

(79) 硬岩トンネルの余掘り低減システムに関する一考察

大日本土木㈱

○坂戸 哲也

大日本土木㈱

佐藤 文雄

山口大学 工学部 正会員

古川 浩平

山口大学 工学部 正会員

中川 浩二

A Study of Optimum System of Overbreak and Underbreak in Hard-Rock Tunnelling

Tetuya SAKATO ,Dai Nippon Construction Co.Ltd.

Fumio SATO ,Dai Nippon Construction Co.Ltd.

Kohei FURUKAWA,Yamaguchi University

Koji NAKAGAWA,Yamaguchi University

Abstract

In this study,the blasting conventional excavation in hard-rock tunnelling was discussed based on the results of statistical analysis, which was obtained through the input/output data to investigate the effects of overbreak and underbreak.

The results demonstrate that the adequate collaring radius and drill hole contour are the most important factors. The results also indicate that a better worker's viewing position is one of the effective methods to improve the outcomes.

1. はじめに

山岳トンネルの標準工法として定着したNATMの問題点の一つとして、発破によって生じる余掘り・あたりが主原因と思われる採算性悪化が挙げられる¹⁾。しかも今後山岳地域での開発が益々多くなることは確実であり、必然的にトンネルの施工数の増・長大化が進むことを考えれば、これは更に重大な問題になるものと思われる。また『トンネルはできる限り地山でもたせる』というトンネル掘削の基本理念²⁾および安全上からも、余掘りが多いことは地山を痛めることにつながり極力避ける方が賢明である。

そこで本研究は、手動式削岩機により実稼働中の現場で各種の測定を行い、余掘り・あたりに関する主要因と有効な対策について検討した結果を論じたものである。

2. 測定方法及び環境

2. 1 検討方針

図-1に検討フローを示す。はじめに、作業員には何らの対策指導も行わず、すべて作業員の判断によ

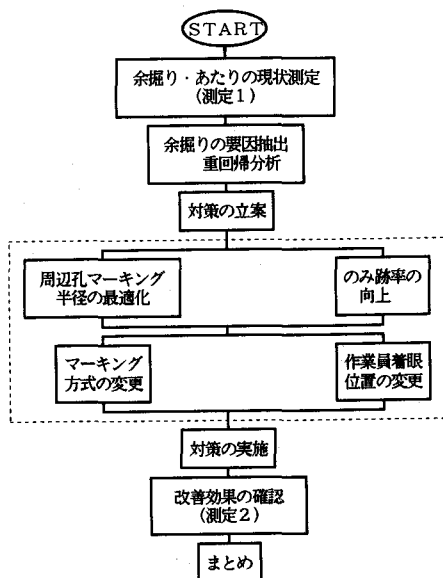


図-1 検討フロー

る施工での状況を測定した。これを測定1と定義する。測定1を用いて余掘り・あたりに関する主要因を抽出し、それに即した改善を行った。改善後の測定を測定2とする。

2. 2. 測定地質

測定は、ミニベンチ方式のNATMによる2車線道路トンネル（掘削断面70m²）において行った。いずれの測定地点も地山の地質状況は粗粒花崗岩であり、安全上の制約から吹付けコンクリート施工後の測定となるため、鋼製支保を必要としない設計パターンAあるいはBの硬岩を対象とした。

2. 3 測定項目・方法

測定項目・方法は、現場工程になるべく影響がでないように考慮し、表-1のように決定した。なお表中 〰 は測定1から判断して、測定2では測定項目から除外したものである。内空断面測定は、市販の内空断面測定器³⁾を用い、図-2に示すように1発破進行長の中間1カ所で、スプリングラインより上側のみを対象として行った。その出力結果例を切羽ビデオ映像から得られた削孔位置も併せて図-3に示す。

3. 測定1の結果及び改善策

図-4に測定1での余掘り厚の測定結果を示す。余掘り厚の平均は38.5cmで多く、かつあたりの確率は0.2%とほとんど無い結果となった。これから余掘りの低減は必要であると判断した。

そこで先ず図-5に示すのみ跡率に注目した。測定1でののみ跡率は平均15.6%と非常に小さく、このことは周辺孔の外側で掘削が行われたことを示しており、このため余掘りが多くなったものと思われる。そこで一般的に言われている周辺孔間隔の変更を行うと同時に、作業員にのみ跡を残すことの重要性を認識させた。

次に測定1で、作業員に聞き取り調査を行ったところ、地山条件（亀裂、岩強度等）は削孔条件（削孔位置、削孔数、装薬量等）を意識的に変更するほど影響がない結果であった。そこで地山条件を除いて、表-2に示す説明変数について余掘り面積を目的変数とした重回帰分析を行った。結果は説明変数2, 11, 4, 13, 7の5変数が最良な回帰モデルとなり、

$$F\text{-Value}=6.49 > F_{26}^5(0.05)=2.59$$

であるから、この回帰は有意で5つの説明変数は余掘り面積の予測に役立つと言える。しかし1つずつの回帰係数の検定を行うと、余掘り面積に有意であ

表-1 測定項目・方法

測定位置	測定項目	測定方法
切羽	延長程, 1発破進行長	エスロンテープによる実測
	岩岩機位置	スタッフによる実測
	岩種, 亀裂, 岩強度等	坑内観察記録表の活用
	切羽状況	写真
	のみ跡	スケッチ
	削孔孔数, 削孔孔位置 (周辺孔, 第2周辺孔のみ)	校正ポイントの3本の基準レーザーからビデオに撮った切羽映像の画素縮尺比を決め、削孔位置を求める。
	削孔孔総数, 装薬関係	火薬類消費日報の活用
	装薬数: 天端1ヶ所 ドベラ2ヶ所 〰 装薬数: 天端1ヶ所, ドベラ2ヶ所	スラント コンベックス
	就付け 〰 クリート厚 天端1ヶ所, ドベラ2ヶ所	ロックボルト孔での実測
		による実測
切羽から15m程度後方	余掘り, あたり	内空断面測定器により、切羽作業休止日にまとめて周方向に3度ヒッチで測定
切羽から200m程度後方	覆工コンクリート量	後日の打設日報

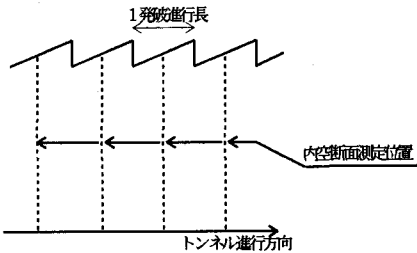


図-2 内空断面測定位置

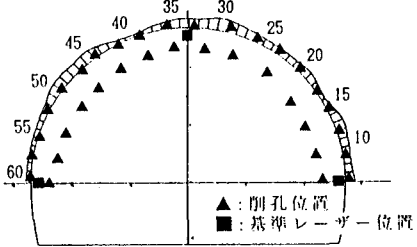


図-3 内空断面測定結果出力例

ることが言えるのは、説明変数2の『周辺孔半径の平均』のみとなった。そこで周辺孔半径を変更することとし、その変更量については余巻きコンクリート費用とあたり取りに要する費用に関して最適化を行って決定した⁴⁾。なお内空断面測定結果から計算で求めた二次覆工コンクリート量は、実打設量と4%程度の差であり1発破進行長の間1ヶ所のデータでも十分な精度をもつことは確かめている。最適計算の結果、周辺孔半径（マーキング半径）を20cmほど小さく変更することとした。

また同時に別の低減手法として、市販のマーキング装置の導入⁵⁾、作業員着眼位置の改善のためのリフトブルオペレータデッキ付き削岩機⁶⁾の導入を行った。表-3に両測定時の特徴をまとめる。

表-2 目的変数と説明変数

目的変数	1. 余掘り面積
説明変数	2. 周辺孔半径の平均
	3. 周辺孔半径の標準偏差
	4. 周辺孔間隔の平均
	5. 周辺孔間隔の標準偏差
	6. 第2周辺孔半径の平均
	7. 第2周辺孔半径の標準偏差
	8. 第2周辺孔間隔の平均
	9. 第2周辺孔間隔の標準偏差
	10. 平均周辺孔間隔E/平均最小抵抗値V
	11. 3ヶ所のサシ角の平均
	12. 削孔孔総数
	13. 1発破進行長
	14. 火薬総量/削孔孔総数
	15. S・B爆薬量/周辺孔孔数

4. 測定2の結果と考察

4.1 測定結果の概要

図-6に測定2での余掘り厚の結果を示す。余掘り厚の平均値は23.9cmで測定1と比較して14.6cm減少し

ている。また測定2でののみ跡率は図-5に示したように、かなり向上し平均で約39.0%となった。

余掘り厚が大きく減少した理由として、のみ跡率の向上と最適化による周辺孔半径の変更が挙げられるが、これらの効果について以下で詳細に検討を試みる。

4.2 のみ跡率の向上による改善効果

測定1, 2の結果をのみ跡率が30%未満と30%以上に分けて、余掘り厚および周辺孔から掘削壁面までの平均距離をそれぞれ表-4, 5にまとめて示す。後者は図-3に示した実際に削孔した周辺孔位置と測

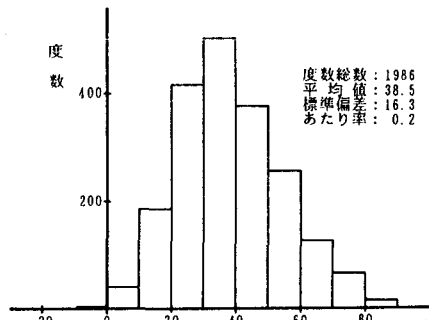


図-4 測定1での余掘り厚

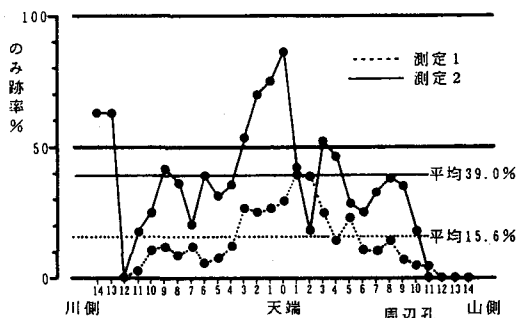


図-5 測定1, 測定2ののみ跡率

表-3 両測定時の特徴

	特 徴
測定1	・前施工区間であたりが多発→作業員への心理的影響 ・川側3P-β/γボ [リフト用レール付], 山側2P-β/γボ [同無] ・マーキング: いわゆるぶんまわし方式のみ [半径5.6m, ピッチ無] 測線数38(32) ・現状施工と余掘りの実態把握のため、低減指導は一切無し
測定2	・測定1結果の作業員への説明→作業員への心理的影響 ・川側, 山側とも3P-β/γボ [リフト用レール付] ・マーキング: レール工法方式 [半径5.4m, ピッチ60cm2ヶス; 他無] 測線数6(4) ; ぶんまわし方式 [半径5.45m, ピッチ無] 測線数20(12)

注: 切羽進行方向に対して左側=川側, 右側=山側

測線数()内は、掘削作業時測定記録者が切羽に常時居た回数

ぶんまわし方式とは、トンネル中心点にテープの一端を固定して他端を円弧上に移動してスプレーでマーキングする方法

定した掘削壁面位置との差の平均をとったものである。

表－4からのみ跡があまり残らない場合は、どこから掘れるかわからないので、周辺孔半径を小さくするという改善を行ってもその効果は少なく、周辺孔から掘削壁面までの平均距離を見ると逆に大きくなることもありうる。これに対してのみ跡が多く残っている場合の表－5では、周辺孔から掘削壁面までの平均距離は測定1、2でほとんど同じであり、余掘り厚のみが大きく異なっている。すなわち、余掘り厚の平均値34.9cmと19.1cmの差が、周辺孔半径を小さくしたことによる効果と考えられる。また掘削壁面の測定は図－2に示したように1発破進行長の中間であり、周辺孔の測定位置は当然切羽であるので、さし角を考慮すると中間点では15cm程度となり、のみ跡が多く残っている場合は周辺孔ラインにかなり近いところで掘削されていることがわかる。

のみ跡率が向上したことによる効果は、表－4、5の周辺孔から掘削壁面までの平均距離を比較することにより求めることができる。これらの差は7.1cm、12.3cmで平均的に10cm程度余掘りを改善する効果があったものと考えられる。

4. 3 周辺孔半径の最適化の効果

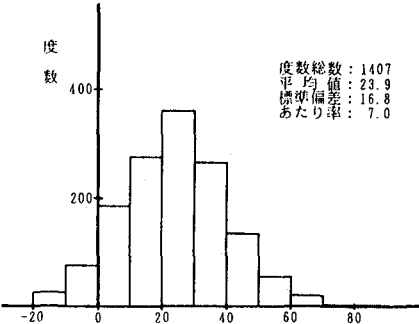
周辺孔半径の最適化の効果はすでに4. 2で一部述べた。表－5の余掘り厚の平均値の差約15cmがその効果と考えられる。よって適切な周辺孔マーキング半径を設定するだけの簡単な手法で、余掘りはある程度まで（余巻率で185％）抑制することができるものと思われる。しかしこれらの効果も、のみ跡率の向上があって初めて有効となるものであり、表－4に示したようにのみ跡率の向上がなければ周辺孔半径の最適化の効果はほとんど見られず、トンネルの余掘り低減に関してはのみ跡率の向上が何より大切なことがわかる。

また余掘り厚の標準偏差が測定1、2で変化がないこと、測定2のあたりの確率が7.0％程度あることから判断して、さらに余掘りを低減するためには別の手法と組み合わせる必要があると思われる。

4. 2と4. 3の両者を合わせて考えると、のみ跡率の向上と周辺孔半径の最適化でほぼ同程度の効果があったものと推測できる。いずれにしても、このような様々な改善策のみ跡が残らない場合は十分な効果が期待できず、余掘りの低減には先ずのみ跡を極力残すようにすることが肝要であることがわかる。

4. 4 マーキング方式の比較

測定2のデータを用いて、マーキング方式の相違による余掘り厚およびマーキング誤差の比較を行った結果を表－6に示す。表中にあるマーキング誤差とは、切羽ビデオ映像によって得られた実際に削孔した周辺孔位置が、マーキングしようとした半径とどの程度差があるか調べた値であり、マーキングしようとした半径と実際にスプレーで描いた半径の誤差とビットをスプレーで示された位置に当てるときに生じる誤差（作業員の力量、削岩機の遊び等）の両



図－6 測定2での余掘り厚

表－4 のみ跡率30％未満での余掘り厚

	測定1	測定2
測定断面数	28	4
測定度数	1457	217
余掘り厚		
平均値(cm)	38.7	36.3
標準偏差(cm)	16.8	16.8
周辺孔から掘削壁面までの平均距離(cm)	26.0	30.2

表－5 のみ跡率30％以上での余掘り厚

	測定1	測定2
測定断面数	4	8
測定度数	211	436
余掘り厚		
平均値(cm)	34.9	19.1
標準偏差(cm)	12.1	13.2
周辺孔から掘削壁面までの平均距離(cm)	18.9	17.9

表－6 マーキング方式の相違による比較

	ぶんまわし方式	レーザーコンパス方式
測定断面数	9	3
余掘り厚		
測定度数	491	162
平均値(cm)	27.6	16.3
標準偏差(cm)	16.3	14.4
マーキング誤差		
測定度数	192	72
平均値(cm)	-0.1	-3.1
標準偏差(cm)	12.1	10.4
周辺孔から掘削壁面までの平均距離(cm)	22.7	19.4

方を含む値である。表から周辺孔と掘削壁面までの平均距離でもレーザーコンパス方式の方が約3cm良い結果となっており、マーキング装置を用いることは余掘り低減の有効な手法の一つであることが確認された。

その理由としては、レーザーコンパス方式の場合周辺孔のピッチを指定したケースが2断面あり、その影響もあると考えられるが、両手法で作業員の変更が無いことからビットをスプレーで示された位置に当たるときに生じる誤差がほぼ同じ程度であると考え、マーキング誤差の標準偏差結果から判断して、よく言われる制御発破の要点である平行削孔、最小抵抗線長のバラツキ減に寄与したためだと思われる。

4. 5 着眼位置の比較

測定1のデータを左右に分けて用いて、作業員着眼位置（削岩機のリフトابلオペレータデッキの有無）の相違による比較を行った結果を表-7にまとめる。余掘り厚は7cm程度減少し、周辺孔から掘削壁面までの平均距離も3cm程度減少している。各油圧ドリフトの操作作業員がほぼ固定されていることから、左右の作業員の力量等の違いの影響もあると考えられるが、着眼位置が良くなったことでさし角制御や平行削孔がしやすくなったことなどが考えられ、余掘り低減にはこれも有望な手法の1つであろうと思われる。そのため、測定2では2台の油圧ドリフトともリフトابلオペレータデッキ付のものを用いた。

表-7 着眼位置の相違による比較

		デッキ無 (27-M)	デッキ有 (37-M)
測定断面数		32	
測定度数		836	832
余掘り厚	平均値(cm)	41.8	34.7
	標準偏差(cm)	15.7	16.1
周辺孔から掘削壁面 までの 平均距離(cm)		26.9	23.3

5. まとめ

今回の測定を通じて得られた結果を以下にまとめる。

- ①のみ跡をより多く残すことは、他の改善手法を成功させるための前提条件とも言え、余掘りを低減するにあたって最も重要なことである。
- ②のみ跡が多く残っている場合、余掘りは周辺孔半径にはほぼ比例すると思われ、最適化による適切な周辺孔マーキング半径を設定することによりかなり抑えることが可能である。
- ③最近よく行われているマーキング装置の導入は、余掘り低減に有効であることが確認された。しかしそのコスト（導入、ランニング）を考へて経済的に効果があるかは今後確認を要する。
- ④リフトابلオペレータデッキによる作業員の着眼位置の改善は、高さにして1m程度の変化であるが、それでも余掘り低減にある程度の効果があることがわかった。このことからさらに進めて周辺孔の真後ろに着眼位置がくるような装置の開発も、今後検討する価値があると思われる。

以上から余掘り低減対策としては、まず現状の余掘り状況、のみ跡率を迅速に把握し、のみ跡率を向上させると共にあたり取りも考慮した最適な周辺孔マーキング半径を設定するようなフィードバックシステムを構築することが第1であると考えらる。

その上でコスト面を充分確認して、二次的な対策としてマーキング装置、着眼位置の改善機構等を導入することも必要であろう。

<参考文献>

- 1) 社団法人日本トンネル技術協会：山岳トンネルに関する意識調査報告書、昭和60年3月
- 2) NATM工法の調査・設計から施工まで：土質工学会
- 3) A. MTプロファイラー2000パンフレット：富士物産㈱
- 4) 吉見憲一、鈴木雅行、古川浩平、中川浩二：手動式削孔機を用いた硬岩トンネルのスムーズプラスティンク設計の最適化と実施工への適用、土木学会論文集 第421号 PP.203~PP.212, 1990年9月
- 5) レーザーコンパスパンフレット：ミカサ㈱
- 6) 油圧式ホイールジャンボ JTH3RS-135パンフレット：古河さく岩機販売㈱