

石灰安定処理による含水比の低減効果に関する一考察

北海道開発局函館開発建設部 正会員 ○高村 章

1. 減水量の指標（目的と方法）

土質安定処理は、長期的反応を考慮して、目標強度に必要な添加量と必要日数を設定¹⁾すれば、固化の進行と乾燥によるクラックの発生やアルカリ性の溶出水の影響を低減でき、短期的反応のみに比べ少ない添加量になる。そして、その添加量は溶解性カルシウムの分析²⁾を必要とせず、設定できたら良い。

土と石灰の反応過程³⁾では、ポゾラン反応の減水量が未知である。ポゾラン反応等の長期的反応を含む全反応での減水量が分かれば、目標の含水比より添加量が求まる。そこでCaO(生石灰)1molを1としたモル倍数Aと、生石灰添加量1kg/m³を1とした添加倍数Bを減水量の指標として提案し、その値を求めた。

最初に、消化吸水反応の化学式のみから求めた。CaO(生石灰)1molと土中の水分(H₂O)1molで、Ca(OH)₂(消石灰)1molが生成されるので、 $A=H_2O/CaO=1mol/1mol=1$ 倍、原子量より $B=H_2O/CaO=18g/56g=0.32$ 倍となる。BとAの関係は、 $B=(18/56) \times A=0.32A$ である。図に $B=0.32$ を短い点線で示す。

2. 土の乾燥重量と自然含水比（基礎式を活用）

土の自然含水比は、次の(1)式で示される。なお、室内土質試験値の重量単位はg(=kg/1000)である。

$$N = (M_n/1000) / (M_s/1000) \times 100 = (V_n \times \rho_w) / (V_s \times \rho_s) \times 100 \quad - (1)$$

N, % : 自然含水比、M_n, kg : 自然水の重量、M_s, kg : 土の乾燥重量(土粒子の重量)、

V_n, m³ : 自然水の体積、V_w, m³ : 土粒子の体積、 ρ_w , g/cm³ : 水の密度、 ρ_s , g/cm³ : 土粒子の密度

土の全体積V_t, m³は、V_nとV_sに空気の体積V_a, m³を加え、 $V_t=V_n+V_s+V_a$ である。V_tは単位量1m³とし、空気の体積が水で満たされた条件 $V_a=0m^3$ とすれば、 $1=V_n+V_s$ となる。(1)式を、分母に重量、分子に体積と密度とし、 $V_n=1-V_s=1-M_s/\rho_s/1000$ を代入し、水の密度 $\rho_w=1$ とした。以降、M_sの式が必要になるので左辺にし式を整理すると(1)'式となる。なお、以降、試算には $\rho_s=2.6$ を用いた。

$$M_s = 1000 / (N/100 + 1/\rho_s) \quad - (1)'$$

3. 消化吸水反応による含水比の低減効果（理論式を図化）

消化吸水反応による含水比の低減効果は次の(2)式³⁾である。またdを左項に整理すると(2)'式となる。

$$D = (N/100 - 0.77d/100) / (1 + 1.32d/100) \times 100 \quad - (2)$$

D, % : 低下後の含水比、d, % : 土の乾燥重量に対する添加率 ($d=S/M_s \times 100$)

$$d = (N-D) / (1.32D/100 + 0.77) \quad - (2)'$$

別にdは、添加量Sで示した式 $d=S/M_s \times 100$ に(1)'式を代入すると(1)''式となる。

$$d = S/M_s \times 100 = S / (1000 / (N/100 + 1/\rho_s)) \times 100 \quad - (1)'' \quad S, \text{kg/m}^3 : \text{添加量}$$

dの代わりにSを用いたので、(1)''=(2)'とし、Sを左辺にすると(3)式となる。

$$S = (N-D) / (1.32D/100 + 0.77) / (N/100 + 1/\rho_s) \times 10 \quad - (3)$$

低下後の含水比Dは、添加量を決める際には低下させたい目標含水比Dとなる。減水量 ΔD は、初期含水比Nと目標含水比Dの差分で、M_sに(1)'を代入すると(4)式となる。

$$\Delta D = (N-D) \times M_s / 100 = (N-D) / (N/100 + 1/\rho_s) \times 10 \quad - (4) \quad \Delta D, \text{kg} : \text{減水量}$$

(3)及び(4)式からBを求めると(4)'となり図に長い点線で示す。

$$B = \Delta D / S = 1.32D/100 + 0.77 \quad - (4)'$$

DのみでBが設定される式となり、例えば、D=35%で $B=1.232$ 、D=60%で $B=1.562$ となる。(4)'式は、(2)式によるので、発熱による蒸発効果と、消石灰生成による重量増加効果が考慮されている。

キーワード 石灰, 安定処理, 含水比, カルシウム, 添加量

連絡先 〒040-8501 北海道函館市大川町1-27 TEL 0138-42-7685

4. 溶解性カルシウムと含有鉱物（結果と考察）

石灰安定処理前後の土試料に対し、室内土質試験に加え溶解性カルシウムを分析した結果²⁾から、Bを求めた。添加量のカルシウム量と溶解性カルシウム量の差（反応 Ca^{2+} 量）から添加量相当、処理前後の含水比差から減水量を求めた。処理前試料毎に必要な強度を得た上限の値を選定し、その結果を図に点で示す。

更に、溶解性カルシウムを分析した土試料の含有鉱物を、偏光顕微鏡観察と X 線回折で確認した。処理前後で雲母類、緑泥石、スクメタイトが主に確認でき、粘土鉱物に有意な差はなかった。処理後のみ炭酸塩鉱物又は CaCO_3 (方解石) が確認でき、炭酸化反応の生成物であり、長期的反応を含む全反応後の値と考えてよい。

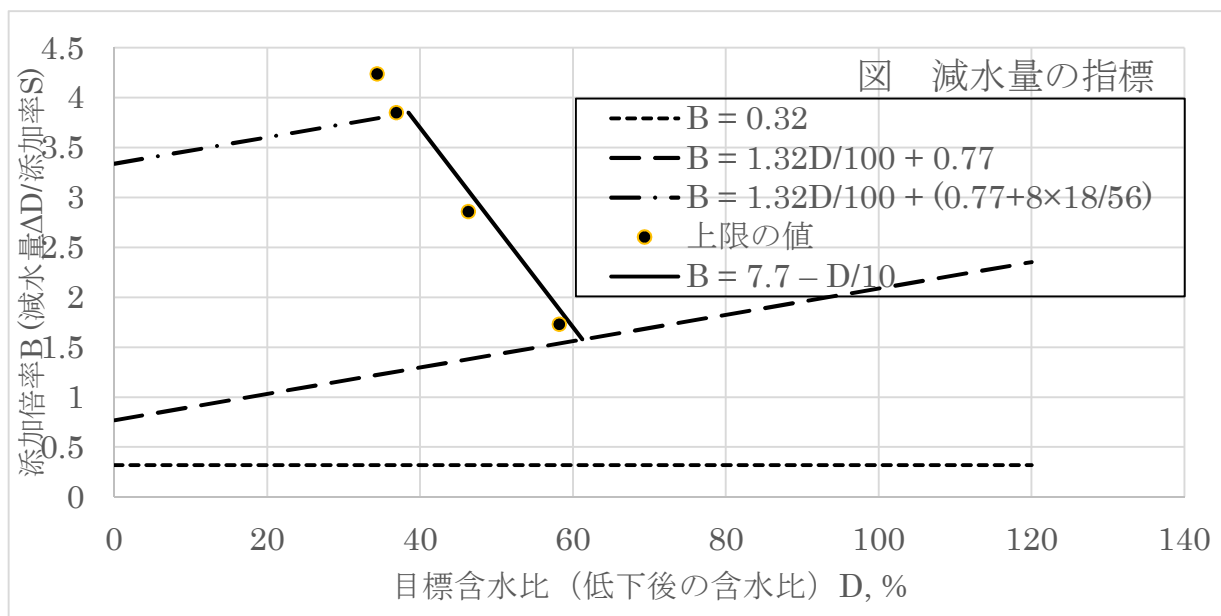
そこで、(4)' 式との差 ΔB を考察する。まず、 $D=35\%$ 付近で $B \approx 4$ 程度で、差は $\Delta B \approx 2.7$ 程度である。モル数では $\Delta A \approx 8.5$ と、緑泥石族の鉱物組成⁴⁾ $(\text{OH})_8$ に相当する塩基数 8 に近似する。 Ca^+1mol に対し $\text{H}_2\text{O}8\text{mol}$ を何らかの形で固定するとして、即ち岩石学由来の切片 ($8 \times 18/56$) を、(4)' 式に加えたのが (4)'' 式で、図に一点鎖線で示す。次に、 $D=60\%$ 付近で B の差はほぼ無く、消化吸収反応のみの値に近似する。

その間で相関関係式を求めたのが (5) 式で、図に直線で示す。

$$B = 1.32D/100 + (0.77 + 8 \times 18/56) \quad \text{--- (4)''}$$

$$B = 7.7 - D/10 \quad (38 < D < 62) \quad \text{--- (5) 相関係数 } R = -0.998$$

この結果より、含水比 38% まで (4)'' 式、62% から (4)' 式、その中間は (5) 式で、B が求まる。



5. 目標含水比から添加量を求める（まとめ）

実務で活用するには減水量 ΔD ではなく、自然含水比 N 及び目標含水比 D と添加量 S の式としたい。そこで $\Delta D = B \times S$ を (4) 式に代入すると、(6) 式となる。(6) 式の分母に着目して整理すると (6)' 式となる。

$$S = (N - D) / (N + 100/\rho_s) \times 1000 / B \quad \text{--- (6)}$$

$$S = \{ 1 - (D + 100/\rho_s) / (N + 100/\rho_s) \} \times 1000 / B \quad \text{--- (6)'}$$

今回は添加量と含水比に限って基礎から着目しており、土質安定処理の解釈とすればその一部であろう。

参考文献

1) 高村章, 2011, 石灰安定処理土の強度とカルシウム量の関係, 2011 年度日本地球化学会第 58 回年会講演要旨集 セッション 21 災害による環境汚染および復興の地球化学

2) 楠美嘉和 高村章 若林英樹, 2011, 河川堤防に用いる高含水比粘性土の石灰安定処理について, 国土交通省北海道開発局第 54 回 (平成 22 年度) 北海道開発技術研究発表会

3) 日本石灰協会, 2010, 石灰による地盤改良マニュアル 平成 22 年度版, 16

4) 上原誠一郎, 粘土基礎講座 I 粘土の構造と化学組成 表 3, 2000, 粘土科学 40 巻第 2 号, 105-107