(III－11)　３Ｄ不連続体解析 FESM による岩石亀裂のフラクタル特性と強度に関する研究

前橋工科大学・建設工学科　学生会員　中 川 真 介
前橋工科大学・建設工学科　正会員　濱 島 良 吉

１．研究の目的

岩石には種々の亀裂が内在しており、この亀裂の存在と強度は密接に関連している。しかし３主応力状態で亀裂がいかに進展するかといった力学的検討はまだ十分になされているとはいえず、強度との対応も不十分である。本研究では３Ｄ不連続体解析 FESM を用いて応力の変化による亀裂の進展とそのフラクタル特性、及び亀裂進展に伴う強度変化との対応を調べた。

２．３D 不連続体解析 FESM の概要

(1)FESM の特徴

①FESM では変位関数を剛体変位と要素内ひずみで表すため、要素毎に変形を独自に定めることができるので、要素間での相対変位を定めることが可能となり、不連続体としての解析が可能となる。

②変位関数を要素の重心の剛体変位と要素内ひずみで定義することにより、要素形状の制約がなくなり、任意の多角形要素を使用することができる。

(2)引張り破壊を考慮した不連続体解析

一般に土や、多くの節理、亀裂面等を含む岩盤は引張りに弱く、亀裂が入りやすい。よって、ここで引張り破壊に対する FESM の理論を説明する。

①引張り応力による破壊

要素間の境界面において引張り垂直応力 σ_n が引張り強度 σ_T を超えると、引張り破壊が生じるものとした(図１)。また、引張り破壊が生じた場合、剛性はゼロになり、そのときの垂直応力とせん断応力は瞬時に０になるものとする。

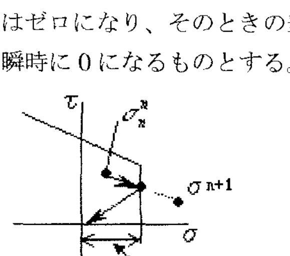


図 1.引張り破壊

②引張り相対変位による破壊

引張り応力 σ_T をバネ剛性 k_n で割ったものを引張り相対変位の強度 δ_T として扱う。垂直引張り相対変位 δ_n が引張り相対変位の強度を超えると、引張り破壊が生じるものとする。

③亀裂の再接触

引張り破壊を起こすと、垂直応力とせん断応力はゼロになるものとする。要素境界の剛性は０になり、その後相対距離が０以上になれば、開口が生じ、開口後において相対距離がゼロ以下になれば再接触したことになる。開口している場合には、剛性は０とし、再接触以後は、垂直方向は剛性は弾性、せん断方向の剛性は小さな値として扱うことにする(図２)。

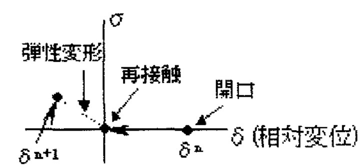


図 2.引張り破壊後の再接触

④増分法

本解析では非線形な剛性の取り扱いとして山田(1972)による増分法を適用する。山田の増分法は、各増分段階で要素またはバネを１つづつ降伏または引張り破壊させていき、降伏または引張り破壊させるのに必要な増分量を自動的に定める方法である。この方法を用いれば、進行性の破壊状況を精密に検討することができる。簡単な計算の流れを説明する。

1)弾性の要素、境界面については$[k_{spg}]$、$[D_{ELM}]$を用いて剛性行列を作成し、塑性化、引張り破壊した要素、境界面はそれぞれ破壊後の剛性行列を作成する。

2)与えられた外力に対して 1)で求めた剛性行列を解き増分変位 {du}、増分ひずみ {dε}、増分応力 {dσELM}、{dσSPG} を求める。

3)この結果から得られた増分応力に対し、すべての要素またはバネの応力が降伏強度または引張り強度と等しくなるような増分率 r を求め、その最小値を r_{min} とする。

キーワード：不連続体解析　岩石亀裂　フラクタル

連絡先：前橋工科大学　〒371-0816　前橋市上佐鳥町 460 番地　TEL.027(265)0111　FAX.027(265)3837

4) 3)で求められた r_{min} を増分変位、増分ひずみ、増分応力に掛け、前回までの変位、ひずみ、応力に加え合わせる。この結果から得られた値を全変位、全ひずみ、全応力とする。

5) 1)～4)を所定の荷重になるまで繰り返す。

⑤剛性の変化

剛性は要素または要素間のバネの状態により変化する。ここで引張り破壊、再接触を含めて剛性の取り扱いについて次のように分類する。1)破壊以前⇒弾性、2)せん断降伏、再接触⇒塑性(関連流れ則)、3)除荷状態、負荷状態⇒弾性、4)引張り破壊、開口⇒剛性が 0 になる、5)再接触後⇒垂直方向のみ弾性、せん断方向には微小、引張り強度は 0 になる

3．研究方法

(1)FORTRAN での数値計算

本研究では FESM の解析を FORTRAN で行った。以下にその方法を説明する。

1)FORTRAN77 言語で FESM の解析プログラムを作成する。

2)インプットデータを作成する。解析するモデルは直方体の岩盤をボロノイ要素によって 231 要素に分割し、上面に荷重をかけた(図 3)。

3)FORTRAN でプログラムを翻訳、実行する。

4)実行が終了するとアウトプットデータが作成されるので、それを Basic で絵に表し、モデルの変形、亀裂の進展・サイズ・頻度を調べ考察する。

(2)フラクタル次元の算出方法

1)亀裂のサイズを計測し、そのサイズを一定の間隔で分類し、その最大値を d とする。サイズごとの亀裂の個数 N(d)を数える。横軸に logd、縦軸に logN(d)をとり、グラフを作成し、近似曲線を描き傾きを出す。その傾きがフラクタル次元である。

2) 2 次元の場合にはモデルを 1 辺の長さ d の正方形に、3 次元の場合には立方体に分割し、亀裂に入っている正方形・立方体の個数 N(d)を数える。d を徐々に小さくしていき、それぞれの N(d)を数える。フラクタル次元の算出方法は 1)と同様である。

3．結果と考察

解析した結果、引張り力と降伏によって、モデルに亀裂が生じた。また、応力が増大するにつれて、亀裂が進展していくという結果を得ることができた。例として、要素内部の任意の面である z-x 平面の亀裂(図 4)の頻度のフラクタル次元(2 次元)を算出したところ、-1.116 となった(図 5)。一般に 2 次元の亀裂のフラクタル次元は 1～2 であるので、この値は当てはまった。また、同様に亀裂のサイズのフラクタル次元(2 次元)を算出したところ、-1.073 となり(図 6)、これも一般のフラクタル次元に当てはまった。2 次元の亀裂のサイズ・頻度にはフラクタル特性が観察されたが、3 次元のフラクタル特性についてはまだ研究中である。

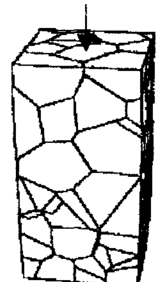
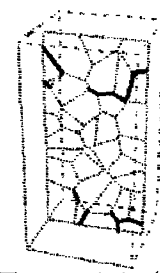


図 3.解析モデル



太線は亀裂を表す

図 4.z-x 平面の亀裂

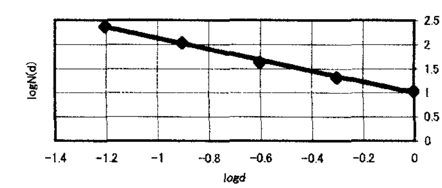


図5.z−x平面の頻度の亀裂のフラクタル次元

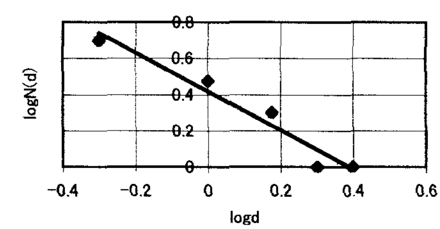


図6.z−x平面のサイズの亀裂のフラクタル次元

4．結論

FESM を用いた解析により、目では見ることのできなかった岩盤の内部の亀裂を容易に観察することができ、任意の平面での亀裂の進展・サイズ・頻度にはフラクタル特性があることが証明された。しかし、3 次元の亀裂のフラクタル特性についてはいまだ解明されておらず、更なる研究が必要である。また、実際の岩盤と比べての精度に関しても議論の余地が残されていると考えられる。