

(47) 油圧割岩機を用いたトンネル掘削のための岩盤破碎に関する研究

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

Study on Rock Fracturing for Tunnel Excavation Using Hydraulic Splitter

Kazuhiro FUKUDA, Hiroshi KAZAMA, Shimizu Corporation

Yoji Ishijima, Hokkaido University

Abstract

Various non-blasting methods for excavating hard rock tunnels have been reported, however, the overall efficiency is not satisfied. As the initial fracturing is not sufficient, conventional non-blasting methods require additional fracturing of the rock using breakers, and this leads to decreased efficiency. In this study, model tests and numerical analysis were conducted to elucidate the mechanism of rock fracturing by splitters and to obtain the optional arrangement of splitting holes. The results indicate that the stroke (width of crack opening) of a splitter plays a vital role in rock fracturing. And during the initial stage of excavation, triangle layout of three splitting holes facilitates the tunnel excavation works even when there is little free surface. We fabricated a hydraulic splitter having the splitting force of 850ton and the stroke of 32mm for on-site tests. This newly developed splitter demonstrated the capability of high efficiency non-blasting excavation without using breakers for additional fracturing.

1. はじめに

硬岩地山にトンネルを無発破で掘削する工法として、TBM先進導坑や切羽に設けたスリットを自由面として割岩機で岩盤を破碎する方法が実績を有している。しかし、主に割岩機的能力不足のために大きな自由面が必要で、割岩密度をかなり密にし、ブレーカー等による2次破碎も行う必要があるため、施工能率は著しく低い。本研究では、割岩の模型試験とき裂進展に関する応力解析を行い、割岩機に必要とされる機能を明らかにするとともに、割岩のための破碎孔の最適配置について検討した。さらに、この検討結果に基づき、割岩力850ton、き裂開口ストローク32mmの大ストローク油圧割岩機を製作して、割岩機のトンネル掘削への適用性に関する現場試験を行い、より効率的な割岩工法を開発することとした。

2. 模型試験

多様な条件下での割岩特性を効率的に把握するために、小型の模型割岩機を用い、実際の硬岩地山に対し適切な模型縮尺となる砂質凝灰岩を対象に模型試験を行った。模型割岩機は、鋼製円柱を縦割にした間にフラットジャッキを挟んだ構造で、外径20mm、長さ110mmである。フラットジャッキは200kgf/cm²までの油圧に耐え、割岩力に換算すると1.5tonの最大荷重を破碎孔の一方向に負荷することができる。

模型と原型の相似則を考えると、模型割岩機の破碎孔が20mmであるので、原型の割岩機の破碎孔径を150mmとすれば、変位も含めた寸法比は1/7.5となる。原岩盤として比重2.5程度の硬岩を想定すると、試験を行った砂質凝灰岩の比重は1.5であったので、強度(応力)の縮尺は1/12.5となる。

(1) 割岩におけるき裂開口ストロークとき裂進展の関係

割岩機に必要とされる割岩力、き裂開口ストロークと岩盤に生じるき裂の長さの関係を明らかにするために、自由面からWの位置に破碎孔を設け、自由面と直交方向に載荷して、破碎孔から生じるき裂の長さ、破

破碎孔の载荷方向の径変化（ストローク）と割岩力を測定した。

破碎孔に载荷すると、き裂は、最初、割岩力に比例して延びるが、ある大きさ以上になると、単位長さのき裂進展に必要な割岩力の増分は次第に小さくて済むようになる。ところが、図-1に示すように、割岩力の増加と共にストロークが増加する割合は次第に大きくなり、一旦き裂が発生すると、割岩力をそれ程増加させなくとも、ストロークは急激に増加する。以上の結果より、長いき裂を進展させて起砕するためには、割岩力以上にストロークが重要になることがわかった。

(2) 円形導坑周りの割岩

岩盤床面に孔径150mm、200mm、400mmの3種の円孔を鉛直下向きに削孔し、これら導坑の周りに破碎孔を配置して、模型割岩機を用いて割岩した。

単一の破碎孔を用いた試験結果を、図-2に示す。破碎

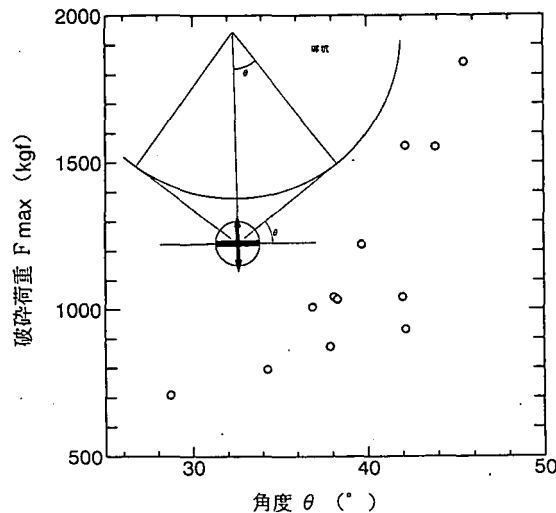


図-2 破碎荷重と角度θの関係（単一孔破碎）

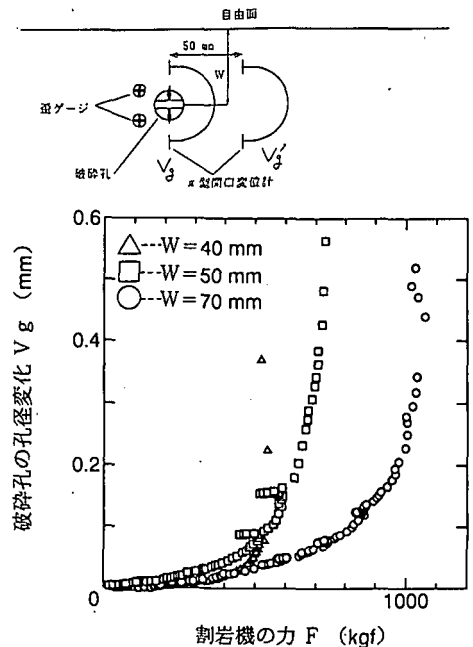


図-1 ストロークと割岩力の関係（単一孔破碎）

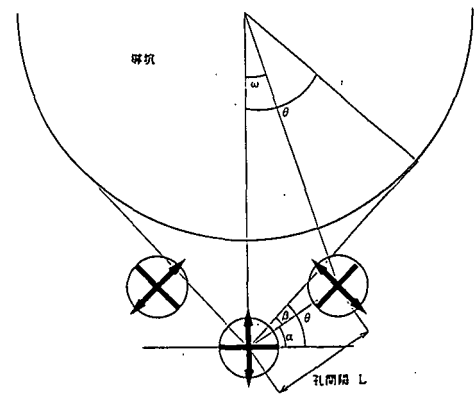


図-3 導坑と3破碎孔の三角形配置

孔と導坑の位置関係は、破碎孔から導坑壁に伸ばした接線と破碎孔における载荷方向に垂直な向きがなす角度θで整理した。なお、角度θと導坑の半径R、最小抵抗線Wの関係は、以下のとおりである。

$$\theta = \cos^{-1} \{R/(R+W)\}$$

破碎荷重は角度θの増加とともに大きくなる。これは、角度θとともに破碎孔から発生したき裂が導坑へ向かうためのき裂の屈折角度が大きくなり、より大きな割岩荷重（あるいはストローク）が必要になるためである。特に、角度θが40°を越えるあたりから破碎荷重が急激に大きくなり、最小抵抗線Wがある値を越えると、急に破碎しにくくなる状況がうかがえる。

次に、図-3に示すように、3本の破碎孔を三角形に配列し3孔同時に割岩した。両端の破碎孔の载荷方向は、中央の破碎孔から導坑壁に伸ばした接線に対し垂直に向けた。この場合には、き裂は容易に自由面

へと進展し、確実に起砕できた。3孔同時破碎と単一孔破碎を比べると、許容載荷力内で起砕できる最小抵抗線Wは、前者の方が1.5～1.9倍大きくとれ、以後の割岩を行う上でも都合のよい三角柱状の切欠きが形成される。

実施工においては、割岩機1台のみで割岩する状況も考えられる。そこで、1本の破碎孔に隣接して複数の空孔が存在する場合を試験した。空孔が存在する場合には、単一孔の破碎に比べて、角度 θ の平均値は10%ほど大きいにもかかわらず、き裂の発生に要する荷重は平均42%、破碎荷重は30%程度低減した。これは、破碎孔に隣接する空孔が自由面としての役割を果たし、破碎孔から発生するき裂が進展しやすくなるためと思われる。

(3) スリット周りの割岩

割岩によるトンネル掘削では、切羽に設けたスリットを自由面として利用することが多い。そこで、採石場の岩盤床面に、チェーンソーを用いて幅10mm、長さ130mm～340mm、深さ200mmのスリットを入れ、スリット中央近くに削孔した破碎孔を用いて模型試験を行った。

単一孔を用いた割岩試験では、最小抵抗線が同じ($W=40\text{mm}$)でスリット長 S が130mm、260mmと2倍違う場合、後者の方がき裂発生に要する荷重は60%程度、破碎荷重は44%程度低減し、起砕されたずり量は逆に数倍大きくなった。破碎孔とスリットの位置関係を表わす指標として、破碎孔からスリット端に伸ばした直線と載荷方向に垂直な方向とのなす角度 θ を用いると、図-4に示すように、角度 θ が大きくなると破碎荷重も増加する傾向が見られる。これは、 θ が大きくなると、き裂がスリットに到達するまでの折れ曲がりの角度が大きくなるので、き裂の進展が容易でなくなるためと思われる。一方、スリット長が長くなり相対的に θ が小さくなり過ぎても、破碎荷重は大きくなっている。この結果から、所与の最小抵抗線に対して最適のスリット長があると推測される。このことは、スリット長と起砕ずり量の関係においても認められる。すなわち、図-5に示すような破碎形状となり、スリット長が200mmのときのずり量は、スリット長が140mm、290mmのときと比べて4倍近い。

3. き裂進展の応力解析

模型割岩試験の結果を線形破壊力学に基づき解釈するために、西谷によって提案されている体積力法に基づくき裂進展の2次元弾性応力解析を実施した。き裂は応力拡大係数 K_I 、 K_{II} が、

$$(K_I/K_c)^2 + (K_{II}/K_c)^2 = 1$$

ここに、 K_c ：破碎靱性値

を満たすとき進展すると仮定した。

(1) 導坑周りのき裂の挙動

導坑周りの単一孔破碎では、最小抵抗線が小さいと、き裂は、図-6に示すように、始めは荷重の増加とともに K_I が増し、導坑壁にはほぼ平行に円周方向に進展する。次に、き裂がある長さに達すると、 K_I の急

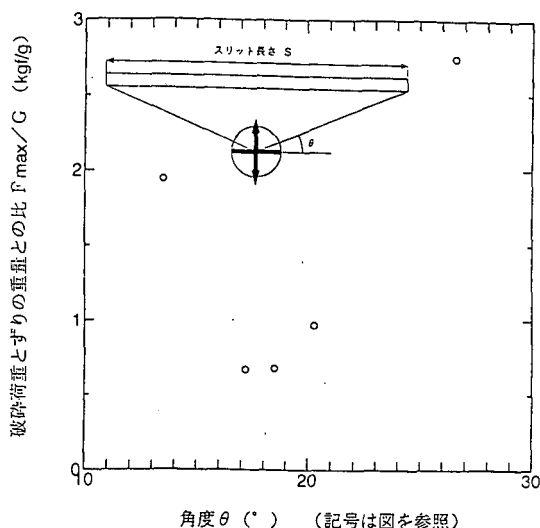


図-4 破碎荷重と角度 θ の関係（単一孔破碎）

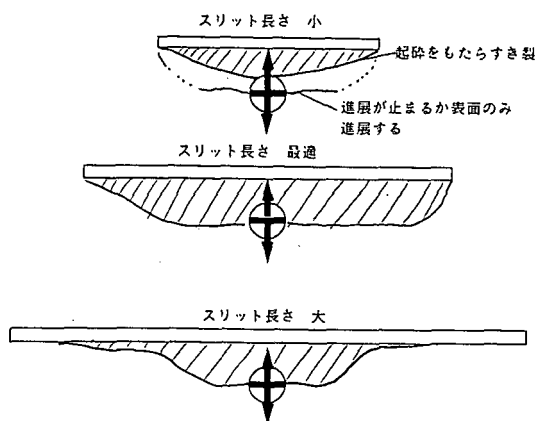


図-5 き裂進展に及ぼすスリット長の影響

減とK IIの急増が起こり、急激に屈折して面内せん断型のき裂として導坑壁に達する。き裂進展に必要な荷重はき裂が屈折するまでは減少し、すなわち、き裂は不安定に成長し、屈折した後は荷重の急増とともにき裂が伸びるという安定な成長に転じており、起砕時に荷重は最大になる。

最小抵抗線が大きいと、き裂は始め導坑壁にほぼ平行に進展するが、その後導坑から次第に離れる向きに進展して、導坑壁には達しない。

(2) スリット周りのき裂の挙動

スリット周りの単一孔破碎の数値解析結果では、スリット長に対して最小抵抗線が適当な大きさの場合には、き裂はスリット端までは伸びず、途中で急激に折れ曲がってスリットに達する。これに対し、最小抵抗線が大きい場合、き裂はスリット端を一度こえてから迂回してそこに達し、実際には起砕が生じにくくなることが予測された。

以上の解析結果は、模型試験の結果と一致していると言える。

4. 油圧割岩機の概要

割岩機に要求される機能としては、充分な割岩力を有することは言うをまたないが、模型試験の結果、明らかになったように、長いき裂を進展させて岩盤を破碎するためには、割岩力以上にストローク（破碎孔の径変化すなわちき裂開口幅）が必要とされる。そこで割岩力を低下させることなく、従来の割岩機よりもできるだけストロークを大きくするよう工夫をした機種を新たに開発した。開発に当たっての原型機は、油圧ゴムチューブを用いた割岩機で、油圧ゴムチューブに最大1250kgf/cm²の油圧をかけ、60cm長の鋼製加圧板で破碎孔に850tonの割岩力を与える。油圧ゴムチューブを用いる方式は、割岩力を充分大きくできるが、通常、ストロークを大きくすると、チューブが破損しやすくなる。この欠点を除くために、図-7のように、2段階で割岩し、1段階当り16mmのストロークで合計32mmまで押し上げられる機構とした。これによって、850tonの割岩力と本体の耐久性を保持しながら、ストロークを大きくすることに成功した。

5. 現場試験

模型試験や解析で得られたトンネル掘削のための自由面と破碎孔の最適配置に関する知見と、開発した油圧割岩機の性能を実規模で確認するために、硬岩地山を対象に割岩の現場試験を実施した。試験場所は、硬質な凝灰岩質岩の採石場のベンチ高10mの壁面で、できるだけ割れ目の少ない一枚岩の部分を選定した。1000kgf/cm²を越える一軸圧縮強度を有する岩自体は硬質で、小さな割れ目が20～30cm間隔で分布していた。

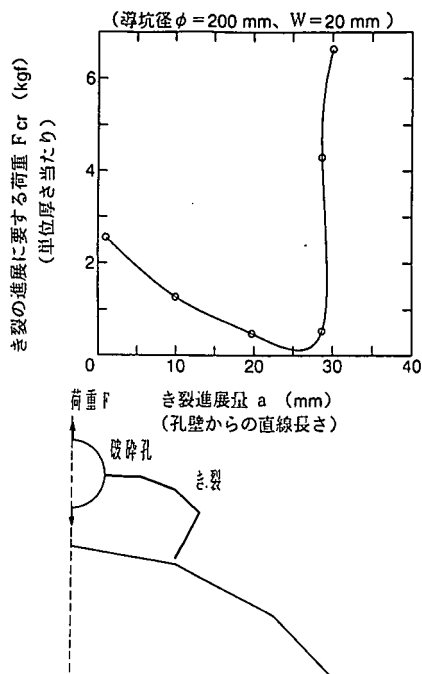


図-6 導坑周りのき裂挙動解析結果

導坑近傍の円孔から出た両側き裂に関して、(a)き裂の進展に必要な荷重と(1)き裂進展量の関係、(b)き裂の進展経路。φ=200 mm W=20 mm

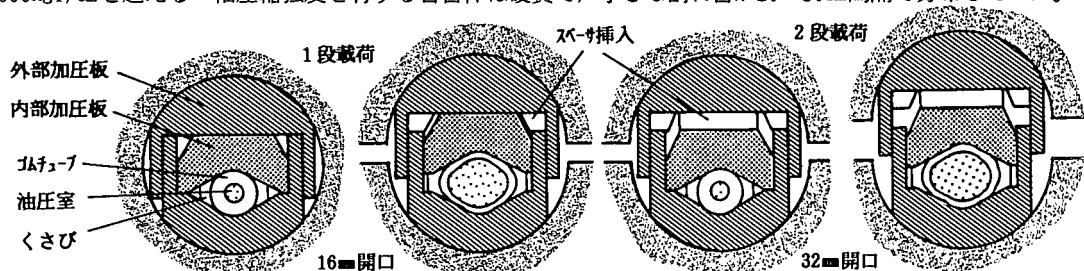


図-7 大ストローク割岩機の割岩機構

岩盤壁面をトンネルの切羽と見なし、ここに、直径2 m、深さ1.4 mの導坑と、幅10cm、長さ2 m、深さ1.8 mのスリットをスリットドリリングで設け、これを自由面として割岩試験を行った。油圧割岩機は、試験機を1台製作しただけであったので、複数孔の割岩では、1孔ずつ順次载荷した。

(1) 導坑周りの割岩

導坑周りの割岩では、まず、模型試験で、導坑切り抜け端に最も効率的な破碎のできた破碎孔の三角形配列を試験した。中央孔の最小抵抗線は60cm、孔間隔も60cmである(写真-1)。油圧割岩機の有効载荷長は60cmであるが、1回の割岩で1.0～1.3 m奥まで破碎できた。続いて、この破碎跡も自由面の一部と考え、これと導坑の周りに最小抵抗線50～60cm、孔間隔60～80cmで二重の破碎孔を配置し、三角形の切欠き部の近くから順次割岩した。最小抵抗線60cm、孔間隔80cmでも、最大割岩力の約70%程度で破碎できており、十分な割岩力を有すると言える(写真-2)。また、割岩後は、すべて0.3 m³級バックホウでずり落しが可能であったことから、起砕状況は満足できるものであり、大ストロークの有効性が確認できた。

(2) スリット周りの割岩

2 m長のスリット中央部分で、最小抵抗線60cmで単一孔割岩を行ったところ、既存の割れ目が存在したため、模型試験と同様の破碎形態にならなかったものの、余裕をもって破碎することができた(写真-3)。ところが、スリット端から50cmの位置では、最小抵抗線を30cmにしてもき裂が発生しただけで起砕には至らなかった。やはり、短いスリットでは割岩は困難になるようである。最小抵抗線60cm程度の場合、スリット長は約1.5 mが適当と推定された。

以上の試験結果は、導坑周り、スリット周りのいずれの場合も、模型試験の予想を越える破碎能力を示している。模型試験で予測された値よりも現場試験で割岩可能な最小抵抗線は大きく、割岩力には余裕があった。原位置岩盤には、ある程度割れ目が存在するため、このような結果になったことも考えられるが、いずれにせよ、本油圧割岩機を用いたトンネル掘削のための岩盤破碎は十分実用的な段階にあると言える。

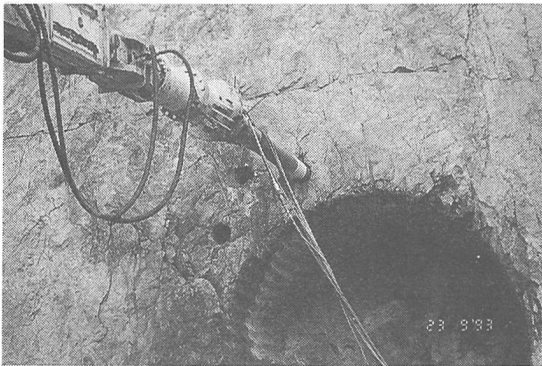


写真-1 導坑周りの3孔破碎

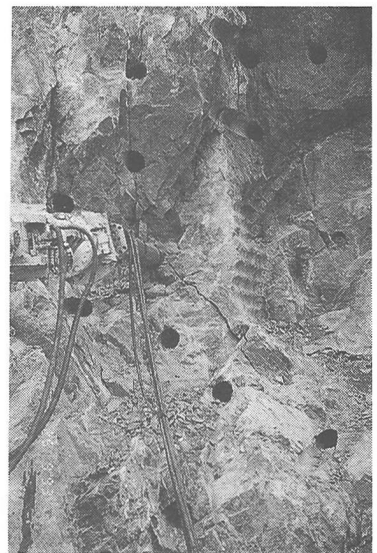


写真-2 導坑周りの割岩状況

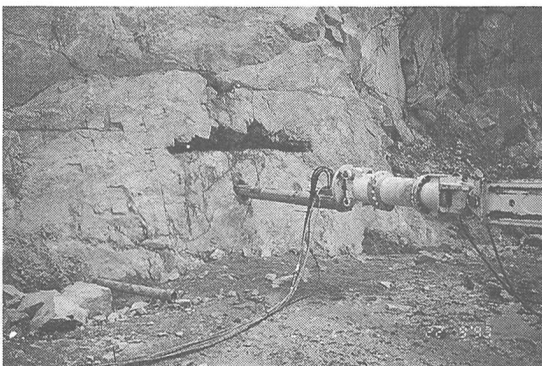


写真-3 スリット周りの単一孔割岩