

地下岩盤 NGH 貯蔵を想定した解析モデルによる変形挙動評価

愛媛大学大学院 学生会員 ○ソン ウォンジュン 愛媛大学大学院 正会員 安原英明

愛媛大学大学院 正会員 木下尚樹

1. はじめに

全世界のエネルギー需要は増加すると予測されている¹⁾。その中、環境への負担が比較的少ない天然ガスの利用が進められている^{2,3)}。日本では、エネルギー基本計画が策定され、一次エネルギー消費項目の中で天然ガスの割合が増加した²⁾。今後も天然ガスの使用が増加傾向である中、従来では天然ガスを液化天然ガス (LNG) として輸送されている。LNG は輸送過程で大気圧、-162℃ の条件で輸送している。一方、大気圧、-20℃ で安定な天然ガスハイドレート (NGH) の輸送と貯蔵の研究が行われ、冷凍エネルギーの節約と小規模ガス田採取の経済性向上を目標としている^{4,5)}。本研究では、その NGH の岩盤空洞貯蔵の可能性検討を目的とし、解析モデルを構築した。この解析モデルを用いて、地下岩盤内空洞に NGH 貯蔵をした際の岩盤の変形性状を評価し、岩盤空洞の健全性を精査した。

2. 地下岩盤内行動の低温環境モデルの概要

本研究は熱 (Thermal 以下, T)・水 (Hydraulic 以下, H)・応力 (Mechanical 以下, M) の相互影響を再現した解析モデルを構築した。本解析では、T→H への作用として、温度変化によって水の密度、熱伝導率、定圧比熱容量変化を考慮する。H→T への作用として空隙水の熱拡散率変化による熱輸送変化と相転移時の発生潜熱による熱伝導の変化、T→M への作用として低温環境により周辺岩盤の熱収縮を考慮する。また、M→T への作用として空隙率変化による熱伝導変化、H→M への作用として温度変化に伴う水の密度変化による周辺岩盤の応力変化を考慮する。なお、NGH 分解に伴う吸熱作用が応力へ与える影響は本研究では考慮しない。

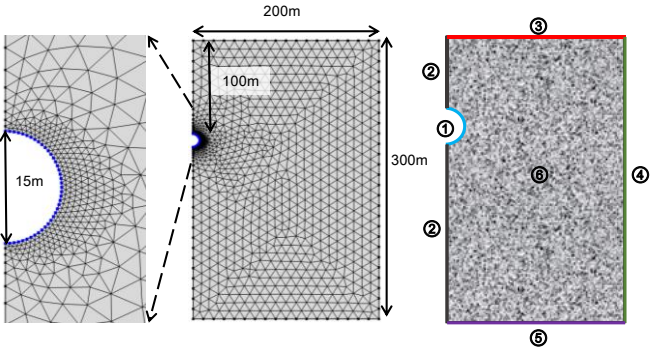


図 1 解析ジオメトリと境界条件

3. 解析境界条件

境界条件は図 1 で表しているように①～⑥であり、それぞれの境界条件を下記の表に示す。

表 1 解析の境界条件

境界番号	温度境界条件	相変化条件	応力境界条件
①	253.15 K の固定温度境界	—	自由境界
②	断熱境界	—	対称境界
③	293.15 K の固定温度境界	—	自由境界
④	$T = 293.15 + 0.05z$	—	$p = -k_0 \rho_p g z$
⑤	$T = 293.15 + 0.05z$	—	水平方向ローラ条件
⑥	$T = 293.15 + 0.05z$	273.15 K になると潜熱 (333.5 kJ kg ⁻¹) を考慮して相転移	自重条件

ここで、 T : 対象岩盤の初期温度 [K], z : 地下深度 [m], p : 圧力 (側圧) [Pa], k_0 : 側圧係数 [-], ρ_p : 対象岩盤の密度 [kg m⁻³], g : 重力 [m s⁻²], k_0 は 0.5 である。なお、今回の研究では Case1 は岩盤空隙の飽和含

水条件, Case2 は岩盤空隙の乾燥条件と分けて解析を行った。

4. 解析結果

解析結果は温度変化結果, 相変化分布変化, 熱応力分布において Case1 と Case2 の比較を述べる。

温度変化分布を図 2 で示す。Case1 の方が Case2 より温度変化が遅くなっていることが明確に確認できる。これは, 岩盤内空隙水が相変化時の潜熱で岩盤に対し保温材としての働きをしていると考えられる。

次に, 飽和含水花崗岩の空隙内に存在する空隙水が, 時間と共に水から氷へ相転移する経時相分布を図 3 に表す。-20℃ の貯蔵空洞に接している部分から徐々に相転移され, 100 年目で空洞壁面から約 5 m まで氷相が形成されている。

熱応力については高い引張応力が発生していた x 軸方向の応力分布を図 4 に示す。Case1 の x 軸応力分布は 10 日, 1, 100 年目の結果において, 最大引張応力値はそれぞれ, 14.7, 12.3, 11.5 MPa である。岩盤に作用する引張応力が 6.40 MPa を超えると損傷が始めると考えられることから, 実際には 10 日以内に岩盤の損傷が発生し始めると想定する。引張応力が作用する領域は徐々に広がっている。ここで損傷領域と想定される範囲を, 図 5 に示す。1, 100 年目で損傷想定範囲はそれぞれ, 0.7, 1.5 m であることを確認した。Case2 の x 軸応力分布は 10 日, 1, 100 年目の空洞内上部の最大引張応力値はそれぞれ, 10.6, 10.1, 9.37 MPa であり Case1 よりも低い値であるが, Case2 の場合も Case1 同様 10 日以内に岩盤の損傷が生じ始めることを確認した。損傷想定範囲は図 5 で示すように 1, 100 年目でそれぞれ, 1.2, 1.4 m であることを確認した。

5. 終わりに

本研究では, NGH 岩盤空洞貯蔵を想定した解析モデルを構築し, 岩盤の健全性を検証した。その結果, 岩盤内空隙水の相変化時に発生する凝固熱により, 穏やかな温度変化になることを確認した。周辺岩盤に作用する引張応力の範囲は Case2 より Case1 が小さく, 岩盤の損傷が生じ始める引張応力 6.5 MPa 以上の範囲について

は, Case2 が大きくなった。また, 空隙水で飽和されている地下岩盤は, 貯蔵空洞の壁面に集中的に損傷が発生すると想定される結果が得られた。解析より得られた損傷想定範囲から, Case1 が Case2 より高い安全性を示すと考えられる。

参考文献

- 1) IEA : ENERGY BALANCES OF OECD COUNTRIES 2015 EDITION, 8pp., 2015
- 2) 経済産業省資源エネルギー庁 : 平成 27 年度エネルギーに関する年次報告, pp.194-196, 2016
- 3) 野瀬実喜男 : わが国天然ガス (LNG) 需要の現状と課題, 石油技術協会誌, 第 59 巻, 第 2 号, pp.148-161, 1994
- 4) 財団法人 日本船舶技術研究協会 : 天然ガスハイドレート (NGH) 輸送船の研究開発, 研究成果概要報告書, 40pp., 2009
- 5) 深沢恵志, 加藤秀治 : 天然ガスハイドレート (NGH) ペレット用貯蔵設備の開発, 三井造船技報, No.203, 2011

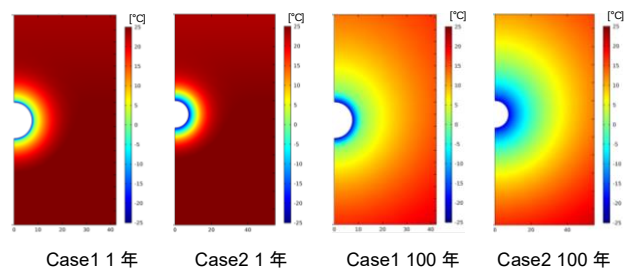


図 2 経時温度変化比較図

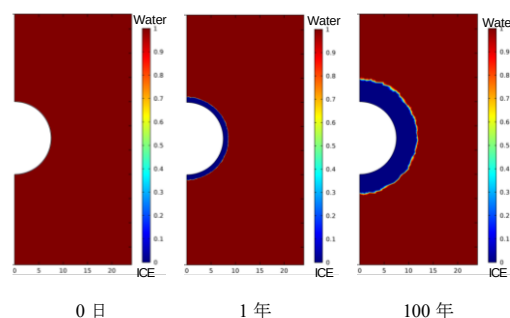


図 3 相変化分布図

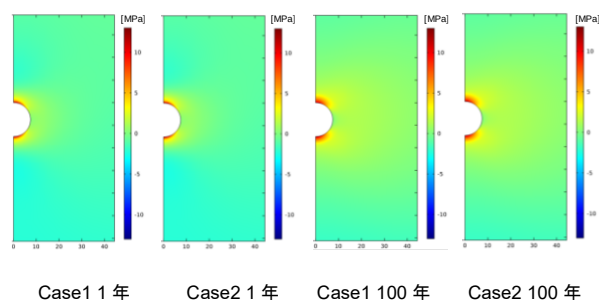


図 4 x 軸応力分布図

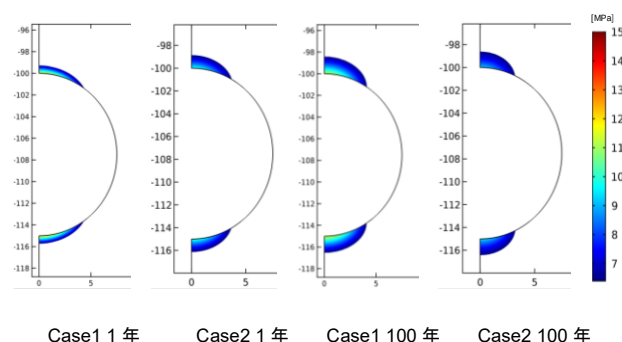


図 5 x 軸損傷想定応力分布図