

メタンハイドレート固結砂の三軸圧縮特性に及ぼす密度の影響

山口大学 学生会員 長通謙二

山口大学 正会員 兵動正幸 吉本憲正 中田幸男

山口大学 学生会員 米田純

1. はじめに 近年、人々のライフスタイルの変化に伴いエネルギー(化石燃料)の消費が増加している。しかしながら、化石燃料の枯渇を背景に、次世代資源としてメタンハイドレート(以下 Methane Hydrate: MH と略す)が注目されている。このエネルギー問題を解決すべく、2001 年より MH 資源開発研究コンソーシアム(MH21)が設立された。2003 年には南海トラフ周辺において基礎試錐試験が実施され、MH がこの海域の深海底に豊富に存在していると報告されている¹⁾。MH 濃集層は、特に水深 1000-1500m の海底から 200-300m 程度の深さに砂泥互層状態を成し、H はその中の砂層の間隙内に存在していることが調査により明らかにされている¹⁾。図

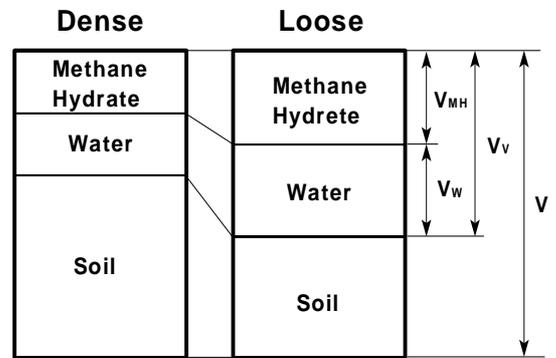


図-1 MH 固結砂の三相モデル

-1 に、土粒子、MH、水の 3 相モデル(水・MH の総和を全間隙とする)を示す。これまで当研究グループで MH を含む砂の力学試験²⁾を行ってきたが、砂の密度は一定として MH 飽和率の変化に着目して検討してきた。しかし、図のように MH 飽和率が一定であっても密度が異なれば、単位体積に含まれる MH の総量が異なる。過去の研究で MH 自身が水圧、温度に依存することが明らかとなっており MH の量が変われば強度に影響するのではないかと考えられる。そこで、本研究では、MH 固結砂の力学特性に及ぼす密度の影響について検討を行った。

2. 実験方法 実験に用いた装置は、深海底と同じ温度と応力条件が再現でき、砂供試体中で MH の生成と分解が可能な MH 三軸圧縮試験機²⁾である。この装置は、高圧三軸試験機に温度制御の機構を加えたものである。本研究では、所定の飽和度の砂供試体を三軸室にセットした後、温度と圧力を制御しながら供試体中にメタンガスを注入し、供試体中の間隙水を MH に置換する方法により砂供試体内に MH を生成した。MH 飽和率は式(1)で定義され³⁾、間隙の体積 V_V に占める MH の体積 V_{MH} の割合を意味する。目標の MH 飽和率 S_{MH} の供試体作成に際して、式(2)より初期含水比を算出し²⁾、目標湿潤密度の供試体を作成し、その供試体中の間隙水を MH に置換する。

$$S_{MH} = \frac{V_{MH}}{V_V} \times 100 \quad (1)$$

$$w_{initial} = \frac{(S_{MH}/100) \cdot V_V \cdot \rho_{MH}}{m_s} \cdot A \quad (2)$$

$w_{initial}(\%)$ は供試体初期含水比、 ρ_{MH} は MH の密度($\rho_{MH} = 0.912 \text{ g/cm}^3$)、 $m_s(\text{g})$ は砂の質量、 $A(\%)$ は MH に含まれる水の質量百分率である。

試験条件は間隙率 40%、45%、水圧 5,10,15MPa、温度 1,5,10、有効拘束圧 1,2,3MPa、MH 飽和度 0%、30%、50% の組合せで行った。表-1 に、使用した豊浦砂の物理的性質を示す。

表-1 試料の物理的性質

Material	Specific gravity of soil particles	Maximum void ratio	Minimum void ratio	Coefficient of uniformity
	G_s	e_{max}	e_{min}	U_c
Toyoura sand	2.643	0.973	0.635	1.20

3. 実験結果及び考察 間隙率 40%、45%、MH 飽和率 50% の砂供試体に対し、温度 5、有効拘束圧 3MPa のもと、水圧 5、10MPa に変化させ、それぞれせん断を行なった。図-2 (a) に間隙率 45%、(b) に間隙率 40% の実験結果をそれぞれ示す。いずれの間隙率においても、水圧の増加に伴い初期剛性、最大軸差応力ともに増加する傾向が認められる。しかし、増加する応力の割合やピークの値は異なっており、(a)、(b) を比べると、(b) は (a) よりも初期剛性、最大軸差応力、共に高い値を示している。また、(a) においてピークを過ぎると徐々に軟化を示している。(b) は (a) よりも、軟化挙動が顕著に現れていることがわかる。軸ひずみが 50% に近付くと、両者とも MH 固結砂が

砂の残留強度に漸近している。これは、せん断が進み終局状態近付くと、MHによる粒子間の固結力は弱まり、残留強度は土粒子が担うところが多くなるためと推察される。次に、水圧 15MPa, 間隙率 40, 45%, 有効拘束圧 3MPa のもと、温度 1, 10 と変化させた三軸圧縮試験結果を図-3 に示す。いずれの間隙率においても、温度の低下に伴い初期剛性、最大軸差応力ともに増加する傾向が認められる。しかし、増加する応力の割合やピークの値は異なっており、(a), (b)を比べると、(b)は(a)よりも初期剛性、最大軸差応力共に高い値を示している。ここで、体積変化について注目すると、(a)はすべての条件において収縮量は異なっているが終始収縮を示している。(b)において、温度が低くなるにつれ収縮挙動の傾向は低減され膨張挙動へと推移していく様子が伺える。これは、温度が低下するにつれ、MH が堅固になり、密な状態の土粒子が MH に乗りあがり、正のダイレイタンシーを起こすためと推察される。これらの実験結果より、MH 固結砂は低温、高压条件になるほどより強度が増加すると分かった。

次に、水圧 5MPa, 温度 5 間隙率 45% 一定のもと、有効拘束圧を 1, 2, 3MPa と変化させた実験結果から得られた破壊時の豊浦砂単体と MH 固結砂のモールの応力円を図-4 に示す。豊浦砂単体の内部摩擦角は $\phi = 26.8^\circ$ となり、MH 固結砂も同様な大きさの内部摩擦角となる。これより、この拘束圧の範囲において、内部摩擦角 ϕ が一定であると仮定し、MH 固結砂の粘着力として c_H を算出した。また、豊浦砂単体の粘着力は生じていないことから、MH が砂中に存在することで c_H が生じたと推察される。

図-5に c_H' と温度、水圧の関係を示す。縦軸に c_H' 、横軸に温度、水圧の二軸をとる。図より、同じ間隙率の試験条件において、温度低下による c_H' 増加率と、水圧による c_H' 増加率を比較すると、温度 1 あたりの変化量と、水圧 1MPa あたりの変化量が異なることがわかる。次に、図-6に、縦軸に水圧、横軸に温度をとり、MHの安定境界線及び、間隙率 40% における温度、水圧条件の c_H' を示す。また、プロットの大小により c_H' の値の大小を表現する。図より、MH 固結砂は MH の安定境界線から離れるほど高い c_H' を示しており、MH 固結砂の c_H' は

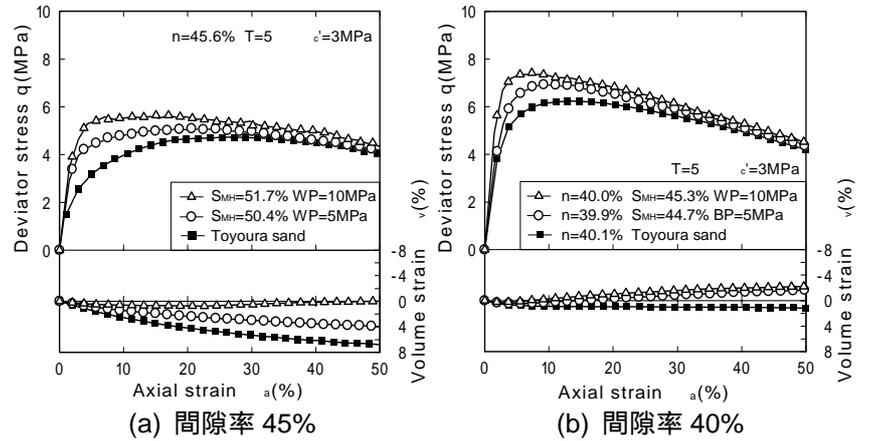


図-2 間隙の異なる MH 固結砂に与える水圧の影響

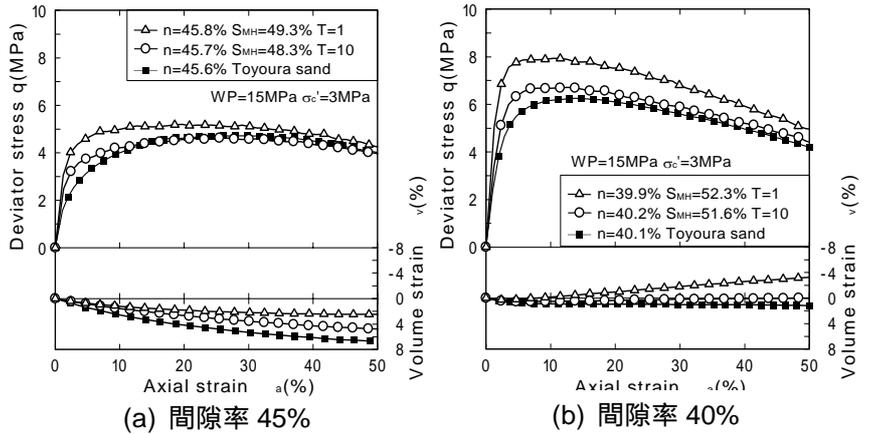


図-3 間隙の異なる MH 固結砂に与える温度の影響

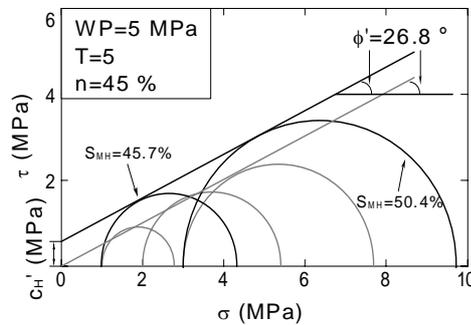


図-4 MH 固結砂と砂のモールの応力円

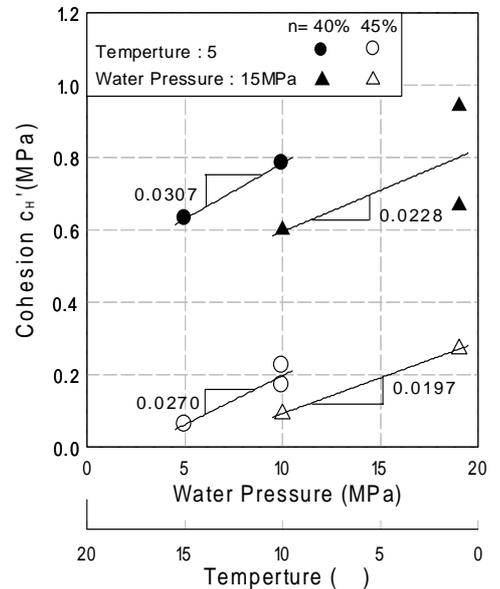


図-5 c_H' と温度、水圧の関係

MHの安定境界の距離と関係があると推察される．このことを踏まえ，MHにより発揮される c_H' が等価となる安定境界線からのT軸方向距離をP軸方向距離に置き換えられる状態パラメータ L を式(3)のように定義する．この関係式を用いることで温度・水圧が，どのような状態であっても，状態パラメータ L として，一つのパラメータで評価することが可能となる．

$$L = a \times L_T + L_P \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

ここで， L_T 及び L_P は，図-6に示す，温度 T ，水圧 P の状態から，安定境界線までのT軸方向距離及び，P軸方向距離である． a は，温度変化による c_H 増加率を水圧変化による c_H 増加率に換算するパラメータとする²⁾．パラメータ a の決定方法は，温度変化による c_H 増加率を水圧変化による c_H 増加率で除して算出する．図-5より，間隙率40%において，温度変化による c_H 増加率は0.0228 (MPa/)，水圧変化による c_H 増加率は0.0307 (MPa/MPa)となり， $a=0.7$ (MPa/)が得られた．間隙率45%においても同様に算出し， $a=0.7$ (MPa/)が得られた．間隙率40，45%の二つの条件に対して値が等しくなった．実験結果より得られる範囲に限定して本研究におけるパラメータ a を， $a=0.7$ (MPa/)とし整理を行った．

次に， L と c_H にどのような関係があるか考察するため，図-7に c_H - L 関係を示す． $L=0$ MPaの時は，MHが存在できる限界であり，実験が困難であるためMHが砂に与える c_H を正しく評価できない．そのため安定境界線上では，MHは分解し，MHによる強度発現がないものと仮定し， $c_H=0$ MPaとした．図より， L が増加するにつれ c_H は増加し，飽和度ごとに一義的な関係が得られた．また，全てのMH飽和度において間隙率40%の方が c_H は高い値を示している．先に述べたように，MH飽和率が一定であっても，単位体積に含まれるMHの量は異なる．密な供試体は間隙が小さくなり，土粒子がより密着するため，少ないMHの量でも粒子間をより効率的に固結する．そのため，間隙の少ない間隙率40%がより高い粘着力を示したと推察される．

4. まとめ 本研究により，以下のような知見が得られた．

- 1) MH固結砂のせん断挙動は，MH飽和率が同一であっても間隙率が異なると，MH固結砂に与える温度，水圧の影響に差が生じる．間隙率が低いほど，より顕著にそれらの影響を受ける．
- 2) いずれの間隙率の場合においても，せん断挙動は最大軸差応力を過ぎると徐々に軟化を示し，軸ひずみが50%に近付くと，同程度の大きさの残留強度に落ち着く．間隙率が低いほど軟化挙動は顕著になる．
- 3) 粘着力の温度1あたりの変化量と，背圧1MPaあたりの変化量は異なる．MHの状態を表すパラメータ L を定義し， L を用いて粘着力を整理した． L が増加するにつれ，粘着力は増加し，飽和度ごとに一義的な関係が得られた．
- 4) 全てのMH飽和度において，間隙率の低い方が粘着力は高い値を示している．このことから，密な試料ほど，土粒子同士がより密着するため，少ないMHの量でも粒子間をより効率的に固結し，高い粘着力を示したと推察される．

【謝辞】本研究は，経済産業省「MH開発促進事業・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.mh21j.a.p.a.n.gr.jp/j.a.p.a.nese/index.html> 2)米田純，兵動正幸，中田幸男，吉本憲正，海老沼孝郎：深海地盤を模擬したガスハイドレート堆積砂の三軸圧縮特性，地盤工学会中国支部論文報告集「地盤と建設」，Vol.25 印刷中 3)Hyodo, M. Nakata, Y. Yoshimoto, N. Ebinuma, T. : Basic research of the mechanical behavior of methane hydrate-sediments mixture. Soils and Foundation, Vol. 45, No. 1, pp. 75-85, Feb. 2005.

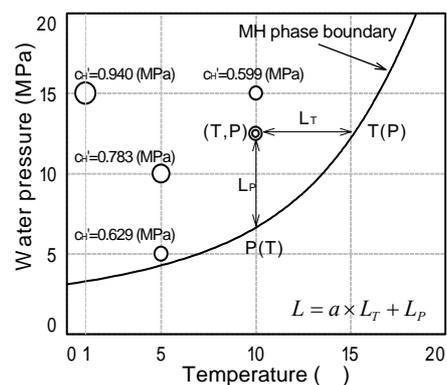


図-6 水圧，温度関係に示すLの概念図

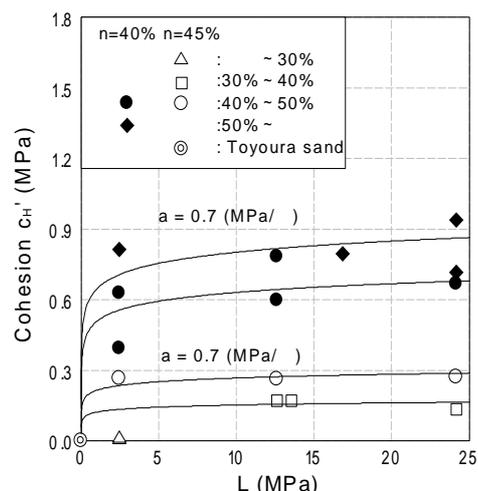


図-7 c_H' - L 関係