

粘質土壌の乾燥収縮亀裂進展シミュレーション

琉球大学学部生	学生会員	○玉那覇 圭一
琉球大学大学院	学生会員	広瀬 孝三郎
琉球大学	正会員	松原 仁
琉球大学	正会員	原 久夫

1. はじめに

粘質土壌が乾燥する過程で生じる亀裂は、乾燥収縮亀裂と呼ばれ（以後、Mudcrack と呼ぶ）、田畑や干潟等において観察することができる。Mudcrack の進展は、紛体の種類や、紛体の粒径、試料の層厚等によって破壊パターンが異なることが知られており、また、複雑な幾何学パターンを示すことから、亀裂発生メカニズムに関する系統的な研究例は多くなく、十分に理解されているとは言い難い状況がある。

Mudcrack に関する研究例としては、Mudcrack の交差角度が 90° あるいは 120° を成していること¹⁾、湿潤土を線形弾性体とみなし適当な破壊条件を仮定した数値解析モデルにて亀裂パターンを再現する研究（単純バネ切りモデル）²⁾、非接触型のレーザーを使用して試料の体積収縮率や亀裂の幅を計測する手法の提案³⁾など、実験的検討や解析的検討、さらに、画像処理を使用した検討等、様々な視点から研究が行われている。しかしながら、Mudcrack は土壌の不均質具合に支配される場合が多く、亀裂の規則性や再現性を評価すること自体が困難である現状もあることから未解明のことが多く存在する。

本研究では、3次元有限要素法に基づく数値解析手法を開発し、Mudcrack の亀裂進展解析を行った。また、数値解析によって得られた亀裂パターンを、実験値のフラクタル次元と比較することにより、本手法の妥当性を検討した。

2. Mudcrack の数理モデル化

2.1 乾燥収縮過程の数値モデリング

本研究では、粘性土壌内部の水分の蒸発にともなうひずみを乾燥収縮ひずみとし、数理モデル化した。弾性ひずみに乾燥収縮ひずみを加えた全ひずみテンソルは次式にて表すことができる。

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^s \quad (1)$$

ここで、 $\boldsymbol{\varepsilon}$: 全ひずみテンソル、 $\boldsymbol{\varepsilon}^e$: 弾性ひずみテンソル、 $\boldsymbol{\varepsilon}^s$: 乾燥収縮ひずみテンソルである。そして、ポテンシャルエネルギー原理に、(1)式で表される乾燥収縮ひずみによる外力を考慮すると、次式のようなになる。

$$\int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \mathbf{u} dV = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}^s dV \quad (2)$$

ここで V : 物体の体積、 \mathbf{B} : ひずみ - 変位マトリックス、 \mathbf{D} : 応力 - ひずみマトリックス、 \mathbf{u} : 節点変位ベクトルである。本研究では、これらの式を 3次元有

限要素法に適用し、亀裂進展解析を実施した。なお、本研究では、全領域において最大主応力の最大値を静弾性解析で求め、1ステップごとにこの要素を亀裂要素とすることで亀裂進展解析を実現した。なお、亀裂進展手法の詳細については文献4に詳しい。

2.2 収縮率のモデル化

本研究では、乾燥収縮ひずみの分布を以下の式にて定義した。

$$\varepsilon_{ii}^s = - \left(\frac{e^{-\beta t} - 1}{e^{-\beta} - 1} \right); t = \frac{z}{z_{\max}} \quad (3)$$

ここで、 ε_{ii}^s : 乾燥収縮ひずみ係数、 z : 試料の底面からの距離、 z_{\max} : 試料の厚さ、 e : ネイピア数である。図-1 に、本解析で用いた乾燥収縮ひずみの分布を示す。同図より、本モデルでは、 β 値が大きい程に表面乾燥が激しく、 β 値が小さい程に表面乾燥が穏やかである状況を模擬している。本論文では、代表例として、 $\beta = 10.0$ のみを取り上げることにする。

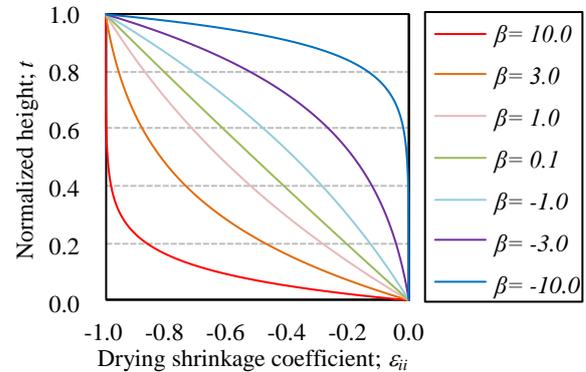


図-1 収縮率の分布

2.3 フラクタル次元

本研究では、実際の亀裂パターンと本解析によって得られた亀裂パターンを定量的に比較するために、ベントナイトペーストを用いた乾燥亀裂実験にて得られた亀裂パターンのフラクタル次元を比較する。本研究では、Mudcrack のフラクタル次元を求めるために、ボックスカウント法を適用した。この手法は、様々な幅 α の正方格子で画像を区切り、対象物が含まれる正方格子の数 $N(\alpha)$ を数えてフラクタル次元を求める手法である。そのとき、 $\log(N(\alpha))$ と $\log(\alpha)$ を軸に取った場合の近似直線の傾きがフラクタル次元となる。式(4)に一般式を示す。

$$\log(N(\alpha)) = D \log(\alpha) \quad (4)$$

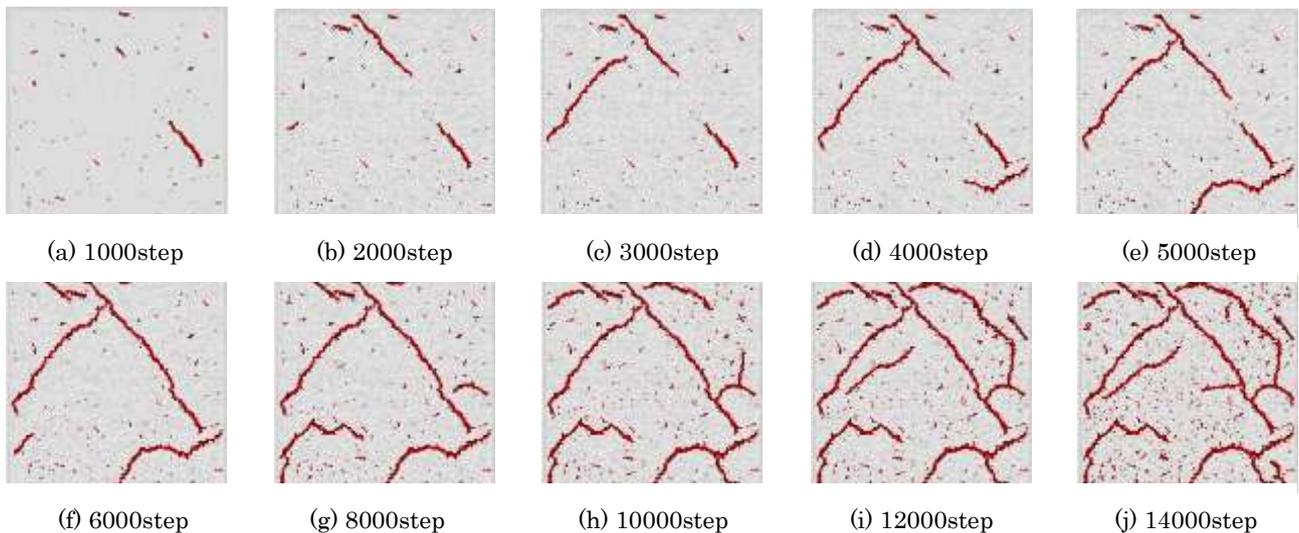


図-3 数値解析による亀裂進展の様子

なお、本研究では、正方格子の幅 α に関しては、2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 32, 64 pixel の 9 つのサイズを用いた。

3. 数値解析例

3.1 数値解析モデルと境界条件

本研究では、 $50 \times 50 \times 2$ (要素数 481,107) の解析領域を仮定し解析を実施した (図-2 参照)。なお、要素は四面体要素を用いた。材料特性として、島尻層群泥岩と同様な縦弾性係数は 80 N/mm^2 、ポアソン比は 0.3、引張強度は 0.02 N/mm^2 とした。

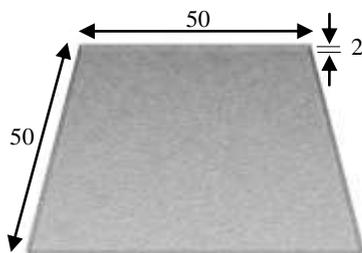


図-2 解析モデル

3.2 亀裂パターン解析

図-3 にペースト表面における亀裂進展の様子を示す。なお、図中では“亀裂要素”と判別された要素のみを赤色で表現している。同図より、初期の段階の表面には小さな亀裂の“種”が発生した。その後、主要な亀裂が複数本発生した。そして、最終的には亀裂同士が交差する様子を再現することができた。この垂直に交わることは、実験や自然界においても確認されていることから、本手法によって亀裂特性が再現できたものと考えられる。

3.3 亀裂パターンのフラクタル次元

本節では、フラクタル解析を用いることで、実験との比較を試みる。本解析では、図-4 に示すように、Mudcrack のフラクタル次元が継時的に 1.45 次元に収

束する傾向が得られた。この結果は、既存のベントナイトペーストを用いた乾燥実験によって得られた 1.46 次元に収束するという結果と類似している。したがって、本解析手法は、実際の Mudcrack の亀裂パターンを再現できたと考えられる。

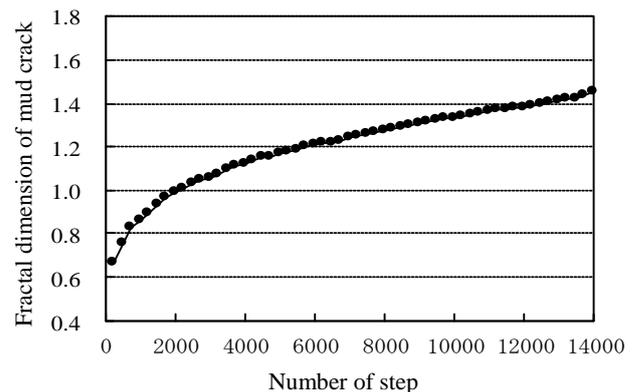


図-4 数値解析による Mudcrack のフラクタル次元

4. おわりに

本手法により、実際の Mudcrack にみられる垂直に交わる亀裂や、Mudcrack の複雑度の再現が可能であることが示された。今後の課題として、Mudblock の形成等の、Mudcrack 現象特有の現象の再現等が挙げられる。

参考文献

- 1) Nakahara, A. and Matsuno, Y.: Imprinting memory into paste to control crack formation in the drying process, J. Stat. Mech.: Theory Exp. P07016, 2006.
- 2) Kitunezaki, S.: Crack propagation speed in the drying process of paste, J. Phys. Soc. Jpn. 78, pp.064801, 2009.
- 3) 伊藤寛之, 宮田雄一郎: マッドクラックのパターン形成実験, 地質学雑誌 104 巻, pp.90-98, 1998.
- 4) 松原仁, 江戸孝昭, 原久夫, 伊良波繁夫: 振り外力を受ける環状切欠き丸棒におけるファクトリーループ状破断面の形成メカニズムに関する数値解析的検討, 日本計算工学論文集, No. 20120016, 2012.