

軸対称および平面ひずみ条件におけるメタンハイドレートによって固結された砂のせん断特性

山口大学大学院 学生会員 ○梶山慎太郎 日下部真佑

山口大学大学院 正会員 兵動正幸 中田幸男 吉本憲正

1. まえがき 南海トラフのメタンハイドレート(以下, MH と略す)は砂の間隙中に砂粒子を固結する形で存在していると考えられており, MH を生産するにあたり, MH 胚胎層の力学的性質の解明は重要である. 一方で, 土のせん断特性は軸対称条件と平面ひずみ条件ではその挙動が大きく異なるとされている. そこで本研究では, MH を含む試料に対して, 軸対象条件および平面ひずみ条件でのせん断試験を行い, それぞれの挙動を調べた.

2. 試験装置の概要 両試験には, MH が存在可能な温度圧力条件を満たす機構を有する試験装置をそれぞれ用いた. まず, 軸対象の実験には温度制御高圧三軸試験装置¹⁾を用いた. 供試体のサイズは直径 30mm×高さ 60mm である. 平面ひずみ条件では, セルの前面に観察窓を有する恒温高圧平面ひずみ実験装置²⁾を用いた. 供試体のサイズは, 高さ 160mm×幅 60mm×奥行き 80mm の直方体である.

3. 実験方法 本実験にはガラスビーズおよび南海トラフ MH 濃集層の鉱物組成および粒度分布を基に作製した模擬試料の 1 つである T_b を用いた. 各試料の粒度分布を図-1 に示す. 図のように両試料の粒度分布は類似している. 試料の含水比は, MH を生成した時の MH 飽和率 $S_{MH}=50\%$ を目標として試料の含水比を調整した. 供試体は, 軸対象条件では所定の含水比および密度で突固め作成後に凍結し試験機に設置した. その後, 4MPa になるまでメタンガスを圧入し試験機管路および供試体をメタンガスで飽和させた後に温度を上昇させて融解し, 温度を 1°C に保って供試体中の水を MH に置換した. 平面ひずみ条件では, MH 供試体を作製するために, まず温度 5°C の状態で供試体内にメタンガスを圧入し, 5MPa に達した後, 圧力を保ちながら時間をかけて MH を生成させた. 両試験ともに, MH 生成後, 間隙内のガスを水と置き換え水飽和状態とした後, 間隙水圧を 10MPa, 所定の有効拘束圧で圧密しせん断を行った. なお, せん断速度は 0.1%/min とした.

4. 実験結果 MH 有無の両試料に対してせん断試験を行った結果を, ガラスビーズを図-2 に, T_b を図-3 にそれぞれ示す. 図から, 両試料ともに, MH を含むことで初期剛性およびピーク強度の顕著な増加が認められる. 各試料において, 試験条件を比較すると, MH を含まない試料では, 平面ひずみ条件の方が軸対象条件よりも初期剛性およびピーク強度が高い. この傾向は, 低圧域における軸対象条件と平面ひずみ条件の実験結果においても同様であることが報告されている. 体積ひずみに着目すると, 両試料ともに各条件においても収縮傾向を示している. これは, 拘束圧が高圧であるために, 粒子破碎が生じたことによると推察される. 一方で MH を含む砂では, やや軸

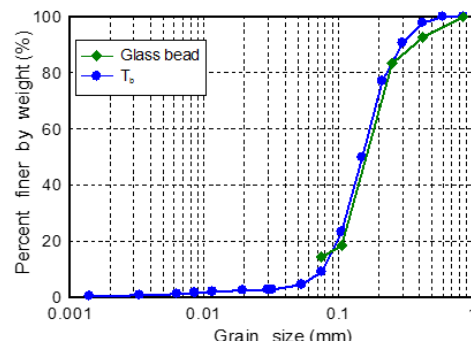


図-1 各試料の配合割合

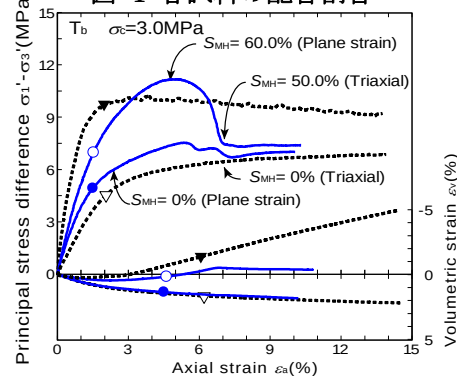
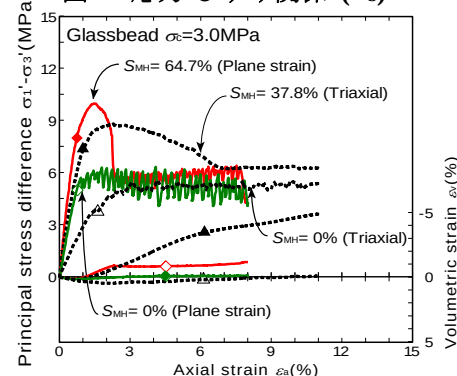
図-2 応力-ひずみ関係 (T_b)

図-3 応力-ひずみ関係 (Glass beads)

キーワード 固結材料, メタンハイドレート, ガラスビーズ, 砂, 三軸, 平面ひずみ

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1

TEL 0836-85-9344

対象条件の MH 飽和率が低いものの、両試料ともに平面ひずみ条件の方がピーク強度が高く脆性的であり、初期剛性は低い。体積ひずみに着目すると、軸対象条件の方が膨張傾向が顕著に起こっており、低圧域における各条件の挙動と同様の傾向が見られる。これは、MH の固結により破砕が抑制されたためと推察される。また、ガラスビーズでは、平面ひずみ条件ではピーク強度発現後スティックスリップ現象が確認される。軸対象条件では、MH を含まない試料ではスティックスリップ現象が確認されるものの、MH を含む試料ではほとんど見られない。これは、平面ひずみ条件では応力が局所的に集中するためと考えられる。各条件同士を比較すると、平面ひずみ条件の方がより脆性的挙動を示している。図-4 は、各軸ひずみにおける MH の有無による強度の差を有効拘束圧で正規化したものである。図より、軸対象条件と平面ひずみ条件を比較すると、軸対象条件の方がより小さい軸ひずみ領域での MH の固結による強度増加が顕著である。一方で、平面ひずみ条件の方がより急激に MH によって増加した強度が損失していることが明らかである。次に、セカントアングルと MH 飽和率の関係を図-5 に示す。図中の曲線は、当研究機関で行った三軸試験の結果 4) を参考にして近似線を描いた。図中には T_b を用いた MH 飽和率 $S_{MH}=40\%$ 程度で行った試験結果も併せて示している。図より、 T_b では、MH 飽和率に関わらず平面ひずみ条件の方が軸対象条件よりも、1 割程度内部摩擦角が大きいことが明らかである。一方で、ガラスビーズでは、MH を含まない試料は T_b と同様に 1 割程度内部摩擦角が大きいものの、MH を含む試料では、軸対象条件の方がより顕著に MH の影響を受ける結果となっている。

5.結論 本研究では、2 種類の試料に対して MH を生成し、軸対象条件および平面ひずみ条件にてせん断試験を行った。これによって得られた知見を以下にまとめる。(1) MH を含まない試料では、低圧域の試験結果と同様に平面ひずみ条件のほうが剛性およびピーク強度が高い。一方で、体積ひずみは収支収縮傾向である。これは粒子破砕の影響と考えられる。(2) MH を含む試料では、平面ひずみ条件のほうが剛性は低く、ピーク強度は高い。体積ひずみは軸対象条件の方が膨張傾向が顕著になる。(3) 軸対象条件の方が、小さい軸ひずみ領域では MH の影響を顕著に受ける。(4) T_b では、MH の有無に関わらず、平面ひずみ条件の方が軸対象条件よりも 1 割程度セカントアングルは大きくなる。ガラスビーズでは、MH を含まない試料は 1 割程度内部摩擦角が大きく、MH を含む試料では、軸対象条件の方が平面ひずみ条件より顕著に MH の影響を受ける結果となった。

【謝辞】 本研究は、文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（A）：課題番号 25249065）の援助を受けて実施した。記して謝意を表する次第である。

参考文献 1) Hyodo, M., Yoneda, J., Yoshimoto, N., Nakata, Y.: Mechanical and dissociation properties of methane hydrate-bearing sand in deep seabed, *Soils and Foundations*, 53(2), 299-314. 2013. 2) Yoneda, J., Hyodo, M., Yoshimoto, N., Nakata, N., Kato, A.: Development of high-pressure low-temperature plane strain testing apparatus for methane hydrate-bearing sand, *Soils and Foundations*, 53(5), 774-783. 2013. 3) 落合英俊, 福島伸二: 三軸圧縮試験と他のせん断試験法の比較, 三軸試験方法に関するシンポジウム論文集, pp.25-34, 1991. 4) Hyodo, M., Kajiya, S., Yoshimoto, N., Nakata, Y.: Triaxial Behaviour of Methane Hydrate Bearing Sand, *Tenth ISOPE Ocean Mining and Gas Hydrates Symposium*, pp.126-131, Szczecin, Poland, 2013

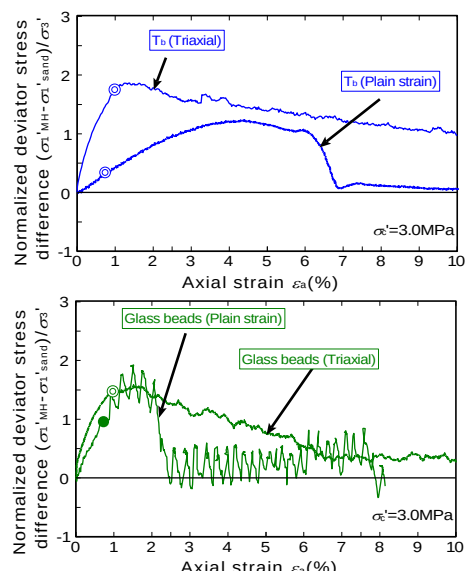


図-4 各試料の軸ひずみごとの MH による強度増加量

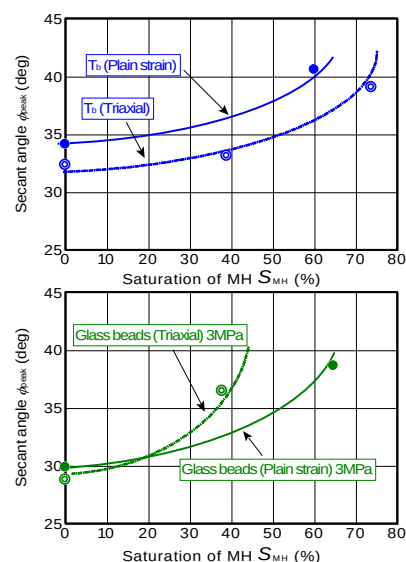


図-5 内部摩擦角と MH 飽和率の関係