

## 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

## Mechanical Property of Gas Hydrate Sediment at Deep Seabed on Triaxial Compression Test

米田 純	Jun YONEDA	(山口大学大学院)
兵動 正幸	Masayuki HYODO	(山口大学大学院)
中田 幸男	Yukio NAKATA	(山口大学大学院)
吉本 憲正	Norimasa YOSHIMOTO	(山口大学大学院)
海老沼孝郎	Takao EBINUMA	(産業技術総合研究所)

次世代資源として考えられているメタンハイドレートを安全に生産するために、高圧三軸圧縮試験機に改良を加えた装置を用いて、深海底地盤を模擬してメタンハイドレートを含む砂の三軸圧縮試験を行った。また、地盤内への地下貯留が考えられている二酸化炭素ハイドレートを含む砂についても合わせて三軸圧縮試験を行った。その結果、ハイドレートを含む砂の三軸圧縮強度は、ハイドレート飽和度、温度、背圧、有効拘束圧に依存することが明らかになった。さらに、ハイドレートの温度圧力状態と安定境界との関係を示すパラメータ  $L$  を提案し、得られた実験結果を用いて  $L$  とハイドレート飽和度に依存したハイドレートを含む砂の強度推定式を提案した。

キーワード：メタンハイドレート、三軸圧縮試験、高圧、セメンテーション、深海底 (IGC : D05, D06, H02)

## 1. はじめに

日本は、第一次石油危機を契機として省エネルギーの推進に取り組んできた。しかしながら、ライフスタイルの変化等により最終エネルギー消費は今も伸び続けている。それら資源のほとんどを外国からの輸入に頼っている日本にとって、エネルギーの安定供給は国の重要課題のひとつとなっている。そこで近年、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) が注目されている。MH とは水分子とメタンガスの水和化合物であり、水分子が構成する籠状の結晶構造の内部にゲストガス分子が内包された固体状の物質であり、低温高圧下で安定する。MH の相平衡条件は Katz ら<sup>1)</sup> によって求められ、Kvenvolden<sup>2)</sup> は図-1 のように海底面からの深度と温度の関係を使って MH の安定領域を示した。表層海水の温度は 5~15℃ であるが水深 500m になると 5℃、水深 3000m になると 0~4℃ となる。海底の堆積層は地熱の影響で深度とともに温度が上昇するため、深度 500m 付近で 10~15℃ になる。海底地盤内の水圧は水深によって決まり、海底地盤内にメタンガスが存在した場合、そのガスに負荷される圧力は静水圧となる。これらを考慮すると、水深約 1000m の海域の場合 MH が生成される領域は、海底下数百 m で浅くなる。日本では 1995 年より経済産業省によって MH に関する調査研究が始まり、翌年 1996 年には南海トラフ等の海域において海上地震探査を行い MH 賦存の可能性を調査した。その結果、推定資源量は 7.35 兆  $m^3$  とされており<sup>3)</sup>、2003 年度日本が使用した天然ガスの約 100 年分となる。2000 年には南海トラフの静岡県浜松市天竜川沖合約 50km、水深 945m において

MH の試掘が実施され、海底下 200~270m で MH 濃集層の存在が確認されそこから MH 試料が採取された<sup>4)</sup>。さらに、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、2002 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)<sup>4)</sup> が設立された。2003 年には再び基礎試錐が実施され MH を含む堆積層コアを採取し、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<sup>5)</sup>。

実地盤における MH の存在形態は様々であり、泥質土層の中や海底面に塊として存在するものや砂質土層の間隙内を埋める形で存在するものがある。南海トラフ海域における MH 濃集層はタービダイト層と呼ばれる砂泥互層の砂質土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おり、コア取りされた試料を用いて MH を効率的にかつ安全に生産するために性状分析等が行われた<sup>6)</sup>。しかしながら、天然の試料を継続的に採取することはコスト面からも困難であるため、実験室内で模擬試料を作成し、系統だった実験を行なう必要がある。

MH と砂の混合物の力学的研究はわが国においては主として当研究グループによって進められており、兵動ら<sup>7)</sup> はまず霧状の水にメタンガスを充てることにより作製した顆粒状の MH を土と混合した後に締固めることで三軸圧縮試験の供試体を作製し、力学特性を検討した。しかし顆粒状の MH の径が砂の径より大きかったため、MH21 で研究の対象とされているような砂粒子を固結または間隙の一部を充填する形で存在する MH の存在形態は再現していなかった。その後、深海底地盤の応力状態を再現可能な MH 低温高圧三軸試験装置を導入し、砂供試体の間隙内に MH を生成することで南海トラフ域における MH の

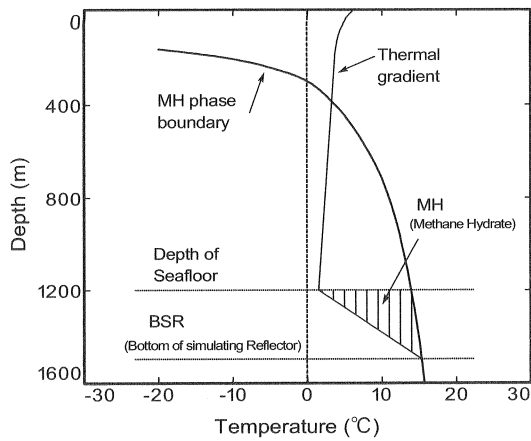


図-1 MHの存在領域 (Kvenvolden, 1988)

模擬供試体を作製し、そのせん断試験を行う手法を確立した<sup>8)</sup>。本論文は、この試験機を用いて行った一連のMHを含む砂の力学試験結果についてとりまとめたものである。

また、比較のために二酸化炭素ハイドレート (Carbon dioxide hydrate 以下 CDH と略す) も同様の方法で砂中に生成し、力学特性を調べた。近年、二酸化炭素を CDH として地盤内へ貯留し、MH 層の人工天盤として利用する技術が検討されている<sup>9)</sup>ことから、CDH を含む砂の力学特性も価値あるデータに成り得ると考えられる。

## 2. 試験装置の開発

### 2.1 低温高圧三軸試験装置

試作した低温高圧三軸圧縮試験機の概要を図-2 に示す。この試験機は高圧三軸圧縮試験の機能に加え、セル内の温度管理を可能としたものである。本装置により砂供試体内に MH の生成が可能となった。主要な装置を図中にマークし、特徴を説明する。

#### a) 温度管理

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  $-40^{\circ}\text{C}$  まで液体として使用可能かつ、各種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。

#### b) 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した。

#### c) ガス流量計

MH 飽和度を算出するため、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、 $20^{\circ}\text{C}-1\text{atm}$  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  $0 \sim 500$  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、供試体上部および供試体下部に設置した圧力計が 0 になるまでガス量を測定した。

#### d) 高拘束圧発生法

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) 背圧発生法

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。しかし背圧については、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おらず、本装置にはこの機能を付加した。すなわち、試験機の上部と下部に 20MPa 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を発生させることを可能とした。最も制御の条件が厳しい 20MPa 時で  $\pm 0.1\text{MPa}$  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背圧を再現することが可能となった。

#### f) 軸の制御

軸荷重載荷方法はひずみ制御、応力制御ともに可能である。最大許容荷重は 200kN であり、許容荷重の 1000 分の 1 の制度で計測可能である。

従来の高圧三軸圧縮試験機を使用した実験結果と新規に開発した低温高圧三軸圧縮試験機の実験結果を比較するため、シリカ砂  $0.18-2.0$  を用いた三軸圧縮試験を行った。結果を図-3 に示す。図より、高圧下に見られる拘束圧の増加に伴う軸差応力の明確なピークの消失、負のダイレイタンスの増加が認められる。図中に示した従来の高圧三軸圧縮試験の結果と新規に開発した低温高圧三軸圧縮試験の結果は非常に類似した挙動となっている。また、その挙動は有効拘束圧が同じならば背圧が異なってもほぼ等しいことから、高圧下の砂の三軸圧縮特性は背圧に依存しないことが確認された。これらより、今回開発した試験機の有用性が伺える。

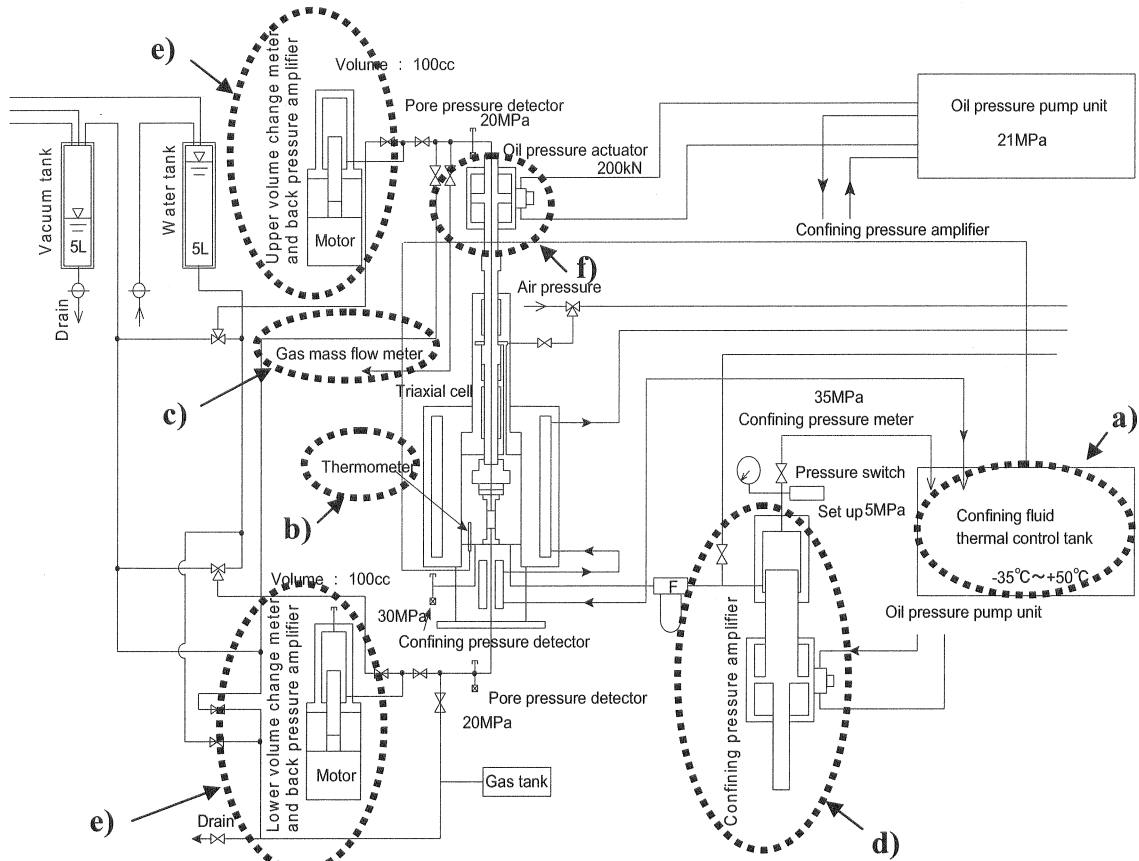


図-2 低温高圧三軸圧縮試験機概要

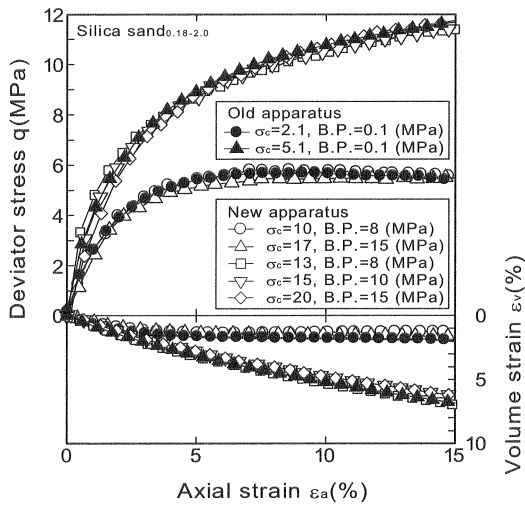


図-3 高拘束圧下の排水せん断試験

## 2.2 試験装置内での供試体作製法の確立

これまでの研究<sup>7)</sup>は顆粒状に作製したMHを冷凍庫の中で砂と混合し、供試体を作製してきたため、間隙充填型や土粒子固着型の供試体作製は困難であった。さらに、作製した供試体を試験機に設置する間にMHが分解してしまうという懸念が残った。そこで本研究ではメタンガスボンベまたは炭酸ガスボンベを管路に繋いで供試体間隙内にガス圧を負荷できるようにし、側液の温度管理と

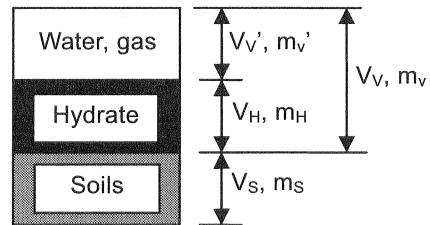


図-4 ハイドレートを含む砂の3相モデル (Hyodo et al, 2005 に加筆)

併用することで供試体にあらかじめ含ませた水をセル内でハイドレート化することを可能とした。

供試体内に生成されたハイドレートを定量的に評価するため図-4のようなモデルが考えられ、パラメータとしてハイドレート飽和度  $S_H$  が式(1)で定義されている<sup>7)</sup>。

$$S_H = \frac{V_H}{V_v} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

ここに  $V_H$  はハイドレートの体積で、 $V_v$  はハイドレートを含んだ間隙の体積を表す。以下、メタンガスによるハイドレートと炭酸ガスによるハイドレートを区別するた

め、MH 飽和度を  $S_{MH}$ 、CDH 飽和度を  $S_{CDH}$  と定義する。

2004 年に行われた基礎試験では、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た<sup>2)</sup>。

本研究では、実地盤の  $S_H$  を再現するために供試体の初期含水比を定めている。目標とする  $S_H$  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。

$$w_{initial} = \frac{(S_H / 100) \cdot V_V \cdot \rho_H \cdot A}{m_s} \quad (2)$$

ここに  $w_{initial}$  (%) は供試体初期含水比、 $\rho_H$  はハイドレートの密度 (MH : 0.912 g/cm<sup>3</sup>, CDH : 1.13 g/cm<sup>3</sup>)、 $m_s$  (g) は砂の質量であり、 $A$  はハイドレートに含まれる水の質量百分率である。MH の場合、分子式 CH<sub>4</sub> · 6H<sub>2</sub>O より  $A=108/124 \times 100=87.1\%$ 、CDH の場合、分子式 CO<sub>2</sub> · 5.75H<sub>2</sub>O より  $A=103.5/147.5 \times 100=70.2\%$  となる。MH の理論分子式は CH<sub>4</sub> · 5.75H<sub>2</sub>O であるが、人工メタンハイドレートの水和数は 6 程度であり、その水和数は生成条件に依存することが知られている<sup>10)</sup>。これより、本論文では MH の分子式を CH<sub>4</sub> · 6H<sub>2</sub>O として計算を行った。CDH の水和数も MH 同様に生成条件に依存することが知られている<sup>11)</sup> が正確な値が得られていないため、理論分子式 CO<sub>2</sub> · 5.75H<sub>2</sub>O を用いて計算を行った。

実際に目標の  $S_H$  の供試体を作製されるかを確認するため、 $S_{MH}=25\%$  を目標に MH を含む砂供試体を作製した。詳しい供試体作製方法は「3. 試験試料および供試体作成方法」にて後述する。MH の生成に十分な時間をとった後に供試体を試験機から取り出し、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℃ まで供試体を冷却し、作業を行った。測定は分割した供試体をケースに入れ、発生した気体の体積を測り、次のようにして MH の体積  $V_{MH}$  を算出した。

MH の分子式 CH<sub>4</sub> · 6H<sub>2</sub>O より、その式量は 124 g となる。MH の密度は 0.912 g/cm<sup>3</sup> であるので、MH 1 mol の体積は  $124 / 0.912 = 135.965 \text{ cm}^3$  となる。MH が 135.965 cm<sup>3</sup> あるときメタンガスが 1 mol 発生するので、MH 1 cm<sup>3</sup> の時発生するメタンガスのモル数は  $1 / 135.965 = 7.355 \times 10^{-3} \text{ mol}$  となる。

次に、式 (3) で表される理想気体の状態方程式を使用する。

$$PV = nRT \quad (3)$$

ここに  $P$  (atm) は大気圧、 $V$  (L) は 1cm<sup>3</sup> の MH から発生するメタンガス量、 $n$  は 1cm<sup>3</sup> の MH から発生するメタンガスのモル数、 $R$  (L atm K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>) = 0.082 は気体定数、

$T$  (K) はガス量測定時の室温を表し、それぞれ代入すると  $V = 7.355 \times 10^{-3} \times 0.082 \times T$  となる。以上を踏まえ、供試体内の MH の体積は式 (4) で表される。

$$V_{MH} = V_{mes} / V \quad (4)$$

ここに  $V_{mes}$  (cm<sup>3</sup>) は供試体から測定したメタンガス量を表す。

以上のようにして算出した各層の  $S_H$  は上段 23.3%、中段 24.2%、下段 25.3% となり、ほぼ目標の  $S_H$  の供試体を作製できることが確認された。

### 3. 試験試料および供試体作成方法

式 (2) により算出された含水量を相対密度 90% 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。試料は豊浦標準砂を使用した。

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用されるゴムの使用は避けた。そこで低温・高圧条件下での柔軟性を考慮して、メンブレンにはシリコンを用いた。

### 4. 試験方法と試験条件

実験過程における温度-背圧履歴を図-5 に、試験条件を表-1 に示す。

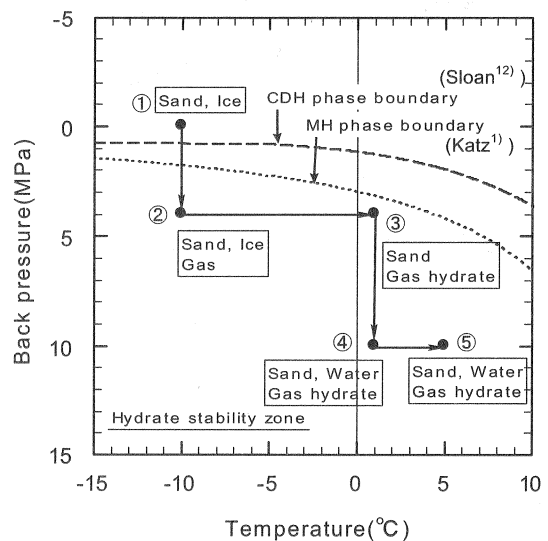


図-5 実験中の間隙水圧-温度履歴

表-1 試験条件

Gas Hydrate	Period of hydrate produced	Test condition			Initial relative density $D_r(\%)$	Initial density $\rho_{in}(g/cm^3)$	Saturation of hydrate $S_H(\%)$
		Back pressure B.P.(MPa)	Temperature T( $^{\circ}C$ )	Confining pressure $\sigma_c$ (MPa)			
Methane hydrate (MH)	Before consolidation	10	5	15	88.3	1.597	24.2
				13	91.3	1.607	35.1
				11	93.5	1.615	26.3
			1	15	91.2	1.607	23.5
				15	90.4	1.604	24.7
	After consolidation	10	5	15	89.6	1.601	41.4
					96.0	1.624	26.1
					90.9	1.606	42.3
					92.6	1.612	27.0
					84.6	1.584	53.1
Carbon dioxide hydrate (CDH)	Before consolidation	10	5	15	94.7	1.599	44.9
				12	97.6	1.609	32.7
				11	91.1	1.587	43.1
			10	15	94.4	1.598	47.8
				15	79.9	1.552	31.1
			1	15	95.6	1.602	31.9

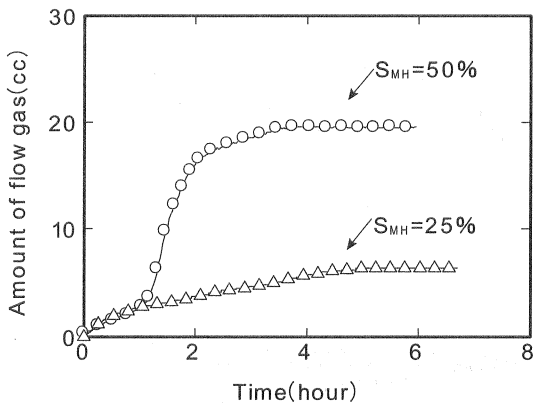


図-6 ガス流入量-時間関係

MHを生成した後に供試体を圧密する試験では、凍結供試体を三軸セル室内へ設置した後(図-5, ①), 所定の背圧までメタンガスを圧入し(図-5, ②), 三軸セル室内の温度を1 $^{\circ}C$ に管理しハイドレート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, ③). 背圧・体積変化計測兼用ピストン内のガス圧を一定に保つようにステップモーターを制御することでガス流入量を随時監視し、図-6に示すよう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した。ハイドレート生成後、圧力を保ったまま管路内のガスを水に置換し、供試体内の通水を行った。その後温度・背圧を試験条件にし(図-5, ④), 所定の応力まで圧密を行い、ひずみ速度0.1%/minでせん断試験を行った。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すぐに融解させ、所定の応力まで圧密を行い、メタンガスを圧入して温度・圧力条件をハイドレート安定領域内にしてハイドレートを生成させた後に、先ほど同様温度・背圧を試験条件にしてせん断試験を行った。せん断終了後供試体温度を上昇させることで安定

境界から外し、図-2に示すc)ガス流量計を使用してガス量を測定した。

## 5. 試験結果と考察

### 5.1 MHを含む砂の三軸圧縮試験

各試験条件のせん断試験結果を示す。なお初期密度を計測し、目標と異なるものについては再度試験を行って本実験の精度を確保している。背圧、拘束圧、温度一定のもとMH飽和度を変化させた試験結果を図-7に示す。図より、MH飽和度の増加に伴う、軸差応力の初期の立ち上がりと最大値の増加が確認された。MHが間隙内を占める割合が大きくなるほど、固結力が大きく発揮されるのはMHが土粒子の接点または接面を固着するように存在しているためと推察される。また、飽和度の変化による残留強度の違いもみられる。飽和度30%未満のものは豊浦砂単体の残留強度とほぼ等しいのに対し、飽和度30%以上のものは残留強度が急激に高くなった。MHは単体でも温度や拘束圧に依存した強度を持つことから<sup>7)</sup>、降伏した後に粒子間の固着が剥れ固結力が低下しても、剥れたMHの結晶が間隙内を占めることで土粒子のような役割をして砂との混合材として残留強度に影響を与えていると思われる。つづいて体積ひずみに注目するが、高压条件下の砂の特性はこれまでも研究が進められており、Hirschfeld and Poulos<sup>13)</sup>は低い拘束圧でせん断時に体積膨張する土が、高拘束圧下では膨張せず収縮一方となることを示している。図-7の体積ひずみをみると、豊浦砂は収縮一方の傾向を示している。しかし、MH

飽和度の増加に伴ってその傾向は和らぎ、MH飽和度53.1%のものについては始め収縮しその後膨張傾向を示

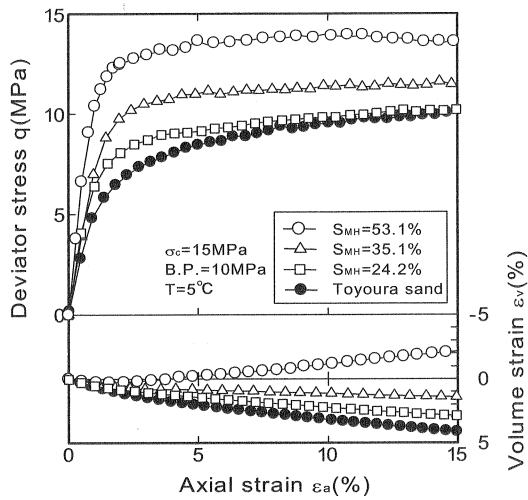


図-7 MHの飽和度依存性

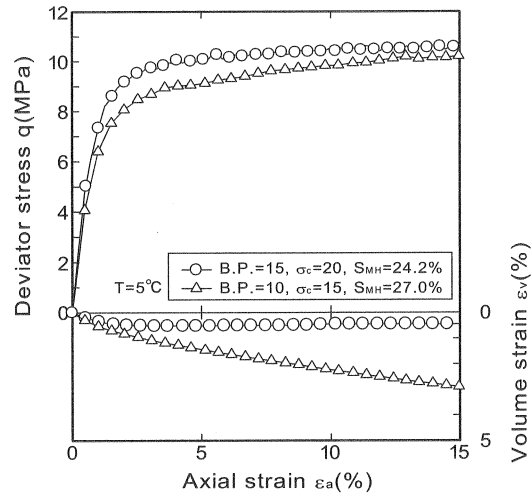


図-8 MH堆積砂の背圧依存性

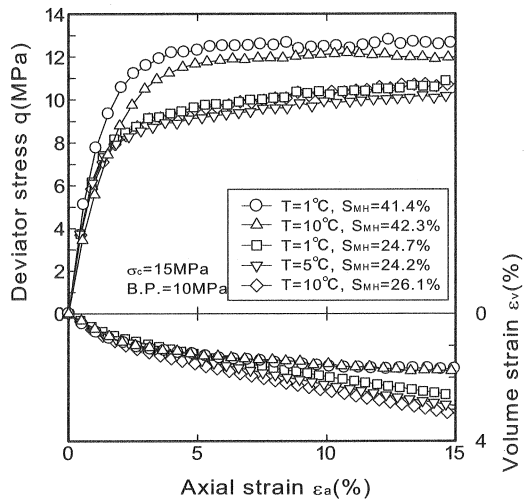


図-9 MH堆積砂の温度依存性

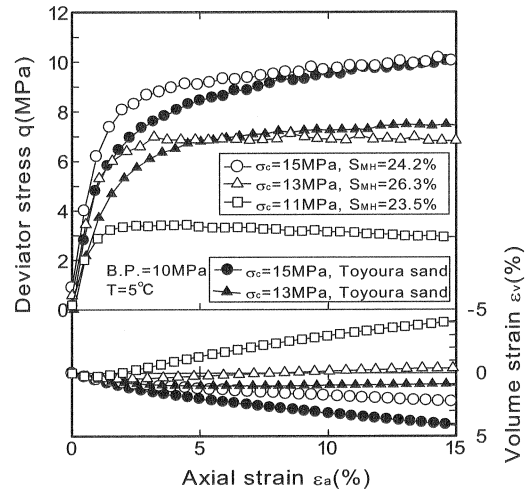


図-10 MH堆積砂の有効拘束圧依存性

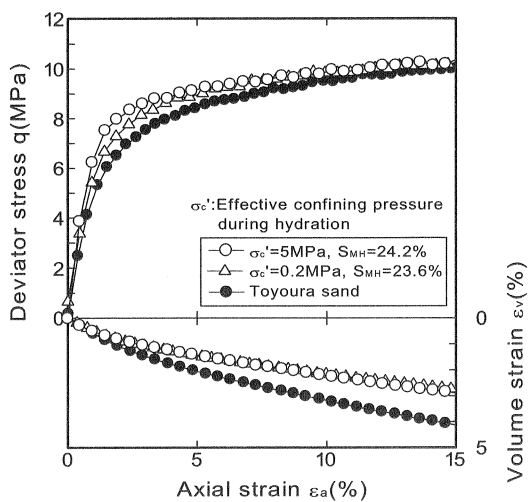


図-11 MH生成時の有効応力依存性

した。これはMHが土粒子の役割をすることで供試体が密になり土のダイレイタンス特性が変化したことで体積膨張したと考えられる。次に背圧を変化させた試験結果を図-8に示す。MHはMH安定境界から離れるほど、つまり低温高压になるほどピーク強度が増加することが知られている<sup>7)</sup>。図より背圧の増加に伴い軸差応力の初期の立ち上がりが大きくなり、密な砂の挙動に類似している。残留強度にも若干の増加がみられる。体積ひずみをみると、有効拘束圧が等しいにもかかわらず背圧が高いほど収縮傾向は弱まり膨張側へと近づいた。これは、背圧が高いほどMHの強度が増加し、土粒子と同じような働きをすることで粒子の乗り上がりが起こったためと考えられる。これより、MH混合砂のダイレイタンスには背圧も大きく関係していることがわかる。続いて図-9では温度を変化させた結果を示す。MH飽和度25%付近と40%付近のものにそって試験を行ったが、飽和度25%程度では温度の依存性が顕著には現れなかった。しかし、MH飽

和度 40% 付近のものについては、温度が低いほうが軸差応力の初期の立ち上がり、最大値ともに高い値を示した。これは  $S_H$  が高くなったことにより、ハイドレート自身の温度依存性が顕著に現れたと考えられる。次に背圧一定

のもと、拘束圧を変化させた結果を図-10 に示す。MH を含む砂の  $\sigma_c=11\text{MPa}$  の結果は、ピークを示した後ひずみ軟化型の挙動を示し、体積ひずみは初期に収縮した後に膨張傾向を示した。  $\sigma_c=15\text{MPa}$  のときは明確なピークを示さず、さらに体積ひずみは収縮一方であった。  $\sigma_c=13\text{MPa}$  のときは、これらの中間的な挙動を示している。これより MH を含む砂も、砂単体の時と同様に有効拘束圧の増加に伴いひずみ軟化型からひずみ硬化型の挙動を示すことがわかった。これまでの結果は、すべて  $\sigma_c'=0.2\text{MPa}$  の状況下で MH を空隙内に生成した後に所定の応力まで圧密し、せん断した。その他、  $\sigma_c'=5\text{MPa}$  まで圧密を行った後に MH を生成し、せん断した結果を図-11 に示す。図より圧密後に MH を生成したもののほうが初期に大きな立ち上がりを示している。これは有効拘束圧 5MPa で生成させたものはせん断時にも有効拘束圧 5MPa であり、圧密時の応力変化はないが、生成時の有効拘束圧 0.2MPa の結果はその後圧密時に有効拘束圧が 5MPa まで増加しており、圧密時の有効拘束圧の増加により MH の固結力が低下し、初期の立ち上がりが小さくなったと考えられる。

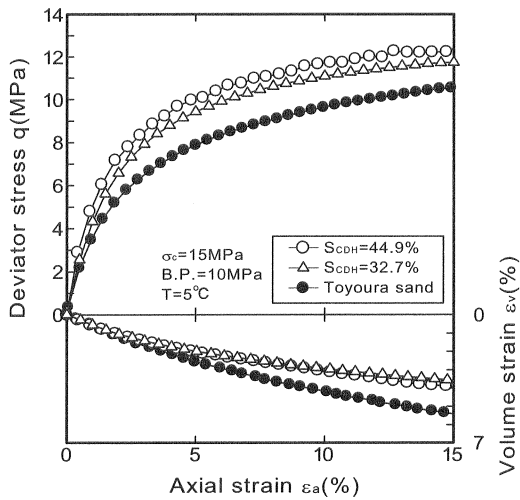


図-12 CDH の飽和度依存性

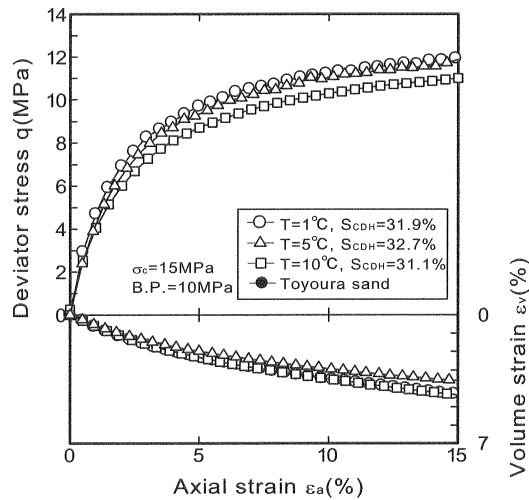


図-13 CDH の温度依存性

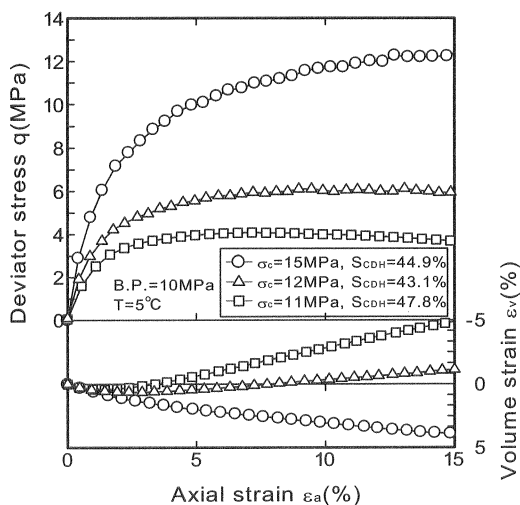


図-14 CDH の有効拘束圧依存性

## 5.2 CDH を含む砂の三軸圧縮試験

CDH の結果について示す。図-12 では CDH 飽和度を変化させた結果を示している。MH と同様に飽和度が高くなるにつれて、ピーク強度は増加している。続いて図-13 に温度を変化させた結果を示す。図より、供試体温度が低いほど軸差応力の初期の立ち上がり、最大値ともに大きな値を示した。図-14 に有効応力を変化させた結果について示した。CDH を含む砂も、MH を含む砂同様に軸差応力は拘束圧の増加に伴いひずみ軟化挙動からひずみ硬化挙動へと変化している。体積ひずみについても拘束圧の増加に伴ってダイレイタンスは正から負へと変化した。このように CDH を含む砂についても MH を含む砂と同様の力学特性を持つことが分かった。これは、MH と CDH はゲスト分子が異なるだけで、構造の主体をなす結晶構造が等しい<sup>10)</sup> ためと考えられる。

## 5.3 三軸圧縮強度

有効拘束圧 5MPa のもとで行った試験結果について、最大軸差応力と温度、ならびに背圧の関係を図-15 に示す。図中黒塗りが温度 5°C のもと背圧を変えた試験結果を表し、白塗りが背圧 10MPa のもと温度を変えた試験結果を表す。MH、CDH ともハイドレート飽和度、温度、背圧、に依存して最大軸差応力が変化していることがわかる。また、MH、CDH の間で温度、背圧に対する圧縮強度とその増加率が違うことがわかる。これは図-5 で示したように MH と CDH の安定境界線が異なるため、同じ温度、背圧条件であっても両者の安定性が異なるためと考えられる。

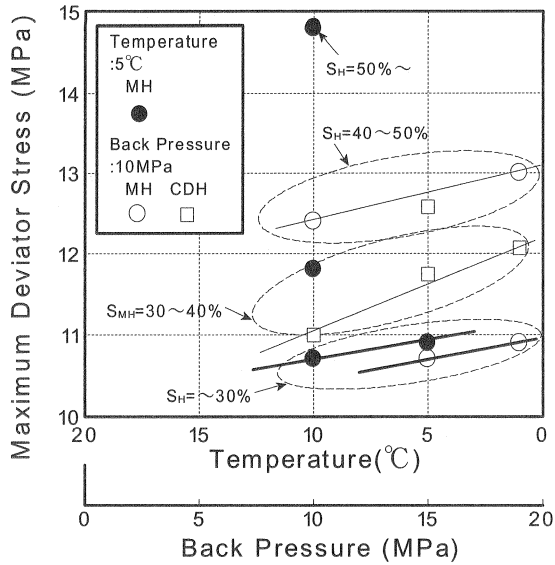


図-15 最大軸差応力と温度，背圧の関係

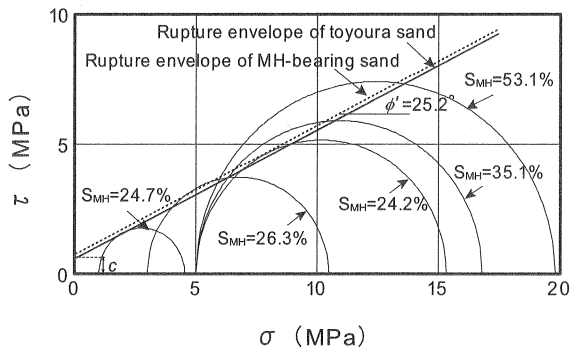


図-16 モール・クーロンの破壊基準

次に温度，背圧の条件をそろえた MH を含む砂のモール円を図-16 に示す。明確なピークを示さなかった結果については $\epsilon_a=15\%$ のときの軸方向応力を最大主応力 $\sigma_1$ としてモール円を描いた。図中の豊浦砂の破壊包絡線が粘着力を有しているのは，有効拘束圧が高圧域のために土粒子が破碎したためと考えられる。MH を含む砂のモール円をみると，MH 飽和度が 25% 付近では内部摩擦角 $\phi'$ は豊浦砂の破壊包絡線と等しく， $\phi' = 25.2^\circ$ となった。 $S_{MH}=35.1\%$ ， $S_{MH}=53.1\%$ のように $S_H$ が高くなると，固結力の影響でモール円は豊浦砂の破壊包絡線を越えることがわかる。

#### 5.4 状態パラメータ L の提案

MH は図-8，図-9 でみられたように背圧と温度に依存することが分かっている<sup>7)</sup>。そこで MH の温度・圧力状態と安定境界との関係が力学強度とどのような関係があるかを考察するために，MH の状態を表すパラメータ  $L$  を提案した。図-17 にパラメータ  $L$  の概念図を示す。温度圧力条件と安定境界線との  $T$  軸方向距離を  $L_T$ ， $P$  軸方向距離を  $L_P$  とし，(5) 式で状態パラメータ  $L$  を定義する。

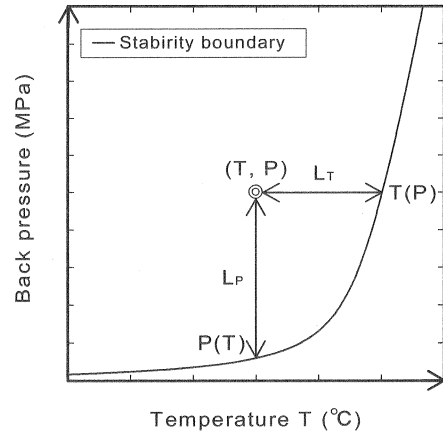


図-17 ハイドレート安定境界線と  $L_P$   $L_T$  の関係

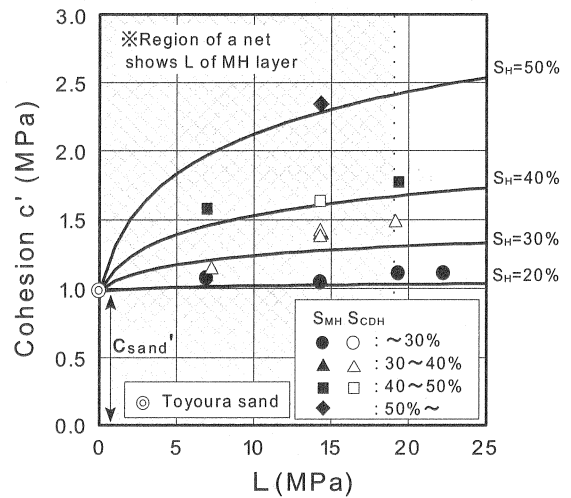


図-18 粘着力  $c'$  と状態パラメータ  $L$  の関係

$$L = a \times L_T + L_P \quad (5)$$

ここで， $a$  (MPa/°C) は  $T$  軸での距離  $L_T$  を  $P$  軸での距離  $L_P$  に換算するパラメータである。最大軸差応力と温度，背圧の関係を示した図-15 の  $S_H \sim 30\%$  の二つの直線を見ると，その傾きは概ね等しい。これは温度 1°C または背圧 1MPa の変化による力学的強度変化が同等であることを示す。よって  $a=1.0$  MPa/°C として整理を行った。また， $L_T = T(P) - T$ ， $L_P = P - P(T)$  であり  $T(P)$ ， $P(T)$  はそれぞれ圧力  $P$  での境界温度，温度  $T$  での境界圧力を示す。図-18 に  $S_H$  の異なる砂それぞれの実験結果について，状態パラメータ  $L$  とハイドレートを含む砂の見かけの粘着力  $c'$  の関係をプロットする。

なお，本実験では「4. 試験方法と試験条件」で説明したように不飽和の供試体にガスを負荷することでハイドレートを生成している。一般に不飽和の土は，粒子間における水と空気によってサクシオンが発生しその力学的強度が増加しているが，本実験ではその水をハイドレート化するため，その固着状況は不飽和土に類似している



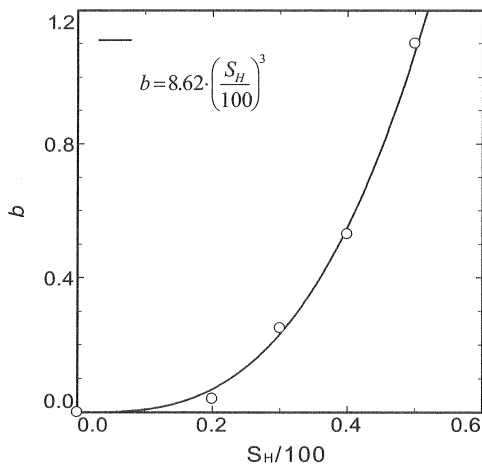


図-19 パラメータ  $b$  と  $S_H$  の関係

と推察される。また不飽和土の内部摩擦角は、有効応力に依存しないことが知られており、そのせん断強度は見かけの粘着力  $c'$  の変化だけで表現される<sup>14)</sup>ことからハイドレートの固結力はすべて  $c'$  で表現されると仮定した。 $c'$  は高压域の砂の粘着力  $c_{sand}'$  とハイドレートの固結力による粘着力  $c_H'$  の和で表されるとし、式(6)で定義する。

$$c' = c_{sand}' + c_H' \quad (6)$$

図中の豊浦砂の結果については図-3 に示した予備実験の結果より、供試体に温度・背力の影響がないため  $L=0$  として図中にプロットした。図-18 のプロットをみるとハイドレート飽和度が30%以下のものは  $L$  の増加に対して、 $c'$  はさほど増加していない。しかし、飽和度が高くなるにつれて  $L$  に対する  $c'$  の増加は顕著になることから  $c'$  は  $S_H$  と  $L$  に依存した材料パラメータであることが分かる。さらに、図よりハイドレートを含む砂の  $c'$  は MH と CDH の違いに関係なく  $S_H$  と  $L$  に対して良い相関が得られている。これはハイドレートが生成される温度圧力条件が異なる MH と CDH であっても、 $L$  を用いることでハイドレートが砂供試体の強度に寄与する量を等価な値として表現できたためと考えられる。

ここで  $c_H'$  が  $L$  の関数であるとして式(7)を式(6)に代入し、実験結果に基づき図中に実線で示した。

$$c_H' = b \cdot \log_{10}(L+1) \quad (7)$$

ここに、パラメータ  $b$  は粘着力の大きさを表す比例定数である。式は工学的な用途を考え常用対数で表される。 $L=0$  時はハイドレートが存在できる限界であり、実験が困難であるためにハイドレートが砂に与える粘着力を正しく評価できない。そのため  $S_H$  が高い場合でも安全側の

強度を見積もり、切片を砂単体のものとした。このために対数内の値が  $L+1$  となっている。図中の  $S_{MH}=20\%$ 、 $S_{MH}=30\%$ 、 $S_{MH}=40\%$ 、 $S_{MH}=50\%$  の4通りの実線は、それぞれ次のような式となった。

$$\left. \begin{aligned} S_{MH}=20\% : c' &= c_{sand}' + 0.04 \log_{10}(L+1) \\ S_{MH}=30\% : c' &= c_{sand}' + 0.25 \log_{10}(L+1) \\ S_{MH}=40\% : c' &= c_{sand}' + 0.53 \log_{10}(L+1) \\ S_{MH}=50\% : c' &= c_{sand}' + 1.10 \log_{10}(L+1) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

これらの式(8)のなかで、式(7)の比例定数に当たる  $b$  と  $S_H$  の関係を図-19 に示す。図中のプロットに対して近似曲線を描くと式(9)で表される。

$$b = 8.62 \cdot \left( \frac{S_H}{100} \right)^3 \quad (9)$$

ここで、式(9)を式(7)に代入し、さらに式(6)に適用することで、式(10)が得られる。

$$c' = c_{sand}' + 8.62 \cdot \left( \frac{S_H}{100} \right)^3 \log_{10}(L+1) \quad (10)$$

本論文では豊浦砂を用いて実験を行ってきたが、実地盤の砂と豊浦砂の粒径加積曲線は類似しており、コア取りした供試体の飽和度に対する三軸圧縮強度の増加も良い相関が得られているため<sup>6)</sup>、提案した式(10)は実地盤においても適用可能と考えられる。先に述べたように海底の堆積層は地熱の影響で深度とともに温度が上昇するため、MH が存在できる深度は限られる。これより熱と圧力の関係から南海トラフにおいて MH が存在できる領域を図-18 の網掛け部分で示した。この領域内では砂単体の粘着力に対し、MH 濃集層のハイドレート飽和度である  $S_H=50\%$  の粘着力は  $L=19$  時に最大で約 2.5 倍の値を示している。これより実地盤においてもハイドレートの固結力により、同程度の粘着力の増加が考えられる。

さらに、ハイドレートを含む砂の  $\phi'$  が砂単体の  $\phi'$  と等しく、ハイドレートによる強度増加はすべて粘着力に与えられるという仮定のもと、式(10)をモール・クーロンの破壊基準に適用することで、式(11)で表されるハイドレートを含む砂の破壊包絡線を推定できる。

$$\tau = c_{sand}' + 8.62 \cdot \left( \frac{S_H}{100} \right)^3 \log_{10}(L+1) + \sigma \tan \phi' \quad (11)$$

このように、 $S_H$ と原位置の温度・背圧を適切に知ることができれば MH 生産の際に掘削する坑井付近の地盤の強度や MH の分解による地盤強度の低下を推定できるとともに、二酸化炭素を CDH として地盤に貯留した際の強度増加も推定できる。

## 6. おわりに

次世代資源として考えられている MH を含む砂の力学特性を検討する目的で従来の高圧三軸試験装置に改良を加えて三軸圧縮試験を行った。そして、実地盤に想定される温度・圧力・MH 飽和度の条件を変化させてそれぞれの結果について比較、検討を行った。得られた知見について以下にまとめる。

(1) 従来の高圧三軸圧縮試験機に改良を加えることで、南海トラフ域における MH 堆積地盤の模擬供試体を作製することに成功した。

(2)  $S_H$ が高くなるほど土のピーク強度、残留強度は高くなる。さらに  $S_H$ の違いにより土のダイレイタンス特性が変化する。

(3) 背圧が高いほど、温度が低いほど MH を含む砂の三軸圧縮強度は増加する。そして、砂と同様で有効拘束圧が増加するほど正規粘土の挙動に類似してくる。さらに、ハイドレートを生成した後に土に応力を加えると固結力の低下に伴い軸差応力の初期の立ち上がりが小さくなる。

(4) ハイドレートを含む砂の三軸圧縮強度は提案したパラメータ  $L$  と  $S_H$  に依存する。そして高圧域の砂の三軸圧縮試験で求められる  $c_{sand}'$  を用いて、 $\phi'$  が一定という仮定のもとでハイドレートを含む砂の見かけの粘着力  $c'$  を推定できる式を提案した。さらに、その式をモール・クーロンの破壊基準に適用することでハイドレートを含む砂の強度が推定できた。

## 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」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) D.L. Katz, D. Cornell, R. Kobayashi, F.H. Poettmann, J.A. Vary, J.R. Elenbaas and C.F. Weinaug: Handbook of Natural Gas Engineering, McGraw-Hill Inc., New York, USA, 1959.
- 2) Kvenvolden, K. A.: Methane hydrate—a major reservoir of carbon in the shallow geosphere, Chemical Geology, 71, pp.41-51, 1998.

- 3) 佐藤幹夫, 前川竜男, 奥田義久: メタンハイドレート 天然ガスハイドレートのメタン量と資源量の推定, 地質学雑誌, Vol.102, No.11, pp.959-971, 1996.
- 4) 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>
- 5) 経済産業省プレスリリース「東部南海トラフのメタンハイドレート資源量評価結果について」平成 19 年 3 月 5 日.
- 6) 榊井明, 羽田博憲, 緒方雄二, 青木一男: 日本近海で採取されたメタンハイドレート堆積層コアの三軸強度試験について, 地盤工学研究発表会発表講演集, Vol.41st 2 分冊の 1, pp.359-360, 2006.
- 7) Hyodo, M., Nakata, Y., Yoshimoto, N., Ebinuma, T.: Basic research of the mechanical behavior of methane hydrate-sediments mixture, Soils and Foundations, Vol. 45, No. 1, pp.75-85, Feb. 2005.
- 8) 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を含む砂の力学特性の評価, 地盤工学研究発表会発表講演集, Vol.40th 2 分冊の 1, pp.425-426, 2005.
- 9) 羽田博憲, 駒井武, 前川竜男, 青木一男, 川村太郎, 大賀光太郎, 樋口澄志, 山本佳孝: メタンハイドレート開発における二酸化炭素ガスを用いた人工天盤構築の基礎的研究-模擬堆積層中における二酸化炭素のハイドレートの成長挙動-, 資源と素材, Vol.120, No.3, pp.159-163, 2004.
- 10) 内田努, 成田英夫, 平野貴史, 前晋爾: メタンハイドレート 人工メタンハイドレートのラマン分光測定, 地質学雑誌, Vol.102, No.11, pp.983-988, 1996.
- 11) 内田努: CO<sub>2</sub> ハイドレートの構造と生成・解離メカニズム, 伝熱研究, Vol.34, No.134, pp.52-57, 1995.
- 12) Sloan, E.D. Jr.: Clathrate Hydrates of National Gases. The values predicted by the program package, 1988.
- 13) Hirschfeld, R.C., and Poulos, S.M.: High Pressure Triaxial Tests on a Compacted sand and an Undisturbed Silt, Laboratory Shear Testing of Soils, STP No.361 ASTM, 1963.
- 14) 山口大樹, 安藤幸二, 小西貴士, 小西純一, 豊田富晴: 種々のサクシオン履歴を有する不飽和土の強度特性, 地盤工学研究発表会発表講演集, Vol.37th 2 冊分の 1, pp.933-934, 2002.

(2007 年 6 月 29 日 受付)