

電気雷管の発火性と瞬断発破回路

田 中 一 三*

電気雷管の発火と同時、あるいはその少し以前に回路を遮断して、爆発後は発破母線上に電圧の残らないような発破回路を作成した。

このための基礎データとして、電気雷管の発火性、すなわち発火時間と点火玉ブリッジの破断時間を、発破電流との関係において測定した。

その結果、電流がある臨界値を超えると、ブリッジの破断は雷管の発火に先行して起り、電流が小さい場合は、両者が同時に起ることを知った。ただし後者の現象は、ブリッジの破断が雷管添装薬の爆発によってもたらされるため、点火玉単体ではブリッジ破断は発火よりも遅れるものである。上記の臨界電流値は、ふつうの電気雷管で約 3.5A であった。

従って所期の発破回路は、電気雷管中のブリッジの破断時に主回路を遮断するようなスイッチ部分を組込むことで達成される。

本報告では、電気雷管および点火玉の発火性に関する測定結果とその考察、ならびに作成した発破回路の実例について述べた。また低電流域における雷管の発火とブリッジ破断の同時性について、別の方向からも検討した。

1. 緒 言

電気測定を伴う爆発実験では、発破母線上の電圧が測定妨害となることがしばしばある。そのとき導火線発破にすればこの困難は除けるが、水中爆発のように導火線発破のやりにくい場合がある（そして水が電気の良い導体であるため、よけいに母線電圧の影響を受けやすい）。

通常の発破器では、雷管の爆発後も母線には電圧がかかったままである。コンデンサー式発破器では、低抵抗による強制放電の回路がついているが、ミリ秒のオーダーで現象を考えるとときには全く無効である。こうして高電圧のかかった電線が、爆発後に空中または水中に露出すれば、それが周囲に妨害電流の発生源となることは明らかである。

これの解決には、発破母線への電流供給スイッチは、雷管に必要な電流を流したあとで自動的に遮断されるようなものでなくてはならない。このような回路方式はいろいろ考えられるが、最も簡単な方法として、電気雷管中の点火玉ブリッジの破断時に、電流を遮断することが考えられる。しかしこれが前記のように、爆発以前に電流を遮断することに結び付くかどうか

かは、実験的にたしかめる必要がある。

筆者はこのような方針で、はじめに点火玉と電気雷管について、ブリッジ破断時間および発火時間を、発破電流との関係において測定した。そして電流があるていど大きくなると、ブリッジの破断が発火に先行することをたしかめた。実はこの現象は、鈴木氏等¹⁾の報告にも述べられているが、ここでは電流範囲を大幅に変えてさらにくわしく測定した。

発破電流が小さいときには、ブリッジの破断以前に発火が起るが、電気雷管では起爆薬と添装薬の爆発が起るために、ブリッジは発火と同時に機械的に破断される。

これらの事実の上に、筆者はサイリスターを使って、ブリッジ破断時に自動的に回路を遮断する発破器を作成し、本報告でそれを「瞬断発破回路」と呼んだ。

この回路によれば、発破電流は雷管の爆発より以前か、あるいは全く同時に切れることになり、その使いわけは発破電流の大小による。前者では、爆発の時点より前から母線には、電圧がかかっていないことになり、当初の目的にかなったものである。一方後者の方式にも長所があって、それは雷管爆発時にあたる電気信号を、簡単に発破器から取り出して、オッシロスコ

昭和48年10月19日受理

* 東京工業試験所第7部 神奈川県平塚市新宿5

ープのトリガー、または瞬間写真のフラッシュ同期などに使えることである。

この報告でははじめに、点火玉および電気雷管の発火時間等に関する筆者の測定結果を述べ、そのあとで瞬断発破回路と特性について述べる。

2. 実 験

2-1 発破電流制御とサイリスター

発破器では、10A以上におよぶ電流回路を開閉することが必要である。本研究では、このようなスイッチの役割を、固体素子であるサイリスターで行っている。はじめにサイリスターの動作について簡単に述べておく。

サイリスターはSCRとも呼ばれ、トランジスターと同様、3本脚の素子で、陽極、陰極およびゲートからなる。陽極陰極間に電圧をかけても、ゲートに信号を加えなければ、サイリスターはオフ状態で、両極間には電流が流れない。ゲートに信号が加わると、サイリスターは瞬間的にオン状態となり、電流が流れる。すなわちサイリスターは、ゲート信号で制御するスイッチである。

サイリスターをスイッチに用いることの特長は、ゲートに信号が加わって一度オン状態になると、あとは信号が消えても電流は流れ続けることである。このために、サイリスターを発破器に用いることには、二重の長所があるように思われる。第一は従来の機械的スイッチでは、これを開閉するとき、振動的なオンオフのくり返し(チャタリング)があるのに対し、サイリスターでは全くそれが無いこと。第二は、機械的な接点がないために、いくら大電流を開閉してもスパーク発生のおそれはなく、危険な場所でもガス引火の心配がないことである。

一度オンしたサイリスターをオフ状態に戻すには、陽極電圧を切ればよい。瞬間的にこれを行うには、陽極にマイナスのパルスを加えればよく、後に述べる瞬断発破回路はこの方法によっている。

サイリスターの主な規格は、陰陽極間の耐圧と許容電流である。ここでの実験に用いたサイリスターは、日立製 CV 01B で、耐圧 100V、電流 1.6A のもので、サイリスターとしては最も小形の種類である。なおこの電流は逆統通電時の定格で、発破電流のような瞬間的なサージ電流は、この10倍位まで許容される。

2-2 発火性能の測定法

点火玉および電気雷管の発火性能をしらべるために、つぎのような実験を行った。

Fig. 1 は、点火玉に電流を流したとき、通電開始からブリッジ破断までの時間 T_b 、および点火玉の発

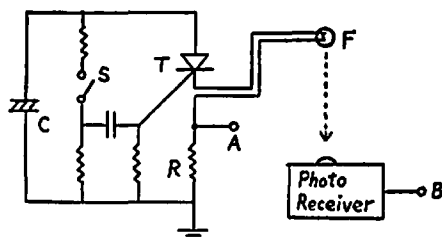


Fig. 1 Method for measuring the breaking time of wire bridge (T_b) and the firing time of fusehead explosive (T_f)

火に至るまでの時間 T_f を測定するための回路装置である。

図でサイリスター T は、充電されたコンデンサー C を電源として、点火玉 F に電流を供給するためのスイッチの役割を果たす。抵抗 R は、発破電流の大きさを測るためのもので、この場合 1.0Ω とした。従って、図の A 点の電圧が、そのままアンペア単位で点火玉を流れる電流値になる。発破電流を変化させるには、コンデンサー C ($2,200\mu\text{F}$) の充電電圧を変えた ($10\sim 25\text{V}$)。

サイリスターをオン状態にするには、図のスイッチ S を閉じれば、ゲートにプラスパルスが与えられる。このときから、点火玉に発破電流が供給されるが、点火玉のブリッジが破断すると、電流は流れなくなる。従って電流の流れている期間を、ブリッジ破断までの時間とする。

一方、点火玉の発火時間は、発火の光を光電回路で検出することにした。受光回路は、筆者が以前本誌に述べたフォトダイオードを組み込んだもので²⁾、これを点火玉から 20cm の位置においた。

こうして発破電流の値(すなわち A 点の電位)、および発火による光電信号 (B 点) を、オシロスコープまたはデジタルレコーダに記録した。

電気雷管について測定するときも全く同様である。ただ受光回路は雷管から 2 m 離し、さらに光を弱めるためにフィルターをかけた。

2-3 試 料

実験に使用した点火玉および電気雷管は、つぎの通りである。

点火玉 A : 日本油脂植木工場, 1973年 8月製
実験時に製造後10日以内のものを、ロット別に5種類用意した。しかし測定結果にロット間の差異がほとんど認められなかったため、ここでは一括して同試料とした。

点火玉 B : 日本油脂植木工場, 1968年10月製

製造後の年月を経たものとして、この試料を用意した。

電気雷管：日本油脂植木工場，1973年2月製
DDNP 雷管

測定のパフォーマンス上、すべて同じメーカーで同一工場製のものを選んだ。

以上点火玉はロダン鉛系のもので、白金線ブリッジの抵抗は、約 0.55Ω であった。メーカーに問い合わせた結果では、上記1968年以降には、点火玉の規格は全く変わっていないとのことであった。

電気雷管の実験には、発破母線（長さ20m）を使用しており、母線抵抗は 0.86Ω であった。しかし以下の測定には、脚線や母線の抵抗を考えなくても良いように、発破電流をパラメーターとしている。

2-4 測定結果

得られた信号波形の例を、Fig. 2 に示す。上の写真は点火玉A、下は点火玉Bについてのもので、どちらも発火がブリッジ破断より遅れた場合である。

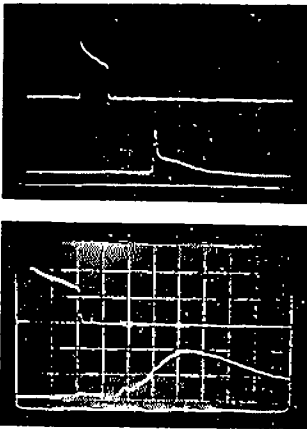


Fig. 2 Examples of recorded signals. First photo: Fusehead A, time scale 0.2msec. Second photo: Fusehead B, time scale 0.1msec. Upper beam shows blasting current in 4 A/div, and lower beam shows firing light in arbitrary scale, both indicating that breaking of wire bridge occurs before firing

ここで上側のビームは Fig. 1 の A 点の電位、すなわち、発破電流の変化を示し、ブリッジ破断時間 T_b は、この信号の継続時間から得られる。ただこの図にも見られるように、発破電流は通電期間中にやや低下し、これはブリッジの加熱による抵抗増加のためと思われる。従って結果の整理には、電流 I として平均値をとっている。

下側のビームは、受光装置で受けた発火光である。

発火時間 T_f は、この立上りからとった。点火玉Aでは、この立上りは鋭いが、点火玉Bではなだらかで、発光の持続時間も、Aにくらべて長いことがわかる。

上の測定では、同じ点火玉について T_b と T_f が同時に得られる。このうちの T_b 値だけを、発破電流 I との関係でプロットしたものが Fig. 3 である。この値については、試料A B間に差異がなかったため、図には両者を区別していない。図中の実線は、プロットの点から求めた点火玉の $T_b \sim I$ 曲線で、これについては次節に述べる。

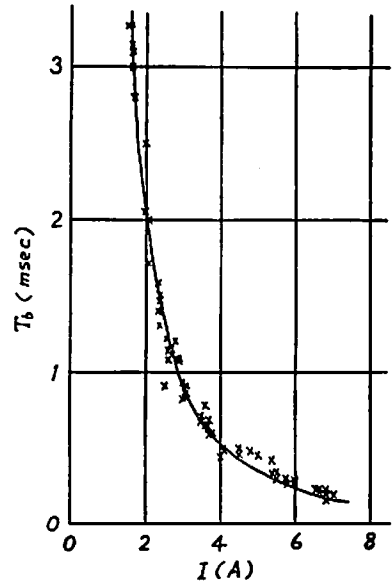


Fig. 3 Obtained relation between supplied current I and breaking time of wire bridge T_b

点火玉の発火時間 T_f は、ブリッジ破断時間 T_b にくらべるとばらつきが大きい。 T_f の値を発破電流 I との関係でプロットすると、Fig. 4 が得られた。このときは新しい試料Aと古い試料Bとの間に有意差が認められる。図には試料Aを白丸、試料Bを黒丸にとっている。図中の実線は、Fig. 3 で得た $T_b \sim I$ 曲線であるが、これとくらべた場合に T_f の方にはばらつきが大きいものの、 T_b と T_f の大小関係は、電流 $3 \sim 4 \text{ A}$ を境にして逆転していることがわかる。

電気雷管について同様な測定を行った結果を、Fig. 5 に示す。図には T_b と T_f を一緒にプロットしてある。電気雷管の場合の T_f は、受光装置を側面方向に置いてとらえたものであるが、雷管の発火光は後の Fig. 11 に見られるように、点火玉にくらべてはるかに急峻であった。図にはやはり、Fig. 3 で得られた点火玉ブリッジの破断時間の曲線が描き入れてある。

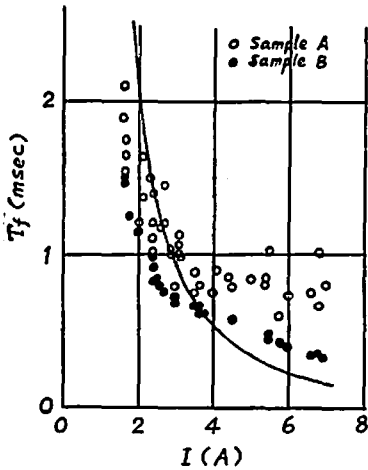


Fig. 4 Obtained relation between supplied current I and firing time of fusehead explosive T_f , T_b vs. I in Fig. 3 is drawn here for referential use

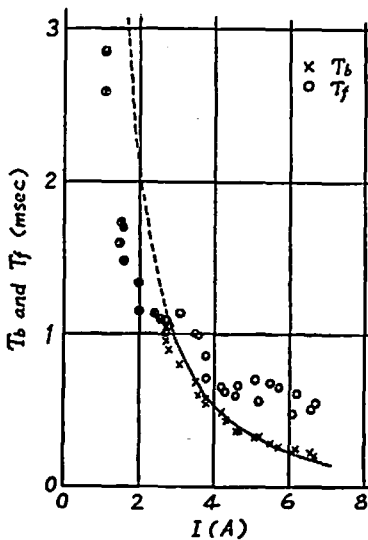


Fig. 5 Breaking time of wire bridge T_b and firing time T_f of electric detonator. Reference curve is T_b vs I relation of fusehead

この図ですぐわかるように、電気雷管の T_b は、電流 3 A 以下では点火玉の T_b とは異なった値をとり、 T_f と完全に一致している。

点火玉についての実験は、Fig. 3, Fig. 4 の図に入りきらない低い電流値についても測定しており、この結果は、次節の考察で適宜引用する。

3. 考察

上の実験結果の中で、瞬断発破回路の設計に必要な

ものは、 $T_b < T_f$ となるような電流値である。それは点火玉については Fig. 4 からわかるように、 $I > 3.5$ A といとればよい。以下この値のことを臨界電流と呼び、 I_c で表わすことにする。

点火玉ブリッジの電気抵抗を r 、電流を I としたとき、時間 T の間に供給されるエネルギーは、

$$E = rI^2T \quad (1)$$

である。

ここで T としてブリッジ破断時間 T_b をとり、各実験値ごとに、ブリッジ破断までのエネルギー、

$$E_b = rI^2T_b \quad (2)$$

を計算してみると、Fig. 6 のようになった。これは

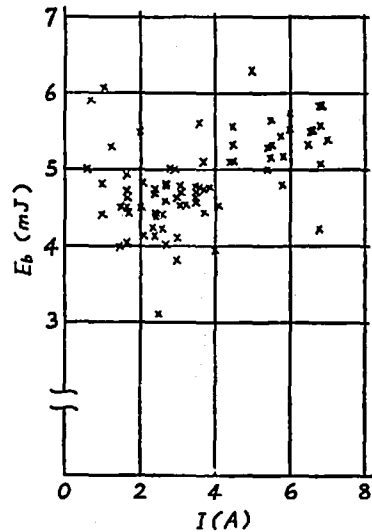


Fig. 6 Energy required for beaking wire bridge

発破電流との関係でプロットしてある。図で見ると臨界電流を境に若干差があるが、ほぼ 5 ± 1 mJ の範囲に収まっている。全測定値の平均をとって、

$$E_b = 4.7 \text{ mJ} = \text{const} \quad (3)$$

とて、(2) 式から $I \sim T_b$ のグラフを求めた結果が、Fig. 3 の曲線である。Fig. 3 における実験値との一致は極めてよく、(3) の仮定は妥当なものと思われる。

鈴木氏等¹⁾は、 $r = 0.58 \Omega$ の点火玉について同様な測定をしておられる。報告された値から E_b を計算してみると、電流 1.6 A 以上 (測定は 3.1 A まで) では、筆者の結果と合致しているが、1 A 以下では急激に小さくなっている (電流 0.7 A では 2.4 mJ)。氏等の測定法の詳細は不明であるが、これは恐らくブリッジ切断点をどこにとるかの違いであろう。Fig. 7 は点火玉 B に 2 A 以下の電流を流したときの波形例である

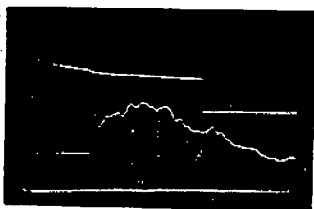


Fig. 7 Recorded signals at small blasting current, time scale 2 msec/div. (Fus-head B). Upper beam shows blasting current in 1A/div, lower shows firing light

が、このように電流が少くなると、点火玉の発火時に電流波形が小さな階段状の低下をしていることが見られる。これはブリッジ抵抗が不連続な増加をしたことを意味する。この点を T_0 にとれば E_0 も小さくなる。

筆者の実験では、点火玉が発火しなくなる電流は、約 0.6A であった。この付近になると点火玉が発火した場合でも、Fig. 7 のような明瞭なブリッジの切断が見られないことがあった。

点火玉の発火時間 T_f については、Fig. 4 に見られるように、試料 A B 間に差があった。そして新しい試料 A の方が、古い試料 B よりばらつきが大きい。この点メーカーの説明によれば、新しいうちは溶剤が完全に乾ききらず、これがばらつきの原因と考えられる、とのことであった。

点火玉の発火機構は、はじめブリッジの近くで点火 (excitation) が起り、これが燃焼伝播して点火玉の皮膜を破り、発火 (firing) に至る。ここで測定された発火時間 T_f は、明らかに後者に関するものである。しかし上記のことを考えると、Fig. 4 で点火玉 A B 間の T_f の差異は、点火まではどちらも同じように起っている、新しい点火玉ではメーカーの説明のように不均一な溶剤が存在して、燃焼伝播の過程でばらつきを生じているとみなされる。また同じ原因で燃焼速度が遅くなり、 T_f の値も大きくなっていると考えられる。

ばらつきの少ない点火玉 B の値から、発火時間 T_f を用いて、

$$E_f = rI^2 T_f \quad (4)$$

を計算してみると、結果は Fig. 8 のようになる。これは先の E_0 と違って、電流値によってかなり変化している。電流値が I_0 を越えると、点火玉に供給されるエネルギーは E_0 を越えることはない。従って Fig. 8 ではこの領域の値には E_0 をとっている (×印の点)。

E_f は点火玉の発火までに与えられたエネルギーで

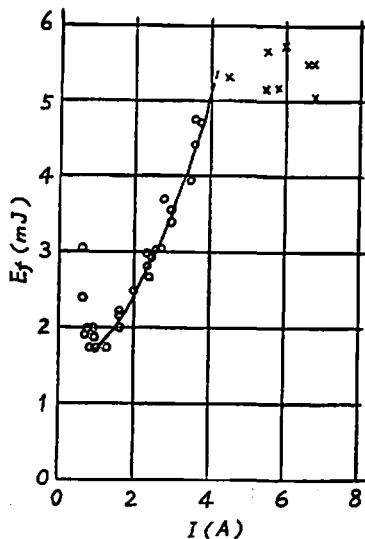


Fig. 8 Energy required for firing fusehead B

ある。しかし実際には、点火が原因となって発火を生じているので、厳密には点火エネルギーを測定しないと意味がないわけであるが、Fig. 8 からは以下のような考察ができる。

すなわち発火エネルギー E_f に対し、点火エネルギーを E_0 としたとき、

$$E_f - E_0 = rI^2(T_f - T_0) \quad (5)$$

となる。右辺の括弧内は発火時間と点火時間の差であり、これは点火玉内の燃焼伝播時間であるから、電流があるていど大きく十分な点火が行われたときには、ほぼ一定であると考えても不自然ではない。そのときは E_0 が既知であれば、上式から $E_f \sim I$ の関係が求められる。

点火玉の点火エネルギー E_0 については、鈴木氏等¹⁾をはじめ、木下氏²⁾、Jones 氏³⁾ の測定がある。数値は少しずつ違うが、共通して電流値 0.5~0.7A で急激に減少し、その後は一定である。筆者の試料とブリッジ抵抗がほぼ等しい鈴木氏等の実験によれば、電流 0.9A 以上では、測定上限の 3.1A まで $E_0 = 1.5\text{mJ}$ となっている。

いま E_0 にこの値をとり、かりに

$$T_f - T_0 = 0.4\text{msec} = \text{const} \quad (6)$$

として (5) 式から $E_f \sim I$ 関係を計算してみると、Fig. 8 中の曲線のようになる。ここでは E_0 が一定とみなされる 1A 以上の範囲だけ計算した。この一致はかなり良好で、この領域では (6) の仮定がほぼ成立しているように思われる。

電流が臨界値を越えると上の関係は成立しない。この場合は実験結果によれば、ばらつきの少ない点火玉 B

では、

$$T_f - T_0 \approx 0.15 \text{ msec} \quad (7)$$

がほぼ成立している。そしてこの領域では、ブリッジ破断時に点火が起っているのではないと思われる。臨界値以上の大電流を用いた発破では、極めて短時間に加熱が起る。そのため熱伝導の悪い火薬層には、点火に至る熱量が伝わらないうちに、ブリッジの熔断によって瞬時に多量のエネルギーが解放され、点火が起ると考えられる。

先の Fig. 2 の写真では、いずれもブリッジ破断時刻に光電信号が僅かではあるが変化している。これは点火玉内部の発光が、未反応の火薬層を透して表面から観測されたものと思われる。Fig. 2 で、この変化が点火玉 B の方が明瞭に見られるのは、コーティング剤の透明度 (A は青、B は黄色であった) にもよるのであろう。

次に Fig. 5 の、電気雷管の測定結果について考える。ここでは現象が、臨界電流を境にはっきり区別される。発破電流がこれより大きいときは、点火玉単独の場合とほぼ同じである。ただし雷管の爆発光は、点火玉の発火後、起爆薬、添装薬の爆発を経て管体が破断してはじめて現れるので、雷管の発火時間は、点火玉のそれより僅か大きいはずである (これについては後に 4.2 で触れる)。Fig. 5 を Fig. 4 と比較したとき、この部分の雷管の発火時間のばらつきが、新しい点火玉 A と同じくらい大きいことに気付く。これは電気雷管の組立て工程では、製造直後の点火玉を管体に密封するので、以後の乾燥がよく進まないためと思われる。

臨界電流以下では、雷管のブリッジ破断時間は、(2) 式の関係から外れて、何れも発火時間と一致してしまう。これは言うまでもなく、雷管の爆発によって、機械的に破断してしまうからである。このときの破断時間と発火時間との一致が、厳密にはどの程度のものであるかは、後に検証される。

4. 瞬断発破回路と雷管の発火時間

4-1 瞬断発破回路

電気雷管の爆発におけるブリッジ破断時間 T_0 と、雷管の発火時間 T_f の関係が、Fig. 4 のようになることがわかれば、瞬断発破器の動作条件は容易に求められる。すなわち、ブリッジ破断の瞬間に発破電圧を遮断するならば、発破電流が臨界値以下では、これは雷管の爆発と同期することになり、それ以上の電流のときは、雷管の爆発より以前に遮断できる。

従って、残された問題は、ブリッジの破断を検知して、それによりスイッチオフのできるような発破回路を構成することである。

Fig. 9 は、瞬断発破回路の原理を説明するために示した図である。この上の図は、普通の発破器を少し変形して描いたもので、スイッチ S を閉じれば、外部端子 K G 間に電圧が供給される。r は電気雷管の抵抗である。

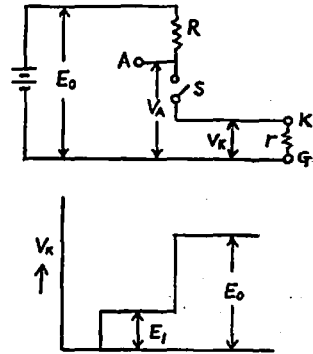


Fig. 9 A circuit for detecting the breaking of wire bridge

通常の発破器では、図の R にあたる抵抗は入っていない。そのときスイッチ S を閉じると、KG 間には直接電源電圧 E_0 がかり、r が切断したあともこの電圧は変らない。しかし R が入った Fig. 9 の回路では、KG 間の電圧 V_K は、図の下に示したように、スイッチオンのとき T_0 には、 $E_1 = E_0 r / (R + r)$ まで上昇し、r が切断したとき T_0 には、さらに E_0 まで上昇する。この変化は、図の A 点についても同様である。瞬断発破回路は、図のスイッチをサイリスターで置きかえ、ブリッジ破断時における A 点の電圧上昇を利用して、サイリスターをオフ状態にするものである。

実際の瞬断発破回路の例を Fig. 10 に示す。発破母線をつなぐ外部端子は、K とアース点 G である。Fig. 9 と比較してわかるように、左側のサイリスターが、スイッチにあたる主サイリスターで、右側のサイ

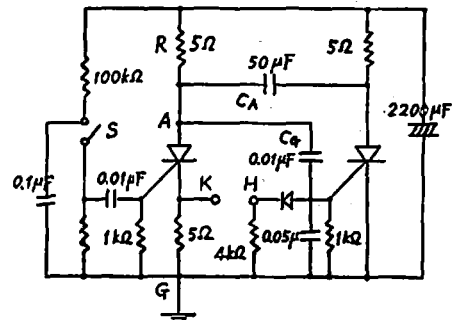


Fig. 10 Realization of instantaneous cut-off blasting circuit

リスターは、主回路をオフ状態にするときに補助的役割を果たす。

発破の前には、サイリスターはどちらもオフ状態にある。主サイリスターのゲートにパルスを加えると、これがオン状態になり、外部端子 KG に給電される。このとき補助サイリスターは、まだオフ状態にある。そしてブリッジが破断したとき、図のA点の電位は Fig. 9 で示したように急激に上るので、コンデンサー C_0 を通して補助サイリスターのゲートにプラスパルスが与えられ、これをオン状態にする。その結果、今度は補助サイリスターの陽極電位が下り、これがコンデンサー C_1 を通して、A点に大きなマイナスパルスが与えられ、主サイリスターはオフ状態に戻る。この経過で、回路の外部端子 KG 間の電圧は、ブリッジ切断時に一たん上昇するが、すぐに主サイリスターがオフ状態になるので、それと共に低下する。この期間は極めて短い(後の Fig. 12 参照)。

Fig. 10 で、端子 KG 間に並列に入っている抵抗 5Ω は、主サイリスターがオフのときの、端子間電圧をゼロにするためのものである。すなわちサイリスターはオフ状態のときも、わずかながら漏洩電流があり(1~5 mA)、従ってこのときの端子間電圧は、KG 間の抵抗と漏洩電流との積で定まる。この抵抗値を 10Ω 以下にとれば、遮断時の端子間電圧はほとんど無視できる。

図には省略したが、 $2,200\mu\text{F}$ の電源コンデンサーは、別の電池から充電される。電源電圧は $10\sim 30\text{V}$ で使用し、臨界電流を与えるための電圧は約 20V である。ただし実際には、使用する発破母線の抵抗の関係があり、電流値を電源電圧のみで規定することはできない。それを可能にするには、図の R を母線抵抗よりもはるかに大きくしておけばよいが、それに比例して電源電圧も上げねばならず、効率が悪くなる。

実験室で、母線抵抗 1Ω 以下で使用するときには、図の回路で十分である。電源電圧をさらに大幅に変えようとすると、それにつれて回路部品の特性値を変えないと誤動作をするおそれがある。誤動作の中で起りやすいのは、ブリッジが破断しても、主サイリスターがオフにならないこと、あるいは一たんオフ状態になっても、しばらくしてオン状態に戻ることである。これには三つほどの原因が考えられ、回路の特性値をきめるときに十分注意が必要である。この種の設計条件については、後日稿を改めて報告する。

Fig. 10 で端子 H は、ブリッジ破断時にあたる信号をとり出すためである。この端子からは、ブリッジ破断時にプラス信号が得られ、KH の両端子を通常のカウンターに接続すれば、発破器の通電時間が読みとれ

る。

4-2 発破回路の動作例と雷管の発火時間の検討

前に述べたように、ブリッジ破断時に回路を遮断するようにした発破器では、臨界電流値を境にして、異なった機能を示すはずである。すなわち電流が I_c 以上のとき母線電圧は雷管の爆発より先に遮断され、これ以下では雷管の爆発と同時に遮断される。これを実際の動作例で示す。

Fig. 11 は、発破電流が I_c より大きいときで、上側の電圧波形は母線電圧の変化、下側の波形は光電回路でとらえた雷管の発光である。雷管の発光は、母線電圧の遮断より明らかに遅れていることがわかる。このときの発破電流は、測定した母線電圧を、雷管と発破母線の電気抵抗(厳密には Fig. 10 の KG 間抵抗 5Ω が並列に入る)で割ったもので、平均値で 3.9A であった。この場合通電期間中に母線電圧が上昇気味になるのは、加熱によるブリッジ抵抗の増加のためである(電源電圧はコンデンサーの放電で低下してゆくが、それを補償するだけの抵抗増加がある。Fig. 2 の場合には、両方の効果が重畳して、通電期間中の電流減少を生じている)。

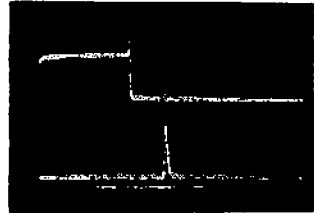


Fig. 11 Recorded signals by instantaneous cut-off blissing circuit (0.2msec/div). Upper beam shows voltage on firing cable (4V/div), and lower shows firing light of electric detonator

ブリッジ破断により、回路が遮断されたあとの母線電圧は、約 10mV であった。これはサイリスターの漏洩電流によるものである。とにかくこのようにして、雷管の爆発以前に母線電圧を遮断することが可能であることが示される。

電流を I_c 以下にすると、母線電圧の遮断は、雷管の爆発と同時に成る。従ってこのような使い方をするときには、雷管の爆発時に相当する電気信号を、発破器から取り出すことができ、実験技術の上で非常に有用である。このような同期信号が役に立つのは、電気的側定におけるオシロスコープのトリガー、光学的側定における瞬間写真のフラッシュ光源等である。ただしこのような精密測定を対象に考えると、ここで得られる同時性がどの程度のものであるか、検討しておく

必要がある。

前にも述べたように、発破電流が小さいときには、点火玉ブリッジの破断は、雷管の爆発によってひきおこされる。しかし雷管の爆発、厳密には添装薬の爆発は、外部から直接検知することはむずかしい。以下には、雷管の発光、雷管に貼付けたピエゾ片の感知する圧力、および雷管に接着した爆薬の爆発時間おくれ等について、その時間関係を測定した結果を述べる。

まず瞬断発破回路を使って、発破電流が臨界値以下の2 Aときの波形例を Fig. 12 に示す。ここではブリッジ破断に伴う母線電圧の変化と、雷管の爆発光との同時性を見るため、得られた信号を部分的に拡大してある。

図の上の信号は、母線電圧の変化で、これが4.1に述べたように、ブリッジ破断時に一たん上昇し、その後2~3 μsec で回路の主サイリスターがオフ状態となり、下降することが見られる。ただし電圧が完全に遮断するまでには10~15 μsec を要している。後者の時間は、発破母線の長さ（この実験では20m）によるインダクタンスの影響を受ける。

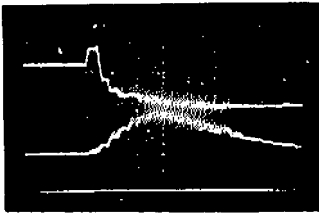


Fig. 12 Recorded signals by instantaneous cut-off blasting circuit in small current region, indicating simultaneity between the breaking of bridge and the firing (5 $\mu\text{sec}/\text{div}$). Upper beam shows voltage on firing cable (2V/div), its rise-up preceding the cut-off means the breaking of wire bridge in detonator. Lower beam shows firing light. These records are reproduced from digital memories with sampling time of 2 μsec

下の信号は雷管の発光で、そのはじまりはブリッジの破断とほぼ一致している。再現性を見るため、発破電流1.2A および2Aにおいてこの実験を数回行った。このときは（Fig. 12を含めて）、サンプリングタイム2 μsec のデジタルレコーダーを用いたので、これ以下の時間分解はできなかったが、雷管の発光はブリッジの破断と同時か、または2 μsec 遅れるかのどちらかであった。この結果から、ブリッジの破断および雷管の発光（これには管体の破壊が必要である）

は、どちらも機械的な破壊現象を伴うので若干のばらつきが予想されるが、後者は前者に遅れるとしてもそれはたかだか2 μsec である、と首うことができる。

電気雷管にピエゾ片を貼りつけ、そこに得られた圧力信号を雷管の発光信号と同時に記録したものを Fig. 13 に示す。上の写真はピエゾ片を雷管端面に、下の写真は点火玉位置の側面につけたもので、どちらも下側ビームの圧力信号は、上側ビームの発光より先行している。ここではいずれにしてもピエゾ片は破壊するので、最初の信号の到達時だけが問題である。そ

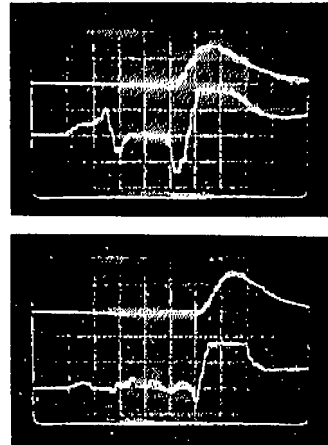


Fig. 13 Detection of tiny pressure change preceding the firing of electric detonator, time scale 10 $\mu\text{sec}/\text{div}$. Upper beam shows firing light. Lower beam shows pressure change detected by piezo electric element attached on end-face (upper photo) or side-face (lower photo) of electric-detonator. This tiny pressure does not appear in the case of plain detonator, revealing that it comes from firing of fusehead explosion

してピエゾ片を側面位置に貼り付けた方が圧力が早く検知されることから、最初の微小圧力は点火玉の発火を表わすものではないと思われる。この時刻は写真で見ると、雷管の爆発に約70 μsec 先行している。工業雷管では、このような初期微圧は存在せず、発光の5 μsec 前あたりから急激な圧力上昇があるのみである。

電気雷管の端面に導爆線を接着し、この中にイオンギャップを挿入して、イオンギャップの導通と雷管の発光の時間関係をしらべた。この実験は前にも行ったことがあるが⁹⁾、やはり雷管の発光のはじまりと、爆速を考慮に入れた導爆線の端の起爆とは、ほとんど同時とみなされる。イオンギャップのみを雷管の端に貼

りつけた場合、およびイオンギャップを雷管に巻きつけた場合も、雷管の発光とイオンギャップの導通開始は、やはり同時である。Fig. 14 は、イオンギャップを雷管の端に貼りつけたときの導通と、雷管の発光信号を並べて示したものである。

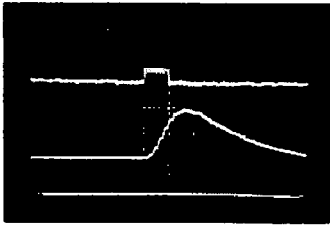


Fig. 14 Examination of simultaneity between break-down of insulation of enamelled wires placed at end-face of detonator (upper deam) and the firing light (lower beam), time scale $10\mu\text{sec}/\text{div}$

一口に雷管の爆発と言ってもいろいろな現象がある。しかし上に述べた諸現象は、先行する点火玉の発火を除けば、ほとんど同時に起っていることがわかる。そしてブリッジの破断を含めて、せいぜい $2\mu\text{sec}$ 以内の誤差で同期している。このことから、ブリッジ破断信号を同期信号に使用すれば、上述の意味で、雷管の爆発とはせいぜい $2\mu\text{sec}$ の範囲内で同期がとれることになる。高電圧を用いた発破器で、特殊雷管を用いたとして、同期時間を $2\mu\text{sec}$ 以内にするには数 kV の電圧が必要であることを思えば⁹⁾、上述の同期法は極めて簡便であるといえる。

9. 結 論

爆薬の爆発時以前に、発破用電源回路を遮断し、母線間電圧をゼロにするような特殊な発破回路を作り、これを「瞬断発破回路」と名付けた。この回路は、電気雷管中の点火玉ブリッジの破断を検知し、それと同時に発破電流回路を遮断する方式をとっている。

この方法が、爆薬の爆発以前に回路を遮断することになるかどうかは、電気雷管およびそれを構成する点火玉について、ブリッジ切断時間 T_b と、発火時間 T_f の関係を知らなければならない。従って筆者は、前以てこの関係を調べる測定実験を行い、次のような結果を得た。

- (1) 発破電流 I を変えたとき、 T_b 、 T_f はどちらも、 I の増加に従って減少する。測定値のばらつきは、 T_f の方がはるかに大きい。
- (2) 点火玉に関しては、 I が小さいときは $T_b > T_f$ であるが、ある値（臨界電流と呼ぶ）を越えて I が大きくなると、逆に $T_b < T_f$ となる。

- (3) 電気雷管に関しては、 I が臨界値以上では、点火玉同様 $T_b < T_f$ であるが、臨界値以下では、ブリッジは爆発が起ると機械的に破断するので、 $T_b = T_f$ となる。
- (4) 臨界電流値は、電気雷管、点火玉を含めて、ばらつきを考慮に入れても $3\sim 4\text{A}$ の間にある。

上記の測定結果を考察して、次のようなことがわかった。

- (5) 点火玉ブリッジの破断までに加えられるエネルギーは、発破電流の大小によらずほとんど一定で、ばらつきを含めた平均値は 4.7mJ であった。
- (6) 点火玉の発火時までのエネルギーは、電流値によって変化する。これから点火玉の点火から発火に至るまでの時間を推定すると、約 0.4msec となった。この値は臨界電流値以下の発破による場合である。
- (7) 臨界電流値以上の発破では、よく乾燥した点火玉では T_f と T_b の時間差が、電流によらずほとんど一定となった。従ってこの場合はブリッジ切断時に点火が起るとすると、発火に至るまでの時間は、約 0.15msec となった。

上記の (1)~(4) の結果から、ブリッジ破断時に回路を遮断する瞬断発破器の特性は、次のように言うことができる。

- I 発破電流を 3A 以下にとると、発破電流は雷管の爆発と同時に遮断される。
- II 発破電流を 4A 以上にとると、発破電流は雷管の爆発より少し前に遮断される。

本報告ではこのあと、次の点について述べた。

- (8) サイリスターをスイッチとして構成された瞬断発破回路の実例を示した。
- (9) この回路は、ブリッジの破断と同時に回路を遮断するように工夫されているが、実際には回路的な遅れがある。測定の結果、ブリッジの破断から遮断動作に入るまでの時間は $2\sim 3\mu\text{sec}$ 、そして母線電圧がほぼゼロまで下るには $10\sim 15\mu\text{sec}$ を要している。
- (10) 電気雷管を臨界電流以下で発破したとき、ブリッジの破断は雷管の爆発によってひきおこされる。この場合雷管の発火と、雷管に接した爆薬の起爆は、ブリッジの切断時間と $2\mu\text{sec}$ 以内の精度で一致している。
- (11) 電気雷管に貼付けたビエソ片の測定によれば、雷管の爆発前 $50\sim 70\mu\text{sec}$ に圧力信号が

感知され、これは工業雷管では現れないことから、点火玉の発火を意味するものと思われる。

付 記

本研究にあたり、点火玉の性能資料をいただいた日本油脂株式会社の林啓三氏、および実験に協力された法政大学工学部学生、小野、寺本氏に感謝の意を表す。

文 献

- 1) 鈴木輝彦, 山本一元, 鷲尾泰俊: 工火誌, 23, 57 (1962)
- 2) 例えば, 築地謙次, 相川浩: 「SCR とその応用」, 日刊工業新聞社 (昭和40年)
- 3) 田中一三: 工火誌, 30, 318 (1969)
- 4) 木下四郎: 工火誌, 15, 2 (1954)
- 5) E. Jones: Proc. Roy. Soc., A198 (1949)
- 6) B. C. Tayloy, G. Melani: Ballistic Research Laboratories Mem. Rept. No. 2096 (1971)

Firing Properties of Electric Detonator And Instantaneous cut-off Blasting Circuit

by Kazumi Tanaka

A special blasting circuit has been realized, for cutting off the circuit at the same instant or a little advance of firing of electric detonator, leaving no electric potential on shot cable after the detonation begins.

Previously the author studied firing properties of electric detonator, such as the firing time and the breaking time of wire bridge in fusehead, in relation to supplied blasting current.

The results revealed that, in larger blasting current region that exceeded a critical value, the wire bridge broke a little advance of the firing of detonator, and in smaller current region it broke at the same instant of the firing. In the latter case, it is noted that the breaking of wire bridge was to be forced by the detonation of detonator charge at the instant of firing, although this would be delay after the firing in the case of fusehead only. The critical blasting current (meant above) was around 3.5A in our commercial electric detonator.

Thus the desired circuit has been achieved by composing a switching part in it, which detects the breaking of wire bridge in detonator and enables cut off the main circuit instantaneously.

This report includes firing properties of electric detonator and fusehead, measured and analyzed, and operating examples of realized circuit. Simultaneity between the breaking time of the bridge and the firing time, in smaller current region, is examined again by the other methods.

(The National Chemical Laboratory for Industry,
Hiratsuka-shi, Kanagawa)
