

多相連成解析法を用いた減圧法によるCO<sub>2</sub>ハイドレート分解実験のシミュレーション

京都大学大学院 正会員 ○木元 小百合  
 京都大学大学院 学生会員 岩井 裕正  
 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 三木 祥弘

1. はじめに

メタンハイドレート資源開発が国内外で注目されている。ガス生産時には地盤中に固体として存在するハイドレートを減圧あるいは加熱することにより、ガスに分解して取り出すが、その際の地盤変形挙動については未解明の部分が多い。本研究では、多相連成解析法<sup>1)</sup>を用いて別報<sup>2)</sup>で報告したCO<sub>2</sub>ハイドレート分解実験について再現し、解析手法の検証を行った。

2. 多相系地盤における支配方程式の定式化

多孔質媒体理論に基づき、多相混合体として支配方程式を定式化する。土骨格の構成式として、サクシオンおよびハイドレートによる強度増加を考慮した弾粘塑性構成式を用い、サクシオンと飽和度関係式としてvan Genuchten式を用いた。updated Lagrangian法により有限要素離散化を行う。未知数は、土骨格の変位、水圧、ガス圧、温度である。

**応力の定義とつりあい式** 構成式中の応力変数として、全応力テンソル $\sigma_{ij}$ から平均間隙圧 $P^F$ を引いたものである骨格応力 $\sigma'_{ij}$ テンソルを用いた。

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

ここで $s$ は飽和度、 $P^W$ 、 $P^G$ は間隙水圧および間隙ガス圧である。各相の運動量保存則を足し合わせることで、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。

$$\int_V \dot{S}_{ji,j} dV = 0 \quad (2)$$

**質量保存則** 固相 (S相)、液相 (W相)、ガス相 (G相)、ハイドレート相 (H相) の各相について質量保存則は以下のように表される。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho^\alpha n^\alpha) = -q_{Mi,i}^\alpha + \dot{m}^\alpha \quad (\alpha = S, W, G, H) \quad (3)$$

ここで $\rho^\alpha$ は $\alpha$ 相の密度、 $n^\alpha$ は体積率、 $q_{Mi}^\alpha$ は質量フラックスベクトル、 $\dot{m}^\alpha$ は分解による質量変化速度である。

**エネルギー保存則** 系全体のエネルギー保存則は以下ようになる。

$$\sum_\alpha (n^\alpha \rho^\alpha c^\alpha) \dot{\theta} = D_{ij}^{vp} \sigma'_{ij} - \sum_\alpha q_{Hi,i}^\alpha + \dot{Q}^H \quad (\alpha = S, W, G, H) \quad (4)$$

ただし $H$ はハイドレート相。 $c^\alpha$ は $\alpha$ 相の比熱容量(kJ/(tK))、 $\theta$ は温度、 $q_{Hi}^\alpha$ は $\alpha$ 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/(m<sup>3</sup>))である。

**ハイドレートの分解** ガスハイドレートの平衡条件は温度と圧力に依存する。すなわち高温・低圧条件下でガスに分解する。CO<sub>2</sub>ハイドレートの平衡曲線は既往のデータに基づき以下の式で与える<sup>2)</sup>。

$$P_c = c \exp(a - b/\theta_c) \quad (5)$$

$P_c$ は平衡時の間隙圧力、 $\theta_c$ は平衡時の温度、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ はCO<sub>2</sub>ハイドレートの材料定数である。分解反応式は、



ただし $n=5.75$ とする。CO<sub>2</sub>ハイドレートの分解速度式はKim-Bishnoi式に基づき現在の圧力、温度、ハイドレート物質に依存するとして与えた<sup>1)</sup>。分解速度より、質量保存則中の質量変化速度 $\dot{m}^\alpha$ 、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. 解析モデルと解析結果

図-1に示す解析モデルを用いて減圧法による1次元分解実験のシミュレーションを行った。分解実験<sup>2)</sup>は豊浦砂の間隙中にCO<sub>2</sub>ハイドレートを生成させて作製した試料を用い、圧力セルの温度を5℃に保ったまま1次元圧密容器内で間隙圧力を減少させることにより、分解を進行させた。解析は2次元平面ひずみ条件で行った。実験条件を模擬して側面は非排気・非排水境界とし、上下面の間隙圧を初期状態(3MPa)から設定圧力(1.5MPa)まで1.5時間かけて減少させた。温度境界については、周面を等温境界(5℃)とした。なお5℃における平衡圧力が約2.2MPaであることから、約0.8時間後に分解が開始する。解析ケースは別報<sup>2)</sup>で示したCase 0(中密・ハイドレートなし)、Case 1(中密供試体)、Case 4(緩詰め供試体)の結果について示す。地盤の材料パラメータは実験に用いた豊浦砂の中密、緩詰め供試体の非排水三軸試験のシミュレーションにより、表-1のように決定した。

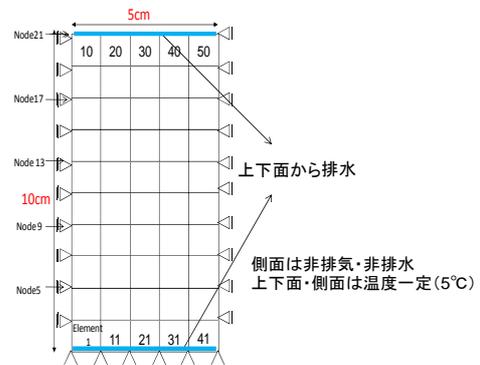


図-1 解析モデル (2次元平面ひずみ)

キーワード: CO<sub>2</sub>ハイドレート, 変形, 有限要素法

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講座 075-383-3193

表-1 解析に用いた材料パラメータ

		中密供試体 (ハイドレートなし) (Case 0)	中密供試体 (Case 1)	緩詰め供試体 (Case 4)
初期平均有効応力	$\sigma'_{m0}$	667(kPa)		
初期間隙比	$e_0$	0.752	0.749	0.878
初期ハイドレート飽和率	$S^H_{ri}$	0	0.554	0.460
初期せん断弾性係数	$G_0$	1349.7(MPa)	1349.7(MPa)	674.87(MPa)
粘塑性パラメータ	$m'$	29.0		
粘塑性パラメータ	$C_0$	$1.0 \times 10^{-9}(1/s)$		$1.5 \times 10^{-7}(1/s)$
熱粘塑性パラメータ	$\alpha$	0.15		
圧縮指数	$\lambda$	0.0112		
膨潤指数	$\kappa$	0.0026		
擬似過圧密比	$\sigma'_{mbi}/\sigma'_{m0}$	1.8		1.0
限界状態での応力比	$M^*_m$	1.13		
内部構造パラメータ	$\sigma'_{maf}/\sigma'_{mai}$	1.0		0.7
内部構造パラメータ	$\beta$	0		20
サクシオンパラメータ	$S_i$	0.20		
サクシオンパラメータ	$s_d$	0.25		
サクシオンパラメータ	$P^C_i$	100 (kPa)		
ハイドレートパラメータ	$n_m$	0.60		
ハイドレートパラメータ	$n_d$	0.75		
透水係数	$k^W$	$1.0 \times 10^{-4} (m/s)$		
透気係数	$k^G$	$1.0 \times 10^{-3} (m/s)$		

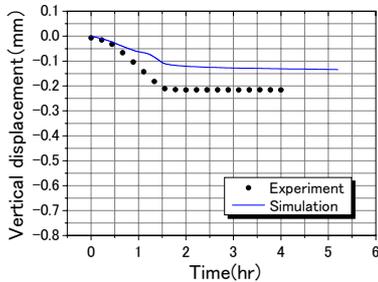


図-3 (a) 沈下量の比較 (Case 0)

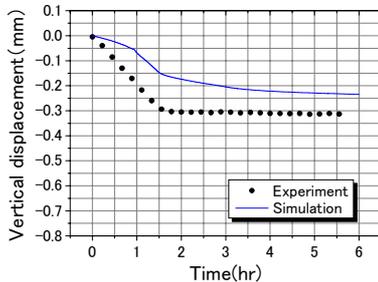


図-3 (b) 沈下量の比較 (Case 1)

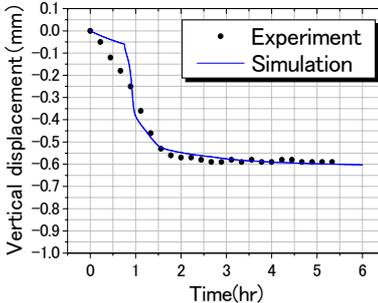


図-3 (c) 沈下量の比較 (Case 4)

図-3 に上面の沈下量の時刻歴を示す. 中密供試体のケース (図-3 (a), (b)) では解析による沈下量のほうが実験値よりもやや小さいが, 緩詰め供試体では実験結果をよく再現できている (図-3 (c)). 分解が開始したと考えられる約 0.8 間後から急激に沈下が進行しており, 解析ではその傾向が顕著である (図-3 (b), (c)).

図-4 から図-7 は Case 1 の解析時の供試体内部のハイドレート残存度, 温度, 平均骨格応力, 体積ひずみの分布図を示す. 図-4 より, 供試体周囲の要素より分解が進行しており, 4 時間後にはすべての要素で分解が終了していることが分かる. 図-5 より, 分解による吸熱により供試体内部の温度が約 3.5 度低下している. 図-6, 図-7 より減圧に伴い平均骨格応力は全体的に増加し, 体積圧縮ひずみが生じている.

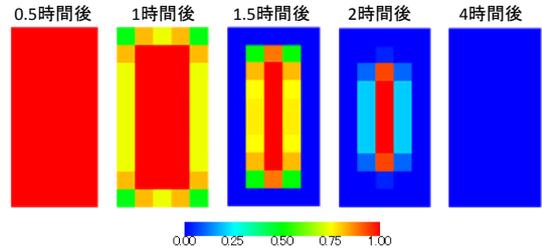


図-4 ハイドレート残存度分布図 (Case 1)

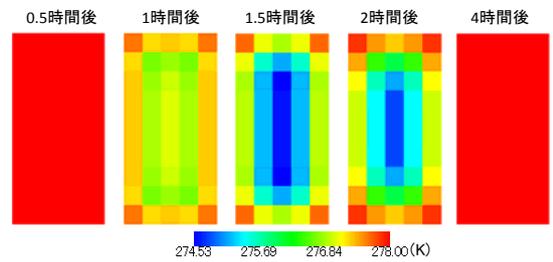


図-5 温度分布図 (K) (Case 1)

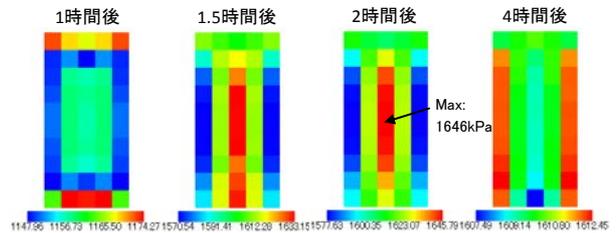


図-6 平均骨格応力分布図 (kPa) (Case 1)

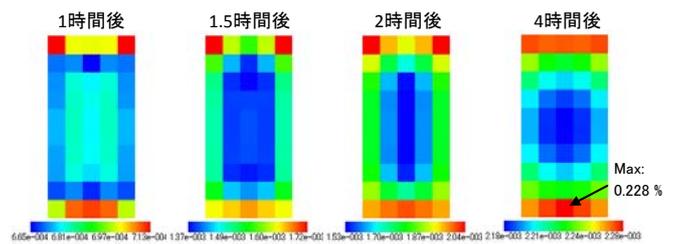


図-7 体積ひずみ分布図 (Case 1)

4. まとめ

分解-変形連成解析法を用いて, CO<sub>2</sub> ハイドレート分解実験の再現を行った結果, 分解時の挙動をほぼ再現できた. 今後さらにモデルやパラメータの設定について検討等を進める必要がある.

参考文献

- Kimoto, S., Oka, F., Fushita, T. A chemo-thermo-mechanically coupled analysis of ground deformation induced by gas hydrate dissociation, Int. J. of Mechanical Sciences, Vol. 52, pp.365-376, 2010.
- 岩井裕正, 木元小百合, 岡二三生, 福田知晃: 減圧法によるCO<sub>2</sub> ハイドレート含有地盤材料の分解実験, 平成22年度第65回全国大会年次学術講演会 (投稿中).