

京都大学工学部 学生員 ○小西 陽太
 京都大学大学院工学研究科 学生員 岩井 裕正
 京都大学大学院工学研究科 学生員 白石 将大
 京都大学大学院工学研究科 正会員 木元 小百合

1. はじめに

近年、CO₂ハイドレートを用いた二酸化炭素回収貯留(CCS)やメタンハイドレート含有層からのメタンガス増進回収法等が注目されている。CO₂ハイドレート含有地盤の力学特性の把握及び変形予測や構造物との相互作用の解明に向けてCO₂ハイドレート含有地盤の力学試験データが必要であるが、特に非排水条件下でのガスハイドレート含有地盤の力学試験はほとんど行われていない。本研究では、CO₂ハイドレート含有砂供試体を作製して非排水三軸圧縮試験を実施し、CO₂ハイドレート含有による力学特性の変化について検討した。

2. 実験概要

(1)試験装置及び供試体：本研究では、従来の高圧三軸試験装置に低温循環給水槽を設置することにより温度制御を可能とした温度制御型高圧三軸試験装置を用いて、CO₂ハイドレート含有砂供試体を作製し三軸圧縮試験を実施した。供試体は豊浦砂と蒸留水を混合することにより含水比15%とした試料を、直径35mm、高さ70mmの金属モールドに突固めながら充填し作製し、凍結させる。この時、間隙比は0.75となるよう調整している。これを三軸室内に設置しCO₂を圧入して供試体内にハイドレートを生成させる。

(2)CO₂ハイドレートの生成過程：図1にCO₂ハイドレートの平衡曲線とCO₂の液化曲線り、およびCO₂ハイドレート生成過程の温度圧力条件を示す。図中点A→Bに示すように、大気圧下10℃でセットした供試体にCO₂ガスを圧入しながら、背圧を2.3MPa、セル圧を2.5MPaまで上昇させる。さらに点B→Cに示すようにハイドレート安定存在領域まで温度を低下させCO₂ハイドレートを生成させ点C→Dに示すように背圧を10MPaまで上昇させることにより、供試体内中に残留したCO₂ガスを間隙水中に溶解させる。点Dにおいて通水を行い飽和状態とした後、B値の測定を行

い圧密過程を経てせん断を行う。

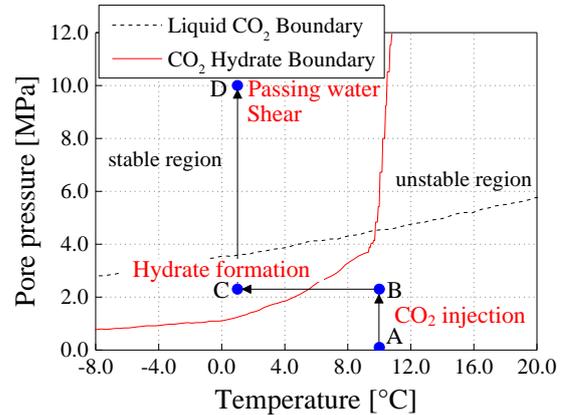


図1 ハイドレート生成過程の温度圧力条件

(3)実験方法及び実験条件：本研究では、初期平均有効応力1.0MPa, 2.0MPa, および3.0MPaの計3ケースのCO₂ハイドレート含有砂供試体の非排水三軸圧縮試験を行う(Case-1-H~Case-3-H)。また比較のためにハイドレートを含有しない飽和豊浦砂供試体を用いて同条件下での試験を実施した(Case-1~Case-3)。全てのケースにおいてせん断前初期間隙圧は水深1000mの海底地盤を想定し10MPaとし、ひずみ速度は0.1%/minとした。また温度はハイドレート安定存在領域内である1.0℃とした。表1に実験条件を示す。ハイドレート飽和率 S_r^H [%]については実験後ハイドレートの分解を行い発生したCO₂ガスを回収することで求めた。ハイドレート飽和率 S_r^H は間隙体積 V_v のうちハイドレート体積 V_H の占める割合であり次式で表される。

$$S_r^H = \frac{V_H}{V_v} \times 100 \quad (1)$$

表1 実験条件

| | せん断前 間隙比 e_0 | 初期平均 有効応力 [MPa] | 通水後 B 値 | ハイドレート 飽和率 S_r^H [%] |
|----------|-------------------|-----------------------|------------|---------------------------|
| Case-1 | 0.74 | 1.0 | 0.95 | 0.0 |
| Case-2 | 0.72 | 2.0 | 0.97 | 0.0 |
| Case-3 | 0.72 | 3.0 | 0.96 | 0.0 |
| Case-1-H | 0.76 | 1.0 | 0.88 | 34.6 |
| Case-2-H | 0.73 | 2.0 | 0.92 | 27.8 |
| Case-3-H | 0.73 | 3.0 | 0.93 | 28.5 |

3. 実験結果及び考察

図 2 に応力-ひずみ関係を示す。等しい初期平均有効応力の実験結果についてハイドレート含有砂供試体と非含有砂供試体を比較すると、いずれの初期平均有効応力においても、せん断初期から残留状態に至るまでハイドレート含有砂供試体の軸差応力が非含有砂供試体よりも大きくなっている。いずれのケースにおいてもせん断初期の軸差応力の立ち上がりはハイドレート含有砂の方が非含有砂より大きく、ハイドレート飽和率が高い Case-1-H で特に非含有砂との差が大きくなっている。これより初期せん断弾性係数についてもハイドレートを含有することによる増加およびそのハイドレート飽和率依存性が確認でき、ハイドレート含有地盤を表現する構成式の定式化の際にも考慮しなければならない。

図 3 はせん断中の有効応力経路である。ハイドレート含有砂における変相後の平均有効応力の増加量は非含有砂と比較して顕著に大きくなっており、固体として間隙中に存在するハイドレートにより正のダイレイタンシー挙動が顕著になったと考えられる。一方、本実験では変相前の平均有効応力の減少量についてもハイドレート含有砂供試体の方が大きくなっており、これはせん断前の初期間隙比の違いによるものと予想されるが、今後検証していく必要がある。限界状態応力比についてはハイドレートの含有、非含有及び初期平均有効応力に関係なく 1.20 となった。ハイドレート含有砂供試体では非含有砂供試体と比較して変相後に一度大きく限界状態線を上回り過圧密土的挙動を示し、最大応力比が大きくなった。

せん断時の最大応力比($\eta = q/p'$)を用いて、ハイドレートを含有することによる強度増加について検討を行った。各初期平均有効応力において、ハイドレート非含有砂供試体の最大応力比を η_{\max}^S 、ハイドレート含有砂供試体の最大応力比を η_{\max}^H としてハイドレートを含有することによる最大応力比の増加率 R_η [%] を以下のように定義する。

$$R_\eta = \left(\frac{\eta_{\max}^H}{\eta_{\max}^S} - 1 \right) \times 100 \quad (2)$$

図 4 はハイドレート飽和率に対する最大応力比の増加率をプロットしたものである。初期平均有効応力に関係なくハイドレート飽和率が高いほど最大応力比の増加率が大きい。

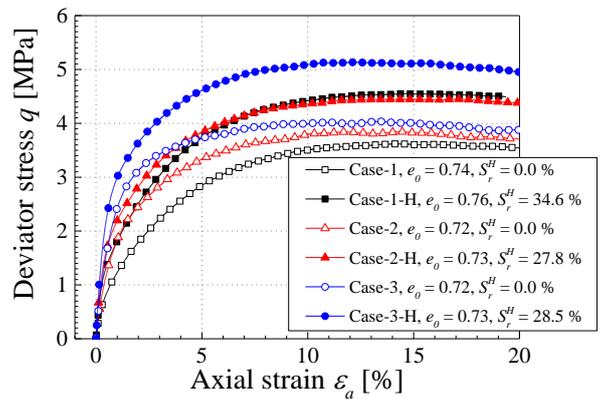


図 2 応力-ひずみ関係

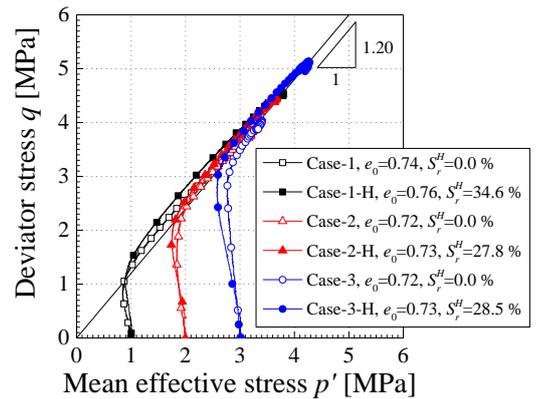


図 3 有効応力経路

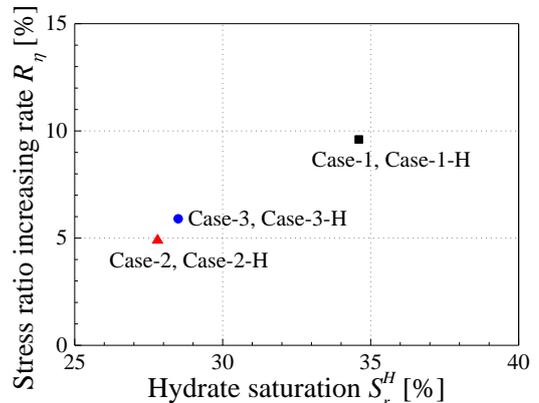


図 4 ハイドレート飽和率と最大応力比の増加割合

4. まとめと今後の課題

ハイドレートの含有による強度増加及びその拘束圧依存性、ハイドレート飽和率依存性を確認するとともにダイレイタンシー挙動が顕著になることがわかった。また、最大応力比はハイドレートの存在により増加し、その割合はハイドレート飽和率に依存することがわかった。これはハイドレート含有地盤を表現する構成式の定式化に有用であると考えている。今後は様々なハイドレート飽和率での実験を行うとともに時間依存性の検討や繰返し三軸試験を実施していく。

<参考文献>

Sloan, E. D. and Koh, C. A. : Clathrate Hydrates of Natural Gases Third Edition, CRC Press Taylor and Francis Group, pp.379-386, 2007.