総論

土圧式の強み

和田（わだ）　浩治（こうじ）
機動建設工業㈱
取締役土木本部長

1　はじめに

大中口径管推進工法−密閉型3工法（泥水式、土圧式、泥濃式）のシリーズ特集の2回目である今月は土圧式推進工法です。土圧式は、土木学会のトンネル標準示方書で、カッタチャンバ内への添加材の注入の有無によって土圧シールドと泥土圧シールドに分類され（公社）日本推進技術協会においても、推進工法でも土圧式推進工法と泥土圧式推進工法に細分類しています。土圧式（土圧式+泥土圧式）の施工延長は、大中口径管推進工法による下水道管路敷設においては全体の10%程度で、他の密閉型2工法（泥水式および泥濃式）と比較して採用件数は決して多くありません。しかし呼び径3500以上の超大口径管推進工法を見ると、現在までに完了しているすべての密閉型推進は泥土圧式によって施工されています。また、シールド工法では泥土圧シールドによる施工件数が7割以上を占めて、密閉型シールドでは泥水工法と比較して（シールド工法では泥濃式は採用されていません）断然リードしています。また、現在では土圧式のほとんどが泥土圧式により設計・施工されており、その基本概念である「泥土化による切羽安定」は、さまざまな小口径管推進工法にも取り入れられています。

本稿では土圧式推進工法の基本と他の2工法と比較して優れている特徴、およびその特徴が生かせる場面などを解説していきたいと思います。

2　土圧式（泥土圧式）推進工法誕生の背景

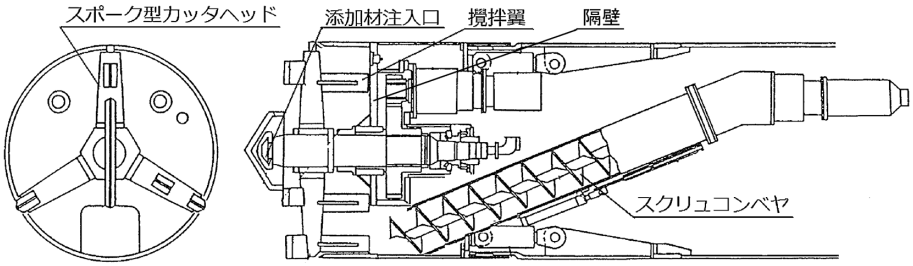
密閉型3工法の中では泥水式の開発が最も早く、1965年に泥水式推進工法が初めて施工され、シールド工事や推進工事で施工実績を着実に増やしていきました。このような中で、泥水式に対抗する工法として、泥水処理のための大がかりな地上設備を必要としないことを特長に、シールドメーカやゼネコン各社が土圧式の開発に取り組まれました。この開発の過程では、土圧シールドと泥土圧（泥土加圧）シールドの二つの流れがありました。以下にそれぞれの開発背景を簡単に整理してみます。

2.1　土圧シールド

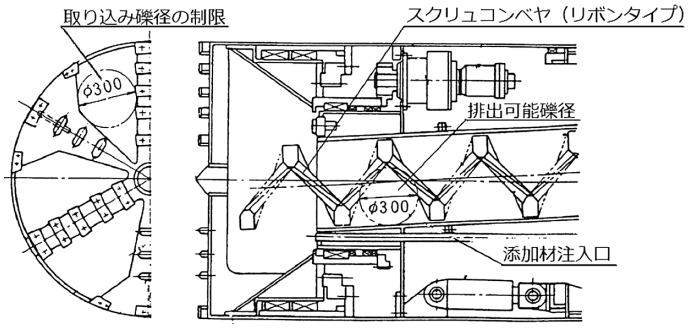
土圧シールドは、シールドメーカが主体となって開発されました。概念的にはブラインドシールドに機械シールドの要素（カッタヘッド+スクリュコンベヤ）を組み合わせたメカニカルシールド（土圧バランスシールド）で、1974年に実現場（東京、下水道水元幹線）に採用されました。

ブラインドシールドは、JIS A8201-1993に「切羽面を密閉し、その一部に調整可能な土砂取出し口又は取出し装置を備えているもので、シールド掘進機を地山に貫入させ、フード内の土砂に塑性流動を起こさせながら排土するもの」と規定されているように、軟弱粘性土地盤に用いられていたものです。隔壁に5%程度の開口を開けておくと、シールドジャッキで推すだけで開口部から土が押し出され、圧気や薬液注入等の補助工法を必要と

しないで安全な掘進ができました。1965年頃から用いられていましたが、地盤の変化（粘性土分の増減）に応じて開口を調整する必要があり、また砂分が増えてくると閉塞し排土できないといった問題がありました。このような地盤の変化に、カッタヘッドによる掘削・混練とスクリュコンベヤの回転数調整による実質開口率の拡大（縮小）で対応したのが土圧バランスシールドです。土圧バランスシールドは、基本的に掘削土砂のみで切羽の土圧・水圧とバランスを取るもので、砂分が多い地盤では圧密脱水によるチャンバ内での固結や閉塞等の問題がありました。これらを防ぐためにチャンバにステンレス鋼材を用いたり、チャンバ内にエアーを送ったり、といった様々な方法で土砂の付着や固結を防止する方法がとられましたが、根本的な解決にはいたらなかったようです。



図－1　泥土加圧シールド



図－2　泥漿（でいしょう）シールド

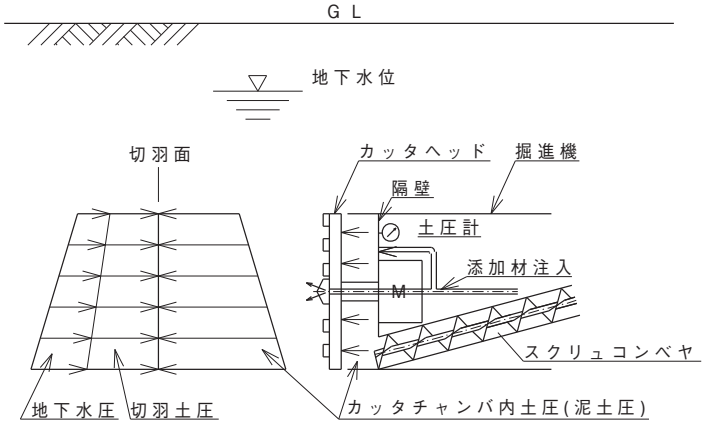
2.2　泥土圧（泥土加圧）シールド

泥土圧シールドの先駆けである泥土加圧シールドは、(公社)日本推進技術協会の会員でもある大豊建設㈱が1974年に特許出願し開発を進められたもので、粘性土分の少ない地盤でも添加材を注入しスポーク型のカッタで攪拌・混練することでチャンバ内の掘削土砂に流動性を持たせ切羽の土圧・水圧に対抗させる工法です（**図－1**）。泥土加圧シールドは、1976年に東京、葛飾区青戸の下水道工事に採用され（シールド工事：仕上り内径1650mm×トンネル延長160m）、また、同工事で呼び径1350×延長51.6mの推進工事も施工されています。

その後、土圧バランス式の発展形として、カッタチャンバ内に添加材を注入しリボンスクリュ（後述）で礫（玉石）を排出できる泥漿（でいしょう）シールド（**図－2**）、カッタチャンバ内に注入した添加材と掘削土砂をカッタチャンバ内で前後に摺動するカッタヘッドによって攪拌・混練する削土密封式といった様々な掘進機が開発されましたが、現在は泥土加圧シールドの考え方が泥土圧シールド（泥土圧式推進工法）の標準になっています。

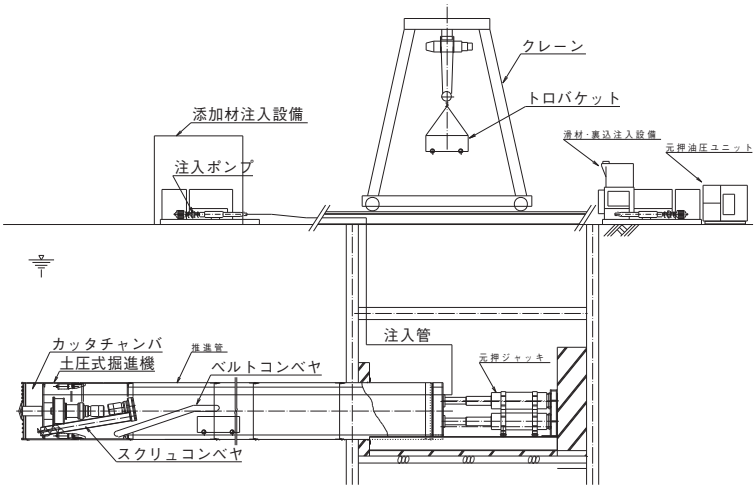
2.3　土圧式による切羽の安定

土圧式推進工法は、①掘進機のカッタチャンバ内およびスクリュコンベヤ内を泥土で満たし、②元押ジャッキの推進力により泥土圧を発生させ、③スクリュコンベヤで排土量を制御することによって泥土圧を切羽の土圧および地下水圧に見合う適正な圧力（掘進管理土圧）に保持することにより切羽の安定を図ります（**図－3**）。



図－3　土圧式の切羽安定方法

添加材は、一般的に、掘削対象地盤のシルト・粘土分の含有率が30%未満の場合に注入し、掘削土砂と攪拌・混練りすることで塑性流動化（泥土化）を促進させます。



図－4　土圧式推進工法説明図

3　土圧式推進工法の基本機構

図－4は土圧式推進工法の説明図で、土圧式固有の設備を主に示しています。以下にその概要を記します。

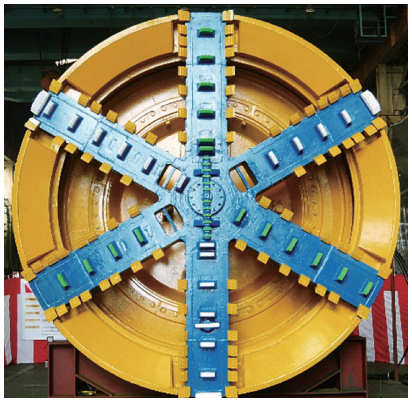
3.1　掘進機

泥水式は泥水圧に加えカッタヘッド（面板）で切羽を抑えるという概念がありましたが、土圧式ではカッタチャンバ内の泥土によって切羽の土圧・水圧に対抗することから、カッタヘッドの形状は比較的自由に設定できます。一般的に、カッタヘッドはスポーク型が多く用いられています（**図－1**）。

【大径礫への対応】

掘進機から排出できる礫の大きさは、搭載できるスクリュコンベヤの大きさによって制限されます。したがって、スクリュコンベヤの能力を超える大径礫が出現する場合は、カッタヘッドを面板構造にして取り込める礫の大きさを制限し、面板部分にローラカッタやシェルビットを装備しカッタヘッド前面で大径礫を破砕する方法が用いられます（**写真－1、2**）。

写真－1　ローラカッタ



写真－2　シェル型ビット

3.2　スクリュコンベヤ

スクリュコンベヤは土圧式掘進機の重要な機構であり、カッタチャンバ内の泥土を排出する機能とカッタチャンバ内の泥土圧を切羽の土圧・水圧に対抗できる圧力に保持する機能を備えていなければなりません。

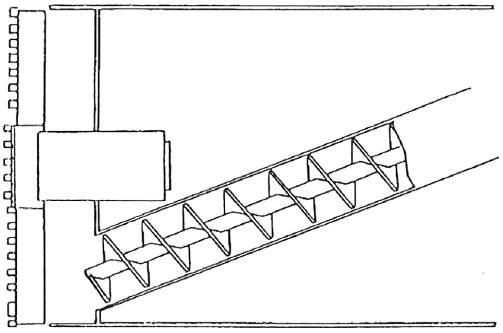
スクリュコンベヤの形式には、軸付きのオーガタイプ、スクリュ羽根だけで軸を持たないリボンタイプがあります。各形式は、それぞれ次のような特徴があり、施工条件によって使い分けられています。

①オーガタイプ（軸付き）

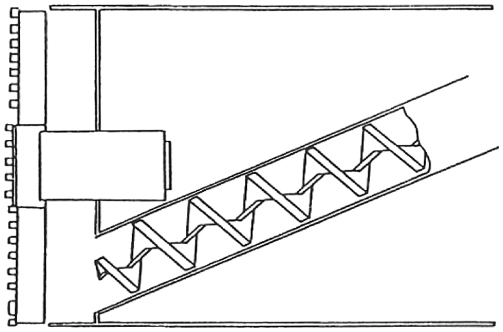
圧力保持能力は高いが、軸がついているため、排出できる礫径が制限されます（**図－5**）。

②リボンタイプ（軸なし）

オーガタイプより大きい礫、粗石・巨石等を排出できますが、圧力保持能力に劣ります。このため、スクリュコンベヤ後部にサンドプラグ形成装置や排土ゲートの開閉調整装置を設けることで、圧力保持能力を高めています（**図－6**）。



図－5　オーガタイプ（軸付き）



図－6　リボンタイプ（軸なし）

3.3　添加材注入口

掘進機には添加材注入のための注入口がカッタヘッド（中心部・スポーク部）やカッタチャンバに設けられます。添加材注入口は、掘削土砂の塑性流動化を促進するため、十分な量の添加材を適切な位置に注入できなければなりません。したがって、注入位置、注入口径、口数等については、土質条件、掘進機口径の大小、掘進機構造等により適切に選定する必要があります。また、注入口は、土砂で詰まった場合の補修、掃除等が困難なため、破損および目詰まりを防止できる構造を検討する必要があります。

3.4　添加材注入設備

添加材注入設備は、流量計、圧力計、注入ポンプ、ミキサ、貯留タンク、配管材および材料置場等から構成されます。添加材注入設備は、カッタトルクの変動、切羽地盤への浸透、スクリュコンベヤからの排出土の状態、カッタチャンバ内泥土圧等に応じて注入量を設定制御できるものが必要です。

3.5　土砂搬出設備

土圧式ではスクリュコンベヤから排出される土砂の状況を確認しながら掘進管理を行います。一般に、スクリュコンベヤから排出された土砂は、ベルトコンベヤやスクリュフィーダを介してトロバケットに積み込み、ウィンチでのけん引やバッテリーカーなどで坑外に搬出します。また、最近の長距離、曲線施工においては土砂圧送ポンプを使用して坑外まで搬出する事例が多くなっています。

4　土圧式推進工法の特徴（強み）

前述したように現状では土圧式推進工法の採用件数は密閉型の他の2工法と比較して低調ですが、その特徴が劣っているわけでは決してありません。むしろシールド工法における採用状況にみられるように、特徴が正しく理解されればその活躍の場は多くあると考えます。ここでは土圧式推進工法の特徴と、その特徴が生かせる場面などを解説していきます。

4.1　狭小な作業基地での施工

シールド工法における土圧式の採用理由の中で最も多いのは作業基地面積です。泥水式の場合は泥水処理プラントの設置に大きな面積を必要としますが、土圧式の場合、**図－4**のとおりコンパクトな添加材注入プラントで施工が可能ですので、とりわけ工事基地の確保に苦心する市街地での施工では必然的に土圧式の採用が多くなります。中口径以下の推進工法においては極論すれば車上プラントでの施工も可能で、工事基地の確保が困難な場合でも対応可能です。

4.2　小土被りでの施工

小土被りの施工は切羽バランスの保持を厳密かつ繊細に行わなければならず高度な技術（技量）が要求されますが、土圧式工法は小土被りの施工においてある意味最適な工法です。泥水式では泥水圧は【地下水圧＋変動圧（0.01～0.02MPa）】に制御するのが基本ですが、小土被りの施工では切羽圧の設定範囲が極端に狭く地上に泥水が噴発する危険と常に隣り合わせになります。例えば土被り2mで地下水位GL-1mの場合、自然水圧は0.01MPaで泥水圧は0.02～0.03MPa程度を保持しなければなりません。しかし土被りは2mですからこの泥水圧は地上に達する位置水頭で、少しでも泥水圧が高くなれば地上に噴出する可能性がありま

す。特に泥水環流が何らかの原因で閉塞した場合、切羽圧が瞬時に上がって地上に泥水が噴発してトラブルになるケースがよくあります。一方、土圧式では切羽の保持はチャンバ内の塑性流動化した掘削土の土圧で行うため瞬時に大きく変動することはなく、土圧の制御範囲は主働土圧～受働土圧の間で管理しますので泥水式ほど繊細な管理ではありません。また、泥濃式の場合はスクリュコンベヤの装備がないため、掘削土を流動化させて押し出す機構ですので、土被りが小さい場合は泥土圧（チャンバ内土圧）を大きくすることができないため、掘削土の排出のためには流動性をより高めなければなりません。そのため添加材をより多く使用して土圧式の排土よりもさらに流動化した状態にする必要があります。

4.3　大土被りでの施工

大土被りの施工には完全な機械式密閉型工法である泥水式が最適ですが、土圧式でも十分対応は可能です。土圧式は泥濃式と違ってスクリュコンベヤを装備しているため、チャンバ内あるいはスクリュコンベヤ内で掘削土が塑性流動化すれば切羽（チャンバ）を密閉することが可能です。スクリュコンベヤは切羽（チャンバ）を密閉するプラグゾーンの役割を果たしつつ、土砂を強制的に搬送する役目も果たす重要な機構です。大土被りの施工においては高性能な添加材の注入と混練りによる完全な塑性流動化を図ることはもちろんですが、二次スクリュを直結したり圧送ポンプ（フィーダ）を直結したりしてより密閉性を高めることも可能です。

4.4　礫地盤での施工

土圧式推進工法が礫地盤で活躍できる理由は二つあります。ひとつはルーズな礫地盤においては透水係数が泥水式の適用範囲である1×10^{-2}cm/secよりも大きく、地盤改良などの補助工法を併用しなければ適用できない場合。ふたつ目は巨礫で面板による一次破砕が必要な場合、土圧式ではリボンスクリュに取り込める程度の破砕でよく、ローラカッタにかかる負荷が軽減されるため摩耗量が少ないという利点です。透水係数の問題は泥水式における唯一といっていい弱点ですが、土圧式においては高濃度、高粘性の添加材を注入して掘削土の塑性流動化を図れば施工可能になる場合がほとんどです。摩耗量に関してはさまざまな意見があると思われますが、面板のローラカッタの配置、スリットの大きさ、スクリュの通過粒径を適切に設定すれば、ビットの摩耗量を低減することは十分に可能です。

4.5　土質が変化する地盤での施工

土質変化への対応は3工法の密閉型推進工法それぞれで異なります。泥水式の場合はジャッキスピード、泥水圧調整とともに作泥を含む泥水の比重、粘性の管理値を変更し、土圧式の場合はジャッキスピード、スクリュコンベヤの回転、ゲートの開度、切羽土圧などの調整とともに添加材の材料、配合、注入量を変更し、泥濃式の場合はジャッキスピード、排泥バルブの開度、切羽土圧の調整とともに高濃度泥水の材料、配合、注入量などを変更して対応します。この中で排土あるいは流体の切羽への還流をできるだけ行わずに、添加材の変更、カッタの回転、スクリュの正逆回転などで強制的に調整が可能なのは土圧式です。また、部分的に硬質土や巨礫が出現してジャッキスピードを落とさざるを得ないような場面でも、前面の土圧を保持して所定の量の掘削土砂を強制的に調整して排土すれば取り込み過ぎなどのトラブルが発生することはありません。泥濃式においては泥土圧（チャンバ内土圧）を適切に保持しながら排土すればいいことは土圧式と同様ですが、排土を行うためには前面地山に押し付けるか添加材の注入を継続して泥土圧を保持する必要があります。硬質土や巨礫層では無闇に押し付けることはできませんので、必然的に添加材の注入量が極端に多くなります。

4.6　長距離施工

長距離施工においても日進量の低下もなく効率的に施工できるのは泥水式ですが、土圧式でも普通土や一部の硬質土、礫質土の場合は効率的な施工が可能です。当然のことながらトロバケット排土では推進距離が長くなれば効率が低下して他の工法より非効率になりますが、掘削土砂の圧送が可能であれば土砂圧送ポンプの使用によって泥水式と同等程度の日進量を確保することができます。400～500m以上の長距離施工の場合は中継の圧送ポンプを使用して、自動制御することも可能です。また、測量管理は泥水式と同様にジャイロの装備と自動測量などで、長距離施工においても効率的な施工が可能です。

4.7　工事費（経済比較）

設計段階において機械式密閉型の3工法から工法選定する場合、特殊なケースは別として3工法とも施工可能であるため、最終的には経済比較になるのが一般的です。経済比較は条件によって異なりますので実算によってなされるべきですが、一般的には土圧式は経済的な工法です。プラント設備を含む仮設備は泥水式より簡易ですし、日進量は土砂圧送ポンプなどを用いて連続搬送すれば泥濃式と同等かより多く、残土量は砂地盤を除く泥水式や一般の泥濃式より少なくて済みます。そのため施工可能と判断されれば設計段階における工法比較は、土圧式を加えた3工法で行うのが適切だと考えます。

5　土圧式推進を支える技術

土圧式推進工法を周辺から支える技術としては添加材の進歩と掘削土砂搬送設備があります。

5.1　添加材

土圧式推進工法で使用される添加材は、もともとは掘削土の塑性流動化に対して不足する細粒分（粘性土分）を補うためのもので、粘土やベントナイトを主体とした泥漿が主流でしたが、最近では高分子系が取り扱いやすく多く用いられています。また、その目的も細粒分の補足だけではなく、増粘による流動性の促進や土粒子の分離防止、付着防止、止水性の向上など、対象土質によってさまざまな添加材が提案されています。高水圧下の施工や長距離施工の管内搬送などを考慮した二液タイプの特殊な添加材なども提案されています。また、ベントナイトの質やミキシングする水や地下水の水質によってはその効果にばらつきがあるため、使用に当たっては現地での試験練りを行って選定するほうが良いと思われます。注入量は掘削土が塑性流動するのに必要な量つまり不足する細粒分を補う量ですが、土砂圧送ポンプを使用する場合はスクリュコンベヤから排出された掘削土砂が後述する生コンのような性状になる注入量が必要です。

5.2　残土搬送設備

掘削土砂の搬送は泥水式ならば流体輸送、泥濃式ならば吸引排土というように工法によって決まっていますが、土圧式の場合はスクリュコンベヤからの排土の先はウィンチけん引によるトロバケット、バッテリーカー、土砂圧送ポンプ、吸引など施工条件によって選定します。もちろん基本はトロバケット搬送ですが短距離、直線の場合以外は安全および効率の問題で敬遠されがちです。長距離曲線施工において最も効率よく搬送できるのは土砂圧送ポンプですが、礫径や礫率によっては圧送不可の土質があるため事前の検討が重要です。大まかに言うならばもともとコンクリートの圧送用であるため掘削土砂を生コン状態まで流動化できれば圧送可能ですが、40 ㎜以上の礫を含む場合や礫率30%以上の場合は圧送困難です。そのような場合はバッテリーカーによる搬送が採用されるケースが多くあります。

6　おわりに

本稿は④土圧式推進工法の特徴（強み）の冒頭に記したように土圧式推進工法がふたつの他の機械式密閉工法と比較して決して劣っているわけではなく、その特徴が正しく理解されればその活躍の場は多くあるとの考えで執筆させていただきました。また、㈱日本推進技術協会の「推進工法体系」および「推進工法用設計積算要領」などには機械式密閉型の3工法（泥水式、土圧式、泥濃式）が並列して記載され、3工法が平等に比較できる記述になっていますが、下水道事業の指針である㈱下水道協会の「下水道用設計積算要領」には機械式密閉型の工法では泥水式と泥濃式のみの記述で土圧式の記述はありません。そのため同法人の「下水道用設計標準歩掛表」にも土圧式の標準歩掛りは提示されていません。もちろん、ここに記載がなくても独自の検討、判断で設計することは可能ですが、これからの雨水管路整備などの比較的大口径の設計積算においては土圧式推進工法をその検討に加えるべきと考えますので、ぜひ上記2巻の記載に土圧式工法を加えて適切な比較検討がなされるようになることを望みます。

読み返してみると筆者の過剰な思いが前面に出すぎた文章になってしまいましたが、本文が今後の土圧式推進工法の採用に少しでも寄与できれば幸甚です。

機動建設工業㈱取締役土木本部長　和田浩治