

土の凍結と地盤工学

9. 地盤凍結工法

伊豆田 久 雄 (いずた ひさお)

㈱精研・凍結本部・技術開発室 室長

譽 田 孝 宏 (こんだ たかひろ)

㈱地域 地盤 環境 研究所 特別技術研究室 主任研究員

9.1 最近の地盤凍結工法

9.1.1 地盤凍結工法とは

我が国は地下水位の高い国である。このため、ほとんどの掘削工事において地下水への対応は常に検討すべき課題である。都市部の掘削工事では、トンネルなどへの出水や土砂流出による地盤変形など、危険性と日日向かい合っている。特に、掘削領域の周辺に地下鉄・電力線・橋脚などの重要構造物が存在する場合などでは、厳しい地下水管理や地盤沈下管理が必要とされている。また、薬液注入による地盤改良工法では大深度や大断面の掘削工事になるほど、未改良領域が残存する確率が増加するため、より確実な止水と強度増加が見込まれる地盤改良工法が要望されている。

地盤凍結工法は、高水圧下においても出水の危険性を低減させることができる優れた掘削防護工法の一つである。シールド機の発進および到達立坑、並列やT字接続させるトンネル間、またはトンネルと立坑間の構築、地下拡幅など、我々が利用しようとする地下空間が深くなればなるほど、本工法の需要は増加すると考えられる。また、凍結工法では、地下水は氷に相変化し、工事後はもとに戻るため、自然に優しい地盤改良工法であるという特徴も兼ね備えている。

地盤を一時的に凍結して硬化させかつ止水する凍結工法では、多くの場合、大型冷凍機により -20°C 以下に冷却された不凍液を、図-9.1のように、地中に埋設された凍結管内に循環させることで凍結管周辺の地盤を凍結する。要求される耐力壁の形状に合わせて最適に配置した凍結管列により、必要な凍土壁を造成することが可能である¹⁾。以下では、凍結工事の動向や施工事例をはじめに述べ、9.2節では凍結工法が抱えている技術的課

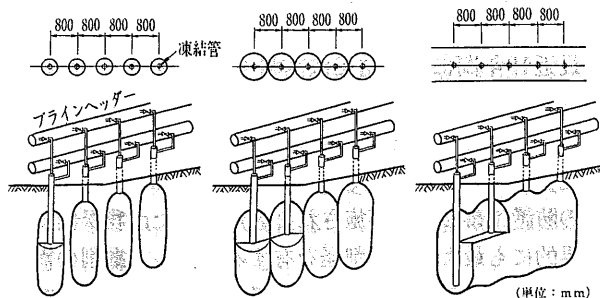


図-9.1 地盤凍結工法における凍土壁造成の模式図

題が最近10年くらいの間どのように解決されてきたかを示す。9.3節では、現在取り組まれている技術的課題について述べる。

9.1.2 凍結工事の動向

世界で最初に土木工事において人工的に凍土を造成して利用したのはイギリスであり、鉱山用立坑建設において滞水層の崩落防止のために、1862年に実施された。その後、ロシアや北欧の採鉱用立坑や都市地下道などの建設などにも用いられ、GL約 -600m までの施工報告がある¹⁾。最近では、例えばオランダにおいて河川下の並列トンネル間の避難坑接続工事の補助工法としても採用された²⁾。我が国では京都大学・故村山朔郎教授が導入の必要性を提唱し、それを受けた故高志 勤氏らによって、ちょうど1世紀後の1962年に大阪府守口市の水道管推進防護工事に適用された。これが、我が国における凍結工法の始まりである。

本工法の土木工学的用途は多岐にわたり、それぞれの時代が要求する地下構造物建設に必要な凍土を提供し続けてきた。1960年代の地下街連絡路や地下鉄の建設、1970年代の河川直下横断トンネル工事や広域下水道整備のためのトンネル工事、1980年代の成田空港への航空燃料・ガス輸送パイプ建設、1990年代の東京湾横断道路(アクアライン)建設や洪水対策用地下貯留池建設などが本工法の用いられた代表的な工事であり、2000年代は首都地下高速道路トンネル建設における発進防護工事などに使われてきている。施工されてきた工事の事業主体は、2001年までの40年間における施工件数でみると下水道事業の流域下水道の幹線トンネル工事で最も多く採用されている(図-9.2)。

凍土壁の用途毎に施工件数の累積数を見ると、シールド機の発進・到達時における防護工としての活用が一番多く236件施工されている。今後、特に止水が主目的となる高水圧対応型の到達防護工事などの必要性が高まる

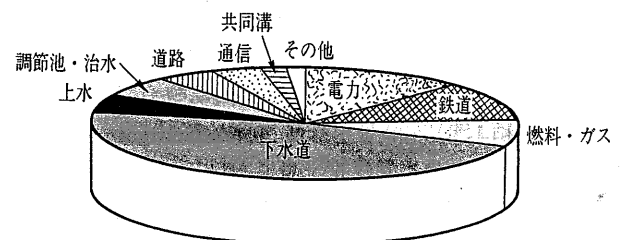


図-9.2 地盤凍結工法を採用した事業主体の割合

ものと思われる。一方、最近施工件数が増えてきたのが、トンネルと立坑間の接続工事における防護工である。接続防護の全工事件数は114件であるが、この10年間に79件施工された。この増加要因としては、土木工事全体の施工深度が深くなり、また接続断面積も大きくなったため、薬液注入による防護工事では完全止水ができず、細砂などのトンネル内への流入の危険性が高くなったことが挙げられる。特に共同溝、電力、通信施設の工事では、出水により都市機能喪失の危険性が隠れている。

これらの用途以外には、既設トンネルの拡幅防護、シールド機の地中接合防護、立坑構築防護、さらに新幹線直下での風化花崗岩中でのトンネル掘削防護まで多種多様なものがあり、国内の総計では500件を越えている。また、これらの凍結工事において造成された凍結土量もほぼ直線的に増加し、現在までに40万 m³ 以上の凍土壁が我が国で造成されてきた。

「大深度地下構造物の設計施工技術に関する研究委員会」がまとめた大深度シールド工事例³⁾ (主に40 m以深、1980年～2002年までの中)で、凍結工法が採用された状況を示すと図-9.3のようになる。図では、横軸にシールド外径を、縦軸にはシールド掘進中の最大土被りを示している。このように、大深度または大口径のシールド工事において何らかの凍結防護が行われており、高水圧下での止水性と地盤強度の増加方法としての信頼性の高さがうかがわれる。

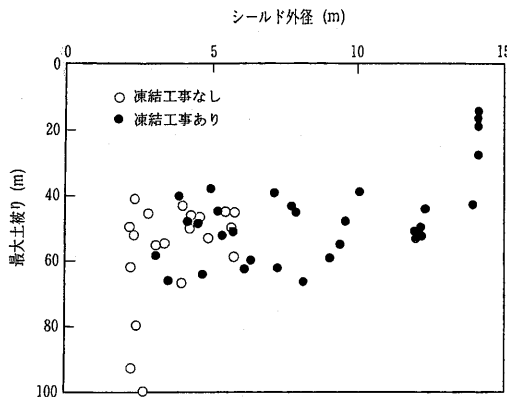


図-9.3 代表的な大口径および大深度のシールド工事と凍結工事の関係（凍結工事が発進・到達・地接・接続のいずれかで適用されたものを黒丸●で示した）

9.1.3 凍結工法の施工事例

最近10年以内に施工された代表的な凍結工事の中で、世界最大級の大断面かつ海底下におけるシールド工事と、高水圧と大きな凍結膨張圧という厳しい条件下で現場計測管理が行われた接続工事の2事例を紹介する。

1) 東京湾アクアライン（東京湾横断道路）における凍結工事⁴⁾

東京湾アクアライン建設工事においては、海底下で外径φ14.14 mの巨大なシールド機発進の防護、さらにシールド機同士の海底下での地中接合防護に凍結工事が用いられた。

凍結工事箇所は、口絵写真-23に示すように、シールド機の発進防護8カ所（その内の川崎人工島を、口絵写真-24, 25に示す）と、海底下のシールド機の地中接続防護4カ所であった。凍結防護は、1994年の凍結管理設ボーリングを皮切りとして、総凍結管本数約960本、総凍結管長約44 km、延べ使用冷凍機能力4 350 kWで、造成した凍結土量は28 600 m³であり、これまでに我が国で施工された凍結工事において最大規模であった。

本凍結工事における技術的課題としては、1) 最深部水圧が700 kPaであり、地下水の供給が絶え間なくあることからわずかの未改良部も許されず、大断面掘削面に対して確実に凍結止水すること、2) 固化処理された人工島からシールド機が発進するため、大きな凍結膨張圧が予測されこれを軽減すること、3) 大規模工事であることから、工期短縮を図ることなどであった。1)に対しては、厳密な凍土の温度管理を行うため、コンピューターで凍土造成図をリアルタイムで画面表示するなどの日常温度管理を行った。2)の膨張圧対策としては、後述する吸収溝で対応し、膨張圧を大幅に軽減することができたと推定されている⁵⁾。3)に関しては、連続地中壁の撤去において、制御発破を初導入し工期短縮と安全確保の両方を満足させることができた（口絵写真-26）。

2) 渋川雨水貯留管での凍結工事⁶⁾

本凍結工事は、口絵写真-27のように下水管渠の計画流量を越えた雨水を取水立坑を経由してトンネルに貯留させるのに必要な水平接続管の設置が目的である。凍結工法が採用されたのは、400 kPaを越す高水圧が作用している地下水条件下で、流動性の高い細砂層を含む地盤を掘削する接続工事であり、出水に伴う地表面沈下などが懸念されたためである。

本工事では、凍結する対象地盤の一部に固結シルト層が存在していたため、凍結膨張圧によるトンネル内空変位やトンネル覆工応力の大きな増加が懸念された。このため、覆工開口に必要な凍土壁を造成した後、余分な凍土成長を抑制するだけでなく、開口部の補強として十分な強度を維持しつつ、また、開口作業の全期間にわたって覆工応力の再分配状況を現場計測管理することによって、凍着部に急激な応力増加が発生しないよう慎重な開口作業を実施した。その結果、開口部におけるトンネル内空変位や、口絵写真-28に示す開口補強部材などの軸力増加は、覆工切断中も緩やかなものに制御することができた。

9.2 地盤凍結技術の進展

最近10年間に、凍結工法へ強く求められた二つの技術的対応を、以下に挙げる。

1) 大深度や大断面の防護工事への対応：大深度地下開発は年々深度を増しており、地下70 mを越す深度での防護工事などが実施されてきた。また、我が国では世界的にも最大級の掘削径を有するシールド掘削の需要が増加しており、前述の東京湾アクアラインの工事では外径はφ14.14 mにもなっている。

2) 大きな凍結膨張圧への対応：工事が大深度化し、硬質粘性地盤などが凍結対象地盤に含まれる場合が増加してきており、大きな膨張圧による問題が顕著になってきた。その結果、既設構造物に作用する膨張圧を精度よく予測すること、その上で膨張圧に対して必要かつ十分な対策が求められるようになってきた。また、例えば立坑における連続地中壁やかまち梁、トンネル覆工や補強部材の健全性に関して、現場計測管理を行う場面も増加してきた。

9.2.1 凍結管曲がり計測技術の改良

前述した東京湾アクアラインの凍結工事では鉛直凍結管の管長は最大74.2 mあり、凍結管先端まで見通せる可能性は低い状態にあった。従来の孔曲がり測定方法であるペンライト法では、先端まで見通せない場合には使用不能であり、挿入式傾斜計では計測に時間がかかりすぎるなどの問題点があった。1993年に開発されたツイーン・ジャイロ式孔曲がり測定器によって、600本以上の凍結管の曲がり測定が行われ、長尺の鉛直ボーリングを管理することができるようになった。

凍結管の埋設には、通常のボーリングより高い埋設精度が要求される。礫層において水平方向への長尺凍結管の埋設が必要となってきたことから、ボーリング方法の改良と長尺の水平孔曲がり測定方法の開発が行われた。この方式のボーリングでは、砂礫を掘削する先端部だけを埋殺しにし、凍結管挿入後にはケーシングを回収できる特徴を有しており、実施工においても砂礫層で30 m近い長尺水平凍結管の埋設が実施された。

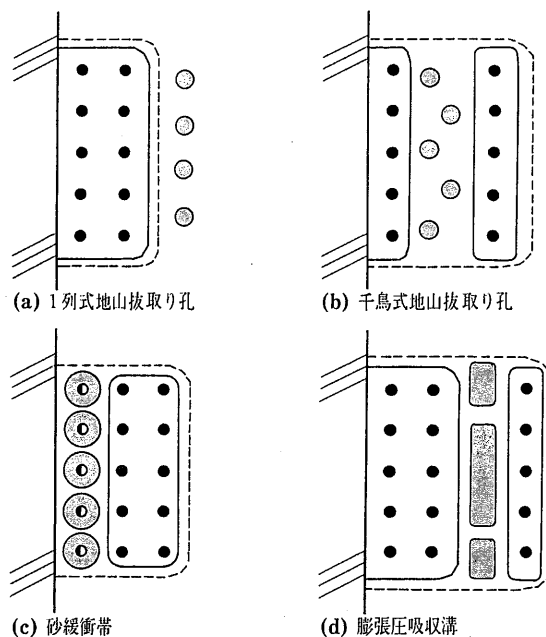
9.2.2 凍結膨張対策の多様化

凍結に伴う粘性地盤の凍結膨張は、凍土壁周辺の未凍結地盤を押し、既設埋設管や地表面を変位させ、また、連続地中壁による立坑やトンネル覆工へ作用圧を付加する。現場で発生する膨張変位量や覆工作用圧に関する設計手法⁷⁾は、数多い施工実績を参考にして検討されてきた。これらが構造物に作用し、構造物の変形や覆工応力増加が許容値を越すと予測された場合、以下に示す種々の凍結膨張対策が取られている。

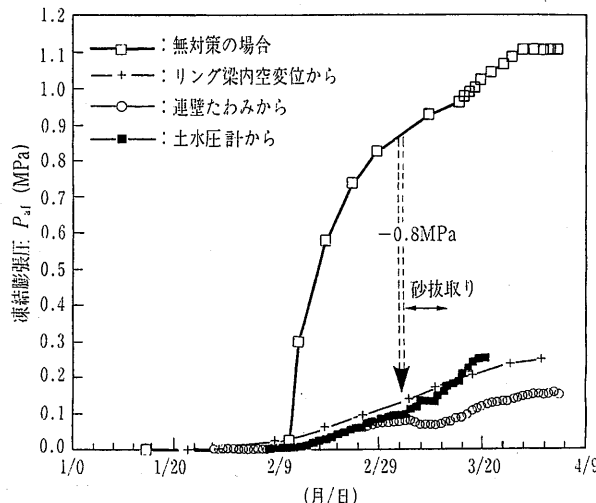
凍結膨張対策の基本は、余分な凍土を造成しないことにある。土圧や水圧に対抗するために必要な凍土厚を造成した後も、凍土は少しずつ成長を続ける。この余分な凍土成長を抑制するため、凍土壁外側に温水管を埋設し、+30～+60℃の適温の水が流し続けられる場合がある。初めて実施されたのは1973年であり、凍土造成範囲を限定することが可能である。

他の凍結膨張対策としては、従来から凍土壁前方の未凍結地盤を抜き取る方法が行われてきた。現在までに、この膨張対策効果は、要素試験、モデル実験、およびFEM解析により定量的評価がされてきた。その結果、図—9.4に示すように凍結膨張変位を吸収する方法が数多く考案され、現場状況に応じて適切な抜き取り方法が設計され、施工されている。

比較的地盤が軟弱であったり軽減すべき膨張圧が小さい場合には、図—9.4(a)のように抜き取り孔を等間隔に1



図—9.4 凍結膨張対策としての、膨張変位の模式図
(平面図で、●は凍結管：●は膨張変位吸収後の凍結管、◎や⊙は吸収孔、帯、溝、破線の範囲は最終造成凍土を示す)



図—9.5 凍結膨張圧軽減効果の経時変化

列削孔する⁸⁾。硬質粘性土層の場合には、抜き取り孔を図—9.4(b)のような千鳥式地山抜き取りと呼ぶ方式で交互削孔し、凍結膨張圧による影響を構造物の許容応力度内に制御することに成功している⁹⁾。さらに硬質な、例えば固結シルト層のような地盤では凍結膨張圧が1 MN/m²前後になるために、砂緩衝帯¹⁰⁾ (図—9.4(c))や膨張変位吸収溝⁵⁾ (図—9.4(d))が施工された。両者とも単孔ではなく、連続溝に近い形状にすることで凍結膨張変位の大部分を吸収しており、過去の施工結果をまとめると立坑などの構造物に加わる付加応力は1/3～1/13に軽減されている。図—9.5は、土丹（未凍結土の変形係数：500 MN/m²）に対して行われた砂緩衝帯による凍結膨張圧の抑制効果を示している¹⁰⁾。凍土造成完了時に立坑に作用する平均的な凍結膨張圧 P_{af} は、砂緩衝帯

を施工しなかった場合（無対策）には、約0.9 MPaと予測されていた。しかし、実際の工事では砂緩衝帯やその中の抜取りにより、 P_{af} を約0.8 MPa減少させることができた。

これらの凍結膨張対策では、いずれの方法でも工期とコストが重要な問題となる。豊富な膨張対策方法の中から、最適な方法を選択することが重要になる。そのためには、今後、凍結膨張量の予測精度を高めるだけでなく、構造物内部に発生する覆工応力増加の算出方法を確立し、また現場計測結果から評価された膨張圧軽減効果を次の設計へフィードバックすることなどが不可欠であると考えられる。

9.2.3 計測管理技術の向上

セメントなどを地盤内に注入または混合し、その化学反応により地盤を硬化させる他の地盤改良方法に比べ、凍土を造成する方法は、地中温度の計測管理によって地盤改良品質（改良むら、改良後強度）を高精度で確認できるという優れた面がある。その理由を以下に挙げる。

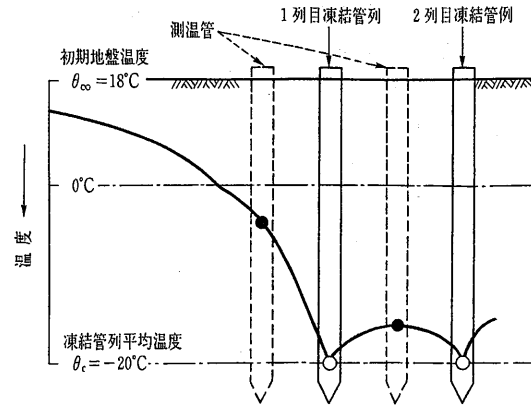
1) 原理面から均質な地盤改良が可能である：局所的に温度の高い地盤が残留していても、熱は高温部から低温部へ流れ、時間とともに温度むらがなく全域で同じマイナス温度の凍土壁となる。このため実際の工事現場で造成された凍土壁の強度は、室内試験で測定された強度とほぼ同じであるものとして設計できる。

2) 高い改良品質を確保できる：測温地点自体の温度の測定精度は0.1°Cであり、測温地点間の温度分布についても熱計算により推定できる（図—9.6）。このため、数mを越す厚みの凍土壁であっても温度分布を精度良く推定でき、温度と強度の関係を用いると、薬液注入やセメント混合などによる土留め壁において強度を推定する場合よりも精度の高い強度管理ができるとみなされている。

以上のようにもともと凍結工法は、薬液注入工法に比べると、計測によって現場管理することに適していたが、パーソナル・コンピューターの処理能力の目覚ましい発展や、ひずみ計や三次元光波測距儀などの計測器の信頼性向上とが結合することによって、凍結工法の計測管理技術がより一層発展してきた。

凍結工事では、どれだけ確実に計画どおりの凍土壁が所定の期間で造成するかを、計測管理することが重要である。地中に埋設された測温管中のセンサーで計測された温度などから、従来の現場では手計算や手書きにより凍土造成図を作成し、管理することで十分対応可能であった。しかし、凍結工事の規模が大きくなり温度測点数が多くなった現場や、万一の出水による悪影響が大きい現場でも、頻度を上げて温度データを管理することが求められるようになった。これらの必要性から、コンピューターによる演算と図化によるリアルタイムの温度管理技術が確立された。

他の技術としては、凍結膨張の既設構造物への影響を計測管理する方法が挙げられる。凍結膨張自体をなくすることはできないものの、構造物の変形や応力および地盤



図—9.6 凍土内温度分布の模式図

内の変位を計測管理し、適切な対策を行う技術が発達した^{8)~10)}。凍土造成の既存構造物への影響は、一般の水圧や土圧によるものとはいくつかの点で異なる。例えば、構造物に発生する応力には、凍結膨張のような外力によるものと、温度低下がもたらす熱応力によるものとが混合している。凍結管を冷却し始めた初期に急激な応力変化が見られる場合があるが、この多くは熱応力によるものであったという計測結果が報告されるようになってきた^{5),8)}。また、凍結膨張の構造物への影響は凍結土圧と呼ばれているが、水圧のように構造物に変形しても小さくならないというものではない。構造物の変形により凍結土圧は小さくなり、極端な場合には凍結膨張に等しい量だけ構造物に変形すると凍結土圧はゼロになるというような特異な面をもっている。

9.3 今後の技術開発の展望

凍結工法に今後要望される点、そしてそれらに応えるために実際の工事に導入中または開発中の凍結技術を以下に述べる。

9.3.1 大深度地下開発に対応した凍結技術

大都市の中浅部地下での各種幹線の輻輳状態や、大地震時の安全性などから、大規模なインフラは地下40m以深に建設せざるをえない場合が多くなってきた。周知のように、「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法案」が平成12年5月に公示され、大深度において多くの建設が計画されている。

大深度地下開発における大きな技術的課題の一つとして、高水圧下での止水技術が挙げられており、凍結工法は今後の大深度地下開発においても需要が増えるものと考えられる。また、大深度地下開発では地上部からの工事が実施できない地中拡幅や接続工事が要求される場合もあるが、本工法は地下深い既設構造物の内部から全方位の施工が可能であることから、これも大きな長所であると言える。

もちろん、大深度施工における凍結工法において、検討すべき技術課題は残っている。例えば、前述した硬質粘性地盤における大きな凍結膨張圧に伴う構造物への影響に関する対応や、造成する凍土壁を水圧が卓越する地

盤に適した円形またはアーチ形にした場合の技術開発も望まれている。また、公共投資の削減が進められる中、安全性を確保しつつも、工期やコストを軽減するための技術開発への努力は常に求められている。

9.3.2 曲線ボーリングを利用した凍結技術

都市部地下において駅舎築造のための拡幅工事や、本線と支線との接続工事などを行う上で、地表部からの地盤改良工事は大きな交通障害となる。また、浅層部における送電管やガス管などの各種埋設物や既存トンネルなどが存在する場合、これらを移設するか、またはそれらを避けるために斜めからの改良工事が必要になり、不必要な部分を工事する割合が増加する。このような場合、地下構造物内部から必要な範囲に限定した地盤改良が行える方法が望まれる。

これまで施工されてきた凍結管は直線形状であって、水平方向の凍結管と鉛直方向の凍結管の組み合わせや、放射状に埋設した凍結管により地盤の凍結を行ってきた。前者では少ないとはいえ地表部からの工事が残り、後者では改良に必要とされるアーチ状の凍土壁以外の余分な凍土を造成することになる。これらを改良するため、図9.7に示す掘削外管が曲線形状であって、先端が外管から独立した掘削部になっている曲線ボーリングが開発され、1992年に最初の試験削孔が行われた¹¹⁾。

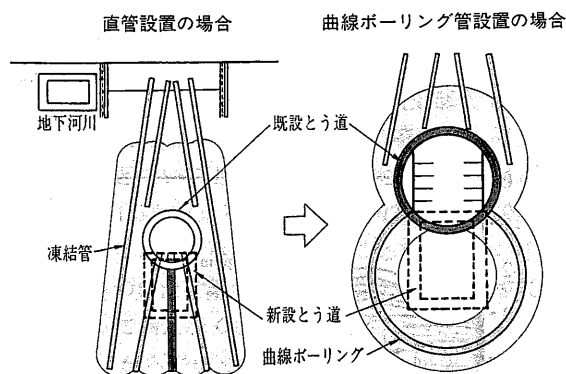


図9.7 凍結管設置の比較図

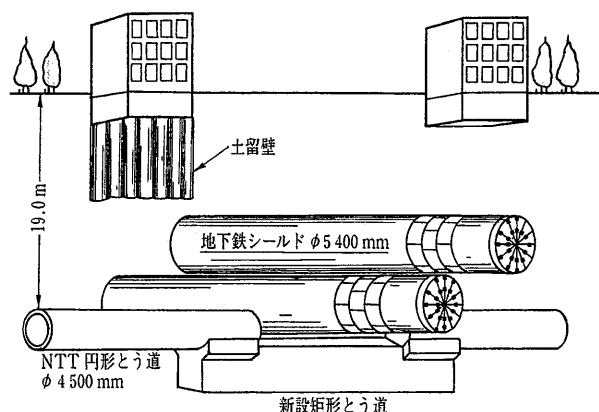


図9.8 通信用トンネルの支障移転地中切下げ工事イメージ図

初めて曲線ボーリング工法が凍結工事に用いられたのは、1996年～1998年に神戸で実施された通信用トンネ

ル移転のための地中切下げ工事¹²⁾であった(図9.8)。神戸市地下鉄海岸線のシールド掘進工事に伴い、近接する既設通信とう道が支障になった。地下鉄の利便性を優先させるため地下鉄の線形は変更せず、とう道内部の重要な通信ケーブルを収容したまま、既設とう道覆工の一部を撤去し、その直下に新設とう道を構築する工事が実施された。狭いとう道内からの工事であるため、とう道周辺地盤の止水と強度増加を目的とした補助工法として、信頼性の高い凍結工法が採用された。ここでは、図9.7に示したように凍結管が掘削坑内に露出することなく、計画範囲に凍土が造成できる曲線ボーリング工法が導入された¹³⁾。

9.3.3 小規模化に対応した凍結技術(凍結工事のスリム化)

凍結工法は、工期が長く、コストも単位体積当たりでは高いと指摘されることが多い。最近、いろいろな面から凍結工法のスリム化が検討されているが、代表的なものを以下に四つ挙げる。

1) 耐力壁設計の合理化：凍結工法の合理性を高めるには、必要かつ十分な凍土厚を設計することが重要である。クリープ性を考慮しつつも凍土の塑性域までの強度を利用した設計手法などが考えられる。なお、この凍土厚の減少は、粘性土地盤で問題となる凍結膨張の量を少なくするという副次的なメリットもある。

2) 止水のみの凍結工法：凍土を耐力壁として用いると、厚い凍土壁が必要となる。土圧や水圧は鋼管などの他の材料で支え、凍土壁は止水のみに、極端に言うと皮1枚だけ作るという考え方もありえる。また、鋼管と凍土の複合した壁の力学特性も検討されつつある¹⁴⁾。

3) ボーリングを省いた凍結工法：これまでの凍結工法では凍結管の埋設が前提条件である。これに対して、接続防護する距離が短い場合には、凍結管を地中には埋設せずに、構造物に埋込みもしくは貼付した凍結管のみで凍土を造成することが検討されている¹⁵⁾。

4) 液体窒素による凍結工法：冷凍機を使わずに液体窒素によって地盤を凍結する割合は海外では高いものの、我が国では凍結の規模が大きくまた期間が長いいため冷凍機による凍結がほとんどであった。しかし、急速施工や地下水対策の観点から、最近も液体窒素による凍結防護が施工されており、この場合の設計や施工技術の合理化などが求められている。

参考文献

- 1) 土質工学会編：土の凍結—その理論と実際—(土質基礎工学ライブラリー23)，第5章 人工凍結の利用と制御，pp. 249～268，土質工学会，1994。
- 2) H. Hab, R. Jagow-Klaff, H.-W. Seidel: Westerschelde tunnel—Use of brine freezing for the construction of the traverse galleries, Ground Freezing 2000, Balkema, Rotterdam, 2000.
- 3) 地盤工学会：大深度地下構造物の設計施工技術に関する講習会，地盤工学会，2001。
- 4) 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，

Vol. 24, No. 7, 1996.

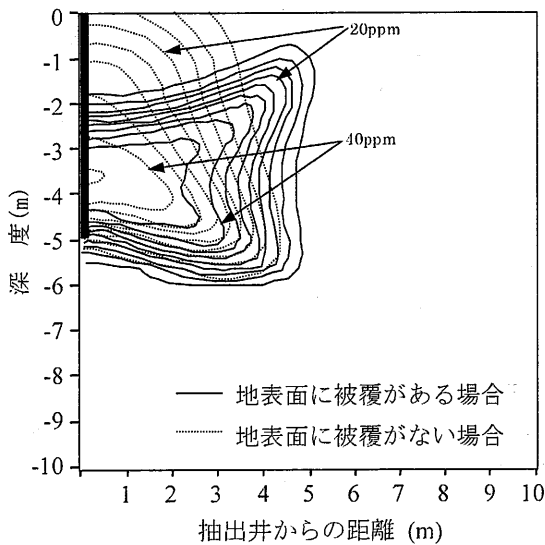
- 5) 増田 隆・森本裕郎・三戸憲二・伊豆田久雄：凍結膨張圧軽減対策溝の効果，トンネルと地下，Vol. 30, No. 1, pp. 7~15, 1999.
- 6) 青木 誠・深澤裕志・石原和典・伊豆田久雄・森 保史：凍結工法による大深度でのシールド地中接続工事における施工管理について，同計測管理について，土木学会第57回年次学術講演会，Ⅲ-168~169, pp. 335~338, 2002.
- 7) 野木 明・上曾山優・伊豆田久雄・加藤哲治：地盤凍結工法における凍上量及び凍結膨張圧の設計手法と事例，土の凍結と室内凍上試験方法に関するシンポジウム，地盤工学会，pp. 99~106, 2001.
- 8) 江口公道・中村隆良・今石 尚・西田与志雄：穿孔抜き取りで凍結膨張圧を軽減 外郭放水路第2工区，トンネルと地下，Vol. 31, No. 5, pp. 37~44, 2000.
- 9) 小松靖朋・高部剣也・伊豆田久雄：発進防護地盤凍結工事における膨張対策の効果について，土木学会第51回年次学術講演会，Ⅲ-B144, pp. 288~289, 1996.
- 10) K. Okubo, T. Okamoto, K. Ryokai and H. Izuta: Evaluation of Countermeasures for 1.10 MPa Frost Expansion Pressure using New Measurements System, Ground Freezing, Frost Action in soils, pp. 299~304, 2000.
- 11) 粕谷太郎・安藤博雄：曲線ボーリングを利用した地盤改良工法の開発—TULIP 工法—，土木技術，Vol. 49, No. 8, pp. 95~101, 1994.
- 12) 鎌田敏正・柴田敏幸・譽田孝宏・奥野正富・福本 博・北村裕二：大規模凍結工法を用いた通信用トンネルの地中切下げ工事—NTT 神戸支店通信用トンネル支障移転工事—，平成10年度施工技術報告会講演概要集，pp. 19~28, 1999.
- 13) 鎌田敏正・鈴江利康・柴田敏幸・藤沢伸行：曲線ボーリング (TULIP 工法) を利用した凍結管の配置，第3回地下空間シンポジウム講演会，pp. 331~338, 1998.
- 14) 上田保司・生頼孝博・山本 稔：鋼管補強による凍土梁の曲げ強度特性の改良，土木学会論文集，No. 694/Ⅲ-57, pp. 81~90, 2001.
- 15) 奥 俊彦・松岡啓次・生頼孝博：埋込凍結管のみによる地盤凍結工法の施工可能性の検討，第36回地盤工学研究発表会，pp. 1951~1952, 2001.

訂 正

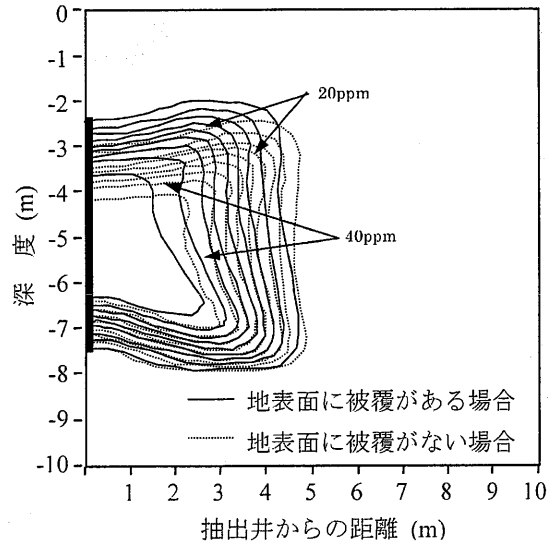
■ 平成15年8月号 (Vol. 51, No. 8) 講座「移流分散解析入門 13. 多相流体の地盤内の移流分散現象の解析例」の図—13.8~図—13.13に説明不足の点がありました。お詫び申し上げますとともに，下記のように追加説明および訂正いたします。

p. 53の図—13.8, 図—13.9, p. 54の図—13.10, 図—13.11の等圧線に示されている数値の単位は圧力水頭 (m) です。

p. 54の図—13.12, 図—13.13のガス濃度の数値が抜けていました。



図—13.12 土壌ガス吸引に伴う土壌水中の TCE 濃度分布の変化 (スクリーン; GL-0~5.0 m, 24 時間後)

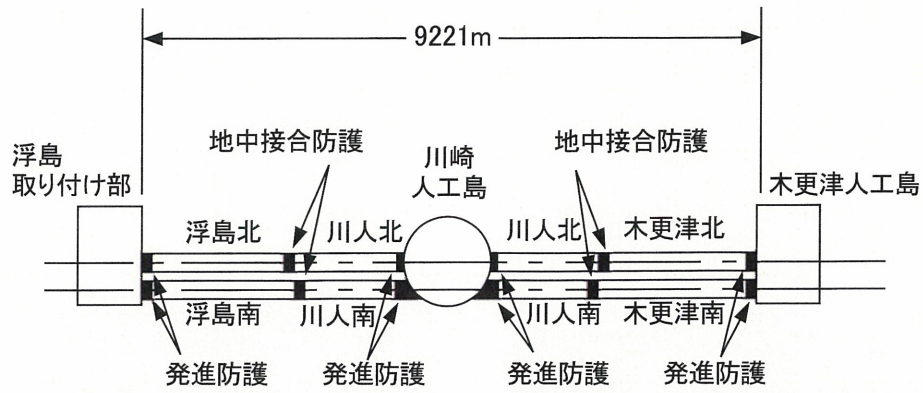


図—13.13 土壌ガス吸引に伴う土壌水中の TCE 濃度分布の変化 (スクリーン; GL-2.5~7.5 m, 24 時間後)

講座「土の凍結と地盤工学」

9. 地盤凍結工法

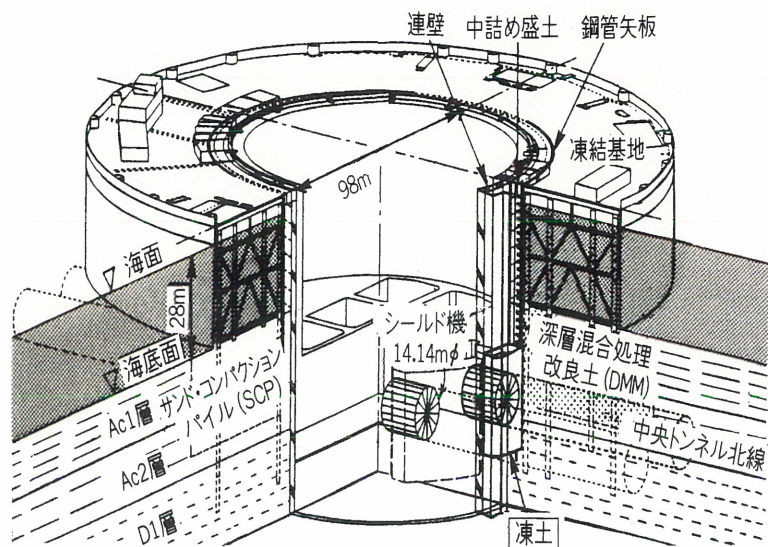
(本文 63～68 ページ参照)



口絵写真一23 東京湾アクアライン（東京湾横断道路）工事と凍結工事箇所（全体平面図）



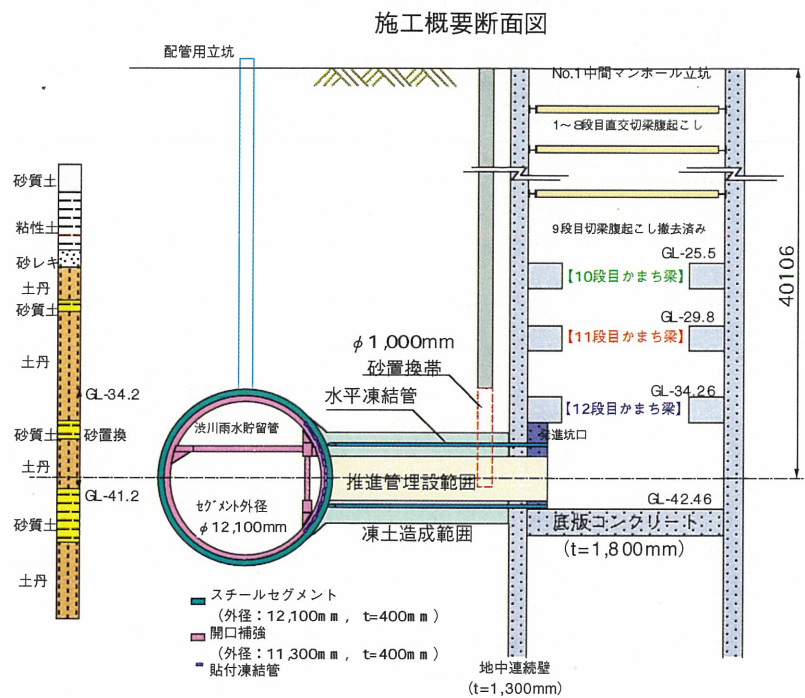
口絵写真一24 川崎人工島（風の塔）の工事全容



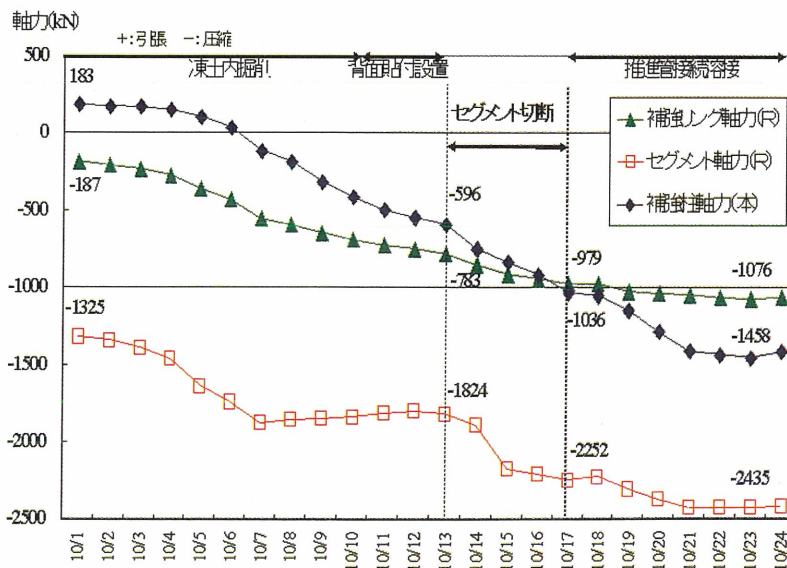
口絵写真一25 川崎人工島（風の塔）での発進防護凍結工事（断面図）⁵⁾



口絵写真—26 川崎人工島（風の塔）開口部における発破撤去後の状態
開口部上半は断熱材（黄色）で覆われている。



口絵写真—27 施工概要断面図



口絵写真—28 凍土壁内掘削・覆工切断中における開口部補強部材の軸力増加の例