

(74) 節理系岩盤のトンネル発破における スムーズブラスティング

株式会社 間 組 正員 ○井澤幸一

株式会社 間 組 正員 吉見憲一

株式会社 間 組 正員 鈴木雅行

山口大学 工学部 正員 古川浩平

山口大学 工学部 正員 中川浩二

1. まえがき

近年、NATMの採算性悪化がしばしば話題になり、その原因の一つとして掘削時の余掘りが論じられている。そのため、発破による余掘り量を低減し、かつ岩盤をなるべく痛めないスムーズブラスティング（以下SBと称す）工法の必要性が言われている。筆者らはすでに節理の少ない堅硬な岩質におけるSBに関する研究を行い、削孔技術の重要性を指摘している¹⁾。しかし我が国のトンネル掘削において、堅硬な岩盤を対象とすることは必ずしも多くなく、対象岩盤に節理等が多く見られるのが通常である。掘削対象となる岩盤が発達した節理を多く含む場合、SBの効果は少ないと言われている。しかし、このことを証明する実験データは特に見られず、その評価のための資料に乏しいのが実情である。

そこで本研究では節理系岩盤において、実施工中に多くの実験を行い、その実験データを基に節理系岩盤でのトンネル掘削のSBに関し考察を加えたものである。実験は第1段階のSBに関する要因である外周孔の孔間隔、抵抗線距離、薬量を各々3種変化させ、それらがSBに関し与える影響を求めたものである。さらに、節理を表す指標を実験結果から求め、節理の影響に関しても考察を加えた。

2. 本研究の実験環境

2.1 実験トンネルの地質

本研究の実験を行ったトンネルの地質は安山岩溶岩（Ⅰ）および（Ⅱ）が大部分であり、SB実験は節理がより発達している安山岩溶岩（Ⅰ）で行った。この岩は節理間隔は20~30cmで、局部的に開口しているとされている。実際に実験を行った地点においても、ほぼこれらの状況であった。また実験位置で採取した岩石の強度は一軸圧縮強度 309~2180kg/cm² (31.5~222.4 MPa) 平均 869kg/cm² (88.7 MPa)、弾性波速度は 3.1~5.6 km/sec、平均4.6 km/secであった。

2.2 実験に用いた削孔機および計測器

SB研究において重要なのは、入力である削孔パターンと出力である掘削断面形状の正確な把握である。そのため入力に関しては削孔ロボットを用い、削孔パターンを全て記録した。またすでに行った研究¹⁾の結果から、削孔開始位置のマーキングがSB結果に大きく影響を及ぼすため、新たに改良を加えたマーキング装置を用い、精度の向上をはかった。

掘削断面形状の測定にはこれも新たに開発したレーザー光線を用いたトンネル断面自動測定装置を用いた²⁾。この装置は約1度間隔に一断面を約3分で自動的に測定できる。

本研究は節理系岩盤を対象とするため、節理を何らかの形で測定する必要がある。しかし節理を測定する効果的な手法は今のところなく、また小さな節理は測定できないこと、切羽での節理の測定は可能であるが、SB結果に影響を及ぼすのは切羽からはうかがえないその先の節理であることなどの理由により、今回節理に関する測定は行わず、得られた結果から節理の影響を解析することとした。

2.3 外周孔の孔間隔(E)、抵抗線距離(V)、薬量(W)

本実験を行う前にこの現場で行われてきた発破は、外周孔の孔間隔60cm、抵抗線距離60cm、外周孔1孔当たり0.5kgの2号榎ダイナマイトを用いたものであった。外周孔のさし角は7度であった。この発破結果はのみ跡がほとんど残っておらず、余掘りや当りが若干大きかった。この結果を考慮して、本研究においては次のように考えた。

(1) 孔間隔(E)

孔間隔は小さい程SB
結果は良好になると考え
られるが、削孔数が多く
なり、時間及びコスト面
で問題が生じる。この実
験を行う前の発破結果で
はのみ跡がほとんど残っ
ていないこと、余掘りが
少し大きいと考えられた
ことから、E=60cmがこ
の岩盤では最大と考えら
れた。そのため本実験で
はE=40,50,60cmの3種
を用いることとした。

(2) 抵抗線距離 (V)

Vとして従来多く用いられてきたの
はE/V=0.8であった。そこでE
=50cmに対するE/Vの値をほぼこの
0.8にすることとし、それらからV
=55,65,75cmの3種とした。

(3) 薬量 (W)

本実験を始める前にこの現場で用い
ていた各数値を基に、外周孔のm³当り
の火薬量を求めると、約0.8kg/m³であ
った。本研究ではこの値を基本にして、
外周孔の薬量Wを決定した。外周孔以
外の装薬量については、実験前の薬量
と同じ約1.0kg/m³を用いる。

本実験前の発破ではすべて起砕でき、
かつ、のみ跡がほとんど残らず、余掘
りや当りも若干大きかった。これらの
ことを考えると、2号櫃による外周孔
の単位薬量 0.8kg/m³ は十分大きい数
値と考えられた。本実験においては外
周孔には2号櫃でなくスラリー爆薬を
用いるので、その威力の差を 10%程度
と考えて、単位薬量0.88kg/m³を基本
とし、実験においてはこれを100%,85%,70%の3種に変化させることとした。

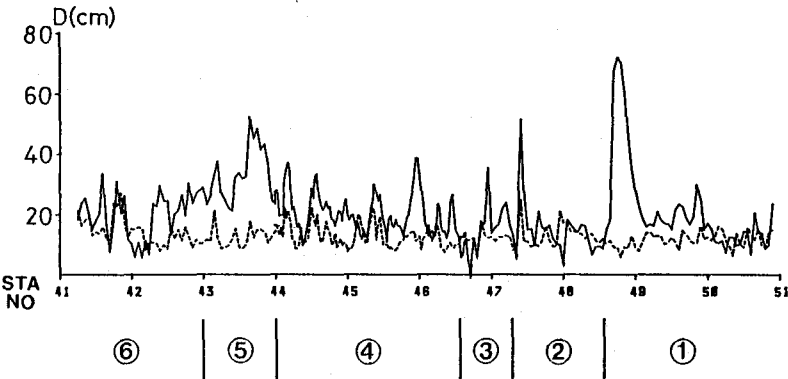


図-1 断面測定結果

表-1 各領域毎のデータ

領 域	⑥	⑤	④	③	②	①
実 験	実	験 後	実験中	実	験	前
設計半径	R=4.6				4.9	4.45
岩 質	(I I)	安山岩溶岩 (I)				(II)
Dの平均	19.8	32.6	19.8	15.4	14.7	21.8
σの平均	14.0	12.2	12.6	12.0	12.5	11.4
断面数	36	21	107	12	29	45

表-2 各サイクルにおけるデータ

サイ クル	E (cm)	V (cm)	W (%)	D (cm)	σ (cm)	のみ跡率 (%)	余掘面積 (㎡)	当り面積 (㎡)
1	60	65	100	14.2	12.1	13	2.20	0.153
2	50	75	100	13.1	10.0	43	0.95	0.034
3	60	75	100	12.1	9.0	33	0.05	0.037
4	60	75	100	13.3	9.9	11	0.03	0.017
5	60	75	85	11.9	3.3	22	0.94	0.022
6	50	65	85	12.3	3.6	29	0.05	0.022
7	50	65	100	11.4	5.5	5	0.08	0.034
8	50	75	85	12.1	4.5	1	0.14	0.071
9	50	75	85	11.6	8.7	1	0.44	0.011
10	50	75	70	12.4	5.0	1	0.39	0.022
11	50	75	70	11.4	5.8	1	0.44	0.022
12	50	75	70	12.3	3.3	3	0.02	0.022
13	40	65	100	11.7	4.7	1	0.35	0.017
14	40	65	85	11.4	7.7	1	0.55	0.054
15	40	65	100	12.4	3.8	1	0.33	0.022
16	40	65	100	11.5	3.7	1	0.33	0.022
17	40	65	100	12.2	5.5	1	0.33	0.022
18	40	65	100	11.9	5.0	1	0.33	0.022
19	40	65	100	11.9	5.0	1	0.33	0.022
20	40	65	100	11.9	5.0	1	0.33	0.022
21	40	65	100	11.9	5.0	1	0.33	0.022
22	40	65	100	11.9	5.0	1	0.33	0.022
23	40	65	100	11.9	5.0	1	0.33	0.022
24	40	65	100	11.9	5.0	1	0.33	0.022
25	40	65	100	11.9	5.0	1	0.33	0.022
26	40	65	100	11.9	5.0	1	0.33	0.022
27	40	65	100	11.9	5.0	1	0.33	0.022

3. 実験結果および考察

図-1に実験前後も含めて発破後の断面を測定した結果を示す。この測定は実験中は50cm毎、実験前後は1m 毎に行った。図中実線は各断面毎に中心からの距離と設計断面との差Dの1断面の平均Dを表し、破線はDの標準偏差σを表している。縦軸はDであり、横軸はSTA.NO. を示している。この図から、非常にDが大きく余掘りが大きいと思われる断面や、逆にDが小さくて当りが多いと見られる断面が存在する。

表-1に、図-1に示した①～⑥区間の設計半径 R 、岩質、 D 、 σ の平均、測定断面数を示す。これを見ると実験終了直後の領域⑤の安山岩溶岩(I)で D の平均が大きくなっていること、実験直前の領域②③で D が小さくなり、特にダム軸部の領域②では R が大きくなっているにもかかわらず、 D が小さくなっており、実験前にはかなり当りが多かったことと符合している。その他の領域はほぼ $D=20\text{cm}$ 程度である。また図-1を見ても分かるように全領域を通じて、 σ の変動は小さい。これは表-1に見られるように安山岩溶岩(I)(II)にかかわらずほぼ同様な岩質であったことの1つの表れであろう。

表-2に実験を行った27サイクルの掘進における E 、 V 、 W 、 D 、 σ 、のみ跡率、余掘面積(Y)、当り部面積(A)を示す。これらはいずれも、各サイクルで数断面測定したものの平均値である。単位薬量を実験前の70%に減少させた発破(W の欄に70と示す)であってもほとんど問題なく破碎されていた。従来から言われているようにこのトンネル掘削においても過装薬気味であったことがわかる。

表-3に表-2で示した D 、 σ 、のみ跡率、余掘面積(Y)、当り部面積(A)を目的変数とし、この目的変数を左右する3個のアイテムである E 、 V 、 W に対する相関係数を数量化理論I類により求めた結果を示す。数量化理論I類では相関係数の絶対値しか求められないため、別途、 E 、 V 、 W と目的変数である D 、 σ 、 Y 、 A との相関図を描き、これらからも相関係数を求めた。その結果得られた相関係数の絶対値は表-3とほとんど等しいため、表-3には別途得られた相関係数の符号をつけて表している。表-3から E が大きくなれば D と余掘面積が小さくなり当り部面積が増加すること、 W が大きくなると D 、余掘面積が増加し、当り部面積が減少することがわかる。それに比べ V の影響は小さく、定性的な特徴は見られない。また、のみ跡率はいずれの要因に対してもほとんど関係がないことがわかる。

このように、 E 、 V 、 W の3要因のみを考えた場合、いずれの要因も目的変数との相関が小さく、これだけでは現象を十分に説明し得ないことがわかる。実験を行った岩盤では節理が発達しており、この影響を何らかの形で取り入れない限り、この実験結果をうまく説明できないことは明らかである。

図-2に50cm毎に連続して測定した断面形状の一部を示す。縦軸は D であり、横軸は中心からの角度である。

表-3 数量化理論I類による解析結果

目的変数	E	V	W	S	重相関係数
D	-0.259	-0.119	0.402	0.489	0.5847
σ	-0.081	-0.300	0.094	0.698	0.7422
のみ跡率	0.197	0.081	0.190	-0.061	0.3124
Y	-0.244	-0.125	0.399	0.492	0.5841
A	0.348	-0.320	-0.289	-0.053	0.5842

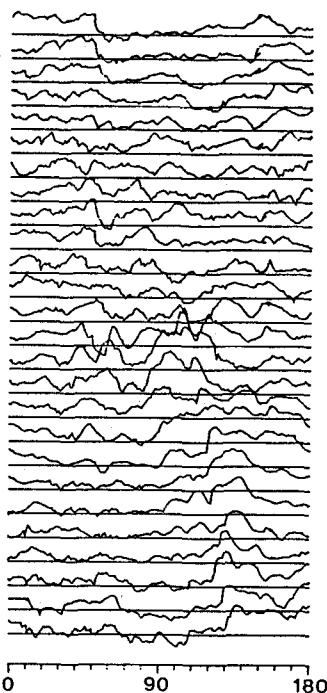


図-2 連続的な断面形状の一部

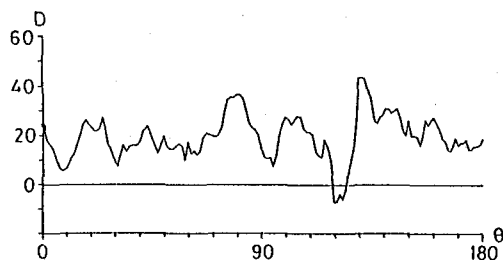


図-3 小規模な節理のある断面形状の一例

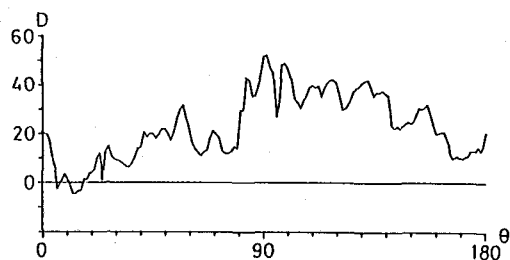


図-4 大規模な節理のある断面形状の一例

る。この図を見て明らかなように、かなり大きな節理の存在によって、余掘や当りの状況が左右されていることがわかる。これらの断面形状の代表的なものを図-3、図-4に示す。図-3は各種の要因により凹凸はあるものの、ほぼ設計半径から20cm程度の余掘りとなっている。それに対して図-4は、左側はDが小さく逆に右側はDが大きく、全体として大きく波があることがわかる。これはかなり大規模な節理が影響を及ぼしているものと考えられる。そこでこの要因をより明確にするため、図-3、4の断面形状データを波動と考えて、そのパワースペクトル及び自己相関関数を求めたものを図-5、6に示す。

図-5のパワースペクトルはかなり高振動数領域にまでピークがあり、また自己相関関数も波打っているため、かなり小さな波が繰り返していることがわかる。それに対して図-6のパワースペクトルは低振動数領域に大きなピークがあるだけであり、自己相関関数も波打っていない。これらから図-3では小規模な節理が、図-4では大規模な節理が発達していることがわかる。そこで節理の評価法の1つとして図-5、6に示すような自己相関関数が0点を切る点までの距離をもって節理を表す指標(S)とする。

すでに表-3に目的変数であるD、 σ 、のみ跡率、Y、AとSとの相関係数を示した。D、 σ 、Yに対する相関係数はいずれもE、V、Wより大きく、節理の影響はかなり大きいことがわかる。節理を表す指標Sが大きくなるとD、 σ 、Yが大きくなり、実験中に大きな節理により岩盤が大きく砕れていた事実を考え合わせると節理の影響をある程度表していると考えられる。

E、V、W、Sの4要因を考慮しても重相関係数はのみ跡率を除いて0.58~0.75と余り大きいとは言えない。これはSだけでは節理の影響を表現するには十分でないことを示している。すでに述べたように、工期の制約や技術的な問題から節理間隔や節理の幅、単位面積当りの節理の長さなどを測定していなかったが、これらの情報があれば、より現象を正確に表現できるものと考えられる。

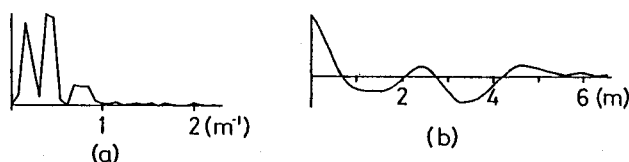


図-5 図-3のパワースペクトル(a)と自己相関関数(b)

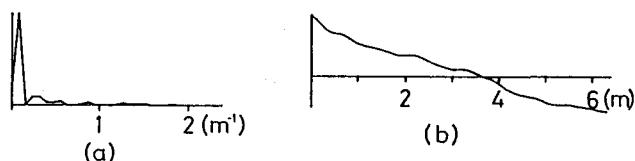


図-6 図-4のパワースペクトル(a)と自己相関関数(b)

4. あとがき

本研究は節理系岩盤に対して、実施工 現場で実験を行い、節理系岩盤におけるSBの効果を論じたものである。本研究の結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 外周孔の孔間隔(E)、抵抗線距離(V)、薬量(W)を各々3種設定し、計27ケースで実験を行った結果、3要因の中ではVの影響が最も小さいこと、Wの影響が大きいことが明らかになった。しかしこれら3要因とも発破結果に及ぼす影響は小さく、どの値を用いても、発破結果にそれ程大きな差がないことが明らかになった。
- (2) 発破結果の断面形状測定データより自己相関関数を求め、それが0点を切る位置までの距離をもって節理の発達を示す指標(S)とした。このSと目的変数であるD、 σ 、Yとの相関はすでに述べたE、V、Wとの相関より大きく節理系岩盤においては節理の影響が最も大きいことが明らかになった。
- (3) 外周孔の m^3 当りの単位薬量を実験前の70%にまで低減して発破を行ったがいずれも破碎でき、一般にかなりの程度まで薬量を減少できることが明らかになった。

参考文献

- 1) 中川浩二、古川浩平、鈴木宏平、吉見憲一：削孔ロボットを用いた硬岩トンネルのスミーズプラスチックに関する研究、土木学会論文集、第367号/VI-4、pp.52-61、1986年3月
- 2) 間組土木技術部・機電部：トンネル内空断面測定器 トンネル断面の高速測定・データ処理が可能、はざま、第428号、pp.24-25、1985年12月

(74) SMOOTH BLASTING FOR TUNNELLING IN JOINTED HARD ROCK

Koichi Izawa *
Ken-ichi Yoshimi *
Masayuki Suzuki *
Kohei Furukawa **
Koji Nakagawa **

Abstract

In this study, the applicability of smooth blasting for tunnelling in jointed rock was discussed with reference to the field measurements. In the field test, spacing, burden and specific charge were varied in three levels individually. The test result was evaluated according to the over and under break and the drill hole contour ratio.

The tests showed that the variations of spacing and burden give little effect on the smooth blasting results and the smaller specific charge gives a little better result than larger one. The tests also showed that the joint structure has a great influence on the blasting results.

* Hazamagumi Ltd.

** Yamaguchi University