

ハイドレートを利用した CO₂ 地中貯留時の海底地盤の安定性に関する数値解析

大阪産業大学 正会員 ○木元小百合
電源開発(株) 正会員 鳥羽瀬 孝臣

1. はじめに

CO₂ 地中貯留の新たな方法として、ハイドレート化して海底地盤中に貯留する方法が提案されている。この貯留法では、液体状態の CO₂ をハイドレート安定領域より深い海底地盤中に圧入し、上昇した CO₂ が安定領域 (圧力 4.5MPa 以上で温度 10°C 以下) に達すると海水と反応して固体のハイドレートが生成され、遮へい層となる。CO₂ を安定に貯留するためには、遮へい層を含む地盤全体の力学的安定性の検討が必要である。本研究では、すでに海底地盤内にハイドレートによる遮へい層が形成されている状態を想定し、CO₂ 圧入および貯留に伴う圧力変化および海底地盤の力学的安定性について二相流体-変形連成数値解析法により検討した。

2. 数値解析手法

本検討では、Akaki et al. (2016)¹⁾ による化学-熱-力学連成解析法を用いた。地盤を固相 (土骨格、ハイドレート) と二つの液相 (水、CO₂) の多相混合体として取り扱い、土の変形、水および液体 CO₂ の流れ、ハイドレート生成による相変化、熱伝導を考慮している。なお、本検討ではハイドレート生成については考慮していないため、二相流体と固相の浸透-変形連成問題を扱う。CO₂(liquid)/water capillary pressure 曲線として van Genuchten 式、土骨格の構成式として弾粘塑性構成式を用いている。定式化は有限変形理論に基づき updated Lagrangian 法を採用

し、空間離散化は有限要素法を用いている。解析は軸対称条件で行った。

3. 解析モデル

水深 1000m 下の海底地盤を想定し、圧入井から半径 1040m、海底面から深度 300m までの領域をモデル化した。図 1 に示すように砂層 (L3) 内に厚さ 2m の CO₂ ハイドレート含有層 (L5、ハイドレート飽和率 99%) が存在するとした。ハイドレート含有層の透水係数は周囲の砂層の約 10⁻⁷ 倍としている。地表面、右側面、モデル下面は静水圧境界、左側面は非排水境界とした。CO₂ 圧入条件は圧力制御とし、ハイドレート含有層の 26m 下方を圧入地点とし、CO₂ 液圧を 10 時間で 250 kPa 上昇させ、その後は一定に保った。砂層 (L3) の透水係数は、絶対浸透率を 1darcy (11°C, 12MPa で $k=7.80 \times 10^{-6} \text{m/s}$ に相当) とした。水分特性曲線は未固結砂の CO₂ /water capillary pressure 曲線²⁾ を参考に図 2 を用いた。水および液体 CO₂ の透水係数の飽和度依存性は鳥羽瀬ら³⁾ を参考にした。各層の弾粘塑性パラメータは南海トラフ海底地盤の地盤定数¹⁾ を参考に決定した。ハイドレート含有地盤の変形特性については、既往の CO₂ ハイドレート含有砂試料の力学試験結果をもとに弾粘塑性構成式⁴⁾ によってモデル化した。

4. 解析結果

図 3, 図 4, 図 6 に 722 日後の CO₂ 飽和率, 間隙水圧, 粘塑性偏差ひずみの分布図 (半径 540m までの範



図 1 解析モデル

キーワード CO₂ 地中貯留, ハイドレート, 数値解析

連絡先 〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1 大阪産業大学工学部 都市創造工学科

囲を表示)を示す。図3より貯留領域はハイドレート層下の半径約100m,高さ約30mの領域に広がっている。なお解析終了時点(約722日後)のCO₂の総圧入量は約105万tであった。図4,図5よりCO₂の圧入とともにハイドレート層下で間隙圧力が上昇している。図6に示す粘塑性偏差ひずみは,せん断破壊の指標となるが,ハイドレート層直上で約2%のひずみが生じている。地表面節点(Node 77)の鉛直変位は図7に示すように,約0.27m(隆起)となっている。これは砂層(L3)で間隙圧力が増加したことによる。図8に示す骨格応力径路をみると,ハイドレート層内では一旦破壊応力線に近づく挙動がみられ,ハイドレート層直下では平均骨格応力が単調に減少している。

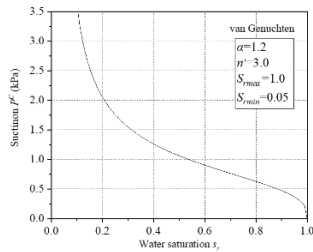


図2 CO₂/water capillary pressure 曲線

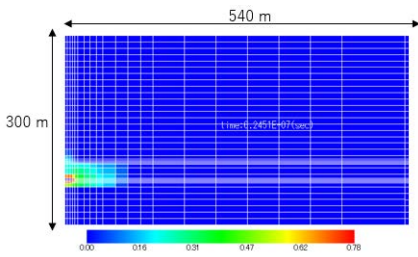


図3 CO₂飽和率分布(722日後)

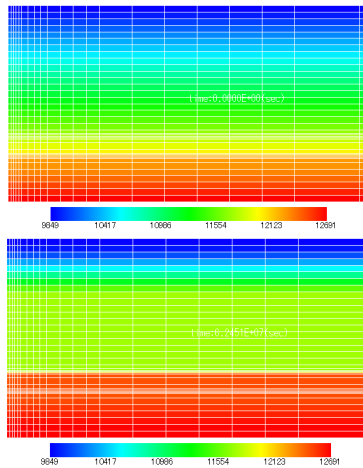


図4 間隙水圧分布(kPa, 上:初期状態, 下:722日後)

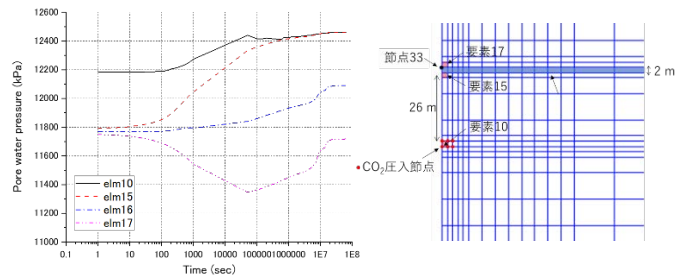


図5 圧入箇所周辺の間隙水圧時刻歴

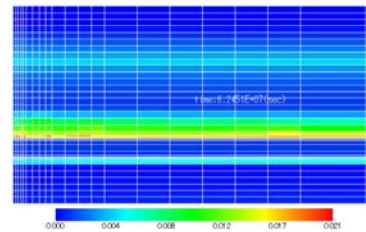


図6 粘塑性偏差ひずみ分布(722日後, 圧縮正)

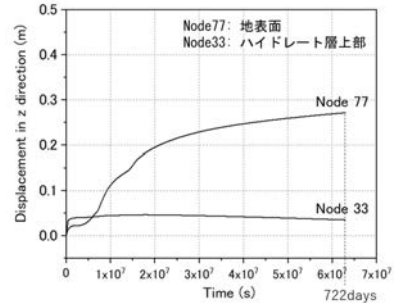


図7 地盤鉛直変位の時刻歴

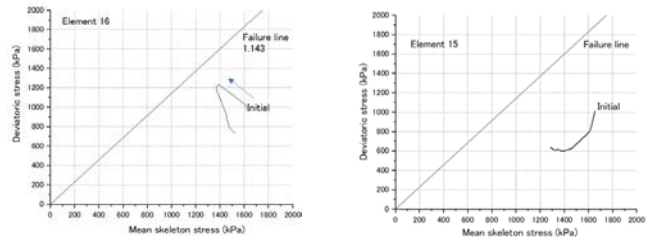


図8 骨格応力径路(ハイドレート層(左), 直下(右))

5. おわりに

二相流体-変形連成数値解析法によりCO₂圧入時の海底地盤の変形挙動について考察した。今後,圧入条件(位置,圧力),ハイドレートシール層の透水性・厚さ,上部の地層構成の影響について検討する。

参考文献

- 1) Akaki, T., Kimoto, S. and Oka, F.: *International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics*, Vol.40, pp. 2207-2237, 2016.
- 2) Plug, W.-J. and Bruining, J., *Advances in Water Resources*, Vol.30, pp.2339-2353, 2007.
- 3) 鳥羽瀬孝臣, 西山治希, 重岡優希: 第48回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 公益社団法人土木学会, 2022年1月 講演番号48, 2022.
- 4) Yoshimoto, M., Kimoto, S.: *Soils and Foundations*, Vol. 62, 2022.