

セメント系固化処理土に関する検討

最終報告書(案)

平成 15 年 6 月 30 日

セメント系固化処理土検討委員会

まえがき

普通ポルトランドセメント中に六価クロムが含まれることは周知のことであったが、土と混合して固化処理を行った際の周辺環境への影響に関する認識は、一部で六価クロム溶出の疑義が呈されていたものの、現場サイドではほとんど等閑視されていた状況であった。しかしながら、土壤環境基準及び地下水環境基準の整備が進められ、ダイオキシン汚染も顕在化するなか、土壤環境への国民の意識の高まりを受けて当委員会の発足をみたものである。すなわち、主として地盤改良や固化処理に利用されているセメント系固化材だけでも、毎年600万トン規模で出荷されている状況において、こうしたものから一部ではあるが、土壤環境基準項目である六価クロムを溶出する可能性が確認され、直ちに周辺環境に影響を及ぼすような高濃度の六価クロムの溶出量値ではないが、固化処理土として一般環境中に投入される数量が膨大であることから、早急な対策が必要とみなされたわけである。

そこで、平成11年12月にセメント系固化処理土検討委員会を設置し、三年半を掛けて計9回の委員会を開催し、今般最終報告書をまとめるに到った次第である。途中、土の違いによる試験方法の差別化の提案、一年前の中間報告、及びこの最終報告までそれぞれ一年強を要した。併行して、平成12年3月24日付けで旧建設省(現国土交通省)より、通達「セメント及びセメント系固化材の地盤改良への使用及び改良土の再利用に関する当面の措置について」とその運用(平成13年4月20日一部変更)が出され(引き続き、旧運輸省(現国土交通省)、農林水産省からも同様の通達が発出)、公共工事では地盤改良等を行う場合、施工前に対象となる土と固化材を混合した試料の溶出試験を行い、土壤環境基準を満足する適切な配合を選定することとされた。

委員会では上述の通達に基づく溶出試験結果を、全国の施工サイトより集計した。また、既設のセメント改良土施工箇所の現地調査、土木研究所における大型土槽実験、数値解析等を行った。おそらくセメント改良土に関してこれほど多くのデータを集められたことは過去になかったといえるだろう。この結果、最初の一年では、土と固化材の種類の組合せによって変化する六価クロムの溶出の特徴を明らかにし、土の違いによる通達中にある試験方法の差別化を提案した。その後の一年間の分析の結果、セメント改良土からの六価クロムの溶出の特徴・メカニズム及び周辺地盤での挙動について多くの成果を得たことから、その段階での最大限の知見に基づく客観的な判断を中間報告として取りまとめ、関係者の参考に供するとともに意見を伺った。最終報告は中間報告の関係者による評価と更に一年間のデータ収集、考察を重ねてまとめたものである。最終的には全国集計データとして1,611現場から3,695試料を収集し、分析を行った。なお、委員会ではセメント改良土以外のセメントを材料とする構造物の施工工程や薬液注入施工時での六価クロムの溶出の可能性についても検討して、この結果も取りまとめた。

セメントはこれまで有害物質を封じ込める役割を果たしてきた。これはセメントが持つ重金属等の物質固定能力が優れているためである。今回の溶出の要因となったのはこうし

た固定能力に係る水和反応が土壌中の有機物や粘土鉱物などによって阻害されるためである。あらためて土木材料の原点である土やセメントの技術課題への取組みの重要性を想起させられたところである。

建設事業と土壌汚染は循環型社会の形成とも密接に関連しながら、今後も様々な調整が必要であり、それらを解決する技術開発が求められる分野である。近年は建設工事の際に土壌汚染に遭遇するケースが増大しているが、本課題では建設事業の実施により土壌環境に負荷を与える可能性が懸念されており、より一層の注意を払って事業を推進する必要がある。様々な土とセメント及びセメント系固化材の組合せが対象となることから、各々の現場では、今後も継続した対応が求められる。したがって、今後施工されるものについては、予防的な措置によって六価クロムの溶出のないセメント改良土を作製することでリスクを解消することとした。また、既に施工されているものについては周辺環境に影響するリスクを評価し、適切にリスクを管理できることを確認した。この最終報告を活用して頂き、いかにリスクを低減するかということを体現され、よりよい環境の構築に貢献されることを期待している。

足かけ4年間にわたる大きな課題に最終報告として取りまとめることができた。精力的な調査検討に参画いただいた委員、幹事各位のお陰である。厚くお礼申し上げます、今後とものご関与をお願いする次第である。

平成15年6月30日

セメント系固化処理土検討委員会委員長
京都大学大学院地球環境学堂

教授 嘉門 雅史

セメント系固化処理土検討委員会 委員名簿

委員長	京都大学大学院 地球環境学堂 教授	嘉門 雅史
委員	和歌山大学 システム工学部 教授	平田 健正
	東京工業大学大学院 理工学研究科 助教授	坂井 悦郎
	農林水産省 農村振興局 整備部設計課 施工企画調整室長	石川 佳市
	(農林水産省 農村振興局 整備部設計課 施工企画調整室長	関岡 英明)*
	(農林水産省 農村振興局 整備部設計課 施工企画調整室長	南部 明弘)*
	経済産業省 製造産業局 住宅産業窯業建材課長	谷 重男
	(経済産業省 製造産業局 住宅産業窯業建材課長	野口 泰彦)*
	(通商産業省 生活産業局 住宅産業窯業建材課 窯業室長	久能木慶治)*
	環境省 環境管理局 水環境部 土壌環境課 課長補佐	辻原 浩
	(環境省 環境管理局 水環境部 土壌環境課 課長補佐	荒木 真一)*
	(環境庁 水質保全局 土壌農薬課 課長補佐	藤倉まなみ)*
	国土交通省 大臣官房 技術調査課長	北橋 建治
	(国土交通省 大臣官房 技術調査課長	清治 真人)*
	(国土交通省 大臣官房 技術調査課長	望月 常好)*
	国土交通省 大臣官房 公共事業調査室長	高橋 総一
	(運輸省 運輸政策局 公共事業調査室長	藤田 武彦)*
	(国土交通省 大臣官房 公共事業調査室長	森川 雅行)*
	国土交通省 大臣官房 官庁営繕部建築課長	寺本 英治
	(国土交通省 大臣官房 官庁営繕部建築課長	奥田 修一)*
	国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部長	平野 吉信
	(国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部長	二木 幹夫)*
	独立行政法人 港湾空港技術研究所 地盤・構造部長	田中 洋行
	(独立行政法人 港湾空港技術研究所 地盤・構造部長	高橋 邦夫)*
	(運輸省 港湾技術研究所 土質部長	中浜 昭人)*
	独立行政法人 土木研究所 技術推進本部 総括研究官	三木 博史
	(独立行政法人 土木研究所 技術推進本部 総括研究官	苗村 正三)*
	独立行政法人 土木研究所 材料地盤研究グループ長	萩原 良二

*前職 (委員当時の役職。また、現職は平成 15 年 6 月時点の役職を示した)

目 次

まえがき
委員名簿
報告の概要

- 第1章 セメント系固化処理土検討委員会・・・ 1
 - 1-1 検討の経緯
 - 1-2 検討の範囲

- 第2章 セメント改良土からの六価クロム溶出に関する検討・・・ 5
 - 2-1 溶出試験による配合の確認
 - 2-2 新たに施工するセメント改良土
 - 2-2-1 施工前の溶出試験結果
 - 2-2-2 施工後の溶出試験の評価
 - 2-3 セメント改良土の再利用
 - 2-4 既設のセメント改良土およびその周辺地盤の調査

- 第3章 セメント改良土からの六価クロム溶出の特徴とメカニズム・・・ 14
 - 3-1 固化材と土質による溶出の特徴
 - 3-2 土の採取地による溶出の特徴
 - 3-3 溶出濃度の特徴
 - 3-4 溶出メカニズム

- 第4章 セメント改良土に起因する六価クロムの周辺地盤における挙動・・・ 21
 - 4-1 pHの変化と吸着作用
 - 4-2 移動の抑制
 - 4-3 周辺地盤における六価クロムの減衰

- 第5章 既設のセメント改良土の周辺環境への影響・・・ 28
 - 5-1 浅層改良のシミュレーション
 - 5-2 深層改良のシミュレーション

- 第6章 セメント改良土以外からの六価クロム溶出に関する検討・・・ 34
 - 6-1 薬液注入等施工時の周辺地盤への影響
 - 6-2 コンクリートに関する溶出の可能性

- 第7章 まとめ・・・ 37

資 料

通達

概要

1. 目的

セメント系固化処理土検討委員会は、土にセメントまたはセメント系固化材を添加混合し、作製するセメント改良土から溶出のおそれのある六価クロムについて検討することを目的として設置された。本委員会は、嘉門委員長をはじめとする有識者ならびに通達等を発出した国土交通省をはじめとする関連機関からの委員で構成した。

本委員会では、セメント改良土が建設事業で広く一般に使われていること、周辺地盤と接する形で長くその場に存在することから、より慎重な検討を行うこととした。そのため、今後新たに施工されるセメント改良土については、六価クロムの溶出のおそれのないものを作製すること、既に施工されたセメント改良土については周辺環境へのリスクを検討した。また、セメント改良土以外にもセメントを材料とするものの中で、六価クロムの溶出可能性のあるものについて検討した。

本報告はこれら検討された内容について取りまとめたものである。

2. セメント改良土の取扱い

(1) 新たに施工するセメント改良土

施工前の溶出試験結果では、様々な土と固化材の組合せの中に 5%程度の割合で六価クロムの溶出が土壤環境基準を超える試料が存在することが明らかになった。

施工前の溶出試験において、六価クロムの溶出が土壤環境基準を超えない土と固化材の組合せ及び配合によって施工した場合、516 現場中 2 現場を除き施工後の溶出試験においても土壤環境基準を満足していることが確認された。タンクリーチング試験では、この 2 現場を含め、溶媒水中の六価クロム濃度は水質の環境基準を超えなかった。上記の 2 現場について、セメント改良土の周辺土壌や地下水では環境基準を超える六価クロムは検出されなかった。

このことから、施工前の溶出試験において六価クロムの溶出が土壤環境基準を超えない場合は、その配合に従って適切に施工を行うことにより土壤環境基準を満足する施工がなされる。ただし、火山灰質粘性土については他の土質と比較して溶出頻度および濃度が高いことから施工後の溶出試験も行い、土壤環境基準を超える溶出のないことを確認する必要がある。

(2) セメント改良土の再利用

施工前及び施工後の溶出試験結果において六価クロムの溶出が土壤環境基準を超える試料はなかった。このことから、施工前の溶出試験を行い、土壤環境基準を超える溶出のないセメント改良土を再利用することにより、土壤環境基

準を満足する施工がなされる。しかし、セメント改良土の再利用では、施工前と施工後の溶出試験実施者が異なる場合が多いため、確認のため施工後の溶出試験を引き続き実施することとする。

(3) 既設のセメント改良土

現地調査を実施した箇所において、セメント改良土から溶出した六価クロムが周辺地盤に影響を及ぼしているものはなかった。また、土木研究所において行った既設のセメント改良土から六価クロムが溶出することを想定した実験や数値解析結果では、周辺地盤のもつ吸着や還元効果により周辺地盤への六価クロムの拡散はわずかであった。

こうしたことから、一部の既設のセメント改良土で六価クロムの溶出のおそれがあっても、六価クロムの拡散の原因となるセメント改良土への大量の浸透水の流入がない限り、周辺地盤へ影響を及ぼすことはない。

3. セメント改良土以外の取扱い

薬液注入施工時に溶出する六価クロムも、セメント改良土と同様に周辺地盤の持つ六価クロムの吸着・還元作用によって移動が抑えられる。また、コンクリートの施工工程では適正な施工手順に基づいて作業されることにより、外部への六価クロムの拡散は防止される。

第1章 セメント系固化処理土検討委員会の活動

1-1 検討の経緯

本委員会は、土にセメントまたはセメント系固化材を添加混合し、作製するセメント改良土¹から溶出²のおそれのある六価クロム³について検討することを目的として設置された。また、セメント改良土以外にもセメントを材料とするものの中で、六価クロムの溶出可能性のあるものについて検討した。

なお、セメント改良土については、平成12年3月24日付けで旧建設省より通達が出され、必要な措置を講じることとされた。

平成11年12月24日に第1回委員会を開催し、最終報告のとりまとめまでに計9回の委員会を開催した。この間、関係機関において新たに施工されたセメント改良土の溶出試験データの集計・分析、土木研究所における室内実験や数値解析、既設のセメント改良土の現地調査などを実施した。また、平成14年5月29日には、それまでの成果を中間報告としてとりまとめた。

本報告は、中間報告から一年間、関係者の評価を受けたこと、検討の開始から3年半が経過し、多くのデータや研究成果が得られたことから、設置目的にある課題に対して報告するものである。

[解 説]

新たに施工されるセメント改良土については、旧建設省では通達「セメント及びセメント系固化材の地盤改良への使用及び改良土の再利用に関する当面の措置について」(平成12年3月24日)とその運用「『セメント及びセメント系固化材の地盤改良への使用及び改良土の再利用に関する当面の措置について』の運用」(平成12年3月24日、平成13年4月一部変更)(以下、「通達」とする)に基づき、必要な措置を講じることとなっている。なお、同様の内容の通達等が旧運輸省、農林水産省、日本道路公団において出されている。

¹ セメント改良土： 土にセメントやセメント系固化材を添加混合したもの。セメント系固化処理土と同意。

² 溶出： 固相から液相に成分が溶け出して移行すること。セメント改良土の場合、使用したセメント中に含まれる六価クロムが溶け出すと考えられる。

³ 六価クロム： クロム化合物として酸化数が6のものであり、酸素を含んだクロム酸(CrO_4^{2-})、重クロム酸($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$)として安定である。酸化数が3の三価クロムに比べると、生物に対する毒性が強く、土壌中での移動性も大きいといわれている。還元反応によって容易に三価クロムに還元される。本報告書で対象となる六価クロムはクロム酸であると考えられることができるが、以下本報告書では、便宜的に六価クロムと表記している。

上記の通達は、セメント及びセメント系固化材⁴（以下、「固化材」とする）を使用した改良土から土壤環境基準を超える六価クロムが溶出するおそれがあるため、地盤改良を行う場合やセメント改良土を再利用する場合に、環境庁告示第46号溶出試験⁵（以下、「環告46号」とする）の実施等の措置を定めたものである。

第1回～第9回までの委員会の開催は下図の通りである。

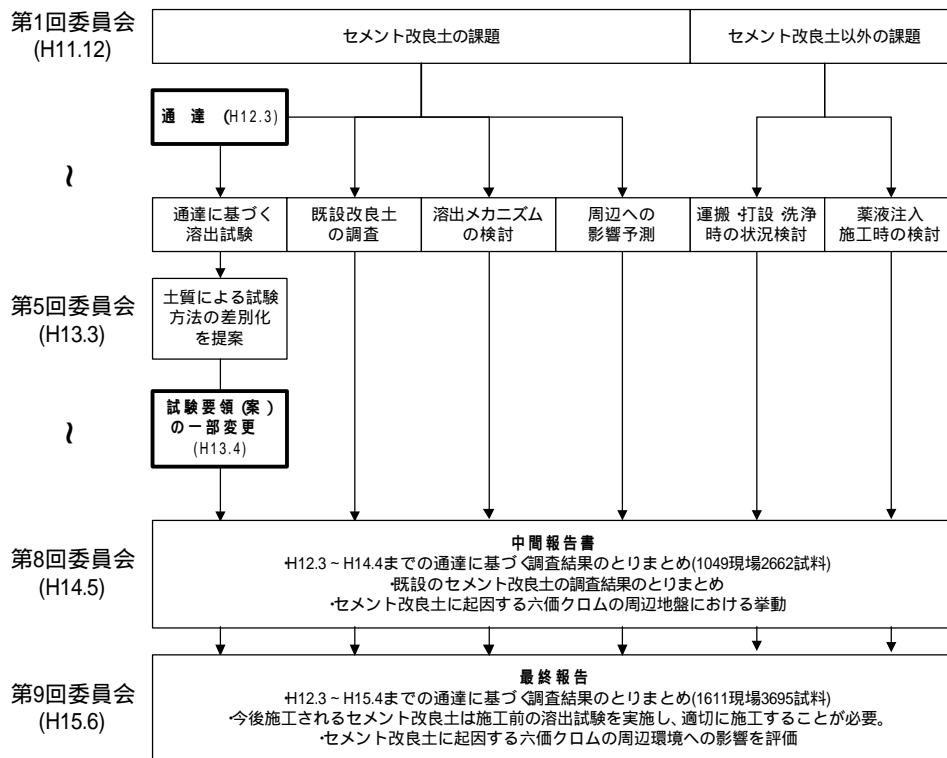


図-1.1 委員会の開催

⁴ セメント及びセメント系固化材： セメントを含有成分とする固化材で、ここでは普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種、セメント系固化材、新型固化材をいう。新型固化材とは、六価クロムの溶出抑制を目的に開発された固化材の総称であり、市場では特殊土用固化材とされている。なお、セメントを含む石灰系固化材と呼ばれているものはセメント系固化材として整理しており、セメントを含まない石灰系固化材は対象外である。

⁵ 環境庁告示第46号溶出試験： 土壤の汚染に係る環境基準について（平成3年8月23日環境庁告示第46号）に規定された各対象物質の検液中濃度を測定するための溶出試験方法。

1-2 検討の範囲

新たに施工するセメント改良土について、六価クロムの溶出がみられる土と固化材の組合せ及び配合の傾向について検討した。また、既設⁶のセメント改良土については六価クロムの溶出があった場合の周辺環境へ及ぼす影響について検討した。さらに薬液注入・コンクリートの施工時の六価クロムの溶出について検討した。

[解 説]

本委員会では、セメント改良土等からの六価クロムの溶出の可能性について、以下の検討を行った。

- 1) 通達以降に施工するセメント改良土
平成12年4月～15年4月の約3年間にわたり、国土交通省(旧建設省、旧運輸省)、農林水産省、日本道路公団において、通達以降に施工した1,611現場、3,695試料のセメント改良土の六価クロム溶出試験結果のデータを収集・整理し、六価クロムの溶出がみられる土と固化材の組合せ及び配合の傾向について検討した。
- 2) 既設(通達以前)のセメント改良土
既設のセメント改良土36箇所の現地調査及び実験・数値解析を実施し、セメント改良土から六価クロムの溶出があった場合の周辺環境へ及ぼす影響について検討した。
- 3) 薬液注入・コンクリートの施工
薬液注入等の施工時及びコンクリートの運搬・打設・洗浄、解体材の再生利用における六価クロム溶出の可能性について検討した。

⁶ 既設： 本報告においては通達以前に施工された改良土を指す。

第2章では、通達及びそれに関連した調査の結果をとりまとめ、今後のセメント改良土等の取扱い方針を示した。また、第3章から第5章では、土木研究所における実験・解析の結果をとりまとめ、セメント改良土から溶出する六価クロムに関してより専門的な視点から考察を行った。第6章では、セメント改良土以外のセメントを材料とした構造物を構築する過程のなかで六価クロムが溶出し、周辺環境に影響を及ぼす可能性についてまとめた。

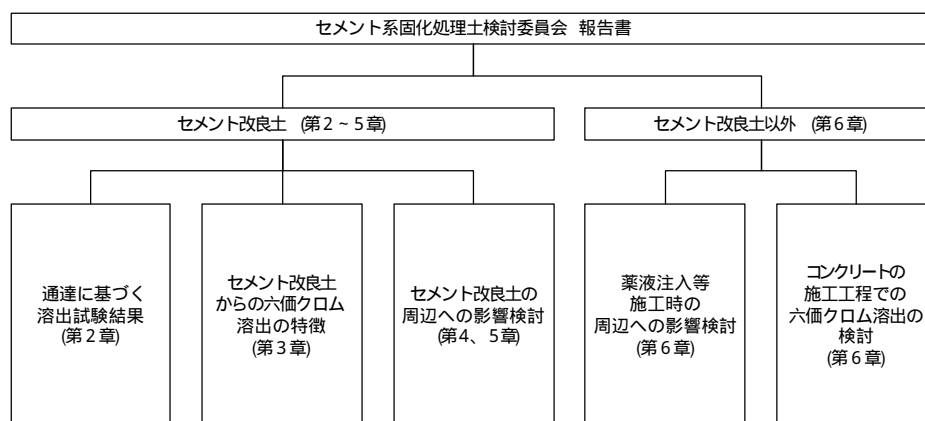


図-1.2 報告書の構成

第2章 セメント改良土からの六価クロムの溶出

2-1 溶出試験による配合の確認

セメント改良土を施工する場合には、通達に基づく試験方法によって、六価クロムの溶出試験を行う必要がある。

[解 説]

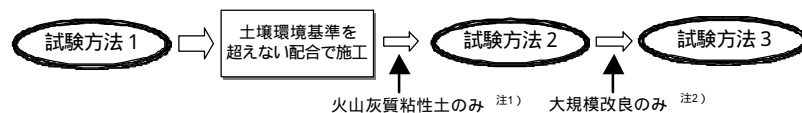
土と固化材を混合することにより、六価クロムが溶出する場合がある。そのため、セメント改良土を新たに施工する場合および再利用する場合においては、環告46号に基づく六価クロムの溶出試験を行うこととする。通達に基づく試験方法の概要を表-2.1に示す。

表-2.1 通達に基づく試験方法の概要

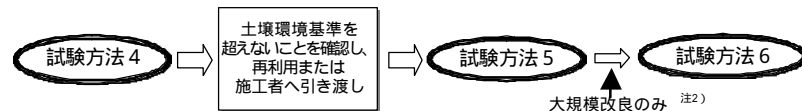
	試験方法	試料	溶出試験
新たに施工するセメント改良土	試験方法1	配合設計材齢7日の供試体	環告46号
	試験方法2	施工後28日材齢の現地採取試料	タンクリーチング ⁷ 試験
	試験方法3		
セメント改良土の再利用	試験方法4	配合設計材齢7日の供試体等	環告46号
	試験方法5	施工後28日材齢の現地採取試料	タンクリーチング試験
	試験方法6		

通達に基づく試験方法の手順は図-2.1のように表せる。平成13年4月の試験要領(案)の一部変更により新たに施工するセメント改良土の一部について施工後の試験が不要になった。

新たに施工するセメント改良土



セメント改良土の再利用



注1)
基本的には日本統一土質分類の中分類に言う火山灰質粘性土(VH₁, VH₂)に該当するか否かの判別である。ただし、物理試験の実施が困難であるため、目視により土質試験法(地盤工学会)に記載されている下記の俗称などに該当するかどうかを目安にすればよい。
参考)火山灰質粘性土の俗称 灰土(阿蘇火山噴出物)、赤ぼ(九州地方に分布)、大山ローム(山陰地方に分布)、関東ローム、信州ローム、山梨ローム、鹿沼土(北関東及び山梨県に分布)、岩手ローム、蔵王ロームなど

注2)
改良土量が5,000m³程度以上または改良体本数が500本程度以上の規模の工事

図-2.1 通達に基づく試験方法の手順

⁷ タンクリーチング試験： 施工後の品質管理等の際に確保していた試料を、塊状のまま溶媒水中に水浸し、水中に溶出する六価クロムの濃度を測定するものである。

平成12年4月より通達に基づきセメント改良土を施工する場合、溶出試験が実施されている。この溶出試験の結果から以下のことが判明した。

(1) 新たに施工するセメント改良土

施工前の溶出試験を行い、土壤環境基準を超える溶出のなかった土と固化材の組合せ及び配合を使用し、適切に施工を行うことにより土壤環境基準を満足する施工がなされる。ただし、火山灰質粘性土については施工後の溶出試験も行い、土壤環境基準を超える溶出のないことを確認する必要がある。(本報告2-2)

(2) セメント改良土の再利用

施工前の溶出試験を行い、土壤環境基準を超える溶出のないセメント改良土を再利用することにより、土壤環境基準を満足する施工がなされる。(本報告2-3)

[参 考]

平成 15 年 2 月 15 日に施行された土壤汚染対策法において新たに直接摂取によるリスクが設定され、六価クロムは土壤溶出量基準(0.05mg/l)とともに土壤含有量基準(250mg/kg)が指定基準とされた。セメント改良土について、土壤汚染対策法に示されている六価クロム土壤含有量試験(平成 15 年環境省告示第 19 号)を実施したが、その結果、セメント改良土の六価クロム含有量は土壤含有量基準を下回り、問題のない値であった。

参考表-2.1 セメント改良土の試験結果

固 化 材		六価クロム溶出濃度 (mg/l) *1	六価クロム含有量 (mg/kg) *2
種 類	添加量 (kg/m ³)		
普通 ポルランドセメント	100	0.14	1.5
	200	0.16	4.6
	300	0.13	5.0
高炉セメント B 種	100	0.04	0.8
	200	0.08	1.5
	300	0.09	2.0
セメント系固化材	100	0.15	2.6
	200	0.20	4.3
	300	0.19	4.7
新型固化材	100	0.04	1.1
	200	0.03	0.7
	300	0.02	<0.5
定量下限値		0.02	0.5

* 1 : 溶出試験は平成 3 年環境庁告示第 46 号による。

* 2 : 含有量試験は平成 15 年環境省告示第 19 号による。

その他 : ・ 対象土は火山灰質粘性土
 ・ 試験材齢は 28 日

2-2 新たに施工するセメント改良土

2-2-1 施工前の溶出試験結果

施工前の溶出試験は六価クロムの溶出が土壤環境基準を超えない土と固化材の組合せ及び配合を選定するために実施される。この施工前の溶出試験では、5%程度の割合で六価クロムの溶出が土壤環境基準を超過し、土と固化材の組合せのほぼ半数においてみられた。

[解 説]

施工前の溶出試験（通達における試験方法1）で土壤環境基準を超える六価クロムの溶出のあったセメント改良土は図-2.2 に示すように、全体の5%程度（132/2544 試料）で、その溶出濃度は概ね 0.30 mg/l までのものが多く、最大で 0.85 mg/l(火山灰質粘性土)であり、大部分のケースで土壤環境基準を満足した。

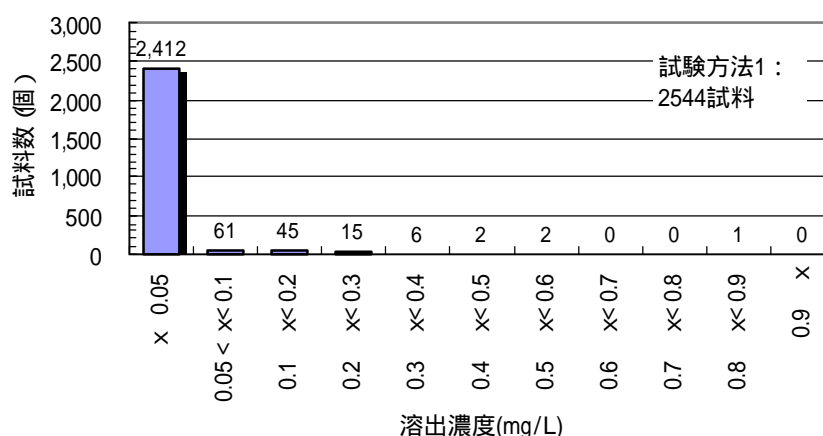


図-2.2 施工前の溶出試験における溶出濃度の頻度分布
注) 同一現場で行った複数試料の結果を含む。

また、その結果を土と固化材の組合せによって分類したものが表-2.2である。土と固化材の組合せにより六価クロムの土壤環境基準を超えた試料の割合に差は認められるが、その組合せに関係なく、土壤環境基準を超える溶出がみられている。

したがって、現状では確実に土壤環境基準を超える溶出がないといえる組合せを特定することは困難であるため、施工前の溶出試験を行い検証する必要がある。

表-2.2 試験方法1の溶出状況(132/2544試料)

土質の分類	固化材の種類	普通ポルトランドセメント	セメント系固化材	高炉セメントB種	新型固化材
砕石等	岩	-	0 / 5	0 / 8	-
	砕石	0 / 5	2 / 11	0 / 57	0 / 9
	砕石+砂質土	-	-	0 / 6	-
	砕石+砂	0 / 2	-	0 / 19	0 / 1
	礫	0 / 7	2 / 16	0 / 27	0 / 13
礫質土 ～ シルト	礫質土	0 / 25	3 / 38	0 / 76	2 / 22
	砂	7 / 35	1 / 120	2 / 142	0 / 32
	砂質土	6 / 29	10 / 216	4 / 150	2 / 46
	粘性土～砂質土	-	-	0 / 7	-
粘性土等	シルト	4 / 36	5 / 124	2 / 176	0 / 45
	粘性土	10 / 47	13 / 343	6 / 249	0 / 81
	有機質土	3 / 10	5 / 70	3 / 46	2 / 36
	高有機質土	-	0 / 25	1 / 3	-
火山灰質土 等	シラス+砕石	-	-	5 / 8	2 / 2
	火山灰質砂	-	3 / 4	0 / 4	0 / 1
	火山灰質砂質土	-	-	0 / 1	0 / 1
	火山灰質粘性土	12 / 14	10 / 36	0 / 27	5 / 31

数字は 土壤環境基準を超えた試料数 / 全試料数
 表中の着色部は土壤環境基準を超えた溶出が見られたもの
 - は該当するデータがなかった組合せ

2-2-2 施工後の溶出試験の評価

施工前の溶出試験において土壤環境基準を超える六価クロムの溶出のなかった土と固化材の組合せ及び配合で施工した 516 現場のうち 2 現場の試料において、施工後の溶出試験で土壤環境基準を超える溶出があった。その場合における溶出濃度は土壤環境基準の 3 倍以内で、タンクリーチング試験の結果では、溶媒水中の六価クロム濃度が水質の環境基準を超えるものはなかった。

したがって、施工前の溶出試験を行い、土壤環境基準を超える溶出のなかった土と固化材の組合せ及び配合を使用し、適切に施工を行うことにより土壤環境基準を満足する施工がなされる。ただし、火山灰質粘性土については他の土質と比較して溶出頻度および濃度が高いことから施工後の試験も行い、溶出のないことを確認する必要がある。

[解 説]

表-2.3 のように平成 15 年 4 月 18 日時点における通達にもとづく溶出試験結果によれば、516 現場(試験方法 1 で土壤環境基準を超える溶出のなかった固化材を用い、施工後の溶出試験までを終了した現場)のうち 2 現場を除いて、試験方法 2 によって土壤環境基準を超えたものはなかった。2 現場においても試験方法 2 の溶出濃度は土壤環境基準の 3 倍以内(土壤環境基準参照)であった。また、試験方法 3 によって環境基準値を超えたものはなかった。上記の 2 現場について、セメント改良土の周辺土壤や地下水では環境基準を超える六価クロムは検出されなかった。

表-2.3 施工前と施工後の溶出試験結果の比較

施工前の溶出試験(試験方法 1)において 土壤環境基準を超える溶出のなかった 土と固化材の組合せ及び配合を用いて施工された現場数	516 現場
施工後の溶出試験(試験方法 2)において 土壤環境基準を超える溶出がみられた現場数 (施工後の溶出試験で観測された溶出濃度)	2 現場 (0.093 ~ 0.110mg/l , 0.067 ~ 0.086mg/l)
施工後の溶出試験(試験方法 3、タンクリーチング試験)に おいて環境基準値を超える溶出がみられた現場数 (一定規模以上の工事においてのみ実施)	0 現場

上記 2 現場の溶出試験結果が施工前と施工後で異なった理由としては、それぞれ次のような点があげられる。

現場 試験方法 1, 2 に供された土の採取地点が異なっていた。試験方法 2 で溶出があった地点の土を再度試験方法 1 で溶出試験を行ったところ、溶出が認められた。

現場 この現場では、固化材の添加量が、配合設計時(試験方法 1 : 0.049mg/l)より約 2 割増となり、その結果試験方法 2 では 0.067 , 0.086mg/l となった。

こうしたことから、セメント改良土を施工する現場では、施工前の溶出試験に供する試料の代表性に注意する必要がある。

表-2.4 に示すように火山灰質粘性土の溶出頻度、溶出濃度は他の土質と比較して高い傾向にある。このため、火山灰質粘性土については施工後の試験も実施し、溶出のないことを確認する。

表-2.4 土質の違いによる六価クロムの溶出状況(試験方法 1)

土質	H12.3～H12.12 集計		H13.1～H15.4 集計	
	環境基準を 超過した試料数 /全試料	最大溶出濃度 (mg/l)	環境基準を 超過した試料数 /全試料	最大溶出濃度 (mg/l)
碎石等	2/72 (3%)	0.085	2/114 (2%)	0.22
礫質土～シルト	18/334 (5%)	0.47	30/985 (3%)	0.29
粘性土等	16/286 (6%)	0.56	27/624 (4%)	0.2
火山灰質粘性土以外の 火山灰質土等	10/21 (48%)	0.18	-	-
火山灰質粘性土	15/36 (42%)	0.85	12/72 (17%)	0.27
合計	61/749 (8%)	-	71/1795 (4%)	-

()内の数字は環境基準を超過した試料数の全試料に対する割合

2-3 セメント改良土の再利用の取扱い

施工前及び施工後の溶出試験結果において六価クロムの溶出が土壤環境基準を超える試料はなかった。このことから、施工前の溶出試験を行い、土壤環境基準を超える溶出のないセメント改良土を再利用することにより、土壤環境基準を満足する施工がなされる。

[解 説]

セメント改良土の再利用に関しては、現時点において土質の種類を網羅したデータが十分に集まっていない。収集したデータからは施工前の溶出試験で土壤環境基準を超える六価クロムの溶出があった試料はなかった。また、施工後の溶出試験までを終了した42現場では試験方法5によって土壤環境基準を超えた試料はなかった。

しかし、セメント改良土の再利用では、施工前と施工後の溶出試験実施者が異なる場合が多いため、確認のため施工後の溶出試験を引き続き実施することとする。

表-2.4 試験方法4の溶出状況(0/85試料)

土質の分類	固化材の種類	普通ポルトランドセメント	セメント系固化材	高炉セメントB種	新型固化材
砕石等	岩	-	-	-	-
	砕石	-	-	-	-
	砕石+砂質土	-	-	-	-
	砕石+砂	-	-	-	-
	礫	-	-	0 / 1	-
礫質土 ～ シルト	礫質土	-	0 / 3	-	-
	砂	0 / 2	0 / 19	-	-
	砂質土	0 / 2	0 / 1	0 / 1	-
	粘性土～砂質土	-	-	-	-
粘性土等	シルト	0 / 5	0 / 1	-	-
	粘性土	-	0 / 5	0 / 32	0 / 2
	改良土	-	-	0 / 1	-
	有機質土	-	0 / 10	-	-
火山灰質土 等	高有機質土	-	-	-	-
	シラス+砕石	-	-	-	-
	火山灰質砂	-	-	-	-
	火山灰質砂質土	-	-	-	-
	火山灰質粘性土	-	-	-	-

数字は 土壤環境基準を超えた試料数 / 全試料数

- は該当するデータがなかった組合せ

表-2.5 施工前と施工後の溶出試験結果の比較

施工前の溶出試験(試験方法4)において 土壤環境基準を超える溶出のなかった 土と固化材の組合せ及び配合を用いて施工された現場数	42 現場
施工後の溶出試験(試験方法5)において 土壤環境基準を超える溶出がみられた現場数 (施工後の溶出試験で観測された溶出値)	0 現場

2-4 既設のセメント改良土およびその周辺地盤の調査

既設のセメント改良土の調査において、一部のセメント改良土から土壤環境基準を超える六価クロムの溶出濃度を示すものがあったが、そのセメント改良土周辺の土壤及び地下水の調査では環境基準を超える値は検出されなかった。

[解 説]

全国 36 現場（浅層改良 24 現場、深層改良 12 現場）において、過年度に施工されたセメント改良土から試料を採取し、溶出試験を行ったところ、6 現場においてセメント改良土の中から土壤環境基準を超える六価クロムの溶出が確認された。しかし、いずれの箇所においても、周辺土壤からの溶出濃度、地下水中の濃度ともに不検出～0.02mg/l で環境基準以下であった。（表-2.6）

表-2.6 土壤環境基準を超えた既設のセメント改良土の調査箇所（6 現場）

No.	工種	対象土質 <注記：含水比、土の色>	固化材	改良土からの 溶出状況	周辺土壤， 地下水から の検出状況	フォロー アップ 調査期間
1	浅層	火山灰質粘性土 <w=90%，褐色>	セメント系 固化材	0.89～0.92 (mg/l)	不検出	H13.6～ H15.3
2	浅層	火山灰質粘性土 <w=20～90%，褐色>	セメント系 固化材	0.17～0.21 (mg/l)	不検出	H13.6～ H15.3
3	浅層	レキ質土(碎石、山砂混合) <w=10%，色=茶褐色>	セメント系 固化材	0.068～0.095 (mg/l)	不検出	H12.9～ H13.8
4	浅層	粘性土 <w=20%，黄褐色>	セメント系 固化材	0.094～0.150 (mg/l)	不検出	H12.8～ H13.9
5	浅層	粘性土(小石混り粘性土) <w=40%，黄灰色>	セメント系 固化材	0.06～0.09 (mg/l)	不検出～ 0.02(mg/l)	H12.9～ H14.9
6	浅層	火山灰質粘性土 <w=125%，茶褐色>	セメント系 固化材	0.11～0.12 (mg/l)	不検出	実施せず

表-2.6 の No.1～2(着色部)については、地下水位が上昇した場合にセメント改良土の一部が浸水する可能性があるため、セメント改良土の表面を被覆材で覆い、有孔管の設置によって地下水位の上昇を抑え、下流側に地下水中の六価クロムを還元する透過層(還元バリア⁸)を設置する、などの対策を施し、地下水のモニタリング(フォローアップ調査)を行った。

また、No.3～5 についてフォローアップ調査を行ったところ、周辺土壤及び地下水のいずれからも、環境基準を超える六価クロムの溶出は確認されていない。なお、No.6 についてはセメント改良土の地表面が舗装されており、雨水の浸透が抑制されるため、フォローアップ調査を行っていない。

⁸ 還元バリア： 汚染された地下水を浄化するために、還元性を有する物質を汚染地下水の流路に一定の厚さで横断するように配置する。

第3章 セメント改良土からの六価クロム溶出の特徴とメカニズム

前章までは通達及びそれに関連した調査の結果について報告した。第3章から第6章は、上記データの分析や土木研究所における実験・解析などをもとにまとめたものである。

3-1 固化材と土質による溶出の特徴

施工前の溶出試験（通達における試験方法1, 4）結果では、固化材の種類や土質により、土壤環境基準を超える六価クロムの溶出濃度や試料の割合が異なる。特に、固化材では普通ポルトランドセメントにおいて、土質では火山灰質土において溶出の割合が高い傾向にある。

[解 説]

第2章に述べた溶出試験結果を固化材、土質別の溶出状況で整理したものを、表-3.1、3.2に示す。

普通ポルトランドセメントを用いた場合、全試料に対する土壤環境基準を超えた試料の割合が19%と他の固化材に比べ高く、高炉セメントを用いた場合は2%と低い。

火山灰質土等（シラス、火山灰質砂、火山灰質砂質土、火山灰質粘性土を含む）の場合、全試料に対して土壤環境基準を超えた試料の割合が29%と他の土質に比べ高い。その中でも火山灰質粘性土が、約7割(27/37試料)を占めるとともに、最高で0.85mg/lの溶出濃度が観測されている。

表-3.1 固化材の違いによる六価クロムの溶出状況(試験方法1, 4)

固化材	平成12年4月から平成15年4月		
	全試料数	土壤環境基準を超えた試料数	土壤環境基準を超えた溶出濃度の平均値(mg/l)
普通ポルトランドセメント	219	42 (19%)	0.15
セメント系固化材	1047	54 (5%)	0.17
高炉セメントB種	1041	23 (2%)	0.08
新型固化材	322	13 (4%)	0.09
計	2629	132 (5%)	-

表-3.2 土質の違いによる六価クロムの溶出状況(試験方法1, 4)

土質	平成12年4月から平成15年4月		
	全試料数	土壤環境基準を超えた試料数	土壤環境基準を超えた溶出濃度の平均値(mg/l)
砕石等	187	4 (2%)	0.08
礫質土～シルト	1353	48 (4%)	0.15
粘性土等	960	43 (4%)	0.11
火山灰質土等	129	37 (29%)	0.18
[うち火山灰質粘性土]	[108]	[27 (25%)]	[0.21]
計	2629	132 (5%)	-

3-2 土の採取地による溶出の特徴

土の採取地で比較すると、陸域において採取した土は水域において採取した土より固化材と混合した場合に六価クロムが溶出しやすい傾向にある。

[解 説]

土の採取地の違いによる溶出試験結果を表-3.3 に示す。太枠内は陸域で酸化雰囲気と考えられ、太枠外は水域で還元雰囲気と考えられる。この結果は、土の色調からも、土の酸化もしくは還元雰囲気⁹を反映したものとなっている。

表-3.3 土の採取地（陸域・水域）と試験結果

項目	火山灰質 粘性土 陸域	火山灰質 粘性土 陸域	火山灰質 粘性土 陸域	火山灰質 砂質土 陸域	火山灰質 砂質土 陸域	火山灰質 砂質土 陸域	粘性土 陸域	有機質 粘性土 陸域	腐植土 陸域	礫混じり 粘性土 陸域	粘土質 しき 陸域	粘性土 水域(海)	砂質土 水域(海)	有機質土 水域 (湖沼)	
採取地 深度	東京都 三鷹市 (0.7 ~ 1.5m)	静岡県 三島市	鹿児島県 財部町 (財部 ローム)	鹿児島県 財部町 (財部 シラス)	鹿児島県 末吉町 (末吉 シラス)	宮崎県 西都市 (國富町)	千葉県 君津市 (君津 粘土)	千葉県 君津市 (君津 有機土)	千葉県 君津市 (君津 腐食土)	滋賀県	和歌山県 田辺市	神奈川県 川崎港沖	東京都 大田区 5 ~ 7m	千葉県 印西市 2 ~ 5m	
試験項目															
土の自然含水比 w_n %	113.2	85.1	72.0	31.7	51.2	26.2	69.6	57.3	122.5	17.4	10.1	72.4	25.2	437.4	
コンシステンシー	液性限界 w_L %	127.9	124.6	88.2	-	-	-	74.0	66.7	200.0	-	-	54.6	-	
	塑性限界 w_p %	91.6	58.3	50.6	-	-	-	36.9	35.8	82.2	-	-	28.5	-	
	塑性指数 I_p	36.3	66.3	37.6	-	-	-	37.1	30.9	117.8	-	-	26.1	-	
その他	土の pH	7.4	5.7	6.1	6.4	6.1	6.7	5.4	5.9	4.8	7.2	6.5	9.2	7.5	
	強熱減量 L_i %	14.0	16.0	8.6	4.7	7.5	2.6	11.0	9.0	30.0	2.0	6.4	2.5	4.7	
	有機物含有量 %	2.6	0.3	0.2	n.d	0.1	n.d	4.6	3.1	25.0	1.3	0.1	1.8	3.9	
酸化還元電位 E_h mV	399	448	417	387	445	316	200	341	152	304	400	-163	496	461	
土の色調	大分類	10R	2.5YR	7.5YR	5YR	5YR	5YR	5GY	7.5GY	10Y	2.5YR	10YR	5B	N	
	小分類	3/3	3/2	6/6	6/1	7/1	3/1	4/1	3/1	2/1	5/2	5/8	3/1	3/0	
	呼び名	暗赤褐	暗赤褐	橙	灰褐	明灰褐	黒褐	暗赤灰	暗緑灰	黒	暗灰黄	黄褐	暗青灰	暗灰	
固化材添加量 (kg/m^3)	140	284	140	30	70	100	200	200	200	200	50	135	200	60	200
環告46号 六価クロム 溶出濃度 (mg/L)	普通ポルトランドセメント	0.46	0.16	0.26	0.06	0.14	0.04	0.06	0.04	0.05	<0.02	0.14	<0.02	<0.02	0.03
	高炉セメント(高炉スラグ置換率45%)	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.11	<0.02	0.02	<0.02	0.05	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
	セメント系固化材	0.27	0.24	0.26	0.03	0.10	0.05	0.03	0.05	0.06	<0.02	0.11	<0.02	<0.02	<0.02
	新型固化材	0.03	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02

表中の数字の単位は全て mg/l

表中の着色部は六価クロムの溶出濃度が土壌環境基準を超過した配合

この還元雰囲気による影響で六価クロムは還元されて三価クロムになるため、還元雰囲気では六価クロムが溶出しにくい傾向を示す。また、三価となったクロムは化学的に安定しているため、三価から六価への反応は起こりにくい。

⁹ 酸化雰囲気、還元雰囲気：酸化還元反応は酸化剤と還元剤の相対的な反応であり、酸化雰囲気と還元雰囲気にどこかで線をひき分けることができるものではない。ここではクロム(Cr)の酸化と還元状態に着目し、不飽和地盤中又は地下水中に酸素がある場合を酸化雰囲気、ない場合を還元雰囲気として評価した。

土の酸化・還元雰囲気が一価クロムの溶出傾向に作用することは、同一の土試料を物理化学的操作で雰囲気の変換を図ることによっても確認された。

[恒温乾燥により還元雰囲気から酸化雰囲気への転換を図った場合]

腐植土を 60 の恒温で 6 週間乾燥させ、酸化雰囲気へ転換を図った試料に普通ポルトランドセメントを混合したセメント改良土では、六価クロム溶出濃度は転換前の 0.05mg/l から 0.10mg/l に増加した。

表-3.4 還元雰囲気から酸化雰囲気への転換¹⁰

	試験土	pH	酸化還元 電位 ¹⁰ (mV)	固化材	添加量 (kg/m ³)	六価クロム 溶出濃度 (mg/l)	
	原土	腐植土	4.8	152	普通ポルトランドセメント	200	0.05
	恒温乾燥後 (6週間)	腐植土	5.3	440	普通ポルトランドセメント	200	0.10

[試薬添加により酸化雰囲気から還元雰囲気への転換を図った場合]

関東ロームに普通ポルトランドセメントを混合したセメント改良土において、しゅう酸鉄()を添加し、還元雰囲気へ転換を図った場合、六価クロム溶出濃度は転換前の 0.25mg/l から 0.06mg/l に低下した。

表-3.5 酸化雰囲気から還元雰囲気への転換

	試験土	pH	酸化還元 電位 (mV)	固化材	添加量 (kg/m ³)	六価クロム 溶出濃度 (mg/l)	
	原土	関東ローム	5.7	400	普通ポルトランドセメント	280	0.25
	しゅう酸鉄 ()添加後	関東ローム	5.4	110	普通ポルトランドセメント	280	0.06

¹⁰ 酸化還元電位(標準電極電位)：酸化還元可逆平衡にある溶液に白金電極と基準として標準水素電極を入れると、両極間に一定の電位が生じる。これを酸化還元電位と呼ぶ。熱力学的な意味としては、可逆的な酸化還元系が酸化又は還元される際に、発生する遊離エネルギーの定量的な尺度と定義される。

3-3 溶出濃度の特徴

土と固化材の組合せによっては、混合前の溶出濃度から計算される値以上の六価クロムがセメント改良土から溶出する場合がある。

[解 説]

表-3.6 は、固化材と土質による六価クロムの溶出濃度についての室内試験結果である。表中の[]内の数字は、実験に使用した固化材単体の六価クロム溶出濃度と土単体の六価クロム溶出濃度であり、内側の二段書きにおいて、上段が実際に混合されたセメント改良土からの溶出濃度、下段が固化材単体での溶出濃度から計算上予測した溶出濃度である。表中の着色を施した箇所においてセメント改良土の溶出濃度実測値が溶出濃度予測値を上回っている。これは、固化材単体の溶出試験では、主としてセメントに含まれる水溶性の六価クロムが溶出しているのに対し、土と固化材を混合した改良土の場合、材齢（水和）の進行によりセメント鉱物に固溶していた六価クロムも溶出し、混合する土によってはセメントの水和反応が阻害され十分に六価クロムが固定されないためと考えられている。

表-3.6 固化材および土質による六価クロム溶出結果*

* 環境庁告示第 46 号の六価クロム溶出試験に準拠

土 質 固化材		火山灰質 粘性土	粘性土	砂質土	腐植土	火山灰質 砂質土
		[< 0.02]	[< 0.02]	[< 0.02]	[< 0.02]	[< 0.02]
普通ポルトランドセメント [1.4]		0.46	0.06	< 0.02	0.05	0.04
		0.21	0.20	0.05	0.28	0.09
普通ポルトランドセメント 低六価クロム[0.41]		0.28	-	-	-	-
		0.05	-	-	-	-
高炉セメント	置換率 45% [0.87]	< 0.02	0.02	< 0.02	0.05	< 0.02
		0.13	0.12	0.03	0.17	0.06
	置換率 60% [0.80]	< 0.02	-	< 0.02	-	-
		0.12	-	0.03	-	-
セメント系固化材 [0.49]		0.27	0.03	< 0.02	0.06	0.05
		0.07	0.07	0.02	0.10	0.03
新型固化材 [0.02]		0.03	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
		< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02

【凡例】

上段	六価クロム溶出濃度実測値 (mg/l)
下段	六価クロム溶出濃度予測値 (mg/l)

単位は全て mg/l

[]内の数字は、固化材および土単体での溶出濃度(mg/l)を示す。

<0.02 は定量下限値以下であることを示す。

なお、溶出濃度予測値は次の式によって計算した。

$$\text{溶出濃度予測値} = \text{固化材単体の溶出濃度(mg/l)} \times \frac{\text{固化材添加量(kg/m}^3\text{)}}{\text{土の乾燥密度(t/m}^3\text{)} \times 1000 + \text{固化材添加量(kg/m}^3\text{)}}$$

3-4 溶出メカニズム

土と固化材を混合したセメント改良土中では、セメントの水和物¹¹が生成される。改良の対象となる土の種類によっては、セメントの水和反応が阻害される場合があり、本来ならセメント水和物に固定¹²される六価クロムが外部へ溶出しやすい状態で存在することがある。

[解 説]

セメント改良土からの六価クロムの溶出は、土と固化材を混合し固化する過程で、水和反応によりセメントから溶出した六価クロムが同時に生成する水和物で十分固定できなかつた場合に発生し、火山灰質粘性土に代表される水和物生成の阻害が著しい土を改良した場合に土壤環境基準を超過する場合がある。

以下に、セメント中のクロムの起源とその存在形態、セメント水和物による六価クロムの固定及びモルタル・コンクリートからの溶出特性について述べ、併せて改良土からの溶出メカニズムについて解説する。

セメント系固化材の主構成材料であるポルトランドセメントは、その原料の大半が地殻に存在する天然資源であることから、主構成成分（Ca、Si、Al、Fe）の他に、クロム（Cr）などの微量成分を含んでいる。表-3.8 は地殻の岩石、セメント原料及び普通ポルトランドセメント中のクロム含有量の一例を示したものである。

表-3.8 各材料のクロム含有量の一例（mg/kg）

地殻 ^{*1}	セメント原料 ^{*2}			普通 ポルトランドセメント ^{*2}
	石灰石	粘土	ケイ石	
100	15.5	80.9	130	97

*1 理科年表、国立天文台編、平成 12 年版

*2 セメント協会、すばらしい素材セメント、p.25（2001）

一般に自然界でのクロムは三価の状態が存在しており、これはセメント原料についても同様である。原料中のクロム（三価）は、セメントの製造過程（焼成）においてその一部が六価クロムに酸化されセメント中に存在することになる。また、その存在形態に関する研究では、六価クロムは主要セメント鉱物の内部に存在する（セメント鉱物に固溶している）他、それとは別に水に溶けやすい状態（水溶性の六価クロム）としても存在するとされている^{文献 1}）。

セメントは水と接触することにより水和反応をおこし、その水和機構（特に初期の水和過程）はセメント鉱物の溶解とその過飽和溶液からの水和生成物の

¹¹ セメント水和物：セメントと水が反応して不溶性のセメント水和物をつくり、凝結固化する。この現象を水和反応という。セメントの水和反応は複雑で、長い年月にわたって変化する。セメントのクリンカ鉱物であるエーライト、ピーライト、アルミネート相、フェライト相が水と反応し水和物を形成する。水和反応が進むとエトリンサイトやモノサルフェートといった水和物も形成される。

¹² 固定：有害物質をセメント水和物中に封じ込め安定化し、外部への溶出を抑制する効果。

析出により説明される。セメント中の六価クロムはこの水和機構の溶解過程で液相中に溶出するが、同時に析出する水和物に固定されるので液相中の六価クロムの濃度（量）は増加し続けることはなく、水和物の生成が十分であれば減少する。セメント水和物による六価クロムの固定機構は、エトリンガイトやモノサルフェートなどの水和物への固定や珪酸カルシウム水和物(CSH)への表面吸着および生成した水和物が間隙を埋めることによる組織の緻密化などの複合的な作用によるものである^{文献²}。

このように、セメントは六価クロムを含有し、その水和反応に伴って六価クロムを溶出するが、同時に生成する水和物に固定されるので硬化後のモルタルやコンクリートの試料からは土壤環境基準（0.05mg/l）を超える六価クロムの溶出は認められない。

表-3.9 普通ポルトランドセメントのモルタル及びコンクリートからの六価クロムの溶出濃度

	六価クロム溶出濃度 (mg/l)	
	材齢 7 日	材齢 28 日
モルタル	< 0.015 ~ 0.028	< 0.015 ~ 0.027
コンクリート	< 0.015 ~ 0.024	< 0.015 ~ 0.020

高橋茂、セメントに含まれる微量成分の環境への影響、セメントコンクリート、No.640、p.26（2000）より作成

一方、セメント改良土の場合は、改良の対象となる土の粘土鉱物や有機成分の影響により水和物の生成が阻害され、その結果、水和物により固定されなかった六価クロムが溶出することがある。その阻害の度合いは粘土鉱物や有機成分の質や量に因るが、火山灰質粘性土を改良した場合に溶出しやすいとされる（本報告 3-1）のは、火山灰質粘性土が水和に必要な Ca イオンを吸着し、水和物の生成を著しく阻害する粘土鉱物（アロフェンなどの非晶質粘土鉱物）を多く含有^{文献³}するためである。

このように、改良の対象となる土によっては六価クロムが溶出する場合があるが、六価クロムは還元性物質によって化学的に安定した三価クロムに還元されるため、還元性を有する土と固化材が混合される場合には六価クロムは発生しにくくなる（本報告 3-2）。

セメント改良土からは、使用したセメント系固化材の溶出試験の結果およびその配合量（添加量）から計算されるよりも多くの六価クロムが確認される（本報告 3-3）場合がある。これは、セメント系固化材の場合、6時間という溶出操作では水和反応が十分に進行しないことから、主に水に溶け易い一部の六価クロムが検出され、材齢 7 日もしくは 28 日が経過し、水和反応が進行したセメント改良土の場合には、水和物が十分に生成すれば六価クロムは固定されるが、火山灰質粘性土のように水和物の生成の阻害が著しい土では六価クロムが十分に固定されず、多くの六価クロムが検出されるためと考えられる。

セメント系材料の水和反応は初期材齢（概ね材齢 7 日）までに急激に進行し、その後は比較的緩やかに推移するといわれている。普通ポルトランドセメント

のペースト (W/C = 0.5、20) では、鉱物組成毎に違いはあるがいずれも材齢 7 日までの水和率の増加が顕著であり、特に組成比の約半分を占める C₃S の水和反応率は約 80% に達している^{文献 4)}。また、各鉱物の水和率と組成比から計算した材齢 28 日の水和率 (約 75%) の 8 割以上が材齢 7 日までに発現していることから初期材齢での水和反応の進行が顕著であることがうかがえる。

セメント改良土からの六価クロムは使用された固化材 (セメント系) が対象土中の水分もしくは混合時の水分との反応 (水和反応) により溶出することから、初期材齢ではその活発な水和反応により六価クロムの溶出も顕著に現れるが、その後は水和反応が比較的緩やかに進行するので、水和物の生成による固定を考慮しなくても、六価クロムの溶出量が急激に増加することはないと考えられる。また、六価クロム固定能力の高いモノサルフェート相^{文献 5)} を生成するセメント鉱物 (C₃A) の初期材齢での水和反応は非常に顕著であり、実際の改良土では、これらの水和生成物による六価クロムの固定も同時に作用するので、六価クロムの溶出はより抑制されると考えられる。

- 文献 1) 寺元秀男他：超早強ポルトランドセメントクリンカー中のクロム含有相、
窯業協会誌、Vol. 83、No. 956、pp. 184-190 (1975)
- 文献 2) 内川浩：セメントによる廃棄物、汚泥中の有害物質の固定、セラミックス、
Vol. 12、No. 2、pp. 103-117 (1977)
- 文献 3) 後藤年芳他：関東ロームの安定処理について、土質工学シンポジウム発表
論文集、pp. 71-75 (1991)
- 文献 4) 中田英喜他：選択溶解法と粉末 X 線回折法との併用によるセメント水和率の
測定、セメント・コンクリート論文集、No. 53、pp. 116-120 (1999)
- 文献 5) 土木学会コンクリート委員会：コンクリートからの微量成分溶出に関する現状
と課題、コンクリートライブラリー 111、土木学会 (2003)

第4章 セメント改良土に起因する六価クロムの周辺地盤における挙動

4-1 pHの変化と吸着¹³作用

pHが高いセメント改良土中の六価クロムがセメント改良土より周辺地盤に溶出した場合、周辺土壌は一般にセメント改良土よりpHが低いため、六価クロムは土壌に吸着されやすい状態になる。

[解 説]

図-4.1 は施工後2年9ヶ月の時点でセメント改良土及び未改良土について、深度ごとに土のpHの測定を行った結果である。セメント改良土でpHは高い値を示すが、未改良土上部のほぼ10cmの範囲で急激に低下している。

試 料：駐車場改良試験工事追跡調査（東京都）
養生日数：2年9箇月

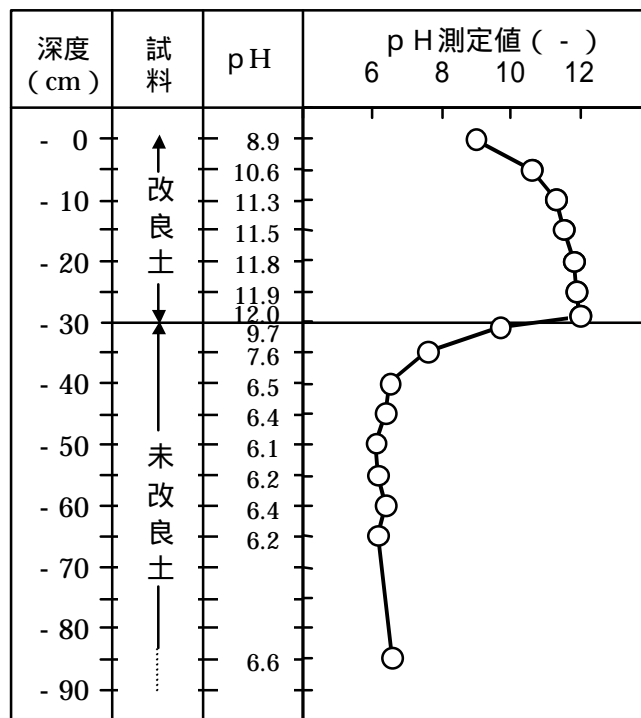


図-4.1 セメント改良土における pH の追跡調査の一例

(社)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 [第二版]，
pp.44-45，1994.8 一部変更して引用

¹³ 吸着： 吸着は、二相（固相と液相、固相と気相など）の界面にある物質が濃縮される現象と定義される。土粒子/地下水界面における吸着の代表的なものは、分子間力によるファンデルワールス力とイオンと帯電粒子表面間にはたらくクーロン力がある。クロム酸イオンの場合は、土粒子表面の水酸基の水酸化物イオンと置換してクーロン力により配位する配位子交換反応と呼ばれる反応である。

周辺土壌における六価クロムの吸着に対する pH の影響を示す。

図-4.2 は六価クロム (CrO_4^{2-} として) が森林褐色土に吸着される割合が pH の低下によって増加することを示したものである。

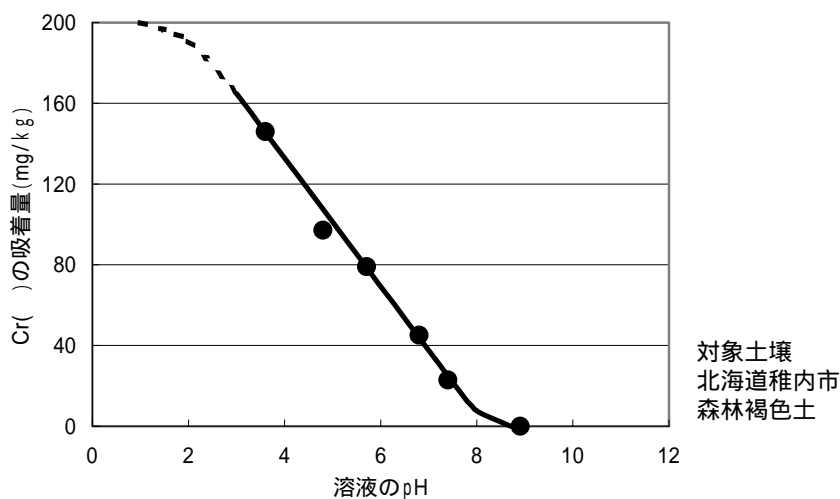


図-4.2 六価クロムの土壌への吸着に対する pH の影響

佐藤一男 (1998) 各種元素の土壌中の移行機構(その3) - 浸透水の pH 変化を考慮した元素の土壌内輸送モデル - 電力中央研究所・研究報告 T87106, p.12 図3を改変

図-4.3 は同様の関係を酸化鉄 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 酸化鉄アモルファス) について調べたもので、吸着率が六価クロム濃度に依存していることがわかる。酸化鉄は土粒子表面にごく普通に存在し、土粒子の六価クロム吸着に関わっているとされている。

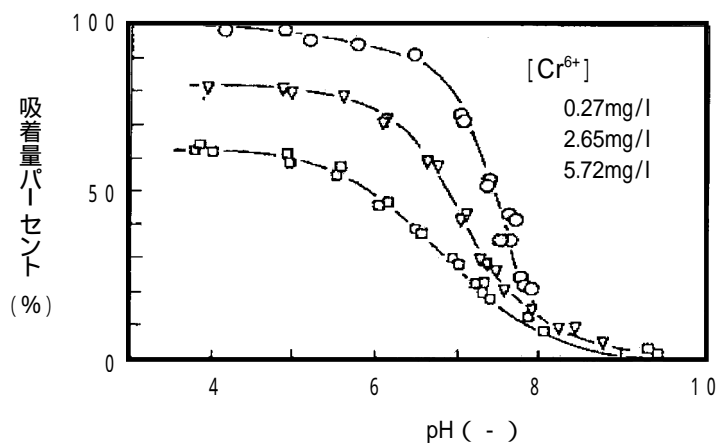


図-4.3 六価クロムの酸化鉄への吸着に対する pH の影響

Rai D., Zachara J.M., Eary L.E., Girvin D.C., Moore D.A., Resch C.T., Sass B.M. and Schmidt R.L. (1986) Geochemical behavior of chromium species. Interim Report EPRI EA-4544, E.P.R.I., Palo Alto, Calif. より引用

4-2 移動の抑制

セメント改良土から周辺地盤に溶出した六価クロムは、地下水とともに移動するが、周辺土壌の吸着作用などにより、その移動が抑制される。

[解 説]

土壌中での六価クロムの移動特性を検討するために、セメント改良土（六価クロム溶出濃度が 0.89mg/l の供試体を作製）を内径 10.4cm のアクリル性カラムに充填し、充填層内に通水した際の通水液中の六価クロム濃度を測定した。また、下流側に未改良土の充填層を設けることで未改良土層での移動の抑制についても検討した。図-4.4 から以下のことが分かる。

セメント改良土のみで通水すると、通水当所から六価クロムの溶出が確認される。

セメント改良土の浸出水の六価クロムは、未改良土の層を通ることで未改良土に吸着し移動が抑制される。

未改良土において、砂質土に比べ火山灰質粘性土の方が移動抑制効果がより顕著であった。

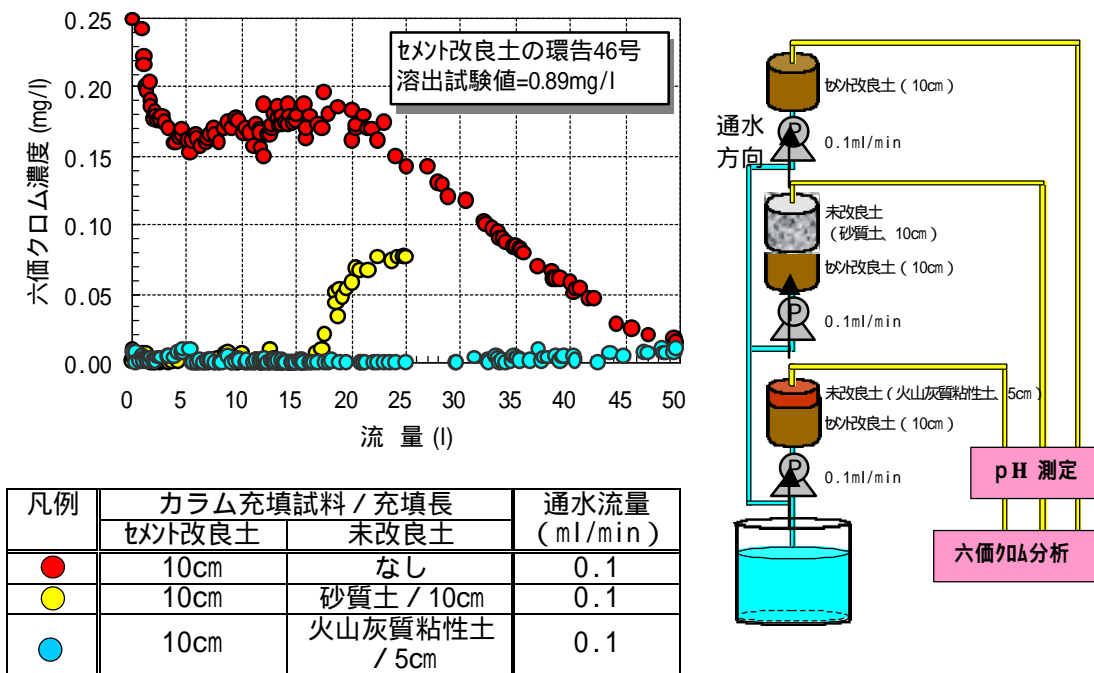


図-4.4 カラム通水実験概略図および結果

4-3 周辺地盤における六価クロムの減衰

セメント改良土から溶出した六価クロムは、時間の経過とともに、三価クロムに還元されたり、周辺土壌により強く吸着することにより、周辺地盤から再溶出せず、減衰する。

[解 説]

周辺土壌中での六価クロム濃度の減衰には、吸着や還元性無機物質¹⁴により速やかに進行する還元¹⁵（速効性）と土壌有機物、微生物および土壌環境により比較的緩やかに進行する還元（遅効性）があり、その進行の程度は対象となる土の性質や周辺環境（地下水など）の影響により様々である。

こうした周辺の土壌による還元能力の絶対量を評価するのは難しいが、有機物含有量が比較的多い土壌では、セメント改良土程度の六価クロム溶出量に対して十分大きいことが報告されている^{文献1), 2)}。

文献1) 佐藤一男、坂田昌弘：各種元素の土壌中以降機構（その1） - 土壌中移行過程のモデル化、電力研究所報告、研究報告 T86096 (1988)

文献2) Kozuh N. and Schara M.: Determination of the reduction capacity and the correlation to reduction of chromium in soils, Ann Chim (Rome), Vol.85, No5-6, 257-265 (1995)

¹⁴ 還元性無機物質： 酸素と結びついて酸化物を作って安定化する無機物質。たとえば、二価の鉄は他の者から強力に酸素を奪って安定な三価となるようするため強い還元性を有している。

¹⁵ 還元： 還元とは 化合物が酸素を失う。単体又は化合物が水素と化合する。単体又はイオンが電子を取り入れる。の3つの場合をいう。これらの結果としてイオンや化合物は酸化数が減少する。Cr()は Cr()に還元されて酸化数が減少する。

図-4.5 は、各種土壌に六価クロム溶液を添加し、時間毎の溶液中の六価クロム濃度の変化を検討したものである。六価クロム溶液の初期濃度は、セメント改良土からそれと同量程度の土壌へ六価クロムの溶出があったと想定して調整した。

火山灰質粘性土(沼津産)や砂質土(美浦産)は、主に吸着作用により比較的早く六価クロム濃度は低下した(速効性)。また、酸化雰囲気にあると思われるが、長期的に六価クロムの減少傾向がみられ、遅効性の還元作用が僅かであるが発現していたと推測される。

粘性土(霞ヶ浦産)は、六価クロムを吸着する能力が砂質土よりも低いいため、速効性の六価クロムの減少はわずかであった。しかしながら、還元雰囲気を有しており遅効性の還元の発現により六価クロムの濃度が急激に減少した。

以上の結果より、土壌中では速やかに発現する吸着や還元以外に、比較的緩やかに発現する遅効性の還元が確認された。また、セメント改良土より溶出する六価クロムは、同量程度の土壌により吸着・還元されることが明らかになった。

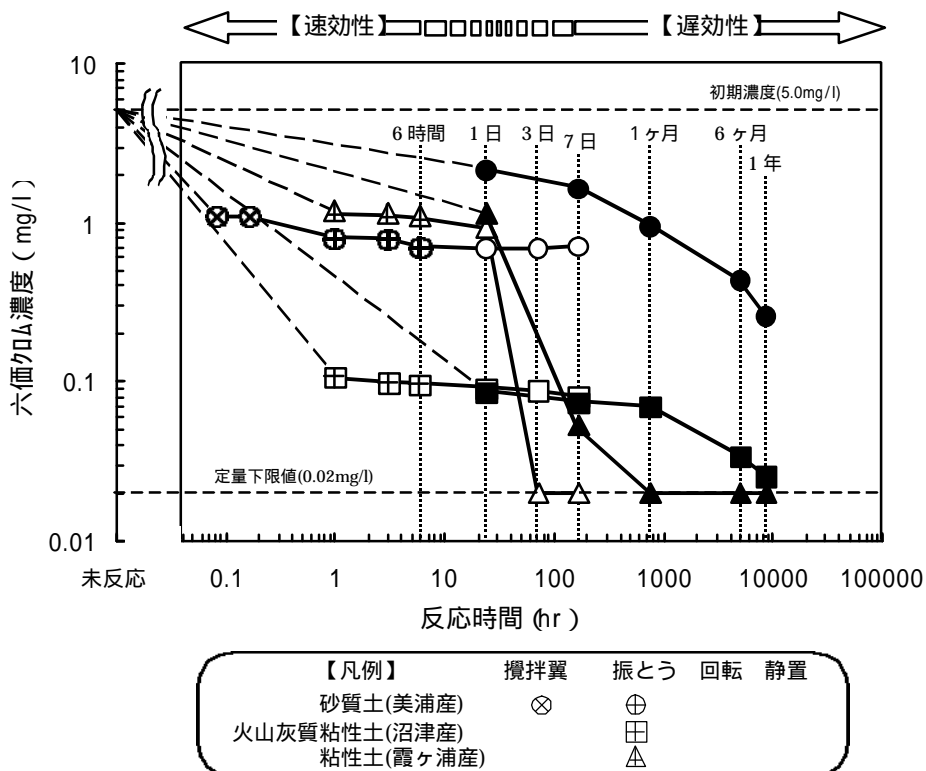


図-4.5 六価クロム濃度の変化

表-4.1 は、六価クロム溶液を添加し、一定時間を経過した後の土壌の再溶出試験を行った結果である。砂質土の材齢1ヶ月以降や粘性土の材齢7日以降で再溶出はほとんどなかった。火山灰質粘性土は材齢とともに再溶出率は低下した。粘性土の材齢1日で再溶出があったのは、遅効性の還元作用が発現する以前であり、速効性の吸着によるものからと考えられる。このように時間の経過とともに土壌に吸着された六価クロムが再溶出しない強い吸着、もしくは三価クロムへの還元に移行することが分かる。

表-4.1 試験結果（再溶出試験）

対象土	時間	pH 測定値* ¹ (-)	六価クロム濃度 (mg/l)	再溶出率* ² (%)
砂質土 (美浦) w=4.03% Eh=611mV pH=4.70	1日	7.64	0.10	25.8
	7日	8.53	0.06	10.8
	28日	8.53	0.06	3.9
	半年	6.86	0.02	3.3
	1年	6.37	0.02	4.2
粘性土 (霞ヶ浦) w=187.56% Eh=688mV pH=3.99	1日	7.40	0.15	27.4
	7日	8.10	<0.02	0.0
	28日	8.10	<0.02	0.0
	半年	5.71	<0.02	0.0
	1年	5.42	<0.02	0.0
火山灰質粘性土 (沼津) w=84.01% Eh=479mV pH=6.41	1日	7.51	0.07	13.9
	7日	9.30	0.05	11.5
	28日	9.30	0.05	9.4
	半年	6.92	0.04	8.4
	1年	6.65	0.03	7.6

*¹：再溶出試験後の検液（ろ液）のpH測定値。

*²：再溶出率は以下の計算式による。

$$\text{再溶出率}(\%) = (\text{再溶出量} / \text{捕捉量}) \times 100$$

再溶出量；再溶出試験によって溶出した六価クロム量 (mg/kg)

捕捉量；バッチ試験の液相からの六価クロム減少量より計算される

各試料土毎の六価クロム捕捉量 (mg/kg-乾土)

既設のセメント改良土における現地調査結果からも周辺地盤における六価クロムの減衰が検証された。図-4.6は水溶性クロムの存在状態をEh（酸化還元電位）-pH関係図に示したものである。六価クロムはEhが高く、pHが高い領域において安定して存在する（図の赤色の領域）。セメント改良土中から六価クロムが周辺土壌に溶出した場合、図中の六価クロムが安定して存在する領域からpHの低下で三価クロムが安定して存在する領域に移動する。つまり、三価クロムに還元されやすい状態になる（図の緑色の領域）。

前述の2-4節で報告した既設のセメント改良土における現地調査結果を図-4.6にプロットした。六価クロムが検出された試料はすべてセメント改良土であり、六価クロムの安定領域にプロットされた。周辺土壌は六価クロムが不検出であったが、概ね三価クロムの安定領域にプロットされた。

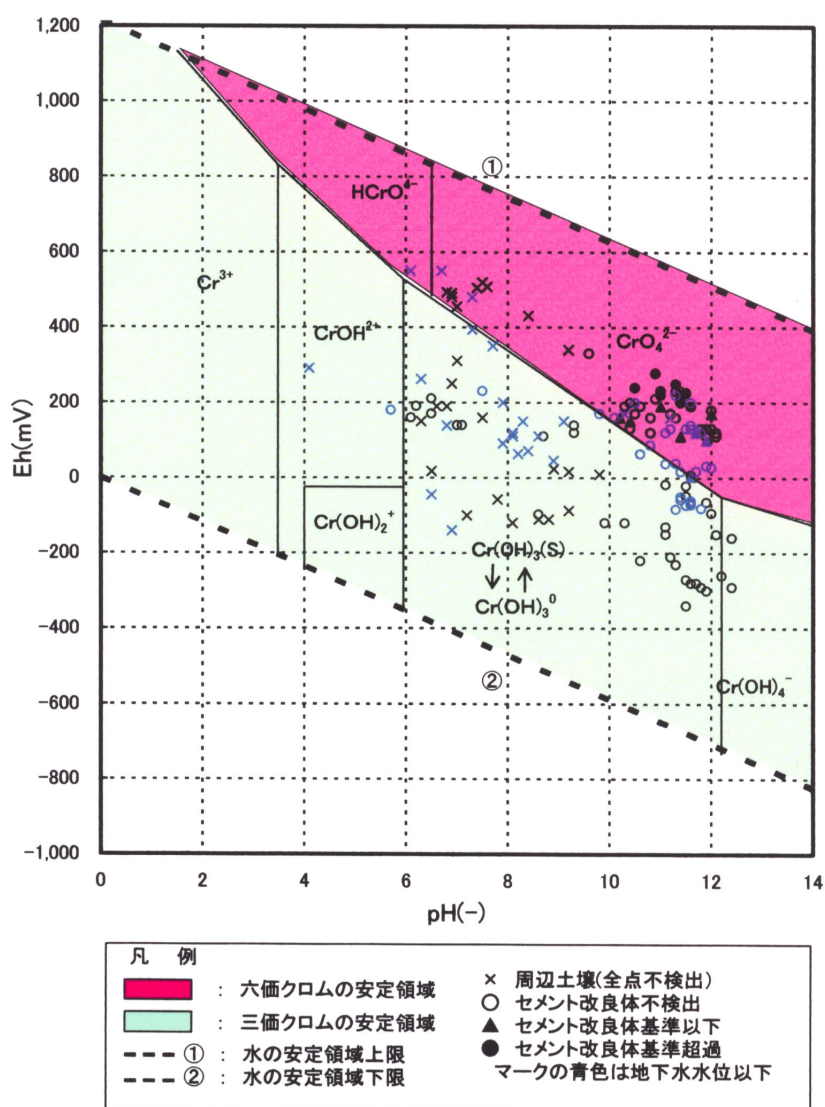


図-4.6 既設のセメント改良土の現地調査結果のEh-pH関係

「Francoise C.Richard and Alain C.M.Bourg, (1991),

Aqueous geochemistry of chromium : a review. Wat.Res.Vol.25,No.7,pp.807-816.」より引用

第5章 既設のセメント改良土の周辺環境への影響

5-1 浅層改良のシミュレーション

主に路床改良等に用いられる浅層改良はその上部が舗装等で覆われるため、セメント改良土中への雨水の浸透が抑制されるケースが多い。数値シミュレーションにおいて、セメント改良土を通過した浸透水による六価クロムの周辺土壌への移流拡散¹⁶を検討したが、雨水等の浸透が抑制される場合は六価クロムの拡散はわずかであった。また、実験においては、セメント改良土の位置から離れるに従って六価クロムの拡散する速度が遅くなり、拡散は数値シミュレーションより小さい範囲であった。さらに、浸透水の蒸発散や周辺土壌の還元効果を考慮すると、実際には数値シミュレーションよりも六価クロムの拡散が抑えられるようになる。

[解 説]

浅層改良の多くは通達における路床・路体、路盤等における固化材による安定処理に分類される工法として施工されるものである。

¹⁶ 移流拡散： 汚染物質が地下水の流れによって移動（移流）することと分子拡散によって広がっていくことをいう。地下水の流れは微視的に見ると、土壌の間隙中を曲がりくねって流れている。

実験及び数値解析を行い、浅層改良土から溶出する六価クロムの周辺地盤への移流拡散についてシミュレーションを行った。その結果、図-5.1のようにセメント改良土上部が舗装等で覆われ、セメント改良土中への雨水の浸透が抑制される一般的なケースにおいては、図-5.3のように浅層改良土に起因する六価クロムの拡散はわずかであった。

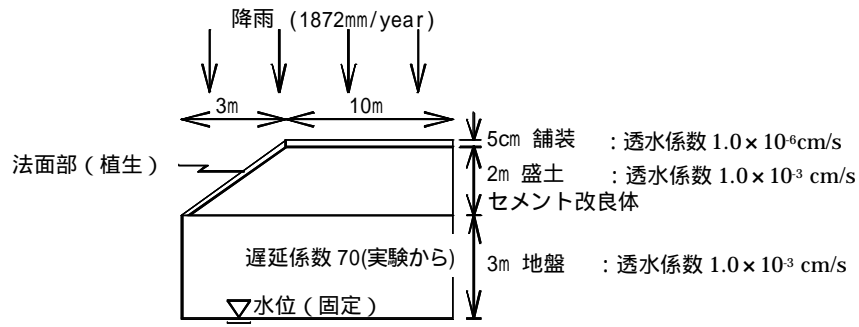


図-5.1 数値解析モデルの一例

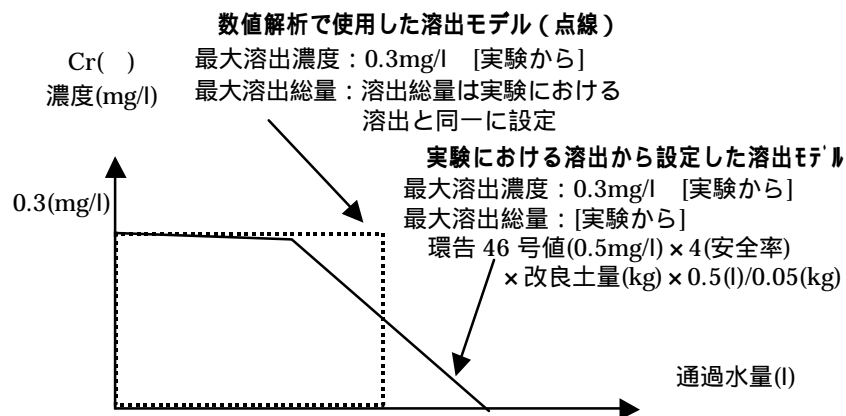


図-5.2 数値解析の入力

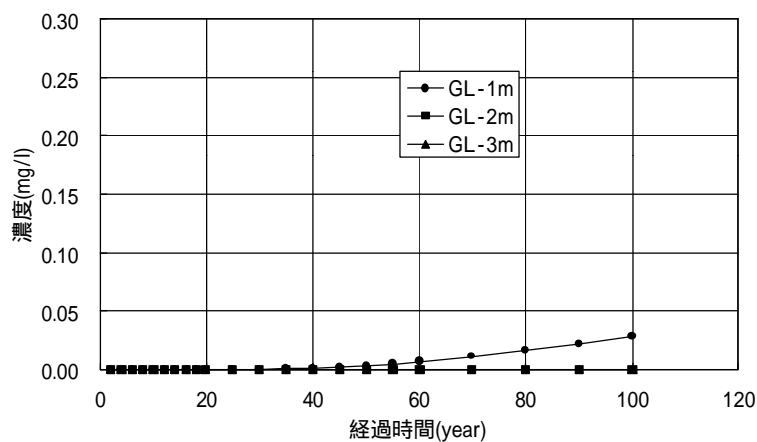


図-5.3 数値解析結果の一例

(* GL は改良体からの距離を示す)

また、砂質地盤上に浅層改良土（六価クロムの環告 46 号溶出試験値が 0.33mg/l）を設置し、降雨を与える大型土槽実験を行った。その結果、図-5.5 のようにセメント改良土から離れるに従い、実験結果と解析結果の乖離が大きくなり、数値シミュレーションの方がより拡散しているという結果が得られた。これは、実際の現場ではセメント改良土から離れるに従い、六価クロム濃度が低下し、遅延係数の増大により六価クロムの拡散する速度が遅くなることを示している。

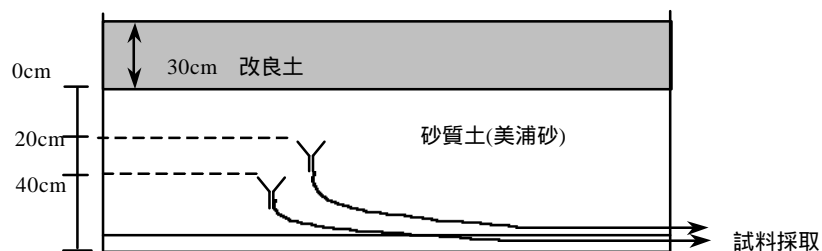


図-5.4 大型土槽実験概要

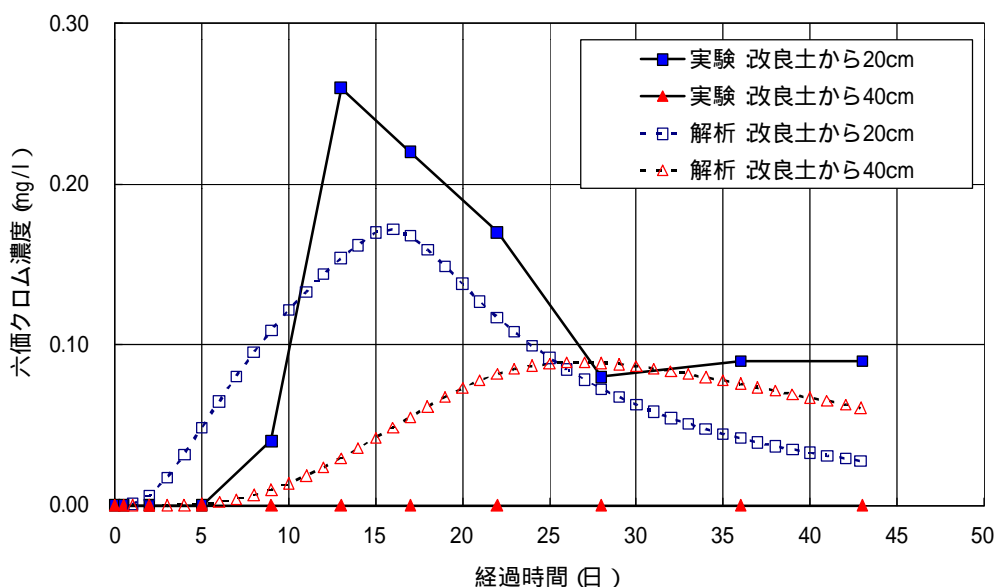


図-5.5 大型土槽実験結果と数値解析結果

5-2 深層改良のシミュレーション

深層改良における六価クロムの溶出は、セメント改良土の透水係数が周辺地盤より低いことから、地下水流のセメント改良土への浸透ではなく、セメント改良土表面からの溶出により生ずるものと考えられる。数値シミュレーションでは、セメント改良土表面からの溶出による微量の六価クロムの地下水による移流拡散を検討したが、地下水で希釈されるため、周辺地下水へ拡散する濃度は極めて低くなる。さらに、還元雰囲気である地下水中に存在することなどを考慮すると、実際には数値シミュレーションよりも六価クロムの拡散が抑えられることになる。

[解 説]

深層改良の多くは、通達における粉体噴射攪拌、高圧噴射攪拌、スラリー攪拌、柱列杭に分類される工法として施工されるものである。

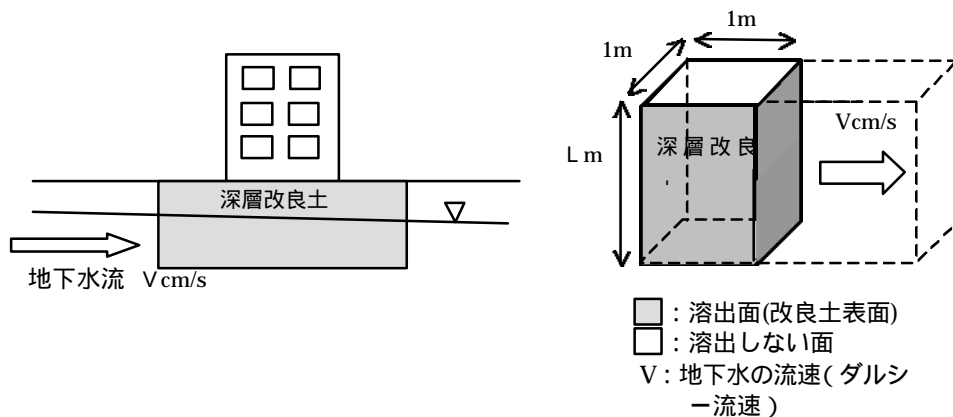


図-5.6 深層改良土の溶出モデル

図-5.6 に示すように、一般的に考えられる地盤・地下水条件を設定し、深層改良土表面から溶出する六価クロム濃度の推移及び地下水中的での移流拡散状況についてシミュレーションを行った。

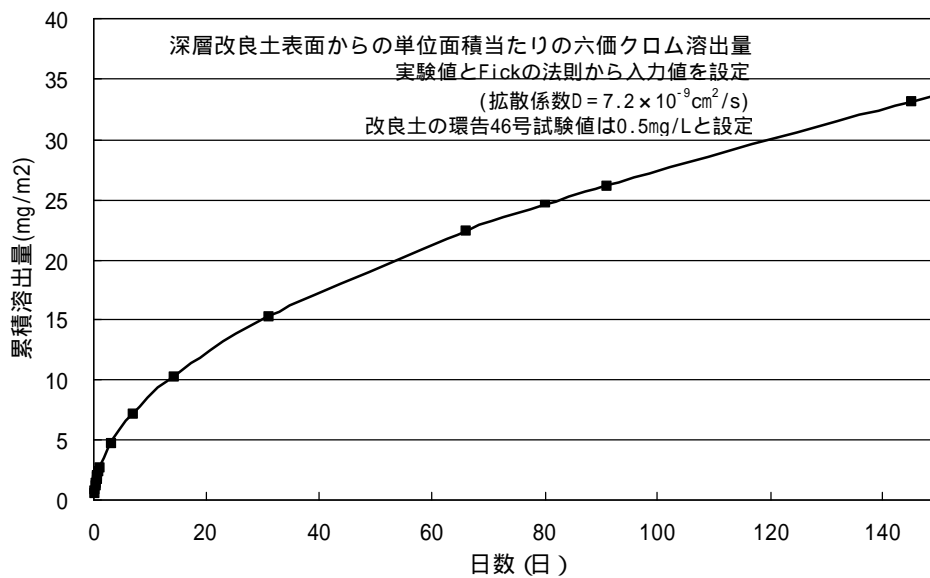


図-5.7 数値解析の入力

<ダルシー流速 43cm/日 (有効間隙率 43% , 真流速 1m/日) のケース (砂礫土地盤の平野を想定) >

図-5.8 に示すとおり、深層改良土表面では周辺の地下水により六価クロム濃度は希釈され、環境基準以下となった。さらに2～3日後には定量下限値 (0.02mg/l) 以下となった。

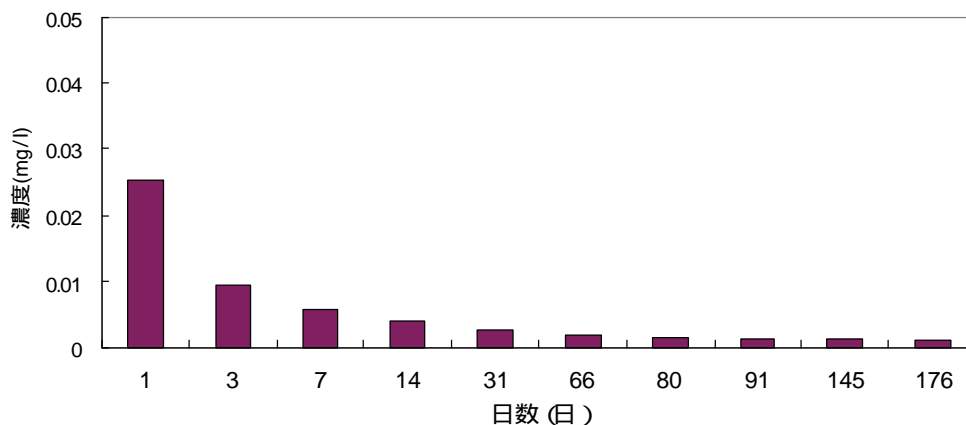


図-5.8 深層改良土からの溶出濃度

(ダルシー流速 43cm/日 (有効間隙率 43% , 真流速 1m/日))

<ダルシー流速 $V=4.3$ cm/日 (有効間隙率 43% , 真流速 10cm/日) 遅延係数 10 のケース (砂礫土地盤の低地部を想定) >

図-5.9 に示すとおり、周辺地盤への移流拡散状況については、本ケースのように遅延係数が 10 程度の砂質土であれば、環境基準の濃度に到達することはない。

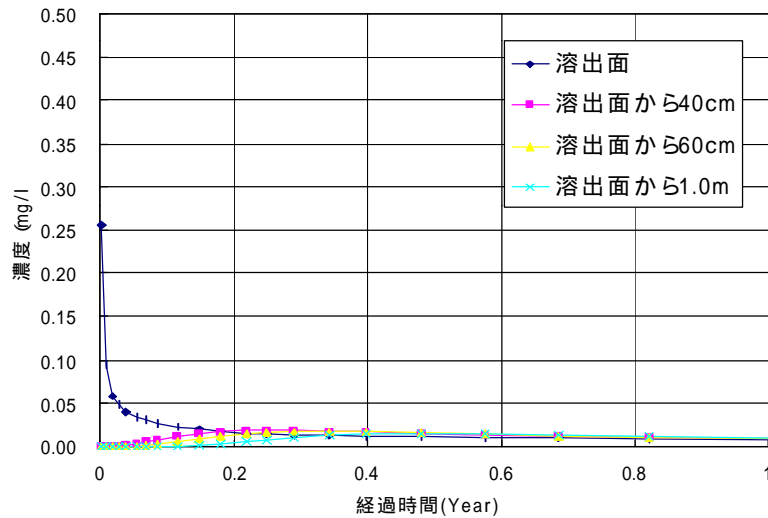


図-5.9 改良体表面からの溶出と周辺地盤への移流拡散状況
(ダルシー流速 $V=4.3\text{cm/日}$ 、遅延係数 10 のケース)

<ダルシー流速 $V=0.43\text{cm/日}$ (有効間隙率 43% , 真流速 1cm/日) 遅延係数 10 のケース (砂質土地盤の低地部を想定) >

図-5.10 に示すとおり、深層改良土表面からの溶出については、最初の 2 年間程度は環境基準を超える溶出が認められるものの、以後はこれを下回る溶出となる。周辺地盤への移流拡散状況については、本ケースのように遅延係数が 10 程度の砂質土であれば、表面より 40~60cm のところで (3 年前後のところで) 一時的に環境基準をわずかに上回るが、以後は環境基準以下で推移する。それより離れたところに環境基準レベルの濃度が到達することはない。

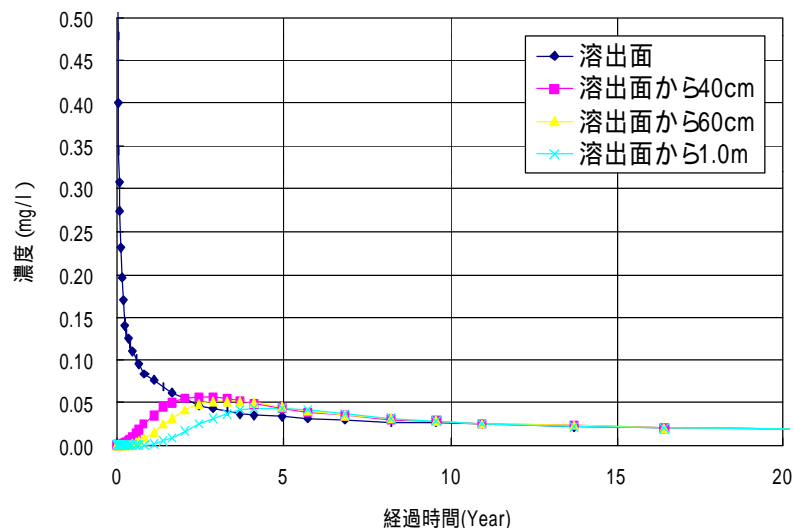


図-5.10 改良体表面からの溶出と周辺地盤への移流拡散状況
(ダルシー流速 $V=0.43\text{cm/日}$ 、遅延係数 10 のケース)

第6章 セメント改良土以外からの六価クロム溶出に関する検討

6-1 薬液注入等施工時の周辺地盤への影響

薬液注入工法等によるスラリー状態での施工において、地下水への影響としては、施工直後に近傍で若干の六価クロムの溶出が認められることもあるが、時間とともに濃度は減少する。さらに、周辺土壌での六価クロムの吸着・還元効果を考慮すると、周辺地盤への影響はない。

[解説]

水ガラス系の薬液注入工法の中で硬化剤としてセメントを用いる懸濁液型は薬液注入工法全体の10%程度で近年減少しており、硬化剤に有機化合物・無機化合物を用いる溶液型のものが大部分を占めている。

薬液注入工法等の施工時の地下水と周辺土壌環境に対する影響を把握するために図-6.1の実験装置で実験を行った。なお土壌は現場発生砂を用い、供試体は固化したものでなく、水・セメント・土砂を混合したスラリー状のものをアクリルパイプに入れた。また排水ポンプにより吸引することにより一定の地下水流速を与えた。

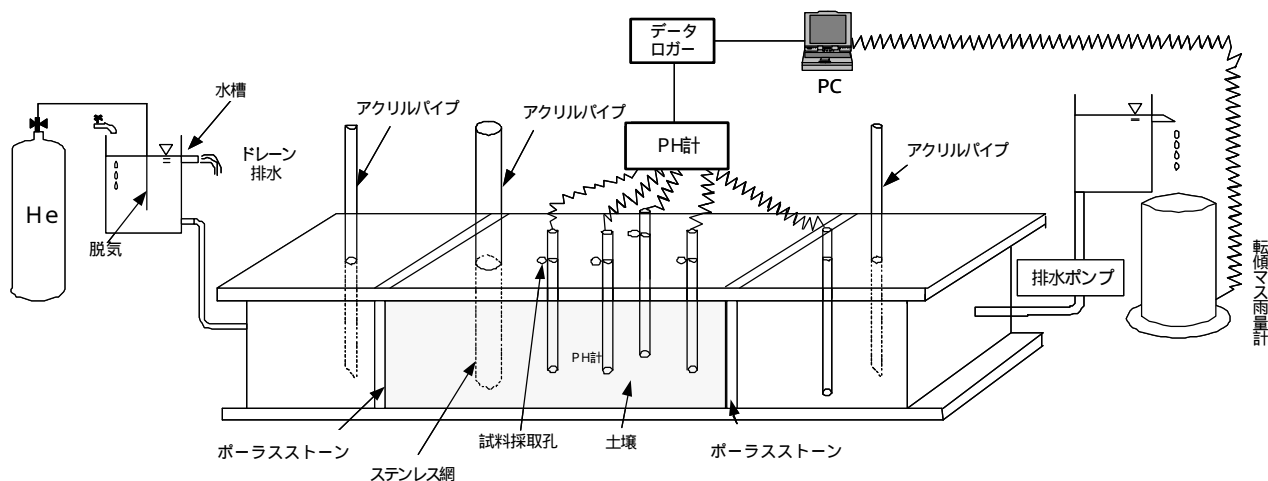


図-6.1 実験装置概要図

図-6.2の観測点での六価クロム濃度は、一時的に近傍(No.1)の地下水への六価クロムの若干の溶出は認められるものの、環境基準以下であり、時間とともに減少した。

また、通水試験の試験終了後、周辺地盤の現地発生砂中の六価クロム濃度を調べたが地盤の吸着・還元作用により影響は認められなかった。

なお、土壌を細粒分の極めて少ない硅砂で実験を行ったケースでは、1日程度、六価クロムの溶出が認められたが、時間とともに減少した。

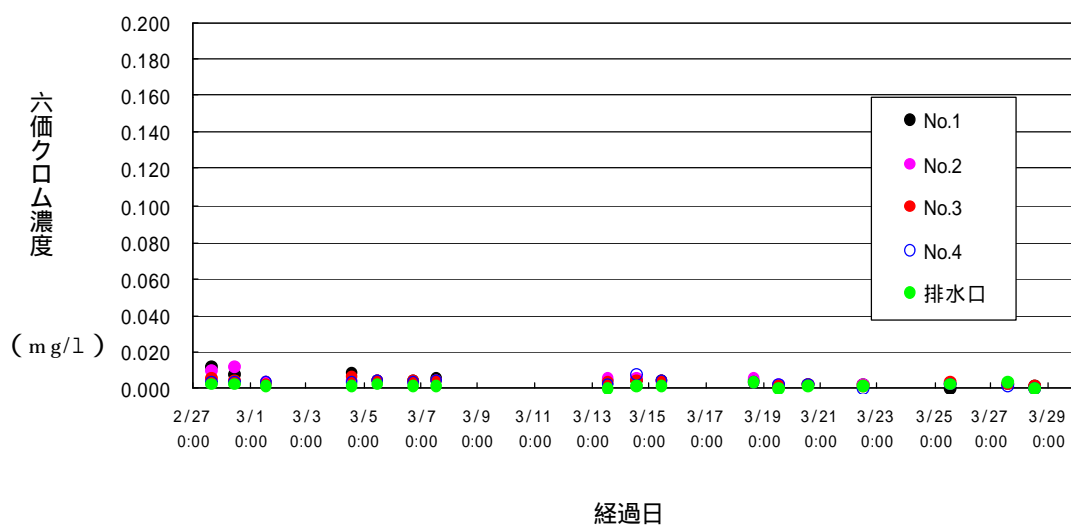


図-6.2 実験結果

6-2 コンクリートに関する溶出の可能性

コンクリートの施工工程では、施工に用いる水への六価クロムの溶出が確認された。また、ブリーディング水¹⁷には高い濃度の溶出が見られた。コンクリート解体材を細かく砕いた試料からは六価クロムの溶出が観測された。ただし、構造物のコンクリートからの溶出は極めて小さく、溶出は施工工程で懸念されるが、適正な作業手順に基づいて実施することにより、外部への影響を与えることはほとんどない。コンクリート解体材についても、その再利用状況を見ると、外部への影響を与えることはほとんどない。

[解 説]

コンクリートの施工工程では、運搬や打設に伴う洗浄水、ブリーディング水、水中コンクリートの周りの水などへ六価クロムが溶出する可能性がある。実施工で調査した結果、洗浄水では0.040～0.157mg/l程度、ブリーディング水では最大2mg/l程度の高い濃度が観測された。ブリーディング水はコンクリートの硬化とともにコンクリートへ吸収された。なお、実験室で行った測定では、ブリーディング水に最大17.2mg/lの高い濃度が観測された。

供用中のコンクリート構造物や屋外に暴露した供試体を粉碎し、環告46号法で測定した結果、表面の中性化している部分は0.03～0.05mg/l、中性化していない部分は0.03mg/l以下の溶出が認められた。中性化によって若干溶出濃度が増える傾向が認められた。ただし、環告46号法の溶出条件は、コンクリートを細かく砕くもので、実際の構造物の使用条件より厳しいものである。このため、実構造物からの溶出の可能性は十分に低いものと判断される。

コンクリート解体材・再生材からの溶出では、環告46号法で0.05mg/l以下の測定値が得られた。ただし、コンクリートを破碎後、屋内に放置し中性化を進行させた解体材では、測定値の上昇が見られ、最大で0.06mg/l程度の測定値が得られたものも一部にあった。なお、環告46号法の溶出条件は、コンクリート解体材・再生材の実際の使用状況に比べかなり細かく砕いた試料を用いる。このため、試験条件としては厳しいもので、通常の使用条件では溶出の可能性は十分に低いものと判断される。

なお、コンクリートからの六価クロムの溶出については「土木学会コンクリート委員会：コンクリートからの微量成分溶出に関する現状と課題（コンクリートライブラリー111、土木学会（2003））」により詳しく述べられているので、参考にされたい。

¹⁷ ブリーディング水：コンクリートを打設した際に発生する余剰の水分。硬化とともにコンクリートへ吸収される。

第7章 まとめ

本委員会は、セメント改良土及びセメントを材料として使用するものから六価クロムが溶出する可能性と周辺環境への影響を検討した。以下、セメント改良土及びセメント改良土以外の取扱いを検討した結果を取りまとめる。なお、セメント改良土以外の取扱いとしたものは、モルタルやコンクリートのようにセメントの水和反応が充分進行し硬化するものからはほとんど六価クロムの溶出のないことが確認されていることから、コンクリートの施工工程、コンクリートの解体・再生材、薬液注入施工時等を対象とした。

1. セメント改良土の取扱い

(1) 新たに施工するセメント改良土

施工前の溶出試験結果では、様々な土と固化材の組合せの中に少ないが、ある一定程度の割合で六価クロムの溶出が土壤環境基準を超える試料が存在することが明らかになった。このため、施工前の溶出試験により六価クロムの溶出が土壤環境基準を超えないことを確認する必要がある。

施工前の溶出試験において六価クロムの溶出が土壤環境基準を超えない場合は、その配合に従って適切に施工を行うことにより土壤環境基準を満足する施工がなされる。ただし、火山灰質粘性土については他の土質と比較して溶出頻度および濃度が高いことから施工後の試験も行い、溶出のないことを確認する必要がある。

(2) セメント改良土の再利用

施工前及び施工後の溶出試験結果において六価クロムの溶出が土壤環境基準を超える試料はなかった。このことから、施工前の溶出試験を行い、土壤環境基準を超える溶出のないセメント改良土を再利用することにより、土壤環境基準を満足する施工がなされる。しかし、セメント改良土の再利用では、施工前と施工後の溶出試験実施者が異なる場合が多いため、確認のため施工後の溶出試験を引き続き実施することとする。

(3) 既設のセメント改良土

現地調査を実施した箇所において、セメント改良土が周辺地盤に影響を及ぼしているものはなかった。また、土木研究所において行った既設のセメント改良土から六価クロムが溶出することを想定した実験や数値解析結果では、周辺地盤のもつ吸着や還元作用によりその移動が抑制されるために周辺地盤への六価クロムの拡散はわずかであった。

こうしたことから、一部の既設のセメント改良土で六価クロムの溶出のおそれがあっても、六価クロムの周辺地盤への拡散の原因となるセメント改良土への大量の浸透水の流入がない限り、周辺地盤へ影響を及ぼすことはない。

2. セメント改良土以外の取扱い

薬液注入施工時に溶出する六価クロムも、セメント改良土と同様に周辺地盤の持つ六価クロムの吸着・還元作用によって移動が抑えられる。また、コンクリートの施工工程では適正な施工手順に基づいて作業されることにより、外部への六価クロムの拡散は防止される。

3. セメント改良土から溶出する六価クロムの周辺環境への影響

セメント改良土から溶出する六価クロムは、セメントが含有するものに由来し、セメントの水和反応により固定されなかった場合に溶出する可能性があることがわかった。また、六価クロムは還元性物質によって化学的に安定した三価クロムに還元されるため、還元性を有する土と固化材を混合した場合には六価クロムは溶出しにくくなることも明らかになった。今後新たに施工する改良土では、施工前の溶出試験によって溶出のないことを確認して施工されることになるが、こうした六価クロムの溶出のメカニズムを十分理解することによってさらに効果的な対策が施される。

セメントに起因する六価クロムの特徴として、周辺土壌において吸着・還元作用の影響を大きく受け、周辺地盤に溶出してもその移動が抑制され、時間の経過とともに減衰することが明らかになった。また、こうした周辺地盤の作用能力は土壌によって異なるが、セメント改良土から溶出する六価クロム量に対して充分大きいことがわかった。こうした六価クロムの周辺環境への影響に対し安全側に作用する要因により、既設のセメント改良土などで六価クロムの溶出のおそれがあっても、大量の浸透水の流入といったような六価クロムの溶出が促進される環境下でなければ、周辺環境への影響はないと結論づけられた。