

モホロジー変化による CO<sub>2</sub> ハイドレート含有地盤の

## 強度増加メカニズムの変化

名古屋工業大学 学生会員 ○川崎 貴也

名古屋工業大学 正会員 岩井 裕正

名古屋工業大学 正会員 張 鋒

## 1. はじめに

ガスハイドレート(以下 GH と記す)の存在形態(モホロジー)が異なることで GH 含有地盤の強度やダイレイタンスーなどの力学特性が異なってくることが指摘されている<sup>1)2)</sup>。これに対して我々は、GH のモホロジーの違いに着目し、その初期割合を考慮した弾塑性構成式を新たに提案し、これがメタンハイドレート(以下 MH と記す)および二酸化炭素ハイドレート(以下 CDH と記す)含有地盤の三軸圧縮試験結果を精度よく再現可能であることを示した<sup>3)</sup>。本研究ではさらに、CDH 含有地盤の非排水三軸圧縮試験におけるせん断に伴うモホロジー変化に着目し、提案した構成式を用いて、CDH 含有地盤の強度増加挙動の再現を試みる。

## 2. ガスハイドレートのモホロジーと力学特性

Yun et al. (2007)<sup>4)</sup>は地盤中の GH は大きく分けて、Cementing(CM)型、Pore filling(PF)型、Load bearing(LF)型、の3形態に分類されると述べており、GH のモホロジーによって地盤の強度、ダイレイタンスー特性が変化してくると論じている。またこれらのモホロジーは地盤がせん断を受けることにより変化すると考えられている。CM 型は自身がせん断によって破壊されることで LB 型に移行し、PF 型はせん断による土粒子の間隙の減少により LB 型に移行すると考えられている。本研究では全体のハイドレート飽和率を PF, LB, CM 型の3種類のモホロジーの総和からなると考えた。

$$S_r^H = S_{CM}^H + S_{PF}^H + S_{LB}^H \quad (1)$$

$$S_{CM}^H = \alpha S_r^H, S_{PF}^H = \beta S_r^H, S_{LB}^H = \gamma S_r^H \quad (2)$$

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  はそれぞれ CM, PF, LB 型の存在割合を示す。 $S_r^H$  は全体のハイドレート飽和率であり、

$$S_r^H = V_H/V_V \quad (3)$$

で表される。 $V_H$  は土粒子中のハイドレートの体積、 $V_V$  は土粒子中の間隙の体積である。

## 3. GH のモホロジーを考慮した弾塑性構成式

降伏関数は Uchida et al.(2012)<sup>5)</sup>が提案した弾塑性構成式を改良したものを用いる。この構成式は修正カムクレイモデルに GH を含有することによる材料の硬化を表すことができるモデルである。

$$f = q^2 + M^2 p' [p' - R(p'_c + p'_{CM} + p'_{LB})] \quad (4)$$

$q$  は軸差応力、 $M$  は限界状態応力比、 $p'_c$  は圧密降伏応力であり、 $p'_{CM}$ ,  $p'_{LB}$  はそれぞれ CM 型および LB 型 GH によるダイレイタンスーへの影響を考慮した強度増加パラメータである。また、式(4)で示す降伏関数を図示したものが図1である。

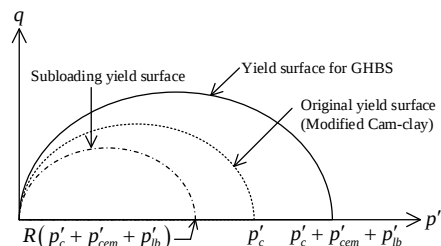


図1 モホロジーを考慮した降伏関数の降伏曲面

硬化パラメータに関する発展測を次式で表す。

$$dp'_c = (1 + e_0) p'_c d\varepsilon_v^p / (\lambda - \kappa) \quad (5)$$

$$p'_{CM} = a_{CM} (S_{CM}^H)^{b_{CM}}, p'_{LB} = a_{LB} (S_{LB}^H)^{b_{LB}} \quad (6)$$

$e_0$  は初期間隙比、 $\lambda$  は圧縮指数、 $\kappa$  は膨張指数、 $\varepsilon_v^p$  は塑性体積ひずみである。また  $a_{CM}$  および  $b_{CM}$  は CM 型ハイドレートの発展則に関するフィッティングパラメータであり、同様に  $a_{LB}$  および  $b_{LB}$  は LB 型ハイドレートの発展則に関するフィッティングパラメータである。

次にモホロジーの割合の増分  $d\alpha$ ,  $d\gamma$  を決める。CM 型は、せん断によって土粒子から剝離される、あるいは GH 粒子自体が破壊されることで、セメンテーションの効果を失うが、破碎した GH 粒子が土粒子と接触することで LB 型として働くと考ええる。また、CM 型はせん断過程では自身の割合は増加することがないと仮定する。よって塑性せん断ひずみ増分の大きさに依存し  $\alpha$  の増分単調減少関数になるようにした。PF 型と LB 型は土粒子中の間隙の大きさによって両者の存在形態を相互に移行すると考えられるため、塑性体積ひずみに依存するようにした。以上より

$$d\alpha = -m_\alpha \alpha |d\varepsilon_d^p|, d\gamma = -m_\gamma \gamma d\varepsilon_v^p \quad (7)$$

と仮定する。 $m_\alpha$  は CM 型から LB 型へのモホロジーの変化の速度を示すパラメータ、 $m_\gamma$  は PF 型と LB 型間のモホロジーの変化を表すパラメータであり、 $d\varepsilon_v^p, d\varepsilon_d^p$  は塑性体積ひずみ増分、塑性せん断ひずみ増分である。(7)でせん断によるモホロジーの移行を表現している。

キーワード 構成式 三軸圧縮試験 砂質土

連絡先 〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学 16 号館 227 号室 TEL052-735-5497

$$dR = -m_R(p'_C + p'_{CM} + p'_{LB}/p'_C) \ln R |dp| \quad (8)$$

$R$  は正規降伏比で過圧密比の逆数である<sup>6)</sup>。  $m_R$  は過圧密消散パラメータである。

#### 4. 実験結果及び解析結果の考察

図2にCDH含有供試体の非排水三軸圧縮試験結果を示す。左の図は通常の応力-軸ひずみ関係のグラフ、右の図は有効応力径路であるが、左下の図は縦軸にCDH含有供試体の軸差応力から非含有砂の軸差応力の差をとった。応力-軸ひずみ関係よりCDH含有砂のひずみ硬化挙動は、軸ひずみ10～15%まで続き最大軸差応力に至るが、概ねハイドレート飽和率が大きくなるほど、ひずみ硬化挙動が長く続く傾向を示した。また、有効応力径路から、せん断初期段階において初期平均有効応力2.0MPaからわずかに平均有効応力が減少し、正の過剰間隙水圧が発生していることが分かる。その後、応力径路は正のダイレイタンシーを示し平均有効応力は増加に転じている。最もハイドレート飽和率が大きい56.9%の結果を除いて、限界状態における応力比は1.2となった。

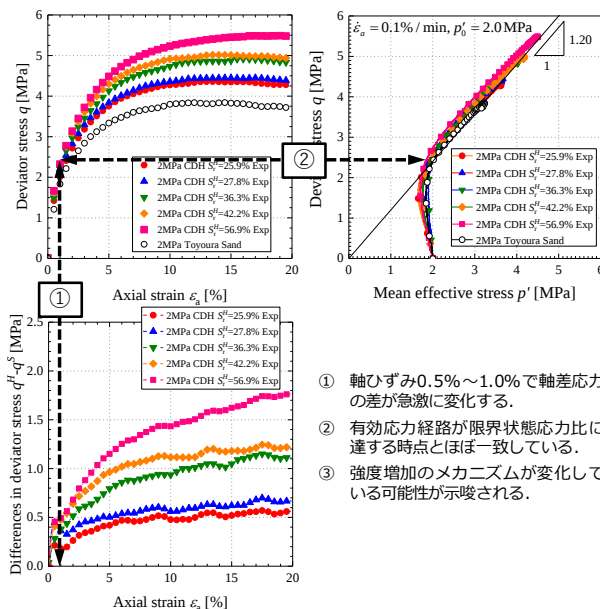


図2 CDH含有地盤の非排水三軸圧縮試験結果

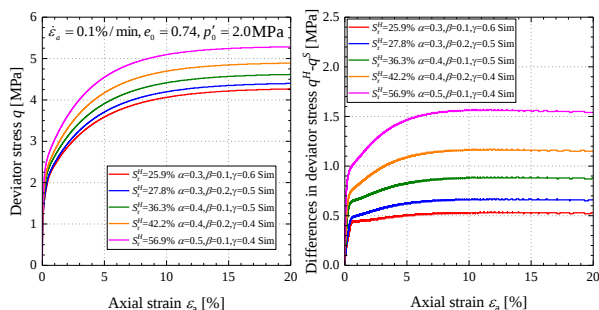


図3 構成式による実験結果の再現解析結果

図2左下のグラフよりCDH含有砂と非含有砂の軸差応力の差に関して、軸ひずみに対する変化を見ると、軸ひずみ0.5%から1.0%にかけてその勾配が著しく減少し、1.0%で再び上昇する。これ

をモホロジー変化という観点から考察すると、CM型のハイドレートがせん断過程で破壊されることによってCDHによる供試体の硬化が失われる。その間、非含有砂の強度は砂が密になることにより増え続けていくので、この瞬間だけ砂の強度増加速度がCDH含有供試体の強度増加速度を超えてしまったのではないかと考えられる。またこの時点は、有効応力径路と限界状態線との交点に概ね一致している。これらの実験結果の考察を踏まえて、解析においては、有効応力径路が限界状態線を超える時点でCDH含有供試体の強度勾配を一時減少に転じるため、CM型割合 $\alpha$ を急減させ、LB型及びPF型の割合を増加させることで現象の再現を試みた。その結果を図3に示す。図3より $S^H = 36.3, 42.2, 56.9$ のケースにおける解析結果は初期の段階では強度が実験結果を大幅に超える結果となってしまった。これは $S^H$ の割合が高く、CM型のハイドレートの割合が多くなったため、剛性が高くなってしまったからだと考えられる。しかしながら変相状態後の強度や所定の軸ひずみにおいて勾配が急激に減少する点については精度よく表現することができた。

#### 5. まとめと今後の課題

本研究ではせん断過程におけるモホロジー変化に着目し、提案した弾塑性構成式を用いて、CDH含有地盤の非排水三軸圧縮試験で見られた特徴的な強度増加挙動の再現を試みた。得られた知見と課題を以下に示す。

1. 非排水三軸圧縮試験結果よりハイドレート飽和率が大きくなるほど軸差応力も大きくなる。また、有効応力径路はせん断初期段階においては正の過剰間隙水圧が発生するが、変相後は正のダイレイタンシーを示し平均有効応力は増加に転じている。
2. CDH含有供試体の軸差応力から砂のみの供試体の軸差応力の差が、軸ひずみ0.5%～1.0%において強度増加勾配が変化する挙動が観察された。これはせん断によるモホロジーの変化によるものであると推察される。
3. 強度増加勾配が変化する点是有効応力径路と限界状態線との交点に概ね一致している。
4. 強度増加の速度が一時的に負に転じる現象は再現できていないが、所定の軸ひずみにおいて勾配が急激に減少する点や変相状態後の強度は精度よく表現することができた。

#### 参考文献

- 1). Hyodo, M., Li, Y., Yoneda, J., Nakata, Y., Yoshimoto, N., Kajiya, S., Nishimura, A., and Song, Y., *American Mineralogist*, **99**, pp.178-183, 2014.
- 2). Miyazaki, K., Oikawa, Y., Haneda, H., and Yamaguchi, T. (2016). *Int. J. Offshore and Polar Engineering*, **26**(3), pp.315-320.
- 3). 川崎貴也, 岩井裕正, 張鋒; ガスハイドレートの存在形態を考慮した弾塑性構成式の提案. 第52回地盤工学研究発表会, 名古屋. 2017.
- 4). Yun, T., S., Santamarina, J., C. and Ruppel, C. *Journal of Geophysical Research*, **112**, NO.B04106, 2007.
- 5). Uchida, S., Soga, K. and Yamamoto, K. *Journal of Geophysical Research*, **117**, NO.B03209, 2012.
- 6). Hashiguchi, K. (1989). *Int. J. Solids and Structures*, **25**, pp.917-945.
- 7). Iwai, H., Konishi, Y. & Kimoto, S. Undrained Triaxial Compression Tests on Artificial CO<sub>2</sub>-hydrate-bearing Sand Specimens. *Energy Procedia* **114**, pp.3175-3184, 2017.