

技術展望

トンネルコンクリートの歴史(鉄道シールドトンネル)

HISTORICAL DEVELOPMENT OF CONCRETE OF SHIELD DRIVEN RAILWAY TUNNELS

河田博之

Hiroyuki KAWATA

財団法人 鉄道総合技術研究所 総務部長
(〒185 国分寺市光町 2-8-38)

Keywords : shield tunneling method, segment, shield tunnel, lining

はじめに

シールドトンネルの覆工はその歴史的な経緯から、材料はレンガ、鉄鉄、石材、木材、鋼枠、コンクリート等があり、断面形状は円形、馬蹄形、矩形、複円形等がある。従って、シールドトンネルの覆工材料としてコンクリートのみを取り上げて整理することは、シールド工法の発展を分かりやすくするおそれがあるので、工法の発展を記述するのに欠かせない技術は、覆工材料がコンクリート以外であっても記述することとする。また、シールドトンネルはさまざまな用途に利用されているが、歴史的な発展経緯を記述するには鉄道を中心に整理することが流れとして整理しやすいので、特筆すべき技術についてはその他で開発された技術を盛り込んではあるが、国内外を問わず柱を鉄道シールドトンネルの覆工コンクリートにおいた。

1. シールド工法の発明とチームズシールド

シールド工法はフランス生まれの技師 Marc Isambard Brunel が 1818 年に取得した特許をもとに、1825~1843 年にかけてロンドンの Thames 河底に、延長約 452 m(立坑間) の道路トンネル(完成後は鉄道併用)を建設したのが工法適用の最初である。

本工事は現在の技術水準から見ても大変な難工事で、断面の大きさ(高さ 6.6 m, 幅 11.3 m: 矩形), 河底からの最小土被り(約 4 m), 無圧気, レンガ覆工(構造は二本の馬蹄形)といった条件で、シールドも多数のセルに分割(図-1)されたものであった。途中 2 回の切羽崩壊と浸水に遭遇し、かかることがあって、工費が当初の見積りを大幅に上回り、途中で 7 年間の工事の中止に見舞われたりしている。

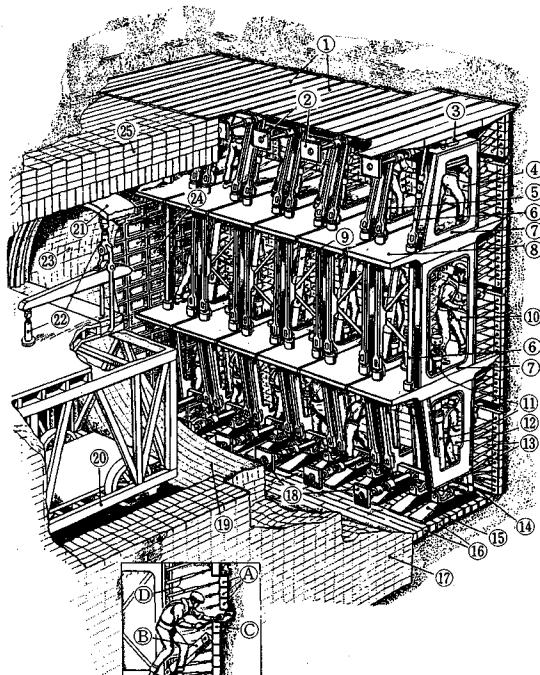


図-1 ブルネルが採用したチームズシールド¹⁾①~⑤は部材及び施工順序を示す

2. 歐米におけるシールド工法技術の改良・発展

上記の工事が膨大な工費や工期を要したので、しばらくシールド工法技術に対して悲観的な見方が多かったが、1869 年になってロンドンとニューヨークで二度目のシールド工法の適用がなされ、ロンドンでは円形の鉄鉄覆工が初めて採用された。この時点で、現在の裏込め注入のほぼ原型が、石灰またはセメント系の材料をシ

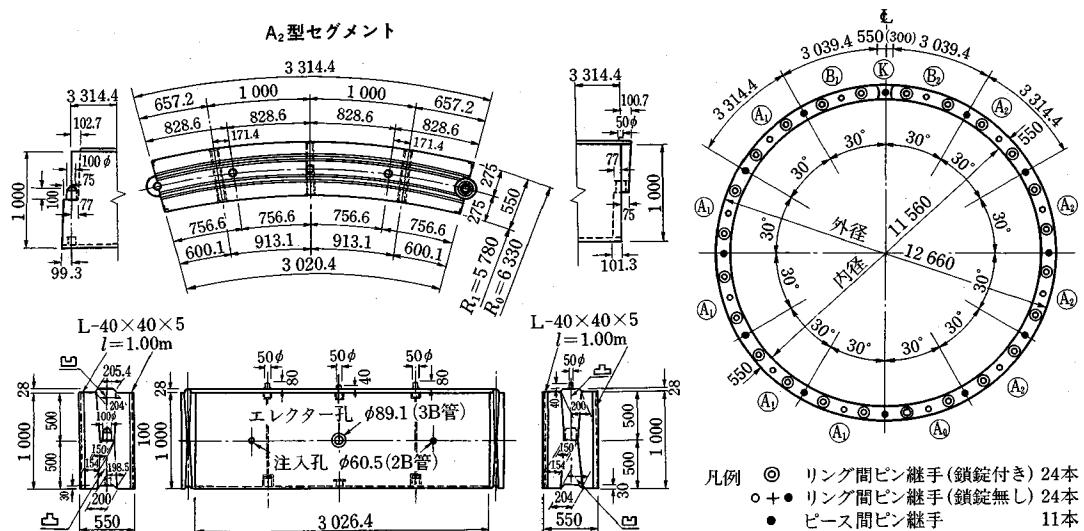


図-2 関門鉄道トンネルに試用された箱型鉄筋コンクリートセグメント⁵⁾

ルドティル部の空隙を埋める手法として開発された。ブルネルは頑強に圧気工法の採用を拒んだとされているが、シールドトンネル工事に圧気工法が適用されたのは1886年（ロンドン）であった。二次覆工として鉄骨覆工の内側にコンクリートが用いられたのは1892年（ロンドン）である。石材やコンクリートのブロックが覆工に初めて採用されたのは1893年のメルボルンであった。木材により一次覆工とし、内側の二次覆工を石材で構成したものも、やはり上記の下水工事（1893年メルボルン）であった。ルーフシールドが初めて採用されたのは1895年のパリの下水トンネル工事で、覆工にはレンガが用いられている。その後、1897年にボストンにおいてスラストバー（プッシュロッド）によりシールドの推進反力を確保し、覆工には場所打ちコンクリートを初めて採用している。

ロールされた鋼材で一次支保とし内側にコンクリート覆工する方法は、1896年にドイツで初めて採用されている。

以上が欧米におけるシールド工法の初期の時代の工法の発展経緯と覆工形式の変遷である。

総じて、当初はレンガ覆工で間もなく鉄の覆工が主流で、地山条件の良い場合にはコンクリートブロックや石材、もしくは一次覆工に木材が使用され、内側に場所打ちコンクリートが打設されている。ルーフシールドではプッシュロッドを用いて反力を確保しながら場所打ちコンクリート覆工も採用されている。

3. 国内におけるシールド工法の採用—戦前—

国内で最初にシールド工法を採用したのは羽越線の折

渡トンネルであった（1920～1922年）。地質は軟質な黒色粘土で当時の山岳工法では掘削が困難を極め、対策として単線円形シールド（シールド外径：7,366 mm、トンネル外径：7,214 mm）が投入されたが、周辺からの地圧により推進が困難となり、約600 feet（180 m）の掘削後放棄された。この覆工にはコンクリートブロックが採用された。このブロックは64個で1リングが構成され、厚さ610 mm、幅457.2 mmであった。裏込め注入としてモルタルが適用された。

次いで、丹那トンネルの水抜き坑用に小口径（外径：2,794 mm）のシールドが上記の折渡トンネルと同様な理由で適用（1927年）されたが、これも約87 mを掘削したのみで放棄された。ここでの覆工は仮設支保として鋼製セグメントが採用された。

本格的にシールド工法が採用されたのは、関門鉄道トンネル(下り線：1929～1931年、上り線：1933～1934年)であった。トンネル外径は7,000mmで覆工は鋳鉄(FC23)が大部分の区間で採用されたが、鉄筋コンクリートセグメント(28 Ring)が試用されている。

この鉄筋コンクリートセグメントは鉄筋セグメントとほぼ同程度の強度の同形式のセグメント（箱型一中子型：図-2）であり、最近でも使用されている形式と殆ど差がないものである。目標圧縮強度は 600 kgf/cm^2 で、鉄筋量は 386 kg/m^3 で、かなり複雑な配筋となっていることが伺われる。型枠は鉄筋製、中子はアルミ製、約 0.5 cm のスランプ、1 ピースの打設に 2.5 hr を要し、棒状バイブレータと表面バイブルレータが用いられている。なお、閨門鉄道トンネルは海峡下のトンネルでもあり、二次覆工コンクリートが施工されていることもある。

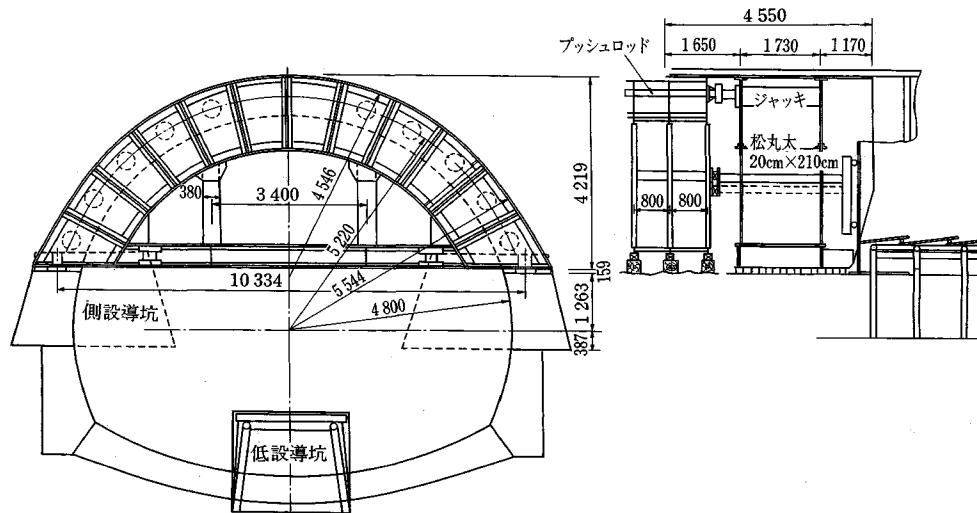
図-3 関門道路トンネルのルーフシールド（上半）⁶⁾

表-1 シールドトンネル歴史（主として鉄道トンネル）

年号	シールド工法および覆工等の変遷	年号	シールド工法および覆工等の変遷
1818	フランス生まれのブルネル、シールドの特許取得	1963	大阪市で日本最初の機械掘りシールド
1825	チームズ河底トンネル工事をシールド工法で着手：世界初のシールド	1964	荒川で日本最初の泥水シールド
1843	チームズ河底トンネル工事完成	1964	営団地下鉄で日本最初の駅部シールド、セパレートホーム
1845	ブルネル死去	1964	下水道としては初めて鉄筋コンクリートセグメントを採用、従来の下水はコルゲートメタルセグメントと内側に場所打ちコンクリート覆工
1869	円形の鉄製覆工一ロンドン	1965	地下道工事で馬蹄形シールド、アーチ部は鋼製セグメントと二次覆工、下部は矩形鉄筋コンクリートセグメント、矩形シールドの国内で初
1869	石灰・セメント系裏込め注入適用一ロンドン	1965	日本最初の複線シールドトンネル（大阪市4号線D=10.1m）
1886	シールドトンネル工事に圧気工法を初めて採用一ロンドン	1967	国鉄が平板型鉄筋コンクリートセグメントの研究開発着手
1893	石材及びコンクリートブロックを採用一メルボルン 一次覆工は木材、二次覆工は石材一メルボルン	1968	総武線で初めて平板型鉄筋コンクリートセグメント
1895	ルーフシールド工法一パリ、覆工はレンガ	1969	山陽新幹線高塚山トンネルでビッグジョンシールド、馬蹄形の複線断面、リブ&ラギング、アーチは二次覆工（場所打ちコンクリート）インバートは鉄筋コンクリートセグメント
1896	一次覆工として、鋼材、二次覆工は場所打ちコンクリート一トイツ	1969	京葉線森ガ崎トンネルで泥水シールド、泥水式シールド工法の本格的夜明け
1897	ルーフシールド工法一パリ、覆工は場所打ちコンクリート、反力はプッシュロッド	1972	東海道線でピンホゾ系繰手平板型鉄筋コンクリートセグメント開発実用
1920	羽越線折渡すい道で国内初めてのシールド工法採用 単線鉄道トンネル、約180mで放棄 コンクリートブロック覆工	1974	土圧式シールドが開発・実用
1927	丹那すい道の水抜き坑一径2.8m、87mで放棄、鋼製セグメント	1979	東北新幹線上野トンネルでピンホゾ系平板型鉄筋コンクリートセグメント（外形12.6m）を全面的に採用
1929	関門鉄道トンネル：下り線1929～1931、上り線1933～1934、单線シールド、大部分が鉄製セグメント、上り線において鉄筋コンクリートセグメントを試用（28リング）、シールド工法の国内での初成功例	1987	MFシールドが開発・実用（京葉線）
1953	関門道路トンネルで国内初のルーフシールド、プッシュロッド方式による場所打ち覆工一国内初、	1988	信濃川発電水路トンネルでECL工法（山岳地帯）—JR東日本
1957	営団地下鉄4号線、永田町駅でルーフシールド	1991	DOTシールドが開発・実用（広島市新交通）
1961	名古屋地下鉄覚王山シールド、单線、戦後初の円形シールド、覆工は全面的に鉄筋コンクリートセグメントを採用		

が、約50年経過した現在全く変状や漏水が発生していないことは時代背景を考えると、驚嘆に値するものである。

4. 国内におけるシールド工法の発展経緯—戦後—

戦後の最初のシールドトンネルは関門道路トンネル

(1953～1954年)のルーフシールドである(図-3)。ここではプッシュロッドを用いて、シールドテール内で場所打ちコンクリートが打設されている。同様な工法が営団地下鉄4号線の永田町駅(1957～1958年)でも採用された。

戦後の最初の円形シールドは名古屋地下鉄の覚王山ト

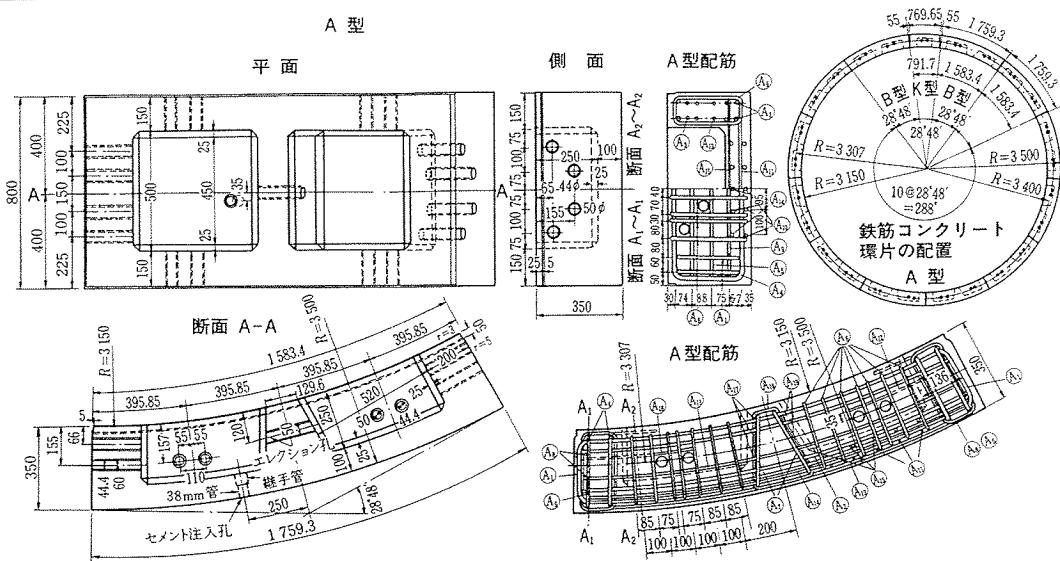


図-4 東北新幹線第2上野トンネルのピン一ホゾ継手鉄筋コンクリートセグメント

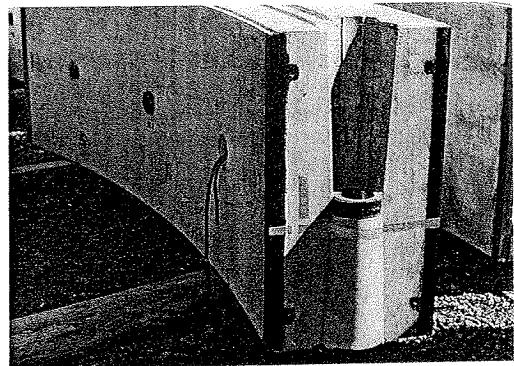
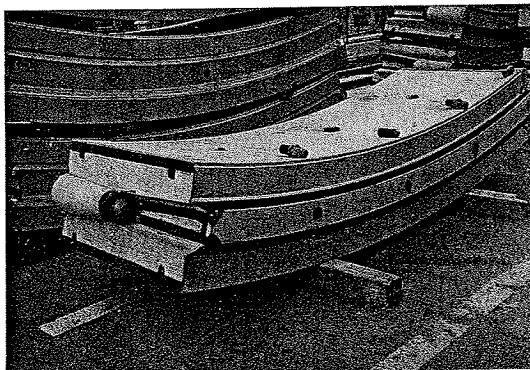


写真-1 ピン-ホゾ継手鉄筋コンクリートセグメント

ンネルで採用（1961年）され、セグメントは関門鉄道トンネルの鉄筋コンクリートセグメントに極めて良く類似しているものである。その後、現在まで鉄道シールドトンネルの覆工には、この箱型鉄筋コンクリートセグメントが多く採用されている。

下水道における初期のセグメントはコルゲートメタルが主流で内側に二次覆工の場所打ちコンクリートを打設するものであったが、1964～1965年にかけて東京都の下水で初めて鉄筋コンクリート製のセグメントが採用された。

1965～1966年にかけて馬蹄形のシールドが地下道に初めて採用され、アーチ部は鋼製セグメントに二次覆工コンクリートを、下半は矩形の鉄筋コンクリートセグメントが用いられた。部分的ではあるが矩形セグメントが採用された最初の事例である。

平板型の鉄筋コンクリートセグメントは、1967年頃から国鉄により開発が進められた。これは、箱型鉄筋コ

ンクリートセグメントがシールドジャッキの推力に対する抵抗が小さく、また、主断面が桁構造となっているため配筋に制約を受けて、高耐力のセグメントが製作しにくい等の欠点をカバーすることを目的とされた。そのためには、継ぎ手構造の開発が必須であり、曲がりボルトや継ぎ手部のみ箱抜きした直ボルト等が開発、実用された。同時にコンクリートの補強方法として、薄い鋼板を内または外に配置し適当なジベルでコンクリートと一体化したコンポジットセグメントや鉄骨と鉄筋によりコンクリートを補強した鉄骨・鉄筋コンクリートセグメント等も実用された。

ヨーロッパ等では平板型のナックルジョイント（セグメント間継ぎ手）や拡径セグメントが実用されているニュースも入ってきて、多ヒンジリングの力学的な検討が進められ、一部で試用されたようである。

国鉄では平板型コンクリートセグメントの継ぎ手構造について種々検討を重ねた結果、この形式の利点を最大

限に生かすには、継ぎ手等による断面欠損の無いピンホゾ系の継ぎ手を開発し、東海道地下線や東北新幹線の第1, 第2上野トンネル(図-4)(写真-1)に実用した。

平板型セグメントのより曲げ耐力の高い継ぎ手として、東京都を中心にカップ継ぎ手が開発され、軟弱地盤等で実用されている。

5. シールドトンネル覆工の最近の話題

セグメントに関する最近の話題は、防水性能の高いことやより高耐力のもの、自動組み立てに適したもの、組み立てとシールド掘削が平行作業ができるもの等の各種の要素から研究・開発が進められている。

そうした例として、鉄板で箱を作りその中にコンクリートを充填し、継ぎ手部分はモルタル等で充填するNMセグメント(漏水があれば鉄板を溶接)や、トンネルを内側から見た個々のセグメントの平面形状が蜂の巣状(ハニカム)のセグメント、リング間の端面に凹凸をつけたセグメント(国鉄で開発し新幹線の上野トンネルで実用したものと原理は同じ)をドイツから輸入して実用しようとしている。

自動組み立てに適したセグメントについては、未だ定説がなく高能率で組み立てられた実績がない。組み立て作業に用いるエレクターの方に研究開発の眼が向けられているようだが、継ぎ手構造の研究の方がより重要であると考えられる。

シールドトンネルの覆工材料といった面で見れば、セグメントを用いないで直接コンクリートをシールドテール付近で打設する、いわゆる、ECL工法の研究開発も盛んであり、一部で実用化されている。セグメントの代わりに場所打ちコンクリートを直接打設することは、ルーフシールドにおける方法と同じであるが、プッシュロッドの代わりに型枠に推進反力をとるところが異なる。コンクリートの補強方法としては一般に鉄筋が我が国では多いが、鋼纖維補強コンクリートがヨーロッパではかなり実用されている。山岳地帯の比較的の地質条件の

恵まれたトンネルでは無筋コンクリートが採用されている。今後の方向としては、鋼纖維コンクリートのような連続打設が可能な方向にゆくのではないかと考えられる。

非常に小口径のシールドトンネルではセグメントを組み立てる作業が極めて困難となり、NTTを中心に早期強度が発現できるレジンコンクリートによる場所打ち覆工の研究が1980年代から進められている。

また、トンネルの断面形状が单一円形から、2つあるいは3つの円を重複させた多円形のシールド工法(MFやDOT)や、2つの円形断面を接する形で接合し、途中で捩じるH&Vシールド工法等も開発・実用化されつつある。

以上、簡単にシールドトンネルの覆工コンクリートの歴史を整理してみたが、もとより十分な調査ができなかつたので、記述に誤りがあるかも知れません。識者のご叱声をおおごととして終わりとする。

主な参考文献

- 1) 菅建彦:英雄時代の鉄道技師たち, 山海堂, 1987.
- 2) B.H.M. HEWETT & S. JOHANNESSON : SHIELD AND COMPRESSED AIR TUNNELING, 1922, McGraw-Hill Book Company.
- 3) 鉄道省, 秋田建設事務所:羽越線折渡ずい道工事概要, 1926.
- 4) 鉄道省, 熱海建設事務所:丹那ずい道東口シールド設備並びに掘削工事概要, 1927.
- 5) 運輸省下関地方施設部:関門ずい道, 1949.
- 6) 建設省・日本道路公団:関門トンネル工事誌, 1960.
- 7) 土木学会:わが国シールド工法の実施例・第1集, 1966.
- 8) 日本鉄道施設協会:シールド工法による鉄道トンネル実施例集, 1974.
- 9) 国鉄・構造物設計事務所, 東京第一工事局:シールド工法による地下駅実施例集, 1978.
- 10) 地下鉄技術協議会:シールド工法による鉄道トンネル実施例集(その2), 1985.

(1992.12.18受付)