

細粒分含有率の異なるメタンハイドレート含有砂の分解時の挙動

山口大学大学院 学生会員 ○梶山慎太郎 朝倉さやか
山口大学大学院 正会員 兵動正幸 中田幸男 吉本憲正

1.まえがき 近年、メタンハイドレート(以下、MH と略す)が新エネルギーとして着目されている。MH は低温高压という条件で安定して存在可能であり、わが国ではその賦存量¹⁾から、南海トラフにおいて生産開発が行われている。南海トラフのMH は砂の間隙中に砂粒子を固結する形で存在していると考えられており、そのMH 胚胎層へ生産井設置し生産井内の圧力を下げてMH を分解する減圧法が主な生産手段として考えられている¹⁾。生産に際して、長期MH 生産は、生産井掘削から廃坑に至るまでにMH 胚胎層は様々な応力状態にあると考えられる。一方で、南海トラフのMH 胚胎層はタービダイトと呼ばれる砂泥互層になっており、各層で細粒分含有率が異なっている。そこで本研究では、細粒分含有率が異なる試料に対してMH を生成させ、せん断応力を与えた状態で間隙水圧を下げることで減圧法を想定した分解実験を行い、その挙動を評価した。

2.試験装置の概要 実験には温度、圧力を制御することでMH が存在可能な深海底地盤の条件を再現でき、セルの前面に観察窓を有する恒温高压平面ひずみ実験装置²⁾を用いた。供試体は、高さ160mm×幅60mm×奥行き80mmの直方体であり、供試体に装着するメンブレンの観察側には画像解析の評点とするために5mm×5mmのメッシュを描いた。この観察窓からデジタル一眼レフカメラを用いてリモート制御によるタイマー撮影を行った。得られた供試体画像のメッシュの交点を読み取り、PIV 解析により局所変形の計測を行った。本実験では供試体内に熱電対を設置し供試体内の温度を測定した。なお、画像の撮影は1分間隔で行った。

3.実験方法 本実験には豊浦砂および南海トラフの試錐試験より得られた粒度分布を元にして作製した2種類の模擬試料(以下、細粒分が多い試料をT_b、細粒分が多い試料をT_cと略す)を用いた³⁾。各試料の粒度分布を図-1に示す。図中のハッチはMH 濃集層の粒度分布の範囲を示している。試料の含水比は、MH 飽和率S_{MH}=50%を目標として試料の含水比を調整した。MH 供試体を作製するために、まず温度5℃の状態ですべての供試体内にメタンガスを圧入し、5MPaに達した後、圧力を保ちながら時間をかけてMH を生成させた。MH 生成後、間隙内のガスを水と置き換え水飽和状態とし、間隙水圧を10MPa、有効拘束圧σ_v'=3MPaで圧密した。圧密後、別途行ったせん断試験の結果³⁾より、MH を含まない砂(以下、ホスト砂と示す)の軸差応力以上かつMH 含有砂以下の軸差応力を与えた後に間隙水圧を制御し、間隙水圧が10MPaから3MPaになるまで減圧を行った。その後MH が分解した後に水圧を回復させた。なお、減圧および水圧回復は供試体上端側からのみ行い、せん断速度は0.1%/min、減圧および水圧回復速度は0.5MPa/minとした。

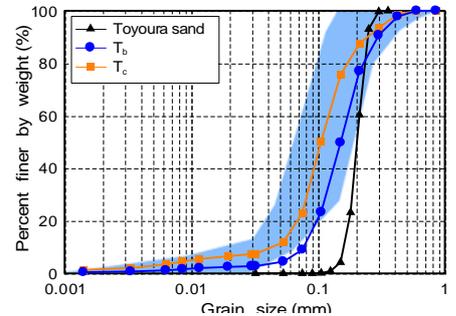


図-1 南海トラフと各試料の粒度分布

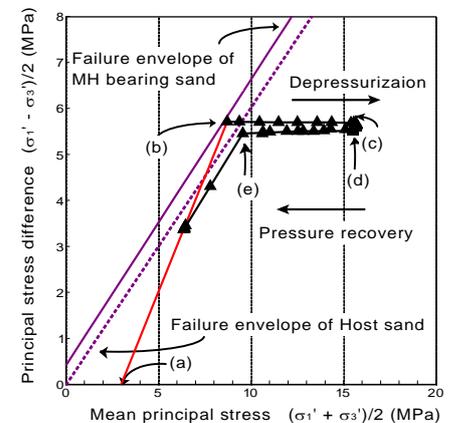


図-2 豊浦砂の分解実験中の有効応力経路

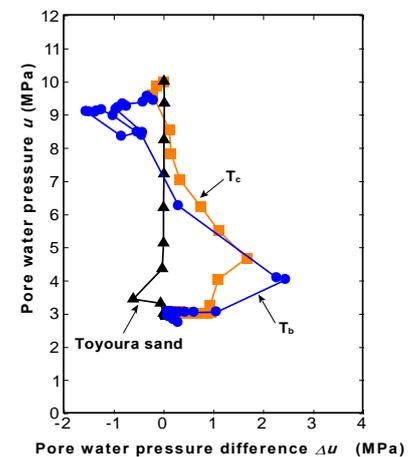


図-3 各試料の減圧中の上下圧力差

キーワード 固結材料, 細粒分, 変形挙動

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1

TEL 0836-85-9344

4. 実験結果 分解実験には、MH 飽和率が豊浦砂では $S_{MH} = 60.3\%$ 、 T_b では $S_{MH} = 57.3\%$ 、 T_c では $S_{MH} = 41.3\%$ の試料を用いた。一例として、豊浦砂の分解実験中の応力経路を、せん断試験の結果から得られた MH 含有砂とホスト砂の強度と併せて図-2 に示す。図中には、せん断を開始した時点(a)、分解を開始した時点(b)、間隙水圧が 3MPa になった時点(c)、水圧回復を始めた時点(d)、供試体が完全に破壊した時点(e)を示している。図-3 に各試料の減圧中の上下の圧力差を示す。図は、縦軸に減圧中の上端の圧力の変化、横軸に上下端の圧力差を示している。いずれの試料も、下端の圧力から上端の圧力を除した結果を示している。図中の T_b の結果が初期に乱れているのは、せん断過程から減圧過程へ移行する際に、実験装置上部の圧力計とシリンジポンプの間の管路内に MH が生成されたため、管路内の MH を融解するために MH を分解する操作を行ったためである。4MPa 以下の圧力で豊浦砂の圧力差が負の値であるのは、ポンプの制御が追いつかなかったためと推察される。各結果を比較すると、豊浦砂では下端の圧力が上端を上回らなかったが、細粒分を含む T_b および T_c では大きく圧力差が生じた。これは、細粒分により透水性が低下したためと推察される。MH 分解後、間隙水圧回復中の供試体の最大せん断ひずみコンター γ_{max} を図-4 に示す。なお、最大せん断ひずみ 50%以上の範囲は同色で示している。図より、豊浦砂および T_b では元の間隙水圧にまでに達した時点でせん断帯が発生する様子が認められる。一方で T_c では、水圧回復とともに徐々に供試体全域が変形しながらせん断帯が形成されることが認められる。図より、最大せん断ひずみのばらつきを調べた。本研究では、ばらつきの程度をワイブル分布⁴⁾によって求めた。用いた式を式(1)に示す。

$$P_s = \exp \left[- \left(\frac{\gamma}{\gamma_c} \right)^m \right] \quad (1)$$

ここで、 γ は各要素の最大せん断ひずみ、 γ_c は最大せん断ひずみの平均値、 m はワイブル係数である。これによって得られた水圧回復中のワイブル係数と間隙水圧の関係を図-5 に示す。ワイブル係数 m は値が低いほどばらつきが大きいことを示す。図より、元の水圧まで回復するとばらつきが大きくなり、細粒分含有率が低いほどに顕著である。図-4、5 より、細粒分含有率が低い方が局所変形が大きくなることが推察される。

5. 結論 本研究では、細粒分含有率の異なる 3 種類の試料に対して MH を生成し、分解実験を行った。これによって得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 減圧を行うと、細粒分を含む試料は上下端で圧力差が生じる。これは、透水性が低下したためと推察される。
- (2) MH 分解後水圧を回復させると、いずれの試料も元の水圧に達するとせん断帯を伴って破壊するが、 T_c では水圧回復中も供試体全域で変形が進行していることが確認される。
- (3) 細粒分含有率が低い方が局所変形が大きくなることが推察される。

【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」の研究活動の一環および、JSPS 科研費 15J06540 の助成を受け実施した。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 2016. <http://www.mh21japan.gr.jp/> 2) Yoneda, J., Hyodo, M., Yoshimoto, N., Nakata, N., Kato, A.: Development of high-pressure low-temperature plane strain testing apparatus for methane hydrate-bearing sand, *Soils and Foundations*, 53(5), 774-783. 2013. 3) Kajiyama S., Hyodo M., Nakata Y. Yoshimoto N., & Kato A., 2014. : The effect of particle characteristics on shear behavior with methane hydrate bearing sand, *The International Symposium on Geomechanics from Micro to Macro*, pp.1087-1092, Cambridge 4) Cheng, Y., P., Nakata, Y., and Bolton, M., D. 2003. : Discrete element simulation of crushable soil, *Geotechnique* 53(7), 633-641

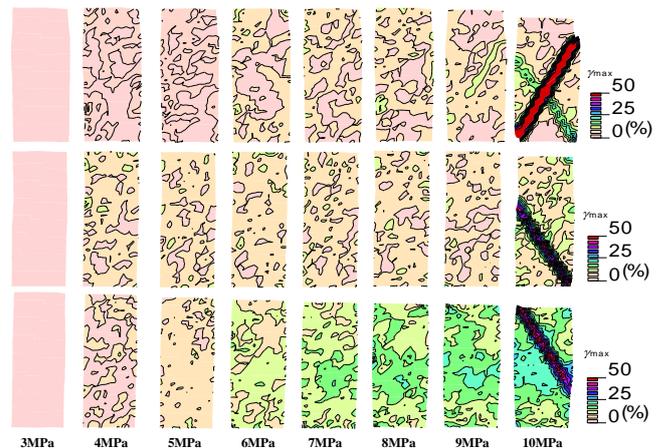


図-4 水圧回復中の豊浦砂(上)、 T_b (中)および T_c (下)の

最大せん断ひずみ γ_{max} コンター

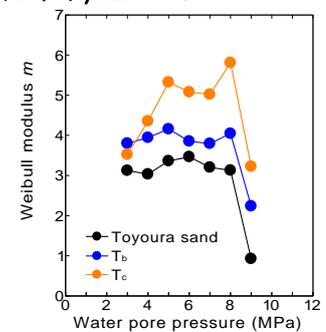


図-5 水圧回復中のワイブル係数 m と間隙水圧の関係