

VI-6

未固結の土砂地盤における大断面パイプルーフトンネル掘削の合理的施工法の開発

鹿島建設 札幌支店 正員 太田 一 広
札幌市交通局 建設部 青木 浩彦
鹿島建設 札幌支店 正員 平野 秀昭

1. はじめに

札幌市の地下鉄は、積雪地における重要な交通手段として、昭和54年に札幌市総合交通対策審議会において、路線総延長50kmにわたる構想（現在、周辺地域の発展状況に合わせて延長を見直し中）が提案され、そのうち既に45kmが営業されている。本工事は、平成7年2月に着工された、既設東西線の西方面への延長工事のうち、河川下横断部で計画・実施されたトンネル工事である。本工事は、非開削工法としてのパイプルーフトンネル工法が採用されたが、その掘削対象土質は未固結の土砂地盤であり、掘削断面は130㎡と大きい。また、横断部河川はいわゆる暴れ川であり、雪解け時、大雨時には一気にH・W・Lまでの増水の危険をはらんでいるため、流量が少量で安定している冬期間渇水期のごく短期間での施工を強いられるものであった。

そこで、本工事では、従来の同種工事を見直し、大断面掘削に対応した、より速く、しかも安全な施工を可能とした新たな施工法を開発し、実施した。

本稿では、この施工法において、新規開発された技術が、それぞれの効果を十分発揮したことが実証されたため、それらの概要について報告するものである。

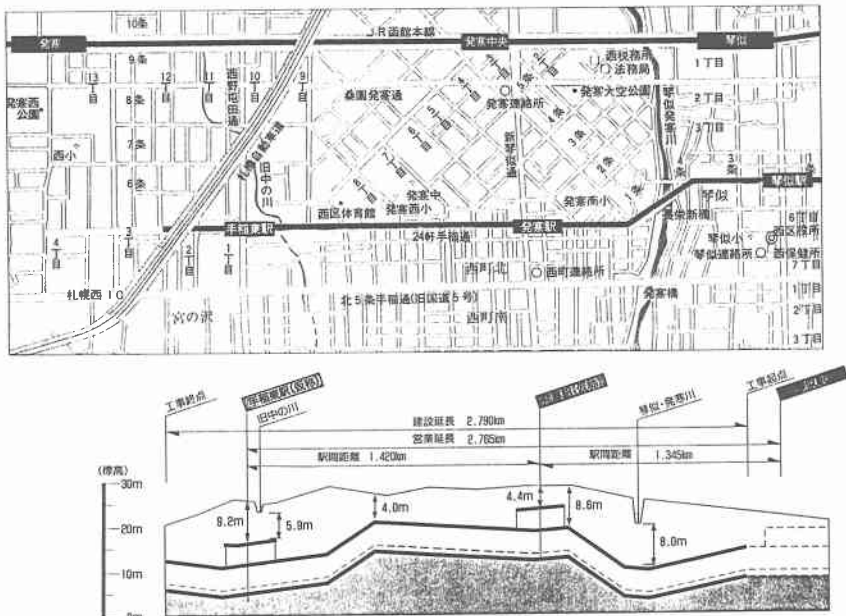


図-1 地下鉄東西線（琴似～手稲東間）建設計画概要図

The development of the rationalistic method of digging the Pipe-Roof Tunnel with large cross section through soil and sand

by Kazuhiro OHTA, Hirohiko AOKI and Hideaki HIRANO

2. 全体工事概要

当工事区は、琴似発寒川を横断する延長 170 m の区間に複線式箱型ずい道を築造するものであり、一般部 83 m と河川横断部 87 m とからなる。地質は砂礫層（N 値≒40）主体で、途中、砂質シルト層（N 値≒15）の介在が認められる。砂礫層は 5～100 mm の礫が中心であるが、その最大礫径は 800 mm にもおよぶ。また、地下水位は GL-6.0 m で最大掘削深さは 23.2 m である。



図－2 高速電車発寒川横断一般部構築工事概要図

工事緒元を以下に示す。

〔一般部〕

工 法 ; 全面覆工式開削工法
土留形式 ; 親杭横矢板＋切梁方式

〔主要工事数量〕

掘 削 土 量 ; $V=46,000 \text{ m}^3$
コンクリート量 ; $V=4,900 \text{ m}^3$
パイプルーフ ; $\phi 812.8 \text{ mm}$, $t=12 \text{ mm}$
 $L=47.0 \text{ m}$
水平部 17 本
鉛直部 20 本
(10 本×2 列)

〔河川横断部〕

- ①発進・到達立坑 工 法 ; 全面覆工式開削工法
土留形式 ; SMW・親杭横矢板
＋グラウンドアンカー工法
②河川下トンネル 工 法 ; パイプルーフトンネル掘削工法

3. 河川横断部の施工

3.1 施工方針決定の経緯

本工事における施工法は、河川管理者（北海道）との協議を踏まえ、非開削工法のパイプルーフトンネル工法による上下半断面分割掘削方式が採用された。しかし、本工事は、その工程を冬期間の渇水期に合わせたことから、工程上のクリティカルパスとなり、当該工区のみならず、全工区工事工程にも影響を及ぼしかねない状況下にあった。従って、施工途上におけるトラブル発生による工程遅延を回避する上でも、更にはまた、施工上の安全確保の上からも 1～3 月の渇水期に確実に掘削を完了させる必要があった。

以上の理由から、トンネル掘削は、工程の短縮を織り込み、安全の確保が可能な施工法の検討が最も重要な課題と考え、種々検討の結果、従来のパイプルーフトンネル工法における施工手順を見直し、単純化することで、工程の短縮、施工上の安全確保にもつながる全断面一括掘削方式に着目し、更に詳細な検討を加えた。全断面一括掘削方式の基本的な考え方は、パイプルーフの本体である鋼管自体の強度と、それを支持する地盤の強度を最大限に利用し、長いスパンの荷重を支える構造であることから、以下の問題が抽出された。

- ①切羽地山の評価とその崩壊防止対策
- ②支保工脚部の支持力
- ③支保工・パイプルーフの応力変化に伴うフェールセーフ
- ④地下水位の低下
- ⑤掘削・支保工の作業方法

3. 2 対応策の検討

前項での問題点に対し、主たるものについての対応策を以下に述べる。また、併せて、その中で今回新技術として採用した工法、内容について述べる。

3. 2. 1 切羽地山の評価とその崩壊防止対策

(1) 切羽地山の評価

図-3に示す通り、当工法の基本は地山の支持力を最大限に利用することであるから、支持荷重による法面のすべり崩壊の検討が重要である。従って、土質状態から判断して切羽勾配を 60° とし、地下水位を完全に低下させるという条件のもとで、すべり安全率を求めたところ

$$F_s = \frac{Mr}{Md} < 1.2 \text{ となり}$$

Mr ; 土塊の抵抗モーメント

Md ; 土塊のすべりモーメント

すべりが発生する危険が予測された。

(2) 地山崩壊防止対策

切羽の安定を図るための工法として、従来採用されていた薬液注入工法、部分フェースボルト工法等に換えて、長尺フェースボルト工法を採用した。

フェースボルトの設計は、打設密度、引張材の本数、削孔径、長さを決定することである。計算方法は数種の事例があるが、今回は円弧すべりによる方法で行った。この方法による補強後のすべり安全率は、次式により求める。

$$F_s = \frac{Mr + \Delta Mr}{Md}$$

ΔMr ; フェースボルトによる抵抗モーメント

$$\Delta Mr = R \cdot \sum \{ T_m \cdot \cos \beta_m + (T_m \cdot \sin \beta_m) \cdot \tan \phi \}$$

T_m ; m 列目のフェースボルトの設計引張力 (地山と充填材の付着強度と引張材の強度の小さい方)

β_m ; フェースボルトとすべり面のなす角度

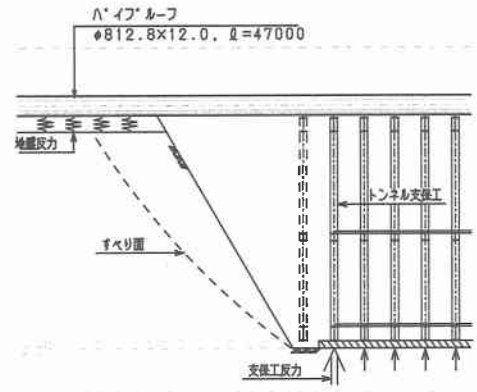


図-3 全断面一括掘削方式概念図

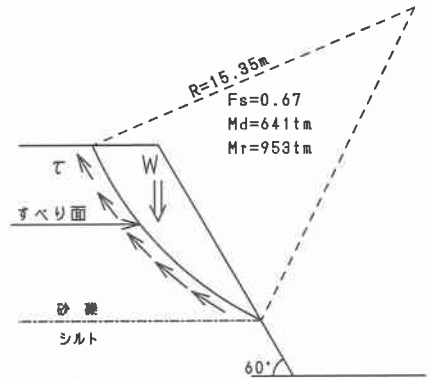


図-4 円弧すべり計算結果

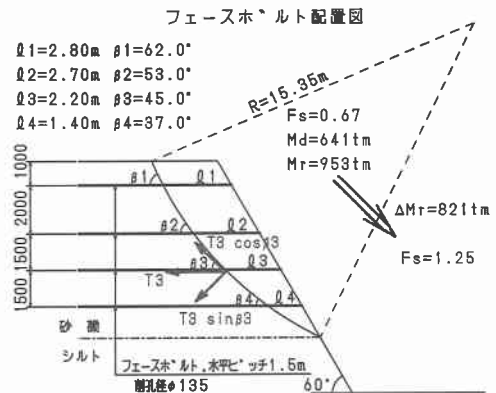


図-5 補強後のすべり計算結果

(3) 新技術としての長尺フェースボルト工法の特長

①トンネル全長に亘る長尺フェースボルトの施工

トンネル掘削の進行に合わせて、常に法面に有効に働く機能を確認するとともに、掘削工程途上におけるフェースボルト工程を省き、施工サイクルの短縮を図った。

②汎用性のあるロータリーパーカッションドリルによる削孔

従来のグラウンドアンカー工事で使用されているロータリーパーカッションドリルを使用することとした。これにより削孔速度の向上を図るとともに、削孔機械の手配を容易なものとした。

③切削性のある引張材の使用

フェースボルトの引張材として、切削性の良いFRPケーブルボルト（ガラス繊維）を使用し、トンネル掘削時の撤去作業を、バックホウのみで容易に行えるものとし、施工サイクルの短縮を図った。

3.2.2 支保工・パイプルーフの応力変化に伴うフェールセーフ

(1) 着工前における予測検討の問題点

事前解析方法として、地盤を弾性床、支保工を弾性支承とした梁理論を用いて、施工段階を踏んだ逐次掘削解析を行った。しかし、この段階で、支保工バネ、地盤バネ、上載荷重を適確に評価するのは難しく、また、その設定により計算結果は大きく変わることが判明した。

(2) 施工途上における情報化施工

前項問題点を解決すべき手法として、パイプルーフ及び支保工の変位・応力を計測し、設計との照査を行い、安全を確認しながら施工を進める、いわゆる、情報化施工の採用を図った。すなわち、計測で得られたデータから前述のパラメーターを再度評価し直すことにより、将来の掘削段階のパイプルーフ及び支保工の挙動を定量的に予測し、施工へフィードバックさせることにした。

(3) 新技術としての事前予測システムの特長

①本システムは、従来の山留工で使用されている

『次段階掘削予測解析』プログラムをベースとして、鉛直方向の掘削を水平方向の掘削に置き換えることで応用したものである。

②可能な限り、先段階での予測精度を向上させるため、重要パラメータである“地盤バネの評価”に着目し、下記の影響を考慮したFEM解析を組み入れた。

(イ) 切羽勾配 60° の影響

(ロ) パイプルーフ支持地盤がシルト層と砂礫層の複合地盤となる影響

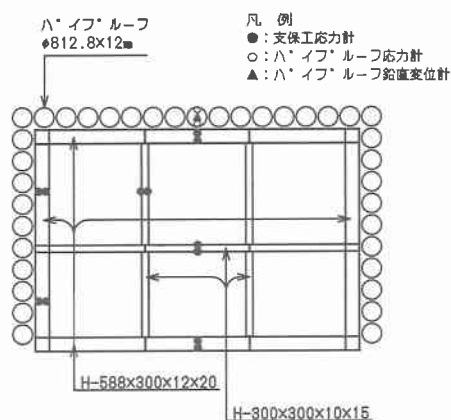


図-6 計測器配置断面図

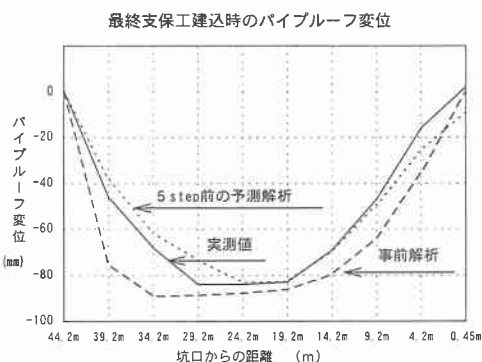


図-7 パイプルーフ変位の実測値と解析値の比較

3.2.3 掘削・支保工の作業方法

(1) 全断面一括掘削方式による作業上の問題点

掘削及び支保工建込みの作業には、以下の様な作業上の問題点が考えられた。

- ①切羽の高さに対する視的感覚による作業効率の低下
- ②切羽の浮石落下の危険性
- ③狭隘な場所での錯綜作業による危険性
- ④高所作業となる支保工組立の危険性

(2) 作業方法の決定

上記の問題点は、支保工の中段に作業床を設置し、実質的な施工高さを半分にするるとともに、中段作業床を落石防護床として兼用させることにより、対応することとした。

以下に選定された主な作業機械を示す。

- [掘削] 上段；スライドアームバックホウ
(0.25 m³級、スライドストローク2.0m)
下段；タイヤショベル (0.7 m³級)
[支保工組立] 上段；マイクロクレーン (2.9t 吊)
鋼材ハンドリングマシン
(ハンドリング荷重 1.9t)

(3) 新技術としての中段作業床の特長

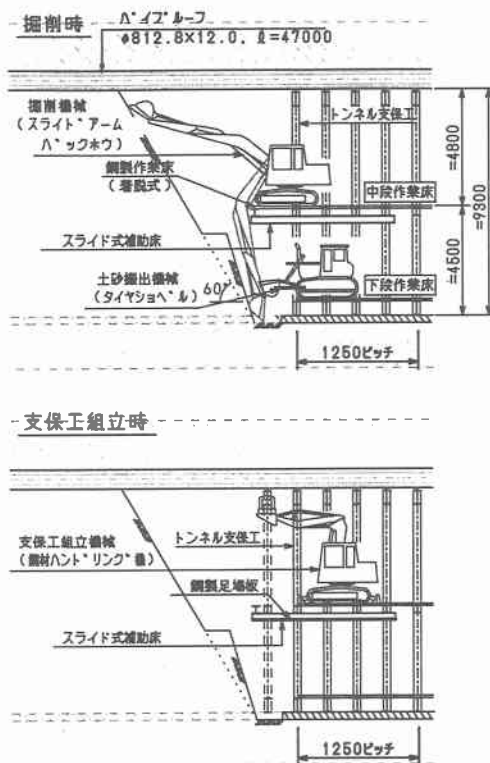
- ①すべての作業にかかわる“高さ”を半分とすることが可能となった。
- ②作業床最先端に設置したスライド式補助床により
 - (i) 細部にわたる機械掘削の施工性向上を図った。
 - (ii) 落石防護床を兼用させることにより下段作業の安全性を確保した。
- ③上下同時作業を可能とし、作業効率を向上させ、施工サイクルの短縮を図った。

3.3 トンネル掘削施工法の概要

以上、種々検討の結果、最終決定された施工法及び施工手順を以下に示す。

(1) 全断面一括掘削施工法の決定

- ・切羽の勾配；平均勾配 60° (1.0 mのミベン設置)
- ・切羽の補強；長尺フェースボルト
- ・支保工ピッチ；切羽 1.25 m, 後方 2.50 m
- ・支保工部材；H-588×300×12×20, H-300×300×10×15
- ・根固めコンクリート；超早強セメントミルク (鉄筋入り)



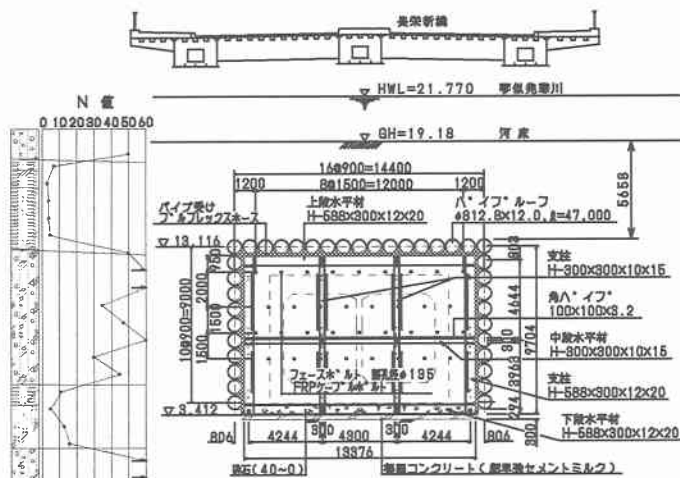
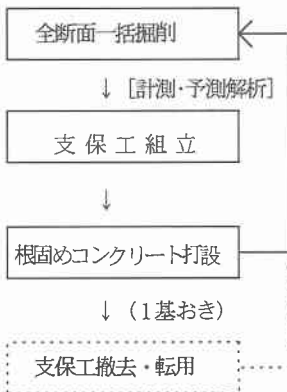
図－8 作業床概念図



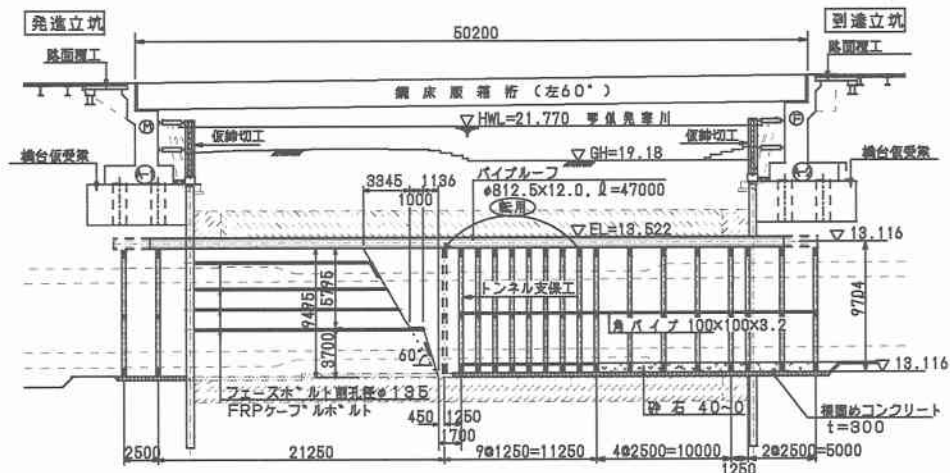
写真－1 支保工兼用による中段作業床

(2) 施工手順

施工手順を以下に示す。



図－9 河川下トンネル掘削工横断面図



図－10 河川下トンネル掘削工縦断面図

4. おわりに

今回の工事は、所期の目的である“工程の短縮”と“安全の確保”について予想以上の効果を挙げることができた。とりわけ、工程については昼・夜施工で行ったが、支保工建込み1基当たり（1サイクル）1.5日という極めて短期間での施工を可能とし、全体工程に大きなゆとりをもたせることができたことは、本工事に携わった者として大きな喜びとするところである。全断面一括掘削方式を採用した最初のきっかけは、法面高さの恐怖を感じさせない中段支保工上の作業床のアイデアであった。このアイデアが生まれなければ、いくら計算上の安全が補償されても、多分今回の工法は採用されなかったように思われる。この他にも、本工事には数々の新技術を採用した。紙面の都合で、それらの紹介ができなかったのは残念である。また、特筆すべきこととして、施工上の“安全”を確保する上で、25回にも及ぶ勉強会を行ったことがあげられる。この勉強会の効果として、様々のアイデアが生まれ、所期の目的達成の大きな原動力となったと確信している。

最後に、今後 本工事と同種の工事がますます増えていくものと思われるが、その際の参考となれば幸甚である。