

節理系岩盤のトンネル掘削におけるスムーズ ブ拉斯ティング効果の検討

STUDY OF SMOOTH BLASTING EFFECTS ON TUNNELLING IN JOINTED HARD ROCK

吉見憲一*・古川浩平**・井澤幸一***・中川浩二****
*By Ken-ichi YOSHIMI, Kohei FURUKAWA, Koichi IZAWA
 and Koji NAKAGAWA*

In this study, the applicability of smooth blasting for tunnelling in jointed hard rock was discussed with reference to the field measurements. In the field test, spacing, burden and specific charge were varied into three levels individually and 27 cases of smooth blasting tests were carried out. The test results were evaluated according to the over-break and under-break and the drill hole contour ratio.

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

Keywords : smooth blasting, tunnelling, jointed hard rock, field test

1. まえがき

近年、ロックボルトと吹付けコンクリートを主体とするトンネル工法が一般的になってきているが、この品質面、コスト面などにおいてスムーズブ拉斯ティング（以下SBとよぶ）の重要性が特に話題となっている。これに関し、著者らはすでに節理の少ない堅硬な岩盤における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⁾。また、SB孔設計の最適化を行うことによって、かなりのコスト削減が行えることも示した²⁾。

しかしながら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、対象岩盤が節理等を多く含むのが通常である。掘削対象となる岩盤が発達した節理を多く含む場合は、そうでない場合と比較してSBの効果は少ないと考えられるが、このことを証明する実験データは特にみられず、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、トンネル掘削の実施工中に多くの実験を行い、その実測データをもとに節理系岩盤でのSBに関し検討を加えたものである。実験は第1段階のSB³⁾に関する要因である外周孔の孔間隔、抵抗線距離、薬量をおのおの3種変化させた計27種の発破パターンで行い、それらがSBに与える影響を検討した。さらに、節理を表わす指標を実験結果から求め、節理の影響に関する考察を加えた。

2. 本研究の実験環境および実験項目

(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。この岩の節理間隔は20~30cmで、局部的に開口しているとされている³⁾。実際に実験を行った地点においても、ほぼ同じ状況であった。また採取した岩石の一軸圧縮強度309~2180kg/cm²(31.5~222.4MPa)、平均869kg/cm²(88.7MPa)、弾性波速度は3.1~5.6km/s、平均4.6km/sであった。

(2) 実験に用いた削孔機および計測器

SB研究においてまず重要なのは、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。

* 正会員 (株) 間組土木本部設計部 課長
 (〒107 港区北青山 2-5-8)

** 正会員 工博 山口大学助教授 工学部土木工学科
 (〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

*** 正会員 (株) 間組仙台支店 月山トンネル作業所 工事主任
 (〒997-05 山形県東田川郡朝日村大字大網字土倉 19)

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

特に本研究のように第1段階のSB¹⁾を対象とする場合、各サイクルごとに異なる削孔パターンで発破することになる。ところがこの作業は非常に複雑で、実施工の中でこれを精度よく行うことは实际上不可能に近い。SB研究の必要性が高く叫ばれながら、従来系統的な研究がほとんど行われなかった原因の主たるもののがこの点にあったといえる。

そのため本研究においては、削孔ロボット（マツダ、システムAD）を用い、各サイクルごとに異なる削孔パターンを用いても、これに対処できるようにした。また同時に削孔パターンをすべて記録した。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ことが知られている。そこで新たに改良を加えたマーキング装置を用い、正確なSB孔削孔位置のマーキングを行うことにより削孔精度の向上をはかった。

掘削断面形状の測定については、これも新たに開発したレーザー光線を用いたトンネル内空断面自動測定装置を用いた⁴⁾。この装置は約1度間隔に一断面を約3分で自動的に計測できる。

(3) 節理に関する測定

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SB結果に与える節理の影響を評価する合理的な方法はいまのところ確立されておらず、また節理を測定する効果的な手法もみられない。

切羽での節理の観察は可能であるが、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。すでに掘削した側壁部の節理を測定することは可能であるが、節理系岩盤では安全面から掘削終了後すぐに1次吹付けをするため、測定に要する時間的余裕がほとんどなく、これも事実上不可能である。また、切羽などの立体写真から切羽の奥の節理の状況を読み取ることは可能であるが、写真ができるまでの時間が実施工のサイクルに間に合わない。また今のところこの方法は高価であり、本研究のように27断面にわたってこの測定を行うと膨大な費用がかかることが予想される。これらの理由により、今回節理に関する厳密な測定は行わず、以下に述べる方法と得られた結果から節理の影響を解析することとした。

節理の状況をできる限り把握するため、実験中の各サイクルごとに切羽の写真をとると同時に、そのときの現場担当者が切羽をみてその凹凸および節理間隔を表-1に示す3段階で評価した。後日、実験責任者がそれらをまとめて総合的に切羽での凹凸および節理間隔を3段階で再評価した。本来、実験責任者が全サイクルに立ち合うことが望ましいが、昼夜を問わずに実施される全サイク

表-1 切羽での岩盤状況の評価

	1	2	3
切羽の凹凸	小さい(平滑)	中程度	大きくてゴツゴツしている
節理間隔	小(10cm以下)	中(10cm~30cm)	大(30cm以上)

ルに立ち合うことは実質上難しいため、このような方法をとった。むろん実験が始まった段階で実験を分担する現場担当者と実験責任者とが同一の切羽を観測し、評価が同じになるようなり合わせは行っている。

(4) 外周孔の孔間隔(E), 抵抗線距離(V), 薬量(W)

第1段階のSBを成功させるための人為的な要因としては、外周孔の孔間隔(E), 外周孔の前発破列に対する抵抗線距離(V), 薬量(W)のほかに削孔の精度、用いる爆薬の種類、前発破列でもSBを行うかどうか、などが考えられる。ここでは一般的なSBを基準にして考え、SB孔列は1列とし、爆薬は親ダイに2号榎、増ダイにSB用スラリー爆薬を用いた。削孔は前述のとおり削孔ロボットとマーキング装置を用いて注意深くを行い、E, V, Wのみ変化させてそのSB結果に与える影響を検討した。

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。ま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、本研究における孔間隔、抵抗線距離、薬量を次のように考えた。

a) 孔間隔(E)

孔間隔Eが小さいほどSB結果は良好になるとを考えられるが、削孔数が多くなり、時間およ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、余掘りが少し大きくなり、当りもかなりあったことから、E=60cmがこの岩盤では最大の孔間隔と考えられた。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。

b) 抵抗線距離(V)

抵抗線距離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⁵⁾。そこでEの中間値であるE=50cmとVの中間値に対するE/Vの値をほぼこの0.8にすることとし、V=55, 65, 75cmの3種を採用した。そのため実験でのE/Vは0.53~1.09の値となる。

c) 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もとに、外周孔のm³当たりの火薬量を求めると、2号榎ダイナマイト約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1.1

kg/m^3 を用いる。

本実験前の発破ではすべて起碎でき、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号榎による外周孔の単位薬量 0.8 kg/m^3 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号榎では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 0.88 kg/m^3 を基本とした。

上述のように単位薬量としてはこれで十分と考えられたため、実験においては単位薬量 0.88 kg/m^3 を100%，85%，70%の3種に変化させることとした。これは単位薬量をあまり大きく減少させると、起碎不能となる可能性があり、その場合、作業員による抵抗を考えたものである。実際の発破においては、スラリー爆薬を小分けする作業を考慮し、表-2に示すような50g単位に丸めた数字を用いた。また親ダイとして2号榎を用いているため、表-2に示す薬量中100gは2号榎となっている。図-1および表-3に $E=50 \text{ cm}$, $V=65 \text{ cm}$, $W=100\%$ とした場合の発破パターンおよび発破諸元を示す。

3. 実験結果および考察

図-2に示すように、中心から実掘削面までの距離を1°間隔で計測し、それから設計半径を差し引いた余掘り（当り）深さ D を統計量としてとらえ、以下、考察する。

図-3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。実験前の発破条件はすでに2.(4)で述べたとおりであり、実験後の発破条件は外周孔以外は実験前と同じで、外周孔は $E=50 \text{ cm}$, $V=55 \text{ cm}$ とし、 $W=300 \text{ g}$ のスラリー爆薬を用いた。この測定はトンネル軸に沿って実験中は50cmごと、実験前後は1mごとに行った。図の横軸はSTA NOを示している。図中実線は余掘り（当り）深さ D の各断面ごとの平均値 \bar{D} を表わしている。すなわち、各断面ごとの平均余掘り深さを示している。また破線は D の標準偏差 σ であり、各断面の凹凸状況を表わしている。この図から、非常に \bar{D} が大きく余掘りが大きいと思われる断面や、逆に \bar{D} が小さく当りが多いとみられる断面が存在することがわかる。

表-2 各ケースの使用薬量
(単位:g)

	V	E	0.4	0.5	0.6
100%	0.55	350	450	500	500
	0.65	400	500	600	
	0.75	500	600	700	
85%	0.55	300	350	450	
	0.65	350	450	550	
	0.75	400	500	600	
70%	0.55	250	300	350	
	0.65	300	350	450	
	0.75	350	400	500	

表-4に、図-3に示した①～⑥区間の設計半径 R 、岩質、 \bar{D} の平均、 σ の平均、平均余掘面積、平均当り面積、測定断面数を示す。これをみると

- 実験終了直後の領域⑤の安山岩溶岩(I)で \bar{D} が大きくなっていること
- 実験直前の領域②、③で \bar{D} が小さくなり、領域②では設計半径が大きくなっているにもかかわ

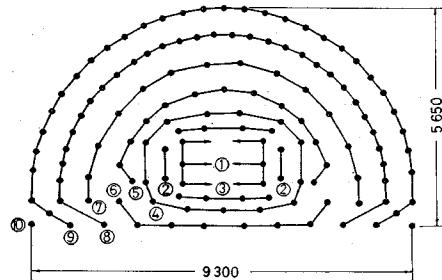


図-1 本研究で用いた発破パターン

表-3 発破の諸元 ($W=0.5 \text{ kg}$ の場合)

1. 岩質	: 安山岩溶岩(I)
2. 弾性波速度	: 4.0 km/s
3. 断面積	: 43.3 m^2
4. 挖進長	: 1.8 m
5. 前孔長	: 2.0 m
6. ピットゲージ	: $41.0 \text{ mm}\phi$
7. 爆薬種別	: 2号榎ダイナマイト (30mm ϕ , 100g) S.B用スラリー爆薬 (25mm ϕ , 150g)
8. 破碎量	: 77.84 m^3
9. 1m ³ 当りの爆薬量	: 1.10 kg/m^3
10. 1m ³ 当りの孔数	: 3.07 孔/m^3

段数	孔数	1孔当装薬量	装薬量 (kg)
1	6	1.0	6.0
2	8	0.8	6.4
3	4	1.0	4.0
	8	0.6	4.8
4	5	0.7	3.5
5	13	0.6	7.8
6	2	0.6	1.2
	6	0.8	4.8
7	14	0.6	8.4
8	30	0.6	18.0
	2	0.8	1.6
	29	0.5	14.5
9	2	0.6	1.2
	2	0.8	1.6
10	2	0.8	1.6
計	133		85.4

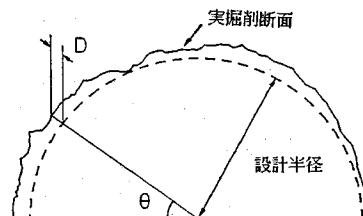


図-2 実験における測定方法と余掘り深さ D の定義

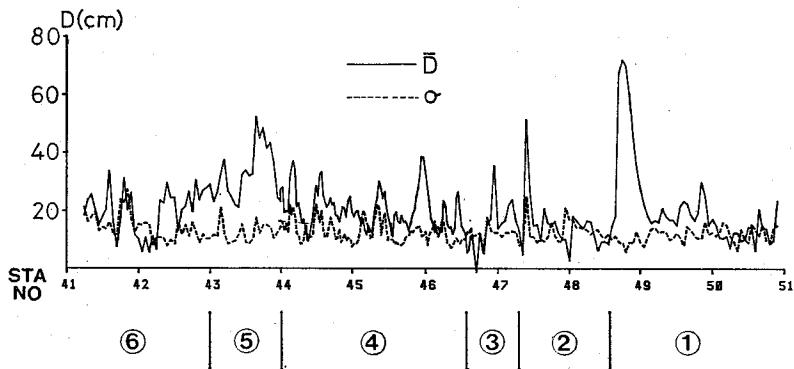


図-3 実験前後を含む断面測定結果

表-4 各領域ごとのデータ

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)	安山岩溶岩 (I)	(II)	(I)		
Dの平均(cm)	19.6	32.6	19.8	15.4	14.7	21.8
σ の平均(cm)	14.1	12.2	12.6	12.0	12.5	11.4
平均余掘面積(m ²)	2.87	4.72	2.91	2.36	2.42	3.14
平均当り面積(m ²)	0.144	0.018	0.054	0.138	0.162	0.081
計測断面数	35	21	107	12	29	45

らぎ最も \bar{D} が小さくなっていること

iii) 領域①の STA NO 付近で \bar{D} が大きくなっていること

が目につく。その他の領域はほぼ $\bar{D}=20 \text{ cm}$ 程度である。また図-3をみてもわかるように全領域を通じて、 σ の変動は小さい。これは部分的には変動があるが全体としてみれば安山岩溶岩 (I), (II) にかかわらず発破効果からみてほぼ同じような岩質であったことの1つの現われであろう。

i) の実験終了直後の領域⑥で \bar{D} が大きくなっている理由は、その前後で岩種は同じ安山岩溶岩 (I) ではあるが、この部分はかなり岩が悪く切羽ごとに岩が変化したうえ、節理が発達していたためと思われる。さらに実験中はほとんどみられなかった湧水も多少みられた。また、実験中はマーキング、削孔など厳しい管理下で厳密に施工を行っていたが、実験終了後は作業員の判断で自由にこれらを行わせたこと、そのため作業員が削孔を当りに対して安全側(余掘り側)に行ったことが考えられる。このことは当りがこの区間で著しく少なくなっていることから認められる。

ii) の領域②, ③での \bar{D} が小さい理由は、かなりの当りが発生したためと考えられる。これは2次覆工に際してかなりの当り取りを行った事実があり、このことは表-4の平均当り面積に示すように、実験中(領域④)の1サイクルの平均当り面積 0.054 m^2 に対して、この間では平均 0.162 および 0.138 m^2 もあったことからも

表-5 各サイクルにおけるデータ

サイクル	E(cm)	V(cm)	W(m ²)	D(cm)	σ (cm)	のみ跡率(%)	余掘面積(m ²)	当り面積(m ²)
1	6.0	5.5	1.00	14.2	12.0	13.0	2.0	0.153
2	5.5	7.5	1.00	13.5	10.9	14.3	0.5	0.034
3	6.0	7.5	1.00	12.1	10.0	13.3	0.5	0.034
4	5.5	7.5	1.00	13.1	11.3	14.0	0.9	0.034
5	5.5	7.5	1.00	14.5	11.1	14.8	0.9	0.034
6	5.5	7.5	1.00	14.5	11.1	14.8	0.9	0.034
7	5.5	7.5	1.00	14.5	11.1	14.8	0.9	0.034
8	5.5	7.5	1.00	14.5	11.1	14.8	0.9	0.034
9	5.5	7.5	1.00	14.5	11.1	14.8	0.9	0.034
10	5.5	7.5	1.00	14.5	11.1	14.8	0.9	0.034
11	5.5	7.5	1.00	14.5	11.1	14.8	0.9	0.034
12	5.5	7.5	1.00	14.5	11.1	14.8	0.9	0.034
13	5.5	7.5	1.00	14.5	11.1	14.8	0.9	0.034
14	5.5	7.5	1.00	14.5	11.1	14.8	0.9	0.034
15	5.5	7.5	1.00	14.5	11.1	14.8	0.9	0.034
16	5.5	7.5	1.00	14.5	11.1	14.8	0.9	0.034
17	5.5	7.5	1.00	14.5	11.1	14.8	0.9	0.034
18	5.5	7.5	1.00	14.5	11.1	14.8	0.9	0.034
19	5.5	7.5	1.00	14.5	11.1	14.8	0.9	0.034
20	5.5	7.5	1.00	14.5	11.1	14.8	0.9	0.034
21	5.5	7.5	1.00	14.5	11.1	14.8	0.9	0.034
22	5.5	7.5	1.00	14.5	11.1	14.8	0.9	0.034
23	5.5	7.5	1.00	14.5	11.1	14.8	0.9	0.034
24	5.5	7.5	1.00	14.5	11.1	14.8	0.9	0.034
25	5.5	7.5	1.00	14.5	11.1	14.8	0.9	0.034
26	5.5	7.5	1.00	14.5	11.1	14.8	0.9	0.034
27	5.5	7.5	1.00	14.5	11.1	14.8	0.9	0.034

確認できる。

iii) の理由はトンネル拡幅部に移行するため、トンネル拡幅部の手前 6 m から順次拡幅を行ったためと考えられる。トンネル拡幅部では削孔パターンやさし角が削孔ごとに変化し、非常に複雑となる。その結果この部分のみ極端に余掘りが大きくなつたものと考えられる。

表-5 に実験を行った 27 サイクルの掘進における E , V , W , 実験結果の測定から得られた \bar{D} , σ , のみ跡率, 余掘面積, 当り面積を示す。これらはいずれも、各サイクルごとに 50 cm 間隔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起碎されていた。このことから従来からいわれているようにこのトンネル掘削においても実験前は過装薬気味であったことがわかる。

本実験においては過去に別のトンネルで行った実験^{1), 2)}で用いたのと同じ削孔ロボットと、改良を加えたマーキング装置を用い、著者らの SB に関する過去の経験を最大限活用した発破を行ったが、実験中ののみ跡率の平均は表-5 に示すように約 22% であった。これは実験前と比べると明らかに高いのみ跡率であるが、著者らがすでに得ている実験結果^{1), 2)}ののみ跡率 $70\sim80\%$

と比べると非常に小さい。上述のように人為的な条件は変わらないとすると、実験対象の岩盤の相違がこの実験結果に現われていると考えられる。

一般に成功した SB においては、トンネル軸方向の断面形状は図-4 に示すようにほぼ削孔したとおりにさし角に支配されて掘削されることが明らかにされている²⁾。図-4 中の破線は 50 cm ごとに断面を測定した箇所を示す。本研究で行った実験において、図-4 に示す実切羽から測定箇所までの距離 (Z) を横軸に、設計半径と実掘削半径との差の平均 (\bar{D}) を縦軸にとり各断面の値をプロットしたものを図-5 に示す。この Z と \bar{D} の相関係数は -0.046 であり、相関はないものと考えられる。もし、著者らの過去の研究^{1), 2)} のように削孔されたとおりに掘削されるなら、相関係数は 1 に近くなるはずである。したがってこの両実験の差は明らかに岩盤の違いに起因するものと考えられる。

このように本実験においては全体的にのみ跡率は低く、第1段階の SB を成功させるための E , V , W に関する情報は不明確である。特に節理系の岩盤では SB 結果に対してここで取り上げた E , V , W のみならず、節理の影響が大きくなることは予想されるところである。

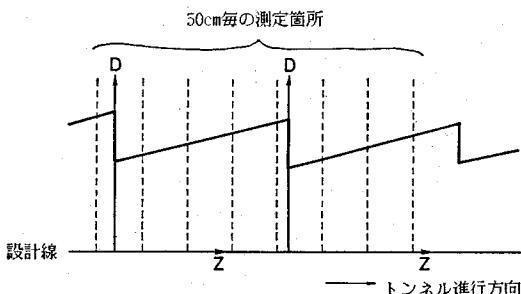


図-4 成功した SB におけるトンネル軸方向の断面形状

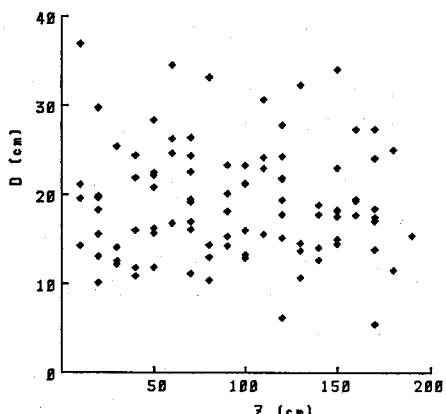


図-5 実切羽からの距離 (Z) と平均余掘り深さ (\bar{D}) との関係

表-6 数量化理論 I 類による解析結果

目的変数	E	V	W	重相関係数
\bar{D}	0.280	0.124	0.429	0.5169
のみ跡率	0.188	0.068	0.196	0.2853
余掘面積	0.243	0.136	0.427	0.5094
当り面積	0.357	0.316	0.310	0.5688

が、トンネルを実掘削するに際して E , V , W がどのような影響をもつかを把握するのは有意であると考えられる。

以上のことから表-5 で示した \bar{D} , のみ跡率, 余掘面積, 当り面積を目的変数とし, この目的変数が 3 個のアイテムである E , V , W に左右されると考え, E , V , W に対する相関係数を量化理論 I 類により求めた結果を表-6 に示す。

表-6 によると \bar{D} に関しては薬量 W の相関係数が孔間隔 E , 抵抗線距離 V に比べて大きく, 薬量を増せば \bar{D} が大きくなることを示している。この傾向は当然のことながら余掘面積にも明確に現われている。またのみ跡率については E , V , W とも相関係数は小さく, これらの値を変化させてもほとんど差がない。特に薬量 W を変化させたときのみ跡率に変化がなく, 余掘面積は影響を受けるというの, SB による最終破断面が孔間をつなぐクラックでなく, 薬量の程度によって決定される地山内の節理を連ねた破断面となる傾向があることを示しているといえよう。さらに, 当り面積に関しては孔間隔 (E) の影響が比較的大きい。これは 27 断面すべての発破で起碎が問題なく行われたことからわかるように基本的に SB 孔を連ねて, あるいはそれより地山側で最終破断面は形成されているが, 孔間隔が大きくなると孔間隔をつなぐクラックが直線的でなく, 大きな凹凸を有するため, 当りも大きくなる機会が増加するものと解釈されよう⁶⁾。しかし, それらの相関係数も高々 0.4 で特に有意な相関があるとはいえない。さらにこれら 3 者の重相関係数も 0.286~0.517 と小さい。

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, この実験結果をうまく説明するためには節理の影響を何らかの形で取り入れることが必要であると思われる。

図-6 に実験中各断面ごとに連続して測定した断面形状の一部分を示す。縦軸は D であり, 横軸は図-2 に示す角度 θ である。図の左側に・がついているのは, この断面から E , V , W のいずれかを変更したことを示している。なお図-6 中, M で示した部分は削孔ロボットが故障し, 削岩機をマニュアル操作して削孔した部分であり, 削孔データが得られない¹⁾ため本実験の考察

からは省く。

これらの図をみて明らかなように、削孔パターンや薬量が変化しているにもかかわらず断面形状の山や谷が数断面以上連続している箇所が多くみられ、かなり大きな節理の存在によって、余掘りや当た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-7、図-8に示す。図-7は図-6のAの断面であり、各種の要因により凹凸はあるものの、ほぼ設計半径から10cm程度の余掘りとなっている。それに対して図-6にBで示す図-8の断面は、 $\theta < 90^\circ$ の部分はDが小さく逆に $\theta > 120^\circ$ の部分はDが大きく、全体として大きく波がある。この状況は数断面にわたって連続しておりかなり大規模な節理が最終破断面の形成に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

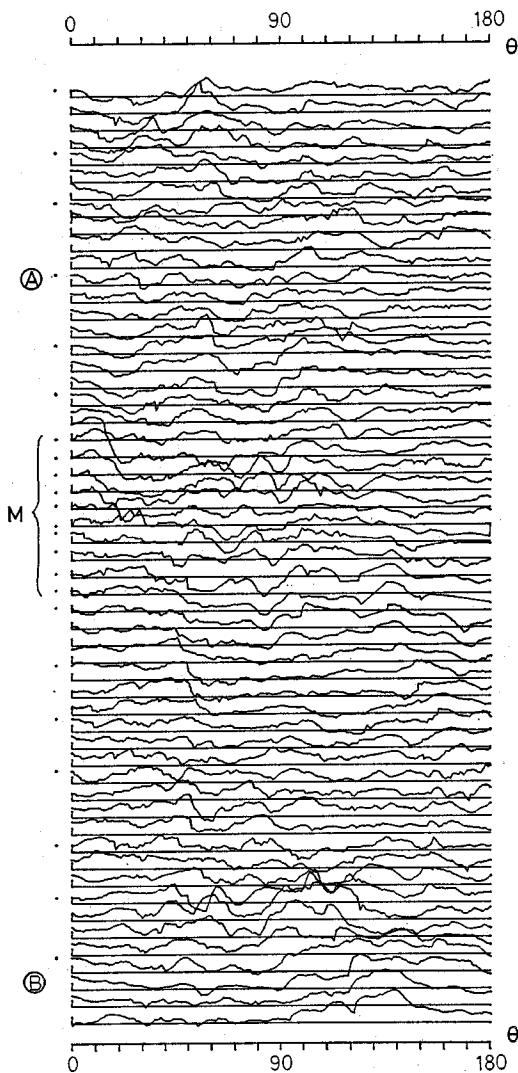


図-6 実験中の50cmごとの全断面測定結果

より明確にするため、図-7、8に示す断面形状データを波形と考えて、そのパワースペクトルおよび自己相関関数を求めたものを図-9、10に示す。

図-9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されていることがわかる。それに対して図-10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。そこで節理の評価法の1つとして図-9、10に示すような自己相関関数が0を切る点までの距離でもって節理を表わす指標(S)とする。こうするとSは大規模な節理の発達の程度を表わし、これが大きいことは掘削断面形状がそれで支配されるような節理が大きく発達していることを意味する。

表-7に目的変数である \bar{D} のみ跡率、余掘面積、当り面積と説明変数であるE, V, Wおよび切羽観察から得られた凹凸、節理間隔そしてSとの相関係数を示す。表-6に比べて説明変数の数を増したため目的変数に対するE, V, Wの相関係数は若干変化しているが大差ないことはいうまでもない。

切羽面の凹凸はどの目的変数に対してもほとんど相関がない。このことは、本研究で行った程度に切羽面の凹凸を観察するだけでは、節理がSB結果に及ぼす影響を正しく把握できないことを示している。また切羽面での節理間隔はほぼWと同程度の影響を及ぼしている。これに対してSが \bar{D} 、余掘面積に対する相関係数は他の要因より大きく、Sが大きくなると \bar{D} 、余掘面積が大きくなる。すなわち破断予定面の近くに大きく発達した

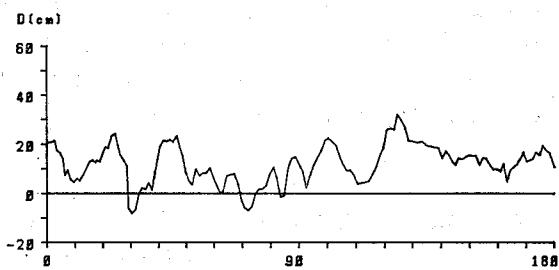


図-7 小規模な節理が多い断面の一例

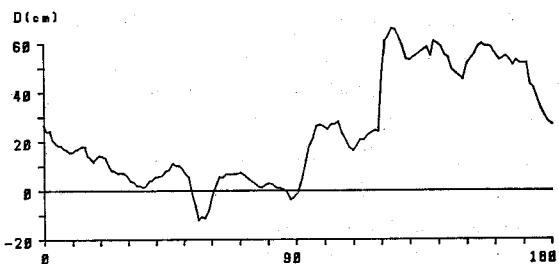


図-8 大規模な節理のある断面の一例

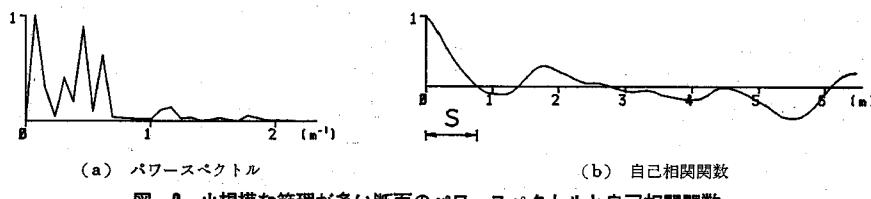


図-9 小規模な節理が多い断面のパワースペクトルと自己相関関数

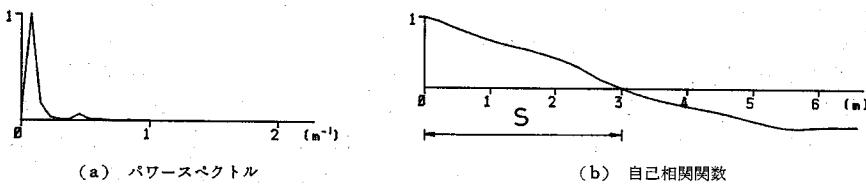


図-10 大規模な節理のある断面のパワースペクトルと自己相関関数

表-7 数量化理論 I 類による解析結果

目的変数	E	V	W	凹凸	間隔	S	重相関係数
D	0.260	0.048	0.420	0.028	0.400	0.488	0.7207
のみ跡率	0.180	-0.057	0.192	0.130	0.158	-0.061	0.5174
余掘面積	0.241	0.076	0.418	0.040	0.384	0.491	0.7200
当り面積	0.107	0.316	0.303	-0.039	0.330	-0.061	0.6892

節理があると発破法にかかわらず破断面はその節理に支配され、大きな余掘りを生じる。そして断面形状に図-8のような傾向を与える、Sが大きくなるものと考えられる。

しかし、これらの6要因を考慮しても重相関係数はのみ跡率を除いて0.70~0.72とあまり大きいとはいえない。これは切羽面での節理間隔や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、単位面積当たりの節理の長さなどを測定していくなかつたが、これらの情報があれば、より現象を正確に表現できたかもしれないと考えられる。

4. あとがき

本研究は節理系岩盤に対して、実施工現場で27種のパターンのSB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)をおののおの3種設定し、計27ケースで実験を行った結果、節理系岩盤ではこれら3要因が発破結果に及ぼす影響は特に大きいとはいえないことが認められた。

(2) しかしSB用爆薬を用い注意深い発破を行うことにより、節理系岩盤といえども明らかにのみ跡率を向上させることができた。

(3) 薬量を低減することにより、余掘りを減少させ、また孔間隔を小さくすることにより当り面積を減少

させることが傾向として認められた。

(4) 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を切る位置までの距離もって節理の発達を示す指標(S)とした。このSと目的変数である平均余掘深さ、余掘面積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。

(5) 切羽面を観察し得られた節理間隔が発破結果に及ぼす影響は、Sより小さいがほぼ薬量と同程度であることが明らかになった。このことは、切羽観察により得られた節理間隔の情報をうまく利用することによって、よいSB結果が得られる可能性のあることを示している。

(6) 外周孔のm³当た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可能性があることが明らかになった。

本研究では27種の発破パターンで発破を行った結果、節理系岩盤では発破パターンより節理の方が発破結果に及ぼす影響が大きいことが明らかになった。一方本研究の過程でもみられたような大きな発達した節理がある場合、発破法を工夫して、孔を連ねた位置に最終破断面を作るより、その節理位置に最終破断面を作る方が保安面から望ましいこともあり得る。これらのことも含めて節理に関する有効な評価法はいまだないのが現状と思われる。今後本研究の結果をもとに、節理の定量的評価に向けて研究を進めたいと考えている。

最後に本研究を行うにあたり、その機会を与えていたいた建設省東北地建月山ダム工事事務所の方々に感謝いたします。また実験に際しては間組月山トンネルの広谷所長をはじめ所員の皆様、および間組土木本部設計部の鈴木雅行氏に多大な労力をかけた。さらに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を得た。

ここに記して謝意を表する。

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ムーズブレースティングに関する研究，土木学会論文集，第367号／VI-4，pp. 52～61，1986年3月。
- 2) 古川浩平・吉見憲一・瀬戸口博昭・中川浩二：硬岩トンネルのスムーズブレースティング孔設計の最適化に関する研究，土木学会論文集，第379号／VI-6，pp. 38～46，1987年3月。
- 3) 三木幸蔵・古谷正和：土木技術者のための岩石・岩盤図鑑，pp. 170～181，鹿島出版会，昭和58年。
- 4) 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。
- 5) Langefors, U. and Kihlstrom : Rock Blasting, John Wiley & Sons, 1979.
- 6) 中川浩二・西田佑・橋本堅一：節理等を有する岩盤のスムーズブレースティングの機構について，土木学会論文報告集，第338号，pp. 123～130，1983年10月。

(1987.8.12受付)