

第Ⅲ部門

メタンハイドレート分解による多相地盤の変形シミュレーション

京都大学大学院 学生員 ○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 岡 二三生
 奥村組(株) 正会員 山崎 順弘

1. はじめに

現在、新しいエネルギー源としてメタンハイドレート(MH:Methane hydrate)が注目を浴びている。しかし、大深度での掘削や地盤環境に与える影響の解明など実用化に向けての課題も多くあり、メタンガスを安全に生産するための実験的・解析的研究が進められている。そこで、熱、ガス、水の流れを考慮し、地盤材料の構成則として弾粘塑性構成式を用いた、熱-ガス-水-土連成有限要素解析法を開発し、MH分解時の地盤変形挙動の予測を行った。

2. 支配方程式と地盤のモデル化

MH含有地盤の構成材料を土粒子骨格(S相)、MH(H相)、水(W相)、メタンガス(G相)とし、地盤を分解層(分解終了後)、境界層(分解中)、ハイドレート層(分解開始前)に分けて考える。ただし、ハイドレート層はS相、W相、H相、境界層はS相、W相、G相、H相、分解層はS相、W相、G相で構成されているものとする。多孔質媒体理論(Theory of Porous Media)に基づき、MH含有地盤を多相混合体として支配方程式の定式化を行う。支配方程式とその他の場の方程式は以下のようになる。

W相の連続式	$s(\dot{n} - \dot{n}^H) + \dot{s}n^F = -V_{i,i}^W + \frac{\dot{m}^W}{\rho^W}$ (1)	エネルギー保存則	$(\rho c)^E \dot{\theta} = D_{ij}^{vp} \sigma'_{ij} - h_{i,i} + \dot{Q}^H$ (8)
G相の連続式	$(1-s)(\dot{n} - \dot{n}^H) - \dot{s}n^F + (1-s)n^F \frac{\dot{\rho}^G}{\rho^G} = -\frac{(\rho^G V_{i,i}^G)}{\rho^G} + \frac{\dot{m}^G}{\rho^G}$ (2)	S相の分応力	$\sigma_{ij}^S = \sigma'_{ij} + (1-n^F)P^F \delta_{ij}$ (9)
平均骨格応力	$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - P^F \delta_{ij}$ (3)	W相の分応力	$\sigma_{ij}^W = n^F s P^W \delta_{ij}$ (10)
平均間隙圧	$P^F = s P^W + (1-s) P^G$ (4)	G相の分応力	$\sigma_{ij}^G = n^F (1-s) P^G \delta_{ij}$ (11)
Darcy 則	$V_i^\beta = \frac{k^\beta}{\rho^\beta g} (P_{,i}^\beta + F_i^\beta)$ (5)	速度-ストレッチング関係	$D_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i})$ (12)
構成式	$\hat{\sigma}'_{ij} = C_{ijkl} D_{kl} - R_{ij}$ (6)	飽和度-サクシオン関係	$s = s_{min} + \frac{s_{max} - s_{min}}{\{1 + (\alpha P^C)^n\}^m}$ (13)
釣り合い式	$\dot{S}_{ij,j} = 0$ (7)	MHの分解速度	$\dot{N}_H = -5.85 \times 10^9 \times \exp(-\frac{9400}{\theta}) \times (P_C^F - P^F) N_{H0}^{\frac{1}{3}} N_H^{\frac{2}{3}}$ (14)

ここで、 s は飽和度、 n は間隙率、 n^H はH相の体積含有率、 n^F は流体相の間隙率、 V^β は β 相の流速、 ρ^α は α 相の密度、 $\dot{m}^\beta$ は β 相の質量増加速度、 σ'_{ij} は平均骨格応力テンソル、 σ_{ij} は全応力テンソル、 P^β は β 相の圧力、 k^β は β 相の透水(気)係数、 F_i^β は β 相の物体力、 $\hat{\sigma}'_{ij}$ は平均骨格応力のJaumann速度テンソル、 C_{ijkl} は4階の接線剛性テンソル、 R_{ij} はリラクゼーション応力テンソル、 S_{ij} は公称応力テンソル、 $(\rho c)^E = \Sigma \rho^\alpha c^\alpha$ で c^α は α 相の比熱容量、 θ は温度、 D_{ij}^{vp} は粘塑性ストレッチングテンソル、 h_i は拡散からなる熱フラックス、 Q^H はH相の融解熱、 σ_{ij}^α は α 相の分応力テンソル、 D_{ij} はストレッチングテンソル、 v_i は骨格の速度、 s_{min} は最小有効飽和度、 s_{max} は最大有効飽和度、 P^C はサクシオン、 α 、 m 、 n は形状パラメータである。MHの分解速度はKim-Bishnoi式により与えられ、 $\dot{N}_H$ はMHの分解速度、 P_C^F は温度 θ での分解圧力、 N_{H0} は初期のMHモル数、 N_H は現在のMHモル数である。また、 $\beta = W, G$ とし、 $\alpha = S, H, W, G$ とした。H相の流れは考えないものとする。土粒子骨格は分解前は弾性体、分解中及び分解後は弾粘塑性とし、内部構造変化を考慮した弾粘塑性構成式を用いた。

上記の関係を用いて支配方程式の弱形式を有限変形理論に基づくupdated Lagrangian法によって有限要素離散化し、さらに変位、水圧、気圧、温度の時間離散化に関して後退差分法を用いると以下ようになる。

$$(\Delta t [K_1] + [K_2]) \{x\}_{t+\Delta t} = \Delta t \{F\} + [K_2] \{x\}_t \quad (15)$$

ここで、 $[K_1]$ は剛性マトリクス、 $[K_2]$ は増分剛性マトリクス、 $\{x\}$ は未知数ベクトル、 $\{F\}$ は既知ベクトルである。

3. 解析例

南海トラフにおける海面下1100m、海底面下200mの地盤材料を想定し、加熱法、減圧法を用いて解析を行う。解析モデルを図1に示す。境界条件は、図1に従って上面は水平方向変位固定、排水・非排気、断熱境界とし、左右面は水平方向変位固定、非排水・非排気、断熱境界とする。また下面は、変位固定、排水・排気として、熱源を設定する。加熱法、減圧法いずれも境界条件は同じであり、加熱法は、下面の水圧、気圧を11MPa、熱源の温度を初期282Kから2時間後に323Kに上昇させる。減圧法は、下面の水圧、気圧を3MPaとし、熱源の温度は282K一定とする。解析に用いたパラメータを表1に示す。

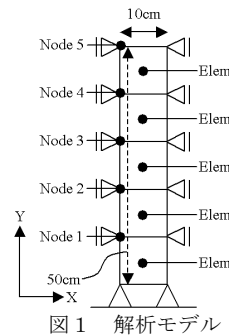


図1 解析モデル

1) 加熱法 図2～図5に加熱法の解析結果を示す。図2より、熱源に近い要素ほど、分解に要する時間が短い。図3より、要素1から順に熱が伝わっていくのが分かる。各要素の温度が286K付近で一定となっている区間では、MHが分解しており、温度一定で分解が進行している。図4より、分解が始まった直後に気圧が増加している。この時水圧は減少している。ガスの透過性は比較的高いため、短い時間で消散する。図5より、分解に伴い各節点で沈下している。これは、間隙圧力の減少に伴う平均骨格応力の増加によると考えられる。

表1 解析に用いたパラメータ

初期状態に関するパラメータ		ハイドレート層土粒子骨格に関するパラメータ	
初期間隙率	$n_o = 0.47$	せん断弾性係数	$G = 53.8(\text{MPa})$
初期 MH 体積率	$n_o^H = 0.298$	膨潤指数	$\kappa = 0.017$
初期温度	$\theta_o = 282.0(\text{K})$	分解層、境界層土粒子骨格に関するパラメータ	
初期圧密応力	$\sigma_{vo} = 1.15(\text{MPa})$	せん断弾性係数	$G = 53.8(\text{MPa})$
静止土圧係数	$K_0 = 0.5$	粘塑性パラメータ	$m' = 23.0$
浸透性に関するパラメータ		粘塑性パラメータ	$C_0 = 1.0 \times 10^{-12}(\text{1/s})$
透水係数	$k^W = 1.0 \times 10^{-9}(\text{m/s})$	破壊応力比	$M^* = 1.08$
透気係数	$k^G = 1.0 \times 10^{-8}(\text{m/s})$	接線剛性法のパラメータ	$\tau = 0.5$
水分特性曲線に関するパラメータ		圧縮指数	$\lambda = 0.169$
初期飽和度	$Sr_0 = 1.0$	膨潤指数	$\kappa = 0.017$
最大有効飽和度	$Sr_{max} = 1.0$	先行圧密応力	$\sigma'_{mbi} = 1.15(\text{MPa})$
最小有効飽和度	$Sr_{min} = 0.0$	変相応力比	$M_m^* = 1.08$
形状パラメータ	$\alpha = 0.0025(1/\text{kPa})$	内部構造パラメータ	$\sigma'_{maf} = 1.15(\text{MPa})$
形状パラメータ	$n = 10$	内部構造パラメータ	$\beta = 0.0$

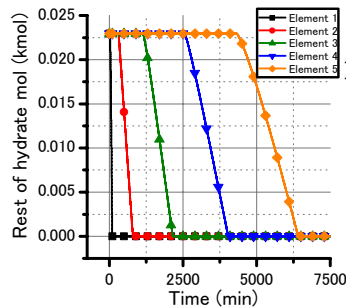


図2 MHモル数時系列(加熱法)

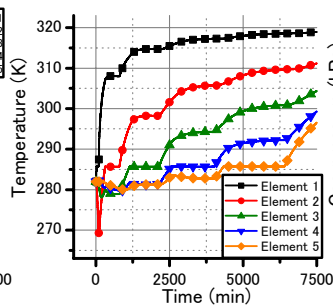


図3 温度時系列(加熱法)

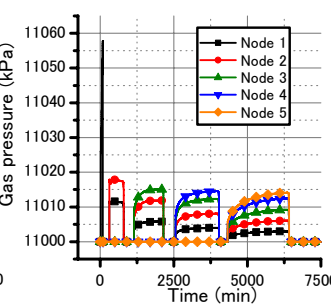


図4 ガス圧時系列(加熱法)

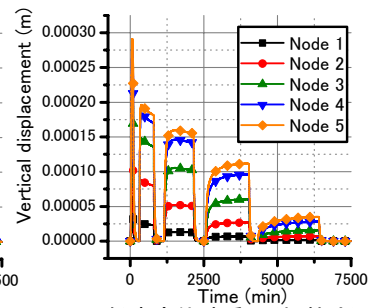


図5 鉛直変位時系列(加熱法)

2) 減圧法 図6～図9に減圧法の解析結果を示す。図6より、熱の供給が下面の初期温度一定の熱源からのみであり、熱源の温度も高くないため、要素1に比べ、要素2、要素3では分解に要する時間が非常に長くなっている。図7より、温度は減圧直後に減少するが、その後分解が終了するとともに初期温度(282K)に戻っていく。図8より、分解により気圧は増加する。しかし、加熱法に比べて分解速度が遅いため、気圧はそれほど増加しない。図9より、減圧直後に急激に沈下が生じている。これは、分解と減圧によって間隙が収縮したためであると考えられる。

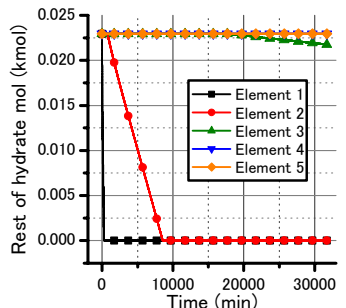


図6 MHモル数時系列(減圧法)

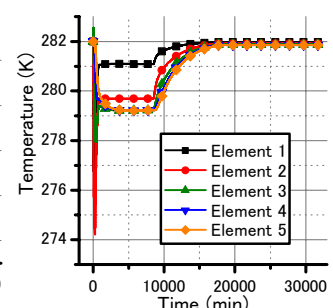


図7 温度時系列(減圧法)

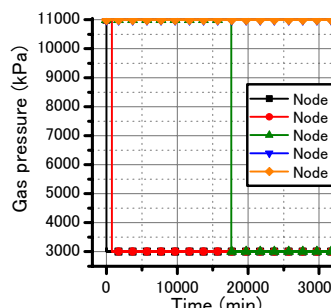


図8 ガス圧時系列(減圧法)

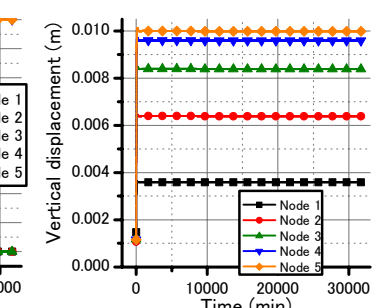


図9 鉛直変位時系列(減圧法)

4. まとめ

加熱法、減圧法の両方で、分解プロセスが表現できた。今回の解析では間隙中にMHが均一に分布していると仮定しているが、実地盤においては局所的に存在している場合があり、その取り扱いについては今後の課題である。

参考文献 [1]藤田裕司：メタンハイドレート分解に伴う多相地盤の有限要素解析，京都大学大学院修士論文，2004. [2]Kim, H. C., Bishnoi, P. R., Heidemann, R. A. and Rizvi, S. S. H. : Kinetics of methane hydrate decomposition, *Chem. Eng. Sci.*, No, 42, pp.1645-1653, 1987. [3]Kimoto, S. : *Constitutive models for geomaterials considering structural changes and anisotropy*, Doctoral thesis, Kyoto University, 2002.