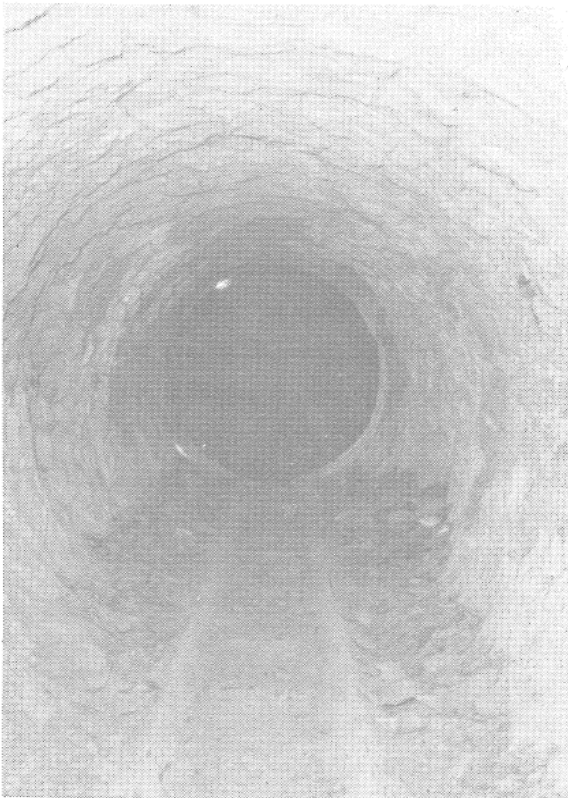


凍結を用いた土木工事 (地盤凍結工法)

高 志 勤



大阪市生野区平野川下で施工された凍結工法、直径3米の凍土トンネルで、クラウンから2米上には川水が流れている。

1. まえがき

土崩瓦壊、狸の泥舟など土は古来頼りにならないものの代名詞のように考えられてきた。このように脆弱な土も一旦凍結すると、スコップは勿論鶴嘴させ受けつけない程強くなる。凍土の強靱性を利用した記録は、既に1800年前魏の曹操が、北夷西涼の馬超と渭水を挟んで対峙した際、夢梅居士の献策により寒夜一夜にして

渭水のほとりに凍土の堅城をつくり、これに據って、寄せては返す猛将馬超の大軍を撃破した話が三国志(吉川英治訳)に記されている。又自然の凍結を利用して、井戸や橋脚の基礎を掘ることは現在でも低温地域では常識的に行われていると言うことである。一方機械を用いて人工的に軟弱帯水地盤を凍結して深い立穴を掘り、その下に埋蔵されている鉱物を掘り出したのは、1862年英国のウェールズで行われたのが最初と言われている。その後この工法は冷凍機器の発達と、低温材料の改良につれて、主として北欧及びソ連で徐々に発展して来たが、今世紀前半迄は殆んどが鉱山用地坑の範囲を出なかった。これはこの工法が家伝の秘法的な扱いをうけ、ノウハウの公表が行われなかった理由によると思われる。今世紀後半に入って、大都市の軟弱地盤中に地下鉄、上下水道、電力、ガス、電話線の単独又は共同溝を、地表の交通や既設構造物を阻害することなしに建設する必要性が強くなり、この工法は都市土木に適用する目的で、吾が国は勿論、ソ連、スウェーデン、英国、カナダ、アメリカ、ブラジルで改めて脚光を浴びるようになった。吾が国では1959年京大防災研村山朔郎教授の提唱で、防災研と精研冷機(株)とで共同研究を開始 1962年大阪府守口市で最初の実施工を完成した¹⁾。

この工法適用の目的は二つに大別することができる。その一つは掘削しようとする部分に水を寄せつけないように遮水することで、他の一つは掘削した部分を凍土で護り、外圧や上部構造物の荷重に対抗することである。これらの目的は凍土が所定通り造成できれば、その完全な遮水性と強度によって充分達成されることを、既に完成した約70例の工事経験が証明している。

2. 凍結工法の概要

目的とする地盤を凍結するには予め対象地盤中にポーリングにより適当な直径をもつ冷却管を所定の間隔を保って平行に埋設しておき、これら冷却管中に冷却液を流すことによって、地盤は冷却管のまわりから凍結しはじめ、時間経過と共に漸次凍結半径は増大し、ついには隣接する冷却管から発達した凍土と合体して、所期の大きさの凍土壁又は凍土ブロックが完成する。土に接する冷却面の形は上記のような円管の場合が大部分で、このような場合の凍結速度は長年月の間経験則が用いられてきたようであるが、著者等は土の凍結潜熱、凍結前後の土の熱伝導率、温度伝播率、地盤の初期温度、冷却面の温度をパラメーターとして、凍結半径を時間の関数とする解を得た²⁾。一方冷却面が平板の場合は Neumann,³⁾ によって解が得られている。これらの解をこれ迄完成したすべての工事データにあてはめて再検証してみると、地下水流がないときは実際の凍結速度の方が理論値より僅かながら大きい、一般的にはよく一致することがわかった。

さて上記冷却管又は冷却板を冷却する方式は、冷凍機で冷却した塩化カルシウムブラインを循環する方式と、液体窒素等の無毒不燃性の低温液化ガスを供給する方式がある。現状では主として経済性の比較から凍土容積が 200 m³ 以上では前者のブライン方式が、それ以下でも工期の短い小規模な凍結には後者の液窒方式が用いられる。凍結工事の平均的凍土量 1,000 m³ で比較すると、液窒方式は、ブライン方式に比較して約 2 倍の単価になるが、凍結速度が約 3 倍大きいことや、約 5 倍の地下水流速があっても凍結すると云う利点がある。又最近 LNG の輸入が増加しこれの低熱利用の一環として液窒の供給原価が下る傾向にある。従って上記 200 m³ と云う経済限界は更に大容量になるものと思われる。又再注目されるようになった省エネルギーの観点からは、単位容積の土を凍結するに要するエネルギー効率は吾が国の場合は冷却面温度が -20℃~-30℃ の間にその最大値があることが証明できる⁴⁾。従って循環ブライン温度は上記温度範囲が適温であることになる。

3. 工法の長短所及び問題点

机上論としては、本工法の実施以前に数多くの長所短所が考えられたが、実施例の累積と共に、吟味改良が加えられ、現在では長短所共に可なり絞られてきた。先ず長所の第一は完全な遮水性であろう。帯水軟弱地盤中に凍土壁をつくり、その中を掘削して数百平方メートルの凍土壁から一滴の水も漏れないことは誠に見事であり他工法では考えられないことである。文頭の写真は凍結工法によって掘さくを完了した直径 3 m の河底トンネルの例である。第二の長所は地下水流さえなければ粘土、シルト、砂、礫層共に殆んど同じ速度で差別なく凍結でき、強度も上記順序で強くなるが、これもそれ程大きい差はなく、全体的には大きな強度が期待できることである。第三の長所は凍土の熱伝導率が未凍結土のその約 2 倍であるために、凍土中の温度にムラが生じ難く、凍土管理が容易である上、凍土が熱伝導率の小さい未凍結土と云う布団に包まれた形になり、停電、故障等で冷凍機が可なり長時間停止しても、解凍が起きる迄に可なり時間がかかることである⁵⁾。

このように長所を並べると全能の工法のように思えるが、一方大きい短所ももっている。短所の第一は高価であることである。この工法を最初に実施した 1962 年頃¹⁾ は 1 m³ の土の凍結費が 15 K¥ 程度で競合工法の薬液注入の 3 K¥ に較べて信頼度が隔段に高いとは云え約 5 倍の価格であった。その後原価低減の努力を重ねて現在では 40 K¥ 程度で薬液注入単価 25 K¥ との比は 1.5 倍強になったが、それでも一般工法として採用されるには高価すぎるようである。第二の短所は透水性の大きい地盤で地下水が流れている場合は、その流速によっては凍結が不可能になることがある。この問題は理論的に解明され⁶⁾、現在ではその対策も確立されているが、これに要する費用が凍結単価を押し上げる結果になる。第三の短所は凍上現象として昔から知られている土の凍結時に発生する体積膨脹である。この現象は粘土、シルトのような小さな間隙をもつ物質が凍結するときに周囲の水を吸い寄せると云う、物理的には非常に興味深い現象であるが、本工法にとっては誠に始末

の悪い現象である。これについてはいくつかの対策が考えられてはいるが、云わば対症療法的なもので、この現象の一般的な法則性⁷⁾の解明がやっと緒についたばかりであるため可及的近い将来に完全な対策を樹立することが著者等の使命と考えている。このように短所をもっているとは云えこの工法は他の工法では不可能な工事を可能にすると云う、特効薬的な作用がある。従って上記の副作用を押えつつより完全な工法に着実に近づきつつあると云うことができよう。

4. 将来の展望

この工法は先にも述べたように歴史が古い割に文献の少ない工法である。従って吾が国において開発に従事した著者等は、年平均気温及び地中温度の比較的高い固有事情を考慮しつつ、凍結速度、凍結効率、解凍速度、地下水流の影響、凍上現象等を全く新しい問題として理論と実験によって一つ一つ解明してゆかなければならなかった。従ってこの工法の発明は外国でなされたけれども、吾が国独特の発展をしたと考えるべきであろう。吾が国の大都市の地下は安全快適な都市機能確保のために、将来益々利用開発されなければならないが、これらの都市は殆んどすべてが沖積層の滞水軟弱地盤上に建設されていると云って差支えない。従って将来は本工法のこの方面への漸増的發展が主流になると考えるのが自然であるが、この工法の開発段階で明らかになったいくつかの副産物的成果の将来が期待される。例えば輸入したL.N.G.を地上タンクより安全な地下タンクに貯える時の周囲地盤の凍結⁸⁾及びそれに伴って生じる凍結膨脹による土圧、変位の問題⁹⁾の解明や、自然災害時の食糧確保のための地下大冷蔵庫をつくと云うような、凍土を一時的な仮設構造物から一歩進めて永久構造物とする検討も進められている。又全地球の見地から全陸地の2%以上を占める永久凍土帯を環境を害わずに開発する問題も最近急速に脚光を浴びるようになった。この地帯では地表面近くの活動層における冬期の凍結、夏期の解凍に伴う諸問題に著者等の凍上沈下の実験結果の応用が期待できる。更に最近ヘドロの脱水処理が公害阻止の観点から

注目されるようになったが、その方法の一つに凍結融解による脱水処理法があり、普通の方法では難しいヘドロへの応用が増加しつつある。この方法は、対象ヘドロを比較的緩速で凍結させてから解凍させると、固形分と水の分離が非常に容易になること¹⁰⁾を利用したもので、上下水処理、工業廃水処理で出て来るヘドロにその利用分野を拡げつつあるものである。著者等の凍土研究成果⁷⁾は上記凍結融解脱水現象の理論解明に役立つことがわかってきた。従って凍結速度、間隙水圧、応力等の変化により最も効果的な条件が組織的に探索できる可能性ができたことになる。

本稿は限られた紙面で工法の概観を行ったために説明が舌足らずになった。引用文献を提示したので興味のある方はこれらを参考に判読願いたい。

引用文献

- 1) 高志、左、吾が国に於ける最初の土壌凍結工法の実施記録、冷凍、38-426 (1963) 282.
- 2) 高志、和田、土壌凍結工法について〔I〕、冷凍、36-408 (1961) 889.
- 3) 川下研介 熱伝導論 オーム社 (1971)。337.
- 4) 高志 勤、地盤凍結工法〔V〕、冷凍、40-456 (1965)。840.
- 5) 高志、山本、土壌凍結工法〔IV〕、冷凍、39-439 (1964)。398.
- 6) 高志 勤、凍結管列の凍結結合に対する地下水流の影響について、土木学会論文報告集、161 (1969)。51.
- 7) 高志、益田、山本、土の凍結膨脹率に及ぼす凍結速度、有効応力の影響に関する研究、雪氷、36-2 (1974)。1.
- 8) 高志 勤、液化低温ガス貯蔵用地下タンク周囲の地盤の凍結について〔II〕、冷凍、47-536 (1972)。521.
- 9) 高志 勤、凍結膨脹による未凍結領域内の土圧と変位の経時変化、土木学会論文報告集、200 (1972)。49.
- 10) Gary S. Logsdon and E. Edgerly Jr., Sludge Dewatering by Freezing, Jour. AWWA Nov 1971 734.