

氏名	加藤 晃
授与学位	博士(工学)
学位記番号	理工博甲第684号
学位授与年月日	平成28年3月17日
学位授与の要件	学位規則第4条1項
研究科, 専攻の名称	理工学研究科(博士後期課程) システム設計工学系専攻
学位論文題目	メタンハイドレートを含む砂の力学特性および分解時変形挙動に関する研究
論文審査委員	主査 山口大学 教授 中田 幸男 山口大学 教授 兵動 正幸 山口大学 教授 松田 博 山口大学 准教授 鈴木 素之 山口大学 助教 吉本 憲正

【学位論文内容の要旨】

近年、非在来型の天然ガス資源のひとつであるメタンハイドレートが日本近海に相当量の賦存が見込まれることが明らかとなり、次世代資源として商業化に向けた研究開発が行われている。メタンハイドレートは水分子とメタン分子からなる氷状の水和物であり、低温・高圧の条件下で安定的に存在することができる。日本近海のメタンハイドレートを回収する方法として、メタンハイドレート貯留層まで井戸を掘削し、井戸内を減圧することで海底地盤内においてメタンハイドレートをメタンガスと水に分解し、ガスとして回収する方法が有効であることが明らかにされてきたが、この場合、土粒子間の隙間に固体として存在するメタンハイドレートを気体として回収するため、開発中に以下のような問題が危惧される。掘削に伴う応力変化による海底地盤の変形、減圧に伴う有効応力の増加による地盤沈下、地すべり、効率的な減圧手法の選択、生産中のガス漏洩、水圧の回復に伴う有効応力の減少による地盤の変形である。そのため、メタンハイドレートを含む砂の強度や変形、砂中のメタンハイドレートの分解特性を知る必要がある。本論文では、メタンハイドレートが含まれる海底地盤の力学特性や変形挙動、砂中のメタンハイドレートの分解挙動を把握するための実験的検討と、それらの挙動を表現する応力ひずみモデルの開発およびそれを組み込んだシミュレータを用いた解析的検討を行う。

第1章「序論」

世界のエネルギー動向について概観し、国産エネルギーの必要性を述べた。また、メタンハイドレートの性質や賦存状況、資源としてどのように活用されるかについて言及し、メタンハイドレートが国産エネルギーになり得る可能性について述べた。さらに、メタンハイドレートを資源化する際に、工学的課題は何か、それら課題に対して過去にどのような研究が行われてきたかを述べた。最後に本論分の目的と構成を示した。

第2章「海底地盤環境下におけるメタンハイドレートを含む砂の力学特性」

メタンハイドレートを含む砂の力学特性および変形特性を調べるために、平面ひずみ応力条件下における圧密排水圧縮試験を行った。このとき、有効拘束圧とメタンハイドレート飽和率を変化させた。その結果、メタンハイドレートを含むことで強度が増加し、膨張挙動が顕著になる結果が得られた。また有効拘束圧が増加するにつれて、応力比は減少する傾向を示した。破壊強度の推定は、SMP 基準が最も適切であるが、有効拘束圧の増加により、Mohr-Coulomb 基準に近づく傾向を示した。さらに、メタンハイドレートが含まない場合において、拘束圧が増加すると、粒子破砕を顕著に起こすことを示した。

第3章「メタンハイドレート分解時の砂の変形挙動」

メタンハイドレート生産方法として減圧法が考えられているため、減圧法によるメタンハイドレート含む砂の変形挙動とメタンハイドレートの分解特性について、実験的検討を行った。このとき、細粒分含有率の異なる試料を用いて実験を行った。細粒分を多く含む場合、分解時に土中の透水性に偏りが生じ、圧力差が生じてしまうことを明らかにした。

第4章「有限要素法解析手法によるメタンハイドレートを含む砂の分解時変形シミュレーション」

地層変形シミュレータを使用して、要素レベルにおけるメタンハイドレート含む砂の力学試験および分解実験シミュレーションを行った。このとき、既往の研究により開発されたメタンハイドレート含む砂の強度および変形挙動を表現できる弾塑性構成式を導入し、解析に使用した。その結果、メタンハイドレートの分解による温度減少を再現できた。また、地層変形シミュレータに導入した弾塑性構成式を用いて、減圧またはメタンハイドレートの分解による変形挙動を再現することができた。

第5章「結論」

各章で得られた知見をまとめ、結論とした。

【論文審査結果の要旨】

次世代資源としてのメタンハイドレート(MH)生産に向けた研究開発が行われている。この生産手法として、MH 貯留層まで井戸を掘削し、井戸内を減圧することで海底地盤内において MH をメタンガスと水に分解し、ガスとして回収する方法が注目されている。しかし、土粒子間の隙間に固体として存在する MH を気体として回収するため、様々な課題が想定される。本研究では、MH が含まれる砂の力学特性、MH 分解中の変形挙動を把握するための実験的な検討と、それらの挙動を表現する構成モデルおよび、そのモデルを組み込んだシミュレータの開発を行っている。MH を含む土の力学特性や分解時挙動については、開発した平面ひずみ圧縮装置を用いて実験的に検討し、中間主応力の考慮した強度評価や局所変形挙動を分析している。分解時挙動では、減圧法を再現し、メタンガスの発生量と変形の関係を示すとともに、圧力回復時に破壊を伴うことやその局所挙動を明示している。解析的な検討では、MH の存在による固結効果を考慮した構成モデルを組み込んで、砂の変形と水やガスの連成解析を実施し、分解時変形挙動を再現している。

以下、各章毎に概説する。

第1章「序論」では、世界のエネルギー動向について概観し、国産エネルギーの必要性を述べた。また、メタンハイドレートの性質や賦存状況、資源としてどのように活用されるかについて言及し、メタンハイドレートが国産エネルギーになり得る可能性について述べた。さらに、メタンハイドレートを資源化する際に、工学的課題は何か、それら課題に対して過去にどのような研究が行われてきたかを述べた。最後に本論文の目的と構成を示した。

第2章「海底地盤環境下におけるメタンハイドレートを含む砂の力学特性」では、メタンハイドレートを含む砂の力学特性および変形特性を調べるために、平面ひずみ応力条件下における圧密排水圧縮試験を行った。ここでは、有効拘束圧とメタンハイドレート飽和率の条件を変化させた検討を行った。その結果、メタンハイドレートを含むことで強度が増加し、膨張挙動が顕著になる結果が得られた。また有効拘束圧が増加するにつれて、応力比は減少する傾向を示した。破壊強度の推定は、SMP基準が最も適切であるが、有効拘束圧の増加により、Mohr-Coulomb基準に近づく傾向を示した。さらに、メタンハイドレートが含まない場合において、拘束圧が増加すると、粒子破碎を顕著に起こすことを示した。

第3章「メタンハイドレート分解時の砂の変形挙動」では、メタンハイドレート生産方法として有力視されている減圧法を対象に、メタンハイドレート含む砂のメタンハイドレートの分解特性と分解時の変形挙動について、実験的検討を行った。ここでは、実際の地盤を想定して細粒分含有率の異なる試料を用いて実験を行った。細粒分を多く含む場合、分解時に土中の透水性に偏りが生じ、圧力差が生じてしまうことを明らかにした。

第4章「有限要素法解析手法によるメタンハイドレートを含む砂の分解時変形シミュレーション」では、地層変形シミュレータを使用して、メタンハイドレート含む砂の力学試験および分解実験シミュレーションを行った。このシミュレータには、提案したメタンハイドレート含む砂の強度および変形挙動を表現できる弾塑性構成式を導入した。その結果、メタンハイドレート飽和率の違いが評価可能なことを確認した。また減圧によるメタンハイドレートの分解および変形量を計算可能なことを明示した。

第5章「結論」では、各章で得られた知見をまとめ、結論とした。

公聴会には、学内外から30名程度の参加があった。公聴会での主な質問内容は、実験中の温度や圧力条件について、提案した構成式のマテリアル定数の評価について、中間主応力の影響について、4章で実施したシミュレーションのモデルについて、減圧・回復時の変形挙動に対するシミュレーションについて、等でありいずれの質問に対しても発表者から十分な回答がなされた。

以上より、本研究は、メタンハイドレートを含む砂の力学特性および分解時変形挙動に関して多くの知見を与え、学術上重要な貢献を行っており、独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士(工学)の論文に十分に値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、関連論文の発表状況は以下のとおりである（関連論文計 3 編）。

- 1) Jun Yoneda, Masayuki Hyodo, Norimasa Yoshimoto, Yukio Nakata, Akira Kato, Development of High-pressure Low-temperature Plane Strain Testing Apparatus for Methane Hydrate-bearing Sand, Soils and Foundations, Vol.53, No.5, pp.774-783, 2013.
- 2) Masayuki Hyodo, Norimasa Yoshimoto, Akira Kato, Jun Yoneda, Shear Strength and Deformation of Methane Hydrate Bearing Sand with Fines, Proc. of 18th ICSMGE, Vol.18, No.2, pp.1011-1014, 2013.
- 3) Akira Kato, Yukio Nakata, Plane strain compression behavior and localization of deformation on MH-bearing sand, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Proc. of 15th ARC on SMGE, 512-517. 2015.