

# 長大トンネルにおける誘導式水平ボーリング 香港 ルート 8 イーグルネストンネル工事

渡辺裕之\* 一瀬邦生\*\* 長松千年\*\* 大嶋秀俊\*\* 水野泰宏\*\* 渡邊智彦\*\*

イーグルネストンネルは、香港のランタオ島とシャーティンを結ぶ 8 号幹線の中で最も長いトンネルである。トンネル掘削は、地下水流入に対する 2 つの管理制限が適用される中、発破工法により施工された。

我々は応札に際し、トンネル線形に沿った地質学的、水文地質学的情報を得るべく両坑口から 2 本の水平ボーリングを行うことを技術提案に盛り込むこととした。本報文は 2 本のトンネル間の限られた空間を方向制御しつつ、経済的且つ短期間に調査する目的で導入した Horizontal Directional Drilling の施工報告である。

キーワード：HDD, NATM, 全断面掘削, 長孔発破, ローリング断面

## 1. はじめに

イーグルネストンネル工事は、香港 8 号幹線網の一部でライチコックとシャーティンハイツを結ぶ延長約 2 km の片側 3 車線断面の道路トンネルと料金所を含む付帯設備の施工である (Fig. 1)。

トンネルの北西には水道局の貯水池群、南坑口には浄水設備が位置し、北坑口には二次覆工されていない導水路トンネルが本坑と交差するなど、既設構造物への発破振動制限、湧水量によるトンネル掘削制限及びグラウトの規定、北坑口への仮設道路の使用制限が施工条件として設定されていた。

また、着工 23 ヶ月後には交通管制システム設置業者への引渡しが決まっており、入札においてはトンネル掘削と覆工の詳細計画と計画進行の達成が要求されていた。

本報文は、トンネルの地質と湧水量を的確に把握するためにトンネルの線形に沿って行った誘導式水平ボーリング (Horizontal Directional Drilling, 以下、HDD と呼ぶ) について報告するものである。



Fig. 1 イーグルネストンネル位置図

\* 国際支店 香港営業所  
\*\* 国際支店 イーグルネストンネル作業所

## 2. 工事概要

### 2.1 工事概要

工事名称：ルート 8 イーグルネストンネル工事

工事場所：香港新界ライチコック～シャーティン地区

発注者：香港特別行政区政府 路政署

設計監理：マウンセル・ハイダーJV

施工者：レイトン・熊谷JV

(レイトン社 51%, 熊谷組 49%)

工期：平成 15 年 10 月 21 日～19 年 11 月 15 日

工事内容

掘削延長：本線北車線 1,984m, 本線南車線 2,006m  
換気斜坑 416m

掘削断面：標準部 148～174 m<sup>2</sup>, 拡幅部 170～190 m<sup>2</sup>  
換気斜坑 39～142 m<sup>2</sup> (Fig. 2)

掘削工法：NATM, 全断面或いは上半先進, 長孔発破, タイヤ方式

地質：主として花崗岩, 石英モンゾナイト

掘削機械：3 ブーム全自動ホイールジャンプ

横断勾配：+4.0～-2.5%：トンネル中心ローリング

二次覆工：無筋又はRCライニング, 連絡通路との交点部はSFRCライニング

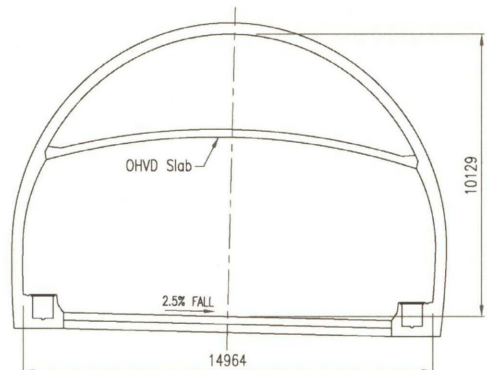


Fig. 2 トンネル標準部断面図

## 2.2 トンネル掘削に関する規定

### 2.2.1 仮設支保工

トンネルの支保パターンは、Q値に基づいて決定されることになっていた。トンネル仮設支保パターン及び掘削工法の決定は、コントラクターに委ねられていた。エンジニア事務所で見ることができる地質資料に基づき、適切な支保パターン、掘削工法の決定を行う必要があった。

### 2.2.2 発破振動制限

2つの水道トンネル、貯水池、浄水設備など近隣の水道施設は13mm/s以内、法面や鉄塔等は25mm/s以内の発破振動制限が設けられていた。

### 2.2.3 湧水に対する規定

湧水に対する規定として次のように規定されていた。

#### (1) 掘削前のグラウトの必要性基準

a または b のいずれかに当てはまればグラウトをしなければ掘削を続けることができない。

a) 探査孔 25m からの湧水量が 24 時間後で毎分 9 リットル以上、探査は常に切羽より最低 20m 前方まで行われていること

b) 切羽より 25m 以内での湧水量が 24 時間後で毎分 36 リットル以上

#### (2) 覆工前のグラウトの必要性基準

c) トンネル区間 100m における湧水量が毎分 36 リットル以上

### 2.2.4 仮設道路使用制限

北坑口への仮設道路は、シャーターンハイツトンネル業者が管理運営しており、9時～17時の間で1時間20台（各方向）の通行制限があり、また、着工19ヶ月後には仮設道路は撤去されるとの制約があった。

## 3. 調査計画

### 3.1 地質

土工工程處 (GEO) の情報、地質ボーリング調査のデータより地質平面図 (Fig. 3)、地質縦断面図 (Fig. 4) を作成した。

地質は主として花崗岩、石英モンゾナイトで構成されており、岩の一軸圧縮強度は 50～190N/mm<sup>2</sup>。

この付近の地質構造は Tolo Fault Zone が支配し、この断層に平行に 3 つの断層 F1～F3 が確認されていた。また、弾性波探査、空中写真より F4～F5、L1～L5 があると予想された。L5 は北坑口の南西を横断しており、ボーリング柱状図に 8～10m 幅の断層が若干現れていた。北坑口より約 700m 付近では花崗岩と石英モンゾナイトが接し、ボーリング柱状図よりセン断帯が見られた。一方、南車線南坑口付近では地質縦断面図より岩のかぶり厚が 1m 以下と薄い状態が続くと予想された。

Table 1 に示すようにトンネル全体の約 86% は良好と判断され、長孔発破に適した地質と考えられた。

Table 1 イーグルネストンネル支保パターンと予想

IMS 岩分類	支保分類	Q 値	割合 (%)	支保詳細
1-2	1-2	5.6 以上	56.9	スポットダウエル L=3m, 必要に応じ吹付 t=25 mm
3	3	2.9-5.6	29.0	パターンダウエル L=4m@2.4m 必要に応じ吹付 t=25 mm
4	4-5	0.36-2.9	7.7	パターンダウエル L=4m@1.8-2.2m, 吹付 t=70-90 mm
5A	6-7	0.036-0.36	2.3	パターンダウエル L=5m@1.4m 鋼繊維吹付 t=120-150 mm
5B	8	0.036 以下	4.1	ラチス支保工@0.8-1.0m, 鋼繊維吹付 t=250 mm
			100	

### 3.2 湧水量

#### 3.2.1 湧水量予想の方程式

Ian McFeat-Smith (以下、IMS と呼ぶ) は、香港における過去のトンネル工事実績を基に湧水量の予想について、次のような方程式を提言していた。

##### ① 湧水量補正係数 R

$$R = S_f \times H_f \times d_f$$

S<sub>f</sub> : 水源の規模係数 (Table 2)

H<sub>f</sub> : 水頭差係数 = 水頭差 / 100m

d<sub>f</sub> : 水源からの水平距離係数

$$= 1 - \sqrt{(d/400)} \text{ 但し, } d=0\sim 400\text{m}$$

Table 2 水源の規模係数

水源の種類	S <sub>f</sub>
海	1.0
大規模溪谷・貯水池	0.85
中規模溪谷・貯水池	0.7
小規模溪谷・貯水池	0.5
小川	0.3
分水線	0.1

##### ② 初期湧水量 I<sub>i</sub> と最終湧水量 F<sub>i</sub>

$$\begin{aligned} \text{初期湧水量 } I_i &= S_f \times H_f \times d_f \times I_F \\ &= R \times I_F \text{ l/min/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{最終湧水量 } F_i &= R^2 \times I_F \\ &= R \times I_i \text{ l/min/m} \end{aligned}$$

I<sub>F</sub> : 地質係数 (Table 3)

Table 3 IMS 岩分類における I<sub>F</sub> 値

IMS 岩分類	1	2	3	4	5	
I <sub>F</sub> 値 /min/m	高(H)	0.6	1.4	12.2	37	3.8
	平均	0.45	1.05	6.55	24	3.1
	低(L)	0.3	0.7	0.9	11	2.4

##### ③ 24 時間後の湧水量

$$\text{24 時間後の湧水量} = I_i \times 50\%$$

50% は Ian McFeat-Smith による想定

#### 3.2.2 湧水量の想定

イーグルネストンネルを水源により 4 つのセクションに分け、湧水量計算値を Table 4 に示す。

Table 4 イーグルネストンネル湧水量計算値

IMS 岩分類	支保分類	Section-A				Section-B				Section-C				Section-D			
		水源：貯水池 Sf=0.6, Hf=0.51, df=0.41, R=0.125				水源：貯水池 Sf=0.85, Hf=0.7, df=0.13, R=0.056				水源：トンネル上河川 Sf=0.6, Hf=0.68, df=0.23, R=0.11				水源：トンネル上河川 Sf=0.6, Hf=0.7, df=0.14, R=0.06			
		IF (H)	Ii (H)	IF (L)	Ii (L)	IF (H)	Ii (H)	IF (L)	Ii (L)	IF (H)	Ii (H)	IF (L)	Ii (L)	IF (H)	Ii (H)	IF (L)	Ii (L)
1-2	1-2	0.6	0.08	0.3	0.04	0.6	0.03	0.3	0.02	0.6	0.05	0.3	0.03	0.6	0.04	0.3	0.02
3	3	1.4	0.18	0.7	0.09	1.4	0.08	0.7	0.04	1.4	0.13	0.7	0.06	1.4	0.08	0.7	0.04
4	4-5	12.2	1.53	0.9	0.11	12.2	0.68	0.9	0.05	12.2	1.08	0.9	0.08	12.2	0.73	0.9	0.05
5A	6-7	37.0	4.63	11.0	1.65	37.0	2.07	11.0	0.60	37.0	3.33	11.0	0.99	37.0	2.22	11.0	0.66
5B	8	3.8	0.48	2.4	0.30	3.8	0.21	2.4	0.13	3.8	0.24	2.4	0.22	3.8	0.23	2.4	0.14

GEOLOGICAL KEY

- F1-F4 FAULTS (GEO)
- F5 (EGS)
- L1-L2, L5 PHOTOGEOLOGICAL LINEAMENT (GEO)
- L3, L4 SEISMIC LINEAMENT (GEO)

MAJOR INTRUSIVE ROCKS

- gf FINED-GRAINED GRANITE
- gc COURSE-GRAINED GRANITE
- mq QUARTZ MONZONITE

GRAPHIC SCALE

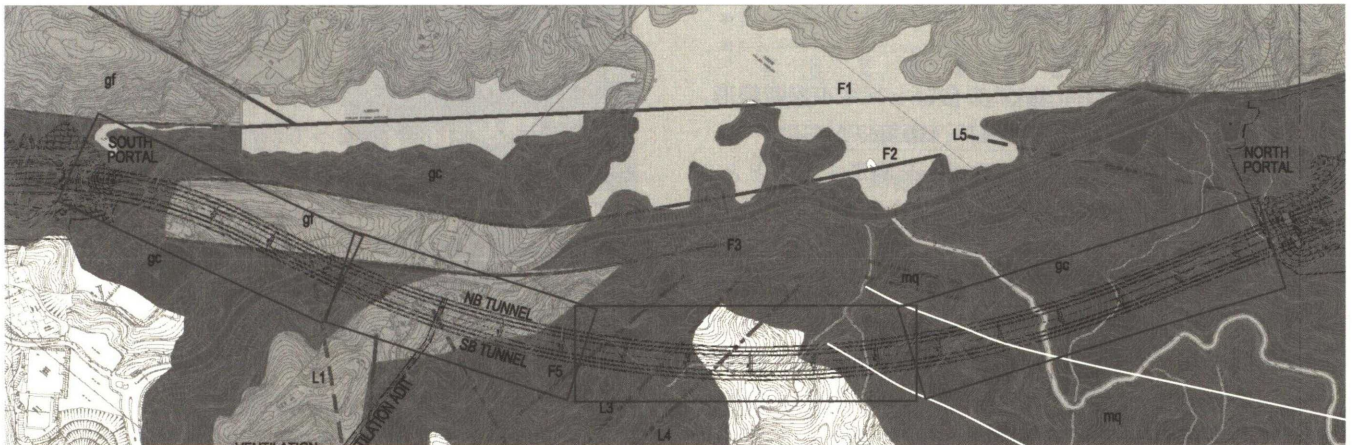


Fig.3 地質平面図

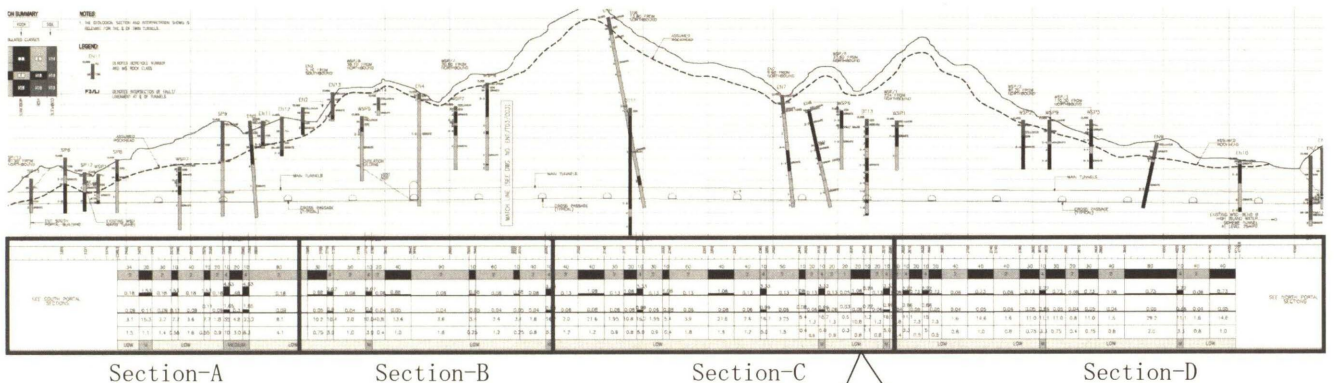


Fig.4 地質縦断面図

Table 5 地質と湧水量の予想 Section-C, D

CHAINAGE TUNNEL Q	3450	3470	3480	3500	3520	3540	3550	3570	3580	3600	3610	3630	3640	3650
LENGTH	20	10	20	20	20	10	20	10	20	10	20	10	20	20
IMS ROCK CLASS	2	4	2	1				2	4	2	4		4	
PREDICTED WATER INFLOW RATE (l/min/m) HIGH		3.33			1.08	0.24		3.33		2.22		2.22		0.73
PREDICTED WATER INFLOW RATE (l/min/m) LOW	0.13		0.13	0.05			0.13		0.08		0.08		0.73	0.73
PREDICTED WATER INFLOW AFTER 24HRS. (l/min) HIGH	4	1.3	16.7	1.3	0.5	10.8	1.2	1.3	16.7	0.8	11.1	7.3	15	7.3
PREDICTED WATER INFLOW AFTER 24HRS. (l/min) LOW	4	0.6	5.0	0.6	0.3	0.8	1.1	0.6	5.0	0.4	3.3	0.5	5	0.5
GROUTING RISK			M			LOW			M					LOW

Table 4 の計算結果より最も湧水量が多いと想定される支保分類 6-7 の場合において 2.2.3(1)b の湧水に対する規定を検討した。Table 5 に示すように IMS 岩分類 (支保分類 6-7) は 1 区間 10m 程度と予想しているが、2.2.3(1)b の条件の最大 25m 区間における湧水量を計算した。

① Section-A

- 24 時間後の最大湧水量 = Ii (H) × 0.5 × 25m  
= 4.63 × 0.5 × 25m = 58 l/min > 36 l/min
- 24 時間後の最小湧水量 = Ii (L) × 0.5 × 25m  
= 1.65 × 0.5 × 25m = 21 l/min < 36 l/min

② Section-C

- ・24時間後の最大湧水量 =  $I_i(H) \times 0.5 \times 25m$   
 $= 3.33 \times 0.5 \times 25m = 42 \text{ l/min} > 36 \text{ l/min}$
- ・24時間後の最小湧水量 =  $I_i(L) \times 0.5 \times 25m$   
 $= 0.99 \times 0.5 \times 25m = 12 \text{ l/min} < 36 \text{ l/min}$

③ Section-B, D

- ・湧水量は規定範囲内

以上より湧水の規定を超えると予想される箇所は Section-A 或いは C の範囲で断層とトンネルの交点付近や花崗岩と石英モンゾナイトの接点で地質が揉まれた場所に限定され、グラウトのリスクは中程度と判断した。

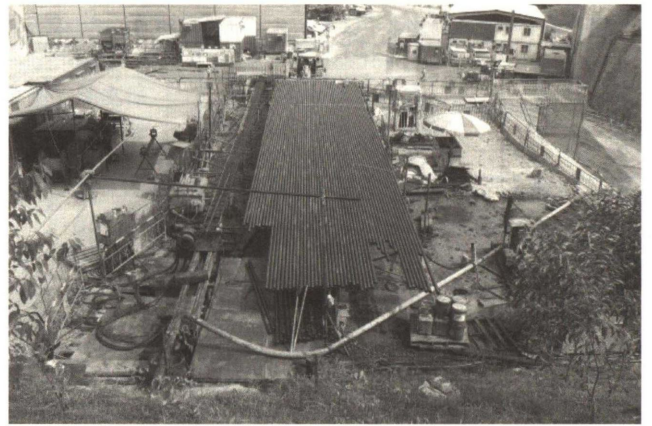


Photo. 1 北坑口作業ヤード

## 4. 誘導式水平ボーリング (HDD)

### 4.1 基本計画

北坑口からは Section-D, C を含むトンネル縦断線形変化点迄の 1,150m 区間 (HDD-1), 南坑口からは Section-A, B の 850m 区間 (HDD-2) を施工することとするが, Section-B の状況により中止を判断することにした。

北坑口からの直線区間約 300m は特殊機材調達時間の配慮からワイヤーラインを用いた在来工法を採用し, カーブ区間よりワイヤーラインを用いた HDD 工法に切り替えることにした。北坑口の作業ヤードは北ポータル換気ビルの広さ 25m×25m の基礎とした (Photo. 1)。

一方, 南坑口前面には作業ヤードが確保できず, 南車線トンネルセンターより南に約 30m オフセットした地表にヤードを構え, 所定のボーリング位置まで斜め下方にアプローチすることとした。

Fig. 5 に HDD の許容範囲を示す。許容範囲は道路センターを中心に 8m の半円内 (斜線部), 連絡路上最低 2m のクリアランスを確保するものとした。不必要に許容範囲を狭めれば HDD のメリットを損ねることになった。

縦断勾配は北坑口が上り 1% (トンネル勾配 0.5%), 南坑口は上り 0.8% (同 0.607%) と設定した。

径 32mm のコアを全線採取するに伴い, HDD 孔の孔曲がり測量, 流量測定を常時義務付けた。その他, 局部的に流量試験及び水圧試験を随時行うこととした。

### 4.2 システム概要

HDD 工法のシステムに Devico 製品を採用した。同製品はプランニングを行うソフトウェア, 穿孔器具, 測量器具, 走向を調査する器具など, ボーリング調査に必要な器具のラインナップが揃っていた。ここでは使用した器具についての概要を述べるに留める。製品の詳細については, Devico の Web サイト <http://www.devico.com> を参照して頂きたい。

#### 4.2.1 穿孔器具 : DeviDrill™ Wireline System

- ①ドリル本体は外径 72mm, 長さ 5.4m, ビッド径 76mm (Photo. 2)。
- ②カーブ軌道は 0~20° /30m の範囲で調整可能。曲率はドリル本体を引き出し手で調整。
- ③動力は在来工法と同じボーリング機を使用可能。外径 70mm (内径 60mm) のロッドで動力をドリル部へ伝達 (Fig. 6)。
- ④ドリル内部には一度に径 32mm×3m のコア採取が可能なコアバレルを収納し, ビット中央部の中空よりコアを連続採取可能 (Fig. 6)。
- ⑤穿孔後のコアバレルの回収はワイヤーライン方式が採用され, コアバレルの末端部の突起に接続した特殊アタッチメントの付いたワイヤーをたぐり寄せロッドを引き抜くことなく回収する (Fig. 6)。
- ⑥ワイヤーリングシステムのアタッチメント, コアバレルや DeviTool をドリル先端に送る場合は, 圧力水を使用。

#### 4.2.2 測量器具 : DeviTool™ PeeWee

- ①測量器具は直径 30mm, 長さ 0.975m でビット中央部のコア採取孔に装着 (Photo. 2)。
- ②コアバレルを引き抜いた後, DeviDrill™ を後方に下げて DeviTool™ を圧力水で挿入。先端の方位角, 仰角を記録した後, DeviDrill™ をさらに下げて次のポイントのデータの記録 (Fig. 6)。
- ④ 測量の完了後, ワイヤーラインで DeviTool™ を引き出す。

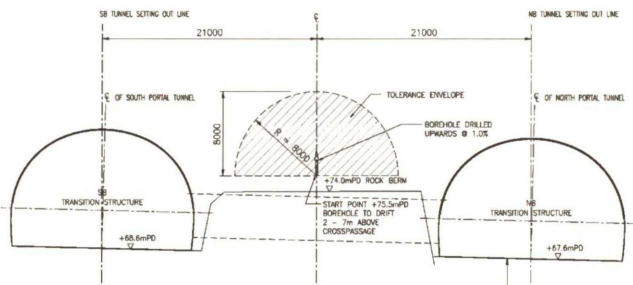


Fig. 5 HDD 許容範囲 (北坑口より)



Photo. 2 DeviDrill™ Wireline System, DeviTool™ PeeWee

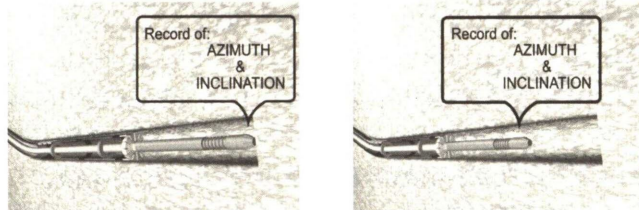
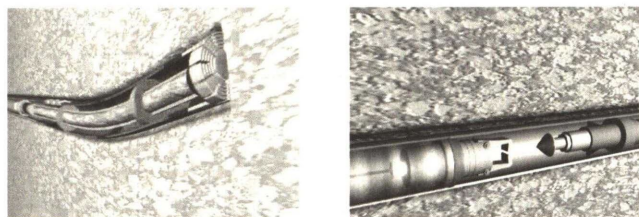


Fig. 6 穿孔, ワイヤライン, 測量イメージ  
(イメージ図は Devico Web サイトより引用)

### 4.3 調査結果

#### 4.3.1 HDD 施工実績

北坑口側 (HDD-1) のボーリング軌道実績, 平面軌道及び縦断軌道をそれぞれ Fig. 7, Fig. 8 に示す。

ボーリング開始 99.8m 地点で在来工法より HDD 工法に変更した。平面軌道については許容範囲内に収まるよう方向管理されており, 機械の精度という点ではセンターのふれ幅は参考にならなかった。

一方, 縦断軌道を見ると, HDD 工法に変更した後も一定の勾配でふれ幅が拡大した。理由としては HDD 器具の操作に不慣れな点が上げられた。B 点にて終点に向け縦断線形を修正し, 850m 区間におけるふれ幅は修正線形に対し +2.5m/-1.7m であった。

HDD 施工実績 (穿孔速度) は, 延長 99.8m の在来工法区間 4.2m/シフト, HDD 工法区間 7.5m/シフト (1シフトは 10 時間), HDD 工法区間の最大進行は 750m 付近の岩盤部で 25.5m/シフトを記録した。上記施工実績は測量及びシステム維持作業を含んでおり, HDD 孔の測量に 0.5~4.5 時間, 約 300m 毎のビットの交換或いはコアパレルの交換に毎回 4~5 時間要した。

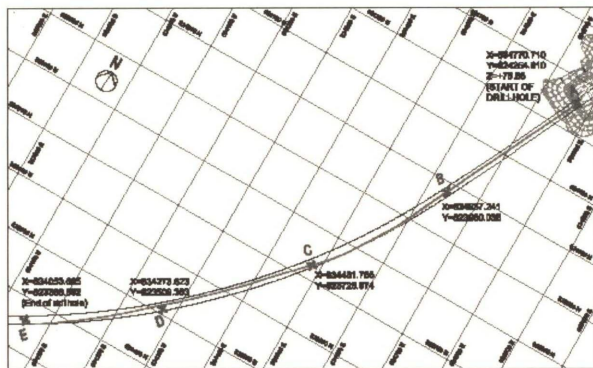


Fig. 7 平面軌道 (HDD-1)

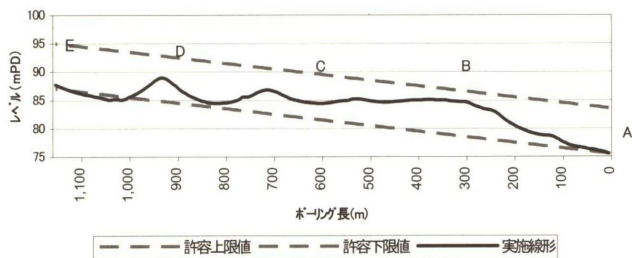


Fig. 8 縦断軌道 (HDD-1)

#### 4.3.2 流量測定

リアルタイムに流量測定を行ったが, 圧力水の影響かデータにばらつきがでた。Fig. 9 はシフト開始前と完了後のデータのみグラフに表示したものだが, やはり短期間の流量変化が激しい。HDD 孔とロッドとの隙間は 3mm, 外周部からの流量は 40 l/min と一定で流量測定に十分な断面が確保されず, データに示す通り 130 l/min が測定の限界と判断した。

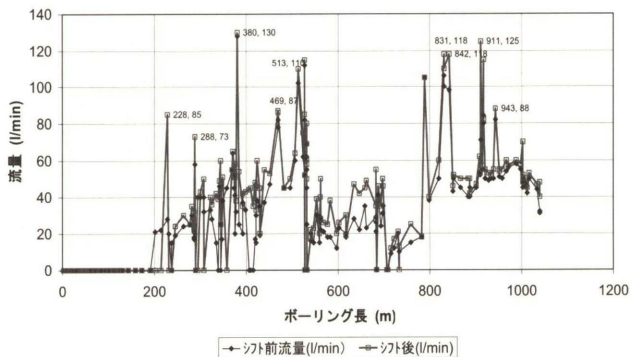


Fig. 9 流量測定結果 (常時)

最終的に正確な湧水箇所, 湧水量を特定できず, ボーリングを完了した時点で, Fig. 10 に示すように DeviDrill™ の先端にパッカーを取り付け, ロッド引き抜きながら 21m 毎に流量測定を行った。

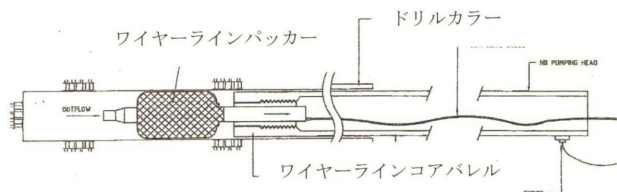


Fig. 10 流量測定方法 (代案)

2004年9月30日に全てのボーリング作業を完了し拘束を開放すると、流量は362 l/minから842 l/minに急上昇した (Fig. 11) .

ボーリング完了時、トンネルは坑口より約100m掘進していた。坑口より約150m区間以外は未だトンネル掘削の影響を受けていないと考えられる。区間流量測定を3回行い、その結果を Fig. 12 に示す。

実測データから、湧水量の減衰率は最初の1ヶ月間に限定して、減衰率 =  $(0.94)^d$  と仮定を変更した。変数  $d$  はボーリング完了日からの経過日数である。

3回目の流量測定結果は全線で湧水規定値 (9 l/min/25m) を下回る状況となったことから、990m地点で断層部へ止水グラウトを実施した。その他の箇所のリスクは小さく、坑内より対応することし、250~400m間で局部的に止水グラウトを実施した。花崗岩と石英モンズナイトの接点付近700~800m間でグラウトが必要であった以外はデータに基づく予想通りの結果が得られた。

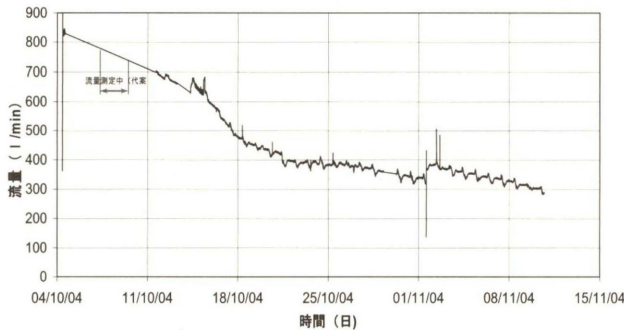


Fig. 11 流量測定結果：減衰状況（ボーリング完了時）

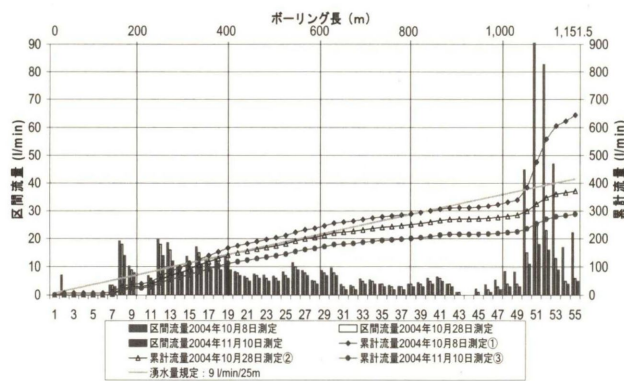


Fig. 12 流量測定結果（ボーリング完了時）

### 4.3.3 地質状況

Table 6 に北坑口から1,151.5m区間の支保分類を入札時、HDD-1 コア判定、実施について比較を示す。結果は良好で入札時の予想通り実施可能と判断した。

しかし、HDD コア判定と実施に差異が生じており、過去のトンネル工事と同様にQ値を判定する過程で安全側に見る傾向や個人差が見られ、支保分類が1ランク下がってしまう課題が残った。

区間流量測定とボーリング柱状図を関連づけると、173~177m付近でコアの未採取の区間、289~300m間及び1,058~1,060間に断層、343~348m区間に破碎箇所があり湧水を伴うことがわかった。

Table 6 HDD-1における支保分類の予想と結果

IMS 岩分類	支保分類	入札時 想定	HDD コア 判定	実施
1-2	1-2	49.9	50.9	43.1
3	3	36.9	34.7	32.6
4	4-5	6.9	9.3	18.9
5A	6-7	1.7	1.0	0.9
5B	8	4.6	4.1	4.5
		100%	100%	100%

## 5. まとめ

基本設計時に行われた垂直ボーリングは延2,996m、施工時の追加を含めると4,000mを超える。HDDは施工数量を削減できるだけでなく、得られたデータを基に的確な判断と工程管理が可能となり、トンネル掘削におけるリスクマネジメントとして有効な手段と言える。

イーグルネストンネルでの施工を切っ掛けに、香港では基本設計時でのHDD工法の採用が主流となっており、本工事の果たした役割は大きかったと考えている。

### 謝辞

イーグルネストンネルの施工にあたっては、土木事業本部トンネル技術部、国際支店の皆様にご指導を賜りました。このプロジェクトに関与していただいた多くの方々へ深く感謝申し上げる次第であります。

## Horizontal Directional Drilling in long tunnels

Hiroyuki WATANABE, Kunio ICHISE, Chitoshi NAGAMATSU, Hidetoshi OSHIMA, Yasuhiro MIZUNO, Tomohiko WATANABE

### Abstract

The Eagle's Nest Tunnel is the longest tunnel of the Route 8, which is the trunk road linking Lantau and Sha Tin in Hong Kong. Tunnel excavation was carried out mainly by the Drill and Blast Method with two criteria on control of inflow from the ground water.

Two long horizontal boreholes from either portal were proposed in the technical submission at tender stage to minimize the likelihood of our encountering unexpected geological and hydrogeological conditions along the tunnel alignment. This report presents the results of employing directional drilling and wireline coring techniques in order to meet our requirements in advance.

Keywords: HDD, NATM, full face excavation, long hole blasting, rolling section