

削孔ロボットを用いた硬岩トンネルの スムーズブラスティングに関する研究

SMOOTH BLASTING IN HARD GRANITE TUNNEL USING AN AUTOMATIC DRILLING MACHINE

中川 浩二*・古川 浩平**・鈴木 宏平***・吉見 憲一****
By Koji NAKAGAWA, Kohei FURUKAWA, Kohei SUZUKI
and Ken-ichi YOSHIMI

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 smooth blasting result, particular attention was payed to the drilling precision. Differences between the designed and actual blasted faces were statistically analyzed and smooth blasting results were discussed from its point of view.

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

緒 言

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^{1),2)}。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る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ム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。

SB がわが国へ紹介されて³⁾ かなりの年月を経ているにもかかわらずその系統的な研究は少なく、個々の現場においては試行錯誤的に行われているのが現状と思われる⁴⁾。現実の問題としてトンネル掘削は実在の岩盤を対象としている。そしてわが国においては岩盤の状況は実

に多種多様であり、SB が試行錯誤的になるのはやむを得ないことであろう。しかし、NATM の現状を考慮すると SB について現場あるいは模型実験を含めた多方面からの早急な研究が望まれるところである。

いま SB の研究を現場を対象としたものに限って考えるとき、その研究が十分でないのは、主として次の理由によるものと考えられる。

第 1 に、SB の効果を検討するには、まず入出力のデータが把握できなければならない。たとえば SB 結果に最も大きな影響を及ぼすと思われる孔配置について考えると、入力としての削孔パターンは図面上は任意に作成しうが、トンネル現場において作業者が図面通り削孔するかどうかは保証の限りではない。たとえ作業者は図面通り削孔する意志を持っていたにしろ、実際削孔された孔が図面通りであったか、どの程度誤差があったかの測定は非常に困難である。時間を十分にかければ、それらの測定は不可能ではないが、工期に追われる現場でそのような時間をさくことは難しい。同じことが出力である発破結果の計測に関してもいえる。

第 2 に、実際の現場では岩の種類、節理の状況等が掘削サイクル毎に異なるため全く同じ発破パターンを用いても結果が異なる。そのため、ある程度の統計的処理に頼らざるを得ないが、その場合実験回数が増加し、先と

* 正会員 工博 山口大学教授 工学部建設工学科
(〒765/山口県宇部市常盤台 2557)

** 正会員 工博 山口大学助教授 工学部建設工学科
(〒765/山口県宇部市常盤台 2557)

*** (株) 間組広島支店 志和作業所長
(〒739-17/広島市安佐北区高陽町大学狩留家 6190)

**** 正会員 (株) 間組 土木本部 設計部副主査
(〒107/東京都港区北青山 2-5-8)

同様の問題がある。

第3に、SBにかかわる要因数が非常に多いことが挙げられる。岩種や節理といった自然要因だけでなく、孔間隔、抵抗線距離、削孔精度、薬量、薬種、雷管の秒時などの人為的に決まる要因も多く、SB結果に対してそれらが相互に影響を及ぼしあうためこれらの各要因について実験を行わないと、その各要因がSBに及ぼす影響を正しく評価できないなどである。

近年、コンピュータや制御技術の発達に伴って、全自動削孔装置(削孔ロボット)が開発された⁹⁾。このロボットを用いれば、前述の現場におけるSB研究の諸問題の多くに解決がつく可能性がある。すなわち、ロボットは数値制御であるため、設計通りの削孔が可能であるとされている。また、削孔位置は常に記録されているため、入力データは時間をかけず入手できる。しかも、作業者の技術力に左右されない利点もある。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。このように削孔ロボットと断面測定器を用いれば、SBの入出力データがある程度正しく、かつ大きな時間をかけず入手できる。その結果、統計的な処理が可能な程度のデータ収集が可能である。

さらに、SBは常に岩盤条件等現場の状況に対応して行われるべきものである。そのため実施工におけるSBの効果を検討するための手法は実際の現場に適用可能であることが望ましい。一方現実の問題として現場は毎日作業を行っており、切羽の進行を妨げて実験を行うことは望ましいことではない。換言すればこの種の実験が掘削作業に及ぼす支障は最小限に止められるべきである。

以上の配慮から、本研究は削孔ロボットを用いたSBに関する研究を、実際の切羽進行の中で行うことを前提とした。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に関し考察を行ったものである。

1. SB についての考え方

トンネル爆破技術指針¹⁰⁾に従えば「最も一般的にトンネル掘削に用いられる制御発破、すなわち周辺孔を平行かつ接近して配置させ、孔径より十分小さい径の爆薬を装填して軽装薬とする発破工法」をSBと定義している。

ここで定義されたSBは発破の方法について定義したものである。本来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。したがって、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は成功したものと考える。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。

この段階のSBの成否を支配する人為的な要因としては、その岩質に合った孔間隔、抵抗線距離、薬量、薬種、雷管の秒時などが挙げられ、それらをいかにうまく決めるかがこの段階での問題となる。

(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。したがって、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を主として用いることになる。

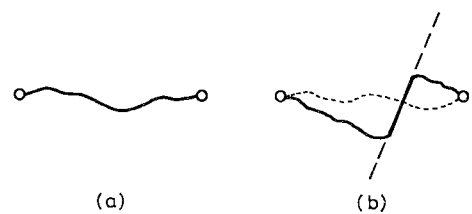


図-1 クラックによる孔間の連結

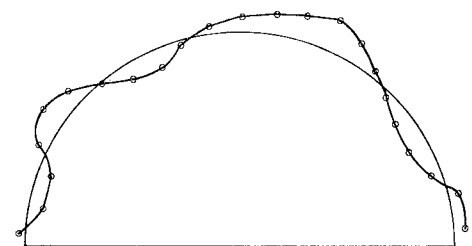


図-2 削孔がでたらめな場合の発破結果

この段階の SB の成功のための主な要因は第 1 段階の要因に加えて、削孔パターン通りに正しく削孔する技術があるか否かということになる。

(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えず, 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。

第 3 段階の SB を成功させるための主な要因としては, 上述の第 1, 第 2 段階の SB の成功要因に加えて, 当りや余掘りを確率統計量としてとらえた上で, 総費用を最小化する発破設計を行うことが問題となる。そしてその成果の評価は総費用最小の観点から行うことになる。

2. 本研究における SB の特徴と実験環境

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/s で, 道路公団の設計パターンは A あるいは B となっている。また代表的な岩石の強度は一軸圧縮強度 1 210~1 470 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。

また, 本研究の開始時には上半部の掘削が掘削予定長の半ばを過ぎていた。そのため, ここまでの間にすでに種々の削孔パターン等に関する検討が行われ, 試行錯誤的に 図-3 に示す削孔パターンと 表-1 の発破諸元がすでに採用されていた。この発破設計によって得られる SB ののみ跡率はかなり高く, 前述の第 1 段階の SB はかなり成功していると考えられた。

第 1 段階の SB に関しては今回まで理論, 模型実験をはじめとして多くの研究がみられ, その結果 SB に関するおおよその指針が得られている⁷⁾⁹⁾。またいくつかの現場実験の報告によると硬岩においては指針のような SB を行えば若干の試行錯誤を経ることによって SB を成功させることは可能なようである⁹⁾。

以上のことから, 本研究においては 図-3, 表-1 に示す発破設計によって第 1 段階の SB は一応成功してい

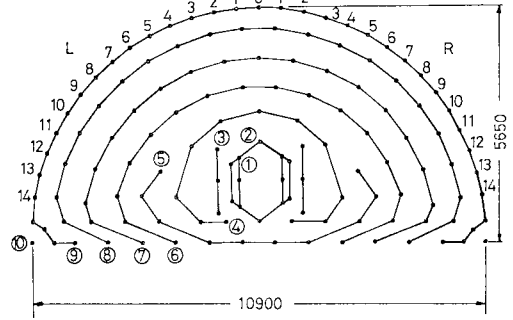


図-3 本研究で用いた発破パターン

表-1 発破の諸元

1. 岩 質: 花 崗 岩
- 弾 性 波 速 度: 4.3 km/s
2. 断 面 積: 49.3 m²
3. 掘 進 長: 2.5 m
4. 削 孔 長: 2.7 m
5. ビ ッ ト ゲ ージ: 41 mmφ
6. 爆 薬 種 別: 2 号 種 ダイ ナ マ イ ト (30 mmφ, 100 g)
SB 用 ス ラ リ ー 爆 薬 (20 mmφ, 200 g)
7. 破 砕 量: 123.25 m³
8. 1 m³ 当 り の 爆 薬 量: 1.04 kg/m³
9. 1 m² 当 り の 孔 数: 2.74 孔/m²

段 数 (DSD)	孔 数	1 孔 当 装 薬 量	装 薬 量 (Kg)
1	6	1.1	6.6
2	6	1.0	6.0
3	6	1.0	6.0
4	11	1.0	11.0
5	6	1.0	6.0
	4	1.1	4.4
6	14	1.0	14.0
	2	1.1	2.2
7	17	1.0	17.0
	2	1.1	2.2
8	20	1.0	20.0
	2	1.1	2.2
9	31	0.7	21.7
	6	1.1	6.6
10	2	1.1	2.2
計	135		128.1

ると考え, 設計断面の実現, そして SB の最適化への手法である第 2, 第 3 段階の SB についての検討を行った。

3. 削孔ロボット精度の検討と削孔データの補正

本研究では, 常に仮想切羽 (実切羽の約 50 cm 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, 実施工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.

(1) 削孔ロボット精度の検討

SB 研究の鍵は発破の入出力データの正確な把握であり, 従来の SB に関する研究はこの点に多くの問題を有していた. 削孔ロボットはこの SB に伴う最大の問題を解決する大きな手助けとなりうるが, そのためには削孔ロボットの精度を正しく評価する必要がある.

すでに 2. で述べたように, 本研究の実験を行った時期には上半掘削が掘削予定長の半ばを過ぎており, すでに削孔ロボットの稼働時間は 1500 時間を越えていた. 本研究で用いた削孔ロボットの削孔精度は当初 ± 5 cm とされていたが, 1500 時間稼働した時点で機械の一部に遊びが生じ, またブームその他にも曲りやそりが見られ, 得られた削孔データが正しい値を示していない可能性が十分に考えられた. そのため実験を始めた時点で用いていた削孔パターンにおいて, いくつかの孔について削孔ロボットに記録された削孔位置の水平および鉛直方向座標値 X_r, Y_r と実測した X_m, Y_m およびその差 $\Delta X, \Delta Y$ を計算した結果の一部を表-2 に示す. これらは今回の実験と直接関係がある外周孔についてのデータである. この表から明らかなように, 両者の差は小さいもので 0.4 cm, 大きいもので 28.2 cm もあり, 補正せずに使用することはできないものと思われた.

(2) 削孔データの補正

(a) 1 次補正

表-2 に示したように, これらの削孔ロボット誤差の分布にはある種の傾向がみられる, そこでこれらの誤差

表-2 削孔ロボットの誤差分布 (単位: mm)

孔番号	X_r	X_m	ΔX	Y_r	Y_m	ΔY
13L	-5301	-5290	+11	1440	1314	-126
11L	-4921	-4960	-39	2448	2321	-127
9L	-4322	-4435	-113	3403	3351	-52
7L	-3550	-3620	-70	4177	4159	-18
5L	-2660	-2680	-20	4831	4827	-4
3L	-1629	-1575	+54	5248	5259	+11
1L	-565	-460	+105	5448	5427	-21
0	-2	110	+112	5498	5467	-31
1R	561	510	-51	5457	5326	-131
3R	1663	1630	-33	5231	5076	-155
5R	2653	2640	-13	4822	4653	-169
7R	3570	3680	+110	4201	4106	-95
9R	4322	4040	-282	3420	3289	-131
11R	4900	4905	+5	2500	2320	-180
13R	5300	5295	-5	1458	1276	-182

分布に筆者らの経験を加味し, 1次補正としての削孔ロボット誤差分布図を作り, これに従って削孔ロボットから得られた値を変更した. これを表-3 に示す. この表の作成にあたっては, 実測された結果がある孔に対してはその値を用い, 実測結果のない孔に対しては, 近傍の値から推定した.

(b) 2 次補正

1次補正のデータのままで誤差が大きく, 精度面から信頼性が小さい. そのため, のみ跡を用いて精度の向上を図った. すなわち, 発破が終わった後図-4 に示すように, のみ跡を担当者が目で見えてスケッチすることとした. これは各孔毎に, のみ跡が残っていた部分に赤鉛筆で線を引くだけであるから, その作業時間はわずかである. ここで図-4 の孔番号は図-3 の周辺孔のそれに対応している.

そして吹付けが終わった段階で断面測定機により正確に断面形状を測定する. その測定結果から検測ピンで測定される近似的なコンクリート吹付け厚を差し引いた結果が発破後の形状と考える. もちろん吹付け後であるからのみ跡は分からないためこの測定はのみ跡に関係なく, 5° 間隔で行う. この断面測定箇所にもっとも近いのみ跡の削孔ロボットデータを, その近傍の断面測定値を用いて線形近似により補正する. このようにして比較的精度よく削孔位置を求めることができる.

吹付け厚は位置により当然多少の差が考えられるが, 実験に先立ち作業員に注意を喚起した上, 検測ピンを用いて設計吹付け厚 5 cm に対し約 6.5 cm となるようにした. さらに, 実験 2 および 3 で各 3 断面ずつ実測した

表-3 1次補正に用いた誤差分布 (単位: mm)

孔番号	ΔX	ΔY	孔番号	ΔX	ΔY
14L	-2	-105	1R	-51	-131
13L	+11	-126	2R	-40	-140
12L	-16	-133	3R	-33	-155
11L	-39	-127	4R	-20	-160
10L	-111	-84	5R	-13	-169
9L	-113	-52	6R	-19	-154
8L	-90	-30			
7L	-70	-18	7R	+110	-95
			8R	-140	-110
6L	-48	-21	9R	-282	-131
5L	-20	-4	10R	-140	-150
4L	-3	+8	11R	+5	0
3L	+54	+11	12R	0	-180
2L	+76	-1	13R	-5	-182
1L	+105	-21	14R	0	-150
0	+112	-31			

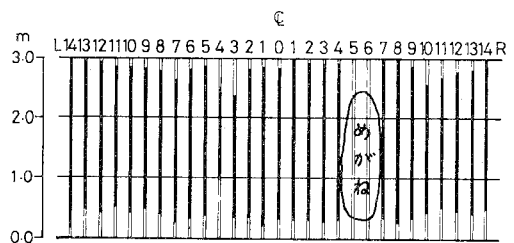


図-4 のみ跡スケッチ

吹付け厚の平均は、実験2では6.3cm、実験3では7.4cmであった。この吹付け厚誤差は他の誤差に比べるとそのオーダーは小さいため無視できる。

(c) 3次補正

2次補正により、のみ跡がある孔に関しては、その位置の推定精度は大幅に向上したが、のみ跡がない孔に関しては1次補正のままであり、その誤差は大きい。のみ跡がない孔に関しては、その断面のデータから補正することは不可能であり、そのため次のように補正を行った。すなわち各孔毎にその実験データ中のみ跡のあるデータのみを用いて2次補正した結果と1次補正との差の平均分だけ、のみ跡のないデータを補正するという考え方である。このようにすれば、のみ跡がない孔に関しても、ある程度の補正を行いうる。

このようにして補正した削孔位置および発破結果の1例を図-5に示す。この場合のみ跡の記録はすでに図-4に示した。のみ跡の記録に表れている『めがね』などもうまく表されていることがわかる。

4. 現場における実験および結果と考察

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。

削孔ロボットの削孔モードは、基本的に①完全自動削孔モード、②半自動削孔モード、③手動削孔モードの3つに分けられる。モード③は従来の削岩機と同じく作業員が経験その他により孔の位置決めを行い削孔する方法である。本研究で用いた削孔ロボットではモード③の場合、マニュアル切り替えとなり削孔位置が記録されない。岩の状態などにより自動削孔が困難な場合このモードを用い、その部分は削孔データが欠落することになる。例えば図-5では、図-3に示された削孔位置のいくつかが記録されていないが、これはこの手動モードで削孔されたためである。またモード②の半自動削孔モードとは、削孔したい位置まで手動でブームを移動、設定した後ロボットを自動削孔に切り換える方法である。これにより削孔位置は切羽上の任意の位置を指定でき、削孔データの採取が可能となる。またSBにおけ

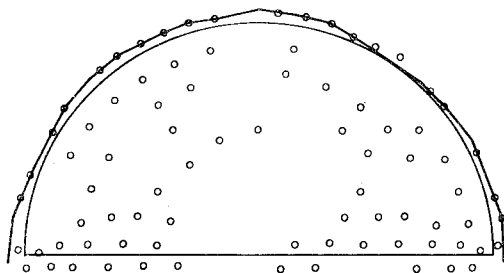


図-5 削孔位置と掘削断面形状

る重要な要因であるさし角の自動設定ができることになる。

(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。この場合発破パターン等は図-3、表-1のとおりであり、さし角は7°に設定されている。この実験1はすでに述べたように、本研究を始める前に行われたものであり、のみ跡の記録はとられていない。

表-4および図-6に実験1において断面測定機による測定により得られた結果を示す。表-4には各断面毎の掘削断面積、余掘面積、余掘率を示す。結果の諸量は計測値から吹き付け厚さを差し引いた実掘削断面から求めている。余掘面積、余掘率が負の値となっているのはその断面では当りの面積が余掘面積より大きいことを意味している。

図-6はこの実験において得られた断面と設計断面とを5°間隔に比較した差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 \bar{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。この例で正規分布曲線から得た当りの個数(Dが負の個数)は194.9個で、実際の実験から得たDが負であった個数は191個であり、

表-4 実験1による掘削結果

STATION	掘削断面積(m ²)	余掘面積(m ²)	余掘率(%)
125+170	46.83	0.17	0.37
125+310	46.99	0.33	0.71
125+415	51.37	4.71	10.10
126+150	47.35	0.69	1.49
126+220	42.21	-4.45	-9.53
126+280	47.20	0.54	1.17
126+300	47.62	0.96	2.06
126+330	48.10	1.44	3.09
126+350	44.54	-2.11	-4.53
126+380	46.80	0.14	0.31
126+405	47.55	0.89	1.91
126+450	46.00	-0.66	-1.41
126+485	46.62	-0.04	-0.08
126+540	49.85	3.20	6.85
126+600	48.11	1.45	3.11
126+630	47.77	1.11	2.39
126+700	46.03	-0.63	-1.34
126+820	46.34	-0.32	-0.68
126+840	47.19	0.53	1.14
126+920	46.85	0.19	0.41
126+940	44.67	-1.99	-4.26
127+145	45.64	-1.01	-2.17
127+311	45.67	-0.98	-2.11
127+333	47.22	0.56	1.20
127+348	46.55	-0.11	-0.23

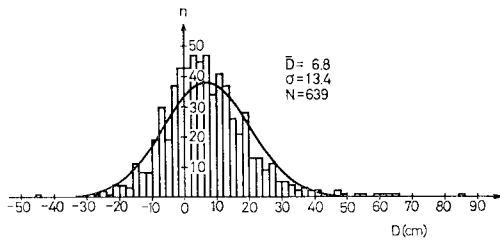


図-6 実験1における掘削断面計測結果のヒストグラム

正規分布と考えて当りや余掘を計算してもほとんど問題のないことがわかる。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 $D < 0$ で示される当りの個数が多い。

このように当りが多くなったのは、すでに述べたように削孔ロボット各部に遊びが生じ、表-2, 3 に示したような誤差が生じ、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(3次補正までを行ったデータ) D のヒストグラムを図-7に、実掘削断面の掘削断面積、余掘面積、余掘率を表-5に、 D のヒストグラムを図-8に示す。図-8より、実験1に比べ \bar{D} は 20.8 cm と大きくなった反面 σ は 10.6 cm 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 6.6% であり、過去の結果¹⁰⁾などから見てもかなり小さい余掘率といえる。

図-7, 8 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。図-8の $D=59$ cm のところに1ヶ所大きな余掘のあることがわかる。これは図-7の $D=55$ cm の削孔の結果であることは明らかである。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-9に実験2による各孔毎のみ跡率の平均値を示す。大部分の孔で平均のみ跡率が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。

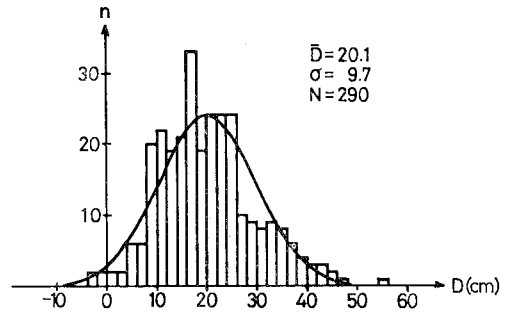


図-7 実験2における削孔結果のヒストグラム

表-5 実験2による掘削結果

STATION	掘削断面積(㎡)	余掘面積(㎡)	余掘率(%)
130+190	48.53	1.87	4.01
130+215	49.23	2.57	5.51
130+240	48.14	1.49	3.18
130+265	48.37	1.72	3.68
130+315	48.77	2.11	4.53
130+340	50.62	3.97	8.50
130+360	50.64	3.99	8.54
130+380	50.21	3.56	7.62
130+407	50.91	4.26	9.12
130+430	51.34	4.69	10.05
130+455	50.39	3.73	8.00
130+480	49.94	3.29	7.04
130+505	49.26	2.60	5.58
全平均	49.72	3.07	6.57

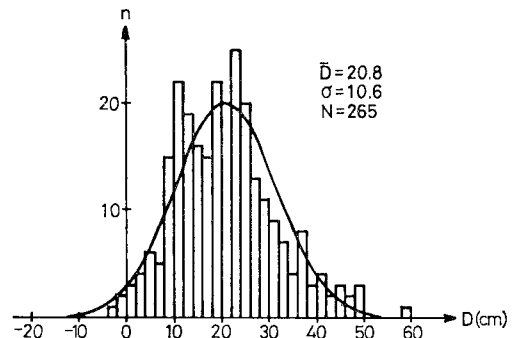


図-8 実験2における掘削断面計測結果のヒストグラム

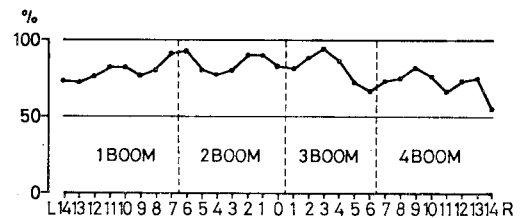


図-9 実験2における各孔平均のみ跡率

このように実験2のSBは、第1段階の観点からは十分成功しているが、 \bar{D} がかなり大きく、また σ もまだ若干大きいので、第2段階のSBの観点からは成功したとは言えない。

(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。その理由は、次のように考えられる。実験2では切羽にスプレーで円を描き、半自動モードで削孔していた。このスプレーで円を描いた場合、その幅が5cm~10cm位あった。また実験1を含む過去の発破で当りがかなり大きく、当り取りに相当時間を要したため、スプレーで描いた円周上に削孔ロボットを位置決めする際に、当りにならないようにという心理が作業者に働き、幅のある円周上の外側に位置決めすることが多いのが実情であった。さらに、円を描く時に原点から巻尺で長さを測るが、その際にも当りが少なくなるように多少半径を大き目にずらしたりする傾向もみられた。

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垢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でより正確な孔の位置決めの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断面における余掘率などの結果を表-6に、削孔および掘削断面のDのヒストグラムを図-10、11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。この実験3

表-6 実験3による掘削結果

STATION	掘削断面積(㎡)	余掘面積(㎡)	余掘率(%)
132+370	48.14	1.49	3.19
132+390	47.60	0.94	2.02
132+415	48.20	1.54	3.31
132+463	47.89	1.23	2.64
132+635	46.87	0.22	0.46
132+683	47.36	0.70	1.50
132+760	45.90	-0.76	-1.62
全 平均	47.42	0.77	1.64
余 掘 平均	47.68	1.02	2.19

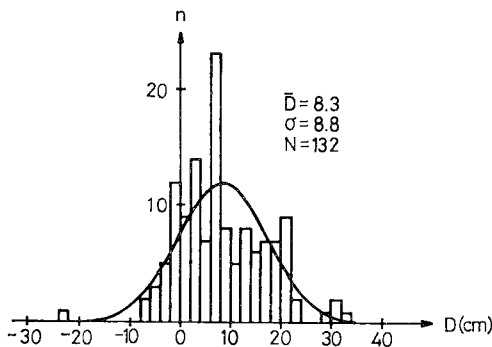


図-10 実験3における削孔結果のヒストグラム

の場合、1ヶ所に明らかな当りがあった。図-10の削孔データのヒストグラムを見れば、 $D=-23\text{cm}$ のところに1ヶ所記録されているのが当りになったものと考えられる。当りの原因は明らかに削孔に問題があったことがわかる。すでに何度も述べているように、硬岩に対しては精度良く削孔することがいかに大切であるかがこの例でもわかる。図-11は当り取りをした後に断面を測定したデータである。表-6より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の結果などと比べても、非常に小さくなっている。

図-12は実験3によるのみ跡率であるが、実験2と同様その率は高く、第1段階のSBはほぼ成功であるといえる。

(4) 各ブーム毎の削孔ロボット特性

(1), (2), (3)では実験1, 2, 3それぞれの結果に関し考察を行ったが、ここでは削孔ロボットのブーム毎の特性について考察を試みる。前述のように本トンネルで用いられた2台の削孔ロボットには、それぞれ左右のブームがあり、周辺孔の削孔には図-13に示すように各ブームが主として側壁部と天端部を分担することになる。1号機の左右、2号機の左右のブームをそれぞれ1~4ブームと名づけ、実験1~3における各ブーム毎の \bar{D} および σ をまとめて表-7に示す。すなわち1, 4ブームは主として側壁部を、2, 3ブームは天端部の削孔を行うことになる。

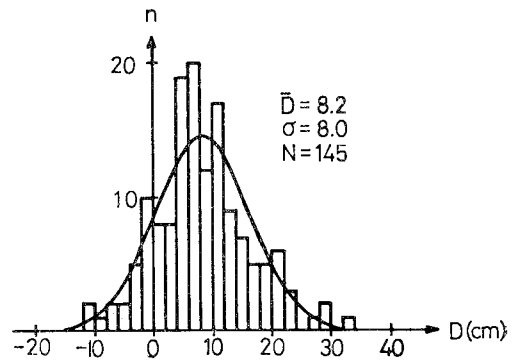


図-11 実験3における掘削断面計測結果のヒストグラム

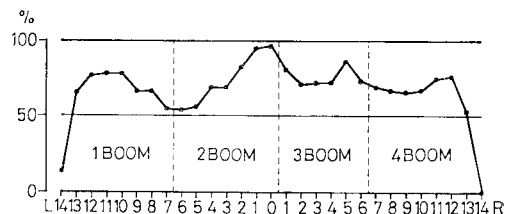


図-12 実験3における各孔平均のみ跡率

この表から次のことが言える。すなわち主として側壁を担当している 1, 4 ブームが 2, 3 ブームより \bar{D} も σ も共に大きい。これは実験 1~3 の全てに共通して言える。しかし 図-9, 12 の結果からすると、のみ跡率に関してはどちらかといえば天端部の方が側壁部より少し良い程度でありほとんど差がない。すなわち第 1 段階の SB についてはブームに関係なく良好な結果が得られており、側壁部の \bar{D} や σ が大きいのは削孔ロボットによる削孔に問題があったことを示している。

削孔ロボットによる削孔を考えた場合、天端部の削孔についてはドリフターやブーム自体の重量が鉛直に作用し、そのためブームを制御するヒンジ等の遊びが常に 1 方向に偏るため、削孔のばらつきが小さくなるのではないかと推測ができる。このことから削孔ロボットを用いた削孔についても削孔ロボットなりの機械のくせのようなものがあり、それを知らずして削孔ロボットに頼りすぎることは問題があるといえる。

(5) 発破結果の分布形

すでに 図-6, 8, 11 に示したように、発破結果と設計断面との差 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-8 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。

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。ただし、図-8 の実験 2 のデータのうち、 $D=59$ cm の極端な 1 データを無視している。実験 1 は 図-6 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、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。

(6) 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、 \bar{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。したがって第 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果を収めたといえる。いま本研究の 1, 2, 3 の実験において σ の値は 13.4, 10.6,

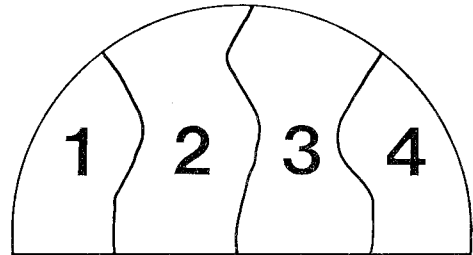


図-13 各ブームの分担削孔領域

表-7 ブームごとの \bar{D} と σ

実験番号	ブーム番号	\bar{D} (cm)	σ (cm)
1	1	11.8	14.2
	2	4.0	9.2
	3	3.7	10.1
	4	7.4	16.6
2	1	23.5	11.1
	2	16.2	8.3
	3	17.1	8.7
	4	24.6	10.5
3	1	11.2	7.2
	2	6.9	6.8
	3	8.3	7.1
	4	6.4	9.2

表-8 実験結果の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	6	194.9	191	妥当でない
2	8	6.5	3	妥当*
3	11	22.0	22	妥当

* $D=59$ cmの1データを無視した結果

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いえる。

(7) 第 3 段階の SB に対する検討

第 3 段階の SB を考える場合、当りと余掘の費用をある程度正確に見積る必要がある。余掘に関する費用は比較の見積りは簡単であるが、当りに関する費用の見積りは難しい。これは現場により、また当りの状況によりその費用が異なることに加え、工期面でのデメリットを費用にどのようにして換算するかの問題がある。現在筆者らはこれらのデータを集積している段階であるがこの見積りは必ずしも容易ではないと思われる。そこで総費用最小化の観点からではなく、別の観点から本研究で行った実験 1, 2, 3 の評価を試みる。

いま、全測定断面のうちある割合の測定点で当りが生じることが許容されるとする。仮に得られた D の分布において作業性等から 16% だけ当りが生じることが許

容されるとする。これは、正規分布において、平均値を中心とし $\pm\sigma$ の領域に面積にして68%が含まれることを利用したものである。このとき、1, 2, 3の実験において \bar{D} が標準偏差 σ と等しい13.4 cm, 10.6 cm, 8.0 cmであれば、当りの確率が16%となる。それに対し、実際の \bar{D} は6.8 cm, 20.8 cm, 8.2 cmである。このことは実験1に関しては \bar{D} が小さすぎ、当りが多すぎたこと、実験2に関しては、実験1で当りが多かったことの反動で、当りを少なくするという作業者の心理が働き、削孔時の各過程で断面を大きくする考えが働き \bar{D} が大きすぎたことと一致し、実験3ではほぼ妥当な結果の得られていることがわかる。

この当りの許容率を決めて設計パターンを求める方法は、非常に簡単な手法ではあるが、今回の実験の結果からはある程度妥当な答を得ることができている。

(8) 第1段階のSBと第2段階のSBとの関係

第2段階のSBの結果

＝第1段階のSBの結果*削孔精度……(1)

で得られると考える。ここに*は何らかの演算である。図-9, 12のみ跡率は第1段階のSBが成功した割合を、図-7, 10は削孔精度を、図-8, 11は第2段階のSBの結果を表している。実験2, 3の平均のみ跡率は77%程度であるが、 \bar{D} , σ は図-7, 8と図-10, 11でほとんど差がない。このことは本研究で対象としたような節理の少ない硬岩に対しては、第1段階のSBに若干の問題があってもその割合は非常にわずかであり、それが全体に及ぼす影響は小さく、SBの成否は削孔精度に大きく依存することを示している。すなわちかに設計パターン通りに削孔するかがSB結果を左右することとなる。

結 論

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行った。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の点からはいずれの実験もほぼ成功であったといえることができる。

(3) 削孔ロボットによる削孔は、削孔ロボットの特性をよく知って行わないと予期した結果を得ることは難しい。特にロボットが過酷な作業のため当初の精度を失うことは十分に考慮する必要がある。また、ブームを動かすためのヒンジなどの位置との関係から、天端部と側壁部の削孔に関し精度面からは大きな差がある。

(4) 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。

(5) 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る。

(6) 与えられた発破設計に対して得られる D の平均値 \bar{D} と標準偏差 σ を用いて第3段階のSBである総費用最小の発破設計を行う。しかし現時点では当りの費用を算出することが難しいため、当りの許容率をあらかじめ与える手法により、第3段階のSBに関し若干の考察を試みた。この手法により、ある程度妥当な削孔パターンを決めることができる。

(7) 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。

以上、本研究で得られた成果を要約した。本研究の着手時期との関係もあり、第1段階のSBには手をつけることができなかった。SBを考える場合、第1, 第2段階のSBを規定する諸要因全てを考慮に入れ、その相互作用の下で各要因を決定する必要があることは言うまでもない。本研究で開発した手法は第1段階のSBの最適手法を求めるためにも若干の修正を加えることでそのまま適用が可能である。これらの件に関しては今後別の現場で試みたいと考えている。

また削孔ロボットに関しても、現状はまだ初期の段階であり、今後その信頼性は大きく向上するものとみられる。その場合トンネル掘削の効果や経済性改善に果たす役割は大きくなるものと期待される。

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、(株)間組志和作業所の瀬戸口博昭主任、山本正明氏には多大な労力をかけた。またデータ整理や作図などで山口大学中尾絵理子技官の助力が大きかった。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 座談会：NATM の不採算性を衝く実態に合った積算を，建設業界，pp. 16～23，1984 年 10 月。
- 2) 官民懇談会：高まる契約・積算改善への気運，建設業界，pp. 26～31，1984 年 8 月。
- 3) たとえば，山口梅太郎・下村弥太郎：スムーズ・ブラスティングに関する研究（第 2 報），工業火薬協会誌，Vol. 30，No. 2，pp. 71～76，1969 年。
- 4) 日本トンネル技術協会：トンネル爆破技術に関する調査研究報告書，pp. 23～42，1981 年。
- 5) 地下構造物ハンドブック 編集委員会：地下構造物ハンドブック，建設産業調査会，4-3，4-5，1983 年。
- 6) 日本トンネル技術協会：トンネル爆破技術指針，p. 101，1982 年。
- 7) 同上，pp. 102～136。
- 8) 工業火薬協会：発破ハンドブック，山海堂，pp. 262～273，1976 年。
- 9) たとえば，中野雅司・南光宣和：スラリー爆破による SB 発破例，工業火薬協会誌，Vol. 39，No. 4，pp. 205～211，1978 年。
- 10) 文献 6)，p. 130。

(1985.7.17・受付)

●ご案内●

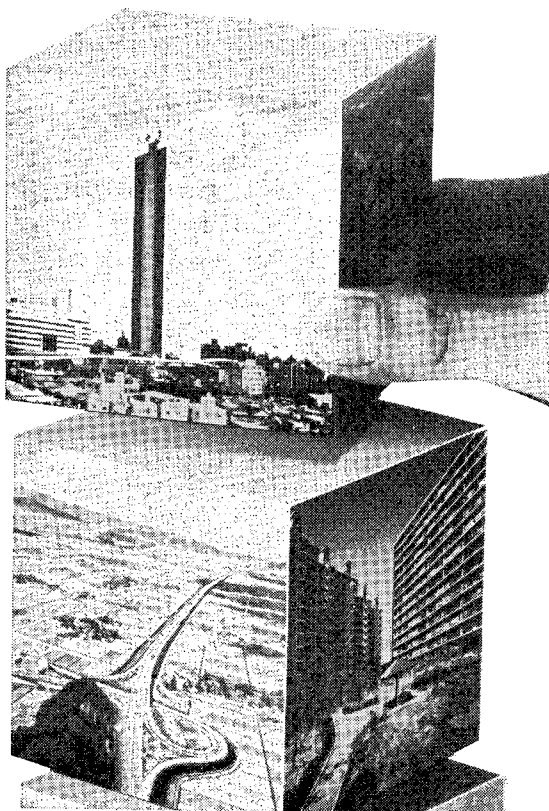
論文集第 6 部門編集小委員会では，情報化施工，海外工事，施工システム，施工マネジメント，技術情報，先端技術，パブリックアクセプタンス（AP），建設労務，契約・積算，建設諸法，などの土木技術や技術開発の論文を募集しております。


さらに，上述のほかにも，工事の企画から調査・設計を経ての積算・施工，あるいは検査・補修技術，品質・コスト・安全・工程などの管理手法や環境・公害対策など，また，新素材や機械に関するもの，そして業的に発展する新技術開発とその商品化など一般のニーズに応える業績を幅広く募集しております。

総合技術力のシミズです。

時代はいま、あらゆる角度から十分に検討された仕事を
建設会社に要求しています。

環境保全、工事の安全性、コスト、視角的な調和。
土木、建築、環境アセスメント、さらに各分野の豊富な技術群、
経験、知識を有機的に結びつけ、時代のニーズに応える——
総合建設会社ならではの仕事を目指すシミズです。





清水建設

本社：東京都中央区京橋2-16-1 千104 ☎(03)535-4111
支店：横浜・名古屋・大阪・広島・高松・福岡・金沢・仙台・札幌