

再生焼き石膏とセメントによる軟弱地盤改良の固化材添加量の推定方法

群馬大学大学院理工学府 学生会員 ○富澤 奈岐沙
 群馬大学大学院理工学府 正会員 蔡 飛
 群馬大学大学院理工学府 正会員 若井 明彦

1. はじめに

廃石膏ボードの二水石膏を細粒化し熱処理することで得られた焼き石膏は、化学反応して土を硬化させる性質がある。環境省などは、半水石膏とセメントを配合したものを路床等の地盤改良材として利用促進している。本稿では、焼き石膏及びセメントの組成成分であるCa量を改良地盤および原地盤（改良前の地盤）について計量し、その増加量から固化材の添加量を推定する方法を提案する。

2. Ca含有量の測定

焼き石膏とセメントによる路床改良が施工された箇所Bと箇所Dにおいて、試掘を行い、路床改良を行った範囲内に一試掘箇所にあたり5箇所で改良土試料を採取した。また、原地盤の自然含有Ca量を測定するため、改良深以深で地盤が改良されていない試掘箇所の底面で試料を採取した。酸分解一原子吸光光度法によるCa含有量の分析結果を表1に示す。

表1 Ca含有量の分析結果

試料名		計量項目
		Ca含有量
箇所	番号	(%-dry)
B	1	5.4
	2	4.1
	3	4.5
	4	5.4
	5	4.7
	6(路床)	0.34
D	1	7.6
	2	7.9
	3	7
	4	8.3
	5	6
	6(路床)	0.53

3. 固化材添加量の推定

セメントと焼き石膏を改良材とした地盤改良工事が終了した後に、焼き石膏およびセメントの水和反応が進行し、セメント硬化体及び焼き石膏硬化体（以降、この2種類の硬化体を改良材硬化体と呼ぶ）になる。105℃炉乾燥では、セメント硬化体と焼き石膏硬化体の付着水は蒸発するが、結合水は変化しない。そのため、改良土試料の105℃炉乾燥質量 M_t は、改良土試料中の土の105℃炉乾燥質量 M_s と改良材硬化体の105℃炉乾燥質量 M_a の和に等しい。

$$M_s + M_a = M_t \quad (1)$$

また、改良土試料中のCa含有量は、改良前の土のCa含有量と改良材硬化体のCa含有量の和であり、それぞれのCa（質量）含有率を用いて、式（2）で表せる。

$$m_s M_s + m_a M_a = m_t M_t \quad (2)$$

ここに、 m_s 、 m_a 、 m_t はそれぞれ改良前の土、改良材硬化体、改良土のCa含有率である。式（1）と式（2）において、 M_t 、 m_s 、 m_t は既知であり、 m_a はセメントと焼き石膏の成分表より後述の方法で求める。また、式（1）と式（2）より、 M_s と M_a は次式で求められる。

$$M_s = \frac{m_a - m_t}{m_a - m_s} M_t \quad (3)$$

$$M_a = \frac{m_t - m_s}{m_a - m_s} M_t \quad (4)$$

次に、改良材硬化体のCa含有率 m_a を求める。改良土の試料採取は地盤改良の約8ヶ月後に行ったため、セメントの水和反応および焼き石膏の二水和反応は共に進行したと考えられる。そのため、改良土単位体積あたりのセメント硬化体質量 a_h と焼き石膏硬化体質量 a_g は、それぞれセメント添加量 a_c と焼き石膏添加量 a_b よりそれぞれ次式で求められる。

$$a_h = c_h a_c \quad (5)$$

$$a_g = c_g a_b \quad (6)$$

ここに c_h と c_g はそれぞれセメントにおける添加量に対する硬化体絶乾質量の比、焼き石膏における添加量に

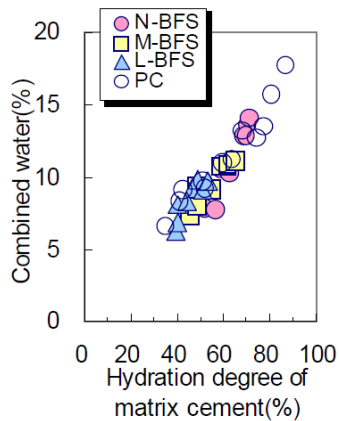


図1 高炉セメント反応率と結合水量との関係¹⁾

対する硬化体絶乾質量の比である。図1より、高炉セメントが十分に水和反応し(反応率約80%)生成した硬化体の結合水量は約15%であるため、セメントにおける添加量に対する硬化体絶乾質量の比 c_h は1.15である。また、焼き石膏における添加量に対する硬化体絶乾質量の比 c_g は次式で求められる。

$$c_g = 1 + \frac{2FW(H_2O)}{FW(CaSO_4)} g_{0III} + \frac{3/2FW(H_2O)}{FW(CaSO_4 \cdot 1/2H_2O)} g_{1/2} \quad (7)$$

セメントと焼き石膏の成分表より、セメントと焼き石膏のCa含有率 m_c と m_b はそれぞれ次式で求められる。

$$m_c = \frac{FW(Ca)}{FW(CaO)} m_{CaO} \quad (8)$$

$$m_b = \frac{FW(Ca)}{FW(CaSO_4)} (g_{0III} + g_{0III}) + \frac{FW(Ca)}{FW(CaSO_4 \cdot 1/2H_2O)} g_{1/2} + \frac{FW(Ca)}{FW(CaSO_4 \cdot 2H_2O)} g_2 \quad (9)$$

ここに、 $FW(x)$ は材料 x の式量である。 g_{0III} , g_{0III} , $g_{1/2}$, 及び g_2 はそれぞれ焼き石膏中のII型無水石膏, III型無水石膏, 半水石膏, 及び二水石膏含有率であり、 m_{CaO} はセメントのCaO含有率である。また、105℃炉乾燥改良材硬化体のCa含有率 m_a は、次式で求められる。

$$m_a = \frac{m_c a_c + m_b a_b}{c_h a_c + c_g a_b} \quad (10)$$

単位体積 $V_0=1m^3$ あたりの改良前の土の105℃炉乾燥質量に対する改良材硬化体の105℃炉乾燥質量($c_h a_c + c_g a_b$)の比は次式で表せる。

$$\frac{c_h a_c + c_g a_b}{\rho_d V_0} = \frac{M_a}{M_s} \quad (11)$$

本稿では、設計のセメント添加量と焼き石膏添加量と同じであり、施工時のセメントと焼き石膏は十分混ぜたとする。即ち、 $a_c = a_b = a$ である。セメント添加量または焼き石膏添加量 a は式(12)で求められる。

$$a = \frac{M_a}{M_s} \cdot \frac{\rho_d V_0}{c_h + c_g} \quad (12)$$

式(3)と(4)を式(12)に代入し整理すれば、次式が得られる。

$$a = \frac{m_t - m_s}{m_a - m_t} \cdot \frac{\rho_d V_0}{c_h + c_g} \quad (13)$$

4. 推定結果

路床改良に用いられたセメントのCaO量は55%であった。また焼き石膏の化学分析によると、半水石膏92.4%、二水石膏4.3%、無水石膏3.3%であり、無水石膏はすべてII型無水石膏とした。なお、乾燥密度は改良前に測定した区間内の平均値を用いた。

試掘箇所BおよびDにおける推定した固化材添加量を表2に示す。表2より、2箇所共に添加量の最小値と最大値は平均値との差は概ね平均値の20%以内に収まっていることがわかる。

表2 固化材添加量の推定値

箇所		Ca含有率 (%)	改良材添加量 (kg/m ³)
B	6(路床)	0.34	-
	1	5.4	257.9
	2	4.1	182.8
	3	4.5	205.1
	4	5.4	257.9
	5	4.7	216.5
	平均		224
D	6(路床)	0.53	-
	1	7.6	405.8
	2	7.9	428.4
	3	7	362.5
	4	8.3	459.5
	5	6	295.4
	平均		376.5

5. まとめ

焼き石膏とセメントによる地盤改良土および原地盤のCa量を計量し、その増加量から固化材添加量を推定する方法を提案した。この推定方法により改良地盤の固化材の混合度合いを確認できることが確認された。この推定方法はセメント系地盤改良の混合の均一性など品質管理に使用できると考えられる。

参考文献：

- 1) 佐川孝広・石川哲也・Yao LUAN・名和豊春：高炉セメントの水和物組成分析と空隙構造特性，土木学会論文集E，Vol.66，No.3，pp.311-324，2010。