

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

米田 純¹・兵動 正幸²・中田 幸男³・吉本 憲正⁴

¹学生会員 山口大学大学院 理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: m004wf@yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 山口大学大学院教授 理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: hyodo@yamaguchi-u.ac.jp

³正会員 山口大学大学院教授 理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: nakata@yamaguchi-u.ac.jp

⁴正会員 山口大学大学院助教 理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: nyoshi@yamaguchi-u.ac.jp

メタンハイドレート（以下MHと略す）が存在している南海トラフの堆積土を模擬したMH生成砂に対して深海底を想定し、MH飽和率・温度・間隙圧を制御して一連の圧密排水三軸圧縮試験を行った。その結果、MH生成砂の三軸圧縮強度には、MHの固結力による強度増加がみられ、その強さは、MH飽和率の増加・温度の低下・間隙圧の増加と共に高くなることが明らかとなった。さらに、2003年南海トラフでの基礎試験により採取されたMHを含む不攪乱砂試料に対して K_0 圧密排水三軸圧縮試験を実施し、その圧縮せん断強度を求めた。その結果、MHを含む不攪乱砂試料の強度が評価され、模擬試料と同様MH飽和率・有効拘束圧による変化傾向が明らかとなった。

Key Words : methane hydrate bearing sand, triaxial compression test, high pressure, temperature, porewater pressure, strength, stiffness

1. まえがき

メタンハイドレート（以下MH）は、水分子が構成する籠状の結晶構造の内部にメタン分子が内包された構造から成る固体状の物質であり、ある一定の温度および圧力の条件下で安定に存在することができる。図-1にMHの存在可能な圧力・温度関係と深海底における存在領域を示している。図-1(a)の曲線はMHの安定境界¹⁾を表すものであり、水とメタンが共存する状態では温度・圧力条件がこの境界線よりも左上に位置する場合にMHが生成され安定的に存在することを意味している。このようにMHは低温または高圧下で安定する性質を持つことから、世界では永久凍土や深海底にその存在が確認されている²⁾。Kvenvolden³⁾は図-1(b)のように海底面からの深度と温度の関係を使ってMHの安定領域を表した。一般に海水温は海面においては5~15°C程度であり、水深の増加に伴い低下し水深1000mの海底では0~5°C程度であるが、海底地盤内では地熱の影響により深度とともに温度が上昇するため、海底面からの深度500mの地層では10~15°C

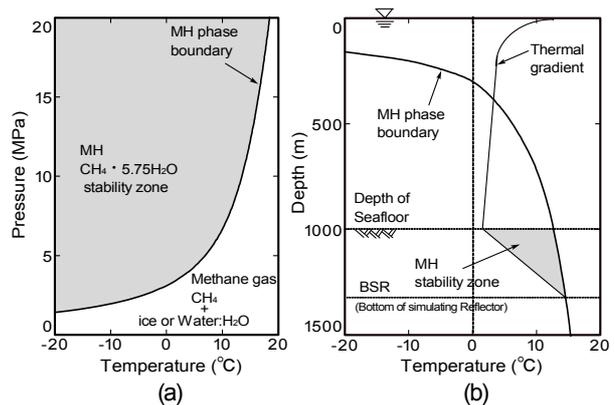


図-1 MHの存在領域 (a)MHの安定境界 (b)深海底に賦存するMHの存在領域

程度となる。一方、水圧は水深の増加とともに増加することから、水深約1000mの海域においてはMH安定境界線は図-1(b)のように描くことができ、MHが生成される領域は、この曲線と温度変化の曲線が交差する深度以浅の海底地盤内となる。永久凍土域が無い日本では、このようにMHは深海底に賦存していることが考えられ、石

油、石炭に代わる次世代エネルギー資源として開発が期待されてきた。

世界におけるMHの存在形態は様々であり、泥質土中や海底面に塊として存在するもの、あるいは砂質土層の間隙内を埋める形で存在するものなどがある。南海トラフ海域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濃集層はその砂層の間隙内を埋める形で存在していることが確認されている⁴⁾。このようなMHの回収を目的として、加熱法、減圧法およびインヒビター圧入法が提案されている⁵⁾⁷⁾。これらの方法は土の間隙内に固体として存在するMHをメタンガスに分解して回収するため、それによる土構造の変化や熱伝導、間隙流体およびガスの移動など、複雑な物理現象が起ると考えられる。このような現象が組み合わさり、MHの分解に伴って地盤内では有効応力の変化や土粒子骨格強度の低下による圧密、せん断変形が生じることが予測される。

しかしながら、このような大水深における高い間隙水圧および土被圧、かつ温度変化まで考慮に入れた実験装置は地盤工学の分野に存在しなかったことから、新たな力学試験装置の開発が必要となった。著者らは砂の高圧三軸圧縮試験の経験⁸⁾⁹⁾から、他に先駆けてMHの力学特性を調べるために冷蔵庫内に高圧セルを持つ三軸圧縮試験機を開発し、顆粒状のMHおよびMHと砂を混合し締固めて作製した供試体の三軸圧縮試験を行い、MH単体および混合土の強度特性に及ぼす温度、拘束圧の影響について調べた¹⁰⁾¹²⁾。しかし、この装置では、温度と拘束圧の制御は可能であったが、間隙水圧の制御ができず、非圧密非排水せん断試験のみが対応可能であった。

その後、深海底地盤の温度、応力条件をより正確に再現可能な力学試験装置の開発に着手した。その結果、原位置および生産時に想定される温度変化、さらに原位置の水深、地盤深さに対応可能な高い間隙圧、拘束圧の負荷が可能なる三軸圧縮試験機を開発することができた。さらにこの装置をMH分解時のガス発生による不飽和土の体積変化が測定可能となるよう、二重セル構造とした。この装置を用いて、セル内で湿潤状態の砂にメタンガスを負荷することにより砂粒子の周りにMHを生成させ深海底と同様の温度、力学環境下でMH生成砂の変形強度特性を調べることに成功した¹³⁾¹⁴⁾。さらに、同試験機を用いて、加熱法、減圧法による生産過程を再現し、MH分解過程におけるMH生成砂の変形挙動を調べることが可能となった¹⁵⁾¹⁸⁾。

Claytonら¹⁹⁾は同様の方法で圧力セル内で作製したMH生成砂供試体に対し、共振柱試験を行い微小ひずみ域におけるせん断弾性係数を調べた。その結果、MHの固結によって砂のせん断弾性係数が急激に増加することが明らかとなった。また、Yunら²⁰⁾は比較的低下でハイドレ

ート化するTHF(テトラヒドロフラン)を用いてTHF飽和水からTHFハイドレートを砂中に生成し、その弾性波速度を調べた。その結果、THFハイドレート飽和率40%以下ではP波速度、S波速度ともに変化が少ないのに対し、飽和率40%を超えると弾性波速度に顕著な増加が認められることを報告している。一方、中・大ひずみ域におけるMHの研究について宮崎ら²¹⁾は同様の方法で作製した供試体に対して、ひずみ速度を変化させて三軸圧縮試験を行い、せん断強度特性に及ぼすせん断速度依存性について調べた。さらに坂本ら²²⁾はMH生産を意識して、MH生成砂中のMHを減圧法により分解をさせ、その結果生じる一次元的な圧縮挙動を浸透特性の変化と併せて調べている。

本論文は先に述べた著者らが開発した三軸圧縮試験機を用いて、南海トラフの模擬試料として作製したMH生成砂に対して一連の三軸圧縮試験を行い、その力学特性に及ぼす諸要因を集約し、基礎的資料とすることを目的としたものである。また、南海トラフから採取した不攪乱試料に対しても三軸圧縮試験を実施し、原位置におけるMH堆積層の力学特性を調べ模擬供試体の挙動と比較検討を行った。

2. 実験装置の開発

(1) 装置について

本研究では深海底における応力および温度条件を再現し、その状態でのMH生成砂の力学挙動およびMH生産時の挙動を調べることを目的に、温度および高圧状態で間隙圧、拘束圧を制御できる三軸試験機装置(温度可変高圧三軸試験機)を開発した。写真-1は装置の外観を、図-2はセル周辺機器および配管をそれぞれ示したものである。図-2の各機器についての説明は以下の通りである。

(a)供試体；供試体は $30\phi \times 60\text{mm}$ または $50\phi \times 100\text{mm}$ の円筒形凍結試料を用いることができる。

(b)ペダスタル；本試験装置では、天然MH試料の分解を防ぐために、供試体をいち早く設置するため、写真-2に示すようにペダスタルがワンタッチで取り外し可能なソケット型となっている。

(c)セル；30MPaの耐圧構造となっており、温度制御のために内部に側液が循環する仕組みになっている。

(d)セル圧発生装置；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。

(e)内セル；試験中に供試体が不飽和状態となる過程があるため、体積変化を計測するために2重セル方式を採用している。一般的には上部が開放された内セル内の水位差を計測することで体積変化を得るが、ここでは高圧



写真-1 温度可変高圧三軸試験装置の外観



写真-2 ペDESTALおよび供試体設置状況



写真-3 間隙水圧発生装置兼体積変化用シリンジポンプ

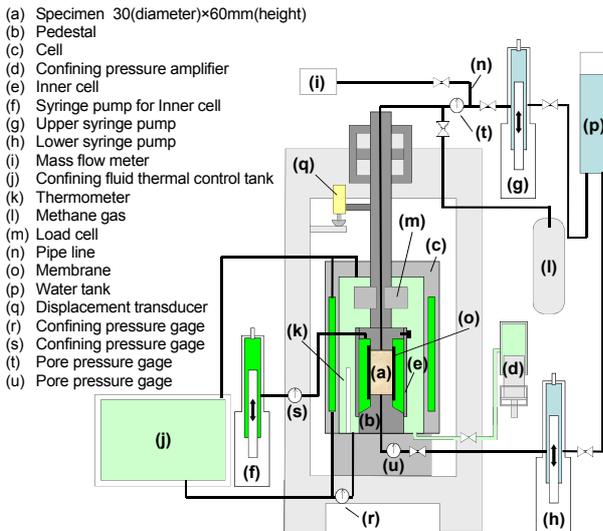


図-2 セル周辺機器および配管図

であるため密閉されたシリンダー内をピストンの貫入によって等圧に制御することで、その体積変化を計測可能としている。

(f)内セル用シリンジポンプ；(e)内セルによる体積変化計測のために、30MPaまでの耐圧性能を有するシリンダーを取り付け、シリンダー内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シリンダー内の体積変化を計測する。さらに、軸の貫入量を補正することで不飽和供試体の体積変化を計測可能としている。

(g)上部シリンジポンプ；これまで地盤工学で用いられてきた高圧三軸圧縮試験機は、高拘束圧域の地盤応力を再現する用途で作製されてきた。しかし間隙圧については、MHが存在できるような大水深を再現できる程の高圧条件は考えられていない。本装置には(f)内セル用シリンジポンプと同様の機構を取り付け、この機能を付加した(写真-3)。最も制御の条件が厳しい20MPa時で±0.05MPaの範囲で制御可能である。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の計測も可

能としている。管路も高圧に耐えうるようステンレス製とした。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。

(h)下部シリンジポンプ；(g)と同様の機構が取り付けられている。

(i)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を取り付けた。装置を通るガスは温度・圧力に依存しない質量流量(g/min)として計測され、20°C-1atmのときの流量(mL/min)として表される。さらに積算することでガス量の測定が可能となっている。計測範囲は0~500 mL/minであり、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。

(j)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~+50°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±0.1°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、各種金属材質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。

(k)温度センサー；図に示したように、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。実験中に温度を変化させる場合は、側液温度と供試体温度が等しくなるように十分な時間を確保する。

(l)メタンガスボンベ；MH作製のためのメタンガス貯蔵用ボンベである。防爆のために屋外での設置が望ましい。

(m)ロードセル；熱，圧力に依存しない円筒形ロードセルをピストン摩擦の影響を除去するためにセル内部へ設置している。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。

(n)配管；実験終了後に管路内にメタンガスが流入するため，ガス溜まりができないように上下の向きを考慮し，できる限り短い管路としている。

(o)メンブレン；本研究では供試体に作用する温度・圧力が低温・高圧のために，通常の三軸圧縮試験でメンブレンとして使われるゴムの使用は避け，低温高圧時の柔軟性を考慮してシリコン性のメンブレンを用いる。ここで，シリコンはメタンガスの浸透性が若干あるため，MHの分解実験¹⁵⁾¹⁸⁾など長い時間をかけて実験をするときはブチルゴムを用いている。

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。この装置の精度の検証のために，まず，MHのない珪砂のみの試料を用いて以下のせん断試験を行った。

(2) 等方圧密排水せん断試験

本実験措置による実験結果を従来の高圧三軸圧縮試験機による結果と比較を行うため，相対密度 $D_r=90\%$ の三河珪砂_{0.18-2.0}を対象に拘束圧 $\sigma'_c=3\text{MPa}$ および 5MPa で三軸圧縮試験を行った。図-3にそれぞれの軸差応力・軸ひずみ・体積ひずみ関係を示す。図より，いずれの拘束圧においても密な砂の低拘束圧下でみられるひずみ軟化，膨張挙動は見られず，過去の高圧三軸試験結果と同様，高拘束圧下におけるひずみ硬化および収縮挙動が見られ，その傾向は拘束圧の増加に伴い顕著になっている。図のように，既設の高圧三軸圧縮試験機⁸⁾⁹⁾による結果と新規に開発した装置による結果は非常に類似した挙動となっている。実験では，深海底の水圧の影響を考慮するために間隙圧を 0.1MPa - 15MPa まで変化させて行ったが，当然のことながら，せん断挙動は有効応力のみ依存し，間隙圧には依らない結果が得られた。また，すべての結果がほぼ同じ挙動となったことから，本装置による実験の再現性の高さも検証された。

(3) K_0 圧密試験

採取した不攪乱コア試料の正確なせん断変形および強度を得るためには，試料を原位置に近い応力状態で圧密を行う必要がある。そこで本装置では K_0 圧密試験を行うために，供試体の体積ひずみ及び鉛直方向ひずみを計測しながら，側方にひずみが生じないようにパーソナルコンピュータを用いて拘束圧を制御することを可能とした。図-4は，豊浦標準砂に対し K_0 圧密試験を行った結果であり，有効鉛直応力と K_0 値および側方ひずみの関係を示し

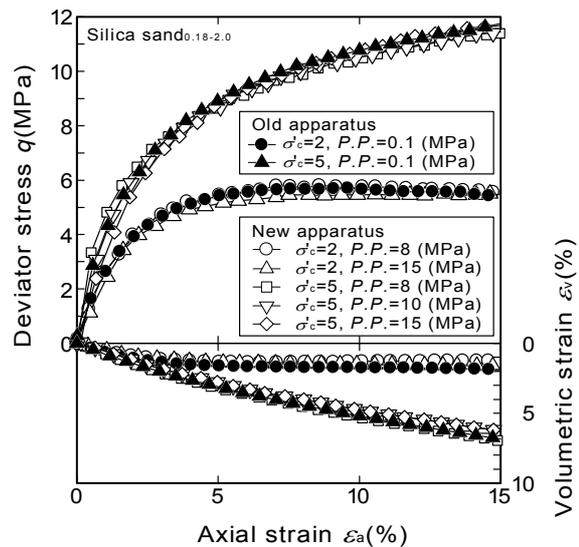


図-3 三河珪砂の高拘束圧下の排水せん断挙動

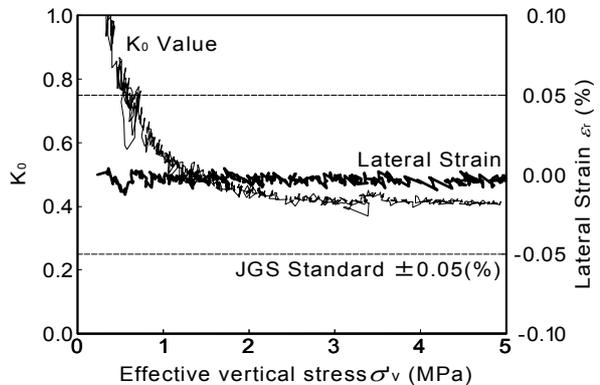


図-4 豊浦砂の K_0 圧密過程における K_0 値と側方向ひずみと有効鉛直応力の関係

ている。側方ひずみは所定の拘束圧に至るまで学会規定である $\pm 0.05\%$ 以内となっており，側方方向に対する変形がうまく拘束されていることが分かる。また得られた K_0 値は有効軸方向圧密応力の増加と共に一定の値に収束している。

3. MH生成砂の三軸試験

(1) 供試体作製法および実験手順

南海トラフから採取した不攪乱試料の観察結果²³⁾から，原位置におけるMHは土粒子に固結して土粒子の間隙を埋める形で存在していると考えられる。MHの多くが砂泥互層の砂層部分に存在し，その中でもMH飽和率の高いものほど，細粒分含有率の低い砂中に存在する傾向があった²⁴⁾。そこで，以下の方法によりMH生成砂を作製した。なお，模擬試料の構成砂として，砂分の平均粒径が近い豊浦砂を用いた。表-1にその物性を示す。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

表-1 豊浦砂の物性

ρ_s (g/cm ³)	D_{max} (mm)	D_{50} (mm)	e_{max}	e_{min}	U_c
2.655	0.425	0.210	0.973	0.613	1.480

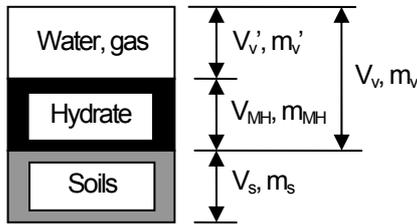


図-5 MH堆積砂の3相モデル (Hyodo et al. (2005)¹⁰に加筆)

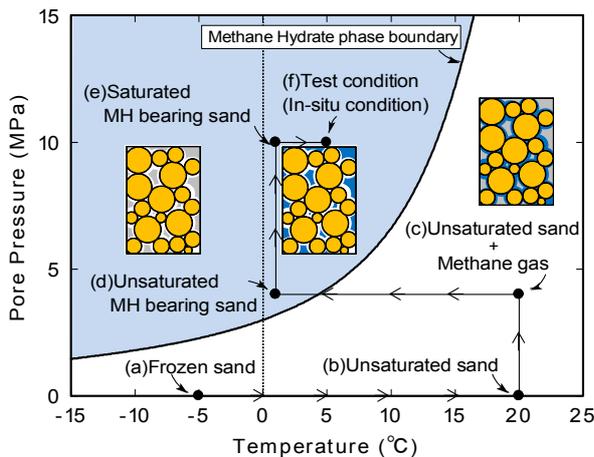


図-6 MH生成過程の温度・間隙圧履歴

を定量的に評価するため図-5の3相モデルにより、MH飽和率 S_{MH} を次式で定義している¹⁰。

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

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。これまで実施された基礎試験では、MH濃集帯で $S_{MH} = 50\%$ 、MH賦存層で $S_{MH} = 30\%$ 程度であることがわかっており、本研究では、実地盤の S_{MH} を再現するために供試体の初期含水比を定めて目標の S_{MH} を生成している。以下のようにMH生成砂の作製を行った。まず、目標のMH飽和率に必要な水を、所定の間隙率となるよう計量した砂と混ぜ合わせ、直径30mm、高さ60mmのモールドに15層に分けて各層40回ずつタンパーで突固めた。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。供試体を脱型した後に供試体をペダスタルに乗せ、メンブレンを装着する。

本研究におけるMH生成砂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-6に示す。図中のパスに示すように、まず、凍結供試体は三軸セル室内へ設置した後(図-6, (a))、融解する(図-6, (b))。

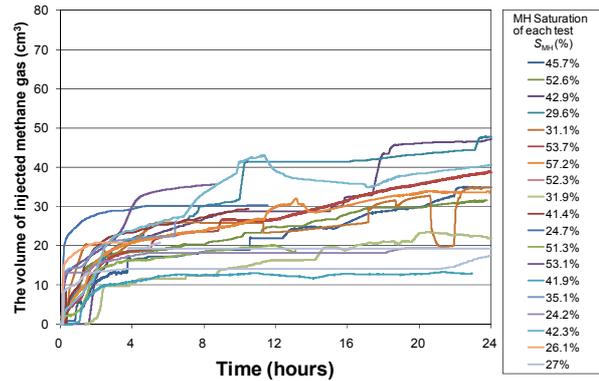


図-7 MH生成過程におけるガス流入量と時間の関係

その後間隙圧を4MPaまで徐々に増加しながらメタンガスを圧入し(図-6, (c)) 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。このとき、圧入によって供試体水分が不均一にならないよう十分に時間をかけてガス圧を増加する。さらに三軸セル室内の温度を1°C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-6, (d))。図-7に注入ガス量の時間的変化を示す。ここで、供試体間隙へつながる上下シリンジポンプのガス圧を一定に保つように制御することでガス流入量を逐次監視し、図に示すようにガス量に顕著な増加が認められなければ、供試体中の水のハイドレート化が完了したと判断する。図中のデータが凸凹になっているのは、MHの生成を促進するために上下のシリンジポンプを制御し、供試体内にガスの流れを作ることによって供試体内のガスの体積がわずかに増減したためである。MH生成後、圧力を保ったまま管路内のガスを水に置換えし、供試体内の通水を行う。その後間隙圧を負荷し(図-6, (e))、試験条件まで温度を調整する(図-6, (f))。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、ひずみ速度0.1%/minでせん断载荷を行う。圧密後にMHを生成させる場合は、凍結供試体を三軸セル室へ設置した後に融解させ、所定の応力まで圧密を行う。ここでは、供試体が不飽和状態であるため、内セルを用いて体積変化を計測する。その後、メタンガスを圧入して温度圧力条件をMH安定領域内にし、MHを生成させた後に、先ほど同様温度・間隙圧を試験条件にしてせん断を行う。せん断終了後供試体温度を上昇させることで、MHを分解させ、図-2に示すガス流量計を使用してガス量の測定を実施する。各試験におけるMH飽和率 S_{MH} は測定後のガス量から算出する。

以上の実験手順で、供試体内にMHが生成されているかを確認するため通水前のMH生成砂供試体を取り出し、AIST札幌研究所の走査電子顕微鏡²³⁾を用いてMHの産状観察を行った。この装置は液化窒素を用いて試験装置を-180°Cに冷却することでMHまたは氷の昇華を抑制し、観察可能としたものである。また、観察面は装置内で供

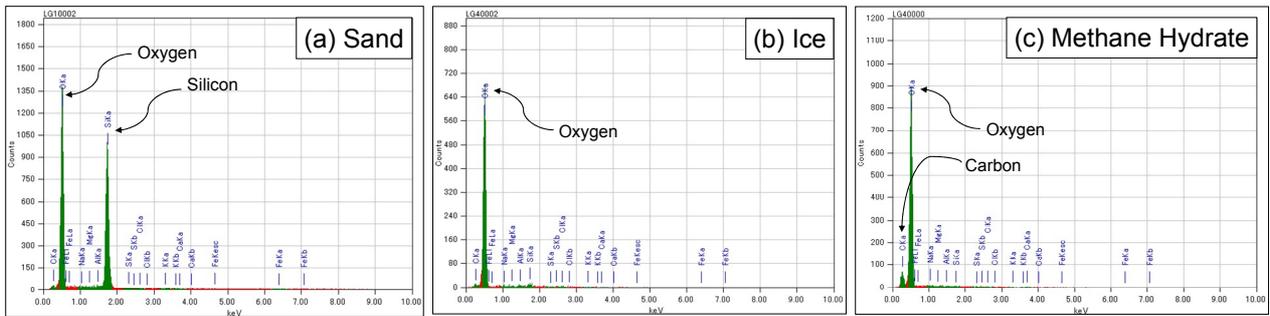


図8 作製した供試体の X線回折結果 (a)土粒子部分, (b)氷部分, (c)MH部分

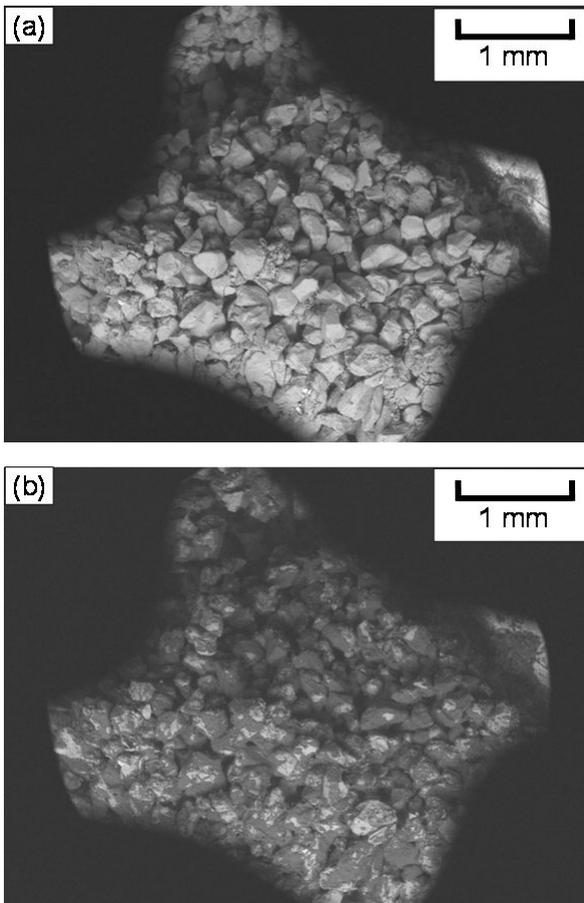


写真4 作製した供試体の SEM 画像(倍率 25 倍)
(a)豊浦砂, (b)MH 生成砂

試体を断割したものであり、霜付きの影響などの無い面である。写真4(a)はMH飽和率 $S_{MH}=0\%$ 、写真4(b)はMH飽和率 $S_{MH}=50\%$ 供試体の倍率25倍で撮影した2次電子画像を示している。写真4(a)では白く見える部分すべてが土粒子を表している。写真4(b)では土粒子に付着する灰色部分がMHまたは氷を示している。図よりMHは土粒子表面を覆うように固着していることが分かる。また、その産状は均一に分布しており、供試体内のMHの均一性が確認された。続いて、MHの分解過程における観察のため、加熱法によるMH分解中に倍率200倍で撮影した画像を写真5(a)~(d)に示す。写真5(a)はMH飽和率 $S_{MH}=50\%$ の供試体を示しており、初期に土粒子がMHに

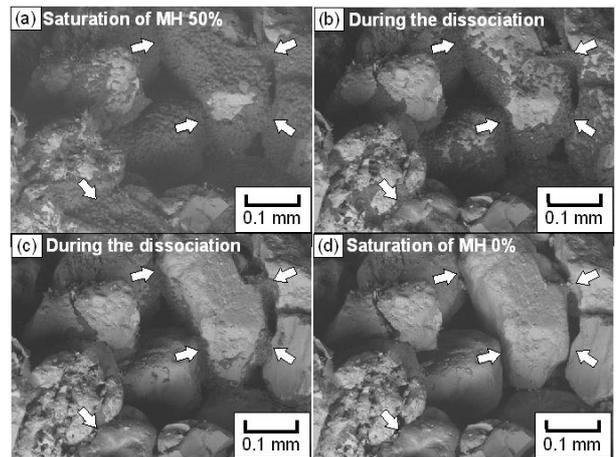


写真5 作製した供試体の SEM 画像(倍率 200 倍)
(a)MH 飽和率 $S_{MH}=50\%$, (b)・(c)MH 分解中
(d)MH 飽和率 $S_{MH}=0\%$

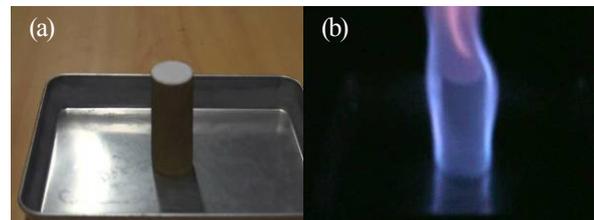


写真6 作製した供試体の燃焼状況
(a)取り出した MH 生成砂, (b)燃焼中の MH 生成砂

覆われているのが分かる。粒子間に注目すると、矢印で示した箇所などはMHが土粒子同士を固結するように生成していることが分かる。写真5(b)、写真5(c)はMHの分解中に撮影した画像を示している。写真5(a)と写真5(b)、写真5(c)を比べると、土粒子表面のMHが徐々に消失していき、矢印で示した土粒子同士が接するような部分のMHが最後まで残っている様子が観察される。

走査電子顕微鏡では、MHと氷との識別が困難であるため、MH生成を確認するため定性分析を行った。定性分析は、任意の定点にX線を照射し、回折が起こり励起された電子の数を計測することで測定対象の構成元素を相対的に評価することができる。図8(a)~(c)は分析を行った代表的なものについて示している。図8(a)は酸素Oとケイ素Siの二つに大きなピークが確認された。これは

表-2 MH生成砂の等方圧密排水せん断試験の試験条件と試験結果一覧

Testing conditions			Testing results			
Effective confining pressure σ_c' (MPa)	Pore pressure $P.P.$ (MPa)	Temperature T (°C)	Porosity n (%)	Degree of saturation by MH S_{MH} (%)	Deviator stress q_{max} (MPa)	Secant modulus E_{50} (MPa)
1	5	5	39.3	0	3.25	369
			45.6	0	2.36	118
			45.0	45.7	2.69	270
	10	5	45.3	45.0	2.76	329
	15	1	39.4	52.6	4.10	484
3	5	5	39.4	0	7.02	501
			45.3	0	6.35	159
			39.6	42.9	7.45	483
			39.5	29.6	8.42	979
			45.3	31.1	6.69	322
			45.3	28.7	6.49	391
	10	5	39.4	53.7	7.63	763
			39.3	38.7	7.90	841
			38.9	26.3	4.47	624
			45.4	69.5	7.00	510
			45.7	57.2	6.89	434
			45.3	50.4	6.54	399
	15	1	39.2	52.3	8.69	943
			39.6	31.9	7.76	690
			45.5	60.9	7.26	459
10		45.2	43.7	6.61	397	
		39.5	51.6	7.57	603	
		45.4	48.3	6.69	485	
5	5	5	39.4	0	10.32	653
	10	1	39.4	41.4	13.55	782
			39.3	24.7	10.95	730
			39.4	51.3	13.88	1068
		5	40.1	53.1※	14.74	1074
			39.1	41.9※	12.86	999
			39.2	35.1	11.84	761
	10	10	39.6	24.2	10.71	756
			39.2	42.3	12.18	693
			38.6	26.1	10.88	668
	15	5	39.0	27.0	10.88	887

※MH was formed after consolidation

表-3 MH生成砂のK₀圧密排水せん断試験の試験条件と試験結果一覧

Testing conditions			Testing results			
Effective vertical confining pressure σ_c' (MPa)	Pore pressure $P.P.$ (MPa)	Temperature T (°C)	Porosity n (%)	Degree of saturation by MH S_{MH} (%)	K ₀	Deviator stress q_{max} (MPa)
5	10	5	39.7	0.0	0.41	5.95
	10	5	39.3	28.9※	0.39	6.7
	10	5	39.4	50.5※	0.40	9.06

※MH was formed after consolidation

本研究で用いた豊浦砂が主に二酸化ケイ素SiO₂で構成されているためである。次に図-8(b)は酸素Oのピークが確認された。これは氷の分子H₂Oに含まれる酸素Oが検出されたもので、測定対象に氷が含まれていることが確認された。最後に図-8(c)は酸素のピークと共に少量の炭素のピークが確認された。これはMH(化学式: CH₄・5.75H₂O)に含まれる炭素Cが検出されたものであり、測定対象にMHが生成されていることが確認された。

また、作製したMH生成砂を取り出し、大気中で燃焼させた。写真-6(a)、写真-6(b)に燃焼前のMH生成砂と燃焼中のMH生成砂を示す。火を近づけると、供試体は青い炎をあげて燃え、約30秒燃え続けた。これより、模擬供試体のMHの生成、および分解によるメタンガスの発

生が確認された。

さらに、目標のS_{MH}が供試体内で均等に生成されているかを確認するため、S_{MH}=25%のMH生成砂を作製し、試験機から取り出した後に供試体を上・中・下の三層に分けてメタンガス量を測定した。MHの分解をできるだけ避けるために、試験機から取り出す前には-30°Cまで供試体を冷却し、作業を行った。その結果、各層のS_{MH}は上段23.3%、中段24.2%、下段25.3%となり、ほぼ目標のS_{MH}の供試体が作製できることが確認された。

(2) 実験条件

実験条件と実験結果の一覧を表-2および表-3にそれぞれ示す。実験は有効拘束圧(1, 3, 5MPa)、間隙圧(間隙

水圧(5, 10, 15MPa)および温度(1, 5, 10°C)をそれぞれ3通り変化させて行った。なお、MHを生成する実験条件の温度、圧力は、すべてMHの安定境界内としている。また、すべての実験においてせん断時のひずみ速度は0.1%/minとした。本研究では間隙率40%(相対密度90%)の密詰めと間隙率45%(相対密度40%)の緩詰めの2種類について実験を行っており、それぞれ種々のMH飽和率になるように調整した。表中の最大軸差応力 q_{max} は、軸差応力・軸ひずみ関係において明確なピークを示さなかったものについては軸ひずみ15%時の結果を示している。

(3) 三軸試験結果

各実験条件における三軸圧縮試験結果を示す。図-9に間隙率 $r=40\%$ の砂およびその砂中に様々な飽和率となるようMHを生成した供試体について有効拘束圧 $\sigma'_c=5\text{MPa}$ の等方応力で圧密しせん断を行った結果の軸差応力・軸ひずみ・体積ひずみ関係をそれぞれ示す。図中、砂は大きい密度にも拘らず、この拘束圧下では体積収縮挙動と硬化挙動が見られた。一方、MH生成供試体においては、MH飽和率の増加に伴い、顕著な初期剛性および強度の増加が認められる。体積ひずみも収縮挙動から膨張挙動に移っており、 $S_{MH}=50\%$ 供試体においては、顕著な膨張挙動が認められる。これは、MHによる砂粒子の固結作用によるものと考えられる。さらに、砂供試体を有効応力軸差力 $\sigma'_a=5\text{MPa}$ まで K_0 圧密を行いMHを種々の飽和度で生成した供試体のせん断結果を図-10に示す。図中に示すように K_0 圧密試験の結果、用いた砂供試体の静止土圧係数 $K_0=0.4$ であった。MH生成供試体の初期剛性およびせん断強度ともに砂供試体のそれらに比べ大きく現れ、 S_{MH} が高いほど大きくなっている。体積ひずみは等方圧密よりも膨張傾向を示し、 S_{MH} が高いほどより顕著な膨張挙動を示している。

次に、供試体のMH生成過程の違いについて検討を行った。すなわち、砂供試体に有効応力 $\sigma'_c=0.2\text{MPa}$ でMHを生成した後に有効拘束圧 $\sigma'_c=5\text{MPa}$ で圧密した供試体と、有効拘束圧 $\sigma'_c=5\text{MPa}$ を加えたのちにMHを生成したものについて両者のせん断の違いを調べた。これは、実際にMHが既存の堆積した土層内に生成した場合と、MHが生成した後にその上に土層が堆積した場合の違いを検討したものである。MH飽和率 $S_{MH}=50\%$ の場合において比較を行った結果を図-11に示す。図より、両者の挙動はほぼ一致しており上記のようなMHの生成過程の違いの影響はないと判断される。

実験の多くは、軸ひずみ $\epsilon_a=15\%$ に至るまで行ったが、図-10, 11のようにこの状態では、MH生成供試体には高い残留強度が見られた。この残留強度が、どの程度の軸ひずみまで存在するかを調べるために、最もMH飽和率の高い $S_{MH}=53.1\%$ の供試体と砂供試体について軸ひずみ

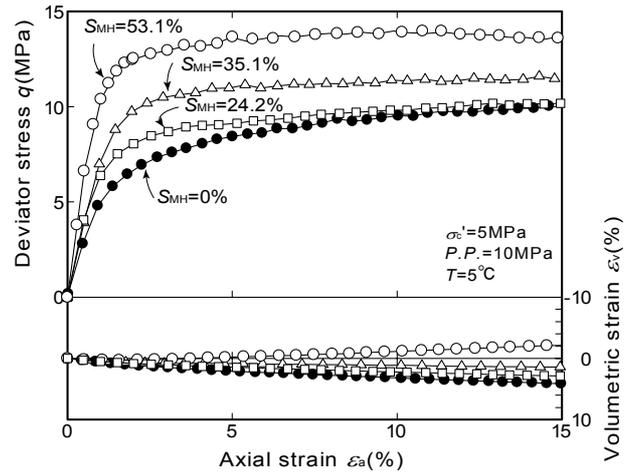


図-9 MH生成砂の排水せん断挙動におよぼすMH飽和率の影響

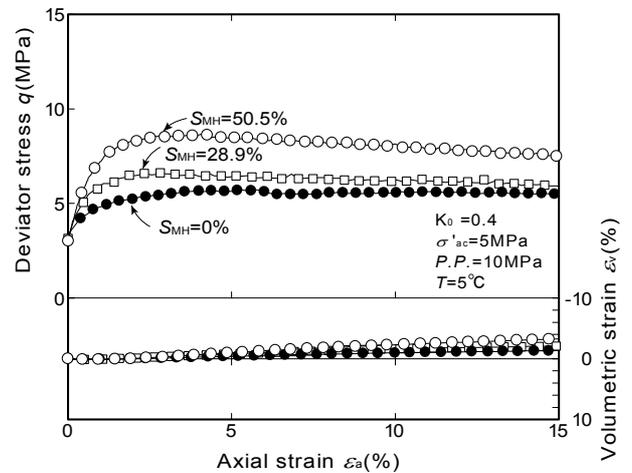


図-10 MH生成砂の K_0 圧密排水せん断挙動におよぼすMH飽和率の影響

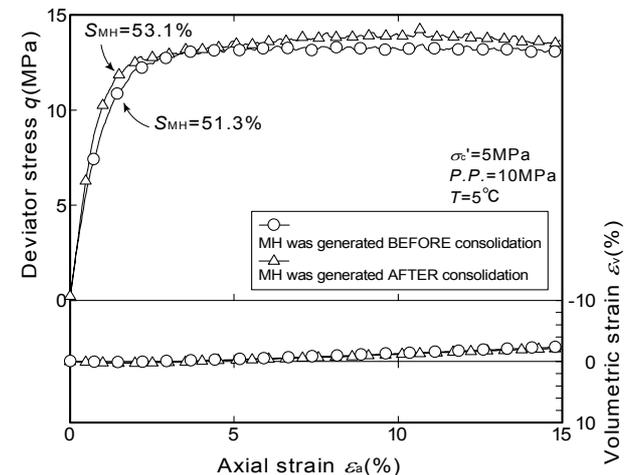


図-11 MH生成砂の軸差応力・体積ひずみ・軸ひずみ関係におよぼすMH生成時期の影響

$\epsilon_a=50\%$ に至るまでせん断を行った結果を図-12に示す。図のように、MH生成供試体においては、 $\epsilon_a=12\%$ 付近でピークを示した後 $\epsilon_a=15\%$ 付近から軟化し始め $\epsilon_a=42\%$ 付近で軸差応力、体積ひずみとも一定となり、ほぼ定常状態に至っている様子が観察される。一方砂供試体にお

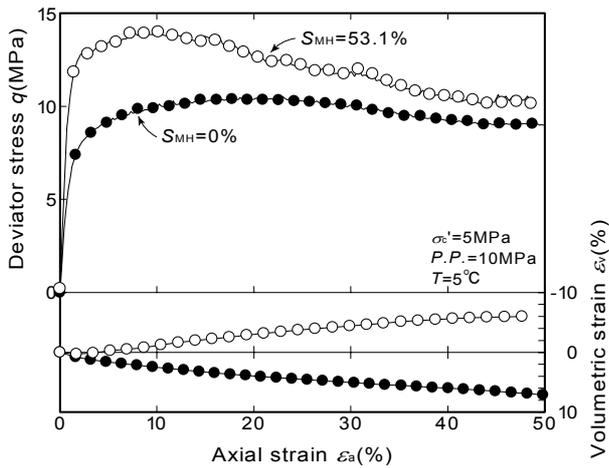


図-12 MH生成砂の大ひずみ域に至る軸差応力・体積ひずみ・軸ひずみ関係

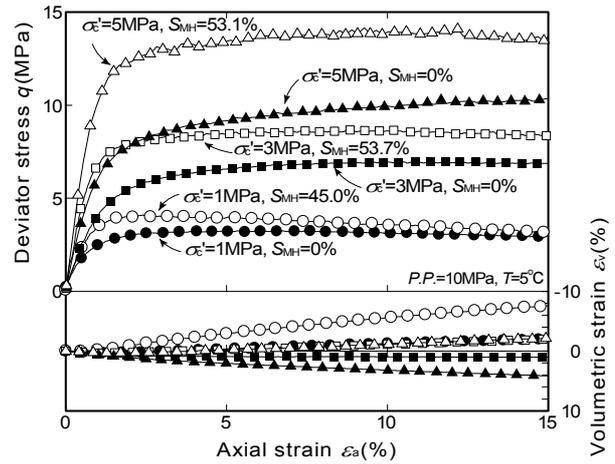


図-13 MH生成砂の軸差応力・体積ひずみ・軸ひずみ関係におよぼす有効拘束圧の影響

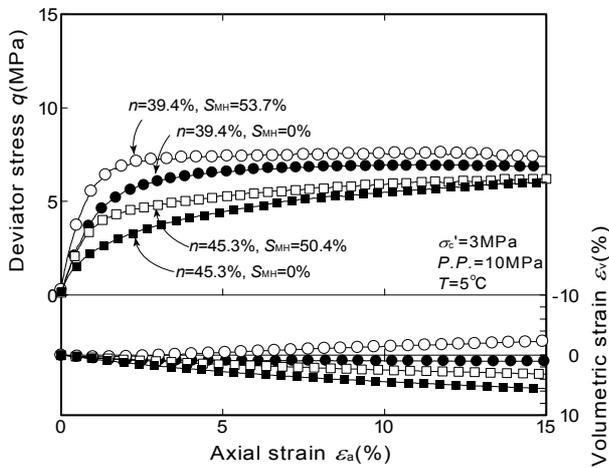


図-14 MH生成砂の軸差応力・体積ひずみ・軸ひずみ関係におよぼす砂の密度の影響

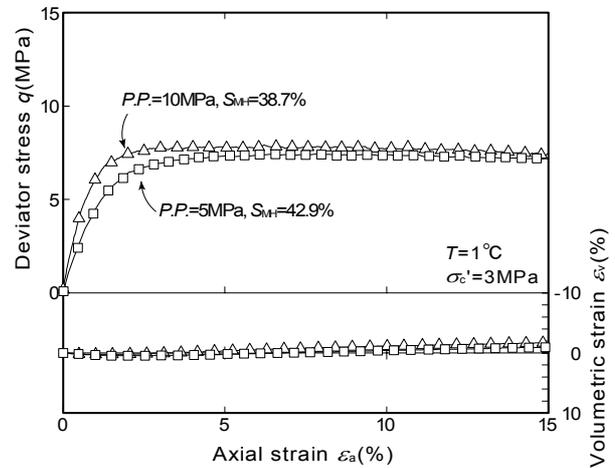


図-15 MH生成砂の軸差応力・体積ひずみ・軸ひずみ関係におよぼす間隙圧の影響

いても同様定常状態に至っているが、 $\epsilon_a = 50\%$ に至っても両者の残留軸差応力に違いがみられる。過去に、固結構造を持つセメント添加した砂についての研究が行われているが、セメント添加量4%および7%の固結砂の内部構造の観察から、ピーク時にはせん断面に固結の強さに対応したサイズの粒子塊が生成すること、また残留時には粒子塊が粒子径と同程度まで破壊し、残留強度は未固結砂と同程度となることが報告されており²⁵⁾、MH飽和率30%未満の供試体については同様の現象が起こっていると推察される。一方、高いMH飽和率供試体の残留強度が砂供試体のそれと異なる理由は、せん断により砂から剥離したMHが砂の間隙内を埋め、せん断強度の発現に加担し、残留強度に影響を与えたと推察される。

次に、MH生成供試体のせん断挙動に及ぼす有効拘束圧の影響を調べるために、有効拘束圧 $\sigma'_c = 1\text{MPa}, 3\text{MPa}, 5\text{MPa}$ と変化させ、間隙圧、温度、MH飽和率一定のもと

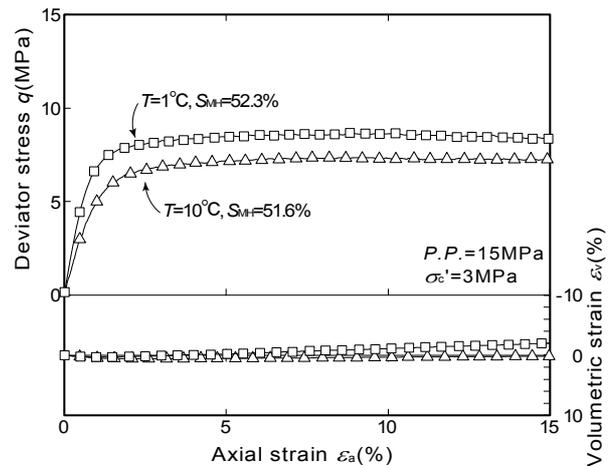
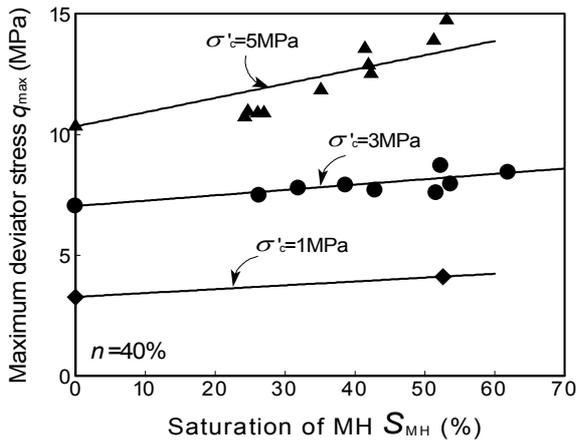
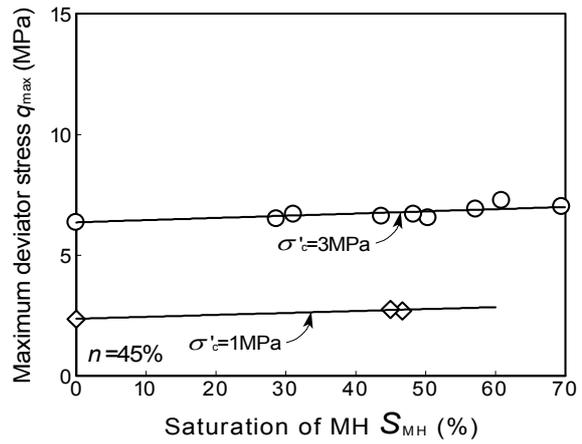


図-16 MH生成砂の軸差応力・体積ひずみ・軸ひずみ関係におよぼす温度の影響



(a) $n=40\%$ 密詰め供試体



(b) $n=45\%$ 緩詰め供試体

図-17 MH生成砂の排水せん断試験における最大軸差応力とMH飽和率の関係

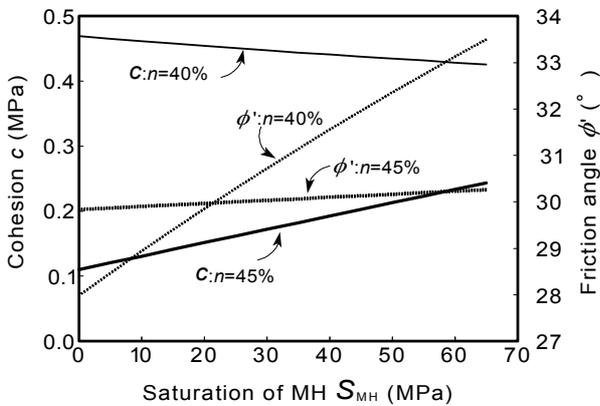


図-18 MH生成砂の粘着力 c ・内部摩擦角 ϕ' とMH飽和率 S_{MH} の関係

実験を行った。それぞれの拘束圧による試験結果を砂供試体の結果とともに図-13に示した。有効拘束圧 $\sigma'_c=1\text{MPa}$ においては、軸差応力・軸ひずみ挙動は、ピークの後ひずみ軟化型傾向を示し、体積ひずみは初期に収縮した後に膨張傾向を示している。この傾向は、有効拘束圧の増加とともに変化し、次第にひずみ硬化、収縮傾向に推移し、 $\sigma'_c=5\text{MPa}$ に至っては明確なピークを示さず、体積ひずみは収縮一方の挙動となっている。

次に、MH生成砂の密度の違いによる影響を調べるために、間隙率 $n=40\%$ に加えて $n=45\%$ の緩詰め供試体にもMHを生成し、それぞれ有効拘束圧 $\sigma'_c=3\text{MPa}$ のもとせん断を行い、結果を図-14に示している。間隙率 $n=40\%$ のMH生成砂の場合の方が $n=45\%$ のものに比べ、初期剛性およびピーク強度ともにより高い結果が得られている。図-15は、間隙水圧の違いによるせん断挙動の違いを調べるために、有効拘束圧、温度、MH飽和率を一定として間隙圧を変化させ行った実験結果を示している。図において間隙圧の2倍の増加により、初期剛性は顕著に増加しているが、ピーク強度は若干の増加に留まる傾向が

認められる。一方、図-16は温度の違いによるせん断挙動への影響を調べたものである。温度 1°C と 10°C の比較であるが、結果に大きな違いがみられ、温度の低いほうが初期剛性および最大軸差応力ともに高い値を示している。先に紹介した著者らによる顆粒状のMH供試体の強度特性¹⁰も同様の温度および圧力依存性を示した。また、Helgerudら²⁶)は人工的に生成したMHに対して $-20\sim 20^\circ\text{C}$ の温度、 $20\sim 100\text{MPa}$ の拘束圧条件のもとP波速度およびS波速度の計測を行い、MHの弾性波速度に温度および圧力依存性があることを明らかにしている。本研究では、MH生成砂のせん断特性が温度および圧力に依存することが確認された。これは、温度、圧力条件がMHの安定境界のより内側、つまり低温高压であるほどMHが安定的に存在でき、構造的にも安定化することでより強い固結力を発揮したものと推察される。

図-17(a), (b)に表-2に掲げたすべての実験条件による三軸圧縮試験結果から得られたMH生成砂の最大軸差応力をMH飽和率の関係でまとめた。図中、砂のせん断挙動の支配要因である間隙率および有効拘束圧に着目して間隙率 $n=40\%$ に対して有効拘束圧 $\sigma'_c=1\text{MPa}$, 3MPa , 5MPa , $n=45\%$ に対して $\sigma'_c=1\text{MPa}$, 3MPa についてそれぞれの回帰線を示している。先に調べた温度および間隙水圧の違いについては、これらの要因と比べるとその影響は小さいとみなして、それぞれの有効拘束圧の中にまとめた。MH飽和率が高くなる程最大軸差応力が増加する傾向が認められる。またその増加傾向は有効拘束圧が高いほど高いことが確認できる。さらに間隙率 $n=40\%$ と $n=45\%$ を比較するとMHによる強度増加は密なほど顕著に表れる結果となっている。図-17の最大軸差応力の結果を用いて、各MH飽和率毎のモールの応力円および破壊包絡線から粘着力 c および内部摩擦角 ϕ を求めて、MH飽和率との関係でまとめ図-18および以下の式により表した。

表4 不攪乱試料の物性および実験条件と実験結果一覧

Test name	Sampling site	Testing conditions							Testing results	
		Dry density ρ_d (g/cm ³)	Density of soil particles ρ_s (g/cm ³)	Porosity n (%)	Degree of saturation by MH S_{MH} (%)	Effective vertical confining Pressure σ'_{ac} (MPa)	Pore pressure $P.P.$ (MPa)	Temperature T (°C)	K_0	Deviator stress q_{max} (MPa)
Core A	A	1.47	2.701	45.7	2.5	5	9	5	0.63	6.60
Core B	A	1.56	2.712	42.6	42.9	2	9	5	0.57	6.52
Core C	A	1.50	2.714	44.6	16.0	2	9	5	0.65	4.31
Core D	A	1.55	2.727	43.0	2.4	2	9	5	0.59	3.21
Core E	A	1.48	2.720	45.5	2.7	2	9	5	0.54	3.17
Core F	B	1.63	2.694	39.6	14.0	9	14	5	0.56	13.49
Core G	B	1.48	2.696	44.9	22.3	4	14	5	0.56	7.31



写真7 MH天然不攪乱試料整形時の様子

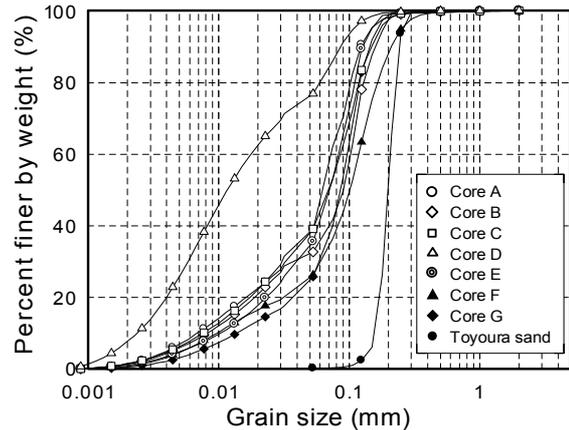


図-19 不攪乱試料の粒度分布

間隙率 $r=40\%$ (相対密度 $D_r=90\%$) のMH生成砂 :

$$c = -7.00 \times 10^{-4} \cdot S_{MH} + 0.468 \quad (\text{MPa})$$

$$\phi' = 8.47 \times 10^{-2} \cdot S_{MH} + 28.1 \quad (^\circ)$$

間隙率 $r=45\%$ (相対密度 $D_r=40\%$) のMH生成砂 :

$$c = 2.10 \times 10^{-3} \cdot S_{MH} + 0.110 \quad (\text{MPa})$$

$$\phi' = 6.60 \times 10^{-3} \cdot S_{MH} + 29.8 \quad (^\circ)$$

ここに、 S_{MH} はMH飽和率(%)である。間隙率 $r=45\%$ の場合の粘着力 c と内部摩擦角 ϕ' はMH飽和率の増加に伴い緩やかに増大するのに対し、 $r=40\%$ の場合においては粘着力 c は減少するが内部摩擦角 ϕ' が急増する傾向が認められる。これは、密度の高い砂の間隙中にMHが生成することにより、MH生成砂の間隙比が減少し、密度の影響をより敏感に受けるためと考えられる。

4. 天然供試体の三軸圧縮試験

(1) 試料採取方法および実験方法

実験対象の試料は、2003年にMH21⁹⁾のプロジェクトの中で圧力保持型のMHコアサンプル採取機PTCS

(Pressure-Temperature Core Sampler)により南海トラフMH濃集層から採取された不攪乱試料である。表4に、実験に用いた試料の物性および実験条件を掲げる。表には、各試料に対する土粒子密度、乾燥密度、間隙率、MH飽和率、さらに各試料の三軸試験において負荷した軸方向有効拘束圧、間隙水圧、温度を記している。また、最後に本実験で得られた K_0 値および最大軸差応力も記した。

まず、採取された試料は低温室で容器内の圧力を解放した後、即座に液化窒素で冷却した -197°C のロケーターで保管した。その後、写真7に示すように上部から液化窒素をかけながら $50\phi \times 100\text{mm}$ の円筒形に整形を行った。実験に用いたコアサンプルは表4に示すように計7本である。図19に各サンプルの粒度分布を、写真8に整形後の各供試体の様子を示す。前述したように、南海トラフは上方に向かって粗い粒子から細かい粒子へ連続的に移行する級化層理が発達した堆積土が何百枚も積み重なる砂泥互層と呼ばれる地層で構成されており、MHを含む不攪乱試料は中でも比較的砂分を多く含む平行葉理の部分から採取された。本研究で実験を行った7本の不攪乱試料は中でも比較的多くの細粒分を含む細粒分まじり砂(SF)であった。また、これらの試料のMH飽和率は低いもので2.4%、高いもので42.9%であった。

実験は以下の手順で行った。まず、整形した不攪乱試料をMHの分解を防止するために、液化窒素ガスを散布

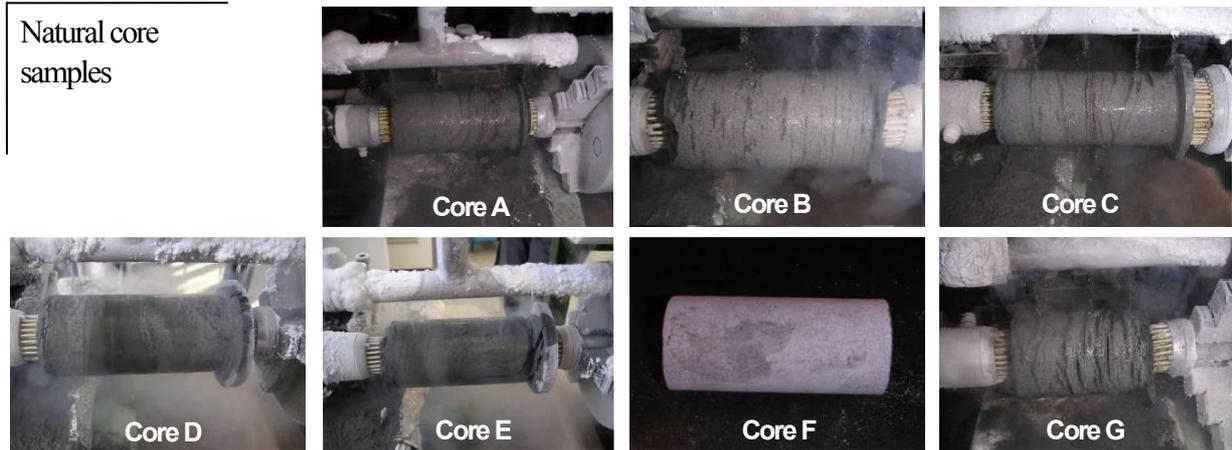


写真8 天然MH不攪乱試料

した低温環境の箱の中でペDESTALに装着し、その後三軸室内に素早く設置した。その後、MHの分解を防ぐために即座に -20°C の低温の側液をセル内に注入し、 0.2MPa の有効拘束圧を保ちながら、原位置に近い状態まで温度と間隙圧を上昇した。この供試体に所定の有効軸方向圧密応力までひずみ速度 $0.01\%/\text{min}$ の軸ひずみ速度で K_0 圧密を行い、さらに $0.1\%/\text{min}$ の軸ひずみ速度で三軸圧縮試験を行った。

(2) K_0 圧密および三軸圧縮特性

本実験装置を用いて自動制御により行った K_0 圧密試験中の K_0 値と有効鉛直応力 σ'_v の関係を図-20に示す。なお実験中、側方向ひずみは $\pm 0.05\%$ の精度を満足している。採取試料の原位置の有効軸方向圧密応力は 2MPa および 4MPa 程度と推察されたことから、多くはこの圧密応力までの载荷を行ったが、最大で 9MPa まで载荷を行った。しかし K_0 値にさほどの変化は見られなかった。ほとんど全ての不攪乱試料において、目標の圧密応力よりも低い $\sigma'_{ax}=1\text{MPa}$ 付近で K_0 値は減少し、 $\sigma'_{ax}=2\text{MPa}$ で一定の値に収束することが確認された。

次に、各不攪乱試料の K_0 値とMH飽和率の関係を図-21に示す。各供試体の K_0 値はおおむね $0.5\sim 0.6$ の間でほぼ一定の値を示した。

採取地点Aの不攪乱試料について、 K_0 圧密後三軸圧縮試験を行った結果から得られた軸差応力・体積ひずみ・軸ひずみ関係を図-22に示す。有効軸方向圧密応力 $\sigma'_{ax}=2\text{MPa}$ の結果をみると、MH飽和率の増加と共に初期剛性・ピーク強度の増加が確認できる。また、MH飽和率の増加によってひずみ硬化型の挙動からひずみ軟化型の挙動に代わり、体積ひずみも圧縮挙動から膨張挙動へと変化していることが確認できる。有効軸方向圧密応力 $\sigma'_{ax}=5\text{MPa}$ の結果と比較すると、その挙動はさらにひずみ硬化型の挙動に代わることが確認された。体積ひずみについても同様に有効軸方向圧密応力の増加とともに負

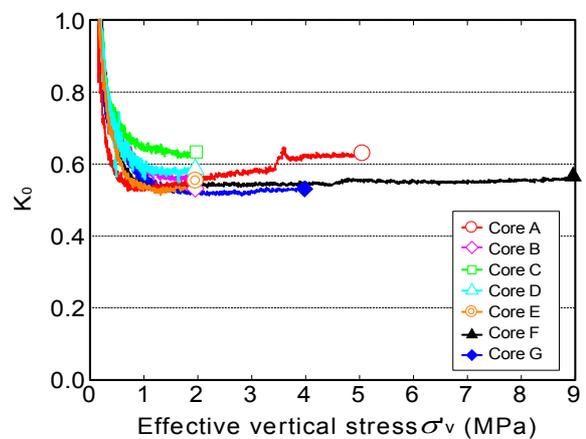


図-20 不攪乱試料の K_0 値と有効鉛直応力の関係

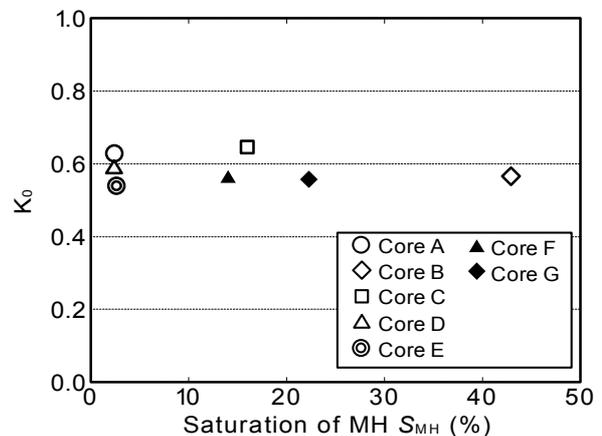


図-21 不攪乱試料の K_0 値と MH 飽和率の関係

のダイレイタンスーが大きくなる一般的な土の挙動を示した。次に採取地点Bの不攪乱試料について、 K_0 圧密後三軸圧縮試験を行った結果から得られた軸差応力・体積ひずみ・軸ひずみ関係を図-23に示す。有効軸方向圧密応力の増加と共に強度が高くなり、ひずみ硬化型の挙動を示すことが確認された。これより、MHが三軸せん断特性に与える影響は不攪乱試料、模擬試料とも同様であることを明らかとした。

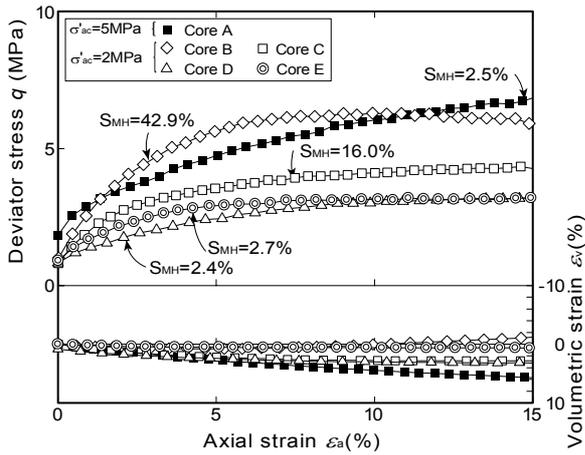


図-22 不攪乱試料の軸差応力・体積ひずみ・軸ひずみ関係

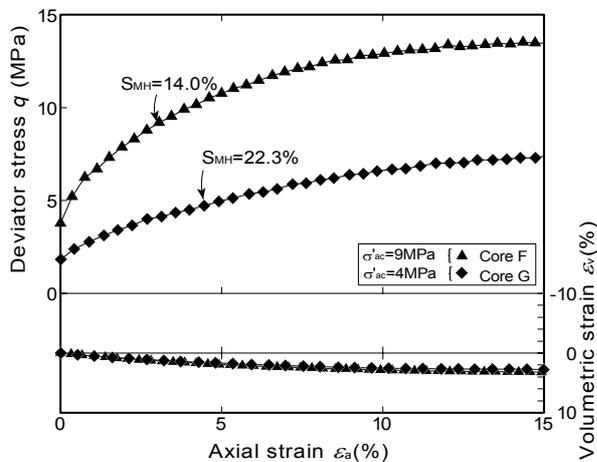


図-23 不攪乱試料の軸差応力・体積ひずみ・軸ひずみ関係

次に、破壊時に注目し、不攪乱試料のモール円と「3. MH生成砂の三軸試験」で模擬試料の試験結果から求めた経験式(5)及び(6)による破壊包絡線を図-24に示している。経験式に基づく破壊包絡線は、おおむねモール円と接することが確認された。しかし、Core B, Core F, Core Gは不攪乱試料のモール円が破壊包絡線を越える結果となった。これらは高いMH飽和率を持つ試料であり、不攪乱試料は模擬試料に比べMHの固結によるせん断強度の増加が大きいことが明らかとなった。MHと同じように固結構造を持つ粒状材料として、セメント固化された砂がある。香月ら²⁷⁾は異なる粒度分布のシリカに任意の量のセメントを添加し、そのせん断強度特性を調べている。その中で、同密度、同セメント添加率であっても粒度分布が異なれば、その強度増加は異なることが示されている。今回試験を行った不攪乱試料は細粒分を含んでおり、豊浦砂の粒度分布と若干異なる。これがMHによる強度増加に影響したと推察される。

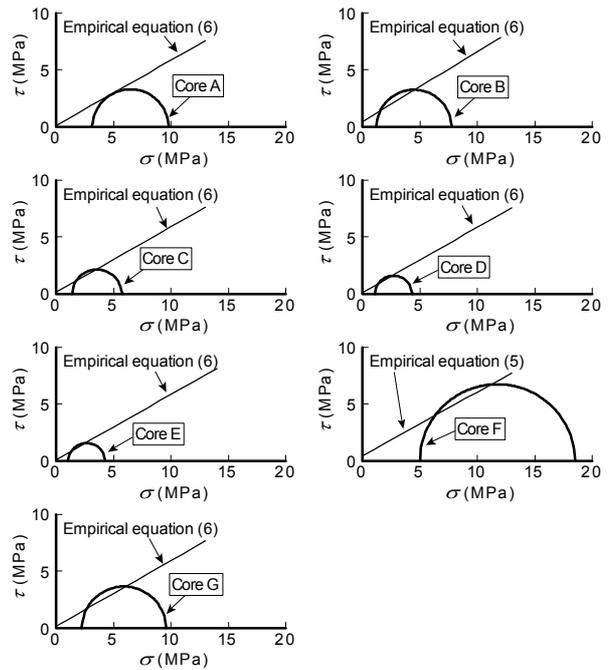


図-24 不攪乱試料のモール円と経験式(5)・(6)による破壊包絡線

5. まとめ

MHを含む堆積土の力学特性を調べる目的で、温度可変高圧三軸圧縮試験装置を開発し、人工的に作製したMH生成砂に対して一連の三軸圧縮試験を行った。さらに、南海トラフで採取した不攪乱試料について、 K_0 圧密三軸圧縮試験を行い、その力学特性を調べ、人工試料と比較検討を行った。本研究により得られた知見は以下の通りである。

- (1) MHの模擬試料として、含水比調整した砂に所定の温度、圧力条件でメタンガスを負荷することにより、所定のMH飽和率のMH生成砂供試体を作製することが可能である。
- (2) 生成したMHは土粒子同士を固結するように存在し、その含有量が多いほど、つまりMH飽和率が高いほどMH生成砂の三軸圧縮強度は高い。
- (3) MH生成砂の三軸圧縮強度は、一定の有効応力下では間隙圧が高いほど、また温度が低いほど高い。
- (4) MH生成砂の強度は、MH飽和率が同一の場合間隙率が小さいほど高く、砂のみの強度に対するその増加割合は有効拘束圧が高いほどより高い。
- (5) K_0 圧密試験から得られた不攪乱試料の静止土圧係数 K_0 はおおむね0.5~0.6である。
- (6) 不攪乱試料の三軸圧縮試験による初期剛性および強度は模擬試料と同様、MH飽和率、有効拘束圧が高いほど高い。

謝辞：本研究の一部は、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」の一環として実施した。関係各位に対し、深甚の謝意を表する次第である。

本研究の実施に当たり、元山口大学大学院理工学研究科博士前期課程の武富一樹氏、寺田和弘氏、松居梓氏、小倉勇志氏、津田伸基氏、長通譲二氏には、実験の遂行に多大なる労を頂いた。ここに深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 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, 1959.
- 2) Kvenvolden, K. A., Ginsburg, G. D. and Soloviev, V. A. : Worldwide distribution of subaquatic gas hydrates, *Geo-Marine Letters*, Vol.13, pp.32-40, 1993.
- 3) Kvenvolden, K. A. : Methane hydrate—a major reservoir of carbon in the shallow geosphere, *Chemical Geology*, Vol.71, pp.41-51, 1998.
- 4) 鈴木清史, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正 : 南海トラフの含メタンハイドレートタービダイト堆積物の圧密特性, 資源と素材, No.A/B, pp.167-168, 2006.
- 5) MH21 Research Consortium JAPAN : <http://www.mh21japan.gr.jp/>
- 6) MH21 コンソーシアム : MH21 フェーズ I 総括報告書, 2009. http://www.mh21japan.gr.jp/pdf/seika/phase1_20100202.pdf
- 7) 市川祐一郎 : メタンハイドレートの掘削と生産について, 地質ニュース, No. 510, pp. 43-58, 1997.
- 8) Yasufuku, N., Murata, M. and Hyodo, M. : Yield characteristics of anisotropically consolidated sand under low and high stresses, *Soils and Foundations*, Vol. 31, No. 1, pp. 95-109, 1991.
- 9) Hyodo, M., Hyde, A. F. L., Aramaki, N. and Nakata, Y. : Undrained monotonic and cyclic shear behavior of sand under low and high confining stresses, *Soils and Foundations*, Vol. 42, No. 3, pp.63-76, 2002.
- 10) Hyodo, M., Nakata, Y., Yoshimoto, N. and Ebinuma, T. : Basic research of the mechanical behavior of methane hydrate-sediments mixture, *Soils and Foundations*, Vol. 45, No. 1, pp.75-85, 2005.
- 11) Hyodo, M., Hyde, A. F. L., Nakata, Y., Yoshimoto, N., Fukunaga, M., Kubo, K., Nanjo, Y., Matuo, T. and Nakamura, K. : Triaxial compressive strength of methane hydrate, *Proc. of 12th Int. Offshore and Polar Engrg. Conf.*, pp. 422-428, 2002.
- 12) 上野俊幸, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正, 松尾知佳, 海老沼孝郎 : メタンハイドレートの三軸圧縮特性に与える温度・拘束圧・ひずみ速度の影響, 第 38 回地盤工学研究発表会講演集, pp.373-374, 2003.
- 13) 古屋敷龍成, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正, 上野俊幸, 武富一樹, 海老沼孝郎 : 深海底条件下でのメタンハイドレート堆積層の力学特性を評価するための三軸圧縮試験装置の開発, 第 39 回地盤工学研究発表会講演集, pp.373-374, 2004.
- 14) 寺田和弘, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正, 古屋敷龍成, 海老沼孝郎 : 深海底地盤条件下におけるメタンハイドレートを含む砂の力学特性の評価, 第 40 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 425-426, 2005.
- 15) Hyodo, M., Nakata, Y., Yoshimoto, N. and Yoneda, J. : Mechanical Behavior of Methane Hydrate-supported Sand, *Proc. of Int. Symp. on Geotechnical Engineering, Ground Improvement and Geosynthetics for Human Security and Environmental Preservation*, pp.195-208, 2007.
- 16) 小倉勇志, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正, 松居梓, 海老沼孝郎 : メタンハイドレートを含む砂の分解時力学特性, 第 41 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.353-354, 2006.
- 17) 米田 純, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正, 小倉勇志, 津田伸基, 海老沼孝郎 : 減圧法によるメタンハイドレート固結砂の分解時力学特性, 第 42 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.321-322, 2007.
- 18) Hyodo, M., Nakata, Y., Yoshimoto, N. and Yoneda, J. : Shear Strength of methane hydrate bearing sand and its deformation during dissociation of methane hydrate, *Proc. of 4th Int. Symp. on Deformation Characteristics of Geomaterials*, pp.549-556, 2008.
- 19) Clayton, C. R. I., Priest, J. A. and Best, A. I. : The effects of disseminated methane hydrate on the dynamic stiffness and damping of sand, *Geotechnique*, Vol.55, No. 6, pp.423-434, 2005.
- 20) Yun, T. S., Francisca, F. M., Santamarina, J. C. and Ruppel, C. : Compressional and shear wave velocities in uncemented sediment containing gas hydrate, *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, L10609, 2005.
- 21) 宮崎晋行, 榊井明, 坂本靖英, 羽田博憲, 緒方雄二, 青木一男, 山口勉, 大久保誠介 : メタンハイドレートを含む模擬堆積物の三軸圧縮特製の及ぼすひずみ速度の影響, *Journal of MMIJ*, Vol.123, No. 11, pp. 537-544, 2007.
- 22) 坂本靖英, 下河原麻衣, 大賀光太郎, 宮崎晋行, 駒井武, 青木一男, 山口勉 : 減圧法におけるメタンハイドレート分解時の圧密挙動ならびに浸透率特性に関する室内実験研究, *Journal of MMIJ*, Vol.124, No.8, pp. 498-507, 2008.
- 23) 鈴木清史, 長尾二郎, 成田英夫 : 走査型電子顕微鏡を用いた堆積物中におけるガスハイドレート産状の観察, 日本地球惑星科学連合 2006 年大会予稿集, G228-006, 2006.
- 24) 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. 899-912, 2009.
- 25) 小田浩司, 中田幸男, 兵動正幸, 村田秀一, 羽場信介, 米田修 : 粒子間に結合力を有する砂の一面せん断特性, 第 33 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.663-664, 1998.
- 26) Helgerud, M. B., Waite, W. F., Kirby, S. H. and Nur, A. : Elastic wave speeds and moduli in polycrystalline ice Ih, sI methane hydrate, and sII methane-ethane hydrate, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 114, B02212, 2009.
- 27) 香月大輔, 中田幸男, 兵動正幸, 吉本憲正, 村田秀一 : 割裂強度およびダイレイタンシー特性に着目したセメント固化粒状材料のせん断強度特性の評価, 材料, Vol.53, No.1, pp. 13-16, 2004.

(2010.4.8 受付)

TRIAXIAL SHEAR CHARACTERISTICS OF METHANE HYDRATE-BEARING SEDIMENT IN THE DEEP SEABED

Jun YONEDA, Masayuki HYODO, Yukio NAKATA and Norimasa YOSHIMOTO

A lot of attention has been paid to methane hydrate (hereinafter referred to as MH) as a hopeful energy resource for the next generation. A series of triaxial compression tests was performed in order to investigate the strength of MH-bearing sand specimens which were formatted to simulate a MH bearing sediment in Nankai trough. The tests were done with varying density of host sand, saturation of MH, confining pressure, temperature and pore pressure, respectively. The result revealed that the peak strength of MH-bearing sand increased depending on the density of sand and confining pressure. Moreover, the peak strength increases with increasing the saturation of MH, decreasing the temperature and increasing the pore pressure. Further in the study, K_0 consolidated and drained triaxial compression tests were done on natural MH-bearing sands which were sampled at the MH reservoir in Nankai trough. The strength characteristics of the natural samples were similar to that of artificially made samples in the study.