

## 土の凍結と地盤工学

### 7. 寒さ利用による地盤凍結

土谷 富士夫 (つちや ふじお)

帯広畜産大学教授 畜産学部畜産科学科

伊藤 譲 (いとう ゆずる)

摂南大学助教授 工学部都市環境システム工学科

了戒 公利 (りょうかい きみとし)

東洋技術㈱ 技師長

#### 7.1 凍土地盤の諸性質と利点

寒冷地域において、克雪・利雪そして寒さの有効利用が近年注目されつつある。今まで有害的な認識におかれ邪魔者扱いをされてきた雪、氷、凍土を積極的に利用する現状調査が、土質工学会の研究委員会で平成元年から3年間にわたって行われた<sup>1)</sup>。「凍害対策と寒さ利用に関するシンポジウム」で寒さ利用が精力的にまとめられた。この一部を紹介するとともに、その後、研究開発が続けられてきた技術および社会情勢の変化に対応しつつある新技術などについて述べることにする。

寒さのなかで最も代表的なものが雪であり、雪は冬期に平地や山岳などを覆うが、多くは夏には消えてしまう。しかし、毎年冬になると再生され、降り積もる雪の量は有限ではあるが枯渇することのない資源である。多雪地帯では行政と地域住民を挙げての除排雪は毎年の課題である。高齢化と核家族化は除排雪のような苛酷な作業を難しくしている。それゆえ雪は厄介ものであったが、近年、雪の長所を積極的に生かし、さらには雪氷技術の工学的応用<sup>2)</sup>を進めて地域振興や産業起しにも考慮した雪対策に意欲が現れてきた。雪利用に関して、①貯雪冷房、②雪利用による温度差発電、③熱サイホン発電、④雪面反射光利用の太陽発電、⑤雪ダム、⑥野菜の雪中貯蔵、⑦通年型屋内スキー場、⑧人工雪パーマスノーなど8項目について調査された。

氷利用は古くは氷室と呼ばれる貯蔵方式の一つとして、その冷熱により野菜を一定温度の低温に保持する方法が利用されてきた。米国では海水を大気中に放水し、自然の寒気で水滴をシャーベット状に凍らせ、真水成分を分離する海水淡水化が行われた。氷上軌道や圧雪駐車場、圧雪滑走路は古くから利用されていた。氷に異物を混入することで氷の強度が増大する研究も行われ、強化氷は護岸工事や強化路面としても使われる<sup>3)</sup>。

これまで、我が国の寒冷地では冬期の地盤凍結によりさまざまな問題が発生してきた。それらは凍上による道路や鉄道等の凍上と春先の融解による支持力低下、凍結による掘削埋戻し等の土工事の難しさ<sup>4)</sup>、農地の凍結による作物根の切断と春先の耕作の遅れ等が挙げられる<sup>5)</sup>。

自然界では冬期に気温が0℃以下になると、間隙水が徐々に凍結し、土質や地下水等の条件によってアイスレ

ンズと呼ばれる氷層が形成される。未凍結地盤から凍結面に水を給水しながら、アイスレズが幾重にも成長し、これが地面を膨張させ凍上と呼ばれる現象を引き起こす。このように地盤が凍結する現象は、人間活動に取っては好ましくないことが多く、凍結・凍上の防止対策がさまざまに講じられてきた。

寒さによる地盤凍結の利用方法を凍土の性質を基にして分類すると、①凍土の強度増加、②凍土の遮水作用、③冷熱源、④凍上による未凍土部分の脱水圧密、⑤凍上時の水分移動、⑥凍結による水分と固形物の分離効果、⑦凍結融解による土の骨格構造の破壊、⑧凍結融解土の透水係数の増加等となる。

強度増加について詳しく述べると、凍結した砂質土などはコンクリート状の氷晶を間隙内に保持し、地盤凍上を発生させない。凍土内に氷が形成されると凍土地盤の強度が増加する。急速に凍結させたコンクリート状の砂質土の一軸圧縮強さで、未凍結状態の20~70 kPaに対して、-10℃で4.9~5.9 MPaにもなる<sup>6)</sup>。こうした凍土の構造物への強度増加は災害にも強く、さらに貯蔵システムへの害虫やネズミの侵入を防ぐ効果がある。

凍土の熱的性質のなかで、低温貯蔵にとって最も重要なのは凍結の潜熱である。例えば、冷熱源となる潜熱量は砂質土の間隙率が40%とすると約63 kJ/kgもあり、間隙率60%の粘性土では約126 kJ/kgに達する。細粒分の多い土ほど、凍結潜熱が多いものの凍上という厄介な問題を引き起こすこととなる。

凍土利用は、主として凍結地盤の優れた強度増加、遮水性、氷晶分離、潜熱貯蔵などの性質を有効利用したもので、先に述べた委員会では次項目について調査を行っている。①シールド発進・到達部防護の地盤凍結、②地中接合防護の地盤凍結、③横坑接続防護のビット、④シールド機ビット交換防護の地盤凍結、⑤トンネル拡幅防護の地盤凍結、⑥河川・軌道・道路の横過工事防護の地盤凍結、⑦構造物近接施工時の防護の地盤凍結、⑧凍土運搬路、⑨凍土止水壁、⑩人工凍土内食糧貯蔵庫、⑪凍結サンプリング、⑫凍結アンカー、⑬汚泥の凍結融解脱水処理等である。

#### 7.2 ヒートパイプを用いた地盤改良

寒冷地域におけるエネルギー源の開発や道路、パイプ

ラインおよび建造物等の必要性から、季節的あるいは永久凍土地帯での地盤改良工法がある<sup>7)</sup>。永久凍土地帯では、凍結地盤はコンクリートと同様の強度を発揮し、土中水の遮断効果を持つ。このような性質を利用したのが地盤凍結工法であり、自然冷気を利用した自然凍結システムと機械的な凍結システムを用いる工法の二つに分類される。前者はアラスカやカナダの永久凍土地帯で建造物等の支持力を増加させ基礎建造物の凍土保持を目的とした自然冷気によるヒートパイプの利用法である。地盤を凍結する際の最も経済的な方法であり、ヒートパイプの自然冷熱利用方法として、パイプライン、井戸、タンク、種々の建造物、道路、滑走路、鉄道、送電塔や変電所の基礎の融解沈下、不整凍上、地形的不安定、凍土の変形対策に使用している<sup>8)</sup>。

凍土の強度は、比較的大きな荷重を支持した地中の遮水壁としての働きをする。しかし、凍結地盤はマイナスの温度で支配されていることから、強度と変形の関係は温度変化に敏感であり、強度そのものが長期的なクリープの発生により衰退する可能性がある<sup>9)</sup>。したがって、適切な基礎設計を行うためには、土の温度変化、凍上力、変形、長期強度を検討しなければならない。建造物の安定性に対応した十分な安全率を与え、建造物の耐久年数内での許容沈下量を設定し、限界の沈下を確立する方法で設計されるべきである<sup>9)</sup>。

ヒートパイプとは、1963年、米国の Grover (グローバー) によって命名された伝熱素材で多量の熱を音速で伝達できるものである<sup>10)</sup>。ヒートパイプは、内部に作動液を封入した2相系の対流過程で熱を地盤から吸収する作用を行う。地温より気温が低い状態のとき、作動液の蒸発は地面に埋設した蒸発部に生じる。そして、蒸気は上方の地上部に向かって上昇し、ラジエーター (フィン) 部を通じて大気に熱を放出する。気化した気体は冷たい空気に接触して凝集されて元に戻る<sup>11)</sup>。このサイクルは温度差のみで繰り返され、パイプの周りの地盤は凍結される。

ヒートパイプは大気がマイナスの場合の冬期寒冷な時期のみ作動し、凍結地盤を造成保持するが、春期に気温がプラスになると自動的に停止する。ヒートパイプの熱ダイオード性により上部の暖気は下部に伝達されることはない。したがって、凍土造成能力は外気温度が低いほど有利である。以下にヒートパイプによる地盤改良例を示す。

#### (1) アラスカ横断パイプラインの地盤改良

世界で初めて行われたヒートパイプの利用例であり、1968年からアラスカで12万2千本のパイプが永久凍土地盤の安定化に使用された。

#### (2) 道路の地盤改良

アラスカ大学構内に隣接する舗装道路が、氷を多量に含む永久凍土上に建設されたが、アスファルトが夏期の太陽熱を吸収し毎年融解沈下が続いた。この対策として道路の盛土路盤に横から長さ30 mのヒートパイプをドリルで穿孔挿入して地盤改良を行った。

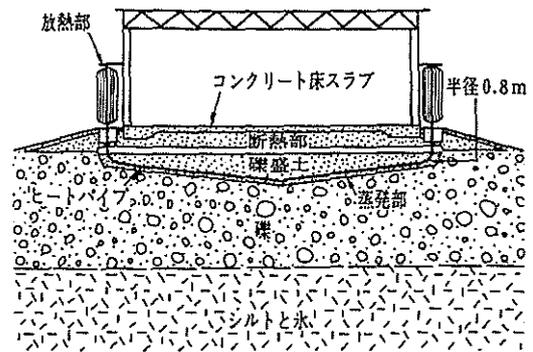


図-7.1 カナダ・ロスリバー校の基礎地盤

#### (3) 滑走路の地盤改良

アンカレッジから西方800 kmに位置するベッセルの舗装滑走路に使用された。滑走路下の永久凍土の熱的劣化を止めるため、盛土内に垂直に対して15分の1の勾配になるように、2列のヒートパイプがドリルで穿孔挿入され、その上段のパイプは永久凍土の安定のために、下段のパイプは融解沈下に対する盛土の安定化のために使用された。

#### (4) 鉄道路盤の地盤改良

カナダのマニトバからチャーチル間の820 kmを走行しているハドソン湾鉄道がある。軌道は季節的凍土、不連続永久凍土および連続永久凍土地帯上にルートがある。シンクホールと呼ばれる融解沈下に悩まされているため、1978年に4地点に、直径51 mm、長さ9.1 mのヒートパイプが3~4 m間隔で鉄道に沿って敷設された。礫土の盛土の上に断熱材として木のチップを散布し、融解路盤の沈下に対して安定化を行った。

#### (5) 盛土上の建物スラブの地盤改良

カナダ・ユーコン準州のロスリバーで建設された学校である。基礎の設計にヒートパイプが使用されている(図-7.1)。ヒートパイプの蒸発部は、アルミニウム製導入パイプに挿入され、盛土の基礎スラブを支持する礫盛土の内部に延びている。

### 7.3 凍土による農産物の低温貯蔵

ヒートパイプの優れた伝熱性についてすでに述べたが、現在多種多様なヒートパイプが開発され、各国で製造販売されている。しかし、地盤を凍結させるためには、長尺で耐久性の大きなものでなければならない<sup>12)</sup>。規格化されたヒートパイプは現在販売されていないため、使用目的によって形状や作動液の種類などを決定しなければならない。

凍土低温貯蔵システムに使用したヒートパイプは長尺コルゲート型ヒートパイプである。ステンレス製コルゲート管の寸法は、外径46 mm、内径39.8 mm、厚さ6 mmのSUS316Lと呼ばれるパイプである。作動液体はモノクロロジフルオロメタン (R-22) を使用し、蒸発部 (地下) の表面積の10倍となる伝達面積フィンを取り付けた。図-7.2に、このヒートパイプの凍土形成半径と外気温の経過日数との関係を示す。土は均質で飽和

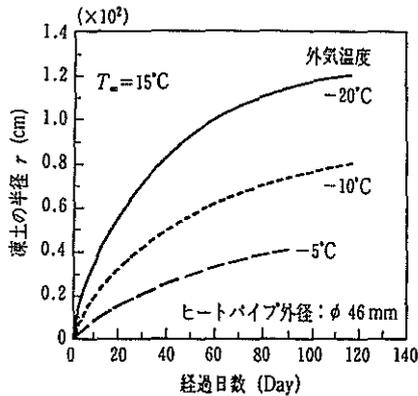


図-7.2 凍土形成の半径と経過日数

状態とすると、初期値の温度15°Cから、外気温度が-5°C、-10°Cおよび-20°Cが60日間続くと、ヒートパイプの周りにできる凍土の直径は約0.7 m, 1.22 m および2.2 m となることが知られている。

1987年12月に帯広畜産大学構内に、幅3.5 m、奥行き6.0 m、高さ3.6 mの貯蔵空間(床面積20 m<sup>2</sup>)を持つ低温貯蔵庫のモデルが建設された(口絵写真-12)。完成後から14年の冬を経過しているが、その間の気象変動は大きい、それに対して凍土低温貯蔵システムの温度変化が計測されている。表-7.1に示すように、1988年～1989年から暖冬傾向が現れ、1992年以降の5年間はほぼ一定の凍結指数を示している。凍結指数が大きいほど貯蔵庫の底部、凍結地盤やヒートパイプの年平均の温度低下を示している。庫内温度も同様な傾向を示すが、貯蔵野菜等の量に多少影響される傾向を示している。庫内の湿度は80%以上の高い値を示すが、湿度センサーの劣化のための93年以降の低い値は信頼できない。他の湿度測定器で確認したところ、80%以上の値には変化がなかった<sup>13)</sup>。凍土層の内部は永久凍土化し、ひと夏で凍土層の表面が約50 cm程度融解するに過ぎなく、毎年周期的な凍土地盤の温度変化を示した。農産物貯蔵、特にパレイシヨなどの根菜類の長期貯蔵に適し、白米等の貯蔵は数年貯蔵が可能であることが判明している。他方、生花や青物野菜等は種類によるが、1～2カ月の貯蔵ならば可能であることもわかった<sup>14)</sup>。

現在は建設コストの低減のため、凍土に代わる吸水性ポリマーや水を使用した研究も行われ、このタイプのモ

デル貯蔵庫も長野県大町市で建設されている(口絵写真-13)。

#### 7.4 寒さを利用した盛土施工

積雪寒冷地では冬期の土工事は行わないことが常識とされてきた。それは、積雪が盛土材料に混ざることにより含水比の増加、凍土の締固めの困難、融解後の泥ねい化と沈下が心配されるからである。このような懸念から、積雪寒冷地では冬期は土工事を休止し、その分夏期に集中的に実施することになる。そのため、寒冷地では冬期の雇用対策と全体工期の長期化およびそれによる管理経費の負担が問題となってきた。冬期を含めた通年の土工事が可能になれば、平準化された工程が立てられ、これらの問題が改善される。

昭和55年に、当時の建設省は「通年施工化技術研究協議会」を発足させた。5カ年かけて各種室内、現場実験を実施し、「冬期土工設計要領」をまとめた。冬期土工では、雪および凍土塊の混入や締固めの観点から、以下の「土質特性と施工限界」を示した。

① 0.075 mmふるいを通す重量が30%以下、② (自然含水比  $w_n$ /最適含水比  $w_{opt}$ ) < 1.6、③ 最大乾燥密度の85%に相当する密度とゼロ空気間隙曲線との交点を示す含水比  $w_z$  が70%以下とする。

すなわち、最適含水比と自然含水比の差が小さく、凍土や雪の混入の影響が少ない砂質土、礫質土、未風化火山灰土が望ましく、先の要領によると大半の粘性土は冬期土工に適さないことになる。さらに、高含水粘性土では、融解時の即時沈下、残留沈下、盛土の安定性等の問題が残る。

寒冷気候を利用した冬期土工の施工方法のステップを図-7.3に示す。1日目は、① 1層目を盛土して、② 夜間放置する。その結果、寒さにより表層が凍結する。③ 2日目に2層目を盛土する。以下②、③ステップを繰り返す。このような地盤改良原理を示すと、地盤が凍結すると、凍土は貧配合のコンクリート並みの強度を有する。夏期には車の走行等により泥ねい化する地盤でも、冬期では地盤が「コンクリート盤」となり、トラフィカビリティが大幅に増加する。さらに、冬期の寒さにより、盛土表面から下方に向けて冷熱が浸透し、凍結面(線)が進行する。このとき、水は凍結面に向けて移動する。

表-7.1 10カ年の気象と凍土システム環境(温度 °C, 湿度 %)

年次	平均気温 °C	凍結指数 °C·days	積算温度 °C·days	庫内温度 °C	庫内湿度 %	底部温度 °C	地盤温度 °C	HP温度 °C	外側地温 °C
1987年度	4.2	962	2 682	1.5	82	-3.9	-1.9	-3.2	6.4
1988年度	6.1	546	2 872	1.6	93	-2.6	-1.4	-2.3	5.1
1989年度	6.4	857	3 297	1.9	92	-3.2	-1.9	-2.9	5.3
1990年度	7.2	575	3 166	1.4	85	-2.5	-1.2	-1.9	5.7
1991年度	6.1	726	2 932	0.8	89	-2.9	-1.6	-2.3	5.4
1992年度	5.9	621	2 749	0.8	86	-2.5	-1.4	-2.0	5.5
1993年度	7.2	645	3 265	0.9	81	-2.7	-1.6	-2.2	5.1
1994年度	6.7	658	3 075	0.9	81	-2.8	-1.6	-2.3	5.3
1995年度	5.7	656	2 804	1.0	80	-2.5	-1.5	-2.3	5.2
1996年度	6.4	639	2 995	0.6	83	-2.9	-1.6	-2.6	4.5

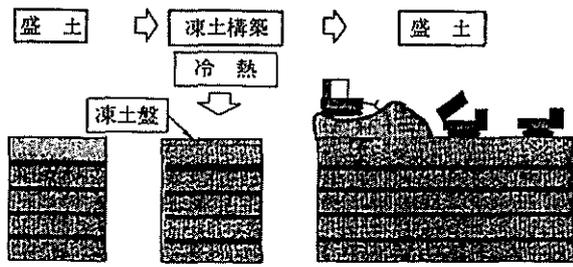


図-7.3 冬期土工の施工手順と施工方法

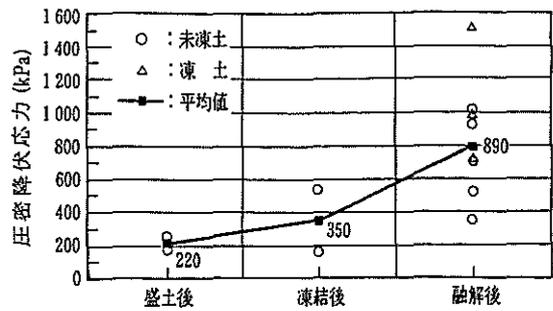


図-7.6 地盤の凍結前後の圧密降伏応力

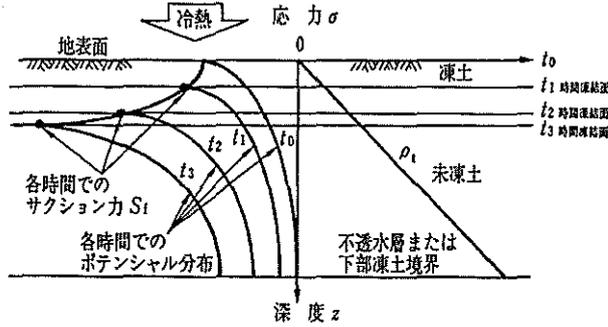


図-7.4 地盤の凍結過程における応力分布

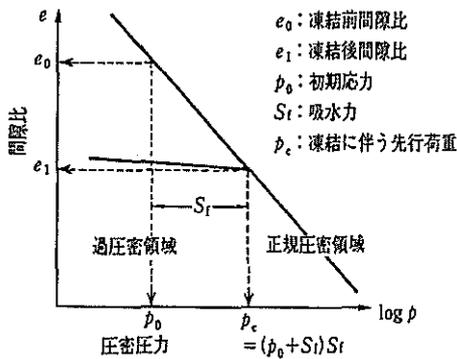


図-7.5 凍結現象による  $e$ - $\log p$  曲線の変化

その結果、凍結面ではアイスレンズと呼ばれる氷の層（地表面では霜柱として観察される）が形成される。このときの凍結面での吸水力  $S_f$  は大きく（図-7.4）、建物を持ち上げることも可能である<sup>15)</sup>。

この吸水力  $S_f$  により、地盤は圧縮され、空隙比は  $e_0$  から  $e_1$  に減少する（図-7.5）。すなわち、初期応力  $p_0$  に  $S_f$  を付加した先行荷重  $p_c$  となり、 $S_f$  分のプレロード効果により地盤の強度が増加する。

北海道東部地域における地盤改良効果例を示すと、初期含水比が52%の粘性土を用いて、1層30 cmの12層で盛土を冬期に施工した。初期の圧密降伏応力が200 kPaに対して、800 kPaに増加している（図-7.6）。これは約40 mの盛土高さに相当する。変形係数および強度も数倍増加した<sup>16),17)</sup>。

改良効果の予測や必要凍結厚、融解土の強度、融解沈下等の予測など検討の余地が残されている。

このように冬期土工の利点は、凍結による土工機械のトラフィカビリティーの確保と凍上による未凍土部分の脱水現象に特徴付けられる。前者では、通常は軟弱な

めに土工機械のトラフィカビリティーが確保できない土質でも、冬期の寒冷な気象条件下では凍結するため、掘削・運搬・敷きならし・締めめの作業が行える。後者は、人工地盤凍結工法の現場や凍上試験で確認されてきた現象であり、凍上が発生する時の未凍土部分が激しく脱水される現象を利用して、締めめを行わずに盛土の高密度化を図ることである。

### 7.5 軟弱地盤の圧密促進

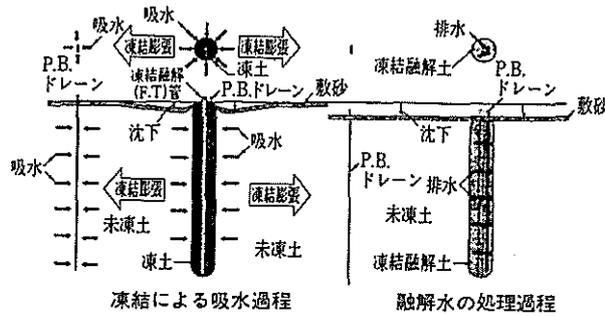
前節の寒さを利用した盛土施工で述べた凍結による脱水圧密効果は、軟弱地盤の圧密促進にも適用可能である。それは、軟弱地盤を構成する細粒土が一般に凍上性を有するからである。

ところで、軟弱地盤対策として鉛直ドレーン工法が一般的である。この工法は、軟弱層の圧密時間短縮を目的として、軟弱層に鉛直方向の排水材を数多く打設するものである。排水材には砂やプラスチック製の帯状材料（PBD）が用いられる。しかし、鉛直ドレーン工法自体では地盤の強度増加は期待できない。そのため、鉛直ドレーン工法は単独で用いられることはなく、載荷盛土（盛土荷重載荷工法）を行ったり、最近では、真空圧を与える（大気圧載荷工法）こともある。

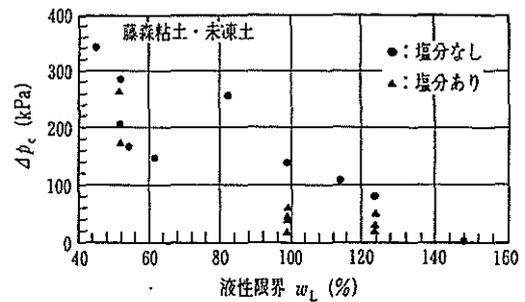
地盤が凍上する時の脱水圧密現象は、載荷盛土や真空圧よりも大きいことは古くから知られている。そこで、鉛直ドレーン工法に、地盤凍結による脱水圧密現象を併用することが考えられた。

凍上による脱水圧密のメカニズムは、例えば図-7.4のように示される。細粒分を含む地盤が凍結すると、アイスレンズに向かって凍結面前面の未凍土側より水分移動が発生する。軟弱地盤の動水抵抗により水分を奪われた凍結面直近では高温側からの水分供給が間に合わず、脱水圧密が生じる。凍結面が進行して、新たなアイスレンズが形成されるたびに、このようにして脱水圧密された未凍土部分が凍土内へと取り込まれる。

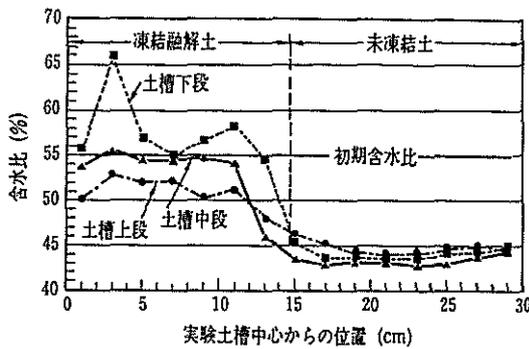
鉛直ドレーン工法と凍上による脱水圧密効果とを組み合わせた工法は、例えば図-7.7のようになろう<sup>18)</sup>。この例では、鉛直ドレーンの2本に1本の割合で、ドレーン体に隣接させて凍結管を打設する。ドレーン体がPBDであれば、その打設時に用いるマンドレルを凍結管の設置に用いることができる等、通常的地盤凍結工法よりもはるかに経済的となろう。



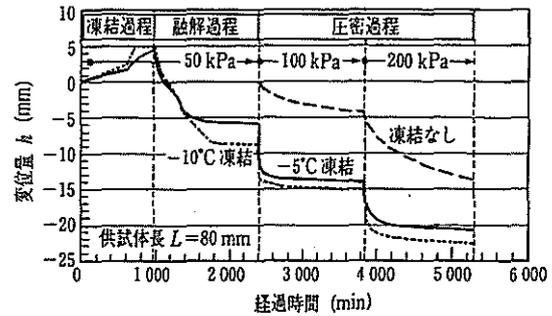
図一7.7 PBドレーンと併用した凍結脱水圧密のイメージ



図一7.9 液性限界と圧密降伏応力の増分  $\Delta p_c$  の関係



図一7.8 土槽実験における凍結融解後の含水比分布



図一7.10 凍結融解による有機質土の圧密特性の変化

図一7.7の工法による凍結脱水圧密の手順は、次のとおりである。工事の前半では、凍結管にブライン等を循環して周辺地盤を徐々に凍結する。そうすると、凍結管の周囲に発達する凍土に向かって、その外側の未凍土部分より水分が移動する。このように水分を奪われた未凍土部分へは、さらに外側の未凍土部分より水分移動が生じる。しかし、未凍土域の透水係数は小さいため、満足する水分供給がなされず、脱水圧密される。次に、工事の後半では、凍結を中止して自然融解に任せるか、あるいは、凍結管に温水を循環して強制融解させる。融解水は、中央のドレーン材より排水される。

このようなメカニズムを実証するため、室内土槽実験が行われた<sup>21)</sup>。実験では、30 kPaにて予圧密した半径30 cmの円筒状供試体の中心に直径34 mmの凍結管を設置して、半径方向に約14 cmまで凍結させた後、強制融解を行った。実験後の含水比分布を図一7.8に示す<sup>18)</sup>。同図では、凍結融解部分よりも外側の未凍結部分において、含水比が初期よりも大幅に低下している。実験後の供試体の未凍土部分よりサンプルを採取して、標準圧密試験を行ったところ、圧密降伏応力 $p_c$ は180 kPa以上であった。

凍上による脱水圧密の効果は、土の凍上性と相関関係があると思われる。室内凍上試験装置を用いた凍結融解実験の結果(図一7.9)<sup>19)</sup>では、液性限界で評価すると50~100%程度の土質において効果が期待できる。また、泥炭のように高含水比の有機質土は凍上性を有さないが、凍結融解により体積減少を生じ、かつ、残留沈下が少ない等の効果が確認されている(図一7.10)<sup>20)</sup>。

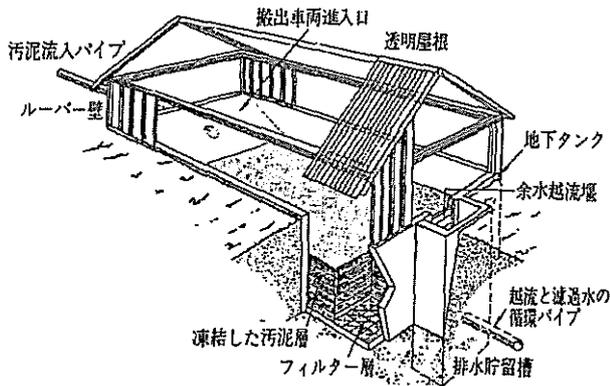
## 7.6 汚泥の凍結脱水

近年、建設工事に起因する高含水比の建設汚泥の処理が問題となっている。我が国では、汚泥処理のため凍結技術を用いた例は、これまでのところ見当たらない。しかし、以下に示す海外での事例は、我が国でも工夫次第では適用の可能性があるものと思われる。

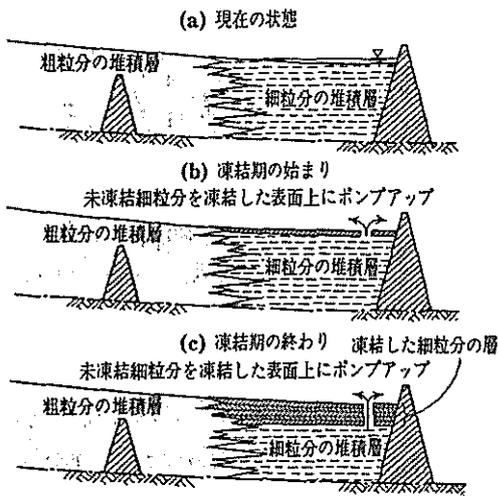
凍結脱水の適用方法として、対象とする汚泥の種類により、2とおりに分かれる。一つは生活廃水などの有機質を含む汚水の減量化であり、もう一つは建設汚泥等の無機質の細粒分の減量化である。前者は、凍結による水(氷)と固形物(汚泥)の分離効果、あるいは濃縮効果と言える。この効果の身近な例には濃縮オレンジジュース、高野豆腐などがある。後者は、凍上による氷晶分離と未凍土の脱水圧密に期待したものである。この例は、前節に示したとおりである。

前者の例として、Martel (マーテル)<sup>21)</sup>はフリージングベッド(図一7.11)と称される汚水の固液分離技術を提案している。この原理は、溶液が凍結する時、成長中の氷晶に水分子が集まり、異物が排除されることを利用するものである。フリージングベッドでは、冬季の寒気を積極的に利用して、汚水を固液分離し、夏季の暖気で融解させて、固形物と排水とに分離する。その主な施設構成は、十分な量の汚泥を蓄えることのできる槽と、積雪を防ぐための屋根、汚泥流入のための斜路、また槽の底には砂が敷かれ排水管が設けられている。

フリージングベッドによる汚泥処理の手順は、以下のとおりである。まず、日平均気温が0°C以下になると処理槽へと汚泥搬入を開始する。汚泥の量は、凍結が素早く完了することと敷きならしの容易さを考慮して1回に約8 cmとしている。1回の搬入量がこれより厚いと



図一7.11 フリージングベッドの施設構成



図一7.12 寒気を利用した鉱山汚泥の凍結脱水

凍結に時間がかかりすぎ、薄いと均一に敷きならすことが難しいとされる。最初の層が凍結すると、直ちに、その上に新たに汚泥を流し込む。この作業を冬期間続ける。そして、春先からは暖気により表面と側壁からの熱流により自然に融解させる。融解水は槽の底部から排水され、十分に脱水されたら固体部分を搬出する。

フリージングベッドは、主に有機質を大量に含む汚水の固液分離を目的とするものである。これに対して、凍上性の無機質分を多く含む場合には、凍上による脱水圧密の効果が加わることになる。

例えば、鉱山から発生したスラリー状廃棄物処分池の安定化のためには、通常、盛土による載荷が行われている。しかし、この方法では、軟弱地盤上の道路盛土でよく発生するすべり破壊などの、安定上の危険を伴うこととなる。StahlとSego<sup>22)</sup>(ストールとシーゴ)は、寒冷地でのスラリー状廃棄物処分池において、凍結融解による脱水圧密効果を利用した安定化の方法を提案した。

この方法は図一7.12に示されるとおりである。まず、冬期にスラリー池表面の0.3 m程度が凍結するのを待ち、資機材を搬入する。そして、池底部の未凍結部分をポンプアップするための穴を凍土に開ける。冬期間、この穴よりスラリーを表面に汲み上げて凍結させることを繰り返す。夏期には、凍結したスラリーが融解して、ある程度は元の強度付近にまで戻る。しかし、数シーズンにわ

たってこの作業を繰り返すことで、スラリーはある程度のせん断強さを有するまでに安定化する。

このような凍結融解による汚泥の凍結脱水技術は、冬の平均気温が0°Cになる地域ではどこでも適用できるとされる。我が国でも、北海道、東北北部、長野県、その他山岳地域における汚泥処理の選択肢として検討の価値があるものと思われる。

### 7.7 汚染土壌の浄化修復

これまで述べた寒気を利用した盛土施工、軟弱地盤対策と汚泥の凍結脱水は、周囲からの水分供給の制限された条件での凍結凍上現象である。これらのケースは、水分供給がない、いわゆる、閉式条件での凍結凍上現象である。これに対して、水分供給が可能であるのが開式条件での凍結凍上現象であり、汚染土壌の浄化修復に対して、応用が期待されている。

近年、重金属イオン、VOC等による土壌汚染が社会問題化している。多種多様な浄化修復技術が開発されているが、しかし、それらには一長一短があり、一般に、既存の技術では細粒分を含む土壌への適用が難しいとされている。

ところで、凍上現象は細粒分の多い土壌において、その発現が顕著な水分移動現象である。そこで、従来の技術で洗浄が困難である細粒分を多く含む土壌に閉じ込められた汚染物質が、凍上現象により除去されることが考えられた。

凍上現象を利用した土壌洗浄のイメージは図一7.13に示される<sup>24)</sup>。同図の方法では、温度調節管と給排水管とを、汚染土壌を挟むように2組設置する。一方より温度を低下させて凍土領域を成長させる時、汚染土壌が凍上性を有するならば、未凍土部分より凍結面に向かって水分移動が生じる。イオン等の汚染物質は、水分移動に伴い、アイスレンズ前面まで移動して、そこで濃縮され、ブラインポケット状に液体のまま存在して、その後、凍土領域の成長により、凍土内に取り残される。未凍土部分では高温側よりの水分供給が可能であるため、連続的に水分が補給される。次に、汚染土壌全体が凍結した後、冷却を開始した方向より融解を行うと、融解水とともに汚染物質が流れ出す。この一連の操作を繰り返して、細粒分を多く含む汚染土壌の洗浄を行うものである。

この概念に基づく実験が行われ、その結果、例えば図一7.14のような結果が得られている<sup>24)</sup>。実験では、藤森粘土にNaClを混合して作製し、直径10 cm、長さ8 cmの供試体に温度勾配を与えて、凍結と融解を繰り返した。繰返し回数が、1回、3回、5回と増えるにしたがい、洗浄領域が高温側より低温側に広がって行くことが分かる。このような現象は、イオン状物質だけでなく、飽和状態であるなら、粘性の比較的小さい油類でも発生するであろう。

また、水溶液が凍る時、一般にイオン等の異物を排除することが、吐き出し効果として知られている。砂分以上の粗粒分主体の場合には、凍上性の細粒土の場合とは

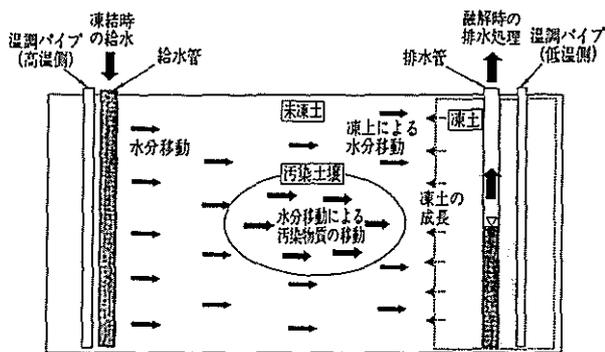


図-7.13 凍上現象を利用した地盤洗浄のイメージ

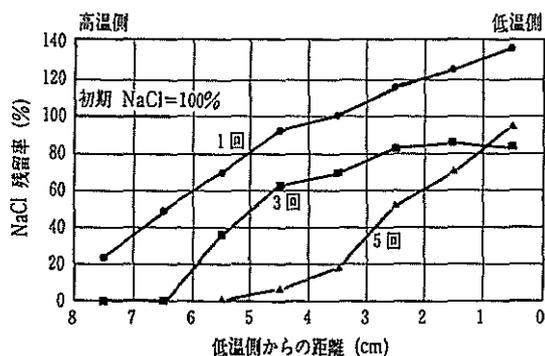


図-7.14 凍結融解の繰返しによる土壌洗浄の効果

異なり、凍結を行うと高温側の未凍土方向に汚染物質を吐き出すことが確かめられている<sup>25)</sup>。

汚染土壌の浄化修復は、地盤工学の分野において、現在、最も関心を集めているテーマの一つである。凍結融解現象を利用した浄化修復技術は、化学物質等による二次汚染の危険性がないため、その実用化が期待される。

### 7.8 あとがき

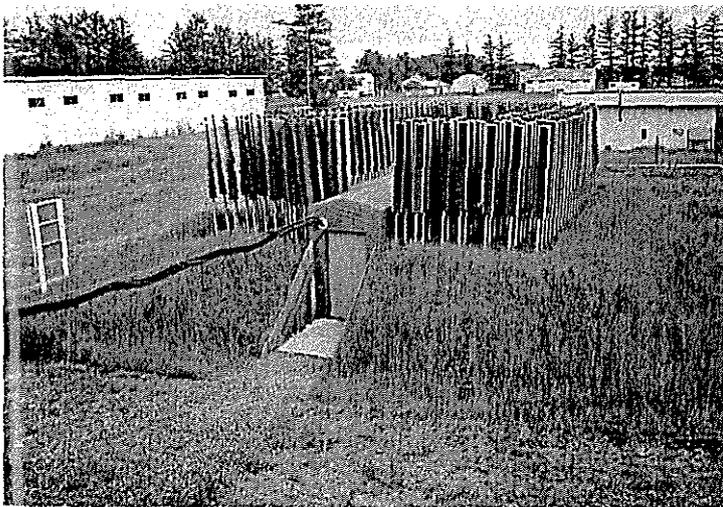
寒さ利用に関する地盤凍結の技術は、まだ研究開発の途中のものもある反面、我が国では高度化している地盤凍結の分野もある。雪・氷および凍土の寒さ利用のなかでは、残念ながら凍土利用が最も知られていない面が多々ある。例えば、古くから使われている凍結運搬路など、最近では凍結サンプリングや凍結アンカーなどは将来重要となると思われるので、今後とも産官学の関係機関での積極的な推進が望まれる。地球環境問題がクローズアップされる今日、食糧備蓄問題、異常気象、および巨大都市災害などの対策にも凍土利用が行われることを期待する。

### 参 考 文 献

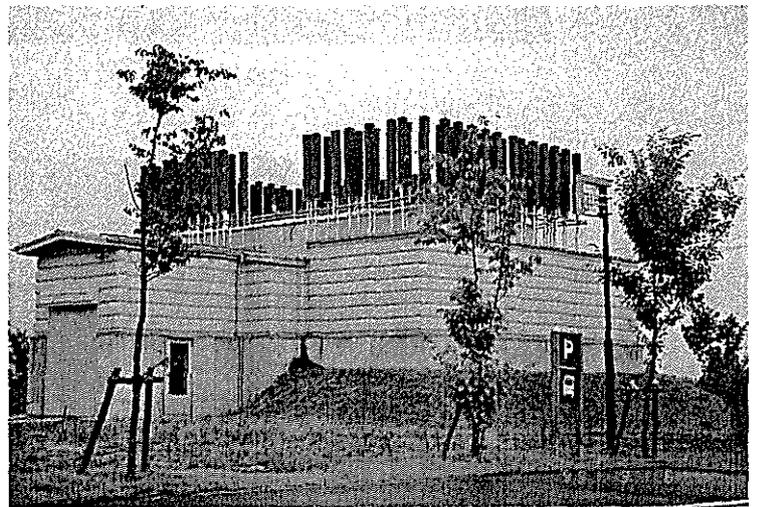
- 1) 土質工学会：凍害対策と寒さ利用に関するシンポジウム発表論文集，委員会報告，Ⅳ，pp. 31~40, 1992.
- 2) 科学技術庁研究開発局：「克雪・利雪の高度化に関する調査」調査作成報告書，p. 210, 1988.

- 3) D. L. Kirkpatrick, M. Asaero, A. Robl, C. E. Roedder, R. H. Socolow and T. B. Taylor: The ice pond production and seasonal storage of ice for cooling, The Center for Energy and Environmental Studies, Princeton Univ. Rept., No. 149, p. 49, 1982.
- 4) 土質工学会編：土の凍結—その制御と応用—, pp. 155~200, 1982.
- 5) 土谷富士夫：農地の土壌凍結作用とその現状，北海道の農業気象，35, pp. 39~46, 1983.
- 6) 了戒公利ほか：人工永久凍土とその食糧用低温貯蔵庫への応用，日本冷凍協会論文集，4(1), pp. 1~9, 1987.
- 7) Phunkan A.: Frozen Ground Engineering, Prentice-Hall Inc., pp. 139~169, 1985.
- 8) Cheng K. C. and Zarling J. E.: Applications of Heat Pipes and Thermosyphons in Cold Regions, 7th International Heat Pipes Conference, Minsk, USSR, 1990.
- 9) Andersland O. and Anderson D.: Geotechnical Engineering for Cold Region. McGraw-Hill Inc., pp. 102~120, 1978.
- 10) Dunn P. D. and Reay D. A.: Heat Pipes (Fourth Edi.), Pergamon, pp. 1~7, 1994.
- 11) 池田義雄ほか：ユーザのためのヒートパイプとその応用，学献社，pp. 3~60, 1981.
- 12) 高岡道雄ほか：長尺ヒートパイプの開発とヒートパイプの応用製品，藤倉電線技報，68号，pp. 50~63, 1984.
- 13) 土谷富士夫・了戒公利：ヒートパイプを利用した人工永久凍土による低温貯蔵庫，農業土木学会誌，58(9), pp. 21~26, 1990.
- 14) 土谷富士夫・了戒公利：冷熱エネルギーを利用した凍土低温貯蔵システム，農業土木学会誌，64(3), pp. 21~23, 1996.
- 15) 了戒公利：熱と流れを結合した飽和土の凍上理論とその応用に関する研究，清水建設研究報告別冊，15, 1985.
- 16) 了戒公利：SEGREGATION POTENTIAL による凍上解析（その1：飽和土に適用した線形モデル），土木学会第44回年次学術講演概要集，pp. 880~881, 1989.
- 17) 境 吉秀・了戒公利ほか：寒冷気候を利用した高含水粘性土の冬期土工（その1, 2），第31回地盤工学研究発表会講演集，pp. 2385~2388, 1996.
- 18) 嘉門雅史・伊藤 譲ほか：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, pp. 141~148, 2001.
- 19) 伊藤 譲・片野田栄一ほか：凍結融解による圧密促進工法の適用地盤条件について，第37回地盤工学研究発表会講演集，pp. 1159~1160, 2002.
- 20) 片野田栄一・伊藤 譲ほか：凍結融解作用による有機質土の圧密特性の評価，土木学会第57回年次学術講演概要集，pp. 139~140, 2002.
- 21) Martel, C. J.: Fundamentals of Sludge Dewatering in Freezing Beds, Journal of Water Science and Technology, Vol. 28, No. 1, pp. 29~35, 1993.
- 22) Stahl, R. P. and Sego, D. C.: Journal of Cold Regions Engineering, Vol. 9, No. 3, pp. 135~151, 1995.
- 23) 伊藤 譲・嘉門雅史ほか：凍結融解現象を利用した地盤洗浄技術の可能性，材料，第51巻，第1号，pp. 42~45, 2002.
- 24) Ito, Y., Kamon, M. and Hato, H.: Remediation of Contaminated Grounds by Soil's Ice Segregation Phenomena, Proc., Fourth International Congress on Environmental Geotechnics, pp. 859~863, 2002.
- 25) Chuvilin, E. M.: Migration of Ions of Chemical Elements in Freezing and Frozen Soils, Polar Record, 35(192), pp. 59~66, 1999.

講座「土の凍結と地盤工学」  
7.寒さ利用による地盤凍結  
(本文39～45ページ参照)



口絵写真一12 人工永久凍土低温貯蔵庫（帯広畜産大学内）  
1987年12月に建設され、216本のヒートパイプが25cmピッチで4列に配置されている。地上に見える部分はヒートパイプの放熱部のアルミ製のフィンである。



口絵写真一13 長野県大町市のヒートパイプ利用低温貯蔵庫  
蓄熱体に吸水性ポリマーを使用し、貯蔵空間周囲に120本のヒートパイプを2列に配置した。ゴムシートを介して冷熱が貯蔵庫内部に浸透する。