

III-B7 三次元境界要素法解析を用いた岩盤の割岩掘削時のき裂進展解析

株式会社フジタ 正会員 野間達也

東北大学 正会員 松木浩二

1. はじめに

筆者らは、硬岩トンネルの割岩掘削工法として、単一孔連続穿孔方式による新しい自由面形成工法と、液圧膨張式割岩機を主体とした割岩工法の開発に取り組んできた¹⁾。ここで、割岩工法による掘削工法では、全般的に理論的な破碎設計法は開発されていないのが現状である。このため、筆者らは割岩工法の破碎設計法を構築するために、割岩機により発生するき裂進展について注目し、二次元境界要素法を用いてき裂先端の応力拡大係数を解析し、線形破壊力学に基づいて岩盤の破碎に必要な力と最小抵抗線・割岩孔間隔についての関係を求めた²⁾。しかし、この方法は二次元解析であるために、無限長さの割岩孔壁に載荷するのと同じ結果であり、現実とは異なる。このため、現実的である三次元解析を行い、二次元解析結果と比較し、その有効性を確認する必要がある。

以上の観点より、本報では三次元境界要素法を用いた割岩工法における破碎時のき裂進展についての解析を行い、二次元解析との比較を行った。

2. 解析モデル

用いたモデルを、図. 1 に示す。図中における D は割岩孔径であり、 D で無次元化している。今回のモデルでは実際の施工状況を反映させ、最小抵抗線距離 W を $10D$ 、孔間隔 $2H$ を $10D$ としたが、割岩孔中心および孔間隔中心で対称となるため、図のようなモデルとなる。

境界条件としては、孔壁に与える表面力は二次元解析と同様としたが、今回対象とした割岩機はゴムチューブを膨張させるタイプであり、割岩孔の深度方向の載荷面は図に示したように実際のゴムが膨張する部分とした。また自由面以外の面は、き裂面以外は面の法線方向に対して変位を固定した。

発生するき裂は、図に示したような長方形とし、き裂長さ a を変化させ、各き裂長さに対する応力拡大係数を求めた。この際、二次元解析と同様に、解析全般を 2 次要素で行うとともに、き裂最前縁の要素には変位型の特異要素を用いた。

本解析では、き裂が孔間で連結することに注目し、き裂開口型であるモード I の応力拡大係数 K_I を求めたが、 K_I は二次元解析と同様に変位外挿法により求め、また無次元応力拡大係数により結果を評価した。なお、解析に用いた物性値はヤング率 $E=39.2\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.2$ とした。

3. 解析結果

今回の解析では、 $a/H=0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ のき裂長さの場合の無次元応力拡大係数を求めた。図. 2 に、割岩孔を連結する方向へ進展するき裂に対する、各無次元クラック長さ a/H における無次元深度と無次元応力拡大係数の関係を示す。いずれのき裂長さでも応力拡大係数は、深度とともに増加した後減少している。従って、実際に生じるき裂は、本解析で仮定したような直線的前縁ではないことがわかる。

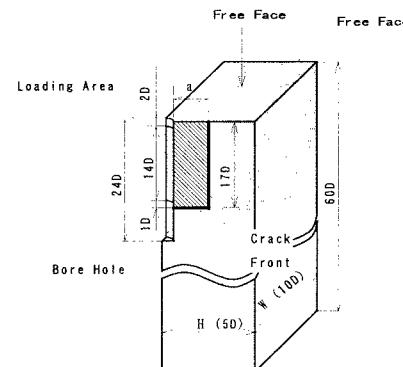


図. 1 解析モデル

キーワード 割岩工法 破碎設計法 三次元境界要素法

〒243-0125 厚木市小野 2025-1 Tel0462-50-7095 Fax 0462-50-7139

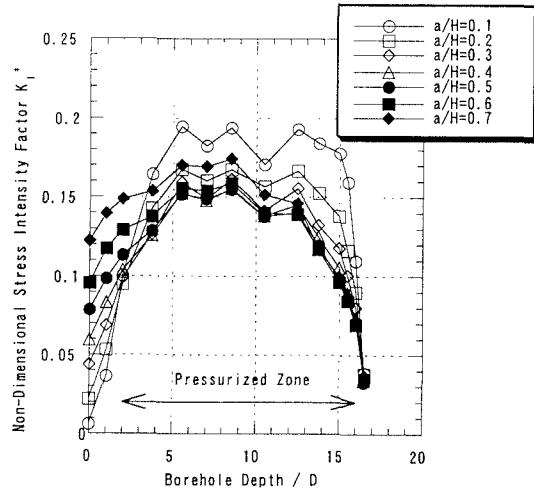


図. 2 き裂進展に伴う無次元応力拡大係数の変化

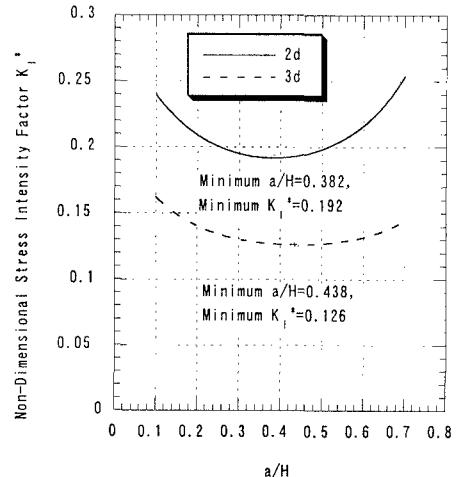


図. 3 二次元結果と三次元結果の比較

応力拡大係数が大きいほどき裂が成長しやすいことを考慮すると、この図はき裂の形状を定性的に表していると考えられる。すなわち、実際の破碎時には、き裂は割岩孔深さの中央部分が先行して進展し、表面に現れるき裂はこれより小さいことがわかる。この傾向はき裂成長の初期の段階で顕著であり、き裂の進展とともにき裂前縁が一様になる傾向にあるが、割岩孔底面のき裂はほとんど成長しない。

このように、三次元解析結果より得られる無次元応力拡大係数は、割岩孔方向の深度に依存する。このため、各き裂長さにおける平均的な無次元応力拡大係数を次式により求めた。

$$K_1^* = \sqrt{\sum_{i=1}^n (K_{1i}^*)^2 \cdot \frac{W_i}{W_0}}$$

ここで、 K_{1i} :節点*i*における無次元応力拡大係数、 W_i :節点*i*が占める無次元前縁長さ、 W_0 :無次元き裂前縁長さである。

この結果と、同様のモデルから得られた二次元結果を比較した結果を図. 3に示す。なお、この図は、解析結果を6次多項式で近似して得られた式を示している。この図より、三次元解析結果でも無次元応力拡大係数の最小値が存在するため、破碎設計を構築可能であること、また三次元解析より得られる無次元応力拡大係数の最小値は、二次元解析の約66%となることが示されている。二次元結果に対する三次元結果の低下の主な原因については、①三次元の場合、アクアスプリッターによる載荷がき裂の全域ではないこと、②アクアスプリッターによる圧力が割岩孔底部のき裂の変形にも使われること、が考えられる。なお、割岩孔底部のき裂の変形（割岩孔の深度方向へのき裂の進展）については本報では割愛する。

4. おわりに

割岩工法の破碎設計法を構築するために、三次元境界要素法を用い、き裂進展解析を行ったところ、き裂の進展が定性的に明らかとなった。また、三次元解析結果でも無次元応力拡大係数の最小値が存在するため、破碎設計を構築可能であること、三次元解析より得られる無次元応力拡大係数の最小値は、二次元解析の約66%となることが明らかとなった。

（参考文献） 1) 野間他：新しい自由面形成と割岩方法による硬岩トンネルの機械化掘削、土木学会論文集、第567号、pp.81～90、1997. 2) 野間、松木：岩盤の静的破碎工法における設計法の開発、第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.299～304、1998.