投稿論文

在来線非電化鉄道トンネルにおける ロックボルト穿孔作業の機械化

大場 宏樹[1]・志子田 洋一[2]・佐々木 崇人[3]・池田 尚[4]・伊深 佳典[5]

[1]仙建工業㈱ 本社土木本部 土木エンジニアリング部 部長（〒980-0811 仙台市青葉区一番町 2-2-13）
E-mail：hiroki-oba@senkenkogyo.com
[2]仙建工業㈱ 本社土木本部 土木エンジニアリング部 次長（〒980-0811 仙台市青葉区一番町 2-2-13）
E-mail：yoichi-shikoda@senkenkogyo.com
[3]仙建工業㈱ 本社土木本部 土木エンジニアリング部 次長（〒980-0811 仙台市青葉区一番町 2-2-13）
E-mail：takahito-sasaki @senkenkogyo.com
[4]仙建工業㈱ 本社土木本部 土木エンジニアリング部 副課長（〒980-0811 仙台市青葉区一番町 2-2-13）
E-mail：nao-ikeda@senkenkogyo.com
[5]仙建工業㈱ 本社土木本部 土木本部 部長（〒980-0811 仙台市青葉区一番町 2-2-13）
E-mail：yoshinori-ibuka@senkenkogyo.com

地方鉄道の多くは山間部に位置し，老朽化したトンネルの維持管理に多くの負担を要している．さらに，少子高齢化の進行により建設分野全体で労働力不足が深刻化しており，特に過酷な作業が敬遠される傾向にある．鉄道トンネルの変位制御に用いられるロックボルト打設作業も例外ではなく，現在でも人力による施工が中心であり，作業負担の大きさや健康被害が懸念されている．本研究では，これらの課題を解決するため，狭隘な地方鉄道トンネルに対応可能な穿孔機と軌陸バックホウを組み合わせた機械化施工工法を開発した．本工法は，従来の人力作業で必要であった足場の組立や煩雑な段取り替えを不要とし，施工効率の向上，作業負担の軽減，安全性の確保が期待できるものである．

キーワード：*Rock Bolt, Tunnel Rehabilitation, Mechanization, Rock Drilling Machine, Occupational Safety*

1. はじめに

現在供用している鉄道トンネルの変状(内空変位)に対するロックボルトによる補強工は，大規模断面(新幹線複断面)の耐震補強工事等では機械化が進んでいる．しかし，小規模(在来線単線，複線の中・小断面)の補修・補強工事においては，現在も重量のある削岩機を人力で操作するレッグドリルによる穿孔作業が主流となっている(**図-1**)．

レッグドリルによる穿孔は圧搾空気による伸縮式サポーターで推力を得る機構であり，機械本体の重量は単体で 20 kg ～ 30 kg 程度である．そのため，人力によって穿孔箇所まで移動・運搬する作業，および穿孔時の押し込み作業や穿孔完了後の引抜き作業は，腰痛を引き起こす原因となる過酷な作業である．さらに，レッグドリル操作時に発生する振動や騒音は，白ろう病や難聴といった職業性疾病の原因となっており，現在も深刻な問題となっている．また，少子高齢化に伴う若年労働者の減少にも対応していくことが，本分野においても求められている．

このような作業状況を改善するため，これまでも穿孔作業の機械化が試みられてきた．取り組み事例としては，掘削土砂運搬車(以降，「トロ台車」と表記)や軌陸ダンプトラック上に，のり面工事で使用される大型削岩機を搭載し，穿孔作業を行ったケースがある．しかし，この工法においても，穿孔位置ごとに角度や高さ(高低)を調整する段取り替えが必要となり，多くの労力と時間を

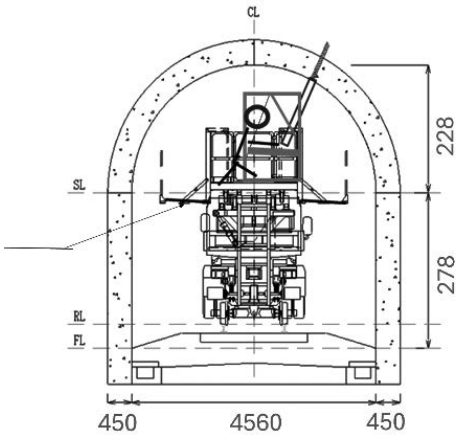


図-1 レッグドリルによるロックボルト穿孔施工略図

要するなど，依然として課題が残されている．

これらの過酷な作業や職業性疾病の予防，さらには穿孔時間の短縮と作業効率の向上を図る観点から，在来線の非電化鉄道トンネルにおけるロックボルト穿孔作業の機械化システムの開発を行う．

2. 既往の機械化事例

2.1　在来線単線トンネルでの一部機械化施工

在来線で実施されているロックボルト穿孔作業は，現在も人力によるレッグドリルを用いた施工が主流である．一方で，当社の実績として，のり面のロックアンカー施工で用いられるインバータチゼル等を活用し，一部を機械化した事例もある．

作業手順としては，施工対象のトンネルに最も近い踏切から，インバータチゼル等の機械を1ｔトロ台車または軌陸4ｔダンプトラックの荷台に搭載し，作業位置まで搬送する．その後，荷台上に作業台や足場を組み立て，削孔位置の高さや方向に合わせて調整を行う．したがって，同一断面で複数のロックボルトを打設する場合には，それぞれの打設方向や高さに応じて，毎回作業台や足場を組み替える必要があり，段取り替えが煩雑となる．このため，作業効率を高める工夫として，一つの打設方向に対して側壁にロックボルトを打設した後，その状態を維持したまま，1ｔトロ台車または軌陸4ｔダンプトラックを次の断面まで移動させ，同じ方向の側面に連続してロックボルトを打設する方法を採用した．

インバータチゼルを導入し一部作業を機械化したことで，作業員の打設作業にかかる負担は軽減されたが，打設方向や高さに応じて機械の位置をセットするための足場や作業台の組み替え作業，およびそれに伴う移動作業には依然として多くの時間と労力を要するため，施工コストが嵩むことが課題となった．**図-2** にロックボルト打設施工断面，**図-3** に施工状況を示す．

2.2　在来線複線トンネルでの大型機械使用

2007年7月16日に発生した新潟県中越沖地震により，被災した在来線トンネルの復旧作業が実施された[1)]．

トンネル形状が在来線複断面であったことから，復旧には通常，道路トンネル等の掘削に用いられている2ブーム1バスケット型の大型ジャンボ掘削機が使用された．軌道上での移動には，自走台車に大型ジャンボ機を搭載し，載線箇所である踏切から施工位置まで走行する方式が採用された．自走台車とは，ドリルジャンボなどの大型機械が自らの駆動力を鉄輪に伝達し，レール上を走行できる装置である．2ブーム1バスケット型の大型

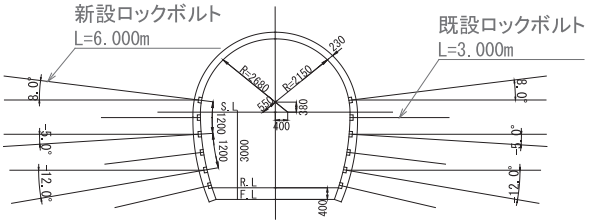


図-2　ロックボルト打設施工断面

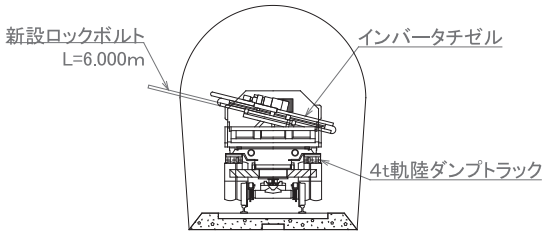


図-3　インバータチゼルによる施工状況（4ｔダンプトラック荷台上に設置しての穿孔）

ジャンボ掘削機を使用することで，人力作業に伴う作業員の労務負担が軽減されるとともに，打設方向や高さに応じた削孔機械の組み替え作業が不要となり，作業の効率化が図られた．また，一つの位置から全周方向に対してロックボルトの打設が可能であった．

さらに，本復旧工事は災害対応であり，列車運行を中止したうえで作業が実施されたため，作業時間に制限がなく，作業前後の離線・載線作業も不要であった．作業終了後は，他の線路作業に支障のない位置に機械を存置することで移動時間の短縮が可能であった．

2.3　新幹線複線トンネルでの機械化施工

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震により，震源断層に近接する上越新幹線のトンネルでは，覆工の崩落など大規模な被害を受けた．このことを受けて，新幹線路線上に位置する活断層近傍の複数の新幹線トンネルにおいて，耐震対策工が実施された．対象となったトンネルは新幹線複線断面であり，かつ新幹線を通常運行させながら対策工を行う必要があったことから，施工は新幹線の運行が停止する深夜の概ね2時間の限られた時間帯に実施された．また，トンネル付近には工事用資材の仮置き場が確保できなかったため，約20 km離れた保守基地から資機材を搬送する必要があり，車両限界内での輸送と，施工時には建築限界内での作業が求められた．これらの施工条件を満たすために，本工事では新たに開発されたロックボルト穿孔マシン「STAR-MD（Multilink Drill）」を専用台車に搭載し，モーターカーで牽引する方式が採用された[2)]．

以上のように，供用中の鉄道トンネルにおけるロックボルト穿孔作業の機械化は，これまでも実施されてきた

実績がある．しかし，在来線単線トンネルでの施工においては，施工効率等の観点から依然として改善の余地が大きく，さらなる機械化が必要と考える．そのため，これまでに実施された在来線および新幹線における機械化施工の実績を基に，開発に必要な条件を抽出し，在来線単線トンネルの内空寸法内で稼働可能な機種や，適切な移動方法を決定していく．

3. 機械化システムの決定

3.1 トンネル内使用機械寸法決定の条件

本システムにおいて使用する機械の寸法は，JR 東日本の規定に定められた在来線非電化単線トンネルの標準断面を基準とする．その理由を以下に示す．

3.1.1 トンネル数における在来線の比率の高さ

我が国に存在する鉄道トンネルの総数は，民鉄・公営鉄道で 1,325 箇所，各 JR を合わせて 3,496 箇所，合計で 4,821 箇所である．このうち新幹線トンネルは，北海道新幹線 31 箇所 , 東北新幹線 154 箇所，上越新幹線 23 箇所，北陸新幹線 29 箇所，東海道新幹線 66 箇所，山陽新幹線 142 箇所，北陸新幹線 30 箇所 , 九州新幹線 66 箇所 , 西九州新幹線 31 箇所の合計 572 箇所である．したがって，在来線トンネルの総数は 4,281 箇所となる．このうち，JR 各社の在来線トンネル数は，JR 北海道 137 箇所，JR 東日本 961 箇所, JR 東海 367 箇所, JR 西日本 789 箇所，JR 四国 275 箇所，JR 九州 390 箇所，JR 貨物 5 箇所の合計 2,924 箇所であり，これは JR 線トンネル全体の 83.6% に相当する（**図-4，5**）．なお，この中には単線断面および複線断面が混在しており，また，電化区間と非電化区間も含まれる [3]．

3.1.2 在来線非電化単線トンネルが最小断面

在来線非電化単線トンネルの標準断面は，現存する断面の中で最小であり，本システムをこの断面に適合させることで，ロックボルト打設工への広範な応用が可能になると考える．

3.1.3 老朽化の進行

在来線非電化単線トンネルは建設からの経過年数が最も長く，老朽化が進んでいる．したがって，補修・補強の必要性が高く，本システムの使用頻度が大きいと見込まれる．

トンネル補修・補強マニュアル [4] において，在来線トンネルの標準断面寸法は，単線トンネルで横幅 4,700 mm，複線トンネルで横幅 9,040 mm と規定されている．複線トンネルにおいては，片側ずつの施工を行うことで本システムによる対応が可能である．また，電化区間ではトロリー線や負起電線などの架空線が存在するが，単線・複線いずれにおいても片線ずつ施工することや，架空線との十分な離隔を確保することで，本システムを用いた施工が可能であると考えられる．

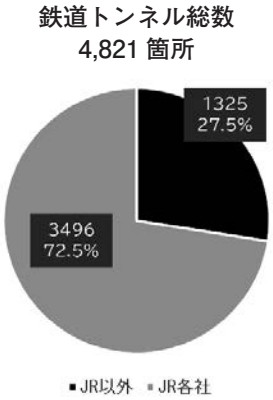


図-4 全鉄道トンネルにおける JR 線トンネルの比率

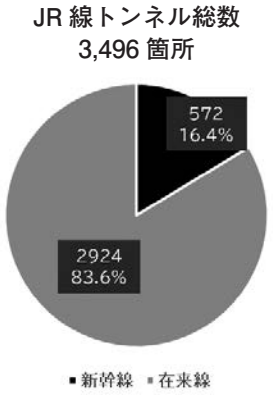


図-5 JR 線トンネルにおける在来線トンネルの比率

3.2 トンネルの補修作業の考え方

在来線単線鉄道トンネル内におけるロックボルト穿孔作業の機械化システムを決定するにあたり，3.1 で述べたトンネル内空寸法に対応した機種の選定に加えて，次の 2 点の条件を考慮する必要がある．第一に，列車運行の合間に確保される限られた作業可能時間内において，施工位置まで移動できる手段を構築することである．第二に，作業中または移動中に機械が故障し走行不能となった場合でも，列車の安定運行に支障をきたさないように，速やかに線路外へ撤去・搬出できるシステムを構築することである．

列車運行の合間における作業を実施するには，列車運行状況を正確に把握する必要がある．JR 在来線の多くでは，旅客列車が早朝から夜間にかけて定められたダイヤで運行されており，貨物列車はその合間に運行されている．このため，昼間は列車の運行本数が多く，作業時間の確保が困難であることから，補修作業は夜間の列車本数が少ない時間帯に実施されている．施工可能時間は

概ね 3 時間（約 180 分）程度である．施工位置までの移動手段を確立するためには，在来線の線路敷設の特徴を理解しておく必要がある．在来線の多くは一般道と踏切を介して平面交差する形で敷設されている．そのため，限られた作業時間内に作業効率を高めるためには，乗り込み地点から施工位置までの移動時間，および作業終了後に施工位置から離脱地点まで戻る移動時間を可能な限り短縮する必要がある．通常は，施工位置に最も近い踏切を乗り込み地点とするが，適切な位置に踏切が存在しない場合には，仮設の乗り込み用踏切を設置することがある．このように，一般道と平面交差する踏切または仮設踏切を利用して線路内に進入し，鉄車輪をレールに載せて走行する「軌道陸上兼用機械（以下，軌陸機械）」を使用することが有効である．軌陸機械には，ダンプトラック，自積載トラック，油圧ショベル，クローラクレーン，高所作業車などがあり，いずれも鉄輪によってレール上を走行可能な構造を持つ[5]．

施工に使用する機械が故障して走行不能となった場合に，列車の安定運行に支障を及ぼさないよう，線路外へ迅速に搬出できるシステムとしては，作業時に複数台（例：ダンプトラック，高所作業車等）の軌陸車を組み合わせ，一台が故障した場合には，他の軌陸車と連結し，牽引または推進によって載線箇所まで移動させる方式が有効である（**図-6**）．さらに，踏切等の乗入れ・搬出箇所から作業位置までの経路には，電気・信号・通信施設等が設置されているため，使用する軌陸車は建築限界をはみ出さない構造であることが求められる．

3.3　使用機械寸法および機種の選定

ロックボルト打設機械は，在来線トンネルの内空寸法内で稼働可能な機種とする．ベースマシンには，汎用の 0.25 m^3 軌陸バックホウ（コベルコ製）を採用し，これにのり面防護工等で使用されるロックボルト用削岩機アタッチメント（EX ドリル）を組み合わせる形式とした．

0.25 m^3 軌陸バックホウを採用した理由は，キャタピラ外側までの幅が 2.38 m であり，トンネル幅が 4.76 m（**図-7，8**）であるため，十分なクリアランスを確保できること，および操作性が通常の作業機と同様であり，当社および他社においても鉄道保守作業で多くの使用実績があるため，信頼性が高いことによる．ロックボルトアタッチメント（EX ドリル）の長さは 3.63 m であり（**図-9**），トンネルの側壁部における S.L の幅 4.76 m および高さ 5.16 m 以内に収まるため，トンネル全周方向へのロックボルト打設に対応可能である．

ロックボルト打設作業には，打設後のモルタル充填作業やロックボルトのナット締付け作業が伴うため，作業

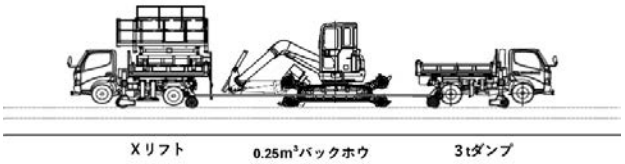


図-6　複数台の軌陸車の組み合わせ例

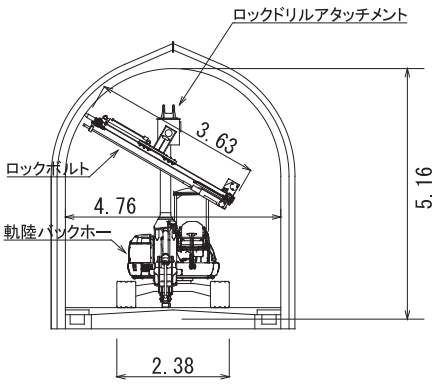


図-7　単線トンネル内のバックホウと EX ドリル断面図

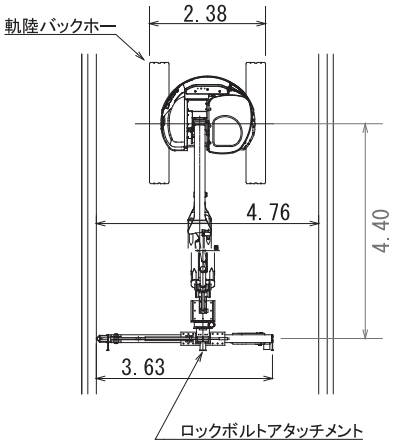


図-8　単線トンネル内のバックホウと EX ドリル平面図

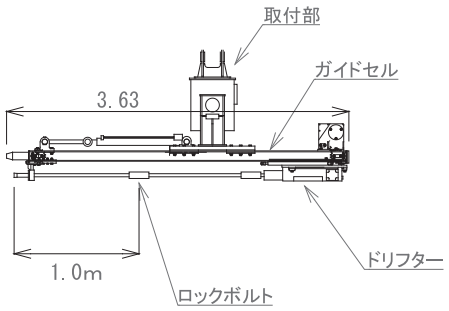


図-9　EX ドリル詳細図

員がロックボルト打設箇所に接近する必要がある．このため，4 t 軌陸ダンプトラックに仮設足場をあらかじめ組み上げ，トンネル建築限界内に収まるよう設計したうえで，軌陸バックホウと同様に踏切から載線し，作業位置まで移動させることとした．さらに，2 t 軌陸ダンプトラックを用いて，ロックボルト，モルタル，発電機，

作業用水などの資機材を運搬することとした．これら3台の機械を使用することで，いずれか1台が走行不能となった場合でも，他の2台を専用の牽引棒で連結し，牽引または推進によって載線位置まで移動させることが可能となる．また，これらの機械には，線路上での作業中にトラブルが発生した場合に備え，エンジン停止時でも動作可能な非常用装置(サブエンジン，手動油圧ポンプ等)，トロリー線との作業時離隔を確保する高さ制限装置，逸走を防止する保安ブレーキ，緊急時に即時停止可能な非常停止ボタン等の安全装置を常備している．

4. 試験施工

現在供用中のトンネル内でロックボルト穿孔状態の試験施工を実施する前に，仮設線路を用いて載線・離線状態の確認および牽引･推進状態の確認を行った．その後，模擬トンネルにおいて操作性の確認を行い，最終的に実トンネル内でのロックボルト穿孔試験を実施した．

4.1 仮設線路での機械性能の確認

宮城県大和町にあるレンタルのニッケンの試験線路を使用し，試験施工を実施した．機械性能の確認項目は以下のとおりである．

4.1.1 油圧動作の確認

ロックボルト穿孔作業は振動を伴う作業であることから，振動作業(ブレーカ等)に実績のあるコベルコ製0.25 m^3軌陸バックホウを採用した．油圧動作確認では，同機に削孔機アタッチメント(EXドリル)を装着し，空打ち運転を行い，軌陸バックホウの油圧系統に異常が発生しないことを確認した．

4.1.2 載線・離線動作の確認

削孔機アタッチメント(EXドリル)を装着した状態で，踏切における載線・離線動作の確認を行った．本試験では，作業時間の短縮を図るため，事前に削孔機を装着したまま軌陸バックホウ(0.25 m^3)の載線・離線を実施した．EXドリルの重量(77 kg/10 kW)によりブーム操作による前後バランスの確保が必要となるが，安定した状態で載線および離線が可能であることを確認した．

4.1.3 牽引・推進動作の確認

軌陸バックホウ(0.25 m^3)に走行不能などの異常が発生した場合を想定し，前後に配置した足場用2 tダンプおよび資材運搬用2 tダンプを用いて，一方から牽引し，もう一方から推進することで，トンネル内から機械を脱出させる動作の確認を行った．接続には長さ2 mの牽引棒を使用し，機械相互の接続状態および牽引状態が適切であることを確認した．



写真-1 油圧系統異常発生有無の試験状況



写真-2 載線・離線確認試験状況



写真-3 牽引・推進状態確認試験状況

写真-1に油圧系統異常発生有無の試験状況，**写真-2**に載線・離線確認試験の状況，**写真-3**に牽引・推進状態確認試験の状況を示す．

4.2 模擬トンネル内における操作性の確認

操作性の確認は，JR東日本白河研修センター内に設置された在来線模擬トンネルにおいて実施した．

本試験の目的は，ドリフター(削孔機)装着状態において，稼働範囲内の各角度(0°，20°，43°，66°)における方向合わせが可能であるかを確認することである．試験の結果，トンネル内における全周方向の打設位置に対して，

アタッチメントの方向を正確にセットできることを確認した．一方で，トンネル内において機械本体を旋回(方向転回)させることは困難であることも明らかとなった．

この結果から，施工当日は，トンネル内の施工位置まで前向きに走行して移動し，作業終了後も進行方向を変えることなく後退移動し，坑外に出た後に方向を変えるという施工条件が必要であることが確認された．

写真-4 に模擬トンネル試験の実施状況を，**図-10** にロックボルトの打設方向を示す．

4.3　実トンネル内におけるロックボルト穿孔確認

4.3.1　試験の目的および施工時間

実トンネル内におけるロックボルト穿孔確認試験の目的は，以下の 3 点である．

① JR 営業線における線路内走行の安全性の確認
②機械穿孔作業における操作性の確認
③人力施工と機械施工における施工時間の比較

試験を実施したトンネルは，JR 線のＡトンネルで実施した．試験箇所は 3 断面において，計 8 箇所で穿孔を行った．施工時間は，21：00 ～ 4：00 の 7 時間とし，2 夜にわたって穿孔試験を実施した．



写真-4　模擬トンネルの試験実施状況

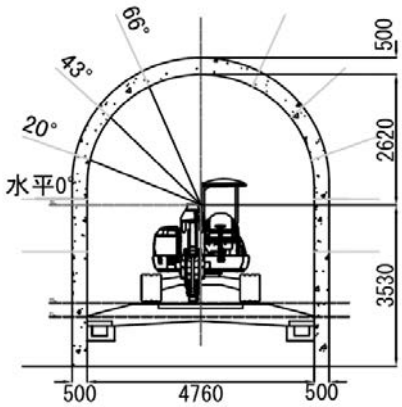


図-10　ロックボルトの打設方向

4.3.2　JR 営業線における線路内走行の安全性の確認

施工機械の載線・離線位置は，施工位置に最も近いＢ踏切とし，施工位置までは約 3.3 km の距離である．

Ｂ踏切において，足場用軌陸 4 t ダンプ(前向き)，軌陸バックホウ(前向き)，資材運搬用軌陸ダンプ(後ろ向き)の順に 3 台を順番に載線し，それぞれ単独で施工位置まで走行した．

穿孔試験終了後も，3 台それぞれが単独でＢ踏切まで戻り，載線時と逆の順番で離線し，線路外へ搬出した．この作業を通じて，走行中に鉄道施設との接触が発生しないことを確認できた．

当日の移動に要した時間は以下のとおりである．

21：00　線閉開始
21：00 ～ 21：20　Ｂ踏切にて載線(3 台)
21：30　移動開始
22：00　施工位置到着(約 3.3 km)
　　Ａトンネル内において穿孔試験の実施，
　　終了後，後片付け
03：00　現場出発
03：30　Ｂ踏切到着
03：30 ～ 03：50　Ｂ踏切にて離線(3 台)
03：55　作業完了

移動は時速 15 km/h を目途としたが，走行中に鉄道施設との離隔確認を行いながらの運行となったため，3.3 km の移動に 30 分を要し，実質の移動速度は約 6.6 km/h であった．**図-11** にＢ踏切からＡトンネルまでの経路および線路勾配図を示す．

4.3.3　実トンネル内における機械によるロックボルト穿孔条件

ロックボルト穿孔における施工時間について，人力施工と機械施工(ドリフター使用)の比較を行うため，両者の穿孔条件は同一とした．

試験では，全長 3 m のロックボルトを打設対象とし，先行する自穿孔ボルト(φ32 mm，長さ 1 m)の先端に超

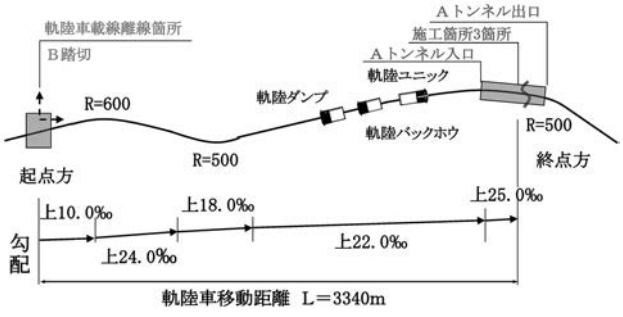


図-11　Ｂ踏切からＡトンネルまでの経路および線路勾配図

硬ビット（ϕ55 mm）を取り付け，トンネル内側の覆工コンクリート面から穿孔を開始し，覆工外面の地山まで掘削する方法とした．ロッドの延長にはカプラー2個を用いて3本を継ぎ足し，合計3 mとした（**図-12**）．

削岩機（EXドリル）による施工と人力による施工の主な違いは，穿孔とボルト挿入の工程にある．人力施工では，押し込み抵抗や方向性の維持が困難であるため，1 mずつボルトを継ぎ足しながら穿孔・挿入を行う必要がある．一方で，EXドリルは長手方向の長さが3.63 mあるため，あらかじめ1 mロックボルト2本をジョイントカプラーで接続して2 mの状態とし，これを一括で穿孔・挿入した後，残りの1 mを追加して3 mまで打設することが可能である（**図-13**）．

穿孔角度については，これまでAトンネルで実施されてきた人力施工の実績をもとに，**図-10** に示す①水平穿孔（角度0°）②上向き穿孔（角度20°）③上向き穿孔（角度43°）④上向き穿孔（角度66°）とした．

穿孔本数は，①の水平0°方向が5箇所，②～④の各上向き方向が1箇所ずつであり，合計8箇所で穿孔試験を実施した．

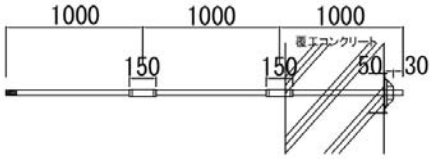


図-12　ロックボルト3m（人力による継ぎ足し）

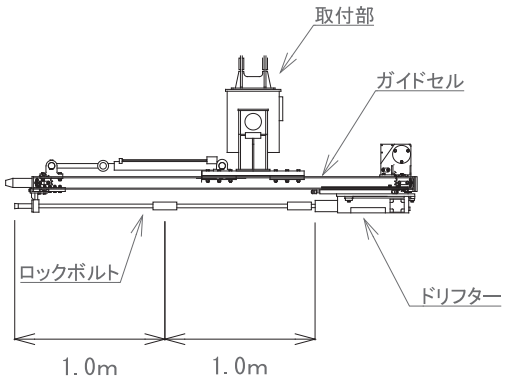


図-13　EXドリルのロックボルト装着状態

4.3.4　機械による穿孔試験結果

表-1 に，機械施工によるロックボルト穿孔試験の結果を示す．表中のNo.①～⑧は穿孔試験を実施した順番を，施工日1・2はそれぞれの試験施工日を示している．

機械施工において，0 m ～ 2 mのロックボルト穿孔および挿入に要した時間は，水平0°で6分～11分，上向き20°で10分，上向き43°で10分，上向き66°で8分であった．「継手」に示す時間は，2 mまでの穿孔・挿入完了後にスリーブカプラーを用いて3 m目のロックボルト（1 m）を継ぎ足す作業時間を示す．この作業は，押し込み完了後の2 mロックボルトの後端とドリフターとの接続を一旦外し，ドリフターをリーダー上で後退させたのち，2 mロックボルトの後端とドリフターの間に1 mロッドを挿入し，前後それぞれをスリーブで接続する工程である．2 m ～ 3 mの穿孔および挿入に要した時間は，水平0°で4分～8分，20°で12分，上向き43°で10分，上向き66°で3分であった．穿孔および押し込みにかかった総時間は11分～20分であり，ロックボルトのつなぎ込み作業が施工時間に大きく影響することが明らかとなった．特に，No.①の水平0°において，3本目の継手から穿孔開始までに60分を要した．このときの状態は，2本目のロックボルトとドリフターを接合しているジョイントカプラーが過度に緊結しており，通常使用している2本のパイプレンチによる回転操作だけでは解除が困難であった．そのため，注油や打撃などを併用して取り外す必要があり時間を要した．

ジョイントカプラーが過度に緊結した原因は，機械施工では人力施工に比べて推進力が大きく，岩の硬度が軟から硬へと変化する場合でも連続して穿孔可能であることに起因すると考えられる．また，EXドリルの先端がトンネル壁面に接し，中間部が軌陸バックホウのブームと接合している構造であるため，穿孔中の反力によってブームが上下左右に振動し，ドリルに微小な回転や揺れ

表-1　機械施工によるロックボルト穿孔試験の結果

番号	穿孔角度	施工日	0～1 m			1～2 m			0～2 m	継手	2～3 m			0～3 m	穿孔合計
			開始	終了	所要時間	開始	終了	所要時間	所要時間		開始	終了	所要時間	所要時間	
①	水平　0°	1	22:45	22:50	5分	22:55	23:00	5分	10分	60分	0:00	0:05	5分	15分	75分
②	上向 43°	1	0:45	0:50	5分	0:50	0:55	5分	10分	35分	1:30	0:40	10分	20分	55分
③	水平　0°	1	1:44	1:50	6分	1:50	1:55	5分	11分	38分	2:33	2:47	4分	15分	53分
④	上向 66 °	2	22:14	22:19	5分	22:19	22:22	3分	8分	15分	22:37	22:40	3分	11分	26分
⑤	上向 20 °	2	23:30	23:35	5分	23:35	23:40	5分	10分	14分	23:54	0:06	12分	22分	36分
⑥	水平　0°	2	1:35	1:40	5分	1:40	1:45	5分	10分	10分	1:55	2:03	8分	18分	28分
⑦	水平　0°	2	2:13	2:17	4分	2:17	2:19	2分	6分	4分	2:23	2:28	5分	11分	15分
⑧	水平　0°	2	2:37	2:41	4分	2:41	2:44	3分	7分	11分	2:55	3:10	5分	12分	23分

が生じた結果，ロックボルトが曲がりながら挿入され，ジョイント部に過大なテンションがかかったものと推察される(**図-14**)．

この問題を解決するため，トンネル壁面または地盤を反力支持点として活用し，EX ドリルの振動を抑制する構造を導入した．具体的には，通常コンクリート型枠の保持に用いられるパイプサポートを専用治具を介して EX ドリルアタッチメントの後端に取り付け，反力装置として機能させた(**図-15**)．この対策により，ガイドセルの削孔時に発生する振動が抑制され，ドリフターの推進力が効率的にロックボルトへ伝達されるようになった．この状態で穿孔を実施した No.④，⑤，⑥，⑦，⑧では，継手に要した時間が 4 分～ 15 分，穿孔合計時間が 15 分～ 36 分となり，この 5 本で平均すると 25.6 分 / 本となった．

一方，対策前に実施した No.①，②，③の穿孔合計時間は 55 分～ 75 分であり，3 本で平均すると 61.0 分 / 本となる．合計時間の差は 61 分 − 25.6 分 ＝ 35.4 分となり，大幅な改善が確認された．

ロックボルトアタッチメント(EX ドリル)の後端にパイプサポートを取り付けた状態でトンネル断面内の旋回が可能で，1 断面内において軌陸バックホウを固定した状態で，全周方向のロックボルト穿孔が可能であることを確認した(**図-16**)．これにより，1 断面の全周穿孔を完了させたのちに，次の断面へ移動して同様に穿孔するという作業手順が，施工の効率化につながることが確認された(**図-17，18**)．

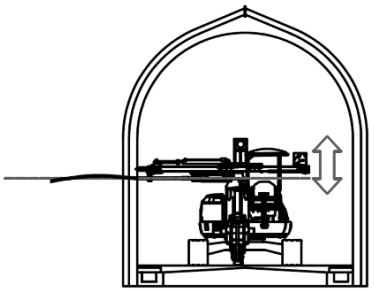


図-14　ロックボルトが曲がりながら挿入

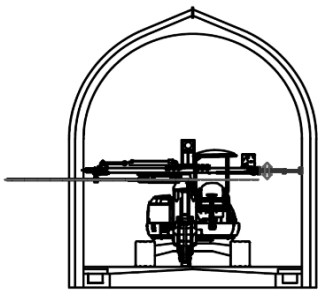


図-15　パイプサポートによる反力設備

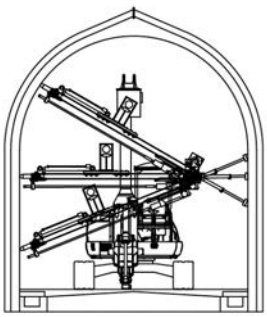


図-16　全周方向に対応可能

5. 機械施工と人力施工の比較

5.1　施工手順および施工時間の比較条件

機械施工および人力施工における穿孔時間を比較するにあたり，標準的な 1 日あたりの施工時間を 5 時間とし，作業位置までの移動時間(往復 2 時間)を差し引いた 3 時間を実施工時間とした．

ロックボルト打設作業の手順は，以下の 6 工程で構成される：①穿孔，②落下防止装置の設置，③座金の取付け，④ナットの仮締め，⑤定着材(モルタル)注入，⑥ナットの本締め．このうち①～④までは連続して実施される

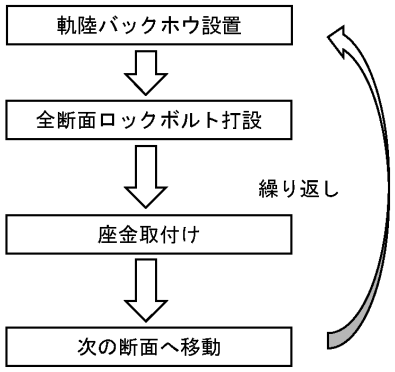


図-17　EX ドリルによるロックボルト穿孔施工サイクル

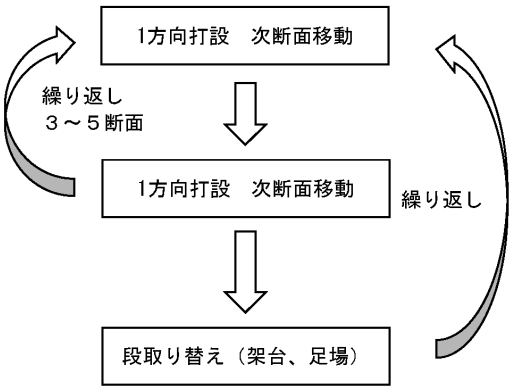


図-18　人力によるロックボルト穿孔施工サイクル

工程であり，1本あたりの打設サイクルとして取り扱う．一方，⑤および⑥については，概ね20本のロックボルト打設完了後にまとめて施工する方法が一般的であり，人力・機械を問わず共通の運用であることから，本稿における比較の対象からは除外した．

5.2 施工性の比較

人力施工では，2名の作業員が1mごとに交代で穿孔を行い，ジョイントカプラーによりロックボルトを継ぎ足しながら3mの穿孔を完了する．当社実績によれば，3mの穿孔(工程①)に約50分を要し，落下防止対策(工程②～④)には約10分を要することから，1本あたりの施工時間は合計で約60分となる．このため，1日あたりの施工可能本数は180分÷60分/本＝3本となる．また，人力施工では，穿孔箇所ごとに足場の移動や段取り替えが必要となるため，施工効率の低下を招く要因となっている．このため，通常は同一方向に対して連続して施工を行うことで，段取り替えの頻度を抑える工夫がなされている．しかしながら，全周方向への打設を完了するためには，いずれ足場の組み替えが必要となることから，工程上の負担および時間的損失の発生は不可避である．

一方，EXドリルを用いた機械施工においても，作業員数はバックホウオペレータ1名およびドリル操作・ボルト装着を担当する作業員1名の計2名であり，人力施工と同一である．機械施工における穿孔時間(工程①)は，4.3.4項の結果より平均25.6分，すなわち約26分であり，落下防止対策(工程②～④)には約10分を要する．したがって，1本あたりの施工時間は合計で約36分となる．この結果，1日あたりの施工可能本数は180分÷36分/本＝5本となる．さらに，機械施工では施工中の段取り替えが不要であり，振動・騒音による健康被害リスクが低減され，作業員の身体的負担が大幅に軽減される．

しかし，機械施工においては，軌陸バックホウは衝撃作業に強いコベルコ製でのみ実績が確認されており，EXドリルについても国内保有台数が限られている．このため，人力施工と比較して施工条件への対応の幅が限定される傾向にある．

5.3 コストの比較

施工コストは，1か月あたりの稼働日数を20日とし，各施工方法における月間施工本数と総費用から算出した1本あたりの施工単価により比較を行った．

人力施工における1か月の施工本数は，3本/日×20日＝60本となる．当社の施工実績によると，1本あたりの施工単価(材工共)は44.8万円である．

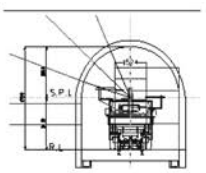
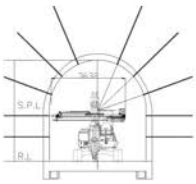
一方，機械施工における1か月の施工本数は，1日5本 ×20日＝100本となる．このときの工事費は，機械経費2,161万円，労務費840万円，材料費806万円の合計で3,807万円となる．よって，ロックボルト1本あたりの施工単価は3,808万円÷100本＝38.1万円/本となる．

以上より，1本あたりの施工単価は，人力施工が44.8万円，機械施工が38.1万円となり，機械施工の方が約15%安価である(38.1/44.8 ≒ 0.85)．

また，機械施工は人力施工に対して1.7倍の作業効率を有していることから，鉄道工事に不可欠な保安要員に係る費用の削減や，工程全体の短縮といった副次的な経済効果も期待できる．

人力施工と機械施工の比較結果を**表-2**にまとめる．

表-2 人力施工と機械施工の比較結果

	人力施工 ＜削岩機(レッグドリル)＞	機械施工 ＜軌陸バックホウ+EXドリル＞	摘要
施工図			
純穿孔時間 (1セット3m辺り)	60 分	36 分	ロックボルト1m毎の継手を含む
1日当たり穿孔本数	3 本	5 本	実施工時間3時間
施工性	穿孔足場の組み替え作業有り	穿孔足場の組み替え作業無し	
作業員への負担	大	小	
汎用性	高 ・使用機械の機種の指定なし	低 ・軌陸バックホウはコベルコ製に限る ・EXドリルの国内保有台数少	
1本当たり穿孔費用	44.8 万円	38.1 万円	

6. おわりに

在来線非電化トンネルにおけるロックボルト穿孔作業の機械化システムの開発を行った．本システムを導入するにあたり採用した基準および，成果を以下に示す．

①トンネル内で使用可能な機械寸法の決定は，JR 東日本の規定に基づく在来線非電化単線トンネルの標準断面を基準とした．

②作業中または作業現場までの移動中に機械が故障して走行不能となった場合でも，列車の安定運行に支障をきたさないよう，線路外へ迅速に機械を搬出できるシステムを構築した．

③軌陸バックホウを用いることで，従来の人力施工およびインバータチゼルによる施工時に必要であった足場の組立・解体や機械設置高さの調整といった段取り替え作業が不要となった．

④人力施工において一般的であった「多断面に対し同一方向へ順次ロックボルトを打設する工法」と比較して，足場の組み替えや煩雑な移動作業を必要とせず，施工時間の短縮と作業負担の軽減が実現できた．これにより，保安費や労務費を削減し，全体としてコスト低減が図られた．

⑤反力設備を活用することで，トンネル側面や地盤からの反力を確保でき，人力やインバータチゼルによる穿孔作業に比べて穿孔能力が向上した．

⑥軌陸バックホウを使用することで，作業の過酷性が軽減されるとともに，振動作業時間の制限も不要となり，振動障害による健康被害のリスクを大幅に低減できた．さらに，熟練作業員に依存せず施工が可能であることから，高齢化や人手不足といった課題の解消にも寄与しうる，有効な工法であることが確認された．

謝辞：本開発の実施にあたり，多大なるご協力，ご指導とご助言を賜りました JR 東日本様，寿建設㈱様，ニシオティーアンドエム㈱様，㈱レンタルのニッケン様の関係各位に深く感謝の意を表します．この場を借りて厚く御礼申し上げます．

参考文献

1）中島純也ほか：新潟県中越地震における JR 信越線鉄道トンネルの復旧工事，土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集，3-335，pp.669-670，2008.

2）土屋尚登，下垣正弘，岡村直利：新幹線鉄道トンネルの耐震対策急速施工技術の開発と実用化，建設機械化施工，Vol.66，No.5，pp.26-33，2014.

3）国土交通省：鉄道統計年報「令和 4 年度」，https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_tk2_000061.html，（参照 2025-04-10）.

4）（公財）鉄道総合技術研究所発行トンネル補修・補強マニュアル，pp Ⅱ 86，pp Ⅳ 63．平成 19 年 1 月．

5）貝吹務：鉄道に利用される軌陸機械，建設機械化施工，Vol.71，No.8，pp.73-77，2019.

（2025.5.14 受付，2025.8.6 採用決定）

Mechanization of Rock Bolt Drilling Work in Non-Electrified Conventional Railway Tunnels

Hiroki OBA[1], Yoichi SHIKODA[2], Takahito SASAKI[3], Nao IKEDA[4], Yoshinori IBUKA[5]

[1] General Manager, Civil Engineering Division, Sanken Kogyo Co., Ltd.
[2] Deputy General Manager,Civil Engineering Division, Senken Kogyo Co., Ltd.
[3] Deputy General Manager, Civil Engineering Division, Senken Kogyo Co., Ltd.
[4] Assistant Manager, Civil Engineering Division, Senken Kogyo Co., Ltd.
[5] EXecutive Officer, Civil Engineering Department, Senken Kogyo Co., Ltd.

Many local railways in Japan are located in mountainous areas, and a large number of aging tun-nels—constructed more than 50 years ago—are still in use, requiring increased efforts and costs for maintenance. In recent years, a serious shortage of skilled labor has become evident in the construction sector due to population aging, and physically demanding tasks are becoming increasingly avoided. Among such tasks, the installation of rock bolts for tunnel deformation control remains largely dependent on manual drilling, which poses significant physical burdens and risks of occupational health issues. To address these challenges, this study developed a mechanized construction method combining an EX-Drill with a rail-road hydraulic excavator, specifically designed to meet the constraints of narrow local railway tunnels. The proposed method eliminates the need for scaffolding and complicated setup changes required in conventional manual operations, thereby improving work efficiency, reducing labor intensity, and enhancing overall safety.