

爆破き裂制御のための装薬ホルダーの有効性に関する研究

中村裕一*, 山本雅昭**, 松永博文**

爆破き裂の方向制御と爆破エネルギーの利用効率の向上を行うために先に提案したくさび形空洞を有する装薬ホルダーを使用する方法についてモデル爆破実験を行い、その有効性を検討した。くさび形空洞を有する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、装薬孔の孔壁に作用する爆力の作用方向および作用時間の制御が可能になる。本研究では、レーザーシャドウグラフ法による爆破現象の可視化写真観察を行い、装薬ホルダーによって生じる応力波の挙動を明らかにした。また、鉛供試体とモルタル供試体を用いたモデル爆破実験によって装薬ホルダーが作り出す爆破効果を明らかにし、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本方法が有効であることを示した。

1. 緒 言

地下空洞開発やコンクリート構造物の爆破解体の具体化にともなって効率的な制御爆破工法の必要性が高まっている^{1)~6)}。特に、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。理想的なき裂制御爆破工法では、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⁷⁾。このため、著者らは爆破現象を解明し、その成果をもとに爆破き裂制御のための有効な要素技術を確立するという立場にたって研究を進めてきた^{8)~9)}。前報では、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示した⁸⁾。この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、装薬孔の孔壁に作用する爆力の作用方向と作用時間を制御し、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を生じさせ、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を意図している。

本研究では、爆破現象を可視化写真観察するために構築したレーザーシャドウグラフシステムを用いて装薬ホルダーによって生じる応力波の挙動をPMMA供試体を使用して可視化観察した。また、鉛供試体とモルタル供試体を用いたモデル爆破実験を行い、装薬ホルダーが作り出す爆破効果を調べた。これらの実験結果から、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関するくさび形空洞を有する装薬ホルダーの有効性を考察した。

2. 実験方法

2.1 装薬ホルダーの形状

実験に使用した装薬ホルダーの形状をFig. 1に示す。くさび形空洞を有する装薬ホルダー (Type II-1, II-2) は、丸鋼を機械加工して作製された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 (空気ギャップ) を形成する。デカップリング状態で装てんされた爆薬の起爆によって生じた衝撃波は、くさび形空洞内を干渉しながらくさび先端に向かって伝ばし、衝撃波の集中効果を作り出す。これにより、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形成され、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を意図している。き裂がくさび先端に形成された後、爆発にともなう生

1994年12月7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 内線255

FAX 0965-33-0616

**旭化成工業株式会社化薬販売第一部

〒100 東京都千代田区内幸町1-1-1

TEL 03-3507-7812

FAX 03-3507-2670

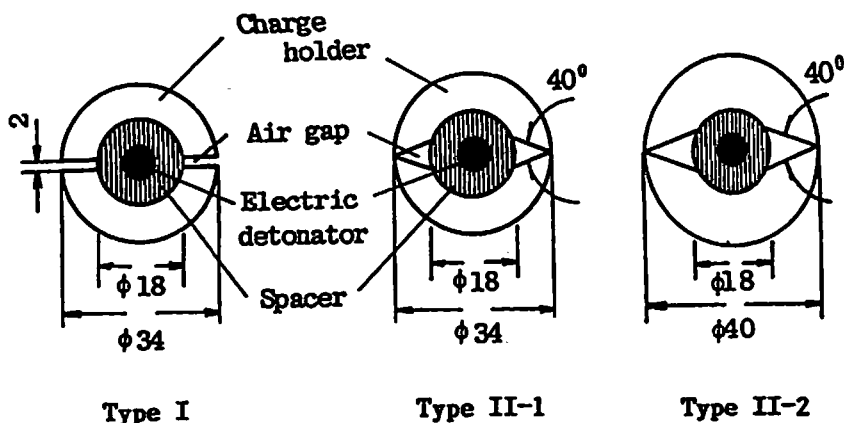


Fig. 1 Geometry of charge holders.

成ガスの作用によりき裂の進展が促進される。また、デカップリング効果およびホルダーの補強効果により、装薬孔壁面の損傷防止が可能であり、爆発ガスの予定破断面以外への噴き出しをなくすることによって破断作用の向上と騒音の低減化も実現できる。このことは、爆薬の有する爆破エネルギーの利用効率を高めることを意味し、装薬量を少なくすることが出来る。Type II-1, II-2は、ホルダーの外径とくさび形空洞の体積が異なっている。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。ホルダーの長さはすべて70mmである。

2.2 鉛供試体及びモルタル供試体の形状と装薬条件

装薬ホルダー-Type II-1, II-2の有効性を検証するために、鉛供試体およびモルタル供試体を用いた2種類のモデル爆破実験を行った。

装薬には、地震探鉱用電気雷管(6号)を用いた。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すべて2.73である。鉛供試体の形状は直径10cm, 高さ11cm, 装薬孔深さ7cmである。爆破実験後の鉛供試体の塑性変形等を確認するために、実験前に鉛供試体上面に水平および垂直方向に1cm間隔の方眼線をけがいた。鉛供試体の中心部に各装薬ホルダーの外径に等しい装薬孔を設け、その中に装薬ホルダーを装着した後、装薬ホルダーの上部は粘土と速硬性樹脂でタンピングを行った。爆破実験は各々の装薬ホルダーについて4回行い、爆破効果の再現性を確認した。また、モルタル供試体の形状は45×30×10cm, 装薬孔深さは6cmである。装薬孔は、各装薬ホルダーの外径に等しい直径を有する丸鋼をモルタル打設時に供試体中央部に所定の深さで埋め込み、半硬化後抜き取ることにより作製した。鉛供試体を用いた爆破実験と同様に装薬ホルダー上部は粘土と速硬性樹脂でタンピングを

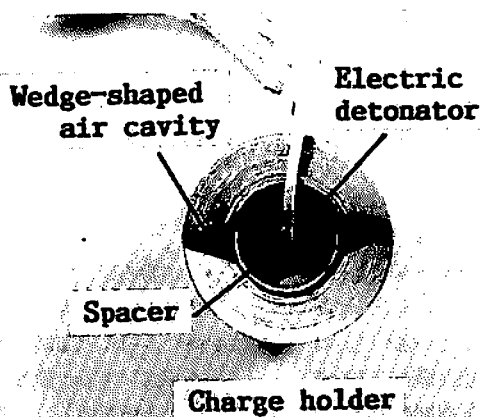


Fig. 2 Photograph of the charge holder. (Type II-1)

施し、さらには鋼製のふたをかぶせることにより、爆発ガスの噴き出しを防止した。装薬孔底部の損傷を防止するためにスペーサーを装薬ホルダー底部に入れた。Fig. 2は装薬ホルダーに雷管を装着した状態を示している。各タイプの装薬ホルダーについて、爆破実験を9回行い、爆破効果の再現性を確認した。比較検討項目は、予定破断面に沿うき裂の長さや角度、破断状態、孔壁近傍の損傷の有無であり、装薬ホルダー-Type Iとの比較を行うことにより、くさび形空洞を有する装薬ホルダーの有効性について考察した。

2.3 レーザーシャドウグラフ法による可視化システム

爆破現象を可視化写真観察するために、Qスイッチルビーレーザーを光源に用いたシャドウグラフシステムを構築した。発光強度の十分な光パルスを効率よく得るには、Qスイッチの作動をポンピング開始時より最適遅延時間(使用したレーザー装置では900マイクロ秒)だけ遅らせる必要がある。本システムでは、現

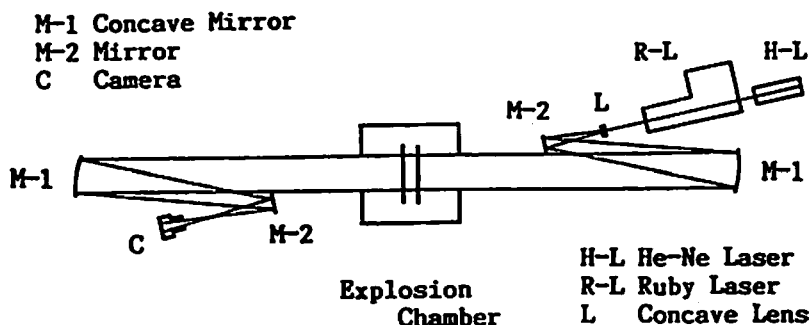


Fig. 3 Optical arrangements of a shadowgraph system.

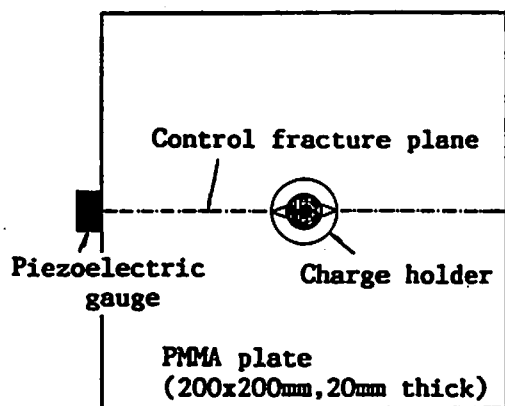


Fig. 4 PMMA plate for optical visualizations of stress waves.

象との同期のために2台の遅延回路と自作した起爆回路(充電電圧45V, 放電時定数2ミリ秒)を使用した。遅延回路はデジセットスイッチによって、1マイクロ秒の精度で遅延時間の設定が可能である。シャドウグラフ法は比較的簡単な光学系の配置で応力波(衝撃波)、爆発ガスやき裂進展などの場の微細構造を知ることが出来る。そのための光学系の配置をFig. 3に示す。2個の凹面鏡(焦点距離1.5m, 有効径15cm)を用いた2面对向法である。これらの光学系はHe-Neレーザーによって光軸調整される。レーザー光はビーム拡散用凹レンズ、補助平面鏡、凹面鏡によって平行光線となり、観測部を通過する。このとき、観測部における密度変化によって生じる光の濃淡は、受光側の凹面鏡、補助平面鏡で集光されたのち、カメラのフィルム面上に結像され、シャドウグラフ写真が撮影される。可視化写真観察のモデル爆破実験には、Fig. 4に示すPMMA板を使用した。この爆破実験は銅製爆発容器内で行い、装薬(地震探査用電気雷管)の爆発光とレーザーの光パルスはフォトリジスタで感知した。これによると使用した電気雷管の起爆遅れは、約120マイクロ秒であった。また、供試体の自由面に圧電ゲージを装着し、応力波の到達時刻を

計測した。

3. 実験結果及び考察

3.1 装薬ホルダー周囲の応力波のシャドウグラフ写真

Fig. 5は、PMMA供試体の中央に装着されたくさび形空洞を有する装薬ホルダー周囲の応力波の挙動を示すシャドウグラフ写真である。時間は応力波が写真の位置から自由面に到達するまでの時間を示している。写真から左右のくさび形空洞先端を中心とする応力波が発生し、伝ばすることがわかる。これは装薬ホルダー内部での衝撃波の動的集中効果によって生じるものであり、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、爆発エネルギーの作用方向と作用時間を制御することが可能であることを示している。予定破断面方向の応力波の伝ば速度はPMMAの縦波弾性波速度に近い。また、ホルダーのくさび形空洞先端から爆発ガスが噴き出していることがわかる。予定破断面方向にき裂が形成されると爆発ガスが作用することによってき裂の進展が促進されることになる。参考のために、装薬ホルダーを使用しない場合のPMMA供試体中の応力波のシャドウグラフ写真をFig. 6に示した。この写真からもわかるように、装薬ホルダーを使用しない場合は装薬孔を中心とする同心円状に応力波が伝ばする。なお、Fig. 6の写真の供試体はくさび形空洞を有する装薬ホルダーによって破断制御された供試体が再使用されており、予定破断面にそう装薬孔付近でのき裂の進展状況がわかる。

3.2 鉛供試体及びモルタル供試体を用いたモデル爆破実験

爆発の仕事効果を調べるためのTrauzl試験を参考にした鉛供試体を使用して装薬ホルダーが作り出す爆破効果を調べた。Fig. 7に、実験終了後に撮影した鉛供試体の上面写真を、また、Fig. 8に装薬孔の変形および損傷状態を確認するための中心線A-A'に沿う断面写真を示す。爆破実験前にけがれた方眼線の歪みより爆力の作用方向を知ることが出来る。装薬ホ

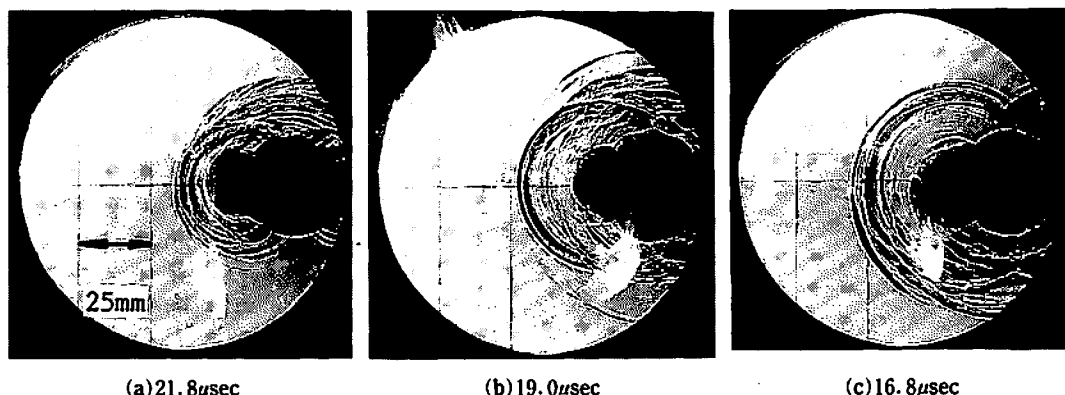


Fig. 5 Shadowgraphs of stress waves in the PMMA plate produced by the charge holder (Type II-1).

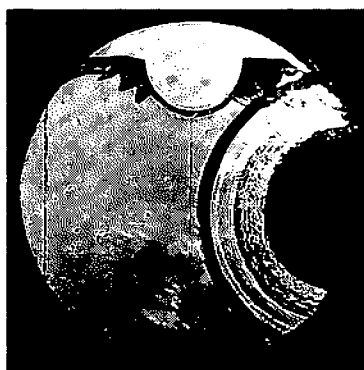


Fig. 6 Shadowgraphs of stress wave in the PMMA plate without the charge holder.

ルダーを使用しない場合、装薬の起爆にともない発生する衝撃波は同心円状に伝ばし、水平および垂直方向のけがき線の歪みに方向性は生じない。これに対して、装薬ホルダーを使用した場合、装薬孔近傍において、予定破断面に対して垂直方向のけがき線の歪みは小さいものの、水平方向のけがき線の歪みが大きくなって

いることがFig. 7よりわかる。このことは、装薬ホルダーを使用することにより、予定破断面方向に沿うき裂を進展させるための爆力の作用方向の制御が可能であるということを示している。また、その効果はけがき線の歪みの大きさからType IよりもType II-1, II-2の方が大きいことがわかる。この様な変形は、装薬ホルダー内部での衝撃波と爆発ガス作用が組み合わさった仕事効果によるものであるが、装薬ホルダーの形状の違いによる衝撃波の動的集中効果の差異は、装薬孔壁面の変形および損傷状態により知ることができる。Fig. 8から、予定破断面方向の孔壁面に装薬孔の深さ方向に沿って損傷もしくはき裂が形成されており、その作用効果は、スロットを有するType Iより、くさび形空洞を有する装薬ホルダーType II-1, II-2の方が大きいことがわかる。Type II-1, Type II-2によって生じたき裂の最大幅と最大深さは約5mm程度である。すなわち、スロットタイプの場合、それを通して衝撃波の作用が孔壁面におよびにくく、一方、くさび形タイプの場合、衝撃波の集中効果によってホルダーのくさび形空洞先端が開き、ジ

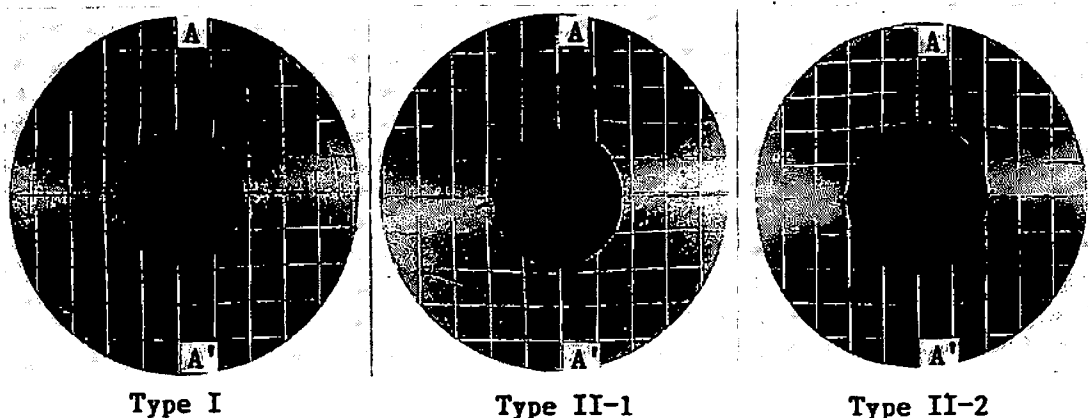
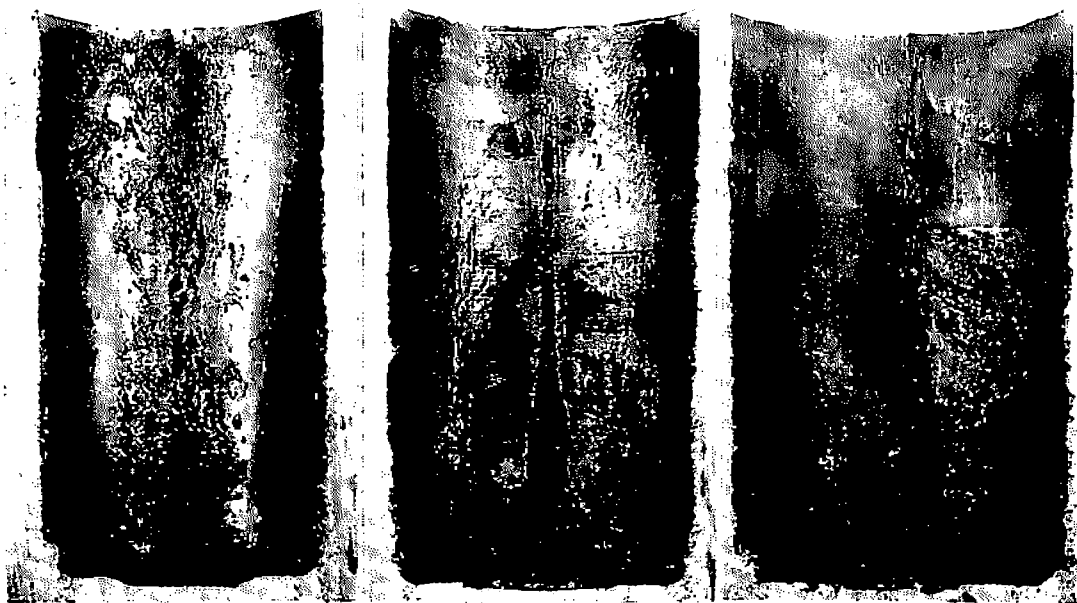


Fig. 7 Top views of the lead specimens after blasting. The charge holders are used.



Type I

Type II-1

Type II-2

Fig. 8 Sectional views of the lead specimens along the A-A' lines shown in Fig.7.

Table 1 Summary of experimental results(charge holder: Type II - 2).

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

エット作用が生じるものと考えられる。このことは、装薬ホルダーのくさび形空洞先端部の変形状態からも裏付けられている。また、実験前後での装薬孔の体積変化はType II - 1 の場合が最大で約22%であり、Type II - 2 が最小であった。これはType II - 2 でのデカップリング体積が最も大きいことに関係しているものと考えられる。

モルタル供試体を使用した爆破実験では、3種類の装薬ホルダーの爆破効果の再現性を確認し、予定破断面に沿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った。

Table 1 は、Type II - 2 を使用した場合の実験結

果をまとめたものである。なお、Type I, II - 1 に関する実験結果の詳細は前報⁹⁾に示されている。Fig. 9 に、モルタル供試体のき裂の形成状態の一例を示す。予定破断面方向に沿ってき裂が形成されていることがわかる。

Table 1 からわかるように自由面近傍において反射応力波の影響¹⁾と思われるき裂の予定破断面からのずれが二、三見られるものの、ほとんどの場合において予定破断面に沿うき裂が形成された。また、Type I の実験結果に見られた装薬孔近傍における損傷は確認されなかった。Fig. 9 (b) は、予定破断面を対角線方向にとり、その方向にくさび形空洞先端を一致させ

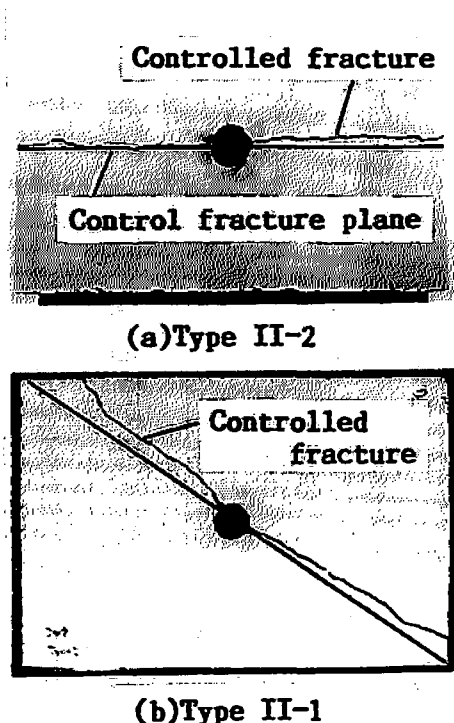


Fig. 9 Fracture patterns in mortar specimens.

た場合のType II-1による爆破効果の再現性について評価したものである。自由面近傍において、予定破断面からのずれが生じているものの、予定破断面に沿うき裂が形成されることがわかる。破断面の平滑さを評価するために爆破き裂による破断面と予定破断面で囲まれた面積を装薬孔中心から両側の自由面までの2方向について求めた。これによるとType II-1では自由面付近でのき裂の予定破断面からのずれによって、その面積にバラツキがあるのに対してType II-2では10cmから20cmの範囲になる確率が約50%であった。これはき裂の進展に影響を及ぼす反射応力波の強さに関係しているものと考えられる。ちなみに、形成されたき裂が直線的であるとする自由面でのき裂位置が予定破断面から1cmずれた場合の面積は11.25cm²である。

4. 結 論

爆破き裂制御を行うために考案したくさび形空洞を有する装薬ホルダーを使用する方法についてモデル爆

破実験を行い、その有効性について考察した。くさび形空洞を有する装薬ホルダーは、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を意図しているが、これによって、くさび形空洞先端を中心とする応力波が装薬ホルダー周囲に発生し、伝ばすることがシャドウグラフ法による可視化写真観察によって明らかになった。また、鉛供試体の塑性変形およびモルタル供試体のき裂パターンからも予定破断面方向の孔壁面へのき裂形成とそれを進展させるための爆力の作用方向の制御が可能になることが確認された。爆破効果を作り出す衝撃波と爆発ガス作用時間にずれがあることを考え合わせると、これらの実験結果はくさび形空洞を有する装薬ホルダーによる動的作用としての衝撃波の集中効果により、予定破断面位置の孔壁面にき裂が形成された後、爆発ガスの作用により、そのき裂が進展し、破断面が形成されることを意味している。

謝 辞

本研究を進めるに際して、熊本大学工学部藤田昌大教授、金子勝比古助教授から有益な御助言を戴いた。また、本研究の費用の一部には文部省科学研究費補助金(試験研究B-(2) 課題番号04555153)を使用した。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: 土木学会論文誌, No. 373, pp. 131-138, 1986-9.
- 2) 橋爪清: 施工, pp. 58-61, 1989-3.
- 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, pp. 369-377, 1987.
- 4) 勝山邦久, 清川博, 佐々宏一: 採鉱と保安, Vol. 29, No. 4, pp. 16-23, 1983.
- 5) 石田毅, 日比野敏: 電力中央研究所研究報告U 88032, pp. 1-20, 1988.
- 6) 橋本博, 高木薫: 土木学会誌, pp. 57-60, 1979-9.
- 7) W. L. Fourny, J. W. Dally and D. C. Holloway: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. Vol. 15, pp. 121-129, 1978.
- 8) 中村裕一, 松永博文, 山本雅昭, 住吉和洋: 工業火薬協会誌 Vol. 53, No. 1, pp. 31-37, 1992.
- 9) 中村裕一: 特許庁公開特許公報, pp. 569-572, 1992-6.

The effectiveness of charge holders for blast crack control

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

The effectiveness of the charge holders with two wedge-shaped air cavities for blast crack control is studied experimentally. The charge holder produces shock converging effects in a borehole and the shock wave pressure acts effectively on the cavity walls. The tensile stress fields are produced on the borehole wall at the locations of the apexes of cavities and controlled cracks are initiated. The following results were obtained from model experiments using a electric detonator as a charge, PMMA plates for optical visualizations of stress waves, mortar specimens and lead ones for examining blasting effects. The photographs taken by the laser-shadowgraphy show that the stress waves propagate outward from the apexes of two wedge-shaped air cavities along the crack control directions. The blasting effects caused by the actions of shock waves and gases in the charge holders initiate the cracks forming a control fracture plane. The charge holders are effective in eliminating the damage to the borehole wall 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 Sales Department, 1-1-1 Uchisaiwaicho Chiyoda-Ku, Tokyo 100)
