果には、屋根の有無による未凍結期の降雨の影響はほとんど現れなかった。

- (2) 2 シーズン目の地表面の変動は、1 シーズン目に比べて小さく、1 年を通しての最終沈下量は、屋根のない場合ではほぼゼロ、屋根を持つ場合で 5cm 程度であった。
- (3) 1 シーズン目の凍結期には乾燥収縮によって土槽表面には幅 30～50mm、深さ 300～500mm 程度の連続したクラックが網目状に発生した。しかし、このクラックは 2 シーズン目にはほとんど発生しなかった。
- (4) 自然地盤の凍結・融解過程における一次元的な水分の移動が、地盤の含水比減少に強く寄与することが確認された。また、上記(1)～(3)の内容は、この効果が 1 シーズン目でその大部分が現れることを示している。特に屋根を持たずに降雨の影響を受ける場合には、2 シーズン目以後は含水比が一定の値に収まる傾向が見られた。
- (5) 未凍結期には、地表面からの乾燥によって、地表から深さ 30cm くらいまでの間で含水比の減少が著しく現れるが、それより下の層では、含水比の低下が小さく、さらに一定の値に落ち着く傾向が見られた。
- (6) 凍結期に入ると、凍上現象による凍土部への水分の吸い上げが起こり、上層の凍結部の含水(氷)比が増加し、水分を吸い上げられた下層の未凍結部の含水比が減少する。
- (7) 上層の凍結部の含水比は融解にともなって急減して行き、融解が完了した時点で、凍結前の含水比より低くなる。このとき、融解した水分の浸入による下層の未凍土層の含水比増加はほとんど見られないことから、融解水の大部分は蒸発によって失われたものと思われる。また、凍結期においても、地表面付近では昇華による含水(氷)比の減少も認められた。

6. おわりに

本実験の結果、凍結・融解による不良土改良の可能性が明らかになった。今回行った実験のモデルをそのまま適用しようとすれば、高含水比土の発生箇所での含水比の低下のための大型の土槽が必要である。今回の実験結果で実用化するためには、土槽に代わることでできる簡易な設備の開発が必要であり、今後この検討を進める予定である。

謝辞

実験でご尽力いただいた北見工業大学平田広昭職員、大学院生の千葉章世さん、島田建設(網走市)、また浚渫土砂を提供いただいた網走開発建設部の関係者には記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 久野悟郎：土の締固め—主として道路土工に関連して—、技報堂、1963.2.
- 2) 佐藤厚子、西川純一：浚渫土砂の有効利用に関する検討、開発土木研究所月報 No.517、1996.6.
- 3) 松尾新一郎：土質安定工法便覧、p.16、1972.12.
- 4) 北海道開発局土木試験所土質研究室：北海道における不良土マニュアル(案)、1985.2.
- 5) 地盤工学会：土の凍結—その理論と実際—、1994.6.20.
- 6) 境秀吉、大貫浩幸、西島利康、本間浩一、了戒公利：寒冷気候を利用した高含水粘性土の冬期土工(その1、野外実験)第31回地盤工学研究発表会講演集、pp.2385～2386、1996.
- 7) 了戒公利、荻迫栄治、境秀吉：寒冷気候を利用した高含水粘性土の冬期土工(その2、締固め効果)第31回地盤工学研究発表会講演集、pp.2387～2388、1996.
- 8) 広瀬剛、伊藤謙、片野田栄一：凍結融解土の圧密特性の変化について、土木学会第55回年次学術講演会、2000.9.
- 9) 嘉門雅史、伊藤謙、片野田栄一：凍結融解現象を利用した圧密促進工法に関する実験、京都大学防災研究所年報第44号B-2、2001.4.
- 10) Martel, C. J.: Fundamentals of Sludge Dewatering in Freezing Beds, Journal of Water Science and Technology, Vol.28, No. 1, pp.29～35, 1993.
- 11) B.Ladanyi: Frozen Ground Engineering, p.44.
- 12) J.-M.Konrad: Physical Processes During Freeze-Thaw Cycles in Clayey Silts, Cold Regions Science and Technology, 16(1989)291-303.
- 13) Craig H. Benson and Majdi A. Othman, Members, ASCE: Hydraulic Conductivity of Compacted Clay Frozen and Thawed in situ, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.119, No.2, 1993.2.
- 14) 木下誠一、鈴木義男、堀口薫、福田正己、井上正則、武田一夫：苫小牧における凍上観測(昭和51年～52年冬期)：初期地下水位の影響、低温科学・物理篇、Vol.35, pp.307-319, 1977.
- 15) 山崎不二夫、山内豊聡：土質工学の基礎—土の力学的挙動、pp.142-144、1972.6.
- 16) 日本道路協会：道路土工-土質調査指針、1977
- 17) 佐藤厚子、西本聡、鈴木輝之、山下聡、小倉憲之：凍結を利用した不良土の改良、第47回地盤工学会北海道支部技術報告集2007.2.
- 18) 鈴木輝之、山下聡、松岡元、山口啓二郎：袋詰めした砂利の凍上抑制効果、第35回地盤工学研究発表会、2000.6.

(2008. 11. 18 受付)

Change of Moisture content of unsuitable soil through freezing and thawing process appeared in natural cold climate

Atsuko SATO¹, Dai NAKAMURA², Teruyuki SUZUKI² and Satoshi NISHIMOTO¹

1 Geotechnical Research Team, Civil Engineering Research Institute for Cold Region

2 Department of Civil and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology

Abstract

Ground freezes from the surface downward, and during this process soil moisture is drawn upward. The moisture content of soil that has frozen is high, whereas the moisture content of non-frozen soil below that is low, because water is drawn upward toward the soil that has frozen. If high-moisture soil can be improved to yield low-moisture soil using this phenomenon, low-cost improvement will be possible. Moisture can be reduced by repeated freezing and thawing, changes in soil temperature, then, soil moisture change through winter were monitored in outdoor experiments. It was shown that unsuitable soil could be improved by repeated freezing and thawing, that the decrease in moisture content was finished within one season.

Key words: frost heave, freeze-dry, high water content, improving