

学位論文要旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	東部南海トラフにおけるメタンハイドレート胚胎土の力学特性 および弾粘塑性構成モデルに関する研究 (Mechanical characteristics and elasto-viscoplastic constitutive model for Methane hydrate-bearing sediments in Eastern Nankai Trough)
氏名(Name)	中島 晃司

日本は、エネルギーの対外依存度が高い状況にあり、エネルギーの安定供給を目的とした資源の自主開発が急務となっている。天然ガス資源であるメタンハイドレートの存在が東部南海トラフ海域で確認され、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深海底地盤を構成する土の間隙に固体物質として存在しており、低温・高圧の条件下で安定する性質を有する。メタンハイドレートを回収するには、メタンハイドレートをガスと水に一度分解する必要がある。掘削した生産井内の水を汲み上げ、地盤内の間隙圧を下げる減圧法による生産が有効とされている。生産井掘削、減圧によるガス回収、廃坑という一連の生産過程をたどる中で、地盤内では複雑な応力変化が生じる。また、間隙中のメタンハイドレートは砂粒子を固結するはたらきをしているため、生産終了後にはセメンテーションが消失し、地盤の強度低下が想定される。それらに伴い、海底地盤の変形、海底地すべりなどの地盤工学的問題が示唆されている。したがって、メタンハイドレートの安全生産に向けて、地盤工学の分野から安全評価していく必要がある。メタンハイドレートが存在する地盤はタービダイトと呼ばれる砂泥互層で構成されているため、地盤を構成している土の種類が様々であることが特徴として挙げられ、複雑な力学特性を示すことが想定される。本論文では、東部南海トラフ海域で採取された天然コア試料のデータを基に、実地盤を模擬した試料を作製し、その力学特性を解明するための実験的検討を行う。さらに、実験的検討で得られた知見に基づき、メタンハイドレート堆積地盤の力学特性を表現できる弾粘塑性構成モデルを開発する。

第1章「序論」

昨今のエネルギー事情を概観し、メタンハイドレート研究開発に至った経緯、そして国内外のメタンハイドレート研究の歴史について概説した。また、メタンハイドレートの化学的性質と存在可能領域を説明し、分布状況より試算された資源量について述べた。次に、メタンハイドレートが海底地盤内でどのように存在しているのか、加えて東部南海トラフ域の地盤の地質学的特徴を紹介した。さらに、メタンハイドレートの生産方法と、生産時に起こり得る工学的課題について取り上げ、メタンハイドレート堆積土の力学特性に関する既往の研究成果をまとめた。最後に、本論文の目的と構成を示した。

第2章「東部南海トラフにおけるメタンハイドレート濃集層地盤の模擬試料と圧縮特性」

東部南海トラフにおける基礎試験で採取されたコア試料のデータより、メタンハイドレート濃集層の地盤は幅広い粒度で構成されていることが明らかとなった。そこで実地盤の粒度分布および鉱物組成を考慮し、東部南海トラフのメタンハイドレート濃集層堆積土を模擬した試料を作製し、メタンハイドレート胚胎土の等方圧密除荷試験を行った。メタンハイドレート生産時の地盤内の応力変化による圧縮特性を明らかにし、弾粘塑性構成モデルに導入する構成則およびパラメータを導出した。

第3章「メタンハイドレート胚胎土の三軸せん断特性」

第1回海洋産出試験地域の地盤を模擬した試料に加え,第2章と同様の実験試料を用いて三軸圧縮試験を実施し,メタンハイドレート胚胎土のせん断特性を明らかにした.また,模擬試料と天然コア試料のせん断試験結果の比較を行い,模擬試料の实地盤に対する再現性を確認した.次に,土中の細粒分がその土のせん断特性に及ぼす影響を調べ,メカニズムについて考察した.続いて,弾粘塑性構成モデルに導入する構成則およびパラメータを導出するために,メタンハイドレートのセメンテーションによる強度増加を定量的に評価することを試みた.さらに,メタンハイドレート胚胎土のストレッチダイレイタンス特性について考察した.最後に,メタンハイドレート胚胎土の限界状態の評価を行った.

第4章「メタンハイドレート胚胎土の時間依存特性」

メタンハイドレートの長期生産を想定して,メタンハイドレート胚胎土の時間依存特性を明らかにすることを試みた.第2章,第3章と同様の実験試料に対して,ひずみ速度の異なるせん断試験を行い,強度特性に及ぼすひずみ速度の影響について調べた.次に,せん断クリープ試験を行い,メタンハイドレート胚胎土のクリープ特性の考察に基づき,弾粘塑性構成モデルの構築に必要なメタンハイドレート胚胎土の時間依存性挙動を定式化した.

第5章「メタンハイドレート胚胎土の弾粘塑性構成モデル」

第2章から第4章で実施したメタンハイドレート胚胎土の力学試験から得られた知見に基づき,メタンハイドレート胚胎土の粒度の違いによる力学特性の変化,時間依存特性を表現可能な弾粘塑性構成モデルの構築を試みた.そして,天然コア試料に対するせん断試験シミュレーションを行い,提案する構成モデルの有用性を検証した.また,ひずみ速度の異なるせん断試験およびせん断クリープ試験をシミュレーションできることを確認した.

第6章「結論」

各章で得られた知見をまとめ,結論とした.

(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	中島 晃司
審査委員	主査: 中田 幸男
	副査: 麻生 稔彦
	副査: 鈴木 素之
	副査: 吉本 憲正
	副査: 中島 伸一郎
	副査: 兵動 正幸
論文題目	東部南海トラフにおけるメタンハイドレート胚胎土の力学特性および弾粘塑性構成モデルに関する研究

【論文審査の結果及び最終試験の結果】

本学位論文は、全6章で構成される。

第1章「序論」では、昨今の日本および世界におけるエネルギー事情を概観し、メタンハイドレート研究開発に至った経緯、そして国内外のメタンハイドレート研究の歴史について概説した。また、メタンハイドレートの化学的性質から、メタンハイドレートが存在可能な地域について言及し、現在までに明らかとなっているメタンハイドレート資源量について説明した。次に、世界各地で採取されたメタンハイドレートの産状および研究開発の中心となっている東部南海トラフ域の地盤の地質学的特徴を紹介した。さらに、提案されているメタンハイドレートの生産方法と、生産時に起こり得る工学的課題について取り上げ、メタンハイドレート堆積土の力学特性に関する既往の研究成果と、提案されている構成モデルについてまとめた。最後に本論文の目的と構成を示した。

第2章「東部南海トラフにおけるメタンハイドレート濃集層地盤の模擬試料と圧縮特性」では、東部南海トラフにおける基礎試験で採取された天然コア試料のデータより、メタンハイドレート濃集層の地盤は幅広い粒度で構成されていることを明らかにした。そこで実地盤の粒度および鉱物組成を考慮し、東部南海トラフのメタンハイドレート濃集層堆積土を模擬した試料を作製し、メタンハイドレート胚胎土の等方圧密除荷試験を行った。メタンハイドレート生産時における地盤内の応力変化による圧縮特性を明らかにし、弾粘塑性構成モデルに導入する構成則およびパラメータを導出した。

第3章「メタンハイドレート胚胎土の三軸せん断特性」では、第1回海洋産出試験地域の地盤を模擬した試料に加え、第2章と同様の実験試料を用いて三軸圧縮試験を実施し、

メタンハイドレート胚胎土のせん断特性を明らかにした。また、模擬試料と天然コア試料のせん断試験結果の比較を行い、模擬試料の实地盤に対する再現性を確認した。次に、土中の細粒分がその土のせん断特性に及ぼす影響について調べ、メカニズムについて考察した。続いて、弾粘塑性構成モデルに導入する構成則およびパラメータを導出するために、メタンハイドレートのセメンテーションによる強度増加を定量的に評価することを試みた。さらに、メタンハイドレート胚胎土のストレスダイレイタンス特性について考察した。最後に、メタンハイドレート胚胎土の限界状態の評価を行った。

第4章「メタンハイドレート胚胎土の時間依存特性」では、メタンハイドレートの長期生産を想定して、メタンハイドレート胚胎土の時間依存特性を明らかにすることを試みた。第2章および第3章と同様の実験試料に対して、ひずみ速度の異なるせん断試験を行い、強度特性に及ぼすひずみ速度の影響について調べた。次に、せん断クリープ試験を実施し、メタンハイドレート胚胎土のクリープ特性の考察に基づき、弾粘塑性構成モデルの構築に必要なメタンハイドレート胚胎土の時間依存性挙動を定式化した。

第5章「メタンハイドレート胚胎土の弾粘塑性構成モデル」では、第2章から第4章で実施したメタンハイドレート胚胎土の力学試験から得られた知見に基づき、メタンハイドレート胚胎土の粒度の違いによる力学特性の変化、時間依存特性を表現可能な弾粘塑性構成モデルの構築を試みた。そして、天然コア試料に対するせん断試験シミュレーションを行い、提案する構成モデルの有用性を検証した。また、ひずみ速度の異なるせん断試験およびせん断クリープ試験をシミュレーションできることを確認した。

第6章「結論」では、各章で得られた知見をまとめ、総括した。

公聴会での主な質問内容は、

- ・時間依存性が特に関連する生産における課題
- ・圧密中のハイドレート飽和率の変化や水圧消散に対する考え方
- ・せん断試験に適用したひずみ速度の設定の経緯
- ・他の研究機関での研究成果に対するモデルの適用性の検討
- ・基準クリープひずみのハイドレート飽和率の変化に対する取り扱い

についてなどであった。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、本論文は、東部南海トラフのメタンハイドレート生産を想定した、メタンハイドレート貯留槽の力学特性の解明とその弾粘塑性構成モデルの開発において、地盤工学から新たな多くの知見を与え、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2編)。

- 1)中島晃司、兵動正幸、吉本憲正、中田幸男、メタンハイドレートを含む砂の力学特性に及ぼす細粒分の影響、地盤と建設, Vol.33, No.1, pp.53-60, 2015.
- 2)M. Hyodo, Y. Wu, K. Nakashima, S. Kajiyama, Y. Nakata, Influence of fines content on the mechanical behavior of methane hydrate-bearing sediments, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol.122, pp.7511-7524, 2017.