

深海底におけるメタンハイドレート堆積層の力学特性の評価

山口大学大学院 学生会員○古屋敷龍成 武富一樹 寺田和弘
山口大学工学部 正会員 兵動正幸 中田幸男 吉本憲正
(独) 産業技術総合研究所 海老沼孝郎

1. はじめに

わが国において、メタンハイドレート(以下 MH と略す)は、南海トラフや北海道近海の深海底地盤中に存在しており、次世代の有力なエネルギー資源として開発することが計画されている。この MH を安全に掘削し生産するために、深海底地盤の圧力・温度などの環境条件を忠実に再現できる試験装置を開発し、MH 堆積層の力学特性を評価する必要がある。そこで、本研究では MH が存在する環境条件、さらに、生産過程におけるそれらの変化を再現できる三軸圧縮試験装置を開発し、深海底条件下での砂および MH 混合砂の力学特性について検討した。

2. 試験の概要

図-1 に深海底における MH 賦存層の水深と温度の関係の模式図を示す。MH は低温・高圧の環境条件下で安定する性質を持っており、MH の安定領域は図-1 に示した安定曲線の左側の部分である。一方、水温は海水中では深度の増加に伴い低下するが、海底地盤内では地温勾配により上昇する。一方、水温は海中では、深度の増加に伴い低下するが、海底地盤内では地温勾配により上昇する。これにより、MH の生成領域は水温断面と安定曲線で囲まれた領域となる。これらの環境条件を想定するために、深海底の水深に応じた高い間隙水圧、海底面からの深さに応じた土粒子骨格への有効土被り圧、海底水の温度、さらに生産過程における温度および圧力変化に対応可能といった様々な条件を再現できる三軸圧縮試験機を開発した。図-2 に試験装置の概略図を示す。この試験機は、MH 供試体のセット時の融解防止・生産時の温度変化を再現するため、三軸室の温度は $-35\sim+50^{\circ}\text{C}$ において制御可能となっている。拘束圧は油圧を圧力源とし、最大 30MPa まで負荷させることが可能である。背圧は試験機上部・下部に設置された背圧増幅器のステッピングモーターをプログラム制御することにより最大 20MPa まで負荷させることができ、さらにモーターの回転速度を決めるパルス信号を体積に変換することで、圧密・せん断時の体積変化も測定できる仕組みになっている。

3. 試料および試験条件

深海底の堆積土を模擬する試料として豊浦砂を用いた。MH 混合砂は、人工的に作製された顆粒状の MH と豊浦砂を用いた(以下 MH 混合砂と称す)。試料の物理的性質を表-1 に示す。これらを用いて、豊浦砂と MH 混合砂の供試体を作製した。豊浦砂供試体については、直径 50mm、高さ 100mm の鉄製のモールドに所定量を投入しながら側壁を木づちで打撃することにより初期相対密度 90% を目標に試料を詰め、その後モールドの下から水を浸透させ後、 -30°C の冷凍庫で凍結させ作製した。MH 混合砂供試体については、果粒状の MH をさらに細粒に播り潰し、冷却した豊浦砂と混合させた。その後、圧力晶析装置に 5 層に分けて試料を投入し 1 層ごとに 9 MPa の鉛直応力を負荷させ加圧成型して作製した。

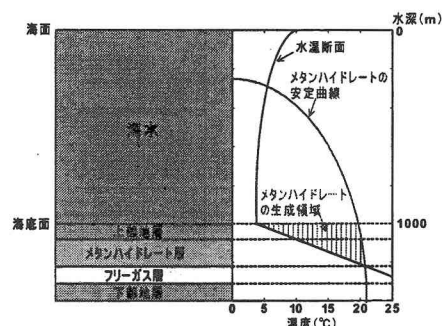


図-1 MH賦存層の水深と温度の関係の模式図

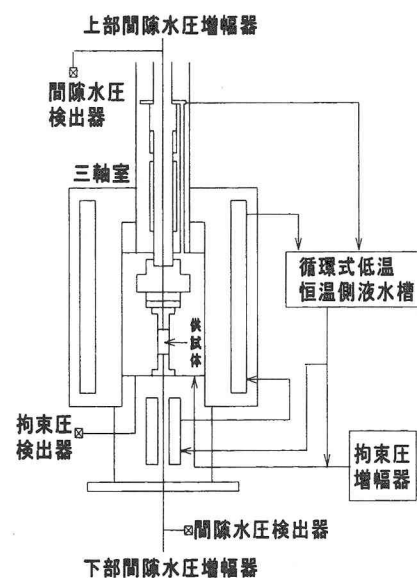


図-2 試験装置概略図

供試体の寸法は直径30mm, 高さ60mm, MH飽和率は10%, 豊浦砂のみの初期相対密度は40%である。メタンハイドレート飽和率は間隙の体積をメタンハイドレートの体積で除した値である。各供試体における排水せん断試験条件は表-2に示す通りであり, ひずみ速度は0.1%/minとした。等方圧縮試験については排水せん断試験と同様の温度, 背圧, 初期相対密で行った。

4. 試験結果と考察

今回は主として, 深海底条件下での堆積土の力学特性を把握する目的で, 試料には豊浦砂を用いて等方圧縮・排水せん断試験を行った。図-3に等方圧縮試験から得られた間隙比-平均有効主応力関係を, 図-4は有効拘束圧3MPaと5MPaの軸差応力-軸ひずみ-体積ひずみ関係をそれぞれ示す。

図-3より, 各背圧条件において平均有効主応力の増加による圧縮特性は, 同じ傾向を示した。図-4より, 軸差応力-軸ひずみ関係については, 各拘束圧共に延性的で明確なピークを見せないひずみ硬化型の挙動であり, 有効拘束圧5MPaがより顕著なひずみ硬化挙動を示した。また, 体積ひずみについては, 有効拘束圧3MPaでは収縮の後, わずかな膨張挙動に転じたが, 有効拘束圧5MPaの結果では収縮一方の挙動を示した。過去に行われた南海トラフの基礎試験より, 深海底堆積土には石英の他に, 石英より比較に脆い鉱物である長石なども多く含まれていたことが報告されており¹⁾, 実際の深海底堆積土の変形強度特性は豊浦砂とは異なっていると推測される。次に, MH混合砂を用いて等方圧縮・排水せん断試験を行った。図-5に等方圧縮試験から得られた間隙比-平均主応力関係を示す。図-5より, 若干初期間隙比に違いが見られるが各温度条件においてその圧縮特性は, 同様な傾向を示した。図-6に有効拘束圧5MPa, 温度条件を+5℃, +10℃の2条件で行った排水せん断試験より得られた軸差応力-軸ひずみ-体積ひずみ関係を示す。

各条件共に軸差応力-軸ひずみ関係については, 延性的で明確なピーク強度を見せないひずみ硬化型の挙動を示した。また, 体積ひずみ関係については, 収縮一方の挙動を示した。MH飽和率36%のMH混合砂の強度には温度依存性があることが他機関の既往の研究により報告されているが²⁾, 本研究では温度の違いによる軸差応力, 体積変化の違いが確認されなかった。この原因としては, MH飽和率10%で供試体を作製したため, MHが比較的少量であり, 全体の力学特性に温度依存性が現れにくかったためと推察される。

5. まとめ

深海底地盤条件でのMH混合砂のせん断挙動は延性的で明確なピークを見せないひずみ硬化型の挙動であり, 体積ひずみに関しては収縮一方の挙動であることが確認された。また, MHの温度依存については, 今回のMH飽和率の試料に対しては明確には確認されなかった。

【参考文献】

- 1) 石油公団: 基礎試験 南海トラフ 調査報告者, 石油・天然ガス基礎調査, 平成11年度
- 2) MH21 研究コンソーシアム: メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム運営協議会, 平成15年度第3回

表-1 試料の物理的性質

試料名	Gs	D _{max} (mm)	D ₅₀ (mm)	e _{max}	e _{min}	U _c
豊浦砂	2.643	2.000	0.200	0.973	0.635	1.200

表-2 排水せん断試験条件

試料	有効拘束圧 (MPa)	温度 (℃)	拘束圧 (MPa)	初期相対密度 (%)
豊浦砂	3	常温	9	90
	5		15	90
MH混合砂	5	+5	15	40
		+10		

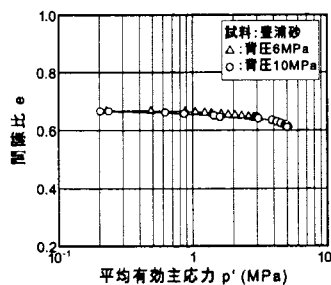


図-3 間隙比-平均有効主応力関係

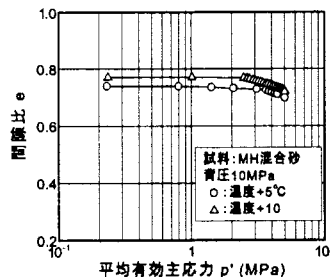


図-5 間隙比-平均有効主応力関係

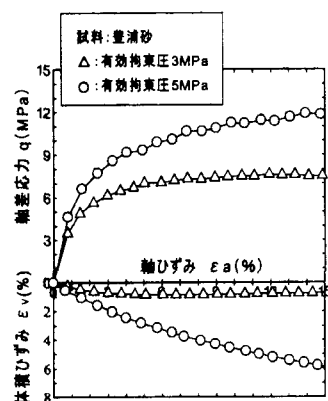


図-4 軸差応力-軸ひずみ-体積ひずみ関係

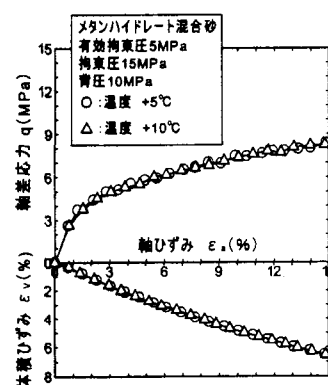


図-6 軸差応力-軸ひずみ-体積ひずみ関係