

固化材を用いた砒素含有軟弱土の 土質改良および砒素不溶化処理の設計

秦 浩司^{*1}

砒素を含有する軟弱土（コーン指数111 kN/m²，砒素溶出量0.17 mg/L）に対し，3種の固化材（高炉セメントB種，低クロム型セメント，酸化マグネシウム系固化材）を用いて土質改良と不溶化処理を目的とした室内適用性確認試験を行った。コーン指数目標値（200kN/m²以上）と砒素溶出量基準値（0.01 mg/L以下）に適合した条件から，pH変化に対する安定性の相対的評価試験や安全率の設定方法を考慮し，使用材料選定と現場添加量の設定（酸化マグネシウム系固化材を150kg/m³添加）を行った。

キーワード：不溶化，砒素，土質改良，固化材

1. はじめに

重金属等汚染土壌の不溶化処理では様々な材料（薬剤等）が用いられるが，セメント等の固化材が使用される例も多い。その利点としては以下が挙げられる¹⁾。

- ・強度発現性に優れる。
- ・（セメントの場合）他の不溶化材に比べて安価である。
- ・既存の地盤改良機械を用いた施工が可能である。
- ・材料の入手が容易である。

重金属等の有害物質に対するセメント系固化材の適用については多くの研究・報告例があり，その作用機構とともにセメント系固化材の有効性が確認されている。また，近年，酸化マグネシウム（MgO）を主成分とする材料（酸化マグネシウム系固化材）が強度発現性と重金属等汚染物質全般に対する高い不溶化効果を発揮することが見出され，実用展開が進んでいる²⁾。

重金属等汚染土壌の不溶化処理の計画においては，実施施工前に現地土壌と候補となる材料を用いた適用性確認試験を実施して使用材料と添加量を検討するが，秦ほか（2014）³⁾では，既存のマニュアル^{1), 4)}等を参考に，試験手順を提案（図-1）するとともに，安全率を考慮した現場添加量の設定方法を紹介している。

本報告では，秦ほか（2014）に準じて実施した，セメント系および酸化マグネシウム系の固化材を用いた砒素含有軟弱土の土質改良および砒素不溶化処理を考慮した設計の事例を紹介する。

2. 方法

2.1 使用材料

試験用土壌は，宮城県内の現場発生土を用いた。これはコーン指数が200kN/m²未満の泥土であり，砒素溶出量が土壤環境基準（0.01 mg/L以下）の17倍を示した（表-1）。

表-1 試験使用土壌の性状

項目	数値
含水比 (%)	97.0
湿潤密度 (g/cm ³)	1.397
コーン指数 (kN/m ²)	111
pH	5.7
砒素溶出量 (mg/L)	0.17

使用する材料は，強度発現と砒素不溶化の効果が期待できるものとして，以下3種の固化材を選んだ。

- ・高炉セメントB種
- ・低クロム型セメント
- ・酸化マグネシウム系固化材

2.2 土質改良試験

「セメント系固化材による地盤改良マニュアル（第4版）」¹⁾を参考に，現地土壌に改良材3種を50，100，150 kg/m³の割合で添加・混合し，コーン指数の変化で強度評価した。養生条件は，空气中3日，水浸4日とし，7日後に測定に供した。コーン指数の測定方法は「締固めた土のコーン指数試験方法（JIS A 1228：2009）」に従った。改良の目標値としては，第4種建設発生土相当の200 kN/m²以上とした。試験状況を写真-1～4に示す。

*1 先端・環境研究部

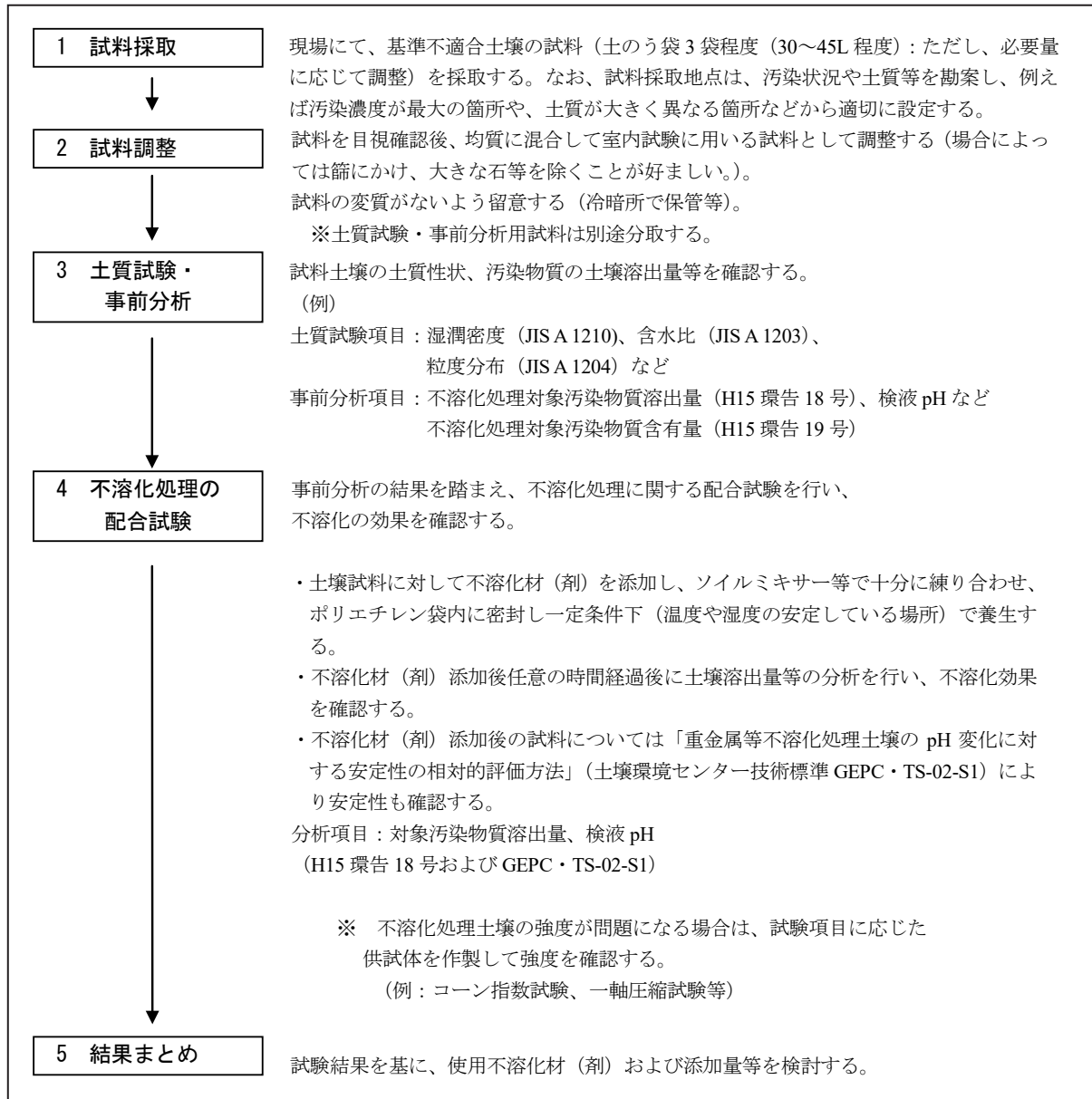


図-2 不溶化処理に係る一般的な適用性確認試験の手順フロー（案）（秦ほか（2014）³⁾より引用）

2.3 重金属(砒素・六価クロム)不溶化試験

上記 2.2 にて作製・養生・強度測定後の試料を用い、環境省告示 18 号に従い溶出試験を行った。得られた検液を用い、砒素 (As) の溶出量を分析した。また、セメント系固化材の使用で懸念される六価クロム (Cr⁶⁺) も分析するとともに溶出液の pH を測定した。



写真-1 使用土壌・改良材



写真-2 改良材混合状況

2.4 処理土壌の pH 変化に対する安定性の相対的評価試験

土質改良と不溶化処理の目標値・基準値をクリアした条件の処理土壌を対象に、「重金属等不溶化処理土壌の pH 変化に対する安定性の相対的評価方法」（土壌環境センター技術標準 GEPC・TS-02-S1）⁵⁾により、酸、アルカリ添加による不溶化処理効果への影響（安定性）を確認した。



写真-3 気中養生状況



写真-4 水中養生状況

3. 結果結果および考察

3.1 試験結果

土質改良試験, 重金属等溶出量試験等結果を表-1に示す。

表-1 試験結果一覧

条件	項目	含水比 (%)	コーン指数 (kN/m ²)	pH	As (mg/L)	Cr ⁶⁺ (mg/L)
原土		97.0	<u>111</u>	5.7	<u>0.17</u>	<0.05
高炉セメント B種	50kg/m ³	96.5	<u>199</u>	11.3	<u>0.079</u>	<0.05
	100kg/m ³	87.1	308	11.7	<u>0.028</u>	<0.05
	150kg/m ³	81.9	832	12.0	0.01	<0.05
低クロム型セメント	50kg/m ³	89.3	220	11.2	<u>0.067</u>	<0.05
	100kg/m ³	79.0	997	11.8	<u>0.016</u>	<0.05
	150kg/m ³	79.3	2535	12.0	<u>0.011</u>	<0.05
酸化マグネシウム系固化剤	50kg/m ³	90.9	228	9.0	<u>0.021</u>	<0.05
	100kg/m ³	81.2	570	10.2	0.008	<0.05
	150kg/m ³	77.8	790	10.5	0.002	<0.05
目標値・基準値		-	200以上	-	0.01以下	0.05以下

(斜体: 目標値・基準値不適合)

セメント系固化剤の添加量とコーン指数との関係を図-1に、砒素溶出量の関係を図-2に示す。

コーン指数は固化材添加量の増加に従い増加し、高炉セメント B種では添加量 100kg/m³ 以上、低クロム型セメントと酸化マグネシウム系固化剤では添加量 50 kg/m³ 以上の条件で目標の 200 kN/m² 以上となった。

砒素溶出量は固化材添加量の増加に従い低下する傾向が認められたが、砒素溶出量が基準値に適合したのは高炉セメントの 150kg/m³、酸化マグネシウム系固化剤の 100 および 150 kg/m³ の 3 条件のみであった。低クロム型セメントはいずれの添加ケースでも砒素溶出量が基準不適合であった。六価クロムは全ケースで土壤溶出量基準 (0.05 mg/L 以下) に適合した (表-1)。

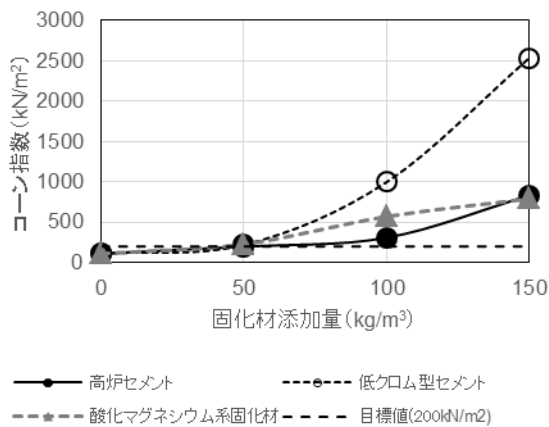


図-1 固化材添加量とコーン指数の関係

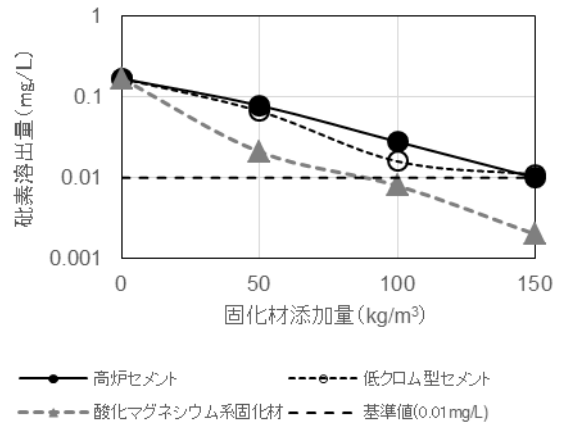


図-2 固化材添加量と砒素溶出量の関係

次に、コーン指数目標値と砒素溶出量基準値を満たした上記 3 条件の処理土壌を用い、「不溶化処理土壌の相対的安定性確認試験」を行ったところ、高炉セメント B種 150kg/m³ 添加ケースでは、硫酸添加試験で砒素溶出量が基準不適合となった (表-2)。

表-2 各条件に対する酸・アルカリ溶出試験 (GEPC TS-02-01) 後の砒素溶出量 (mg/L)

条件	硫酸添加溶出試験	消石灰添加溶出試験
高炉セメント B種 150 kg/m ³ 添加	<u>0.014</u>	0.009
酸化マグネシウム系固化剤 100 kg/m ³	0.006	0.007
酸化マグネシウム系固化剤 150 kg/m ³	0.003	0.003

(斜体: 目標値・基準値不適合)

これらの結果から、酸化マグネシウム系固化剤を 100 kg/m³ 以上量で添加することが望ましいと判断された。

3. 2 安全率を考慮した現場添加量の設定

固化改良工事における現場添加量の設定方法としては、室内試験で得られた改良材添加量と強度の関係より、下記の2つの考え方により求める方法が示されている¹⁾。

- ・設計強度を（現場 / 室内）強さ比で除した室内目標強度から得られる添加量を現場添加量とする。
- ・設計強度を満足する添加量に割増率を乗じ、現場添加量とする。

一方、重金属等不溶化処理工事においては、室内試験と現場施工とで不溶化効果の違いを整理した既往の知見は少なく、適用性確認試験の結果を基に土質や使用施工機械等を考慮した安全率を加味した現場添加量を設定する方法は確立されていない。しかし、固化改良工事における現場添加量の設定方法を参考に、以下のような方法が提案されている¹⁾（図-3）。

（例1）目標とする基準に安全率で除して得られる溶出量値を満たす添加量を設定する方法。

（例2）目標とする基準を満たす添加量に30～50%の割増率を設定する方法。

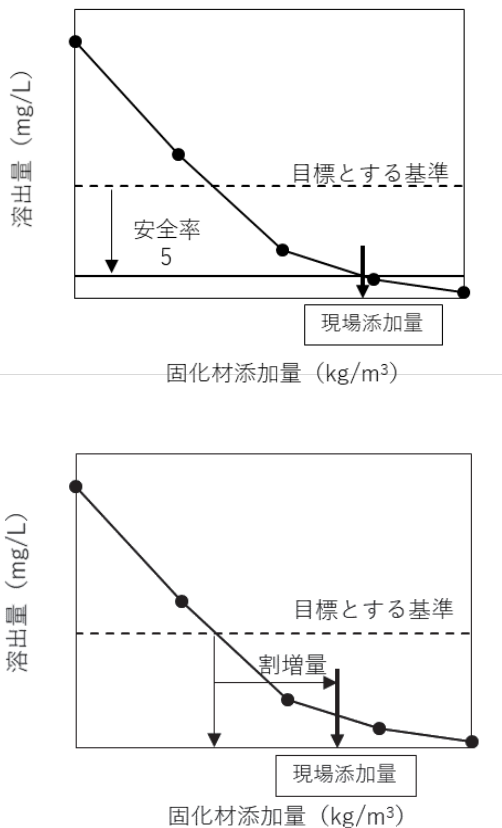


図-3 現場添加量の設定方法（上：例1、下：例2）
 （「セメント系固化材による地盤改良マニュアル（第4版）」¹⁾を参考に作図）

これらの設定方法を参考に今回得られたデータを当てはめると、

- ・目標とする基準値（0.01 mg/L）を安全率5で除して得られる溶出量（0.002 mg/L）を満たす添加量 = 150 kg/m³
- ・目標とする基準を満たす添加量（100 kg/m³）に30～50%の割増率を設定 = 130～150 kg/m³

となることから、施工条件としては以下のように結論された。

- ・使用材料として「酸化マグネシウム系固化剤」を選定
- ・添加量を「150 kg/m³」に設定

4. おわりに

砒素を含有する軟弱土を対象に、セメント系および酸化マグネシウム系の固化材を用いた土質改良、不溶化処理の試験、および試験結果を基に安全率を考慮した現場添加量の検討事例を通じ、不溶化処理に係る設計（使用材料選定、添加量設定）の手順を紹介した。不溶化処理の実施工では、処理後土壌の強度が要求されるケースも多いため、土質改良を兼ねた不溶化処理の試験と設計（使用材料選定、添加量設定）の方法として、本報告で示した手順が参考になると考えられる。

謝辞

本研究の実施にあたり、(株)計測企画の井村英樹氏にご協力いただいた。

参考文献

- 1) 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，技報堂出版(株)，2012
- 2) 大山将：酸化マグネシウム系材料による汚染土壌の固化・不溶化，ARIC 情報，No95，pp.37-43，2009
- 3) 秦浩司・大山将・鈴木義彦・片岡昌裕・土壤環境センター技術標準化部会：重金属等不溶化処理の適用性確認試験手順（案）の作成および不溶化処理土壌の安定性に関する既往研究事例の調査．第20回地下水土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，S5-11，2014
- 4) 日本石灰協会：石灰による地盤改良マニュアル，(株)報光社，2011
- 5) 一般社団法人土壤環境センター：GEPC 技術標準「重金属等不溶化処理土の pH 変化に対する安定性の相対的評価方法」，GEPC・TS-02-S1，2008

Design of Solidification and Insolubilization Treatment for Arsenic-Containing Soft Soils using Solidified Materials

Hiroshi HATA

Treatability tests were conducted to solidify and insolubilize soft soil containing arsenic (cone index 111 kN/m^2 , arsenic elution amount 0.17 mg/L), using three types of solidification materials (Blast furnace cement type B, Low chromium type cement, and Magnesium oxide solidification material). Based on conditions suitable for the cone index target value (200 kN/m^2 or more) and the arsenic elution amount reference value (0.01 mg/L or less), considering the relative evaluation test of stability against pH change, safety factor setting method, etc., the materials and amounts to be used were determined (mixing of 150 kg/m^3 of magnesium oxide solidified material).