

節理等を有する岩盤のスムーズブラスティング の機構について

ON THE MECHANISM OF SMOOTH BLASTING OF ROCKS CONTAINING DISCONTINUITIES

中 川 浩 二*・西 田 佑**・橋 本 堅 一***

By Koji NAKAGAWA, Tasuku NISHIDA and Ken-ichi HASHIMOTO

1. はじめに

地下発電所や岩盤内石油備蓄設備の建設に伴う岩盤掘削の必要性やトンネル掘削における NATM の一般化により爆破による岩盤掘削が問題になることが多くなり、それとともにスムーズブラスティング (以下 SB と略) の重要性が見直されている。

SB の考え方がわが国へ導入されてからかなりの年月を経ており、岩盤掘削現場においては現場技術者の手により種々の工夫がなされてきている。しかしその統一的な検討はあまりみられないようである。その理由の一つとして実際の岩盤の力学特性が実に多種多様であることが挙げられよう。

この岩盤の力学特性を支配する大きな要因として岩盤中の不連続部がある。爆破による岩盤掘削という立場からみたとき、わが国において均質とみなし得る岩盤はまず存在せず、多くの場合節理などの不連続部を含んでいる。したがって実際の岩盤掘削において節理等の不連続部を離れて SB を考えることは困難である。しかるに不連続部の存在を考慮した岩盤の SB に関する研究はほとんどみられず、この問題に対する基礎的な研究の蓄積が強く望まれる。

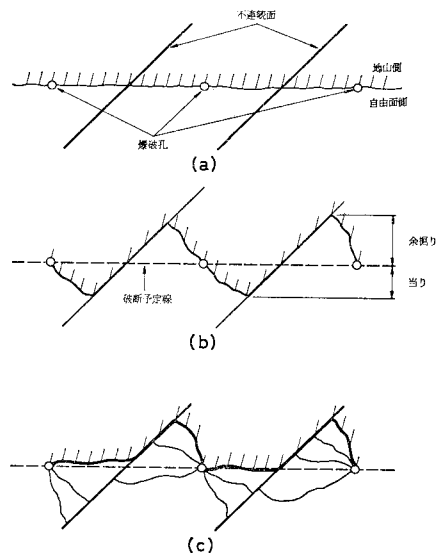
このことを考慮すると不連続部を含む岩盤において効果的な SB を行うための基礎的研究の第一歩として、典型的な不連続部を含む岩盤モデルにおける爆破破断面の形成機構を明らかにすることは非常に有意義であると考えられる。

著者らはこれまでコンクリート供試体を用いて SB の模型実験を行ってきた^{1),2)}。本研究ではさらにコンクリートモデル供試体を工夫して不連続面を含む岩盤の模型

を作製し、これを用いて模型実験を行い、不連続部を有する供試体における爆破破断面の形成機構に関する検討を行った。

2. 不連続部を含む岩盤の SB について

岩盤の爆破において SB を成功させるということは目的とする破断予定面に沿ったクラックを発生させ、またこの破断予定面より地山側にはできるだけ破壊を発達させないことを意味する。しかるに節理等は爆破以前から不連続部として存在している。したがって不連続部を含む岩盤の SB を行うときにはこの不連続部を利用し、あるいはそれ以上に発達させないように配慮しつつ目的とする方向のクラックを発達させ、所定の破断面を形成することになる。



(a) 不連続性の程度が低く SB が成功したとき
(b), (c) 不連続性の程度が高いとき

図一 不連続部を有する岩盤の爆破破断面の形成

* 正会員 工博 山口大学教授 工学部建設工学科

** 日本化薬(株)技術担当部長(火薬事業部営業部)

*** 正会員 徳山工業高専助手 土木建築学科

いま 図-1 のように不連続面が存在する岩盤を考え、図のように爆破孔の配置が行われたとする。理想的な SB が行われたとすると破断面は不連続面にかかわりなく爆破孔を直接連結して形成され、またそれ以外には著しいクラックは発達しない状態となる (図-1 (a))。しかし一般に不連続面のもつ不連続性の程度が高い場合にはそれぞれの爆破孔からのクラックは不連続面に向かって発達する。この場合、不連続面から爆破孔までの距離に対する薬量の多少や不連続面のもつ不連続性の程度によりクラックは単一のもの (図-1 (b))、あるいは多数の放射状のもの (図-1 (c)) となる。その結果破断面はこれらのクラックと不連続面とを連結した状態で形成される。

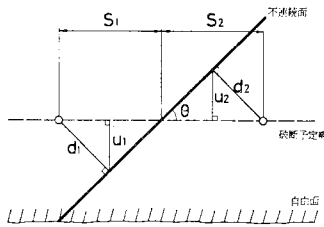


図-2 不連続面と爆破孔との位置関係

ここで SB の効果を評価するための一つの方法として爆破によって形成される破断面の平滑さを考え Unevenness (非平滑さ：破断予定面から実際の破断面までの最大距離) をとる。図-2 のように典型的な不連続面を有する岩盤の一部を考え、その両側に爆破孔が配置されたとする。いま 図-1 (a) の形式 (以下 ㊸ の形式とよぶ) で破断面が形成された場合には Unevenness はほぼ 0 であり、理想的な SB が行われたことになる。ここで破断面の形式が 図-1 (b) (以下 ㊹ の形式とよぶ) の場合を考えるため 図-2 において各爆破孔から不連続面へ垂線を下ろし、その長さをそれぞれ d_1, d_2 とする。各爆破孔から不連続面までの破断予定面に沿った長さを S_1, S_2 とし、破断予定面と不連続面とのなす角を θ とすると

$$d_1 = S_1 \sin \theta, \quad d_2 = S_2 \sin \theta \dots\dots\dots (1)$$

が与えられる。破断面が ㊹ の形式となる場合にはこの垂線が破断面の一部を形成することになり、Unevenness u は当り (u_1)、余掘り (u_2) のそれぞれに対して

$$\left. \begin{array}{l} \text{当りのとき} \\ -u = u_1 = d_1 \cos \theta = S_1 \sin \theta \cdot \cos \theta \\ \text{余掘りのとき} \\ u = u_2 = d_2 \cos \theta = S_2 \sin \theta \cdot \cos \theta \end{array} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

となる。ただしここで Unevenness は符号を含めて考え、余掘りに対しては正、当りに対しては負の値として扱う。したがって Unevenness u が負のときは当りの状態であり当り u_1 は正となる。さらに 図-1 (c) の形式

(以下 ㊺ の形式とよぶ) で破断面が形成される場合には破断面は 図-1 (c) の太実線で形成されるため、破断面の当りは式 (2) で与えられる u_1 より小さく、余掘りは u_2 より大きくなる。

これより Unevenness は式 (2) を基準として考えることにより破断面の形式が

- ㊸ の場合：余掘り、当りともほぼ 0 となる。
- ㊹ の場合：余掘り、当りともほぼ式 (2) で与えられる。
- ㊺ の場合：余掘りは式 (2) で与えられる値より大きく、当りは式 (2) の値より小さくなり、時には存在しない (余掘り状態となる)。

となることが予想される。ここで ㊸ の形式は不連続面のもつ不連続性の程度が高くなく、隣接爆破孔の爆破衝撃波等の影響が主として爆破クラックの発達パターンを決める場合に生じる。しかし明瞭な不連続面を含む岩盤においては破断面は ㊹ あるいは ㊺ の形式となることが多い。破断面の形式が ㊹ となるか ㊺ となるかについてはクラックが爆破孔から不連続面に向かって発達するとき顕著なクラックが単一となるか複数となって放射状になるかによる。そして爆破孔から不連続面に向かって発達するクラックが単一となるか放射状となるかは薬量、爆破孔から不連続面までの距離、不連続面のもつ不連続性の程度などによることを考慮すると、薬量と不連続面の条件とが与えられればこの限界となる爆破孔から不連続面までの距離 (以下限界不連続面距離とよぶ) W_0 は決定されることになる。

いまここで簡単のため 図-2 において $S_1 = S_2 = S/2$ (S は孔間隔) とすると爆破孔から不連続面までの距離 d および Unevenness u は

$$d = \frac{S}{2} \sin \theta \dots\dots\dots (3)$$

$$u = \pm \frac{S}{2} \sin \theta \cdot \cos \theta \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。逆に $d = W_0$ (W_0 ：限界不連続面距離) とおいて爆破孔からのクラックが単一となるか放射状となるかの限界となる孔間隔 S_0 は

$$S_0 = 2 W_0 / \sin \theta \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。以上より 図-2 の爆破孔が爆破されたときの破断面の形成機構と Unevenness は次のように予測されることになる。すなわち不連続面の不連続性の程度が高くなく、隣接孔の爆破がクラック発達に影響を及ぼす程度が高いときには爆破破断面は ㊸ の形式となり Unevenness は 0 に近くなる。しかし不連続面の不連続性の程度が高い場合には不連続面の傾き θ と限界不連続面距離 W_0 に対して孔間隔 S が S_0 より大きいときには破断面の形式は ㊹ となり、 S が S_0 より小さいときには ㊺ の形式となる。ここで ㊹、㊺ の形式のみを考

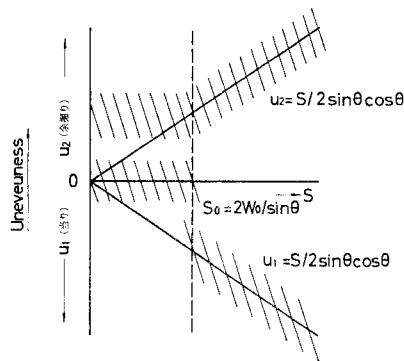


図-3 不連続面の傾き θ 、孔間隔 S に対して予測される Unevenness (斜線部)

慮して孔間隔 S に対する Unevenness を予測すると図-3の斜線部のようになる。

以上のように不連続部を含む岩盤のSB結果としてのUnevennessは予測されるが、実際の爆破においては不連続面の不連続性の程度の評価が困難であり、また自由面からの反射引張波の影響の評価にも問題がある。そこで本研究では上述の考え方の妥当性を評価し、不連続面を含む岩盤のSBに関する資料とするため、まず不連続面近くの単一の爆破孔からのクラックの発達について実験的に検討し、さらに不連続面を含むコンクリート製のモデル岩盤の爆破を行い、その破断面の形成を検討した。

3. 不連続面近くの爆破孔からのクラックの発達について

不連続面近くで爆破が行われると爆破孔から発達するクラックは爆破孔から不連続面までの距離や薬量、そして不連続面のもつ不連続性の程度によってその発達状況が変化する。爆破孔からのクラックは放射状に多数発生するが、発達の過程でそのうち数本が卓越し、肉眼で可視状態になる。そして爆破孔が不連続面に近く、かつ不連続面のもつ不連続性の程度が高い場合には爆破孔からのクラックは不連続面に向かって放射状となり、遠くなると不連続面に向かう一本の直線状となる傾向にある。

この状況を明らかにするため単一の爆破孔から不連続面へ発達するクラックが不連続面の性質および爆破孔から不連続面までの距離により変化する状況を実験的に検討する。

(1) 実験

a) 供試体

供試体は $41.5 \times 41.5 \times 10.5$ cm のコンクリート製である。コンクリートにはレディミクストコンクリートを用い、最大骨材寸法 20 mm、スランプ 8 cm、4 週設計

強度 350 kgf/cm^2 (34.3 MPa) のものとしている。不連続面の種類として不連続性の程度の異なる条件を考え、(1) コンクリートの打ち継ぎ面、と(2) 打ち継ぎ面の間に厚さ 0.3 mm のビニールシートを挟んだものを考える。以後これらの不連続面の条件を整理の都合上、それぞれ不連続面の条件Aおよび不連続面の条件Cとよぶことにする。不連続面の条件Cの供試体においてシートを挟む不連続面の長さは中央部 20 cm である。供試体の概形を図-4に示す。

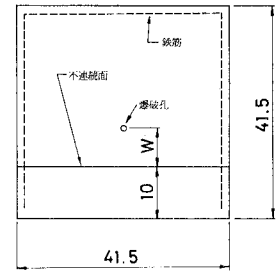


図-4 不連続面近くでのクラック発達検討のための供試体概形 (単位: cm)

強度 350 kgf/cm^2 (34.3 MPa) のものとしている。不連続面の種類として不連続性の程度の異なる条件を考え、(1) コンクリートの打ち継ぎ面、と(2) 打ち継ぎ面の間に厚さ 0.3 mm のビニールシートを挟んだものを考える。以後これらの不連続面の条件を整理の都合上、それぞれ不連続面の条件Aおよび不連続面の条件Cとよぶことにする。不連続面の条件Cの供試体においてシートを挟む不連続面の長さは中央部 20 cm である。供試体の概形を図-4に示す。

供試体の作製に際してはまず厚さ 10 cm のブロックを作り、その翌日爆破孔を含む部分を打ち継ぐ。打ち継ぎ時に不連続面の条件Cの供試体ではシートをあらかじめ所定の位置に固定する。また打設時に所定の位置に直径約 12.5 mm の丸棒 (公称 13 mm 丸鋼) を埋め込み、コンクリートが半ば硬化した時点で抜きとり、爆破孔を作製する。爆破孔から不連続面までの距離 (図-4中の W) は $2, 3, 4, \dots, 12 \text{ cm}$ の 11 種である。また同一条件の供試体個数は各 3 個であり、この実験の供試体数は 66 個である。供試体は打設後 1 日で脱型し、試験材令 (約 4 週間) まで湿潤状態を保つように努めている。

また爆破による供試体の破断、飛散を防ぐ目的で図中破線のように 6 mm 丸鋼を高さ方向に 2 段に配している。

b) 爆 破

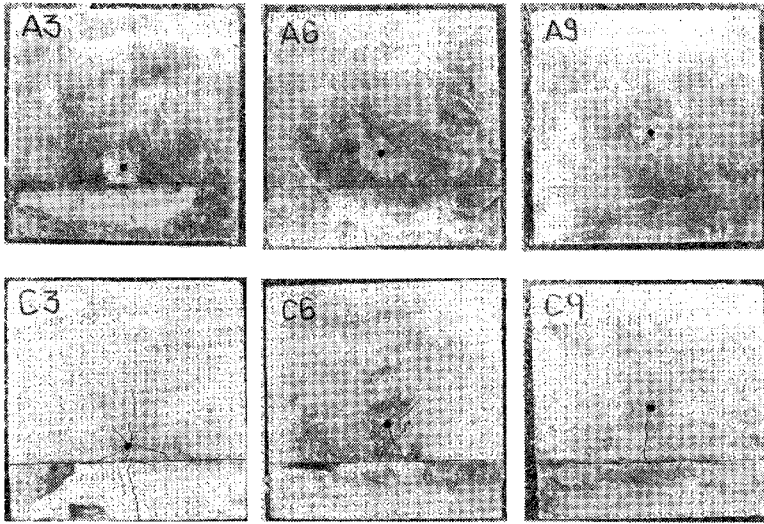
用いた爆薬は導爆線である。導爆線は PETN を心薬とし、薬量は 10.7 g/m である。導爆線は供試体を貫通しており、爆破孔 1 孔当たりの薬量は 1.12 g となる。装薬に際して導爆線が孔中央近くに保たれるように 2 か所にテープを巻きつけた。起爆は供試体の外部で行い、 6 号電気雷管を用いた。

c) 爆破により発生したクラックの検出

爆破後供試体表面に発生、発達したクラックを検出した。爆破により供試体中に発生、発達するクラックには種々のレベル (幅) のものがあるが、本研究では肉眼で検出できるもののみを取り上げることとした。検出されたクラックを黒色インクでトレースし、写真撮影ならびに計測に供した。

(2) 実験結果と考察

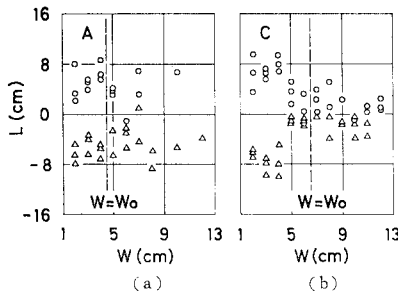
爆破により発達したクラックを有する供試体の例を写真-1に示す。写真中の文字は不連続面の条件 (A, C)、



写真一 不連続面近くの爆破孔から不連続面へのクラックの発達 (写真中の文字はたとえば、A6：不連続面の条件 A，爆破孔から不連続面までの距離 6 cm を表わす)

爆破孔から不連続面までの距離 (2, 3, 4, ..., 12 cm) を表わす。ここでは紙面の都合上クラックの発達が代表的と思われる距離 3, 6, 9 cm のもののみを示している。爆破した供試体において不連続面へ到達したクラック群のうち最外縁のものが不連続面と交わる位置を求め、爆破孔から不連続面へ下ろした垂線の足からこの位置までの距離 L を符号を含めて求める。この場合垂線の左側へ出たものを負、右側へ出たものを正とする。これにより爆破孔からのクラックが不連続面に向かって放射状に発生した場合は 1 つの供試体について 2 つの実験値が得られるが、クラックが 1 本のみの場合には 1 つのみ得られる。これをそれぞれの不連続面の条件について示したものが図-5 である (Δ ：垂線の左側へ出たもの、 \circ ：垂線の右側へ出たもの)。

図-5 (a) (不連続面の条件 A) では爆破孔から不連続面までの距離 W が増加するに伴いデータの数は減少



(A, C：不連続面の条件, Δ , \circ ：不連続面上におけるそれぞれ左 (Δ) 右 (\circ) 端のクラック位置)

図-5 爆破孔から不連続面までの距離 W に対するクラック端の垂線の足からの距離 L (破線：限界不連続面距離)

するが、 L の絶対値に特に大きな変化はない。これと比べて 図-5 (b) (不連続面の条件 C) では W の小さい間は L の値の絶対値は大きい、 W がある値より大きくなると急にその値は小さくなる。この状況は A と C の不連続面の条件の相違から推測される。すなわち A の条件では不連続面に引張強度の不連続性はあるが、波動は不連続面を通過する。そのためクラックは爆破孔から放射状に発達し、不連続面に到達するとこれと連結して大きく発達し、可視状態となりやすいと思われる。したがって不連続面の条件 A では不連続面の存在が卓越して発達するクラックに方向性を与えることは少

なく、クラックが単一となってもそれが必ずしも不連続面に垂直に近づくことにはならない。これと比べて不連続面の条件 C では不連続面における波動の反射が顕著となり、反射波による応力場が不連続面に垂直なクラックの発達を促す。そのため W が増加して爆破孔からの放射状クラックが不連続面へ到達し得なくなった段階では不連続面に垂直に近いクラックが卓越するのである。

また同一条件の供試体数は 3 個であるため W が小さい間得られるデータ数は 6 (クラックは放射状) となる。そして W が増加するとその数は 3 (クラックは単一) となり、やがて 0 となることが予想される。しかし実際には必ずしも同一条件の供試体において同一の W で放射状クラックが単一クラックへと変化しないため、データ数は 6 から 3 へと順次減少する。このデータ数が最初に 5 以下となる (3 個の供試体のうち少なくとも 1 個でクラックが放射状でなくなる) W をそれぞれの不連続面の条件について求める。図によるとこの値は条件 A の場合 5 cm, 条件 C の場合 7 cm となり、若干ではあるが不連続性の高い方が大きくなることが示されている。これよりそれぞれの条件について限界となる爆破孔から不連続面までの距離 (限界不連続面距離) W_0 が 4 cm および 6 cm より小さくないことが示されたが以後 W_0 をそれぞれ 4.5 cm, 6.5 cm として扱うことにする。

4. 不連続面を有する岩盤の SB に関する模型実験

前節では不連続面近くの爆破孔から不連続面へ向けて

発達するクラックについて実験的に検討した。そして本節では不連続面を有する岩盤の SB に関するコンクリートモデルの爆破実験を行う。前節の実験結果を 2. に示した爆破破断面の形成に関する考え方に用いることにより予測される Unevenness と本節の実験により得られる Unevenness とを比較することにより不連続面を含む岩盤の SB に関する検討を行う。

不連続面を含む岩盤の SB を考える場合に考慮すべき要因の数は多くあるが、本節の実験においては比較的重要であると思われる 1) 不連続面の種類, 2) 不連続面と破断予定面との傾き, 3) 爆破孔間距離を取り上げる。そしてこれらを変化させたとき爆破による孔間の破断面形成がどのように不連続面の影響を受けるかを問題とする。

(1) 実験

a) 供試体

供試体は $57 \times 27 \times 10.5$ cm のコンクリート製でありその概形は 図-6 に示すとおりである。用いたコンクリートは前項と同じものである。

供試体の作製に際してまず中央部の台形部分を打設、作製する。そしてその翌日台形部分を型枠中に固定した状態で周囲のコンクリートを打設する。周囲のコンクリート打設後 1 日で脱型、試験日 (材令約 4 週間) まで湿潤状態を保つように努める。

打設時に所定の位置に直径約 12.5 mm の丸棒を埋め込み、コンクリートが半ば硬化した時点でこれを抜き取り爆破孔を作成する。爆破孔間隔は 10, 15, 20, 25, 30 cm である。

不連続面の種類として先の A, C の不連続面の条件のほかにコンクリート打ち継ぎ面に厚さ 0.013 mm のポリエチレンシートを挟んだものを加えた。このポリエチレンシートを挟んだ供試体は不連続性の程度が A, C の中間にあると考えられ、不連続面の条件 B とよぶ。また不連続面は両爆破孔から等しい距離にあり、爆破孔間を結ぶ破断予定面と $22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$ の傾きをそれぞれ有している。

爆破により供試体が破断、分離するのを防ぐ目的で供試体中 図-6 にみられるような 6 mm 丸鋼を 2 段、2 重

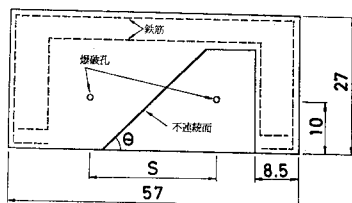


図-6 不連続面を含む岩盤の SB モデル
供試体概形 (単位: cm)

に配している。供試体の個数は不連続面の種類 3, 不連続面の傾き 4, 孔間隔 5, 各条件に対する供試体の個数 3 であり合計 180 個となる。

b) 爆薬および爆破により発生したクラックの検出
爆薬および爆破により発生するクラックの検出については前項の実験と同じである。本実験においては供試体中の 2 つの爆破孔を同時起爆するため雷管から両爆破孔に至る導爆線の長さを等しくとっている。

(2) 実験結果と考察

a) 実験結果

写真-2 に不連続面を有する供試体の爆破例を示す。

写真中の文字は不連続面の条件 (A, B, C), 不連続面の傾き ($22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$), 爆破孔間隔 (10, 15, 20, 25, 30 cm) を表わす。ここでは紙面の都合上孔間隔 20 cm のもののみを示す。写真から爆破孔間のクラックの発達とそれに伴う破断面の形成は不連続面の影響を大きく受けるのが認められる。またその影響は不連続面の条件, 不連続面の傾きによっても変化が顕著である。

ここで爆破により生じた破断面の Unevenness を次のように考える。すなわち左右それぞれの爆破孔から発達した最も地山側のクラックにより破断面は形成されることから、これらが不連続面と交わる点の破断予定面からの距離を Unevenness として符号を含めてとる。したがってこれらの点が破断予定面より自由面側にあるときを負 (当り u_1 は正), 地山側にあるときを正 (余掘り u_2 は正) とする。

これらの値を不連続面の傾き, 不連続面の種類ごとに爆破孔間隔に対して示したものが 図-7 である。ただしここでは左側爆破孔から出たクラックによる Unevenness を ●, 右側爆破孔から出たクラックによる Unevenness を ○ で表わしている。

また 図-7 には不連続面の傾きと孔間隔により式 (4) で与えられる Unevenness を実線で、不連続面の傾きおよび前節の実験から求められた W_0 の値より式 (5) で与えられる S_0 の値を破線で示している。また不連続面の条件 B に対する S_0 は A と C との平均値として考えている。

b) 考察

実験の結果得られる Unevenness と破断面の形成の機構とを先に示した式 (4) と式 (5) の考え方をもとに検討する。

(イ) $\theta = 90^\circ$ の場合 2. に述べた ㊸ の形式によって破断面が形成されるとすると爆破孔から不連続面の垂線は破断予定面と重なり、予測される Unevenness は常に 0 となる。また破断面の形成が ㊹ の形式となる場合も予測される Unevenness は 0 となる。

実際の破断面は不連続面の条件が A の場合には㊸の形式となることが多い。しかし B, C の場合両爆破孔から不連続面へ向けて発達するクラックはそれぞれ独立に

不連続面と交わるため、形成された破断面は折れ線状となり㊹の形式となる。さらに不連続面の条件にかかわらず孔間隔が特に小さいとき ($S=10\text{ cm}$) にはいくつかの供試体で爆破孔から不連続面へ向けてクラックは放射状となり㊺の形式となることが認められる。

実測される Unevenness の絶対値は全体的に小さく予測された Unevenness に対応している。

(ロ) $\theta=22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ$ の場合、予測によるとまず孔間隔 S が S_0 より大きいとき爆破孔から不連続面へ向けて単一のクラックが発生すると考えられる。そして右側爆破孔からのクラックによる Unevenness は不連続面の傾きの方向が反時計回りであることから余掘りとして生じる。余掘りの値は式 (4) で表わされ、図-7 中の実線となる。図-7 によるとこの状態は破線より S の大きい状態に対応し不連続面の条件 B, C の場合実測値と予測値との間にはよい一致がみられ、これらの場合に予測は合理的であるといえる。しかし条件 A の場合にはよい一致があるとはいえない。

条件 A で $\theta=45^\circ$ および 67.5° の場合、爆破クラックは隣接爆破孔からの爆破衝撃波の影響を受け、両孔間を結ぶ方向へ強く制御されることが認められる。 $\theta=67.5^\circ$ では約半数の供試体で孔間をつなぐクラックが一本の直線(曲線)状となり、㊸の形式となる。しかし $\theta=45^\circ$ では破断面は㊸の形式とならず㊹の形の破断面が隣接爆破孔からの爆破衝撃波の影響を受け Unevenness を小さくする形で形成されたと解釈される。いずれにせよ条件 A では余掘りは実線の値より著しく小さくなる。

(ハ) S が S_0 より大きいと

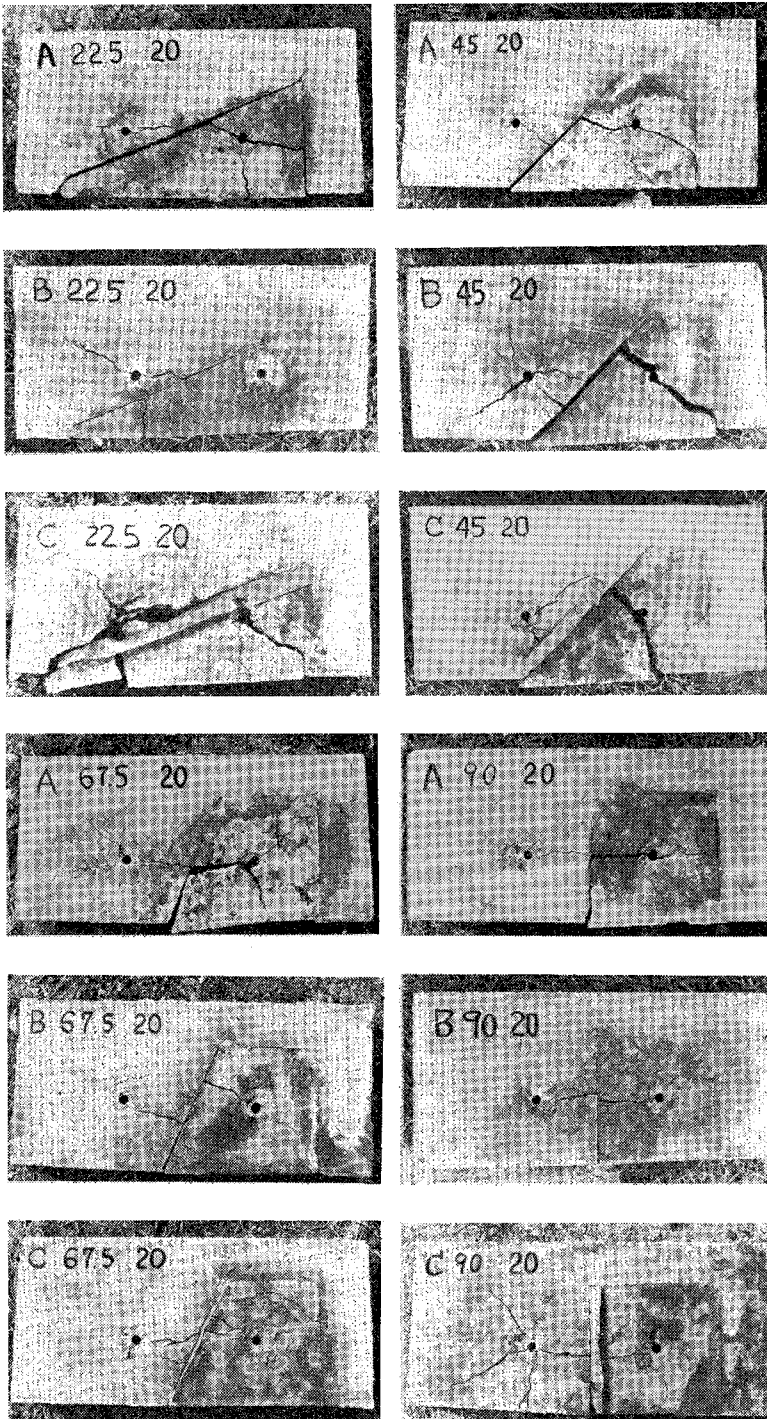
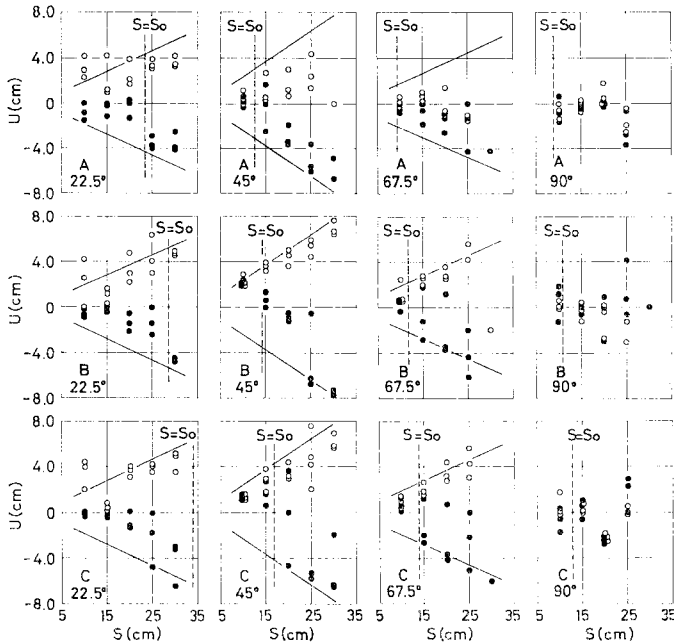


写真-2 爆破孔間に不連続面を有するモデルにおける爆破破断面の形成 (写真中の文字はたとえば B 45 20: 不連続面の条件 B, 不連続面の傾き 45° , 孔間隔 20 cm を表わす)



(●, ○: それぞれ左 (●), 右 (○) 側爆破孔からのクラックによる Unevenness)

図一七 不連続面の傾き (左より 22.5°, 45°, 67.5°, 90°), 不連続面の条件 (上より A, B, C) のそれぞれについて孔間隔 S に対して実測された Unevenness u と予測値 (実線: 式 (4), 破線: 式 (5)) との比較

き左側爆破孔からのクラックによる Unevenness は通常当りとして生じる。この場合にも条件 B, C において実測値と予測値との間にはかなりの一致がみられるが右側爆破孔からのクラックによる余掘りほどではない。これはいくつかの供試体において爆破孔からのクラックが不連続面に垂直な方向のみならず孔間を結ぶ方向にも発達し、これにより破断面が形成されるためである。この孔間を結ぶ方向のクラックのうち左側爆破孔から発生したものは当りを小さくする結果を与えるのに比べて右側爆破孔からのクラックは余掘りには影響を与えない (右側爆破孔からのクラックによる破断面はさらに地山側にある不連続面に垂直なクラックによって形成される)。そのため右側爆破孔からのクラックによる Unevenness に比べて左側爆破孔からのクラックによる Unevenness のばらつきが大きくなると考えられる。

条件 A の場合当りは右側爆破孔からのクラックによる余掘りの場合と同じ理由で予測値より小さくなる。また $\theta=67.5^\circ$ の場合破断面が形成されずに左側爆破孔からのクラックのみ不連続面に到達する場合があります、当りが大きくなるような結果が得られている。

(二) S が式 (5) で与えられる値 S_0 より小さい場合爆破孔から発達するクラックは不連続面に向かって放射状となる可能性が高い。そのため右孔からのクラックによる余掘りは 図一七 中の破線より S が小さい場合実

線で与えられる値よりも大きくなると予測される。しかし実際に余掘りが予測値より大きくなるのは $\theta=22.5^\circ$ のしかも S が S_0 よりかなり小さい場合のみである。これは破線で与えられる値に近い孔間隔では多くの供試体で爆破孔からのクラックが放射状となり、破断面の形成は (○) の形式となるが隣接爆破孔からの爆破衝撃波の影響等により放射状クラックの開きの方向そのものが隣接爆破孔の方向へ回転し、大きな余掘りが生じにくくなるためである。また $\theta=22.5^\circ$ の場合余掘りが大きくなるのは爆破孔から不連続面までの距離が著しく小さくなると、大きな開きの放射状クラックが発生し得ることによる。

(ホ) S が S_0 より小さい場合には左側爆破孔から発達するクラックによる破断面は放射状クラックの最も地山側のクラックにより形成されるため当りとしては小さくなり、しばしば余掘りの状態となる。これは S が S_0 より小さくなるため孔間を結ぶ方向のクラックの発生が確実となるためである。この結果破断面は予測される (○)

の形式で生じる。

(ヘ) 以上のように予測値と実験値とは余掘りに関してはかなりよく一致しており、破断面の形成に関する 2. の考え方が合理的であると思われる。また形式 (○) で破断面が形成されるのは本実験によれば不連続面の条件 A の不連続面の傾きが $67.5^\circ, 90^\circ$ の場合に限られることが示された。

実験の結果不連続面の条件が A の場合と B および C の場合には顕著な差が破断面の形成に認められたが、B と C の間に大きな差は認められていない。B の不連続条件の作製に用いたシートが厚さ 0.013 mm という薄いものであることを考慮するとシートのような材料の不連続面効果が大きいことが示されたといえる。

5. おわりに

本研究では不連続面を含む岩盤の SB における破断面の形成の機構を明らかにし、効果的な SB を行うための基礎的資料とすることを目的としている。そのためまず破断面の形成と Unevenness についての予測を行い、その後実験値との比較、検討を行っている。実験結果は予測に用いられた破断面形成と Unevenness に対する考え方が十分に合理的であることを示しており、不連続面を含む岩盤の SB の機構がかなり明確にされたと考えられ

る。

一般に SB においては爆速の遅い爆薬を用いることにより爆破孔に作用する爆轟圧力を小さくし、地山の破壊が極力小さくなるよう配慮した爆破が行われる。しかし本研究の結果によると爆轟圧力の小さい爆薬を用いて SB を行うと不連続性の高い岩盤では本研究における⑥の形式の破断面を形成する可能性が高い。⑥の形式の破断面においては余掘りのみならず当りが大きく、二次的な爆破等の処置を必要とすることにもなる。この問題を解決するには破断予定方向に切り欠き³⁾やガイドホール^{2),4)}を設ける方法、あるいは地山の若干の破損が許される場合には爆速の大きい爆薬を用いるなどの方法により当りを減少させることが考えられる。この点についての今後の研究が期待される。

本研究の実験は日本化薬厚狭工場において行われたものであり実験に便宜をお計りいただいた厚狭工場の諸氏に謝意を表す。また種々ご討議いただいた日本化薬

坂本 佐氏、山口大学資源工学科 水田義明助教授および実験にご協力いただいた福谷和史君（現・大成建設）をはじめ山口大学工学部土木工学科の学生諸君に心から感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 中川浩二・坂本 佐・山本顕一郎：スムーズブラスティングの機構に関する 実験的検討，土木学会論文報告集，No. 316, pp. 51~60, 1981.
- 2) 中川浩二・坂本 佐・吉開亮介：スムーズブラスティングにおけるガイドホールの利用に関する基礎実験，工業火薬協会誌，Vol. 43, No. 2, pp. 75~82, 1982.
- 3) Sperry, P.E., W.L. Fourny, D.E. Thompson and A.F. Mckown : Controlled Blasting Experiments at Porter Square Pilot Tunnel, Proc. of R.E.T.C., pp. 1130~1157, 1979.
- 4) 勝山邦久・佐々宏一・伊藤一郎：スムーズブラスティングにおけるガイドホールの効果について，日本鉱業会誌，86-984, pp. 195~200, 1970.

(1983.1.22・受付)