

弾粘塑性構成式を用いた CO₂ ハイドレート含有砂供試体の三軸圧縮試験の再現

京都大学大学院 (現 名古屋工業大学大学院) 正会員 岩井 裕正
 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 小西 陽太

1. はじめに

CO₂ ハイドレート生成熟を利用した MH の増進回収法や CH₄-CO₂ 置換法などの方法は、メタンガスの生産量増加が見込めることに加えて、産業活動によって排出された CO₂ を海底地盤内に固定できるため、CCS 技術の一つとしても、その一端を担うものである。そこで本研究では、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砂供試体の非排水三軸試験を実施した。また時間依存性挙動を記述可能な弾粘塑性構成式を用い、その再現を行った。その結果、CO₂ ハイドレート非含有、含有供試体どちらに関しても三軸圧縮試験の再現が可能であることを示した。

2. 弾粘塑性構成式

本研究で用いた構成式は、Kimoto et al. (2010)¹⁾ の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)²⁾ による構成式に内部構造変化を考慮して拡張した弾粘塑性構成式 (Kimoto and Oka, 2005)³⁾ をもとにしている。以下にモデルの詳細を示す。

2.1 有効応力テンソル及びひずみ速度テンソル

有効応力テンソル σ'_{ij} は圧縮側を正として次式のように表される。

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + p^w \delta_{ij} \quad (1)$$

ここで σ_{ij} は全応力テンソルであり、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタ、 p^w は間隙水圧である。また、全ひずみ速度テンソル $\dot{\epsilon}_{ij}$ は弾性ひずみ速度テンソル $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ 及び粘塑性ひずみ速度テンソル $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ に分けられるとする。

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^{vp} \quad (2)$$

弾性ひずみ速度テンソルは Hooke の法則に従うとする。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^e = \frac{1}{2G} \dot{S}_{ij} + \frac{\kappa}{3(1+e)} \frac{\dot{\sigma}'_m}{\sigma'_m} \delta_{ij} \quad (3)$$

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij}, \quad \sigma'_m = \frac{1}{3} \sigma'_{kk} \quad (4)$$

ここで G はせん断弾性係数、 e は間隙比、 κ は膨潤指数である。また、せん断弾性係数は粘塑性ひずみの進行に伴う低減を考慮し以下のように表される。

$$G = \frac{G_0}{\left\{1 + \alpha (\gamma^{vp})^r\right\}} \sqrt{\frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m0}}} \quad (5)$$

ここで、 α 及び r は粘塑性ひずみ依存性パラメータであり、応力-ひずみ関係へのフィッティングから本報では $\alpha = 4.0$ 、 $r = 0.5$ を用いる。

2.2 過圧密境界面

応力状態が過圧密領域とそれ以外の正規圧密領域にある場合とで異なる性質を示すことを考慮し以下のような過圧密境界面を定義し、その境界を与える。

$$f_b = \bar{\eta}_{(0)}^* + M_m^* \ln(\sigma'_m / \sigma'_{mb}) = 0 \quad (6)$$

ここで $f_b \geq 0$ のとき正規圧密領域、 $f_b < 0$ のとき過圧密

領域であるとする。 $\bar{\eta}_{(0)}^*$ は次の式で表される相対応力比である。

$$\bar{\eta}_{(0)}^* = \sqrt{(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*)(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*)} \quad (7)$$

ここで、下付指標 (0) は変形前の初期状態を示す。 η_{ij}^* は応力比テンソル $\eta_{ij}^* = S_{ij} / \sigma'_m$ であり、 M_m^* は体積圧縮から体積膨張へ変化する応力比を示している。過圧密状態と正規圧密状態とで異なる。式中の 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。MH は地盤中の土粒子に固着する形で存在し、ハイドレート飽和率の増加に伴い強度が増加することが報告されている。そこで本研究では以下のように硬化パラメータを設定し、MH 飽和率による強度増加を表現した。

$$\sigma'_{mb} = N_m \sigma_{ma} \exp\left(\frac{1+e_0}{\lambda - \kappa} \epsilon_{kk}^{vp}\right) \quad (8)$$

$$N_m = \left[1 + n_m \exp\left\{-n_d \left(\frac{S_r^H}{S_r^H} - 1\right)\right\}\right], \quad S_r^H = \frac{n^H}{n} \quad (9)$$

式(8)中の λ は圧縮指数を表す。式(9)は MH 飽和率による強度増加を表す。 S_r^H は現在の MH 飽和率、 n^H は MH 含有率、 n は間隙率である。 n_m は初期 MH 飽和率のときの強度増加率、 n_d は強度の変化速度を調整するパラメータである。

2.3 静的降伏関数

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。ダイレイタンシー特性の変化である変相とその後の硬化-軟化特性を説明するため、粘塑性偏差ひずみ硬化特性を考慮した。

$$f_y = \bar{\eta}_\chi^* + \tilde{M}^* \ln(\sigma'_m / \sigma'_{my}^{(s)}) = 0 \quad (10)$$

$$\bar{\eta}_\chi^* = \sqrt{(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)} \quad (11)$$

$$d\chi_{ij}^* = B^* (A^* de_{ij}^{vp} - \chi_{ij}^* d\gamma^{vp}), \quad d\gamma^{vp} = \sqrt{de_{ij}^{vp} de_{ij}^{vp}} \quad (12)$$

ここで、 $\sigma'_{my}^{(s)}$ は静的平衡状態に達する平均有効応力を示し、 $f_y = 0$ は粘塑性変形が生じない静的平衡状態を示す。 B^* 、 A^* は移動硬化パラメータである。

2.4 粘塑性ポテンシャル関数

粘塑性ポテンシャル面は次の式で与える。

$$f_p = \bar{\eta}_\chi^* + \tilde{M}^* \ln(\sigma'_m / \sigma'_{mp}) = 0 \quad (13)$$

ここで \tilde{M}^* は正規圧密領域と過圧密領域では異なる値を持ち、次式で表される。

$$\tilde{M}^* = \begin{cases} M_m^* : (f_b \geq 0) \\ \frac{\sqrt{\eta_{ij}^* \eta_{ij}^*}}{\ln(\sigma'_m / \sigma'_{mc})} : (f_b < 0) \end{cases} \quad (14)$$

σ'_{mc} は過圧密境界面と σ'_m 軸との交点である。

2.5 粘塑性流れ則

粘塑性ひずみ速度テンソル $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ は超過応力型流れ則に

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

より次のように与える。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \gamma \left\langle \Phi_{ijkl} (f_y) \right\rangle \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{kl}} \quad (15)$$

さらに Adachi and Oka (1982)²⁾の定式化に則り、式(15)は以下のように表される。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = C_{ijkl} \sigma'_m \left\{ m' \left(\bar{\eta}_x^* + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}} \right) \right\} \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{kl}} \quad (16)$$

ここで C_{ijkl} 及び m' は粘塑性パラメータである。 m' はひずみ速度の異なる非排水三軸圧縮試験結果より次式により求める。

$$m' = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\ln \dot{\epsilon}_{11}^{(1)} - \ln \dot{\epsilon}_{11}^{(2)}}{\left\{ q^{(1)}/p' - q^{(2)}/p' \right\}} \quad (17)$$

$\dot{\epsilon}_{11}^{(1)}$, $\dot{\epsilon}_{11}^{(2)}$ は異なるひずみ速度, $q^{(1)}$, $q^{(2)}$ は各ひずみ速度での平均有効応力 p' における軸差応力である。

3. 材料パラメータ

弾粘塑性構成式に用いたパラメータを表-1 に示す。Case 名末尾に「H」を付したものはハイドレート含有供試体であることを示す。時間依存性を表すパラメータ m' は、別途行ったひずみ速度急変非排水三軸圧縮試験より決定した。拘束圧によって変化させたパラメータは、初期せん断弾性係数と圧密降伏応力である。 $\sigma'_{mbi}/\sigma'_{m0}$ で定義される擬似過圧密比は Case-1, 1-H で 3.5, Case-2, 2-H で 1.5, Case-3, 3-H で 1.0 となっている。またハイドレート含有による変形特性への影響は、 S_r^H 依存性パラメータによって表現される。また M_m^* は実験結果より限界状態での応力比 M_m を求め、 $M_m^* = \sqrt{2/3} M_m$ より全てのケースにおいて 0.98 とした。

表-1 用いた材料パラメータ

Case-No.		1	1-H	2	2-H	3	3-H
初期有効応力 [kPa]	σ'_{m0}	1000		2000		3000	
ハイドレート飽和率 [%]	S_r^H	0.0	34.6	0.0	27.8	0.0	28.5
初期間隙比	e_0	0.74	0.76	0.72	0.73	0.72	0.73
ひずみ速度 [%/min]	$\dot{\epsilon}_0$			0.1			
初期せん断弾性係数 [kPa]	G_0	50000		100000		150000	
圧密降伏応力 [kPa]	σ'_{mbi}	3500		3000		3000	
圧縮指数	λ			0.0112			
膨潤指数	κ			0.0026			
限界状態応力比	M_m^*			0.98			
粘塑性パラメータ	m'			109.9			
粘塑性パラメータ [1/s]	C_1			3.5×10^{-12}			
粘塑性パラメータ [1/s]	C_2			1.0×10^{-12}			
移動硬化パラメータ	A'			0.98			
移動硬化パラメータ	B'			55			
S_r^H 依存性パラメータ 1	S_r^H			0.55			
S_r^H 依存性パラメータ 2	n_d			0.75			
S_r^H 依存性パラメータ 3	n_m			0.6			

4. 解析結果

図-1 に CO₂ ハイドレート非含有供試体の非排水三軸試験結果及びそのシミュレーション結果、図-2 に CO₂ ハイドレート含有供試体の非排水三軸試験結果及びそのシミュレーション結果をそれぞれ示す。シンボルでプロットされたものは実験結果であり、実線で示したものは構成式によるシミュレーション結果である。まず図-1 に示す CO₂ ハイドレートを含有しないケースに関して、実験結果では、せん断初期における応力-ひずみ関係の立ち上がりは初期有効応力が大きくなるほど増加しており、初期拘束圧依存性が確認される。Case-1~Case-3 いずれにおいても明瞭なピークは観察されず、最終的に軸差応力 q は 3.5MPa~4.0MPa 近傍と類似した値に収束している。実験における応力-ひずみ関係を精度よく再現できている。

一方で有効応力径路を見ると、Case-1, Case-2 の径路は、実験結果をよく再現できているのに対して、Case-3 の径路に関しては解析において平均有効応力が大きく減少する結果となった。Case-1 及び Case-2 においては過圧密状態を仮定して材料パラメータを設定しているため平均有効応力の減少が抑えられてのが、Case-3 では正規圧密状態としているために平均有効応力が大きく減少する結果となったと考えられる。

次に、図-2 に示す CO₂ ハイドレート含有の実験結果に関して、いずれのケースにおいても非含有の場合と比較して軸差応力の大きな増加が見られる。ハイドレート含有試料と非含有試料の最大軸差応力の比を求めると Case-1, 1-H で 1.26, Case-2, 2-H で 1.16, Case-3, 3-H で 1.27 となっている。Case-2-H は、ハイドレート飽和率が小さかったために強度増加も小さくなったものと考えられる。この実験結果の構成式による再現結果を図-2 中に実線で示す。ハイドレート非含有のケースにおいて得られたパラメータに加えて式(8), (9)を考慮してフィッティングを行った。ケース間において S_r^H 依存性パラメータ 1~3 を変更することなく全てのケースにおいて同じ値を用いている。図-2 に示すように、応力-ひずみ関係及び有効応力径路のどちらにおいても実験結果をよく再現できていると言える。

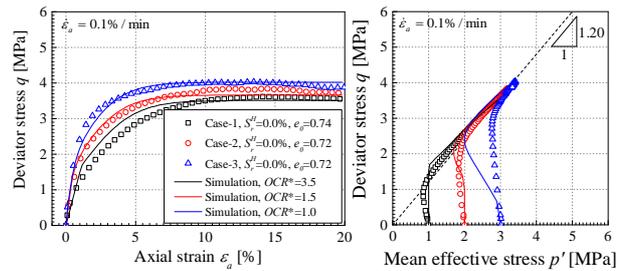


図-1 応力-ひずみ関係及び有効応力径路(非含有)

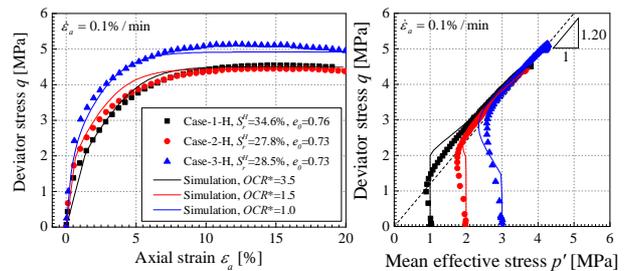


図-2 応力-ひずみ関係及び有効応力径路(含有)

5. 結論

本研究では、豊浦砂供試体及び CO₂ ハイドレート含有供試体の非排水三軸圧縮試験結果に対して、ハイドレート飽和率依存性を考慮した構成式によるフィッティングを行った。その結果、特にハイドレート含有の場合において、提案した式及びパラメータは実験結果を良く再現できることが確認された。

謝辞 本研究の一部は、特別研究員 24・1274 の助成を受けたものである。ここに謝意を示す。

参考文献 1) Kimoto, S. et al., *Int. Jour. Mech. Sci.*, **52**(2), pp. 365-376, 2010. 2) Adachi, T. and Oka, F., *S. and F.*, **22**(4), pp.57-70, 1982. 3) Kimoto, S. and Oka, F., *S. and F.*, **45**(2), pp.29-42, 2005.