

# 19. ブルドーザによる層理岩盤の掘削能力に関する研究

愛媛大学：\*室 達朗・日立造船(株)：松永 好史

**1. まえがき** 宅地造成地、碎石場およびアースフィルグムの原石山等における岩盤掘削にはブルドーザによるリッピングおよびドーピング作業からなる機械化掘削工法が多く採用されている。掘削性能を向上させるためには、層理岩盤の走向、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<sup>1)</sup>。ここでは、2ヶ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。その後、単位掘削仕事量当たりの掘削量で表される掘削効率が最大となる掘削方向を求めた。さらに、所定の掘削区域内でのリッピング作業後ドーピ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される掘削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。また、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壊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解析を行った結果について述べる。

**2. 現地掘削試験** リッピングおよびドーピングを行っている2ヶ所の現場A、Bにおいて掘削試験を実施した。表1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を実施したものである。現場A、Bは写真1、2に示したように、層理面の発達した節理やヘアークラックなどの不連続面を有する岩盤である。現場Aの層理間隔は数10cmで、層理面と交叉する節理が数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。なお、いずれの現場もリッピングに際して予備発破は行っていない。

表1 岩盤および岩石の力学特性

(1) 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チップに作用する掘削力の大きさおよびその作用方向<sup>1)</sup>を測定するとともにリッパチップ通過

現場名	A	B
見かけ比重 G	2.62 ± 0.02	2.68 ± 0.01
真比重 G <sub>0</sub>	2.75 ± 0.01	2.75 ± 0.01
自然含水比 W (%)	0.33 ± 0.06	0.02 ± 0.01
吸水率 W' (%)	0.66 ± 0.10	0.10 ± 0.01
ショア硬さ H <sub>0</sub>	102.3 ± 3.3	35.1 ± 2.4
無亀裂岩石に対する超音波伝播速度 V <sub>1</sub> (m/s)	5133 ± 88	2988 ± 441
岩盤の縦波弾性波速度 V <sub>2</sub> (m/s)	533 ± 74	907 ± 20
亀裂係数 C <sub>c</sub>	0.99 ± 0.02	0.91 ± 0.03
ロサンゼルスすりへり減量 U (%)	30.9	34.0
一軸圧縮強度 σ <sub>c1</sub> (MPa)	318.4 ± 50.3	42.4 ± 13.1
弾性係数 E <sub>1</sub> (MPa)	(5.37 ± 2.31) × 10 <sup>4</sup>	(1.97 ± 0.98) × 10 <sup>4</sup>
ポアソン比 ν <sub>1</sub>	0.22 ± 0.02	0.17 ± 0.02
引張強度 σ <sub>t1</sub> (MPa)	15.5 ± 2.9	3.8 ± 1.0
岩盤の変形係数 E <sub>d</sub> (MPa)	121.7 ± 40.1	342.2 ± 291.8
岩盤の一軸圧縮強度 σ <sub>2</sub> (MPa)	54.1 ± 8.6	8.5 ± 2.6
岩盤の引張強度 σ <sub>t2</sub> (MPa)	4.0 ± 0.6	0.6 ± 0.1
走向 (度)	N (53.8 ± 5.1) E	N (76.8 ± 18.6) E
傾斜 (度)	(87.3 ± 3.1) S	(64.6 ± 17.0) N



写真1 現場Aの走向・傾斜



写真2 現場Bの走向・傾斜



写真3 リッピング作業状況

後の掘削断面積を実測した。写真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。現場Aでは自重441kN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 $\pi/4$ および④走向と時計回り $3\pi/4$ の4通りとした。掘削方向別の平均掘削合力を図1に示す。その平均値は204kNであり、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49.4度をなしている<sup>2)</sup>。現場Bでは自重500kNのブルドーザを使用し、リッピングの方向を走向と各 $\pi/4$ 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同図に示しており、その平均値は519kNである。また、掘削合力の作用方向の鉛直下方に水平となす角は24.3度である<sup>2)</sup>。

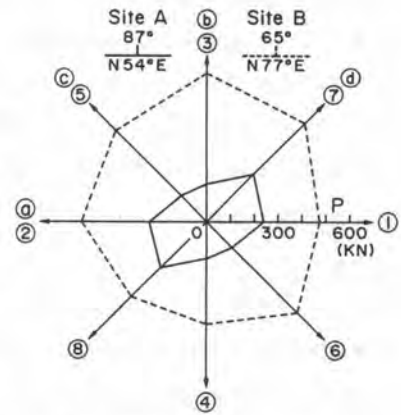
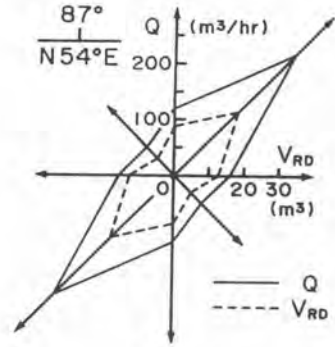


図1 掘削合力Pの分布

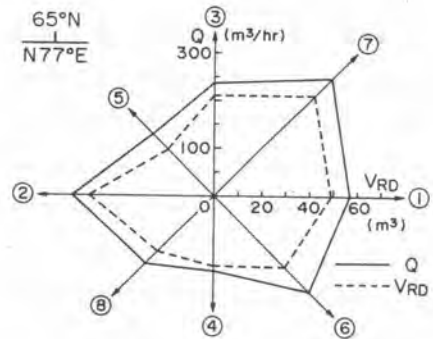
(2) ドージング試験 各作業現場において、7m×7mの岩盤掘削区域内で所定のリッピング回数を定め等間隔にリッピング作業を行い、その後ブレードによって岩盤の破壊領域を完全に掘削するドージング作業を行った。同時にリッピングおよびドージング作業時間を測定し、両者の和を全作業時間とした。ブレードによる掘削後の地盤高を計測し、初期地盤高との差より掘削量 $V_{RD}(m^3)$ を算定し、全作業時間(hr)で除した値を掘削作業能力 $Q(m^3/hr)$ とした。現場Aにおいては、リッピング回数を5回とし4通りの掘削方向に対してドージング試験を行った。図2(a)はリッピング後ドージング掘削したときの $V_{RD}$ 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 $3\pi/4$ をなす掘削方向に対して最大値を示すことが分かる。なお、リッピング時の掘削深さと比較してドージング掘削による掘削深さは殆んど増大していない。現場Bにおいては、リッピング回数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。図2(b)は同様に $V_{RD}$ と $Q$ の分布を示した。この場合、両者とも走向と時計回りに $3\pi/4$ をなす⑦の方向において最大値を示した。以上、各リッピング掘削方向でのドージング掘削の方向は同一方向をとした。なお、写真4はリッピング作業後のドージング掘削の様子を示している。



写真4 ドージング掘削状況



(a) 現場A



(b) 現場B

図2 ドージング掘削量  $V_{RD}$  と掘削能力  $Q$

3. 掘削性能 各現場において直径10cmのボーリング孔を削孔し、ピストン型孔内載荷試験<sup>3)</sup>を実施して得られた貫入係数より各掘削方向での岩盤の変形係数  $E_d$  を求めた。図3はそれぞれの現場における  $E_d$  の分布を示したものである。現場Aにおいては、 $E_d$  の最大となる方向④において  $V_{RD}$  と  $Q$  は最大値を示している。

現場Bにおいても、高い  $E_d$  の値を示す⑦、②、①の方向において  $V_{RD}$  と  $Q$  は増大している。

次に、リッピング後ドージングしたときの掘削量  $V_{RD}$  をリッピング距離で除した値  $V_{RD}/P$  を求め、掘削効率として  $V_{RD}/P$  と単位掘削仕事量との比  $V_{RD}/P$  で表現することとする。図4は、現場A、Bにおける  $V_{RD}/P$  の掘削方向別の変化を示したものであり、現場Aにおいては  $E_d$  の最小値を示す①の方向に掘削効率は最大値を示しており、一方現場Bにおいては走向方向①、②および走向と時計回りに  $3\pi/4$  をなす⑤の方向において掘削効率は卓越している。このように、現場Bにおいてはリッピング掘削力が増大する方向であっても  $E_d$  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になる。

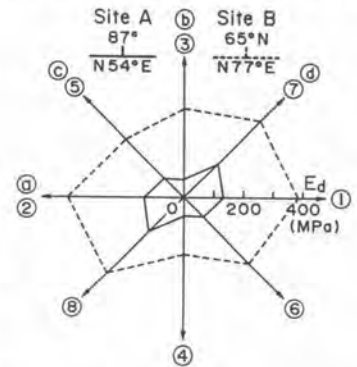


図3 岩盤の変形係数  $E_d$  の分布

4. FEM解析 鉛直方向 500cm、水平方向 500cm、節点総数 179、要素数 309のモデルについて非線形材料の大変形問題として R.von Mises の降伏条件を用いた平面ひずみ状態において FEM 解析を行った。弾性係数  $E$  およびポアソン比  $\nu$  は岩盤試験として実施したピストン型孔内載荷試験より求めた  $E_d$  および  $P$ 、 $S$  波から求めたりを用いた。岩盤の圧縮強度  $\sigma_c$  は各現場の亀裂ブロック数より Müller<sup>4)</sup> の式を用いて算定し、今津<sup>5)</sup> の式より引張強度を推定した。リッパチップの地表面からの掘削深さは実際の値をとり、すべて 60cm として、掘削合力  $P$  と破壊域の到達深さから算定した掘削量  $V_{RD}$  を算定した。岩盤の  $E_d$  を 500MPa まで 50MPa 毎に、また岩盤の圧縮強度を 10 から 40MPa まで変

化させ、ポアソン比 0.3とし掘削力の水平となす角を $\pi/4$ とし荷重制御によって算定した。図5は掘削効率 $V_{RD}/P$ と岩盤の変形係数 $E_d$ の関係を示しており、 $V_{RD}/P$ は $E_d$ および $\sigma_c$ が増大するとともに減少している。また、同じ $\sigma_c$ をもつ岩盤に対しては $E_d \leq 200\text{MPa}$ 以下の岩盤では $E_d$ の減少とともに $V_{RD}/P$ は著しく増加するのに対し、それ以上の $E_d$ を示す岩盤では $V_{RD}/P$ に与える $E_d$ の影響は少ない。なお、図6に示したように、リップングによる破壊領域の到達深さ $d$ は $E_d$ が増加するとともに増大しており、実測結果とよく一致している。以上、リップ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。

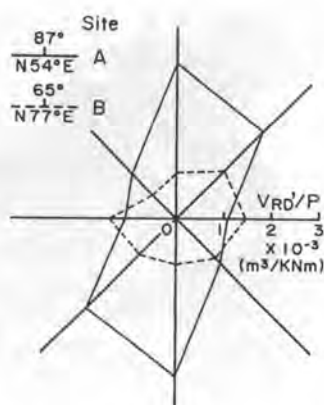


図4 掘削効率 $V_{RD}/P$ の分布

5. 結論 2ヶ所の掘削現場試験とFEM解析の結果、

層理岩盤における機械化掘削性能を向上させるための土木工学上有益な二・三の知見をえた。まず、岩盤の変形係数が比較的小さい約200MPa以下の岩盤では変形係数の減少とともにリップング後ドーピングを行う場合の掘削効率は著しく増加し、その掘削効率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、変形係数が200MPa以上では掘削効率に与える変形係数の影響は少なく層理構造に支配されること。掘削能力は、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こと、およびリップングによる岩盤のゆるみ領域は変形係数の増大とともに深部に達することが明らかとなった。

6. 参考文献

- 1) 室達朗, 河原荘一郎, 松永好史: 節理岩盤に対するリップ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.
- 2) 室達朗, 深川良一, 河原荘一郎: 岩盤掘削におけるリップビリティの評価, 愛媛大学工学部紀要, 第XI巻第1号, pp.329-341, 1986.
- 3) 島昭治郎, 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.
- 4) Müller-Salzburg et al.: Dreidimensionale spannungsumlagerungsprozesse im bereich der ortsbreust, Rock mechanics, Suppl.7, pp.67-85, 1978.
- 5) 今津雅紀: 岩盤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集, 土木学会岩盤力学委員会, pp.71-75, 1985.

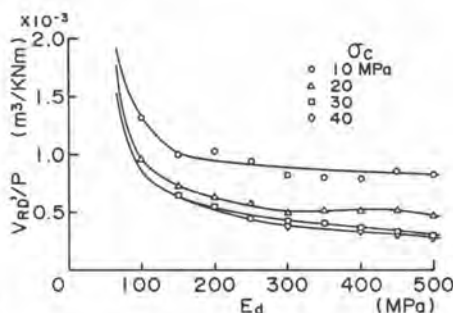


図5 掘削効率 $V_{RD}/P$ と変形係数 $E_d$ の関係

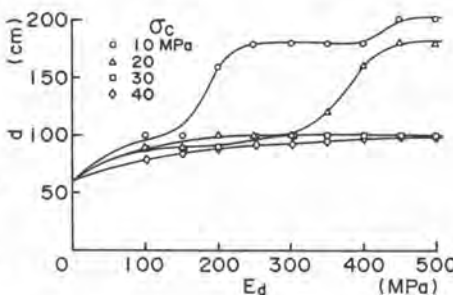


図6 破壊領域 $d$ と変形係数 $E_d$ の関係