透水・透気係数のメタンハイドレート飽和率依存性を考慮した分解-変形シミュレーション

京都大学大学院	学生会員 〇	三木 祥弘
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
㈱阪急電鉄(元京都大学大学院)	正会員	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分解-変形連 成有限要素解析法¹⁾を用いて,加熱・減圧法によるMH分 解時の地盤変形挙動の予測を行った.特に,透水・透気係 数のMH 飽和率依存性を考慮した解析を行い,その影響に ついて考慮した.

2. 多相系地盤における弾粘塑性構成式¹⁾

過圧密領域と正規圧密領域とを区別する過圧密境界面 $f_b = 0$ の存在を仮定し、さらに静的降伏関数 $f_y = 0$ を次 式で定義する.

$$f_b = \bar{\eta}^* + M_m^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}} = 0 \tag{1}$$

$$f_y = \bar{\eta}^* + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{my}} = 0$$
⁽²⁾

ここで、 $\bar{\eta}^*$ は相対応力比で初期の応力比に対する現在の応力比を表す。 \tilde{M}^* はダイレイタンシー係数、 σ'_{mb} は硬化パラメータである。本研究では、この σ'_{mb} の中で MH 依存性を考慮する。

$$\sigma'_{mb} = N_m N_s \sigma'_{ma} \exp\left(\frac{1+e}{\lambda-\kappa} \varepsilon^{vp}_{kk}\right) \tag{3}$$

$$\mathbf{N}_m = 1 + n_m \exp\left\{-n_d \left(\frac{S_{ri}^H}{S_r^H} - 1\right)\right\}$$
(4)

ここで N_s はサクション効果を表す項, MH 飽和率 S_r^H は 間隙の体積に対する MH の体積の割合, S_{ri}^H は初期 MH 飽 和率, n_m はハイドレート飽和率が S_{ri}^H のときの強度増加 率で, n_d は強度の変化速度を調節するパラメータである. また,静的硬化パラメータ $\sigma'_{my}^{(s)}$ においても MH 依存性を 考慮し,以下のように表されるとする.

$$\sigma_{my}^{'(s)} = \frac{N_m N_s \sigma_{ma}'}{\sigma_{mai}'} \sigma_{myi}^{'(s)} \exp\left(\frac{1+e}{\lambda-\kappa} \varepsilon_{kk}^{vp}\right) \tag{5}$$

3. 透水・透気係数のメタンハイドレート飽和率依存性

透水係数 k^W (m/s),透気係数 k^G (m/s) は間隙比 e および MH 飽和率 S_r^H に依存しているとし、以下の関係で表されるものとする ²⁾.

$$k^{W} = k_{0}^{W} \exp\left(\frac{e - e_{0}}{2}\right) (1 - S_{r}^{H})^{N}$$
(6)

$$k^{G} = k_{0}^{G} \exp\left(\frac{e - e_{0}}{2}\right) (1 - S_{r}^{H})^{N}$$
(7)

ここで, e, e_0 はそれぞれ現在及び初期の間隙比, k_0^W, k_0^G は それぞれ MH 飽和率 0 の土の初期の透水係数 (m/s), 透気 係数 (m/s), S_r^H は現在の MH 飽和率, N は浸透性に関す る MH パラメータである.

4. 分解-変形解析法の有限要素定式化¹⁾

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を定式化する. 支配方程式としてつりあい式,液相および気相の連続式,エ ネルギ保存則を考える.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,温度であり,変 位は8節点,その他については4節点のアイソパラメト リック要素を用いるものとする.応力変数として骨格応力 (Skeleton stress)を用いる.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する.水とメタンガスの流れはDarcy 則に従い,MHの分解速度はKim-Bishnoi式により与えら れる.

5. 2 次元解析結果

解析に用いたモデルは図1に示すように,海面下約900m, 海底面下約250mに存在しているMH含有地盤を想定し, 初期鉛直有効応力 $\sigma'_{v0} = 2205(kPa)$ とし,解析モデルは全 層厚20mの小規模モデルを用いた.図中で水色の部分が MH含有地盤であり,層厚1.2mとしている.境界条件は, 左面は坑井を想定して非排水・非排気,断熱境界とし,上 下右面を水圧・ガス圧一定,等温境界とする.MH含有層 中央左端に長さ0.8mの加熱・減圧源を設置し,5時間かけ て水圧,ガス圧を初期圧力から1500kPa減圧し,温度を初 期283Kから303K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,採取 試料の室内実験結果を用いて決定した.



キーワード:メタンハイドレート,多相地盤,数値解析

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







解析に用いたパラメータを表1に,解析モデルの拡大図を 図 4, 透水・透気係数の MH 飽和率依存性を考慮しない場 合 (N=0) と、した場合 (N=6) の鉛直変位と間隙水圧分布 をそれぞれ図 2,3,5,6 に示す. なお,間隙水圧分布の図は解 析モデルの拡大図における間隙水圧分布を示す.まず間隙 水圧分布について比較すると、透水・透気係数の MH 飽和 率依存性を考慮した場合,MH 含有層の初期の透水・透気 係数は,MH 分解後の 1/100 程度,また,透水・透気係数の MH 飽和率依存性を考慮しない場合の MH 含有層の 1/100 程度となっている. そのため, 透水・透気係数の MH 飽和 率依存性を考慮する場合,60時間後までは減圧される範囲 が減圧源付近に偏っている (図 6). そして, MH 分解中の 領域が上下地盤との境界に既に達した120時間後以降は, 減圧範囲が広がっている.鉛直変位については、透水・透 気係数の MH 飽和率依存性を考慮した場合の MH 含有層の 上の地盤の節点である Node41,55 は透水・透気係数の MH 飽和率依存性を考慮しない場合と大きく異なり、約80時間 後から急激に沈下する (図3). これは、約80時間後に MH 分解開始領域が上下地盤との境界に達し、間隙圧力低下に 伴う骨格応力の増加量が大きくなるためであると考えられ る.



図 6: 過剰間隙水圧分布 (kPa) (N=6)

<u>6. まとめ</u>

海底下に存在する MH 含有層及び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 い, 透水・透気係数の MH 飽和率依存性を考慮する場合と しない場合の力学的挙動の結果の違いを考察した. 結果と して, 透水・透気係数の MH 飽和率依存性を考慮した場合, MH 分解開始領域が上下地盤との境界に達する際に, 間隙 水圧分布が大きく変化し, MH 含有層の上の地盤の節点の 沈下の挙動に違いが見られた.

参考文献

- Kimoto, S., Oka, F., Fushita, T., Fujiwaki, M.: A Chemo-Thermo-Mechanically Coupled Numerical Simulation of the Subsurface Ground Deformations due to Methane Hydrate Dissociation, *Computers* and *Geotechnics*, No.34, pp.216-228, 2007.
- Masuda, Y., Kurihara, M., Ohuchi, H. and Sato, T.: A field-scale simulation study on gas productivity of formations containing gas hydrates, *Proc. 4th Int. Conf. on Gas Hydrate*, Yokohama, Japan, pp. 40-46, May 2002.