

細粒分を含むメタンハイドレート胚胎砂のダイレイタンシー特性の評価

山口大学大学院 学生会員 ○中島晃司

山口大学大学院 正会員 中田幸男 兵動正幸 吉本憲正

1. まえがき

クリーンな天然ガス資源であるメタンハイドレート（以下 MH と略す）が注目されている。天然の MH が存在する東部南海トラフの海底堆積層には、細粒分が含まれていることが知られており¹⁾、その粒度特性を踏まえた MH 堆積層のせん断変形に伴うダイレイタンシー特性の評価が重要となっている。本研究では、現地のコア試料から得られたデータをもとに、MH 濃集層の堆積土の粒度を模擬した試料を作製し、それらの間隙中に MH を生成させ三軸圧縮試験を行い、MH 濃集層模擬試料のダイレイタンシー特性の評価を行うことを目的としている。

2. 細粒分含有率の異なる MH 胚胎砂試料

実験試料は、基礎試錐「東海沖～熊野灘」と海洋産出試験地域から得られたコア試料のデータ²⁻³⁾をもとに、MH 濃集層の堆積土の粒度分布と鉱物組成を近似して作製した。MH 濃集層模擬試料の粒度分布を図-1 に示す。間隙率は南海トラフにおけるコア試料の砂層の密度試験結果⁴⁾をもとに、 $n=45\%$ とした。また、目標の MH 飽和率 $S_{MH}=30\%$ 、 50% となるように含水比を調整して供試体を作製した。

3. 細粒分含有率の異なる MH 胚胎砂のダイレイタンシー特性

図-2(a)~(b)にホスト砂と MH 胚胎砂の応力ひずみ関係を示す。MH 胚胎砂については MH 飽和率 $S_{MH}=50\%$ を目標に作製した供試体の実験結果を示している。また、実験結果は有効拘束圧 $\sigma'_c=3\text{MPa}$ で行ったものを示している。ホスト砂では、細粒分含有率の違いによる、強度変形特性の違いはわずかである。一方、MH 胚胎砂については、細粒分含有率の増加に伴う、最大応力比、正のダイレイタンシーの増加が顕著に見受けられる。細粒分含有率の違いにより、MH によるセメンテーション効果の受け方が異なることが明らかである。そこで、ストレスダイレイタンシー関係に着目し、Yasufuku et al.⁵⁾、Hyodo et al.⁶⁾が提示するストレスダイレイタンシー式(1)を用いて、細粒分含有率の異なる MH 胚胎砂のダイレイタンシー特性の評価を行っていく。

$$\frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_s^p} = \frac{M^2 - \eta^2}{c\eta} \quad (1)$$

式(1)の $c=2$ のときに Roscoe らの修正 Cam-clay model のストレスダイレイタンシー式と等価になる。 $F_c=8.9\%$ および $F_c=30.0\%$ の各 MH 飽和率について、ストレスダイレイタンシー関係を図-3(a)~(b)に示す。塑性ひずみ増分比 $d\varepsilon_s^p/d\varepsilon_s^p=0$ のときの応力比を限界応力比 M とし、図-4 に限界応力比と細粒分含有率の関係を示す。塑性ひずみ増分は全ひずみ増分から弾性ひずみ増分を

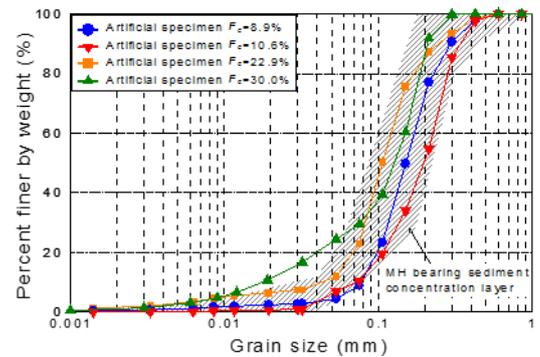


図-1 実験試料の粒度分布

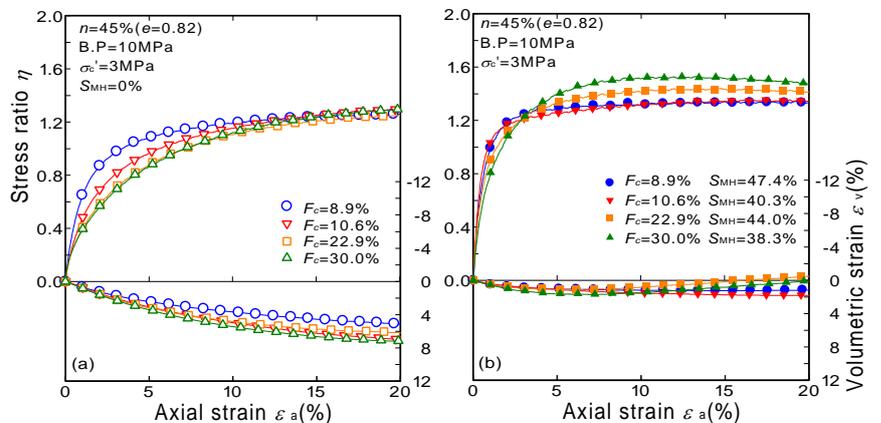


図-2 応力ひずみ関係 (a)ホスト砂, (b)MH 胚胎砂

キーワード メタンハイドレート 細粒分含有率 ストレスダイレイタンシー関係

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1 TEL 0836-85-9344

除いて求めている。図より、間隙中のMHの増加により、ホスト砂に比べてMの値が大きくなり、細粒分含有率の高い試料ほど、それは顕著であることが確認される。図-3中の実線は、式(1)のcの値を変化させて、実験結果に合うものを示している。図-3(a)における拡大図中の色塗りのプロットは、塑性ひずみ増分比 $d\varepsilon^p/d\varepsilon^p > 0$ の範囲で応力比の値が最大応力比の値と0~0.005以内の差であった結果を抽出したものである。ピークに近づくにつれて応力比の値は最大応力比の値とほぼ同値になり、塑性ひずみ増分比の値だけが增加する様子が確認される。そこで、ハッチングされる部分は無視し、最初に応力比が最大となった状態を通るようにcの値を決めている。図-5にcの値と細粒分含有率の関係を示す。ホスト砂においては、細粒分含有率の増加に伴い、cの値が次第に2に近づいていくことが見て取れる。これは骨格の主体が砂から細粒分に推移していき、Cam-clay型の挙動、つまり粘土の挙動に近づくことに関連していると考えられる。また、いずれの試料においてもMH飽和率の増加に伴いcの値が大きくなり、同程度のMH飽和率で比較すると、細粒分含有率の高い試料ほどcの値は大きくなる。これはMHのセメンテーションにより砂粒子が団粒化し、ダイレイティブな挙動に推移したことによるものと考えられ、細粒分含有率の高い試料ほどそれが顕著に表れたためといえる。パラメータcを取り入れたストレスダイレイタンシー式を用いることで、細粒分含有率の異なるMH胚胎砂のストレスダイレイタンシー関係を表現できることが明らかとなった。

4. 結論

本研究では、パラメータcを取り入れたストレスダイレイタンシー式を用いて、細粒分を含むMH胚胎砂のダイレイタンシー特性を評価した。結果は以下のとおりである。細粒分含有率の高い試料ほど、MHのセメンテーションによるダイレイティブな挙動は卓越し、パラメータcの値が大きくなる。このストレスダイレイタンシー式を用いることで細粒分を含むMH胚胎砂のストレスダイレイタンシー関係を表現できるといえる。

4. 結論

本研究では、パラメータcを取り入れたストレスダイレイタンシー式を用いて、細粒分を含むMH胚胎砂のダイレイタンシー特性を評価した。結果は以下のとおりである。細粒分含有率の高い試料ほど、MHのセメンテーションによるダイレイティブな挙動は卓越し、パラメータcの値が大きくなる。このストレスダイレイタンシー式を用いることで細粒分を含むMH胚胎砂のストレスダイレイタンシー関係を表現できるといえる。

謝辞：本研究は、経済産業省「メタンハイドレート開発促進事業部・生産手法開発に関する研究開発」の一部として実施された。記して謝意を表する次第である。

参考文献：1) 宮崎晋行ら：細粒分を含む模擬メタンハイドレート含有砂質堆積物の三軸圧縮試験とメタンハイドレート分解時の力学挙動, *Journal of MMIJ*, Vol.127, pp.565-576, 2011. 2) Yoneda, J. et al.:

Mechanical properties of hydrate-bearing turbidite reservoir in the first gas production test site of the Eastern Nankai Trough, *Marine and Petroleum Geology*, 66, pp.471-486, 2015. 3) 鈴木清史ら：メタンハイドレートを胚胎する砂質堆積物の特徴とメタンハイドレート胚胎メカニズムへの影響, *地学雑誌*, Vol.118, No.5, pp.889-912, 2009. 4)メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム：フェーズ1総括成果報告書, p.14. 5) Yasufuku, N. et al.: A stress-strain relationship for anisotropically consolidated sand over a wide stress region, *Soils and Foundations*, Vol.31, No.4, pp.75-92, 1991 6) Hyodo, M. et al.: Stress-dilatancy relationship and simple constitutive model for methane hydrate bearing sand, 19th ICSMGE (in review)

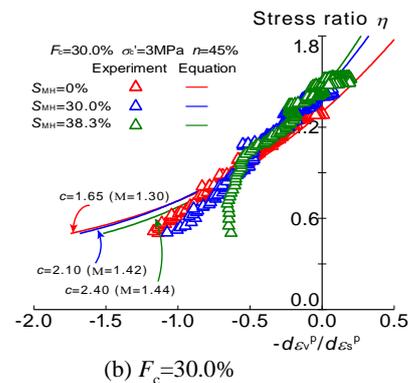
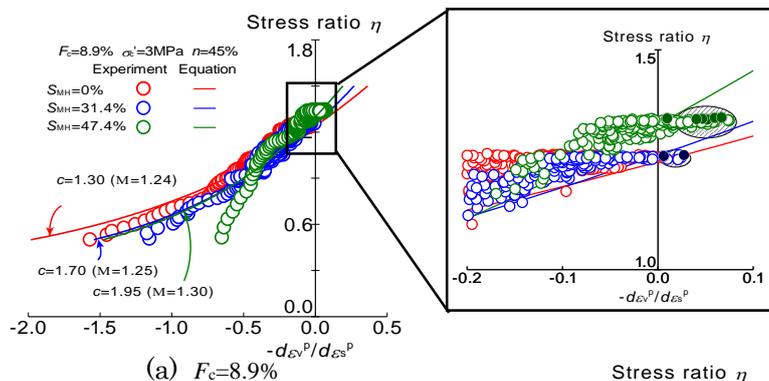


図-3 細粒分含有率の異なるMH胚胎砂のストレスダイレイタンシー関係

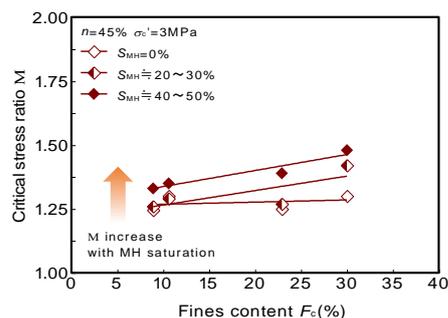


図-4 限界応力比MとFcの関係

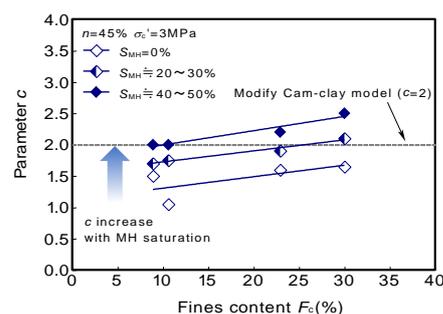


図-5 パラメータcとFcの関係