

《実用講座》

爆 破 4

若 園 吉 一*
佐 藤 忠 五 郎**

2.15 現場における発破回路の計算

現場において計算を必要とする場合はつぎの方法によ
るとよい。

R—C 回路計算

発破回路の正確な計算には回路のインダクタンス、キ
ャパタンスと電気雷管白金線電橋部の抵抗の増大など
を考慮せねばならないが³⁾、計算が複雑となるのでこれ
らの影響を考慮しないで、単に点火器の放電電圧、コン
デンサー容量、および回路抵抗のみをもととして計算す
る。この単純な計算法をR—C回路計算と略称すること
とする。

(a) 尖頭電流値 n は直列電管数, m は並列数, r
は電気雷管1発の抵抗値とすれば,

$$\text{並列部合成抵抗 } R_1 = \frac{nr}{m} \dots\dots\dots(2.2)$$

$$\text{全抵抗 } R = R_1 + R_2 \dots\dots\dots(2.3)$$

ただし, R_2 は母線部抵抗

$$\text{母線電流 } I = \frac{V}{R} \dots\dots\dots(2.4)$$

ただし, V は点火器の放電電圧

$$\text{母線終端電圧 } V_e = I \times \frac{nr}{m} \dots\dots\dots(2.5)$$

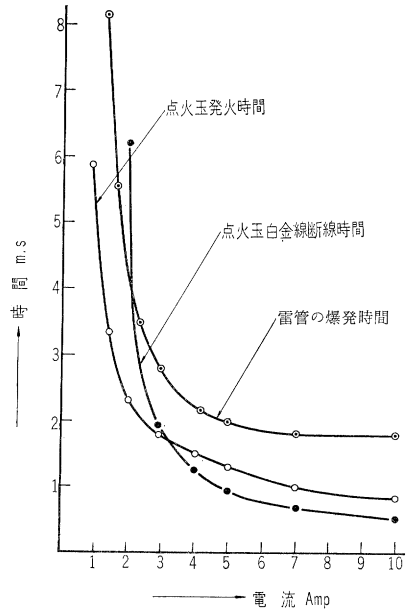
$$\text{尖頭電流値 } i_p = \frac{I}{m} \dots\dots\dots(2.6)$$

爆破を実施する際の直列結線, あるいは直並列結線に
おいて, 実際に電気雷管を多数斉発せしめるためには,
2アンペア以上の電流を流す必要があると考えられてい
る。電気雷管の点火玉はその構造上, 点火玉発火時間と
点火玉白金線電橋の断線時間に差があり, 定常直流では
3アンペアを境にしてそれより大きい電流では電氣的溶
断後発火し, それ以下の電流では点火によって機械的断
線が起きる。したがって, とくに確実を期す必要のある
爆破においては, 回路に実際に流れる尖頭電流値が3ア
ンペア以上が望ましい(図—2.8 参照)。

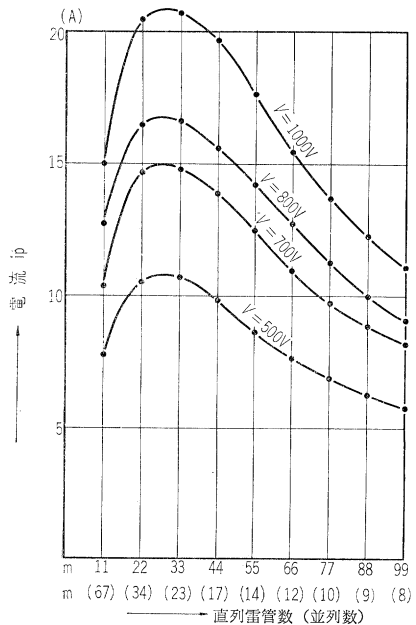
* 正員 工博 京都大学工学部
** 正員 工博 鹿島建設KK

爆破に際して電気雷管の点火を確実にするもっとも大
切な要素は, 点火器を放電するときの電気雷管に流れる
尖頭電流値をもっとも大きくすることである。電気雷管
の多数斉発において直列結線がよいか, 直並列結線がよ
いか, また直並列結線においてどういう結線がもっとも
尖頭電流値が大となるかを知るために, ある回路条件の

図—2.8 点火玉・発火時間(旭化成の実験による)
(電源は定常電流を使用した場合)



図—2.9 電気雷管の多数斉発の直並列結線
における尖頭電流値



もとに尖頭電流値を計算してみると 図-2.9³⁾ に示すようになる。この図は直並列結線の場合の尖頭電流値の傾向を示すもので、直列数が30発前後が最大の電流値を示し、直列数が減少しても増大しても尖頭電流値は小さくなる。したがって、尖頭電流値を大きくするためにはあまり多数の直列結線は直並列結線に比して有利ではなく、また直並列結線においても直列数を40ぐらいまでにするのが望ましい。しかし尖頭電流値があまり大きくなると電気雷管の電橋部がアーク放電を起こしてMS、DS電気雷管の効用を阻害することが起きるので、尖頭電流値は30アンペア以下とすべきである⁷⁾。単に尖頭電流値および尖頭電流値を最大ならしめる m, n を求めるには次式が便利である。

$$i_p = \frac{V}{nr + mR_2} \dots\dots\dots(2.7)$$

$$m = \sqrt{\frac{Nr}{R_2}}, \quad n = \sqrt{\frac{NR_2}{r}} \dots\dots\dots(2.8)$$

ただし、 $N = m \cdot n \dots\dots\dots(2.9)$

(b) コンデンサー容量 コンデンサーに蓄積されるエネルギー P は、

$$P = \frac{1}{2} CV^2 \times 10^{-6} \dots\dots\dots(2.10)$$

ただし、 P : Watt Second, V : コンデンサー電圧 V.D.C., C : コンデンサー容量 μF

したがって

$$C = \frac{2 \times 10^6}{V^2} \cdot P \dots\dots\dots(2.11)$$

なお、電気雷管1本の点火に必要なエネルギーは、点火力積の実験⁹⁾より平均4.00 m.w.s./ Ω ぐらいである。しかし漏洩、結線部抵抗その他の損失を考慮して一般には1本あたり10.00 m.w.s. あれば十分であろう(脚線の長さが特別に長いときは別に考慮する必要がある)。電気雷管回路エネルギー P_1 は、

$$P_1 = P \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \dots\dots\dots(2.12)$$

したがってコンデンサーエネルギーは、

$$P = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot P_1 \dots\dots\dots(2.13)$$

いまもし電気雷管1本の点火に要するエネルギーを10 m.w.s. とすれば

$$P_1 = 10 \text{ m.w.s.} \times (\text{電気雷管総数}) \dots\dots\dots(2.14)$$

式(2.13)を式(2.11)に代入すれば所要のコンデンサー容量がえられる。そこで、

$$\text{安全率} = \frac{\text{使用するコンデンサー容量}}{\text{所要のコンデンサー容量}} \dots\dots\dots(2.15)$$

(c) コンデンサー減衰時間 電気雷管の点火に必要な限界電流値を500 mA (表-2.2 参照)とし、ここまですべて減衰するのに要する時間を求めると、

$$\text{母線減衰電流} = 0.5 \text{ A} \times \text{並列接続数} = i$$

$$i = I e^{-x} \dots\dots\dots(2.14)$$

ただし、 $x = \frac{t}{RC \times 10^{-6}} \dots\dots\dots(2.15)$

$$\therefore t = RC \times 10^{-6} \cdot x \text{ (ms)} \dots\dots\dots(2.16)$$

(e^{-x} は一般には e^{-x} 指数関数の表による)

コンデンサーエネルギーが点火玉の発火に有効に与えられるためには、減衰時間は1.50 ms~2.50 ms 以内であることが望ましい。

2.16 計算例

2.16.1 R-C 回路の計算

普通一般に行なわれている、単に点火器の放電電圧とコンデンサー容量および回路抵抗のみをもととして計算してみる。

(a) 電気雷管40本直列結線の場合

点火器: 100 発掛, 電圧 $V=600 \text{ V}$,
コンデンサー容量 $8 \mu F$,

電気雷管: 白金線電橋部抵抗 $0.55 \Omega/\text{本}$

脚線部(長 $2.7 \text{ m} \times 2 \text{ 本}$) 抵抗 $0.63 \Omega/\text{本}$

電気雷管1個あたりの抵抗 $1.18 \Omega/\text{本}$

補助母線: $\phi 0.65 \text{ mm}$ ビニール線, 使用長 $50 \text{ m} \times 2 \text{ 本}$

補助母線の抵抗 $53.02 \Omega/\text{km}$

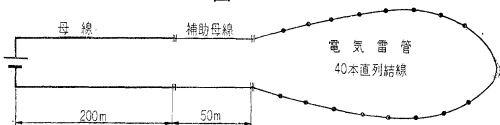
母線: 断面積 1.25 mm^2 キャブタイヤケーブル

使用長 $200 \text{ m} \times 2 \text{ 本}$

母線の抵抗 $14.86 \Omega/\text{km}$

① 尖頭電流値: 結線の方法は 図-2.10 のように電気雷管40本を直列に結線して斉発せしめるものとする。

図-2.10



電気雷管40個直列結線部の抵抗を R_1 とすれば、

$$R_1 = 1.18 \Omega/\text{本} \times 40 \text{ 本} = 47.20 \Omega$$

補助母線部の抵抗 R_2 は、

$$R_2 = 53.02 \Omega/\text{km} \times 0.1 \text{ km} = 5.30 \Omega$$

母線部の抵抗 R_3 は、

$$R_3 = 14.86 \Omega/\text{km} \times 0.4 \text{ km} = 5.94 \Omega$$

したがって発破回路の全抵抗 R は、

$$\begin{aligned} R &= R_1 + R_2 + R_3 \\ &= 47.20 + 5.30 + 5.94 \\ &= 58.44 \Omega \end{aligned}$$

点火器の放電電圧は600 V であるから、この回路に流れる電流 I は、

$$I = \frac{V}{R} = \frac{600}{58.44} = 10.27 \text{ Amp.}$$

この場合、電気雷管部を流れる尖頭電流値 i_p は、

$$i_p = I = 10.27 \text{ Amp.}$$

となる。

② コンデンサー容量の安全率：点火に必要なエネルギーは電気雷管1本当り 10 m.w.s. あれば十分であると考えれば、電気雷管部の消費エネルギー P_1 は、

$$P_1 = 10 \text{ m.w.s.} \times 40 = 0.4 \text{ w.s.}$$

消費エネルギーは抵抗に比例するから電気雷管1個当り 10 m.w.s., すなわち電気雷管部で 0.4 w.s. のエネルギーを消費するのに必要なコンデンサーのエネルギー P は、

$$P = \frac{R}{R_1} \cdot P_1 = \frac{58.44}{47.20} \times 0.4 = 0.5 \text{ w.s.}$$

このエネルギー P を出すのに必要なコンデンサー容量を C_0 とすれば、

$$P = \frac{1}{2} C_0 \times V^2 \times 10^{-6}$$

$$C_0 = \frac{2P \times 10^6}{V^2} = \frac{2 \times 0.5 \times 10^6}{600^2} = 2.8 \mu\text{F}$$

したがって、この回路において電気雷管1本当り 10 m.w.s. のエネルギーを供給するためには、点火器の電圧 600 V の場合コンデンサー容量は 2.8 μF あればよいことになる。いま使用する点火器のコンデンサー容量は 8 μF のものであるから安全率は、

$$\text{安全率} = \frac{8 \mu\text{F}}{2.8 \mu\text{F}} = 2.9$$

となる。

(b) 電気雷管 102 本直列結線の場合 電気雷管数が 40 本を越えて 100 本以上にもなった場合には、全部を直列に結線するか、または直並列結線にするかによって尖頭電流値がいちじるしく異なる。まずはじめに電気雷管数を 102 本として直列結線とする場合を考える。この場合は点火器は (a) の項で用いた 100 発掛では容量が不足するので、さらに大きな容量の点火器を使用する。

点火器：200 発掛，電圧 $V=600\text{V}$ ，

コンデンサー容量 60 μF

使用する電気雷管，補助母線および母線は (a) の場合と同一条件とする。

① 尖頭電流値：結線方法は 図-2.11 のように電気雷管 102 本を直列に結線して斉発せしめる。

電気雷管 102 本直列結線部の抵抗

$$R_1 = 1.18 \Omega/\text{本} \times 102 \text{ 本} = 120.36 \Omega$$

補助母線部の抵抗 $R_2 = 5.30 \Omega$

母線部の抵抗 $R_3 = 5.94 \Omega$

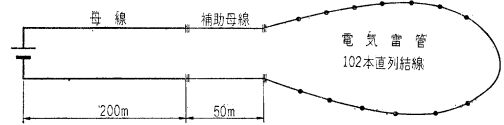
したがって発破回路の全抵抗

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \\ = 120.36 + 5.30 + 5.94 = 131.60 \Omega$$

点火器の放電電圧は 600 V であるから、この回路に流れる電流 I は、

$$I = \frac{V}{R} = \frac{600}{131.60} = 4.56 \text{ Amp.}$$

図-2.11



この場合、電気雷管を流れる尖頭電流値

$$i_p = I = 4.56 \text{ Amp.}$$

となる。

② コンデンサー容量の安全率：(a) の項で述べたように、点火に必要なエネルギーは電気雷管1本当り 10 m.w.s. あれば十分であるとして同様の計算を行なえば、

$$P_1 = 10 \text{ m.w.s.} \times 102 = 1.02 \text{ w.s.}$$

$$P = \frac{R}{R_1} \cdot P_1 = \frac{131.60}{120.36} \times 1.02 = 1.12 \text{ w.s.}$$

$$C_0 = \frac{2P \times 10^6}{V^2} = \frac{2 \times 1.12 \times 10^6}{600^2} = 6.2 \mu\text{F}$$

したがって、この回路においては、電気雷管1本当り 10 m.w.s. のエネルギーを供給するためには、点火器の電圧 600 V の場合コンデンサー容量は 6.2 μF あればよいことになる。いま使用する点火器のコンデンサー容量は 60 μF であるから、

$$\text{安全率} = \frac{60 \mu\text{F}}{6.2 \mu\text{F}} = 9.7$$

となる。

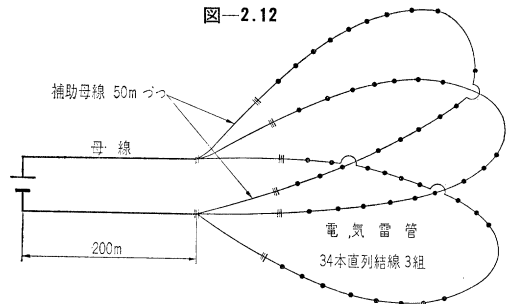
(c) 電気雷管 102 本を 34 直列 \times 3 並列結線の場合

つぎに尖頭電流値を最大にする結線法を考える。直並列結線の場合、尖頭電流値の最大となるのは直列数 30 本前後のときであるから、102 本の電気雷管を 34 直列 \times 3 並列の結線として斉発せしめる。点火器、電気雷管、補助母線および母線は (b) の場合と同一条件とする。

① 尖頭電流値：結線方法は 図-2.12 に示すようにする。すなわち電気雷管 34 本と補助母線 1 組を直列につないだもの 3 組を、母線に並列に結線する。

電気雷管 34 本と補助母線の直列結線部の抵抗、

図-2.12



$$r_1 = r_2 = r_3 = 1.18 \Omega/\text{本} \times 34 \text{ 本} + 5.30 \Omega = 45.42 \Omega$$

電気雷管並列結線部の合成抵抗 R_{1+2} は、

$$\frac{1}{R_{1+2}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}$$

$$R_{1+2} = \frac{r_1}{3} = \frac{45.42}{3} = 15.14 \Omega$$

母線部の抵抗, $R_3 = 5.94 \Omega$

したがって発破回路の全抵抗は,

$$R = R_{1+2} + R_3 = 15.14 + 5.94 = 21.08 \Omega$$

点火器の放電電圧は 600 V であるから, この回路に流れる電流 I は,

$$I = \frac{V}{R} = \frac{600}{21.08} = 28.46 \text{ Amp.}$$

この場合, 電気雷管結線部に流れる尖頭電流値は,

$$i_p = \frac{I}{m} = \frac{I}{3} = \frac{28.46}{3} = 9.49 \text{ Amp.}$$

となる。

この値と (b) の電気雷管 102 本直列結線の場合の尖頭電流値 4.56 Amp とを比較すると, 電気雷管 34 本直列 × 3 並列結線のほうが 2 倍の尖頭電流を流すことができ, 電気雷管の多数斉発には非常に有利である。

また, 電気雷管がたとえば 103 本で, 並列部の雷管数が 34 本, 34 本, 35 本と不ぞろいになる場合, その尖頭電流値を計算すると並列部にそれぞれ 9.51 Amp., 9.27 Amp. が流れることになり, 並列部の電気雷管数を上記のようにだいたいそろえて, それぞれの抵抗値をほぼ等しくしておけば, (c) の場合の計算値と大差なく実用上支障はないと考えられる。

② コンデンサー容量の安全率: (a) の項と同様の計算を行えば,

$$R_1 = \frac{1.18 \Omega / \text{本} \times 34 \text{ 本}}{3} = 13.37 \Omega$$

であるから,

$$P_1 = 10 \text{ m.w.s.} \times 102 = 1.02 \text{ w.s.}$$

$$P = \frac{R}{R_1} \cdot P_1 = \frac{21.08}{13.37} \times 1.02 = 1.61 \text{ w.s.}$$

$$C_0 = \frac{2P \times 10^3}{V^2} = \frac{2 \times 1.61 \times 10^6}{600^2} = 8.9 \mu\text{F}$$

所要コンデンサー容量は 8.9 μF であるが, いま使用する点火器のコンデンサー容量は 60 μF であるから,

$$\text{安全率} = \frac{60 \mu\text{F}}{8.9 \mu\text{F}} = 6.7$$

となる。

2.16.2 電気雷管白金線電橋の抵抗増大を考慮した計算

実際の電気発破に際しては, 2.16.1 の項の R-C 回路のほか, 放電時において電気雷管の白金線電橋の抵抗値が大體 2 倍に増加し, またインダクタンス, キャパシタンスなどの影響があって電流値はさらに低下する³⁾。しかし, 一般に現場における普通の電気発破では, インダクタンス, キャパシタンスなどは計算が複雑なのでこれらの影響は一応無視することとし, ここでは電気雷管の白金線電橋の抵抗値が放電時に 2 倍になることだけを

考慮して計算してみる。

2.16.1 の (a), (b), (c) 項は電気雷管 1 本当りの抵抗が増大して,

電気雷管: 白金線電橋部抵抗

$$0.55 \Omega / \text{本} \times 2 = 1.10 \Omega / \text{本}$$

脚線部抵抗

$$0.63 \Omega / \text{本}$$

電気雷管 1 本当りの抵抗

$$1.73 \Omega / \text{本}$$

となる。この値を用いて 2.16.1 の (a), (b), (c) 項の尖頭電流値を計算すれば,

(a) の場合 $i_p = 7.46 \text{ Amp.}$

(b) の場合 $i_p = 3.20 \text{ Amp.}$

(c) の場合 $i_p = 7.32 \text{ Amp.}$

をうる。これらの値と 2.16.1 の R-C 回路の計算値とを比較すると表-2.5 のようになる。

表-2.5 電流値の比較

点 火 器	結線方法	R-C回路による尖頭電流値	白金線電橋の抵抗が2倍とされたときの尖頭電流値	尖頭電流値の低下率
600 V, 8 μF	直列 40本	10.27 Amp.	7.46 Amp.	73%
600 V, 60 μF	直列 102本	4.56 "	3.20 "	70%
600 V, 60 μF	直列 34本 × 3 並列	9.49 "	7.32 "	77%

現場で実施する普通の電気発破においては表-2.8 に示す尖頭電流値の低下率を考慮し, さらにインダクタンスなどによる影響も加えれば, 発破時の実際に流れる尖頭電流値は 2.16.1 の R-C 回路の計算値に対して,

$$\text{実際の尖頭電流値} = (\text{尖頭電流の計算値}) \times 0.6$$

程度を考えるべきであろう。電気発破に際して, 計算値にくらべ実際に流れる電流値がこのように低下するので, これを考慮に入れて発破回路の計算を行なうべきである。またインダクタンスの影響を減少するためには, 単心母線 2 本を密着して使用する必要がある。コンデンサー容量については, 点火器の定格容量 (公称能力, 何発掛) 以内で使用する場合は, 点火エネルギーは十分あるので, 普通の電気発破では計算する必要はないものと考えられる。

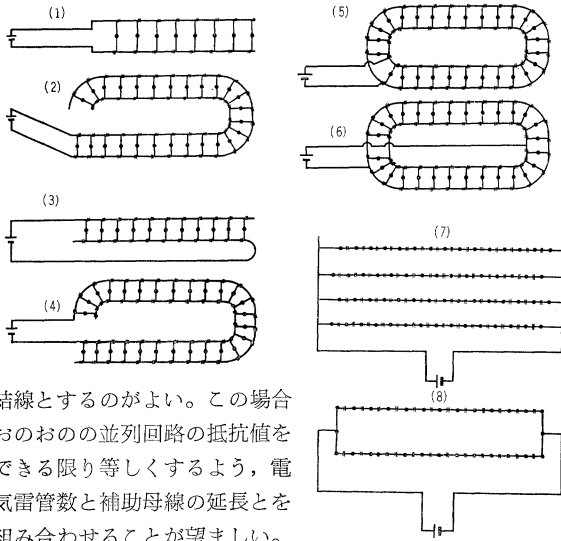
2.17 現場における電気発破の結線方法

現場における電気発破に際して結線の方法をどういう方法にするかは, 現場の気象, 地質, 削孔などの条件によって一概にいえませんが, 土木現場において多数の電気雷管を確実に斉発せしめるためには,

① 直列結線の電気雷管数は, 電源電圧がそうとう高くとも (400 V.D.C. 以上であっても) 40 発程度までとして結線したほうがよい。

② 直列 40 発程度以上の場合には図-2.13⁴⁾に示すようないろいろな直並列結線の方法があるが, 現場でもっとも簡便に多数雷管を斉発せしめる方法は図-2.14 に示すように, 母線終端 1 カ所で結線できるような直並列

図-2.13 各種直並列結線の方法



結線とするのがよい。この場合おのの並列回路の抵抗値をできる限り等しくするよう、電気雷管数と補助母線の延長とを組み合わせることが望ましい。

最近、点火器の電圧を1000~1200V程度に高めてコンデンサー容量を小さくした小型軽量の点火器が用いられるようになったが、電気雷管の多数斉発の場合に点火器の電圧を高くして直列結線とすると尖頭電流値は十分であっても、電圧が高いため裸線の結線部分あるいは電気雷管の脚線の損傷箇所などのリーク(Leak, 漏電)によって不発を起こすことがあるので、あまり多くの電気雷管を直列結線で斉発せしめるのはさけたほうがよい。

2.18 現場における不発の原因

爆破を実施するため、電気点火器を用いて点火しても不発を生ずることがある。爆破の不発の原因はいろいろの原因が考えられるが、現場において遭遇するもっとも多い不発の原因はつぎのものが考えられる。

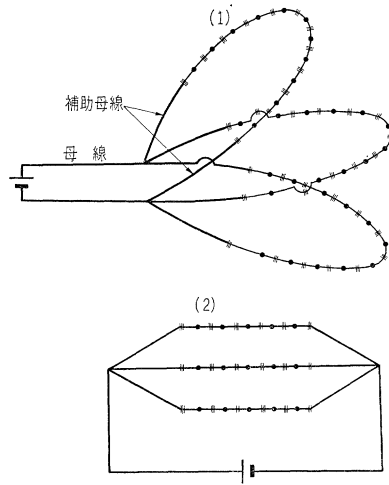
(1) 断線によるもの

これは脚線あるいは補助母線、母線のビニール被覆をはいで結線のための裸線部を作るに際して、ニッパまたはペンチの刃が銅線に損傷を与えて結線後に断線する場合は非常に多い。ビニール被覆をはいだときに心線のビニール被覆の末端を爪で押上げて、心線の表面の溝傷の有無を点検すれば防止できる。

(2) リーク(Leak)によるもの

各結線部分の防湿をほどかさず点火すると、裸線部が接地してリークの現象を起こす。リークの箇所が2カ所以上ある場合には直列結線部の両端の部分が爆発しても中央部分が不発となることが多い。これは発破回路を流れる尖頭電流値が不発部分については不足するからである。リークを防止するためには各結線箇所をラ線状に巻いて裸線部の接地をさけるか、または裸線部をすべてビニールテープを用いて防湿する必要がある。導通試験

図-2.14 現場における簡便な直並列結線の方法



の結果導通があったからといって必ずしも完爆するとは限らない。

(3) 電気点火器の容量不足によるもの

発破回路に流れる尖頭電流値は電気点火器の容量、能力と発破回路条件(R

—C 回路計算では回路の抵抗値)によって定まる。したがって、電気点火器の容量能力が不足する場合は、発破回路に流れる尖頭電流値が部分的に点火玉の点火に必要なエネルギーを与えない場合が生じて一部分不発となることがある。また電気点火器が故障を起して(主として絶縁不良か接触不良のため)定格出力を出していない場合がある。したがって電気点火器は随時出力計(能力試験器)を用いて容量、能力を点検する必要がある。

2.19 むすび

以上は、土木現場における爆破実施についての必要事項の概要を述べたものであるが、爆破はその取り扱い上において常時危険をとまなうものなので、必ず火薬法規を厳守して危害予防と安全作業に万全を期し、爆破作業においては慣れるにしたがってますます細心の注意と準備の完全を期し、爆破実施にあたってはいかなる条件下の発破作用においても安全に完爆せしめることを心がけねばならない。

参考文献

- 1) 通産省火薬班校閲、一橋書房編輯部編：“最新火薬法令集”，一橋書房，1961
通産省軽工業局無機化学課編：“改正火薬類取締法令解説”，日本産業火薬会内資料編輯部，1961
- 2) 山本祐徳、浜野元継：“最新火薬必携”，一橋書房，1961
- 3) 佐藤忠五郎：“爆破によるダム基礎掘削における設計施工上の諸問題”，鹿島建設技術研究所出版部，1960
- 4) Du Pont：“Blasters' Handbook”，1958
- 5) 教育総監部：“爆薬戦闘の参考”，1945
- 6) Hans-Georg Halbel, Clausthal: Nobel Hefte, January, 1956. Abb. 2 Kurbenbild der Versuchsreihe.
- 7) 伊藤一郎・若園吉一・藤中雄三：“大電流による電気雷管の点爆について”，工業火薬協会誌，21巻5号，1960，9，10月号 (文責 佐藤忠五郎)