

## 水中発破用爆薬の衝撃波感度試験

(ギャップテストによる水中発破用爆薬の起爆限界圧力の測定)

藤原修三\*・飯田 稔\*・日下部正夫\*・水島容二郎\*

海底発破用の各種爆薬について、その衝撃波感度を小型ギャップテストにより測定した。小型ギャップテストは当所で開発したもので、衝撃波発生源として20gのテトリルペレット( $\phi=20\text{mm}$ ,  $\rho_0=1.55\text{g/cc}$ )を使用し、衝撃波媒体には、plexiglass板を用いる。各種爆薬の爆発限界ギャップ長(50% point)を実測し、これより圧力校正曲線から得た各種爆薬の限界起爆衝撃波圧力はSX-1は $31\pm 5\text{kbar}$ , CX-1,  $8\pm 1\text{kbar}$ , CX-2,  $28.5\pm 5\text{kbar}$ , GX系統はすべて $2.5\text{kbar}$ 以下であった。GX系統の爆薬はニトログリセリンゲルを含むゆえ、その低速爆轟のため、極めて衝撃波感度が鋭敏となるのであろう。

### 1. 緒 言

火薬類は熱力学的に不安定状態にある。このため火薬類に外部より、衝撃、摩擦、火花等の刺激を与え、かつ、その刺激が一定強度を越えた場合、火薬類は分解着火燃焼を始める。したがって火薬類が外部刺激に感応して着火燃焼を開始するのに必要な最小外部刺激量をもって、刺激への応答性、つまり着火感度が決められる。起爆薬類を除いて、一般に着火燃焼を開始した火薬類が、たとえば、強度の十分な容器内へ密閉して置かれた場合、燃焼の進行とともに生成ガスのため容器内の圧力が増大する。内部圧力の増加は燃焼速度を加速し、このため内部圧力が著しく増大して、遂には、火薬類の未燃焼部分に衝撃波が生成されるようになる。反応の様子は一変し、衝撃波により維持される超高速化学反応、いわゆる爆轟へと転移する。爆轟は衝撃波を伴い、かつ衝撃波により維持される発熱高速化学反応であるゆえ、何らかの方法で一定強度以上の衝撃波(圧縮波)を火薬類に与えると直ちに爆轟を開始する可能性がある。爆轟開始に必要な最低衝撃波圧力をCritical shock initiation pressure(以後 $P_i$ と記す。)と呼び、これは爆薬の種類、物理的条件により決まる特有なものであることが知られている<sup>1),2),3)</sup>。欧米で盛んに行なわれている爆薬の衝撃波感度測定方法の一にギャップテスト(gap test)と呼ばれる方法があり<sup>4)</sup>、当所において新しく開発したギャップテ

スト方法により、各種爆薬の衝撃波感度、つまり、 $P_i$ の間接測定を行なった。 $P_i$ の測定は爆薬の強い衝撃に対する安全性を推定できるだけでなく、水中殉爆性等をも知ることができ、非常に有用である。

### 2. ギャップテストの簡略説明

図1にギャップテストの簡単な概略図を示す。

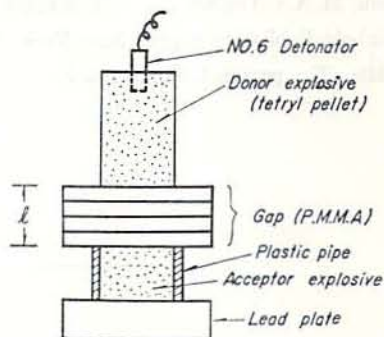
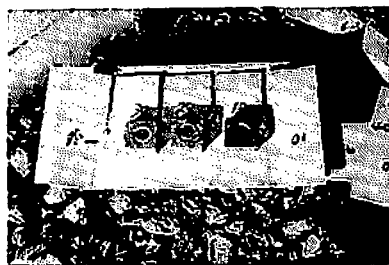
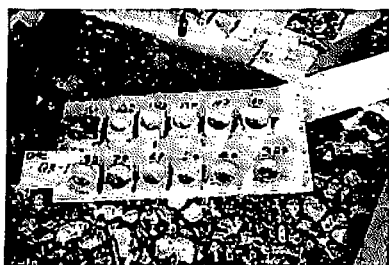
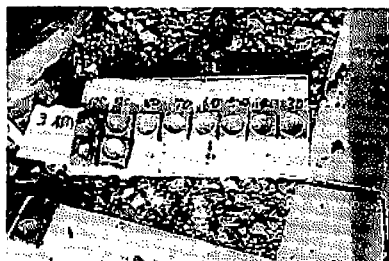
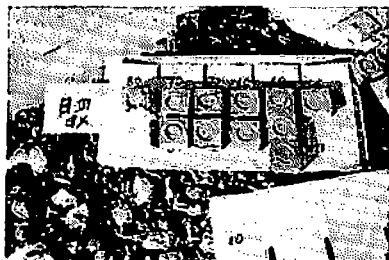
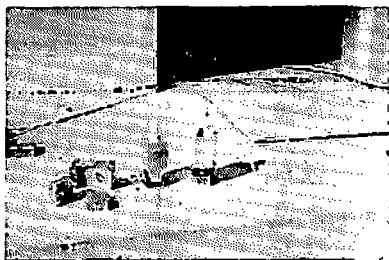


図1 ギャップテストの略図

超高压衝撃波発生源として donor explosive の爆発を利用する。donor explosive の爆轟は衝撃波媒体(gap)に衝撃波を誘起し、この衝撃波は図1の下方向へ距離とともに減衰しながら進行し、試料爆薬(acceptor explosive)へと入射して行く。ギャップ長:  $l$  が短くて、試料爆薬へ入射する衝撃波が十分強いと、試料爆薬は感応し爆轟するが、ギャップ長が長くて、試料爆薬へ入射する衝撃波が弱いと爆轟を呈さない。試料爆薬の爆、不爆の判定方法は、種々の方法が考えら

東京工業試験所第七部

\* 昭和48年6月15日受理



れるが、図1に示すような、鉛板を使用して、これに刻まれた爆痕を見るのが最も簡便な方法であろう。

ギャップ長を変化させて、試料爆薬が爆轟を呈さなくなる限界ギャップ長（以後  $lig$  と記す。）を繰り返しの実験により求め、 $lig$  の大小を基準にして、爆薬の衝撃波感度を定量化するのがギャップテストである。一定の donor explosive と同材質のギャップを使用する場合、ギャップ長と試料爆薬へ入射する衝撃波圧力関係が判っていると、試料爆薬の  $lig$  を求めることにより、直ちに、 $P_i$  を知ることができる<sup>9)</sup>。本実験では donor explosive としてテトリルペレット、ギャップとして P.M.M.A 板 (polymethyl methacrylate, 英名 plexiglass に相当) を重ね合わせたものを使用した小型ギャップテスト方法により、各種爆薬の  $P_i$  を測定した。

### 3. 衝撃波圧力校正曲線

図2は donor explosive として、20g のテトリルペレット (径 20 mm, 密度:  $1.55 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ , 94/6: テトリル/ステアリン酸混合物) ギャップとして P.M.M.A 板を用いた場合の、ギャップ長 ( $l$ ) と試料 (acceptor) 入射衝撃波圧力 ( $P$ ) の関係を示す

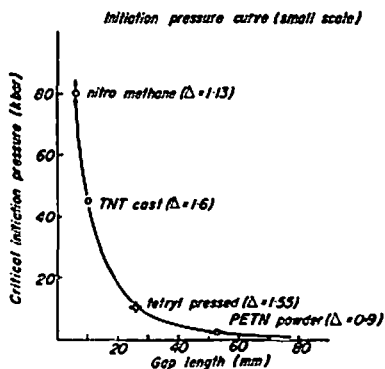


図2 小型ギャップテストの圧力校正曲線

$l$ - $P$  校正曲線である。これはニトロメタン、鋳造 TNT、圧填テトリル、粉状 PETN の一次元衝撃波圧縮により求められた  $P_i$ <sup>(1), (2), (3), (7), (8), (9), (10)</sup> と、本法、つまり、小型ギャップテストによって求めた前記四種の爆薬の  $lig$  より得たものであり、文献<sup>9)</sup> の大型ギャップテスト法の  $l$ - $P$  校正曲線より、衝撃波圧力の精度は低い。

### 4. 実験方法および実験結果

donor explosive はテトリル/ステアリン酸 = 94/6

混合物, 10g を圧填して得れるペレットを用いた。ペレットは中心部に径 6.5mm, 深さ 10mm の 6号雷管さし込み用の孔を設けたものと, 孔なしの二種類あり, どちらも外径 20mm である。有孔のものと孔なしの二つをセロテープで接着させたものを donor (薬量 20g) とした。ペレットの密度は  $1.535 \pm 0.02 \text{g/cm}^3$  (10個の平均) で, 図 2 の圧力校正曲線を求めるのに用いたものより 1% 強, 小さい。また, イオンギャップ法による爆速測定の結果, ペレットは  $7.26 \pm 0.05 \text{km/sec}$  (4回の平均値) の爆速を呈した。

ギャップには P. M. M. A 板を使用した。50×50mm の正方形で, 厚さが 5mm, 2mm, 0.5mm の三種類の P. M. M. A 板を適当に重ね合わせてほぼ任意のギャップ長を作り, 爆発前ノギスでギャップ長を測定しておく。acceptor 容器は外径 26mm, 内径 20mm, 長さ 20mm の硬質塩ビ管を使用し, これに, 各種爆薬を一杯に入れたものを acceptor とする。

acceptor の爆, 不爆は, 50×50×20 mm の鉛板を acceptor 下部に置くことにより得られる鉛板上の爆痕をもとに判定した。acceptor が不完爆の場合, 鉛板痕跡からの爆不爆の判定には困難が伴う。このため, acceptor 塩ビ容器に完全不活性体で, かつ衝撃波抵抗が爆薬に近似していると考えられる油粘土をつめ, これを Sample acceptor とし, ギャップ長を 10~15mm の範囲で変えて, donor を爆発させて得れる鉛板痕跡を, 完全不爆の代表例として参考にした。

試料爆薬は, SX, H-6, ベントライト, GX-1, GX-2, GX-3, 3号桐ダイナマイトの 7種であり実験結果を表 1 ((I)~(VII)) に示す。表 1 の判定は, 鉛板痕跡を基準にしたものであり, 完爆: ○, 完全不爆 (残薬が認められる): ×, 爆発はしているが爆痕の小さいものを△とした。

表 1 各種爆薬のギャップテスト結果  
(I) SX

ギャップ長: $l$ (mm)	判 定
9.98	○
12.30	○
12.73	○
12.88	○
13.45	○△
14.38	△
14.80	×
19.88	×
29.95	×

限界ギャップ長:  $lig = 13.9 \pm 0.5 \text{mm}$

(注) ギャップ長は 2 回測定の平均値である。

(II) H-6 (CX-2)

ギャップ長: $l$ (mm)	判 定
10.60	○
12.37	○
12.73	○
14.03	○△
14.88	×
15.20	×
20.30	×
30.45	×

限界ギャップ長:  $lig = 14.5 \pm 0.5 \text{mm}$

(III) ベントライト (CX-1)

ギャップ長: $l$ (mm)	判 定
19.25	○
25.40	○
27.10	○△
27.15	△
27.53	△
29.40	×△
30.65	×
40.01	×

限界ギャップ長:  $lig = 28.5 \pm 0.5 \text{mm}$

(IV) GX-1

ギャップ長: $l$ (mm)	判 定
60.00	○
60.70	○
89.93	○
99.40	○
100.30	○
122.70	×
123.63	×

限界ギャップ長:  $lig = 110 \pm 10 \text{mm}$

(V) GX-2

ギャップ長: $l$ (mm)	判 定
80.55	○
91.45	○
99.70	○
123.10	○
131.00	○
140.50	○△
141.90	○
160.05	×
162.95	×

限界ギャップ長:  $lig = 150 \pm 10 \text{mm}$

## (VI) GX-3

ギャップ長: $l$ (mm)	判 定
55.33	○
59.10	×
60.03	○
60.10	△
64.57	○
65.60	○
69.45	○
70.45	×
74.90	×
75.70	×
80.80	×

限界ギャップ長:  $lig = 65 \pm 10$ mm

## (VII) 3号桐ダイナマイト

ギャップ長: $l$ (mm)	判 定
61.05	○
70.30	○
81.00	○
91.00	○
91.45	○
100.50	×
101.50	×

限界ギャップ長:  $lig = 95 \pm 10$ mm

## 5. 考 察

ギャップテストは一般に再現性が良好であるが、表1のVI, GX-3について、ギャップ長が短いところで、結果がばらついている。この理由は、donor、もしくは acceptor の P. M. M. A. 板への接着のしかた不十分であったものと思われる。

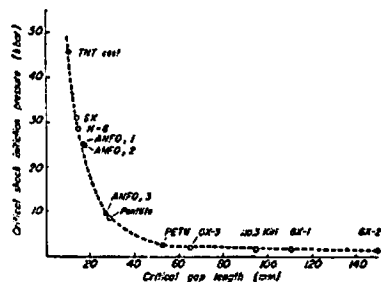
表1の実験結果をもとに、各種爆薬の衝撃波による起爆限界ギャップ長を SX:  $lig = 13.9 \pm 0.5$  mm, H-6:  $lig = 14.5 \pm 0.5$  mm, ペントライト:  $lig = 28.5 \pm 0.5$  mm, GX-1:  $lig = 110 \pm 10$  mm, GX-2:  $lig = 150 \pm 10$  mm, GX-3:  $lig = 65 \pm 10$  mm, 3号桐ダイナマイト:  $lig = 95 \pm 10$  mm と決定した。ギャップ長が50 mm 以下の場合、使用した最小肉厚の P. M. M. A. 板が0.5 mm 厚であるゆえ、 $lig$  の誤差範囲を  $\pm 0.5$  mm とした。60 mm 以上のギャップ長の場合、10 mm 程度のギャップ長の変化は衝撃波圧力をほとんど変化させないこと<sup>3)</sup>、また圧力校正曲線の信頼度の二点を考慮して、 $lig$  の誤差範囲を  $\pm 10$  mm とした。各種爆薬の  $lig$  を図2の校正曲線から起爆限界圧力 ( $P_i$ ) へと転換した値を表2に示す。 $P_i$  の決定は図2の校正曲線の信頼性を考慮して、誤差範囲 10~20% の広

表2 各種爆薬の起爆限界圧力

爆 薬	限界ギャップ長	起爆限界圧力
SX	$13.9 \pm 0.5$ mm	$31 \pm 5$ kbar
H-6	$14.5 \pm 0.5$	$28.5 \pm 5$
ペントライト	$28.5 \pm 0.5$	$8 \pm 1$
GX-1	$110 \pm 10$	2.5 以下
GX-2	$150 \pm 10$	//
GX-3	$65 \pm 10$	//
3号桐ダイナマイト	$95 \pm 10$	//

範囲にとつた。また、PETN (密度  $0.9 \text{ g/cm}^3$ ) よりも低い起爆圧力範囲、つまり 2.5 kbar 以下は校正曲線の圧力についての信頼性が極めて低くなるゆえ、すべて、 $P_i$  を 2.5 kbar 以下としたが、3号桐ダイナマイト、GX-1、GX-2、GX-3 に関して、各々の限界ギャップ長 ( $lig$ ) には有意な差が明確に認められる。実験者らの経験によれば、 $P_i < 20$  kbar の爆薬は概して6号雷管での起爆が可能で (Cap sensitive)  $P_i > 20$  kbar の爆薬の起爆にはブースターが必要である。

次に、3号桐ダイナマイト、GX 類が衝撃波に対して極めて鋭敏な結果が出たのは、これは前記爆薬がニトログリセリンを含むことに起因している。すなわち、ニトログリセリンのような液体硝酸エステル類はゲル状であっても極めて低速爆轟を起こしやすいからであろう。Watson ら<sup>11)</sup>によれば、これら液体硝酸エステル類が低速爆轟を呈すには、特に、内部に気泡が含まれる時、生じやすく  $1 \sim 2$  kbar 程度の衝撃波 (圧縮波) 圧力で十分であることを報じている。本実験において、GX 類、3号桐ダイナマイトの鉛板爆痕のクレーターの深さは、H-6、SX、ペントライト等と比較して、極めて浅く、以上のことから GX、3号桐ダイナマイトに関しては、これらの低速爆轟感度が測定されたものである。最後に、図3に、本実験結果と、小型ギャップテストにより求めた、他の爆薬類の限界



ANFO, 1 94/6 硝安/軽油, 工業用硝安  
 ANFO, 2 94/6 // , 活性剤処理硝安  
 ANFO, 3 94/6 // , L. D. 硝安

図3 各種爆薬の衝撃波起爆限界圧力

ギャップ長，起爆限界圧力を掲げて本報告を終る。

なお，この実験は本四橋公団から産業火薬会に委託したものの一部であり，報告書が公団に提出されている（但し非公開）今般公団の了解を得てここに掲載するものである。実験に御援助をいただいた，日本カーリット，筒井，前田，日本工機，亀ヶ井，矢野各氏に謝意を表す。

#### 文 献

- 1) A. W. Campbell et al., *Phys. of Fluids* 4, 499, 1961
- 2) A. W. Campbell et al., *ibid.* 4, 571, 1961
- 3) P. A. Persson et al., in *Detonics of High Explosive* p. 81~124 1970, Academic Press. New York
- 4) A. Mäcek *Chem. Rev.* 62, 2421, 1961
- 5) 飯田，藤原，日下部，*工火誌* 33, 291, 1972
- 6) G. E. Seay, et al., *J. Appl. Phys.* 32, 1092, 1961
- 7) D. Stirpe *ibid.*, 41, 3884, 1970
- 8) I. E. Lindstorm, *ibid.* 41, 337, 1970
- 9) D. Price 5th Symposium on Detonation p. 207, Office of Naval Research Department of the Navy. U. S. A. 1970
- 10) I. M. Voskovoinikov, et al, *Combustion, Explosion & Shock Waves.* 4, 26, 1968
- 11) R. W. Watson, et al 4th Symposium on Detonation p. 117, p. 412, Office of Naval Research Department of the Navy. U. S. A. 4, 26, 1965

---

### Gap Test of Explosives for underwater blasting

by S. Fujiwara\*, M. Iida\*, M. Kusakabe\* & Y. Mizushima\*

Shock sensitivity of some explosives for underwater blasting was measured by a small scale gap test in which plexiglass plates were used as a gap material and tetryl pellets as a donor explosive ( $\rho_0=1.55\text{ g/cc}$ ). Shock initiation pressure obtained from the 50% initiation gap length was  $31 \pm 5\text{ kbar}$  for SX-1,  $28.5 \pm 5\text{ kbar}$  for CX-2,  $8 \pm 1$  for CX-1, and less than  $2.5\text{ kbar}$  for GX explosives. The GX explosives which contain NG-gell have high shock sensitivity owing to their low velocity detonation (L.V.D.).

(\*The National Chemical Laboratory for Industry. Tokyo.

Hiratuka, Kanagawa, Japan.)