

Mk III 弾動臼砲の性能と応用 (VI)

— Mk III 弾動臼砲の特性 —

松永猛裕*, 村永浩太郎**, 藤持 勇***,
安部隆之**, 田村昌三*, 吉田忠雄*

Mk III 弾動臼砲の構造、振動特性および試料量・投射物が弾動臼砲値に与える影響について調べた。その結果、構造的に弱い部分を取替可能にした Mk III F を開発、耐急性が向上した。また、Mk III 弾動臼砲は実験時に減衰振動をし、記録用ペンは測定値に殆ど影響しないこと、試料量は完爆する物質では振れ幅と直線関係があること、投射物の質量が大きくなると振れ幅も大きくなり完爆性が高まることなどがあきらかにされた。

1. はじめに

筆者らは英国 RARDE (Royal Armament and Research Development Establishment) で Turner によって開発された小型弾動臼砲 Mk III D を導入した。そして種々の爆発性物質への適用、操作の標準化及び爆発物の希釈による安全化への応用を検討してきた²⁾。以上の研究の過程で Mk III 弾動臼砲の改良を行い、又いくつかの特性についても知見が蓄積されてきたので、それらについて報告する。

2. Mk III 弾動臼砲の構造とその改良

Mk III D は重量約 110kg の弾動臼砲で吊り具等を簡略化した、従来型臼砲に比べて小型、低価格の弾動臼砲である。構造及び寸法は第 1 報¹⁾に示した。この臼砲を設置後約 400 回の実験を行ったところで Fig. 1 に示すような損傷が起った。外観的損傷は A の部分に亀裂が入り、割れてしまったことである。この損傷の原因に対する最初の解釈は爆発室での試料の爆ごうに

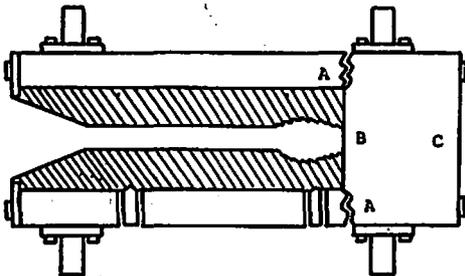


Fig. 1 Structural damage of the Mk III D Ballistic Mortar as a result of continued firings

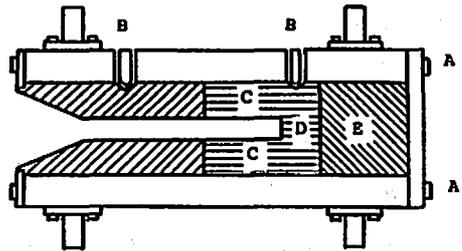


Fig. 2 Cross section of the Mk III E Ballistic Mortar

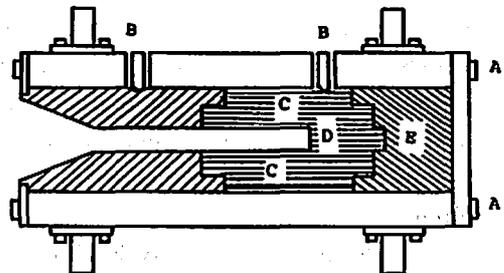


Fig. 3 Cross section of the Mk III F Ballistic Mortar

昭和59年 9月 5日受理

*東京大学工学部反応化学科
〒113 東京都文京区本郷 7-3-1
TEL 03-812-2111 (内7293)

**日本カーリット㈱保土ヶ谷工場 研究課
〒240 横浜市保土ヶ谷区仏向町 1625
TEL 045-331-3041

***藤持科学器械製作所㈱
〒110 台東区池之端 2-3-4
TEL 03-821-8176

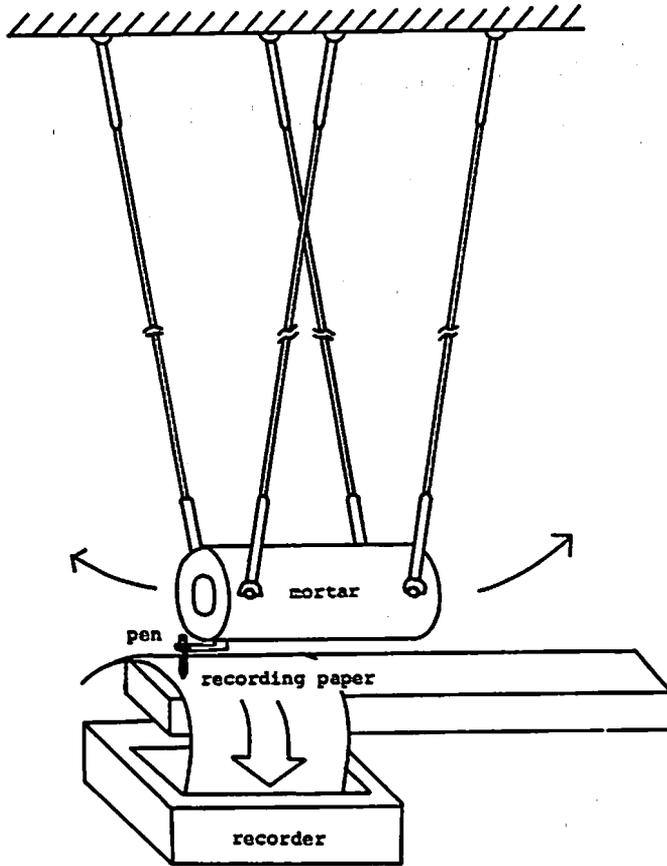


Fig. 4 Experimental setup for measurement of swing of the Mk III Ballistic Mortar

よってB部分に投射された衝撃波がC面で反射されて引張り波となり戻ってきて、構造的に最も弱いA部分で破壊を起したというものである。

最初の改良で作られたのがMk III E (Fig. 2)である。これはFig. 1におけるA部分のような構造的に弱い部分をなくし、また爆発室部分だけが損傷を受け易いのでその部分だけを取替可能としたものである。

ところが、Mk III Eもいくつかの欠点を持つことが分かった。まず、A部分のボルトが抜けなくなった。これは試料の爆発によってD部分を圧迫してA部分のボルトを動かなくしたことが分かった。B部分のボルトも抜けなくなった。これもA部分のボルトが抜けなくなったのと同じD部分の膨張によるものであろう。

第三の欠点は爆発室のブロックが抜けなくなってしまったことである。これは、C部分が爆発によって膨張したためであることが分かった。

これらの点を改良したのがMk III F (Fig. 3)である³⁾。C部分に空間を設けることにより膨張でDブロックが抜けなくなることを防いだ。A部分のボルトを補強す

ることによりボルトへの応力の集中を防いだ。

3. Mk III 弾動臼砲の振動特性

3.1 実験

Mk III 弾動臼砲の記録用ペンには、爆発時の衝撃に耐え、且つ記録用紙上を滑るだけで記録できるようなものとして真ちゆう棒に鉛筆の芯を付けたものを用いている。しかし、これを用いて実験した場合、爆発後10数回の振動で止まってしまうため、この記録用ペンにかなりの摩擦抵抗があると考えられた。記録用ペンがない場合、臼砲の振動は単振子の振動と見ることができ、速度に比例する抵抗を受ける減衰振動をすると予想される。しかし、記録用ペンがある場合、臼砲は様々な抵抗を受けるため単純にその運動方程式を解くことはできない。そこで記録用ペンを付けた場合と付けない場合の臼砲の振動状況を調べ、その振動を時間 t の関数で近似することを考える。すると、この関数を時間で微分することにより摩擦力の程度を知ることができ、また、ある初速を与えられたとき臼砲の振れ幅が記録用ペンの摩擦によりどのように変わるかを調

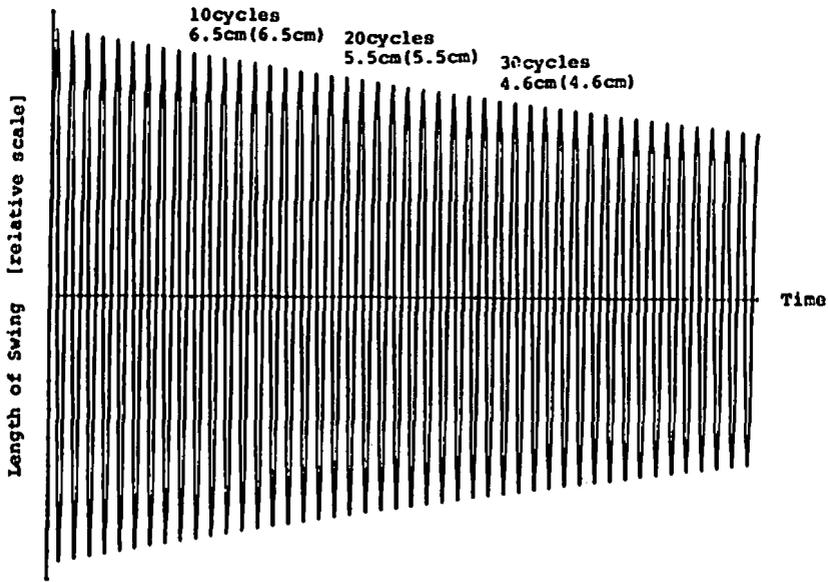


Fig. 5 Vibration curve of the Mk III without a recording pen () : Calculated Value

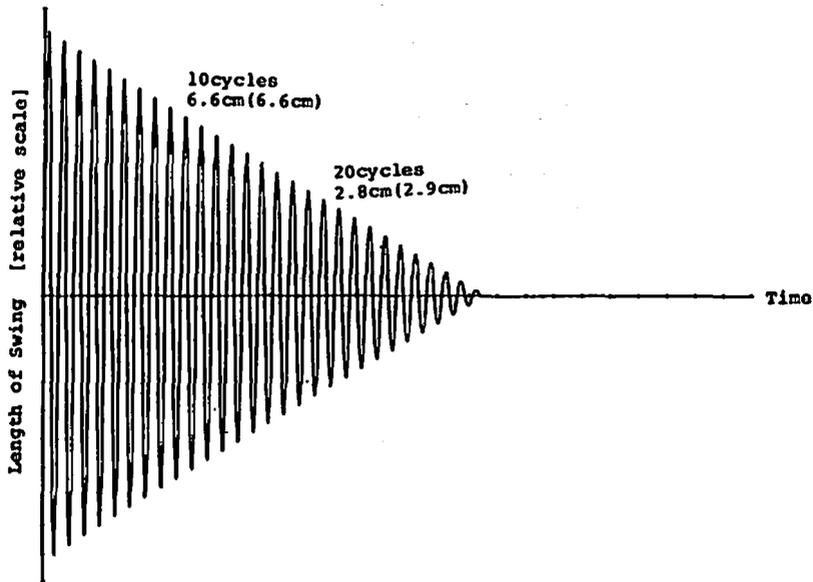


Fig. 6 Vibration curve of the Mk III with a recording pen () : Calculated Value

ることができる。

実験は Fig. 4 に示すような装置で行った。まず記録用紙を付け白砲を手で揺らし、レコーダーで記録用紙を一定速度で動かして振動の時間変化を記録した。次にペンを取りはずし、記録台の上に定規を置き、各振動毎の振れ幅を目測した。その時、振動周期も測定した。

3.2 Mk III 弾動白砲の振動曲線

Mk III 弾動白砲の振動曲線を解析した結果、振動周

期はペンの有無にかかわらず一定で 3.24 であった。また、ペンなしの場合には速度に比例する抵抗を受ける一般の減衰振動⁹⁾の関数(1)式に従うことが分かった。

$$X(t) = a \cdot \exp(-kt) \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{T_0}\right) \quad (1)$$

t : 時間 a : 任意定数 T_0 : 振動周期

そこで、ペンなしの場合の実験で得られた曲線を近似すると次式のようなになる。

$$X(t) = a \cdot \exp(-0.00323t) \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{3.24}\right) \quad (2)$$

(2)式では位相を実際の場合 ($t=0$ で $x(0)=0$) に合わせるため、 \sin 関数を用いている。この式をプロットしたのが Fig. 5 である。括弧内に実測値を記してあるが近似式はこの実測値と良く一致している。

ペンを付けた場合の振動変化は(1)式における k の値を変えるだけでは、うまく近似できない。そこで(2)式中の減衰に影響を与える項 $\exp(-0.0323t)$ は MkIII 弾動臼砲本体が持つ抵抗であり、記録用ペンの有無によらないと考える。そして、実際の振動曲線に合うように一次的に減衰する補正項を加えることにより、ペンありの場合の近似式を作った。

$$X(t) = a \cdot [\exp(-0.00323t) - 0.0079t] \sin\left(\frac{2\pi t}{3.24}\right) \quad (3)$$

この式をプロットしたのが Fig. 6 である。ペンなしの場合の曲線と形が異なるがペンありの場合の振動曲線を良く近似している。

3.3 記録用ペンが振れ幅に与える影響

爆発による速度変化が瞬時に起こり、臼砲は最下点で初速度 V_0 を与えられるとすると初速度 V_0 は $(dx/dt)_{t=0}$ で与えられる。この仮定は必ずしも実際には成り立たないことがここでは仮想的初速度を想定する。(2)式及び(3)式においてこの値は、

$$V_0 = \frac{2\pi a}{3.24} \quad (4)$$

となり、ペンの有無によらない。この関係式を用い、任意定数 a を消去すると次のようになる。

ペンなしの場合

$$X(t) = \frac{3.24 V_0}{2\pi} \cdot \exp(-0.00323t) \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{3.24}\right) \quad (5)$$

ペンありの場合

$$X(t) = \frac{3.24 V_0}{2\pi} \cdot [\exp(-0.00323t) - 0.0079t] \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{3.24}\right) \quad (6)$$

弾動臼砲試験において測定される振れ幅 d は関数 $x(t)$ の最大値であり、ペンありの場合には時間 t が $1/4$ 周期 (0.81 秒) の時の値である。ペンありの場合、補正項のため $x(t)$ は $1/4$ 周期で最大とはならないが、数値計算を行うと 0.807 秒の時最大となることが分かる。これらの時間を各々の式に代入すると最

下点で同じ初速を与えられたときのペンなしの振れ幅 d' とペンありの振れ幅 d との関係式が得られる。

$$d' = 1.0064d \quad (7)$$

これによると記録用ペンの摩擦抵抗による誤差は 1% 未満であり、実験値のばらつきを考慮すると無視できる程度といえる。

4. 爆発物試料量 (W) と臼砲振れ幅 (d) との関係

4.1 従来の弾動臼砲

弾動臼砲は爆発力の測定装置である。爆発力は試料が完爆した場合には試料量 (W) に比例すべきと考えられるので、爆発力を示す弾動臼砲値は W を変化させたときに W に直線的に変化することが望ましい。弾動臼砲値としては、従来、次のようなものが使われてきた。

- ・ウエイトレステングス (WS)⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

$$WS = 100(1 - \cos \alpha) / (1 - \cos \alpha_0) \quad (8)$$

ここに、 α : 試料 10g の爆発による振れ角

α_0 : プラスチングゼチチン 10g の爆発による振れ角

- ・爆発物の強さ (S)⁽¹²⁾

$$S = 100(1 - \cos \theta) / (1 - \cos \theta_0) \quad (9)$$

$$= 100A^2 / A_0^2 \quad (10)$$

ここに、 θ : 試料 10g の爆発による振れ角

θ_0 : TNT 10g の爆発による振れ角

A : 試料 10g の爆発による振れ幅

A_0 : TNT 10g の爆発による振れ幅

- ・弾動臼砲値 (B)⁽¹⁾

$$B = \frac{d^2 - d_0^2}{d_1^2 - d_0^2} \times 100 \quad (11)$$

ここに、 d_0 : 雷管のみの振れ幅

d : 雷管 + 試料 10g の振れ幅

d_1 : 雷管 + TNT 10g の振れ幅

以上の弾動臼砲値は爆発物試料から発生したエネルギーに比例したエネルギーが弾動臼砲の振れに使われるという考え方で導かれている。

4.2 実験結果

MkIII 弾動臼砲を用いた実験では試料量 (W) と振れ幅 (d) との間には Table. 1 に示すような実験結果が得られた。

Table. 1 を用いて TNT の実験結果を試料量 W に対して d^2 の値をプロットすると MkIII 弾動臼砲では Fig. 7 に示すように直線にはならず、下方に凸な曲線上に並ぶ。これに対して、 W を d に対してプロットすると各点は殆ど直線上に並ぶ (Fig. 8)。同じグラフ上に従来型弾動臼砲を用いて実験したし結果をプロットしたのが Fig. 8 の Run (5) である。この場合には d と W との関係は直線とはならず、上に凸な曲線と

なる。

MkIII 弾動白砲の特性として完爆する爆発物の場合には W と d とは直線関係が成立することが TNT, 5 B 黒カーリット及び PETN などの実験結果から言え

よう。

4.3 投射物の効果

白砲振れ幅 d は投射物の重量によって変化する。完爆性の高い爆薬については投射物の重量を 0~11.3

Table 1 Results for the MkIII Ballistic Mortar Test

(1) Explosives

Run No.	1	2	3	4	5	6	7
Material	TNT	TNT	TNT	TNT	TNT	Carlit 5B	ANFO
Mortar	MkIIID	MkIIIE	MkIIIF	MkIIIF	Conventional	MkIIIF	MkIIIF
Detonator	No. 8	No. 6	No. 6	No. 6	No. 6	No. 6	No. 6
Projectile	(1)	(2)	(3)	(4)	(6)	(4)	(5)
Sample Weight(g)	Length of Swing (mm)						
12	331						
10	285	120	348		692		
9	262	112	323		637		
8	239	95	291		581		316
7		79	265		537		273
6	193	75	232	383	486		229
5		63	195	356	404	385	157
4		52	168	291	370	317	47
3		40	136	235	322	258	36
2		31	98	187	253	197	35
1		19	65	123	174	130	32
0	35	7	31	77	57	77	29

(2) Organic Peroxides

Run No.	8**	9**	10	11	12	13
Material	Perbutyl-D	Perbutyl-D	Perbutyl-D	Perbutyl-I	Perbutyl-I	Perbutyl-I
Mortar	MkIIIE	MkIIIE	Conventional	MkIIIE	MkIIIE	Conventional
Detonator	No. 8	No. 8	No. 6	No. 8	No. 8	No. 8
Projectile	(2)	(1)	(6)	(2)	(1)	(6)
Sample Weight (g)	Length of Swing (mm)					
16	27	140				
12	36	108		72		
11	33	138		69	172	
10	36	132	279	61	163	382
9	37	125	275	56	159	348
8	32	122	253	44	140	301
7	27	103	227	40	136	283
6			222		118	266
5	26	95	209	33		253
4			192		90	222
3	20	68	174	22		174
2			148		60	157
1			114			114
0	12	35	57	12	35	57

(3) Blowing agents and so on

Run No.	14	15	16	17*	18*	19	20	21
Material	DPT	ADCA	ADCA	ADCA	ADCA	NH ₄ NO ₃	NH ₄ NO ₃	(NH ₄) ₂ SO ₄ ·2NH ₄ NO ₃
Mortar	MkIIIF	MkIIIF	MkIIIF	MkIIIF	MkIIIF	MkIIIF	MkIIIF	MkIIIF
Detonator	No. 6	No. 6	No. 6	No. 6	No. 6	No. 6	No. 6	No. 6
Projectile	(2)	(2)	(4)	(2)	(4)	(5)	(2)	(2)
Sample Weight (g)	Length of Swing (mm)							
25					113			
20				9	95			
15				9	95			
13				9				
10	17				108		40	
9				9				10
8	18						58	8
7		7	71					8
6	17	7	80	7	156			11
5		8	87					9
4	13	7	84			103	15	9
3		7	84		108	71		7
2	10	6.5	74			43	15	7
1			74					
0	5	5	74	6	74	29	5	5

* Sample container: paper cartridge

** Sample container: glass bottle of varied length Others: 15ml glass bottle

Projectile: (1) - Cu block and quartz sand in a paper cartridge

(2) - No projectile

(3) - 1.98kg projectile

(4) - 11.3kg projectile

(5) - 4 Cu blocks

(6) - 17.4kg

Organic peroxide:

Perbutyl-D: Di-tert-butyl peroxide

Perbutyl-I: tert-Butyl peroxy isopropylcarbonate

kg の範囲で変化させても W と d との間の直線性は保存される。投射物質量 m に対する振れ幅 d の変化を Fig. 9 に示した。投射物の重量による弾動白砲値の変化については今後、実験を積み重ねないと明言できないが、6号留管単独と5g TNT の実験結果の比較から、こめものなしの場合を除いて異種爆発物間の d の比は投射物重量 m によって変化しないようである。

4.4 完爆し難い物質についての結果の解釈

Mk III 弾動白砲で実験を行った範囲で完爆しなかった不安定物質がいくつかあった。BAM50/60 鉄管試験 (大容量, 強力起爆, 高密度) では伝爆するが, Mk III 弾動白砲試験では完爆しない例として硝安油剤爆薬 (ANFO), 硝安アンモニウム (硝安), 硫硝安複塩およびニトロソペンタメチレンテトラミン (DPT)

がある。これらの W に対する d のプロットを Fig. 10 に示した。

ANFO は試料量が少なくなると不爆となる傾向を示した。硝安は単独では10gでの振れ幅は8gでの振れ幅より減少している。5個の銅ブロック (160g) を投射物として用いた時は、投射物なしの場合に比べてかなり高い d を与える。これは、硝安の伝爆が密閉度に依存することを示している。

DPT 及び硫硝安複塩は BAM50/60 鉄管試験では伝爆することが知られている。⁷⁾ しかし、6号留管を用いた Mk III 弾動白砲試験では不爆であることが示された。これらの物質の爆発性の評価には現在の方法では Mk III は不適当なことが分かった。

有機過酸化物は典型的な不安定物質であり、中には

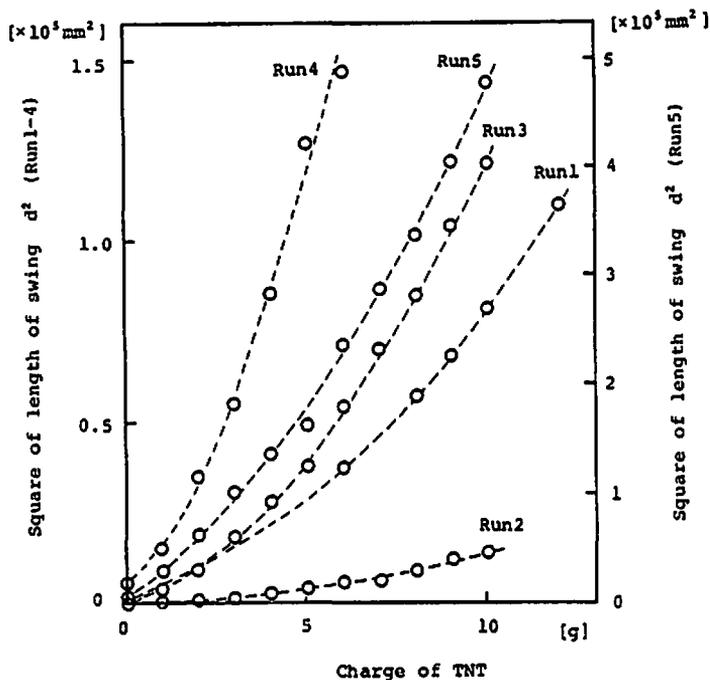


Fig. 7 Variation of square of the length of swing with charge of TNT

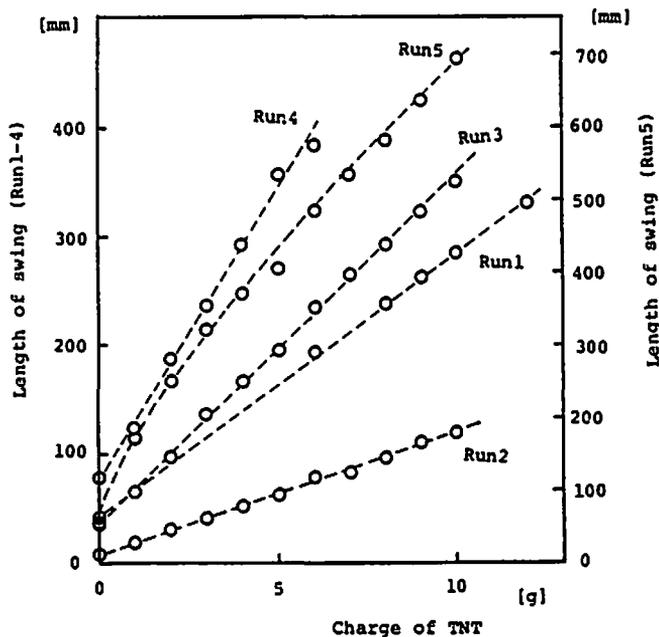


Fig. 8 Variations of the length of swing with charge of TNT

かなりの爆発性を持つものがある。しかし、これをMkIII 弾動臼砲で評価するにはいくつかの問題があることが分かった。まず、パーブチルDのような有機過酸化物の場合には最初 d は W とともに直線的に増加

するが、ある量以上で d の増加は頭打ちになる。これは不伝爆の証拠と思われる。試料量が少ない部分で d が増加するのは雷管の爆発に伴う高温のため不安定なパーブチルDが発熱分解し、 d を増加させるものと

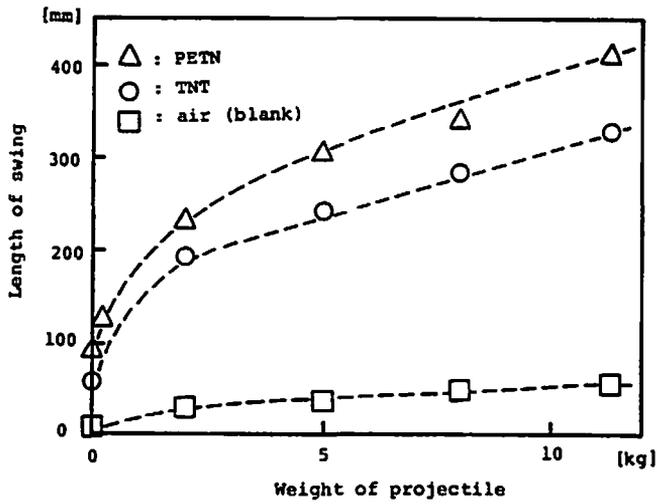


Fig. 9 Variation of the length of swing with weight of projectile

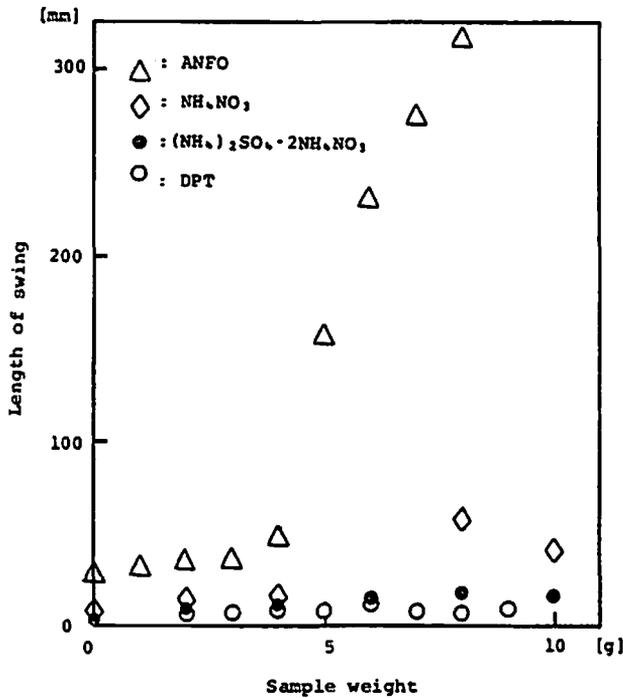


Fig. 10 Variation of the length of swing with sample weight

思われる。

パーブチルIの場合は実験の範囲内でこのような頭打ちの現象は見られない。しかしながら、投射物なし及び11.3kgの投射物を用いた実験を比較すると前者ではパーブチルIのB'値は38%であるのに対して、後者では20%と下がる。これもパーブチルIが正常な爆発反応をしていないことを示唆している。有機過酸

化物の爆発性の評価は弾動臼砲試験が有効か否かについては更に検討を深める必要がある。

アゾジカルボンアミド(ADCA)は発砲剤として用いられているが、危険性の小さいということで危険物の規制から外された物質である。¹²⁾ Fig. 10に示したようにdはWの増加によって最初増加するが、更にWを増すと頭打ちないしは減少傾向を示す。AD

CAの場合もある試料量の所でかなり高い d を与えることがある。これは雷管の爆発に伴う高温でADCAの一部が発熱分解して d の増加に寄与するためであろう。

5. 結論

以上の考察より、次に示すことが明らかにされた。

・MkⅢ弾動白砲は爆発時の衝撃のため破損しやすいがMkⅢF弾動白砲のように構造的に改良すれば耐久性をあげることができる。

・MkⅢ弾動白砲の本体は動作時に減衰振動をし、記録用ペンによる摩擦誤差は殆どない。また、TNTとの比で示される弾動白砲値は記録用ペンによらない。

・完爆する物質では試料量と振れ幅とは直線関係にある。完爆しない物質では、このような直線関係は見られず爆発威力の評価にMkⅢ弾動白砲を用いるには更に検討が必要である。

文 献

- 1) B. C. Turner, "The Mk I and Mk III Ballistic Mortar Tests. Part. I Experimental Design and Methods", RARDE, Branch Memorandum, FM 2/2/73 (1973)
- 2) 安部隆幸, 村永浩太郎, 大内博史, 林維明, 張文礼, 伊藤葵, 田村昌三, 吉田忠雄, 工業火薬協会誌, 44, 236 (1983)
- 3) 大内博史, 村永浩太郎, 武井秀一, 伊地知哲朗, 田村昌三, 吉田忠雄, 安全工学, 22, 277 (1983)
- 4) 武井秀一, 伊地知哲朗, 大内博史, 村永浩太郎, 安部隆幸, 田村昌三, 吉田忠雄, 工業火薬協会誌, 45, 204 (1984)
- 5) 村永浩太郎, 伊藤葵, 大内博史, 田村昌三, 吉田忠雄, 村井一, 火薬と保安, 16, 10 (1984)
- 6) 松永猛裕, 村永浩太郎, 田村昌三, 北川宏, 吉田忠雄, 安全工学, 23, 202 (1984)
- 7) 村永浩太郎, 松永猛裕, 新井充, 中村順, 田村昌三, 吉田忠雄, 安全工学投稿中
- 8) 吉田忠雄, 藤持勇, "耐急性的ある弾動白砲", 実用新案登録申請中
- 9) 原島鮮, "力学", (1978) 袋帯房
- 10) 工業火薬協会編, "工業火薬ハンドブック", P. 376, (1966) 共立出版
- 11) H. Ahrens, Propellants and Explosives, 2, 7, (1977)
- 12) C. M. Mason and E. G. Aiken, "Methods for Evaluating Explosives and Hazardous Materials", Bureau of Mines IC8541 (1972)
- 13) 吉田忠雄編著, "化学薬品の安全—反応性化学薬品の火災・爆発危険性評価と安全対策", P253 (1982)

Performance and Application of the Mk III Ballistic Mortar Test (VI)
— Properties of the Mk III Ballistic Mortar Test —

by Takehiro MATSUNAGA*, Kotaro MURANAGA**, Isamu KURAMOCHI***,
Takayuki ABE**, Masamitsu TAMURA* and Tadao YOSHIDA*

We have examined the effects of the structure, the oscillating properties, the weight of a charge and the weight of a projectile on the Mk III Ballistic Mortar values. As the results, we can obtain some new findings on the properties of the Mk III Ballistic Mortar Test, as follows:

- 1) A new type of the Ballistic Mortar, Mk IIIF is more durable than the former types of the Mk III Ballistic Mortars, because it has no structural weak points.
- 2) The length of swing of the Mk III Ballistic Mortar obeys the equation expressing a general dumped oscillator curve and the difference between the swing of mortar without pen and that with pen is so small that it can be neglected.
- 3) The length of swing increases linearly with the weight of a charge which detonates completely.
- 4) The length of swing increases with the weight of a projectile and the heavy projectile can help the material detonate completely.

(*Department of Reaction Chemistry, Faculty of Engineering,
University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

**Hodogaya Factory, The Japan Carlit Co., Ltd., 1625
Bukko-cho, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, 240

***Kuramochi Scientific Instruments Co., Ltd.,
2-3-4 Ikenohata, Taito-ku, Tokyo 110)
