

メタンハイドレートを含む海底地盤の力学特性 - その1：メタンハイドレートを模擬した氷試料の三軸圧縮試験 -

清水建設 技術研究所 正会員 ○西尾 伸也 安部 透
同 上 正会員 荻迫 栄治 傳田 篤
北海道大学 大学院 正会員 赤川 敏

1. はじめに 南海トラフを中心とした日本周辺海域に存在するメタンハイドレートの賦存量は、日本の現在の天然ガス消費量の100年分に相当すると推定されており¹⁾、石油・天然ガスに代わる次世代資源としてメタンハイドレートに期待が集まっている。この膨大なメタンハイドレートを資源として有効利用するためには、賦存域や賦存量を特定する探査技術、安全かつ経済的に産出する生産技術の開発と併せて、メタンハイドレート開発が海底環境へ与える影響を事前に予測・評価する技術の開発が不可欠である。経済産業省が策定した「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」に基づき、「メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム」が組織され、(財)エンジニアリング振興協会が環境影響評価に関する研究開発を行っており、筆者らは、この中で、メタンガス生産に伴う海底地盤の変形の可能性について検討を進めている。ここでは、メタンハイドレートの特徴を紹介すると共に、メタンハイドレートの存在状態がその力学的性質に与える影響を把握するために実施した、氷を含んだ砂試料の三軸圧縮試験結果について述べる。

2. メタンハイドレートの性質 水分子が水素結合によって作る格子状のゲージの中にメタン分子が取込まれた水和物がメタンハイドレートである。メタンハイドレートは、見掛け上シャーベット状の氷に類似しており、物性値としても氷に近い値 ($\rho=0.912 \text{ g/cm}^3$ 、 $V_P=3300 \text{ m/sec}$ 、 $V_S=1700 \text{ m/sec}$) が報告されている²⁾。低温高压の環境条件下で安定に存在し、常温常圧下ではメタンと水に分解する。自然界においても、メタンハイドレートが生成する温度・圧力条件を満たす永久凍土地帯の深部地盤や深海海域の海底地盤内で天然のメタンハイドレートが存在する。海域では、水深約500m以深でこの温度・圧力条件に達するが、海底地盤の地温が深度と共に増加するため、メタンハイドレートの生成条件が満たされる下限深度もある。この深度は地温勾配に依存するが、水深1000mに海底面がある場合、海底面下200m～300mである。

3. 氷模擬試料の意義 現在、地盤中にあるメタンハイドレートからメタンを生産する手法として提案されているのは、1)熱刺激法、2)減圧法、3)インヒビター注入法等により、地盤中でメタンハイドレートの相平衡状態を変化させて分解するものである³⁾。すなわち、地盤中に存在する固体のメタンハイドレートが水とメタンに置換わることから、骨格構造の変化や間隙圧の変化に起因した大規模な地盤変形が生じる可能性が懸念されている。メタンハイドレートが存在するのは大水深海域の海底下浅層部の軟弱地盤中であり⁴⁾、このような領域では乱れの少ない試料の採取が難しく、対象となる地盤の力学的性質を調べる上で、室内における試料の作成方法が重要な位置付けとなる。地盤中におけるメタンハイドレートの存在状態(図-1参照)はまだ十分に解明されてはいないが、それを室内で再現した試料作成方法の確立が必要となる。ここでは、間隙浮遊型(状態A)および土粒子固着型(状態B)を想定し、メタンハイドレートの代わりに氷を用いて2つの状態を模擬した試料を作成して三軸圧縮試験を行い、その力学特性を比較した。

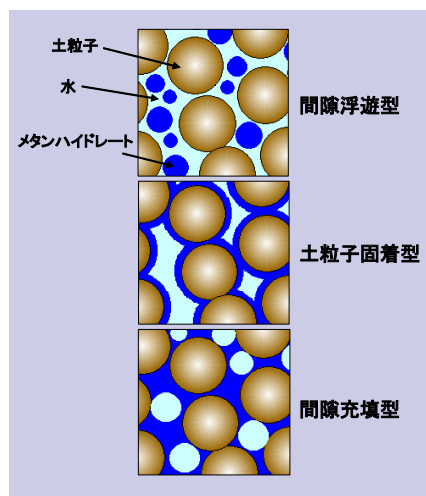


図-1 メタンハイドレートの存在状態

キーワード：メタンハイドレート、三軸圧縮試験、氷、変形、強度

〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17・電話 03-3820-5267・FAX 03-3820-5959

4. 試験方法

状態 A の供試体は、-20 の冷凍室内で超音波加湿器から噴霧した水を急速冷凍することにより氷微粉末を作成し、これを所定の比率（重量比：8%、15%および 30%）で乾燥させた豊浦砂と混合した後、供試体作成モールド内で静的に締固めて作成した。なお、供試体作成時において、砂粒子および氷粉末粒子以外の間隙が全体積に占める比率は 0.40～0.43 の範囲である。一方、状態 B の供試体は、乾燥させた豊浦砂を空中落下法で供試体作成モールドに詰め（ $n=0.40 \sim 0.42$ ）供試体下部から蒸留水で水侵させた後、所定の含水比となるよう供試体上部から低圧のエアを圧入して脱水し、供試体下部から凍結させて作成した。試験温度は -20 とし、所定の拘束圧（1MPa、2MPa および 4MPa）まで等方圧密した後、ひずみ制御（軸ひずみ速度：0.1%/min）で非排水せん断を行った。

5. 試験結果

図-2 にせん断中の軸差応力と軸ひずみの関係を示す。凡例の VR_{ICE} は、氷を含む間隙の体積に占める氷の体積比として定義した値である。状態 A の軸差応力は、軸ひずみ：1%程度でピークを示した後、ひずみ軟化を示すが、さらにせん断が進むと再び増加する傾向を示す。一方、状態 B の場合、軸差応力は状態 A より大きく、軸ひずみ：7%程度で最大値を示す。 VR_{ICE} の変化に伴う最大軸差応力（状態 A の場合は、最大主応力比時の軸差応力）の変化を図-3 に示す。状態 A では、氷体積の増加に伴い砂粒子の体積が減少するため、強度は低下する傾向を示す。状態 B においては、氷は砂粒子に固着しており、その体積の増加に伴い強度は増加する。図-4 に状態 A および状態 B の有効応力経路の代表例を示した。破壊抱絡線から求めた強度定数を見ると、状態 B では粘着力が増大すること、 ϕ の値は、状態 A、状態 B 共に、高圧下での豊浦砂での測定結果⁵⁾と比較して大きく低下していることがわかる。状態 A については、砂粒子と氷粒子の混合された緩い粒状体としての挙動、状態 B については、砂粒子同士の接点近傍が氷によって固着され、セメンテーションが発達した粒状体としての挙動が卓越している可能性が考えられる。

6. おわりに

メタンハイドレートの代わりに氷を用い、その地盤中での存在状態を模擬した試料を作成して三軸圧縮試験を行った。その結果、氷が土粒子と固着した状態と遊離した状態では、強度・変形特性に与える氷の影響が大きく異なる事を確認した。メタンハイドレートの存在状態が地盤の力学特性に大きな影響を与える可能性が示唆される。

（参考文献） 1) 佐藤幹夫・前川竜男・奥田義久、「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。 2) 例えば、<http://www.netl.doe.gov/sceng/hydrate/> 3) 棚橋 学、「メタンハイドレート資源の開発」、物理探査、Vol.55、No.5、pp.403-412、2002。 4) 西尾伸也・荻迫栄治・傳田篤、「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 - その 1：南海トラフ海底地盤の工学的性質 -」、第 38 回地盤工学研究発表会講演集、2003。（投稿中） 5) 三浦哲彦・山内豊聡、「高拘束圧下における標準砂の排水せん断特性について」、土木学会論文報告集、Vol.193、pp.69-79、1971。

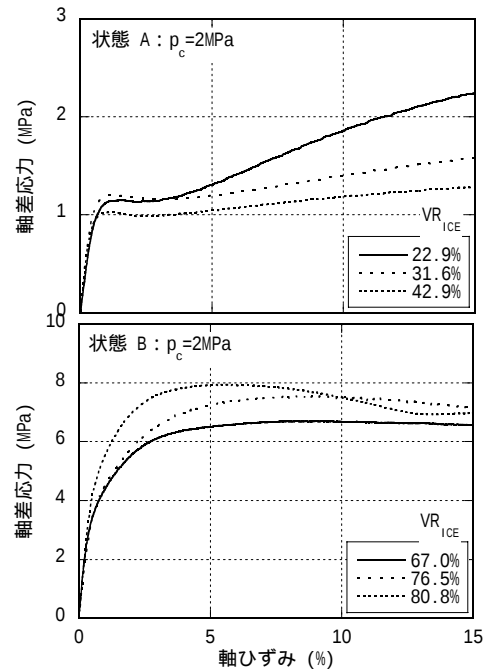


図-2 状態 A・B の応力～ひずみ関係

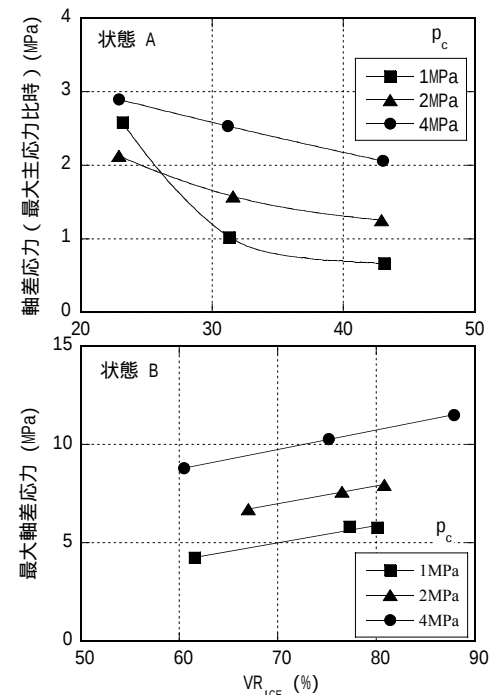


図-3 状態 A・B の強度～ VR_{ICE} 関係

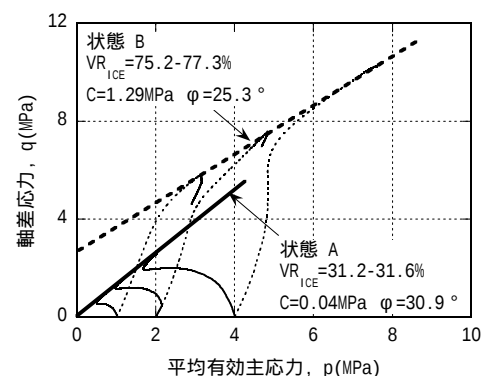


図-4 状態 A・B の有効応力経路