

(51) 軟岩の平刃による比切削抵抗

愛媛大学工学部 正 会 員 室 達朗
愛媛大学工学部 正 会 員 ○河原莊一郎
愛媛大学大学院 学生会員 藤田 克美

Specific Cutting Resistance for Blade Operating in a Weak Rock Mass

Tatsuro MURO, Ehime University
Soichiro KAWAHARA, Ehime University
Katsumi FUJITA, Ehime University

Abstract

To predict the maximum excavation force acting on a blade of bulldozer which operates in a weak rock mass from the two dimensional specific cutting resistance, the failure mechanism of specific cutting resistance should be analysed in relating to that of steady excavation of the blade. Here, several weak rock models made of cement mortal were used to the specific cutting resistance test and to the steady cutting test of zero rake angle for various depths. It is found that the specific cutting resistance is proportional to the shear strength of rock material and the shear failure develops on the whole linear slippage line on which the normal stress distributes to the power of 0.75. And the slippage line for steady cutting state could be expressed as longitudinal spiral and linear line on which the shear failure develops and the normal stress distributes to the power of 0.60. As the results, the maximum excavation force could be determined theoretically as a function of specific cutting resistance and excavation depth. The relation was also justified experimentally and verified from FEM analysis.

1. 緒言 本研究は比切削抵抗¹⁾という指標を用い、基礎的な軟岩の掘削機構²⁾を解明するために、比切削抵抗及びすくい角が0度の時の定常掘削抵抗の理論式を導き出した。そして、種々の軟岩モデル、掘削深さに対する比切削抵抗及び定常掘削抵抗を測定し理論の検証を行った。更に定常掘削抵抗と比切削抵抗との関係式を導き出した。また、有限要素法を利用して実測値との比較も行ってみた。

2. 軟岩モデル 供試体は普通ポルトランドセメントCと乾燥シルト質ロームSの重量比C/Sを約3, 9, 30%とし、含水比をそれぞれ60%にして混合攪拌し、平面歪条件のもとで90cm×60cm×5.4cmの鋼製容器に打設し、室内で7日間湿潤養生させた。その結果、圧裂引張強度 σ_t 及び一軸圧縮強度 σ_c の平均値はC/S=3%の場合0.21, 0.99(kgf/cm²), 9%の場合1.10, 7.78(kgf/cm²), 30%の場合3.36, 26.42(kgf/cm²)を得た。



3. 比切削抵抗 地盤の掘削強度を示す指標で比切削抵抗というものがある。それは、元来3次元掘削を対象としているが、本研究では平面歪条件で実験を行っているため、区別して2次元における平刃掘削に対する比切削抵抗 R_s とし、これについて考察している。実験は図1に示すように幅 B cm, 長さ $(L+t)$ cmの鋼板を鉛直に深さ t cmだけ貫入させ点 O を固定支点とし最大引張力 P を測定するものである。また, t は C/S が3%の場合2, 4, 6, 8, 10 cmの5通り, 9, 30%

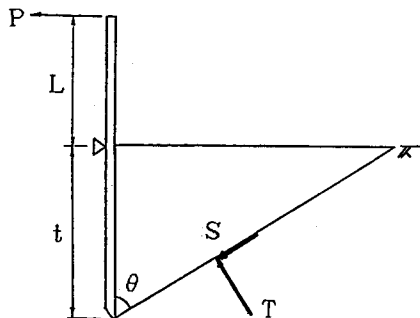


图1 比切削抵抗実験図

の場合2, 4, 6cmの3通りの実験を行い, それぞれ破壊領域の形状も測定した。以下の3つの仮定に基づき理論式を導くことにした。

- 1) 破壊領域は三角形の岩石塊とし, 岩石塊と容器内面との間の摩擦はないものとする。
- 2) 図2に示す破壊基準線に達した時に破壊するものとする。
- 3) 破壊線ABに働く垂直応力 σ_n の分布は地表面で0で刃先方向に近づくにつれ増加し, σ_n を $k S t$ とおいた時引張力 T は次式を仮定した。 λ は地表面からの距離で, θ は破壊領域角である。

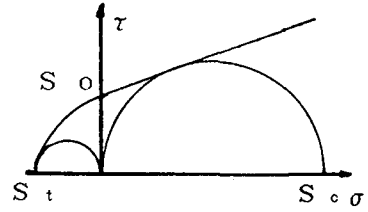


図2 軟岩の破壊基準

$$\sigma_n = \sigma_0 \left(\frac{\lambda}{t / \cos \theta} \right)^n \quad (1) \quad T = - \frac{B k S t t}{2 \cos \theta} \quad (2)$$

σ_0 を $k S t$ とおいた時, せん断応力 τ_n 及びせん断力 S は次式で与えられる

a) $0 \leq k \leq 1$ の場合

$$\tau_n^2 = m S t (S t - \sigma_n) \quad (3) \quad S = - \frac{2 B \sqrt{m} S t t}{3 k \cos \theta} \{ (1 - k)^{3/2} - 1 \} \quad (4)$$

b) $k < 0$ の場合

$$\tau_n = \mu \sigma_n + \sqrt{m} S t \quad (5) \quad S = - B \mu \frac{k S t t}{2 \cos \theta} + B \frac{\sqrt{m} S t t}{\cos \theta} \quad (6)$$

ここで, B は刃幅である。 m, μ は次式で与えられる。

$$m = \frac{S_c + 2 S t - 2 \sqrt{(S_c + S t) S t}}{S t} \quad (7) \quad \mu = \frac{4 m S t^2 - S_c^2}{4 \sqrt{m} S_c S t} \quad (8)$$

まず計算の簡単化のため, $n = 1$ とし, 応力は三角形分布として計算する。掘削刃が岩石塊を押し上げる時の点Oにおけるモーメント M を求め, M を刃幅 B と掘削深さ t の2乗で除した値は次式となる。

$$a) 0 \leq k \leq 1 \text{ の場合 } \frac{M}{B t^2} = \frac{k S t}{6 \cos^2 \theta} - \frac{k S t}{2} - \frac{2 \sqrt{m} S t \{ (1 - k)^{3/2} - 1 \} \tan \theta}{3 k} \quad (9)$$

$$b) k < 0 \text{ の場合 } \frac{M}{B t^2} = \frac{k S t}{6 \cos^2 \theta} - \frac{k S t}{2} - \frac{\mu k S t \tan \theta}{2} + \sqrt{m} S t \tan \theta \quad (10)$$

上式は試料の強度のみによって定まる。これを平面歪条件における比切削抵抗とし, $R s^*$ とおく。

$$R s^* = M / B t^2 \quad (11)$$

理論的に破壊領域角 θ を求めるため $R s^*$ を θ で偏微分し0となる θ を求め実測値と比較してみた。また, 実測値を上記の(9), (10)両式に代入して k の逐次計算を行い理論の $R s^*$ と実測の $R s^*$ とを比較して, 一番近い時の k を算出したところ k はほとんどが負となった。つまり, 破壊線に沿って起こる破壊は全てせん断破壊している事が判明した。次に n を変えて, 同様の計算を行ったところ比切削抵抗 $R s^*$ 及び破壊領域角 θ の

表1 比切削抵抗の実測値 $\theta_m, R s^*(M)$ と理論値 $\theta_t, R s^*(T)$ の比較

C/S (%)	3		9		30	
t (cm)	2.0	6.0	2.0	6.0	2.0	6.0
St (kgf/cm ²)	0.27	0.13	0.66	1.28	2.81	3.41
Sc (kgf/cm ²)	1.09	0.63	3.58	7.44	20.30	16.80
θ_m (度)	60.20	54.60	64.00	70.20	89.00	89.00
θ_t (度)	75.90	55.40	67.30	67.70	86.00	66.60
$R s^*(M)$ (kgf/cm ²)	0.90	0.51	2.16	3.63	40.33	6.42
$R s^*(T)$ (kgf/cm ²)	0.90	0.51	2.42	5.02	40.35	11.33
m	1.52	1.91	2.38	2.59	3.49	2.06
μ	0.50	0.55	0.60	0.63	0.71	0.57
k	-0.90	-4.78	-2.38	-2.46	-0.40	-2.25
σ (kgf/cm ²)	0.25	0.64	1.56	3.15	0.96	7.67
τ (kgf/cm ²)	0.50	0.54	1.95	4.03	5.92	9.24

理論値 $R s^* (T)$, θ_t と実測値 $R s^* (M)$, θ_m は, $n=0.75$ でよい一致をみた。その結果の一例を表 1 に示す。なお σ , τ は破壊線上の刃先端 B 点における垂直応力とせん断応力を示す。なお実験の結果, $R s^* (kgf/cm^2)$ は岩石のせん断強さ $S_0 = \sqrt{m} S_t$ (kgf/cm^2) によって次式の様に表すことができる。

$$R s^* = 2.12 S_0^{0.92} \quad (12)$$

4. 定常掘削抵抗 実験は牽引速度を 7.3 cm/min, 刃幅 B は 5 cm と一定にし, 刃先に作用している軸力及び曲げモーメントを掘削刃に取り付けた歪ゲージにより測定した後, 水平・鉛直掘削抵抗に換算した。実験はすくい角 α を 0 度とし掘削深さ t を 1.5 ~ 6.0 cm (1.5 cm 間隔) と変えて実験を行った。破壊領域を測定したところすべり面は曲線であることが判ったので以下の仮定に基づき理論式を導くことにする。

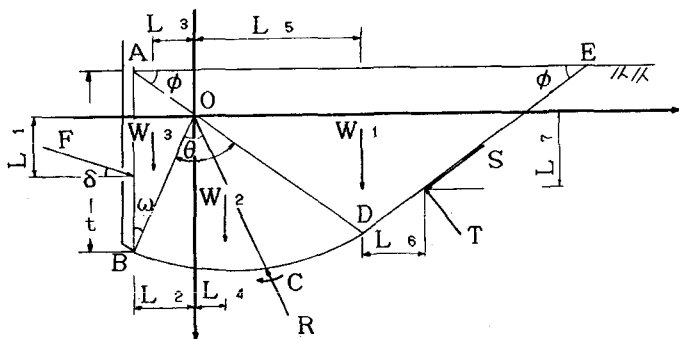


図3 定常掘削実験図

1) 破壊領域は図3に示す様な岩石塊である。破壊線は直線 DE と対数らせん線 BD からなり, 対数らせん線は次式で表す。

$$r = r_0 e^{\theta \tan \phi} \quad (r_0 \text{ は } OB \text{ の長さ}) \quad (13)$$

2) 破壊線 DE に働く垂直応力 σ_n 及びせん断応力 τ_n の分布は地表面で O で刃先方向に近づくにつれて増加するよう次式を仮定した。 λ は地表面からの距離で, m, μ は前章と同様である。

$$\sigma_n = \sigma_0 \left(\frac{\lambda}{DE} \right)^n \quad (14) \quad \tau_n = \mu \sigma_n + \sqrt{m} S_t \quad (15)$$

DE 間のせん断力及び引張力は次式となる。

$$S = - \frac{B \mu k S_t DE}{n+1} + B \sqrt{m} S_t DE \quad (16) \quad T = - \frac{B k S_t DE}{n+1} \quad (17)$$

図3に示すように幾何学的関係から r_0 は t と ω の関数であることが判る。(8)式より点 D の座標を求めた後 ω について微分して傾きを求め, 直線 DE の傾きと等しくなる ω を逐次計算で求める。次に O 点まわりのモーメントを考え, そのモーメントが 0 となる F を求める訳である。F の算定式を次式に示す。

$$F = \frac{Mc + W_1 \times L_5 + W_2 \times L_4 + (T \sin \phi + S \cos \phi) \times L_7 + (S \sin \phi - T \cos \phi) \times (L_5 + L_6) - W_3 \times L_3}{L_1 \cos \delta + L_2 \sin \delta} \quad (18)$$

ここで, W_1, W_2, W_3 は岩石塊 ADE, BDO, ABO の重量である。 Mc , Rf は曲線 BD 上の全粘着力の点 O に関するモーメント及び未知反力である。 $L_1 \sim L_7$ は図4参照。 r_1 は直線 DO の長さで Mc , ϕ は次式に示す。

$$Mc = \frac{B \sqrt{m} S_t (r_1^2 - r_0^2)}{2 \mu} \quad (19)$$

$$\phi = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \quad (20)$$

(φ は内部摩擦角)

表2 定常掘削抵抗の実測値 $R(M)$ と理論値 $R(T)$ の比較

C/S (%)	3		9		30	
t (cm)	3.0	6.0	3.0	6.0	3.0	6.0
S_t (kgf/cm^2)	0.27	0.24	0.87	1.57	4.37	3.43
S_c (kgf/cm^2)	1.09	1.00	9.29	7.88	22.13	22.38
ω (度)	12.25	7.50	-14.85	2.90	5.50	-3.65
$R(M)$ (kgf/cm^2)	28.62	59.42	85.19	172.42	229.13	460.84
$R(T)$ (kgf/cm^2)	28.34	59.62	85.22	175.45	230.30	451.33
m	1.52	1.63	5.87	2.12	2.14	3.04
μ	0.50	0.51	0.88	0.57	0.58	0.67
k	-3.50	-3.30	-13.30	-7.30	-7.20	-9.50
σ (kgf/cm^2)	0.96	0.79	11.53	11.43	31.49	32.57
τ (kgf/cm^2)	0.81	0.71	12.24	8.85	24.55	27.76

そして掘削抵抗の実測値と上式より求めた F を比較して一番近い k を算出したところ前章と同様に k は負の値をとりせん断破壊していることが判明した。 $n=0.60$ で良い一致をみたので、表2に示す。また、実験結果より当然のことながら軟岩の強度が大きくなれば掘削抵抗も大きくなり、掘削深さが深くなっても大きくなることが明らかとなった。

5. 定常掘削抵抗と R_s^* の関係 前節で得られた理論式に同一の強度定数 S_c 、 S_t を代入し両者の関係を調べた。この時の k はそれぞれの平均値を用いた。結果を図4に示す。掘削抵抗を従属変数、掘削深さと比切削抵抗を独立変数として重回帰分析したところ次式を得た。

$$R(T) = 4.12 t^{1.887} R_s^{*0.265} \quad (21)$$

また実測値を用いて掘削抵抗 R (kgf)、水平掘削抵抗 H (kgf)及び鉛直掘削抵抗 V (kgf)と R_s^* (kgf/cm²)について回帰分析を行ったところ次式が得られた。

$$R(M) = 12.47 t^{0.988} R_s^{*0.744} \quad (22)$$

$$H = 10.02 t^{0.925} R_s^{*0.884} \quad (23)$$

$$V = 9.88 t^{0.554} R_s^{*0.412} \quad (24)$$

上記の式によって比切削抵抗を求めれば、掘削抵抗及びその分力である水平掘削抵抗、鉛直掘削抵抗が求められるわけである。

6. 有限要素解析 比切削抵抗実験及び定常掘削実験結果について弾塑性有限要素解析を行い、その適用性の検討を行った。この解析では、関連流れ則を仮定するとともに増分法を用いることによって材料学的非線形と大変形問題を統一的に取り扱った。

圧縮側の降伏条件は取扱容易な平面ひずみ状態におけるDrucker-Prager基準を用いた。

$$f_0 = a J_1 + \sqrt{J_2} - b \leq 0 \quad (25)$$

弾性限度を越えたところの応力増分-ひずみ増分マトリックスは、次式のように求められる³⁾。

$$\begin{bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \\ d\tau_{xy} \end{bmatrix} = [D_0] \begin{bmatrix} d\varepsilon_x \\ d\varepsilon_y \\ d\gamma_{xy} \end{bmatrix} - \frac{1}{S} \begin{bmatrix} S_1^2 & S_1 S_2 & S_1 S_3 \\ S_2 S_1 & S_2^2 & S_2 S_3 \\ S_3 S_1 & S_3 S_2 & S_3^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\varepsilon_x \\ d\varepsilon_y \\ d\gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$S = 4 J_2 \left(\frac{H'}{3} + G + \frac{3 a^2 E}{1 - 2\nu} \right) \quad S_1 = 2 G \sigma_x' + \frac{2 a E}{1 - 2\nu} \sqrt{J_2}$$

$$S_2 = 2 G \sigma_y' + \frac{2 a E}{1 - 2\nu} \sqrt{J_2} \quad S_3 = 2 G \tau_{xy}$$

$[D_0]$: 平面ひずみ状態における弾性の応力-ひずみマトリックス σ_x' , σ_y' : 偏差応力

E : 弾性係数 ν : ボアソン比 G : 剛性率 H' : ひずみ硬化率

また、引張側の降伏条件は式(3)の放物線とした。

引張破壊後の $[D]$ は E を弾性状態の0.001, ν を0.499として処理した。

解析に用いた岩の物性値は $E=454.60\text{kgf/cm}^2$, $S_t=1.198\text{kgf/cm}^2$, $S_c=8.115\text{kgf/cm}^2$, $\nu=0.3$, $H'=10^{-5}xE$ である。 ν , H' 以外はすべて実測した。掘削深さは比切削抵抗実験、定常掘削実験とも6cmである。

比切削抵抗実験を表現するため、刃物と軟岩の境界節点に原点を中心とする回転運動の強制変位を x , y 方向に与えた。回転角が小さいため、比切削抵抗は x 方向だけの節点反力より計算した。図5はせん断破壊域を示したものである。破壊は刃先近傍より始まり、次第に上方に及ぶ。また、破壊域は円弧よりやや下の

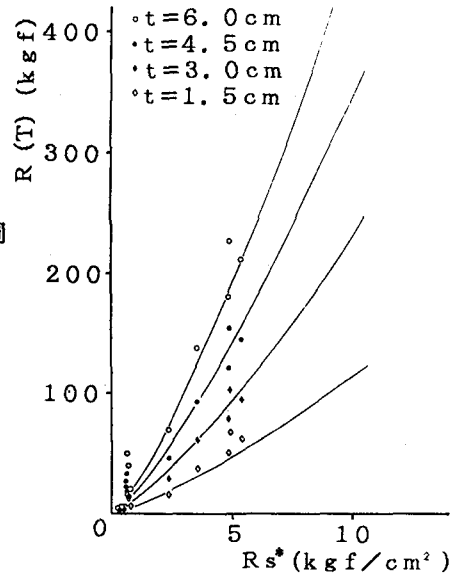


図4 定常掘削抵抗 $R(T)$ と比切削抵抗 $R_s^*(T)$ の関係

領域まで及ぶ。節点反力は先端ほど大きくなっている。

定常掘削実験を表現するため、境界節点のx方向に強制変位を与えるとともにy方向には変位拘束した。掘削抵抗はそれぞれの節点反力の合力より算定した。図6はせん断破壊域を示している。せん断破壊域は前述した受働破壊の形状を示す。また、節点反力は先端ほど大きくなっている。

比切削抵抗実験、定常掘削実験ともせん断型の破壊パターンを示す。しかし、どちらも明瞭なすべり線はみられず、進行性破壊の傾向が強い。

7. 結論

軟岩の基礎的な掘削機構を解明するために、比切削抵抗実験及び定常掘削実験を行い以下の結論を得た。

- (1) 比切削抵抗 R_s (kgf/cm²) と軟岩試料のせん断強さ S_o (kgf/cm²) の関係は式(12)で与えられる。
- (2) 比切削抵抗実験に於て、破壊領域は三角形となり直線破壊線上の垂直応力分布は0.75乗で与えられ、いずれも圧縮応力下に於てせん断破壊している。また定常掘削実験に於て、すべり線は対数らせん線と直線で示され破壊線上の垂直応力分布は0.60乗で与えられ圧縮応力下に於てせん断破壊している。

- (3) 刃幅5cm、掘削深さt(cm)、掘削抵抗実測値R(M)、掘削抵抗理論値R(T)、水平掘削抵抗H及び鉛直掘削抵抗Vはそれぞれ(21)、(22)、(23)、(24)式で与えられる。

- (4) FEM解析より比切削抵抗実験、定常掘削実験ともせん断型の破壊パターンを示す。しかし、どちらも明瞭なすべり線はみられず、進行性破壊の傾向が強い。

参考文献

- 1) 畠昭治郎著；建設機械学，鹿島出版会，pp.151～168，1987。
- 2) 鈴木光，西松裕一，小泉昇三；石炭・岩石類の切削機構について（第2報）—二次元切削実験—，日本鉱業会誌 Vol.82, No.938, pp.502～508, 1966。
- 3) 川本勝万，林正夫著；地盤工学における有限要素解析，培風館，pp.56～96，1978。

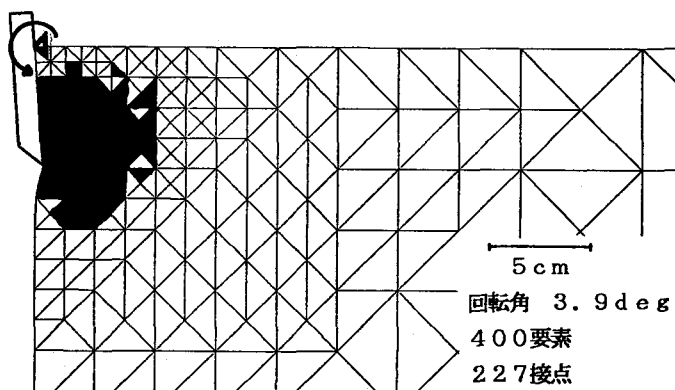


図5 FEM解析によるせん断破壊域（比切削抵抗）

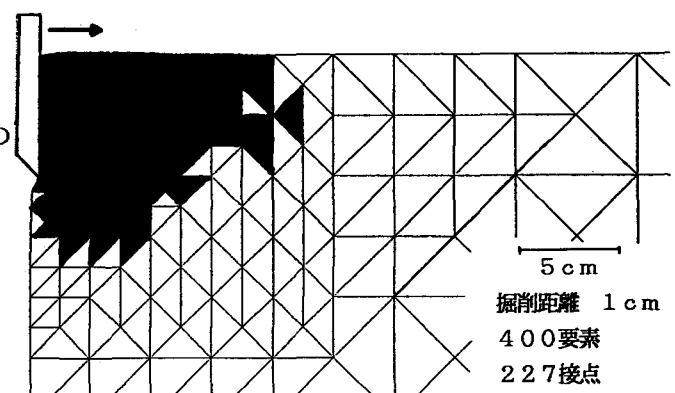


図6 FEM解析によるせん断破壊域（定常掘削）