

# 不連続性岩盤に対する機械化掘削性能の向上

## INCREMENT OF MECHANICAL EXCAVATING PERFORMANCE FOR DISCONTINUOUS ROCK MASS

室 達朗\*

By Tatsuro MURO

For a ripping and dozing operation on a discontinuous rock mass, the optimum excavating direction to increase a rippability or a dozability after ripping operation and a productivity of excavation should be carefully determined, considering the strike and dip of bedding plane. Here, several rock mass model tests and excavation tests in-situ at 3 different ripping and dozing operation sites have been executed, and then the excavating performance has been theoretically considered by means of FEM analysis. As results, the dozability after ripping operation increases with decreasing the modulus of deformation of rock mass, especially for a discontinuous rock mass of the modulus of deformation less than 200 MPa. The maximum rippability or dozability after ripping operation and productivity of excavation could be obtained at the direction having minimum and maximum modulus of deformation of rock mass, respectively.

*Keywords : rock mass, strike, dip, excavation, productivity*

### 1. まえがき

ロックフィルダムの原石山、碎石現場および宅地造成地における岩盤掘削にはリッピングが多く採用されている。リッピングによる機械化掘削性能を向上させるためには、不連続性岩盤の走向・傾斜に対して掘削方向を適切に選択することが重要である。ここでは、まず不連続性岩盤モデルとして所定の層理間隔で種々の走向・傾斜をなすセメントモルタル供試体を作成し、モデルチップの貫入に伴うセメントモルタルの破碎量と貫入力の関係を求めた。そして、単位貫入仕事量当たりの破碎量として表わされる破碎効率が走向・傾斜に対していかに変動するかについて実験的考察を行った。次に、リッピングおよびドージング作業を行っている3か所の岩盤掘削現場を選定し、リッピング作業時のチップに作用する掘削力と掘削量の掘削方向による変動を測定した。そして、単位掘削仕事量当たりの掘削量で表わされるリッピング能力が最大となる掘削方向を求めた。さらに、ある掘削区域内でのリッピング作業後ブルドーザのブレードでドージング作業を行った場合の全体の掘削量、および単位時間当たりの掘削作業量で表わされる掘削作業能力の

掘削方向による変動について試験し総合評価を行うこととした。なお、種々の不連続性岩盤についてリッピングによる掘削力とともに岩盤の破碎領域がどの程度の深さにまで達しているかを求めるためFEM解析を行った。

以上の室内・現場実験およびFEM解析結果より、不連続性岩盤に対する機械化掘削性能を向上させるために、最大リッピング能力、最大リッピング後ドージング掘削能力および最大掘削作業能力を与える掘削方向が岩盤の変形係数といかなる関係にあるかを追究することを本研究の目的とした。

### 2. 掘削試験

#### (1) 層理岩盤モデル

先端径1.0 cm、長さ10 cm鋼棒のモデルリッパチップを用いて室内掘削試験を行うため、セメントモルタルによって層理間隔2 cmで走向・傾斜をそれぞれ $\pi/6$  radごととなるよう厚さ0.1 mmの薄紙をジョイント部に挿入した寸法40 cm×25 cm×25 cmの層理岩盤モデルを作成した。実験装置および実験の方法については、前報<sup>1)</sup>に記したとおりである。モデルチップの載荷点を岩盤モデルの仮想地表面より深さ5 cm中央部に設定し、貫入力と貫入変位、および破碎後の破壊体積を測定

\* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部海洋工学科  
(〒790 松山市文京町3)

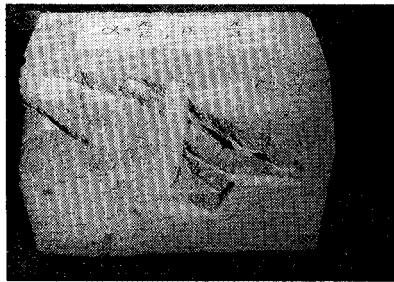


Photo 1 Example of fracture pattern of fissured rock mass model.

した。一例として、Photo 1 に示したのは走向方向と貫入方向とのなす角  $\alpha = \pi/2$  rad, 水平面との傾斜角  $\beta = -\pi/3$  rad の場合の破壊状況である。ここに、 $\alpha$  は走向方向に対して時計回りを正とし、 $\beta$  は逆目を正、順目を負とした。Table 1 はそれぞれの  $\alpha$ ,  $\beta$  に対して実測したモデルチップの貫入係数  $K$ , 最大貫入力  $F_{max}$ , 貫入仕事量  $Fl$  および破碎量  $V_c$  である。これより岩盤モデルの変形係数  $E_d$ <sup>1)</sup> および単位貫入仕事量当たりの破碎量で与えられる破碎効率  $V_c/Fl$  を算定した結果、Fig. 1, Fig. 2 に示すように、種々の  $\beta$  の値に対して  $E_d$  が小さいほど破碎効率が増大する傾向にある。すなわち、 $\beta = \pm \pi/6$  rad で走向直角逆目方向に、 $\beta = -\pi/3$  rad で  $\alpha = \pi/6$  と  $\pi/3$  rad の方向に、また  $\beta = \pm \pi/2$  rad で走向直角方向に全般破壊しており、 $V_c/Fl$  が卓越している。ここに、貫入仕事量とはモデルリッパチップの貫入力  $F$ -貫入量  $l$  曲線を所定の貫入量まで積分して求めたものである。また、貫入仕事量  $Fl$  とセメントモルタルの破碎量  $V_c$  とはほぼ比例関係にあることが実証されてお

Table 1 Coefficient of penetration  $K$ , maximum penetrating force  $F_{max}$ , work of penetration  $Fl$  and fractured volume  $V_c$  of fissured rock mass model for various  $\alpha$ ,  $\beta$  values.

$\alpha$ (rad)	$\beta$ (rad)	$K$ (KN/cm)	$F_{max}$ (KN)	$Fl$ (KNcm)	$V_c$ (cm <sup>3</sup> )
0 $\pm \pi/6$ $\pm \pi/3$ $\pi/2$	$\pm \pi/2$	44.9 ± 33.1	32.9 ± 4.4	151 ± 13	242 ± 49
		64.2 ± 28.0	50.2 ± 15.1	187 ± 31	390 ± 179
		47.3 ± 11.8	44.8 ± 12.1	183 ± 46	430 ± 100
		45.1 ± 12.1	26.2 ± 3.7	104 ± 11	652 ± 217
0 $\pm \pi/6$ $\pm \pi/3$ $\pi/2$	$\pi/3$	69.3 ± 18.1	30.0 ± 2.0	148 ± 18	602 ± 191
		83.7 ± 7.2	39.7 ± 2.6	167 ± 14	437 ± 36
		71.5 ± 13.8	39.9 ± 7.3	186 ± 2	428 ± 46
		63.8 ± 29.0	36.0 ± 4.0	147 ± 8	546 ± 131
0 $\pm \pi/6$ $\pm \pi/3$ $\pi/2$	$\pi/6$	74.4 ± 12.1	41.5 ± 11.7	179 ± 30	638 ± 205
		66.8 ± 10.5	59.7 ± 16.3	177 ± 28	676 ± 211
		67.1 ± 13.2	39.1 ± 9.3	143 ± 11	652 ± 207
		40.6 ± 9.6	24.8 ± 6.5	94 ± 5	575 ± 181
0 $\pm \pi/6$ $\pm \pi/3$ $\pi/2$	- $\pi/6$	74.4 ± 12.1	41.5 ± 11.7	179 ± 30	638 ± 205
		80.8 ± 15.7	31.2 ± 8.4	103 ± 8	589 ± 161
		70.6 ± 14.3	35.5 ± 9.8	153 ± 24	536 ± 174
		70.8 ± 12.7	47.5 ± 10.3	162 ± 28	1034 ± 320
0 $\pm \pi/6$ $\pm \pi/3$ $\pi/2$	- $\pi/3$	69.3 ± 18.1	30.0 ± 2.0	148 ± 18	602 ± 191
		52.7 ± 10.3	22.5 ± 1.6	76 ± 6	478 ± 48
		68.1 ± 0.6	25.4 ± 2.0	107 ± 11	430 ± 44
		67.6 ± 16.2	34.8 ± 1.0	135 ± 14	834 ± 80

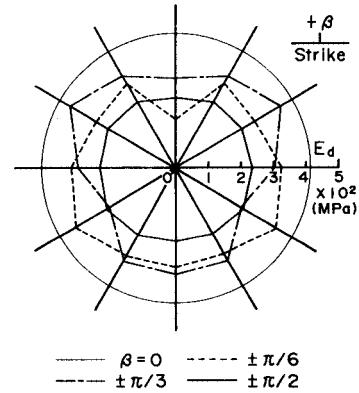


Fig. 1 Variation of modulus of deformation  $E_d$  of rock mass model with penetrating direction of model rippertip.

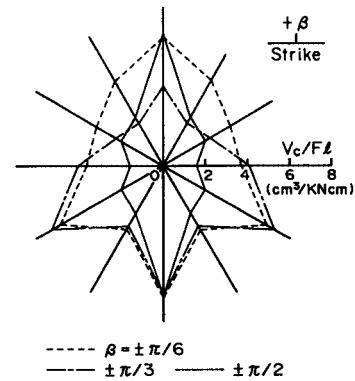


Fig. 2 Variation of efficiency of fracture  $V_c/Fl$  of rock mass model with penetrating direction of model rippertip.

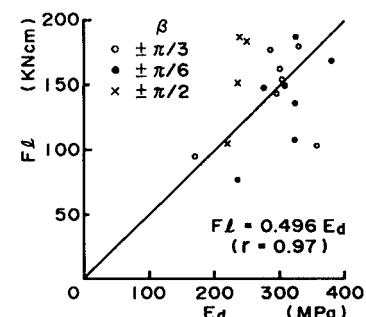


Fig. 3 Relation between excavation work  $Fl$  and modulus of deformation  $E_d$  of rock mass model.

り、破碎効率  $V_c/Fl$  は同じ不連続性岩盤モデルに対して貫入エネルギーを変えても等しい値が得られている。なお、Fig. 3 に示したように、種々の  $\beta$  に対して  $Fl$  は  $E_d$  とともに直線的に増大していることが明らかとなつた。

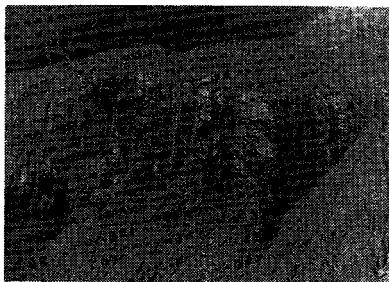


Photo 2 ( a ) Site A.

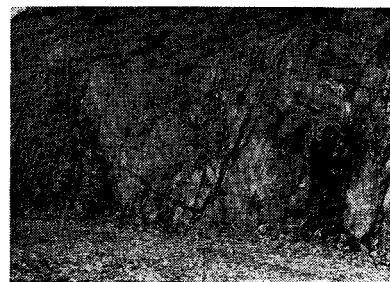


Photo 2 ( c ) Site C.

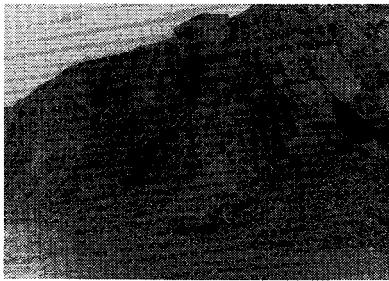


Photo 2 ( b ) Site B.

リッピングおよびドージング作業を行っている3か所の現場A, BおよびCにおいて現場掘削試験を実施した。Table 2は、各現場より採取した岩石に対する室内岩石試験および岩盤試験の結果を示したものである。現場A, BおよびCはPhoto 2 (a), (b), (c)に示したように、層理面の発達した節理やヘーグラックなどの不連続面を有する岩盤であり、それぞれの走向・傾斜の方向は前表に示した。現場Aの層理間隔は数10cm

Table 2 Mechanical properties of rock sample and rock mass.

Site	A	B	C
Name of rock	Sandstone	Limestone	Rhyolite
Apparent specific gravity G	2.62 ± 0.02	2.68 ± 0.01	2.63 ± 0.05
Specific gravity G <sub>s</sub>	2.75 ± 0.01	2.75 ± 0.01	2.65 ± 0.01
Natural water content W (%)	0.33 ± 0.06	0.02 ± 0.01	0.14 ± 0.01
Absorption W' (%)	0.66 ± 0.10	0.10 ± 0.01	0.25 ± 0.04
Shore hardness H <sub>s</sub>	102.3 ± 3.3	35.1 ± 2.4	95.0 ± 5.0
Longitudinal elastic wave velocity of non-fissured rock sample V <sub>1</sub> (m/s)	5133 ± 88	2988 ± 441	3678 ± 171
Longitudinal elastic wave velocity of rock mass V <sub>2</sub> (m/s)	533 ± 74	907 ± 20	2578 ± 1073
Coefficient of crack C <sub>r</sub>	0.99 ± 0.02	0.91 ± 0.03	0.51 ± 0.03
Amount of Los Angeles abrasion U (%)	30.9	34.0	14.1
Uniaxial compressive strength σ <sub>c1</sub> (MPa)	318.4 ± 50.3	42.4 ± 13.1	109.9 ± 29.5
Static modulus E <sub>1</sub> (MPa)	(5.37 ± 2.31) × 10 <sup>4</sup>	(1.97 ± 0.98) × 10 <sup>4</sup>	(1.64 ± 0.31) × 10 <sup>4</sup>
Poisson's ratio ν <sub>1</sub>	0.22 ± 0.02	0.17 ± 0.02	0.30 ± 0.03
Radial compressive strength σ <sub>t1</sub> (MPa)	15.5 ± 2.9	3.8 ± 1.0	7.8 ± 1.6
Modulus of deformation of rock mass E <sub>d</sub> (MPa)	121.7 ± 40.1	342.2 ± 291.8	1574 ± 273
Uniaxial compressive strength of rock mass σ <sub>2</sub> (MPa)	54.1 ± 8.6	8.5 ± 2.6	19.8 ± 5.3
Tensile strength of rock mass σ <sub>t2</sub> (MPa)	4.0 ± 0.6	0.6 ± 0.1	1.5 ± 0.4
Strike rad (degree)	N(0.94±0.09)E N(53.8±5.1)E	N(1.34±0.32)E N(76.8±18.6)E	N(1.51±0.18)E N(86.6±10.5)E
Dip rad (degree)	(1.52±0.05)S (87.3±3.1)S	(1.13±0.30)N (64.6±17.0)N	(1.39±0.15)N (79.7±8.7)N

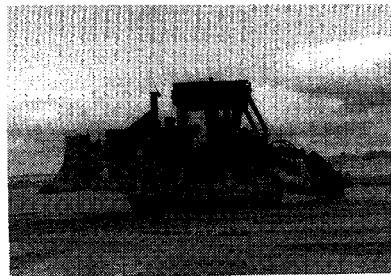


Photo 3 Ripping operation at site B.

で、層理面と交差する節理が数 cm の間隔で入っており亀裂係数は最も高い値を示している。現場 B では層理間隔数  $m$  に及び層理間の節理は比較的少ない。一方、現場 C では層理は数 10 cm 間隔で構成されているが亀裂係数は最も小さく層理面間の不連続面は僅少であると考えられる。なお、いずれの現場においてもリッピングに際して予備発破は行っていない。

a) リッピング試験 岩盤の走向方向に対して掘削の方向を種々に変化させ、リッピング作業時のリッパチップに作用する掘削力の大きさおよびその作用方向を測定するとともにリッパチップ通過後の掘削断面積を実測した。掘削力の計測はリッパシャンクに作用する曲げモーメントと軸圧縮力を半導体ゲージによって測定した<sup>2)</sup>。Photo 3 は計測中のリッピング装置を搭載したブルドーザである。また、リッピングによって掘削された岩盤の破壊部分をショベル掘り出し、Photo 4 に示すように掘削断面積をメジャーで測定した。

現場 A では、自重 441 kN のブルドーザを使用し、リッピングの方向を、① 走向と平行、② 走向と直角、③ 走向と時計回り  $\pi/4$  rad、および、④ 走向と時計回り 3

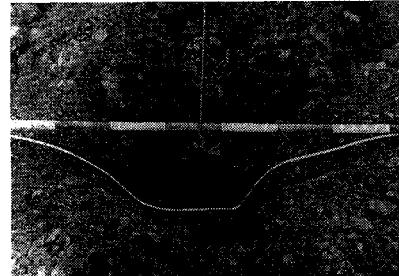
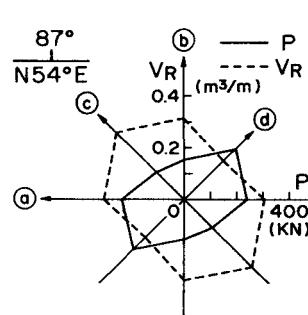
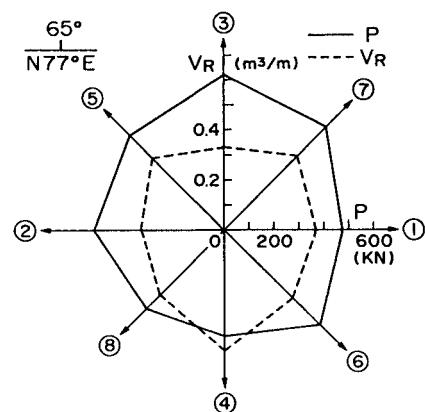


Photo 4 Measuring a cross section area after one pass ripping (parallel to strike).

$\pi/4$  rad の 4 通りに定め掘削試験を行った。掘削方向別の平均掘削合力は Fig. 4 (a) に示すとおりであり、その平均値は 204 kN である。また、それぞれの掘削合力の作用方向はブルドーザの進行方向と逆に鉛直下方側で水平と  $0.862 \pm 0.353$  rad ( $49.4 \pm 20.2$  度) 時計回りに傾斜している。さらに、1 回のリッピング作業量として単位掘進長当たりの掘削量<sup>3)</sup>を  $V_R$  ( $m^3/m$ ) で表示し、各掘削方向別の値を同図に示した。この場合、リッピング深さは約 50 cm であったが、掘削幅は ④ の方向で最も大きく ④ の方向で最も小さいことが明らかであり、掘削合力が小さいほど掘削量は増大している。すなわち、掘削力と掘削量の方向依存性は顕著であり、④ の方向では岩盤の亀裂係数は最も小さく<sup>2)</sup>、掘削力は最大値、掘削量は最小値を得ている。この現場では、層理構造の掘削性能に与える影響は不明確である。すなわち、傾斜はほぼ鉛直であり順目・逆目方向は存在せず、走向の方向と掘削力や掘削量との因果関係は不明瞭である。むしろ、それらの掘削性能は層理面と交差する節理面の発達方向に大きく依存していると考えるべきである。



(a) Site A



(b) Site B

Fig. 4 Variation of excavating resultant force  $P$  acting on a rippertip and amount of excavation  $V_R$  after one pass ripping with ripping direction.

現場Bでは、自重500 kNのブルドーザを使用し、リッピングの方向を走向と各 $\pi/4$  radをなす①～⑧の8通りの方向において掘削試験を行った。掘削方向別の平均掘削合力はFig. 4 (b)に示しており、その平均値は519 kNである。また、掘削合力の作用方向はブルドーザの進行方向と逆に鉛直下方側で水平と $0.424 \pm 0.099$  rad ( $24.3 \pm 5.7$  度) 時計回りに傾斜している。さらに、掘削方向別の単位掘進長当たりの掘削量<sup>4)</sup>を同図に併記した。この場合、逆目(③, ⑤, ⑦)掘削の方が順目(④, ⑥, ⑧)掘削より大きな掘削力を必要とし、掘削量も減少している。リッピング深さは約55 cmであったが掘削方向④において掘削力は最小となり掘削量は最大値を得ている。この現場の平均亀裂係数は0.905と現場Aと比較して節理の発達は少なく、層理面の走向・傾斜の掘削力、掘削量に与える影響は顕著であった。

b) ドージング試験 各作業現場において、ある与えられた岩盤掘削区域内での数回のリッピング作業後、ブルドーザのブレードによって岩盤破碎領域を完全に掘削するドージング試験を行った。最初、岩盤の表土を取り除くためブレードによってドージングした後初期地盤高をレベルによって計測した。岩盤掘削領域を $7\text{m} \times 7\text{m}$ とし、各作業現場ごとに所定のリッピング回数を定め等間隔にリッピング作業を実施した。ここでリッピング回数とは同じパスを数回通るという意味ではなく、ある掘削平面内を等間隔で互いに重複しないように独立して数本のリッピング作業を行うリッピング条痕の本数である。その後、ドージング作業を行いブレードが破碎されていない新鮮な母岩に達するまで完全に掘削した。同時にリッピング作業時間およびドージング作業時間を測定し、両者の和を全作業時間とした。ブレードによる掘削後の地盤高を計測し、初期地盤高との差より掘削量 $V_{RD}$  ( $\text{m}^3$ )を算定し、全作業時間(h)で除した値を掘削作業能力 $Q$  ( $\text{m}^3/\text{h}$ )とした。

現場Aにおいては、前述と同じブルドーザ(自重441 kN)を使用し、リッピング回数を5回とし4通りの掘削方向に対してドージング試験を行った。この場合、リッピング時のブルドーザのスリップ率は $41 \pm 15\%$ 、ドージング時において $62 \pm 26\%$ であった。Fig. 5は、リッピング後ドージング掘削したときの $V_{RD}$ と $Q$ の関係を各リッピング方向に対して示したものである。両者とも走向と時計回りに $3\pi/4$  radをなす掘削方向に対して最大値を示すことが判明した。すなわち、Fig. 4(a)に示したように掘削力 $P$ は④方向に最大値、⑤方向に最小値をとっており、 $V_{RD}$ と $Q$ は一定距離リッピング後の掘削エネルギーの大きさに比例していることがわかる。なお、リッピング時の掘削深さと比較してリッピング後のドージング掘削による掘削深さはほとんど増大しない。

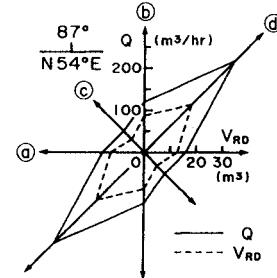


Fig. 5 Variation of productivity  $Q$  and amount of excavation  $V_{RD}$  with ripping direction at site A (Operation area  $49\text{ m}^2$ ).

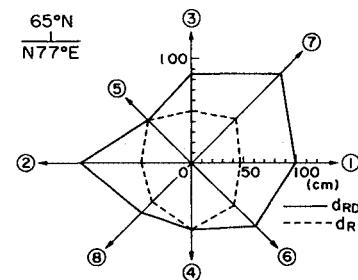


Fig. 6 Variation of depth of excavation  $d_R$  after one pass ripping and  $d_{RD}$  after 10 ripping and several dozing with ripping direction at site B.

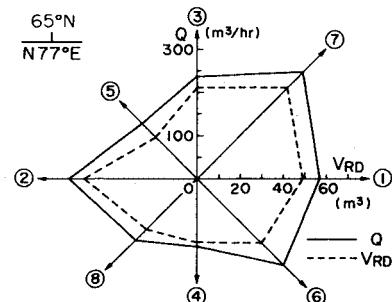


Fig. 7 Variation of amount of excavation  $V_{RD}$  and productivity  $Q$  with ripping direction at site B (After 10 ripping and several dozing on  $49\text{ m}^2$  operation area).

現場Bにおいては、前述と同じブルドーザ(自重500 kN)を使用し、リッピング回数を10回とし8通りの方向に対してドージング試験を行った。この場合、ブルドーザのスリップ率はリッピング時 $33 \pm 24\%$ 、ドージング時 $22 \pm 14\%$ であった。Fig. 6は、1回のリッピングによる掘削断面積を計測したときの掘削深さ<sup>4)</sup> $d_R$ と10回リッピング後のドージングによる掘削深さ $d_{RD}$ の関係を各掘削方向別に示したものである。図より明らかに、④と⑤の掘削方向では $d_R$ と $d_{RD}$ はほとんど変化がなく

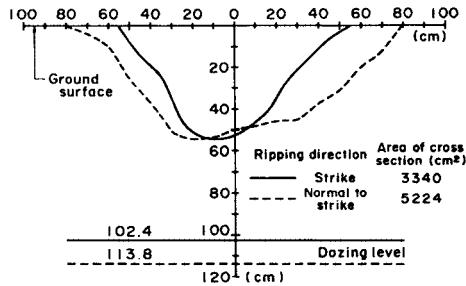


Fig. 8 Cross section of one pass ripping and final dozing level after ripping operation.

ドージングによって掘削深さは進行していない。Fig. 7 は、リッピング後ドージング掘削したときの  $V_{RD}$  と  $Q$  の関係を各リッピング方向に対して示したものである。この場合、両者とも走向と時計回りに  $3\pi/4$  rad (135 度) をなす⑦の方向において最大値を示した。この方向は、前述した  $V_R$  が最大となる方向④とは異なっている。

現場 C においては、自重 860 kN のブルドーザを使用し、リッピング回数 6 回とし、掘削の方向を走向方向および走向と直角順目方向の 2 通りについてドージング試験を行った。 $V_{RD}$  は走向方向で  $50.2 \text{ m}^3$ 、走向と直角順目方向で  $55.8 \text{ m}^3$  となり、走向方向と比較して走向に直角順目方向に掘削した方が 1.11 割掘削量が増大した。また、ドージング作業時間を除いた単位リッピング作業時間当たりの掘削作業量は走向方向で  $1204 \text{ m}^3/\text{h}$ 、走向に直角順目方向で  $1312 \text{ m}^3/\text{h}$  となり、走向方向と比較して走向に直角順目方向でリッピングした方が 0.90 増大することが判明した。なお、Fig. 8 は 1 回のリッピング掘削断面とドージング掘削面の位置を示しており、走向に直角順目方向に掘削した方が走向方向より大きな掘削作業能力を有するものと考える。

以上の各現場でのリッピングおよびドージング作業において各リッピング掘削方向でのドージング掘削の方向は同じ方向とした。

### 3. 掘削性能

不連続面が層理面のみで構成された岩盤モデル試験では、リッピング方向の  $E_d$  が小さいほど破碎効率が増大すること、特に岩盤の傾斜が水平と  $\pm\pi/6$ 、 $\pm\pi/2$  rad であるとき走向直角方向に、また  $-\pi/3$  rad であるとき走向直角順目方向と  $\alpha=\pi/6, 5\pi/6$  において破碎効率は最大値に達することが明らかとなった。

実際の岩盤に対するリッピング掘削において、単位掘削仕事量当たりの掘削量で表示されるリッピング能力  $V_R/P$  を算定するとともに、前報で述べたピストン型孔内載荷試験<sup>1)</sup>で得られた貫入係数より各掘削方向の岩盤の変形係数  $E_d$  を求めた。なお、リッピング時の掘削仕

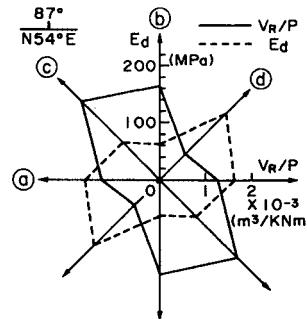


Fig. 9 Variations of modulus of deformation  $E_d$  and rippability  $V_R/P$  with ripping direction after one pass of ripping on site A.

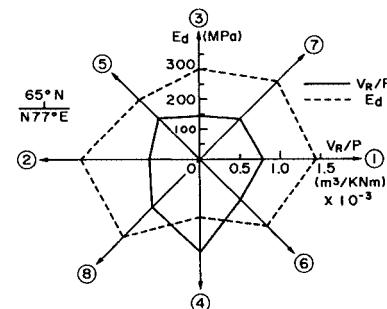


Fig. 10 Variations of modulus of deformation  $E_d$  and rippability  $V_R/P$  with ripping direction after one pass ripping on site B.

事量は、前節 2.(2)a) でその計測法を述べた掘削力のリッピング距離に対する変動曲線を積分して求めることができる。また、この場合の  $V_R/P$  は岩盤掘削における比エネルギーの逆数として表現されている。

Fig. 9 は、現場 A における種々のリッピング方向に対する  $V_R/P$  と  $E_d$  の関係を示したものである。図より明らかに、 $V_R/P$  は走向と時計回り  $\pi/4$  rad をなす②方向で最大値をとり、また  $E_d$  は②から⑥の方向域で最も小さくなっている。この現場では、岩盤の平均変形係数が相対的に小さく亀裂係数がかなり大きくなっている。この岩盤の特性が掘削深さ  $d_R$  と  $d_{RD}$  をほぼ等しくさせている事実を裏付けている。 $E_d$  の小さい領域で  $V_R$ 、 $V_R/P$  が最大となるのに対し、 $V_{RD}$  と  $Q$  は  $E_d$  の最大となる方向に最大値を示しており、両者の方向は一致しない。

Fig. 10 は、現場 B における  $V_R/P$  と  $E_d$  の関係を示している。この場合、 $V_R/P$  は走向と  $\pi/2$  rad をなす④の方向で最大値をとり、また  $E_d$  はこの方向で最小値を得ている。この岩盤の平均変形係数は現場 A より大きな値を示しているが、④の方向で最も小さく次いで⑤の方向が小さく、このことは前述したようにそれらの方向

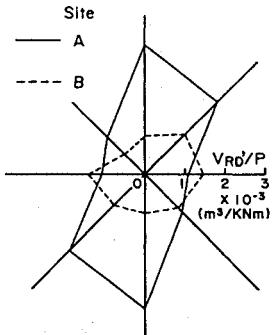


Fig. 11 Variation of dozability after ripping operation  $V'_{RD}/P$  measured for one pass ripping after dozing with ripping direction at site A and B.

での  $d_R$  と  $d_{RD}$  がほぼ一致していることと対応する。しかし、他の方向では  $d_{RD}$  が  $d_R$  より大きく掘削によるゆるみ領域が拡大している。したがって、リッピング後ドージング掘削した場合の  $V_{RD}$  と  $Q$  は走向と時計回り  $3\pi/4$  rad をなす⑦の方向において最大値をとることとなり、リッピング作業のみの最大リッピング能力を与える方向とは一致しない。このように、リッピング掘削力が増大する方向であっても岩盤の変形係数が高い値をとる場合にはリッピング深さ以上に岩盤は破壊されておりドージング深さを増大させることとなる。

次に、掘削能力としてリッピング後ドージングした掘削量  $V_{RD}$  をリッピング距離で除した値  $V'_{RD}$  を求め、単位掘削仕事量との比  $V'_{RD}/P$  で表現することとする。

Fig. 11 は、現場 A, B におけるリッピング後ドージング掘削能力  $V'_{RD}/P$  の掘削方向別の変化を示したものである。図より明らかに、現場 A においては  $E_d$  の最小値を示す走向と  $\pi/2$  rad をなす方向にリッピング後ドージング掘削能力は最大値を示しており、一方現場 B においては走向方向および走向と時計回り  $3\pi/4$  rad をなす⑦の方向においてリッピング後ドージング掘削能力は卓越している。いずれも、前述した  $V_R/P$  最大の方向とは

異なり、リッピング作業のみとリッピング後ドージングした場合とで評価は異なる。

#### 4. FEM 解析

不連続性岩盤をリッピング掘削する場合のチップに作用する力と岩盤の破壊領域を算定するために、大変形問題として FEM による弾塑性解析を行った。この解析では関連流れ則を仮定し、非線型材料と大変形の問題を同時に取り扱った。弾性状態下での降伏条件は簡単化して R. von Mises のものを用い、降伏後の応力ひずみ関係は次式を用いた<sup>5), 6)</sup>。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \\ d\tau_{xy} \end{pmatrix} &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{pmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\varepsilon_x \\ d\varepsilon_y \\ d\gamma_{xy} \end{pmatrix} \\ &- \frac{9G^2}{\bar{\sigma}^2(3G+H')} \begin{pmatrix} \sigma'_x^2 & \sigma'_x\sigma'_y & \sigma'_x\tau_{xy} \\ \sigma'_x\sigma'_y & \sigma'_y^2 & \sigma'_y\tau_{xy} \\ \sigma'_x\tau_{xy} & \sigma'_y\tau_{xy} & \tau_{xy}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\varepsilon_x \\ d\varepsilon_y \\ d\gamma_{xy} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 $G$  は剛性率、 $H'$  はひずみ硬化率、 $\sigma'_x$ ,  $\sigma'_y$  は偏差応力である。また、 $\bar{\sigma}$  は相当応力として次式で与えられる。

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3\tau_{xy}^2} \leq q_u \quad (2)$$

上式は平面ひずみ状態におけるものであり、実際のリッパチップによる岩盤の三次元変形を単位長さ当たりの二次元変形を仮定して算出している。なお、 $E$  および  $\nu$  は岩盤試験としてピストン型孔内載荷試験より求めた岩盤の変形係数および縦波・横波の弾性波伝播速度から求めたポアソン比を使用した。 $q_u$  は岩盤の圧縮強度または引張強度である。ここに、岩盤の引張強度はその圧縮強度の 0.074 倍として与えた<sup>7)</sup>。破壊した要素については弾性係数をもとの  $1/2000$  とし、ポアソン比を 0.499 として処理した。

Table 3 Modulus of deformation  $E_d$ , Poisson's ratio  $\nu$ , compressive strength  $\sigma_c$ , excavation depth  $d_e$ , applied angle  $\theta$ , resultant excavating force  $P$ , fracture zone  $d$ , and dozability after ripping operation  $V'_{RD}/P$ .

Site	Ed (MPa)	$\nu$	$\sigma_c$ (MPa)	$d_e$ (cm)	$\theta$ (rad)	P (kN)		d (cm)	$V'_{RD}/P$ ( $m^3/KNm$ )
						Calculated value	Measured value		
A a	129.4	0.37	54.1	60	0	212	$241 \pm 178$	110	$5.19 \times 10^{-3}$
A b	60.8	0.36	54.1	60	0	176	$151 \pm 123$	100	$5.68 \times 10^{-3}$
A c	90.2	0.40	54.1	60	0	195	$151 \pm 116$	105	$5.38 \times 10^{-3}$
A d	162.7	0.22	54.1	60	0	233	$274 \pm 172$	115	$4.94 \times 10^{-3}$
B 1	386.7	0.31	8.5	60	0.419	586	$474 \pm 357$	140	$1.67 \times 10^{-3}$
B 2	389.9	0.31	8.5	60	0.419	594	$521 \pm 265$	140	$1.65 \times 10^{-3}$
B 3	299.8	0.32	8.5	60	0.419	571	$623 \pm 326$	100	$1.23 \times 10^{-3}$
B 4	190.8	0.32	8.5	60	0.419	414	$429 \pm 343$	70	$1.18 \times 10^{-3}$
B 5	281.6	0.27	8.5	60	0.419	526	$539 \pm 222$	80	$1.07 \times 10^{-3}$
B 6	313.4	0.27	8.5	60	0.419	496	$539 \pm 332$	100	$1.41 \times 10^{-3}$
B 7	374.7	0.16	8.5	60	0.419	549	$584 \pm 314$	130	$1.66 \times 10^{-3}$
B 8	356.9	0.16	8.5	60	0.419	496	$443 \pm 160$	110	$1.55 \times 10^{-3}$

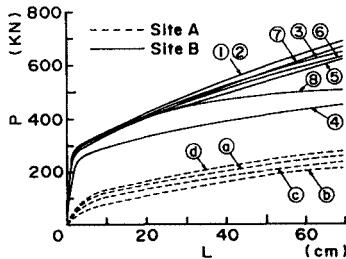


Fig. 12 Relation between resultant excavation force  $P$  and moving distance  $L$  calculated from FEM analysis for site A and B.

解析にあたって使用したモデルは鉛直方向に 500 cm, 水平方向に 500 cm とし, 節点総数 179, 要素総数 309 とした。また, 岩盤中の境界線上の節点はすべて完全固定とした。リッパチップの地表面からの掘削深さおよび荷重の作用方向の水平となす角は現場 A で 60 cm, 水平方向の変位制御とし, 現場 B で 60 cm, 上向き 0.419 rad (24 度) の荷重制御とした。Table 3 に, 現場 A, B の岩盤に対して, 計算に用いた入力定数である岩盤の変形係数  $E_d$ , ポアソン比  $\nu$ , 圧縮強度  $\sigma_c$  および掘削力の作用点の位置  $d_0$ , 作用方向の水平となす角  $\theta$  を列挙した。なお, 岩盤の圧縮強度はリッピングおよびドージング掘削後の破碎された岩石塊の大きさから岩盤の平均亀裂数を算定し, 無亀裂岩石の一軸圧縮強度に対する減少率<sup>8)</sup>から求めたものである。また, 掘削合力  $P$  の実測値と 50 cm 貫入時の計算値とを比較するとともに, 破壊域の到達深さ  $d$ , リッピング後ドージング掘削能力  $V'_{rd}/P$  を算定した。

Fig. 12 は, 現場 A と B に対して算定した掘削合力とリッパチップの移動距離 (貫入量) との関係を示したものである。掘削合力の計算値と実測値は前表に示したようによく対応しており, 岩盤の変形係数が大きくなるとともに掘削力も増大している。また, Fig. 13 (a), (b) はリッピング掘削による岩盤 A, B の破壊領域の代表例を示しており, 一般に岩盤の変形係数が増大するほど破壊域の到達深さが深部に及んでいることが明らかである。次に, 一般的な岩盤について岩盤の変形係数を 500 MPa まで 50 MPa ごとに, また岩盤の圧縮強度を 10 から 40 MPa まで変化させ, ポアソン比 0.3, 載荷深さ 60 cm, 掘削力の水平となす上向きの角度 0.785 rad として荷重制御によって同様な計算をした。Fig. 14 は, 50 cm 貫入時の掘削合力  $P$  と破壊域の到達深さ  $d$  から求めた単位掘削仕事量当たりの掘削量  $V'_{rd}/P$  で表現されるリッピング後ドージング掘削能力と岩盤の変形係数の関係を示したものである。図より明らかに, 掘削能力は岩盤の圧縮強度および変形係数が増大するとともに減少している。また, 同じ圧縮強度をもつ岩盤に対しては

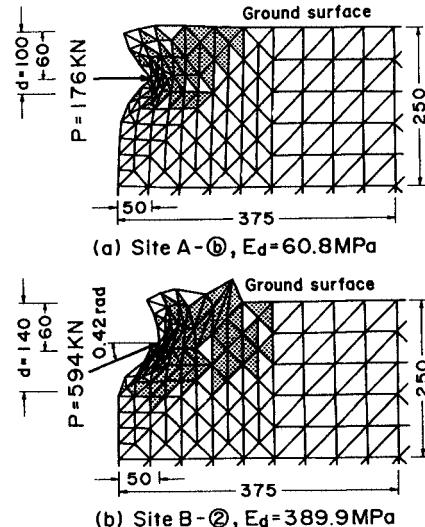


Fig. 13 Failure zone calculated from FEM analysis [unit : cm].

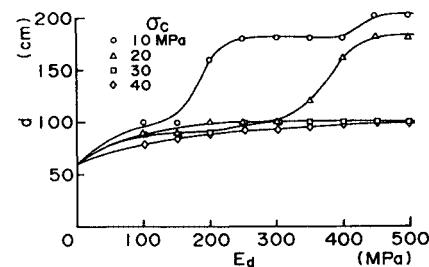


Fig. 14 Relations between dozability after ripping operation  $V'_{rd}/P$  and modulus of deformation  $E_d$  for various compressive strength  $\sigma_c$  of rock mass (FEM analysis).

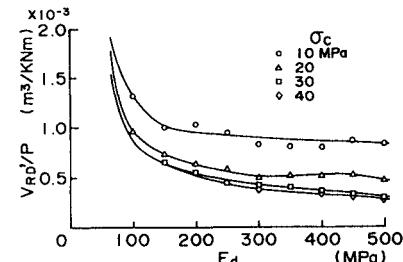


Fig. 15 Relations between depth of failure zone  $d$  and modulus of deformation of rock mass  $E_d$  (FEM analysis).

変形係数約 200 MPa 以下の岩盤では変形係数の減少とともに掘削能力は著しく増加するのに対し, それ以上の変形係数を示す岩盤では掘削能力に与える変形係数の影響は少ない。

なお, Fig. 15 に示したように, リッピングによる破壊領域の到達深さ  $d$  は岩盤の変形係数  $E_d$  が増大すると

ともに大きくなる。特に岩盤の圧縮強度  $\sigma_c$  が 20 MPa 以下ではある変形係数において断続的に増加する。

リッピング掘削による岩盤の破壊によるゆるみ領域を的確に予測することはトンネル底盤、地下空洞基盤および建造物基礎の建設においてきわめて重要である。たとえば、現場 A においては岩盤の  $\sigma_c$  が 54.1 MPa と大きく  $E_a=150$  MPa に対して岩盤のゆるみ領域  $d$  はリッピング深さ  $d_0$  に対して約 30 % 増加している。一方、現場 B, C においては  $\sigma_c$  はそれぞれ 8.5 MPa, 19.8 MPa であり、 $E_a$  は約 250 MPa、約 450 MPa において岩盤のゆるみ領域は急増しリッピング深さの 3 倍程度にまで達している。なおこの現象は前図 Fig. 5 と Fig. 7において同様な傾向が認められる。

## 5. 結 論

層理岩盤モデルと数か所のリッピング作業現場において掘削試験を実施し、不連続性岩盤に対する機械化掘削の性能を向上させる手法について考察した。その結果、以下に示す土木施工学上有益な新しい知見を得た。

(1) 層理構造の発達した岩盤モデル試験では、岩盤の変形係数が小さいほどチップの単位貫入仕事量当たりの破碎量で算定される破碎効率は増大する。

(2) 亀裂係数がかなり大きく岩盤の変形係数が相対的に小さい傾斜 1.52 rad (87.3 度) の砂岩で構成された層理岩盤では走向と時計回り  $\pi/4$  から  $\pi/2$  rad をなす方向域で岩盤の変形係数は小さく、リッピング作業時のリッピング能力は走向と時計回り  $\pi/4$  の方向において最大値を得ること、またリッピング後ドージング掘削能力は岩盤の変形係数が最小となる走向と  $\pi/2$  rad をなす方向で最大値を得る。一方、リッピング・ドージング全作業時間当たりの掘削量である掘削作業能力は走向と時計回りに  $3\pi/4$  rad をなす方向で最大となり、またその方向は岩盤の変形係数が最大となる方向と一致することが判明した。

(3) 節理面が比較的少なく層理面が発達し岩盤の変形係数が相対的に大きな傾斜角 1.13 rad (64.6 度) の石灰岩の岩盤掘削試験では、走向と直角方向で順目となる方向で岩盤の変形係数が最も小さくリッピング時のリッピング能力は最も増大した。しかし、リッピング後ドージング掘削能力および掘削作業能力は岩盤の変形係数の高い方向に増大しており特に走向と  $3\pi/4$  rad をなす逆目方向および走向方向に卓越することが明らかとなった。

(4) 現場試験および FEM 解析の結果、岩盤の変形係数が比較的小く約 200 MPa 以下の層理岩盤では変形係数の減少とともにリッピング後ドージング掘削能力は著しく増加する傾向にあり、その掘削能力は最小の

変形係数を与える方向において最大となる。一方、岩盤の変形係数が約 200 MPa 以上の層理岩盤ではその掘削能力を与える変形係数の影響は少なく、層理構造に左右される。掘削作業能力は、一般に岩盤の変形係数が最大となる方向において最大値をとる。

(5) リッピング作業による岩盤のゆるみ領域は岩盤の変形係数の増大とともに深部に達する。また、同じ変形係数に対しては岩盤の圧縮強度の低下とともにその深さは著しく増大する。

以上、層理岩盤の掘削性能を向上させるうえで、リッピング能力を最大とする方向に掘削することは、相対的に掘削力の減少となり経済性の向上、燃費の節約および足廻り部品の摩耗による損傷の低下に役立つものである。一方、掘削作業能力を最大ならしめる方向で掘削することは、時間当たり作業量を増大させることとなり、施工期間の短縮に関連するものである。いずれを選択するかは現場における適切な判断を要する。なお、与えられた層理岩盤においてリッピングによるゆるみ領域を減少させるためには、変形係数の最小となる方向へ掘削方向を選ぶ必要がある。

最後に、室内および現場実験では、河原莊一郎助手、元大学院学生 松永好史氏をはじめ元学生 白石貴之氏、森川宏之氏にご協力をいただいた。また、快く現場試験にご援助いただいた愛媛碎石（株）、日鉄鉱業（株）の関係各位に謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 室 達朗：層理岩盤に対するリッピング作業時の掘削力特性、土木学会論文集、第 375 号、pp. 84~92、1986 年 9 月。
- 2) 室 達朗・深川良一・河原莊一郎：岩盤掘削におけるリッパビリティの評価、愛媛大学工学部紀要、第 11 卷、第 1 号、pp. 329~341、1986 年 2 月。
- 3) Muro, T. : Efficiency of ripping excavation of a jointed rock mass, Proc. of 1st Asian-Pacific Conf. of International Society for Terrain-Vehicle Systems, Beijing, China, pp. 1010~1021, Aug., 1986.
- 4) 畠昭治郎・室 達朗・深川良一：亀裂岩盤に対する機械化掘削性能の向上、第 18 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. 81~85、1986 年 2 月。
- 5) 山田嘉昭：マトリックス法材料力学、培風館、pp. 37~53、1980 年。
- 6) 山田嘉昭：塑性・粘弾性、培風館、pp. 75~147、1980 年。
- 7) 今津雅紀：岩石物性におけるデータベース化の試み、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. 71~75、1985 年 2 月。
- 8) Müller-Salzburg, L., Sauer, G. und Vardar, M. : Dreidimensionale spannungsumlagerungsprozesse im Bereich der ortsbrust, Rock Mechaniks, Suppl. 7, pp. 67~85, 1978.

(1986.5.19・受付)