

巨石・岩盤層の掘削機構の解明および技術的課題

島田, 英樹

九州大学大学院工学研究院地球資源システム工学部門 : 教授

笹岡, 孝司

九州大学大学院工学研究院地球資源システム工学部門 : 准教授

<https://hdl.handle.net/2324/6767920>

出版情報 : 月刊推進技術. 35 (12), pp.4-10, 2021-12. LSプランニング
バージョン :
権利関係 :



巨石・岩盤層の掘削機構の解明および技術的課題

島田英樹（しまだひでき）

九州大学大学院工学研究院地球資源システム工学部門 教授

笹岡孝司（ささおかたかし）

九州大学大学院工学研究院地球資源システム工学部門 准教授

1. はじめに

推進工法は、「推進管の先端に先導体を取り付け、発進立坑内に推進力の反力受けを設置し、ジャッキの推進力により推進管を地中に圧入して、刃口部で土砂の掘削・搬出を行いながら、順次推進管を継ぎ足して管渠を敷設する工法等」と定義されている¹⁾。推進工法は、内径 $\phi 150\text{mm} \sim 700\text{mm}$ の小口径推進工法と人間が入ることができる $\phi 800\text{mm} \sim 3,000\text{mm}$ の中大口径推進工法に分類されている。推進工法の先導体は、自らの推進装置を持たず、発進立坑で推進管を継ぎ足してジャッキにより管を押すことで掘進力を得て進行し、地山掘削は人力あるいは動力（掘削機）で行われる。

推進工法の歴史は、1896年のアメリカ北太平洋鉄道軌道下の排水管横断工事に始まり、これ以後の既設鉄道下の横断鑄鉄管を押し込む工事に採用された²⁾。欧州においては、第二次世界大戦後、1950年代に推進工法の技術は多くの国で用いられ、その中でもイギリス、ドイツ等で積極的に採用された。

我が国では、1948年の国鉄福知山線の軌道横断工事（ガス管のさや管として $\phi 600$ を $L=6.0\text{m}$ ）に初めて手掘り式（刃口式）推進工法が採用され、この後、中押し工法（1953年）、動力式ジャッキ装置（1959年）の実用化、続いてホリゾンタルオーガ（1963年）の導入、フロントジャッキング工法およびセミシールド工法（1965年）の開発等の技術革新が成されてきた¹⁾。また、シールド工法において、1961年にフランスで泥水式が考案され、1972年に日本で土圧式が開発されると、このシールド工法の技術が推進工法に転用され、1981年には泥水加圧推進工法の開発と施工開始に始まり、1986年には曲線施工能力を飛躍的に向上させた高濃度泥水加圧推進工法が開発された。現在では元押しのみで $1,000\text{m}$ 、曲線半径 10m の施工も可能となっている。一般に、地下構造物の有効径 3m 程度以下で施工距離 500m 程度までにおいては、シールド工法に比べて安価な場合が多いため、現在では地下構造物の敷設施工法としての地位をほぼ確立している³⁾。

これまで、推進工法は都市部やその周辺地域での沖積層を中心に適用されてきた。しかしながら近年、地方都市や山間部に向けてのインフラ整備が増加し、地山条件が従来の沖積層から複合地盤や岩盤層、玉石・砂礫層へ移行し、厳しい施工環境での適用性拡大が求められている⁴⁾。そのため、推進工法において効果的な破碎機構を有した掘進機の開発が必要とされている。現在、巨石・岩盤層等の地盤では面盤タイプの破碎型掘進機が主流であるが、長

距離での複合地山や急曲線を含む推進施工では、スリット閉塞による前面抵抗の増大、全面破碎に対応したビット寿命の予測手法が未確立等、未だ多くの技術的課題を残している。さらに、推進工法の長距離化および施工コスト削減の実現には、このような地山におけるビット寿命の予測手法およびその向上が必要不可欠である。しかしながら、これら施工のほとんどが未だ現場経験に頼った施工管理が行われており、工学的な検証や実態の把握がまだ不十分であると考えられる。

そこで、本論説では、巨石および岩盤掘進に関する現状および検討すべき技術的課題について論じることを目的とする。

2. 巨石・岩盤の掘削機構

2.1 破碎型掘進機による破碎機構

一般的な岩盤・巨礫層での破碎機構は大別すると以下のとおりである。

①押付け力による破碎

ローラービット等を岩層や玉石に押し付けることで破碎

②楔効果による破碎

岩層や玉石にディスクを押し付けることで、くさび効果により破碎

③表面剥離や小破碎チップングの繰返し工程による破碎

岩相や玉石の表面を小規模に破碎しながら、き裂を発生・進展させる破碎

④玉石・岩片の衝突破碎

カッターの回転による切羽全面での破碎片や玉石の衝突を期待した破碎

⑤カッター回転の衝撃力による破碎

カッターの回転力により、衝撃力が発生することで破碎

このような背景から、巨礫等の破碎はせん断力と衝撃効果を併せた破碎と考えられる。

次に、巨礫の破碎機構の概念図を図－1に示す。この図に示す通り、礫や岩の破碎は①表面破碎から始まり、剥離は弱部を中心に斜面すべり状に破碎が進行する。②V字割裂が進行して破碎に至る。③カッター回転による衝撃力や破碎片同士の衝突破碎が発生して大割される。これらの破碎機構は、これまでの長い経験を有するシールド工法やTBMの施工実績から明らかとなっている。

2.2 ローラービットによる巨礫破碎

プロトジャコノフの実験による礫の断面積と圧縮荷重の関係やコマツが1977年、1983年の2回実施した礫破碎実験の比較グラフ⁵⁾を図－2に示す。この図に示すとおり、コマツの関係式からはプロトジャコノフの実験式にみられるような礫の破碎断面の増加と破碎荷重の比例関係とはならないことが分かる。この実験結果から、破碎断面が5倍となったときに必要な破碎荷重は2倍程度となっており、小さな圧碎力で破碎されることが分かっている。また、ローラービットの礫破碎時の転動抵抗力（水平力）は垂直荷重の30%を示しており、押付け力よりかなり低い荷重で破碎に至ることが明らかとなっている⁶⁾（図－3参

照)。次に、点荷重と一軸圧縮強度の関係について実験式を図－4に示す。この図に示すとおり、円柱状の岩石試料に対し、直角方向に 60° の挟み角と接触先端部を5mmの曲率半径の最荷球で載荷した場合、試料に対して効果的に引張応力が発生して比較的低い荷重で破断されとの見解が示されている。この実験結果から効果的な破碎を行った場合、岩は一般の一軸圧縮強度に比べ非常に小さい荷重で破碎に至ることが確認されている。

さらにビット先端の挟み角に着目すると、図－5に示すとおり、 100° の挟み角より 70° と鋭角な挟み角の方の切込深さが大きいことが分かる⁷⁾。以上のことから、ローラービットにおいては、 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ の挟み角を有したビット先端が効果的であることが分かる。

3. 巨石・岩盤掘削における破碎型掘進機の機構

前章では、破碎に適したビット先端形状について論じたが、そのビットを取り付けた破碎型掘進機に関する知見について事前に掌握する必要がある。そこで、本章では巨石・岩盤掘進に用いられる破壊型掘進機の機構について言及する。巨石・岩盤掘進に用いられ破碎型の掘進機の機構は、大別して3つに分類される。破碎型掘進機の一例として、図－6～図－8に超流バランス式のそれぞれの破碎型掘進機を示す⁸⁾。

(1) 面盤フェイス型

基本的に岩盤層単体の地盤や巨礫層の場合に用いる。

ビット突出率が30%程度と小さいため破碎効率よりもカッタービットの保護と切羽の安定を重視した構造である。

(2) 多軸コーン型（自転・公転式）

複数の内周コーンビットと最外周のシェルビットが自転・公転し、巨石をすり鉢状のカッター室内に取り込み、衝撃破碎により掘進を行う構造である。この機構による岩盤層での掘進効率の向上が図られる。

(3) ビット単体型

中硬岩から巨石岩盤に用いる。面盤フェイス型とは逆にカッタービット全体が剥き出しとなっているため、ビット磨耗は面盤フェイス型より顕著であるが破碎効率が良く掘進速度も速い。また、開口率が大きく、巨石・岩盤層や複合地盤に対しても有効な構造で途の粘性土の付着も少ない。

以上のような構造の破碎型掘進機を現在開発している。特に日本の地層においては、粘土、玉石、岩盤等が複層した地盤で構成されていることが多く、掘進機の選定も一様とはならないため、掘進機構造やカッターフェイスのみならずビット配置、チップ形状を含めた総合的な検討が重要であると考えられる。

一般的に巨石・岩盤層においては、面盤フェイスの掘進機を用いることが多いが、ビット突出率および面盤開口率が小さいために十分な掘進速度を確保することが困難であると言われている。特に、長距離破碎型推進に見られる複合地盤への掘進の際には、微粒子分の付着や開口部の閉塞現象により施工が困難となるケースが多い。したがって、より破碎効率を

高めたローラービット単体型の掘進機が適していると判断した。図-9 に破碎型掘進機を示す。この写真に示すとおり、一般的な面盤フェイス型とは異なり、それぞれのビット突出率および開口率を大きくした構造となっている。このため、巨石・岩盤層や複合地盤に対しても効率の良い掘削と攪拌・混合が可能な形状となっている。破碎型掘進の場合、初期段階のテールボイドの形成も重要となってくるため、①掘削、②破碎、③テールボイド形成の過程をリアルタイムに行うことができるビット機構を具備する必要がある。また、巨石・岩盤掘削の場合、掘削破砕片がテールボイドに残存し、推進管の破損を招く恐れがある。このような現象を抑止するためには、①掘削初期段階でのテールボイドの構築、②その掘削余掘部のテールボイド材および固結型滑材の即時注入、が必要不可欠である。特に日本の地層においては、粘土、巨石、岩盤等が複層した地盤で構成されていることが多く、掘進機の設定も同様とはならないため、掘進機構造やカッターフェイスのみならずビット配置、チップ形状を含めた総合的な検討が重要であると考えられる。

4. 巨石・岩盤掘削におけるビットの摩耗機構

推進工法による施工を行う際、その施工計画策定にはビットの摩耗量予測が必要不可欠である。摩耗量予測は各社により異なっているが、一般的に以下の式が用いられている⁹⁾。

$$\delta = \frac{K \times \pi \times D \times N \times L_a}{V} \cdot \cdot \cdot \cdot (1)$$

ここで、 δ ：摩耗量(mm)、K：摩耗係数(mm/km)、D：切羽外径(m)、N：カッター回転速度(rpm)、 L_a ：掘進距離(km)、V：掘進速度(m/min)、 D_r ：摺動距離(km)である。

ここで、カッターの回転に伴いビットが掘削面を移動する距離(以下、摺動距離)を L_r ：摺動距離(km)とすると、以下の(2)式により表される。

$$L_r = \frac{\pi \times D \times N \times L_a}{V} \cdot \cdot \cdot \cdot (2)$$

(1) 式、(2)式より、ビットの摩耗量は、

$$\delta = K \times L_r \cdot \cdot \cdot \cdot (3)$$

これにより、ビットの摩耗量はビットの摺動距離に比例し、その比例定数は K(摩耗係数)で表される。つまり、ビット摺動距離とビットの摩耗量との比によって、ビット摩耗係数は算出することができる。しかし、K(摩耗係数)は、掘削対象地盤の地質状況や、掘進機の形式などの施工条件によって異なり、ほとんどの現場で、施工実績に基づいた経験的な求め方や、

ビットメーカーが提示している値を使っているのが現状である。しかしながら、ビットの摩耗係数を非常に大まかな地山区分により分類しているため、特異な地山条件を反映しにくく、これが想定外の摩耗の一要因となっている。このため、詳細な地山条件に基づいた定量的なビット摩耗量の予測手法の確立が求められている。

ビットの摩耗機構は掘進対象地山によって異なる。岩盤層であれば岩石の摩耗能（接触させる相手を摩耗させる程度）に従ってビットが摩耗することが予想され、岩石の摩耗能について定量的評価が可能とされる従来の試験方法として、Cerchar 摩耗試験¹⁰⁾や Schimazek 摩耗試験¹¹⁾が挙げられる。Cerchar 摩耗試験は、適用岩石が限定されずあらゆる岩石の摩耗性を簡便に評価する方法として、フランスの石炭公社の中央研究所 Cerchar で提案された方法であり、図-10 に示すように試験用ビットに一定の荷重を作用させて供試岩石をひっかき、その際の試験用ビットの摩耗量（幅）を指標として CAI（Cerchar Abrasivity Index）を導くものである。

$$\text{CAI（Cerchar 摩耗性指数）} \quad CAI = d \times 10 \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで、 d ：試験用ビットの摩耗した平面幅（mm）である。

これに対し、Schimazek 摩耗試験は、岩石の強度や鉱物組成（石英含有）に基づく硬度を考慮できる評価方法とされており、次式に示す摩耗係数 F を指標とする。

$$\text{Schimazek 摩耗係数} \quad F = Q \times D \times S_t \quad \cdots \cdots (5)$$

ここで、 Q ：岩石中の石英体積含有率（ $0 \leq Q \leq 1$ ）、 D ：岩石中の石英粒子の平均粒径（mm）、 S_t ：岩石の引張強度（MPa）である。

一方、礫層では、土層と礫の結合体で構成されていることから、ビット摩耗の際には複数の要因が絡み合い摩耗機構が複雑となるため、施工前のビット摩耗の定量的評価指標は未だ確立されていない。そこで、筆者らはこれまでの研究において、各種室内試験や現場実測データをもとに礫層におけるビットの摩耗特性や摩耗予測・評価に関する検討を行ってきた。まず、礫層におけるビットの摩耗量を定量的に予測するための基礎的な知見を得るために、セメントに礫を混合して作製した礫層の模擬供試体を用いて、一軸圧縮試験、Cerchar 摩耗試験、Schimazek 摩耗試験、実際のビットの摩耗状態を模した旋盤摩耗試験（図-11 参照）を実施し、礫層の特性がビットの摩耗に及ぼす影響について種々検討した¹²⁾。その結果、礫層ではビットの摩耗特性が礫の摩耗能および礫の含有率に依存し、礫の含有率が大きいほど、また礫の摩耗能が大きいほど、ビットの摩耗量が増大することが明らかになった。一方、礫率が小さい場合には、土層に含まれる石英含有率の影響が顕著となり、土層の石英

含有率の増大に伴い、ビット摩耗量も増大することも明らかとなった。一連の実験および検討結果から、礫層ではビットの摩耗は礫が有する摩耗能に依存し、その摩耗特性は礫の強度と硬度の両方を考慮する Schimazek 摩耗係数と相関性が高いことが明らかとなっており、礫の Schimazek 摩耗係数からビットの摩耗量を予測できると考えられる。

今後、礫層におけるビットの摩耗量をよりの確に予測するためには、様々な地山条件での実施工データを蓄積していき、礫率や強度の相違、ビットの押付け力や回転速度等によるビットの摩耗特性への影響についてさらなる検討を進める必要がある。

5. 巨石・岩盤掘進における技術的課題

今後推進工法が適用される用途としては、昨今の雨水災害に伴う浸水防止対策のための地下調整池や貯留管の築造が急務であり、推進工法のみならずシールド工法に推進工法を併せた併行工法なども拡大していくものと考えられる。一方、下水道普及率が 80% 近くまで到達しており、他のライフライン整備に伴う管路の構築においても再構築や改築を除き新規施工は減少しており、推進工法の従来からの管理設工法への適用は減少傾向にあると考えられる。

このような現状を打破する推進工法の新たな適用対象としては、①山岳 NATM 工法における地山変状抑止のための先受け対策工、②シールド管渠内からの分割組立型セグメント推進工。③ボックス推進機を活用した地下空間の構築ならびに水平土留壁の築造等が挙げられる。しかし、このような現場では岩盤・礫対象として現場が多く認められているため、前述のような課題を克服する必要があると考えられる。

割れ目の少ない一様な岩盤層であれば、ビット寿命に関する問題を克服できればシールド掘進機を模したカッター形状および押付け力により推進が可能であると考えられるが、強度の大きな玉石混じりの礫層のような場合、先述のようにビットの摩耗機構が複雑になりその予測が困難となるとともに、岩盤中に軟弱な地山と礫が混合していることから、掘進の制御が極めて困難であると思われる。したがって、実施工を基にこれら技術的課題を克服し、岩盤・巨礫に地山における推進技術が確立することを期待する。

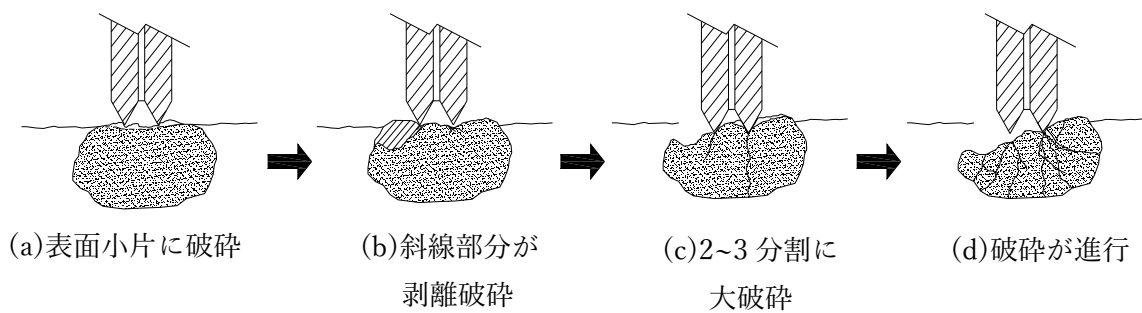
近年、東アジア・東南アジア地域の経済発展に伴い、これらの地域ではインフラ整備が積極的に行われており、これまでわが国が蓄積した技術がこれらの地域に流出している。わが国においても、これまで模倣から始まった技術が世界に発信するまでの技術力を培ってきた。今後これらの地域が当然、わが国同様、模倣から始まった技術が長年実績を積み重ねれば、それは模倣ではなく当該国の技術になると確信される。経済規模が今後大幅に減少の一途を辿ると推測されているわが国から見れば、巨大な経済大国に対するコンセンサスを維持するためには、今後、推進工法の核心的技術の保護をはじめ、わが国の地質的特徴から大きく発展してきた巨石・バンバン掘進技術の更なる発展促進が今後の活路として切り開かれると強く信じている。

謝辞

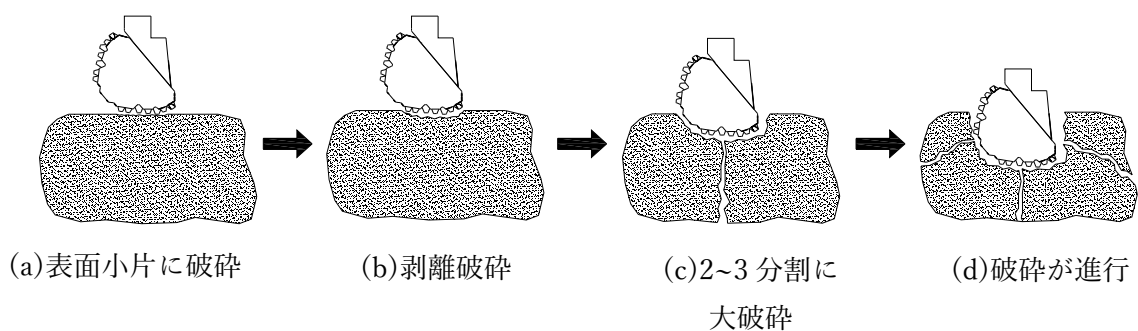
本総論を執筆するにあたり、現場の状況に関するご教示をいただいた(株)アルファシビルエンジニアリング・松元文彦氏、森田智博士ならびに(株)イセキ開発工機・佐藤徹博士、日本下水道推進技術協会審査部長・千田 尚博士には多大なるご助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 竹林亜夫・志田亘：ブルネルのシールド/ニューコンストラクションシリーズ第9巻「地下空間を拓く」，山海堂，1994
- 2) 石橋信利・田中壬子也：推進工法の実際，鹿島出版会，1992
- 3) Katano, S. and Ogawa, T：Proc. of Int. Congress on Tunneling Ground Conditions, pp.151-156, 1994
- 4) Matsumoto, F., et al.：No-Dig 2018, Paper No. 79, 2018
- 5) 勝沼清：第17回「特殊な条件下を掘る」，pp.1-2, 日本プロジェクトリサーチ，1993
- 6) 鈴木光：岩盤の計測と解析 pp.33-36, 土木工学社 1982
- 7) 推進工法用設計積算要領「泥濃式推進工法編」226pp. (社)日本下水道管渠推進技術協会 2006
- 8) 松元他：第31回「最近の推進工法に見る厳しさへの対応」，pp.28-39, 日本プロジェクトリサーチ，2007
- 9) 山元他：土木学会学術講演会，2016
- 10) Michael Alber et al:47nd Rock Mech Rock Eng, pp.61-266, 2014
- 11) Schimazek et al.:Gluckauf, Vol.106, pp.5-278, 1970
- 12) Sasaoka, T., et al.: Proc. of Asian Rock Mechanics Symposium, 2018

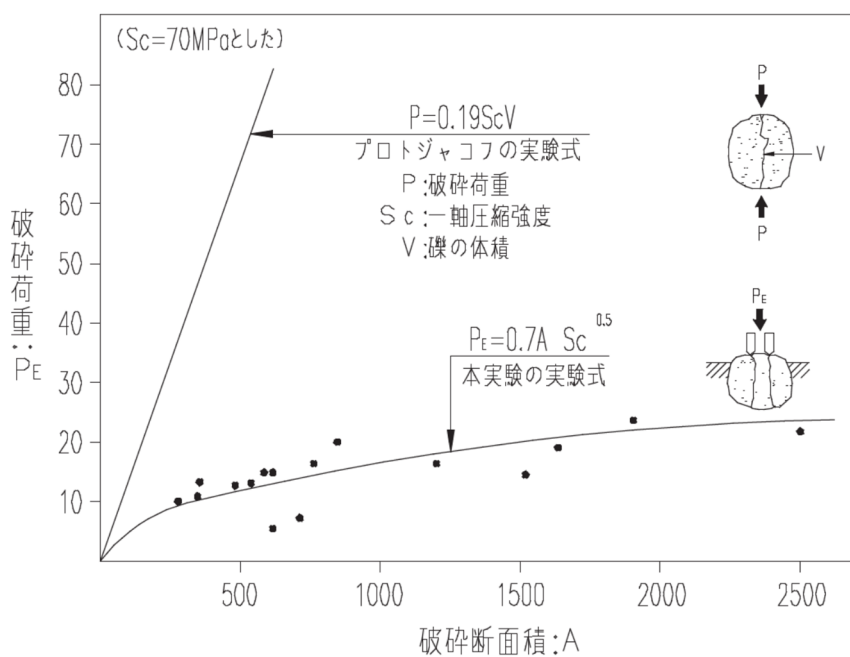


① ディスクカッターによる破碎進行過程

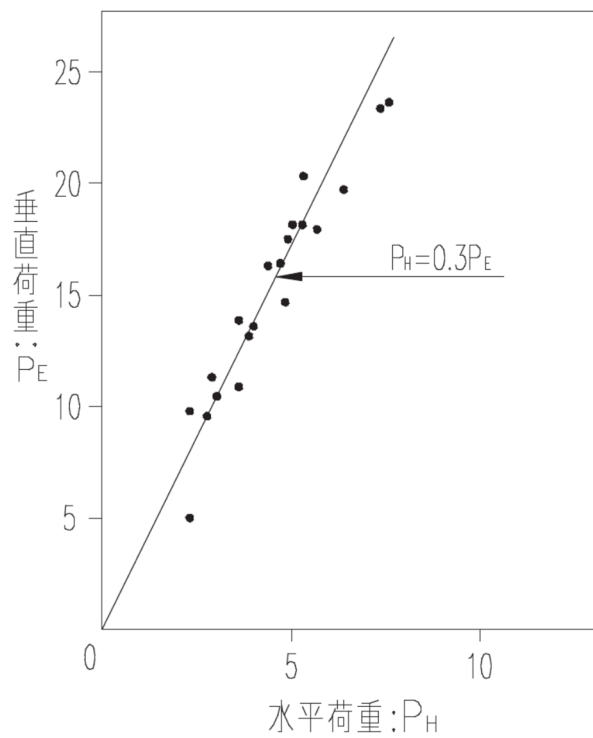


② ローラービットによる破碎進行過程

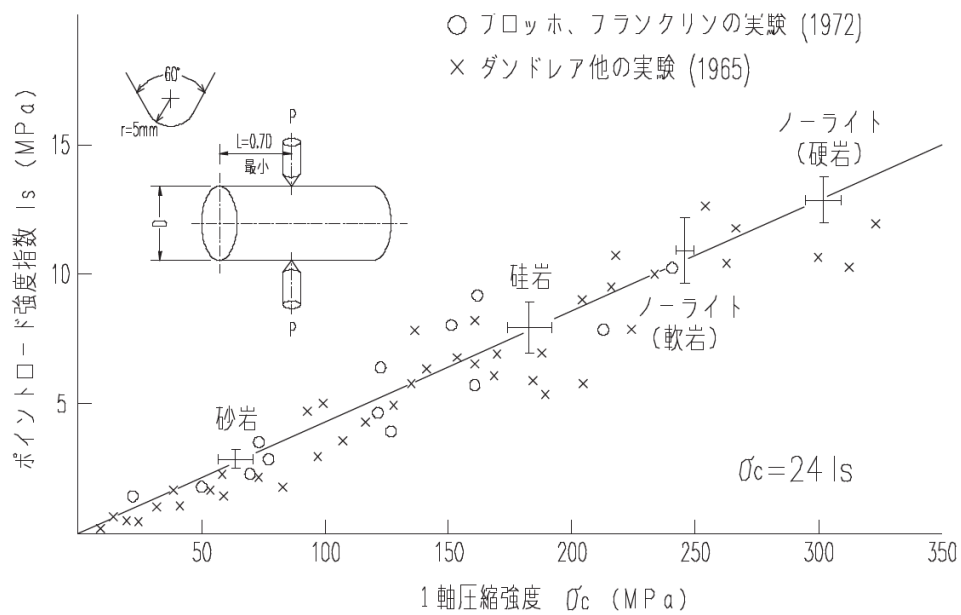
図－1 巨礫の破碎進行過程概念図



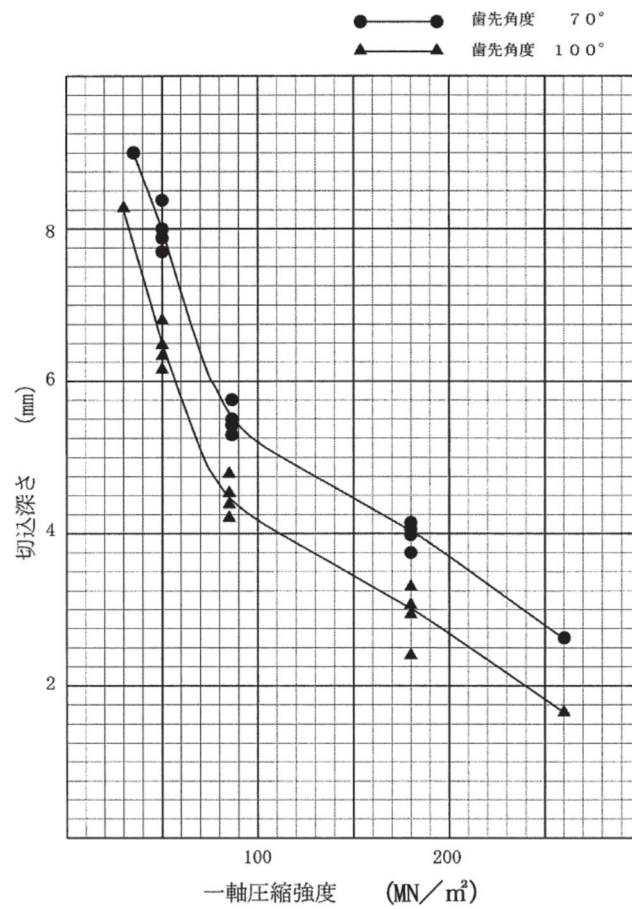
図－2 礫断面と圧縮荷重の関係



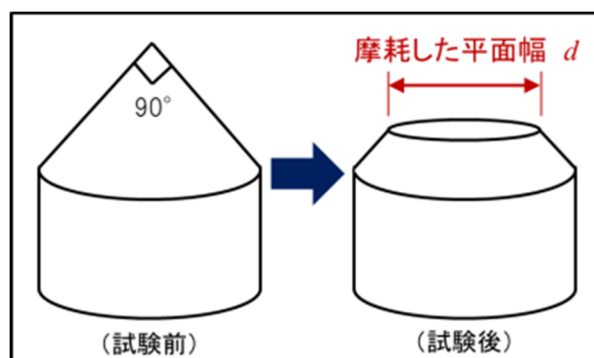
図一3 転動抵抗力（垂直・水平力）の関係



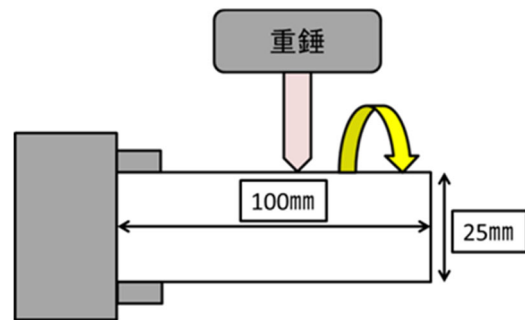
図一4 点载荷指数と一軸圧縮強度の関係³⁾



図一5 一軸圧縮強度と切込深さの関係⁴⁾



図一10 Cerchar 摩耗試験の概要



図一11 旋盤摩耗試験の概要