

メタンハイドレートを含む砂の力学特性に及ぼす細粒分の影響

Effect of Fines on Mechanical Characteristics of Methane Hydrate Bearing Sands

中島晃司	Koji NAKASHIMA	(山口大学大学院理工学研究科)
兵動正幸	Masayuki HYODO	(山口大学大学院理工学研究科)
吉本憲正	Norimasa YOSHIMOTO	(山口大学大学院理工学研究科)
中田幸男	Yukio NAKATA	(山口大学大学院理工学研究科)

東部南海トラフに賦存するメタンハイドレートを対象に研究開発が進められている中、メタンハイドレートの存在が多く確認されている濃集層の粒度分布は様々であることが明らかにされてきた。メタンハイドレートを安全に生産する上では粒度の違いによる力学特性を把握しておくことは重要であり、本研究では採取されたコア試料のデータをもとに粒度や鉱物組成を考慮して作製したメタンハイドレート模擬試料を対象に三軸せん断試験を行った。その結果、模擬試料中の細粒分含有率に着目すると、細粒分含有率が高い試料においてメタンハイドレートを含むことによる強度増加の傾向が顕著であることが明らかとなり、細粒分を含む環境下では生産後の地盤の強度低下が大きいことを示唆した。

キーワード：メタンハイドレート、細粒分含有率、固結力、メタンハイドレート飽和率、
三軸せん断試験 (IGC : D-5, D-6, D-10)

1. はじめに

現在、私たち人類はエネルギー源のほとんどを石油、天然ガスなどの化石燃料に依存している。我が国の一次エネルギー自給率はわずか 6%とエネルギー資源のほとんどを海外からの輸入に頼っている状況にあり、その水準は OECD 諸国の中で 2 番目に低い値を示す¹⁾。また 2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災時の福島第一原子力発電所の事故以降、原子力発電の再開の見通しも不透明であることから、さらに海外からのエネルギー資源の輸入が増加すると考えられる。そこで、新たな次世代資源としてメタンハイドレート (Methane Hydrate 以下 MH と略す) が注目を浴びている。

MH とは水分子から成る籠状の結晶構造の内部にゲスト分子としてメタン分子が入り込んだ水和物であり、永久凍土層、深海底地盤のような低温高压の条件が成り立つ場所で氷状の結晶として安定して存在する²⁾。MH の相平衡条件は Katz ら³⁾によって求められ、Kvenvolden⁴⁾は図-1 に示すように深海底地盤の代表的な深度・温度関係と MH の安定領域を示した。海底地盤内の圧力は水深によって決まり、水深が大きくなるほど、圧力は大きくなる。温度勾配は、海水面から深海底面まで、一般的な海水の温度勾配であり、深海底面からは地温勾配の影響で変化する。MH は温度が低く水深が深いほど、つまり前述した低温高压の条件下で安定に保たれる。海域に存在する MH は深海底の堆積土中に存在するため、図-1 の安定境界、温度勾配で囲まれる斜線部で示される範囲で存在する。永久凍土層が無い日本では、このように MH は深海底地

盤内に賦存していることが考えられる。

日本では、南海トラフにおいて MH 濃集層の存在が確認され、この区域の MH を経済的に採掘、生産回収することを目的として、2001 年にメタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム (MH21) が設立された²⁾。2003 年に実施された基礎試験より、MH 堆積層には、MH が多く堆積した MH 濃集層とそれ以外の MH 賦存層が存在することが新たに判明した²⁾。2013 年には東部南海トラフ (第二渥美海丘) において海洋産出試験が行われ、約 6 日間にわたってほぼ定常的なガスの生産が計測された²⁾。これは、海洋の MH を対象とした生産試験としては世界初の試みである。

MH を回収する方法として、生産井内を減圧することで深海底地盤内の MH をメタンガスと水に分解した後、ガスとして回収する減圧法が有効であることが明らかにされてきた²⁾。この場合、MH の分解による土骨格の変形、応力変化に伴う海底地盤の変形、2013 年の産出試験においても生産障害の主要因となった出砂現象など、解明、解決しなければならない課題が多く残っている²⁾。

本研究グループにおいても、MH と砂の混合物の力学特性を解明するための研究が進められてきた。米田ら⁶⁾、兵動ら⁷⁾は MH の安定境界内の温度および応力を再現できる恒温高压三軸試験装置を用いて、豊浦砂を対象に種々の条件下でせん断試験を実施し、MH 固結砂の温度、背圧、有効拘束圧依存性などを明らかにしてきた。今村ら⁸⁾、米田ら⁹⁾は恒温高压平面ひずみ試験装置を用いて、豊浦砂を対象にせん断試験を行い、実験中に取得した画像からせん断時の局所変形を調べ、MH の有無による変形

挙動の違いやせん断帯内外での変形挙動の違いを明らかにしてきた。しかし、天然のMHが存在する我が国周辺の海底堆積層には、細粒分が含まれていることが既に知られており、豊浦砂と比較すると、ほとんどの場合、平均粒径は小さいと推定される¹⁰⁾。豊浦砂で得られた試験結果が、実地盤にそのまま対応しているとは一概には言えず、また、現地の粒度を考慮した試料に対する研究成果は少ない。MHが存在している地盤の構成は、砂分の多い地盤から細粒分の多い地盤まで様々であり、地盤を構成している粒度がその地盤の強度変形特性を担っているともいえる。安全な生産手法の確立のためには、事前にそれらを把握しておくことが重要である。

そこで本研究では、コア試料から得られたデータをもとに、南海トラフを模擬したMH模擬試料を作製し、三軸せん断試験を行う。そして模擬試料内の細粒分に着目し、細粒分含有率の違いがMH固結砂の力学特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

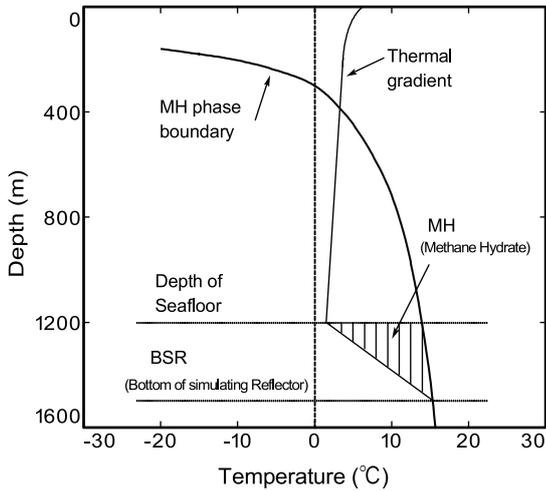


図-1 MHの存在領域 (Kvenvolden, 1988)⁴⁾



写真-1 恒温高压三軸圧縮試験機の外観

2. 試験装置の概要

本研究では低温および高压状態で間隙圧、拘束圧を制御可能な三軸試験装置(恒温高压三軸圧縮試験機)を用いて実験を行った。これにより深海底における応力及び温度条件を再現可能となり、MHを生成した砂の力学挙動を明らかにできる。写真-1は装置の外観を、図-2はセル周辺機器及び配管図をそれぞれ示したものである。図-2の主な機器についての説明は以下の通りである。

- (1) 拘束圧発生装置：拘束圧は油圧を圧力源とし、その圧力を増幅することにより30MPaまで負荷することが可能であり、 $\pm 0.1\text{MPa}$ の範囲で制御可能である。
- (2) シリンジポンプ：本装置には、20MPaまで耐圧性能を有するシリンダーを装置の上下に取り付け、シリンダー内部のピストンをパルス制御方式のステッピングモーターでコントロールすることで背圧(以下、間隙圧と表記する)を発生させることが可能となっている。0~20MPaの範囲で $\pm 0.05\text{MPa}$ の精度で制御可能である。また、シリンダー内に非圧縮性の溶液を用い、ピストンのシリンダー内への貫入量をパルスから計算することで供試体の体積変化も計測可能としている。この装置は本試験機における最も特徴的な部分であり、これにより深海底における高い間隙圧を再現することが可能である。
- (3) ガスマスフローメーター：MH飽和率を算出するため、管路に気体用マスフローメーターを設置している。せん断終了後にMHを分解させ、供試体から気体用マスフローメーターに繋がる管路のバルブを調節しながらガス量を測定する。
- (4) 側液温度管理装置：この装置では外部に設置された循環式低温恒温水槽により $-35\sim+50^\circ\text{C}$ の範囲で温度調整された側液を三軸試験装置に循環させ、三軸セル内部の温度条件を調節するシステムとなっている。また、槽内の温度は $\pm 0.1^\circ\text{C}$ の範囲で管理可能である。側液については低温での実験を行うため、凝固点が低く -40°C まで液体として使用可能かつ、各種

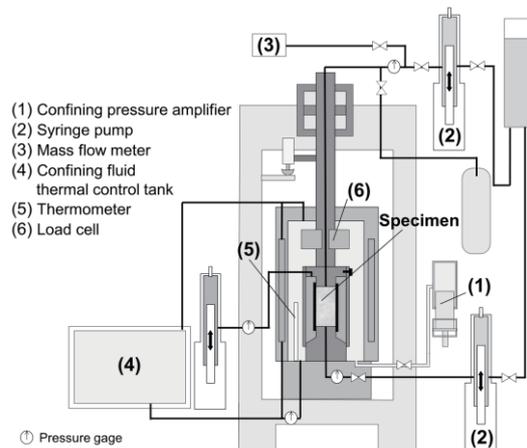


図-2 セル周辺機器および配管図

金属材料に優れた防食性能を持つオーロラブライ
ンを使用している。

- (5) 温度センサー：図に示すように、三軸室内の供試体横に温度センサーを取り付け、三軸室内の温度を測っている。この温度センサーの値を基にセル内の温度管理を行っている。
- (6) ロードセル：最大許容荷重は 200kN であり、許容荷重の 1000 分の 1 の精度で計測可能である。

計測機はデータ収集システムに接続され、パーソナルコンピュータによって鉛直荷重、軸変位、拘束圧、供試体体積変化、間隙圧が自動計測される仕組みとなっている。

3. 試験試料および供試体作製方法

3.1 試験試料

基礎試錐「東海沖～熊野灘」において、南海トラフ海域の MH はタービダイト砂泥互層の砂層の間隙中に存在していることが明らかにされている⁹⁾。鈴木ら¹¹⁾は、砂層の X 線 CT 画像を撮影し、その画像から特徴的な平行葉理と斜交葉理で構成されている堆積構造の組み合わせがみられることを報告している。そして、堆積構造から、砂層の内部構造として、葉理の顕著でないタービダイトの塊状級化部、平行葉理部、斜交葉理部、および上部平行葉理から上位に相当する泥質部で構成していることを報告している。

2013 年の海洋産出試験では砂質土層の間隙中に存在する MH を開発対象として、生産試験が行われた¹²⁾。米田ら¹²⁾は産出試験地の実地盤の圧力を保持したまま採取したコア試料に対して、非排水および排水三軸圧縮試験を行っている。本研究では基礎試錐「東海沖～熊野灘」と海

洋産出試験地付近のコア試料から得られたデータをもとに、MH 濃集層の粒度分布と鉱物組成を近似するため、表-1 に示す鉱物を所定の配合割合で混合することで、南海トラフを模擬した MH 模擬試料を作製した。本研究で使用する MH 模擬試料の粒度分布を図-3 に示す。

3.2 供試体作製方法

試料は 3.1 で前述した MH 模擬試料を用いた。既往の研究から、供試体に含まれる MH の含有量が力学特性に大きく影響することが明らかとなっており、その含有量を定量的に評価するため図-4 の三相モデルより MH 飽和率 $S_{MH}(\%)$ を式(1)で定義している¹³⁾。ここに V_{MH} は MH の体積であり、 V_v は MH も含む間隙の体積を表す。本研究では、実地盤の S_{MH} を再現するために、目標とする S_{MH} から水の量を式(2)によって算出し、目標の湿潤密度の供試体を作製した。算出した量の水は注入されるメタンガスと全て反応し、MH に置換されることを想定している。

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

$$w_{initial} = \frac{(S_{MH}/100) \cdot V_v \cdot \rho_H \cdot A}{m_s} \cdot A (\%) \quad (2)$$

ここに $w_{initial}(\%)$ は供試体初期含水比、 $\rho_{MH}(\text{g}/\text{cm}^3)$ は MH の密度 ($\rho_{MH}=0.912(\text{g}/\text{cm}^3)$)、 $m_s(\text{g})$ は砂の質量であり、 $A(\%)$ は 1 つの MH に含まれる水の質量百分率である。MH の理論分子式は $\text{CH}_4 \cdot 5.75\text{H}_2\text{O}$ であるが、人工 MH の分子式は $\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ より $A=108/124 \times 100=87.1\%$ となる。

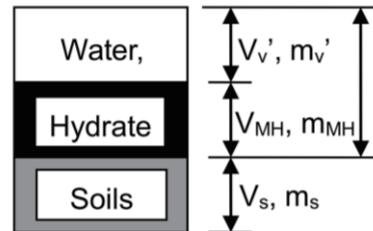


図-4 メタンハイドレート堆積土の三相モデル¹³⁾

供試体作製は以下の方法によった。式(2)により算出された目標の S_{MH} に必要な水を所定の空隙率となるように計量した MH 模擬試料作製の砂と含水状態が均質になるようによく混ぜ合わせ、直径 30mm、高さ 60mm のモールドに所定の密度となるよう 15 層に分けてタンパーで突固める。試料を詰めたモールドは供試体を自立させる為、冷凍庫内で凍結保存する。

4. 試験方法と試験条件

4.1 試験方法

本研究における MH 模擬供試体作製から実験の初期条件を付与するに至る温度-間隙圧履歴を図-5 に示す。図中

表-1 各 MH 模擬試料作製に使用する鉱物の配合割合

Sample name	Kaolin	Mica	No.9 Silica sand	No.8 Silica sand	No.7 Silica sand	No.6 Silica sand	R55
$F_c=8.9\%$	1	2	0	17	70	0	10
$F_c=10.6\%$	0	1	9	10	10	70	0
$F_c=22.9\%$	3	5	0	55	30	0	7
$F_c=30.0\%$	0	5	35	50	10	0	0

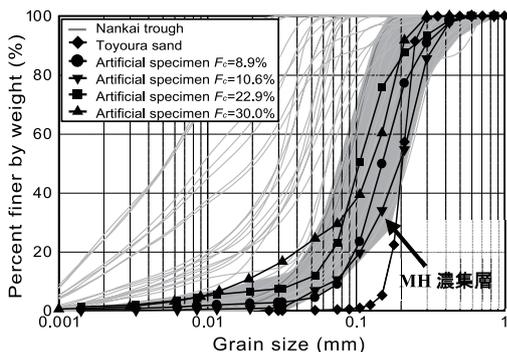


図-3 MH 模擬試料の粒度分布

のパスに示すように、まず凍結供試体を三軸セル室内に設置した後(図-5, ①), 間隙圧を4MPaまで徐々に増加させながらメタンガスを圧入し(図-5, ②), 供試体間隙内および試験機管路内をメタンガスで充満する。メタンガスは供試体上部のみから圧入しているため、供試体上部の方だけMHが生成され、下部へのメタンガスの通り道を塞ぎ、供試体内に均質に生成されていないことが考えられる。そこで、一度温度をMHの安定境界外まで上げ、MHを分解することで、メタンガスを供試体間隙内全体に行き渡らせる(図-5, ③)。MH模擬試料作製時に、含水状態が均質になるように混ぜ合わせているため、MHが均質に生成されると考えられる。その後、三軸セル室内の温度を1℃まで下げ、MHが安定して存在できる温度圧力条件に供試体環境を保つ(図-5, ④)。メタンガスは上下シリンジポンプから供試体に供給しており、上下のシリンジポンプで計測される体積変化が定常状態になり、供試体へのメタンガスの供給がなくなることでハイドレート化の確認を行っている。MH生成後、圧力を保ったまま管路内に残ったメタンガスを水に置換し、供試体の通水を行う。その後、試験条件の間隙圧を負荷し(図-5, ⑤), 試験条件まで温度を調整する(図-5, ⑥)。ここで、間隙圧一定のまま所定の有効応力まで圧密を行い、軸ひずみ速度0.1%/minで軸圧縮を行う。せん断終了後、間隙圧、温度共にMH安定境界の外に出し、マスフローメーターで測定したメタンガス量からMH飽和率 S_{MH} を算出する。

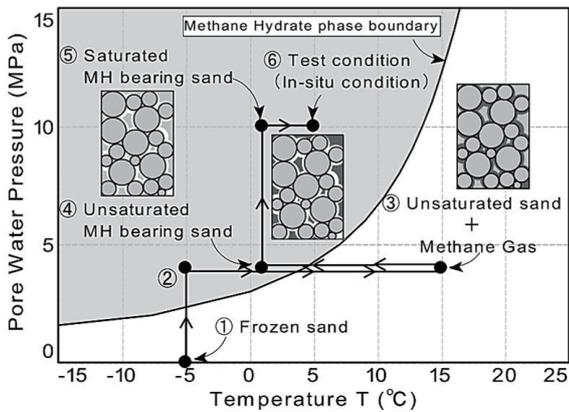


図-5 実験中の温度-間隙圧履歴

4.2 試験条件

試験条件を表-2に示す。試験は有効拘束圧1, 3, 5MPa, 間隙水圧10MPaおよび温度5, 20℃の条件で行った。「我が国におけるメタンハイドレート計画開発」フェーズ1総括成果報告書では現地基礎試錐「東海沖～熊野灘」より得られた物性値として砂泥互層の間隙率が40~45%であったことを公表している⁵⁾。また、海洋産出試験地域より得られたコア試料の間隙率は40~50%であったことから、本研究では目標の間隙率を45%としている¹²⁾。MHが間隙中を占める割合は、これまで実施された基礎試錐により、MH濃集層で $S_{MH}=50\%$ 、MH賦存層で $S_{MH}=30\%$ 程度であることがわかっている¹³⁾。本研究ではそれらに

表-2 試験条件

Sample name	Pore pressure (MPa)	Temperature (°C)	Effective confining pressure σ'_c (MPa)	Porosity n (%)	Degree of MH saturation S_{MH} (%)
$F_c=8.9\%$	10	20	1	45.48	0.00
				45.25	31.11
		5	3	45.31	47.36
				44.91	0.00
		20	3	45.40	31.38
				45.22	47.43
		5	5	44.95	0.00
				45.04	31.69
		20	5	45.27	50.00
				$F_c=10.6\%$	10
45.85	24.66				
5	3	44.85	43.73		
		46.89	0.00		
20	3	44.91	24.38		
		45.11	40.31		
5	5	45.03	58.75		
		46.48	0.00		
20	5	45.65	47.94		
		$F_c=22.9\%$	10	20	1
45.01	24.30				
5	3			44.91	58.60
				43.54	0.00
20	3			45.29	19.60
				44.77	43.95
5	5	44.53	0.00		
		$F_c=30.0\%$	10	20	1
44.56	46.01				
5	3			44.41	0.00
				45.58	30.46
20	3			45.54	38.30
				43.34	0.00

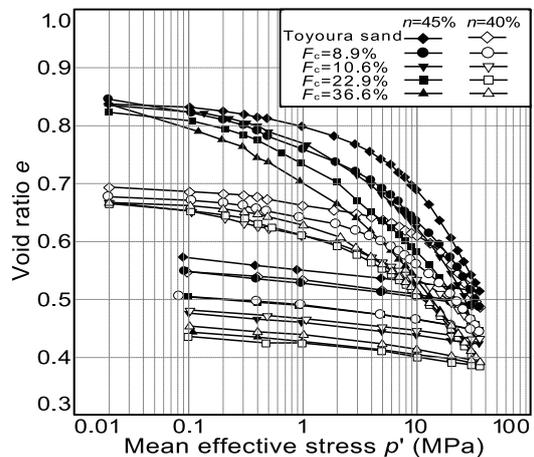


図-6 ホスト砂模擬試料の e-log p' 曲線

ならい目標のMH飽和率 S_{MH} を 30, 50%としている。

5. 試験結果と考察

5.1 ホスト砂模擬試料の等方圧縮特性

MH を生成していないホスト砂模擬試料を対象に行った等方圧縮・除荷試験より得られた間隙比 e と平均有効主応力 p' の関係を図-6 に示す。ここでは豊浦砂と細粒分含有率 $F_c=36.6\%$ の試料の結果も併せて示している。 $F_c=36.6\%$ の試料は 3.1 で前述した泥質部の代表的な粒度として試料を作製し試験を行っている。この試料は細粒分の多さから透水性が悪く、間隙に MH が生成されるのではなく、土粒子を押しつけて塊状で生成されるので、他の試料とは MH の存在形態が異なる。また、透水性の悪さから、本研究で MH の生成方法として採用しているガス浸透法では上手く MH を生成できなかつたため、せん断試験については検討の対象としていない。荷重試験は、20kPa から 35MPa まで、除荷試験は 35MPa から 100kPa まで、各荷重ステップで 1 時間荷重を行った。間隙率は $n=40\%$ および 45% の 2 種類を対象に試験を行った。図より、細粒分含有率が高い試料ほど圧縮性が高くなる特徴が見られる。供試体中の細粒分が、相対的に粒形の大きい粒子が形成する骨格の隙間へ入り込んだためだと考えられる。一方除荷試験において描かれる膨潤曲線の様子は

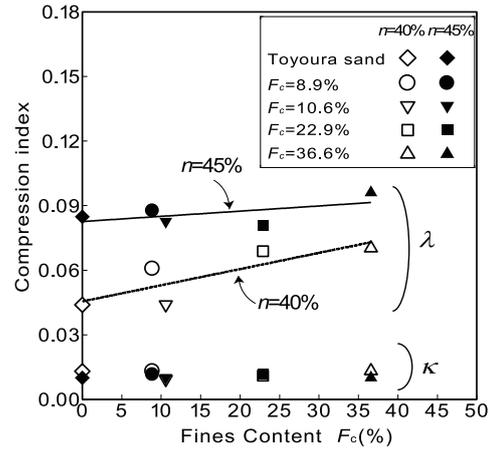


図-7 圧縮指数 λ および膨潤指数 κ と細粒分含有率 F_c の関係

全ての試料でほぼ等しいことが認められる。次に、 e - $\log p'$ 曲線から得られた圧縮指数 λ および膨潤指数 κ と細粒分含有率 F_c の関係を図-7 に示す。圧縮曲線の平均有効主応力 20~35MPa の応力域で直線を引き、その傾きを圧縮指数とした。また、膨潤曲線の平均有効主応力 1MPa~35MPa の応力域で同様に直線を引き、その傾きを膨潤指数とした。圧縮指数は細粒分含有率が増加するにつれて大きくなり、どの試料においても、間隙率 $n=45\%$ の試料の方が大きいことが確認できる。膨潤指数は細粒分含有率によらず等しい傾向が見られる。

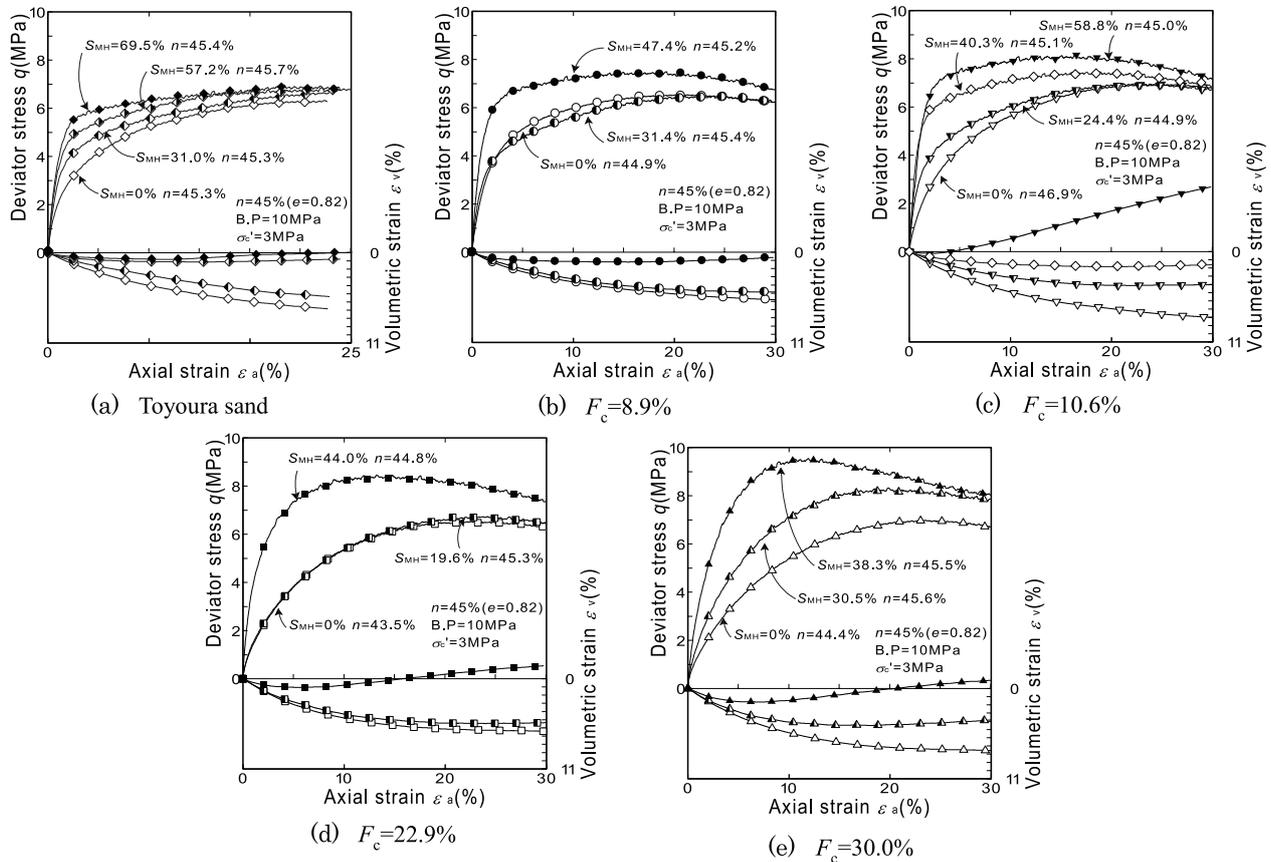


図-8 MH 模擬試料の軸差応力軸ひずみ関係

5.2 MH 模擬試料の三軸圧縮特性

MH を生成させた MH 模擬試料のせん断試験結果を図-8 に示す. ここで MH 飽和率の影響を見るために, MH を生成していないホスト砂模擬試料のせん断試験結果も同図に示し, 有効拘束圧は 3MPa と一定としている. また, 比較の為に豊浦砂を対象に同様の試験条件で行った結果についても示している. どの試料においても MH の増加に伴い, 剛性および最大軸差応力が増加する傾向が見られる. これらは砂粒子間に固着している MH の固結力によるものと推察され, MH の量が多くなるほど, 固結力は大きく発揮されている. また MH の増加に伴い, 最大軸差応力が出現する軸ひずみは低ひずみ域に移っている様子が見られる. 体積ひずみはホスト砂模擬試料では収縮一辺倒の挙動が見受けられるが, MH を含むことで初期に収縮傾向を示した後, 膨張傾向に転ずる特徴が見受けられる. これは MH によって固結された土粒子の団粒化により粒子を乗り越える作用が強くなったためであると考えられる.

次に, 軸差応力を平均有効主応力で除した応力比の最大値 $\eta_{max}(=q_{max}/p')$ と MH 飽和率 S_{MH} の関係を図-9 に示す. 細粒分を含む各試料において試料による差はあるが, 破線で囲まれるように, おおよそ MH 飽和率 30% 付近からその増加傾向が顕著に現れる様子が確認できる. しかし豊浦砂においては, 1 点鎖線で示すように, MH 飽和率の増加に伴い強度は線形的に増加する傾向が見られる. 宮崎ら¹⁰⁾は細粒分を含む 8 号珪砂, 7 号珪砂それぞれに人工的に MH を生成させ, 三軸圧縮試験を行っている. その中でも MH の増加に伴って強度が増加し, MH 飽和率 20% 以上程度でその傾向が顕著になることを報告している. 変形係数 E_{50} と MH 飽和率 S_{MH} の関係を図-10 に示す. 変形係数 E_{50} は式(3)を用いて求めた.

$$E_{50} = \frac{q_{max}/2}{\epsilon_{50}} \times 100 \quad (3)$$

q_{max} (MPa) は最大軸差応力, ϵ_{50} (%) は軸差応力が $q_{max}/2$ (MPa) のときの軸ひずみを示す. 最大応力比と同様, MH 飽和率 30% 付近から変形係数の増加傾向が顕著に現

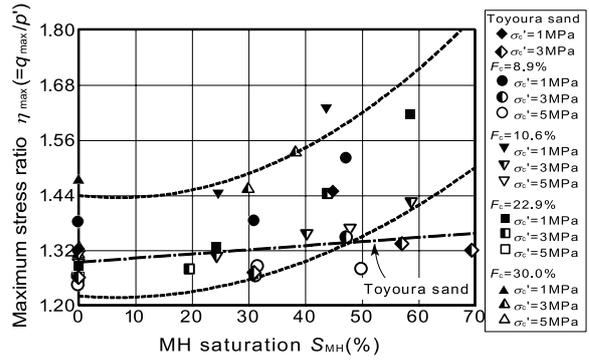


図-9 最大応力比 η_{max} と MH 飽和率 S_{MH} の関係

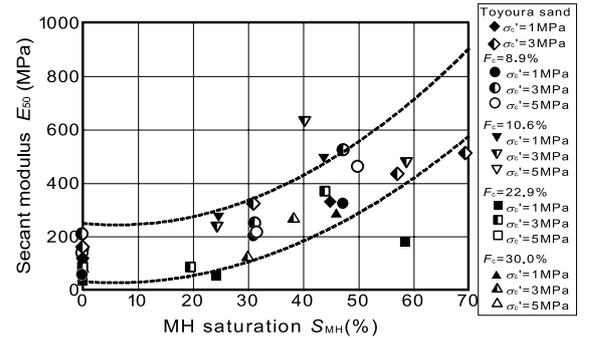


図-10 変形係数 E_{50} と MH 飽和率 S_{MH} の関係

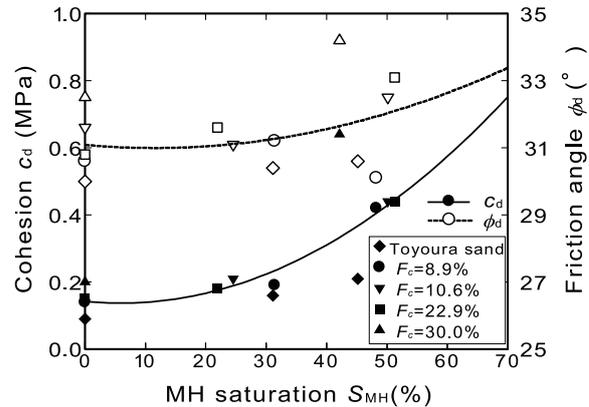


図-11 粘着力 c_d および内部摩擦角 ϕ_d と MH 飽和率 S_{MH} の関係

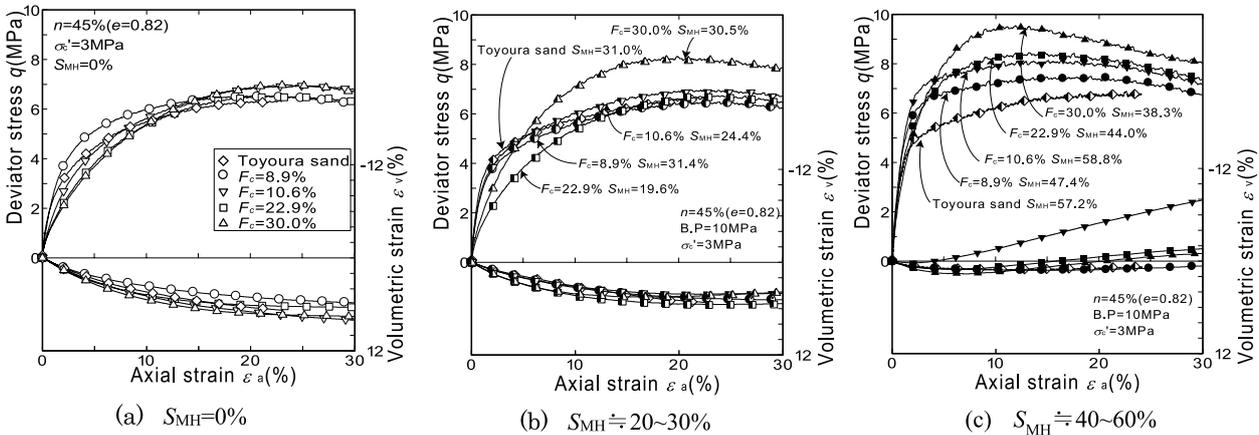


図-12 MH 飽和率ごとの軸差応力軸ひずみ関係

れる様子が認められる。変形係数の増加傾向については、豊浦砂と細粒分を含む試料の違いによらず同様の傾向が見受けられる。

続いて、MH 模擬試料の強度定数を調べるために、各 MH 模擬試料の三軸せん断試験の軸差応力軸ひずみ関係より破壊時のモールの応力円を描き、その破壊線から得られた粘着力 c_d および内部摩擦角 ϕ_d を求め、それらと MH 飽和率 S_{MH} との関係を図-11 に示す。MH 飽和率が高くなるにつれて粘着力は増加している傾向が確認できる。また、内部摩擦角についてもばらつきはあるが、MH 飽和率が高くなるにつれて増加する傾向が見られる。MH の固結力は特に粘着力に影響を与えることが認められる。

ここまでの結果から、どの試料においても MH による強度や変形係数および強度定数の増加が認められ、それらの増加傾向の様子はおおよそ同じであるが、試料によって異なることが確認される。そこで、各 MH 模擬試料の細粒分含有率に着目し、その違いが強度に及ぼす影響を把握していくこととする。おおよそ同じ MH 飽和率の試料について比較をするために、MH 飽和率ごとの軸差応力軸ひずみ関係を図-12 に示す。有効拘束圧は 3MPa の試験結果を示している。ホスト砂模擬試料においては、試料による強度やダイレイタンスの違いは明確には認められないが、MH の増加に伴い、その違いが顕著に現れてくることを確認できる。

次に、最大応力比 η_{max} と細粒分含有率 F_c の関係を図-13 に示す。ホスト砂模擬試料においては、細粒分含有率の違いによる強度の差はわずかであるが、MH 模擬試料においては細粒分含有率が高い試料ほど強度が高い傾向が見受けられる。青山ら¹⁴⁾はセメント固化材料の力学特性は砂の種類や状態により異なるという見地から、細粒分含有率の異なるセメント改良土を用いて力学特性を調べている。その中で行われたペーンせん断試験の結果によると、細粒分含有率の違いによりせん断強度は異なり、細粒分含有率 30% 以上から強度増加が大きくなる傾向を示すと報告している。変形係数 E_{50} と細粒分含有率 F_c の関係を図-14 に示す。ホスト砂模擬試料において、細粒分含有率が高い試料ほど変形係数は小さい傾向が見られる。また、MH 模擬試料においてもその傾向は変わらないことが確認できる。

図-12 より、破壊後の残留強度も試料によって異なる様子が見られる。そこで、残留応力比 η_{res} と細粒分含有率 F_c の関係を図-15 に示す。残留応力比については軸ひずみが 20% 時の応力比を残留応力比として取り扱っている。ホスト砂模擬試料において試料による残留応力比の違いはわずかであるが、MH の増加に伴い細粒分含有率が高い試料ほど残留応力比が高くなる傾向が見られる。どの試料においてもホスト砂模擬試料の残留応力比よりも MH 模擬試料の残留応力比の方が高い傾向が確認されるが、これはせん断により剥離した MH が砂の間隙内を埋め、残留応力比の発現に加担したと考えられる¹³⁾。

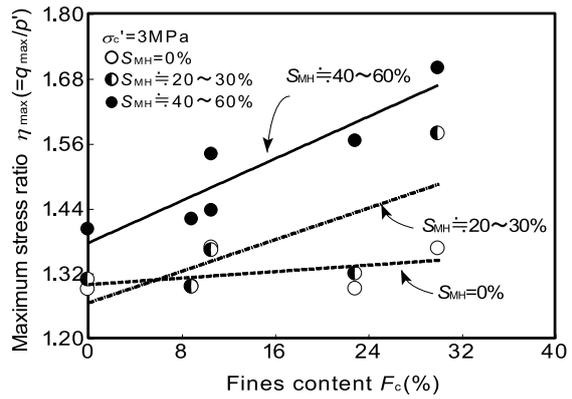


図-13 最大応力比 η_{max} と細粒分含有率 F_c の関係

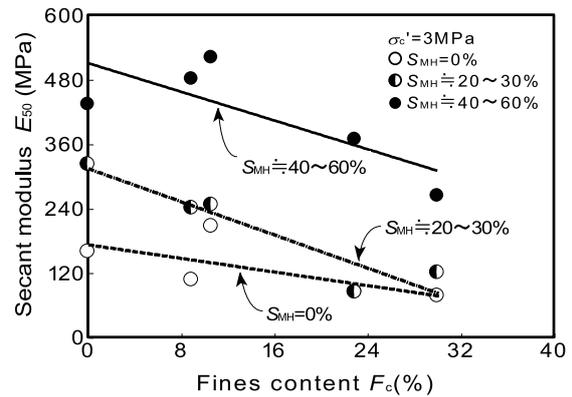


図-14 変形係数 E_{50} と細粒分含有率 F_c の関係

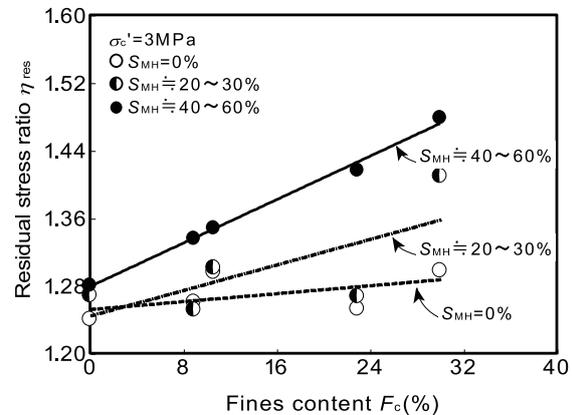


図-15 残留応力比 η_{res} と細粒分含有率 F_c の関係

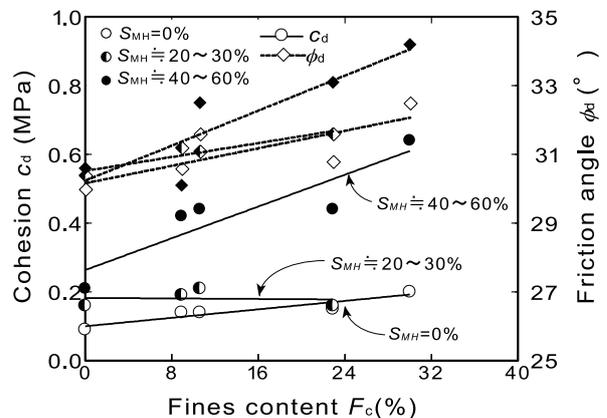


図-16 粘着力 c_d および内部摩擦角 ϕ_d と細粒分含有率 F_c の関係

続いて、粘着力および内部摩擦角と細粒分含有率の関係を図-16に示す。細粒分含有率の高い試料ほど、強度定数は大きい傾向が認められ、それはMH飽和率が比較的高い場合において顕著である様子が見られる。

6. おわりに

本研究では、生産試験地付近におけるMH濃集層の力学特性の把握のために、東部南海トラフのMH濃集層の粒度を模擬した試料を用いて、三軸せん断試験を行った。また、模擬試料中の細粒分含有率に着目し比較を行い、細粒分含有率が力学特性に及ぼす影響を調べた。本研究により得られた知見は以下の通りである。

- (1) ホスト砂模擬試料を対象に行った圧縮除荷試験より、細粒分含有率が高い試料ほど圧縮性が高い特徴が見られる。また、圧縮指数は細粒分含有率が増加するにつれて大きくなるが、膨潤指数は細粒分含有率によらず等しい傾向が見られる。
- (2) どの試料においてもMHの増加に伴い、最大応力比や変形係数および強度定数が高くなる傾向が見られ、MH飽和率30%付近からその傾向は顕著に現れる。
- (3) ホスト砂模擬試料では細粒分は強度に大きな影響を与えないが、MH模擬試料においては細粒分含有率が高い試料ほど、強度増加が認められる。
- (4) ホスト砂模擬試料、MH模擬試料ともに細粒分含有率が高い試料ほど変形係数は小さくなる。
- (5) 軸ひずみが20%のときの応力比を残留応力比として見たとき、ホスト砂模擬試料では細粒分は残留応力比に大きな影響を与えないが、MH模擬試料においては細粒分含有率が高い試料ほど、残留応力比の増加が認められる。
- (6) MH飽和率が比較的高い場合において、細粒分含有率の増加に伴う強度定数の増加傾向が顕著に現れる。
- (7) MHを含むことで強度増加が確認されることから、実際の生産試験では、生産終了後にMHの固結力が消失し地盤の強度が低下することが予想される。それによる地盤の変形に伴う海底地すべり、生産井の破壊などが想定され、細粒分を含む環境下でそれらは起こりやすい可能性があることを示唆している。

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・生産手法開発に関する研究開発」の研究活動の一環として実施したものである。関係者各位に対し、謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 経済産業省, 資源エネルギー庁: エネルギー白書 2014 www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/ (参照 2015 年 6 月)
- 2) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム www.mh21japan.gr.jp/ (参照 2015 年 6 月)
- 3) Katz D.L., Cornell D., Kobayashi R., Poettmann F.H., Vary J.A., Elenbaas J.R. and Weinaug C.F.: *Handbook of Natural Gas Engineering*, McGraw-Hill Inc., New York, USA, 1959.
- 4) Kvenvolden K.A.: Methane hydrate—a major reservoir of carbon in the shallow geosphere, *Chemical Geology*, 71, pp.41-51, 1998.
- 5) メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム: 「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」フェーズ 1 総括成果報告書, pp.11-12,14, 2008.
- 6) 米田純, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正, 海老沼孝郎: 深海底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, 地盤と建設, Vol.25, No.1, pp.113-122, 2007.
- 7) Hyodo M., Yoneda J., Yosimoto N. and Nakata Y.: Mechanical and dissociation properties of hydrate-bearing sand in deep sea bed, *Soils and Foundations*, 53(2), pp.299-314, 2013.
- 8) 今村豊, 米田純, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正: 高圧化におけるメタンハイドレート固結砂の平面ひずみせん断挙動と局所化の評価, 地盤と建設, Vol.28, No.1, pp.95-104, 2010.
- 9) Yoneda J., Hyodo M., Yoshimoto N., Nakata Y. and Kato A.: Development of high-pressure low-temperature plane strain testing apparatus for methane hydrate-bearing sand, *Soils and Foundations*, 53(5), pp.774-783, 2013.
- 10) 宮崎晋行, 坂本靖英, 覺本真代, 天満則夫, 青木一男, 山口勉: 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特性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.
- 11) 鈴木清史, 海老沼孝郎, 成田英夫: 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.
- 12) Yoneda J., Masui A., Konno Y., Jin Y., Egawa K., Kida M., Ito T., Nagao J. and Tenma N.: Mechanical properties of hydrate-bearing turbidite reservoir in the first gas production test site of the Eastern Nankai Trough, *Journal of Marine and Petroleum Geology*, 2015 (in press).
- 13) 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, pp.742-756, 2010.
- 14) 青山要, 宮森建樹, 脇山哲也: 土の粒度特性を考慮した改良土の特性と配合設計に関する研究, 土木学会論文集, No.749/VI-61, pp.149-163, 2003.

(2015 年 6 月 22 日 受付)