

雷管による爆薬起爆の研究

〔第6報 雷管起爆力の計算式〕

井田 一夫*

従来、雷管の威力(起爆力)は猛度によると考えられていたので、雷管の威力を表現するには爆轟圧力の計算式 $P = D \cdot A \cdot W$ (D は爆速, A は装填密度, W はガス流速) 等が利用されていた。然し乍ら、第1報~第5報で述べた如く、雷管による爆薬の起爆作用は①雷管の爆発による衝撃作用, ②管体破片の投射作用, ③高温の生成ガスや衝撃波による熱作用, 等によると考えられるので、雷管起爆力の計算式としてもこれら三つの作用を総合的に表現するものであることが望ましい。

一方雷管製造の立場から考えると、雷管の起爆作用に影響する最も重要な因子は、①添装薬種, ②添装薬量, ③添装薬圧搾圧力(装填比重), ④管体材質, ⑤管体内厚, 等であると推定される。

本報に於ては、雷管による爆薬の起爆作用に熱起爆説を適用して雷管の総合威力の計算式を導出し、更に雷管の製造条件によって雷管の威力がどの様になるかを算出する。

I 雷管の総合威力の計算式

熱起爆説によれば、爆薬の起爆は爆薬の温度上昇によって生ずる hot spot の生成によるとされているので、雷管の総合威力(起爆力)を S_T 、衝撃による起爆力を S_I 、破片による起爆力を S_F 、熱による起爆力を S_H とすれば、これらが同時に作用した場合、爆薬の温度上昇は個々の作用による温度上昇の総和と考えて、次式を仮定する。

$$S_T = S_I + S_F + S_H \dots\dots\dots (1)$$

従って先ず個々の起爆作用についての計算式を求めることとする。

1.1 衝撃作用

Bowden氏等の熱起爆説によれば、衝撃による起爆は爆薬中の気泡の断熱圧縮による温度上昇であるとされ、衝撃圧力と温度との関係は

$$T = T_0 (P/P_0)^{(\gamma-1)/\gamma} \dots\dots\dots (2)$$

によって表わされる¹⁾。 T_0 は気泡の初期温度, T は気泡の到達温度, P_0 は気泡の初期圧力, P は気泡の到達圧力, γ は気体の比熱比である。

熱起爆説では爆薬の起爆は或る大きさの分子集団が或る一定温度に達したときに所謂 hot spot が生ずるとされているので、起爆力とは爆薬を一定温度にまで上昇させる能力と考えることが出来る。従って雷管の衝撃による起爆力 S_I は(2)式より

$$S_I = T - T_0 = \Delta T = T_0 [(P/P_0)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1] \dots\dots\dots (3)$$

となる。③式に於て、 P は P_0 に比べて非常に大きいので右辺第二項は省略出来るし、 T, P に比べると一般に T_0, P_0 は非常に小さく T_0, P_0 は一定と考えることが出来るので $T_0/P_0^{(\gamma-1)/\gamma} = K_I'$ とおけば

$$S_I = K_I' P^{(\gamma-1)/\gamma} \dots\dots\dots (4)$$

又爆薬中の気泡は空気であるから $\gamma = C_p/C_v = 1.4$ 、即ち $(\gamma-1)/\gamma = 2/7$ となり、これより

$$S_I = K_I' P^{2/7} \dots\dots\dots (5)$$

が成立する。

而してこの場合、 P は爆薬中の気泡が断熱圧縮を受けた際の最終圧力であるから、実用上は雷管の爆轟によって生ずる最大圧力(雷管に接した部分に与える衝動圧)に比例すると考えることが出来る。

雷管の爆轟圧力(衝動圧)に影響を与える要因を考えて見る。先ず Hopkinson 棒を利用した植竹氏の報告²⁾ や日下部氏等の報告³⁾ によると、爆圧は雷管の装薬量 ω と共に増大すると推定されるが、伊藤氏等の報告⁴⁾ によると、3, 6, 8号雷管底方向の爆圧によって岩石中に生ずる応力の最大値は大理石の場合夫々 770, 1074, 1470 kg/cm² であると云われ、3, 6, 8号雷管の装薬量を太々 0.54g, 1.0g, 2.0g とすれば、爆圧 P は装薬量 ω の $1/2$ 乗にほぼ比例すると思われる。山家氏⁵⁾ も爆源より一定距離に於ける衝動圧(空气中)を鉛板式測圧器で測定した結果、爆源に於る爆薬量 ω と衝動圧 P との間に $P = k\omega^{1/2}$ なる

昭和35年12月28日受理

* 日本化研KK折尾作業所、福岡県若松市浅川

関係を得ている。

又雷管の爆圧は添装薬自体の爆轟圧力にも関係があるが、添装薬自体の爆轟圧力 p は理論的に $p = \Delta DW$ (Δ は装填比重, D は爆速, W はガス流速) で表わすことが出来るので、雷管の爆圧が添装薬自体の爆圧に比例すると仮定すれば、添装薬の薬種、薬量、装填比重等の如き雷管の製造条件と雷管の衝撃による起爆力 S_I との関係は (5) 式より

$$S_I = K_I \cdot (\Delta DW)^{1/2} \omega^{1/2} \dots\dots\dots (6)$$

と表わすことが出来る。但し K_I はすべての比例係数を含めたものである。

1.2 破片作用

管体の破片による爆薬の起爆は固体投射による起爆であるが、第4報で述べた如く、固体投射による起爆は投射された固体の運動エネルギーによると考えるよりも、投射物の摩擦による爆薬の温度上昇と考えるのが妥当である。摩擦による温度上昇は Bowden 氏によれば次式で表わすことが出来るので、熱起爆説によって起爆力とは温度を上昇させる能力であるとすれば、管体破片による起爆力 S_F は

$$S_F = \Delta T = (\mu MV / aJ) \{1 / (k_1 + k_2)\} \dots\dots\dots (7)$$

で表わすことが出来る。雷管による爆薬起爆の場合には、(7) 式に於る μ は摩擦係数(破片の形状、凹凸、硬度、融点)、 M は破片重量、 V は破片速度、 a は破片の大きさ、 J は熱の仕事当量、 k_1 、 k_2 は管体破片及び爆薬の熱伝導度である。

雷管による爆薬起爆の場合には雷管破片は雷管の爆発熱のために加熱されていて常に未分解の爆薬の温度よりも高いので、摩擦熱は管体破片には伝達されず爆薬に伝達されると考えられる。従って熱伝導度の影響は主として爆薬の熱伝導度 k_1 のみによると思われ、破片の熱伝導度 k_2 の影響は小さいので、爆薬が一定であれば (7) 式に於ける $k_1 + k_2$ は一定となる。即ち同一の爆薬を種々の雷管によって起爆して雷管威力を比較する場合には、 $k_1 + k_2$ は一定であるから、 $1/4J(k_1 + k_2) = K_F$ とおけば (7) 式は次式となる。

$$S_F = K_F \cdot \mu VM / a \dots\dots\dots (8)$$

1.3 熱作用

第5報で述べた如く爆薬を短時間加熱した場合の温度上昇は次式で表わすことが出来るが⁶⁾、熱起爆説により雷管の爆発熱による起爆作用 S_H は爆薬の温度上昇に等しいと考えれば

$$S_H = \Delta T = 2Q \{t / (\pi k \rho C_p)\}^{1/2} \dots\dots\dots (9)$$

茲に Q は雷管の爆薬熱量、 t は加熱時間、 k は爆

薬の熱伝導度、 π は円周率、 ρ は爆薬の密度、 C_p は爆薬の比熱である。即ち爆薬が一定の場合には k 、 ρ 、 C_p は一定であるから $2/(\pi k \rho C_p)^{1/2} = K_H$ とおけば

$$S_H = K_H \cdot Q t^{1/2} \dots\dots\dots (10)$$

即ち雷管の熱による起爆作用は雷管の爆薬熱量に比例し、加熱時間の $1/2$ 乗に比例する。

1.4 雷管の総合威力を示す計算式

雷管の衝撃による起爆力 S_I 、破片による起爆力 S_F 、熱による起爆力 S_H は夫々 (6) 式、(8) 式、(10) 式によって表わされる事が判明したので、これらを (1) 式に代入すれば、雷管の総合威力 S_T を示す計算式は

$$S_T = K_I \cdot (\Delta DW)^{1/2} \omega^{1/2} + K_F \cdot \mu VM / a + K_H \cdot Q t^{1/2} \dots\dots\dots (11)$$

と表わすことが出来る。

II 雷管の製造条件との関係

雷管の起爆力に影響を及ぼす主な要因は、添装薬種、薬量、圧搾圧、管体材質、肉厚等であると推定されるので、本項に於ては前項で得られた計算式を利用してこれらの要因(製造条件)が起爆力に及ぼす影響を計算例を以て示すこととする。

2.1 添装薬種の影響

(a) 衝撃作用

添装薬種のみを変える場合には、装填比重 Δ 、薬量 W は一定であるから、(6) 式に於る変数は爆速 D とガス流速 W である。

例えばペントリットとテトリールの場合について比較すると、雷管添装薬の装填比重 $\Delta = 1.4$ であり(第2報IV項参照)、この比重に於る爆速は木原、正田氏等の報告⁷⁾より夫々 7100m/sec 及び 6700m/sec である。又 $\Delta = 1.4$ に於ける W と D の比は、両者とも $W/D = 0.4$ 即ち、 $W = 0.4D$ である⁷⁾。従って雷管の爆圧が添装薬自体の爆圧に比例すると仮定すればペントリット雷管の衝撃による起爆力 S_{IP} とテトリール雷管の起爆力 S_{IT} との比は

$$\frac{S_{IP}}{S_{IT}} = \frac{(7100 \times 0.4 \times 7100)^{1/2}}{(6700 \times 0.4 \times 6700)^{1/2}} = \left(\frac{7100}{6700}\right)^{1/2} = 1.3$$

即ち S_I はペントリットの場合テトリールの1.03倍である。

(b) 破片作用

管体が一定の場合には (8) 式に於る破片の摩擦係数 μ 、破片の比重 M/a は共に一定となるので $K_F \cdot \mu M/a = K$ とおけば

$$S_F = K_F \cdot \mu VM / a = K \cdot V \dots\dots\dots (12)$$

即ち S_F は破片速度 V に比例する。

次に破片速度 V に影響する要因を考える。Marjich 氏の報告⁹⁾によれば、添装薬を TNT, テトリール, ペントリットとした雷管で、添装薬自体の爆速 D と破片速度 V との間に比例関係が成立している。次に V と装薬量 W の関係について考察すると、日下部氏等の報告⁹⁾では 3, 6, 8 号雷管の破片速度は夫々 1950, 2250, 2450m/sec であって、これは装薬量 w の $1/2$ 乗に比例している。従って (12) 式は次の如くなる。

$$S_F = K \cdot D w^{1/2} \dots\dots\dots (13)$$

添装薬種のみが変る場合には w は一定であるから S_F は D のみに比例するので、ペントリットとテトリールとについて比較すると

$$\frac{S_{FP}}{S_{FT}} = \frac{7100}{6700} = 1.06$$

(c) 熱作用

熱による起爆作用 S_H は (10) 式で表わされるが、雷管の爆発による加熱時間は雷管が爆発を開始してから終了するまでの時間に比例するとすれば

$$t = k (h/D) \dots\dots\dots (14)$$

茲に h は薬高, D は爆速 k は比例係数である。

ペントリットとテトリールの 6 号雷管について比較すると, $A=1.4$, $w=0.45g$ で一定であるから, h は夫々 10.4mm, 10.6mm (実測値) であり, D は夫々 7100m/sec, 6700m/sec であるから t は夫々 1.46 及び 1.58 μ sec に比例する。又爆粉部分の t は, $h=10mm$ (実測), $D=4000m/sec$ ⁹⁾ より 2.5 μ sec で、これはペントリット雷管, テトリール雷管何れにも共通であるから、両雷管の t の比率は (1.46+2.5) : (1.58+2.5) 即ち 3.96/4.08 となる。

又爆発熱量 Q はペントリット雷管とテトリール雷管とで 3 回の実測値の平均が前者は 1390cal/本, 後者は 1190cal/本 となったので、両雷管の S_H の比は (10) 式より

$$\frac{S_{HP}}{S_{HT}} = \left(\frac{1390}{1190} \right) \left(\frac{3.96}{4.08} \right)^{1/2} = 1.15$$

2.2 添装薬量の影響

(a) 衝撃作用

添装薬量が変わっても圧搾圧力 (装填比重) や薬種が同じ場合には A, D, W は何れも一定となるのでこの場合 (6) 式に於る S_I は薬量 w のみの函数となる。

例えば混成 8 号雷管 (装薬量 1.4g) と混成 6 号雷管 (装薬量 0.85g) の比率は

$$\frac{S_{I8号}}{S_{I6号}} = \left(\frac{1.4}{0.85} \right)^{1/2} = 1.075$$

(b) 破片作用

管体が一定であるから破片による起爆力 S_F は (13) 式によって計算されるが、この場合 D は一定であるから S_F は $w^{1/2}$ のみに比例することとなり、8 号と 6 号の比率は

$$\frac{S_{F8号}}{S_{F6号}} = \left(\frac{1.4}{0.84} \right)^{1/2} = 1.29$$

(c) 熱作用

S_H は (10) 式より $Qt^{1/2}$ に比例するが、爆発熱量 Q は装薬量 w に比例するので $Q=k\omega$ であり、加熱時間 t は装薬長に比例すると考えれば、薬長は薬量に比例するので $t=k'\omega$, 即ち A, D が一定で w のみ変る場合には (10) 式は次の如くなる。

$$S_H = K_H \cdot Qt^{1/2} = K \cdot \omega \omega^{1/2} = K\omega^{3/2}$$

従って 8 号雷管と 6 号雷管の比率は

$$\frac{S_{H8号}}{S_{H6号}} = \left(\frac{1.4}{0.85} \right)^{3/2} = 2.12$$

2.3 添装薬圧搾圧力 (装填密度) の影響

(a) 衝撃作用

添装薬の装填密度 A は普通 1.4 程度であるが、実用上は 1.3~1.5 (圧搾圧力として 40~150kg/本) の範囲で変化することがあると推定されるので、両極端の場合、即ち $A=1.3$ と $A=1.5$ の場合について比較する。

衝撃による起爆力 S_I は A, D, W, w に関係するが、この場合は w は一定である。 A と D 及び W との関係は木原、疋田氏の計算⁷⁾によれば、テトリールの爆速 D は, $A=1.3$ のとき 6500m/sec, $A=1.5$ のとき 7200m/sec であり、又 W は夫々の場合 1570 m/sec, 1710m/sec であるから、 $A=1.5$ のときと 1.3 のときとの S_I 比は (6) 式より

$$\frac{S_{I1.5}}{S_{I1.3}} = \left(\frac{1.5 \times 7200 \times 1710}{1.3 \times 6500 \times 1570} \right)^{1/2} = 1.10$$

(b) 破片作用

管体が一定であるから、破片による起爆力 S_F は (13) 式より $Dw^{1/2}$ に比例するが、この場合 w は一定であるから単に D に比例し、次の如くなる

$$\frac{S_{F1.5}}{S_{F1.3}} = \frac{7200}{6500} = 1.11$$

(c) 熱作用

S_H は (10) 式より $Qt^{1/2}$ に比例するが、 Q について考察すると、 $A=1.3$ の場合と $A=1.5$ の場合に於て、雷管/テトリール 6 号 混成雷管の爆発熱量を測定すると、3 回の平均値が両者とも約 1200cal/本であった。即ち A の差異がこの程度では Q は殆んど変らないと考えられる。

又加熱時間 t は (14) 式より h/D に比例するとすれば、 $A=1.5$ 及び 1.3 のとき、夫々 $h=10.0$ 及び

11.7mm(実測値)であり、 D は夫々 7200 及び 6500 m/sec であるから、添装薬部の t は夫々 1.4 及び 1.8 μ sec となり、爆粉部分の $t=2.5\mu$ sec を加えると装薬部分全体の t は夫々 3.9 及び 4.3 μ sec となる。

従って (10) 式より次の如くなる。

$$\frac{S_{H1.3}}{S_{H1.3}} = \left(\frac{3.9}{4.3}\right)^{1/2} = 0.95$$

即ち装薬比重は大きい方が却って熱効果小さい。このことは雷管のメタン着火が添装薬の圧搾圧力が高い方が却って安全になるという事実¹⁰⁾を説明する理由の一つと考えられる。

2.4 管体材質の影響

(a) 衝撃作用

装薬が一定であれば (6) 式に於る d , w は一定となるので、管体材質によって影響を受けるのは密閉強度によって変ると推定される D と W である。然し、日野氏の実測¹¹⁾によれば、薬径や装薬密度を同一条件として、テトリールの爆速は厚さ 6 mm の鋼管に填実した場合 5690m/sec、厚さ 0.5mm のボール紙筒に填実した場合 5650m/sec であって、密閉強度による爆速の差異は非常に小さい。又雷管の薬径とはほぼ等しい 6.5mm の薬径で、 $d=1.5$ 、長さ $l=10$ cm のテトリールのダブレットをセロハンに包んで廻転カメラで爆速を測定すると $D=7000$ m/sec であって¹²⁾、密閉強度は弱くても爆速は低下しない。然るに管体の密閉強度は実用上 200~500kg/cm² の範囲にあるので、この程度のちがいで爆速への影響は殆んど認められないと思われ、従って (6) 式の右辺は一定となり

$$S_f = \text{const}$$

となる。即ち管体条件(管体材質や肉厚)を変えても装薬が一定であれば S_f は変らない。

(b) 破片作用

破片による起爆力 S_p は (8) 式より μ , V , M/a に比例するが、装薬が一定であれば D と W は一定であるから破片速度 V も一定となる。従って以下 μ と M/a について銅管体と合成樹脂管体について比較する。最近では合成樹脂管体でも金属管体に劣らない起爆力を有するものがあるが、ここでは起爆力の弱い PVC 雷管と銅雷管とを比較する。

先ず M/a は破片の比重を表わすので Cu の場合は 8.92、PVC (硬質) の場合 1.45 である。

摩擦係数 μ は破片の硬度、融点、形状等種々の要因に関係するので、厳密に云えば破片 1 個 1 個で異なる。従って μ を実測することは困難であるが、比較値を得るために Cu 雷管と PVC 雷管の場合について雷管爆発後の破片を回収してペントリットに混入

し、落槌試験を実施したところ、落槌重量 222g で 50% 発火落高は Cu 雷管の破片を混入したペントリットでは 16.4cm であり、PVC 雷管の破片を混入したペントリットでは 21.8cm となり管体破片を混入しないペントリットでは 31.5cm であった。これによって管体破片の混入によって爆薬は鋭敏となること及び銅雷管の μ は PVC 雷管の μ より大きいことがわかる。

即ち S_p Cu と S_p PVC の比は両者の破片の比重 M/a の比 $8.92/1.45=6.3$ よりも μ の影響が含まれるだけ更に大きい差異があると考えられる。

(c) 熱作用

管体材質が変わると発熱量 Q が変わるが、装薬量が変わらない限り加熱時間への影響は少いと考えられるので、管体材質のみが変わった場合には (10) 式は次の如くなる。

$$S_H = K \cdot Q$$

Cu 雷管と PVC 雷管の爆発熱量は第 5 報の表 2 により夫々 1188cal, 1238cal であるから両者の比は

$$\frac{S_H \text{ Cu}}{S_H \text{ PVC}} = \frac{1188}{1238} = 0.96$$

即ち S_H は PVC 雷管の方が却って Cu 雷管より若干大きい。

2.5 管体内厚の影響

(a) 衝撃作用

S_f はこの場合も 2.4 項の (a) と同様であるから、管体内厚によっては S_f は変らない。

(b) 破片作用

管体内厚は変っても材質が一定であれば破片の比重を表す M/a は一定であり、破片の摩擦係数 μ もほぼ一定と考えられるので、(8) 式より S_p は破片速度 V のみの函数となるが、前述の如く管体の密閉強度によって装薬の爆速は殆んど変わらず、即ち装薬が一定であれば V は一定となる。従って (8) 式の右辺はすべて一定となり、管体の肉厚のみが変っても S_p は変らない。

(c) 熱作用

装薬条件が一定であれば、前述の如く爆速は管体内厚によって殆んど変らないので、爆発時間 t は殆んど一定と考えることが出来る。

又管体内厚による爆発熱量 Q の実測値は管体内厚が 0.18, 0.25, 0.30% の場合夫々 1200, 1240, 1230 cal/本であって実用上 Q も変らない。

従って実用上は管体内厚によって S_H も変らないと考え得る。

以上雷管の製造条件を変えた場合に雷管起爆力がどの様に変るかについて計算例を示した。

要 約

従来、雷管の威力とは猛度であるとの見解の下に、雷管威力の計算値としては爆轟圧力等が利用されていたが、筆者は雷管による爆薬の起爆現象に熱起爆説を適用し、雷管の衝撃作用、破片作用、熱作用すべてを含む雷管の総合威力の計算式として近似的に次式を導出した。

$$S_T = K_I \cdot (\Delta DW)^{1/2} \cdot \omega^{1/2} + K_F \cdot \mu VM/a + K_H \cdot Qt^{1/2}$$

右辺第一項は衝撃による起爆力を、第二項は破片による起爆力を、第三項は熱による起爆力を表わす。又上式中 Δ は装填比重、 D は爆速、 W はガス流速、 ω は薬量、 μ は破片の摩擦係数、 M は破片の重量、 V は破片速度、 a は破片の容積、 Q は爆発熱量、 t は爆発による加熱時間、 K_I 、 K_F 、 K_H は夫々比例常数である。

上式を適用して雷管の製造条件、例えば、添装薬種、薬量、圧搾圧力、管体材質、肉厚を変えた場合に雷管の起爆力がどの様になるかを計算した。

謝 辞

第1報～第6報に亘る本研究は、日本化薬KK折尾作業所に於て行われたものであるが、終始御指導御鞭撻を蒙った研究課長木下四郎氏、及び原稿を閲読して戴き種々有益な御教示を賜った原狭作業所研究課長日野熊雄氏、東大工学部正田教授、岡崎助教授に深謝す

る次第である。又実験に際して多くの御協力を蒙った有村武人氏、勝原幾生氏、工藤隆義氏に厚く御礼を申上げる。

文 献

- 1) F.P. Bowden & A.D. Yoffe: "The Initiation and Growth of Explosions in Liquids and Solids" p.33 (1952), Cambridge
- 2) 植竹万太郎: 東大工学部火薬学科卒業論文 (1936)
- 3) 日下部正夫, 井田一夫: 工火協, 19, 353 (1958)
- 4) 伊藤一郎, 寺田孚: 日本鉱業会誌, 昭和33年, 2月号, p.75 (1958)
- 5) 山家信次: 火兵, 31, 585 (1938)
- 6) G.B. Bryan & E.C. Noonan: Proc. Roy. Soc. 特別号, p.175 (July. 1958)
- 7) 木原太郎, 疋田強: 工火協, 13, 111 (1952)
- 8) A. Majrich: 火協, 5, 142 (1943)
- 9) Encyclopedia of Chemical Technology, vol.6, p.11 (1951) New York,
- 10) H. Elsner: DRP 803645 (1951)
- 11) 日野熊雄: 工火協, 9, 18 (1948)
- 12) 横川六雄他: 日化厚研, E, 1960-6号 (1960)

Studies on Initiation of Explosives by Detonator

Part VI The calculation of the strength of a detonator

by Kazuo Ida

(1) By the application of "Thermal initiation theory", the strength (initiation force) of a detonator is given approximately by the expression

$$S_T = K_I \cdot (\Delta DW)^{1/2} \cdot \omega^{1/2} + K_F \cdot \mu VM/a + K_H \cdot Qt^{1/2}$$

where S_T is the total strength of a detonator, Δ the loading density of the base charge, D the detonation velocity, W the velocity of flow, ω the weight of charge, μ the coefficient of friction of fragments of the shell, V the velocity of fragments, M/a the specific gravity of the shell, Q

the explosion heat of a detonator, t the heating period by explosion of detonator, K_I , K_F and K_H the proportional coefficient.

In the above expression the first term of right side means the impulsive effect, the second term the friction effect of fragments and the third term the heating effect of a detonator.

(2) The strength of several sorts of detonators were calculated by the application of above said expression.