

道路陥没に配慮した上水道シールドの設計事例

日本水工設計株式会社 吉田康二

近年、都市部での道路陥没がメディアで頻繁に報道され、シールド工法等の大口径管路の布設工法に対する関心が高まっている。上下水道分野におけるシールド工事は、日本国内のシールド工事全体の過半数を占めており、これからもリダンダンシー確保のために浄水場と配水場等の急所施設を繋ぐ大口径管路の布設工事などが予想される。道路陥没は下水道管路の腐食によるイメージが強いが、本稿では、道路陥没に配慮した上水道シールドの設計事例であるN市の大口径送水幹線の二条化事業の管路設計を通じて得られた知見や成果について報告する。

Key Words : シールド工法、道路陥没、軸方向挿入、二次排土機構

1. はじめに

N市送水幹線の二条化事業は、浄水場から配水場にかけて埋設されている送水幹線φ1500のバックアップとして第2送水幹線φ1350を布設し、維持管理性の向上と緊急時の体制強化（幹線二条化によるリダンダンシー確保）を目的としている。管路の布設予定位置には、別系統の水道管等、多くの埋設物があることに加え、布設延長が約1000mと長距離であることから、シールド工法を採用する方針とした。なお、シールド工法の検討は全国簡易水道協議会の水道事業実務必携記載のとおり下水道の設計基準に準拠し、φ1350の仕上り内径とするためのセグメント外径は設計当時の最小口径であるφ2000とした。

シールド工法による道路陥没の事例には、令和7年1月に八潮市で発生したような「老朽化による陥没」、令和6年9月に広島市で発生したような「設計・施工が原因による陥没」の2つのリスクが考えられる（図1）。本稿では、設計・施工が原因による陥没に着目し、シールド工法を採用した際に想定される道路陥没の要因となる着目点およびその対策事例について報告する。

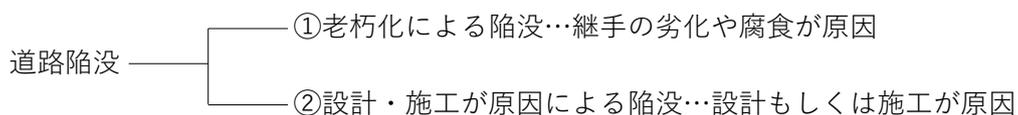


図1 道路陥没の分類

2. 掘進排土方法

シールド工法は「泥水式」と「泥土圧式」に大別されるが、今回は都市部での施工であ

ることを考慮して、泥水式よりも施工ヤードが小さくできる「泥土圧式」を選定した。

同工法は、地山（地盤）をカッターで切削しながら、シールド機に少しずつ取り込むことで、土水圧のバランスを調整して掘進する。その際に、作泥材（ベントナイトやセメント等）を作泥土室に連結されるスクリーコンベヤーで攪拌・混練し、止水性と流動性を兼ね備えた塑性流動化状態へ変化させたプラグゾーンを形成する。この時の掘削土はマヨネーズ状となり、一般的にベルトコンベヤーによってシールド機後方に運搬される（図 2）。

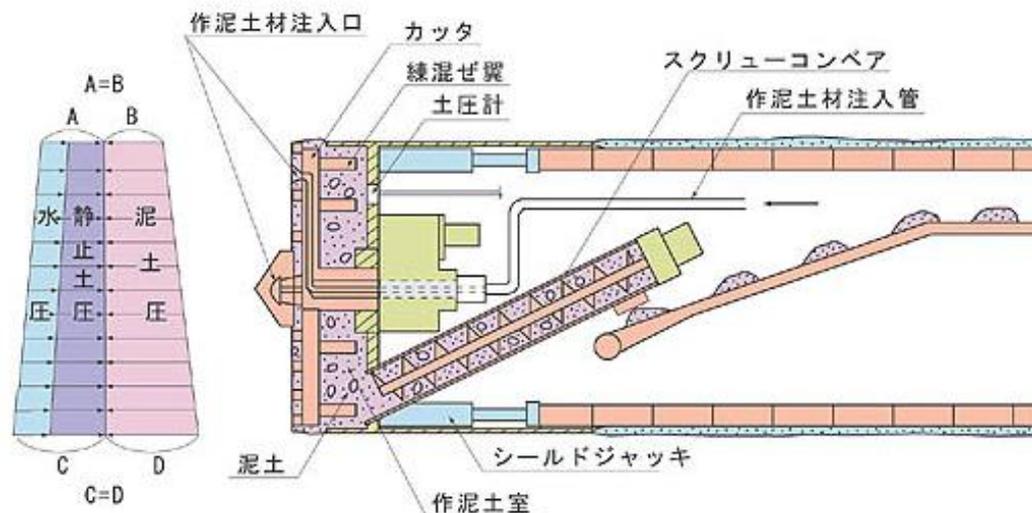


図 2 泥土圧式シールド工法の概念図（出典：シールド技術協会 HP）

3. 道路陥没要因とメカニズム

泥土圧式シールド工法に起因する道路陥没は、以下の 2 つが考えられ、そのメカニズムは以下のとおりである。

(ア) 掘削土の塑性流動化ができない場合

実際の土質条件が想定と異なる場合、選定した作泥材では塑性流動化できない。塑性流動化ができない状態ではスクリーコンベヤー（図 3）単体で止水できないため、シールド機内に大量の土砂を地下水と同時に取り込むこととなり、地中が空洞化し、地表のアスファルトが崩壊することで道路陥没が生じる恐れがある。

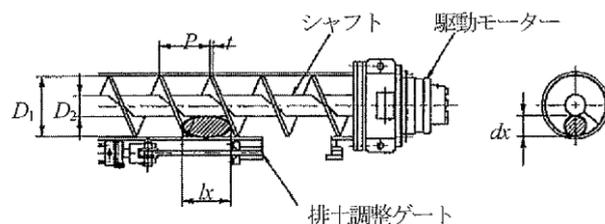


図 3 シールド工法のスクリーコンベヤー
（出典：土木学会 トンネル標準示方書シールド工法編）

(イ) セグメントが土水圧に抵抗できない場合

セグメントが土水圧に抵抗できないと、トンネル内で最後に挿入するKセグメント（図4）が脱落するおそれがある。この場合でもリング形状が崩壊し、大量の土砂を地下水がトンネル内に流入することで道路陥没が生じる恐れがある。

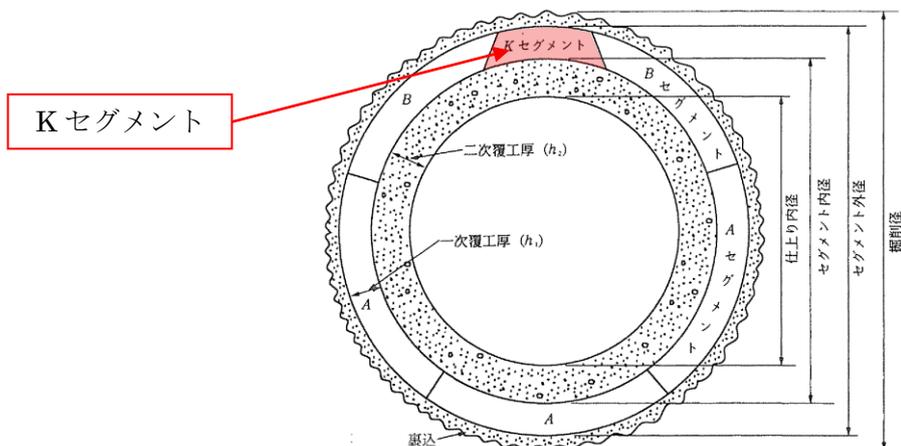


図 4 セグメントの標準構成図

(出典：日本下水道協会 下水道用設計積算要領—管路施設（シールド工法）編—)

4. 本事業における道路陥没リスク

N市送水幹線二条化事業の土質条件は、N値の高い硬質粘性土と砂質土の互層で構成されている（図5）。硬質粘性土は湧水の影響が少なく掘進できるが、砂質土が水みちとなり、被圧された地下水が突発的に奮発することで大量の土砂を取り込んでしまうリスクがあった。さらに、市街地での施工であるため道路陥没が発生した場合は被害が甚大になるリスクもある。これらのリスクから、設計段階において、前章で示した陥没要因を踏まえた対策を行い、施工時のリスクを最小限に抑えるように努めた。

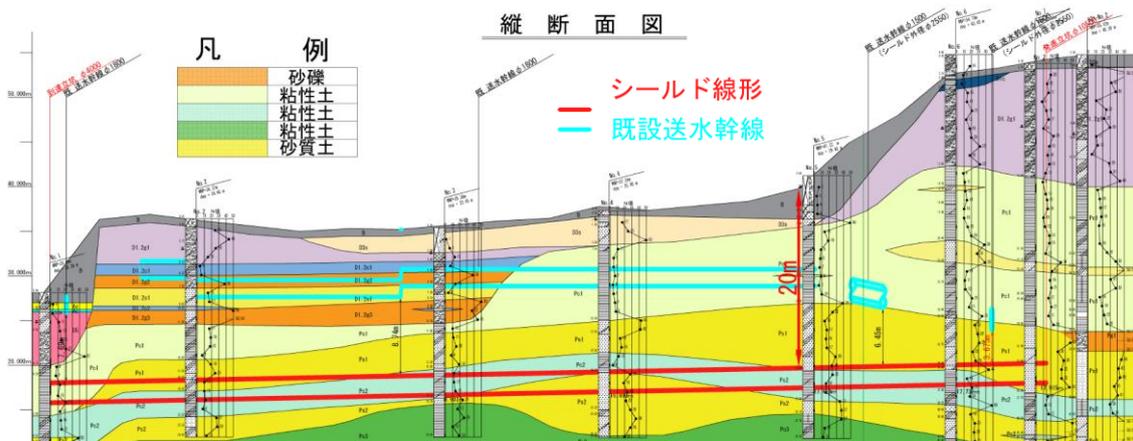


図 5 土層想定図

5. 道路陥没の対策

今回の設計では施工時の道路陥没リスクに対して、排土機能の対策（2つ）、セグメントの対策を行った。

5. 1. 対策①：排土機構の対策（軸付スクリーコンベヤーの採用）

泥土圧式シールド工法は、地山からカッターチャンバー内に掘削土を取り込み、スクリーコンベヤーを通して鋼車に落とすことが標準的な排土機構である。しかし、本設計条件のような土盛りが 20m を超える場合は、スクリーコンベヤーに対して大きな水圧が発生するため対策が必要になる。

泥土圧式シールド工法に用いるスクリーコンベヤーは「軸付きスクリーコンベヤー」と「軸無しリボンスクリーコンベヤー」の 2 種類がある（図 6）。

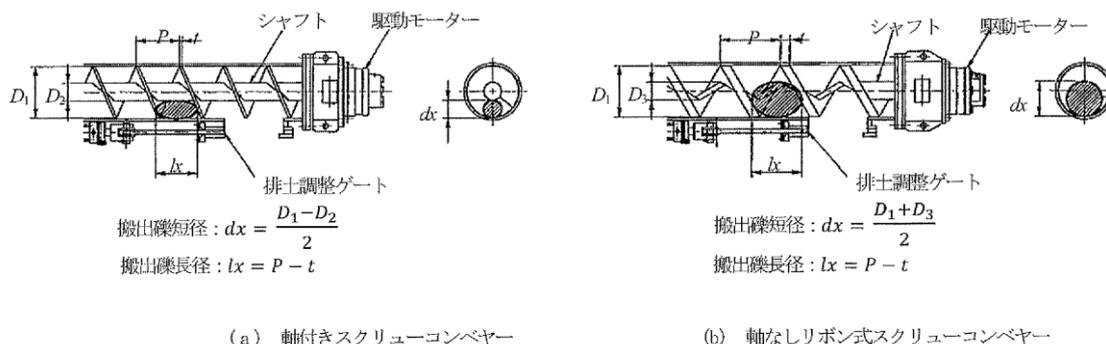


図 6 泥土圧式シールド工法のスクリーコンベヤー
 (出典：土木学会 トンネル標準示方書 シールド工法編)

軸付きスクリーコンベヤーは中心に筒状の軸があるため、掘削土の通過する面積が小さく急激な土水圧が比較的発生しにくいメリットがあるが、大きな礫が通過できないデメリットがある。一方で、軸無しスクリーコンベヤーは土砂の通過面積が大きいため比較的水圧に弱いことがデメリットとなるが、大きな礫も通過できるメリットがある。

そこで今回の土質条件を確認したところ、ボーリング調査の結果から礫層を掘進しないことが確認できたため、急激な土水圧が発生しにくい「軸付きスクリーコンベヤー」を採用した。

5. 2. 対策②：排土機構の対策（二重ゲートの採用）

前節 5. 1. において、止水性能の高い軸付きスクリーコンベヤー（一次排土機構）を採用することを示したが、軸付きスクリーコンベヤーだけでは硬質粘性土と砂質土の変わり目（ミックスフェイス）に作泥材の調整が間に合わず、排土制御が困難になる場合が想定されるため、その他の装置と組み合わせた対策（二次排土機構）を検討した。

二次排土機構は様々な方法が考えられるが、小口径シールド工法であるため作業空間の狭い環境での施工性を確保した上で採用できる方法を検討した。考えられる方法として、「二重ゲート方式（図7）」、「ホース圧送方式（図8）」の2種類が挙げられる。

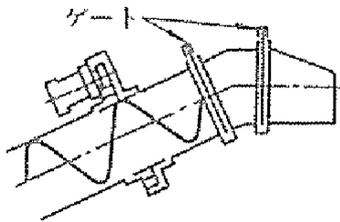


図7 二重ゲート方式

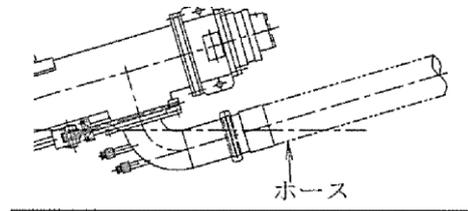


図8 ホース圧送方式

(出典：地盤工学会 地盤工学・実務シリーズ 29 シールド工法)

二重ゲート方式は、作泥材の調整に影響されずに2つのゲートを交互に運用することで不測の事態でも坑内に地下水が奮発しないことがメリットであるが、デメリットとして、礫や異物が混入するとゲートを完全に締め切ることができない可能性がある。

一方、ホース圧送方式は、スクリーコンベヤーにホースを接続し、塑性流動化させるプラグゾーンを伸ばすことで止水効果を高めることが期待できるが、デメリットとして、作泥材に依存するため想定外の地盤条件では地下水を浸入させる可能性がある。

これら2種類について検討した結果、今回の土質条件では礫層を通過しないが粘性土と砂質土を交互に通過することが想定されたため、作泥材だけに依存せずにゲートで物理的に地下水を遮断できる「二重ゲート」を採用した。

5. 3. 対策③：セグメントの対策（軸方向挿入型の採用）

セグメント外径φ2000mmでは、AセグメントとBセグメントそれぞれ2つと、Kセグメント1つの合計5つのピースで構成される。セグメントをリング状に組立てる際に、最後に挿入するKセグメントには「半径方向挿入型（図9）」と「軸方向挿入型（図10）」の2種類の挿入方式がある。

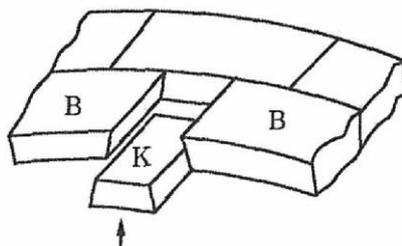


図9 半径方向挿入型

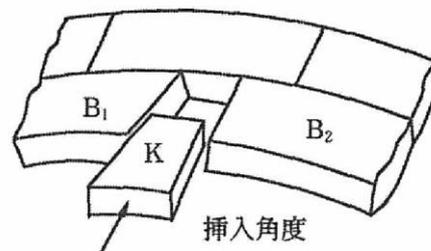


図10 軸方向挿入型

(出典：日本下水道協会 下水道シールド工事用標準セグメント A-3)

半径方向挿入型は、従来から採用されている標準的な挿入方式であり実績も多数あるが、形状的なデメリットとして軸方向挿入型よりもトンネル内部に脱落しやすい。近年はそのようなリスクがあることから減少傾向である。

一方、軸方向挿入はセグメントをシールド機後方（発進立坑側）から挿入するため、半径方向挿入型で想定されているシールド機よりもセグメント幅の 1/3～1/2 程度長くなる。それに加えて、余裕幅として 100 mm程度確保する必要があるため、急曲線施工が困難となることが想定された。しかし、本設計条件ではセグメント外径 $\phi 2000\text{mm}$ を超える標準幅が 1000 mmであるのに対して、セグメント外径 $\phi 2000\text{mm}$ は標準幅が 750 mmで元々短いことから、シールド機が 350 mm程度 ($750/3+100$) 長くなることで済むため、曲線施工にも対応可能なことを確認した上で問題が無いと判断し、最大限に道路陥没のリスクを低減できる「軸方向挿入型」を採用した。

なお、セグメントの標準幅は、日本下水道協会 下水道用設計積算要領—管路施設（シールド工法）編—に準拠した。

6. おわりに

本設計事例では、シールド施工中における道路陥没の要因の一つである高水圧下において、

- ・排土機構の対策（①軸付スクリーコンベヤーの採用、②二重ゲートの採用）
- ・セグメントの対策（③軸方向挿入型の採用）

の対策を行うことで、土質条件に適合し、道路陥没リスクを低減したより安全性の高い設計を行うことができたと考える。

道路陥没はひとたび発生すると、社会的にも非常に大きな問題に発展する。そのため、安全性を最大限に考慮した設計が、これからの上下水道サービスを維持・確保する上でも重要である。

（出典資料）

土木学会 トンネル標準示方書 シールド工法編

土木学会 シールド工事用立坑の設計

地盤工学会 地盤工学・実務シリーズ 29 シールド工法

日本下水道協会 下水道シールド工事用標準セグメント A-3

日本下水道協会 下水道用設計積算要領—管路施設（シールド工法）編—

全国簡易水道協議会 水道事業実務必携

シールド工法技術協会 HP