

セメント固化処理した海成粘土の強度推定法に関する一考察

A Consideration on Estimation of Strength of Cement-Treated Marine Clays

土田 孝 Takashi TSUCHIDA (広島大学大学院工学研究科)
湯 怡新 Yi Xin TANG (関門港湾建設株式会社)

セメント処理土の新しい強度推定式を提案した。本式ではセメント処理土の強度は、土の乾燥重量に対する添加率から最小添加率を引いた値に比例し、土の体積比の3乗に反比例する。わが国の主要な港湾の海成粘土について提案式の適用性を検討したところ、いずれの地域の粘土でも適用できることを確認した。次に、提案式を用いて、セメント処理土の圧密圧力 p と強度の関係を表す次式を誘導した。この式をすでに発表されている 10Mpa 以上の強度を有するセメント処理土のデータについて適用した結果、実験値に近い推定値が得られた。

キーワード: セメント固化処理土, 海成粘土, 圧密, 一軸圧縮強度 (IGC: D10)

1. はじめに

セメント固化処理工法は、軟弱な粘土を改良して良質な地盤材料とするため、広く用いられている。粘土を原材料としてセメント固化改良を行う際にまず把握しておかなければならないことは、軟弱土に対しどのぐらいのセメントを配合すれば所定の改良強度が得られるかという問題である。具体的な設計・施工の段階においては、固化処理の対象となる軟弱粘土を用いて室内配合試験を実施することになるが、工法を比較検討する段階では粘土の情報としては含水比が分かる程度なので、これらの情報とセメント配合量だけで固化強度を推定できることが望ましい。

固化処理土の一軸圧縮強度と軟弱土の含水比を関連付けるために、下記のような幾つかのアプローチが試みられている¹⁾。

$$q_u = aw + b \quad (1)$$

$$q_u = a(W/C)^c + b \quad (2)$$

$$q_u = a C/w^c + b \quad (3)$$

式(1)の相関は一軸圧縮強度と含水比の直線関係であるが、セメント含有量 C ごとに係数 a, b が変わるので実用性はない。式(2)、式(3)の考え方は、コンクリートの圧縮強度特性の考え方をういたものである。すなわち、処理土中の水分量に対するセメントの重量比(水セメント比, W/C)をパラメータとして、一軸圧縮強度の予測に用いている。喜田ら²⁾は、強保持水($pF3$)を除いた弱保持水のみによる補正した水セメント比(W/C)' を提案している。しかし、式(2)や式(3)のタイプの式はセメント処理土の水分とセメン

ト含有量のみに着目しているため、土粒子の存在は直接的に考慮されていない。このため、土粒子の含有量が変わるごとに別々の相関関係を用いる必要がある。

宮崎ら^{1),3),4)}は、セメント含有量 C と、浚渫粘土中の土粒子の体積に対する全体の体積である体積比 f の影響が強度にもっとも良く反映されると考えて、多くの室内配合試験の結果にもとづいて、次式を提案した^{1),2)}。

$$q_u = \frac{K(C - C_0)}{f^2} = \frac{K(C - C_0)}{(G_s w / 100 + 1)^2} \quad (4)$$

ここに、 f は体積比、 G_s は土粒子比重、 w はセメントを添加した粘土の初期含水比である。また、 C は 1m^3 あたりのセメント添加量(kg)、 C_0 はセメント処理土が強度を発現するために必要な最低セメント量、 K は粘土の種類と材令によって決まる強度増加係数である。この式は、多くの室内配合試験の傾向から考案された経験的な関係式であり、基本的にセメント配合量が多いほど、また含水比が低いほど、一軸圧縮強度が発現しやすいという考えに基づいたものである。

図-1 に宮崎らが(4)式を粘性土に当てはめたときの例を示す^{1),3)}。図のように、適切に最小セメント量 $C_0(\text{kg}/\text{m}^3)$ と強度増加係数 K を選択することによって、各材令において(4)式の推定強度と実測強度は高い相関(相関係数 $r=0.911 \sim 0.992$)を示している。また、同じ粘土であれば C_0 は材令によらない傾向があり、(4)式の適用性を高めている。

しかし、(4)式における 1m^3 あたりのセメント添加量は、粘土の含水比が変化する場合、土粒子体積に対しても、水の体積に対してもその比率は異なってくる。すなわち経験的には K を用いた(4)式はセメント処理の強度発現を説明することに成功しているが、含水比が変化する状況では K の物理的な意味は明確でない。

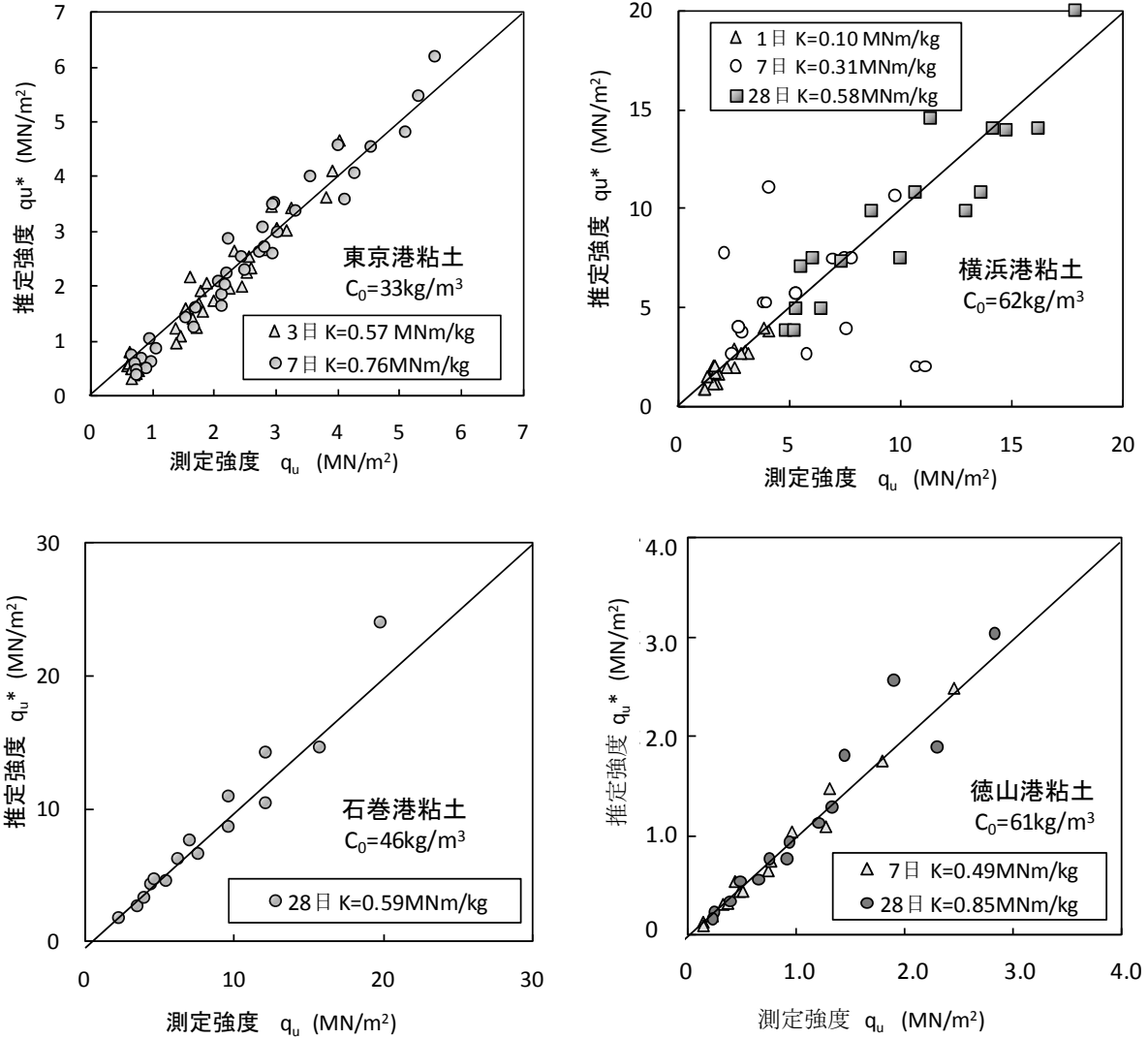


図-1 (4)式による実測強度と予測強度の比較²⁾

本論文では宮崎らの式(4)を発展させ、体積比 f と粘土の乾燥重量に対するセメント添加率 c (%)を用いた新たな式を提案する。これによって、セメント処理土の強度発現は、粘土に固有の強度発現係数 k_c と有効セメント添加率 $(c-c_0)$ に比例し、体積比 f の3乗に反比例(土粒子率の3乗に比例)することを示して、その工学的な意味を考察する。

2. セメント処理土の新しい強度推定式

2.1 新しい提案式

宮崎らが提案した(4)式において、 C と C_0 はスラリーの 1m^3 あたりのセメント質量(kg)で単位は kg/m^3 であった。また、セメント添加による強度増加係数 K の単位は MNm/kg である。ここで粘土の乾燥重量あたりのセメント添加率 (%) c を用いると、

$$c = 100 \frac{C}{\frac{1}{f} \bullet \rho_s} = \frac{100 Cf}{\rho_s} \quad (5)$$

となる。ただし、 ρ_s は 1m^3 の土粒子質量で、約 2700kg である。

(5)式より、

$$C = \frac{c\rho_s}{100f} \quad (6)$$

なので、これを(4)式に代入すると、

$$q_u = \frac{\rho_s K (c - c_0)}{100 f^3} = \frac{10 G_s \rho_w \bullet K (c - c_0)}{f^3}$$

よって、

$$q_u = \frac{G_s k_c (c - c_0)}{f^3} \quad (7)$$

となる。 c_0 は強度発現に必要な最小セメント添加率である。セメント固化処理土において強度発現のための最小セメント添加率が存在する理由としては、セメントと反応して固化した部分が骨格構造を形成するためには一定の量が必要のためと考えられる⁵⁾。 k_c はセメント添加による強度増加係数であり、次式で表される。

$$k_c = 10 \rho_w \cdot K \quad (8)$$

単位は一軸圧縮強度 q_u と同じ応力の単位となる。

(4)式と(7)式を比較すると、セメント添加量の定義が異なっている。(4)式ではセメント添加量は粘土 1m^3 あたりに添加する質量で定義されているが、すでに述べたように 1m^3 あたりでセメント添加量を定義すると、同じ粘土にセメントを添加する場合でも初期の含水状態によって、添加セメント量は異なってくる。これに対して、(7)式で用いた土の乾燥重量に対するセメント添加率は、混合時の土の含水状態によらないため、その物理的意味はより明確であるといえる。

(7)式で興味深いのは、セメント添加後の一軸圧縮強度が体積比の3乗に反比例していることである。体積比は土粒子の体積を1としたときの全体の体積の比であるので、 $1/f$ は土の全体の体積中の土粒子の体積の比率(土粒子率)を意味する。したがって、(7)はセメント処理土の強度が土粒子率の3乗に比例することを示している。このように、セメント処理土の強度発現が土粒子率の3乗というわかりやすい式になる理由については後に考察する。

2.2 日本各地の海成粘土における提案式の適用性

日本各地の港湾における海成粘土を原料土としたセメント処理土配合例を用いて、(7)式の適用性を検討した。表-1は検討に用いた事例の一覧である。これらの事例のほか過去に研究論文として発表されているデータについても検討を行った。

(7)式より、

$$\frac{q_u f^3}{G_s} = k_c (c - c_0) \quad (9)$$

となるので、配合試験の結果求められた一軸圧縮強度から

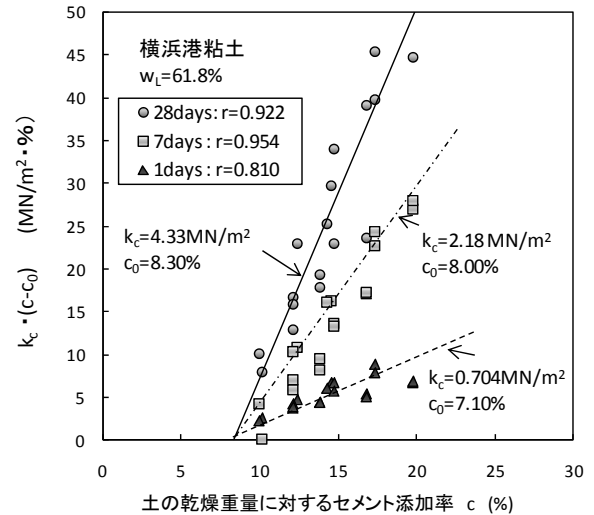


図-2 セメント添加率と $k_c (c - c_0)$ の関係 (横浜港粘土)

$q_u f^3 / G_s$ を計算し、粘土の乾燥重量に対するセメント添加率 c_0 との関係から、(9)式の関係(直線性)を確認し、強度増加係数 k_c と最低セメント添加率 c_0 を求めた。この際、粘土の体積比 f については混合時の体積比を使用した。セメント処理土は水和反応によって含水比が変化するが、ここでは混合時の含水比を用いて体積比を計算している。

図-2は横浜港南本牧ふ頭の高成粘土の配合試験結果について検討した結果である。図中には材令28日、7日、3日の一軸圧縮強度から計算した結果を示しているが、いずれの材令においても、セメント添加率と $q_u f^3 / G_s$ との間には直線関係が得られ相関係数も高い。また、直線近似で求めた強度増加係数 k_c は材令とともに増加し、最低セメント添加率 c_0 は材令とともに7.1%、8.0%、8.3%とわずかながら増加している。

k_c と c_0 が得られると一軸圧縮強度は(7)式により、セメ

表-1 検討に用いた配合事例

配合事例	調整含水比w(%)	セメント配合量(kg/m ³)	セメントスラリーの水セメント比(%)	液性限界(%)	塑性指数(%)	強熱減量(%)	養生日数(日)	データ数
横浜港粘土	78.3, 100, 120%	90,110,130	120	61.8	32	5.7	1,7,28	18
東京湾粘土	155, 186, 217	40, 50, 60	100, 200, 300	124.9	35.9	8.8	3,7,28	27
徳山港粘土	120,150,200, 250	80	粉体	77	46.6	10.7	7,28	15
石巻港粘土	118, 162, 198	60,70,80, 90,120	粉体	119.9	85.6	12.2	28	15
名古屋港粘土	110.4	70,100,130	100%	77	38.5	7.4	7	24
神戸港粘土	136.4, 166.1, 220.5	50,70,90,110	120	71.4	40.9	8.7	7	12
北九州粘土	132	60, 80, 100	100	72.8	40.6	8.3	7, 28	6

ント添加率から推定することができる。図-3 は横浜港粘土土において(2)式で求めた k_c と c_0 を用いて推定した一軸圧縮強度と実測値との比較である。図のように、両者はよく一致しており、このことはここで用いた横浜港粘土土において(7)式による推定が適用できることを示している。

図-4 (a), (b), 図-5 (a), (b), 図-6 (a), (b), 図-7 (a), (b), 図-8 (a), (b), 図-9 (a), (b) は、それぞれ東京湾粘土、徳山港粘土、石巻港粘土、名古屋港粘土、神戸港粘土、北九州空港粘土について提案式を適用した結果である。図のように、いずれの粘土においても相関性は高く本モデルが適用できると考えられる。

3. 考察

3.1 強度増加係数 k_c と最小セメント添加率

全国の港湾の海成粘土に適用した結果、下記に示す強度推定式はほぼ適用できることがわかった。図-10 は強度増加係数 k_c と試料の液性限界 w_L の関係である。図中には h 液性限界との相関は見られなかった。

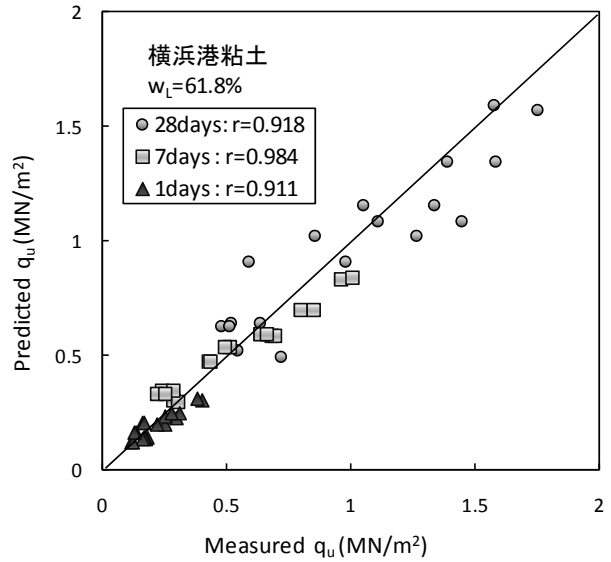
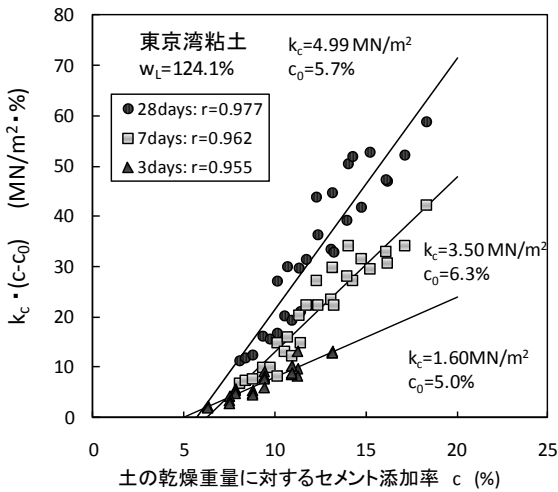
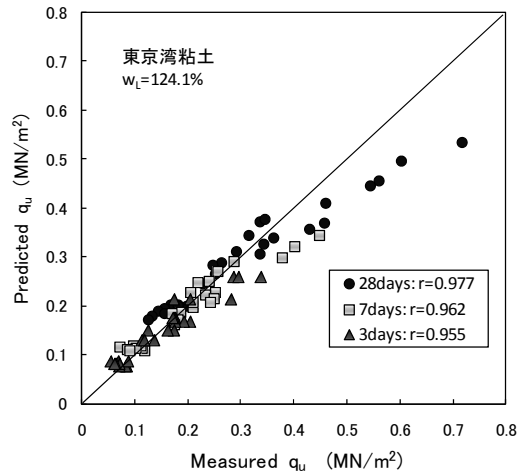


図-3 実測強度と予測強度の比較 (横浜港粘土)

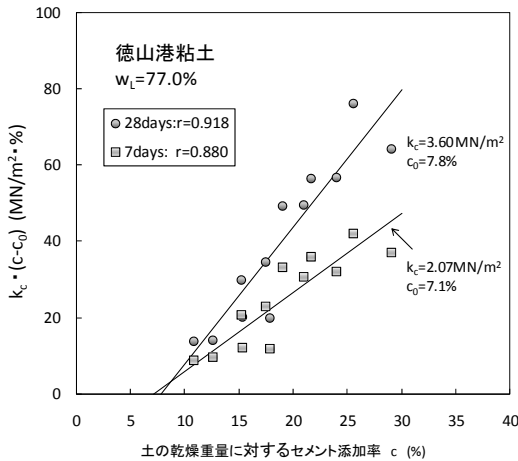


(a) セメント添加率と $k_c(c-c_0)$ の関係

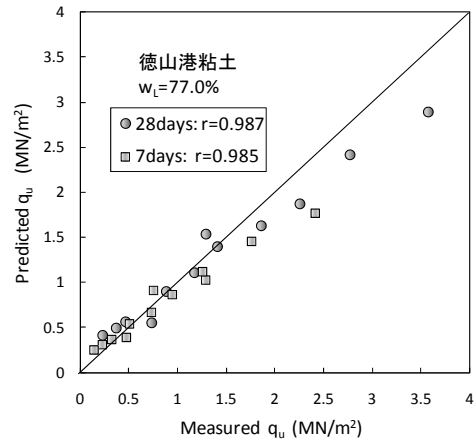


(b) 実測強度と予測強度の比較

図-4 東京湾粘土に関する(7)式の適用性の検討



(a) セメント添加率と $k_c(c-c_0)$ の関係



(b) 実測強度と予測強度の比較

図-5 徳山港粘土における(7)式の適用性の検討

セメント固化処理した海成粘土の強度推定法に関する一考察

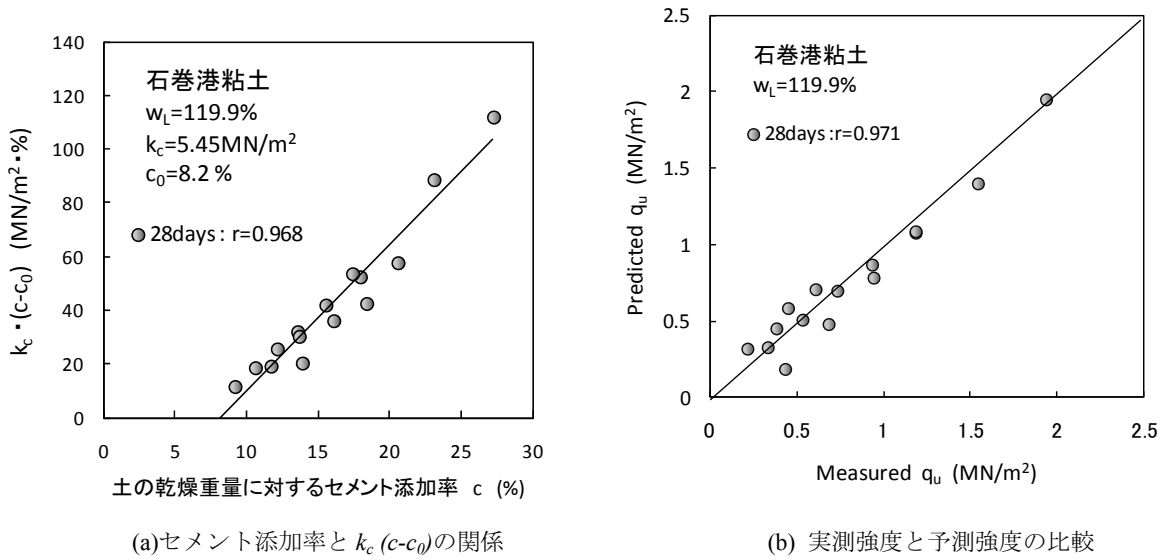


図-6 石巻港粘土における(7)式の適用性の検討

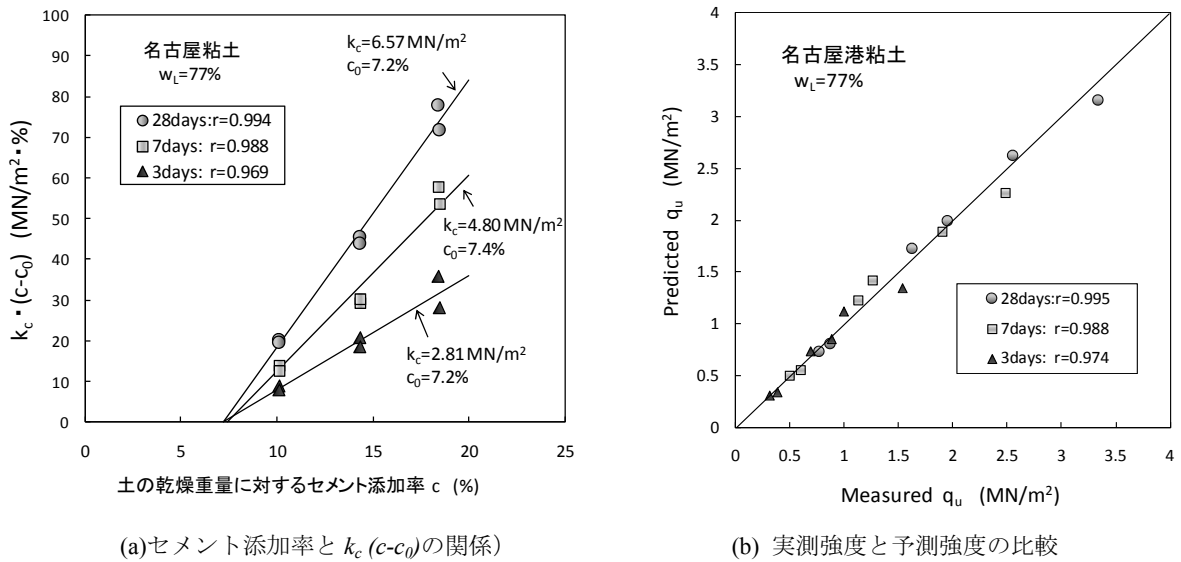


図-7 名古屋港粘土における(7)式の適用性の検討

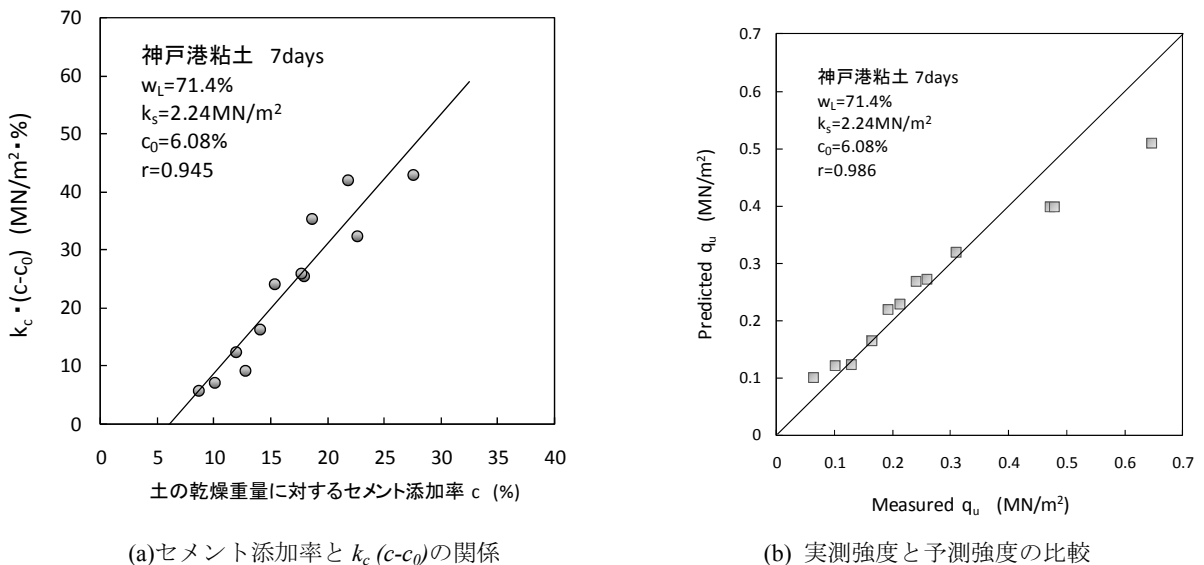
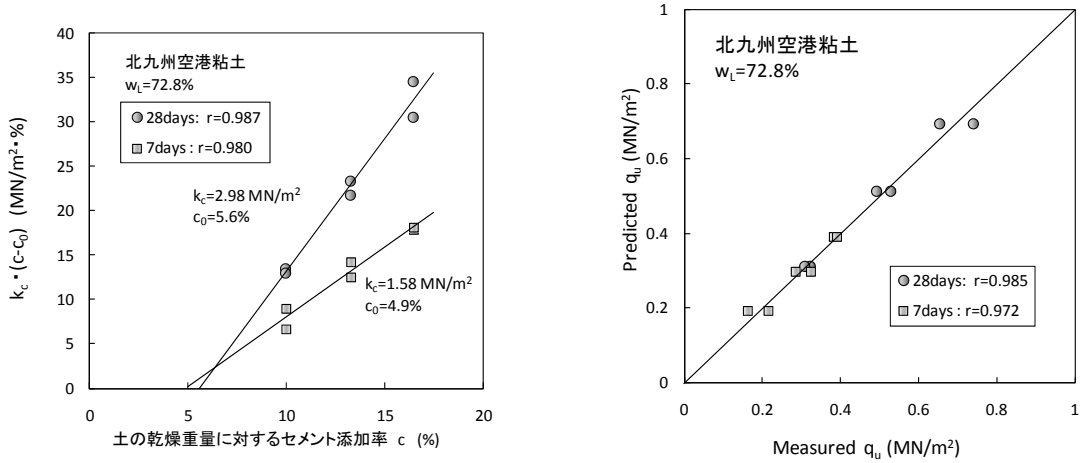


図-8 神戸港粘土における(7)式の適用性の検討



(a)セメント添加率と $k_c(c-c_0)$ の関係

(b) 実測強度と予測強度の比較

図-9 北九州空港粘土における(7)式の適用性の検討

図-4～図-9 で示したデータのほか、既往の文献のデータから求めた値も含めている^{(6), (7), (8), (9), (10), (11), (12)}。図のように k_c は低塑性粘土を除くと $1 \sim 7$ MN/m²·% の範囲にあり、粘土の液性限界と明確な関係はみられない。

図-11 は強度増加係数 k_c と最小セメント添加率 c_0 の関係である。材令による k_c の増加とともに、最小セメント添加率 c_0 は少しずつ増加する傾向を示している。

3.2 (7) 式の物理的意味について

今回の強度予測式は以下のようである。

$$q_u = \frac{G_s k_c (c - c_0)}{f^3} \quad (7)(\text{再掲})$$

すなわち、ここで $1/f$ は土の全体の体積中の土粒子の体積の比率（土粒子率）を意味するので、セメント処理土の強度は土粒子比率の 3 乗とセメント添加率に比例している。このことの物理的意味を考察してみる。

セメント混合による固化は土粒子の接触点のせん断抵抗として働いていると考えられる。セメント添加率は接触点におけるせん断強度を規定し、その大きさは最小セメント添加率を超えた分のセメント添加率に比例している。一方、処理土の x , y , z 方向を考えそれぞれの方向の土粒子間接触点の数が粒子比率に比例すると仮定すると、供試体全体で土粒子間接触点の数は土粒子比率の 3 乗に比例する。このようなメカニズムが(7)式に表されていると考えられる。

3.3 圧密圧力と強度の関係

(7)式を用いて圧密圧力とセメント固化処理土の強度について検討する。一般にセメント処理される粘土は液性限界以上の含水比でスラリーを作成して混合する。高含水比状態で練り返した粘性土では、正規圧密状態における体積

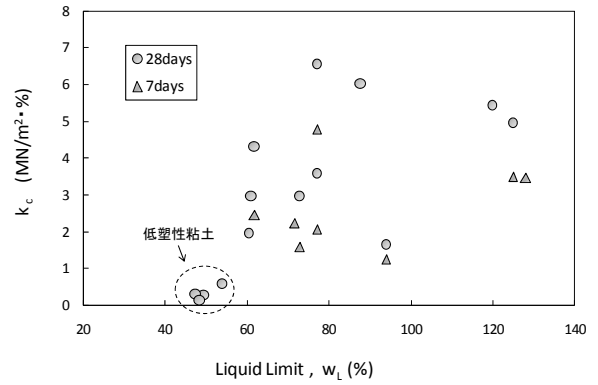


図-10 k_c と液性限界の関係

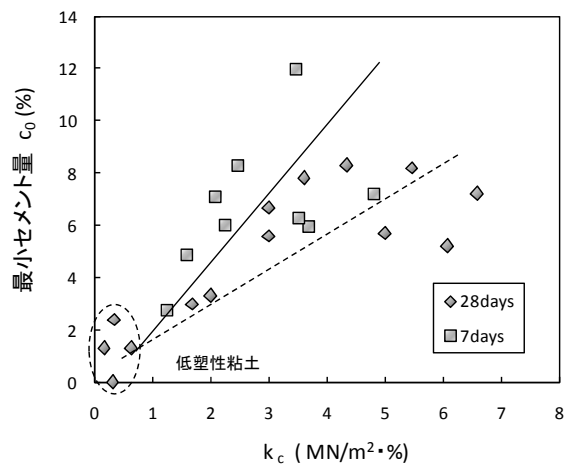


図-11 k_c と最小セメント量 c_0 の関係

比と有効圧密圧力 p の関係は、広い有効圧密圧力の範囲で、以下のように表すことができる¹³⁾。

$$\ln f = b - a \ln p \quad (10)$$

(10)式の a と b は液性限界と相関が高く、液性限界時の体積比 f_L によって次式で与えられる¹³⁾。

$$a = 0.12 \cdot \ln f_L \quad (11a)$$

$$b = 1.47 \cdot \ln f_L \quad (11b)$$

この関係がセメント処理土に用いる粘土スラリーにおいても成り立つと仮定すると、上式より、

$$f = \exp(b) \cdot p^{-a} \quad (12)$$

となる。これを(7)式に代入すると、

$$q_u = \frac{G_s k_s (c - c_0)}{\exp(3b) p^{-3a}} \quad (13)$$

(11a),(11b)式を代入すると、

$$\begin{aligned} q_u &= \frac{G_s k_s (c - c_0)}{\exp(4.41 \ln f_L) p^{-0.36(\ln f_L)}} \\ &= \frac{G_s k_s (c - c_0)}{f_L^{4.41}} p^{0.36(\ln f_L)} \end{aligned} \quad (14)$$

となる。

液性限界を 50%, 100%, 150% で $G_s \approx 2.70$ とすると $0.36(\ln f_L)$ はそれぞれ 0.31, 0.47, 0.58 となる。したがって、わが国の港湾地域の高塑性粘土のように液性限界が 70~100% の場合、セメント添加による強度発現はほぼ圧密圧力の 0.5 乗に比例することになる。

最近、笠間ら¹⁴⁾は、海成粘土にセメントを添加し、圧密養生を行うことによって、10MPa 以上の大きな強度を有するセメント処理土を造成できることを報告している。図-12 は笠間らの論文から引用した圧密圧力と一軸圧縮強度の関係である。図中で constant stress mode とあるのは、定圧で圧密養生した後に一軸圧縮強度を求めた結果であり、constant strain mode は定率ひずみで圧密したときの強度である。定率ひずみの圧密は圧密未了であり有効応力、含水分布が不確定なので定圧圧密試験の結果に着目すると図より、一軸圧縮強度は圧密養生圧力の 0.4~0.5 乗に比例しているようである。笠間らの論文によると用いられた熊本港粘土は $w_L=101\%$, $w_0=152\%$, $G_s=2.614$, $f_0=4.973$, $f_L=3.640$ であり、さらに筆者らが過去に有明粘土を用いて実施したセメント固化処理土の配合試験データから求めた $k_s=2.2\text{MN/m}^2$ (22kgf/cm²), $c_0=6.0\%$ を用いて(13)式より

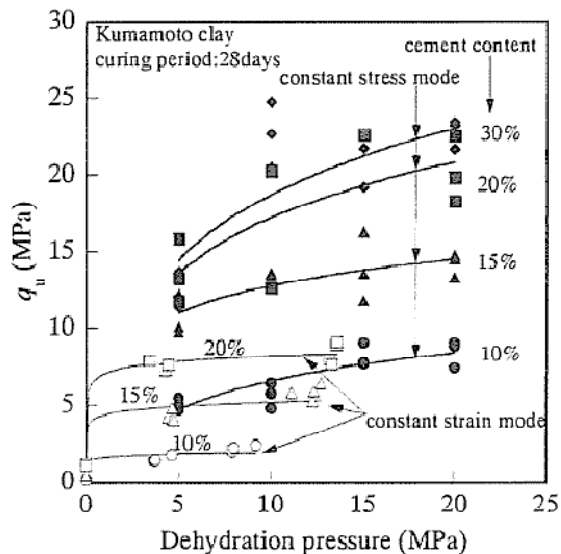


図-12 圧密圧力と一軸圧縮強度の関係 (Kasama et al.,2007)

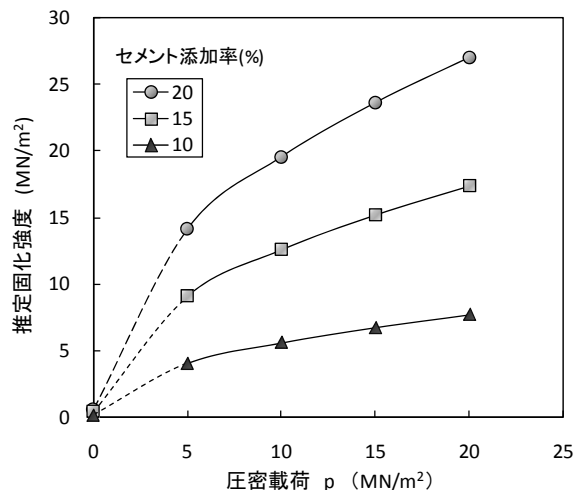


図-13 (13)式を用いた推定一軸圧縮強度

強度を推定した。図-13 は推定強度と圧密圧力の関係であるが、ほぼ図-12 の笠間らの実験結果に近い推定値が得られた。

以上のことから今回の提案式から求められた(13)式の関係は、一軸圧縮強度が 10MPa 以上の高強度セメント処理土においても成立している可能性がある。しかし、(13)式は自然粘土に関する体積比と圧密圧力を用いて誘導したが、セメント処理を行うことによって粘土の液性限界も変化し体積比-圧密圧力関係も異なってくる。この影響について今後さらに検討する必要がある。

筆者らは¹⁵⁾、セメントを添加しない粘性土の長期圧密によるせん断強度の増加を室内実験によって調べた。Tangらは強度増加を二次圧密による間隙比の減少によるものと、間隙比の変化によらないセメンテーションによる強度増加とに分離し、一定の有効応力のもとでは、セメンテー

ションによる強度の増加は時間の対数に比例して発現することを示した。さらに、経過時間が10倍になったときのせん断強度増加はそのときの有効土被り圧 σ_{v0}' の関数となっているとして、セメンテーションによる強度せん断強度増加分 $\Delta \tau$ に関する次式を提案している¹⁵⁾。

$$\Delta \tau = k \sqrt{\sigma_{v0}'} \cdot \left(\log_{10} \left(\frac{t}{t_0} \right) \right) \quad (15)$$

ここに k はセメンテーションによる強度増加を表すパラメータ、 t_0 は一次圧密終了時の時間である。(15)式は、本論文が取り扱うセメント処理土ではなく、通常の粘土が長時間かけて堆積し圧密する間のセメンテーションによる強度発現を示す式であるが、強度増加が有効圧密圧力の0.5乗に比例するという点が同様であることは興味深い。

4. 結論

1) セメント処理土の強度推定式として次式を提案した。

$$q_u = \frac{G_s k_s (c - c_0)}{f^3}$$

ここに、 c は土の乾燥重量に対するセメント添加率、 c_0 は強度発現のための最小セメント添加率、 f は土の体積比、 G_s は土粒子密度、 k_s はセメント添加による強度増加係数である。

2) わが国の港湾地域の海成粘土について、提案式の適用性を検討したところ、いずれの地域の粘土でも適用できることを確認した。
3) 提案式を用いて、セメント処理土の圧密圧力 p と強度の関係を表す次式を誘導した。

$$q_u = \frac{G_s k_s (c - c_0)}{f_L^{4.41}} p^{0.36(\ln f_L)}$$

ここに、 f_L は粘土の液性限界における体積比である。この式を笠間らが実施した10Mpa以上の強度を有するセメント処理土のデータについて適用した結果、実験値に近い推定値が得られた。

参考文献

- 1) 宮崎良彦：浚渫粘土の固化処理技術と水中打設工法に関する研究，九州大学大学院工学研究科，学位請求論文，2003。
- 2) 喜田大三，久保博，炭田光輝：汚泥の処分処理に関する研究（第3報）--セメント固化強度と水セメントとの関係へのpF水分の適用--，第12回土質工学発表会，pp.1309-1312，1977。
- 3) Tang, Y. X., Miyazaki, Y. and Tsuchida, T.: Practices of reused dredgings by cement treatment, *Soils and Foundations*, Vol.41, No.5, pp.129-143, 2001.10.
- 4) 宮崎良彦・湯怡新・落合英俊・安福規之・大嶺聖・土田

孝：セメント混合処理作業船を用いた浚渫土の有効利用，土木学会論文集 No.750/III-65, 193-204, 2003。

- 5) 平原毅，土田孝，平本真也：少量のセメントを添加した粘土の圧縮およびせん断特性に関する研究，地盤と建設，Vol.26, No.1, pp. 49~56, 2008。
- 6) 寺師昌明，奥村樹郎，光本司：石灰安定処理土の基本的特性に関する研究（第1報），港研報告 Vol.16, No.1, pp.3-28, 1977。
- 7) 寺師昌明，田中洋行，光本司，新留雄二，本間定吉：石灰，セメント系安定処理土の基本的特性に関する研究（第2報），港研報告 Vol.19, No.1, pp.33-57, 1980。
- 8) 馬場崎亮一，寺師昌明，鈴木健夫，前川淳，川村政史，深沢栄造：安定処理土の強度に及ぼす影響因子，地盤工学会，セメント安定処理土に関するシンポジウム，pp.42-56, 1996。
- 9) 卷瀨正治，土田孝，山根信幸，湯怡新，浜福健二：セメント固化処理した浚渫土の初期強度特性，第34回地盤工学研究発表会，pp.827-828, 1999。
- 10) 小泉信太郎，河田暢亮，三谷司郎：固化処理された海底浚渫土の一軸圧縮強度に及ぼす要因，第32回地盤工学発表会論文集，pp.2435-2436, 1997。
- 11) 鈴木健夫，国籐祚光：炭酸ガス添加による粘土地盤改良の基礎的研究，第27回土質工学発表会論文集，pp.2347-2348, 1992。
- 12) 三瀬貞，山田優，真嶋光保，根来日出晴：粘土，セメント混合物の強度の予測に関する一研究，第17回土質工学発表会論文集，pp.2713-2716, 1982。
- 13) 土田孝：海成粘土地盤の自然間隙比と土被り圧の関係に関する統一的な解釈，地盤工学会論文報告集，Vol. 41, No.1, pp.127-143, 2001。
- 14) Kasama, K., Zen, K., and Iwataki, K.: High-strengthening of cement treated clay by mechanical dehydration, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.2, pp.171-184, 2007。
- 15) Tang, Y.X. and Tsuchida, T.: The development of shear strength for sedimentary soft clay with respect to aging effect, *Soils and Foundations*, Vol.39, No.6, pp.13-24, 1999。

(2010年7月2日 受付)