

CO₂ ハイ ド レ ー ト 含 有 砂 供 試 体 の 時 間 依 存 性 挙 動 に 関 す る 実 験 お よ び そ の モ デ ル 化

名古屋工業大学大学院 正会員 岩井 裕正
 京都大学大学院 学生会員 小西 陽太
 京都大学大学院 正会員 木元 小百合

1. はじめに

近年、日本近海に存在するメタンハイドレート(以下、MH と記す)が、新しいエネルギー資源として着目されている。経済的に MH を天然ガス資源として利用するためには、1つの生産サイトにおいて長期間 MH を生産し続けることが必要であり、数十年単位で海底地盤の変形や力学特性を把握することが要求される。そのため MH 含有地盤の時間依存性挙動の把握と、それを的確に表現する構成モデルの構築が課題である。また、近年検討されている地盤内での二酸化炭素ハイドレート(以下、CO₂ ハイドレート)の生成熟を利用した MH 増進回収法などについても、上述の構成モデルの構築は CO₂ ハイドレートを含有する人工地盤の長期に渡る安全性の評価に寄与すると考えられる。そこで本研究では、CO₂ ハイドレートを含有する砂供試体を用いてひずみ速度急変非排水三軸圧縮試験を実施した。また実験結果をもとに時間依存性挙動を記述可能な弾粘塑性構成式による再現を試みた。

2. 実験概要

本研究では、豊浦砂内に CO₂ ハイドレートを生成したハイドレート含有供試体を作製しひずみ制御の非排水三軸圧縮試験を実施した。実験装置には、ハイドレートが生成する海底地盤環境を再現可能な、低温高压三軸試験装置を用いた¹⁾。载荷過程において2種類のひずみ速度を設定し、载荷中ひずみ速度を切り替えることで、CO₂ ハイドレート含有供試体のひずみ速度依存性を調べた。また比較のためにハイドレートを含有しない飽和豊浦砂供試体に対しても同様のひずみ速度急変試験を行い、結果を比較した。

2.1 実験方法および実験条件

本研究では合計で7ケース行った。各ケースの実験諸量を表1に示す。Case-1は比較のために行ったハイドレートを含有しない飽和豊浦砂を用いた試験である。ひずみ速度は基本的には0.005%/minと100倍大きい0.5%/minの2種類を用いたが、Case-2のみ0.005%/minと0.1%/minのひずみ速度を設定し、せん断中にひずみ速度を数回急変させた。飽和率 S_r^H についてはせん断後にCO₂ ハイドレートを分解し、発生したCO₂ ガスの体積から求めた。ここで S_r^H は以下の式で定義される。

$$S_r^H = 100 \times V^H / V^v \quad (1)$$

V^H および V^v は間隙中のハイドレート体積および間隙の体積である。

表-1 実験条件

Case	Initial void ratio	Strain rate [%/min]	Hydrate saturation [%]
Case-1	0.72	0.005 ⇔ 0.5	0.0
Case-2	0.75	0.005 ⇔ 0.1	10.0
Case-3	0.74	0.005 ⇔ 0.5	24.4
Case-4	0.73	0.005 ⇔ 0.5	26.5
Case-5	0.74	0.005 ⇔ 0.5	26.4
Case-6	0.74	0.005 ⇔ 0.5	34.7
Case-7	0.74	0.005 ⇔ 0.5	32.1

3. 弾粘塑性構成式

本研究で用いた構成式は、Kimoto et al. (2015)²⁾のガスハイドレート飽和率依存性を考慮した弾粘塑性構成式である。このモデルは、粘性土など時間依存性挙動を示す材料の構成式として提案されたAdachi and Oka (1982)³⁾による構成式をもとにしている。

3.1 過圧密境界面、静的降伏面、粘塑性ポテンシャル面

本構成式では、過圧密境界面、静的降伏面、粘塑性ポテンシャル面の3つの境界面を与える。応力状態が正規圧密領域にある場合と過圧密領域にある場合に境界を与えるべく、過圧密境界面を定義する。

$$f_b = \bar{\eta}_{(0)}^* + M_m^* \ln(\sigma'_m / \sigma'_{mb}) = 0 \quad (2)$$

$\bar{\eta}_{(0)}^*$ は相対応力比、 M_m^* は体積圧縮から体積膨張へ変化する応力比を示し、 σ'_{mb} は硬化パラメータであり、初期では圧密降伏応力に一致する。ハイドレート飽和率の増加に伴う強度の増加を表現するため以下のように硬化パラメータを設定している。

$$\sigma'_{mb} = N_m \sigma_{ma} \exp\left(\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} \varepsilon_{kk}^{vp}\right) \quad (3)$$

$$N_m = \left[1 + n_m \exp\left\{-n_d \left(\frac{S_r^H}{S_r^H} - 1\right)\right\}\right], S_r^H = \frac{n^H}{n} \quad (4)$$

λ は圧縮指数であり、 κ は膨潤指数である。式(4)によりMH含有による強度増加を表現する。 S_r^H は現在のMH飽和率、 n^H はMH含有率、 n は間隙率であり、 n_m および n_d によって強度の増加度合いおよびその変化速度を調整する。 $f_b \geq 0$ のとき正規圧密領域、 $f_b < 0$ のとき過圧密領域である。また、時間経過後の静的平衡状態を表す静的降伏面は、移動硬化を考慮して次の式で与える。

$$f_y = \bar{\eta}_{(x)}^* + \tilde{M}^* \ln(\sigma'_m / \sigma'_{my}) = 0 \quad (5)$$

$$\bar{\eta}_{(x)}^* = \sqrt{(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)} \quad (6)$$

$$d\chi_{ij}^* = B^* (A^* de_{ij}^{vp} - \chi_{ij}^* d\gamma^{vp}), d\gamma^{vp} = \sqrt{de_{ij}^{vp} de_{ij}^{vp}} \quad (7)$$

$f_y = 0$ が静的平衡状態を示し、 σ'_{my} は静的平衡状態に達する平均有効応力、 B^* , A^* は移動硬化パラメータである。 B^* は粘塑性ひずみの進行に伴う低減を次式で考慮した。

$$B^* = (B_{\max}^* - B_1^*) \exp(-C_f \gamma^{vp}) + B_1^* \quad (8)$$

$B_{\max}^*$, B_1^* は B^* の最大値、最小値であり C_f により調整する。

さらに、粘塑性ポテンシャル面は次式により与える。

$$f_p = \bar{\eta}_{(x)}^* + \tilde{M}^* \ln(\sigma'_m / \sigma'_{mp}) = 0 \quad (9)$$

上式中 σ'_{mp} は粘塑性ポテンシャル関数と σ'_m 軸の交点を表し、 $\tilde{M}^*$ は正規圧密領域では一定、過圧密領域では応力状態によって変化する。

3.2 粘塑性流れ則

粘塑性ひずみ速度テンソル $\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}$ は、Perzyna⁴⁾の超過応力型流れ則により次式で与える。

Key Words : CO₂ ハイ ド レ ー ト, 三 軸 圧 縮 試 験, 構 成 式

連絡先 : 〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学 16 号館 226 号室

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = \gamma \langle \Phi_{ijkl}(f_y) \rangle \frac{\partial f_p}{\partial \sigma_{kl}} \quad (10)$$

上式中 $\langle \Phi_{ijkl}(f_y) \rangle$ は次のように定義される.

$$\langle \Phi_{ijkl}(f_y) \rangle = \begin{cases} \Phi_{ijkl}(f_y) & : f_y > 0 \\ 0 & : f_y \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

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.

$$\gamma \langle \Phi_{ijkl}(f_y) \rangle = C'_{ijkl} \sigma'_m \exp(m' f_y) \quad (12)$$

m' は時間依存性を表す粘塑性パラメータであり, 時間依存性の大きい材料ほどその値は小さくなる.

4. 材料パラメータ

解析に用いたパラメータを表 2 に示す. いずれのケースも応力-ひずみ関係に対して, ひずみ速度急変時の軸差応力の変化を再現できる粘塑性パラメータ m' の値を決定した. ケース間での差異は, 粘塑性パラメータと移動硬化パラメータを変化させて表現を試みた.

表 2 用いた材料パラメータ

Case-No.		Case-4	Case-6
Initial mean effective stress [kPa]	σ'_{m0}	2000	2000
Hydrate saturation [%]	S_r^H	26.5	34.7
Initial void ratio	e_0	0.73	0.74
Strain rate [%/min]	$\dot{\varepsilon}_0$	0.005 $\leftrightarrow$ 0.5	
Initial elastic shear modulus [kPa]	G_0	180000	190000
Compression yield stress [kPa]	σ'_{mbi}	3000	
Compression index	λ	0.0112	
Swelling index	κ	0.0026	
Stress ratio at critical state	M'_m	0.98	
Viscoplastic parameter	m'	20	13
Viscoplastic parameter [1/s]	C_1	8.5×10^{-7}	9.5×10^{-7}
Viscoplastic parameter [1/s]	C_2	7.5×10^{-7}	8.5×10^{-7}
Hardening parameters 1	A	0.98	0.98
Hardening parameters 2	B_{max}	32	20
Hardening parameters 3	B'_i, C_i	9.0, 3.0	5.0, 4.0
CO ₂ -hydrate parameters 1	S_{ri}^H	0.55	
CO ₂ -hydrate parameters 2	n_d	0.45	
CO ₂ -hydrate parameters 3	n_m	0.50	

4. 実験結果および解析結果

時間依存性挙動を示す材料の構成式である Adachi and Oka(1982)³⁾の弾粘塑性構成式において, 材料の時間依存性は粘塑性パラメータ m' によって表される. m' は通常, ひずみ速度を変えた非排水三軸圧縮試験より, 次式を用いて求めることができる.

$$m' = \sqrt{3/2} (\ln \dot{\varepsilon}_a^{(1)} - \ln \dot{\varepsilon}_a^{(2)}) / (q^{(1)}/p' - q^{(2)}/p') \quad (13)$$

$\dot{\varepsilon}_a^{(k)}$ は 2 種類の異なるひずみ速度, $q^{(k)}$ はある等しい平均有効応力 p' における軸差応力である. 今回, CO₂ ハイドレート含有砂供試体のひずみ速度依存性を定量的に評価するために, 得られた有効応力経路から, ひずみ速度依存性に関する粘塑性パラメータ m' の算定を行った. Case-1 から Case-7 までの有効応力経路から, 式(13)を用いて m' を算定し, ハイドレート飽和率との関係を調べた. ハイドレート飽和率と m' の関係をプロットしたものを図 1 に示す. 図 1 から, 飽和豊浦砂供試体(Case-1)の m' は 169.5 となり, 砂供試体のひずみ速度依存性は小さいということが分かる. Case-2 は, ハイドレート飽和率が 10.0% と今回の実験では比較的ハイドレートの含有量は少なく, m' の値も 147.7 となったが, ハイドレート非含有である Case-1 と比較するとその値は小さくなっており, CO₂ ハイドレートがわずかにあれ含まれることで時間依存性が発現することが分かった. 同様にハイドレート飽和率が大きくなるにしたがって, 粘塑性パラメータ m' の値も小さくなっている. Case-6 および Case-7 はハイドレート飽和率が 30% 以上の試験であり, ハイドレート飽和率が大きくなるほどひずみ速度依存性が顕著になり m' の値が小さくなる

という傾向は同じであるが, その減少量はやや小さくなっていると考えられる. このハイドレート飽和率と粘塑性パラメータ m' の負の相関が線形近似されるものなのか非線形であるのかは, 今後さらにデータを蓄積して検討していく必要がある.

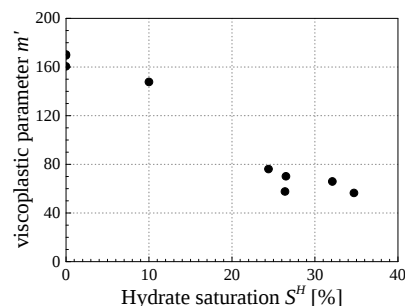


図 1 粘塑性パラメータ m' とハイドレート飽和率関係

図 2 および図 3 に Case-4, Case-6 のシミュレーション結果を実験結果と併せてそれぞれ示す. シンボル付きの点線が実験結果, 実線がシミュレーション結果である. Case-4 および Case-6 とともに応力-ひずみ関係において, ひずみ速度の急激な増加減少に伴う軸差応力の急激な増加減少が見られ, 各ひずみ速度に固有の曲線に乗り移る挙動を示しているが, シミュレーション結果もこれらの挙動を概ね再現できている. これら 2 ケースの比較ではハイドレート飽和率の大きい Case-6 の方が, 軸差応力の変化がより大きくなっており, シミュレーションでは粘塑性パラメータ m' の値を小さくすることでこれを表現できている. 有効応力経路についても限界状態近傍でループを描く挙動などを含めて概ね実験結果を再現できているものの, 特にひずみ速度急増時の軸差応力の立ち上がり方に関しては差異が大きくなっている. 各ケースでカーブフィッティングにより求めた m' を比較すると, ハイドレート飽和率が大きいほどその値は小さく, 図 1 に示す実験結果と同様の傾向が得られた.

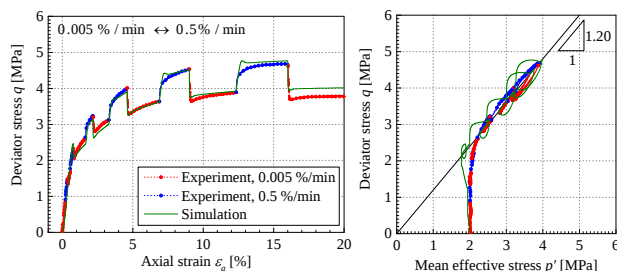


図 2 応力-ひずみ関係および有効応力経路 (Case-4)

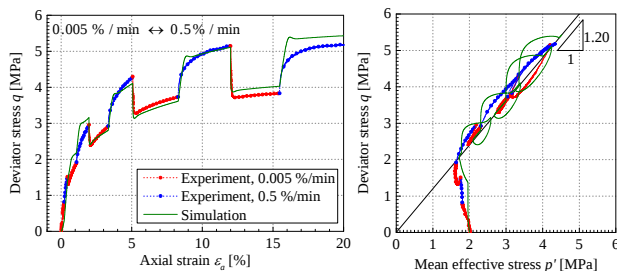


図 3 応力-ひずみ関係および有効応力経路 (Case-6)

参考文献

- 1) Iwai, H. et al. (2016), JGS Special Pub., 2(13), 518-521.
- 2) Kimoto, S. et al. (2015), J. Soc. Mater. Sci. Japan., 64(4), 317-322.
- 3) Adachi, T. and Oka, F. (1982) S. and F., 22(4), 57-70.
- 4) Perzyna, P. (1963) Proc. Vibrational Problems, 4(3), 281-290.