

CCS/CCUS に関する大学の研究動向調査

武川順一*

1. 研究の目的

近年、二酸化炭素を地中に貯留する carbon capture and storage (CCS) や、貯留だけでなくそれを別の用途にも利活用する carbon capture, utilization and storage (CCUS) が注目されている。地下に二酸化炭素を圧入する際、地層の透水特性を改善する目的で水圧破碎が実施される。水圧破碎により造成された亀裂は流体の主要な流路となるため、造成された人工亀裂の透水特性が効率的な CCS, CCUS において重要となる。亀裂の透水特性は様々な要素で決まるが、中でも亀裂開口幅は重要な要素の一つとなる。これまで多くの室内実験や数値実験により人工亀裂開口幅に及ぼす影響が調べられてきた。一方、地下深部では周辺環境が高温・高圧条件となることが考えられ、これらの影響により生じる亀裂の開口幅がどのように変化するかはあまり明らかとなっていない。また、圧入流体の粘性も温度条件により変化すると考えられ、それらの複合的な影響により亀裂開口幅分布はさらに複雑になると考えられる。

そこで本研究では、水圧破碎により生じる亀裂開口幅の空間分布について、温度・拘束圧・流体粘性の影響を調べる。手法としては、個別要素法を用いた数値実験を採用した。水圧破碎シミュレーションを実施するにあたり、流体流動や温度変化の影響を個別要素法に組み込んだ手法を用い、様々な条件での数値実験を実施した。それらの比較を通して、どのような要素が亀裂の開口幅に影響を与えるか調査した。

2. 研究の方法

本研究では、数値解析手法として個別要素法 (Cundall and Strack, 1979; Potyondy and Cundall, 2004) を採用した。粒子間はバネで繋がれており、bond を考慮することで引張力も生じるモデルとなっている。そこに流体流動の影響 (Shimizu et al., 2011; Nagaso et al., 2019) と温度変化による影響 (Zhou et al., 2022) を取り入れることで、深部地熱貯留層造成に関するシミュレーションを実施した。

Bond は一定のせん断応力、引張応力が作用するとそれ以上の荷重を負担しないような設定となっており、これにより岩盤内に生じる破壊を表現している。また、破壊が生じた bond 間は荷重を受け持たないだけでなく、開口幅も大きくなる。そのため、圧入された流体は破壊の生じた bond 間を選択的に流動するようになる。これにより、水圧破碎亀裂が岩盤内を進展していく様子をシミュレーションすることが可能となる。

3. 得られた成果

計算に用いたモデルを図 1 に示す。モデル中央部に坑井があり、ここから流体が圧入されると仮定する。モデルの周囲は壁要素で囲まれており、一定の拘束圧をモデルに作用させる。モデルサイズは 15 cm×15 cm とし、坑井の直径を 1 cm とした。温度は 100 °C~400 °C、拘束圧は 5 MPa~20 MPa、流体粘性は 0.5 mPas~2.0 mPas の間で変化させた。

計算結果の一例を図 2 に示す。モデル中央部の坑井から上下方向に亀裂が進展する様子が確認できる。坑井に近いほど暖色（亀裂開口幅大）となっており、距離が大きくなるに従い寒色（亀裂開口幅小）となることがわかる。同様の数値実験を、温度・拘束圧・圧入流体粘性を変化させて実施した。その結果、流体粘性の変化に対して、亀裂開口幅は最も大きく増加することが確認された。一方、温度変化に対する亀裂開口幅の変化は比較的小さかった。

*京都大学・准教授

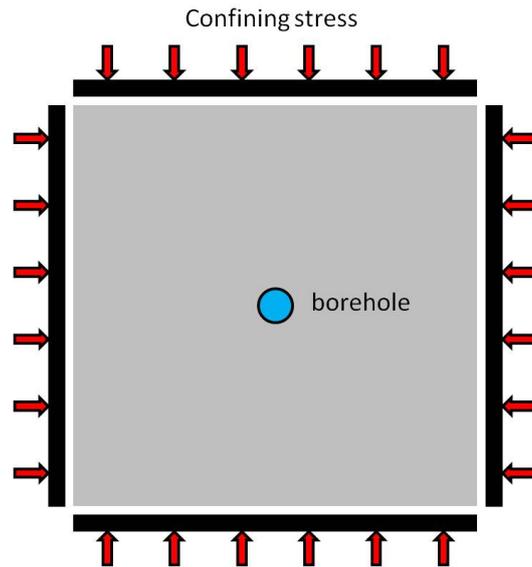


図1 計算モデル。モデル中央部の青色部が坑井，灰色部が解析対象となる岩盤を表す。上下・左右の壁面には壁要素を配置している。

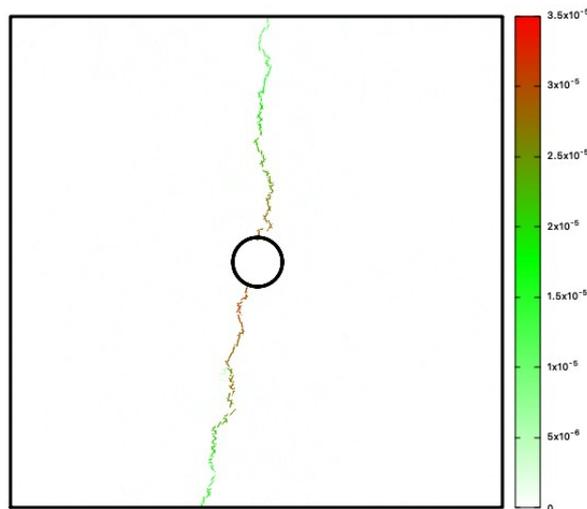


図2 モデル中央の坑井から亀裂が進展する様子。コンターカラーは亀裂の開口幅を表す。

4. 謝 辞

本研究を実施するにあたり，株式会社地球科学総合研究所より多大なご支援をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

発 表 論 文

今田龍馬，水圧破砕における様々な条件下で生じる亀裂開口幅の基礎研究，京都大学特別研究，2024。

参 考 文 献

- 1) Cundall, P.A., Strack, O.D.L., (1979): Discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, 29, 1, 47-65.
- 2) Nagaso, M., Mikada, H., Takekawa, J., (2019): The role of rock strength heterogeneities in complex hydraulic fracture formation - Numerical simulation approach for the comparison to the effects of brittleness -, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 172, 572-587.
- 3) Potyondy, D.O., Cundall, P.A., (2004): A bonded-particle model for rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 8, 1329-1364.
- 4) Shimizu, H., Murata, S., Ishida, T., (2011): The distinct element analysis for hydraulic fracturing in hard rock considering fluid viscosity and particle size distribution, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48, 5, 712-727.
- 5) Zhou, Z, Mikada, H., Takekawa, J., Xu, S., (2022): Numerical simulation of hydraulic fracturing in enhanced geothermal systems considering thermal stress cracks, *Pure and Applied Geophysics*, 179, 1775-1804.