

第Ⅲ部門 減圧法によるメタンハイドレート生産が海底地盤の動的挙動に与える影響の数値解析的検討

京都大学大学院 学生会員 ○ 赤 木 俊 文
京都大学大学院 正 会 員 木 元 小 百 合

1. 研究の背景と目的

近年メタンハイドレート（以下 MH）が新しいエネルギー資源として注目されている。MH は日本近海にも多く存在し、特に MH の濃集帯が確認されている東部南海トラフの渥美半島沖では 2013 年 3 月 12 日～3 月 18 日にかけて世界初となる海洋産出試験が行われた。一方で日本は世界有数の地震大国であり、今世紀前半における発生が懸念されている南海トラフ地震の震源域には MH の濃集帯が含まれている。将来安定した MH の産出を実現するには MH の産出過程において地震動が与える影響を知ることは重要な課題となる。本研究は MH 生産に伴う水圧、ガス圧、温度、間隙比、MH 飽和率などの地盤状態の変化が海底地盤の動的挙動に与える影響を数値計算によって検討したものである。まず、化学-熱-力学-連成解析手法¹⁾によって減圧法を想定した生産シミュレーションを行い、減圧後の地盤状態を再現する。その計算結果を動的解析の初期値とすることで MH 生産に伴う地盤状態の変化を考慮した動的解析を行った。

2. 数値計算手法

動的解析に先立ち MH 生産後の地盤状態を求めるために生産シミュレーションを化学-熱-力学連成解析手法¹⁾を用いて行う。動的解析ではこの結果を初期値として用いる。



図 1 動的解析手法の概要

図 1 に動的解析手法の概要を示す。MH 含有地盤を土粒子(S), MH(H), 水(W), ガス(G)の 4 相から成ると仮定し, 多孔質媒体理論に基づいて連続体力学の枠組みで定式化する。空間離散化は有限要素法, 時間離散化はニューマークのβ法を用いた。

MH を含有した地盤は変形特性の MH 飽和率依存性, ひずみ速度依存性を示す。MH 含有地盤のこうした特性を考慮しながら動的挙動を扱うため, 本研究では超過応力型の繰返し弾粘塑性構成式²⁾を用いる。

3. 数値計算条件

図 2 に生産シミュレーションと動的解析に用いた有限要素メッシュをそれぞれ示す。図に示すように, 水深 700m の海底の海底面下 100m に厚さ 100m の MH 含有層が存在するモデルを設定している。このモデルは東部南海トラフにおいて確認されている MH 濃集帯の深度を参考に設定した。生産シミュレーションにおける減圧点は MH 含有層の中央に設定している。各解析

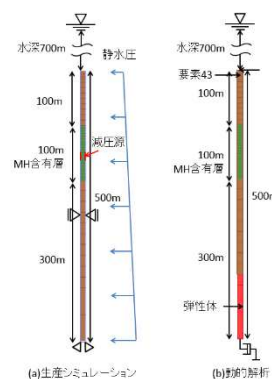


図 2 有限要素メッシュ

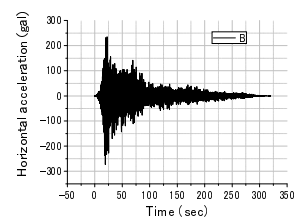


図 3 入力地震動

ケース間では生産シミュレーションで与える減圧量を変更しており, 減圧量は 0MPa (MH 生産なし), 3MPa, 5MPa, 7MPa の 4 種類を設定した。図 3 は入力地震動であり, 強地震動予測手法 EMPR³⁾により求めた南海トラフ地震の熊野灘地点における予測波形である。また, 図 4 に動的解析に用いた材料パラメータの非排水繰返し三軸シミュレーションの結果として応力径路と応力-ひずみ関係を示す。

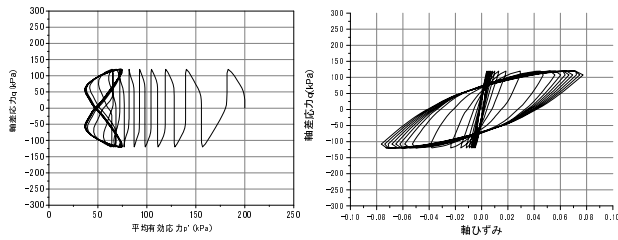


図4 動的解析に用いた材料パラメータによる

非排水繰返し三軸シミュレーション結果

4. 数値計算結果と考察

以下に動的解析の数値計算結果を示す。

4.1 最大水平加速度および最大水平変位に与える影響

図5に最大水平加速度の深度分布を示す。最大水平加速度について減圧量 0MPa のケースでは深度 300m で極小値を、深度 250m で極大値をとり、深度 80m 付近から海底面にかけて増加している。MH 生産を行った場合は上記とは逆に深度 300m 付近で極大値を、深度 200m で極小値をとり、深度があがるにつれて最大水平加速度は増加する。深度 100m から海底面にかけては減圧量 0MPa のケースと同様な傾向を示している。MH 未生産のケースと他のケース間での各極値の差は減圧量が増加するにつれ大きくなる。海底面における値は与える減圧量の増加に伴い大きくなっている。

図6に最大水平変位の深度分布を示す。最大水平変位はすべてのケースで同様な深度分布を示しており、モデル底部深度 500m から深度あがるほど増加し、MH 含有層で増加が緩やかになるが、深度 60m 付近から海底面にかけて増加が急になる。全体に与える減圧量が大

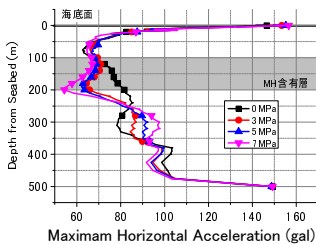


図5 最大水平加速度の

深度分布

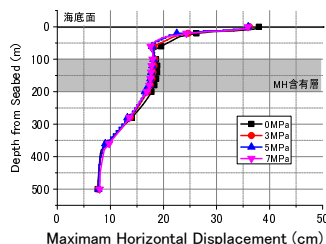


図6 最大水平変位の

深度分布

4.2 海底地盤の応力経路および変形量に与える影響

図7に減圧量 0MPa と 5MPa のケースで得られた海底面付近における応力経路を示す。両ケースの応力経路はよく似た挙動を示している。図に示す A の領域では大きな地震動が加わることで数回の振動で平均骨格応力が大きく低下しており、減圧量 0MPa のケースに比べて減圧量 5MPa のケースにおいて低下の度合いがやや大

きい。これは 4.1 で示したように MH 生産を行ったケースで海底面における水平応答加速度が増加したためと考えられる。また、図に示した B の領域では減圧量 0MPa のケースに比べ、減圧量 0MPa のケースで 1 回の振動に対する平均骨格応力の低下が小さい傾向がある。

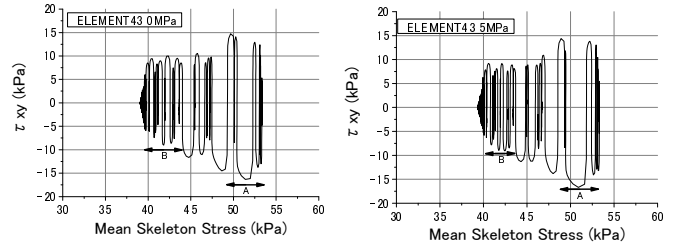


図7 減圧量 0MPa, 5MPa のケースで得られた応力経路

図8に減圧量 0MPa, 5MPa のケースで得られた海底面付近の蓄積粘塑性偏差ひずみと体積ひずみの時刻歴を示す。蓄積粘塑性偏差ひずみは $\epsilon_{ij}^{vp} = \int \dot{\epsilon}_{ij}^{vp} dt$ で定義される量で地盤の劣化の程度を表す。 $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ は粘塑性偏差ひずみ速度である。各ひずみの発生量は減圧量 0MPa のケースに比べ、減圧量 5MPa のケースの方が若干小さい。

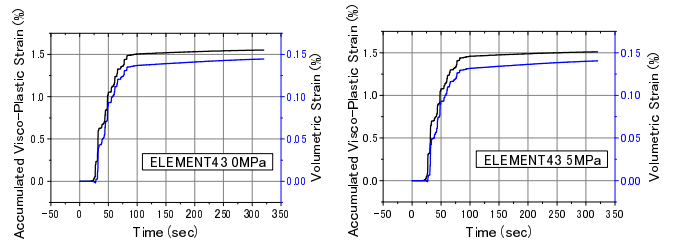


図8 減圧量 0MPa, 5MPa のケースで得られた

蓄積粘塑性偏差ひずみと体積ひずみの時刻歴

5. まとめ

減圧法を想定した MH 生産シミュレーション結果を初期値とした動的解析を行い、MH 産出に伴う地盤状態の変化が海底地盤の動的挙動に与える影響を検討した。水平加速度の深度分布には MH 生産による定性的な変化が見られた。水平変位、応力経路、ひずみの発生量にも影響が確認されたがその程度は小さい。今後の課題としては、(1)MH の生産に伴う海底地盤の材料特性の質的变化の考慮 (2)MH 生産の影響範囲の 3 次元的な広がり (3)地震時における生産井の安定性 (4)地震中における MH の分解挙動、があげられる。

参考文献

- 1) 赤木俊文, 木元小百合, 岡二三生, 肥後陽介, 岩井裕正. 2012. 第 47 回地盤工学研究発表会概要集(CD-ROM), 333-334.
- 2) Oka, F and Kimoto, S. 2013. Taylor and Francis.
- 3) Sugito, M., Furumoto, Y., and Takeshi Sugiyama, T. 2000. "12th World Conference on Earthquake Engineering. Vol. 2111. No. 4.