

ガスハイドレートの存在形態の存在形態が地盤の強度変形特性に
及ぼす影響の考察とそのモデル化

名古屋工業大学 正会員 ○岩井 裕正
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 張 鋒

1. はじめに

最近の研究結果でガスハイドレート(以下 GH と記す)の存在形態が異なることで 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事が指摘されている¹⁾²⁾。そこで本研究では既往の研究で得られたメタンハイドレート(以下 MH と記す)含有地盤、CO₂ ハイドレート(以下 CDH と記す)含有地盤の排水三軸圧縮試験結果をもとに存在形態を考慮した弾塑性構成式を新たに提案し、再現シミュレーションにより、本構成式の GH 含有地盤への適用の可能性を検証した。

2. ガスハイドレートの存在形態と力学特性

Pinkert et al. (2014)³⁾は地盤中の GH は大きく分けて、Pore filling(PF)型、Load bearing(LF)型、Cementing(CM)型の 3 つの形態に分類されると述べており、GH の存在形態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。それぞれの存在形態について説明すると、

1. PF 型は土粒子の間隙に粒子状に存在し、地盤の固体相の密度は増加するが、強度変形特性に与える影響が小さいとされている。
2. LB 型は土粒子の間隙で骨格を支えるように存在し、強度変形特性に与える影響があるが、土粒子の移動、回転抑制効果が少ない。
3. CM 型は土粒子同士を固着するように存在し、地盤の強度変形特性に大いに影響し、土粒子の回転移動の抑制効果はあるとされている。

またこれらの存在形態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 型に移行する。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。本研究では存在形態の初期割合が異なることによる地盤の強度変形特性の違いを表現するために全体のハイドレート飽和率を PF, LB, CM 型の 3 種類の存在形態の総和からなると考えた。

$$S_r^H = S_{pf} + S_{lb} + S_{cm} \quad (1)$$

$$S_{cm} = \alpha S_r^H, S_{pf} = \beta S_r^H, S_{lb} = \gamma S_r^H \quad (2)$$

α, β, γ 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、

$$S_r^H = \frac{V_H}{V_V} \quad (3)$$

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。また、GH の存在形態によっては地盤に対して正のダイレイタンスー挙動、粘着力が発現されることがある。本研究では以上の特性を提案する構成式に取り入れるために表 1 のように仮定した。

表 1 存在形態に関する仮定のまとめ

	粘着力	ダイレイタンスー	せん断による形態の移行
CM 型	○	○	せん断によって LB 型へ
LB 型	—	○	体積膨張により PF 型へ
PF 型	—	—	体積圧縮により LB 型へ

以上の仮定を用いて構成式を提案していく。

3. ガスハイドレートの存在形態を考慮した弾塑性構成式

本研究で用いる降伏関数は Uchida et al.(2012)⁴⁾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圧密降伏応力、粘着力の増加やダイレイタンスーの変化を表すことができるモデルである。

$$f = q^2 + M^2(p' + p'_{coh})[p' - R(p'_{cs} + p'_{cm} + p'_{lb} + p'_{coh})] \quad (4)$$

ここで、 q は軸差応力、 M は限界状態応力比、 p'_{coh} は CM 型ハイドレートによって発生した粘着力による強度増加パラメータである。 p'_{cs} は圧密降伏応力であり(5)、 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り(6)で表される。

$$p'_{cs} = p'_{cs0} \exp\left\{\left(1 + e_0\right) \varepsilon_v^p / (\lambda - \kappa)\right\} \quad (5)$$

p'_{cs0} は初期圧密降伏応力、 e_0 は初期間隙比、 λ は圧縮指数、 κ は膨張指数、 ε_v^p は塑性体積ひずみである。

$$p'_{cm} = a(\alpha S_r^H)^b, p'_{lb} = c(\gamma S_r^H)^d \quad (6)$$

a, b, c, d はフッィティングパラメータである。また本研究では p'_{coh} を定数として扱う。次に存在形態の割合の増分 $d\alpha, d\beta$ を決める。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。よって塑性せん断ひずみ増分に絶対値をつけ α の増分が常に負になるようにした。PF 型の割合は土粒子中の間隙によって LB 型に移行したりするため体積ひずみに依存するようにした。以上より

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

と仮定する。 m_α は CM 型から LB 型への存在形態の変化の速度を示すパラメータ、 m_β は PF 型と LB 型の間の存在形態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)でせん断による存在形態の移行を表現している。

$$dR = -m_R \left(\frac{p'_{cs} + p'_{cm} + p'_{lb}}{p'_{cs}} \right) \ln R |d\varepsilon^p| \quad (8)$$

R は正規降伏比で過圧密比の逆数である⁵⁾。 m_R は過圧密消散パラメータである。式(4)で示す降伏関数を図示したものが図 1 である。なお図 1 は

キーワード 構成式 三軸圧縮試験 砂質土

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

$p'_{coh} = 0$ とした時の降伏関数の概略図である。

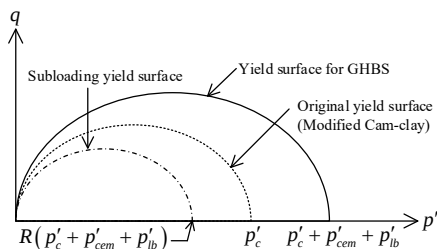


図1 存在形態を考慮した降伏関数の降伏曲面

本研究では特に GH の存在形態の違いによるダイレイタンス特性への影響に着目したい。そのため、以降は粘着力の項は無視し、 $p'_{coh} = 0$ と仮定する。以上の式に対して関連流れ則、Prager の適合条件を用い応力、ひずみ増分を計算していく。

4. 解析概要及び結果

MH, CDH 含有地盤の三軸圧縮試験結果に対して提案した弾塑性構成式を用いた再現シミュレーションを行い、実験結果と解析結果の比較を行う。1MPa の比較には Miyazaki et al.(2016)²⁾の実験結果を用いる。表2に材料パラメータをまとめる。

表2 材料パラメータ

ポアソン比	ν	0.2
限界状態応力比	M	1.2
圧縮指数	λ	0.16
膨張指数	κ	0.04
初期間隙比	e_0	0.613
初期降伏応力 (MPa)	p'_{cs}	9.0
過圧密解消パラメータ	m_β	20.0
p'_{cm} に関するパラメータ	a, b	21.0, 1.0
p'_{lb} に関するパラメータ	c, d	6.0, 1.0

また、各飽和率の初期割合を表3の値で仮定する。既往の研究により $S_r^H = 50\%$ 付近の MH 含有地盤では CM 型の GH が卓越している²⁾という結果から表3のように設定した。CDH 含有地盤に関しては $S_r^H = 49\%$ と MH 含有地盤よりも S_r^H が高いにも関わらず、強度及び体積膨張量が小さい結果となっている。よって MH 含有地盤よりも CM 型が CDH 含有地盤においては卓越していないと考えたため表3のように設定した。 $S_r^H = 30\%$ 付近においては MH, CDH 含有地盤の強度はともに $S_r^H = 50\%$ 付近の時と比べて小さいが、MH, CDH 含有地盤同士を比較するとほとんど変化がない。しかし体積膨張量に差がある結果となっている。よって、MH 含有地盤では力学挙動に大いに影響してくる CM 型の割合 α を減らし、CDH 含有地盤では元の α が小さいので、力学挙動に影響しない PF 型の割合 β を増やすことで調整した。

表3 GH 飽和率と存在形態の割合の初期条件

	S_r^H	α	γ	β
MH	48.0	0.7	0.2	0.1
MH	34.0	0.5	0.4	0.1
CDH	49.0	0.2	0.7	0.1
CDH	33.0	0.2	0.4	0.4

以上より図2に拘束圧 1MPa における $S_r^H = 50\%$ 付近、図3では $S_r^H = 30\%$ 付近の MH, CDH 含有地盤及び豊浦砂のみの排水三軸圧縮試験、及び再現結果を図示する。

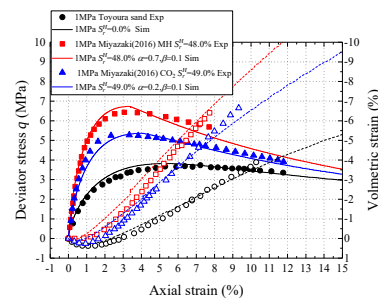


図2 拘束圧 1MPa, $S_r^H = 50\%$ における実験²⁾と解析結果

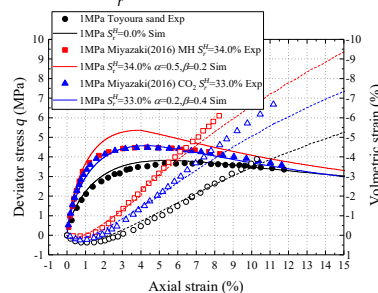


図3 拘束圧 1MPa, $S_r^H = 30\%$ における実験²⁾と解析結果

$S_r^H = 50\%$ 付近においては a, b, c, d を GH の種類によって変えることなく、初期剛性、ピーク強度、体積変化量を再現することができた。 $S_r^H = 30\%$ 付近の CDH 含有地盤に関しては S_r^H とハイドレートの初期割合を $S_r^H = 50\%$ 付近から変えただけで強度及びダイレイタンスの傾向を表現できた。しかし、MH 含有地盤においては、体積ひずみの傾向は表現できたが、強度が実験結果を超える結果となった。原因としては先に体積ひずみの解析結果を実験値に合わせたからだと考えられる。

5. まとめと今後の課題

本研究では GH の存在形態を考慮した弾塑性構成式を提案し、提案した構成式を用いて MH, CDH 含有地盤の排水三軸圧縮試験結果の再現解析を試みた。まとめ及び今後の課題を以下に示す。

1. MH, CDH 含有地盤の実験結果に対しては、 a, b, c, d を GH の種類によって変えることなく、GH 存在形態の割合を変化することで両者の違いを精度よく再現することができる。
2. S_r^H が減少した場合も同様に、GH の存在形態の割合を変化させることで強度変形特性の違いを再現することが可能である。
3. 本研究ではダイレイタンス特性に着目し、粘着力による強度増加は考慮しなかった。今後の課題としてダイレイタンス、粘着力両方の影響を考慮した GH 含有地盤の再現シミュレーションをしていきたい。
4. 実地盤をモデル化した境界値問題を解くために温度変化の項やハイドレートの分解による応力変化の項を考慮していく。

参考文献

- 1). Hyodo, M., Li, Y., Yoneda, J., Nakata, Y., Yoshimoto, N., Kajiyama, 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). Pinkert, S., and Grozic, J. L. H. (2014). *Chemical and engineering data*, **60**(3), pp.376-382.
- 4). Uchida, S., Soga, K. and Yamamoto, K. *Journal of Geophysical Research*, **117**, NO.B03209, 2012.
- 5). Hashiguchi, K. (1989). *Int. J. Solids and Structures*, **25**, pp.917-945.