

VOC汚染土壌に対する 酸化鉄、石こう系固化材を用いた浄化工法

— 深層土壌へ適用可能なVOC汚染土の速効的浄化工法 —

柳沢 隆* 遠藤 修*

要約： VOC (Volatile Organic Compounds—揮発性有機化合物) で汚染された土壌に対する有効な浄化工法として、従来より酸化鉄を用いた攪拌混合が行なわれているが、この工法では攪拌により地盤を緩めるため、浄化後の地盤の軟弱化、周辺地盤への影響等の問題点がある。そのため、セメント系固化材を同時使用するか、あるいは浄化後の地盤改良を行なう必要があった。セメント系固化材は周知のとおりアルカリ性を呈するため、固化後の土壌が高アルカリといういわば二次汚染を引き起こし、さらに土中の有害物質を溶出させる危惧が指摘されている。一方、浄化後に地盤改良を行なった場合には、浄化のトータルコストを引き上げる。

そこで、浄化とともに地盤を早期に固化し周辺環境への影響を最小限にする工法として、酸化鉄および石こう系固化材のペーストを混合攪拌する工法に着目した。本論文では、汚染土の浄化と、とりわけ深層部汚染土に対する処理土の力学特性について検討した。

キーワード： VOC, 土壌汚染, 深層土壌, 酸化鉄, 石こう, 中性, セメンテーション, ダイレタンシー, ストレスパス

目次： 1. はじめに
2. 原位置浄化の必要性
3. 使用材料

4. 汚染土への適用性
5. 深層土壌への適用性
6 まとめ

1. はじめに

土壌汚染の処理技術として掘削除去などの工法があるものの、処分場への依存過多から原位置浄化工法に対するニーズが高まってきている。また、揮発性有機化合物 (以下 VOC) は地下深くへの浸透性が顕著なことから、VOC で汚染された土壌を浄化するには、速効性があり深層部でも原位置で浄化可能な施工方法が望まれている。そこで、土地の早期活用も視野に入れ、浄化が速く同時に地盤を緩めることのない方法を検討した。その際、配合設計の簡便さ、浄化の速効性、周辺環境へ及ぶ影響の少なさから、酸化鉄および石こう系固化材に着目した。

本論文では、酸化鉄および石こう系固化材のペースト混合により、深層部の処理土の早期強度発現および力学特性が確認できたので、ここに報告する。

2. 原位置浄化の必要性

汚染土壌の浄化には主として2つの方法がある、すなわち掘削除去と原位置浄化である。その速効性、確実性から従来掘削除去法が主に採用されてきたが、もとより除去した汚染土壌が消失するわけではなく、汚染がきれいに除去された土地の代わりに、汚染土を持ち込む新たな土地 (処分場) が必要となる。近年、特に2003年2月の土壌汚染対策法の施行後、土壌汚染に対する認識が高まり、土壌浄化の実績は飛躍的に増加しているが、一方で掘削除去土の受入先となる最終処分場の容量不足が表面化してきている。¹⁾ (表1参照)

そこで、従来のVOC汚染土の代表的な原位置浄化工法である、土壌ガス吸引工法や揚水曝気工法の弱点であった、浄化の長期化、浄化の不確実さを解消することで、掘削除去工法と対抗できる原位置浄化工法が望まれている。ここでは、浄化対象物質として、第一種特定有害物質汚染土を対象に、とりわけ深層土壌の汚染に対処でき、かつ浄化と同時に硬化が可能なVOC浄化工法について述べる。

表1 最終処分場の残存容量と残余年数¹⁾
(平成14年4月現在)

区分	最終処分量 (万t)	残存容量 (万m ³)	残余年数 (年)
全国	4,200 (4,500)	17,941 (17,609)	4.3 (3.9)
(参考) 首都圏	1,210 (1,301)	1,316 (1,517)	1.1 (1.2)
近畿圏	559 (635)	1,204 (1,224)	2.2 (1.9)

※ ()内は前年度調査結果

3. 使用材料

本研究において酸化鉄および石こう系固化材は、石原産業株式会社製のMT-酸化鉄およびジブサンダーを使用した。

3.1. 酸化鉄の概要

酸化鉄は、0.07(μm)の非常に微細な粒子であることから容易にペーストを形成しやすく、速効的にVOC全般 (ただし、ジクロロメタン、ベンゼンを除く) を還元分解する特徴を有する。

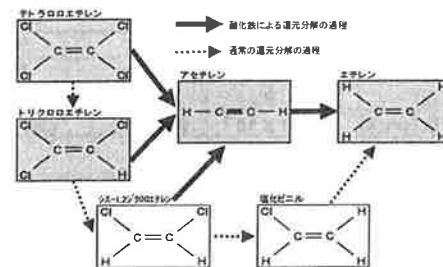


図1 酸化鉄によるVOCの浄化プロセス

例えば、テトラクロロエチレン(以下PCE)は、トリクロロエチレン(以下TCE)、シス-1,2-ジクロロエチレン(以下cis-1,2-DCE)、塩化ビニルを経て無害なエチレンまで分解されるのが通常の浄化プロセスである。しかし、酸化鉄による分解は図1に示すように、PCE、TCE および cis-1,2-DCE はアセチレンを経由しエチレンに至るため、浄化過程で有害物質である TCE、cis-1,2-DCE を生成しない。

3.2. 石こう系固化材の概要

石こう系固化材は、セメント系固化材に比べて強度は低いものの、pH=7.0 前後と中性であり、硬化が速いという特徴を有する。固化材として代表的なセメントと硬化時の水素イオン濃度の推移を比較すると、図2に示す通り、セメントはアルカリ性となるのに対し、石こう系固化材は硬化開始直後から中性を維持している。一方で強アルカリであるセメント系固化材では、酸化鉄の浄化効果が小さくなり、かつ、中性領域では溶出しにくい重金属類が、物質によっては溶出することとなる。この他、石こう系固化材の硬度は、セメント系固化材よりもかなり小さいことが知られている。

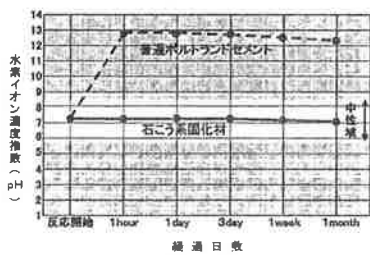


図2 石こう系固化材の水素イオン濃度の推移

4. 汚染土への適応性

酸化鉄と石こう系固化材を同時混合する方法は、石こうの水和により形成される硬化によってVOCと酸化鉄の接触機会を奪い、浄化効率を低下させる可能性が懸念される。そこで、ペースト硬化体の透水性の測定、浄化速度の測定および一軸圧縮強さの測定を行い、石こうの混合による影響を確認した。

4.1. 透水試験

・実験方法

供試体は、φ46mm、h35mmとした。ペーストの配合は、水固材比=1を基本とし、これに酸化鉄をペースト1リットル当たり500g及び1000g添加した。透水試験は、簡易的な測定が可能な三軸試験装置を用いて、供試体に水圧49.0kPaの圧力下で、定水位条件として実施した。

・実験結果

石こう系固化材の硬化体の透水係数は、表2に示すように、 5×10^{-4} 程度であり、ほぼシルトに相当していることが判る。

表2 配合および試験結果

	Case1	Case2	Case3
石こう固化材(g)	725	653	580
水道水(g)	725	653	580
酸化鉄(g)	0	500	1000
透水係数(cm/s)	4.97×10^{-4}	3.63×10^{-4}	1.80×10^{-4}

このため、硬化後であっても、ある程度の透水性が確保されていることとなる。

また、これに酸化鉄を混合した硬化体は、ペースト1リットル当たり1000gを加えた場合でも、透水係数が僅かに低下する

程度であった。したがって、酸化鉄と石こう系固化材を同時混合しても十分な透水性は確保され、硬化後においても透水性が確保され、石こう混合による影響は少ないと考えられる。

4.2. 浄化速度

・実験方法

実験に用いる山砂の物理特性を表3に示す。この山砂500(mg)に、TCE、cis-1,2-DCE および TCE+cis-1,2-DCE を溶出濃度

表3 山砂の物理特性

名称	土粒子の密度(g/cm ³)	自然含水比(%)	粒 度			
			礫分	砂分	シルト分	粘土分
山砂(千葉県君津産)	2.70	21.2	0.2	82.2	8.4	9.2

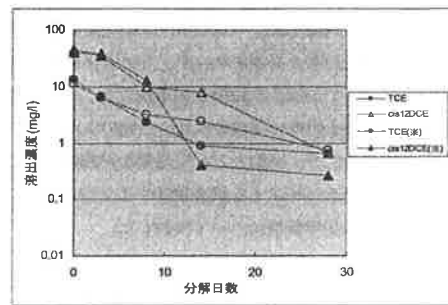


図3 山砂(Wn=27.0%)模擬汚染土の浄化
(※) TCE、cis12DCEの複合汚染土

50(mg/L)となるように添加し模擬汚染土を作製した。その模擬汚染土に、酸化鉄と石こう系固化材を同時に混合し、その後の濃度を測定した。

・実験結果

浄化結果は、図3に示すように、1ヶ月間の溶出濃度の測定では、環境基準の1000倍を上回る50(mg/L)程度の高濃度模擬汚染土に対しても、速効的に浄化する傾向を示した。

4.3. 硬化への影響

・実験方法

4.2.の実験に用いた山砂に、水固材比を変化させて、酸化鉄および石こう系固化材の添加の供試体、石こう系固化材のみを添加した供試体を作製し、硬化後の一軸圧縮強さを測定した。

・実験結果

一軸圧縮強さの結果は図4に示すように、酸化鉄および石こう系固化材の添加の供試体、石こう系固化材のみを添加した供試体は、同程度の強度となった。したがって、石こう系固化材

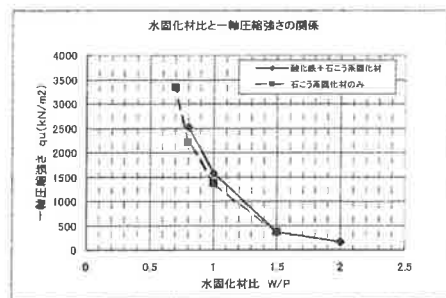


図4 水固材比と一軸圧縮強さの関係

が発揮する強度は、酸化鉄および石こう系固化材を同時に混合

した場合において損なわれることなく同程度の強度を発揮していると考えられる。

5. 深層土壌への適用性

VOC 汚染土はその性質から、重金属等他の特定有害物質と比較して、地下深くへの浸透性が顕著なことが知られている。そこで、酸化鉄および石こう系固化材を同時混合する場合において、深層部に適用するための条件を設定するため、基礎的な試験を行った。

5.1. 施工機械の適用範囲

土壌深層部の汚染土の浄化では、図5に示すように大型の深層混合機による施工となる。酸化鉄および石こう系固化材をペースト状で注入する場合、配合は施工機械の送泥圧や材料分離防止を考慮して、適度な粘性とすることが求められる。酸化鉄の分離は、ペーストの水固化材比を1.5以下にすることで抑制できる傾向がある。

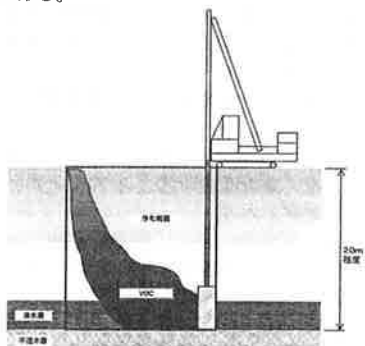


図5 土壌深層部の汚染土の浄化イメージ

5.2. 同時添加における硬化

5.2.1. 強度発現

セメント改良土は、長期にわたり強度増加するため、配合設計においては材齢28日の強度をもって、要求条件を満たす固化材量を採用することが一般的である。このため、配合設計が完了するまでに要する期間は、約5週間程度を必要とする。また、緊急性が必要な場合には、材齢28日強度を材齢7日の強度から推定する等の方法を採用するケースもある。いずれの場合においても、配合設計において適正な固化材添加量を求めるためには、ある程度の期間を必要とする。

一方、石こう系固化材は、水和反応を主体とした硬化特性を有している。このため、この固化材で安定処理した改良土は、図6に示すように、1日で所定の強度に達し、その後の強度増加がほとんど見られない、といった強度発現傾向がある。この

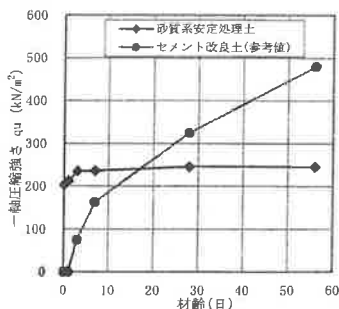


図6 材齢による強度発現の違い

ように速硬性を示し強度増加しない石こう系固化材による安定処理土は、配合設計における養生期間の大幅な短縮が可能となるばかりか、施工時における地層のバラツキへの対処も比較的容易となるため、原位置改良にも適していると考えられる。

5.2.2. 処理土の力学特性

透水性の高い砂質土層が VOC で汚染された土壌では、汚染の拡散が懸念されている。この砂質土層は、深層部においてある程度密実であるため、土粒子のインターロッキング効果が卓越した状態であると想定される。したがって、このような砂質地盤を安定処理する場合、過大にセメンテーションを付与すると、インターロッキング効果が低減し、荷重分散効果も期待できない異なる地盤特性を原位置に形成する可能性がある。このため、改良後の間隙比は、可能な限り小さいことが望ましいこととなる。

一軸圧縮強さが 500kN/m² 以下と比較的少ないセメント量による改良土は、湿潤密度を高めると、インターロッキング効果を発揮する³⁾ことが知られている。このことから、砂質土を改良する場合には、注入材の添加量を抑制することで、同様の効果が得られるものと考えられる。

そこで、細粒分の異なる砂質土に、所定の水固化材比のペーストを加えて、湿潤密度が一定となるように配合した供試体を用いて、三軸圧縮試験(JGS 0523)を行い、インターロッキング効果を確認した。

・実験方法

実験用の配合は、表4に示すように、Case1 から Case4 までの4種類を考え、石こうを含む注入材量によって、Case1, Case2 および Case3, Case4 の2グループに分類した。さらに密度によって再分類し実験を行った。

表4 配合および供試体の諸元

	配合					供試体諸元	
	密度 γ (g/cm ³)	砂 (kg)	石こう (kg)	水 (kg)	注入材料 (kg)	密度 γ_t (g/cm ³)	一軸圧縮強度 q_u (kN/m ²)
Case1	1.80	1,063	211	527	607	1.810	167
Case2	1.90	1,245	187	468	539	1.897	247
Case3	1.80	1,305	218	305	388	1.828	235
Case4	1.90	1,519	194	211	284	1.906	248

一般的な強度レベルとして目標 $q_u=250\text{kN/m}^2$ とし、それぞれ密度 1.8g/cm³ 及び 1.9g/cm³ になるように注入材量を調節した。試験は、強度増加が認められない材齢7日の試料を用いた。バックプレッシャーは 50kN/m² とし、所定の拘束圧で等方圧密させた。実験時の B 値は全て 95%以上であった。また、せん断速度は、0.05%/分とした。

・実験結果

Case1 の供試体は、図7に示すようにストレスパスが左上に向かって上昇し、ピークを迎えた後、左下へと推移している。

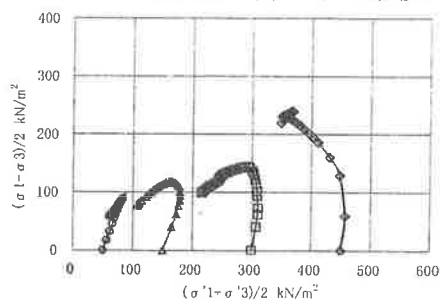


図7 Case1 供試体のストレスパス

このため、正のダイレタンシーもないことから、インターロッキング効果が期待できず、セメンテーションが卓越した状態と考えられる。ただし、一軸圧縮強さを越える圧密圧力を載荷した供試体は、圧密により間隙比が減少し密実化するため、ピーク強度を迎えた以降のストレスパスが、反転して僅かに右上に向かう傾向が認められた。

一方、Case3の供試体のストレスパスは図8に示すように、

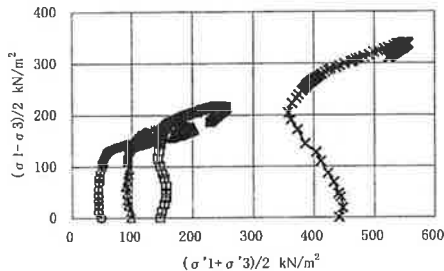


図8 Case3 供試体のストレスパス

セメンテーション効果が失われたことによる破壊と、正のダイレタンシー発生後に再び破壊する2段階の破壊機構が観察された。このような破壊機構は、セメントで改良された同一密度の流動化処理土における応力経路³⁾にも類似している。尚、Case2, 4に示す密度1.9g/cm³の供試体においても、同様のストレスパスが確認されている。

両者は、注入量に大きな違いが認められるが、改良後の間隙比等はほぼ同程度である。流動化処理土の場合には、間隙比が1程度でしかも一軸圧縮強さが50kN/m²以下の場合には、実験

した全てのケースにおいて、正のダイレタンシーが確認されている。しかし、石こう系固化材を用いた安定処理土は、改良後と同じ間隙比であってもセメント改良土と異なり、インターロッキング効果が発揮されない場合もある。したがって、原位置浄化に伴い深層の砂質地盤を乱した後に強度付与する場合、荷重の支持や周辺地盤への荷重分散といった地盤本来の機能を期待するときは、セメンテーションを可能な限り抑制すると共に、改良後の間隙比が大きくなるように注入量を低減することが効果的、と考えられる。

6. まとめ

土地の早期活用も視野に入れた、浄化が速く同時に地盤を緩めることのない、酸化鉄および石こう系固化材のペースト同時混合方法について、以下のことが確認できた。

- 酸化鉄および石こう系固化材を同時混合した場合においても、高濃度汚染土を短期間で浄化できる。また、その際石こう系固化材が発揮する強度は、酸化鉄の混合によって損なわれることなく、石こう系固化材のみの場合とほぼ同程度の強度を発揮する。
- 石こう系固化材は、速硬性を示し強度増加しないため配合設計が容易となる。
- 砂質地盤に対して石こう系固化材の付与できるレベルを考慮すると、注入量を低減することでインターロッキング効果が有効に発揮される。

このことから、深層部において揮発性有機化合物で汚染された土壌、酸化鉄と石こう系固化材のスラリー混合により、原位置にて速効的に浄化可能である。

今後、室内試験で得られた成果をもとに、実施工を通じて本工法の有効性を検証していく予定である。

謝 辞

本論文は、株式会社みらい建設グループとの共同研究内容の一部をとりまとめたものであり、関係各位に末筆ながら感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 環境省：産業廃棄物の排出・処理状況について、2004年3月
- 2) 岩淵常太郎・市原道三・小林学：石こう系固化材による砂質系安定処理土の実用化に関する研究，材料学会第6回地盤改良シンポジウム，2004年9月
- 3) 久野悟郎・岩淵常太郎・市原道三：固化した流動化処理土の力学特性と品質基準に関する考察，土木学会論文集No. 750/Ⅲ-65，pp99-113，2003年12月

REMEDIAL METHOD FOR VOC-CONTAMINATED SOIL BY IRON OXIDE WITH GYPSUM

T.Yanagisawa and O.Endo

Recently, soil contamination has become serious problem in Japan, particularly after the law for soil contamination was enacted in 2003. VOC contamination is one of the large issues for soil contamination. VOC contamination easily penetrates under deep soil, and may cause larger scale pollution rather than heavy metal contamination. However, the capacities of disposal facilities are limited, though the most possible remedial action for VOC contamination is still disposal at present.

Therefore it is urged and important to get the practical way to decontaminate VOC on-site. This paper shows one of the practical methods to solve VOC contamination in deep soil. Iron oxide has been used and is well known as a solution for VOC contamination. Gypsum strengthens the agitated soil properly. This paper also shows that the mixture of both materials would make VOC contaminated soil clean and tight after agitation.