

粒状体解析手法による硬岩の割裂引張試験シミュレーション

山口大学大学院 学生会員 ○米田直広, 石川昌義, 李茜

山口大学大学院 正会員 船津貴弘, 清水則一

1. はじめに

近年, 原子力発電によって発生する高レベル放射性廃棄物の処理場所が問題となっている. そこでその廃棄物の処理場所として大深度地下が着目されている. 大深度では高い地圧が想定され, このような高応力場ではたとえ硬岩のような強度の高い岩盤であっても, 岩盤構造物の開削に伴う応力場の変化などで亀裂の発生すること, その亀裂が進展し最終的には破壊に至ることが懸念される. したがって, このような岩石の亀裂の進展をあらかじめ数値解析によって予測することは岩盤構造物の安定性を確保するために極めて重要である. しかしながら, 通常よく用いられる有限要素法や有限差分法では材料の分離など亀裂を再現するのは難しい. そこで本研究では個別要素法に基づく粒状体解析手法に着目し, その岩石の亀裂進展問題に対する適用性を検討することを目的としたシミュレーションを行った. 岩石の亀裂の進展モードには引張りによるものとせん断によるものと, およびその複合モードに大別できるがここでは引張りによるものに着目し, 岩石の引張強度の試験法である割裂引張試験を対象とし粒状体解析手法で割裂引張試験を再現することが可能であるか検討した.

2. 粒状体解析手法について

粒状体解析には2次元解析コードPFC2D(Particle Flow Code)¹⁾を使用する. PFCは粒状体の挙動を個別要素法により再現する解析プログラムである. 基本となる要素形状は円で, それらを互いに接着させることで様々な形状のモデルを作ることができる. PFCは剛体要素なので要素内部にひずみ, 応力は発生しないため, 粒子間のバネに力が働いている. PFCでは, ある円形領域(以下, 応力円)内に作用している平均応力を粒子間接触力から求めることができる. また粒子間の接着方法として, Contact BondとParallel Bondがある.

3. 割裂引張試験

PFCでは弾性係数やポアソン比のような巨視的なパラメータを与えることができない. そこでPFCで使用する微視的なパラメータを調整し, 現場物性(巨視的なパラメータ)を再現しなければならない. 現場物性は, 現場の地下より抽出されたボーリングコアを用いてあらかじめ室内実験することによって得た結果を用いる.

岩石の引張試験には, 供試体に直接引張荷重を与える一軸引張試験, あるいは円柱供試体の側面を圧縮する割裂引張試験がある. 円柱供試体を軸方向に引っ張って行う一軸引張試験は, 供試体に引張荷重を均等にかける機構が難しいため, 方法が簡単な割裂引張試験がよく行われている²⁾.

本研究では割裂引張試験を行い, 硬岩の引張強度を算出する. 図-1に示す割裂引張試験モデルのように円盤状の供試体に対し, 2枚の加圧板を内側に動かし等変位荷重を加える. PFC2Dによる割裂試験で入力する微視的なパラメータを表-1に示す. このパラメータはあらかじめ圧縮試験を行い現場物性と相関を取ったものである. また, 割裂引張試験のシミュレーションで得られた荷重-変位曲線を図-2に, 図-3は左から解析終了時の変位ベクトル, 粒子間接触力分布, 亀裂分布の図である.

表-1 入力パラメータ

最大半径と最小半径の比	R_{max}/R_{min}	1.66	-
最小半径	R_{min}	20	mm
密度	ρ	2630	kg/m ³
接触係数	E_c	48	GPa
鉛直方向剛性と水平方向剛性の比	K_n/K_s	2.1	-
接着面半径と最小粒子半径との比	λ	1.0	-
接触係数	$\bar{E}_c$	48	GPa
鉛直方向剛性と水平方向剛性の比	$\bar{K}_n/\bar{K}_s$	2.1	-
摩擦係数	μ	0.5	-
鉛直方向強度の平均値	$\bar{\sigma}_c$ (mean)	140	MPa
鉛直方向強度の標準偏差	$\bar{\sigma}_c$ (std.dev)	40	MPa
せん断方向強度の平均値	$\bar{\tau}_c$ (mean)	140	MPa
せん断方向強度の標準偏差	$\bar{\tau}_c$ (std.dev)	40	MPa

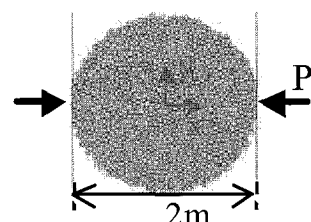


図-1 割裂引張試験モデル

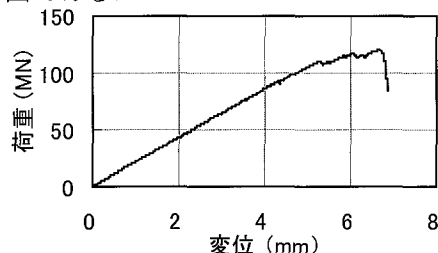


図-2 応力-ひずみ曲線

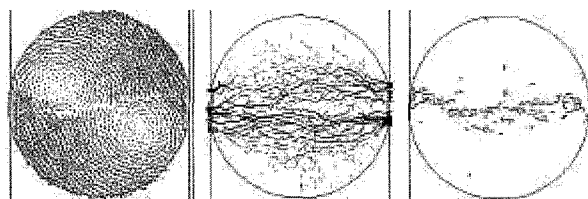


図-3 解析終了時の変位ベクトル, 粒子間接触力分布, 亀裂分布図

引張強度を導く式は、一般的に室内実験では以下の弾性式が用いられる²⁾。

$$\sigma = \frac{2P_{\max}}{\pi DL} \quad (1)$$

ここで $P_{\max}$ は最大荷重、 D は供試体直径、 L は供試体奥行きである。

また、本研究では、供試体内部の応力分布を調べるために図-4のように、供試体の载荷軸上に応力円を設け、各応力円領域内の平均応力を求めている。ここで、図-4の载荷部によく注目すると、加圧板によって供試体両端部の粒子が押し潰され、面载荷となってしまうことがわかる。先述の式(1)では点载荷を想定しているの、このように面载荷であることを考慮できる式として、下式 Hondros の弾性解に着目した³⁾。

$$\sigma = -\frac{P}{\pi R_0 L \alpha} \left\{ \frac{\left[1 - \left(\frac{R}{R_0} \right)^2 \right] \sin 2\alpha}{1 - 2 \left(\frac{R}{R_0} \right)^2 \cos 2\alpha + \left(\frac{R}{R_0} \right)^4} - \tan^{-1} \left[\frac{1 + \left(\frac{R}{R_0} \right)^2}{1 - \left(\frac{R}{R_0} \right)^2} \tan \alpha \right] \right\} \quad (2)$$

ここで、 R は供試体半径、 L は供試体奥行き、 2α は荷重 P が半径方向のある距離に分布していると仮定したときになす角距離、 r は円盤中心からの距離である。模式図を図-5に示す。以上、今まで挙げた応力の評価方法を図-7(a)にまとめて示す(圧縮+, 引張-)。Hondros の弾性解によって、応力円による平均応力を正確に表現できていることがわかる。

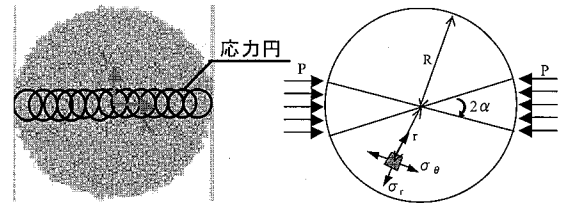


図-4 応力円の位置

図-5 模式図

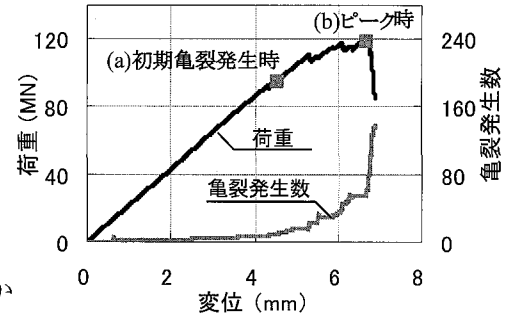


図-6 荷重、亀裂発生数 - 変位曲線

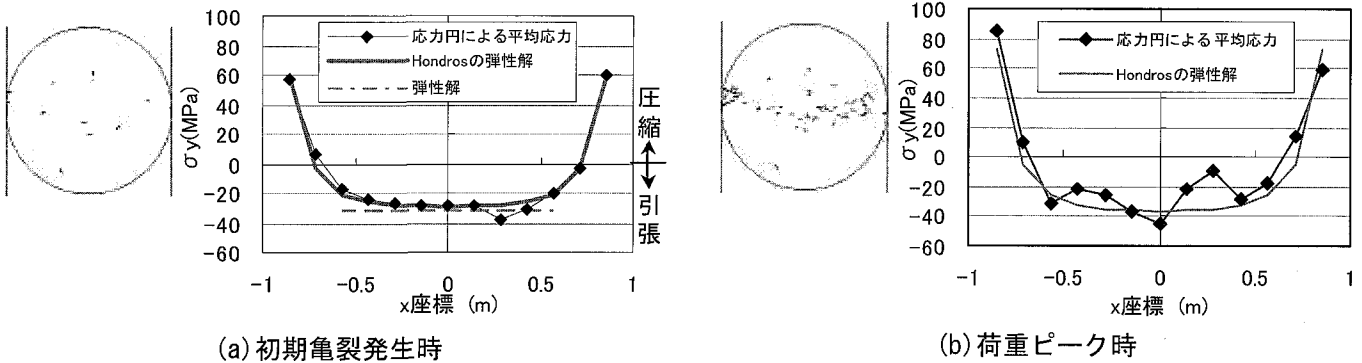


図-7 供試体内の亀裂分布と応力分布

次に亀裂発生・進展にともなう応力の変化の様子について述べる。図-6は割裂引張試験の荷重-変位曲線である。図-6内に示すように(a)初期亀裂発生時と(b)軸方向荷重ピーク時のそれぞれの応力分布を見ることとした。図-7(a)は初期亀裂発生時の、(b)は軸方向荷重がピークに達しているときの σ_y である。(a)の亀裂発生時には、応力円から得た平均応力と Hondros の弾性解が近い値となっているのに対し、(b)の荷重ピーク時には、応力円から得た平均応力がばらついており Hondros の弾性解から少し外れてしまっている。これは、荷重を増加させて、亀裂が進展し不連続面が広がるにつれて供試体が弾性挙動を示さなくなっているものと考えられる。したがって、粒状体解析手法による割裂引張試験において引張強度を評価する場合、不連続面が広がるまでは Hondros の弾性式を適用することができるが、不連続面が広がったあとに Hondros の弾性式を適用するのは問題である。つまり、ここまで挙げた評価方法としては、応力円から得られた平均応力がもっとも正しく引張強度を評価できているといえる。

4. まとめ

粒状体解析手法による割裂引張試験では荷重条件が面载荷となってしまうが、Hondros の弾性解によれば応力を評価することができる。しかし、亀裂の進展にともなって弾性挙動から離れてしまうことがわかった。ただし、応力円から算出した平均応力を用いることにより引張強度を算出することが可能である。また、粒状体解析手法で岩石中の亀裂の進展挙動を得ることができた。

参考文献

- 1) ITASCA Consulting Group, Inc: PFC2D, Version3.00 Theory and Background
- 2) 日本材料学会, ロックメカニクス, 技報堂出版, pp.61, 2002
- 3) V.S.Vutukuri, R.D.Lama, S.S.Saluja 著 増田秀夫, 田中莊一訳 岩の力学的性質 I, 古今書院, pp.93, 1989