

海外の建設施工特集

ロンドンユーロスタートンネルの TBM 超高速長距離施工

宇津木 薫

国際列車ユーロスターの走る英国側の鉄道的高速化を目的として整備する大型プロジェクトであり、従来のフォークストン～ウォータルー間においてユーロスターが利用している在来線の老朽化が進み高速走行が不可能であったため、このたびロンドン・コンチネンタルレールウェイ社が2007年の完全開通を予定して、ルートをフォークストン～セントパンクラス109 km間に変更し整備するものである。本報文では、この内のストラットフォード～セントパンクラス間の7.5 kmのトンネルを上下線ともシールドマシンにて高速・長距離施工した工事内容を紹介するものである。

当工事には、日本のメーカーが英国において現地製作した泥土圧式シールドマシン2台が使用され、日本でも例の無い長距離を超高速で施工したことにより洗練された日本の技術が見直された工事事例である。

キーワード：長距離施工，急速施工，トンネル連続コンベヤ，モニタリング，メンテナンス

1. はじめに

フランス、ベルギーを新幹線並みに走行しているユーロスターは、ドーバートンネルを越えイギリス国内に入ったとたん在来線と同様な速度に落として運行していた。この理由としては、ユーロスター開通以来イギリスでは老朽化した在来線を利用して走行していたためである。このプロジェクトは、こうした事情を改善すべく、ユーロスター全線的高速走行を可能にする

ことでロンドン～パリ間を現行より35分短縮し2時間20分、ロンドン～ブリュッセル間を40分短縮し2時間で結ぶものである。

英国フォークストンからセントパンクラスまで全長109 kmの路線は、Section 1とSection 2に分けて発注され、Section 1は2003年に開通した。

当該工事は、Section 2に含まれる全長19 kmのロンドントンネルのうち、ストラットフォード駅からセントパンクラス駅手前1.6 kmまでの7.5 kmの長距離トンネルの施工について紹介するもので（図-1）、

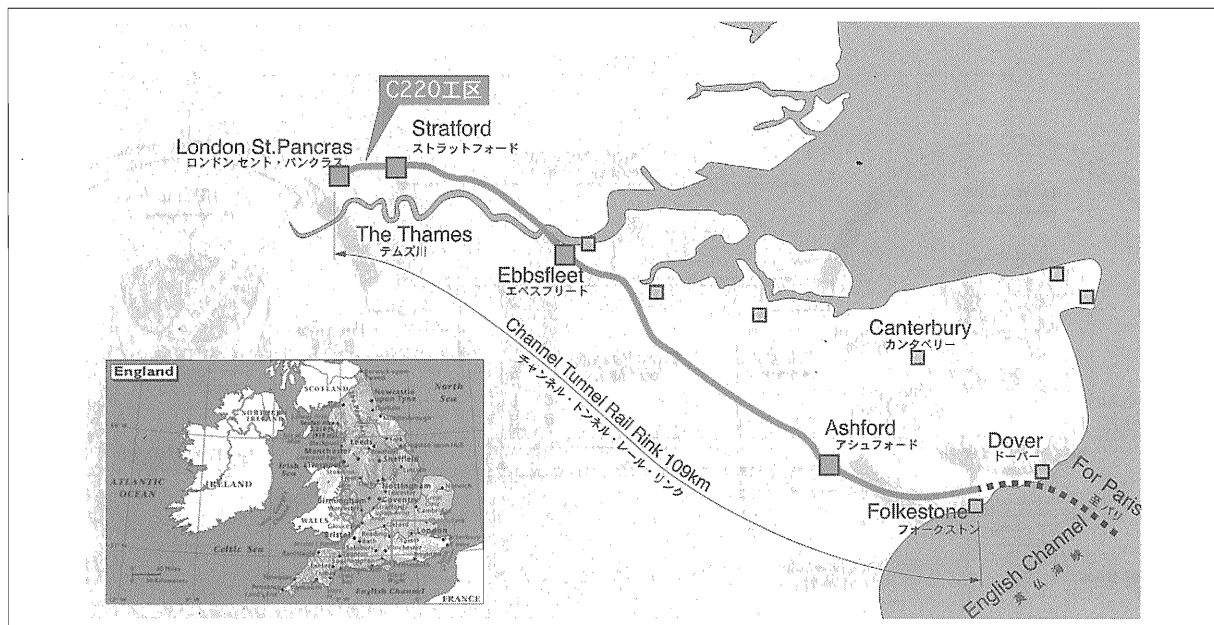


図-1 チャンネルトンネルレールリンク路線図

発進から到達まで僅か 500 日で急速施工したシールド工事である。

工事にあたり、効率の良い稼働を目的とし機械の長期間停止を避けることが要求され、各種のモニタリングの実施による機械の維持管理および良好なメンテナンスによる機械の長寿命化を可能にした事例でもある。

2. 工事概要

急速施工シールド工事の概要を以下に示す。

- 工 事 名 称 : Channel Tunnel Rail Link Section 2 : Contract 220
- 事 業 主 体 : London and Continental Railway Ltd. (LCR)
- 企 業 先 : Union Railways (North) Ltd.
- 資 金 源 : 政府拠出金及び民間基金
- コンサルタント : Rail Link Engineering (RLE)
- 施 工 企 業 体 : 西松・Cementation Skanska JV
- 工 事 場 所 : 英国ロンドン市内
- 工 期 : 2001 年 2 月 16 日 ~ 2005 年 3 月 25 日
- 工 事 内 容 : シールドトンネル
 - セグメント内径 7,150 mm
 - セグメント外径 7,850 mm
 - 単線トンネル長
 - 上り線 7,539 m 1 本
 - 下り線 7,547 m 1 本
 - 土 被 り 5~35 m

- 連絡横坑 11 箇所
- 釜場横坑 1 箇所
- 換気立坑

- Graham Road Ventilation Shaft
 - 28.3 m, 12.3 m, 深さ 45.28 m, 1 箇所
- Corsica Street Ventilation shaft
 - 外径 19 m, 内径 18 m, 深さ 35.23 m, 1 箇所
 - 地下水位低下工 1 式
 - インバート工 1 式

完成予想図を図-2 に示す。

3. 土質概要

ここでは、掘削対象土について簡単に説明する。

- ① 表層 (200 m 区間)
埋戻した表土からなる。
- ② ロンドンクレイ層 (1,400 m 区間)
硬質粘土層で、 N 値 = 10~50, 粘着力 = 40~150 kPa
- ③ WRB 層 (1,790 m 区間)
粘土および砂質シルトの互層で、 N 値 = 30~80, 粘着力 = 150~300 kPa
- ④ アップナーフォーメーション層
シルト質細砂で、 N 値 = 40, 透水係数 $l = 10^{-6} \sim 10^{-5}$ m/s

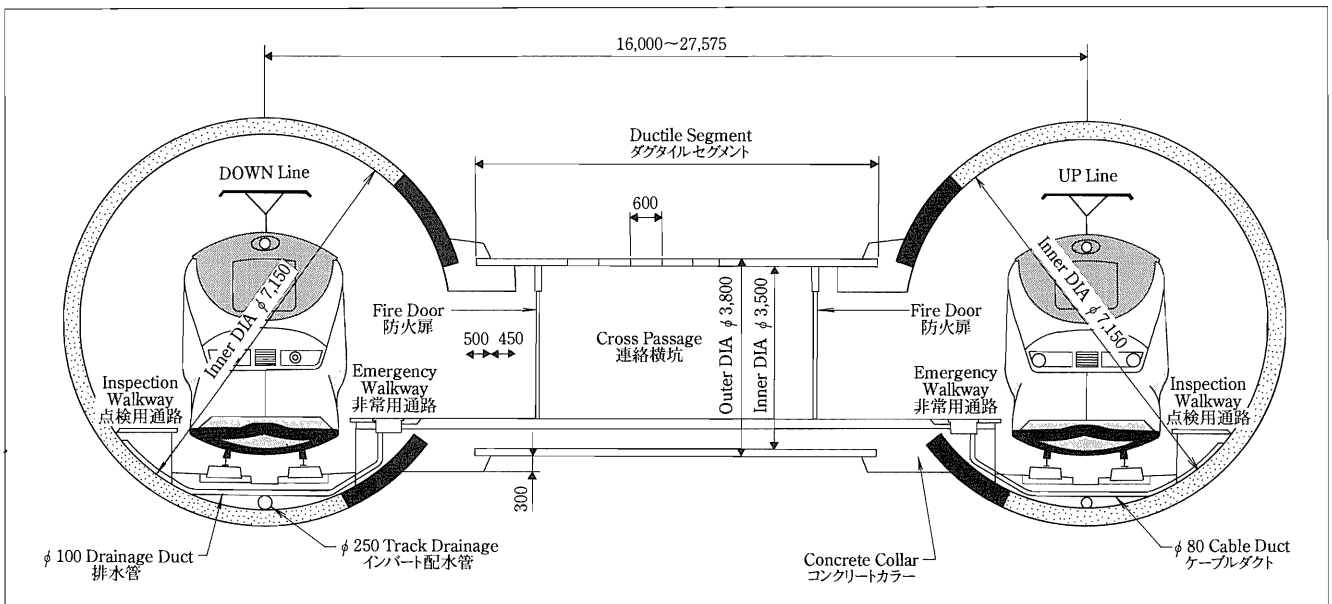


図-2 トンネル完成予想図

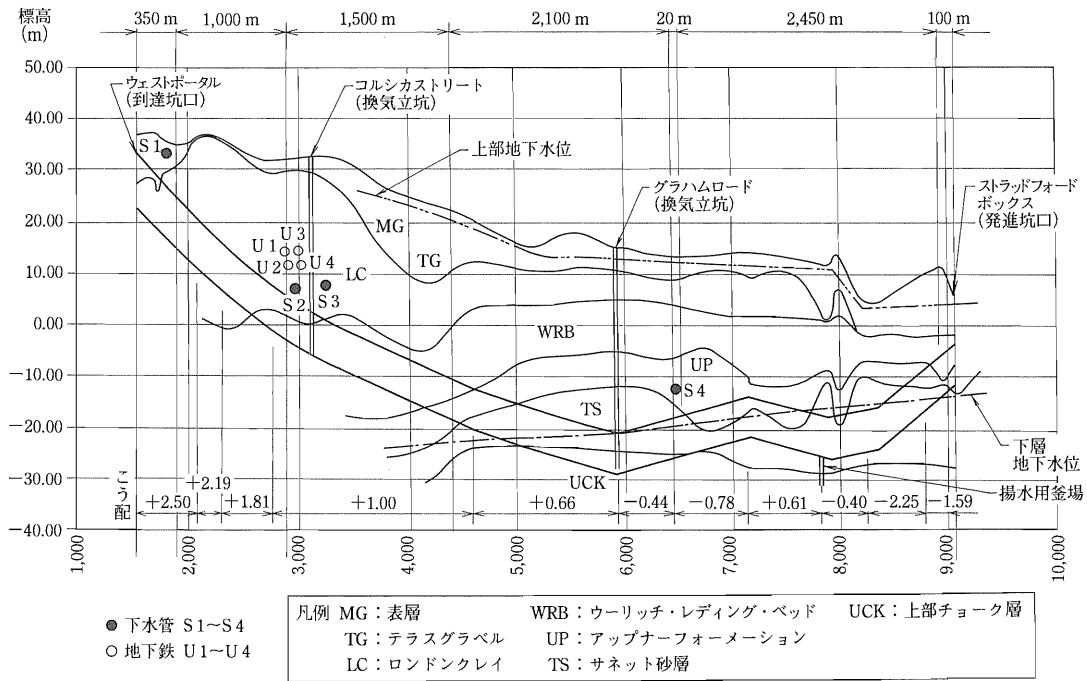


図-3 地質縦断面図

⑤ サネットサンド層

シルト質細砂で、 N 値 = 180, 透水係数 $l = 10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ m/s}$

⑥ チョーク層

チョーク自体の一軸圧縮強度は 3~8 MPa であるが、ブルヘッドと呼ばれる火打石が礫径 300 mm 程度で混じって出現する。

以上の地質縦断面図を図-3 に示す。

4. シールド掘進機

今回使用したシールド掘進機の主な仕様を以下に示す。

- ・マシン外径：8,110 mm
- ・カットトルク：5,723/11,456 kN・m
- ・カット回転数：2.5/1.25 r.p.m.
- ・カットモータ：250 kW 電動カットモータ 6 台
- ・シールドジャッキ推力：65,250 kN
- ・中折れジャッキ推力：32,000 kN
- ・中折れ角度：±1 度
- ・最小曲率半径：400 mR
- ・スクリュウコンベヤ型式：デュアルモード型オーガスクリュウ

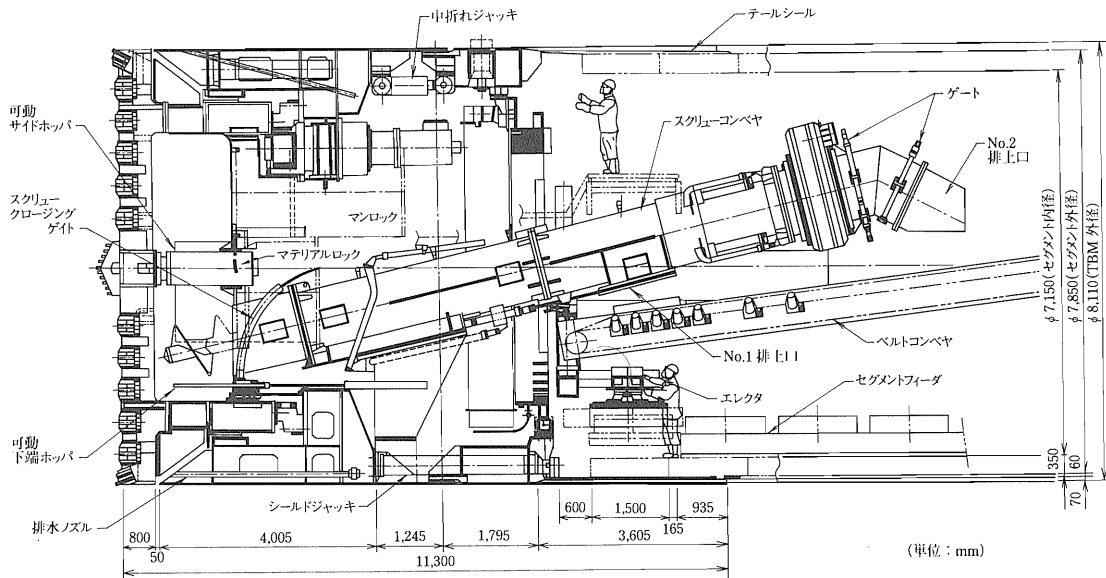


図-4 デュアルモード型シールド掘進機

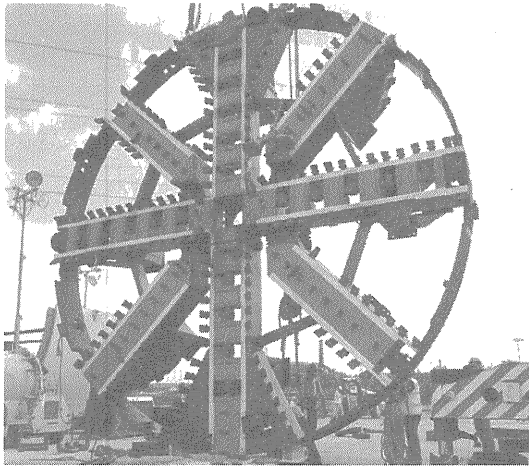


写真-1 組立て中のカットフェース

- スクリューコンベヤ
羽根外径：1,100 mm
 - スクリューコンベヤ
トルク：143/245 kN・m
 - スクリューコンベヤ
排土量：747/1,260/h
 - エレクタ型式：バキュームエレクタ
 - エレクタ回転数：0～2.0 r.p.m.
 - エレクタ伸縮ジャッキ推力：340 kN
 - 裏込注入方式：自動同時注入
 - 自動測量システム：レーザー付光波測距儀
 - セグメント供給システム：油圧式昇降摺動型
(参考)
 - セグメントタイプ：ファイバーコンクリート
 - セグメント分割数：10分割 (1ピース最大重量 3,200 kg)
- シールド掘進機の全体図を図-4に示す。また、組立て中の状況を写真-1に示す。

5. 長距離掘進

(1) 特殊装備

(a) カッタモータ

カッタモータ出力軸は通常片持ちで支持されるが、両端支持にし、耐久性を高めると共にカッタモータ本体の固定も前後2点固定とし、モータ自体の振れを極力抑える構造とした(写真-2)。

(b) カットトルク

全体の負荷率を下げる目的で最大トルクを11,456 kN・mと高く設定し、メインベアリングの長寿命化を図った。

(c) 縦型土砂シール

長距離の掘進に耐え得るよう縦型土砂シールを先端

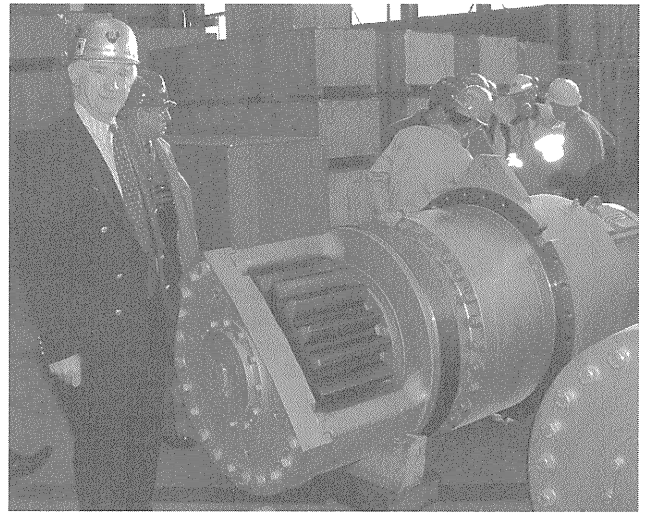


写真-2 カッタモータ

に装備し、水平土砂シールに直接土砂が触れぬようにし長寿命化を図った。

(d) 移動型水平土砂シール

掘進途中でシール当たり面が限界摩耗に達した際、シール取付け部を摩耗していない位置まで移動できるようにし、修理交換なしにできるものとした。

(e) 土砂シール当たり面モニタリング室

土砂シールと接している面の板厚を計測できるようにアクセスを設け、限界摩耗に達するまえに水平土砂シールを移動できるようにした。

(f) グリースサンプリング装置

土砂シール、メインベアリング、スクリュー土砂シール内のグリースを直接サンプリングし、分析にかけて異物の種類、大きさ、量を把握することで汚染の進行をモニタリングした。

(g) マンロック

切羽の状態が不安定でもチャンバ内を圧気していつでも切羽の確認ができるようにマンロックを設置し、地山の確認、カッタビット等の摩耗状況の確認ができるようにした(写真-3)。

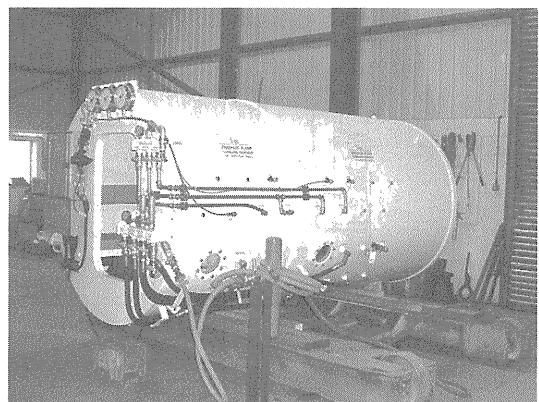


写真-3 2室型マンロック

(h) スクリューコンベヤ

スクリュー先端部の摩耗を抑える目的で、羽根外周およびケーシング内周に耐摩耗鋼板を取付けた。また、先端部のケーシングを二重構造とし、内側のケーシングが限界摩耗に達した際に交換できるものとした。

(2) 特殊装備の効果

(a) カッターモータ

ピニオンギヤおよびメインベアリングギヤの歯当たりを確認した結果、歯の当たり傷が一様であり、片当たりしていなかったことを確認した。これにより、ピニオンギヤの振れは生じなかったことが証明された。

(b) カッタートルク

全体平均の負荷率は、60%程度に抑えることができたため寿命としては十分であったが、実際の最大トルクはメーカサイドのインターロックで90%までしか有効でなかったため、最大トルク設定としては不足しており、満足できるものではなかった。

(c) 縦型土砂シール

4 km 掘進した時点でこの部分への土砂侵入が確認されたが、縦型土砂シールを先端に装備したことで水平土砂シールの摩耗を大幅に抑えることができたと評価する。現実には水平土砂シール部からは、土砂の侵入は認められず正常であった。

(d) 移動型水平土砂シール

摩耗が少なく、移動することは無かったが、より長距離になった場合には有効であると考えられる。

(e) 土砂シール当たり面モニタリング室

直接摩耗量を確認できたため、安心して掘削することができた。

(f) グリースサンプリング装置

定期的な分析で汚染度合を把握し、場合によっては機械の休止中でも給脂したりすることでグリースを常にクリーンな状態に維持することができた。これも、シール、ベアリング等を一度も交換することがなかった理由のひとつと評価する。

(g) マンロック

進捗が急変したりした際にすぐに切羽の点検が行なえた。一度カッタスポークが摩耗したことがあったが、大事に至らず短期で修理することができた。カッターツールの摩耗管理、地山の確認がすぐにできるのは進行を維持するためにも重要である。

(h) スクリューコンベヤ

実際に摩耗に対して補修したのは、二つの中間換気立坑で行なっただけであるが、最初のグラハムロード換気立坑は、発進から3.2 km 地点で、ここでの摩耗

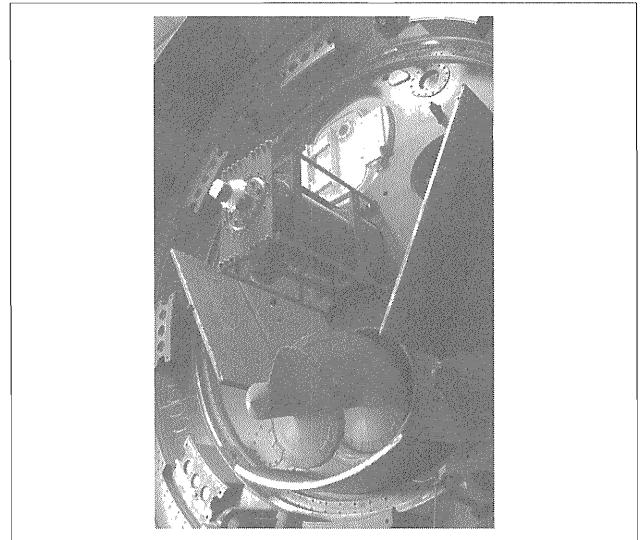
は羽根側ですでに30 mmに達しており耐摩耗鋼板が無くなっていた。この間では地上構造物（鉄道、民家、河川等）への影響範囲下で長期停止できない状況にあり途中で補修できなかったこともあるが、補修する時期としては遅すぎたと言え、より耐久性のあるものが要求される。

6. 高速施工

(1) 特殊装備

(a) デュアルモードシールド

切羽が自立する場合にはオープンモード（土圧を立てずに掘進）、自立しない場合にはクローズモード（土圧を立てて掘進）と両方の掘進が可能ないようにスクリューオーガを前後にスライドできるようにし、さらにチャンバにホッププレートが出し入れできる構造とした（写真—4）。オープンモードでの掘進によるスピードアップ化を目的とした。



写真—4 デュアルモードシールド

(b) 高速回転カッター

カッター回転数を高速時2.5 r. p. m.（周速64 m/min）、低速時1.25 r. p. m.（周速32 m/min）と速くすることでカッターの地山に対する切込み深さを浅くし、カッタートルクの上昇を抑えるために設定した。

(c) スクリューコンベヤ

高速掘進速度を最大100 mm/minに設定し、排土量Max. 1,260/hと大容量を装備した。

(d) エレクタ

バキュームエレクタを採用し、1リング（10ピース）の組立て時間を25分と想定した。

(e) 加泥材注入装置

ポリマー注入装置およびフォーム注入装置を使い分けることで各地質に対応させた。

(f) セグメント供給装置

上記セグメント組立て時間を確保するため油圧式セグメントフィーダを設置した。10 ピースが並ぶ長さにし、待ち時間の無いようにした。

(g) トンネル連続ベルトコンベヤ

サイクルタイムを最小限にすべく、ブースタ無しの連続ベルトコンベヤを採用した。

(h) トンネル換気ファン

段取替えによるロスタイムを無くすため、ブースタ無しの大容量換気ファンを採用した。

(2) 特殊装置の効果

(a) デュアルモードシールド

オープンモードを使用できたのは当初の計画区間 5,550 m に対し 150 m 区間のみであったが、実際には土砂をチャンバに半分以上溜めて掘進したため、ホッププレートを使用することなくスクリュウオーガのみ前に出して掘進した結果、最大 95 mm/min で掘進できた。計画区間が変更になったのは、予想以上に地山が悪かったため地上への影響を考慮したからである。

(b) 高速回転カタ

カッタトルクが全体平均で 60% であったことは事実であるが、加泥材の影響もあるので一概に効果があったとは言えない。

(c) スクリュウコンベヤ

現実的には、掘進スピードが 95 mm/min の時でも排土量は許容値の 30% であったことからすると過剰装備であったと言える。これは、設計上の充填率、地山フケ率等の係数が実際と合致しなかった結果である。

(d) エレクタ

実際の組立て時間は、最短で 15 分、平均 25 分であったので非常に有効であったと判断する。

(e) 加泥材注入装置

発進前に事前の実験結果から各地質に最も効果的である使用方法を確立していたので、採用にあたり迷うことはなかった。ただし、フォーム発生装置の不調で掘削に大きく影響した。洗練された装置が必要である。

(f) セグメント供給装置

荷振れも無く安全にまた傷つけたりすること無く確実に供給できるので、ロスタイムが無く有効であった。

(g) トンネル連続ベルトコンベヤ

ずり出しがサイクルタイムに影響することなく長距離、急速施工には最適である。特にメインドライブユニットを立坑に設置しただけで済んだので段取替えも

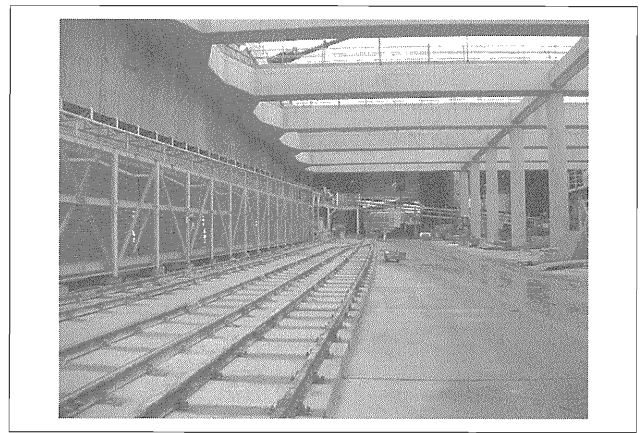


写真-5 トンネル連続ベルトコンベヤドライブユニット

なく、ベルト延長のみにて施工できた。今後の問題点は、メインドライブユニットを設置するスペースが 70 m 必要なことと、トンネル線形の最小曲率半径がどこまで可能かということである（写真-5）。

(h) トンネル換気ファン

7.5 km の長距離をブースタドライブなしで換気するには、

- ・大容量換気ファンを選定できること
- ・ダクト外径を最大限にとること、
- ・高圧に耐え得るダクトであること、
- ・摩擦抵抗の少ないダクトであること、

が条件であるが、ヨーロッパ市場にはこれらの要求を満たすものが日本に比べるとはるかに多いことで可能となった。

7. 掘進実績

今回上り線での掘進実績を下記に示す。

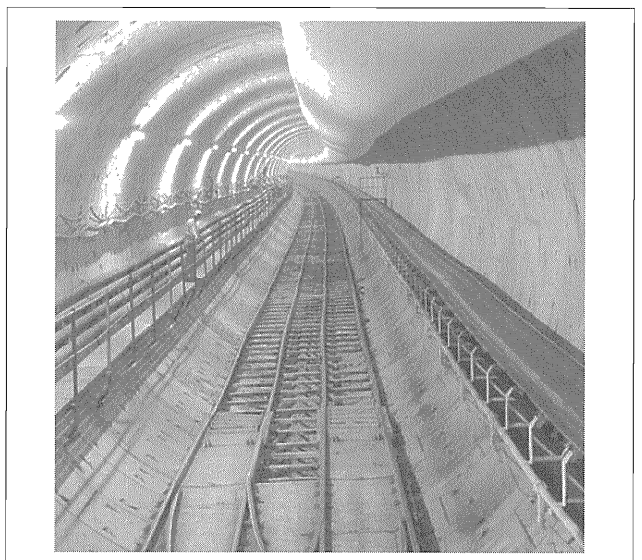


写真-6 トンネル坑内

- ・期間：2002年9月19日～2004年1月23日
 - ・掘進暦日数：500日
 - ・実作業日数：464日
 - ・掘進機稼働日数：360日
 - ・最大日進長：55.5m/日
 - ・最大月進長：919.5m/月
 - ・平均日進長：21m/日
 - ・平均月進長：465m/月
- 稼働中のトンネル坑内を写真—6に示す。

8. おわりに

今回の実績は、特殊装備、各種モニタリングの成果、的確なメンテナンスと最新の機械設備を導入するこ

とで成し得たが、企業先の協力・理解もあり、その設備費にも多大な投資をしていることも見逃せない。長距離、高速施工は可能であるが、計画時にこれらの設備費用、特に大容量設備の設置場所またその費用を十分検討することが肝要であり、今後の課題と言える。

最後にJVトンネル委員会の皆様には多大なご指導、ご検討を賜り心より厚く御礼申し上げます。 JCMMA

【筆者紹介】

宇津木 薫（うつぎ かおる）
西松建設株式会社
ロンドントンネルCTRL C 220 工区
副所長



建設工事に伴う 騒音振動対策ハンドブック

「特定建設作業に伴って発生する騒音の規制に関する基準」（環境庁告示）が平成8年度に改正され、平成11年6月からは環境影響評価法が施工されている。環境騒音については、その評価手法に等価騒音レベルが採用されることになった等、騒音振動に関する法制度・基準が大幅に変更されている。さらに、建設機械の低騒音化・低振動化技術の進展も著しく、建設工事に伴う騒音振動等に関する周辺環境が大きく変わってきている。建設工事における環境の保全と、円滑な工事の施工が図られることを念頭に各界の専門家委員の方々により編纂し出版した。本書は環境問題に携わる建設技術者にとっては必携の書です。

■掲載内容：

- 総論（建設工事と公害、現行法令、調査・予測と対策の基本、現地調査）
- 各論（土木、コンクリート工、シールド・推進工、運搬工、塗装工、地盤処理工、岩石掘削工、鋼構造物工、仮設工、基礎工、構造物とりこわし工、定置機械（空気圧縮機、動発電機）、土留工、トンネル工）
- 付録 低騒音型・低振動型建設機械の指定に関する規程、建設機械の騒音及び振動の測定値の測定方法、建設機械の騒音及び振動の測定値の測定方法の解説、環境騒音の表示・測定方法（JIS Z 8731）、振動レベル測定方法（JIS Z 8735）

■体 裁：B5判、340頁、表紙上製

■定 価：会 員 5,880円（本体5,600円） 送料 600円

非会員 6,300円（本体6,000円） 送料 600円

・「会員」 本協会の本部、支部全員及び官公庁、学校等公的機関

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8（機械振興会館） Tel. 03(3433)1501 Fax. 03(3432)0289