



TRD 工法協会設立 30 周年を迎えて 協会員の皆様と取り組んだ施工機と工法の改善

水 谷 元 彦

地中連続壁工法の1つである TRD 工法 (Trench cutting Re-mixing Deep wall method) であるが、1995 年の TRD 工法協会設立以降、協会員である施工会社と施工機メーカーが一緒になって工法の拡大とともに直面した数々の課題にチャレンジしてきた。それら課題の対策を施工ノウハウの充実化と周知活動、施工機械への機能 UP という形で解決し、今日までの安定した施工方法として確立してきた。本稿では施工機メーカー側の立場である筆者が関わってきたいくつかの開発事例を紹介し、TRD 工法 30 年の歴史を施工機性能向上という視点で振り返る。

キーワード：連続地中壁工法，施工管理，安全性向上

1. はじめに

2025 年 2 月 14 日、東京都内において TRD 工法協会設立 30 周年記念パーティが開催された。パーティには、発注者、学術団体、報道関係者などの多くのご来賓、協会員の参加のもと、盛況のうちに終わった。

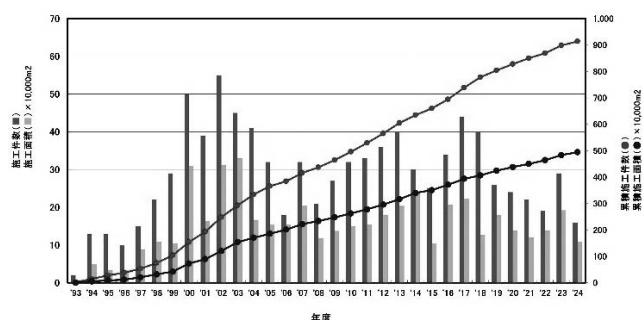
20～30 年前に初めて TRD 工法施工機を目にし、機械の組立や施工状態までの各種段取りおよび施工方法を、施工機の製造会社である我々とともに一から経験されてきた懐かしい方々とここまでの工法発展を共有することができ有意義な時間を過ごすことができた。30 年に及ぶ協会全体で施工技術の普及に努めた結果、今日までに多くの施工実績 (図—1) を積み重ねることができている。この過程における協会員、関係各位の計り知れないご尽力に対し、深い感慨と感謝を覚えるものである。パーティの中盤に主に工法黎明期に関わったメンバーの 1 人として恐縮ながら筆者も

拙い現場での思い出話をさせていただいたが、改めて 30 年間に直面してきた施工上の課題とその対応についていくつか紹介していく。

2. TRD 施工方法概要

TRD 工法は地中連続壁工法のうち、掘削対象地盤の土砂とセメント固化材を原位置で攪拌、固化させるソイルセメント連続壁工法の 1 つである。施工原理を図—2 に示すが、チェーンソウ状のアタッチメントを地中に鉛直に突き刺し、チェーンに取り付けたカタビットを主に横方向に押し付けることで等厚の溝を掘り進め、地盤土砂とチェーンソウ先端から吐出される固化材とを攪拌することで均質なソイルセメント壁を造成することができる。

実際の施工では浅い施工深度時は掘削しながら造成も同時に行う 1 パス施工、一般的には地山掘削と造成とを分けて行う 3 パス施工が多く採用される。詳細の施工方法説明は協会 HP に動画等が UP されているのでご参照されたい。TRD 工法の特徴としては図—3 に示す通り、等厚の地中壁ができ、H 型鋼などの芯材間隔の自由度が高いこと、また地上から下端部までが複数の地層、土質に分かれていても掘削中に上下に攪拌することでの強度や透水係数等の均質性が高いこと、そして施工中は重心が地表より低く転倒絶無で安全性の点で非常にすぐれた工法となっている。デメリットとしては施工機特性上、地中壁が短いピッチで



図—1 TRD 工法の施工件数と施工面積推移*

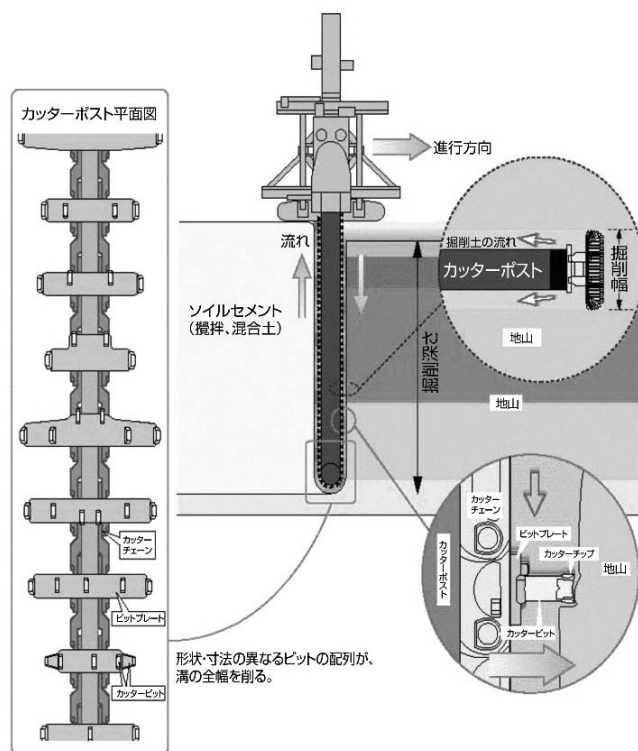


図-2 TRD 施工方法原理*



図-3 TRD 工法の特徴*

表-1 TRD 施工機の種類

機械名	壁厚	最大壁深度	総質量	平均接地圧
TRDⅠ型機	450~700mm	20m	64.3t（仕様 深度20m、壁厚450mm）	90kN/m ²
TRDⅡ型機	550~700mm	35m	140t（仕様 深度35m、壁厚550mm）	158kN/m ²
TRDⅢ型機	550~850mm	60m	162t（仕様 深度60m、壁厚550mm）	171kN/m ²

方向が変わるような狭い現場等で段取り時間が非常に多くなることである。

3. TRD 施工機

TRD 施工機は上記の TRD 工法のために特化した建設機械となっている。表-1 に示す通り、対象施工深度、掘削幅別に3種類に大別される。

TRDⅠ型はショベル本体ベースの小型機で、低空頭仕様や地中控え護岸壁施工仕様等（写真-1）のアタッチオプションがある。低空頭仕様は橋梁下の工事等、高さ制限がある現場に対応し、地中控え護岸壁施工仕様は河川の護岸工事において斜め形状の地中壁を造成するための専用アタッチメントとなっている（NETIS KT-980128）。

TRDⅡ型は1992年に最初にTRD施工機として開発された機械でクローラークレーンがベースであり、ベースマシン中央にあるウインチから繰り出されるワイヤーにより掘進機構とカッターポストを昇降する機構



写真-1 地中控え護岸壁施工時のTRDⅠ型*

となっている（写真-2）。

TRDⅢ型は後述するTRDⅡ型での施工上の課題解決のために1997年に初号機が開発され、何度かのマイナーチェンジやオプション追加を繰り返し、TRD施工機的主力機として今日に至っている（写真-3）。



写真—2 TRD II型*



写真—3 TRD III型*

TRD 施工機の役割を機能的に説明すると大きく 4 つに大別される。

- 1) 地中に入ったカットポスト・チェーンを施工計画通りに横方向及び上下にガイドする機能
- 2) カットポストを地盤に対して横方向、上下方向に押し付ける機能とその反力を受け止めるための本体重量及び動力源
- 3) カットチェーンを回転する機能及び動力源
- 4) 掘削状況の可視化機能（各種センサによる）

本稿では筆者が関わってきた TRD III 型における各種課題への対応を中心に説明をしていく。

4. TRD III 型開発経緯

前述の通り、工法協会設立前の 1992 年に TRD II 型（当時の呼称は TRD25）が開発され、市場に投入された。当時の呼称の通り、標準仕様での掘削深度は約 25 m である。この機械は通常のクローラクレーンのように機械中央部にウインチを備えたベースマシンがあり、写真—2 に示す通り、リーダ上部と掘進機構上部に多数のシーブを備え、ワイヤの巻き取り、繰り出しにより上下する機構を具備していた。

TRD 工法協会設立前後での施工深度は比較的低深度の現場が多かったが、実績を重ねるごとに案件によっては 35 m を超える深度や砂礫地盤を含む硬質地盤の現場も出てきており、主に下記の課題解決が急務となった。

- 1) 地中部分の掘削精度の可視化
- 2) 所定深度までの自力建込機能
- 3) 門型フレーム端部での昇降動作

次節より 1 つ 1 つの課題に対しての対応を説明する。

（1）地中部分の掘削精度の可視化

TRD II 型の標準深度以下で、かつ比較的軟らかい地盤であれば、面外変位も小さく、カットポスト中に

設置した二軸傾斜計の一点での測定でカットポストの面内面外の傾きを把握することで十分であったが、掘削深度が徐々に深くなり、かつ地盤が硬い場合等は施工が進むにつれて面外変位が大きくなり、横方向への掘削や、引き抜き時に土圧影響の大きな抵抗を受けることで施工効率の低下、最悪時にはカットポスト引き抜き、別工法で再度周辺地盤での建込穴掘削などで手戻りが生じる場合があった。

上記の問題に対してはカットポストの傾きや変位を複数の深度でリアルタイムに可視化するための新機能で対応することとなった。筆者が所属するコベルコ建機ではクレーンやショベルでも多くの種類の傾斜計やポテンショメータを用いてきていたが、TRD の施工精度を担保できる傾斜計は部品設定されておらず、精度及び耐振性を考慮して「地すべり計測用の多段傾斜計の複数利用」で対応することとした。

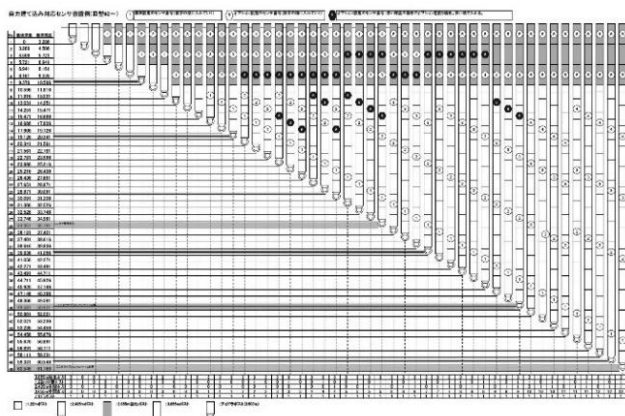
上記多段傾斜計は高粘度流体中に 2 軸の振り子の根元にひずみゲージを貼り合わせた構造を持った長い円筒状の傾斜計であり、 ± 5 度という狭い角度範囲ではあるが、TRD 施工で求められる面外精度 1/250 ~ 1/500 に対して 10 倍以上の分解能を持つもので TRD の測定には適したものだ。一方で取り扱いには注意が必要であり、運搬中の多段傾斜計の姿勢を維持し、かつキャリブレーションを行うための専用のトランクケースを準備した（写真—4）。

TRD III 型では図—4 に示すように 60 m までのカットポスト構成と地上の掘進機構に 1 個、地中のカットポスト内部に最大 6 個の計 7 個の多段傾斜計を搭載することとした。

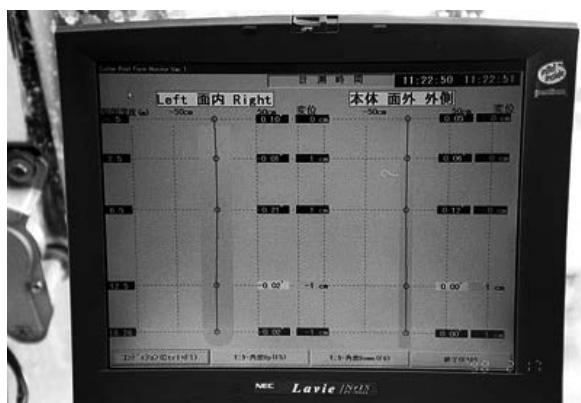
傾斜計信号はカットポストから運転席までアナログの多芯ケーブルで伝達され、運転席に装着された動歪み計を通じて運転席内部に設置されたノートパソコン



写真—4 多段傾斜計用専用トランクケース



図—4 掘削深度 60 m までのカッターポスト構成と多段傾斜計設置資料 (TRD III 型仕様書抜粋)



図—5 PFM モニタ画像例

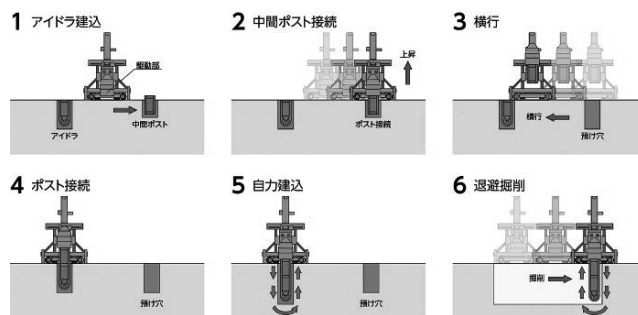
の専用ソフトにてオペレータにカッターポスト変形状態をリアルタイムにモニタ可能 (図—5) とした。これにより面外方向では壁精度を管理, 面内方向では地盤に対してのカッターポストを巧みに傾けて地盤に接触させることで 60 m を超える深度においても安定した掘削を実現できるようになった。

この機能はカッターポストフォルムモニター (以後 PFM) として TRD III 型の標準仕様として設定され, 当時先に市場に出ていた TRD II 型にも後付け採用された。

(2) 所定深度までの自力建込機能

TRD II 型では掘削開始時では全旋回等の他工法を用いて掘削深度までの建込穴を掘ったのちに, そこに何分割かに分けて組み立てられたチェーン付きのカッターポストを大型クローラークレーン等で建て込むやり方が一般的であった。この方法の利点は掘削開始時にカッターポストが土留め用ベントナイト液の中で地盤土圧を受けずに精度を保ったまま所定深度まで組立可能な点である。

しかしながら地中壁施工の始点において毎回他工法



図—6 カッターポストの自力建込工程イメージ※

が必要となることで施工全体のコスト増加及び工程期間的にも長くなることから, 「TRD 施工機のみで自力で所定掘削深度までを掘削できないか?」という要望が高まってきた。自力建込機能とは掘進機構にアイドラポスト, カッターポストを 1 本ずつ接続し, カッターポスト 1 本分の深さまで掘削し, 施工機が新しいカッターポストを接続した状態で地中にある掘削済みのカッターポストとを接続し, 所定深度までこの作業を繰り返す工程である (図—6)。

ワイヤ方式の TRD II 型でも自力建込は可能ではあったが, ワイヤ吊り下げでは自重以上の押し付け力をかけることができない。また現場条件で門型フレームの端部で建て込む場合においてはウインチから繰り出されたワイヤを斜めにかかる必要があるが基本的には不可能である。

これらの課題克服のために TRD III 型ではウインチワイヤでの昇降ではなく, リードに取り付けられた 2 本の昇降スライドシリンダ (2 段式) により 5 m のストロークで掘進機構が上下できるようになった。また TRD II 型で存在したリード上端部のシーブブロックや掘進機構上部のシーブブロックも不要となり, 構造上もシンプルになる。

昇降シリンダの強力な引き抜き力は毎日の施工開始時に一晩のうちに地盤土圧で締められたカッターポストの縁切り作業時においても大きな力を発揮すること, また何よりも下方向にも荷重をかけられることで硬質地盤における自力建込掘削時に大きなアドバンテージを得ることになった。

(3) 門型フレーム端部での昇降動作

昇降スライドシリンダによる掘進機構の上下作業はウインチと違って門型フレーム端部での昇降動作も可能となり, 施工現場特性上敷地ギリギリ位置からの地中壁造成も可能となった。

5. 施工機メーカーによるソフト的な支援活動

TRDⅢ型の普及により、施工実績としては最大掘削深度 60 m を超える事例や硬質地盤における施工実績も増え始めた。現場開始前に協会の現場担当者からは主に下記の要請があり、施工機メーカーとして対応してきた。

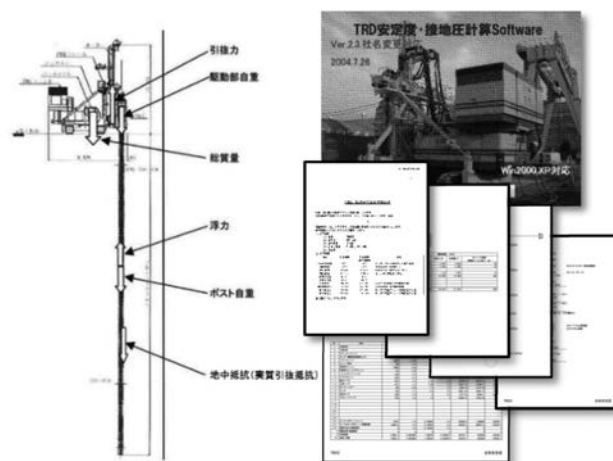
(1) 安定度計算 PC アプリケーション（施工機メーカー社内利用）

TRD 施工機の場合、接地面に一番圧力がかかるケースは毎日の施工開始時のカットポスの縁切作業時の昇降シリンダ出力最大時である（人が畑の大根を引き抜くときに地面を足で押し付ける原理と同じ）。またカットポスト長さや掘削液比重、門型フレームの左右位置等様々な条件を加味して平均接地圧、最大接地圧を計算し、協会のご依頼に対して回答してきた。はじめはエクセルマクロで計算していたが、社内的には PC アプリ化することで迅速かつ正確に回答できるようになった。現場ではこの接地圧計算値を参考に TRD 施工機の前側クローラ接地面等に必要に応じて低層地盤改良等を行う場合もあった（図一七）。

(2) 掘削性能推定 PC アプリケーション（協会向け）

現場実績が増えてくるとより深く、また硬質地盤での現場採用が増えてきた。そのような場合、TRD 施工機が 1 日にどのくらいのパフォーマンスを出せるかを事前に把握することが重要となる。1 日の施工量を決定するのは対象地盤における横方向の地山掘削速度が最も重要な指標となる。例えば深度が深く硬質な地盤の場合は 1 日単位での造成、地山掘削のパターンでなく、数日間地山掘削に集中し、ある程度の既掘削区間を確保したのちに、固化材投入しながらの造成作業を集行的に行い、その後再び複数日数の地山掘削を行うような施工計画を立てる場合もある。そこで当社では標準貫入試験結果と施工条件（掘削幅、掘削深度、対象施工機）を入力し、対象地盤においてどのくらいの水平方向の地山掘削速度を得られるかについて土質力学に基づく理論演算を行った。

当初は協会の問い合わせ毎にエクセルマクロに条件を入れて個別に回答してきたが、2002 年には各深度の土質と N 値を入力し、施工条件を設定すれば推定水平方向の掘削速度が算出できる TRDEST なる PC アプリケーション（図一八）を開発し、工法協会を通じて協会に配布した。理論演算ではあるが、各施工現場での施工実績での水平方向掘削速度（図一九）も

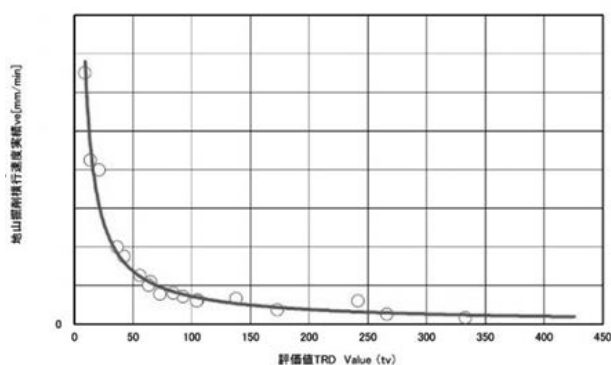


図一七 最大引張力発生時に TRD 施工機に加わる力の参考図と安定度計算ソフトウェアと計算結果例



図一八 TRDEST アプリケーションと計算結果事例

掘削性能推定評価値(TRD Value tv)と地山掘削横行速度veの関係(99.4.1更新版)



図一九 理論値と水平方向掘削速度の相関図

フィードバックし、一定の補正演算を行っている。

6. 掘削状況の可視化のさらなる改善

TRDⅢ型の導入後 5 年経過し、施工上の課題が顕在化したため施工機メーカーとして、施工モニタリングシステムの抜本的改善を図ったコベルコトータルモニタリングシステム（以後、KTMS）を開発した。KTMS の

可視化部分における改善項目のいくつかを紹介する。

- 1) 自力建込時の傾斜モニタリング機能強化
- 2) 多段傾斜計キャリブレーション機能強化
- 3) TRD 施工局面に最適化された支援機能

(1) 自力建込時の地中部傾斜モニタリング強化

TRDⅢ型が市場に投入され、自力建込によるカットポスト建込が普及したが、TRDⅢ型の初期の自力建込中は地上部分にある掘進機構の1か所の傾斜計角度を見ながら所定深度までのカットポストを掘り進めた後、面外方向に反った状態で建て込んでしまう事例があった。当時のアナログタイプのPFMシステム(多段傾斜計測定システム)は微弱なひずみゲージベースのアナログタイプであったため、絶縁不良リスクを少なくするために極力、コネクタによる接続部を減らした構成であった。そこで所定深度を掘った後に、数十mのケーブルと一体となった多段傾斜計を中間ロッドを挟みながら一気に挿入して通常施工時は複数の多段傾斜計によりモニタリングを実現してきた。

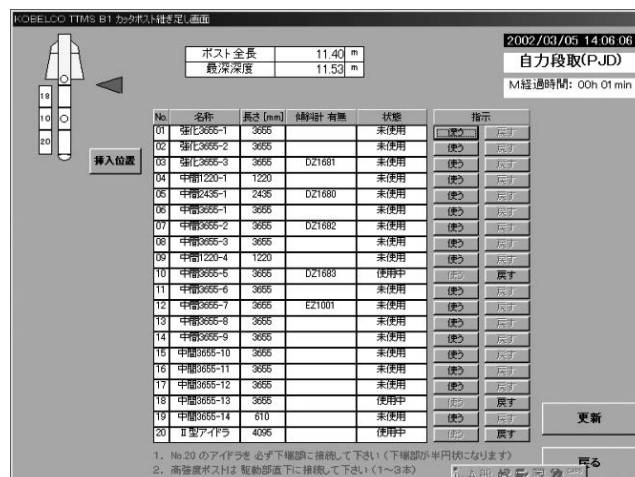
そこで 2002 年に多段傾斜計のデジタル化を図り、配線がデジタル 2 線式となり、絶縁不良リスクが大幅に低減したことで、1 つ 1 つのカッターポストに多段傾斜計や中間ケーブルを追加しながら自力建込を行うシステムに改善した。また後述記載の通り、自力建込の段取り用の専用画面（図—10）や自力建込掘削中の専用画面（図—11）も準備し、所定深度までカッターポスト傾斜を確認、補正しながらの掘削を支援できるようになった。

(2) 多段傾斜計キャリブレーション機能強化

KTMS 導入以前もアナログタイプの PFM にて写真—4 に示すアルミトランクケースを用いたキャリブレーションを行っていたが、ゼロ点算出方法はシステム計測値と野帳を用いて手計算で導出後、システムに入力するやり方であった。KTMS 導入時には図—12 に示す多段傾斜計専用キャリブレーション画面で手順を追って多段傾斜計をトランクケースに設置しながらゼロ点計測およびシステムインプットを KTMS ソフトウェア上で完結できるようになり、作業性の改善を図った。

(3) TRD 施工局面に最適化された支援機能

KTMSではTRD施工の日々の作業工程に合わせた専用画面を準備(図一13)し、次に示すような工程に応じた画面により最適な情報をオペレータに提供することでTRD施工をより円滑に進めることができるようになっている。



图一 10 自力建込段取り画面事例



图一 11 自力建込（貫入）画面事例

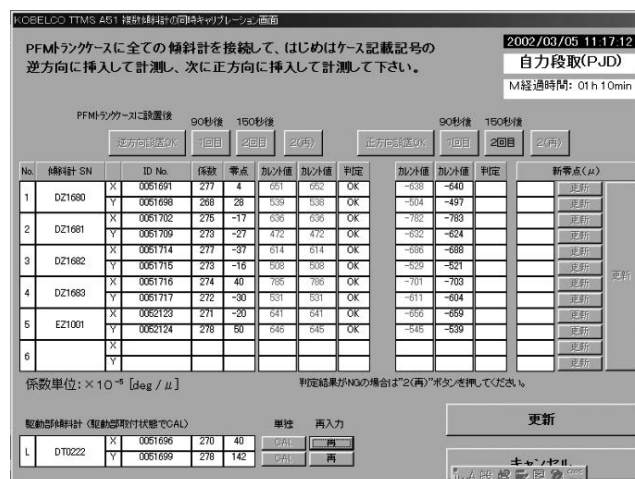


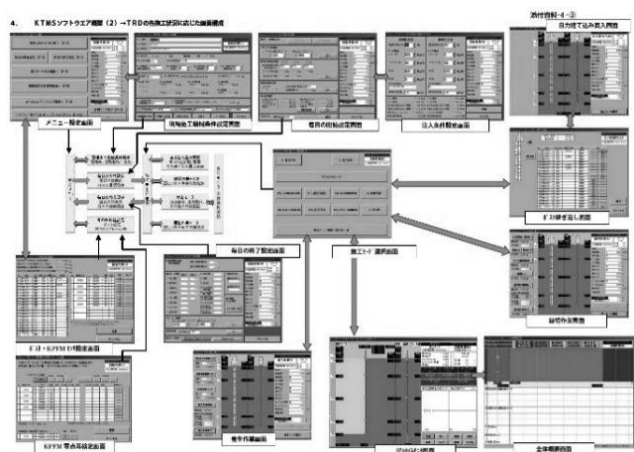
図-12 KTMS 多段傾斜計キャリブレーション画面

- ・施工開始時の縁切作業画面

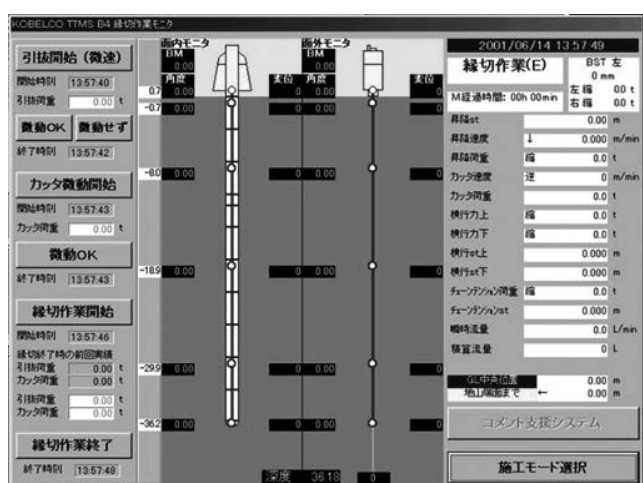
縁切作業におけるカット回転、昇降動作を支援し、確実にポストと土砂の縁切ができているかをモニターで確認することができる画面（図－14）。

- ・バックステイ補正作業画面

左右のバックステイストローク，圧力の差がないか？



図一13 KTMS ソフトウェア構成画面



図一14 縁切作業画面

掘進機構の鉛直が保たれているかをチェックする画面。

・自力（建込）段取画面

カタポストの繋ぎこみと多段傾斜計のセッティングを支援する画面。

・自力建込（貫入）画面

下方への自力建込時のカタポスト状況や各アクチュエータ出力をモニタリングする画面。

・通常施工画面（地山掘削、造成等各種モード有）

面内、面外傾斜や各種アクチュエータの出力、ストローク回転数等を確認しながら掘削作業、造成作業等を支援する画面。

・施工終了時の養生画面

1日の施工終了時にセメント固化材投入位置や地山掘削面から確実に退避されているかを確認し、かつ所定の養生作業を円滑に行うための専用画面。

以上、KTMSによる施工時の可視化支援の一部を紹介したが、KTMSは2002年以前に出荷されたTRDⅢ型にも後付け改造で一部機能を移植可能であり、

TRDⅢ型であればほぼすべて自力建込時のモニタリング等が可能となっている。

7. 工法適用範囲の拡大に向けて

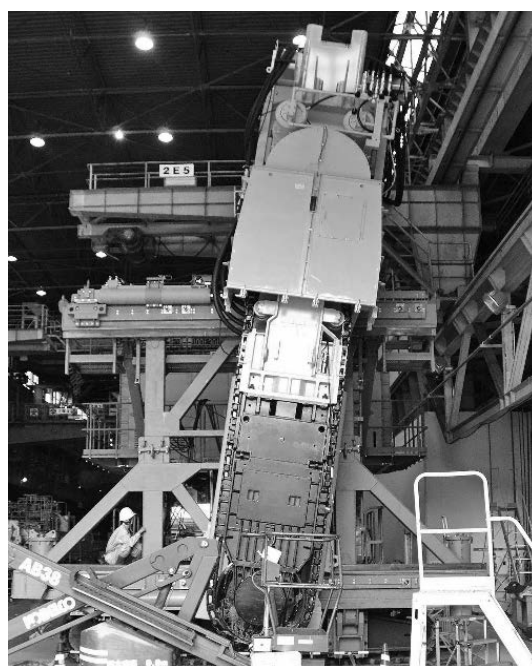
前項までは主に可視化改善中心の改善であるが、TRDⅢ型において現在では標準仕様に近い機能となっているハード的な追加改善例について紹介する。

(1) 掘進機構の面内8度傾斜対応

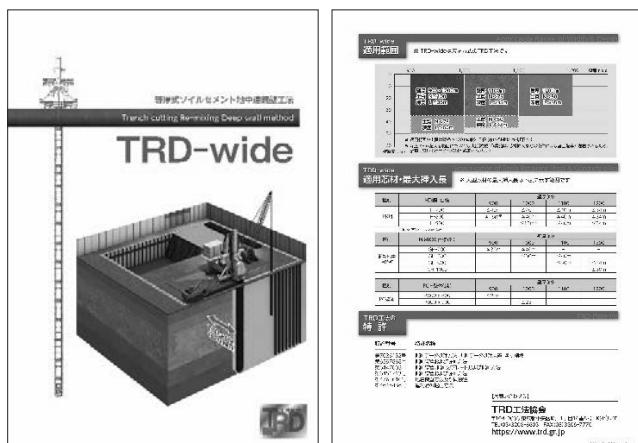
坂道部分での施工や通常水平基面上での施工における面内方向における掘削自由度を高めるために掘進機構の振り子角度幅を広げる改造オプションを2002年に開始した。それまでは掘進機構は最大でも約±3度程度しか傾けられず、実質的な坂道施工の許容範囲は±1.5度程度であったが、±5度程度の傾斜面においても地中壁施工を可能とするために掘進機構のガイド部分や各種シリンダのブラケット部が複雑化し、組立時の注意点は増えるものの±8度の面内傾斜角度（写真—5）を実現した。のちに後付け対応工事も多く受注し、2012年からは標準仕様として設定するに至った。

(2) TRD-Wide 工法

TRD工法は主に仮設壁に採用されることが多い工法ではあるが、TRDⅢ型の最大掘削幅は当初875mmであり、本設壁に採用されるにはもう一段の掘削幅の拡幅が必要となった。施工機メーカーとしても地盤状況によっては875mm幅以上の掘削が可能であること



写真—5 掘進機構8度傾斜出荷試験状況



図—15 TRD-Wide 工法※

は掘削理論上や事前の実験施工で把握できていたこともあり、それまでの掘削幅の制約となっていた掘進機構の構造を改造することで900 mm～1,200 mmの掘削幅に改造できるオプション改造を2018年から開始した。また協会においてもTRD-Wide工法（図—15）として定義し、積算条件等の整備も行い、徐々に適用例を増やしつつある状況である。

8. おわりに

ここまで、TRD 施工機メーカー側から筆者が関わったシステム面やハード面の改善事項を紹介してきた。

30年を経た今、工法黎明期に作業現場でお客様とともに各種作業や運転支援を行った貴重な経験が、お客様の要望を具現化する上で重要であったことを改めて感じる次第である。TRD 施工機の出荷納入指導時には、お客様もまだ手探り状態であったが、現在では多数の現場で実績を上げ、各種システムも筆者の予想を超えて使いこなされており、感無量である。引き続きTRD 工法が今後も社会インフラの充実に貢献していくことを願って止まない。最後に TRD 工法協会事務局から各種資料をご提供いただいたことに感謝して本稿の終わりとさせていただきます。

J C M A

《参考文献》

※ TRD 工法施工協会ホームページから引用
(工法協会ホームページリンクのQRコード)



【筆者紹介】

水谷 元彦（みずたに もとひこ）
コベルコ建機(株)
アフターセールス本部カスタマーソリューション部
ITソリューショングループ長（工学博士）

