

# 小口径バーンカットの破碎機構 についての一考察

河野 興<sup>1</sup>・小早川 忠行<sup>2</sup>・吉永 正雄<sup>3</sup>・小松 正三<sup>4</sup>・中川 浩二<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 ダイノ・ノーベル・ジャパン (株) (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町6番3号)

<sup>2</sup>佐藤工業 (株) (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-20)

<sup>3</sup>佐藤工業 (株) (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-20)

<sup>4</sup>佐藤工業 (株) (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-20)

<sup>5</sup>フェロー会員 工博 山口大学工学部 臨床トンネル工学研究所 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

小口径バーンカットの破碎機構検証のため心抜き段階的な起爆実験を行った。中心の装薬孔の起爆では、その周辺に配置した空孔との連結や中心起爆孔の拡大等による自由面の増加は特に見られなかったが、その後の段階的な連続起爆では、孔奥方向への心抜きの進行が順次行われ進行率は約90%程度得られた。

中心孔を囲む周辺の空孔は自由面となり中心装薬孔の起爆により、装薬孔近傍の岩石に多くの微小亀裂が発生・進展を促す役割を果たし、その後連続的な起爆によりこの損傷部分が破碎・排出され、心抜きが完成していくものと考えられた。

**Key Words** : tunnel blasting, burn cut, breaking structure

## 1. はじめに

トンネル掘進発破においてその核となる各種心抜き方式は、実験・検証<sup>1,2,3,4</sup>より効果的な方法が確立されてきた。

現在、わが国の支保パターンにおける標準設計進行長は、日本道路公団積算基準<sup>5</sup>で1.0~2.0m、日本鉄道建設公団<sup>6</sup>では1.0~2.5mとなっており、これら一進行長の掘進において採用されている心抜き工法はVカット工法が多い。

近年、坑内掘削機器の大型化や地山評価判定基準、支保材料の向上、作業の迅速化、情報化施工などにより一掘進長延伸の検討が行なわれているが、現在採用が多いVカット心抜き工法はその機構から、1) 削孔長はトンネルの形状・寸法に左右される(通常トンネル幅の45~50%とされる)、2) 安定した孔底間隔の保持が困難で、削孔精度により起爆効果が安定せず、所定の進行長の確保が困難である、などの問題があり長孔発破に適した心抜き工法とはいえない。

硬岩地質が多い北欧では一発破掘進長約4.0~5.0mが一般的とされており、一発破掘進長約7m余りの報告<sup>7</sup>もある。これら長孔発破のトンネル掘削で標準的に採用されている心抜き工法は、自由面をあらかじめ持たせた平行心抜き工法の一つであるバーンカット(図-1(a):大

口径バーンカット)が多い。

わが国でも大口径バーンカットを用いたトンネル掘進発破は一応の成果が得られている。しかし、硬岩地山において一様の地質は少なく大口径バーンカットは、口付け誤差や削孔精度などによる空孔と装薬孔の連結、あるいは孔壁の崩壊などの理由から汎用性、利便性に欠ける工法であることが推測される。このことから、長孔発破を有効かつ効率的に実施可能な心抜き工法の確立が求められる。

さらにANFO爆薬、バルクエマルジョン爆薬のトンネル発破への実用化が現実のものとなる中でこれらの爆薬を用いたバーンカット技術の確立は硬岩トンネルの合理的掘削のために有用と考えられる。

## 2. 平行心抜きの破碎機構と特性

Langefors等は大口径バーンカットの破碎機構を、段階的な起爆により順次自由面の拡大状況<sup>8</sup>を確認するとともに空孔径、離隔距離より装薬量を求める式を示した。

また、Oucherlony等<sup>9</sup>による大口径バーンカットの実験において、装薬孔と大口径空孔間の岩石は流体輸送のように空孔を通して排出されることが画像で確認されている。

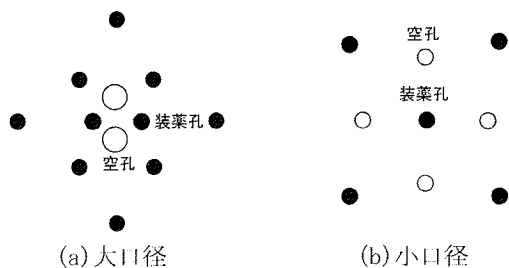


図-1 パーンカット例

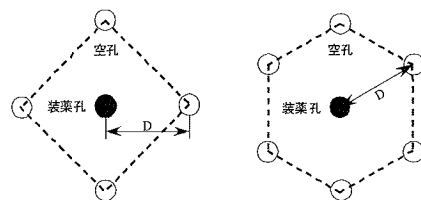


図-2 Step1 実験の削孔配置

パーンカット報告書などには大口徑・小口径パーンカットは同等に記載されるなか、小口径パーンカットの破砕機構についての報告書は特にみられず、特に空孔の大小により区別していたとは考えられない。また、小口径パーンカットの破砕機構を実際に示した例は筆者らの知る限りでは無い。

大口徑パーンカットには前述のほか、1) 削孔ビットの取り替えに時間を要する、2) 心抜き部の削孔数が多い、等の特徴がある。この2つの項目は、トンネル掘削の良否の問題より経済性・利便性の観点からこの工法の問題点を示していると考えられる。

一方、小口径パーンカットは、①装薬孔と同じビットで空孔を設けるためビットの取替えや先行削孔などは省略できる、②心抜き周辺の削孔数は増える、等の特徴を持ち、大口徑パーンカットと同様な事項はあるが、大口徑パーンカットと比べ①の点において優位性があると考えられる。

小口径パーンカットは、大口徑パーンカットと異なり最初に起爆する装薬孔は通常空孔の中心に位置している(図-1(b))。装薬孔を取り巻く周囲の空孔の断面積総計は通常長孔発破に採用される大口徑パーンカットに比して削孔径あるいは空孔の数により同等もしくは大きい場合もある。一方、中央の装薬孔を取り巻く空孔の中心点を結んだ面積は、装薬孔と空孔面積の和より大きく、大口徑パーンカットの破砕機構と同様に流体的に破砕岩片が排出されると考えることは難しい。このことから、装薬孔と空孔間での破砕機構は大口徑パーンカットと異なると推測され、その解明の必要性がある。

### 3. 小口径パーンカットにおける岩石破砕機構

小口径パーンカット破砕機構の解明のための実験計画にあたり小口径パーンカットの経験を有する技術者に対してヒアリングを行った。その結果、小口径パーンカットの破砕機構をひとまず次のように仮定し、まずこの検証を行うこととした。

① 空孔の中心にある装薬孔の起爆に伴う衝撃作用およ

- び生成ガスによるガス圧の作用により
  - ・装薬孔周囲の空孔を繋ぐ内側のライン内に亀裂が到達する
  - ・ライン内の岩石は破砕され坑口方向に排出される
- ② 破砕岩石の排出により形成された空洞は、段階的な起爆により拡大し、心抜きが完成する

#### (1) 当初仮定した考え方の検証 (Step1)

##### a) 実験の目的

先の仮定の検証を前提とし、心抜き中央にある装薬孔の起爆により、その周囲に配置した空孔に向けてどのように破壊が生じるか、また、発破の基本とされるハウザーの公式<sup>9)</sup>から考えられる破砕形状である円錐状の破砕状況の実現などについての検討を予備的な実験として行った。

##### b) 実験場所の地質・岩質条件

実験は、実施工トンネル工事の切羽で行なった。実験切羽は、安山岩で大目・流れ目をなし堅固で湧水は無く、節理に粘土、破砕岩は挟んでいない。

地山弾性波速度は、2900~4200m/s であり、一軸圧縮強度は約 200MPa と非常に硬い。

##### c) 発破条件と計測

削孔長は 4.0m を標準として心抜きの形状は装薬孔を中心とした四角形と六角形状とした。削孔径は、汎用性のある3種類(φ45,51,64mm)を選定した。

心抜き形状、削孔径、空孔・装薬孔の間隔などを、図-2、表-1に示す。

空孔の数ならびに孔間隔は大口徑パーンカット空孔断面積(φ102mm×1孔=81.67cm<sup>2</sup>, 2孔=163.34cm<sup>2</sup>)および装薬孔と空孔で囲まれる面積を参考に同等周辺となるように決めた。

親ダイは膠質状爆薬で、増しダイは ANFO 爆薬を機械装薬によりほぼ削孔長全長に装薬した。雷管は導火管付き雷管(MS 雷管)を用い孔底起爆(逆起爆)として込め物はしていない。

ANFO 爆薬の装薬密度は単管パイプ2インチ(内径44mm,長さ4m)を用い機械装薬を行った結果、0.88g/cm<sup>3</sup>(装薬集中度約1.34kg/m)が得られた。

起爆前に、①切羽写真、②削孔精度(口元位置、孔尻

表-1 Step1 実験仕様

削孔径 空孔数 D(mm)	φ45mm		φ51mm		φ64mm	
	4孔	6孔	4孔	6孔	4孔	6孔
150	○	—	○	—	—	—
200	○	○	○	○	—	—
250	○	○	○	○	○	○
300	○	○	○	○	○	○
350	—	○	—	○	○	○
400	—	—	—	—	○	○
空孔面積 (cm <sup>2</sup> )	63.6	95.4	81.7	122.5	128.6	192.9
空孔φ10.2cm×1孔 =81.7cm <sup>2</sup>			空孔φ10.2cm×2孔 =163.3cm <sup>2</sup>			

位置), ③削孔長, ④装薬長を, 起爆後に⑤進行長, ⑥閉塞長, ⑦破碎形状写真撮影の項目の計測等を行うこととした。

d) 実験結果

図-2に示す孔位置で削孔, 装薬を行い, 中心の装薬孔のみの発破をおこなった。表-1に示す24ケースの一段発破を行った結果を以下に記す

- ・ 装薬孔と空孔とが繋がったのは, 8ケースあった
- ・ 鉄砲 (吹き出し) 現象は4ケースあった
- ・ 閉塞長 (装薬孔内において破碎された岩片が外部に押し出されず残った状態) は, φ51mm で平均約33.3%未満, φ64mm で約50.9%であった。なお, φ45mm の場合発破時に計測ピンが破碎され計測不能であった
- ・ 発破後の装薬孔を中心とした切羽にはハウザー式でいう円錐状の破碎 (過装薬, 弱装薬によるラッパあるいはチュアリップ状など) は見られなかった

e) 考察

以上のように広範囲の条件について実験を行った。幾つかの装薬孔と空孔の連結はあったが, 当初仮定した装薬孔を中心とした空孔と装薬孔間の破碎, 空孔近傍の破碎, 隣接する空孔間の亀裂等, 目視による明確な確認はできなかった。

以上のことから大口径バーンカットの初期起爆の事象と比べ自由面の拡大などの現象はほとんど無く, 小口径バーンカットは大口径バーンカットのあるいは当初仮定した破碎機構とは異なることが明確になった。

(2) 多段階発破による小口径バーンカット破碎機構の検討 (Step2)

a) 実験の目的

前述の予備の実験の結果, 小口径バーンカットは中心位置の孔の発破のみで形成されるものではなく, 心抜き形成は装薬孔が順次起爆されることによると考えた。

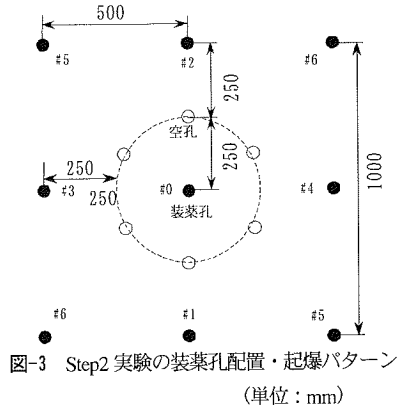


図-3 Step2 実験の装薬孔配置・起爆パターン (単位: mm)

表-2 Step2 実験順序

NO.	MS 雷管段数	
	1回目	2回目
I	#0	#1, #2, #4*
II	#0, #1	—
III	#0, #1, #2	—
IV	#0, #1, #2, #3	#4, #5, #6
V	#0, #1, #2, #3, #4	#5, #6

\* : #3は破碎による孔閉塞のため, #4を起爆した

従って, 実験の主たる目的は装薬孔が順次起爆されることにより心抜きが進行する状況を明らかにすることとなる。

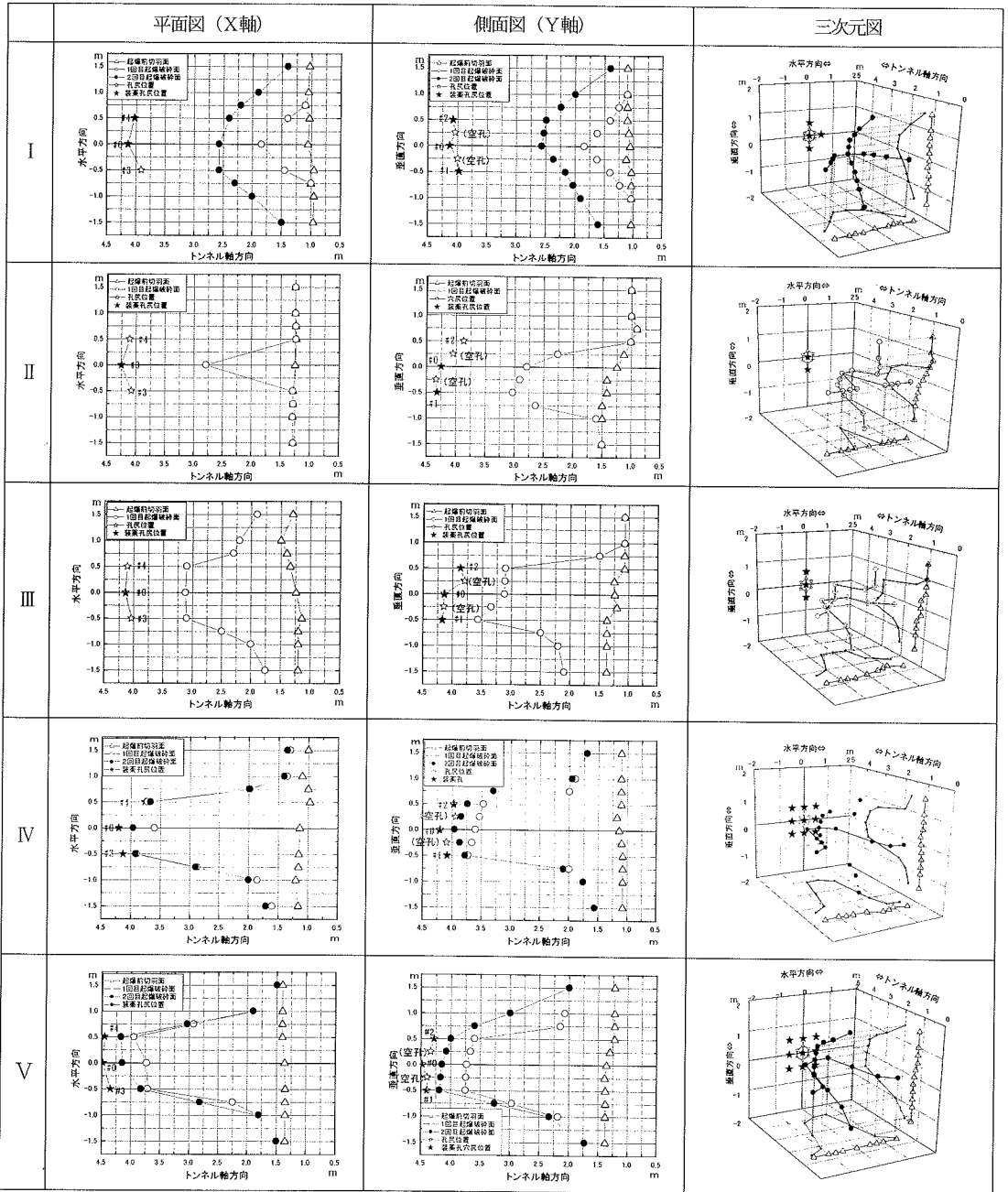
しかし, この作業のためには1つの孔を発破するごとに切羽に近づき, 計測, 装薬を行わねばならない。一般に発破により発破孔に隣接する領域および切羽面は損傷を受ける。このような作業に対する安全性確保の目的から繰り返し計測, 装薬, 発破というプロセスは最小限である2回とすることとした。そこで各ケースでの第1回目の発破において#0のみ (No. I), #0, #1 (No. II), ..., #0~#4 (No. V) と起爆し, それぞれの起爆段数での心抜きの進行状況を検討することとした。この各ケースの心抜きの進行状況を段階的に並べることにより近似的に#0~#4の順次起爆による心抜き進行の検討という当初の目的は達成されると考えた。

また, 1回目の起爆, 計測後に2回目の装薬, 発破を行うこととしている。

心抜きのパターンは図-3に示すものとした。実験順序を表-2に示す。なお, #0~#4はMS雷管の瞬発~4段を意味する。

b) 実験場所の地質・岩質

実験は実施トンネル工事の切羽で行なった。実験切羽の地質は, 黒雲母花崗岩を主体とし部分的に安山岩の貫入岩帯が存在している。地山弾性波速度は4500~5000m/s, 一軸圧縮強度は約40~110MPaであり, 前の実



\*三次元図凡例；★：装薬孔位置 ☆：空孔位置 ○：1回目起爆破砕面 ●：2回目起爆破砕面 △：起爆前切羽面

図-4 Step2 実験の段階的な起爆後の破砕形状

験地山より低い。また概ね堅硬で湧水・滴水は無い。

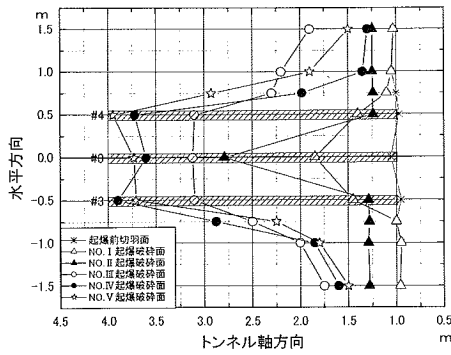
### c) 発破条件と計測

削孔長は標準3.0mとし削孔径はφ45mmを採用した。爆薬・雷管、計測項目等に関しては先の実験と同様とした。Step1とStep2の実験条件(地質、削孔長)は異なるが、支配的な相違は無いと考えた。

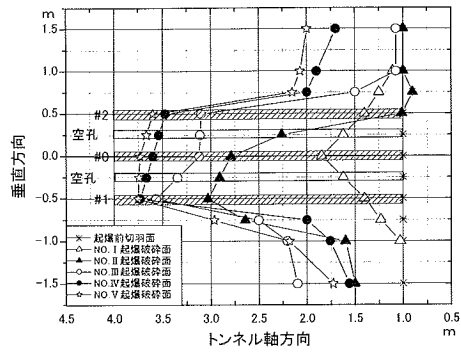
### d) 実験結果

前述のプロセスに従って第1回目の発破を行った。第1回目の発破によりNo. II, IIIにおいては第2回目起爆のための装薬孔が乱され、また切羽も不安定な状況となったので2回目の発破は取りやめた。そのため予定を変更しNo. Iは内側の4辺形まで、No. IV, Vは最終心抜きまでの2回発破を行うこととした。

図-4に段階的起爆により得られた破砕形状の平面、側

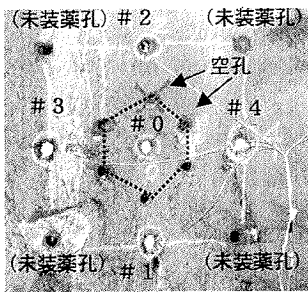


a) 平面図

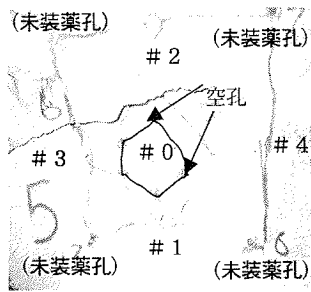


b) 側面図

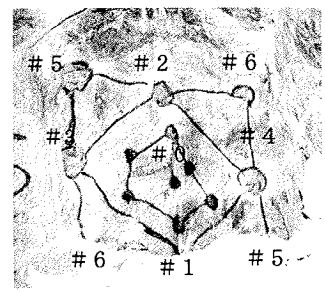
図-5 段階的な起爆による破砕面の推移



a) 装薬完了 (#1,#2,#3,#4)



b) 1回目起爆後



c) 2回目起爆完了

写真-1 No. V起爆写真

面、3次元図を示す。それぞれの図は1回目、2回目のそれぞれの起爆による中心面（#0孔を通る直立面）での進行状況の投影を行っている。

この平面図および側面図の投影において1回目の進行のみをNo. I～No. Vと並べて示したものが図-5 a),b)である。前述のように岩盤、削孔精度のばらつきは考えられるが大まかに#0～#4と順次起爆が進むにつれて心抜き進行していく状況が見て取れる。すなわち#0 (No. I) によってほぼ平面、側面とも似たような形状の進行（クレーター状）が生じ、続いて中心孔の下および上に配置された#1、#2により下および上方向へ大きく進展し（No. II, III）これにより側面図に下側、続いて上側へ大きな変化が現れている。その後、左右に配置された#3、#4 (No. IV, V) により左右方向へ広がる状況が明らかである。

前述のように2回目発破を行ったのはNo. I, IV, Vの3ケースである。No. IV, Vの最終進行形状を見るとほぼ望ましい形の心抜きが完成していることが認められる。

この状況をNo. Vについて写真-1 a),b),c)に示す。正面からの写真であり立体感に欠けるが、スプレーマーキングと図-4の最下段の3次元図を参考に心抜きが進行し完成する状況を推察されたい。

なお、図-4, 5の平面図・側面図のトンネル軸方向（切羽面からの奥行き深さ：m）の数値は、計測基準点（0.0m）からの距離であり、切羽面がほぼ1.0m位置となっている。

### (3) 破砕機構の推定

Step1 およびStep2の実験結果から小口径バーンカットの破砕機構は次のように推定される。

中央装薬孔の起爆により装薬孔近傍およびその空孔間の領域が破砕・変形され、この領域はそれに続く装薬孔の起爆により充分な破砕・押し出し（排出）を可能にする程度に脆弱化する。その微小な破砕・変形あるいは亀裂が発達した範囲は中心孔の下、上、左右に配置された装薬孔に連続的起爆が行われることにより、次第に心抜き部の損傷と空洞が側方への拡がりと同時に孔奥方向へと大きくなり心抜きが完成する。

小口径バーンカットの中心装薬孔とその周辺にある空孔の役割は、後段の連続的な起爆によりその動的エネルギー・静的エネルギーを有効にかつ効率的に心抜き（坑道掘進の初期自由面確保のための方法）を推進するための役割を果たす部位であると推定される。

以上のように、Vカットや大口径のバーンカット工法では装薬孔に並んだ位置にある自由面に向かって破砕

が進行するのに対して小口径バーンカットでは起爆により順次孔奥方向への破碎が進行するという異なった破碎機構を有するといえる。

#### 4. おわりに

実験の結果、小口径バーンカットでは連続的な起爆により順次地山の破碎、放出が行なわれ、孔奥方向への心抜きが進行することが示された。ここで、小口径バーンカットの破碎機構のパラメータは、①口径、②中心孔と空孔との離隔距離、③装薬量と考えられたが、STEP2では実験数が少なくその関係を究明するまでに至らなかった。

しかし、本研究により解明された小口径バーンカットのメカニズムは、ANFOあるいはバルクエマルジョン爆薬の使用が実用的段階に達した今日において、今後の平行心抜きの発展を考える上で有用な資料を提供するものと考ええる。

#### 参考文献

1) 日野熊雄：Concentrated type of no-cut round of blasting, 火薬

学会, 1955.5.

- 2) 村田勉, 田中一三：岩石発破に関する力学的研究, 工業火薬学会誌, 15~17巻 (1954-1955).
- 3) U. Langefors and B. Kihlstrom : The Modern Technique of Rock Blasting, Almqvist & Wiksell Forlag AB, pp186-200, 1978.
- 4) Blaster's handbook 16<sup>th</sup> Edition: Dupont
- 5) (財) 高速道路技術センター, 日本道路公団土木工事積算資料・平成14年度版, 19-12.
- 6) 日本鉄道建設公団積算基準 (平成14年度版), pp138.
- 7) Niklasson, M. Keisu: New Methods for Contour Blasting Using Electronic Detonators and Water-Notched Boreholes, Including Longer Drift Rounds and Cuts without Large Cut Holes, pp.1~pp.19, In Proc of 4<sup>th</sup> High Technology Seminar. State of the Art of Blasting, Technology, Instrument, Explosives, Applications. BAI, Allentown PA, 1992.
- 8) F. Ouchterlony, Y. Kanoh, H. Minamide, K. Nakagawa : Parallel hole cut blasting tests with ANFO and Emulsion explosives, Swedish Rock Engineering Research, pp. 25, SveBeFo Rapport 28, 1997.
- 9) 発破工学ハンドブック : pp116-119, 火薬学会, 2001.8.

(2003. 6. 3 受付)

## AN EXAMINATION OF BURN CUTS WITHOUT LARGE CUT HOLES

Ko KAWANO, Tadayuki KOBAYAKAWA, Masao YOSHINAGA  
Shozo KOMATSU and Koji NAKAGAWA

In order to inspect the breaking structure of burn cuts without large cut holes, we study step-by-step blasting.

According to the blasting at the center hole neither connections among a center hole and its surrounding holes and increase free faces by expanding center hole were observed. At the next step-by-step continuous blasting, however, we observed that the cut area expanded sequentially and approx.90% of drilling length could be advanced. By vacant holes surrounding the center hole become free faces on a limited small area, and many minimum cracks are produced and grown around the charging center hole.

As a result, it is observed that the cut is accomplished by continuous blasting at the effected weak area.