

装薬ホルダーを使用したき裂制御爆破工法

中村 裕一*, 松永 博文**, 山本 雅昭**, 住吉 和洋***

爆破エネルギーの効率を高め、高精度のき裂方向制御を行うために、くさび形空洞を有する装薬ホルダーを使用する方法を提案し、その有効性を検討するためのモデル爆破実験を行った。この装薬ホルダーの特徴は動的作用としての爆発衝撃波の集中効果を作り出すことにあり、これによって、装薬孔の孔壁に作用する爆力の作用方向と作用時間の制御が可能になる。実験の結果、この装薬ホルダーはき裂形成位置と進展方向の制御、装薬孔の孔壁の損傷防止、破断作用の向上などにおいて効果的であることが明らかになった。

1. 緒言

NATM工法を適用したトンネル掘削において効率的な制御爆破工法の必要性が従来から指摘されてきたが、近年のジオフロント開発などに見られるように地下空洞開発の具体化にともなってその要求は一層大きくなっている¹⁾。これらの施工においては爆破による地山の損傷防止と余掘を少なくし、平滑な仕上げ面を得ることなどが要求される。また、制御爆破工法は構造物の解体工法としても適用され、わが国ではミニブラスティング工法の有効性が注目されている²⁾。これは少量の爆薬を使用して一部分を破砕する解体工法である。この場合にも残すべき構造物への損傷を防止するとともに周囲環境への問題から振動、騒音の防止が必要となる。このため、精度の高いき裂の方向制御が可能な爆破工法を確立することが重要である。

Fourneyらも指摘しているように³⁾、理想的なき裂方向制御爆破工法ではき裂による破断面の数の制御、き裂の位置と進展方向の制御、き裂の進展を効率的にする爆力の制御などが満足されなければならない。爆破によるき裂の方向制御を目的とした従来の技術としては、ウォータージェットを使用して爆破孔壁に切り欠

きを入れて応力集中効果を生じさせる方法⁴⁾や、管状のスリーブにスリットを入れて応力集中効果を生じさせる方法^{4) 5)}、半円状の反射板を使用した方向性水圧発破⁶⁾などがある。

この様な背景のもとに、著者らは爆破現象を解明し、その成果をもとに爆破エネルギーの効率を高め、高精度のき裂方向制御を可能にする爆破工法として装薬ホルダーを使用したき裂制御爆破工法に関する実験を進めている^{7)~11)}。本論文では、先ず、新しい着想として衝撃波の集中効果を作り出すくさび形空洞を有する装薬ホルダーを使用したき裂の方向制御の作用原理を示す。次に、応力集中効果のみを考えたスリットを有する装薬ホルダーとくさび形空洞を有する装薬ホルダーを使用した場合のき裂方向制御や破断作用に関する有効性をモルタル供試体と電気雷管を用いたモデル爆破実験によって比較考察した結果について述べる。

2. 実験

2.1 くさび形空洞を有する装薬ホルダーを使用したき裂の方向制御の原理

くさび形の空洞を有する装薬ホルダーを使用したき裂の方向制御の原理をFig.1に示す。装薬ホルダーは図に示す部品を組み合わせて構成され、同一直径上に適当な角度を有するくさび形空洞（空気のギャップ）を形成する。この装薬ホルダーを使用することによってき裂方向制御を可能にするFig.1に示すような動的な作用としての爆発衝撃波の集中効果を生じさせることが出来る。すなわち、その周囲に空気の空隙を有するデカップリング状態で装てんされた爆薬を起爆すると爆発衝撃波がホルダー内を外側に向かって伝播する。

1991年11月11日受理

*八代工業高等専門学校
〒866 熊本県八代市平山新町2627
TEL 0965-35-1611

**旭化成工業純化薬研究所
〒882 宮崎県延岡市水尻町304
TEL 0982-22-6310

***西松建設㈱中部支店
〒461 愛知県名古屋市中区泉2-5-13

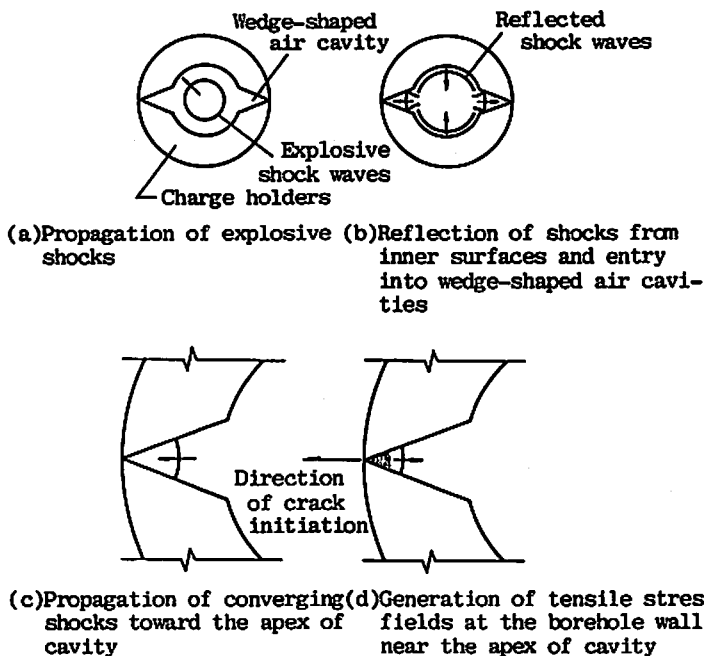


Fig. 1 Shock converging effects produced by charge holders with wedge-shaped air cavities and the mechanism of controlled crack initiation.

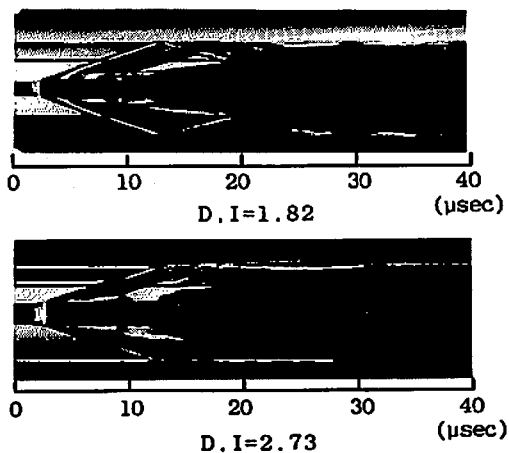


Fig. 2 Streak photographs of the shock wave propagation in PMMA blocks.

くさび形空洞以外のホルダー内壁面において衝撃波は反射するが、くさび形空洞部分では衝撃波はその中を干渉しながらくさび形空洞の先端に向かって進み、衝撃波の集中効果を作り出す。この様なメカニズムによって装薬孔の孔壁に作用する爆力の作用方向と作用時間の制御が可能となり、くさび形空洞先端位置の装薬孔壁面上に引っ張り応力場が作り出され、その位置を予定破断面方向に一致させることによってき裂の進展

方向を制御することが出来る。き裂がくさび先端に形成されると引き続いて爆発ガスが作用してき裂進展が促進される。また、装薬のデカップリングとホルダーの補強効果による爆破孔壁近傍の損傷防止や予定破断面以外への爆発ガスの噴き出しを抑制することによる破断作用の向上と騒音の低減なども実現できる。このことは、爆破エネルギーの変換効率を高めることを意味し、使用する薬量の低減化を可能にする。

提案法は、デカップリング状態にある装薬の爆発によって発生する衝撃波と特別に工夫された幾何形状を有する装薬孔壁面との干渉効果に着目したものであり、この着想は先に示したアクリルブロック (80×80×80 mm) 中の電気雷管 (6号) の爆破現象を光透過法で撮影した流し写真からの情報に基づいている¹²⁾。Fig. 2の流し写真から軸対称性を保ちながら外側半径方向に伝ばし、自由面で反射する供試体中の衝撃波 (応力波) の挙動だけでなく、デカップリングがある場合には装薬孔内部での爆発光が2段階状になることがわかる。また、写真(a), (b)の比較からデカップリングの増大によってその時間差も顕著になることがわかる。即ちこれらの現象は、装薬周囲の空気ギャップの存在によって、爆発衝撃波と装薬孔壁面との干渉作用が存在することを意味している。

2.2 実験方法

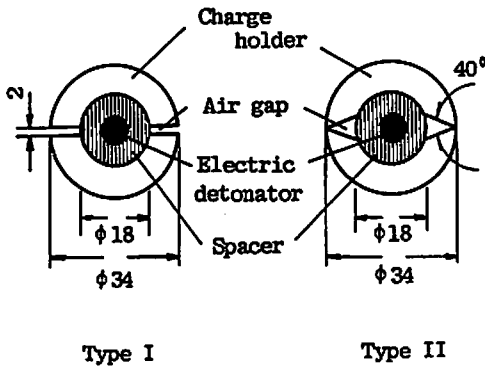


Fig. 3 Geometry of the charge holders.

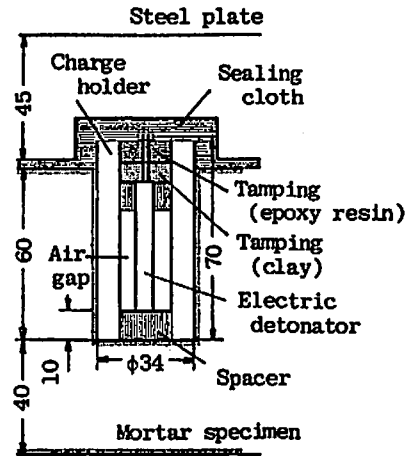


Fig. 4 Loading conditions.

Table I Specified mix proportions of mortar.

Water-cement ratio W/C(%)	Water W(kgf / m ³)	Cement C(kgf / m ³)	Sand S(kgf / m ³)
55	303	551	1325

Table II Physical properties of mortar specimens.

Density	(g / cm ³)	2.14
p-wave velocity	(km / s)	3.93
s-wave velocity	(km / s)	2.04
Young's modulus (dynamic)	(kgf / cm ²)	2.38×10^5
Young's modulus (static)	(kgf / cm ²)	2.23×10^5
Compressive strength	(kgf / cm ²)	410
Tensile strength	(kgf / cm ²)	34

爆破き裂の方向制御や破断作用に関する装薬ホルダーの有効性を確認するためにモルタル供試体と瞬発電気雷管(6号)を使用してモデル爆破実験を行った。実験ではFig. 3に示す2種類の鋼製の装薬ホルダー(Type I, II)を使用した。Type Iは従来の方法を踏襲したもので応力集中効果のみを作り出すことを意図している。勝山らはデカップリング係数=1.0の場合についてスリット近傍の領域に引っ張り応力場が生じることを動的応力場の理論解析によって明らかにした⁵⁾。これに対し、Type IIはホルダー内部のくさび形空洞によって、衝撃波の集中効果を作り出し、き裂方向制御を行うことを意図している。モルタル供試体は

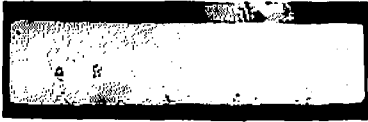
水セメント比55%で配合し、その示方配合をTable Iに示す。形状は450×300×100mmである。材令35日でのモルタルの力学的特性値をTable IIに示す。これらの値は、動的試験、静的試験における3本の円柱供試体(φ100×200mm)の測定値の平均値を示している。Fig. 4に装薬状態を示す。爆破孔は直径34mmの丸鋼をモルタル打設時に供試体型枠中央に深さ60mmで埋め込み、半硬化後抜き取ることによって作製した。装薬ホルダーの内径で定義される装薬のデカップリング指数は、2.73である。ポアホール底部のスペーサーは孔底部分の損傷を防止するためのものである。ポアホール上部は粘土と速硬性樹脂でタンピングし、鋼製の板(200×100×45mm)をかぶせて爆発ガスの噴き出しを防止した。爆破実験は、Type I, Type IIを使用して各々9回行って爆破効果の再現性を確認した。予定破断面にそうき裂の長さや角度、破断状態、孔壁近傍の損傷の有無などについて比較考察を行い、2種類の装薬ホルダーの有効性を調べた。

3. 実験結果及び考察

Fig. 5は装薬ホルダーを使用せずに爆破した場合のき裂形成状態の一例である。装薬のデカップリング効果(デカップリング指数=2.73)によって孔壁の損傷は少ないが、爆破孔上部の自由面には爆発ガスの噴き出しと反射波の引っ張り作用によって爆破クレーターが生じている。また、最小抵抗線(この場合は爆源か

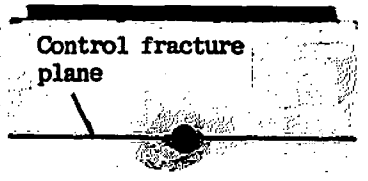


(a) Top view

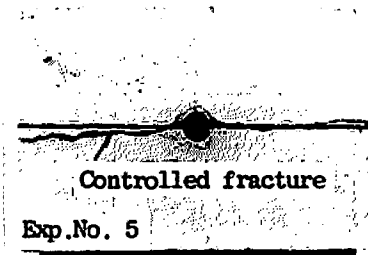


(b) Side view

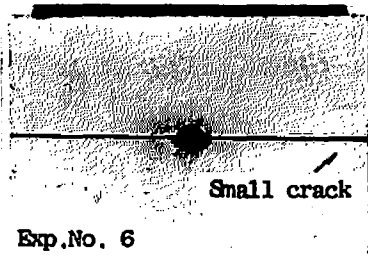
Fig. 5 Fracture developed in mortar specimens (decoupling index=2.73, no charge holder used).



Exp.No. 4



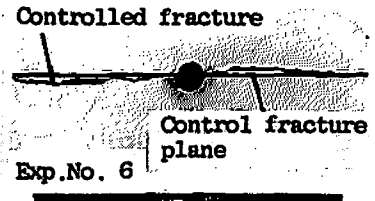
Exp.No. 5



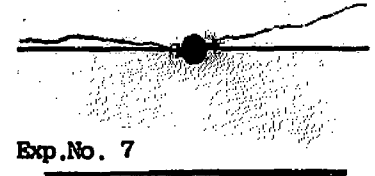
Exp.No. 6

Fig. 6 Crack formation produced by the charge holder (Type I).

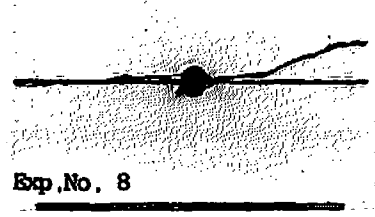
ら側面の自由面までの距離) にそって微小き裂が形成



Exp.No. 6



Exp.No. 7



Exp.No. 8

Fig. 7 Crack formation produced by the charge holder (Type II).

されている。Fig. 6はType Iの装薬ホルダーを使用した場合の爆破後のき裂形成状態の一例を示している。予定破断面はいずれも爆破孔中心をふくむ横方向中心線にそう方向である。実験番号4の供試体では、予定破断面にそう方向のき裂は見られず、爆破孔周囲が損傷している。実験番号5の供試体では予定破断面にそってき裂が形成され、これによって供試体は破断されている。Table IIIはType Iを使用した場合の実験結果をまとめたものである。き裂の長さや角度は予定破断面方向に進展したき裂についての値である。これより、Type Iでは予定破断面にそうき裂の形成についてある程度の効果が見られるが、破断作用については十分な効果を有していないことがわかる。Fig. 7はType IIの装薬ホルダーを使用した場合のき裂形成状態の一例を示している。これよりき裂がほぼ予定破断面にそって形成されていることがわかる。実験番号7, 8では爆破孔から右側 (B side) に進展したき裂が自由面付近で予定破断面方向からそれている。これは文献¹⁾においても指摘されているように、爆破によって供試体中

Table III Summary of experimental results(charge holder:Type I).

Exp. No.	Crack length(cm)		Angle of crack propagation		Fracture pattern	Damage near broehole
	A side	B side	A side	B side		
1	—	—	—	—	not broken	nothing
2	22.5	12.5	3°	3°	not broken	nothing
3	—	—	—	—	not broken	existing
4	—	—	—	—	not broken	existing
5	22.5	22.5	5°	2°	controlled	nothing
6	22.5	22.5	2°	3°	not broken	nothing
7	22.5	22.5	2°	12°	not broken	nothing
8	22.5	22.5	3°	0°	controlled	nothing
9	22.5	22.5	0°	10°	not broken	nothing

Table IV Summary of experimental results(charge holder:Type2).

Exp. No.	Crack length(cm)		Angle of crack propagation		Fracture pattern	Damage near broehole
	A side	B side	A side	B side		
1	22.5	22.5	0°	0°	controlled	nothing
2	22.5	23.0	5°	10°	not broken	nothing
3	22.5	23.0	0°	10°	controlled	nothing
4	22.7	22.5	5°	3°	controlled	nothing
5	16.0	—	8°	—	not broken	nothing
6	22.5	22.5	0°	0°	controlled	nothing
7	22.5	23.0	3°	13°	controlled	nothing
8	22.5	23.0	0°	11°	controlled	nothing
9	22.5	23.0	7°	10°	controlled	nothing

衝撃的な応力波が発生、伝ばし、それが自由面で反射され、供試体中に複雑な応力場が生じることに関係していると考えられる。Fig. 8は、爆破孔近傍の破断状態を示している。孔壁近傍の損傷は見られない。これは装薬のデカップリングによるクッション効果と装薬ホルダーの補強効果によるものである。Fig. 9は爆破後の装薬ホルダーの変形状態を示している。爆破後の装薬ホルダーのくさび形空洞の先端は外側にめくれた状態に変形している (Fig. 9の矢印の部分)。ホルダーのその位置には引っ張りによるき裂が生じる場合もあった。このことから、装薬ホルダーのくさび形空洞先端近傍の孔壁面に引っ張り応力場が生じることがわかる。Table IVは、Type II を使用した場合の実験結果

をまとめたものである。Type II では予定破断面方向のき裂形成、破断効果、孔壁近傍の損傷防止に有効性が高いことがわかる。

4. 結 言

爆破き裂の方向制御を行うために、新しい着想として衝撃波の集中効果を作り出すくさび形空洞を有する装薬ホルダーを使用する方法を提案し、モデル爆破実験を行って従来の方法に基づく応力集中効果を意図したスリットを有する装薬ホルダーとくさび形空洞を有する装薬ホルダーの有効性を比較考察した。実験の結果、くさび形空洞を有する装薬ホルダーはスリットを有する装薬ホルダーと比較してき裂形成位置と進展方向の制御、爆破孔壁の損傷防止、破断作用の向上など

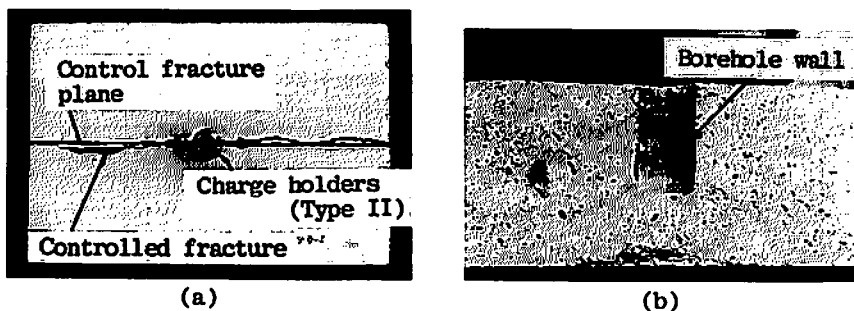


Fig. 8 Fracture pattern and fracture surfaces. (a) Fracture pattern. (b) Fracture surfaces.

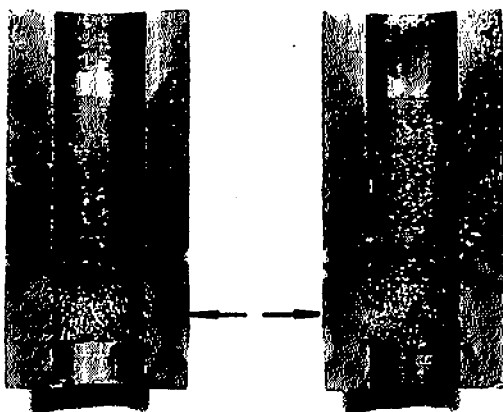


Fig. 9 Explosively loaded charge holders with wedge-shaped air cavities.

において効果的であることが明かになった。このことは、くさび形空洞を有する装薬ホルダーを使用することによって衝撃波と爆発ガスの作用方向と作用時間の制御が可能になることを意味している。

本論文で示したくさび形空洞を有する装薬ホルダーを使用するき裂制御爆破工法は特許出願中（特願平2-275183号）である。また、本研究を進めるに際して有益な御助言を熊本大学工学部藤田昌大教授、金子勝比古助教授、旭化成工業株式会社研究所佐藤俊一課長より戴いた。ここに記して感謝の意を表する。

文 献

1) 中川浩二, 西田 佑, 小野勇司, 川上 純, 土木

学会論文集, No. 373, 1986-9, pp. 131-138.

2) 橋爪 清, 施工, 1989-3, pp. 58-61.

3) 飯星 茂, 川上 純, 五十嵐孝文, 中尾健児, 工業火薬協会誌, Vol. 48, No. 6, 1987, pp. 369-377.

4) W. L. Fournery, J. W. Dally and D. C. Holloway, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr, Vol. 15, 1978, pp. 121-129.

5) 勝山邦久, 清川 博, 佐々宏一, 採鉱と保安, Vol. 29, No. 4, 1983, pp. 16-23.

6) 橋本 博, 高木 薫, 土木学会誌, 1979-9, pp. 57-60.

7) 中村裕一, 井上正康, 中嶋幸敏, 田西裕之, 九田祐二, 工業火薬協会誌, Vol. 48, No. 4, 1987 pp. 225-231.

8) 中村裕一, 住吉和洋, 平成2年度工業火薬協会年会要旨集, 1990-5.

9) 中村裕一, 松永博文, 平成2年度衝撃波シンポジウム論文集, 1990-12.

10) 中村裕一, 松永博文, 山本雅昭, 平成3年度工業火薬協会年会要旨集, 1991-5.

11) Y. Nakamura, Proc. of Int. Conf. on Engineering Blasting Technique, 1991, pp. 346-353, Peking University Press.

12) 中村裕一, 中嶋幸敏, 昭和62年度工業火薬協会秋季講演会要旨集, 1987-10.

Blasting Methods for Crack Control by Utilizing Charge Holders

by Yuichi NAKAMURA*, Hirofumi MATSUNAGA**
Masaaki YAMAMOTO** and Kazuhiro SUMIYOSHI***

This paper describes a series of experiments of a new blasting method for achieving crack control by utilizing the charge holder with two wedge-shaped air cavities. The charge holder produces shock converging effects in the borehole. Radially outgoing shock waves generated by initiation of explosives converge toward the apex of cavity. The shock wave pressure acts effectively on the cavity walls. The tensile stress fields are produced on the borehole at the locations of the apexes and controlled cracks are initiated. Results obtained from blasting experiments using a electric detonator and mortar specimens ($450 \times 300 \times 100\text{mm}$) showed that the present method is feasible means for achieving crack control. The charge holder is effective in eliminating the damage to the borehole walls and in driving the controlled cracks to greater distances.

(*Yatsushiro National College of Technology, 2627 Hirayama-shinmachi, Yatsushiro City, Kumamoto 866

**Asahi Chemical Industry Co., Ltd., Explosives Laboratory, 304 Mizushiri, Nobeoka City, Miyazaki 882

***Nishimatsu Construction Co., Ltd., Chubu Branch Office, 2-25-13 Izumi, Higashi-Ku, Nagoya City, Aichi 461)