

災害の低減のための地盤工学に基づく カーボンリサイクル

吉本 憲正¹

¹山口大学 大学院創成科学研究科 工学系学域 社会建設工学分野。

毎年のように豪雨による災害が発生している。災害の原因となる豪雨は、地球温暖化により発生頻度が増加しているものと考えられ、二酸化炭素など温暖化係数の高い物質の発生量が増加していることが原因と考えられている。したがって、豪雨による災害を減少させるには、二酸化炭素を削減することが有効と考えられる。

二酸化炭素を削減する方法として、二酸化炭素の地中貯留が提案されている。本発表では、二酸化炭素を固体であるハイドレートとして、地盤の間隙に閉じ込める技術及び地盤改良としての利用について紹介する。

キーワード：二酸化炭素、ハイドレート、せん断特性、低拘束圧

1. はじめに

近年、毎年のように豪雨による大規模な災害が発生している。図-1¹⁾は、1時間降水量50mm以上の年間発生回数及び土砂災害発生件数の推移を示している。1982年からの10年間で2013年からの10年間で比較すると、約30年間で大雨は約1.3倍、土砂災害は約1.6倍の発生件数を示しており、顕著に増加していることが確認される。そして、このことから、土砂災害が大雨に起因していると考えられる。図-2²⁾は、世界の平均気温について、1850年を基準にその変化量の推移を示している。黒の実線が観測記録を示しており、1930年頃までは、一時的な温度上昇は見られるものの、概ね変化なく推移している。しかし、その後は、増加傾向を示し、2020年には、約1.2℃の増加を示しており、温暖化していることが確認できる。気温が上昇していることと関連して、空気中の水蒸気量の変化を図-3³⁾に示す。図より、空気中の水蒸気量も増加していることが確認できる。これは、気温が上昇することにより、海水の蒸発などが顕著になったことと関連していると考えられる。また、空気中に水蒸気量が増加すると降雨も必然的に増加すると考えられ、図-1に示したような大雨やそれに起因する土砂災害の増加に繋がっていると考えられる。気温が上昇している要因の一つと考えられている二酸化炭素累積排出量に関する結果を図-4⁴⁾に示す。この図は、1850年からの二酸化炭素累積排出量と気温上昇量の関係である。図中の黒実線部分が観測記録で種々の色の実線は予測結果である。観測記録から明らかなように、二酸化炭素累積排出量が増加するに

つれ、気温も上昇していることが確認できる。二酸化炭素が地球温暖化に影響していると考えられるため、災害の発生も二酸化炭素の排出が原因の一つと考えることができる。つまり、二酸化炭素の削減が災害対策の一つの方法になると考えることができる。

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、CO₂）を削減することが必要である。著者は、CO₂が図-5に示す、赤色曲線左上側の、低温高压の環境下で水と化学反応し、CO₂ハイドレート（以下、CDH）を形成することに着目し、CDHを海底地盤内に生成させることで、CO₂の削減に寄与するだけ

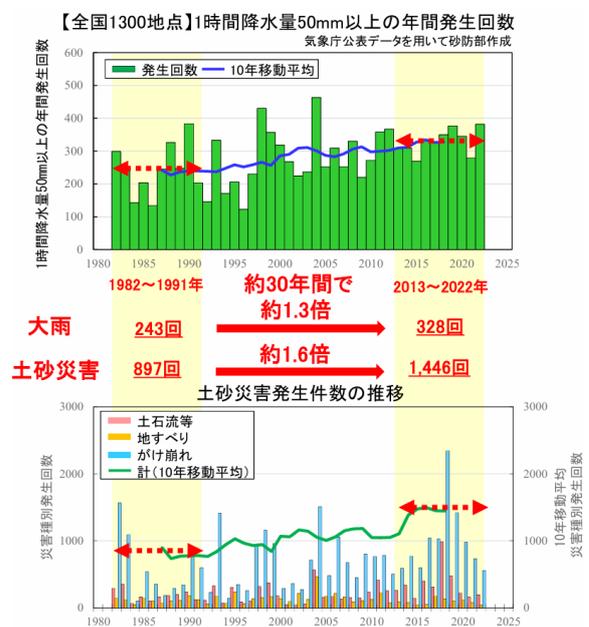


図-1 豪雨及び土砂災害の発生件数の推移¹⁾

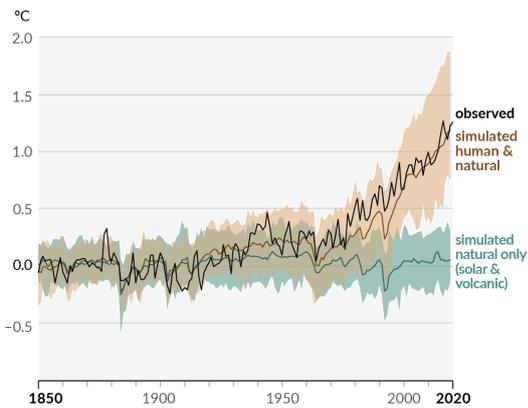


図-2 1850年基準の世界平均気温の変化量の推移²⁾

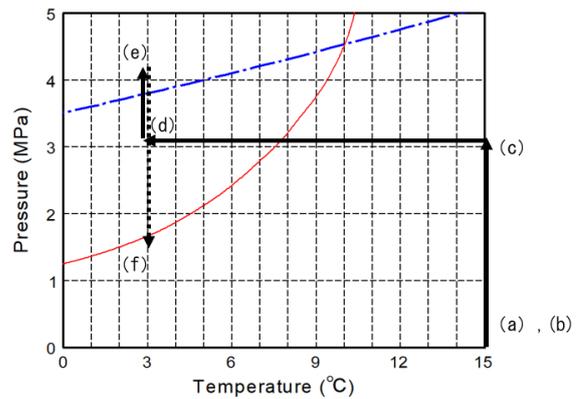
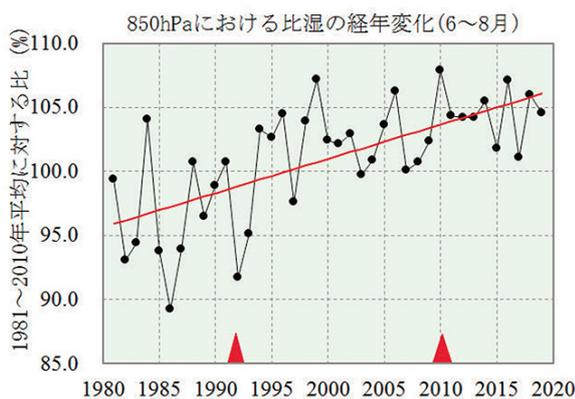


図-5 CDH安定領域図と供試体内の温度-圧力履歴

空気中の水蒸気量の変化 (夏季)



日本域の上空約1,500メートルの6～8月で平均した比湿(空気1kgあたりに含まれる水蒸気量)の変化。2つの赤三角の間では測器の変更の影響により、相対的にやや値が高めになっている可能性があるが、大気中の水蒸気量も長期的に増加している。

図-3 空気中の水蒸気量の変化³⁾

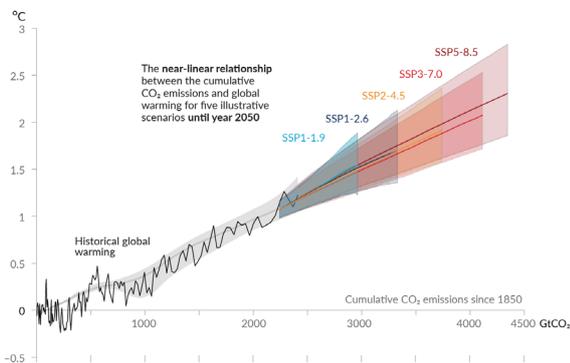
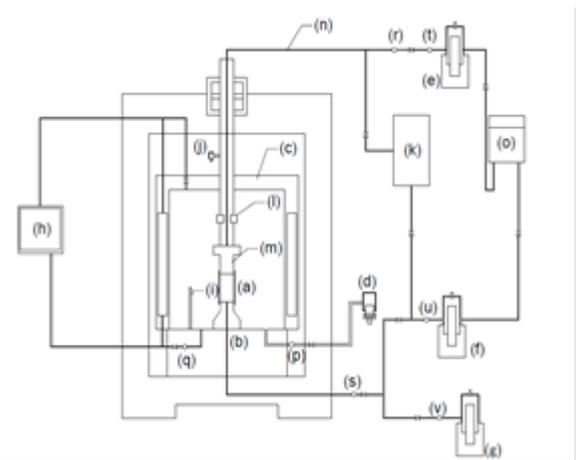


図-4 二酸化炭素累積排出量と気温上昇量の関係²⁾

でなく、地盤改良にも利用できることを考え、CDHを含んだ砂のせん断強度変形特性に関する研究を行ってきた。既往の研究⁹⁾では、水深1,000m以深(10MPa以上の)深海底地盤にCDHを生成させることを想定した圧力条件で実験を行った。しかし、図-5に示すように、10°C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



- | | |
|--|-----------------------------|
| (a) Specimen 30(diameter)×60mm(height) | (l) Load cell |
| (b) Pedestal | (m) Top cap |
| (c) Cell | (n) Pipe line |
| (d) Confining pressure amplifier | (o) Water tank |
| (e) Upper syringe pump | (p) Confining pressure gage |
| (f) Lower syringe pump ① | (q) Confining pressure gage |
| (g) Lower syringe pump ② | (r) Pore pressure gage |
| (h) Confining fluid thermal control tank | (s) Pore pressure gage |
| (i) Thermometer | (t) Pump pressure gage |
| (j) Displacement transducer | (u) Pump pressure gage |
| (k) CO ₂ gas cylinder | (v) Pump pressure gage |

図-6 ガスハイドレート用
恒温高圧三軸圧縮試験装置概略図

一面でも有効であると考えられる。また、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を生成させることを考える必要がある。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-5の相平衡曲線から、この背圧ではCO₂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。

表-1 豊浦砂の物性

ρ_s g/cm ³	d_{max} mm	d_{50} mm	e_{max}	e_{min}	U_c
2.665	0.425	0.21	0.973	0.613	1.48

表-2 試験条件

Carbon dioxide hydrate	Back pressure B.P.(MPa)	Temperature T(°C)	Effective Confining pressure σ'_c (MPa)	Saturation of hydrate $S_{CDH}(\%)$	Initial density $\rho_{ini}(\text{g/cm}^3)$	Porosity $n(\%)$
Gas Saturation	4	3	0.5	57.0	1.403	47.0
			0.8	50.7	1.414	46.6
			1	52.3	1.380	47.8
			3	58.6	1.407	46.8
			0.5	26.7	1.391	47.4
	10	20	0.8	28.7	1.389	47.6
			1	37.2	1.386	47.6
			3	33.3	1.411	46.7
			0.5	0	1.391	47.4
			0.8	0	1.400	47.1
Water Saturation	10	5	1	23.3	1.395	47.3
			3	27.8	1.412	46.6
			1	0	1.399	47.1

2. 試験方法

(1) 試験装置

ガスハイドレート用恒温高圧三軸圧縮試験装置の概略図を図-6に示す。図中の (e) , (f) , (g) に示すように、供試体内の間隙圧を高圧に保つためのシリンジポンプが供試体の上部と下部に接続されている。このシリンジポンプでは、シリンダー内の体積変化を計測することが可能であり、シリンダーの移動量から供試体の体積変化や、せん断試験後のガス量の計測を行うこともできる。また、図中の (h) に示す、冷媒循環装置が試験装置の外部に設置され、セル内の温度を一定に保つことが可能である。以上の圧力と温度の制御により、低温高圧の海底地盤環境の再現と、試験装置でのCDHの生成を可能にしている。本試験装置の詳細に関しては、既往の研究⁹⁾を参照されたい。

(2) 供試体作製方法

図-6の (a) に示す供試体について、試料には豊浦砂を使用した。表-1に、実験に使用した豊浦砂の物性を示す。供試体の作製は、既往の研究にならった方法を適用した。目標となるCO₂ハイドレート飽和率 S_{CDH} を設定し、それに必要な初期含水比 $w_{initial}$ (%) を算出し、所定の水を用意する。その初期含水比相当の水を間隙率45%となるように計量した砂と混ぜ合わせ、それを供試体作製用モールドに3層に分けて、各層40回ずつタンパーで突き固め、成型した。成型後、供試体を自立させるため、突き固めた試料をモールドごと冷凍庫内で冷凍させる。凍

結後、供試体を脱型し、ペDESTALとトップキャップを取付け、メンブレンを装着し、実験用供試体とした。

(3) 試験手順

実験過程における供試体の間隙圧-温度履歴を図-5に、試験条件を表-2に示す。実験手順を以下に示す。最初に、セル内に凍結供試体を設置する (図-5, (a))。続いて、セル内を15°Cの冷媒 (不凍液) で満たす (図-5, (b))。間隙圧を3MPaまで徐々に増圧させながら (図-5, (c))、並行してCO₂ガスを圧入し、供試体間隙内をCO₂ガスで充填する。その後、セル内の温度をCDH生成環境である5°Cに設定し (図-5, (d))、CDHを生成する。その後、背圧と拘束圧の条件を設定し (図-5, (e))、せん断試験を軸ひずみ速度0.1%/minで軸ひずみ15%まで行った。せん断試験後に、温度一定の環境下で、圧力を減圧し、CDHの安定領域外の温度圧力を保持し (図-5, (f))、CDHをCO₂ガスに分解し、CO₂ガス量を計測した。得られたガス量から、CDH飽和率を計算した。

3. 試験結果

CDH飽和率別の軸差応力と軸ひずみの関係を図-7に示す。各有効拘束圧は、(a) 0.5MPa, (b) 0.8MPa, (c) 1.0MPa, (d) 3.0MPaを示している。本研究のいずれの実験においても、最大軸差応力の明確なピークが現れなかったため、軸ひずみ15%時の軸差応力を最大軸差

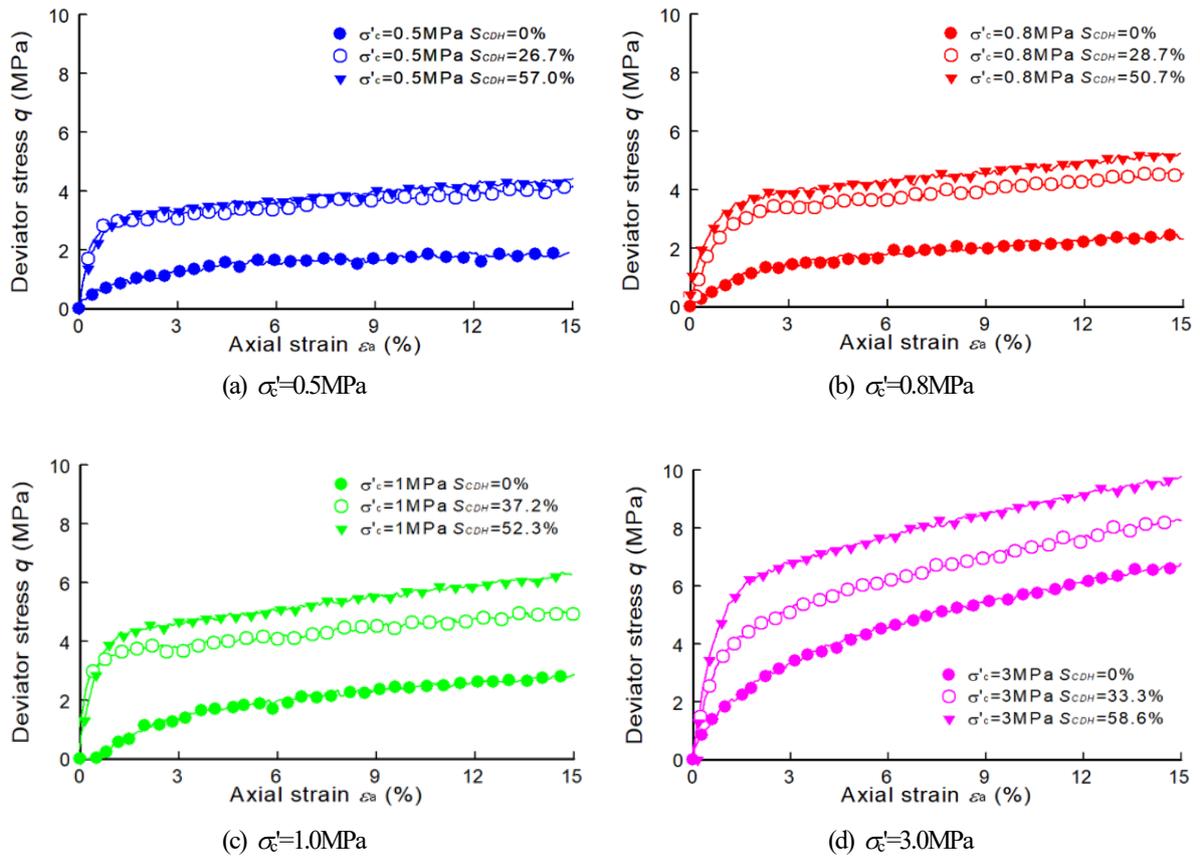


図-7 軸差応力と軸ひずみの関係

応力と定義した。図より、CDH飽和率の増加に伴う、初期剛性と、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、その後、CDHが土粒子から剥がれ、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。しかし、有効拘束圧0.5MPaでは、飽和率による違いはあまり認められず、飽和率の増加に伴う初期剛性と、最大軸差応力の増加は確認されなかった。この原因として、供試体内でCDHが均一に生成されず、ある部分に集中的に生成され、その箇所が目標のCDH飽和率を上回り、出力された値に影響したと推察される。

図-8に、最大軸差応力とCDH飽和率の関係を示す。図より、いずれの拘束圧の結果においても、CDH飽和率が大きくなるにつれ最大軸差応力が大きくなっていることが確認される。

図-9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と、CDH飽和率の関係を示す。図より、図-8と同様にCDH飽和率の増加に伴う最大軸差応力の増加が確認できる。また、有効拘束圧が低いほど、正規化した最大軸差応力とCDH飽和率の関係の勾配が大きく

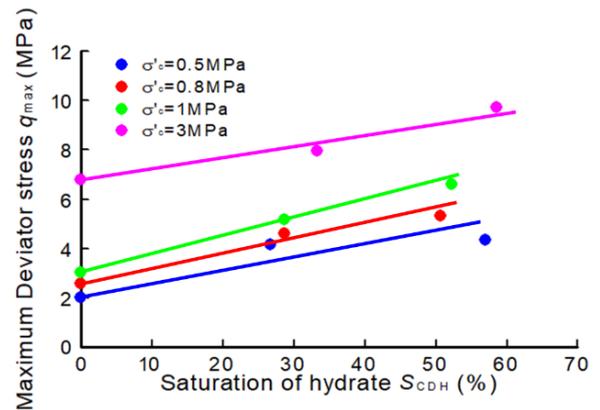


図-8 最大軸差応力と CDH 飽和率の関係

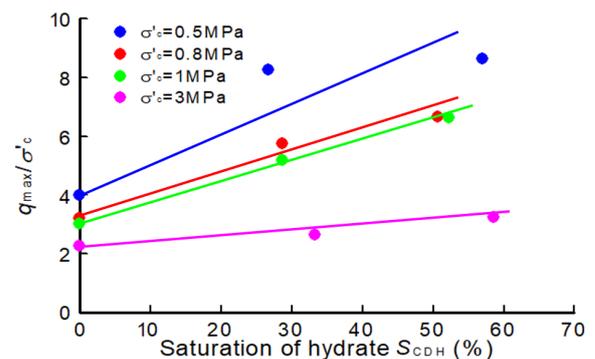
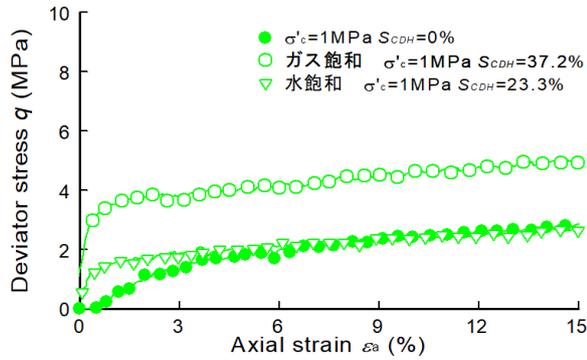
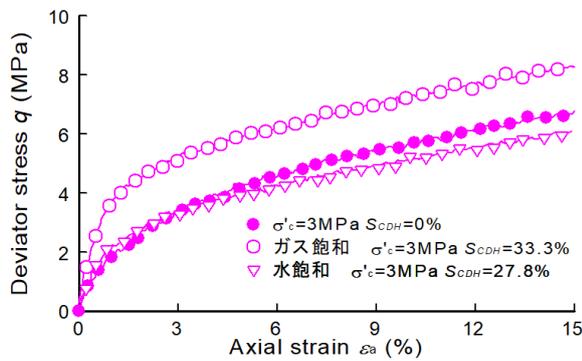


図-9 正規化した最大軸差応力と CDH 飽和率の関係



(a) $\sigma'_c=1.0\text{MPa}$



(b) $\sigma'_c=3.0\text{MPa}$

図-10 軸差応力と軸ひずみの関係

なっており、有効拘束圧が低い程、CDHの影響を顕著に受けることが確認できる。これは、拘束圧が大きいほど、土粒子間を伝達する力が大きく、土粒子間に存在するCDHが損傷を受けやすく、CDHの固着が剥がれ落ちることなどが原因と考えられる。

既往研究⁹⁾の水飽和条件と、本研究のガス飽和条件の、軸差応力と軸ひずみの関係を図-10に示す。結果の比較には、同じ有効拘束圧条件であり、飽和率が最も近い条件のものを用いた。(a)は、有効拘束圧1MPaでCDH飽和率が約25%の結果を、(b)は、有効拘束圧3MPaでCDH飽和率が約30%の結果を示している。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-11に、ホスト砂の最大軸差応力に対するCDH含有砂の最大軸差応力の比とCDH飽和率の関係を示す。また、比較のために、本研究と同様の供試体条件で三軸圧縮試験を行ったメタンハイドレート（以下、MH）含有

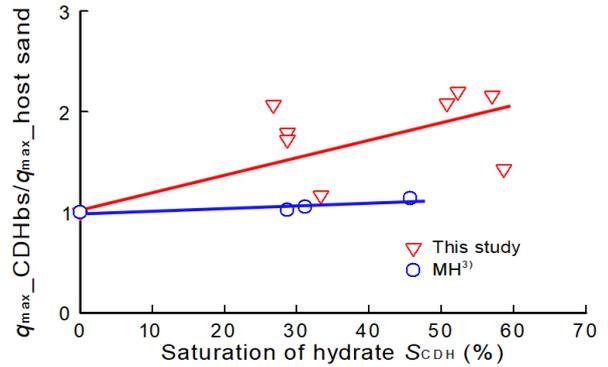
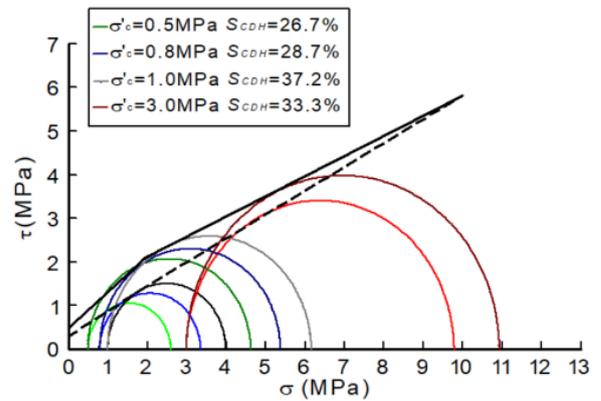
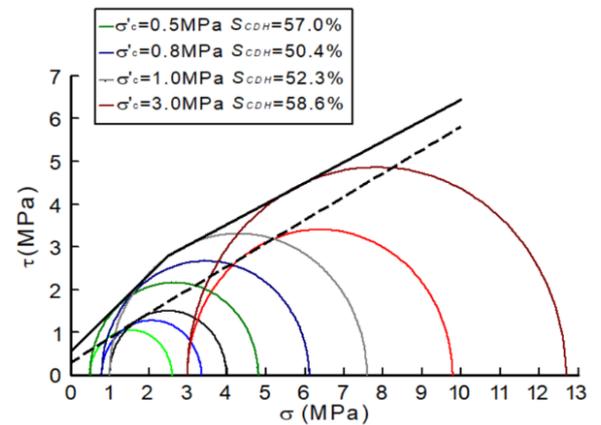


図-11 砂のみの最大軸差応力に対するCDH含有砂の最大軸差応力の比とCDH飽和率の関係



(a) $S_{CDH}=30\%$



(d) $S_{CDH}=50\%$

図-12 モールの応力円と破壊包絡線

砂の結果⁹⁾を示す。図より、本研究で得られたCDH含有砂の結果は、MH含有砂の結果よりも、最大軸差応力の増加する傾きが大きいことが確認できた。これは、MHの存在環境と現時点で考えているCDHの存在環境が異なること、MHとCDHそのものの強度が異なることなどが原因として考えられる。

図-12に、モールの応力円と破壊包絡線を示す。CDH飽和率は、(a)が30%目標、(b)が50%目標の結果で

ある。このモールの応力円は、最大軸差応力の値を用いて評価を行っている。なお、有効拘束圧3MPaの結果は、**図-9**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-12** (a), (b)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。

4. まとめ

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合物（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。

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。

参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局 砂防部: 土砂災害の現況について, https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/items/post-163/01/shiryu4.pdf, 参照 2024.11.04.
- 2) IPCC: Climate Change 2021 – The Physical Science Basis, SPM - Summary for Policymakers, p.1-31, 2023.
- 3) 気象庁: 気象業務はいま 2020 守ります人と自然とこの地球, pp.8-9, 2020.
- 4) 池川洋二郎, 宮川公雄, 鈴木浩一, 窪田健二: CO₂水合物の生成熱を用いたメタン水合物増進法における地層温度を考慮した CO₂注入法に関する室内検証, 土木学会論文集 G (環境), Vol. 67, No. 4, pp.213-222, 2011.
- 5) 米田純, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正, 海老沼孝郎: 深海底を模擬したガス水合物堆積砂の三軸圧縮特性, 地盤と建設, Vol. 25, No. 1, pp.113-122, 2007.
- 6) 米田純, 兵動正幸, 中田幸男, 吉本憲正: 深海底におけるメタン水合物堆積土の三軸せん断特性, 土木学会論文集 C, Vol. 66, No. 4, pp.742-756, 2010.