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-変形シミュレーション

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.MH飽和度依存性を 導入した弾粘塑性構成式を提案し、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⁾、本研究では、MH分解時の2次元平 面ひずみ条件下での地盤変形解析を行った。

2. 多相系地盤における弾粘塑性構成式

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、 $\hat{\eta}^*$ 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である。 σ'_{mb} は硬化パラメータであり、山崎²⁾は σ'_{mb} において内部構造の変化およびサクション依存性を考慮している。本研究では、この σ'_{mb} の中で MH 依存性を考慮する。

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

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

ここで N_s はサクション効果を表す項, S_{ri}^H は初期 MH 飽 和度, n_m は初期ハイドレート飽和度 S_{ri}^H が作用している 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.

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

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} を,非関連流動則によって以下のように仮定 した.なお,下式の粘塑性パラメータ C_{ijkl} 中に温度変化 の影響³⁾を考慮する.

$$D_{ij}^{vp} = C_{ijkl} \left\langle \Phi(f_y) \right\rangle \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{kl}} \tag{6}$$

ここで、 Φ はひずみ速度効果を表す材料関数であり、 $f_p = 0$ は粘塑性ポテンシャル関数である.これらを用いると粘塑 性ストレッチングテンソル D_{ij}^{vp} は次のように表すことがで きる.

$$D_{ij}^{vp} = C_{ijkl} \exp\left\{m'\left(\bar{\eta}^* + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}}\right)\right\} \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{kl}}$$
(7)

キーワード:メタンハイドレート,熱,弾粘塑性構成式

 京都大学大学院
 学生会員
 ○ 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

3. 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.

$$\sum_{\alpha} \sigma_{ij}^{\alpha} = \sigma_{ij} \qquad (\alpha = S, W, G) \tag{8}$$

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.

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - P^F \delta_{ij} , P^F = sP^W + (1-s)P^G$$
(9)
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.

$$\dot{S}_{ij,j} = 0$$
 (10)
(2) 質量保存則

W相, G相に関して質量保存則は以下のように表される.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho^{\alpha}n^{\alpha}) = -q_{Mi,i}^{\alpha} + \dot{m}^{\alpha} \quad (\alpha = W, G) \tag{11}$$

 q_{Mi}^{α} は流量フラックスベクトル, \dot{m}^{α} は分解による単位体 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) エネルギ保存則

系全体のエネルギ保存則は以下のようになる.

$$\sum_{\alpha} (n^{\alpha} \rho^{\alpha} c^{\alpha}) \dot{\theta} = D_{ij}^{vp} \sigma_{ij}' - \sum_{\alpha} q_{Hi,i}^{\alpha} + \dot{Q}^{H} \quad (\alpha = S, W, G, H)$$
(12)
$$c^{\alpha} \wr \alpha \ d \sigma \ D \lor \& R a^{2} \left(\mathsf{kJ}/(\mathsf{tK}) \right), \ \theta \ \iota \& \& B, \ q_{Hi}^{\alpha} \wr \alpha \ d \sigma$$

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 ($kJ/(m^3s)$)である.

ハイドレート分解速度を Kim-Bishnoi 式⁴⁾ で与える.
$$\dot{N}_{H} = -5.85 \times 10^{9} \times \exp\left(-\frac{9400}{\theta}\right) (P_{C} - P) N_{H0}^{\frac{1}{3}} N_{H}^{\frac{2}{3}}$$
(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 物質量 (kmol)、 N_{H0} は領域 V に含まれる、初期ハイドレー ト物質量 (kmol) である.また、P は現在の圧力 (kPa)、 θ は現在の温度 (K)、 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}^{α} およびエネ ルギ保存則中の分解熱 \dot{Q}^H を算出する.

連絡先:〒606-8501 京都市左京区吉田本町 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 075-753-5086



4. 2次元解析結果

解析モデルは図1に示す様に,縦14要素,横20要素の 280要素とし,長さは縦1.8m,横3.2mとする.境界条件 は、2次元平面ひずみ条件,上面,右面,下面を排水・排 気,等温境界,左面を非排水・非排気,断熱境界とし,モ デル中央左端に長さ40cmの加熱・減圧源を設定し,1時 間後に水圧,気圧を初期11MPaから10.5MPaに減圧し, 温度を初期282Kから313Kへ上昇させる.解析に用いた パラメータは表1に示す.パラメータは南海トラフにおけ る海面下約1100m,海底面下約200mに存在する地盤材料 を想定し,決定した.

| 初期間隙率 | n_0 | 0.47 |
|--------------|-----------------|-----------------------------|
| 初期 MH 飽和度 | S^H_{r0} | 0.634 |
| 初期温度 | θ_0 | 282.0 (K) |
| 初期平均有効応力 | σ'_{m0} | 1150 (kPa) |
| 初期間隙圧力 | P_{s0} | 11000 (kPa) |
| 静止土圧係数 | K ₀ | 1.0 |
| 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 | $9.0 \times 10^{-11} (1/s)$ |
| 変相応力比 | M_m^* | 1.09 |
| 先行圧密応力 | σ'_{mhi} | 1150 (kPa) |
| 圧縮指数 | λ | 0.169 |
| 膨潤指数 | κ | 0.017 |
| 内部構造パラメータ | σ'_{maf} | 1150 (kPa) |
| 内部構造パラメータ | β | 0.0 |
| 最大有効飽和度 | s_{max} | 1.0 |
| 最小有効飽和度 | s_{min} | 0.0 |
| 水分特性曲線のパラメータ | α | 0.0025 (1/kPa) |
| 水分特性曲線のパラメータ | n | 10 |
| 透水係数 | k^W | $1.0 \times 10^{-9} (m/s)$ |
| 透気係数 | k^{G} | $1.0 \times 10^{-8} (m/s)$ |
| 熱粘塑性パラメータ | α | 0.15 |
| サクションパラメータ | S_I | 0.2 |
| サクションパラメータ | s_d | 0.25 |
| サクションパラメータ | P_i^C | 100 (kPa) |
| MH パラメータ | S_{ri}^{H} | 0.65 |
| MH パラメータ | n_m | 0.2 |
| MH パラメータ | n_d | 1.5 |

表1 解析に用いたパラメータ

図 2~7 に解析開始から5日後の結果を示す.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 物質量 n_0^H と現在の MH 物質量 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、非対称に進行しており、下部の方が卓越していることがわかる.これはモデル上部が沈下することにより、水圧・気圧が下部に比べて大きく発生し、MH の安定領域に近付くため、分解を妨げていると考えられる.図3は変形図であり、MH が分解した部分を中心に沈下している様子がわかる.モデル上部左端の5日後の沈下量は2.63cm であった.

図4は過剰間隙水圧分布図を示している.加熱・減圧源か ら上面,下面,右面の排水境界に向けて,ほぼ段階的に分 布しているが,モデル上部は沈下しているため,下部より もわずかに大きな値を示している.図5は過剰間隙気圧分 布図を示している.分解が終了した要素で減圧が進んでお り,まだ分解が開始していない要素に向けて,分解中の要 素で段階的に分布している.図6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が,モデル上部 に比べ,下部の方が高い温度を示している.図7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.HH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,モデル左端の地表面においても,ひずみが発生してい る様子がわかる.

<u>5. まとめ</u>

MH 飽和度依存性を導入した弾粘塑性構成式を用いて, 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,加熱・減圧法による MH 分解時の二次元地盤変形挙動の予測を行った.結果として, 構成式中に MH 飽和度の減少に伴う強度低下および温度に よる影響を考慮することにより,最大で2.63cm もの沈下 が生じた.今回は2次元モデルでの解析を行ったが,MH の実用化に向けては3次元,軸対称モデルでの解析を行う 必要がある.

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(投稿中),2006.
- 山崎順弘:弾粘塑性地盤の多相連成変形解析法,京都 大学大学院修士論文,2005.
- Yashima, A., Leroueil, S., Oka, F. and Guntoro, I.
 Modelling temperature and strain rate dependent behavior of clays : one dimensional consolidation, *Soils and Foundations*, Vol.38, No.2, 1998.
- 4) 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.