

学位論文内容の要旨	
学位論文題目	南海トラフのメタンハイドレート生産を想定した土の変形および強度特性に関する研究
氏名	梶山 慎太郎
<p>研究の目的は、南海トラフのメタンハイドレート(以下、MH)濃集層の模擬試料をはじめとして、様々な粒度から成る複数の砂に対してMHを生成させ、模擬試料ごとの変形および強度特性を評価するとともに、MHが分解した時の土の変形および強度特性を評価することである。</p> <p>現在、一次エネルギーの国内供給に占める化石燃料の割合は非常に高いが、その全てを輸入に頼っている。また、原子力が一次エネルギーの国内供給に占める割合は2008年現在で約10.4%であった。しかし、東北地方太平洋沖地震を端緒に日本のエネルギー政策が根本的に見直され、今後、原子力発電のエネルギー供給に占める割合は減少し、化石燃料がエネルギー供給に占める割合は増加すると考えられる。</p> <p>このような経緯から、代替エネルギーへの移行への関心が高まっており、MHが注目されている。MHは日本の近海にも大量に存在し、特に東部南海トラフのMH濃集層で研究開発が進められている。</p> <p>ここで、MHが存在する南海トラフの海底地盤に着目すると、MH濃集層は砂泥互層と成っており、その砂の間隙中に砂を固結する形で存在している。MIIの生産はMII濃集層まで掘削を行い、MII濃集層にかかる圧力を下げてMHをメタンガスと水に分解して回収する減圧法が考えられている。このような地盤からMHを長期的かつ安全に開発するためにはMH含有地盤の挙動の把握が重要である。</p> <p>MHの商業生産を目指し、MHを含んだ砂やコア試料の力学試験や南海トラフにおいて海洋産出試験が行われ、研究開発が進められている。しかし、先述の通り対象のMH含有地盤は広範囲な粒土分布を有しているにもかかわらず、粒土分布を管理して行われた力学挙動の評価やMHが分解された時の砂の挙動を評価した研究は少ない。そこで、本研究では試料としてMH濃集層の模擬試料を用いた。また、後述の個別要素法には、球形要素を用いて解析を行っている。そこで、形状が球形に近く表面が滑らかなガラスビーズも併せて試料として用いた。</p> <p>本研究では、先述の複数の試料に対して、恒温高圧平面ひずみせん断実験装置を用いてせん断試験およびMH分解実験を行った。また、実験によって得られた知見をもとに、個別要素法によるMH生産を想定した、固結力を失った土の力学シミュレーションを行い、変形挙動について評価している。</p> <p>第1章「序論」</p> <p>第1章では、まずMHの性質およびMH開発の歴史について概説した。さらに、既往の研究と商業生産のための課題についてまとめた。</p> <p>第2章「南海トラフ模擬土の変形および強度特性」</p> <p>第2章では、まず、研究に用いた試料について概説した。南海トラフ模擬土をはじめとして、細粒分含有率の異なるMH含有砂に対してせん断試験を行い、細粒分の違いによる力学特性の違いを評価した。また、試験中に取得した画像から、PIV解析を行い、局所変形を評価した。その結果、既往の研究と同様にMH含有砂は、ホスト砂よりも高い強度を発現することが分かった。また、MHによる強度の増加量は、細粒分含有率が高いほどに大きくなる傾向が認められた。変形挙動に着目すると、ホスト砂では終始収縮傾向が認められ、有効拘束圧が増加するほどに収縮挙動が顕著となった。これは、拘束圧が高圧であるために粒子破砕が起こったためと考えた。これに対しMH含有砂ではホスト砂と比較すると収縮挙動が低減された。変形挙動に着目すると、細粒分含有率が低いほどに局所変形が大きくなることが明らかとなった。</p>	

第3章「メタンハイドレート分解に伴う土の変形および強度特性」

第3章では、第2章に用いた試料に対して間隙水圧を減少させることで減圧法によるMH生産を想定したMH分解実験を行った。本研究では、最も危険側な条件であるMHを含まない砂の強度以上、MH含有砂の強度以下のせん断応力を保持した状態での分解挙動を評価した。その結果、いずれの試料もMHが分解すると、吸熱反応により供試体内の温度が低下した。またMH分解中、応力比が一定のまま軸ひずみが進行した。MHが完全に分解し間隙水圧を回復させると、いずれの試料も応力比がホスト砂の強度に達すると、せん断帯を伴って破壊した。一方で、細粒分含有率の低い試料ではせん断帯が生じるまでに大きな変形は認められなかったが、細粒分含有率が高い試料では、せん断帯が生じるまでもに全体的に変形が生じることが明らかとなった。また、破壊後の供試体のせん断帯の角度は、同じ拘束圧で行ったせん断試験によって得られたせん断帯の角度より大きくなることが分かった。

第4章「メタンハイドレート生産を想定した粒状体の力学シミュレーション」

第4章では、個別要素法を用いて第2章および第3章で得られたパラメータを用いて解析を行った。本シミュレーションでは、間隙中に存在するMHが力学特性および変形挙動へ与える影響を評価するために、供試体を作製後にその間隙中に固結力を持つ小さな粒状体を発生させてせん断試験シミュレーションおよび固結粒状体消去シミュレーションを行った。解析の結果、固結粒状体を含まない試料のシミュレーションよりも、固結粒状体を含む試料のシミュレーションの方が強度が高くなることが分かった。また、固結粒状体消去シミュレーションでは、粒子消去前に大きなせん断応力を加え、粒子を消去した後にせん断終了時の有効応力まで応力が回復すると、シミュレーションではそのまま軸ひずみが進行したが、 k_0 条件では軸ひずみは進行しない結果となった。

第5章「結論」

第5章では、各章で得られた知見をまとめ、結論としている。

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

学位論文題目	Deformation and shear strength characteristics of methane hydrate bearing sediments in Nankai Trough during gas production
氏 名	KAJIYAMA Shintaro

This study aims to evaluate the deformation and shear strength characteristics of methane hydrate bearing sediments prepared with the similar grading curves to the deposits in the methane hydrate concentrated layers in Nankai Trough during shearing and gas production processes.

Currently, the percentage of fossil fuel in the domestic energy provision is very high and almost all the domestic energy resources are imported. The atomic energy almost covered 10.4% of the primary energy provision in 2008. However, this percent continually decreased after the 2011Tokoku earthquake for the safe reason. To solve the problem of energy insufficiency, the concentration of the renewable energy resources such as methane hydrate becomes higher. Methane hydrate is expected to become a future energy source and widely distributed in seabed near Japan. Especially, the research on the methane hydrate in the Nankai Trough attaches lots of attentions.

The geology of the sea bed of the Nankai Trough, called turbidite, constitutes multiple stratified layers of sand and clay. MH mostly exists in the void spaces of the sand layers. The production well is constructed on the methane hydrate bearing layers for gas exploitation. The gas dissociation is implemented by depressurizing the pore pressure in the methane hydrate concentrated layers to convert the methane hydrate into the gas and water. Well understanding of the mechanical behaviour of marine ground with methane hydrate is significantly important for the efficient and safe gas exploitation.

To achieve the goal of commercial exploitation of methane gas, the mechanical properties of the pressure-core sample retrieved from offshore trial test had been investigated. However, the experimental study on the mechanical properties of the methane hydrate bearing sediments with various grading curves is limited. Besides, the discrete element analysis using the spherical ball is also implemented. Thus, the glass beads with smooth surface and rounded shape is also employed to form the methane hydrate bearing granular materials and its mechanical behaviour and deformation are also examined as the benchmark.

The dissociation tests have also been performed on the above methane hydrate bearing sediments using the innovative high-pressure low-temperature plane strain testing apparatus equipped with an observation window. The discrete element analysis is performed to evaluate the deformation of methane hydrate bearing sediments with deteriorating cementation force under the assumption of methane hydrate production.

Chapter One: Introduction

The past relevant study on the characteristics of methane hydrate and the history of the methane hydrate exploitation development had been reviewed. Additionally, the unsolved problem concerned with the commercial exploration of the methane hydrate had been summarized.

Chapter Two: The deformation and shear strength of methane hydrate bearing sediment in Nankai Trough

A series of plane strain compression shearing tests at high pressures were performed on methane hydrate bearing sediments with the similar grading curves to the deposits in Nankai Trough to investigate the effect of fines content of the host sands on the shear behaviour of methane hydrate bearing sediments. The particle image velocimetry analysis was conducted on pictures taken during the experiments and the local deformation of

specimens was evaluated. The test results demonstrated that the shear strength of methane hydrate bearing sediments was higher than that of the corresponding host sand. It is in consistence with the previous study. The strength enhancement due to the bonding effect in methane hydrate bearing sediments increased with the level of fines content. The rise in confining pressure also increased the volume contraction of host sand and this tendency was attributed to the particle crushing of sand at high pressures. The volume contraction of host was reduced once the methane hydrate was formed. It is noted that the local deformation of methane hydrate bearing sediments with less fines content was larger.

Chapter Three: The mechanical and dissociation of sand during methane hydrate dissociation

The dissociation tests have also been performed on the above methane hydrate bearing sediments employed in Chapter Two using the innovative high-pressure low-temperature plane strain testing apparatus. This study attempts to investigate the dissociation deformation of methane hydrate bearing sediments under the most critical condition subjected to an initial shear stress which is higher than the shear strength of host sand but higher than that of methane hydrate bearing sediments. The temperature in the specimens with and without methane hydrate reduced due to the abortion of heat during methane hydrate dissociation. The axial strain progressed with the constant stress ratio during the methane hydrate dissociation. The shear strength of methane hydrate bearing samples went back the shear strength of host sand and finally attained the failure state after the complete dissociation of hydrate and pore water recovery. The distribution of global deformation of specimens in advance of the appearance of shear band became remarkable as the fines content of specimens increased. Besides, the angle of the shear band of methane hydrate bearing sediments at the same confining pressures also increased with the rise in fines content.

Chapter Four: Mechanical simulation of granular material under the assumption of methane hydrate production

The discrete element analysis was performed using the mechanical parameters determined from the measured results in Chapters Two and Three. In the simulation, the numerical analysis on the specimens assembled of sand grain particles without small hydrate mass particles and the specimens assembled of sand grain particle and smaller hydrate mass particles with cementation stress in the void space to examine the influence of the presence of methane hydrate on their shear response. The numerical results showed that the shear strength of methane hydrate bearing sediments was higher than that of corresponding host sand. When the removal of cemented particles was simulated, the axial strain of specimens under initial shear stress progressed in advance of the removal of cemented particles as the confining pressures went back to the initial value. No axial strain of specimens under K_0 condition was seen.

Chapter Five: Conclusion

The findings in each chapter were summarized.

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

(博士後期課程博士用)

山口大学大学院理工学研究科

報告番号	理工博甲 第 717 号	氏名	梶山 慎太郎
最終試験担当者		主査	中田 幸男
		審査委員	松田 博
		審査委員	鈴木 素之
		審査委員	吉本 憲正
		審査委員	中島 伸一郎
		審査委員	兵動 正幸
【論文題目】			
南海トラフのメタンハイドレート生産を想定した土の変形および強度特性に関する研究			
【論文審査の結果及び最終試験の結果】			
<p>メタンハイドレートの生産には自噴の有無や温室効果ガスであるメタンガスの漏洩など、既存の石油開発技術だけでは解決できない問題が多い。また、地盤工学的な問題に着目すると、掘削に伴う応力変化や、メタンハイドレート生産によって、メタンハイドレート含有層の間隙内のメタンハイドレートがメタンガスに分解することで固結力が失われ、地盤沈下や海底地すべりなどに起因して、生産効率の低下や生産井の健全性の喪失などの問題が危惧されている。</p> <p>メタンハイドレートの生産が予定されている南海トラフは、タービダイトと呼ばれる砂と粘土が交互に重なり合う砂泥互層である。この層の物理調査から、粒度が種々様々であり、密度やメタンハイドレート飽和率も分布していることが指摘されている。上述するような問題の解決のために、地層の変形および強度特性の把握の要望が高まっている。こうした課題に対して、これまで、現地試料のサンプリングとそれを用いた力学試験の実施が行われている。しかし、試料の物理特性のばらつきに加え、サンプリング時の乱れ、サンプリング数の制限などで、体系立てて検討されているとはいえない。また、南海トラフでのメタンハイドレート生産については、生産井の掘削からメタンハイドレート生産終了まで、土に作用する応力状態が様々に変化することが想定される。この変化がメタンハイドレート含有土および分解後の土の変形および強度特性に与える影響を十分に把握する必要がある。</p> <p>以上のことを鑑み、本学位論文では、南海トラフでのメタンハイドレート生産を想定した、土の変形および強度特性を把握するための一連の基礎的な検討を行っている。特に、南海トラフ域においてメタンハイドレートが含有する砂泥互層の粒度組成を再現した模擬試料を用いた一連の検討、および生産手法の有力な候補となっている減圧法を想定した検討を行っている。また、得られた実験的な知見を踏まえて、個別要素法を用いた粒状体モデリングとそれによる分解過程での微視的力学特性を考察している。</p> <p>本学位論文は、序論を含め以下に示す5つの章で構成されている。</p> <p>第1章では、メタンハイドレート開発の歴史や基本的特徴を示している。また、砂泥互層中に存在するメタンハイドレート含有砂に対する地盤工学的課題と既往の研究などについてまとめている。さらに、本論文の目的および構成を示している。</p>			

第2章では、南海トラフの砂泥互層の模擬試料を対象として、せん断中の変形及び強度特性の評価を行っている。ここでは、比較材料として豊浦砂、さらに第4章の個別要素法の検証材料としてガラスビーズを比較試料として、平面ひずみ条件でせん断試験を行っている。まず、メタンハイドレートを含有させる各模擬試料のせん断特性を把握し、その上で、メタンハイドレート含有砂の力学特性および変形特性について明らかにしている。また、得られた結果に基づいて、メタンハイドレートの存在形態について考察を行っている。

第3章では、メタンハイドレートの生産開始から生産終了までの応力変化を模擬試料に与えて、変形特性を把握している。具体的には、減圧法を想定したメタンハイドレート分解実験を、恒温高圧平面ひずみ実験装置を用いて行っている。結果については、まず、減圧中の温度、間隙水圧の変化を示し、メタンハイドレートの分解を確認している。その上で、分解中の土の変形特性の評価、および分解後の力学挙動の安定性の検討を行っている。

第4章では、個別要素法を用いて、第2章でのせん断試験および、第3章での分解実験を想定した数値解析を行っている。ここでは、メタンハイドレートの存在形態に対する考察を踏まえて、土粒子およびMH自体を要素とするモデル化を採用している。そのうえで、平面ひずみ条件にて固結粒状体のせん断および固結除去のシミュレーションを行っている。このシミュレーションにおいてメタンハイドレート含有砂の変形、強度特性を再現するとともに、固結除去シミュレーションによってメタンハイドレート生産中の土の内部構造の変化を、有効接点数に着目して考察している。

第5章では、以上の結果を要約し、南海トラフでのメタンハイドレートの生産における地盤力学的な観点からの留意点を提示し、結論としている。

公聴会での主な質問内容は、

- ・メタンハイドレートの存在を固結要素として表現することとした経緯、
 - ・その固結要素の材料パラメータの設定方法、
 - ・メタンハイドレートによる強度増加に与える粒子表面の粗度の影響、
 - ・メタンハイドレートの存在形態に対する考え方、
 - ・メタンハイドレートの生産に伴う、分解による安定化の捉え方等であり、
- 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、南海トラフのメタンハイドレート生産を想定した土の変形および強度特性に関して多くの知見を与え、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5編）。

- 1) S. Kajiyama, M. Hyodo, Y. Nakata, N. Yoshimoto, Y. Wu, and A. Kato, Shear behaviour of methane hydrate bearing sand with various particle characteristics and fines, *Soils and Foundations*, Vol.57 (2), 2017 (2017年4月号掲載決定).
- 2) S. Kajiyama, M. Hyodo and A. Nishimura, Mechanical characteristics and localized deformation of Methane Hydrate-bearing sand using high pressure plane strain shear tests, *The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paper No. JPN-123, 2015.