

地盤改良におけるCO₂排出量と六価クロム溶出量を低減する改良手法の開発

諸 富 鉄之助 三 浦 俊 彦
井 出 一 貴

Development of Improvement Methods to Reduce CO₂ Emissions and Hexavalent Chromium Elution in Ground Improvement

Tetsunosuke Morotomi Toshihiko Miura
Kazuki Ide

Abstract

Recently, there has been a demand for reducing CO₂ emissions, and cements have a risk of eluting Cr (VI). In this study, we assumed two addition methods, powder addition and slurry addition, and set as a purpose of reducing CO₂ emissions and hexavalent chromium elution. For powder addition, we proposed a new cement. For slurry addition, the effect of the improvement method in reducing the amount of additive was evaluated. Consequently, we reduced the CO₂ emissions by 50% and reduced the amount of hexavalent chromium eluted to less than 20%. In the latter method, the CO₂ emission was reduced by approximately 20% by using a low-W/C cement slurry containing a fluidizing agent, and the amount of hexavalent chromium elution was approximately the same.

概 要

昨今は、工事に伴うCO₂排出量の削減が求められている。また地盤改良に用いられるセメント系固化材は、関東ロームのような特殊な土質条件では六価クロム溶出リスクが懸念される。本研究では、関東ロームを対象とし、粉体添加とスラリー添加の2つの添加方法を想定し、それぞれにおけるCO₂排出量および六価クロム溶出量の低減を目的として開発を行った。粉体添加については、CO₂排出原単位が小さく、六価クロム溶出量の低減効果を有する新しいセメント系固化材を提案し、スラリー添加については、改良材添加量の低減に資する改良方式の効果を評価した。その結果、前者については、CO₂排出量が約50%削減され、六価クロム溶出量も従来の20%以下に低減することを確認した。後者については、流動化剤を添加した低W/Cセメントスラリーによる改良で、CO₂排出量を約20%削減でき、六価クロムは同程度の溶出量であることを確認した。

1. はじめに

昨今の建設業では、行政の環境計画や経団連「カーボンニュートラル行動計画」と連携し、施工段階におけるCO₂排出量を2050年までに実質ゼロとするための取組みを推進中である¹⁾。しかしセメントのCO₂排出原単位は、例えば普通ポルトランドセメントについては0.766 kg-CO₂/kgと大きく²⁾、改善の余地があるのが現状であり、セメントを大量に使用する地盤改良工においても例外ではない。この問題を解決するためには、CO₂排出原単位の小さい改良材を使用する、もしくは改良材添加量を低減するといったアプローチが考えられる。

また、セメント系固化材による地盤改良は多数の施工実績があり、各セメントメーカーの製品種類も多数ある。ここでFig. 1にセメント系固化材の位置づけを表した分類図を示す。火山灰質粘性土などに代表される六価クロムの溶出リスクが懸念される土質の場合は、特殊土用という六価クロム溶出抑制型のセメント系固化材がある。また六価クロムが土壤環境基準を超えて溶出することがないように、国土交通省の通達⁴⁾によりセメント系固化材

についての取扱いが規定されている。上記のように様々な対策がとられており、通常では六価クロムの溶出リスクは小さいと考えられている。しかし関東ロームや沖積粘土のような一部の粘性土地盤や、改良強度が小さい施工条件等の場合には、必ずしも六価クロム溶出量を低減

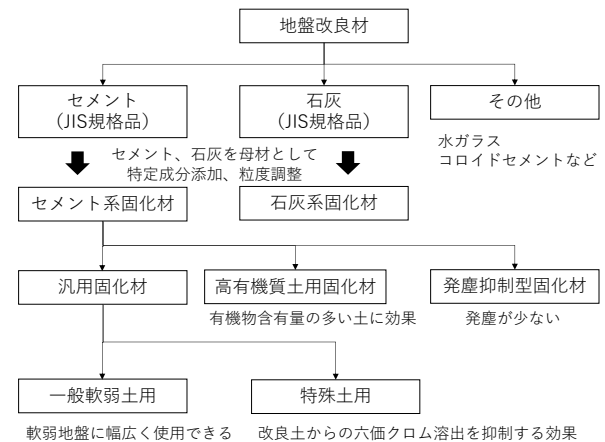


Fig. 1 セメント系固化材の位置づけ³⁾に加筆

Classification of Cements

できず、基準値を超過する場合があります。さらに2022年から六価クロムの地下水基準が0.05 mg/Lから0.02 mg/Lに改定されたことにより、今後は土壌溶出量基準も厳しくなることが想定される。このような背景から、ますます六価クロム溶出の懸念がない改良材や施工方法が必要と考えられる。ここでTable 1に地盤改良の分類を示す。

本研究では、強度確保や六価クロム溶出量の点から改良が困難な関東ロームを対象土とした。改良材の添加方法は、浅層改良に代表される粉体添加と中層・深層改良に代表されるスラリー添加の2ケースを設定し、それぞれの添加方法におけるCO₂排出量の削減および六価クロム溶出量の低減を目的とした。まず粉体添加については、従来の改良材である六価クロム溶出抑制型のセメント系固化材の一部をスラグ等で置き換えた新しいセメント系固化材（以下、開発改良材）を提案した。副産物由来でCO₂排出原単位が小さいスラグは、六価クロム溶出量の低減効果も有すると考えられている⁹⁾。よってCO₂排出量の削減と六価クロムの低減の双方について効果が期待できるため、今回の検討に適当と考えた。次にスラリー添加については、流動化剤により低W/Cで施工可能なセメントスラリーによる改良手法を考えた。加水量を減らすことによる強度の増加、それに伴う改良材添加量の低減を期待し、CO₂排出量の削減効果を評価した。またW/Cの低下による六価クロム溶出量への影響も確認した。

2. 粉体添加試験

2.1 使用材料

試料土には、9.5 mm以下に篩った関東ロームを使用した。物性値をTable 2に示す。改良材には、普通ポルトランドセメント（以下、OPC）、高炉セメントB種（以下、高炉B）、六価クロム抑制型のセメント系固化材2種類（以下、固化材A、B）、および開発改良材（固化材A：スラグ：石灰を乾燥重量比3：5：2で混合）の5種類を使用した。スラグにはJIS規格適合の高炉スラグ微粉末を、石灰には粒径0.6 mm以下の生石灰を使用した。セメント系固化材以外の材料のCO₂排出原単位および諸物性値をTable 3に示す。固化材A、BのCO₂排出原単位はメーカーヒアリングから0.536 kg-CO₂/kgと推定し、それぞれ同じ値で考えた。また、既往の文献^{2,9)}に従い、副産物であるスラグのCO₂排出原単位は0と考えた。開発改良材のCO₂排出原単位は0.323 kg-CO₂/kgと計算した。

2.2 試験方法

改良材添加量を200, 250, 325 kg/m³の3ケースとして、自然含水比の試料土に改良材を添加し、ソイルミキサーで4分間、混合・攪拌した。その後、セメント協会規格の締固め方法⁷⁾に準拠し、φ5 cm、高さ10 cmのモールド内に3層に分けて充填・締固めを実施した。締固め後、直ちに脱型し、密閉養生した。養生日数は7, 28日間の2ケース

Table 1 地盤改良の分類³⁾を加筆・修正
Classification of Ground Improvement

分類	施工機械や工法の特徴	改良材添加方法	
浅層改良	特殊なバケットや攪拌装置を装着したバックホウ、スタビライザを用いる。	粉体添加	
中層改良	バックホウをベースマシンとし、アームにトレンチャ式やロータリー式等の攪拌装置を装着する。粉体添加方式で施工可能な工法もある。	スラリー添加	
深層改良	機械式攪拌	攪拌翼を回転させ混合攪拌する。大規模工事では3点式杭打機、小規模工事ではバックホウ等をベースマシンとする。大型では深度50 m程度まで実績がある。	粉体添加 スラリー添加
	高圧噴射	固化材スラリーを地中に噴射し、スラリーや空気の圧力で混合攪拌する。一般的に小型のボーリングマシンタイプが用いられる。	スラリー添加
	ソイルセメント地中連続壁	固化材スラリーを原位置の土と混合攪拌して連続壁を造成する。機械式鉛直改良は専用機にチェーンソー型カッターポストを装着する。機械式柱列改良は大型の3点杭打機をベースマシンとし、複数の攪拌翼を装着する。H鋼等の心材と組み合わせることで土留壁や止水壁として適用できる。	スラリー添加

Table 2 関東ロームの諸物性値
Properties of Kanto Loam

項目	単位	値
土粒子密度	g/cm ³	2.882
自然含水比	%	125.6
礫分	%	0.0
砂分	%	8.7
シルト分	%	41.9
粘土分	%	49.4
液性限界	%	166.5
塑性限界	%	93.9
組成指数	—	72.6
コーン指数	kN/m ²	1052

Table 3 改良材の物性値およびCO₂排出原単位

項目	単位	OPC	高炉B	石灰	スラグ
密度	g/cm ³	3.14	3.03	-	2.89
比表面積	cm ² /g	2500 ≤	3000 ≤	-	4370
強熱減量	%	≤5.0	≤5.0	-	1.0
酸化マグネシウム	%	≤5.0	≤6.0	-	5.8
三酸化硫黄	%	≤3.5	≤4.0	-	2.0
SiO ₂	%	20.42	25.65	<1.0	33
Al ₂ O ₃	%	5.33	8.82	-	14
Fe ₂ O ₃	%	2.96	1.98	-	0.3
CaO	%	64.29	55.02	95.6	43
CO ₂ 排出原単位	kg-CO ₂ /kg	0.766	0.479	0.748	0

とした。養生後に、一軸圧縮試験および溶出試験を実施した。溶出試験は環境庁告示46号⁸⁾に従い、分析項目はpHと六価クロムとし、六価クロムの分析はジフェニカルバジド法 (JIS K 0102 65.2.1) で実施した。この方法では、前処理における酸との接触時間が規定されていないが、六価クロムが最も溶出する場合を評価するため、酸との接触時間は1分とした。

2.3 試験結果

2.3.1 一軸圧縮強度 それぞれの条件における一軸圧縮強度、溶出液のpHおよび六価クロム溶出量をTable 4に示す。Fig. 2に養生28日における改良材添加量と一軸圧縮強度の関係を示す。改良材添加量が200 kg/m³のケースでは、すべての改良材で強度に大きな差はなく、改良材添加量が250, 325 kg/m³と増加するにつれ、それぞれ強度は増加する。その増加量は、OPCと高炉Bが小さく、次いで開発改良材、固化材A、Bが大きい。既往の研究⁹⁾で知られているように、関東ロームのような火山灰質粘性土には、JISで規定されたセメントでは強度発現が難しいことと、セメント系固化材では強度が確保できることを確認した。改良材添加量325 kg/m³における強度増加は、開発改良材と比べて固化材A、Bの方が大きい、改良材添

加量250 kg/m³における強度増加は、開発改良材の方が大きい。そのため、一軸圧縮強度が1000 kN/m²程度までは、開発改良材の方が少ない改良材添加量で強度を確保することが可能であった。

ここで開発改良材の強度発現について考察する。まず固化材A、Bについて、改良材添加量が250 kg/m³のケースで強度が小さかった原因は、カルシウム量が少なく、関東ロームのアロフェンに吸着されて消費され、セメント水和物の生成量が少なかったためと考えられる。そこで改良材添加量が325 kg/m³のケースになると、アロフェンに吸着されても十分な量のカルシウムが存在するため、本来のセメント系固化材の性能が発揮され、高い強度を発現したと考えられる。ここから、生石灰を20%含む開発改良材については、改良材添加量が250 kg/m³のケースでも、十分なカルシウム量であったため、他の改良材と比べて強度が最も大きかったと考えられる。

そこでカルシウム量と強度の関係を把握するために、開発改良材の生石灰の割合を5, 15, 20, 25, 30%と変動させた改良材を調査し、それぞれを用いて2.2節と同様の要領で、改良材添加量250 kg/m³の条件で補足試験を実施した。Fig. 3に生石灰割合と一軸圧縮強度の関係を示す。生石灰割合が20%以下では、強度と正の相関関係を示し

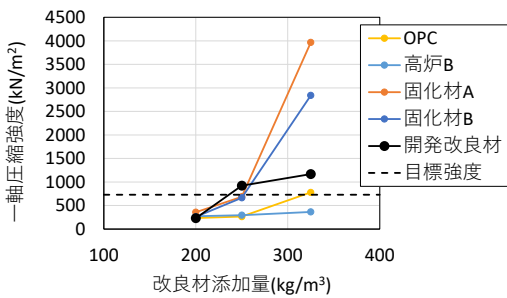


Fig. 2 粉体改良材添加量—一軸圧縮強度 (養生28)
Amount of Cements - UCS

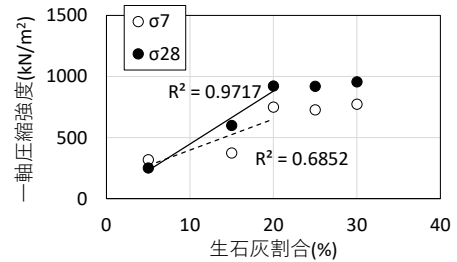


Fig. 3 石灰割合—一軸圧縮強度(養生28)
Ratio of Lime - UCS

Table 4 粉体添加の試験結果

Test Results of Powder Addition Improvement

改良材	改良材添加量	7日			28日		
		一軸圧縮強度	pH	六価クロム溶出量	一軸圧縮強度	pH	六価クロム溶出量
—	g/cm ³	kN/m ²	—	mg/L	kN/m ²	—	mg/L
OPC	200	208	11.7	0.45	233	11.3	0.55
	250	261	11.8	0.40	265	11.7	0.38
	325	221	12.2	0.24	779	12.0	0.22
高炉B	200	170	11.3	0.40	270	11.1	0.02
	250	146	10.9	0.09	294	11.3	0.02
	325	132	11.2	0.09	364	11.4	0.04
固化材A	200	174	10.3	0.05	357	10.8	<0.01
	250	313	10.8	0.10	686	11.3	0.08
	325	1546	11.3	0.07	3966	11.6	0.04
固化材B	200	211	11.1	0.17	259	11.0	0.02
	250	397	11.2	0.17	664	11.1	0.10
	325	1310	12.1	0.08	2841	11.3	0.12
開発改良材	200	188	10.1	0.02	231	10.0	<0.01
	250	750	10.5	0.02	923	10.3	<0.01
	325	950	11.4	0.03	1169	11.1	<0.01

た。生石灰割合が20%より大きくなると、強度は横ばいとなった。これは、石灰は水分変化により土質性状を改善するため、セメント固化のような大きな強度は期待できないためである。これらのことから、開発改良材は一定量以上のカルシウム量を有し、かつ水硬性やセメント固化も期待できるスラグやセメント系固化材も含んでいることから、関東ロームの改良強度が適切に発現したと考えられる。

2.3.2 CO₂排出量 今回は、バックホウによる一般的な土間下の浅層改良として設計基準強度150kN/m²、現場室内強度比0.5を想定し、設計指針¹⁰⁾から目標一軸圧縮強度を730kN/m²と設定した。この目標強度を満足する改良材添加量と改良材のCO₂排出原単位から、原土1m³を改良する際のCO₂排出量を算出した。その結果をTable 5に示す。目標強度730kN/m²を満足するために必要な改良材添加量は、固化材A、Bがそれぞれ250、255kg/m³であるのに対し、開発改良材は235kg/m³と少ない。さらに、固化材A、Bと比べて開発改良材の方が、CO₂排出原単位も小さいため、CO₂排出量は約1/2の76kg-C/m³であった。

2.3.3 六価クロム溶出量 それぞれの改良材添加量と養生7日における六価クロム溶出量の関係をFig. 4に示す。開発改良材のみが、現行の六価クロム溶出量基準値0.05mg/L以下を満足した。改良材添加量により六価クロム溶出量は異なるが、従来のセメント系固化材と比較して、開発改良材を使用することで、最低でも六価クロム溶出量が2/5以下に低減できた。このことから、従来のセメント系固化材は六価クロム抑制型であっても、六価クロム溶出量が基準値を超過するケースが存在することと、開発改良材はセメント系固化材よりも六価クロム溶出量が小さいことを確認した。

ここで開発改良材が六価クロム溶出量を低減した理由について考察する。2.2節で述べた通り、本検討では、六価クロムが最も溶出する場合を想定して、酸との接触時間を1分としたが、本来はジフェニカルバジド法では、酸との接触時間が規定されていない。そのためスラグ等の還元物質を含む材料がある場合は、酸による還元能力の増加によって六価クロムが三価クロムに還元され、六価クロム溶出量が過少に分析される可能性がある。そこで

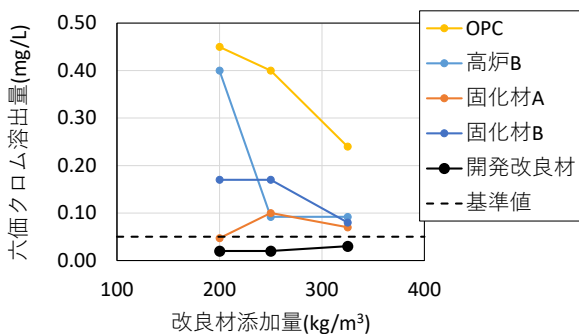


Fig. 4 粉体改良材添加量－六価クロム溶出量(養生7)
Amount of Cements - Hexavalent Chromium Elution

追加試験として、上記と同様の要領で供試体作製および溶出試験を実施し、OPC、高炉Bおよび開発改良材の改良材添加量200kg/m³のケースについて、酸との接触時間と六価クロム溶出量の関係を把握した。JIS法とは異なり、セメント協会では接触時間が5分と規定されているため¹¹⁾、試験条件は1、5、30分と設定した。Fig. 5に酸との接触時間と六価クロム溶出量の関係を示す。なお、六価クロム溶出量が定量下限値以下となったケースは、グラフ中では0.01mg/Lでプロットしている。スラグを含む高炉Bについて、接触時間が長くなると六価クロム溶出量が小さくなった。ここからスラグによる六価クロム溶出量の低減要因は、三価クロムへの還元が主であることがわかる。一方で開発改良材については、接触時間が短くても六価クロム溶出量が小さかった。ここから、開発改良材は、スラグによる還元だけでなく、セメント自体の割合を低減させることにより六価クロム含有量が低下し、六価クロム溶出量が低減したと考えられる。

3. スラリー添加試験

3.1 使用材料

試料土には、粉体添加試験と同様の関東ロームを使用した。3.2.2項で後述するように、本検討では施工実績から試験条件を設定したため、改良材としては、過去の施工データが入手可能であった固化材Bを使用した。また流動化剤としては、汎用的なポリカルボン酸系流動化剤を使用し、CO₂排出原単位はメーカーヒアリングをもとに推定し、0.668kg-CO₂/kgとした。

Table 5 室内強度を満たす改良材添加量とCO₂排出量
Amount of Cements Satisfied Strength of Test Specimen and CO₂ Emissions

改良材	改良材添加量 kg/m ³	CO ₂ 排出量 kg-CO ₂ /m ³
—		
OPC	320	245
高炉B	325<	156<
固化材A	250	134
固化材B	255	137
開発改良材	235	76

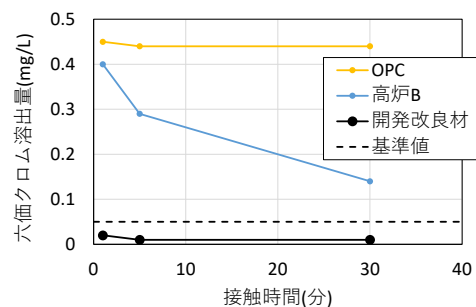


Fig. 5 酸との接触時間－六価クロム溶出量
Contact Time with Acid - Hexavalent Chromium Elution

3.2 試験方法

3.2.1 Pポート試験 本試験は、セメントミルクに添加する流動化剤添加量を決定するために実施した。一般的なスラリー添加では、地盤内にセメントミルクを圧送し、原土と混合攪拌する。その際に重要な施工管理項目となるのがセメントミルクの流動性であり、圧送可能な流動性を確保する必要がある。本検討では、過去の施工実績から、流動性の指標としてPポート流下時間を設定し、その目標値を混練終了から30分後で16秒以下とした。試験方法は、高流動コンクリートの漏斗を用いた流下試験方法 (JSCE F 512) に従った。試験条件としては、W/C=45%のケースは流動化剤添加量を0, 0.5, 1, 2, 3 wt-C%, W/C=70%のケースは0 wt-C%と設定した。

3.2.2 改良試験 まず流動化剤を添加した水と改良材をスリーワンモーターで2分間混合・攪拌してセメントスラリーを作製した。流動化剤添加量については、3.3.1項で後述するPポート試験結果から、W/C=45%のケースでは1 wt-C%, W/C=70%のケースでは0 wt-C%とした。改良材添加量は300, 400, 500 kg/m³の3ケースとした。その後は、2.2節と同様の要領で実施した。脱型後の供試体をすぐに密閉し、室温で所定日数まで養生した。養生日数は7, 28日の2ケースとした。測定項目も2.2節と同様の要領で実施した。

3.3 試験結果

3.3.1 流動性 W/C=70%のケースは、流動化剤を添加せずに基準値の16秒を満たすことができた。W/C=45%のケースについては、流動化剤添加量が0 wt-C%のケースでは、流下時間が180秒以上であったが、流動化剤添加量が1 wt-C%のケースでは急激に粘性が低下し、流下時間は16秒であった。2, 3 wt-C%と流動化剤添加量を増加しても、Pポート流下時間に大きな減少は見られなかった。ここから、W/C=45%の試験ケースでは、流動化剤添加量を1 wt-C%とした。

3.3.2 一軸圧縮強度 それぞれの条件における一軸圧縮強度、溶出液のpHおよび六価クロム溶出量をTable 7に示す。養生28日における改良材添加量と一軸圧縮強度の関係をFig. 6に示す。同じ改良材添加量で比較すると、W/C=70%と比べて、W/C=45%の方が、一軸圧縮強度が

大きい。これはセメントミルクの水量が減少したことで、改良土中の含水量も減少したためである。

3.3.3 CO₂排出量 今回は、長期地耐力400 kN/m²を要する地盤改良工を想定し、設計指針¹⁰⁾に従い、設計室内強度を2500 kN/m²と計算した。この地盤改良に必要な改良材添加量およびCO₂排出量を計算した結果をTable 8に示す。W/C=70%と比べて、W/C=45%の方が、添加量が80 kg/m³ほど小さい。その分CO₂排出量も小さくなり、約20%のCO₂が削減できた。

3.3.4 六価クロム溶出量 それぞれのケースについての7, 28日養生における六価クロム溶出量と改良材添加量の関係をFig. 7に示す。なお、六価クロム溶出量が定量下限値以下となったケースは、グラフ中では0.01 mg/Lでプロットしている。いずれにおいても六価クロム溶出量は基準値0.05 mg/L以下となった。改良材添加量300 kg/m³のケースのみ、W/C=70%と比べて、W/C=45%の方が、六価クロム溶出量が大きくなった。これは、加水量の低減により、六価クロムの吸着効果が大きいと考えられているモノサルフェート等¹²⁾のセメント水和物の生成量が減少したためと考えられる。しかしスラリー添

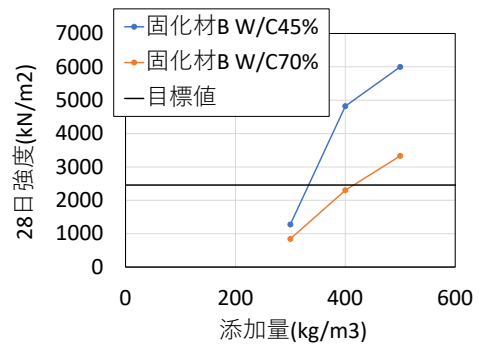


Fig. 6 スラリー改良材添加量—軸圧縮強度(養生28)
Amount of Cements - UCS

Table 8 設計強度を満たす改良材添加量とCO₂排出量
Amount of Cements and CO₂ Emissions Satisfied Strength of
Test Specimen

W/C	改良材添加量	CO ₂ 排出量
%	kg/m ³	kg-C/m ³
45	340	185
70	420	225

Table 7 スラリー添加の試験結果
Test Results of Slurry Addition Improvement

W/C	改良材添加量	7日			28日		
		一軸圧縮強度	pH	六価クロム溶出量	一軸圧縮強度	pH	六価クロム溶出量
%	kg/m ³	kN/m ²	—	mg/L	kN/m ²	—	mg/L
45	300	811	10.8	0.05	1277	11.3	0.02
	400	3290	11.2	0.02	4821	11.6	<0.01
	500	4343	11.5	0.02	5999	11.8	<0.01
70	300	685	10.9	0.03	871	11.5	<0.01
	400	1872	11.2	0.02	2102	11.9	<0.01
	500	2708	11.4	0.02	3568	11.8	<0.01

加による改良体は強度が大きいいため、六価クロム溶出量は基準値以下と小さく¹³⁾、さらに28日養生することで大きく低減したため、実環境中でリスクが顕在化する可能性は低いと推察できる。ここから、柱状改良でセメントミルクのW/Cを低下させても、六価クロム溶出量は従来のW/Cと同程度に小さいことがわかった。

4. まとめ

関東ロームのような特殊土を対象とした地盤改良について、浅層改良に用いる粉体添加方式と、柱状改良に用いるスラリー添加方式の2つを考え、これらのCO₂排出量および六価クロム溶出リスクの低減を目的として、室内試験による検討を行った。粉体添加については、CO₂排出原単位が小さく、かつ六価クロム溶出量の低減効果も有する新しいセメント系固化材を提案し、性能評価を行った。スラリー添加については、流動化剤を添加し、流動性を高めることにより、改良材添加量の低減を図り、その改良効果を確認した。

粉体添加に用いる改良材についての知見は以下の通りである。

- 1) 従来のセメント系固化材の一部を石灰およびスラグで置き換えた新しいセメント系固化材を使用することによって、改良材添加量250 kg/m³以上の条件で、一軸圧縮強度1000 kN/m²程度を満足することができた。
- 2) 従来のセメント系固化材による改良と比較し、CO₂排出量を約50%削減することが可能となった。
- 3) 従来のセメント系固化材では改良が難しかった関東ロームにおいても、六価クロム溶出量基準を満足することを確認した。

スラリー添加についての得られた知見は以下の通りである。

- 1) スラリー添加による改良方式として、従来のセメント系固化材を用いたセメントミルクに流動化剤を添加し、低W/Cの条件での改良によって、改良材添加量340 kg/m³の条件で目標強度2500 kN/m²を満足することができた。
- 2) 従来のW/C条件と比較して、CO₂排出量を約20%削減できることがわかった。
- 3) 六価クロム溶出量は従来のW/Cと同程度であり、基準を満足することを確認した。

本検討によって、地盤改良分野においては、特別な材料がなくとも、汎用的な材料の組合せ、副産物の利用および加水量の低減といった工夫によって、CO₂排出量を削減でき、かつ六価クロム溶出量も低減できる可能性が示唆された。今後は、新しいセメント系固化材の適用範囲や強度発現機構を検討していきたい。

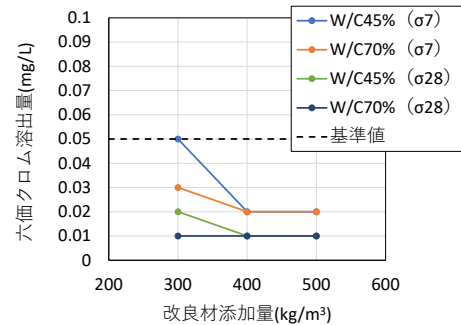


Fig. 7 スラリー改良材添加量一六価クロム溶出量
Amount of Cements - Hexavalent Chromium Elution

謝辞

株式会社エステック長谷和典様には、材料提供や施工に関するご指導を賜りました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) (一社)日本建設業連合会：2020年度CO₂排出量調査報告書, 2022
- 2) 土木学会：社会資本のライフサイクルをとらした環境評価技術の開発に関する報告-社会資本LCAの実践方策, pp. 2-11, 2012
- 3) 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5版, pp. 3-9, 2022
- 4) 国土交通省通知：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）
- 5) 櫻井ら：高炉スラグ微粉末の六価クロム溶出抑制効果の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, pp. 52-57, 2014
- 6) 大嶺聖：産業副産物・災害廃棄物の地盤工学的利用, 地盤工学会誌4月号, pp. 51-58, 2017
- 7) セメント協会：セメント系固化材による改良体の強さ試験方法 (JCAS L-01), 2006
- 8) 環境省：環境庁告示第46号（平成3年8月23日）
<https://www.env.go.jp/kijun/dojou.html>
- 9) 社団法人セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル第4版, p. 49, 2012
- 10) 日本建築センター, ベタリービング：建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針-セメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法-, pp. 367-377, 2018
- 11) セメント協会：吸光度法によるセメント中の水溶性六価クロムの定量方法 (I-51), 1998
- 12) 平本ら：高炉スラグ微粉末を用いたセメント硬化体中の六価クロムの挙動に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, pp. 25-32, 2021
- 13) 社団法人セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル第4版, p. 63, 2012