

二酸化炭素ハイドレートによる地盤改良技術の開発とカーボンリサイクル

山口大学 ○吉本 憲正 1\*

二酸化炭素	ハイドレート	せん断強度
せん断特性	ガス環境	低拘束圧

研究の目的

地球温暖化対策に向けて、温室効果ガスの大半を占める二酸化炭素（以下、CO<sub>2</sub>）を削減することが必要である。CO<sub>2</sub>は低温高压の環境下で水と化学反応し、CO<sub>2</sub>ハイドレート（以下、CDH）を生成する。CDHを生成させることでCO<sub>2</sub>の削減に寄与するだけでなく、地盤改良にも利用できる可能性がある。

図-1に示すように、10℃程度以下であれば、水深400m程度（4MPa程度）の低い圧力でもCDHを生成させることが可能であり、エネルギー面でも有効であると考えられる。地盤改良として利用することを考えると、海底地盤の表層付近でCDHを生成させる必要がある。

これらのことから、本研究では、水深400m程度（4MPa程度）の背圧条件、図-1の相平衡曲線から、この背圧ではCO<sub>2</sub>はガスの状態の可能性が高いため、間隙をガス環境条件、また、海底地盤表層を想定した拘束圧（0.5～3.0MPa）条件でのCDH含有砂のせん断特性を調査することを目的とする。

研究の内容

実験には豊浦砂を使用し、直径30mm、高さ60mmの円柱供試体を作製した。実験手順を、図-1に示す供試体内の温度-圧力履歴に沿って、以下に記す。①目標のCDH飽和率に必要な水と試料を混ぜ合わせ、不飽和供試体を作製後、実験機のセル内に設置する。②CO<sub>2</sub>ガスを供試体内に注入する（3MPa）。③セル内の温度を供試体内でCDHが生成可能な温度に設定する（5℃）。④背圧の条件を設定する。⑤圧密を行う。⑥軸ひずみ速度0.1%/minで軸ひずみ15%までせん断試験を行う。⑦せん断試験後、温度一定の環境下で、間隙圧を減圧し、CDH安定領域から外し、CDHをCO<sub>2</sub>と水に分解する。CO<sub>2</sub>のガス量を計測することで、CDH飽和率の計算を行う。実験は、有効拘束圧0.5MPa、0.8MPa、1MPa、3MPaの4ケースで、それぞれCDH飽和率0%、30%目標、50%目標の3ケース、計12ケースで実施した。

図-2に、CDH飽和率別の軸差応力と軸ひずみの関係を示す。例として、有効拘束圧1MPaの結果を示す。図より、CDH飽和率の増加に伴う、初期剛性と軸ひずみ15%時の最大軸差応力の増加が確認された。せん断開始初期は、土粒子に固着したCDHの影響で、急激に軸差応力が増加したと考えられる。その後、CDHが土粒子から剥がれ、

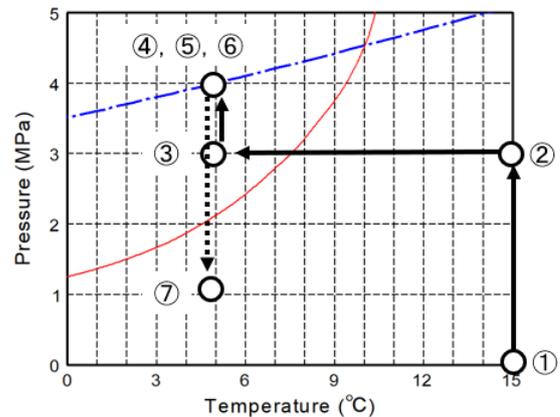


図-1 CDH安定領域図と供試体内の温度-圧力履歴

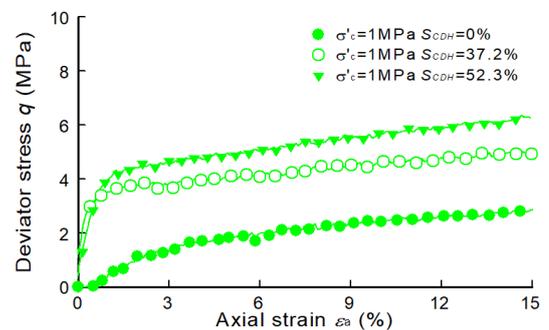


図-2 軸差応力と軸ひずみの関係

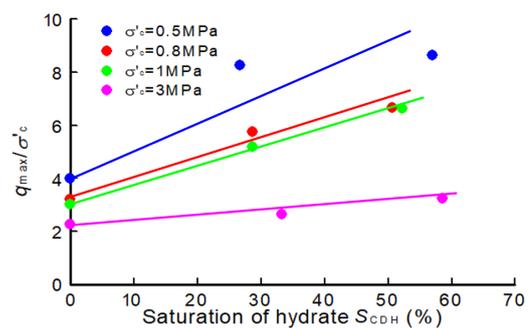


図-3 正規化した最大軸差応力とCDH飽和率の関係

供試体の間隙をCDHが埋めることで、土粒子と同様の役割を果たし、軸ひずみの増加に伴い、軸差応力が緩やかに増加したと推察される。また、CDHが供試体内の間隙内を占める割合が大きくなるほど、土粒子の接点、および接面を固着するCDHがより多く存在し、固結力が大きく発揮されたと推察される。図-3に、最大軸差応力を有効拘束圧で除し、正規化した最大軸差応力の値と、CDH

飽和率の関係を示す。図より、飽和率の増加に伴う最大軸差応力の増加傾向が確認できる。また、有効拘束圧が大きいほど、最大軸差応力の増加する傾きが小さいことが確認できた。これは、拘束圧が大きいほど、土粒子とCDHの固着が剥がれ、強度に影響したためと考えられる。

図-4に、本研究で得られた、供試体の間隙をCO<sub>2</sub>で飽和させたガス飽和条件の結果と、CDH生成後の間隙を水で飽和させた水飽和条件の結果を比較した、軸差応力と軸ひずみの関係を示す。例として、有効拘束圧3MPaの結果を示す。図より、ガス飽和条件では、水飽和条件よりも初期剛性、および最大軸差応力が大きく発現した。水飽和条件では、通水を行いCDH表面が水と接することで、表面張力の作用でCDHの形が変化し、土粒子の接着能力が低下することにより、せん断強度がガス飽和条件に比べ低く発現したのではないかと推察される。このことから、CDH生成後の地盤内はガス飽和状態である方が、高いせん断強度を発揮すると考えられる。

図-5に、最大軸差応力の値を用いたモールの応力円を示す。例として、飽和率50%目標の結果を示す。有効拘束圧3MPaの結果は、図-3より、他の有効拘束圧の結果に比べ、飽和率の増加に伴う最大軸差応力の増加する傾きが小さいことがわかっている。この結果を含めて、破壊包絡線を近似して示すと、粘着力 $c'$ が大きくなる。したがって、破壊包絡線は、0.5~1.0MPaのモール円に接するものと、1.0MPaと3.0MPaのモール円に接するものの2つで示すこととした。図より、結果の整理の方法のために、拘束圧の高いところでは、砂のみとCDH含有砂の結果が近づいてくるが、実験を実施した範囲においては、CDH含有砂の全データは、豊浦砂のみの破壊包絡線を超えていることがわかる。特に、低拘束圧域である拘束圧1MPaまでの範囲では、粘着力 $c'$ も破壊包絡線の傾きであるせん断抵抗角もCDH含有砂の方が顕著に大きな値を示すことが確認された。

#### 研究の成果、新発見

本研究では、CO<sub>2</sub>ガスを注入し、CDHを生成させた後、間隙をCO<sub>2</sub>ガスで飽和させた砂供試体の強度特性の調査を行った。実験結果より、CDHの飽和率の増加に伴う初期剛性、および最大軸差応力の増加が確認された。また、間隙を水で飽和した結果や、MH含有砂の結果と比較を行い、本研究で得られた結果が、先行研究よりも強度が発揮されることが分かった。このことから、水深400m程度の海底地盤において、CDHを利用した地盤改良効果は、期待できると考えられる。

従来の研究で対象としてきた水深1000m程度や深海底地盤下数百mの水圧・拘束圧環境とは異なり、水深約

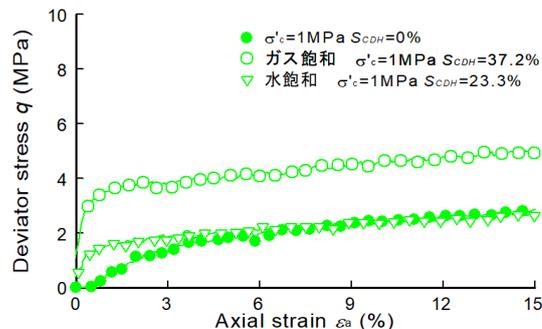


図-4 ガス及び水飽和の軸差応力と軸ひずみの関係

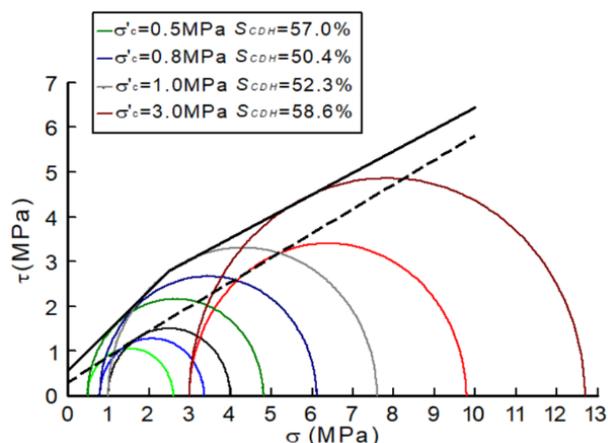


図-5 モールの応力円と破壊包絡線

400m程度の深海底の水圧、その海底地盤表層付近の低拘束圧、そして、気体状態の二酸化炭素環境下において、砂中に二酸化炭素水化物（CDH）を生成できることが確認できた。このような環境下で生成されたCDHを含んだ砂のせん断特性を調べたところ、CDHの効果により、従来の研究で得られたせん断強度よりも高いせん断強度を発現することが確認された。これらのことから、CDHによる地盤改良も期待できることが明らかとなった。

今後の予定

地盤内が、土粒子とCDHと水という状態も考えられる。そのような状態でもCDHは保持され、せん断強度も保持できるかを調査しておく必要がある。CDHとしてCO<sub>2</sub>を貯留する適用範囲を広げることを考えると、液体CO<sub>2</sub>を圧入することによるCDHの生成についても検討しておく必要がある。今後は、これらについても検討していきたいと考えている。

#### 謝辞

試験の実施にあたり、元生優作氏（山口大学大学院創成科学研究科）、津田亘耀氏（山口大学工学部）にご協力いただいた。ここに記して感謝の意を表します。