

ウイングホールブラस्टィング工法の開発

Development of Wing-Hole Blasting Method

椋木 淳二*
Junji Mukugi

大原 直**
Tadashi Ohara

石井 正典***
Masanori Ishii

要 約

一般に発破工法でトンネル等を掘削する場合、破碎境界線より外側の岩盤が破碎されて、余掘りやゆるみが岩盤に発生する。

一方、破碎境界線上に位置する火薬孔について、円孔の壁面に破碎境界線に沿った一対の対向する溝を形成し、発破時の爆発力を破碎境界線上にある溝に向けて集中的に作用させることにより、良好な破碎面を得られることが理論的に証明されている。

この溝付き孔を形成する既応の方法としては、削岩機で円孔を削孔後、ウォータージェットで溝を形成する等がある。この方法だと、2つの作業工程を要するばかりでなく、溝削孔時の穴あわせが面倒であり、さらにウォータージェット使用のため作業時間が長くなる等の問題がある。

筆者らはこの問題を解決するために、1つの作業工程で溝付き孔（ウイングホール）を削孔できるビット（ウイングビット）と、ウイングの方向を任意に制御する装置（ウイングコントローラ）を製作し、このウイングホールを周辺孔に用いて発破を行うことにより余掘りを減少させ、周辺岩盤のゆるみをなくす工法（ウイングホールブラस्टィング工法；WHB工法）を開発した。

目 次

- §1. はじめに
- §2. ウイングビットおよびウイングコントローラ
- §3. 要素実験
- §4. 耐久性実験
- §5. 現場実験（布引トンネルでの実験）
- §6. おわりに

§1. はじめに

NATMにおける支保の考え方の基本は、周辺地山自体が持つ強度を最大限に利用することである。そのためには発破の際に周辺地山をできるだけ傷めない方法の採用が望ましい。このことはNATMに限らず、明り工事などで発破を利用する工法においてもいえ、余掘りの低減、周辺岩盤のゆるみ防止を図ることが重要である。このためにプレスブリッティング、ラインドリリング等のスムーズブラस्टィング工法が採用されている。

一方、破碎予定線上に位置する火薬孔の壁面に、破碎

*機材部機械課副課長
**技術研究所土木技術課副課長
***機材部機械課

予定線に沿った方向に一对の対向する溝を形成し、発破時の爆発力をその両溝に集中すれば、発破時のクラックの発生方向を制御することができ、良好な破碎面を得ることが理論的に知られている^{1),2)}。

従来は溝付き孔を削孔することが、また溝の方向を任意に制御することは技術的に難しいとされ、削孔できても2工程を要し、作業時間がかかる等の多くの問題があった。

ここに報告するウイングビットおよびウイングコントローラは、これらの問題を解決するために開発したもので、削岩機の先端に装着するだけで任意の方向に、また通常の削孔と同様に1工程で溝（ウイング）を形成することができるものである。

§ 2. ウイングビットおよびウイングコントローラ

通常、ドリフタによる削孔作業は岩盤に打撃力と回転力を加えることによって行われ、孔の仕上り形状は円形となる。

本装置は通常のロッドに、ウイングビットおよび先端ビットを装着した特殊ロッドを連結し、先端ビットには打撃力と回転力を、ウイングビットには打撃力だけを伝えるようにしたものである。Fig. 1 にウイングビット概念図を示す。

削孔作業は先端ビットで円孔が形成され、後続するウイングビットで一对のウイングが形成される。Fig. 2 に通常のビットによる削孔穴とウイングビットによる削孔穴の比較を示す。

ウイングコントローラは、ウイングを任意の方向にコントロールするための装置であり、ドリフタの先端に取付けられる。この装置はパンタグラフの構造を有し、削孔後のたびにロッドの引き抜きの動きに追随して、ウイングビットを所定の位置に円滑に収納できるようになっている (Photo 1 参照)。またこの装置は、切羽面に接触してドリフタの揺れを防止するストッパーの役目もあわせて有している。

本工法の開発により、余掘りの低減・岩盤のゆるみ防止以外に、発破振動の伝播の低減、亀裂制御による火薬量の低減、削孔数の低減による工事費の低減などの副次的効果が期待できる。

§ 3. 要素実験

3-1 基礎実験

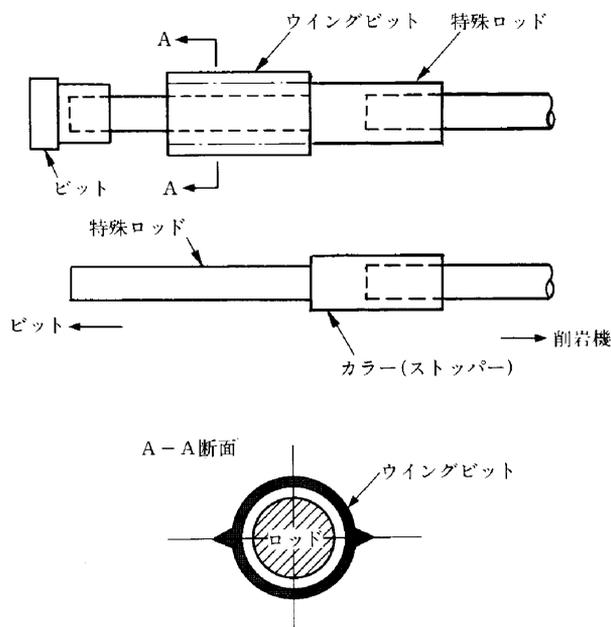


Fig.1 ウイングビット概念図

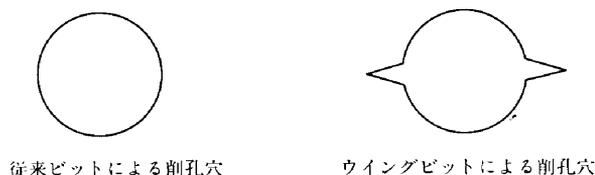


Fig.2 削孔穴の比較

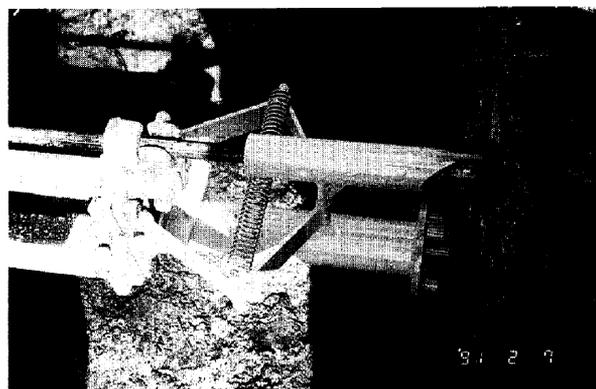


Photo 1 ウイングコントローラ

ウイングビットの開発にあたっては、トンネル工事等の通常の削孔機械にウイングビットを装着することを目的としており、先端ビットをφ42mm、ロッドをH28、R32ネジと通常の径とした。また、素材メーカーの参加が不可欠と思われ、東邦金属㈱と共同で行った。

開発の最初の課題は、1工程でウイングを持った孔が削孔可能かという基本的課題であった。すなわち、

- ① 先端ビットの後方にウイングビットを追随させ

て、くり粉の排出が可能か。

- ② ウイングビットにも回転力が伝達する可能性があり、ウイングホールが直線状に形成されず、ねじれていくのではないか。

という2点である。

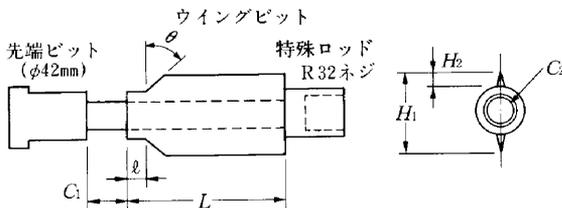
このためウイング長20cm、25cmの2種類のテストビットを製作し、平成元年8月に基礎実験を行った。

実験はクロードリルのドリフタにウイングビットを装着して花崗岩を削孔し、できたウイングホールを目視で確認した。その結果、くり粉の排出はウイングのつけ根よりスムーズに行われ、またウイングの方向もねじれ現象がないのが確認された (Photo 2 参照)。



Photo 2 ウイングビットにより削孔された孔

開発を進めていくうえで解決すべき課題は、ウイングビットおよび特殊ロッドの形状と材質の最適化であり、検討すべき各部の寸法を記号化して示すと Fig. 3 のようになる。



- ①ウイングビット：
 - ウイング長さ (L)
 - ウイング高さ (H₁, H₂)
 - チップ角度 (θ)
 - チップの逃げ (l)
- ②特殊ロッド：
 - 長さ (先端ビットとウイングビットのクリアランス：C₁)
 - 径 (ウイングビットとロッドのクリアランス：C₂)

Fig.3 ウイングビットおよび特殊ロッド形状

それぞれの観点についてテストビットを製作し、要素実験を繰り返して最適な形状、材質の確認を行った。

3-2 ウイングビットの形状

- (1) ウイングの高さ (H₁, H₂)

理論上、ウイングは最初の割れ目発達箇所として働く³⁾。したがって、ウイングは鋭くできるだけ深い方が良いことはいうまでもない。

本実験では、特殊ロッドにつけるチップのロー付面積の確保、鋭く高くした際のチップの靱性などの点から H₁=50mm (H₂=5mm)、55mm (7.5mm) の2種類のテストビットを製作し削孔テストを行った。削孔テスト、穴のでき上りぐあいの視認の結果、H₁=55mmを選択した。

- (2) ウイングの長さ (L)

前述のように、ねじれ現象を防止するためにはウイングがある程度の長さを持たなければならないが、ウイングをあまり長くすれば全体が長く重くなり、削孔時の抵抗も大きくなる欠陥が生じる。

このためどこまで短くできるかということを検討するために、テストビット長さを L=250, 200, 150, 100, 80, 60mmの順で段々短くし、それぞれのビット長で削孔テストを行った。

その結果、ウイングの直進性については80, 60mmでも何らの問題はなかったが、引き抜き時のひっかかりや亀裂・節理部での回転が生じやすいことがわかった。そこで、コントローラでウイングを把持するためにもある程度の長さが必要なため、L=100mmを採用した。

- (3) チップ角度 (θ)

チップの逃げ角 (θ) は、30°、45°、70°の3種類をテストした。70°は頂部が扁平になり接触面積が大きくなる。30°、45°については削孔速度、摩耗のぐあいなどを比較して45°を採用した。

- (4) チップの逃げ (l)

チップの逃げは0mm、5mm、20mmの3種類を比較した。逃げがない場合 (0mm) は先端ビットの後端とチップの取付部がじかに接触しチップの剥離が生じた。5mm、20mmとも問題はなかったが、全体長をできるだけ短くするため5mmを採用した。

3-3 特殊ロッドの形状

- (1) 長さ (先端ビットとウイングビットのクリアランス：C₁)

C₁が長くなれば孔尻からウイング形成部までが長くなり、ウイング効果の減少となる。したがって C₁は短い方が望ましい。

要素実験では C₁=1mm、5mmの2種類でスタートしたが、C₁が短いとドリフタの打撃時にウイングビットが前後に摺動し、先端ビットおよび特殊ロッドの端面に激しくぶつかり、Photo 3 に示すように両端面にめくれが生じた。このため C₁=100mmのテストビットを製作し、高速度ビデオを用いて空打ち～削孔中のウイングビット

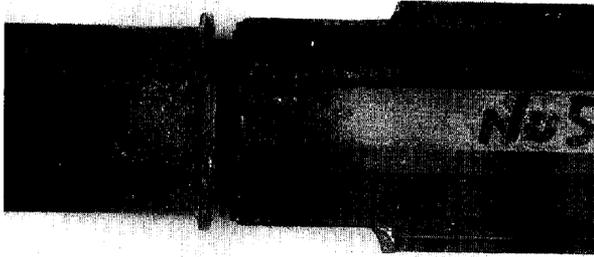


Photo 3 打撃による端面のめくれ

の挙動を観測、分析した。

その結果、空打ち状態においては、ウイングビットの摺動が激しく繰り返されるが、 C_1 が長いと端面のめくれは生じなかった。また、削孔状態ではウイングビットはほとんど特殊ロッドカラー部に密着しており、わずかに摺動しないことがわかった。

このことから、 $C_1=10\text{mm}$ 、 35mm 、 50mm のテストビットを製作し、削孔テストを行って 50mm を採用した。

(2) 径(ウイングビットとロッドのクリアランス： C_2)

C_2 は 0.5mm 、 1mm の2種類についてテストを行った。径差の少ない方が、くり粉などの異物も入りやすく摺動摩擦なども発生しづらいとため 0.5mm を採用した。

3-4 従来ビットとの削孔時間の比較

削孔能率の確認のため、従来ビットでの場合とウイングビットを装着した場合との削孔時間の比較を行った。

(1) 例-1 「布引トンネル」

岩種：花崗岩、使用機械：古河 HD75-2B、削孔長：2.0m/本、油圧式(水掘り)

	11/20	11/21	11/21
ウイングビット	6本 2分26秒/本	7本 2分12秒/本	8本 3分6秒/本
従来ビット	6本 2分30秒/本	7本 2分23秒/本	8本 2分7秒/本

(2) 例-2 「竜門ダム出張所 原石山」

岩種：花崗岩、使用機械：クローラドリル(エア式) CD-610 ドリフタ YD-135、削孔長：2.5m/本

ウイングビット	67.5本 2分46秒/本
従来ビット	15本 2分55秒/本

油圧式(水掘り)、エア式ともウイングビットを装着した場合の削孔速度は、従来ビットのみと比較してほとんど変わらない結果を得た。

§4. 耐久性実験

要素実験の結果を受け、ビットライフ確認のための耐久性実験へと移行した。

耐久性実験は竜門ダム出張所原石山で数回にわたり行った。主要データを Table 1 に示す。

Table 1 耐久性実験主要データ

場所	竜門ダム出張所 原石山
岩種・強度	花崗岩 一軸圧縮強度 1,200~1,400kgf/cm ² (117.6~137.2MPa)
実験用ビット	$L=100\text{mm}$, $H_1=55\text{mm}$, $\ell=5\text{mm}$, $D=45^\circ$, $C_1=50\text{mm}$, $C_2=0.5\text{mm}$
チップ材質	E3(RCA 硬度=88.0), E5(RCA=86.5), E6(RCA=85.5), E7(RCA=84.5), G6(RCA=87.0)
使用機械	・クローラドリル(エア) CD-610, ドリフタ YD-135 ・クローラドリル(油圧) CDH-700C

実験方法は、クローラドリルを用いて(ロッド長2.5m)、 $\ell=2\text{m}$ 前後の孔をビットが摩耗するまで削孔を続ける方法で行った。また、新たな課題点が生じるたびにビットを改良して行う形で実験を繰り返し、最終の耐久性実験へ移行させた。

実験を継続する過程で、新たに次の課題が生じた。

- ・チップの欠損
- ・ウイング後部(チップの無い部分)の著しい摩耗
- ・ロッドの摺動部摩耗
- ・ロッドの折損(CDH-700Cを使用した場合)

以下、それぞれについてポイントを述べる。

4-1 チップの欠損

ウイングビットの超硬チップの材質別に比較した耐久性実験では、チップの硬いテストビットは摩耗が少ないものの、靱性は小さくチップの欠損が生じた。

このため欠損部の状況と原因を検討した結果、材質はE6(RCA 硬度85.5)を使い、チップの形状とボリュームを改良して靱性を増やすことにした。

4-2 ウイング後部の著しい摩耗

ウイングビットの超硬チップは当初前端だけに埋込んだ。削孔長が30mを超すと、ウイング後部の摩耗が顕著となり、引き抜きの際にロッドの回転力によってローリングをおこし、ひっかかりが生じることが多くなった。

この解決策として、後端にもガイドチップを埋め込むことにより対処した(Photo 4 参照)。

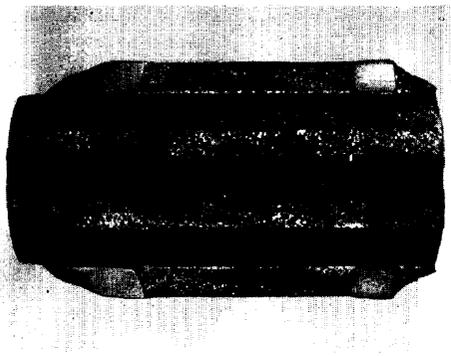


Photo 4 後端チップを埋め込んだもの

4-3 ロッドの摺動部摩耗

削孔長が増すにつれて、ウイングビットと特殊ロッドの摺動による摩耗が双方に発生した。この原因としては、くり粉がウイングビットと特殊ロッドの間に入りこむことによるものと考えられた。

このため摺動部にくり粉の侵入を防ぐとともに、クッションロッドを製作してテストを行い、ロッドの摺動部の摩耗を防止する効果を確認した。

4-4 先端ロッドの折損

耐久性実験では、エアークローラドリル CD-610(回転力10.0kgf・m (98J)) を使用していたが、途中から都合により油圧式クローラドリル CDH-700C (回転力30.0kgf・m (294J)) に変更した。ところが、テストビット4本とも削孔途中で先端ロッドネジボトム部で折損した。

折損部の精密検査の結果から、ロッドのボトム底の最薄部で疲労破壊しており、CDH-700Cの回転力が強くロッドの最薄肉部では耐えられなかったものと判断された。

将来的にトンネル掘削へ適用する場合、ドリルの回転力としては30~40kgf・m (294~392J) が必要であり、この部分の肉厚を増すしか方法が考えられなかった。このため先端ビット径をφ42mmからφ45mmに、特殊ロッド径をφ40mmからφ42mmに変更し、最薄肉部の厚みも増強した。

4-5 耐久性実験

以上の改良を経て、平成3年7月、最終の耐久性実験を行った。

実験はチップ材質 E5 (RCA 硬度86.5)、E6 (RCA 硬度85.5) の2種類のウイングビットを用い、再研磨を行わず連続して行った。

チップの欠損は、E5、E6それぞれ190.1m、370.1m

で発生した。チップの摩耗は、E5でほとんどなく、E6では研磨時期を過ぎている状態にあった。

チップの欠損面検査によれば、E5の場合靱性が劣ることから起きたものと思われる。さらに、E6については摩耗幅が過大のまま削孔を繰り返したため、削孔抵抗が大きくなり欠損を起こしたものと考えられる。なお、先端ビットは削孔長約100mで研磨を行っている。

以上のことから、E6チップを適当な時期に研磨を行えば2~3回研磨、すなわち削孔長1,000~1,500mは可能となることがわかった。

§5. 現場実験 (布引トンネルでの実験)

最終の耐久性実験に先立ち、布引トンネル出張所において現場実験を行った。主要諸元を Table 2 に示す。

Table 2 現場実験主要諸元

場 所	布引トンネル出張所 第2ポンプ室	
岩種/区分	深成岩類	布引花崗岩 岩種区分: A
断 面 積	31.125m ²	
掘 削 長	1.7m	
削 孔 長	2.0m	
削 孔 数	85孔	2.73孔/m ²
爆 薬	電気雷管 チタマイト	DS.1~10# φ30×100, 200, SB φ20×200
削孔機械	古河	HD-75, 2B

実験では、通常の削孔とウイングビットを使った削孔とを比較するため、両者の削孔パターンを同一とした。Fig. 4 に示すように、掘削断面を左右対称とし、一方の周辺孔をウイングビットにより、他方を従来ビットにより削孔した。ウイング効果を確認するため、周辺孔位置にマーキングを行い、できるだけ正確に削孔を行った。

データ取得のため左右は1~2発破で交替し、計4発破を行った。効果の確認は、断面測定器による余掘り測定と発破跡の目視により行った。

5-1 断面計測器による計測結果

断面計測器による計測結果を Table 3, Fig. 5 に示す。結果はわずかながらウイングビットの方が良好であった。

5-2 目視による確認

目視による確認の結果、次のことがわかった。

- ・ウイングビットを使用した削孔は、従来ビットに比べて削孔速度、くり粉の排出とも問題はない。

Table 3 断面測定結果

区 分	11月20日		11月21日		11月21日		11月22日	
	W/B側	従来B側	W/B側	従来B側	W/B側	従来B側	W/B側	従来B側
余掘り (m ²)	1.28	2.13	0.07	1.44	1.56	2.14	0.85	0.30
当り (m ²)	-	-	0.84	0.03	-	-	0.11	0.21

※ W/B: ウイングビット, 従来B: 従来ビット

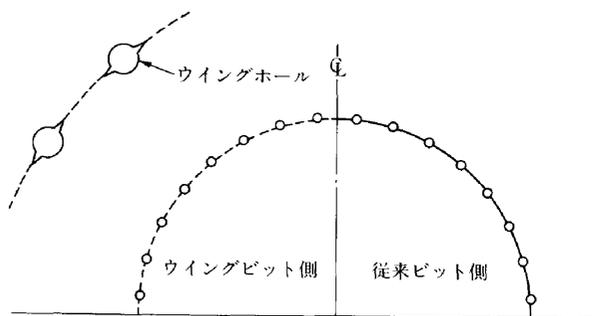


Fig.4 現場実験削孔パターン

・孔間の壁面はウイングビットの方が平滑である。

以上のように、実験のトンネルにおける実験では、ウイングビットの効果について定量的なデータとして確認できなかったが、破碎面の目視による確認では十分その効果が定量的に実証できたといえる。

今後、トンネル等の現場で実証実験を積み重ねウイングビットの効果が及ぼす余り掘量、削孔数、火薬量の低減化等について、本格的に定量的把握を行う予定である。

§ 6. おわりに

ウイングビットの開発は平成元年に着手して以来、延べ10数回の削孔実験を繰り返してきたが、ようやく現場での使用に耐え得る形状になってきた (Photo 5 参照)。今後は現場での実証実験を積み重ね、余掘り量や火薬量の把握等を含めた効果の確認とともに、ビットやコンローラの改良を進めていくつもりである。

本技術は周辺に影響を及ぼさないための亀裂制御発破技術であり、山岳トンネルばかりでなく、コンクリート構造物の破壊や採石などに適用可能である。また本技術は単独で使用するとどまらず、静的破碎剤、形状記憶合金との組合せなど、他方面への展開も可能と思われる。

おわりにあたり東邦金属株、竜門ダム出張所の皆様ほか多くの関係者の暖かい励まし、ご厚意に深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) Langefors, U. and Kihrstrom, B.: The Modern Technique of Rock Blasting, John Wiley and Sons, p.301, 1979.
- 2) 中川浩二, 西田佑, 小野勇司, 川上純: 孔壁に設けられた切り欠きによる爆破クラックの制御とそのSB効果, 土木学会論文集, 第373号, pp.131-138, 1986. 9.
- 3) P.E. SPERRY, W.L. FORNEY, D.E. THOMPSON, A. F. MCKOWN: Controlled Blasting Experiments at Porter Square pilot tunnel, RETC-1979 PROCEEDINGS.

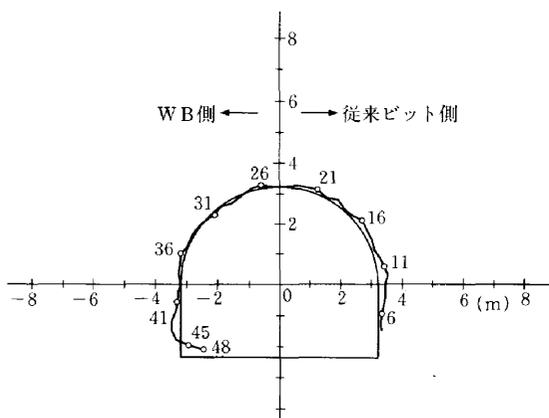


Fig.5 断面形状計測例

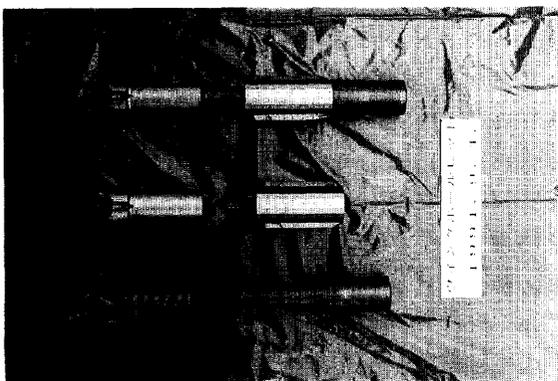


Photo 5 ウイングビット

- ・削孔方向の破断跡がウイングビットは直線的であり、従来ビットでは波状となっている。
- ・ウイングビットの方がノミ跡が顕著に残っている。
- ・ウイングビットの方が孔尻まで発破がおきている。