

ガスハイドレート含有地盤の非排水三軸圧縮試験 Undrained triaxial compression tests on gas hydrate-bearing sediments

岩井裕正¹, 小西陽太²

1 名古屋工業大学・工学部社会工学科・iwai.hiromasa@nitech.ac.jp

2 京都大学大学院・工学研究科社会基盤工学専攻

概 要

新たなエネルギー資源としてメタンハイドレート(以下, MH と記す) が注目を浴びている。深海底地盤内に存在する MH 層からメタンガスを採取するためには, 地盤内で MH を水とメタンガスに分解し, それらを分離することでメタンガスを生産しなければならない。近年, MH 増進回収法として CO₂ ハイドレートの利用が注目されている。これは, CO₂ ハイドレート生成時の発熱反応を利用して, 低温高压で存在する MH の分解を促進させる方法である。この方法を用いれば, 温室効果ガスである CO₂ ガスの地盤内固定と MH 資源開発の両者を同時に進めることができる。本研究では, CO₂ ハイドレート生成後の海底地盤の強度変形特性を把握するために, CO₂ ハイドレート含有砂供試体を作製し, 異なるハイドレート含有率, 異なる拘束圧および異なるひずみ速度で非排水三軸圧縮試験を行った。また, 比較のためにガスハイドレートを含有しない飽和砂供試体の三軸圧縮試験も実施しそれぞれの結果を比較した。

キーワード: 三軸圧縮試験, ガスハイドレート含有地盤, 砂質土, CCS

1. はじめに

近年, 新たなエネルギー資源としてメタンハイドレート(以下, MH と記す) が注目を浴びている。MH は非在来型の資源に分類され, MH 層まで井戸を掘ったとしても自噴しない。従って MH 層からメタンガスを採取するためには, 地盤内で MH を水とメタンガスに分解し, それらを分離することでメタンガスを生産しなければならない。低温高压で存在する MH は熱を加えるか周囲の圧力を減らすことで水とメタンガスに分解するが, 現在では, 後者の減圧法の適用が有力視されている。しかしながら, 減圧によって周辺地盤の有効応力が大きく変化することや, 分解に伴い, 固体である MH が消失することを考えると, 安全な MH 生産のためには, 深海底 MH 含有地盤の変形挙動を予測することが可能な数値シミュレーションの開発が必要である。特に, 長期間安全で経済的な MH 生産を行うためには, 数十年単位で海底地盤の変形や力学特性を把握することが要求される。従って, MH 含有地盤の時間依存性挙動を把握し, その挙動を的確に表現しうる構成モデルの構築は必要不可欠な課題である。

また近年, MH と並んで CO₂ ハイドレートの活用も注目されている。ガスハイドレートの分解は吸熱反応であるため, MH が分解すると温度が低下し再び低温状態になる「自己保存性」を有している。そこで, 深海底地盤内で MH 分解と同時に CO₂ ガスを圧入することで CO₂ ハイドレ

ートを生成させ, 生成時の発熱反応によって MH 分解を促進させる方法である。またこれとは別に, CH₄-CO₂ 置換法によってメタンガスを取り出しつつ CO₂ を地盤内に固定する技術も研究されている¹⁾²⁾。図 1 は MH と CO₂ ハイドレートの相平衡曲線である³⁾。図 1 より, MH が安定して存在するためには CO₂ ハイドレートに比べてより低温かつ高压が要求されることが分かる。特に図 1 中 II に示す範囲は, MH は分解してしまうが, CO₂ ハイドレートは安定して存在する領域であり, 前述の CO₂ ハイドレートの生成熱を用いた MH 増進回収法や CH₄-CO₂ 置換法は, これら 2 種類のガスハイドレートが安定して存在するために必要な温度圧力条件の差を利用して実施される。また, III の領域は MH および CO₂ ハイドレートともに不安定領域であり, それぞれメタンガスと CO₂ ガス(または液体 CO₂) および液体状態の水が存在している。

いずれの方法にしろ, 最終的に深海底地盤内には CO₂ ハイドレート含有層が生成されるが, この MH 生産後の CO₂ ハイドレート含有地盤が長期にわたって力学的に安定かどうか, また地震のような外力にも耐えうるかどうかを評価するためには, ガスハイドレート含有地盤の構成モデルの構築, およびそれを用いての数値解析的な検討が必要不可欠である。本研究ではその初期段階として, CO₂ ハイドレート含有地盤の強度変形特性を調べることを目的とし, 非排水三軸圧縮試験を行った。三軸試験は, ひずみ速度一定の単調載荷試験に加えて, 時間依存性挙動を調べ

るために 2 種類のひずみ速度を载荷中に数回切り替えるひずみ速度急変試験も併せて実施した。

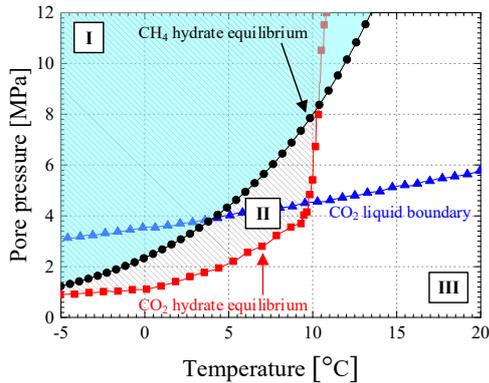


図 1 MH と CO₂ハイドレートの相平衡曲線

2. 三軸圧縮試験装置および供試体作製方法概要

本試験では、地盤の間隙内に CO₂ハイドレートを生成させる必要があるため、海底地盤のような低温・高圧環境が再現可能な温度制御型高圧三軸試験装置を用いた。試験装置の詳細および CO₂ハイドレート含有供試体の作製手順は文献 4)を参照されたい。

2.1 試験条件

2.1.1 単調载荷非排水三軸圧縮試験条件

本研究では、6 ケースの単調载荷非排水三軸圧縮試験を行った。3 本の CO₂ハイドレート含有供試体に対して初期平均有効応力を 1.0MPa, 2.0MPa, および 3.0MPa の 3 ケース、比較のために同じ初期平均有効応力でハイドレートを含有しない飽和豊浦砂供試体で合計 3 ケース実施した。表 1 に実験条件を示す。Case 名末尾に「H」を付したものはハイドレート含有供試体であることを示す。ハイドレート飽和率 S_r^H についてはせん断後に分解を行い回収した CO₂ ガスの体積から求めた。ここで S_r^H は以下の式で定義される。

$$S_r^H = v^H / v^v \quad (1)$$

ここで、 v^H および v^v は間隙中のハイドレート体積および間隙の体積である。また単調载荷試験では全てのケースにおいて背圧は 10MPa, ひずみ速度は 0.1%/min に設定した。

表 1 非排水単調载荷試験条件

Case-No.	Initial void ratio	Mean effective stress	Hydrate saturation [%]
Case-1	0.74	1.0 MPa	0.0
Case-2	0.72	2.0 MPa	0.0
Case-3	0.72	3.0 MPa	0.0
Case-1H	0.76	1.0 MPa	34.6
Case-2H	0.73	2.0 MPa	27.8
Case-3H	0.73	3.0 MPa	28.5

2.1.2 ひずみ速度急変非排水三軸圧縮試験条件

ここでは、CO₂ハイドレート含有地盤の時間依存性挙動

を調べるために行ったひずみ速度急変試験条件を示す。この試験では、2 種類のひずみ速度を設定し、せん断途中で数回ひずみ速度を切り替えながら軸ひずみ 20%までせん断を行う。全てのケースにおいてせん断前の平均有効応力は 2.0MPa, 背圧は 10MPa とした。表 2 にひずみ速度急変試験の実験条件を示す。実験は合計で 5 ケース行った。Case-4 は CO₂ハイドレートを含有しない飽和豊浦砂供試体である。Case-5~Case-8 は CO₂ハイドレートを含有する供試体であり、それぞれハイドレート飽和率が異なる。2 種類のひずみ速度は、基本的には 0.005%/min および 100 倍大きい 0.5%/min を設定したが、Case-5 のみ 0.005%/min および 0.1%/min を用いている。

表 2 ひずみ速度急変非排水三軸圧縮試験条件

Case-No.	Initial void ratio	Strain rate [%/min]	Hydrate saturation [%]
Case-4	0.72	0.005⇔0.5	0.0
Case-5	0.75	0.005⇔0.1	10.0
Case-6	0.74		24.4
Case-7	0.73	0.005⇔0.5	26.5
Case-8	0.74		26.4

3. 実験結果および考察

3.1 単調载荷非排水三軸圧縮試験結果

CO₂ハイドレート含有供試体のせん断剛性、強度、ダイレイタンス挙動を把握するために、単調载荷非排水三軸圧縮試験結果を以下に示す。まず、図 3 は CO₂ハイドレート含有砂と飽和砂の応力-ひずみ関係および有効応力径路である。図 3 の応力-ひずみ関係より、いずれの初期平均有効応力においても、CO₂ハイドレート含有砂は飽和砂に比べて、初期剛性および軸差応力ともに大きな値を示している。ハイドレートは固体であるので、砂粒子の間隙にハイドレートの固体が存在することで見かけの密度が増加していると考えられる。有効応力径路からは、ハイドレート含有砂のダイレイタンス挙動が顕著になっていることが分かる。限界状態線を大きく超えて軸差応力が増加していることから、ハイドレートを含有することでより密な砂の挙動になった。しかしながら、限界状態における応力比は飽和砂、ハイドレート含有砂ともに同じであり、その値はおよそ 1.2 である。

また、飽和砂供試体だけに注目すると、限界状態における軸差応力は 1.0MPa, 2.0MPa, 3.0MPa のケースでほぼ同程度の軸差応力に落ち着いているのに対して、ハイドレート含有砂では Case-3H が最も大きく、Case-1H と Case-2H が近い値となっている。ハイドレート飽和率 S_r^H は Case-1H の 34.6% が最も大きいにも関わらず、 S_r^H が 28.5% の Case-3H が最も大きくなったことから、ハイドレート飽和率による軸差応力の増加率は拘束圧に依存するということが推察される。この傾向は、Case-2H と Case-3H の比較においても同様で、Case-2H と Case-3H ではせん断前の間隙比が 0.73 と同じ値であり、 S_r^H が 0.7 ポイントの差しかないにも関わらず軸差応力は Case-3H の方が顕著に増加

している。このことから、ハイドレート飽和率が同程度であっても拘束圧が大きいほど強度増加の割合が大きくなるという、拘束圧依存性が存在すると考えられる。

CO₂ ハイドレート含有砂の剛性について詳細に考察するために、図 4 に割線係数 E_{50} および飽和砂の E_{50} に対するハイドレート含有砂の E_{50} の増加割合を示す。飽和砂の E_{50} は拘束圧に依存して大きくなっていることが分かる。ハイドレート含有砂の E_{50} の値は、Case-1H, Case-2H および Case-3H のいずれのケースにおいても飽和砂と比較して大きくなっている。これは固体であるハイドレートが砂粒子の間隙を充填、あるいは砂粒子同士を固結することで供試体全体としての剛性が增加しているからであると考えられる。また図 4 右図は飽和砂の E_{50} に対するハイドレート含有砂の割線 E_{50} の増加割合をハイドレート飽和率との関係で見た図である。ハイドレート飽和率が高くなるのに伴い、割線 E_{50} の増加割合も大きくなっており正の相関が得られた。3 ケースのみの結果であるので、この相関が線形的なのか非線形なのかは今回の結果だけで判断することはできない。今後実験ケースを重ねていく必要がある。

次に、飽和砂とハイドレート含有砂のダイレイタンスー挙動を比較するために、過剰間隙水圧－軸ひずみ関係を図 5 に示す。図 3 右図の有効応力径路でも示したように、ハイドレート含有砂の過剰間隙水圧は飽和砂と比較して大きく減少するという顕著な正のダイレイタンスー挙動が見られ、より密な砂の挙動に近くなる結果となった。ところが、せん断が進むにつれて過剰間隙水圧は大きく減少しているが、せん断初期の過剰間隙水圧はむしろハイドレート含有砂の方が大きく出ていることが図 5 右図から分かる。本来、固体であるハイドレートを含有することで供試体全体の見かけの密度が増加することやハイドレートの固着効果によって、地盤の変形が抑えられることが予想されるが、せん断初期の過剰間隙水圧挙動はその予想とは反する結果となった。その原因について次節で考察する。

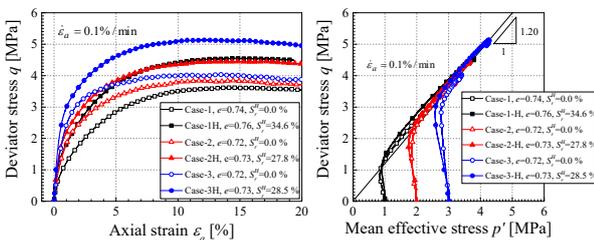


図 3 応力－ひずみ関係 (左) および有効応力経路 (右)

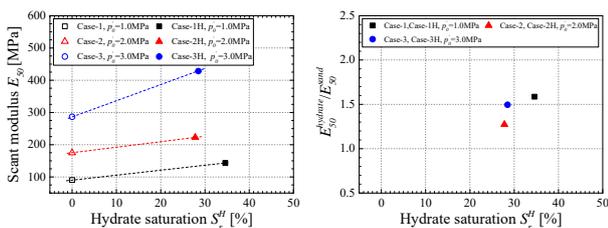


図 4 割線係数 E_{50} 結果 (左) および E_{50} 増加率－ S^H 関係 (右)

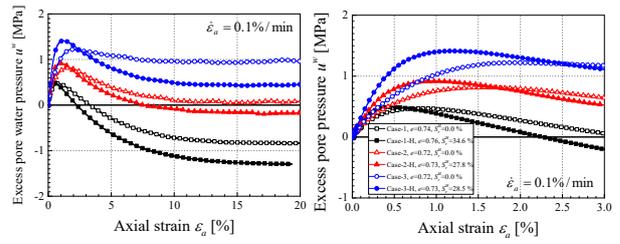


図 5 過剰間隙水圧－ひずみ関係 (左：軸ひずみ20%, 右：軸ひずみ3%までの領域を拡大)

3.2 CO₂ ハイドレート存在形態が三軸圧縮挙動に与える影響に関する考察

ガスハイドレートが地盤の力学挙動に与える影響は、ハイドレートがどのような大きさ、あるいはどのような形状で地盤の間隙内に存在しているかに大きく依存している。ガスハイドレート存在形態は大きく(1) Pore filling, (2) Load bearing, および(3) Cementing の3つの形態に分類されると考えられている⁵⁾⁶⁾⁷⁾。それぞれの存在形態の模式図を図 6 に示す。Pore filling では小さなハイドレート粒子が土粒子の間隙を埋めるように存在している。このタイプでは地盤全体の固体相の密度は増加しているが、土粒子自身が土骨格を形成しているため微小なひずみ領域ではハイドレートによる変形抑制や強度増加効果は小さいとされている⁷⁾。この Pore filling タイプでは、せん断初期では土粒子骨格の変形や回転を抑制する効果は期待できないが、せん断過程において土粒子の再配列が起こると、土粒子とハイドレート粒子の接触が多くなり、土骨格を支持する構造へと変化する。

次に、Load bearing タイプは初期の状態から土骨格を支持するように間隙内に存在しており、Pore filling タイプに比べてせん断初期の変形が抑えられることが予想される。しかしながら Pore filling と同様に依然として土粒子の回転を抑制する効果は小さいとされる。

最後に、Cementing タイプは、ハイドレートが複数の土粒子を固着するように存在しており、主要3タイプの中では最も地盤を強固にする効果があるとされている。ハイドレートのブリッジによって土粒子骨格の変形や回転が抑制され、せん断初期から大きな剛性と強度増加が得られる。ハイドレートによって固着された土粒子塊が、あたかも一つの大きな粒子として振る舞うため、体積膨張や過剰間隙水圧の減少といった正のダイレイタンスー挙動もより顕著になる。

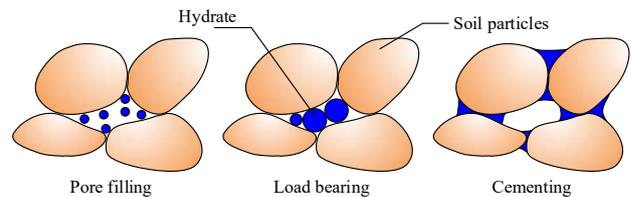


図 6 地盤内におけるガスハイドレート存在形態の模式図

以上のようなハイドレート存在形態を踏まえて、今回の過剰間隙水圧-軸ひずみ関係について考察すると、今回用いた CO₂ ハイドレート含有供試体の内部構造としては Pore filling タイプが支配的であったと推察される。表 1 より、せん断前の初期間隙比はいずれの拘束圧の場合においてもハイドレート含有砂の方が大きくなっており、せん断初期段階でハイドレート含有砂における過剰間隙水圧が飽和砂のそれを上回ったのは、土骨格の変形による影響が大きかったためであると考えられる。その後、図 7 に示すように、せん断による土骨格の変形に伴い間隙構造が変化し、Pore filling タイプから Load bearing タイプへとハイドレートの存在形態が遷移したため、最終的にはハイドレート含有砂において過剰間隙水圧が大きく減少し、正のダイレイタンシーが顕著になったと解釈される。もちろん、実際の内部構造は 3 つの存在形態が混在しており、どのタイプが卓越するかによって力学応答が変化してくると思われる。ハイドレート存在形態と地盤のマクロな力学挙動変化に関する詳細検討は今後の課題としたい。

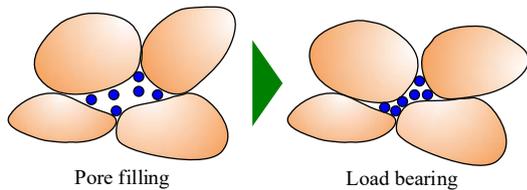


図 7 せん断に伴う Pore filling 型から Load bearing 型への変化

3.3 ひずみ速度急変非排水三軸圧縮試験結果

CO₂ ハイドレート含有深海底地盤は長期スパンで考えると、テクトニクスや土砂運搬による急速な堆積によって地形が大きく変化することがある。また、こうした地形の変化によって海底地盤内の間隙水圧が発生することが指摘されているが⁸⁾⁹⁾、ガスハイドレート含有地盤では、間隙に固体が生成されることで透水性が著しく低下し、水圧の消散に時間を要する長期圧密のような現象が起こる。また、ガスハイドレート自身、ひずみ速度依存性やクリープ変形といった粘塑性挙動を示すことも知られている¹⁰⁾。そこで本研究では、CO₂ ハイドレート含有地盤の時間依存性挙動を調べることを目的とし、単調載荷試験に加えてひずみ速度急変非排水三軸圧縮試験を実施した。本節ではその結果について示す。

図 8~図 12 にひずみ速度急変非排水三軸圧縮試験の応力ひずみ関係および有効応力径路を示す。Case-4 はハイドレート非含有供試体であるが、ひずみ速度の急激な増減に伴い、軸差応力もわずかではあるが増加・減少しており、それぞれのひずみ速度に固有の応力-ひずみ曲線を描く isotaches 性が確認される。Case-5 は、ひずみ速度を 0.005%/min と 0.1%/min の 2 種類で行った。Case-4 と比較すると、ひずみ速度の差は小さいが、Case-4 と同程度の軸差応力の変化が見られる。Case-5 のハイドレート飽和率は 10.0%であったが、ハイドレート飽和率が 24.4%の Case-6

では、ひずみ速度切り替え時の軸差応力の増減がより顕著に現れている。Case-4 および Case-5 では、有効応力径路における差異は小さかったが、Case-6 では応力-ひずみ関係のみならず、有効応力径路においても顕著な違いが確認される。

Case-7 (26.5%)および Case-8 (26.4%)は、Case-6 (24.4%)と比べてハイドレート飽和率は大きく、ひずみ速度切り替え時の変化もより明確になっており、ハイドレート飽和率が増加すると、ひずみ速度依存性もより大きくなることが推察される。また、Case-7 と Case-8 を比べると、同程度のハイドレート飽和率であるのにも関わらず、ひずみ速度依存性は、応力-ひずみ関係図、有効応力径路図のどちらを見ても Case-8 の方が強く表れている。

表 3 に Case-4~Case-8 の、それぞれのひずみ速度における最大軸差応力の値を示す。また、表 3 に基づいて各ひずみ速度における最大軸差応力とハイドレート飽和率との関係をプロットしたものを図 13 に示す。

表 3 および図 13 より、ハイドレート飽和率の増加に伴い、ひずみ速度 0.5%/min における最大軸差応力が増加しているのが分かる。これは前節の単調載荷試験より得られた結果とも整合している。しかし、ここで注目すべきはひずみ速度が遅い場合における最大軸差応力とハイドレート飽和率の関係である。表 3 および図 13 を見ると、0.005%/min の最大軸差応力はハイドレート飽和率が増加してもほぼハイドレート非含有の飽和砂と大きな違いが見られない。つまり、緩速載荷の場合にはハイドレートを含有することによる強度増加効果が小さいということである。これについては、緩速載荷時の粒子の再配列やひずみ速度と応力緩和速度の関係など、いくつかの原因が考えられるが、いずれも予測の範疇を出ない。詳細なメカニズムの解明は今後の課題である。

表 3 各ひずみ速度における最大軸差応力

Case-No.	q_{max} (0.005%/min)	q_{max} (0.5%/min)
Case-4 (0.00%)	3.96 MPa	4.20 MPa
Case-5 (10.0%)	3.90	4.05 (0.1%/min)※
Case-6 (24.4%)	3.89	4.58
Case-7 (26.5%)	3.87	4.68
Case-8 (26.4%)	3.99	5.13

※Case-5 は 0.005%/min および 0.1%/min で行っている。

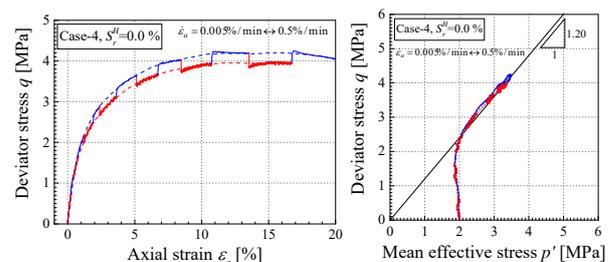


図 8 応力-ひずみ関係および有効応力径路 (Case-4, 0.00%)

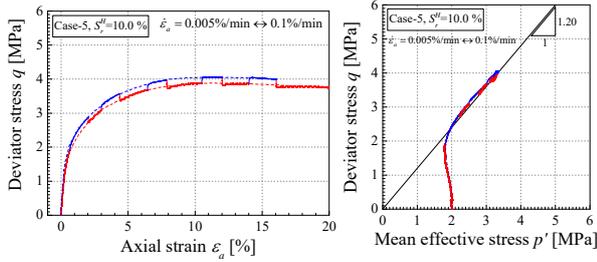


図 9 応力-ひずみ関係および有効応力経路 (Case-5, 10.0%)

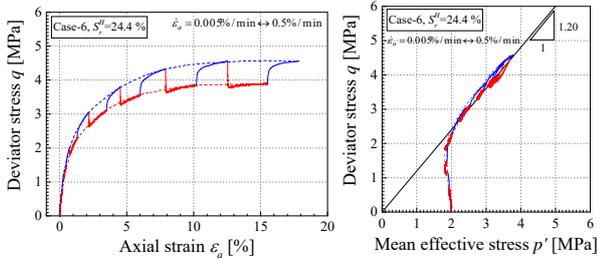


図 10 応力-ひずみ関係および有効応力経路 (Case-6, 24.4%)

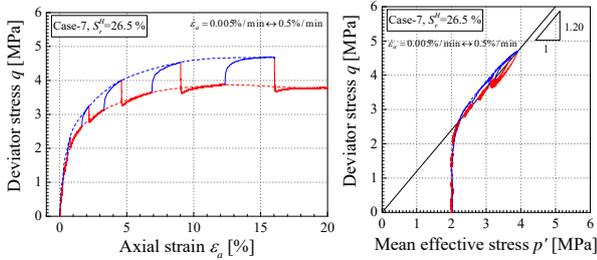


図 11 応力-ひずみ関係および有効応力経路 (Case-7, 26.5%)

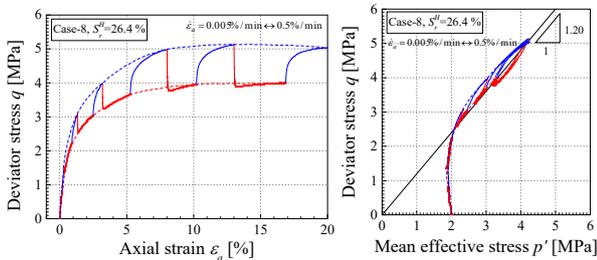


図 12 応力-ひずみ関係および有効応力経路 (Case-8, 26.4%)

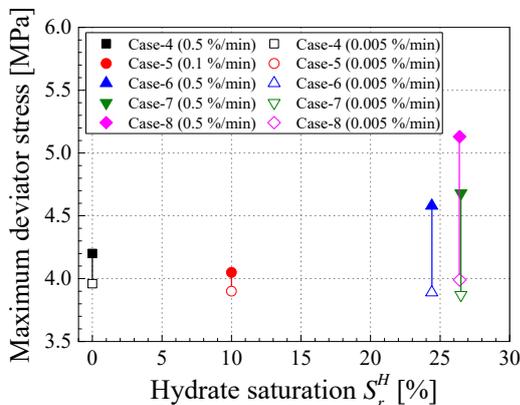


図 13 最大軸差応力とハイドレート飽和率の関係

3.4 時間依存性挙動の定量的評価

前節では、最大軸差応力に注目してひずみ速度の影響を比較してきた。本節では、CO₂ハイドレート含有地盤の時間依存性挙動をより詳細に検討するために、粘塑性パラメータ m' によるひずみ速度依存性の定量的評価を行った。

時間依存性挙動を示す材料の構成式である Adachi and Oka の弾粘塑性構成式¹¹⁾において、材料の時間依存性は粘塑性パラメータ m' によって表される。Kimoto et al.¹²⁾は、天然ガスハイドレート試料およびメタンハイドレート含有砂質試料に対して本構成式を基本としたガスハイドレート飽和率依存性を考慮した弾粘塑性構成式の適用を試みている。 m' は通常、ひずみ速度を変えた非排水三軸圧縮試験結果より、次式を用いて求めることができる。

$$m' = \sqrt{3/2} (\ln \dot{\epsilon}_a^{(1)} - \ln \dot{\epsilon}_a^{(2)}) / (q^{(1)}/p' - q^{(2)}/p') \quad (2)$$

ここで $\dot{\epsilon}_a^{(k)}$ は 2 種類の異なるひずみ速度、 $q^{(k)}$ はある等しい平均有効応力 p' における軸差応力である。上付きの番号(1)(2)はそれぞれひずみ速度 $\dot{\epsilon}_a^{(1)}$ および $\dot{\epsilon}_a^{(2)}$ に対応している。ひずみ速度依存性が顕著であるほど、 m' の値は小さくなる。地盤材料によるが、粘性土あるいはシルトで $m'=15-35$ 程度、砂質土では $m'=33-100$ 程度の値を示すことが知られている¹³⁾。今回、CO₂ハイドレート含有砂質試体のひずみ速度依存性を定量的に評価するために、得られた有効応力経路から、ひずみ速度依存性に関する粘塑性パラメータ m' の算定を行った。Case-4 から Case-8 までの有効応力経路から、式(2)を用いて m' を算定し、ハイドレート飽和率との関係を調べた。表 4 に各ケースのハイドレート飽和率と m' の値を示す。

表 4 より、豊浦砂のみのハイドレート非含有供試体 (Case-4) の m' は 169.5 となり、Leroueil and Hight¹³⁾ が示した砂質土の値よりも大きくなったが、砂のひずみ速度依存性は小さいという傾向は同様となった。Case-5 は、ハイドレート飽和率が 10.0% と今回の実験では比較的高いハイドレートの含有量は少なく、 m' の値も 147.7 となったが、ハイドレート非含有である Case-4 と比較するとその値は小さくなっており、CO₂ハイドレートがわずかで入れられることで時間依存性が発現することが分かった。同様に Case-6、Case-7 とハイドレート飽和率が大きくなるにしたがって、粘塑性パラメータ m' の値も小さくなっている。Case-8 は Case-7 とほぼ同じハイドレート飽和率であるが m' の値は 57.7 とさらに小さくなる結果となった。表 4 に示したハイドレート飽和率と m' の関係をプロットしたものを図 14 に示す。図 14 から、ハイドレート飽和率の増加に伴う m' の値の減少を見て取ることができる。その減少傾向は今回実施した 5 ケースでは線形で近似されるが、ハイドレート飽和率はいずれも 30% 未満であり、今後さらに高いハイドレート飽和率での実験を実施し、それらの結果を含めて考察していく必要がある。

表 4 粘塑性パラメータ m' およびハイドレート飽和率

Case-No.	Viscoplastic parameter m'	Hydrate saturation [%]
Case-4	165.5	0.00%
Case-5	147.7	10.0%
Case-6	76.1	24.4%
Case-7	70.2	26.5%
Case-8	57.7	26.4%

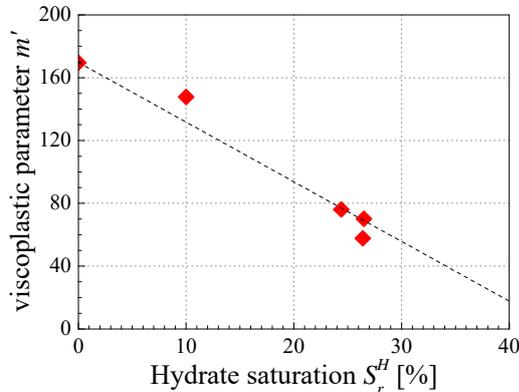


図 14 粘塑性パラメータ m' とハイドレート飽和率の関係

4. まとめ

本研究では、MH の増進回収や二酸化炭素地中固定化技術の一つとして CO_2 ハイドレートの利活用が注目されていることを背景に、 CO_2 ハイドレート含有地盤の高精度な構成モデルを構築することを最終目標に据えている。本稿では、その初期段階として行った、単調載荷非排水三軸圧縮試験およびひずみ速度急変非排水三軸圧縮試験の 2 種類の試験結果について示した。本研究によって得られた知見を以下に示す。

- (1) 初期剛性および軸差応力ともにハイドレート含有砂は飽和砂供試体に比べて大きくなった。初期剛性の増加割合はハイドレート飽和率と正の相関がある。また、軸差応力の増加割合はハイドレート飽和率だけでなく拘束圧にも依存していると考えられる。
- (2) ハイドレート含有供試体ではより密な砂の挙動を示し、正のダイレイタンス挙動が顕著になるが、限界状態における応力比はハイドレート含有砂、飽和砂で大きな違いはなく概ね一致する。
- (3) ハイドレートを含有することによる強度増加およびダイレイタンス特性の変化は、ハイドレート飽和率のみならず間隙内のハイドレートの存在形態にも大きく依存することが推察される。
- (4) ひずみ速度急変試験より、速いひずみ速度では単調載荷試験結果と同様に、軸差応力はハイドレート飽和率と正の相関があり、ハイドレート飽和率が増加するにつれて軸差応力も大きくなるが、遅いひずみ速度の場合、ハイドレート飽和率が増加しても最大軸差応力は飽和砂のそれとほとんど変化が見られなかった。この詳細なメカニズムについては今後の検討事項である。

- (5) ハイドレート飽和率が増加すると、ひずみ速度切替え時の軸差応力の増減が顕著になり、明確な時間依存性挙動が観察された。構成式に用いられる粘塑性パラメータを導入し時間依存性挙動の定量的評価を試みた結果、粘塑性パラメータとハイドレート飽和率との間にきれいな相関が得られた。本実験結果を構成モデルへと繋げていく上で重要な情報である。

参考文献

- 1) Inui, M. and Sato, T. : Economical feasibility study on CO_2 sequestration in the form of gas hydrate under seafloor, *Journal of Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, Vol.3, pp.35–46, 2006.
- 2) Ohgaki, K., Takano, K., Sangawa, H., Matsubara, T. and Nakano, S. : Methane exploitation by carbon dioxide from gas hydrates. Phase equilibria for CO_2 - CH_4 mixed hydrate system., *Journal of chemical engineering of Japan*, Vol.29, No.3, pp.478–83, 1996.
- 3) Sloan Jr, E. D. and Koh, C. A. : Clathrate hydrates of natural gases, CRC press, 2007.
- 4) Iwai, H., Saimyou, K., Kimoto, S. and Oka, F. : Development of a temperature and pressure controlled triaxial apparatus and dissociation tests of carbon dioxide hydrate containing soils, *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, Vol.2, No.13, pp.518–21, 2016.
- 5) Winters, W. J., Pecher, I. A., Waite, W. F. and Mason, D. H. : Physical properties and rock physics models of sediment containing natural and laboratory-formed methane gas hydrate, *American Mineralogist*, Vol.89, No.8-9, pp.1221–27, 2004.
- 6) Waite, W. F., Santamarina, J. C., Cortes, D. D., Dugan, B., Espinoza, D. N., Germaine, J., Jang, J., Jung, J. W., Kneafsey, T. J., Shin, H., Soga, K., Winters, W. J. and Yun, T. S. : Physical properties of hydrate-bearing sediments, *Reviews of Geophysics*, Vol.47, No.RG4003, pp.1–38, 2009.
- 7) Pinkert, S. and Grozic, J. L. H. : Failure Mechanisms in Cemented Hydrate-Bearing Sands, *Journal of Chemical & Engineering Data*, pp.376-382, 2014.
- 8) Kvalstad, T. J., Andresen, L., Forsberg, C. F., Berg, K., Bryn, P. and Wangen, M. : The Storegga slide: evaluation of triggering sources and slide mechanics, *Marine and Petroleum Geology*, Vol.22, No.1, pp.245–56, 2005.
- 9) Jahren, A. H., Conrad, C. P., Arens, N. C., Mora, G. and Lithgow-Bertelloni, C. : A plate tectonic mechanism for methane hydrate release along subduction zones, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol.236, No.3, pp.691–704, 2005.
- 10) Miyazaki, K., Masui, A., Sakamoto, Y., Haneda, H., Ogata, Y., Aoki, K., Yamaguchi, T. and Okubo, S. : Strain rate dependency of sediment containing synthetic methane hydrate in triaxial compression test, *Journal of MMIJ*, Vol.123, No.11, p.537, 2007.
- 11) Adachi, T. and Oka, F. : Constitutive equations for normally consolidated clay based on elasto-viscoplasticity, *Soils and Foundations*, Vol.22, No.4, pp.57–70, 1982.
- 12) Kimoto, S., Iwai, H., Saimyo, K., Shindo, T. and Oka, F. : Application of an Elasto-viscoplastic Model to the Gas Hydrate-bearing Soil, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.64, No.4, pp.317–22, 2015.
- 13) Leroueil, S. and Hight, D. W. : Behavior and properties of natural soils and soft rocks, in *Characterization and engineering properties of natural soils*, Eds. Tan, T. S., Phoon, K. K., Hight, D. W. & Leroueil, S., p.123, Balkema, 2003.