多相連成解析法による CO。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 〇	木元 小百合
京都大学大学院	学生会員	福田 知晃
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	佐藤 朋弥

1. はじめに

近年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^{1), 2)}を用いて別報³⁾で報告したCO₉ハイドレ ート分解実験のシミュレーションを行い、分解時の挙 動について検討した.

<u>2. 多相系地盤における支配方程式の定式化</u>

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. 土骨格の構成式として, サクショ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, サクションと飽和度関 係式としてvan Genuchten式を用いた. 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,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 σ_{ii} から平均間隙圧 P^{F} を引いたも のである骨格応力σ'_{ii}テンソルを用いた.

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

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_{ii}を用いた増分型の運動量保 存則が得られる.

$$\int_{V} \dot{S}_{ji,j} dV = 0 \tag{2}$$

質量保存則 固相(S相),液相(W相),ガス相(G 相)の各相について質量保存則は以下のように表され る.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho^{\alpha} n^{\alpha} \right) = -q^{\alpha}_{Mi,i} + \dot{m}^{\alpha} \quad \left(\alpha = S, W, G \right)$$
(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.

$$\sum_{\alpha} \left(n^{\alpha} \rho^{\alpha} c^{\alpha} \right) \dot{\theta} = D_{ij}^{\nu p} \sigma'_{ij} - \sum_{\alpha} q_{Hi,i}^{\alpha} + \dot{Q}^{H} \qquad (4)$$

 $(\alpha = S, W, G, H)$

ただし*H*はハイドレート相. c^αはα相の比熱容量 $(kJ/(tK)), \theta$ は温度, q_{Hi}^{α} は α 相の熱フラックスベ クトル、 \dot{O}^{H} は単位時間・単位体積あたりの分解熱 (kJ/(m³))である.

反応は可逆反応であり、そ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し, 低温・高圧条件下でハイドレートを生成する.

$$CH_4 \bullet nH_2O$$
 (hydrate) $\leftrightarrow nH_2O$ (water) $+CH_4$ (gas)
(5)

CO2ハイドレートの分解速度式は得られていないため, 本研究ではメタンハイドレート分解速度式 (Kim-Bishnoi式) に基づき, 次式で仮定した.

$$\dot{N}^{H} = -0.585 \times 10^{10} \times exp^{-\frac{9400}{\theta}} \left(P^{e} - P \right) N^{H_{0}^{\frac{1}{3}}} N^{H_{2}^{\frac{2}{3}}}$$
(6)

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^{H_0} は初期のハイドレート物質量水 の物質量(kmol), CO₂ガスの物質量(kmol)である. ま た、Pは現在の圧力(kPa)、 P^{c} は現在の温度 θ にお ける分解圧力である.分解速度より、質量保存則中の 質量変化速度 m^a, H相の間隙率変化速度 n^H 及びエネ ルギ保存則中の分解熱 Q^H を算出する.

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) は土骨格以外か らなる間隙比eと,間隙中の 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³⁾.

$$k^{\alpha} = k_0^{\alpha} \exp\left(\frac{e - e_0}{2}\right) \left(1 - S_r^H\right)^N \quad \left(\alpha = W, G\right) \tag{7}$$

ここで e_1, e_0 はそれぞれ現在及び初期の間隙比, k_0^{α} は MH飽和率が0の場合の透水係数(m/s),透気係数(m/s) を表している. また透水・透気係数のMH飽和率依存性 パラメータについては、実験結果より N=7とした¹⁾.

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³⁾ は豊浦砂の間隙中に CO2 ハイドレートを生成させた 試料を用い, 圧力セルの温度を5℃に保ったまま一次 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 MPa/h で減少させた. 温度-熱流量境 界は,上下面,側面の解析モデル周囲を等温境界と した. 地盤の材料パラメータは南海トラフにおける地 盤材料を想定したものを用いた.初期のCO₂ハイドレ ート飽和度は0.5とした.表-1に解析に用いた材料パ ラメータを示す.

キーワード: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研究室 075-383-3193

表-1 解析に用いた材料パラメータ

土骨格及びCO ₂ ハイドレートに関するパラメータ			
せん断弾性係数	G	53800(kPa)	
粘塑性パラメータ	m'	23	
粘塑性パラメータ	C ₀	$1.0 \times 10^{-12} (1/s)$	
熱粘塑性パラメータ	α	0.15	
破壊応力比	М*	1.09	
圧縮指数	λ	0.169	
膨潤指数	к	0.017	
先行圧密応力	σ'_{mbi}	667(kPa)	
変相応力比	M* _m	1.08	
内部構造パラメータ	σ'_{maf}	667 (kPa)	
内部構造パラメータ	β	0.0	
サクションパラメータ	SI	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)	
CO2ハイドレートパラメータ	n _m	0.6	
CO2ハイドレートパラメータ	n _d	0.75	
CO2ハイドレートパラメータ	S ^H _{ri}	0.5	
透水係数	k ^w	$1.0 \times 10^{-4} (m/s)$	
透気係数	k ^G	$1.0 \times 10^{-3} (m/s)$	
CO ₂ ハイドレートパラメータ	N	7	



図-3 上面節点の沈下量

図-2 より温度はハイドレートの分解による吸熱に より約0.7間後から1.5時間後に最大で約3.6℃低下 した後,境界の温度まで上昇した.図-3 に上面の節

点沈下量を示すが,分解が開始したと考えられる約 0.7間後から1.5時間後において急激に沈下している. これは実験で得られた挙動と類似している.解析で はハイドレート飽和率の低下による地盤の軟化を構 成式中に取り入れているためこのような挙動を再現 できたと考えられる.1.5時間後以降は全ての節点に おいて,緩やかな変形が続く.図-4~図-7のコンタ 一図により,モデル周囲より分解が進行し,モデル上 面付近で骨格応力の増加とともに変形が進んでいる.





<u>4. まとめ</u>

分解-変形連成解析法を用いて, CO2 ハイドレート 分解実験のシミュレーションを行った結果, 分解時の 温度変化や沈下挙動を定性的によく再現できた.今後 さらにパラメータの検討等を進める必要がある.

<u>参考文献</u>

- (大田智彦, 木元小百合, 岡二三生, 三木祥弘:メタンハイドレートを含有する海底多相地盤の分解-変形シミュレーション, 平成20年度第43回地盤工学研究発表会,2008.
- Kimoto, S. Oka, F. Fushita, T. Fujiwaki, M .:A Chemo-Thermo-Mechanically Coupled Numerical Simulation of the Subsurface Ground Deformation due to Methane Hydrate Dissociation, Computers and Geotechnics, .34, pp.216-228, 2007.
- 3)福田知晃,木元小百合,岡二三生,佐藤朋弥: CO₂ハイドレート 含有地盤材料の分解実験,平成21年度第64回全国大会年次学術講 演会(投稿中).