

京都大学工学部 学生会員 ○北野 貴士
 京都大学大学院 正会員 木元 小百合, 肥後 陽介
 京都大学大学院 フェロー会員 岡 二三生
 京都大学大学院 正会員 福田 知晃
 京都大学大学院 学生会員 岩井 裕正

1. はじめに

近年, メタンハイドレート (以下, MH とする) が新しいエネルギー源として注目されている. 本研究では, 分解時の相変化, 熱の移動, 土骨格変形を考慮した化学・熱・力学連成有限要素解析法¹⁾を用いて, 減圧法による MH 分解時の地盤変形挙動の予測を行った. 海洋における深層型 MH の産出状況を想定し, MH 含有層及び海底面までの周辺地盤を含んだ領域を対象とした解析を行った.

2. 多相系地盤における支配方程式の定式化

多孔質媒体理論 (TPM) に基づき, 多相混合体として支配方程式を定式化する. Cauchy 応力の Jaumann 速度を用いた updated Lagrangia 法に基づき定式化を行う. 空間離散化には有限要素法を用いる. 未知数は変位, 水圧, ガス圧, 温度である.

(1) 応力の定義と運動量保存則

構成式中の応力変数として, 全応力 σ_{ij} から平均間隙圧 P^F を引いたものである骨格応力 σ'_{ij} を用いた.

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - P^F \delta_{ij}, \quad P^F = sP^W + (1-s)P^G \quad (1)$$

ここで s は飽和度, P^W , P^G は水圧およびガス圧である. 各相の運動量保存則は次のように表される.

$$n^\alpha \rho^\alpha \dot{v}_i^\alpha = \sigma_{ji,i}^\alpha + \rho^\alpha n^\alpha \bar{F}_i - \tilde{P}_i^\alpha \quad (\alpha = S, W, G, H) \quad (2)$$

n^α は各相の体積含有率, ρ^α は密度, $\tilde{P}_i^\alpha$ は α 相と他の相の相互作用を表す項である. また変形は準静的であるとし, 液相・気相の運動量保存側において液相と気相の相互作用を無視すると, 以下のダルシー則に相当する関係式が得られる.

$$V_i^W = \frac{k^W}{\rho^W g} \{ -(P^W \delta_{ji})_{,j} + \rho^W \bar{F}_i \} \quad (3)$$

$$V_i^G = \frac{k^G}{\rho^G g} (-P^G \delta_{ji})_{,j} \quad (4)$$

ここで k^W は透水係数, k^G は透気係数である.

(2) 質量保存則

各相について質量保存則は次のように表される.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho^\alpha n^\alpha) = -q_{Mi,i}^\alpha + \dot{m}^\alpha \quad (\alpha = S, W, G, H) \quad (5)$$

ここで, $q_{Mi,i}^\alpha$ は各相の流量フラックスベクトル, $\dot{m}^\alpha$ は MH 分解による質量増加速度である. 液相・気相の質量保存則に式(3),(4)を代入することで得られる液相・気相の連続式を用いる.

(3) エネルギー保存則

エネルギー保存則は次のようになる.

$$\sum_\alpha (n^\alpha \rho^\alpha c^\alpha) \dot{\theta} = D_{ij}^{vp} \sigma'_{ij} - \sum_\alpha q_{Hi,i}^\alpha + \dot{Q}^H \quad (\alpha = S, W, G, H) \quad (6)$$

c^α は α 相の比熱容量 (kJ/(tK)), θ は温度, $q_{Hi,i}^\alpha$ は α 相の熱フラックスベクトル, $\dot{Q}^H$ は分解熱 (kJ/(m³s)), D_{ij}^{vp} は粘塑性ストレッチングテンソルである.

3. 地盤の弾粘塑性構成式¹⁾

地盤の構成式には応力変数に骨格応力, サクシオンを用いた不飽和土の弾粘塑性構成式を用いる. 構成式中の硬化パラメータにサクシオン, MH 飽和率による強度変化, 粘塑性パラメータ中に温度変化の影響を考慮する. また, MH 分解反応式は, Kim-Bishnoi 式²⁾により与えられる.

4. 解析モデル

解析モデルは図 1 に示すように, 水深 1010m に相当する静水圧を与え, 海底面下 290m に存在する厚さ 44m の MH 含有層を想定している. モデル上下右面を排気・排水・等温境界, 左面を非排気・非排水・断熱境界の対称軸とし, 2 次元平面ひずみ条件で解析を行う. また, モデル左面, MH 層最下部から 5m の位置から

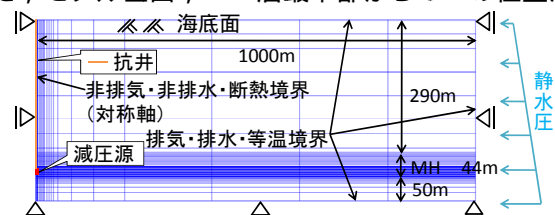


図-1 解析モデル

14m に渡って減圧源を設ける．抗井を考慮するモデルでは減圧源最上部から海底面までの高さ 335m，幅 0.5m の縦一列の要素に，鉄筋コンクリートの剛性，透水性を考慮し，抗井を考慮したモデルとする．解析はモデルに抗井を考慮しないケース(Case1)と，抗井を考慮するケース(Case2)の 2 ケースについて行う．

解析に用いるパラメータは，南海トラフ海底面下約 220m の地点で採取されたシルト質土の非排水三軸試験結果を基に決定した．これらのパラメータを表 1 に示す．

表-1 地盤の構成式に関するパラメータ

せん断弾性係数	G	53800 (kPa)
擬似過圧密比	$\sigma'_{mb1}/\sigma'_{m0}$	1.0
粘塑性パラメータ	m'	23.0
粘塑性パラメータ	C_0	1.0×10^{-12} (1/s)
熱粘塑性パラメータ	α	0.15
接線剛性法のパラメータ	θ	0.5
圧縮指数	λ	0.169
膨潤指数	κ	0.017
変相応力比	M_m^*	1.08
内部構造パラメータ	β	0.0
内部構造パラメータ	$\sigma'_{maf}/\sigma'_{mai}$	1.0
サクシオンパラメータ	S_I	0.2
サクシオンパラメータ	s_d	0.25
サクシオンパラメータ	P_i^C	100 (kPa)
MH パラメータ	n_m	0.6
MH パラメータ	n_d	0.75
MH パラメータ	S_{rs}^H	0.51

5. 解析結果

減圧は両ケースとも減圧源の設定圧力を，初期の約 13MPa から 25 時間かけて約 6MPa まで減圧し，以降一定とした．図 2~5 に Case2 の減圧開始から 30 日後の解析結果を示す．図 3~5 は減圧源周辺の拡大図であり，図 2 はモデル全体を示している．図 2 は間隙水圧分布であり，減圧源から圧力の低下が広がっている．図 3 は MH 残存度を示している．MH 残存度とは，初期の MH 物質量を n_0^H ，現在の MH 物質量を n^H として， n^H/n_0^H で表す．減圧源から分解が広がっている様子が見られる．図 4 には粘塑性偏差ひずみの第二不変量の蓄積量を示している．減圧，MH の分解に伴い偏差ひずみは減圧源付近に顕著に発生しており，30 日後に最大で 5.76% の偏差ひずみが発生している．図 5 は温度分布図であり，MH の分解に伴って温度が低下している．30 日後の減圧源付近の要素の温度は約 381K まで低下しており，これは間隙圧 6MPa における分解の平衡温度と一致している．図 6 には両ケースの海底面の沈下量を示している．node 103 は減圧源直上，node 2118 はそこから 30.5m，

node3358 は 400m 離れた点である．Case1 では node103 で最大で約 11.8cm，Case2 では node 2118 で最大で約 12.1cm の沈下が起こっている．

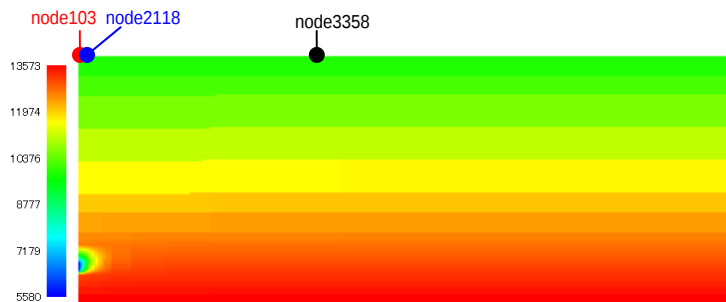


図-2 間隙水圧分布(kPa)

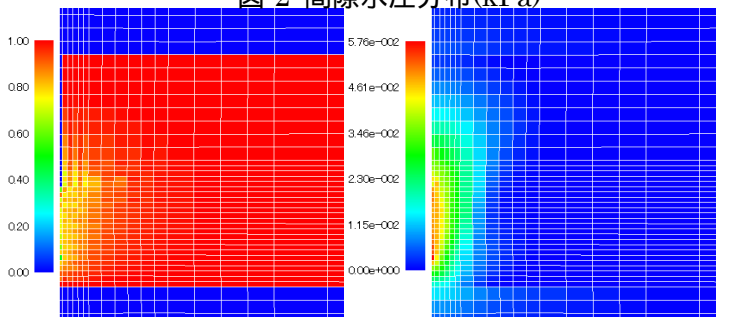


図-3 MH 残存度分布

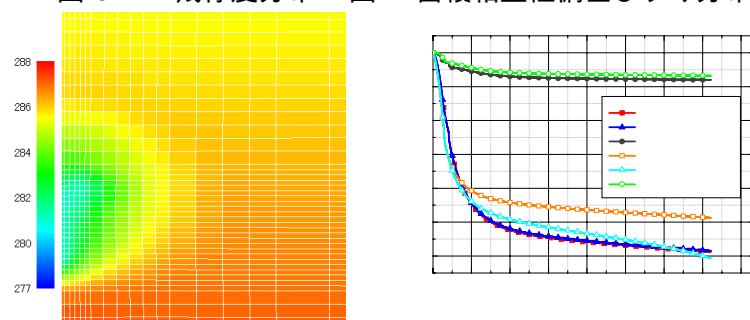


図-4 蓄積粘塑性偏差ひずみ分布

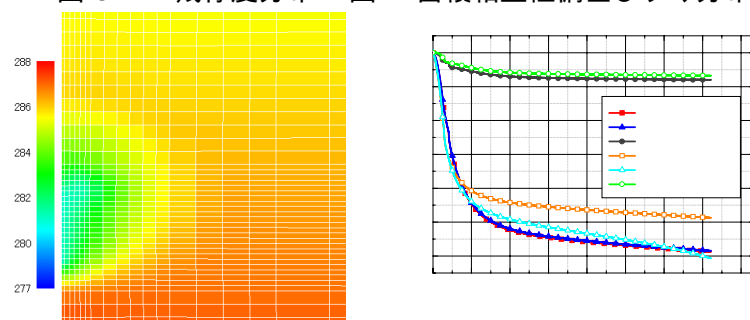


図-5 温度分布(K)

図-6 海底面の沈下量

6. まとめ

海底下に存在する MH 含有層及び海底面までの周辺地盤を含んだ領域に対して，MH 分解時の相変化，熱の移動，土骨格変形を考慮した化学-熱-力学連成有限要素解析法を用いて，減圧法による MH 分解時の地盤変形挙動の予測を行い，抗井の剛性，透水性を導入した．その結果，抗井を考慮したモデルと抗井を考慮しないモデルとでは最大沈下の起こる位置に違いが見られ，変形のモードが異なることが明らかになった．また，ここで仮定した減圧量では，地盤の破壊は見られなかった．

参考文献

- 1) Kimoto, S., Oka, F., Fushita, T., Tomohiko, F. : Int. J. Mech. Sci, Vol.52, pp.365-376, 2010.
- 2) Kim, H. C., Bishnoi, P. R., Heidemann, R. A. and Rizvi, S. S. H. : Chem. Eng. Sci., No.42, pp. 1645-1653,1987.