

令和元年6月11日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14721

研究課題名(和文) 深海底地盤に隔離されたCO₂ハイドレートの相転移を考慮したトラップメカニズム

研究課題名(英文) Trap mechanism of carbon dioxide hydrate stored in deep seabed ground considering phase transition

研究代表者

岩井 裕正 (Iwai, Hiromasa)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：80756908

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、二酸化炭素ハイドレート(CDH)含有地盤の強度・変形特性を表す弾塑性構成式の高精度化および、深海底地盤の不安定化現象に関する模型実験を実施した。弾塑性構成式の高精度化については、従来のガスハイドレート(GH)含有地盤の構成式には考慮されてこなかったGHの存在形態を考慮した弾塑性構成式を新たに提案した。提案した構成式によって、種々のGH含有地盤の強度変形特性を統一的に表現することが可能となった。また、海底地盤不安定化現象に関する模型実験からは、地盤内に不透水層が存在する場合に特に大規模な地すべりが発生することが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、温室効果ガスである二酸化炭素をハイドレート化して深海底に貯留した際の地盤強度や地盤変形について正確に予測することが可能となった。これにより、CDH含有地盤が十分な強度を持つと判断することができれば、放出される二酸化炭素をハイドレート化して深海底地盤内に貯留する技術が実現されることとなる。また、ハイドレート化貯留は従来の地中貯留と比べてもコストが安価であり、二酸化炭素削減に向けて追い風となる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we propose a new elasto-plastic constitutive equation that represents the strength and deformation characteristics of the ground containing carbon dioxide hydrate (CDH) and we carried out model tests on the instability of the deep-seabed ground. In order to improve the elasto-plastic constitutive equation, we proposed an elasto-plastic constitutive equation considering the morphology of gas hydrates (GH) which has not been considered in the conventional constitutive equation of GH containing ground. The proposed constitutive equation makes it possible to uniformly express the strength and deformation characteristics of various GH-containing ground. In addition, from the model experiments on the seabed ground instability phenomenon, it became clear that a large-scale landslide occurs especially when the impermeable layer exists in the ground.

研究分野：地盤工学

キーワード：CO₂ハイドレート 海底地盤 二酸化炭素地中貯留 海底地すべり 弾塑性構成式 三軸圧縮試験

1. 研究開始当初の背景

温室効果ガスの削減は全世界規模で考えるべき喫緊の課題である。二酸化炭素回収隔離(CCS)技術は、排出源からのCO₂を大規模かつ直接的に削減することが可能な唯一の対策であり、火力発電所や製鉄所等の大規模発生源に共通に適用できる将来の有効な地球温暖化対策技術として位置付けられている。

CO₂の地中貯留の従来方法としては、海底面下1,000m~2,000mの深部帯水層内に高圧のCO₂を圧入し、帯水層の上部の非常に透水性の低い岩盤層(不透水層)でキャップするように物理的に封じ込める方法が提案されてきている。しかし、地震断層域の多い我が国では岩盤層に亀裂が入り、封じ込められていたCO₂が漏洩するリスクを無視できないだけでなく、そのような岩盤層に断層のない領域を見つけることさえ困難である。そこで近年新たに、回収したCO₂をハイドレート化(以下、CDH: Carbon Dioxide Hydrateと記す)して海底地盤の砂層に固体として隔離する方法が効果的であると提案されてきている。これを以下、「ハイドレート化貯留」と呼ぶ。従来の深部帯水層への圧入方法と比較して「ハイドレート化貯留」のメリットとしては、主に以下の項目が挙げられる。

ハイドレート化することで地盤内に固体として固定できるため漏洩のリスクが低い。

圧入対象となる地盤は、海底面下100m~300mの比較的浅い未固結層であり、間隙体積が比較的大きく浸透性もよいため、CO₂を効率よく圧入できる。

ハイドレート化することでCO₂ガスの体積をおよそ1/165倍に圧縮できることから、一度に大量のCO₂を貯蔵することが可能である。

一方で、海底地盤隔離後のCDH含有地盤の力学的安定性に関する研究は未だ途上にある。海底地盤内に隔離されたCDHが、地熱、海水温上昇、熱水噴出等が原因となり再び水とCO₂ガスに分解する可能性を無視してはいけぬ。また、こうした相転移に伴う流体圧上昇は海底地盤の不安定化を招き海底地すべり等大規模災害の原因となる。海底地盤内における水・CO₂ガスの混合流体の振舞いや、流体圧の変化に伴う海底地盤の力学挙動に関して地盤工学的観点から詳細に検討することで、安全かつ高効率なCCSの実現可能性を担保することができる。本研究では、CDH分解に伴う流体の発生および地盤内における流れを室内実験により詳細に観察し、固体-液体-気体の相転移に伴う地盤強度・変形に関する精緻な数値モデルを構築することを主眼に据える。

2. 研究の目的

本研究の目的は主に2つある。一つ目の目的は、深海底二酸化炭素ハイドレート化貯留が地盤工学的に見て十分な強度や安全性を有するのかを適切に評価する手法を開発することである。二つ目の目的は、仮に海底地盤内に貯留されたCDHが分解した際の海底地盤災害のリスクについて把握することである。

まず、一つ目の目的に対しては、実際の深海底地盤の温度圧力条件下でのCDH含有地盤の強度と変形特性を明らかにするため、低温高圧三軸圧縮試験装置を用いたCDH含有供試体の三軸圧縮試験を実施した。さらに、様々なGH存在形態を考慮した弾塑性構成式を新たに提案し、先に得られたCDH含有地盤の三軸圧縮試験結果に対してシミュレーションを実施した。

二つ目の目的に関して、海底地盤内におけるGHの分解が引き起こす地盤災害として特に「海底地すべり」現象に着目した。模型実験土槽を用いて、CDH分解による流体圧の上昇を地盤不安定化現象の典型である海底地すべり発生メカニズムの解明を試みた。

3. 研究の方法

(1) CDH含有地盤の強度変形特性の把握に関する実験および弾塑性構成式の提案

本研究で提案する構成式は、Uchida et al.(2012)[1]のMHCSモデルに基づく。このMHCSモデルは、従来の限界状態を想定した修正カムクレイモデルに、MHを含有することによるダイレイタンスーおよび粘着力の増加を降伏関数の拡大に導入したモデルである。本研究で提案する構成式は、MHCSモデルに基づいているが、GHの存在形態を考慮するうえで、以下に示す仮定を用いた。

地盤間隙内におけるハイドレートの存在形態は、図1に示すようにPore filling(PF)型、Load bearing(LB)型、およびCementing(CM)型の3形態に分けられ、全体のハイドレート飽和率は、それぞれの存在形態割合の総和として表す。

PF型は地盤の力学挙動に影響を与えない。つまり、降伏関数の拡大には寄与しない。

LB型は、ハイドレートを含まない地盤に比べて、強度増加や正のダイレイタンスー挙動を顕著にする。

CM型は、土粒子同士固着することによってLB型に比べてより大きな正のダイレイタンスー挙動を示す。

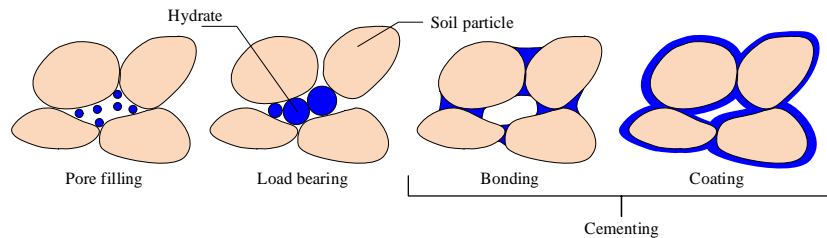


図 1 GH 存在形態の概念図

修正カムクレイ型の降伏関数を基本に，GH を含有することによる地盤強度増加およびダイレイタンスー挙動の変化を表現するために，従来の圧密降伏応力に加えて，CM 型ハイドレートおよび LB 型ハイドレートの存在形態割合に依存した硬化パラメータを導入した．本研究で提案した降伏関数を次の式(1)に示す．

$$f = q^2 + M^2 p' \left[p' - R(p'_c + p'_{CM} + p'_{LB}) \right] \quad (1)$$

p'_c 圧密降伏応力， R は Hashiguchi(1989)[2]の下負荷面を表す変数， p'_{CM} および p'_{LB} はそれぞれ，CM 型による硬化および LB 型による硬化を表現するための硬化パラメータである．地盤の強度増加，つまり降伏関数の拡大には 2 種類のハイドレート存在形態 (CM 型，LB 型) が寄与しており，たとえ同程度のハイドレート含有量を有していたとしてもどちらの存在形態が支配的下によって地盤強度増加の程度が異なってくる．様々な存在形態が混合している GH 含有地盤の強度変形特性を統一的に記述できる弾塑性構成式である．

(2) 間隙圧上昇による海底地すべり発生メカニズムに関する模型実験

本実験では，海底斜面を模擬した模型土槽を用いる．模型土槽内に設置した斜面模型上に砂を堆積させ，斜面下面から定水位昇降装置の上下の変更に伴う水位差により水圧を与えることで海底地盤のすべり出し時の水圧及び土塊の移動を把握することを目的とした実験を行う．本研究では，特に以下の 2 つの項目に着目する．

海底地盤内に過剰間隙水圧が発生したことを想定し，間隙水圧の大きさと圧入範囲を変えた時の地盤変動．

不透水層の有無が地すべり発生に及ぼす影響．

実験土槽はアクリル製の土槽を用いた．土槽の寸法は内寸で幅 1500mm，深さ 600mm，奥行方向 400mm であり，土槽内に斜面角度 10° ，水平距離 1000mm の斜面模型を設置した．斜面中央には幅 200mm でポラスフィルターが設置されており，水圧を与える際に分散して圧力を与えることができる．ポラスフィルターは，孔径の異なる 2 種類のアルミパンチング板で紙を上下から挟み込んだ構造になっている．また，厚さ 1mm，幅 395mm，長さ 920mm のビニールシートを不透水層として用いた．斜面模型には，5 枚の透水性フィルターが設置されており，フィルターに繋がるチューブを通して定水位昇降装置から水が供給される．この時，それぞれのチューブにはコックが取り付けられており，コックの開閉位置を変えることで，斜面に与える水圧の範囲を調節することが可能な機構となっている．また，斜面地盤に与えられた水圧は，法尻，斜面中腹，法肩の 3 カ所で計測し，地盤変動に関しては水中カメラによって撮影した．

4. 研究成果

まず研究内容(1)の CDH 含有地盤の三軸圧縮試験結果と，CDH のモホロジーを考慮した弾塑性構成式の比較結果の一例を図 2 に示す．図 2 より，実験結果の応力 - 軸ひずみ関係を精度良く再現できている．また有効応力径路においても，変相前の負のダイレイタンスー量はケース間であまり差が見られないが，変相後の正のダイレイタンスー量は全体のハイドレート飽和率の増加に伴い大きくなっている特徴を弾塑性構成式による計算においてもよく捉えることができている．

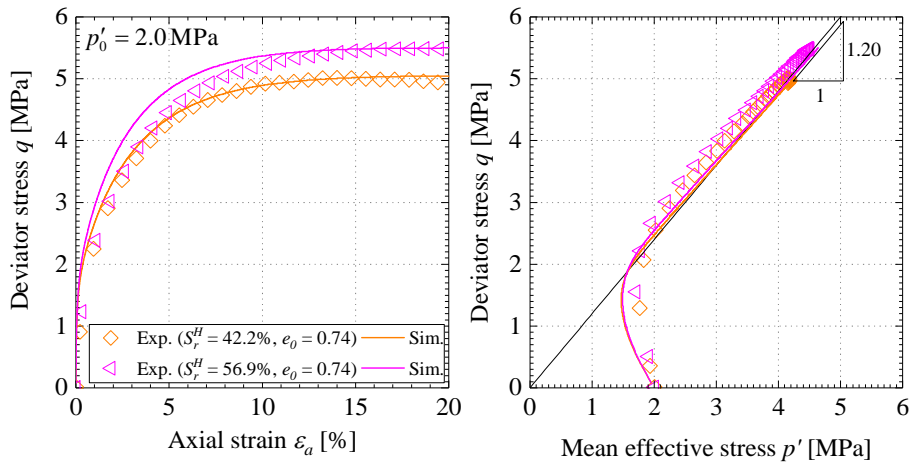


図2 CDH含有供試体の非排水三軸圧縮試験結果と構成式による解析結果の比較

次に、研究内容(2)の模型土槽を用いた海底地すべり発生メカニズムに関する実験結果の一例を示す。まず、不透水層の有無で比較すると、不透水層なしのケースでは、水圧を与えた法尻付近でパイピングが発生したが、研究背景で述べたような斜面全体の地すべりは発生しなかった。一方で、斜面内に不透水層を設置したケースでは、全てのケースで斜面下方向に不透水層に沿って平行移動するすべりが確認された。不透水層が無い場合は、水圧を与えた範囲にのみ圧力が集中し、パイピングが発生するのに対して、不透水層が有る場合では、水圧を与える範囲が局所的であっても不透水層下の広範囲で過剰間隙水圧が増加し、地すべりが発生したと考えられる。下の図3は不透水層が有るケースにおいて、水圧を与える範囲を変化させたときの地すべり距離の比較結果である。"Case-i"に続く数字が大きいくほど、水圧を与える範囲が大きいくことを示している。図3より水圧を与える範囲が大きいくほど、小さい水頭差ですべりが発生し、最終的なすべり距離も大きくなる傾向が見られる。また、Case-i3, Case-i4, Case-i5において水位差 200mm ~ 400mm ではすべり距離の増分が大きいが、Case-i3 では水位差 800mm, Case-i4 では水位差 500mm, Case-i5 では水位差 400mm 付近でその勾配が緩やかになる。水位差を大きくすればより長い距離をすべるのではなく、すべり距離の増加が頭打ちになる点が存在する。これはすべりに伴って移動した不透水層上部の砂が法尻に堆積し、すべりの進行を阻害していることによるものだと考えられる。そのため、移動距離が短いことで法尻の堆積量が少ない Case-i1 および Case-i2 では明確に勾配が緩くなる点が見られないと考えられる。

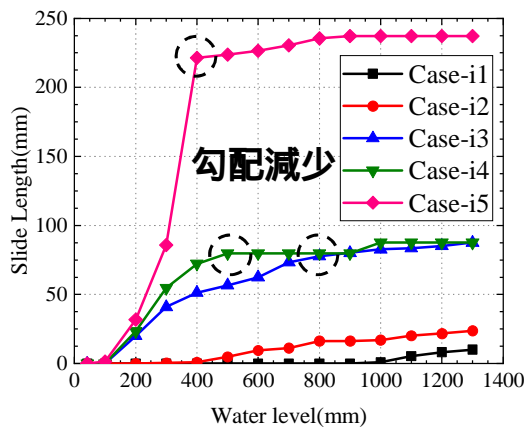


図3 不透水層ありのケースごとのすべり距離の比較

<参考文献>

[1] Uchida, S., Soga, K., Yamamoto, K. (2012). Critical state soil constitutive model for methane hydrate soil. J. Geophys. Res. **117**, B03209.
 [2] Hashiguchi, K., (1989). Subloading surface model in unconventional plasticity. Int. J. Solids Struct. **25**(8), 917-945.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- (1) **岩井裕正**, 小西陽太, 木元小百合: CO₂ハイドレート含有砂のひずみ速度依存性と弾粘塑性構成式の適用, *土木学会論文集 C*, 2019. (in press) (査読有)
- (2) **Iwai H.**, Konishi Y., Saimyou K., Kimoto S. and Oka F.: Rate effect on the stress-strain relations of synthetic carbon dioxide hydrate-bearing sand and dissociation tests by thermal stimulation, *Soils and Foundations*, **58**(5), pp.1113-1132, 2018. 10.1016/j.sandf.2018.05.007 (査読有)
- (3) **Iwai H.**, Konishi Y., Kimoto S.: Undrained triaxial compression tests on artificial CO₂-hydrate-bearing sand specimens, *Energy Procedia*, **114C**, 99.3175-3184, 2017. 10.1016/j.egypro.2017.03.1446 (査読有)

〔学会発表〕(計10件)

- (1) **Iwai H.** and Kawasaki T.: A constitutive model for gas hydrate-bearing soils considering hydrate morphology, *International Symposium on Energy Geotechnics, Laussane Switzerland*, 2018.
- (2) **岩井 裕正**, 川崎 貴也: モホロジー変化を考慮した二酸化炭素ハイドレート含有地盤の強度増加メカニズムのモデル化, 第21回応用力学シンポジウム, 名城大学, 2018.
- (3) **Iwai H.**: Constitutive Modeling For Gas-Hydrate-Bearing Soils Considering Hydrate Morphology, 3rd CICHE-JSCE Joint Workshop, Taichung Taiwan, 2018.
- (4) **岩井 裕正**, 川崎 貴也, 張 鋒: ガスハイドレート存在形態の違いによる強度増加及びダイレイタンスの変化, 第53回地盤工学研究発表会, 高松, 2018.
- (5) 木村 真郷, **岩井 裕正**, 川崎 貴也, 張 鋒: 海底地すべり発生メカニズムおよびその規模に関する室内模型実験, 第53回地盤工学研究発表会, 高松, 2018.
- (6) 木村 真郷, **岩井 裕正**, 川崎 貴也, 張 鋒: 海底地すべり発生メカニズムに関する研究, 第30回中部地盤工学シンポジウム, 名古屋大学, pp.99-106, 2018.
- (7) **Iwai H.**: Geotechnics for Gas Hydrate-Bearing Sediments, ACECC The 1st Future Leader Forum, Kathmandu Nepal, 2017.
- (8) **岩井 裕正**, 川崎 貴也, 張 鋒: ガスハイドレート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, 平成29年度土木学会全国大会, 九州大学伊都キャンパス, 2017.
- (9) **岩井 裕正**, 川崎 貴也: 間隙中のガスハイドレート存在形態を考慮した地盤強度変形特性のモデル化に関する研究 第9回メタンハイドレート総合シンポジウム 東京 pp.166-172, 2017.
- (10) 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.

〔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:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。