

砂防ソイルセメント（INSEM 工法）における六価クロム溶出量傾向

独立行政法人 土木研究所：田村圭司，武澤永純
財団法人 砂防・地すべり技術センター：松井宗廣
S B ウォール工法研究会：秋山祥克，○橋木貞則

1 はじめに

近年，建設コスト縮減，環境負荷軽減あるいはゼロエミッションへの対応など，経済性や環境保全が特にクローズアップされる中，建設廃材など現地発生土砂を有効活用する「砂防ソイルセメント工法」の優位性が注目され，全国で活用されるようになっていく。

一方，砂防ソイルセメント工法を活用するにあたり，六価クロムが基準値以上溶出する場合があることから，砂防ソイルセメント活用ガイドライでは必要に応じて試験を実施することと示されている。しかしながら，砂防ソイルセメント工法においては六価クロム溶出に関する実態，これに関する知見は公表されているものの具体的な対策方法などについては明確にされていない。

本報告は，室内試験より砂防ソイルセメント工法のうち INSEM における六価クロム溶出抑制に有効な強度発現に着目した対策方法に関してとりまとめたものである。

2 六価クロム溶出のメカニズム

既往文献によると六価クロムの生成および溶出のメカニズムは，以下のとおりである¹⁾。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“六価クロムは土壤溶出量基準が 0.05mg/L 以下，土壤含有量基準が 250mg/L 以下であること”と定められた。クロム化合物は，一般的に三価クロムと六価クロムが知られている。クロムは土中にクロム単体または三価クロムの形で広く存在しており，人体を構成する元素の一つでもあり体内に 2mg 程度存在している。クロム化合物のうち三価クロムは，自然界に広く存在しており安定した無害の化合物である。一方，六価クロムは極めて強い毒性を持ち自然界ではクロム鉱石として限定的に存在するに過ぎないとされているが，人工的に製造する場合は，三価クロムを高熱で焼くことによって生成される。また，六価クロムは不安定な物質であり，強い毒性を持つものの有機物と接触すると有機物を酸化して自身は三価クロムに変わることから，自然界には通常存在しないといわれる。ゆえに，INSEM のように現地発生土砂にセメントなどを混合する場合，使用する現地発生土砂自体が六価クロムを保有していない限り，セメントに含まれる六価クロムが溶出していると考えられる。ただし，セメントを使用する場合，必ず六価クロムが溶出されることではない。参考文献によると六価クロムの生成および溶出のメカニズムは，「土と固化材（セメント）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

る水和物で充分固定できなかった場合に六価クロムは発生し，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²⁾と示されている。言い換えればセメントを使用する場合必ず六価クロムは発生するが，これを水和物（固化すること）で封じ込めているということになり，封じ込めることができない場合に六価クロムが溶出することとなる。この六価クロム溶出のメカニズムを考慮して，今回の試験を実施した。

3 メカニズムを踏まえ設定した配合と溶出試験

六価クロム溶出のメカニズムである水和反応による固化すなわち強度発現に着目し，強度発現と六価クロム溶出量の関係を確認することを目的として同一の現地発生土砂を用いて試験を実施した。なお，示方配合は単位セメント量 $C=80\text{kg/m}^3$ に固定し，水和反応に必要な水量および養生方法を変化させ試験を実施した。以下に具体的な実施試験項目を示す。

- 1) 自然含水比（加水無）を用いた場合の圧縮強度と六価クロム溶出量の確認。
- 2) 設計含水比（加水有）を用いた場合の圧縮強度と六価クロム溶出量の確認。
- 3) 養生方法を変えた場合の圧縮強度と六価クロム溶出量の確認。
 - a. 標準養生を用いた場合（室内試験条件を想定）。
 - b. 気中養生を用いた場合（施工現場条件を想定）。

上記全てのケースに対し，「セメント及びセメント系固化材を使用した改良土の六価クロム溶出試験実施要領（案）」に準じて環境庁告示 46 号溶出試験「試験方法 1」を実施した。なお，六価クロム溶出試験の測定方法は，環境庁告示 46 号溶出試験に定められる下記 5 手法が示されているものの，各手法に対する選定基準が特に定められていない。ここでは，過去の実績および全国で標準的に実施が可能であるとされるジフェニルカルバジド吸光光度法 JIS K0102 の 65.2.1 および ICP 発光分析法 JIS K0102 の 65.2.4 の 2 種類を用いて実施した。

- ① ジフェニルカルバジド吸光光度法 JIS K0102 の 65.2.1
- ② フレーム原子吸光法 JIS K0102 の 65.2.2
- ③ 電気加熱原子吸光法（フレームレス原子吸光法） JIS K0102 の 65.2.3
- ④ ICP 発光分析法 JIS K0102 の 65.2.4
- ⑤ ICP 質量分析法 JIS K0102 の 65.2.5

4 実験結果と考察

実施した試験結果を以下に示す。なお、使用した現地発生土砂の特性は、細粒分 0.075mm 以下含有量 0.9%、細骨材 2.0mm 以下含有量 20.3%、均等係数 $U_c=9.98$ 、50%粒径 $U_{50}=8.42\text{mm}$ 、最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=2.092\text{g/m}^3$ であり、既往資料ⁱを用いて判断すると INSEM として活用する場合、良好な現地発生土砂であると判断される。

表-1 実施試験結果

配合 ケース	現地材特性	設計含水比 (%)	水量 (kg/m ³) 加水量 全水量	養生 方法	圧縮強度 (N/mm ²) 7日 28日	六価クロム溶出量 (0.05mg/l以下)		判定
						試験方法	測定値	
CASE. ①		7.0(下限値)	66.7	139.1	4.44	7.68	吸光光度 0.01未満(検出せず)	OK
CASE. ②	○最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=2.092\text{t/m}^3$	8.5(中央値)	96.6	168.9	3.40	6.32	発光分析 0.02未満	OK
CASE. ③	○最大粒径 $\phi 75\text{mm}$	10.0(上限値)	126.4	198.7	2.48	4.77	吸光光度 0.01未満	OK
CASE. ④	○50%粒径 $U_{50}=8.42\text{mm}$	7.0(下限値)	66.7	139.1	4.54	7.47	発光分析 0.02未満	OK
CASE. ⑤	○均等係数 $U_c=9.98$	8.5(中央値)	96.6	168.9	3.45	5.92	吸光光度 0.01未満(検出せず)	OK
CASE. ⑥	○曲率係数 $U_c=0.899$	10.0(上限値)	126.4	198.7	2.76	3.81	発光分析 0.03未満	OK
CASE. ⑦		3.64 ^{※1}	0.0	72.34	— ^{※2}	— ^{※2}	吸光光度 0.01未満	OUT
CASE. ⑧		3.64 ^{※1}	0.0	72.34	— ^{※2}	— ^{※2}	発光分析 0.08未満	OUT

注：※1：自然含水比(w_n)
※2：圧縮強度試験実施不可
現地発生土砂100%使用
加水量($w_n=3.64\%$) $W=(\text{設計含水比}-\text{自然含水比})/100 \times \text{現地発生土砂の密度} \times 0.95 \times 1.000$
全水量 $W_{max}=\text{設計含水比}/100 \times \text{現地発生土砂の密度} \times 0.95 \times 1.000$

この試験結果より、以下に示す事項が確認できた。

- CASE. ①～CASE. ⑤の配合ケースにおいては、六価クロム溶出量が基準値未満であった。
- CASE. ⑥・CASE. ⑦および CASE⑧で六価クロム溶出量の基準値を超えた。
- 材齢 7 日における強度発現が 3.0N/mm^2 以下であった CASE. ⑥においては、吸光光度法では基準値未満であったが、発光分析法では基準値を超えた。
- 自然含水比（加水無状態の土砂）を用いた CASE. ⑦・CASE⑧では、何れの六価クロム溶出試験においても溶出量が基準値を超えた。
- 同条件（土砂・セメント量）であっても加水量と養生条件によって強度発現が異なるものの養生方法の違い（標準・現場養生）による六価クロム溶出量への影響は少ないと考えられる。

上記試験結果より、強度/セメント比と六価クロム溶出量の関係を以下に示す。

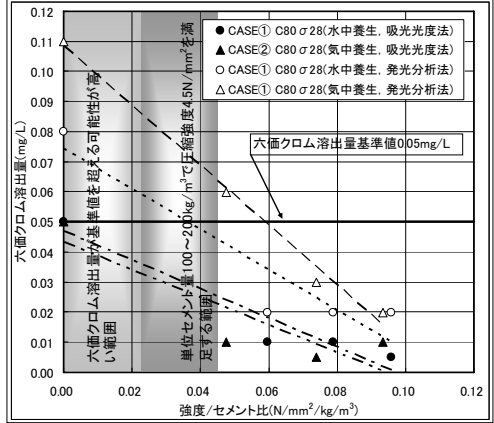


図-1 強度セメント比と六価クロム溶出量の関係

図-1より、

- 設計含水比が適切に設定されている場合、すなわち強度セメント比が一定以上の場合には六価クロム溶出量が少ない傾向が解る。
- 現地発生土砂の自然含水比が低く、かつ加水しない場合は、六価クロムが溶出する確率が上がる。これは水和反応に必要な水量が不足し、強度発現が小さく（本試験における CASE⑦・⑧では強度発現≒ゼロ）なったことが影響をしていると考えられる。
- 強度と六価クロム溶出量の関係には一定の関係があると判断される。

5 六価クロムの溶出抑制方法

今回実施した試験結果より INSEMにおける六価クロム溶出の抑制方法としては、強度発現（水和反応促進）を高めることが有効であると考えられる。

INSEM の強度発現を高める方法としては、セメント量の増加、適切な含水比設定、クラッシュラン等を混合し粒度調整を図るなどが考えられ、強度発現率を向上させることが結果的に六価クロム溶出量を抑制することにつながる。以上を踏まえ、六価クロムに対する抑制方法としては、水和反応の促進（強度発現率）を高めることであり、以下に示す方法が有効であると考ええる。

- ① 適切な単位セメント量の設定
- ② 単位セメント量に応じた設計含水比の設定
- ③ 土質改良（クラッシュランなどの良質材混合）

6 今後の課題

今回実施した試験では、INSEM の強度発現と六価クロム溶出量の関係に着目した試験を実施した。結果は、強度セメント比すなわち強度発現が一定以上高くなる場合、六価クロム溶出量を基準値未満に抑制できる可能性が高いこと、強度を発現させるためには十分な水和反応が必要であり、水量が重要なパラメータであることが確認できた。紙面の都合で紹介出来なかったが、実施工においても今回の検討結果と同様の結果が得られている。これについては、別紙に譲ることとしたい。

今後は、より多くの試験データ、資料収集を行い本検討で得られた知見の精度向上を図るとともに、六価クロム溶出試験方法の特性などについて試験を実施し、検証していく所存である。

参考文献

- 砂防ソイルセメントの材料特性に関する調査（独立行政法人土木研究所、財団法人砂防・地すべり技術センター）
- セメント系固化処理土に関する検討最終報告書(案)「セメント系固化処理土検討委員会 平成 15 年 6 月」（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）