第Ⅲ部門　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-変形連成解析

京都大学大学院　学生会員　○　伏田 智彦
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　藤脇 昌也

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，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た．そして，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，MH 分解時の地盤変形挙動の予測を行った．

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．

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

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

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である．σ'_{mb} は硬化パラメータであり，山崎 [1] 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．

$$\sigma'_{mb} = \sigma'_{ma} \exp\left(\frac{1+e}{\lambda-\kappa}\varepsilon^{vp}_{kk}\right) \times \left[1 + n_m \exp\left\{-n_d\left(\frac{S^H_{ri}}{S^H_r} - 1\right)\right\}\right] \quad (3)$$

$$= \sigma'_{ma}(S^H_r) \exp\left(\frac{1+e}{\lambda-\kappa}\varepsilon^{vp}_{kk}\right) \quad (4)$$

ここで S^H_{ri} は初期 MH 飽和度，n_m は初期ハイドレート飽和度 S^H_{ri} 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 $\sigma'^{(s)}_{my}$ 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．

$$\sigma'^{(s)}_{my} = \frac{\sigma'_{ma}(S^H_r)}{\sigma'_{mai}} \sigma'^{(s)}_{myi} \exp\left(\frac{1+e}{\lambda-\kappa}\varepsilon^{vp}_{kk}\right) \quad (5)$$

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^{vp}_{ij} を次のように表す．

$$D^{vp}_{ij} = C_{ijkl} \exp\left\{m'\left(\bar{\eta}^* + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}}\right)\right\} \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{kl}} \quad (6)$$

なお，上式の粘塑性パラメータ C_{ijkl} 中に温度変化の影響 [2] を考慮する．ここで，$f_p = 0$ は粘塑性ポテンシャル関数である．

3. 三軸圧縮試験のシミュレーション

提案した弾粘塑性構成式中の MH パラメータの影響を調べるため，排水三軸圧縮試験のシミュレーションを行った．ここではサクションおよび温度の影響は考慮しない．飽和土中に MH が存在するとし，軸ひずみ速度 0.005 %/min でせん断したときの変形特性を調べる．

表 1　解析に用いたパラメータ

初期間隙率	n_0	0.47
初期平均有効応力	σ'_{m0}	1150 (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	3.5×10^{-9} (1/s)
変相応力比	M^*_m	1.09
先行圧密応力	σ'_{mbi}	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
MH パラメータ	S^H_{ri}	0.65
MH パラメータ	n_m	0.4
MH パラメータ	n_d	0.15

解析結果を図 1，図 2 に示す．図 1 より，MH 飽和度が大きいほど体積圧縮ひずみが小さい．図 2 より，MH 飽和度が大きいほど軸差応力が大きくなり，強度特性の MH 飽和度依存性を表現している．本研究では n_m，n_d についてパラメトリックスタディを行い，松居ら [3] による CO_2 ハイドレート混合砂を用いた排水三軸試験の実験結果を参考にして $n_m = 0.4$, $n_d = 1.5$ とした．

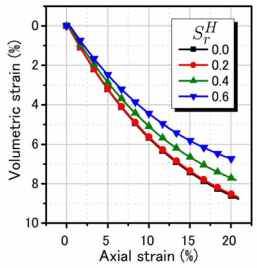

図 1　体積ひずみ～軸ひずみ関係

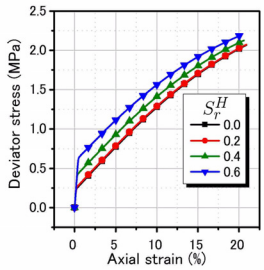

図 2　応力～ひずみ関係

4. 分解-変形解析法の有限要素定式化 [4]

多孔質媒体理論（TPM）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

Tomohiko FUSHITA, Sayuri KIMOTO, Fusao OKA, Masaya FUJIWAKI

いるものとする．応力変数として平均化骨格応力（Average 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．なお，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. 解析例

解析モデルは図 3 に示す一次元 5 要素とする．加熱法では，下面の水圧，ガス圧を 11MPa，熱源の温度を初期 282K から 20000 秒後に 303K に上昇させる．減圧法では，下面の水圧，ガス圧を初期 11MPa から 18000 秒後に 4MPa に減圧させ，熱源の温度は 282K 一定とする．また，減圧法ではサクション依存性を考慮しない．解析に用いたパラメータを表 2 に示す．

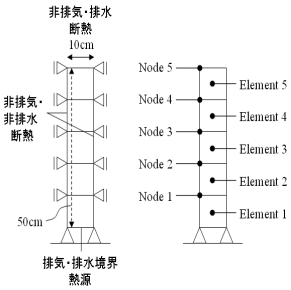

図 3　解析モデル

1) 加熱法　図 4～7 に加熱法の解析結果を示す．図 4 は要素内の MH 物質量を示している．熱源に近い要素から順に分解し，分解に要する時間が短い．また，図 5 より，各要素の分解は温度一定（約 286K）で進行することが分かる．図 6 より，分解直後にガス圧は上昇する．この時，水圧は減少している．ガスの透気性は比較的高いため，短時間で消散する．一方，水圧の減少は大きいため，平均間隙圧が減少する．その結果，平均骨格応力が増加し，沈下が生じている．分解終了後には応力状態はほぼ初期状態に戻り，弾性変形は回復するが，粘塑性変形が残留していることが分かる（図 7）．

2) 減圧法　図 8～図 11 に減圧法の解析結果を示す．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 は分解に要する時間が長くなっている（図 8）．また，要素 3 以降は分解していない．温度は要素 1 の分解中に減少するが，分解終了後に初期温度（282K）に戻る（図 9）．分解中にガス圧は上昇している（図 10）．この時，水圧は減少している．加熱法と比べて分解速度が遅いため，ガス圧は少ししか上昇しない．減圧と分解により，平均間隙圧が減少する．その結果，平均骨格応力が増加して，沈下が生じる．

6. まとめ

MH 飽和度依存性を導入した弾粘塑性構成式を用いて，加熱法・減圧法による MH 分解時の地盤変形挙動の予測を行った．結果として，MH 飽和度の減少に伴う強度低下を考慮することにより沈下量が増大した．減圧法の場合は，減圧そのものによる変形が大きく生じるため，減圧圧力，減圧速度等の設定の際には注意が必要である．

表 2　解析に用いたパラメータ

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)
初期飽和度	s_0	1.0
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	1.0×10^{-9} (m/s)
透気係数	k^G	1.0×10^{-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^C_i	100 (kPa)
MH パラメータ	n_m	0.4
MH パラメータ	n_d	1.5
MH パラメータ	S^H_{ri}	0.65

参考文献

1) 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.　2) 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. 3) 松居，兵動，中田，吉本，武富：砂中における二酸化炭素ハイドレートの生成と力学特性，第 40 回地盤工学研究発表会講演集，函館，pp.423-424, 2005.　4) 藤脇，木元，岡，山崎：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，平成 17 年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集，大阪，Ⅲ-47, 2005.

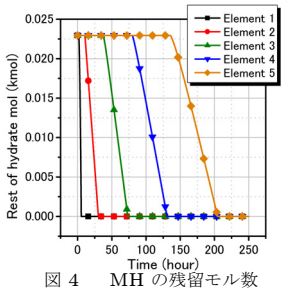

図 4　MH の残留モル数（加熱法）

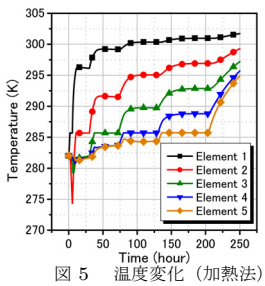

図 5　温度変化（加熱法）

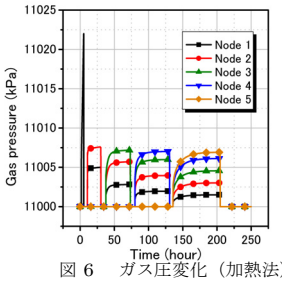

図 6　ガス圧変化（加熱法）

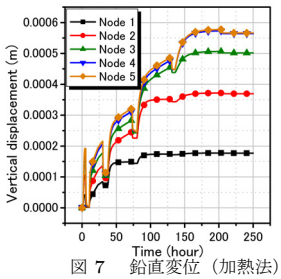

図 7　鉛直変位（加熱法）

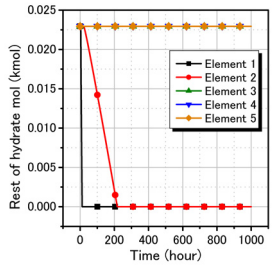

図 8　MH の残留モル数（減圧法）

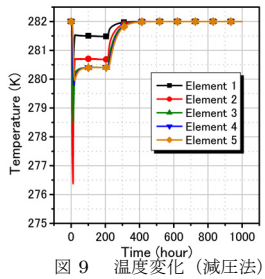

図 9　温度変化（減圧法）

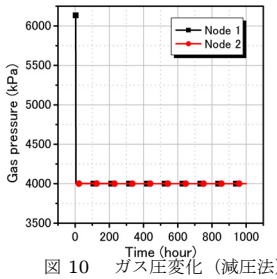

図 10　ガス圧変化（減圧法）

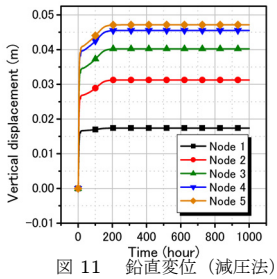

図 11　鉛直変位（減圧法）