あんな発破　こんな発破

発　破　事　例　集

平 成 １４ 年 ３ 月

日　本　火　薬　工　業　会

はじめに

紀元前４～５世紀ごろに戦いで用いられたギリシャ火が最初の「火薬」といわれています。その後、主として兵器用として発達し、１３～１４世紀ごろには推進用のほか、発射剤、焼夷剤、爆破剤及び信号用などにも用いられました。 １７世紀になると土木や採鉱など鉱工業用にも利用され、１９世紀後半にダイナマイトや雷管が発明されるとその方面の用途も次第にひろがり、発破の基礎が確立されました。以来、発破の歴史は、１５０年以上連綿と続いています。

発破は、戦後の日本の復興にも大いに関係しました。石炭、鉱石、石灰などの鉱物資源の採掘はもとより、ダム、発電所、鉄道、道路の建設など、その貢献度は計り知れません。この間、発破規模の多様化、大型化に伴い、安価で安全な火薬類へシフトしながらも、その需要は着実な伸びを示していました。
しかし、近年、経済発展に伴う社会情勢の変化が著しく、環境に対する意識改革が進むにつれて、発破による振動や騒音などが原因の環境問題が表面化するようになりました。

このような状況の中で、私たちの諸先輩はいろいろな発破技術を駆使することによって、幾多の難しい環境問題を克服しながら、素晴らしい成果を上げて来られました。そして、それらの貴重な経験を、いろいろな場所で、様々な方法で発表しておられます。私たちは、現在のように意識改革が進んで環境問題が議論されているときだからこそ、それらの尊い記録を、是非活用すべきであると考え、この小冊子「**あんな発破　こんな発破　発破事例集**」をまとめました。

私たちはこの中で、発破に介在する代表的な環境問題である「振動」と「騒音」について解説するとともに、それらに関連した事例を中心に、その他の「いろいろな発破技術」を駆使した事例を紹介しました。本書が、若手土木技術者にとって、少しでも発破の長所を理解することに役立ち、また、厳しい環境問題下においても発破工法が有効であることを認識していただけるようであれば、こんな嬉しいことはありません。

本書は、試行錯誤の末にまとめ上げたもので、まとめ方やその内容について不備な点も多いことと思います。今後は、国内の事例に限らず海外の事例を紹介するなど、若手技術者向け小冊子との役割に止まらず、発破技術者の参考書としてもご利用いただける充実した内容の小冊子にしたいと考えております。ご利用の皆様の率直なご意見をお願いします。

最後になりましたが、この発破事例集を発行するに当たり、文献の使用を許諾していただきました原著者並びに関係団体の方々に心から御礼を申し上げます。

平成１４年３月
日本火薬工業会
専務理事　橋本淳二

目　　　　次

（頁）

第一章　発 破 振 動

1．振動について

1.1 振動について

地面上のある点の振動、あるいは物体上のある部分の振動という場合、我々が直感的に感知できるのは、物の動きの量、変位である。

正弦波の振動の場合、ある時間 t における変位 A_t は(1-1)式で表される。

$$A_t = Y \sin \omega t \quad \cdots\cdots(1\text{-}1)$$

Y：振幅　　ω(=2πf)：角振動数　　f：周波数

振動を表すには変位のほかに、変位速度 V、変位加速度αがある。振動が正弦波の場合、これらの最大値の関係は(1-2)(1-3)式で表される。

$$V = 2\pi f A \quad \cdots\cdots(1\text{-}2)$$

$$\alpha = 2\pi f V = (2\pi f)^2 A \quad \cdots\cdots(1\text{-}3)$$

従って、周波数 f と、変位 A、変位速度 V、変位加速度αのうちどれかを測定すれば、他は計算で求めることができる。

振動規制法では、振動は振動レベル(VL)で規制され、その単位は dB(デシベル)である。振動レベルと変位速度は、周波数が 8Hz 以上の振動では理論的に(1-4)式の関係が成り立つ。※1

$$VL = 20 \log V + 91 \quad \cdots\cdots(1\text{-}4)$$

VL：振動レベル(dB)

V：変位速度(cm/s)

1.2 振動の単位

振動の単位を表 1-1 に示す。※2

表 1-1　振動の単位

	基本単位	実 用 単 位
振　　幅(A)	cm	mm(=10^{-1}cm) μm(ミクロン=10^{-4}cm)
変位速度(V)	cm/s	kine(カイン=cm/s) mm/s(=10^{-1}cm/s)
変位加速度(α)	cm/s^2	gal(ガル=cm/s^2) g(ジー＝980cm/s^2)
周 波 数(f)	Hz	Hz(ヘルツ) c/s(サイクル)

一般的に、発破振動では変位速度(cm/s)が、自然地震では変位加速度(cm/s^2)が用いられる。

発破振動で変位速度が用いられるのは、変位速度の大きさと建物の被害の程度との関係が比較的一致するためである。Langefors らによって示された地盤振動の振幅と周波数、被害の程度の関係を図 1-1 に示す。

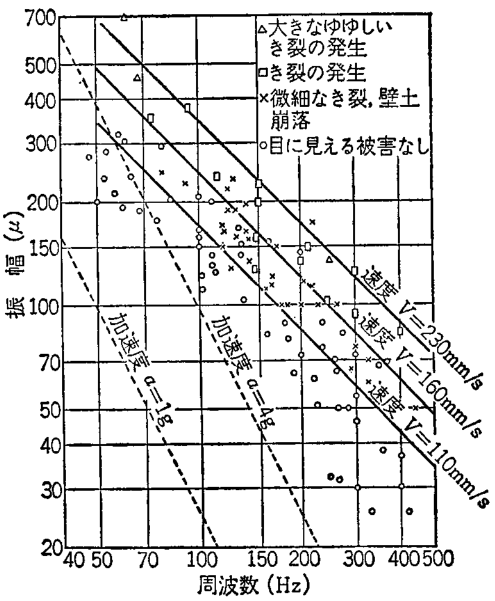


図 1-1　地盤振動の振幅と周波数、被害との関係

この図から、同一程度の損傷が、両対数グラフ上で－1 の傾きを示している。これは、変位速度一定の傾きに等しいことを表しており、変位速度の大きさと建物の被害の程度との関係が一致することが分かる。[※1]

1.3 発破振動の特徴と自然地震との比較

(1) 影響範囲

発破によって発生するエネルギーは小さく、局部的な振動であるため、発破振動が伝わる範囲は狭い範囲に限られる。

自然地震は、数百 km にわたって振動が観測される。しかし、発破振動は斉発薬量にもよるが、せいぜい数百 m の範囲で振動が感じられる程度である。

(2) 周波数

自然地震に比べて発破振動の周波数は高い。

自然地震の周波数は 1～5Hz 程度であるが、発破振動の場合 10～200Hz である。

このように、自然地震に比べ周波数が大きく異なるため自然地震と発破振動を単純に比較することはできない。例えば、震度 5(80～250cm/s^2)の地震の場合、耐震性の低い木造構造住宅は、壁や柱が破損するものがあるが、発破振動で同程度の変位加速度が発生しても、周波数が大きいため建物への影響が生じることはない。比較例を表 1-2 に示す。　(感じ方については表 1-5、図 1-2 参照)

表 1-2　発破振動と自然地震の比較

	自 然 地 震	発 破 振 動
変位加速度	80 gal(震度 5)	80 gal
周　波　数	2 Hz	50 Hz
変 位 速 度	6.4 cm/s	0.25 cm/s
変　　　位	5100μm	8μm
人間の感じ方	多くの人が身の安全を図ろうとする 一部の人は、行動に支障を感じる	一般に多くの人々が振動を感じる

(3) 振動継続時間

発破振動は、地震に比べ振動継続時間が短い。

地震の振動継続時間は、数秒から長い場合は数分にもなることがある。しかし、発破振動は単発発破であれば、ほとんどの場合 1 秒以内で振動は収まる。

1.4 発破振動の予測式

発破振動の予測式は、一般的に(1-5)式で表される。

$$V = K \times W^{m} \times D^{n} \quad \cdots\cdots(1\text{-}5)$$

V：変位速度(cm/s)　　　K：発破条件や岩盤特性によって変化する係数
W：段当たりの薬量(kg)　　D：発破場所からの距離(m)

ここで、m は通常 0.5～1.0 の範囲で、n は−2 前後の値となることが多い。火薬メーカーから提案されている推定式と K の値の例を表 1-3 に示す。

表 1-3　発破振動推定式と K の値

	推 定 式	区　　分	K の値
日本化薬※1	$V = K \times W^{0.75} \times D^{-2}$	トンネル発破の心抜	450～900
		トンネル発破の払い	200～500
		トンネル発破の踏まえ	300～700
		す か し 発 破	200～500
		大口径ベンチ発破	100～300
		盤下げ、ゆるめ発破	300～2000
旭 化 成※2	$V = K \times W^{2/3} \times D^{-2}$	トンネル発破の心抜	500～1000
		トンネル発破の払い	200～500
		明 か り 発 破	200～500
日本油脂※3	$V = K \times W^{0.75} \times D^{-1.5}$	トンネル発破	80±40
		大口径ベンチ発破	20±10
		小口径ベンチ発破	50±30
		明 か り 発 破	50±30

1.5 変位速度と振動レベルの関係

振動規制法では、振動レベルで振動値が規制されるため、発破振動についても振動レベルで管理されることが多くなっている。

前述のように、周波数が 8Hz 以上の振動では変位速度と振動レベルの関係は $VL = 20\log V + 91$ で表される。しかし、この式は鉛直方向の連続正弦振動に対して成立する式であり、発破振動のように 80Hz 以上の高い周波数を含む振動継続時間の短い振動に適用すると、振動レベルを過大に評価することになる。変位速度と振動レベルの関係についての報告を表 1-4 に示す。

表 1-4　変位速度と振動レベルの関係

提 案 者	関　　係　　式
佐　々	$VL = 20\log V + 91 - (5\sim15)$
清　水	$VL = 20\log V + (81\sim84)$
北　村	$VL = 20\log V + 84$
国　松	$VL = VL_S + 8\log(1400/Tt)$ $VL_S = 20\log V + 85 + 10\log(1 - e^{-Td/\tau})$ VLs：単発発破の振動レベル Tt：秒時差(ms)使う雷管で決定 明かり発破：0.3 秒 トンネル発破：0.15 秒 τ：時定数(0.63)

研究者によって若干異なるが、定数の平均は 83 程度となる。従って、事前検討の段階では、(1-6)式を用いて計算すれば大きな誤差はないものと考える。

$$VL = 20\log V + 83 \quad \cdots\cdots(1\text{-}6)$$

2．振動管理値について

2.1 人体及び家屋への影響及び管理値

発破振動の人体への影響は、不安感や驚き等の心理的影響、睡眠妨害等の生理的影響、仕事が中断される活動妨害等がある。

(1) 振動感覚閾値

全く振動を感じない状態から振動を大きくしていった場合、ある大きさ以上になると振動を感じるようになる。これを振動感覚閾値という。

振動感覚閾値は個人差があり、必ずしも一定でないが、ISO の指針や地震の震度階等から、振動を感じ始める振動レベルは 55dB 程度と考えられる。地震の震度階を表 1-5 に示す。※4

表 1-5　気象庁震度階級と対応する変位加速度、振動レベル

震度	人　　間	木造構造物	鉄筋ｺﾝｸﾘｰﾄ構造物	加速度 (cm/s^2)	振動レベル (dB)
0　無感	人は揺れを感じない。			0.8 以下	55 以下
1　微震	屋内にいる人の一部がわずかな揺れを感じる。			0.8～2.5	55～65
2　軽震	屋内にいる人の多くが揺れを感じる。眠っている人の一部が目を覚ます。			2.5～8.0	65～75
3　弱震	屋内にいる人のほとんどが、揺れを感じる。恐怖感を覚える人もいる。			8.0～25	75～85
4　中震	かなりの恐怖感があり一部の人は身の安全を図ろうとする。眠っている人のほとんどが、目を覚ます。			25～80	85～95
5 弱 強震	多くの人が身の安全を図ろうとする。一部の人は、行動に支障を感じる。	耐震性の低い住宅では、壁や柱が破損するものがある。	耐震性の低い建物では、壁等に亀裂が生じるものがある。	80～250	95～105
5 強 強震	非常な恐怖を感じる。多くの人が、行動に支障を感じる。	耐震性の低い住宅では壁や柱がかなり破損したり、傾くものがある。	耐震性の低い建物では、壁、梁、柱等に大きな亀裂が生じるものがある。耐震性の高い建物でも壁等に亀裂が生じるものがある。		
6 弱 烈震	立っていることが困難になる。	耐震性の低い住宅では、倒壊するものがある。耐震性の高い住宅でも、壁や柱が破損するものがある。	耐震性の低い建物では、壁や柱が破壊するものがある。耐震性の高い建物でも壁、梁、柱等に大きな亀裂が生じるものがある。	250～400	105～110
6 強 烈震	立っていることができず、はわないと動くことができない。	耐震性の低い住宅では、倒壊するものが多い。耐震性の高い住宅でも、壁や柱がかなり破損するものがある。	耐震性の低い建物では、倒壊するものがある。耐震性の高い建物でも、壁や柱が破壊するものがかなりある。		
7　激震	揺れにほんろうされ、自分の意志で行動できない。	耐震性の高い住宅でも、傾いたり、大きく破壊するものがある。	耐震性の高い建物でも、傾いたり、大きく破壊するものがある。	400 以上	110 以上

(2) 睡眠への影響

振動レベルと睡眠の関係は、地表の振動値に換算して、表 1-6 のようにまとめられる。※5

表 1-6　振動の睡眠への影響

地表の振動値	睡 眠 へ の 影 響
55dB 以下	睡眠への影響はない
60～64dB	浅い睡眠に対して影響が見られる
69dB 以上	深い睡眠にも影響がではじめる

(3) 振動規制法

振動規制法では、発破振動に関する規制はない。

一般の振動及び特定建設作業での振動規制値を表 1-7 に示す。※5

表 1-7　振動規制法による規制値

	区　分	昼　　間	夜　　間
道路交通振動	第 1 種区域	65dB	60dB
	第 2 種区域	70dB	65dB
特 定 工 場	第 1 種区域	60dB 以上 65dB 以下	55dB 以上 60dB 以下
	第 2 種区域	65dB 以上 70dB 以下	60dB 以上 65dB 以下
特定建設作業	-	75dB 以下	-

※第 1 種区域は、良好な住居の環境を保全するため、特に静穏の保持を必要とする区域及び住居の用に供されているため、静穏の保持を必要とする区域。

※第 2 種区域は、住居の用に併せて商業、工業の用に供されている区域であって、その区域内の住民の生活環境を悪化させないため、著しい振動の発生を防止する必要がある区域。

※特定建設作業とは、くい打機、くい抜機、舗装版破砕機、ブレーカーを使用する作業。鋼球を使用して建築物その他の工作物を破壊する作業。

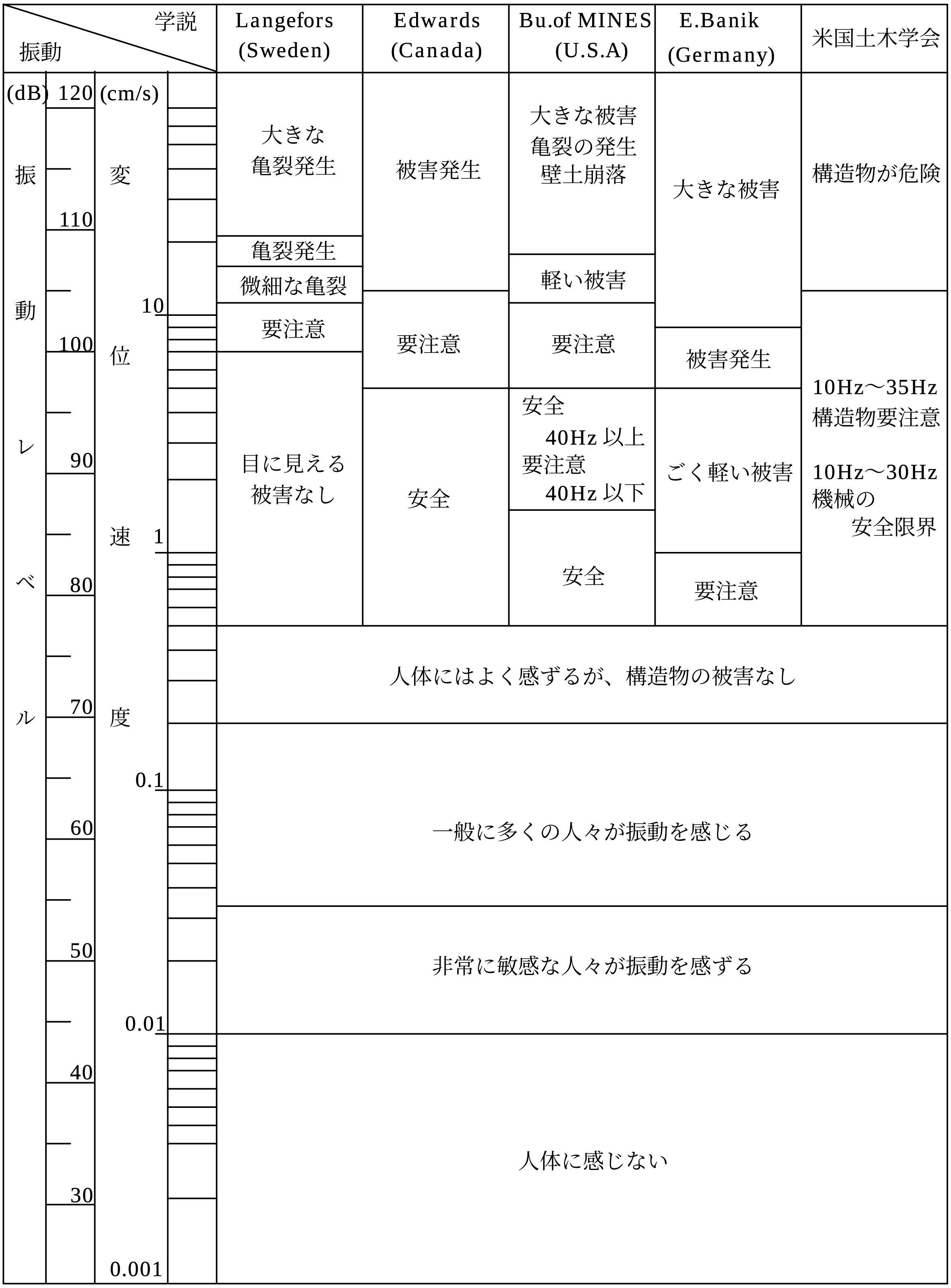
(4) 家屋への影響

発破振動と被害の関係を次ページの図 1-2 に示す。これによると、建物に対して影響を与えない振動の大きさは 0.5～1.0cm/s と考えることができる。

雑喉氏は、民家に対する発破振動の影響について表 1-8 のようにまとめている。※6

表 1-8　発破振動の民家に対する影響

0.2cm/s 以下ならまず問題はない。
0.2～0.5cm/s 程度ならば、感覚面では振動を感じても、民家に被害を及ぼすことはまずない。(あえていえば震度 1 程度)
0.5～1cm/s 程度ならば、ある特定の弱い部分に限ってみれば小さな被害が発生する場合もあるが、補修困難なほどの大きな損傷は発生しないと考えられる。(あえていえば震度 2 程度)



※変位速度と振動レベルの換算式　$VL = 20 \log V + 83$

図 1-2　発破振動と被害の関係

(5) 振動管理値に対する提言

火薬学会より提言されている振動規制値を表 1-9 に示す。

表 1-9　発破振動の管理値(提言値)

		振　　動(周波数)		
対　象　＼　周波数		10Hz 未満	10～50Hz	50Hz 以上
人 (dB)	昼　間	73 暗振動＋30	79 暗振動＋30	85 暗振動＋30
	夜　間	58 暗振動＋20	64 暗振動＋20	70 暗振動＋20
構造物 (cm/s)	強度の明確な構造物	1.25	2.5	5.0
	一般構造物(民家)	0.50	1.0	2.0
	重 要 な 構 造 物	0.25	0.5	1.0

※人を対象とした振動レベルは表中のいずれか小さい方の値を提言値とする
※周波数分析のできない場合は、10Hz 未満の値を適用する

また、コンクリート構造物発破解体工事保安技術指針(全国火薬類保安協会編)では、人体に対する影響も含め、周辺環境に対する振動の影響を与えないための管理目標値を、最大 89dB としている。

(6) 振動管理値の例

各種報告によると、民家に対する発破振動の管理値は、

管理値が変位速度の場合 ･････････ 0.05～0.2cm/s　(57～69dB)
管理値が振動レベルの場合 ･･････ 55～75dB　(0.04～0.4cm/s)
※( )内の数値は(1-6)式での換算値

としている場合が多い。

2.2 コンクリート構造物への影響及び管理値

既設のコンクリート構造物に対しては、コンクリートの強度から理論的に管理値を求めることができる。※7

(1) 計算方法

一般にある材料内に発生する変位速度と応力の間には(1-7)式が成立する。

$$\sigma = \frac{\rho C V}{g} \quad \cdots\cdots (1\text{-}7)$$

σ：応力(kgf/cm^2)　　ρ：材料の密度(g/cm^3)
C：材料の弾性波速度(cm/s)　　V：発生変位速度(cm/s)

この式は、棒を伝わる一次元波に成り立つ式で、通常の三次元の材料中を伝わる波には(1-8)式が適用できる。

$$\sigma = \frac{\rho C V}{g} \times \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{1-\nu} \quad \cdots\cdots (1\text{-}8)$$

ν：材料のポアソン比

《計算例》

コンクリートの引張強度を 20kgf/cm^2、密度を 2.5 g/cm^3、弾性波速度を 3000m/s、ポアソン比を 0.25 とすれば、

$$V=\frac{\sigma g}{\rho C}\times\frac{1-\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)}=\frac{20000\times 980}{2.5\times 300000}\times 1.2=31.4\ (\mathrm{cm/s})$$

となる。

(2) 実験例

トンネルの覆工及び吹付コンクリートにクラックが発生し始める限界値を実験で求めた事例を表 1-10 に示す。※7

表 1-10　覆工、吹付コンクリートのクラック発生実験事例

工 事 名 称	対　　象	限 界 値
己斐トンネル	覆工コンクリート	30cm/s 以上
小木津トンネル	覆工コンクリート	30～40cm/s 以上
若山トンネル	吹付コンクリート	70cm/s 以上

(3) 振動規制値

(財)鉄道総合技術研究所の既設トンネル近接施工対策マニュアルでは、トンネルの健全度によって発破振動の規制値を決めている。健全度区分を表 1-11 に、許容値を表 1-12 に示す。※8

表 1-11　健全度判定区分

判定区分	運転保安等に対する影響	変 状 の 程 度	措　　　置
AA	危　険	重　大	直ちに措置
A1	早晩脅かす 異常外力の作用時危険	変状が進行し、機能低下も進行	早急に措置
A2	将来脅かす	変状が進行し、機能低下の恐れ	必要な時期に措置
B	進行すれば A ランクになる	進行すれば A ランクになる	監視(必要に応じて措置)
C	現状では影響なし	軽　微	重点的に検査
S	影響なし	な　し	―

表 1-12　発破振動の許容値

既設トンネル覆工の 健全度判定区分	許容振動速度
AA	2 cm/s
A1，A2	3 cm/s
B，C，S	4 cm/s

注　1)覆工に落下の可能性のあるクラックがある場合や止水用の薄いモルタル等がある場合は覆工の健全度判定区分によらず 2 cm/s とする。
2)落下防止工等の処置済みの場合は 4 cm/s としてよい。

(4) 振動管理値の例

構造物に対する発破振動の管理値は、(1-8)式で求めた値に 5～10 倍の安全率を見て、1～5cm/s とする場合が多い。管理値の例を表 1-13 に示す。

表 1-13　構造物に対する管理値の例

トンネル名称	管理値	施工条件
山陽新幹線　己斐トンネル	2.5	送水トンネルと立体交差　D=11.4m
中央自動車道　笹子トンネル	6.5	国道笹子トンネルと立体交差 D=17.0m
上越新幹線　六日町トンネル	1.0	北陸北線赤倉ﾄﾝﾈﾙと立体交差 D=1.8m
神戸市　布引トンネル	2.5	新幹線神戸トンネルと立体交差 D=34m
山陽自動車道　欽明路トンネル	5.0	欽明路トンネルに近接　D=5m

2.3 その他の保安物件に対する管理値

岩盤斜面に対する発破振動の影響について Oriard の示した値を表 1-14 に示す。

表 1-14　岩盤斜面に対する変位速度の影響

変位速度(cm/s)	岩盤斜面に対する影響
5.1～10.2	斜面上の浮石が落下
12.7～38.1	ゆるんだ岩石の崩落
63.5 以上	弱い斜面に損傷が起こる

原子炉に対する規制値の実績を表 1-15 に示す。原子炉に設置されている検知器は加速度計であるため、規制値は加速度となっている。※7

表 1-15　原子炉に対する規制値

工事名	規制値(gal)
島根原子力発電所 2 号機	40
女川原子力発電所 2 号機	22
伊方原子力発電所 3 号機	30

３．発破振動低減対策

3.1 雷管の段数を増す

振動推定式から分かるように、発破振動は段当たりの火薬量に比例する。従って、現場で最も安価で容易な対策は段当たり薬量を減らすことである。(最初の段階では、使用する火薬量を減らすのではなく、段当たりの火薬量を減らす。)

段当たり薬量を減らすためには、使用する電気雷管の段数を増す。電気雷管には DS(秒時間隔：250ms)と MS(秒時間隔：25ms)があり、それぞれ 20 段まで製造されている。

明かり発破では、デッキチャージによる分散装薬で段当たり火薬量を減らすことも有効である。

《段当たり薬量の求め方》

トンネル発破において 100m 地点での振動を 0.2cm/s 以下にする。

推定式は $V = K \times W^{0.75} \times D^{-2}$ 式を用い、心抜の K を 700、払いの K を 400 と仮定する。

$$\text{心抜} \cdots\cdot \quad W = \left(\frac{V \times D^2}{K}\right)^{1/0.75} = \left(\frac{0.2 \times 100^2}{700}\right)^{1/0.75} = 4.1\,\text{kg}$$

$$\text{払い} \cdots\cdot \quad W = \left(\frac{0.2 \times 100^2}{400}\right)^{1/0.75} = 8.5\,\text{kg}$$

となるので、段当たり薬量を、心抜 4.1kg、払い 8.5kg 以下で発破すればよい。

明かり発破(ベンチ発破)で、300m 地点の振動を 0.1cm/s 以下にするためには、K の値を 300 とすれば

$$W = \left(\frac{V \times D^2}{K}\right)^{1/0.75} = \left(\frac{0.1 \times 300^2}{300}\right)^{1/0.75} = 93\,\text{kg}$$

となるので、段当たり 93kg 以下で発破すればよい。

雷管の違いによる振動の特徴を表 1-16 に示す。現場にあった種類の雷管を選ぶことも対策の一つである。

表 1-16　電気雷管の種類と特徴

DS 電気雷管	MS 電気雷管
振動を完全に分離することができる	振動を完全に分離できない場合がある (このような場合は、1～2 段抜きで発破する)
起砕効果が悪くなる場合がある	起砕効果は DS に比べよい
振動を感じる時間が長くなる	振動を感じる時間が短い

(1) トンネル発破での心抜の対策

トンネル発破では通常 V カットによる心抜が行われるが、多くの場合心抜から発生する振動が最も大きくなる。心抜から発生する振動を抑えるには補助心抜を設けることが最も効果的である。補助心抜を設けることにより、心抜で発生する振動を 30～50%程度小さくすることができる。

補助心抜を設けた場合には、補助心抜により本心抜の荷が軽くなり振動も小さくなる。通常、補助心抜の K は心抜の K、本心抜の K は払いの K 若しくは払いと芯抜きの K の中間値を用いて段当たり薬量を求めることができる。

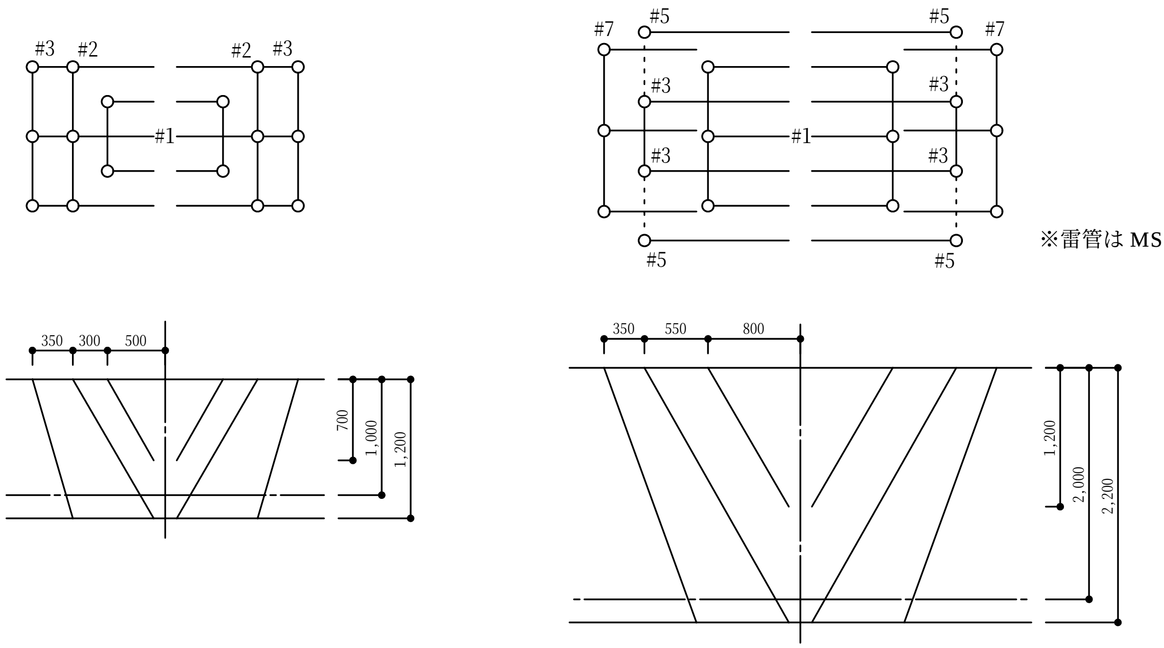


図 1-3　補助心抜の例

また、心抜を平行心抜(バーンカット)に変えることにより、V カットに比べ 40%程度振動を小さくすることができるとの報告もある。

(2) 特殊雷管の使用

電気雷管では、MS と DS を併用する場合、25～30 段程度の発破を行うことができる。

これ以上の段数が必要な場合には、表 1-17 のような特殊雷管が使用される。

表 1-17　特殊雷管

種　　類	特　　　　徴
秒時一様分散型 電気雷管	段数は 60 段。 通常の電気雷管と同じ発破器で起爆できる。
導火管付き雷管	導火管付き雷管とコネクターを組み合わせることにより、トンネルでは 100 段程度、明かりでは無限の発破が可能。
電 子 雷 管	トンネル用は 146 段(秒時間隔 30ms)。 明かり発破では、現場に合わせて秒時間隔を決める。

※電子雷管は p.14 (No.1)、p.16 (No.4)、p.21 (No.2)、p.22 (No.5,6) 参照
※導火管付き雷管は p.18 (No.9)、p.19 (No.1) 参照

3.2 発破規模を小さくする

雷管の段数を増しても問題が発生するような場合は、発破規模を小さくする。

トンネル発破では、掘進長を標準掘進長の半進行にする場合が多い。※p.16 (No.5)、p.17 (No.8) 参照

明かり発破では、ベンチ高を 1/3~1/2 程度にする。

3.3 分割発破を行う

切羽をいくつかのブロックに分けて、分割発破を行う。

※p.17 (No.8) 参照

明かり発破では、段発発破器を使用して分割発破を行う場合もある。

図 1-4　段発発破器の例

3.4 使用する爆薬の種類を変更する

振動対策用の火薬には、低爆速爆薬、低比重硝安爆薬、コンクリート破砕器がある。

(1) 低爆速爆薬　※p.17 (No.6)、p.18 (No.9) 参照

低爆速爆薬の爆速は 1500～2000m/s で含水爆薬に比べ半分以下の爆速である。一般的に爆ごう圧力の立ち上がりは、爆速の低いものほど緩やかで、発生する振動は小さくなる。また、低爆速爆薬の薬包径は 18mm 程度で、発破孔とのデカップリング効果(空間部分のクッション作用)により振動が小さくなる。

過去の報告例では、低爆速爆薬の振動はダイナマイト等の振動に比べ 60%程度になっている。[※9]

(2) 低比重硝安爆薬

低比重硝安爆薬は明かり発破で用いられ、その爆速は 2000m/s 前後で、ANFO 爆薬の 70~80%の爆速である。

ANFO 爆薬に比べ 20～40%の振動低減効果が期待できる。

(3) コンクリート破砕器　※p.17 (No.6)、p.24 (No.10) 参照

コンクリート破砕器は火工品に分類され、破砕薬は火薬で、穿孔内での燃焼速度は約 60m/ｓである。

市街地等で爆薬が使用できないような場所で使用される。

表 1-18　コンクリート破砕器の振動測定例　[※10]

例１				
薬　　種	薬量(g)	振動速度　cm/s(カイン)		
		10m 地点	20m 地点	30m 地点
コンクリート破砕器	300	0.25	0.06	0.03
3 号桐ダイナマイト	250	0.96	0.23	0.10
例 2				
薬　　種	薬量(g)	振動速度　cm/s(カイン)		
		20m 地点	50m 地点	70m 地点
コンクリート破砕器	900	0.044	0.017	0.009
〃	1800	0.081	0.036	0.015
3 号桐ダイナマイト	1500	0.49	0.14	0.061

3.5 破砕帯を設ける

振動伝播途中に破砕帯等がある場合には、その部分で振動が急激に減衰する。

トンネル発破では、外周に溝(スロット)を形成し、この溝を自由面として払い発破を行う方法が行われる。この方法による発破では、通常の発破に比べ K が 70%前後になるという報告がある。※11

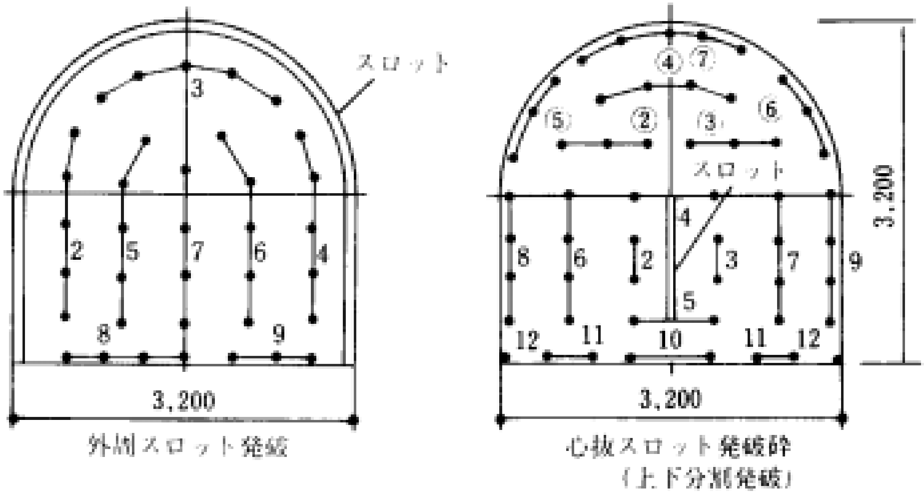


図 1-5　スロット発破の発破パターン

明かり発破で破砕帯を設ける場合には PS 発破が考えられるが、十分な溝の深さが必要なこと、PS 発破で大きな振動が発生することもあるため、あまり行われていない。

4．振動対策実施例(トンネル発破)

4.1 振動対策実施例

No.1	トンネル発破振動軽減工法
文献名	EDD による全段面制御発破の研究　第 2 報
著　者	岩崎孝高、井下浩正、織田律生、富山紀光、坂元 緑、松岡秀之
掲載誌	火薬学会　1998 年度年会講演要旨集　pp.67～68

1．概要

1.1 目的

トンネル中央部直上、土被り 17m 地点にある浄水場及び坑口周辺に点在する民家に対する発破振動の軽減。

1.2 結論

・EDD(電子雷管)による全断面制御発破工法を用い、一孔一段に振動波形を分離させることにより、施工サイクルを落とすことなく、振動を制御することができた。

・浄水場に対して発破振動の影響を与えることなく、且つ坑口周辺に点在する民家への影響も最小限に抑制し、施工を終了した。

2．施工方法

2.1 発破振動許容値

トンネル中央部直上にある浄水場に対する発破振動許容値を 1.96cm/s に設定した。

(許容値設定経緯は、「発破振動の周辺への影響と対策」／鹿島出版会※6　参照)

2.2 EDD 採用経緯

発破振動を許容値以下に制御することは勿論のこと、発破の効率性、経済性及び安全性を考慮し、一段一孔の全段面発破が可能な EDD(EDD 制御発破工法)を採用することになった。

2.3 試験施工

試験発破の発破振動測定結果を表 1 に示す。現行発破及び EDD 制御発破工法における K 値を算出し、発破振動制御区間の設定を行った。本試験発破において、当該トンネルにおける K 値を表 2 に、発破振動制御区間を図 1 及び表 3 に示す。

表 3 より、浄水場直下手前 28m から通過後 20m 区間において、EDD 全断面制御発破工法を採用し、発破振動の制御を行うこととした。EDD 全断面制御発破工法を採用することにより、浄水場直下でも、一発破進行長を落とすことなく、発破振動を規制値(管理値)以下に制御可能であることが予測された。

2.4 実施工結果

当該現場では、振動計測を簡便にするため、振動レベル計を採用し、試験施工で算出された振動速度への換算式により振動値を管理した。実施工における発破振動測定結果を表 4 に示す。

表 1　発破振動測定結果(試験発破)

工　法	測点	距離 (m)	成分 (軸)	振動速度　(cm/s)			振動レベル (dB)
				心抜き	2 段	最外周	
現行発破	1	56.7	Z	0.569	0.103	0.165	76
	2	69.1	Z	0.533	0.060	0.128	76
EDD 発破	1	57.8	Z	0.121	0.128	0.110	71
	2	71.1	Z	0.098	0.098	0.090	71

表 2　各発破の K 値

	心抜き	払 い
現 行 D S 発 破	1200	200
EDD 全断面制御発破	800	800

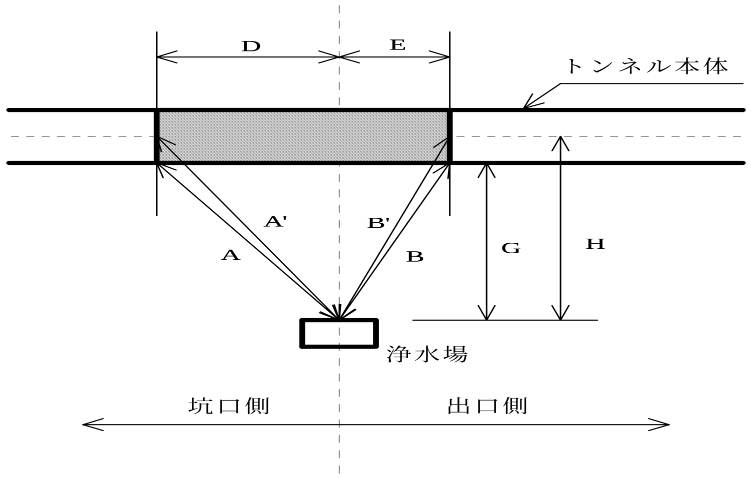


図 1　制御区間算出方法

表 3　制御区間算出結果

		斉発薬量 (kg)	K 値	距　　離 (m)			
				A or A'	B or B'	C	D
通過前	心抜き	3.0	1200	35.7	-	27.7	-
	払 い	10.0	200	21.2	-	12.6	-
通過後	心抜き	3.0	840	-	29.9	-	19.6
	払 い	10.0	140	-	17.8	-	5.2

表 4　発破振動測定結果(実施工)

岩種	使用雷管	支保 No.	振動レベル (dB)	換算振動速度 (cm/s)	浄水場からの距離 (m)
CⅡ	DS	344	66	0.507	36.1
CⅡ	EDD	345	61	0.285	35.1
		354	66	0.507	28.5
		359	69	0.716	23.3
		365	72	1.012	19.1
		369	70	0.804	17.4
		379	66	0.507	18.8
		387	64	0.403	22.7

4.2 振動対策事例(要約)

<table>
<tr><th>No.</th><th>題　目</th><th>概　　　要</th><th>掲　載　誌</th></tr>
<tr><td>2</td><td>低騒音・低振動掘削工法(1)</td><td>本報告書は、低公害掘削工法分科会が中心となり、施工事例等を踏まえた現状技術や最新技術に関して実施した調査･研究報告書である。
本報告書では、振動・騒音の概要(特性・計測単位)や発破振動・発破音の特徴及び規制値等についてまとめている。</td><td>トンネルと地下
1993, 4
第 24 巻 4 号
pp.65～72
井上堯之、雑喉 謙</td></tr>
<tr><td>3</td><td>低騒音・低振動掘削工法(2)</td><td>現地の制約条件に従い、制御発破工法等、最適な工法の提案ならびに制御発破の具体事例が紹介されている。
発生源対策としては、装薬量の低減、予備発破(ゆるめ発破)、使用する爆薬の変更、装薬方法の変更(デカップリング装薬)等がある。
また、発破工法では、PS 発破、SB 発破(発破による岩盤損傷領域低減)、心抜き発破方法の変更、多段発発破方法、SD スロット発破工法等がある。</td><td>トンネルと地下
1993, 4
第 24 巻 5 号
pp.65～71
雑喉 謙、坂野良一
河原一則、南出英男
池田 真</td></tr>
<tr><td>4</td><td>EDD による全断面制御発破の研究</td><td>心抜き発破に瞬発電気雷管、DS2 段及び起爆秒時間隔の異なる EDD(電子遅延式雷管)を用いた試験発破を実施し、発破振動推定式のＫ値を求め、発破振動軽減効果を確認した。
発破振動推定式　$V = K \times W^{2/3} \times D^{-2}$　(cm/s)
ここで、Ｋ：定数
Ｗ：段当たり装薬量(kg)
Ｄ：距離(m)
<table><tr><td>電気雷管</td><td>瞬発</td><td>2 段</td><td>－</td><td>－</td></tr><tr><td>K 値</td><td>1024</td><td>574</td><td>－</td><td>－</td></tr><tr><td>EDD</td><td>10ms</td><td>20ms</td><td>30ms</td><td>40ms</td></tr><tr><td>K 値</td><td>623</td><td>519</td><td>454</td><td>459</td></tr></table>
これにより､起爆秒時間隔が長いほど振動低減上有利であることが確認された。</td><td>火薬学会 1996 年度年会講演要旨集
pp.89～90
篠宮勝利
佐々木郁男
織田律生、富山紀光
佐久間信彰</td></tr>
<tr><td>5</td><td>第 2 新神戸トンネルの計画と施工</td><td>第 2 新神戸トンネル(全 6 工区)の第 2 工区では、既設の新神戸トンネルと近接(約 50m)し、近隣に民家が点在するため、また、第 5 工区では、大規模住宅団地の直下 150～190m で、かつ 800m 区間を掘削するため、制御発破工法を採用した。
第 2 工区では、既設の新神戸トンネルの振動速度管理目標値を 2cm/s とした。日々発破振動の測定を行い、次回以降の発破パターンにその結果を反映した｡心抜き発破に使用する雷管を MS 雷管へ変更し、さらに振動を低減するために、一発破進行長を短くすると同時に、一孔当たりの装薬量を制限した。</td><td>トンネルと地下
1986, 2
第 17 巻 2 号
pp.19～28
岡本利彦、中野 章</td></tr>
</table>

		第 5 工区では、斜坑と既設トンネルとの交差部において、既設トンネルの振動速度管理値を 2cm/s に設定した。心抜き部の中心にバーンホールを設け、さらに MS 雷管の 2、4、6 及び 8 段で分散させた場合、瞬発電気雷管を用いた場合と比較すると振動値は 1/3 程度に低減した。	
6	活線トンネルに超近接施工 (山陰本線夜久野トンネル)	新設の夜久野トンネルは、坑口部で営業線の既設夜久野トンネルと超近接施工であるため、計画、設計段階において地質調査、地山の挙動、施工方法等種々の検討を行った。 既設トンネル(レンガ造)の強度特性を考慮し、発破振動管理値を 5cm/s に設定した。 坑口付近の明かり工事の切り取りでは、H 鋼と軽量矢板で在来線を防護し、露出した玄武岩の切り取り作業には、コンクリート破砕器(CCR)を使用した。 坑口付近の側壁導坑では、ジャイアントブレーカーを使用し、一部発破可能な領域では少量の低爆速爆薬(アーバナイト)を使用した分割発破工法を採用した。 試験発破の結果から振動推定式($V = 1282 \times W^{3/4} \times D^{-1.88}$)を求め、発破不可能領域及び最大斉発薬量を算出した。 爆薬は、低爆速爆薬、雷管は MS 雷管を用い、既設トンネルへの影響を考慮し、心抜き発破は行わず、当り発破のみに使用した結果、最大 3.5cm/s 程度の振動に抑えることができた。	トンネルと地下 1987, 2 第 18 巻 2 号 pp.33～43 藤田晶宏 玉井浩次郎 青木宣雄
7	既設トンネルとの近接交差における発破振動の管理 (四国横断自動車道平山トンネル)	平山トンネル(下り線)は北坑口より約 300m の地点で水路トンネル(半径 1.65m、覆工厚 20～30cm)と約 30 度の角度で立体交差し、上方 15.7m で通過する。 覆工コンクリートの強度特性より、水路トンネルに被害が発生する振動値は、26.4cm/s と推定された。安全率を 10 倍に設定し、発破振動規制値を 2.6cm/s に設定した。 導坑の発破で得られた振動推定式 初　　段： $V = 709 \times D^{-2.08} \times W^{0.579}$ 後　　段： $V = 178 \times D^{-1.94} \times W^{0.667}$ 全装薬量： $V = 161 \times D^{-2.11} \times W^{0.665}$ より、水路トンネルまでの距離に応じて段当たり薬量を求めた。 導坑は 2.6cm/s 以下、上半は 1.0cm/s 以下で施工を完了することができた。	トンネルと地下 1987, 6 第 18 巻 6 号 pp.27～33 久吉哲太郎 磯野龍昭 岡　憲二郎
8	現在線直上の急崖部の坑口施工 (山陰本線第 1 保津トンネル)	現在線と約 33 度で交差し、坑口が現在線直上約 15m にあるため、本坑横から約 20m 離れて作業坑を施工した。 既設構造物の圧縮強度から推定される引張強度は $10kgf/cm^2$ となった。発破による振動応力が繰り返し作用することを考慮して安全率を 5 に設定した結果、許容振動値は 2.9cm/s と算出されたが、営業鉄道線の近接工事であることを考慮して、許容振動値を 2.0cm/s 以下とした。	トンネルと地下 1989, 9 第 20 巻 9 号 pp.15～25 藤岡繁樹 玉井浩次郎

		地質調査や過去の測定例から、発破振動推定式として次式を用い、最大許容装薬量を算出した。 心抜き部： $V = 213 \times W^{0.75} \times D^{-2}$ 払 い 部： $V = 122 \times W^{0.75} \times D^{-2}$ 坑口から 31～56m 区間(NATM)は、既設構造物までの距離が 19～33m となっており、全断面では装薬量が多くなるため、上半と下半に分割して発破パターンを決定した。 坑口から 21～31m 区間(在来工法)は、既設構造物に近接しているため、上半を 3 分割した発破パターンとし、かつ一発破進行長を 0.9m とした。 制御発破を必要とする全区間において、許容振動値 2cm/s を下回り、無事掘削を終了した。	
9	一孔一段で発破振動を軽減 (愛知用水二期幹線水路兼見 B サイホン工事)	立坑ならびに立坑に続く計画路線には民家、精密工場が近接しているため制御発破工法を採用した。 周辺民家に対して 0.4cm/s(昼間)、金型精密機械工場に対して 0.1cm/s の発破振動管理目標値を定めた。 立坑周辺に民家及び精密工場が近接しているため、騒音・低周波音対策として立坑上部に移動式防音蓋を設置し、50dB 程度の低減が可能になった。 発破工法の検討を行った結果、ノネル LP 雷管(起爆秒時 100～5000ms の 22 種)とスナップライン(起爆秒時 0、17、25、42ms)を組み合わせた多段発発破工法を採用した。 荷の重さの違いにより、一部異常値が確認されたものの、概ね発破振動管理目標値を満足する結果が得られた。	トンネルと地下 2000, 6 第 31 号 6 号 pp.35～40 東 世司美、石村 忍 竹内郁男、麻生敏美

５．振動対策実施例(明かり発破)

5.1 振動対策実施例

No.1	明かり発破振動軽減工法
文献名	放水路仮締切撤去で実施した 51 段発発破について
著　者	峰　重之、時岡忠弘、井上博之、西田　佑、吉田信生、野口勝己
掲載誌	工業火薬　Vol.46, No.1　1985　pp.24～30

１．概要

放水路仮締切部のコンクリート構造物を発破により撤去するに当たって、仮締切部から最短距離 5.5～10m の極近傍に新設の導流壁及び放水路コンクリート構造物がある。これらの保安物件に影響を与えない発破を実施する必要があり、斉発装薬量を最小限に抑制した多段発発破が必要と考え、いくつかの起爆方法を検討した。その結果、MS、DS 電気雷管及び Nonel 雷管との組合せを併用することにより 51 段発発破が可能となり、一段当たり最大薬量を 22.5kg(全体の爆薬使用量：639.75kg)以下とした多段発発破を実施した。

発破振動も最短地点で変位速度は、最高 9.4cm/s で許容内に抑えられ、満足すべきものであった。また飛石も完全に防護できた。

２．実施方法

2.1 起爆方法の検討

いくつかの起爆方法を検討し、多段発発破を行うために、

(1)MS 電気雷管：1、2、3、4、5、7、8、10 段

(2)DS 電気雷管：2 段～16 段

(3)DS 電気雷管(2～16 段)と Nonel 雷管(125ms 及び 175ms)との組合せ

を用いて、総計 51 段発とした。

2.2 穿孔及び装薬パターン

仮締切部発破場所より最短の所で 5.5mの距離に導流壁、8mの距離に放水路コンクリート構造物が存在する。発破振動を防止するために、斉発薬量を極めて小さくし一段当たりの孔数を少なくした。

解体撤去すべき放水路仮締切部付近の位置関係と、その穿孔パターンを図 1 に示す。

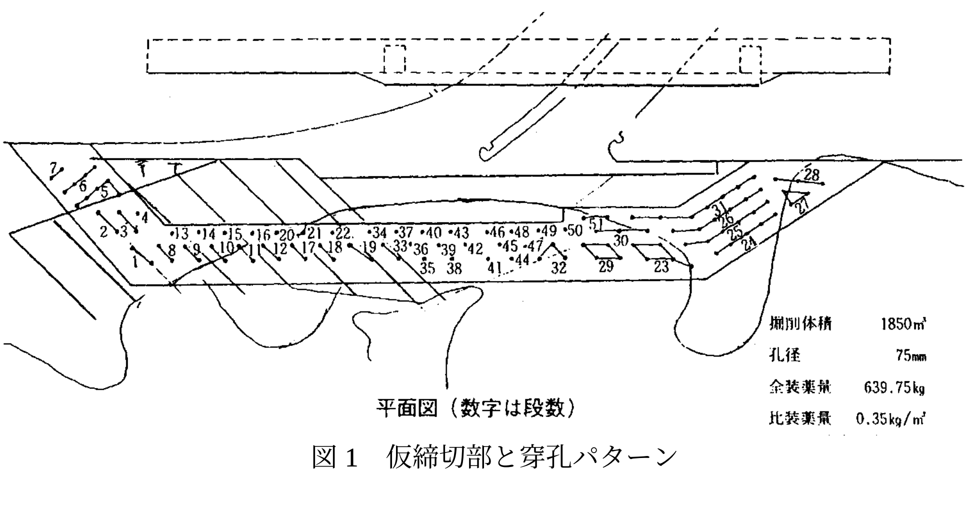


図 1　仮締切部と穿孔パターン

装薬量と穿孔数の概要：0.75kg／孔、穿孔数 11 孔(No.5、6、7)
1.5kg／孔、穿孔数 45 孔(No.23～31)
6.75kg～14.25kg／孔、穿孔数 55 孔

特に、保安物件に近い仮締切中央部(No.34～50)では、一段当たり一孔とした。

発破計画では発破振動を考慮し、若干弱装薬と思われる 0.35kg/m^{3}を採用した。掘削体積が 1,850 m^{3}であるので、全爆薬量は 640kg 程となる。

装薬方法は、斉発薬量をできるだけ少なくするためデッキチャージを採用した。カットオフ及び飛石の防止の為、通常の装薬よりも装薬重心を下に沈めたものとした。図 2 に装薬状況を示す。

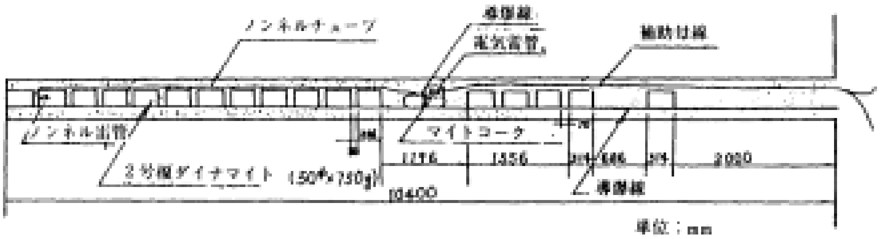


図 2　装薬状況　(10.4m 孔の例)

※図 2 は火薬と保安　51 段発の発破について(西田佑)より抜粋

2.3 許容振動値の検討

衝撃振動によって、コンクリート構造物に発生する応力及びコンクリートの圧縮強度と伝播速度との関係等より、変位速度の許容値を 19cm/s とした。

コンクリート構造物上で計測される変位速度は、端面での反射を考慮すると上記変位速度の 2 倍(=38cm/s)となる。安全率を 1.5 にとり、許容変位速度＝25cm/s として評価した。

2.4 飛石防護工

装薬完了後、ブルーシートを全面に覆い、その上を菱形金網で覆う等し、付近の高圧線に対する飛石防護を行った。

3．結果

導流壁及び放水路コンクリート構造物に何ら影響を与えず、満足すべき破砕結果を得た。なお、測定した振動の最高値は 9.4cm/s 以下で許容変位速度 25cm/s より小さく、また飛石も完全に防護することができた。

5.2 振動対策事例(要約)

<table>
<tr><th>No.</th><th>題　目</th><th>概　　　要</th><th>掲　載　誌</th></tr>
<tr><td>2</td><td>大迫水力発電所の設計と施工</td><td>ダムの真下に発電所を設置するため、ダム及び放流設備、導流壁等に近接する場所で、地山挙動を計測管理しながら発破掘削を行った。
試験発破を行い、発破振動推定式を求めた。
心抜き発破相当：$V=966\times W^{0.75}\times D^{-2}$
ベ ン チ 発 破：$V=(323\sim483)\times W^{0.75}\times D^{-2}$
振動規制値は事例及び各構造物の特性等を検討して次の値に決めた。
ダム基盤：0.5cm/s、バルブ室：2cm/s、導流壁：5cm/s
DS、MS 雷管を試しながら更に、設定時間が正確な電子雷管(EDD)を採用し、かつスリットカットを行い振動減衰を図る等した結果、若干管理値を越えたものがあったがほぼ満足でき、既設構造物に与えた影響も皆無で、工程も確保できた。</td><td>電力土木
1998, 1　No.273
pp.32～37
横井宏彦、小牧 忍
安藤仁志</td></tr>
<tr><td>3</td><td>露天堀りにおける斜面安定
(その３)</td><td>発破の振動を繰り返し受ける岩盤斜面は、その岩石構造上の粘着力や摩擦力が暫時低下し、斜面の強度が漸減して安全率が次第に減少する。
発破の影響としては、岩盤の振動が斜面安定に損害を及ぼす場合と、過度に岩盤を破砕し、その強度を劣化させる場合、の２つのタイプが考えられる。
岩盤の過度の破砕を制御し、発破振動の影響を軽減するには、
①発破規模の縮小、例えば装薬量を減らす。
②装薬の集中度を減らす。装薬を空間的に分散する。例えば多数の発破孔に分散する。
③装薬を時間的に分散する。例えばミリセコンド発破を採用する。
④装薬の密閉強度を減らす。例えばクッション発破、バッファー発破、スムース・ブラスティング等を採用する。
⑤斉発孔数を減らす。
等の方法がある。
振動速度の岩盤斜面に対する影響として、Oriard は次のように示している。
<table>
<tr><th>振動速度(cm/s)</th><th>岩盤斜面に対する影響</th></tr>
<tr><td>5.1～10.2</td><td>斜面上の浮石の落下</td></tr>
<tr><td>12.7～38.1</td><td>ゆるんだ岩石の崩落</td></tr>
<tr><td>63.5 以上</td><td>弱い斜面に損傷が起こる</td></tr>
</table>
※原文の単位は in/s であるが cm/s に変換した
発破振動の波形のピークを分離するための発破の遅延時間は、普通 9ms～15ms 以上とされているが、表土や軟岩の場合には大きくなる。</td><td>石灰石　1979, 3
No.178
pp.28～38
下村弥太郎</td></tr>
</table>

		斜面設計に際しては、将来発生すると思われる地震の大きさを仮定し、その震度における最大加速度を採り、滑ると思われる岩盤ブロックの質量に、この加速度を乗じて地震力を求め、これを斜面の安定計算に組み入れる。	
4	港湾しゅんせつ工事における発破振動の軽減	港湾しゅんせつ工事での水中発破において、発破振動問題により一発破の使用薬量が 3kg に規制され、工事の能率が大幅に低下した。発破振動軽減を主目的としてプレスプリッティング(PS)を使用した発破と、クローラードリルを使用した MS 発破を行い、次の効果を得た。 ①プレスプリッティングにより主体発破の振動を軽減することの可能性が認められた。主体発破のパターンとプレスプリッティングの深さや幅等、種種の条件については今後研究する必要がある。 ②クロラードリル使用の MS 発破は、従来の発破に比し、振動の減少と掘削能率の向上に効果のあることが確かめられた。	工業火薬 1978 Vol.39, No.2 pp.15～23 赤塚鉄夫、児島安喜 永井初己、前田 裕
5	EDD による発破振動・音の予測と軽減	高秒時精度電気雷管(EDD)による発破振動・音が最も小さくなる最適遅延秒時間隔を決定する技術手法を確立し、その有効性を実証するために現場実験を行った。 発破振動・音の予測に際して一番重要なデーターとなるのが単発波形である。コンピューターを用いて単発波形を重ね合せ、軽減目的に最も適した遅延秒時間隔を選択する。 石灰石鉱山にて単発波形の再現性を確認するために、信頼性確認実験を行い、次の結果を得た。 ①単発発破の再現性と波の重ね合せの原理を利用して、実発破の発破振動・音を予測することができる。 ②最適起爆秒時間隔の EDD を用いることにより、発破振動の軽減が可能である。 ③発破音の軽減には今後発破工法上の検討が必要である。 ④EDD を用いて各現場に最適かつ正確な時間間隔で発破することにより破砕効果を向上させることができる可能性がある。	工業火薬 1988 Vol.49, No.6 pp.367～373 山本雅昭、市川 清
6	EDD による発破振動軽減について(Ⅱ)	EDD を用いることにより、発破振動を軽減することができた。 ①採石場の掘削に伴い、近接する発電所の導水路に対する発破振動の影響が懸念された。導水路に損傷を与えないためには発破振動を 2.58cm/s 以下にする必要がある。発破振動軽減対策として EDD による試験発破を行った結果、約 40%振動軽減が確認された。これにより、当初導水路より 100mまでしか掘削できなかったが、約 45.6m まで掘削可能となった。 ②採石場において、EDD を使用することにより振動低減効果が認められ、発破規模を従来のおよそ 1.6 倍にまで拡大することができた。	工業火薬協会 1993 年度年会講演要旨集 pp.193～194 緒方雅幸、愛甲研一 山本雅昭 伊久美武秀 髙城三郎、矢野征男 日高栄利

7	デッキチャージ発破法による発破振動低減	石灰石鉱山でのベンチ発破で、発破振動の問題を解決するため、デッキチャージによる発破振動低減方法を確立した。 ①従来発破 根切れを確実にするため、メインホールとトーカットホールを交互に配置した発破。 ②デッキチャージ発破 メインホールの装薬を上下に２分割とし、上部岩石が 1/3 程度前方に押し出された時、下部岩石が動き出すような起爆秒時間隔(上下の時差は 75ms を中心とした)を設定した。これにより、飛石もなく、根切れも確実で、振動レベルは 5～10dB 低下した。	石灰石　1983, 9 No.205 pp.10～13 三輪加寿則 大野雅之
8	高段差 DS 発破による振動軽減対策	ベンチ発破での振動軽減対策として、段発発破が有効とされている。DS 発破では、0.25～0.75 秒程度のものを用いるのが一般的である。 当現場における瞬発斉発の振動の継続時間が 2 秒程度であることから、各段の振動を完全に分離するために延時秒時を最大 1.8 秒に設定し、DS の 3 段、10 段の組合せ試験を行った。その結果、0.5 秒の時間差(瞬発と DS3 段)の振動に比べ約 5dB 低減することが確認された。5dB の差は、装薬量を半減した場合に近い効果と考えられる。 初段に瞬発を使用しなかったのは、DS 雷管のバラツキによる振動低減効果を期待したもので、測定波形からもそのことが確認された。	石灰石　1984, 11 No.212 pp.32～39 喜多敬二
9	高精度秒時雷管による発破振動の低減	起爆方法による発破振動の軽減の目的として、高精度秒時雷管を用いてＭＳ雷管と比較試験を行った。また、デッキチャージによる振動低減効果の確認試験も行った。 砕石場の 6mベンチの発破で、高精度秒時雷管の秒時間隔は、現場での単発発破振動の波形の解析から 19mｓと 44mｓの 2 種類を用い、次の結果を得た。 ①高精度秒時雷管は、ＭＳ雷管より、振動レベルを 4～5dB 低減することができた。 ②高精度秒時雷管でデッキチャージを行うと MSD 通常法より 8～9dB、MSD のデッキチャージより 6dB 程度、振動レベルを低減することができた。	工業火薬協会 1995 年度年会講演要旨集 pp.3～4 松村也寸志 木村 歩､中村聡磯

10	建設における発破の現状と将来都市型発破の施工事例	振動を制御した明かり発破の実施例。(山陽自動車道倉敷インターチェンジ工事) 振動管理値は、 既設トンネル、コンクリート構造物：2.0cm/s 民家：0.1cm/s 精密機器：0.02cm/s とした。 保安物件までの距離に応じ、ANFO 爆薬、低爆速爆薬、コンクリート破砕器を用い、盤下げ発破を行った。振動推定式の K を比較すると、測点毎のバラツキがかなり大きいが、低爆速爆薬の K は ANFO 爆薬の 50～70%であった。	平成元年度 第 21 回基礎火薬学セミナー 坂野良一

【引用文献】

※1：発破振動対策について　日本化薬㈱技術資料
※2：発破振動について　旭化成㈱技術資料
※3：発破振動について　日本油脂㈱技術資料
※4：震度階級が変わります　気象庁
※5：新訂・公害防止の技術と法規(振動編)　公害防止の技術と法規編集委員会
※6：発破振動の周辺への影響と対策　雑喉 謙
※7：制御発破工法の実際　ジェオフロンテ研究会
※8：既設トンネル近接施工対策マニュアル　(財)鉄道総合技術研究所
※9：トンネル工事の発破振動および騒音対策に関する調査研究報告書　(社)日本トンネル技術協会
※10：コンクリート破砕器作業の安全　(社)全国火薬類保安協会
※11：無発破掘削工法“SD 工法"(㈱奥村組技術本部土木部)　石灰石

第二章　発 破 騒 音

1．騒音について

1.1 騒音の定義

騒音とは、「好ましくない音」の総称であると定義されている。発破において、爆薬の爆発に伴い強い衝撃波とガス膨張による圧力の波が発生し、空気や地盤等の弾性体の中を圧力波が伝播する。この圧力波を弾性波といい、地盤中を伝播する弾性波が振動、空気中を伝播する弾性波(以降、音波という)が騒音という感覚で感知される。

1.2 音の単位

音として感知される音波の性質を示すものとして、表 2-1 に示す単位が使用されている。

表 2-1　音波の性質を示す単位

種　類	単　位	内　　　　容
周波数 (f)	Hz (ヘルツ)	音波は、空気中を圧力の変化を伴って伝播する波で、１秒間に圧力が変化する回数を周波数と言う。
波　長 (λ)	m （メートル）	音波の波形で、あるピーク圧力から次のピーク圧力までの空間的長さを波長と言い、次の式で求められる。 波長＝空気中の音速(m/s)／周波数(Hz)
音　圧 (P)	Pa (パスカル)	音波が空気中を伝播する時、変化する圧力を音圧と言う。 音圧の実効値は、最大値の 70%($\sqrt{1/2}$)に相当する。
音圧レベル (L)	dB (デシベル)	音波は圧力変化を伴う波で、その圧力変化を音圧と呼び、一般的に実効値として考える。 音圧実効値と音圧の基準値から、音圧レベルは次の式で表される。 $L_P = 10\log\left(\frac{P^2}{P_0{}^2}\right) = 20\log\left(\frac{P}{P_0}\right)$ L_P：音圧レベル(dB) P　：音圧実効値 P_0：基準の音圧実効値(2×10^{-5} P_a)
音の強さ (I)	W/m^2	$1m^2$の面積を通過する音波のエネルギーを音の強さと言う。 音の強さ I は、音圧実効値Ｐから次の式で求められる。 $I = \frac{P^2}{\rho c}$ ρ：空気の密度(kg/m^3) c：空気中の音速(m/s)

1.3 騒音レベルについて

音波の中で、人間の可聴できる音は、周波数が 20～20000Hz で音圧レベルが 0～120dB の範囲と言われている。人間の可聴範囲を図 2-1 に示す。※1

発破による音が騒音となるのは、その音の大きさが主要な要因となるが、音の大きさを測定することが難しく、騒音測定においては音の大きさにできるだけ近似した値を測定し評価する。計器で測定する場合、音の大きさを周波数と音圧レベルからなる音の等感曲線に基づいて音圧レベル(dB)を周波数補正したものを騒音レベル(dB)とする。

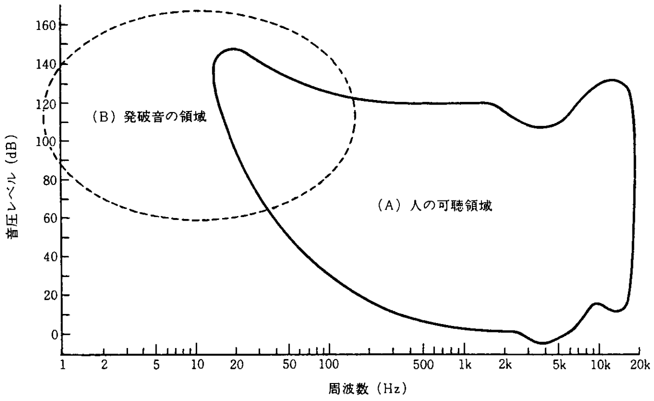


図 2-1　人間の可聴範囲の周波数と音圧の範囲

1.4 低周波音について

音波の周波数の中で、人間の可聴範囲より周波数の高い音波を高周波、周波数が低く 100Hz 以下の音波を低周波、特に周波数が 20Hz より低い周波数の音は超低周波と呼ばれている。

発破により発生する音(発破音)は、音の強さ(音圧レベル)が高く、周波数の低い音波が主になる場合が多くみられる。

低周波音は、ダムの放水、航空機、大型トラック、送風機等からも発生し、人間に対して不快感を与えたり建具のがたつき等を発生するため、低周波公害と呼ばれる公害の原因になっている。

2．発破音について

2.1 発破音の発生機構

ベンチ発破における発破音の発生機構の概略図を図 2-2 に示す。地中で爆薬を爆発させたときの爆発音は、主に次の４種の機構で発生する。※1

(a) 地盤衝撃音(APP、又は、GSIP)
発破により起砕した岩盤の移動により大気を圧縮することによって発生する応力波による音波

(b) 発破ガス音(GRP)
爆発生成ガスが起砕された岩盤の隙間から噴出されるときの音

(c) 発破孔音(SRP)
込め物を押し出し、発破孔を通して爆発生成ガスが急速に噴出する時に生じる音

(d) 地盤振動音(RPP)
地盤の振動により発生する音

2.2 発破音の大きさ

発破音は、爆発により発生する爆轟圧力から推定することができ、爆薬の爆轟圧力は、(2-1)式(Jones の式)で表される。

$$P_D = 4.15 \times 10^{-6} \times \rho_e \times \left(1 - 0.543\rho_e + 0.193\rho_e{}^2\right) \times D^2 \quad \cdots\cdots(2\text{-}1)$$

P_D ：爆轟圧力(Pa)
ρ_e ：爆薬の初期密度(g/cc)
D　：爆薬の爆速(m/s)

爆轟圧力波は、岩盤中を減衰しながら伝播する。自由面に達したときの爆轟圧力波の大きさは、(2-2)式により近似値が表される。

$$P_m = P_D \times \left(\frac{a}{b}\right)^n \times \frac{2\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \quad \cdots\cdots(2\text{-}2)$$

P_m ：自由面に達した爆轟圧力(Pa)　　P_D ：爆轟圧力(Pa)
a ：爆薬の装薬半径(cm)　　b：自由面までの距離(cm)
n：減衰指数(1 自由面：n=2.0、2 自由面：n=1.5)
ρ_1：岩盤の密度(g/cc)　　ρ_2：空気の密度(g/cc)
C_1：岩盤中の弾性波速度(cm/sec)　　C_2：空気中の音速(cm/sec)

自由面に達した爆轟圧力波は、大気中を音波となって伝播する。この音波を騒音として評価する場合、音圧レベルに変換し、さらに騒音レベルに補正して考える必要がある。音波の圧力Ｐ(Pa)は、(2-3)式により音圧レベルに変換される。

$$L = 20\log\left(\frac{P}{P_0}\right) = 20\log P - 20\log(\sqrt{2} \times P_0) \quad \cdots\cdots(2\text{-}3)$$

L ：音圧レベル(dB)
P ：音圧実効値(Pa)
P_0：基準の音圧実効値［$P_0 = 2 \times 10^{-5}$(Pa)］

(2-1)式における P_Dは、音圧レベルを求めるときは対象としている音圧そのものを指すが、騒音レベルを求めるときは、その特性に応じて聴覚補正(A、B、C)を加えた音圧を使用する。聴覚補正(A、B、C) の特性曲線を図 2-2 に示す。※2

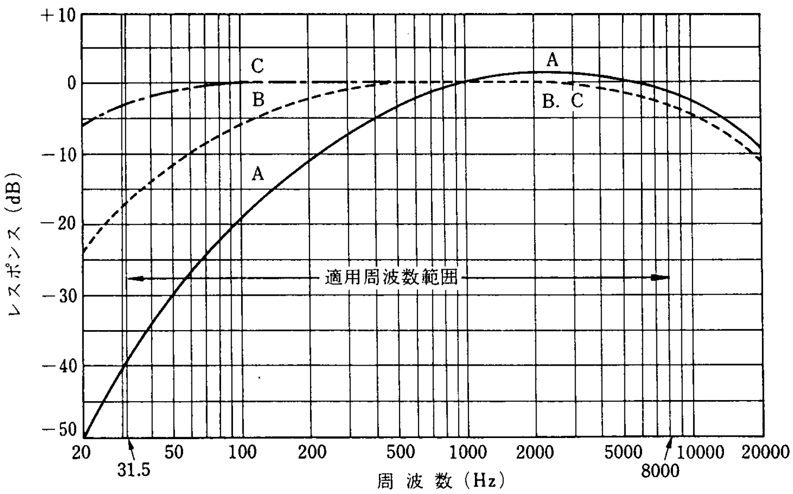


図 2-2　騒音レベルの周波数特性

2.3 発破音の伝播について

(1) 発破音の伝播特性

空気中を縦波の音波が伝わる速さ、すなわち圧力変化が伝わる速さを音速といい、(2-4)式で表される。

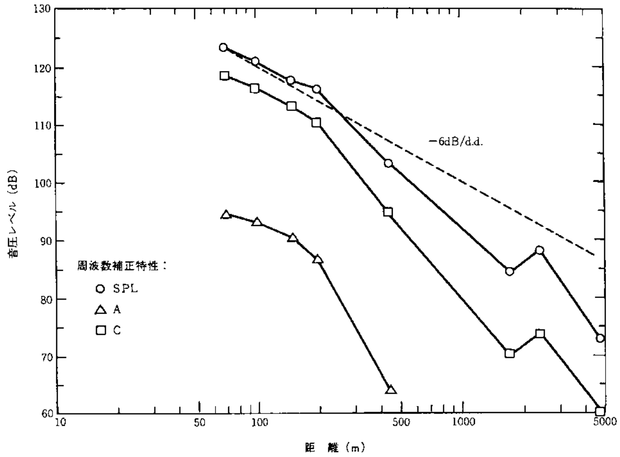
$$c = 331.5 + 0.61t \quad \cdots\cdots(2\text{-}4)$$

c：音速(m/s)　　※温度 t＜273 の場合

一般に音波は、伝播を妨げる障害物が存在しなくても、音波の発散による減衰や、空気や地盤への吸収による減衰等の要因により伝播した距離によって減衰する。

発破音は、伝播とともに音圧が減衰するほかに、高い周波数の音波が大きく減衰するが、低い周波数の音波(低周波を含む)は、大気中のエネルギー損失が少なく、遠距離まで伝播する傾向がある。

一つの発破音を数 km の範囲で平坦特性で同時に測定し、デジタルシミュレーションにより各測定点の測定結果から音圧レベル、A 特性の騒音レベル及び C 特性音圧レベルとして求めた伝播減衰を図 2-3 に示す。[※3] 同じ発破音でも音圧レベルに比べ騒音レベルの値が小さく、音圧レベルとC特性音圧レベル(低周波音)は遠距離まで伝播しても高いレベルが保たれる傾向にあることがわかる。



※図 2-3 中の点線は、音源を点音源としたときの伝播距離減衰を求める基本式から求めた値

図 2-3　発破音の距離減衰例

(2) 伝播による距離減衰値

音源を点音源とすると、受圧点(距離 r)における音圧レベル L_pは、伝播する空間条件により(2-5)式、(2-6)式で表される。

L_p(自由空間伝播)　$L_p = L_w - 20\log r - 11$　・・・・・・(2-5)

L_p(半自由空間伝播)　$L_p = L_w - 20\log r - 8$　・・・・・・(2-6)

L_p：受圧点(距離 r)における音圧レベル(dB)

L_w：音源のパワーレベル(dB)

r　：受圧点の距離(m)

ここで、L_w(dB)は音源パワーレベルで、音響出力 w(W)と、基準の音響出力 w_0（$=10^{-12}$W）を用いて(2-7)式で表される。

$$L_w = 10\log\left(\frac{w}{w_0}\right) \quad \cdots\cdots(2\text{-}7)$$

w　：音響出力(W)

w_0：基準の音響出力 w_0($=10^{-12}$W)

音源が線音源の場合、自由空間での音圧レベルの距離減衰式は、(2-8)式で表される。

$L_p = L_w - 10\log r - 8$　・・・・・・(2-8)

これらの伝播距離減衰値を求める基本式より、距離が倍になる毎に点音源と線音源でそれぞれ６dB、３dB づつ減衰することがわかる。

(3) 実際の伝播における距離減衰の予測式

発破音が実際に屋外を伝播する場合、空気や地面等への吸収等の諸要因により、基本式による値よりも減衰値が大きくなる。この基本式より過分に減衰する値を超過減衰値と呼ぶ。

ある基準点(距離：r_0)における音圧レベルを L_0、距離 r における音圧レベルを L とすると、L は(2-9)式で表される。

$$L = L_0 - 20\log\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad \cdots\cdots(2\text{-}9)$$

屋外での音の伝播における超過減衰値を a(dB)とすると、L は(2-10)式で表される。

$$L = L_0 - 20\log\left(\frac{r}{r_0}\right) - a \quad \cdots\cdots(2\text{-}10)$$

発破音の伝播において、超過減衰値を実用上の計算に取り込む方法として、(2-11)式で表される場合がある。このとき、n の値は、経験的に 2.0～2.5 程度の値が使用される。

$$L = L_0 - 10n \times \log\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad \cdots\cdots(2\text{-}11)$$

(4) 発破音の伝播に影響する外的要因

1) 山や丘等の地形遮蔽物の影響

発破音は、その音源エネルギーが非常に高く、周波数が低い低周波は伝播中のエネルギー損失や吸収による減衰が少ないため長距離伝播し易く、伝播経路に山や丘等の地形遮蔽物がある場合でも、反射や回折等の現象により伝播するため、ほとんど遮蔽効果がみられない傾向がある。[※4]

2) 谷間等を伝播するときの影響

発破音が反射体が多い谷間等を伝播する場合、共鳴現象やうなり現象を発生したり、異なる音波の音圧ピークが重なることにより距離減衰以上になる場合があり、注意が必要である。

3) 家屋内における影響

低周波音は、家屋内において共鳴現象等が発生する場合があり、入射した音圧以上に家屋内の音圧レベルが強くなる場合がある。[※5]

4) 気象条件による影響

発破音が空気中を伝播するときの速度は空気の温度に大きく影響し、音波が伝播する音路は上空の空気の温度や風向き等により大きく影響を受ける。このため、発破音の伝播は、気温、風速、風向き、湿度及び雲等の気象条件により大きく影響を受ける。

３．発破音の管理値について

3.1 発破音による影響と公害の種類

(1) 騒音による影響

一般的な騒音の中で、音圧レベルによる人体や物に与える影響を表 2-2 に示す。また、騒音が動物に与える影響の報告例を表 2-3 に示す。※6

表 2-2　音圧レベルによる影響例と発生源例

<table>
<tr><th>音圧レベル(dB)</th><th>影 響 の 程 度</th><th>音圧レベルの発生源例</th></tr>
<tr><td>169</td><td>窓ガラスを破損することがある</td><td>衝撃波</td></tr>
<tr><td>150</td><td>瞬時に聴覚を失う(鼓膜の損傷)</td><td rowspan="2">ジェット機の爆音，衝撃音</td></tr>
<tr><td>140</td><td></td></tr>
<tr><td>130</td><td rowspan="2">耳が痛く、痛感を受ける</td><td></td></tr>
<tr><td>120</td><td>削岩機</td></tr>
<tr><td>110</td><td>0.5 時間/日で聴力障害(米国)</td><td>自動車の警笛(2m)</td></tr>
<tr><td>100</td><td>長時間にて難聴</td><td>電車が通るガード下</td></tr>
<tr><td>90</td><td></td><td>電車の中、工場、交叉点</td></tr>
<tr><td>80</td><td>人体の外的損傷について安全域</td><td>電気洗濯機、蝉の声、大声の会話</td></tr>
<tr><td>70</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>60</td><td>睡眠妨害(商業地域)</td><td>普通の会話</td></tr>
<tr><td>50</td><td></td><td>静かな事務所</td></tr>
<tr><td>40</td><td>気にならないレベル</td><td>コオロギの最大音</td></tr>
<tr><td>30</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>20</td><td></td><td>ささやき声</td></tr>
<tr><td>10</td><td></td><td>両耳で聞こえる限界</td></tr>
</table>

表 2-3　騒音が家畜・家禽に及ぼす影響調査

<table>
<tr><th colspan="2">対 象</th><th>暴 露 音</th><th>大きさ</th><th>影 響</th></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="3">乳 牛</td><td>ジェット機音</td><td>120dB 未満</td><td>乳量が約 30%減少</td></tr>
<tr><td>競艇場の発生音</td><td>90～110dB</td><td>乳量が減少</td></tr>
<tr><td>射 撃 音</td><td>不 明</td><td>乳量が約 5%減少</td></tr>
<tr><td colspan="2">豚</td><td>ジェット機音</td><td>120～135dB</td><td>成長速度、受胎率ともに影響認められず</td></tr>
<tr><td rowspan="6">鶏</td><td rowspan="2">成長</td><td>ジェット機音</td><td>65～115dB</td><td>成長(体重増加)に影響みられず</td></tr>
<tr><td>ジェット機音</td><td>115dB</td><td>成長(体重増加)に影響みられず</td></tr>
<tr><td rowspan="4">産卵</td><td>ジェット機音</td><td>110～120dB</td><td>1 ヶ月目は若干低下するが 2 ヶ月目には回復</td></tr>
<tr><td>パイル打ち込み音</td><td>110dB 前後</td><td>初期に驚愕するが順応し影響なし</td></tr>
<tr><td>建機稼働音</td><td>85～95dB</td><td>突発音に驚愕するが産卵率低下せず</td></tr>
<tr><td>発破、建設工事</td><td>不 明</td><td>影響なし</td></tr>
</table>

(2) 低周波音による影響

1) 低周波音による影響の種類

発破音の中で、低周波音は音としてほとんど感知されないが、次の種類の苦情を発生する可能性がある。発破音の苦情として最も多いのは、(a)の物理的苦情である。

(a) 物理的苦情：窓ガラス、建具、人形ケース等の揺れ、がたつき現象による苦情
(b) 心理的苦情：がたつき音や低周波音を直接知覚することによるいらつき、不眠等
(c) 生理的苦情：耳鳴り、頭痛、吐き気等、心理的被害から派生する生理反応

2) 低周波音による物理的影響

低周波音は、ほとんど音としては感知されないが、その音圧レベルにより建具等ががたつく現象が発生する。実験室において、定常的な低周波音を建具に放射し、建具のがたつき始める最小音圧レベルを求めた実験結果を図 2-4 に示す。※7　この実験により、建具は低い周波数ほど低い音圧レベルでがたつきが発生する傾向があることがわかる。しかし、建具の面積や重さ、取り付け条件、部屋の間取り、建具種類と閉め方、開閉状態等によりがたつきが発生するレベルが異なり、図 2-4 から得られる音圧レベルが入射したときに必ずしもがたつきが発生するものではないので、注意が必要である。

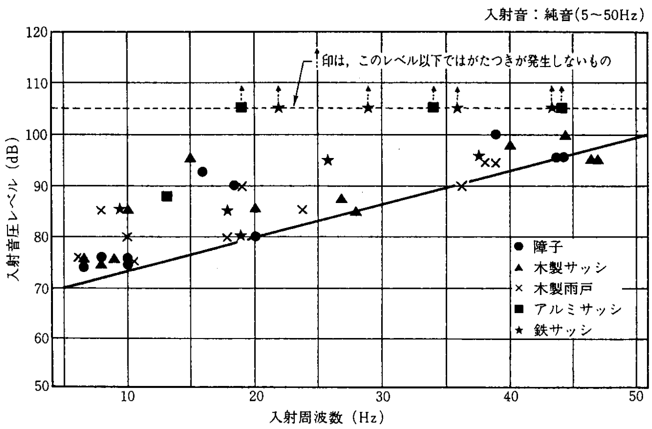


図 2-4　建具のがたつきが始まる音圧レベル

3) 低周波音による人体への影響

人間の感覚は、急激かつ大幅に変化する刺激に対して感受性が高く、発破音等の衝撃性低周波音に対する影響は重要な問題と考えられる。衝撃音は、発破以外の音源として打撃音、鉄砲の発射音、及びソニックブーム(超音速で移動する物体が発生する衝撃波)等がある。発破音に似たソニックブームのピーク過圧(音圧レベルのピーク)と心理的反応の関係を表 2-4 に示す。※8

表 2-4　ソニックブームによる心理的反応と物理現象

ブーム強度(dB)	心理的反応	伴って起きる物理的現象
108～117	不快感なし	かろうじて聞き取れる爆発音
117～128	我慢できる程度	遠方の爆発または雷
128～137	不快と感じる	近雷、窓が破損することがある
137～148		大きい板ガラスの窓が破損する
148～157		小さい簡易窓を決定的に破損する

3.2 発破音の管理値について

(1) 騒音の基準値※9

日本の国レベルで用いられている騒音の種類と騒音評価量の主なものを表 2-5 に示す。また、表 2-5 における騒音評価量の用語の意味を表 2-6 に示す。

騒音規制法の公示により、特定建設工事作業の騒音は、その敷地の境界線において 85dB を超えない大きさであることと定められている。しかし、これは定常的に発生する音について規制されたものであり、発破音について適用することについては疑問があるとされている。

表 2-5　騒音源と騒音評価量(日本)

音　源	基準種類	騒音評価量	単位	基準値	備　　考
工場騒音	規制値	90%レンジ上端値 (L_5)他	dB	昼：45～50 注1 夜：40～45	騒音レベルが大幅に不規則に変動のとき他 FAST
建設騒音	規制値	ピークの L_5他	dB	85 以下注2	騒音レベルが間欠的で一定でないとき他 FAST
自動車騒音	環境基準	中央値(L_{50})	dB	昼：70 以下注3 夜：55 以下	FAST でサンプリング 例：5 秒 50 回法
新幹線鉄道騒　音	環境基準	ピーク・パワー平均	dB	Ⅰ：70 以下注4 Ⅱ：75 以下	SLOW 20 本の上位半分
航空機騒音(民間空港)	環境基準	WECPNL	dB	Ⅰ：70 以下 Ⅱ：75 以下	SLOW ピーク・パワー平均 時間帯別機数を考慮

注１：工場騒音の基準値は、第１種区域（第１種・第２種低層住居専用地域）での基準値
注２：特定建設作業において、特定建設作業場所の敷地の境界線における基準
注３：Ａ地域（住居の用に供される地域）のうち２車線を有する道路に面する地域の基準値
注４：Ⅰは第１種区域、Ⅱは第２種区域における基準値を示す。

表 2-6　騒音評価量における用語の意味

騒音評価量の種類	用　語　の　意　味
等価騒音レベル［L_{Aeq}］	騒音レベルが時間とともに変化する場合、測定時間内でこれと等しい平均二乗音圧を与える連続定常音の騒音レベル。
単発騒音暴露レベル［L_{AE}］	単発的に発生する騒音の１回の発生ごとにＡ特性で重み付けられるエネルギーと等しいエネルギーを持つ継続時間１秒の定常音の騒音レベル。
時間率騒音レベル［L_x］	騒音レベルがあるレベル以上である時間が実測時間 x%を占める場合、そのレベルをＸパーセント時間率騒音レベルという。 ・50 パーセント時間率騒音レベル L_{50}：中央値 ・ 5 パーセント時間率騒音レベル L_5　：90 パーセントレンジの上端値 ・95 パーセント時間率騒音レベル L_{95}：90 パーセントレンジの下端値
FAST，SLOW	騒音計の音圧の実効値を求める回路は、速い動特性と遅い動特性を備えており、速い動特性を F 又は FAST、遅い動特性を S 又は SLOW とする。

(2) 発破音の管理値

1) 騒音の継続時間による補正

ISO/R1996 では、対象地域の環境騒音を騒音計で計測した騒音レベルに基づいて、その地域の騒音基準値の設定や社会反応の発生状況を予測する評価法を制定している。この中で、間欠性騒音に対する補正が盛り込まれており、発破のような単発音も同じ考えができるものと考えられる。定常騒音に比較して、単発的な騒音を時間発生率(ある時間内で騒音が発生する時間が占める割合)で表したとき、測定値をどの程度小さく評価して良いかを提示したものを表 2-7 に示す。

表 2-7 より、発破音の発生時間を 10 秒程度とすれば、3 時間当たりの時間発生率は 0.2%以下であり、測定値より 30dB 小さい値で評価して良いことが読みとれる。

表 2-7　間欠性騒音の時間発生率による補正

発生時間率 注5	補正量(dB)
100〜56	0
56〜18	-5
18〜6	-10
6〜1.8	-15
1.8〜0.6	-20
0.6〜0.2	-25
0.2 以下	-30

注５：昼間は 3 時間当たりの発生時間、夕方、夜間は 1/2 時間当たりの発生時間

2) 発破音の管理値の提言

発破による騒音と低周波音について、火薬学会より提言されている規制値を表 2-8 に示す。※10

表 2-8　発破音の人を対象とした提言値

対 象	騒　音 (dB)	低周波音(dB)
昼 間	「100」または「暗騒音＋30」 のいずれか小さい方	130
夜 間	「70」または「暗騒音＋20」 のいずれか小さい方	100

４．発破音の予測

4.1 トンネル発破

(1) トンネル発破音の伝播傾向

トンネル発破による発破音は、次のような伝播傾向がある。

a)トンネル発破は、基本的に１自由面発破であり、心抜きと払い発破からなる。いずれも岩盤を大きく破砕し、移動させるために高温で多量のガスが噴き出され、このガスによる発破ガス音(GRP)が主となる。

b)トンネル内は一次元的な閉鎖空間であり、その膨張と伝播が一次元に限られるために爆風に近いものとなり、ほとんど減衰されずに坑口まで伝播する。

c)坑口からは三次元的に膨張するため、急速に低周波音ないし超低周波音に変わり伝播する。

また、発破音は非常にエネルギーが大きく、遠距離伝播する特徴を持っている。

(2) トンネル発破音の予測式

トンネル発破により発生する低周波音の坑外における予測式として、表 2-9 に示す式が提言されている。

表 2-9　トンネル発破における発破音の推定式

種　　類	トンネル発破音の推定式	提案者
騒音レベル	$L_A = A + 16\log W - 16\log D - 20\log R + \Delta L$　・・・・・・(2-12) L_A　：騒音レベル(dB) W　：総薬量(kg) D　：坑内距離(m) R　：坑外距離(m) A　：DS 雷管の場合；130 　　MS 雷管の場合；136 ΔL　：指向性、防音扉および障害物等の補正値(dB)	船津[11]
低周波音レベル	$L_C = A + 7\log W - 20\log R + \Delta L$　・・・・・・(2-13) L_C　：低周波音レベル(dB) W　：総薬量(kg) R　：坑外距離(m) A　：DS 雷管の場合；141 　　MS 雷管の場合；148 ΔL　：指向性、防音扉および障害物等の補正値(dB)	船津[11]
	$L_{(ro)} = 5.36W + 127.2$　・・・・・・(2-14) $L_r = L(r_0) - 20\log\left(\frac{r}{r_0}\right) + A_{tt}$・・・・・・(2-15) $L(r_0)$　：切羽からトンネル坑口までの距離 r_0 における低周波音レベル(dB) L_r　：切羽面から受音点までの距離 r における低周波音レベル(dB) W　：段当たりの斉発爆薬使用量(kg) r　：切羽面から受音点までの距離(m) r_0　：切羽面からトンネル坑口までの距離(m) A_{tt}　：超過減衰量(dB)	塩田[12]
音圧レベル	$L_f = 145.0 + 10.7\log W - 5.7\log R$　・・・・・・(2-16) $L_b = 188.1 + 8.3\log W - 22.0\log R$　・・・・・・(2-17) L_f　：切羽前方の音圧レベル(dB) L_b　：切羽後方の音圧レベル(dB) W　：段当たりの装薬量(kg) R　：爆源からの距離(坑内)	田名瀬[13]

4.2 ベンチ発破による発破音の予測

(1) 発破音の予測式

ベンチ発破における発破音の音圧レベルと騒音レベルを推定する式として、表 2-10，2-11 に示す式が提言されている。

表 2-10　ベンチ発破における発破音の推定式(その 1)

種　　類	ベンチ発破音の推定式	提案者
音圧レベル	$L = 20\log(P_{peak}) + 85 + 10\log\left\{1 - \exp\left(\frac{-T_d}{\tau}\right)\right\}$ ……(2-18) $P_{peak} = K_p W^a D^{-b} T^n S^c$ ……(2-19) L ：推定音圧レベル(dB) P_{peak} ：ピーク音圧の予測値(Pa) T_d ：波形の継続時間（秒） τ ：時定数 K_p ：発破による係数 W ：段当たりの爆薬量（kg） D ：伝播距離（m） T ：$T = \frac{\cos(\theta) + 2}{3}$ θ ：測線とベンチの法線とのなす角度 S ：段当たりのベンチ面積 a,b,c,d ：定数	国松※14
発破音過圧と 音圧レベル	$P_{peak} = K\left(\frac{D}{W^{\alpha}}\right)^{-n}$ ……(2-20) $L = 91 + 20\log K + 20\alpha n \times \log W - 20n \times \log D$ ……(2-21) P_{peak} ：発破音過圧の最大値(Pa) L ：(2-3)式による P_{peak} の音圧レベル(dB) n ：距離減衰指数で、普通は $n = 1 \sim 2$ D ：測定点までの距離(m) K ：$\frac{D}{W^{1/3}} = 1$ での定数 W ：段当たりの最大斉発薬量(kg) α ：通常 1/3、立方根相似係数 $\frac{D}{W^{1/3}}$ ：立方根相似距離	一般式

表 2-11　ベンチ発破における発破音の推定式(その２)

種　　類	ベンチ発破音の推定式	提案者
発破音過圧と音圧レベル	$P_{peak} = 3718.25\left(\frac{D}{W^{1/3}}\right)^{-0.966}$ ・・・・・・(2-22) $L = 162.38 + 6.44\log W - 19.32\log D$ ・・・・・・(2-23) $P'_{peak} = 239.88\left(\frac{D}{W^{1/3}}\right)^{-0.515}$ ・・・・・・(2-24) $L' = 138.57 + 3.43\log W - 10.3\log D$ ・・・・・・(2-25) P_{peak} ：発破面方向の発破音過圧の最大値(Pa) P'_{peak} ：発破面背後方向の発破音過圧の最大値(Pa) L，L' ：P_{peak} と P'_{peak} それぞれの音圧レベル(dB) W ：一段当たりの最大斉発薬量(kg) D ：測定点までの距離(m)	米国採石場の測定例※1
騒音レベル	$L_A = 114.7 + 13.0\log W - 20\log D - 0.7\Delta L$ ・・・・・・(2-26) L_A ：推定騒音レベル W ：最大斉発薬量(kg) D ：切羽からの距離(m) ΔL ：障害物における減衰	水資源開発公団川上ダム調査所※15
低周波音の音圧レベル	$L = 147.6 + 10.5\log W - 23.4\log D$ ・・・・・・(2-27) L ：低周波音の音圧レベル(dB) W ：最大斉発薬量(kg) D ：切羽からの距離(m)	吉竹※16
低周波音レベル	$L_C = 146.4 + 12.2\log W - 20\log D - 0.8\Delta L$ ・・・・・・(2-28) L_C ：推定低周波音レベル(dB) W ：最大斉発薬量(kg) D ：切羽からの距離(m) ΔL ：障害物における減衰	水資源開発公団川上ダム調査所※15
	$L_C = 146.4 + 12.2\log W - 20\log D - 0.8\Delta L$ $L_C = 124.4 + 7.7\log W - 16.25\log D - 0.0555\theta + 1.052\log N_h$ ・・・・・・(2-29) L_C ：推定低周波音レベル(dB) W ：最大斉発薬量(kg) D ：切羽からの距離(m) N_h ：段当たりの穿孔数 θ ：測線とベンチの法線とのなす角度(°)	辻井※17

(2) ベンチ発破音の指向性

ベンチ発破による発破音は、ベンチ面に対して指向性があり、正面で受ける音圧レベルが最も大きいことが知られている。ベンチ発破における発破音の指向性を図 2-6 に示す。※1

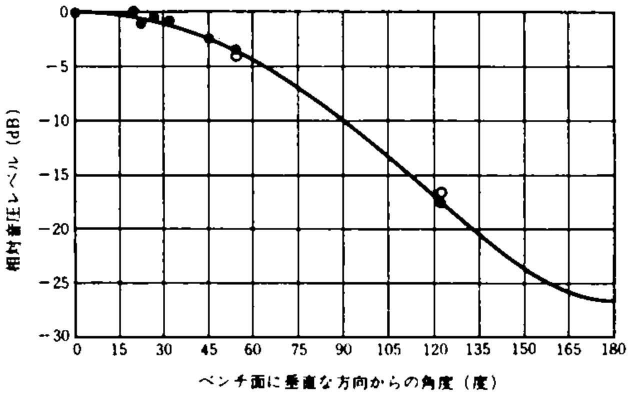


図 2-6　ベンチ発破音の指向性

切羽面に対して角度θの位置で測定した場合、指向性係数Tを用いて発破音の指向性による相対レベルΔLを(2-30)式で表される。

3

$\Delta L = 20n \times \log(T)$　……(2-30)

図 2-6 中の実線は、(2-30)式で n=2.8 としたときの計算値を示す。

5．発破音の低減方法

発破音を低減する方法は、大別すると発生源対策と伝播経路対策の 2 つの方法がある。この 2 つの方法の代表的な対策例を示す。

5.1 発生源対策

(1) 装薬量の低減

切羽における発破音は、発破音を推定する式で示すように爆発する爆薬量が多いほど大きくなるため、1 回に爆発する爆薬量を低減して発破音を小さくする方法。

1) 発破規模を小さくする

トンネル発破においては、掘進長を短縮し、1 回の発破の装薬量を低減する。

明かり発破においては、ベンチ高さを小さくしたり、穿孔数を少なくする等、 1 回の発破の装薬量を低減する。

2) 斉発薬量を少なくする

使用する雷管の段数を増やし、斉発薬量を少なくすることにより、発破音を低減する。

電気雷管では、MS と DS の組み合わせにより 25～30 段の段発が可能であり、これ以上の段数が必要な場合は特殊雷管(電子雷管、導火管付き雷管等)を使用することにより可能である。

(2) 切羽面積の低減

ベンチ発破において、切羽面積が大きくなると低周波音圧が大きくなる傾向にある。これは、発破音が放出される自由面の面積が大きくなるためであり、この対策として、切羽面積を小さくしたり、盤打ち発破に変更して自由面の面積を小さくする等の方法がある。

(3) 段発発破の秒時調整

段発雷管により発破した場合、それぞれの段発で発生した発破音の音波ピーク圧が伝播過程で重なると、単独の音圧よりも大きくなる場合がある。この現象を予防する対策として、段発秒時を調整する方法(M系列発破、高精度秒時雷管を使用した発破等)がある。※18

(4) 爆薬種類の変更[※19]

1) 爆轟圧力の特性

発破音の中で、地盤衝撃音(GSIP)と地盤振動音(RPP)は、爆発による爆轟圧力が大きいほど大きくなる傾向がある。(2-1)式により、爆轟圧力は爆薬の爆速の二乗に比例するため、爆速の低い爆薬を使用することにより、地盤衝撃音(GSIP)と地盤振動音(RPP)を低減する方法である。

2) バブルエネルギーの特性

発破音の中の発破ガス音(GRP)は爆薬の持つバブルエネルギーが大きいほど大きくなる傾向がある。また、発破音に対する影響は、爆薬の持つ爆轟圧力よりもバブルエネルギーによる影響の方が大きいことが報告されている。よって、バブルエネルギーの小さい爆薬を使用することにより、発破音を低減することができる。

5.2 伝播経路対策

(1) 防音扉の設置

トンネル発破による発破音は、坑内をほとんど減衰せずに伝播し、坑口から３次元的に膨張しながら伝播するため、坑口から屋外に放出される前に、坑内で発破音を低減させるよう防音扉を設置する方法である。

防音扉は、その面密度が大きいほど低減効果が得られる。また、１基よりも 2 基、3 基と設置したほうがより低減効果が得られ、扉の間隔は音波の波長を考慮して決定すると効果的である。

【防音扉の低減効果[※20,※21]】

低周波音に対する減音：7～15dB(1 基)、15～25dB(2 基)

中・高周波音に対する減音：15～25dB(1 基)

(2) 切羽の被覆

1) 砂被覆

都市部で構造物を発破する場合、爆薬や切羽を砂で覆うことにより、発生する発破音を低減することができる。[※22]

2) 気泡の被覆

切羽に気泡を充填して被覆することにより、低周波音を低減する効果が得られる。[※16]

６．騒音対策実施例

6.1 トンネル発破

No.1	防音扉設置による低周波音の低減対策
文献名	トンネル発破工事の低周波音の対策例
著　者	大江章雄、脇谷偵一、熊取谷晃吉、木山雅和、長谷川渡、高田重隆
掲載誌	日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集　1993, 9　pp.65～68

1．概要

早朝と夜間に発破作業を行っているトンネル工事現場で、周辺住民から「窓が揺れる」との苦情が発生し､防音扉をトンネル坑内に 2 台設置する対策により 12～25dB の低周波音の低減効果が得られ、苦情を解決することができた。

2．内容

(1) 防音計画

トンネル坑口と民家の位置関係を図 1 に示す。対策計画の基礎資料を得るため、苦情の発生している民家の外壁の窓面で低周波音の測定を行い、その測定結果を図 2 に示す。図 2 には、建具のガタツキが始まるとされる低周波音レベルを破線で示す。民家の窓面における発破作業時の低周波音は、建具のガタツキが始まるとされる低周波音の音圧レベルを 1 オクターブバンド中心周波数 4Hz～31.5Hz で 20dB を超えている。また、騒音レベルは 63dB 程度であった。

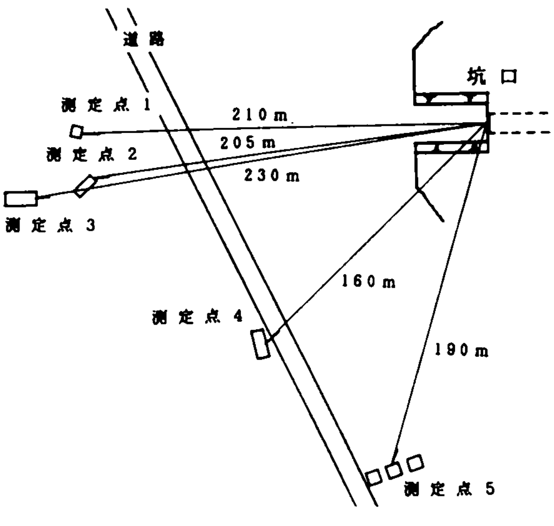


図 1　トンネル坑口と民家の関係

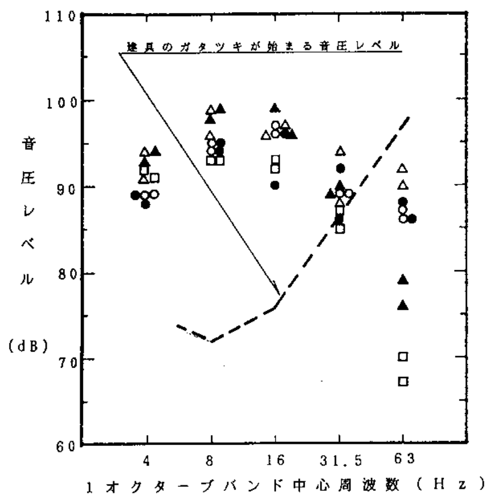


図 2　防音対策前の低周波音

○：測定点 1　●：測定点 2　△：測定点 3

▲：測定点 4　□：測定点 5

(2) 対策方法の決定

低周波音の実測結果から、建具のガタツキを無くすための対策量を、1 オクターブバンド中心周波数 4Hz～31.5Hz で 20dB 程度とした。

対策方法は、トンネル発破工事の低周波音に対する減音効果の実績がある防音扉を選定した。

防音扉を使用する利点は次の通りである。

1) 現場施工日数が短い。(施工日数 1.5 日)

2) 解体・移設が可能

3) 爆風圧(設計強度：1ton/m²)及び大型機械の接触等に対して強度がある。

(3) 対策の実施

防音扉は、防音パネル(厚さ t=100mm)・工事車両用扉・人用扉・風管(換気装置用)・柱・梁から構成されていて、トンネルの形状に合わせて製作した。

設置場所は、トンネル坑口と坑口から切羽側に 20m 入った位置の 2 箇所に設置した。

(4) 防音扉設置による効果

防音扉を 1 台設置した時と 2 台設置した時に、民家の窓面における低周波音を測定した。

測定結果による防音扉の減音効果を表 1 に示す。また、防音扉を 1 台設置した場合と 2 台設置した場合の測定結果をそれぞれ図 3, 図 4 に示す。

防音扉を 1 台設置したことにより、7～11dB 程度の減音効果が得られたが、低周波音に対する民家からの苦情は無くならなかった。

防音扉を 2 台設置したことにより、対策前よりも 12～25dB 程度の減音効果が得られたが、4Hz～16Hz の範囲では建具のガタツキが始まる音圧レベル以下にはならなかった。しかし、低周波音に対する民家からの苦情は無くなり、苦情問題を解決することができた。

表 1　防音扉による減音効果　(単位：dB)

防音扉の台数	1 オクターブバンド中心周波数(Hz)				
	4	8	16	31.5	63
防音扉　1 台	7～9	7～10	10～12	9～10	14～18
防音扉　2 台	15～20	15～18	19～21	18～21	23～25

○：測定点 1　●：測定点 2　△：測定点 3　▲：測定点 4　□：測定点 5

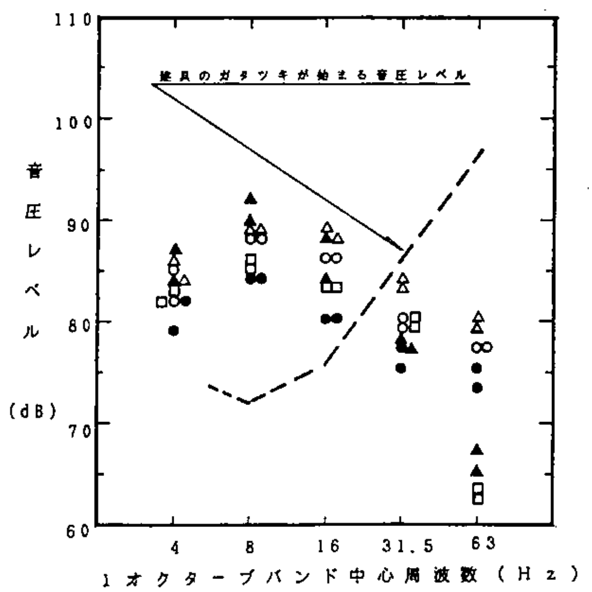


図 3　防音扉 1 台設置後の低周波音

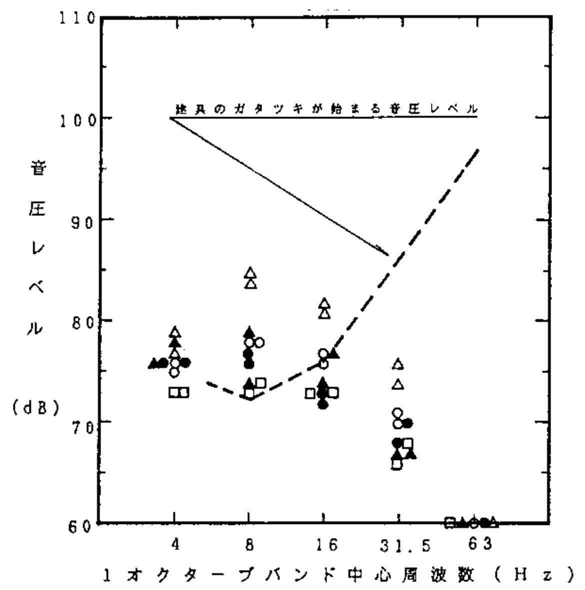


図 4　防音扉 2 台設置後の低周波音

No.2	防音扉の種類による遮音性能の比較
文献名	トンネル発破音用防音扉の遮音性能
著　者	高田重隆、木山雅和、熊取谷晃吉、脇谷偵一
掲載誌	日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集　1994.10　pp.73～76

1．概要

防音扉の設置は、トンネル坑口から放射される発破音の音圧レベルを低減する有効な方法として知られている。本報告では、面密度が 26 kg/m²，63 kg/m²，287kg/m² の３種類の防音扉を設置した場合の発破音の減音効果を測定し、面密度による遮音性能を比較した。

2．内容

(1) 防音扉の種類

使用した防音扉は３種類で、車両用扉，人用扉，風管用開口，支柱，梁，防音パネルから構成されており、それぞれの防音パネルの構造を表 1 に示す。

表 1　防音扉に使用する防音パネルの構造

防音扉の種類	面密度	防音パネルの構造
坑口設置型防音扉	26 kg/m²	道路公団統一型
坑内設置型防音扉	63 kg/m²	鉄板(t=3.2)＋ｸﾞﾗｽｳｰﾙ(32kg/m³,t=100)+鉄板(t=2.8)+補強鉄骨
コンクリート充填 坑内設置型防音扉	287kg/m²	鉄板(t=3.2)+鉄板(t=2.8)+補強鉄骨+充填ｽﾍﾟｰｻｰ

※表中の t は厚さ(mm)

(2) 測定方法

防音扉の遮音性能は、防音扉の前後それぞれ 3 点で測定した発破音音圧レベルの算術平均値の差で評価した。

音圧レベルの測定点の配置スケッチを図 1 に示す。測定点は、トンネル坑内及び坑口とも防音扉から 5m 離れた地点で、測定点の高さは地上 1.5m とした。発破音の測定は、低周波音圧レベル計の交流出力信号を PCM データレコーダに全点同時録音した。また、低周波音の大きさは、録音データを再生し 1/3 オクターブバンド周波数分析器により 1/3 オクターブバンド中心周波数 1.6Hz～630Hz の各バンドごとに発破音の最大値を読みとった。

トンネル坑口(坑内側)で測定した代表的な発破音の音圧波形と 1/3 オクターブバンドの周波数特性をそれぞれ図 2、図 3 に示す。

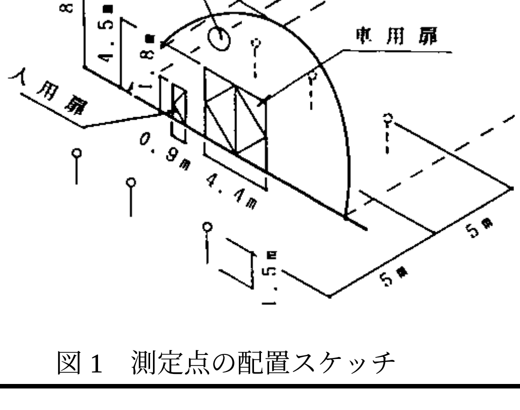


図 1　測定点の配置スケッチ

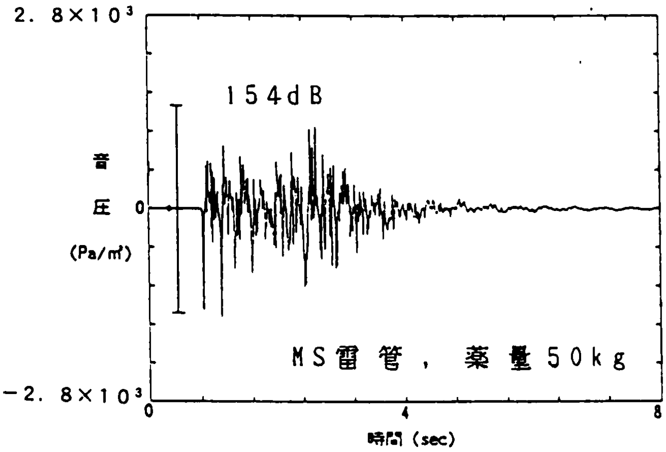


図 2　発破音の音圧波形

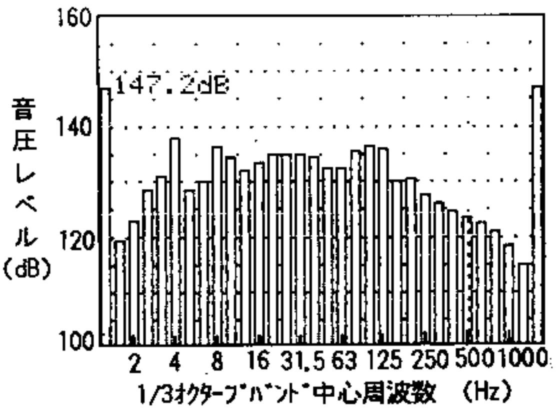


図 3　1/3 オクターブバンドの周波数

(3) 遮音効果の比較

使用した 3 種類の防音扉による遮音性能を比較した結果を図 4 に示す。

防音扉による遮音性能は、いずれの種類の防音扉においても、31.5HZ または 40Hz を超える範囲では周波数が高いほど音圧レベルの遮音性能が良くなり、31.5HZ または 40Hz より低い周波数範囲では周波数が低いほど遮音性能が良くなっている。防音扉の面密度の差による遮音性能を比較すると、31.5Hz または 40Hz を超える周波数範囲では、大きな差はみられないが、31.5Hz または 40Hz より低い周波数範囲では、面密度が最も高いコンクリート充填坑内設置型防音壁の遮音性能が最も良く、20Hz 以下の周波数範囲で他の防音扉と比べて 8〜15dB 遮音性能が良い。

63Hz 以上の周波数範囲で、面密度による遮音性能に差がほとんど無いのは、車両用扉・人用扉・風管等の隙間と開口の影響によるものと考えられる。防音扉の遮音性能を高めるためには、気密性を上げることが要求されるが、トンネル内の換気が悪くなり作業環境が劣化すること、爆風圧が上昇すること等を検討する必要がある。

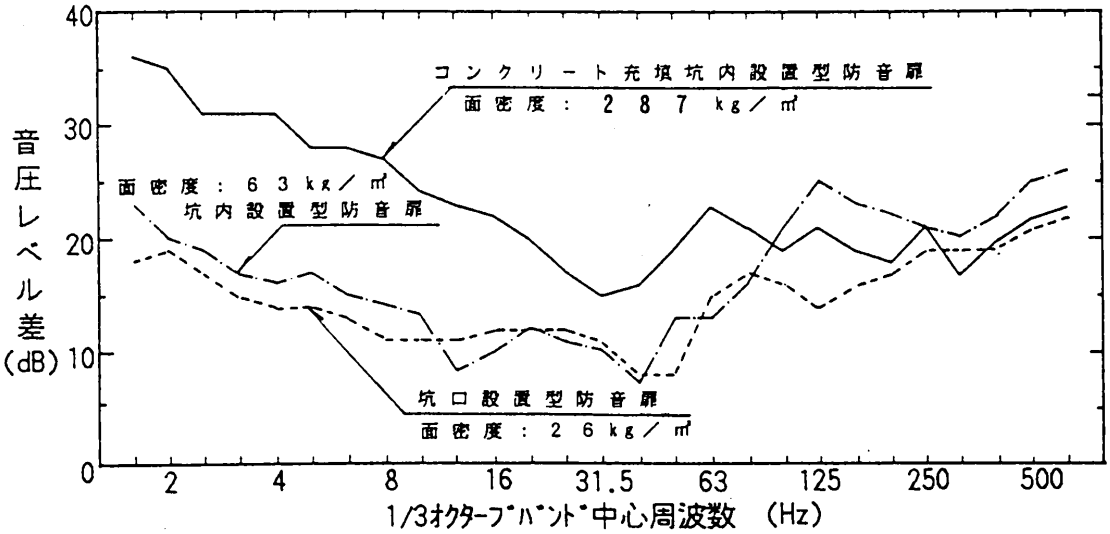


図 4　防音扉の遮音性能の比較

<table>
<tr><th>No.</th><th>題　目</th><th>概　　　要</th><th>掲　載　誌</th></tr>
<tr><td>3</td><td>発破(振動・騒音)の軽減対策(一般国道 162 号線食見トンネル)</td><td>トンネル坑口付近の環境保全(特に発破の騒音・振動の軽減対策)を重視し、更に地域住民との調和を図りながら施工した。
(1)電気雷管の段数を、9 段から 15 段までの使用に変更し、一段当たりの斉発薬量を低減。
(2)防音パネルによる防音壁と坑口に防音扉をそれぞれ設置。
【効果】
防音壁の設置：防音壁の後方と前方で約 12dB の減音効果
防音扉の設置：騒音計で 7～8dB、低周波音レベル計で 5～7dB の減音効果が得られた。
(3)地元住民への PR
低周波音による建具のがたつき等に対する対策は万全とはいえず、地域住民の理解を得た環境対策として
①深夜発破作業を可能な限り中止
②住民に発破時間を連絡する
③工事内容の PR
等をとることが肝要である。</td><td>トンネルと地下
1990, 6
第 21 巻 6 号
pp.53～59
坂川 勝、森川英雄
竹内 登、清水正幸</td></tr>
<tr><td>4</td><td>トンネル発破音の特性と遮音扉の効果について</td><td>(1)トンネル発破音の特性(断面積：53.5m²)
①トンネル坑内の音圧レベルは、145～150dB 程度である。
②測定した発破音の周波数特性は、数 Hz～100Hz 程度までが主要周波数で、その間では平均的な周波数分布がみられる。
(2)遮音扉(面密度：約 600kg/m²)を坑口に取り付けた場合の低減効果
<table><tr><th>測定点方向</th><th>遮音扉からの距離</th><th>扉開</th><th>扉閉</th><th>差</th></tr><tr><td>遮音扉正面</td><td>1m</td><td>127.4dB</td><td>117.0dB</td><td>10.4dB</td></tr><tr><td>遮音扉正面</td><td>90m</td><td>105.7dB</td><td>97.1dB</td><td>8.6dB</td></tr><tr><td>遮音扉45度</td><td>100m</td><td>97.6dB</td><td>91.5dB</td><td>6.1dB</td></tr></table></td><td>日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集
1993, 9
pp.73～76
井清武弘、国松 直
今泉博之、塩田正純</td></tr>
<tr><td>5</td><td>トンネル発破時における圧力破音の低減方法</td><td>発破圧力破音は、一瞬の爆発音とそれに伴う二次的な建物鳴動音で、人間･家畜等に影響を与えることは大きい。
第一白坂トンネルでは、フレキシブルボード(厚さ 16mm)で中空二重壁(中区間隔 45mm)の防音扉を作ることにより、可聴周波騒音で約 30dB(A)、低周波音で約 20dB の低減効果が得られ、民家の窓ガラス等の振動を著しく減少することができた。その結果、一時中断された夜間発破作業が再開される等、環境保全対策として顕著な効果を得た。</td><td>鉄道土木 23-1
1981-1
pp.37～42
柴田定雄、山本規勝</td></tr>
<tr><td>6</td><td>M 系列信号処理技術を用いた発破工法による低周波音制御について</td><td>発破に伴う低周波音制御の一方法として、爆破の秒時列を信号処理理論の一つである M 系列に従って起爆させ、スペクトルの卓越周波数をシフトし、低周波音を制御する工法を考案した。トンネル発破で実験した結果、次の結果を得た。
【音圧レベルの低減効果】　1.6～2Hz：6～7dB
2.5～3Hz：約 10dB
4～12.5Hz：2～4dB</td><td>土木学会論文集
1990　Vol.18
pp.124～128
内田季延、塩田正純
安藤四一</td></tr>
</table>

7	供用線近接の避難坑拡幅によるⅡ期施工 (北陸自動車道市振トンネル)	供用線に近接（30～38m）した避難坑を拡幅するトンネル工事で、供用線で災害が発生した場合の避難者の安全（衝撃音の許容音圧レベル 138dB）を確保しながら施工するため、切羽前方と後方で発破騒音を測定し、次の回帰式を得た。 切羽後方の音圧レベル(dB) $SPL = 188.1 + 8.3\log W - 22.0\log R$ 切羽前方の音圧レベル(dB) $SPL = 145.0 + 10.7\log W - 5.6\log R$ W：段当たり装薬量(kg)　R：爆源からの距離(m) 回帰式で得られる音圧レベルに防護壁設置による減衰量を考慮して、一部の連絡坑の閉鎖、閉鎖解除のタイミングや、災害発生時の連絡体制等を整備した。	トンネルと地下 1998, 3 29 巻 3 号 pp.15～23 田名瀬寛之 斉藤 宏 上原希四朗
8	トンネルから発生する低周波音について (その 1) 坑口扉による対策	発破１回当たりの総火薬量を増加する場合、発破音の上昇が予測されるため、次の対策を実施した。 ①既存の坑口扉(鋼製、50kg/m²)にコンクリートを吹き付け、面密度を約 350kg/cm² にする。 ②給気ダクトを鉄製に変更し、ダクト周辺の隙間を小さくする。 この対策により、1.25～25Hz の周波数帯域で 10dB 程度の低減効果が得られた。また、坑外における発破音の距離減衰は、遮蔽物がなく見通しがよい 80m までは逆二乗則とほぼ一致することを確認した。	日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集 1986, 9 pp.321～324 新鍋秀幸､平野興彦 岩田行夫､塩田正純 真藤利孝､平野 滋 縄岡好人
9	トンネルから発生する低周波音について (その 2) 発破条件と低周波音の関係	トンネル発破における低周波音を測定し、次の特徴があることを確認した。 ①段発発破において､1 段目の低周波音が最も大きい傾向がみられる。（一段当たりの火薬量がほぼ同じ場合） ②2～5 段より､6～8 段のピーク音圧レベルが大きくなる傾向がみられる。 ③一段当たりの火薬使用量が多いほど、ピーク音圧が大きくなる傾向がみられる。	日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集 1986, 9 pp.325～328 塩田正純､新鍋秀幸 平野興彦､岩田行夫 真藤利孝､平野 滋 縄岡好人
10	トンネル発破の特性と予測	過去に測定したトンネル発破音のデータを、簡単な発破条件で整理し、発破音の予測式を求めた。 騒音レベル(dB)　$L = A + 16\log W - 16\log D - 20\log R + \Delta L$ 低周波音レベル(dB)　$L = A + 7\log W - 20\log R + \Delta L$ A：定数　騒音レベル　DS 雷管 130　MS 雷管 136 低周波音レベル　DS 雷管 141　MS 雷管 148 W：総薬量(kg) D：坑内距離(m) R：坑外距離(m) ΔL：指向性、防音扉、回折減衰等の補正値(dB) 本式で得られる予測値と実測値の関係は、相関係数がそれぞれ 0.82、0.87、誤差の標準偏差が 5～6dB であった。	日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集 1987, 9 pp.57～60 船津弘一郎 内山恒光

6.2　明かり発破

No.1	低周波空気振動対策
文献名	都市近郊発破作業における低周波空気振動対策
著　者	吉竹伸治、外山　順
掲載紙	火薬と保安　Vol.26, No.3　1994　pp.4～10

1．概要

市街地に隣接する場所で発破工法を用いる場合、飛石等の対策の他に、発破騒音・振動・低周波空気振動の管理が求められる。本工事では、発破により家の建具が揺れるとの苦情について調査した結果、その原因が低周波空気振動によるものと判明したため、薬量制限、HDS 雷管の使用、位相差を利用した波の打ち消し等の実験を行い、効果のある対策を講じた結果、苦情が非常に少なくなった。

2．実施内容

当該現場の発破による低周波空気振動の音圧レベルのピーク値の大きさは、85～98dB の間で、音圧レベルのピーク値が 93dB を越えると窓ガラス等のガタツキによる苦情が多くなることがわかった。この音圧レベルのピーク値を低下させるため、次の対策について実験を行った。

2.1 薬量制限

低周波空気振動の低減対策として、低周波空気振動のエネルギーの大きさを決定する要因の一つである薬量の制限が考えられる。

段当たりの薬量と低周波音空気振動レベルの関係を求めるために、ベンチの高さを変えて試験発破を行った。ベンチの高さと一孔当たりの装薬量の関係を表 1 に示す。

表 1　ベンチの高さと一孔当たりの装薬量

ベンチの高さ（m）	6.5	8.0	10.0	12.0	14.0	15.0
一孔当たりの装薬量（kg）	15.2	25.5	38.0	51.0	61.0	64.5

※　地山１m^3当たり薬量 230ｇ

表 1 の条件による発破において音圧レベル(LSPL)を測定したところ、段当たりの薬量が増加するに従い、音圧レベル(LSPL)が大きくなる傾向がみられた。また、段当たりの計測データから爆発点からの距離(D)と段当たりの薬量(W)と音圧レベル(LSPL)の関係が(1)式のように求められた。

$$\mathrm{LSPL} = 147.6 - 23.4\log D + 10.5\log W \quad \cdots\cdots(1)$$

(1)式により、段当たりの薬量が多く当現場の工事区域内での管理基準値 93dB をクリアできないと算出された場合は、段当たりの孔数を減らした。また、当初計画で 15m まであったベンチ高さを 6～10mに制限したり、民家から 500m までの範囲はゆるめ発破とリッピングの併用とした。

2.2 HDS(Half　Deci　Second)雷管の開発

DS 雷管と MS 雷管を使用した発破による低周波音空気振動の音圧レベルの測定結果を表 2 に示す。

表２　雷管の種類と音圧レベル(ピーク値)

<table>
<tr><th rowspan="2">工　法</th><th rowspan="2">雷 管</th><th rowspan="2">総薬量
(kg)</th><th rowspan="2">段当たり薬量
(kg)</th><th rowspan="2">段　数
(段)</th><th colspan="2">音圧レベル(dB)</th></tr>
<tr><th>範　囲</th><th>平均値</th></tr>
<tr><td rowspan="2">ベンチ
カット</td><td>MS</td><td>610.0</td><td>61.0</td><td>10</td><td>96～114</td><td>103</td></tr>
<tr><td>DS</td><td>610.0</td><td>61.0</td><td>10</td><td>87～107</td><td>96</td></tr>
<tr><td rowspan="2">盤　打</td><td>MS</td><td>900.0</td><td>90.0</td><td>10</td><td>97～107</td><td>101</td></tr>
<tr><td>DS</td><td>900.0</td><td>90.0</td><td>10</td><td>88～95</td><td>92</td></tr>
</table>

MS 雷管を使用したほうが低周波空気振動の音圧レベルが高いため、MS 雷管の使用を中止した。しかし、DS 雷管だけでは多段式発破における段数が制限され、１日当たりの起砕量が不足してしまうため、MS と DS 雷管の中間の秒時差を持った HDS 雷管が開発され、HDS 雷管と DS 雷管の組み合わせにより最大 28 段の多段式発破が可能となった。

2.3 気泡の被覆実験

低周波音空気振動を低減する方法としてシールド工事の切羽安定化のために充填する気泡を被覆し発破を実施した結果、低周波空気振動の音圧レベルが 1～2dB 減少しており、気泡被覆の有効性が示された。しかし、定常的に利用する場合、時間と費用がかかるため実施には至らなかった。

2.4 位相差を利用した波の打ち消し

音が波であるとした場合、位相のズレを利用することで波は打ち消しあうことから、波の打ち消しに最適な起爆間隔を探るためシミュレーションを行ったところ、60ms の秒時差で起爆すれば最適であるとの結果を得た。電気雷管では 60ms の秒時差をもつ製品はないが、ノネル雷管は基本延時秒時に 67ms の製品があり、同じノネル雷管の延時秒時 109ms のものを使用した場合の低周波空気振動の音圧レベルを測定した。その結果、67ms の方が比較的音圧レベルが低くなる傾向があり、シミュレーションの結果が証明された。

表３　ノネルシステムによる低周波空気振動の音圧レベル測定結果

<table>
<tr><th colspan="3">実　施　日</th><th colspan="2">平成３年６月 18 日</th><th colspan="2">平成３年６月 19 日</th></tr>
<tr><td rowspan="6">発破条件</td><td colspan="2">全装薬量(kg)</td><td>730</td><td>730</td><td>330</td><td>330</td></tr>
<tr><td colspan="2">斉発薬量(kg)</td><td>36.5</td><td>36.5</td><td>16.5</td><td>16.5</td></tr>
<tr><td colspan="2">段　　数</td><td>20 段</td><td>20 段</td><td>20 段</td><td>20 段</td></tr>
<tr><td colspan="2">秒 時 差</td><td>109ms</td><td>67ms</td><td>109ms</td><td>67ms</td></tr>
<tr><td rowspan="2">切 羽</td><td>方 法</td><td>ベンチ</td><td>ベンチ</td><td>盤打</td><td>盤打</td></tr>
<tr><td>高 さ</td><td>10m</td><td>10m</td><td>10m</td><td>10m</td></tr>
<tr><td rowspan="3">測定結果</td><td colspan="2">測 点 ①</td><td>91.5dB</td><td>91.5dB</td><td>－</td><td>－</td></tr>
<tr><td colspan="2">測 点 ②</td><td>91.7dB</td><td>90.6dB</td><td>87.3dB</td><td>83.7dB</td></tr>
<tr><td colspan="2">測 点 ③</td><td>88.4dB</td><td>87.8dB</td><td>－</td><td>－</td></tr>
</table>

３．まとめ

今回の対策によって管理値を超えることはなくなり、苦情も少なくなった。また、発破時にモニタリングを毎日実施し、苦情の内容と音圧レベルの関係、距離と適正薬量について対応した。

<table>
<tr><th>No.</th><th>題　目</th><th>概　　　要</th><th>掲　載　誌</th></tr>
<tr><td>2</td><td>砂被覆による発破音の低減効果の予測手法に関する検討</td><td>都市部での発破による構造物解体工法の実用化に対し、環境問題として考えられる騒音の対策について減音材料として砂を用いた場合の騒音レベルの近似的な予測式を求めた。
$$L_{DP} = 18.4\log W - 44.2\log R - 20\log D + 89 + \Delta L$$
$$L_{DA} = L_{DP} - 14$$
L_{DP}：音源から Dm地点での動特性 Impulse 或いは Fast で計測した場合の音圧レベルの予測値(dB)
L_{DA}：音源から Dm地点での騒音レベルの予測値(dB)
W　：薬量(g)　R：砂厚(m)　D：音源からの距離(m)
ΔL ：時定数による補正値</td><td>工業火薬　1993
Vol.54, No3
pp.130～135
小林茂雄、世一英俊
池田義之、中川浩二</td></tr>
<tr><td>3</td><td>ベンチカット発破に起因する発破音の軽減方法について</td><td>ベンチカット発破において、第 1 列の爆発に起因する発破音を減少させるためには、面音源の大きさを小さくすることが有効であり、その方法として第 1 列をＭＳ発破にすることが有効であることが明らかになった。
また、2 列以上の多列発破の場合、第 2 列以降には前列の起爆時間からの遅れ時間が 0.25 秒程度以下である同一段の雷管を使用する多列発破が有効であることや、第 2 列以降の爆発音は前列の爆発によって破砕された破砕片によって遮音されるので、ほとんど無視できるほど小さくなった。</td><td>工業火薬　1978
Vol.39, No.2
pp.10～14
佐々宏一、菊岡栄次
李 義雄、伊藤一郎</td></tr>
<tr><td>4</td><td>発破による低周波空気振動の指向性</td><td>発破作業から発生する低周波空気振動について、低周波音圧レベルの最大値及び単発低周波音暴露レベルを測定し、切羽面に対する角度（ベンチ発破の指向性)、薬量等の要因が測定値に与える影響について検討した結果、次の関係式を得た。
【ベンチ発破】
$$L_{max} = 124.4 - 16.25\log D - 0.055520\theta + 7.7\log W_1 + 1.052\log N_h \quad (R=0.7969)$$
$$L_E = 118.4 - 16.68\log D - 0.052810\theta + 11.81\log W_1 + 1.855\log N_h \quad (R=0.8522)$$
【盤打ち】
$$L_{max} = 130.5 - 17.01\log D + 4.038\log W_1 + 4.72\log N_h \quad (R=0.8170)$$
$$L_E = 127.0 - 16.58\log D + 11.81\log W_1 + 4.990\log N_h \quad (R=0.8353)$$
L_{max}：低周波音圧レベル(dB)
L_E　：単発低周波音暴露レベル(dB)
D　：発生源からの距離(m)
θ　：切羽面との測点の角度(°)
W_1　：段当たりの最大斉発薬量
N_h　：段当たり孔数</td><td>日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集
1993, 9
pp.61～64
辻井洋一</td></tr>
</table>

【引用文献】

※1：発破による音と振動　(社)日本騒音制御工学会技術部会低周波音分科会編　(株)山海社
※2：飛石･振動･発破音について　日本油脂㈱
※3：シミュレーションによる爆発音の単発騒音暴露レベルなどの伝搬減衰評価
騒音制御 Vol.17, No.5　1993
※4：爆発音･発破音の伝搬における周波数減衰特性について
日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集　1994
※5：低周波空気振動の家屋等へ及ぼす影響　騒音制御　Vol.4, No.4　1980
※6：制御発破工法の実際　ジェオフロンテ研究会　掘削工法分科会　1996
※7：昭和 52 年度低周波空気振動実態調査(低周波音の家屋等に及ぼす影響の研究)　環境庁
※8：日本音響学会誌　28 巻 8 号　1972
※9：公害防止の技術と法規　(社)産業環境管理協会　1995
※10：発破振動･騒音･低周波音の規制値に関する提言(数値の提案)
火薬学会 Explosion Vol4, No.3　1994
※11：トンネル発破の特性と予測　日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集　1987
※12：トンネル発破から発生する低周波音について
日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集　1986
※13：供用線近接の避難抗拡幅によるⅡ期工事施工　トンネルと地下　29 巻 3 号　1998
※14：ベンチカット発破による低周波音の予測　土木学会　1990
※15：原石山振動･騒音等影響調査業務現地報告書　水資源公団川上ダム調査所　1989
※16：都市近郊発破作業における低周波空気振動対策　火薬と保安　Vol.26, No.3　1994
※17：発破音による低周波空気振動の指向性　日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集　1993
※18：M 系列信号処理技術を用いた発破工法による低周波音制御について 環境システム Vol.18 1990
※19：爆薬の諸特性が発破音に及ぼす影響　工業火薬　Vol.53, No.2　1992
※20：トンネル発破用防音扉の遮音性能　日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集　1994
※21：トンネル発破工事の低周波音の対策例　日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集　1993
※22：砂被覆による発破音の低減効果の予測手法に関する検討　工業火薬　Vol.54, No.3　1993

第三章　いろいろな発破技術

この章では、第一章と第二章で述べられた振動と騒音に関する技術以外の多岐にわたる発破技術について、文献で報告されている実施例を紹介する。

１．起爆システム

爆薬を起爆するシステムには、大別して電気式と非電気式がある。電気式の起爆システムに使用する雷管には、国内で最も多く消費されている電気雷管(瞬発、DS、MS 等)と電磁誘導を利用したもの(MBS 等)と IC タイマーを内蔵した電子雷管(EDD 等)があり、非電気式には、海外で生産されている導火管付き雷管(ノネル、エクセル等)がある。ここでは、これらのシステムの説明並びにその実用報告についてまとめた。

No.1	ノネルシステム
文献名	NONEL 雷管を使用した発破について
著　者	小野　浩
掲載誌	火薬と保安　Vol.30, No.1　1998　pp.21～24

１．概要

住友大阪セメント株式会社唐沢鉱業所では、1996 年 5 月から発破作業中の雷対策としてノネルを導入し、落雷の時期に限定して使用していたが、根切れの悪さ、大塊発生の問題を解決するために年間を通して採用することとした。

２．使用実績

当鉱山では、雷管はチューブ長 15m の U-500、コネクターは SL-0、SL-25(延時差 25ms)を使用しており、さらに孔底起爆法の徹底等、各種製品の利用により、多岐にわたる発破への展開も考慮している。また、現在は最終ラインのノネルチューブに電気雷管を 1 本使用して発破を行っている。

３．評価

3.1 長所

(1) 雷・静電気に対する安全性が高い

通常、1 日 2 回の発破を行っているが、電気雷管の発破作業では雷による作業の中止が年 30 回程度あったが現在は皆無で、計画したとおりの作業ができるようになった。

(2) 作業性が良い

結線作業はチューブをコネクターに連結していくだけの単純な作業のため作業性が良好になった。

(3) 孔底起爆が可能となる

ノネル雷管は非電気式であるため、孔底起爆を行っても装薬作業中に発生する静電気の影響を考慮する必要がない。孔底起爆により根切れの向上が期待できるため、切羽下での修正発破作業の削減やブルドーザーのリッピング作業の減少、積込能力のアップが期待できる。

(4) 秒時精度の誤差が小さい

電気雷管に比べて秒時誤差が小さいため、岩石の破砕粒度に与える効果が期待できるとともに、振動の抑制を考える上で大きなメリットが現れるのではないかと思われる。

3.2 短所

(1) ノネルチューブ残物の発生

発破後のノネルチューブ残物の回収が必要になる。コネクターチューブについては、反切羽側に結線することにより大部分を回収しているが、雷管部のチューブや複列発破の前列は切羽で回収が不可能であるので、破砕設備でも回収を行っている。

(2) ノネルの保管

ノネル雷管は電気雷管に比較してチューブ部分が大きくかさばるため、火工品庫での保管数量が少なくなる。(従来電気雷管で、10,000 個程度→ノネル 3,000 個程度の貯蔵)

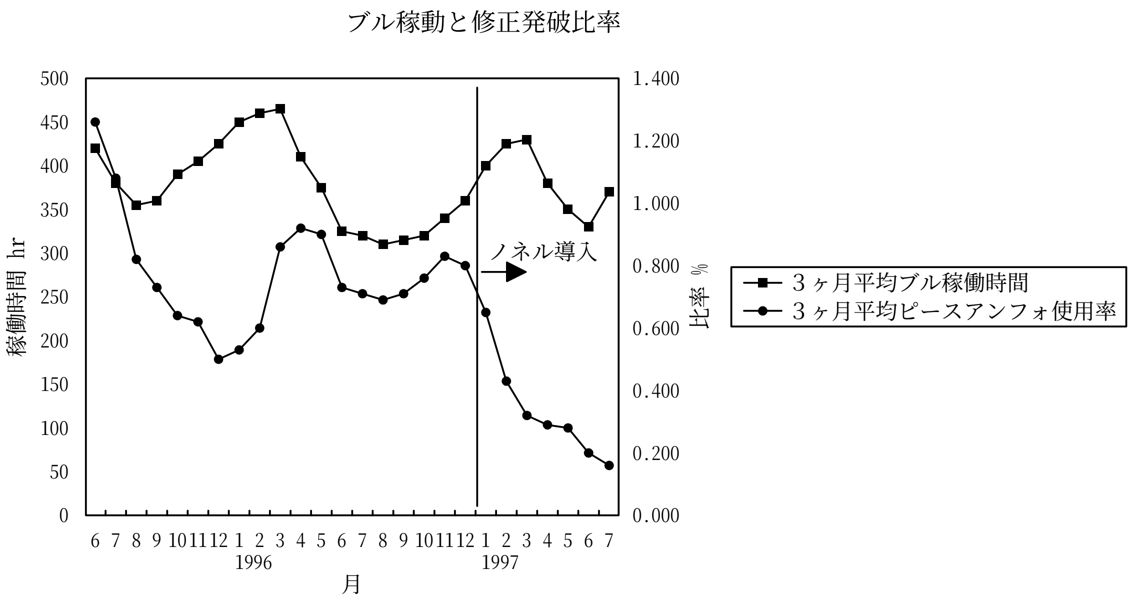


図 1　秋芳鉱山における孔底起爆による作業改善状況

その他に、コスト問題としてノネル雷管が高価なことが挙げられるが、根切れの向上等を含めたトータルコストとして考慮した場合には短所とはならないものと考えられ、また、それがノネルを通年で採用した理由でもある。

No.	題　目	概　　　要	掲　載　誌
2	集中管理発破システムの研究開発	集中管理発破システムは、複数の切羽に設置した発破器を有線による遠隔制御で一箇所から集中して発破操作を行うものである。 本システムはコントロールステーションと称し電源を有する制御器、リレーターミナルと称する中継器、電源を有しない電磁誘導式発破器から構成され、神岡鉱山にて採用されている。離れた位置にある複数の切羽を有線により１ヶ所から集中して点火操作を行うことができ、しかも電磁誘導を利用した MBS 方式を採用することで、装薬結線後発破までの待ち時間に考えられる漏洩・迷走電流等の電気的危険性に対しても十分配慮したものである。	工業火薬　1988 Vol.49, No.6 pp.405～411 田崎陽治､黒川孝一 植田武雄

3	電磁誘導発破システム(M.B.S.)について	MBS は、電気発破作業における安全性の向上と作業の省力化を目的として開発された電気発破システムである。 マジックシザースによるワンタッチの電磁的結線により、結線作業が省略化されるうえ、使用周波数が 70～110kHz であることと雷管が終始短絡されていることから、漏洩電流等保安上安全である。	火薬と保安　1984 Vol.16, No.4 p.5 植田武雄、黒川孝一
4	PDD による最適起爆時間間隔の決定方法と新起爆システム PLODED について	鉱山、砕石場の発破における破砕岩石の細粒化と、市街地近隣での発破における振動等の公害軽減問題を解決する方法として、起爆秒時差の最適化を検討した。 最適秒時は、最終的に電子雷管による試験発破で決定する。最適秒時で操業発破を実施するために、発破器本体、制御線コード、端子ボックス、特定秒時雷管から構成される新起爆システム PLODED を開発し、岩石細粒化を試みた。その結果、15ms の起爆秒時差で大塊発生を大幅に抑制できた。	火薬と保安　1996 Vol.28, No.4 p.5 川村 実
5	遠隔制御発破装置について	水深の大きいところや、潮流の激しいところでは、有線発破に替わるものとして遠隔発破が要求される。そこで、受信側に電池を内蔵せず、海上から一定周波数の電磁波を送り受信器内部の発火用のコンデンサーを充電する、電磁誘導による遠隔制御発破装置を開発した。 本装置は、発振機、ループアンテナ、受信器より構成され、発火バラツキ 1ms 以内で水深 75～80m までの起爆能力を得た。中規模の海中実験(水深 7m、流速 2 ノット)では、直径 40m のループアンテナを用いて岩盤中の出力減衰を計測した結果、電磁波の透過も良好であった。本装置は本四架橋工事のような大規模海底掘削工事においても充分に実用し得ると考えられる。	工業火薬　1974 Vol.35, No.5 pp.211～219 植田武雄、中野雅司
6	EDD によるトンネル掘進発破工法について	心抜きにおける爆薬の起爆時間間隔の影響を明らかにすべく電子式遅延雷管(EDD)を用いて実験を行った。その結果は次の通りである。 ①V カットにおいては、適当な起爆時間間隔を持たせると大幅に振動値を軽減できる。発破効果を低減させないためには孔尻間隔の制御が重要であるが、起爆時間間隔が短ければある程度の孔尻間隔のずれには対応できる。 ②バーンカットにおいては、振動値に関して起爆時間間隔との特徴的な関係はみられないものの、起爆時間間隔が長くなると発破効果が向上する結果となった。	工業火薬協会 1993 年度年会講演要旨集　p.109 黒木和弘、愛甲研一 山本雅昭、一条俊之 佐藤喬一、平田敦夫 田中義晴

2．飛　石

例年火薬消費中の事故原因の中で最も発生率の高いのが、飛石の予期せぬ飛散によるものである。ベンチ発破や盤下げ発破等の明かり発破では、常に問題となっている。規模が小さな発破では、シートやマットで直接防護することで岩石の飛散を防止することができるが、発破の規模が大きくなると切羽の状況に応じた適正な装薬が重要である。ここでは、飛石についての解説や発生原因に関する実験報告および飛石事故対策事例報告についてまとめた。

No.1	飛石対策
文献名	飛石について
著　者	黒川孝一、植田武雄
掲載誌	火薬保安(愛知県火薬類保安協会)　No.21　1990　pp.40～44

1．飛石の発生機構

飛石は次の 3 種に大別される。

(1) 前面に亘っての飛石

岩石破砕に必要な薬量より実際の装薬量が多い、いわゆる過装薬の場合。

(2) 装薬部の吹き抜けによる飛石

岩盤の亀裂や空洞等により、装薬部が部分的に過装薬になった形。

(3) 噴出した爆発ガスによる孔口部分の飛石

弱装薬により逃げ場のない爆発ガスが口元から噴出する場合。鉄砲現象と呼ばれる。

2．飛石の初速度

飛石の飛散距離を検討するためには、飛散片の初速度を知る必要がある。飛石の発生要因は一元的なものではないため、飛散時の初速度にもバラツキがある。

ベンチカット発破の場合、ベンチ壁面の最大移動速度は高速度カメラによる観察結果あるいは、可変抵抗器による測定結果の報告では 10m/s 程度である。ガス噴出に伴う飛石の初速度は最大 70m/s に達したとの実測例もある。また、規模の小さい発破による飛石の初速度の実測結果では、最大初速度は 94m/s のものが観測されている。

飛石の初速度と装填密度の関係を図 1 に示す。この結果は(1)式で表される。

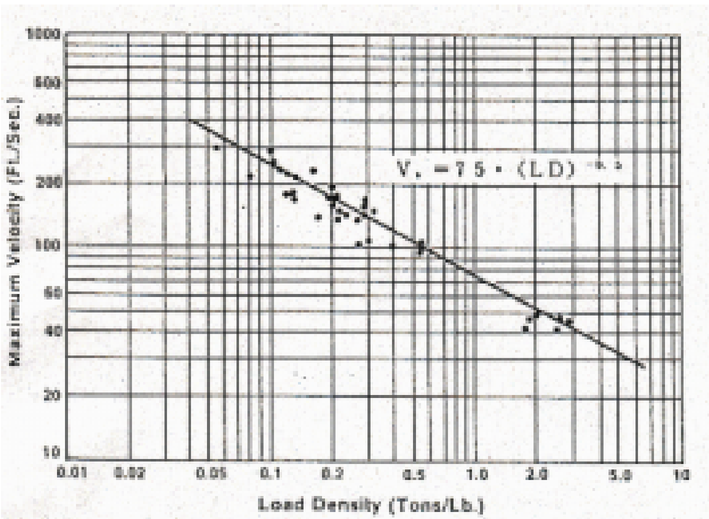


図 1　飛石の初速度と装薬密度との関係

$$V_o = 75 \times [LD]^{-0.5} \quad \cdots\cdots(1)$$

Ｖo：最大初速度 (ft/s)
LD：装填密度 (ton/Lb)　LD は 1 ポンド当たりの破砕岩の重量

一般的に使用している発破係数と LD との関係は(2)式で表される。

$$LD = \frac{0.454\rho}{C} \quad \cdots\cdots(2)$$

C：発破係数 (kg/m³)
ρ：岩石の密度 (ton/m³)

飛石の初速度 V と発破係数 C の関係は(3)式で表される。

$$V = 33.9\frac{C}{\rho} \quad \cdots\cdots(3)$$

V：飛石の初速度 (m/s)

３．飛石の飛散距離

$$L = \left(\frac{V^2}{g}\right)\sin 2\theta \quad \cdots\cdots(4)$$

L：飛散距離 (m)
V：初速度 (m/s)
g：重力加速度 ($=9.8m/s^2$)

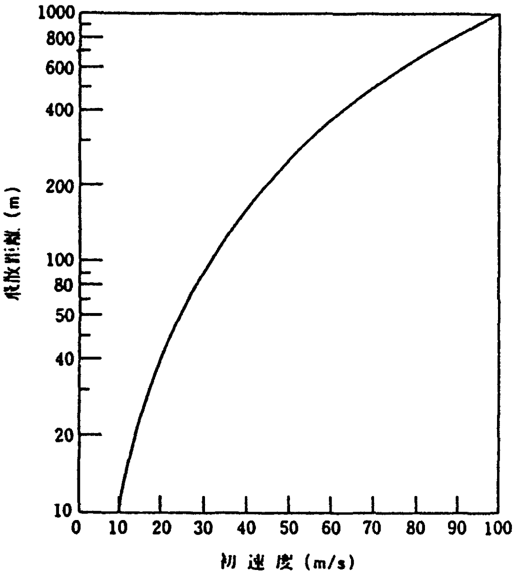


図 2　空気抵抗を無視した場合の初速度と飛散距離

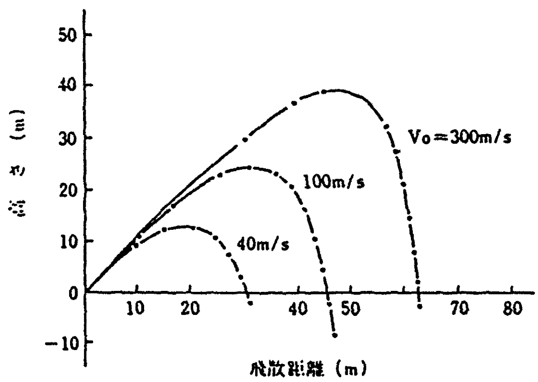


図 3　空気抵抗を考慮した場合の初速度による飛散距離

4．飛石防止対策

4.1 不慮の飛石を防止するためには次のような対策が考えられる。

(1) 抵抗線や穿孔の方向は、できるだけ保安物件の方向にとらないこと。

(2) 穿孔精度を確認する。

(3) 十分な込め物を行い、込物長は最小抵抗線より長くする。

(4) 荒れ孔により孔内で薬包が詰まらないよう、装薬前に十分孔掃除を行う。

(5) 穿孔者と装薬者が変わる場合には、申し送りを十分に行うこと。

(6) カットオフを生じないような発破計画を行う。

(7) 適切な退避場所を定め、退避規則を守る。

(8) 発破後の待時間を確実に守る。

4.2 二次的に防止するための対策を以下に示す。

(1) 直接防護

ブラスティングマット、畳、ブラスティングシート等で覆う。

(2) 間接防護

板、金網、シート等でフェンスを作る。

No.2	飛石対策
文献名	当鉱山の発破工法について
著　者	柳瀬昇時
掲載誌	火薬と保安　Vol.31, No.2　1999　pp.13～18

1．概要

叶山鉱業所での、打掛発破と多列発破を組み合わせた『多列集中発破工法』の実績。

2．多列集中発破工法について

「多列集中発破工法」とは、多列発破と打掛発破を総称したものである。

2.1 多列発破

この方法は、岩盤の状態が良好な場所に用いる発破方法で、一日の装填可能範囲で、一度に多列の発破を実施することによって、単段ベンチの切羽不足を解消する。

2.2 打掛発破

この方法は、前の発破で起砕された鉱石を処理せず 3～4 列発破で順次、前の起砕石に打ち掛けていく発破工法である。

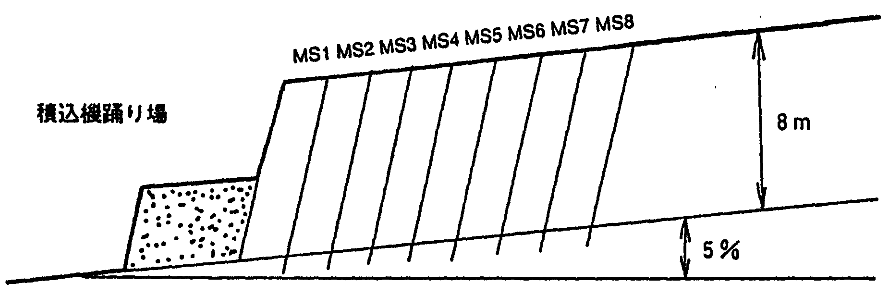


図 1　多列発破概要図

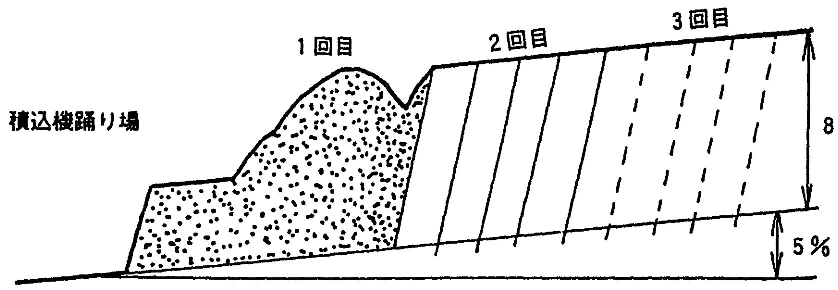


図２　打掛発破概要図

2.3 多列集中発破の得失

(1) 利　点

1)打掛発破工法の自由面は既に、前回の発破によって起砕された岩石に覆われており、自由面方向への飛石はない。タンピングは十分に行っており、鉄砲現象による飛石もない。

2)単段ベンチでの実施により、起砕石を多量に貯鉱できる様になった。加えて飛石の心配がないことで、同じフロアで穿孔・発破作業と積込運搬作業が、それぞれ他の作業に関係なく独立集中でき、作業効率の向上が図れた。

3)発破における飛石がない為、積込機等の退避距離が短くなり、退避移動時間が減少した。

4)発破毎の切羽の整備が不要になり、発破段取り時間が大幅に減少した。

5)大塊の発生が減少した。理論的な説明は難しいが、小割機の稼働時間が従前の 1/3 に減少し、一次クラッシャーの電力原単位の減少が見られた。

6)先行発破ができることにより、発破作業に余力を持たせる事ができ、雪の時期や降雨等、発破作業に問題が生じ易い環境下にある時、余裕をもってこれに対応できることにより、発破作業の安全性が向上した。

(2) 欠　点

切羽面を直接見て岩盤の状況を確認する事が出来ないため、岩盤の状況に応じた発破パターンの変更が難しく、確実に根切れを行う事を考えると、孔間隔を狭めにしての発破となるため火薬使用量は１割程度増加する。しかし、トータル的にみると多くの利点があり火薬量(ANFO)の増加分は消化できている。

(3) 発破振動・発破音の比較

発破振動は多列発破、打掛発破はやや小さくなっており、発破騒音は従来発破に比較してかなり低くなっている。

表１　振動・騒音レベルの比較(各平均値)

	振動レベル (dB)	騒音レベル (dB)
従来発破 (26.8 孔)	55.6	80.6
多列発破 (110 孔)	47.6	63.0
打掛発破 (29 孔)	51.5	60.0

No.	題　目	概　　　要	掲　載　誌
3	発破による飛石の実験報告	明かり発破で条件を変えて実験を行い、飛石のための条件について考察。 実験の結果から、盤打発破における込め物長と飛石の関係は顕著で、発破の際十分に配慮すべき条件であることがわかった。また、ベンチ発破における飛石の飛散距離は、概ね火薬使用量(kg/m^3)と直線的に比例している等が確認できた。また、今回の実験場所の岩質では、ANFO 爆薬との組合せで(最小抵抗線／薬径)＝30 が、飛石発生の 1 つの目途にできるのではないかと考えられる。	火薬と保安　1995 Vol.27, No.4 pp.2〜18 (社)全国火薬類保安協会
4	盤下げ発破における飛石防止の基本的な考え方	盤下げ発破の飛石防止のための基本的な考えとして、過去の多くのデータと発破立会の経験等から、爆薬の品種、サイズ等の面から考慮し、経済的にしかも保安上安全な発破計画をするためには、以下の 11 項目を検討する必要がある。 最低必要条件 11 項を以下に示す。 (1) 盤下げ発破の薬量計算式　(2) 発破係数の理論値 (3) 空孔径　(4) 最小抵抗線 (5) 孔間隔　(6) 穿孔長 (7) 装薬長　(8) タンピング長 (9) 電気雷管　(10) 水孔対策 (11) 防護及びその他	火薬保安(愛知県火薬類保安協会) 1996　No.27 pp.16〜22 辻　義高

３．破砕粒度

発破により破砕される岩石の粒度は、利用目的に応じた大きさで均一であることが望ましい。石灰石鉱山或いは砕石場では生産コストの面から、多くの場合大塊の発生が問題となる。破砕粒度をコントロールするには、大別して発破諸元(規格)を最適化する方法と起爆秒時を最適化する方法がある。ここでは、粒度を改善する方法についての解説および大塊発生を抑制した様々な技術報告についてまとめた。

No.1	破砕岩石の粒度改善に関する技術
文献名	破砕粒度を改善するための発破技術について
著　者	山本雅昭
掲載誌	火薬学会 1999 年度年会講演要旨集　pp.73～76

１．概要

岩石採取を目的とした発破の破砕粒度は最終製品に近いほうが好ましいが、その制御については未だ決定的な技術は見出されていない。本報ではこれまで研究されてきた代表的な破砕改善技術を紹介した。

２．発破諸元と破砕粒度の関係

Kuznetsov によれば、発破の諸条件と破砕岩石の平均粒度との関係は(1)式で表現できるとしている。

$$X = A \times K^{-0.8} \times Q^{1/6} \times \left(\frac{115}{E}\right)^{19/30} \quad \cdots\cdots(1)$$

X：平均粒径　　A：岩石係数　　K：火薬原単位
Q：一孔薬量　　E：火薬のウエイトストレングス

平均粒径は、岩石が軟らかいほど、火薬原単位が大きいほど、一孔薬量が小さいほど、火薬の力が強いほど小さくなり、中でも岩石の硬さと火薬原単位により寄与される。

Cunningham によれば、破砕岩石の粒度も粉砕工学で用いられる Rousin-Rammler 式に従うとし、粒度分布を決定する指数と発破の諸条件との関係は(2)式で予測できるとしている。

$$n = \left(2.2 - 14 \times \frac{B}{d}\right) \times \left(1 - \frac{W}{B}\right) \times \left(1 + \frac{A-1}{2}\right) \times \frac{L}{H} \quad \cdots\cdots(2)$$

n：粒度分布指数　　B：抵抗線　　d：削孔径　　W：削孔誤差
A：孔間隔／抵抗線　　L：装薬長　　H：ベンチ高さ

粒度分布指数ｎが大きいほど均一であることを示す。破砕粒度は、抵抗線が小さいほど、削孔誤差が小さいほど、(孔間隔／抵抗線)が大きいほど、(装薬長／ベンチ高さ)が大きいほど均一となり、中でも(孔間隔／抵抗線)と(装薬長／ベンチ高さ)の影響が大きい。(孔間隔／抵抗線)の影響は、ワイドスペース発破として広く知られている。

３．起爆時間差と破砕粒度の関係

近年、非電気式雷管や電子雷管による起爆時間差制御技術の向上で、破砕粒度を改善する研究が行われている。

Langefors と Gustafsson によれば、破砕岩石を細粒化するための起爆時間差と抵抗線の関係は(3)式で表現される。

$$\tau = k \times V \quad \cdots\cdots(3)$$

τ：最適起爆時間差　　　k：定数　　　V：抵抗線

Langefors は定数 k＝3～5ms/m が好ましいとし、Gustafsson は抵抗線 V＝5～8m の範囲で k＝5ms/m が好ましいとしている。さらに小規模試験の結果から、Bergmann らは k＝3.3～6.6ms/m、Stagg らは k＝3.3～10ms/m が好ましいとしている。

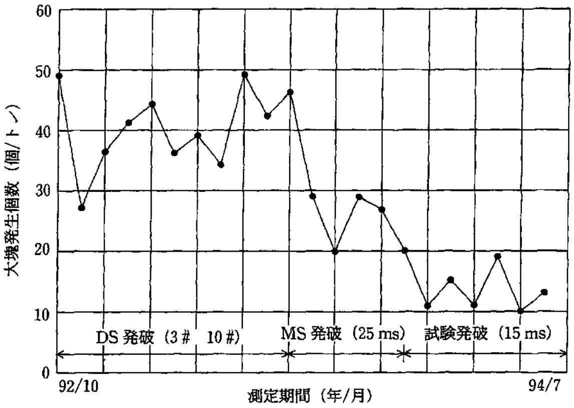


図 1　千トン当たりの大塊個数の推移

曽山らは石灰石鉱山において時間差 15ms の発破を実施し、図 1 に示すように DS 及び MS 電気雷管の発破に比べて大塊発生個数が大幅に減少したことを報告している。

山本らは砕石場において(4)式から得られた時間差 18ms の発破を実施し、従来の発破に比べて大塊発生が半減し、且つブレーカーの小割作業が大幅に削減されたことを報告している。(4)式は亀裂の伝播速度が地山の弾性波速度の 12%程度であり、亀裂が自由面に達する頃に次孔を起爆するのが好ましいという仮説に基づくものである。

$$\tau = \frac{V}{V_p \times 0.12} \quad \cdots\cdots(4)$$

τ：起爆時間差　　　V：抵抗線　　　Vp：地山の弾性波速度

その他大塊発生抑制方法として、多列発破、千鳥発破が有効であるという俗説がある。

以上、破砕改善に関する代表的な技術について紹介したが、その理論的根拠が十分解明されておらず、何れも完成されたものとはいえない。よってさらなる研究を要する分野である。

No.	題　目	概　　　要	掲　載　誌
2	EDD によるフラグメンテーションの改良	地山の弾性波速度から破砕の最適秒時を算出する経験式を用いて、10ｍｓ間隔の電子雷管 EDD による試験発破(デッキチャージのベンチ発破)を実施し、現行の瞬発電気雷管によるベンチ発破と比較した。 その結果、修正発破数が現行発破で 10(小割発破を含む)であったのに対し、試験発破で 1 となり、加えてブレーカーによる小割数と火薬の原単位も低減できた。	工業火薬協会 1992 年度秋季研究発表講演会要旨　p.29 柿本悦二、愛甲研一 松永博文、村上了治 伊瀬谷登
3	起爆秒時差を利用した破砕産物の細粒化	発破の大型化に伴う大塊発生数量の増加を防ぐため、最適な起爆秒時差を電子雷管で調査し、安価な高精度電気雷管(MSD)を開発して操業発破を実施した。 その結果、大塊発生数(小割を要する岩石数)が破砕量 1 千トン当たり平均で 40 ヶから 14 ヶへ抑制された。	石灰石　1995, 11 No.278 pp.12~16 塚本員久
4	EDD によるフラグメンテーションの改良 (第 2 報)	前報に引続き、最適秒時を算出し 18ms 間隔の電子雷管 EDD による試験発破(デッキチャージのベンチ発破)を実施し、現行の瞬発電気雷管によるベンチ発破と比較した。 その結果、ブレーカーの総分割回数で 55%、総処理時間で 30%低減できた。さらに一次クラッシャーの処理量を月平均最大 39t/Hr 増加することができた。	工業火薬協会 1993 年度年会講演要旨集　p.83 柿本悦二、秋丸 進 松永博文、廣瀬幾造 大山慶信
5	発破における岩石細粒化(第一報)－粒度分布評価技術の確立(実篩い分け及び画像解析比較実験)ー	発破による破砕粒度の評価技術の確立を目的として、WipFrag 画像解析システムを導入し、これにより得られたデータと実篩い分け試験(10t トラック 3 台分)で得られたデータを 6 発破分について比較検討した。 その結果、細粒区分で実篩い分けデータ、大塊区分で画像解析データを用いれば事実に近いと考えられ、本システムにおける細粒区分データを補正すれば充分適用可能な評価技術であることが判明した。	火薬学会 2000 年度年会講演要旨集 p.81 西 政明、村下 剛 野田英弘
6	宇部苅田鉱山におけるワイドスペース発破法	大塊発生により多くの二次発破を要する現状を改善するため、スウェーデンやオーストリアで実用化されているワイドスペース発破法を導入し、様々な検討を試みた末、次の成果を得た。 (1) 大塊が大幅に減少 (2) 小割発破を含めた採掘費を 30～40%低減 (3) 多列発破により一発破の起砕量が増加 (4) 破砕粒度の細粒化と均一化 (5) クローラの能率向上	石灰石　1978, 9 No.175 pp.19～23 有田健二

４．制御発破

PS(プレスプリッティング)や SB(スムースブラスティング)等の制御発破は、法面の形成やトンネル天盤、側壁の形成において必要な技術である。いずれも岩盤に必要以上の損傷を与えずに余掘りを少なくすることを目的とする。それぞれの解説に加え、SB 効果に影響を与える穿孔精度、穿孔配置、斉発性等について検討した試験報告および施工報告についてまとめた。

No.1	PS
文献名	プレスプリット発破法の基礎知識と実際
著　者	西田　佑
掲載誌	骨材資源　No.65　1985　pp.30～38

１．概要

PS 発破は爆力を制御し、装薬孔の周辺にはできるだけ破壊を及ぼさず、2 孔間の方向のみに破壊効果を得ようとするものでむしろ切断を目的とする発破法である。

２．発破

穿孔は、通常発破で使用しているクローラドリルを用い、一般的に 65～75mm 径程度を使用しているところが多い。火薬類については、導爆線と含水爆薬(またはダイナマイト)を使用して、デッキチャージを行う場合もあるが、爆薬の成形作業にかなりの工数がかかる。従って、クローラドリルの 65～75mm 径を対象にした場合、20～22mm 径のＰＳ発破用爆薬を使用するほうが好ましい。

C.J.Konia によると、孔間隔は、経験的に(1)式で表され、また、平野、岸本等は(2)式で計画している。

$$S = 10D、 D > 2d、 \rho = 8.24D^2 \quad \cdots\cdots(1)$$

$$S = (10\sim12)D \quad \cdots\cdots(2)$$

Ｓ：２孔中心距離 (cm)　Ｄ：穿孔径 (cm)　ｄ：薬包径 (cm)　ρ：装填密度 (g/m)

装薬量に関しては各種いろいろな考え方があるが、(3)式を用いることが多い。

$$L = C \cdot D \cdot l \quad \cdots\cdots(3)$$

Ｌ：一孔当たりの装薬量 (kg)　Ｃ：発破係数 (kg/m^3)　Ｄ：孔間隔 (m)　ｌ：穿孔長 (m)

発破係数Ｃは、岩質により決まるもので、表 1 を参考にして求める。

表 1　各岩質の発破係数

岩　質	発破係数 (kg/m^3)
軟　岩	0.17
中硬岩	0.20
硬　岩	0.25

３．その他

PS 発破は孔底部の起砕効果が悪いため、30mm×100g 程度の含水爆薬やダイナマイトを孔底に使用したり、PS 爆薬の孔尻部分を折り曲げて二重にして使用するのがよい。また、込物長についても岩質等の条件によりまったく異なるが、平均的には 1m 程度と考えられる。切断予定面に斜めに亀裂や目がはいっている岩盤は非常に凹凸ができ易く、平滑な面はできにくい。この場合は、穿孔間隔を狭くして装薬量を減らしたりする等の手段を講ずる必要がある。

No.2	SB
文献名	EDDによるSB発破
著　者	愛甲研一、山本雅昭、佐久間信彰、野間正治、山田謙二、佐藤雄昭
掲載誌	工業火薬協会1989年度秋季研究発表講演会要旨　pp.47～48

1．概要

トンネル掘削における SB 発破は、発破による地山の損傷をできるだけ抑制し、掘削面をより平滑に仕上げることを目的としたものである。ここでは、従来の SB 発破の欠点である最外周面仕上りの不良の原因を雷管の秒時のばらつきに起因するものであると仮定し、最外周孔に高秒時精度雷管 EDD を使用して SB 発破を実施したところ、大変良好な SB 効果を確認することができた。

2．実施方法

今回は、SB孔を斉発にした場合(SB-1)と5msの遅延をもたせた場合(SBD-1)の2通りの条件で行った。発破諸元について以下に示す。また、図1および図2に発破パターンを示す。

実験評価方法は表1に示すとおり、のみ跡の数を4段階に分けて観察した。

岩　種：花崗岩　　穿孔長：1.8m　　SB装薬量：12.5kg

岩　質：中硬岩　　掘進長：1.6m　　SB孔間隔：0.6m

弾性波速度：4000m/s　　掘削量：69.86m^3　　SB抵抗線：0.8m

断面積：43.66m^2　　SB孔数：25孔

表1　のみ跡の判定方法

ランク	判　定　基　準
A	のみ跡がほとんど全長残った
B	のみ跡が半分程度残った
C	のみ跡が1/4程度残った
X	のみ跡がまったく残らなかった

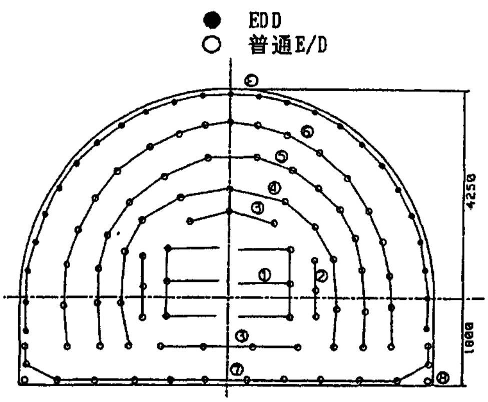


図1　SB-1発破パターン

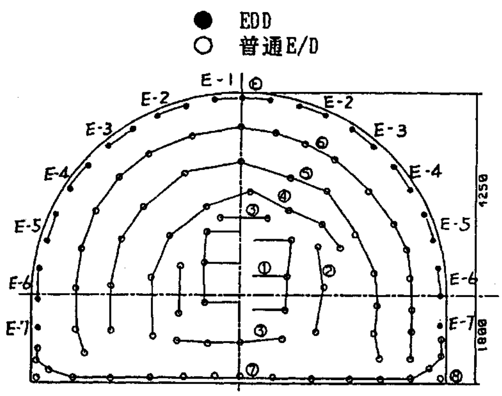


図2　SBD-1発破パターン

3．結果

SB-1 では、25 本の SB 孔中 24 本ののみ跡が確認され、そのうち 21 本が A ランクとなった。また、孔数、原単位ともに通常発破と同程度で大変効率のよい発破であった。また、SB 孔間に秒時差をもたせた SBD-1 では、多少仕上りは悪かったが発破振動軽減の効果が得られた。

４．結言

今回の実験により、SB 工法に使用する雷管の秒時精度が最外周面の仕上げの向上を大きく左右することが示された。しかしながら、EDD を全て同秒時にして斉発することは大きな発破振動を発生させることになり、振動問題を考慮すべき現場では秒時差を EDD に設けて発破する必要があるが、今回、EDD を使用した SB 孔の秒時差を 5ms 間隔で発破させ、振動軽減の効果を確認することができた。

No.	題　目	概　　　要	掲　載　誌
3	軟岩における SB 発破工法について(第 3 報)	電子遅延式雷管(EDD)を用いて、軟岩における SB 効果を検討した。 その結果、のみ跡率は現行発破において 0～10%であったのに対して EDD 使用では、50～85%となり余掘り量も少ない良好な平滑掘削面を得ることができた。また、分散装薬で装填比重を変化させることにより、軟岩においても適切な SB 発破を行うことができる。	火薬学会 1998 年度年会講演要旨集 p.73 村下 剛、富山紀光 山本雅昭、久野建明 金谷義之
4	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	本研究では、SB を次の 3 段階に分けて検討した。 第 1 段階－発破技術に関する問題（のみ跡率による評価)、すなわちその岩質にあった孔間隔、抵抗線、薬量等に起因する問題 第 2 段階－削孔に関する問題、すなわち第 1 段階の成功に加えて、削孔パターン通りに正しく削孔できるかどうかの問題 第 3 段階－SB の最適設計、すなわち第 1、第 2 段階の SB の成功要因に加えて、「当り」、「余掘り」に対する費用を最小化する設計が行えるかどうかの問題 上記 3 段階について、削孔ロボットを用いた硬岩トンネルで実験を行った。 その結果、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、すなわちいかに設計パターン通りに削孔するかが SB の結果を左右することになる。	土木学会論文集 1986, 3 No.367/IV-4 pp.52～61 中川浩二、古川浩平 鈴木宏平、吉見憲一
5	硬岩トンネルのスムーズブラスティング孔設計の最適化に関する研究	本研究は、前論文「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」において SB の成否を 3 段階に分類したうちの第 3 段階である当たりや余掘りの確率を考慮に入れて削孔パターンの最適化を試みた。 硬岩の SB 設計の最適化で最も重要な要因はさし角と実切羽上に描く削孔半径の大きさであることを指摘し、この最適化問題を定式化することができた。また、費用は削孔精度を上げることで 7～10%、最適化を行うことで 6～11%、総合的には 20%近く削減が可能であることが明らかになった。	土木学会論文集 1987, 3 No.379/IV-6 pp.107～115 古川浩平、吉見憲一 瀬戸口博昭 中川浩二

6	節理系岩盤のトンネル掘削におけるスムーズブラスティング効果の検討	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 27 種の発破実験を行い、その実測データをもとに節理系岩盤での SB に関して検討を行い、以下の結果を得た。 節理系岩盤では、外周孔の孔間隔、抵抗線距離、薬量の 3 要因が発破結果に及ぼす影響は特に大きいとは言えないことが認められものの、SB 用の爆薬を用いることにより、のみ跡率を向上させることが可能であった。しかしながら、節理系の岩盤においては、発破パターンよりも節理のほう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。	土木学会論文集 1988, 3 No.391/IV-8 pp.220～227 吉見憲一、古川浩平 井澤幸一、中川浩二
7	低比重含水爆薬の研究(第 2 報)	従来の SB 爆薬と電子遅延式電気雷管(EDD)を用いても顕著な SB 効果を得ることが困難な軟岩領域において、エネルギーを低減させた低比重含水爆薬と EDD を組み合わせて実験を行った。 その結果、通常発破と比較して余吹率が低減され顕著な効果が現れた。また、通常発破で突発的に発生していた余吹率増大現象の頻度が減少することがわかった。 こうした傾向はトンネル最外周の余掘りの大幅な減少と、岩盤安定により、坑内作業の安全性が改善したことを示唆していると考える。	火薬学会 1999 年度秋季研究発表講演会要旨　p.45 円城篤志、有田武功 小坂安則、椿 五男
8	スラリー爆薬による SB 発破例	三井金属鉱業㈱神岡鉱業所において、残留爆薬のくり当て暴発防止や後ガスに対する安全性に主眼を置き、ダイナマイトからスラリー爆薬への切り替えが行われた。 これにともない、 (1)非常に高価な SB ダイナマイトから、大幅なコストダウンができること (2)一般サイズ品を使用して SB 発破を行う (3)浮き石災害防止のためにも仕上り面は円滑であること の 3 つの着眼点に基づいてスラリー爆薬による SB 発破の検討をおこなった。 その結果、装薬孔内圧力が等しければ切断効果は等しいと仮定し、装薬孔内に空間を設けることにより良好な結果が得られた。	工業火薬　1978 Vol.39, No.4 p.205 中野雅司、南光宣和
9	制御発破工法と岩盤への影響度	亀裂の発達した岩盤において、パラメータを変化させた制御発破法を用い、壁面の仕上り状況、空洞掘削による亀裂状況の変化、岩盤への発破による影響度の評価を検討した。 その結果、制御発破を用いた場合でも、発破手法、周辺孔の間隔、装薬量の違いによりその結果には大きな差が現れることが確認された。また、トンネルでのプレスプリッティング工法は、余掘りを減少させ、岩盤への損傷を抑えるのに効果的であること、トンネル内での機械装薬による ANFO 爆薬を用いての制御発破も十分に効果が期待できることが確認された。	トンネルと地下 1993, 4 Vol.24, No.4 pp.29～36 玉井昭雄、永久和正 白旗秀紀

５．爆破解体

構造物の爆破解体においては、倒壊方向の制御や周辺環境への配慮(振動、騒音、飛散物、埃)等、それぞれの物件に対し独自の技術を要する。鋼材の解体にはＶ型成形爆破線等の成形爆薬を使用して、ジェットの侵徹によって切断する。海外で実施されているビル解体等に比べると国内の事例は数少ないが、高炉、鉄塔、煙突、橋等の解体施工報告およびコンクリート構造物の爆破試験報告についてまとめた。

No.1	発破解体事例
文献名	高炉爆破解体報告
著　者	長野正幸
掲載誌	火薬と保安　Vol.29, No.2　1997　pp.20～26

１．概要

岩手県の製鉄所で、平成 8 年 7 月～11 月の間で行われた、高炉の発破解体の報告。

発破解体は、7 月に熱風炉内のチェッカー煉瓦受支柱の発破を行い、8 月に 3 基ある熱風炉を発破倒壊させた。11 月に高炉本体櫓を発破倒壊させて一連の発破解体工事は終了した。

２．実施内容

2.1 チェッカー煉瓦受支柱の発破

最初に、熱風炉を倒壊させる際に障害となるチェッカー煉瓦受支柱を発破により破砕し、チェッカー煉瓦を落下させた。この支柱は鋳鉄でチェッカー煉瓦を支えており、熱風炉 1 基につき 21 本ずつある。

表 1　チェッカー受支柱の寸法

高　　さ	底部の外径	平 均 厚 さ
1,580mm	500mm	63.5mm

支柱内部を水で満たした後、ヒモに吊るした爆薬を内部にセットし、水を媒体とした発破を行い鋳鉄製の支柱を一挙に破砕した。

2.2 熱風炉の発破倒壊

熱風炉は 3 基並んでいる。この熱風炉の下部の鉄皮をＶ型成型爆破線で爆破切断し、同時に煉瓦を穿孔発破することにより倒壊させた。

表 2　熱風炉の寸法

高　　さ	外　　径	鉄 板 厚 さ
約 34m	約 7.5m	19mm

表 3　熱風炉 1 基あたりで使用した V 型成型爆破線

種　　類	本　　数	延べ長さ	換算薬量	切断能力
900GR/FT	8 本	14m	2,688g	20mm

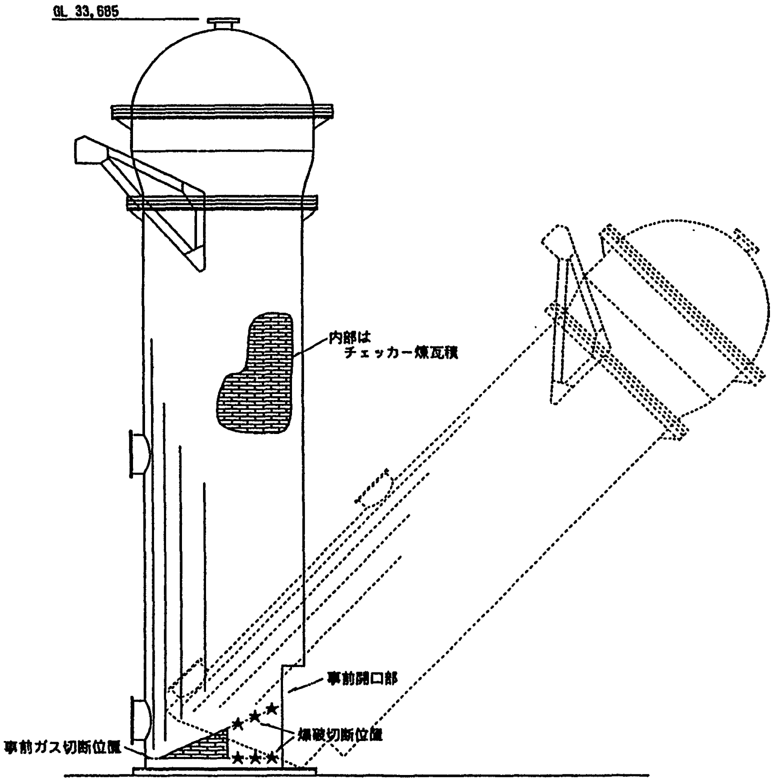


図 1　熱風炉　切断位置　事前開口部切断位置

2.3 第一高炉本体櫓の発破、倒壊

自立支持している炉体を事前に解体して取り除き、最終的には炉体櫓と炉頂部の諸設備のみの構造とし、これを発破倒壊させた。炉体櫓は 4 本の柱からなる鉄骨構造である。

4 本の柱の内、転倒方向の 2 本の柱をＶ型成型爆破線で爆破切断(間引き)し、自重による転倒モーメントを利用し、倒壊させた。また所定の方向に確実に倒壊させるために爆破切断しない側の 2 本も柱の周囲を一部残してガス切断した。

表 4　炉体櫓の寸法

底部の平面寸法	最大高さ	総　重　量
17m×17m	77.6m	1,724ton

表 5　発破切断された柱の寸法

断面寸法	板　　厚
1m×1m	32mm

表 6　柱の発破切断に使用されたＶ型成型爆破線

種　　類	本　　数	延べ長さ	換算薬量	切断能力
5,000GR/FT	16 本	18.4m	18,400g	40mm

Ｖ型成型爆破線は柱の上、下部 2 個所の周囲 4 辺に取り付け、ここを爆破切断面とした。2 個所の爆破切断面は長さ約 5m の間をハの字に間引くように設計された。

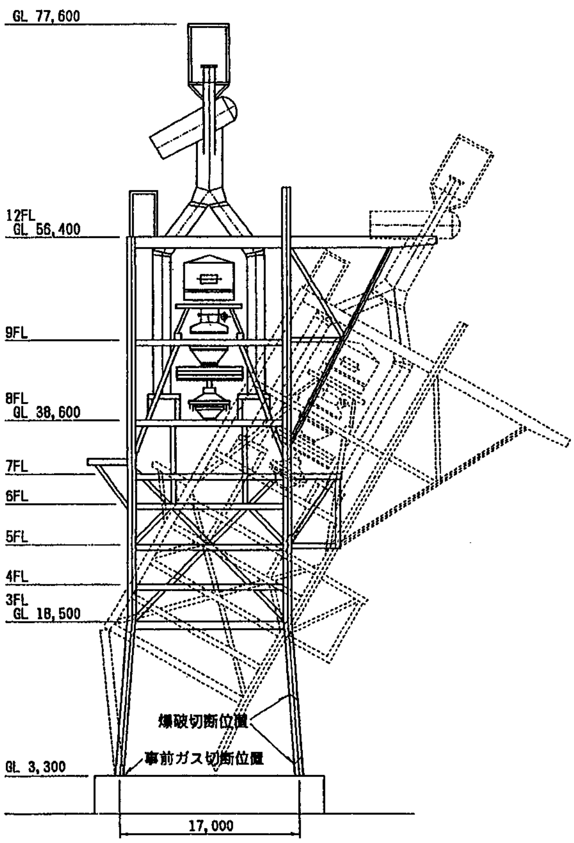


図 2　炉体櫓　切断位置，事前ガス切断

発破の結果、柱は上下部で完全にハの字に切断され、この切断された部分は所定の方向に確実に離脱された。柱の一部がなくなったことにより、炉体櫓の重心との関係からこの支点部分に曲げの力が働き、折れ曲がり始めた。と同時に炉体櫓に転倒モーメントが作用し、ゆっくりと傾き始めた。起爆後約 6 秒でマウンドの上に着地し、倒壊終了まで約 15 秒を要した。

発破作業に伴って発生する騒音及び振動に関する環境保全管理には十分留意する必要がある。周囲への環境対策として、発破による飛散物等、周囲環境へ与える影響を抑えるために切断個所を防爆シートで覆った。また、炉体櫓の着地する際の衝撃を和らげることにより、振動及び騒音を抑えるよう努めた。

騒音については、極めて大きな爆発音が発生し、周囲の住民に与える影響が大きな問題になることが懸念され、200m 離れた地点で 119dB(A)の爆発音が測定された。しかし、今回は事前の広報活動により発破場所及び時間等が周辺住民に周知徹底されていたので、爆発音に対する驚きや苦情は聞かれなかった。

表 7　騒音､振動計測結果

	距　離（m）	騒音レベル（dB（A））		振動レベル（dB）	
		発破時	倒壊時	発破時	倒壊時
P－1	100	120	104	71	71
P－2	150	―	―	68	71
P－3	200	119	98	67	68
P－4	260	109	90	―	―

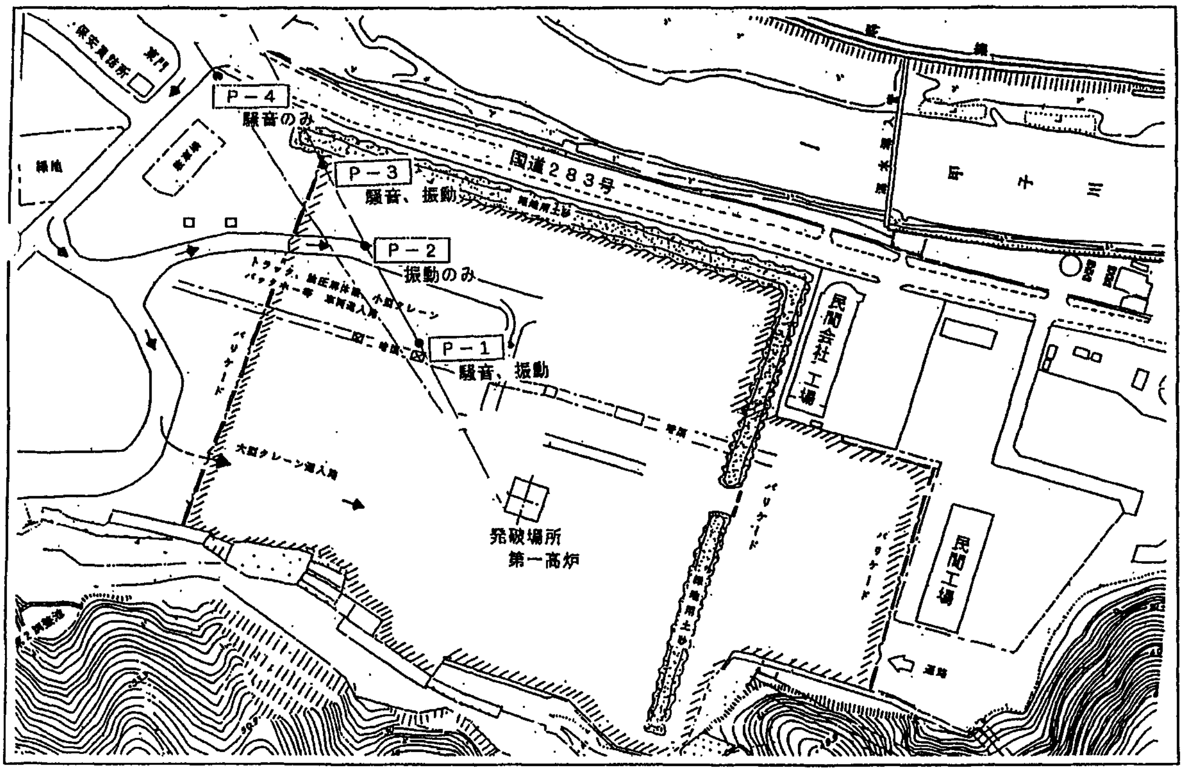


図３　製鉄所周辺及び計画位置

No.2	発破解体事例
文献名	鋼構造物の発破解体
著　者	前田正尚
掲載誌	工業火薬　Vol.51, No.5　1990　pp.323～327

1．概要

構造物を解体撤去するのに、発破工法が採用される場合がある。発破による解体工法は、工期の短縮、コストの低減、高所作業の削減等のメリットがある。特に、鋼構造物の解体発破の場合は、ノイマン効果を利用した成形爆薬を用いるのが有効である。

2．施行例事例

2.1 電波鉄塔(昭和 61 年 4 月)

高さ 400m の支線式鉄塔で、3 方向を各 5 本の支線で支えられており、1 方向の支線とアンカーに連結しているアンカープレートを切断することにより支線と反対方向に倒壊。(自重落下により十分破壊された)

2.2 水管橋基礎杭(昭和 61 年 12 月)

既存する基礎杭が支障となったため、一部撤去する事となった。鋼管の外径が 267.4mm と小さく切断機が挿入できないので成形爆薬による切断工法が採用された。厚みは 6.7mm であるが、防音対策の為に鋼管杭内部に水を満たし、車輪上の成型爆薬を鋼管内部に挿入し切断した。周囲には発破場所から民家が約 40m、県道が約 20m の位置にあったが、騒音・振動とも問題はなかった。

2.3 溶鉱炉付帯設備(昭和 63 年 6 月～9 月)

(1) エレベーター塔

高さ 58m、総重量 45t で 4 本の支柱(L-130×130×9)で支えられており、重心の位置と角度により切断位置を決定。支柱を爆破切断し、倒壊させた。

(2) 熱風本管

全長約 54m、直径 2.7m の鋼管に耐火煉瓦が内張されたもので、高さ 15m の位置に 20 本の支柱で支えられ、総重量が約 600t で、支柱はH鋼(H-300×300×15×10)であった。倒壊方向の支柱 10 本に成型爆薬をセットし足を払う様に倒壊させた。

(3) 鋼製煙突

高さ 75m、下部の外径が 7.6m で、耐火煉瓦が内張りされており、総重量は約 380t である。解体工法は事前にH鋼の柱に仮受して、煙突底部の鉄皮を倒壊方向に合わせてクサビ状に切り欠き、H鋼の支柱を切断し、足を払う様にして倒壊させた。

2.4 道路橋(昭和 63 年 9 月)

スパン 38m の合成桁構造で、ウェブの高さは 2.1m の主桁 7 本で構成されていた。下フランジの厚さは最も厚い所で 36mm であった。 解体は先にブレーカーで RC 床版を撤去した後、成型爆薬によって主桁を切断落下させた。

3．今後の課題

この施工例にも挙げた成形爆薬という特殊性から、これまでの経験を基に、爆破解体施工上考えられる今後の課題について記す。

(1) 安全性、経済性を考慮した事前処理方法

(2) 成形爆薬のコスト低減、とくに製作時間の短縮

(3) 変則的断面形状にも対応できる成形爆薬の開発

(4) 周辺環境に応じた解体パターンが選択できる技術

No.	題　目	概　　　要	掲　載　誌
3	制御発破薬に関する 2､3 の実験	都市におけるコンクリート発破の基本的な考え方をまとめる為に 2、3 の実験を行った。 無筋コンクリートブロックを削孔し、種々の火薬類を装薬し、発破後の状況を確認した。飛石については、薬種による影響は明確でなく、薬量の影響が大きい。砂タンピングが有効となる点火から破壊開始までの時間は約 15ms であるとの結果が得られた。	工業火薬　1972 Vol.33, No.4 pp.235～241 桜井武尚､酒井 洋 坂口道明､植田武雄 佐々宏一
4	旧高島炭坑６階建て鉄筋コンクリート造集合住宅の発破解体(第１報)	6 階建て鉄筋コンクリート造アパートメントの発破解体工事に先立って予備実験としてアパートメントの構造主体をなす、柱、壁、梁を発破し、その発破効果及び発破に伴って発生する振動、騒音、飛散物を計測した。 破砕効果に関しては、部分的に不完全なところもあったが、全般的には倒壊工法決定の有益な資料が得られた。また、飛散物の発生に関しては古畳と防爆シートによる防護養生が十分有効であることが確認された。 振動、騒音については発生しても瞬間的であることから被害の発生する範囲ではないものと考えられる。	工業火薬　1993 Vol.54, No.6 pp.225～264 黒川孝一､吉田忠雄 齋藤照光､山本雅昭 中村重幸
5	石油プラットフォーム撤去工事(第１報～第３報)	石油プラットフォームのコンダクターパイプ(石油を採取する為のパイプ)10 本、メインパイル及びスカートパイル(脚･約 1.3m 径の鋼管)12 本の合計 22 本を約 90m の海面下、約 5m の海底面下で内部装薬により爆破切断した。 切断には、オクトールを用いたパイプライナー方式のシェープドチャージを使用した。起爆は、深海用電気雷管、特殊導爆線、数種類のブースターを組み合わせて使用した。起爆部及び切断用火薬をユニット化し、パイプ内へ装填した。 発破後、水中カメラにより切断状況を点検し、追加発破の必要性の有無を判断した。今回の発破作業では全て 1 回で切断が完遂でき、再発破の必要はなく作業を終了した。	工業火薬　1993 Vol.54, No.6 pp.310～315 火薬学会誌　1995 Vol.56, No.1 pp.44～57 前田博志､伊藤建爾 加納俊彦､新藤孝志 武石文暢､西田 佑
6	コンクリート破砕器によるダム堤体コンクリート掘削例	ダム堤体のコンクリートの一部を破砕し、他の部分が損傷しないような掘削方法を検討した。作業能率が良好で、掘削部以外の部分に悪影響を与えない条件を満足する工法としてコンクリート破砕器とダルダ工法の併用が採用された。 掘削部以外の堤体に対する許容振動値は 2.5cm/s とし、事前の実験結果からコンクリート破砕器を用いた場合の振動推定式は $V = 30 \cdot W^{1.14} \cdot D^{-1.73}$ となった。 最終掘削面の内側 50cm はダルダ工法により掘削し、その他の部分は最終掘削面までの距離に応じ 90～600g の破砕器を用い、最小抵抗線 20～25cm、孔間隔 15～25cm で破砕した。 掘削作業中、振動測定を行ったが、いずれの場合も許容振動値を超えることはなかった。	工業火薬　1997 Vol.38, No.1 pp.24～29 西田 佑､配川敬典

7	砂中爆発法の性質と応用(Ⅱ) ー爆薬による鋼鈑切断における川砂の防音効果ー	都市発破の諸条件の中で重要なものは、火薬の安全管理と低公害性である。特に近隣の住民に不安を与えない程度の低騒音、低振動、無飛散物及び低粉塵等が達成される必要がある。 低騒音を可能とする発破法として砂の利用を考え、鉄板切断発破にこれを適用するための基礎実験を行った。その結果、装薬部を砂で覆うことにより爆発音は大きく減少した。 砂厚 30cm で 35dB 程度、50cm で 45dB 程度騒音レベルが低減することが確認された。 今回の実験では、騒音レベル(Ｓ:dB)と砂の厚さ(ｒ:cm)の関係式 $S=168r^{-0.22}$ が得られた。	火薬と保安　1987 Vol.19, No.4 pp.21～25 齋藤照光、小林直太 黒川孝一、田村昌三 松永猛祐、吉田忠雄
8	砂中爆発法の性質と応用(Ⅲ) ー爆薬によるＨ型鋼入りコンクリートブロック破砕における川砂の防音効果ー	H 型鋼の入った柱のコンクリート破砕のモデル的な発破実験を行い、覆砂の防音効果を主として検討した結果、次のことが確認された。 (1) 砂被覆によって、爆発騒音を抑制できる。 (2) 貼付法、内部装薬法、砂被覆等の爆発騒音、コンクリート破砕、H型鋼とコンクリートの剥離に及ぼす影響を調べ、内部装薬被覆法が最も優れている。	火薬と保安　1988 Vol.20, No.2 pp.23～31 齋藤照光、小林直太 黒川孝一、田崎陽治 川村 実、和田有司 吉田忠雄

６．特殊発破

本節は、あまり例を見ない特殊な発破事例に関するものである。特殊な発破であるがゆえにそれぞれ独自の応用技術を要する。一般的な掘削方法が困難である場合の大規模な横孔式発破、漁場を改善するために海底の有機物を撹拌するための発破、道路沿いで落下の危険を有する岩塊を除去するための発破等、めずらしい発破の実施報告についてまとめた。

No.1	コブ状の山の発破掘削
文献名	大規模な横孔式段発発破例
著　者	藤間勝雄、安河内孝、前田正尚、橋爪　清
掲載誌	工業火薬　Vol.53, No.4　1992　pp.205～210

１．概要

ダム建設の原石山で直径 33m、高さ 33m、体積約 1.2 万 m^3 のコブ状の山を破砕するため、岩質、地形等の条件を考慮し、横孔式段発発破を検討した。最長 20m の横孔 32 孔に、アンホ爆薬を主体とした爆薬 2.4t を装薬し、側面を自由面として MS 段発発破を実施した結果、上部岩石の予定通りの落下と予想以上の破砕量が得られ満足できるものであった。

２．施工方法の検討

コブ状の山は、大部分が風化した安山岩で、極めて足場の悪い位置に存在し一部が幅 10m で原石山と尾根伝いになっている。そのため人や機械の頂上への移動は不可能で、ベンチカット工法は採用できなかった。幸いにも現場周辺には、民家や構造物がほとんど存在せず飛石や振動の影響を無視できるため、一気に爆破する工法を検討した。

坑道式大発破法は、摂理の発達により坑道の保安を確保できないこと、足場が悪く地形の精密な測量ができないこと等の理由から採用しなかった。

横孔式発破法についても様々な問題が考えられたが、以下の理由により横孔式発破法を採用した。

①大型削岩機で一方向から長い穿孔ができる

②装填機を使用することによりアンホ爆薬を荒孔へ装薬できる

③段発で横方向へ払うことにより上部岩石を落下させることが可能である

３．発破パターンの検討

発破の対象範囲は、図 1 に示すようにコブ状の山の下部で、削岩機の能力と足場の移動可能な範囲から、穿孔位置は口元で上下方向 8～10m、左右方向最大 11.5m とし、ビット径 102mm で最長 20m の放射線状の穿孔配置とした。

最小抵抗線は、アンホ爆薬を機械装填すること、および過装薬による多少の飛石が許されることから 4m を基本とし、孔の中央で 4m とした。

孔間隔は、岩石 m^3 当たりの爆薬量を考慮し、隣接孔ショックによる不発発生を防止するため、親ダイの位置で 1.5m 離すことにした。

秒時差は、次段の起爆時における自由面の形成とカットオフによる不発の防止、さらに最終段後の上部岩石を落下させる空間形成を考慮して、電気雷管の瞬発、MS6 段(130ms)、MS10 段(300ms)、MS13 段(450ms)、MS16 段(640ms)を使用した。

装薬は、孔尻からアンホを装填機で装薬した後、親ダイの３号桐ダイナマイト 80mm×2.25kg、アンホピース 80mm×2.25kg、親ダイの順とした。

以上の検討から、穿孔数 32 孔、装薬量 2364kg(アンホ重袋 1860kg、アンホピース 324kg、３号桐ダイナマイト 180kg)、原単位 0.20kg/m^3 の発破を実施した。

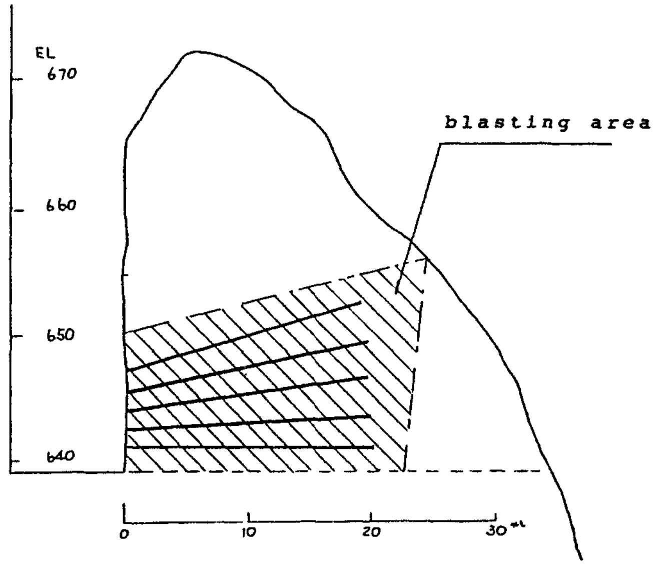


図１　Blasting area

４．施工結果

発破作業に先立ち落石防護柵を設置した。穿孔作業では、発破対象範囲の上部から順に下部へと、穿孔機を設置している岩盤を下げながら穿孔した。孔の向きと角度の調整には、それぞれトランシットとスラントルールを用いた。装薬作業では、足場を組んで装填機を使用した。リークを防止するために結線部にはプロタイトを施した。

発破の様子をビデオで観察し、爆薬が完爆した後に上部岩石が落下し、ほぼ計画通りの成果が得られたことを確認した。断層部の存在で穿孔長が計画より短くなった影響で、孔尻部に若干の未掘削部を残すことになったが、予想以上の広い範囲を破砕できた。

飛石は、約 150m 離れた位置で少量のこぶし大のものが落ちていた程度であった。騒音と低周波音は、装薬孔口元方向約 300m 離れた位置でそれぞれ 115dB(A)、134dB(SPL)であった。

No.	題　目	概　　　要	掲　載　誌
2	増養殖漁場の改善方法としての爆薬の利用	真珠養殖漁場の老化を改良するため、漁場底泥の爆破耕耘を検討した。 ダイナマイト 500g を消石灰 15kg 中に挿入して海底にて爆発させることにより、半径 5m の範囲で老化の原因である底泥中の有機物量およびフェオフィチン量を減少させ消石灰を均一に散布することができた。作業能率の向上も含めて爆破耕耘の有用性が確認された。	工業火薬　1971 Vol.32, No.4 pp.182～186 若園吉一、中野雅司 小川輝繁、沢田保夫 谷口宮三郎
3	北海道岩内町刀掛トンネル坑口上部巨岩爆破工事について	地震の災害復旧工事において、トンネル坑口上部で傾倒した 9000t の巨岩を爆破で除去した。 対象巨岩に近接する岩塊への発破振動の影響、巨岩の転落方向等の問題を考慮し、穿孔数 48、穿孔長 2.7～9.0m、瞬発～DS9 段の秒時で３号桐ダイナマイト 585kg の発破を実施した。 その結果、予想通りの爆破効果が得られ本工事は成功のもと無事終了した。	火薬と保安　1994 Vol.26, No.3 pp.11～15 定久典英

７．発破の改善

本節は、安全性の向上、作業能率の向上、工期の短縮、コストの削減等、発破作業の改善に関するものである。ここでは、トンネルの長孔発破を中心に、立坑の掘削、大断面坑内におけるベンチ掘削、明かりの先行発破工法等広範囲に及ぶ発破改善の事例報告についてまとめた。

No.1	ノネルによる坑道掘進の能率向上
文献名	神岡鉱山における非電気式雷管による坑道掘進について
著　者	茂住洋史、藤井広太郎、齋藤修二
掲載誌	工業火薬　Vol.54, No.1　1993　pp.44～49

１．概要

神岡鉱山では坑道掘進の能率向上を目的として、非電気式雷管(NONEL)の導入を計画した。

NONEL を使用することにより、一発破掘進長を従来の 2m から 3m に延ばすことを目指し、計 80 回の試験発破を実施した。その結果、坑道掘進能率が 1 工(1 人 330 分)当たり 1.9m から 2.6m へ向上する等飛躍的な成果を得た。

２．現行発破

発破作業は、穿孔、発破、ズリ出しを分業化したクルーシステムを採用している。爆薬は親ダイにエマルジョン爆薬、増ダイにアンホを、雷管は電磁誘導式雷管(MBS)を使用している。点火作業は遠隔発破システムを開発し、坑外事務所で定時に集中して点火している。

MBS はあくまで電気雷管であり、アンホを機械装填する際は静電気の発生が原因で孔底起爆ができないため、カットオフ等で残留を生じる場合があった。

３．試験発破

試験は、岩質が片麻岩(一軸圧縮強度 200～220MPa)、スカルン(杢地鉱同 70～100MPa)の円山坑内坑道掘進箇所で実施した。

NONEL システムは Nitro Nobel 社が開発した非電気式起爆システムで、チューブ、雷管、コネクターより構成される。チューブは外径 3mm、内径 1.5mm の中空の高品質プラスティックで内壁に爆薬が塗布されており、起爆するとチューブ内を 2000m/s の速度で衝撃波が伝播し、そのエネルギーによって雷管を起爆する。雷管は外径 7.5mm のアルミ管体で、8 号雷管に相当する量の添装薬、起爆薬、延時装置、ゴム製塞栓とチューブで構成される。ゴム製塞栓は孔底起爆で逆管にした際のチューブの摩耗を防ぎ、チューブ末端はシールされ耐水性を有する。

本試験における雷管は、NONEL、GT-T シリーズの 0～50 段で、チューブ長 4.8m、5.4m を使用した。コネクターはチューブ内の衝撃波伝播の中継として働き、コネクターブロックとミニ雷管で構成される。ミニ雷管は普通雷管の 1/3 の威力を有する。コネクターに導爆線を組込んでバンチコネクターとし、より多くのチューブへ衝撃波を伝播できる。この場合、コネクターのチューブ内の衝撃波がコネクターブロックに到達すると、ミニ雷管、導爆線が順次爆発し、導爆線に結束された雷管のチューブに衝撃波が伝播して雷管を起爆する。NONEL システムの特徴をまとめると、電気に対し安全であること、精度良く多段数の発破が可能であること、結線が容易であること等が上げられる。

試験切羽であるトラックレス坑道の加背は、幅 4.5m、高さ 3.5m、断面積 15m^{2}である。芯抜きはバーンカットを採用し、装薬孔数 38(径 51mm)、空孔数 4(径 85mm)、穿孔長 3.1m とした。穿孔パターンを図 14 に示す。

装薬は、まず親ダイのエマルジョン爆薬 100g を孔底に手装填し、増ダイのアンホを鉱山専用のアンホトラックで孔口まで機械装填した。その結果、装薬率は 90%を超えた。外周孔のアンホ装薬は少量でタンピングをし、その他はタンピング無しとした。結線は、切羽を 4 分割してバンチコネクター

を 4 個使用し、それぞれに雷管を最大 10 個束ね、さらに 4 個のバンチコネクターを 1 個のコネクターに束ね、最後にそのチューブに MBS 雷管を平行に添えてテープで固定した。点火は、現行のシステムを使用して坑外事務所にて行った。

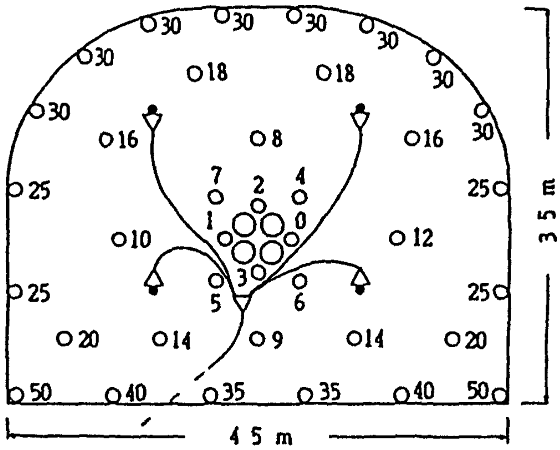


図 1　Connection of tunnel round with NONEL bunch connectors and intervals

4．試験結果

発破の効果及び経済性を評価するために、穿孔長、進行長、爆薬量、装薬・結線時間、坑道掘進能率を一発破毎に測定した。

主な結果について現行発破との比較を以下に示す。

比 較 項 目	現行発破(電気雷管)	試験発破(NONEL)
一発破進行長	2.0m	2.9m
坑道掘進能率 (1 人 330 分)	1.9m/工	2.6m/工
発破作業時間 (穿孔、ズリ出しを除く)	102.7 分	75.4 分
爆薬原単位	2.4kg/m^3	3.0kg/m^3
雷管使用量	1.27 個/m^3	0.85 個/m^3

本試験では、表に示されるように飛躍的な成果が得られた。しかし、試験では 3.0m を確実に起爆するという意識が強く装薬量が若干多くなり、その結果爆薬原単位が増加した。天盤の仕上り面が荒れている、側壁部分が穿孔範囲以上に起砕している、破砕岩石が従来に比べ細かいこと等から過装薬になっていたことは明らかである。このため、穿孔数を減らすことや一孔当たりの爆薬量を減らすこと等、爆薬原単位の改善が今後の課題である。

No.2	発破の改善
文献名	クレーターカット発破によるグローリーホール切上り工法について
著　者	北村美也彦、澤田　斉、西田　佑、橋爪　清
掲載誌	工業火薬　Vol.43, No.2　1982　pp.90〜96

1．概要

北海道電力㈱高見発電所の地下発電所建設工事のうち、ケーブルトンネルの立坑開削用のグローリーホール掘削法として、クレーターカット発破を利用した切上り開削工法を実施し有用な結果を得た。ここでは、各レベルで最適な孔を使用し、砂タンピングのほかベントナイト泥水を利用することにより、作業の安全性の確保、作業の単純化、工期短縮をはかることができた。

一発破当たりの進行長 0.2〜2.1m、平均進行長は約 0.8m、掘削断面積は約 $2m^2$ 程度であった。

2．緒言

クレーターカットによる切上り工法は、切上がる坑道内に作業員が入る必要がないので安全性が高く、在来工法に比べ作業が非常に単純であり、また穿孔機等に特別な設備投資を必要としない等の長所がある。さらに大口径の穿孔が不必要であり、比較的穿孔精度を要しないという特徴をもっている。

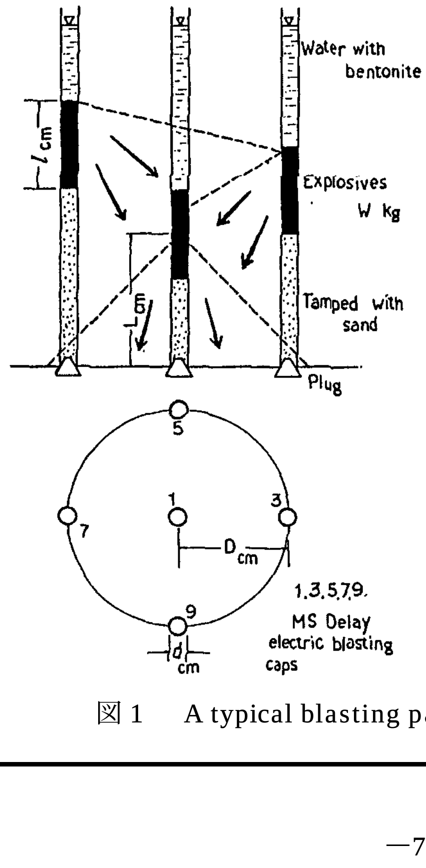
今回は穿孔機としてクローラドリルを用い、ビット径 65mmφ、長さ 2m のロッドを継ぎ足して穿孔したため穿孔精度は必ずしも満足できるものではなかった。従って、装薬孔を設計上の 5 孔とせず、最終的に 13 孔を穿孔し、ステージの各レベルで使用できる適当な孔を利用して発破することにした。

また、岩質は中硬岩程度の輝緑凝灰岩であったが、比較的よく節理が発達しており、発破後、込物の焼結による孔詰まり、あるいは込物として使用する水の漏水を防止するため、砂タンピングのほかベントナイト泥水を使用した。

3．実施方法

標準発破パターンを図 1 に示す。

各孔(各段)の装薬中心は 10cm ずつ上げている。



l：装薬長 40
N：臨界深度 160cm
d：装薬孔径 6.5cm
LC：一発破進
W：一孔当たり装薬量 1200g
D：孔間隔 60cm

図 1　A typical blasting pattern of crater cut method

穿孔は図 2 に示すように、ケーブルトンネル上部坑側よりクローラドリルで 2m のロッドを継ぎ足して、下部坑側へ貫通させた。しかしながら、穿孔精度の向上には制限があったため、あらかじめ 13 本穿孔し、各レベルにおいて適した孔を選択することとした。実際の穿孔配置を図 3 に示す。

発破作業は、まず、孔底にスポンジ栓を施し、装薬深度(下部最小抵抗線)を保持するため、所定量の乾燥砂を込める。次に爆薬筒を装填し、砂およびベントナイト泥水を流し込んだ。

爆薬は、２号榎ダイナマイト(30×100)を薬径が約 50mm になるように束ね防水のためビニール袋に入れた。

電気雷管は、主に MS 電気雷管を使用し結線部には漏電防止のためプロタイトを用いた。

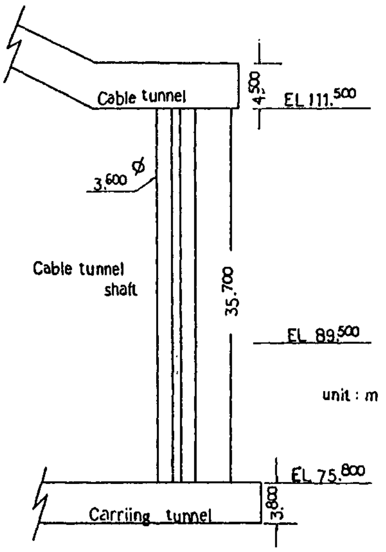


図 2　Schematic diagram of shaft raising blast area

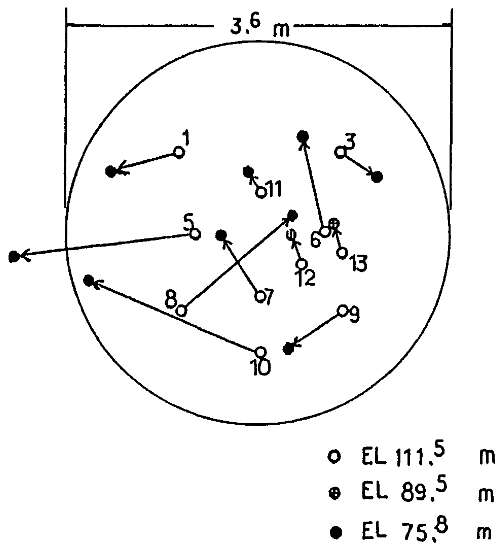


図 3　Schematic pattern of bore holes

４．結果と考察

作業は、1 日に 1～4 回、計 44 回の発破をおこなったが、平均進行長は 0.8m/回となり、各レベルにて状況に応じたパターン(使用穿孔数)でその都度装薬量も調整しておこなった。

また、スポンジ栓の使用は、栓のしやすさや漏水防止効果に適しており、込物についてもベントナイト泥水を用いたことにより、乾燥砂タンピング時の孔詰まりによる清掃時間の短縮や水タンピング時の漏水等を防ぐことができ、大変効率的であった。

上記のとおり、本工法を採用することにより作業の安全性を確保するとともに、作業の単純化および工期の短縮をはかることができた。

No.	題　目	概　　　要	掲　載　誌
3	油圧ジャンボとノネル雷管による坑道掘進	高品位石灰石の鉱量確保のため探鉱坑道を開削する必要がでてきた。 そこで耐静電気性に優れ高い秒時精度を有し、漏洩電流等の問題も解消できる NONEL と油圧ジャンボを採用することにより、容易に正確なパラレルカットが可能となった。 その結果一発破で 4m 以上の掘進ができる見通しがついた。	石灰石鉱学大会資料　1996 p.55 斉藤十三、小松 洋
4	先行発破工法による岩盤ゆるめ効果とその評価法	発破振動等を抑制し、かつ、大量の破砕を実現するため、先行発破工法を検討した。この工法は従来のゆるめ発破の装薬孔に空気室を設けることにより、岩盤の破壊をより均等に拡大しようとするものである。 3 種類の岩盤で 4 種類の発破を実施し、発破前後の弾性波速度を 3 つの深度で測定して破壊効果を確認した。 その結果、脆性度の大きい岩盤ほど(ここでは粘板岩より砂岩)ゆるめ効果が大きいことが示され、容積比 9 倍前後が最も良い効果を得た。	石灰石　1983, 5 No.203 pp.47～57 和田米生、坂野良一 沖津敏洋、伊藤譲輔
5	大規模地下空洞における効率的掘削システムの提案とその適用	従来、国内における大規模地下空洞の盤下げ掘削では、一発破当たりの掘削範囲は幅 10m～空洞幅、長さ 5～15m、高さ 3m、平均掘削量は 300m^{3}程度で行っているのが実状である。このように、大規模ベンチ掘削が用いられない理由としては、空洞壁面の崩壊、雷管段数の制約による振動問題の懸念等があげられる。 ここでは、NONEL 雷管とアンホ爆薬を用いることにより、振動の制御も可能となり、大断面ベンチ掘削(幅 20m、長さ 50m、高さ 3.6m、掘削量 3600m^3)による効率的な掘削システムを確立することができた。	トンネル工学研究論文報告集 第 7 巻 1997, 11, (14) pp.169～174 手塚昌信、加藤清策 河邊信之
6	山岳トンネルの遠隔爆薬装填システム	山岳トンネルで火薬の装薬、結線作業を作業員が出来るだけ切羽に近づかずに行えるよう、切羽での作業の安全化を目的として「爆薬の遠隔装填システム」を開発した。 遠隔装填装置は、含水爆薬供給、込め物供給、装填機の各装置と、装填ホース、装填パイプ、手元スイッチから構成される。模擬薬による工場と現場での実験及び砕石場での実爆薬による実験において安全性を確認した後、トンネル現場での実施実験を行い、装填システムとしての安全性を確認することができた。 また、密装填が可能なため、発破効果の向上や飛石防止にも役立っていることが明かりの実験で確認された。	トンネル工学研究論文報告集 第 7 巻 1997, 11, (15) pp.175～180 岡田 喬 御手洗良夫 堀内幸男、畔高伸一
7	NATM と最近の爆破技術(1)	NATM 工法の普及により長孔発破技術の向上が求められている。穿孔数の減少、穿孔速度の高速化、穿孔径の拡大が進められている。 長孔発破では、穿孔機の選定が重要なポイントで、油圧削岩機の存在が不可欠であり、穿孔長 2～3m 以上で効果を発揮できるようである。さらに、ロッドとビットの及ぼす影響が大きいため、その選定には注意が必要である。	トンネルと地下 1982, 10 Vol.13, No.10, p.65 山口梅太郎 和田満穂、吉野耕一 坂野良一

8	NATM と最近の爆破技術(2)	長孔発破の発破設計に必要となる諸要因のうち、穿孔配置、心抜方法、爆薬の選定、薬量の決定、ずりの性状について検討した。 穿孔は、主に心抜き孔、心助孔、払い孔、踏前孔、天端孔、周辺孔に分けられる。特に、心抜き孔はその成否が発破の成否につながるほど重要な要素である。心抜法は、一般的に V カット(アングル)、バーンカット(パラレル)、シリンダーカット(パラレル)が広く使われている。 爆薬の選定については、トンネルの場合十分爆力があることのほかに、後ガス中に有毒成分が少ないこと、耐水性のあること等の条件が必要となる。薬量の決定には、一般的に池田の式やハウザーの公式等が使われるが、V カット、大口径バーンカット等の条件より考え方も変わってくる。 一方、長孔発破におけるずりの性状は、一発破当たりのずり量が増加することや、ずり径が大きくなる傾向にある。従って、ずり処理にあたってはずりの大きさや堆積状況等を把握する必要がある。	トンネルと地下 1982, 12 Vol.13, No.12, p.55 山口梅太郎 玉田 一、金成勝博
9	切羽情報管理システムを併用した長孔発破による急速施工	堅硬かつ均質な岩盤に対して長孔発破を実施した。長孔発破では、心抜きパターン、装薬量の決定、SB による掘削面の平滑化が重要である。 油圧ジャンボの改良と切羽情報管理システムの導入により、一発破進行長 4m、月進 180m の実績が得られ、急速施工を目的とした長孔発破が実現できた。	日本トンネル技術協会主催第 40 回施工体験発表会 1997 石井 泉、北村秀之 小林正治
10	ステージブラスティングによる長孔立坑開さく法	ステージブラスティングによる立坑開削法は、装薬等の作業をすべて上部フロアで行い作業者が立坑内に入らないので保安上きわめて安全であり経済的にも有利である。 直径 5m 深さ 47m の立坑を、試錐機と組み合わせた孔径 100mm のダウンザホールドリルを用いて削孔し、心抜きをバーンカットにより掘削した。計 13 回の発破を実施し、トラブルも無く貫通した。	石灰石　1978, 9 No.175 pp.24～27 松本孝雄
11	エマルジョン爆薬との併用による ANFO の発破効果の改善(抄訳)	ANFO の発破効果を改善するため、装薬孔内部の数カ所に、ある間隔を置いてエマルション爆薬を配置する方法を検討した。爆速を測定した結果、ANFO が幾分湿った箇所で 616m/s まで低下したが、中間にあるエマルション爆薬の爆轟により、それ以降の ANFO は定常爆速に戻ることが確認された。 この装薬法に基づくベンチ発破の岩石の移動速度を測定した結果、増ダイが ANFO のみのベンチ発破に比べ、明らかに高速であり、発破設計を大きく変更することなく全体の岩盤起砕を改善することができる。	石灰石　1987, 1 No.225 pp.71～73 野口勝巳

12	4m の長孔発破に挑む(今市発電所導水トンネル)	油圧削岩機の特徴を生かしたパラレルホールカットによる長孔発破、および SB 工法の確立を目指して試験施工を行った。 結果として一発破の穿孔長を 3.5～3.9m に対して 95%の掘削長を達成し、SB の効果により余堀率 2%の好成績をおさめることができた。しかしながら、SB 爆薬の残留発生、孔荒れ時の装薬法改良等の問題を残した。	トンネルと地下 1983, 2 Vol.14, No.2 pp.15～27 加納米二、大塚昌彦 前田正一
13	NONEL 雷管と ANFO 爆薬による長孔発破(北陸新幹線五里ヶ峰トンネル上田工区)	「発破エキスパートシステム」を活用した「発破パターン自動マーキングシステム」および NONEL と ANFO 爆薬の自動装填機を使用して一発破進行長 4m で、月進 260m という記録を達成した。同時に、振動・騒音抑制等の環境対策を実施した。 この長孔システムは、急速施工が可能なほか、切羽への立ち入り時間の短縮により安全性が向上する。また、1 サイクルタイムが 8～10 時間と長いため、路盤整備、機械整備が可能となり、機械の故障率の低下とともに稼働率の向上等の特徴がある。	トンネルと地下 1997, 11 Vol.25, No.11 pp.7～12 小池弘昭、柴田 浩 小早川忠行 小泉直人

おわりに

この発破事例集は、これまでに発表されたいろいろな文献を、振動、発破騒音及びいろいろな発破技術の3つに分類し、各文献について、2ページ程度に要約した要約レベル１と、200～300字にまとめた要約レベル２の形式で掲載しました。その際、本書では、要約ごとに図1又は表1から一連番号で図表番号を表示しました。

著者の意向をより正確にお伝えするには、要約しないでそのまま掲載するのがベストとは思いましたが、お忙しいお仕事の合間にちょっと目を通していただくことで、その論文の概略を把握していただくことを第一に考えた結果、このような形になりました。より詳細な内容をお知りになりたい方のためには、掲載誌及び著者名等も明らかにしましたので、今後の検索にお役立ていただけると思います。

用語については、できる限り著者の言葉遣いを尊重しましたが、誤解を避けるため、あるいは理解しやすくするため、一部、言い回しを替えた箇所もあります。アンホ、アンホ爆薬、硝油爆薬等の呼び名は、いずれもかなり一般化しておりますが、硝安油剤爆薬が正式名称であることは申し上げるまでもありません。一方、書籍では商品名を使用しないならわしがありますが、本書では原著者の意向に添ってそのままの形で掲載しました。例えば、EDD、電子遅延式雷管は一般的には電子(式)雷管と呼ばれ、ノネル、ノネル雷管、NONEL雷管、Nonel雷管は、一般的には導火管付き雷管と呼ばれています。

以上申し述べたことの他にも、要約の段階で著者の言い回しを替えた部位も多少ありますが、原著の文意を変えるものではないと考えております。また、スペースの関係からでしょうか、数式を「／」あるいは「・」「＊」等を用いて一行に表記している文献もありましたが、そのような場合には一般的な表記方法に直しました。

収録した文献の数は全部で82を数えますが、その中の要約レベル１と要約レベル2の振り分けは、独断で行いましたが他意はございません。また、その順位についても特別に意味はありませんので、併せてご了解下さいますようお願いいたします。

本書を発刊するに当たり、私たちの「発破の効能をより良く理解していただきたい」という趣旨にご賛同下さり、文献の利用を快くご承諾下さった原著者の皆様及び各団体に、この紙面を借りまして心から御礼申し上げます。また、本書をご活用の皆様にも、今後の一層のご活躍を祈念いたしまして、おわりの言葉とさせていただきます。

完

編　者	日本火薬工業会総務部会分科会小冊子作成委員会		
委　員	相葉　昭男	ワイ・エス・ケー株式会社	
◎委　員	五十嵐　豊	日本カーリット株式会社	
委　員	柴山　真也	日本油脂株式会社	
委　員	田畑　重治	中国化薬株式会社	
委　員	中村　聡磯	株式会社カヤテック	
委　員	長崎　康浩	日本アンホ火薬製造株式会社	
委　員	永瀬　淳	日本工機株式会社	
委　員	橋本　賢二	株式会社ジャペックス	
委　員	松永　博文	旭化成ジオテック株式会社	
委　員	湯澤　晴久	株式会社ジャペックス	
事務局	橋本　淳二	日本火薬工業会	
事務局	佐藤　孝幸	日本火薬工業会	

◎　印：委員長

平成１４年3月２８日　発行

発　行　者　　日 本 火 薬 工 業 会

〒104-0028 東京都中央区八重洲２丁目７番７号
（八重洲旭ビル６階）
TEL 03-3271-6715　FAX 03-3271-7592

印　刷　所　　永 興 印 刷 株 式 会 社
TEL 03-3234-0740　FAX 03-3265-0256