

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560604

研究課題名(和文) ガスハイドレートを含む地盤材料の分解挙動の把握と変形予測手法の開発

研究課題名(英文) Dissociation behavior of hydrate-bearing sediments and prediction of deformation behavior

研究代表者

木元 小百合 (Kimoto, Sayuri)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70362457

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：温度制御型高圧三軸試験装置を用いて、湿潤砂試料中に二酸化炭素を浸透させた後、セルの温度を低下させて水と二酸化炭素を反応させることにより、CO<sub>2</sub>ハイドレート含有砂供試体を作成した。作成した供試体を用いて非排水条件で加熱分解試験、せん断試験を実施した。特にひずみ速度を変えた非排水三軸試験を行い、ハイドレート飽和率による変形強度特性の変化について検討した。

上述の試験結果に弾粘塑性構成式を適用し要素シミュレーションを行った。また、加熱分解試験について化学-熱-力学連成解析手法を用いて数値シミュレーションを行った。開発した手法は間隙圧の上昇による骨格応力減少、変形挙動を再現できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Carbon dioxide hydrate-bearing sand specimens were prepared by using temperature controlled high pressure triaxial apparatus. Dissociation tests by heating and shear tests under undrained conditions were performed in order to investigate the deformation behavior during dissociation and shearing with different hydrate saturation. Especially, undrained triaxial tests with different strain rate were conducted to investigate the time dependency of hydrate-bearing soil. An elasto-viscoplastic model was applied to the shear test results. In addition, a chemo-thermo-mechanically coupled numerical analyses were conducted to reproduce the dissociation tests. The proposed method well reproduce the increase in the pore pressure during dissociation and following deformation.

研究分野：地盤力学

キーワード：ハイドレート 非排水三軸試験 弾粘塑性構成式

1. 研究開始当初の背景

ハイドレート資源開発時の地盤環境問題としては、1) 急激な生産に伴う坑井周辺の沈下やすべりを伴う大変形、2) 生産に伴う海中および大気中へのガスの漏洩、3) 地震時の挙動、について検討する必要がある。我が国で開発対象とされている東部南海トラフでは、砂泥互層(タービダイト)中の砂層間隙中に分散状のハイドレート層が確認されている。開発時には、地盤内で固体として存在するハイドレートを、加熱あるいは減圧することによりメタンガスに分解して取り出すため、海底地盤中で固体(ハイドレート)から気体(メタンガス)への相変化が起こるといふ、資源開発分野や地盤工学でも未経験の特殊なケースが生じる。以上のような地盤変形問題を取り扱うため、ハイドレート含有地盤材料の変形特性の把握とそのモデル化が重要である。

2. 研究の目的

既往の研究により、間隙中にハイドレートを含む地盤材料は、ハイドレートを含まない試料と比較して、ハイドレートによる固結や間隙率の低下により、強度が増加することが示されている。しかしながら、研究例は未だ少なく、特に排気・排水条件の違いやひずみ速度の影響、構成モデルの検討など、ハイドレート含有地盤の力学特性や分解時の地盤の基本的な挙動について未だ解明されていない部分が多い。本研究では、特に非排水条件下でハイドレート含有地盤の分解試験およびせん断試験を実施し、相変化、応力変化に伴う土骨格の挙動を把握することを目的とする。また、ガスハイドレート含有地盤を対象とした変形予測手法の確立のため、構成モデルおよび数値解析手法の開発を行う。

3. 研究の方法

ハイドレート含有試料の作製と力学試験には、不飽和土の体積測定と温度制御が可能となるよう改良した高圧三軸試験装置を用いた。写真-1に試験装置を示す。安全性、作業性を考慮しメタンの代わりに、より低圧で安定となるCO<sub>2</sub>ハイドレートを用いる。作成したハイドレート含有砂試料の三軸試験を行い、変形特性を明らかにするとともに、構成式によるシミュレーションを行う。次に同じ装置を用いて加熱法による分解実験と非排水せん断試験を行い、分解時の変形挙動を把握するとともに、化学・熱・力学連成解析手法を用いて再現して分解時の変形挙動を考察し、解析手法について検証する。

4. 研究成果

(1) 実験結果

豊浦砂内にCO<sub>2</sub>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、異なる初期平均有効応力及び異なるハイドレート飽和率で非排水三軸圧縮試験を行った結果を示

す。図-1にCO<sub>2</sub>ハイドレート平衡曲線及び生成過程の温度圧力径路を示す。図-1の径路(b)のように、間隙圧力を2.3MPaに保ちつつ、セル内部の温度を10から1に冷却することでCO<sub>2</sub>ハイドレートが生成される低温高压条件にする。この状態で24時間置きCO<sub>2</sub>ハイドレートを生成させる。CO<sub>2</sub>ハイドレート生成後、通水を行い、残留したCO<sub>2</sub>ガスを蒸留水と置換し、飽和状態とする。図-1中径路(c)に示すように、間隙水圧を目標値まで上昇させたのち、等方圧密過程を経てせん断を行う。表-1にハイドレート非含有試料および含有試料の実験条件を示す。



写真-1 試験装置概略

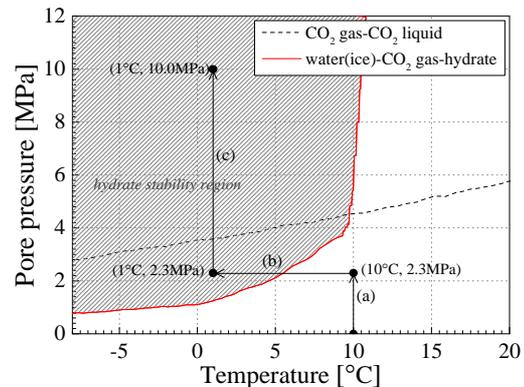
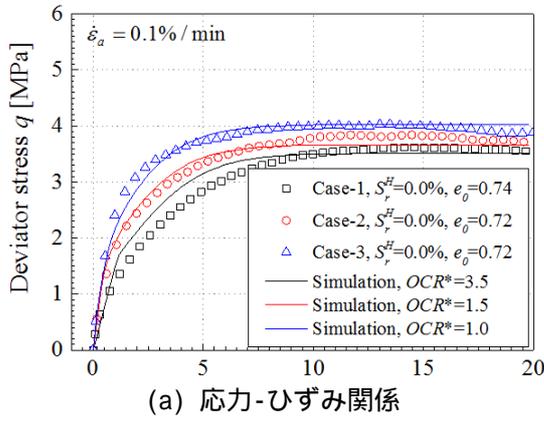


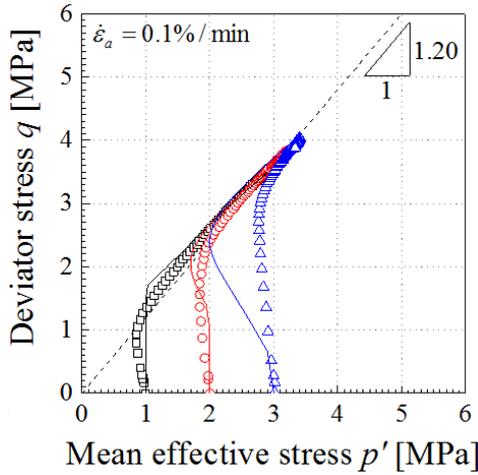
図-1 CO<sub>2</sub>ハイドレート生成過程の温度圧力

表-1 実験条件

Case-No.	Initial void ratio: $e_0$	Initial mean effective stress[MPa]	Hydrate saturation: $S_r$ [%]
Case-1	0.74	1.0	0.0
Case-2	0.72	2.0	0.0
Case-3	0.72	3.0	0.0
Case-1-H	0.76	1.0	34.6
Case-2-H	0.73	2.0	27.8
Case-3-H	0.73	3.0	28.5

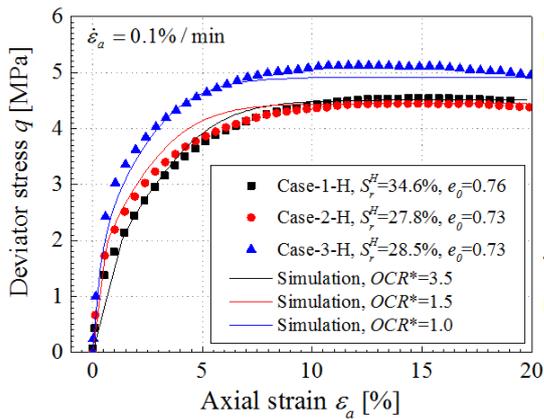


(a) 応力-ひずみ関係

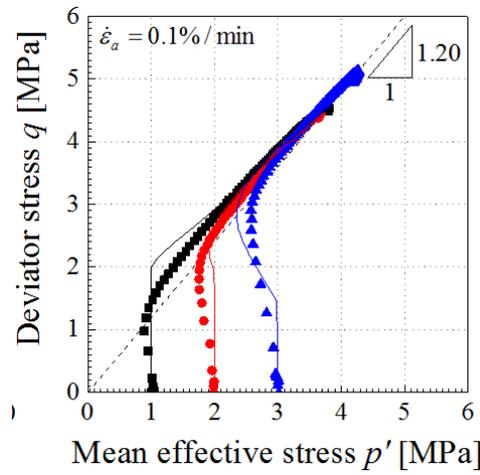


(b) 有効応力径路

図-2 ハイドレート非含有試料の非排水三軸試験



(a) 応力-ひずみ関係



(b) 有効応力径路

図-3 ハイドレート含有試料の非排水三軸試験

表-2 解析に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]	$\sigma'_{m0}$	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
初期間隙比	$e_0$	0.74	0.76	0.72	0.73	0.72
ひずみ速度 [%/min]	$\dot{\epsilon}_a$			0.1		
初期せん断弾性係数 [kPa]	$G_0$	50000	100000	150000		
圧密降伏応力 [kPa]	$\sigma'_{mi}$	3500	3000	3000		
圧縮指数	$\lambda$		0.0112			
膨潤指数	$\kappa$		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]	$C_1$		$3.5 \times 10^{-12}$			
粘塑性パラメータ [1/s]	$C_2$		$1.0 \times 10^{-12}$			
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			

図-2 にハイドレートを含わない砂試料の非排水三軸試験、図-3 にハイドレート含有試料の非排水三軸試験結果を弾粘塑性構成式によるシミュレーションと合わせて示す。実験結果より、ハイドレート含有供試体は非含有供試体と比較して最大軸差応力は増加し、その増加割合はハイドレート飽和率及び拘束圧に依存することが分かった。また限界状態における応力比は含有、非含有に関わらず一定の値になることが分かった。

## (2) 解析結果

ハイドレート含有地盤材料の構成モデルとして、弾粘塑性構成式の適用性について検討する。既往の研究により、ハイドレート単体の力学的物性については、ヤング率やポアソン比は概ね氷と類似しており、氷と同様にクリープ特性を示すことが報告されている。これにより、ハイドレート含有地盤材料も明確な時間依存性挙動を示すことが知られている。これまでにガスハイドレート含有試料の構成モデルはいくつか提案されているが、長期的変形の再現に有効な時間依存性を考慮したモデルは提案されていない。本研究で

は、ハイドレート飽和率依存性を考慮した弾粘塑性構成式を用いた。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モデルとして提案された超過応力型流れ則を用いた構成式に、内部構造変化、ハイドレート飽和率依存性を考慮して拡張した弾粘塑性構成式をもとにしている。モデルにおいて、変形特性のハイドレート依存性は、過圧密境界面および静的降伏曲面の拡大および縮小、つまり硬化および軟化によって表現している。

決定した材料パラメータを表-2に示す。時間依存性を表す粘塑性パラメータ  $m'$  は、別途行ったひずみ速度急変三軸試験より決定した。初期せん断弾性係数と圧密降伏応力については拘束圧によって異なる値を用いた。圧密降伏応力と初期有効応力の比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 としている。またハイドレート含有による変形特性への影響は、ハイドレート飽和率依存性パラメータによって表現される。

図-2、図-3より提案した構成式により、ハイドレート飽和率による軸差応力の増加、拘束圧による有効応力径路の違い、各条件における粘塑性体積圧縮から粘塑性体積膨張への遷移を概ね再現できている。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2件)

木元小百合, 岩井裕正, 最明和樹, 進藤拓人, 岡二三生, ガスハイドレート含有地盤材料への弾粘塑性構成式の適用, 材料, Vol.64, No.4, pp.317-322, 2015.

Iwai, H., Kimoto, S., Akaki, T., Oka, F., Stability analysis of methane hydrate-bearing soil considering dissociation, Energies, Vol.8, pp.5381-5412; doi:10.3390/en8065381, 2015.

[学会発表](計 7件)

Akaki, T., Oka, F., Kimoto, S., Higo, Y. and Iwai, H., Effect of permeability and dissociation rate on a chemo-thermo mechanically coupled numerical analysis of hydrate-bearing sediment, Prof. 25th KKCNN, Busan, Korea, October 2012, pp. 351-355, 2012.

岩井裕正, 木元小百合, 最明和樹, 岡二三生, CO<sub>2</sub> ハイドレート含有砂供試体の非排気非排水条件下における分解実験, 第5回メタンハイドレート総合シンポジウム, CSMH-5 2013, pp. 162-164, 2013.

進藤拓人, 岡二三生, 木元小百合, 天然ガスハイドレート三軸圧縮挙動の弾粘塑性構成式によるモデル化, 第5回メタンハイドレート総合シンポジウム, CSMH-5 2013, pp. 178-183, 2013.

Iwai, H., Kimoto, S., Oka, F., Higo, Y., Shiraishi, M, Formation and Dissociation Tests of Carbon Dioxide Hydrate Containing Soils by a Triaxial Apparatus, The Twenty-Sixth KKHTCNN Symposium on Civil Engineering, November 18-20, 2013, Singapore, 2013.

Iwai, H., Kimoto, S., Akaki, T., and Oka, F., Instability analysis and numerical simulation of the dissociation process of methane hydrate bearing soil, Computer methods and Recent Advances in Geomechanics, Oka, Murakami, Uzuoka & Kimoto (eds.), Proc. of the 14th Int. Conf. of International Association for Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics, Kyoto, Japan, 22-25 September, 421-426, 2014.

Kimoto, S., Iwai, H., Akaki, T., Oka, F., Instability of Dissociation Process of Methane Hydrate Bearing Soil, Bifurcation and Degradation of Geomaterials in the New Millennium, Bifurcation and Degradation of Geomaterials in the New Millennium, Proc. of the 10th International Workshop on Bifurcation and Degradation in Geomaterials, Hong Kong, May 28-30, 2014, Kam-Tim Chau and Jidong Zhao (Eds), Springer, 245-251, 2014.

岩井裕正, 最明和樹, 木元小百合, 岡二三生, 第6回メタンハイドレート総合シンポジウム, CSMH-6 2014, 2014年12月3-4日 pp. 158-162, 2014.

[図書](計 0件)

[産業財産権]

出願状況(計 0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:

発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

木元 小百合 (KIMOTO, Sayuri)  
京都大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：70362457

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：