

個別要素法の微視的パラメータ同定に対する応答曲面法の適用について

清水建設株式会社 土木技術本部 正〇郷家光男
 清水建設株式会社 技術研究所 正 櫻井英行

1. はじめに 岩盤のような固体の破壊現象を解析するための手法として、粒状体による個別要素法（以下、個別要素法と略す）が注目されて、様々な問題に適用されている¹⁾。個別要素法^{2),3)}では、物体をバネで結合された球形の剛体要素の集合体としてモデル化する。そして、解析の際には、球形要素の粒径、要素間のバネ剛性や強度などの微視的パラメータを入力する必要がある、その微視的パラメータは、対象とする岩石の一軸圧縮強度やヤング率などの力学特性を再現できるように設定されなければならない。しかし、微視的パラメータと固体の力学物性値の関係が明らかではないために、これまで、要素試験を再現する数値解析をトライ&エラーで行って、微視的パラメータを設定することが多かった。そこで、本研究では、より合理的に微視的パラメータを設定する方法として応答曲面法に着目した。すなわち、岩石の一軸圧縮試験を対象として、微視的パラメータを設計変数、数値解析による巨視的応答値と実験値との誤差を目的関数として、応答曲面法による最適化によって微視的パラメータを合理的に同定することができるのではないかと考えた。個別要素法の解析には PFC3D³⁾、応答曲面法の解析には AMDESS⁴⁾ を用いた。

2. 逐次更新型応答曲面法による最適化の概要 従来、直交表によるサンプリングをして、2 次の多項式で近似することを応答曲面法と呼んでいるが、AMDESS では、多点近似全般を広い意味で応答曲面法としている。また、初期サンプリングだけで十分な近似最適解が得られない場合は、サンプルデータを追加して、応答曲面を近似し直して新たな近似最適化を求めることを繰り返す。このような手法のことは、逐次更新型応答曲面法と呼ばれている。逐次更新型応答曲面法を個別要素法の微視的パラメータの同定に適用した場合のフローを図-1 に示す。緑色が PFC3D、橙色が AMDESS による解析を示している。

3. 解析条件 微視的パラメータの同定の対象とした土岐花崗岩 CH 級の物性値を表-1 に示す⁵⁾。個別要素法による解析モデルの外形は、室内試験と同様に直径 50mm、高さ 100mm の円柱形とした。

微視的パラメータの同定を行うためには、始めに解がどの範囲にありそうなのかを想定しておく必要がある。ここでは、表-1 や過去の事例などを参考にして、微視的パラメータの探索範囲を表-2 のように設定した。なお、粒子最小径 R_{min} 、平行ボンド直径比 λ については一

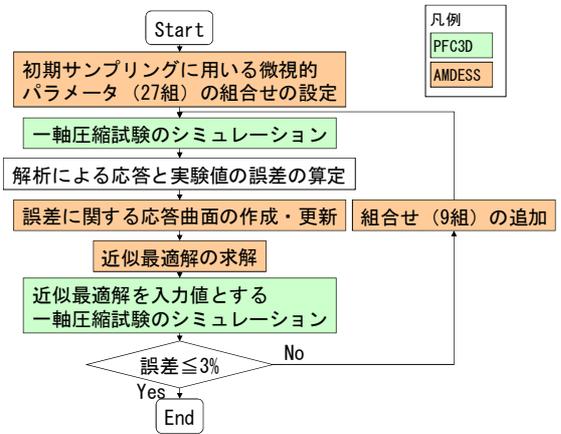


図-1 逐次更新型応答曲面法による同定フロー

表-1 土岐花崗岩の CH 級の物性値

一軸圧縮強度 q_u (MPa)	181.3
岩石のヤング率 E (GPa)	55.8
ポアソン比 ν	0.27

表-2 微視的パラメータの探索範囲

微視的パラメータ		範囲
粒子の最小径	R_{min}	2.0(mm)
粒子最大径との比	R_{max}/R_{min}	1.25~2.00(-)
コンタクトボンドと平行ボンドの接触剛性	E_C, \bar{E}_C	25~85(GPa)
垂直剛性とせん断剛性の比	$\bar{k}_n/\bar{k}_s, k_n/k_s$	1.0~4.0(-)
平行ボンドの直径比	λ	1.0(-)
粒子間の摩擦係数	μ	0.1~1.0(-)
平行ボンドの引張り強度	$\bar{\sigma}_C$	130~230(MPa)
平行ボンドのせん断強度	$\bar{\tau}_C$	130~230(MPa)

定値とした。また、コンタクトボンドの接触剛性 E_C と平行ボンドの接触剛性 \bar{E}_C は、同じ値をとるものとした。さらに、垂直剛性とせん断剛性の比も $\bar{k}_n/\bar{k}_s = k_n/k_s$ として取り扱うことにした。そのため、実際に可変させる微視的パラメータは 6 種類となった。初期サンプリングにおける微視的パラメータの組合せには、6 因子に対する 3 水準の直交表 (L_{27}) を用いた。

本研究では、数値解析による巨視的応答値と実験値との誤差を目的関数とした。比較できる実験値には一軸圧縮強度、ヤング率、ポアソン比があったが、ここでは、これらを同時に満足することを考えた。そして、実験値

キーワード：個別要素法，一軸圧縮試験，応答曲面法，最適化，微視的パラメータ

連絡先：〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目 16-1 Tel.: 03-3561-3919 Fax.: 03-3561-8673

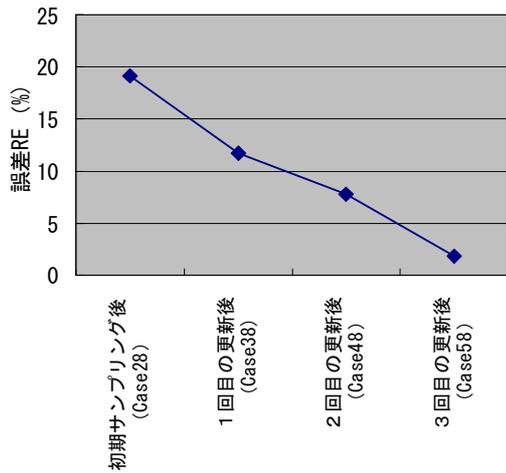


図-2 近似最適解の誤差の改善

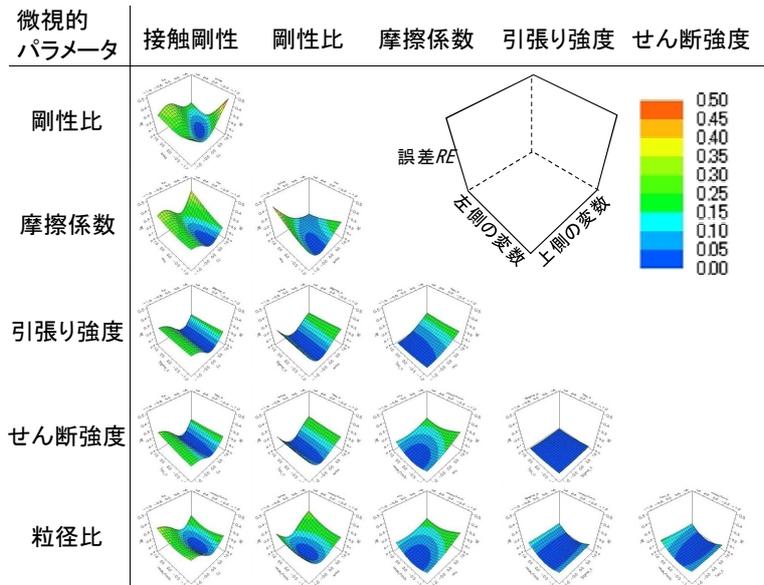


図-3 最終的な応答曲面

で正規化されたパラメータ空間中の誤差ベクトルの大きさから、以下のような誤差 RE を定義した。

$$RE = \frac{\sqrt{\left(1 - \frac{q_u(sim)}{q_u(lab)}\right)^2 + \left(1 - \frac{E(sim)}{E(lab)}\right)^2 + \left(1 - \frac{\nu(sim)}{\nu(lab)}\right)^2}}{\sqrt{3}} \quad \text{式(1)}$$

ここに、添え字の(sim)は個別要素法による値、(lab)は実験値であることを示している。

また、応答曲面の近似には、Kriging 法を用いた。そして、誤差 RE が 3%以下となる組合せを土岐花崗岩 CH 級の岩石の微視的パラメータとした。

4. 解析結果 応答曲面の更新 3 回後の近似最適解に対して個別要素法による一軸圧縮試験の解析を行った結果、巨視的応答値は、 $E = 56.6$ (MPa), $q_u = 176$ (MPa), $\nu = 0.273$ (-)となり、誤差 RE は 1.8%となった。また、解析による応力-ひずみ曲線も実際の一軸圧縮試験で見られるような挙動を示したことから、この結果は妥当なものと判断し、土岐花崗岩の CH 級に対する微視的パラメータを、 $R_{max}/R_{min} = 1.579$ (-), $E_C = \bar{E}_C = 65.06$ (GPa), $k_n/k_s = \bar{k}_n/\bar{k}_s = 2.143$ (-), $\mu = 0.209$ (-), $\bar{\sigma}_c = 170.4$ (MPa), $\bar{\tau}_c = 207.1$ (MPa)と同定した。また、初期サンプリングから更新 3 回目までの近似最適解に対する誤差の状況を図-2 に示す。この図より、解析が追加されるにしたがって、近似最適解の誤差が減少していて、応答曲面の逐次更新の効果が表れていることも確認できた。

最終的な応答曲面を図-3 に示す。この図では、6 種類の微視的パラメータの内、4 種類を近似最適解に固定して、残りの 2 種類を横軸、誤差 RE を縦軸として、変数の組合せごとに応答曲面を描いている。この図より、粒子間の摩擦係数やパラレルボンドの引張り強度などの強度の微視的パラメータよりも、変形の微視的パラメータ

(接触剛性、剛性比)の方が、感度が強いことが分かった。この結果に関して、変形の微視的パラメータは巨視的な変形特性に影響を与えることと、誤差 RE が変形の物性値 2 個と強度の物性値 1 個からなっていることから、変形の微視的パラメータの感度が相対的に強くなったと考えている。

今回の結果から、応答曲面法は微視的パラメータの同定に効果があったと考えている。しかし、6 つの微視的パラメータを同定するために合計 58 回の解析を要した。より少ない回数で同定できることを理想とするならば、解析回数の削減が今後の課題と考えられる。

5. おわりに 本研究では、土岐花崗岩の CH 級の物性値を対象として、個別要素法の微視的パラメータを設計変数、数値解析による巨視的応答値と実験値との誤差を目的関数として、応答曲面法による最適化を適用することによって、微視的パラメータの同定を試みた。

その結果、応答曲面を逐次更新することによって、近似最適解が徐々に改善されていくことを確認でき、土岐花崗岩の CH 級の物性値に対する微視的パラメータを合理的に同定することができた。また、今後の課題として、解析回数の削減を挙げた。

参考文献

- 1) 例えば、森岡宏之 他：AE 計測による大規模地下空洞掘削時の岩盤挙動評価手法に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.791/VI-67，pp.81-96，2005。
- 2) Potyondy, D.O. and Cundall, P.A.: A bonded-particle model for rock, Int. J. of Rock Mech. & Mining Sci., Vol.41, pp.1329-1364, 2004.
- 3) ITASCA Consulting Group Inc.: PFC3D, Version 4.0. User's Guide, 2008.
- 4) くいんと：AMDESS 2010, リファレンスマニュアル, 2009.
- 5) 郷家光男 他：瑞浪超深地層研究所の研究坑道における掘削損傷領域を考慮した掘削影響解析，トンネル工学論文集，第 16 巻，pp.35-45，2006。