第Ⅲ部門　　CO_2 ハイドレート含有砂試料の非排水三軸クリープ試験

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
京都大学大学院　学生会員　　田窪　尭

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っており，日本では「メタンハイドレート資源開発コンソーシアム」を中心に 2001 年以来メタンハイドレート（以下 MH と表記する）の研究開発が行われている．MH の分解は吸熱反応であり，減圧法での分解・回収時には熱の供給が必要である．そこで，MH 堆積層内に CO_2 ガスを圧入して CO_2 ハイドレートを生成し，発生した生成熱を用いて，MH の分解を増進させる技術が注目されている．MH と CO_2 ハイドレートが置換されることで地盤変形やメタンガスの漏洩リスクを軽減すると同時に，温室効果ガス削減の効果が期待される．しかし，CO_2 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い．そこで，本研究は，CO_2 ハイドレート含有地盤の物性把握，特に時間依存性挙動の把握のため，人工的に CO_2 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．

2.　試験概要

CO_2 ハイドレートを生成する低温・高圧条件を再現可能な温度制御型高圧三軸試験装置を使用した．試験装置の概要を**図 2-1** に示す．豊浦砂を使用し，含水比 16.0 %，直径 35 mm，高さ 70 mm の凍結砂供試体を作製する．供試体作製における温度圧力条件を CO_2 ハイドレート平衡条件と MH の平衡条件とともに，**図 2-2** に示す．三軸セル内に設置した供試体に CO_2 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_2 ハイドレートを生成する．その後，供試体に通水を行い，供試体を水，CO_2 ハイドレート，土粒子の三相で構成された CO_2 ハイドレート含有砂供試体を作製する．背圧上昇により，間隙圧を増加させ，等方圧密後，供試体を非排水条件の下でひずみ速度 0.5 %/min の定ひずみ速度のせん断を行う．その後，所定のクリープ応力に至ると，軸差応力を一定とし，非排水三軸クリープ試験を実施する．また，供試体の間隙体積 Vv と供試体内のハイドレートを分解し，回収されたガス体積から求められる CO_2 ハイドレート体積 V_H との比をハイドレート飽和率 Sr^H とし，式(1)のように表す．

$$Sr^H = V_H/V_v \times 100 \quad [\%] \tag{1}$$

供試体の最大軸差応力q_{max}[1]とクリープ応力qとの比をクリープ応力比q_rとして以下の(2)式で表す．q_{max}はハイドレート飽和率に依存し，既往の実験データより，式(3)のように表される．

$$q_r = q/q_{max} \tag{2}$$

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

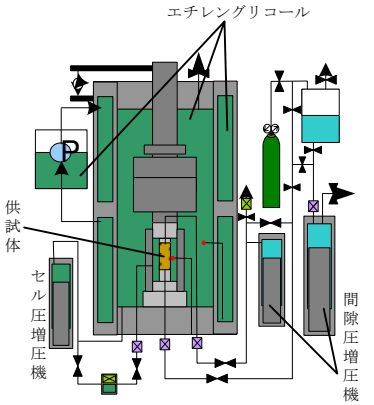

図2-1　温度制御型高圧三軸試験装置

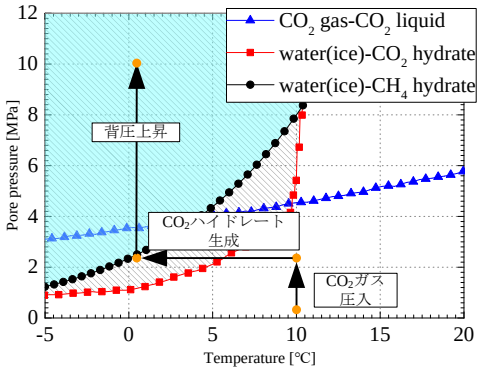

図2-2　CO_2ハイドレート平衡条件とMH平衡条件

3.　実験結果

既往の研究[1]で実施されたハイドレートを含有しない飽和豊浦砂 Case S と CO_2 ハイドレート含有砂試料 Case H2, Case H3 の 3 ケースと本研究で新しく実施された Case H1，Case H4 の 2 ケースをあわせて考察し，CO_2 ハイドレート含有砂試料の非排水三軸クリープ挙動の把握を行う．実験条件を**表 3-1** 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 10.0MPa，初期平均有効応力 2.0 MPa の下で実施した．Case H4 は試験装置の故障により，正確なハイドレート飽和率が測定できなかったため，推測される値を記載した．

Masaki Yoshimoto, Sayuri Kimoto, Gyo Takubo
yoshimoto.masaki.44w@st.kyoto-u.ac.jp

1) 有効応力径路

図 3-2 に等方圧密し，定ひずみ速度のせん断後，クリープ応力を載荷し，試験を終了までの有効応力を示す．CO_2 ハイドレート含有，非含有砂供試体の全ケースにおいて，平均有効応力が減少し，減少が収束した後，限界状態線を上回りながら増加に転じ，限界状態線に向かう挙動がみられた．.

2) 時間-クリープひずみ関係

図3-2にクリープ時の対数時間-クリープ中の軸ひずみ関係を示す．この図から，Case S の飽和豊浦砂の試験結果は，時間の経過とともにクリープひずみが増加する様子が確認されが，クリープひずみは4.0％程度に収束した．これに対し，ハイドレート含有砂供試体 Case H1～Case H4 では，クリープひずみが時間の経過とともに急速に増加する挙動が確認された．このグラフから，飽和豊浦砂供試体は CO_2 ハイドレート含有によって，顕著な時間依存性挙動を示した．ここで，Case H1～Case H4 の実験比較を行うと，クリープ応力比が大きい供試体ほど時間経過によるクリープひずみがより急速に増加した．

3) 時間-クリープひずみ速度関係

図 3-3 に時間-クリープひずみ速度関係を示す．既往の研究の飽和豊浦砂供試体の試験結果 Case S では，クリープ開始から 100 s までの間ではひずみ速度がほぼ一定の値を示した後，ひずみ速度が減少し続け，明確な定常・加速クリープはみられなかった．ハイドレート含有砂供試体の Case H1～Case H4 では，クリープ開始から 100 s まで一定のひずみ速度をとる様子は概ねハイドレート非含有砂と同様の挙動であったが，ひずみ速度が減少する遷移クリープ，ひずみ速度の減少が収束した後，一定となる定常クリープの挙動が確認された．ここで，図 3-3 において，ハイドレート非含有砂供試体の遷移クリープの速度減少の傾きは，0.3～0.5 程度であり，ハイドレート非含有砂供試体よりも緩やかであった．Case H4 の結果では，クリープひずみ速度が最小値を記録した後，再び増加する加速クリープの挙動は確認されなかったが，Case H1～Case H3 では，加速クリープの挙動がみられた．また，最小クリープひずみ速度$\dot{\varepsilon}_m$と，それを記録する時間 t_m には線形関係があることが確認され，以下の式で表された．

$$\log_{10} \dot{\varepsilon}_m = -0.97 \log_{10} t_m + 0.64$$

また，CO_2 ハイドレート含有砂供試体のクリープ中のひずみ速度は，クリープ応力の増加に伴い大きくなった．

4. 結論

CO_2 ハイドレートの含有によって顕著なクリープ挙動を示し，その挙動はクリープ応力比に大きく依存した．本研究では，クリープ応力 4.0 MPa，初期平均有効応力 2.0 MPa のクリープ試験を実施したが，今後はクリープ応力比が同じハイドレート含有砂供試体のハイドレート飽和率の影響やクリープ挙動の初期平均有効応力依存性についても検討する．

参考文献

1) 小西ほか，第 52 回地盤工学研究発表会, pp.351-352, 2017.

表 3-1 クリープ試験条件

	Hydrate saturation Sr^H [%]	Creep stress q [MPa]	Creep stress ratio q_r
Case S	0.0	3.5	0.84
Case H1	21.8	4.0	0.86
Case H2	40.0	4.0	0.71
Case H3	41.4	4.5	0.84
Case H4	50*	4.0	0.69*

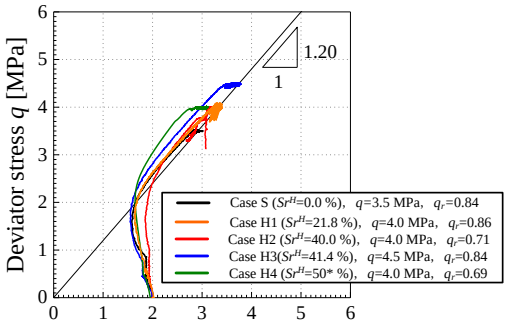

図3-1 有効応力径路

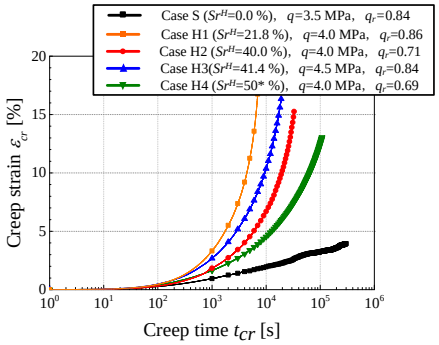

図3-2 時間-クリープひずみ関係

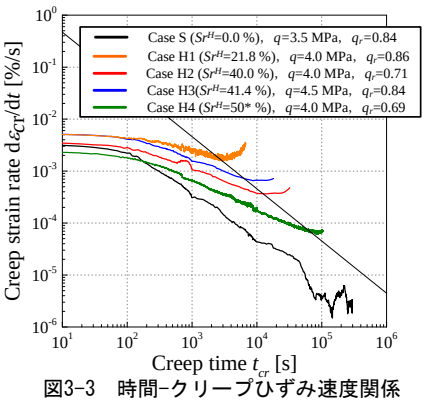

図3-3 時間-クリープひずみ速度関係