

Up-and-Down試験法による爆薬の摩擦感度試験

丁 大玉

足利工業大学工学部機械工学科 〒326-8558 栃木県足利市大前町268-1

†Corresponding address: dding@ashitech.ac.jp

2008年2月21日 受付 2008年6月12日 受理

要旨

本研究は荷重の対数を試験水準としてUp-and-Down試験法により爆薬および起爆薬の摩擦感度を調べた。摩擦による発火確率の分布の広がり、荷重の対数を確率変数として得た標準偏差だけでなく、平均値にも関係するので、本研究は物質の感度データのばらつきを発火確率に対応する爆点の範囲(爆発範囲)により評価することを検討した。

1. 緒言

火薬類を取り扱う際に、摩擦や打撃等の作用によって、発火や爆発等の事故が発生することがある。その中の摩擦の作用に起因する事故も多いので、火薬類を安全に取り扱うためには、摩擦感度を正しく評価する必要がある。日本では、BAM式摩擦感度試験機を摩擦感度の測定装置としてよく用いられる。摩擦感度の測定では、物質に与えた刺激は摩擦力であるが、摩擦力が荷重に比例するため、刺激量を荷重により定量化する。同一物質に対して同一荷重でも、発火を起こしたり起こさなかったりすることがある。したがって、摩擦感度は発火確率に対応する荷重によって評価される。日本火薬学会規格ES-22では、1/6発火確率に対応する荷重を求め、この荷重を1/6爆点として物質の摩擦感度を評価している。また、Dixonら¹⁾のUp-and-Down試験法により、50%発火確率に対応する刺激量(50%爆点)を求める方法がある。

本研究は荷重の対数を試験水準としてUp-and-Down試験法により爆薬および起爆薬の摩擦感度を調べ、感度データの統計的な処理手法および爆発性物質の摩擦感度をより正確に評価する方法を検討した。

2. 実験方法

本研究では、PENT, RDXなどの爆薬およびトリシネートなどの起爆薬を試験対象とし、BAM式摩擦感度試験機を用いて、荷重の常用対数値を等間隔で変化させてUp-and-Down試験法により摩擦感度試験を行なった。試験の前に、各試料を60℃、24時間乾燥後、デシケータに保管する。試験数については、石塚ら²⁾によれば、50回の試験数でも100回の試験数の場合に等しい50%爆点が得られるので、本実験では試験数を50回とした。試験は火薬学会規格ES-22³⁾に記載された試験手順に従って行なわれた。

3. 感度の計算方法

本研究ではDixonら¹⁾の統計方法を用いて、Up-and-Down試験法により得られた実験データを解析した。Dixonらが用いた統計モデルは正規分布モデルである。正規分布にしたがう確率密度関数(正規曲線ともいう)は次の式で表示される。

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(X-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

ここでは、 X は確率変数、 $f(X)$ は確率密度関数である。

確率変数 X を横軸としたこの正規分布の曲線は分布の中心位置を示すパラメータ μ (平均値)と分布の広がり(分散 σ^2)、あるいはばらつきの尺度を示す標準偏差 σ の値がわかれば確定してしまう。

Dixonらの統計方法によれば、Up-and-Down試験で得られたデータから次のように平均値を計算する。

$$\bar{X} = c + d \left(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right) \quad (2)$$

ここでは、 $N = \sum n_i$ 、 $A = \sum (i \times n_i)$ 、 i は新たに割り付けた試験水準、 n_i は各水準における発火数又は不発火数、 c は $i = 0$ の試験水準、 d は試験水準の間隔(以下、試験間隔)である。式中の \pm は発火の場合、“-”とし、不発火の場合、“+”とする。発火数と不発火数をそれぞれ数え、数が少ない方の試験データを統計計算に使用する。

また、標準偏差は

$$s = 1.620d \left(\frac{NB - A^2}{N^2} + 0.029 \right) \quad (3)$$

のように求める。ここでは、 $B = \sum (i^2 \times n_i)$ である。式(2)で求めた平均値 \bar{X} は50%発火確率に対応する爆・不爆の臨界爆点(以下、50%爆点)である。

Table 1 Experimental results of BAM friction sensitivity test.

Sample	Sample volume (mm ³)	Testing interval (log ₁₀)	Mean \bar{X} (log ₁₀)	Standard deviation s (log ₁₀)
PETN (1)	10	0.15	1.65	0.12
PETN (2)	10	0.15	1.64	0.10
RDX-A	10	0.15	2.00	0.18
RDX-C	10	0.15	1.93	0.14
RDX-Ci	10	0.15	2.04	0.10
Tricinate (1)	10	0.15	0.71	0.66
Tricinate (2)	10	0.30	0.57	0.60
Tricinate (3)*	3	0.15	-0.06	0.22
Tricinate (4)	3	0.15	0.51	0.36
Tricinate (5)	3	0.15	0.07	0.48

*Import friction board and stick were used.

そして、発火確率 α に対応する爆点は次式で推定される。

$$X_\alpha = \bar{X} + Z_\alpha \sigma \quad (4)$$

式中の Z_α は信頼度(発火確率) α より決定される標準正規分布の逆関数である。信頼度 $\alpha=50\%$ のとき、式(4)から求められた爆点は、式(2)により得られた50%爆点に等しい。 Z_α の値はExcelのNORMSINV関数により計算できる。

実際に式中の σ が未知であるので、計算には σ の代わりに、式(3)で計算した s を用いる。

式(2)による平均値 \bar{X} のサンプリングエラーは次式で推定される。

$$\sigma_m = \frac{G\sigma}{\sqrt{N}} \quad (5)$$

式(3)による標準偏差 s のサンプリングエラーは次式で推定される。

$$\sigma_s = \frac{H\sigma}{\sqrt{N}} \quad (6)$$

式中(5)と(6)中の G と H はDixonら¹⁾の図表により求める。

発火確率 α に対応する爆点の信頼区間は次のとおりである。

$$(X_\alpha - t\sqrt{\sigma_m^2 + Z_\alpha^2 \sigma_s^2}, X_\alpha + t\sqrt{\sigma_m^2 + Z_\alpha^2 \sigma_s^2}) \quad (7)$$

t は信頼水準の値に対して求めたスチューデント(Student)の t -分布の逆関数である。 t の値はExcelのTINV関数により計算できる。

4. 結果と考察

各試料についての摩擦感度の試験結果をTable 1に示す。PETN (1)とPETN (2)は同じ試料であり、試験を2回行ったものである。試料RDX-AはRDXクラスA、RDX-CはRDXクラスC、RDX-CiはRDXクラスC輸入品である。起爆薬トリシネート(Tricinate)については、同じ試料を5回試験した。また、本試験では日本国産摩擦板と摩擦棒を使ったが、トリシネートの3回目試験では輸入摩擦板と摩擦棒を使った。

もし荷重 F (確率変数 $X = F$)と発火確率との関係が正規分布にしたがうならば、試験間隔 d は荷重 F の等間隔(ΔF 一定)であり、式(2)で推定した平均値 \bar{X} は50%爆点(荷重 $F_{50\%}$)であり、式(3)で推定した s はばらつきの尺度として使われる。しかし、他の研究結果⁴⁾によれば、摩擦感度の場合、荷重の対数(確率変数 $X = \log F$)と発火確率の関係が正規分布にしたがう。したがって、試験間隔 d は荷重 F の等間隔ではなく、荷重の対数 $\log F$ の等間隔($\Delta \log F$ 一定)であり、式(2)~式(7)により得られたのはいずれもそれぞれの統計量の対数値である。本実験により得られた各試料の平均値 \bar{X} および標準偏差 s をTable 1に示す。

平均値 \bar{X} は50%発火確率に対応する荷重の対数である。50%爆点は平均値 \bar{X} の逆対数により求められる。一方、Table 1に示した s は荷重に関する対数値であるが、 s の逆対数を求めたものは明確な意味を有する統計量ではない。通常の標準偏差の概念と区別するために、以下は荷重の対数を確率変数として得られた統計量 s を対数標準偏差という。したがって、対数標準偏差のみを摩擦感度データのばらつきの尺度として使うことはできない。ここでは、次の解析方法により感度データのばらつきを評価する。

本実験では、荷重の常用対数の等間隔を試験間隔としたので、式(4)により得られた統計量は、発火確率 α に対応する荷重の対数である。この荷重の対数を次式により荷重に変換する。

$$F_\alpha = 10^{\bar{X} + Z_\alpha s} = 10^{\bar{X}} 10^{Z_\alpha s} \quad (X = \log_{10} F \text{ の場合}) \quad (8)$$

F_α は発火確率 α に対応する荷重あるいは爆点である。荷重の単位をニュートン(N)とした場合、式(8)で得られた量の単位もニュートンである。

また、荷重で表示する信頼区間は次のように表示される。確率変数が荷重の常用対数である場合、即ち、 $X = \log_{10} F$ の場合

$$(10^{X_\alpha - t\sqrt{\sigma_m^2 + Z_\alpha^2 \sigma_s^2}}, 10^{X_\alpha + t\sqrt{\sigma_m^2 + Z_\alpha^2 \sigma_s^2}}) \quad (9)$$

単位は式(8)と同様で、ニュートン(N)である。

各試料の50%爆点および50%爆点についての95%の信

Table 2 Estimated ignition points and confidence intervals.

Sample	50 % ignition point (N)	95 % confidence interval of 50% ignition point (N)	5 % ignition point (N)	95 % ignition point (N)	1 / 6 ignition point(N)
PETN (1)	44.4	39.4 ~ 50.0	27.7	71.00	33.7
PETN (2)	43.2	39.1 ~ 47.7	30.1	61.9	34.9
RDX-A	101	85.8 ~ 118	51.6	196	67.9
RDX-C	86.0	75.2 ~ 98.3	50.8	145	63.1
RDX-Ci	109	98.4 ~ 121	73.5	162	86.6
Tricinate (1)	5.15	2.96 ~ 8.96	0.43	61.6	
Tricinate (2)	3.69	2.20 ~ 6.17	0.38	36.1	
Tricinate (3)*	0.87	0.71 ~ 1.05	0.37	2.02	
Tricinate (4)	3.23	2.38 ~ 4.39	0.82	12.8	
Tricinate (5)	1.17	0.77 ~ 1.77	0.19	7.27	

*Import friction board and stick were used.

Table 3 Estimated 1 / 6 ignition points by Up-and-Down method and other method.

Sample	1 / 6 ignition point		
	Up-and-Down method		Other method ⁵⁾
PETN (1)	33.7 N	PETN	2 ~ 4 kgf (19.6 ~ 39.2 N)
PETN (2)	34.9 N		
RDX-A	67.9 N	RDX	Grade 4 (39.2 ~ 78.4 N)
RDX-C	63.1 N		

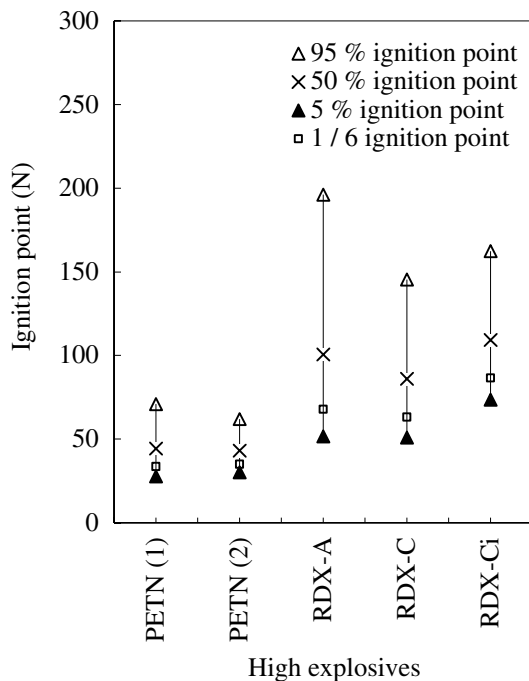


Fig. 1 Estimated 5 %, 1 / 6, 50 % and 95 % ignition points of high explosives.

頼区間を Table 2 に示す。

爆薬PETNの2回の試験結果から得られた50 %爆点および95 %の信頼区間はほぼ同じである。爆薬RDXクラスCはRDXクラスAより50 %爆点がわずかに小さく、摩擦感度がやや鋭感である。RDXクラスCの粒度はRDXクラスAの粒度より大きい。また、輸入RDXクラスCは日本国産RDXクラスCより鈍感である。

Table 2によれば、50 %爆点については、爆薬PETNのほうが爆薬RDXより低く、有意差が見られる。すなわち、PETNはRDXより摩擦感度が鋭感であることがわかった。また、爆薬に比べて、起爆薬トリシネートの50 %爆点が小さく、摩擦感度がかなり鋭感であることもわかった。

式(8)により推定した5 %爆点および95 %爆点を Table 2 および Fig.1 に示す。通常の標準偏差(対数ではない)は正規分布の中心位置(平均値)と関係なく、分布の広がり(分散)を示すものであるが、荷重の対数を確率変数とした場合、式(3)のsは分布の広がりあるいは感度データのばらつきを直接に反映しないので、式(4)で得られた統計量を最終的に式(8)により荷重に変換しなければならない。式(8)によれば、発火確率の分布の広がり(分散)は対数標準偏差だけではなく、平均値にも関係することがわかる。したがって、本研究は物質の感度データのばらつきを発火確率の範囲(爆発範囲)により評価した。Fig.1によれば、荷重の対数を荷重に変換した結果、発火確率は50 %爆点(平均値)を中心として対称的に分布していないことがわかる。発火確率の分布は50 %爆点以下のほうが狭くなり、50 %爆点以上のほうが広がる。感度データのばらつきをどのくらいの発火確率の範囲(爆発範囲)で評価すれば、適当であるかは今後の研究課題である。

式(8)により推定した爆薬PETNと爆薬RDXの1/6爆点を Fig. 1 および Table 3 に示す。比較のために、日本火薬学会規格ES-22³⁾に規定された1/6爆点試験法による爆薬の1/6爆点⁵⁾も Table 3 に示す。Table 3によれば、Up-and-Down試験法で推定した1/6爆点はほぼ1/6爆点試験法で直接に求めた1/6爆点の範囲に含まれていることがわかった。Up-and-Down試験法は50 %爆点だけでなく、発

火確率の範囲等の情報を得ることができるが、より信頼のある統計量を得るには、50回以上の試験数が必要である。これに対して、1/6爆点試験法は必要な試験数が少ない。しかし、1/6爆点試験法により得られた物質の感度に関する情報は少ない。

5. 結論

本研究はUp-and-Down試験法で爆薬と起爆薬の摩擦感度を調べた。Up-and-Down試験法により、50%爆点および他の発火確率に対応する爆点を推定し、物質の感度に関する多くの情報を得ることができる。また、発火確率の分布の広がり是对数標準偏差だけではなく、平均値にも関係するので、感度データのばらつきを発火確率の範囲(爆発範囲)により評価すべきである。

謝辞

摩擦感度実験は、日本工機株式会社白河製造所において行った。実験の実施にあたり、日本工機株式会社白河製造所鹿住孝氏、独立行政法人産業技術総合研究所黒田英司氏には多大なご協力を頂いた。ここに記して深く感謝の意を表します。

References

- 1) W. J. Dixon and F. V. Massey, Jr., "Instruction to Statistical Analysis", pp.377-394 (1969), McGraw-Hill Book Co., Toronto.
- 2) T. Ishizuka and K. Okazaki, J. the Industrial Explosives Society (Sci. Tech. Energetic Materials), 34, 2, pp.86-92 (1973)
- 3) Japan Explosives Society Standard E-22, "Friction test", pp.65-68 (1996), Japan Explosives Society, Tokyo, JAPAN.
- 4) Sensitivity sub-committee, J. the Industrial Explosives Society (Sci. Tech. Energetic Materials), 34, 2, pp.114-118 (1973)
- 5) <http://www.jes.or.jp/members/kando/data/index.html/> Sensitivity Test Database of Japan Explosives Society

Investigation on friction sensitivity of explosives using Up-and-Down method

Dayu Ding

The friction sensitivities of high explosives and primary explosives were tested by the BAM Friction Apparatus with the Up-and-Down method and an equal interval of logarithm of a load was used as the testing interval. Only the logarithm standard deviation cannot estimate variation in sensitivity data because the distribution of ignition probability from the experimental results is related not only to the logarithm standard deviation but also the mean. Therefore, this research evaluated the variation by the range of loads corresponding to ignition probabilities.

Keywords: Friction sensitivity, Up-and-Down method, Statistical analysis, Explosive

Department of Mechanical Engineering, Ashikaga Institute of Technology, 268-1 Omae-cho, Ashikaga-shi, Tochigi 326-8558, JAPAN

† Corresponding address: dding@ashitech.ac.jp