

(17) 亀裂岩盤に対する機械化掘削性能の向上

京都大学工学部 正 員 島昭治郎
愛媛大学工学部 正 員 室 達朗
京都大学工学部 正 員 ○深川良一

1. まえがき 層理や節理の発達した亀裂岩盤をリッパ工法により機械化掘削する場合、掘削の方向を変える
と掘削性能がかなり変動することが知られている¹⁾。省エネルギー対策上、単位掘削力当たりの掘削量を最大限
に維持するため掘削の方向を定めることは掘削性能の向上に大いに役立つのである。従来のリッパビリティを
判定する手段である岩盤の種類、縦波伝播速度や岩塊に対する縦波伝播速度の振幅減衰量²⁾からだけでは、岩盤
層理の走向、傾斜の方向や岩盤の力学的異方性を検知することは不可能である³⁾。ここでは、層理面の走向、傾斜が明確であり層理間の節
理の発達が比較的少ない岩盤において、孔内载荷試験によって岩盤の
力学的異方性を調査するとともに、50トン級ブルドーザを用いてリ
ッピング作業中の掘削力測定を行い、掘削性能を最大限に発揮しうる
掘削の方向を求めることとした。

2. 岩盤特性 リッピング作業試験を行った岩盤は石灰岩で構成さ
れており、層理面の走向と傾斜をクリノメータを用いて数十ヶ所測定
した結果、走向は $N(76.8 \pm 18.6)$ 度Eで傾斜は (64.6 ± 17.0) 度N
であった。写真1は、この現場の走向、傾斜を示しており、層理間隔
は数mであり、層理間の節理はあまり発達していない。現地で実測し
た縦波伝播速度および現場より採取した岩塊について行った室内岩石
試験結果を表1に示した。亀裂係数の平均値は0.905と比較的亀裂の
少ない岩盤であることを意味している。さらに、岩盤の亀裂の発達状
況を詳細に把握するため、走向と各45度の方向を成す4方向におい
て縦波(P波)および横波(S波)弾性波伝播速度を計測した。図1
は、この現場における縦波伝播速度分布を示したものである。走向方
向に最も大きな値を示しており、層理面間の節理に比較して層理によ
る亀裂がより卓越していることがわかる。

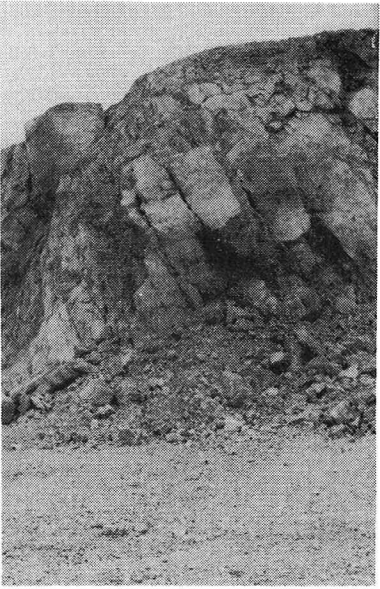


写真1 リッピング作業現場の走向と傾斜

表1 岩石試験結果

岩	石	名	石 灰 岩
み	か	け	比 重
真		比	重
自	然	含	水 比 (%)
吸		水	率 (%)
シ	ヨ	ア	硬 さ
超	音	波	伝 播 速 度 (m/sec)
弾	性	波	伝 播 速 度 (m/sec)
亀	裂	係	数 C_r
ロ	サ	ン	ゼ
ル	ス	ス	リ
リ	ヘ	リ	減 量 (%)
弾	性	係	数 (kgf/cm ²)
ポ	ア	ソ	ン
比			
一	軸	圧	縮 強 度 (kgf/cm ²)
圧	裂	引	張 強 度 (kgf/cm ²)

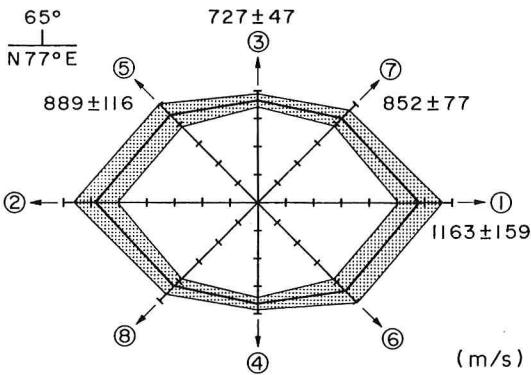


図1 縦波弾性波伝播速度分布図

次に、岩盤に削孔したボーリング孔壁を利用して2種類の孔内载荷試験を行った。まず、岩盤の平均変形係数 E_d を求めるため、岩盤表面より85mmφビットを使用して深さ約2m削孔し、その中に直径60mmのゴムチューブに水圧で载荷するエラストメータを挿入し、加圧力と変形量との関係⁴⁾を計測した。なお、ゴムチューブの有効長は520mmであり、ゾンドの中心位置を約55cmに維持して、最大100 kgf/cm²の加圧を行った。試験の結果、当該岩盤の変形係数 E_d は $1839 \pm 1366 \text{ kgf/cm}^2$ とかなり小さく、かつ大きな分散値を示した。その後、直径100 mmのボーリング孔を数本深さ約1.5mの位置まで穿孔、図2に示すポアホール载荷試験機を種々の方向に挿入して岩盤の力学的異方性を調べた。この試験機⁵⁾は、直径20mmの円筒形ピストンを水平方向にボーリング孔壁に貫入させるもので、弾性領域内で単位貫入量当りの貫入力である貫入係数 $K (\text{kgf/mm})$ を測定することができる。図2は円筒形ピストンの载荷方向を岩盤の走向方向に対して各々45度をなす計8通りとし、貫入力と貫入量の関係を示したものである。その結果、走向方向①、②の貫入係数が最大値を示し、走向と直角方向で順目となる方向④の貫入係数が最も小さくなることが判明した。なお、载荷深さは実際のリッピング深さを考慮して、約80cmとした。

表2は、走向と各45度を成す8方向①～⑧に測定したP波とS波から算定した動弾性係数 E_{dyn} とポアソン比 ν 、および亀裂係数 C_r であり、さらに前述したポアホール载荷試験から得られた貫入係数 K の値を示したものである。なお、平均動弾性係数の1/8は $2475 \pm 1003 \text{ kgf/cm}^2$ となり、Stacy⁶⁾が指摘しているように、前述したエラストメータから求めた変形係数と良く対応している。

以上、岩盤の力学的異方性は明らかに存在しており、層理面の走向方向とその直角方向とはかなり異なった力学性状を示すことがわかる。

3. 掘削力測定 層理方向と各45度を成す8方向①～⑧を掘削方向とし、50トン級ブルドーザを使用してリッピング作業時のリッパチップに作用する掘削力を測定した。計測方法は、写真2に示すようにリッパシャンク取り付け部に4枚のストレインゲージを張付け、掘削中の発生ひずみ量より軸圧縮力と曲げモーメントを求めリッパチップに作用した鉛直方向力と水平方向力を算定するものである⁷⁾。図3(a)、(b)は、一例として走向の方向①でリッピ

ング作業したときの軸圧縮力と曲げモーメントの実測値である。また、図4は各掘削方向において実測したリッパチップに作用する鉛直および水平方向力の分布図である。一般に、鉛直方向力と比べて水平方向力の方が大きく、合力の作用方向の平均値はリッパチップの進行方向に対して上方から下方に向かって $\alpha = 24.3 \pm 5.7$ 度で作用していることがわかる。次に掘削合力と掘削方向の関係を図5に示

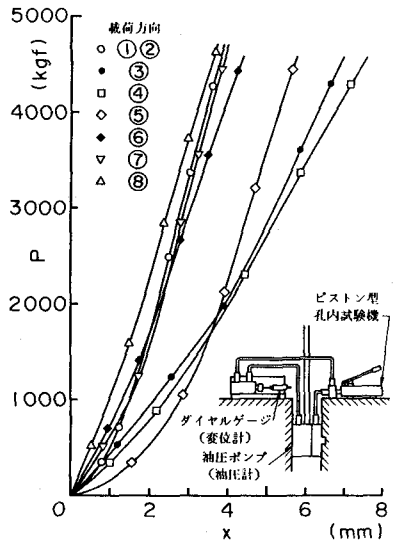


図2 貫入力Pと貫入量xの関係

表2 掘削方向別縦波伝播速度 V_p 、動弾性係数 E_{dyn} 、ポアソン比 ν 、亀裂係数 C_r 、および貫入係数 K

掘削方向	V_p (m/sec)	E_{dyn} (kgf/cm^2) $\times 10^4$	ν	C_r	K (kgf/mm)
①	1163 ± 70	2.457 ± 0.756	0.309 ± 0.118	0.85 ± 0.05	1698
②					1320
③	727 ± 9	1.616 ± 0.198	0.323 ± 0.039	0.94 ± 0.02	840
④					1200
⑤	889 ± 20	1.282 ± 0.096	0.268 ± 0.096	0.91 ± 0.03	1336
⑥					1520
⑦	851 ± 33	2.563 ± 0.136	0.159 ± 0.067	0.92 ± 0.03	1448
⑧					1337 ± 251
平均値	908 ± 80	1.980 ± 0.802	0.265 ± 0.169	0.91 ± 0.07	



写真2 掘削力測定中の50トン級ブルドーザー

した。図中、太線で示した掘削力は平均値であり、細線で囲んだ部分はその標準偏差である。掘削力はかなり変動している。走向方向①、②の掘削力は層理間隔が大きく弾性波速度も大きいために十分大きな値を示しているが、他の方向③、④と⑤、⑥、および⑦⑧の掘削力の平均値と比較すると最小値を示している。また、逆目方向の掘削力、とくに走向と直角方向を成す③方向の掘削力は順目方向の掘削力より大きくなっている。

さらに、掘削方向④の掘削力が最小値を示しているのは、先に行ったボアホール載荷試験において貫入係数が最小値を得たこととよく対応している。

4. 掘削性能 亀裂岩盤の機械掘削におけるリッパビリティを評価する上で、単位掘削力当りの掘削量で表される掘削性能を最大限に維持すべくリッピング作業を行うことが省エネルギー対策上重要な意義を有するのである。ここでは、掘削量としてリッパチップに作用する掘削力測定後の掘削痕跡より掘削によって破壊された部分の断面積を直接現地で計測した。写真3は掘削断面積の計測状況の一例を示したものである。また、表3は8通りの掘削方向に対して各々の掘削深さ、掘削幅、および単位掘削長当りの破壊体積（掘削量）を実測し、掘削性能を算定したものである。その結果、走向と直角方向を成し順目方向となる④の掘削方向において掘削性能は最大値となり、一方、走向と直角方向で逆目方向となる③の掘削方向で最小値となった。一般に、掘削力の大きさと掘削量とは反比例の関係にあり、掘削力が小さいほど掘削量は増大しており、掘削性能は増加する傾向にある。したがって、層理の傾斜が65度を成す当該岩盤にお

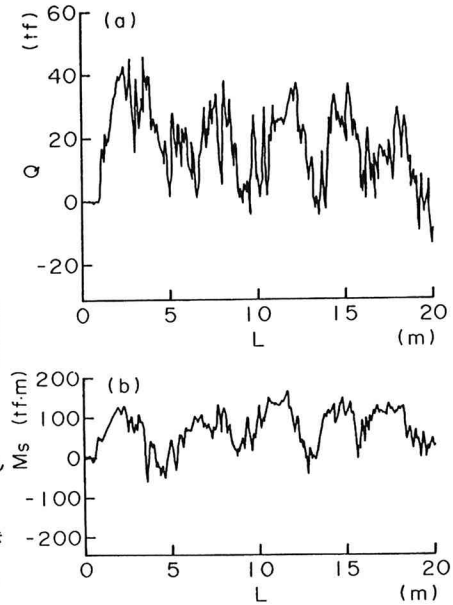
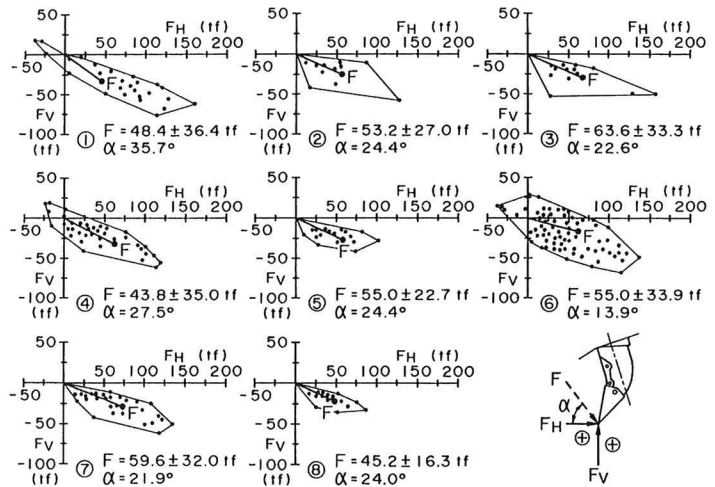


図3 リッパチップに作用する軸圧縮力 Q 、曲げモーメント M_s とブルドーザ走行距離 L の関係（掘削方向①）

図4 リッパチップに作用する平均合力 F とその作用角 α （掘削方向別水平力 F_H と鉛直力 F_V ）



計測状況の一例を示したものである。また、表3は8通りの掘削方向に対して各々の掘削深さ、掘削幅、および単位掘削長当りの破壊体積（掘削量）を実測し、掘削性能を算定したものである。その結果、走向と直角方向を成し順目方向となる④の掘削方向において掘削性能は最大値となり、一方、走向と直角方向で逆目方向となる③の掘削方向で最小値となった。一般に、掘削力の大きさと掘削量とは反比例の関係にあり、掘削力が小さいほど掘削量は増大しており、掘削性能は増加する傾向にある。したがって、層理の傾斜が65度を成す当該岩盤にお

いては、走向方向に掘削するよりも走向方向に直角で順目となる方向に掘削するのが最も掘削性能を発揮できることが判明した。

5. 結論 層理の走向、傾斜が卓越している岩盤の機械化掘削において、与えられた傾斜の方向に対してリッピング作業の掘削性能を最大限とするために掘削方向を走向に対してどのように選択していくかは、とくに省エネルギー対策上の重要な課題である。ここでは、50トン級ブルドーザによるリッピング試験を行った結果、傾斜65度の石灰岩の岩盤において走向と直角方向で順目方向となる方向に掘削するのが最も掘削性能を発揮できることが判明した。また、この最大掘削性能の大きさは最小掘削性能の2倍以上であり、いかに掘削方向を適確に選択するかが重要な意味を持つのである。さらに、この最適な掘削方向を見出す方法として、縦波弾性波伝播速度を計測するとともに、ポアホール載荷試験によって貫入係数を求め岩盤の力学的異方性を調査していく方法がより簡便である。この現場においては、最小の縦波弾性波伝播速度と最小の貫入係数となる方向が最適掘削方向と一致した場合であり、今後は他の構造岩盤に対しても調査し、より普遍的な判定基準を確立していく所存である。

最後に、本実験を実施するに際して心よく現場を御提供いただいた日鉄鉱業（株）の関係各位に謝意を表します。

参考文献

1) Hornung, J.: Materialbedingte Einflüsse auf den Gewinnungsvorgang des mashinellen Reissens von Fels, Baumaschinen und Bautechnik, Heft 1, pp.14-18, 1976.
 2) 山崎: 新しいリッパビリティの判定法, 小松技報, 第29巻, 第1号, pp.13-19, 1983. 3) 谷本・畠・玉置: 互層岩盤中の弾性波伝播挙動, 第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会岩盤力学委員会, pp.111-115, 1985. 4) 深川・太田・畠・荒井: プレッシャーメータによる砂質地盤の鉛直方向変形係数の決定, 土木学会論文集, 第358号/Ⅲ-3, pp.137-145, 1985. 5) 亀岡・室・榎: 孔内載荷試験によるリッパビリティの判定について, 土木学会第38回年次学術講演会講演 概要集3, pp.535-536, 1983. 6) Stacy, T. R.: Proc. of Symp. Exploration for Rock Eng., Ed. by Z. T. Bieniawski, 2, 113, 1977. 7) 室・河原・松永: 節理岩盤に対するリッピング特性に関する研究, 昭和60年度建設機械と施工法シンポジウム論文集, pp.147-150, 1985.

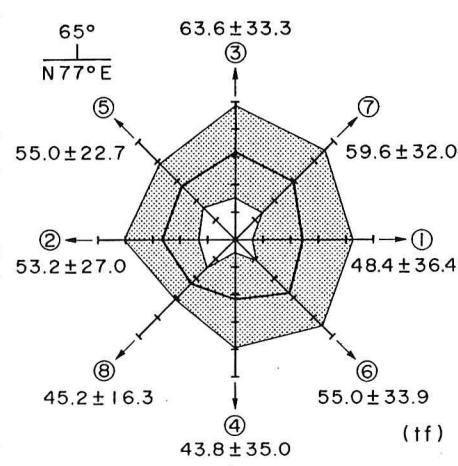


図5 走向・傾斜に対する掘削力

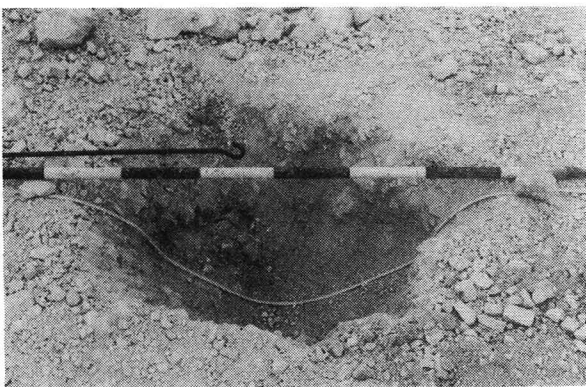


写真3 掘削断面積実測状況

表3 掘削性能の算定

掘削方向	掘削深さ (m)	掘削幅 (m)	破壊体積 (m ³ /m)	掘削性能 (m ³ /m/ tf) × 10 ⁻²
①	0.46	1.25	0.370	0.765
②	0.48	1.10	0.336	0.632
③	0.50	1.00	0.332	0.521
④	0.63	1.10	0.492	1.123
⑤	0.58	1.10	0.391	0.711
⑥	0.57	1.10	0.389	0.707
⑦	0.60	1.10	0.415	0.696
⑧	0.53	1.00	0.369	0.815

(17) Improvement of ripping productivity for fissured rock mass

Shojiro HATA*

Tatsuro MURO**

Ryoichi FUKAGAWA*

* Kyoto University

** Ehime University

Abstract

In a ripping work for remarkably layered rock, the choice of ripping direction against dip and strike is an important problem to maximize a ripping productivity defined by ripping volume per unit ripping force. The relation between ripping direction and ripping productivity was investigated by use of 50 ton class bulldozer for limestone of layered rock mass whose dip angle was 65° . Obtained conclusions are as follows,

1) Most effective ripping direction giving a maximum ripping productivity is the direction of right angle to the strike and of reverse to the dip.

2) Maximum ripping productivity corresponding to the most effective ripping direction is more than two times greater than minimum ripping productivity.

3) Penetration coefficient estimated from the bore hole loading test as well as longitudinal wave velocity are simple practical indices to look for the optimum ripping direction. In this site, the optimum ripping direction accords with the direction giving a minimum longitudinal wave velocity and a minimum penetration coefficient.