

1. はじめに

近年、新たな天然ガス資源としてメタンハイドレート（以下 MH と略す）が注目されている。深海底の MH から天然ガスを経済的かつ安全に生産することを目的として南海トラフを対象に研究開発が行われている。南海トラフの海底地盤はタービダイトから成る砂泥互層を構成しており、MH は砂層の中に濃集している。MH 濃集層にもかなりの割合で細粒分

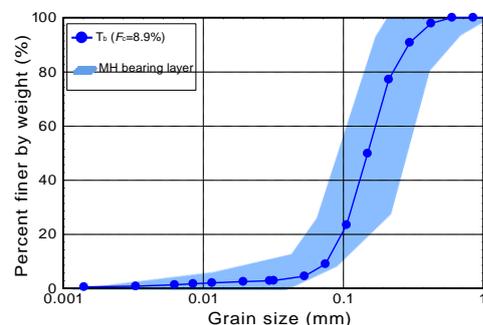


図-1 使用した試料の粒度分布

が含まれており、存在域の深度にも幅があることから様々な土被り圧が想定される¹⁾。そのため、力学特性も場所によって異なることが予想される。本研究では現地基礎試験により得られた土質データをもとに作製した模擬試料の1つとしての T_b ²⁾に種々の飽和率となるよう MH を生成させ、拘束圧を連続的に変化させそのせん断特性の評価を行う。

2. 実験方法

MH 模擬試料作製及びせん断試験は、当研究室で開発した深海底における応力及び温度の再現、制御可能な三軸試験装置（温度可変高圧三軸試験機）³⁾を用いた。MH 濃集層の鉱物及び粒度を近似させるために、8号・7号・R5.5珪砂、カオリン、雲母を混合し模擬試料 T_b を作製した。さらにそれらの間隙中に MH 飽和率 $S_{MH} = 0, 30, 50\%$ になるように初期含水比を調整し MH を生成させた。図-1 に模擬試料 T_b の粒度分布を示す。また南海トラフの天然コアの密度試験の結果を基に、本研究では模擬試料の間隙率は $n=45\%$ とした。MH 模擬試料作製は以下の手順に沿った。まずホスト砂に目標とする MH 飽和率となるように初期含水比を調節し、所定のエネルギーで突固めた $\phi 30 \times H 60 \text{mm}$ の不飽和円筒試料を凍結する。次に、準備した凍結した供試体を三軸室内に設置する。その後供試体を室温で融解させ、供試体内にメタンガスを注入し MH 安定境界内の圧力・温度を保ちながら約 24 時間をかけて間隙水を MH に置換する。さらに作製した供試体は間隙内を水で飽和させ背圧を 10MPa 負荷し有効拘束圧 1, 3, 5MPa でそれぞれ圧密させた後、せん断速度 0.1%/min で排水せん断試験を行った。

図-2 に有効拘束圧 1MPa において MH 飽和率を変化させた有効応力比 η ・軸ひずみ ϵ_a 関係を示す。図より、MH 飽和率の増加に伴い、初期剛性及び強度の増加が確認でき、体積ひずみについては収縮挙動から膨張挙動に移り、せん断による正のダイレイタンスーがより顕著になる傾向が認められる。砂粒子が細粒分と共に MH によって固結され、団粒化したことによるものと考えられる³⁾。図-3 に MH 飽和率 $S_{MH} = 50\%$ で、有効拘束圧を $\sigma'_c = 1, 3, 5 \text{MPa}$ と変化させた場合の MH 模擬試料の有効応力比 η ・軸ひずみ ϵ_a 関係を示す。図より、有効拘束圧の増加に伴い初期剛性及びピーク強度、残留強度の低下、体積ひずみについては膨張挙動から収縮挙動に移り、拘束圧の増加に伴いせん断時の粒子接触部分の破碎によりダイレイタンスー挙動が抑制されたことに依るものと考えられる。これを踏まえ MH 飽和率、有効拘束圧をパラメータとして MH 胚胎砂の強度推定式を算定した。

3. 実験結果

図-2 に有効拘束圧 1MPa において MH 飽和率を変化させた有効応力比 η ・軸ひずみ ϵ_a 関係を示す。図より、MH 飽和率の増加に伴い、初期剛性及び強度の増加が確認でき、体積ひずみについては収縮挙動から膨張挙動に移り、せん断による正のダイレイタンスーがより顕著になる傾向が認められる。砂粒子が細粒分と共に MH によって固結され、団粒化したことによるものと考えられる³⁾。図-3 に MH 飽和率 $S_{MH} = 50\%$ で、有効拘束圧を $\sigma'_c = 1, 3, 5 \text{MPa}$ と変化させた場合の MH 模擬試料の有効応力比 η ・軸ひずみ ϵ_a 関係を示す。図より、有効拘束圧の増加に伴い初期剛性及びピーク強度、残留強度の低下、体積ひずみについては膨張挙動から収縮挙動に移り、拘束圧の増加に伴いせん断時の粒子接触部分の破碎によりダイレイタンスー挙動が抑制されたことに依るものと考えられる。これを踏まえ MH 飽和率、有効拘束圧をパラメータとして MH 胚胎砂の強度推定式を算定した。

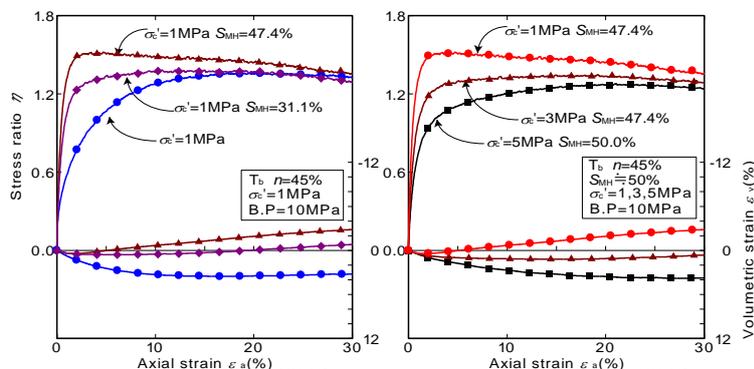


図-2 応力比-ひずみ関係に及ぼす MH 飽和率の影響
図-3 応力比-ひずみ関係に及ぼす拘束圧の影響

4. 推定式の算定

Gutierrez⁴⁾ は Vesic and Clough らが提案した式を用いて、有効応力比と有効拘束圧との関係を表すものとして式(1)を提案している。ここで、定常状態の強度 η_{cr} の代わりに残留強度 η_{res} (本研究では軸ひずみ $\epsilon_a=30\%$ 時の強度を用いた)、平均主応力 P の代わりに有効拘束圧 σ'_c を用い、本研究では密度を変化させて試験を行っていないため $D_r=1$ とし、式(1)を変形すると式(2)になる。

$$\eta_{peak} = \eta_{cr} + CD_r \ln\left(\frac{P_{cr}}{P}\right) \quad (1) \quad \eta_{peak} - \eta_{res} = C \ln\left(\frac{P_{cr}}{\sigma'_c}\right) \quad (2)$$

ここに C は材料定数であり、式(2)は拘束圧 σ'_c が限界応力 P_{cr} を超えると拘束圧はピーク強度 η_{peak} の発現に影響しなくなり、ピーク強度 η_{peak} が残留強度 η_{res} に等しくなることを意味している。このことから残留強度 η_{res} 、材料定数 C 及び P_{cr} がわかれば、ピーク強度 η_{peak} を予測することができる。図-4 に実験より得られた $\eta_{peak}-\eta_{res}$ と拘束圧の関係を示す。ピーク強度と残留強度が等しくなる拘束圧がMH飽和率の異なる試料のそれぞれの P_{cr} となる。図-5 に $\eta_{peak}-\eta_{res}$ と P_{cr}/σ'_c の関係を示す。近似線の傾きがそれぞれのMH飽和率の材料定数 C であり、図-6 に示すように材料定数はMH飽和率と線形的な関係を示し次式で表される。

$$C = 0.001 \times S_{MH} + 0.02 \quad (3)$$

また各実験で得られた残留強度と有効拘束圧の関係を図-7 に示す。図から残留強度 η_{res} は拘束圧の増加に伴い減少傾向にあり、次式で表される。

$$\eta_{res} = 1.33 - 0.02 \times \sigma'_c \quad (4)$$

得られた残留強度 η_{res} 、材料定数 C と P_{cr} を式(2)に代入し、拘束圧とMH飽和率の影響を加味したピーク強度 η_{peak} を算定することができる。図-8 に実験値と推定値の相関図を示す。図から高い相関性が確認できる。

5. まとめ

本研究では、南海トラフMH貯留層付近の堆積土の鉱物組成と粒土分布を考慮して作製したホスト砂とその中にMHを生成させたMH模擬試料を対象に3種の拘束圧条件下で圧密排水三軸圧縮試験を行った。それらの応力比は有効拘束圧の増加に伴い、剛性、ピーク強度、残留強度の低下が認められ、MH飽和率の高いもの程その傾向が顕著であった。これらの特性を踏まえ、Gutierrezに習い式(2)を提案することでMH飽和率と有効拘束圧に依らず、ピーク時の応力比を推定することが可能となった。

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・生産手法開発に関する研究開発(MH21研究コンソーシアム)」の研究活動の一環として実施したものである。関係各位に対し、深甚の謝意を表する次第である。

参考文献：1)メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム, <http://www.mh21japan.gr.jp/japanese/index.html>,2014. 2)鈴木清史, 榊井明, 宮崎普行:メタンハイドレート胚胎層の力学特性と生産に伴う変化,Journal of Geography,118(5), pp899-912,2009. 3)米田純, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正:深海底におけるメタンハイドレート堆積土の三軸せん断特性,土木学会論文集C,Vol.66,No.4,pp742-756,2010. 4)M.Gutierrez: Modeling of the steady state response of granular soils, Soils and Foundations, vol.43,No.5,pp93-105,2003.

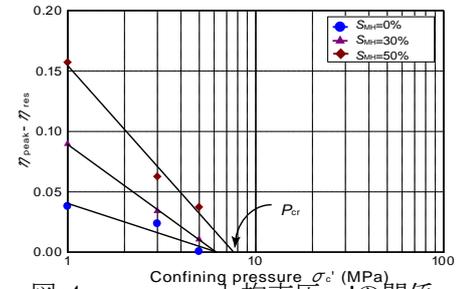


図-4 $\eta_{peak}-\eta_{res}$ と拘束圧 σ'_c の関係

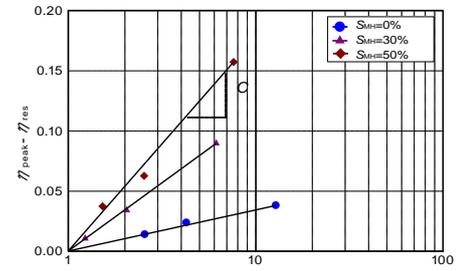


図-5 $\eta_{peak}-\eta_{res}$ と P_{cr}/σ'_c の関係

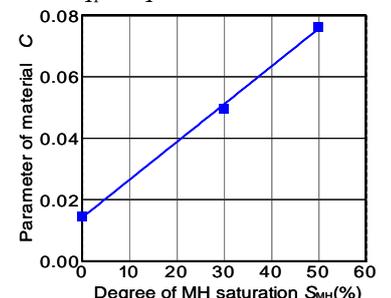


図-6 材料定数 C と S_{MH} の関係

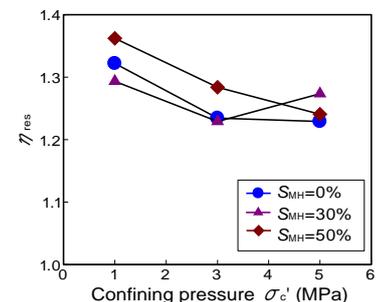


図-7 η_{res} と拘束圧 σ'_c の関係

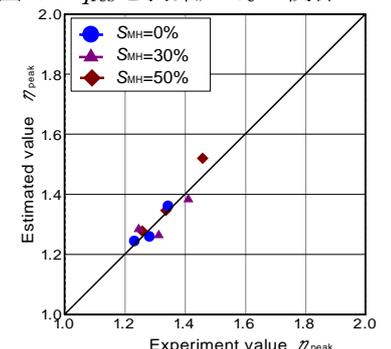


図-8 ピーク強度の実験値と推定値