

## 混合初期におけるセメント固化処理土の強度発現特性に関する実験的研究

## The Strength Mobilization of Cement Treated Clays During Initial Stages of Curing

脇岡宏行 Hiroyuki WAKIOKA (広島大学大学院工学研究科)  
 姜 庚吾 Gyeong O KANG (広島大学大学院工学研究科)  
 土田 孝 Takashi TSUCHIDA (広島大学大学院工学研究院)

セメント固化処理土は利用量、利用用途が拡大する一方で、強度発現メカニズムに関する知見に進展が見られていない。また、セメント固化処理土によって地盤を造成する場合、セメント混合直後からの強度特性を知ることが設計および施工性の判断において重要となる。そこで、各種の含水比、セメント添加率で作製したセメント固化処理土の経時的な強度発現を調べた結果、養生開始から1時間の強度は2つの直線で表すことができることを示した。また、養生期間72時間以内の強度増加プロセスに関しては、発現強度は養生期間との両対数グラフ上に直線的に増加し、強度増加係数を1つの式で示し、パラメーター $a_1, b_1$ から強度予測が概ね可能であることを示した。

キーワード：セメント固化処理土、セメント添加率、初期含水比 (IGC:D10)

## 1. はじめに

沿岸部の建設工事において発生する浚渫土は、高含水比で軟弱な粘性土が多く地盤材料として適さず建設廃棄物として埋立処分されるため、廃棄物処分場の有効運用という観点から浚渫土を有効利用する必要がある。さらに、良質な砂質土の入手が困難なことも相まって、セメント固化処理土は地盤材料として様々な用途で利用されてきた<sup>1)</sup>。近年では海上空港などの大規模な人工島の造成工事にも利用されており、2000年竣工の中部国際空港建設において、空港用地である約470haの海面埋立造成地のうち、名古屋港の航路浚渫土を原料とするセメント固化処理土は面積140ha、860万 $m^3$ に対して用いられ、管中混合固化処理工法により造成された<sup>2)</sup>。また、2010年竣工の東京国際空港(羽田空港)D滑走路増設工事において、全埋立土量である約3800万 $m^3$ の約15%にあたる約570万 $m^3$ (管中混合処理土490万 $m^3$ 、軽量混合処理土80万 $m^3$ )に対して東京湾の航路浚渫土を原料土とするセメント固化処理土が用いられている<sup>3)</sup>。

さらに、埋立材料や盛土としての利用のみならず、海面における廃棄物処分場の遮水構造を構成する中間保護土や遮水材としての利用、海中での築堤材としての利用、震災により沈下した地盤の嵩上げ、岸壁の耐震補強のための裏込め土の軽量化など利用用途が拡大しており<sup>4)</sup>、今後も浚渫土を原料とするセメント固化処理土を様々な用途に適用する必要性が高まると考えられる。

上記のような利用用途、利用量が拡大している一方で、

セメント固化処理土の強度発現メカニズムに関する知見は大きな進展が見られていないという現状がある。この理由として、セメント固化処理土は現場で発生した土を利用する場合がほとんどであり、土の種類や初期含水比、使用する固化材の種類等により発現強度が大きく異なることが挙げられる。このことから、現場においてはセメント固化処理土としての特性を明らかにするよりも、それぞれの現場で発生する発生土と様々な固化材を用いて行った配合試験結果を用いて発現強度を予測し、実務上の問題を解決するといった方法がとられてきた。しかし、セメント固化処理土をさらに広く利用するためには、一般的な力学特性等を把握し、建設分野における材料の一つとして活用していく方が合理的であると考えられる。

固化処理工法を採用するにあたり、まず把握すべき点は、軟弱土に対してどのく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点である。具体的な設計段階においては、固化処理の対象となる軟弱土を用いて室内配合試験を実施されることが望まれるが、工法検討段階では原料となる粘土の含水比やコンシステンシー、粒度分布などが把握できる程度なので、含水比とセメント配合量だけで固化強度を推定できれば、実務的な利用価値が高いと考えられる。また、セメント固化処理土によって地盤を造成する場合は、コンクリートのように打設後、所定の養生期間をとってから次の施工に移るという施工ではなく、打設直後のセメント固化処理土地盤の上に短時間で新たな処理土地盤を施工するケースが多い。したがって、様々な含水比におけるセメント添加直後からの強度特性を知るこ

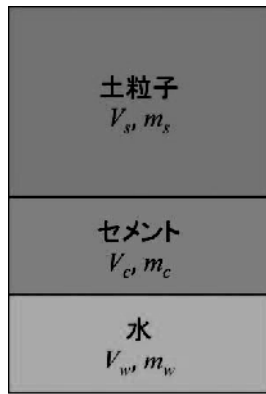


図-1 セメント固化処理土の構成要素

とが設計や施工性の判断において重要になる。

セメント固化処理土の強度を評価するために、以下の  
ような式が提唱されている<sup>5), 6)</sup>。

$$q_u = aw + b \tag{1}$$

$$q_u = a/(W/C)^C + b \tag{2}$$

$$q_u = aC/W^C + b \tag{3}$$

ここで、 $q_u$ はセメント固化処理土の一軸圧縮強度(kPa)、 $w$ は対象土の含水比、 $W$ は水の重量(kg/m<sup>3</sup>)、 $C$ はセメントの重量(kg/m<sup>3</sup>)、 $a$ 、 $b$ は各式におけるパラメーターである。式(1)は一軸圧縮強度と含水比が直線関係で表すことができるが、セメント含有量  $C$  が変化すると係数である  $a$ 、 $b$  の値が変わるため実用的でない。式(2)は、コンクリートの圧縮強度特性の考え方を応用したものであり、固化処理土中の水分量に対するセメント量の質量比(水セメント比)をパラメーターに一軸圧縮強度を予測している。また、式(3)はセメント含有量と粘土の含水比のべき乗により一軸圧縮強度を予測している。式(2)と式(3)はセメント固化処理土の水とセメントのみに着目しているため、土粒子の存在を直接的に考慮できていない。土田らは土粒子の存在を考慮した新たな強度予測式として次式を提案している<sup>7)</sup>。

$$q_u = k_c^* (c^* - c_0^*) Y^N \tag{4}$$

ここに、 $k_c^*$ は強度増加係数、 $c_0^*$ は強度発現に必要な最小セメント添加率(%)、 $Y$  はセメントを含めた体積固体分率であり、

$$Y = \frac{V_s + V_c}{V_s + V_c + V_v} \tag{5}$$

である。 $V_s$ 、 $V_c$ はそれぞれ土粒子とセメントの体積、 $V_v$ は固体分以外の間隙の体積であり、 $N$ はセメント処理土の間隙構造が強度に及ぼす定数、 $c^*$ はセメント添加率であり、式(6)に示すようなセメントを含む固体分全体に対するセ

表-1 徳山港粘土の物理特性

液性限界 $w_L$ (%)	塑性限界 $w_P$ (%)	塑性指数 $I_P$	土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )
107.6	35.4	72.2	2.64

表-2 セメント固化処理土の配合条件と養生期間

初期含水比 (セメント添加前) $w$ (%)	セメント 添加率 $c^*$ (%)	養生期間
1.5 $w_L$ (161.4)	2, 4, 6, 10	2, 5, 7, 10, 15(時間)
2.0 $w_L$ (215.2)	15, 20, 30	1, 2, 3 (日)

メントの比率で定義される。

$$c^* = \frac{m_c}{m_s + m_c} \times 100(\%) \tag{6}$$

しかし、これらの強度予測式はいずれもセメント添加後3日以上経過したセメント固化処理土を対象としている。そこで、土田らはセメント添加直後のセメント固化処理土の強度発現を調べ、強度発現特性がセメント混合後3日以内と3日以上で異なる傾向を示すことを明らかにしている<sup>8)</sup>。しかし、土田らの実験はセメント添加率 10%以上を対象としたものであった。

そこで、本研究ではセメント添加率を2%から30%まで変化させ、混合直後からの強度特性を実験的に調べた。

## 2. 試料および実験方法

### 2.1 セメント添加率の定義

図-1 に飽和状態におけるセメント固化処理土の構成要素を示す。本研究ではセメント添加率を式(6)に示すように、土粒子質量とセメント質量の和をセメント固化処理土の固体部の質量とし、セメント固化処理土の固体部の質量に対するセメント質量の比率で表している。

一般的にはセメント固化処理土のセメント添加率は次式のような土粒子質量に対するセメント質量で示されることが多い。

$$c = \frac{m_c}{m_s} \times 100(\%) \tag{7}$$

本研究において式(7)ではなく、式(6)を用いた理由は、セメント添加直後からの強度の変化を検討するうえで、セメント添加による固体成分の増加による効果と、セメントの化学反応の効果に分けることを考え、固体成分の質量( $m_s + m_c$ )に注目したためである。式(6)を用いると土の質量に対してセメントの質量が著しく多い場合であっても適

用しやすいと考えた。ここで、セメント添加による固体成分の増加による効果とは、セメントを添加することで固体成分が増加し、物性が変化することを指している。

## 2.2 実験試料

実験試料は徳山港において浚渫された粘土（以下、徳山港粘土と表記）を用いて行った。表-1 に徳山港粘土の物理特性を示す。また、セメントは普通ポルトランドセメント ( $\rho_c=3.15\text{g/cm}^3$ )を使用した。

本研究では、様々な条件下での強度発現について調べるために 2 種類の初期含水比、7 種類のセメント添加率で作製した供試体に対して経時的にせん断試験を行い、供試体のせん断強度が時間の経過とともにどのように変化していくかを調べた。表-2 に本研究において強度を求めたセメント固化処理土供試体の初期含水比、セメント添加率、養生期間の一覧を示す。

以下に本研究で用いたセメント固化処理土の作製方法を示す。

- (1) 粘土と蒸留水の冷却：徳山港粘土と練混ぜに使用する蒸留水を  $0\sim 2^\circ\text{C}$  に冷やす。これは粘土とセメントを攪拌する際にセメントの化学反応を抑制し、混合後にセメントによる固化を発現させるためである<sup>9)</sup>。
- (2) セメントミルクの作製：セメントミルクとは、蒸留水にセメントを溶かしたものである。セメントミルクの配合は、セメントの質量と蒸留水の質量が 1:1 となるように調整した。ただし、初期含水比が  $1.5w_L$ 、セメント添加率  $c^*$  が 30% の試験において、セメント質量が加える蒸留水質量より大きくなった。この場合はセメントミルクの配合をセメント質量：蒸留水質量 = 1 : 0.5 とした。
- (3) セメントミルクの添加と混合：セメントミルクを粘土に添加し、ハンドミキサーを用いて 2 分間混合する。このとき、セメントミルク中の水分を考慮し、粘土の含水比が設定した初期含水比になるように調整した。その後、真空ミキサーを用いて 30 分間試料を混合した。このとき、(1)と同様の理由で真空ミキサーの容器を氷水を用いて  $0^\circ\text{C}$  程度の水温を保ち攪拌した。
- (4) モールドへの打ち込みと養生：攪拌終了後、直径 50mm×高さ 100mm のサミットモールド（一軸圧縮試験用供試体の作製用）と直径 60mm×高さ 60mm のベーンせん断試験用モールドに試料を充填する。各モールドに蓋をすることで試料の乾燥を防ぎ、ベーンせん断試験用モールドは室温  $20^\circ\text{C}$  で養生し、サ

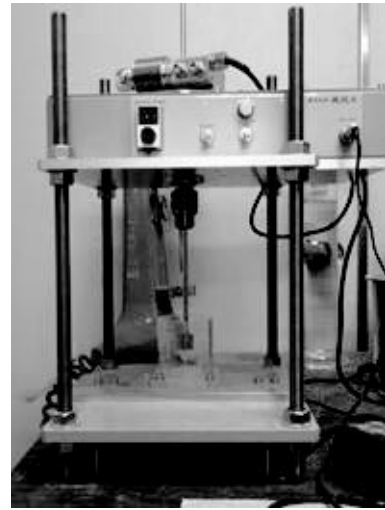


図-2 ベーンせん断試験機

ミットモールドは室温  $20^\circ\text{C}$  の部屋に置かれた水槽中で水中養生を行った。

以上の方法において、攪拌が終了してからモールドに試料を充填し、養生を開始するまでに 30 分要したため、攪拌終了 30 分後を養生開始時間と設定した。

## 2.3 実験方法

作製したセメント固化処理土供試体のせん断強度の測定は、セメント添加直後からある時間までは供試体が軟弱で自立できないため、ベーンせん断試験を用いて非排水せん断力  $s_u$  を測定し、化学反応が進むことで固化が進み、供試体が自立できるようになって以降は一軸圧縮試験を用いて一軸圧縮強度  $q_u$  を測定した。ここで、セメント固化処理土の配合試験などではベーンせん断強度  $s_u$  ではなく、一軸圧縮強度  $q_u$  を用いるのが一般的であるため  $s_u=1/2q_u$  ではなく、 $q_u=2s_u$  として計算を行った。

### 2.3.1 ベーンせん断試験

本研究では、ベーンを供試体表面からベーンの上端までの距離が 2cm になるように貫入し、ベーン回転速度は  $6^\circ/\text{min}$  で試験を行った。図-2 は本研究で用いたベーンせん断試験機である。また、ベーンせん断強度  $s_u$  は、ベーンシャフトと供試体の摩擦の影響が考慮された次式を用いて計算した。

$$s_u = \frac{M}{\pi \left( \frac{D^3}{6} + \frac{HD^2}{2} - \frac{d^3}{12} + \frac{d^2La}{12} \right)} \quad (8)$$

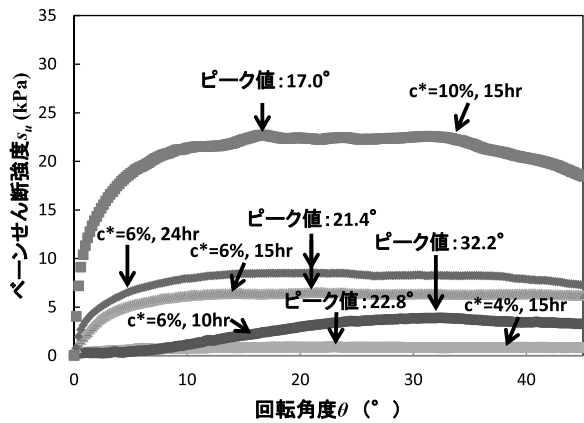


図-3 ベーンせん断強度と回転角度の関係

ここで、 $M$  は測定最大トルク (N・m)、 $d$  はベーンシャフトの直径 (mm)、 $L$  はベーンシャフトと供試体の接触部の長さ、つまりベーンの貫入距離 (mm)、 $D$  はベーンブレードの幅 (mm)、 $H$  はベーンブレードの高さ (mm)、 $a$  はベーンシャフトの表面摩擦  $f_s$  を  $f_s = a\tau_v$  から求めるときの摩擦係数である。本研究では、 $d=2\text{mm}$ 、 $L=20\text{mm}$ 、 $D=20\text{mm}$ 、 $H=20\text{mm}$ 、 $a=1.0$  を用いた。

図-3 はベーンせん断試験におけるせん断強度と回転角度の関係であり、最大せん断強度が現れる時の回転角度も示している。この図より、セメント添加率  $c^*$  が小さいときや養生期間が短いときなど固化が進んでいないときは最大せん断強度が現れる回転角度が大きく、固化が進むにつれて最大せん断強度の時の回転角度が小さくなる傾向があることがわかる。また、固化が進むにつれ多少は減少が見られるようになるが、全体的にせん断強度のピークを過ぎた後も強度の大幅な減少がないことがわかる。固化が進んでいない場合はベーンブレードによって乱された箇所から供試体が流れ込むため、供試体にせん断面が現れない。しかし、固化が進むと供試体にせん断面が現れ、ベーンによってせん断される箇所とせん断されない箇所に分かれてしまったため、回転角度に伴うせん断強度の挙動に違いが生じたと考えられる。

### 2.3.2 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験は日本工業規格 JIS A 1216 に準拠して行い、ひずみ速度は 1%/min である。また、一軸圧縮強度は次式を用いて算出した。

$$q_u = \left( \frac{N}{A} \right) \times \left( 1 - \frac{\varepsilon}{100} \right) \quad (9)$$

ここで、 $N$  は圧縮力 (N)、 $A$  は供試体断面積 ( $\text{cm}^2$ )、 $\varepsilon$  は圧縮ひずみである。図-4 は一軸圧縮試験の破壊形状を示している。

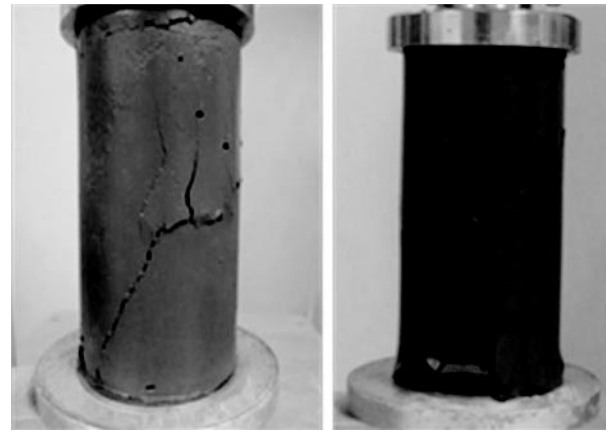


図-4 一軸圧縮試験の破壊形状  
(左：せん断破壊、右：引張り破壊)

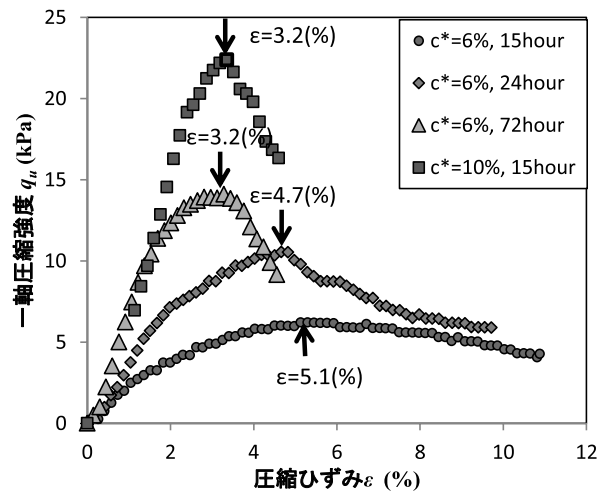


図-5 応力-ひずみ曲線

図-5 は一軸圧縮強度と圧縮ひずみの関係である。セメント添加率  $c^*$  が小さく、養生期間が短いときには破壊時の圧縮ひずみが大きく、破壊後の強度減少が緩やかであるのに対し、セメント添加率  $c^*$  や養生期間が増加すると強度増加に対する圧縮ひずみが小さくなり、破壊時の圧縮ひずみは約 3% であることがわかる。これは、セメント添加率  $c^*$  が小さく、かつ養生期間が短いときには脆性的な破壊をしないのに対し、セメント添加率  $c^*$  や養生期間が増加し固化が進むと脆性的な破壊を起こすためであると考えられる。

### 3. 実験結果

図-6 は養生期間 72 時間の範囲における強度の経時変化を示している (左図は初期含水比が  $1.5w_L$ 、右図は初期含水比が  $2.0w_L$ )。図のように養生期間の経過とともに強度は増加している。しかし、一部で強度が減少しているデータ

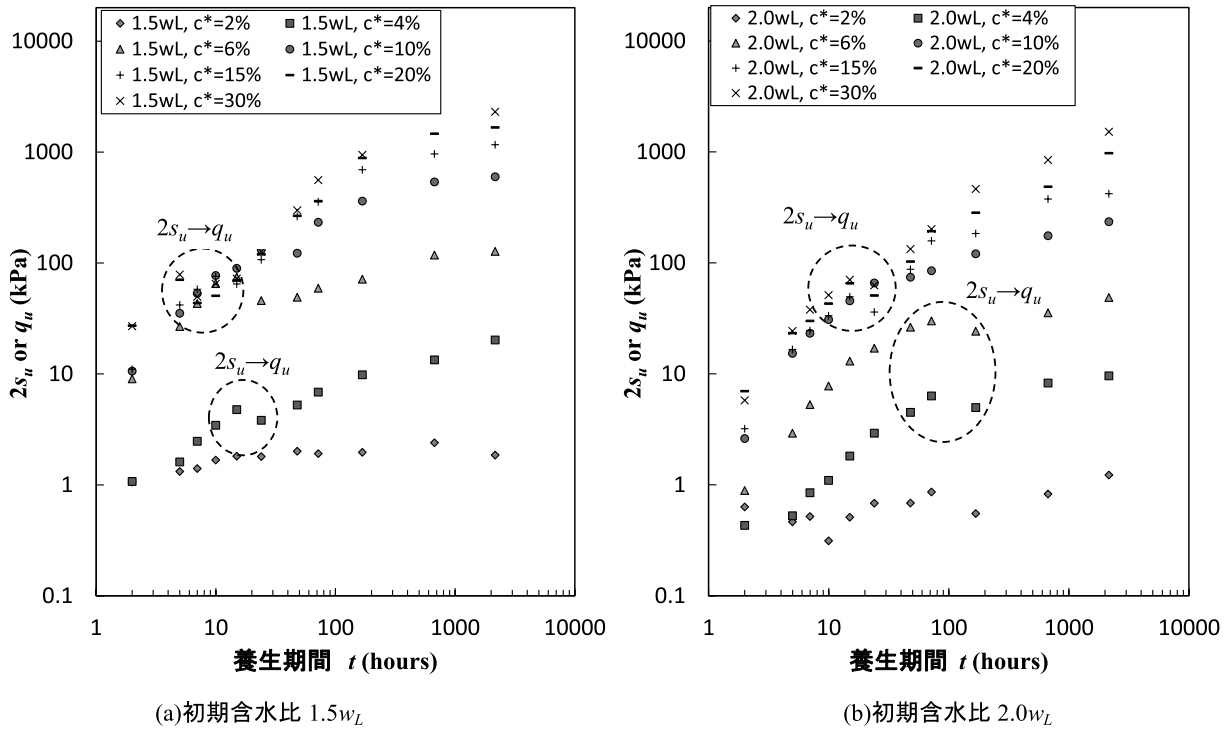


図-6 セメント固化処理土の構成要素

が存在する(図-6 中の丸印)。これは、供試体の固化が進行し、ベーンせん断試験でのせん断強度測定が困難となり、一軸圧縮試験によって測定し始めたところで発生している。この原因として以下のようなものが考えられる。

- (1) ベーンせん断試験を行った供試体は養生期間が短期であったため気中養生で養生を行ったのに対して、一軸圧縮試験を行った供試体は水中養生で養生を行った。この養生方法の違いが強度に影響を及ぼした。
- (2) ベーンせん断試験はベーンの回転抵抗で強度を算出するのに対して、一軸圧縮試験は供試体を圧縮する力から強度を算出する。モールドに供試体を充填する際に完全に均一にすることが出来なかった、あるいはサミットモールドから脱型する際に供試体に弱点となる部分ができ、弱点となる部分に集中応力が働き、一軸圧縮強度を過小評価した可能性がある。

ベーンせん断強度  $2s_u$  と一軸圧縮強度  $q_u$  の強度差の傾向を明らかにするために、同じ配合条件の供試体(図-6 中の丸印)に対してベーンせん断試験と一軸圧縮試験を行い、ベーンせん断強度と一軸圧縮強度の関係を検証した。図-7 はベーンせん断強度と一軸圧縮強度の関係を示している。この図より、一軸圧縮強度とベーンせん断強度は直線関係があり、概ね  $q_u = s_u$  に近い。実験により得られた一軸圧縮強度とベーンせん断強度から式(10)のような補正係数  $\mu$  を算出し、その結果を図-8 に示す。

$$\mu = q_u / 2s_u \quad (10)$$

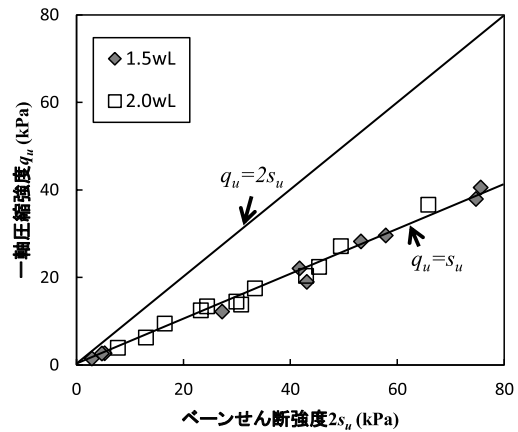


図-7 一軸圧縮強度とベーンせん断強度の関係

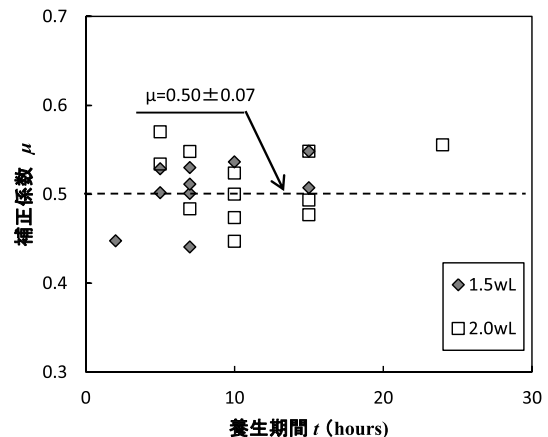


図-8 補正係数  $\mu$  ( $q_u/2s_u$ )

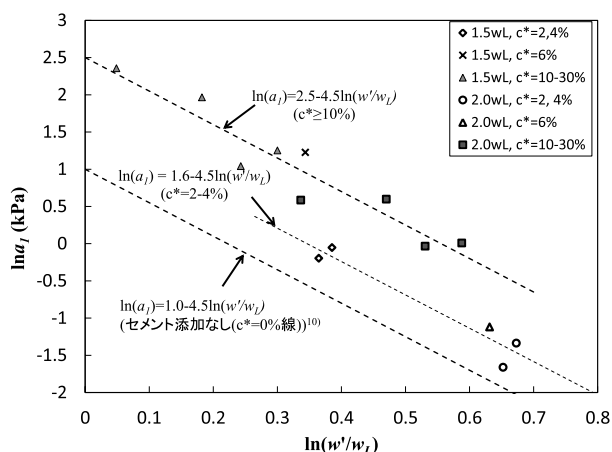


図-9 養生1時間時強度  $a_1$  と正規化含水比  $w'/w_L$  の関係

図-8 より、養生期間と補正係数との間には次式のような関係が得られた。

$$\mu = 0.50 \pm 0.07 \quad (11)$$

図-8 および式(11)より、養生期間に関係なく、補正係数がほぼ一定であることがわかる。つまり、養生期間に関係なく、一軸圧縮強度とベーンせん断強度にはほぼ一定の関係があるといえる。本研究では補正係数  $\mu$  を用いることで、一軸圧縮強度とベーンせん断強度の強度差を補正することとし、 $\mu=0.50$  を用いた。

### 3.1 養生期間1時間での強度特性

セメントを粘土スラリーに添加したときの含水比を  $w'$  とし、式(12)のように定義する。

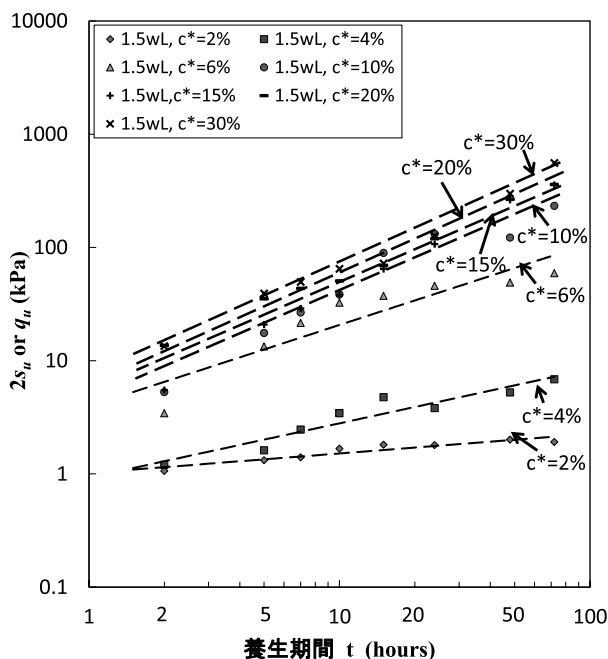
$$w' = \frac{m_w}{m_s + m_c} \times 100(\%) \quad (12)$$

図-9 はセメントを粘土スラリーに添加したときの含水比  $w'$  を液性限界  $w_L$  で正規化し、対数表示化した  $\ln(w'/w_L)$  と1時間養生時のせん断強度  $a_1$  を対数表示化した  $\ln a_1$  の関係である。ここで、養生期間1時間時の強度  $a_1$  は、養生期間72時間までにおける強度と養生期間の両対数グラフ上に近似直線を描くことで算出した。図中には本研究で行った全試験ケースの強度がプロットされており、ばらつきは多少あるものの、本研究ケースにおいてはセメント添加率6%を境に式(13)の形で表すことができる直線関係が2つ得られた。

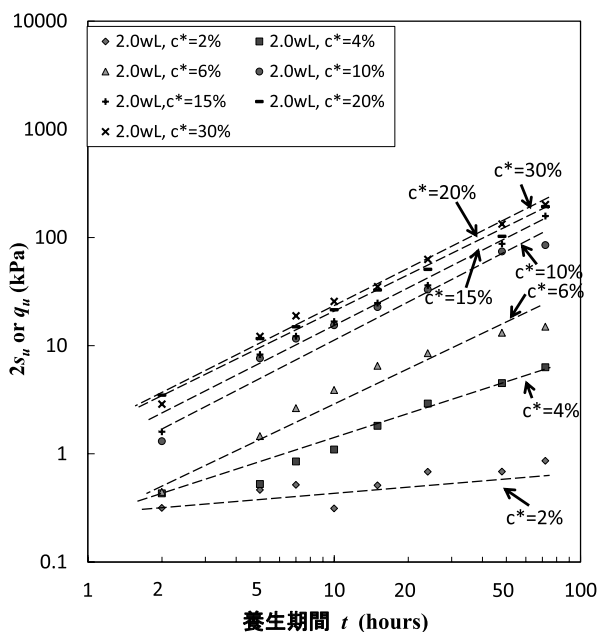
$$\ln a_1 = c_1 - c_2 \ln(w'/w_L) \quad (13)$$

回帰直線を求めると、セメント添加率10%以上の場合は  $c_1=2.5, c_2=4.5$  であり、セメント添加率4%以下の場合は  $c_1=1.6, c_2=4.5$  であった。式(13)を用いて、セメント添加率10%以上の場合とセメント添加率4%以下の場合の養生1時間強度  $a_1$  を求めると、次式ようになる。

$$a_1 = 12.2(w'/w_L)^{-4.5} \quad (c^* \geq 10\%) \quad (14)$$



(a) 初期含水比  $1.5w_L$



(b) 初期含水比  $2.0w_L$

図-10 強度の経時的変化

$$a_1 = 4.9(w'/w_L)^{-4.5} \quad (c^* \leq 4\%) \quad (15)$$

ここで、比較のためにセメント無添加時の正規化含水比とせん断強度の関係について検討する。土田ら<sup>10)</sup>は、セメント無添加時の練返した粘土の非排水強度  $s_u$  を式(16)のように表すことができると示しており、その結果を図-9中に示す。

$$s_u = 1.4(w'/w_L)^{-4.5} \quad (16)$$

$$\ln(2s_u) = 1.0 - 4.5 \ln(w'/w_L) \quad (17)$$

セメント混合後の正規化含水比である  $w'/w_L$  とせん断強度の関係を示す図-9より、2%以上のセメントを添加すると、1時間の養生期間でセメントを添加していない粘土 ( $c^*=0\%$ 線)より大きな強度を発現していることがわかる。そして、本研究で行った試験ケースにおいて、セメント添加率が10%以上になるとセメント添加率や初期含水比に依存しない一定の強度を発現し、セメント添加率4%以下においても同様の傾向が見られた。しかし、セメント添加率6%の試験ケースにおいては初期含水比によって発現強度が異なる傾向が見られ、発現強度の遷移領域になっている可能性がある。セメント添加直後の強度増加の理由として、水和物の生成に伴う供試体中の自由水の減少が考えられ、セメント添加率6%の試験のように初期含水比の違いによって強度差が生じることは説明できる。しかし、セメント添加率10%以上の試験と4%以下の試験のようにセメント添加率を変化させても発現強度にあまり影響しない点は十分に説明できない。したがって、添加直後の強度発現メカニズムに関しては今後さらなる検討が必要である。

### 3.2 養生期間 72 時間以内での強度特性

図-10は養生期間 72 時間の範囲における強度の経時変化を示している。この図より養生期間 72 時間までの範囲においては、強度と養生期間は両対数グラフにおいてほぼ直線関係になることがわかる。したがって発現強度は次式のようになる。

$$\ln(q_u) = \ln(a_1) + b_1 \ln(t) \quad (18)$$

$$q_u = a_1 t^{b_1} \quad (19)$$

式(18)および式(19)において  $t$  は養生期間であり、強度  $q_u$  としては一軸圧縮強度あるいは養生期間の短い場合はベーンせん断強度の2倍の値を示している。また、式中の  $a_1$  は3.1で考察した養生期間1時間における強度(kPa)であり、 $b_1$  は強度増加係数(両対数グラフにおける強度と養生期間の勾配)である。図-10に示す養生期間72時間以内のデータを式(18)に当てはめ、強度増加係数  $b_1$  を決定した。

図-11は強度増加係数  $b_1$  とセメント添加率  $c^*$  の関係を示している。この図より、セメント添加率が小さいときは強度増加係数もゼロに近いことがわかる。さらに、セメント添加率が増加すると初期含水比に関係なく強度増加係数も増加することがわかる。

図-11より、強度増加係数とセメント添加率の関係を次式のような回帰曲線で求める。

$$b_1 = d_3 \ln(c^* - d_4) + d_5 \quad (20)$$

図-11より、強度を発現するのに最低限必要な最小セメント添加率が存在することがわかる。したがって、最小セメント添加率を考慮するために式(20)中にパラメーター  $d_4$  を用いている。

式(20)よりパラメーターを算出すると、 $d_3=0.266$ 、 $d_4=1.0$ 、 $d_5=0.216$  となった。

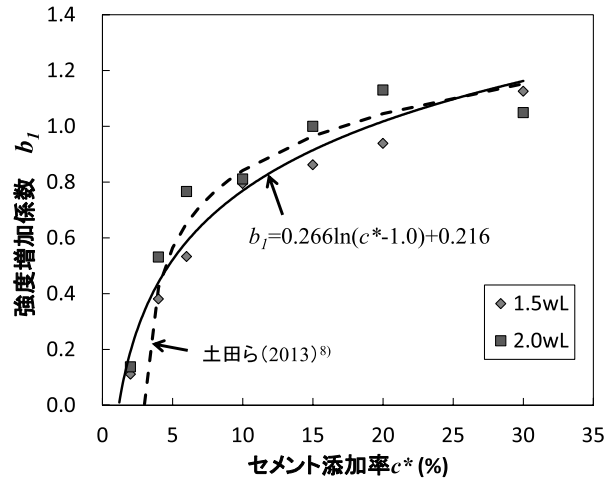


図-11 強度増加係数  $b_1$  とセメント添加率  $c$  の関係

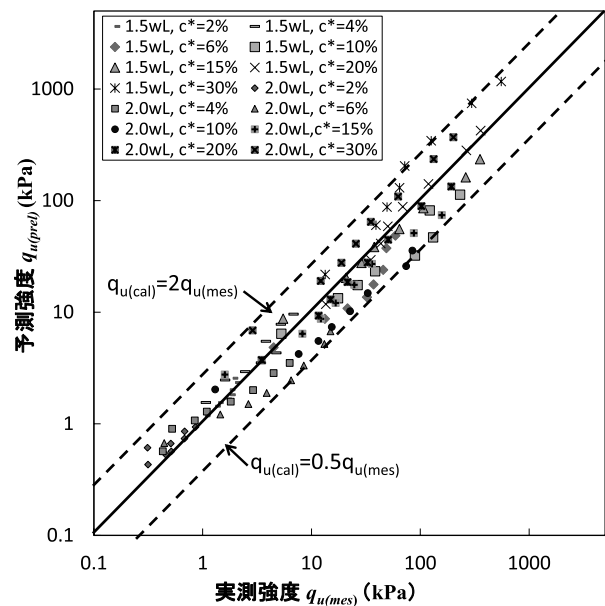


図-12 予測強度と実測強度の比較

図-11中に水島港粘土、ひびき粘土、門司港粘土を用いた既往の研究によって得られた強度増加係数も示す<sup>8)</sup>。この図より、本研究で得られた結果は既往の研究で得られた結果とほぼ同等であるといえる。

式(19)に式(14)、式(15)と式(20)を代入し整理することで次式のような強度予測式を立てることが出来る。

$$q_u = 12.2(w'/w_L)^{-4.5} t^{0.266 \ln(c^* - 1.0) + 0.216} (c^* \geq 10\%) \quad (21)$$

$$q_u = 4.9(w'/w_L)^{-4.5} t^{0.266 \ln(c^* - 1.0) + 0.216} (c^* \leq 4\%) \quad (22)$$

式(21)あるいは式(22)を用いて強度予測を行い、図-12に予測強度と実験を通して得られた実測強度の関係を示す。この図より、実測強度と予測強度の間には多少のばらつきが見える。パラメーター  $a_1$  と  $b_1$  は式(14)、式(15)、式(20)のような近似式で表されているため、各条件における実際の  $a_1$  や  $b_1$  と比較して値が過大評価あるいは過小評価

されている。したがって、パラメーター $a_1$ と $b_1$ の組み合わせによって成り立っている式(21)と式(22)は実測強度と比較して多少のばらつきが見られると考えられる。しかし、実測強度と予測強度は概ね一致しているため、原料土の初期含水比やセメント添加率等の条件が異なってもセメント固化処理土の強度予測は概ね可能であると考えられる。

#### 4. 結論

セメント固化処理土の初期強度発現特性について検討するために、徳山港粘土を用い、各種含水比、セメント添加率でセメント固化処理土を作製し、ベーンせん断試験と一軸圧縮試験によりせん断強度を測定した。実験結果をもとに得られた結論を以下に示す。

- (1) 添加直後(養生期間 1 時間)におけるせん断強度 $a_1$ と正規化含水比 $w/w_L$ の関係をみると、いずれのセメント添加率においても無添加の場合より大きな強度を発現している。養生期間 1 時間時の強度はセメント添加率 4%以下のとき、10%以上のときでそれぞれ次式のような直線で表すことができる。

$$a_1 = 12.2(w/w_L)^{-4.5} \quad (c^* \geq 10\%)$$

$$a_1 = 4.9(w/w_L)^{-4.5} \quad (c^* \leq 4\%)$$

- (2) 養生期間 72 時間までのせん断強度は、せん断強度と養生期間の両対数グラフ上で直線的に増加し、強度増加係数はセメント添加率 $c^*$ とともに増加し、次式で表すことができる。

$$b_1 = 0.266 \ln(c^* - 1.0) + 0.216$$

- (3) (1), (2)で求めた式から次式のような強度予測式が得られた。

$$q_u = 12.2(w/w_L)^{-4.5} t^{0.266 \ln(c^* - 1.0) + 0.216} \quad (c^* \geq 10\%)$$

$$q_u = 4.9(w/w_L)^{-4.5} t^{0.266 \ln(c^* - 1.0) + 0.216} \quad (c^* \leq 4\%)$$

#### 謝辞

本研究は、平成 25 年度文部科学省科学研究費による研究課題「第 3 の土木材料—固化処理土—の強度発現メカニズムの解明 (課題番号 25289146)」の成果の一部である。

ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 佐藤恒夫：中部国際空港埋立用地造成への管中混合固化処理工法の適用, 土木学会論文集, No.749, VI-61, pp.33-47, 2003.
- 3) Watabe, Y. and Noguchi, T.: Site-investigation and geotechnical design of D-runway construction in Tokyo Haneda Airport, Soils and Foundations, Vol.51, No.6, pp.1003-1018, 2011.
- 4) 渡部要一, 古野武秀, 土田孝：浚渫泥土を利用した貧配合セメント処理土の力学特性, 土木学会論文集, No.694, III-57, pp.331-342, 2001.
- 5) 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.
- 6) 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, pp.193-204, 2003.
- 7) 土田孝, 湯怡新：海成粘土を用いたセメント固化処理土の強度推定法, 地盤工学ジャーナル, Vol.7, No.3, pp.435-447, 2012.
- 8) 土田孝, 湯怡新, 嶋川奈津美, 安部太紀：高含水比の海成粘土を原料土とするセメント固化処理土の強度発現過程に関する研究, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.1, pp.53-70, 2013.
- 9) 平原毅, 土田孝, 平原真也：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.
- 10) 土田孝, 洪振舜, 渡部要一, 小川富美子：繰り返した粘性土の非排水強度と正規化含水比の関係, 第 34 回地盤工学研究発表会, pp.543-544, 1999.

(2014 年 6 月 20 日 受付)