

平面ひずみ条件下でのメタンハイドレート含有砂のせん断特性に及ぼす载荷速度の影響

山口大学 ○バトオチル トムルドラム
 山口大学 呉 起
 山口大学 正会員 吉本 憲正

1. 目的

現在、私たちの生活に欠かせないエネルギー資源のほとんどは、石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料に依存しており、世界のエネルギー消費は、経済成長と人口増加に伴って増加している。その中で天然ガスは、すべての化石燃料の中で最もクリーンであり、生成される同じエネルギーに対して、石油や石炭よりも25~50%の少ない二酸化炭素の排出にとどまる。

メタンハイドレートを安全で効率的に開発するために、ガスハイドレート貯留層の力学特性をよりよく理解する必要がある。その貯留層の挙動を正確かつ長期間予測するためには、生産において貯留層に生じる応力の大きさやその変化の速さについて理解しておくことが重要である。そのため、メタンハイドレート含有砂（以下MHBSと呼ぶ）のせん断特性に及ぼす载荷速度の影響を調べる研究が必要である。

そこで本研究では、低温高压平面ひずみ試験において、MHBSの载荷速度の影響を評価すること、また、試験機の性能によりせん断時の供試体の変化が観察できるため、局所的な変形をPTV解析によりあきらかにすることを目的とした。

2. 試験条件

実験条件を表1に示す。低温高压平面ひずみ実験装置を使用して、すべての実験は圧密排水条件下で行われた。研究試料として一般に用いられる豊浦砂、南海トラフの粒度分布を模擬したTbの2種類を使用しセル圧13MPa、背圧10MPa、温度は5°Cとした。また、メタンハイドレート飽和率の選定にあたっては、低いと試験結果に大きな差がなく評価がしにくくなり、高いとメタンハイドレートを生成するのに時間がかかり研究の効率が悪くなるため約40%を目標にした。ひずみ速度は0.05, 0.5, 1(%/min)、実験時の乾燥密度は $\rho_d=1.73\text{g/cm}^3$ とした。本研究では、供試体の局所的な変形を定量的に表すために粒子追跡法による画像解析を行った。粒子追跡法(Particle Tracking Velocimetry)とは、ある時間間隔で画像中の各トレーサ粒子の移動を自動的に追跡し、流れ場を計測する方法である。

表1 試験条件

	MH 飽和 /%		間隙水圧 /MPa	セル圧力 /MPa	せん断速度 %/min	温度/K
	Tb	豊浦砂				
1	43.7	43.6	10	13	0.05	278.15
2	40.0	41.2			0.5	
3	50.0	42.5			1	
4	0				0.05	
5					0.5	
6					1	

キーワード エネルギー資源、メタンハイドレート、粒子追跡法、载荷速度、せん断特性

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1 山口大学 大学院創成科学研究科 工学系 社会建設工学分野 吉本憲正

TEL0836-85-9344

3. 試験手順

実験手順を以下に示す。まず、低温室内を 5°C に設定する。次に、所定の含水比になるように調整した試料を 12 層に分けて突き固めて供試体を作製し、供試体を拘束したのち、側液を満たす。その後、供試体の上下からメタンガスを圧入する。なお、圧入時の圧力はメタンハイドレートの安定境界である 5MPa で行う。圧力を保ちながら時間をかけ、メタンハイドレートを生成する。供試体を飽和させ、背圧を 10MPa まで上昇させる。そして、所定の拘束圧、間隙水圧で圧密し、圧密排水せん断試験を行う。その時、実験装置前面の観察窓よりデジタル一眼レフカメラを用いてリモートによる供試体の撮影を行い、1 分毎の供試体の画像を取得する。取得した画像に対して、幾何補正を行った後、PTV 画像解析を行う。

4. 結果

試料ごとに 2 つの異なる载荷速度での軸差応力、体積ひずみと軸ひずみの関係を図 1 の (a) にホスト砂、(b) に MHBS をそれぞれ示す。図 1 の (b) の MHBS の応力-軸ひずみ関係より、豊浦砂と Tb 試料の両方とも载荷速度が速くなると、剛性と強度が高くなって大きな影響を及ぼしたが、図 1 の (a) に示したホスト砂に関しては、剛性とせん断強度も载荷速度にほとんど依存していないことが観察できる。ホスト砂の体積ひずみは、せん断中、常に収縮の挙動を示し、载荷速度が増加するにつれて、正の体積圧縮ひずみは減少したことが認められる。MHBS の場合、速い载荷速度で、剛性と強度が高くなる。また、体積ひずみは、最初はわずかな収縮挙動を示し、その後、すべての载荷速度条件で体積膨張が生じている。

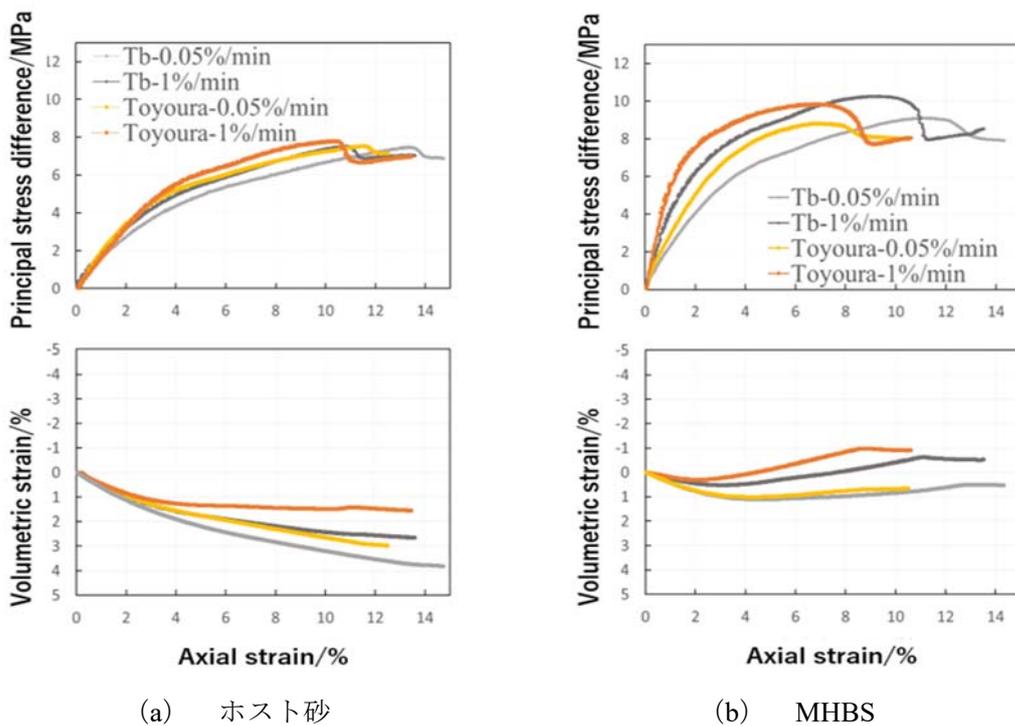


図 1 軸差応力、体積ひずみと軸ひずみの関係

せん断特性と载荷速度の関係を示した図 2 (a) の変形係数の結果より、载荷速度が増加するとともに MHBS の変形係数が増加することが観察された。これは、载荷速度が速いと、MHBS の剛性が高くなることを意味する。ホスト砂に関しては、異なる载荷速度で変形係数に明らかな違いは観察されなかった。三軸試験下で行った他の研究者の実験結果^{1), 2)}と比較した载荷速度とピーク強度の関係を図 2 (b) に示す。図 2 (b) より、三軸試験と平面ひずみ試験と異なる実験タイプにおいても、载荷速度の増加に伴い、MHBS のピーク強度が常に増加することが分かる。さらに、ホスト砂のピーク強度は、载荷速度の変化に関わらずほぼ一定となるのは、ピーク強度に関しては、MH が速度の影響を受けていることを意味する。

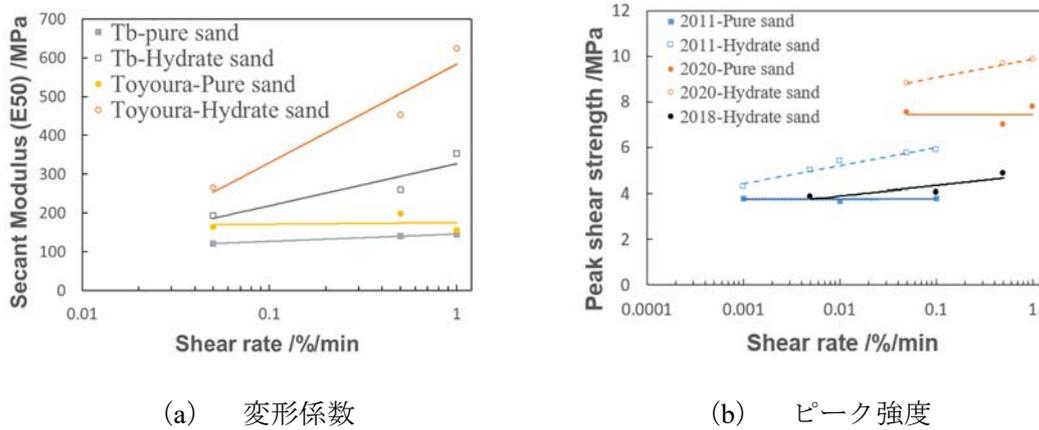


図2 セン断特性と载荷速度の関係

PTV 解析の結果に関しては、試料（豊浦砂と Tb 砂）による違いは認められなかったため、結果の例として Tb のホスト砂と MHBS を使用し、最大せん断ひずみのコンターを図 3、体積ひずみコンターを図 4 に所定の軸ひずみごとに示す。図 3 (b) の MHBS の場合、最大せん断ひずみがせん断帯の内部だけに集中するのではなく、せん断帯の周りにおいても観察された。メタンハイドレートの不均一なセメンテーションで部分的に、メタンハイドレートと砂で構成させる塊が発生する。これらの塊は、せん断帯の形状など、せん断帯の特性を大幅に変更すると考えられる。

本研究では、平面ひずみせん断試験でせん断帯領域に体積収縮と膨張が同時に存在することが報告されているため、せん断試験中の供試体の局所的な体積膨張（マイナス値）と収縮（プラス値）を図 4 に示した。図 4 より、ホスト砂の場合、収縮挙動は、より低い载荷速度（0.05%/min）でより支配的であったことが見て取れる。せん断速度が増加すると、せん断帯の部分は、明らかな膨張挙動を示したことが観察される。しかし、MHBS では、すべての载荷速度条件下で、より局所的な膨潤挙動が観察される。特に、より速い载荷速度条件（1%/min）の場合、局所的な膨張の領域が広がることで、速い载荷速度がより広範な局所膨張挙動につながることを意味している。

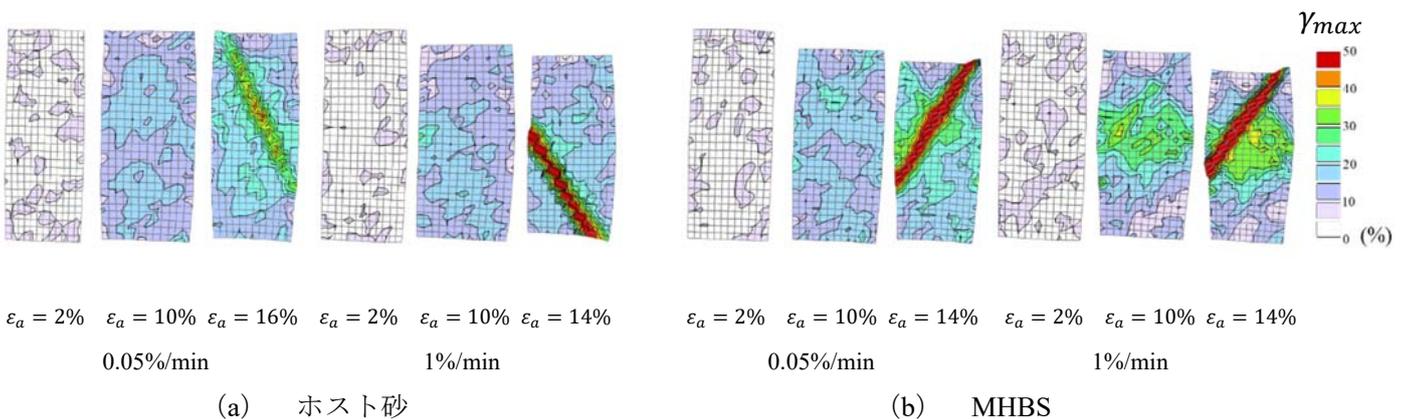


図3 Tb の 0.05%/min, 1%/min のせん断速度での最大せん断ひずみのコンター

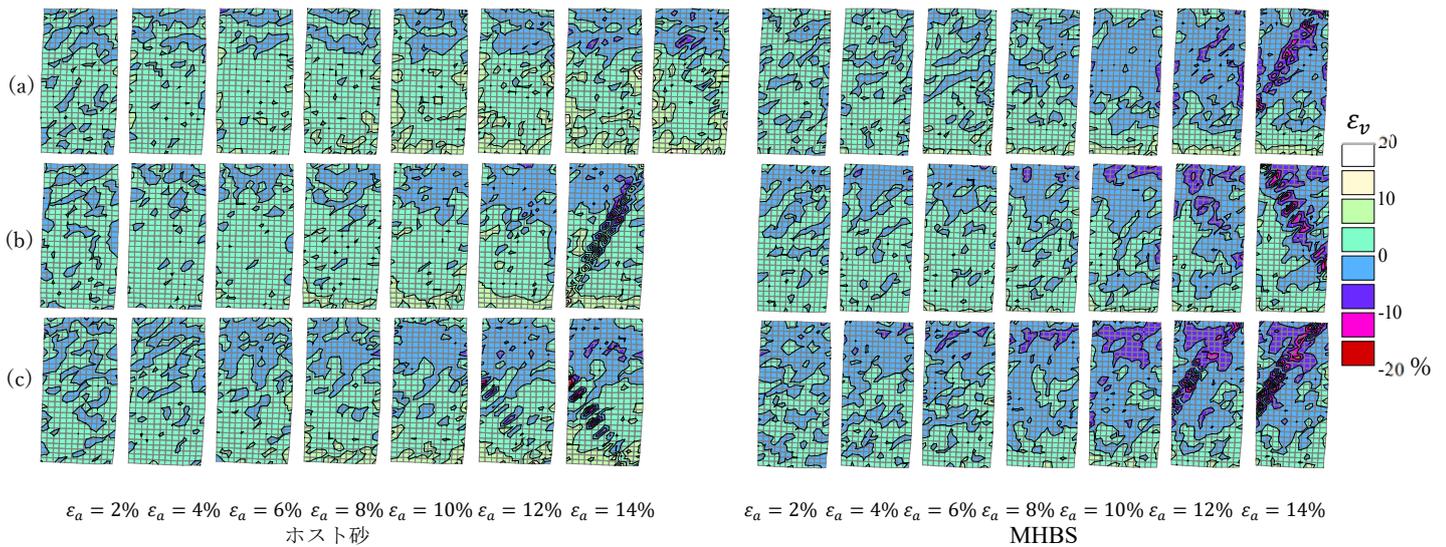


図4 Tbのホスト砂とMHBSの(a)0.05%/min, (b)0.5%/min, (c)1%/minのせん断速度での体積ひずみのコンター

5. まとめ

本研究では、平面ひずみせん断試験下でのMHBSの荷速度依存挙動を調査した。平面ひずみせん断試験の結果を、Tbと豊浦砂のホスト砂とメタンハイドレート含有砂の3つの異なる荷速度で比較した。その結果、MHBSのせん断挙動は、ホスト砂と比較して、より強い荷速度依存特性を示した。MHBSの供試体全体の体積ひずみ、ピーク強度、変形係数は荷速度の増加とともに、ホスト砂と比べて大幅に増加した。最後に、荷速度が増加するにつれ、膨張挙動が卓越し、特にMHBSのせん断帯付近の膨張挙動がより顕著になることが明らかとなった。

参考文献

- 1) Iwai, H., Y. Konishi, K. Saimyou, S. Kimoto, and F. Oka (2018), *Rate effect on the stress-strain relations of synthetic carbon dioxide hydrate-bearing sand and dissociation tests by thermal stimulation*, Soils Found., 58(5), 1113-1132, doi:10.1016/j.sandf.2018.05.007.
- 2) Miyazaki, K., T. Yamaguchi, Y. Sakamoto, and K. Aoki (2011), *Time-dependent behaviors of methane-hydrate bearing sediments in triaxial compression test*, International Journal of the JCRM, 7(1), 43-48, doi:10.11187/ijjcr.7.43.