多相流体-地盤力学連成問題の並列計算コードの開発 -既往室内実験データによる検証と並列性能-

大成建設 正会員 〇赤木 俊文 産業技術総合研究所 非会員 後藤 宏樹

大成建設 正会員 山本 肇

1. はじめに

大規模な CO2 圧入では地層中の圧力上昇により地盤変形が生じる.地盤変形は地表面の隆起,透水性の変化や 遮蔽層を含む上部層の破壊を引き起こす可能性があり,その評価には多相流-地盤力学連成解析コードが用いられて いる.著者らは、広域の貯留層や不均一性の強い 3 次元流れなど大規模な問題に対して並列化による高速計算が可 能な地下多相流解析コード TOUGH2-MP および力学解析コード GeoFEM を連成した TOUGH-GeoFEM の開発を進め てきた¹⁾.一方で,室内実験結果を通じた検証は十分に行われていない.そこで本研究では、TOUGH-GeoFEM の検 証に焦点をあて,Goto et al. (2014)による室内試験を参照し、TOUGH-GeoFEM によって実験結果を再現できること を確認した.加えて TOUGH-GeoFEM の現状の並列性能について報告する.

2. TOUGH-GeoFEMの概要

TOUGH2-MP は LBNL(Lawrence Berkeley National Laboratory)が開発した多孔質および亀裂性媒体中の多成分多 相流シミュレータ TOUGH2 の並列化版である. GeoFEM は、大規模並列計算機上での運用を目的に開発された 3 次 元弾性体の解析機能を有する解析コードである. TOUGH-GeoFEM は両者を陽的に連成した解析コードで、現状は TOUGH2-MP から GeoFEM への一方向連成を採用している. TOUGH2-MP で求めた平均圧力 $\bar{p} = s_w p_w + (1-s_w) p_n$ を GeoFEM に節点外力として引き継ぎ、岩石と間隙流体の混合体に対する釣り合い式 $\nabla \cdot \sigma' = -b\bar{p}I$ を解く. σ' は 有効応力、b は Biot の定数、 s_w は水飽和率、 p_w は濡れ相(wetting phase)の圧力、 p_n は非濡れ相(non-wetting phase)の圧力である. また、GeoFEM 中の固体の構成式には面内等方弾性体を用いた.

3. 砂岩への空気圧入試験の解析

実験は Goto et al. (2014)によって三軸圧縮試験装置を用いて行われた²⁾.図1に試験装置の概念図を示す.岩石試料は直径 5cm,高さ10cmの Berea 砂岩の円柱供試体である. 垂直応力,水平拘束圧,背圧をそれぞれ3.5MPa, 3.4MPa, 0.40MPa に設定し,底部より0.55MPaの圧縮空気を試料内部に圧入した.Berea 砂岩の弾性係数は層理面に起因する異方性を示す場合があるが,本試験では層理面に垂直な方向に切り出した試料を用いている. 計測項目は試料上部からの排水量および試料中央側面のひずみである.実験では排水速度の振動が見られた時刻や試験装置上部のチューブ内での目視観測から,100 秒経過前後で空気が試料上部に到達したものと推測される. 本実験でのひずみレベルは小さく(×10⁻⁶)弾性領域である. Goto et al. (2014)は連続体力学に基づく2相流存在下の多孔質異方弾性体により,実験結果をよく再現できることを示しており,これに倣い本実験の再現を通じてTOUGH-GeoFEMの多相流存在下における弾性範囲の変形問題への適用性を検討する. 解析モデルを 5cm×5cm×10cmの角柱とし,初期条件は上部0.40MPa の静水圧で,境界条件は上部が水圧および空気圧が0.40MPa で固定,底部が空気圧 0.55MPa で固定および非排水,側面非排水・非排気である. **表**1に岩石の力学パラメータを示す.試料は水平面内等方と仮定し,鉛直ヤング係数 E_z ,水平ヤング係数 E_h ,ポアソン比 v_{zh} , v_{hh} , せん断剛性G, Biot-Willis 係数b を Goto et al. (2014)を参考に決定している.



図1実験装置の概念図(Goto et al. 2014)

表1 岩石の力学パラメータ

キーワード 二酸化炭素地中貯留,流体-力学連成解析、多相流

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1; E-mail: akktsh00@pub.taisei.co.jp

Goto et al. (2014)は実験結果をよく再現できる弾性係数の組み合わせが一意でないことを指摘し、異なる弾性係数の値を用いた3ケースを実施している.本研究でも同様の3ケースで解析を実施した.間隙率は0.18、浸透率は3.1×10⁻¹⁴ m² である.計算は、境界条件が明確な空気が試料上部に到達したと考えられる100 秒経過時点までを対象とする.図2に試料中央(底部より5cm)における空気飽和度、空気圧、水圧および平均圧力の時刻歴を示す.有効圧力の変化が流体圧力の有効応力への寄与となる.試料中央では56 秒経過後に空気が到達し、空気飽和度、水圧、空気圧が上昇する.図3に排水速度時刻歴・ひずみ時刻歴の計算結果と実験結果の比較結果を示す.全ケースで実験結果をよく再現できており、流体挙動と砂岩の力学変形を統一的に説明できていることが分かる.





図3試料中央における排水速・ひずみ時刻歴の実験結果との比較

4. TOUGH-GeoFEM の並列性能

図4にTOUGH-GeoFEMの並列性能に用いたモデルを示す.モデル規模は200万格子モデルで,青色の貯留層に 二酸化炭素を3.1万トン/年のレートで貯留層底部中央より圧入したときの地盤変形を解析した.図5に TOUGH-GeoFEMの並列性能を示す.横軸はプロセス数×0.5(プロセス数2が基準のため),縦軸は計算速度の向上率 で(2プロセスでの計算時間)÷(計算時間)の値であり、両者対数軸で表示している.赤の点線がプロセス数の増加率 と計算速度の向上率が一致する場合で,計算速度向上の理想値である.全体に比較的良好な並列性能が得られてい る.GeoFEMの線形ソルバの並列性能がやや低いので,その改善が今後の課題である.



5. 結論と今後の課題

本研究では室内試験の再現解析を通じて TOUGH-GeoFEM の適用性を検討した.その結果,本検討範囲内では, 弾性領域における多相流体存在下における流体挙動と岩石の変形挙動をよく表現できることが分かった.また, TOUGH-GeoFEM の並列性能を確認し,全体に比較的良好な並列性能が得られた.

謝辞:本研究は、経済産業省から二酸化炭素地中貯留技術研究組合が委託された平成 29 年度「安全な CCS 実施のための CO2 貯留技術の研究開発事業」の成果の一部である.

参考文献: 1) 大成建設 (2010). 平成 22 年度成果報告書: CO2 地下貯留の安全性・周辺環境影響の予測および評価手法の研究開発, NEDO, pp.117. 2) Goto et al. (2014). Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 119(8), pp.6211-6228.