

## 凍結を利用した不良土の改良

寒地土木研究所 ○ 正 員 佐藤厚子  
寒地土木研究所 正 員 西本 聡  
北見工業大学 学生員 小倉憲之  
北見工業大学 正 員 鈴木輝之

### 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。近年、環境負荷低減への社会の関心が高くなっていること、廃棄処分できる場所が限られてくることなどから、このような不良な土砂であっても有効利用しなければならない気運にある。

浚渫土砂は、浚渫作業時に河川や湖沼の水と一緒に排出されるため、特に含水比が高い材料である。このため、天日乾燥や強制乾燥などの方法により、十分な強度とするためには時間と費用が大きくなる。また、固化材による改良や寒さを利用した施工技術の紹介<sup>1)</sup>があるもののあまり実用的ではない。

一方、地盤が凍結する場合、地表面から冷却されることにより土中の水分を上部に吸い上げながら凍結していく<sup>2)</sup>。このとき地盤の下部では水分が上昇することにより、含水比が低下すると予想される。この原理を応用して北海道の冬の寒冷な気候の下で、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、かなり低コストな改良が可能となる。

本報告では、室内および屋外で高含水比の浚渫土砂を凍結、融解させる実験を行ったところ、含水比を低下させることができたのでこれを取りまとめた。

### 2. 実験の原理

冬期間気温が0℃以下になると、図-1に示すように土の中の間隙水が徐々に凍結し未凍結部分から凍結面に水を供給しながらアイスレンズが成長していく。このため、アイスレンズより下の土砂の水分は減少し、非常に低い含水比となる。一方、含水比調整などで自然含水比状態の試料をいったん乾燥してから加水すると、粒径の比較的小さな試料では土粒子の吸水する能力が変化し、もとの状態まで水分を吸収しない。

これらのことから、北海道の冬季の低い気温を利用して、高含水比の土を凍結させてアイスレンズを発生させることにより地盤下部の含水比を低下できる。さらに、春季に気温が上昇しアイスレンズが融解しても水分が土砂に吸収されず、高含水比土の含水比をより効果的に低下させることが期待できる。

### 3. 堆積している不良土の含水比

図-2に堆積している不良土の含水比の分布として、網走湖の浚渫底泥を貯留した排泥池の含水比の分布を示す。地表面から20cm程度は自然の風乾で含水比の低下が見られるが、これよりも深くなると含水比の低下は見らず、凍結融解を利用した改良が適用できれば、地表面から深い箇所の不良土の改良が期待できる。

### 4. 試験方法

#### 4. 1 試験に用いた材料

試験は秋から初冬にかけて網走湖より浚渫され排泥池に沈澱した3種類の細粒土で行い、その基本物性値を表-1に示す。沈澱のための凝集剤は用いていない。いずれも自然含水比が高くコーン指数の測定が不能な軟弱土で高液性限界シルトに分類される。No.1とNo.3は同じ排泥池から採取し、No.2は異なった排泥池から採取した。

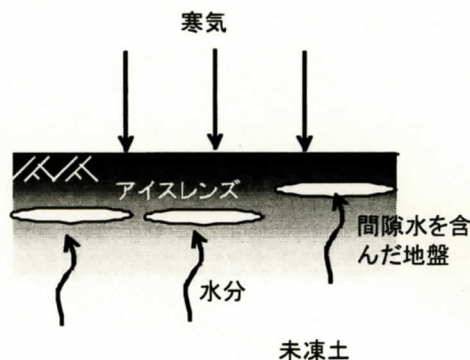


図-1 凍上の原理

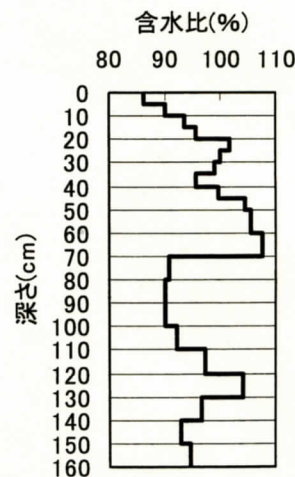


図-2 排泥池にある浚渫土砂の含水比

Application of a Freeze-dry Method for Improving Wet Unsuitable Soil

Atsuko Sato, Satoshi Nishimoto(Civil Engineering Research Institute for Cold Region)

Noriyuki Ogura, Teruyuki Suzuki (Kitami Institute of Technology)



表-1 高含水比土の基本物性値性状

網走湖底泥		1	2	3
土粒子密度 $\rho_s(t/m^3)$		2.478	2.260	2.45
自然含水比 $w_n(\%)$		102.85	332.44	81.73
粒度特性	2mm 以上 (%)	0.0	0.0	4.10
	75 $\mu m$ ~ 2mm (%)	0.0	7.6	68.07
	75 $\mu m$ 以下 (%)	100.0	92.4	27.83
液性限界 $w_L(\%)$		122.0	231.0	121.52
塑性限界 $w_P(\%)$		60.5	105.6	65.78
地盤材料の分類記号		MH	MH	MH
締固め特性	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(t/m^3)$	0.905	-	0.96
	最適含水比 $w_{opt}(\%)$	51.90	-	49
コーン指数 $qc(kN/m^2)$		100	測定不能	測定不能

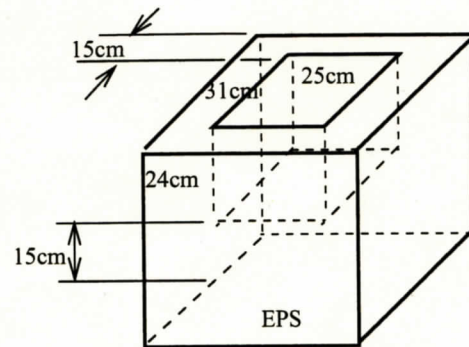


図-3 EPS容器

#### 4.2 室内試験

凍結融解を繰り返すことにより実際に含水比の低下が発生するかを確認するため、No.1の試料を 295×235×45mm の容器（以降浅形容器と称する）に入れ凍結融解を繰り返し、各融解後に土の重さを測り含水比を計算した。次に 300×400×250mm のコンテナ容器（以降コンテナ容器と称する）と実際の地盤を想定し寒気が上部からしか入らないように、図-3で示すような EPS で断熱した容器（以降 EPS 容器と称する）に、No.2 の試料を投入し凍結融解を繰り返した。凍結融解ごとにコンテナ容器の底部から試料を採取し含水比を測定した。すべての試験で-20℃で凍結、室温（15～20℃）で融解させた。

#### 4.3 屋外試験

No.3 の試料について、図-4に示す屋外土槽に 10 月下旬に試料を投入し、2005 年 11 月から翌年の融雪期まで、凍上量、凍結深度、外気温、土中温度、土中含水比を計測した。各測定方法と測定間隔を表-2に示す。降雪時には除雪し地表面が常に大気中に現れているようにした。なお、周辺からの水分は土槽の底面から自由に移動できる状態になっている。

### 5. 試験結果

#### 5.1 室内試験

##### ①凍結・融解後の含水比の変化

浅形容器に入れた試料の含水比の変化を図-5に示す。凍結融解を繰り返すごとに含水比は低下した。凍結により、試料内部の水分が表面に集まる。表面の氷が融解して再び凍結するとき、凍結室内の湿度が低いため、試料表面の水分の一部が凍結する前に空气中に蒸発したと思われる。事前の試験でこの試料は含水比 80%で  $qc=500kN/m^2$  となることを確認しているが、5回の凍結融解繰り返してこの強度を確保できる含水比となり凍結を利用した不良土の改良が可能であるといえる。

##### ②土中の水分の上昇確認

コンテナ容器の凍結融解繰り返しの不良土の状態を写真-1に示す。1回目の凍結(b)では表面に氷ができず表面が隆起し内部に氷が発生したように見受けられた。この

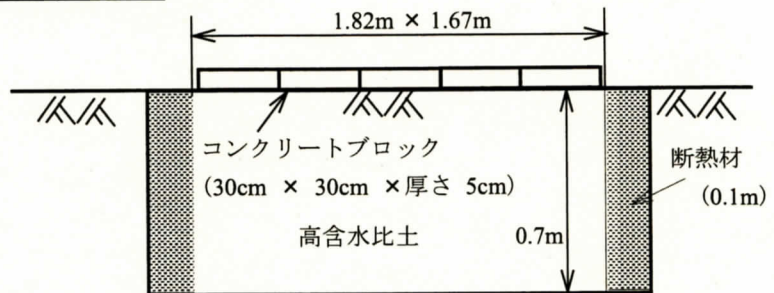


図-4 屋外試験土槽

表-2 屋外試験測定項目と間隔

測定項目	測定方法	測定間隔
凍上量	変位計	2 時間
	定規	1 日
土中温度	熱電対	5 分
外気温		
凍結深度	メチレンブルー計	1 日
含水比	ボーリング採取	1 か月

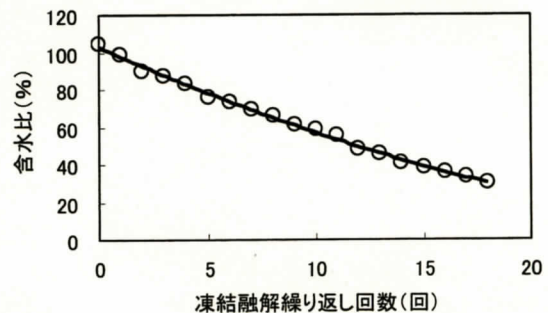


図-5 浅形容器試料の含水比の変化

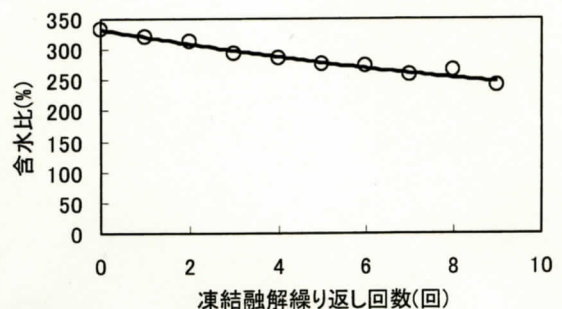


図-6 コンテナ容器試料の含水比の変化



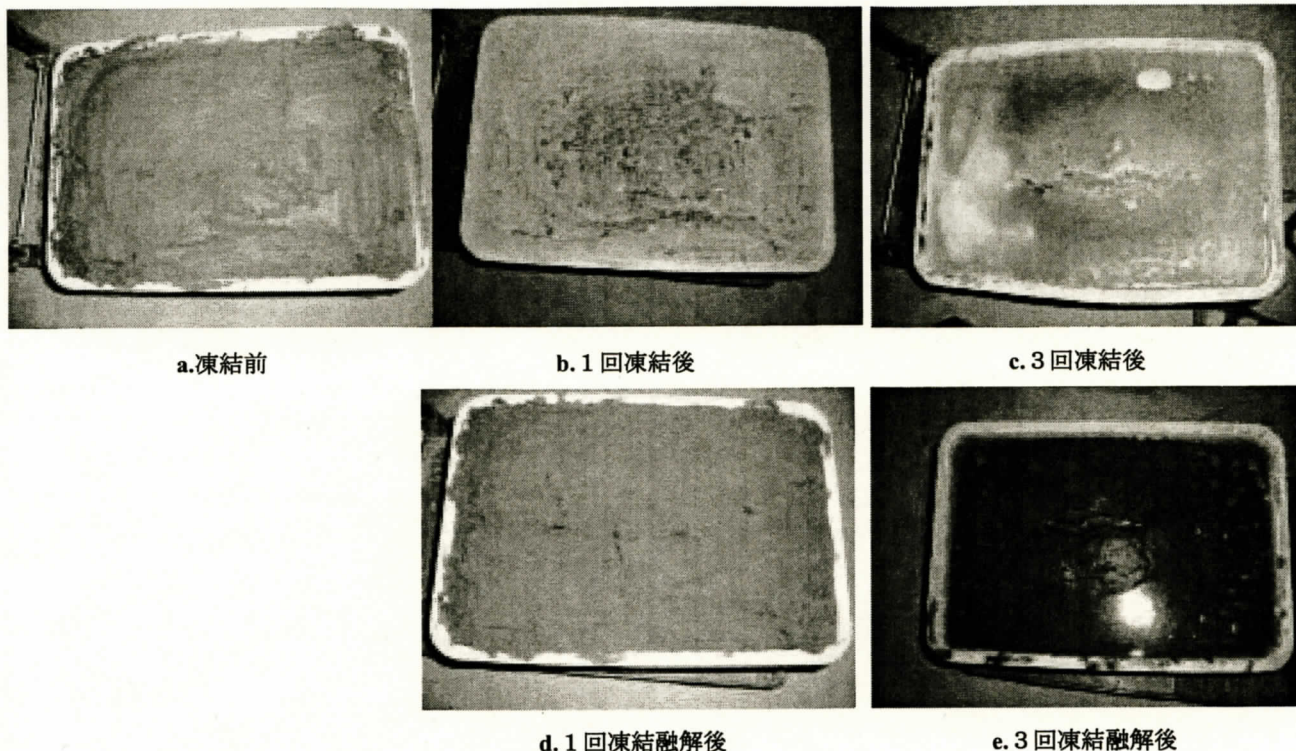


写真-1 コンテナ容器試料の凍結状況

後融解(d)すると凍結前とほぼ同じ状態になった。2回目以降の凍結で表面に氷ができれば、3回目以降の凍結(c)で顕著に厚い氷が表面にできた。融解後(e)は、土表面に厚い水の層ができ、水の上方への移動が認められた。

コンテナ容器の凍結融解後の含水比の変化を図-6に示す。コンテナ容器では10回の凍結融解の繰り返しの約100%の含水比の低下が確認できた。もとの含水比が高いためこの状態では施工可能な状態には至っていないが、確実な含水比の低下がみられた。

EPS容器では1回目の凍結融解後に試料の表面の含水比は19.68%となり含水比の大きな低下が見られた。その後は凍結融解を繰り返すごとに土中の水が表面に浮き出てきて、コンテナ容器と同じ状態になった。

## 5. 2 屋外実験

### ①外気温、地中の温度変化

外気温と地中温度の変化を図-7に示す。地表面は外気温の影響を大きく受け温度の変化が著しい。深度10cmよりも深くなると外気温の影響を受けづらくなり、いったん0℃以下になると本格的な雪融け時期になるまで地中の温度は0℃を越えない。深さ40cm程度までは外気温の変化と同様な温度変化を示し、地中の温度が最低となる時期と外気温が最低となる時期とほぼ等しい。これよりも深い場所では、地中の温度が最低になる時期は外気温が最低になる時期よりも遅れて現れる。また、深さ100cmでは0℃以下になることはなかった。これらのことから深度40cm程度までは外気温の低下にともないこれよりも深い部分の水分移動が生じ、深度40cmよりも深い部分では外気温が上昇傾向の時期でも、さらに下方の水分が上方へ移動すると考えられる。

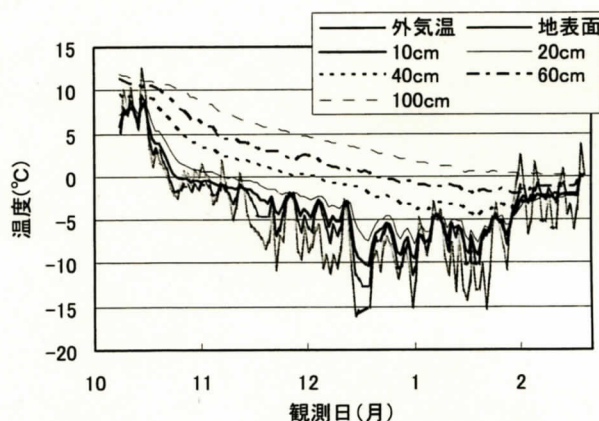


図-7 外気温、地中の温度

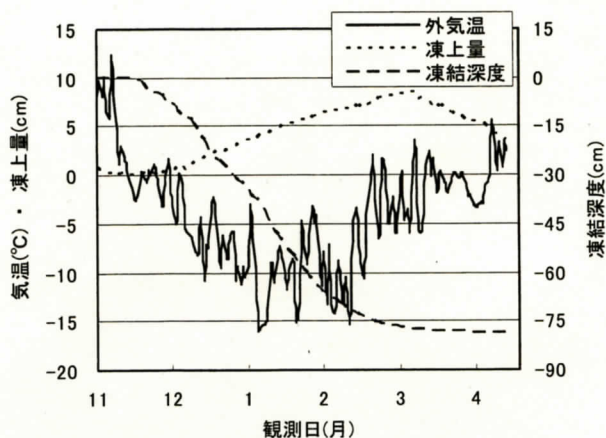


図-8 外気温、凍結深度、土層の凍上量の変化



## ②外気温、凍上量、凍結深度

外気温、土槽の凍上量、凍結深度を図-8に示す。11月下旬の日平均外気温が0℃を下回るところから凍結深度が深くなり、凍上量が大きくなっている。凍上量は外気温が0℃を上回るところから減少している。外気温が0℃を上回っても凍結深度はしばらく深いままであり、かなり遅い時期まで水分移動があるものと考えられる。

## ③含水比

土槽の含水比分布の変化を図-9に示す。含水比分布は、凍土ボーリングとシンウォールサンプラーにより12/20、1/31、2/24の3回測定した。12/20の凍結面は、地表面から22.5cmである。12/20では凍結面を境として、それよりも上方では凍結する前の含水比81.7%よりも高くなっており、凍結面よりも下方では含水比が低くなっている。特に凍結面の直下では20%近く含水比が低下し、凍結により未凍結部分からの大きな水分移動があることをはっきりと確認できる。未凍結部分の含水比は凍結面から下方に向かうに従い徐々に大きくなっており、深度65cmくらいまで、含水比の低下が見られた。すなわち凍結面より下方40cm程度は改良効果が期待できるといえる。凍結部分の含水比は凍結面から10cmまでは大きな変化はないが、地表面は高い含水比であった。このとき地表面に氷が見られた箇所もあった。

1/31では、凍結面は地表面から60cmである。凍結部分の含水比は12/20測定時の含水比よりも高くなっており、12/20測定時の地表面から60cmのときの含水比が約75%であり、凍結部でこれよりも高い含水比となっていた。1/31でも12/20と同様に凍結面付近で急激な含水比の低下がみられ未凍結部分からの水分移動があったものと考えられる。凍結部分の含水比の増加の傾向は12/20測定時とほぼ同じ傾向にある。

2/24は土槽の下方に凍結面がある。2/24の測定では1/31よりも凍結面より上の含水比が高くなっている。これは土槽の底部から自由に水分移動できたため、ここからの水分移動により全体としてもとの含水比よりも高くなったものと考えられる。

以上の3回の含水比の測定結果より、凍結面を境として凍結部分に未凍結部分からの水分が移動したことが確認できた。特に凍結面直下の含水比低下が著しく、凍結による不良土の改良の可能性が確認できた。

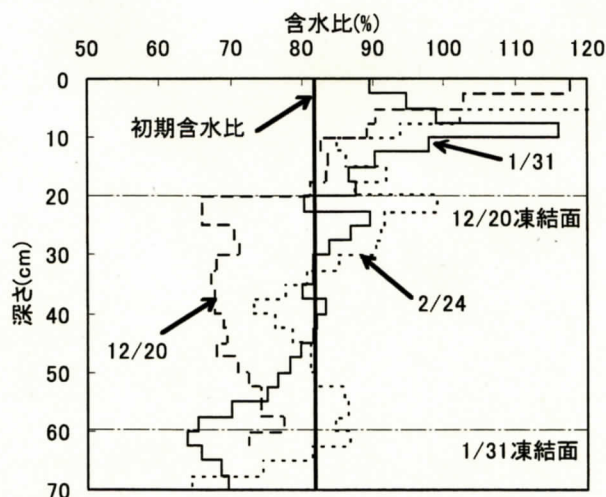


図-9 土層の含水比の変化

## 6. まとめ

これまでの試験結果より次のことがわかった。

- ①凍結を利用して不良土の改良が可能である。
- ②凍結深が深くなっていく途中で未凍結部分からの水分移動がある。
- ③凍結面直下の含水比低下が著しい。
- ④凍結面から40cm程度下方までの未凍結土の改良ができる。

## 7. おわりに

本検討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。より効果的に含水比を低下する目的で、現在、雨水や土槽底部からの水分供給のない状態で凍結実験を行っている。今後、さらに検討を重ね凍結による水分移動特性を明らかにするとともにこの工法の実用化に向けたたいと考える。

なお、最後になりましたが実験でお手伝いいただいた北見工業大学平田技官、学生の千葉章世さんには記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 土谷富士夫、伊藤譲、了戒公利：土の凍結と地盤工学、7. 寒さ利用による地盤凍結、土と基礎 Vol51.No.9、pp39-45、2003.9
- 2) 土質工学会：土の凍結—その理論と実際—、p5、1994.6