

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

Blasting Method to Reduce Overbreaks Using Notched Blast Holes on Outer Circumference Line of Tunnel

塚本耕治* 浜田 元* 浅野 剛**

要 旨

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。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。ここでは、効率的な発破を実現するための有力な方法として、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、数値解析、要素実験、現場実験から本発破方法の余掘り低減効果を確認したので報告する。

キーワード：山岳トンネル、制御発破、ノッチ、ウォータージェット

1. まえがき

山岳トンネル工事において、発破方式で掘削を行う場合の主な作業は、①穿孔・装薬・発破、②坑外へのずり運搬、③支保工の設置の3つに大別される。①～③の各作業の時間は、1 施工サイクルの中で各々約 3 分の 1 を占めており、同時並行で作業することが難しい。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ことが必要となる。

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工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としては、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、必要なノッチを形成する方法の要素実験、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ズ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¹⁾。

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²⁾などがある。このうち、WJ を用いた方法では、装薬孔内で超高压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. 削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（超高压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
- iii. 超高压水を噴射しながら WJ ノズルを一定速度で引き出し、装薬孔の孔壁の 2 か所に連続的にノッチを形成

* 技術研究所土木研究グループ ** 技術研究所

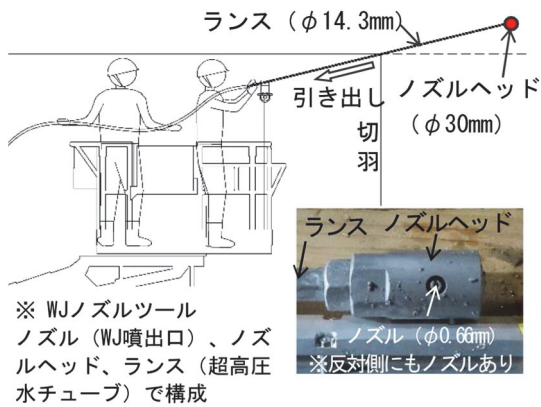


図-1 ノッチの形成方法

3. 発破による亀裂進展の数値解析

3.1 数値解析の目的

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。

3.2 数値解析の概要

解析には、発破時の亀裂進展の評価が可能な破壊プロセス法 (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 Case1、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、Case1 と Case2 に対して孔あたりの装薬量を増やし、通常発破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 (10⁻⁷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表現した

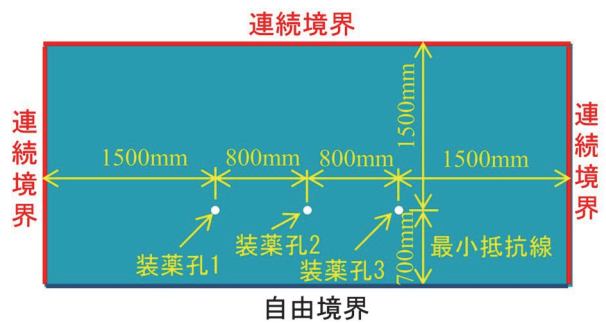


図-2 解析モデル

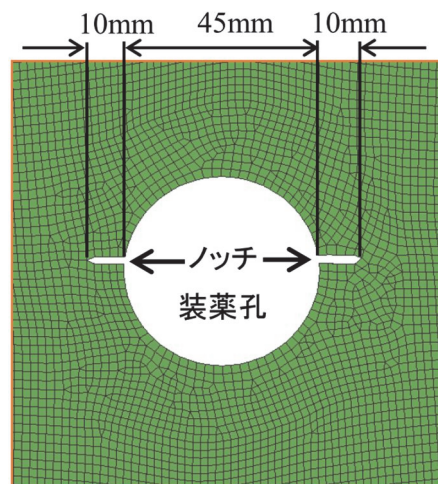


図-3 ノッチ深さ10mmの要素分割例

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φ26の場合、De=1.50: 爆薬径φ30の場合

表-2 解析対象の諸物性値

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 kg/m ³
ヤング率 (E)	80 GPa
ポアソン比 (ν)	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 (m)*	5
内部摩擦角 (ϕ)	60°

*岩盤内の強度不均一性を表現するための係数

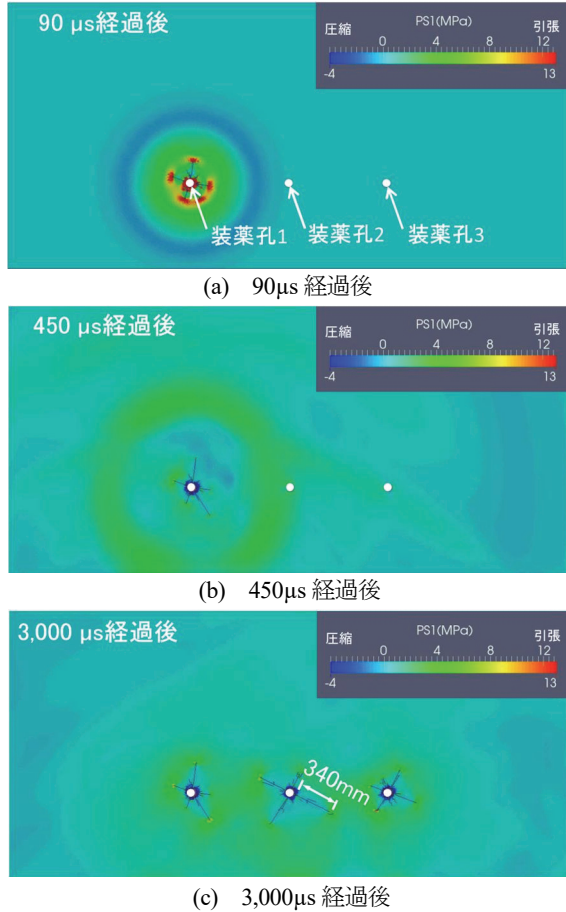


図-4 Case1 ノッチなしの亀裂進展状況 (De=1.73)

JWL 状態方程式による値を用いた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階発破として扱い、雷管の起爆時間差を 1ms 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 1ms 後の時刻 1ms 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。

3.3 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 Case1 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

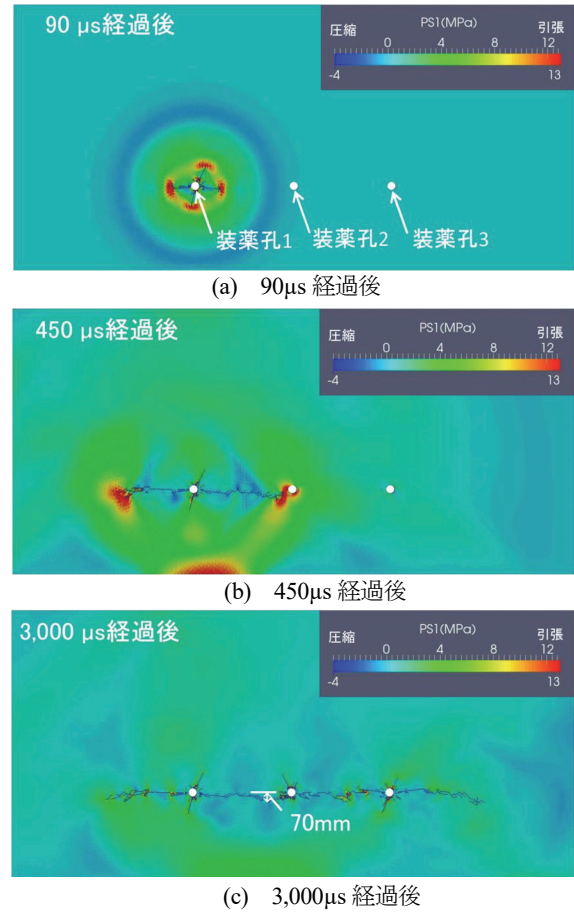


図-5 Case2 ノッチ深さ 10mm の亀裂進展状況 (De=1.73)

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。

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、

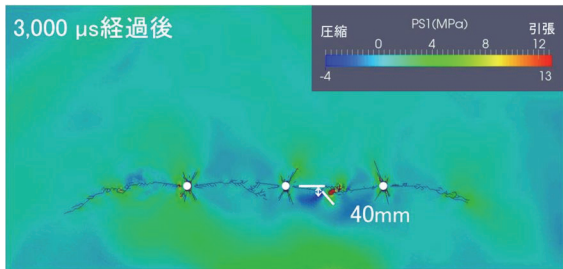


図-6 Case3 ノッチ深さ 20mm の亀裂進展状況 (De=1.73)

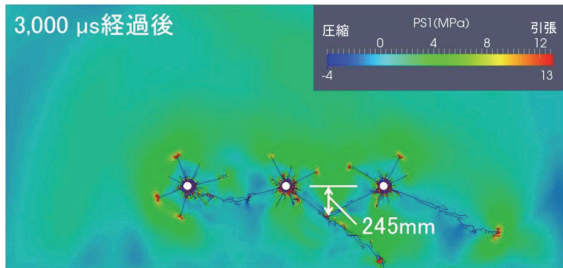


図-7 Case4 ノッチなしの亀裂進展状況 (De=1.50)

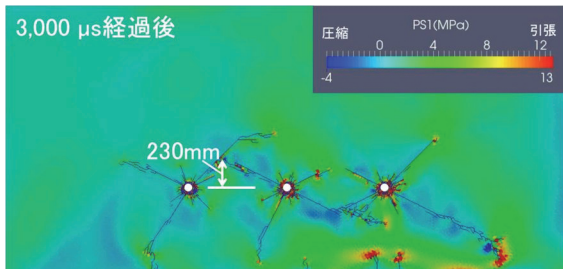


図-8 Case5 ノッチ深さ 10mm の亀裂進展状況 (De=1.50)

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が見られた。そのため、図-5のような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ことが分かった。

4. WJによるノッチ形成の要素実験

4.1 実験の目的

WJ によるノッチ形成において、ノッチ深さを 10mm 以上にするためのノズルの移動速度を把握することを目的として、室内実験を行った。

4.2 実験の概要

装薬孔の孔径を $\phi 45\text{mm}$ と想定し、花こう岩（一軸圧縮強度： 150N/mm^2 ）の試験体を用いて、図-9 に示す自動送り装置にノズルツールを取り付けて WJ による

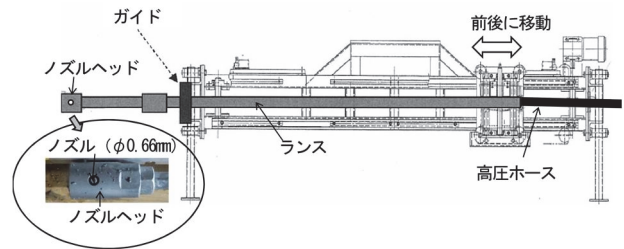


図-9 ノズル自動送り装置

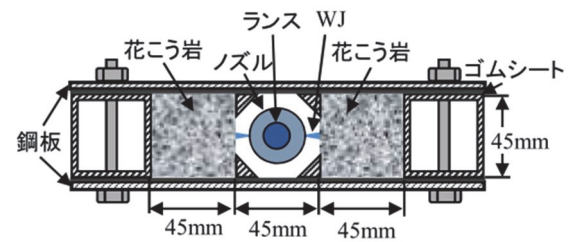


図-10 試験体固定装置（断面図）



(a) ノズル自動送り装置 (b) 試験体固定治具

写真-1 WJによるノッチ形成実験の状況

ノッチ形成実験を行った。

実験は、装薬孔を模擬するため、図-10 の試験体固定治具内に固定した 2 個の花こう岩試験体（ $45\text{mm} \times 45\text{mm} \times 1,000\text{mm}$ ）の間をノズルヘッドが通過できるように 45mm 離してセットする。ノズルヘッドを先端側まで挿入し、ノズルから超高压水を噴射しながら自動送り装置を用いてノズルを一定速度で引き出し、試験体の側面に連続してノッチを形成した（写真-1）。なお、WJ を使用するにあたり、以下の条件を設定した。

- i. 散水車に貯めた水道水を使用
- ii. 超高压水ポンプは最高圧力 250MPa、最大吐出量 45 l/min を使用し、ポンプの吐出圧力は 245MPa に設定
- iii. WJ ノズルは $\phi 0.66\text{mm} \times 2$ 穴であり、超高压水ポンプの吐出圧力が 245MPa の場合、吐出水量は 2 穴あたり 19.8 l/min

4.3 実験結果

実験から得られたノズルの移動速度とノッチ深さの関係を図-11 に示す。深さ 10mm 以上のノッチ形成には、1,200 mm/min 以下の速度でノズルを移動する必要があることが分かった。

5. 現場実験

5.1 実験サイトの概要

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。実験サイトの状況を写真-2に示す。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から、換算一軸圧縮強度は100~200N/mm²であった。

5.2 実験の概要

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、前述の要素実験の結果を参考に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. 超高压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(超高压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)

5.3 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でオーバーコアリングし、ノッチ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(写真-3)。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。これらの結果は、ノッチ形成の要素実験から求めたノズルの移動速度1,200mm/minで深さ10mmのノッチ形成が可能という結果に比べてノッチの切削効率が低くなっている。これは花こう岩と頁岩の岩種や強度の違い、亀裂

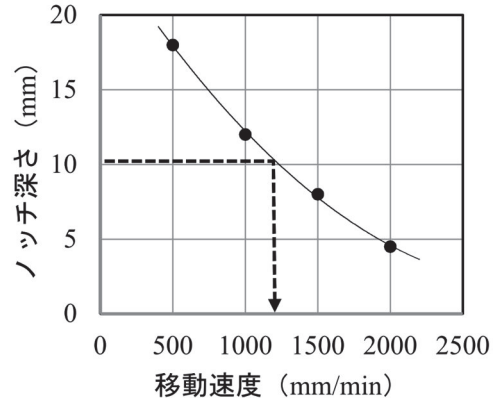


図-11 ノズルの移動速度とノッチ深さの関係



写真-2 実験位置の状況

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 ・ノズル: φ0.66mm×2穴 (流量: 2穴あたり19.8ℓ/min) ・孔径φ45mm, 孔長1,500mm
①-2	1,000	8	
①-3	1,500	5	



写真-3 ノッチ深さの確認(移動速度500mm/min)

の有無などの地山条件のほか、削孔した際の孔壁の凹凸や孔内に残った掘削ずりなどの施工条件の違いがWJの切削効率に影響したものと推察される。

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。

5.4 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-12に示す。切羽左側はノッチを形成し発破する方法（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。

実験にあたり、トンネル外周装薬孔の穿孔を同一精度で行う必要があった。そこで、切羽にマーキングした穿孔口にビット先端を合わせ、さらに、切羽後方の鋼製支保工に取り付けた指示棒を基準にガイドセルの姿勢を定め、穿孔を行った。トンネル外周装薬孔の穿孔状況を写真-4に示す。

ノッチ形成に用いた装置（ノズルヘッド、ランス、ノズル引出し治具）を写真-5に、トンネル外周装薬孔におけるノッチ形成作業の状況を写真-6に示す。

また、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。3D レーザスキャナは、Basis 社製の Surphaser 25HSX（測距精度±1.0mm）を使用した。

b. 実験結果

掘進長 1m 位置における掘削断面の測定結果を図-13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、同図中には一掘進長（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
- iii. 余掘り面積の平均値に各断面の離隔 10cm を掛けて足し合わせ、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 であり、標準発破の 0.236m³ に比べて、余掘りを 12%低減

表-4 掘削発破の実験ケース

実験 No.	切羽(左側):ノッチ付き発破				切羽(右側):標準発破			
	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

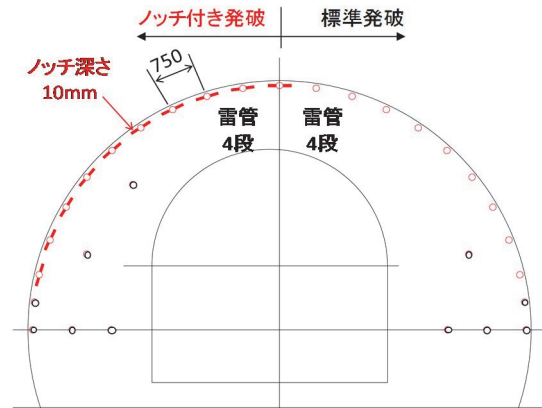


図-12 実験の発破パターン

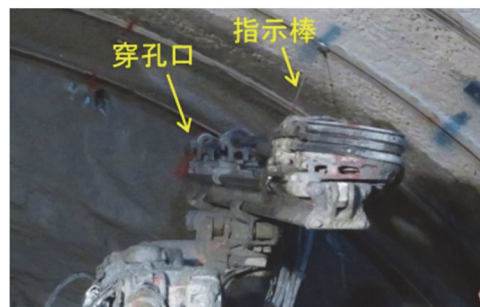


写真-4 トンネル外周装薬孔の穿孔状況

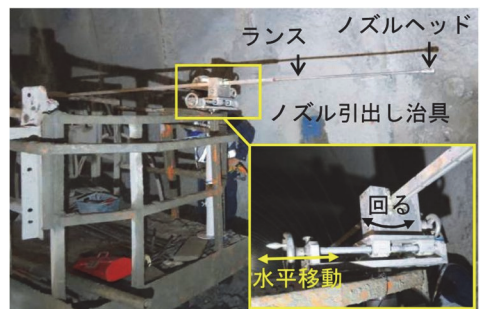


写真-5 ノッチ形成装置



写真-6 ノッチ形成作業の状況

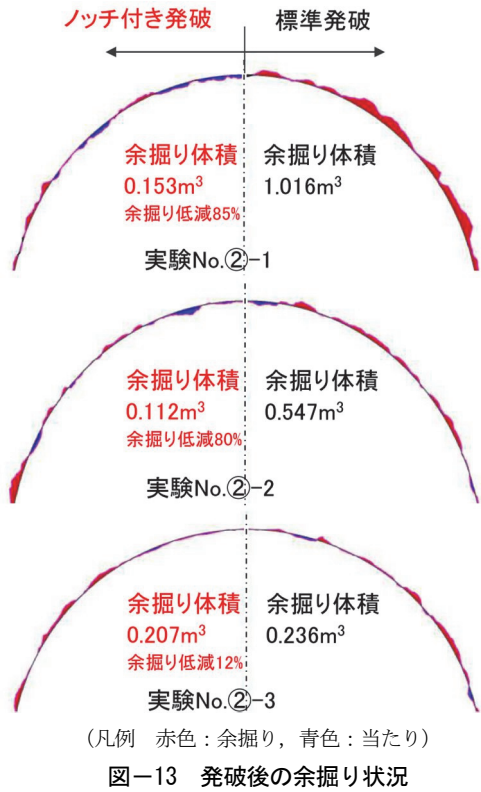


表-5 余掘り体積と凹凸の標準偏差の一覧

実験 No.	切羽(左側):ノッチ付き発破			切羽(右側):標準発破		
	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)
②-1	0.45	0.153	52	0.45	1.016	100
②-2	0.30	0.112	56	0.45	0.547	184
②-3	0.30	0.207	67	0.45	0.236	72
	平均	0.157	58	平均	0.600	119

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（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2/3(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を示している。

6. まとめ

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、要素実験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. WJによるノッチ形成の要素実験や原位置での切削実験のノズルの移動速度が異なることから、現場適用時には原位置でのWJによる切削実験を行い、ノズルの移動速度を決める必要があった
- iii. 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、孔あたり装薬量が同じ場合で余掘りが85%低減し、また、孔あたり装薬量を2/3にした場合でも余掘りが低減した
- iv. 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。

7. 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、要素実験、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】

- 1) 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、「ウイングホールプラスチック工法の開発」、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、「スムーズプラスチックにおける起爆秒時差の影響」、火薬学会、Vol.58、No.3、pp.91-99、1997。