

K₀圧密下におけるメタンハイドレートを含む砂の力学特性

山口大学大学院 学生会員○津田伸基 小倉勇志

山口大学大学院 正会員 兵動正幸 中田幸男 吉本憲正

(独) 産業技術総合研究所 非会員 海老沼孝郎

1.はじめに

近年、エネルギー資源の枯渇、地球温暖化などの背景をうけ、新たなエネルギー資源であるメタンハイドレート(以下MH)が注目されている。MHは高压低温下で安定する性質ゆえ、日本近海では水深 1000mを超える深海海底地盤内に存在する。MHの生産手法としては、現在、主に熱刺激法、減圧法などが検討されている。MHの生産に際しては、坑井周辺地盤の変形の予測やそれに伴うガスの漏出防止が必要とされる。本研究では、MH濃集層地盤の力学的挙動を再現するためK₀圧密下でMHを生成させた砂供試体に対し、原位置環境における変形および強度特性を調べるために三軸圧縮試験を行った。また減圧法による生産を模擬し、生産によって生じる地盤の変形挙動を把握することを目的とした。

2.実験装置の概要

本研究で用いた実験装置¹⁾の主な特徴について述べる。概略図を図-1 に示す。本研究においては、K₀状態の砂供試体にMHを生成させること、またMHの分解時に生じる体積変化を測定できることが必要条件であった。そこで、二重セル方式を採用した。内セルは金属性で、最大 20MPaまでの使用が可能である。また、体積変化測定のため、内セル、供試体(上部・下部)のそれぞれに背圧・体積変化兼増圧器を設けた。

3.MHの生成方法

用いた供試体は任意のMH飽和率S_{MH}に作製するため、目標とするMH飽和率から算出した水の質量と相対密度90%となるよう算出した豊浦砂を混ぜ合わせ、直径 30mm、高さ 60mmの亚克力 molds にプレス機により詰め作製した。豊浦砂の物理的性質を表-1 に示す。なお、MH飽和率S_{MH}とは供試体の間隙V_vをMHの体積V_{MH}が占める割合のことをいう。

MH生成までの供試体が受ける背圧・温度履歴を図-2 に示す。

(a)試料を詰めたモールドは供試体を自立させるため、冷凍庫内凍結保存した。

(b)供試体をモールドから脱型した後、試験機に設置し自立のため有効拘束圧 0.2MPa を負荷させ、管路及び供試体間隙をメタンガスで充満し 4MPa を負荷した。

(c)氷を水に融解させるため、温度 20℃まで上昇させ 1 時間放置した。

(d)MHを生成させるため、三軸セル内部の温度を 1℃まで低下させ、背圧(メタンガス圧)を 4MPaに保つように制御した。また、流入量を随時監視し、ガス流入量の顕著な増加が認められなくなった時点でハイドレート化が完了したと判断し、その後 6 時間MHの養生時間とし生成完了とした。ただし、分解実験においてはK₀圧密後にMHの生成を行った。これは、圧密過程でMHの固結力が損なわれることを考慮したためである。

4.K₀圧密²⁾

本研究ではK₀圧密中の軸載荷速度を 0.01%/minとし、側方向応力の制御は、供試体の体積変化をフィードバックすることで側方向ひずみε_rを式(1)より算出し、この値が常に地盤工学会基準で規定されている±0.05%以下となるように側圧制御した。

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2V_0} (\Delta V_t - A_0 \times \Delta H_t) \times 100 \dots (1)$$

ここに、ΔH_t、ΔV_tはそれぞれ供試体の軸変位量cm、体積変化量cm³、A₀、V₀はそれぞれ圧密前の供試体断面積cm²、供試体体積cm³である。なお、分解実験においては、圧密中はメタンガスで背圧を負荷しており、背圧・体積変化

表-1 豊浦砂の物理的性質

G _s	G ₅₀ (mm)	e _{max}	e _{min}	U _c
2.643	0.200	0.973	0.635	1.200

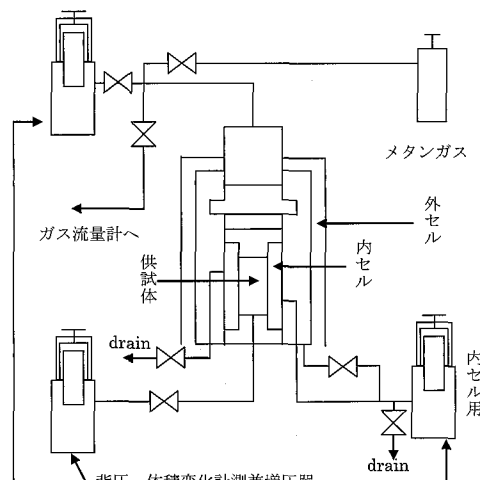


図-1 試験機概略図

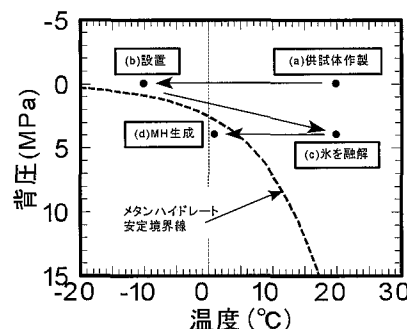


図-2 試験開始から終了までの背圧・温度履歴

計測兼増圧器による体積変化量をそのまま供試体の体積変化とみなすことができない。そこで、二重セル方式を用い、二重セル内の側液の体積変化を測定し、供試体の体積変化とした。

5.実験結果と考察

5.1MH を含む砂の三軸圧縮試験

MHの生成後、 K_0 圧密及びせん断を行った。実験対象はMH飽和率 0、30、50%の砂供試体であり、いずれもせん断時の背圧および温度を、それぞれ 10MPa、5℃とした。図-3 に K_0 圧密の実験結果を示す。MH飽和率が高くなると K_0 圧密開始後、急激に K_0 値は低下し、早期に一定値に収束することが分かる。また、その値はMH飽和率の上昇に伴い低くなっている。これは砂の粒子間で発揮されたMHの固結力によって、側方向ひずみが抑制されたためと推察される。また、図-4 に K_0 圧密後に行ったせん断試験結果を示す。MH飽和率の増加に伴い応力比が増加していることが認められる。この結果も、先程と同様に砂中に生成されたMHの固結力によるものと考えられる。

5.2MH を含む砂の分解実験

MH の生産にあたって、実地盤では坑井掘削によりせん断応力の作用、また MH 分解時には背圧の減少に伴い、有効拘束圧の増加が考えられる。そこで本研究では、MH 飽和率 50%の供試体を用い、軸ひずみ 0.5%までせん断した後分解実験を行った。具体的な内容は、まず、供試体に軸載荷を行い所定の軸ひずみに達した時点でその軸応力を保つように制御し、次に背圧を初期の 10MPa から 3.5MPa または 2MPa まで、6.5MPa もしくは 8.0MPa の減圧をいずれも 0.5%/min の速度で行い、分解実験を行った。また分解中のガス量の測定においては、分解実験の際に排水された間隙水の中にメタンガスが含まれているので、二重セル方式を適用した。メタンガス採取量の算出方法は以下のとおりである。

$$\Delta V_{Gass} = \Delta V - \Delta V_{In} - \Delta V_{Water} \cdots (2)$$

ここに、 ΔV_{Gass} 、 ΔV 、 ΔV_{In} 、 ΔV_{Water} ：それぞれ、ガス発生量 cm^3 、供試体に通じる背圧・体積変化計測兼増幅器によって計測された体積変化 cm^3 、内セルによって計測・算出された供試体の体積変化 cm^3 、水の圧力低下に伴う体積変化 cm^3 である。水に融解するメタンガス量は考慮していない。この ΔV_{Gass} をボイル・シャルルの法則により、常圧(0.1MPa)に換算し採取したガス量とした。

図-5 に採取したガス量-軸ひずみ-時間関係、図-6 にガス発生量-体積ひずみ-時間関係を示す。図-5、図-6 より温度 5℃での MH 安定条件である 4.2MPa から大きく下回る 2MPa に至る、減圧量 8.0MPa の実験結果の方がより急激に MH の分解が生じていることが確認される。また、その MH の分解に伴う圧縮側への軸ひずみ、体積ひずみの発生が確認される。供試体サイズではこのような結果を得たが実地盤においては減圧量が増大すると圧密の進行に伴う透水及び透気性の低下が考えられガスの採取が難しくなることも考えられる。

6.まとめ

①三軸試験結果より、MH は砂に固結力として強度増加の役割を果たし、その飽和率が高いほど強度は増加する。②分解実験より、減圧量の増加に伴い軸ひずみおよび体積ひずみは大きく、また MH の分解速度も上昇する。

謝辞:

本研究は、経済産業省「MH 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)小倉勇志他：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，2006，pp.353-354.
- 2)社団法人地盤工学会：土質試験の方法と解説，第一回改訂版，pp.501-507.

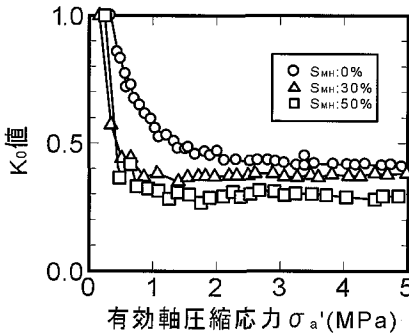


図-3 K_0 値-有効圧縮応力 σ_a' (MPa)

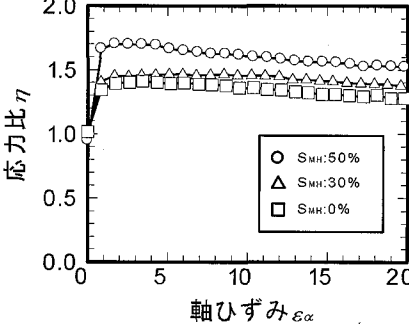


図-4 飽和率依存性

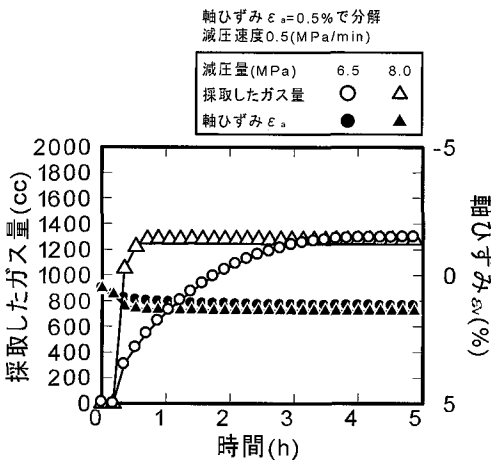


図-5 採取したガス量-軸ひずみ-時間関係

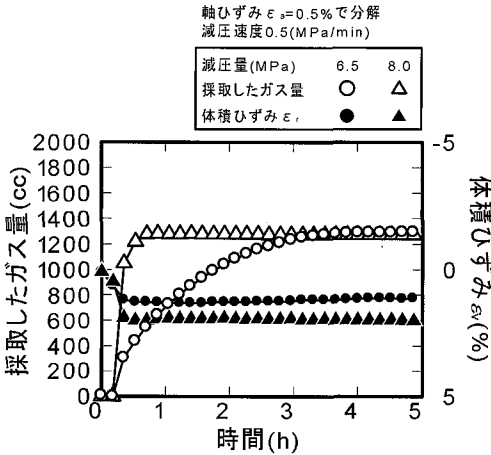


図-6 採取したガス量-体積ひずみ-時間関係