

Ⅲ-351

岩盤切削に関する模型実験と破壊力学の適用

徳島大学工学部 正 員 藤 井 清 司

西松建設（株） 正 員 大 林 孝 一

住友建設（株） 高 科 浩 之

1. はじめに トンネル等の掘削工事中において岩盤を切削する時、合理的な方法、すなわち、より小さな力で、より多くの岩を切削する問題に、破壊力学による理論的考察を加えることを目的として研究を行っている。そこで、第一段階としてその切削機構を把握するため模型実験を行い、以下のような結果を得たので、ここに報告する。岩盤切削時、岩盤表面の破碎の基本的なメカニズム、および、その切削方法により実験の条件としては種々考えられるが、ここでは、切削刃を平行移動あるいは回転させることによるとする。そして、一度の切削深さ、掘削機械の切削刃の角度の2つを種々変化させて実験を行う。この時、模型試験体は一定厚さの2次元板状とし、切削1サイクルをモデル化した実験である。

2. 実験 切削方法は、刃が平行に移動することによるため、図のようなガイドにより刃先が試験体に押し込まれるような機構になっている。試験体寸法は図の通りで厚さは10.0cm、切削深さdが10.0, 5.0, 2.5cmの3種とする。切削角度 α は、表-2に示すように、5種類とし角度が大きくなると刃先が鋭くなることを表す。試験体材料は、材令7日間のモルタルで、その材料強度特性は表に示す。モードIの破壊靱性値は73.0kgf/cm^{3/2}である。この実験における測定項目は、荷重、図の位置での水平、鉛直方向の変位、刃先から水平線の上に10mm間隔に貼られた3枚の歪ゲージによるひずみ、その他、アコースティック・エミッション等である。載荷速度は5kgf/secとする。試験体破壊後、破面の観察、き裂進展面のスケッチ等を行う。この破面観察により破壊がせん断によるか、引張りによるか等の判別が行える。

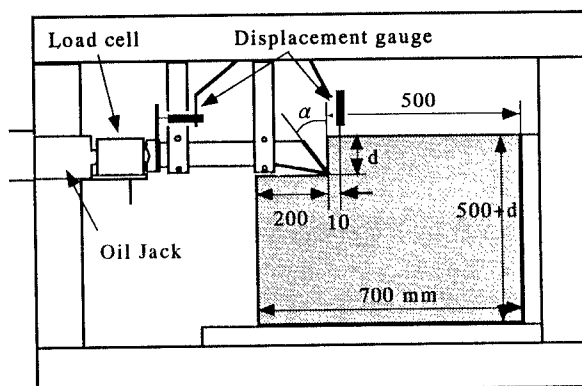


図-1 実験装置（単位mm）

表-1 材料特性

σ_c (kgf/cm ²)	σ_t (kgf/cm ²)	E (kgf/cm ²)	ν	K_{Ic} (kgf/cm ^{3/2})
395.8	33.2	2.16×10^5	0.18	73.0

3. 実験結果 ここでは紙面の関係上、主に表-2に示した切削深さ5.0cmの結果について述べる。まず、破壊強度は切削角度が大きくなるにつれて、すなわち、刃先が鋭くなるにつれて小さくなっている。これは表の次の欄に示したEvansの理論強度の減少傾向と同じだが、しかし、その値は大きく異なっている。この理由はEvansの理論強度は岩盤の引張り強度のみから求められるため、破面の観察より破壊にせん断

$$F_c = \frac{2tWd \sin \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right)}{1 - \sin \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right)}$$

F_c : 破壊時の切削方向の力
 t : 岩盤の引張り強度
 W : 切削幅(奥行き幅)
 d, α : 図-1参照

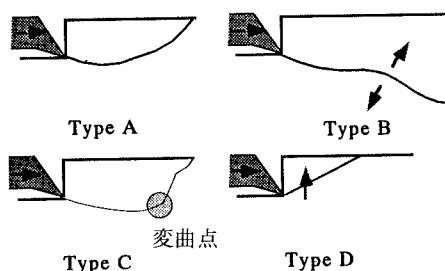


図-2 破壊タイプ

が関与していることは明かで、これを考えに入れていない Evans の理論値と異なった値が得られたと思われる。

次に、き裂進展形状、すなわち、破壊破片の形を模式的に表すと図-2に示すような4タイプになる。ここで、Type Bは、模型では生じるが現実の岩盤では起こり得ない形式であり、原位置ではType A、または、Cの何れかになるものと思われる。Type CはAの途中変曲点で急に上方に方向を変え、ここから上は引張り破壊を生じる形式である。

この表-2より、刃先が鋭くなればType Bから、Aに移行する。き裂進展角度とは、刃先端接触点鉛直下方から左回りに測定した角度で、例えばType Dの場合は、90°以上の値となる。この進展角度をみれば、同じ破壊タイプでは、切削角度が大きくなるほど多少下方に掘れ込むようにき裂が進展し始めることがうかがえる。掘削深さ5.0cmではType Dの破壊は表れないが、掘削深さ2.5cmで切削角度の15°、25°の時、言い換えれば、刃先端から自由表面までの距離が小さく、掘削面全体を水平に押すような荷重状態の時に生じる。この時、破壊は山はねの状態ではねの状態で瞬間的に生じる。

4. K 値の計算 切削刃が岩石に押しつけられた時そこからき

裂が生じ、その先端部において破壊力学の適用が可能となる。切削刃角度を種々変化させたとき、予め設けた予き裂先端での応力拡大係数K値を計算する。計算は境界要素法で、変位と応力の接続外挿法による。まず、予き裂を切削刃先端から鉛直下方から左回りに図-3に示した $\theta = 45^\circ \sim 90^\circ$ の何れかの角度で、長さ3cmのものを設けておく。そして、刃先角度に対応させた単位荷重を水平方向から左回りに载荷角度 β として、刃先端部に右上向きに载荷する。図-3には、その代表例として $\beta = 15^\circ$ の計算結果を示す。この図は、ある θ の予き裂先端でのKI値、KII値を計算し、これを(KI, KII)座標面にプロットする。それが図中の記号で表された点である。原点とこの記号を結んだ直線は、荷重が増加した時、このK値はこの直線上を増加していくことを示している。また、図中の放物線はこの材料の混合モード破壊靱性値を表している。ゆえに、上の直線がこの曲線と切り取られる線分を見たとき、先にプロットされた点がこの線分上で曲線に近い位置にあれば、それだけ破壊の危険性が高いことを表す。よって種々のき裂進展角度の内ではプロットされた記号が曲線に最も近いものの角度でき裂が進展していくことを表す。これらの結果として、载荷荷重が水平に近いとき($\beta = 15^\circ$)、き裂の進展方向が斜め下方($\theta = 45^\circ$)を向いている時はモードIが卓越した破壊となり、進展方向が水平($\theta = 90^\circ$)に近い時はモードIIのせん断が卓越した破壊を生じる。しかし、 $\beta = 15^\circ$ の場合、破壊靱性値への接近度はどの角度でもほぼ同じであるためき裂がどの方向に進んで行くかは確定できない。これより、切削刃が鋭い時は、最初に刃が岩盤に押し込まれた時に生じたき裂の方向に従ってそのままき裂は進展する。その進展方向により変形モード状態が規定されることになる。

参考文献 1) B. N. Whittaker, R. N. Singh and G. Sun: Rock Fracture Mechanics Principles, Design and Applications, Developments in Geotechnical Engineering, 71, Elsevier, 1992.

2) Evans, I: A theory of the mechanics of coal ploughing, Proc. Int. Symp. of Min. Res., G. Clark, (Ed.), 2, Pergamon Press, London, 1962.

表-2 切削深さ 5.0cm の実験結果

切削角度 (α)	破壊強度 (tf)	Evansの理論 強度 (tf)	き裂進展 角度(θ)	破壊 タイプ
15°	7.49	5.19	61.7°	B
25°	4.53	3.90	55.6°	B
35°	4.10	2.85	88.1°	A, (C)
45°	3.97	2.03	82.3°	A, (B)
55°	2.67	1.43	77.0°	A, (B)

() 内はそれぞれ5試験体中1例がこのタイプ

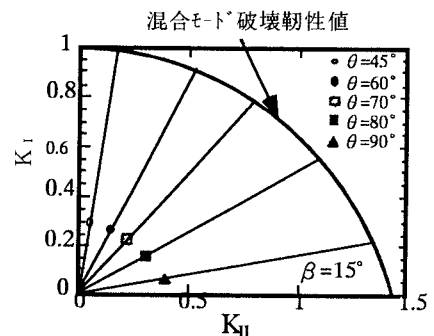


図-3 応力拡大係数 ($\beta = 15^\circ$)