

(Ⅲ-9)

発破パターンの変更による 低公害化と施工効率

Reduction Vibration Level and Airshock Waves ,and Improvement workability

by Changing Firing Pattern in Tunnel

佐藤工業(株) ○南出英男*

佐藤工業(株) 泉 登**

By Hideo MINAMIDE and Noboru IZUMI

山岳トンネルの発破掘削において、想定通りに岩を破碎でき、かつ振動・騒音も低減できることを目指してエキスパートシステムを開発した。このシステムの根幹をなす部分は、スウェーデン式発破の導入から成り立っている。スウェーデン式発破を我が国に導入して、果たして初期の目的が達成されるのか、また施工上受け入れられそうかを把握する目的で現場実験を行った。

現場実験は通常のVカットのまわりに同心円状に爆破していくパターンから、シリンダーカットで格子状に爆破箇所が分散しているパターンまで、3つのパターンで19回の試験発破を行った。その結果、削孔数・単位装薬量の低減、進行率の向上、破碎岩の飛距離の短縮など施工面で好結果が得られた。また、振動速度・音圧レベル・低周波音レベルの低減などの公害面でも好結果が得られたので報告する。

【キーワード】 施工計画、エキスパートシステム、環境・公害

1 はじめに

従来、山間僻地でのトンネル現場が多かったため、施工性や経済性に重きをおいて工事を進めてきた。しかし、最近は都市周辺部のトンネル現場が増えるとともに、発破振動・発破音・飛石などの発破公害に対する社会的関心も高まってきたので、民家・学校・精密機械工場などへの影響を考慮せずに工事を行うことが許されなくなっている。発注者からもその対応を迫られるようになってきている。そこで、想定どおりに岩盤を破碎でき、かつ振動・騒音も低減できることを目指してスウェーデンで行われている発破方式を検討してきた。

この発破方式（以下S方式とする）と我が国の発破方式（以下N方式とする）との相違は以下のようである。

①N方式の発破パターンは芯抜きを中心とした同心円状で、同一半径を同一秒時に起爆している。雷管の起爆秒時にばらつきがあるので、同一半径でも起爆順序によって荷が変わってくる。この条件下で岩を破碎するには過装薬ぎみになる。これに対し、S方式は格子状パターンにし、起爆秒時のばらつきを考慮して、同一秒時に起爆する箇所を分散させ、荷のかかり方を均一にしている。よって、適正な装薬量になる。

②N方式の芯抜きはVカットがほとんどである。S方式ではかつてVカットを使用していた時期もあったが、トンネル幅に制限があり、1発破当りの進行長を長くできないので、現在は平行芯抜き

* 中央技術研究所 0462-41-2171

** 中国支店 082-241-2201

が標準となっている。

③ S方式では削孔の孔底部において削孔径一杯になるように爆薬を密装薬にして爆破威力を効果的に利用している。N方式では孔全体が軽装薬である。

④ 外周孔はS方式ではスムーズプラスティングが標準になっているが、N方式では必ずしも標準にはなっていない。

⑤ S方式では平行芯抜き、Vカットにかかわらず芯抜きにMS電気雷管を使用している。N方式ではVカットはDS電気雷管使用である。

我が国の発破方式に慣れた作業員が、これらの相違を有したスウェーデンの発破方式で施工しても、同様の効果を発揮するかを現場で確認するため、現場実験を行った。現場実験は発破パターンを在来方式から徐々に新方式に向けて変更しながら3タイプ計19回の発破を行い、削孔数、装薬量、進行長、振動速度、音圧レベル、低周波音レベル、ズリ堆積形状を計測した。その結果、スウェーデンで行われている発破方式は削孔数低減、単位装薬量低減、進行率向上、振動速度・騒音レベル・低周波音レベル低減、ズリ飛距離短縮などあらゆる面で優位性を示した。

上記の発破方式をエキスパートシステムに採用しており、システム説明は第9回建設マネジメント講演論文集に報告した。ここでは現場実験について報告する。

2 実験概要

(1) 実験期間

第1回：91年10月／タイプA (STA50 +50付近)

第2回：91年12月／タイプA, B (STA47 +90付近)

第3回：92年1月／タイプB, C (STA46 +70付近)

(2) 地質概要

本トンネルは笠井山の山頂(標高330m)直下付近を通過して東西に貫く。トンネル計画高はEL45～50mで、山頂での土被りは約280mである。

本トンネルの地質は古生層で、粘板岩が變成作用を受けたホルンフェンス(5.3～5.4km/sec)が主体である。

STA49～STA53区間は、ホルンフェンスの安定

した地山で、一部砂岩との互層になっている。

STA43～STA49区間は、ホルンフェンスが主体で岩石自体は堅硬である。

坑口部(STA53+80)は厚さ4～6mの崖錐堆積層であるが、N値20～50の締まった砂礫層である。

(3) 掘削工法

ミニベンチカット工法(SMB工法)によるNATM

(4) 掘削断面 約70㎡

(5) 火薬類

爆薬：2号履、チタマイト

電気雷管：MS1～12、DS1～15

(6) 調査・計測項目

削孔数、装薬量、進行長、振動速度、音圧レベル、低周波音レベル

3. 実験結果と考察

(1) 発破パターン

タイプ別の発破パターン内容を表-1に示し、タイプ別の発破パターンを図-1～3に示す。

表-1 タイプ別発破パターン内容

タイプ	芯抜き	一般孔	外周孔	電気雷管
A	Vカット	同心円状	払いと同じ	DS1～10
B	〃	格子状	〃	〃
C	ジグザグカット	〃	SB	MS1～12, DS3～15

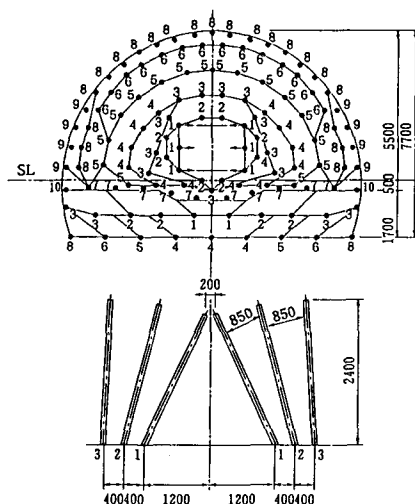


図-1 発破パターン (タイプA)

タイプ別の削孔数・単位装薬量・進行率を表-2に示す。

タイプ	平均削孔数	平均単位装薬量	平均進行率
A	129 (131)	0.94kg/m ³	0.88
B	115 (119)	0.90	0.86
C	112+2	0.83	1.00

表2において、平均削孔数の()内はタイプA、Bの外周孔をタイプCと同数にして、条件をそろえた場合の数字である。これをみると、Vカットでは同心円状(タイプA)よりも格子状(タイプB)のほうが平均削孔数は10%低減している。格子状ではVカット(タイプB)よりもシリンダーカット(タイプC)のほうが平均削孔数は4%低減している。タイプAとCを比較すると、Cのほうが総平均削孔数は13%低減している。

単位装薬量はタイプA、B、Cの順で少なくなっており、CはAよりも11%低減している。

Vカット（タイプA、B）の進行率は測定結果によると削孔長の90%以下であるのに対し、シリンダーカット（タイプC）は100%であり、進行率は芯抜きの影響が大きいと考えられる。これはV字の2本のブームのお互いの角度調整、水平度調整、削孔長調整が困難で、切羽ごとに進行率が変わってくるのに対し、シリンダーカットは水平保持装置を使って1本のブームで削孔するため、技能差の影響が少ないためと考えられる。

合成最大振動速度の平均は タイプA : 0.049 kine、B : 0.058kine、C : 0.008kine である。切羽から測定位置までの距離に最大400mの差があるため、一概には比較できないが傾向として、Vカット(タイプA、B)は、第1段で最大値が発生しているのに対し、シリンダーカット(タイプC)は第12段の外周孔・下段で最大値が発生し

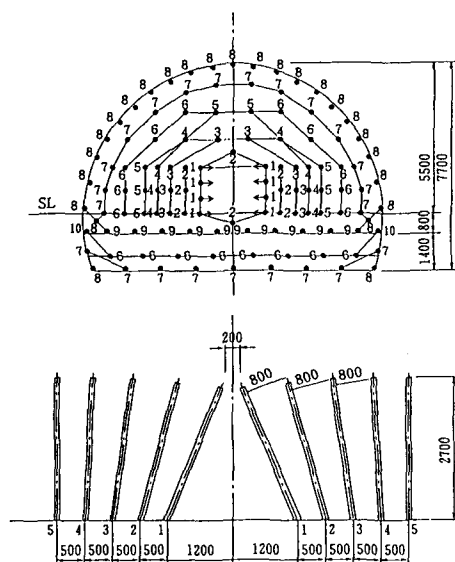


図-2 発破パターン (タイプB)

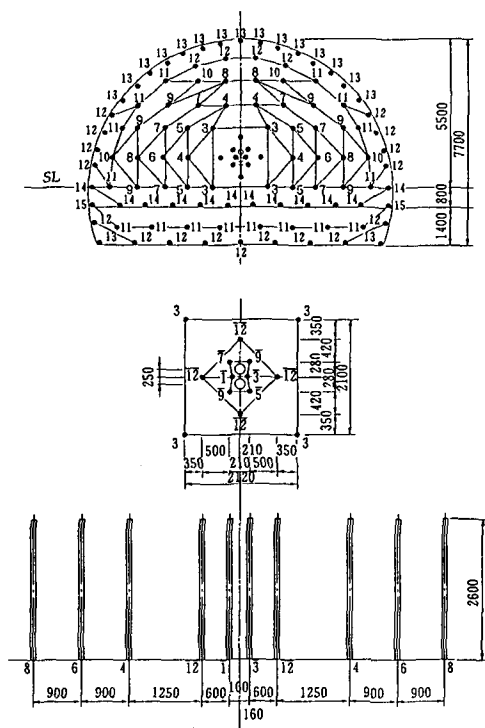


図-3 発破パターン(タイプC)

ている。さらにこの値はVカットの外周孔・下半断面の数値と同程度である。(図-4)

このことからシリンダーカットは振動低減に効果があり、さらに低減効果を増大させるには外周孔・下半断面の段数分割を考慮すればよいことが分かる。

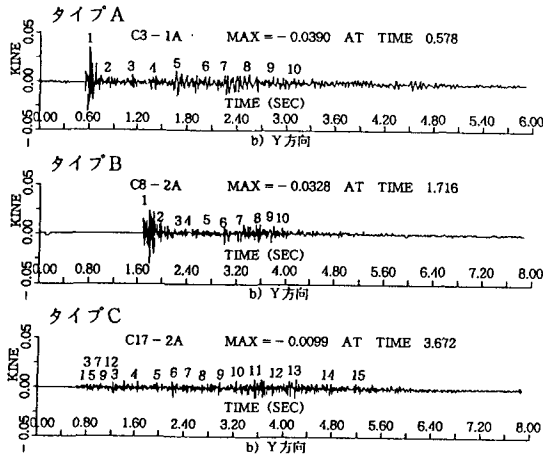


図-4 タイプ別振動速度測定例

b) 比例係数C

距離と振動速度の関係を図-5に示す。比例定数Cと段当たり装薬量の0.75乗の積は、ほとんどのデータが750～10000の間で、平均2500である。比例係数Cは切羽部位によって、 $C=200 \sim 1000$ が一般的であり、破砕された面積(2自由面の面積)が大きくなるほどCは小さくなる。2自由面の面積は計測不可能なため、指標として爆発秒時を選んで、爆発秒時とCの関係を図-6に示した。図-6では、測定値のばらつきに距離の2乗を掛け

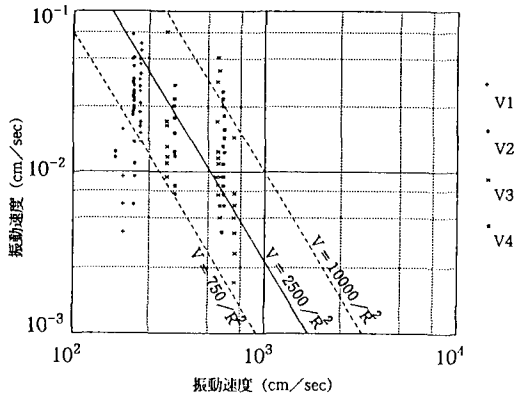


図-5 距離と振動速度の関係

ているため、Vカットの芯抜きと外周孔でばらつきがあるものの、Cは低下傾向を示している。しかも直線式のCの値は70～700で切羽部位による一般的な値と同程度である。

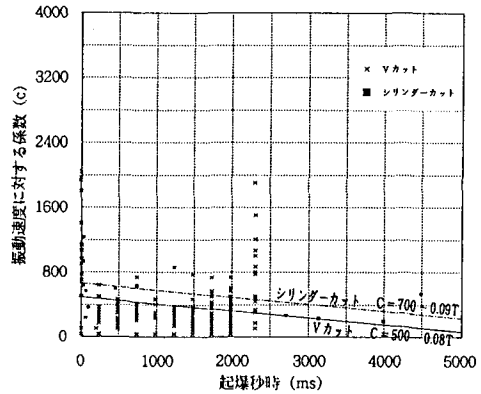


図-6 起爆秒時とCとの関係

c) 人体に感ずる感覚

振動の人体に感ずる感度曲線(図-7)によれば、実験値は感じない、ようやく感じるの範囲である。現場での感覚としては、爆破音のよく聞こえない地点では足裏にようやく感じられる程度であり、爆破音のよく聞こえるところでは爆破音ばかりが気になり、振動はほとんど無感である。

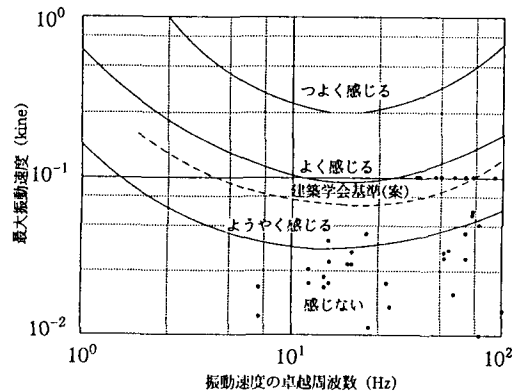


図-7 振動の人体に感ずる感度曲線

d) 起爆時間のずれ量

段発電気雷管の基準秒時と実際の起爆時間にどのくらいのずれ量があるかを、振動測定の波形から調べた。(図-8)

図-8より、30ms以下の秒時差は60%程度であり、60ms以下の秒時差は80%をこえている。振動計測位置が切羽から最大700m離れているため厳密ではないが、起爆時間のばらつきはかなりのあるものと考えてよいであろう。よって、同心円状パターンで起爆のばらつきのために過装薬ぎみであったものを、格子状のパターンにして回避したほうが合理的である。

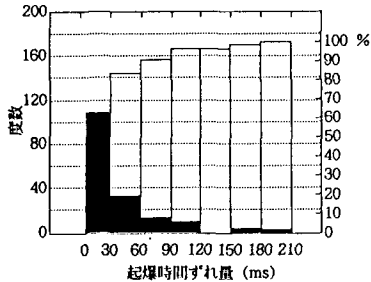


図-8 電気雷管の基準秒時のずれ

(4) 音圧レベル

a) 坑口の音圧

坑内の同時測定の場合から、段当り装薬量をW、トンネル延長をLとして、坑口の音圧を計算すると、次式が求められた。

$$V \text{ カット ; } P = 0.81W^{0.5} D^{-0.25}$$

$$\text{シリンダーカット ; } P = 1.71W^{0.5} D^{-0.25}$$

b) 受音点の音圧レベル

図-9より 430m, 860m 地点については倍距離ではば-6dBを示しており遠距離では点音源の減衰に近似する。100m以内の測定値にはかなりばらつきがあり、今後、更に検討を要する。

坑口と430m, 860m地点の音圧レベルから、坑口を円形面音源として受音点の音圧レベルを計算する。坑口の音圧レベルをPWL, 受音点の音圧レベルをSPL とすると、

格子状 (Vカット) 10段の時

$$SPL = PWL + 10 \log \{ \log. | 1 + (D/2d)^2 | \} + 11$$

格子状 (シリンダー) 15段の時

$$SPL = PWL + 10 \log \{ \log. | 1 + (D/2d)^2 | \} + 5$$

ただし、D ; トンネル直径(m)

d ; 坑口から受音点の距離(m)

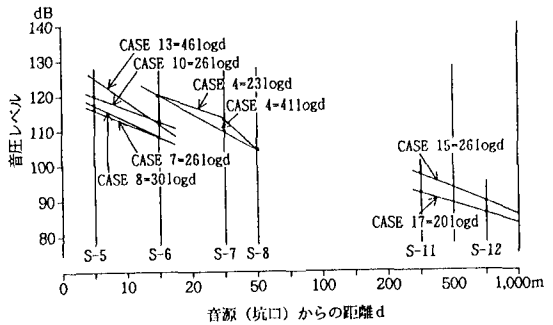
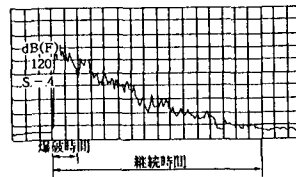


図-9 音源からの距離減衰

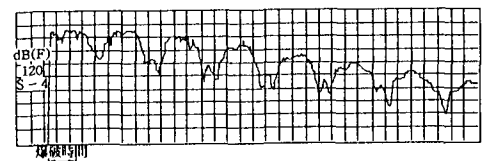
c) 発破音継続時間

図-10において、タイプAでは防音屏の中心点をバックホーで押して、爆風圧に対抗した。タイプB、Cではバックホーで押していない。発破音継続時間 (発破後の音圧レベルが発破前のレベルまで戻る時間) は、タイプAが15秒、タイプBが60秒、タイプCが45秒である。これは爆風が防音屏を振動させ、防音屏自体が新たな音源となって、空気振動を引き起こすため、防音屏の中心点を支持すると継続時間が短縮されるものと推察される。またタイプBとタイプCを比較すると、残響音のパターン崩壊がタイプCのほうが早いことも一因と考えられる。

タイプA



タイプB



タイプC

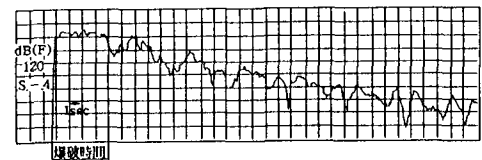


図-10 音圧レベル測定例

(5) 低周波音レベル

a) 感じ方

430m地点と860m地点の周波数分析結果を示すと図-11になる。両点とも感覚閾値以下であるが、ガタツキ境界値は大きく上回っている。

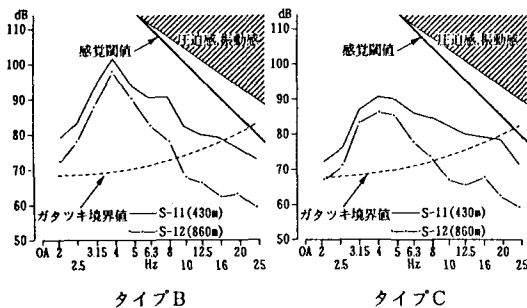


図-11 周波数分析結果

b) 測定波形・周波数分布

測定波形例と周波数分布例を図-12に示す。

図-12で、タイプAとBを比較すると、Aのほうが波形が急峻である。また、タイプBとCを比較すると、Cのほうが1波ごとの波形がBほど明確でなく、MS雷管とDS雷管の組み合わせが波形を複雑にして、平均化しているものと考えられる。

周波数分布は、タイプA、Bの卓越周波数が4 Hzで、Cが5 Hzである。これはA、BがDS雷管だけの使用であり、CがMS雷管とDS雷管の組み合わせの使用と関係があると推察できる(DS雷管秒時差=0.25sec = 4 Hz)。

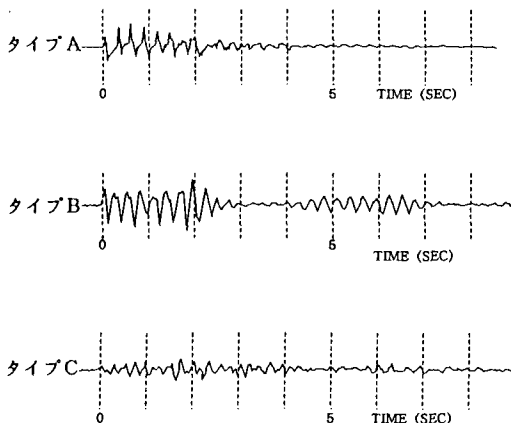


図-12 測定波形例

3. おわりに

想定どおりに岩盤を破砕でき、かつ振動・騒音も低減できるようにスウェーデンで行われている発破方式を導入した。この方式の公害に対する効果確認と施工上我が国に受け入れられそうかの把握のために、現場施工条件を極力変更しないかたちで、3タイプの現場実験を行って、以下の知見を得た。

(1) スウェーデン式発破は、日本式発破に比較して以下の好結果を得ている。

削孔数	13%低減
単位装薬量	11% "
進行率	14%向上
振動速度(芯抜き)	84%低減
音圧レベル	10% "
低周波音レベル	4% "

(2) 雷管起爆精度のばらつきを考慮して、格子状に爆破ブロックを分散させるのは合理的である。

(3) シリンダーカットは、芯抜きを多段の短い秒時差で起爆するため、振動、騒音の低減に効果がある。

(4) スウェーデン式発破の削孔数は少ない。空孔の削孔時間を考慮しても削孔時間は日本式発破より短縮される。しかも、シリンダーカットの進行率は高い。

(5) 低周波音が原因の住民の苦情を低減させるためには、MS電気雷管の多用などの雷管使用の工夫が考えられる。また防音扉の中心を重機でおさえるのも効果がある。

(6) 実験はエキスパートシステムの入力条件を、岩石係数C=0.35、設計削孔径φ32(実削孔径φ45)にして得られた施工結果である。

(7) スウェーデン式発破はブームの移動操作が容易であるために、標準発破パターンを同心円状から格子状にするように、協力会社から当社に要請がきて、それを採用している。このことから、施工的にもスウェーデン方式は優れている。

【参考文献】

1) Stig O Olofsson: APPLIED EXPLOSIVES TECHNOLOGY FOR CONSTRUCTION AND MINING, 1989