

(16) 硬岩トンネルのSBにおける削孔ロボットの利用

株式会社	間組	吉見 憲一
株式会社	間組	山本 正明
山口大学	工学部	中尾絵理子
山口大学	工学部	古川 浩平
山口大学	工学部	中川 浩二

1. はじめに

近年、トンネルの掘削法としていわゆるNATMが主流となってきているが、その採算性悪化が最近特に問題とされている。なかでも発破における余掘りのため、吹きつけコンクリートや2次覆工コンクリートが設計量と比べて著しく多量となることがその主原因の一つと考えられている。この余掘りを避け、また地山の発破によるゆみをできるだけ小さくし、岩盤を保護するための手法としてスミーズブラスティング（以下SBと呼ぶ）の重要性が最近特に叫ばれているが、その研究は少なく、中でも現場を対象としたものはほとんど見当たらない。これは、発破の入力である削孔データと出力である発破結果のデータの測定に時間がかかり、現場でこのようなデータを得られなかったことに起因する。

近年、コンピュータや制御技術の発達に伴って、削孔ロボットが開発された。このロボットを用いれば、入力の削孔位置データは時間をかけず入手できる。一方発破結果の計測に関しては、レーザー光線を利用した各種の便利な断面測定器が開発され、発破後にあまり時間をかけずに断面測定することが可能となっている。

以上のことから、本研究は削孔ロボットを利用したSBに関する研究を、実際の切羽進行の中で行ったものである。すなわち、削孔ロボット（システムAD、マツダ）と断面測定機（ミカサ式トンネル断面測定機）を用いて実際の現場において以下に述べる実験1、2、3を実施し、そのデータを基に、硬岩トンネルのSBにおける削孔ロボットの有効性を論じたものである。

2. SBについての考え方

SBは地山を保護し滑らかな掘削面を作ることによってトンネル掘削に要する費用を最小限に抑えることを目的としている。従って、発破の結果からするとSBの成果は次のように3つの段階に分けて考えることができる。

(1) 第1段階、発破技術

図-1 (a)に示すように発破により発破孔間がクラックで連結され、のみ跡が全て残っていることで第1段階のSBは成功したと判断する。この場合、図-1 (b)の破線のように発達した節理があると点線のようにはならず、太実線のように破断面が形成されることもある。この場合も、のみ跡が残っており、かつ凹凸の状態が特に大きな当りにならない限りSBは成功したものとする。たとえば図-2に示すように設計断面に対して削孔がでたらめであったとしても、その孔間を発破によりうまく連結できればSBは成功したとする考え方である。そのためこの第1段階のSBの成否は主としてのみ跡率で判断することになる。

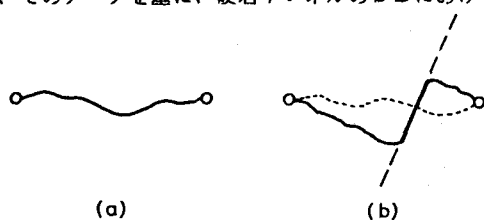


図-1 クラックによる孔間の連結

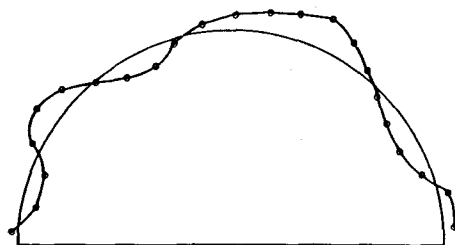


図-2 削孔がでたらめな場合の発破結果

(2) 第2段階、設計断面の実現

あらかじめ設計された削孔パターン通りに正しく削孔が行われ、かつ前述の第1段階のSBにも成功した状態をもって第2段階のSBの成功と考える。すなわち第2段階では第1段階に加えて削孔が正しく行われたかどうかの問題となる。従って、この段階のSBの成否の判断は、削孔パターンと得られた発破結果との差のばらつきを主として用いることになる。

(3) 第3段階、SBの最適化

これら第1、第2段階のSBは100%成功することはありません、結果として設計削孔パターンに対する発破結果はある程度のばらつきを有する統計量として得られることになる。そのため掘削断面は凹凸のあるものとなり、設計断面に対しては当りと余掘りとが現実の問題として生じる。ここで当りと余掘りとに対する費用をも考慮した上で総費用を最小化するような発破結果が得られた場合、第3段階のSBの成功とする。

3. 現場における実験および結果と考察

本研究の実験は日本道路公団広島建設局の発注による山陽自動車道志和トンネル西工事において行った。トンネルの掘削方式はいわゆるNATMである。地山の地質状況は広島型花崗岩類に属する花崗閃緑岩であり、実験位置の弾性波速度はいずれも4.0～4.6 km/sec、岩石の強度は一軸圧縮強度1210～1470 kg/cm² (119～144 MPa)、圧裂強度68～83 kg/cm² (6.7～8.1 MPa)であった。すなわち、本研究で対象としたのは、このような硬岩トンネルの掘削であるといえる。

本研究では、常に仮想切羽(実切羽の約50cm手前にパターン設計のため仮想的に設けられた切羽)から1m先の断面をそれぞれのサイクルの考察、検討の対象とした。SBを論じる場合、それぞれのサイクルにおいて掘削方向での削孔位置および発破結果をも含めて検討することが望ましい。しかし掘削方向についても検討するためには計測量が著しく増加し、実施中の作業を困難にする。そのため仮想切羽から1m先の断面でもってそのサイクルの代表断面とした。

行った実験は以下の1、2、3である。この結果を用いて削孔ロボットを用いたSBに関する考察を試みる。

(1) 実験1 (完全自動削孔モードによる削孔)

本研究を行う前に、この現場で実際に行っていた削孔は完全自動削孔モードによる削孔であり、これを実験1とする。これは、あらかじめ削孔ロボットに記録させた削孔パターンに従って全孔を自動的に削孔させたものである。

図-3は実験1において断面測定機による測定により得られた断面と設計断面との差Dのヒストグラムであり、横軸にDの値、縦軸にその個数を示して

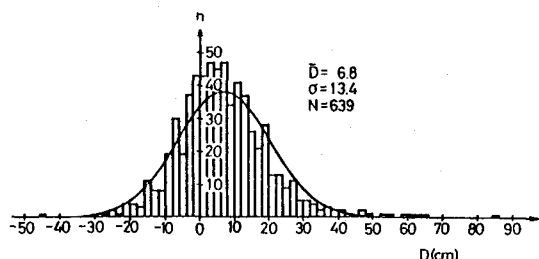


図-3 実験1における掘削断面計測結果

いる。図中のNはこの実験1の25断面の総測定箇所数を示し、 $\bar{D}$ はDの平均値、 σ はDの標準偏差を示す。Dが負ということはそのデータに対応する箇所が当りであることを意味する。図中の曲線はこのDと σ を用いて得られた正規分布曲線である。余掘量(当りも含めて)のデータはほぼ正規分布をしていることがわかる。実験1における $\bar{D}$ は6.8 cmであり、余掘量の値としては比較的小さいが σ が13.4 cmもあり、その結果 $\bar{D} < 0$ で示される当りの個数が多い。このように掘削におけるばらつきが大きくなったのは、すでに述べたように削孔ロボット各部に遊びが生じ、実削孔位置が設計削孔パターンから大きく外れたためと考えられる。

(2) 実験2 (半自動削孔モードによる削孔)

実験1の全自動削孔モードによる削孔では当りや余掘が多くSBとして問題があるので、実験2では切羽に設

計断面と等しい円をスプレーで描き、その円周上まで手動でブームを移動した後、自動削孔させる半自動削孔モードにより削孔を行った。

実験2の13断面における削孔結果のデータDのヒストグラムを図-4に、掘削断面計測結果のヒストグラムを図-5に示す。図-5より、実験1に比べDは20.8cmと大きくなった反面 σ は10.6cmとかなり小さくなり、その結果当りである $D < 0$ の個数はほとんどゼロとなっていることがわかる。この場合の平均余掘率は8.8%であり、過去の結果¹⁾などから見てもかなり小さい余掘率といえる。図-4、5の両図を比べると分かるように、入力としての削孔の $\bar{D}$ 、 σ と出力としての掘削断面の $\bar{D}$ 、 σ とはほとんど差がない。このように、本研究で対象としたトンネルのSBに関しては、いかに精度よく設計削孔パターン通りに削孔するかが、SBの成否を決定する大きな要因であることがわかる。

図-6に実験2による各孔毎ののみ跡率の平均値を示す。大部分の孔で平均ののみ跡率が70%を越え、そのうちの5孔は90%を越えている。このように第1段階のSBの観点からすればこの発破は十分成功しているといえるが、Dがかなり大きく、また σ もまだ若干大きいため、第2段階のSBの観点からは成功したとは言い難い。

(3) 実験3 (半自動削孔モードによる削孔)

実験2の場合、第2段階のSBの観点からは十分に成功したとは言えなかった。そこで切羽にスプレーで半円を描くことは同じであるが ①円を描く中心をより正確に求める ②円周を描くスプレーの先に塗料が拡がらない器具をつけ、なるべく細い線を描くことを試み、これによる削孔を実験3とした。このようにして描かれた半円のスプレー幅を細くすることにより正確な孔の位置決め的重要性を作業者に認識させる心理的効果をも考慮した。

実験3の7断面における掘削断面のDのヒストグラムを図-7に示す。これによると $\bar{D} = 8.2\text{cm}$ 、 $\sigma = 8.0\text{cm}$ とともに実験2に比べ非常に小さくなっている。この時余掘率の平均はわずか1.64%、当りの生じた断面を除いた余掘率の平均でも2.2%であり、過去のSBの結果¹⁾などと比べても、非常に小さくなっている。

(4) 発破結果の分布形

すでに図-3、5、6に示したように、発破結果と設

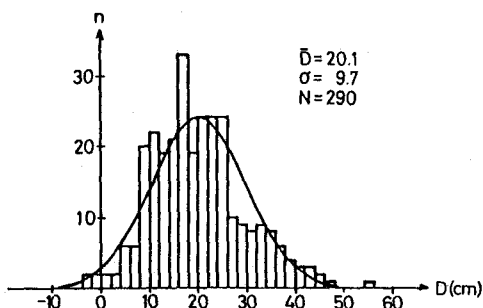


図-4 実験2における削孔結果

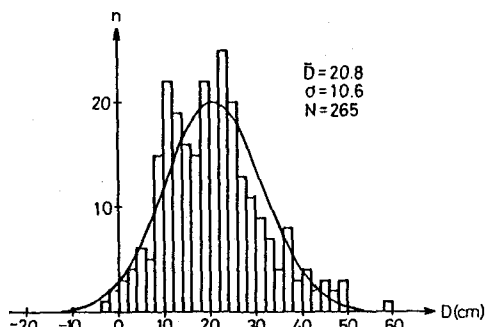


図-5 実験2における掘削断面計測結果

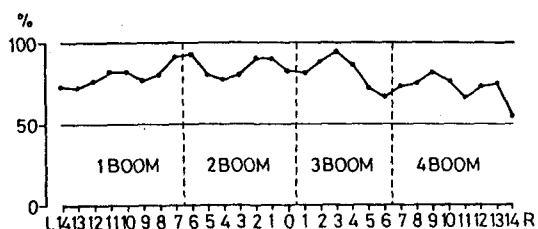


図-6 実験2における各孔平均ののみ跡率

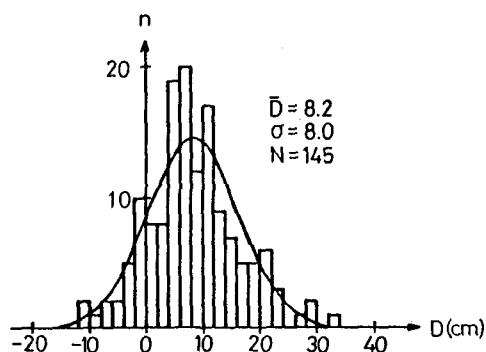


図-7 実験3における掘削断面計測結果

計断面との差Dの分布は正規分布でほぼ表現できると考えられる。このことを検討するために、正規分布から計算された当りの個数 N_1 と、実際の当りの個数 N_2 とを比較した結果および χ^2 検定を行った結果を表-1に示す。この両者の個数 N_1 と N_2 は非常によく合っており、この点からはDの分布は正規分布と考えて取り扱っても問題のないことがわかる。

表-1 正規分布曲線との比較

実験番号	図番号	N_1	N_2	χ^2 検定
1	3	194.9	191	妥当でない
2	5	6.5	3	妥当*
3	7	22.0	22	妥当

* D=59cmの1データを無視した結果

χ^2 検定の結果は、有意水準5%で実験2、3は妥当、実

験1は妥当でない。実験1は図-3を見ても分かるように、極端な当りや余掘が多く、正規分布曲線にのらないデータが多いことは明らかである。これは削孔ロボットの特性を十分把握しないで用いていたためで、その特性をうまく利用して削孔すれば、実験2、3のように正規分布で近似できる程度の結果が得られるものと考えられる。しかしこの実験1でも、 N_1 と N_2 とがほとんど等しいことは、大きく見ればほぼ正規分布で近似できる結果が得られると考えてよい。

(5) 第2段階のSBの評価

第1段階のSBがほぼ成功している場合、Dの値は周辺孔の削孔予定半径に依存すると考えられ、それに対して σ はこれの実現に対するばらつきとなる。従って第2段階のSBは σ の値をより小さくすることによってより良い成功を収めたといえることができる。いま本研究の1、2、3の実験において σ の値は13.4、10.6、8.0 cmと順次著しく低下させることに成功しており、第2段階のSBは良い成果を収めたとすることができよう。

4. 結 語

近年開発された削孔ロボットを用いて、トンネルの現場において、SBに関する多くの実験を行い検討を加えた。この実験から得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) SBに対する考え方をまとめ、第1段階のSBは主として発破に関する問題であり、第2段階のSBは削孔に関する問題、そして第3段階のSBはSBの最適設計であるとの提案を行った。

(2) 本研究で対象としたような硬岩に対しては、第1段階のSBのみならず、削孔精度に支配される第2段階のSBもまた重要であることが明らかになった。本研究の場合は、第1段階のSBの点からはいずれも実験もほぼ成功であったといえることができる。

(3) 実掘削断面と設計断面との差Dの分布は、正規分布と考えてもよいことが明らかになった。

(4) 削孔精度を上げるために、切羽にスプレーで描く円をより精度よく、細い線で描き、手動で線上までブームを移動した後自動削孔に切りかえることにより、前項Dの標準偏差を小さくすることができた。このことは、今後のSBに対する大きな指針となろう。

(5) トンネル工事に削孔ロボットを用いた場合、稼働時間が長くなると、当初のような削孔精度は望めず、削孔面だけを取り上げるとそのメリットは予期した程大きくない。しかしTQCの観点からすると適当な補正を行うことにより、入出力の関係が数値で得られ、フィードバックする資料を与えてくれる点でそのメリットは非常に大きいと考えられる。

なお本研究の実験を実施するにあたり日本道路公団広島建設局広島工事事務所、間組志和作業所の鈴木宏平所長ならびに瀬戸口博昭主任には多大な労力をかけた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本トンネル技術協会；トンネル爆破技術指針，p.130，1982.

(16) SMOOTH BLASTING IN HARD GRANITE TUNNEL
USING AN AUTOMATIC DRILLING MACHINE

Kenichi Yoshimi *
Masaaki Yamamoto *
Eriko Nakao **
Kohei Furukawa **
Koji Nakagawa **

Abstract

In this study, the smoothblasting in hard granite tunnel was discussed with reference to the results of three field tests which aimed at the minimization of overbreak and underbreak. In the tests, the drilling was practiced by the aid of automatic drilling machine. Among many factors which effect on the smoothblasting result, particular attention was payed to the drilling precision. Differences between the designed and actual blasted faces were statistically analized and smoothblasting results were discussed from its point of view.

The study reveald that not only the blasting techniques but also the drilling precision give a great effect on the smoothblasting result in hard granite tunnels.

* Hazamagumi, Ltd.

** Faculty of Engineering, Yamaguchi University