

装薬のデカップリングが爆破孔近傍における応力波の挙動と破壊におよぼす効果について

中村裕一*, 井上正康*, 中嶋幸敏**
田西裕之***, 丸田祐児****

爆源近傍における応力波の挙動を調べるために、爆破実験を行なった。応力波の挙動と破壊の進展を視覚的に把握する目的で、PMMAブロックを用いて実験を行ない、高速度カメラでその爆破現象を写真観察し、同時に圧電ゲージによって、応力波の圧力履歴を計測した。また、破砕された供試体を回収して復元し、そのき裂パターンを観測した。これらの実験結果をもとに装薬のデカップリングが爆破孔近傍における応力波の挙動と破壊におよぼす効果について考察し、デカップリングの増大が、応力波の初動の立ち上りやき裂パターンに変化を生じさせることなどを示した。

1. 緒 言

制御爆破工法としてクッションプラスチック法¹⁾があるが、最近ではコンクリート構造物の解体などの都市発破技術としても注目されている²⁾。都市発破では爆破の効果が強すぎても弱すぎても問題となり、その効果の精密な予測がより一層不可欠となる。

クッションプラスチック法においては、デカップリング効果とよばれる装薬周囲に設けられた空隙の作用によって、爆薬がする仕事、すなわち媒体中の応力波による動的効果と爆発ガスによる静的効果をうまく利用することを意図している。この概念は、Atchisonらによって提案され³⁾、伊藤・佐々⁴⁾や、山口・下村⁵⁾らの研究がよく知られているが、爆発による材料の破壊のメカニズムそれ自身が明確でないことも加わって、爆破現象が瞬間的であるため不明な点も多い⁶⁾。クッションプラスチックを効果的に行うには、爆破孔内部の圧力履歴や媒体中の応力波の挙動なども知る必要がある。

本研究では、爆源近傍の応力波の挙動と破壊の進展を視覚的に把握する目的で、材料として光を透過するPMMA(Polymethyl methacrylate, 通称Acryl)のブロックを用いて実験を行ない、高速度コマ撮りカメラでその爆破現象を観察し、同時に圧電ゲージによって、供試体中に発生した応力波の圧力履歴を電気計測した。

また、破砕された供試体を回収して、その破壊状況を観察するとともに、これらの実験結果をもとに、爆破のメカニズムについては従来、諸説があることも考慮して^{7)~10)}、装薬のデカップリングが、爆破孔近傍における応力波の挙動と破壊におよぼす効果について考察した。

2. 実験方法

2.1 供試体形状と装薬状態

PMMAブロックの形状は、80×80×80mmで、キャストアクリル角棒(三ツ星キャデラック製)を切断して作った均質ブロックである。実験には、現象と計測システムとの同期の点から、起爆遅れのバラツキが少ない地震探鉱用6号電気雷管(旭化成製、管径6.6mm)を使用した。爆破実験において、本研究のように、供試体にPMMAブロックを用いることや、その爆源に電気雷管を使用することの有用性は、今までになされた研究で認められている⁵⁾⁶⁾¹¹⁾。

装薬状態に関する因子としては、爆破孔の直径(D、以下孔径と称す)、深さ(H)、爆薬の装着方法、込物の有無などが考えられるが、ここでは、深さ(H=45mm)が一定で孔径が異なる場合(D=6.7, 12, 18mm)について実験を行なった。3つの孔径のデカップリング指数(Decoupling Index=孔径/装薬径、

昭和62年1月9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

**熊本大学工学部

〒860 熊本県熊本市黒髪2丁目

TEL 096-344-2111

***三菱樹脂株式会社

〒254 神奈川県平塚市真土 2480

TEL 0463-55-1130

****三井ハイテック株式会社

〒806 北九州市八幡西庄小領

TEL093-611-1331

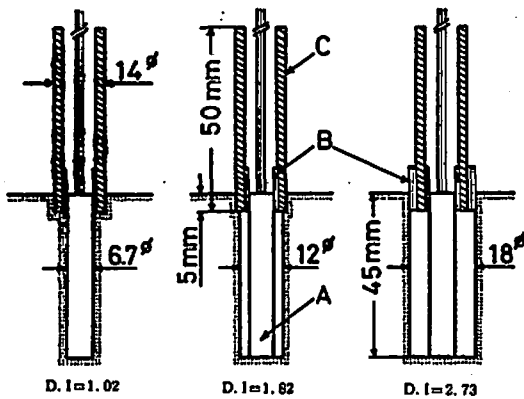


Fig. 1 Schematic representation of the loading conditions. A, electric detonator; B, drafting tape; C, brass tube; D, I, decoupling index.

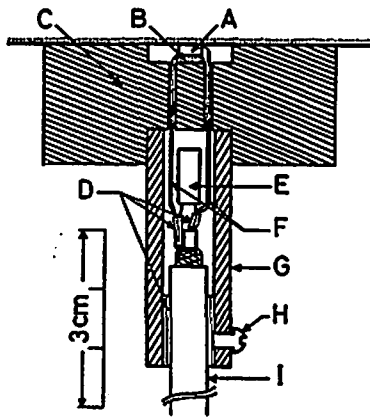


Fig. 2 Sectional view of the piezoelectric gauge. A, piezoelectric element; B, epoxy resin; C, PMMA plate; D, insulating tape; E, capacitor (0.3 μ F); F, electric leads; G, brass tube; H, metal screw; I, coaxial cable.

以下D.Iと記す)は、1.02, 1.82, 2.73になる。Fig. 1は、孔径Dが異なる3つの爆破孔についての雷管の装着状態を示したものである。孔の入口に装着された真ちゅう製のパイプは、爆発ガスが供試体の周囲に拡散して写真撮影に必要な透過光をしゃ断することを防止するために設けられたもので、その有効性は、予備実験で確かめられている。実験は、各々の装着状態について5回ずつ行なった。

2.2 圧電ゲージによる応力波の圧力履歴の測定

実験には、村田製作所製の圧電素子(ピエゾタイト、7D-4-900BA)を使用した。これは、直径4mm、厚さ2mmの円板型で、厚み方向共振周波数900kHz、厚み方向電圧出力係数 $31.2 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{m/N}$ 、静電容量113pFの特性をもつチタン酸ジルコン酸鉛系のもので

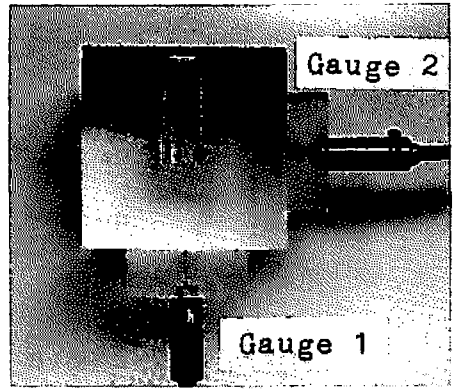


Fig. 3 PMMA block and piezoelectric gauges.

ある。

圧電ゲージの断面図をFig. 2に示す。圧電素子の表面は、絶縁シールドするために、絶縁塗料でコーティングされている。圧電素子を用いて圧力履歴を正確に測定するには、ゲージの放電時定数を現象の測定時間と比較して十分大きくする必要がある。また、素子の静電容量が小さいため、圧電素子に並列にコンデンサーを入れることが多く¹²⁾、本実験でも図の位置にコンデンサー(0.3 μ F)を装着した。ゲージは、同軸ケーブル(3D-2V)を通して、計測機に直結した。使用した計測機の入力インピーダンスは1MQであるから、ゲージの放電時定数は、0.3secとなり、現象の測定時間が3msec程度であれば、1%の精度で素子に発生した電圧を測定することができる。Fig. 3は、供試体に装着した圧電ゲージの外観を示したものである。2個の圧電ゲージを装薬の中心(雷管の添装薬の中心で、管底から5mmの位置)から各々、40mmの距離にある爆破孔の軸方向(Gauge 1)および半径方向(Gauge 2)の自由面に装着した。

2.3 計測方法

本実験における測定システムの概略をFig. 4に示す。爆破現象の写真観察は、熊本大学工学部付属衝撃エネルギー実験所の爆発実験室において、キセノンランプ(菅原研究所製)と日立・植村式高速度コマ撮りカメラ(20万コマ/sec、露出時間0.4 μ sec)を用いて行なった。キセノンランプと雷管の起動は、パルス発生器(岩通製PG-230)と自作した起爆回路(充電電圧45V、放電時定数2msec)を用いた。圧電ゲージからの信号波形は、トランジェントレコーダー(岩通製DM-902)に記録した。雷管の母線電流とフォトトランジスターで受光したキセノンランプの発光強度の時間変化は、もう1台のトランジェントレコーダー(岩通製SS-5802)に記録して、起爆のタイミングを確認した。

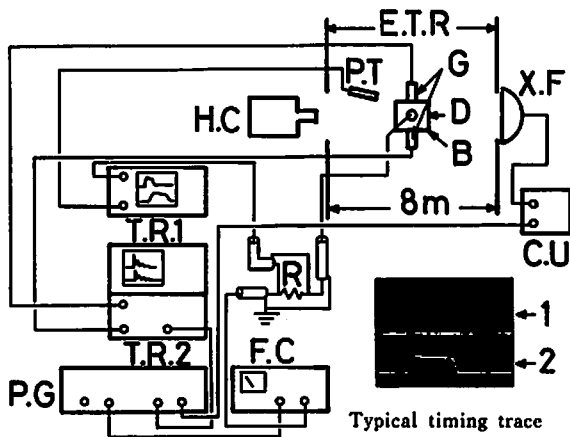


Fig. 4 Schematic diagram illustrating the experimental setup. 1, trace of current change of the electric detonator; 2, trace of xenon light flash detected by the Photo TR; B, PMMA block; D, electric detonator; G, piezoelectric gauges; R, resistor (1 Ω); T.R. 1 and T.R. 2, transient recorder; H.C. high speed camera; P.G. pulse generator; F.C. firing circuit; P.T. photo transistor; X.F. xenon lamp; C.U. control unit; E.T.R. explosion test room.

3. 実験結果および考察

3.1 応力波の圧力履歴

圧電ゲージからの出力波形の記録例を Fig. 5 に示す。これらの測定データから、PMMA ブロック中に生じた応力波の挙動に関して次のことがわかる。Gauge 1 の波形比較から、D. I が大きくなると、応力波の初動の立ち上がりが2段階状になり、第1波と第2波の時間間隔も長くなることからわかる。これは、装薬周囲の空隙の増大によって、爆破孔の軸方向への爆力の作用が2段階になることを示すもので、爆発によって、雷管の底面に接した供試体に第1波が投射されたのち、側面方向に膨張した爆発波が爆破孔内に充満した時点で、第2波が投射されるものと考えられる。この初動の立ち上がりが2段階になる波形は、D. I=1.82, 2.73 についてのすべての実験において確認された。第1波の立ち上がりから第2波のピークまでの時間間隔 τ は、D. I=1.82 に対して、 $2.5\mu\text{sec} < \tau < 2.8\mu\text{sec}$,

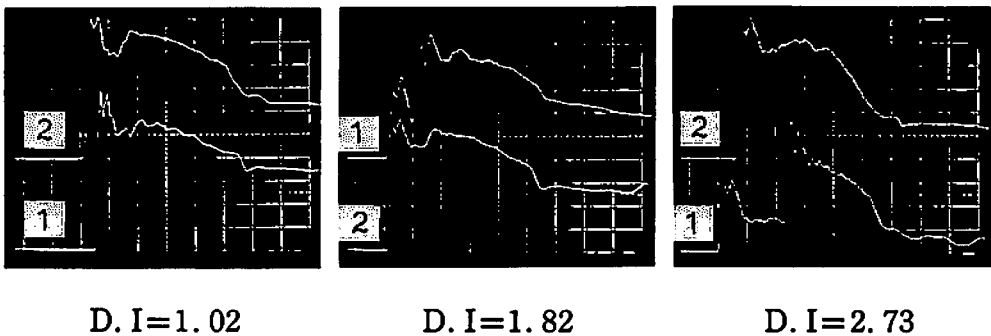


Fig. 5 Typical output signals from the piezoelectric gauges in PMMA block. 1, gauge 1; 2, gauge 2. Sensitivity=2.0v/div, time scale=2.0 μsec /div.

D. I=2.73 に対して、 $4.8\mu\text{sec} < \tau < 5.1\mu\text{sec}$ の範囲にある。また、Gauge 2 の波形比較から、半径方向の応力波の圧力履歴の形は、D. I が増加してもほとんど変化はなく、前述のような初動における2段階状の立ち上りは生じていないことがわかる。これは、半径方向については、雷管が孔壁に接触していないことによるものであろう。Fig. 6 は、Gauge 1 と 2 に応力波の波頭が到達するまでの伝播時間の差 Δt を図示したものである。D. I が大きくなると、Gauge 1 の装着された軸方向の自由面に応力波が先に到達することがわかる。これより、装薬のデカップリングは、爆源近傍に

おいて、供試体内に生じた応力波の幾何形状を変える効果も有していることがわかる。

使用した電気雷管は、ノイマン効果を得るために小さな凹みを有した底上型であるが、雷管が爆破孔の底面に接した状態でこの凹みを作る空隙は、雷管周囲のデカップリングに比べて無視出来るほど小さい。雷管の底面の凹みを作るノイマン効果については、著者の一人が行なった雷管単体の爆発現象の光学的観察によって、底面からのジェットは、先行する微小破片とそれに続く大きな破片からなっていることが示されている¹³⁾。雷管の爆力の方向性についてのこのジェットの

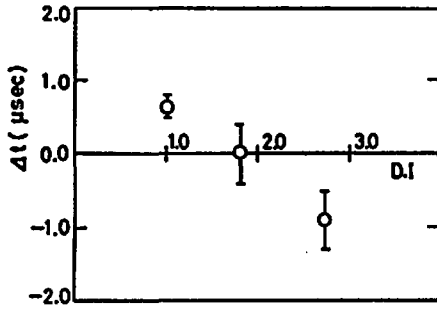


Fig. 6 Difference of arrival times ($\Delta t = t_1 - t_2$), t_1 , t_2 are the arrival time of gauge 1, 2, respectively.

効果が爆破孔の軸方向の応力波の初動の立ち上りに影響をおよぼすとすると、その効果は、デカップリングの小さい場合により顕著になることが考えられるが、 $D.I = 1.02$ では生じていないことを考え合せると、応力波の2段階状の立ち上りは、装薬のデカップリングの効果によって生じたものと考えられる。Fig. 7は、トランジェントレコーダーから読みとったGauge 1と2の電圧のピーク値をD.I.に対して図示したものである。初動でのピーク値は、 $D.I = 1.02$ に

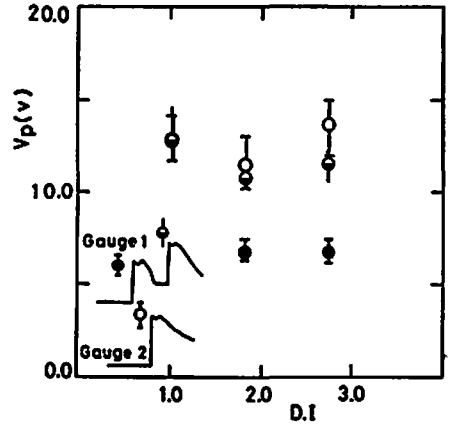


Fig. 7 Peak voltage (V_p) of the piezoelectric gauges as a function of decoupling index (D.I.).

対して、 $D.I = 1.82$ の場合、低下しているものの、 $D.I = 2.73$ では、若干増大している。 $D.I = 2.73$ の実験結果について、納得できる説明は、まだ見出していない。

3.2 爆破現象の高速度写真観察

高速度カメラで撮影したコマ撮り写真の一例として、

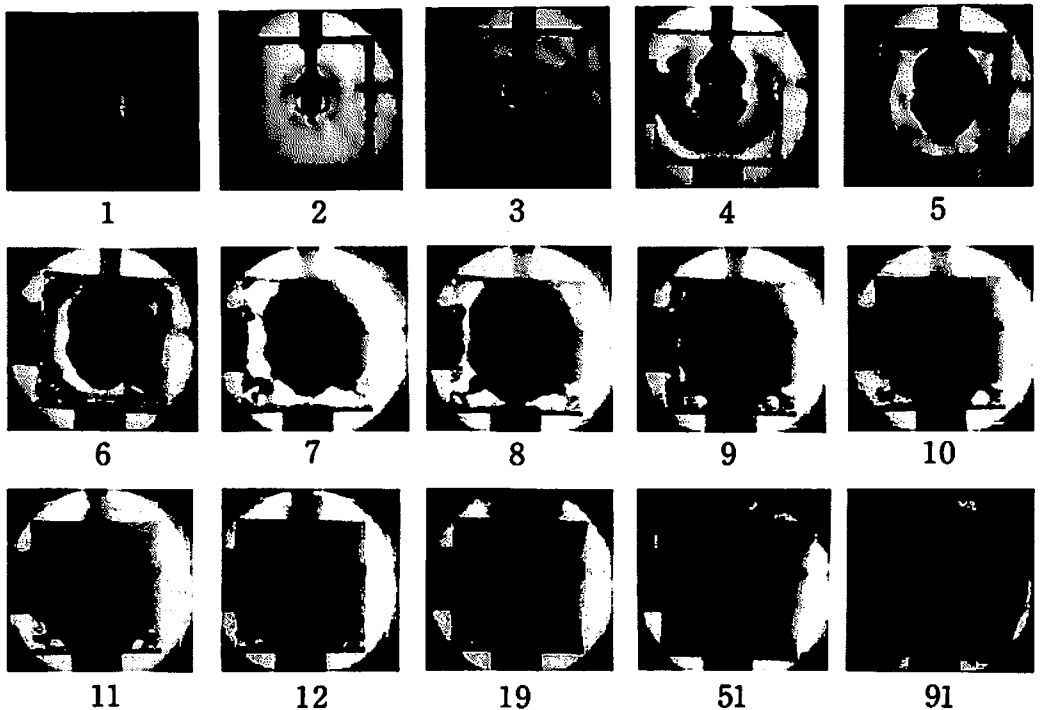


Fig. 8 Framing camera photographs (PMMA blocks, $D.I = 1.02$). Exposure time = $0.4 \mu\text{sec}$. framing interval = $5 \mu\text{sec}$. Numerals attached to each photograph indicate the number of frames.

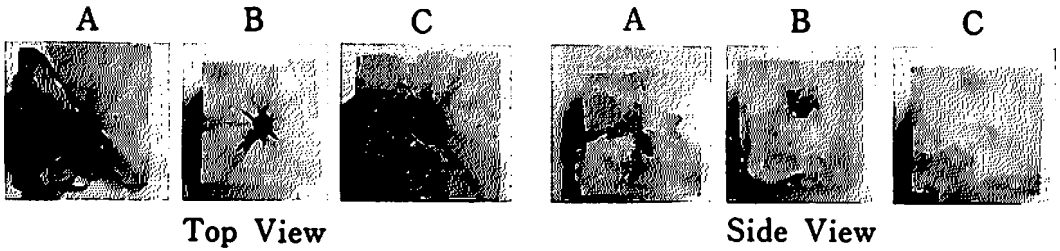


Fig. 9 Reconstructed PMMA block. A, D.I=1.02 ; B, D.I=1.82 ; C, D.I=2.73

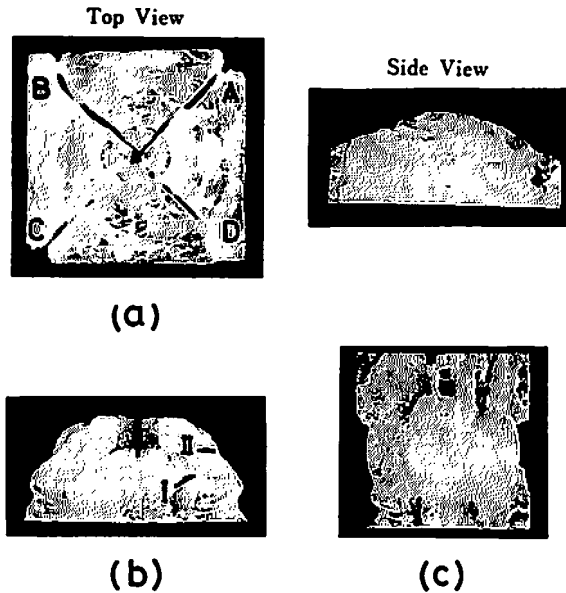


Fig. 10 Partially reconstructed PMMA blocks showing fracture patterns, D.I=2.73.

D. I=1.02の場合をFig. 8に示す。連続写真の中から15コマ選び出したもので、各々の写真下の数字は1コマ目を基準としたときのコマ番号を意味する。これより、破壊の進展に関して次のことがわかる。爆発後約10 μ secで応力波は自由面に達する。このとき、供試体の自由面近傍の領域は不透明になる。これは、応力波が自由面で反射することによって生じる引張波の作用によるものであるとされている¹⁴⁾。爆破孔近傍の破壊域は、時間とともに拡大していくが、約25 μ sec以降、供試体の自由面の交角の2等分線上に不透明の領域ができていく。これは、コーナーフラクチャーとよばれるき裂の発生を示すものであろう。約55 μ secたつと、供試体全域にわたって不透明となり、爆発ガスが孔口から噴出する。第19コマからわかるように、この時、孔口付近の自由面は盛り上がっている。250

μ sec程度になると孔口付近の供試体の一部は、引きちぎられて飛散する。しかしながら、爆発後450 μ secたつても供試体の形状は、まだ保たれていることがわかる。3.1の考察から、D. Iによって応力波の波頭の幾何形状が変化することが示されているが、使用したキセノンランプの光が完全な平行光線でないことと、高速度カメラの露出時間が不十分なために、波頭それ自身が明瞭な波面として撮影されていないこれらのコマ撮り写真から、その幾何形状の相異を明確に確認することは困難であった。

3.3 供試体の破壊状況

破壊されたPMMAブロックのき裂の状態を調べることによって、応力波の挙動を知ることができる。

Fig. 9は、復元した供試体の外観を示したものである。D. I=1.02の場合には、破砕片の飛散が著しく、

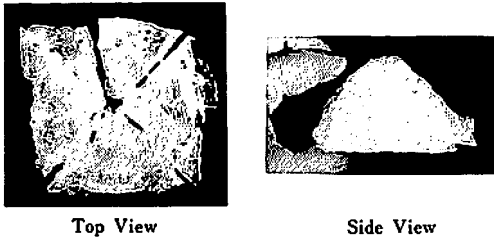


Fig. 11 Partially reconstructed PMMA blocks, $D.I=1.82$

完全に元の状態にすることが出来なかった。 $D.I$ が大きくなると孔壁の損傷は小さくなり、破砕片の大きさも増し、き裂の状態を明瞭に知ることができた。

Fig. 10は、 $D.I=2.73$ の供試体の破壊状況を示したものである。(a)は、孔底より下の部分の破砕片を組み合わせたものであり、爆破孔に平行な4つの自由面の各々の交角の2等分線上に、コーナーフラクチャーとよばれるき裂が生じていることがわかる。そのき裂面は、非常に平滑であった。このコーナーフラクチャーは、応力波の自由面での反射によって生じる引張波の干渉によって発生したものであり¹⁵⁾、き裂の方向が供試体の対角線AC、BDと一致していることは、応力波が爆破孔に関して軸対称であることを意味している。(b)は、(a)の対角線ACにそり断面内のき裂の状態を示したものである。(I)のき裂は、爆破孔に垂直な供試体底面と側面からの反射引張波との干渉によるき裂と爆破孔底部のコーナーでの応力集中によるき裂とが結び合わさったものと考えられる。また、供試体の側面には、(c)からわかるようなスポーリングによる破壊が生じており、その破片(Spall)の厚みは、4~5mm程度であった。(b)の(II)のき裂は、このスポーリングによって生じた供試体の弱面にそり方向に形成されていることから、スポーリングによる破壊の後に生じたものと考えられる。Fig.10の(a)、(b)の写真から、雷管底面からのジェットによって孔底中央に小さな穴が生じていることがわかる。

$D.I$ によるき裂パターンの相異は、(I)のき裂の方向にみられる。Fig.11は、 $D.I=1.82$ の場合のものであり、Fig. 10の(a)と比較するとその違いがわかる。 $D.I=2.73$ の場合には、き裂の方向が交角の2等分線よりも少し上へ移動しているが、これは反射引張波の干渉点の位置にも関係しているものと思われる。すなわち、供試体の中央縦断面での応力波の幾何形状を考えると、 $D.I=2.73$ の場合、応力波の波頭が爆破孔底部の自由面に先に到達するとその場合の干渉点は、交角の2等分線よりも上側になる。このほか、

$D.I=1.02$ の場合、爆発ガスの投入を示すススの付着が孔底下部の破砕片に著しく、供試体底面付近まで達していることがわかった。

4. 結 論

本研究では、クッションングラスティングにおける爆破現象を把握する意図のもとに、PMMAブロックと電気雷管を用いて爆破実験を行ない、装薬のデカップリングが爆破孔近傍における応力波の挙動と破壊におよぼす効果について考察した。得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) 圧電ゲージによるPMMAブロック中の応力波の圧力履歴の測定によって、装薬周囲の空隙が増大すると孔底側の軸方向に伝ばする応力波については、初動の立ち上りが2段階状になり、第1波と第2波の時間間隔も長くなることがわかった。また、装薬のデカップリングは、爆破孔近傍における応力波の幾何形状を変える効果も有していることがわかった。これらは、供試体への爆力の作用が、デカップリングの増大によって変化することを意味するものである。
- (2) 高速度カメラを用いたPMMAブロック中の応力波の伝ばと破壊の進展の写真観察によって、応力波が自由面で反射したのちPMMAが不透明になること、爆発後約25 μ secたつと自由面の交角の2等分線上付近にコーナーフラクチャーの発生を示す不透明領域が出来ることなどがわかった。
- (3) 供試体の破砕片を回収して復元し、そのき裂パターンの観察から、 $D.I$ が大きくなると孔壁の損傷は小さくなり、破砕片の大きさも増し、応力波の干渉によって生じるき裂パターンも変化することがわかった。

謝 辞

本論文の投稿にあたっては、査読者より有益な御助言をいただいた。研究成果の一部は、昭和60年度工業火薬協会秋季大会において発表された。実験を進めるに際しては、熊本大学松尾日出男教授、月俣昇助手より御協力をいただいた。また、研究費用の一部は、昭和61年度文部省科学研究費より補助を受けた。実験に使用した電気雷管は、旭化成より提供していただいた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- 1) 工業火薬協会編、「発破ハンドブック」, P.265 (1976), 山海堂
- 2) 秋山 守, 工業火薬協会誌, 44, 5(1983)
- 3) T. C. Atchison, Quarterly of the Colorado School of Mines, 56, 163 (1961)
- 4) 伊藤一郎, 佐々宏一, 日本鉱業会誌, 84, 1059 (1968)

- 5) 山口梅太郎, 下村弥太郎, 工業火薬協会誌, 29, 459(1967)
- 6) 山口梅太郎, 下谷高瀬, 茂木源人, 工業火薬協会誌, 47, 287(1986)
- 7) 橋本清, 本間久郎, 日本鉱業会誌, 88, 11 (1972)
- 8) J. E. Field and A. Ladegaard-Pedersen, In. J. Rock Mech. Min. Sci. 8, 213 (1971)
- 9) S. Bhandari, Acta Astronautica, 6, 365 (1979)
- 10) 中川浩二, 坂本 仡, 山本願一郎, 土木学会論文報告集, 316, 77(1981)
- 11) V. Langefors and B. Kihlström, "The Modern Technique of Rock Blasting", John Wiley, (1963)
- 12) 田中一三, 工業火薬協会誌, 26, 361(1965)
- 13) 中村裕一, 松尾日出男, 工業火薬協会誌, 41, 106(1980)
- 14) H. D. Mallory and W. S. McEwan, J. Appl. Phy. 32, 421 (1961)
- 15) J. S. Rinehart, Quarterly of the Colorado School of Mines, 55-4 (1960)

Effects of the Decoupling on the Motion of Stress Waves and Fracturing near a Bore Hole

by Yuichi NAKAMURA*, Masayasu INOUE*, Yukitoshi NAKASHIMA**
Hiroyuki TANISHI*** and Yuji MARUTA****

The blasting experiments with a PMMA block (80×80×80mm) and a electric detonator were carried out to analyze the effects of decoupling on the motion of stress waves and fracturing near a bore hole. The stress wave propagation and the breakup process in the block were optically observed by means of a high speed framing camera and a xenon flash lamp. The pressure pulses of the stress waves were detected by the piezoelectric gauges. The fracture patterns formed in the block were determined by the collection of fragments of it.

High speed photographs showed that the optical clarity of the PMMA block near the free surfaces is lost by the tension of stress waves and that the corner fractures formed by interaction of the stress waves are developed near the apex of the free surface planes. The pressure measurements showed that an air cavity between the charge and the walls of the bore hole causes influence to the wave form of compression stress waves in the medium. This means that the decoupling causes alteration of the mechanism of transmission of explosive energy to the surrounding medium. The increased decoupling index produced coarser fragments and the different fracture patterns.

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

**Kumamoto University, Faculty of Engineering, Kumamoto 860

***Mitsubishi Jushi Co., Hiratsuka City, Kanagawa 254

****Mitsui High Tech Co., Kitakyushu City, Fukuoka 806)