

CO₂ ハイドレート含有砂試料のクリープ挙動と 弾粘塑性構成式による再現

木元 小百合* 吉本 将基** 田窪 堯**

Creep Behavior of CO₂ Hydrate-Bearing Sand and Its Simulations by an Elasto-Viscoplastic Constitutive Model

by

Sayuri KIMOTO*, Masaki YOSHIMOTO** and Gyo TAKUBO**

Recently, a possibility of a new technique of CO₂ storage in the ground, namely, CO₂ storage as hydrate, has been under discussion. In the present study, the mechanical behavior of CO₂ hydrate bearing sediments was investigated to provide the fundamental mechanical properties of CO₂ hydrate sediments. Especially, time dependent behavior was focused on and a series of undrained triaxial tests were conducted using high pressure and low temperature triaxial apparatus. From the results, it is found that hydrate-bearing sand specimen exhibits acceleration creep under undrained condition while sand specimen does not. In addition, an elasto-viscoplastic model considering the effect of hydrate saturation is adopted to reproduce the test results.

Key words:

CO₂, Gas hydrate, Sand, Creep, Elasto-viscoplastic, Constitutive model

1 緒 言

2016 年 11 月, 地球温暖化対策の国際的合意であるパリ協定が発効された。これを受け, 近年各国で化石燃料から再生可能エネルギーへの転換, ガソリン車から電気自動車への転換 (EV シフト), 省エネルギーの進展などの対策が進められている。わが国も, 「2030 年までに 2013 年比で温室効果ガス排出量を 26%削減する」という目標を定めており, これを踏まえたエネルギー消費のあり方が議論されている。

温室効果ガスの中心となる CO₂ の排出量を削減するための長期的な方策としては, エネルギー消費を減らす, エネルギー効率を上げる, 化石燃料から再生可能エネルギーなどへの転換が挙げられる。しかし, 世界的な人口増加・エネルギー需要の増加傾向は今後も続くと予測されており, 排出量自体を急激に削減することは, 現実的には難しい。そこで, 二酸化炭素地中貯留 (Carbon dioxide Capture and Storage, 以下 CCS) が考えられる。CCS は, 火力発電所や製鉄所などの大規模な発生源から回収した CO₂ を地中あるいは海洋に注入し, 貯留・隔離する技術であり, CO₂ 排出削減に貢献することが期待されている。

CCS プロジェクトは, 米国および欧州で先行的に進められてきた。現在世界の大規模プロジェクトは運転中のものが 17 件あり, その多くは天然ガス精製に伴う CO₂ を

回収し油層に圧入する石油増進回収 (EOP) タイプである^{1),2)}。わが国でも, エネルギー基本計画に沿って CCS 技術の実用化を目指し, 苫小牧において 2012 年度より CCS 大規模実証試験が開始され 2016 年から圧入が開始されている。苫小牧実証試験では, 商業運転中の製油所で発生する CO₂ を分離・回収し, 苫小牧沖の 2 つの貯留層 (海底下 1,100~1,200 m と 2,400~3,000 m) に超臨界流体の状態 (31.1 °C 以上かつ 7.4 MPa 以上, Fig. 1 参照) で圧入する。

苫小牧プロジェクトのような貯留方式は「帯水層貯留」と呼ばれる。超臨界状態の二酸化炭素の密度は海水の 1/2 程度と小さいため, 間隙の大きい貯留層 (砂岩など) の上部に, CO₂ を通しにくい低透水性の遮へい層 (泥岩など) をもつ地質構造が不可欠であり, 貯留可能地点は限られる。一方, CO₂ をハイドレート化して海底地盤中に貯留する方法が提案されている。この方法では, Fig. 1 の CO₂ ハイドレート安定領域で CO₂ と海水を反応させ, 固体のハイドレートとして化学的に固定するため, 超臨界状態や気体の場合より漏洩しにくいことが考えられる。また, 遮へい層は必要ではないため, 実用化されれば貯留適地の拡大が期待できる³⁾。

以上の背景をふまえ, 本研究では CO₂ ハイドレート生成後の地盤の基本的な力学特性を調べるため, ハイドレート含有砂試料を作製して力学特性について検討した。

† 原稿受理 平成 31 年 4 月 10 日 Received Apr.10, 2019 ©2019 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂
Dept. Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University, Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540.

** 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂
Dept. Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University, Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540.

特に、ガスハイドレートは時間依存性挙動を示すことから、クリープ挙動に着目して非排水条件で三軸クリープ試験を行った。また、ハイドレート含有を考慮した弾粘塑性構成式を用いて、その再現解析を行った結果を示す。

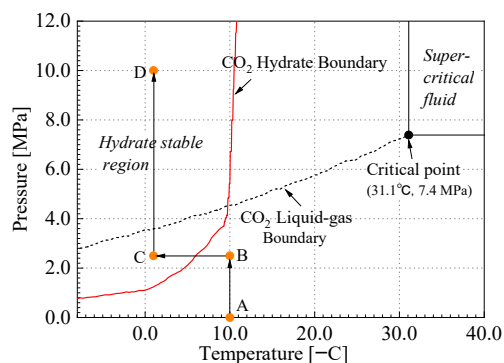


Fig. 1 Equilibrium curve of CO₂ hydrate and state path during sampling preparation and creep tests (hydrate equilibrium data is from Sloan and Koh (2007)⁴⁾).

2 ハイドレートと地盤材料のクリープ特性

ガスハイドレートとは、一般に水分子が水素結合によりケージ状の構造単位を作り（これをホストという）、その中にガス分子（ゲスト）が包摂された化合物群のことである。ホストである氷がゲストをケージの中につかむことにより、ケージ中にガス分子が均質に分散し、低温高压下で固体として安定に存在する⁵⁾。

メタンや二酸化炭素など比較的小さいゲスト分子の場合、structure-I型と呼ばれるハイドレート結晶構造をもつが、この場合ゲスト分子1個に対して水分子5.75個が結合するため、モル比率で85%以上は水分子から成る。そのため、物性は氷の物性と類似していると考えられる。ゲスト分子によって若干異なるが、例えば、メタンハイドレートの体積弾性係数は5.6~8.8 GPa、氷の体積弾性係数は8.8~9.1 GPaであることが報告されている⁶⁾。また、氷は水素結合結晶の塑性により顕著なクリープ挙動を示すことが知られている。ガスハイドレートもクリープを示すが、メタンハイドレートのクリープ変形は、氷と比較して小さいとされている⁷⁾。

地盤材料については、特に粘性土や岩盤は顕著な時間依存性挙動を示すことが知られており、粘性土の非排水クリープや、岩盤の一軸圧縮クリープに関するデータは、これまで数多く報告されている^{7,8)}。砂質土については、粘土や岩盤ほど顕著ではないが、例えば Benedetto et al. (2002)⁹⁾は、飽和砂試料がひずみ速度急変時の応力の増減、クリープ、応力緩和などの時間依存性挙動を示すことを報告している。砂質土のクリープ破壊（加速クリープ）については、それほど実験データはないが、Murayama et al. (1984)¹⁰⁾や Enomoto et al. (2015)¹¹⁾は、クリープ応力レベルが大きい場合、飽和砂がクリープ破壊を示すことを報告している。

ガスハイドレートの中で、ここ数十年もっとも脚光を浴びているのは、資源としての利用が期待されるメタンハイドレートである。メタンハイドレート含有砂の力学特性については、その資源開発を進めるわが国で先駆的に研究が進められてきた。実験室で作製した人工試料によるものが多いが、近年では南海トラフ海底採取試料を用いた力学試験データも得られている¹²⁾。時間依存性に着目した研究例は多くはないが、宮崎ら (2009)¹³⁾はメタンハイドレートを含む砂試料を作製し、三軸排水クリープ挙動を調べ、クリープ中のひずみ速度の増加を報告している。メタンハイドレート含有砂とCO₂ハイドレート含有砂の力学特性を比較した試験データは多くはないが、例えば Hyodo et al. (2014)¹⁴⁾は、三軸排水挙動を比較し、初期剛性はCO₂ハイドレートのほうが小さいが、残留強度はあまり変わらないとしている。

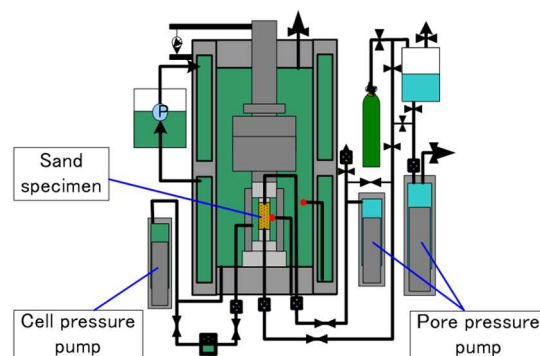


Fig. 2 Temperature controlled high-pressure triaxial apparatus.

3 ハイドレート含有砂試料の準備

低温・高压条件を再現するため温度制御型高压三軸試験装置 (Fig. 2) を使用した。外側のセル壁内部に冷却液循環室を設けており、温度制御した低温冷却液（エチレングリコール系ブライン）を循環させることで、供試体の温度を制御している。供試体の温度は内セル内部に設置した温度センサーにより計測する。また、供試体上下で独立に圧力制御できるよう、間隙圧増幅器をそれぞれに設けている。装置の詳細については Iwai et al. (2018)¹⁵⁾を参照されたい。

Fig. 1 に CO₂ ハイドレート平衡曲線と CO₂ 気体-液体境界線を示す。また図中の A→B→C→D の矢印は、供試体作製過程の温度-圧力状態の変化を表している。砂試料には豊浦砂（平均粒径 0.24 mm, 均等係数 1.27）を用いた。ガスハイドレート含有試料の作製法は、氷とガスを反応させる Ice seeding method, 溶解ガスを用いる Dissolved gas method などいくつか提案されているが¹⁶⁾、本研究では Partial water saturation method にて作製した。この方法では、含水比調整し締固めた不飽和状態の砂試料にガスを圧入後 (Fig. 1, A→B), 平衡条件を満たすように温度を下げることでハイドレートを生成する (Fig. 1, B→C)。その後、海底の地盤状態を模擬するため、試料中のガスを水で置換して水飽和状態にし、間隙圧を 10 MPa（水深 1000 m）

まで上昇させた (Fig. 1, C→D). また, 平均有効拘束圧が 2 MPa (海底面下 300 m~500 m 相当) となるようセル圧を 12 MPa まで上昇させた. なお, 供試体に被せるゴムメンブレンには, CO₂ の浸透を防ぐため, 通常のラテックス製ではなくクロロブレン製で厚さ 0.5 mm のものを用いた. セン断・クリープ試験時の供試体温度はすべて 1 °C とした.

4 クリープ試験

ハイドレート飽和率を変えて, 非排水三軸クリープ試験を行った. ハイドレート飽和率 S_r^H は, 間隙 (土粒子以外) の体積 V^v に対するハイドレートの体積 V^H の比率であり, 次式で定義される. なお本研究では, ハイドレートの体積 V^H は, 試験後にハイドレートを分解し回収されたガスの体積から換算して求めた.

$$S_r^H = \frac{V^H}{V^v} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

非排水条件下で定ひずみ速度 0.5 %/min で所定の軸差応力に至るまでせん断し, 軸差応力を一定に制御してクリープ試験を行った. 実験条件を Table 1 に示す. Case S はハイドレートを含まない豊浦砂, Case H1 は $S_r^H = 21.8 \%$, Case H2 は $S_r^H = 40.0 \%$ である. Table 1 中のクリープ応力比 q_r は, 供試体の最大軸差応力 q_{max} とクリープ応力 q との比として以下の式で定義される.

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

最大軸差応力 q_{max} は, 既往の単調試験データよりハイドレート飽和率に依存することが確認されており, 以下の式で表される.

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

Table 1 Testing conditions.

	Hydrate saturation S_r^H [%]	Creep stress [MPa]	Creep stress ratio
Case S	0	3.5	0.84
Case H1	21.8	4.0	0.86
Case H2	40.0	4.0	0.71

5 弾粘塑性構成式

3次元応力状態に対する粘塑性体の構成式は, ビンガム体を一般化した形で Hohenemser and Prager (1932)¹⁷⁾によって最初に定式化された. Perzyna (1963)¹⁸⁾はこれに非線形の材料関数を導入し, 超過応力型の弾粘塑性モデルを提案した. ビンガム体を一般化した他の粘塑性モデルとしては, Duvaut-Lions によるモデルがある^{19), 20)}. Duvaut-Lions のモデルでは, 現在の応力点か

ら降伏曲面への直交射影で求められる応力との差によって粘塑性ひずみ速度が発生する. 本研究では, 金属や地盤材料の弾粘塑性モデルとして広く用いられている Perzyna の粘塑性理論に Camclay 型の関数を導入した, Adachi and Oka (1982)²¹⁾のモデルに基づく弾粘塑性構成式を用いた.

用いた構成式は, 木元ら(2015)²²⁾のガスハイドレート含有による硬化を考慮した弾粘塑性構成式に, 弾性定数および粘塑性パラメータのハイドレート飽和率依存性を考慮して拡張した構成式である²³⁾. 構成式中の材料定数は Table 2 のとおりである. まず, 次式で過圧密境界面を定義し, 正規圧密領域 $f_b \geq 0$ と過圧密領域 $f_b < 0$ の境界を与える.

$$f_b = \bar{\eta}_{(0)}^* + M_m^* \ln(\sigma'_m / \sigma'_{mb}) = 0 \quad (4)$$

$$\eta_{(0)}^* = \left\{ \left(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^* \right) \left(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^* \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$\eta_{ij}^* = S_{ij} / \sigma'_m$ は応力比テンソル, S_{ij} は偏差応力テンソル, σ'_m は平均有効応力, $\eta_{ij(0)}^*$ は初期の応力比テンソル, M_m^* は変相応力比である. σ'_{mb} は硬化・軟化パラメータであり, 粘塑性体積ひずみ ε_{kk}^{vp} による硬化・軟化を次式で与える.

$$\sigma'_{mb} = N_m \sigma'_{ma} \exp \left(\frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} \varepsilon_{kk}^{vp} \right) \quad (6)$$

時間経過後の静的平衡状態を表す静的降伏面は,

$$f_y = \bar{\eta}_{(z)}^* + \tilde{M}^* \ln(\sigma'_m / \sigma'_{my}^{(s)}) = 0 \quad (7)$$

$$\eta_{(z)}^* = \left\{ \left(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^* \right) \left(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^* \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

χ_{ij}^* は非線形移動硬化パラメータである. $\sigma'_{my}^{(s)}$ の硬化・軟化則は,

$$\sigma'_{my(s)} = \frac{N_m \sigma'_{ma}}{\sigma'_{mai}} \sigma'_{myi}^{(s)} \exp \left(\frac{1 + e}{\lambda - \kappa} \varepsilon_{kk}^{vp} \right) \quad (9)$$

$\sigma'_{myi}^{(s)}$ は $\sigma'_{my}^{(s)}$ の初期値である. 過圧密境界面と静的降伏面中の σ'_{ma} について, 以下の式で内部構造劣化による軟化を考慮する.

$$\sigma'_{ma} = \sigma'_{maf} + (\sigma'_{mai} - \sigma'_{maf}) \exp(-\beta z) \quad (10)$$

$$z = \int_0^t \dot{z} dt, \quad \dot{z} = \sqrt{\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} \dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}} \quad (11)$$

z は粘塑性ひずみ速度の第二不変量の蓄積量である.

σ'_{maf} は構造劣化の程度, β は構造劣化の速度を表す材料定数である. 本構成式では, 後述するように内部構造劣化の導入によって加速クリープを再現することができる. 粘塑性ポテンシャル面は静的降伏面と同形で次式により与える.

$$f_p = \bar{\eta}_{(z)}^* + \tilde{M}^* \ln(\sigma'_m / \sigma'_{mp}) = 0 \quad (12)$$

σ'_{mp} は粘塑性ポテンシャル関数と σ'_m 軸の交点で, $\tilde{M}^*$ は正規圧密領域で一定値 M_m^* , 過圧密領域では応力状態によって変化する ($< M_m^*$). 粘塑性ひずみ速度テンソル $\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}$ は Perzyna の超過応力型流れ則により次式で与える.

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = \begin{cases} \gamma \Phi_{ijkl}(f_y) \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{kl}} & : f_y > 0 \\ 0 & : f_y \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

Φ_{ijkl} は速度依存性を表す材料関数であり、実験結果に基づき 4 階の等方テンソル C'_{ijkl} を用いて次式で定義される。

$$\gamma \Phi_{ijkl}(f_y) = C'_{ijkl} \sigma'_m \exp(m' f_y) \quad (14)$$

m' は時間依存性を表す粘塑性パラメータである。

本研究では、せん断弾性係数および粘塑性パラメータについて、ハイドレート飽和率 S_r^H による影響を導入した。まず、せん断弾性係数について、ひずみ依存性、応力依存性、ハイドレート飽和率依存性を考慮して以下のように表した。

$$G = \left(\frac{G_0}{1 + \alpha^b (\gamma^{vp})^r} \right) \sqrt{\frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m0}}}, \quad b = 1 + S_r^H \quad (15)$$

$$G_0 = G_{0s} + n_g S_r^H \quad (16)$$

γ^{vp} は粘塑性偏差ひずみの蓄積量である。 n_g はハイドレート飽和率依存性に関する材料定数である。次に、過圧密境界面および静的降伏面のハイドレート含有による拡大を、硬化パラメータ中の係数 N_m で表す。

$$N_m = 1 + n_m \cdot (S_r^H)^{n_d} \quad (17)$$

n_d , n_d はハイドレート飽和率依存性に関する材料定数である。時間依存性のハイドレート飽和率依存性については、先述のとおり飽和率 S_r^H が高いほど、時間依存性が顕著になることが分かっている。別途実施したひずみ速度急変試験結果へのフィッティングにより、 m' (値が小さいほど時間依存性が大きい) は S_r^H の減少関数、初期粘塑性ひずみ速度を表す C_1 は S_r^H の増加関数、初期粘塑性体積ひずみ速度を表す対応 C_2 は S_r^H の減少関数となり、以下の式で表される²³⁾。

$$m' = \frac{1}{1/m'_s + m_b (S_r^H)^{m_c}} \quad (18)$$

$$C_1 = C_{1s} \left\{ 1 + c_{1b} (S_r^H)^{c_{1c}} \right\} \quad (19)$$

$$C_2 = \frac{C_1}{C_{2s}/C_{1s} + c_{2b} S_r^H} \quad (20)$$

m'_s, C_{1s}, C_{2s} はそれぞれ豊浦砂の m', C_1, C_2 である。 $m_b, m_c, c_{1b}, c_{1c}, c_{2b}$ は粘塑性のハイドレート飽和率依存性に関するパラメータである。

以下ではまず、内部構造パラメータ β についてパラメトリックスタディを行った。解析に用いた材料パラメータを Table 2 に示す (ただし β を除く)。ハイドレート飽和率依存性に関するパラメータ以外は、豊浦砂の単調載荷試験を再現できるように決定した。ハイドレート飽和率依存性パラメータは、既往のハイドレート含有砂試料の単調載荷試験をもとに決定した²³⁾。なお、本研究で示す解析結果はすべて、構成式を三軸条件下で書

き下し、ルンゲ・クッタ法を用いて数値解を求めたものである。

実験条件と同様に、定ひずみ速度 0.5 %/min でクリープ応力 (4MPa) に至るまでせん断した後、軸差応力一定の条件を与えクリープの解析を行った。Fig. 3 に応力ひずみ関係、Fig. 4 および Fig. 5 にクリープ中の時間-ひずみ関係と時間-クリープ速度関係をそれぞれ示す。Fig. 5 より、 $\beta=0$ の場合はクリープ中のひずみ速度は減少し続けるのに対し、 $\beta=2.5, 5.0, 7.5$ の場合はいずれもひずみ速度が増加に転じる加速クリープを再現している。 β が大きいほどクリープ開始時の粘塑性ひずみおよび粘塑性ひずみ速度が大きく、加速クリープ開始までの時間が短くなっている。

Table 2 Material parameters.

Initial mean effective stress σ'_0 [kPa]	2000
Initial void ratio e_0	0.74
Compression yield stress σ'_{mbi} [kPa]	3000
Compression index λ	0.112
Swelling index κ	0.0026
Initial elastic modules G_{0s} [kPa]	120000
Hydrate dependency of G_0 n_g [kPa]	103000
Strain dependency of G α	4.0
Stress ratio at critical state M_m^* γ	0.5
Hardening parameter A^*	0.98
Hardening parameter B^*_{max}	40
Hardening parameter B^*_1	20
Hardening parameter C_f	5
Structural parameter σ'_{maf} [kPa]	2500
Viscoplastic parameter m'_s	66.7
Hydrate dependency of m' m_b	0.22
Viscoplastic parameter C_{1s}, C_{2s} [1/s] m_c	1.41
Hydrate dependency of C_1 c_{1b}	3.0×10^{-11}
Hydrate dependency of C_2 c_{1c}	5.8×10^5
Hydrate saturation dependency N_m c_{2b}	2.6
Structural parameter β n_m	6.1
	2.9×10^{-3}
	1.3
	0 (Case S)
	2.65 (Case H1)
	7.25 (Case H2)

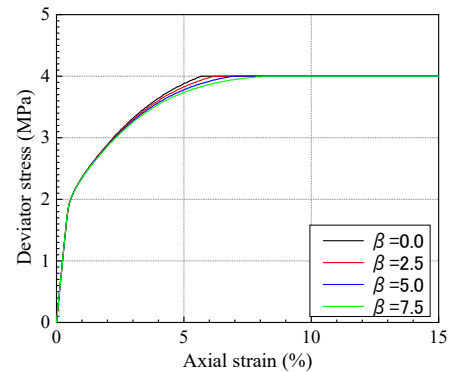


Fig. 3 Effect of structural parameter β (Stress-strain relations).

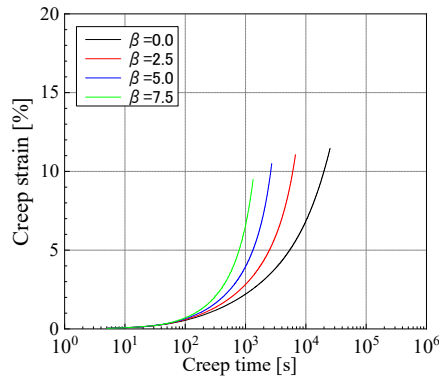


Fig. 4 Effect of structural parameter β (Time-creep strain relations).

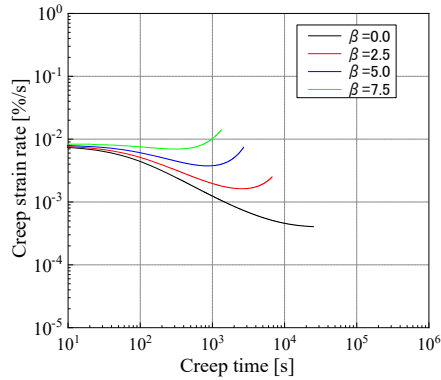


Fig. 5 Effect of structural parameter β (Time-creep strain rate relations).

6 結果と考察

Fig. 6～Fig. 9 に非排水三軸クリープ試験結果（実線）、および構成式による再現解析（点線）を示す。材料パラメータは Table 2 に示したとおりである。内部構造パラメータ β については時間-クリープひずみ、時間-クリープひずみ速度関係にカーブフィッティングすることにより Case S は $\beta=0$ 、Case H1 は $\beta=2.65$ 、Case H2 は $\beta=7.25$ とした。まず、Fig. 6 に示す軸差応力-ひずみ関係より、ハイドレート飽和率が高いほど軸差応力が大きく、クリープ開始時のひずみは小さい。その傾向は再現できているが、Case H1、H2 では軸差応力を過大評価している。また Fig. 7 に示す有効応力経路では、せん断初期の平均有効応力の減少を過少評価している。今回の解析では、 β 以外のパラメータについては別途実施した単調荷重試験とひずみ速度急変試験によって決定した²³⁾ものを用いたが、試料作成過程で特にハイドレート生成過程によって個体差が生じている可能性が考えられる。

Fig. 8～Fig. 10 にクリープ中の時間-クリープひずみ、時間-クリープひずみ速度関係図を示す。豊浦砂（Case S）の場合、クリープひずみは小さく、ひずみ速度は単調減少して加速クリープには移行しない。Case H1、H2 の場合、加速クリープ（クリープ破壊）を生じている。ハイドレート飽和率が小さい Case H1 のほうがクリープひずみが大きく、クリープ破壊に至る時間も短い。これは、ハイドレート飽和率が小さいほうが強度が小さいため、式(2)で定義

されるクリープ応力比が大きいためである。解析ではこれらの傾向をよく再現している。

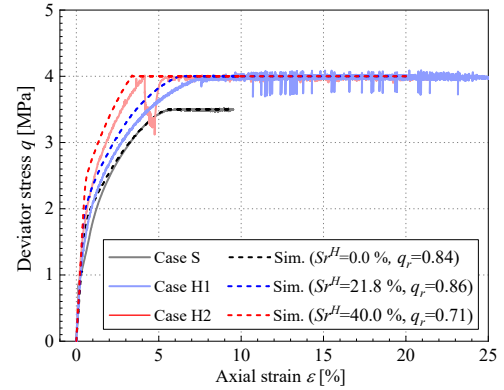


Fig. 6 Stress-strain relations (Undrained triaxial creep).

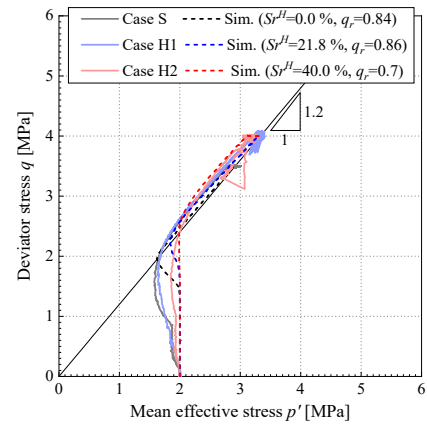


Fig. 7 Effective stress paths (Undrained triaxial creep).

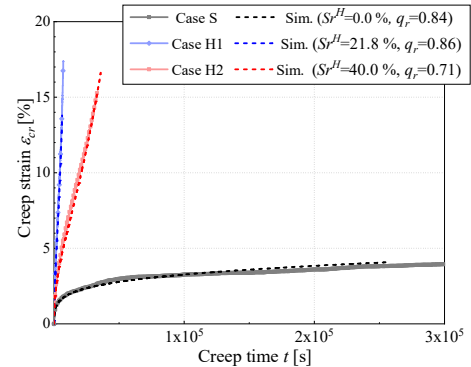


Fig. 8 Time-strain relations (Linear scale, Undrained triaxial creep).

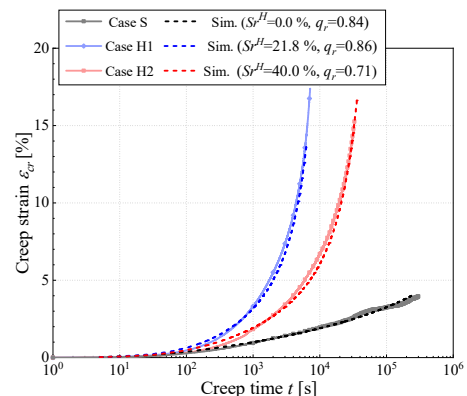


Fig. 9 Time-strain relations (Log scale, undrained triaxial creep).

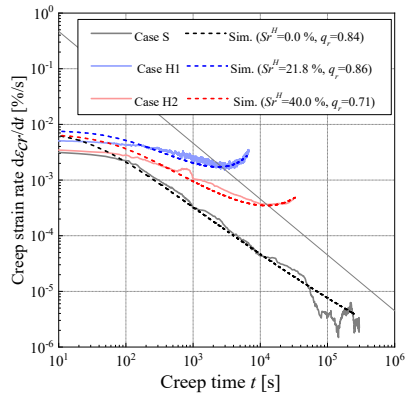


Fig. 10 Time-strain rate relations (Undrained triaxial creep).

7 結 言

本研究では、豊浦砂を用いて CO₂ ハイドレート含有砂試料を作製し、非排水条件下でクリープ挙動について検討した。応力条件は海底地盤を想定して有効拘束圧 2MPa とした。その結果、ハイドレート含有砂試料は軸差応力 4MPa 下で加速クリープを示した。また、ハイドレート含有を考慮した弾粘塑性構成式を用いて、その再現解析を行った。今後、さらに実験データの蓄積が必要である。

参 考 文 献

- 1) Ministry of Economy, Trade and Industry, "Current status of CCS", June 11th, 2018 (in Japanese), https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs_jissho/pdf/001_05_00.pdf (2018).
- 2) Ministry of Environment, "CCS project in Japan", Sep. 5th, 2017 (in Japanese), <https://www.env.go.jp/council/06earth/y0618-17/ref01.pdf> (2017).
- 3) T. Tobase, G. Orugawa, Y. Ikegawa and H. Kimura, "A proposal of CO₂ underground storage using hydrate", Proc. 45th Symposium on Rock mechanics, JSCE, Jan. 2018, (in Japanese), No. 41 (2018).
- 4) E.D. Sloan and C.A. Koh, "Clathrate Hydrates of Natural Gases Third Edition", CRC Press Taylor and Francis Group, pp.379-386 (2007).
- 5) H. Hirai and H. Kadobayashi, "Changes in phases and physical properties of gas hydrates under low to high temperatures and high pressures and their implications of interiors of icy bodies", Journal of the Crystallographic society of Japan, 60, pp.54-61 (2018).
- 6) E.D. Sloan and C.A. Koh, "Clathrate hydrates of natural gases third edition", CRC Press Taylor and Francis Group, pp.93-97 (2007).
- 7) L. Finn and D. Shead, "Creep and creep rapture of a sensitive clay in dynamic compression", 8th ICSMFE, Moscow, Vol.1.1, pp.135-142 (1973).
- 8) R.D. Lama and V.S. Vutukuri, H., Translated by Masuda, S. Tanaka, "Handbook on mechanical properties of rocks -Testing techniques and results- Volume I" (in Japanese), p.209 (1999) Kokon-shoin.
- 9) H.D. Benedetto, F. Tatsuoka and M. Ishihara, "Time-dependent shear deformation characteristics of sand and their constitutive modelling", Soils and Foundations, Vol. 42, No.2, pp.1-22 (2002).
- 10) S. Murayama, K. Michihiro and T. Sakagami, "Creep characteristics of sands", Soils and Foundations, Vol. 24, No. 2, pp.1-15 (1984).
- 11) T. Enomoto, J. Kosekik, F. Tatsuoka and T. Sato, "Creep failure of sands exhibiting various viscosity types and its simulation", Vol. 55, No. 6, pp.1346-1363 (2015).
- 12) J. Yoneda, A. Masui, Y. Konno, Y. Jin, K. Egawa, M. Kida, T. Ito, J. Nagao and N. Tenma, "Mechanical properties of hydrate-bearing turbidite reservoir in the first gas production test site of the Eastern Nankai Trough", marine and Petroleum Geology, Vol. 66, No. 2, pp.471-486 (2015).
- 13) K. Miyazaki, T. Yamaguchi, Y. Sakamoto, H. Haneda, Y. Ogata, K. Aoki and S. Okubo, "Changes in phases and physical properties of gas hydrates under low to high temperatures and high pressures and their implications of interiors of icy bodies" (in Japanese), Journal of MMIJ, Vol. 125, pp.156-164 (2009).
- 14) M. Hyodo, Y. Li, J. Yoneda, Y. Nakata, N. Yoshimoto, S. Kajiyama, A. Nishimura and Y. Song, "A comparative analysis of the mechanical behavior of carbon dioxide and methane hydrate-bearing sediments", American Mineralogist, Vol. 99, pp.178-183 (2014).
- 15) H. Iwai, Y. Konishi, K. Saimyou, S. Kimoto and F. Oka, "Rate effect on the stress-strain relations of synthetic carbon dioxide hydrate-bearing sand and its dissociation test by thermal stimulation", Soils and Foundations, Vol. 58(5), pp.1113-1132 (2018).
- 16) W.F. Waite, J.C. Santamarina, D.D. Cortes, B. Dugan, D.N. Espinoza, J. Germaine, J. Jang, J.W. Jung, T.J. Kneafsey, H. Shin, K. Soga and W.J. Winters, "Physical properties of hydrate-bearing sediments". Reviews of Geophysics 47(RG4003), pp.1-38 (2009).
- 17) K. Hohenemser and W. Prager, "Über die Ansätze der mechanik isotroper continua", ZAMM - Z. Angew. Math. Mech. Vol. 12, No. 4, pp. 216-226 (1932).
- 18) P. Perzyna, "The constitutive equations for rate sensitive plastic materials", Quarterly of Applied Mathematics, Vol. 20, No. 4, pp. 321-332 (1963).
- 19) G. Duvaut and J.L. Lions, "Inequalities in Mechanics and Physics", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, Chapter VI (1976).
- 20) W. M. Wang, L. J. Sluys, R and De Borst, "Viscoplasticity for instabilities due to strain softening and strain-rate softening", International Journal of Numerical Methods in Engineering, Vol. 40, pp. 3839-3864 (1997).
- 21) T. Adachi and F. Oka, "Constitutive equations for normally consolidated clay based on elastoviscoplasticity", Soils and Foundations, 22, No. 4., pp.57-70 (1982).
- 22) S. Kimoto, H. Iwai, K. Saimyo, T. Shindo and F. Oka, "Application of an elasto-viscoplastic model to the gas-hydrate bearing soil" (in Japanese), Journal of Society of Material Science, Vol.64, No.4, pp.317-322 (2015).
- 23) H. Iwai, Y. Konishi and S. Kimoto, "Time dependent behavior of CO₂-hydrate-bearing sediments and application of elasto-viscoplastic constitutive model" (in Japanese), Journal of JSCE, Vol. 75, No.3, pp.273-287 (2019).