微小発破の生体応用に関する研究

第6報 実験的破砕装置の衝撃波圧測定

京都府立医科大学泌尿器科学教室 近 藤 和 秀
(主任: 渡辺 洪教授)

STUDIES ON THE APPLICATION OF MICROEXPLOSION TO MEDICINE AND BIOLOGY

VI. The Pressure Profile of Blast Wave in Air by Detonation of a Lead Azide Charging Chamber

Kazuhide Kondo

Department of Urology, Kyoto Prefectural University of Medicine

(Director: Prof. H. Watanabe)

Using the experimental apparatus for microexplosion, the peak pressure of blast wave which indicated dynamic effect of lead azide explosives was measured in the four directions (0° , 45° , 90° , 135°) to the central axis of charging chamber and at various distances from its front.

The results were as follows:

- 1) The scaling law already established in general explosion was confirmed also in microexplosion.
- 2) The isobaric profile of the peak pressure showed that the blast wave propagated to the anterior direction of explosive charging chamber, mostly to the central axis of it.
- 3) The following experimental formulas relating to peak pressure and scaled distance in the four directions (0° , 45° , 90° , 135°) were obtained:

$$(i) \quad P_{0^\circ} = 2.5 \times 10^4 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{D} \right)^{2.8}$$

$$(ii) \quad P_{45^\circ} = 4.2 \times 10 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{D} \right)^{1.2}$$

$$(iii) \quad P_{90^\circ} = 1.2 \times 10 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{D} \right)^{1.1}$$

$$(iv) \quad P_{135^\circ} = 2.0 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{D} \right)^{0.6}$$

P: Pressure (kg/cm²)

W: Weight (g)

D: Distance (cm)

要旨: 微小発破に対する実験的破砕装置を用いて, アジ化鉛爆薬の動的作用をなす衝撃波のピーク圧の測定を, 爆薬室の中心軸方向から 0° , 45° , 90° , 135° の各角度で, 種々の距離においておこなった.

結果は次のごとくであった.

- 1) 一般の爆破現象において成り立つ相似法が, 微小発破においても成立した.
- 2) ピーク圧の等圧線分布図により, 衝撃波は, 爆薬室の中心軸方向に集束性を示した.
- 3) 各角度 (0° , 45° , 90° , 135°) におけるピーク圧と換算距離に関して成立した実験式は次のごとくであった.

$$(i) \text{ 角度 } 0^\circ \text{ のとき, } P_{0^\circ} = 2.5 \times 10^4 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{D} \right)^{2.8}$$

$$(ii) \text{ 角度 } 45^\circ \text{ のとき, } P_{45^\circ} = 4.2 \times 10 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{D} \right)^{1.2}$$

$$(iii) \text{ 角度 } 90^\circ \text{ のとき, } P_{90^\circ} = 1.2 \times 10 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{D} \right)^{1.1}$$

$$(iv) \text{ 角度 } 135^\circ \text{ のとき, } P_{135^\circ} = 2.0 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{D} \right)^{0.6}$$

P : Pressure (kg/cm²)

W : Weight (g)

D : Distance (cm)

結 言

医療に治療の目的で破壊を利用する場合に、その効果を最大限に生かす方法の1つに爆薬の爆破がある。私たちは微小発破を生体に応用することによつて尿路結石を破碎する計画をすすめているが、今回、爆破による結石破壊エネルギーの重要な要素である衝撃波の圧測定を行い、若干の知見を得たので報告する。

方 法

1) 実験用爆薬および爆薬室

爆薬¹⁾は、起爆薬として通常用いられているアジ化鉛 (Pb (N₃)₂) で、薬量 5mg, 10mg, 20mg のものを使用した。

爆薬室²⁾は、数回の改良後、図1のごとく管体をステンレス (長さ 20mm, 外径 3~5mm) とし、先端部に爆薬を装填した。そして後端部に点火用の白金線ブリッジをおき、これに延時薬を塗布した。そして防水用にエポキシ樹脂を注入し、ロックピンで固定し、通電用の脚線を管外へ導き出した。

図 1 爆薬室

2) 爆薬室固定装置²⁾ (図2)

爆薬室を長さ 30cm のステンレス管の先端内部に包埋固定し、この管腔より点火用脚線を導き出し電源に接続した。そして三脚型パイプホルダーにて把持固定した。

3) 圧測定装置および測定方法

圧測定器には、Kistler 社製 607A を用いた。これは、長さ 35.5mm, 径 9.5mm の水晶を素子とする圧電型ピッ

図 2 爆薬室固定装置

クアップで、測定圧力は最高 70,000psi (5,000kg/cm²)、分解能 0.5Psi、感度 0.15pCb/Psi である。これを図3のごとく径 2.5cm の鉄製アダプターにはめ込み、10×10×3cm の鉛ブロックに鑄込み、さらに中央に径 1cm の穴のあいている 10×10×6cm の鉛ブロックにボルトで固定した。

圧電信号の増幅のためのチャージアンプは、Kistler 社製 504D を用いた。この特性は入力抵抗 10⁸Ω、出力抵抗 100Ω であり、周波数域は、DC~100KHz である (図 4, A)。

これを、瞬時の電氣的現象の据置形の波形記憶装置であるデジタルメモリー・DM-703 を使用し、記憶させ

図3 圧測定器

図4 圧測定装置

A : チャージアンプ
B : デジタルメモリー
C : オシロスコープ

た。これは電氣的現象に変換した信号を、任意のタイミングでサンプルし、アナログ・デジタル (A/D) 変換器で8ビットのデジタル信号に変換し、8ビット×1,024ワードの記憶素子に記録し、用途に応じて D/A 変換器を通してオシロスコープで波形解析等を行うことができる。記憶容量8ビット×1,024ワード、書き込み速度50n SEC/WORD~1SEC/WORD、記憶素子バイポーラ

図5 圧測定装置の配置

RAM, 感度±0.05 V ~ ±50 V フルスケール, 周波数域 DC~5MHz である (図4, B)。

波形記録のためのオシロスコープは、岩崎通信機製の SS-4511で、内部トリガーによる単掃引として使用した。周波数帯域は、DC~50MHz である (図4, C)。

以上の測定装置を図5のごとく配置した。爆破測定は空気中で行い、壁からの反射の影響を避けるため広い実験室を使用した。

このようにして爆薬室の中心軸方向より 0°, 45°, 90°, 135° の各方向において種々の距離における衝撃波の圧測定をした。

結 果

1) 実験的破碎装置の性能

爆破数55発中、52発 (94.5%) が完爆し、不発が3発 (5.5%) みられた。完爆したもののうち測定できなかったものが14発 (25.4%) あり、残り38発 (69.1%) について測定可能な圧波形をオシロスコープに記録できた。

爆薬室固定装置については、爆破の衝撃による装置自体の動揺や、ステンレス管把持部の異常などはとくに認められなかった。

圧測定器を鑄込んだ鉛ブロックは、きれいな波形を得るために生沼ら³⁾により考案されたものであるが、ノイズの入らない衝撃波々形を得るのに有用であつた。

2) 衝撃波の圧測定

測定された圧波形を図6に示した。縦軸は圧力、横軸は時間である。衝撃波は爆薬が空中で爆破したとき三角波で近似されるが、図はこれを満足し典型的な衝撃波形と考えられた。波形の後方の細かい波は圧電素子の

図 6 測定された衝撃波の圧波形

固有振動である。

各角度ごとに圧測定結果を薬量，距離，換算距離，圧の順に表 1 に示した。換算距離とは距離を薬量の 3 乗根で割ったもので，爆破現象における圧と薬量の関係を論ずるときに使用される。すなわち，一般の爆破現象においては，ピーク圧と換算距離はよく相関し，一定の比

表 1 圧測定結果

Direction of the straight

Weight of explosives ($\times 10^{-3}$ g)	Distance (cm)	Scaled distance ($\text{cm/g}^{\frac{1}{3}}$)	Peak pressure (kg/cm^2)
20	11	40.6	1.92
20	9	33.2	1.12
20	7	25.8	2.00
20	5	18.5	25.6
20	5	18.5	88.0
20	4	14.8	22.4
20	3	11.1	92.0
20	2	7.4	224
10	12	55.8	0.68
10	5	23.3	6.00
10	5	23.3	4.40
10	3	14.0	44.0
10	1.5	7.0	128
10	1	4.7	300
5	10	58.5	0.26
5	5	29.2	1.44
5	2	11.7	29.0
5	1	5.9	192

Direction of 90 degrees

Weight of explosives ($\times 10^{-3}$ g)	Distance (cm)	Scaled distance ($\text{cm/g}^{\frac{1}{3}}$)	Peak pressure (kg/cm^2)
20	12.4	45.8	0.16
20	7.2	26.6	0.45
20	3.9	14.4	0.96
20	1.2	4.4	3.60
20	0.7	2.6	2.90
10	15	69.8	0.18
10	9.5	44.2	0.33
10	1.6	7.4	2.56
10	0.5	2.3	3.44
5	19.8	116	0.08
5	6.5	380	0.29
5	0.9	5.3	1.98
5	0.4	2.3	3.60

Direction of 45 degrees

Weight of explosives ($\times 10^{-3}$ g)	Distance (cm)	Scaled distance ($\text{cm/g}^{\frac{1}{3}}$)	Peak pressure (kg/cm^2)
20	20	74.9	0.19
10	10	46.5	0.48
10	5	23.3	1.16
10	3	14.0	1.84
10	1	4.7	5.80

Direction of 135 degrees

Weight of explosives ($\times 10^{-3}$ g)	Distance (cm)	Scaled distance ($\text{cm/g}^{\frac{1}{3}}$)	Peak pressure (kg/cm^2)
20	11	41.7	0.16
20	6	21.8	0.24

率で拡大，縮小させても現象が全く平行的に扱えるという。これを相似法が成立するという。

表 1 の結果を両対数グラフ上に，縦軸に圧を，横軸に換算距離をとり，図 7 に示した。相似法を満たすには，このグラフ上で各点が一直線上にあることが必要であるが，図 8 は，これを満した。

換算距離と衝撃波圧の間には，つぎのごとき実験式が成立した。

- 1) 角度 0° の場合， $P_{0^\circ} = 2.5 \times 10^4 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{D} \right)^{2.8}$
- 2) 角度 45° の場合， $P_{45^\circ} = 4.2 \times 10 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{D} \right)^{1.2}$
- 3) 角度 90° の場合， $P_{90^\circ} = 1.2 \times 10 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{D} \right)^{1.1}$

図7 衝撃波圧直線

4) 角度135°の場合, $P_{135^\circ} = 2.0 \left(\frac{8\sqrt{W}}{D} \right)^{0.6}$

P : Pressure (kg/cm²)

W : Weight (g)

D : Distance (cm)

考 察

火薬類は、燃焼によって推進作用などを得る火薬と、爆轟によって破壊使用などを得る爆薬とに分類されるが、実験に使用されたアジ化鉛は爆薬中でも最も敏感な起爆薬に属する。そして、衝撃波は爆薬の爆轟という現象の中で発生する。

爆薬の爆轟によって生ずる作用には、衝撃波のエネルギーによる破壊作用である動的作用と、生成ガスのエネルギーによる推進作用（破壊されたものを移動させる作用）である静的作用の2つがある⁴⁾。簡単に述べるなら、衝撃波により物質にひび割れを起こしバラバラに壊れ、生成ガスのエネルギーにより破壊された物体を周囲に飛ばすのである。図8は高速度写真でとらえた爆破現象の実況であるが、Aは衝撃波の動的作用により尿路

図8 尿路結石爆破現象の高速度写真

A. 衝撃波により結石にひび割れが、おこった直後（爆薬の動的作用）

B. 生成ガスにより吹き飛ばされる結石（爆薬の静的作用）

結石にひび割れが起こった直後であり、Bは結石が静的作用により粉々に吹き飛ばされた一コマである。

そこで今回、結石破碎の重要な要素である衝撃波の圧測定を行い、そして、その圧の大きさや性質につき検討した。

測定上問題のあつた点をあげると、このような微小発破のデータは過去になく、まったく未経験の分野であつたために、当初、圧を設定する基準を決められず、測定器の適正測定帯を探し出すのに大きな苦労があつた。また器械の設置の悪さや圧電素子の接触不良などの初歩的な誤りも、実験を安定化させるまでに検討を要した点であつた。

前回の報告²⁾でも述べたごとく、これまでが着火を確実にするために、点火玉にトリシネートを使用していた。しかし、この場合、同じ薬量のアジ化鉛を爆破させても測定圧がかなり異つた。これは点火玉のトリシネー

図9 典型的衝撃波形

図10 衝撃波の等圧線分布

トからも衝撃波を発生し、それが加わつたためと考えられた。このことから、今回よりエネルギーのほとんどが熱になつてしまい、衝撃波を発生しない延時薬を白金ブリッジに塗布するよう考案し、安定して衝撃波が得られるようになった。

衝撃波とは、媒体中の固有の音速よりも速く伝わる（通常、毎秒数千m）波のことで、音波のように一定の

周波数で振動する波ではなく、くり返しのない単一の疎密波である。そして、図9のごとく、波の最初の部分の圧力変化は極めて急峻である。この急峻な圧力変化の最大値をピーク圧と呼び、衝撃波の強さを示す。

一般に爆薬を空中で爆破させたとき、衝撃波は球面状に広がり距離とともに急速に減少する。私たちの爆薬室で爆破されたときは、図7のごとく、爆薬の中心軸方向からの角度が大きくなるにつれてピーク圧は減少した。このことから、衝撃波の方向性について調べるために、表1の圧測定結果から5mgのアジ化鉛爆薬室に装填した場合のピーク圧の等圧線分布を、図10のごとく描いてみた。ピーク圧は爆薬室の中心軸方向に強い集束性をみせ、中心軸方向より約25°離れるだけでピーク圧は1/50に減少した。

私たちの尿路結石破碎計画では、爆薬の制御法が最も大きな問題である。今回の実験で、爆薬の動的作用である衝撃波の性質につき検討し、爆薬室における爆薬の相当重量に対するピーク圧の強さ、そして衝撃波の集束性などかなりのことが判明した。

今後本法の実用化に際して、生体におよぼす副作用を最小限に抑えるには、この衝撃波による動的作用を最大に発揮させ、静的作用を極力減少させることが要求される。そのためには、爆薬の改良、個々の結石に合致した爆薬量の決定、衝撃波ビームの集束法などをさらに研究する必要があると思われる。今回の衝撃波圧の測定成績は、それらの研究のために不可欠の基礎的資料を提供したものだといえよう。

結 論

第5報で報告した実験的破碎装置を用いて、爆薬の動的作用、すなわち尿路結石にひび割れをおこす作用をなす衝撃波の圧の強さ・性質について検討し、つぎの結果を得た。

1) 微小発破においても一般の発破と同様に相似法が成立した。

2) 爆薬室の中心軸方向からの各角度における等圧線分布図を作成した。その結果、衝撃波圧は爆薬室の中心軸方向に強い集束性をみせた。

3) 爆薬と圧測定器の間の距離を爆薬量の3乗根で除した、いわゆる換算距離と、衝撃波圧の間には、つぎのごとき実験式が成立した。

$$(i) \text{ 角度 } 0^\circ \text{ の場合, } P_0 = 2.5 \times 10^4 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{D} \right)^{2.8}$$

$$(ii) \text{ 角度 } 45^\circ \text{ の場合, } P_{45} = 4.2 \times 10^4 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{D} \right)^{1.2}$$

(iii) 角度 90° の場合, $P_{90^\circ} = 1.2 \times 10 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{D} \right)^{1.1}$

(iv) 角度 135° の場合, $P_{135^\circ} = 2 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{D} \right)^{0.6}$

P : Pressure (kg/cm²)

W : Weight (g)

D : Distance (cm)

今後、水中および緩衝液中において実験を行い、実用化に対する爆薬の動的作用の基礎的研究をすすめる予定である。

稿を終るに臨み、ご指導ご校閲いただいた京都府立医科大学泌尿器科学教室渡辺決教授に深謝する。また、今回の実験を直接ご指導いただいた渡辺康介助手、ならびに科学技術研究所生沼仙三技官、椎野和夫課長、田中一三技官に多大な謝意を表する。

(本研究は文部省科学研究費 8 件および科学技術庁特

別研究促進調整費によって行われた。本論文の要旨は第 19 回日本 ME 学会大会において発表した。)

文 献

- 1) 渡辺 決, 生沼仙三: 微小発破の生体応用に関する研究. 第 1 報, 実験用爆薬の試作. 日泌尿会誌, 68, 243—248, 1977.
- 2) 渡辺康介, 渡辺 決, 高橋 徹, 秋山喜久夫, 金子 宏, 近藤和秀, 内田 睦, 生沼仙三, 椎野和夫, 田中一三: 微小発破の生体応用に関する研究. 第 5 報, 実験的破砕装置の開発および空中での爆破によりうける成犬膀胱片の障害度. 日泌尿会誌, 71, 15—19, 1980.
- 3) 生沼仙三, 椎野和夫, 田中一三: アジ化鉛の爆風圧. 工業火薬協会誌, 40, 25, 1979.
- 4) 須藤秀治, 大久保正八郎, 田中一三: 火薬と発破. 第 7 版, 12, オーム社, 東京, 1978.

(1980 年 9 月 10 日受付)