

ドリルジャンボの穿孔精度向上

ーガイドセル先端固定装置の開発ー

Improvement of Accuracy of Drilling by a Drill Jumbo

- Development of a Device for Fixing the Tip of a Guide Cell -

浅野 剛* 今泉和俊** 塚本耕治*

要 旨

山岳トンネルの急速施工を実現するための有力な方法として、一掘進長を標準よりも長くする長孔発破がある。長孔発破による急速施工では、「確実な芯抜き発破」と「余掘り量の低減」が重要な課題となり、それを解決するにはドリルジャンボによる穿孔精度向上がポイントとなる。

本開発では、まず一般的なドリルジャンボを用いた穿孔試験を行い、ドリルジャンボによる穿孔精度向上には穿孔時、特に穿孔初期のガイドセルの位置を固定することが重要であることを明らかにした。さらに、これを実現するための装置を考案・製作し、その装置を用いた穿孔試験により、穿孔中のガイドセルの変位が抑制されること、穿孔精度が向上することを確認した。

本報は、開発したガイドセル固定装置の概要、および穿孔試験による装置の性能評価結果について報告するものである。

キーワード：急速施工、穿孔精度向上、長孔発破、ガイドセル先端固定

1. まえがき

計画が具体化されつつある中央新幹線では、トンネル部が全延長の約 85%を占め、建設される山岳トンネルは長大トンネルとなるため、コスト低減に加え事業効果の早期発現に対して有力な方法である急速施工が求められている。このような状況を踏まえ、中央新幹線で想定される掘削断面積 100m² の山岳トンネルにおいて月進 200m を実現することを目標として、山岳トンネルの急速施工技術の開発に取り組んでいる。B~C I 級相当の硬い岩盤を山岳工法で効率的に掘削して工期短縮を図る方策の一つとして、一発破の進行長を長くする長孔発破が有望であり、本開発においても長孔発破を主要技術と位置付けている。本報は、安定した長孔発破の実現において重要となる装薬孔の穿孔精度向上のための一連の検討結果と、開発した装置の概要について報告するものである。

2. 穿孔精度向上を目的とした既往の研究

実施工において長孔発破を実現するにあたっては、「確実な芯抜き発破」と「余掘り量の低減」が重要であり、これを実現するためには、ドリルジャンボによる穿孔精度の向上がポイントとなる。

穿孔精度を向上させる方法としては、従来よりガイドセルを所定の位置に精度良く設置する方法が検討されてきた^{1)、2)}。切羽面の外周孔穿孔位置については、切羽外周の所定ライン上にレーザー光によるマーキングを行う方法が広く採用されているが、この方法では穿孔方向を明示することはできない。

ガイドセルの穿孔位置への設置に加え、ガイドセルを適正な方向に向けることを目的として、宮原らはガイドセル後端部、およびドリルジャンボに自動追尾トータルステーションのターゲットとなるプリズムを設置するとともに、ガイドセルを支持するドリルジャンボのブームの関節の動作を角度センサにより検出する方法を提案している³⁾。

現在、最新のドリルジャンボに同様のシステムが組み込まれている例が見られるが、この方法を含め、これまで検討されてきた方法は穿孔前のガイドセルの位置、姿勢に着目したものであり、穿孔時のガイドセルの動きやそれにとまらぬ穿孔方向のずれについて言及されているものは見られない。

3. 一掘進長を延伸するにあたっての課題

3.1 確実な芯抜き発破の実現

トンネル発破では、自由面が切羽のみで発破効率が悪

*技術研究所 **東日本支社土木第2部

いため、最初に自由面を増やすことを目的に行われる芯抜き発破が非常に重要となる。

芯抜き発破には、大きく分けて「アングルカット」と「平行芯抜き」の2種類がある(図-1参照)。一掘進長が地山等級C Iにおいて標準的な1.5m程度の場合には、穿孔精度が芯抜きの成否に大きな影響を及ぼしにくいアングルカットが用いられる。しかし、確実な破砕を行うためには、アングルカットでは孔尻から直角に引いたラインが切羽面と交差する必要がある⁴⁾。このため一掘進長が長くなる長孔発破では一般に平行芯抜きが用いられる。平行芯抜きでは、装薬孔を水平かつ平行に穿孔し、中央部に爆薬を装填しない空孔(バーンホール)を配置して自由面の役割を代行させるため、アングルカットに比べて穿孔精度が芯抜きの成否に及ぼす影響が大きくなる。さらに、穿孔長が長くなることで、岩盤の破砕状況に大きな影響を及ぼす孔間距離の誤差が大きくなりやすい。

発破による確実な破砕が可能となる空孔と装薬孔の間隔と装薬量の関係が、ラングフォースにより図-2のよ

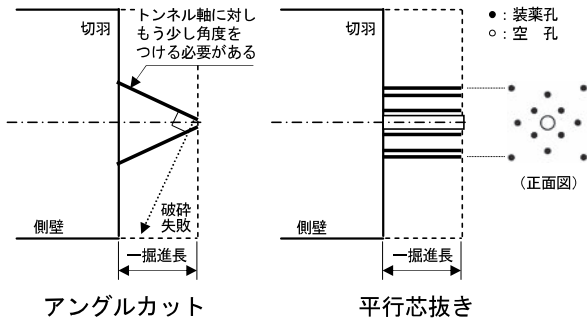


図-1 芯抜き発破パターン

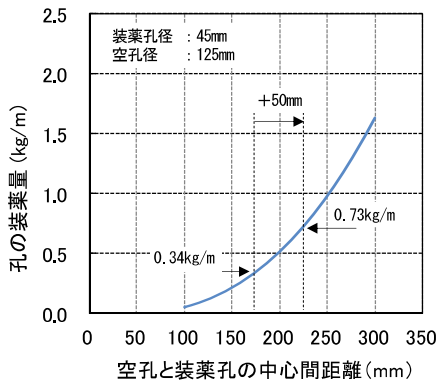


図-2 孔間隔と装薬量の関係

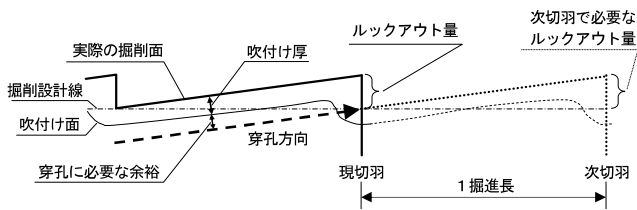


図-3 坑壁の掘削状況とルックアウト量

うに示されている⁵⁾。例えば、空孔と装薬孔の距離が所定の距離175mmより50mm広がることで必要な装薬量は2倍程度になる。実施工では安全側に薬量を割増しして設定するが、孔曲りの程度によっては破砕できない場合が生じる。逆に孔曲りにより装薬孔同士が交差するとそれ以上の進行が得られない。さらに、穿孔作業に携わる技術者に対するヒアリングでは、平行芯抜きでは孔曲りが50mm以上になると(隣接孔との間隔が設計より50mm程度広がると)所定の芯抜きが行えないケースが発生するというコメントが得られている。そのため、長孔発破の適用にあたっては、安定した芯抜き発破を実現するために穿孔精度の向上が課題となっている。

3.2 余掘り量の低減

トンネル外周の装薬孔は、基本的に切羽面において掘削設計線上に穿孔する必要がある。切羽面では、吹付けコンクリートの厚さとドリルジャンボの仕様から決まる施工余裕が必要となるため、次の切羽位置で必要となるルックアウト量を確保できる方向に外周装薬孔を穿孔する必要がある(図-3参照)。

ドリルジャンボの仕様と吹付け厚さが変わらなければ必要となるルックアウト量は一定であり、一掘進長が長くなると必要なルックアウト量を確保するための穿孔勾配はそれに対応して小さくすることが可能である。しかし、穿孔長が長くなると、孔曲りに起因する穿孔位置の誤差により、設計断面に対する掘削不足の発生が懸念される。掘削不足が生じると、ブレイカー等による掘削断面拡大のための破砕作業が必要になり、作業効率が著しく低下する。そのため、実施工ではルックアウト量を余分に確保する傾向が多く、結果的に余掘りが増大する。余掘りの増加は、吹付けコンクリート量および掘削ずりの増加につながり、コスト増だけではなく施工サイクルが長くなることから、穿孔精度の向上による余掘り量の低減は急速施工実現のための課題となっている。

4. 穿孔中のガイドセルの挙動と孔曲りの発生状況

2章で述べた状況を踏まえ、穿孔前にガイドセルを所定の位置に設置する方法は確立されていると考え、穿孔精度の一層の向上を実現するために、穿孔時のガイドセルの挙動に着目して穿孔試験を実施した。

4.1 試験サイトの状況

穿孔試験は、稼働中の碎石場(図-4参照)で実施された。地質はホルンフェルス、石灰岩、粘板岩から構成されている。地山評価を目的として実施した岩石試験結果を表-1に示す。調査ボーリング孔No.1、No.2、No.3は、各々ホルンフェルス、石灰岩、粘板岩層に削孔しており、いずれも孔長は5mである。圧縮強度はホルンフェルスが100N/mm²以上、石灰岩が50N/mm²程度、粘板岩が20~30N/mm²となっており、穿孔試験は

地山等級が C I 以上と判断できるホルンフェルスを中心に実施することにした。孔 No.1 のコアの状況を写真-1 に示す。コアは硬質で柱状ないし短柱状であり、RQD は 80~100、開口亀裂は 5m 区間に 2 本のみであったが、亀裂表面は若干風化が見られる。ボアホールカメラにより確認された亀裂の走向はボーリング孔に直交し、傾斜は 60~70° の流れ目となっており穿孔方向（ボーリング孔の方向）との交差角が比較的垂直に近く本数も少ないことから、穿孔時に孔曲りに及ぼす影響は小さいと考えられる。

4.2 穿孔試験概要

一般的なドリルジャンボにより長さ 4m 程度穿孔した場合を想定して、孔の直進性に影響を及ぼす原因を把握する。試験状況を図-5 に示す。使用したドリルジャンボは古河ロックドリルの JTH2RS-190EX (2 ブーム 2 ケージ、搭載ドリフタは HD190) であるが、穿孔長 4m を想定してフィード長 4040mm のガイドセルに変更した。ビット径およびロッドは、現場で一般に用いられることが多いφ45 のボタンビットと 32mm の六角ロッドを使用した。穿孔時のドリフタのフィード圧は、現場でのヒアリングに基づき C I 級の岩盤における最大レベルと考えられる 10~12MPa を基本とした。

計測項目を表-2 に示す。ガイドセルの姿勢についてはガイドセル前後にターゲットとなるプリズムを 2 箇所設置し、ガイドセル設置時および穿孔時に自動追尾型のトータルステーションで計測することにより把握した。

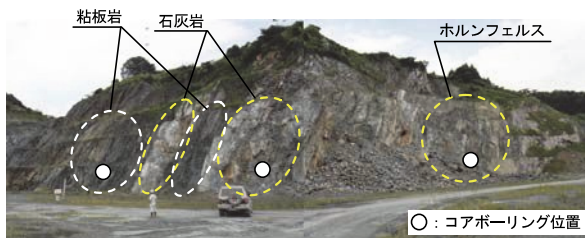


図-4 穿孔試験サイト

表-1 岩石試験結果

	No.1 (ホルンフェルス)	No.2 (石灰岩)	No.3 (粘板岩)
地山等級	CI	CI	CI~CII
密度 (g/cm ³)	2.87 ~ 2.90	2.71 ~ 2.72	2.74 ~ 2.75
一軸圧縮強度 (N/mm ²)	102 ~ 151	42.6 ~ 57.8	21.8 ~ 28.8
Vp (km/s)	6.01 ~ 6.44	5.70 ~ 6.29	5.33 ~ 5.40
開口亀裂頻度 (本/m)	0.4	1.0	0.5
開口量 (mm)	1.0~1.5	1.0~6.0	1.4~4.0



写真-1 コア写真 (No. 1)

1 台のトータルステーションにより 2 点のターゲットを交互に計測したため、各ターゲットの計測ピッチは 5 秒程度となった。孔曲りについては、鉛直角を検知する角速度センサーと水平角（磁北からの方位）を検知する磁気センサーを内蔵した機器を孔内に挿入し、孔の深さ方向に 25cm ピッチで計測した。

試験手順は以下のとおりである。

- i. ドリルジャンボのブームの角度や伸びを調節することで、ガイドセルを所定の位置に移動させる
- ii. ガイドセル下部に装備されているジャッキ（以後、ジャッキ A）を伸ばし、硬質ゴム製のフードパッドを岩盤に押し当て、ガイドセルの位置をトータルステーションで計測する（図-5 参照）
- iii. ガイドセルの位置計測を継続しながら、所定のフィード圧で穿孔を実施する
- iv. 穿孔後、孔曲りを計測する

上記手順のうち、i. ii. については通常の施工と同様の手順である。ジャッキ A の押し付け圧は 20MPa であり、この時点のフードパッドの押し付け荷重は、現地での計測によると 13kN となった。しかしながら現状のドリルジャンボは、穿孔時にこの押し付け圧を維持できる構造になっておらず、ジャッキ A に対する油圧供給バルブを閉じると、油圧は 2MPa 程度まで低下する。このため、後述のように穿孔にあたりフィード圧を作用させるとフードパッドが岩盤から離れてガイドセル先端の拘束が維持されなくなるため、穿孔方向にずれが発生することが明らかになった。

4.3 穿孔試験結果

穿孔試験における水平方向および鉛直方向の孔曲りの

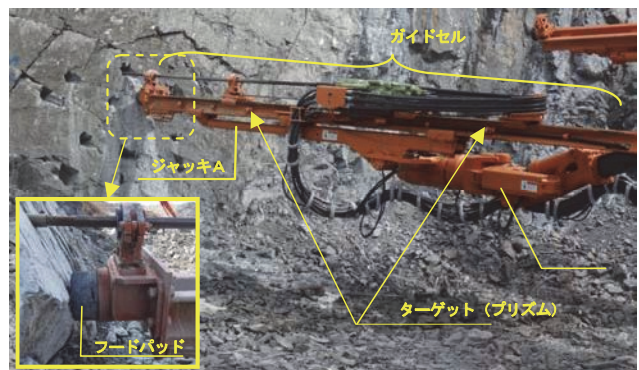


図-5 穿孔試験状況

表-2 計測内容と方法

項目	計測内容	計測方法
穿孔前のガイドセルの設置位置	・ガイドセル前後2箇所の3次元座標	・2箇所にプリズムを設置(図-5) ・自動追尾型トータルステーション
穿孔中のガイドセルの挙動	・ガイドセル前後2箇所の3次元座標	・2箇所にプリズムを設置(図-5) ・自動追尾型トータルステーション
穿孔精度	・孔曲り 孔の鉛直および水平方向の角度 (ガイドセル設置方向からのずれに換算)	・角速度および磁気センサーを装備した機器を孔に挿入 (デジタルオンライン、DOS-180)

計測結果を図-6、7に示す。穿孔開始直前（前ページ試験手順ii. 終了時）のガイドセルの向きを目標とする穿孔方向とし、孔曲りはその方向からの水平および鉛直方向のずれ量で評価した。岩盤面に向かって右側および上側へのずれ量を+とした。

図-6、7からわかるように、穿孔方向は孔の深さ方向に大きな変化は見られず、孔口付近の穿孔初期の方向が維持されていることがわかる。この結果、変位のずれ量は孔の深部に向かって直線的に増加しており、穿孔途中で孔の大きな曲りは発生していない。

写真-2は、穿孔時のガイドセル前方およびロッドの状況である。現状のドリルジャンボでは、穿孔にあたりビットを岩盤に押し付けるためフィード圧を増加させるとガイドセルが押し戻される。これにより、ガイドセル先端のフードパッドが岩盤面から離れて拘束力がなくなり、上下・左右に移動しやすくなる。穿孔初期にビットが穿孔位置に拘束された状態で、掘削する岩盤面に対するブームとガイドセルの位置関係によってガイドセルが左右あるいは上下に動くため、ロッドが曲がり、目標とする方向に対するズレが生じる。今回の試験では、ブームをドリルジャンボ本体の左側に張り出して岩盤面に直角に穿孔したことからガイドセルは左側に移動しやすい状況となっており、その結果、ロッドは右側に曲がっている。

図-8に、図-6で最も水平方向ずれ量が多いNo.1におけるガイドセル先端の水平方向および鉛直方向の挙動を示す。フィード圧を作用させることでガイドセルが押し戻されて先端の拘束がなくなり、ガイドセルが左側に移動している様子がうかがえる。一方、ブームとガイドセルの位置関係から、ガイドセルの鉛直方向の移動量は小さくなっている。その結果、図-7に示すように、鉛直方向のずれ量は水平方向よりも小さくなっている。

このような状況から、穿孔時にガイドセルの動きを抑えて所定の方向に穿孔を進めることができれば、穿孔の途中で孔曲りが発生することなく、精度良く穿孔することが可能になるものと考えられる。したがって、穿孔時にガイドセル先端を拘束することが穿孔精度向上の重要なポイントであると考えた。

5. 先端固定治具の開発

フィード圧作用時にガイドセル先端の拘束を維持できる装置を考案した。図-9に考案した先端固定治具（以後、治具）を示す。治具の主な構成要素は岩盤と接触する「ツメ」、ツメを均等に岩盤に押し付けるための球座、押し付け荷重を一定に保つための「油圧シリンダ」、球座に支持されたツメをフリーな状態で正面に向けておくための「エアシリンダ」である。

油圧シリンダの最大荷重は50kN、ストロークは75mmであり、ドリルジャンボと独立した油圧ユニットに接続することで、油圧を一定に維持できる。エアシリ

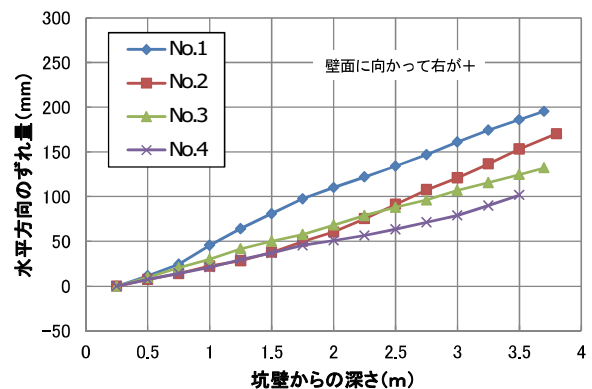


図-6 穿孔試験結果（水平方向ずれ量）

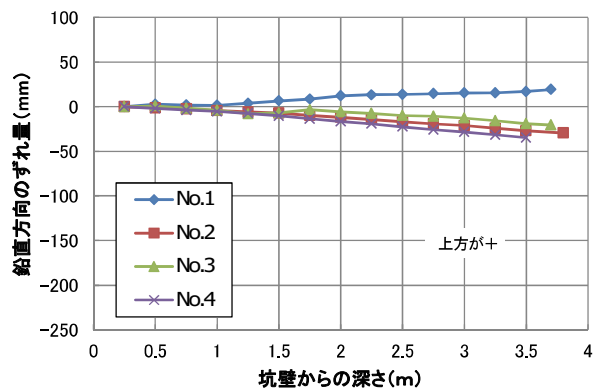


図-7 穿孔試験結果（鉛直方向ずれ量）



写真-2 穿孔時のロッドの状況

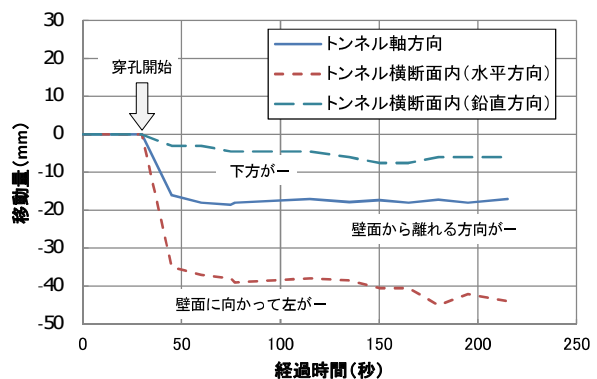


図-8 ガイドセル先端の移動量

シリンダのストロークは 50mm であり、制御圧力 1MPa のコンプレッサに接続している。制御圧力の大きさは、ツメを岩盤に押し付けるまではエアシリンダのストロークが伸びて球座が回転しないように支持し、押し付け時には球座の回転に支障が生じないレベルに設定した。

治具はフードパットを取り外すことで通常のガイドセルに設置できる構造となっており、既に現場で稼働中のドリルジャンボのガイドセルに容易に取り付けることが可能である。写真-3 に治具の設置状況を示す。

6. 先端固定治具を用いた穿孔試験結果

磯の沢地区トンネルにおいて、製作した治具を用いた穿孔試験を実施した。坑口部インバート施工中の切羽が停止している期間に、鏡吹きが施工されている切羽面を穿孔した。

試験状況を図-10 に示す。ドリルジャンボ、ビットおよびロッドは碎石場における穿孔試験（以後、一次試験）と同じものを使用し、治具は右側のガイドセルに設置した（図-10 参照）。地山等級は DIII であり、一次試験サイトよりもかなり悪い状況であったためフィード圧は 5MPa とした。計測項目は一次試験と同様であるが、ブームにもターゲットとなるプリズムを 4 箇所設置し、合計で 6 箇所の変位を自動追尾型のトータルステーションで計測してガイドセルおよびブームの挙動を把握した。孔曲りは一次試験と同じセンサーを用いて孔の深さ方向に 25cm ピッチで計測した。穿孔中のガイドセルの挙動に影響を及ぼすと考えられるブームとガイドセルの角度については、0°、30°、45° の 3 ケースとした。

試験手順は以下のとおりである。

- i. ドリルジャンボのブームの角度や伸びを調節することで、ガイドセルを所定の位置に移動させる
- ii. ガイドセル下部に装備されているジャッキAを伸ばして治具のツメを岩盤に押し当て、ジャッキ圧を 20MPa（ドリルジャンボの最大値）まで上昇させ、ガイドセルおよびブームの位置をトータルステーションで計測する
- iii. ジャッキAの油圧回路を閉じた後（この時油圧は 2MPa 程度に低下する）、治具の油圧シリンダの油圧を 20MPa まで増加させてツメを切羽に押し当て、ガイドセルおよびブームの位置をトータルステーションで計測する
- iv. ガイドセルの位置計測を継続しながら、所定のフィード圧で穿孔を実施する
- v. 穿孔後、孔曲りを計測する。

手順iii.以降、油圧シリンダに接続した油圧ユニットの圧力目標値を 20MPa に設定しておくことで、油圧シリンダの油圧を維持できる。また、穿孔時にビットを岩盤に押し付けるためにフィード圧を増加させると、ガイ

ドセルが後方に移動するケースが見られた。これに伴う油圧シリンダの圧力低下に対して、瞬時に油圧を高めてストロークを伸ばしツメの押し付け荷重を回復することで、ガイドセル先端の拘束を維持できる。

穿孔試験における水平および鉛直方向のずれ量の深さ方向の分布を図-11、12 に示す。これらは、ガイドセルが最も移動しやすい、ブームとガイドセルのなす角度が 45° の場合である。水平方向のずれ量は、一次試験では 100~200mm であったのに対し、最大で 30mm 程度であり大幅に低減されている。一方、鉛直方向のず

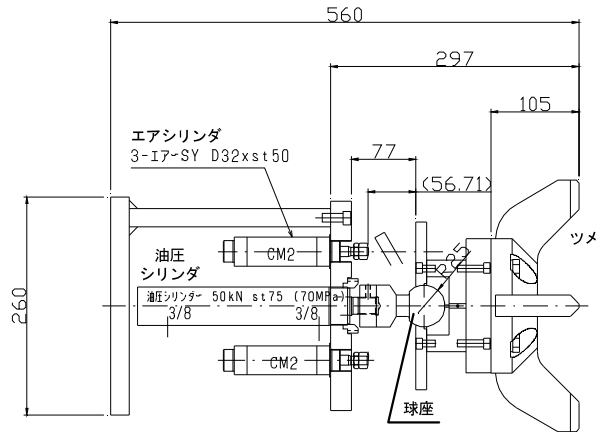


図-9 先端固定治具



写真-3 固定治具設置状況

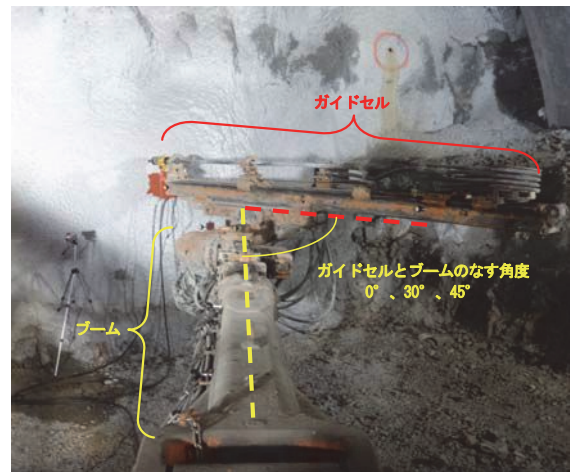


図-10 穿孔試験状況

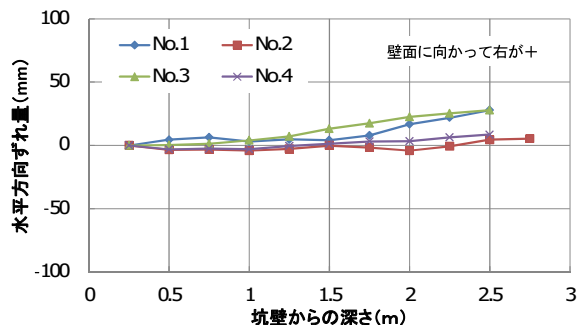


図-11 穿孔試験結果（水平方向ずれ量、角度 45°）

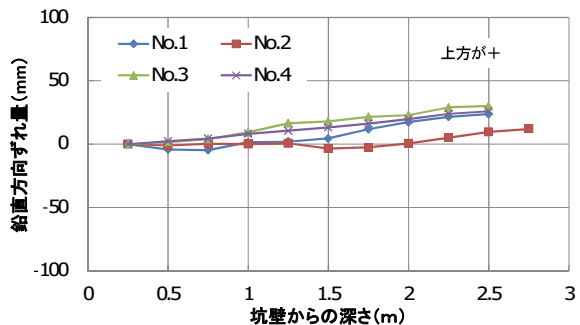


図-12 穿孔試験結果（鉛直方向ずれ量、角度 45°）

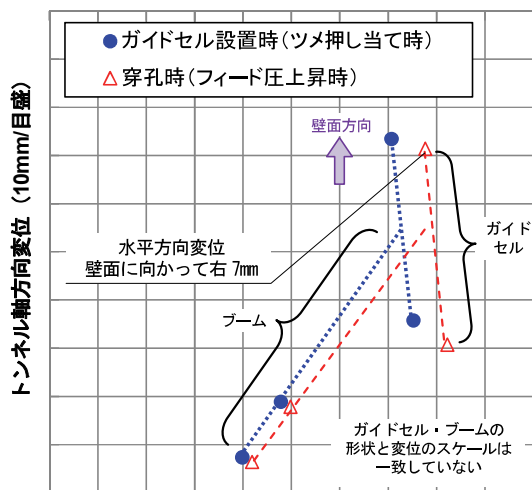


図-13 フィード圧上昇時のガイドセルの水平方向変位（平面図）

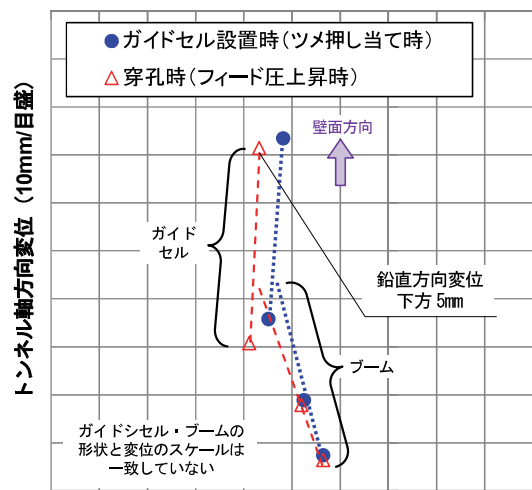


図-14 フィード圧上昇時のガイドセルの鉛直方向変位（縦断面図）

れ量は一次試験と同程度であった。

ずれ量が相対的に大きかった No.1 について、フィード圧の作用にともなうガイドセルの水平および鉛直方向の移動量を図-13、14 に示す。ガイドセル先端の水平方向移動量は 7mm 程度、鉛直方向 5mm 程度であった。水平方向については、一次試験の結果よりも大幅に小さくなっており、この結果が水平方向ずれ量の低減につながっていると考えられる。鉛直方向の移動量は一次試験でも 5mm 程度と小さかったこともあり、治具を用いた場合にも大きな違いは見られず、その結果、鉛直方向のずれ量も同程度となっている。

7. あとがき

穿孔時にガイドセル先端を拘束することが穿孔精度向上の重要なポイントであることを考慮してガイドセル先端固定装置を考案し、それを用いて穿孔試験を実施した。穿孔時のガイドセルの変位は数 mm 程度、孔曲りは 30mm 程度に抑制されており、開発した装置を用いることで、十分な穿孔精度を確保できることを確認した。

今回の開発により確実な芯抜き発破、余掘り量の低減を実現でき、B~C I 級相当の岩盤への長孔発破の適用

が可能となったと考えている。

現在、装置簡略化を図るために球座を固定するためのエアシリンダをばねに変更して、ドリルジャンボの油圧ユニットから油圧シリンダの油を供給できるように改良中である。今後は工場で穿孔性能を確認後、現場のドリルジャンボに装備して実証試験を継続する予定である。

【参考文献】

- 1) 真下 亨、板村雅弘、「全自動油圧ジャンボ」、トンネルと地下、vol.12、No.3、pp.225-229、1981.3
- 2) 原 和利、及川修二、北川 隆、「日本初の全自動コンピュータジャンボによる施工」、トンネルと地下、vol.35、No.1、pp.15-20、2004.1
- 3) 宮原宏史、坂口 武、松生隆司、小笠原光雅、河野興、中川浩二、「自動追尾トータルステーションの活用によるハイブリッド方式削孔誘導装置」、土木学会論文集 F、Vol.65、No.1、pp.32-37、2009.2
- 4) 「発破技術の現状」連載講座小委員会、「発破技術の現状(4)ー発破技術の基本(2)ー」、トンネルと地下、vol.38、No.2、pp.51-52、2007.9
- 5) 石井康夫、西田佑太、中野雅司、坂野良一、「最新発破技術」、森北出版、pp15-23、1985.8