

メタンハイドレート生産時における二酸化炭素ハイドレートの利用可能性と 坑井の力学的安定性について（その1）

長崎大学大学院工学研究科 学生会員 ○松山彰宏 ホアン ハオ 石田純平
フェロー会員 蔣 宇静 正会員 杉本知史 李 博

1. はじめに

メタンハイドレート（以下、MH と略す）生産時には、MH 分解に伴う海底地盤の強度低下により坑井周辺の海底地盤に大きな変形をもたらす可能性がある。そこで、MH を開発・生産する上で、環境問題への対策の1つとして二酸化炭素を利用する方法が提案されている。二酸化炭素はMHと同様に、二酸化炭素と水を用いて二酸化炭素ハイドレート（以下、CO₂-Hyd と略す）を生成することができる。CO₂-Hyd は MH より容易に生成でき、また逆に分解しにくいという性質があることが既往研究においても確認されている。

本研究では、一般的なMHの生産手法である「減圧法」を対象に、MHの分解と同時に分解範囲内でCO₂-Hydが生成されると仮定した場合における応力-浸透流連成解析を行う。そして、CO₂-Hydを置換することにより海底地盤の強度低下を緩和し、海底地盤沈下の抑制効果と坑井の安定性を評価することを目的とする。

2. MH 生産時における変形挙動評価の解析手法

2.1 解析概要

MH 生産時における海底地盤の変形挙動を精度よく予測するためには、温度の影響を考慮出来る応力-ひずみ関係モデルと MH 層の骨格・水・気体・熱を連成した解析手法が必要である。しかし、それら要素をすべて考慮した解析モデルが複雑で、計算時間が長くなることに加え、どの要素がどのように影響してくるのかが理解しにくくなる恐れがある。そこで、本研究ではまず、MH 層中の気体（メタンガス）の影響、MH 層中の水の流れと熱移動現象との相互作用の影響を考慮せず、三次元有限差分法による応力-浸透流解析を行う。なお、入力パラメータは既往研究²⁾で得られたデータをもとに設定した。

2.2 解析モデル

解析モデルを図-1に示す。海水面から1000m以深の海底地盤を対象とし、解析領域は水平方向500m、垂直方向が海底面から300m以深の軸対称モデルとした。また、本研究では図-2のようにMH生産時において利用が検討されている坑井の形が異なる二つの解析モデルを用いた。境界条件として、MH層より上の坑井部分を非排水（水平方向変位固定）、MH層の坑井部分を排水（水平方向変位固定）とした。

解析ケースを表-1に示す。MH分解時におけるCO₂-Hydへの置換を考慮しないケース及び考慮するケースの計4ケースを設定した。本研究では、MH分解によるMH分解域の強度低下及びCO₂-Hydへの置換は設定した物性値を変化させることによって再現した。初期温度5℃、MH層の初期圧力を12MPaとし、圧力を1MPaまで減圧させることによってMHを分解させ、計100時間の解析を行った。また、表-2に材料の物性値を示し、表-3に坑井(コンクリート)の物性値を示す。

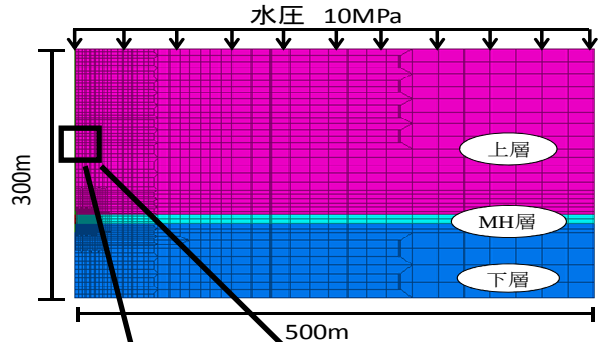
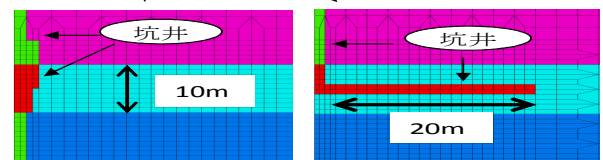


図-1 解析モデル



(a) Case1

(b) Case2

図-2 坑井周辺

表-1 解析ケース

解析ケース	生産坑井の形	CO ₂ -Hyd置換の有無
Case1_1	鉛直	無
Case1_2	鉛直	有
Case2_1	水平	無
Case2_2	水平	有

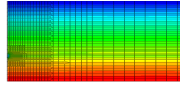
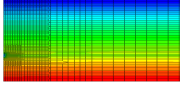
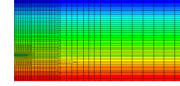
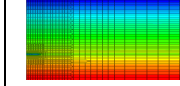
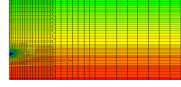
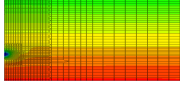
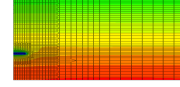
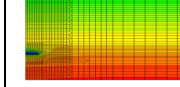
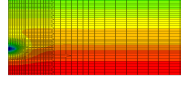
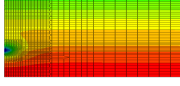
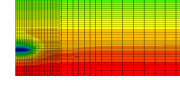
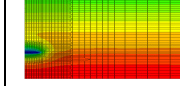
表-2 物性値

パラメータ	岩盤層	MH層	CO ₂ -Hyd
変形係数 E (MPa)	1.5×10^2	5.2×10^2	1.4×10^2
密度 ρ (kg/m ³)	2450	1969	910
透水係数 k (m/s)	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-5}
粘着力 c (MPa)	0.3	1	1.2
ポアソン比 ν	0.33		0.3
内部摩擦角 ϕ (°)	30		25
間隙率 n	0.4		
初期温度 °C	5		

表-3 坑井の物性値

パラメータ	坑井
変形係数 E (MPa)	2.5×10^2
ポアソン比 ν	0.2
密度 ρ (kg/m ³)	2400
圧縮強度 σ_c (MPa)	24

表-4 各ケースの間隙水圧の経時変化

Fluid time	Case1_1	Case1_2	Case2_1	Case2_2	Pore pressure
T=1h					18MPa 14MPa 10MPa
T=50h					18MPa 10MPa 1MPa
T= 100h					18MPa 10MPa 1MPa

3. 解析結果と考察

表-4 に間隙水圧の経時変化を、図-3、4 に解析終了時(100 時間後)における MH 層上部、海底面での各地点における最大沈下量を示す。時間が経過するとともに間隙水圧の低下が起き、圧密が進行することによって海底地盤の沈下が生じていることが分かる。また、Case1_1 と Case1_2、Case2_1 と Case2_2 の沈下量を比較すると MH 分解後の CO₂-Hyd への置換がある場合は沈下量が大きく抑制されている。MH 分解後に MH 分解域の変形係数が元の値の約 1/10 となるのに比べ、CO₂-Hyd への置換を考慮したケースでは約 1/3 程度になるので、海底地盤沈下の抑制に繋がったと考えられる。また、MH 生産に伴い坑井から浸透流を排水することによって坑井周辺で生じる圧密沈下が海底地盤沈下の大きな要因となることは既往研究で明らかになっている。本研究では、MH 分解後に MH 分解域の浸透率が元の値の約 20 倍となるのに比べ、CO₂-Hyd への置換を考慮したケースでは約 10 倍程度に抑えることができ、CO₂-Hyd への置換が過剰な圧密沈下を防ぎ、海底地盤沈下の抑制効果を果たしていることが確認できた。

図-5 に解析終了時の岩盤層(深度 0m~200m)における坑井への水平方向応力を示す。各ケースにおいて坑井への水平応力は坑井の圧縮強度 24MPa を下回っているため、坑井の安定性が確認された。

図-6 に Case1_1 と Case1_2 の MH 層における垂直坑井への水平応力を、図-7 に Case2_1 と Case2_2 の MH 層における水平坑井への鉛直応力を示す。Case1_1 と Case1_2 では、坑井への水平応力が坑井の圧縮強度 24MPa を下回っているため、坑井の安定性は保たれていると考えられる。しかし、Case2_1 と Case2_2 では水平坑井の 0m 付近で約 50MPa の鉛直応力が生じており、坑井の局所的な破壊が発生する可能性が示唆された。従って、水平坑井を考慮した MH 生産では水平坑井が強度の高い材料を利用する必要があると考えられる。

4. おわりに

本研究では、MH 生産時における坑井の安定性の評価を行うとともに MH 分解時における CO₂-Hyd への置換が海底地盤沈下の抑制効果があることが確認できた。今後は、分解条件や地盤条件等を変えて、その抑制効果を詳細に検討する必要がある。

【参考文献】

- 1) 青木一男他:メタンハイドレート生産に伴う地盤変形に伴う地盤変形について、資源素材 2003 (宇部) 秋季講演論文集, B4-1, pp.235-236, 2003
- 2) 古賀小百合, 蔭 宇静, 宮城卓史:温度-応力-浸透流-連成解析によるメタンハイドレート生産時海底地盤の変形挙動の予測変化, 第 67 回年次学術講演会講演概要集, pp.719-720, 2012

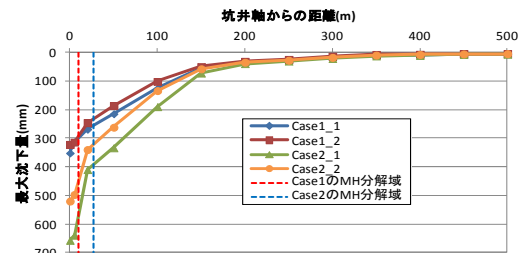


図-3 各地点における最大沈下量 (MH 層)

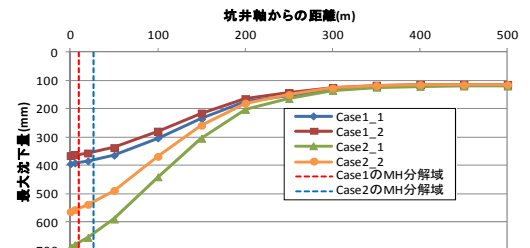


図-4 各地点における最大沈下量 (海底面)

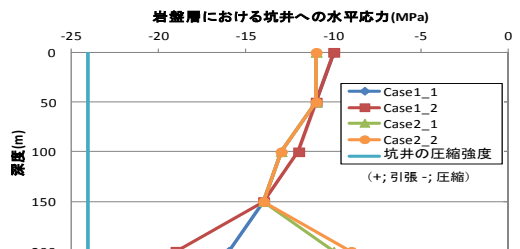


図-5 各ケースの岩盤層における坑井への水平応力

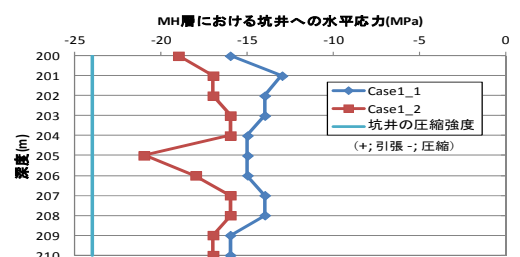


図-6 Case1 の MH 層における垂直坑井への水平応力

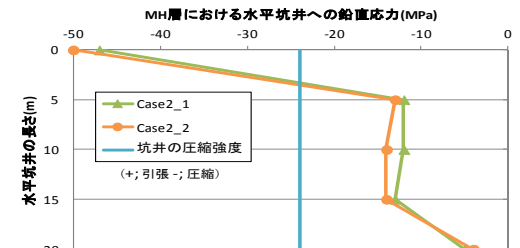


図-7 Case2 の MH 層における水平坑井への鉛直応力