

大型硬岩 TBM の機種選定と基本施工計画 (香港電力第二ケーブルトンネルの設計とその急速施工)

Selection of a Large Diameter Hard Rock Tunnel Boring Machine and Associated Rapid Construction Method of the Tunnel (Design and Construction of Second Cable Tunnel of Hongkong Electric Co., Ltd)

市川 寛*
Hiroshi Ichikawa

桑原 資孝**
Yoshitaka Kuwabara

要 約

香港における主要電力会社である香港電力株式会社の高圧送電線配線トンネル工事の入札にあたり、在来工法による企業先の原設計に対して大型硬岩 TBM によるトンネルの代案設計とその急速施工を計画した。

西松建設単独では初めての長距離(約5,500m)の全断面掘削型の大型 TBM (直径4.80 m) の採用にあたっての最新型 TBM 機種の選定・一軸圧縮強度で140MPa~300MPa にわたる強固な花崗岩における掘進速度の想定および基本施工計画等について述べる。

目 次

- §1. はじめに
- §2. プロジェクトの概要
- §3. 原設計と代案設計の比較
- §4. 代案設計によるトンネル施工法の内容
- §5. TBM 掘進速度の検討と使用する TBM の選定
- §6. 計画工程
- §7. おわりに

§1. はじめに

今回香港支店で受注した香港電力株式会社の二番目の送電線設置用トンネルは同じく我が社の設計施工による同社初の送電ケーブル設置用トンネルに引き続く、ラマ島火力発電所からの電力配線用のものである。

この工事は企業先である香港電力(株)の在来工法に

よるトンネル計画に対して香港支店がトンネルボーリングマシン (TBM) による設計施工代案を入札に際して提出していたものが受け入れられたものである。

人口の密集が著しい香港では、日本と同様にインフラストラクチャーの建設工事と言えど工事に伴う騒音・振動等の環境問題を如何に克服して行くかが官民を問わず企業者と施工者にとっての問題となっている。

今回の送電線は香港島南西部一帯の配電能力を大幅に改善する為のものであるが、トンネル坑口近辺はひとつが住宅・人口の密集地帯、他が学校・住宅等のある地帯で、路線も一部は振動等が問題になる地域を通過する。

企業先である香港電力(株)は我が社の TBM による計画によりこういった環境問題を最小限に抑えることができる点と工期短縮のメリットといった観点から TBM の採用に踏み切ったもので、これは香港における初の大型硬岩トンネルボーリングマシン

*香港(支)技術開発部長

**機材部機械課長

の導入であり、また我が社にとっても単独で施工する初めての大型・長距離のTBMによるトンネル工事といえる。

以下は入札に当たり平成元年12月中旬に作成した基本施工計画書から主要点を抜粋したもので、現在この基本施工計画に従って現場での作業が開始されている。また本工事に使用されるTBMはアメリカ・シアトル市にあるロビンス社本社工場で平成二年十月末に完成、香港へ向け出港の予定である。

§2. プロジェクトの概要

2-1 工事概要

企業先 : 香港電力株式会社

コンサルタント : 香港電力株式会社
プロジェクト部

プロジェクト名称 : 香港島ナムフン変電所～パーカー配電所間275kV配線トンネルその他工事

工期 : 1990年4月～1993年3月

工事概要 :

香港ラマ島火力発電所で発電された電力を香港島南西部のナムフン変電所から香港島北東部のパーカー配電所へ送電するための電力配線用トンネル全延長約5.5kmと上記変電所、配電所他諸設備の建設である。

変電所・配電所は企業先の設計、トンネルは我が社のランプサムによる設計施工である。

(1)トンネル :

- a. 外径4.80mの硬岩用トンネルボーリングマシン(TBM)による円型トンネル約5,300m。覆工は基本的には総て吹付けコンクリートを永久構造物とする構造である。
- b. 掘削断面約45m²の配線結線用の拡大馬蹄型トンネル部(ジョイント・ベイ)5ヶ所、計約300mでTBMによる掘削の後拡大される。
- c. 掘削断面約29m²のTBM発進および到達用馬蹄型トンネルの計約200mで、在来工法で施工される。
- d. トンネル内高圧送電線配線トレンチ他一式。

(2)その他敷地造成および変電所等の建築工事一式。

2-2 トンネル路線概要

当トンネルは香港島南西部のナムフン変電所建設予定地に設けられるナムフン坑口から香港島北東部

のパーカー配電所建設予定地に設けられるパーカー坑口を結ぶトンネルである。平面線形はナムフン坑口近辺およびトンネル中間付近で半径400mの曲線部をもつ以外は直線であり、縦断線形はナムフン坑口から約400m地点までパーカー坑口へ向かっての0.90%の上がり勾配、そこから0.60%の下り勾配となっている。

この平面線形と縦断線形は、基本的にはTBMによるトンネル掘削を理想的に行う事を主眼とし、かつ高圧送電線の配線上の便宜を考慮にいて、代案設計の中でその利点の詳細な説明とともに企業先に提出し合意されたもので、企業先の原設計によるトンネル線形とは少し異なっている。

山の被りは最高で約290m、坑口付近を除いた谷部で約60mであり、一部の谷部近くでは既存の水道トンネルおよび貯水池の近くを通過する(Fig.1)。

2-3 地質と岩質の概要

今回のトンネルはそのほとんどが今から約一億四千万年前のジュラ紀末期から白亜紀初期にかけて生成された新鮮で比較的均質な香港花崗岩の中を通過する。その地山の概要は日本道路公団の地山分類におけるAc、また旧国鉄の岩盤強度分類におけるA岩種のVn等級に相当する。全般的な岩の物性、性質および状態は以下のとおりである。

弾性波速度 4～5 km/sec

一軸圧縮強度 140～300MPa (N/mm²)

引張強度 12～15MPa (N/mm²)

石英含有率 約40%前後(体積%)

なお、地質・岩質については後述する。

§3. 原設計と代案設計の比較

3-1 トンネル標準断面

Fig.2は原設計におけるトンネル標準断面、Fig.3は我が社の代案設計による標準断面である。代案によるこのトンネル標準断面の設定にあたっては、このプロジェクトが競争入札であるということを考慮にいたうえて、以下の諸条件を満たすものでなければならなかった。

- a. 当該トンネル建設の目的である将来用を含めた高圧送電線設置用トレンチおよびその管理保守に必要な諸設備を完備し得る地下空間を確保する。
- b. 永久構造物として使用される当該トンネルの使用に際しての換気機構・機能が、原設計において

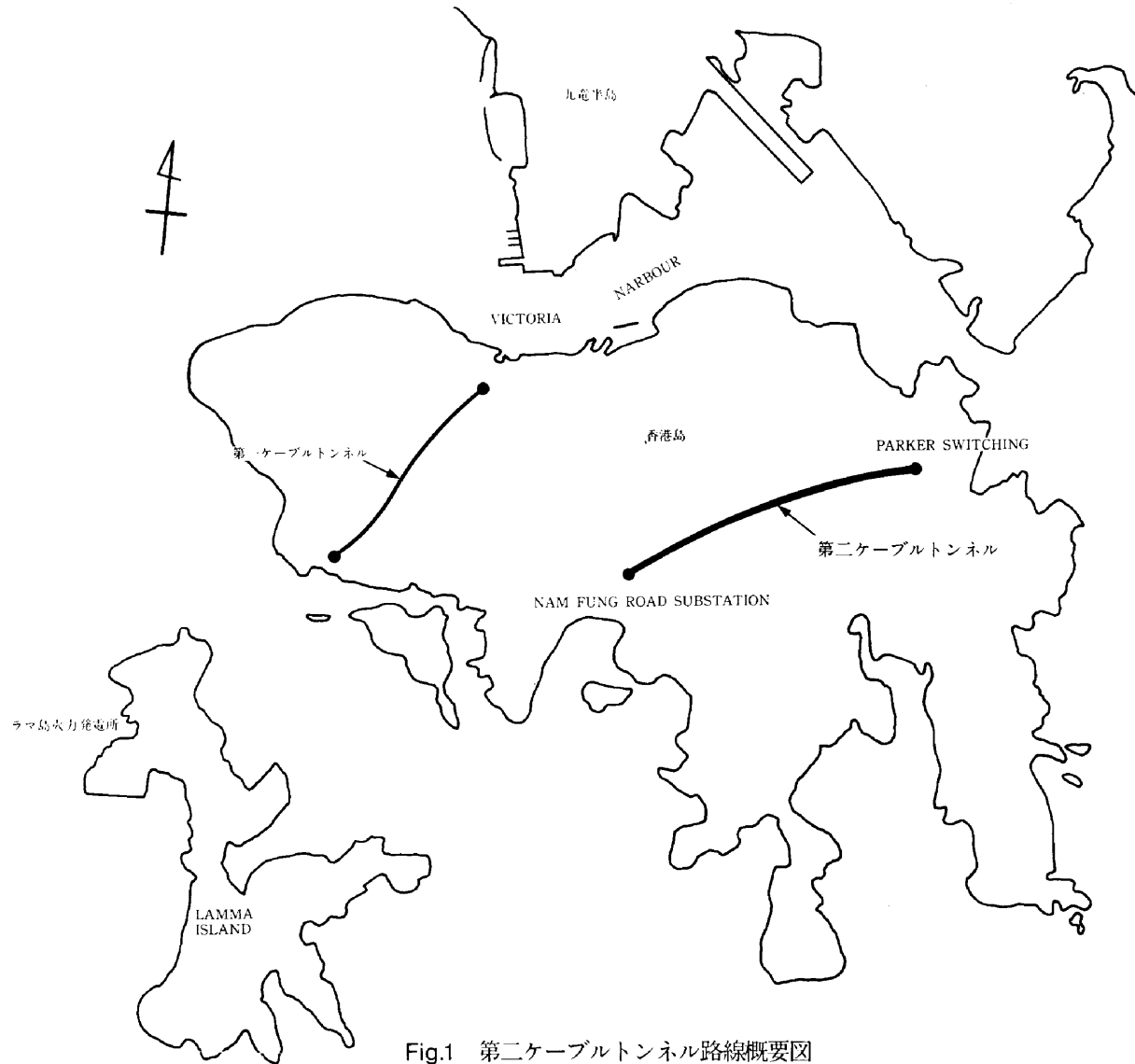


Fig.1 第二ケーブルトンネル路線概要図

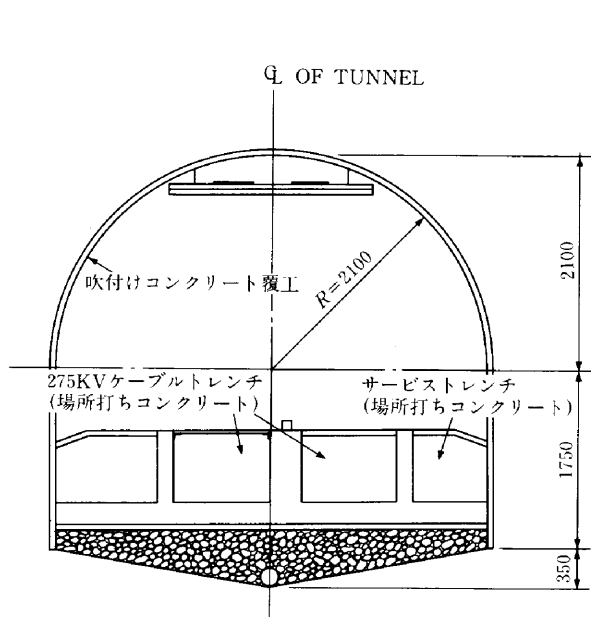


Fig.2 企業先による第二ケーブルトンネルの標準断面

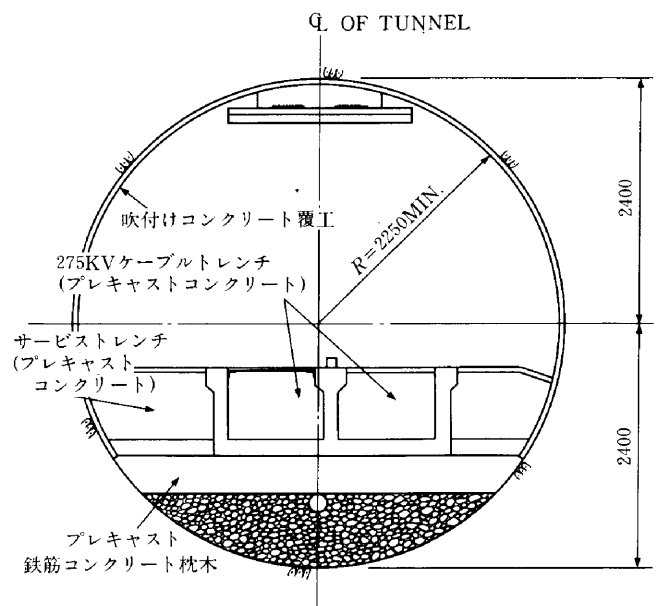


Fig.3 TBMによる我が社の代案トンネル標準断面

考慮されているものに対して設備費および長期のランニングコストを増加させることなく成立し得るものでなければならないこと。

- c. トンネルとしての構造的要求を満たし、かつ設計し、施工する我が社にとってトンネル施工に伴う経済性・効率性を理想的に充足できること。
- これらの諸条件を勘案のうえ、Fig. 3 に示すトンネル標準断面を設定し、企業先の合意を得た。

3-2 トンネルの線形

企業先によるトンネルの線形は当然にTBMによる施工を考慮にいて設定されたものではない。

したがって、その線形は平面的には大型TBMにはちょっときつい曲線半径をもっており、かつTBMの発進基地として適当とおもわれるパーカー坑口から途中までは上り勾配、途中から突っ込みになる下り勾配であった。

種々の曲折があったが、結果的にはTBMによる急速施工を理想的に行うことができるとおもわれるFig. 4のような縦断勾配および平面線形によるトンネルを合意して貰うことができた。

§ 4. 代案設計によるトンネル施工法の内容

4-1 施工法の内容

今回TBMを採用するに当たっての最大の問題点は発注者の正式注文を受けてからでないと生産にかかれぬ機械であるTBMをいかに工程に間に合うように入手するかということであった。

通常の場合、大～中口径のTBMの発注から現場着までの所要期間は新品の場合で9～10ヶ月かかり、中古の場合でも7～9ヶ月位が必要であるといわれている。今回のプロジェクトのような公開競争入札で、かつ工程的に非常に厳しい場合には、TBMの発注時期の設定は当然ある種のリスクを伴わざるを得ないともいえる。

そのリスクを最小限に抑え、かつ厳しい工程上の要求を満足するためには、TBM入手に伴う必然的準備期間である9～10ヶ月をあらかじめ加味したうえで、工事入手後の施工の総てをいかに効率的に、急速に実施していくかがキー・ポイントになってくる。

このため、今回の施工計画の策定にあたっては、トンネル内部構造が基本的には同じである過去のケーブル・トンネルの施工経験を通してクリティカル・アクティビティであった幾つかの工種について、その施工を最大限の急速施工法で対応し得る方法をまず確立させ、その工程の短縮によって上述のよう

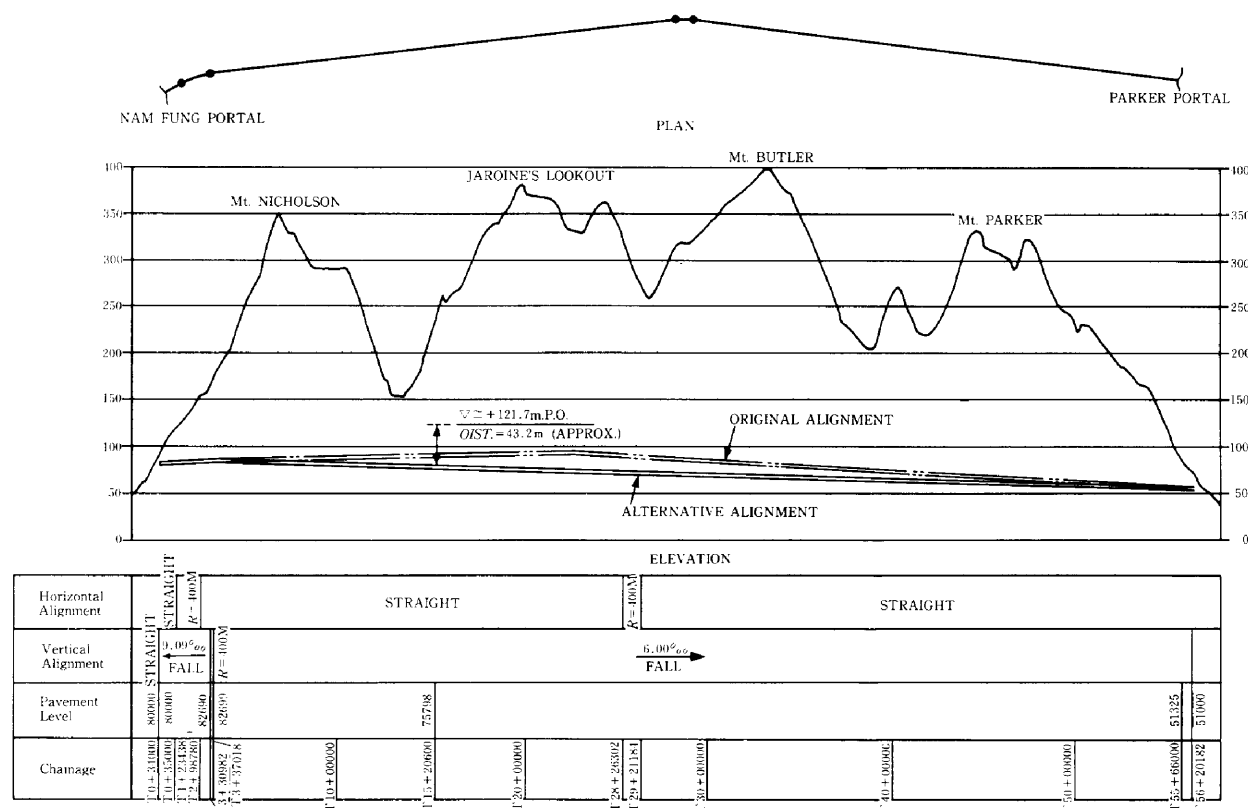


Fig. 4 第二ケーブルトンネルー平面・縦断線形

なTBM発注からTBMの発進までの時間的要素を組み入れることを可能にし、かつそれに伴うリスクを最小限に、できればゼロにし得るかということが眼目となる。

また、このトンネル工事の特徴のひとつは、多少微妙な表現となるが、トンネルを掘るということはプロジェクト完遂の手段であって、目的ではないということである。

すなわち、企業先である電力会社としての建設目的である高圧送電線を設置するための配線トレンチやその他の諸設備を約定工期内に一切を完備させ、初めて完工になるということである。

このため、次のような対応を原則として採用した。

(1) 吹付けコンクリートによる永久覆工の採用

今回の地山の条件からみて、基本的にはコンクリート覆工を必要としない区間がかなりの部分を占めるものと考えているが、トンネル全長の内、約10%から30%位は全面的あるいは部分的に覆工が必要になると予測している。

このため、これらの覆工が吹付けコンクリートによって十分に成立することを確認するとともに、これをTBMによって比較的なめらかに掘削できる掘削面に対していかに効率的に施工し得るかということがひとつのポイントになってくる。

永久覆工としての吹付けコンクリートは特に狭隘なトンネルの場合、狭隘空間での作業性の悪さ、跳ね返りによる実質数量の増加、その結果による残存コンクリートの除去作業等の施工上の難点があり、型枠を使用してのコンクリート覆工に比較してコスト面ではかならずしも有利といえない点もある。

今回、TBMによる掘削に対してコンクリート覆工を計画するとした場合には、覆工はプレキャスト・セグメントを使用しない限り、覆工という工種を掘削と並行して行うのは困難であり、コスト的にも不利となる。

以上のような考察の結果、TBMによる掘削に並行して施工する形での吹付コンクリートによる永久覆工を基本とすることにした。

(2) 送電線配線トレンチの急速施工

トンネル内の送電線配線トレンチを主とするコンクリート諸構造物は、基本的に総てプレキャスト部材とし、クリティカル・アクティビティであることを無くす計画を策定することにした。

これらのトンネル内コンクリート諸構造物の内の最大クリティカル・アクティビティであり、工程上

は最後の工種である送電線配線トレンチの施工速度を飛躍的に高める工夫を行い、その超急速施工速度を基準として総ての工程を策定し、最小リスクとなるTBMの発注時期を決定する。

以上のようなコンセプトに基づきFig.3に示すようなTBMによるトンネル断面を設定し、それに対して以下のように各種コンクリート構造物の機能を設定したうえでトンネル工事全体の基本施工手順を策定した。

4-2 トンネル内部の各種構造物の機能

(1) 枕木

TBM後続台車、ズリトロ台車、ベルトコンベヤ台車、各種プレキャスト部材運搬台車、コンクリートポンプ等台車、一部に使用されるセントルの移動、送電線配線トレンチ設置用ガントリークレーン等を使用するレール（4線）を枕木上に設置し、最終的には送電線配線トレンチの永久支承とする。

枕木はトンネル掘削面によって支持される単純梁のプレキャスト鉄筋コンクリート製とし、枕木とトンネル掘削面等との不整合性は必要によりノンジュリンク・モルタル等で充填する。

(2) 送電線配線トレンチ

今回のプロジェクトの最終目的構造物であり、275kVの送電線が設置される。すべてプレキャストコンクリートで、1ユニットは5.0mないし7.5mとして設定し、枕木上にガントリークレーンによって設置される。

その施工速度は、TBMによる当該トンネル成功の鍵を握っているといえる。

(3) コーナー床スラブ

トンネル掘削面と送電線配線トレンチ間の空間を埋める床スラブで、送電線配線トレンチの一部およびサービストレンチを形成する。同様にすべてプレキャスト化する。

4-3 基本施工手順その1…TBMの発進と到達

今回のトンネルの坑口は、前述のようにパーカー坑口、ナムフン坑口であるが、ナムフン坑口は崩壊土堆積地帯であり、坑口から約100~200mは転石混りの悪い地山で、出水も予測され、かつ下り勾配であることからTBMの発進には不適であるといえる。

一方、パーカー坑口はごく僅かの表土を除けば直ちに堅固な花崗岩帯になり、勾配も0.60%の上りとすることができる。トンネル発進基地としての面積、使用時期の問題等はあるがTBMの発進はここを

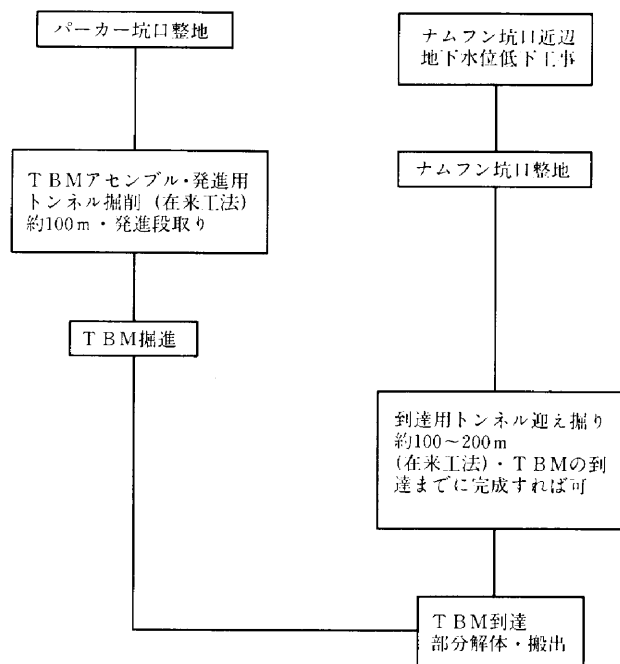


Fig.5 TBM発進と到達

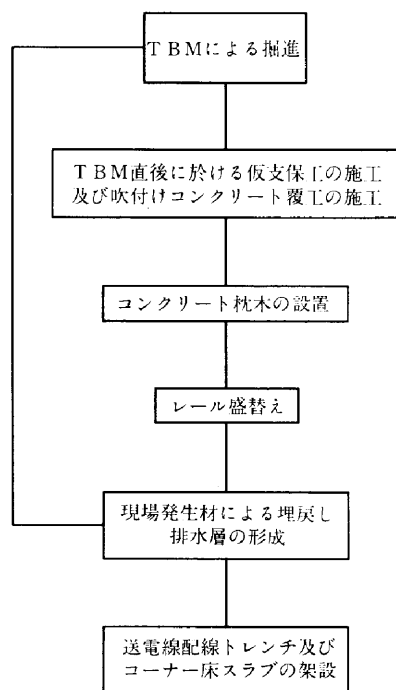


Fig.6 トンネルの基本施工手順

選定の方がベター、あるいはそれしか無いといえた。

以上のような考察に従ったTBMの発進と到達の手順はFig.5の通りである。

4-4 基本施工手順その2…トンネルの施工

トンネル自体の基本施工手順はFig.6に示す手順にて行う。

§5. TBM掘進速度の検討とTBMの選定

5-1 今回のトンネルに対する地山分類

今回の入札にあたり企業先によって用意された入札資料の中における地山、岩に関する資料は以下の通りであるが、海外工事においてはよほど特別の場合を除いて、入札業者はその数多いデータに対して土質工学的・地質学的判断を自ら下し、自己の責任において工法・機械・工程等を決定する。

- 地質調査結果の一式および代表的ボーリングの図面。
- 特記仕様書の中における岩と地山に対する全般的評価。
- 企業先がTBMの専門メーカーに委託して行ったTBMに関するマシンナビリティーテストの結果一覧表。

これらの資料や生データを検討の結果、Table 1のように地山の等級を分類し、特記仕様書に明記されている以外の岩の各定数等を設定した。

5-2 地山等級分類、それぞれの施工延長およびTBMの稼働率

硬岩TBMによるトンネル月進速度を推定するにあたって、前記の地質・岩質によるデータ、その結果であるTable 1をベースとして、更には香港における幾多の過去のトンネル工事の実績等を参考にして、Table 2のようにその地山等級ごとの予測施工延長を算定し、Table 3に示すようにトンネル全長に対する加重平均稼働率を決定した。

なお、この稼働率は我が社の支保工の基本設計に基づき、地質およびトンネルの設計を専門とするイギリスのコンサルタントに設定させたもので、世界各地の類似TBMの施工実績から統計的に割り出したものである。

5-3 シフト、稼働時間、稼働日数

シフト数 : 2シフト/日

1シフト当たりの稼働時間 : 10hr/日（メンテナンスを除く）

月当たり稼働日数 : 25日/月

5-4 月進速度の検討とTBMの選定

硬岩TBMによるトンネル月進速度の算定方法には色々の考え方があがあるが、基本的な算定要素は次のような点である。

Table 1 地山等級の評価とトンネルの設計に使用する諸定数

地山等級	1	2	3	3A	4	5	5A
定数							
α	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	
R, Q, D (%)	90.0	75.0	50.0	40.0	20.0	10.0	
γ (kN/m ³)	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	20.0
E (GN/m ²)	70	64	53	37	5	2	1.88×10^{-2}
T_u (N/mm ²)	8.2	7.0	5.6	5.4	4.9	1.2	
q_u (N/mm ²)	115.1	98.4	78.6	75.4	68.9	16.8	
C (N/mm ²)	15.4	13.1	10.5	10.1	9.2	2.2	
K	0.663	0.381	0.190	0.165	0.048	0.028	
C (N/mm ²)	10.2	5.0	2.0	1.7	0.44	0.06	0.005
ϕ_u (Deg.)	60.1	60.1	60.1	60.1	60.1	60.1	
$K\phi$	0.709	0.678	0.625	0.604	0.577	0.577	
ϕ (Deg.)	42	40	37	36	34	33	30

α : ボアソン比
 γ : 単位体積重量
 E : ヤング係数
 T_u : 引張り強度
 q_u : 一軸圧縮強度
 C, ϕ : 一軸圧縮強度 q_u 及び引張り強度 T_u より推定されたせん断定数
 $K, K\phi$: 亀裂係数によるせん断定数の低減係数
 C, ϕ : せん断定数 (設計値)
 $C = K \cdot C_u$ $\phi = K\phi \cdot \phi_u$

Table 2 地山等級の分類

地山等級	予測延長 (m)	比率 (%)	支保工タイプ	説明
1	820	14.8	岩塊崩落防止・剝離防止用のランダムボルト	新鮮な～僅かに風化した花崗岩を主体とする地山
2	2,230	40.3		
3	1,805	32.6	必要により適宜打設・施工する吹付けコンクリート及びロックボルト	僅かに風化した花崗岩を主体とする地山
3A	330	6.0	吹付けコンクリート 50mm 施工し、必要によりランダムボルト打設	中位の風化した花崗岩を主体とする地山
4	210	3.8	吹付けコンクリート 100mm 施工し、必要によりランダムボルト打設	中位～完全に風化した花崗岩を主体とする地山
5	60	1.1	鋼製支保工+吹付け	完全に風化した花崗岩を主体とする地山
5A	80	1.4	鋼製支保工+吹付け	土 (日本のマサ土に近い)
Total	5,535	100		

(注) 1. トンネルの全長はその後の線形の修正等により、現在施工中のものと多少違っている。

2. 「説明」は各地山等級の性格を理解するための目安であり、香港での一般的な岩及び地山の概念を当て嵌めたものでありこの場合地質工学的意味は特にはない。

Table 3 地山等級とTBMの予測実稼働率

地山等級	施工延長 (m)	比率 (%)	稼働率 (%)	加重平均稼働率 (%)
1	820	14.8	50.0	$14.8 \times 0.50 = 7.4$
2	2,230	40.3	45.0	$40.3 \times 0.45 = 18.1$
3, 3A	2,135	38.6	35.0	$38.6 \times 0.35 = 13.5$
4, 5, 5A	350	6.3	20.0	$6.3 \times 0.20 = 1.3$
合計	5,535	100	--	総平均 40.3

地山の条件、すなわち岩が強固なものか、健全なものか、支保工を必要とするかどうか等

TBM 自体の機械的・機能的性能

実質的作業時間

作業員の機械に対する習熟度

その他 (西松建設 TBM 施工マニュアル参照の事)

今回のプロジェクトの場合には使用しようとする TBM の選定は、比較的大きなトンネル断面を急速施工で完成させるということから、硬岩全断面掘削方式で、かつ、しっかりとした実績のある機種あるいはメーカーから選ぶという考え方が機械の選定の決定的要素の重要なひとつとなっていた。したがって、考慮の対象となった機械製作会社は当初からアメリカ・ロビンズ社と西ドイツ・ビルト社のものであったが、種々の検討の結果、アメリカ・ロビンズ社の最新型を第一候補として対応してきた。

以下のトンネル月進速度の算定は以上の前提のもとで、次の5種類の検討を行い、最終的に期待進行速度を策定した。

A 案：香港における経験の豊富なイギリスの地質コンサルタントの意見を聞き、彼らとのディスカッションに基づく硬岩 TBM の期待し得る純掘進速度から計算した場合 (Table 4)。

B 案：日本の小松製作所による各種の TBM に関する技術資料からのデーターによって検討した場合 (Table 5)。

C 案：アメリカ・ロビンズ社とのディスカッションに基づく純掘進速度により検討した場合で、17インチおよび19インチのカッターについてそれぞれ検討した場合。Table 6 は17インチカッター、Table 7 は19インチカッターの場合である。

D 案：アメリカ・ロビンズ社による純掘進速度を西松建設機材部の TBM 掘進速度算定フォーマットに従って検討した17インチカッターの場合 (Table 8)。

ここで、C 案のアメリカ・ロビンズ社の純掘進速度による評価については、与えられたデーターに対して以下のような調整を行った。すなわちロビンズ社は企業先の依頼により、香港から送付された当該トンネルの岩のコア・サンプルの試験を行い TBM の純掘進速度を予測している。しかしながら、ロビン

Table 4 月進速度の検討(A案)17インチカッター

地 山 等 級	純掘進速度 (m/hr)	掘削時間 (hr)	加重平均掘進速度 (m/hr)
1,2	2.60	$3,050 \div 2.60 = 1,173$	$5,535 \div 2,035 = 2.73 \text{ m/hr}$
3	2.85	$2,135 \div 2.85 = 749$	
4~5A	3.10	$350 \div 3.10 = 113$	
合計		2,035	

月進速度 = $2.73 \text{ m/hr} \times 10 \text{ hr} \times 2 \text{ s} \times 25 \text{ 日} \times 0.403 = 550 \text{ m/月}$

Table 6 月進速度の検討(C案その1)17インチカッター

岩 区 分 (地山等級)	施工延長 (m)	純掘進速度 (m/hr)		掘削時間 (hr)		加重平均掘進 速度(m/hr)
		Min	Max	Min	Max	Max: $5,535 \div 1,601 = 3.46$ Min: $5,535 \div 2,114 = 2.62$
Very Hard	410	0.7	1.0	586	410	
Hard	410	1.5	2.0	273	205	
Medium	2,192	2.6	3.5	843	626	
Soft	2,173	6.0	7.0	362	310	
—	350	7.0	7.0	50	50	
Total	5,535			2,114	1,601	

最大月進速度 = $3.46 \times (10 \text{ hr} \times 2 \text{ s} \times 25 \text{ 日} \times 0.403) = 697 \text{ m/月}$ 最小月進速度 = $2.62 \times (\quad \quad \quad) = 528 \text{ m/月}$

Table 5 月進速度の検討(B案)17インチカッター

地 山 等 級	純掘進速度 (m/hr)	掘削時間 (hr)	加重平均掘進速度 (m/hr)
1,2	2.10	$3,050 \div 2.10 = 1,452$	$5,535 \div 2,281 = 2.43 \text{ m/hr}$
3	2.80	$2,135 \div 2.80 = 763$	
4~5A	5.30	$350 \div 5.30 = 66$	
合計		2,281	

月進速度 = $2.43 \text{ m/hr} \times 10 \text{ hr} \times 2 \text{ s} \times 25 \text{ 日} \times 0.403 = 490 \text{ m/月}$

Table 7 月進速度の検討(C案その2)19インチカッター

岩 区 分 (地山等級)	施工延長 (m)	純掘進速度 (m/hr)		掘削時間 (hr)		加重平均掘進 速度(m/hr)
		Min	Max	Min	Max	Max: $5,535 \div 1,257 = 4.40$ Min: $5,535 \div 1,614 = 3.43$
Very Hard	410	1.1	1.4	373	293	
Hard	410	2.0	2.7	205	152	
Medium	2,192	3.5	4.7	626	466	
Soft	2,173	6.0	7.3	362	298	
—	350	7.3	7.3	48	48	
Total	5,535			1,614	1,257	

最大月進速度 = $4.40 \times (10 \text{ hr} \times 2 \text{ s} \times 25 \text{ 日} \times 0.403) = 887 \text{ m/月}$ 最小月進速度 = $3.43 \times (\quad \quad \quad) = 691 \text{ m/月}$

Table 8 月進速度の検討(D案)17インチカッター

		地 質 区 分	単 位	Very Hard	Hard	Medium	Soft	Soft	計	備 考
地 質 要 素 作	掘 削 深 度	D	M	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8		18.096m
	掘 削 延 長	L	m	410	410	2,192	1,888	225	5,135	400m (山岳工法)
	掘 削 速 度	V	KM/S							
	掘 削 力	αC	KG/CM2	2,800~3,160	2,100~2,450	1,400~1,750	1,050以下	—		
	掘 削 時 間	HE	H	372	205	626	316	75	1,594	HE=L/VH
自 営 サ イ タ ー の 他 作 業	盛 り 付 え 時 間	0.11		45	45	241	209	25	565	12' 1.8m÷60=0.11H・m
	レール風管等延伸	0.046	m	19	19	101	87	10	236	30' 10.8m÷60=0.046H・m
	吹 付	m	(R.B)本・m(並行作業)	(同 作)	(同 作)	吹付R・B後の考慮	支保工、R・B、吹付			80'×1.898・1.8÷60=703H
	ロックボルト打設	m	0	0	0	703	187		890	90'×22.5・1.8÷60=187H
	掘 削 量	0.046	m	19	19	101	87	10	236	1H/21.6m=0.046H・m
	掘 削 時 間 (同時作業)			0	0	0	0	0	0	
	スリットロッチ時間			0	0	0	0	0	0	
	カッター交換	0.833	m	258	127	324	123	30	862	50'×3÷60=0.833
	点 検 整 備	0.046	m	19	19	101	87	10	236	1H 21.6m=0.046H・m
	断 層 部 対策	m	—	—	—	—	—	—	—	TOTAL工期にて考慮
安 静 休 憩	0.185	m	76	76	405	351	42	950	4H 21.6m=0.185H・m	
そ の 他	0.023	m	9	9	50	44	6	118	30' 21.6m=0.023H・m	
掘 削 速 度	計	HT	m	817	518	1,949	2,007	395	5,687	
	掘 削 率	HE/HT	%	45.5	39.5	32.1	15.7	19.0	28.0	
	カッター切込深さ	PE	CM/R _Y	0.16	0.29	0.52	0.87	0.43		
	カッターヘッド回転数	N	PPM	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5		
	掘 削 速 度	VH	M/M	1.1	2.0	3.5	6.0	3.0		VH=PE×N×60 100m/min資料参考
	掘 削 率	α		0.455	0.395	0.321	0.157	0.19	0.28	
	掘 削 速 度	VD	M/D	12.0	19.0	27.0	22.6	13.7	平均21.7m/D	VD=VH×24H×π
	掘 削 速 度	VM	KM	300.0	475.0	675.0	565.0	343.0	平均 542.5m/M	VM=VD×25H
	掘 削 時 間			34H	22H	81H	84H	16H	237H	237日×30.25=265日 330日
	掘 削 延 長									初期掘進 断層対象=45日 (11×11)
カ タ ー 消 費 量	カッター転送距離	L	M3	261	291	336	461	461		小松資料より(19カッター想定)
	カッターライフ	CQ	M3・個	24	49	102	233	115		C ₀ =8×D ^{0.25} ×L×R
	地 山 掘 削 量	Q	M3	7,419	7,419	39,666	34,346	4,072	92,922	カッター=33個
	カッターリング消費量	HC	個	310	152	389	148	36	1,035	
	カッターハブ消費量	NH	m	62	30	78	30	7	207	1.5

ス社が試験した岩がどのような基準で選ばれて送付されたか分からない以上それらのサンプルが当該地山の平均的地質状態を示していると考えすることはできない。

ロビンス社の純掘進速度の予測は試験した岩の単体としての強度を基準としての純掘進速度であり、特にカッターの地山への貫入速度に影響を与えると考えられている岩石の堅さ以外の要素、すなわち、岩盤の節理・割れ目等の点が考慮されていない可能性がある。したがって、ロビンス社の純掘進速度の予測による月進速度の算定に際しては以下のように試験された岩強度と今回採用された地山等級分類との調整をしたうえでその数字を適用し、検討する必要がある。

このため、以下の表に示すような方法で、純掘進速度とそれを適用する地山等級区分との調整を行った。

Table 9 はロビンス社の岩石サンプル試験の結果に基づく純掘進速度の評価で、Table 10 はそれを今回のプロジェクトで採用されている地山等級区分へ調整配分したものである。

Table 9 岩石サンプル試験の結果に基づくアメリカ・ロビンス社の想定する純掘進速度

花崗岩	一軸圧縮強度 (Mpa)	純掘進速度 (m/hr)	
		17インチカッター	19インチカッター
Very Hard	275~310	0.70~1.00	1.10~1.40
Hard	205~240	1.50~2.00	2.00~2.70
Medium	139~172	2.60~3.50	3.50~4.70
Soft	>103	6.00~7.00	6.00~7.30
—	—	(7.00)	(7.30)

Table 10 ロビンス社の一軸圧縮強度による岩分類と地山等級分類の調整

花崗岩	一軸圧縮強度(MPa)	地山等級の適用	対象等級の配分	距離(m)
Very Hard	275~310	地山等級1を一部適用する	地山等級1の50% $14.8 \div 2 = 7.4$	410
Hard	205~240	地山等級1を一部適用する	地山等級1の50% $14.8 \div 2 = 7.4$	410
Medium	139~172	地山等級2~3を適用する	地山等級2の60% 地山等級3の40%	1,338 854 2,192
Soft	>103	地山等級2~3	上記残り	2,173
—	—	地山等級4~5	—	350
合 計				5,535

期待掘進速度はこの Table 10 にあるように当方の判断で調整した地山等級分類に対して行った。

Table 11 純掘進速度の評価による平均月進速度(m/月)

カッター	17インチ	19インチ
A 案	550	—
B 案	490	—
C 案(その1)	最大 697 最小 528	— —
C 案(その2)	— —	最大 887 最小 687
D 案	—	543
総 平 均	556	706

5-5 月進速度の決定とカッターサイズの選定

以上の検討の結果を Table 11 に示す。この結果に対する考察として、

- 1) A,B,C 案共にその稼働率に関してはいずれも TBM 施工の実績があり、その施工にある程度習熟している世界各地の各現場での平均的統計から来ている。
- 2) 稼働率の中に TBM の施工とそれに伴う支保工、吹付け、ロックボルト等の作業効率は入っているが、それらの工種に対する香港での特性とか作業員の習熟性等は加味されていない。
- 3) 支保工の他に、現地発生材を TBM の背後で埋戻し流用しての排水層をインバートに設置するという作業が特に計画されている。
- 4) 西松建設として単独では初めての硬岩大型長距離 TBM の計画・設計・施工である。
- 5) 契約が代案設計によるランプサムであり、完全な責任施工でクレームは一切できない。
以上のような諸点のほか、
- 6) 類似の地山である我が社のテーツケーン・トンネルにおいても一部経験されているような小規模ではあるが断層に遭遇する可能性もあり、その断層対策に対する余裕の確保。
- 7) 契約上のプロジェクト全工程から逆算的に必要とされるターゲット工程である月平均500m という急速施工速度を考慮した場合、総平均で566m/月、最低で500mを割っている17インチカッターの使用は不安なしとは言いきれない。

以上のような検討と考察の結果、今回の計画ではカッターは余裕をもった19インチとし、その計画平均月進速度は、その平均値である706m/月にたい

して、多少の安全側をとり500m／月と設定した。

5-6 TBMの仕様

今回使用するTBMは世界的にもまだ数の少ない19インチ（外径482mm）のディスクカッターを装備している高出力型の最新式のものである。

また、この機械は今回の使用後の転用を考慮し、再整備にあたってその直径を±500mm増減し得るものとした。従って、転用する次のプロジェクトに対して掘削径で、4.30mから5.30mまで変更することができる。

Fig.7は今回のTBMの標準図、Table 12はその詳細仕様である。

Photo 1は平成2年10月10日に撮影されたロビンス社シアトル工場での最終組立て完了時点のものである。

§6. 工程計画

今回のプロジェクトにおける工程計画は基本的には完全な逆追い計画である。すなわち既述のようにプロジェクト全体を通じての最後の主要工程である送電線配線トレンチの超急速施工の可能性を極限まで煮詰め、検討し、それを絶対に実施可能なものであると確認したうえでTBMの発注時期とその進行速度を決定するという形をとっている。

Fig.8は入札時に企業先に提出した工程表である。

Table 12 TBMの仕様

製作会社	The Robbins Company
型式	TBM152-261
製作年月	1990年10月
設計対象岩石・能力	一軸圧縮強度140～300MPa, 最大7.3m/hr
直径 (m)	4.80
全長 (m)	(切羽面よりトレーリングコンベア先端まで)133.219
本体機長 (m)	(切羽面よりマシンコンベア先端まで) 24.484
推進装置ストローク (m)	1.83
最大スラスト (t)	1,024
カッターヘッド回転数	12rpm (50Hz)
総重量 (t)	285
電動機出力 (kW)	カッターヘッド：335kW×7, 油圧ポンプ117kW (最高248bar)
ディスクカッター	外径482mm×32セット
バケット	(No.)
グリッパー最大推力 (t/m²)	421.86、ストローク0.559m
グリッパー面積 (m²)	4.1×2、スパイク付き
操向装置	フロントサイド
	フロントバーチカル
	トップシールド
	グリッパーバーチカル
	グリッパーホリゾンタル
	リヤーサポート
最小曲率半径 (m)	325
分解最大寸法・重量	カッターヘッド：φ4.80m×1,676mm, 38.8t メインビーム：長16.818m×高3,397mm, 44.8t

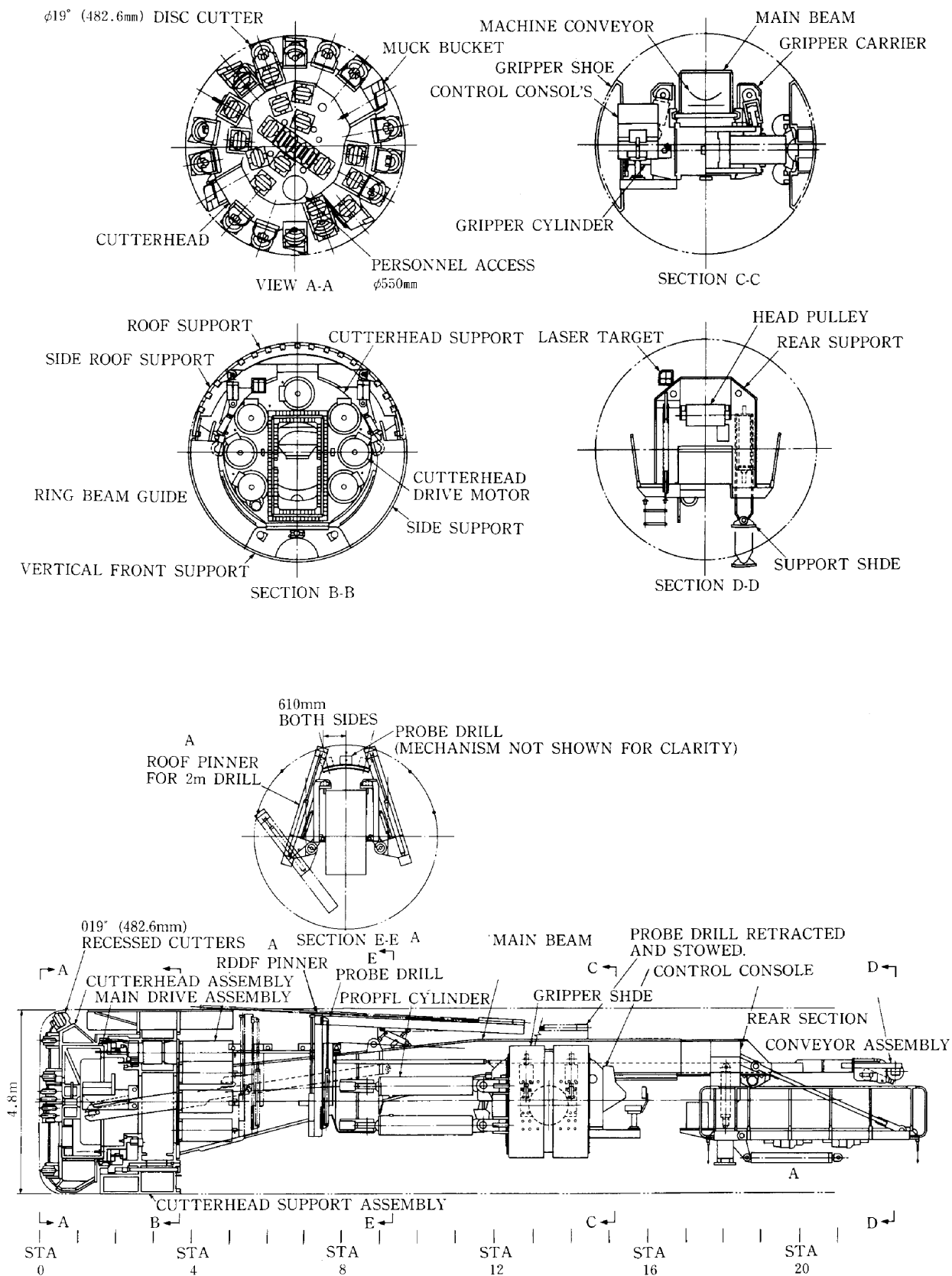
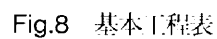


Fig.7 ロビンス社硬岩用ハイパフォーマンスTBM標準図
(外径4.80m19インチカッター装備)



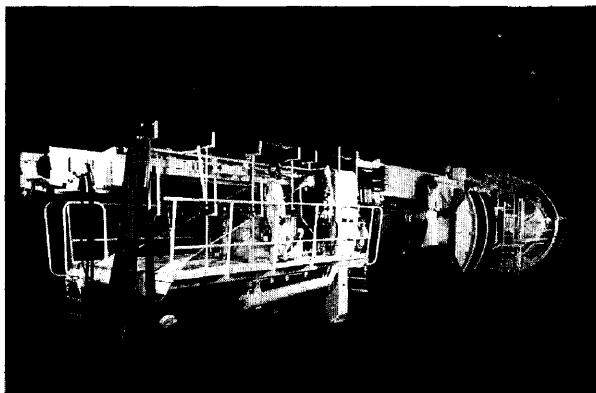


Photo 1 TBM の組立完了時の写真

§7. おわりに

以上今回の大型 TBM による施工計画および機種選定に対する考え方等について述べたが、このサイズの TBM によるトンネル工事の設計施工は我が社にとっても、そう数あるケースではないかと思う。

TBM の発進は平成 3 年 2 月の初めという予定で鋭意準備中であるが、この基本プランニングに基づいて西松建設としての TBM 実績の蓄積に成功したいと考えている。

今回の工事におけるひとつの重要なクリティカル工種である約 5,500m にわたる鉄筋コンクリート製の配線トレンチの狭隘なトンネル内での超急速施工法も非常に興味のある点ではあると思うが、今回の報告では割愛させていただいた。

今回の計画作成にあたり種々の御助言を戴いた本社トンネル委員会に感謝するとともに、この大型 TBM の導入に当たり御理解と御支援を下された本社ならびに香港支店の各関連部署にお礼を申しあげる次第である。