

2. 岩盤掘削問題に対する破壊力学の応用 - rock cutting を中心に -

(1) はじめに

岩盤掘削はトンネル、地下空洞、ダム・橋梁基礎、切取斜面などの土木工事において、また、地下資源、エネルギーなどの資源開発において欠くことのできない基本的な技術である。そして、掘削のメカニズムの解明は掘削制御などの技術的な面のみならず、工事全体の効率化および経済化に結びつく重要な課題である。岩盤の掘削方法は、1) 機械掘削、2) 発破掘削、3) 化学的掘削、などに分類することができるが、ここでは機械による rock cutting を対象に述べる。

rock cutting を行う掘削機械として、ロードヘッダ、カッターローダ、トンネルボーリングマシン (TBM) などが良く知られている。これらの機械では掘削部先端に掘削刃 (cutting tools) が取り付けられ、それを岩盤表面に強く押しつけたり、平行に移動させたり、あるいは回転させることによって岩盤表面を破碎し最終的に岩盤を掘削するものである。

岩盤表面の破碎の基本的なメカニズムは、図 2.1 に示すように考えられている¹⁾。すなわち、a) くさび型の刃先を岩盤に押し込むとスラスト力を作用させた方向に分離クラックが生じ、続いて横方向に二次クラックが進展し岩盤を破碎する、b) ボタンカッタを強く押しつけると刃先近傍に圧砕ゾーンが形成され、その境界から初期クラックが生じ、続いて横方向に二次クラックが進展し破碎する、c) 刃先を岩盤表面に平行に動かし岩盤にせん断あるいは分離破壊面を生じさせ削り取るように破碎する、d) ディスクカッタを回転させると初期クラックが発生し、続いて隣接するディスク間の岩盤において横方向に二次クラックが進展し、それらが交差することによって破碎する、ものである (いずれも図 2.1 参照)。これらは、1) 刃先を押しつけることによる破碎、2) 平行移動あるいは回転による破碎、3) 1) および 2) の組み合わせによる破碎、に大別できる。以上に述べた破碎のメカニズムを力学的にモデル化し、破碎のプロセスなどを解析することは、掘削刃や掘削機械の設計において重要である。そして、そのような問題に破壊力学の理論を適用できる可能性がある。

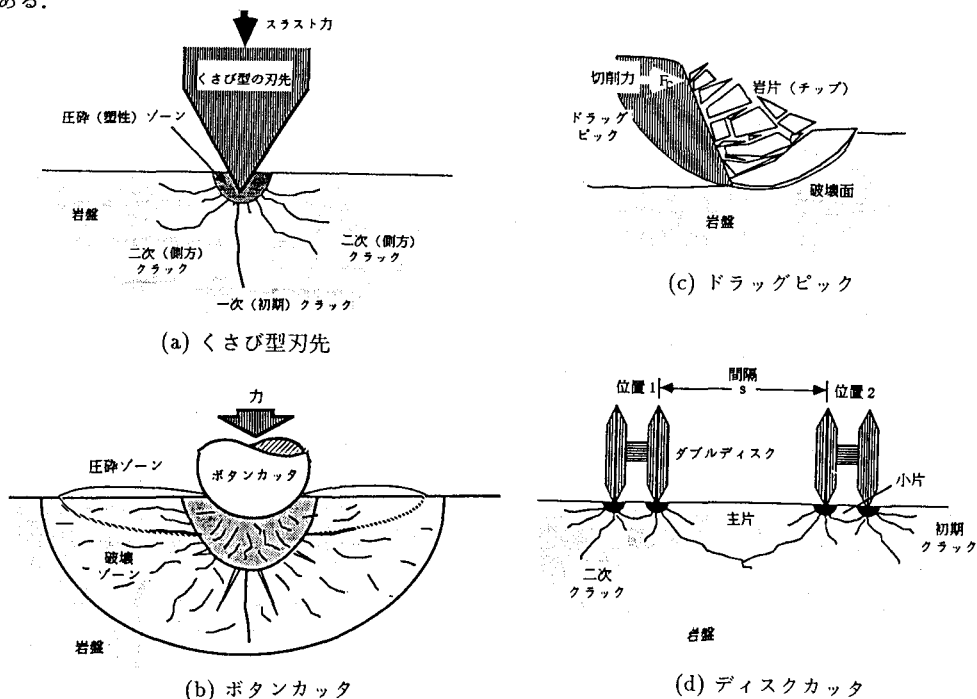


図 2.1 岩盤破碎のメカニズム¹⁾

(2) 従来の研究の概要¹⁾ - rock cutting の力学モデル -

rock cutting による岩盤掘削の問題への力学的なアプローチとして、掘削岩片に対して極限平衡法を適用するものがある。例えば、drag pick による岩盤表面切削(図 2.1(a))に対して、破壊面を実験的事実などに基づいて仮定して、破壊面上の抵抗力和掘削刃から加えられる外力に対して釣合式をたてて掘削に必要な力を求める²⁾⁻⁴⁾などの研究が、また、ディスクカッタによる岩盤掘削に対して、カッタの貫入力と岩盤の圧縮破壊抵抗力を等しいと置いて破碎のためのカッタの推進力を求める⁵⁾など研究がある。

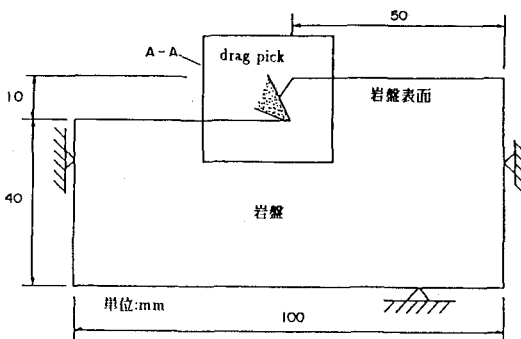
一方、岩を対象とした破壊力学の応用に関する基礎的な研究は数々みられるが、rock cutting へ適用した例は少ないようである。たとえば、drag pick による岩盤表面切削を対象に、岩盤のクラック進展と破砕片の形成を数値シミュレーションによって検討した例がある⁶⁾⁻⁸⁾。それらはいずれも、線形破壊力学を適用して二次元問題として解析している。また、破壊靱性値と TBM の掘進率との関係を調べた研究がある⁹⁾。

(3) 破壊力学の応用

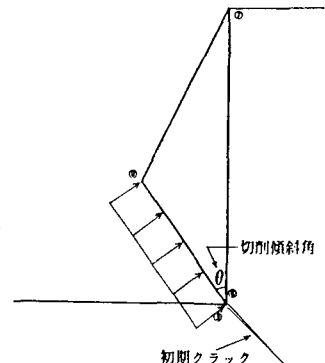
破壊力学を岩盤掘削問題に応用するためには、対象とする岩盤に対してクラックの発生および進展条件を設定する必要がある。線形破壊力学において、数々の条件が提案されており、1) 最大接線応力基準 (maximum tangential stress criterion), 2) 最小ひずみエネルギー密度基準 (minimum strain energy density criterion), 3) 最大エネルギー解放率基準 (maximum energy release rate criterion) などが基本的なものとして良く用いられる¹⁾。ここでは、1) の基準に基づいて、drag pick による岩盤表面の破碎について数値シミュレーションを行った例を示す。

図 2.2 に解析対象とする二次元モデルと境界条件を、図 2.3 に有限要素の分割を示す。シミュレーションでは、掘削刃のあたる岩盤の切削傾斜角 (rake angle; 図 2.2(b) θ) をパラメータとして、クラックの進展の状況と最小切削荷重 (クラックが最初に生じる荷重) を調べた。結果の一例を図 2.4 および 2.5 に示す。

これらの図から、切削傾斜角が小さいほどクラックは岩盤表面から深い位置を進展し、最小切削荷重も大きいことがわかる。切削傾斜角が大きいと最小切削荷重は小さいものの、切削される岩片の体積は小さく (クラックがすぐに表面に達する) 切削効率が低くなることがわかる。このような解析から最適切削傾斜角および切削荷重などを検討することが可能である。図 2.5 には、Nishimatsu のせん断破壊モデル³⁾と Evans の引張破壊モデル⁴⁾による解析例を併せて示しているが、本解析は前者のモデルの解に近いことがわかる。なお、本解析には、谷口教授 (岡山大学) の開発された自動要素分割クラック進展解析有限要素プログラムを用いた。



(a) ドラッグピックによる岩盤破碎の二次元モデル⁸⁾



(b) 切削部の拡大図 (A-A 部分)

図 2.2 解析モデル

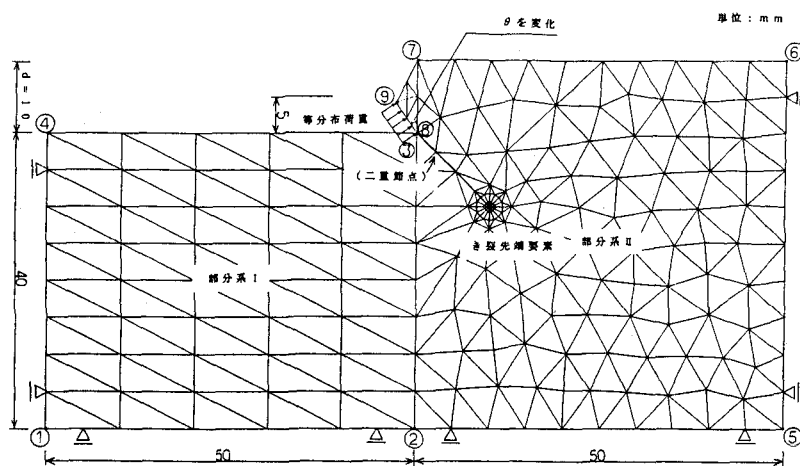


図 2.3 有限要素分割図

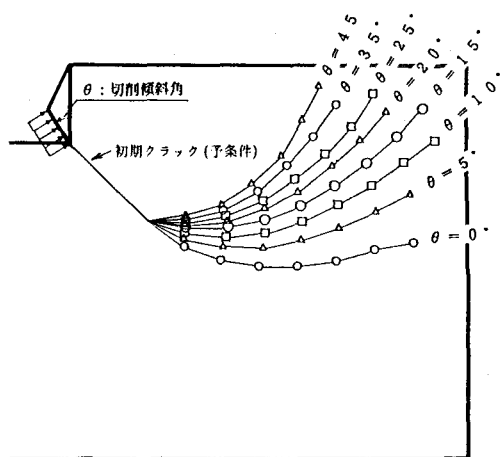


図 2.4 クラックの進展経路

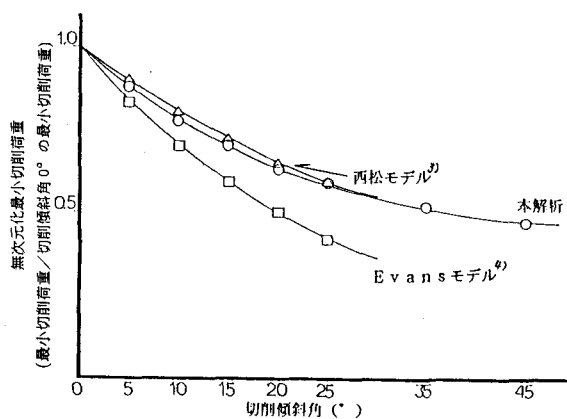


図 2.5 切削傾斜角と最小切削荷重

(4) むすび

本章では rock cutting による岩盤掘削への破壊力学の応用の現状を述べ、解析結果の一例を示した。掘削問題への破壊力学の応用はまだ十分ではなく、今後、より実際の掘削状態に近いモデルの確立、妥当性のあるクラック伝搬のモデリング、クラックの進展・交差のシミュレートが可能な数値解析プログラムの開発などを進める必要があると思われる。なお、破壊力学は発破による掘削問題などのような動的破壊にも適用が試みられている¹⁾。

参考文献:1) B. N. Whittaker, R. N. Singh and G. Sun : Rock Fracture Mechanics - Principles, Design and Application, Elsevier, 1992. 2) E. L. J. Potts and P. Shuttleworth, Trans. Inst. Min. Engr., 117, p.520, 1958. 3) Y. Nishimatsu, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 9, p.261, 1972. 4) I. Evans, Proc. Int. Sympos. of Min. Res, 2, p.761, 1962. 5) F. F. Roxborough and H. R. Phillips, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 12, p.361, 1975. 6) V. E. Saouma and M. Kleinovsky, Proc. US Sympos. on Rock Mech., p.792, 1984. 7) A. R. Ingraffea, Fracture Mechanics of Rock, p.71, 1987. 8) H. Guo, N. I. Aziz and Schmidt, Eng. Fracture Mechanics, 41(5), p.771, 1992. 9) P. P. Nelson, A. R. Ingraffea and T. D. O'Rourke, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 22(3), p.189, 1985.

(山口大学工学部 清水則一, 松重宗徳, 甲口典明, 中川浩二)