

改良土の初期強度発現過程における強度の変化に関する基礎的検討

佐賀大学理工学部 学○ 末吉聖次

佐賀大学 低平地沿岸海域研究センター 正 日野剛徳

佐賀大学理工学部 正 根上武仁

1. はじめに

化学的改良土の地盤環境の変遷に伴う長期強度変化がクローズアップされてきている¹⁾。既往の研究の対象とされた改良土の諸特性や研究方法では改良土の強度発現メカニズムを始め、地表・地下のどの改良部のことを指すのか曖昧な点が残されるなど、長期強度変化に関する理解の混雑さは増す一方といえる。本報では、石灰系・セメント系固化材を用いた改良土の初期強度発現過程における強度変化の基礎的知見を得ることを目的として、粘土鉱物に依存するポゾラン反応およびこれ以外の反応を想定した改良土を用いて力学的検討を行った結果について述べる。

2. 実験条件

蒸留純水ケイ酸ナトリウム水溶液（濃度 50g/L）を準備し、SIGMA・ALDRICH 社製の試験用試薬のカオリンに対し液性限界状態の 1.5 倍の含水比に調整した試料を用いた。蒸留純水調整の場合の初期含水比は 75%，ケイ酸ナトリウム水溶液調整の場合の初期含水比は 70.5%である。改良材には表-1 に示す生石灰および高炉セメント B 種を用いた。事前の配合特性に関する検討の結果、生石灰については 100kg/m³、高炉セメント B 種については 150kg/m³・水セメント比 1:1 の配合条件を設定した。供試体作製は JGS 0821-2000 に準拠した。室内で 7 日間および 28 日間恒温養生後の供試体に対して一軸圧縮試験を行った。7 日間養生後の供試体についてはさらに、タンクリーチング試験の方法に基づいて蒸留水、人工海水溶液（濃度 30g/L）²⁾および硫酸水溶液（濃度 0.01N）に水浸させ、7 日間および 28 日間経過後の試料を一軸圧縮試験に供した。硫酸水溶液を用いているのは、日本の沖積粘土には多くの珪藻遺骸が含まれ、珪藻遺骸中もしくはその近傍に多くの生物起源パイライトが確認でき、酸化によって硫酸が生成されることによる³⁾。

種類	生石灰	高炉セメント B 種
試験項目		
密度 (g/cm ³)	3.35	3.04
比表面積 (m ² /g)	-	0.389
化学組成 (%)	SiO ₂	2.13
	Al ₂ O ₃	-
	Fe ₂ O ₃	2.6
	CaO	95.36
	MgO	3.2
	SO ₃	2.1

表-1 改良材の化学的成分（公称値）

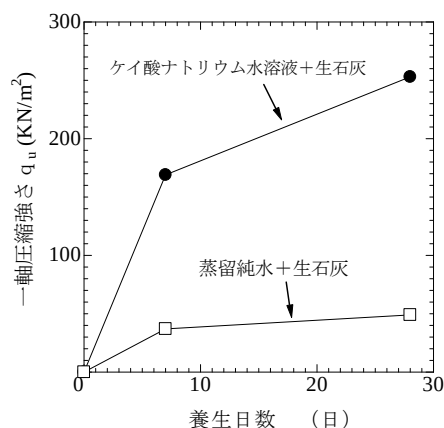


図-1 生石灰における非水浸時の強度発現特性

3. 非水浸時の初期強度発現特性

図-1 および図-2 に、生石灰および高炉セメント B 種における非水浸時の一軸圧縮試験の結果を示す。まず、蒸留純水による含水比調整試料に生石灰を添加した場合の強度増加は低く、養生日数の経過に伴う強度発現は明らかに遅い。次に、生石灰および高炉セメント B 種をそれぞれ添加した場合の一軸圧縮強さはいずれもケイ酸ナトリウム水溶液による含水比調整試料のほうが高い強度増加を示す結果を得ている。さらに、ケイ酸ナトリウム水溶液調整によるものは養生日数の経過に伴い早い強度発現を示している。

4. 水浸時の初期強度発現特性

図-3 および図-4 に、各水溶液条件による水浸時における一軸圧縮試験の結果を示す。まず、室内恒温養生 7 日後という初期強度発現過程の水浸条件下では、蒸留純水調整試料に生石灰を添加した場合のみ、水浸後に一度強度は上がるが、後に強度は低下する傾向が認められる。これら以外の結果については、水浸後も強度発現は継続する傾向が読み取れる。

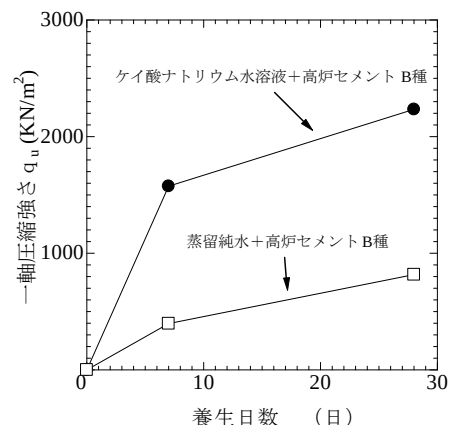


図-2 高炉セメント B 種における非水浸時の強度発現特性

5. 考察

蒸留純水調整試料に生石灰を添加した場合について、ポズラン反応とは、ケイ酸質の物質が消石灰と化学的に結合して不溶性の水和化合物を生成して土粒子を凝結させ、長期間継続する反応のこととある⁴⁾。ケイ酸質の物質の供給源は、高アルカリ環境の下での粘土鉱物の壊変によるシリカやアルミナの供給に求められている⁵⁾。蒸留純水調整試料に生石灰を添加した場合の結果は、これらのメカニズムを確かめるためには長時間の経過観察が必要であり、ポズラン反応による水和化合物の生成は遅いことを示している。当該結果はむしろ正規のポズラン反応のメカニズムを示したと考えられる反面、強度発現に寄与する水和物が未生成のため、水浸とともに土粒子・水界面特性の観点から強度発現に寄与していた Ca^{2+} 等の溶脱が進み、強度低下に至ったと考えられる。かつ、当該結果は固化の目的を担う地盤改良の観点からはそもそも不適合配合に仕分けられるものであり、実際には改良材を変更するなどの措置が図られるのであって、このような失敗事例を対象に長期強度変化の検討が行われても工学的役割は果たされないであろう。他方、土質安定処理の場合はトラフィカビリティやワーカビリティの改善に主眼が置かれ、固化までの期待は伴わないことがある。当該条件においては、蒸留純水調整試料に生石灰を添加した場合の結果は対策の必要性を示すことになると思われる³⁾。

次に、ケイ酸ナトリウム水溶液調整試料に生石灰および高炉セメント B 種を添加した場合、3 章から 4 章までに示した強度発現特性がポズラン反応によるものとすれば、ケイ酸ナトリウム水溶液調整による一連の結果はそのメカニズムに反して短期に強度発現していることになり、矛盾点となる。石田⁶⁾は短期強度発現に関するメカニズムに加水ゲーレンナイトを見出し、ポズラン反応の本来のメカニズムとの間の区別を図っている。加水ゲーレンナイトは一種のケイ酸水和物であり、本検討においては当該水和物に相当する物質の形成にケイ酸ナトリウム水溶液による成分が寄与しているといえ、このことが短期の強度発現を促していると考えられる。筆者らの一部は先に、有明海沿岸低平地域における浮泥・底泥・海成軟弱地盤中の溶存ケイ酸に関する広域調査を実施し、浮泥・底泥・海成軟弱地盤中の溶存ケイ酸量は表流水のそれに比べほぼ 2~3 倍の量を含んでいることを明らかにしている⁷⁾。結果から、まずこれまでの有明海沿岸低平地域の粘性土に認められてきた短期間の強度発現は前述のような溶存ケイ酸が関与していると考えられる。また、4 章における蒸留純水調整・生石灰配合条件以外の結果からは、室内恒温養生 7 日後水浸との初期強度発現過程においては劣化の原因環境とみなされつつある塩水、硫酸はむしろ強度発現に寄与していることが考えられる⁸⁾。

6. まとめ 本検討で得られた結果を要約すると次のとおりである。

- 1) ケイ酸ナトリウム水溶液調整したカオリンに生石灰や高炉セメント B 種を添加すると、短期間で強度発現する。蒸留純水調整したカオリンに生石灰を添加すると短期間での強度発現は認められない。また、前者はポズラン反応以外のケイ酸水和物生成によるメカニズムが考えられ、後者は正規のポズラン反応によるメカニズムが考えられる。
- 2) 改良土の初期強度発現過程においては塩水環境や硫酸環境は強度発現を促す可能性が考えられる。
- 3) 長期強度変化の検討に際しては、改良の目的および強度発現の収束を見極めて劣化加速などの処理を行う必要がある。

参考文献：1) 国土交通省佐賀国道事務所：大川佐賀道路軟弱地盤対策技術基準検討委員会・軟弱地盤 WG 資料，pp.27-30，2009。
 2) 原ら：土木学会論文集，Vol.66, No.1, pp.21-30, 2010。 3) 国土交通省佐賀河川総合開発工事事務所：佐賀導水事業巨勢川調整池～東名遺跡の保存対策～，130p，2007。 4) 有泉：土と基礎，Vol. 22, No. 1, pp.4, 1974。 5) 地盤工学会：入門シリーズ 20 環境地盤工学入門，丸善，pp.200-218，1999。 6) 石田：土と基礎，Vol.42, No.4, pp.9-14, 1994。 7) 田中ら：第 41 回地盤工学研究発表会平成 18 年発表講演集，CD-ROM, pp.1045-1046, 2006。 8) 中村ら：土と基礎，Vol.35, No.5, pp.9-14, 1987。

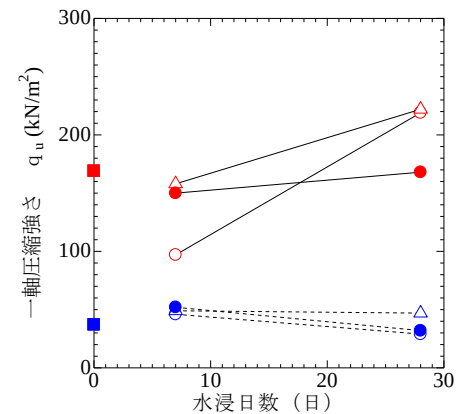


図-3 生石灰における水浸時の強度発現特性

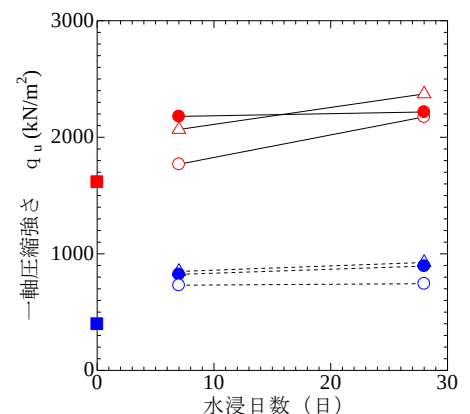


図-4 高炉セメント B 種における水浸時の強度発現特性

ケイ酸ナトリウム水溶液 — △ ○ ● ■
 蒸留純水 --- △ ○ ● ■