

振り摩擦試験機による火薬類の摩擦衝撃感度の測定

(第1報) 振り摩擦試験機の特徴

蓮江和夫*, 菊川俊広*, 平野誠司*
 小川優一*, 森田 寧*, 門馬達也*
 中原正二*, 岡崎一正

火薬類の摩擦および衝撃感度は性能面、保安面、ならびに起爆機構解明の点から重要である。摩擦感度と衝撃感度の間にはあまり相関性がない。また、火薬類が実際に受ける機械的作用は純粋な摩擦または衝撃でなく、両者が混在している場合が多い。そこで、米国の Bureau of Mines が開発した振り摩擦試験機に若干の修正を行なって、火薬類の摩擦衝撃感度を測定した。本報ではまず振り摩擦試験機の特徴をしらべた。すなわち、自由振動と空打ちの場合につき、振り子の振動の速度と加速度を求め、また、摩擦板とアンビルの接触の仕方を観測した。さらに、振り摩擦試験機と落槌試験機につき、速度と衝撃力の比較を行なった。

1. 緒言

火薬類の摩擦および衝撃感度の測定は、その性能面ならびに製造、運搬、貯蔵、消費などの保安面から重要であるとともに、起爆機構解明の点からも意義がある。

衝撃感度試験¹⁾には、種々の大きさの落槌感度試験機が使われる。平頭弾による射撃感度試験も一種の衝撃感度試験である。一方、摩擦感度試験法²⁾としては、乳鉢試験、ラーツブルグ感度試験、山田式摩擦試験、BAM式摩擦試験、Bowdenら³⁾が研究に使用した摩擦板打撃式試験、カナダで開発されたボルトーナット摩擦試験⁴⁾などがある。

摩擦感度と衝撃感度の間には、精度のよい相関関係は存在しないことが知られている。また、実際に火薬類が受ける機械的作用は、純粋な摩擦または衝撃よりはむしろ両者が混在していることが多いであろう。摩擦衝撃試験⁵⁾は、このような実的な現象に対応した試験法である。その試験方法には、英国王立兵器研究所法、Tailor および Rinckenbackの小型振り摩擦試験(起爆薬用)、Ubbelohdeの振り摩擦試験(起爆薬用)、Torpedo式摩擦試験⁶⁾があり、また、本研究の主題である米国鉱山局で炭鉱用爆薬の安全性確認のために開発された振り摩擦試験がある。

本研究の目的は、振り摩擦試験機の特徴を把握し、各種火薬類の摩擦衝撃感度を測定するとともに、摩擦感度および衝撃感度の比較を行うことにある。まず本報では、振り摩擦試験機の特徴をしらべた。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

2.1.1 本体

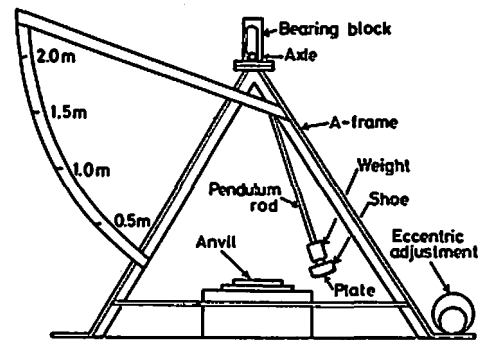


Fig.1 Diagram of the pendulum friction tester

装置の略図を Fig.1 に示す。本体は摩擦板と分銅を付けた振り子、振り子を維持するためのA型フレーム、および鋼製アンビルからなっており、全高2.5m、全長4m、巾1mである。振り子の上端は回転横軸に固定されている。回転横軸はA型フレーム上に固定されたベアリングブロックで支えられており、振り子とアンビルが接触する際、自由に上下に動くようになっている。

昭和56年12月4日受理

*防衛大学校化学教室

〒239 横須賀市走水 1-10-20

TEL 0468-41-3810

また、摩擦衝撃力を一定で再現性あるように維持するため、アンビルに対する振子の調整は、摩擦調節用偏心軸を用いて、A型フレームを上下することによって可能である。

振子の重量は、振子に分銅を取付けることによって調節できる。振子はワイヤーおよび滑車を用いて、モーターで巻上げ、解放装置の止め金を外すと、所望の高さから放つことができる。

2.1.2 アンビル

Photo 1はアンビルを上から見た写真である。アンビルは米国規格SK-20340-L鋼材で、巾8cm、長さ30cmのなめらかな面をしており、堅固なコンクリート基礎上に固定されている。アンビル表面の中央には、試験中に試料が飛ばないように、3本の平行な溝が掘られている。溝は長さ55mm、深さ1.4mm、間隔4mmである。

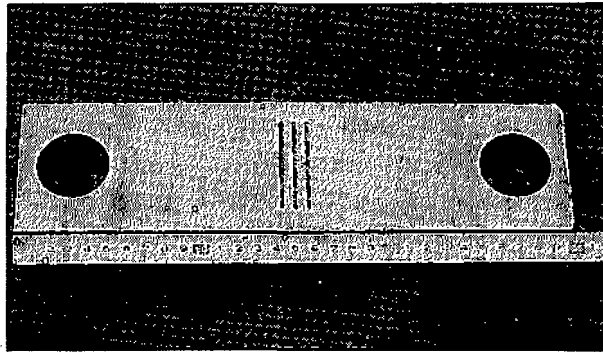


Photo 1 Steel anvil

2.1.3 振子

振子は全長2,097mm、直径30mmで、振子棒とシュー部に分解できる。振子棒には1~30kgの分銅が取付けられる。振子棒の重量と合計すると、最高52.17kgまでの荷重がかけられる。シューの摩擦面には、摩擦板を取付ける。その寸法は長さ140mm、厚さ1mm、曲率半径約322mmで、幅は10~80mmに変えられる。材質もいろいろかえたが、本報ではステンレス(SUS 304)を使用した。振子の落高は、0.5、1.0、1.5、2.0mの4段階になっている。

2.2 実験方法

2.2.1 減衰自由振動における振子の振れ数と速度

振子は摩擦板とアンビルが接触しない場合、減衰自由振動(Damped free vibration, 以下DFVと略す)する。振子の振れ数は、ベアリングブロックを固定しているボルトの締付けトルクを調節することにより、増減できる。

本実験ではDFVの振れ数を31~120と変化させ、振子を最下端を通過するときの速度を測定した。分銅は20kg、落高は2.0mとした。速度測定には、岩通製PB-2型光電管ピックアップと、岩通製ユニバーサルカウンターUC-6131を使用した。すなわち、光電管ピックアップで振子棒下部の直径60mmの部分の通過

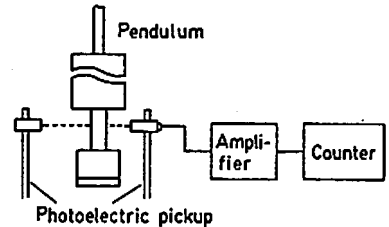


Fig. 2 Block diagram for measuring shoe swing velocity

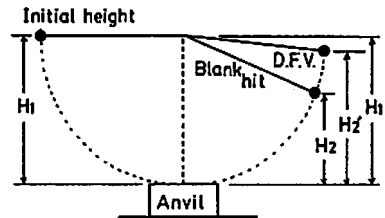


Fig. 3 Schematic explanation of the energy loss for swing

時間を測定し、速度を計算した。測定方法はFig. 2に示した。図で振子は紙面に垂直方向に振れるものとする。

2.2.2 DFVおよび空打ちにおける振子の落高測定
空打ちとは、アンビル上に試料を置かず、摩擦板

とアンビルが18回接触するよう調節した場合をいう。18回接触到調節した場合が最も安定していて、他の回数では、繰返し実験している間に接触回数にずれが生じた。

落高測定は、Fig. 3 に示す方法で行なった。振子を H_1 の高さから落とし、DFV の場合は H_1' 、空打ちの場合は H_2 の高さまで遡したとする。 H_1 と H_2' の高さの差 ($H_1 - H_2'$) は、回転横軸と支持台の摩擦に起因する減衰によるポテンシャルエネルギーの減少に対応するものである。また ($H_1 - H_2$) は、上記の減衰と空打ちの際の振子の摩擦衝撃の両方によるエネルギー損失に対応するものである。したがって ($H_1 - H_2$) - ($H_1 - H_2'$) = ($H_2' - H_2$) は摩擦衝撃によるエネルギー損失に対応するものである。

DFV 数 52 と 120 の場合について、 H_1 をかえて H_2 と H_2' とを測定した。測定は振子先端の軌道に沿って作成したスケール (1cm 間隔) を用いて、目視によって行なった。

2.2.3 空打ちにおける振子速度

DFV 数 52 および 120 で空打ちさせた場合の振子の最下端における速度を求めた。測定方法は 2.2.1 の場合と同様である。

2.2.4 摩擦板とアンビルの接触面積の測定

分銅 20kg、落高 2.0m と一定にし、振子が 18 回空打ちするように調整した後、アンビルに塗料を塗布して空打ちを行なった。振子が停止した後、摩擦板およびアングルの上の痕跡をグラフ用紙に印刷し、接触距離と見かけの接触面積をプランメーターで測定した。

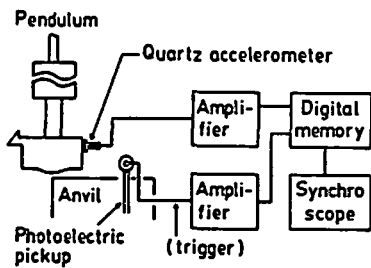


Fig. 4 Method employed in measuring the acceleration

2.2.5 空打ちの場合の振子の加速度測定

振子摩擦試験機の力学的特性を求めするために、接線方向成分の加速度を測定する目的で、Fig. 4 のように測定回路を構成した。加速度計は PCB 社 K 303 A 02 (感度 12.48 mV/G)、デジタルメモリーは岩通製 DM 305、シンクロスコープは岩通製 SS-4500 A を使用した。振子の質量、落高、摩擦板の幅を変化させて測定

した。

3. 実験結果と考察

3.1 減衰自由振動 (DFV) における振子の振れ数と速度

DFV 31~120 について、それぞれの振れ毎の速度を測定し、Fig. 5 に示した。DFV のいずれの場合においても、1 振り目は約 700 cm/sec である。DFV の数の多くなるほど、振動速度の減少は少ない。参考のために、日下部³⁾らのデータに基づいて、落植感度試験機における落植の終速を計算すると次の通りである。

落高 (cm)	終速 (cm/sec)
10	145.0
25	221.4
75	388.0

振子摩擦試験機の 1 振り目の方が速度が速い。

なお、DFV 数 120 ± 5 回の範囲では、減衰曲線に殆ど差がないことが、別の実験で認められた。DFV 数 120 は安定性、再現性とも良好と言える。

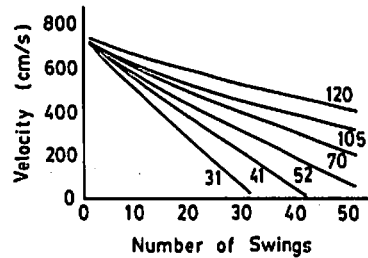


Fig. 5 Swing velocity of each DFV

3.2 DFV および空打ちにおける振子の落高測定

DFV 数 120 および 52 の場合と、それぞれの空打ちについて落高の測定結果は、Table 1 と Table 2 の通りである。

DFV 数 120 の方が、摩擦衝撃によるエネルギー損失が大きい。すなわち、120 の方が 52 よりもアンビルに与えるエネルギーが大きいことを表わしている。

3.3 空打ちにおける振子速度

Table 3 は DFV 数 120 および 52 で空打ちの場合の、各振れにおける振子の最下端速度を示したものである。

同一落高では、DFV 数 52 の方がやや速度が大きい。DFV 数 52 の方がエネルギー損失が少ないためであろう。しかし、各振れについてみると、DFV 数 120 の方が振子速度が大きい。毎回、DFV 数 120 の方がアンビルに大きな摩擦衝撃力を与えることを意味している。なお、DFV 数 120 の空打ちで、シューの幅 10~80mm、分銅の質量 20~30kg と変化させても、速度には顕著な差は認められなかった。

Table 1 Height difference at DFV 120

n	blank hit (cm)	$H_{n-1} - H_n$ blank hit (cm)	$H_{n-1} - H_n$ DFV 120 (cm)	H_{diff}		ΣH_{diff}	
				(cm)	(%)	(cm)	(%)
1	203	16	6	10	4.9	10	4.9
2	187	15	5	10	4.9	20	9.9
3	172	14	4	10	4.9	30	14.8
4	158	13	4	9	4.4	39	19.2
5	145	12	3	9	4.4	48	23.6
6	133	11	2	9	4.4	57	28.1
7	122	11	2	9	4.4	66	32.5
8	111	11	2	9	4.4	75	36.9
9	100	10	2	8	3.9	83	40.9
10	90	10	2	8	3.9	91	44.8
11	80	10	2	8	3.9	99	48.8
12	70	10	2	8	3.9	107	52.7
13	60	9	2	7	3.4	114	56.2
14	51	9	2	7	3.4	121	59.6
15	42	8	1	7	3.4	128	63.1
16	34	7	1	6	3.0	134	66.0
17	27	7	1	6	3.0	140	69.0
18	20	20	1	19	9.4	159	78.3

Table 2 Height difference at DFV 52

n	blank hit (cm)	$H_{n-1} - H_n$ blank hit (cm)	$H_{n-1} - H_n$ DFV 52 (cm)	H_{diff}		ΣH_{diff}	
				(cm)	(%)	(cm)	(%)
1	203	19	10	9	4.4	9	4.4
2	124	18	9	9	4.4	18	8.9
3	166	17	9	8	3.9	26	12.8
4	149	18	8	10	4.9	36	17.7
5	131	14	7	7	3.4	43	21.2
6	117	13	6	7	3.4	50	24.6
7	104	12	6	6	3.0	56	27.6
8	92	12	6	6	3.0	62	30.5
9	80	11	5	6	3.0	68	33.5
10	69	10	5	5	2.5	73	36.0
11	59	9	4	5	2.5	78	38.4
12	50	9	4	5	2.5	83	40.9
13	41	6	2	4	2.0	87	42.9
14	35	7	3	4	2.0	91	44.8
15	28	7	3	4	2.0	95	46.8
16	21	5	1	4	2.0	99	48.8
17	16	6	1	5	2.5	104	51.2
18	10	10	1	9	4.4	113	55.7

Table 3 Swing velocity at each fall height

No. of swing	DFV 120			DFV 52		V (cm/s)
	H (cm)	E_{loss} (%)	V (cm/s)	H (cm)	E_{loss} (%)	
1	203	4.9	689	203	4.4	689
2	186	4.9	666	184	4.4	659
3	172	4.9	644	166	3.9	624
4	158	4.4	617	149	4.9	593
5	146	4.4	581	131	3.4	559
6	134	4.4	559	117	3.4	534
7	123	4.4	529	104	2.9	494
8	111	4.4	511	92	2.9	470
9	100	3.9	474	80	2.9	436
10	90	3.9	442	69	2.4	412
11	80	3.9	417	59	2.4	370
12	70	3.9	387	50	2.4	347
13	59	3.4	351	41	2.0	309
14	51	3.4	307	35	2.0	281
15	43	3.4	281	28	2.0	246
16	34	3.0	227	21	2.0	211
17	27	3.0	184	16	2.5	157
18	20	9.4	—	10	4.4	—

3.4 摩擦板とアンビルの接触面積の測定

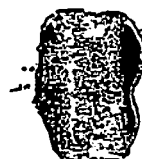
摩擦板とアンビルの摩擦衝撃による、塗料付着状況の一例を Photo 2 に示した。n=10 での見掛けの接触面積と最大接触距離の平均値は Table 4 の通りである。

目視で観察すると、アンビル上の痕跡の左端は一振り目（左側からの打撃）の摩擦板が飛したもので、右端の痕跡は2振り目（右側からの打撃）によるものである。3, 4, 5 振り目と落高の減少に伴ない、摩擦板とアンビルの接触長さはわずかずつ減少し、10回目前後で初めてアンビル中央の溝部分に接触している。

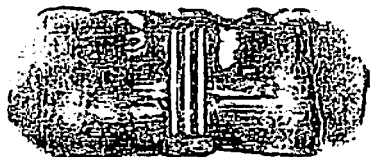
アンビルよりも摩擦板の方が見掛けの接触面積、最大接触距離ともに小さいのは、摩擦板には曲率があるためである。アンビル上の接触距離は約14cm であるが、左右の最大値はそれぞれ約8cm, 7cm であるため、これをアンビル上に資料を一樣に広げる基準とした。

3.5 空打ちの場合の振子の加速度測定

Fig. 6 は加速度測定で得られた接線方向成分の波形（1振り目）の模式図である。この波形から、最大加速度 a_m 、立ち上がり時間 t_r 、衝撃時間 T_p を求め、さらにプランメーターによる図積分で力積 P を求めた。また衝撃力 F は $F = (M + 25, 40) a_m$ (M : 振子の質量, 25, 40は回転横軸の質量) から計算した。Table 5 に各条



a



b

Photo 2 Pictures of the contact surface area

- a: the stainless steel plate
- b: the steel anvil

Table 4 Contact areas and maximum contact lengths of the plate and the anvil

(n=10)	Apparent contact area (cm ²)		Maximum contact length (cm)		
	Anvil	Plate	Anvil		Plate
			Left half	Right half	
\bar{X}	105.02	24.13	7.36	6.44	3.28
σ	4.26	1.59	0.22	0.23	0.23

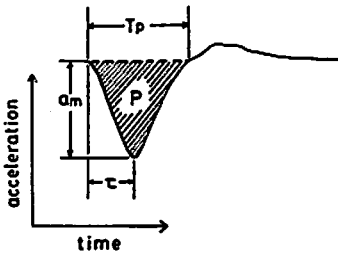


Fig. 6 A schematic figure delivering the acceleration at blank hit

件に対する測定結果を示した。表中の士で示した値は σ である。

Table 5 において、最大加速度は落高の減少に伴ない減少するが、同一落高でも振子の質量により変化している。

立ち上り時間および衝撃時間は、振子の質量の増加あるいは落高の減少に伴ない増加しているが、摩擦板の幅に対しては、ほぼ一定である。

次に衝撃力について、空打ちの場合の両試験機の比較を行なう。日下部ら⁶⁾のデータから落槌試験機の衝

Table 5 An analysis of the acceleration for the first shoe swing

M (kg)	H (m)	D (cm)	n	a_m (G)	τ (ms)	T_p (ms)	F (N)	P (N·S)
42.11	2.0	8	10	16.1 ± 1.5	0.98 ± 0.15	4.04 ± 0.25	10600 ± 990	20.8 ± 2.1
	1.5		10	8.4 ± 1.1	1.06 ± 0.09	3.89 ± 0.41 (※8.78 ± 0.68)	5560 ± 730	9.2 ± 1.1 (※18.6 ± 1.7)
	1.0		10	5.5 ± 0.5	1.17 ± 0.19	3.58 ± 0.32 (※9.41 ± 0.62)	3640 ± 330	6.7 ± 0.9 (※16.2 ± 2.0)
52.17	2.0	8	10	23.2 ± 1.2	0.91 ± 0.15	3.95 ± 0.25	17600 ± 910	28.5 ± 1.7
		6	10	22.1 ± 1.4	0.92 ± 0.19	4.15 ± 0.19	16800 ± 1070	28.3 ± 3.0
		4	10	21.7 ± 2.3	0.90 ± 0.11	3.96 ± 0.14	16500 ± 1750	24.1 ± 1.7
		2	9	20.8 ± 1.4	0.82 ± 0.12	8.84 ± 0.21	15800 ± 1070	23.6 ± 2.4

M; Weight of the pendulum, H; Fall height, D; Width of the steel plate, n; Number of experiments, a_m ; Maximum acceleration, τ ; Rise time, T_p ; Duration of impact, F; Force of impact, P; Impulse, $g=9.79763\text{m/s}^2$ in this place. *Total value of all the impact in the first shoe swing.

撃力を計算すると、下記の通りである。

落高 (cm)	衝撃力 × 10 ³ (N)
2	33.6
5	104
10	163
20	213
30	224
40	244
50	248

最大値と比較すると、落槌試験機の方が約 1.4 倍の衝撃力であることがわかる。この場合も衝撃力がすべて有効に試料に与えられるわけではない。

4. 結論

振子摩擦試験機による各種火薬類の摩擦衝撃感度の測定に先立ち、本試験機の特性を把握するための実験を行ない、次の結論を得た。

(1) 減衰自由振動 (摩擦板とアンビルが接触しない場合で、DFV と略す) の数を 31~120 と変えると、

DFV の数が多くなるほど、同一振れ回数での振子速度の減少は少なくなる。ただし、1 振り目はいずれの場合も約700cm/secである。

(2) 空打ち(試料なしで、摩擦板とアンビルが18回接触するように調節した場合)のときも、DFV 数が大きいほど、各振れに対する振子速度は大きく、アンビルに与える衝撃力も大きい。しかし、振子の荷重やシューの幅は、振子速度に影響を与えない。

(3) 摩擦衝撃における摩擦板とアンビルの接触の仕方を観察し、見掛けの接触面積と最大接触距離を測定した。

(4) 空打ちの場合の振子の加速度を測定し、立ち上り時間、衝撃時間、衝撃力、力積を求め、これらの値の振子の質量、落高、摩擦板の幅などの要因による影

響をしらべた。

(5) 振子摩擦試験機と落錘試験機について、速度と衝撃力の比較を行なったが、いずれの場合も極端に大きな差異は認められなかった。

文 献

- 1) 工業火薬協会編, 工業火薬ハンドブック (1966)
- 2) F. P. Bowden and A. D. Yoffe, "The Initiation and Growth of Explosion in Liquids and Solids." (1952)
- 3) E. Contestabile, Report No. MRP/MRL 76/128 (TR) (Sept. 1976)
- 4) India Standard (Part II/Sec. 1) p. 11 (1973)
- 5) 日下部正夫, 石川 昇, 工業火薬, 24, (6), 318 (1963)

Pendulum Friction Tests on Some Explosives (I) Mechanical Characteristics of the Pendulum Friction Tester

by Kazuo HASUE*, Toshihiro KIKUKAWA*, Seiji HIRANO*
Yuichi OGAWA*, Yasushi MORITA*, Tatsuya MONMA*
Shoji NAKAHARA* and late Kazumasa OKAZAKI

Explosive sensitivity has been tested by the U. S. Bureau of Mine's pendulum friction tester. To provide for the testing of less sensitive explosives, the American style pendulum friction tester was modified as follows; weights of the pendulum, width of the stainless steel plate, and pendulum rod release height were varied. Without plate and steel anvil contact, the number of swings (Damped Free Vibration, DFV) could be adjusted. The number of swings were adjusted to 18 with plate and steel anvil contact without any explosive sample on the anvil (Blank hit).

When the release height was 2.0 meters, the swing velocity at the lowest point at different DFVs was measured. The initial swing velocity was almost the same at each DFV, although the decreasing velocity was different. The energy loss of each swing was obtained by comparing the height difference between that of the DFV and the blank hit swing. The acceleration of the shoe at blank hit was also measured. The acceleration was increased with increasing release height or weight. Large differences in velocity and impact force could not be detected between the pendulum friction tester and a fall hammer tester.

(*Department of Chemistry, The National Defense Academy, 1-10-20
Hashirimizu, Yokosuka, Kanagawa, 239, Japan)