

CO<sub>2</sub>ハイドレート含有砂の非排水三軸クリープ特性の把握

京都大学大学院 学生会員 ○吉本 将基

京都大学大学院 正会員 木元 小百合

東海旅客鉄道株式会社 正会員 田窪 堯

## 1. はじめに

近年、ガスハイドレートの利用に対する関心が高まり、日本でも研究開発が行われている。その中で、メタンハイドレート(以下 MH と表記)の分解・回収時に、MH 堆積層内に CO<sub>2</sub>ハイドレートを生成し、発生する生成熱を用いて、MH の分解を増進させる技術が注目されている。しかし、CO<sub>2</sub>ハイドレート含有地盤の力学挙動に関しては未解明な点が多く、地盤変形の予測などには地盤の時間依存性挙動を正確に表現する構成式の構築が必要である。そこで本研究は、CO<sub>2</sub>ハイドレート含有地盤の時間依存性挙動の把握のため、人工的に CO<sub>2</sub>ハイドレート含有砂試料を作製し、非排水三軸クリープ試験を実施した。そして得られた試験結果を通じ、CO<sub>2</sub>ハイドレート含有砂試料の力学特性の把握を行った。

## 2. 試験概要

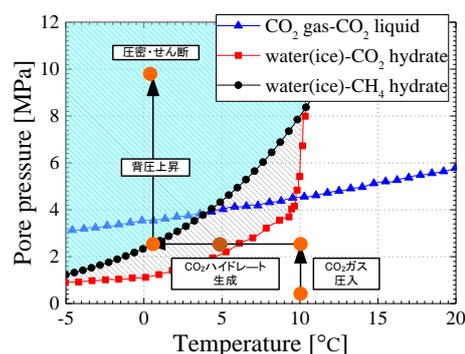
CO<sub>2</sub>ハイドレートを生成するため低温・高圧条件を再現可能な温度制御型高圧三軸試験装置(Iwai et al. (2018)<sup>1)</sup> 参考)を使用した。試験手順における温度圧力条件を図 1 に示す。砂試料には豊浦砂を使用し、はじめに含水比 16%，直径 35 mm，高さ 70 mm の凍結供試体を作製する。次に三軸セル内に設置した供試体に対して CO<sub>2</sub>ガスを圧入し、温度・圧力条件を調整することで供試体内に CO<sub>2</sub>ハイドレートを生成した。その後、供試体上下の間隙圧に圧力差をつけて通水を行い、供試体を水、CO<sub>2</sub>ハイドレート、土粒子の三相で構成された CO<sub>2</sub>ハイドレート含有砂供試体を作製する。そして背圧を 10 MPa，セル圧を 12 MPa で等方圧密した後、非排水条件下でひずみ速度 0.5%/min の定ひずみ速度のせん断を行う。所定のクリープ応力に至ると軸差応力を固定して非排水三軸クリープ試験を実施した。また、供試体に含有される CO<sub>2</sub>ハイドレートは、供試体の間隙体積  $V_v$  と CO<sub>2</sub>ハイドレート体積  $V_H$  の比をハイドレート飽和率  $S_r^H$  とし、式(1)で示す。

$$S_r^H = V_H / V_v \quad (1)$$

供試体の最大軸差応力  $q_{max}$  と载荷クリープ応力  $q$  との比をクリープ応力比  $q_r$  として以下の式(2)で定義する。また  $q_{max}$  は既往の試験データよりハイドレート飽和率  $S_r^H$  に依存することが確認されており、式(3)で表される。

$$q_r = q / q_{max} \quad (2)$$

$$q_{max} = 0.00496(S_r^H)^{1.46002} + 4.19 \quad (3)$$

図 1 CO<sub>2</sub>ハイドレート・MH の温度圧力平衡条件

## 3. 試験結果と考察

既往の研究で得られた飽和豊浦砂の試験結果 Case S, CO<sub>2</sub>ハイドレート含有砂供試体の試験結果 Case H1, H4, H5, H6 の 4 ケース<sup>2)</sup> と本研究で新たに実施した 6 ケースの CO<sub>2</sub>ハイドレート含有砂供試体の非排水三軸クリープ試験の結果を比較し、物性把握を行う。各ケースの試験条件と結果を表 1 に示す。試験は全ケース初期間隙比 0.74，セル圧 12.0 MPa，初期間隙圧 10.0 MPa，初期平均有効応力 2.0 MPa の下で実施した。なお、Case H6 は装置の故障により正確なハイドレート飽和率を測定することができなかったため、クリープ応力载荷前のせん断時における剛性から推測した値を記載した。

表 1 試験条件と結果

Case name	Hydrate saturation $S_r^H$ [%]	Creep stress $q$ [MPa]	Creep stress ratio $q_r$	Minimum creep strain rate $\dot{\epsilon}_m$ [%/s]	Elapsed time at $\dot{\epsilon}_m$ $t_m$ [s]	Stress ratio at $\dot{\epsilon}_m$ $\eta_{cr}$
Case S	0.0	3.5	0.84	-	-	-
Case H1	21.8	4.0	0.86	$1.7 \times 10^{-3}$	3450	1.22
Case H2	32.7	4.0	0.80	$7.09 \times 10^{-4}$	10300	1.26
Case H3	33.8	3.5	0.68	$4.34 \times 10^{-3}$	118000	1.33
Case H4	34.3	4.5	0.89	$3.46 \times 10^{-3}$	1500	1.25
Case H5	40.0	4.0	0.76	$3.29 \times 10^{-4}$	17000	1.25
Case H6	41.4	4.5	0.84	$6.54 \times 10^{-4}$	8700	1.22
Case H7	41.7	4.5	0.84	$1.53 \times 10^{-3}$	6150	1.26
Case H8	45.8	4.0	0.72	$2.99 \times 10^{-4}$	31000	1.30
Case H9	50.0*	4.0	0.69*	$6.43 \times 10^{-3}$	89000	1.30
Case H10	54.8	4.5	0.72	$2.34 \times 10^{-4}$	54000	1.32

キーワード ガスハイドレート，三軸圧縮試験，クリープ試験，非排水

連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 社会基盤工学専攻 地盤力学分野 TEL 075-383-3193

### 3.1 時間-クリープひずみ関係

図2に、軸ひずみの経時変化を示す。CO<sub>2</sub>ハイドレートを含む飽和豊浦砂の結果 Case S は時間の経過に伴いひずみが収束するのに対し、ハイドレート含有砂の試験結果 Case H1~H10はひずみが顕著に進行する様子が確認された。また、クリープひずみの進行は、クリープ応力比  $q_r$  が大きいほどより急速に進行するという結果となった。

### 3.2 時間-クリープひずみ速度関係

図3にクリープひずみ速度の経時変化を示す。飽和豊浦砂の試験結果 Case S では、時間経過に伴いひずみ速度が減少し続ける様子がみられたが、ハイドレート含有砂供試体の全10ケースからは加速クリープが明確に確認され、破壊に向かう挙動が確認された。また、加速クリープ発生時の最小ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_m$  と  $\dot{\epsilon}_m$  におけるクリープ応力荷重時間  $t_m$  は図4に示すように両対数で整理すると式(4)で定義される線形関係で表される。

$$\log_{10} \dot{\epsilon}_m = -0.96 \log_{10} t_m + 0.67 \quad (4)$$

また、最小ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_m$  と荷重時間  $t_m$  をそれぞれクリープ応力比  $q_r$  についてまとめたものをそれぞれ図5、図6に示す。この結果より、ハイドレート含有砂の最小ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_m$  と荷重時間  $t_m$  はそれぞれ式(5)、(6)で定義される線形関係式近傍に収束することが確認された。

$$\log_{10} \dot{\epsilon}_m = 7.64 \log_{10} q_r - 9.31 \quad (5)$$

$$\log_{10} t_m = -7.97 \log_{10} q_r + 10.41 \quad (6)$$

これより、ハイドレート飽和率 20%~60%程度のCO<sub>2</sub>ハイドレート含有砂の非排水条件のクリープ挙動は、

ハイドレート飽和率によらずクリープ応力比  $q_r$  により決定されることがわかる。

### 3.3 加速クリープ発生時の応力状態

図7にハイドレート含有砂の加速クリープ発生時における応力比  $\eta_{cr}(=q/p')$  とハイドレート飽和率関係を示す。既往の結果より、ハイドレート含有砂の限界状態における応力比  $\eta(=q/p')$  はハイドレートの有無に関わらず 1.2 に収束することが確認されているが、図7よりハイドレート含有砂の加速クリープは限界状態の応力比よりも高い応力比で発生することがわかる。さらに、 $Sr^H=33.8\%$  の Case H3 は全体の傾向と離れる結果ではあるが、ハイドレート飽和率  $Sr^H$  が高いほど加速クリープ発生時の応力比  $\eta_{cr}$  が増加する傾向がみられた。

### 4. まとめ

飽和豊浦砂とハイドレート含有砂の非排水三軸クリープ試験の結果を比較より、飽和豊浦砂はハイドレート含によって顕著なクリープ挙動を示すが確認された。また、ハイドレート含有砂のクリープ挙動はクリープ応力比  $q_r$  に依存し、また加速クリープ発生時の応力比  $\eta_{cr}$  はハイドレート飽和率  $Sr^H$  の増加に伴い大きくなるという傾向が確認された。

### 参考文献

- 1) Iwai et al. : Rate effect on the stress-strain relations of synthetic carbon dioxide hydrate-bearing sand and dissociation tests by thermal stimulation, Soils and foundations, Vol.58, No.5, pp.1113-1132, 2018.
- 2) 吉本ら : 非排水三軸試験によるCO<sub>2</sub>ハイドレート含有砂試料のクリープ挙動の把握, 第54回地盤工学研究発表会, No. 6, pp. 301-302, 2019.

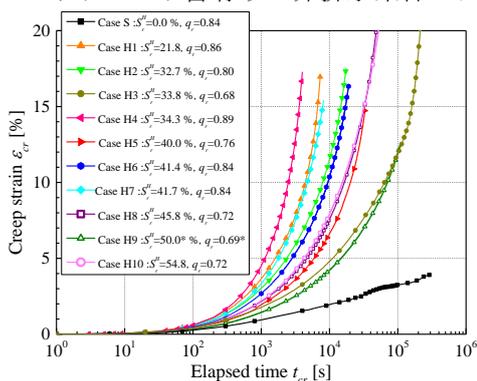


図2 時間-クリープひずみ

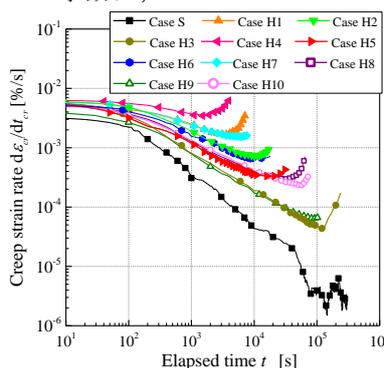


図3 時間-クリープひずみ速度

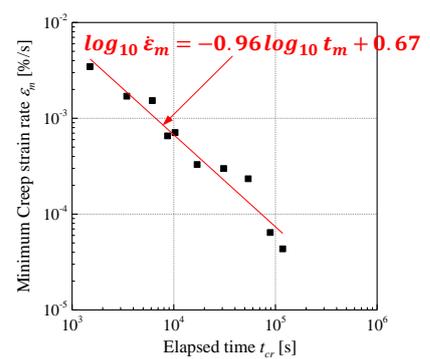


図4 荷重時間-最小ひずみ速度

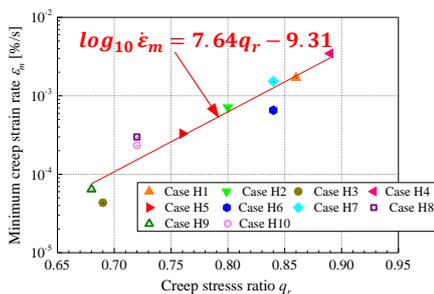


図5 クリープ応力比-最小ひずみ速度

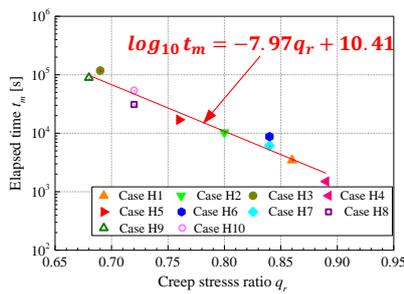


図6 クリープ応力比-ε̇\_mでの荷重時間

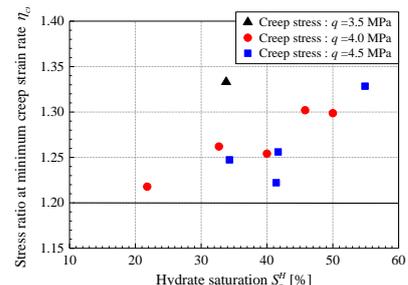


図7 ハイドレート飽和率-η<sub>cr</sub>