

下水道シールドトンネルの歴史と その評価に関する調査研究

1. 研究目的

我が国のシールド工法は、今日の代表的なトンネル築造工法として大きな役割を担っており、これまで下水道管きょの築造施工を主体とした技術開発を重ね、1975年以前の圧気併用の手掘り式からその後10年間での土圧式や泥水式等の密閉型シールド工法の確立を始めとして、近年の複雑・多様化する施工条件に対応して急激な発展を遂げてきた。本研究は、これまでのシールド工法技術の歴史の変遷を調査・整理・分析し、下水道事業がシールド工法の発展に大きく貢献してきたことを客観的に示す技術資料を作成することを目的とする。なお本研究は、(財)下水道新技術推進機構の固有研究として行った。

2. 研究内容

研究内容は、1. シールド工法の輸入から現在までに至る技術発展経緯、2. シールド工法の発展に大きく貢献したと考えられる主要技術、3. シールド工法の発展と下水道事業の位置づけについてである。

2.1 シールド工法発展経緯の概要

シールド工法の発展経緯について、シールド工法の発祥、日本への導入期、日本独自で発展させる成長期、旺盛な技術開発を実施した成熟期、バブル崩壊後の爛熟期の5つに分けて経緯の概要を述べる。

2.1.1 シールド工法の発祥

シールド工法の発祥はフランス技師ブルネル(Sir

Marc Isambard Brunel)が考案したものであり、1818年にイギリスにおいて特許を取得したことから始まるといわれている。特許は図-1に示すように円形シールドで申請していたが、1825年にロンドンのテムズ河を横断する水底道路トンネルに世界で初めて、図-2に示す矩形断面の開放型シールドが用いられた。(Thames Tunnel 1843年竣工) また、覆工は当初煉瓦積みの覆工が採用されたが、後に長方形の鑄鉄製の枠を組み合わせたものが用いられている。

1869年に、第2のトンネルがテムズ河に建設される際には、イギリス人グレートヘッド(James Henry Great head)の考案した円形シールドが採用された。

(Tower Subway Tunnel 1869年完成) このトンネルは覆工に鑄鉄が使用され、円形4分割でキーセグメントがあり、フランジボルト継手が用いられている。これがシールド工法の原形と言えるものである。

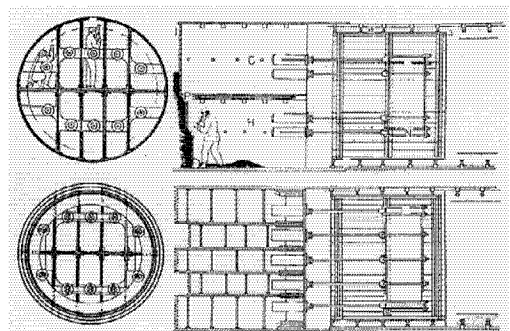


図-1 ブルネルシールドの特許の図面¹⁾

75cm, 桁高 28cm, と言われている。セグメントの止水は当時既にシール溝を設け、鉛をコーキング材として用いていた。また、圧気の噴発防止対策の補助工法として、貝殻混じりの砂層部では水ガラスの注入、海底の小土被り箇所では、粘土を海底に沈めてクレー・ブランケットを設置して空気の噴発を防ぐ工夫をしている。

国鉄関門トンネルの工事時期は、ちょうど第二次世界大戦中であり、鉄材の節約が図られたために上り線の一部に鉄筋コンクリートセグメントが採用されている。(図-8 参照)

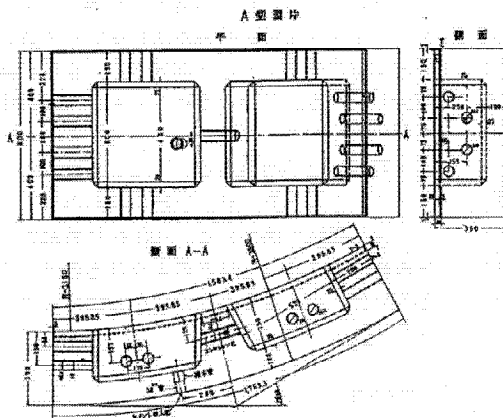


図-8 中子型鉄筋コンクリートセグメント⁵⁾

その後、1953年に日本初のルーフシールドを採用した関門道路トンネル、1957年には都市トンネルでは初めてのルーフシールドを採用した営団地下鉄4号線(丸ノ内線)トンネルと、両者とも半円形ルーフシールドで現場打ちコンクリート覆工が用いられた2工事であるが、1960年の覚王山トンネル施工まで本格的なシールド工事は再開されていないと言える。(図-9 参照)

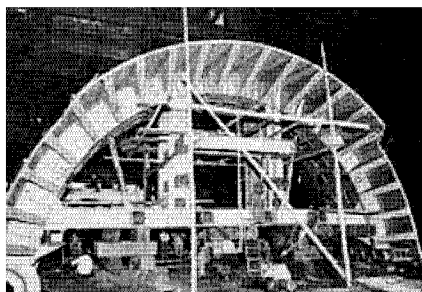


図-9 丸ノ内線永田町トンネル⁶⁾

2.1.3 成長期(1960年~1975年)

~切羽の安定が課題~

戦後の混乱期を経て復興を成し遂げたこの時期は導入期の数々の教訓をふまえ、1960年(昭和35年)名古屋市地下鉄・覚王山トンネル工事(円形シールド+セグメント)をきっかけとして次々と新技術を駆使した日本初のシールド工事が成功していった。

シールド工法の発展に大きく影響し、キーポイントになったと考えられる主要工事を以下に示す。

- ・1943年(昭和18年): 国鉄・関門トンネル工事下り線(中子型セグメントを初採用)(図-8)
- ・1960年(昭和35年): 名古屋市営地下鉄・覚王山トンネル工事(都市部で初採用, 覆工設計に慣用計算法を初採用)(図-10, 図-11)
- ・1962年(昭和37年): 東京都下水道・石神井川下幹線工事(下水道で初採用, コルゲート型の鋼製セグメントを初採用)(図-12, 図-13)
- ・1963年(昭和38年): 大阪市上水道・大淀送水管工事(機械掘り式シールドを初採用)
- ・1965年(昭和40年): 東京都下水道・浮間幹線工事(ブラインド式シールドを初採用)
- ・1966年(昭和41年): 川崎市上水道・排水本管工事(泥水式シールドを初採用)
- ・1969年(昭和44年): 国鉄・京葉線羽田トンネル(海底下軟弱地盤の大口径で初採用)
- ・1975年(昭和50年): 東京都下水道局・豊洲幹線(土圧式シールドの初採用)

この時期の前期の技術は、切羽の崩壊を防ぎ、うまくシールドを動かすことが最大の課題であった。圧気や地盤改良で切羽の崩壊を防ぐことができるようになるとシールド工法が盛んに採用され始める。さらに好景気と都市化の進展を背景とした社会基盤整備の急務性から、これまでにない量の整備が行われた。これにより、技術開発にも積極的に投資でき、次々と新技術を創出・実用化しシールド工法の急速な発展に拍車をかけている。

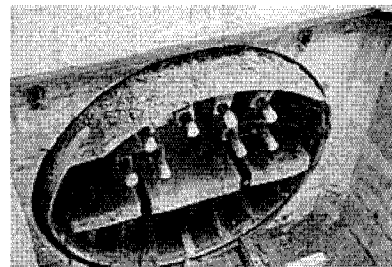


図-10 覚王山トンネルのシールド⁶⁾

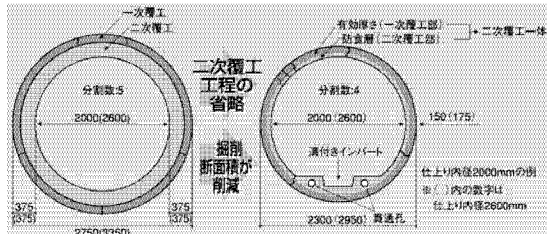


図-14 二次覆工一体型セグメント⁹⁾

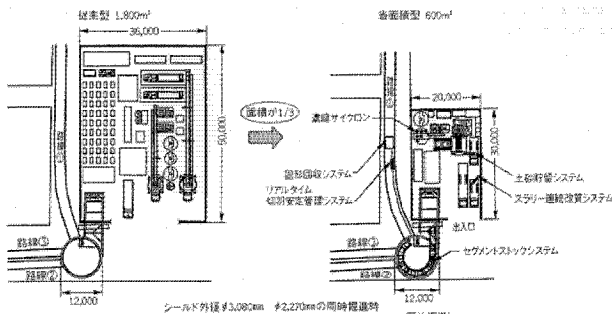


図-15 省面積立坑システム¹⁰⁾

2.2 シールド工法発展のポイントとなった技術

シールド工法の発展のポイントとなり、時代の変遷を経て開発された技術や部品などの内、現在も継承されて盛んに使われている重要と考えられる技術を以下に示す。

(1) シールド

①土圧式シールド, ②テールシール(ワイヤブラシ・テールグリッド), ③余掘り装置(コピーカッター), ④中折れ装置, ⑤同時裏込め注入装置, ⑥直角連続シールド

(2) 覆工

①シールド工用標準セグメント(規格), ②鋼製セグメント, ③コンクリート系セグメント, ④二次覆工一体型セグメント, ⑤水膨張シール

(3) 調査・設計技術

①シールド工用標準セグメント(設計法), ②地盤変位の分類, ③予測解析, ④慣用計算法, ⑤開口補強範囲と補強構造

(4) 施工技術

①添加材, ②チャンバー内の圧力管理, ③排土量管理, ④急曲線施工, ⑤地中接合・地中分岐

2.3 シールド工法の発展と下水道事業の位置付け

シールド工法発展の経緯とそのポイントとなった技術を見ると、下水道事業が係わった技術が時代の変遷毎に絶え間なく、関与し続けていること、また、

関与している技術の数についても他事業者に比べて圧倒的に多いことがわかる。

これら、下水道事業が貢献してきた技術は大別して以下の4つであると考えられる。

(1) シールド工事全体に占める下水道事業の圧倒的な事業量

図-16に示すように、シールド工事全体に占める下水道事業の事業量は圧倒的に多い。下水道事業では大口径シールドは少ないが、その数は他の事業を凌駕しており、その数と事業費がシールド工法に従事する技術者の知恵を引出し、これを改善するための知恵やアイデアの創出を助長し、高度成長期の工事量や社会風土が、これらの技術の実現を後押ししたものと考えられる。

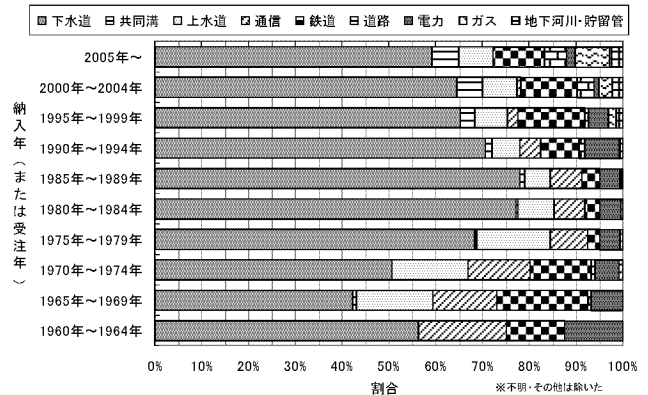


図-16 シールド工事件数実績 (シールドメーカ7社)

(2) 「シールド工用標準セグメント」の発行

「シールド工用標準セグメント」の発行は、シールドやセグメントに作用する荷重の考え方や構造計算法に対する知識の共有化とセグメント仕様の標準化を図りシールド技術の根幹を作ってきたものと考えられる。また、地盤変状の数値解析手法において、地盤変状の詳細な分析による地盤変位の分類(図-17)や、FEMによるテールボイドを考慮した沈下量予測手法(いわゆる都下水法)(図-18)を提案し確立した。

(3) 泥土圧シールドの開発・発展

安全・安心なシールド工事を行うために欠かせないものとして切羽の安定がある。シールドは開放型シールドから密閉型シールドに変化し、現在では泥水式と土圧式に自然淘汰された。1996~2005年間の施工実績は70%が泥土圧シールドであり、本方式を開発・発展させたのは、下水道事業である。(図-19参照)

(4) シールド工法に伴う地盤変状や
家屋被害状況の公開

環境問題などへの対応として、シールド工法に伴う地盤変状や家屋被害があり、下水道事業がこれを包み隠さず公開したことが事業者や技術者を啓発し、さらなる技術力と質の向上に貢献したものと考えられる。

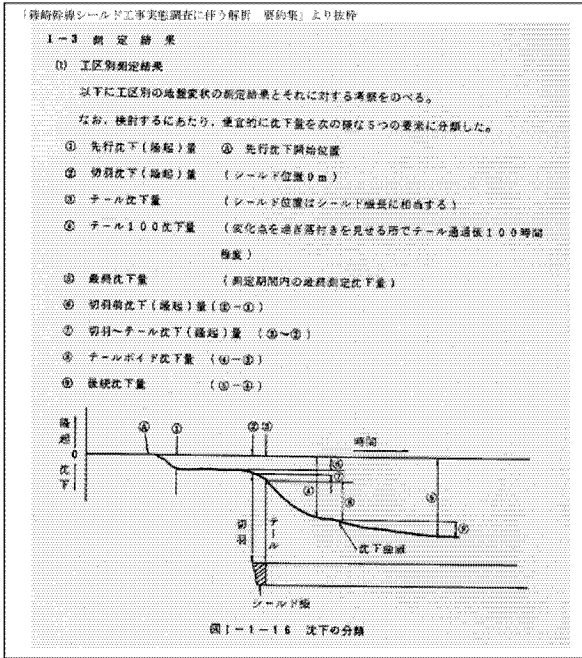


図-17 地盤変位の分類¹¹⁾

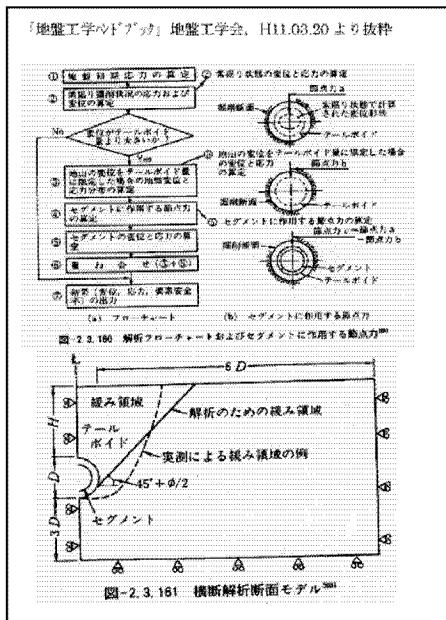


図-18 都下水法の考え方の紹介¹²⁾

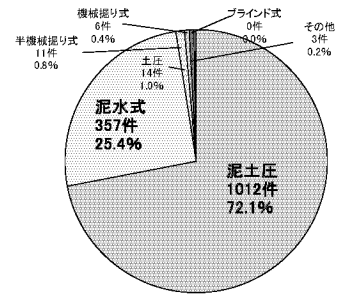


図-19 シールド形式別の施工実績数¹³⁾

(5) 現在のシールド工法に不可欠な技術や
部品の開発・実用化に寄与

下水道事業は、カッターヘッド、中折れ装置、テールシール、裏込め注入工といった要素技術や、標準セグメントの発行、地盤変状予測手法の確立、応用技術として急曲線、地中接合・分岐、断面変化、直角、大小土被りに対する施工技術など、多種多様な技術の開発、実用化に寄与してきた。

貢献度の一つの指標である初採用をキーワードに下水道事業において初採用された技術項目は以下の通りである。

- ・シールド：土圧式シールド・泥土圧シールドの初採用
- ・要素技術：コピーカッターの初使用、中折れ装置・同時裏込め注入の初採用
- ・覆工：楔継手構造のワンパス継手・二次覆工一体型セグメント初採用
- ・施工技術：自由断面シールド初採用・横横連続シールド初採用親子シールド、機械式地中接合T-BOSS工法を初採用

3. 報告書の構成

報告書の構成は、本編と資料編からなり、本編の構成は以下のとおりである。

1. シールド工法発展経緯の概要

- 1.1 シールド工法の発祥
- 1.2 導入期
- 1.3 成長期
- 1.4 成熟期
- 1.5 爛熟期

2. シールド工法の発展に貢献した主要技術の選定

3. シールド

- 3.1 シールド形式の変遷
- 3.2 土圧式シールドの誕生経緯
- 3.3 わが国のシールド工法の発展に寄与した泥土圧シールド

- 3.4 シールドの成長を支えた要素技術の変遷
- 3.5 シールドの多様化
- 4. 覆工
 - 4.1 覆工技術の変遷
 - 4.2 シールド工工事用標準セグメント改訂の変遷
 - 4.3 覆工材料
 - 4.4 継手構造
 - 4.5 止水性について
 - 4.6 その他
- 5. 調査・設計技術
 - 5.1 指針、示方書、基準などの変遷
 - 5.2 測量
 - 5.3 シールド掘削に伴う地盤変状問題の変遷
 - 5.4 覆工の設計技術
- 6. 施工技術
 - 6.1 施工技術の変遷
 - 6.2 切羽の安定
 - 6.3 裏込め注工
 - 6.4 各種条件下の施工
- 7. シールド工法の発展と下水道事業の位置付け
- 参考資料

4. まとめ

本研究では、シールド工法の発展の歴史の変遷について、シールド工法の発祥期から導入期、成長期、成熟期、そして爛熟期と振り返り、それぞれの時期で重要で、かつ分岐点となり、現在も継承されている技術の変遷を調査してきた。そして、これらの技術の発展に下水道事業が大きく貢献してきていることを確認した。今後も下水道事業は、大深度化、二次覆工一体型セグメント、コンパクトシールドなど、各種技術の開発やコスト縮減に貢献して行くものと考えられる。

下水道事業におけるシールド技術の将来展望としてこれまで培われてきた多くの新技術を、わが国と同様の状況（例えば、軟弱な沖積地盤上に立地、都市化の進展とともに社会基盤整備が急務であり、過密化によって地下埋設物の輻輳、道路渋滞、環境への配慮が必要である）の国外への都市に対して技術支援を行う等の積極的な国際展開が期待できる。

【参考文献】

- 1)塚田ら:シールド工法の実際, 鹿島出版会, 1980, p9.
- 2)土木学会:トンネルライブラリー第8号 都市 NATM とシールド工法との境界領域—設計法の現状と課題—, 土木学会, 1996.
- 3)土木学会 H.P.2007.4.
- 4)小西真治:シールド工法の変遷, Civil Engineering Journal, 2005.
- 5)小山幸則:32.シールド覆工の変遷, 日本鉄道施設協会誌, 2003-4.
- 6)熊谷組:KUMAGAI UPDATE55「業界 No.1 を誇る熊谷組のシールド技術」, 2005.
- 7)土木学会:日本土木史(昭和16年~昭和40年巻)1973, pp855~858.
- 8)土木学会:トンネルライブラリー第13号 都市 NATM とシールド工法の境界領域—荷重評価の現状と課題—, 土木学会, 2003.
- 9)コンパクトシールド工法研究会:コンパクトシールド工法パンフレット.
- 10)前田正博ら:省面積立坑から3本のシールドを発進 東京都下水道千代田区外神田再構築工事, トンネルと地下, 第33巻5号, 2002年5月.
- 11)東京都下水道局「篠崎幹線シールド工事実態調査に伴う解析要約集」, 1980.3.
- 12)地盤工学ハンドブック, H11.3.20.
- 13)シールド工法技術協会:技術資料.

●この研究を行ったのは

研究第二部長
研究第二部総括主任研究員
研究第二部主任研究員
研究第二部研究員

松浦 將行
目黒 享
松本清治郎
岡本 健

●この研究に関するお問い合わせは

研究第二部長 松島 修
研究第二部副部長 目黒 享
研究第二部総括主任研究員 早田 光利