

フッ素不溶化処理工法

宮下 広樹・福本 茂・玉上 和範

平成 15 年に施行された土壤汚染対策法では健康被害の防止を目的として、フッ素の溶出量が定められている。この法令に基づき、フッ素の不溶化を目的とした処理工法を開発し、実施工へ適応させた。

本施工では 2 種類の不溶化材を添加・混合するために、自走式土質改良機を 2 台直列 2 系統で用いた。本稿では不溶化材、自走式土質改良機について、その不溶化性能や機械的性能、施工結果について報告する。
キーワード：土質改良機、自走式、土壤汚染、フッ素、不溶化

1. はじめに

土壤が有害物質により汚染されると、その汚染された土壤を直接摂取、もしくは、汚染された土壤から有害物質が溶け出すことによって汚染された地下水の飲用により人の健康に影響を及ぼすおそれがある。こうした土壤汚染は、企業の工場跡地等の再開発等に伴い社会問題化してきている。

このような背景から、健康被害の拡大を防止する目的で、土壤汚染対策法が制定・施行された。土壤汚染対策法では、重金属・揮発性有機化合物に対して、環境基準値が定められており、フッ素においてはその溶出量が 0.8 mg/L 以下と定められている。

近年、フッ素化合物を使用する工場からのフッ素の大気中への飛散、排水中への排出により、フッ素が土壤に混入する機会が増加しており、フッ素汚染土の処理には一定のニーズが見込まれる。

本論文では、弊社で開発したフッ素汚染土の不溶化処理工法の概要ならびに本工法を用いた処理事例について報告する。

2. 不溶化処理工法の概要

(1) 工法概要

本工法は、土質改良機等の混合機械を用いて、フッ素不溶化材を汚染土に適正な配合量で均一に混合攪拌することにより、フッ素汚染土の不溶化処理を行うものである。

(2) フッ素不溶化材

不溶化処理に使用するフッ素不溶化材は、アルミニウム系固化材（ランドライム QS-F、村瀬石灰工業製）である。

本不溶化材は、主に石灰系固化材（固化材成分；ランドライム QS-F (A)、以下 A 材）とアルミ系固化助剤（固化助剤成分；ランドライム QS-F (B)、以下 B 材）の 2 材で構成されている。フッ素汚染土には、2 材を最初に A 材、後に B 材の順番に添加することにより、不溶化と強度増進の効果を同時に発揮させる。室内試験で実施した不溶化材の配合試験結果の一例を図 1 に示す。本例では、土壤溶出量基準の約 2 倍程度の汚染であれば総添加量が 50 ~ 100 kg/m³ で基準以下になることを示している。

本不溶化材は 2 材ともに粉末状で、使用する際にはセメント設備の転用が可能である。また、2 材の混合

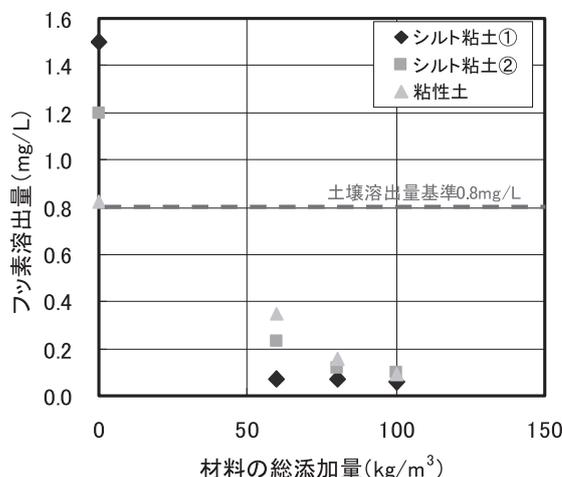


図-1 不溶化材の室内配合試験結果（材齢 7 日）

割合を変化させることにより様々な土質に対して適用が可能であるといった特徴を有する材料である。

(3) フッ素不溶化材の混合方法

不溶化材の混合方法については、現場条件等によって異なるが、不溶化材が粉末状で2材であることや不溶化処理では均一な混合攪拌が必要であることを加味して、混合方法を選定する必要がある。以下に混合方法例をいくつか示す。

(a) 自走式土質改良機

薬剤の定量添加が可能で安定した品質で処理を行うことができる。処理土量は $40 \sim 150 \text{ m}^3/\text{h}$ 。また、改良機自ら汚染土発生場所まで自走し施工できるため、汚染土が広範囲または点在している場合に有効である(図-2)。

(b) 定置式土質改良プラント

自走式土質改良機と同様に薬剤の定量添加が可能で安定した品質で処理を行うことができる。処理土量はプラント設備の大きさにより異なるが、一般的なもので概ね $10 \sim 35 \text{ m}^3/\text{h}$ 程度である。プラント本体のコストは自走式土質改良機と比べ安い場合が多いが、組立や汚染土の運搬が必要になるため、施工条件によ

ては割高になる(図-3)。

(c) 油圧ショベル(従来工法)

ピット内で汚染土と薬剤を油圧ショベルで混合攪拌し改良を行う。混合攪拌が不十分な場合が多く、品質は安定しない。そのため、安定した処理を行うためには特殊バケットの使用など混合性能の強化が必要である。また、薬剤添加時の粉塵発生も課題である。

各混合方法の特徴を踏まえ、施工条件に合わせた混合方法を選定することが重要である。

3. 不溶化処理事例

(1) 工事概要

当工事は、昭和61～62年にかけて埋め立てられた処分場跡地の土砂を掘削し、盛土材料としてリサイクルするものである。リサイクルの条件は、①フッ素の土壤溶出量基準 (0.8 mg/L) を満足する、②盛土材として利用できる強度 ($q_c = 400 \text{ kN/m}^2$ 以上) を確保する、の2点であった。

処分場跡地の主な埋立て材は浚渫土、建設汚泥、焼却灰で、現在は茶畑として跡地利用されている。掘削範囲は、処分場跡地の一部であり、面積約 $7,000 \text{ m}^2$ (最

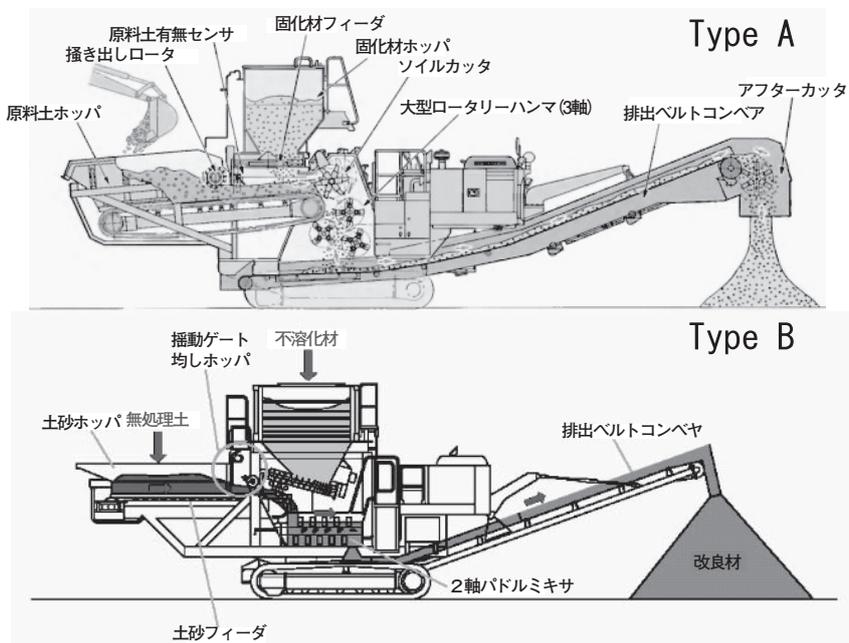


図-2 自走式土質改良機概要

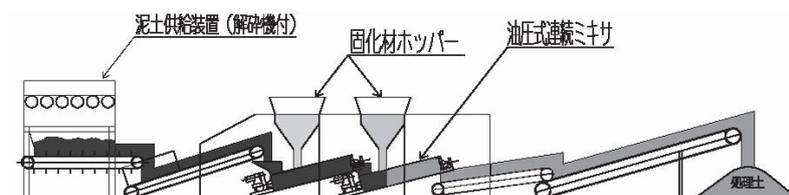


図-3 定置式土質改良プラント

大深さ約 12 m), 容積約 30,000 m³ である。

(2) 処理対象土について

(a) 物性

全体的に土質性状はシルト分を中心とする黒褐色状のものが多く、自然含水比が 64～97% 程度である。また、浚渫土と建設汚泥のコーン指数はそれぞれ $q_c = 95 \text{ kN/m}^2$, 125 kN/m^2 程度と推定された。

(b) フッ素溶出量

着工前に処分場跡地の土壌調査を実施した結果、フッ素溶出量は土壌溶出量基準 (0.8 mg/L 以下) を超過することが確認された。そこで、処分場跡地におけるフッ素汚染土の分布・範囲を把握するために平面的に 6 地点、深さ方向に 2～3 地点の試料を採取し、環境庁告示第 46 号溶出試験を実施した。溶出試験の結果、全ての試料でフッ素の土壌溶出量基準を超過したが、その値は 1.0～2.8 mg/L (環境基準値の 1.25～3.5 倍) と比較的低濃度のレベルであった。

(3) 混合方法の選定

不溶化材の混合方法は、以下の点を考慮し選定した。

- ① 処理土量が約 30,000 m³ と大容量であり効率よく処理する必要がある。
- ② 不溶化処理を行う上で不溶化材を出来る限り均一に混合攪拌する必要がある。(処理対象土は粘性が強く、改良機を一度通しただけでは混合攪拌が不十分。)
- ③ 粉塵の発生を抑制する必要がある。
- ④ 不溶化材が 2 材混合タイプであり、両者を規定の配合量で正確に添加する必要がある。

以上の点より、自走式土質改良機 (以下改良機) を 2 台直列 2 系統で混合攪拌する方法とした。具体的には第 1 段階として最初の改良機で石灰系固化材 (A 材) を混合攪拌した後、第 2 段階として次の改良機でアルミ系固化助剤 (B 材) を混合攪拌する方法である。

改良機による混合攪拌状況を写真一 1 (第 1 段階)、写真一 2 (第 2 段階) に示す。

(4) 処理概要

不溶化処理は、約 30,000 m³ の処理を約 3 ヶ月の期間で行った。

フッ素汚染土の掘削から不溶化処理、運搬までの施工フローを図一 4 に示す。施工は、不溶化処理の前処理として振動ふるい機を用いて掘削土の夾雑物 (転石やゴミ等) を取り除いた後に、ベルトコンベヤにて揚土し、不溶化処理を行った。

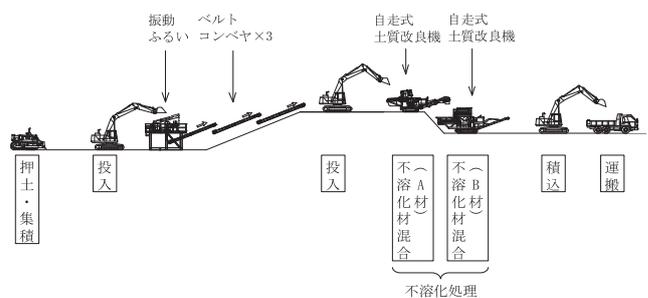


写真一 1 石灰系固化材の混合攪拌状況



写真一 2 アルミ系固化助剤の混合攪拌状況

不溶化処理は、アルミニウム系固化材を 2 台直列 2 系統の改良機にて連続して混合攪拌した (写真一 3)。なお、アルミニウム系固化材の総添加量は事前の配合試験により 80 kg/m^3 とした。また、処理後の土壌はダンプトラックに積込み、盛土箇所に運搬した。



図一 4 施工フロー図



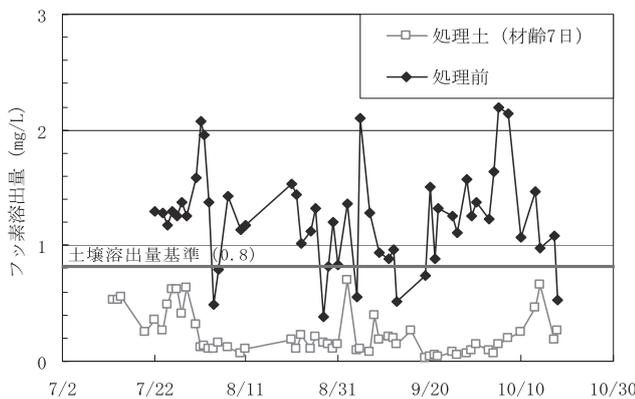
写真一 3 不溶化処理状況

(5) 処理結果

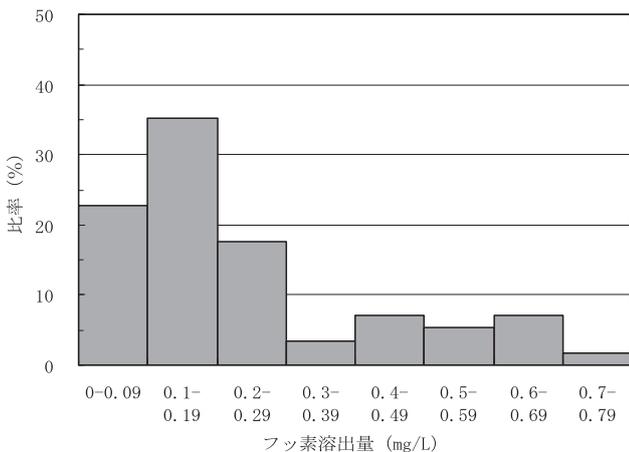
処理土の試料は、フッ素溶出量については盛土箇所にて1日1回5点混合により採取し、また強度を確認するために実施したコーン指数については200m³に1回採取し、試験を実施した。

施工日ごとのフッ素溶出量の結果を図一5に示す。フッ素溶出量は、処理前で0.38～2.19mg/L(平均1.23mg/L)であったが、処理後には材齢7日で0.03～0.70mg/L(平均0.23mg/L)まで低下し、全ての処理土で土壌溶出量基準(0.8mg/L)を満足した。また、コーン指数も全ての試験で盛土材料として利用できる品質基準(qc = 400kN/m²以上)を満足した。

次に、処理土(材齢7日)のフッ素溶出量の度数分布を図一6に示す。処理土の約80%が環境基準値の1/2以下の値となり、本不溶化材を用いた不溶化処理は、高い不溶化効果を発揮していることが確認できた。



図一5 施工日ごとのフッ素溶出試験結果



図一6 フッ素溶出量(処理土)の度数分布

(6) 処理施工に関する問題点・解決方法

処理対象土の事前調査では、夾雑物(転石やゴミ等)の混入は微量であり、前処理は行わない計画だったが、

当初の予想より多くの夾雑物が見られた。それにより以下の問題が生じた。

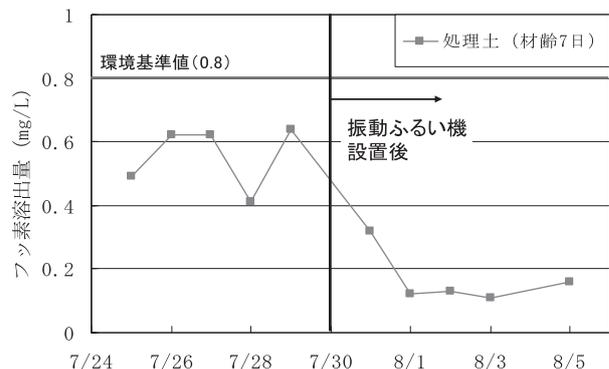
- ① 夾雑物が改良機の攪拌翼に絡まり(写真一4)、混合攪拌性能が低下する(処理効率の低下)。
- ② 夾雑物が改良機の攪拌翼に絡まることにより混合攪拌出来なくなり、故障する(稼働率の低下)。

これらの問題は工程の遅れだけでなく、処理土の強度、不溶化効果に大きな影響を及ぼすため、早急に解決する必要があった。検討した結果、掘削土を改良機に投入する前処理として振動ふるい機を設置し、夾雑物を取り除くこととした。

振動ふるい機を設置する前後のフッ素溶出量を図一7に示す。設置前のフッ素溶出量は、平均で処理前1.27mg/Lが処理後0.56mg/Lとなるのに対し、設置後には平均で処理前1.56mg/Lが処理後0.17mg/Lとなり、設置後には処理後のフッ素溶出量が低下し、フッ素不溶化効果が高くなった。また、改良機の稼働率を(改良機の処理時間) / (改良機の稼働時間)として算出したところ、稼働率は設置前が0.69に対し設置後は0.75と設置後の方が高くなり、振動ふるい機を設置することにより問題が解決したことが確認された。



写真一4 改良機の攪拌翼に絡まった夾雑物



図一7 振動ふるい機設置前後のフッ素溶出量

4. おわりに

(1) まとめ

本論文では、弊社が開発したフッ素汚染土の不溶化処理工法の概要ならびに本工法を用いた処理事例について報告した。以下にまとめを示す。

- ①フッ素汚染土の不溶化処理は、アルミニウム系固化材（石灰系固化材，アルミ系固化助剤）を2台直列2系統の自走式土質改良機を用いて混合攪拌して行った。
- ②処理対象土は粘性が強く，改良機を一度通しただけでは混合攪拌が不十分なため，2台直列で混合攪拌することで安定した処理を行うことができた。
- ③不溶化処理土は，フッ素溶出量の土壤溶出量基準（0.8 mg/L 以下）および盛土材料として利用できる品質基準（ $q_c = 400 \text{ kN/m}^2$ 以上）を全て満足した。
- ④本施工における不溶化処理は，高い不溶化効果を発揮していることが確認できた。
- ⑤夾雑物（転石やゴミ等）が見られたが，振動ふるい機等で前処理を行うことで処理効率及び稼働率の低下を防ぐことができた。

(2) 課題および今後の展開

今後も同種の工事が増加することが予想されるため，本施工で判明した課題については今後も検討していく必要がある。課題を下記に示す。

本施工では，不溶化処理の効果確認を施主との協議により材齢7日のフッ素溶出量で判定した。実際に判定できるのは分析期間を含めて処理後10日間程度を要するため，N.G.判定が出た場合には10日以上遡って再処理を行う必要があった。本不溶化材では，材齢に伴う溶出量の変化がほとんどないことから，より早い段階で溶出試験を行うことも可能と考えられるが，

公定法に基づく溶出試験では短縮できる日数にも限度がある。今後は，迅速判定のためにフッ素溶出量と相関性の高い指標の見出しや簡易分析手法の導入等についても検討する必要がある。

不溶化処理は，掘削除去による土壌入れ替えや洗浄分級と異なり，汚染物質は原位置に封じ込められる。今回使用したフッ素不溶化材は固化処理物中にアルミニウム系水和物の生成を促進する成分で構成されており，生成された水和物の中にフッ素を封じ込めるため，長期的な安定性も期待される。今後，長期の溶出挙動の安定性が確認できれば非常に有用性の高い工法であると考えられる。

最後に，本工法の開発・施工にあたりご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

JCMA

【筆者紹介】



宮下 広樹（みやした ひろき）
東亜建設工業(株) 土木事業本部
機電部 機械グループ



福本 茂（ふくもと しげる）
東亜建設工業(株) 土木事業本部
土木部 上席工事長



玉上 和範（たまうえ かずのり）
東亜建設工業(株) 土木事業本部
技術研究開発センター 環境技術グループ
主任研究員