

メタンハイドレート分解時の2次元有限要素変形シミュレーション - 境界条件の影響 -

特許庁 (元京都大学大学院)	正会員	藤脇 昌也
京都大学大学院	正会員	木元 小百合
京都大学大学院	フェロー会員	岡 二三生
京都大学大学院	学生会員	○ 伏田 智彦

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. MH 飽和度依存性, サクション依存性, 温度変化の影響も構成式中に導入し, 分解時の相変化, 熱の移動, 土骨格変形を考慮した分解・変形連成有限要素解析法を開発しているが¹⁾²⁾, 本研究では, 実際の産出状況を模擬した2次元モデルを用いて, MH 分解時の地盤変形解析を行い, モデル上面・下面の境界条件の影響について検討した.

2. 多相系地盤における支配方程式の定式化

MH 含有地盤の構成材料を土粒子 (S 相), MH (H 相), 水 (W 相), ガス (G 相) とし, 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. サクションと飽和度の関係である水分特性曲線を構成式として用い, van Genuchten 式により定義するものとし, 土骨格の構成式として, 先に述べた弾粘塑性構成式を用いた. さらに, Cauchy 応力の Jaumann 速度を用いた updated Lagrangian 法により有限要素離散化を行う. 未知数は変位, 水圧, ガス圧, 温度である.

(1) 応力の定義とつりあい式

全応力テンソル σ_{ij} が各分応力テンソル σ_{ij}^α の総和で表されるとする.

$$\sum_{\alpha} \sigma_{ij}^\alpha = \sigma_{ij} \quad (\alpha = S, W, G) \quad (1)$$

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

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - P^F \delta_{ij}, \quad P^F = sP^W + (1-s)P^G \quad (2)$$

ここで s は飽和度, P^W , P^G は水圧および気圧.

各相の運動量保存則を足し合わせることににより, 公称応力テンソル S_{ij} を用いた増分型の運動量保存則が得られる.

$$\int_V \dot{S}_{ji,j} dV = 0 \quad (3)$$

(2) 質量保存則

各相について, 質量保存則を仮定する. S 相, W 相, G 相の質量保存則は次のように表される.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho^\alpha n^\alpha) = -q_{Mi,i}^\alpha + \dot{m}^\alpha \quad (\alpha = S, W, G) \quad (4)$$

q_{Mi}^α は流量フラックスベクトル, $\dot{m}^\alpha$ は MH 分解による単位体積あたりの質量増加速度である. W 相は非圧縮性とし, G 相は理想気体とする. さらに, W 相, G 相の流れは共に Darcy 則に従うものとする.

(3) エネルギー保存則

系全体のエネルギー保存則は以下のようになる.

$$\sum_{\alpha} (n^\alpha \rho^\alpha c^\alpha) \dot{\theta} = D_{ij}^{vp} \sigma'_{ij} - \sum_{\alpha} q_{Hi,i}^\alpha + \dot{Q}^H \quad (\alpha = S, W, G, H) \quad (12)$$

c^α は α 相の比熱容量 (kJ/(tK)), θ は温度, q_{Hi}^α は α 相の熱フラックスベクトル, $\dot{Q}^H$ は単位時間・単位体積あたりの分解熱 (kJ/(m³s)) である.

(4) 弾粘塑性構成式

ひずみ速度依存性挙動を表現できる粘塑性ストレッチングテンソル D_{ij}^{vp} は, 非関連流動則によって以下のように書ける.

$$D_{ij}^{vp} = C_{ijkl} \exp \left\{ m' \left(\bar{\eta}^* + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}} \right) \right\} \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{kl}} \quad (5)$$

ここで, $f_p = 0$ は粘塑性ポテンシャル関数, $\tilde{M}^*$ はダイレイタンシー係数, C_{ijkl} と m' は粘塑性パラメータ, σ'_{mb} は硬化パラメータである. なお, C_{ijkl} において温度変化の影響³⁾を考慮し, σ'_{mb} において内部構造の変化, サクション依存性, MH 依存性を考慮¹⁾²⁾している.

(5) MH 分解反応式

ハイドレート分解速度を Kim-Bishnoi 式⁴⁾で与える.

$$\dot{N}_H = -5.85 \times 10^9 \times \exp \left(-\frac{9400}{\theta} \right) (P_C - P) N_{H0}^{\frac{1}{3}} N_H^{\frac{2}{3}} \quad (13)$$

上式中で, N_H は領域 V に含まれる現在のハイドレート物質質量 (kmol), N_{H0} は領域 V に含まれる初期ハイドレート物質質量 (kmol) である. また, P は現在の圧力 (kPa), θ は現在の温度, P_C は温度 θ における分解圧力である. これにより, 質量保存則中の質量増加速度 $\dot{m}^\alpha$, H 相の間隙率変化速度 $\dot{n}^H$ 及びエネルギー保存則中の分解熱 $\dot{Q}^H$ を算出する.

3. 2次元解析結果

前節までで定式化した分解・変形連成有限要素解析法を用いて, 2次元平面ひずみ条件で MH 分解時の地盤の変形シミュレーションを行った. 解析に用いたモデルは海底面下 200m の MH 含有層を想定しており, 図 1 に示すように, 縦 12 要素, 横 16 要素の 192 要素とし, 長さは縦 2.8 m, 横 10.0 m である. 境界条件は, 左面を非排水・非排気, 断熱境界とし, 右面を水圧・ガス圧一定, 等温境界とし, Case 1 では上面および下面を非排水・非排気, 等温境界, Case 2 では上面および下面を水圧・ガス圧一定, 等温境界とする. 水圧・ガス圧一定境界では水圧・ガス圧を初期値の 9MPa に固定する. そして, モデル左端中央に長さ 80cm の加熱・減圧源を設置し, 5 時間かけて水圧, ガス圧を初期 9MPa から 7MPa に減圧し, 温度を初期 283K から 313K へ上昇させる. 解析に用いたパラメータを表 1 に示す. パラメータは南海トラフにおける, 海面下約 900m, 海底面下約 200m に存在する地盤材料を想定し, 決定した.



図 1: 解析モデル

キーワード: メタンハイドレート, 多層地盤, 変形

連絡先: 〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 地盤力学研究室 075-383-3193

表 1: 解析に用いたパラメータ

初期間隙率, n_0	0.47
初期 MH 飽和度, S_{r0}^H	0.634
初期間隙圧力, P_{s0}	9000 (kPa)
圧密降伏応力, σ'_{mbi}	1095.2 (kPa)
静止土圧係数, K_0	0.5
初期せん断弾性係数, G_0	53800 (kPa)
粘塑性パラメータ, m'	23.0
粘塑性パラメータ, C_0	6.6×10^{-12} (1/s)
圧縮指数, λ	0.169
膨潤指数, κ	0.017
破壊応力比, M^*	1.09
内部構造パラメータ, σ'_{maf}	1095.2 (kPa)
内部構造パラメータ, β	0.0
熱粘塑性パラメータ, α	0.2
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	0.2
MH パラメータ, n_d	0.5
MH パラメータ, S_{ri}^H	0.65
透水係数, k^W	1.0×10^{-7} (m/s)
透気係数, k^G	1.0×10^{-6} (m/s)
最大飽和度, S_{rmax}	1.0
最小飽和度, S_{rmin}	0.0
van Genuchten パラメータ, α	0.0025 (1/kPa)
van Genuchten パラメータ, n	10

図 2～図 7 に解析開始から 120 時間後の結果を示す。図 2～図 4 には Case 1 の結果を、図 5～図 7 には Case 1 と Case 2 の比較を示す。図 2 は要素中の MH 残存度を示している。ここでいう残存度とは領域内の初期 MH 物質質量 n_0^H と現在の MH 物質質量 n^H を用いて n^H/n_0^H で表す。MH の分解は加熱・減圧源を挟んで、ほぼ上下対称に進行していることがわかる。Case 2 の場合、分解領域は Case 1 と大きく変わらず、メタンガス回収量は Case 1 で 61.5m^3 、Case 2 で 57.0m^3 となった。図 3 は温度分布図を示している。加熱・減圧源を中心として、上面・下面・右面の等温境界に向けて、ほぼ段階的に分布している。初期の温度より低い温度となっている領域があるが、MH 分解反応は吸熱反応であるため、MH 分解中の要素の周りの要素では熱が吸収されるためである。図 4 は過剰間隙ガス圧分布図を示している。メタンガスの発生した領域のみに圧力分布を表示しているため、図のように一部にしか色のついていないコンター図となっている。ガス圧は加熱・減圧源を中心に分布

しており、メタンガスが加熱・減圧源に向かって流れていることがわかる。MH は減圧圧力-2000kPa の加熱・減圧源に近い領域で分解しているため、発生と同時に回収され、それほど大きなガス圧の発生には至らなかったと考えられる。図 5 は過剰間隙水圧分布図を示している。Case 1 では、モデル左部にある加熱・減圧源からモデル右面の排水境界に向けて、ほぼ一次元的に分布している様子がわかる。それに対し、Case 2 では加熱・減圧源から上下右面の排水境界に向けて放射状に分布している。図 6 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。MH の分解に伴い加熱・減圧源を中心にひずみが発生している。また、モデル上部左端においても、ひずみが発生している様子がわかる。Case 1 に比べ、Case 2 ではひずみの発生量が小さく、分布範囲も狭い。図 7 は変形量を 4 倍にした、変形図を示している。加熱・減圧源周辺で大きく変形し、その上部で沈下が生じている様子がわかる。モデル上面左端において最大の沈下量が生じており、120 時間後で Case 1 では 9.74cm、Case 2 では 3.70cm の沈下量が発生している。

4. まとめ

MH 飽和度依存性を導入した弾粘塑性構成式を導入した、分解時の相変化、熱の移動、土骨格変形を考慮した分解・変形連成有限要素解析法を用いて、加熱・減圧法による MH 分解時の 2 次元地盤変形挙動の予測を行った。境界条件による影響を検討した結果、上面および下面を非排気・非排水条件とした方が加熱・減圧源付近およびモデル上部左側で、より大きなひずみが発生することがわかった。MH 分解領域およびメタンガス回収量にはそれほど大きな違いはみられなかった。

参考文献

- 1) 伏田, 木元, 岡, 藤脇: メタンハイドレート飽和度を考慮した弾粘塑性地盤の分解・変形解析, 第 41 回地盤工学研究発表会講演集, 鹿児島, pp.367-368, 2006.
- 2) Kimoto, S., Oka, F., Fushita, T. and Fujiwaki, M.: A Chemo-Thermo-Mechanically Coupled Numerical Simulation of the Subsurface Ground Deformations due to Methane Hydrate Dissociation, Computers and Geotechnics, 2007 (submitted)
- 3) Yashima, A., Leroueil, S., Oka, F. and Guntoro, I.: *Soils and Foundations*, Vol.38, No.2, 1998.
- 4) Kim, H. C., Bishnoi, P. R., Heidemann, R. A. and Rizvi, S. S. H.: *Chem. Eng. Sci.*, No.42, pp.1645-1653, 1987.



図 2: MH 残存度



図 3: 温度 (K)



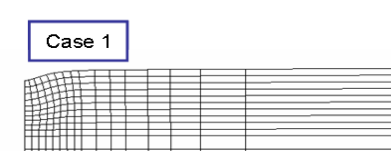
図 4: 過剰間隙ガス圧 (kPa)



Case 1



Case 1



Case 1



図 5: 過剰間隙水圧 (kPa)



図 6: 粘塑性偏差ひずみの第二不変量

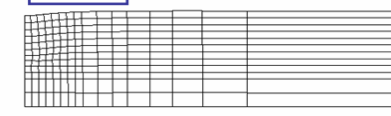


図 7: 変形図 (4 倍)