

リッパチップによる岩盤掘削力の解析

愛媛大学大学院 学生員 松永 好史
愛媛大学工学部 正員 空 達朗

1. まえがき 近年、土木工事において環境や安全性などの点から発破工法が制限され、リッパチップによる岩盤掘削工法が多用されるようになってきた。リッパ工法の特徴として(i)発破工法に比べて安全である、(ii)他の作業を停止する必要がないために作業におけるロスタイムが少ない、(iii)岩盤を痛めることがほとんどない等がある。ここでは岩盤強度と掘削力の関係を求めるために実際の重機による掘削力と岩盤の特性を測定した。また弾塑性有限要素法を用いて、岩盤特性の変化による掘削力を推定し実験結果との比較を行なった。

1. 岩盤特性 図1は製作した孔内試験機で、内径100mmの試験孔に試験機本体を挿入し、油圧ポンプAにより水平方向に直径20mmのピストンを貫入させるものである。それと同時に油圧と変位交換器Cのシリコンダの交位によりBのピストンの貫入力と貫入深さを測定する。実際の掘削現場の岩盤に4ヶ所試験孔をあり、孔内試験を行なった。図2に貫入力と貫入深さの関係の一例を示す。図2よりピストンを1mm貫入させるのに必要な力を求め、その値を変形係数 K とした。ジョイントが存在している岩盤の弾性係数は次式より求めた。

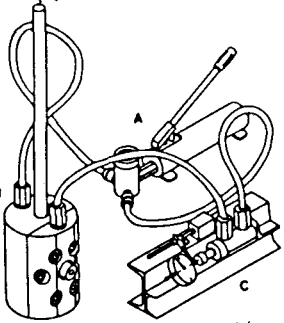


図1 孔内試験機

$$E = K \frac{r}{a} \left(\log \sqrt{\frac{P}{\sigma_t}} + 1 + \nu \right) \quad \text{--- (1)}$$

E : 岩盤の弾性係数 (kgf/cm^2) ν : ポアソン比
 K : 変形係数 (kgf/cm) σ_t : 岩盤の引張強度 (kgf/cm^2)
 r : ホール半径 (cm) P : ピストン圧 (kgf/cm^2) a : ピストン断面積 (cm^2)

また岩盤の圧縮強度 q_u は次式より求めた。表1 現場岩盤の K, E, q_u 値

$$q_u = q \frac{1 + \log N^{3/4}}{1 + \log N} \quad \text{--- (2)}$$

q_u : 岩盤の圧縮強度 (kgf/cm^2)

q : 岩石の単軸圧縮強度 (kgf/cm^2) N : 観測範囲での割れブロック数

求められた K 値、 E 値、 q_u 値を表1に示す。表2は現場より採取した岩石試料の室内試験の結果である。

	現場I	現場II
K (kgf/mm)	2124	1634
E (kgf/cm^2)	68392	42874
q_u (kgf/cm^2)	764	1160

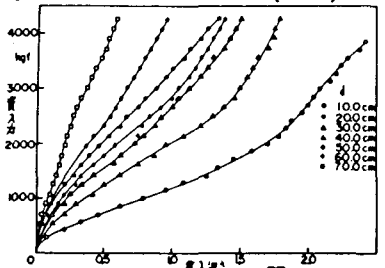


図2 貫入力と貫入深さの関係

3. リッパチップの掘削力の測定 前述の孔内試験を行なった現場において、76t及び45t級ブルドーザを用いてリッピング作業を行ない、チップ

に作用している力を測定した。測定方法は図3に示すように、リッパチップを取り付けているシャック上部に軸圧縮力④、⑤、および曲げモーメント⑥、⑦を別々に測定できるようにストレインゲージを貼り付けた。軸圧縮力、曲げモーメントより水平方向力 F_H 、鉛直方向力 F_V を計算し、チップに作用する合力を求めた。リッピング作業中の作用力を表3に示す。

4. 有限要素法による解析 孔内試験より得た岩盤の弾性係数 E 、および室内試験より得た岩盤の圧縮強度 q_u 。この両者の値を基に2次元平面ひずみ状態における弾塑性の有限要素法解析を行なった。解析にあたって使用した岩盤モデルは鉛直方向500cm、水平方向500cm、節点数173、要素数309のものである。重機による掘削深さを考慮すると、このモデルの地表面より70cmの深さの点に水平荷重0.2t毎、鉛直荷重0.4t毎の段階荷重を

表2 現場岩石特性

	現場 I	現場 II
歪み比	2.58 ± 0.01	2.62 ± 0.02
歪み比	2.60	2.75
自然含水比 (%)	0.22 ± 0.03	0.33 ± 0.06
吸水率 (%)	0.23 ± 0.02	0.66 ± 0.10
シオア率	76.1 ± 10.04	102.3 ± 3.3
圧縮速度 V_1 (m/s)	5035 ± 118	5133 ± 88
引張速度 V_2 (m/s)	963 ± 68	515 ± 81.6
歪み率 $C_r = (V_1/V_2)$	0.96	0.99
歪み率 C_r の誤差 (%)	43.3	30.9
引張強度 (kgf/cm^2)	114 × 10 ³	274 × 10 ³
ポアソン比	0.36	0.22
単軸圧縮強度 (kgf/cm^2)	1909	3249

加え逐次計算する荷重制御と、0.1 cm 毎 表 3 チップに作用する合力と作用方向に1 印点に強制変位を与え逐次計算する変位制御の2通りの解析を行なった。この解析では、関連流れ則を仮定し、材料の非線形と変形の問題を統一的に取り扱っている。降伏条件は、次式のVon-Misesのものを用いた。

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

--- (3)

σ_u ; 岩盤の圧縮強度 (kgf/cm²)

$\bar{\sigma} = \sigma_u$ が満足されると降伏が始まる。弾性限度をこえたところのポアソン比関係は次式のものを用いた。

$$\{d\sigma\} = [De] \begin{Bmatrix} d\epsilon_x \\ d\epsilon_y \\ d\epsilon_z \end{Bmatrix} - \frac{9G^2}{\sigma^2(3G+H)} \begin{Bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x\sigma_y & \sigma_x\sigma_z \\ \sigma_y^2 & \sigma_y\sigma_x & \sigma_y\sigma_z \\ \sigma_z^2 & \sigma_z\sigma_x & \sigma_z\sigma_y \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} d\epsilon_x \\ d\epsilon_y \\ d\epsilon_z \end{Bmatrix}$$

G ; 剛性率 H ; ひずみ硬化率 σ_x, σ_y ; 偏差応力
 $\bar{\sigma}$; 相当応力

--- (4)

なお岩盤の引張強度は圧縮強度の0.07倍した値、破壊した要素については、弾性係数を元の1/1000.000、ポアソン比を0.499にして処理した。

5. 解析結果と考察 図4に変位制御で行なった岩盤の弾性係数と圧縮強度を変化させた時の掘削力の解析結果を示す。ここにおける掘削力は10 cmの強制変位を与えた時の力 F_{20} を示している。図4より岩盤の圧縮強度、弾性係数が大きい程 F_{20} の値も大きくなっている。また岩盤の圧縮強度の大きいところでは弾性係数の値の変化が掘削力の変化に大きく影響している。解析値と実測値との比較を行なってみると、現場Iにおいては解析値25.6tf、実測値32.7tf、現場IIにおいては解析値23.2tf、実測値18.9tfとなる。解析値は現場Iにおいては小さく現場IIにおいては大きくなっている。これは求めた岩盤の圧縮強度に問題があるのではないかと考えられる。次に荷重制御で行なった要素の破壊状態を図5に示す。このとき岩盤に作用している合力は35.8tfである。破壊は引張破壊がほとんどであり、破壊領域は地表面より100 cmの深さに達している。これは荷重載荷点の30 cm下であり岩盤を痛める領域の少ないことがわかる。

6. まとめ 以上、岩盤の圧縮強度、弾性係数を考慮して弾塑性の有限要素法解析を試みた。解析による掘削力は実測値とは少し異なるが大きな傾向は同じであった。また破壊領域は深さ方向には大きくは広がらなかった。これより岩盤の圧縮強度と弾性係数を求めることで対応する岩盤の掘削力が予測できると考えられる。今後は両者の物性値をより的確に求め、さらに破壊領域との関連についても研究していくつもりである。

参考文献 1) Manuel Rocha et al; Determination of the deformability of rock masses along boreholes, Proc 1st Congress of the ISRM, PP697-704, 1966 2) 土木学会岩盤力学委員会第3分科会; 原位岩盤の試験法, 岩の力学'80, PP80-84, 1981 3) 山田喜昭; コンピュータによる構造工学講座 I-2-A 塑性・粘弾性, 培風館, PP59-84, 1979

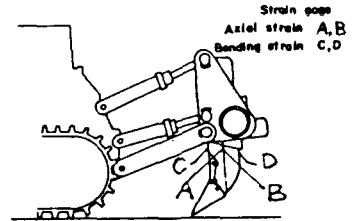


図3 ストレインゲージ配置図

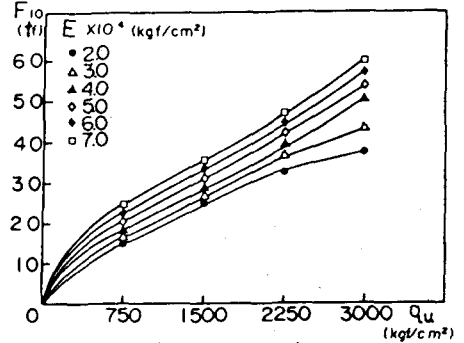


図4 圧縮強度 σ_u 、弾性係数 E と掘削力 F_{10} の関係

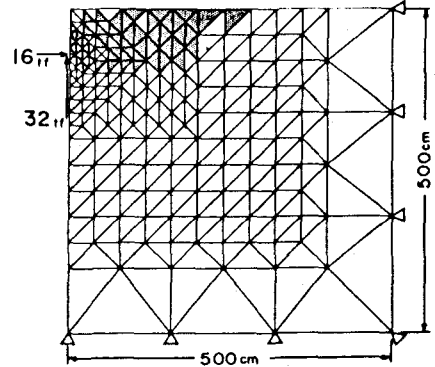


図5 岩盤モデルの破壊状態図