表層型メタンハイドレートの有無が微生物固化処理土の強度特性に与える影響に関する検討

富山県立大学　学生会員　○木谷　龍平
同上　　正 会 員　　畠　　俊郎

1. はじめに

近年，石油や石炭に代わる次世代のエネルギーとして日本近海に存在しているメタンハイドレート(以下 MH)が注目されている．MH からのメタンガス生産における課題として,砂層型では出砂の発生,表層型では表層地盤の崩壊などが挙げられる.表層型 MH からメタンガス生産時に課題とされる表層地盤の崩壊を防止・抑制する技術として原位置由来の微生物を用いた地盤固化技術に注目した．先行研究より,日本海周辺海域の表層型 MH 胚胎層由来の微生物による炭酸カルシウムの結晶化に基づく強度増進効果が明らかとなっている．本研究では,周辺海域で採取した MH を含まない底泥由来の微生物にも研究対象を広げ,原位置における MH の有無が微生物固化による強度増進効果に与える影響を室内試験で検討した結果を報告する．

2. 微生物代謝による地盤固化のメカニズム

本研究では，珪砂 8 号を対象とし，原位置微生物由来の酵素を用いて尿素を加水分解させ，その際に発生する炭酸ガスを利用して珪砂 8 号の間隙中に炭酸カルシウムを析出させることによる強度増加を評価することを目的としている．微生物の代謝活性による化学反応式を以下の**式**(1)，(2)に示す.

＜尿素分解＞　$CO(NH_2)_2+2H_2O \rightarrow$(ウレアーゼ)$\rightarrow 2NH_4^+ + CO_3^{2-}$　(1)

＜炭酸カルシウム析出＞　$Ca^{2+}+CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3$　(2)

3. 試験方法

図-1 に示す手順に従って，微生物固化処理が珪砂 8 号の強度に与える影響検証を目的とした土の三軸圧縮試験(以下 CD 試験)と,均質な固化効果を得ることを目的とした負圧通水処理による固化供試体による CD 試験を実施した．なお，本試験では採取時に MH が確認されたサンプルを MH 有と呼ぶこととした.

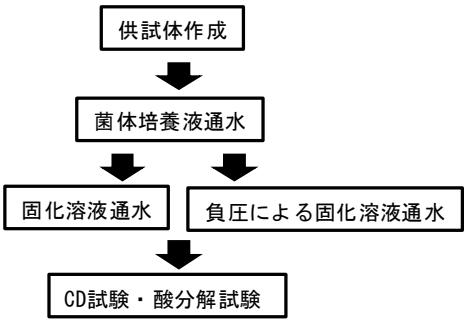

図-1 試験フロー

表-1 試験ケース

ケース1	未処理
ケース2	MH有5回通水
ケース3	MH有5回通水(負圧)
ケース4	MH無5回通水
ケース5	MH無5回通水(負圧)

表-2 供試体の作製条件

砂種	珪砂8号
砂量	259g
固化溶液通水回数	5回
1回あたりの通水量(間隙体積分)	100mL
目標Dr	50%

表-3 サンプリング地点

	GPS座標	水深(m)
日本海側(MH有)	37° 21′ 9.55″ N 137° 57′ 9.75″ E	567
日本海側(MH無)	37° 20′ 15.3″ N 137° 57′ 10.4″ E	607

表-4 尿素培養液(0.15mol/L)組成

YP21-CM(酵母エキス)	1.32g
尿素	1.8018g
純水	200mL

3-1. CD 試験(通常)

表-1 に示す通り，微生物処理を行わずにタンピング法により作成した供試体(未処理)，集積培養菌体(MH 有・無)を用いて作成した固化供試体を使用した．供試体の作製条件を**表-2** に示す．珪砂 8 号 259g をプラスチックモールド内に 3 層に分けて 1 層につき 15 回ガラス棒で突き固める方法を用いて，Dr=50%の供試体を作成した．微生物は，2017 年 5 月に富山湾の**表-3** に示す地点(二点間の距離約 1.24km)でサンプリングした底泥を用いて MH の有無に着目して集積培養を行った菌体を用いることとした.サンプリングした富山湾底泥 0.3g を**表-4** に示す組成の酵母エキス入り 0.15mol/L 濃度尿素培養液と混合し,1 カ月 20℃の恒温室で静置培養を行った．その後，再度**表-4** に示した組成の尿素培養液の中に培養済溶液 1mL 加え，さらに 1 週間培養して集積培養液を作成した.なお,試験では本培養液を 5 倍希釈した集積培養液(MH 有・無)を 100mL 通水した.その後，0.3mol/L 濃度の尿素及び塩化カルシウムを含む固化溶液 100mL を供試体上部から 12-24 時間かけて通水した．これを 72h/回で 5 回通水した.

3-2. CD 試験(負圧による均質な固化供試体作製)

先行研究より，3-1 の方法で作成した供試体は固化溶液の浸透に伴い微生物の代謝活性によりカルシウムイオンが消費され上部で多くの炭酸カルシウムが析出し，不均質な供試体となることが懸念されている．本試験では，均質な固化効果を得る通水方法として固化溶液を短時間に浸透させる方法について検討することとした．具体的には，負圧-0.005MPa を用いて固化溶液 100mL を供試体上部から約 4 分で通水させ均質な固化効果を期待する方法の有効性について検討することとした．なお，通水間隔は 72h/回とし，計 5 回行った．

3-3. 酸分解試験

3-1, 3-2 で作成した供試体を上部・中部・下部の三等分に区分した．その後，105℃の乾燥炉で乾燥させ 0.5mol/L 塩酸を用いて炭酸カルシウムを分解し乾燥させた後の質量差をもとに析出した炭酸カルシウム量を算出し，固化の均質性について検討することとした．

4 実験考察と結果

珪砂 8 号の強度増進効果検証を目的とし，集積培養菌体(MH 有・無)を対象に行った CD 試験（有効拘束圧 150kPa）の結果を**図-2** に示し，考察する．MH 有と MH 無のピーク強度は未処理と比べ約 50kPa ほど高い値となった．これは炭酸カルシウムの析出による強度増進効果である．間隙内で炭酸カルシウムが析出することにより土粒子同士を結合させ，強度増進に繋がったと考えられる．異なる浸透方法で作成した供試体のピーク強度を比較すると，MH の有無に関わらず均質化を期待して作成した 3-2 の方法による供試体のピーク強度のほうが高い結果となった．これは炭酸カルシウム析出分布の偏りが緩和されたことによって，より高い強度増進に繋がったと考えられる．未処理と MH 有・無の強度定数 c，ϕの比較を行った結果を**表-5** に示す．微生物固化処理後はいずれの供試体も粘着力 c と内部摩擦角 ϕの増加が示された．未処理と MH 有・無の結果から，MH の有無に関わらず微生物固化は土の強度増加に寄与することが明らかとなった．次に 3-1 と 3-2 の方法で作成した供試体の強度定数 c，ϕの比較を行った．均質化を期待して固化した供試体は，これまでの方法と比較すると，内部摩擦角 ϕは若干減少し，粘着力 c は増加する結果となった．**表-6** に各供試体を酸分解した結果を示す．3-1 の方法で作成した供試体は MH の有無に関わらず上部に約 55%析出する結果となった．これに対し均質化を期待した 3-2 の方法で作成した供試体は各部に 30-37%とほぼ均等に析出する結果となった．負圧を用いて作成した供試体は均質に炭酸カルシウムが析出した．これが粘着力 c，ピーク強度の増加に繋がったと考えられる．

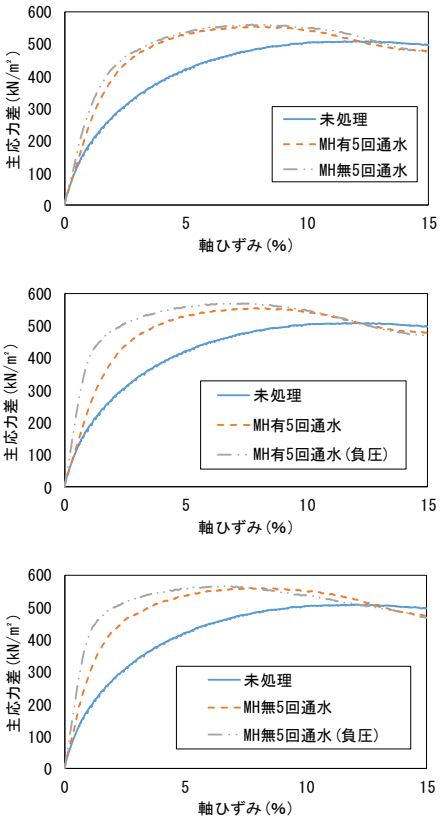

図-2 CD 試験(有効拘束圧 150kPa)

表-5 CD 試験結果の比較

試験ケース	粘着力 c	内部摩擦角 ϕ
未処理	0.0	38.5
MH有5回通水	6.6	39.2
MH有5回通水(負圧)	16.8	38.7
MH無5回通水	8.7	39.4
MH無5回通水(負圧)	13.1	39.0

表-6 酸分解試験結果の比較

試験ケース		$CaCO_3$析出量(g)	砂重量に対する $CaCO_3$析出率(%)	割合(%)
MH有	上部	7.9	8.7	55
	中部	4.1	4.8	30
	下部	2.1	2.3	15
MH有(負圧)	上部	4.1	4.9	34
	中部	3.5	4.5	31
	下部	3.9	5.1	35
MH無	上部	7.7	8.8	54
	中部	4.1	4.6	29
	下部	2.5	2.8	17
MH無(負圧)	上部	4.4	5.4	37
	中部	3.9	4.9	33
	下部	3.6	4.5	30

5 まとめ

今回の試験結果から，日本海側の表層型 MH の有無にかかわらず，原位置由来の微生物による強度増進効果が明らかとなった．富山湾周辺海域において微生物固化処理技術は普遍的に利用できると考えられる．また，固化成分の浸透時間を短縮させることで炭酸カルシウムを供試体内に均質に析出させることが可能になるとともに，粘着力 c の増加が期待できることが明らかとなった．今後は，均質固化の場合に若干低下する炭酸カルシウム析出率の改善方法についての検討が必要であると考えられる．