

ベルトコンベア搬送土砂の 土砂量（体積・重量・比重）計測装置の開発

植田 勝紀 *小崎 正弘

要 旨

土木工事において、ベルトコンベアを用いて大量の土砂を搬送することが極めて多い。これまでの、大量土砂を扱う場合の土砂量管理手法として、ベルトスケール等による重量計測管理がよく採用されてきた。しかし、土砂の体積は地山の掘削あるいは搬送中の状況によって相当量の変化を伴い、重量管理だけでは不十分なケースが多々発生する。こうした理由から、土砂の重量だけでなく、体積変化まで把握できる土砂管理方法が望まれ、一部導入された例もあるがシステムの確立されたものは少ない。

特に、地上および周辺地下構造物に影響を与えず、都市部の地下にトンネルを掘り進むシールド工法にとっては、この掘削土砂量の体積管理は重要な管理項目の一つである。

当社では、土圧式シールド掘進の自動化技術である土圧・速度制御システムの開発を進めると共に、掘進制御にフィードバックする土砂体積計測装置の開発を行っている。

本編では、開発がほぼ完了したベルトコンベア搬送土砂の体積・重量・比重同時計測装置の概要について報告するものである。

尚、開発した実用機は、平成6年5月から大阪支店神呪新川雨水幹線シールド工事において、土圧・速度制御システムと共に運用を開始した。

1. まえがき

密閉型シールド工法には、大きく分けて土圧式シールドと泥水式シールドがあり、いずれも、すでに確立した工法として広く採用されている。このうち、土圧式シールドは泥水式シールドに比較し、作業基地を狭くでき、設備コストも低廉であるため、年々その施工実績は増加している。しかしその反面、適用土質の拡大、厳しくなる施工環境等に対してかならずしも万全という訳ではない。その理由の一つは、土圧式シールドの管理方法には土量管理と土圧管理の2つがあるが、重要といわれる土量管理方法において、早期に、精度良く、判断出来る管理手法が確立していない点あげられる。

土砂体積・重量・比重同時計測装置は、こうした問題を解消しようとするもので、従来の製品よりも高い精度で検出でき、また、同時に掘進管理にフィードバックできる計測システムの確立を目的として、開発に取り組んできた。

開発した土砂量計測システムは、シールド工事に限らず、その他ベルトコンベアを使用する広範囲な現場で運用することができる。特に大量土砂を扱う埋立工事等では土砂体積変化率把握の必要性が指摘されており、こうした現場での活用も期待できる。

2. 土圧式シールドにおける土砂体積計測の必要性

土圧式シールドの掘削土量管理は、ずりトロの重量を計測し比重換算する方法が一般的である。しかし、この方法は精度が悪く、測定結果が出るまでに時間がかかるなどの問題があり、掘削中の安定掘進判定に用いる事は出来ない。このため、円滑施工を継続させるためには、土圧管理を主たる管理方式として採用することになる。しかしこの土圧管理は、排土量と掘削量のバランスがとれているという前提のもとで成立する管理方法である。こうしたことから、特に土質の変り目などでは、慎重を期した施工がなされてきた。しかし、最近の工事例をみると、適用土質が増えると共に、急勾配施工などに代表されるような、同一トンネル施工の中で土質がさまざまに変化するケースが増えている。

このような状況を鑑みると、今後、土圧式シールド掘進技術の理論と施工をさらに確実なものとするために、土圧管理と掘削土量管理を結び付ける、掘削土砂量（体積・重量・比重）リアルタイム計測装置が必要と考えられる。また、開発に当たっての装置は、土木工事の特殊性を考慮して、工事現場に適応した実用性と機能性を持つ計測管理機器が望まれている。

*本社 土木本部 機械部

3. 排出土砂量（体積）計測装置

3.1 従来の技術と問題点

ベルトコンベアの搬送容量を計測しようとする試みは、これまでもなされている。しかし、完成品としての一般市販品はまだ出ていない。

これまで使用されてきた体積計測装置には、超音波、スポットレーザ、I T Vカメラ等による光スキニング計測等、いずれも搬送物の通過断面を連続して計測積算する方式が多い。

これら従来の装置においては、以下のようなほぼ共通した問題点がある。

- ①計測サンプリング頻度が少なく、また、計測分解能が悪いことから誤差が大きくなる。これを解消するためには搬送物表面を強制的に平滑化する機構をもうける必要がある。
- ②断面積計測をする部分において、ベルト面の上下動が誤差となる。
- ③計測箇所において、ベルト脇の固定部分（トラフ、スカート部等）に固着した土砂等が発生すると、積算誤差が大きくなる。
- ④計測センサ部の固定状態が悪いと、ベルト面との相対位置が変化し計測誤差となる。

3.2 開発した土砂量（体積）計測装置

前項で述べた、従来の技術における問題点を考慮し、新しい土砂量（体積）計測装置を開発した。

3.2.1 装置の原理

ベルトコンベアにて輸送される搬送物に対して、その横断方向にスリットレーザ光を照射し、光のカーテンを作る。この光のカーテンに照射された土砂の断面形状を、2台のCCDカメラにより画像処理させ捉える。ベルト速度信号との乗算および積算処理により、搬送物の通過容量（体積）を連続して計測するものである。

図-1 に本装置の計測概念図を示す。

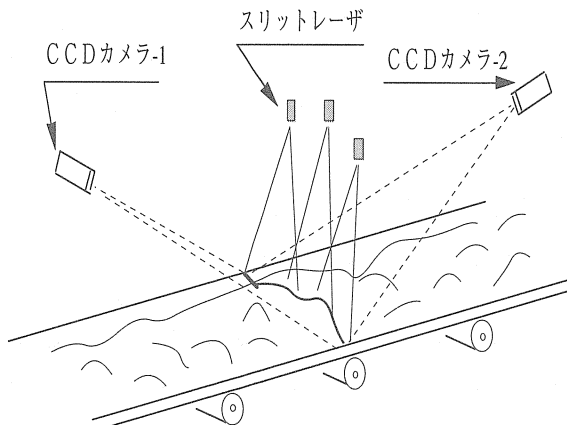


図-1 計測概念図

以下に本原理の特長を述べる。

- ①スリットレーザはベルトコンベアのキャリアローラ軸心上から直角に当たるため、レーザ光は搬送土砂を真上からスライスするイメージで形状表示する。
- ②レーザ光が照射された土砂ラインは、従来の超音波やスポットレーザと異なり、微小凸凹まで捉えることができ、高い分解能が可能となり、従来の方式より高精度検出ができる。
- ③スリットレーザにより照射された搬送物の形状を、2台のCCDカメラで捉える。この2台はスリットレーザ照射部の前後に設置される。2台の画像を合成することで、一方のカメラが何等かの原因で（特に搬送物の影になって）形状の一部ラインが検出できない場合、他方のCCDカメラがバックアップ計測し、その部分を補完する。
- ④CCDカメラは、スリットレーザの形状を線形で捉えコンピュータ処理するため高い検出能力と分解能を発揮できる。

3.2.2 装置の機器構成

機器構成ブロック図を図-2 に、機器リスト概要を、表-1 に示す。

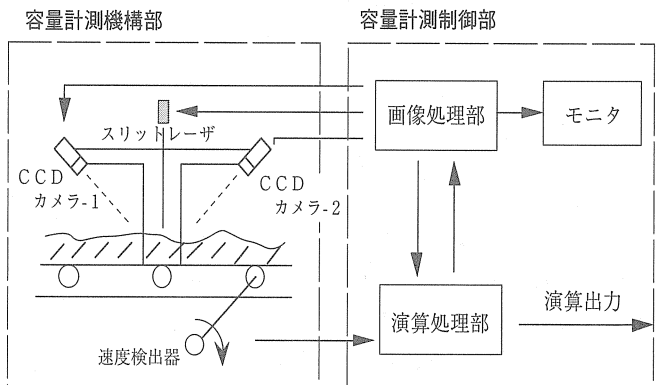


図-2 機器構成ブロック図

表-1 機器リスト

項	内 容	型 式	員数
1	制御機器収納盤		1台
-1	画像処理装置	MIL10	1台
	光切断プログラム内蔵		
	光切断専用外部インターフェイス		
-2	パソコン	PC9801nx/c	1台
-3	拡張ボックス	NOTE-PAC(98)	1台
	絶縁型パラレル入出力ボード付		1枚
	絶縁型電圧/電流A/Dボード		1枚
-4	エンハンサ		2台
-5	モニタ	PVM-91J/5	1台
2	据付架台		1台
-1	CCDカメラ	XC-75	2台
-2	ミニレーゼム	L050A	4台
3	ベルト速度検出器	BSPU	1台

3.2.3 機能

計測精度の向上、良好な運用性をめざして、以下のよ
うな機能を具備した。

①オートゼロの機能

シールド掘進の場合1サイクルの作業は1リングとな
る。この1リング掘削開始前にベルト1~2回転の無負
荷運転を行ない、オートゼロ計測とデータ設定を行な
う。計測開始毎に処理されるオートゼロ機能は、機械自
体の微妙な変形はもとより、ベルト脇の固定部分(トラ
フ、スカート等)に付着成長した土砂のプリセット機能
としても有効となる。

②ベルト速度校正機能

速度検出用ローラは、運用を重ねるに従い、摩耗ある
いは土砂等の固着によりローラ外周長に変化がおき、設
計回転数が得られなくなることがある。このようなケ
ースに備えてベルト速度校正機能を備えた。これはベル
トを数分空運転し、パルス数・時間・ベルト長の関係で速
度校正値が自動設定出来るよう設計した。

③軽負荷停止機能

ベルトコンベア駆動中、ベルト面はわずかに上下動す
る。空運転の時間が長くなると、このわずかな上下動
による計測誤差積算が無視できなくなる場合がある。こ
の誤差を極小にするため、軽負荷時積算停止機能を備
えた。

④出力定格容量変更機能

シールド機外径の違いにより、計測容量は大きく変化
する。これらの変化に伴う条件および容量設定が自在
に出来るよう考慮した。

⑤計測基準校正機能

真上から照射されるスリットレーザを、CCDカメラ
は斜め前方・後方から撮影し、この画像を処理する。こ
のとき高さ方向の成分を検出するために、緻密な補正演
算を行なう機能を強化した。

補正式の一例を示す。

$$f \chi 1 = (0.001361) \chi + 1.283352$$

$$\cdot \quad \cdot \quad \cdot$$

$$f y 1 = (-1.513800) \chi + 477.528400$$

$$\cdot \quad \cdot \quad \cdot$$

このような補正式の係数は、工場出荷時詳細データ採取
結果にて決められる値であるが、問題はカメラとの相対
位置に変化が生ずると、上記補正式は成立しなくなる。
そこで、運用現場において、機器設置後の調整を容易に
する機能として、折りたたみ式基準マーカ(ゼロ、スパ
ンの2点)を考案した。

⑥レンズフィルタの装備

本計測装置の使用場所は、周囲に作業用の投光器・蛍
光灯が使われる所である。本体は機器保護用のハウジング内
に収められているが、周囲から洩入する照明光が外乱とな
らぬ様、様々なフィルタをテストし、他種光を極力シャ
ットアウトするレンズフィルタを選定装備した。

4. 開発の経過

本装置開発に当たって、2ステップのテストを段階的に
進めた。

第1ステップは、静的テスト。断面積の判明しているテ
ストピースを静止状態で面積計測し、この時の精度、必要
とされる機能の抽出、次ステップ展開への可能性と判断を
行なった。

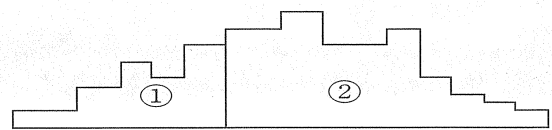
第2ステップは、動的テスト。2台のCCDカメラで互
いにデータを補完しあう画像処理機能の確認、コンベアを
用いての実量計測テスト、実用機製作に向けての問題点の
抽出を行なった。

上記2ステップを経て、大阪支店神呪新川シールド用実
用機を製作し、総合的な土砂量計測システムとして運用を
開始した。

4.1 一次(静的)テスト

体積は面積計測の時間積分で算出されるため、まず、静
止状態での面積計測精度が充分得られるか、数種のテスト
ピースを用いて静的試験を行なった。またCCDカメラに
対する外乱光(蛍光灯、他)の影響等についても調査し
た。

実験は、検出原理にもとづく実験装置を製作し、下図に
示すテストピースの面積を計測・検証した。



①、面積：4420 (mm²) ②、面積：9180 (mm²)
①+②、面積：13600 (mm²)

4.1.1 実験結果

表-2 静的テストデータに示すように、面積計測結果
は、フルスケールに対する誤差率で約0.7%以内、計測対
象面積に対する誤差で約2%以内であった。

この結果から、開発を次ステップに進めることが可能と
判断し、二次(動的)テストに開発工程を進めた。

4.2 二次(動的)テスト

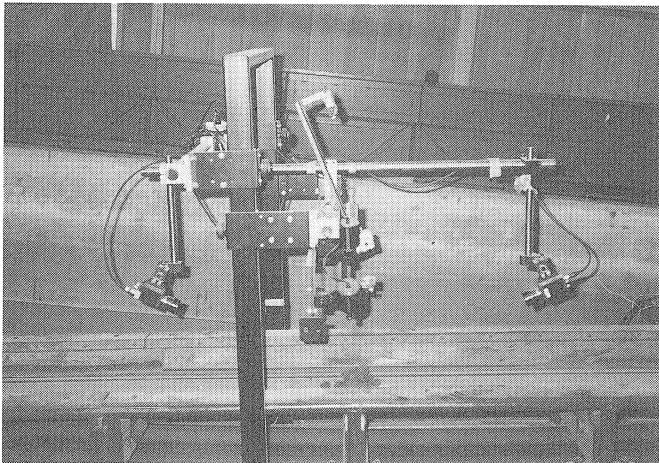
実験装置を写真-1に示す。仮設のベルトコンベア(3
ローラタイプ)に実験機を設置し、土砂に見立てた試料の
実通過体積計測を行なった。

表一 静的テストデータ

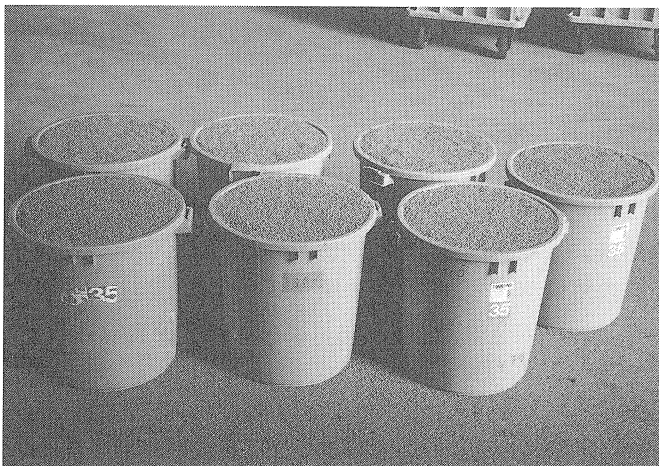
テストピース No.	基準値 (mm ²)	測定値 (mm ²)			平均値 (mm ²)	誤差率 F.S (%)	誤差 (%)	位置
①	4,420	4,450	4,439	4,578	4,511	0.41	2.05	中央
		4,441	4,578	4,578				
		4,478	4,478	4,425	4,471	0.23	1.14	左
		4,478	4,487	4,478				
4,435	4,444	4,472	4,483	0.29	1.41	右		
4,593	4,480	4,472						
②	9,180	9,080	9,320	9,312	9,251	0.32	0.76	中央
		9,109	9,341	9,341				
		9,434	9,289	9,237	9,327	0.67	1.6	左
		9,440	9,303	9,260				
		9,044	9,044	9,228	9,132	-0.22	-0.52	右
9,229	9,211	9,038						
①+②	13,600	13,667	13,706	13,706	13,700	0.45	0.73	中央

$$\text{※誤差} = \frac{\text{計測値} - \text{テストピースの基準値 (器差)}}{\text{基準値 (テストピースの値)}} \times 100 (\%)$$

$$\text{※誤差率} = \frac{\text{計測値} - \text{テストピースの基準値 (器差)}}{100\% \text{計測基準値 (22000mm}^2)} \times 100 (\%)$$



写真一 実験装置



写真二 実験用試料

4.2.1 実験用試料

比較的軽量で取り扱いの容易な、珪藻土焼成粒を使用した。写真一に示す。

- ①品名 : イソライトCG
- ②かさ比重 : 0.48~0.55
- ③通気係数 : 0.12 cm/sec
- ④一般用途 : 人工地盤用材料

4.2.2 実験方法

- ①ベルコン運転方法 : 連続運転
- ②試料通過高さ最大 : 100mm
- ③ベルト速度 : 50~70m/min可変
- ④オートゼロ設定時間 : ベルコン5回転
- ⑤テスト用試料 : 210リットル (35リットル×6)

テスト用試料 (35リットルポリバケツ6缶、摺りきり満杯) を連続的、あるいは間欠的に搬送し、瞬時体積および積算体積のデータ採取を行なった。また、シールド工事を想定し、様々な他作業との連携で必要となる作動シーケンスについての検討を行なった。

4.2.3 実験結果

実験においては、すでに前項3で述べた幾つかの問題点についてテストを重ね、これを解消するためハード・ソフト両面の改善を行なった。

実験結果は、対策後のデータで、表一にテスト結果を示す。

表一 動的テストデータ

	基準値 リットル	計測結果 リットル	誤差 (%)	試料の 流し方
1回目	210	210.7	0.3	100mm高さ程の均等
2回目	210	206.8	-1.5	ク
3回目	210	217.2	3.4	50mm高さ程の均等
4回目	210	216.4	3.0	間欠投入

最終実験結果では、上記の如く3%程度の精度確保が確認できた。

4.2.4 実用システム製作に向けての検討

動的テストにおいては、極めて良好な結果が得られた。しかし、写真二に示した35リットルポリ容器満杯の状態ですら大きく振動させると写真三の様に約10mm~20mm程度のレベル低下がおきた。今回実験に使用した基準は、前者のものである。このことから土砂体積の変化は極めて大きいことが予想され、実用システムに向けて体積・重量の同時計測が必要であることが推察された。

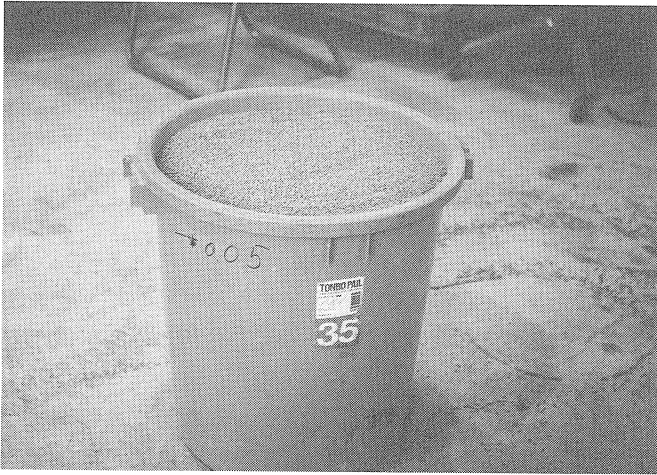


写真-3 振動後の試料容器

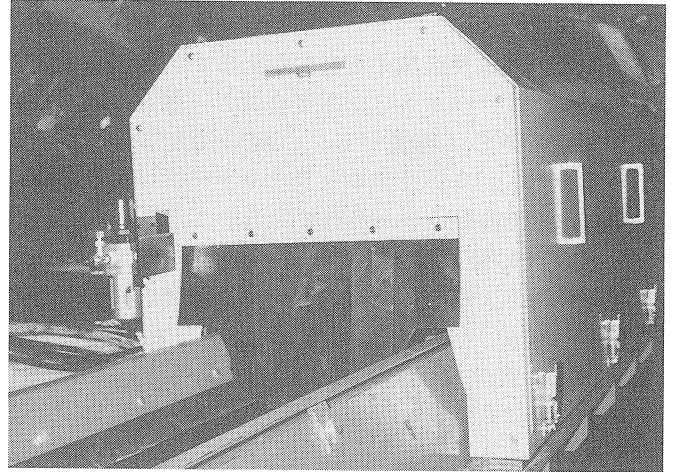


写真-4 土砂量（体積）計測実用機

5. 開発した土砂量計測システム（実用機）

平成6年5月から本掘進を開始した大阪支店神祝新川シールド工事に、開発装置を含んだ実用システムを製作して運用を開始した。

5.1 全体機器構成

システム化した土砂量装置の機器構成は

- ①土砂量（体積）計測装置
- ②土砂量（重量）計測装置
- ③土砂体積・重量・比重遠隔監視装置

の3装置である。全体機器概略構成図を図-3に示す。

5.2 排土量（体積）計測

写真-4に現場用に製作した体積計測装置を示す。ハウジングは作業環境を考慮した設計がされている。

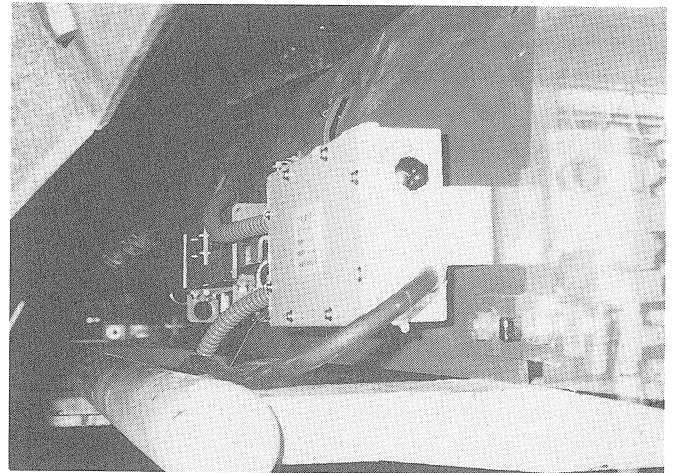


写真-5 土砂量（重量）計測装置

外部出力は、リアルタイムの通過量（ m^3 /分）、及びシールド機掘進開始からの積算量（ m^3 ）の2種類データを遠隔監視装置に出力する。

5.3 排土量（重量）計測

一般にベルトスケールといわれている重量計測装置で、近年、コンパクトで比較的精度の良い製品が作られるようになった。

計測原理は、移動するベルトの下部に計測専用キャリアローラを設置し、この荷重をロードセルで検出するタイプのものが一般的である。

体積計測装置と同様、ベルト速度検出器からの速度パルスを受けて積分する。ゼロ点補正や、キャリブレーションなど、付加的機能が充実し、汎用機器の技術レベルはこの数年向上していると思われる。

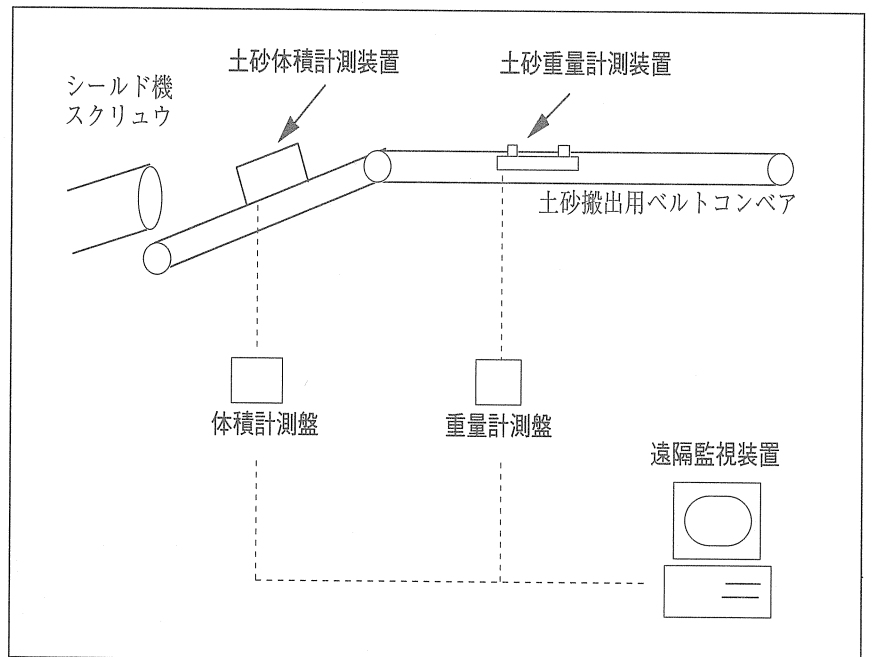


図-3 全体機器概略構成

今般開発の土量計測システムの一部として運用するには、体積計測装置とのデータ同時性（タイミング）を図るために一部改良を加える必要があるが、汎用品に大きな手を加えず、ベルトコンベアの能力・構造に応じた装置が選定できる。写真-5に、現場投入したベルトスケールを示す。キャリアローラとリターンローラの間計測ロードセルがセットされている。

5.4 土砂量遠隔監視装置

土砂体積および土砂重量の各データを現場事務所等で受信し、両データから比重演算する。土砂の体積・重量・比重の変化状況をCRTに判り易く表示し管理する。データは自動ファイルされ、過去から現在に至る変移を解析できる。

6. 今後の展開

開発した土砂量計測システムは、平成6年5月、シールド機外径φ2480mmの大阪支店神祝新川シールド工事で運用を開始した。また、当現場では、前年度開発したシールド機の土圧・速度制御システムも同時に運用を開始した。

本工事の対象土質は巨礫を含む砂礫層である。この土質は、周知の通りシールド機掘進にとって難しい土質と云われている。また、工事の後半には50%の下り急勾配施工があり、この施工区に入ると対象土質及び地下水位は掘進するに従いどんどん変化する難工事である。

開発した土砂量計測システムは、現在、運用開始したばかりであるが、このような難しい施工にとって充分有力な武器になり得ると確信する。また、これまで得られなかった早期の掘進管理へのフィードバックができ、安定掘進評価の技術的レベルを一步前進させる完成度の高いシステムの確立を目指している。

本報告は、開発した装置の概要とその過程について概要記載したが、今後の開発経過については、自動掘進システムの成果報告の中で述べていきたい。

最後に、本システム現場運用に当り、御協力を頂いた大阪支店および神祝新川雨水幹線シールドの皆様方ほか開発に当ってお世話になった関係各位に深くお礼申し上げます。