

バイオ製剤と掘削除去を併用した土壌浄化事例

日本物理探査株式会社 ○古賀 文晴、伊藤 明、芳賀 紀行、植山 隆義
株式会社バイオレンジャーズ 鴻野 雅一、岩橋 さおり

1. はじめに

土壌汚染対策法に指定されている有害な物質は、地下水、土壌中に留まり易い性質がある。特にジクロロメタンのような揮発性有機化合物は、地下水に溶け出すと地下深くまで浸透し、汚染が広がる可能性がある。地下深くまで浸透した揮発性有機化合物による汚染除去工事の費用は高額となる場合が多い。本調査・浄化工事は、工場跡地において、地下タンク内とその周辺に確認された揮発性有機化合物を含む汚染物質を掘削除去とバイオレメディエーションを併用し汚染を除去したものである。その際、浄化工事による経済的負担を低減することに成功したため、事例を報告する。

2. 汚染の状況

2.1 調査結果

図-1に調査位置関係図を示す。調査はA、Bの2区画において特定有害物質全項目について実施し、下記の汚染が検出された。併せてノルマルヘキサン含有量試験（油）を実施した。

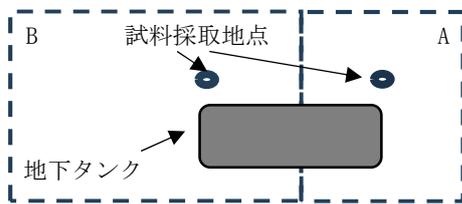


図-1 調査位置関係模式図

- (1) Aにおいては深度4～5mにジクロロメタンの汚染、深度1mにふっ素の汚染が確認された。確認されたジクロロメタンの濃度は基準値の2～3倍程度であり、ふっ素は基準値をわずかに超過する程度であった。また、ノルマルヘキサン含有量試験により、深度2mにおいて油汚染が確認された。
- (2) Bにおいては深度0～4mにおいて、最大で基準値の約200倍となるジクロロメタンの汚染が確認された。ふっ素、油の基準値を超えた汚染は確認されなかった。
- (3) A区画 G.L-2.2m、B区画 G.L-1.8mで採取された地下水については、どちらも基準値を超過する汚染は確認されなかった。

2.2 対策工法の選定

以下条件を踏まえ、対策工法を検討した。

- (1) 周辺に主要道路、駅があり、交通量が多い。
- (2) 調査地の開発まで、10か月程度の余裕がある。
- (3) 工事にかかる費用は可能な限り抑えたい。

(4) 地下水位がG.L-2.0m付近にあり、掘削時には汚染水の処理対策が必要となる。

以上条件に基づき、掘削除去とバイオレメディエーション併用の2工法について検討した。バイオレメディエーションとは、微生物や菌類、植物の作用により揮発性有機化合物や油汚染を分解し、除去する技術である。

(1) 掘削除去案

Aは深度6mまで、Bは深度5mまで掘削除去を行う。

長所は、対策工事期間が短い。短所は地下水位が高く、山留工事、水処理が必要なため工事費が高くなる。

(2) 掘削除去+バイオレメディエーション併用案

Aは深度0.5～2mまでふっ素の汚染があるため掘削除去、深度2～6mまではバイオレメディエーションによる原位置浄化、Bは深度0～5mまでバイオレメディエーションによる原位置浄化を行う。

長所は、全てを掘削除去するより経済的であり、バイオレメディエーションにより油汚染も併せて浄化できる。短所は浄化に半年程度の期間が必要である。

掘削除去案、併用案の工事費を概算した結果、併用案が掘削除去案より約50%の費用の削減ができることが分かった。¹⁾本工事では併用案を採用した。

3. 対策工事

3.1 トリータビリティ試験

バイオレメディエーションによる浄化は、対象地の地質条件により処理可能か否かが決まる。本試験では、事前に調査地の土壌を用い、バイオ製剤による処理が可能か判定することを目的とした。

(1) 使用材料と添加量

使用した材料と添加量を表-1に示す。

表-1 材料及び添加量

材料	添加量	添加量 (/m ³)
試験対象土壌	1.5 kg	
複合バイオ製剤テラザイム	1.80 g	2.0 kg
複合バイオ製剤フォーミュラCL	0.18 g	0.2 kg
栄養剤	1.80 g	2.0 kg
必須元素水溶液 (10倍希釈液)	450 μl	原液50 ml

(2) 試験結果

ジクロロメタンの土壤溶出量の推移を図-2、全微生物数の推移を図-3にそれぞれ示す。

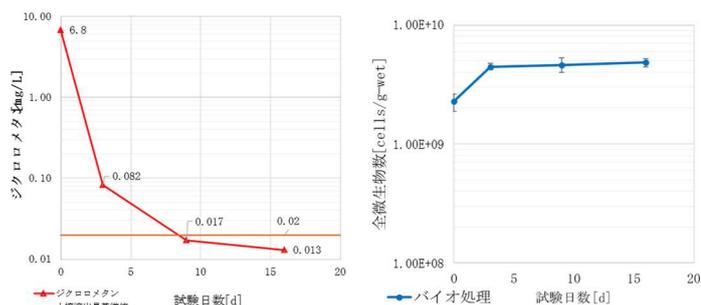


図-2 ジクロロメタン土壤溶出量 図-3 全微生物数の推移

トリータビリティ試験用に新たに採取した土壤試料には基準値の約340倍となる6.8mg/Lのジクロロメタンが検出されたが、3日後には0.082mg/Lまで減少、9日後には0.017mg/Lとなり、土壤溶出量基準を満たした。また、16日後には0.013mg/Lまで低減した。全微生物数は、初期値と比較し、3日後には約2倍に増加した。土壤のpHは試験前8.4、3日後8.2、9日後8.2、16日後8.2で安定しており、微生物の増殖に影響はなかった。

3)有効性の判定

全微生物数の増加とともにジクロロメタンの減少が確認されたため、使用したバイオ製剤による土壤の処理は可能であると判定するとともに添加する薬量を決定した。

3.2 バイオレメディエーション

対策工事は、掘削除去とバイオレメディエーションの併用で実施した。最初にジクロロメタンと油をバイオレメディエーションにより浄化した。Aについては、ジクロロメタン浄化後にふっ素で汚染された0.5m~2.0mの土壤を掘削除去し、指定の処分場において適切に処理を行った。また、表層部は角礫を多く含み、かなり固いため、ランドファーマリングにより浄化工事を行った。

(1) 薬剤注入

土壤の掘進には、打撃式ボーリングマシンを用いた。Aは最大深度6mまで、Bは最大深度5mまで掘進した。その後、高圧ポンプにより、孔内に薬剤を注入した。

(写真-1) 薬剤注入状況

対象地区の地盤が軟弱の場合、薬剤注入作業時に空洞が発生する恐れがある。本工事は対策工事が終わり次第建物の建設が予定されていた。そのため、空洞発生の可能性を軽減するために、通常用いるポンプより弱い出力のポンプを選定した。その際、薬剤を均等に浸透させるために、攪拌中の薬剤を、各孔最大深度から注入を始め、注入量が規定に達したら注入を停止し、0.2m引き上げ、再度注入を行った。この工程を繰り返し、G.L-1.0mまで注入作業を行った。引上げ間隔0.2mは、調査地の土質と経験値から設定した。

(2)ランドファーマリング

表層においては、土壤が固結しており、薬剤の噴霧効果が減少する恐れがあるため、ランドファーマリングを採用した。バックホウにより、G.L-1.0mまで土壤攪拌を行い、ホースで表層に薬剤を散布、攪拌を繰り返した。



写真-1 薬剤注入状況

3.3 掘削除去と汚染拡散防止

Aはふっ素が基準値を超過しており、深度2.0mまでの掘削除去が必要であった。H型鋼による親杭横矢板で山留した後、深度2mまでの土壤を搬出した。この工事は、建築基礎工事と合わせて実施し、効率化を図った。

掘削時に発生した滲出水は、別途ノッチタンクに貯め、汚染の拡散を防止するためバックテストによりふっ素の汚染がないことを確認した後、下水に放流した。

4 まとめ

全ての工程を終了したのち、1か月後、2か月後において再度土壤、地下水を採取し、分析した結果基準値を超過する汚染は検出されなかった。

トリータビリティ試験を行うことにより、適切な薬剤とその分量が選定されさらに、土壤注入とランドファーマリングを併用することで当初半年を想定していた浄化期間が、わずか1か月という短い期間において効率的な土壤浄化ができたと考える。土壤汚染対策工事は、発注者の要望や施工条件に応じて様々な工法を選定する必要がある。現状では、掘削除去による土壤汚染の除去実施措置が最も多い²⁾が、土壤汚染対策工事費が土地価格の20~40%を超えると土地売買が不成立になる場合が多い³⁾。発注者の経済的負担を軽減するために、施工条件の中で実施可能なより良い工法を提案することが重要である。

《引用・参考文献》

1) 環境省 (HP、2025、5、15閲覧):対策工事費と土地売却額との関係の試算

<https://www.env.go.jp/houdou/index.html>

2) 環境省 (HP、2025、5、16閲覧):令和5年度土壤汚染対策法の施工状況及び土壤汚染調査・対策事例等に関する調査結果 <https://www.env.go.jp/press/>

3) 環境省 (HP、2025、5、16閲覧):土壤対策工事の現状と課題 <https://www.env.go.jp/press/>

重金属封じ込め盛土周辺で生じた鉛の基準値超過の原因分析事例

川崎地質株式会社 ○町田 悠輔, 米田 英治, 佐藤 祥昭, 若林 将暉

1. はじめに

建設工事で発生する岩石・土壌は、盛土や埋土の材料として有効活用が推進される中で、自然由来のヒ素や鉛などの重金属等を含む問題があり、土壌汚染対策法の適用外である岩砕（掘削ずり）の対策手法の標準化が進められてきた。一般的に、重金属を含む岩石・土壌に対して封じ込めや不溶化等の対策を施した盛土へは、効果確認の地下水モニタリングが実施される¹⁾。

本稿では、重金属封じ込め盛土周辺の水質モニタリングにより、鉛の基準値超過が観測された地域に対し、基本的な水文調査による地下水解析から、同位体分析による起源の確認調査を実施し原因分析を試みた事例について報告する。

2. 調査背景

図-1に対策盛土と周辺井戸の位置関係を示す。本業務の契機は、2023年9月の水質モニタリング調査であり、2箇所の井戸で鉛が基準値を超過（観井⑪：0.017mg/L、民井⑳：0.011mg/L）し、その後に民井⑧で超過（0.028mg/L）が確認された。民間井戸での基準値超過は初めての事象であった。（※井戸名の記載は、民間井戸を「民井」、対策盛土周辺の観測井戸を「観井」と表記する。）

対策盛土は2013年7月頃に造成され、重金属含有土（ヒ素）をベントナイト混合土+遮水シート（二重）により封じ込めている（図-1）。盛土材は、隣接するトンネル掘削工事で発生した結晶片岩類から成る。なお、鉛は事前のスクリーニング調査により基準値以下と評価されており、かつ、非酸性土である。

ここに、盛土施工後10年経過後に、地下水モニタリングにてヒ素ではなく鉛の基準値超過が確認された事象に

対し、対策盛土との因果関係が懸念された。

3. 調査結果

(1) 水理地質構造と地下水流向

図-2に本調査の目的と実施した項目を示す。対策盛土周辺で観測井戸増設のためのボーリング調査を行い、併せて既往調査を含めた地質縦横断面図を作成して、盛土付近の地質構造を把握した。対象地は黒色・緑色片岩類を基盤に、高位～低位の段丘堆積物（玉石・砂礫）が覆う。地下水は基盤と中位～低位段丘堆積物との境界付近を流下している。

盛土周辺の地下水流向は、図-3に示すコンター図より、通年で西南西⇒東北東を示す傾向である。また、観井④、⑤で実施した流向流速測定により、盛土西側は西⇒東の流下傾向を示した。図-4より、主要井戸に設置した自記水位計による観測の結果、豊水期（豪雨時）に地下水位の大きな変動は確認されるものの、各井戸間（民井⑧、⑳周辺）の水位高低に逆転は認められない。従って、盛土側から民地側への地下水の供給の可能性は低いものと推察される。

(2) 水質分析(イオン分析)

各種水質分析結果の経時変化を図-5に示す。水素イオン濃度（pH）は、民井⑧で弱酸性、民井⑳で中性の傾向を示す。鉛の検出とpH値に明瞭な相関は認められない。電気伝導率（EC）は、民間井戸で一般的な地下水の範疇にあるが、観測井戸では管理基準値（30mS/m）を超える値も多く見られ、盛土側と民地側では、溶存イオン量の傾向に差異がある。

鉛濃度は、民井⑧は当初最大0.028mg/Lで検出されたが、その後は比較的低濃度で推移し2024年7月以降で

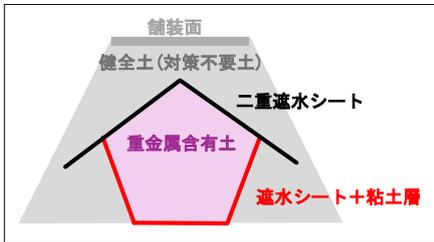


図-1 封じ込め盛土の構造

調査目的	調査項目
地下水位の経時変化 地域の地下水位状態	地下水位測定
水質の経時変化図 地域の地下水位状態	地下水質測定 (pH、EC、鉛、ヒ素) イオン分析 酸化還元電位測定
盛土周辺地盤の地質構造 地下水位コンター図精度向上	ボーリング調査 観測井戸追加設置
平水時及び降雨時 地下水流動過程の解明	自記計設置 (水位、pH、EC)
健全土盛土評価 健全土浸出水の影響有無	土研式雨水曝露試験 全含有量試験 短期溶出試験 酸性化可能性試験
民井⑧、⑳周囲 調査・評価 盛土と民地井戸間の関係性調査	井戸追加 流向流速測定 自記計設置 (水位、pH、EC)
民井⑧、⑳ 鉛の由来判別	放水量調査 同位体分析

図-2 調査目的と項目

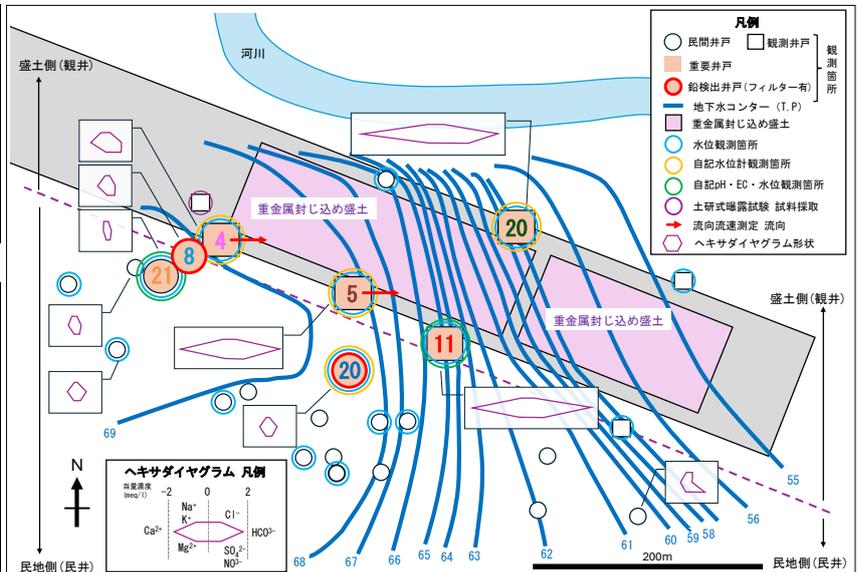


図-3 対策盛土周辺の井戸の配置と地下水コンター図(平水時)

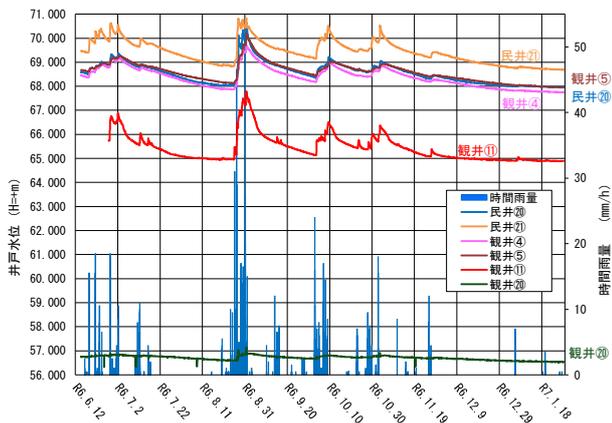


図-4 地下水位経時変化図

再び基準値超過の傾向を示した。民井⑩において、基準値超過後は定量下限値程度で推移している。なお、ヒ素については民井の何れも基準値超過は認められない。

一方、観井⑪等の盛土側の観測井戸では、採水時の確実なパージとろ過処理により定量下限値未満となった。そのため、観測井戸における鉛の検出は井戸内滞留水に含まれる濁質に起因したものと推察される。

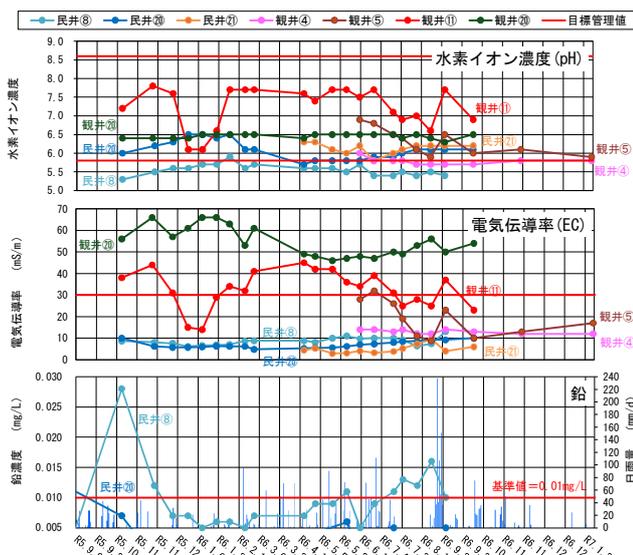


図-5 水質分析結果

水質の化学的性質を把握するため、イオン分析を行った結果、盛土側と民地側ではヘキサダイアグラムの姿形に明らかな差異が見られる(図-3)。このことは、盛土側と民地側の水質が異なることを示唆している。また、盛土側と民地側の境界にあたる観井④は、民地側からの地下水供給が主であると推察される。

(3) 盛土材の溶出特性

封じ込め盛土外部の健全土盛土からの浸出水による影響が懸念されたため、対策不要土にてボーリングを実施し、コア試料や近隣露頭試料を対象に全含有量試験を実施した。健全土盛土と自然地盤での鉛の含有は普遍的に確認されるものの、何れも一般的な濃度であった。併せて、ボーリングコア試料を用いた土研式雨水曝露試験を実施し、長期溶出特性を確認した結果、酸性水の発出、

及び鉛の検出は認められなかった。従って、健全土盛土が鉛の検出原因である可能性は低いと評価された。

(4) 鉛の放水濃度調査と同位体分析

鉛の基準値超過が確認された民井⑧、⑩において、蛇口から出た初期水と 100L 程放水した水試料を採水し、鉛の分析を複数回実施した(表-1)。民井⑧の初期水は 0.3mg/L 以上と高濃度を示すものの、放水後は基準値付近まで低下した。また、民井⑩は定量下限未満であった。いずれも初期水数値>放水後数値となり、鉛は井戸に起因したものである可能性が示唆された。

表-1 初期水と放水後の鉛濃度(mg/L)

井戸名	実施回数	1回目	2回目	3回目	4回目
	民井⑧ 放水後		0.012	0.016	0.010
民井⑧ 初期水		0.32	0.33	0.34	欠測
民井⑩ 放水後		<0.005	<0.005	0.005	<0.005
民井⑩ 初期水		<0.005	0.007	0.015	0.015

赤字:基準値超過

鉛は同位体分析で起源を推定できる²⁾。盛土材(健全土部)と盛土周辺地盤、及び民井⑧、⑩の採水試料における鉛の同位体分析の結果、民間井戸の地下水は人為由来による可能性が高いことが示唆された(図-6)。民間井戸での鉛の超過原因は、井戸配管等の取水設備の腐食等が考えられる。今回は密閉井戸であり、井戸内部の詳細は不明である。

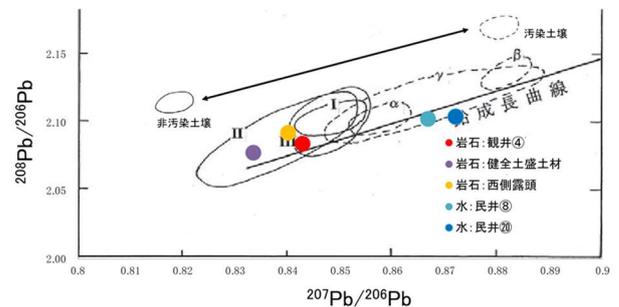


図-6 鉛同位体比の散布図と由来判別²⁾を改変

4. 考察

調査結果を総合的に判断すると、民間井戸の鉛の基準値超過は対策盛土に起因したものではないと評価される。すなわち、民地側井戸の地下水の流向や水質は盛土近傍と異なる可能性が高く、また、基準値超過井戸における詳細調査の結果、個々の井戸の要因により生じた可能性が高いものと推察された。

《引用・参考文献》

- 1) 建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル(2023年版)(2023): (建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル改訂委員会。
- 2) 島田允堯(2014):自然由来重金属と環境汚染応用地質学・地球化学的データバンク, p.37, 愛智出版。

地下水汚染の揚水対策における揚水位置の選定について

興亜開発株式会社 平川 飛樹

1. はじめに

土壌・地下水汚染の原位置浄化手法の一つである原位置抽出のうち、地下水の揚水対策（以下、地下水揚水）は、地下水汚染の除去方法として広く用いられている。揚水に用いる井戸は、特定有害物質の濃度がより高い場所付近（地下水汚染の中心付近）に設置することにより除去の効率を向上させることができる¹⁾。措置の対象物質が第一種特定有害物質の場合、汚染源が地下水中を移動することにより特定有害物質の高濃度地点の場所が変化し、適切な位置に揚水井戸を設置できない可能性がある。従って、対策直前の対策範囲における特定有害物質の平面分布は、地下水揚水を効率良く進めるために必要な情報である。

本事例は、土壌汚染状況調査で把握された汚染状況を基に地下水揚水を実施したものである。揚水井戸の設置位置の選定にあたり、特定有害物質の平面分布を想定するための調査を補助的に実施した。本報告では、地下水揚水の実施状況を報告すると共に、対策前に実施する調査の重要性について考察する。

2. 既往調査結果及び追加調査概要

クリーニング店跡地において、使用が廃止された有害物質使用特定施設に係る工場または事業場の敷地であった土地の調査（以下、法第3条第1項本文調査）を実施した。調査対象地面積は464.78㎡であり、全6区画で構成される。法第3条第1項本文調査及び対策範囲確定のための詳細調査の結果、テトラクロロエチレンの土壌溶出量基準の超過及び地下水基準の超過が確認された。土壌溶出量基準の超過は3区画であり、いずれも地下水以浅（不飽和部）に認められた。地下水基準の超過は、No.1区画でのみ確認された。表-1に対象地の汚染状態を示す。この3区画は要措置区域に指定された。

表-1 土壌汚染状況調査結果(テトラクロロエチレン)

区画名	土壌ガス濃度 (vol1ppm)	土壌溶出量		地下水濃度 (mg/L)	地下水位 (KBM-m)
		深度(KBM-m)	濃度(mg/L)		
No. 1	1.9	0.05	0.78	0.032	1.66
		0.50	0.13		
		1.00	0.039		
		1.50	0.60		
		2.00	0.001		
No. 5	1.1	0.05	0.016	<0.001	1.52
		0.10	<0.001		
		0.05	<0.001		
No. 7	0.4	0.50	0.14	0.004	1.54
		1.00	0.025		
		1.50	0.016		
		1.60	<0.001		

青文字…第二溶出量基準超過
赤文字…溶出量基準超過、地下水基準超過

区域指定後、No.5区画及びNo.7区画の基準不適合土壌については掘削除去を実施し、区域指定が解除された。No.1区画の基準不適合土壌については掘削除去を実施

し、地下水汚染については地下水揚水を実施することとした。掘削除去後までの状況を図-1に示す。

掘削除去後まで、区画内の汚染の平面分布は明らかではなかった。対策にあたり、No.1区画内のテトラクロロエチレンの平面分布を把握し効率の良い揚水計画を検討するために、追加調査を実施することとした。

追加調査は、対象区画を細分して土壌ガス調査を実施した。単位区画の縦辺と横辺に等間隔で2本ずつ線を引き、単位区画を9等分し各エリアについて土壌ガス濃度を測定した。図-2に追加の土壌ガス調査の地点図を示す。

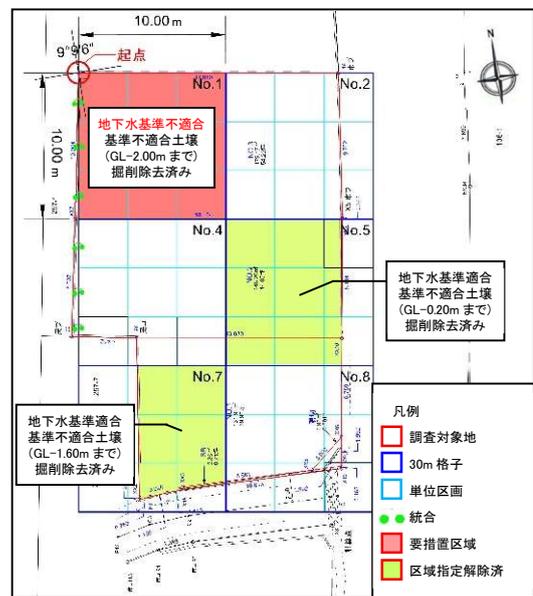


図-1 対象地(掘削除去後)

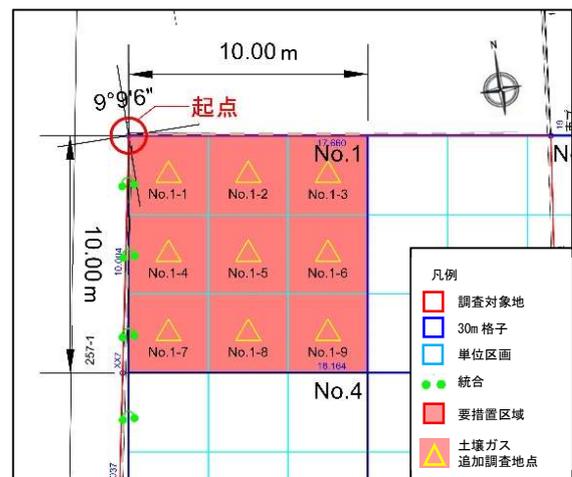


図-2 土壌ガス追加調査地点図

3. 土壌ガス追加調査結果

追加調査の結果、要措置区域内のテトラクロロエチレンの平面分布を把握することができた。テトラクロロエチレンは全地点で検出され、最も検出値が高かった地点

は No. 1-5地点で87volppm であった。また、濃度分布は No. 1-5地点を中心に広がっており、汚染の中心が複数確認されることはなかった。図-3に土壤ガス追加調査結果を示す。追加調査の結果から、テトラクロロエチレンの濃度が最も高かったエリアの中央 (No. 1-5地点) に揚水井戸を設置することとした。

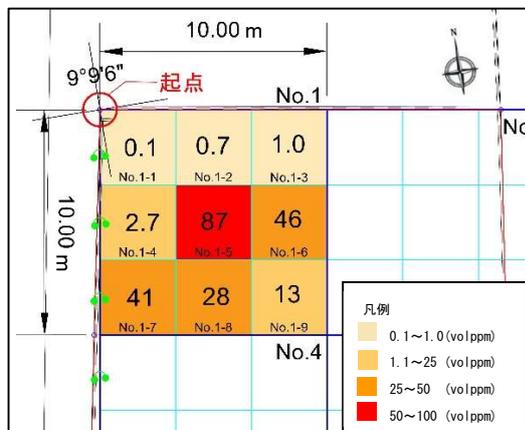


図-3 追加調査結果

4. 地下水揚水結果

追加調査の結果から、No. 1-5地点の中心に径100φの揚水井戸を設置し、地下水揚水を実施した。図-4に地下水揚水設備の構造を示す。

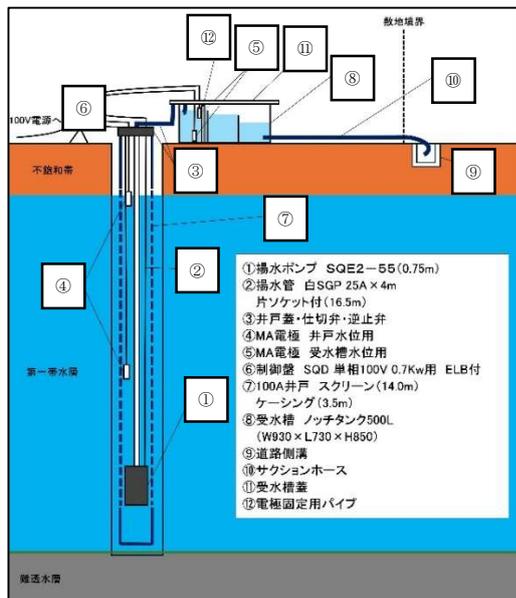


図-4 地下水揚水設備

揚水井戸の下端深度は難透水層の直上とした。地下水揚水は1.8m³/hの流量で実施し、揚水した地下水は、ノッチタンク内で活性炭吸着処理後、市の排水基準以下であることを確認し下水道へ放流した。

地下水のテトラクロロエチレンの濃度の確認は、揚水井戸から地下水の下流方向4m地点に設置した観測井戸で実施した。揚水井戸及び観測井戸の位置図を図-5に示す。地下水揚水の結果、当初は地下水基準の21倍の基準超過が確認されていたが、日数経過と共に段階的に濃度

が低下し、揚水開始から77日で地下水基準以下となった。現在は措置の効果の確認のための2年間モニタリング中である。地下水揚水の結果を図-6に示す。

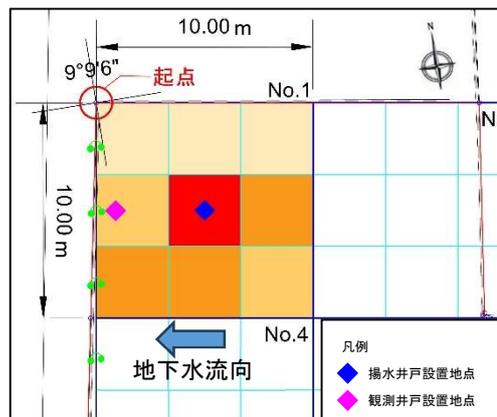


図-5 観測井戸及び揚水井戸位置図

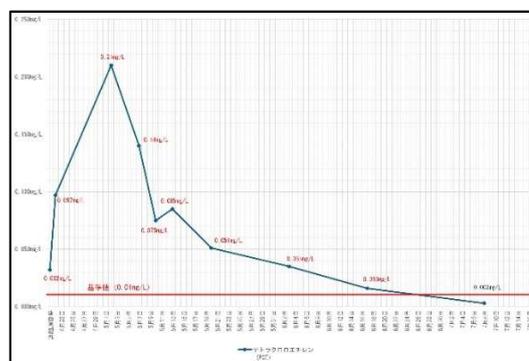


図-6 地下水揚水結果

5. まとめ

地下水揚水を実施する前に特定有害物質の濃度把握のための調査を実施し、揚水井戸の設置地点を選定することで、効率的に原位置抽出を実施することができた。地下水揚水についての環境省の報告²⁾によると、特定有害物質の地下水中の移動特性及び詳細調査時から地下水揚水開始までの時間経過により、特定有害物質の高濃度地点の場所が変化し、適切な位置に揚水井戸を設置できず、地下水揚水の期間が長期間化し浄化費用が増加するケースが確認されている。地下水揚水等の対策を実施する際に、対策の規模や内容に応じて対策の対象を絞り込むことは、対策を効率良く進めるために必要な情報であると考えられる。

《引用・参考文献》

- 1) 土壤汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン (改訂第3.1版) (2022) : 環境省, pp. 585
- 2) 環境省: 参考資料 11 地下水汚染のメカニズムと汚染事例
<https://www.env.go.jp/water/chikasui/brief2012/manual/div-ref-11.pdf> (最終閲覧日 2025. 5. 30)

効果的に油汚染範囲を把握するための調査方法事例

榎セイコー ○原田 輝光, 黒田 憲介, 村嶋 光明, 久保田 勝彦, 古賀 淳貴, 榎 幸祐

1. はじめに

新設工場増築工事の基礎構造設計に必要な地盤データを得るためのボーリング調査を実施した際に土壤中に油汚染が発覚した。対象地は、現在更地であるが昭和初期から工作所として利用されており、油を使用した業態であることは推測できたものの、土地利用は昭和以前からと古く、油汚染漏洩原因については不明であった。新設工事の基礎形式は、支持杭、深層混合処理工法の採用が考えられていた。しかし、油汚染の分布範囲が不明確であるために支持杭の場合は、不透水層(粘性土層)を貫通することによる下位層への油汚染拡散のおそれがあること、深層混合処理工法では油を含有した土壌を改良することから油汚染濃度に応じた配合量を設定する必要が生じることが問題となった。それに加えて期間の制約もある中、迅速かつ効果的に油汚染範囲を把握することが出来た調査方法について、調査結果と共に紹介する。

2. 調査方法

調査方針を決定するために図-1に示す手順フローに従って行った。なお、今回は、鉱油類を対象としており、種類としてはガソリン、灯油、重油等の燃料油と機械油、切削油等の潤滑油が挙げられる。油には環境基準がないものの油の揮発成分の総量(全炭化水素)を測定し推定した。

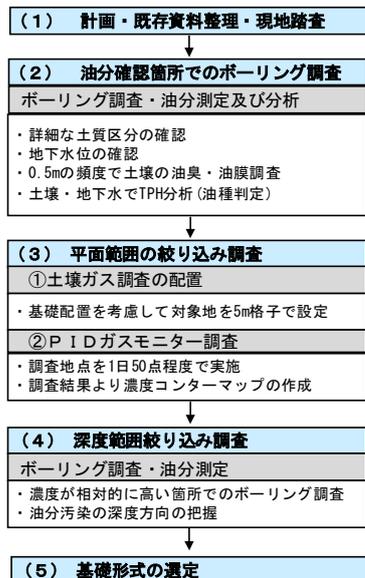


図-1 手順フロー

(1) 計画・既存資料整理・現地踏査

現地にて工事関係者及び土地所有者から油汚染が確認された経緯や過去の土地利用について聴取を行った。また、現地で地質調査結果やボーリングコアの確認及び地質調査箇所や周辺状況を現地踏査にて確認した。

(2)油分確認箇所でのボーリング調査

対象地の油汚染が確認された地点でボーリング調査を行い、表-1に示すように詳細な地層区分や地下水位の確認を行った。また、油分測定は、採取されたコアで深度ごとに油臭・油膜測定を実施した。測定結果より油分濃度が高い2深度と帯水層直下1深度の計3深度で油種の同定を行うために TPH 試験を実施した。表-2に示すTPH試験結果から油種は、残油・軽油・A重油であることが判明した。

表-1 地層層序一覧及び油臭・油膜測定結果表

地層名	層厚	深度	油臭・油膜測定
B: 盛土(礫混じり砂)	0~0.30m	0.15m	無
Ac: 沖積砂質土	0.3~5.0m	0.5m	無
		1.0~4.0m	有
As: 沖積砂質土	5.0~7.0m	4.5~5.0m	無
地下水		GL-2.2m	有

表-2 TPH 試験結果

地点名	深度(m)	TPH(mg/kg・dry)		
		C ₆ ~C ₁₂	C ₁₂ ~C ₂₈	C ₂₈ ~C ₄₄
No. 1	2.2	定量下限値未満	3190	2030
	3.0	定量下限値未満	420	320
	5.0	定量下限値未満	定量下限値未満	定量下限値未満
定量下限値		50		

(3)平面範囲の絞り込み調査

①土壌ガス調査の配置

配置方法は、通常の土壌汚染対策法に準じた10m 格子の中央に採取地点を配置した場合は、基礎部の配置箇所が精度良く捉えられない。よって、図-2に示すように、基礎配置を考慮しピッチを細かく5m 格子に設定した。

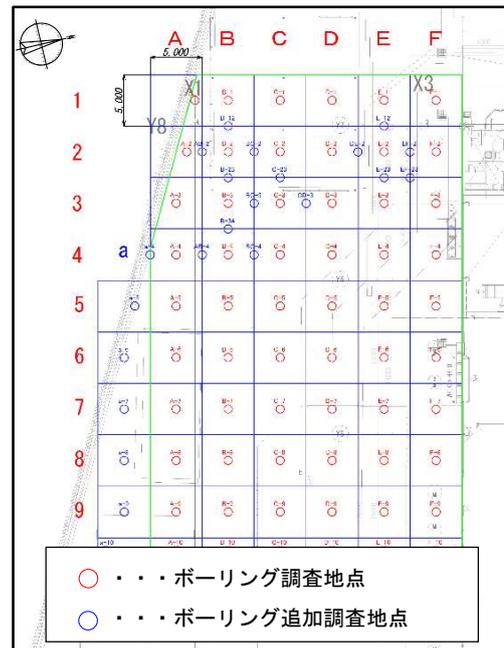


図-2 土壌ガス調査の位置図

②PID ガスモニター調査

PID ガスモニターを用いると揮発性有機化合物 (VOC) や炭化水素 (今回は油種判定より残油・軽油・A 重油) などの高濃度 (測定範囲が0.1~15,000ppm) に汚染された地域においても, 図-3に示すような手順により短時間で濃度値を測定できる. その結果, 多地点 (1日50点程度) のデータを短期間で収集し, 汚染濃度分布を早期に精度よく把握できた.



図-3 PID ガスモニター作業状況

調査対象地で測定したPID ガスモニター測定結果を基に図-4に示す濃度等高線分布図を作成した. 測定結果より, 対象地全体において相対的に濃度が高い4箇所が確認された.

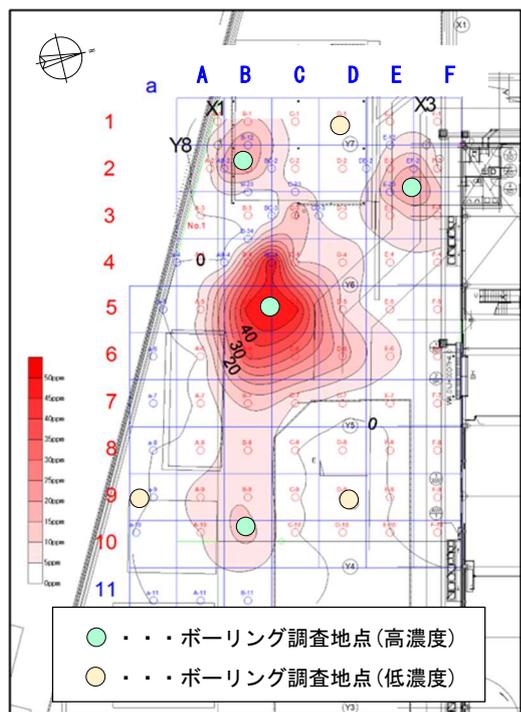


図-4 濃度等高線分布図

(4)深度範囲絞り込み調査

濃度等高線分布図より濃度が相対的に高い4箇所と濃度が低い3箇所の計7箇所での深度方向のボーリング調査を行った. 掘削は, 油汚染が拡散しないように泥水を使用しない打撃式による自走ボーリングで実施した. なお, ボーリング掘り止め深度は, 油臭・油膜が無い深度を2深度確認した深度までとした. 調査結果より沖積粘性土 (不透水層) 以深の油汚染の拡散は, 確認されなかった.

(5)基礎形式の選定

当初の基礎形式の選定では調査結果より基礎形式が支持杭, 深層混合処理工法の2工法の採用が考えられた. しかし, ボーリング調査より油汚染は, 深さ方向が概ねGL-1.0~ -4.0m までの汚染範囲であることが判明したことから, 図-5に示すように仮に支持杭であった場合は, 不透水層を貫通し, 油汚染が下層に拡散するリスクがある. よって, 油汚染拡散を考慮し改良材を吐出しながら地盤改良を行う深層混合処理工法が選定された. なお, 対象地は沖積層の低地からなり地下水の流速は遅く, 周囲 (対象地外) への汚染は確認されていない.

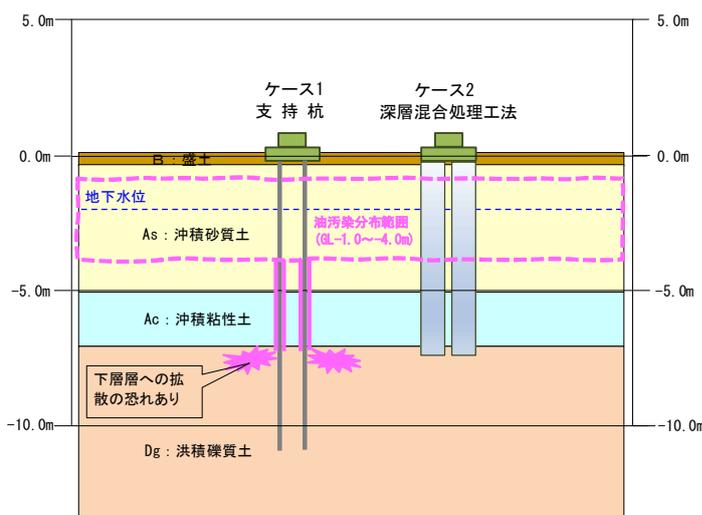


図-5 対象地の地層想定断面図と基礎形式想定図

3. おわりに

油汚染の問題は, 土壌汚染対策法とは異なり基準値がなく評価することが非常に困難な場合もある. 今回の事例のように建設工事において油汚染や地下水汚染の可能性が当初より予見できず, 工事着手後に汚染が判明する可能性がある. このような汚染については, 浄化等による汚染の除去措置の実施が望ましいが規模, 事業の緊急性や期間・費用等の制約から早期かつ効率的に汚染範囲を特定することが望まれる. よって, 今回のようなTPH 試験とPID ガスモニター調査をハイブリッドで使用することで油汚染の濃度等高線分布図を作成し精度の高い分布状況を早期かつ的確に捉えることができた. しかし, 油分濃度の高い地点, 低い地点でボーリング調査を実施しているが, 部分的に平面濃度分布が高い箇所が深度方向においても必ずしも濃度が高い結果が得られなかった. このような事象について今後は, 平面分布と深度分布の相関関係が得られるような調査方法を開発していきたい.

《参考文献》

- 1) 油汚染対策ガイドライン: 中央審議会土壌農薬部
- 2) 土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン (改訂第3.1版): 環境省 水・大気環境局
- 3) (社)地盤工学編: 地盤調査の方法と解説 2013.3

関東地域の軟弱地盤に対する配合試験事例

大日本ダイヤコンサルタント株式会社 ○田中 陸登

1. はじめに

軟弱地盤上に構造物を施工するにあたって、安定・沈下・変形の様々な課題に対する対策方法として地盤改良工法が選定されることがある。軟弱地盤対策として地盤改良を行うにあたって、改良強度や六価クロムの溶出を確認するために、施工前に配合試験が実施される。

地盤改良を実施するうえで必要となる配合試験ではあるが、工事において実施される場合や、詳細設計で必要強度が決定してから実施されるケースが多く、地質調査結果、地下水調査結果、水質調査結果などと比較すると公開されている事例として非常に少ない状況である。

本発表では、関東地域の軟弱地盤に対して配合試験を実施した事例を紹介する。

2. 配合試験の概要

(1) 実施項目

配合試験の条件は表-1 に示すように設定し、改良強度の評価は一軸圧縮試験によって行った。また、改良土から、条件によっては六価クロムが溶出するおそれがあるため、六価クロム溶出試験を実施した。配合試験の項目については表-2に示す。

表-1 室内配合試験の試験条件

項目	数量	内容
改良材	2種類	高炉セメントB種 特殊土用セメント
添加量	3配合	100、200、300 kg/m ³ ※一部試料については100、200、250kg/m ³ で実施
養生機関	2材例	7日、28日
水セメント比	-	W/C=100%

表-2 室内配合試験の項目¹⁾

項目	規格	内容
供試体作成	JGS0821-2009	-
一軸圧縮試験	JIS A 1216	-
六価クロム溶出試験	環境省公示46号 溶出試験 (H3/8/3)	土壤環境基準0.05 mg/L 以下

(2) 対象となる地層

配合試験の改良土は沖積層の第一粘性土層 (Ac1層) のシルトとし、A~F の全6か所で実施した配合試験結果の事例を基に比較、検討を行った。いずれの実施箇所も河川沿いの低地に該当する。

配合試験を実施した各箇所の地盤特性について、室内土質試験結果を表-3に示す。

表-3 配合試験実施箇所の地盤特性

改良土 土質名称	A シルト	B 砂質シルト	C シルト	D 砂混じり シルト	E シルト	F シルト
自然含水比 w_n (%)	61.8	52.2	49.1	94.8	42.2	62.4
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.628	1.687	1.830	1.724	1.785	1.610
細粒分含有率 F_c (%)	94.6	84.7	-	-	97.8	99.5
強熱減量 L_i (%)	-	5.3	5.8	10.6	5.1	8.8
pH 試験	-	7.4	6.3	6.1	8.0	6.4

3. 一軸圧縮試験結果の事例

材例28日における一軸圧縮試験結果を図-1、図-2に示す。各箇所の地盤特性は概ね類似しているが、試験結果による一軸圧縮強度には箇所毎にばらつきがみられたため、一軸圧縮試験結果と改良土の地盤特性との関係について検討した。

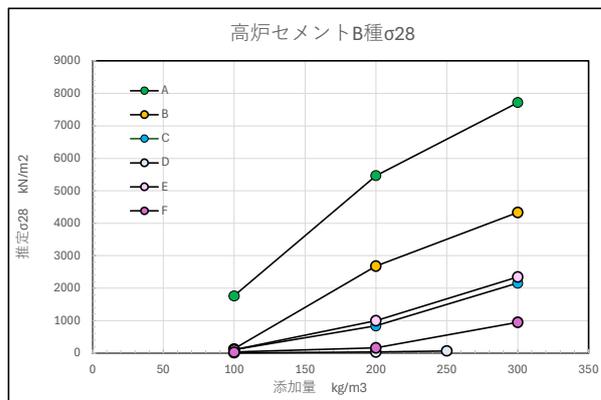


図-1 材齢28日における一軸圧縮試験結果 (高炉セメントB種)

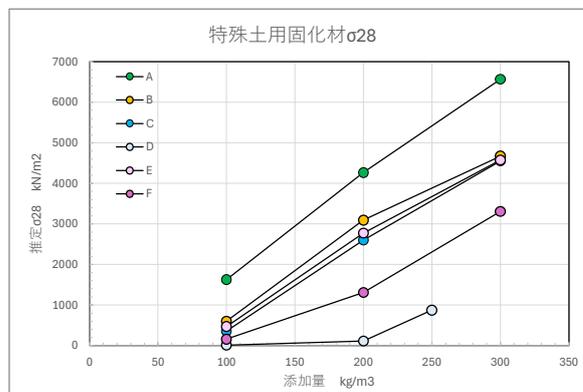


図-2 材齢28日における一軸圧縮試験結果 (特殊土用セメント)

土の pH は、鉱物組成のほか土中に存在する無機塩類や有機物の種類や量で変化する。pH が4~5を示すような酸性土はセメント系固化材で改良しても水和硬化反応が阻害され十分な強度発現が得られない場合がある²⁾。

B~F の事例では pH の範囲は6.1~8.0であり、pH の観点からは水和硬化反応の阻害は低いと考えられる。土の懸濁度試験を実施した5種の改良土のうち、最も pH の値が大きかった改良土 E は改良土 B よりも一軸圧縮強度が小さい結果となった。改良土の懸濁度と室内配合試験の一軸圧縮試験結果との相関は明瞭ではなかった。

また、土の水分量による影響として、一般的に含水比が高いとセメント系固化材により、固化した土の改良強度は小さくなるとされている²⁾。改良土 D は本事例のうち一軸圧縮強度が最も小さい。自然含水比が94.8%と高いために、強度発現が低くなったものであると考えられる。

細粒分含有率についても一般的に、砂分が少ないほど改良土の強度が小さいとされている²⁾が、本事例では細粒分含有率との相関は確認されなかった。

4. 六価クロム溶出試験の事例

各改良土について六価クロム溶出試験の試験結果を表-4に示す。なお、使用した供試体は7日強度の配合試験結果から推定した材齢28日強度において、目標強度に必要な添加量に最も近い供試体を使用した。また、基準値は土壤環境基準値 (0.05mg/ℓ) 以下とした。

表-4 六価クロム溶出試験結果

改良土	固化材	固化材添加量	六価クロム溶出量	判定 OK:○ NG:×
		(kg/m ³)	(mg/ℓ) ※基準0.05mg/ℓ	
A	高炉セメントB種	100	0.01	○
	特殊土用固化材	100	0.01	○
B	高炉セメントB種	200	0.03	○
	特殊土用固化材	200	0.02	○
C	高炉セメントB種	-	-	-
	特殊土用固化材	200	0.02	○
D	高炉セメントB種	-	-	-
	特殊土用固化材	250	0.02	○
E	高炉セメントB種	200	0.07	×
	特殊土用固化材	100	0.03	○
F	高炉セメントB種	300	0.13	×
	特殊土用固化材	200	0.06	×

セメント系固化材には、微量のクロム化合物が含まれており、これを用いた改良土からは環境基準を超える六

価クロムが溶出される場合がある。

本事例では、改良土 E、F で基準値を超える六価クロムの溶出が確認された。特に改良土 F については特殊土用のセメントを用いた場合でも六価クロムの溶出が確認されている。地盤特性としては、細粒分含有率は改良土 E、F とともに97%以上であり同程度の細粒分含有率を示すが、自然含水比は改良土 F が20%高い。含水が多いことにより固化する際に固まりにくく、水和反応が不十分になりやすいことが六価クロム溶出の要因となる可能性があると考えられる。

ただし、本事例のうち含水比が最も高い改良土 D は特殊土用固化材を用いた配合試験で六価クロムの溶出は確認されていないことから、含水比のみが六価クロムの溶出に影響しているとは限らない。

本発表では、類似した地盤条件、試験条件の事例を基に比較検討を行ったが、地盤条件の他にも温度や深度、地形条件等様々な要因から総合的に判断することが望ましい。したがって、配合試験結果のデータベース化が今後の課題としてあげられる。

5. まとめ

本発表では、地盤改良施工において実施される配合試験結果の事例を整理した。実際には非常に多くの試験データはあるものの公開されにくい情報となっているため、データ蓄積の重要性とともに調査事例として整理した。

現在、室内配合試験に関するデータベース化は十分に進展されていないため、地質調査結果、地下水調査結果、水質調査結果と配合試験結果を照合し、相関関係を的確に把握することが困難な状況である。例えば、配合試験結果に異常値が観測された場合においても、地盤条件や試験結果のデータの蓄積が十分に進展していれば、原因の追究が可能になる可能性があると考えられる。

このような現状を踏まえ、今後は配合試験や地質調査結果などのデータを体系的に集約し、データベース化を推進することが重要であると考えられる。これにより、設計段階において最適な試験条件の設定等に活用でき、無駄な試験の削減や設計変更の低減を通じて、費用および時間といったコストの削減につなげられるものと期待される。

《引用・参考文献》

- 1) 地盤材料試験の方法と解説(第一回改訂版)(2020), : 公益社団法人地盤工学会, pp. 581-592.
- 2) セメント系固化材による地盤改良マニュアル(第5版), : 一般社団法人セメント協会, pp. 44-119.