トンネル外周装薬孔のノッチを利用した 余掘り低減発破工法

塚本 耕治1*・浜田 元1・浅野 剛1・福田 大祐2

1株式会社奥村組 技術研究所 (〒300-2612 茨城県つくば市大砂387)

²北海道大学大学院 工学研究院環境循環システム部門(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目) *E-mail: koji.tsukamoto@okumuragumi.jp

長距離・大断面の山岳トンネル工事において、コスト低減、事業効果の早期発現といった観点から急速 施工のニーズが高まっている.山岳トンネルの急速施工を実現するには、余掘りの低減や地山の安定性確 保などを図り、効率的な掘削を行うことが重要である.本研究では、効率的な発破を実現するため、トン ネル外周装薬孔にノッチ(切欠き)を形成して発破する方法に着目し、発破時の亀裂進展評価が可能な破 壊プロセス法を用いた数値解析、ノッチの効果を検証するための現場実験を実施した.その結果、本発破 方法に余掘り低減効果があることを確認した.

Key Words : mountain tunnels, controlled blasting, notch, waterjet

1. まえがき

山岳トンネル工事において,発破掘削方式による主な 作業は,穿孔・装薬・発破,坑外へのずり運搬,支保工 の設置などであり,各作業を同時並行で行うことが難し い.そのため,山岳トンネルの急速施工を実現するには, 各々の作業を高速化するとともに,作業のロスを最小化 し,作業効率を向上することにより,作業時間を短縮す る必要がある.

発破掘削においては、余掘り(計画断面より大きく掘 削される部分)が大きくなると、坑外に搬出するずり量 の増加に加え、吹付けコンクリートや覆エコンクリート の量が増えてコスト増になるとともに、工程の遅れを生 じることになる.発破時の余掘りを低減する有力な方法 には、コンピュータジャンボを用いた装薬孔の穿孔精度 の向上、芯抜き部や最外周孔の孔数や間隔を考慮した発 破パターンの採用や高精度の電子雷管を用いた爆砕方法 の工夫などが挙げられる.ここでは、余掘り低減の有力 な方法の一つとして、発破時の亀裂進展方向を制御する 方法に着目し、トンネル外周装薬孔にノッチを形成して 発破する効率的な発破工法の開発に取り組んだ.本報で は、発破による亀裂進展の制御に必要なノッチ深さを把 握するための数値解析、発破掘削による現場実験を行い、 ノッチによる余掘り低減効果を確認したので報告する.

2. トンネル外周装薬孔にノッチを形成する技術

トンネル周辺の地山をできるだけ緩めず,さらに余掘 りを低減する発破の方法として、プレスプリッティング やスムースブラスティングなどの制御発破がある.この 制御発破の中で装薬孔の孔壁にノッチを設け、発破の爆 破力をノッチに集中させることでノッチ方向に亀裂を進 展させ、亀裂の方向を制御する手法がある^り.

装薬孔内にノッチを形成する方法には、ウォータージ ェット(以下,WJ)を用いる方法、通常のロッドにウ イングビットと先端ビットを装着した特殊ロッドを連結 する方法³などがある.このうち、WJを用いた方法では、 装薬孔内で超高圧水を噴射して孔内表面の岩石を切削す ることにより、ノッチを形成する.

トンネル外周装薬孔にWJでノッチを形成する方法は, 以下の手順で行う.

- i.穿孔した装薬孔内に図-1のようにノズル、ノズル ヘッド、ランス(超高圧水をノズルヘッドに流 通させる管)から構成されるWJノズルツールを 挿入
- ii. WJノズルの姿勢をノッチ形成方向にあわせてセット
- 超高圧水を噴射しながらWJノズルを一定速度で
 引き出し、装薬孔の孔壁の2か所に連続的してノッチを形成



図-1 ノッチの形成方法



3. 発破による亀裂進展の数値解析

(1) 数値解析の概要

亀裂進展の方向制御に必要なノッチ深さを事前に把握 することを目的として、発破による亀裂進展の数値解析 を行った.解析には、発破時の亀裂進展の評価が可能な 動的破壊プロセス解析法(Dynamic Fracturing Process Analysis,以下DFPA)³を用いた.このDFPAは、破壊力 学および有限要素法(FEM)に基づいた2次元動粘弾性 の解析法であり、岩石内の強度不均一性を考慮した亀裂 の生成・進展・連結などの解析に適用できる.

解析モデルの模式図を図-2 に示す. 孔径 45mm の装 薬孔 3 孔を孔間距離 800mm,最小抵抗線 700mm となる ように解析モデル内に設けた.また,解析モデルの下側 境界に自由境界条件,それ以外の左右および上側境界に は反射波が生じない連続境界条件を与えた.ノッチを形 成した装薬孔近傍の要素分割例を図-3 に示す.図のよ うに,装薬孔の 2 か所に深さ 10mmのノッチが形成され るように要素分割を行った.

解析ケースは,表-1 に示す 5 ケースとした. 孔あた りの装薬量が通常発破より少ない状態を想定したデカッ プリング係数 (De:装薬孔の直径/爆薬の直径)が 1.73 で従来の装薬孔のみの場合を Casel,各装薬孔に深さ 10mmのノッチ形成した場合を Case2,および深さ 20mm のノッチ形成した場合を Case3 とした. さらに, Casel と Case2 に対して孔あたりの装薬量を増やし,通常発破



図-3 ノッチ深さ10mmの要素分割例

表-1 解析ケース

解析 ケース	デカップリング 係数(De)*	ノッチ の有無	ノッチの深さ (mm)
Case1	1.73	無	-
Case2	1.73	有	10
Case3	1.73	有	20
Case4	1.50	無	_
Case5	1.50	有	10

*De=1.73:爆薬径 \$\phi 26\$ 0 場合、De=1.50:爆薬径 \$\phi 30\$ 0 場合

 衣⁻∠ 解析对象0_	諸物性胆
P波速度(V _P)	6,000 m/s
S波速度(V _S)	3,464 m/s
密度(ρ)	$2,700 \text{ kg/m}^3$
ヤング 率(E)	80 GPa
ポアソン比(<i>u</i>)	0.25
Q値(Q)	10
平均圧縮強度 (S_{c})	250 MPa
平均引張強度 (S_t)	18 MPa
破壊エネルギー(G _f)	300 Pa•m
均一性係数(<i>m</i>) [*]	5
内部摩擦角(Φ)	60°
	and the state of t

表-2 解析対象の諸物性値

*岩盤内の強度不均一性を表現するための係数

で使用する装薬量を想定し、デカップリング係数が 1.50 の場合 ⁴を Case4 と Case5 とした.

解析対象の岩盤の諸物性値は表-2 に示すとおりで, 等方性の潜在亀裂がない岩盤を想定した.また,解析対 象時間を 3ms (3,000μs) とし,計算時間増分を 0.1μs (10⁷秒),計算ステップ数を 30,000 回とした.

装薬孔内の孔壁に作用させる発破の圧力には、装薬孔 の体積変化やデカップリングによる圧力変化を考慮でき る JWL 状態方程式を用いた⁹. 起爆条件は、装薬孔の一 つが起爆により亀裂が進展し終息するまでにかかる時間 に比べて DS 雷管の起爆時間差の方が大きいことから各 装薬孔の起爆を段発発破として扱い、雷管の起爆時間差 を lms に想定した⁹. 具体的には、装薬孔 1 を時刻 0ms に起爆してから lms 後の時刻 lms に装薬孔 2 を起爆、さ らに 1ms 後の時刻 2ms に装薬孔 3 を起爆した.

解析結果については、最外周孔の発破により孔壁周辺 に生じる亀裂の位置で、当たり(計画断面より内空側に 残留する部分)と余掘りになることから掘削計画線から 連結した亀裂までの鉛直距離の最大値でノッチの効果を 評価した.

(2) 解析結果

ノッチがない装薬孔でデカップリング係数が 1.73 で ある Casel の結果を図-4 に示す.図は、時間の経過に伴 う最大主応力分布と亀裂進展の状況を示し、寒色系が圧 縮応力、暖色系が引張応力を表している.装薬孔1の発 破から 90µs 後では、最大主応力のうち圧縮応力波が先 行して放射状に伝播し、続いて引張応力波が伝播する. この円周方向の引張応力波により亀裂が装薬孔から放射 状に進展する.引張応力は亀裂先端部および装薬孔周辺 で大きいことが分かる.450µs 後では、圧縮応力波が装薬 孔2付近まで伝播するが、新たな亀裂の進展は見られな い.3,000µs後では、装薬孔2および装薬孔3の発破が終 了するが、装薬孔間で亀裂が連結に至っていない.なお、 DFPA では、形成巨視亀裂中への爆発生成ガス流入を考 慮していないため、解析から得られる巨視亀裂長につい ては過小評価されることに注意が必要である. 装薬孔に深さ 10mm のノッチを形成した Case2 の結果 を図-5 に示す. 90µs 後では、引張応力波の伝播に伴い、 新たな亀裂のうちノッチの方向の亀裂がより長く進展す る傾向が見られる. 450µs 後には、ノッチ先端からの亀 裂が進展し、装薬孔 2 付近まで到達する. 発破後 (3,000µs 経過後)には、装薬孔間の亀裂が連結してい る. なお、掘削計画線から連結した亀裂までの鉛直距離 の最大値は 70mm で、当たりが残る結果になった. 装薬 孔に深さ 20mm のノッチを形成した Case3 の結果を図-6 に示す. 掘削計画線から連結した亀裂までの鉛直距離の 最大値は 40mm で、当たりが残る結果になった. ノッチ 深さが 10mm の場合と同様にノッチの方向に亀裂が進展 し、ノッチが長くなるほど、当たりや余掘りの低減が期 待できる.

ノッチがない通常の装薬孔でデカップリング係数 1.50 である Case4 の結果を図-7 に示す. 図-4 のデカップリ ング係数 1.73 に比べて亀裂が進展し,装薬孔間の亀裂 が連結するが,当たりが 245mm と大きい. 同様に,ノ ッチ深さが 10mm でデカップリング係数 1.50 である Case5 の結果を図-8 に示す. 爆薬量が大きすぎると,起 爆初期の段階で装薬孔周辺に比較的大きな亀裂が生じ, この一部の亀裂がノッチからの亀裂よりも進展する傾向



- 89 -



図-6 Case3 ノッチ深さ 20mm の 亀裂進展状況 (De=1.73)



図-7 Case4 ノッチなしの亀裂進展状況 (De=1.50)



図-8 Case5 ノッチ深さ 10mm の 亀裂進展状況 (De=1.50)

が見られた.そのため、ノッチ方向に亀裂が進展する傾向が見られず、230mmの余掘りが生じた.

以上の結果から、ノッチ深さが 10mm 以上であれば、 通常発破の場合より少ない装薬量でもノッチの亀裂進展 の方向制御の効果が現われ、当たりや余掘りの低減を期 待できる.一方、ノッチが存在しても必要以上の爆薬量 で発破を行う場合には、通常発破と同程度の当たりや余 掘りが生じ、ノッチによる亀裂進展の方向制御が期待で きない可能性があることが分かった.

4. 現場実験

(1) 現場実験の概要

現場実験は、一般国道 340 号(仮称) 押角トンネル築 造工事のうち、終点側から掘進するトンネルの切羽で実 施した.同工事では既設トンネルを拡幅し2車線の道路 トンネルを新設する.実験区間の地山は中生代ジュラ 紀・高屋敷層の頁岩で構成されており、支保パターンは CII、一掘進長は1.2m であった.切羽観察の結果から、 地山性状は、実験区間において概ね同一と判断した.ま た、切羽の岩片試料を用いたポイントロード試験の結果

表-3 ノズル移動速度の確認実験結果

実験 No.	WJ ノズルの 移動速度 (mm/min)	ノッチ深さ の平均値 (mm)	備考
1-1	500	12	 ・ポンプの設定圧力:240MPa
1)-2	1,000	8	・ノズル: Ø0.66mm×2穴 (流量:2穴あたり19.80/min)
1)-3	1,500	5	・孔径 <i>ϕ</i> 45mm, 孔長1,500mm



写真-3 ノッチ深さの確認(移動速度 500mm/min)

から, 換算一軸圧縮強度は100~200N/mm²であった.

現場実験は、①ノッチ形成深さの確認実験、②トンネ ル外周装薬孔にノッチを形成して発破する実験の順に行 った.①の実験は、目標深さ10mm以上のノッチを形成 するのに必要な WJノズルの移動速度を求めるために行 い、②の実験は、余掘り低減に対するノッチの効果を検 証するために実施した.なお、実験では、地山性状の違 いが発破掘削の結果に及ぼす影響を極力避けるため、同 一の切羽を左右に分けて、ノッチの有無や孔あたり装薬 量の条件を変えた.

①,②の実験を行うにあたり、以下の事項を同一条件 として設定した.

- i. 散水車に貯めた水道水をWJに使用
- ii. 超高圧水ポンプは最高圧力240MPa,最大吐出水 量35ℓ/minを使用し、ポンプの吐出圧力は240MPa に設定
- iii. φ0.66mm×2穴のWJノズルを使用(超高圧水ポン プの吐出圧力が240MPaの場合,吐出水量は2穴あ たり19.8ℓ/min)

(2) ノッチ形成深さの確認実験

a)実験方法

切羽に装薬孔とは別に穿孔した φ45mm×長さ 1.5m の 孔を用い, WJ ノズルの移動速度を変えてノッチを形成 した. その後, φ45mm 孔をφ150mm で長さ 30cm ごと のオーバーコアリングによりコアを回収し, 孔内の画像 (写真-3) と回収したコアからノッチの形成深さを確認

した.

b)実験結果

ノッチ形成深さの確認結果を表-3 に示す. ノッチ形 成深さの確認結果から, WJ ノズルの移動速度が最も遅 い実験 No.①-1 におけるノッチ形成深さの平均値は, 12mm であった. 一方, WJ ノズルの移動速度が速い実 験 No.①-2 では 8mm, 実験 No.①-3 では 5mm であり, 深 さ 10mm 以上のノッチを形成できなかった.

上記の結果から,目標深さ10mm以上のノッチを確実 に形成するWJノズルの移動速度として,500mm/minの 条件が適切と判断し,後述の実験条件として定めた.な お,深さ1,000mmの装薬孔1本あたりのノッチ形成には, 移動時間を含めて5min程度の時間を要した.

(3) 外周装薬孔にノッチを形成し発破する実験

a)実験方法

実験は、トンネル外周装薬孔の穿孔、同孔内での WJ によるノッチ形成、装薬、発破、3D レーザスキャナ (Basis 社製の Suphaser 25HSX、測距精度:±1.0mm) に よる掘削断面の測定の順で行った。

掘削発破の実験ケースの一覧を表-4 に,実験の発破 パターンを図-9 に示す.切羽左側はノッチを形成して 発破する方法(以下,ノッチ付き発破),切羽右側は現 場で採用している標準的な発破方法(以下,標準発破) である.いずれの実験ケースとも、トンネル外周装薬孔 の孔間隔は750mm,使用した雷管はDS 雷管で4段とし た.トンネル外周装薬孔の装薬量は、ノッチ付き発破で 0.45kg 孔と 0.30kg 孔の2条件とし、標準発破では 0.45kg/ 孔とした.なお、ノッチによる余掘り低減効果の再現性 を確認するため、実験 No.2-2 と実験 No.2-3 は同一条 件とした.発破後の余掘りや当たりを把握するため、 3D レーザスキャナによる掘削断面の測定を行った.

b)実験結果

掘進長 lm 位置における掘削断面の測定結果を図-10 に例示する.同図では、余掘り領域(掘削計画線より外 側の領域)を赤色で、当たり領域(掘削計画線より内空 側の領域)を青色で表示しており、同図中に一掘進長

(1.2m)当たりの余掘り体積を併せて示している. なお, 余掘り体積は以下の手順で求めた.

- i. 掘進10cmごとの断面測定の結果から, 掘削計画線 に対する余掘り面積を算出
- ii. 前後2断面の余掘り面積から,掘進方向10cmごと に余掘り面積の平均値を算出
- 説:余掘り面積の平均値に各断面の離隔10cmを掛けて
 合計して一掘進あたりの余掘り体積を算出

実験 No.2-1 の結果から, 発破後の余掘り体積は, ノ ッチ付き発破の場合で 0.153m³, 標準発破の場合で 1.016m³であった. ノッチ付き発破の余掘りは, 標準発 破に比べ15%と小さく, ノッチの形成により, 余掘りが 85%低減した. また, 実験 No.2-2 の結果から, ノッチ 付き発破の余掘り体積は 0.112m³であり, 標準発破の 0.547m³に比べ余掘りを 80%低減できた. 実験 No.2-3 の 結果から, ノッチ付き発破の余掘り体積は, 0.207m³で

表-4 掘削発破の実験ケース

	切羽(左側):ノッチ付き発破				切羽(右側):標準発破			
実験 No.	装薬孔 の間隔 (mm)	ノッチ 形成 深さ (mm)	装薬量 (kg/孔)	雷管	装薬孔 の間隔 _{(mm})	ノッチ 形成 深さ (mm)	装薬量 (kg/孔)	雷管
② −1	750	10	0.45	4段	750	-	0.45	4段
(2)-2 (2)-3	750	10	0.30	4段	750	-	0.45	4段





あり,標準発破の 0.236m³に比べて,余掘りを 12%低減 できた.

トンネル坑壁の平滑性については、坑壁の凹凸の平均 値に対するばらつき(掘削計画線と掘削断面間距離の標 準偏差)により評価し、余掘り体積の結果と併記した一 覧を表-5に示す.実験 No.2-1~No.2-3の結果から、坑

	切羽(左側):ノッチ付き発破			切羽(右側):標準発破			
実験 No.	装薬量 (kg/孔)	余掘り 体積 (m ³)	坑壁凹凸の 標準偏差 (mm)	装薬量 (kg/孔)	余掘り 体積 (m ³)	坑壁凹凸の 標準偏差 (mm)	
<u>②</u> -1	0.45	0.153	52	0.45	1.016	100	
<u>(2</u>)-2	0.30	0.112	56	0.45	0.547	184	
<u>(2</u>)-3	0.30	0.207	67	0.45	0.236	72	
	平均	0.157	58	平均	0.600	119	

表-5 余掘り体積と凹凸の標準偏差の一覧

壁の凹凸の標準偏差は、ノッチ付き発破の場合で、それ ぞれ 52mm、56mm、67mm であり、標準発破の場合で 100mm、184mm、72mm になった、ノッチ付き発破にお ける凹凸の標準偏差の平均値は 58mm であり、標準発破 の平均値 119mm と比べてノッチにより坑壁の凹凸が半 減し、坑壁の平滑性が向上していることが分かった。

実験 No.②-2, No.②-3 のノッチ付き発破は,実験 No. ②-1 のそれと比べ,孔あたり装薬量が 23(0.30kg/孔) と少ないが,標準発破と比べて余掘り低減効果が認めら れた.これは,装薬孔にノッチを形成することにより余 掘り低減の有効性と孔あたりの装薬量低減の可能性があ ることを示している.

5. 結論

トンネル外周装薬孔にノッチを形成する方法について 数値解析および現場実験により、その効果を検討し、以 下の結果が得られた.

- i. 数値解析から、ノッチ深さが10mm以上で、適切 な装薬量を設定すれば、発破による亀裂進展の方 向制御が可能であった.
- ii.トンネル外周装薬孔にノッチを形成し発破することで、標準パターンの発破に比べ、孔あたりの装薬量が同じ場合で余掘りが85%低減し、また、孔あたりの装薬量を2/3にした場合でも余掘りが低

減した.

iii. 坑壁の平滑性において、ノッチの効果により坑壁の凹凸の標準偏差の値が半減した.

以上から、本発破方法の実施により、余掘りの低減や 坑壁の凹凸を低減できることを確認した.また、発破に よる周辺地山への損傷やゆるみの低減も期待できる.

6. あとがき

トンネル外周装薬孔にノッチを形成した数値解析,現 場実験により,余掘りの抑制効果,発破後の坑壁平滑化 の効果を確認できた.今後は,適用事例を増やして技術 的なブラッシュアップを行い,トンネルのコスト削減と 安定性向上を図りたいと考えている.

参考文献

- 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とその SB 効果, 第 373, VI-5, 土木学会論文集, pp.131-138, 1986.
- 2) 大原 直, 椋木淳二, 秋吉直義: ウイングホールブラ スティング工法の開発, VI-116, 土木学会第47回学術 講演会, pp.254-255, 1992.
- 3) 福田大祐, 金子勝比古, 石山宏二, 内藤将史: 大口径 ガイドホールを用いたトンネル最外周発破における破 断面平滑性に関する数値的検討, 土木学会論文集 C, Vol.68, No.1, pp.213-223, 2012.
- 4)石山宏二,木村 哲,岡村光政,内藤将史,金子勝比 古,福田大祐:数値解析に基づくガイドホールの破断 面平滑効果,VI-295,土木学会第 63 回学術講演会, pp.589-590, 2008.
- 5) 金子勝比古,山本雅昭,諸岡敬太,田中義晴:スムー スブラスティングにおける起爆秒時差の影響,火薬学 会, Vol.58, No.3, pp.91-99, 1997.

BLASTING METHOD TO REDUCE OVERBREAKS USING NOTCHED BLAST HOLES ON OUTER CIRCUMFERENCE LINE OF TUNNEL

Koji TSUKAMOTO, Hajime HAMADA and Takeshi ASANO

In projects involving the construction of long-distance mountain tunnels having large cross sections, there is a growing need to accelerate the construction process, both to reduce costs and to achieve the project goals faster. To accelerate the construction of mountain tunnels, it is important to reduce overbreaks and establish ground stability in order to ensure efficient excavation. In this study, we focused on the use of notched blast holes around tunnel contours as an effective method to make blasting more efficient. Based on numerical analyses, and field studies, we confirmed the effectiveness of the proposed blasting method in reducing overbreaks.