研 究 論 文

爆破き裂制御のための切り欠きを有するガイドホ-有効性に関するモデル実験

-*. 岩本誠治*. 大原

爆破き裂制御のための円孔ガイドホール(空孔)の有効性の評価については幅があり、 ガイト ホールによるその効果のメカニズムについても十分な解明がなされていない。本研究では、構 ~蒅したレーザーシャドウグラフシステムを使用して,円孔と干渉する応力波の可視化写真観察 を行い、相互作用としての応力波の干渉挙動を明らかにし、その成果に基づいた爆破き裂の制が - 御方法として、切り欠きを有するガイドホールを使用する方法が有効であることをモデル実験。 によって示す。シャドウグラフ写真から、ガイドホールからの反射応力波の挙動、円孔壁面の 変形や切り欠き先端の供試体中に強い引張応力の集中を示すシャドウスポットが生じることな どが明らかになった。また、高速度ビデオ画像撮影装置を使用して、予定破断面に沿う爆破き 裂の進展拳動を明らかにした。

1. 緒 骨

- 地下空間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。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。き裂進展制 御を目的とした従来技術の中で、装薬孔の近くに円孔 のガイドホール(空孔)を設けておくと、その方向へ爆 破き裂を進展させることが出来ると言われており。こ の方法に関する理論的、実験的研究がこれまでにいく つかなされている。山口・下村じは姜薬孔間の連結を 確実化する効果はあるが、孔間距離を大きくする効果 はないことをモデル実験によって示した。伊藤・佐々2) は理論的考察と実験から、応力波の伝ばによる空孔周 辺の応力集中効果を説明した。勝山・佐々ら³⁾は理論 解析と実験によって、空孔の方向以外のき裂進展に対 する応力解放波の役割を説明した。 Dally らいは、モ デル実験から、き裂進展方向制御の効果について否定 的な結論を出している。中川らうはモデル実験によっ

1997年3月31日受理 👘 👘
*八代工業高等専門学校土木建築工学科
〒866 熊本県八代市平山新町2627
TEL 0965-35-1611(内線255)
FAX 0965-33-0616
**西松建設株式会社技術研究所
〒242 神奈川県大和市下鶴間2570-4
TEL 0462-75-1135
***西松建設株式会社関西支店
〒540 大阪市中央区釣鐙町2―4―7
TEL 06-942-1131

て、装薬孔に空孔が近接している時のみ有効としてい る。この様にその評価については幅が有り、円孔のガ イドホールによるき裂制御のメカニズムについても十 分な解明がなされていない。これは爆破現象が瞬間的 であることなどの実験的困難さによって、動的現象と しての爆破にともなう応力波と円孔との相互作用やき 裂進展に及ぼすその役割が,必ずしも十分に明らかに されていないことなどによるものである。この様な背 景の中で、最近、緒方ら6)はモデル実験と数値計算に よって、応力波が作り出す円孔周囲の応力状態を明ら かにしている。

本研究では構築した可視化システム⁷⁾を使用して. 円孔と干渉する応力波の写真観察を行い、その相互作 用としての干渉挙動を明らかにし、その成果に基づい たき裂制御方法として切り欠きを有するガイドホール を使用する方法が有効であることをモデル爆破実験に よって示す。また、爆破き裂の進展挙動を高速度ビデ オを使用して画像解析した。この様な切り欠きを有す る孔(満付き孔)の削孔は椋木・大原らによって開発さ れたウィングビット⁸⁾を使用して行うことが出来る。 2. 実験方法

2.1 実験装置及び方法

本実験における装置の配置を, Fig. 1 に示す。光 源にQスイッチルビーレーザー(発光時間20 nsec)を 使用した可視化システムは、伝ば速度が数km/秒の応 力波を完全な瞬間写真として撮影することが出来る。

Kayaku Gakkaishi, Vol. 58, No. 3, 1997 - 131-



QSD: Q-Switch Driver LPS: Leser Power Supply DPG: Delayed Pulse Generator DSO: Digital Storage Oscilloscope PG: Pulse Generator FC: Firing Circuit

PE: Piezoelectric Gauge PC: Pulse Circuit IG: Ionization Gauge ED: Electric Detonalor PT: Phototransistor

Fig. 1 Experimental setup.

可視化写真観察には、爆破モデル実験での有用性が認う められているPMMA供試体を使用した。Qスイッチ の作動と装薬の起爆の同期のために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2ms) を使用した。装薬には、起爆遅れのバラッキの少ない 地震探鉱用電気雷管(6号)を使用した。爆破現象の解 析のために, 装薬の爆発時刻、 レーザーの発光時刻及 び応力波の自由面到達時刻を各々、イオンギャップ、 フォトトランジスター及び自作した圧電ゲージで測定 した。圧電ゲージは、装薬孔とガイドホールを結ぶ方 向の自由面位置に装着した。使用した圧電案子は、直 径4㎜, 厚さ2㎜で, 共振周波数は900 kHz である。 これらの波形は、2台のデジタルストレージオシロス コープに記録した。実験から求められた雷管の起爆遅 れは、114µsから144µsの範囲にあった。高速度ビデ オカメラによる爆破現象撮影では、爆発容器内に配置 された供試体に2個のハロゲンランプの光をあてて、 き裂の進展挙動を撮影した。厚みのあるモルタル供試 体を使用する場合は、装薬孔からの飛散物による観測 窓の破損を防止するために、供試体を光軸に対して 45°傾けて撮影した。使用した高速度ビデオカメラは デジタルメモリー方式の画像記録装置(Photron社製 FASTCAM-ultima-02)で、トリガー機能によって爆 破現象に同期させて画像記録が可能であり、分割フ レームにすれば、最高撮影速度40500コマ/秒の画像 記録が可能である。記録された画像(最大記録枚数 49152枚)は、付属の画像解析ソフトによって、変位 や速度を求めることが出来る。実験では爆発ガスの拡 散を防止するために装薬孔位置の供試体表面に鋼製チ





Fig. 2 Details of PMMA specimens. Dimensions are given in millimeters. (a) Type 1 (b) Type 2 (c) Geometry of the guide hole

ャンネルを被せた。

2.2 供試体形状と装薬方法

Fig. 2に、可視化実験に使用じたPMMA供試体の 形状を示す。市販のアクリル板(アクリライトS,厚 さ20㎜)を機械加工して使用した。超音波パルス法で 求められるこの供試体の縦波弾性波速度は、2.62㎞ /sである。Type 2の供試体は、き裂進展方向と進展 長さに及ぼすガイドホールの効果を調べるためのもの である。切り欠きを有するガイドホールの形状を(c) に示す。切り欠きの形状は、ウィングビットで得られ る切り欠きの形状を参考にした。Fig.3に、PMMA 供試体への留管の装着状態を示す。直径7㎜の装薬孔 の上部に起爆後の爆発ガスや雷管の破片の飛散を抑え るために、図の様な鋼製パイプを装着した。円孔及び 切り欠き円孔のガイドホール効果に関する実験では、 30 × 30 × 3 cm 及び 30 × 30 × 10 cm のモルタル供試体も 使用した。モルタルは水セメント比55%で配合し、 材料試験の結果、その力学的特性値(材令69日)とし て、縦波弾性波速度4.10km/s、横波弾性波速度2.14 km/s, E縮強度416kgf/cm, 引張強度29.9kgf/cm, 割線弾性係数(1/3強度)2.5×10⁵kgf/cmが得られた 。

117

-132-





Fig. 4 Shadowgraphs of the stress waves propagating in the PMMA specimen without the circular hole. Time t' is the arrival time of the first incident wave propagating from the location on the photograph to the piezoelectric gauge attached to the free surface of the specimen.



Fig. 7 Shadowgraphs of stress waves interacting with the circular hole in the PMMA specimen. Time t" is the arrival time of the first incident wave after reflecting from the free surface.



Fig. 8 Shadowgraphs of stress waves interacting with the circular hole having two notches in the PMMA specimen. Time t is the arrival time of the first incident wave after the explosion of the charge.

値から平均速度は約3km/sになるが、Fig. 5からわ かるように、自由面付近での伝ば速度は約2.7km/sと なり、前述の縦波弾性波速度に近い値になっている。 Fig. 5における第1波と第2波の波面位置間の距離は、 その伝ば速度が両者ほぼ等しいことを考え合わせると、 Fig. 6の圧電ゲージの出力波形が示す様な応力波の初 動の二段階の立ち上がりの時間差(約12µs)に対応す ることがわかる。

· .

円孔と干渉する応力波のシャドウグラフ写真を, Fig. 7 に示す。写真から円筒状に爆源から伝ばする入 射圧縮応力波は,円孔に到達すると干渉して、反射引 援波が円筒状に入射波と逆向きに伝ばすることがわか。 る。また,円孔壁面周囲に不透明の領域が生じ,応力 波の通過にともなって,その領域が移動していること がわかる。この不透明領域の動きから、円孔壁面の変 形挙動を知ることが出来る。特徴的なこととして,円 孔内部の空気中に収束する衝撃波が発生していること がわかる。これらの現象は,入射応力波に対して円孔 壁面が自由面となり、応力波との干渉によって、自由 面が内側に変位することによって生じたものである。 円孔内に生じた衛撃波は収束したのち、反射衛撃波と して再び円孔壁面と干渉することがわかる。この様な 衛撃波の多重反射は、円孔壁面に内圧となって繰り返 し作用することになる。これらの事実に着目すると、 円孔に切り欠きを設けることによって、き裂の進展方 向制御を可能にすることが期待できる。

Fig. 8 は、切り欠きを有する円孔と干渉する応力 彼のシャドウグラフ写真である。円孔の場合と異なっ て、反射直後の反射引張波の幾何形状は楕円のように なる。また、両端の切り欠き先端に強い引張応力の集 中を示すシャドウズボットが生じていることがわかる。 き裂の進展に対して円孔は自由面として作用するため に、円孔の存在によって、き裂の進展が停止すること になるが、写真からわかるように供試体の自由面側に 位置する切り欠き先端部のシャドウスポットは自由面 側へのき裂の進展が期待出来ることを示している。



Fig. 9 Crack propagation recorded by the high-speed video camera. (a) PMMA specimen (Type 1), framing rates: 18000 frames per second (b) PMMA specimen (Type 2), framing rates: 18000 frames per second (c) PMMA specimen (Type 2), framing rates: 18000 frames per second (d) Mortar specimen, framing rates: 18000 frames per second (e) Mortar specimen, framing rates: 27000 frames per second (f) Mortar specimen, framing rates: 27000 frames per second

Kayaku Gakkaishi, Vol. 58, No. 3, 1997 -135-



(e) with notches (c) wi

3.2 き裂の進展挙動

Fig. 9は、高速度ビデオカメラで記録した画像を ビデオプリンターで出力したものである。(a)から (c)ではPMMA供試体が使用され、(d)から(f)で はモルタル供試体が使用されている。起爆回路とビデ オ装置の起動の同期時刻はコマ番号-1から+1の間 である。装薬の起爆遅れのため,例えば扱影速度 18000 コマ/秒の場合でコマ番号3,4 で起爆時の爆 発光が最初に見られる。これらの画像から、き裂の進 展挙動と切り欠きを有する円孔のガイドホール効果を 確認することが出来る。(a)から、切り欠き円孔の切 り欠き先端から、き裂が互いに逆向きに予定破断面に そって進展することがわかる。(b)においても、2個 の切り欠き円孔の切り欠き先端からき裂が生じ、円孔 間で互いにき裂が衝突することがわかる。(c)の円孔 では、応力波の伝ば方向に対して直交する方向に切り 欠きが配置されている。応力波と干渉して切り欠き先 端から応力波の伝ば方向に直交する方向にき裂が進展 し、自由面からの反射波の作用によって、自由面側の き裂がより長く進展することがわかる。円孔の切り欠 き方向と応力波の伝ば方向が直交する場合のシャドウ グラフ写真からも, Fig. 8の場合と同様, 切り欠き 先端にシャドウスポットが生じることが確認されてい る。(d)と(e)の写真では、30×30×3cmのモルタ ル供試体が使用されている。ガイドホールは装薬中心 及び写真左側の自由面から10㎝の位置にある。円孔 のみの場合は、き裂が円孔を通過したのち、円孔と自 山面の中間付近でその進展速度が低下するのに対して, 切り欠きを有する円孔の場合では、進展速度が急激に 低下することなしに、自由面までき裂が進展する。こ のため、爆発ガスの膨張エネルギーが効果的に作用す ることから、破断面が形成された後の上側の供試体は 拘束されていないために、その移動も速くなる。(f) の写真では、30×30×10cmのモルタル供試体が使用 されている。写真から爆発ガスが、き裂面に沿って移

動することがわかる。モルタル供試体における破断面 の形成は、微視を裂の発生とそれに続くき裂の開口に よるものであるが、爆発ガスの移動がき裂の開口に重 要な役割を果たすことがわかる。(d)の写真からもわ かるように、これらの実験の一部においては、供試体 表面に塗布した導電塗料の破断を利用した電気的方法 によるき裂進展速度の測定も試みたが、現時点では定 量的精度のあるき裂進展速度のデータは得られていな い。

き裂形成状態を示す爆破後のPMMA供試体の写真 の一例をFig.10に示す。Type 1の供試体について, き裂の進展制御効果を比較すると、円孔ガイドホール の場合、実験回数15回中で7回は、き裂が円孔壁面 で停止した。また、き裂が予定破断面に沿って自由面 まで到達することはなかった。これに対して、切り欠 きを有するガイドホールの場合は、すべての実験にお いて予定破断面に沿ったき裂が自由面まで到達した。 これらの実験結果から、特定の方向へのき裂進展を実 現するための方法として、切り欠きを有するガイド ホールを使用する方法が有効であることがわかる。ま た、起爆後の早い段階で特定の方向にき裂を進展させ ることが出来れば、装薬孔から無秩序に進展するき裂 を抑えることが出来る。

4. 精 2 篇 3. 35 37 7 7 8 8 7 7 8

爆破にともなう応力波ど円孔の干渉挙動をPMMA 供試体を使用して可視化写真観察し,爆破き裂を制御 する方法として,切り欠きを有するガイドホールを使 用する方法が有効であることをモデル実験で示した。 本研究で明らかになった主要な成果を以下に示す。

(1)円孔と干渉する応力波の挙動に関しては、シャド ウグラフ写真から、円孔からの反射波の伝ばや円 孔壁面の変形、円孔内部に発生する衝撃波などの 挙動が明らかになった。切り欠きを有する円孔と 応力波の干渉によって、切り欠き先端に引張応力 の集中によるシャドウスポットが生じ、き裂が切

り欠き先端から自由面側へ向かって進展するメカ ニズムが生じる。

(2)高速度ビデオを使用して、予定破断面に沿ら爆破 き裂の進展挙動を明らかにした。円孔のガイド。 ホールでは、き裂進展が円孔付近で停止するのに 対して、切り欠きを有するガイドホールでは、切 り欠き先端から自由面側へのき裂進展が生じ、切 り欠き先端位置を予定破断面方向に一致させるこ とによって、き裂進展方向を制御出来る。切り欠 きガイドホールの使用によって、起爆後の早い段。 階でこの様なき裂の進展制御が可能となるため、「1993年5)」中川浩二, 版本化, 吉開亮介, 工業火薬協会誌, 予定破断面以外へ進展するき裂の抑制や爆発ガス の作用をより効果的にすることが出来る。 6) 緒方雄二,和田有司,勝山邦久,火薬学会誌,

谢 辞礼: "

本研究を進めるに際して、熊本大学工学部藤田昌大 教授,北海道大学工学部金子勝比古教授から有益な御。 助賞を戴いた。また、本研究の費用の一部には文部省 科学研究资補助金(基盤研究C-(2)課題番号

12 20 8

note Sige()

11.1.1.11.1

- 08651116)を使用した。ここに記して感謝の意を表する。 文 搧
- 1) 山口梅太郎, 下村弥太郎, 工業火薬協会誌, 28; 29 (1967.)
- 2) 伊藤一郎, 佐々宏一, 日本鉱業会誌, 84, 1059 (1968)
- 3) 勝山邦久,佐々宏一,伊藤一郎,日本鉱業協会 誌, 86, 195(1970)
- 4) J. W. Dally, W. L. Fourney and A. L. Peterson, Mining Engineering, 30, 184 (1978)
- 43, 75 (1982)
- 56, 1(1995)
- 7) 中村裕一,山本雅昭,松永博文,火薬学会誌, 56, 19(1995) · .
- 8) 椋木淳二, 大原直, 秋吉直発, 国武誠二, トンネ ルと地下,23,41(1992)

4.1

Model experiments on the effectiveness of guide holes with notches for blast 1. crack control

____**(qr**_)

1. 4. 4

by Yuichi NAKAMURA*, Seiji IWAMOTO*, Tadashi OHHARA** and Junji MUKUGI***

Model experiments are carried out to examine the interaction of stress waves with the circular hole and to demonstrate the effects of the circular hole with notches as a guide hole using PMMA plates and mortar specimens. The stress wave propagation in blasting processes is visualized by the laser shadowgraph method. The dynamic behaviour of cracks along a control fracture plane is observed by means of a high-speed video camera. It is indicated from the experimental results that utilization of the circular holes with notches is effective in controlling the orientation of the fracture plane, in driving the controlled cracks to greater distances and in suppressing crack growth propagating in random directions from the charge hole.

- (*Yatsushiro Nat. College of Technology, 2627 Hirayama-shinmachi, Yatsushiro, Kumamoto 866, Japan ۰. 1 24
 - **Nishimatsu Construction Co., Ltd. 2570-4 Shimotsuruma, Yamato, Kanagawa 242, Japan
 - ***Nishimatsu Construction Co., Ltd. 2-4-7 Tsurikane-machi, Chuo-ku, Osaka 540, Japan) · · · · · · ·

Kayaku Gakkaishi, Vol. 58, No. 3, 1997 -137-