

一軸引張試験を用いた粒状体解析のパラメータ決定と亀裂進展破壊の数値シミュレーション

山口大学大学院 学 ○児玉涼 田口和也
山口大学大学院 正 中島伸一郎 清水則一

1. はじめに

大深度地下における岩盤掘削では、高い初期応力や偏圧により、山はねなどの破壊現象が懸念される。図-1はLac du Bonnetの地下研究所において空洞周辺に発生した破壊事例である¹⁾。このような亀裂の発生・進展の再現方法としては、個別要素法に基づく粒状体解析手法が有効である。本研究では、高応力下にある岩盤での空洞掘削時の亀裂進展破壊メカニズムの考察を目的とし、粒状体解析手法による硬岩のモデル化と円孔掘削シミュレーションを実施した。なお、本研究では、解析コードとしてParticle Flow Code (PFC^{2D})を使用している。

2. 花崗岩のモデル化

本研究では、林ら(2008)による稲田花崗岩をモデル化対象とした²⁾。粒状体解析手法では、表-1に示すマイクロパラメータを対象硬岩の要素試験から求めることができないため値の同定が困難である。本研究では、図-2に示す一軸圧縮試験、一軸引張試験を用いたマイクロパラメータ決定手順により、何度も試行錯誤することで稲田花崗岩のモデル化を行なった。ここで、一軸引張試験を用いたのは圧裂試験に比べ供試体内部の応力状態が単純であり、効率的にパラメータ決定ができるためである。稲田花崗岩の力学特性をモデル化できた時のマイクロパラメータを表-1に、シミュレーション結果を表-2、図-3、図-4に示す。表-2より稲田花崗岩の力学特性が再現できており、図-3、図-4より圧縮・引張領域ともに変形特性を再現できている。また、表-1に示すマイクロパラメータを用いて圧裂試験を行なった結果、一般に硬岩の圧裂引張強度と一軸引張強度が一致するという実験的事実も実証できた。

3. 高応力下における硬岩の円孔掘削シミュレーション

前章の硬岩モデルを用いて円孔掘削シミュレーションを実施し、円孔周辺に図-1と同様の破壊が生じるかを検討する。現場では、水平方向 $\sigma_1=60\text{MPa}$ 、鉛直方向 $\sigma_3=11\text{MPa}$ の応力が作用している。図-5に示す300mm×300mmの解析モデルに $\sigma_1=60\text{MPa}$ 、 $\sigma_3=11\text{MPa}$ の応力を作用させ、直径30mmの円孔を掘削した。円孔周辺にお

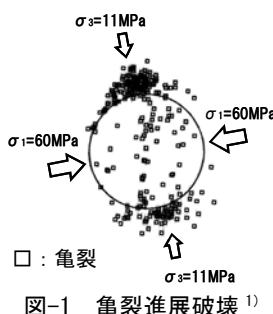
図-1 亀裂進展破壊¹⁾

表-1 マイクロパラメーター一覧

Minimum ball radius	$R_{\min}$	0.25	[mm]
Ball size ratio	$R_{\max}/R_{\min}$	1.5	
Ball density	ρ	2619	[kg/m ³]
Contact modulus	E_c	16	[GPa]
Normal/shear stiffness ratio	k_n/k_s	2.4	
Friction coefficient	μ	0.3	
Parallel-bond modulus	$pb.E_c$	16	[GPa]
Parallel-bond stiffness ratio	$pb.k_n/k_s$	2.4	
Parallel-bond radius multiplier	$pb.\lambda$	0.6	
Parallel-bond normal strength	$pb.\sigma_c$	20	[GPa]
Parallel-bond shear strength	$pb.\tau_c$	160	[GPa]
Clump radius	R_c	1.5	[mm]

表-2 稲田花崗岩の実験値と解析結果²⁾

	Uniaxial compression test			Uniaxial tensile test		
	σ_c [MPa]	E [GPa]	ν	σ_t [MPa]	E [GPa]	ν
Experiment	163	58.6	0.27	7.1	26.2	0.06
Simulation	160	52.8	0.3	7.2	27.6	0.05

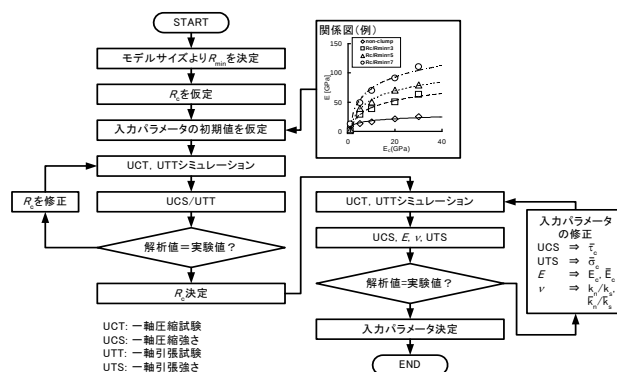


図-2 マイクロパラメータ決定手順

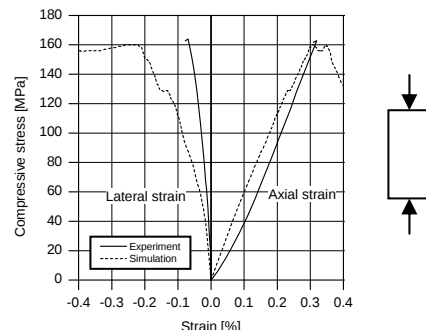


図-3 稲田花崗岩を対象とした一軸圧縮試験シミュレーション結果

キーワード 粒状体解析手法, 亀裂進展破壊, 一軸引張試験, マイクロパラメータ

連絡先 〒755-0097 宇部市常盤台 2-11-9-3 山口大学大学院理工学研究科 TEL 090-7393-0546

ける亀裂進展破壊の再現が目的のため、図-5の破線内部90mm×90mmの粒子半径、クランプ半径を表-2に示すパラメータの1/3にした。

図-6～図-9は解析結果を示す。これらの図では円孔周辺を拡大している。図-6の亀裂分布から図-1の事例とは異なり、 σ_3 側の壁面周辺での集中的な亀裂は発生していない。また、図-6に示す変位ベクトルからも円孔周辺の粒子の移動はみられない。そこで、载荷応力の偏差をさらに強調して、すなわち、 σ_1 を100MPaまで増加させて解析を実施した。その結果、図-7に示すシミュレーション結果では、図-6と同様の亀裂分布がみられ、図-7より、モデル全体の亀裂数は図-6よりも増加しているが、応力偏差の強調に起因する壁面上の亀裂の集中は、やはり再現されていない。すなわち、図-1に示すような壁面上の集中的な亀裂の集中は、粒状体解析における単なる载荷応力とその偏差だけでは再現されないといえる。一方、実岩盤内に存在する潜在亀裂などの弱点が、空洞壁面での応力集中と亀裂発生を生じさせている可能性がある。そこで、解析モデルの壁面近傍に意図的に弱点を設けて解析を実施した。ここでは、円孔付近の粒子要素を取り除くことで潜在的な弱部を表現した。図-8、図-9に示すように、 σ_3 側壁面付近に長さ10mm、幅0.5mmの弱部を縦方向、横方向に設けた。ここでの载荷応力は、図-7の時と同様である。

図-8の横方向に弱部が存在するモデルでは、亀裂の発生状況は図-7のモデルと大差はない。一方、図-9の縦方向の弱部が存在するモデルの亀裂分布では、 σ_3 側壁面付近に図-1に示すような亀裂の集中がみられ、変位ベクトルからも σ_3 側壁面付近に破壊が生じていることが確認できる。本研究では、岩盤内の弱部の影響を単純なモデルで検討するために、 σ_3 側壁面近傍に1本の弱部を設けた。そのため、亀裂の方向によって破壊現象に違いがみられたが、実際の岩盤内部ではより小さな潜在的な亀裂が様々な方向に存在していると考えられる。そのため、弱部の方向・寸法・密度などの幾何学的な情報をさらに考慮し、空洞の破壊への影響を検討していく必要がある。

5. 結論

本研究では、マイクロパラメータの決定手順として一軸引張試験を用い、変形特性を実験値と比較することで圧縮、引張領域ともに実験値を再現できることを示した。また、高応力下の円孔掘削シミュレーションを行うことで、円孔周辺に生じる集中的な亀裂は、载荷応力の大きさではなく弱部の有無および方向が原因となる可能性があることを示した。

参考文献

- 1) D.O.Potyondy, P.A.Cundall : A Bonded-Particle Model for Rock, Rock Mechanics and Mining Sciences, pp. 1338-1348, 2004.
- 2) 林為人, 高橋学, 藤井幸泰, 西山哲, 竹村貴人: 一軸引張状態における数種類の花崗岩質岩石と斑れい岩の変形特性, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.56, No.7, pp.654-659, 2007.

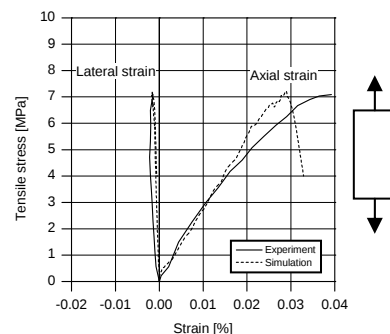


図-4 稲田花崗岩を対象とした一軸引張試験シミュレーション結果

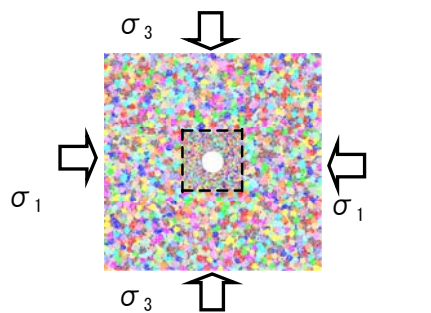


図-5 解析モデル

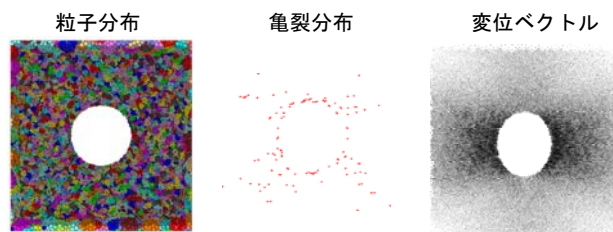


図-6 数値シミュレーション結果 ($\sigma_1=60$, $\sigma_3=11$)

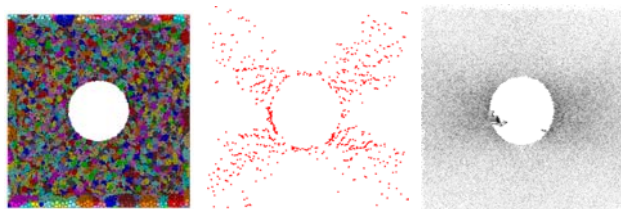


図-7 数値シミュレーション結果 ($\sigma_1=100$, $\sigma_3=11$)

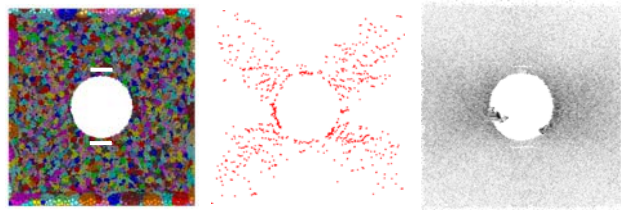


図-8 横方向に弱部が存在する場合のシミュレーション結果

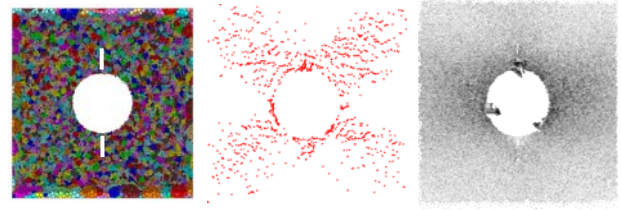


図-9 縦方向に弱部が存在する場合のシミュレーション結果