

セメント系固化材を用いた改良体の長期安定性に関する研究

—材齢22年調査の追加検証結果 [前編] 強度発現性—

セメント系固化材技術専門委員会
変質機構分析WG

1.はじめに

セメント系材料による地盤改良は、社会インフラを支え、安全・安心な生活を築く技術として全国各地で活用されている。セメント系固化材の需要¹⁾は増加基調にあり、本材料(を利用した地盤改良技術)が担う社会的役割はより重要なものとなりつつある。こうした中、改良土の耐久性についても関心が高まっており、各研究機関でさまざまな検討^{2~4)}が行われている。セメント協会においても実際に施工した改良体での長期追跡調査(以下、原位置試験と称す)^{5~7)}を実施しており、これまでに材齢22年の結果^{5, 6)}を報告している。その調査で確認された強度に関する現象を再検証するために、2015年にセメント系固化材

技術専門委員会傘下にWG(主査:半井健一郎教授(広島大学))を設置し4年間の活動を終えた。

本稿は、その検証結果⁸⁾を報告するもので、①改良体の強度発現性と、②周辺土と接触する改良体表層の変質について紹介する2編のうちの前編にあたる。

2.材齢22年調査(原位置試験)の概要

1990年、千葉県習志野市の関東ローム地盤で、原位置試験を開始した。現地の火山灰質粘性土と一般軟弱土用固化材は、表1に示す配合で混合した。改良柱体(φ0.45m×2m)は、図1に示すように、アースオーガーにより掘削した土を地上で安定処理し、掘削孔に埋め戻すことで作製した。調査は材齢10年までに8回実施し、各材齢で1本の改良柱体を掘り起こし(写真1)、各種試験を行った。材齢10年時点で残った1本は、4分割して別の敷地へ移設し、浅層部の粘性土層に埋設した。周辺土の含水比の測定結果は、当初の火山灰質粘性土が122.4%、材齢10年以降は63.2%である。移設から12年経過した2012年に、分割した4つの供試体のうち2つを使用して、材齢22年の調査を実施した。

A study on the long-term stability of cement-treated column-
Additional test results of the 22 year survey [First part]
strength development (by JCA.)

(一社)セメント協会 セメント系固化材技術専門委員会
変質機構分析WG活動期間 [2015年5月~2019年3月]

主 査: 半井健一郎 [広島大学教授],
委 員 長: 黒澤功 [宇部三菱セメント], 清田正人(2018
年3月退任) [三菱マテリアル],
WGリーダー: 吉田雅彦, 吉原正博(2016年9月退任) [住友大
阪セメント],
委 員: 本田欽也 [日鉄高炉セメント], 酒井秀一 [日
鉄セメント], 二戸信和, 齋藤和彦(2016年3月
退任) [デイ・シイ], 飯田達郎, 渡辺雅昭(2018
年3月退任), 上村 豊(2016年3月退任) [デン
カ], 佐々木慎一 [麻生セメント],
事 務 局: 近藤秀貴(2017年3月退任), 佐藤智泰(2017年3
月退任), 野田潤一, 泉尾英文 [セメント協会]

表1 改良土の配合

試料土	水	固化材
600 kg	525 kg	200 kg

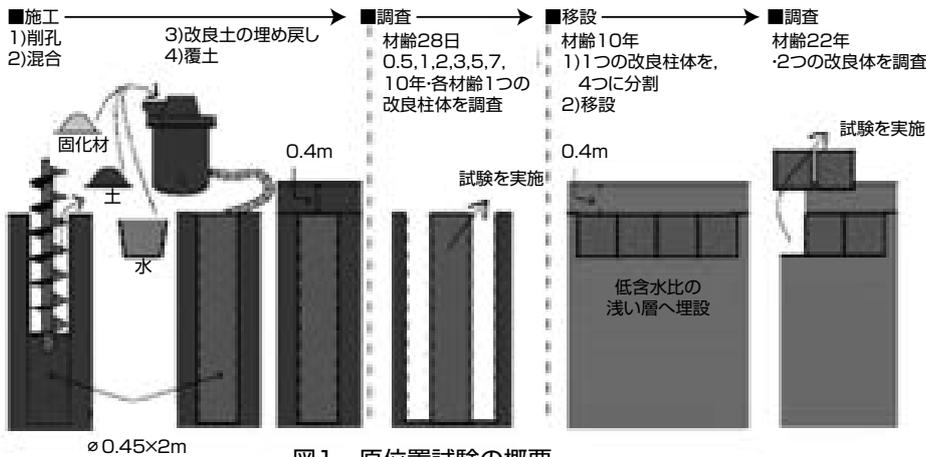


図1 原位置試験の概要



写真1 改良柱体の掘起し状況

3.追加検証(室内試験)の概要

材齢22年の調査では、改良土の長期的な強度発現性と安定性を確認した。一方で、周辺土に接触する改良体の表層では、内部よりも強度が低い層が確認された。低強度層は、表層から約10mm程度とごくわずかではあったが、この層がどのように形成されたのかが検討課題として残った。また、改良対象土の土質性状の評価が十分ではなかった。

そこで、追加検証を行うため、施工当初の原位置試験フィールドから試料土を採取し、各種土質試験を実施した。また、当時使用したものと同等の固化材を調合して改良土を作製し、強度発現性を確認した。低強度層の生成については、図2に示すように、周辺土と改良土を接触させた供試体を作製し、強度分布の変化、pH分布やCa分布などの変化を評価することで検証を試みた。

4.検証結果

4-1. 試料土の土質性状

施工当初の原位置試験のフィールドから採取した試料土の土質試験結果を表1に示す。含水比は113.7%、シルト分と粘土分を主体とする茶褐色の砂まじり火山灰質粘性土(V-S)である。関東ロームと称される土であり、アロフェン等の非晶質を多く

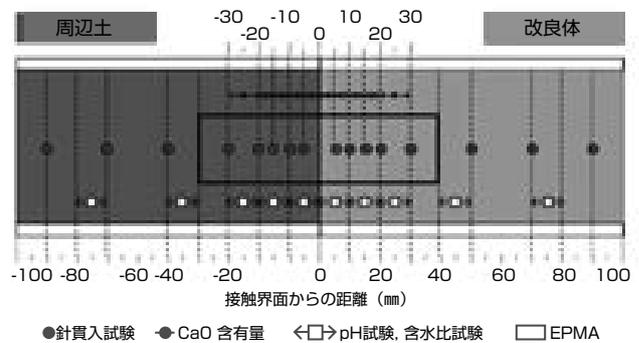


図2 周辺土との接触試験の概要

含むことで特異な性質を有する。

そこで、8N HCl- 0.5N NaOH交互溶解法(北川法)⁹⁾によって、アロフェン等の非晶質を確認した。この試験は、絶乾状態の試料土を塩酸と水酸化ナトリウム溶液で交互に溶解させ、溶解にともなう質量の減少率から非晶質を評価する方法である。非晶質物質を含む土では、処理の初期段階で含有する非晶質物質が溶解するため質量が大きく減少し、その後は繰り返しの溶解処理により質量減少率が線形的に変化する。よって、線形的に変化する区間で回帰直線を求め、その直線の切片を求めることにより非晶質を評価することができる。

本試料土の試験結果を図3に示す。含有するアロフェン等の非晶質物質は50.9%であった。また、試料土の化学成分を表4に示す。試料土はSiO₂を38.4%、Al₂O₃を23.7%含んでおり、これらの成分が

表1 試料土の土質性状

項目	試験結果	準拠規格
土質分類	-	砂まじり火山灰質粘性土(V-S)
含水比	%	113.7
湿潤密度	g/cm ³	1.412
液性限界	%	125.5
塑性限界	%	94.3
塑性指数	-	31.2
土粒子密度	g/cm ³	2.824
礫分	%	0
砂分	%	9.5
シルト分	%	57.0
粘土分	%	33.5
最大粒径	mm	2
強熱減量	%	15.7
pH	-	7.4
EC	mS/m	11.1

表4 試料土の化学成分

化学成分	分析値 (%)
ig.loss	15.7
SiO ₂	38.4
Al ₂ O ₃	23.7
Fe ₂ O ₃	14.1
CaO	1.7
MgO	3.1

※準拠規格：セメント協会標準試験方法 CAJS I-12

溶解した場合は、固化材から供給されるCaと結合して新たな水和物を生成することが考えられる。有泉ら¹⁰⁾は、アロフェンとCa(OH)₂溶液との反応を検討し、C₄AH₁₃やC₂ASH_nの生成を報告している。

4-2. 改良土の長期強度発現性

原位置試験での強度発現性と本検証で作製した改良土の強度発現性を図4に示す。原位置試験では、材齢28日において1246kPaの強度を発現し、その後も長期的に強度が増加して、材齢5年までに28日強度の約3倍に達し、以降は安定的に強度を維持していた。本検証で作製した改良土の一軸圧縮強さは、

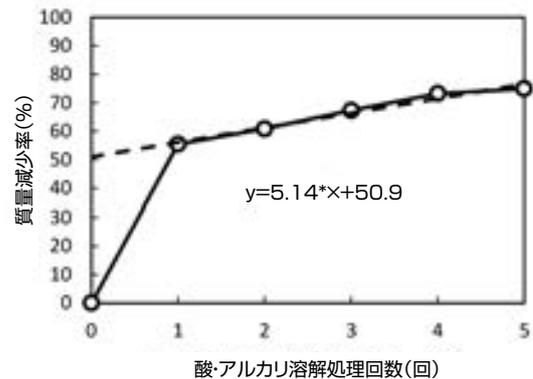


図3 アロフェン等の非晶質量試験結果

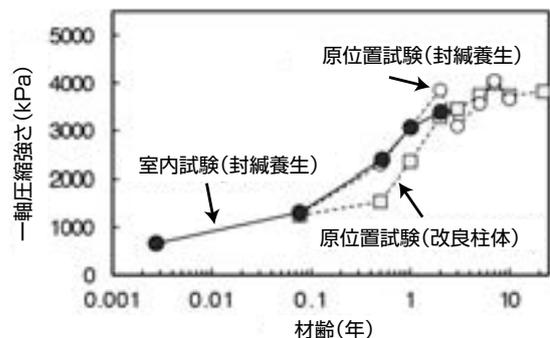


図4 改良土の長期強度発現性

材齢1日で663kPa、材齢28日で1310kPaであった。原位置試験と同様に長期的な強度発現性を有し、材齢2年(最終材齢)に28日強度の約2.6倍となった。本検証に当たり作製した改良土が、22年調査を終えた原位置試験と同等の改良土であることを確認した。また、火山灰質粘性土を安定処理した改良土の長期的な強度発現性を再確認することができた。この長期的な強度発現性には、試料土の半分以上を占める非晶質物質が影響していると考えられる。なお、原位置試験では、ゲーレンナイト水和物(C₂ASH₈)が長期的に生成していることを粉末X線回折によって確認している。

4-3. 改良体表層の強度

原位置試験の材齢22年調査で、改良体表層の強度を評価した結果を図5に示す。改良体表面から10mmまでのごく表層にて、針貫入時の荷重が小さ

い個所、つまり強度が低い層が認められた。

この低強度層の生成過程について検証するため、改良土と周辺土との接触試験(図2)は、2ケースで実施した。ひとつは硬化前の改良土を自然含水比の周辺土に接触させた試験、もうひとつは硬化後(材齢1日)の改良土を低含水比の周辺土に接触させた試験である。前者は材齢10年までの原位置試験、つまり移設前の状況を想定し、後者は材齢10年における移設に伴う環境変化を想定している。

硬化前の改良土を周辺土に接触させたケースの試験結果を図6に示す。周辺土の土質性状は、含水比112.3%、湿潤密度 1.384g/cm^3 、間隙率76.2%、飽和度96.1%である。材齢28日における針貫入勾配は一樣に分布しており、改良体表層の強度は内部と同等であった。その後、材齢の経過とともに改良体表層の強度発現性が低下し、改良体表層において相対的に強度が低い低強度層が形成された。この結果から、原位置試験の材齢22年調査で確認された低強度層は、材齢の比較的早い段階において、周辺土との接触によって形成されたものと考えられる。低強度層の生成の要因として、改良体表層からのCaの溶脱が挙げられるが、この検証は次号(後編)で報告する。

次に、移設後の環境を想定して、低含水比の周辺土に硬化後の改良土を接触させたケースの試験結果を図7に示す。周辺土の土質性状は、含水比80.7%、湿潤密度 1.201g/cm^3 、間隙率75.7%、飽和度70.9%である。材齢28日における針貫入勾配は、前述の試験結果と同様に、表層および内部ともに一樣に分布していたが、それ以降の材齢でも一樣に増進しており、改良体の表層と内部で差が生じて低強度層が形成されることはなかった。この結果から、移設後の低含水比の周辺土との接触によって変質が進行することはなかったものと考えられる。

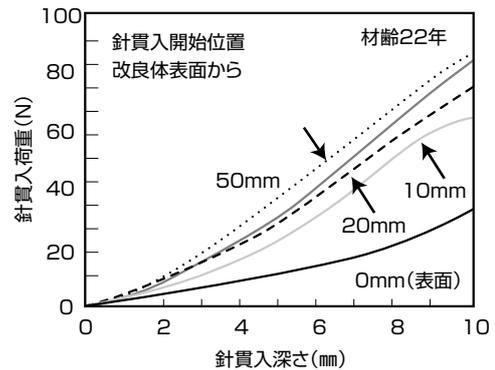


図5 針貫入試験結果⁵⁾

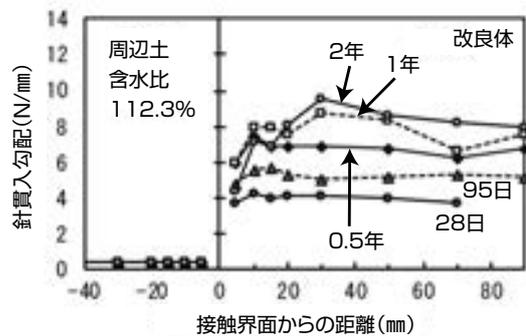


図6 硬化前に周辺土へ接触させた改良体の強度分布の経時変化⁸⁾

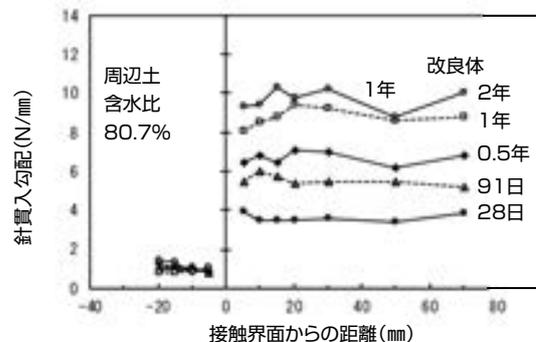


図7 硬化後に周辺土へ接触させた改良体の強度分布の経時変化

4-4. 原位置試験結果と室内試験結果との比較・検証

原位置試験の材齢22年調査と室内試験の材齢2年における針貫入勾配について、一軸圧縮強さに換算し、表層強度分布の変化を検証した。換算には、原位置試験および室内試験において得られたデータをもとにして、図8に示す回帰式を用いた。なお、原位置試験の結果は、図5に示す針貫入深さ4~8mm

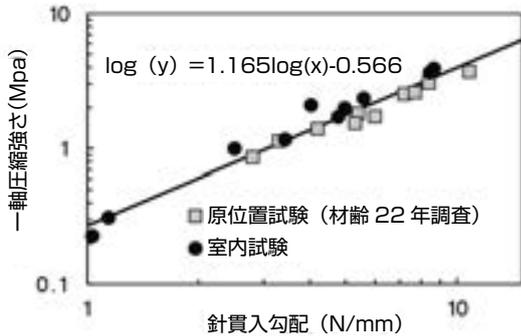


図8 針貫入勾配と一軸圧縮強さとの関係³⁾

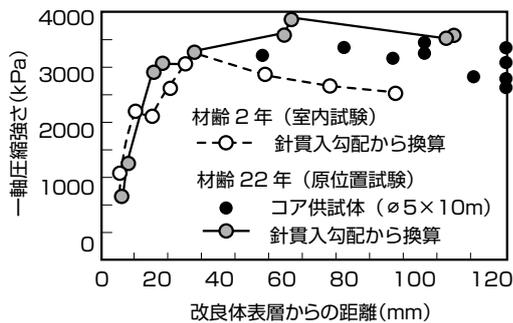


図9 改良体表層の一軸圧縮強さ分布

と6~10mmの範囲を対象に針貫入勾配を算出し、一軸圧縮強さへ換算した。

一軸圧縮強さの分布を図9に示す。図には、原位置試験の改良柱体からコア採取し、実測した一軸圧縮強さの結果も併記する。その結果、表層に認められる低強度層の分布は、材齢22年の原位置試験結果と材齢2年の室内試験結果でおおむね同程度であったが、改良体の中心側で両結果に強度差が認められた。図4から判るように、本改良土は材齢2年以降も強度の増加が想定され、その長期的な強度増加によって、改良体中心側の強度差は小さくなるが、一方で、改良体表層では強度差が広がるものと推察される。これらの結果から、原位置試験における改良体表層では、材齢2年以降も変質が進行し、強度低下が生じていたものと推察される。ただし、図7に確認されたように、移設後に低含水比の周辺土と接触することで、変質が進行した可能性は低いと考えられる。そこで、移設に伴う乾燥・炭酸化の影響を検証しており、この検証結果も次号(後編)にて報告する。

5.おわりに

関東ローム(火山灰質粘性土)をセメント系固化材で安定処理した改良土の長期的な強度発現性を再確認した。また、試料土はアロフェン等の非晶質物質を多く含み、化学成分としてはSiO₂およびAl₂O₃が主体であることを確認した。原位置試験で改良体表層に認められた低強度層は、室内試験でも再現された。低強度層が生成した要因については、Caの溶脱や移設との関連性の検証を行っており、それらの結果は次号(後編)で報告する。

【参考文献】

- 1) セメント協会/セメント系固化材需要推移, <http://www.jcassoc.or.jp/>
- 2) 橋本 聖他/30年経過した深層混合処理改良体の強度特性, 材料, Vol.67, No.1, pp.47~52, 2018
- 3) 宮下 千花他/Effect of curing conditions on long term mechanical property of improved surplus soils, E3S Web of Conferences 92, 2019
- 4) 原 弘行他/マグネシウム塩を含有する石灰・セメント処理土の強度発現および海水環境下での劣化速度, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.72, No.4, pp.294~299, 2016
- 5) (一社)セメント協会 セメント系固化材技術専門委員会/セメント系固化材を用いた改良体の長期安定性に関する研究—材齢22年試験結果報告—, セメント・コンクリート No.804, pp.9~14, 2014.2
- 6) 清田 正人他/セメント系固化材を用いた改良体の長期安定性—材齢22年—「セメント系構築物と周辺地盤の化学的相互作用」に関するシンポジウム講演概要集, pp.465~472, 2014
- 7) 野田 潤一他/セメント系固化材を用いた改良体の長期安定性に関する研究—材齢10年結果報告—, 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会概要集, III-121, 2019
- 8) 泉尾 英文他/含水比の異なる周辺土との接触がセメント安定処理土の表層強度に与える影響, 地盤工学ジャーナル, Vol.14, No.4, pp.307~320, 2019
- 9) 北川 靖夫/土壌中のアロフェンおよび非晶質無機成分の定量に関する研究, 農技研報告, No.29, pp.1~48, 1977
- 10) 有泉 昌他/アロフェン質粘土の消石灰—石膏による化学的安定方法に関する研究(2)—アロフェンとCa(OH)₂溶液との反応条件について—, 土木研究所報告第110号-5, 1962

編集委員会のうごき

本誌の編集企画にご尽力いただきました、大崎雅史氏は3月号をもって退任されました。ここに氏のご協力・ご支援に対し感謝の意を表します。

なお、後任には河村 浩幸氏(株宇部興産)が就任されました。