

地下鉄工事における凍結工法の応用

—大阪市地下鉄ケーソン部における実例—

村 山 朔 郎*
道 田 淳 一**
高 志 勤***

1. 緒 言

本文は、潜函や沈埋管などを含水軟弱地中において、凍結工法を用いて連結するために新たに考案した工法を、大阪市地下鉄第3号線西道頓堀川河底トンネル用潜函に適用した報告である。

地盤を冷凍機を用いて一時的に凍結し、その間に地下構造物を構築するいわゆる地盤凍結工法は、1862年にイギリスの Wales で立坑掘削に初めて利用¹⁾されて以来、海外、特に年平均気温の低い地域における実用例はかなりあるようであるが、わが国においては長く実施されるに至らなかった。しかし、地盤凍結工法は、軟弱地盤の施工法として有力な工法であることに着目し、村山・高志は 1959 年より基礎的な研究に着手し、実験、理論両面より本工法の適用についての指針を求めるとともに、比較的地中温度の高いわが国でも有利に採用できることを確かめた^{2), 3), 4), 5), 6)}。これらの成果を適用して、凍結工法は 1962 年にわが国で初めて大阪府守口市の新寺方橋橋台下を通る外径 2.1 m の河底トンネル（最少土かぶり：水底下約 2 m）を構築する際に、トンネル周囲の軟弱地盤の安定化のために用いられた^{7), 8)}。同様の適用法は、その後も近鉄や東急の軌道下の横断にしばしば用いられ、安全・確実に掘削を行なうことができた。

本報告は上記の例とは多少趣を異にした新たな凍結の施工法についてであって、沈設された圧気潜函の継手部の連結施工のため、潜函継手部外周の土を潜函内にあらかじめ埋設しておいた凍結管によって凍結させ、継手部の作業箇所の周囲に凍土のシールを作るものである。その潜函は、大阪市地下鉄第3号線の西道頓堀川横断に用いた深里橋下流の2基の河底トンネル用潜函（この長さ

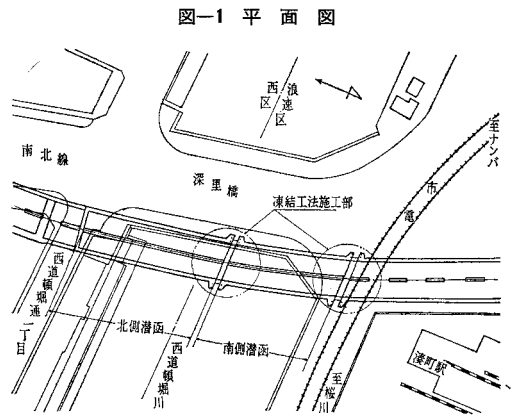


図-1 平面図

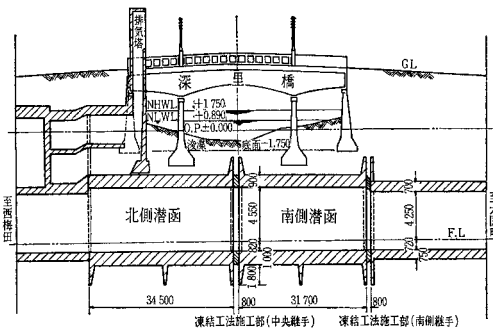


図-2 縦断面図

概略位置は 図-1, 2 に示すとおりである。従来、大阪市地下鉄では、潜函継手の施工法としては、継手部分の外周を矢板で囲み、地表から開削して行なう方法か、圧気を継手部分に封入して、圧気下で継手を連絡する方法かの2種の工法が主に採用されていた。これらの工法と凍結工法の利害得失については、予備実験も加えて約半年にわたり慎重な検討を重ね、1963年秋に凍結工法の採用が決定された。この工法が採用された主な理由は、① 継手の施工する部分を凍土壁によって囲み、継手の作業箇所への湧水を全く阻止できること、② 凍土壁に作用する土圧・水圧などの外圧に対して、凍土壁の安全

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
** 正会員 大阪市交通局高速鉄道建設本部
*** 正会員 理博 精研冷機 KK

度が非常に高いこと、③ 良質のコンクリートをオープンエヤーのもとで、急速かつ確実に打設できることがあげられる。以下にこの工法の概要と二、三の問題点について述べる。

2. 工事計画

(1) 施工順序

凍結工法に関する箇所施工は、つぎの順序で行なった。

① 潜函を築島上で構築する際、その継手部に 図-2.3 に示すコンクリートの突起部をつけ、そこにあらかじめ凍結管を埋設しておく。

図-3 (a) 潜函継手部縦断面図

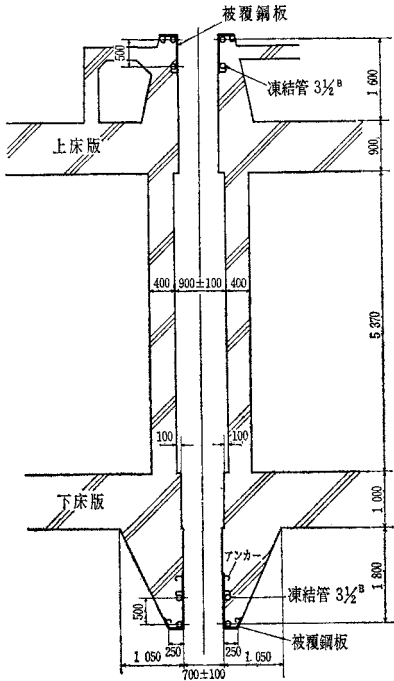
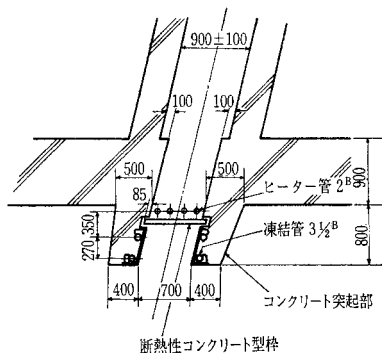
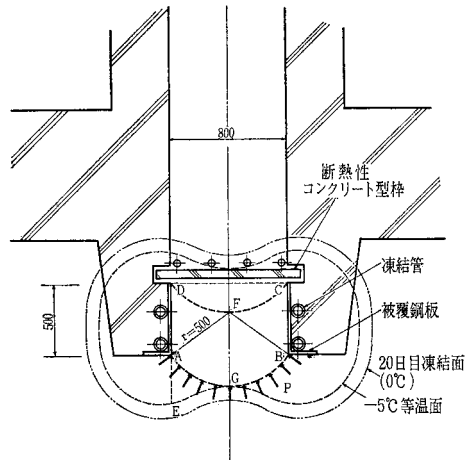


図-3 (b) 潜函継手部水平断面図



② 両側の潜函を沈設後、凍結管内に低温のブラインを循環して、継手部外周の土を凍結する。このとき地盤の熱は突起部コンクリートを通して凍結管内のブラインに吸収されるが、コンクリート自身の温度伝播率は $4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ 程度で、凍土のそれとほとんど等しいので、熱伝導がコンクリートによって阻害されることはない。さらに本工事の場合には、凍結管を埋設した継手部コンクリートの表面の保護と、熱伝導を促進し、地盤中の凍結時の温度の一層の均等化をはかるため、コンクリート表面を熱の良導体である銅板で被覆した。この被覆銅板の影響を無視して計算すれば、凍結管内に -25°C の低温ブラインを循環することにより、凍結は管を中心に発達し、継手部間隔が 800 mm のときは、20日経過すれば両側潜函の継手部は、図-4 に示すように、凍土壁で結合される。

図-4 側壁継手部



③ その後も凍土壁は時とともに厚さを増加するが、凍土壁に所定の強度がでた時点で、潜函内より継手部の土を掘削する。凍土の露出面は 図-3 (b) に示す断熱性のコンクリート型わく板(木板)でおおうとともに、この板の内側には加熱コイル(ヒーター管)を設置する。

④ 継手部に配筋を行なった後、コンクリートを打設するが、その際に加熱コイルには温水を循環して、打設コンクリートが硬化する間 $+5^\circ\text{C}$ 以下に冷却されないよう温度管理を行なう。

⑤ コンクリートの硬化と同時に凍結を解除して、工事を終了する。

(2) 凍土壁の安全性

この計画では、継手部外周に形成された凍土壁が、その内側の土を掘削した場合に、土圧および水圧などの外圧に対して十分安定していることが重要である。凍結管間隔が狭いために凍土壁の形成厚さが最も薄くて、しか

も外圧の最も大きく作用する場所は側壁の下端である。そこでこの部分の凍土壁の安全性について検討してみよう。図-4 に示すように、継手部幅 (80 cm) に対して、凍土壁の厚さが十分大きいため凍結部は、アーチ作用により外圧を支えたと考えられる。したがって、掘削面 DC と -5°C の等温面で囲まれた凍土帯内に最小の半径を持つ仮想アーチ ABCD を想定して、このアーチについて安全性を検討する。なお -5°C の等温面より高温側の領域の強度を無視した理由は、 -5°C より高温部の凍土は一見凍結しているようにみえても、それに含まれている水分のうちには完全に凍結していないものが存在し、強度に不安定性があるからである⁹⁾。

a) 圧縮に対する安定性

GF 面に作用する圧縮力 F は、図-4 の紙面に直角な単位長当たり、

$$F = rp$$

である。ここに r は仮想アーチ半径で、この場合 0.5 m、 p は土圧で、この場合 24 t/m^2 。

ゆえに、

$$F = 0.5 \times 24 = 12 \text{ t/m}$$

となる。したがって、FG 面の受ける圧縮応力 σ は

$$\sigma = \frac{12}{GF} = \frac{12}{0.5} = 24 \text{ t/m}^2$$

-5°C の凍土の圧縮強度を 300 t/m^2 と仮定すると⁹⁾、安全率は $300/24 = 12.5$ となる。

b) せん断に対する安定性

AD 面にかかるせん断力 T は

$$T = p \times (0.8/2) = 9.6 \text{ t/m}$$

したがって、せん断応力 τ は

$$\tau = \frac{T}{AD} = \frac{9.6}{0.5} = 19.2 \text{ t/m}^2$$

-5°C の凍土のせん断強度を 150 t/m^2 と仮定すると、せん断力に対する安全率は $150/19.2 = 7.8$ となる。ゆえに凍土壁は外圧に対して十分安全である。

(3) 冷凍機負荷

この工事では、3カ所の潜函継手のうち南側と中央の2継手を同時に凍結する計画となった。使用する凍結管は外径 101.6 mm の引抜鋼管で、総延長は 426 m である。この凍結管の表面温度を -25°C に保って凍結を行なうものとして計算すると、熱負荷は図-5 に示す下側の曲線となる。なおこの計算値は地中温度 θ を 18°C として既報⁴⁾ の方式⁴⁾ より算出したものを基礎とし、それ

図-5

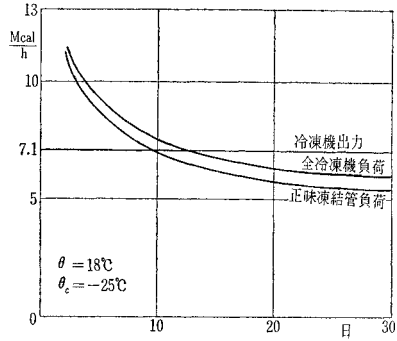
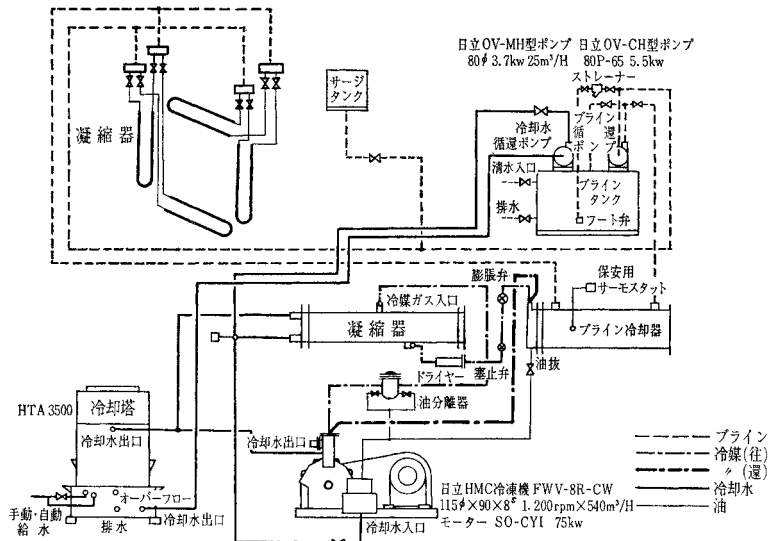


図-6 冷凍装置図



に凍結管相互の干渉、被覆鋼板、構造用鉄筋等の影響を加えて推定したものである。さらにこの値に、ブライン循環用ポンプおよび地上配管よりの取得熱量を加算したものが全冷凍機負荷として図-5 上側の曲線となる。図-5 が示すように、凍結工法の熱負荷は凍結初期が最大で、時間の経過とともに減少する。この熱負荷に対し、ここでは冷凍能力 7.1 Mcal/h 、電動機出力 75 HP の冷凍機を使用した。したがって、ブライン温度は冷凍開始後、約 13 日間を経過すれば所定温度の -25°C まで下がることとなる。上記冷凍機の内容配管その他の諸元は、図-6 に示すとおりである。なお凍結管は図-6 のように、潜函継手部の四周に上下左右の 4 系統に分けてコンクリート中に埋設し、各系統はヘアピン状につないだ往復 2 本の管より構成するようにした。

3. 施工上の問題点および予備試験

(1) 低温コンクリートの強度

凍結工法の際の低温がコンクリート強度におよぼす影響は、既存の文献からみても本質的に問題となる点はないと思われたが、施工会社において追試¹⁰⁾が行なわれた。その結果を要約すると、① 硬化完了後のコンクリート供試体では、凍結解凍を数回くり返しても強度低下はほとんどない、② 硬化期間中に冷却されたコンクリートは、たとえ早強コンクリートを使用した場合でも +5°C 以上に保温されなければ所期の強度の伸びが得られない。したがって、凍土に接して現場で打設するコンクリートは、硬化期間中は +5°C 以上の温度を保つよう保温対策を講ずる必要がある。

この対策を理論的に検討した結果では、凍土と打設コンクリートとが接する場合には、両者の間に断熱性のコンクリート型わくとして厚さ 45 mm の木板を入れるならば、打設コンクリートの硬化熱のためにコンクリート硬化期間中の温度低下が防止される。しかし本工事の場合は、一層の安全をみて断熱板の内側に 20~30°C の温水を循環できる加熱コイルを設けることとした。

(2) 凍土の強度

図-7 土層図および試料採集位置図

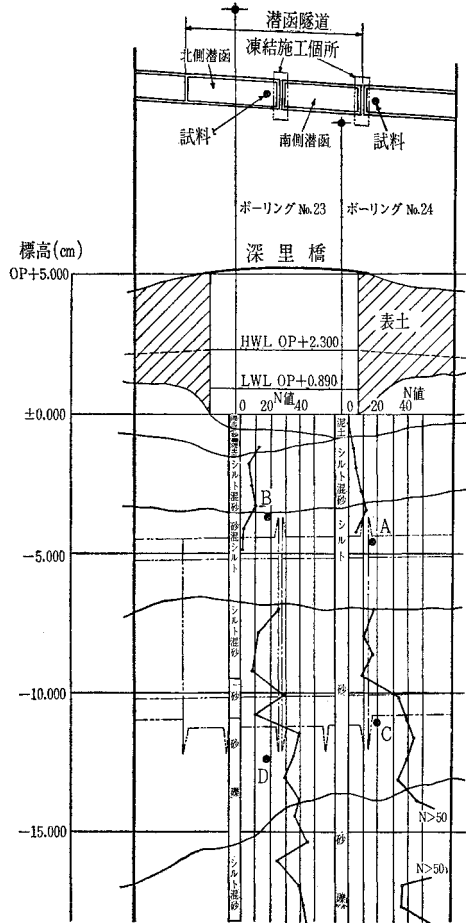
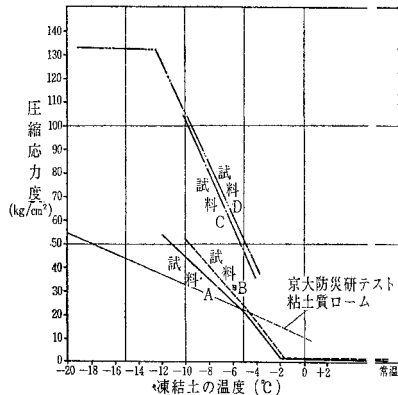


図-8 凍上の温度と圧縮強度の関係



この凍土の強度の概値を推定できる程度の資料はすでに保有していたが^{3), 4), 5)}、現場の土が凍った場合の適確な強度を知るために試験が行なわれた。

テストは図-7のA, B, C, Dの地点の土を乱さない状態で採取して型わくに入れて凍結したものの一軸圧縮強度と、試料中心部の温度をサーミスタによって測定した。結果は図-8に示すように、-5°Cにおける強度はシルト(試料A, B)では25 kg/cm²程度、砂(試料C, D)では50 kg/cm²程度であった。なお図-8からもわかるように、凍土の温度低下に対する強度の増大率はかなり大きい。このことは本工法にとって好ましいことであるが、一方凍土の温度が-2°Cで強度がほとんど出ないことを示している。これはテストを低温室内で行なわなかったため、試料の温度が不均一になったことが主要因と考えられるが、2.(2)で述べた土中の水分が全部凍結していないための影響も多少あるかもわからない。したがって、掘削は凍土壁の必要部の温度が-5°C以下になってから行なうように規制した。

(3) 間げき水の氷点

西道頓堀川は感潮河川である上に、多年の地下水の大量汲み上げのために、海水が地盤中に浸透して、地下水の氷点降下を起こす可能性が考えられた。したがって、凍結範囲にある土中間げき水を採取して、大阪市大理学部応用地質学研究室 霍巻道二博士に氷点降下度の測定を依頼した。結果は、氷点降下度は0.024°Cで、実質的には全く問題にならなかった。

(4) 地下水流

凍結工法では、地下水流があれば熱拡散が増加して、凍結不可能になる場合がある。本計画の凍結範囲内で地下水の流動が予想されるのは、図-7よりわかるように、O.P. -9m から -12m までに存在する砂層(この層

の透水係数は $10^{-1} \sim 10^{-2}$ cm/sec 程度) であるが、この動水勾配が無視しうるほど小さいことが観測されたので、凍結に支障がないものと認めた。

(5) 鉄筋よりの熱損失

コンクリート自身の温度伝播率は凍土のそれとほぼ等しいが、凍結管の周囲にある多数の構造用鉄筋を伝わって、不必要な熱の流入が考えられる。特に下部刃口付近では、直径 25 mm の鉄筋が凍結管軸に直角に 125 mm ピッチで集中している。この鉄筋群による熱取得量は、検討の結果、凍結管と鉄筋との間に設計通りの厚さのコンクリートが介在していれば、全鉄筋よりの伝熱損失は約 5000 kcal/h となり、全冷凍機出力の 7% 以内であることがわかった。したがって、それ以上の熱損失がないようにするため、鉄筋と凍結管の間にコンクリートのスペーサーを置いて、相互の離隔を完全に保持するようにした。

(6) 解凍

凍結工法の施工中に冷凍機が事故または停電のために冷却作用が停止した場合に、もし凍土がただちに解凍する恐れがあるならば、予備の冷凍機や電源を準備しておく必要がある。この点についてはさきに求めた一般的な解析¹¹⁾に基づいて、現場の土質、凍結期間に対応させて検討を行なった結果、凍結の開始後 20 日以上経過した状態では 72 時間以内の凍結停止に対しては全く安全であることがわかった。本工事現場のような大都市では、よほど大きな天災が起こらない限り 72 時間の停電はありえないし、想定しうる冷凍機の事故に対しても 72 時間は十分対処しうる時間であるので、二次電源、予備冷凍機の準備は不要とした。

(7) 凍結膨張

水は凍結すると約 9% の体積膨張をする。したがって、土の間げき比によってもかわるが、土中の間げき水が凍結することによって、土の体積は 3~4% 程度膨張し、この膨張を 3 軸方向に均等に分解すると、1 軸方向では 1~1.5% 程度の線膨張が起こることとなる。本工事の場合は、トンネル軸方向の膨張が潜函によって抑制されているので、潜函には膨張圧を与える。しかし、この圧力は最大のときでも凍土の圧縮強度以上にはならないから、この最高圧力に対して潜函の変形・強度を検討したが、十分安全であることを確かめた。なお凍土にはかなり大きいクリープ特性があるので、1 軸圧縮の場合には、膨張圧の発生とともに凍上の流動が生じ、大きな膨張圧の発生を避けることができる。本工事の場合には、凍結の進行速度がかなり緩慢であるうえ、凍結範囲

が局所的で小さく、かつ凍土を囲む土はきわめて軟弱なため、凍土の流動が期待でき、潜函にはそれほど大きな膨張圧力が与えられるには至らないと思われる。

4. 施工経過

(1) 凍結管の設置

潜函工事は 1963 年 10 月に着工され、北側潜函は翌年 4 月に製作し同年 8 月に沈設され、南側潜函は同年 12 月に製作、1965 年 2 月に沈設を完了した。凍結管は各潜函の製作時に継手部のコンクリート中に組み込まれ、継手部外周には同時に被覆鋼板も取り付けられた。なおこの被覆鋼板は、結果的にみると一部を除いてはそれほど必要でない部分もあった。

(2) 凍結経過

潜函沈設後の実測によると、継手間の最大間隔は、南側では 840 mm、中央では 560 mm であった。潜函の沈設後凍結管に配管を行ない、凍結は 1965 年 3 月 5 日より南側継手部を、3 月 9 日より中央継手部を開始した。凍結運転中には冷媒乾燥剤や油の交換、冷媒ガスの補給、停電などのため 1~2 時間の冷却停止はあったが、機械の故障による停止は 4 月 24 日の凍結終了まで一度もなかった。凍結施工中は凍結の確認、凍土の強度の判定、長期停電時の解凍の警戒などすべての凍結の管理はあらかじめ凍結区域付近にそう入しておいた温度計の示度によって行なった。温度計にはカールソン型温度計とサーミスター型防水温度計を合計約 60 本用い、凍結監視のために土中、潜函壁にそう入したもののほか打設コンクリートの測温やブライン温度の監視にも用いた。

図-9 はこれら測温結果の一部で、線-I は凍結管中を循環するブラインの温度で、3 月 18 日(凍結開始後 13 日目)には 2.(3) で推定したように、目標の -25°C に達している。線-II は、継手部外側に取付けた被覆鋼板中央の表面温度である。線-III は、南側継手部中央(正確に言えば測温点は中央より 10~15 cm 北寄りであった)の地中の温度で、冷却開始後 5 日目に 0°C に達している。

なお、これらの 3 線とも 3 月 20 日に急な温度上昇を示しているのは、掘削に先だち長期停電時の解凍の恐れをテストするため、19 日 18 時より 20 日 6 時まで 12 時間冷却を停止したためである。このテストの結果、間隔の大きい南側継手に関しては、この時点における凍結状態でも 36 時間の冷却停止に耐え得ることがわかった。

図-10 (a) は、北側継手突起部上端から鉛直に A の方向にはかった 3 時点における温度分布である。図-10

図-9 深里橋地下鉄現場測定温度表 (その1)

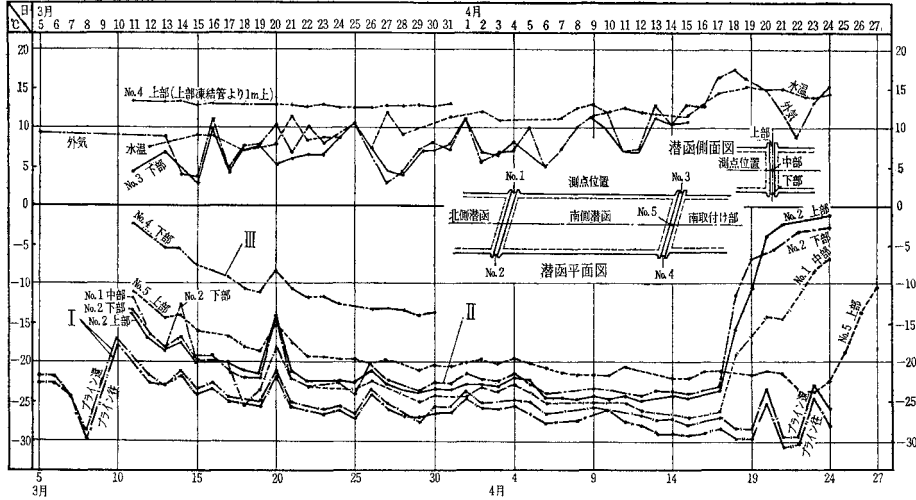
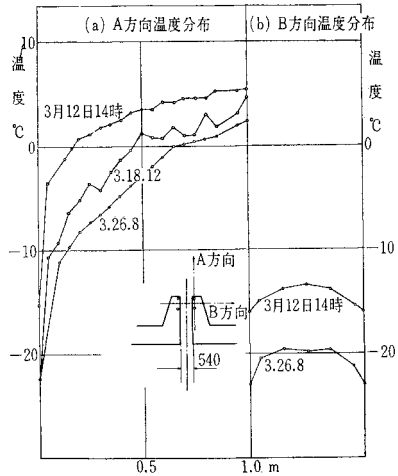


図-10 深里橋地下鉄現場測定温度表 (その2)



(a) によれば、凍結開始より17日目(3月26日)にはA方向に約65cm凍結が進行している。被覆鋼板の伝熱性を無視した単一凍結管の計算⁴⁾では55cmまで凍結することになるので、この差は、主として並列においた凍結管を鋼板で結んだ構造としたための熱の良導性によるものと思われる。図-10(b)は、4本の凍結管に囲まれた中央部のB方向の温度分布を示すもので、この部分も被覆鋼板のため非常に速やかに凍結を完了している。

なお本工事の場合、凍結開始前の地中温度は潜函上床版付近では+10°C、下床版付近では+18°Cであった。下床版付近の温度は南側潜函着床時は+25°Cぐらいで、自然状態のときよりも高かったが、潜函沈設工事に用いた圧気の使用を停止すると同時に下降しはじめ、凍結開始時には最初の+18°Cに復帰した。凍結期間中は河水の温度は11°C前後、潜函のトンネル内の温度は天井で13°C、下床で9°C、外気平均気温は11°Cであっ

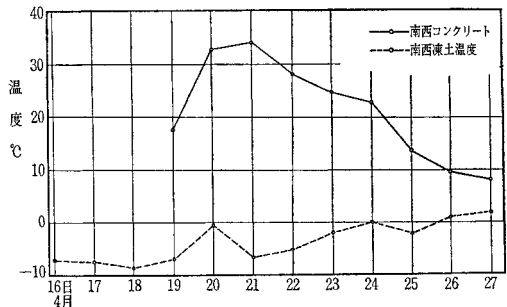
た。

(3) 継手部の掘削とコンクリートの打設

3月18日(南側継手部凍結開始後13日目、中央継手部では9日目)には、継手部中央の地中温度は-10°C以下を示し、凍土壁の強度は十分に発現し、掘削が可能になった。そこで前述のように長期停電の際の解凍に対する安全性をテストした後、3月21日からまず潜函のトンネル部端面にある仮壁をはずし、ついで坑内から継手部の土を掘削して継手部構築のための空間を作った。下床版連結部の掘削面は、凍結管からかなり離れているので、掘削は凍土におよぶことはなかったが、側壁連結部の掘削は、側方の突起の幅が短いので、凍土を掘削して凍結面を露出した。凍土は、潜函壁面と緊密に凍着して完全に水密であった。側壁部の凍土露出面には断熱のために厚さ45mmの木板をあてがい、さらに木板の内側には加熱コイルの配管を行なった。上床版連結部に対する掘削は、潜函の上部突起壁にそい上方に掘り進み、頂部凍結面が露出する程度に掘削して上床版の連結用コンクリートを下向きに打設できるよう、高さ約80cmのトンネル状の作業坑を作った。

継手部全周の土の掘削が終了すれば、配筋とコンクリ

図-11 現場打ちコンクリートの温度



ート打設を行なう。連結用コンクリートの打設は、下床版、側壁、上床版の順で行なうが、前二者は潜函内より打設し、上床版は潜函内部から上記の作業坑に出てその中で打設し、防水工事とその押えコンクリートを施工後この作業坑は砂で充てんした。

コンクリート打設完了後加熱コイルに 20~30°C の水を循環して、打設コンクリートの温度が硬化中は +5°C 以下にならないようにした。なお加熱コイルの必要性を検討する目的で、一部の加熱コイルには温水の循環を止めておき、断熱木板の凍土側とコンクリート側の温度を測定した。結果は 図一11 に示すように、早強コンクリートの硬化期間中は、予測したように加熱コイルの必要はないことが明らかになった。

最終コンクリートの打設は 4 月 20 日で完了し、冷凍機の運転はコンクリート硬化順にその部分のブライン循環を停止して、4 月 24 日に全運転を停止した。

5. 結 言

ここに述べた凍結工法は、他に前例のない適用方式のものであったが、幸い何らの支障もなく施工を完了することができた。本工法を、潜函継手の連結に用いられてきた従来の工法と比較すると、土留工が不要であること、最初にトンネル部の仮壁が撤去できるために広い作業空間が得られること、作業場所には圧気を使用しない上にゆう水が皆無であるから、安全撤実に施工や施工管理ができること、良質のコンクリートが施工できるので

従来とかく起こりがちであった継手部のろう水が全くないこと、工期を短縮できることなどの利点を実証することができた。

最後に、本工法を企画された大阪市交通局、ならびに施工、管理、試験を行なわれた鹿島建設 KK、精研冷機 KK の諸氏に深く謝意を表する次第である。

引 用 文 献

- 1) J. Riemer and J.W. Broogh : Shaft Sinking in Difficult Cases, pp. 62~91
- 2) 村山朔郎 : 地盤凍結工法の実験, 土木学会第 16 回年次学術講演会講演概要 I, 1961, pp. 61~62
- 3) 村山朔郎・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
- 4) 高志 勤・和田正八郎 : 土壌凍結工法について, 冷凍, 第 36 巻第 408 号, 1961, pp. 1~15
- 5) 高志 勤・松浦一三・谷口晴美 : 土壌凍結工法 II, 冷凍, 第 37 巻第 410 号, 1961, pp. 1~20
- 6) 高志 勤・松浦一三・谷口晴美 : 土壌凍結工法 III, 冷凍, 第 36 巻第 411 号, 1962, pp. 1~15
- 7) 村山朔郎・高志 勤 : 凍結工法について, 土木学会第 18 回年次学術講演会講演概要 III, 1963, pp. 105~106
- 8) 高志 勤・左治 : わが国に於ける最初の土壌凍結工法の実施記録, 冷凍, 第 38 巻第 426 号, 1963, pp. 1~13
- 9) N. A. Tsytovich : The Fundamentals of Frozen Ground Mechanics (New Investigations) Academy of Sciences of the U.S.S.R., Frozen Ground Research Institute, Moscow. U.S.S.R. 1958. p. 116
- 10) 鹿島建設 KK : 大阪市高速電気軌道 第 3 号線 四ツ橋~西難波間西道頓堀川河底隧道潜函接続部凍結工法 試験中間報告書
- 11) 高志 勤・山本義章 : 土壌凍結工法 IV, 冷凍, 第 39 巻第 439 号, 1964, pp. 1~12

(1966.2.24・受付)

建設／創造／技術 (写真集) 彰国社発行

定価 : 3 800 円 (〒 200 円)

内 容 : 最近 10 年間の土木技術の進展はめざましいものがある。戦後、土木工事の機械化にともない工事の進捗は早く、ここ数年の間に黒四ダム、若戸橋、東海道新幹線などの大工事が相ついで完成した。これらの工事の全ぼうを写真および解説でとらえ、立体的にとりまとめたのが本書であり、従来の写真集のイメージを打破した内容は高く評価されている。

論 文 : 日本における建設の問題点／高橋 裕・開発と新しい生活の創造／川喜田二郎・土木技術昨日と今日／久野悟郎

写 真 : ダム／発電施設／土地造成・団地／農業／災害／河川・海岸／砂防／都市計画・オリンピック施設／上下水道／国鉄・鉄道橋・トンネル／私鉄／地下鉄／特殊鉄道／道路・道路橋／港湾／空港／研究・試験・実験／基礎工・土工・建設機械／材料／測量・その他

展 望 : 産業基盤のため建設 ■ 災害に対応する建設／高橋 裕・国造りにおける産業偏重より生活創造への移行・わが国における交通関係施設の現況および課題／鈴木忠義・最近 10 年間の主要工事リスト

体 裁 : A 4 判 233 ページ 箱入上製デラックス造本