

粒状体解析手法を用いた硬岩のモデル化におけるマイクロパラメータ決定手順の検討

山口大学大学院 学 〇三輪 旭 井上 健太郎 米田 直広
 産業技術総合研究所 正 船津 貴弘
 呉工業高等専門学校 正 三村 陽一
 山口大学大学院 正 清水則一

1. はじめに

進展性の亀裂破壊を再現できる解析手法として、粒状体解析手法が有効であることが示されている¹⁾。粒状体解析手法では、ヤング係数、ポアソン比などの力学特性でなく、粒子の寸法や密度、粒子間のバネ剛性や強度などのマイクロパラメータを入力値とする。そのため、力学特性を再現するマイクロパラメータを解析の最初の段階で決定しなければならない。本研究では、マイクロパラメータ決定を効率よく行うためのフローチャートを作成し²⁾、その妥当性を検証するため、コンクリート室内試験の結果に適用した。

2. 粒状体解析手法について

粒状体解析手法では、内部摩擦角、引張強度が適切に再現できないことなどが課題としてあげられる。そこで、本研究では指定した複数の粒子を剛結させるクランプモデルを適用した(図-1)³⁾。

3. マイクロパラメータ決定手順について

これまで、力学特性に対応したマイクロパラメータを同定するのに多大な時間を費やしてきた。そこで、力学特性とマイクロパラメータの関係を調査し、関係図を作成した(図-2)⁴⁾。また、この関係図を利用した決定手順のフローチャートを作成した(図-3, 図-4)。

3.1 クランプ半径決定手順

クランプ半径決定手順のフローを図-3に示す。まず、モデルのサイズより解析の計算時間に影響する R_{min} を決定する。次に、目標とする力学特性の一軸圧縮強度と引張強度の比を確認し、表-1を参照しクランプ半径(R_c)を仮定する。また、関係図を利用して他のマイクロパラメータの初期値を仮定する。一軸圧縮試験、圧裂引張試験を行い、強度比の実験値を数値解析で概ね再現できたかを確認する。できていなければ R_c のみを変更する。

3.2 マイクロパラメータ決定手順

マイクロパラメータ決定手順を図-4に示す。一軸圧縮試験、圧裂引張試験の数値解析を行い、数値解析で求めた力学特性の中で実験値と最も異なる値の力学特性を選択する。一軸圧縮試験、圧裂引張試験で求まる力学特性(E ,

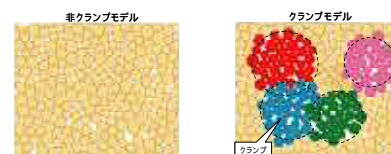
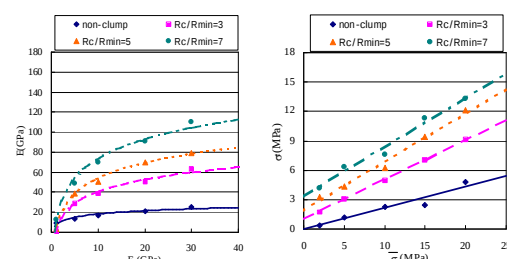


図-1 粒状体解析モデル



(a) E - E_c 関係図 (b) σ_t - σ_c 関係図

図-2 関係図

表-1 σ_c/σ_t - R_c/R_{min} 関係

強度比 σ_c/σ_t	0~5	5~10	10~20
クランプ半径倍率 R_c/R_{min}	3.5, 4, 4.5	4, 4.5, 5	4.5, 5, 5.5
関係図で読み取る近似曲線 R_c/R_{min}	3	5	5

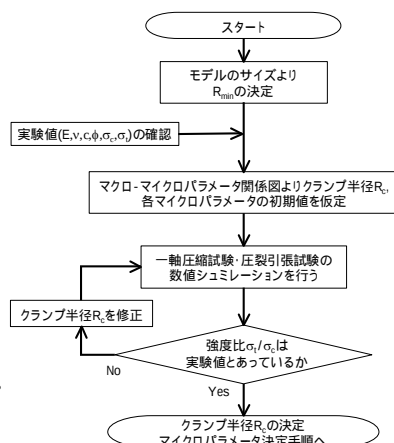


図-3 クランプ半径決定手順

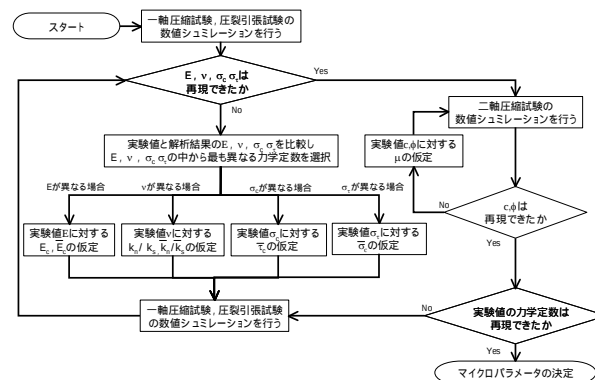


図-4 マイクロパラメータ決定手順

ν , σ_c , σ_t)を概ね再現できた後、次は二軸圧縮試験を行う。二軸圧縮試験で求まる力学特性(c , ϕ)も同様に、関係図に基づいてマイクロパラメータを変化させ、実験値を再現する。

4. 粒状体解析手法を用いた室内試験の再現

前述のフローチャートを用いてマイクロパラメータの決定を行うため、まず硬岩を想定したコンクリートの室内試験を行い、そこで得られた力学特性を粒状体解析で再現する。今回行った室内試験は一軸圧縮試験と圧裂引張試験である。一軸圧縮試験の供試体両側面には検長 20mm クロスひずみゲージ、検長 60mm ひずみゲージを貼り付け、ヤング係数、ポアソン比を求めた。

フローチャートに基づき、室内試験で得られた力学特性に対応したマイクロパラメータを決定した(表-2)。室内試験と数値解析により得られた力学特性を表-3 に示す。室内試験と数値解析の結果を比較すると

表-3 室内試験および数値解析結果

	室内試験	数値解析	
ヤング係数 E	27.2	27.5	GPa
ポアソン比 ν	0.22	0.23	-
圧縮強度 σ_c	21.5	21.7	MPa
引張強度 σ_t	2.6	2.7	MPa
粘着力 c	-	3.4	MPa
内部摩擦角 ϕ	56.2	51.9	°

力学特性はほぼ再現できている。また、図-5 に示すように、ヤング係数・ポアソン比を算出した 50%応力レベルまで応力 - ひずみ曲線が数値解析結果と室内試験結果が概ね一致した。また、図-6 から解析結果において、実際の供試体に生じたせん断すべり面、また、引張亀裂が再現されていることがわかる。

5. まとめ

硬岩のモデル化に必要な粒状体解析の入力パラメータの決定手順を提案した。コンクリート供試体の試験結果に適用したところ、解析結果と試験結果は概ね一致し、破壊の形態も概ね再現された。このことより、提案したマイクロパラメータ決定手順の妥当性が示されたといえる。

表-2 入力パラメータ

最大半径と最小半径の比	$R_{\max}/R_{\min}$	1.5	-
最小粒子半径	$R_{\min}$	0.82	mm
密度	ρ	2316	kg/m ³
接触係数	E_c	10	GPa
垂直方向剛性と水平方向剛性の比	k_n/k_s	3.5	-
接着面半径と最小粒子半径との比	λ	1	-
パラレルボンドの接触係数	E_c	10	GPa
パラレルボンドの垂直方向剛性と水平方向剛性の比	k_n/k_s	3.5	-
摩擦係数	μ	0.4	-
垂直方向強度の平均値	$\bar{\sigma}_c(\text{mean})$	4	MPa
垂直方向強度の標準偏差	$\bar{\sigma}_c(\text{std.dev})$	0.4	MPa
せん断方向強度の平均値	$\bar{\tau}_c(\text{mean})$	20	MPa
せん断方向強度の標準偏差	$\bar{\tau}_c(\text{std.dev})$	2	MPa
クランプ半径	R_c	3.28	mm

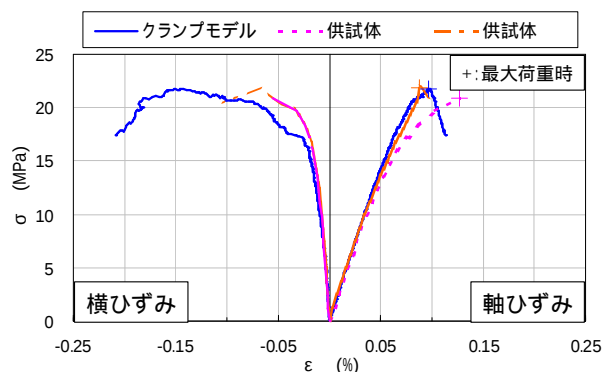


図-5 応力 - ひずみ曲線

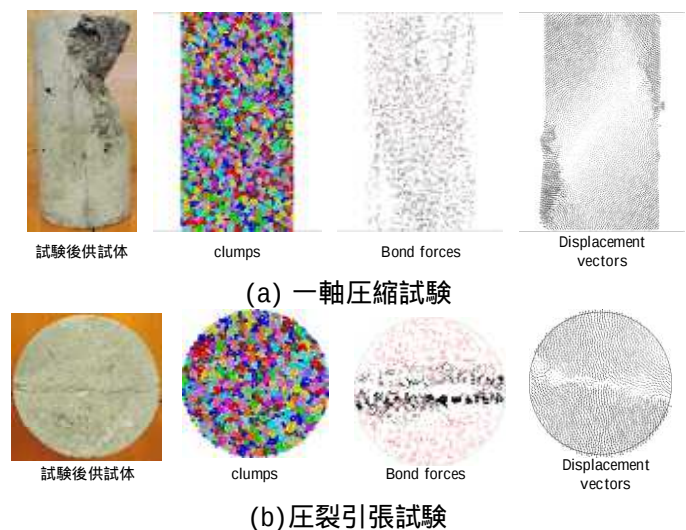


図-6 室内試験と数値解析モデル比較図

参考文献

- 1) 船津貴弘, 李 茜, 清水則一, 瀬戸政宏, 松井紀久男: 粒状体解析手法による岩石の亀裂進展挙動に関する検討, *Journal of MMIJ*, Vol.124, pp.611-618, 2008.
- 2) 三輪旭: 粒状体解析手法を用いた硬岩のモデル化におけるマイクロパラメータ決定法に関する検討, pp.20-27, 2009.
- 3) N. Cho, C.D. Martin, D.C. Sego: A clumped particle model for rock, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 44, pp.997-1010, 2007.
- 4) 井上健太郎, 李 茜, 米田直広, 船津貴弘, 清水則一: クランプモデルによる硬岩のモデル化におけるマイクロパラメータの影響, 第 12 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.941-945, 2008.9.