

剛体ばねモデルを用いた不連続面を含む脆性材料の破壊解析

木更津工業高等専門学校専攻科 学生会員 ○吉田 理紗
正会員 石井 建樹

1. はじめに

岩盤は断層や節理などの不連続面を多く含み、複雑な荷重を受けた脆性材料である。そのため岩盤材料は、不連続面の長さや角度、配置条件、開口・閉合の違いによって破壊挙動もその影響を受け、強度特性や変形特性が変化する¹⁾。岩盤は多くの亀裂や節理が含まれており、そうした破壊挙動をとらえながら、強度を定量的に評価検討することが重要である。

そこで本研究では、不連続挙動を容易に表現できる剛体ばねモデル：RBSM (Rigid Bodies-Spring Model) を用いた破壊解析を実施して、既往の一軸圧縮試験の室内実験²⁾で得られている破壊挙動を再現するために必要な条件を検討する。

2. 剛体ばねモデル (RBSM)

複数不連続面を含んだ石膏供試体の実験を数値解析する際に、実験で確認されたひび割れや初期不連続面の接触・すべり挙動を表現できる手法を選択する必要がある。剛体ばねモデル (RBSM) では、有限要素法などの数値解析法とは異なり、離散体解析法であるのでひび割れなどの挙動を比較的容易に表現することができる。

RBSM では、要素自体を剛体と仮定し、要素分割によって生じる要素境界面上に2種類のばねを設けて、要素内の仕事の代わりに要素境界面上に集中化された表面力の仕事を用いてエネルギーを評価する。このとき、要素同士は、図1に示すように、要素境界に設けられた2種類のばねによって連結される。そのため、脆性材料のひび割れやせん断すべり、圧壊といった物理現象は、要素間に存在するばねを切断する、または、すべりモデルを導入する事で、それぞれが直接的に表現されることが可能となる。

したがって、ひび割れやせん断すべりなどの不連続挙動は、ひび割れの発生・進展は剛体要素の境界面に

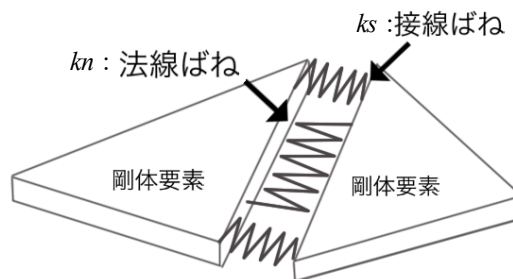


図1 剛体ばねモデル

沿って進展することになり、ひび割れの進展経路は要素分割に依存することとなる。

RBSM では、ばねモデルに基づいて、要素境界面における表面力をベクトル量として扱っている。引張によるひび割れやせん断によるひび割れの発生は、垂直応力 σ_n とせん断応力 τ_s を用いて判定する。引張によるひび割れは、垂直応力 σ_n が引張強さに達したときに生じるとして発生を判定する。引張りによりひび割れが生じた後は、要素間を連結しているばね剛性がゼロとなるように応力解放を行う。

一方、せん断によるひび割れはせん断応力 τ_s がモール・クーロンの条件に従って判定する。せん断によるひび割れが発生した場合には、次式のモール・クーロンの条件

$$f = \tau_s^2 - (c - \tan\phi \cdot \sigma_n)^2$$

という関係を満足するようにばね定数を変化させる。

また接触は、要素間の相対変位 δ によって容易に判定ができ、相対変位 δ を強制的にゼロにするだけで隣り合う要素にも変化をもたらすことができる。

3. RBSM を用いた破壊解析

3. 1. 解析条件

数値解析の対象となる供試体モデルの境界条件と荷重条件を図2に示す。既往の実験²⁾で実施した一軸圧

キーワード ひび割れ, 破壊, 剛体ばねモデル

連絡先 〒292-0041 木更津市清見台東 2-11-1 TEL. 0438-30-4156 E-mail : cishii@kisarazu.ac.jp

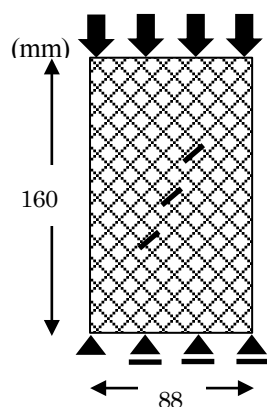


図2 指示条件と荷重条件

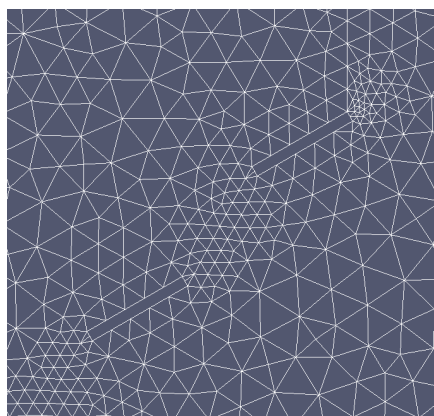


図3 解析モデルA

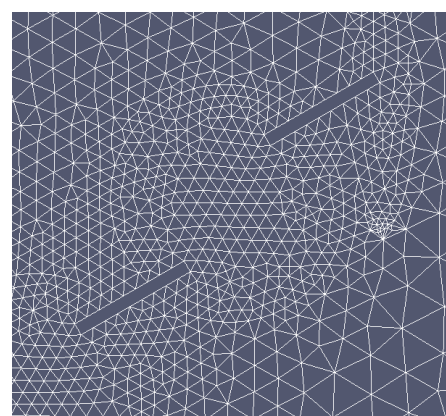


図4 解析モデルB

縮試験を2次元解析にて実施する．解析には，既往の実験²⁾で用いた石膏供試体の物性値を設定し，ヤング率 5535MPa，ポアソン比 0.251，引張強さ 1.5MPa，粘着力 1.5MPa，摩擦角 45° を用いた．既往の一軸圧縮試験では，図2のような供試体では，既存ひび割れの先端から載荷軸方向に向かって進展する引張りによるひび割れと，既存ひび割れ同士を連結するようにせん断によるひび割れが生じる．

要素分割による影響を検討するために，解析モデルは，図3,4に示すように，異なる要素分割により2種類を準備した．図3に示す解析モデルAは，実験で観察されたひび割れ経路のみを考慮して，その経路周辺のみを細かく要素分割したモデルである．一方で，図4に示す解析モデルBは，既存ひび割れ周辺全域を細かく要素分割し，既存ひび割れの影響により生じる種々の破壊挙動を検討できると期待した解析モデルである．

3. 2. 解析結果

図5,6にそれぞれの解析モデルにおける破壊解析結果を示す．解析モデルAにおける破壊解析結果では，ひび割れが発生する経路をある程度限定したために，実験で観測されたような引張りによるひび割れ，または既存ひび割れ同士を結ぶようなひび割れが確認できる．一方で，より詳細な破壊解析が可能であると期待した解析モデルBでは，比較的広い範囲にひび割れが分散し，定性的な分布傾向しか実験結果と一致しなかった．

今後は，更に適切であると考えられるような解析モデルを作成して，破壊解析結果を数多く収集して，本研究のような一軸圧縮試験でのひび割れ進展をRBSMによって再現するための知見を得る予定である．

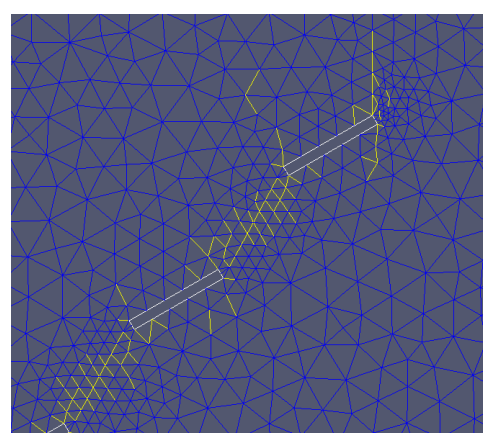


図5 解析モデルAでの破壊解析結果

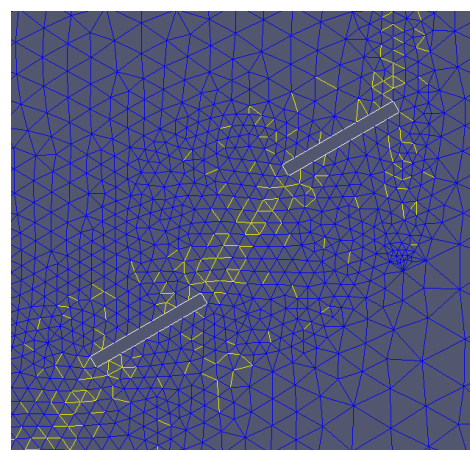


図6 解析モデルBでの破壊解析結果

参考文献

- 1) 竹内則雄ほか：鉄筋コンクリート構造の離散化極限解析法，丸善出版社，2005
- 2) 石井建樹，村井凌，月崎良一，関口佳那，嶋野慶次：不連続面を含む石膏供試体の一軸圧縮下での破壊挙動と強度特性，土木学会論文集，68(2)，I，383-392，2012