

模擬メタンハイドレート供試体の圧縮強度及び変形特性の評価

Compression Strength and Deformation Behaviour of Methane Hydrate Specimen

青木一男*, 緒方雄二*, 榊井 明*, 蔣 宇静**, 大野俊平***, 棚橋由彦**

K.Aoki, Y.Ogata, A.Masui, Y.Jiang, S.Oono and Y.Tanabashi

Methane hydrates, which form at low temperature and high pressure, are found in ocean sediments and being evaluated as a potential fuel for the future. The worldwide total of methane hydrate is estimated to be equivalent to 250 trillion cubic meters of methane gas. In order to establish an efficient production technology for extraction of methane from hydrates, deformation and movement behaviour of ocean sediments have to be basically clarified. The aim of this study is to develop the low temperature auto-controlled triaxial compression apparatus and to estimate the mechanical properties by using the ice rock matrix specimen. The preliminary results on relationships between deformation properties, shear strength and sand content in the specimen are presented and discussed.

Key Words: methane hydrate, compressive strength, deformation, temperature, triaxial compression test

1. はじめに

近年、日本の周辺の海域においても、メタンハイドレート (Methane Hydrate、以下は MH と略す) の存在が明らかに、天然ガス消費量の約 100 倍の相当量が推定されている^{1),2)}。MH は、圧力と温度の平衡条件でメタンガスが水分子に取り囲まれたカゴ状構造を形成し、凍土地域や海底の堆積層中に氷状で分布しており、次世代のエネルギー資源として国際的に注目されている。MH を分解しメタンガスを生産する方法としては、坑井内の循環水を利用して MH 層の温度を上昇させる方法 (熱刺激法) や圧力を低下させる方法 (減圧法) 等が考えられている³⁾。この場合、MH の分解による堆積層の強度低下と間隙中の流体移動にともなう生産坑井周辺の地盤変形によって、生産活動が阻害される可能性が高く、MH の安全かつ継続的な生産性を確保するには、MH 堆積層の力学特性や変形特性を解明する必要がある^{3),4)}。また、筆者らは「メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム」における生産手法開発分野の一部を担当し、三相 (固相・液相・気相) で構成される土・熱・浸透の連成解析モデルを用いた圧密変形特性の計算モジュール開発等に取り組んでおり、MH 堆積層の力学特性把握が不可欠である。

本研究は、圧密計算モジュールの開発にあたって必要な MH 堆積層の力学パラメータの基礎データを得る目的で、圧縮強度・変形特性に及ぼす温度と圧力および砂配合率の関係を調べるため、低温高圧の制御が可能な力学特性試験装置を製作し、MH 模擬試料を用いた低温下における三軸圧縮試験を実施した。

2. 力学特性試験装置と模擬供試体の作製方法

* 正会員 独立行政法人 産業技術総合研究所

** 正会員 長崎大学工学部

*** 学生員 長崎大学工学部

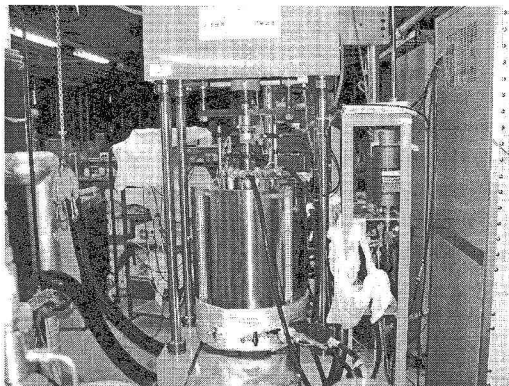


写真-1 試験装置の外観

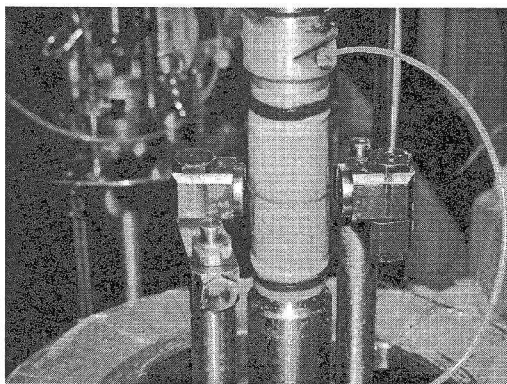


写真-2 供試体設置と半径方向変位計測

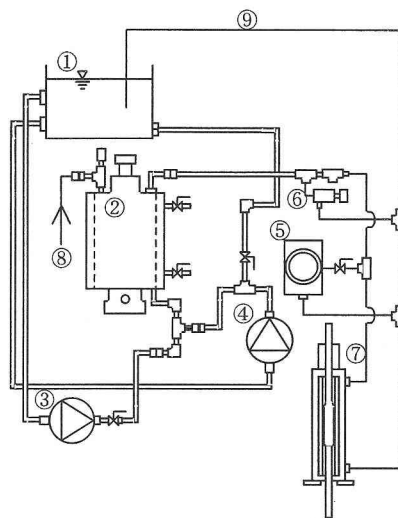


図-1 試験装置図

①蓄熱槽 ②耐圧容器 ③低圧ポンプ

④高圧ポンプ ⑤フロコン ⑥安全弁

⑦アクチュエーター

力学特性試験装置を図-1 と写真-1 に示す。

-30℃から+20℃までの温度範囲において三軸圧縮試験が可能（垂直軸荷容量 100kN、側圧軸荷容量 10MPa、間隙圧容量 10MPa）であり、2 個のギャップセンサーにより半径方向の変位が計測される（写

真-2）。圧力容器は直径 30mm から 100mm、高さ 60mm から 200mm までの試料に対応できるが、今回は直径 50mm ×高さ 100mm の試料を用いた。蓄熱槽と圧力容器の間はナイプラインを循環させることにより圧力と温度を自動制御できる。

実際に MH が比較的多く存在するとされる堆積層は砂質土が対象となるため、模擬試料の作製にあたっては、豊浦砂と微粉水（250 μ m のふるい通過分）を混合した土質材料を、-15℃の雰囲気において内径 50mm の金属製シリンダーとピストンにより圧力約 50 MPa で圧縮固結させ直径 50mm 長さ 100mm の模擬試料を作製した。

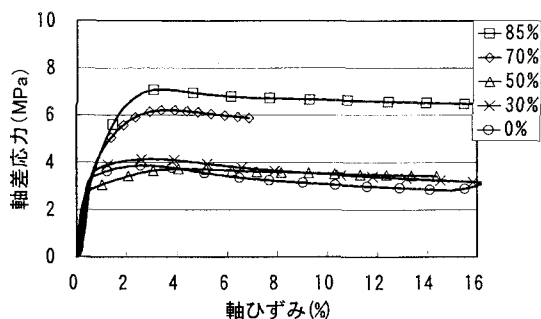
3. 実験方法および実験結果

3.1 実験方法

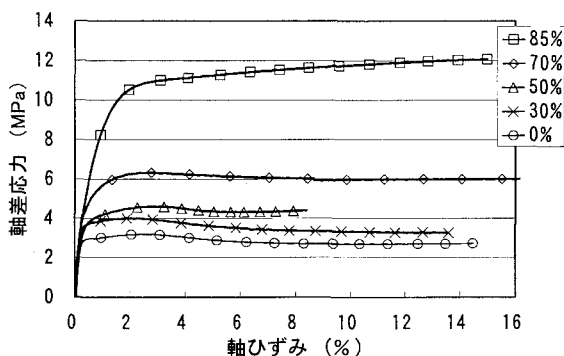
豊浦標準砂と供試体の質量比（以下、砂配合率と略す）が 0%、30%、50%、70%、85%の試料により、側圧条件 2、6、10MPa の場合について、軸載荷速度 1%/min、温度を-5℃の条件下で三軸圧縮試験を行った（表-1）。

表-1 三軸圧縮試験の試験条件と試料数

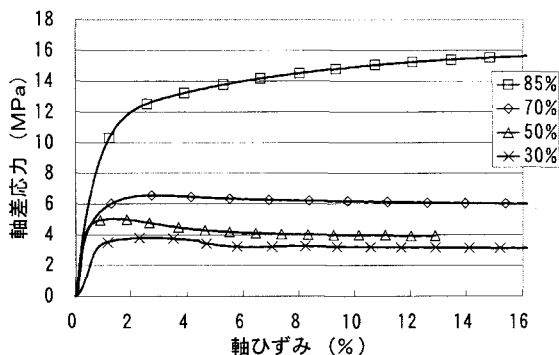
砂配合率 (%)	試験温度 (℃)	側圧 (MPa)	試料数 (個)
0	-5	2,6	2
30	-5	2,6,10	3
50	-5	2,6,10	3
70	-5	2,6,10	3
85	-5	2,6,10	3



(a) 側圧 2MPa



(b) 側圧 6MPa



(c) 側圧 10MPa

図-2 砂配合率に対する軸差応力と軸ひずみの関係

砂配合率の増加に伴って最大軸差応力が上昇することが認められた。また、砂配合率 85% では最大軸差応力が側圧の影響を著しく受けているが 70% 以下では側圧の影響が小さい結果となっており、側圧に対する依存性がきわめて低いと考えられる。

図-4 は最大軸差応力に対応した軸ひずみと砂配合率の関係を示している。砂配合率 0%、30%、50%、70% では、軸ひずみ量が 2% から 4% と若干のバラツキがみられるが、側圧の違いによる変化は認められない。一方、砂配合率 85% では、図-2 (b) および (c) から側圧 6MPa 以上における最大軸差応力はひずみ硬化により最大軸差応力に対応した軸ひずみ量が大きくなった (軸ひずみ量の上限は 15%)。

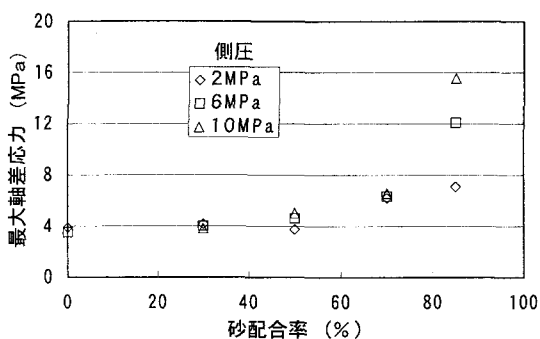


図-3 最大軸差応力と砂配合率の関係

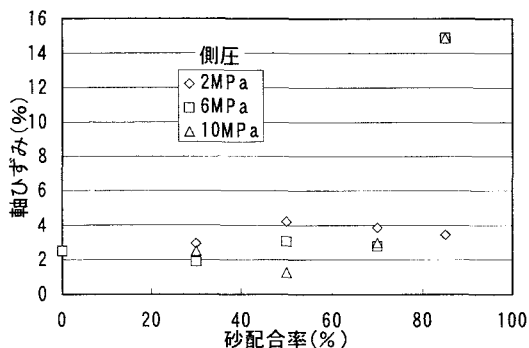


図-4 最大軸差応力時の軸ひずみと砂配合率の関係

3.2 試験結果と考察

(1) 軸差応力と軸ひずみとの関係

図-2 は、砂配合率が異なる場合の軸差応力-軸ひずみの関係を側圧ごとに示す。砂配合率が高くなるにつれ、軸差応力も上昇する傾向が認められることから、砂の割合が軸差応力-軸ひずみの関係に影響することがわかる。また、砂配合率 0%、30% では僅かながらひずみ軟化傾向を示したのに対し、85% の場合はひずみ硬化傾向を示した。

以上の結果より最大軸差応力と砂配合率の関係を整理すると図-3 になる。図-2 にも対応しているが、

(2) 変形係数と砂配合率の関係

図-5 は、試験温度が-5℃で、側圧を 2、6 と 10MPa と変化させた時の最大軸差応力の 50%時における変形係数 (E) の変化を示す。

図中では、 E_t は接線係数を、 E_s は割線係数を表す。砂配合率によって変形係数の変化にはばらつきが見られるが、全体の傾向として、試料の質量に占める砂の割合が増加するほど、つまり MH の含有量が少ないほど変形係数が減少する傾向にある。

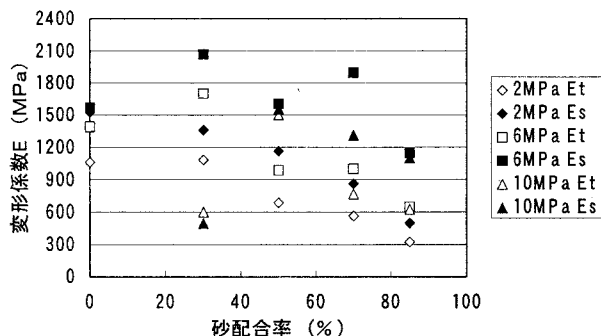


図-5 変形係数と砂配合率の関係

(3) せん断強度と砂配合率との関係

ここでは砂配合率と模擬供試体のせん断強度との関係を考察する。一例として、砂配合率 70%と 85%の場合のモール応力円を図-6 に示す。砂配合率 85%では、最大軸差応力が側圧の影響を大きく受けており、側圧に対する高い依存性が示された。一方、砂配合率 70%以下の場合では、最大軸差応力に及ぼす側圧の影響が小さく、内部摩擦角は 1° 前後の値を示した。

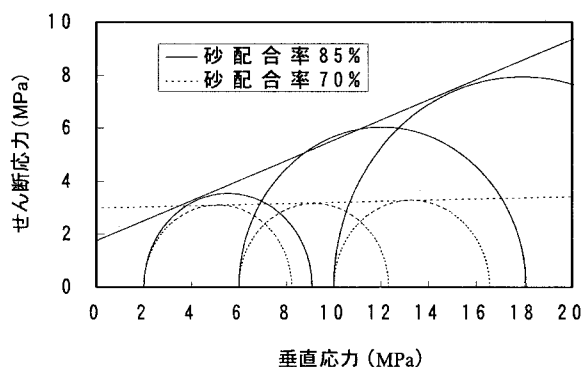


図-6 砂配合率 85%、75%時のモール応力円

(4) 多段階载荷三軸圧縮試験による評価

実際の MH 堆積物試料の取得は非常に限られており、少ない供試体から解析に必要なパラメータを求めるためには、多段階载荷試験方法についても検討する必要がある。

岩石の強度定数を求める方法として、Kovari & Tisa (1975) が多段階载荷三軸圧縮試験法を提案した⁶⁾。この試験の特徴としては、1 本の供試体に対して複数の拘束圧を段階的に作用させて行えば、強度定数を求めることができる。よって、十分な数量の供試体を用意できない場合に非常に有効である。しかし、軸圧縮（せん断）を複数回行

表-2 多段階载荷三軸圧縮試験と通常の三軸圧縮試験における軸差応力と軸ひずみの比較

(a) 多段階载荷三軸圧縮試験

側圧 (MPa)	軸差応力 (MPa)	軸ひずみ (%) (各側圧開始時より)	ε_u (%) (試験開始時より)
2	7.455	2.745	2.745
6	11.236	2.256	4.61
10	13.904	2.333	6.495

(b) 通常の三軸圧縮試験

側圧 (MPa)	軸差応力 (MPa)	軸ひずみ (%)
2	6.986	2.746
6	10.716	2.256
10	12.356	2.337

うため供試体に損傷が蓄積され、せん断強度を過小評価する可能性があり、さらに、載荷経路と載荷回数によって試験結果も大きく変わることが指摘されている⁷⁾。中園ら⁷⁾は2種類の軟岩を対象とし、多段階載荷三軸圧縮試験の適用性を検討した結果、負のダイラテンシーと延性破壊を特徴とする軟岩（例えば、シルト岩）に対して、側圧の設定順序を低い側圧から増加させる経路の適用性が高いことを明らかにした。

本研究ではそれを参考に、1本の模擬供試体に対して、低い側圧から増加させる側圧の設定順序を用いた多段階載荷三軸圧縮試験を実施した。側圧の載荷段階は、通常の三軸圧縮試験で得られた結果との関連性を確かめるために、2、6と10MPaの三段階において試験を行った。

図-7は配合率85%の模擬供試体の多段階載荷三軸圧縮試験によって得られた軸差応力と軸ひずみとの関係を示す。比較のために、図-8には、同じ砂配合率の試料で得られた側圧ごとの試験結果を示す。表-2より、せん断強度定数はかなり近い値を示しており、多段階載荷試験の可能性について確認できた。ただし、載荷段階の移行における側圧の載荷方法について検討課題が残されており、現在試験を継続中である。

4. おわりに

本研究では、MH 模擬供試体のための低温自動制御三軸圧縮試験装置を製作し、それを用いた供試体の作成法と試験手順を確立することができた。この装置を用いて、模擬供試体の試験温度を-5℃と設定した場合の三軸圧縮試験を実施し、砂配合率と模擬供試体の変形係数、強度定数との関係を考察した。特に砂配合率によっては延性破壊

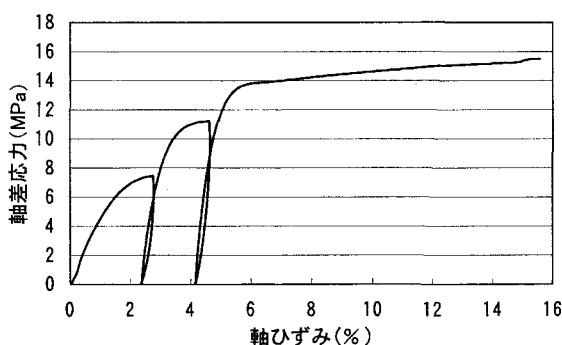


図-7 砂配合率85%の多段階圧縮試験の結果

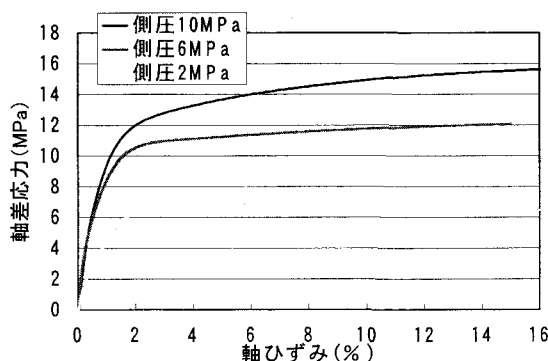


図-8 砂配合率85%の通常の三軸圧縮試験の結果

からひずみ硬化挙動を示し、最大軸差応力が大きくなるなど、将来の数値シミュレーションのための基礎データを一部得ることができた。また、実際の MH 堆積物試料の個数が限られていることを想定し、低温多段階載荷三軸圧縮試験の可能性についても検討した。

今後は、試験温度を -1°C ～ -10°C と変化させた低温三軸圧縮試験を実施し、MH 模擬供試体の変形特性と強度定数の温度依存性についても解明していく。さらに、実際のメタンハイドレートを含む模擬供試体を用いた低温圧縮試験も行う予定である。

謝 辞

本研究は、経済産業省資源エネルギー庁から委託された「メタンハイドレート資源開発手法・生産手法開発研究」の一環として実施したものである。また、模擬供試体の作製と室内実験に際して、横浜国立大学大学院社会空間システム専攻修士課程の石川君の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐藤幹夫：ガスハイドレート(IV)－メタンハイドレートの分布とメタン量及び資源量，日本エネルギー学会誌，Vol.80，No.895，pp.1064-1074，2001
- 2) 芦田 讓：国内における在来・非在来型資源の探査と開発，資源と素材，Vol.118，No.8，pp.536-545，2002
- 3) 青木一男，緒方雄二，榊井明，森二郎，方火浪：メタンハイドレート生産に伴う地盤変動について，資源・素材 2003(字部)秋季講演会論文集，B4-1，pp.235-236，2003
- 4) 安部透，西尾伸也，若林成樹，傳田篤，赤川敏：メタンハイドレート資源開発に伴う海底地盤の変形予測－メタンハイドレートを模擬した氷試料のせん断特性，第 38 回地盤工学研究発表会概要集，D-06，pp.379-389，2003
- 5) 松尾知佳，兵動正幸，中田幸男，吉本憲正，上野俊幸，海老沼孝郎：質量百分率の異なるメタンハイドレートの力学特性に及ぼす温度及び拘束圧の影響，第 58 回土木学会年次学術講演会概要集，III-393，pp.785-786，2003
- 6) Kovari,K. & Tisa,A.：Multiple Failure State and Strain Controlled Triaxial Tests, Rock Mechanics 7, pp.17-33, 1975
- 7) 中園康平，谷和夫，岡田哲実：2 種類の軟岩を用いた MLD モデルによる多段階載荷三軸圧縮試験の検討，第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.65-72，2003