

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Contents of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目
(Dissertation Title)

(Shear Rate-dependent Behaviors and Decomposition
Characteristics of Methane Hydrate-bearing Sediments)
(メタンハイドレート胚胎砂のせん断速度依存挙動および分解特性)

氏 名(Name)

Qi Wu (呉 起)

The development of society has increased the demand for energy consumption year by year, and the exploitation and utilization of new energy are urgent and necessary. At present, a large number of natural gas hydrates have been found in permafrost and marine sediments around the world. It has been estimated that the carbon content in the natural gas hydrate is about twice the sum of the carbon content in all currently proven fossil fuels (including coal, oil, and natural gas), so it is a promising energy resource in the future. The ultimate aim of this thesis is to provide an experimental basis for the realization of safe and efficient exploitation of natural gas hydrate.

Firstly, before realizing the safe exploitation of natural gas hydrate, it is necessary to study the influence mechanism of different factors on the mechanical properties of hydrate-bearing sediments by the laboratory's mechanical experiments. Sediments have various stress conditions in the natural gas hydrate reservoir. However, most of the current studies about the mechanical properties of hydrate-bearing sediments under general stress conditions and then established corresponding constitutive models. The failure of hydrate-bearing sediments under plane strain conditions is always accompanied by significant local strain and eventually formed a clear shear band. Even under the same experimental conditions, the stress-strain relationship of hydrate-bearing sediments is different in the triaxial shear and plane strain shear experiments. Moreover, the local strain may cause changes in the local permeability of the reservoir, which can also affect the gas production efficiency. As in the plane strain experiment, the failure of the specimen is affected by the development of the shear band. In particular, the angle and thickness of the shear band are considered to be related to the strength of the specimen. The study of the development of the shear band is helpful to understand the development process of the shear band in different stress-strain stages and to establish the relationship between the development of the shear band and the stress strain in the future.

Secondly, to the long-term accurate prediction of the changes in the mechanical properties of natural gas hydrate reservoirs, the time dependence of hydrate-bearing sediments must also be considered. The shear rate dependence experiment is an effective method to study the time dependence of materials, but only a few relevant research results have been reported. The shear rate dependence characteristics of the hydrate-bearing sediments under plane strain conditions have also been studied in this thesis. The research results will help to introduce time parameters into the constitutive model of hydrate sediments in the future, and

then achieve long-term accurate prediction of the mechanical characteristics of natural gas hydrate reservoir.

Finally, understanding the decomposition characteristics of hydrates in the sand is the basis for developing methods to improve gas production efficiency. Therefore, the effect of the content of fine particles on the decomposition characteristics of hydrates in the sand under local thermal stimulation conditions has been studied firstly. And then considering the mechanical properties of the reservoir are closely related to the decomposition properties of hydrates, under different stress conditions, the stress-strain relationship of hydrate-bearing sediments and the decomposition characteristics of hydrates during local thermal stimulation and depressurization have been studied. The experimental results are helpful to understand the interaction mechanism between the decomposition of hydrates and the stress-strain behavior of sediments under different conditions.

The content of this thesis as follows:

In chapter 1, the research background about the natural gas hydrate has been introduced. The current exploitation progress of natural gas hydrate and the related problems were also reviewed. And then the mechanical properties and the decomposition characteristics of hydrate-bearing sediments have been discussed. Finally, the aim and organization of this thesis were shown.

In chapter 2, it has shown the image information and some basic physical properties of the experimental materials that used in this thesis. And then, with the plane strain shear tests on the host sand and hydrate-bearing sediment, the development of the shear band has been studied.

In chapter 3, the shear rate-dependent characteristics of hydrate-bearing sediments has been studied. After confirming that hydrate-bearing sediment also has shear rate-dependent characteristics under plane strain conditions, three different shear rates have been selected to study the effects of hydrate saturation and fines content on shear rate dependence.

In chapter 4, the decomposition of hydrate in sands has been studied. Firstly, the decomposition characteristics of hydrate-bearing sediments with different fine particle contents by local thermal stimulation were researched. And then, combined with different stress conditions, the decomposition characteristics of hydrate in the sediments by local thermal stimulation and depressurization have been studied.

In chapter 5, the summary of this thesis and future work has been shown.

(様式9号)

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏名	Qi Wu (呉 起)
審査委員	主査：吉本 憲正
	副査：麻生 稔彦
	副査：中田 幸男
	副査：鈴木 素之
	副査：中島 伸一郎
論文題目	Shear Rate-dependent Behaviors and Decomposition Characteristics of Methane Hydrate-bearing Sediments (メタンハイドレート胚胎砂のせん断速度依存挙動および分解特性)
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>深海底地盤に存在するメタンハイドレート（以下、MH と記述する）は、砂中の間隙を埋める形で存在するため、その資源開発においては地盤工学の立場から取り組む必要がある。特に、MH を含む砂のせん断特性や、MH 資源開発中の MH 貯留層の力学挙動の変化を明らかにすることは、安全かつ効率的な生産を行う上で重要である。そこで、これまで実施されていない平面ひずみ条件下で、MH を含む砂のせん断時のせん断帯の特性やせん断速度依存性を解明すること、さらには、生産手法として考えられている減圧法や加熱法を適用した条件下での、MH 分解時の力学挙動を解明することを目的に、低温高圧平面ひずみせん断試験装置や低温高圧三軸試験装置を用いた種々の実験が実施された。</p> <p>学位論文の内容は以下の通りである。</p> <p>第1章では、MH 資源開発を安全かつ効率的に実施するための背景や課題について、MH の特性や資源としての MH の可能性、実施された実証試験の現状、安全かつ効率的な資源開発に関連するせん断特性や分解特性に関する既往の研究に基づいて整理した。また、本研究の流れを明確にするために、論文の構成と概要を示した。</p> <p>第2章では、実験試料の物理的特性や試験方法および画像解析手法を説明した。さらに、客観性の高いせん断帯の幅と角度の決定方法を提案し、その手法を用い、せん断帯はピーク強度発現後徐々に形成されること、MH を含む砂は、砂のみの場合に比較してせん断帯の角度が大きく、幅が狭いこと、せん断帯の角度や幅がせん断中に変化することなど、有益な結果を得た。</p> <p>第3章では、MH を含む砂のせん断挙動のせん断速度依存性について、MH 飽和率や細粒分の影響を明らかにするために、平面ひずみせん断試験で得られた結果を示した。MH 飽和率が高い場合、せん断速度の増加に伴い体積ひずみの膨張量が大きくなり、特にせん断帯内の体積膨張が顕著に表れること、変形係数は、正のせん断速度依存性を有すること、細粒</p>	

分の存在は、せん断帯内での体積膨張のせん断速度の影響及び変形係数のせん断速度依存性を減少させることを明らかにした。MH 飽和率が高い場合、細粒分の有無に関わらず、ピーク強度は、正のせん断速度依存性を示すこと、残留強度は、せん断速度との間に相関が認められないことを明らかにした。

第 4 章では、MH 分解時の力学挙動を調査するために、生産手法である減圧法や加熱法を再現可能な低温高圧三軸試験装置や低温高圧平面ひずみ試験装置を用いて実験的検討を行い、その結果について述べた。減圧法を想定した実験から、減圧初期は、MH の分解により主応力差が急激に低下し、体積の収縮が顕著に表れるものの、メタンガスの生産効率は高くなること、更なる減圧により有効拘束圧が高くなることで、ひずみ硬化挙動が顕著に表れること、加熱法を想定した実験から、初期せん断応力の大きさにより、MH の分解が全体で生じていない条件においてもせん断破壊に至ること、せん断破壊が生じることにより、メタンガスの生産挙動に影響を与えることなど、生産中の重要な力学挙動について言及した。

第 5 章では、本研究で得られた成果をとりまとめ、本論文の総括を行うとともに、今後の展望について示した。

公聴会における主な質問内容は、せん断帯に着目した研究の工学的な理由、せん断帯の幅と角度に及ぼすせん断速度の影響、MH 及び細粒分を含む砂の強度発現のメカニズム、供試体の破壊がメタンガスの生産性に及ぼす影響、実地盤での生産活動におけるせん断速度の考え方、ピーク強度及びせん断帯の角度とせん断速度との関係が異なる理由、などに関することであり、いずれの質問に対しても発表者からの的確かつ十分な回答がなされた。

以上より本研究は独創性、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、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。（関連論文：計 4 編）

- 1) Dongliang Li, Qi Wu, Zhe Wang, Jingsheng Lu, Deqing Liang, Xiaosen Li: Tri-Axial Shear Tests on Hydrate-Bearing Sediments during Hydrate Dissociation with Depressurization, *Energies*, 11(7), 1819, 2018.
- 2) Qi Wu, Norimasa Yoshimoto, Naoki Nakano, Shintaro Kajiyama, Jialin Xu, Yukio Nakata: Shear Rate-dependent behaviors on natural gas hydrate-bearing sediments under plane strain shear test, *Proceedings of 30th International Ocean and Polar Engineering Conference*, pp.63-67, 2020.
- 3) Qi Wu, Norimasa Yoshimoto, Bat-ochir Tumurdulam, Shintaro Kajiyama, Yukio Nakata, Masayuki Hyodo: Effect of fines content and hydrate saturation on the shear rate dependence of methane hydrate-bearing sediments, *Proceedings of 31st International Ocean and Polar Engineering Conference*, pp.289-293, 2021.
- 4) Qi Wu, Norimasa Yoshimoto, Shintaro Kajiyama, Yukio Nakata: Image analysis of natural gas hydrate-bearing sand during shear with different plane strain shear rate, *Proceedings of 3rd International Symposium on Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics*, 2021. (Accepted)