

人工地盤凍結工法
— その歴史と発展 —¹
Artificial Ground Freezing Method
- History and Development -

伊藤 譲² 摂南大学理工学部都市環境工学科
ITO, Yuzuru Department of Civil and Environmental Engineering, Setsunan
University

Abstract

The artificial ground freezing (AGF) method is a construction method with relatively long history. 50 years has passed since it was first introduced to Japan. Nowadays it plays an important role in underground construction especially in urban area. An extreme case is the impermeable frozen earth wall constructed for shielding from ground water flow into the damaged nuclear reactor buildings. However, it cannot be said that the principle and construction method are widely well known. In order to promote understanding of AGF, the history and some applications are presented in this report.

キーワード: 地盤凍結工法、凍結融解、遮水壁、シールドトンネル、立坑

Keywords: artificial ground freezing, freeze-thaw, ice wall, shield tunnel, shaft sinking

1. はじめに

著者が摂南大学に就任しての数年間、梅雨から夏の夕立ちの季節には旧2号館1階にあった実験室では毎年のように床下浸水となるので、床においてある実験器具を椅子の高さに移動するのが夏の行事となっていた。寝屋川の地は、淀川よりも低くなっており、水はけの良くない水害を受けやすい土地である。このような梅雨時の慣例行事がなくなったのは2000年代に入って、寝屋川北部地下河川と呼ばれる地下に大規模な調節池が建設され始めてからである。

この調節池は地下40mの深度に建設され、豪雨時に一時的に雨を貯留しておき晴天時に大川に放流するようになっている。工事では地下水圧400kN/m²の大きな圧力に対抗し

¹【原稿受付】2016年8月4日、【掲載決定】2016年9月30日

²【主著者連絡先】伊藤 譲 摂南大学、教授 e-mail: cito@setsunan.ac.jp
〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8、摂南大学理工学部都市環境工学科

て安全に工事を進めるために人工地盤凍結工法（地盤凍結工法）と呼ばれる工法が採用された⁽¹⁾⁽²⁾。図1は雨水の集水立坑と調節池を結ぶ本体トンネル建設のために設けられた仮設の凍土トンネルである。トンネル本体はこの内側に設置された。



図1 寝屋川地下河川工事における仮設凍土トンネル

地盤凍結工法と聞いてなじみのある人は少ないが、最近マスコミで報道されている福島第一原子力発電所の「凍土遮水壁」または「氷の壁」は誰もが聞いたことがあるだろう。「氷の壁」とは英語の Ice Wall の直訳であり本当は凍土の壁なのであるが、この「氷の壁」に対して多くの人々はアイスクャンディーを連想するのか、すぐに融けてしまう頼りないものという印象を持っているようである。しかし、実際の地盤凍結工法とは、土圧や水圧が極めて大きい都市部における地下構造物工事で高い安全性が求められる場合に、最後の選択肢として検討される信頼性の高い工法である。

2. 地盤凍結工法の施工⁽²⁾

地盤凍結工法とは図2に示すような冷凍設備を有し、図3のようにボーリングで削孔した地盤に直径約10cmの二重構造の凍結管を一定間隔で多数埋設して、その中に冷凍機で冷却した不凍液を連続的に循環させて、地盤の間隙中の水分を氷に変化させる工法である。凍土の間隙に成長した氷が土粒子や岩を結合する接着剤のような役割を果たし、強度を劇的に増加させるとともに遮水性を獲得する。冷凍機で冷却された冷却液は内管から二重管の底に流し出され、外管との隙間を上昇しながら地盤の熱を奪う。土の温度が氷点下になると凍結管の周囲に円筒状に凍土柱が成長し、時間経過とともに隣接する凍土柱どうしが結合して一体となり凍土壁が形成される。

地盤凍結工法の目的は地盤の強度増加や遮水性の獲得を目指す点で、通常の地盤改良工法と違いがない。長所としては、他の地盤改良工法のように大型機械を用いて対象地盤全体を物理的にかく乱する必要がない点である。地盤凍結工法ではボーリングマシンを用いて地盤を削孔して埋設した細い凍結管に冷却液を循環させるだけである。また、地盤改良効果は温度低下による間隙水の凍結として凍結管表面から周辺地盤へと均一に伝搬するの

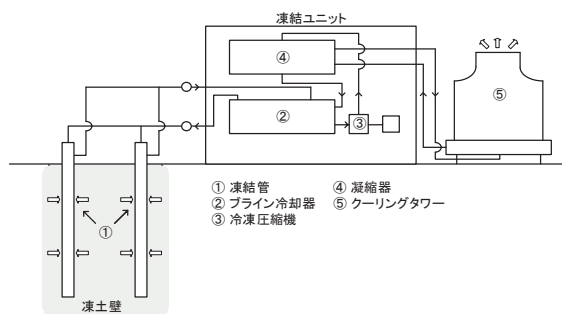


図2 地盤凍結のシステム⁽²⁾

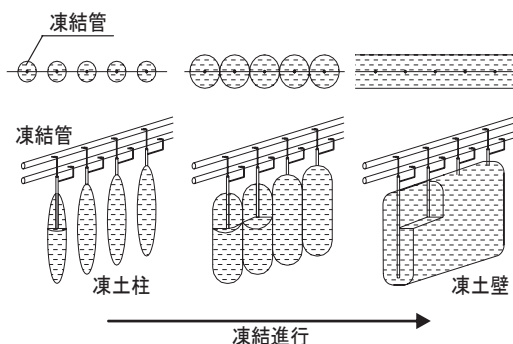


図3 凍土壁造成までの流れ⁽²⁾

で、改良効果のばらつきが少ない。さらに、冷却液に使用する塩化カルシウム水溶液（ブラインと呼ぶ）は凍結管内を循環するだけであり、環境汚染の心配がなく、工事の騒音・振動も少ない。短所としては、地下水流が速い場合には、流入する熱量が冷却力を上回り、凍土壁が完成しないこともある。そこで凍結管の間隔を狭くしたり、流速を遅くするために部分的に地盤改良を行うこともある。また、凍土の造成速度は他の地盤改良工法よりも遅くなることが多い。そこで、工事全体の中に凍結工程を効果的に組み込む工夫が必要であり、一般に他の工法よりも工費が高くなる。

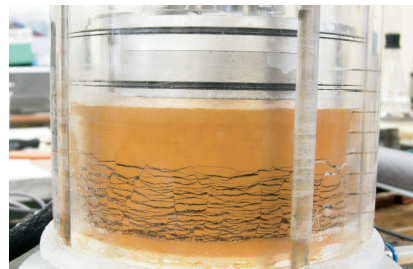


図 4 凍土に成長する
アイスレンズ

また、水は凍結すると 9%の体積膨張を生じ解凍すると元に戻る。砂礫地盤では膨張分の余剰水が排水されるため凍結膨張しないが、細粒土地盤では凍結時に凍上現象が発生してアイスレンズ（図 4）が成長する。そのため凍結膨張量が大きくなり、その分、解凍時には大きな沈下が生じ、時には周辺構造物に影響を与えることがあるので、工事中や工事後の地盤変位を予測して、現場計測するとともに、事前に対策を講じることが大切である。

凍上現象のメカニズムは、例えば Miller⁽³⁾や Gilpin⁽⁴⁾によると、含水状態の細粒土では氷点下の温度にさらされても不凍水が存在し、それが凍土中に負圧を発生させ、未凍土から凍土方向への水分移動の駆動力となるとされている。

人工地盤凍結工法の冷却システムとしては、冷凍機により冷却されたブラインを循環させるケースが大多数を占める。一部には、工期短縮のため極低温で冷却する必要が生じ液体窒素を用いることもある。冷却システムは現場近くに冷凍プラントとして設置されるものがほとんどであるが、海外では移動式のシステムも多い。また、寒冷地においてはヒートパイプを用いて自然冷熱を取り込むことも可能である。

3. 地盤凍結工法の歴史

凍土壁を用いて鉱山立坑に流れ込む地下水を止めるアイディアは 1852 年にフランスで考えられていた。一方、19 世紀前半に冷凍機の発明が相次ぎ、1859 年には現代の冷凍機の起源であるアンモニア吸収式冷凍機がフランス人カレにより発明された⁽⁶⁾。そして、イギリス・ウェールズの炭鉱におけるクイックサンド地盤（緩く水分の多い地盤）における立坑掘削工事の現場において、1862 年世界最初の地盤凍結工法が実施された^{(6),(7)}。その時に採用された方法は、立坑の覆工よりも大きな直径に巻いたコイルをクイックサンドに沈めて、ブラインをコイルに流して冷却して凍土を造成するという方法であった（図 5）。

1880 年にはドイツに広まり、鉱山技術者ポーシュによりコイルの代わりに鉛直に設置した鋼鉄パイプを用いた現在の二重管方式スタイルによる凍結方法が開発された⁽⁶⁾。その後、19 世紀末から 20 世紀初頭にかけて、ヨーロッパ、アメリカ、ロシア等で用いられるようになった。

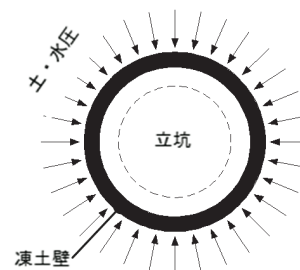


図 5 立坑掘削における凍土⁽⁶⁾

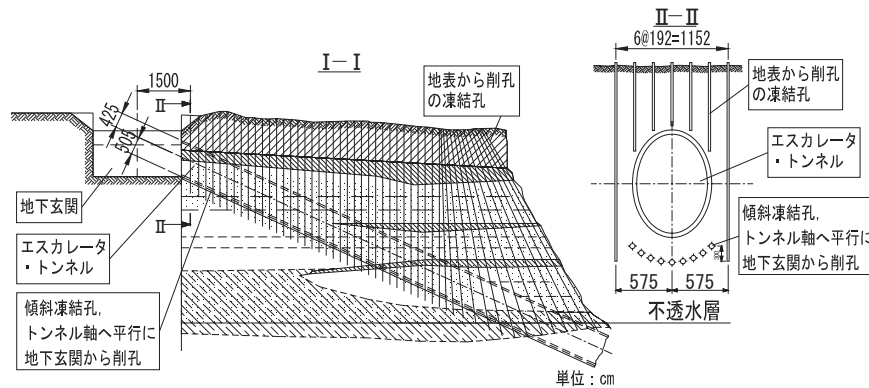


図 6 キュフ地下鉄エスカレータートンネルでの地盤凍結工法⁽¹⁰⁾

アメリカへは 1888 年に鉱山の立坑建設のために導入されたが最初の工事で失敗したため、その後は鉱山においては 1950 年代まで地盤凍結工法が試みられることはほとんどなかった⁽⁶⁾。しかし、地滑り防止や仮締め切りとしての様々な工夫が続けられてきた⁽⁹⁾。ロシアでは、1928 年に鉱山の立坑に適用され、1933 年に地下鉄エスカレータートンネルの建設に用いられてから (図 6)、建築物の支持壁として基礎工事においても活用され施工事例が増えてきた⁽⁶⁾⁽¹⁰⁾。

ヨーロッパにおける代表的な凍結工事は 1932 年アントワープのシェルデ川の川底を横断するシールドトンネル工事において行われた⁽¹¹⁾。まず、シェルデ川兩岸の換気塔部の立坑工事で凍結工法が用いられ、さらに換気塔部をシールドマシンが貫通通過する際に到達防護と発進防護として凍結工法が用いられている (図 7)。この時代に現在でも難しい川底下のシールドトンネル工事が行われ、さらにその補助工法として地盤凍結工法が用いられていることは驚くべきである。

このように海外において、地盤凍結工法の利用は鉱山の立坑建設において始まり、現在でも世界の鉱物資源採掘は地盤凍結工法に負うところが大きい。また、発明後の比較的早

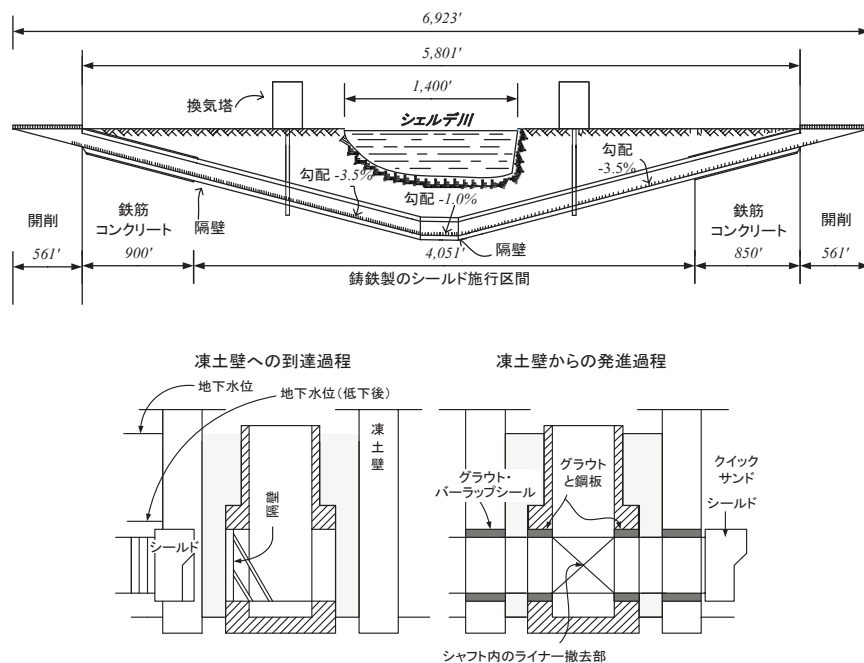


図 7 シェルデ川シールドトンネル換気塔工事⁽¹¹⁾

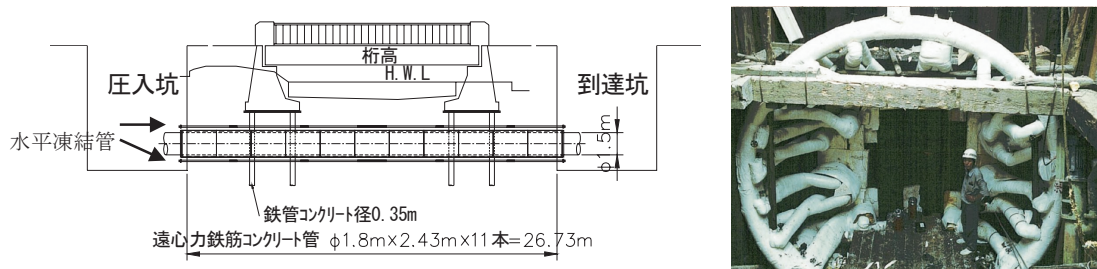


図8 日本初の地盤凍結による川底下の横断防護工事⁽¹⁴⁾

い時期からシールドトンネル、仮締め切りや支持力壁等にも用いられている。

地盤凍結工法は日本へはシールドトンネル工事の草分けである京都大学の村山朔朗教授によって紹介された。1960年頃から京都大学と精研により研究が着手され⁽¹²⁾、⁽¹³⁾、最初の地盤凍結工事として、1962年に大阪府守口市の橋梁下における河川横断水道管圧入工事において実施された⁽¹⁴⁾。工事は土被りが僅か2mの川底に上水道管を圧入するものであり、途中で落盤すれば河川水が流入して人命に被害が生じる危険が予想された。そこで、グラウト工法等と比較した結果、事前に凍土トンネルを造成して、その中にヒューム管を圧入する工法が採用された(図8)。なお、村山教授は京都大学退官後に創設期の摂南大学土木工学科に着任されている。

その後、わが国ではこのような河川下横断防護では、1978年都営地下鉄新宿線工事において日本橋川横断個所の川底凍結工事では約38,000m³の凍土造成ができるまでに発展している⁽¹⁵⁾。

4. 地盤凍結工法の発展

4-1 東京湾横断道路海底トンネルにおけるシールド発進防護と地中接続

東京湾横断道路は、1997年に開通した東京湾を川崎から木更津まで結ぶ全長約15kmの高速道路で、川崎から約9.5kmが海底トンネルであり、海底道路トンネルとしては世界最長である⁽¹⁶⁾。

上下2本の海底トンネルの建設においては、工期短縮のため、川崎側の浮島取り付け部、川崎人工島(図9)及び木更津人工島の3箇所の立坑から2機ずつ合計8台の泥水式シールドマシンを向かい合って推進させて、海底下の4箇所で地中接続させることとなった⁽¹⁷⁾。そこで、海面下70mの高水圧下における外径約14mの世界最大級のシールドマシンの発



図9 工事中の川崎人工島

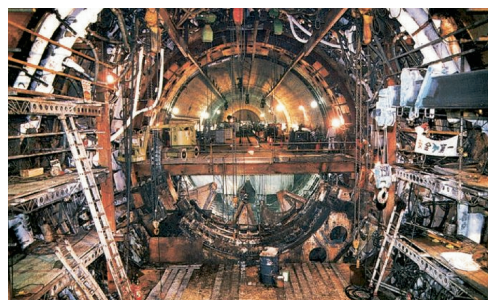


図10 シールド海底下地中接続

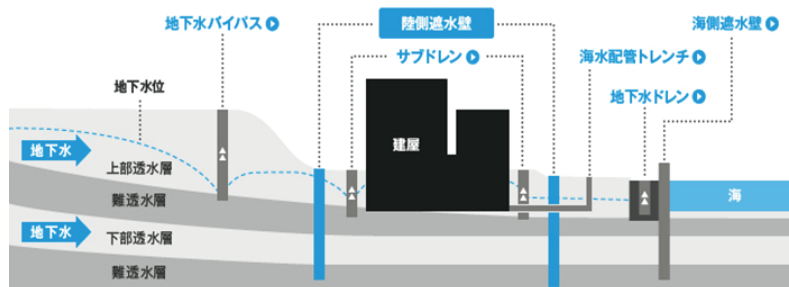


図 11 福島第一原発汚染水対策 断面図²¹⁾

進時の仮壁撤去と発進防護⁽¹⁸⁾、さらに海底下でのシールドの地中接合(図 10)が必要となった。そこで、遮水性と土・水圧対策が問題となり、確実な遮水性が得られ、土・水圧に対する十分な強度を有し、地中構造物との付着(凍着)も確保でき、温度管理を確実に行えば一様な品質の地盤改良域を造成可能である地盤凍結工法が採用された⁽¹⁹⁾。



図 12 福島第一原発凍土遮水壁平面図

4-2 福島第一発電所の凍土遮水壁

東京電力福島第一原子力発電所における汚染水の問題は、廃炉を進めていく上で最も深刻な課題のひとつである。山側からの地下水流入により、日々発生する約 400m³の汚染水を減らすことは、原子炉建屋をドライアップし、建屋の止水処理を完了し燃料デブリの取り出し作業に着手するために必要不可欠である。そこで、図 11 に示すように上流側に揚水井を設けてポンプアップする地下水バイパス、原子炉建屋近傍から地下水を汲み上げるサブドレン、地表面からの雨水浸透を抑制するフェーシング等の措置が講じられている⁽²⁰⁾。

さらに信頼性における重層的な対策にするために建屋全体を囲む遮水壁が構想され、粘土壁、凍土壁とグラベル連壁(砕石による透水性の壁)などが提案され、検討の結果、遮水の確実性、施工機械が小型で埋設物の多い建屋近傍での工事が容易であるとされる凍土方式の遮水壁が採用された⁽²¹⁾。遮水壁としての凍土壁の採用にあたっては、従来の地盤凍結工法の適用範囲から時間・空間規模が大きく超えること等から賛否様々な見解がある中で、2013年5月に経済産業省汚染水処理対策委員会において、これら複数案の中で陸側遮水壁として凍土壁が最適であると判断され、技術的検討を踏まえて施工が進められてきた⁽²⁰⁾⁽²²⁾。

2014年6月より凍結設備工事が着手され、2015年9月には山側、2016年2月には海側の凍結準備が完了し、2016年3月に海側から凍結が開始された⁽²³⁾。2016年3月までに、遮水壁のための凍結管は1m間隔で、深度25~30mまで、合計1568本打設され、凍土遮水壁完成時には約70000m³の凍土が造成される予定である(図 12)。これは、わが国における地盤凍結工法による凍土造成量の5~6年分の規模である。2016年9月の段階で、凍土壁は100%完成には至っていない。原因は地下埋設物の埋め戻し材料に粗粒分が多く混入していたためであるとされ、薬液注入等の補助工法を適用して地下水流速を低下させる措置を講じている。

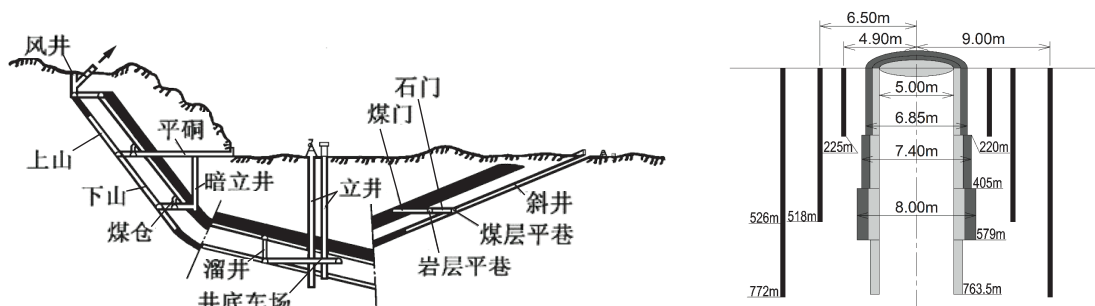


図 13 中国李粮店炭鉱における立坑工事の地盤凍結工法

4-3 中国における炭鉱立坑での発展⁽²⁴⁾

中国に人工地盤凍結工法が導入されたのは日本とほぼ同じの 1950 年代である。主に鉱山の立坑建設の補助工法として、遮水性と安定性を確保するために用いられてきた。最初はドイツやロシアの技術導入を図りながら、独自の発展を遂げ、1990 年代には深層沖積層の立坑掘削における凍結深度は 400m を超えて、世界レベルに達している。2000 年代になると最深凍結深度は 955m に達し、これは世界最深の規模である。この背景は、中国における石炭火力発電への依存度が高く、世界最大の石炭消費国として、輸入量だけでは賅えないために、石炭開発がより深層部へと及んでいるからである。深層部での採炭のためには高含水比の沖積層に石炭搬出、人員や資材運搬、換気等のための立坑建設の必要があり、現在最も信頼のおける工法は人工地盤凍結工法と立坑 TBM 工法とされている。

中国の代表的な鉱山立坑工事である李粮店炭鉱工事では深層沖積層と深層含水岩盤層を通過し、深度 771～800m の凍結立坑を造成している（図 13）。工事では、従来の設計理論を適用するとコストが高くなり、工期が長くなる等の問題が予想されたため、凍土壁の厚さ、凍結管の配置等を理論解析と実験により明らかにして、さらに工事中は現場計測を実施している。その結果、深度 800m の凍土壁を三列に配置した凍結管による凍土壁を用いて克服することができた。

4-4 凍土壁による汚染土壌対策⁽²⁵⁾

アメリカでは寒冷地での汚染地盤の封じ込め技術として、凍土壁が利用されている。この方法には、図 14 に示すとおり特定の方向への漏れ出し防止、凍土壁で完全に囲い込む方式、さらに汚染土壌全体を凍結する方法がある。

凍土壁の造成ではハイブリッドサーモサイフォンが注目されている。このシステムは、サーモサイフンの一方を地盤に埋設しておき、冬季に気温が地中温度よりも低くなると、地中の熱が上部へ移動し、サイフォン先端部のフィンから大気中に放出されて地盤が凍結される。夏季に気温の方が地中温度よりも高い場合にはサイフンの先端部をヒートポンプに接続して強制的に熱を奪う。

このようにハイブリッドサーモサイフォンとは、自然冷熱 (passive) と人工冷却 (active) を組み合わせたシステムである。自然冷熱のみに頼る従来のサーモサイフォンとは異なり、夏季においても凍土を造成できる。また、緊急時には、active システムで凍土壁を急速造成させて、汚染物質を封じ込めることができる。さらに、冷媒としてブラインを二重管に

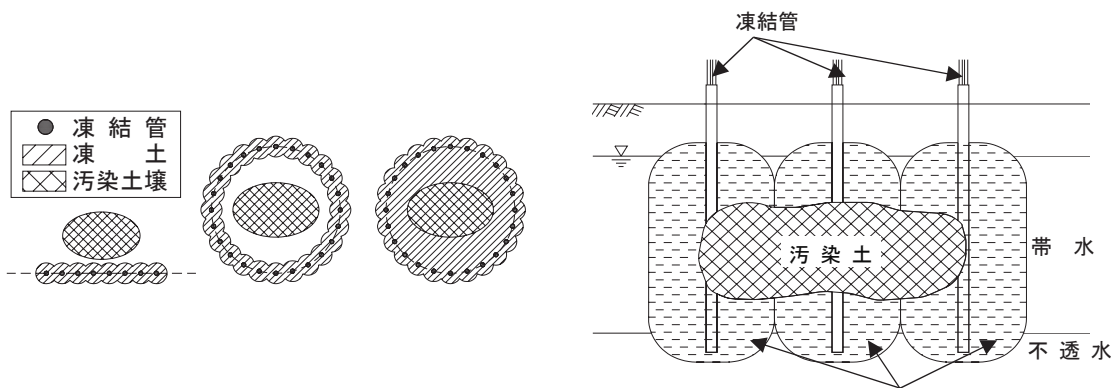


図 14 凍土壁による汚染土壌対策

循環させる必要がないために環境にも優しく、停電時においても凍土はすぐには融解しないので安全性に優れている。しかし、人工冷却（active）の期間が長くなる条件下では、運転コストが大きく、含水比が低い地盤等への適用性が課題として残る。

5. 近年の技術・開発中の技術

従来の地盤凍結工法では強度と遮水と言った物理的な側面を期待していた。しかし、地盤の低温化や凍結を新たな視点から眺めると環境分野での活用方法が期待できる。

5-1 低温化と凍結による汚染物質の揮発抑制

都市開発等において、揮発性の有害物質による汚染地盤を掘削除去して運搬する場合、作業員や周辺住民の健康への配慮が重要である。一方、揮発性物質の蒸気圧は温度に依存して、温度の低下とともに蒸気圧は急激に低下することが知られている。さらに、 0°C 以下まで冷却され凍土となると、揮発性物質が氷で封じ込められた状態になる。そこで、揮発性物質の有害性や現地の状況に応じて、掘削除去と運搬の前に、地盤を低温化または凍結することが考えられた⁽²⁶⁾。

図 15 は汚染土壌の運搬前にチルド管を設置して、柱状に地盤を凍結させてから掘削除去を行っているイメージである。汚染物質の危険性に応じて、低温化までで留めるのか凍結まで行うのかを判断して工事を進めることができる。

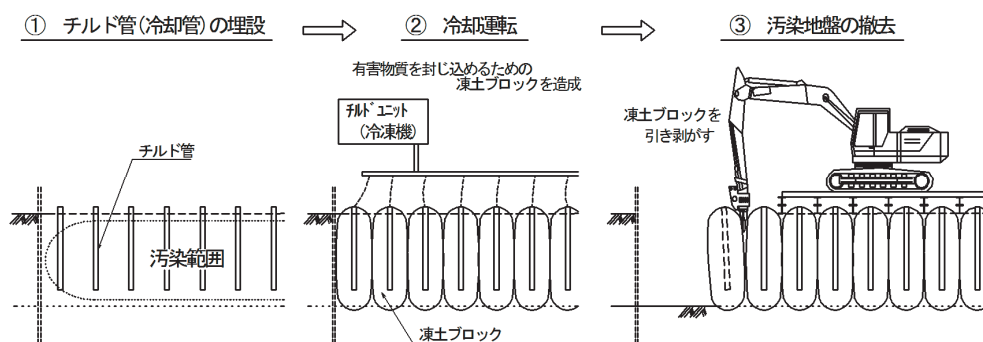


図 15 地盤の凍結と低温化を利用した汚染土壌の回収

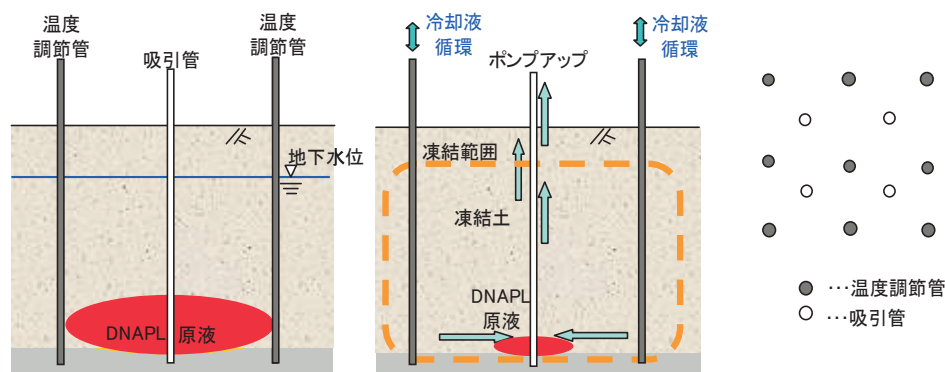


図 16 凝固点の違いを利用した VOCs の回収方法

5-2 凝固点の違いを利用した VOCs 原液の回収

土壌・地下水の汚染物質である TCE や PCE など VOCs は地表面で漏えいすると、不飽和地盤中を通過して地下水面に達し、水よりも密度が大きく粘性が小さいために、帯水層を通過して、難帯水層上に原液状態のまま滞留する。そのため地下水をポンプアップしても、原液状態の VOCs (DNAPL) が存在する限り、地下水は汚染され続ける。

汚染源である DNAPL を回収するために、VOCs と水との凝固点の違いを利用した方法が提案されている。例えば、TCE の凝固点は -86°C 、PCE では -22°C であるので、図 16 に示すように地盤を水の凝固点である 0°C 以下に冷却して、地盤中に液体状態で存在する VOCs を吸引により選択的に回収することができる⁽²⁷⁾。しかし、実施工においては DNAPL の存在する位置をどのように特定するのか課題が残っている。

5-3 凍上現象を利用した細粒土の洗浄

汚染土壌の洗浄技術において、砂のような粗粒土は容易に洗浄されて有効利用に供されるが、粘土やシルトのような細粒土は洗浄が困難なために最終処分場に廃棄される。

このように通常は洗浄が困難とされる細粒土の汚染土壌に対して、凍上現象を利用した方法が提案されている。その原理は、細粒土が凍結する時に凍土に向かって水流が発生することであり、凍上現象を利用した洗浄では、特に細粒土中の汚染間隙水のみを強制的に移動させることができる。基礎実験の段階であるが、自然冷熱の利用やイオン交換反応が利用できれば実現性が高くなる⁽²⁸⁾。

6. まとめ

地盤凍結工法は世界では 150 年の歴史があり、我が国でも 50 年の歴史を有する土木や資源開発の分野においては重要な補助工法であったが多くの人々には知られていない。現在では都市土木のシールドトンネル工事において不可欠な補助工法として定着し、原子力発電所の廃炉事業などの重要な局面で活用されるように信頼される技術へと発展している。今後は、従来は顧みられてこなかった汚染土壌対策等の環境分野やエネルギーの分野における発展も期待できる。

参考文献

- (1) 櫛田幸弘, 伊豆田久雄他, 「凍結工法50年の歩み」, 地盤凍結工法50周年記念集, (2014), pp. 3-5, 100-110.
- (2) 地盤工学会, 「地盤改良の調査・設計と施工」, 地盤工学実務シリーズ31, (2013), pp.160-161.
- (3) Miller, R. D., “Freezing and Heaving of Saturated and Unsaturated Soils”, *Highway Research Record* 393, TRB, National Research Council, Washington D. C., (1972), pp.1-11.
- (4) Gilpin, R. R., “A model for the prediction of Ice Lensing and Frost Heave in Soils”, *Water resources research*, 16-5 (1980), pp.918-930.
- (5) 井上宇市, 「冷凍空調史」, 日本冷凍空調設備工業連合会, (1993), pp.22-23.
- (6) Jumikis, A. R., “Thermal Soil Mechanics”, Rutgers Univ. Press, (1966), pp.120-123.
- (7) Lightfoot, T. B., “On refrigerating and ice-making machinery and appliances”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, (1886), pp. 201-261.
- (8) John, E. L., ”Soil freezing produces excavation hazards”, *Refrigerating Engineering*, (1955), pp.32-37.
- (9) Gordon, G., “Arch dam of ice stops slide”, *Engineering News Record*, (1937), pp.211-214.
- (10) Dorman, Y. A., and Trupak, N. G., (原田干三 訳編), 「凍結工法」, 鹿島出版会, (1972)
- (11) Thoresen, S. A., “Shield-Driven Tunnels Near Completion Under the Schelde at Antwerp”, *Engineering News Record*, 110-26 (1933), pp.827-832.
- (12) 村山徹, 柴田徹, 軽部大蔵, 「地盤凍結工法に関する実験」, 京大防災研究所年報, 第5号A, (1962), pp.94-101.
- (13) 高志勤, 「凍結管列の凍結結合に対する地下水の影響について」, 土木学会論文報告集, No.161, (1969), pp.51-58.
- (14) 高志勤, 左治, 「わが国における最初の土壌凍結工法の記録」, 冷凍, 38-426 (1963), pp. 282-294.
- (15) 金安進, 後藤康之, 青木稔, 「日本橋川下の大断面凍結工法」, トンネルと地下, 9-8 (1978), pp.23-30.
- (16) <https://www.pref.chiba.lg.jp/doukei/aqualine/aqualinegaiyou/> (参照日 2016年7月1日)
- (17) 古郷誠, 山田憲夫, 岩間紀夫, 渡辺恒方, 「東京湾横断道路・川崎人工島凍結工法による発進防護工」, 基礎工, 24- 7 (1996), pp.120-123.
- (18) 石倉克司, 櫛田幸弘, 「白い凍土はシールドの守り神」, *Tunnels and Underground*, 29-2 (1998), pp.45-50.
- (19) 富田一隆, 「東京湾横断道路建設工事における地中接合防護凍結工法」, 第25回土木学会関東支部年次学術講演会, (1998), pp. 1012-1013.
- (20) <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/genshiryoku/dai32/siryoul.pdf>, (参照日 2016年7月1日)
- (21) <http://www.tepco.co.jp/decommision/planaction/landwardwall/index-j.html>, (参照日2016年7月1日)
- (22) 並川正, 森川誠司, 吉田輝, 佐藤一成, 相馬啓, 「地下水流を考慮した凍土方式遮水壁の閉合に係る解析的評価」, 土木学会第70回年次学術講演会, 第三部門, (2015), pp.545-546.

- (23) http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2016/pdf/0331_2a.pdf, (参照日2016年7月1日)
- (24) Rui, D., “Construction of 1,000 meter depth mine shaft in China”, Personal communication.
- (25) Wagner, A. M., “Creation of an artificial frozen barrier using hybrid thermosyphons”, *Cold Regions Science and Technology* 96, (2013), pp.108-116.
- (26) 吉田聡志, 伊藤譲, 嘉門雅史, 日置和昭, 福島信吾, 野村忠明, 「冷凍と凍結による有害物質の気化の制御と除去技術」, 第51回地盤工学会研究発表会, (2004), pp.2213-2214.
- (27) 伊藤譲, 「凍結融解技術を利用した汚染土壌対策」, ケミカルエンジニアリング, 49-5 (2004), pp.14-20.
- (28) 井上拓人, 伊藤譲, 廣瀬剛, 阪部秀雄, 芮大虎, 「凍結融解とイオン交換反応を利用した土壌洗浄における洗浄効率に及ぼす影響」, 第12回地盤改良シンポジウム, (2016), 投稿中.