

安定処理土の品質に関する新しい評価手法

A NEW METHOD FOR EVALUATING THE QUALITY OF STABILIZED SOIL

下村幸男*・李 黎明*・伊藤圭一*・小阪陽克**
Sachio SHIMOMURA, Liming LI, Keiichi ITO and Harukatsu KOSAKA

The efficiency of soil stabilization depends not only on the type of soil material, but also the soil water content and compaction density, even for the same type of soil. However, research to evaluate soil quality by unifying both the state of the stabilized soil and the treatment effect has not yet been systematically carried out. Based on a series of laboratory test results, we suggest that mixing mechanisms generally assumed for the evaluation of soil treatment effect using lime and cement stabilizers are valid. A new method of evaluating the quality of stabilized soil is also proposed.

Key Words : soil stabilization, water content, density, unconfined compressive strength, cone index, cement, lime

1. まえがき

安定処理工法はその種類と施工技術の開発が進み、軟弱地盤の地震時液状化対策、および大規模盛土工における軟弱基礎ならびに盛土材料の改良を目的として、近年重要かつ大規模な工事に応用する傾向がある。処理効果は土の種類は当然ながら、同じ土でも含水比や地盤造成後の密度によっては効果の程度が異なる。しかしながら、処理土の状態と処理効果を統一的に評価するための研究はほとんどなされておらず、大嶺ら¹⁾による混合むらがある処理土の変形・強度特性を二種混合体モデルによって評価する研究があるにとどまる。本論文は、石灰およびセメントによる安定処理効果を仮定した混合メカニズムを試験結果に基づいて検証し、処理土の品質に関して新しい評価手法を提案するものである。

2. 混合メカニズムの仮定

処理土の土質や性状を問わず統一的に処理土の品質を評価するため、処理土の空隙量と処理材の体積混合比に着目するものとし、その際、処理材が土中に混入するメカニズムを以下のように仮定した。

(1) 締固めを伴う場合

セメントおよび消石灰で代表される反応熱を無視する場合と、生石灰で代表される反応熱を伴う場合に分けた。

1) セメントおよび消石灰

①締固めのメカニズムは無処理土と同じとする。この理由は安定処理工法の混合比（土と処理材の乾燥重量比）が一般的には最大で20%であり、微粉体のセメントまたは消石灰が混入されても締固めのメカニズムは無処理とほぼ同じと考える。②安定処理土の構成物質は土粒子、セメントまたは消石灰、水、および空気とする。③混入した処理材の一部は、無処理土の締固め状態を原点として、土粒子と処理材の粒子が入替わり、残りは土粒子間に入り込むものとする。したがって、体積は無処理土と同じであるが、土粒子と入れ替わった処理材との比重差および土粒子間に入った処理材粒子の分だけ重量が変化し、単位体積重量が変化するものとする。④処理材と土の化学的な反応による粒子重量の変化は無視する。

2) 生石灰処理

セメントまたは消石灰混合の場合の仮定条件①、②、③はそのまま同じとする。しかし生石灰の場合には水和反応を考慮する必要があり、上記の仮定④は成立せず、生石灰が水と反応した後の状態がセメントの場合と同じとする。生石灰と水の反応は、 $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2$ となり、そのため、まず生石灰が消石灰に変化する水和反応後の状態を算定した上で、セメント・消石灰の場合が適用できるとする。生石灰の混入によりコンシステンシーなど土性変化があるため、処理土と未処理土の締固めのメカニズムは厳密には同じでないが、推定精度を左右する程の違いはないとする。具体的には、混合後の土のみの締固め密度を想定するに際して、反応熱が少ないセメントや消石灰では処理前の土の含水比を w_0 としてその時の締固め試験による密度を ρ_{d0} と

* 中央研究所 総合技術開発部

** 大阪支店 技術第二部

するが、生石灰の場合には締固め前に水和反応と反応熱による水分蒸発を考慮する。そのため、処理土の密度の算定に用いる土のみの密度 (ρ'_{d0}) は、水和反応後の土のみの含水比 (w'_0) に対応した未処理土の密度として未処理土の締固め曲線に基づいて設定する。

(2) 締固めを伴わない場合

高含水比粘性土 (飽和度 $\approx 100\%$) にセメントを混入する場合は単位セメント量を、また、スラリーで混合する場合は水セメント比 (w/c) をパラメータとして考慮する。注入される水分により増加した含水比を起点としてセメントが混入してセメント粒子の一部は土粒子と、他は水と置き換わるとする。

3. 混合メカニズムの検証

(1) 処理土の含水比および乾燥密度の算定式

混合メカニズムは、処理土が示す含水比および乾燥密度より検証するもとし、前述の仮定に基づいて、処理土の含水比および乾燥密度を求めるための算定式をたてた。

1) 締固めを伴う場合^{2), 3)}

$$w = \frac{\{w_0 - P(\beta + \gamma \cdot m)\} \{1 + R_1 \cdot \alpha \cdot P \cdot n\} - Q \cdot R_1 \cdot \alpha \cdot P \cdot n}{1 + \alpha \cdot P} \quad (1)$$

$$\rho_d = \frac{\rho'_{d0} (1 + \alpha \cdot P)}{1 + R_1 \cdot \alpha \cdot P \cdot n} \quad (2)$$

ここに、

w : 混合土 (締固め後) の含水比

P : 処理材の混合率 (乾燥重量比)

w₀ : 未処理土の含水比

β : 水和反応時の生石灰と水の重量比 (18/56=0.321)

γ : 反応熱のすべてが蒸発熱として作用した場合の生石灰1g当たりの水の蒸発量

m : 水和反応熱の土中水蒸発に費やされる割合 (m=0: まったく蒸発に寄与しない、m=1; すべて蒸発熱として作用する)

R₁ : 処理材と土粒子の密度の比 (= ρ_s / ρ_c 、 ρ_s : 土粒子の密度、 ρ_c : 処理材の密度)、

α : 消石灰と生石灰の重量比 (74/56=1.321、セメント混合の場合は物質変化はないとして $\alpha=1$ とする)

n : 土粒子と入れ替わる処理材粒子の割合

(n=0: 処理材はすべて土粒子の間隙に入り込む、

n=1: 処理材はすべて土粒子と入れ替わる)

Q : 土粒子が内包している水分量 (\approx 土粒子の吸水率)

ρ_d : 混合土 (締固め後) の乾燥密度

ρ'_{d0} : 未処理土の含水比における乾燥密度 (未処理土の締固め曲線により求める)

式 (1)、(2) において、処理土の含水比および密度を概略求める式⁴⁾ $w = w_0 / (1+P)$ 、 $\rho_d = \rho_{d0} (1+P)$ は反応熱を無視し (m=0)、処理材はすべて同粒子間に入りこむとした場合 (n=0) に一致する。また、生石灰処理の含水比を予測する簡便式⁵⁾ は、土の種類によらず、式 (1) における蒸発効率を m=0.45 とした混合後 (締固め前) の含水比に一致する。

2) 締固めを伴わない場合

$$w = \frac{\{w_0 + (w/c)P\} \{(\rho_{d0} / (1 + (w/c)C)) - Q \cdot R_1 \cdot C \cdot n - R_2 \cdot C \cdot (n-1)\}}{C(1/P+1)} \quad (3)$$

$$\rho_d = \frac{(1+P) \cdot \rho_{d0} / \{1 + (w/c)C\}}{1 + R_1 \cdot P \cdot n} \quad (4)$$

ここに、

C : 対象土の単位体積当たりセメント量 (t/m³)

w/c : セメントスラリーの水セメント比

R₂ : セメントと水の密度比 (ρ_w / ρ_c)

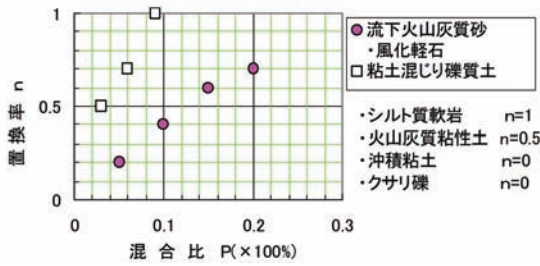
ρ_w : 水の密度 (=1)

(2) 蒸発効率 (m) および置換率 (n) の設定

検証に用いた対象土は、火山灰質粘性土、沖積粘土、粘土混じり礫質土、軟岩など幅広く土の種類を選んだ。各土質特性と処理材は表-1に示すとおりである。また、反応熱による水分の蒸発効率 (m) および土粒子と処理材の置換率 (n) は、あらかじめ式 (1) ~ (4) により試験結果から逆算により求めた。mは粘性土分が少ない流下火山灰質砂と粘土混じり礫質土では混合比に関係なく m \approx 0、粘性土および細粒化し易い風化砂礫を含む土では蒸発作用を認めることができ m=1とした。次に、置換率については、粘土混じり礫質土、火山灰質砂および風化軽石では図-1を目安として混合比ごとにn値を選定した。また、シルト質軟岩ではn=1、火山灰質粘性土ではn=0.5、沖積粘土およびクサリ礫ではn=0とした。

表-1 対象土の土質特性

土質名	粒度分布			土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	含水比 Wn(%)	処理材の種類
	細粒分 Fe(%)	砂分 Sc(%)	礫分 Gc(%)			
火山灰質粘性土1A	96	4	0	2.69	63	生石灰
火山灰質粘性土1B	88	10	2	2.73	103	生石灰
火山灰質粘性土2	82	18	1	2.74	56	普通セメント 生石灰
沖積粘土A	69	28	3	2.59	81	普通セメント 生石灰
流下火山灰質砂	26	63	11	2.73	32	普通セメント 生石灰
風化軽石	42	56	2	2.72	83	生石灰
クサリ礫	63	30	6	2.70	29	普通セメント 生石灰
粘土混じり礫質土	47	45	8	2.69	33	普通セメント 生石灰
粘土混じり砂礫	22	35	43	2.72	19	普通セメント
シルト質軟岩	25	18	57	2.70	9	高炉セメント
強風化角礫岩	52	31	17	2.78	72	普通セメント 生石灰
強風化安山岩	56	34	10	2.77	58	普通セメント 生石灰
礫混じり砂質粘性土	58	40	2	2.84	93	生石灰
沖積粘土A	100	0	0	2.70	147	普通セメント 高炉セメント

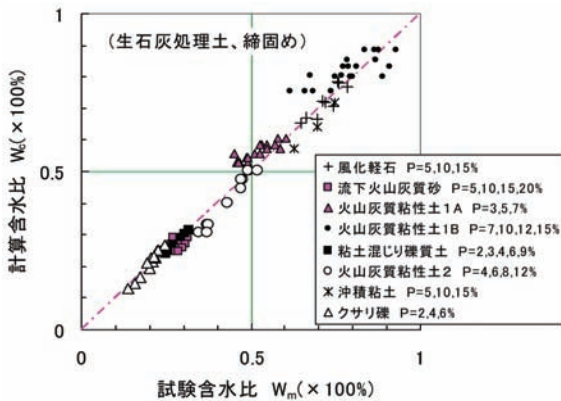


図一 混合比とnの相関性

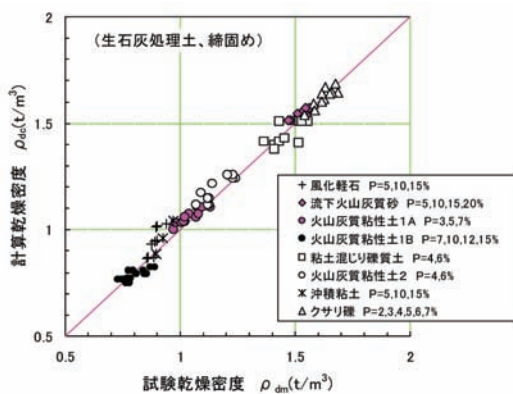
(3) 含水比および乾燥密度の検証結果

締固めを伴う場合の生石灰処理に関する検証結果を図一2、3に示し、締固めを伴わない場合に関して図一4、5に示す。ややばらつきはあるが、含水比、密度ともに土の種類によらず適合性は良い。図示していないが、締固めを伴うセメント処理においても含水比、密度ともに同様の結果が得られている。

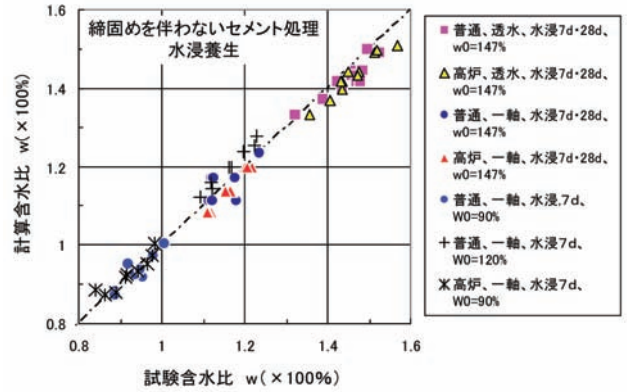
したがって、安定処理土における処理材の混入のメカニズムの仮定は妥当であると考えられる。



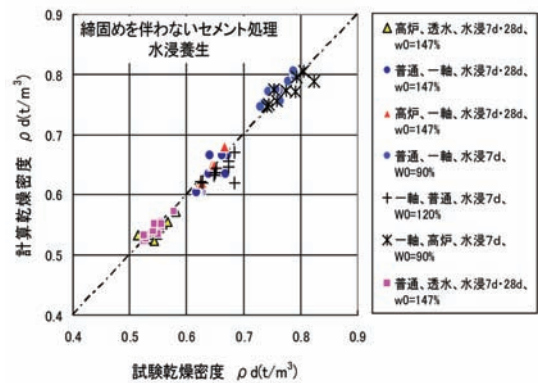
図一2 含水比における検証結果



図一3 乾燥密度における検証結果



図一4 締固めを伴わないセメントスラリー処理の含水比における検証結果



図一5 締固めを伴わないセメントスラリー処理の乾燥密度における検証結果

4. 安定処理土の強度特性の評価手法

(1) 処理材の空隙充填率の定義

土質材料の締固め後の空隙比は土の種類、含水比および締固めエネルギーにより決まる。処理土においてもこの関係が保たれるとすると、無処理土の締固め試験から得られる空隙比もしくは密度で表示することができ、処理土の強度特性は式(5)のように表現出来る。

$$F_m = F \cdot (\text{無処理土の空隙比} \cdot \text{密度} \cdot \text{体積混合比} + \text{処理土の空隙比}) \quad (5)$$

次に、処理土の密度の影響として同じ混合比においても、処理土の密度が低いほど力学的には低品質で、高い密度ほど高品質が得られることは一般の土質材料と同じとする。ここでは、体積混合比と処理土の空隙比を1つの指標で表示するため、処理材の空隙充填率 (f_v : 処理材が混合土の空隙を占める割合) を用いることとし、以下で定義する⁶⁾。

$$f_v = V_d / (V_a + \Delta V_s) \quad (6)$$

ここに、

V_c : 締固め後に混入した処理材の体積

V_a : 無処理土の空隙量

ΔV_s : 処理材と置換した土粒子の体積

(2) 強度特性と f_v の相関関係

1) 締固めを伴う生石灰処理における相関性

生石灰処理におけるコーン指数と重量混合比 (P) および処理材の空隙充填率 (f_v) の関係を図-6 (1)、(2) に示す。Pによる整理では同一のPの値に対して最大～最小幅が1,000～1,500kPaであるが、 f_v の整理では400～600kPaに収束する。

2) 締固めを伴うセメント処理における相関性

一軸圧縮強度 (養生:6日空气中+1日水浸) に関して、Pおよび f_v との相関を図-7 (1)、(2) に示す。 q_u はPとの関係では間隙比や締固め処理土の状態により異なるが、 f_v で整理した場合はほぼ一本の直線が得られる。 f_v は強度特性に強い影響因子であることが分かる。

3) 締固めを伴うセメント処理における相関性

一軸圧縮強度 (7日水浸養生) に関して、単位セメント量 (C) および f_v の相関性を図-8 (1)、(2) に示す。Cとの関係では、 q_u は w_0 および w/c の影響をうけて分かれているが、 f_v で整理すると w/c で分かれるものの、 w_0 の影響は受けていない。

(3) f_v による強度評価に基づく処理効果に関する考察

図-7 (2) 中に記した q_u と f_v の相関式を用いて混合比 (P) の影響を計算により調べたものが図-9 (1) である。混合むらにより生じるPの影響は、対象土の含水比が低いほど強く、混合比が高くなると影響は小さくなる。そのため、シルト質軟岩などの含水比が低い材料を安定処理する場合は混合程度の管理が重要になる。例えば、 $w_0=10\%$ の材料に対して乾燥重量比0.1を目標とした時に、 ± 0.2 の変動が生じた場合は q_u 値が800～1,500kPaの幅を持ち、 $\pm 40\%$ 程度の強度差となる。

次に、混合比を0.05～0.3の一定とした場合に、 w_0 と q_u の関係を示したものが図-9 (2) である。 w_0 と q_u は指数関数的な関係を持ち、 w_0 の影響は $w_0 \leq 70\%$ の低含水比側で q_u の変化が著しくなる。例えば、 $P=0.1$ を目標として対象土の有意な含水比幅 $w_0=30 \pm 10\%$ を処理した場合には、 q_u の差は乾燥側で大きくなり $q_u=900 \sim 400\text{kPa}$ (目標 $q_u=600\text{kPa}$) となり、目標値に対して1.5～0.66倍の強度幅をもたらすことを示す。

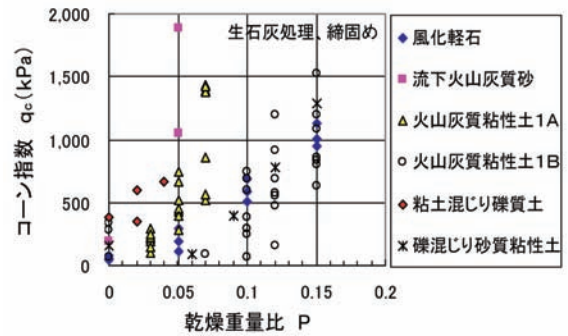


図-6 (1) 締固め伴う生石灰処理におけるPと q_c の関係

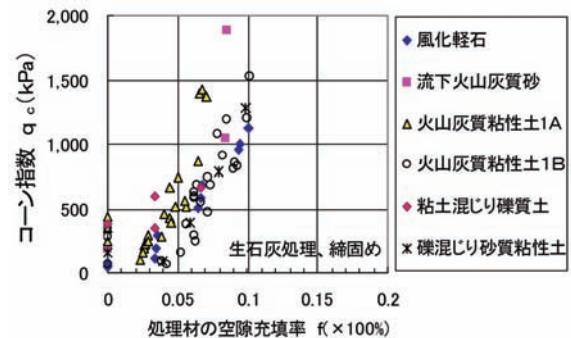


図-6 (2) 締固め伴う生石灰処理における f_v と q_c の関係

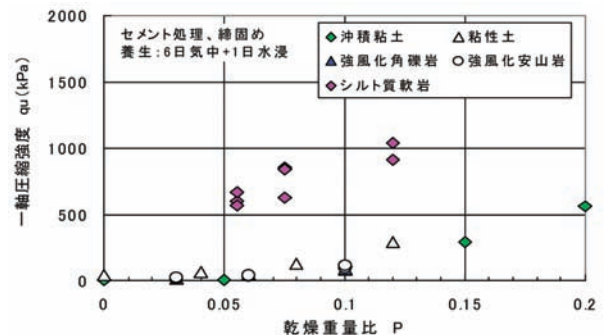


図-7 (1) 締固め伴うセメント処理におけるPと q_u の関係

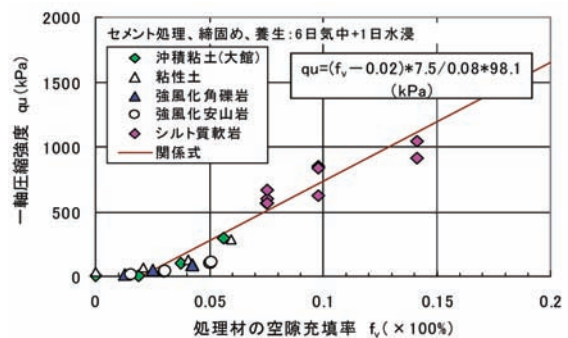


図-7 (2) 締固め伴うセメント処理における f_v と q_u の関係

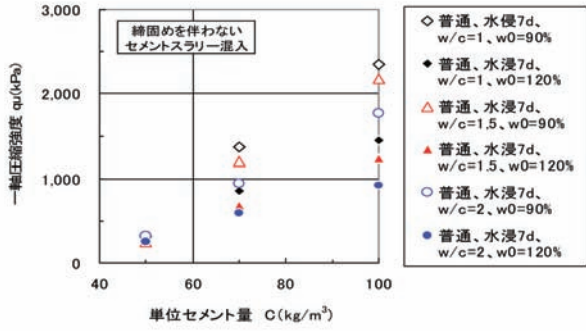


図-8 (1) 単位セメント量と一軸強度の関係

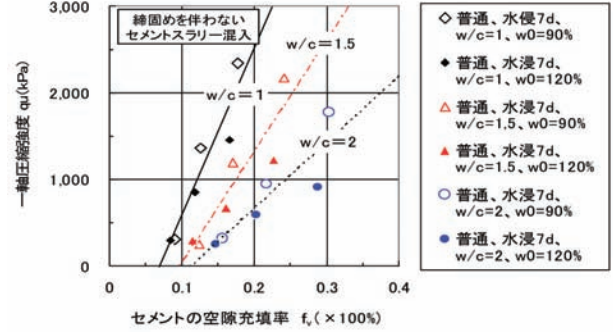


図-8 (2) セメントの空隙充填率と一軸強度の関係

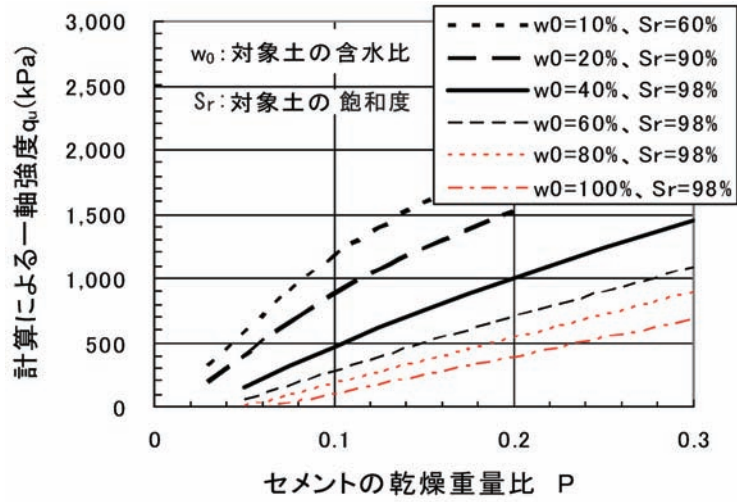


図-9 (1) セメント混合率と一軸強度の関係

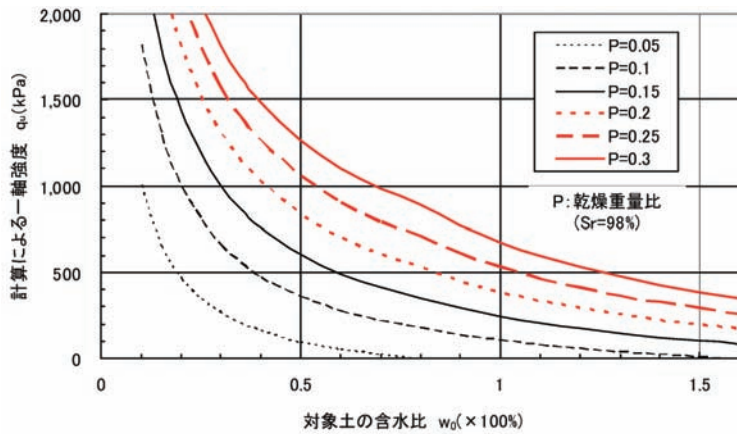


図-9 (2) 対象土の含水比と一軸強度の関係

5. 結論

- ・安定処理土の含水比および密度は、締固めを伴う場合、伴わない場合ともに、処理材の粒子が無処理状態の土粒子間に入り、他は土粒子と置き換わって土中に入りこむメカニズムとして考えることができる。
- ・上記のメカニズムに基づいて構成した関係式によって、無処理状態から処理後の含水比および密度が推定できる。
- ・土中に混入した処理材の空隙充填率 (f_v) は、処理土の強度特性を支配し、 f_v を介して処理土の含水比および密度と強度特性の関係を評価することができる。

6. 今後の課題

本研究は細粒分含有率が20%以上の土に対して行った。今後は土の種類を広げて評価手法の精度の向上を図る必要がある。

参考文献

- 1) 大嶺聖、落合英俊、吉田信夫：セメント改良土の変形・強度特性の評価法、日本材料学会、材料、VOL.44、NO.503、AUG.1995
- 2) 下村幸男：安定処理土の含水比および密度の算定法に関する提案、日本工営技術情報、NO.20、pp.200-215、2000
- 3) 下村幸男、小阪陽克：安定処理土の含水比・密度の算定方法、第38回地盤工学研究発表会講演集、514、pp.1027-1028、2003
- 4) セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル（第二版）、技報堂出版、1994
- 5) 日本石灰協会：石灰安定処理工法、設計・施工の手引き、1996
- 6) 下村幸男、小阪陽克：安定処理土の力特性を支配する因子、第38回地盤工学研究発表会講演集、515、pp.1029-1030、2003