

第3章 火薬類および発破

第1節 火薬類

1 火薬類の概念

(1) 火薬類の定義

火薬類とは、利用価値のある爆発物であって、熱や衝撃などの外力を適正に作用させると急激な化学反応を起こし、熱量と多量のガスを発生して、圧力の上昇を起こす物質（一般に固体、液体）をいう。この化学反応は発熱酸化反応で、一度反応が始まると、連鎖的に反応を継続する。生成ガス量は初めの物質の体積に比し、きわめて大きな容積を占め、周辺に対し非常に大きな圧力となり、反応速度によっては衝撃的な破壊力となる。

(2) 爆発現象

急激な速度で起こる燃焼を爆発現象（爆発）といい、その速度のちがいによって爆ごう（爆轟：デトネーション）と爆燃（ノッキング）とに分ける。

- ・ 爆ごう 爆発速度が2,000～8,000m/sの急激な化学反応を爆ごうといい、衝撃波と強力なガス圧を伴う（例：雷管起爆の爆薬）。
- ・ 爆燃 300m/s程度と反応速度が遅く、衝撃波がほとんどなく、発生ガスによる圧力を主とする反応を爆燃という（例：発射薬）。
- ・ 燃焼 熱と光を伴う遅い酸化反応を燃焼という。

2 火薬類の分類

(1) 法令による分類

火薬類取締法第2条による火薬類の分類を簡単に示すと、次のとおりである。

- ・ 火薬 黒色火薬、無煙火薬などの如く、推進的爆発の用途に供されるもの。
- ・ 爆薬 起爆薬、硝安爆薬、カーリット、ダイナマイト、ニトロ化合物、液体酸素爆薬などの如く、破壊的爆発に使用されるもの。
- ・ 火工品 工業雷管、電気雷管、導火線などのように、火薬、爆薬を使用して、加工・製造したもの。

(2) 組成による分類

火薬の組成上、化合火薬類と混合火薬類に分けることができる（図 1.36 参照）。

3 鉱山用爆薬の種類と成分

工業爆薬を大別すると、鉱工業用爆薬（金属、非金属、石灰石鉱山用）と石炭鉱山用爆薬（石炭鉱山用検定爆薬）に分けられる。

鉱工業用爆薬は、非検定爆薬で、主として爆力が問題となる。坑内用では、保安上、発破の後ガスが重要な問題となる。

石炭鉱山用爆薬の甲種炭坑用爆薬は、坑内用品の検定試験合格が必要で、検定爆薬という。

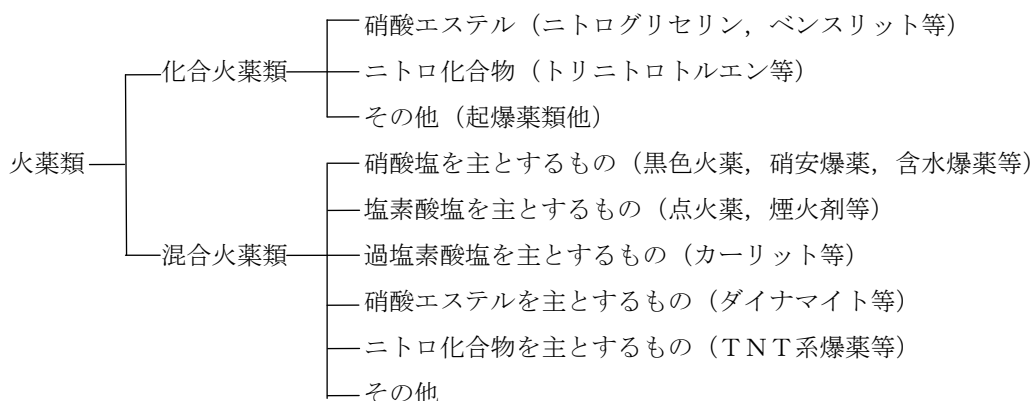


図 1.36 組成による火薬類の分類

石炭鉱山用爆薬は、石炭鉱山の坑内ガス、炭じんに対する安全性確保のため、食塩、塩化カリウムなどの減熱・消炎剤を配合して、爆薬のエネルギーを少なくし、爆発温度を下げる措置を講じている。

(1) 膠質ダイナマイト

膠質ダイナマイトは、綿薬でコロイド化（膠化）したニトログリセリン（NG）を基剤とした、可塑性のある爆薬である。鉱工業用には、桜ダイナマイト（NG約50%，硝酸カリ約40%）、桐ダイナマイト（NG30～50%，硝酸アンモニウムその他を含む。特桐，新桐，3号桐などの種類がある。），榎ダイナマイトが市販されている。検定爆薬には、白梅ダイナマイト（NG35%前後，硝酸アンモニウム，減熱剤を含む。3号白梅，3号特白梅の種類がある。）が市販されている。

(2) カーリット

過塩素酸塩を基剤とし、その含有量が10%を超える爆薬を、カーリットという。通常、過塩素酸アンモニウムを主成分とし、けい素鉄および重油、木粉などを加える。最も基本的なカーリットは、黒カーリットである。これは、爆発に際してCOを発生するので、坑外用に使用されている。

(3) 硝安爆薬

硝安爆薬は、坑内用としては検定爆薬で、硝酸アンモニウムを主成分とし、鋭感剤としてニトログリセリン（NG），トリニトロトルエン（TNT），ジニトロナフタリンが添加されている。3号硝安爆薬，5号硝安爆薬，G硝安爆薬などの種類がある。

(4) 硝安油剤爆薬（ANFO爆薬）

硝酸アンモニウム（硝安）94%と軽油6%を成分とし、他の火薬類や鋭感剤を含まない。起爆時には、通常のダイナマイトや含水爆薬などの爆薬を起爆剤（プライマー）として用いる。

(5) 黒色火薬

黒色火薬は、硝石60～80%、硫黄10～20%、木炭10～20%を混合した粒状火薬で、爆燃するのを利用して、石材採取などの特殊な目的に使用する。

(6) 含水爆薬（スラリー爆薬およびエマルジョン爆薬）

含水爆薬とは、組成中に水を含む（含有率は通常8～15%）ことを特徴とし、スラリー爆薬とエマルジョン爆薬の2種類がある。成分には、水、硝酸アンモニウム、鋭感剤（アルミニウム、モノメチルアミンナイトレート、硝酸ヒドラジン等）、粘ちゅう剤、気泡剤、油剤、乳化剤等を含み、膠質またはゲル状である。衝撃、摩擦等に比較的安全であり、特に火炎では着火しにくい。耐水、耐湿性があり、水孔の使用に適し、後ガスは非常に優れており発煙量も少ない。

一般発破用、炭鉱用、耐熱用、スムーズブラस्टィング用等種々の製品がある。

(7) コンクリート破砕器

コンクリート破砕器は火薬類取締法では「火工品」に入り、発破による飛石、騒音、振動など周辺環境上、爆薬の使用ができない岩盤やコンクリートの破砕を目的に開発され、薬筒と点火具を一对として取扱う。ポリエチレン薬筒に入った粒状の可燃剤に、小型の電気雷管のような点火管を装着し電気点火する。この破砕薬は、密閉中で40～60m/sの緩やかな速度で燃焼し、かつ高熱を発生してのガス圧で対象物を破砕する。

(8) 鉱山爆薬中の主な成分

① ニトログリセリン（NG）

工業用NGは、淡紅色、油状液体の三硝酸エステルで、比重1.6、凍結温度13.5℃。熱、打撃、衝撃、摩擦に極めて敏感で爆ごうする。常温では無臭で、わずかに刺激性の甘みがある。揮発ガスを吸入したり、皮膚に触れると、中毒を起し、発熱、頭痛、めまいを発症する。

② ニトログリコール

ニトログリコールはNGに混合してNGの凍結温度を下げる。比重1.5、凍結温度-22℃。性質はNGに似ているが、揮発性はNGより大きく中毒しやすい。

③ 硝酸アンモニウム（硝安）

硝酸アンモニウムは比重1.73の白色結晶で取扱いの安全な硝酸塩であるが、爆発能力があり、鉱工業爆薬の主成分として使用される。過塩素酸アンモニウムとともに酸素供給剤でもある。貯蔵中に吸湿、固化しやすい。

④ 可燃性物質

酸素供給剤に対し可燃性物質として木粉、でんぷん、硫黄、けい素鉄、重油、軽油などが用いられる。

⑤ 鋭感剤

硝酸アンモニウムを主剤とする比較的鈍感な爆薬には、鋭感剤としてトリニトロトルエン（TNT）、ジニトロナフタリン（DNN）等のニトロ化合物等が添加される。また、含水爆薬の鋭

感剤に、アルミニウム粉末、モノメチルアミンナイトレート（MMAN）等が用いられる。

4 鉱山用爆薬の性能

(1) 爆 力

爆薬が爆発したとき出す爆破能力を爆力といい、その力は、動的作用（衝撃破碎効果）と静的作用（高圧推進効果）の2つに大別される。

動的作用は爆速に比例し、爆発の瞬間に衝撃波を生じて岩石などを破壊する作用であり、静的作用は発生する多量の高温・高圧ガスの膨張による推進的作用で岩石などを自由面方向にはね飛ばす作用である。爆速の大きなものは破碎効果が大きく、爆速の小さなものは推進効果が大きい。

動的作用を測る試験方法には、爆速試験、猛度試験（ヘス、カストなど）等がある。また、静的推進効果の尺度には、鉛とう試験（トラウズル）、弾動振子試験、弾動きゅう砲試験等がある。

(2) 爆 速

爆薬の一端に爆発が起こり、それが他端に伝わる速さを爆速といい、爆薬の薬包径、爆薬に加えられる圧縮度（周囲の圧力）、爆薬の仮比重などの影響を受ける。仮比重の増加につれて爆速も増加するが、上りすぎると死圧（過圧）となって殉爆しなくなることがある（表1.17参照）。

表 1.17 各種爆薬の爆速と猛度

項 目 品 名	状 態	爆 速 m/s	猛 度 mm
桜 ダイ ナ マ イ ト	膠 質	5,600 ～ 6,100	16～18
3 号 桐 ダイ ナ マ イ ト	膠 質	5,800 ～ 6,300	18～19
2 号 榎 ダイ ナ マ イ ト	膠 質	5,800 ～ 6,300	18～19
3 号 特 白 梅 ダイ ナ マ イ ト	膠 質	5,500 ～ 5,800	15～17
ス ラ リ ー 爆 薬	ゲル状	4,000 ～ 5,500	13～20
エ マ ル シ ョ ン 爆 薬	膠 質	5,200 ～ 5,800	16～17
黒 カ ー リ ッ ト	粉 状	4,100 ～ 4,600	
5 号 硝 安 爆 薬	粉 状	4,500 ～ 5,000	12～13
A N F O 爆 薬	粉 状	2,500 ～ 3,000	
E q S 爆 薬	粉 状	2,700 ～ 3,200	6 ～ 9

(3) 感 度

爆薬を爆発させるためには、爆発するのに必要で最小のエネルギー（打撃・熱・摩擦・電気火花・火炎など）を与えなければならない。爆薬の種類によってこのエネルギーには大小があり、この爆発のしやすさ（爆発の原因的性能）を感度という。

① 殉爆

第一薬包が爆発したとき、空気その他の媒体を隔てた第二薬包が爆発する現象を殉爆という。この試験方法には、砂上殉爆試験と密閉殉爆試験とがあり、実際の発破の爆薬は密閉状態なので、密閉殉爆試験がふさわしいが、要素が多く、一般には、砂上殉爆試験によっている。NGを含むダイナマイトの密閉殉爆は、砂上殉爆の5～10倍となり、NGを含まない爆薬は、せいぜい2倍程度である（表1.18参照）。

② 衝撃と摩擦

衝撃・摩擦のような機械的作用に対する爆薬の感度は、取扱い上、低いほど安全な爆薬といえる。

一般に、衝撃に対する感度は、落つい試験（試料約1gを鋼板上に置き、5kgの鉄ついを落して行う試験）で測定し、不爆点を落高で示す（表1.19参照）。

摩擦に対する感度は、BAM式の摩擦試験機を用いて測定し、摩擦荷重で示す。

③ 耐火度

火薬類には黒色火薬や黒カーリットのように僅かな熱源ですぐ発火するものもあるし、反対に燃焼しにくいものもある。試験として、導火線の火炎で着火するものを、従来、可燃性爆薬としている。桐ダイナマイト、硝安爆薬は可燃性爆薬ではないが、石炭粉の混入率、炭粉の性質、発破などの条件によっては燃焼を起こす場合もある。

ANFO爆薬は、引火点50℃以上の油剤を使うので、夏期にはかなり引火しやすく、火気について十分な注意が必要である。

④ 耐熱性

一般のダイナマイトは高温下に長時間放置すると、NGが分解して、ついには自然発火する。安全をみて、爆薬は60～70℃以下の温度で使用することが望ましい。特に岩盤温度が高い場合は、特別の耐熱爆薬（例：140℃で24時間耐える爆薬）を使用しなければならない。

⑤ 起爆感度

雷こうのような起爆薬はわずかな熱源で爆ごうを起こすが、一般のダイナマイトや硝安爆薬は導火線の火炎だけでは爆発せず、雷管を使用して爆発を起こす。しかし、ANFO爆薬は、雷管

表 1.18 各種爆薬の砂上殉爆度

品 名	状 態	砂上殉爆度 (薬径の倍数)
桜 ダイナマイト	膠 質	5 ～ 7
3号桐ダイナマイト	膠 質	4 ～ 6
2号榎ダイナマイト	膠 質	4 ～ 6
3号特白梅ダイナマイト	膠 質	5 ～ 7
ス ラ リ ー 爆 薬	ゲル状	2 ～ 4
エ マ ル シ ョ ン 爆 薬	膠 質	2 ～ 4
黒 カ ー リ ッ ト	粉 状	4 ～ 6
5 号 硝 安 爆 薬	粉 状	2 ～ 4
A N F O 爆 薬	粉 状	
E q S 爆 薬	粉 状	4 ～ 6

表 1.19 落つい試験結果

品 名	不爆点 (c m)
ニトログリセリン	4 以下
桜ダイナマイト	11 ～ 13
新桐ダイナマイト	16 ～ 20
硝 安 爆 薬	40 ～ 50

1本では爆発せず、新桐ダイナマイト級の爆薬をプライマー（起爆剤）として使用する。

(4) 耐水性と吸湿性

1) 耐水性

爆薬（除、含水爆薬）は吸湿性の多少にかかわらず、水中では急速に吸水して性能が低下する。膠質系統の爆薬は、NGの保護で耐水性が高くほとんど猛度は低下しないが、粉状爆薬は、一般に耐水性が乏しい。近年、爆薬内部に特殊耐水剤を加えて耐水性を高めており、最近の硝安爆薬は比較的耐水性が良好である。ANFO爆薬、黒色火薬には耐水性がない（表1.20、表1.21参照）。

表 1.20 新桐ダイナマイト（裸薬）の水中での猛度変化

水 中 時 間	0 時間	6 時間	24時間	72時間
猛 度 比 率	100 %	約90%	約90%	約85%

表 1.21 新桐ダイナマイトの水中での殉爆度変化

水 中 時 間	0 時間	6 時間	24時間	48時間	76時間	96時間
殉爆距離の比率	100 %	約 100%	約90%	約60%	約20%	約 0%

2) 吸湿性

一般に、硝酸アンモニウムを含有する爆薬（除、含水爆薬）には、吸湿性があり、吸湿により諸性能が低下し、著しいときは、不発、残留の原因となる。特にANFO爆薬でプリル硝安を使用する場合は、吸湿性が強く、吸湿により爆速が低下し、水分9%で不発となることがある。NGの含有量の多い膠質ダイナマイトは、比較的、吸湿性が小さいが、NGの含有量が少ないか、全く含まない粉状爆薬は、吸湿性が大きいので、通常、包装で防湿を行っている。

(5) 膠質ダイナマイトの凍結とNGの浸出

膠質ダイナマイトは、凍結すると可塑性を失い、衝撃に対して敏感になり、雷管の装着時や薬包装填時などで無理な力が加わると、爆発して不慮の災害を起こす。凍結したダイナマイトは、融解作業が必要である。ダイナマイト貯蔵中に薬包からNGが浸出して外部を汚染することがある。このようなときは、苛性ソーダのアルコール溶液を注いでNGを分解し、ふきとる。

(6) 安全度と安定度

1) 安全度

炭鉱爆発のメタンガス、炭じんに対する安全性を安全度という。石炭鉱山では空気中にメタンガスや石炭の微粉末が混在して、爆発性混合物を形成するので、強力な爆薬では2次爆発を起こす恐れがある。このような危険のある甲種炭坑では、検定爆薬以外は使用できない。検定爆薬の安全度は、最低400g不引火であることが必要で、600gあるいはそれ以上の高安全度の爆薬もある。

安全度に影響する項目に、薬径と発破数とがある。試験結果では薬径の大きいほど安全度は低下し、単発発破は2孔斉発破よりも安全度が高い。

2) 安定度

火薬類の貯蔵上の安全性を安定度という。ニトロ化合物、黒色火薬などは、分解せず長年月保存できるが、NG・ニトロセルローズなどの硝酸エステルおよびこれらを含むダイナマイト類は自然分解を起こす。分解は温度の上昇によって激しくなり、ついには自然爆発を起こす。

火薬類取締法では、硝酸エステルおよび硝酸エステルを含む火薬または爆薬は製造後1年以上、硝酸エステルを含まない爆薬は製造後3年以上を経過すると、年1回以上安定度試験を行うよう規定している。

(7) 発破後ガス

発破の後ガスとして酸素 (O_2)、炭酸ガス (CO_2)、窒素 (N_2)、水素 (H_2)、一酸化炭素 (CO)、塩酸ガス (HCl)、酸化窒素 (NO_x) などのガスが発生する。この中で CO 、 NO_x などは有毒ガスであり、特にANFO爆薬は他の爆薬に比して CO 、 NO_x の発生量が多くなるので、坑内で使用する時は注意する。一般に、坑内用爆薬は、酸素バランスを考慮して製造されているので、爆発による発生ガスは、 N_2 、 CO_2 および H_2O (水蒸気) など人体に無害であるが、不完全爆発の場合には CO 、 NO_x などの有毒ガスを発生する。このため、爆薬の使用に当たっては、坑内用と坑外用をよく識別するとともに、装薬量を適正にして過装薬にならないよう留意する。

(8) 爆薬の選択

爆薬は、種類や製品によって成分・性能が異なり、また切羽条件や岩盤条件は鉱山・切羽により変化するから、爆薬選択にはこの両者を考慮しなければならない。特に石炭鉱山では保安確保上、坑内ガス、炭じんの発生状況、炭層条件などを十分把握し、適当な爆薬を選択する(表1.22参照)。

表 1.22 爆薬用途一覧表

項 目 品 名	状 態	最硬岩発破	硬岩発破	中硬岩発破	軟岩発破	長孔発破	通気不良切羽	大発破	小割発破
桜ダイナマイト	膠質	○	●	○			●		
新桐ダイナマイト	膠質	○	●	●	○	○		○	○
2号榎ダイナマイト	膠質		○	●	○	○	◎		
含水爆薬	膠質又は ゲル状		○	○	○	◎	●		
ANFO爆薬	粉状			○	○			○	

◎: 最適 ●: 適している ○: 十分使用できる

5 火工品の種類および構造

(1) 火工品の種類

鉱山で使用する主な火工品は、各種雷管、導火線、導爆線である。雷管は、工業雷管と電気雷管に

分けられ、電気雷管には、瞬発電気雷管と段発電気雷管（DS、MS雷管）がある。

(2) 雷管の構造

1) 工業雷管

管体は銅、鉄あるいはアルミニウムなどの金属管体で、起爆薬はアジ化鉛、ジアゾジニトロフェノール（DDNP）などを、添装薬はテトリール、ペンスリットなどを主剤としている。

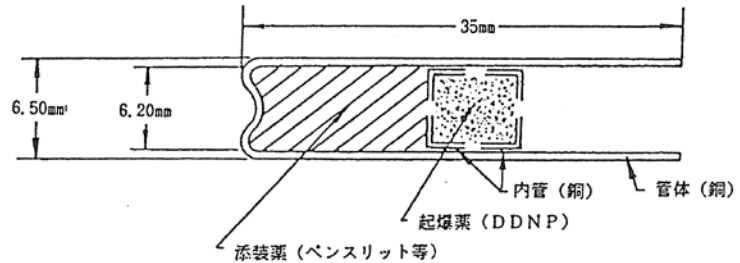


図 1.37 工業雷管の構造

工業雷管(6号雷管)の構造を、図1.37に、主な雷管の寸法、装薬量を、表1.23に示す。

2) 電気雷管

一般に使用する電気雷管は6号電気雷管であり、瞬発電気雷管と段発電気雷管（DS電気雷管、MS電気雷管）とがある（図1.38、図1.39参照）。電気雷管は、金属管体に起爆薬と添装薬とを

表 1.23 工業雷管の寸法および総薬

	管 体			装 薬 量	
	内径(mm)	外径(mm)	管長(mm)	起爆薬(g)	添装薬(g)
6号雷管	6.20	6.50	35	0.4	0.45
8号雷管	"	"	50	0.5	0.90

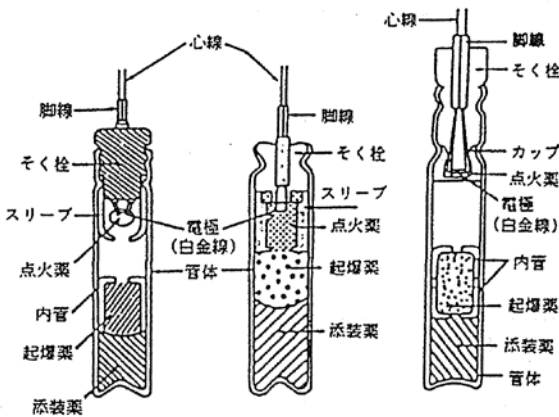


図 1.38 瞬発電気雷管の構造

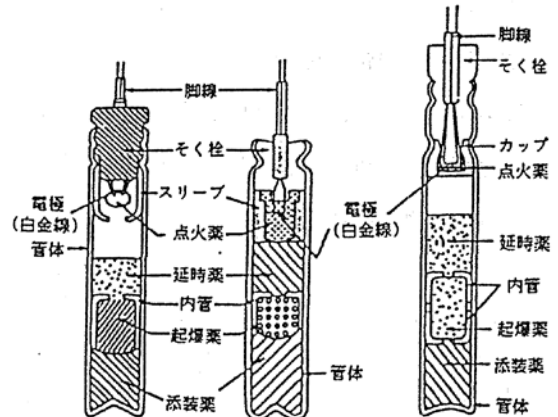


図 1.39 段発電気雷管の構造

装填した原料雷管（工業雷管の場合と同様）に、電気点火装置および必要により（段発電気雷管の場合）延時装置を組み込んで、塞栓^{そくせん}、脚線を取付けたものである。最近では、すべて耐静電気性（管体と脚線間において、2,000ピコファラッド、8キロボルトの静電気放電エネルギーにより発火しない構造）

である。

電気点火装置は、電橋（白金線等）と点火薬とから成る。通電により電橋が発熱し、点火薬を発火させる。

延時装置は、過酸化バリウム、四三酸化鉛、クロム酸鉛等と金属または合金粉末等を組合せた、延時薬を造粒装填している。塞栓には合成樹脂またはゴム等を使用し、雷管内部を完全に密封して防水する。脚線の心線は、銅、鉄またはアルミニウムを用い、合成樹脂で被覆する。心線の径は0.4mm以上とし、長さは2.4m、3.0m、4.5m等がある。

3) 導火線の構造

導火線は、黒色火薬を心薬とし、これを被覆したもので、標準線径は4.6mmである（図1.40参照）。

4) 導爆線の構造

導爆線は、ペンスリットを麻糸などで被覆し、更にアスファルト、合成樹脂などで防水処置を施したもので、25および50グレン導爆線が市販されている。主として鉱山の大発破爆薬起爆に用いる。

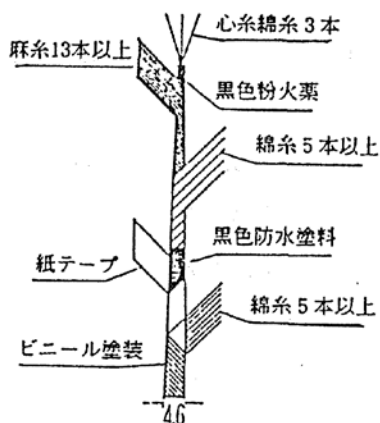


図 1.40 導火線の構造

6 火工品の性能

(1) 雷管の性能

1) 起爆力

鉱山では、一般に6号雷管が使用されている。6号雷管の起爆力は、鉛板試験で4mm鉛板を貫き、鈍性爆薬（TNT 70%，タルク30%）を起爆する能力を持っている。

2) 耐水性

雷管の内部に水が入ると起爆力が低下し、不発の原因となる。なお電気雷管は、そく栓に合成樹脂またはゴムを用いているので、水圧1kgf/cm² (0.1MPa) で60分程度なら使用できる。

3) 段発電気雷管の起爆時間精度

段発電気雷管の段数は2段から10段までを標準とし、1段は瞬発電気雷管とする。これは段発発破効果を左右するものであるが、精度維持には十分な起爆電流が必要である。

段発電気雷管の起爆時間精度を、表1.24に示す。

表 1.24 段発電気雷管の起爆時間精度

DS電気雷管

段 数	2	3	4	5	6	7	8	9	10
秒時差 (sec)	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.30

MS電気雷管

段 数	2	3	4	5	6	7	8	9	10
秒時差(msec)	25	50	75	100	130	160	200	250	300

(2) 導火線の性能

導火線の主な性能は、下記のとおりである。導火線は、折り曲げや吸湿などにより燃焼速度が変化するので注意しなければならない。

- ① 導火線 1 mの燃焼秒時は100～140秒で、各測定値のバラツキは、平均値の±7%以内である。
- ② 点火力試験で、50mm以上の点火力を持つ。
- ③ 2時間以上の耐水性を持つ。

(3) 導爆線の性能

導爆線の主な性能は、下記のとおりで、雷管で起爆し大発破、長孔発破、水中発破に用いる。

- ① 爆速は5,000～7,000m/sと高速・均一であり、励爆性がある。
- ② 水圧0.3kgf/cm²(30kPa)に、3時間以上の耐水性を有している。

7 火薬類取扱上の一般的な注意

(1) 火薬類取扱所における管理

- ① 火薬類取扱所に存置する火薬類は、2作業日の使用見込量以上としない。
- ② 作業に関係のない者は立ち入らせない。
- ③ 境界のさくの内側においては、喫煙その他の火気の使用を禁止し、かつ発火または燃焼しやすいものを置かない。
- ④ 携帯用の灯火を用いるときは、安全な携帯用の電灯以外のものを使用してはならない。

(2) 火薬類の取扱い

- ① 火薬類は火気、高温場所および電気施設に近づけてはならない。また、くわえ煙草で取り扱ってはならない。
- ② 火薬類には打撃、摩擦、強圧を加えてはならない。特に、粉状爆薬は、強圧すると殉爆性が悪くなる。
- ③ 火薬類は長時間直射日光にさらしてはならない。

- ④ 火薬類は湿度の多い所に貯蔵してはならない。
- ⑤ 凍結ダイナマイトは、温水で融解して使用する。直接火気にあててはならない。
- ⑥ 硝酸アンモニウムを多く含有する爆薬は古くなると、固化して殉爆度が悪くなったり爆力が低下したりするから、手もみし柔らかくしてから使用する。

(3) 火工品の取扱い

1) 導火線

- ① 折り曲げてはならない。
- ② 防湿に留意し、長時間現場に置いてはならない。

2) 工業雷管

- ① 衝撃には特に注意する。
- ② 吸湿すると起爆力が低下し、不発の原因となるから注意する。

3) 電気雷管

- ① 衝撃については工業雷管と同様に、特に注意する。
- ② 電気雷管を、電線、モータ、電池、電鈴等の電気設備、レール、鉄管などに接触させない。
- ③ 脚線を強く引っ張らないこと。無理な力を与えると爆発することがある。

(4) 不発、残留および燃焼の原因

1) 爆薬に起因するもの

- ① ダイナマイトの凍結
- ② 爆薬の性能の低下

2) 雷管に起因するもの

- ① 吸湿
- ② 雷管の起爆力不足
- ③ 電気雷管の白金線ブリッジ切れ、あるいは内部抵抗の不同
- ④ 雷管と爆薬との密着不良

3) 装填不良に起因するもの

- ① 発破孔の掃除不十分
- ② 水孔
- ③ 粉状爆薬の死圧
- ④ 雷管の離脱
- ⑤ 電気雷管の脚線の損傷
- ⑥ 薬包間に異物の介在
- ⑦ 導火線の損傷
- ⑧ 発破設計の不良

4) 電気点火器および発破母線に起因するもの

- ① 母線の損傷または短絡
- ② 接続の不良
- ③ 点火器の不良
- ④ 点火器の容量不良

8 火薬類の廃棄

(1) 異状火薬類の判定

火薬類に異状が認められたときは、次の如き試験を行って、変質していないことを確認してから使用し、変質しているときは使用せず廃棄する。殉爆・燃烧・爆破試験は、安全な場所で、警戒人を配置するなど保安確保に十分配慮をして実施する。

- ① ダイナマイトのNG滲出は、なめてみて甘い味がするかどうかによって判定する。
- ② ダイナマイトおよび硝安爆薬の固化または軟化は殉爆試験を行って判定する。
- ③ カーリット、黒色火薬が手でさわってしっとりしているときは、少量、燃して勢よく燃えるかどうかを見て判定する。
- ④ ANFO爆薬が固化しているときは木づちなどで軽くたたいて粉碎する。また、染色に濃淡があるときは油が分離しているので、手でかきまぜて均一にする。
- ⑤ 導火線が吸湿した疑いがあるときは、燃烧試験を行う。
- ⑥ 雷管・電気雷管に吸湿の疑いがあるときは、爆発試験を行い、不発・半爆の有無を確認する。

(2) 火薬類の廃棄

火薬類に変質あるいは性能の低下が認められたときは、その火薬類は安全に廃棄する。

- ① 火薬または爆薬は、少量ずつ爆発または焼却する。ANFO爆薬、カーリット、黒色火薬などのように、硝酸塩、過塩素酸塩などの水溶性成分を主とする火薬・爆薬は、安全な水溶液として多量の水中に流して処理する。
- ② 凍結したダイナマイトは、完全に融解した後燃烧処理するか、500g以下を順次爆発処理する。
- ③ 工業雷管、電気雷管は取り纏めて小包とし、新しい雷管をつけて土中に埋め、爆発処理する。
- ④ 導火線は燃烧処理する。
- ⑤ 導爆線は雷管で起爆処理する。
- ⑥ 爆発、燃烧処理を行う場所は、周囲に危害を及ぼさない安全な場所で、赤旗などの警標を掲げ、見張人を配置して通行を遮断するなどの措置を講ずる。
- ⑦ 順次、廃棄処分を行うときは、火薬類を安全な箇所に隔離し、爆発処理する箇所は隔離箇所から十分な安全距離をとる。
- ⑧ 燃烧処理は風の少ない日を選び、点火は風下から行い、焼却中は近よらない。また、前回燃烧の残火に注意する。

第2節 発 破

発破は、火薬類を使用して岩盤などの被爆破物を破壊する作業である。発破の設計では、次のような条件を考慮する必要がある。

(1) 発破の形状・規模

- ① 自由面の大きさとその数
- ② 爆破生成物の破碎大きさ
- ③ 最小抵抗線、孔長
- ④ 発破孔数

(2) 岩石の性状

- ① 岩石の硬度、靱性
- ② 岩石の岩目などの構造

(3) 火薬類の性能

- ① 火薬類の選択
- ② 装薬量

(4) 発破方法

- ① 斉発
- ② 段発
- ③ 時差

(5) 発破箇所周辺の環境

- ① 振動
- ② 騒音
- ③ 保安物件との距離

1 発破理論

(1) 自由面と最小抵抗線

均質な岩盤中に、爆薬を球状に密閉装填して起爆した場合を想定する。爆薬は爆発の瞬間に多量のガスと高熱を生じ、強大な圧力と衝撃が周辺岩盤に作用する。中心部は粉碎され、その周辺は大小の塊に破碎され、さらにその外側は亀裂を生じ、それ以上に遠い岩盤は、わずかに振動する。この爆破力の影響する範囲を爆薬の威力圏という(図1.41参照)。

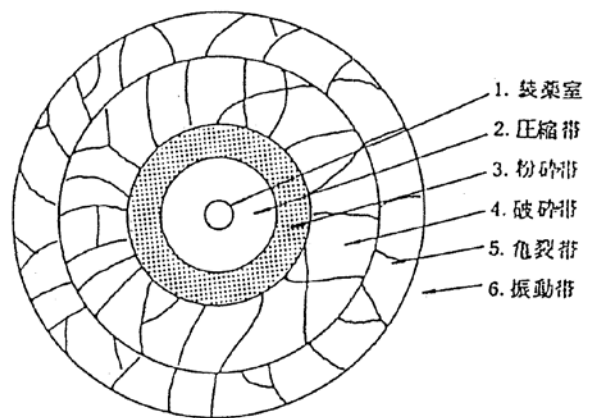


図 1.41 爆薬の威力圏

実際は、岩盤にせん孔して、爆薬を円筒状に装薬し、込物をして起爆する。この場合、抵抗の小さい方向に爆破作用が働く。せん孔の底部方向は岩盤が続き、ほとんど無限に近い抵抗であるから、破碎は抵抗の小さく空間のあるせん孔口側に及ぶ。このように、爆発による破碎は、せん孔口元の空気に接している面側にのみ行われる。この面を自由面といい、装薬の中心部から自由面へ、最も抵抗の小さい最短距離を最小抵抗線という。ベンチ採掘における自由面と最小抵抗線を、図1.42に示す。この場合、自由面はせん孔口側と切羽面側の2つである。

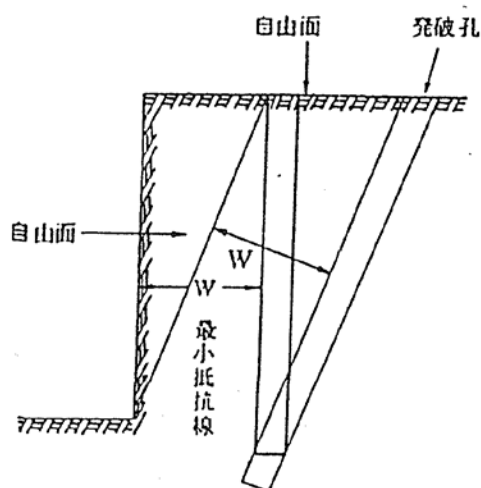


図 1.42 ベンチ採掘における自由面と最小抵抗線

(2) 漏斗孔とハウザー公式

自由面1である平坦で均質な床面（岩盤）をせん孔し、ある深さ（最小抵抗線： W ）の位置に、火薬を装填し（装薬量： L ）、込物を込めて発破したとする（図1.43参照）。発破により、床面（岩盤）は、図1.44-1のように破碎される。破碎ズリをとり除くと、図1.44-2のように、自由面を底面とする円錐形のじょうご形となる。このじょうご形を漏斗孔（クレータ）という。

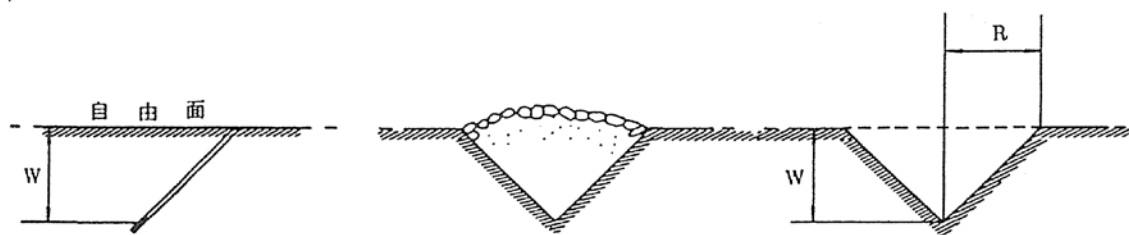


図 1.43 発破前のせん孔状態

図 1.44-1 発破後の破碎状態

図 1.44-2 発破後の床面図

この最小抵抗線の長さ W ，爆破の結果形成された漏斗孔の半径 R の関係から，装薬量 L が適正であったかどうか判定できる。

- ① $W=R$ のときは標準装薬発破でクレータの頂角がほぼ直角になり，発破効果がもっともよく保安上も良好である。
- ② $W>R$ のときは弱装薬発破でクレータの頂角は鋭角となり，ときには空吹きとなる。保安上も危険であり，発破効果も悪く，爆薬の浪費につながる。
- ③ $W<R$ のときは過装薬発破でクレータの頂角は鈍角となり，被爆破物は粉碎され爆薬の浪費である。 R/W を漏斗指数（ n ）という（図1.45参照）。

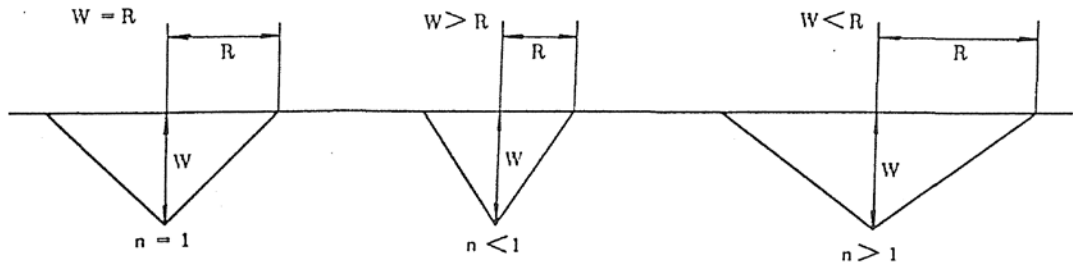


図 1.45 発破後の床面状態の比較

標準装薬発破で破碎した漏斗孔の体積 V は、 $V = (1/3) \pi R^2 W$ であるから、標準装薬の場合 $R = W$ を代入すると $V = (1/3) \pi R^2 W \div 1.05 W^3 \div W^3$ となって、漏斗孔の体積は最小抵抗線の3乗に比例する。

$n = 1$ の標準装薬の漏斗孔では、破碎量と装薬量は比例するから、次のハウザー公式が得られる。

ハウザー公式

$$L = C W^3 (= g \cdot e \cdot d \cdot f(n) \cdot W^3) \quad \dots\dots (1.20)$$

L : 装薬量 (kg) d : てん塞係数 $C = g \cdot e \cdot d \cdot f(n)$: 発破係数

g : 岩石抗力係数 $f(n)$: 漏斗指数の函数

e : 爆薬威力係数 W : 最小抵抗線 (m)

ハウザー公式 $L = C W^3$ は、1自由面発破における漏斗孔の容積を表わすと考えてよい。従って、岩石と火薬の条件が一定であれば、火薬量は破碎容積に比例することとなり、単位容量当りの装薬量は一定である。さらに、ベンチ採掘における2自由面発破の場合は、ベンチの高さを H とすれば $L = C \cdot W^2 \cdot H$ と考えることができ、また、孔間隔を D とすれば $L = C \cdot D \cdot W \cdot H$ と考えることができる。

表 1.25 各種岩石の岩石抗力係数 (g)

岩 種	g (kg/m ³)	岩 種	g (kg/m ³)	岩 種	g (kg/m ³)
硬珪岩	3.3	花崗岩	2.1	石灰岩	1.6
硬角閃岩	2.9	閃緑岩	2.1	砂 岩	1.4
珪 岩	2.7	片麻岩	2.1	頁 岩	1.3
硬石灰岩	2.5	安山岩	1.8	凝灰岩	1.3
硬砂岩	2.3	片 岩	1.7	明礬岩	1.0

1) 岩石抗力係数 (g)

標準爆薬 ($e=1$) を用い、完全に込物を込めた場合 ($d=1$) , 岩石 1 m³ を爆破するのに必要な標準装薬量である。各種岩石の岩石抗力係数 (g) の例を、表1.25に示す。

2) 爆薬威力係数 (e)

ある爆薬を標準として、他の爆薬の発破効力決めた係数である。日本ではNG60%の桜ダイナマイトを標準として、各種爆薬の爆薬係数を、表1.26のように定めた。

3) てんそく係数 (d)

装薬孔に爆薬を装填した後、せん孔の空げきに粘土、砂、水などを込める。これが十分であるほど爆薬の爆破効果がよくなる。通常、込物が完全な場合を、 $d=1$ とする。込物の発破効果に対する影響は、表1.27のように大きい。

表 1.26 各種爆薬の爆薬威力係数 (e)

爆 薬 種 別	動的係数	静的係数	総合係数 (e)
桐 ダイナマイト	0.85	0.75	0.85
桜ダイナマイト60%	1.00	1.00	1.00
梅 ダイナマイト	1.52	1.35	1.45
カ ー リ ッ ト	2.04	0.82	1.30
硝 安 爆 薬	2.15	1.39	1.40

表 1.27 装薬孔てんそく係数 (d)

条 件		d
適当に深い装薬孔の場合	込物完全	1
	込物不完全	$1 < d < 1.25$
	込物せず	1.25
装薬のみ装薬孔内にある場合	盛土する	1.5
	盛土せず	2.0
外部装薬の場合	多くの場合	$2.0 < d < 9$

4) 漏斗指数の関数 ($f(n)$)

$f(n)$ は漏斗指数 $n (= \frac{R}{W})$ の値、つまり漏斗孔の形によってきまる関数であり、一般にダンブラン

の式が使われる。この場合の各 n の値に対する $f(n)$ の値は、表1.28に示すとおりである。

$$f(n) = (\sqrt{1+n^2} - 0.41)^3 \dots\dots\dots (1.21)$$

標準装薬の場合は、 $R=W$ 、 $n = \frac{R}{W} = 1$ となり、 $f(n) = 1$ となる。

表 1.28 漏斗指数 n と関数 $f(n)$ の関係

n	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.75	2.0
$f(n)$	0.36	0.42	0.52	0.66	0.83	1	1.26	1.52	1.86	2.25	2.70	4.14	6.09

(3) 漏斗試験 (クレータ・テスト)

漏斗試験(クレータ・テスト)とは、岩盤に1自由面発破を行い、形成された漏斗孔を厳密に調査し、その結果を利用してその岩盤の標準爆薬量を決定する試験である。

いま、図1.46示すせん孔を行って、新桐ダイナマイト0.25kgを装薬し、粘土の込物を込めて発破したところ、図のような漏斗孔が形成されたとする。

漏斗試験条件と結果

使用爆薬量 (L_k) 0.25kg
 装薬長 0.195m
 せん孔長 (l) 0.710m
 せん孔角度 (Q) 30°
 漏斗孔半径 (R) 0.48m
 最小抵抗線 (W)

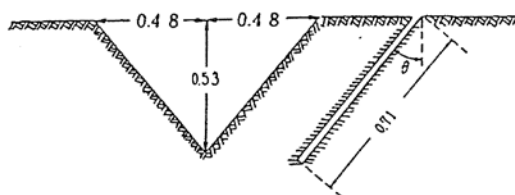


図 1.46 漏斗試験図

$$\begin{aligned}
 &= (\text{せん孔長} - \text{装薬長}/2) \times \cos \theta \\
 &= (0.710 - 0.195/2) \times \cos 30^\circ \\
 &= 0.530(\text{m})
 \end{aligned}$$

\therefore 漏斗指数 (n) = $R/W = 0.48/0.53 \approx 0.9$ ($R < W$ より, 本漏斗孔発破は弱装薬である。

表1.28より, $n = 0.9$ のとき, 漏斗指数の関数 $f(n) = f(0.9) = 0.83$

このときの標準装薬量 (L_s) を求める。標準装薬量では $n = 1$ であり, 表より $f(n) = 1$ となる。

従って, $L_s/L_k = f(1)/f(0.9)$ となる。

$$\therefore L_s = L_k \times f(1) / f(0.9)$$

ここに $L_k = 0.25\text{kg}$, $f(1) = 1$, $f(0.9) = 0.83$

$$\therefore L_s = 0.25 \times 1 / 0.83 \approx 0.301\text{kg}$$

これより, 最小抵抗線0.530mのときの標準装薬量は0.301kgとなる。

2 せん孔

露天採掘の発破は, ほとんどがせん孔による密閉発破によって行われる。その目的は, 最小の装薬量で最大の発破効果をあげることである。ベンチ発破における装薬量は, 最小抵抗線, ベンチ高さ, せん孔間隔などによって左右されるから, これらを実際上決定するせん孔は, 発破効果を決定する重要な要素である(図1.47参照)。

(1) せん孔径

せん孔能率を決定する主要要素の1つに, せん孔径がある。一般に, せん孔径が小さいほどせん孔能率は向上する。これに反して, 爆薬の径が小さくなると, 爆速は低下し発破効果も減少する。

最近では, ビット径が大形化し, せん孔径が大きくなったために, 爆速が大きくなり, 最小抵抗線, せん孔間

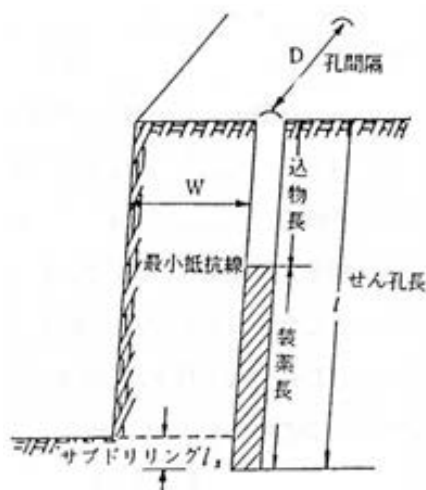


図 1.47 せん孔

隔を広げて、せん孔本数を少なくできるようになった。反面、最小抵抗線を大きくするということは、大塊の発生が多くなりやすい。また一般に、岩石の破壊は爆破の際発生する衝撃波によるところが大きいので、せん孔径に対して薬径が小さく、また装填に間隙があるような部分装填のときは、直接岩石内に衝撃波が発生せず発破効果が悪い。従って、せん孔径はせん孔能率と発破効果の両面から検討して、総合コストを最小とすることが必要である。

(2) せん孔長 l

せん孔長を決める要素は、せん孔径、一発破の進行長、切羽の高さである。せん孔長には特に枠はないが、ベンチカットのような場合は、サブドリリング (l_s) を最小抵抗線の0.3倍以上掘ることが常識とされている。これを行わないと、十分根切れが行われない。

(3) せん孔間隔 D

ベンチ発破の場合には、最小抵抗線と孔間隔の決定が大きな要素となる。一般にせん孔間隔は、集中装薬の場合は最小抵抗線の1.0～1.3倍にとり、ベンチ発破のような長装薬の場合には、1.0～1.4倍にとるのが普通である。

(4) せん孔時の注意事項

- ① 岩盤などの自然条件がその都度変化するから、前回発破の実績を考慮して、岩質、節理、き裂、断層などに注意し、必要な修正を行う。
- ② せん孔角度に十分注意し、適正な最小抵抗線にする。
- ③ 前回の発破孔あるいは孔じりを利用してはならない。
- ④ 特に前回発破の残留爆薬、残留雷管の有無について入念な検査を行う。
- ⑤ せん孔を終った孔は、燥粉と泥水をキューレンやブローパイプで装填前に掃除・排出する。

(5) せん孔設計

せん孔設計は、変動する岩盤などの諸条件のなかで最適せん孔の基準を定め、発破効果を高い水準で維持する目的で行う。しかしせん孔、発破条件の要素はきわめて多様であり、かつ、岩盤などの自然条件は常に変化するから、せん孔基準を決定するまでは、試験せん孔、試験発破を繰返し行うことが必要である。また、せん孔設計はあくまで基本であり、変動する諸条件に応じ、その都度必要な修正を行うことが大切である。

1) 条件の設定

せん孔設計の準備段階として、多くの要素のうち比較的固定できる条件をあらかじめ決定し、決定した条件は切羽で維持する。固定要素として、次のようなものがある。

① せん孔手段

使用せん孔機、使用ビット、ビット径（孔径）、チップ角度

② 切羽条件

岩質（断層、亀裂、岩目など）、ベンチ高さ、切羽長、湧水の有無

③ 火薬類

使用爆薬、薬径、薬長、薬包当重量、使用雷管（脚線長、瞬発、段発—MS、DS）、火工品など

④ 発破

発破方法（電気発破、非電気式発破、導爆線発破）、発破器、テスト類（電気抵抗、漏電流、静電気）

⑤ その他

込物の材質、込め方など、付近の保安物件、飛石の防止法

2) 発破係数Cの決定

クレータ・テストはかなり困難な実験であり、発破係数は各鉱山特有の値であることから、経験値を修正して求めることが多い。理想的には、クレータ・テストを繰返し行って、岩質に対する $L = CW^3$ における発破係数Cを決定する。

本節1(1)のクレータ・テストの結果を岩質Aに対する第1回クレータ・テストとすると、最小抵抗線 $W = 0.53m$ に対し、標準装薬量 $L = 0.301kg$ であるから、

$$L = CW^3 \text{より}$$

$$C_1 = L_1 / W^3 = 0.301 / 0.53^3 \\ = 2.02 \text{ となる。}$$

同様なクレータ・テストを W と L を変化させて行い、それぞれ標準装薬量を求め、 $C_2 C_3 C_4 \dots$

C_n を求める。 C_n の平均・分布などから、岩質Aに対する C_A を決定する。

3) 設 計

せん孔設計を行うに当たって、あらかじめ検討しなければならない事項は、与えられた切羽条件（ベンチ高さ、ベンチ幅、切羽長）、岩質、発破規模（起砕鉱量、破碎粒度）、発破孔の配列、発破方法等である。これらは生産規模、積込方法、運搬方法、破碎設備の能力等の条件によって決定されるが、環境条件（保安物件などの有無）によって左右される場合があり、これらを考慮に入れてせん孔設計を行う。せん孔において最も重要な因子は、最小抵抗線である。この値を決定するには、いろいろの公式を応用して現場テストを行い、初期の値を求めるのが望ましい。

各孔の最小抵抗線、孔間隔およびベンチ高さが決定されると、装薬量は、テスト結果による $L = CDWH$ により計算される。

ここで得られたせん孔設計に基づいてせん孔、装薬、発破を行った後、切羽での実績を検討する。これを繰返し行い、所要の修正を実施して、最終的にその岩質に対するせん孔設計基準として確立させる。通常これらの試験は、特別な切羽を用意せず、運営切羽を利用することが望ましい。

(6) 傾斜面採掘におけるせん孔

近年、車両系鉱山機械の発達により露天採掘の主流は階段採掘法に移行し、傾斜面採掘は数鉱山で採用されているにすぎない。傾斜面上で行うため、レッグドリルまたはハンドハンマ等の小型さく岩

機を用いる。

(7) 階段採掘法におけるせん孔

1) さく岩機

階段採掘法で使用するさく岩機は、一般に大型である。主なものは、ドリフタを搭載したクローラドリル、ロッドの先端に打撃ハンマを設けロッドは回転を伝えるだけの機構のダウンザホールドリル、回転機構だけによるロータリドリルなどである。移動方式には、人力運搬形と車輪やクローラによる自走形がある。

2) 垂直せん孔法

従来、図1.48に示す垂直せん孔法による発破が行われていたが、ベンチトウ部のバックブレイクが大きいこと、切羽面が立っているため安全性に欠けることにより、現在はあまり用いられていない。しかしながら、同一のHに対して ℓ が少ないことや、せん孔方向を他の孔と調整する必要がないこと等のメリットがある。

3) 傾斜せん孔法

本法は、最近の階段採掘せん孔発破の主流で、ベンチトウ部の発破効果が良く、バックブレイクも少ない。また、切羽面に傾斜がついており、崩壊の恐れが少ない(図1.49参照)。

① ビット径

径60～300mmのものが採用されている。生産規模、積込機、粗砕機の大小、岩盤、鉱床、地形などにより

せん孔規格とビット径が決まる。国内の石灰石鉱山では、60～250mm程度であるが、ダム工事現場では径300mmのビットを使用している例がある。

② 孔 長

せん孔長は、ベンチの高さによって決まるが、ベンチの高さは、5～15m程度に設定されることが多い。これは、能率向上と保安面の向上が目的である。孔長は普通、ベンチ高さより10～20% (+0.3W以上) 深くする。これをサブドリリングと呼ぶ。サブドリリングを行うことで、フロア以下の部分まで爆破作用がおよび、発破後、フロアを平にしやすくなり、積込み能率や次の発破効率が向上する。従って、

$$\ell = (H / \sin \theta) + 0.3W \quad \text{または} \quad \ell = \{H / \cos(90 - \theta)\} + 0.3W \cdots (1.22)$$

となる。

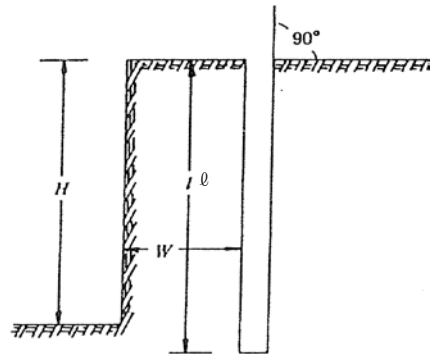


図 1.48 垂直せん孔法

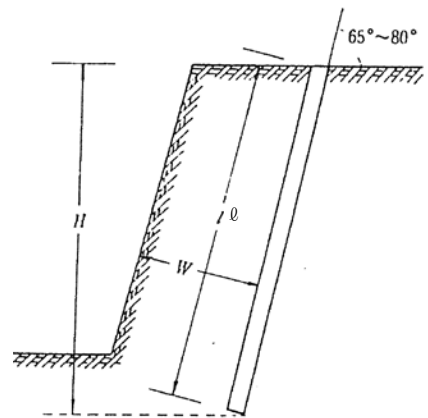


図 1.49 傾斜せん孔法

③ 最小抵抗線

ベンチカットの場合、最小抵抗線の大きさは種々条件に応じて決める。ハウザーの公式や変形式を使う場合もあるが、明確ではないため、従来の経験によって求めるのが望ましい。計画を単純化するため、薬径をベースとし、最小抵抗線： $W = (30 \sim 60) \times d$ と見積る方法もある。

一般に、石灰石鉱山では、最小抵抗線の大きさは1.5～7.0mの範囲である。

④ 孔間隔

一般に、最小抵抗線の1.0～1.4倍とする。石灰石鉱山では、1.5～8.5mの範囲である。

⑤ 孔列数

1列、2列、あるいはそれ以上の場合がある。単列発破はベンチ高さが大きいときに有利で、多列発破はベンチ高さが6～12m程度のときに有利である。この場合、2列目から後の列の最小抵抗線を短くすると起爆後の状況がよい。また、孔の位置を千鳥にする方が、発破効果がよく、小割が少なくなる。

4) 水平せん孔法

この方法は、岩質が軟弱であって下向きせん孔が困難である時に用い、部分的にベンチの作成段取りや不良岩の処理を行う場合は、3～5mの水平せん孔を併用する（図1.50参照）。

5) トウホール（地ならし孔）せん孔法

下向きせん孔による発破では、踏前の凹凸が生じ、ショベル等による積込作業を困難にする場合は、トウホールを入れて路面の修正を行う。一般に、トウホールせん孔法は孔荒れが多く、下向きせん孔法に比べて能率が低い（図1.51参照）。

我が国石灰石鉱山における階段採掘法のせん孔規格を、表1.29に示す。

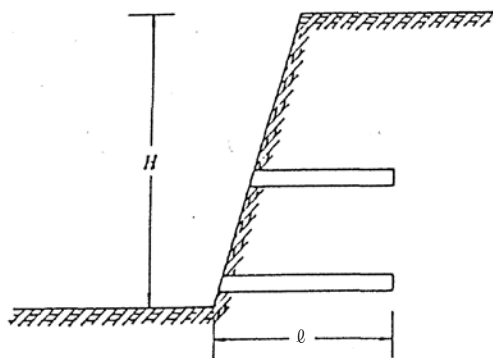


図 1.50 水平せん孔法

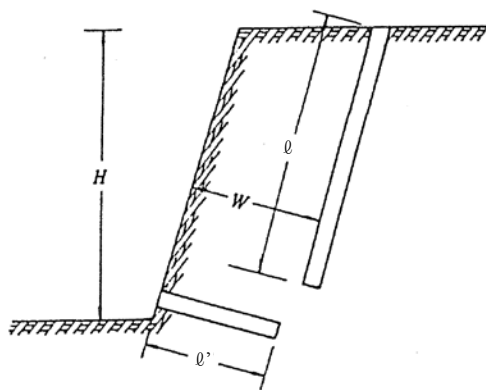


図 1.51 トウホールせん孔法

表1.29 我が国石灰石鉱山における階段採掘法のせん孔規格

項 目	ベンチ高さ 5m 位の鉱山におけ る事例	ベンチ高さ 10m 位の鉱山におけ る事例	ベンチ高さ 15m 位の鉱山におけ る事例	生産規模 60 万 t/年 以上の鉱山におけ る平均せん孔規格
ベンチ高さ	5 m	10 m	15 m	10.3 m
孔 間 隔	1.5～ 4.0 m	2.5～ 4.5 m	7.5～ 8.5 m	4.5 m
最小抵抗線	1.5～ 3.5 m	2.3～ 4.2 m	5.2～ 7.0 m	4.1 m
孔 深	5.5～ 6.0 m	11.0～11.3 m	18.0 m	11.2 m
孔 径	60～95 mm	95～115 mm	115～250 mm	101 mm
せん孔傾斜	75～80 度	65～70 度	70 度	70.5 度

(8) 発破方法

1) 斉発発破

2孔以上の起爆を同時に行うことを斉発発破とい
い、各孔の装薬量は同じで、単独発破よりも多量の
起採ができる。図1.52のA・Bを、各々単独で発破す
るとC部分は残るが、A・Bを斉発発破するとC部分
も起採される。斉発発破には、通常、瞬発電気雷管
を使うが、導爆線を使うこともある。

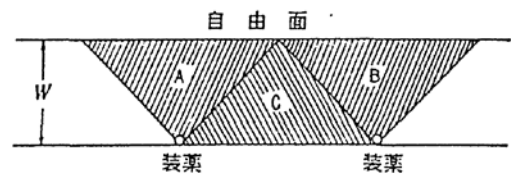


図 1.52 斉発発破の破壊状況

2) ミリセコンド発破

ミリセコンド発破は、MS電気雷管を使用して、斉発効果を持ちながら、段発発破の長所を兼ね備
えた発破方法で、次のような特徴を持っている。

- 発破による振動や爆破音が小さい。
- 破碎面がきれいで、浮石が少ない。
- 隣接発破孔への影響がない。またカット・オフもない。
- 岩石が適度に破碎され、飛散距離も小さい。
- 粉じん量が少ない。

3) 長孔発破

通常、孔長が最小抵抗線の2倍以上の発破を長孔発破という。
自由面は2つ以上で、ベンチ発破、サブレベル採掘法などに利用
されている。

図1.53に示す発破において、関与する抵抗は、AB面の引張
応力、底面BCでのせん断応力、およびBC面での摩擦抵抗の3
つが考えられ、発破エネルギーはこれらの抵抗にまさる大きさ

が必要である。この場合、装薬は3抵抗の荷重中心以下に行わなければならない。荷重中心の位置は
岩石強度、孔深、最小抵抗線などによって変化する。これらの関係を、式次に示す。

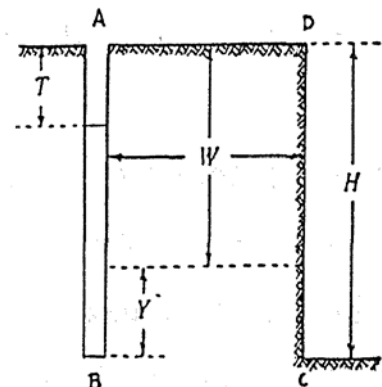


図 1.53 長孔発破模式図

なお、薬量の算定式には、 $L_1 = eW^3$ 、2自由面のときは、 $L_2 = 2W \times W / 2 \times H$ を用る。また、せん孔間隔は $1.3W$ 以下が適当である。

$$Y = \frac{H}{2} \times \frac{\text{引張り応力}}{\text{引張り応力} + \text{せん断応力} + \text{摩擦抵抗}}$$

$$= \frac{H}{2} \times \frac{T \times H}{T \times H + S \times W + \Delta \times W \times H \times R} \quad \dots\dots\dots (1.23)$$

ここで、Y : 孔底から荷重中心までの距離 (cm)

H : 孔深 (cm)

W : 最小抵抗線 (cm)

R : 岩石のBC面での摩擦係数 (一般に0.65)

T : 引張り応力 (kg/cm^2)

S : せん断応力 (kg/cm^2)

Δ : 岩石の単位体積質量 (kg/cm^3)

4) 坑道式発破

坑道に多量の爆薬を装填する方法で、一発破で数千トン、数万トンの岩石や鉱石を採掘する場合に用いる。この発破は、使用する爆薬量が多く、一発破当りの起さい量も莫大である。従って、過・弱装薬で生ずる損害も大きく、大きな災害になりやすいので、最近ではほとんど採用されない。

5) その他の発破

① 制御発破 (コントロールブラスティング)

トンネル周壁や露天切羽残壁等の壁面保持のために、制御発破が採用されている。

これは、目的とする部分だけの破壊を行い、破壊せずに残したい部分へ発破の力が及ばないように制御しようとするものである。

プレスブリット・ブラスティング (PSB) 主に、露天切羽における残壁面の保護のために行われる発破方法で、破壊計画線の背部の岩盤に余分の破壊・亀裂を生じさせないように、本発破の前に、計画線に沿ってあらかじめ発破により亀裂を入れておく。亀裂を入れるだけであるから、本発破に比べて爆薬量も少なく、孔間隔も狭く、デカップリング指数 (= 発破孔直径 / 爆薬の直径) を大きくとることが普通である。

石灰石鉱山では、孔間隔1m程度で、導爆線に $0.1 \sim 0.2 \text{kg}/\text{m}$ の爆薬を装着するケース、専用の含水爆薬 (10m もの $\times 0.3 \text{kg}/\text{m}$) のケース、制御発破用コードを使用するケースが多い。

スムーズ・ブラスティング 岩盤の仕上がり壁面を滑らかにする発破で、主にトンネル周辺の仕上り壁面で採用されている。仕上り面の発破孔に爆薬を低密度で装填し、最後に点火する。

② ワイドスペースブラスティング (WSB)

せん孔間隔を拡げ逆に抵抗線を小さくすることにより、破碎ズリを細かくかつ比較的均一にする多列式発破法の一種である。ベンチ発破の場合は、従来からせん孔間隔を抵抗線長の1.0～1.5倍に取っている。すなわち、岩質、せん孔径および使用爆薬種により取り得る最大抵抗線長(W)を決め、せん孔パターンをその1.0～1.5倍としている。

WSB法は、抵抗線長(W)×せん孔間隔(D)(すなわち、平面的には1孔当りの受け持つ破碎面積)を従来法と同じ大きさにとりD/Wの比を4～8倍と、いままでの常識に比べ非常に大きくとるせん孔パターンにし、掘削 m^3 当りの火薬量およびせん孔長は変えない。2～3列以上の多列発破とすることが一般的である。ただし、2列目、3列目は、1列目と同じ規格を取る場合と、更にD/Wを大きく取る場合がある。

③ 小割発破

小割機の発達等により小割発破の頻度は減ってきたが、発破で大塊を破碎する方法として、せん孔発破、張付け発破、蛇穴発破がある。

爆薬量の算定式 $L = C D^2 \cdots \cdots (1.15)$

ここに L : 爆薬量 (g)

C : 発破係数 (表1.30参照)

D : 岩石径 (cm)

コンクリートおよび鋼材の発破

爆薬量の算定式 $L = C A \cdots \cdots (1.16)$

ここに L : 爆薬量 (g)

C : 発破係数 (表1.31参照)

A : 裁断面積 (cm^2)

Cは定数で桂ダイナマイト、アンモン爆薬、カーリットなどでは、次の値をとる。

ただし、コンクリートは一般に壁の厚さの $1/3 \sim 1/2$ の長さのせん孔するので、上記算定量の $1/8 \sim 1/10$ の薬量でよい。また、壁の厚さをh (m) とすれば、 $L = 0.4h^3$ でもよい。

⑤ 樹木の切断

爆薬量の算定式 $L = C D^2 \cdots \cdots (1.17)$

ここに L : 爆薬量 (g)

C : 発破係数 (表1.32参照)

D : 樹木直径 (cm)

伐根発破の場合

伐根発破は、切り株の真下に装薬する場合と太い張り根の下に分散装薬する場合がある。切り株の中に穴を作って装薬する方法は、発破の利きが悪く効果が薄い。装薬量は、切り株下部の堅

表1.30 小割発破の発破係数 (C)

小割の方法	C の数値
せん孔法	0.007～0.02
蛇穴法	0.05 ～0.07
張付け法	0.15 ～0.20

表1.31 コンクリート-鋼材の発破係数 (C)

発破方式	C の数値	
	コンクリート	鋼 材
せん孔法	0.25 ～0.5	—
覆土法	2.5～5.0	10～15

表1.32 樹木伐材の発破係数 (C)

発破方式	C の数値
せん孔法	0.05～0.07
張付け法	0.35～0.45
外部装薬	0.60～0.75

さにより異なるが、樹木直径10 c m当り0.1～0.3kgを目安とする。

6) 特殊な起爆システム

ここでは、最近各鉱山で採用されることが多くなった、ハーキュデット起爆法、ノネル起爆法および、MBS、MAGNADETについて述べる。

起爆方式の分類を、図1.54に示す。

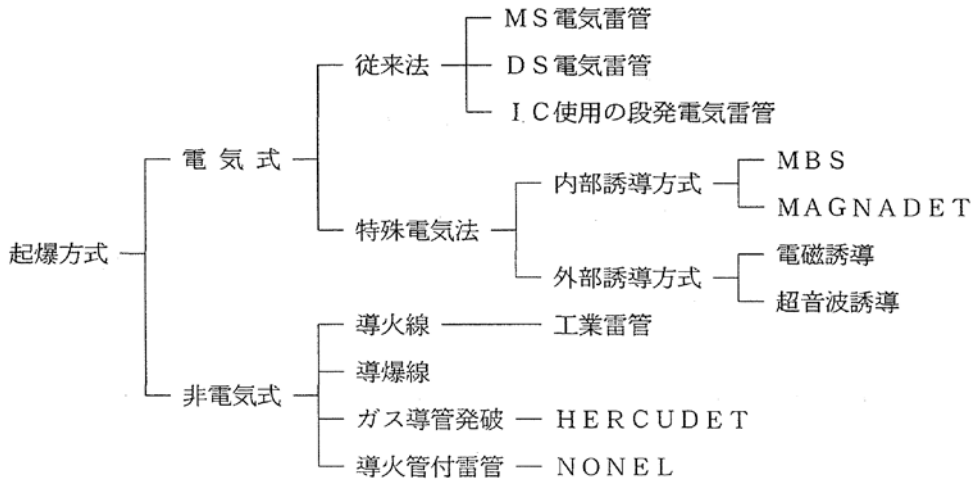


図1.54 起爆方式の分類

① ハーキュデットシステム（HERCUDET）

ハーキュデットシステムは非電気式の起爆法であるため、静電気・雷・迷走電流・漏えい電流等に対して安全である。電気雷管の脚線、補助線、発破母線の代わりに、2本の細いプラスチックのチューブで回路を作り、この中に送り込んだ混合ガスの爆発により起爆する。

発破回路は、コネクタの接続で形成され、この回路に専用のガス供給装置から酸素と燃料ガスを所定の混合比で送り込み、専用発破器のスパークで点火する。混合ガスの爆発反応速度は2,500 m/sで発破回路チューブ内を進行し、ハーキュデット雷管を起爆する。

ハーキュデットシステムには、次のような長所・短所がある。

長所 ・発破直前に燃料ガスをチューブに通すので、不慮の着火の恐れがない。

・ガスを通してチェックすることにより、回路の導通確認ができる。

・チューブ長の調整で、極短秒時差の設定が可能であり、発破振動抑制に活用できる。

短所 ・専用の点火器、テスト等が必要である。

・発破後、プラスチックチューブが残る。

② ノネルシステム（NONEL）

ノネル非電気式^{ばくごう}爆轟システムも、非電気式であるため、静電気・雷・迷走電流・漏えい電流等に対して安全である。雷管とチューブが一体化されたもので、電気雷管の脚線の代わりに、断線

等の恐れのない外径3mm、内径1.5mmのプラスチックチューブ内壁に微量の爆薬（HMX＋AL0.02g/m）が塗布されている。ノネルチューブの末端を点火器で起爆すると、極めて小さな爆轟波がチューブ内を伝播し、先ずコネクタのミニ雷管を起爆する。ミニ雷管の爆発により、爆轟波が次のノネル雷管またはコネクタへ伝播し、順次起爆していく。

ノネルシステムには、次のような長所・短所がある。

長所 ・結線が容易で単純であるため、作業能率が良い。

- ・専用点火器のほか、工業雷管、電気雷管による点火も可能である。
- ・チューブ長の調節で、極短秒時差の設定が可能であり、発破振動抑制に活用できる。
- ・雷管の使用種類が少なく、無限に近い段差が設定できる。

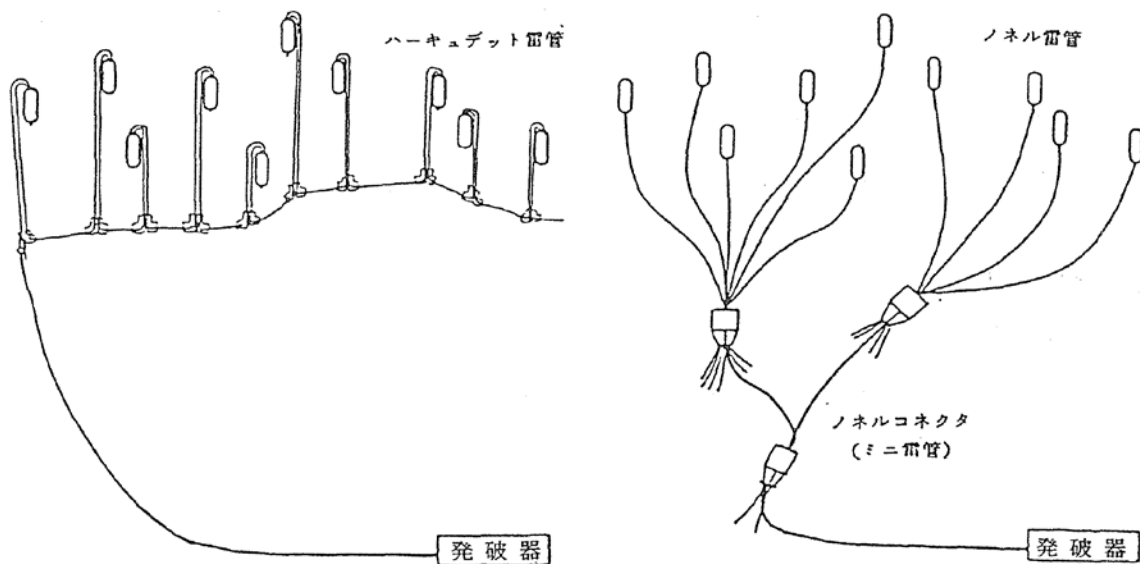
短所 ・導通テストができないため、結線のチェックは目視に頼らざるを得ない。

- ・発破後プラスチックチューブが残る。

③ MBS (Electro Magnet Induction Blasting System) およびMAGNADET

HERCUNETやNONELとは異なり、起爆方式は特殊電気法による電気式である。ただし、電氣的に絶縁被覆された電気雷管を使用し、専用のトランスコアを介して電磁的に接続された電気雷管を起爆するため、漏れ電流・迷走電流・静電気等に対して安全である。特に、使用の簡便さと結線接続部のリーク防止効果があるため、金属鉱山で採用されてきている。このような電磁誘導の原理を応用した特殊電気法による起爆方式は、遠隔制御による外部誘導方式が可能であるため、本四連絡橋の水中における基礎掘削工事にも採用された。

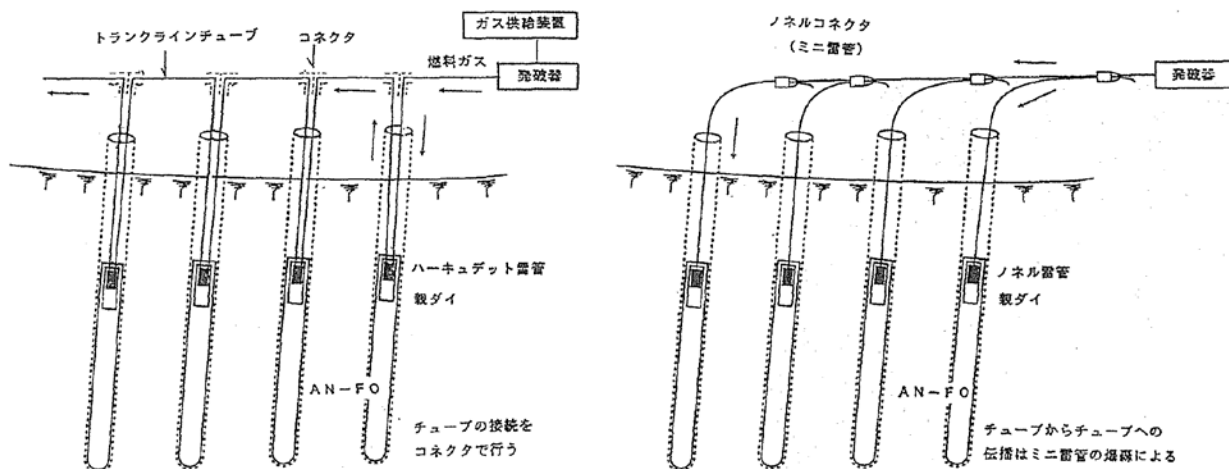
ハーキュデットおよびノネル起爆法の使用概念を、図1.55および図1.56に示す。



ハーキュデット結線方法の例

ノネル結線方法の例

図1.55 ハーキュデットおよびノネル起爆法の使用概念図



ハーキュデット結線方法の例

ノネル結線方法の例

図1.56 ベンチカットにおけるハーキュデットおよびノネルの使用概念図

3 発破作業

(1) 電気発破用機器

電気発破用機器には、各種発破器、テスト、漏えい電流検知器などがあり、いずれも発破作業の成否、保安の確保に重要な役割を持つ。

1) 発破器

電気発破器の具備すべき性能は、次のとおりである。

- ・確実に所要電圧を短時間に放出すること。
- ・絶縁性が高いこと。
- ・軽量、小形で携帯に便利であること。
- ・炭鉱の坑内で使用するものはメタン・炭じんに安全なこと。

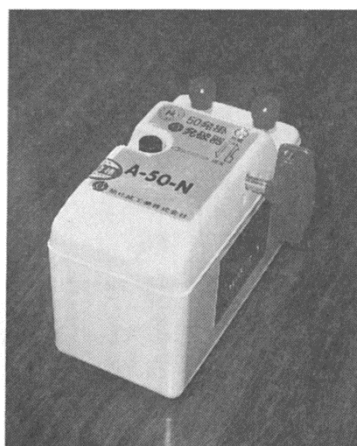


図1.57 50発がけ発破器

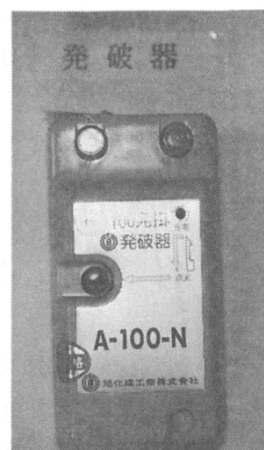


図1.58 100発がけ発破器

発破器には発電機式、コンデンサ式、

トランジスタ式などがある。最近では、乾電池を電源とし、充電器にコンデンサ、昇圧部にトランジスタ・コンバータ・ユニットを使用した、昇圧・充電して高電圧を放出する形式の発破器が多い。

図1.57の50発がけ発破器は定格放電電圧240V、コンデンサ容量30 μ F、図1.58の100発がけ発破器は定格放電電圧850V、MPコンデンサ容量10 μ Fで、ともに炭鉱用耐圧防爆構造の検定品である。

2) テスタ（導通試験器）

テスタには、乾電池を電源とし回路抵抗値を直読できるものと、回路に流れる短絡電流を1mA以下に規制して単に発破回路の導通を検査する光電池式の2種類がある。ともに小形・軽量で、絶縁性も高く、ほとんどが検定合格品である。

3) 漏えい電流検知器

切羽の漏えい電流検知を行う機器で、漏えい電流の加熱が起こす微電流をメータ部で表示する。100mA以上の場合は赤色で表示し、危険範囲であることを示す。

4) 保守・検査

電気発破用機器は乾燥した場所に保管し、定期的に検査や乾電池の交換を行う。検査は、乾燥したほこりの少ない部屋で行う。

・発破器の検査 電池の異状の有無、ネオンランプの異状の有無、各部の湿気、ごみ付着などを検査する。故障している場合は、分解せずに直ちに製造元に修理を依頼する。

・テスタ 標準抵抗器を測定し、所定の抵抗値を指示するか確認する。誤差範囲は±2%以下。

(2) 発破準備

1) 火薬類の受領

発破に使用する火薬類は、発破請求票に火薬類の種類・数量その他所定事項を記入して火薬係員に請求し、火薬取扱所で受領する。その際、下記事項を確実に実行する。

- ① 火薬類の請求量は、請求者が当日使用する見込量（1作業時間）を超えない。
- ② 請求する火薬類の種類は、あらかじめ定められたものである。
- ③ 受領するとき、火薬類の種類・数量を確認するとともに、異状の有無を点検する。
- ④ 無資格者が火薬類を請求・受領してはならない。
- ⑤ 受領した火薬類の紛失・盗難について注意する。

2) 火薬類の携帯

火薬類を携帯するときは、次の事項を遵守する。

- ① 携帯容器は、布、合成樹脂など電気不良導体で作られ、外部からの衝撃に耐え、内部に鉄類が現れておらず、火薬・爆薬・導爆線と火工品とを隔離して収納できるものを使用する。
- ② 携帯容器には火薬類以外のものを入れてはならない。
- ③ 携帯する火薬類の量は、1作業時間の使用見込量を超えない。
- ④ 携帯容器には、「火薬」などの標識を付け、施錠する。
- ⑤ ケージまたは車両に乗るときは、専用のケージまたは車両を用いる。積卸しは、原動機、バケットの運行等を止めてから行う。
- ⑥ 携帯容器を身辺から離すときは、盗難防止の処置をとり、容器から遠ざかってはならない。
- ⑦ 電気雷管を携帯しているときは、配線、移動電線など電気施設に容器が触れないよう注意し、置くときは、それらの施設から1m以上離れた落石の恐れのない安全な場所を選ぶこと。

⑧ 喫煙・火気取扱いを行ってはならない。

⑨ 常時火気を取り扱う場所、発火性・引火性物質の蓄積場所へは接近しない。

3) 切羽での保管

切羽での火薬類の一時保管は落石の恐れのない乾燥した箇所の木箱などに収容し、かつ盗難防止の措置を講ずる。

4) 発破用器材

雷管そう着棒、込棒（ともに木製）、キューレンまたはブローパイプを準備・点検するとともに、電気発破器、テスト、発破母線、ANFO装填器などの異常の有無をあらかじめ検査する。また込物（アンコ）、電気発破用補助線を十分な量準備する。なお、電気発破の場合、発破器のハンドル（キー）は、発破係員または有資格者で点火する者が常時携行して不測の事故を防止する。

5) 切羽片付

せん孔に使用したさく岩機ビットなどの機具は、発破の影響を受けない安全な箇所に保管する。また、切羽近くの運搬機器や車両は、発破による損傷を被らないよう、十分な距離を取り処置する。移動できない機器で、発破飛散ズリの影響を受ける恐れがある場合は、必要な防護措置を取る。

6) 発破警戒

発破による災害は、ほとんどの場合、死亡などの重大災害となり、かつ、り災者は他人である場合が多い。従って、発破警戒は特に厳重・確実に行わなければならない。

① 担当係員は就業前に、あらかじめ、当日の発破時間、発破箇所について作業員全員に周知させる。特に外来者は、個別に行動を確認するとともに発破時間、発破箇所を周知徹底させる。

② 発破箇所に通じる主要な道路には、発破施行者が立会の上、所定箇所に見張人を配置し、発破時間、警戒位置、発破終了の連絡方法などの打合せを行う。見張人は、あらかじめ決められた発破施行者から発破終了の連絡があるまでは、みだりに警戒位置を離れてはならない。

③ 露天採掘場などにおいては、発破の影響は隣接の鉱山や付近の田畑、道路などの交通機関にも及ぶので、これらに対する連絡および警戒は厳重にする。

④ 発破施行者は、点火に先だって、あらかじめ配置した見張人、立入禁止設備を点検し、点火することを告げて危険のないことを確認してから点火すること。この時発破器のハンドル（キー）は必ず携行する。

⑤ 発破施行者は、発破が終了し危険がないことを確認して、見張人に発破終了を連絡するとともに警標を撤去する。

7) 発破孔の点検・掃除

発破孔の点検・掃除が不十分な場合、薬包間の岩片介在や薬包の吸湿が発・残留の原因となる。

① キューレンまたはブローパイプで孔内のくり粉・岩片・水分を排除する。

② 掃除した発破孔を込棒で点検し、くり粉などがいないことを確かめる。

③ 孔内が荒れているときは、掃除直後に込棒を孔底まで押し込み、装填までそのままにする。

8) 漏えい電流の測定

電気発破で、発破箇所近辺に電車線などの電気施設があるときは、あらかじめ漏えい電流や迷走電流を測定する。測定には、漏えい電流検知器を用い、岩盤と鉄管、岩盤とレール、鉄管とレール、岩盤と岩盤などの電圧、電流を測定する。直流で100mA以上の電流を検知した場合は、危険状態とみなし、電気発破は中止する。

(3) 装 填

1) 装填準備

装填に先立って、下記の点検および準備を行う。

- ① 各発破孔の最小抵抗線、孔深を点検し、各孔装薬量をあらかじめ決めておく。
- ② 携行した火薬類の種類、数量を再点検し、所要量を確認する。電気雷管は他社製品との混用を絶対に行ってはならない。
- ③ 込物の数量を確認する。
- ④ 雷管装着爆薬（親ダイナマイト）を準備し、安全な箇所に保管する。
- ⑤ ANFO装填器のアースを確実にとる。
- ⑥ せん孔時に空洞等があった箇所については、あらかじめその対策を講じる。

2) 親ダイの作り方

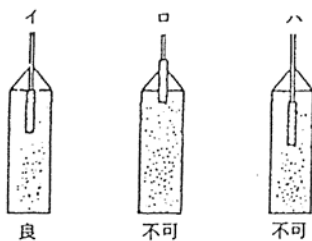


図1.59 雷管装着爆薬（親ダイ）の作り方

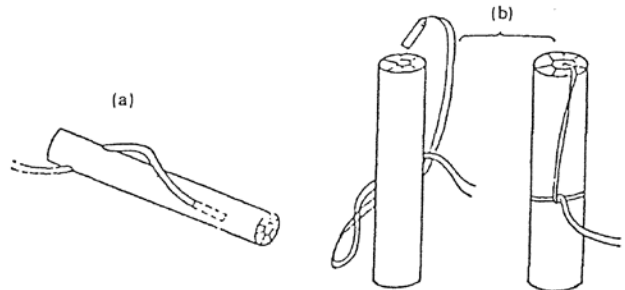


図1.60 膠質ダイナマイトへの雷管装入法

- ① 爆薬の包装紙を開き、薬包端に木製の雷管装着棒で雷管そう入孔を開ける。雷管をそう入後、再び包装紙で包み、ひもまたはゴム輪で口元を結ぶ。（図1.59参照）
- ② 膠質ダイナマイトに雷管を装入するときは図1.60の如く、導火線の場合（a）は薬包の腹に装入し、電気雷管の場合（b）は脚線で薬包のまわりに結びつける方法も行われている。

3) 薬包の装填

薬包の装填は、薬包間に空隙を作らないように慎重に行う。

- ① 発破孔の位置、孔深、最小抵抗線を再確認し、木製込棒で薬包1本ごとに押し込む。
- ② 粉状爆薬は薬包を破らないように、また、強く押すと粉薬が固まり爆破効果を減ずるから適当な力で押し込む。

- ③ 各発破孔に予定の薬包数を装填してから、最後に親ダイを装入する。
- ④ 導火線発破のときは、雷管取付口を手前にし導火線を片手で支えて静かに押し込む。
- ⑤ 雷管脚線の被覆が破れないように、また、電気雷管の段数を間違えないように確認する。
- ⑥ ANFO装填は静電気を帯びぬよう慎重に行う。装填後、除電してから親ダイを装入する。
- ⑦ 水孔は、防水の措置を講じるか、耐水性のある爆薬を使用する。
- ⑧ 空洞のある孔は、ポリエチレンチューブ（導電性のものが好ましい）等により、過装薬とならないよう措置を講ずる。

4) 込 物

込物は、一般に粘土、ポリエチレン袋に入れた砂・岩粉・尾鉱粉、水などを使用する。粘土の硬さは孔の中に押しつけるとつぶれる程度がよく、袋入りの砂、岩粉も、ある程度袋に余裕のある方が使いやすい。

- ① 初めの1本は静かに押し込み、次第につき固め回数を多くして強くこめるようにして薬包面を完全に密閉する。
- ② つき固めるときに導火線を痛めないよう、また電気雷管の脚線を巻きこまないよう手で軽く緊張しながら行う。
- ③ 各発破孔にもれなく込物を装入する。忘れると空吹きすることがある。

5) 荒れ孔の装填

あらかじめ装填する薬包、親ダイ、込物を用意し（電気雷管の段数に注意）、込棒を抜いた直後に手早く薬包、親ダイ、込物の順で当該発破孔ごとに装填する。要領は前記2）、3）と同様であるが、手早く行う必要があるのでより注意しなければならない。

6) 後片付け

装填が終了したら、残った火薬類の種類と数量を確認し、携帯用容器に収納して安全な箇所に保管する。込棒、残った込物も所定の場所に片付ける。

(4) 結 線

1) 結線方法

電気雷管の結線方法には直列式、並列式、直並列式の3種類があるが、発破器を点火源とするときは、直列式が次の点で優れている。

- ① 結線方法が簡単で誤りが少ない。
- ② 結線不良が1箇所あっても導通しないから全孔点火せず、部分的不発が防止できる。
- ③ 結線の不具合いで回路に大きい抵抗を生じて、テストで直ちに発見できる。
- ④ 並列結線は大電流が必要であるが、直列結線は計算上1A、安全率をみて、2～3A以上の電流でよい。

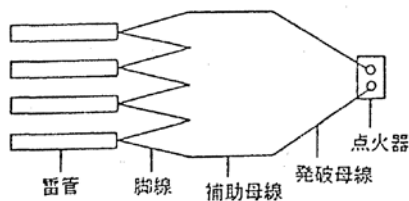


図1.61 電気雷管結線（直列方式）

2) 直列式

直列結線は、隣り合せの電気雷管の脚線を次々と結線し、両端の電気雷管脚線のうち1本と母線とを結線する方法である（図1.61参照）。

長所 ・結線の誤りが少ない。

- ・不発のときの調査が容易である。
- ・母線と脚線との短絡が起こらない。
- ・電気発破器で点火できる。

短所 ・電気雷管の抵抗を統一しなければならない。抵抗の大きいものは、先に爆発する。

- ・雷管形式、脚線長を同一にしなければならない。

3) 並列式

並列結線は、各電気雷管の脚線をそれぞれ母線に直結する方法である（図1.62参照）。

長所 ・電気雷管の抵抗が少し位ばらついても影響しない。

- ・電源には電灯線、動力線などが利用される。
- ・大形発破に利用される。

短所 ・結線に誤りを生じやすい。

- ・結線もれや電気雷管不良のものがあれば、それだけが不発となる。
- ・線と脚線の短絡が起こりやすく、メタンガスや炭じんの発生箇所には採用できない。

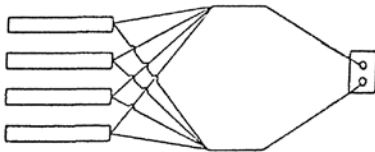


図1.62 電気雷管結線（並列方式）

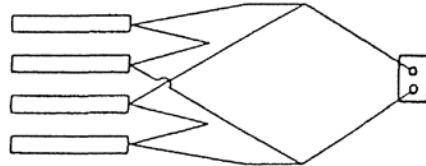


図1.63 電気雷管結線（直並列方式）

4) 直並列式

いくつかの直列結線群を並列に結線したもので、図1.63のように結線し、電灯線や動力線により大量に斉発する。斜・立坑などの大断面で断面の中央、左右、上下と区画的に直列結線したものをさらに並列結線する方法である。

5) 結線作業

結線作業の不備は、結線抵抗の増大、短絡、電流の漏えいとなって不発を生ずる原因となるから、各作業は、決められた手順に従って確実に行わなければならない。

① 脚線の結線

- ・脚線をほどいてよごれを除き、鍔は紙ヤスリなどでみがいて結線抵抗の増加を防止する。
- ・脚線の結び方を、図1.64に示す。
- ・結線部は岩盤などに触れないように処置し、電流の漏えいを防止する。湧水の多い切羽では結線

部を絶縁テープで被覆する。

② 補助線の結線

脚線の結線が終了したら、発破母線が傷つかない位置まで補助線を延長して、その末端をそれぞれ脚線結線の両端に結線する。

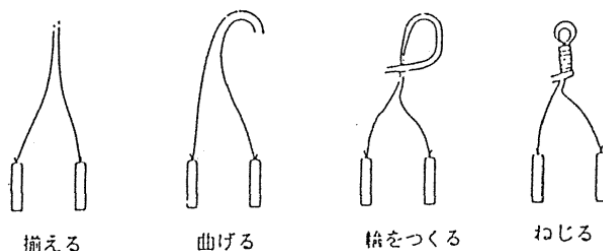


図1.64 脚線の結び方

- ・補助線と脚線との結線は、図1.65と同じ

く、各々の末端はよく^{みが}研いて結ぶ。

- ・結線部は互いにずらし、絶縁テープを巻き、短絡、接地を防止する。
- ・延長した補助線を損傷しないように注意する。

③ 発破母線の結線

発破母線と補助線の結線は、図1.65のように行う。この場合、結線部位置を互いにずらして短絡を防止するとともに、接地しないよう留意する。

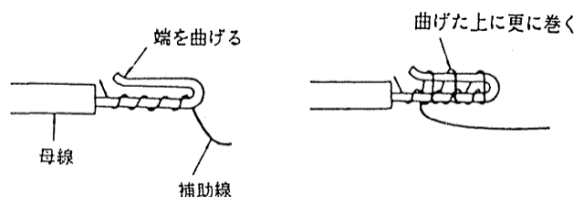


図 1.65 母線と補助線の結び方

6) 発破母線

発破母線は、綿ゴム、合成樹脂などで被覆・絶縁された機械的に強力な電線で、2心1線の場合と単心2線の場合がある。いずれの場合も、常に発破によるズリの飛散を避ける十分な長さ(30m以上)を保持することが大切である。使用中に損傷して漸次短くなりやすいので注意を要する。

発破母線の使用では、次点の注意が必要である。

- ① 発破母線は、絶縁度が良好で、銅線の太さは径1mm以上が望ましい。
- ② 発破母線は、結線の前に必ず導通試験を行う。
- ③ 発破母線の電気雷管脚線または補助線への脚線側の心線は、常に長短不揃いとし、短絡による不発・ガス炭じんへの着火を未然に防止する。
- ④ 発破母線は電線路、その他の充電部または帯電の恐れが多い軌道、鉄管類から隔離し、かつ、浮石などに対し安全な位置に布設する。
- ⑤ 発破母線の点火器に接続する側の末端は、点火するとき以外は常に短絡させておく。

7) 結線時の一般的注意事項

- ① 発破器により点火するときは、原則として直列結線とする。
- ② 結線抵抗はできるだけ小さくするよう努める。
- ③ 短絡防止の措置をとる。
- ④ 裸部接地、浸水、金属に結線部が触れることは絶対に避ける。特に、水の多い発破箇所では電流の漏えいを少なくする。
- ⑤ 発破時には、次項に留意する。

- ・出力の十分な発破器を使用する。
- ・発破母線から漏えいしないよう、絶縁被覆の完全なものを使用する。
- ・結線部は絶縁物で被覆する。
- ・脚線は、ピンホールのないビニル脚線を使用する。

(5) 導通試験と所要電圧の算出

導通試験は、装填・結線を完了した発破電気回路の最後の点検機会である。確実に実施し、異状が認められたときは、その原因を確かめて必要な処置を取る。

1) 導通試験

- ① 導通試験は、発破電気回路に電流が流れるから、発破に対して安全な点火位置で行う。なお、通電電流1mA以下の光電池式テストを使う場合は、切羽で導通試験を行ってもよい。
- ② 実験抵抗値と計算値との誤差は10%以下とする。10%以上のときは、再点検が必要である。
- ③ 発破電気回路の抵抗の測定は、発破母線が短絡した端末をほどこき、テストの端子に確実に取り付けて、目盛を読みとり記録する。測定が終了すれば、発破母線の端末は短絡する。

電気雷管、補助線、発破母線の抵抗を、各々表1.33、表1.34および表1.35に示す。

表 1.33 電気雷管の抵抗

脚 線 長 m	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4
白金線付標準抵抗 Ω	0.97	1.04	1.11	1.17	1.24
公 差 Ω	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1

表 1.34 補助線の抵抗

長さm	10	20	30	40	50
抵抗Ω	1.11	2.23	3.35	4.47	5.59

注) ただし 径 0.45mm とする。

表 1.35 発破母線の抵抗

種 類	線 径	単線 1 m の抵抗Ω	複線50m の抵抗Ω	複線100m の抵抗Ω
銅線径1.016 mm	1.024	0.021	2.1	4.2

2) 所要電圧の計算式

直列、並列、直並列ごとの所要電圧計算式を、次に示す。

- ① 電圧・電流・抵抗の関係式 $E = I \times R$ …… (1.24)
E : 電圧 (V : ボルト) , I : 電流 (A : アンペア) , R : 抵抗 (Ω : オーム)
- ② 直列結線の場合 $E = I \times (R_0 + mR)$ …… (1.25)
- ③ 並列結線の場合 $E = nI \times (R_0 + R/n)$ …… (1.26)
- ④ 直並列結線の場合 $E = nI \times (R_0 + mR/n)$ …… (1.27)

I : 電気雷管1個に対する点火電流

R_0 : 発破電気回路中、電気雷管以外の総抵抗

(補助線の抵抗 + 発破母線の抵抗 + 点火器の内部抵抗)

m : 直列雷管数, n : 並列雷管または回路数

⑤ 前記の直接結線の計算式から、次のことがいえる。

- ・抵抗 (R) は電気雷管数に伴って増加する。
- ・電圧 (E) も同様である。
- ・電流 (I) は変りがない。
- ・電気発破器を使用してよい。

⑥ 同様に、並列結線の場合、次のことがいえる。

- ・抵抗 (R) は電気雷管 1 個の抵抗を雷管数で除したものになるから、かなり減少する。
- ・電圧 (E) は、電気雷管当りの電流を維持するためには大幅に増大する。
- ・電流 (I) は雷管数に伴って増加する。
- ・電灯線を利用しないと電流が足りない。

3) 所要電圧の計算例

例1: 次の条件で電気突破を行うとき、① 直列結線の所要電圧、② 並列結線の所要電圧所要電圧を計算せよ。

電気雷管数: 20個 (点火電流: 1 A, 抵抗: 1.52Ω /個), 補助線: 20m複線 (抵抗: 0.36Ω /m), 発破母線: 100m (抵抗: 0.05Ω /m), 電気発破器の内部抵抗: 18Ω

解答

① 直列結線 $E = I (R_0 + mR)$ で

$$R_0 = 0.36 \Omega / m \times 20m \times 2 \text{本} + 0.05 \Omega / m \times 100m + 18 \Omega = 37.4 \Omega$$

$$m = 20, \quad R = 1.52 \Omega / \text{個}, \quad I = 1 \text{ A} \text{を代入して,}$$

$$E = 1 \times (37.4 + 20 \times 1.52) = 67.8 \text{ V}$$

② 並列結線 $E = nI (R_0 + R/n)$ で

$$R_0 = 0.36 \Omega / m \times 20m \times 2 + 0.05 \Omega / m \times 100m + 18 \Omega = 37.4 \Omega$$

$$n = 20, \quad R = 1.52 \Omega / \text{個}, \quad I = 1 \text{ A} \text{を代入して,}$$

$$E = 20 \times 1 (37.4 + 1.52/20) = 749.52 \text{ V}$$

上記計算例のように、結線の条件が全く同じでも、並列結線の方が10倍以上の電圧が必要で、通常の発破器では電圧不足のため、電灯線等を使用しないと電流不足となることがある。

4) 導通不良の場合の調べ方

① 抵抗が無限大のときは、断線であるから次の順序で調べる。

- ・発破母線の断線かどうか調べる。補助線を離し、発破母線を短絡して導通試験を行う。
- ・次に補助線の断線かどうか調べる。補助線と脚線を離し、補助線の切羽側を短絡し、補助線と発破母線を結線して導通試験を行う。
- ・最後に電気雷管の断線かどうか調べる。電気雷管の結線した脚線を2分して、一方を補助線に接続して点火位置で導通試験を行う。導通がなければそのグループに不良があることがわかる。

から、そのグループを更に半分に分けて前同様の試験を行い、導通の有無を見る。

- ② 抵抗測定値が、計算抵抗値の許容範囲の上限（計算値×1.1）と無限大との間にあるときは、結線抵抗が増加しているので、結線部を点検し不良結線部の錆やよごれを除き再度結線する。
- ③ 測定値が計算値の許容範囲の下限（計算値×0.9）を下回るときは、脚線どうしの短絡であるから発破電気回路を点検する。異状がなければ前記1)③によって、孔中の短絡を調べる。
- ④ 測定値が更に小さいときは、母線あるいは補助線の短絡である。

5) 導通不良の場合の処置

- ① 発破母線、補助線が断線の場合

不良部分を切り捨て、心線を約5cm現わし、紙やすりなどでよくみがいて心線をねじ合わせ、絶縁テープを巻いた後点火位置で導通試験を行って修理結果を確認する。

- ② 発破母線、補助線の結線不良の場合

不良結線部をほどいて両心線をよくみがき、断線の場合と同様の処置をとる。

- ③ 脚線が断線の場合

切羽に露出している部分の断線の場合は、再結線を行う。孔中での断線の場合は、込物をぬきとり新しい親ダイを装填して結線し直す。

(6) 点 火

1) 警 戒

「第2節 発破 3 発破作業 (2) 発破準備 6) 発破警戒」を参照。

2) 点 火

導通試験完了後、下記事項を確認してから、当該の坑外保安係員、または発破係有資格者自らが発破母線の端末をほどき、発破器の端子に接続して、携帯していたハンドル（キー）で点火する。電灯線、動力線を電源とするときは、点火用開閉器の施錠をはずして開閉器を閉じ通電点火する。点火後は母線の端末をねじ合わせて短絡させる。

3) 電 源

電気発破の電源には次の3方法がある。

- ① 電灯線、動力線による方法

この方法は立坑や大形岩石坑道掘進あるいは大形の採掘発破に利用される。電源が大きいから、何10発も一斉に発破しうる。

- ② 電池による方法

1.5Vの乾電池を直列に結べば目的は達し得るが経済的でない。

- ③ 電気発破器による方法

電気発破の点火用に製作された機器である。最近では、トランジスタ式の高電圧のものが利用されている（第2節 発破 3 発破作業 (1) 電気発破用機器 1) 発破器 参照）。

(7) 発破後の処置と異状発破

1) 発破後の点検

発破施行者（坑外保安係員、発破係有資格者）は、発破後、次の点検・処置を行う。

① 発破警戒の解除

見張人に発破の終了を連絡し警標を撤去する。

② 残火薬類の返還

残った火薬類は、速やかに火薬類取扱所に返還する。

③ 再点火防止のための処置

発破施行者は、発破切羽の点検に当たる前に、万一の不発に備え、再点火防止の処置を取る。

- ・電気点火法の場合は、発破母線を点火器から切り離し、その端を短絡させて、かつ、再点火防止の措置を取る。

- ・ガス導管点火法の場合は、ガス導管内の爆発性ガスを不活性ガスで完全に置換し、かつ、再点火防止の措置を取ってから、5分以上経過後に点検を行う。

- ・その他の点火法の場合は、再点火防止の措置を取ってから、15分以上経過後に点検を行う。

2) 不発、残留の処置

点検で不発、残留を発見したときは、次のいずれかによって処置する。

① 不発火薬類が孔中に残ったとき

- ・不発孔から0.6m（石炭鉱山では0.4m）以上の距離を取って平行孔をせん孔し、この孔に新たに装填して殉爆させる。火薬類は、鈍感な爆薬でも、せん孔中のビットが触れると爆発する可能性が大きい。この種の災害は多く発生しているため、特に慎重に行う。

- ・不発孔からゴムホースの水流または圧縮空気で込物、火薬類を流し出して回収する。ただし、ANFO爆薬は圧縮空気では回収してはいけない。

- ・不発孔からゴムホースの水流、または圧縮空気で込物を流し出した後、新たに親ダイを装填し、再点火して殉爆させる。

② 不発火薬類が行方不明のとき

不発火薬類が隣接孔の爆破で飛び出した可能性があったり、前記の平行孔再発破で殉爆の確認ができず、不発火薬類が岩石または石炭中に混入した恐れのあるときは、鉱車に標識をつけ、作業関係者、係員および管理者に報告する。

③ 発破施行者が不発、残留の処置ができないとき

発破施行者は、当該発破箇所で交替者に引き継ぐか、または不発孔に標識などを付けて明示し、かつ、柵囲などの危険防止措置を行って交替者に引き継ぐ。

3) 異状発破

装填火薬類に不発、残留、空発、燃焼が生じ、期待した破碎効果が得られなかった発破をいう。

① 不 発

装填した爆薬が爆発しない場合をいう。不発のときは、不発孔として発破後に残っていることが多いので、発破後点検では比較的発見しやすい。

② 残 留

装填した爆薬の一部が爆発し、一部が残る場合をいう。不発と異なり爆発しているので、残留薬包につるはしを打ち込んだり、せん孔ビットを当てて災害を起こす例が多い。発破後点検では発見しにくく、発破後点検では各孔尻を入念に調べる必要がある。

③ 空 発

装填した爆薬が孔から吹き出し爆発することをいい、次のようなときに空発が起こる。

- ・装薬量に対し最小抵抗線が大きく、弱装薬となって込物が吹き出る。
- ・過装薬で負荷は僅少な爆力で起爆され、残った大部分の爆力が無負荷で爆発する。
- ・込物が詰められていない場合や不十分な場合。

④ 燃 焼

爆薬が爆発せずに燃えることをいう。最近では、爆薬もよくなり装填方法も確実にようになってきているので燃焼はまれである。燃焼は発煙するので、すぐ発見できる。ただし、燃焼途中で爆発することがあり、また可燃性ガスに着火する危険があるから注意を要する。燃焼が起こったときは、その状況を詳細に調査し、メーカーに連絡して打合せ、対策を講ずる。

(8) 導火線発破

導火線発破で特に注意すべき事項を、次に示す。

1) 発破準備

導火線の発破準備では、本節3発破作業 (2) 発破準備のほか、次の事項を行う。

- ① 使用する導火線から試料を取り燃焼試験を行い、あらかじめ燃焼速度を把握する。導火線の燃焼速度は、長さが長くなるほど速くなり、また、保存・取扱い上の不注意で変化することがある(表1.36参照)。導火線の燃焼速度は、普通120 s/m前後でその公差は7%以下である。
- ② 1本の導火線の長さは、燃焼速度、1人の点火数、退避に要する時間などから決定し、退避に十分な時間がとれる長さとする。
- ③ 導火線の雷管への取り付けには導火線の切口を直角に切断し、導火線の心薬が雷管の中心に来るように装入し、所定の雷管口締器を使用して口元をよく締める。このとき、雷管の内管を締めると、爆発することがあるので注意する。
- ④ 水の多い切羽のときは、装填に先だって導火線に油脂を塗るなど適当な防水措置を講ずる。

表 1.36 導火線試料長と燃焼秒時

試 料 長 (m)	0.1	0.25	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
燃 焼 秒 時(s)	13.4	30.9	59.5	117.1	175.0	233.2	290.9
1 m換算秒時(s)	134	123.6	119.0	117.1	116.6	116.6	116.3

2) 点火準備

- ① 導火線が孔から長く垂れ下がっているときは、引き抜かれたり、切断された恐れがあるから、ゆるく曲げて孔中に入れておく。
- ② 導火線の末端を、第1段から切断して段差をつける。切込みは点火しやすいように45°位の角度にする。
- ③ 段狂いの確率を10%以下にするための段差は、次の間隔とすることが必要である。
 - ・導火線の全長が70cm以下のとき：5cm間隔
 - ・導火線の全長が140cm以下のとき：10cm間隔
 - ・導火線の全長が225cm以下のとき：15cm間隔ただし、実際は点火時間が段差の役割を果たすから、上記の各段差より小さくてよい。
- ④ 点火数が6以上の発破を行うときは、確実に退避時間を確保するため発破時計（点火開始より一定時間：最短導火線秒時の $1/2 \sim 1/3$ の時間がたつとベルが鳴り退避時間を知らせる時計）あるいは伴導火線（第1段の点火に先だって、最短導火線長の $1/2 \sim 1/3$ の長さで伴導火線に点火し、これが燃えつきたら点火途中でも退避する。）を用意すること。

3) 点 火

- ① 導火線の点火は線香、カンテラ、TMライタなどで行い、1人の点火数は普通10孔以内とし、導火線長1.5m未満のときは5孔以下とすること。
- ② 多数孔を2人以上で点火するときは、あらかじめ分担範囲を定め、合図により一斉点火する。
- ③ 滴水水、吸湿などで点火が困難な場合は、約3cm切りこんで点火すること。

4) 退 避

発破時計あるいは伴導火線によって退避するが、その際、特に次の事項に注意しなければならない（第2節 発破 3 発破作業（7）発破後の処置と異状発破 参照）。

- ① 爆発音を数え異状、不発の有無を確認する。
- ② 発破箇所には発破後、15分以上経過しなければ近寄ってはならない。

(9) ANFO爆薬による発破

ANFO爆薬による発破は、装填のとき静電気を発生する。また、発破の後ガスは、往々にして NO_x ガスを発生する。静電気は微粒子の摩擦、衝突で発生するので、発生した静電気は、蓄積せず、小さな電圧のうちに放電させることが大切である。 NO_x ガスは、空発、残留など異状発破のときに発生しやすい。ANFO爆薬を使用する発破箇所では、必要な通気量の確保が大切である。

1) ANFO爆薬の吸湿

ANFO爆薬は硝安94%、油剤6%のときに最大爆速となり、油剤が6%以下になると爆速は急速に低下する。油分が分離した場合（色に濃淡がつく）は、よく混合する。

ブリル硝安は吸湿しやすく、吸湿すると、爆速が急速に低下し、水分9%以下では不発になることがある（図1.66参照）。従って、貯蔵中に吸湿しないよう留意し、また、水の多い切羽で使用する

ときは十分な防水対策を講じる。

2) ANFO爆薬装填による爆速の変化

ANFO爆薬は、その粒子が小さいほど爆速が高くなる（表1.37参照）。装填機によるANFO爆薬の圧気装填では、プリル硝安粒子は圧縮空気によって粉碎され、爆速が高くなる効果をもたらす。しかし、静電気の発生を考慮すると、急速な装填は避けるべきである。

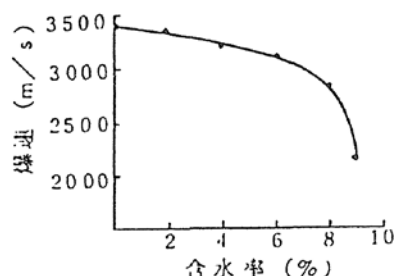


図 1.66 含水率と爆速の関係

3) ANFO爆薬使用上の注意事項（特に静電気）

① 一般的注意事項

- ・ 服装は木綿のように吸湿性の高い作業服、下衣、靴下を着用し、安全靴は、半導電性のある静電気用のものを着用する。
- ・ 静電気測定器で静電気の帯電を測定し、もし静電気があれば、帯電箇所を補助線で接地して、静電気を逃がす。

その後、再度測定して静電気のないことを確認する。

- ・ 爆薬取扱中は喫煙してはならない。また、裸火も使用しない。

② 発破準備での注意事項

- ・ 薬包に電気雷管を装着（親ダイ作り）する前に、両手を岩盤に付けて身体の静電気を逃がす。
- ・ 親ダイ作りは、ANFO装薬切羽や静電気を帯電しやすいゴムホース、ビニルパイプ、風管あるいは電線、鉄管、レールなど電気の流れ易いものから、適当な距離を取った安全な所で行う。
- ・ 親ダイ作り作業中も、体に静電気を発生することがあるので、ときどき両手を接地する。
- ・ ダイナマイト、電気雷管は、静電気を帯電しやすいゴムホースやビニルパイプから離れた場所に存置する。

③ 圧気式装填機による装填作業の注意事項（表1.38参照）

④ 流し込み装填作業の注意事項

- ・ 爆薬を包装用のビニル袋から直接孔中に流し込んだり、プラスチックなどの絶縁性の高い容器ですくって流し込んだりせず、一度ふまえに置いた金属容器に移してから流し込む。
- ・ 流し込みはゆっくり行う。また、尻管、中管は絶対にさけること。防水上ポリエチレンなどの袋でカートリッジにして装填するときは、特に時間をかけて静かに装填する。

⑤ 親ダイ装入の注意事項

- ・ 装填機、空気ホースなど静電気が帯電しやすいものは切羽から片付けて隔離すること。

表 1.37 ANFO爆薬の粒度と爆速

粒度 (μm)	平均粒径 (mm)	爆速 (m/s)
2000 ~ 2380	2.0	2,600
1190 ~ 2000	1.4	2,780
840 ~ 1190	1.0	3,000
500 ~ 840	0.7	3,480

表1.38 圧気式装填機による装填作業の注意事項

対 象	注意事項
装填機	a) 使用前後によく点検し、また、清掃する。 b) 装填作業中に発生する静電気をにがすため確実に接地する。 c) 接地はレール、鉄管、常設の電気接地系統に直接繋いだり、その近くにとらない（迷走電流流入の防止）。
装填用ホース	a) 静電気を消散でき、迷走電流の流入を防止できるもの（電気抵抗 $107\Omega/\text{m}$ 以下、 $104\Omega/\text{m}$ 以上）を使用する。 b) 表面を静電気防止加工したものは、古くなると電気抵抗値が高くなりやすいため使用しない。 c) 鉄線コイル入りは、断線・錆・折れ等により接続が不良になりやすい。 d) たとえ同材質のホースでも、継ぎ足したものは使用しない。 e) 濡したり、汚したり、泥をつけたりしないようにする。 f) ホースの長さは、装填する孔の孔深より60cm以上長くして使用する。 g) ホースのコントロールバルブは、急激な開閉操作を避ける。 h) 装填中のホース先端は、常に孔底や装填面から約20cm位の位置に保ち、ANFOの吹き戻りを防止する。
その他	a) 吹き戻りANFOの帯電微粒子が空中に浮遊して、人体、脚線、補助線などの帯電を起こさないよう処置する。 b) ANFO爆薬を装填するときは、静電気が逃げにくいので、装填は十分時間をかけてゆっくり行う。 c) ANFO爆薬装填用のポリエチレンチューブは、導電性あるいは帯電防止形のものを使用することが望ましい。

・ANFO爆薬装填後5分位は時間を置き、その間電気雷管、プライマーは装填箇所近づけたり、取り扱ったりしない。

・装填作業後、体についたANFO爆薬の吹き戻りは、エアブローで吹き払わない。必ず両手を接地して、体の静電気を逃がす。

・尻管、中管方式による親ダイの装入は、危険が大きいため避ける。

・親ダイの装入は木製込棒で行い、装填用ホース、塩化ビニル、ポリエチレンなど電気絶縁性の高いものは使用しない。

⑥ 結線作業の注意事項

・脚線や補助線を取り扱うときは線をしごかない。特に防水手袋を着用したときは注意する。

・脚線、補助線端末の裸線部、各結線部は、絶縁テープを巻いて絶縁する。

・結線が終れば、なるべく早く点火する。

⑦ 不発・残留の処置（本節3（7）発破後の処理と異状発破 2）不発、残留の処置を参照）

(10) ANFO爆薬の導火線発破

導火線を使ってANFO爆薬を発破するときは、ANFO内の油が導火線に浸入して立消えを生ずることがあるから、油の影響を受けないビニル導火線を使用しなければならない。

外部被服の違いによる軽油中の浸漬時間と燃焼性の関係を、表1.39に示す。

表 1.39 導火線外部被服の違いによる軽油中の浸漬時間と燃焼性の関係

種 類	外部被覆	軽油内の浸漬時間（時間）								備 考
		1	3	10	30	60	120	240	300	
第2種導火線	ビ ニ ル	—	—	—	—	○	○	○	○	○：完全燃焼
”	綿 巻	○	×	×	×	×	—	—	—	×
第3種導火線	綿 巻	×	×	×	×	×	—	—	—	×

4 発破災害

発破災害には、次のような特性がある。

① 発生頻度は高くないが、一度発生すると重傷または死亡の重大災害となる。

② 災害の原因のほとんどはオペレーション・ミスである。

従って、一瞬の油断や不注意による手順の省略が重大災害に繋がる。発破災害の防止には、常に決められた手順で火薬類を取り扱い、発破作業を行うことが大切である。

(1) 発破災害の分類

1) 不発および残留による災害（最も発生率が高い）

① 不発，残留の点検が不十分のため，残留爆薬にせん孔ビットをくりあてる。

② 不発，残留は，点検で分っていたが，せん孔不良でくりあてる。

③ 不発，残留の点検はしたが発見できず，くりあてる。

2) 退避遅延による災害（導火線発破で多く発生）

① 発破時計，伴導火線を使用しないで退避遅れ

② 点火具不良のため，点火時間に手間どって退避遅延

③ 導火線が不良のため退避遅延

④ 連絡不十分，退避通路不良により退避遅れ

3) 装填中の災害

① 込棒不良のため爆発

② 雷管の異状圧迫のため爆発

③ 導通試験中に爆発

④ 迷走電流による爆発

4) 早期接近による災害

- ① 完爆したと誤認して接近したため
- ② 錯覚による接近のため
- ③ 待機時間を短縮して接近したため

5) 退避場所不適當による災害

- ① 退避場所の位置，構造が不良であったため
- ② 退避場所は適当であったが退避状態が不良であったため

6) 警戒不完全による災害

- ① 警戒区域の設定を誤ったため
- ② 警戒方法を誤ったため
- ③ 警戒解除の方法を誤ったため
- ④ 貫通発破で反対側（貫通側）の警戒不良のため
- ⑤ 点火直前の警戒確認を怠ったため

7) 火薬類携帯運搬中の災害

- ① 携帯中に引火した（通電または火が入った）ため
- ② 火薬類以外のものを一緒に収納したため

8) 凍結ダイナマイト融解中の災害

- ① 融解方法不良のため
- ② 融解設備不良のため

9) 電気雷管結線中の災害

迷走電流，静電気などによる暴発など

10) その他の原因による災害

ズリとり中に，残留爆薬に打ちあてたため

(2) 発破災害の防止

1) 退避遅れによる災害防止

この災害は，導火線発破のときに起こるもので，無理な点火が原因である。

点火回数を少なくし，多数のものに点火する場合には，集束導火線やTSコードを使用する。また発破時計，伴導火線などにより点火の際の時間経過を確認する。

2) 不発残留爆薬による災害防止

点火後，不発または不発の恐れのある時には電気点火法の場合は発破母線を点火器から取り離し，その端を短絡する。

再点火できないようにしてから，ガス導管点火法の場合はガス導管内の爆発性ガスを不活性ガスで完全に置換し，かつ，再点火できないようにしてから5分以上，その他の場合は点火後15分以上経過した後でなければ，火薬類装填箇所に近寄らない。

① 不 発

不発処理は困難であり、処置を誤ると災害が起こるので、慎重に行う。

② 残 留

不発とは異なり、爆音を発しており気付かない場合がある。そのため、次のさく孔では、絶対に孔尻を利用しない。万一の場合に備え、最近では含水爆薬を使用し、安全性を高めることが多く採用されている（本節3発破作業（7）発破後の処置と異状発破 2）不発、残留の処置を参照）。

1) 取扱い上の不注意による災害

この災害の大部分は、火薬類についての知識が浅いか、あるいは軽視し過ぎたために起こる。保安教育の徹底を期する外に方法はない。

2) 早期接近のための災害防止

完爆と誤認したり、錯覚によって発破箇所早く近づき災害を起こした例があるので、十分注意しなくてはならない。

3) 警戒不良のための災害防止

発破の警戒は、特に重要である。採掘場内はもちろんのこと、隣接鉱山や付近の田畑、道路に対しても厳重な警戒が必要である。

4) 退避不良のための災害防止

発破現場の状況並びに方法によって、退避の位置を選定すべきであるが、その選定を誤った場合に起きている。従って、飛石の危険のない安全な位置で、かつ発破振動による上部からの落石にも安全な位置を選定すべきである。

5) 雷による災害の防止

雷による災害は、雷管や火薬類または結線回路への直撃による暴発よりも、雷によって脚線や発破結線回路に発生する誘導電流による暴発が多い。このため、最近では既に触れたハーキュデットシステムやノネルシステムが採用されるようになった。その他の方法では、導火線または導爆線により発破を行うべきである。やむを得ず電気雷管による発破を行う場合には、襲雷を予知し、いつでも退避できる体制を取り、退避時には電気雷管の脚線や発破結線回路の両端は開いておくことが重要である。