

9. 薄膜遮水壁工法の掘削機械とその施工方法 (TRUST工法)

大成建設(株)：*有山 元茂・内藤 禎二
荒井 政男

はじめに

地下水の流れを遮断したり制御するための遮水壁は、地下構造物の施工には欠かせない技術として発達してきた。さらに近年は、地下水を積極的に利用するための地下ダムや、液状化防止対策工、地下水の汚染防止工といった新しい利用方法が注目されている。現在、これらの遮水壁には、鋼矢板壁、ソイルセメント壁、連続地中壁などが多く採用されている。しかし、鋼矢板壁やソイルセメント壁を遮水壁として使用する場合には、鋼矢板壁で約20m、ソイルセメント壁で約50mといった施工深度の制限や、深度が深くなるにつれてエレメント間のジョイント施工が難しくなる等の問題を有している。また、連続地中壁を遮水壁として使用する場合には、水平多軸回転カッター式で壁厚65cm程度が最小であり、止水や遮水だけを目的とする場合には不経済となる。このため、経済性・信頼性に優れた大深度まで施工できる壁厚の薄い連続地中壁の開発が求め



写真-1：TRUST-21型掘削機

られてきた。そこで、大成建設(株)、ライト工業(株)、成和機工(株)、(株)利根の4社で共同研究を行い、最小壁厚20cm、最大深度150m、沖積土から軟岩まで広範囲の地盤で掘削可能な薄膜遮水壁用掘削機であるTRUST21型機を開発した。また、本掘削機を用いた遮水壁構築工法であるTRUST工法の実証実験工事を行い、薄膜遮水壁の構築技術を確立したのでここに報告する。

1. 掘削機械 (TRUST-21型機)

遮水壁を目的とした大深度掘削に対応可能な最小壁厚200mmの薄膜掘削機を開発するにあたり、様々な角度から検討を行った結果、サイドカッター並びにオフセットビットを併用したディスクカッター方式を選定した。当初、水中ポンプ搭載型の検討を行ったがポンプ収納部の容積が大きく、壁厚が厚くなり薄膜のイメージから外れることや、フレーム強度や重量の問題で地上に設置したサクシヨンポンプ等による排泥方式を選定した。

掘削機はベースマシンからワイヤーロープで吊り下げ、ケーブルリールに巻かれた導電ケーブルを介して掘削機に搭載した水中モータを駆動し、動力伝達装置を介して各カッターを駆動回転させる。また、高精度位置管理システムから得られた掘削機の絶対位置や捻れなどの情報を基に、アジ

ジャスタブルガイドによって掘削機の姿勢を制御することができる。以下にTRUST-21型掘削機の主な仕様を述べると共に、構造図を図-1に示す。

(1)掘削機の形状、重量

TRUST-21型機は、最小厚さ200mm（最大厚さ600mm）、幅3,980mm、高さ7,318mmでありフレーム強度から実用上最大限に近い寸法となっている。重量は24t（水中重量21t）であり、80tクラスのベースマシンが必要となる。

(2)動力

駆動装置として18.5kwの電動油封式水中モータを左右1台づつ搭載している。これらのモータは、左右単独に駆動できるようになっている。さらに、インバータ制御盤（22kw×2台）を用いてモータの回転数を変化できるようにしているため、初期掘削時やレキ掘削など振れや衝撃を伴う地層に対しては回転数を下げるなどして掘削条件に合わせて適切な回転数を選定することができる。また、サイドカッターとオフセットビットに負荷が集中的に作用した場合のギアの損傷を防ぐために、摩擦力によるクラッチタイプのスリップ機構を備えている。

(3)カッター

壁の主要部分である20cm厚を掘削するディスクカッター2枚、水中モータ・ギアボックスの下部を掘削するサイドカッター4枚、そしてエレメント間のラップ部を掘削するオフセットビット2組から構成される。これらのカッターで、沖積土から軟岩（ $q_u=500\text{kg}/\text{cm}^2$ ）までの地盤を掘削することが可能である。

(4)アジャスタブルガイド

前後両面の上下に各4箇所（計8箇所）、左右両面の下部に各1箇所（計2箇所）に、ストローク50mmの電磁操作油圧シリンダー式アジャスタブルガイドを取り付けている。これらのアジャスタブルガイドによって掘削機の姿勢を制御することが可能である。

(5)その他

大深度掘削に対応できるように掘削機には本体内に油を充填し、高感度圧力バランス装置により内部圧を水頭圧とバランスさせてシール性能の信頼性を図っている。また、固化材を機械攪拌することでモータに負荷がかかり発熱するのを防ぐ目的でモータ外筒をジャケットで被い、冷却水を循環して強制冷却するようにしている。

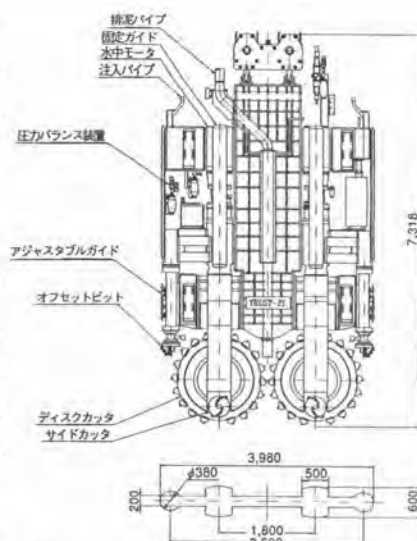


図-1：TRUST-21型掘削機構造図



写真-2：カッター部詳細

2. 高精度位置管理システム

すでに白鳥大橋や東京湾横断道路などの大型連続地中壁工事で多くの実績を有する高精度位置管理システムを搭載することにより、薄い壁厚で大深度まで精度良く施工することを可能とした。高精度位置管理システムは図-2に示すように、掘削機に位置検出用のワイヤを取付け、精度管理装置に設置したレーザ変位計により掘削機の移動に伴い発生する検出ワイヤの移動量をミクロン単位に測定することにより、掘削機の絶対位置・捻れ状態・傾き等を高い精度でリアルタイムに検出する。得られた情報を基に、掘削機のアジャスタブルガイドによって捻れや傾きを制御することで、深さに関係無く僅か5cm以内の精度で掘削機の位置をコントロールすることができる。

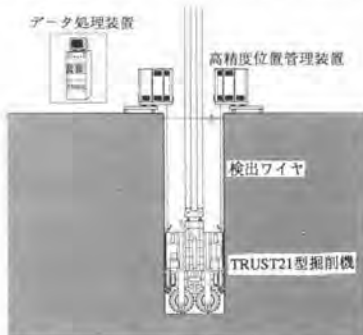


図-2：高精度位置管理システム



写真-3：高精度位置管理システム使用状況

3. 遮水壁の構築手順

本工法は、連続地中壁工法の回転式掘削機を用いた工法と同様に、安定液を用いて掘削した溝の安定を保ちながら掘削を行う泥水掘削工法である。本工法の施工手順図を図-3に、主たる作業内容を以下に示す。

(1)掘削

掘削方式は、掘削機のカッターで切削した土砂を、安定液と共に地上のサクションポンプまたはエアリフト方式にて排出し、地上で固液分離を行う逆循環方式である。高精度位置管理システムを用いて掘削機の位置を制御することにより、深さに関係無く5cm以内の精度で掘削することが可能である。

(2)スライム処理

所定の深度まで掘削が完了した後、掘削機を用いて溝底に堆積した掘削スライムの処理を行う。実証実験では、掘削機を利用した良液置換方式にて行った。

(3)固化

地上で混練した固化液を掘削機の両端に取り付けられた供給口から溝内へ供給し、安定液と置換する。掘削機械が固化液に埋没した時点から、固化材の供給量に合わせて掘削機を上昇させる。掘削機の上昇に伴いカッターを回転させ攪拌するので、局所的な弱点が無くなりむらのない均一な固化体を構築することができる。

(4)先行部完了

所定の高さまで固化を行い、1つのエレメントの施工が終了する。先行エレメントは1つおきに施工する。

(5)後行部施工

先行エレメントの間を掘削して後行エレメントを施工する。先行エレメントの端部を再掘削することにより、ジョイント部の水密性を高めている。

(6)遮水壁完成

以上の作業を繰返し、高品質な遮水壁が完成する。

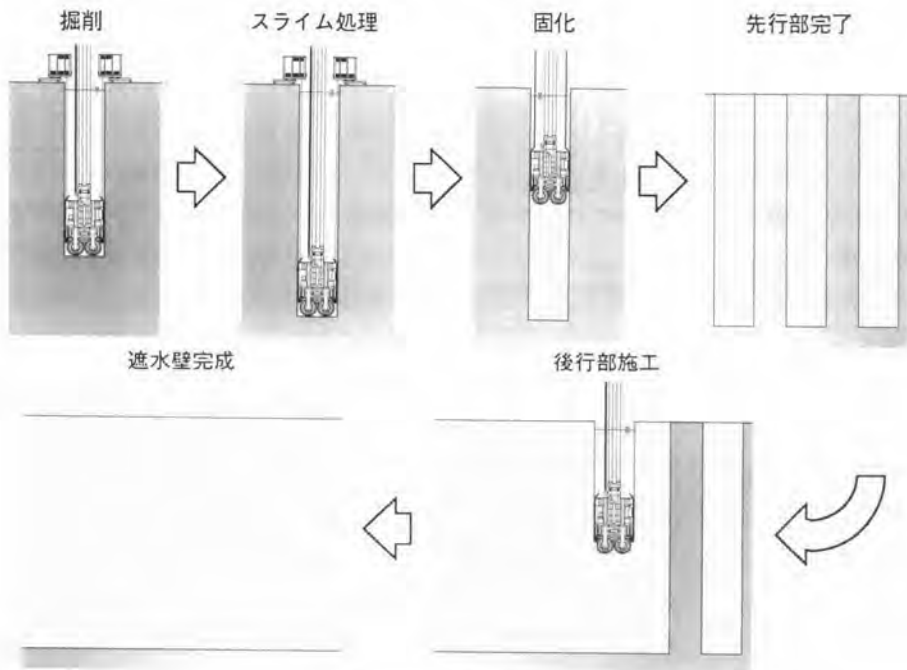


図-3：施工手順図

4. 実証実験の概要

TRUST工法の構築技術を確認すると共に、その遮水性能を確認するための実証実験を行った。エレメント割付図は図-4に示すように、4エレメントで平面形状が正方形となるように施工した。また、実験場所の土質柱状図を図-5に示す。土質はローム、粘性土、細・中・粗砂、砂礫等の層からなり、当工法の施工性を把握するには最適な地盤であった。掘削深度は、構築した壁の遮水性能を調査するために、不透水層と考えられるGL-25m付近から介在する粘性土に3m根入れして28mまで施工を行った。さらに掘削機の性能を確認するためにEL.4エレメントだけ100mまで掘削を行った。尚、実証実験では、掘削に用いた安定液とセメントを地上のプラントで混合し、この泥水固化材を溝内の安定液と置換して遮水壁の構築を行った。

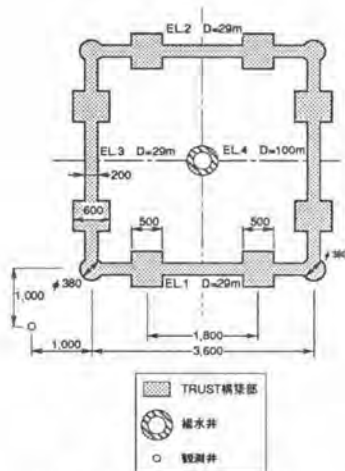


図-4：エレメント割付図

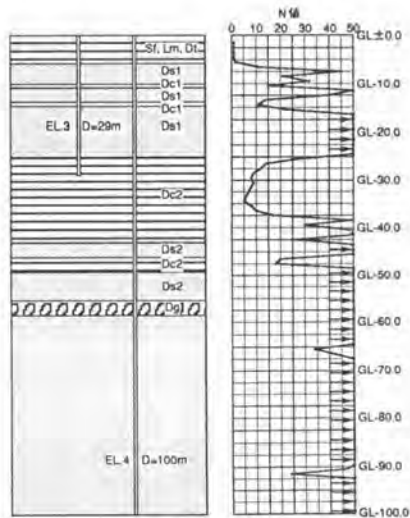


図-5：土質柱状図

5. 実験結果

以下に、掘削能率、掘削精度、遮水壁の性能などの主な実験結果について示す。

(1)掘削能率

土質毎にN値と掘削能率の回帰分析を行った結果、掘削速度は土質別にそれぞれ土質のN値によって分類できることが判った。土質別に整理した掘削能率を表-1に示す。一部の軟弱粘性土層を掘削するときにオフセットビットに粘土の絡み付きがあり掘削能率が低下したこともあったが、ほぼ全土質に渡りN値との相関性が得られた。表に示すように、掘削能率は全層に渡って4.0m/Hr前後の掘削が可能であり、実用に供する範囲であった。

ただし、今回の実験だけでは施工数量が少ないので、この結果を本工法の掘削能率と一概に決めることは出来ないが、今後のデータ収集・整理に関しての方向付けとなった。

(2)掘削精度

本工法では、高精度位置管理システムを使用して5cm以内に管理することを目標に掘削機の制御を行った。目標深度到達後に、超音波測定器によって調査した溝壁測定結果から掘削精度は、EL.4の100m掘削時にセンター変位量で30mm以内であり1/3500以上の精度を確保することができた。また、超音波データと高精度位置管理システムの掘削履歴図との比較を図-6に示す。溝壁の肌落部分を除外して両測定方法のセンター変位量を比較すると、最大で2cm程度の誤差であり相関性も非常に高い。以上の結果より、高精度位置管理システムを使用して掘削することによって、深さに関係無く50mm以内の精度を確保できることが確認された。併せて、本掘削機にはストローク5cmのアジャース

表-1：土質別掘削能率(全エレメント)

土質分類		実掘削能率(m/Hr)
0 < N < 50	砂質土	3.5~5.0
	粘性土	4.0~5.0
50 ≤ N	砂質土	2.5~3.5
	粘性土	3.0~4.0
砂礫(最大礫径50mm)		4.0~5.0

実掘削能率とは掘削作業に関する排泥管の接続作業や修正掘削時間、溝内安定液循環時間などを純掘削能率に加えたものとする。

ダブルガイドを設けているが、その修正機能も充分に発揮されたことが解った。

(3)品質確認

TRUST工法の品質確認は、その主たる目的である遮水性能の評価を中心に行った。確認方法は、TRUST壁によって囲まれた内部の水を汲み上げて水位の回復状況を測定し透水係数を求める揚水試験を現場で行った。さらに壁をコアボーリングして得られたサンプルに対して一軸圧縮試験や透水試験を行った。以上の結果を表-2に示す。揚水試験とコアサンプルそれぞれの透水係数を比較すると近い値を示しており、壁全体に渡って均一な泥水固化体が構築できたことが確認された。また、室内透水試験は、場所を変えて採取した供試体により透水試験を行ったが、透水係数のばらつきが少ない。以上の結果から判断すると、機械的な攪拌による置換方法を行なう事は、局所的な弱点の発生を極力減らし効率の良い構築が行えると考えられる。

(4)まとめ

以上に示した試験結果以外にも、掘削機の性能、安定液の管理、固化液のハンドリングなど多くの試験を実施し、それぞれ満足する結果が得られた。

おわりに

TRUST工法の実証実験工事は、施工性、品質などの確認を行い良好な結果を得ることができ、すぐにも実際の工事に適用できる技術であることが確認された。また現在は、ここに紹介した固化材料に加え、変形追随性をもつ $k=10^{-7} \sim 10^{-8} \text{ cm/sec}$ 程度の遮水材料も開発が完了しており様々な条件に適應できる技術となっている。今後、実工事への適用を進め、より信頼性が高く、多目的に使用できる技術をめざしている。

参考文献

- 1)熊野隆喜・内藤植二：最近の連続地中壁工法から見た薄膜遮水壁TRUST工法,建築技術, No.8, pp.116~121, 1993.
- 2)池内義彦ら：薄膜遮水壁工法 - 壁厚20cmの遮水壁の構築方法について -, 第49回土木学会年次学術講演会, 1994.
- 3)樋口雄一ら：薄膜遮水壁工法 - 変形追随性をもつ遮水材の基本性状について -, 第49回土木学会年次学術講演会, 1994.
- 4)荒井政明ら：連続地中壁の高精度位置検出システム, 建設機械と施工法シンポジウム論文集, pp.190~193, 1990.

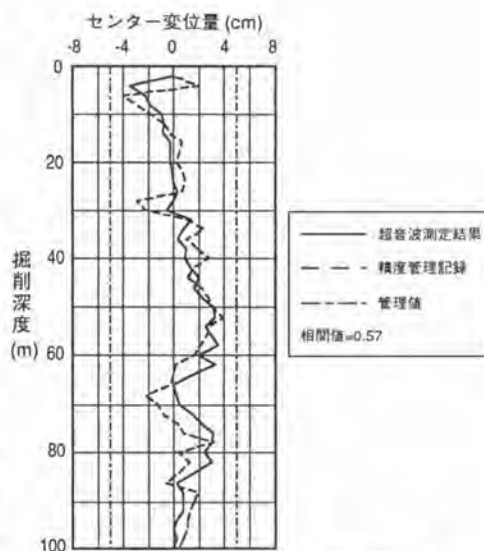


図-6：超音波測定結果と高精度位置管理システムの比較

表-2：品質確認試験結果

試験名	試験値
揚水試験*1	$k_H = 1.3 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$
一軸圧縮試験*2	$q_v = 9.3 \text{ kgf/cm}^2$
	$E_{50} = 2,400 \text{ kgf/cm}^2$
透水試験*2	$k_v = 1.6 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$

*1：図-2の中央の揚水井から揚水し地下水水位の変化を観測して求めた。

*2：コアサンプルによる室内試験の平均値