

土壌に含有する 6 価クロムのセメント系固化材 による原位置不溶化処理に関する基礎研究

上岡 誠一¹・柏谷 衛²

¹正会員 工修 ライト工業株式会社 技術研究所 環境・化学研究室(〒274-0071 千葉県船橋市習志野 4 丁目 15 番地 6 号)

²フェロー会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科(〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641 番地)

高炉セメント B 種とベントナイトの混合材 (CB 混合材) 及び高炉セメント B 種単体を用い、深層機械攪拌工法で Cr(VI) 汚染土壌を原位置不溶化処理する基礎研究を行った。この結果、Cr(VI) 吸着能力が高い CB 混合材では、硬化発現に伴う Cr(VI) のセメントマトリックス中への封じ込め効果が低く、材令経過に伴い溶出量が増加した。高炉セメント B 種単体ではセメントマトリックス中への封じ込め効果が高く、Cr(VI) 含有量 50mg/kg (dry-base) の砂質土では 200kg/m³、有機質土では 100kg/m³ 添加で土壌環境基準値を下回る溶出 Cr(VI) 濃度となること、かつ粉体よりスラリー状で効果が高いことも確認された。攪拌混合度の相違が Cr(VI) 溶出量に及ぼす影響については、混合度を明度値より求め、汚染土壌に不溶化処理材が均質に行きわたる最適な不溶化処理は混合度の変動係数が 2% を下回る攪拌混合が必要であることが判明した。

Key Words: *confining treatment in situ, hexavalent chromium, leaching test, deep mixing - stabilization process, mixing efficiency, lightness*

1. はじめに

筆者らは、工場跡地、鉱滓埋立地など、汚染源の地下水汚染域制御のために、セメント・ベントナイト地中壁の適用に関する研究を行ってきた^{1), 2)}。これらの研究で、重金属類、特に Cr(VI) に関して、地中壁内部で難溶解性物質の生成による抑留および吸着現象を解明してきた。この実験過程で Cr(VI) は地中壁内部での難溶化が困難であり、比較的早期に破過が生じるため、さらなる地下水汚染域制御が必要であることも言及してきた。

Cr(VI) 汚染土壌対策としては、全量掘削を行い、地上にて硫酸、硫酸第一鉄および水酸化ナトリウムを添加し、難溶性水酸化物の生成による不溶化技術が適用されてきている³⁾。この不溶化技術は地上にて処理可能な場合には、操作上も簡易なために、非常に有効な手段であると考えられる。当然のことながら汚染土壌は、浄化を行い自然土と遜色ない修復がなされることが望ましい。しかし、掘削を含めた修復工事の経済性、汚染地の立地条件、対策実施に時間がかかるなども予想され、公園や工場の緩衝緑地など跡地利用の条件で許容される場合には、遮水機能を合わせもった原位置不溶化処理も十分採用できると考えられる。

そこで、本研究では、表層から地下 10m を越える地盤

深部に至る土壌汚染を想定し、深層機械攪拌工法の適用による Cr(VI) 汚染土壌の原位置不溶化処理に関する基礎研究を行った。原位置不溶化処理を行った場合、不溶化処理材と Cr(VI) 汚染土壌との強制機械攪拌により、汚染地盤が乱され、地耐力の減少が予想されるため、処理後地盤の不等沈下を防止する目的で固化材を併用する必要がある。地盤の固化材は、セメント系固化材、消石灰、水ガラス系固化材が一般的であるが、これらを地上における Cr(VI) 不溶化に適した硫酸、硫酸第一鉄および水酸化ナトリウムによる難溶性水酸化物の生成後に添加した場合、セメント系固化材および消石灰では、処理後地盤のアルカリ化に起因した亜クロム酸イオン生成により Cr(III) が再溶解する。また、水ガラス系固化材は耐久性に問題があるため、この種の材料として適さない。

このようなことから、本研究では、最初に用いる不溶化処理材に硫酸、硫酸第一鉄、水酸化ナトリウムは使用せず、それ自身が硬化発現を示すセメント系固化材を使用し、深層機械攪拌工法に適した性状での不溶化処理効果の確認を行った。Cr(VI) 汚染土壌の原位置不溶化処理に深層機械攪拌工法を適用する際には、地上における不溶化処理とは異って、Cr(VI) 汚染土壌と不溶化処理材の混合過程における処理効果を確認できないため、不均一な攪拌混合による効果不足を生じる恐れもある。そこで、

Cr(VI)汚染土壌と不溶化処理材との混合の進行度合い(以下、混合度という)を明度値により把握し、任意の混合度における Cr(VI)不溶化処理効果を確認することで、最適な不溶化処理効果が得られる混合度を導くこととした。

2. 不溶化処理材の効果検討

(1) 材料、実験および評価方法

a) 不溶化処理材

不溶化処理材には高炉セメントとベントナイト混合材(以下、CB 混合材という)を使用した。ベントナイトには膨潤性に優れ、膨潤後には疎水性を示す Na 型ベントナイトを使用した。高炉セメントは安価な材料であるうえ、普通ポルトランドセメントと比較して化学抵抗性に優れ、長期強度の発現が認められる。また、含有スラグ中の硫化物、アルミニウム、鉄系化合物等は重金属類の溶出を抑制する働きが確認されている⁰。高炉セメントはスラグ含有量の相違により、A(5~30%)、B(31~60%)、C(61~70%)の3種に区分される。図-1はPb、Cr、As、Se、HgおよびCd、それぞれ乾燥土量1kgあたり50mg[以下、50mg/kg(dry-base)という]添加させた佐原砂(含水比:23%、見掛け比重:2.01)に、スラグ含有量の異なる高炉セメントB種、C種およびスラグ含有量80%に調整した高炉セメント(以下、スラグセメントという)を、粉体状で100kg/m³添加したときの材令28日(以下、 σ_{28} という)における溶出試験結果を示している。高炉セメントB種およびC種は、スラグ含有量46%および65%のものを使用した。また、溶出試験および分析方法は、後述するc)実験方法および評価方法と同様に行い、Pb、Cr、As、Se、HgおよびCdはそれぞれ、Pb(NO₃)₂、K₂Cr₂O₇、Na₂HAsO₄、SeO₃、HgCl₂およびCd(NO₃)₂として添加した。この結果、Asを除く溶出濃度は、スラグ含有量の相違により、

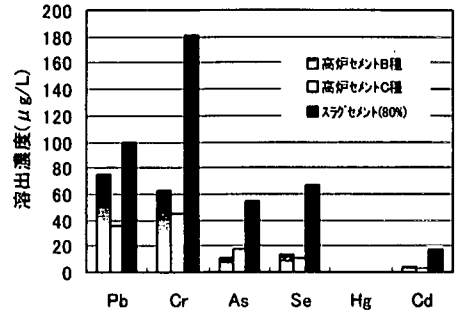
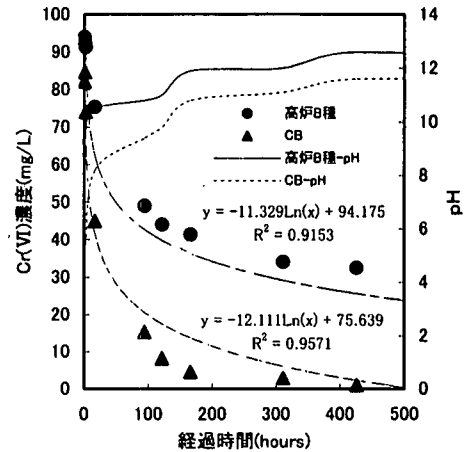


図-1 スラグ含有量の異なる高炉セメントを用いた各種重金属類の溶出試験結果

[重金属含有量:50mg/kg(dry-base), 添加量:100kg/m³]



(註) 図中の y は Cr(VI)濃度(mg/L), x は経過時間(hours)を示す。

図-2 高炉セメントB種硬化体とCB硬化体のCr(VI)吸着能力の相違

高炉セメントC種<高炉セメントB種<スラグセメントとなることが示され、高炉セメントC種がセメント系固着材として適していることが判明した。しかし、高炉セメントC種は、常に、生産されていないこと、全国的にも安定供給ができないこと、Pbを除いては高炉セメントB種とC種の溶出濃度に大きな差異がないことなどから、CB混合材のセメント系固着材として高炉セメントB種を使用することとした。

図-2はCr(VI)100mg/Lに調整した2Lの溶液に、 ϕ 50×100mmに成形した材令7日(以下、 σ_7 という)の高炉セメントB種硬化体およびCB硬化体を浸漬させたときのCr(VI)の濃度変化とpH変化を示している。 σ_7 の透水係数は、高炉セメントB種硬化体で 5×10^{-7} m/s、CB硬化体で 2×10^{-7} m/sであった。高炉セメントB種硬化体は透水性が高いにもかかわらず、Cr(VI)初期濃度100mg/Lが浸漬170時間では43mg/Lであった。CB硬化体を浸漬さ

せた場合には、同じ浸漬時間で5mg/L以下まで低下した。高炉セメントB種硬化体およびCB硬化体による経時的吸着現象は、それぞれ、 $[\text{Cr(VI)濃度}] = -11.329 \text{Ln}(\text{経過時間}) + 94.175$ 、 $[\text{Cr(VI)濃度}] = -12.111 \text{Ln}(\text{経過時間}) + 75.639$ で表すことができた。このときの重相関係数は0.915、0.957であった。また、高炉セメントB種硬化体と比較してCr(VI)吸着量が多いCB硬化体では浸漬溶液のpHが低いことが確認された。クロム酸イオンは酸性からアルカリ性に移行すると、 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ から CrO_4^{2-} へとイオン形態が変化する。一方、pHが高いほど固相側に負電荷が発達し、陰イオンの吸着には不利となる。このことから、pH変化が、高炉セメントB種硬化体およびCB硬化体のCr(VI)吸着量に及ぼす影響を調べるため、Ca(OH)₂およびNaOHのアルカリ溶液を別々に用いて、Cr(VI)100mg/L溶液をそれぞれpH9.0、10.0、11.0および12.0に4段階変化させて同じく浸漬実験を行った。この結果、pH無調

整とアルカリ側に調整した場合とで Cr(VI)吸着能力に差異は認められず、高炉セメントB種硬化体およびCB硬化体の Cr(VI)吸着量の差は、pH の影響ではないことが確認された。

以上の結果から、高炉セメントB種にNa型ベントナイトを混合したCB硬化体は、Cr(VI)吸着能力が優れていることが確認された。したがって、CB硬化体をCr(VI)の不溶化処理に適用できると考え、この実験に使用することとした。

b) Cr(VI)含有試験土壌

この実験ではCr(VI)含有試験土壌材料に7号珪砂を標準として使用した。7号珪砂はCr(VI)が比較的吸着されにくいいため、不溶化処理材としての効果を確認できる利点がある。Cr(VI)含有試験土壌は乾燥土量300gの7号珪砂に、蒸留水およびCr(VI)溶液を添加し、含水比23%に調整した。含水比の調整は、蒸留水および蒸留水ベースのCr(VI)溶液を用いた。吸水時に土粒子マトリックスにCr(VI)が取り込まれ溶出量が減少することを懸念し、ある程度蒸留水を加え吸水させた後にCr(VI)溶液を加える2回に分けた操作で行った。このときの含水比は飽和状態であり、見掛け比重は2.01であった。この実験のCr(VI)含有量は乾燥土量1kgあたり50mg[以下、Cr(VI)含有量50mg/kg(dry-base)という]とし、重クロム酸カリウム($K_2Cr_2O_7$)試薬を使用した。

c) 実験方法および評価方法

含水比調整後のCr(VI)含有試験土壌に不溶化処理材を添加し、攪拌を行ったものを試料とした。攪拌時間は数回にわたる試行により、あらかじめ、試料間にばらつきが生じないことを確認したうえで、5分間に設定した。

不溶化処理効果は溶出試験によって確認した。溶出試験は、土壤環境基準環境庁告示第46号“土壤中重金属等の溶出量分析方法”(1991)に準拠した。溶出試験によって得られた溶出液は工業用水試験方法(1998)および工業排水試験方法(1998)に則り前処理を行い、電気加熱原子吸光法により濃度の測定を行った。

Cr(VI)含有試験土壌に不溶化処理材としてセメント系固化材、特にスラグを含有する高炉セメントを使用した場合、セメントアルカリとスラグに含まれるFeS等によりCr(VI)がCr(III)に還元される可能性がある。溶出液濃度を電気加熱原子吸光法により測定した場合、測定濃度はCr(VI)とCr(III)を含めた全Cr濃度で表されることになる。本実験の一部の溶出液に対しては、セメント協会標準試験方法(CAJS-1981)に基づき前処理を行い、Cr(VI)および全Crの濃度をジフェニルカルバジド吸光光度法により測定した⁹⁾。この結果、Cr(VI)と全Cr濃度にほとんど差異がなかったことから、電子加熱原子吸光法により定量した溶出液濃度はCr(VI)濃度であったとして表すこととする。

表-1 CB混合材の配合

CB配合	高炉セメントB種	Na型ベントナイト	水
	(kg)	(kg)	
	250	60	1000
配合比	1	0.24	4

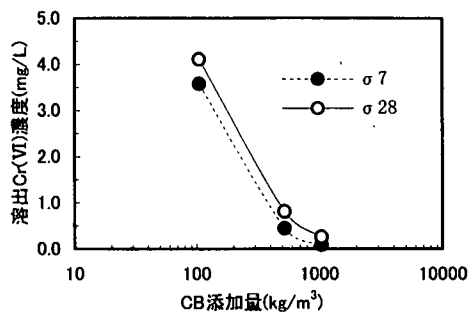


図-3 CB混合材を用いたCr(VI)含有試験土壌の不溶化処理

表-2 CB添加量に対するCr(VI)不溶化率

CB添加量 (kg/m³)	Cr(VI)不溶化率(%)	
	σ ₇	σ ₂₈
105	21.4	9.8
524	89.7	81.1
1,048	97.7	93.5

(2) CB混合材による不溶化効果

a) CB混合材

CB混合材の配合は、深層機械攪拌工法における混合材の圧送を考慮してファンネル粘度25秒以内となるように、高炉セメントB種250kgに対してNa型ベントナイト60kg、水道水1000kgとした(表-1)。このとき、見掛け比重は1.48であった。また、CB混合材は、水道水にNa型ベントナイト、次に、高炉セメントB種を添加して調整した。各材料の添加の間には3分間の攪拌を行った。この操作手順は、Na型ベントナイトが十分に膨潤していない場合、高炉セメントを混入することによって生じるCaイオンとベントナイトのNa基が置換して、膨潤性の低いCa型ベントナイトへ変質することを防止するためである。

b) 実験結果および考察

図-3はCB混合材105、524および1,048kg/m³をCr(VI)含有試験土壌に添加したときのσ₇およびσ₂₈における溶出Cr(VI)濃度を示している。高炉セメントB種添加量は、それぞれ20、100および200kg/m³であった。また、CB混合材を添加しないときの初期溶出Cr(VI)濃度は4.63mg/Lであった。この結果、CB105kg/m³の添加では、溶出Cr(VI)濃度がσ₇で3.58mg/Lを示し不溶化効果があり認められなかったが、CBが524および1,048kg/m³の添加では、溶出Cr(VI)濃度は、それぞれ0.44と0.09mg/Lであり、CB添加量の増加に伴う溶出濃度の減少が確認された。また、σ₇よりσ₂₈の溶出Cr(VI)濃度が高く、材令経

表-3 CSAと高炉セメントB種の化学組成(単位:%)

	lg-loss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	計
CSA	1.0	1.4	4.0	10.0	1.2	52.5	0.6	28.3	99.0
高炉セメントB種	0.8	0.3	26.2	10.9	2.6	53.6	3.2	2.1	100.0

過による再溶出が確認された。

Cr(VI)溶出試験系中の実質的なCr(VI)濃度は、CB添加量に比例して希釈され減少する。初期溶出Cr(VI)濃度4.63mg/Lは、CB混合材105, 524および1,048kg/m³添加したとき、希釈により、それぞれ、4.56, 4.29 および3.99mg/Lとなる。この希釈効果を除いたCB混合材によるCr(VI)不溶化率を表-2に示す。この結果、 σ_{28} におけるCr(VI)不溶化率は、CB添加量105, 528および1,048kg/m³で9.8, 81.1 および93.5%を示した。また、 σ_{28} と σ_7 のCr(VI)不溶化率の差分で表される再溶出率(以下、再溶出率という)はCB添加量105, 528および1,048kg/m³で11.6, 8.6 および4.2%となりCB添加量の増加により減少することが確認された。

CB混合材によるCr(VI)の不溶化は、高炉セメントB種の水和反応により生成したC-S-Hへの吸着、アルミン酸三石灰水和物(エトリンガイト、モノサルフェート水和物)とのイオン交換、そして、水和物の形成に伴い緻密化したセメントマトリックス中への封じ込めが要因として挙げられる⁶⁾。セメント系固硬化材は水と接触後、水和反応によりC-S-H, Ca(OH)₂, エトリンガイト、モノサルフェート水和物などの水和物を生成するが、これらの水和物は時間経過とともに生成・消失を繰り返すことが知られてきた⁷⁾。特に、アルミン酸三石灰水和物のエトリンガイトは、材令14日(以下、 σ_{14} という)付近を境にして、その一部がモノサルフェート水和物、さらに二水石膏へと変化するとされている⁸⁾。また、CB混合材の主材である高炉セメントB種は、スラグから溶出したCa, Al, SiがC-S-Hおよびモノサルフェート水和物の生成に寄与することで、内部構造が緻密化するとされている⁹⁾。これらのことから、CB添加量の増加に伴う溶出Cr(VI)濃度の減少は、水和物が安定していること、材令経過に伴い内部構造が緻密化することなどの理由から、C-S-Hへの吸着およびセメントマトリックス中への封じ込めによるものと推察される。また、材令経過に伴うCr(VI)の再溶出は、エトリンガイトが σ_{14} 付近で消失するような不安定な水和物であるため、エトリンガイトの消失により生じたかのようにも見えたが、後に示す実験結果よりその可能性は否定された。

(3) エトリンガイト生成促進材による不溶化効果

CB混合材によるCr(VI)の不溶化において、材令経過に伴う再溶出の要因にエトリンガイトの消失を挙げた。エトリンガイトの消失は、水和反応過程でセメント中のSO₃の欠乏により生じる¹⁰⁾。 σ_{14} 付近を境に消失する不安定なエトリンガイトを、CBに生成促進材を加えることにより長期間

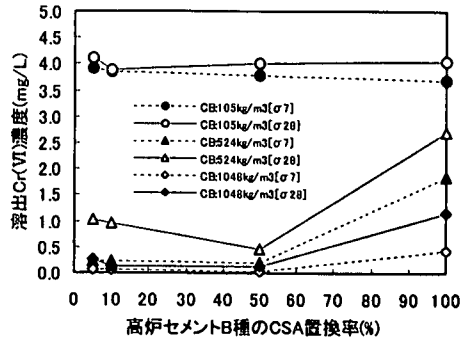


図-4 高炉セメントB種のCSA置換によるCr(VI)不溶化処理

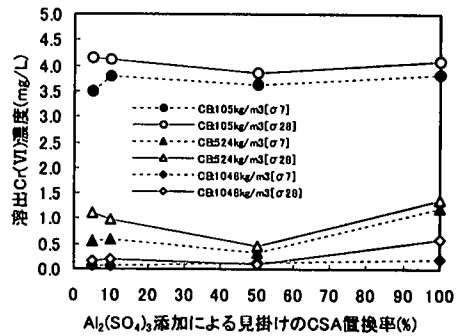


図-5 Al₂(SO₄)₃添加によるCr(VI)不溶化処理

安定な水和物とすることを試みた。このことから、エトリンガイトの存在がCr(VI)不溶化の促進要因であるか否かを検討した。

a) エトリンガイト生成促進材

3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·32H₂Oの組成式で示されるエトリンガイトは、基本的にSO₃をセメントに添加することで生成量が増加する。エトリンガイト生成促進材には、セメントの化学組成に類似したCaO, SO₃, Al₂O₃を主成分とした粉末材料(以下、CSAという)と液状のAl₂(SO₄)₃を使用した。CSAおよび高炉セメントB種の化学組成は表-3に示すように、CSAは高炉セメントB種と比較してSiO₂が少なく、SO₃の含有率が高い材料である。

b) 実験および考察

CSAはCB混合材の高炉セメントB種に対して、重量比で5, 10, 50, 100%置換(以下、CSA置換率という)することで添加した。また、Al₂(SO₄)₃は、CSA置換率5, 10, 50, 100%のCB混合材と比較し、SO₃量が等しくなるように添加した。このとき、SO₃量が等しい点から、Al₂(SO₄)₃添加量も見掛けのCSA置換率として表す。図-4はCB混合材のCSAと高炉セメントB種の置換率を変化させたときの溶出Cr(VI)濃度を示している。CB添加量105kg/m³では、溶出Cr(VI)濃度は3.69~4.12mg/Lであり、CSA置換率によって大きな差は認められなかった。しかし、CB添加量524kg/m³と1,048kg/m³とはCSA置換率が0~50%

表-4 希釈効果を除いた Cr(VI)不溶化率 [CSA 置換]

CB添加量 (kg/m ³)	CSA置換率 (%)	Cr(VI)不溶化率(%)	
		σ_7	σ_{28}
105	5	14.2	9.6
	10	15.7	14.6
	50	17.3	12.0
	100	19.0	10.9
524	5	94.9	76.2
	10	94.4	77.6
	50	95.3	89.0
	100	57.3	36.8
1,048	5	98.0	93.5
	10	98.0	96.5
	50	99.5	97.0
	100	89.5	71.4

表-5 希釈効果を除いた Cr(VI)不溶化率 [Al₂(SO₄)₃ 添加]

CB添加量 (kg/m ³)	見掛けのCSA置換率 (%)	Cr(VI)不溶化率(%)	
		σ_7	σ_{28}
105	5	23.0	8.7
	10	17.0	9.6
	50	20.3	15.1
	100	16.0	10.5
524	5	86.9	74.3
	10	86.5	76.9
	50	92.5	89.0
	100	71.5	68.3
1,048	5	98.7	95.7
	10	98.7	95.2
	50	96.7	97.2
	100	95.5	85.5

で溶出 Cr(VI)濃度に大きな差異はなく、CSA 置換率が 50%を超えると溶出 Cr(VI)濃度の増加が確認され、CSA による Cr(VI)不溶化効果の向上にはならなかった。また、 σ_7 より σ_{28} の溶出 Cr(VI)濃度が高く、Cr(VI)の再溶出が確認された。図-5 は Al₂(SO₄)₃ 添加によりエトリンガイトを生成した CB 混合材による Cr(VI)不溶化処理の結果である。 σ_7 より σ_{28} の溶出 Cr(VI)濃度が高く、Cr(VI)の再溶出傾向は図-4 と同様であり、Cr(VI)不溶化効果の向上は認められなかった。表-4、表-5 に希釈効果を除いた Cr(VI)不溶化率を示す。CB 添加量 524 および 1,048kg/m³ の CSA 置換率 50%では、再溶出率が 6.3 および 2.5%を示した。また、Al₂(SO₄)₃ 添加による見掛けの CSA 置換率 50%では CB 添加量 524kg/m³ で再溶出率 3.5%となり、1,048kg/m³ では 0.5%の不溶化率の向上が認められた。表-2 に示した CB 混合材 524 および 1,048kg/m³ の再溶出率 8.6 および 4.2% に比べて、CSA、Al₂(SO₄)₃ の効果は微量であり、有効であると判断できるものではなかった。

以上の結果、エトリンガイトの生成量を増加させ、安定化させても Cr(VI)の再溶出が認められたことから、Cr(VI)の再溶出はエトリンガイトの消失により生じたものではないと判断された。これより、エトリンガイトのイオン交換作用が、CB 混合材による Cr(VI)不溶化に占める割合は小さいことが判明した。CB 混合材添加量の増加に伴い溶出 Cr(VI)濃度が大幅に減少し、Cr(VI)不溶化率が増加することから、CB 混合材による Cr(VI)の不溶化は、セメントマトリックス中への封じ込めの割合が大きいと推察された。

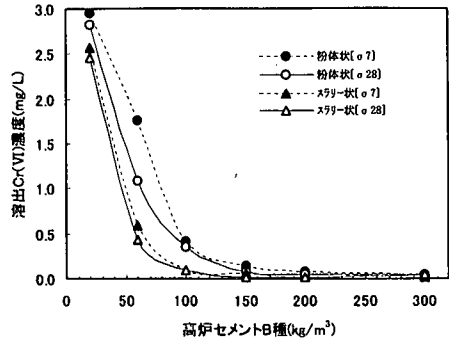


図-6 高炉セメント B 種を使用した不溶化処理

(4) 高炉セメント B 種による不溶化効果

a) 高炉セメント B 種

CB 混合材による Cr(VI)不溶化処理は、セメントマトリックスによる封じ込め効果の割合が大きいと推察された。このことから、CB 混合材としてではなく、不溶化処理材として高炉セメント B 種を単体で使用し、不溶化処理効果の確認を試みた。高炉セメント B 種は、含有スラグの鉄系化合物、アルミニウム系化合物が水和反応において微細なセメント水和物を形成するため内部構造が緻密化する⁹⁾。これより、セメントマトリックスによる Cr(VI)の封じ込め効果が大きいと推察した。深層機械攪拌工法ではコンプレッサーからの吐出とポンプ圧送の点から、セメント系固化材を粉体状あるいはスラリー状で用いている。したがって、高炉セメント B 種も粉体状またはスラリー状で使用した。深層機械攪拌工法におけるスラリー状の高炉セメント B 種は、水セメント比(W/C)として 80~120%の範囲で使用されていることから、本研究ではスラリー状高炉セメント B 種を W/C として 100%で使用した。

b) 実験および考察

この実験での土壌の Cr(VI)含有量は 50mg/kg (dry-base) とした。図-6 は Cr(VI)含有試験土壌に高炉セメント B 種を粉体状またはスラリー状で、それぞれ 20~300kg/m³ 添加したときの σ_7 および σ_{28} における溶出 Cr(VI)濃度の測定結果を示している。この結果、粉体状よりもスラリー状で添加する場合の方が、溶出 Cr(VI)濃度が低いこと、溶出 Cr(VI)濃度が σ_7 よりも σ_{28} で低く、セメント水和反応が進行するに従って不溶化が高まることが確認された。また、添加 100kg/m³ 以下では、粉体状、スラリー状ともに添加量に対する溶出 Cr(VI)濃度が大きく減少しており、添加 100kg/m³ を越えると溶出 Cr(VI)濃度は余り減少しなかった。これより、添加 100kg/m³ を境にして、添加量の多寡により Cr(VI)の不溶化効果が大きく異なることが確認された。しかし、粉体状で 300kg/m³ となると、溶出 Cr(VI)濃度は、 σ_7 と σ_{28} でそれぞれ 0.05、0.04 mg/L となり、スラリー状で 200kg/m³ となると、ともに 0.02mg/L まで

表-6 希釈効果を除いたCr(VI)不溶化率〔7号珪砂〕

添加量 (kg/m ³)	Cr(VI)不溶化率(%)			
	粉体状		スラリー状	
	σ_7	σ_{28}	σ_7	σ_{28}
20	35.2	38.1	43.8	46.2
60	60.5	75.5	86.8	90.4
100	90.3	92.0	97.7	97.9
150	96.4	98.1	98.3	99.5
200	98.0	98.8	99.5	99.5
300	98.7	99.0	99.5	99.5

に減少し、土壤環境基準値(Cr(VI):0.05mg/L)またはそれを下回る不溶化が確認された。したがって、不溶化処理材として、高炉セメントB種をスラリー状で用いることが有効であることが見出された。表-6に示したCr(VI)不溶化率ではスラリー状200kg/m³以上で σ_7 、 σ_{28} ともに不溶化率99.5%を示し、材令初期から安定した不溶化効果が得られることが確認された。後述する3.(2).a)土粒子および不溶化処理材の N_p による評価では、粉体状より、スラリー状で攪拌による混合度が高いことが確認された。このことから、W/C=100%に調整したスラリー状では移動媒体が多量に存在し、セメント粒子のCr(VI)含有試験土壤への分散性が高いため、粉体状より不溶化効果が高いと推察された。

(5) 7号珪砂以外のCr(VI)含有試験土壤に対する高炉セメントB種の不溶化効果

Cr(VI)吸着性が低い7号珪砂をCr(VI)含有試験土壤として用い、高炉セメントB種単体を不溶化処理材として用いたところ、土壤環境基準値を下回る不溶化効果が確認された。次に、異なる土壤についても適用されるかを確認することとした。ここではCr(VI)含有試験土壤として、細粒分を調整した砂質土および有機質土を選定した。

a) 細粒分調整砂質土壤

Cr(VI)含有の細粒分調整砂質土壤は、木更津砂に木節粘土を混入し細粒分を10, 30, 50%に調整することにより作製した。含水比調整は、作製した細粒分10, 30, 50%砂質土の最大乾燥密度を求め、そのときの空隙に水が満たされることを条件として行った。この操作は、細粒分調整に使用した木節粘土の吸水が瞬時に完了しない可能性を考慮したものである。最終的な細粒分調整砂質土壤の含水比は、細粒分10および30%の砂質土では24%、細粒分50%の砂質土では25%を示し、各試料間の含水比に大きな相違はなかった。また、見掛け比重は、細粒分10%砂質土で1.99、30%砂質土で1.96、50%砂質土では1.92を示した。Cr(VI)含有量は、7号珪砂のときと同様、50mg/kg(dry-base)に調整した。初期溶出Cr(VI)濃度は、細粒分10, 30および50%の場合、それぞれ4.32, 4.47および4.46mg/Lであり、ほぼ同じであった。

b) 有機質土壤

Cr(VI)含有の有機質土壤材料には千葉県四街道市物

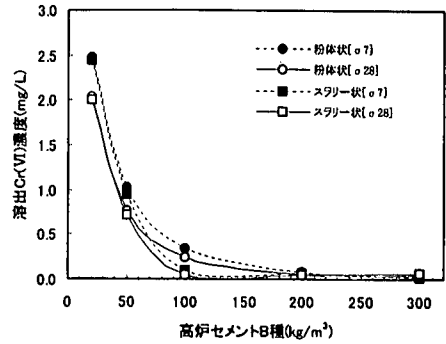


図-7 細粒分10%の砂質系Cr(VI)含有試験土壤の不溶化処理

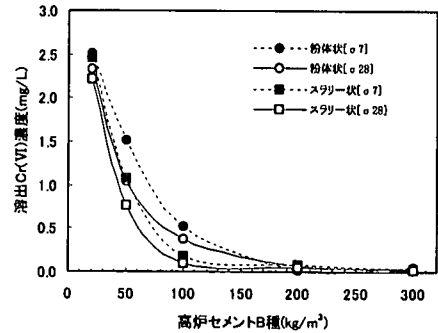


図-8 細粒分30%の砂質系Cr(VI)含有試験土壤の不溶化処理

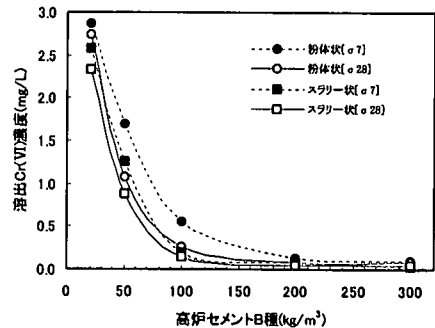


図-9 細粒分50%の砂質系Cr(VI)含有試験土壤の不溶化処理

井で採取した黒ぼく土を使用した。採取した黒ぼく土は、含水比327%であったことから、最終的な含水比を350%に調整した。見掛け比重は1.16であった。この黒ぼく土土壤のpHは5.6であり、弱酸性を示していた。Cr(VI)含有量50mg/kg(dry-base)のとき、初期溶出Cr(VI)濃度が1.36mg/Lとなり、Cr(VI)吸着による溶出量の減少が確認された。このことから、Cr(VI)による吸着等温試験を行い、その吸着特性は次式のFreundlich型吸着等温線を示された。

$$q_e = 0.25C_e^{0.12} \quad (1)$$

ここに、 q_e :平衡吸着量(mg/g)、 C_e :平衡吸着濃度(mg/L)

表-7 希釈効果を除いたCr(VI)不溶化率

[細粒分調整砂質土壌]

細粒分率 (%)	添加量 (kg/m ³)	Cr(VI)不溶化率(%)			
		粉体状		スラリー状	
		σ_7	σ_{28}	σ_7	σ_{28}
10	20	41.8	52.2	42.8	53.1
	50	75.4	81.8	77.5	83.0
	100	91.4	94.1	97.6	98.9
	200	97.7	98.6	98.4	98.9
	300	99.0	98.8	99.7	98.3
30	20	43.1	47.2	44.0	49.9
	50	64.9	75.7	75.3	82.2
	100	87.6	91.2	95.7	97.6
	200	99.5	98.3	98.1	98.7
	300	98.7	98.9	98.9	99.5
50	20	34.8	37.7	41.3	47.0
	50	60.8	74.9	70.8	79.6
	100	86.8	93.8	95.2	96.4
	200	96.6	97.8	97.8	98.7
	300	97.6	97.8	99.0	98.8

そして、初期溶出Cr(VI)濃度が5mg/LとなるCr(VI)含有量を、式(1)と操作線により算出した結果、Cr(VI)含有量は352mg/kg(dry-base)となった。Cr(VI)含有量352mg/kg(dry-base)を添加させた有機質土壌の初期溶出Cr(VI)濃度は4.11mg/Lを示し5mg/Lより小さな値を示したが、砂質系土壌の初期溶出Cr(VI)濃度は4.32~4.62mg/Lであり、比較は可能であると考えた。

c) 実験および考察

図-7、図-8、図-9は細粒分を10、30および50%に調整した砂質系Cr(VI)含有試験土壌に対し、それぞれ高炉セメントB種を粉体状およびスラリー状で、20~300kg/m³添加したときの σ_7 および σ_{28} における溶出Cr(VI)濃度を示している。標準として用いた7号珪砂によるCr(VI)含有試験土壌と同様、粉体状、スラリー状ともに材令経過に伴って溶出Cr(VI)濃度は減少した。また、粉体状よりスラリー状で用いた方が効果的であった。細粒分の増加に従い、溶出Cr(VI)濃度が増加することも確認された。高炉セメントB種添加による希釈効果を除いたCr(VI)溶出率を表-7に示す。これより、特に20~100kg/m³の低配合において細粒分の増加に伴うCr(VI)溶出の傾向が大きいことが確認された。粉体状では、細粒分10、30%の砂質土、スラリー状では、10、30および50%の砂質土に対して、高炉セメントB種300kg/m³添加で行った不溶化では土壤環境基準値を下回る効果(0.05mg/Lまたはそれ以下)が確認された。しかし、粉体状使用で細粒分50%の砂質土は300kg/m³添加で土壤環境基準値を下回る効果(0.08mg/Lまたはそれ以上)が認められなかった。このような細粒分増加による溶出Cr(VI)濃度の増加は、特に20~100kg/m³の低配合において顕著に認められることから、細粒分がセメント硬化を阻害することによるセメントマトリックス中への封じ込め効果の減少もしくは土粒子が負に帯電しているためと推察される¹¹⁾。細粒分の増加により負電荷が増加し、陰イオンで存在するCrO₄²⁻に電氣的反発力が働き溶出量が増加したと考えられる。

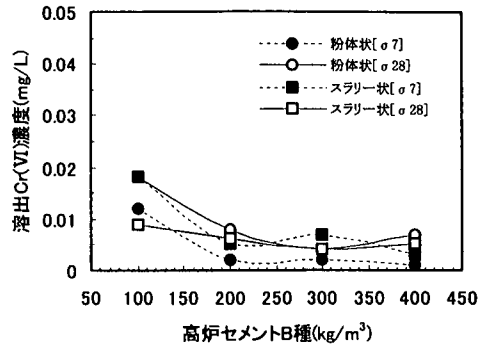


図-10 有機質系Cr(VI)含有試験土壌の不溶化処理

表-8 希釈効果を除いたCr(VI)不溶化率 [有機質土壌]

添加量 (kg/m ³)	Cr(VI)不溶化率(%)			
	粉体状		スラリー状	
	σ_7	σ_{28}	σ_7	σ_{28}
100	99.7	99.5	99.5	99.8
200	99.9	99.8	99.9	99.8
300	99.9	99.9	99.8	99.9
400	99.9	99.8	99.9	99.8

黒ぼく土を使用した有機質系Cr(VI)含有試験土壌に対する高炉セメントB種のCr(VI)不溶化効果を図-10に示す。有機質系土壌はセメントによる硬化が乏しいために、セメントマトリックス中の封じ込め効果が小さく、Cr(VI)不溶化効果は期待できないとみられた。しかし、高炉セメントB種100kg/m³添加においても土壤環境基準値を下回る不溶化効果(0.018mg/Lまたはそれ以下)が確認された。粉体状とスラリー状の添加形態の違いでは、砂質系試験土壌と比較して、溶出Cr(VI)濃度に大きな差は認められなかった。また、表-8に示したCr(VI)不溶化率においても粉体状、スラリー状に大きな差異は認められず、 σ_7 、 σ_{28} ともに200kg/m³以上で99.8%を上回る不溶化効果が確認された。

3. 攪拌による混合度判定

全量掘削して地上にて処理する場合とは異なり、深層機械攪拌工法によってCr(VI)汚染土壌を原位置不溶化処理する場合には、Cr(VI)汚染土壌と不溶化処理材の混合状態を可視的に評価することができないことから、不均一な攪拌混合を生じさせない最適な操作条件を設定する必要がある。そこで、土壤環境基準値を下回る効果を生じる不溶化処理材を加えたうえで、攪拌による混合度が不溶化処理に及ぼす影響を判定する方法を検討することとした。

(1) 実験方法、実験条件及び混合度の指標と評価

a) 実験装置および実験方法

混合度の異なる試料を得るために、図-11に示す模擬

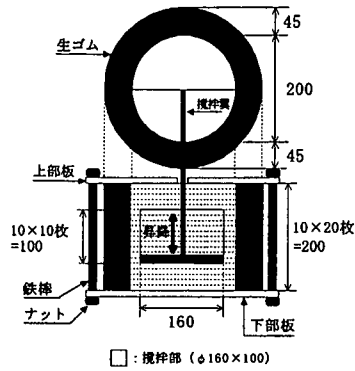


図-11 模擬土槽攪拌のための実験装置(単位:mm)

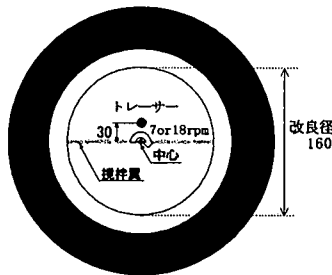


図-12 トレーサー, 不溶化処理材挿入位置(単位:mm)

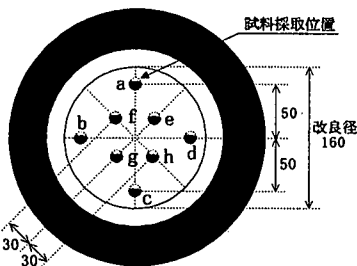
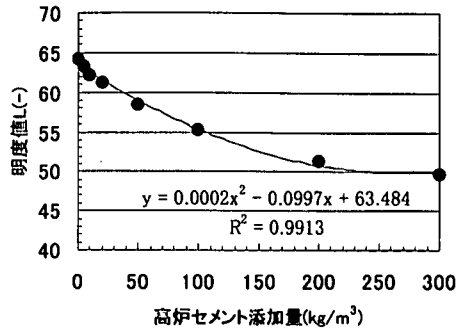


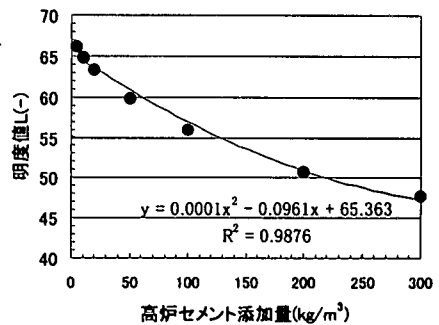
図-13 トレーサー, 不溶化処理材の試料採取位置(単位:mm)

土槽攪拌装置を作製した。この装置は、外径 290mm、内径 200mm、厚さ 10mm のドーナツ状の中空気生ゴムを 20 枚重ね合わせ、中空部に土壤材料と攪拌翼をそれぞれ充填・挿入した模擬土槽である。この土槽は間隙率 38% となるように生ゴム 5 枚 (50mm) ずつ 4 回に分けて充填した。攪拌翼には長さ 160mm、幅 15mm のステンレス製平板翼を使用した。平板翼は模擬土槽作製時に土槽底部から 50mm の位置に設置した。この土槽ができた段階で、上部板をかぶせ正確に 200mm の高さとなるよう調整した。生ゴムには、攪拌中、水分の放出を防止する目的でシリコングリスを塗布した。攪拌翼を回転させる動力には単相誘導電動機を使用し、攪拌翼が攪拌部上下 100mm を一定速度で昇降できるように取り付けた。攪拌による混合度が Cr(VI)溶出量に与える影響を知るうえで、土壤材料と不溶



(註) 図中の y は明度値(-), x は高炉セメント添加量(kg/m³)を示す。

図-14 高炉セメント B 種添加量と明度値の関係
【粉状の場合】



(註) 図中の y は明度値(-), x は高炉セメント添加量(kg/m³)を示す。

図-15 高炉セメント B 種添加量と明度値の関係
【スラリー状の場合】

化処理材の混合度をできるだけ定量的に表すことを試みた。そこで、土壤材料の混合過程が色調で追跡でき、加えられたエネルギーに応じて分散の度合いが異なるような凝集性酸化鉄(トダカラー:140ED)をトレーサーとして使用した。このトレーサーは土粒子に対する凝集性が高いため、加えられたエネルギーに応じて変化する土粒子の混合度を表すことができる^{12,13)}。トレーサーは平均粒径 0.47 μm の暗赤色酸化鉄であり、攪拌の進行に伴って、トレーサーが付着した土粒子は混合され攪拌部は均質な暗赤色へと収束してゆく。この混合過程において変化する色調を明度値として捕らえ、任意の攪拌混合における混合度を表すこととした。明度値の測定には、ハロゲンランプを光源とした積分球式の測色色差計を用い、その反射光を測定し、CIE(国際照明委員会)算出法により明度値を求めた。

トレーサーは、攪拌開始前、図-12 に示すように攪拌翼から 30mm 位置に点突出を想定して挿入した。所定の攪拌を終えた状態で、上部板を取り外し、土壌上部の攪拌されていない層 50mm の土壤材料を取り除いた。攪拌部が

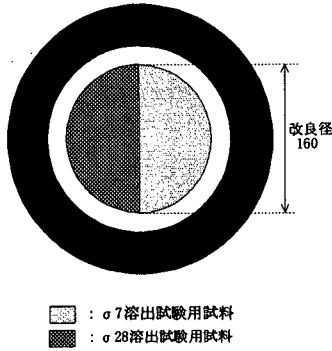


図-16 試料採取位置[Cr(VI)不溶化処理]

露出したら、深さ10mmあたり(生ゴム1枚あたり)8個の試料を図-13に示した(a~h)位置にて採取した。この試料採取の操作を、トレーサーを加えて攪拌されている部分100mmに対して繰り返して行って、一度の攪拌混合実験で計80個の試料を採取して、それぞれ明度値を測定した。不溶化処理材として使用した高炉セメントB種の場合も同様に、明度値の測定により混合度を表すこととした。事前に、高炉セメントB種含有量の明度値による測定、評価が可能であるか否かを確認した結果を図-14および図-15に示す。粉体状、スラリー状ともに添加量0~300kg/m³において2次式で回帰され、それぞれ、重相関係数0.9以上を示したことから、高炉セメントB種含有量は明度値によって表わせることが判明した。図-14および図-15は検量線として用い、実験精度の管理指標として使用した。

攪拌による混合度の相違がCr(VI)溶出量に与える影響に関する実験では、図-11に示した攪拌装置の土槽内にCr(VI)含有試験土壌を充填し、粉体状またはスラリー状の高炉セメントB種を加えて攪拌した。図-16に示すように、攪拌部10mmごとに、1/2ずつの試料をσ₇およびσ₂₈溶出試験用試料として、不攪乱状態で採取した。試料は、20℃恒温室にて養生を行った。養生後、環境庁告示第46号に準拠して溶出試験を行い、溶出Cr(VI)濃度を測定した。

b) 実験条件

Cr(VI)含有試験土壌材料には前記2.にて標準とした7号珪砂を使用した。この際、含水比を23%に調整し、模擬土層の間隙率は38%とした。また、不溶化処理材には高炉セメントB種を使用した。さらに、不均一な攪拌による影響が顕著に現れるようにするために、粉体状で300kg/m³、スラリー状で200kg/m³の配合で実験を行うこととした。攪拌による土粒子および不溶化処理材の挙動を把握する実験では、試験用土壌材料にCr(VI)を添加していない。他方、混合度がCr(VI)の溶出に与える影響を把握する実験では、Cr(VI)含有量が50mg/kg(dry-base)となるよう添加した。また、土槽内での攪拌速度は7rpmと18rpmの2

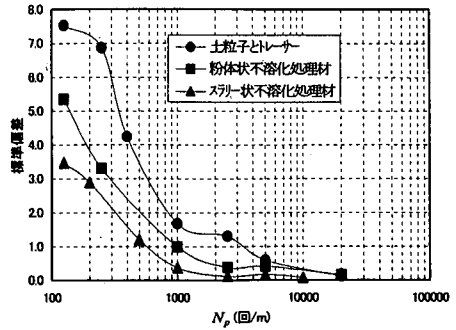


図-17 明度値の標準偏差と羽切り回数(N_p)

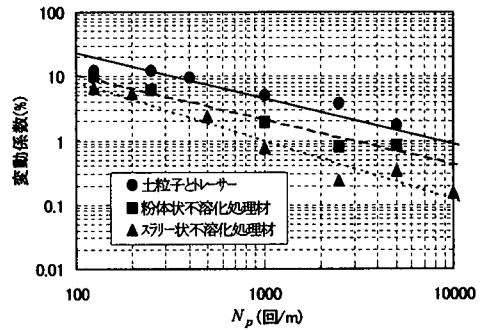


図-18 明度値の変動係数と羽切り回数(N_p)

種類とし、昇降回数の増減により混合度が異なるように操作を行って、終了後に溶出試験用試料を採取した。

c) 混合度の指標と評価方法

深層機械攪拌工法は、その重要性から実機や研究室レベルのモデル機を用い、攪拌効率に関する研究がすでに行われてきた¹⁰。このとき、攪拌効率は羽切り回数(N_p)で管理されてきた。N_pは攪拌翼が固化材を添加した改良対象土壌の任意の1m区間を下降および上昇する間の、羽根の回転数の総和を示し、式(2)で表される。

$$N_p = \frac{2 \times m \times n \times E}{V} \quad (2)$$

ここに、

- N_p : 羽切り回数 (回/m)
- m : 羽根枚数 (-)
- n : 羽根の回転数 (回/m)
- E : 昇降回数 (-)
- V : 貫入速度 (m/min)

本研究でも式(2)を使用してN_pを算出している。不溶化処理材(粉体状、スラリー状)との混合度を表す実験では、任意のN_pにより作製された試料の明度値に対し、標準偏差を算出し指標とすることで混合度を求めた。しかし、トレ

表-9 不溶化処理材として粉体状高炉セメントB種 300kg/m³を用いたときの N_p(回/m)と溶出Cr(VI)濃度(mg/L)

N _p	125			500			1000			2500			10000			20000		
	σ7	σ28	判定	σ7	σ28	判定	σ7	σ28	判定	σ7	σ28	判定	σ7	σ28	判定	σ7	σ28	判定
0~10	0.048	0.084		0.054	0.093		0.095	0.053		0.038	0.046	○	0.039	0.046	○	0.048	0.038	○
10~20	0.416	0.023		0.063	0.049		0.058	0.035		0.045	0.043	○	0.044	0.034	○	0.041	0.038	○
20~30	0.106	0.011		0.034	0.037		0.048	0.026	○	0.046	0.043	○	0.030	0.048	○	0.047	0.044	○
30~40	0.101	0.064		0.043	0.033	○	0.046	0.020		0.046	0.043	○	0.049	0.050	○	0.045	0.026	○
40~50	0.068	0.032		0.104	0.047		0.063	0.032		0.047	0.042	○	0.041	0.026	○	0.039	0.027	○
50~60	0.057	0.041		0.036	0.029	○	0.034	0.048	○	0.048	0.035	○	0.037	0.029	○	0.039	0.033	○
60~70	0.094	0.057		0.124	0.031		0.035	0.036	○	0.050	0.041	○	0.050	0.038	○	0.026	0.021	○
70~80	0.073	0.019		0.039	0.031	○	0.057	0.013		0.048	0.021	○	0.048	0.022	○	0.028	0.019	○
80~90	0.081	0.011		0.133	0.043		0.041	0.025	○	0.050	0.034	○	0.043	0.045	○	0.036	0.028	○
90~100	0.042	0.053		0.104	0.044		0.052	0.013		0.048	0.043	○	0.031	0.046	○	0.044	0.039	○

※表中○は、σ₇およびσ₂₈ともに土壌環境基準値もしくはそれを下回る溶出Cr(VI)濃度を示す

表-10 不溶化処理材としてスラリー状高炉セメントB種 200kg/m³を用いたときの N_p(回/m)と溶出Cr(VI)濃度(mg/L)

N _p	125			500			1000			2500			10000			20000		
	σ7	σ28	判定	σ7	σ28	判定	σ7	σ28	判定	σ7	σ28	判定	σ7	σ28	判定	σ7	σ28	判定
0~10	0.061	0.031		0.011	0.004	○	0.002	0.003	○	0.029	0.040	○	0.029	0.023	○	0.043	0.007	○
10~20	0.062	0.027		0.014	0.009	○	0.028	0.003	○	0.026	0.035	○	0.027	0.022	○	0.032	0.007	○
20~30	0.054	0.036		0.014	0.011	○	0.030	0.012	○	0.034	0.050	○	0.024	0.028	○	0.032	0.009	○
30~40	0.064	0.028		0.016	0.010	○	0.030	0.014	○	0.049	0.033	○	0.024	0.025	○	0.023	0.007	○
40~50	0.062	0.024		0.021	0.007	○	0.023	0.005	○	0.034	0.049	○	0.050	0.021	○	0.020	0.010	○
50~60	0.055	0.034		0.022	0.006	○	0.030	0.007	○	0.034	0.031	○	0.050	0.023	○	0.022	0.007	○
60~70	0.040	0.038	○	0.024	0.010	○	0.030	0.007	○	0.038	0.035	○	0.045	0.023	○	0.022	0.007	○
70~80	0.051	0.050		0.033	0.012	○	0.028	0.010	○	0.033	0.040	○	0.047	0.021	○	0.023	0.008	○
80~90	0.042	0.025	○	0.046	0.026	○	0.026	0.010	○	0.046	0.040	○	0.043	0.023	○	0.016	0.008	○
90~100	0.069	0.057		0.029	0.018	○	0.020	0.017	○	0.021	0.029	○	0.037	0.026	○	0.023	0.015	○

※表中○は、σ₇およびσ₂₈ともに土壌環境基準値もしくはそれを下回る溶出Cr(VI)濃度を示す

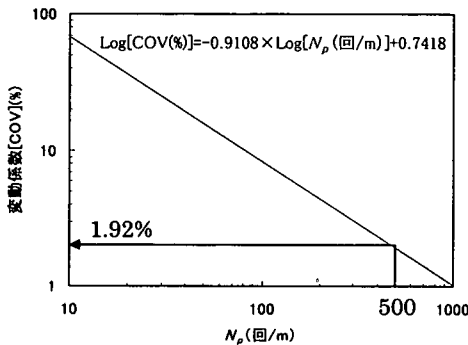


図-19 混合度の変動係数と N_p 回帰線(スラリー状の場合)

サーと不溶化処理材をそれぞれ混合したときには、完全混合時の収束明度値が異なることから、明度値の変動係数を求め混合度とした。これを指標とすることにより任意の N_p と、それに対する混合度の変動係数の関係式が導き出され、これより、試験用土壌材料、不溶化処理材、それぞれの比較が可能となる。

次に、Cr(VI)含有試験土壌と、不溶化処理材を任意の N_p に対して攪拌混合したのち、採取したいずれの試料についても溶出試験を行った結果、土壌環境基準値を下回るときの N_p を求めた。この N_p に対する変動係数を、不溶化処理材の混合度を表す実験で導いた関係式から逆算し、原位置不溶化処理に必要な混合度を求めた。

(2) 実験結果および考察

a) 土粒子および不溶化処理材の N_p による評価

前述 2.(4) で土壌環境基準を下回る不溶化処理効果が確認

された高炉セメント B 種粉体状 300kg/m³、スラリー状 200kg/m³ およびトレーサーを用い、任意の N_p に対する混合度を求め、不溶化処理材および土粒子の攪拌に伴う挙動を確認することとした。図-17 は N_p に対する混合度を、測定した明度値の標準偏差として表している。この結果、粉体状とスラリー状不溶化処理材添加率をそれぞれ、300kg/m³、200kg/m³ としたとき、およびトレーサーを添加し攪拌混合を行ったときには、N_p 1,000 回/m を境として標準偏差が安定することが確認された。トレーサーは試験用土壌材料の土粒子に付着することから、試験用土壌材料、不溶化処理材ともに攪拌に伴う混合度の進行は類似した挙動を示すことが確認された。

実測結果および検量線から算出した完全混合状態における明度値は、トレーサーで 32.0、不溶化処理材の粉体状 300kg/m³ で 51.6 およびスラリー状 200kg/m³ で 50.1 となり、一致しない。そこで、標準偏差の平均に対する相対割合で示される変動係数と N_p の関係を両対数グラフで図-18 に示し、土粒子とトレーサー、不溶化処理材の粉体状 300kg/m³ およびスラリー状 200kg/m³ の比較を行った。この結果、N_p に対しスラリー状、粉体状、土粒子の順に攪拌による混合度が高いことが確認された。この理由として、土粒子に対して高炉セメントB種の粒径が小さいこと、粉体状よりスラリー状は移動媒体が多量に存在することが挙げられる。Cr(VI)の不溶化処理に高炉セメントB種を使用した場合、粉体状よりスラリー状で使用する方が少量の添加で土壌環境基準値を下回る結果が得られたこともこの混合度の違いに関係していたと推察される。

b) 混合度がCr(VI)溶出に与える影響

表-9 および表-10 は、不溶化処理材として粉体状 300kg/m³およびスラリー状 200kg/m³を使用したときの N_p に対する σ_7 および σ_{28} における溶出 Cr(VI)濃度を示している。この結果から、攪拌部 100mm のいずれの試料を抽出しても土壤環境基準値を下回るには、粉体状で N_p 2,500 回/m 以上、スラリー状で N_p 500 回/m 以上の攪拌が必要であることが分かった。通常施工時の N_p は、各種深層機械攪拌工法、DJM(粉体状使用)で 275 回/m、CDM(スラリー状使用)で 350 回/m、RAS(スラリー状使用)で 450 回/m 程度であることを考慮すると、粉体状での N_p 2,500 回/m は現実的でない。他方、スラリー状での N_p 500 回/m は室内実験と実施工の違いがあることを考慮しても、可能性の高い数値であると考えられる。したがって、深層機械攪拌工法を利用し、汚染土壤の原位置処理を行う場合、高炉セメントB種は粉体状よりスラリー状で使用する方がより確実な処理が行えるといえる。さらに、スラリー状で Cr(VI)不溶化処理に必要な N_p 500 回/m における変動係数を、図-18 で示した変動係数と N_p の関係から逆算すると 1.92%となる(図-19 参照)。したがって、Cr(VI)による汚染土壤を、深層機械攪拌工法を使用し、スラリー状高炉セメント B 種で不溶化処理する場合の変動係数は 2 % を下回る攪拌を必要とすることが見出された。

スラリー状セメント系固化材を使用し、RASコラム機で実地盤を改良した後、改良体のコアサンプルをボーリングにより採取し明度値の変動係数を調査した。このとき、 N_p は 450 回/m、高炉セメントB種配合量は 150kg/m³であった。この結果、均質土層から採取した試料の明度値変動係数は、シルト層で 1.5%、砂層で 1.0%を示した。よって、地盤改良で行われている現状の施工方法で、Cr(VI)汚染土壤を適切に処理することが可能であることが見出された。

4. まとめ

- (1) スラグ含有量の異なるセメント系固化材を用い、重金属類の不溶化を行った結果、As を除いてスラグ含有量 65 %で最も効果的であった。
- (2) 高炉セメント B 種硬化体と CB 硬化体について浸漬実験を行ったところ、初期 Cr(VI)濃度 100mg/L が浸漬 170 時間には、高炉セメント B 種硬化体で 43mg/L、CB 硬化体で 5mg/L 以下を示し、CB 硬化体は Cr(VI)吸着能力に優れていることが確認された。
- (3) CB 混合材を Cr(VI)含有試験土壌の不溶化処理材とした場合、CB 添加量の増加に伴い溶出濃度の減少が確認された。しかし、材令経過に伴い再溶出も確認された。
- (4) CSA または $Al_2(SO_4)_3$ を CB 混合材に加え、エトリンガイトの生成量増加及び長期安定化による再溶出の抑制を試みた実験では、CSA、 $Al_2(SO_4)_3$ 共に再溶出抑

制及び不溶化効果の大きな向上は認められず、エトリンガイトの Cr(VI)不溶化への寄与は小さいことが判明した。

- (5) 高炉セメント B 種単体を 7 号珪砂中の Cr(VI)の不溶化処理材に用いた場合、粉体状 300kg/m³ 添加およびスラリー状 200kg/m³ 添加では共に土壤環境基準値もしくはそれを下回る不溶化効果が確認された。また、粉体よりスラリー状で用いることが有効であることも確認された。
- (6) 砂質系 Cr(VI)汚染土壤の高炉セメント B 種単体による不溶化では、細粒分の増加に伴い溶出 Cr(VI)濃度が増加した。また、有機質系 Cr(VI)汚染土壤の不溶化では、砂質系 Cr(VI)汚染土壤と比較して、高炉セメント B 種添加量を少なくして土壤環境基準値を下回る不溶化が確認された。
- (7) 模擬土槽実験により N_p に対する土粒子、不溶化処理材の混合度を調べた結果、 N_p に対する混合度はスラリー状高炉セメント B 種、粉体状高炉セメント B 種、土粒子の順に高いことが確認された。
- (8) Cr(VI)汚染土壤と高炉セメント B 種が均質に行きわたる不溶化処理は、粉体状高炉セメント B 種 300kg/m³ では N_p 2,500 回/m、スラリー状 200kg/m³ では N_p 500 回/m の攪拌が必要であった。模擬土槽と実機の違いを考慮しても粉体状の N_p 2,500 回/m は現実的でなく、高炉セメント B 種はスラリー状で用いることが有効であると判断された。
- (9) スラリー状高炉セメント B 種の N_p 500 回/m における変動係数を関係式から求めた結果、Cr(VI)汚染土壤と高炉セメント B 種は変動係数 2 % を下回る攪拌混合が必要であることが見出された。RAS コラム機で改良された実地盤のボーリングコアに対して、均質土層 vol.における明度値を測定し変動係数を求めた結果、シルト層で 1.5%、砂層で 1.0%を示し、現状の施工方法で、Cr(VI)汚染土壤と高炉セメント B 種が均質に行きわたる不溶化処理を行うことが可能であった。

参考文献

- 1) Kashiwaya, M., Deguchi, H., Ueoka, S., Iwasa, H. and Iio, M.: Laboratory Study on Dispersion Prevention of Dissolved Sexivalent Chromium in Groundwater by Cement-Bentonite Cut-off Barriers, Wat.Sci.Tec., Vol.34, No.7-8, pp.357-382, 1996.
- 2) 柏谷 衛, 上岡 誠一, 出口 浩, 岩佐 弘: クロム系廃棄物から流出する 6 価クロム化合物のセメント・ベントナイト系地中壁を用いた地下水汚染防止に関する実験的研究, 廃棄物学会論文誌別冊, Vol.8, No.2, pp.97-106, 1997.
- 3) 峠 和男, 漆原 和則, 光本 純, 藤井 研介: 六価クロム汚染土の不溶化処理工事, 土と基礎, Vol.47, No.10, Ser.No.501,

- pp.28-30, 1999.
- 4) Dimitrova, S.V.: Metal Sorption on Blast-Furnace Slag, *Wat. Res.*, Vol.30, No.1, pp.228-232, 1996.
 - 5) セメント協会編:標準試験方法(CAJS-1981), セメント協会, pp.112-115, 1981.
 - 6) 島岡 隆行, 花島 正孝:セメント固化による安定化飛灰の埋立処分特性, *廃棄物学会誌*, Vol.5, No.1, pp.32-45, 1994.
 - 7) セメント協会編:セメント科学, セメント協会, pp.46-53, 1993.
 - 8) 岡田 清, 六車 照:コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, pp.35-39, 1981.
 - 9) セメント協会編:セメント科学, セメント協会, pp.78-104, 1993.
 - 10) W.チェルニン, 徳根吉郎訳:セメント・コンクリート化学, 技報堂出版, pp.43-45, 1979.
 - 11) 土壌物理研究会編:土の物理学, 森北出版, pp.36-71, 1979.
 - 12) 大住 学, 下田正雄, 佐藤宗武, 岩倉由隆, 利根哲也, 宮南啓:攪拌工法における混合状態の評価方法に関する基礎研究, 第31回地盤工学会研究発表論文集, pp.91-92, 1997.
 - 13) 佐藤宗武, 山下貞彦, 吉田達守, 長谷川修嗣, 宮南啓:付着性微粉体を用いた粉体混合機の混合性能評価, *粉体工学会誌*, vol.30, No.6, pp.390-396, 1993.
 - 14) 中村正邦, 松沢 論, 松下正憲:深層混合処理工法における攪拌効率の向上についての研究, 第17回土質工学研究発表会論文集, pp.2585-2588, 1982.

(2000. 2. 17 受付)

STUDY ON A CONFINING TREATMENT IN SITU MIXED WITH CEMENT STABILIZER FOR HEXAVALENT CHROMIUM COMPOUND CONTAMINATED SOIL

Seiichi UEOKA and Mamoru KASHIWAYA

A laboratory study on confining treatment in situ for Cr(VI) compound contaminated soil by applying a deep mixing stabilization process was conducted using either slug-cement type B with sodium base bentonite(CB mixture) or slug-cement type B only. There were found that 50mg/kg(dry-base) of Cr(VI) contaminated sandy and organic soils could be kept lower than the established leaching concentrations by the environmental quality standard on soil by dosing 200kg/m³ and 100kg/m³ respectively of slug-cement type B, and the confining effect was recognized at slurry type superior to powder type. There was also found that the mixing efficiency of mixed slurry samples could estimate by measurement of lightness on affecting Cr(VI) leaching concentrations with the difference between strength of the mixing. It was required that the coefficient of variation on mixing efficiency was 2% or less for a most effective confining treatment, which the cement stabilizer can be distributed uniformly in Cr(VI) contaminated soil mass in situ.