

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289146

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) The 3rd Construction Material, the Study on Mechanism of Strength Mobilization of Cement-Treated Soil

研究代表者

土田 孝 (Tsuchida, Takashi)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10344318

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,000,000円

研究成果の概要(和文)： 固化処理直後から長期間に至るセメント固化処理土の強度及び変形係数の発現特性について、主に室内力学試験により一連の研究を実施した。その結果いかにわかった。

- 1)海成粘土を原料土とするセメント固化処理土の予測式として、水セメント比を用いる式に替わる新たな実用強度推定式を提案した。提案式は現行の水セメント比による式に比べ格段に精度が高いことを明らかにした。
- 2)セメント固化処理土の混合直後からの強度発現を表現する式を提案した。本式は1)の実様式とも整合しており、原料土の間隙率(あるいは体積固体分率)とセメント添加率の役割をそれぞれ明らかにしていることが特徴である。

研究成果の概要(英文)： A formula to estimate unconfined compressive strength of cement-treated marine clays is proposed. In the proposed formula, the strength of cement-treated soil is given by volumetric solid content, strength increase coefficient due to cement, and exponential parameter N representing the effect of the void structure of soil and cement content on the solid material of soil. On comparing the estimates with those using a conventional formula based on water cement ratio, the proposed formula generated better-fit estimates. On the basis of the results obtained from the laboratory tests, it was found that the strength mobilization process can be divided into two stages; first stage within 3 days after curing (the early stage of curing) and the second stage 3 days after the curing. Two equations to evaluate strength during early stages of curing were proposed based on the normalized initial water content and normalized specific volume ratio.

研究分野：地盤工学

キーワード：セメント固化処理土 浚渫土 海成粘土 一軸圧縮強度 含水比 セメント添加率 港湾 養生時間

## 1. 研究開始当初の背景

土に固化材を添加混合した固化処理土は、地盤改良工法として研究・利用されてきたが、近年、土木構造物を構成する主要な材料としてさまざまな用途で使用されており、締固め土、コンクリートに次ぐ「第3の土木材料」になりつつある。2003年に完成した中部国際空港において空港島470haのうち140ha(860万 $m^3$ )を浚渫土を固化処理した土で埋め立て造成したこと(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, -61,2004)をきっかけとして、土構造物本体の構成材料としての利用が急速に進んでいる。固化処理土に気泡を混合し軽量性を付加して使用する場合も含め、東京国際空港では490万 $m^3$ のセメント固化処理土と80万 $m^3$ の軽量混合処理土が空港本体の構築に使用された(Watabe and Noguchi, Site-investigation and geotechnical design of D-runway construction in Tokyo Haneda Airport, Soils and Foundations, 51(6), 2011)。

このほか、管理型処分場のシート保護土層、人工干潟・浅場造成材、東日本大震災で沈下した地盤のかさ上げ、福島第一原発海底覆土、シンガポール港パシルパンジャンターミナルなど利用用途は年々拡大している。固化処理土の利用の拡大は、不要となった土(浚渫土や第四種建設発生土など)のリサイクル、宅地需要の減少と環境保護規制による自然地盤材料の供給減少などの社会的な変化、要請を背景としており、今後もさらに続くと考えられる。

しかし、一方で、固化処理土の強度発現メカニズムに関しては、研究上の進展がみられていない。土構造物の設計と配合に必要な強度発現推定式は、コンクリートと同様に水セメント比を用いる式(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3版, 2007)が用いられているが、地盤材料として不可欠な固体(土粒子および固化材)と間隙(流体)との質量比あるいは体積比に関するパラメータ(含水比や間隙比)が含まれていない。固化処理土では土の含水比が50~300%以上と広範囲となるので、水セメント比を用いた式で推定した強度と実測強度の相関性は低いのが実状である。

さらに、コンクリートについては強度発現機構が化学反応の段階からシミュレーションできるレベルまで解明が進んでいるが、処理土の場合は固化材添加後の強度発現を定量的に分析するための知見がほとんど得られていない。土の種類によって発現する強度が大きく異なることが知られているものの、現場技術者の経験的な対処で済まされてしまい、学術的な解明がほとんどなされていない。

## 2. 研究の目的

土木構造物を構成する主要な材料とし用

途が拡大しているセメント系固化処理土の強度発現メカニズムを明らかにし、合理的な試験法と設計法を提案することを目的として以下の項目を達成する。

(1) 各種条件の原料土、固化材を用いた固化処理土の時間-強度関係を把握する。

計画的に時間と発現強度の関係を調べ、添加混合直後、短期(3日以内)、長期(3日以降)における固化処理土の強度発現特性を明らかにする。考慮する条件は、原料土に関しては、土の粒度と塑性(砂分含有率、液性限界)、粘土鉱物(スメクタイト混合率など)、有機分含有率、土の間隙水(海水または清水、pH、含まれるイオン)および固化材に関しては、固化材の種類(普通ポルトランドセメント、高炉セメントほか成分の調整)である。

(2) 強度を求めた固化処理土の内部における経時的な化学反応を明らかにする。室内で作成した供試体について、各養生時間において、熱分析試験による結合水量の測定と、粉末X線回折による生成鉱物の同定を行う。

(3) 固化処理土の強度と内部の化学反応の関連を明らかにし、強度発現モデルを構築する。対象とする化学反応として、セメントの水和反応を詳細に検討するが、加えて、気中の炭酸化反応の影響についても基礎的な検討を行う。また、実工事における施工管理データの解析および施工後の固化処理土地盤のコアの調査を行い、強度発現モデルの適用性を検討する。

(4) 得られた知見より、固化処理土の合理的な試験法と設計法を提案する。

## 3. 研究の方法

(1) 固化処理土の強度発現に影響を及ぼす要因の抽出と実験条件の検討

経験的に固化材を添加しても強度が発現しにくい土の条件として、土の粒度(砂分含有率が多い場合など)、土の塑性(土の液性限界が非常に低い場合)、粘土鉱物(高い膨張性を有するスメクタイトを混合している場合など)、有機分含有率(土が有機分を10%以上含む場合など)、土の間隙水(間隙水が海水か清水か、間隙水中のpH、間隙水が特定の金属イオンを含む場合)が知られている。これらの経験的な知見を参考に、原料土の条件を検討する。固化材としては、普通ポルトランドセメント、高炉セメントが代表的であるが、このほかにセメントのエーライト、ビーライト成分を調整した固化材もあり、それぞれの特性を検討して実験条件を設定する。

(2) 各種条件の原料土、固化材を用いたときの時間と強度発現の関係の把握

(1)で設定した原料土と固化材を用いて、初期間隙比の状態を4種類程度、固化材添加率を3~4種類としそれぞれの組み合わせで添加混合を行い、直後からの強度を継続的に測定する。試料はベーンせん断試験用、一軸圧縮試験用のモールドに入れて養生し、供試体が自立するまでの強度はベーンせん断試験、供試体自立後の強度は一軸圧縮試験により強度を測定する。また専用容器に入れて非破壊試験であるベンダーエレメント試験により、継続的に弾性係数を測定する。

### (3) 固化処理土内部における化学反応の分析と解明

(1),(2)で設定した原料土と固化材と用いた試料について、強度を測定した所定の時間において、生成鉱物を同定し、養生中の固化体の化学反応を分析する。

### (4) 固化処理土の強度と内部の化学反応の関連を明らかにし強度発現モデルを構築する。

(2),(3)で求めた固化処理土の強度発現と化学反応との関連を検討し、固化処理土の化学反応と強度発現の関連を明らかにする。強度が発現しない試料については、化学的な観点からその理由を明らかにする。強度発現と化学反応の分析結果に基づいて、固化処理土の強度発現モデルを構築する。過去の実工事における配合試験データと施工管理データを収集して解析するとともに、施工後の固化処理土地盤のコアを採取して力学試験と化学分析を行い、モデルの適用性を検討する。

### (5) 合理的な固化処理土の試験法および設計法の提案

固化処理土の強度発現モデルに基づき、実務での利用を考慮した合理的な試験法および設計法を提案する。なお、応募者は、港湾の浚渫土を用いた強度発現過程の試験結果から強度予測式を提案し、所定のセメント量に対して最も強度を発現させる最適なセメント量が存在することを示している。この成果は、限られた条件の原料土と固化材で得られたもので、固化処理土の化学反応の裏付けもなかった。本研究で得られる知見により、強度予測式と最適セメント添加率について再検討を行う。

## 4. 研究成果

固化処理直後から長期間に至るセメント固化処理土の強度及び変形係数の発現特性について、主に室内力学試験により一連の研究を実施した。研究成果は以下のようにまとめることができる。

(1) 海成粘土を原料土とするセメント固化処理土の予測式として、水セメント比を用いる式に替わる新たな強度推定式を提案した。本提案式の適用性に関して以下のことがわかった。

港湾の浚渫土を原料土とするセメント固化処理土に関する宮崎らの強度推定式と、コンクリート固化体に関するゲル空隙比説との類似性から考察し、セメント固化処理土に関する以下のような強度推定式を提案した。

$$q_u = k_c^*(c^* - c_0^*)Y^N$$

ここに、 $Y$  はセメントを含めた体積固体分率であり、

$$Y = \frac{V_s + V_{\text{cement}}}{V_s + V_{\text{cement}} + V_v}$$

である。ここに  $V_s$ ,  $V_{\text{cement}}$  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る。 $N$  はセメント処理土の間隙構造が強度に及ぼす影響を示す定数、 $c^*$  は処理土のセメントを含む固体分全体に対するセメントの比率であり次式で定義される。

$$c^* = \frac{m_{\text{cement}}}{m_s + m_{\text{cement}}}$$

提案式をわが国の6箇所の海成粘土を用いた配合試験結果に適用したところ、それぞれの粘土において提案式がもっとも当てはまる定数  $N$  を用いると高い相関係数で提案式の関係が成り立つとがわかった。それぞれの粘土においてこのときの  $N$  の値は異なり、今回調べた範囲では 3.5 ~ 4.5 の範囲であった。

気泡混合処理土、発泡ビーズ混合処理土の強度に関しても提案式は適用できるが、相関係数は軽量材を含まないセメント固化処理土よりも小さかった。また、もっとも当てはまるときの定数  $N$  は 2.1 ~ 2.5 の範囲であった。

提案式は標準的な配合のコンクリート、セメントミルクにおいてもおおよその強度予測に適用できる。しかし、コンクリートの場合は体積固体分率  $Y$  の変化が小さいため、強度は主に有効セメント添加率  $(c^* - c_0^*)$  で決まっている。セメント固化処理土の場合は原料土の含水比が大きいため体積固体分率  $Y$  は大きく変化し、定数  $N$  の影響も大きい。したがって、提案式はセメント固化処理土において適用性が高いといえることができる。

提案した予測式は、実務でよく用いられている水セメント比を用いる式よりもセメント固化処理土の強度を精度よく予測する。また、本式は液性限界が異なる粘土を一つのグループとして予測式を適用する場合においても水セメント比を用いる式よりも適用性が高い。

490 万  $m^3$  のセメント固化処理土が地盤造

成に使用された東京国際空港 D 滑走路事業における 7 種類の粘土の配合試験結果に提案した予測式を適用したところ、それぞれの粘土で高い予測精度を示した。さらに、7 種類の粘土を一つのグループとして提案した予測式の当てはめを行った場合においても、各粘土の個別の式に比べるとばらつきは大きくなるが実用上十分な精度で予測することができた。特に水セメント比法と比較すると予測性能は格段に高いといえる。

東京国際空港 D 滑走路事業の配合試験結果に提案した強度予測式を当てはめて決定した予測式を用いて、設計強度と必要セメント量の関係を求めた。この結果、所定の設計強度に対して  $1\text{m}^3$  あたりの必要セメント量が最小となる原料土の「最適な含水比」が存在することを示した。

- (2) 固化処理直後から長期間に至るセメント固化処理土の強度発現特性を調べた結果、以下のことがわかった。

浚渫土を利用したセメント固化処理土の強度発現傾向は養生 72 時間以内(前期強度発現過程)では強度と養生時間が両対数上で直線関係となり、72 時間以降(後期強度発現過程)は時間の対数と強度が直線関係となる。

セメント添加直後の初期強度は、セメント粒子を固体として計算した含水比  $w'$  と添加前の液性限界  $w_L$  による正規化含水比  $w'/w_L$  あるいは添加後の体積比  $v'$  と添加前の液性限界の体積比  $v_L$  による体積比指数  $(\ln v')/(\ln v_L)$  によってほぼ決まりセメント添加率の影響は小さい。養生時間 72 時間以内における強度増加割合は、ほぼセメント添加率で決まり、粘土の初期含水比の影響は小さい。

乾燥によって含水比が低下すると強度が増加する。一方、密封状態から水に浸漬して飽水処理を行った場合の強度変化は小さい。

環境作用の影響として、空気中の二酸化炭素とセメント水和物との炭酸化反応によって強度が変化する。また、炭酸化反応の進行速度は含水比によって変化し、含水比が高くなると進行速度が著しく低下した。

以上の特性をもとに、セメント固化処理土の新たな強度発現予測式を提案した。固化処理土の強度発現特性として、原料土の間隙率(あるいは体積固体分率)とセメント添加率の役割をそれぞれ明らかにしていることが提案式の特徴である。強度予測式を用い、12 種類の海底浚渫粘土について提案強度予測式のパラメータを決定し、実測強度とパラメータによる計算強度を比較した結果、提案強度予測式は混練直後から養生

90 日程度までのセメント固化処理土の強度発現過程を適切に予測することを明らかにした。

- (3) 非破壊試験である BE(ベンダーエレメント)試験を利用して同一の試料のセメント処理土の弾性係数の経時的な増加を測定し、強度と関連づけて検討を行うことで以下の結果を得た。

セメント固化処理土のせん断弾性係数の増加傾向は圧縮強度と同様に養生期間 72 時間前後で変化し、前期剛性発現過程(養生期間 72 時間以前)と後期剛性発現過程(養生期間 72 時間以降)に分類できる。

養生期間 1 時間時のせん断弾性係数は、圧縮強度と同様に正規化含水比あるいは体積比指数を用いて表すことができる。せん断弾性係数の増加係数は、初期含水比やセメント添加率に関係なく(添加率 10%以上の範囲で)ほぼ一定であった。

せん断弾性係数と一軸圧縮強度の関係を用いることで短期のせん断弾性係数から一軸圧縮強度を予測することができる。

- (4) 有機物(フミン酸)を混合したセメント固化処理土の強度発現特性を実験的に調べ、(2)で提示した強度予測式を用いて有機物が強度発現特性に及ぼす影響を検討し以下のことがわかった。

有機物を含むセメント固化処理土の強度は(セメント添加率 - 有機物添加率)と明確な関係があり、有機物の添加はセメント添加の効果を減殺する効果があることを明らかにした。

XRD と SEM を用いた EDX 分析より、有機物の添加によって新たな化合物が生成される一方でセメント化合物が減少していることを確認し、有機物がセメント固化処理土の強度発現を抑える仕組みがわかった。

- (5) 再構成した海成粘土にスラリー状態で少量のセメントを添加して圧密することにより、堆積過程で形成された構造を有する自然粘土の圧縮特性の一部が再現できる。本研究は、この方法により少量のセメントをスラリーに添加して再圧密した粘土の非排水せん断特性を調べた。結果をまとめると以下のようになる。

セメント添加率  $c$  と添加後の一軸圧縮強度の関係より強度発現のための最小セメント添加率  $c_0$  から求めた有効セメント添加率  $c_c = c - c_0$  はセメント添加量と土の力学特性を関連づける有効な指標となる。

5 種類の海成粘土について少量のセメン

トを添加し一次的に圧密した試料を作製して、一連の圧密試験を行った。この結果、有効セメント添加率が-2.0%から-3.0%として再圧密した試料において、圧密降伏応力付近の圧密圧力で圧縮指数が最大となり、圧密圧力の増加とともに遞減してセメントを添加しないときの圧縮指数にほぼ等しくなるという圧縮特性を示した。

自然粘土と少量セメント添加再圧密粘土の圧縮曲線の形状を、構造を考慮した  $e - \log p$  曲線のモデルに当てはめ、パラメータの比較を行った。少量セメント添加再圧密粘土と、自然海成粘土のパラメータを比較すると、有効セメント添加率が-2.0%から-3.0%の場合、構造係数  $A$  が 0.1 程度（構造が高位な粘土）の自然粘土の圧縮曲線とよく一致した。しかし、有効セメント添加率を-2.0%より大きくすると構造係数  $A$  は 0.2 程度（構造がきわめて高位な粘土）に増加するが、収れん係数  $B$  が自然粘土と異なってくるため自然粘土の圧縮曲線と大きく乖離した圧縮曲線となることがわかった。

有効セメント添加率を-2.0%とし 49 kPa で圧密した再構成大阪湾粘土、セメントを添加しないで圧密した再構成粘土、大阪湾泉州沖海底地盤（沖積粘土 Ma13）の乱れの少ない試料の間隙分布曲線を比較した結果、1%のセメントを添加した大阪湾粘土は、セメントを添加しない場合に比べ、自然粘土の間隙径分布に近い間隙径分布を有していることを確認した。

等方圧密三軸試験結果を比較すると、圧密降伏応力よりも小さい圧密圧力において、小さな軸ひずみで軸差応力のピークが明瞭に現れ、その後ひずみの増加とともに軸差応力が低下する傾向を示した。これは、年代効果による構造を有する不攪乱自然粘土の三軸 CIU 試験結果と類似している。

少量セメント添加再圧密粘土の圧密試験結果から圧縮指数比を求め、圧縮指数比と破壊ひずみ、強度低下率の関係を大阪湾粘土の不攪乱試料の結果と比較すると、両者の傾向はほぼ一致した。また、変形係数  $E_{50}$  と破壊時の間隙水圧計数  $A_f$  について、圧密降伏応力で正規化した圧密圧力との関係で比較を行った結果、少量セメント添加再圧密粘土は、再構成粘土の試験結果よりも、明らかに大阪湾粘土の不攪乱試料の結果に近いことが判明した。

少量セメント添加再圧密粘土の圧密養生時の  $K_0$  状態の有効応力を三軸試験機で再現し、圧縮せん断および伸張せん断を行って求めた応力ひずみ曲線と有効応力径路は、不攪乱大阪湾洪積粘土を用いて原位置の有効応力を再現した後に圧縮、伸張したときの応力ひずみ曲線とよく類似した。

以上の結果を総合すると、有効セメント添加率  $c_e$  が-3~-1%の範囲でセメントを添加し再圧密することで、堆積時に形成された構造を有する粘土に類似した力学特性を示す粘土試料を室内で作製できる。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計9件)

1. Gyeonggo Kang, Takashi Tsuchida, A.M.R.G. Athapaththu, Engineering behavior of cement-treated marine dredged clays during early and latter stages of curing, Engineering Geology (accepted on May 22, 2016, 査読有)
2. Tsuchida, T. and Tang, Y. X. : Estimation of Compressive Strength of Cement-Treated Marine Clays with Different Initial Water Content, Soils and Foundations, Volume 55, Issue 2, April 2015, Pages 359-374, doi:10.1016/j.sandf.2015.02.011.(査読有)
3. Gyeonggo KANG, Takashi Tsuchida, A.M.R.G. Athapaththu : Estimation of Strength Mobilization on Cement-Treated Dredged Clay in Early Stages of Curing, Soils and Foundations, Volume 55, Issue 2, April 2015, Pages 375-392, doi:10.1016/j.sandf.2015.02.012. (査読有)
4. Kang, G., 脇岡宏行, 土田孝: ベンダーエレメント試験で測定した養生初期のセメント処理土の弾性係数と発現した強度の関係について, 地盤と建設, pp.97-104, Vol.33, 2015. (査読有)
5. 土田孝, 平原毅, 平本真也, 宇高薫: 少量のセメントを添加し再圧密した再構成海成粘土のせん断特性, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.2, pp.71-84, 2014. (査読有)
6. 脇岡宏行, 土田孝, 姜庚吾, セメント固化処理土の強度発現特性に関する研究, 第 50 回地盤工学シンポジウム論文集, 643-650, 2014. (査読有)
7. 脇岡宏行, Gyeong O KANG, 土田孝: 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, 地盤と建設, Vol.32, 2014, pp.53-60. (査読有)
8. 宇高薫・土田孝・今井遥平・湯怡新: 少量のセメント添加により高位な間隙構造を有する再構成海成粘土の圧縮特性, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.3, pp.425-439, 2013. (査読有)

9. 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. (査読有)

〔学会発表〕(計7件)

1. Kang, G. Tsuchida, T. Wakioka, H. and Ys. Kim,  
Strength Mobilization of Cement treated  
Marine Clay with Various Curing Time, Asian  
Regional Conference on SMGE, Fukuoka,  
2015.11.9-11, pp.2047-2052.
2. Ho, L.S., Nakarai, K., Sasaki, T., Watanabe, M.  
and Morioka, M., Effects of Carbonation and  
Water Content on Strength Development of  
Cement-Treated Soil, Proceedings of the  
Fourteenth East Asia-Pacific Conference on  
Structural Engineering and Construction  
(EASEC-14), Ho Chi Minh City, Vietnam,  
2015.1.6-8, pp.1026-1032.
3. Ho, L.S., Nakarai, K., Sasaki, T., Watanabe, M.  
and Morioka, M., Effect of carbonation under  
drying condition on strength development of  
cement-treated soil, The Third Scientific  
Conference in Transport Technology, Hanoi,  
Vietnam, 2015.10.17
4. Gyeong O Kang, Takashi Tsuchida, Hiroyuki  
Wakioka : Strength mobilization characteristic  
of dredged clay mixed with cement during  
initial curing time, ISOPE2014, 24th  
International Offshore and Polar Engineering  
Conference, Busan (Korea), pp.15-20, 2014.  
6.15-20.
5. Wakioka, H., Tsuchida, T., Gyeong Kang: A  
study on the strength development of cement  
treated clays during initial stages of curing,  
13th International Conference on Civil and  
Environmental Engineering, Busan (Korea),  
2014.9.23-24.
6. Kang, G.O., Tsuchida, T., Wakioka, H. and  
A.M.R.G. Athapaththu.: Small Strain Shear  
Modulus and Unconfined Compressive  
Strength of Cement-treated Clays during Initial  
Stages of Curing, Proceedings of the 13th  
Korea/Japan Joint Seminar on Geotechnical  
Engineering, 2014.12.5-6, Osaka.
7. Kang, G.O., Tsuchida, T. and Wakioka, H. :  
Strength Mobilization of Marine Clays Mixed  
with Low Quantity of Cement, Proceedings of  
the 12th Korea/Japan Joint Seminar on  
Geotechnical Engineering, Seoul (Korea), 2013.  
10.25-26, pp.111-119.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)  
取得状況(計0件)

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

土田 孝 (TSUCHIDA TAKASHI)  
広島大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号: 10344318

### (2) 研究分担者

半井 健一郎 (NAKARAI KENICHIRO)  
広島大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号: 10359656

### (3) 研究協力者

湯 怡新 (Tang, Y.X.)  
関門港湾建設(株)・技術課長