

減圧法を適用したメタンハイドレート開発時の海底地盤変形予測

山口大学大学院	学生会員	○米田 純
山口大学大学院	正会員	兵動正幸
山口大学大学院	正会員	中田幸男
山口大学大学院	正会員	吉本憲正

1. まえがき

次世代エネルギー資源として近年注目を浴びているメタンハイドレート（Methane Hydrate 以下 MH と略す）を南海トラフの海底地盤から回収する計画が進められている¹⁾。MH は水分子とメタン分子から成る結晶構造を持ち、低温高压下で安定的に存在する。こうした MH の性質から、開発計画では海上プラットフォームより海底地盤内の MH 濃集層に達する坑井を設け、内部を減圧することで MH をメタンガスと水に分解し、気体として回収する方法が進められている。南海トラフに存在する MH 濃集層は、タービダイトからなる砂泥互層の砂部分の間隙に存在しており、深度方向に数十 m の層を形成している。生産対象となる地盤は、この MH 濃集層の上下が透水性の低い泥層などによってキャップロックされた領域となる。そこで本研究では、キャップロックされた MH 濃集層に対して減圧法を適用した際の生産井周辺地盤の変形予測を行う。

2. 構成式と解析モデルの支配方程式

MH を含む土の力学的な研究は、著者らなどによって進められており、南海トラフより採取した不攪乱試料と、それを模擬した MH 堆積土の観察や圧縮試験から、MH は土粒子間を固結、または充填する形で存在し、MH が土の間隙を占める割合を示す MH 飽和率に応じて土の圧縮せん断強度を増加させることが明らかとなっている。本研究では、この結果に基づいて構築した MH モデル²⁾を構成式として使用している。さらに、著者らは MH の開発において想定される、土の変形、水の移動、ガスの発生および MH の分解や熱移動を表現するため、土-水-ガス-熱の連成有限要素法解析コードの開発³⁾を行ってきた。本研究にはこれを用いる。

3. 解析モデルの詳細

本研究で用いた解析モデルを図-1 に示す。要素数 400、接点数 1279 の水深 800m、海底下 200×500m の水平地盤を解析対象とし、境界条件は下端を鉛直方向固定端、左右端を水平方向固定端、上下端を等温、等圧境界とした。海底下 100m～150m 間を MH 飽和率 50% の様な MH 濃集層とした。また、その上下に透水係数 $1.0 \times 10^{-9} \text{m/s}$ の不透水層を設けている。解析では、MH 濃集層に設けた鉛直坑井から減圧法を適用する場合を想定し、MH 濃集層の左端 Node435, Node497 の水压を静水压から 4,000kPa へ 27 時間かけて線形的に減圧を行った。その後 1 年間減圧源の圧力を保つことで MH 生産をシミュレーションする。解析モデルの解析に用いるパラメータを表-1 に示す。値は既往の研究から得られたものおよび一般的な値を用いた。

4. 減圧法による生産シミュレーション結果

減圧開始から 100 日後の海底地盤の水压分布、温度分布、MH 飽和率分布および変形の様子を図-2 に示す。まず、水压分布をみると圧力の減少が減圧源から MH 濃集層全域にわたって広がっていることが確認できる。次に、温度分布をみると坑井から約 100m の範囲の MH 濃集層で温度低下がみられる。これは減圧によって分解した MH の吸熱反応による影響と考えられる。MH 飽和率の分布に着目すると、減圧域の影響を受けて坑井から約 100m の範囲で分解が進んでいる様子が確認された。また、MH 濃集層の上下で分解が若干速いのは、不透水層からの熱供給があるためと推察される。地盤の変形図に注目すると、MH 濃集層の収縮挙動が著しく、坑井直上の海底面が最大の変位を示すことが明らかとなった。これは減圧による有効応力の増加と MH の分解による剛性の低下で圧密が進行し、減圧源を中心として収縮挙動が生じたと考えられる。図-3 は各解析時間における海底面の沈下量を表している。減圧開始から 1 日後、10 日後の海底面は坑井近傍の沈下が顕著に表れているのに対して、100 日後、1 年 1 日後の海底面は約 1.5m の沈下が広範囲にわたってほぼ均等に生じた。

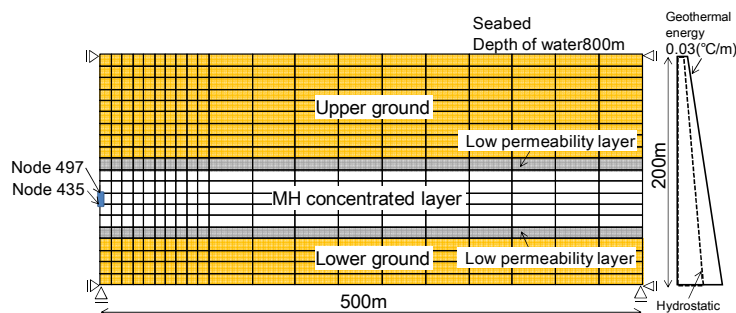
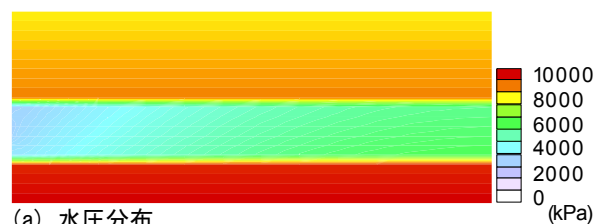


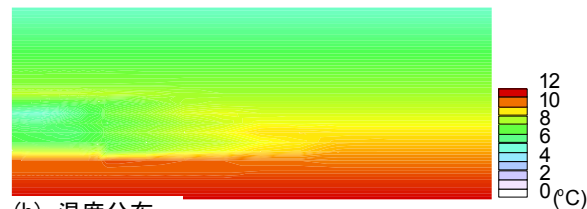
図-1 南海トラフにおけるMH濃集層を模擬した解析モデルと境界条件

表-1 解析に用いたパラメータ

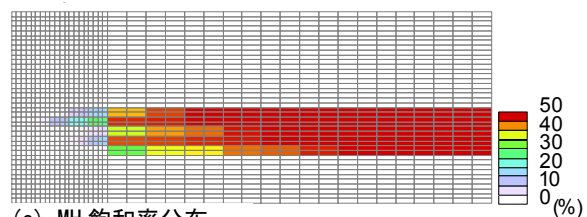
FEM関連				
Symbol	Parameter	Unit	MH堆積層	通常地盤
E	弾性係数	kPa	1.0×10^5	1.5×10^5
v	ポアソン比		0.33	0.33
ρ_s	土の単位体積重量	kN/m ³	25	25
ρ_w	水の単位体積重量	kN/m ³	10	10
ρ_H	MHの単位体積重量	kN/m ³	9.12	
k_w	透水係数	m/sec	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-5}
k_G	透気係数	m/sec	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}
n	初期間隙率		0.4	0.4
n^H	メタンハイドレート体積比		0.2 (S _{MH} =50%)	0
A	膨張係数	/K	5.0×10^{-6}	5.0×10^{-6}
K_{TW}	水の熱伝導率	cal/m・K・sec	0.14	0.14
K_{TS}	土粒子の熱伝導率	cal/m・K・sec	0.5	0.5
K_{TG}	ガスの熱伝導率	cal/m・K・sec	0.1	0.1
K_{TH}	メタンハイドレートの熱伝導率	cal/m・K・sec	0.1	
C_{vW}	水の比熱	cal/N・K	2.5×10^4	2.5×10^4
C_{vS}	土粒子の熱伝導率比熱	cal/N・K	1.0×10^5	1.0×10^5
C_{vG}	ガスの比熱	cal/N・K	1.0×10^4	1.0×10^4
C_{vH}	メタンハイドレートの比熱	cal/N・K	1.0×10^5	
M_G	メタンガスの物質質量	g/mol	16	16
M_W	水の物質質量	g/mol	18	18
M_H	メタンハイドレートの物質質量	g/mol	119.5	119.5
R	気体定数	kPa・m ³ /K・mol	8.314	8.314
構成式関連				
Symbol	Parameter	Unit	MH堆積層	通常地盤
λ	圧縮指数		0.146	
κ	膨潤指数		0.0016	
p_i	基準有効平均応力	MPa	1.2	
e_i	基準間隙率		0.973	
M	限界応力比		1.2	
u	塑性ひずみ増分を規定		10	
α	内部応力の変動に伴う降伏応力を規定		10	
ζ			10	
γ	内部応力の損傷の程度を規定		5	
ζ	内部応力の大きさを規定		0.05	



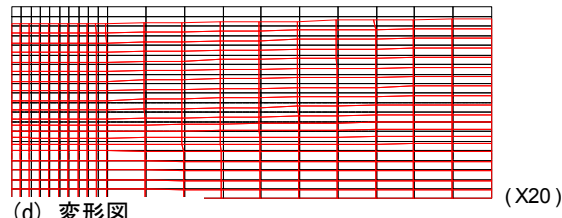
(a) 水圧分布



(b) 温度分布



(c) MH飽和率分布



(d) 変形図

図-2 減圧開始から100日後の地盤の(a)水圧分布, (b)温度分布, (c)MH飽和率分布, (d)変形図

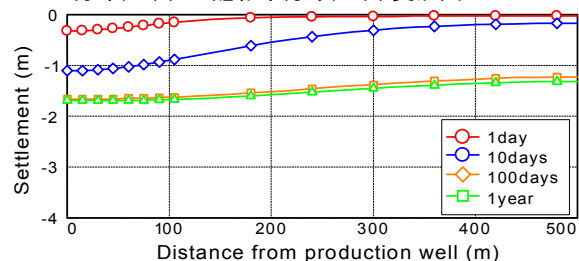


図-3 各解析ステップにおける海底面の沈下量

5. まとめ

本研究では土-水-ガス-熱連成有限要素法を用いた非線形解析を行い, MH 生産時に想定される地盤の変形予測を行った. その結果, 不透水層に挟まれた MH 濃集層の内部は構成からの減圧によって徐々に全体に減圧域が広がり, やがて定常状態に至ることが確認された. その際, 有効応力の増加と MH の分解による固結力の低下によって海底面全域において地盤沈下が生じることが明らかとなった.

謝辞

本研究は, 経済産業省[メタンハイドレート開発促進事業・生産手法開発に関する研究開発]の一部として実施された. 記して謝意を表する次第である.

参考文献

- 1)メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム: <http://www.mh21japan.gr.jp/japanese/index.html>.
- 2)Hyodo, M., Nakata, Y., Orense, R. P., Yoshimoto, N. and Yoneda, J.: Elastoplastic Constitutive Equation for Methane Hydrate-bearing Sand in Deep Seabed, *Proceedings of the 14th International Symposium on Plasticity 2008*, pp.349-351, 2008.
- 3)米田純, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正: メタンハイドレート開発に伴う生産性周辺地盤の変形予測, 第 44 回地盤工学研究発表会講演集, pp.789-790, 2009.