

## トンネル 特集

# 最近のトンネル施工技術の動向

猪 熊 明

トンネル施工技術の動向について最近の学会発表などを調査した。山岳トンネルでは新しい地質調査法、維持管理上の技術などが注目され、さらに省力化、自動化などの着実な施工技術の開発があった。シールドトンネルでは再利用シールドなどコストダウンに関する技術やリサイクル技術などが注目される。

また2002年1年間で数は少ないが、アイルランドでのトンネル事業など日本企業による海外でのトンネル事業が発表された。このことは、日本のトンネル技術がコストも含めて世界的に評価されたものと考えられる。

キーワード：トンネル、施工技術、山岳トンネル、シールドトンネル、技術動向、地質調査

## 1. はじめに

昨今公共事業に対して逆風が強く技術開発も滞りがちであるが、成熟社会になるほど地下に対する需要は増大し、それに応じてトンネルの施工技術は着実に進歩している。本報文では最近のトンネル施工技術の動向を、2002年の1年間に公表された報告、論文などを調査して把握した。対象として

- ・山岳トンネル、
- ・シールドトンネル、

とし、参考にする文献は、

- ・トンネルと地下（日本トンネル技術協会）、
- ・建設の機械化（日本建設機械化協会）、
- ・土木学会年次学術講演集、土木学会論文集VI、

とした。ただし、発表された報告すべてを本文で述べることはできないので、極力新しい観点を持っていると思われるものについて少し詳しく紹介し、今後のトンネル施工技術の動向も含めて探求したい。

## 2. 山岳トンネル工法

山岳トンネル工法の動向について2002年の土木学会の年次講演会では（山岳）トンネルは9つのセッションが設けられ、それぞれのテーマを筆者の考えでかなり割切って決めると、概略表—1のようになる。また土木学会論文集の施工編（VI）では山岳トンネル施工で5編の発表があり、それらをテーマで整理すると表—2のようになる。また「トンネルと地下」「建設

の機械化」の研究報告を同様にテーマで整理すると表—3、表—4のようである。

以下にこれらに共通なテーマを紹介する。

表—1 2002年「土木学会年次講演会」のトンネルセッションのテーマ

セッション番号	テ ー マ
1	FEM 解析
2	地 質 調 査
3	施工中の計測
4	吹付けコンクリート
5	ボルト系の補助工法
6	切羽安定等
7	軟弱地質等
8	地表面沈下
9	湧 水 等

表—2 2002年「土木学会論文集（VI）」の山岳トンネル関係発表論文のテーマ

分 野	テ ー マ
調 査	トモグラフィ的弾性波探査手法
施 工	バルクエマルジョン爆薬 膨張性地山と多重支保工法 New PLS工法
建設機械	ベルトコンベヤざり出し

表—3 2002年「トンネルと地下」の山岳トンネル関係報文の研究分野でのテーマ

分 野	テ ー マ
調 査	弾性波速度評価
施 工	地震時挙動 鏡止めボルトの作用効果 切羽安定性 地山分類基準
維持管理	新しい打音検査手法 変位計測による覆工保守管理の手法

表一4 2002年「建設の機械化」の山岳トンネル関係報文のテーマ

分野	テーマ
調査	反射法地震探査による切羽前方探査 発破を用いないトンネル切羽前方地質探査法
施工	TULIP 工法を用いた先行支保工 発破振動の自動計測
建設機械	New PLS 工法 集塵強制換気システム 爆薬の遠隔装填 連続ベルトコンベヤ
維持管理	覆工打音点検システムの開発 レーザを用いたトンネル覆工測定

(1) 地質調査

石山<sup>1)</sup>らの報告で、異なる探査法、TDEM 法（比抵抗法電気探査）、TSP（トンネル方向弾性波探査）、DRISS（穿孔探査法）を組合わせて実施し、総合的に結果を検討することで高精度に切羽前方の地山性状を評価できるとしている。

探査対象としたトンネルは、土被り 200 m を超え、凝灰岩および花崗斑岩からなり、数条の断層と交差していることが予想されていた。ここで TDEM 法による事前概査では、断層（脆弱）部の正確な位置を捉えきれしていない。

一方、TSP の結果を見ると反射面の密集ゾーンとして断層部が検知されるが、現段階では TSP の結果から反射面（群）および反射面間の脆弱程度を推定することは困難である。地山脆弱部の正確な位置把握および定量的な地山（等級）の評価は施工中の DRISS の穿孔エネルギー、ダンピング圧からの推定が最適としている。

(2) 施工

施工で注目される補助工法については、切羽安定や地表面沈下についての報告がある。内藤<sup>2)</sup>らは未固結砂層大断面トンネル（断面積 147 m<sup>2</sup>）の鏡面の注入を、高村<sup>3)</sup>らは泥岩 2 車線めがねトンネルの長尺鏡ボ

ルト（ボルト長さ 21 m）を報告している。

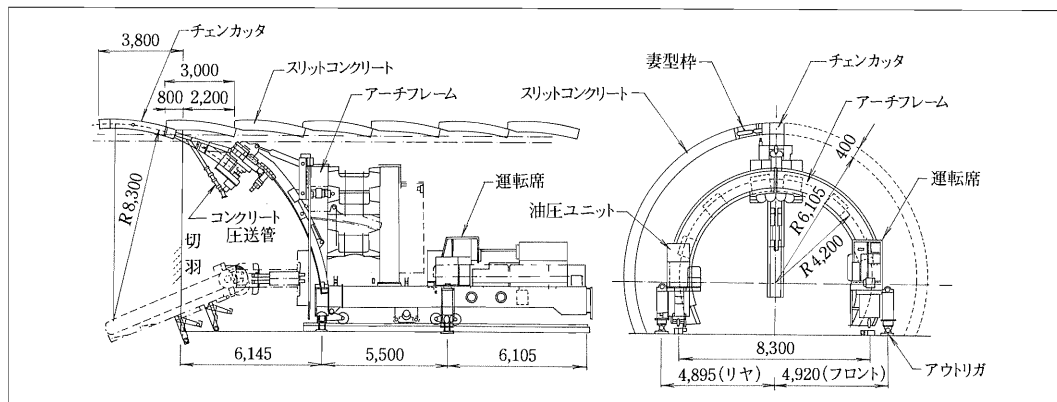
これらの工法自体は目新しいものではないが、両報告を比較すると鏡面の注入と鏡ボルトの作用効果が明らかになる。内藤らは、鏡補強注入は鏡面の安定性に寄与するほか、リバウンドが低減するなど、施工性も改善され鏡面の分割施工数が当初の 5 分割から 2 分割程度で掘削可能となったため、最大月進 41 m を達成し、当初に比較して進捗率を約 15% 向上することができた。また、経済性については切羽毎に打設する注入式鏡ボルトの当初本数の施工費と比較して同程度以下になったとしており、鏡注入の効果を述べている。

一方、高村らは、「切羽の押出し量の測定結果によると、鏡ボルトが有る場合には押出し量が半分以下に収まっている場合も確認されて」いるが、「いくら長尺ボルトで切羽をおさえても、切羽付近 2 m 程度以下の鏡の崩壊は発生する。この場合長尺鏡ボルトの補完として、地山注入または短尺ボルトの追加打設も効果があるものと思われる」としている。したがって、膨張性地山のような切羽の押出しの場合にはボルトがより有効で未固結地山の切羽安定には注入がより有効と思われる。

補助工法についてはそれ以外に AGF による地表面沈下対策などが報告されている。

(3) 建設機械

建設機械の技術動向として爆薬装填についての報告が 2 件ある。岡田<sup>4)</sup>らは数年前、圧縮空気を用いて膠質状爆薬および込め物を装填する機械を開発した。今村<sup>5)</sup>らは膠質状爆薬・顆粒状爆薬（ANFO 爆薬）・バルクエマルジョン爆薬（bulk：ばら物、現地製造できる爆薬）を比較して、バルクエマルジョン爆薬を選定し同爆薬による坑道掘進について報告している。今後発破技術については、長期的な爆薬性能の向上、装薬機械の改良、スムーズブラスティングへの対応など



図一1 New PLS 機構造図

の検討を踏まえ自動化が進むものを考えられる。

また連続ベルトコンベヤの報告も数件ある。ベルトコンベヤのコスト面での課題としてずりを細かく処理するクラッシャのコストがあるが、木村<sup>9)</sup>らはトンネルのずりを盛土工事に使うことを前提として「ずり出しに連続ベルトコンベヤシステムを採用すると、ずりをベルトコンベヤで運べるかたまりにしなければならぬ。これはずりを盛土材に適した状態にするということである。連続ベルトコンベヤシステムを採用しない場合、盛土工事側では、大塊ずりを小割したりして、工事を行う。コスト比較をする場合、トンネル掘削側だけでなく、盛土工事側で生じる費用もカウントしたとしたら、連続ベルトコンベヤシステムは、かなり短いトンネルでも採用できるのではないかとしている。

以上は省力化の観点からの機械化であるが、地表面沈下を抑制する点から先受け工法で遠藤<sup>7)</sup>らの改良 New PLS (図-1) の報告がある。本件は施工中の崩落が報告され、その原因と対策について、「崩落結果から、スリットコンクリートの剛性は高く、周辺地山の変位の抑制に効果を十分発揮していたと考えられるが、無筋コンクリートであり靱性が小さいことから、急激な脚部沈下により崩落に至ったものと考えられた。その対策として当初風化泥岩と想定され実際には異なっている箇所には、追加の脚部補強工（地表からの RJP 工）を実施し、さらに今後の盛土区間においては施工直後の脚部地山判定手法を追加実施する」としている。

#### (4) 維持管理

維持管理面では、調査技術として供用トンネルの覆工打音検査手法が数件報告されている。打音検査シス

テムについては、施工技術総合研究所でも国土交通省関東技術事務所の委託を受けて図-2、写真-1 のようなシステムを開発した。これは打音の音圧レベルの差を解析して健全度を判定しようとするもので、平成12年度から研究を実施している。これまでの実験機を用いた基礎実験および現地試験の結果から、概ね実用化の見通しを得た。

活線拡幅の施工法として今岡<sup>8)</sup>らの移動式プロテクタの報告があるが、今後、より短い工期で現況交通への影響の少ない活線拡幅工法の開発が期待される。

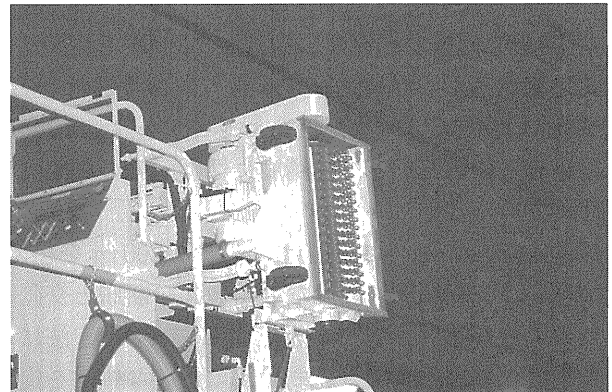


写真-1 打音部分

### 3. シールドトンネル工法

シールドトンネル工法の動向について2002年の土木学会の年次講演会ではシールド（トンネル）は5つのセッションが設けられ、それぞれのテーマは概略表-5 のようである。また土木学会論文集の施工編(VI)ではシールドトンネルの施工での発表はなかった。また「トンネルと地下」「建設の機械化」のシールドトンネルに関する研究報告を同様にテーマで整理

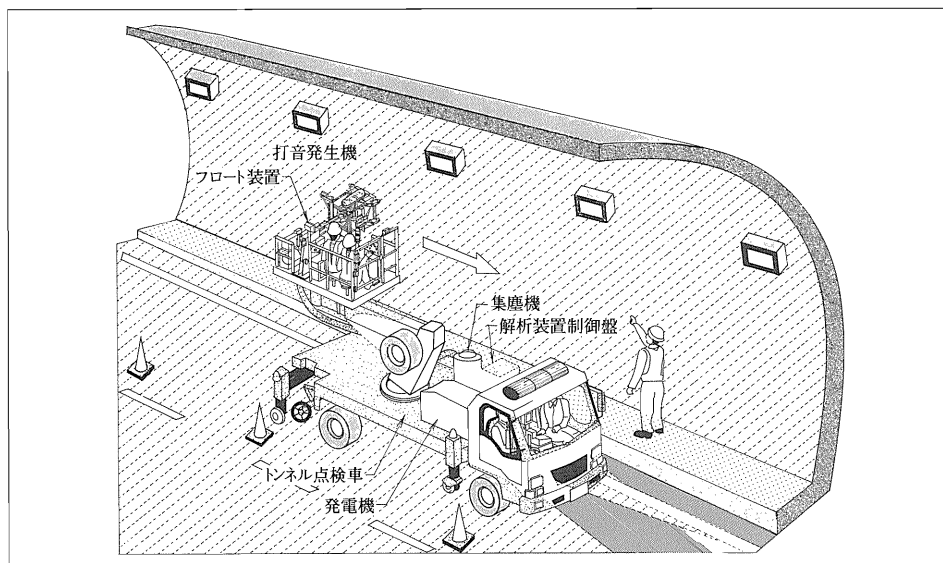


図-2 打音点検装置の全体図

表—5 2002年「土木学会年次講演会」のシールドトンネルセッションのテーマ

セッション番号	共通のテーマ
1	変位・土圧の解析
2	凍結工法、偏平シールド等
3	場所打ち覆工等
4	水密性もしくは多ヒンジ系セグメント等
5	継手・コッターセグメント等

表—6 2002年「トンネルと地下」のシールド関係論文の研究分野でのテーマ

分野	テーマ
施工	シールド機挙動のシミュレーション 施工時荷重
泥土処理	シールド泥土・改良土

表—7 2002年「建設の機械化」のシールド関係論文のテーマ

分野	テーマ
施工	上向きシールド 岩盤対応型泥水シールド 内胴引抜き再利用型シールド 親子シールド掘進機
泥土処理	建設泥土処理とリサイクル

すると表—6、表—7のようである。

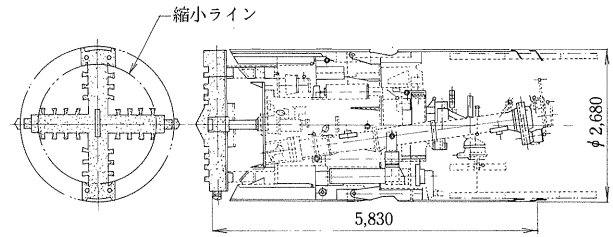
これらに共通なテーマを以下に紹介する。

### (1) 施工

シールドの新技术として、高石<sup>9)</sup>ら、もしくは伊東<sup>10)</sup>らの鉛直方向上向きシールドがある。

「上向きシールド工法」によるマンホールの築造を採用した結果、本工法での施工により、工期短縮（在来工法比で全体工期 1/3，地上作業 1/6），騒音，振動などによる建設公害の抑制・安全性の向上などの成果が得られた。泥土圧式シールド工法でシールド外径 2,280 mm（3分割）の上向きシールドは，従来の水平トンネルの掘削と異なり，地山の自重に逆らう施工のため，常にチャンバ内を泥材と混練りされた改良土砂で充填した。また留意点として，施工上チャンバを漏斗形状とすること，排土機構には安定した切羽土圧・排土管理が可能なピンチバルブを採用すること，トンネル坑内からのシールド発進部には横シールド施工時にシールドで直接切削できる素材のセグメントを組立てておくこと，管理土圧の設定は地山を緩ませないことを基本に行うこと，などである。

藤崎<sup>11)</sup>らは再利用型シールドについて報告している。従来のシールド工法は，マシンを回収再利用するため到達立坑の規模を大きくしてきた。その結果立坑設置に多額の費用が必要になる等の問題があった。そこで，新しく開発された内胴引抜き再利用型シールドマシン



図—3 再利用型シールド機

(図—3)を採用することによって上記の問題を解決し，工事費削減，周辺環境の配慮を目指した。

再利用型の泥土圧式シールドマシン（外径  $\phi 2,680$  mm）と通常のシールドマシンとの違いは，外胴部と内胴部の二重構造，カッタフェースの縮小機構，スプレッタの取外し，偏心対応ジャッキの回転・収納，内胴収納時走行装置と内胴反力システムなどである。これを，

- ① 掘進，
- ② 到達，
- ③ 分離・移動，
- ④ 内胴回転・再組立て，
- ⑤ 再発進

のように施工し，シールド内部の機器を再利用し，マシン製作費を 25% 縮減したとされる。

こうしたコスト縮減は今後もたゆまず追求されることと思われるが，そうした観点から研究段階ではあるが，岩本<sup>12)</sup>らの多ヒンジ系セグメントの研究や近藤<sup>13)</sup>らの大断面シールド覆工としての場所打ち鉄骨コンクリートライナなどが新しい方向のように思われた。

### (2) 泥土処理

近年の循環型社会を指向する時代の流れを受けて，シールドで発生する汚泥のリサイクル技術が報告されている。

野神<sup>14)</sup>らは泥水シールドの泥水処理について砂質土（1次処理土）を新海面埋立て地へ搬出し，粘性土（2次処理土）は流動化処理土プラントに搬出して地下鉄工事の埋戻しに再利用した。

流動化処理土は，土砂に大量の水を含む泥水（または水）と固化材を加えて混練することにより流動化された安定処理土であり，主材，固化材，調整泥水で構成されている。発生する 2次処理土は，流動化処理土の原料として望ましい以下の条件，

- ① 流動性を伴う泥水であること
- ② 比重 1.3 以上であること
- ③ 凝集剤などの薬剤が混入していないこと

を満たすことができた。

このため、通常の流動化処理土プラントの泥水受入れ費や中間処理場の泥水処分費より安価となり、発生土処分費の縮減が行えた。

また荒木<sup>15)</sup>らは泥土のリサイクルとして、2種類の改良材（セメント系固化材、無機系吸水材）を泥土に連続的に投入し、効率良く攪拌・混合処理する泥土リサイクル装置を報告している。改質土として、無機系吸水材を1.0 wt%、セメント系固化材を5.0 wt%もしくは10.0 wt%添加し、混合、攪拌処理した。泥土では、コーン指数、6価クロム溶出の基準を満足することができた。

#### 4. おわりに

公共事業に対する逆風が強い昨今、技術開発に注力することは今後の一つの重要な方向であると言える。近年VE方式も数多くなってきたし、総合評価方式などの流れは強まりこそすれ弱くなることはない。

こうした中で最近の学会発表などからトンネル施工技術の動向を調べると、山岳トンネルでは新しい地質調査法、維持管理上の技術などが注目され、さらに省力化、自動化などの着実な施工技術の開発がある。シールドトンネルでは再利用シールドなどコストダウンに関する技術やリサイクル技術などが注目される。

こうした技術は国際競争力をもつことによって、一層評価が確立する。2002年1年間で数は少ないが、日本企業によるアイルランドでのトンネル事業や中国へのシールド機の輸出などが発表されたことは、日本のトンネル技術がコストも含めて世界的に評価されたものと言える。

JICMA

#### 《参考文献》

- 1) 石山宏二, 他: 高精度切羽前方探査システムの適用, 土木学会第57回年次学術講演会, p.1327, 2002年9月
- 2) 内藤将史, 他: 未固結砂層における鏡補強注入の効果, 土木学会第57回年次学術講演会, p.515, 2002年9月
- 3) 高村栄二, 他: トンネル掘削に伴う切羽前方地山挙動についての一考察—長尺鏡ボルトの効果の検証—, 土木学会第57回年次学術講演会, p.503, 2002年9月
- 4) 岡田 喬, 他: 山岳トンネル工事における爆薬の遠隔装填システムの導入, 建設の機械化, p.29, 2002年7月
- 5) 今村仁悟, 他: バルクエマルジョン爆薬を用いた坑道掘進, トンネルと地下, 第33巻, 11号, p.17, 2002年11月
- 6) 木村裕俊, 他: 連続ベルトコンベヤシステムを土砂地山に採用, トンネルと地下, 第33巻, 11号, p.7, 2002年11月
- 7) 遠藤元一, 他: 盛土造成地を改良 New PLS 機で施工, トンネルと地下, 第33巻, 5号, p.17, 2002年5月
- 8) 今岡彦三, 他: 移動式プロテクタを用いた発破によるトンネル活線拡幅工法(エルトン)の施工, 建設の機械化, p.3, 2002年7月
- 9) 高石 享, 他: 3か所のマンホールを1機の上向きシールドで築造, トンネルと地下, 第33巻, 9号, p.41, 2002年9月
- 10) 伊東 憲, 他: 上向きシールド工法の開発と実証施工, 建設の機械化, p.21, 2002年4月
- 11) 藤崎 満, 他: 内胴引抜き再利用型シールドマシンによる再構築工事, 建設の機械化, p.22, 2002年7月
- 12) 岩本 勲, 他: シールドトンネル用多ヒンジ系セグメントの耐荷特性1(常時), 土木学会第57回年次学術講演会, p.371, 2002年9月
- 13) 近藤紀夫, 他: 場所打ち鉄骨コンクリートライナーの開発(その4)—せん断実験—, 土木学会第57回年次学術講演会, p.353, 2002年9月
- 14) 野神睦雄, 他: トンネル掘削土のゼロエミッション, トンネルと地下, 第33巻, 3号, p.35, 2002年3月
- 15) 荒木輝夫, 他: 泥土圧式シールド工事における建設泥土処理とリサイクル, 建設の機械化, p.27, 2002年9月

#### 【筆者紹介】

猪熊 明 (いのくま あきら)  
 独立法人土木研究所  
 基礎道路技術研究グループ長  
 前施工技術総合研究所技術部長



現場技術者のための

## 建設機械整備用工具ハンドブック

- ・建設機械整備用工具約180点の用語解説と約70点の使い方を収録。
- ・建設機械の整備に携わる初心者から熟練者まで幅広い方々の参考書として好適。

■ A5判 120頁

■ 定 価: 会 員 1,050円(消費税込), 送料420円

非会員 1,260円(消費税込), 送料420円

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 (機械振興会館) Tel. 03(3433)1501 Fax. 03(3432)0289