

## 第 III 部門

## 生石灰を用いた軟弱粘土地盤改良における炭素固定量測定法の比較

京都大学大学院 学生員 ○和久七海人  
 京都大学大学院 正会員 加藤 智大  
 京都大学大学院 正会員 高井 敦史  
 京都大学大学院 フェロー会員 勝見 武

## 1. はじめに

建設工事や災害に伴って高含水比かつ細粒な土が発生することは珍しくなく、これらの軟弱土を有姿で有効利用することは難しい。軟弱土に生石灰を混合することが強度を改善する有効な手段である一方、1tの生石灰を製造する際に約748 kgもの二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)が排出されることがカーボンニュートラルの観点から課題になっている。しかし、生石灰はCO<sub>2</sub>と反応することで難溶性の炭酸カルシウム(CaCO<sub>3</sub>)を生成するため、土質改良により湿潤した土と混合された後にはCaCO<sub>3</sub>が生成し、CO<sub>2</sub>を固定している可能性がある。既往の研究<sup>1)</sup>では、CaOを含む廃棄物とCO<sub>2</sub>を反応させ生じたCaCO<sub>3</sub>の質量を計測しているが、その測定方法は研究によって異なっており、CO<sub>2</sub>の固定量を定量する方法は標準化されていない。本研究では模擬軟弱土にCaOを混合して所定の期間養生した後に、塩酸ガス圧法、TOC計を用いた測定、TG-DTA、の3種類の 방법으로炭素固定量や測定精度を評価した。

## 2. 試験方法

**2.1 使用材料** 地盤材料として笠岡粘土と真砂土を用いた。表1に笠岡粘土と真砂土の基礎物性を示す。表1中の $\rho_s$ は土粒子密度、 $w_n$ は自然含水比、 $w_L$ は液性限界、 $w_P$ は塑性限界を表す。また、CaO試薬は富士フィルム和光製のものを用いた。

**2.2 模擬軟弱土と改良土の作製** 笠岡粘土と真砂土を1:1.7の割合で混合し、さらに蒸留水を加えて含水比35%の模擬軟弱土を作製した。これに乾燥重量の6%分の生石灰を混合し、改良土を作製した。

**2.3 供試体の作製と養生** 2.2節で作製した改良土を直方体のプラスチックケース(約100 cm<sup>3</sup>)に充填した。表2に示す供試体の諸元の通り、乾燥密度と養生期間の違いに着目した。表2中の上4つは乾燥密度が高く、下4つは乾燥密度が低い条件である。また、各供試体で上下2カ所からサンプリングした。サンプリング位置は養生終了後の供試体を上下に分離し、それぞれに対してCO<sub>2</sub>固定量を評価した。また、供試体作製直後(0h養生)、供試体作製後1.5h、石灰の添加なしの3種類についても測定した。

**2.4 CO<sub>2</sub>固定量の評価方法**

塩酸ガス圧法はCaCO<sub>3</sub>とHClが反応することで発生するCO<sub>2</sub>の圧力を測定し、圧力を炭素量に変換することで炭素固定量を推定する方法である。この方法では一度に約5gの試料を測定できる。TOC計(全有機体炭素計: Total Organic Carbon)を用いた測定は200°Cまで加熱したTOC計の中でCaCO<sub>3</sub>を含んだ試料にリン酸を加えて酸性にし、CaCO<sub>3</sub>からCO<sub>2</sub>を弱酸遊離させその量を測定する方法である。TOC計では数百mgの試料を測定できる。ただし、発生するCO<sub>2</sub>が少ないと十分に定量できないという特徴がある。TG-DTA(熱重量示差熱分析装置:

Thermogravimeter-Differential Thermal Analyzer)は熱重量測定(TG)と示差熱分析(DTA)を同時に行う装置である。熱重量分析では、試料を一定の温度上昇速度で加熱しながらその重量変化を連続的に測定する。示差熱分析では、基準物

表1 使用材料の基礎物性

	笠岡粘土	真砂土
粒度 (%)		
礫分	0	42.8
砂分	1.16	51.2
細粒分	98.8	6.0
$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.66	2.59
$w_n$ (%)	5.79	1.32
$w_L$ (%)	53.5	NP
$w_P$ (%)	31.0	NP

表2 供試体の諸元

養生日数 (日)	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )
1	4.47	1.70
3	5.35	1.59
7	4.07	1.57
14	4.74	1.54
1	2.19	0.848
3	2.85	0.780
7	1.48	0.771
14	1.37	0.812

質とともに試料を加熱した時の両者の温度差を電圧に変換して連続測定する。両者を同時に測定することで、試料の熱的变化を推定できる。この方法では約 10 mg の試料を測定できる。

3. 結果と考察

**3.1 塩酸ガス圧法** 塩酸ガス圧法で得られた測定結果を図 1 に示す。凡例の「top」は供試体の上半分、「bottom」は供試体の下半分の測定結果である。縦軸の「CO<sub>2</sub>固定量 (kg/t)」は生石灰 1t あたりの CO<sub>2</sub> 固定量を表す。乾燥密度の違いに着目すると低乾燥密度の供試体の方が CO<sub>2</sub> 固定量が多かった。これは低乾燥密度の方が表面積が大きく、空気に触れる面積が大きかったことが原因として考えられる。また、「top」と「bottom」を比べると「top」の方が CO<sub>2</sub> 固定量が多かった。これは供試体の下部に比べて上部の方が空気に触れやすかったからだと考えられる。およその傾向としては、経過時間が長くなるほど固定量も上昇した。

**3.2 TOC 測定** これ以降は図 1 の黒丸をつけた 3 つの供試体について結果を報告する。この 3 つは塩酸ガス圧法で固定量の最大、最小、中央値である。これらの供試体について塩酸ガス圧法の結果を表 3 に示す。また、塩酸ガス圧法と TOC 測定で複数回測定を行った時の変動係数を表 4 に示す。表 4 よりいずれの方法でも CO<sub>2</sub> 固定量の多い供試体では変動係数が小さくなった。測定する CO<sub>2</sub> が多いほど、系統誤差が小さく測定できたといえる。また、塩酸ガス圧法は TOC と比べて系統誤差が小さかった。塩酸ガス圧法は TOC に比べると 1 回の計測に用いる試料量が多いため誤差が小さくなり、変動係数も小さくなったと考えられる。

**3.3 TG-DTA** 図 2 に TG-DTA 測定を行った結果を示す。これは CO<sub>2</sub> 固定量が最も多かった供試体の測定結果である。使用した試料の質量は 12.96 mg だった。TG、DTA とともに明瞭なピークが確認されなかった。供試体の中には笠岡粘土、真砂土と生石灰の 3 種類が含まれており、土の中に含まれる CaCO<sub>3</sub> 以外の物質の熱分解が発生した可能性が考えられる。TG-DTA は計測に用いる試料量が少ないため、今回の研究対象のような複数の種類の材料を混合した改良土には適さない可能性が示唆された。

4. おわりに

本研究では一定期間静置養生した供試体に対して塩酸ガス圧法、TOC 測定、TG-DTA の 3 つの方法で CO<sub>2</sub> 固定量を測定した。石灰系改良土の炭素固定量の測定精度を鑑みると、今回対象とした 3 種類の測定方法のうち塩酸ガス圧法が計測に適している可能性が示唆された。また、高含水の軟弱土を石灰で改良した場合、供試体の乾燥密度の違いによって差異があるものの、7 日程度養生することで 100~600 kg-CO<sub>2</sub>/t 程度の炭素固定量が期待できることが明らかになった。

参考文献

- 1) 小峯秀雄, 横井享朱, 多賀春生, 斉藤泰久, 鈴木清彦. CO<sub>2</sub> 固定化素材を活用したカーボンキャプチャー都市環境創生に関する基礎研究. 土木学会論文集. 2019, Vol. 67, No. 4, pp. 16-19.

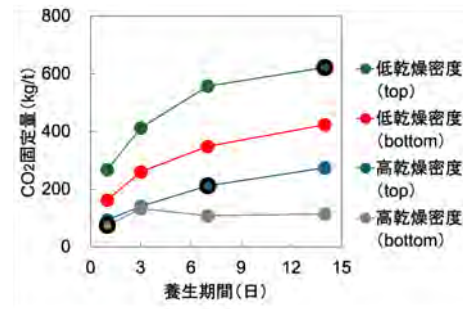


図 1 塩酸ガス圧法の測定結果

表 3 TOC 測定の測定結果

CO <sub>2</sub> 固定量	試料量(mg)	固定量(kg/t)	
最小	1	299.3	88.10
	2	299.2	71.90
	3	300.3	85.51
	4	300.3	69.96
中央値	1	150.8	163.2
	2	149.5	139.9
	3	150.3	149.6
	4	149.7	154.2
最大	1	150.1	560.3
	2	149.5	570.7
	3	150.5	575.9
	4	149.9	572.6

表 4 測定方法と変動係数

固定量	塩酸ガス圧法	TOC
最小	0.131(3)	0.117(4)
中央値	0.0337(3)	0.0445(3)
最大	0.00192(3)	0.0118(4)

() 内の数字は測定を行った回数

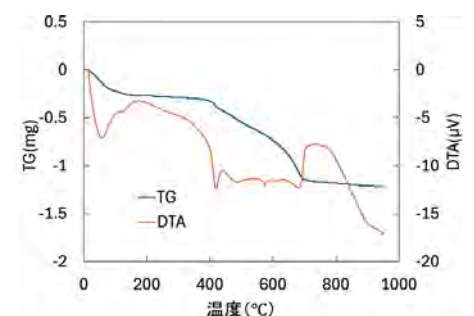


図 2 TG-DTA の測定結果