CO_2 ハイドレート含有砂供試体の非排水三軸圧縮特性

京都大学大学院　学生会員　○小西　陽太
京都大学大学院(現 名古屋工業大学大学院)　正会員　岩井　裕正
京都大学大学院　正会員　木元　小百合

1. はじめに

近年，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 CO_2 ハイドレートの利用が注目されている．CO_2 ハイドレート含有地盤の力学特性の把握及び変形予測に向けて，その力学試験データが必要であるが特に非排水条件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，CO_2 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，CO_2 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，CO_2 ハイドレート含有砂供試体の作製と三軸圧縮試験を行った．供試体は含水比 15 %とした豊浦砂を用い，直径 35 mm，高さ 70 mm の金属モールドに突固めながら充填し凍結させて作製した．供試体作製時の間隙比は 0.75 となるよう調節している．これを三軸室内に設置し CO_2 を圧入して供試体内にハイドレートを生成させる．

(3)実験方法及び実験条件：図 1 に CO_2 ハイドレートの平衡曲線 [1]と CO_2 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 °C で設置した供試体に CO_2 ガスを圧入し，背圧 2.3 MPa，セル圧 2.5 MPa まで 0.2 MPa の圧力差を保ち上昇させる．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てハイドレートを生成し，さらに，背圧を 10 MPa まで上昇させることにより供試体内に残留した CO_2 ガスを間隙水に溶解させる．点 D において通水を行った後，B 値の測定を行い圧密過程を経て三軸圧縮試験を実施する．

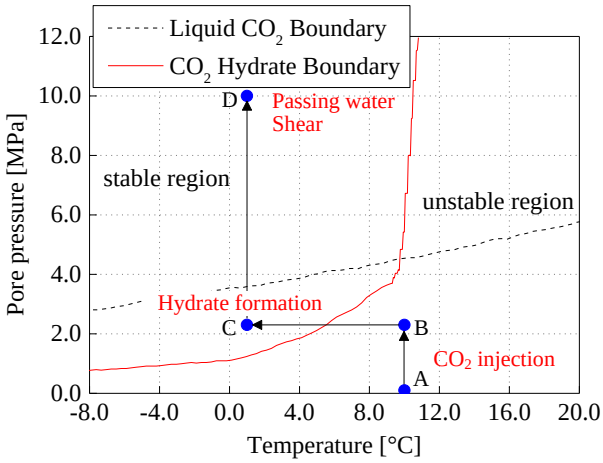

図 1 ハイドレート生成過程の温度圧力条件

(3)実験方法及び実験条件：表 1 に実験条件を示す．初期平均有効応力 1.0 MPa, 2.0 MPa 及び 3.0 MPa の計 3 ケースの CO_2 ハイドレート含有砂供試体の三軸圧縮試験(Case-1-H~Case-3-H)と，比較のためハイドレートを含有しない飽和豊浦砂供試体を用いた同条件での三軸圧縮試験(Case-1~Case-3)を実施した．全てのケースにおいてせん断前初期間隙水圧は海底 1000 m を想定し 10 MPa，温度はハイドレート安定存在領域内の 1.0°C とし，ひずみ速度は 0.1 %/min とした．ハイドレート飽和率 S_r^H [%]は実験後に供試体中のハイドレートを分解し発生した CO_2 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．

$$S_r^H = \frac{V_H}{V_V} \times 100 \qquad (1)$$

表 1 実験条件

	せん断前 間隙比 e_0	初期平均 有効応力 [MPa]	初期 間隙水圧 [MPa]	通水後 B 値	ひずみ速度 [%/min]	ハイドレート 飽和率 S_r^H [%]
Case-1	0.74	1.0	10.0	0.95	0.1	0.0
Case-2	0.72	2.0	10.0	0.97	0.1	0.0
Case-3	0.72	3.0	10.0	0.96	0.1	0.0
Case-1-H	0.76	1.0	10.0	0.88	0.1	34.6
Case-2-H	0.73	2.0	10.0	0.92	0.1	27.8
Case-3-H	0.73	3.0	10.0	0.93	0.1	28.5

キーワード：ハイドレート，三軸圧縮試験，非排水

連絡先：〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻地盤力学分野 075-383-3193

3. 実験結果及び考察

図 2 に応力-ひずみ関係を示す．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，いずれの初期拘束圧においてもせん断初期から残留状態までハイドレート含有砂供試体の軸差応力が非含有砂よりも大きくなっており強度増加が見られる．また，せん断初期の軸差応力の立ち上がりは含有砂の方が非含有砂よりも大きくなっている．特に，ハイドレート飽和率が大きい Case-1-H では Case-1 との差が大きいことから，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り増加し，その増加割合はハイドレート飽和率と正の相関があると言える．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の際にも考慮しなければならない．

ハイドレートを含有することによる強度増加について，軸差応力の最大値を用いて比較を行った．各初期平均有効応力における非含有砂供試体の最大軸差応力を $q^S_{\max}$，含有砂供試体の最大軸差応力を $q^H_{\max}$ としてハイドレートを含有することによる軸差応力の増加率 R_q [%]を以下のように定義する．

$$R_q = \left(\frac{q^H_{\max}}{q^S_{\max}} - 1 \right) \times 100 \qquad (2)$$

R_q を用いて Case-1-H と Case-3-H を比較すると，それぞれの軸差応力の増加率は 25.7 %, 27.3 %と Case-3-H の方がハイドレート飽和率が低いにもかかわらず，軸差応力の増加率は Case-3-H の方が大きくなっている．これより，初期平均有効応力が大きい方が軸差応力の増加率が大きくなることが考えられるが，さらにデータの蓄積が必要である．

図 3 はせん断中の有効応力径路である．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，固体として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．限界状態での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はよらず 1.20 となったが，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大きく限界状態線を上回る過圧密土的挙動を示し，最大応力比が大きくなった．各初期平均有効応力において，非含有砂供試体の最大応力比を $\eta^S_{\max}$，含有砂供試体の最大応力比を $\eta^H_{\max}$ 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し，各ハイドレート飽和率における最大応力比の増加率を**図 4** に示す．

$$R_\eta = \left(\frac{\eta^H_{\max}}{\eta^S_{\max}} - 1 \right) \times 100 \qquad (3)$$

これより，最大応力比の増加率は初期平均有効応力によらずハイドレート飽和率が高いほど大きくなることがわかる．

4. まとめと今後の課題

本研究では，CO_2 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，CO_2 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．その結果，ハイドレートを含有することにより非排水強度は増加し，非含有砂と比較してダイレイタンシー挙動がより顕著になった．さらに，より過圧密土的な挙動を示すようになり最大応力比はハイドレートの存在により増加した．この最大応力比の増加率はハイドレート飽和率が高いほど大きくなった．

今後は，ハイドレート含有砂のひずみ速度依存性などの時間依存性挙動について検討する．

<参考文献>

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

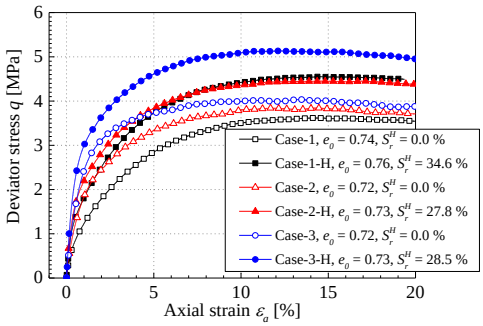

図 2 応力-ひずみ関係

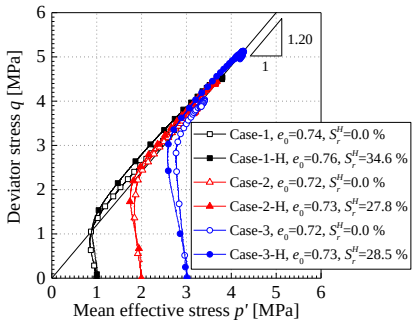

図 3 有効応力径路

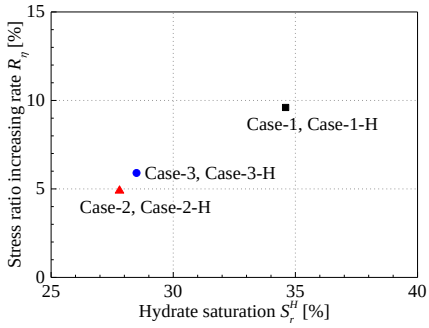

図 4 最大応力比の増加割合