

エマルジョン爆薬とANFOを用いた 平行削孔心抜き発破に関する実験的研究

Finn OUCHTERLONY¹ · 加納米二² · 南出英男³ · 中川浩二⁴

¹Dr Techn., Swedish Rock Engineering Research (Box 49153 S-10029 Stockholm ; 元山口大学教授)

²株式会社東建ジオテック(〒113-0034 東京都文京区湯島3-37-4)

³佐藤工業株式会社 大阪支店(〒541-0041 大阪市中央区北浜1-1-6)

⁴正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科(〒755-0031 山口県宇部市常盤台2557)

山岳トンネルの発破掘削における長孔削孔心抜き発破について、従来の高性能爆薬（本報ではエマルジョン爆薬）によるものと、最近話題になることの多いANFOを用いた実験を行った。ここではLangeforsらにより提案されている平行心抜き発破の実験式を参考に、高性能爆薬とANFOの装薬集中度、抵抗線の関係等について実験的に比較ならびに検討を行った。

エマルジョン爆薬およびANFOによる1発破進行4mの長孔削孔心抜き発破について、石灰石鉱山のベンチという限定された条件下ではあるが爆薬量、孔間隔など基本データを得ることができ、これらのデータをもとにそれぞれの爆薬を用いた心抜き発破におけるLangeforsらの装薬量計算式を修正提案した。

Key Words : tunnel blasting, parallel hole cut, ANFO, emulsion explosives, design formula

1. まえがき

我が国ではトンネルの1発破進行長が地質条件に支配されることが多い。そのために3m以上の長孔の平行削孔心抜きはいくつかの報告¹⁾は見られるがまれであり、トンネル掘進発破としてはVカット心抜きによる進行長2m以下の発破が一般的である。

しかしトンネルにおける高速掘進のための試みが種々なされるなかで、効率的発破に関する技術開発が要望されている。中でも長孔発破に関する研究はいくつか報告されており、海外の良好な岩盤では1発破進行長7mという実績がある²⁾。

一方、発破に伴う一連の作業の中で削孔や積込作業は機械化が進み、爆薬の装填作業は発破掘削の施工サイクルタイムの中で大きな作業時間を占めるようになっていく。我が国では大断面トンネルでも削岩ジャンボのローディングバスケットからの薬包の人力装填が一般に行われている。トンネル掘進発破において安全性あるいは環境問題からANFOはほとんど使用されず、従って爆薬の空気式自動装填機も一般には採用されていないが、ANFOの空気式自動装填は施工サイクルタイム向上の近

道であると考えられ、最近ではこれらの方法を用いた実施工の報告^{3), 4), 5)}もいくつか見られる。

これらのことを考慮するとANFOを用いた長孔平行削孔心抜き発破は、岩盤条件に合致した場合はトンネルの効率的発破として期待されるものであるといえる。

このような背景のもと、本研究ではエマルジョン爆薬とANFOによる1発破進行長4mの長孔心抜き発破について実験を行い爆薬量、孔間隔について基本データを得た。それらをもとに従来提案されている装薬量計算式を修正提案した。

2. 平行削孔心抜き発破における爆薬量の考え方

平行削孔心抜きにおいてスウェーデンの一般的な硬岩（岩石係数0.4）を対象に、LFBダイナマイト（1952年当時のスウェーデンの標準ダイナマイト）を使用した削孔径32mmに対する装薬量計算式としてLangeforsら⁶⁾が図-1を参考に次式を提唱している。

$$la=0.55(B-\phi/2)/(\sin \alpha)^{3/2}=1.5(B-\phi/2)(B/\phi)^{3/2} \quad (1)$$

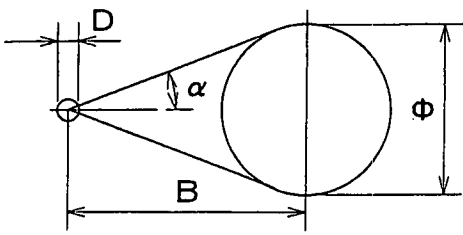


図-1 小断面円孔への心抜き発破

図-1 においては直径φの空孔に対してBの距離にある直径Dの発破孔から発破する状況を想定しており、式(1)において la は装薬集中度(装薬孔1m当り装薬量) kg/m, Bは装薬孔と空孔の中心間隔m, φは空孔の直径m, 2α は破碎角である。なおこの式の中では $\sin \alpha = 0.5 \phi/B$ が用いられている。

Holmberg⁷⁾ はこの装薬量計算式において以下の方法により爆薬の種類, 岩盤条件の一般化を図っている。すなわち爆薬の爆力の換算は在来のスウェーデン式ウェートストレングス(爆薬単位重量当りの爆力の相対値)を用い, 例えば ANFO を基準爆薬にする場合, LFB ダイナマイトのウェートストレングスは $S_{ANFO}=1.19$ となる(当然 ANFO の $S_{ANFO}=1.0$)。また岩盤条件は後述する岩石係数 c に対して $c/0.4$ で修正する。さらにデカップリング状態の薬包の装薬量は発破孔の径Dと基準孔徑32mmにより, $D/0.032$ に比例する。これにより la は,

$$la = 55D(B - \phi/2)(B/\phi)^{3/2}(c/0.4)/S_{ANFO} \quad (2)$$

となる。

数孔の空孔(孔徑φ)が十分に接近しているときは, 有効孔徑として $\phi_{eff} = \phi\sqrt{n}$ で換算する。nは孔数で今回の実験発破では2孔である。

Langefors⁸⁾ の考え方によれば図-1の孔配置においては図形上の制約を伴うことも含めて, 式(1)を満足する装薬量であっても, 以下のような違った種類の破碎現象が発生するとされている。

$B \geq 2.1 \phi$	塑性変形又は焼結
$2.1 \phi > B \geq 1.5 \phi$	単なる破碎状態
$1.5 \phi > B \geq 0.5(\phi + D)$	望ましい粉碎状態
$0.5(\phi + D) > B$	発破孔が空孔に貫通

これらの破碎現象を日本の岩盤へ適用するにあたっては, 式(2)が現場で実証されたものではないということも考慮に入れた上で実証実験を行うことが必要である。

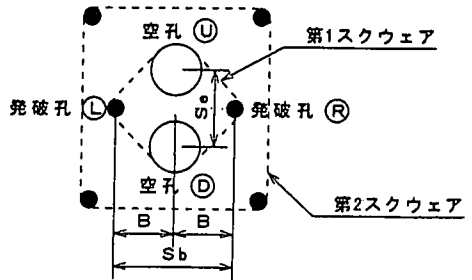


図-2 心抜き発破実験の孔配置

3. 実験場所の状況

(1) 実験場所

実験は石灰石鉱山のベンチを用いて行った。この石灰石鉱床はおおよそ10億年前の古生代に生成されたものである。山頂高さは1305mであり, 実験時の稼行レベルは1130mまで下がっている。

(2) 岩盤条件

実験ベンチとその上2段の残壁には少なくとも4つのジョイントセットが認められる。ベンチ方向を仮に北とすると, まず風化した2組のジョイントの傾斜/傾斜方位は45/135と45/225であり, これらのジョイントの間隔は2-4mで輝緑凝灰岩で充填されている。実験ベンチでもこれははっきりと認められる。

他の2組のジョイントは新鮮で間隔も狭い。3組目のジョイントは間隔が0.2-0.3mで傾斜/傾斜方位はおおよそ30/90である。4組目は0.05-0.1m間隔で90/90である。この4組目のジョイントはどこにでも目視出来るものではないが, ジョイントに囲まれた岩石は角砂糖状を呈する事がある。この2組のジョイントは岩盤の平均的な破碎性を支配していると考えられる。

本石灰石鉱山の石灰岩の密度は $2590-2690 \text{ kg/m}^3$ である。P波速度による岩盤等級分類は

硬質石灰岩	$V_p=2500-4000 \text{ m/s}$
軟質石灰岩	$V_p=1000-2500 \text{ m/s}$
風化輝緑凝灰岩	$V_p=1000-1800 \text{ m/s}$

とされている。点荷荷試験の引張り強度は大きくばらつくが主として5.3-7.9MPaの範囲にあり, 平均5.8MPaである。また1軸圧縮強度 $\sigma_c=120-125 \text{ MPa}$, ショア硬度は46-55の範囲である。なお, 実験ベンチでは $V_p \approx 2300 \text{ m/s}$ であった。

これらの状況から判断して岩盤は電中研式岩盤分類の C_M クラスに相当すると思われる。

(3) 岩石係数(岩石抗力係数)

岩石の発破に対する難易度はLangefors⁸⁾ により岩

石係数 c で与えられている。1 m³ の岩石を破碎するに必要なボトムチャージの限界装薬量を c_0 kg として 20% の技術的余裕を加えた $c = 1.2 c_0$ が石係数である。

式 (2) で用いる c を求めるためにエマルジョン爆薬を用いて $\phi 32$ mm 発破孔でベンチ発破実験を 4 回行っている。放出距離が 2 m となる薬量を限界装薬量とするならば、実験値 $c_0 \approx 0.3$ で石係数は $c \approx 0.35$ となる。これは日本の平均的な石係数 0.30-0.35 にほぼ等しい。スウェーデンではこれは 0.40-0.45 であり、スウェーデンの岩盤は日本の岩盤より一般的に堅硬である。

4. 心抜き発破実験

(1) 爆薬

爆薬はエマルジョン爆薬（商品名ハママイト）と ANFO を使用した。

用いたエマルジョン爆薬は、密度 1050-1150 kg/m³、VOD (Velocity of Detonation) は開放状態の $\phi_{exp} = 25-30$ m 薬包で 5000-6000 m/s である。また ANFO を基準にしたウェーテストレングスは $S_{ANFO} = 0.94$ となる。

(2) 実験計画, 実験状況, 計測

心抜きの配置は図-2 のようである。基本的に削孔長 4 m, 空孔 2 孔で実験した。発破孔は第 1 スクエアの 2 孔のみとした。爆薬と最大抵抗線の関係を同時に求められるように実験計画を作成した。

基本的な組み合わせは

- イ) 爆薬；エマルジョン爆薬 ($\phi_{exp} = 25$ 又は 30 mm 薬包) と ANFO
- ロ) 発破孔の直径；D=43, 45, 48 mm
- ハ) 抵抗線；初めに起爆する発破孔の抵抗線 200-400 mm

付帯的な条件として

- ニ) 空孔間の間隔；150-300 mm
- ホ) 空孔の直径；大空孔 102 mm が主であるが、小空孔 45, 48 mm, および大空孔 114 mm も実験した
- ヘ) 雷管；Hercudet と NONEL
- ト) 発破孔間の起爆秒時差；100, 75, 50, 25, 0 ms
- チ) 空孔の形；2 大空孔, 1 大空孔, 2 小空孔の他にスリット型空孔

実験発破ではベンチの壁面が大きく落下し、そのたびにバックホウで壁面を掘削し浮き石を落とす作業が加わり、相当な作業計画の変更が生じた。実際の実験内容は次のようである。

- i) エマルジョン爆薬使用, 2 大空孔の心抜き 9 発破
- ii) ANFO 使用, 2 大空孔の心抜き 20 発破

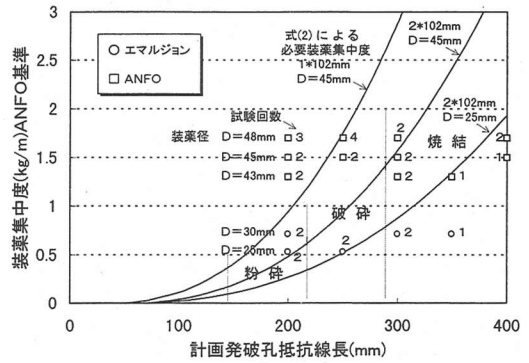


図-3 実験計画の装薬集中度と抵抗線の関係

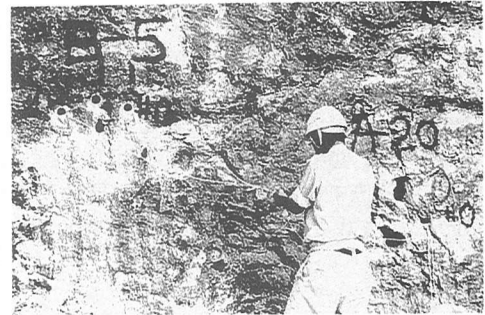


写真-1 発破前の壁面

- iii) ANFO 使用, 2 小空孔の心抜き 3 発破
- iv) その他 16 発破

合計 48 発破を実験したが、本報告では後述する表-1 に示すように上記 3 項目までの 32 発破を検討している。記録されている 32 発破のうち、実験番号 A-23 (後述) は浮き石落として完全に壁面が落ちてしまい発破の痕跡を残さなかった。

ANFO の装薬密度は発破孔径 D=43, 45, 48 mm に対して 900 kg/m³ で計画されているので、装薬集中度はそれぞれおよそ 1.31, 1.43, 1.63 kg/m となる。無装薬部は 0.25-0.35 m とした。ANFO の装填は空気式自動装填機を使用し、口元の填塞は行っていない。実際の装薬密度は 3(5) に述べる。

報告する 32 発破の装薬集中度と抵抗線との計画時の関係を図-3 に示している。式 (2) で計算した必要装薬集中度の 3 本の曲線では $c = 0.35$ である。エマルジョン爆薬の場合ウェーテストレングス $S_{ANFO} = 0.94$ を用いて記入している。図中それぞれの曲線は上から順にデカップリングを伴った 45 mm の発破孔から 1 孔の 102 mm 空孔へ、同じく 2 孔の 102 mm 空孔へ、それと 25 mm の発破孔から 2 孔の 102 mm 空孔へ向けて発破したとして計算したものである。中間の曲線に付した 3 本の垂直な線分は前に示した粉碎状態、破碎状態、焼結状態を分けるものである。図-3 によると ANFO 発破の多くは粉碎あるいは破碎状

態領域において曲線より上にあり、もし薬量計算に用いられている仮定が正しいとすれば過装薬状況にあるといえる。

ANFO 発破では塑性変形や焼結による発破の不具合が問題になることが考えられる。そこで各空孔間の間隔を変えて繰返し実験し、発破が 2 空孔のうちどちらか 1 空孔とのみ繋がる状況を考え、上側に示した装薬集中度曲線をも考慮した実験をしている。

下の曲線は 25mm 孔に装填した場合の装薬集中度曲線である。従ってエマルジョン爆薬の場合、25mm の薬包を 45mm の孔に用いており、中間と下側の曲線間の領域はエマルジョン爆薬に対するデカップリング効果の検討領域と見ることが出来る。即ち、計画では粉碎、破砕の領域にあっても、良好な発破効果が得られない場合はデカップリングの影響と考え、抵抗線の決定のための参考とすることが出来る。

実験前に岩盤表面の地質をスケッチし、写真-1のように赤ペンキで削孔位置をマーキングし、削孔位置と削孔方向を孔口と孔底で計った。発破中の地盤振動も測る予定であったが、鉾山の発破と重なり記録できなかった。

(3)削孔精度

図-2 に示す上側の空孔(U)を基準にした削孔「ズレ」を図-4 に示す。この図は他の 3 孔の相対的な口付け「ズレ」、孔底での方向「ズレ」、及び総合「ズレ」を示している。1 例を除き下の空孔 (D) の口付け誤差は、10cm 以下で平均 6cm である。発破孔の口付け誤差は少し大きい、一番大きい 20cm を除外すると他はすべて 15cm 以下で平均して右(R)左(L)とも 7cm である。各分布の重心はすこし心抜き方向にずれている。即ち実際の実験は他の報告⁸⁾にも見られるように計画より狭くなっている。

方向誤差は口付け誤差より大きい、二三の例外を除けば 15-20cm 以下であり、平均は D,L,R 各々 10, 11, 13cm である。両方の誤差を足した総合「ズレ」は少し大きくなる。

(4)実抵抗線。削孔精度等級(D,Q,R)

起爆時の孔間の干渉と抵抗線が大きすぎるために発生する発破の失敗の原因を考察するため、削孔誤差の検討を行う²⁾。両発破孔の実抵抗線をまず求める。発破孔の中心軸上の一点を頂点とし 2 つの空孔中心からなる底辺を結ぶ 3 角形で破砕範囲が求まる。一般に抵抗線は最短距離、即ち発破孔中心から両空孔中心を結ぶ線に下した垂線の長さとして定義している。(図-5 参照)

抵抗線は孔底で求めている。孔底における抵抗線の算出に用いる孔深は 3 角形を形成する孔の中の一番短い孔の孔底とする。図-5 ではどちらかの空孔が一番短いとケース 1、発破孔のどちらかが最短であればケース 2 と

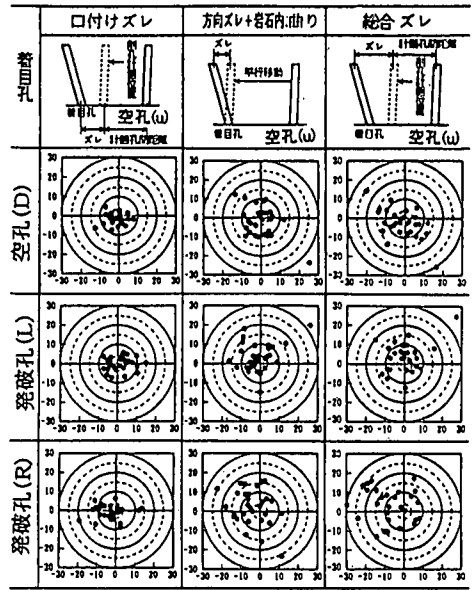


図-4 口付け、方向、総合誤差の分布図

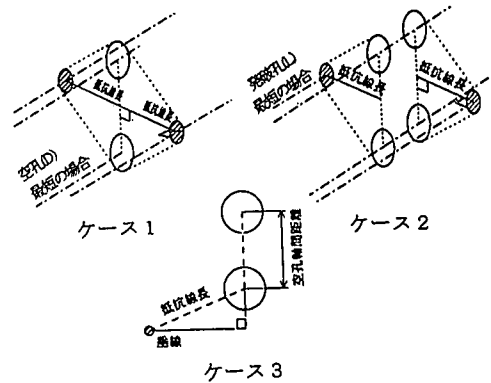


図-5 孔の深さと孔底での抵抗線の関係

なる。削孔誤差が大きすぎて頂点から下した足が底辺の外に出てしまう時はケース 3 となる。その場合抵抗線は発破孔と近い方の空孔との中心距離となる。実験の解析にはこの抵抗線を用いている。空孔間隔は抵抗線が定義された孔底位置で求める。

表-1 には今回の 32 回の実験発破における各計測値等を示している。表では爆薬の種類別に第 1 発破孔の抵抗線の小さいものの順に並べている。

図-6 に縦軸に装薬集中度、横軸に第 1 発破孔の抵抗線をとって、各発破の削孔状況の一覧を示す。図中成功、成功/不成功、不成功とあるのは後に示す図-7 の結果をそのまま示したものである。図中、削孔位置表示において実線は孔底、破線は孔口を示している。

図-6 の空孔間隔及び抵抗線の削孔状況から、削孔精度等級 (Drilling Quality Rating : DQR) の判定を試みた。等級は最不良 (VB), 不良 (B), 普通 (A), 良好 (G), 最良 (VG) の 5 段階に分け、判定に際しては次のようないくつかの

表-1 実験発破の削孔、装薬状況

実験番号	爆薬	雷管	段差秒時 (ms)	空孔径 (mm)	発破孔径 (mm)	薬包径 (mm)	空孔間隔 (mm)	抵抗線		装薬集中度	
								第1孔 (mm)	第2孔 (mm)	第1孔 (kg/m)	第2孔 (kg/m)
E-1	E	H	100	102	45	30	200	35	160	0.85	0.76
E-2	E	N	75	102	45	25	211	71	280	0.56	0.55
E-3	E	N	75	102	45	30	330	126	250	0.70	0.76
E-4	E	N	75	102	45	25	248	163	—	0.59	0.44
E-5	E	N	75	102	45	25	434	223	330	0.57	0.54
E-6	E	N	75	102	45	25	197	244	280	0.54	0.54
E-7	E	N	75	102	45	30	197	286	220	0.74	0.71
E-8	E	H	100	102	45	30	170	288	280	0.69	0.76
E-9	E	N	75	102	45	30	341	390	390	0.72	0.70
A-1	A	N	75	102	43	43	232	80	160	2.72	1.45
A-2	A	H	100	102	48	48	383	91	220	1.57	1.62
A-3	A	N	75	48	48	48	145	94	250	1.71	1.95
A-4	A	N	75	102	45	45	331	128	270	1.63	1.49
A-5	A	N	75	102	43	43	258	131	150	1.65	1.45
A-6	A	H	100	114	45	45	264	146	260	1.24	1.28
A-7	A	N	0	102	48	48	205	177	250	2.74	1.49
A-8	A	N	75	48	48	48	190	195	250	1.72	1.98
A-9	A	N	75	102	45	45	89	202	300	1.39	1.84
A-10	A	N	75	102	43	43	217	208	370	1.74	1.62
A-11	A	N	75	102	48	48	270	208	560	1.65	1.86
A-12	A	H	100	114	48	48	242	219	160	0.85	0.87
A-13	A	H	100	45	45	45	138	245	190	1.47	1.49
A-14	A	N	50	102	48	48	241	246	190	1.63	1.58
A-15	A	N	75	102	43	43	195	256	170	1.31	1.31
A-16	A	N	75	102	45	45	245	265	400	1.25	1.49
A-17	A	N	75	102	43	43	374	275	370	1.73	1.44
A-18	A	N	75	102	48	48	327	275	320	2.06	1.80
A-19	A	N	25	102	48	48	324	283	220	2.17	1.48
A-20	A	N	75	102	45	45	258	332	150	1.42	1.36
A-21	A	H	100	102	45	45	291	349	210	1.41	1.39
A-22	A	N	75	102	48	48	262	353	340	1.31	1.89
A-23	A	N	75	102	48	48	160	384	460	1.72	1.89

E : エマルジョン爆薬, A : ANFO, H : Hercudet N : NONEL

この表は第1発破孔抵抗線の短い順に配列されている。

表-2 エマルジョン爆薬とANFOの装薬状況

種類		無装薬長 m	装薬長 m	装薬集中度 kg/m	見掛比重 kg/m ³
E	計画	0.20-0.35	3.65-3.80	0.53-0.71	1050
	実績	0.17-0.94	2.93-3.70	0.44-0.85	904-1207
	平均±標準偏差	0.37±0.18	3.42±0.23	0.65±0.11	1071±80
A	計画	0.25-0.35	3.65-3.75	1.38-1.72	800-1000
	実績	0.00-0.60	2.93-4.00	0.85-2.74	469-1874
	平均±標準偏差	0.21±0.17	3.63±0.26	1.61±0.36	973±222

E : エマルジョン爆薬 A : ANFO

基準を設けた。

- 心抜きによるもの(1) - 深さによる歪みと振れ: 図-6により判定し, DQRはVBからVGに分類する。

- 極端な振れ: 図-5ケース3のように抵抗線が一孔だけに繋がる場合はDQRはAより良くはならない。
- 心抜きの形によるもの(2) - 孔底と口元の心抜き面積の比較: 心抜きが口元に向かって開くなら, 口元が狭まるより破砕片は出やすい。
- 孔底での空孔と発破孔の距離: 孔底で15cm以下であれば両者は孔底でつながる危険性があるのでDQRはAより良くならない。
- 孔底での空孔と発破孔の距離が離れすぎの場合: 抵抗線が30cm以上の時は破砕機能が失われる危険性がある。

1章で述べたように, Langeforsら⁶⁾はもし $B \geq 2.1\phi$ であれば, 式(1)の最小必要装薬量が満たされていても塑性変形や焼結が発生してうまく破砕しないようになると述べている。大部分の空孔は $\phi = 102\text{mm}$, 有効孔径 $\sqrt{2}\phi$

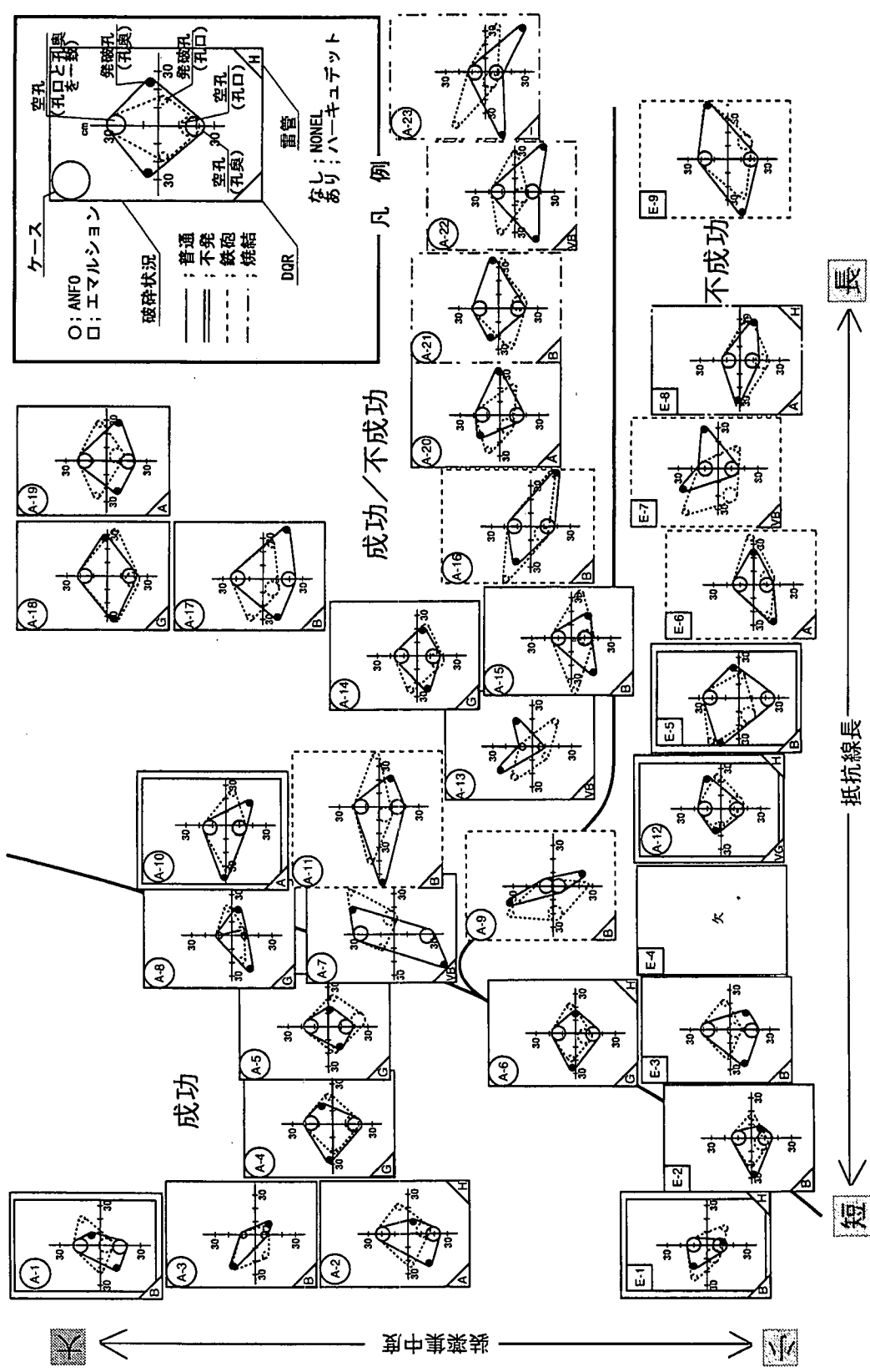
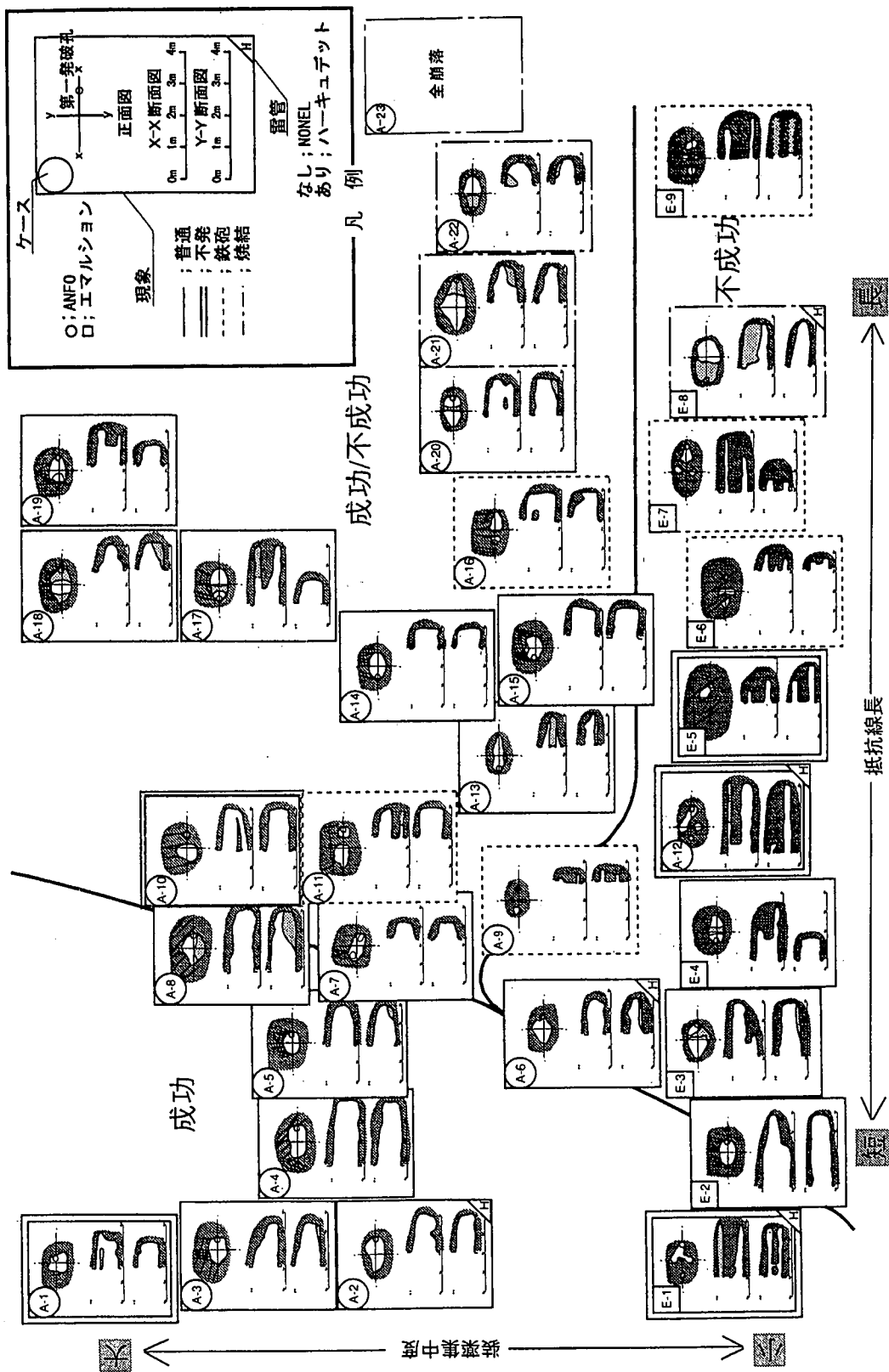


図-6 実験発破の削孔状況



図一七 発破後の残存空洞の分布

=144mm であるので限界距離は約 B=30cm となる。今回の実験では実験番号 E-9, A-20, A-21, A-22, A-23 で第1発破孔の抵抗線が限界抵抗線 30cm を超えており, Langefors ら⁶⁾によると破砕困難とされる領域に対応する。

表-3 発破結果の一覧

実験番号	DQR	不具合発破の分類			進行率%	空洞	破砕状況
		不発	鉄砲	焼結			
E-1	B	2			—	小	不良
E-2	B				103	大	良
E-3	B				101	中	良
E-4	—				46	大	不良
E-5	B	2			—	小	不良
E-6	A		1+2		—	小	不良
E-7	VB		1+2		—	小	不良
E-8	A			1	108	中	良
E-9	B		1+2		—	小	不良
A-1	B	2			87	大	中間
A-2	A				95	大	良
A-3	B				83	大	中間
A-4	G				101	大	良
A-5	G				104	大	良
A-6	G				96	大	良
A-7	VB				83	大	中間
A-8	G				102	大	良
A-9	B		1+2		80	小	不良
A-10	A	1			98	中	良
A-11	B		1		—	中	良
A-12	VG	2			—	小	不良
A-13	VB				104	大	良
A-14	G				100	大	良
A-15	B				101	大	良
A-16	B		1		103	中	良
A-17	B				94	中	不良
A-18	G				96	中	良
A-19	A				79	大	中間
A-20	A				90	大	良
A-21	B			1	103	大	良
A-22	VB			1	103	中	良
A-23	VB				—	—	—

(5)爆薬の装填

各孔の装薬集中度は表-1の最右欄に、装薬集中度と装薬長、無装薬長の集計は表-2に示してある。エマルジョンの装薬集中度が比較的大きめではあるが安定しているのは薬包を使用しているためで、ANFOでは平均値は範囲内であるが相当部分が範囲を逸脱している。ANFOのようなバラ物の爆薬では孔の形状等により起こり得ることであると考えられる。A-12の見掛装薬密度は装薬集中度 0.85kg/m, 0.87kg/m から計算してそれぞれ 469 と 480kg/m³となり孔の半分ぐらいしか詰まっていない。このことから装薬状態は不均一状態となっていることが予想される。

(6)発破時及び発破後の観察

高速ビデオでは起爆すると孔から爆発ガスが噴出し、砕粉が飛び出すのが観察される。発破後はベンチの壁面の崩れが大きく、健全な発破跡空間は部分的にしか残らない状態となった。発破の成功、不成功は次の基準で区分した。

- ・良好な破砕 : 90%以上の進行率,
(成功) かつ大空洞又は中空洞
- ・部分的な破砕 : 90%以下の進行率,
(成功/不成功) かつ大空洞又は中空洞
- ・不良破砕 : 進行なしあるいは小, 小さな空洞
(不成功)

進行長はその深さまで最小限2発破孔のうちの一つが2空孔に貫通し、その間の岩石が取り除かれている状態を意味している。これはトンネル発破で全断面を起こしうる最大深さを想定している。進行率は4孔即ち2発破孔と2空孔の平均削孔深さに対するものである。

5. 実験結果と検討

(1)実験結果の概要

表-3にDQR, 不具合発破, 進行率, 空洞状況, 破砕状況を一覧表にして示す。表には実験の結果明快に認められた次に示す3種類の不具合発破を記載している。不具合発破欄における1, 2は1番目,あるいは2番目に起爆した発破孔(第1, 第2発破孔)を意味する。

不発: 雷管又は爆薬が起爆しない。即ち不発か点火機能の不足。

鉄砲: 1ないし2発破孔の鉄砲又は破砕機能の不足,

表-4 破砕状況と削孔精度等級(DQR)の関係

破砕状況	削孔精度等級(DQR)				
	VB	B	A	G	VG
良	A-13 A-22	E-2 E-3 A-11 A-15 A-16 A-21	E-8 A-2 A-10 A-20	A-4 A-5 A-6 A-8 A-14 A-18	
中間	A-7	A-1 A-3	A-19		
不良 (E-4) [※]	E-7	E-1 E-5 E-9 A-9 A-17	E-6		A-12

※DQR データ不明

即ち発破孔が空孔に繋がらない。

焼結: 焼結又は砕粉の排出不能, 即ち発破空洞に破砕物が残って固結する。(本文では若干の破砕物

が固結する場合も広義の焼結として扱う)

図-7には装薬集中度を縦軸に、第1発破孔の孔底での抵抗線を横軸に発破後の空洞を配置している。各々のスケッチの外周線は発破の結果生じた現象を表しており、これをもとに図-7を大まかに成功、成功/不成功、不成功と大別している。

ANFOのA-1からA-6、A-8とエマルジョンのE-1、E-2は抵抗線と装薬集中度からすれば成功領域に入るものである。進行率90%に達しない中間的破碎状況のA-1、A-3と不良破碎のE-1を除けば大きな空洞、良好な破碎状況を示している。境界線上にある進行率83%の中間的破碎のA-7は2発破孔間に段差時間を設けていない。不成功領域には残りのエマルジョン爆薬のE-3からE-9とANFOのA-12が入る。E-3とE-8を除けばこれらのエマルジョン爆薬の発破は破碎不良である。エマルジョン爆薬の場合ANFOに比較して装薬集中度が低い。A-12の場合低い装薬集中度と第2発破孔の不発が重なっており、Hercudet雷管が不発で残留しANFOが2mも孔内に残る結果となった。

(2)DQRの影響の検討

4(4)で紹介した削孔精度等級DQRを表-3に示す。破碎状況とDQRの関連性を表-4に示している。

表-4では起爆機能の損傷の影響のためもあり、破碎状況とDQRとは直接関係づけられない。表-4から判断する限りにおいてはDQRがA~VGでは良好な結果が得られ、VB、Bでは不良となる可能性があるようである。

(3)不具合発破の検討

32発破の内14発破に以下に示すような各種の不具合が発生した。

【不発】 不発と判定したのはE-1、E-5、A-1、A-10、A-12である。

この中で第1発破孔が不発であったのはA-10のみであり、他の4例はすべて第2発破孔の不発となっている。A-10の第1発破孔の不発の原因は不明である。A-1、E-1の場合図-6より第1発破孔が孔底で空孔と連結していると思われる。特にA-1の場合大きな装薬集中度がみられることから、このことが認められる。これらの場合第1発破孔は爆轟しているが装薬状態が乱れるかあるいは、大きなデカップリング状態となり爆力不足を生じ、第1発破孔の発破は十分には成功していない。E-1の第2発破孔は不発で親ダイ、増ダイとも残っているが、Hercudet雷管のチューブは反応している。これは第1発破孔が近い場合衝撃波による死圧現象を受けたためと思われる。A-1の第2発破孔も第1発破孔に近く、NONEL雷管が大きな衝撃波を受けたと思われるが、NONEL雷管の特性上死圧と判定できるかどうか不明である。A-12、

E-5でも第2発破孔は不発となっている。A-12の第1発破孔は前述のような装薬集中度の乱れにより不完全発破を生じ、その衝撃波により第2発破孔のHercudet雷管が死圧現象を生じたものであろう。E-5のNONEL雷管のチューブは反応しているが、雷管は起爆しておらずこれもその原因は明らかでない。

このように不発に関してE-1、A-12の第2発破孔のように、Hercudet雷管の死圧現象を説明できるものもあるが、説明困難とされるものも見られた。

【鉄砲】 鉄砲現象と判定した発破はE-6、E-7、E-9、A-9、A-11、A-16である。

E-6、E-9のエマルジョン発破は表-1に見られるように抵抗線に比べて装薬集中度が低く、それが鉄砲現象の原因と考えられる。ANFO発破ではA-11、A-16とも第1発破孔は鉄砲現象となっているが装薬集中度は高く、第2発破孔は両空孔を破碎しており、中程度の空洞が孔底まで形成されている。そのため次の発破で残った岩片が掃き出されると予期され破碎状況そのものは良に分類した。A-10でも同じ事が言える。

図-6、図-7、表-1、表-3は抵抗線と破碎状況の関係は単純でない事を示している。A-16では第1発破孔は抵抗線の短い左の発破孔であるが破碎は成功していない。しかし抵抗線の長い第2発破孔は成功している。右側の発破孔が最初に起爆されたA-11も同じ現象を起こしている。これは第1発破孔が周囲の岩石を痛めているので第2発破孔でこのような結果が得られたと考えるのが妥当であろう。同じような状況が小口径空孔を用いた平行心抜きでも報告¹⁰⁾されている。

A-9の場合破碎不良の原因は粘土層の影響が考えられる。第1発破孔の親ダイが1.25mしか入って居らず、粘土層境界にガスがもれて圧力が低下してしまった可能性がある。またE-7はDQRがVBである。

【焼結】 ここでは前述のように焼結を広義に考えている。E-8、A-21、A-22は焼結を起こしている。これらの発破においては第1発破孔の抵抗線が大きく、装薬集中度が相対的に低い。即ち、多くの破片が少ない装薬で押し出されようとするので第2発破が起爆する時点でまだ第1発破の破片は空孔内に散らばっていることになる。その結果排出の不完全さが生じ、第2発破孔の破片が第1発破孔に凝結してしまうようになると推定される。これは必ずしも短い段差秒時のための時間不足とは思われない。というのはA-7(0ms)、A-19(25ms)、A-14(50ms)で焼結の兆候が認められないからである。またA-21、A-22では共に103%の進行率となっており、焼結は破碎不良の指標となっていない。

抵抗線が小さすぎると起爆機能が損なわれ進行率は低下し、抵抗線が大きすぎると起爆機能は良好であるが、破碎機能が損なわれ、やはり進行率は低下する。望まし

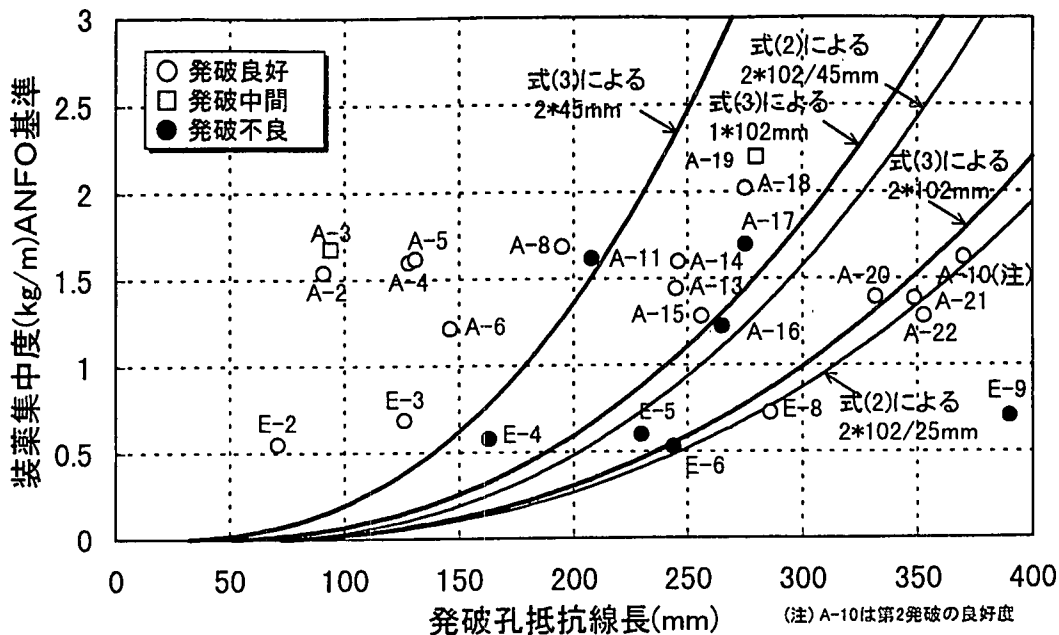


図-8 装薬集中度と第1発破孔の孔底での抵抗線からみた第1発破孔の発破の良好度

いのは両機能が良好でその結果進行率が90-100%となることである。

(4)抵抗線と装薬集中度

図-8はANFO換算の装薬集中度と孔底での第1発破孔の実抵抗線の関係を各発破の破砕状態別に示したものである。ここでは前に述べた明白な理由で破砕状態が不良のものは除いている。すなわちDQRがVBのもの(E-7, A-7, A-13, A-23), 第1発破孔が不発のもの(A-10), 装薬状態が不良のもの(E-1, A-1, A-9, A-12)は除いている。

図-3の実験計画図と比較すると削孔精度及びANFOの見かけ比重の変化で記入位置が大きくばらついている。4(4)に従えば、塑性変形又は焼結で破砕状況が悪くなるLangeforsら⁶⁾の抵抗線の限界は大空孔では30cm, 小空孔では15cmより少し小さい程度である。しかし図-8において破砕状態良好ないくつかの心抜きはこの限界を超えている。普通石灰岩は火成岩より拘束状態では塑性変形しやすいはずであるが、本鉱山の石灰岩にはLangeforsら⁶⁾の限界は適応しないようである。またA-10は第1発破孔が不発となったものの第2発破孔の発破が成功しているため、ここではこの第2発破孔のデータを記入している。A-11, A-16の2例は第1発破孔が空孔に完全には貫通していないという不具合であるが、第2発破孔がほぼ全長にわたり破砕されているので図-7, 表-3では破砕良好と判定した。しかし第1発破孔について検討しているここでは発破失敗と判断されるべきであろう。このように第1発破孔が不成功であっても第2発破孔の発破で回復可能という余裕発破力は各発破孔の破砕量を最適にするように考えたス

パイラカット¹¹⁾に対して、左右対称の平行削孔心抜き大きな利点である。

エマルジョン爆薬の場合E-6, E-9の第1発破孔が両空孔に貫通しなかった主たる原因は、低い装薬集中度又は長い抵抗線と考えるのが妥当である。E-4についてはDQRデータが不明である。またE-5については空孔間隔が434mmと著しく大きくなっており、両空孔が協同して作用せず、実質的な抵抗線長が図-8に示すものよりはるかに大きくなったためと解釈できる。

ANFOの場合おおむね良好な発破結果を示しているがA-11, A-16, A-17の3例で発破不良となっている。これら破砕不良例よりもはるかに大きな抵抗線の多くの発破が成功していることから、これらの例において抵抗線が大きすぎたとするのは困難である。またA-11, A-16の2例においては第2発破孔の発破において破砕良好となっていることも状況解釈を困難としている。

図-8のデータが装薬計算式(1), (2)にどのように対応するか検討する。本実験の結果は説明困難な例もいくつか含んでいる。しかし発破失敗のいくつかの例はその原因を装薬量と抵抗線の関係に帰することが困難であること、および平行削孔心抜きの装薬量計算式として知られるものは、式(1)あるいは式(2)あたりのみであることを考慮し、式(1), (2)の考え方を生かした上で発破成功例が式で説明できるように係数を修正する。

一番下の曲線は式(2)の2個のφ102mm空孔, D25mm発破孔, 岩石係数 $c=0.35$ に対するものであり、図-3のエマルジョン発破の可能最大破砕線である。又曲線はエマルジョン発破の成功, 不成功をうまく分けている。しかし、

ANFO 発破における2個のφ102mm 空孔, D45mm の発破孔に対応する曲線は式(2)で与えられるよりはるかに大きな抵抗線を持つ3つの発破が成功となっていることからうまく分ける曲線とは言えない。

そこでLFBダイナマイトのウエートストレングス $S_{ANFO}=1.19$ を試験データとの適合性を良くするために省いて次式を得る。

$$l_2=1.56(B-\phi/2)(B/\phi)^{3/2}(c/0.4)/S_{ANFO} \quad (3)$$

いま $c=0.35$ とすれば発破孔径に関係なくたい実線が得られる。式(2)による2本の曲線(102mm 2空孔, 45mm および25mm 発破孔)に比べて, 式(3)による3本の曲線(45mm 2空孔, 102mm 1空孔, 102mm 2空孔, 発破孔径関係なし)は次の点で大まかな爆薬の種類に関わらない装薬計算式を与えるものと考えられる。

1. 大きな抵抗線の発破 (A-10,A-20,A-21,A-22) の成功が説明される。
2. 空孔一孔に貫通したと判定された A-17 は式(3)の1個のφ102mm 空孔の曲線のごく近くに位置している。
3. 2個のφ45mm 空孔の曲線は小空孔 ANFO 発破の A-8,A-13 の中間に入っている。
4. DQR が不明である E-4 を除くと, ほぼエマルジョン爆薬による発破の限界値を与えている。

これらの理由から必要装薬量の計算には式(2)より係数を修正した式(3)が実用上良いと言える。この実験では爆薬は違いうがデカップリングとそうでないものも同時に扱っている。すなわち式(3)を用いる事によりデカップリングの問題は無視して ANFO 換算の装薬集中度の違いで処理することとなる。

6. 結論

本研究では1発破長4mの平行削孔心抜き発破におけるエマルジョン爆薬と ANFO の比較を行うと共に装薬量, 抵抗線についての検討を行うことを目的とした。

実験を行った石灰石鉱山のベンチでは操業発破のため岩盤が損傷を受けた状態にあり, 多くの心抜きで発破後計測の前に空洞の半分が崩落してしまうという状態にあった。しかし, トンネルの中という閉じられた場所ではなく, 明かりでの実験は多くの利点を持つものであった。

実験場所の不安定な岩盤条件あるいは機械条件のため削孔精度は予測したものと比較して大きく低下し, また装薬についても, ANFO の装薬長, 装薬密度に大きなばらつきが生じた。その結果広い範囲の抵抗線, 装薬状況に対して実験を行う結果となった。

実験結果の評価において90%以上の進行率, 中程度以上の心抜き空洞の形成をもって成功とした。また進行長は少

なくとも一方の発破孔が2空孔につながり, 実際のトンネル発破ではそれに続く発破によりトンネル全体の進行が可能となる状況とした。

実験の結果は概して空気式自動装填された ANFO を NONEL 雷管で起爆するという, 多くの現場で報告されている結果の優位性を肯定するものとなった。

石灰石鉱山の残壁における実験という, 岩種をはじめとし限定された条件下ではあるが, 実験により得られた結果は以下の通りである。

1. 削孔精度についてDQRと呼ぶ5段階(VG~VB)の定性的評価法を提案した。削孔精度は発破結果に直接影響を与えるものではないが, B (Bad), VB (Very Bad) の状況は影響があることが認められた。
2. 心抜き発破の3種の不具合(不発, 鉄砲, 焼結)の状況を示した。焼結は不発や鉄砲と違い破砕不良に繋がらない。鉄砲は装薬が抵抗線部分の岩盤を破壊, 移動させ得なかった時に発生する。この状況は過大な抵抗線を与えた時や, 削孔不良の時に生ずる。
3. 不発は, 雷管の破損, 雷管の位置不良, 発破孔内の ANFO の異常見かけ比重, あるいは発破孔の ANFO が空孔に漏れている場合に生ずる。この ANFO の空孔への漏れは発破孔の孔底が空孔に接近しすぎた時に起こる。エマルジョン爆薬の場合は ANFO のようにエアギャップに対し敏感でないでこのような不発は生じないと考えられる。
4. 発破結果のうち成功と中間あるいは不成功のうち適当な理由を示せなかったものを, 装薬量と第1発破孔の抵抗線で示し実際の成功例を式で表現できるよう試みた。その考察の結果, 次のような分析がえられた。
 - 1) Langefors ら⁶⁾の塑性変形あるいは焼結の限界抵抗線は本実験に対しては30cmであるが, 少し広くすることが可能である。
 - 2) 岩石係数とウエートストレングスを導入して係数を修正した Langefors ら⁶⁾の装薬計算式は本実験においては Holmberg の修正式より適合性が高い。

謝辞: 最後に, 本実験の実験場所を提供いただき種々便宜をお図り頂いた武甲鉱山の各位及び関係者の協力に謝意を表します。

参考文献

- 1) 加納米二, 大塚昌彦: 4mの長孔発破に挑む今市発電所導水トンネル, トンネルと地下, 第14巻, 2号, pp.178-183, 1983.2.
- 2) Ouchterlony, F.: Some Recent Research and Development in Swedish Tunnel Blasting, SveDeFo Report DS 1992.1.
- 3) 佐藤建二, 渡辺進, 堀場秀享: 40%の突っ込みで掘る山梨リニア実験線 九鬼トンネル, トンネルと地下, 第25巻, 12号,

- p.995-1001, 1994.12.
- 4) 小池弘昭, 柴田浩, 小早川忠行, 小泉直人: NONEL 雷管と ANFO 爆薬による長孔発破 北陸新幹線 五里峯トンネル上田工区, トンネルと地下, 第 25 巻, 12 号, pp.895-900, 1994.11.
 - 5) 岡村永造, 根征喜, 河野興: 近接するトンネル間を制御発破で掘る 中央本線 新深沢第 2 トンネル, トンネルと地下, 第 26 巻, 12 号, pp.1007-1017, 1995.12.
 - 6) Langefors, J. and Kihlström, B.: The Modern Technique of Rock Blasting, Almquist & Wiksell, Stockholm, 1978.
 - 7) Holmberg, R.: Blasting, Chapter 1, Charge Calculations for Tunneling, *Underground Mining Methods Handbook*, pp.1580-1589, W. Hustrulid, SME-AIME, New York, 1983.
 - 8) Ouchterlony, F., Niklasson, B., Björkman, M. and Ragnasson, A.: Storsjö tunneln, a Follow up of Blasting in Argillaceous Shale. *SveDeFo Report DS 1991:4*, 1991. (in Swedish)
 - 9) Nie, S., Nordqvist, A. and Öqvist, J.: Pressurization of an Explosive in a Blast-hole, *SveDeFo Report Ds 1991:5G*, 1991. (in Swedish)
 - 10) Singh, S.P.: Mechanism of Cut Blasting, *Trans Inst Min Metal*, vol.104, pp.A134~A138, 1995.
 - 11) Koorem, B.: The Spiral Cut in Drifting and Tunneling, *Report 1992:088E, Luleå University of Technology, Luleå, 1992* (in Swedish)

(1998. 3. 12 受付)

PARALLEL HOLE CUT BLASTING TESTS WITH ANFO AND EMULSION EXPLOSIVES

Finn OUCHTERLONY, Yoneji KANO, Hideo MINAMIDE and Koji NAKAGAWA

Cut blasting tests were performed in an open pit of a limestone mine. The goals were to confirm earlier experience in blasting parallel hole cuts with emulsion explosives, to obtain the relation between charge concentration and burden, and to obtain basic data for ANFO in rounds with 4 m advance.

The goals of the project have been reached; basic data for ANFO in 4m long rounds have been obtained and a design formula for parallel hole cuts which is useful both for ANFO and decoupled emulsion explosives has been found.

Our experience of the requirements for obtaining good breakage in a four-section cut have been listed. In order to obtain a better design basis for parallel hole cuts, the effect of the following factor should be investigated: primarily the cooperation of multiple relief holes and decoupling, and to some extent initiation delay and bad drilling.