改良型炭酸カルシウム法を用いた地盤改良技術の提案

富山県立大学　学生会員　○村田湧水
同上　正会員　畠　俊郎

１．研究背景・目的

緩い砂などによって構成される地盤を改良する方法として，セメントやセメント系の固化材による処理が用いられている．しかし，これらの固化材の使用には二酸化炭素排出などの多くの環境負荷が伴う．そこで，本研究では従来の工法と比較して二酸化炭素排出量が少ないと期待されている微生物固化技術の効率化を目指し，短期間で高強度となる効果を期待した有機系の添加剤（以下，天然素材）について着目し，これらを組み合わせた新しい固化工法の有効性ついて検討することとした．なお，本検体では反応触媒である酵素を微生物および市販の酵素製剤から得ることとした．

２．微生物の代謝，酵素活性機能を用いた固化

本研究では，微生物の代謝機能もしくはナタマメ由来の酵素（以下，ウレアーゼ）を用いて尿素の加水分解発生により発生する炭酸イオンから生成される炭酸カルシウムを砂の間隙中に析出させることで固化するMICP(Microbially Induced Carbonate Precipitation)およびEICP(Enzyme Induced Carbonate Precipitation)工法に着目した．この，炭酸カルシウムの析出メカニズムを下記の**式(1)**，**(2)**に示す．また，**式(2)**における炭酸カルシウム析出に加え，短期間での強度増進効果を期待した天然素材の併用を試みた．

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

$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3\downarrow$　(2)

３．試験方法

微生物(*Bacillus pasteurii*)またはナタマメ由来のウレアーゼと天然素材を使用し，計 8 ケースの供試体を作製した．各ケースの組成を**表-1** に示す．ケース 1 は MICP 工法，ケース 2 が MICP 工法に天然素材を併用した提案工法である．また，ケース 3, 5, 7 は EICP 工法，ケース 4, 6, 8 は EICP 工法に天然素材を併用した提案工法により作製した供試体である．供試体には，溶液 A, 溶液 B を各 30 mL で計 60 mL 作成し，5 分程度撹拌させた後，添加した豊浦砂 420 g を用いた．MICP 工法では，溶液 B で用いた純水の代わりに菌体培養液を 30 mL を使用した．添加した後，D_r=80 %程度となるよう突き固めで φ=35 mm, H=88 mm のモールドを使用し，供試体を作製した．なお，**表-1** に示した組成および豊浦砂の量は供試体 3 本あたりの使用量である．次に試験の流れを**図-1** に示す． 作製した供試体を 105℃の乾燥炉で 24 時間加熱した後，土の一軸圧縮試験 (JIS A 1216: 2009) を行い試験終了後の供試体の一部を取り 105℃で 24 時間乾燥させた後，電子顕微鏡 (SEM) を用いた砂粒子表面の観察を行った．

表-1 試験ケース

試験ケース		1	2	3	4	5	6	7	8
使用工法		MICP		EICP					
溶液A	$CaCl_2$ (mol/L)	0.67				1.00		1.36	
	$CO(NH_2)_2$ (mol/L)	1.00				1.67		2.03	
溶液B	天然素材 (g/L)		4.0		4.0		4.0		4.0
	ウレアーゼ (g/L)	3.0							
純水もしくは菌体培養液(mL)		60							

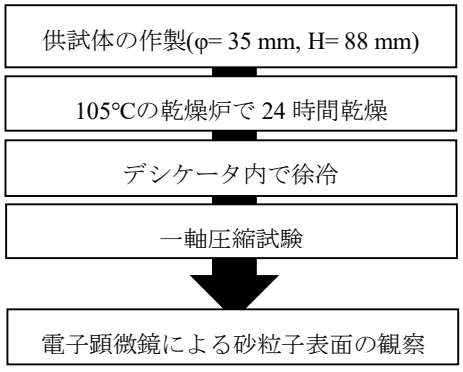


図-1 試験フロー

４．試験結果

(1)土の一軸圧縮試験

MICP・EICP 工法とこれらの工法に天然素材を用いて固化した供試体の一軸圧縮試験結果を**図-2** に示す．なお，**図-2** の結果は各ケースで 3 本作製した供試体の一軸圧縮強さの平均値と標準誤差をとったものである．ケース 1 と 2 では 590 %，ケース 3 と 4 では 110 %，ケース 5 と 6 では 25 %，ケース 7 と 8 では 35 %程度の強度増進効果が確認された．また，高濃度の $CaCl_2$ と $CO(NH_2)_2$ 溶液を添加したケースの一軸圧縮強さは各ケースの中で最も増加したが，増加率では低濃度の試験ケースおよび菌体を使用したケースが高い増加率を示した．ケース 2 はケース 4 と比較すると一軸圧縮強さは大きいが強度増進効果は高いことから，天然素材が及ぼす強度への影響は EICP 工法に比べ，MICP 工法に併用した際に高くなることが分かる．これらのことから提案工法は従来の EICP 工法に比べ強度増進効果が期待できる．**図-3** は EICP 工法で作製した各ケースの一軸圧縮試験結果と砂重量に対する炭酸カルシウムの析出率の関係を示したものである．なお，炭酸カルシウムの析出率は添加した $CaCl_2$ から試算された計算上の最大値を使用した．**図-3** より炭酸カルシウムの析出率が高くなるにつれて，一軸圧縮強さが増加することが明らかとなった．また，炭酸カルシウムの析出率より必要となる強度が算出可能であると考えられる．

(2)SEM による砂粒子表面撮影結果

写真-1 はケース 3 およびケース 4 の砂粒子表面撮影結果である．ケース 3 は EICP 工法，ケース 4 は提案工法を用いたケースである．EICP 工法によって固化処理を行ったケース 3 の表面には 3.3~16.5 μm の炭酸カルシウムの結晶が析出していることが確認された．一方で，EICP 工法に天然素材を併用したケース 4 の砂粒子表面には膜のようなものが生成されていることが確認された．また，EICP 工法で作製した供試体の砂粒子表面で確認された炭酸カルシウムの結晶は提案工法では確認されなかった．これらのことから，一軸圧縮強さが増加した要因としては天然素材によって生成された膜が炭酸カルシウムの結晶の上に覆いかぶさることで間隙を埋めることで砂粒子同士の接合箇所が増えたためであると考えられる．

５．まとめ

本試験結果から MICP・EICP 工法に天然素材を併用したケース 2, 4, 6, 8 で強度増進が確認された．MICP 工法で作製したケースは EICP 工法で作製したケースに比べ一軸圧縮強さは小さいが，強度増進率は高いことが明らかとなった．また，SEM による砂粒子表面の撮影結果より，EICP 工法と天然素材を併用したケースでは砂粒子表面に析出した炭酸カルシウム上に膜が形成されたことによって間隙をより埋めることで一軸圧縮強さが増加したと考えられる．今後の展望としては養生温度が及ぼす一軸圧縮強さへの影響について明らかにする必要がある．

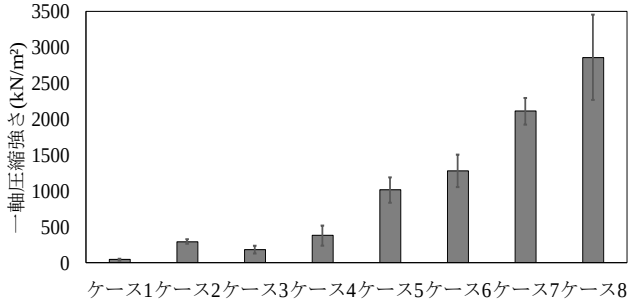


図-2 一軸圧縮試験結果

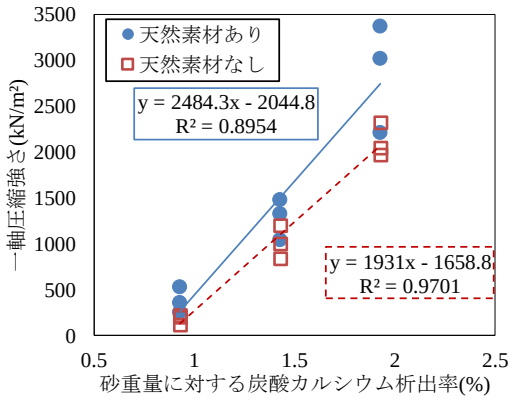
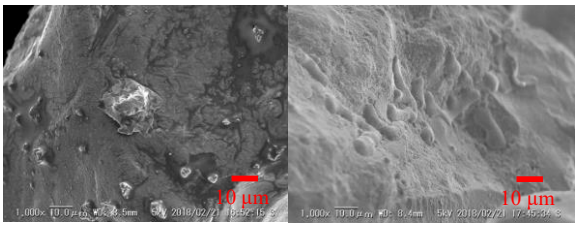


図-3 一軸圧縮強さと $CaCO_3$ 析出量



（ケース 3）　　（ケース 4）

写真-1 SEM 撮影結果(1000 倍)