異なる存在形態を有するガスハイドレート含有地盤の弾塑性構成式の提案

Proposal of elasto-plastic constitutive model of gas hydrate containing sediments with diffrrent hydrate morphology

川崎 貴也¹, 岩井 裕正², 張 鋒³

1 名古屋工業大学・大学院・社会工学専攻・29415031@stn.nitech.ac.jp

2 名古屋工業大学・大学院・社会工学専攻・iwai.hiromasa@nitech.ac.jp

3 名古屋工業大学・大学院・社会工学専攻・cho.ho@nitech.ac.jp

概 要

近年,新しいエネルギー資源としてメタンハイドレート,二酸化炭素地中固定化技術の一つとして CO₂ ハイドレ ートが注目されている。メタンハイドレートおよび CO₂ ハイドレート含有地盤の強度変形特性に関する実験は数 多くなされているが,その中で,ハイドレート含有による強度増加やダイレイタンシーの変化は,ハイドレート含 有量のみならずその存在形態に大きく依存することが分かってきた。しかし存在形態を考慮した構成式に関して はあまり研究が進んでいないのが現状である。本研究ではハイドレートの地盤間隙中における存在形態を考慮し た弾塑性構成式を新たに提案し,既往の研究で得られたメタンハイドレート含有地盤および CO₂ ハイドレート含 有地盤の排水・非排水三軸圧縮試験結果の再現シミュレーションを行った。その結果,提案する構成式は実験結果 を精度よく再現することが可能であり,メタンハイドレートおよび CO₂ ハイドレート含有地盤の強度変形特性の 違いは存在形態によって説明可能であることを示した。

キーワード:ガスハイドレート含有地盤,三軸圧縮試験,弾塑性構成式,存在形態

1. はじめに

近年,資源枯渇問題や地球温暖化問題などでガスハイド レートの利用が注目されている。ガスハイドレートは水分 子が構成する籠状の結晶構造の内部にメタン分子や CO2 などのゲストガスが内包された固体で,低温高圧下で安定 に存在することができる。標準状態換算で自身の160~170 倍の体積のガスを放出する特質を持つことから地球温暖 化の原因である温室効果ガスの CO2 をハイドレート化し 地中貯留する技術や天然ガスの運搬への利用,海底地盤や 永久凍土に存在するメタンハイドレート(以下 MH と記 す)の資源開発が注目されている。

しかし MH 含有地盤からのメタンガス産出にはなお多 くの課題があり,そのうちの一つが地盤変形問題である。 地盤内では固体であった MH が回収時に水とメタンガス に分解されることで地盤内の応力が変化し土粒子骨格が 変形することで大規模な海底地すべりや地盤沈下が起こ り周辺の構造物に多大な被害やメタンガスの漏洩の危険 性がある。現在,MHの回収法として最有力視されている 方法は減圧法であるが,減圧によって周辺地盤の有効応力 が大きく変化することや,分解に伴い,固体である MH が 消失することを考えると,安全な MH 生産のためには,深 海底 MH 含有地盤の変形挙動を予測することが可能な数 値シミュレーションの開発が必要である。

また近年, MH と並んで CO₂ ハイドレート(以下 CDH と記す)の活用も注目されている。現在, MH 含有地盤か らメタンガスを回収する方法としては地盤内の圧力を下 げていく減圧法が取り入れられている。しかし MH の分解 は吸熱反応であるので,減圧法だけではメタンガスの回収 効率が低いという問題がある。そこでこの問題を解決する ために CDH を利用した MH 含有地盤からのメタンガス増 進回収技術が考えられている。この方法は MH 含有地盤に CO₂を注入し CDH を生成し, CDH 生成時の生成熱で MH の分解を増進しメタンガスを生成する方法である。この方 法によって地盤変形やガスの漏洩などを抑止するととも に CO₂の地中貯留法としても期待されている。

以上のような背景から,MH 含有地盤だけでなく CDH 含有地盤の力学特性についても数多くの研究がなされて いる。特に,MH および CDH 含有模擬地盤に対する排水・ 非排水三軸圧縮試験はここ数年で相当数のデータが蓄積 された¹⁾²⁾³⁾。MH 及び CDH 生成砂の三軸圧縮強度はハイ ドレートのセメンテーションによる強度増加がみられ,そ の強さはハイドレート飽和率の増加,温度の低下,初期有 効拘束圧の増加とともに高くなることが分かった.また体 積ひずみはハイドレートの存在により正のダイレイタン シーが増加する傾向がみられることが分かった.ところが

その一方で、ガスハイドレート含有地盤は同程度のハイド レート飽和率を持つにもかかわらず異なる力学挙動を見 せることということが発見された 4。これはつまり、室内 試験で人工的に作製したガスハイドレート含有模擬地盤 と実際の海底地盤で強度変形特性が異なる可能性を示唆 している。ガスハイドレートの種類によってピーク強度や ダイレイタンシーなどの力学特性が異なってくると,産出 に関わる坑井や洋上構造物などの被害や,予期せぬ海底地 盤災害を招く恐れがある。これに対して、同じハイドレー ト飽和率を有するにも関わらず,異なる力学挙動を見せる 原因として、ガスハイドレートの地盤間隙中における存在 形態が寄与していると主張する研究もあるが,詳細な検討 がなされていないのが現状である。そこで本研究では,既 往の研究によって得られたガスハイドレート含有地盤の 排水・非排水三軸圧縮試験結果をハイドレート存在形態の 違いという観点から考察する。併せて, それらの試験結果 に対してハイドレートの存在形態を考慮した弾塑性構成 式の構築を試み,実験結果との比較によりその合理性を調 べた。

2. ガスハイドレートの存在形態と力学特性

Pinkert et al. (2014)⁵⁾ は地盤中のハイドレートは大きく分けて, Cementing型 (CM型), Pore filling型 (PF型), Load bearing型 (LB型), の3つの形態に分類されると述べており, それぞれのハイドレート存在形態によって地盤の強度, ダイレイタンシー特性が変化してくると論じている。図1 に土粒子間隙中に存在するハイドレートの存在形態の模式図を示す。





以下にそれぞれの存在形態と地盤の力学特性との関係に について説明すると、

- CM 型は土粒子同士を固着するように存在するもの で強度やダイレイタンシーに大いに影響し、土粒子 の回転移動の抑制効果はあるとされている。
- > PF型は土粒子の間隙に粒子状に存在するもので、地盤の固体相の密度は増加するが、初期の強度やダイレイタンシーには影響が小さいと考えられている。
- LB型は土粒子の間隙で骨格を支えるように存在す るものであり、強度やダイレイタンシーには影響す るが、土粒子の回転、移動の抑制効果は少ないと考え られている。

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って変化すると考えられている。図2および図3は地盤間隙中におけるハイドレート存在形態の変化を模式的に表

したものである。図2に示すように、せん断によって間隙 が減少することで、初期状態では間隙に浮遊していたハイ ドレートが土粒子に接触しLB型に移行する。また図3に 示すように、ハイドレート自身がせん断によって破壊され ることで、CM型のハイドレートは減少するが、土粒子に 固着した状態で残ったハイドレートが他の土粒子と接触 することでLB型として作用することも考えられる。





Breaking

Cementing型

また一般的にハイドレート含有地盤は CM 型が卓越して いるガスハイドレート含有地盤では強度が大きく, 土粒子 が団粒化して動くため正のダイレイタンシーが顕著にな ることが分かっている。

このようにガスハイドレートは地盤中のガスハイドレ ートの存在形態の割合により地盤の力学特性が変わって いくことや、せん断が進行するとともにその存在形態を変 化していくため、ガスハイドレート含有地盤の強度変形特 性をとらえることは複雑である。そこで本研究では、全体 のハイドレート飽和率を PF型、LB型、CM型の3種類の 存在形態の総和からなると考える。つまり、

$$S_{r}^{H} = S_{pf} + S_{lb} + S_{cm}$$
(1)

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

ここで, α , β , γ はそれぞれ, CM型, PF型, LB型の存在割合を示す。 S_r^H はハイドレート飽和率であり式(3)で表される。

$$S_r^H = V_H / V_V \tag{3}$$

 V_{μ} は土粒子中のハイドレートの体積, V_{ν} は土粒子中の間隙の体積である。また,ハイドレートの存在形態によっては地盤に対して正のダイレイタンシー挙動,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	ダイレイタンシー	せん断による形態の移行
CM 型	\bigcirc	0	せん断によって LB 型へ
LB 型	_	0	体積膨張により PF 型へ
PF 型	_	—	体積圧縮により LB 型へ

ガスハイドレートの存在形態を考慮した弾塑性 構成式

3.1 弾塑性構成式の概要

本研究で用いる降伏関数は Uchida et al. (2012)⁶ 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ガスハイドレートを含有するこ とによる圧密降伏応力,ダイレイタンシーの変化を表すこ とができるモデルである。

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

ここで,qは軸差応力,Mは限界状態応力比, p'_{a} は圧密 降伏応力であり(5), p'_{an} , p'_{b} はそれぞれ CM 型および LB 型ガスハイドレートによるダイレイタンシーへの影響を 考慮した強度増加パラメータであり(6)で表される。

$$p'_{cs} = p'_{cs0} \exp\{(1 + e_0) \mathcal{E}_v^p / (\lambda - \kappa)\}$$
(5)

 p'_{a0} は初期圧密降伏応力, e_0 は初期間隙比, λ は圧縮指数, Kは膨張指数, ε_1^{n} は塑性体積ひずみである。

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

a,b,c,dはフッイティングパラメータである。

次に存在形態割合の増分 $d\alpha$, $d\beta$ を決める。CM 型はせん 断によってハイドレート自身が破壊された場合,自然に CM 型に再生することはない。つまり一度 CM 型の割合は 減少すると、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 β は土粒子中の間隙体積の増減によって LB 型に移行したりするため塑性体積ひずみに依存するよ うにした。以上より

$$d\alpha = -m_{\alpha}\alpha \left| d\varepsilon_{d}^{P} \right|, \quad d\beta = -m_{\beta}\beta d\varepsilon_{v}^{P} \tag{7}$$

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, $d\epsilon_{v}^{\prime}, d\epsilon_{a}^{\prime}$ 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。

また,弾性領域でも塑性ひずみを計算するため, Hashiguchi(1989)⁷⁾の下負荷面を導入しているが,ハイドレ ートの存在によって過圧密領域が変化するのでこのモデ ルに p'_m, p'_bを取り入れている。

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

Rは正規降伏比で過圧密比の逆数である。 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4である。



図4存在形態を考慮した降伏関数の降伏曲面

本研究では特にガスハイドレートの存在形態の違いによ るダイレイタンシー特性への影響に着目したい。 次に以上の式に対して関連流れ則, Prager の適合条件を用 い塑性ひずみ,応力増分を計算していく。

3.2 塑性ひずみ増分の計算

この節では降伏関数の増分式から塑性ひずみ増分を導出 していく。

まず降伏関数の増分式

$$df = \frac{\partial f}{\partial q} dq + \frac{\partial f}{\partial p'} dp' + \frac{\partial f}{\partial p'_{cs}} dp'_{cs} + \frac{\partial f}{\partial p'_{cm}} dp'_{cm} + \frac{\partial f}{\partial p'_{lb}} dp'_{lb} + \frac{\partial f}{\partial R} dR = 0$$
(9)

に p'_{cr} , p'_{cr} , p'_{h} , Rの発展則を代入し, 関連流れ則より,

$$\begin{pmatrix} d\varepsilon_{v}^{p} \\ d\varepsilon_{d}^{p} \end{pmatrix} = \Lambda \left(\frac{\partial f}{\partial p'}, \frac{\partial f}{\partial q} \right)^{r}$$
(10)

また、Prager の適合条件式 df = 0 よりひずみ増分 Λ について整理し、得られた Λ を式(10)に代入し、塑性ひずみ増分を計算する。

3.3 応力増分の計算

次に応力増分の式を導出していく。

$$df = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{\sigma}'}^{T} d\mathbf{\sigma}' + \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}^{P}}^{T} d\boldsymbol{\varepsilon}^{P} + \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{S}_{r}^{H}} dS_{r}^{H}$$
(11)

この降伏関数の増分式にハイドレート含有地盤の応力 -ひずみ関係の増分式(12),関連流れ則により(10)を代入 していく。

$$d\mathbf{\sigma}' = \mathbf{D}_{hs}^{e} d\mathbf{\epsilon}^{e} \tag{12}$$

ここで, $d\sigma'$ は応力増分, D_{hs}^{e} はハイドレート含有地盤の 弾性剛性マトリクス, $d\epsilon^{e}$ は弾性ひずみベクトルである。 ここで D_{hs}^{e} は式(13)で表される。

$$\mathbf{D}_{hs}^{e} = \begin{pmatrix} K' + \frac{4}{3}G_{hs} & K' - \frac{2}{3}G_{hs} & K' - \frac{2}{3}G_{hs} \\ K' - \frac{2}{3}G_{hs} & K' + \frac{4}{3}G_{hs} & K' - \frac{2}{3}G_{hs} \\ K' - \frac{2}{3}G_{hs} & K' - \frac{2}{3}G_{hs} & K' + \frac{4}{3}G_{hs} \end{pmatrix}$$
(13)

K'は体積剛性係数, G_{hs} はハイドレートによる影響を考慮したせん断剛性係数であり、それぞれ式(14)、(15)で表される。

$$K' = \frac{1+e_0}{\kappa} p' \tag{14}$$

$$G_{int} = \left(3K'\frac{1-2\nu}{2(1+\nu)} + m_2(1-\beta)S_r^H\right)\frac{p'}{p'_i}$$
(15)

vはポアソン比, m_2 はハイドレートによるせん断剛性増 加パラメータである。この式に用いられるハイドレート飽 和率は力学挙動に寄与するものでなければならないので 全体の飽和率から PF型の割合を引いたものとなっている。 p'_i は基準応力であり、せん断弾性係数の平均有効応力依 存性を考慮するために導入した。また、

$$\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}^{p}}^{T} = \frac{\partial f}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}^{p}}^{T}$$
(16)

と偏微分させた式を導入する。 k は硬化パラメータであ り, p'_{cs} , p'_{cm} , p'_{b} , R^{である。}

(16) を(11) に代入し, 整理すると,

$$d\mathbf{\sigma'} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{hs}^{e} - \frac{\mathbf{D}_{hs}^{e} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{\sigma'}} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{\sigma'}}^{T} \mathbf{D}_{hs}^{e}}{\frac{\partial f}{\partial \mathbf{\sigma'}} - \frac{\partial f}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial \boldsymbol{\epsilon}^{p}} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{\sigma'}}} \end{bmatrix} d\boldsymbol{\epsilon}$$
(17)

となる。

4. 解析結果および考察

4.1 材料パラメータの決定

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。初期平均有効応力 1MPa の比較には Miyazaki et al.(2016)⁴⁾が行った排水三軸圧縮試 験の結果を,初期平均有効応力 5MPa に関しては Hyodo et al.(2014)³⁾が行った排水三軸圧縮試験に対して再現シミュ レーションをする。表2に材料パラメータをまとめる。ま た,全体のハイドレート飽和率及び存在形態の初期割合を 表3及び表4の値で仮定する。また,図5に初期平均有効 応力 1MPa における $S_r^H = 50\%$ 付近,図6 では初期平均有効 応力 1MPa $S_r^H = 30\%$ 付近の MH, CDH 含有供試体及び豊浦 砂のみの排水三軸圧縮試験,及び再現結果を図示する。

図5の実験結果より1MPaにおいては砂のみの供試体と 比較して,MH含有供試体,CDH供試体ともにq,初期剛 性,正のダイレイタンシーが大きい結果となった。しかし ながら,MH含有供試体,CDH供試体の結果を比較する と,同程度の S_r^{H} を持つにもかかわらず,軸差応力及び体 積膨張量に大きな差がみられた.また,図6より S_r^{H} =30% 付近においてはMH,CDH含有供試体の強度はともに S_r^{H} =50%付近の時と比べて小さいが,MH,CDH含有供試 体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。これは S_r^{H} =50%付近でのMH 含有地盤においてはCM型のガスハイドレートが卓越し ているということが原因と考えられている⁴⁾。よって表3 に示すようにMH含有供試体では力学挙動に大いに影響 してくるCM型の割合 α をCDH供試体よりも多めに,逆 にCDH供試体では,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。本来ならば、実際の存在形態 の割合を可視化して確認することが望ましいが、現状では 不可能である。よってこれらの存在形態の割合をフィッテ ィングパラメータのように取り扱って、 α , β , γ を決定し た。基本的にはハイドレート飽和率が上がるにつれて MH 含有供試体では CM 型の割合 α を、CDH 供試体では LB 型の割合 γ を増やした。5MPa においても同様の理由で**表 4**のように設定した。

表2材料パラメータ				
初期平均有効拘束圧(MPa)	p'	1.0	5.0	
基準応力(MPa)	p'_i	0.1	0.1	
ポアソン比	V	0.2	0.2	
限界状態応力比	М	1.2	1.23	
圧縮指数	λ	0.16	0.072	
膨張指数	К	0.04	0.035	
初期間隙比	e_0	0.613	0.667	
初期降伏応力(MPa)	p'_{cs}	9.0	9.0	
過圧密解消パラメータ	m _R	20.0	11.0	
CM 型から LB 型への存在形 態の変化を表すパラメータ	m_{α}	1.0	1.0	
PF 型と LB 型への存在形態の 変化を表すパラメータ	m_{β}	7.0	7.0	
ハイドレートによるせん断剛 性増加パラメータ	m_2	250.0	250.0	
<i>p'_{cm}</i> に関するパラメータ	a,b	21.0,1.0	55.0,1.0	
<i>p'_{lb}</i> に関するパラメータ	c,d	6.0, 1.0	10.0,1.0	

表3 ガスハイドレート飽和率と存在形態の 割合の初期条件(1MPa)

1MPa	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	

表 4 ガスハイドレート飽和率と存在形態の 割合の初期条件(5MPa)

5MPa	S_r^H	α	γ	β
MH	41.9	0.7	0.2	0.1
MH	35.1	0.4	0.2	0.4
CDH	44.9	0.2	0.5	0.3
CDH	32.7	0.2	0.4	0.4

4.2 排水三軸圧縮試験及び再現シミュレーション

図 5 より初期平均有効応力 1MPa における $S_r^H = 50\%$ 付近 においては a,b,c,d をガスハイドレートの種類によって 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シーの傾向を表現 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。



図 5 拘束圧 1MPa, $S_r^H = 50\%$ 付近における実験 4 と解析結果



図 6 拘束圧 1MPa. $S_r^H = 30\%$ 付近における実験 ${}^{\circ}$ と解析結果 次に図 7 に初期平均有効応力 5MPa における $S_r^H = 40\%$ 付近,図 8 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。 しかしハイドレートによる強度増加の拘束圧依存性を考 慮するために、1MPa のケースからフィッティングパラメ ータを変化させた。

5MPaの S_r^H = 40% における場合でも, *a,b,c,d* をガスハ イドレートの種類によって変えることなく, MH 含有地 盤の三軸圧縮強度の増加傾向,体積ひずみの膨張傾向を表 現できた。特に初期剛性はよく表現できている。しかし CDH 含有地盤の圧縮量は実験結果と差が出てしまう結果 となった。これは実際の実験が高拘束圧の下で行われてい たので,粒子破砕が発生し,圧縮量が多くなってしまった と考えられる。次に 1MP と同様に*a,b,c,d* を変えずに存 在形態の割合を変えて S_r^H = 40% 付近から S_r^H = 30% ヘハイ ドレート含有地盤の力学特性が合うように調整した。その結果, MH 含有地盤, CDH 含有地盤ともにピーク強度,体積圧縮 傾向を表現できた。また,CDH 含有地盤に関しては初期 剛性から限界状態における強度までの実験結果をほぼ再 現することができた。







図8 拘束圧 5MPa, S^H_r = 30% 付近における実験³⁾と解析結果

4.3 非排水三軸圧縮試験結果の再現シミュレーション

次に CDH 含有地盤の非排水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。 初期平均有効 応力 2MPa に関しては Iwai et al. (2017)⁸⁾ が行った非排水三 軸圧縮試験に対して再現シミュレーションをする。表5に 材料パラメータをまとめる。

また,図9に初期平均有効応力2MPaにおけるCDH含 有地盤及び豊浦砂のみの非排水三軸圧縮試験,及び再現結 果の応力-ひずみ関係,図10に有効応力経路を図示する。

図9の実験結果より、qは S_r^H の増加に伴い増加してい く。また、図10の有効応力経路より、各ケースの変相後 のダイレイタンシーは全体のハイドレート飽和率 S_r^H が 大きくなるほど、正のダイレイタンシーが顕著になり正の 相関があることがわかる.しかし一方で、せん断初期の正 の過剰間隙水圧の大きさに差が見られない。非排水三軸圧 縮試験で用いた CDH 含有供試体において、せん断が進行 することによる PF 型から LB 型への存在形態の移行が行 われたからであり、 S_r^H が大きいほどその影響が顕著に表 れたと考えられる。

次に構成式における各存在形態の初期割合であるが,前 節の実験及び解析結果より CDH 含有地盤においては, CM 型のハイドレートよりも PF 型及び LB 型が卓越している 可能性が示唆された。よって非排水試験での各飽和率の初 期割合を表6の値で仮定した。また、飽和率が上昇するご とにLB型の割合を増やすことで調整した。

図 9 より各飽和率のケースにおける非排水三軸試験の 応力-ひずみ関係の初期剛性, ピーク強度を再現すること ができた。非排水試験においても排水試験の時と同様に存 在形態の割合を変えることによって応力--ひずみ関係を 再現することができる。また,図10より有効応力経路も ほぼ再現することができた。

表	5	材料/	パラ	X	ータ
---	---	-----	----	---	----

初期平均有効拘束圧(MPa)	p'	2.0
基準応力(MPa)	p'_i	0.1
ポアソン比	v	0.2
限界状態応力比	М	1.2
圧縮指数	λ	0.16
膨張指数	к	0.004
初期間隙比	e_0	0.740
初期降伏応力(MPa)	p'_{cs}	6.5
過圧密解消パラメータ	m_R	250.0
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_{α}	1.0
PF 型と LB 型への存在形態の 変化の速度を示すパラメータ	m_{β}	1.0
ハイドレートによるせん断剛性 増加パラメータ	<i>m</i> ₂	250.0
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

表 6 ガスハイドレート飽和率と存在形態の 割合の初期条件 (2MPa)

2MPa	S_r^H	α	γ	β		
CDH	25.8	0.1	0.3	0.6		
CDH	36.3	0.1	0.45	0.45		
CDH	56.8	0.1	0.5	0.4		



図9 拘束圧 2MPa における実験⁸⁾と解析結果



図 10 拘束圧 2MPa における実験⁸⁾と解析結果

5. まとめと今後の課題

本研究ではガスハイドレート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 含有地盤の排水及び非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。

- MH, CDH 含有地盤の実験結果に対しては, *a*, *b*, *c*, *d* をガスハイドレートの種類によって変えることなく, 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。
- MH と CDH の違いだけでなく、S^H が減少した場合も 同様に、ガスハイドレート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。
- 同程度の S^H で初期平均有効応力が異なる場合は、ハ イドレートによる強度増加は拘束圧に依存するという 知見に基づいて、フィッティングパラメータを増減さ せることで実験結果を精度良く再現することができる。 この時、全体のハイドレート飽和率はほぼ等しいため、 存在形態の割合は変化させていない。
- 本研究ではダイレイタンシー特性に着目し、粘着力に よる強度増加は考慮しなかった。今後の課題として粘 着力の影響も考慮したガスハイドレート含有地盤の再 現シミュレーションを実施する。

参考文献

- 米田純,兵動正幸,中田幸男,吉本憲正:深海底におけるメタン ハイドレート堆積土の三軸せん断特性,土木学会論文集 C, Vol.66, NO.4, pp.742-756, 2010.
- Hyodo, M., Yoneda, J., Yoshimoto, N. and Nakata,Y.: Mechanical and dissociation properties of methane hydrate-bearing sand in deep sealbed, Soils and Foundations, Vol.53, NO.2, pp.299-314, 2013.
- Hyodo, M., Li, Y., Yoneda, J., Nakata, Y., Yoshimoto, N., Kajiyama, S., Nishimura, A. and Song, Y.: A comparative analysis of the mechanical behavior of carbon dioxide and methane hydrate-bearing sediments, American Mineralogist, Vol.99, pp.178-183, 2014.
- Miyazaki, K., Oikawa, Y., Haneda, H., Yamaguchi, T.: Triaxial Compressive Property of Artificial CO₂-Hydrate Sand, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol.26, NO.3, pp.315-320, 2016.
- Pinkert, S., Grozic, J.L.H.: Failure Mechanisms in Cemented Hydrate-Bearing Sands, *Chemical and engineering data*, Vol60, NO3, pp.376-382, 2014.
- Uchida, S., Soga, K. and Yamamoto, K. : Critical state soil constitutive model for methane hydrate soil, *Journal of Geophysical Research*, Vol.117, NO.B03209, 2008.
- Hashiguchi, K.: Sobloading surface model in unconventional p lasticity, *Internationl Jorunal of Solids and Structures*, Vol.25, pp.917-945, 1989.
- Iwai, H., Konishi, Y., Kimoto, S.: Undrained triaxial compression tests on artificial CO₂-hydrate-bearing sand specimens, *Energy Procedia*, 2017. (in printing)