

## 薬液穿孔水を用いたトンネル孔壁自立工法の開発 - 亀裂性地山トンネルでの現場実験 -

福與 智\* 武内 秀木\*  
徳永 豊\* 河上 清和\*\*  
後藤 克人\* 渡邊 伸弘\*

### 要 旨

孔壁自立工法は、ロックボルト孔、アンカーボルト孔、火薬装填孔等を穿孔する際に、孔壁自立が困難な亀裂性地山および未固結性地山において、穿孔ドリル先端から水溶性高分子水溶液(以下、「薬液」と記述する)と圧縮空気の混合気を霧状に噴射し、それによりくり粉を排出しながら穿孔し、孔壁の崩れを防止するものである。地質が亀裂性地山である下谷トンネル工事と境トンネル工事のロックボルト工で現場実験を300本以上行った。その結果、水穿孔では孔壁自立率が10~20%であったのに対し、薬液穿孔では全体の約80%の孔で孔壁が自立した。また、穿孔時間とロッド引抜き時間を合わせた施工時間は、通常のトラブルのない場合の水穿孔と比べて60~100%程度であり、通常の穿孔時間と変わらないことが確認できた。また、孔壁に残留した薬液は、ロックボルト定着力に影響を及ぼさないことも確認できた。

### 1. はじめに

NATMにとってロックボルトは、地山の強度劣化を防止し、トンネル周辺地山が本来有している耐荷能力を発揮させる重要な支保部材であり、ほとんど全てのトンネルで施工されている。また、今後はトンネルの大断面化や、不良地山でのトンネル施工の増加に伴い、長尺ロックボルトやケーブルボルトの施工量が増加することが考えられる。

図-1は、地山条件とロックボルト施工時間の関係を模式的に示したものである。ロックボルト穿孔時に孔壁が自立する場合は、施工上何も問題はない。一方、孔壁が荒れたり、自立しない場合は、本図に示すように自穿孔ボルトを施工するのが一般的であった。しかし、自穿孔ボルトは工事費が通常のロックボルトの2倍程度と高いため、工事費縮減の気運が高まる現在、採用されることが少なくなっている。従来のロックボルト穿孔方法は、大量の穿孔水をビットから噴射して、その水流でくり粉を排出する水穿孔であった。この方法は、孔先端に大量の穿孔水が噴射されるために次のような問題があった。

トンネル地山周辺が大量の穿孔水で緩む。

亀裂性地山では穿孔水が亀裂に浸透するため孔内に小石が落下し、ロックボルトの施工時間が長くなる。

軟岩地山や未固結性地山では孔径が拡大し、材料の喰い込みが生じる。

また、水を全く使用せず圧縮空気だけを使用してくり粉を排出する穿孔方法があるが、これは粉塵の発生が著しく作業環境を悪化させるため好ましくない。一方、気泡を穿孔水の代わりに用いる工法が開発され現場で適

用されている<sup>1)</sup>。しかし、この工法は、排出された気泡が消えにくく、作業場所に残留するなど問題がある。



写真-1 ロックボルト施工状況

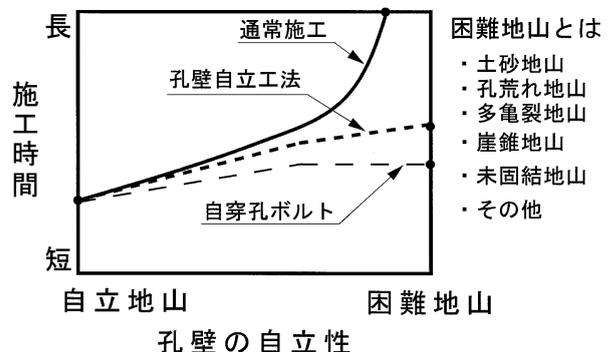


図-1 各種工法の適用範囲

\* 技術研究所 \*\* 名古屋支店

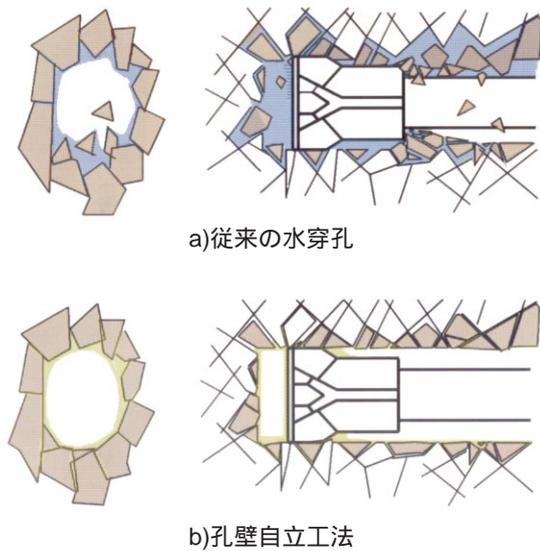


図 - 2 孔壁自立工法の模式図

このような問題を解決するために、水穿孔に代えて薬液を使用して穿孔する「孔壁自立工法」を考案、開発した。図 - 2 は、従来の水穿孔と孔壁自立工法の模式図である。

本報は、孔壁自立工法の概要、現場実験結果に関して述べたものである。

2. 孔壁自立工法の概要

2.1 孔壁自立工法の特徴

孔壁自立工法は、ロックボルト孔等の穿孔に用いられ、次のような特徴を有している。

本工法では、地山を穿孔して発生したくり粉を大量の穿孔水ではなく、粘性のある薬液と圧縮空気の混合気で排出する。

穿孔水量は、従来の水穿孔の約 1/8 に少なくできるため、穿孔水による地山の緩みや孔径の拡大が少なくなる。

薬液が粘性を有するため、地山亀裂部に浸入することがほとんどなく、小石等の洗い出しがなくなる。

薬液とくり粉の混合物が接着剤のような役割を果たし、小石等が孔内に落下するのを防ぐ。

2.2 使用資機材

2.2.1 薬液

薬液の特徴を以下に示す。

写真 - 2 に示す粉末状の薬剤を現場で水と混ぜて所定の濃度に調節し、使用する。

本薬剤は食品添加物の一種で人体や自然環境に対して無害であり、薬液使用量は従来の水穿孔の穿孔水量と比べると少ない。

100 mPa・s 程度の粘性を有する。



写真 - 2 薬剤

2.2.2 使用機械

使用機械は、ロックボルト工等で通常施工する機械の他に、表 - 1 に示す機械を必要とする。このうち、コンプレッサ、グラウトポンプ、水槽タンクは、図 - 3、写真 - 3 のようにトラックに乗せて移動する。

表 - 1 使用機械一覧表

名称	寸法・規格
コンプレッサ	10.3kgf/cm <sup>2</sup> (1010.1kPa) 8.2m <sup>3</sup> /min
グラウトポンプ	46.0kgf/cm <sup>2</sup> (4511.1kPa) 49ℓ/min
水槽タンク	1m <sup>3</sup>
流量調節装置	

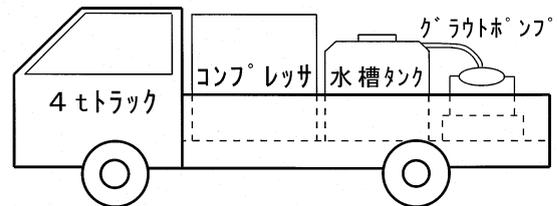


図 - 3 使用機械配置図



写真 - 3 使用機械配置図

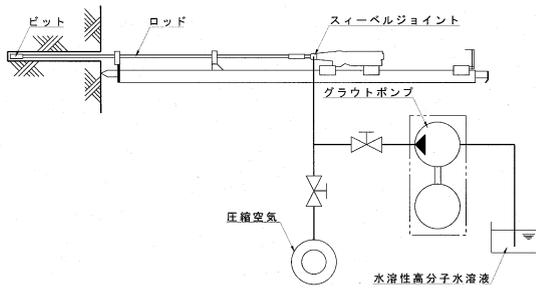


図 - 4 穿孔装置図

2.2.3 穿孔装置

図-4に穿孔装置図を示す。薬液はグラウトポンプで圧送され、流量調節装置で所定流量に調整される。一方、圧縮空気はコンプレッサから供給され、調圧弁によって所定空気圧に調節される。両者は合流後、スィーベルジョイントを経てロッド内に供給され、ロッド先端のビットより霧状に噴射される。

3. 下谷トンネルでの現場実験

3.1 実験概要

実験概要を以下に示す。

場 所：熊本県唐津郡五木村

実験 期 日：1997年8月

実験の目的： 孔壁自立効果の確認

施工性の確認

施工時間の確認

実験 項 目： 空気圧、薬液量、薬液濃度の条件を変えた実験

孔内の状況確認

ロックボルト引抜き試験

穿孔 機 械：3ブ-ム油圧削岩機 150kg級

実験は、上半ロックボルト(L=4m)で図-5に示す位置で行った。

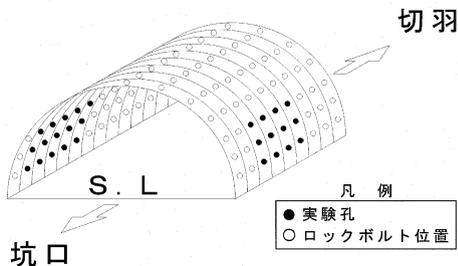


図 - 5 穿孔位置図

3.2 地山状況

下谷トンネルの掘削地山の地質は、古生代の四万十帯で粘板岩および砂岩を主体としている。実験は、坑口から70m付近で行い、その地質は風化砂岩と粘板岩の互層である。割れ目は5~10cm間隔程度に入り、割れ目の形態は層状・片状・板状である。

従来の水穿孔で施工した場合、孔内に小石が落下し、ビットが前後進できなくなる状況(ジャミング)が9割程度の高い確率で起こった。

3.3 実験ケ-ス

今回の下谷トンネルでの実験では、表-2のように空気圧、薬液量、薬液濃度を変えた8ケ-スで穿孔作業を行い、各条件で孔壁の自立性等の比較を行った。

表 - 2 実験ケ-ス

No	空気圧* kgf/cm <sup>2</sup> (kPa)	薬液量 ℓ/分	薬液濃度** %
1	13 (1275)	4.5	0.6
2	13 (1275)	3.4	0.6
3	13 (1275)	2.0	0.6
4	7 (686)	4.5	0.6
5	7 (686)	3.4	0.6
6	7 (686)	2.0	0.6
7	13 (1275)	4.5	0.8
8	13 (1275)	3.4	0.8

空気圧 7kgf/cm<sup>2</sup>(686kPa)は、通常のトンネル施工で使用するコンプレッサの空気圧  
薬液濃度は、水 1m<sup>3</sup> に対する薬剤の重量比

3.4 実験結果

(1) 孔壁の自立性(成功率)

穿孔した孔に4mの塩化ビニ-ル管(径25mm)が全て挿入できた孔を自立孔とした。実験ケ-スにより、ばらつきがあるものの、全体としては27本中18本が自立した。表-3に孔壁の自立性結果を示す。

表 - 3 孔壁の自立性結果

No	穿孔本数	自立孔数	孔内状況
1	3本	3本	穿孔形状を保持
2	3	3	崩落土砂が若干存在
3	3	2	穿孔時に粉塵発生
4	3	3	穿孔形状を完全に保持
5	3	1	崩落土砂が存在
6	3	3	穿孔時に粉塵発生
7	3	3	穿孔形状を完全に保持
8	3	0	碎石とスライムで閉塞

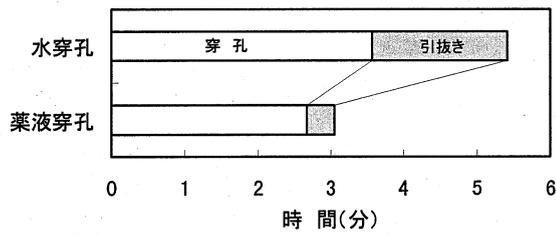


図 - 6 ロックボルト 1 本あたりの平均穿孔時間

(2) 施工時間

図 - 6 に水穿孔 (3 本) と薬液穿孔 (27 本) の穿孔に要した時間とロッド引抜きに要した時間の平均を示す。薬液穿孔は、水穿孔の平均 55% 程度で穿孔作業が完了した。とりわけ、引抜き時間は約 1/5 に短縮できた。水穿孔は全て孔壁崩壊し、薬液穿孔は 18 本孔壁自立した。

(3) ロックボルトの定着力

薬液を使用して穿孔することから、残留薬液がロックボルトの定着力に及ぼす影響について確認するために、ロックボルト引抜き試験を行った。管理基準値は、一般に施工後 3 日で 10tf の引抜き耐力が必要とされている。図 - 7 にア - チ部での試験結果を示す。引抜き荷重が 10tf までの間は、変位量が直線的に増加しているため、引抜き耐力は 10tf 以上ある。

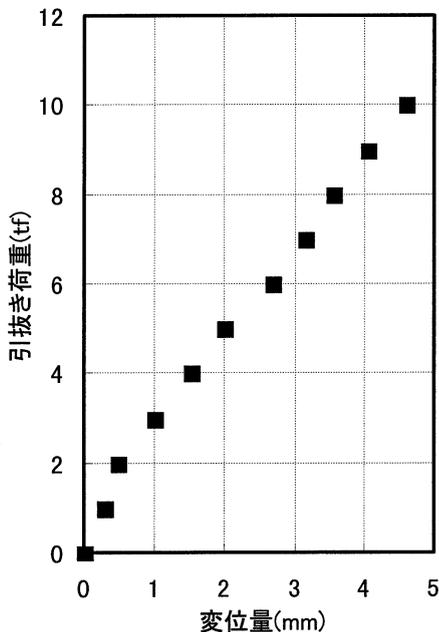
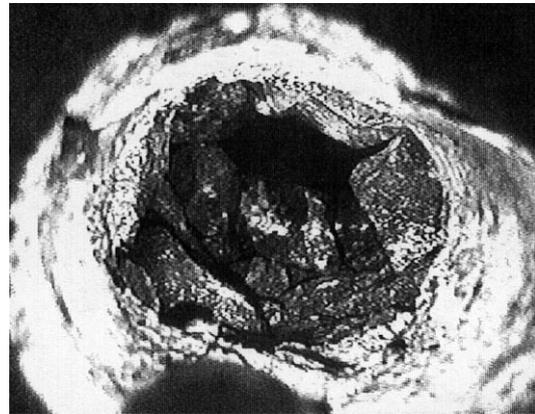


図 - 7 ロックボルト引抜き試験結果

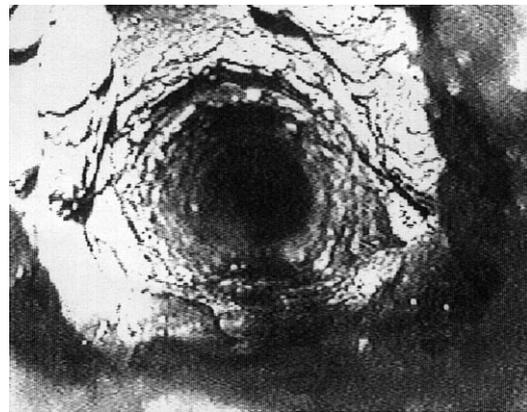
(4) 孔内の映像

写真 - 4 は、隣接孔における水穿孔と薬液穿孔の場合の孔内の映像である。水穿孔は、孔内に小石が崩落して

孔壁の自立性が低いのに対し、薬液穿孔では孔壁が自立している。



a) 従来の水穿孔



b) 孔壁自立工法 (薬液穿孔)

写真 - 4 孔内映像

4. 境トンネルでの現場実験

4.1 実験概要

実験概要を以下に示す。

場 所：富山県下新川郡朝日町

実験 期 日：1997 年 12 月 ~ 1998 年 1 月

実験の目的： 孔壁自立効果の確認

施工性の確認

施工時間の確認

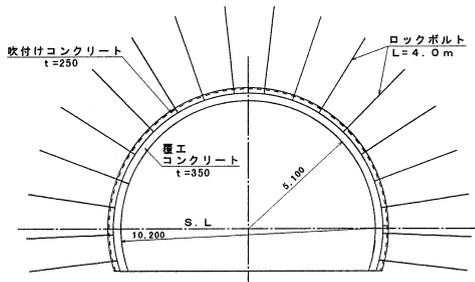
実験 項 目： 圧縮空気圧、薬液量、薬液濃度の条件を固定した実験

孔内の状況確認

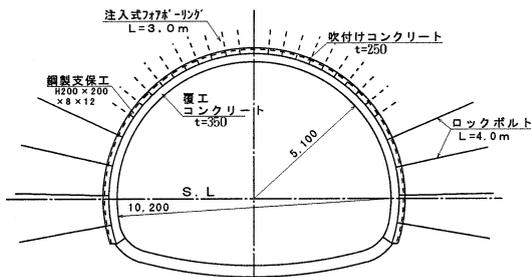
ロックボルト引抜き試験

穿孔 機 械：3 プ - ム油圧削岩機 150kg 級

実験は、通常のトンネル施工のサイクルに合わせて行った。試験打設は、図 - 8 に示す D および D a の上下半ロックボルト (L = 4 m) で行った。



a) D パターン



b) D aパターン  
図 - 8 穿孔位置図

4.2 地山状況

境トンネルで実験を行った地山の地質は、第三紀の中新世～暁新世の安山岩質角礫凝灰岩および第四紀沖積世の崖錐堆積物である。安山岩質角礫凝灰岩は、全体に風化程度は低いが、亀裂が非常に多く亀裂面には粘土が介在している。崖錐堆積物は、粘土分を多く含み転石状の岩塊および巨礫を主体に構成されている。

従来の水穿孔で施工した場合、これまでの施工実績からジャミングする確率は8割程度と考えられた。

4.3 実験ケ-ス

境トンネルの実験では、先に行った下谷トンネルの実験ケ-スのうちNo.1に該当する条件で、全てのロックボルト孔(286本)について行った。

- ・空気圧：13kgf/cm<sup>2</sup>
- ・薬液量：4.5 ㍓/分
- ・薬液濃度：1.0% (1.0%で下谷トンネルでの薬液と同粘度になるよう薬剤を改良)

4.4 実験結果

(1) 孔壁の自立性 (成功率)

本工法の全施工本数286本において、孔壁自立性確認作業ができた孔のうち、84%で孔壁の自立が確認できた。

(2) 施工時間

図-9のロックボルト1本あたりの平均穿孔時間は、水穿孔(38本)と薬液穿孔(110本)の施工時間をそれぞれの自立本数で除した値である。また、( )内の分母は打設本

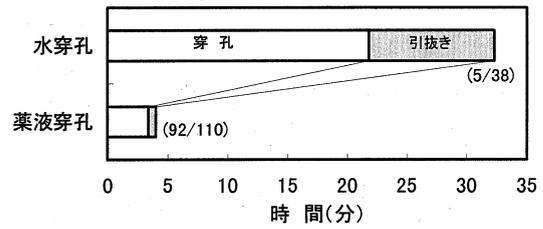


図 - 9 ロックボルト1本あたりの平均穿孔時間

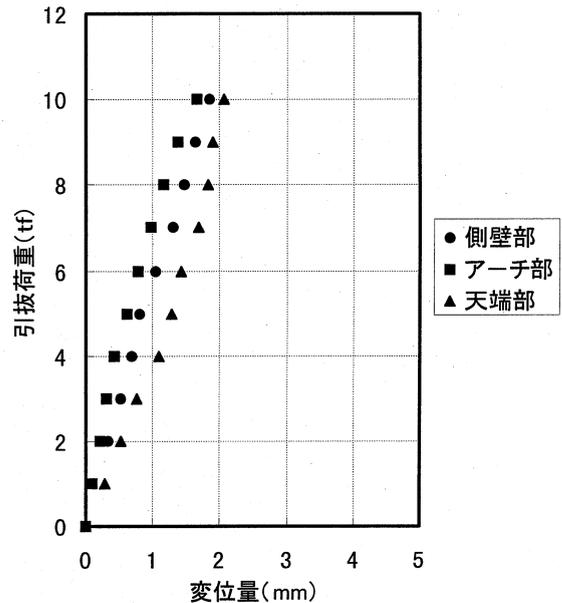


図 - 10 ロックボルト引抜き試験結果

数で、分子は自立本数を示している。これによると、施工時間は1/8程度に短縮でき、とりわけ引抜き時間が1/17に短縮できた。

(3) ロックボルトの定着力

図-10に、D パターンの同一断面で行った孔壁自立工法で打設したロックボルトの引抜き試験結果を示す。引抜き荷重が10tfまでの間は、変位量が直線的に増加しているため、引抜き耐力は10tf以上ある。

(4) 実験に従事した作業員へのヒアリング

当トンネルのトンネル特殊作業員は、前述した泡穿孔を経験している。そこで、両工法についてヒアリングした。

- ・泡穿孔は、切羽部に残った泡が消えにくく、消泡剤や水を散布しないと足元が見えないことがある。しかし、本工法ではそのようなことがない。
- ・本工法は、薬液が無害であるため安心して使用できる。
- ・本工法は、従来の穿孔方法に若干の改良を加えたシンプルで構造なので、夜勤時にトラブルが発生しても自

分達で対応ができる。

5. まとめ

(1) 孔壁の自立性(成功率)

平成10年3月31日現在、約360本の施工実績がある。そのうち、確認作業ができた孔についての孔壁の自立率は81%である。この孔壁の崩落を防止し、穿孔作業が円滑にできる機構を考察すると次の2要素がある。

- ・薬液には若干の粘性(100mPa·s)があり、かつ、少量であるので、亀裂部への浸透が少なく、地山をいためにくい。
- ・逆に、少量の亀裂部への浸透は、粘性薬液であるため接着作用を持ち合わせており、それが孔壁を崩落しにくくしている。

(2) 施工時間

地山の種類、ドリルジャンボの能力等に相違があるが、各トンネルにおいて以下の傾向がある。

- ・穿孔時間(ビットが前進するのに要する時間)は、従来の水穿孔と薬液穿孔で比較した場合、同等かまたは薬液穿孔の方が速い。
- ・引抜き時間(ビットが後進するのに要する時間)は、薬液穿孔で施工した方が従来の水穿孔での施工に比べ、1/5 ~ 1/2に短縮できる。

(3) ロックボルトの定着力

図-11に日本道路公団試験方法に記載されている荷重-変位曲線を示す<sup>2)</sup>。この図において、D点は引抜き耐力であり、通常、ロックボルト施工後3日で10tfの引抜き耐力があれば品質管理上、合格である。両トンネルのロックボルト引抜き試験結果では、10tfの荷重をかけても荷重-変位曲線が直線上であり、A点まで到達していないので、10tf以上の引抜き耐力がある。すなわち、薬液を使用して穿孔した場合でも、残留薬液がロックボルトの定着力に及ぼす影響はないものと考えられる。

6. おわりに

平成10年3月現在、3箇所のトンネル工事で合計360本余りの現場実験を行った。そのうち、孔壁の自立が確認できたのは全体の81%である。残りの19%は現時点では自穿孔ボルトを施工するか、その他、別の施工をすることを余儀なくされる状況である。また、トンネルの地山は多種多様の姿があるので、今後は本工法の適用範囲を拡大していくことを目指す。

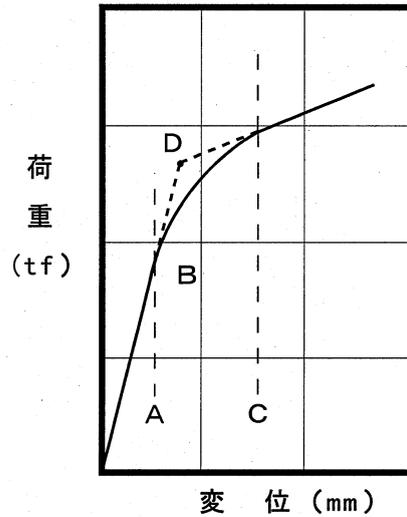


図-11 荷重-変位曲線

なお、本工法は五洋建設(株)、マツダアステック(株)および第一工業製薬(株)の共同開発によるものである。

謝辞

施工中のトンネルを実験場として提供していただいた南九州支店下谷トンネル工事事務所および北陸支店境トンネル工事事務所の方々には、多大な協力をいただきました。紙面を通じて深く感謝します。

参考文献

- 1) 飛鳥建設(株): とびしま技報(土木)No.45、pp.69~76、1994
- 2) 日本道路公団: 日本道路公団試験方法、第7編、pp.7~13、1992