

総

論

地下水に挑む守る

地下水に挑む技術と 地下水を守る技術

なかの まさあき
中野 正明

機動建設工業(株)
代表取締役社長
(本誌編集参与)



1 はじめに

1.1 地下水に挑んだ歴史

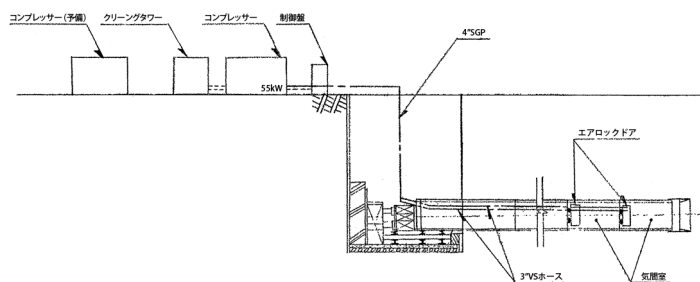
我が国での推進工法の歴史は開放型の刃口推進に始まり、当然のことながら切羽の湧水と戦いながらの施工でした。その後、今ではほとんど見受けられなくなっていますが、圧気工法、ブラインド刃口（圧密刃口）やウェルポイントな

ど地下水に挑む技術が開発されて、地下水位以下の帯水地盤でも推進工法で施工できるようになりました。また、薬液注入の一般化によって、地盤改良による切羽の自立を確保しながら施工できるようにもなりました。まさに地下水に挑んだ歴史という感があります。しかし、今ではこのような施工方法は特殊なケースを除いて採用されていません。

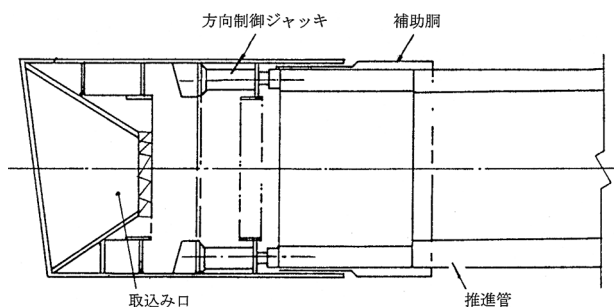
それは機械推進工法の開発、普及、進歩によるところが大きいと思われます。本稿前段ではまずこのような地下水に挑んできた歴史を踏まえて、現状の地下水対策の先端を解説いたします（図－1、2）。

1.2 地下水の価値を守る

本年3月に水循環基本法が成立し、地下水を含む水が「国民共有の財産であり、公共性の高いもの」と法的に位置づけられました。我が国の地下水や表流水（河川、湖沼）および海岸の海水を含む景観などは世界に誇る貴重な財産であり、近年は水環境の保全意識が高まっています。これをうけて、推進工法でも地下水の保全に配慮した技術の必要性を感じていますので、後段では水を守る推進技術について解説したいと思います（写真－1）。



図－1 圧気工法



図－2 ブラインド刃口図面



写真－1 清流

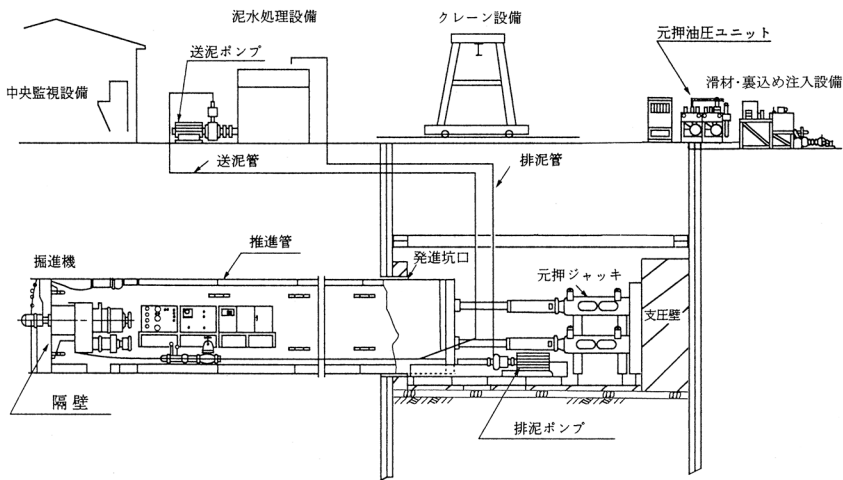


圖-3 泥水推進

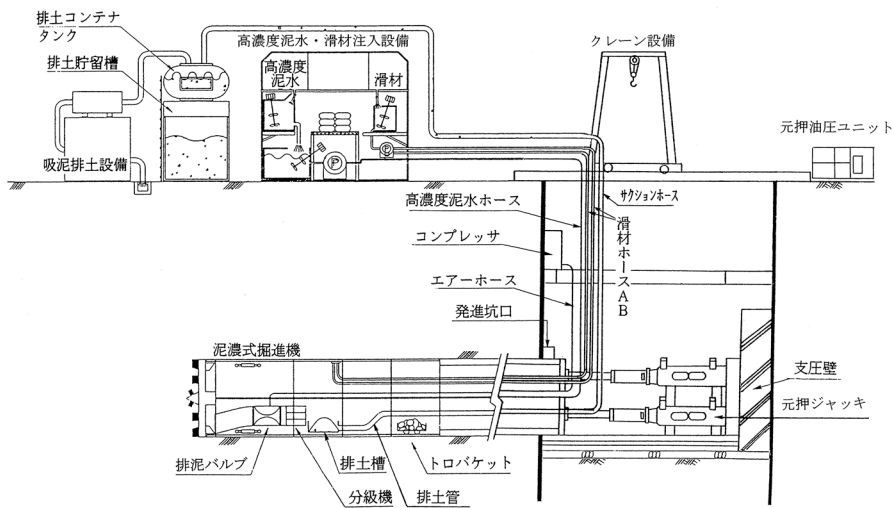


圖-4 泥濃推進

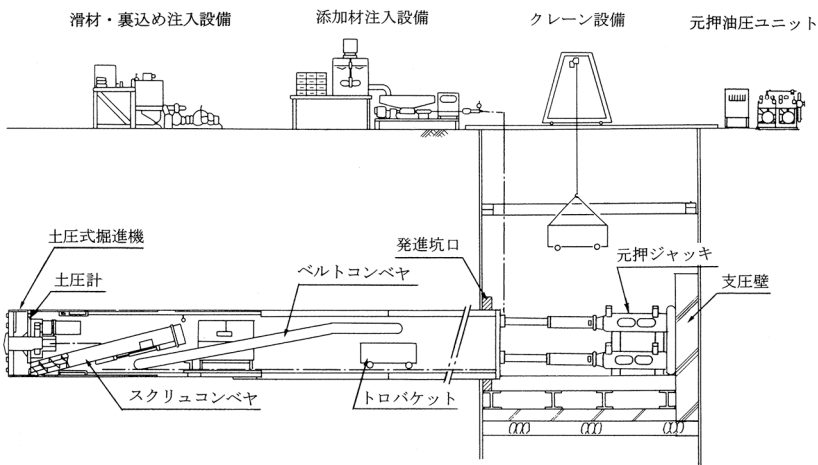


図-5 泥土圧推進

2 地下水に挑む

2.1 工法および掘進機

現在の推進工法で地下水に挑む技術は、当然機械式密閉型の各工法ですが、その工法別にいろいろな工夫や開発がなされています。その主たる技術は掘進機に施された様々な工夫ですので、まずそのあたりを見ていきたいと思います。

(1) 泥水式

泥水式推進工法はその原理から唯一の完全な機械式密閉型ですから、高水圧には適した工法と言えます。通常推進工法で施工する高水圧とは0.3～0.4MPaまでで、掘進機そのものの隔壁や軸受、中折れ部のシールなどはそれ以上の耐水性を確保していますので、掘進機の設計、製造、整備および使用方法を誤らなければ地下水に対して安心な工法です。むしろ問題になるとすれば地下水が無かったり透水係数が大きすぎたり($K > 10^{-2}$ cm/sec)で泥水の環流ができない場合です。このような場合の掘進機の工夫としては面板の開口を小さくしたりしますが、それより重要なのは施工時の泥水管理で、泥水の比重、粘性を上げたり逸泥防止材を使用したりします。それでも泥水の環流が確保できなければ、予め推進管路部を薬液注入などで地盤改良しなければなりません(図-3)。

(2) 泥濃式

泥濃式推進工法は高濃度泥水の注入と掘進機の練り混ぜ性能で削土を塑性流動化させ、チャンバ内の土圧を立てることによって排土管から残土を排出する工法です。また、チャンバ内の土圧の保持管理は排土管に設置したエアピンチバルブの開閉とジャッキの推進で行います。そのため地下水圧の高い地盤での施工には、掘進管理者や掘進機オペレータの技量が大切です。ここでポイントとなるのは掘進機の練り混ぜ性



写真-2 推進用ダクタイト管



写真-3 鋼・コンクリート合成管

能とピンチバルブによる排土の制御です。掘進機の練り混ぜ性能に関しては、一般的にスポークや攪拌翼を装備して、カッタ回転はトルクより回転数を大きくとっています。外周の回転速度は20m/min程度は確保します。また、ピンチバルブによる制御は操作する掘進機オペレータの技量が必要ですが、万一のために2個のバルブを装備したりスクリュコンベヤを後続させたりするケースもあります(図-4)。

(3) 泥土圧式

泥土圧推進工法も添加材の注入と掘進機の練り混ぜ性能で削土を塑性流動化させ、チャンバ内の土圧を立てることによって排土管から残土を排出する工法です。泥土圧方式の場合の排土管はスクリュコンベヤで、チャンバ内の土圧保持や排土の制御はスクリュコンベヤの回転制御とゲートの開閉で行います。つまり強制的な制御が可能ですので比較的高水圧下でも施工が可能です。シールド工法などでは泥水方式と同じく地下水圧が0.3~0.4MPaまでの施工事例があります。高水圧施工に対する掘進機の工夫としては、プラグゾーンとしてスクリュコンベヤの長さを長くしたり、二次スクリュをゲートに直結したりすることがあります。しかしながらこの場合も最も重要なのは掘削土の塑性流動化ですので、添加材の配合、注入量、注入位置の検討および掘進機の練り混ぜ性能の確保が必須です(図-5)。

2.2 推進管

地下水に挑む推進管といえばヒューム管では高水密推進管ですが、継手の止水性能の確保と管体自体の強度の確保があります。また、それ以外の管種では鋼管、ダクタイト管などはもともと高水圧に対応可能な推進管が提供されています。そのためここではコンクリート管で地下水に挑む推進管を紹介いたします(写真-2)。

(1) 管体

高水圧に対応する推進管は当然のことながら、その土圧と水圧に対して十分な外圧強度を確保していなければなりません。下水道協会規格(JSWAS)では1種から2種までの外圧強度がありますが、それを超える場合でも鉄筋量の増加、ガラス繊維の付加あるいは鋼、コンクリート合成管などで対応することがあります(写真-3)。

(2) 継ぎ手

高水圧施工において推進管に起因するトラブルの多くは継手の漏水です。ヒューム管の継手は曲線施工の場合はもちろんですが、直線施工でも方向修正のために目地が開閉します。そのため鋼製カラーにスピゴッド部を挿入し、ゴムリングで止水します。下水道協会規格ではその許容開口長と止水性能別にJA、JB、JCの3種類の継手があり、止水性能はJAは0.1MPaでJBおよびJCは0.2MPaです。それを超える水圧に対しては特殊な継手が必要ですので、

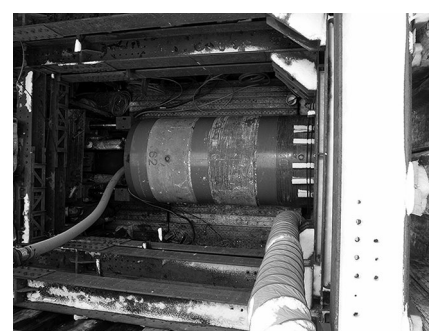


写真-4 高水密管

メーカー各社によってさまざまな高水密タイプの継手が開発されています。主なものとしては、鋼製カラーおよびスピゴッドの品質を確保したうえで、ゴムリングを2重、3重にしたり、ゴムリングの形状(リップ)に工夫を加えたり、水膨潤ゴムなどの特殊な材質のゴムリングを併用したりです。施工にあたっては当然のことながら、ゴムリングの挿入を正常に行わなければなりませんので、ゴムの接着が確実に行われていることを確認して、慎重に挿入しなければなりません。とりわけ掘進機直後の先頭管の挿入はより一層慎重な施工が必要です(写真-4)。

(3) 中押管

高水圧下の施工でもう一つ問題になるのは、中押し設備の稼働です。中押管の摺動は標準管の目地の開閉とは違って、その摺動量、回数が圧倒的に多く、ゴムリングの摩耗あるいは最悪の場合損傷で漏水するケースがあります。また中押ジャッキのバランスの問題

や蛇行、曲線施工などによって前後の管(S/T)の中心がずれて漏水するケースもあります。現状の中押管の規格では高水圧下の施工ではゴムリングを劣化させない滑剤の補給注入や中心保持の工夫をしたうえで、直線区間での使用が無難です(写真-5)。

2.3 施工および設備

(1) 発進

高水圧下の施工でまず初めに気を使うのは鏡切りと発進です。以前は地盤改良が不完全で鏡切り工の途中で出水して立坑が水没してしまうようなケースがありましたが、現在では地盤改良技術が進歩して事前の確認(探り穴)をしっかりしておけばそのような事態にはなりません。しかし高水圧下での長時間の開放は危険ですので、鏡切り完了後は速やかに掘進機を挿入する必要があります。

発進部に必要な特殊装備としては発進坑口リングがあります。積算基準にあるような通常の坑口は0.1MPa以下程度と考えるべきで、それを超える場合はゴムリングに工夫が必要です。主な例としては、ゴムリングを2重にしたり、エアチューブを使用したりヒンジ付きの

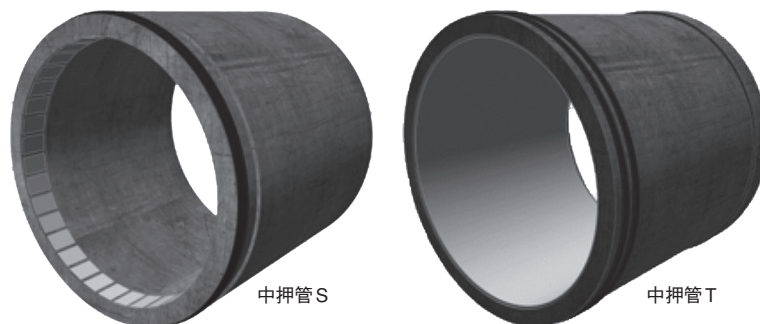


写真-5 中押管管内

フラップ方式のめくれ止め金具を使用したりです。どのタイプを使用するかは、費用も含めて考えると一長一短で、ケースバイケースで判断すべきです(写真-6)。

(2) Backing

高水圧下の初期掘進では元押ジャッキを引き戻す時に、掘進機が前面の土圧や水圧に押されて戻る現象があります。バックング(Backing)と呼んでいるこの現象は極端な場合は100m以上推進しても継続することがあります。そのため事前にBacking防止方法を検討して、金具などを設置しておかなければなりません。その方法にはいろいろあって特許も数件登録されていますが、

大きく分けて推進管にアンカを事前に埋め込んだりグラウトホールを利用したりしてストッパー金具を取り付けるタイプと、バンドやジャッキで推進管を締めこんで止めるタイプの2種類です。どちらも実績がありますので、使用する推進管の種類や水圧(Backing力)によって選定します(写真-7)。

(3) 曲線施工

高水圧下の曲線施工で、もし目地の開口が大きくなってゴムリングがカラーから逸脱すれば、急激な出水などにより最悪の場合人命にかかわる大変なトラブルになります。そのため事前の十分な検討と対策が必要です。曲線施工において極端な方向修正を行わなくても、カラーとゴムリングの拘束力にはばらつきがあり、曲線部を通過する推進管の目地開きは一定にならず、1か所に集中して大きく抜け出すことがあります。とりわけ急曲線においては、もともと計算上の目地開口が許容に近い場合、その危険が懸念されます。そのた



写真-6 エアチューブ発進坑口

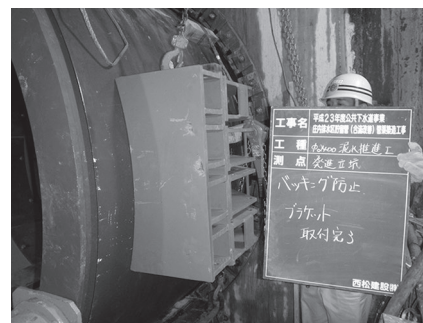


写真-7 Backing防止装置

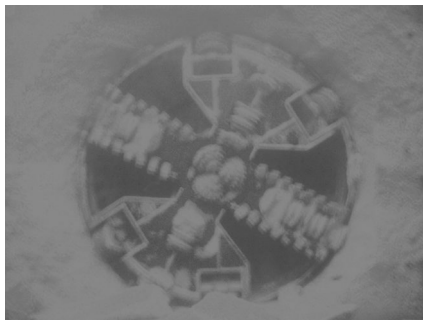
め目地の開口を強制的に制限する「目地開口制限装置」を使用します（写真－8）。



写真－8 開口制限装置

(4) 無水層

高水圧の反対で水が無い地盤（無水層）での推進施工も、ある意味では地下水に挑む施工です。短距離の刃口式推進工法では無水層は歓迎することですが、機械式密閉型の推進施工ではかえって難しい問題があります。無水層は当然切羽の水圧は0ですから切羽圧をむやみに高くすることは、周辺地盤の変状や透水係数の大きな比較的緩い地盤では泥水や添加材の逸泥が懸念されます。そのため切羽バランスの保持は微妙な調整が必要になります。また、長距離施工においては滑材の水分が地盤に吸水されて、脱水や乾燥のため固化するケースがあります。こうなると滑材を注入し続けても推進抵抗が増大し、最悪の場合は推進不能になります。そのため無水層で



写真－9 水中回収

使用する滑材は、脱水されにくく性状の変化のない材料を選定すべきです。

(5) 到達

到達における地下水の問題はBackingを除いては発進における問題と同じで、まずは安全な鏡切り作業が保証される鏡面の地盤改良です。最近では高水圧の発進、到達では信頼性の高い置換工法などが採用されて、以前ほどの心配はなくなりましたが、大口径の場合や連壁立坑などで鏡切り作業に長時間を要する場合は注意が必要です。

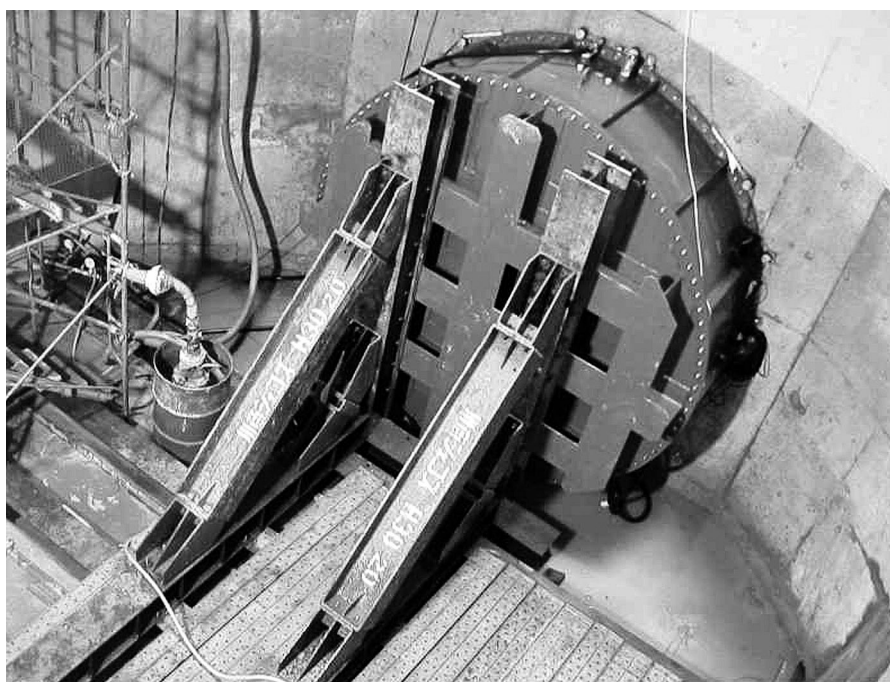
その次は到達坑口リングおよび掘進機の回収ですが、坑口リングは発進と同じで、標準の坑口リングは0.1MPa以下程度と考えるべきで、それを超える場合はゴムリングに工夫が必要です。到達の場合は掘進機回収後に追加注入で止水することが可能ですので、まず短時間での止水効果を考えてゴムリングの締め付け方法の工夫や、エアチューブ方式などが多く採用されつつあるようです。しかし、高水圧下の到達作業における問題の多くは、鏡切り完了後掘

進機押し出しを開始して坑口リングを通過するまでの間です。管列が移動するため管外周にゆるみが生じて、水や土砂が到達立坑内に噴出して掘進機の回収が困難になったり背面の地盤変状が生じたりします。そのための方策としては鏡切り完了後に到達立坑に地下水位以上の水を張ったり、特殊な掘進機回収用の鋼製筒を使用したりします。「水張り方式」の場合は排水前に、「回収筒方式」の場合は筒解体前に補足の地盤改良が必要です。何れの場合も掘進機撤去後は速やかに裏込め注入を行わなければなりません（写真－9、10）。

3 地下水を守る

3.1 泥水および添加材

推進工法に伴って地下水に影響を与える可能性のあるものとしては、泥水式における泥水の循環と泥濃式、泥土圧式における添加材注入があります。



写真－10 回収筒

(1) 材料

泥水方式における泥水は基本的に環流するものですので、その全てが地中に残留することはありませんが、その一部が残留することは確かであり、作泥材は地下水に影響のないものでなければなりません。通常使用される作泥剤は粘土、ベントナイト、CMCなどの自然由来のものと、ポリマなどの加工品ですが、何れの材料もpH中性に近くて毒性がないことが必要です。泥濃方式や泥土圧方式の添加材は土中に注入して削土と混練りして回収するものですが、泥水と同じく地中に残留することは確実ですので、作泥材と同じく無害なものでなければなりません。何れの材料も製品規格表、成分分析表（試験表）、製品データ安全シート（MSDS）、第三者機関分析などで安全を確認する必要があります。

(2) 逸泥

泥水材料や添加材料が安全なものであっても、地盤の変化や管理不足で逸泥させては、地下水への影響がないとはいえません。そのためには泥水式においては、泥水の比重、粘性管理と

流量、送排泥圧管理による切羽バランスの管理をしっかりと行う必要があります。砂礫地盤などで流体が逸泥している場合は、作泥によって泥水の比重を1.3以上にしてファンネル粘性を60秒以上にするような場合もあります。泥濃式や泥土圧式の場合は、添加材の配合や注入量の管理と排土管理によって、掘削土の塑性流動化を確実に行って切羽バランスをしっかりと管理しなければなりません。この方式で逸泥する場合は一般的には添加材の濃度を濃くして逸泥せずにチャンバ内が塑性流動化した掘削土で充填するようにしますが、地下水圧が非常に高い場合で掘削土の塑性流動化が困難な場合は2液ショットタイプの添加材が用いられる場合があります（写真－11）。

3.2 滑材注入

滑材注入は推進管の外周のゆるみに注入して潤滑層を形成するものですから、安全な材料で適切な注入を行えば地下水への影響はほとんどありません。

(1) 材料

滑材の材料は大きく分けてベントナイトを主成分とした配合材料、高分子ポリマの単品あるいは配合材料、その他の化成品などがあります。添加材と同じくpH中性に近くて毒性がないことが必要ですし、使用に当たっては製品規格表、成分分析表（試験表）、製品データ安全シート（MSDS）、第三者機関分析などで安全を確認する必要があります。

(2) 注入方法

滑材注入は掘進機直後の推進管から、外周のゆるみに相当する量を注入しますが、長距離推進では後続の管列から追加して繰り返しの2次注入を行うケースもあります。いずれにしても注入圧力の管理は必要で、むやみに圧力を上げて憤発させるなどはもってのほかです。2次注入はむしろ低压で繰り返し注入の方が効果が上がると思われます。

3.3 裏込注入

推進工法に起因して地下水に影響を与える懸念が最も高いのは裏込注入です。特に近接して使用中の井戸がある場合などは注意が必要です。注入材料そのものは安全なものを使用しても、裏込注入は管外周のゆるみを充填して固化するものですから、注入時は流動性がありますが時間経過とともに固化して強度を発現します。そのため井戸のくみ上げなどによって地下水の流れがある場合、裏込材は地下水のみず道を通して拡散して、思わぬところで固化する場合があります。時には井戸に流入したりポンプを故障させたりするケースもあります。そのため注入に当たっては注入圧および注入量の管理を厳格に行うことは当然ですが、リスクの高い場合は2液ショットで瞬結タイプの注入に変更するケースもあります。

3.4 補助工法

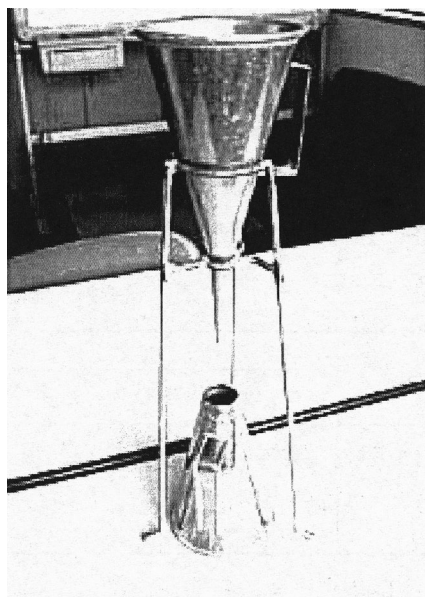
推進工法に伴って補助工法を併用する場合がありますが、その補助工法についても地下水への影響がないように配慮が必要です。

(1) 地盤改良

発進到達部や路線部を地盤改良することがありますが、一般的には薬液注入か置換工法が採用されます。何れも使用材料の安全を事前に確認したり、事前事後の地下水採取検査で影響がないことを確認したりしますので、最近では地下水汚染トラブルなどはほとんどありません。

(2) ウェルポイント

最近ではあまり見かけなくなりましたが地下水位低下による湧水対策があり、代表的なものはウェルポイント工法ですが、この施工に伴って周辺の地下水位が低下して問題になるケースがあります。具体的には近隣の井戸が枯れて補償を要求されるケースや、施工後に地下水位が回復しないなどのトラブルで



写真－10 ファンネル粘性計

す。地盤の透水係数が比較的小さい場合はその影響が広範囲にわたり、圧密沈下などの2次的な問題が起こるケースがあります。地下水位低下工法の採用に当たっては、周辺の事前調査や地盤、地下水に対する影響検討を入念に行う必要があります（写真－12）。

4 おわりに

冒頭に記述したように推進工法はその開発初期においてはまさに「地下水に挑む」工法であり、技術の進歩は地下水との戦いを抜きにしては語れません。今日ではその挑む地下水はさらに深く、高水圧になっていますが、技術の進歩は機械式密閉型という地下水と坑内を完全に遮断するすばらしい工法を生み出しました。大深度地下利用法の普及などのによって、これからさらに厳しい条件で地下水に挑むことが考えら

れますが、常に念頭に置かなければならないのは作業の安全性と理論的に確立された根拠および新技術に挑む姿勢だと思います。このことを踏まえてさらに「地下水に挑む」技術を磨いていく必要があります。

また、地下水を含む自然水に対する価値認識が高まっており、これは推進技術にとってはある意味追い風だと思われます。推進工法は環境に優しい工法であり、地下水に対してもしっかりと事前検討と施工管理を行えば、まさに「地下水を



写真－12 ウェルポイント施工状況

守る」技術です。

以上、地下水をキーワードに現状の技術を解説いたしましたが、今後もさらにすばらしい推進技術が普及、発展することを願っておわりの言葉といたします。