

ワイドスペース爆破の機構と最適孔間隔、最小抵抗線長比について

中川浩二*, 坂本 佐**, 橋本堅一***

本研究はベンチカットにおいて爆破孔配列が多列千鳥型の Wide Space である場合の機構と最良の破壊性を得るための孔間隔と抵抗線距離との比について検討したものである。

セメントモルタルモデル供試体を用いた模型実験の結果 Wide Space とすることにより破砕性が向上する理由として 1) 爆破孔からの放射状クラックが効果的に分布し、特に次列の爆破による破砕に有効となること。2) 隣接爆破孔からの応力場によりクラック発達が抑制される程度が小さくなること。3) 抵抗線距離が小さくなり破砕片の厚さそのものが小さくなること。4) 自由面が近くなることより反射引張波による破砕効果が大きくなること、などがあげられる。

さらに爆破孔一孔当りの破砕面積を変化させた実験により破砕面積によって最良の破砕性を与えると考えられる孔間隔と抵抗粉距離の比 S/W が変化することが示された。

1. はじめに

ベンチカット爆破において重要なことは単に穿孔および爆破そのものに要する経費を小さくすることのみではなく、穿孔、爆破、積み込み、輸送、破碎といった一連の諸経費を最小にすることである。そのためには、その現場で要求される最適の破碎度を爆破により得ることが重要である。従って、爆破により得られる碎石は目的に応じた粒度まで一次破碎されていることが望ましく、小割免破や小割機による破碎はできるだけ避けるべきである。また碎石の目的によっては、碎石の粒度はその目的程度近くにできるだけ揃うことが必要とされる。

ベンチカット爆破において孔間隔Sと抵抗線距離Wとを変化させることにより良い破砕性を得ることのできる爆破法がLangeforsによって提案されており¹⁾、この方法の実施によっていくつかの現場での成功が報告されている^{2) 3)}。Langeforsはこの爆破法を示すに当ってPlexiglassによる一連の実験を行っている。そこではS×Wを一定にする(爆破孔一孔当りの破砕面積を一定とし、爆薬原単位を一定とする)爆破において

S/W の値を 1 から 8 まで上げた実験を行い、爆破孔が千鳥配列の場合 S/W の増加とともに破砕性が良くなることを示し、また S/W の増加により破砕性が良くなる理由として、前列の爆破により発生したクラックが次列の爆破におけるクラックパターン形成時に有効に作用することを強調している。

このS/Wを大きくする爆破法(Wide space 爆破法)の機構を解明するため、Bhandari and Vutukuri⁴⁾はコンクリートおよび花崗岩によるベンチモデルを用いた実験を行っている。そして破砕性の向上に関して抵抗距離の減少にともなう自由面での反射引張波の役割の向上を述べている。また Harris⁵⁾ は、Wide space とすることにより爆破孔が幾何学的に有効な配置となり、各爆破孔からの爆破クラックが効率よく(お互いに干渉しあうことが少なく)発達しうることを述べている。

筆者らは、これらの研究では Wide space 爆破による破砕性向上の機構検討が十分ではないと考え、多列の Wide space 爆破を行うときに生じる破壊機構を明らかにすることを目的とし、セメントモルタルを用いた模型実験とそれに対応する有限要素法を用いたシミュレーション解析とを行ない、Wide space 爆波の機構に力学的立場からの説明を加えた⁶⁾。その結果 Wide space 爆破の機構がかなり明らかとなり、さらに $S/W = 4$ 以上ではその破砕性に大差ないことが示された。

しかしこの研究では実験およびシミュレーション解析のいずれにおいても薬量は一定として扱っており、爆薬原単位に対する配慮がなされていない。そこで本

昭和58年 1月18日受理

*山口大学工学部

于755 宇部市常盤台 2557

TEL 0836-33-2016

****日本化薬株式会社**

〒100 東京都千代田区丸の内 1-2-1

TEL 03-216-0461

***德山高専

〒745 徳山市久米高城 3538

TEL 0834-28-3766

研究では爆破孔を千鳥配列とした場合の S/W の変化による破砕性の変化とその原因についてさらに詳しく検討し、爆薬原単位を変化させることによって破砕性がどのように変化するかを模型実験により検討した。

2. 実験

実験にはセメントモルタル供試体を用いた。材料としては早強ポルトランドセメントと砕砂とを用い、配合をセメント：砂：水 = 1 : 2 : 0.52 とした。打設後 1 日で脱型、試験日まで湿潤状態を保つようにした。試験時材令は 2 週間である。なお材令 2 週間の同種のモルタルの一軸圧縮強度は約 400kgf/cm² であった。

実験においては、孔間隔と抵抗線距離の比の変化による破砕性の変化とそれを生じる機構の変化について検討するとともに、爆薬原単位を変えることにより破砕性がどのように変化するかを検討することを目的とした。そこで、供試体中の爆破孔位置を各孔当りの破砕面積 $A = S \times W$ が一定値となるように保った上で $S/W = 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0$ と定めた。さらに爆薬原単位の変化に伴う破砕性の変化を検討する目的から一孔当りの破砕面積をかえた三つのシリーズの実験を行い、それぞれのシリーズで各孔当りの破砕面積を $S \times W = 60\text{cm}^2, 80\text{cm}^2, 100\text{cm}^2$ とした。爆薬原単位に変化を与えるためには薬量を固定して破砕面積を変化させる方法と、破砕面積を固定して薬量を変化させる方法とが考えられる。しかし本研究では、爆薬として取り扱いの容易さと再現性の点から導爆線を用いるため、薬量を一定として破砕面積を変化させる方法をとっている。

各供試体の孔間隔と抵抗線距離とは一孔当りの破砕面積と S/W によって異なり、Fig. 1 および Table 1 に示すとおりである。また供試体の縦横の長さは境界

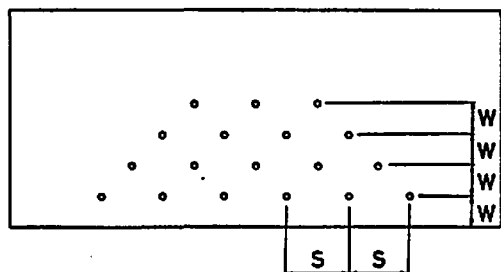


Fig. 1 Blast holes in cement mortar specimen

骨材のふるい分けに用いられる JIS A 1102 に従っている*。

3.1 Wide Space 爆破の機構に関する検討

このようにして得られた FM を、 $S \times W = 80\text{cm}^2$ の影

響が爆破結果に大きく及ばないように考慮し、各孔配列に対応して決定した。打設に際して所定の爆破孔位置に直径約 6mm の鋼棒を埋込み、モルタルの半硬化後抜きとることにより必要な配列の孔を設けた。なお爆破に際しては、このようにして設けられた孔を径 6.5 mm のビットを用いて整えている。

実際のベンチカットにおいて各爆破孔は MS あるいは DS 雷管を用い逐次起爆されることもあるが、雷管配置の複雑さを避けるため各列については斉発爆破が行なわれることも多い。そこで本実験では各列については同時爆破を行うことにしている。そのため、Photo 1 に示すように各列の爆破において雷管（6号電気雷管）から爆破列の各孔に至る導爆線の長さを等しくとり、同列の各孔を完全同時起爆とし、次列の爆破に際しては改めて装薬を行っている。

爆破時には供試体の周囲を板枠で囲むことにより爆破片の飛散を防ぎ、各爆破ごとの破砕片を集めて後の検討に供している。

3. 実験結果と考察

爆破の結果得られた破砕片を集め、それぞれの爆破ごとのふるい分けを行っている。ふるい分けられた典型的な破砕片の写真例を Photo 2 に示す。この写真からそれぞれの爆破における破砕性の検討はある程度可能であり、特に大塊の発生についての傾向は一見にして認められる。しかし細部にわたる検討のためにはこれらを定量化して検討することが必要と考えられる。そこで、それぞれの爆破による破砕性を定量化するための方法として種々のものが考えられる中でふるい分けに用いた各ふるいに留まるものの百分率の累率である粗粒率 (Fineness Modulus, FM) を求め、これによる検討を行っている。ふるい分けはコンクリート用

Table 1 Spacings and Burdens

S/W		1	2	4	6	8
$S \times W = 60\text{cm}^2$	S	7.7	11.0	15.5	19.0	21.9
	W	7.7	15.5	3.9	3.2	2.7
$S \times W = 80\text{cm}^2$	S	8.9	12.7	12.9	21.9	25.3
	W	8.9	6.3	4.5	3.7	3.2
$S \times W = 100\text{cm}^2$	S	10.0	14.1	20.0	24.5	28.3
	W	10.0	7.1	5.0	4.1	3.5

*ある与えられた骨材の粗粒率を JIS A 1102 に従って求めるには、ふるい目の間隔 80, 40, 20, 10, 5.0, 2.5, 1.2, 0.6, 0.3, 0.15mm の 10 個のふるいを使用して各ふるいに留まるものの全骨材重量に対する百分率の総和を 100 で割る。粒径の大きいものが多いほど粗粒率が大きくなる。

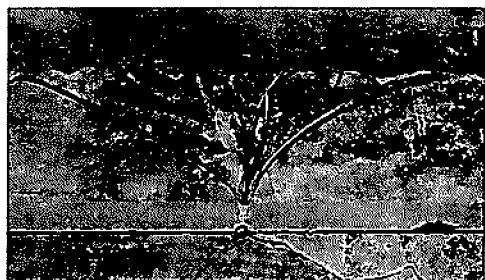


Photo 1 Detonator and detonating fuse in second row of blasting

場合について、供試体爆破の各列別に S/W の変化に対して示したものが Fig. 2(a) である。図によると、FM は S/W の増加とともに減少し（破砕性は向上し）、また $S/W=4$ 以上ではおよそ同程度の値となるようである。

この傾向を詳しく検討するために各列ごとの爆破による FM の変化を Fig. 2(b) に示す。この図によると、 $S/W=1$ および 2 では列番号の増加とともに FM が小さくなるのがみられる。また $S/W=4$ では第 1 列とくらべて第 2 列で減少し、第 3、第 4 列では第 1、第 2 列の中間程度となる。これに対し $S/W=6$ および 8 で

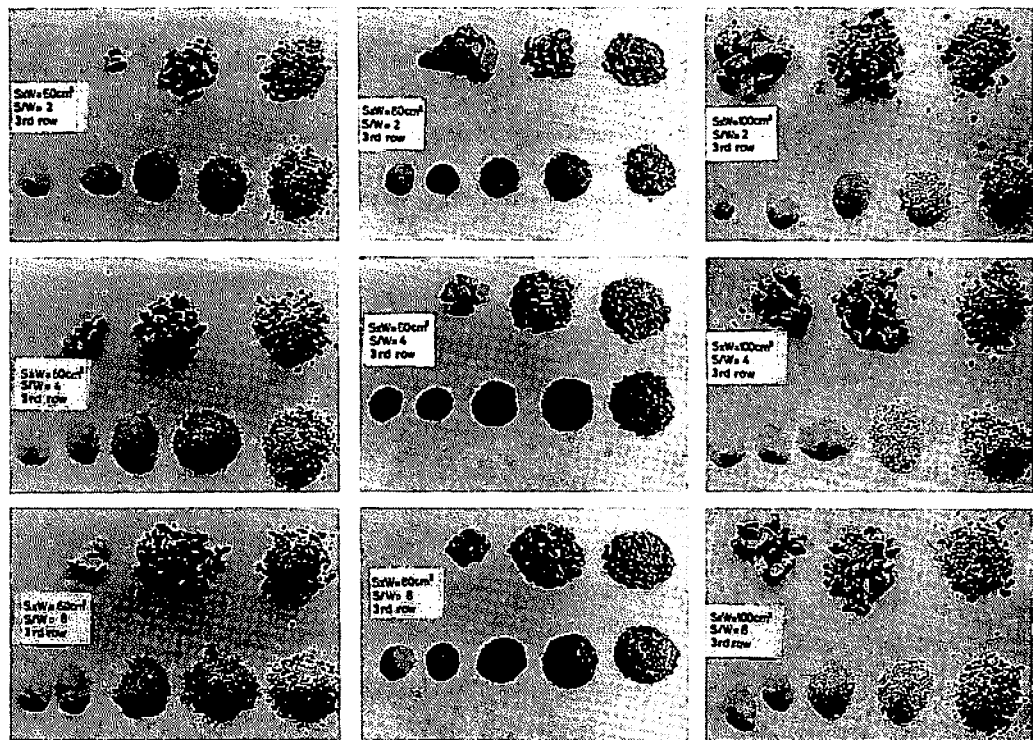


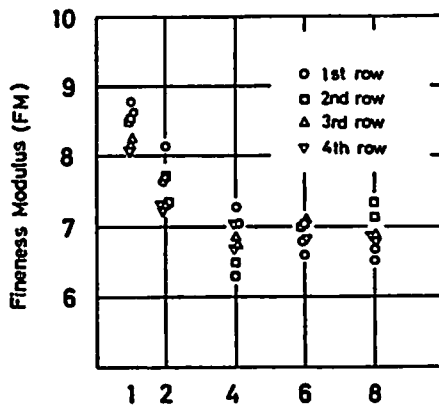
Photo 2 Sized fragments by the sieve

は第 1 列で小さい FM をとるが第 2 列では若干大きくなり、第 3、第 4 列では第 1 列程度の値にもどる。

この S/W と列番号による FM の変化を考えた場合に破断面の形状が参考になる。そこで S/W および爆破列の典型的な値における破断面の形状を示すために、 $S/W=2, 4, 8$ の場合の第 1 列および第 3 列の破断面を Photo 3 に示す。爆破による破断面は、 S/W が 1 および 2 の場合には、爆破列番号にかかわらず爆破孔を直線で連ねた状態となる。このことは各列の爆破において隣接爆破孔間隔が小さく、それぞれの爆破孔から発生する衝撃波が孔間を結ぶ方向以外のクラックの

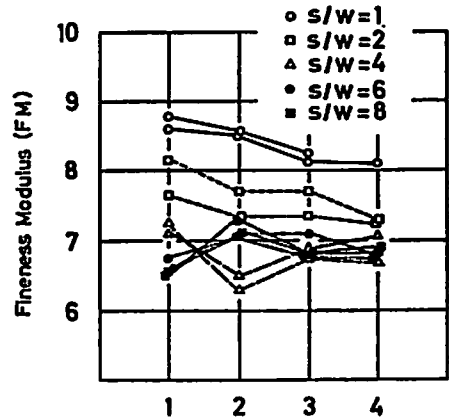
発達を抑制する作用もあって、爆破クラックが主として孔間を結ぶ方向に限定されることを意味する。その結果破砕片は細かくなることなく大塊として発生する。しかし爆破列の進行にともない前列、前々列の爆破により生じた潜在的な破壊が蓄積されるため破砕性はしだいに向上し FM は小さくなる。

$S/W=4$ の場合、前列の爆破による潜在的なクラックが存在しない第 1 列の爆破では $S/W=1, 2$ の場合と同じく直線になる。しかし第 2 列以降では、前列の爆破孔から放射状に発達していると考えられる潜在クラックの影響により、爆破クラックが前列の爆破孔



the ratio of the spacing to the burden (S/W)

(a)



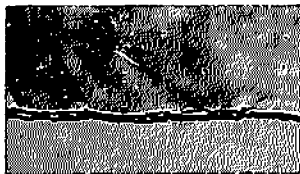
the number of the order of blasting row

(b)

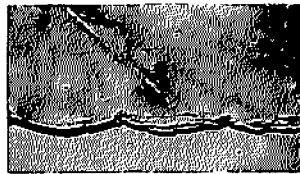
Fig. 2 Fitness moduls of fragments. $S/W=80\text{cm}^2$

a : a function of S/W

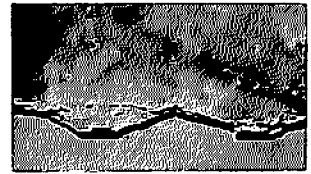
b : a function of the number of the order of blasting row



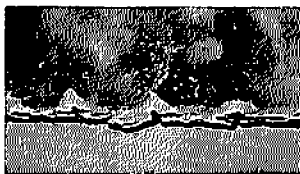
$S/W=2$ 1st row



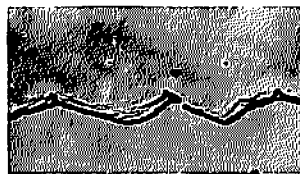
$S/W=4$ 1st row



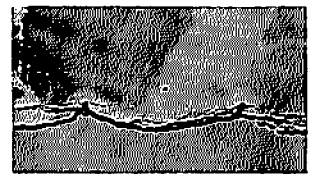
$S/W=8$ 1st row



$S/W=2$ 3rd row



$S/W=4$ 3rd row



$S/W=8$ 3rd row

Photo 3 Bench face formation in each blasting

方向へ強く発達する結果となり爆破孔間は自由面側へはらみ出した折線で結ばれることになる。この場合、第1列の爆破では、抵抗線の減少のため自由面での反射引張波による破砕が有効となるなどにより破砕性がいくらか向上し、FMは $S/W=1, 2$ の場合とくらべて若干小さくなる。ところが第2列となると第1列の爆破の影響が有効に作用し、かつ第1列では直線状であった破断面が折線状になり、よく破砕された部分のみが破砕領域として破断されることにより著しく破砕性は良くなる。しかし第3列以降（過去の爆破の影響が十分に存在する爆破）では破砕性は低下し、第1列

より若干良い程度となる。

さらに S/W が6あるいは8となると第1列の破断面は爆破によってできるクレーター部分と爆破の影響が及ばずそのまま残された自由面とを連ねた形となる。さらに第2列では破断面は第2列の爆破孔と第1列の爆破孔とを連ねた折線状態となり、第3、第4列でもこの傾向は変わらない。この場合には第1列の破砕領域はクレーター状に破砕される部分だけであり、破砕性はすこぶる良い。しかし第2列では、自由面近くの前列の爆破クラックが及んでいない部分が破砕領域に含まれるため破砕性は著しく低下する。しかし第3列

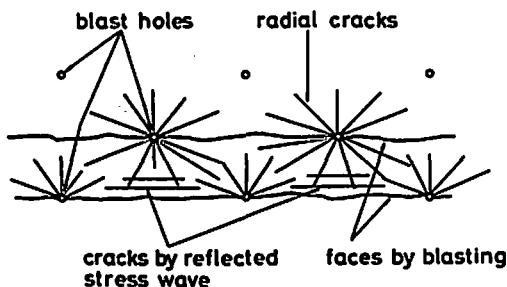
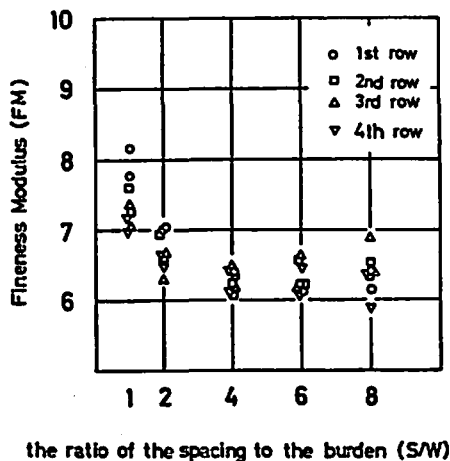


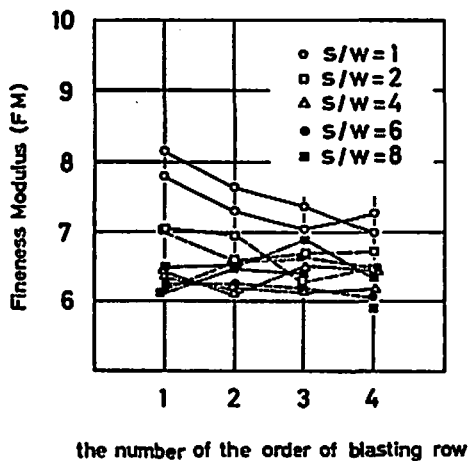
Fig. 3 Crack pattern formation by blasting

以降では、前列および前々列の爆破クラックが有効に作用し破砕性の向上に役立つ。各爆破孔からのクラックの発達を模式的に示したものがFig.3である。以上の結果から、孔配列を千鳥型 Wide Spaceとすることにより破砕性が良くなる理由として次の諸点が挙げられる。

(1) 爆破孔配置を千鳥型 Wide spaceとすることにより、それぞれの孔から発達する放射状クラックが隣接孔からのクラックに妨げられることが少なくなる。この効果は後列の爆破時の破砕性を向上させるのに特に



(a)



(b)

Fig. 4 Fineness modulus of fragments. $S \times W = 60 \text{ cm}^2$

a : a function of S/W

b : a function of the number of the order of blasting row

有効となる。

- (2) 同時に起爆される爆破孔間の距離が大きくなることにより隣接爆破孔からの衝撃波とそれに続くガス圧の影響が小さくなる。その結果、衝撃波、ガス圧によるクラック発達の抑制効果が小さくなる。
- (3) 抵抗線距離が小さくなることにより各列の爆破で破断される領域の幅は小さくなり、少くとも破砕片の抵抗線方向の最大寸法が減少する。
- (4) 自由面が近くなることにより反射引張波による破砕効果が大きくなる。

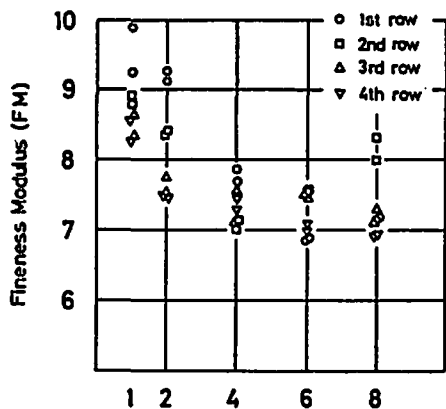
3.2 破砕面積の変化と最適 S/W について

前項では Wide space 爆破により破砕性が向上する機構について検討したが、実際の Wide space 爆破においては、上述の(1)~(4)の爆破効果の有効性の割合が被破砕岩盤の性質、爆薬原単位等により変化することが予想され、それにより最適な S/W が異なると考えら

れる。本項ではこの点についての検討を行う。

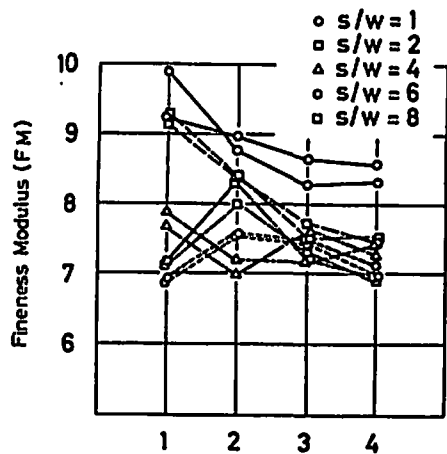
Fig. 4(a) および Fig. 5(a)に、1孔当りの破砕面積をそれぞれ $S \times W = 60 \text{ cm}^2$, 100 cm^2 とする場合の FM を各列別に S/W の変化に対して示し、また Fig. 4(b), Fig. 5(b)に各列ごとの FM をそれぞれの S/W に対して示す。

Fig. 4(a)によると、FMは $S/W=4, 6$ のあたりを最低としてその両側で若干大きくなっているようである。また Fig. 4(b)によると、 $S/W=1$ を除いて、各 S/W に対する FM は列数の増加にともなう変化の傾向が前の $S \times W = 80 \text{ cm}^2$ の場合ほど明確ではない。しかし各 S/W についての詳細な検討を行うと、 $S \times W = 80 \text{ cm}^2$ の場合に認められた S/W のそれぞれの値に対する爆破列の進行にともなう FM の変化には基本的に同じ傾向が認められる。また形成される爆破破断面の形状はほぼ $S \times W = 80 \text{ cm}^2$ の場合と同様となる。



the ratio of the spacing to the burden (S/W)

(a)



the number of the order of blasting row

(b)

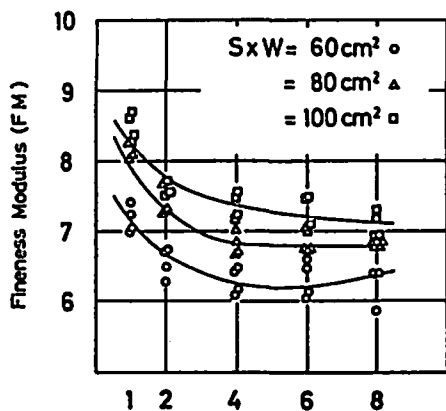
Fig. 5 Fitness modulus of fragments. $S \times W = 100 \text{ cm}^2$

a : a function of S/W

b : a function of the number of the order of blasting row

Fig. 5(a), (b) によると, $S \times W = 100 \text{ cm}^2$ では $S \times W = 80 \text{ cm}^2$ の場合に認められた S/W のそれぞれの値に対し爆破列数の進行にともなう FM の変化の傾向は明確となる。すなわち $S \times W = 100 \text{ cm}^2$ においては, $S/W = 1, 2$ における第 1 列の FM は著しく大きい。これは, W の値が大きくなるため爆破孔からの放射状の破壊が自由面にまで十分に到達せず, 孔間を直接つなぐあたりに破壊が集中するためであろう。また $S/W = 6, 8$ において第 2 列で FM が大きくなることや, $S/W = 4$ の第 2 列で FM が小さくなるなどの傾向は $S \times W = 80 \text{ cm}^2$ の場合より顕著に認められる。さらに全体的にみて, S/W の増加にともなって FM は $S/W = 8$ に至るまで減少する。しかし, 各 S/W , 爆破列ごとの破断面の形成は $S \times W = 80 \text{ cm}^2$ の場合とくらべて大差ない。

ここで破断面積の変化により各 S/W による破砕性の変化を比較する目的で, それぞれの破断面積ごとに FM の変化を示したものが Fig. 6 である。ここでは, すでに材料中に含まれる潜在的な破壊から考えて, 実際の Wide space 爆破の破砕性に対応すると考えられる第 3 列以降の爆破による FM のみをまとめて比較検討をしている。この図によると, 全体として FM は各 S/W に対して $S \times W = 60 \text{ cm}^2$ が最も小さく, $S \times W = 100 \text{ cm}^2$ で大きくなるのが認められる。すなわち一般には, ペンチカットの破砕性が爆薬原単位の増加により向上することが明らかである。さらに S/W の増加に対する FM の傾向を比較す



the ratio of the spacing to the burden (S/W)

Fig. 6 Comparison of Fitness Modulus in each $S \times W$

ると, $S \times W = 60 \text{ cm}^2$ では $S/W = 2$ でかなり小さく, 4 で最小となり, 6, 8 では若干増加するようである。これに対して $S \times W = 80 \text{ cm}^2$ では, S/W が増加するにともない FM は減少し $S/W = 4$ 以降はほぼ一定となる。さらに $S \times W = 100 \text{ cm}^2$ では, この実験に関する限り $S/W = 8$ まで減少を続けている。

以上のことを考慮すると, 破断面積の増加にともなう破砕性の変化について次のようなことが考えられる。すなわち, Wide space 爆破とすることにより破砕性

が向上する理由は前に述べた通りであるが、基本的には、爆破孔からの直接の放射状クラックのみでは十分に破碎しえない領域を Wide space とすることにより、より有効となる自由面での反射引張波によるクラックや前列の爆破クラックにより破碎するものである。そして、岩石の圧縮強度が引張強度にくらべて著しく高いことを考慮すると、破碎性向上のために自由面での反射引張波の効果は特に大きく、これを有効に利用することが破碎性を効率良く向上させる上で重要なことであると考えられる。したがって $S \times W = 60\text{cm}^2$ の場合、 $S/W = 2$ ですでに他の大きい S/W の場合に劣らない破碎性が得られているということは、基本的な破碎の機構は他の $S \times W$ の場合と変化なくとも、大きな S/W に対して爆破エネルギー、特に自由面での反射引張波が破碎のために十分有効に用いられていないことを意味するといえよう。すなわち破碎面積が小さい場合には、 S/W が大きくなると各爆破列において抵抗線距離は若しく小さくなる。このことは一面では自由面での反射による引張波の大きな発生を促し、その部分での破碎性を向上させる。しかし抵抗線距離がある程度より小さくなると爆破エネルギーが自由面へ向って大きく放射され、爆風、飛石等に消費される部分が多くなり、破碎目的の有効性が低下するのであろう。

これとくらべて破碎面積が大きい場合には、たとえ $S/W = 8$ としても W は極端には小さくならず、爆破エネルギーは有効に破碎に用いられることになる。そのため $S \times W = 100\text{cm}^2$ の場合には S/W の増加にともない破碎性の向上が生じるのであろう。

このようにベンチカットにおける最良の破碎性は必ずしもある特定の S/W によって与えられるものでは

なく、爆薬原単位等によって異なる最適な S/W がそれぞれ存在すると考えられる。

4. おわりに

本研究は千島型 Wide space の孔配列を有する爆破における破碎の機構と、爆薬原単位の変化による破碎性の変化を実験的に検討したものである。その結果破碎の機構がかなり明らかとなり、爆薬原単位により最適な S/W が異なる可能性が示された。このことから、現場により岩質、節理系等が異なることを考慮すると、それぞれに最適な S/W が存在しうることが考えられる。またこれらは爆破にともなう飛石などとも関連して決定されるべきであり、現場に応じた S/W の選択が重要となることを意味しよう。

5. 謝 辞

本研究の実験は日本化薬厚狭工場の爆発実験場において行なわれたものである。種々御配慮いただいた日本化薬の諸氏ならびに実験に協力いただいた山口大学の学生諸君に心からの謝意を表する。

文 献

- 1) Langefors, U., Min. Minls. Engs 2, 339, (1966)
- 2) 有田健二, 第37回石灰石工業大会資料 (1978)
- 3) Lindgren, G. and P. Travis, Mining Magazine, 125, 188, (1971)
- 4) Bhandari, S. and V. S. Vutukuri, Proc. 3rd. Congress Int. Soc. Rock Mech., Denver, 1337, (1975)
- 5) Harris, G., Proc. Australia-New-Zealand Conference on Geomechanics, 149, (1975)
- 6) 中川浩二, 坂本佐, 橋本堅一, 土木学会論文報告集, 320, 89, (1982)

On the Fragmentation Mechanism of Wide Space Blasting and its Optimum Spacing to Burden Ratio

by Koji NAKAGAWA*, Takeshi SAKAMOTO,
and Ken-ichi HASHIMOTO*****

In this study, the fragmentation mechanism of wide space blasting is studied. Then the optimum spacing to burden ratio is discussed. In the experiments, cement mortar specimens are used.

The results may be summarised as follows;

1. Wide space hole pattern causes effective full crack development with less cut-off by the cracks of previous round.
2. The reduction of burden increases the cracking by reflected tensile stress wave.
3. The optimum spacing to burden ratio to get the best fragmentation depends on the blasting area (burden $\times$ spacing) when the concentration of charge is kept constant.

(*Yamaguchi University, Tokiwadai, Ube, Yamaguchi, Japan

**Nippon Kayaku Co. Ltd., 1-11-2 Fujimi, Chiyoda, Tokyo, Japan

***Tokuyama Technical College, Takagi, Tokuyama, Yamaguchi, Japan)
