

(84) 油圧割岩機を用いたトンネル拡幅工法

清水建設(株) 福田和寛
清水建設(株) 風間広志
北海道大学工学部 石島洋二

Method of Expanding Tunnel Width Using Hydraulic Splitter

Kazuhiro FUKUDA, Shimizu Corporation
Hiroshi KAZAMA, Shimizu Corporation
Yoji ISHIJIMA, Department of Engineering, Hokkaido University

Construction works are increasing such as repair/expansion of a tunnel in which blasting cannot be employed because of the need to secure the traffic. Although various non-blasting tunnel excavation methods have been proposed, most of them are defective in that they require many repeated splittings of rock as well as secondary demolition using a breaker, etc. because of the low splitting capacity.

This paper proposes a non-blasting tunnel expansion method using a hydraulic splitter of 850 ton capacity. The splitter has a sufficiently large splitting width and proved sufficiently practical.

1. はじめに

近年、市街地や発電所増設などの硬岩トンネル工事において、住民や近隣施設に対する振動、騒音などの公害の少ない施工法が要求されることが多くなっている。また、交通を確保しながらのトンネル改修や拡幅など発破を使用できない工事も増えている。このため、いくつかの無発破トンネル掘削工法が提案されている。これらの工法は、トンネル切羽に自由面を形成し、その自由面を利用して高水圧破碎機や静的破碎剤、油圧くさびなどで割岩し、その後、油圧ブレーカーで打撃破碎することで硬岩を無発破掘削することを基本としている。自由面の形成には、スロット削孔機等が開発されており、また、TBMを先進させこれを大断面トンネルの自由面として利用する方法等も考えられている。しかし、割岩については、従来の割岩機が能力的に不十分なため割岩密度を高くしなければならず、さらにブレーカーによる2次破碎が必要とされるため、能率的な無発破掘削が行えない状況にある。そこで、今回、最大割岩容量850tonの油圧割岩機を用い、さらに割岩機のストローク（開口幅）を十分大きくすることにより、2次破碎を必要としない無発破トンネル拡幅工法を開発した。

2. き裂進展の解析

線形破壊力学によれば、半無限板中の自由端近くに配置した円孔から生じるき裂は、自由面に垂直なき裂よりも平行なき裂の方が進展が容易であることがわかっている¹⁾。また、円孔の周囲に同心円状に配列した孔から生じるき裂の進展圧(P)と進展に必要な開口変位量(u)を体積力法を用いて計算すると、図-1に示すように、円周方向のき裂の方がp, u共に小さく、円周方向へのき裂の進展が予想される。したがって、割岩を行う場合、き裂を進展させる上では、自由面に平行な割岩孔配置が効率的である。しかし、き裂は自由面と平行に形成されるため、割岩したブロックを分離させ、はつり出すためには、き裂進展の方向を

制御し、き裂が自由面と交わるような割岩法の工夫が必要である。

3. 割岩法の概要

今回開発した割岩法は、スリット付割岩孔と方向制御型油圧割岩機の組合せを基本とする。図-2に割岩法の模式図を示す。

直径 150mmの割岩孔には、ウイングビットを用いて深さ15mmのスリットを付け、き裂の発生を容易にすると共に、き裂の進展方向を規定する。

油圧割岩機は、油圧ゴムチューブに最大1250kgf/cm²の油圧をかけ、60cm長の鋼製圧力板で孔壁に最大850tonの割岩荷重を加える。孔壁との接触部に剛性の高い鋼製厚板を用いたため耐久性も高く、一方向にき裂を発生させることができる。スリット付割岩孔とこの割岩機を組合せることで、ある程度き裂の発生方向が制御可能となる。

実際の岩盤では、き裂が生じてもき裂の開口変位量を十分大きくしないと、岩塊どうしがかみ合い、せめぎ合って分離できないことが多い。従来の割岩で2次破碎が必要なのは、開口変位量を十分大きくできなかったためと考えられる。そこで、本割岩機ではストローク（すなわち開口変位量）を30mmまで大きくする工夫をし、割岩後の岩塊が容易に分離、脱落できるようにした。

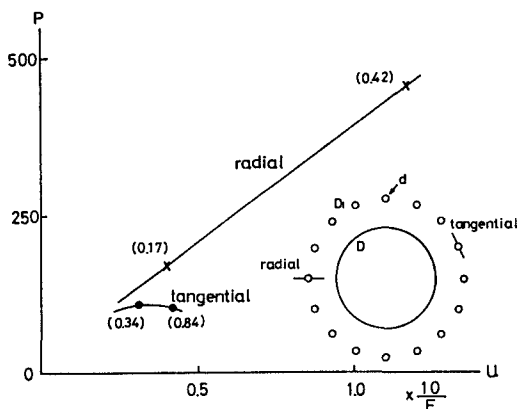


図-1 円孔周囲の同心円配列孔から生じるき裂の進展圧力(P)と開口変位量(u)
()内は無次元化したき裂進展長

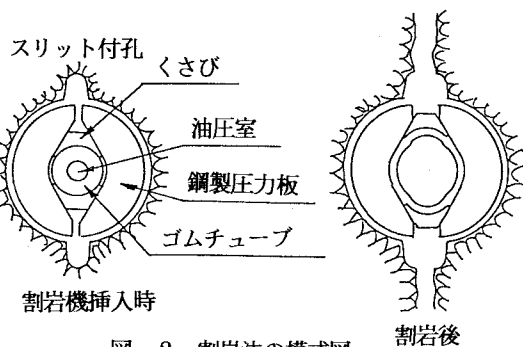


図-2 割岩法の模式図

4. 割岩の模型実験

基本的な割岩特性を把握するために、小型の模型割岩機を用い、比較的均質な凝灰岩を対象に割岩実験を行った。用いた模型割岩機は割岩孔径20mm用で、鋼製円柱を縦割にした間に銅製のフラットジャッキを挟んだ構造で、実機と同様の割岩機構を有する。模型実験を行ったのは、札幌近郊の凝灰岩採石場のベンチ端である。

割岩の実規模対象として花崗岩を想定すると、模型の縮尺は次のようになる。

- ① 割岩孔径が、模型20mm、実規模150mmであるから、長さの縮尺は1/7.5
- ② 応力の相似比は、密度がそれぞれ 2.0g/cm³、3.0g/cm³程度であるから、
 $(2/3) \times (1/7.5) = 1/11.25$

なお、この凝灰岩の一軸圧縮強度は40~50kgf/cm²、引張強度は3~4kgf/cm²程度であった。

割岩孔の一部には、削孔後、カッターにより深さ2mmのスリットを入れた。

まず、単一孔を用いた割岩を実施した。割岩状況例を図-3に、割岩結果を表-1に示す。割岩方向を自由面に垂直にした方が平行よりも壊れ易く、破壊力学に基づく予想と一致した結果となった。また、結果にバラツキがあるため明確でないが、スリットの存在は割岩圧を低下させる上で多少の効果がありそうである。

次に、自由面に平行かつ同一間隔で配置した3孔の同時载荷を行った。表-2の試験結果からわかるように、割岩孔と自由面との距離（最小抵抗線）に比べ孔間距離をかなり長くしても割岩可能であり、複数孔を

同時に用いることで効果的な割岩が可能であることがわかる。

最後に、より現実に近い状況として割岩領域を逐次拡大する多孔割岩を行った。孔配置を図-4に示す。最初の①の加圧では110kgf/cm²程度で大きく割れたものが、③の加圧では、き裂が既存のき裂に達するために176kgf/cm²の圧力を必要とした。割岩部が広い自由面から遠ざかるにつれ、有効な自由面が湾曲し、かつ、下部に未破壊の領域が残るため、割岩に対する抵抗が急激に増大したためと考えられる。

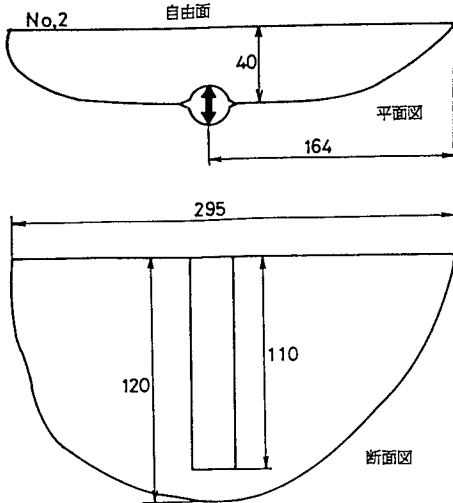


図-3 模型試験における単一孔割岩状況

表-2 模型を用いた3孔発破試験結果

No.	最小抵抗線 W (mm)	孔間距離 L (mm)	破 碎 圧 P (kgf/cm ²)	破 碎 荷 重 F (kgf)
1	30	100	85, 50, 73	138, 72, 113
2	30	125	88, 90, 115	144, 148, 208
3	30	75	113 → 80	204 → 127
4	40	75	105	184
5	40	100	100, 95	172, 160
6	40	125	108, 110, 105	191, 196, 184
7	50	75	130	247
8	50	125	135, 110	259, 196
9	60	75	135	259

表-1 模型を用いた単一孔発破試験結果

No.	W (mm)	スリットの有無と 加圧方向	破 碎 圧 P (kgf/cm ²)	破 碎 荷 重 F (kgf)
1	40	無	82	132
2	40	有	78	124
3	40	有	150	295
4	60	無	145	283
5	90	無	破 碎	せ ず

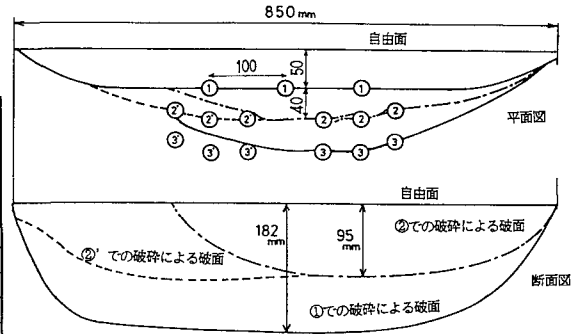


図-4 模型による多孔拡大割岩状況

5. 割岩拡幅工法の現場実験

本割岩法の有効性を実際に確認するため、花崗岩を対象にトンネル拡幅実験を実施した。実験は、新潟県赤谷鉱山のかぶり深さ約30mの花崗岩中に掘削されたトンネルの分岐部を利用して行った。岩盤中にはトンネルと斜交する主要な割れ目と何系かの割れ目群があり、割れ目間隔は20~80cm程度であった。地表に近いためか、褐色に変色した割れ目が多く、開口割れ目もいくつか見られたが、岩自体は堅硬で、一軸圧縮強度1200kgf/cm²、引張強度77kgf/cm²であった。

トンネルは、幅6m、高さ5mの馬蹄形断面で、互いに直交分岐するトンネル交差部の一方のトンネルを自由面とみなして、他の一方のトンネルからこれを拡幅した。割岩孔の配置を図-5に示す。まず、①、②孔を各1孔ずつ割岩し、次に③~⑥孔を同時に4連で破碎した。割岩孔長は1.5mで、割岩機の載荷長が60

cmであったので、1～3回の載荷で1.5mを破碎している。①～⑥孔の割岩で新たな切羽面をはつり出し、続けて⑦～⑩孔の割岩を行った。したがって、トンネル拡幅切羽を2サイクル進行させた状況を実験したことになる。割岩孔はすべてスリット付きとした。図-6にスリット付孔を示す。

割岩結果を表-3に、また、割岩状況を図-7に、割岩後の切羽状況を図-8に示す。岩盤中に既存の割れ目が存在したためか、余裕を持って割岩することができ、最小抵抗線70cm、割岩孔間75cmの割岩が十分可能であった。また、4連孔で円弧状の破碎ができ、方向制御もある程度可能であったものと考えられる。さらに、割岩ストロークすなわち割岩に伴う開口変位量を大きくしたことで、破碎ズリはすべて、ブレーカー等の重機を用いずにはつり出すことができた。

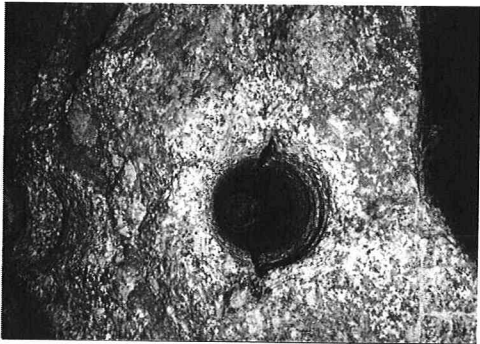


図-6 スリット付割岩孔

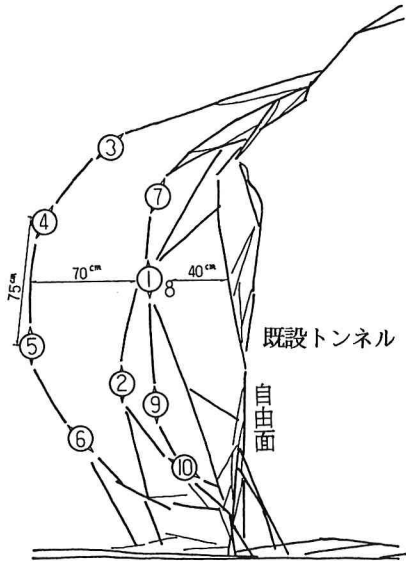


図-5 現場試験における割岩孔配置



図-7 現場試験における割岩状況

表-3 現場試験における割岩結果

割岩 孔番号	破 碎 圧 (kgf/cm ²)			破 碎 荷 重 (ton)		
	口元～ 60cm	60～ 120cm	120～ 150cm	口元～ 60cm	60～ 120cm	120～ 150cm
①	343	995	188	233	677	128
②	1000	1000	—	680	680	—
③	233	488	—	158	332	—
④	250	508	—	170	345	—
⑤	208	483	—	141	328	—
⑥	980	325	1000	666	221	680
⑦	1000	348	—	580	237	—
⑧	325	250	—	221	170	—
⑨	250	—	—	170	—	—
⑩	325	1000	1000	221	680	680

6. おわりに

今回の実験で、本工法により十分実用的な割岩の行えることが明らかになった。今後は、割岩機のハンドリング性能等、実用工法としての完成度を高めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 石島洋二，木下重教：岩石の静的破碎－水圧破碎と静的破碎剤による破碎－，第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，361-366(1984)。



図－8 現場試験における割岩拡幅状況