京都大学大学院 学生会員 白石将大京都大学大学院 正会員 木元小百合京都大学大学院 フェロー 岡二三生京都大学大学院 学生会員 岩井裕正

1.はじめに 近年,新たなエネルギー資源としてメタンハイドレートが注目を浴びており,実用化に向けて研究や開発が進められている.東部南海トラフ海域では、メタンハイドレートは水深500m以深,海底面下数100m程度の地盤中に存在しており、大規模なメタンハイドレート濃縮帯の存在が確認されている¹⁾.メタンガスを安全に生産するためには、メタンハイドレート分解時の地盤の変形挙動や地盤力学的特性を把握する必要がある.本研究では温度制御型高圧三軸試験機を用いて、非可燃性でメタンガスより比較的取り扱いが容易であるガスを用いて砂供試体内にCO2ハイドレートの生成及び分解実験を行った.

2.実験概要

試験装置概略図を図1に示す.供試体は豊浦砂を用い,含水比をCase1は15%,Case2は20%に調整した試料を間隙率0.40となるよう突き固めた.供試体サイズは直径35mm,高さ70mmである. ハイドレート生成及び分解過程の温度圧力径路を図2に示す²).(a)まず湿潤供試体の間隙内にCO2ガスを圧入し,間隙圧を2.3MPa,セル圧を2.4MPaとする.(b)その後セル内部の温度を10から1に冷却することで供試体間隙内にハイドレートを生成させた.CO2ハイドレート分解過程では,(c)供試体を非排気-非排水条件としてセル内部の温度を1から20に上昇させた.この時セル圧は、Case1においては,有効拘束圧を0.1MPaに保つように間隙圧の上昇に合わせて手動で上昇させている.Case2では3.4MPaで一定とした.

3. 実験結果

Case1 のハイドレート生成時及び分解時の間隙圧, セル圧,間隙圧増圧器(上),セル圧増圧器のピストン 貫入量の時刻歴を各々図3,図4に示す.ハイドレート 生成時は間隙圧が一定となるように間隙圧増圧器のピストンを制御しており,圧力低下時には,ピストンが シリンダー内に自動で貫入して低下した圧力がもとに もどるように制御する.

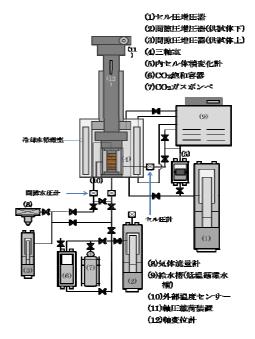


図1 試験装置概略図

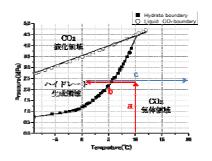
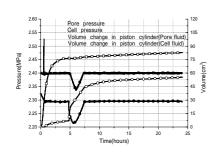
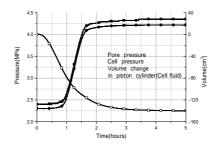


図 2 CO2 ハイドレート平衡曲線と 温度圧力径路

図3より、冷却開始から5時間後に急激な間隙圧増圧器のピストンの貫入が起こっており、これはハイドレートが間隙内で生成し、CO2ガスが消費されたことによる圧力低下によるものと考えられる.ピストンの貫入量は50cm³以上であり、これは、CO2の溶解度、ファンデルワールスの式、ヘンリーの法則から算定した、温度低下によるブラインの収縮や CO2ガスの間隙水への溶解によるピストンの貫入量の理論値である7.63cm³を超えており、ハイドレートが生成していると考えられる.また図4より、分解時には、加熱から1時間経過後、間隙圧が大きく増加している.これは、温度上昇によりハイドレートが分解し、間隙内に CO2ガスが発生したことによると考えられる.間隙圧の上昇はハイドレートの分解以外の要因による上昇量の理論値の2.0MPaを超えており、ハイドレートの分解によるものと考えられる.





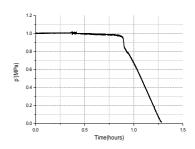


図3 ハイドレート生成時 (Case1)

図 4 ハイドレート分解時 (Case1)

図 5 平均骨格応力変化 (Case2)

図5にCase2における,ハイドレート分解時の平均骨格応力変化を示す.平均骨格応力とは全応力から平均間隙圧を引いたものである³⁾. 定義式を以下に示す.

$$\sigma'_{m} = \sigma_{m} - \{S_{r}P_{W} + (1 - S_{r})P_{G}\}$$
 $\sigma_{m} = \frac{(\sigma_{1} + 2\sigma_{3})}{2}$

ここで、 , , , , , Sr, Pw, PGはそれぞれ平均骨格応力、平均全応力、飽和度、間隙水圧、間隙ガス圧である. 本ケースでは、供試体間隙内に水はほとんど存在していないとして、飽和度はゼロとした. 図5より、ハイドレート分解に伴い平均骨格応力が大きく減少していることが分かる. また、間隙中のハイドレート生成量を求めるため、以下の式で定義されるハイドレート飽和率を算定した.

$$S_{H} = \frac{V_{H}}{V_{V}}$$

ここでSH, VH, Vvはそれぞれ, ハイドレート飽和率, ハイドレート体積, 間隙体積である. (A)ハイドレート生成時の間隙圧増圧器のピストンの貫入量から算出する方法と, (B)実験後の含水比から算出する方法の二通

表2 ハイドレート飽和率算定

Case No.	生成時 圧力 (MPa)	間障率	試験後 含水比 w (%)	00₂ ガス消費量 (cm³)	COz ハイドレート 飽和率S#(%) (A)	CSI2 ハイドレート 般和事が問
Case 1	2.3	0.41	5.43	53.36	26.3	23.3
Case 2	2.3	0.41	上4.37 下5.03	41.34	22.8	19.0

りで算出したハイドレート飽和率を表2に示す.ハイドレート飽和率はいずれの算出方法においても概ね19~27%程度となった.

4. まとめ

砂供試体内においてハイドレートを生成及び分解させ、間隙圧力や骨格応力の変化について調べた.二通りの方法でハイドレート飽和率を算定したところ、いずれの算出方法でも、近い値とった.

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/, 2013.
- 2) Sloan.E.D, Koh.C.A: Clathrate hydrates of Natural Gases Third Edition, CRC Press Taylor and Francis Group, p.380, 2007.
- 3) Jommi, C.: Remarks on the constitutive modelling of unsaturated soils, Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils, Tarantio, A. and Mancuso, C. eds., Balkema, pp.139-153, 2000.