

シールド掘進統合化システムの開発 —統合化システムの運用実績から—

杉本 英樹* 山野井 章**

要 旨

シールド工事は、掘進、資機材およびセグメント搬送、セグメント組立等の施工サイクルに合わせ多くの機械設備が連携動作する。近年の工事は大型化、長距離化の傾向にあり、これらの連携動作する機械設備の稼働バランスを図るための管理と、的確に制御する技術が重要となっている。当社ではここ数年にわたり、こうした工事を「安全に高速に」施工する技術として、「シールド掘進統合化システム」（以下、統合化システム）を開発推進してきた。

本報では、この統合化システムのうち「テールクリアランス管理装置」「セグメント自動搬送」「坑内映像無線伝送」についてその導入結果を報告する。報告の内容は下記のとおりである。

- ①当社開発の「テールクリアランス計測装置」を導入した現場では、掘進中の連続したテールクリアランス管理が実現でき、掘進終了時のシールド機とセグメントの位置関係を考慮しながらの姿勢制御（ジャッキパターン選択）が可能となった。このテールクリアランス計測装置による計測値をF分布を用いて検定し従来の計測方法による実測値と分布の分散が同様であることを確認した。
- ②セグメント自動搬送装置を導入したことにより施工サイクルが安定し省人化が図られた。
- ③S S無線映像伝送を組合せた映像監視システムをシールド坑内に導入したことにより統合化システムが充実できた。

1. まえがき

一般にプラント設備など少人数で多くの機械設備を稼働させる場合、その操作盤を一元集中化させた監視室で運転を行う。今後シールド工事の長大化が予想されており、全体の施工管理、把握のためにもこうした一元集中化が望まれる。ここで、一元集中化を進める上で重要なポイントを以下にまとめる。

①全設備の運転制御にバランスがとれており、掘削する地山の変化に即応できる。

②連携動作する稼働設備の運転、制御の状況と過程情報の的確なオペレータへの伝達ができる。

③オペレータにとって即応的な認識と総合的な判断が容易である。

「シールド掘進統合化システム」の開発は、これらをコンセプトにおき、これまで“シールド機掘進の自動化”というテーマのもとで実用化してきた開発技術に遠隔制御や遠隔監視を加え統合化したものである。この統合化システムを96年4月より東京ガス横浜幹線共同工事区間シールド工事（以下、横浜幹線シールド工事）に導入・運用を行った。横浜幹線シールド工事は施工延長2.913kmの長距離工事であるとともに、国内で初めて“ほぞ付きセグメント”が採

用された工事である。導入したシステムの概要は昨年すでに報告した¹⁾。図-1に統合化システム構成概念図を示す。本報では、この統合化システムの中から、以下の実績について述べる。

- ①テールクリアランス計測装置の手動データ計測との比較と考察
- ②セグメント自動搬送の導入と搬送サイクル
- ③移動映像無線伝送の導入と実績データおよび今後の展開

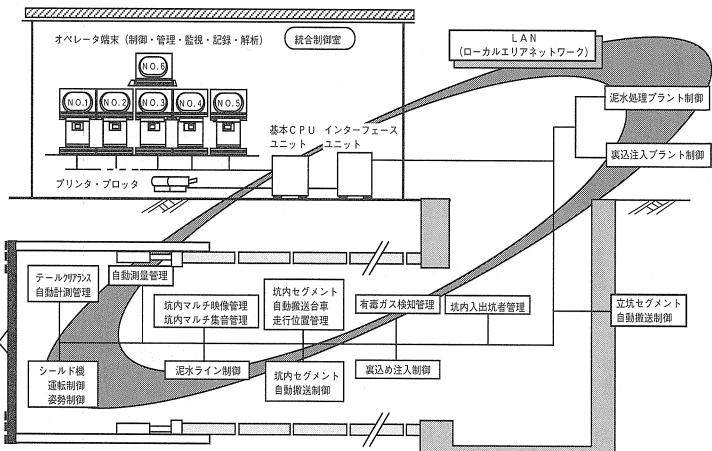


図-1 システム構成概念図

*技術研究所 **南九州支店

2. テールクリアランス計測

2. 1 テールクリアランス計の開発

セグメント組立において、

テールクリアランスの適正なバランスの保持管理はピース間およびリング間の目違い、目開き防止の上で重要なポイントとなる。92年度より開発に着手したテールクリアランス計は、スキンプレート埋込み型（以下、埋込み型）とスプレッダへの併設型（以下、取付型）の2つのタイプがありいずれも実現場へ導入、運用実績を上げている。

両タイプとも、掘進中連続したクリアランス管理が可能で、掘進終了後に組立てるセグメントの割付けや、施工線形に対して適当なジャッキパターン選択を支援する。

2つのタイプのうちいずれか一方のタイプのみでも、両タイプ併用でも導入可能である。横浜幹線シールド工事では、取付型テールクリアランス計を導入した。テールクリアランス計の設置は、シールド機の対角する位置、4カ所に取付けることを標準としている。今回は12時（上）、4時（右）、8時（左）位置へ設置した。

2. 2 従来の実測値と装置計測値の比較

テールクリアランス計測装置導入の結果、掘進中のテールクリアランスの推移を把握できるため、施工線形や掘進後組立てるセグメントのテーパー量等を考慮したシールドジャッキパターン選択に有効に活用できた。

導入に際して手動計測での測定値（以下、実測値）とテールクリアランス計測装置での測定値（以下、計測値）の比較を直線施工区間で行った。各々の測定値の推移を図-2～4に示す。両者のデータ比較は、ジャッキストローク値400mm、1000mm、1600mmごとに実施した。測定値を比較対照すると、両データの差

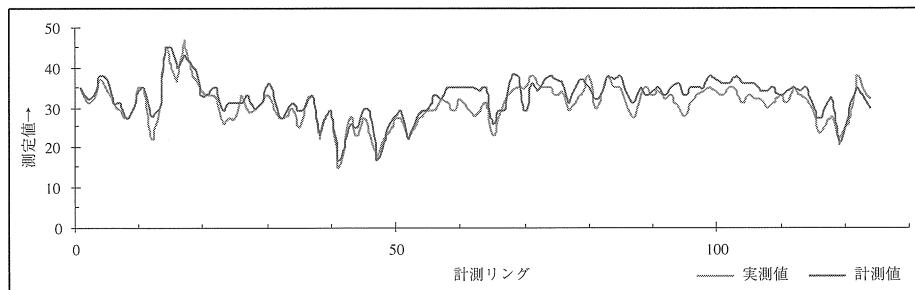


図-2 実測値と計測値との比較（上）

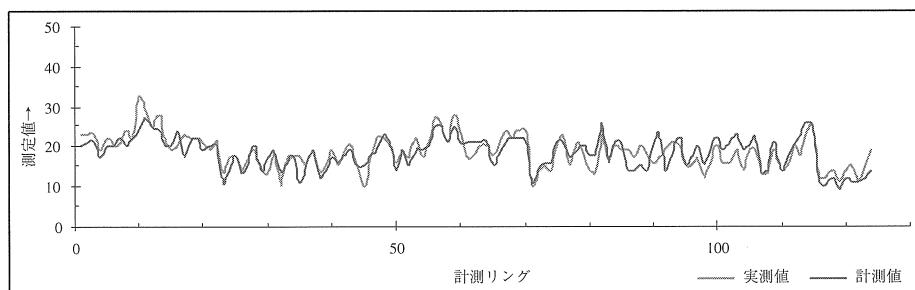


図-3 実測値と計測値との比較（左）

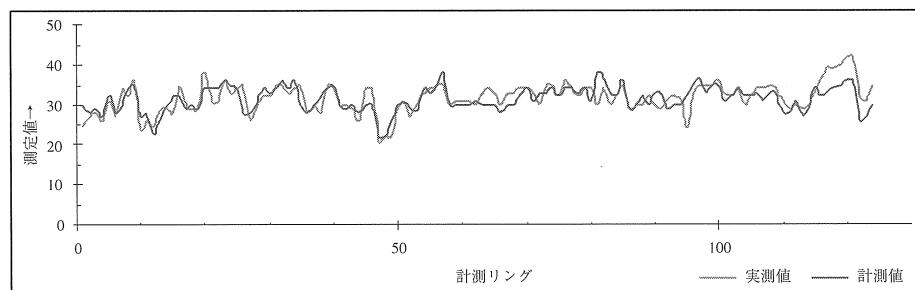


図-4 実測値と計測値との比較（右）

は概ね数ミリ以内におさまっていた。実測値と計測値各々の統計的な算出値を表-1に示す。結果をみると平均値の差が0.4mm、最大値の差が2.0mm、最小値の差が1.0mm、標準偏差の差が0.209mmである。ほぼ、同様の測定結果であり、運用に関して問題ないように見えるが、実測値と計測値は全く違う誤差要因を持つため単純に統計的な算出値の比較により両者は同じ測定結果であると結論づけるには不十分である。両者の測定値のバラツキ方（以下、分散）が同程度の場合にのみ統計で得られる算出値が意味をもつ。したがって、次に分散の比に関する検定を行った。

表-1 統計による算出値

	実測値	計測値
最大値	47.0	45.0
最小値	10.0	9.0
平均値 μ	27.0	27.4
個数n	372	372
不偏分散V	55.13135	58.27953
標準偏差 ρ	7.425	7.634

2.3 実測値と計測値の統計的比較

一般的に、2つの正規母集団からそれぞれn1,n2の試料を抜取り、不偏分散V1,V2を計算して、これから2つの母集団の母分散に違いがないかを検定するには、「母分散が $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ で、かつそれぞれの不偏分散がV1,V2のとき $F_0 = V_1/V_2$ はF分布をする」²⁾という事を利用して行う。

計測値と実測値が正規分布に従うことを確認する。次の確率密度関数f(x)用いて分布図を作成すると図-5の様になる。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x-\mu)^2}$$

ここに、
 μ ：平均値
 σ ：標準偏差
 e ：自然底

計測値、実測値ともに正規分布に従うので以下、F分布検定を行った。ここで、「計測値と実測値の分布の分散は同様である。すなわち $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ 」という仮説H0をたてる。

すると、

$$\text{分散比 } F_0 = \text{計測値の不偏分散} / \text{実測値の不偏分散} \\ = 58.27953 / 55.13135 = 1.0571$$

となり、仮説H0のもとで自由度対[372-1,372-1]のF分布に従うことになる。有意水準を0.10として、F分布の0.05(=0.10/2)点をF分布表(5%)より補間して求める。

$$F_{371}^{371}(0.05) = 1.095$$

$$F_{371}^{371}(0.95) = 1 / F_{371}^{371}(0.05) = 1 / 1.095 = 0.913$$

したがって、有意水準0.10の棄却域は $\{F \mid F > 1.095 \text{ または } F < 0.913\}$ となる。よって、さきに求めた実測値と計測値の分布の分散比 F_0 はこの棄却域にははいらず、仮説H0は有意水準0.10で棄てられない結果となる。計

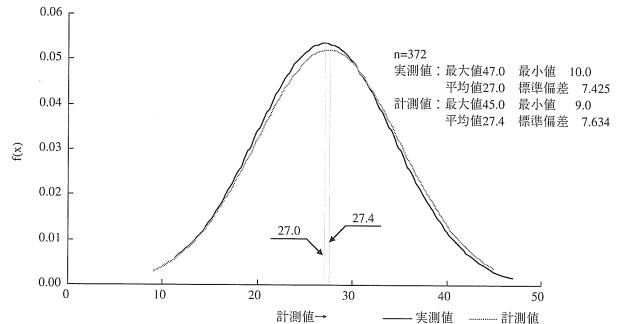


図-5 計測値と実測値の確率密度

測値と実測値の分布の分散は同様であるといえる。よって、統計的な算出値の比較により、実測値と計測値に差異はないと考察できる。

2.4 運用環境への適応

テールクリアランス計の測定部には直線式ポテンショメータを採用した。この最大の利点は抵抗値を計測せず、抵抗値の比率を電圧として出力するため温度変化での誤差、バラツキは発生しない。したがって、3台のテールクリアランス計測装置の内1台が洗浄水などを浴びて他の2台と温度差が発生しても測定したデータの誤差には影響しない。

また、取付型のテールクリアランス計測装置は切羽にあるため、裏込注入での洗浄水やグリスなどの油脂類などが混在した濁水を浴びる。このため、実際のシールド工事の切羽で採取した濁水中での動作確認を数千回行い、計測値および動作に異常のないことを確認している。

横浜幹線シールド工事では延べ10ヵ月間使用しているが、長い休止期間明けの摺動部メンテナンスを除き、計測装置本体の異常による修理・取替えなどは行っていない。写真-1に到達3週間前のテールクリアランス計測装置の設置状況を示す。

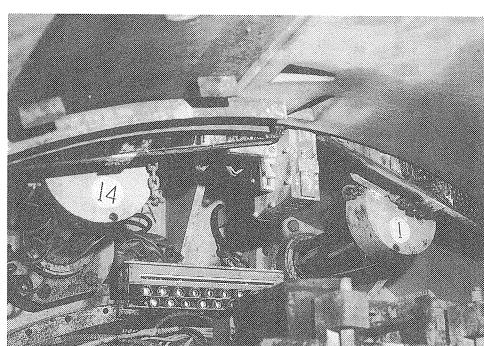


写真-1 テールクリアランス計測装置設置状況

3. セグメント自動搬送

横浜幹線シールド工事は発進立坑深さは約30m、施工延長2.9kmにおよぶ。したがって、立坑での上下作業時の安全確保、荷降ろしの際のクレーン操作や坑内搬送台車の専従オペレータの省人化を目的として、セグメント搬送システムを導入した。本システムは、ストックヤードから立坑下の自走台車にセグメントを積込むまでの「立坑搬送」と立坑下から切羽までの「坑内搬送」を無人化、自動化しており、統合監視室から遠隔制御する。

3. 1 セグメント立坑搬送装置

セグメント立坑搬送装置の搬送機搬送経路は、ストックヤードから立坑下の坑内自走台車へ移載するまでである。立坑上の水平部が⁹.4m、立坑垂直部（曲線部を含む）が25m、立坑下の水平部が4.7mあり全長39.1mである。この搬送路において1リング分のセグメントを搬送し2両編成の坑内自走台車へ3ピースずつ振分けて積載するまでの所要時間は5分程度である。

主な仕様はつぎのとおり。

搬送速度 : 20m/min

搬送重量 : 6トン

搬送線形は現場状況に適応した設計が可能で、複層構造の立坑へも対応できる。立坑搬送装置の手動での運転操作では、法的に6トンのテルハクレーンと同様の扱いとなり運転にクレーン運転士の免許を要する。

主な非常停止は、次の項目の検知および状況下で動作する。

- ①オーバーラン検知
- ②過速度、加熱検知
- ③ブレーキ駆動など走行系の異常
- ④セグメントの掴み具合の異常
- ⑤移載ピース数、旋回、掴み部開閉などの動作異常
- ⑥移載エリアの安全柵扉が開放される。
- ⑦統合制御室および立坑上下の非常停止釦を押す。

写真-2に立坑セグメント搬送状況を、図-6に立坑搬送装置断面図を示す。

3. 2 セグメント坑内搬送装置

坑内自走台車の自動運転区間は立坑から後続台車後方に設けた停止位置までである。後続台車後方の停止位置から切羽の積降ろし装置までは、人間が無線機にて走行させる。1列車2両編成で2列車で運行する。主な仕様はつぎのとおり。

走行速度 : 6km/h (通常)
2km/h (急曲線部(R=30m))

最大積載重量 : 3.5トン (1両あたり)

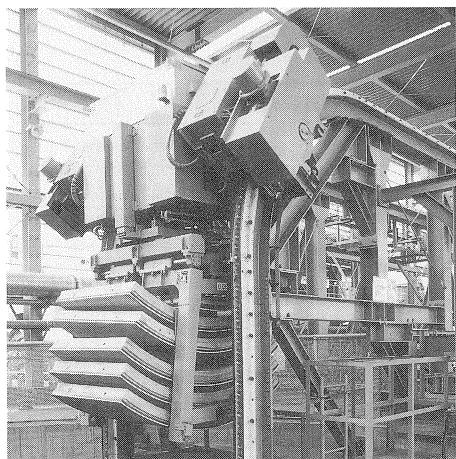


写真-2 立坑セグメント搬送状況

線路は単線で坑口から1,500m付近に設置された行違い設備にて2列車の台車がすれ違いを行う。行違い設備を境とし切羽側と立坑側にそれぞれ1列車が走行している。この搬送システムは誘導無線で発進、停止、すれ違い、現在位置の信号の送受信を行う。行違い設備での衝突防止の制御は次のように行っている。

1号車が坑口、2号車が切羽より走行してきた場合

- ①坑口からきた1号機台車が行違い設備内進入予定線路上に2号機台車がないことを確認後、行違い設備に進入し停止する。
- ②切羽からきた2号機台車も行違い設備進入予定線路上に1号機台車がないことを確認後、行違い設備に進入し停止する。
- ③ここで、1号機台車2号機台車ともにお互いに、相手の列車が行違い設備に停止していることを確認し再び走行を開始する。

主な非常停止は、立坑搬送装置と同様にある走行異常等の検知に加え、光電式センサーおよび対物バンパー作動による走行線路上の障害物検知や台車上の非常停止釦により行われる。写真-3に坑内自走台車走行状況を示す。

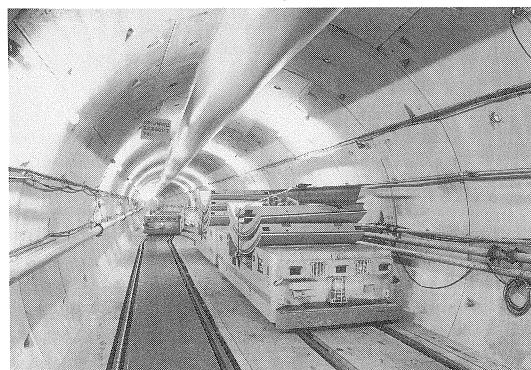
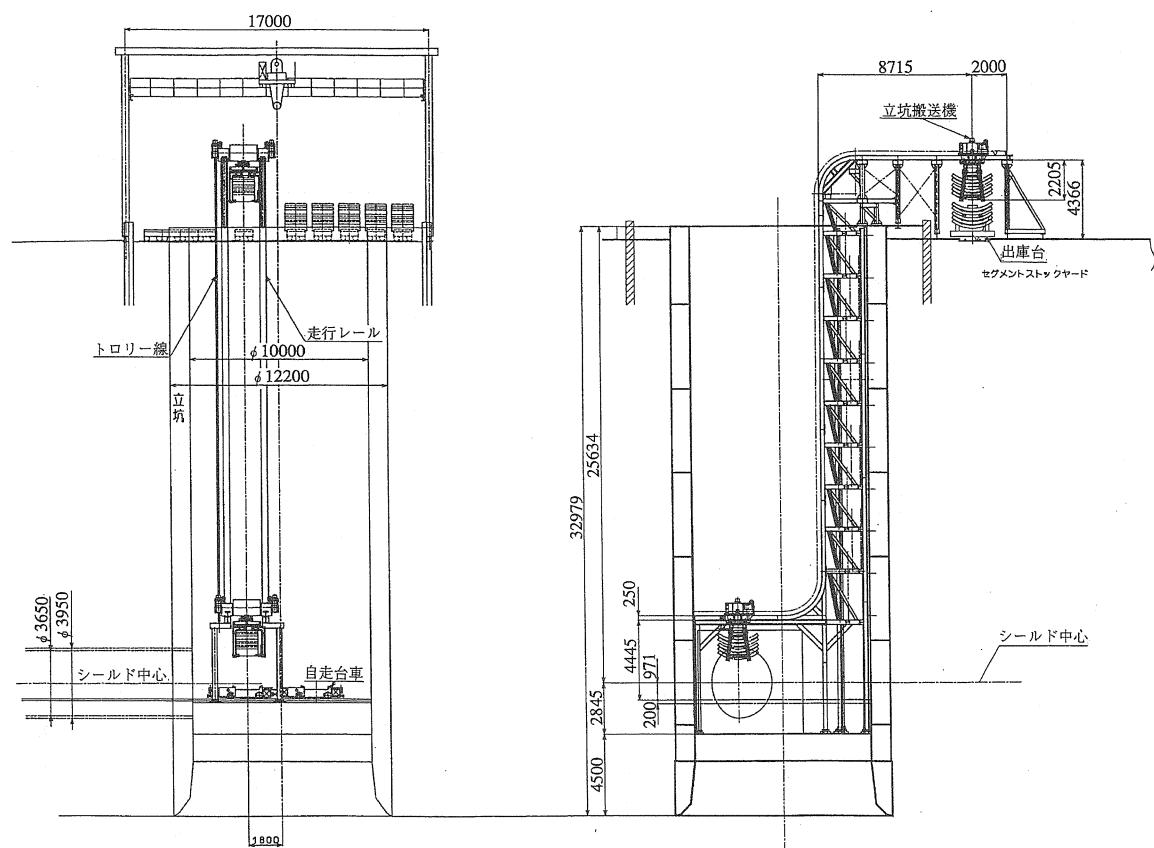


写真-3 坑内自走台車走行状況



図一6 立坑搬送装置断面図

サイクルタイム (分)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
1号台車													
1) セグメント積込み													
2) 行違い設備へ走行													
3) 行違い設備で待機													
4) 切羽停止位置へ走行													
5) 切羽停止位置で待機													
6) セグメント降ろし													
7) 坑口へ走行													
2号台車													
1) セグメント積込み													
2) 行違い設備へ走行													
3) 行違い設備で待機													
4) 切羽停止位置へ走行													
5) 切羽停止位置で待機													
6) セグメント降ろし													
7) 坑口へ走行													

図一7 セグメント搬送サイクル

3. 3 搬送サイクル

掘進延長2.5km付近での実際のセグメント搬送とシールド機掘進のサイクルタイムを図-7に示す。行違い設備での待機時間が20分、切羽停止位置での待機時間が15分あるが、後続台車後方の停止位置での配管、資機材の積降ろしの時間（約25分間）も含まれている。よって、掘進延長2.5km付近でトータルの停止時間が10分となる。これらのデータから3km掘進時のサイクルタイムを想定すると、切羽での余裕時間は5分であり、この2列車でのシステムでの施工は可能であることがわかる。

4. 映像監視システム

4. 1 坑内マルチ画面監視

横浜幹線シールド工事では施工エリアが長大化するため、多角的な自動化を採用し集中制御を行った。この場合、実際行われている作業状況の確認が極めて大切になる。このため、作業上のキーポイントとなる場所の映像と音声を同時に収集し、監視できる映像システムを導入した。種々の機械設備が連携し施工されていく掘進作業状況をオペレータの五感にてとらえることができ、より迅速で的確な判断・指示を可能としている。

本システムには以下の特徴がある。

- ①一本の映像ネットワーク上に複数のカメラおよびマイクをつなげることができるために、ケーブルの延長および養生作業の簡素化が図られる。
- ②監視場所の変更は、ネットワーク幹線付近の別の場所にカメラおよびマイクを移設接続するだけでおこなえる。
- ③音声も同時に伝送可能である。

これにより、複数のケーブル延長もしくは養生作業の煩雑さは解消され、時間をかけることなく自由に監視位置へのカメラ設置、変更を行うことができた。

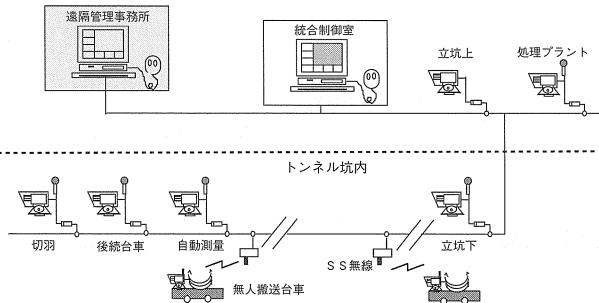


図-8 マルチ映像・集音管理装置概念図

図-8にマルチ映像・集音管理装置概念図を示す。横浜幹線シールド工事では6台のカメラを設置した。設置場所を表-2に示す。

表-2 カメラ設置場所と監視内容

カメラ番号	設置場所	監視内容
カメラ1	セグメントヤード	セグメント搬入状況モニタ 作業基地内モニタ
カメラ2	立坑下	立坑搬送装置から自走台車 への移載状況
カメラ3	坑内行違い設備	坑内自走台車のすれ違い状況
カメラ4	切羽	シールド機掘進時の監視 セグメント組立状況
カメラ5	No.2坑内自走台車	自走台車走行状況監視
カメラ6	自動測量装置 トータルステーション	ターゲット規準状況

このうちカメラ5は坑内走行台車に積載され、移動中の台車前方映像を無線送信する。この無線映像はネットワークラインに繋がれた中継局で受信し、統合制御室まで伝送される。この映像は切羽以外のトンネル坑内での作業状況、人員配置などの確認もできる。また、統合制御室にマイクを、自走台車にスピーカを取り付け注意喚起するといったことや、台車に取付けた機械装置の計測・制御などが可能である。横浜幹線シールド工事では、シールド機後方台車にSS映像無線受信器を設置し、切羽より坑口側約500mまでの区間の映像伝送を行った。

写真-4に統合制御室に設置した21インチ監視CRTの表示例を示す。操作は、画面の右端および下に小さく並べて表示されている静止画面のうち、任意の画面をマウスでクリックすれば右上側の13インチ相当の動画に表示場所が切替り当該場所の音声がモニタされる。さらに、この画面をクリックするとフルスクリーンでの動画表示が可能である。



写真-4 映像監視モニタ

4. 2 移動映像無線伝送

4. 2. 1 映像無線伝送装置の選定

これまで、トンネル坑内における無線伝送は、電界強度の減衰が大きいため長距離通信が難しく運用性が悪いと言われてきた。しかし、坑内自走台車や高度化した各種自動化設備の導入により、坑内無線技術のレベルアップが望まれている。当社では、こうしたニーズに対応できそうな無線装置としてS S映像に着目し数年前から調査・実験を進めてきた。この実験の課題は以下のようなものであった。

①坑内のどれくらいの距離まで安定した映像が送受信可能か？

②無線伝送距離が長くなり映像受信レベルが低下もしくは途絶えたときの受信器の処理はどうか？

③坑内に設置したトランスや中継ポンプ、その他機械設備の影響はないか？

実験を進めた結果、小口径シールドの現場（スチールセグメント施工区間内径；φ2,700mm）の曲線を含んだ約400mの区間で安定した映像伝送が行えることを確認でき、運用性が比較的良好な無線伝送装置を見いだすことができた。また、この装置の特徴として、短時間の受信エラーに関してこれを一時的に補完する機能を持っており、この機能が本映像伝送にとってある程度有効であることも確認できた。本S S無線の仕様を表-3に示す。

表-3 映像無線伝送装置仕様

電波形式	スペクトラム拡散方式
搬送波周波数帯域	2,471 ~ 2,497MHz(2.4GHz ISM BAND)
空中線電力	10mW/MHz以下
データ伝送速度	256Kbps
伝送距離	1Km(見通し距離)
画像圧縮方法	独自方式
伝送プロトコル	独自方式
伝送画面数	毎秒2画面（最大解像度時）～20画面
画面選択	フル画面 320×240 小画面 280×200
解像度選択	10段階設定
映像入出力信号	NTSC 1Vp-p/75Ω

4. 2. 2 横浜幹線シールド工事現場への導入

本S S無線装置の導入に当たり、横浜幹線シールド工事にて次のような実験結果を得ることができた。実験調査した区間のトンネル概要を表-4に示す。

(1) 伝送距離確認の実験

坑内自走台車にCCDカメラおよびS S無線伝送装

表-4 実験調査した区間のトンネル概要

セグメント内径		3650mm
走行区間		R240～R970
施工線形	曲線(曲率R=50)	269R～285R
	直線	286R～308R
	曲線(曲率R=30)	309R～372R
	直線	373R～381R
	曲線(曲率R=200)	382R～399R
	直線	400R～411R
	曲線(曲率R=200)	412R～430R
	直線	431R～442R
設置位置	曲線(曲率R=400)	443R～929R
	受信器	930R～970R
	P9中継ポンプ	487R
	トランス(3k/400V)	630R付近
P8中継ポンプ		885R付近
		935R付近

置送信機を積載して坑内を走行させ伝送距離を確認した。受信器は487リングに設置して、受信される映像をビデオデッキにて収録し、1秒間に受信できたフレーム数をカウントした。

①380～910リング間の約640mにおいて毎秒1.5～2.3フレームの映像受信が確認できた。

②240～380リング間の区間と910～970リング間の区間において毎秒約1フレームの映像受信が確認できた。

(2) 使用環境から受ける影響調査の実験

表-4にあるとおりトンネル坑内には中継ポンプや降圧トランスといった障害物、ノイズ発生源が設備されている。これら機械設備の前後約10リング（距離約12m）の映像データを前項（1）伝送距離確認の実験で収録したビデオ映像より解析すると表-5の結果となり、障害物の影響は監視上問題ないことを確認することができた。

表-5 坑内機械設備周辺での受信フレーム数

機械設備名称	走行時間(sec)	受信フレーム数(フレーム)	時間当り受信フレーム数
P9中継ポンプ	2.2	46	2.1
降圧トランス	3.1	31	1.7
P8中継ポンプ	3.7	37	1.8

以上の実験より、映像監視装置として有効とされる区間距離が約700mあり、坑内に設置した機械設備の影響もないことが確認された。

さらに、実用面での問題として受信器が映像を受信できない場合、監視CRT上では最後に受信できた画

像が表示され続けるが、これでは坑内自走台車が停止しているのか映像が途絶えたのか判断がつかない。したがって、解決策として次のような機能強化を行った。

- ①受信器から統合監視室に伝送される映像データが更新されていない場合、映像受信異常と判断し該当モニタ画面エリアを黒く塗りつぶす。
- ②自走台車に積込んだカメラレンズの前に発光ダイオードを装備し停止中はこの発光ダイオードを点滅させる。

現在、トンネル全体での映像伝送を行うべく、受信局の多局化について取組んでいる。また、振動、温度、湿度、粉塵など運用環境についての適正も調査中であり、今後も、こうした無線装置の調査、実証実験を行っていきたい。調査の対象は、長距離伝送、小型化、フィールドへの適応性とコストである。

5.まとめ

(1) テールクリアランス計

当社開発のテールクリアランス計測装置の計測結果と従来の実測作業との結果を比較した結果、測定方法に差異はなく、人為的な誤差がないため信頼性も高いことが検証できた。実際のシールド工事で10カ月間使用し、切羽の濁水を浴びる作業環境であっても十分耐久性があることが実証できた。

(2) セグメント自動搬送

①立坑セグメント搬送

深さ約30m立坑でのセグメント搬入作業において吊荷の動搖がなく上下作業での安全が確保されクレーンの操作員が省人化された。

②坑内セグメント搬送

自動運転のため坑内搬送台車のオペレータ2人を省人化できた。

③施工サイクル

台車2編成の自動運転のため、切羽へのセグメント搬入が計画的に行われ、全体の施工サイクルの安定に寄与できた。

(3) 映像監視システム

①坑内マルチ監視画面

統合監視室のコンソールにデジタル表示される機械設備の稼働状況に、映像と音を加えたことによって、現場作業状況の詳細が把握できた。

②移動映像無線伝送

坑内自走台車に取付けたCCDカメラの映像を無線伝送し、台車前進方向の視界による、人員配置、作業状況を統合監視室で監視できた。

6.あとがき

横浜幹線シールド工事の発進当初は現場職員、関係部署一丸となり、ほど付きセグメントの掘進・組立など施工方法の確立に向けて全力で取組んだ。この期間中は日進1~2リングと出来高は低迷していたが、その後、ほど付きセグメントに関しての課題を徐々に解決しながら順調に出来高をのばし、その結果、当初計画を約1.5カ月短縮して到達することができた。導入した統合化システムはその過程において、リアルタイムで欠落のない詳細情報が得られるため、様々な課題解決に大きく貢献できたと確信する。また、ワンマンコントロールは長大トンネルの施工になるほど、その有効性が増すことも検証できた。これらの開発・導入・問題解決にあたり、多大なご指導頂いた関係各位に対し深く感謝の意を表し、今後さらなるご支援、ご協力を紙面を借りてお願いするものであります。

参考文献

- 1) 植田勝紀・杉本英樹・山野井章・石関潤一：シールド掘進統合化システムの開発、五洋建設技術研究所年報、Vol.26、pp.59-66、1996
- 2) 藤代侑宏：ステップ式による統計的方法(全訂版)、pp.135-145、pp.193-194、1987