

除去土壌(中間貯蔵施設)を対象とした選別補助材の開発とその展開

Development and Deployment of a New High Functional Soil Improvement Additive on Removed Radioactive-Contaminated Soil at an Intermediate Storage Facility

田中真弓 大橋麻衣子
河合達司 小澤一喜¹⁾

要 約

福島第一原子力発電所の事故によって福島県内で発生した放射性物質を含む除去土壌や除染廃棄物は、中間貯蔵施設での貯蔵開始後 30 年以内に、福島県外で最終処分されることになっている。2017 年 10 月から中間貯蔵施設で除去土壌の保管が開始され、輸送・受入分別・埋立て貯蔵の作業が行われている。このうち受入分別作業では、除去土壌の貯蔵量の減容化と有機物の分解による盛土沈下やメタンガスの発生抑制などのため、土壌からの異物(草木根、礫など)の選別が行われている。除去土壌の約半分は農地の粘性土であり、選別時には高含水土壌と異物の分離を容易にするため選別補助材が必要になる。筆者らは、無機物質に高分子化合物などを配合した高性能の選別補助材である「泥DRY®(デイドライ)」を開発した。本報では、本材料の特性と土木資材としての再利用の可能性、さらに中間貯蔵施設における展開状況について報告する。

目 次

- I. はじめに
- II. 選別補助材「泥DRY」の特性
- III. 現場実験
- IV. おわりに

I. はじめに

福島第一原子力発電所の事故によって発生した放射性物質を含む汚染土壌や廃棄物のうち、福島県内では 2018 年 3 月までに帰還困難区域を除き全ての面的除染が完了し、これまでの除去量は約 1650 万 m³ と推計されている¹⁾。除去土壌等は、中間貯蔵施設で貯蔵開始後 30 年以内に福島県外で最終処分される。2017 年 10 月から中間貯蔵施設で除去土壌の保管が開始され、輸送・受入分別・埋立て貯蔵の作業が行われているが、このうち受入分別作業では、除去土壌の貯蔵量の減容化と有機物の分解による盛土沈下やメタンガスの発生抑制などのため、土壌からの異物(草木根、礫など)の選別が行われている。除去土壌の約半分は農地の粘性土であり、選別時には高含水土壌と異物の分離を容易にするため選別補助材が必要になる。筆者らは、無機物質に高分子化合物などを配合した高性能の選別補助材である「泥DRY®(デイド

ライ)」を開発した。以下では、本材料の特性と中間貯蔵施設における展開状況について述べる。

II. 選別補助材「泥DRY」の特性

従来、高含水の粘性土から異物を分離する場合に使われていた選別補助材としては、石灰、半水石膏、高分子系、セルロース系などがある。中間貯蔵施設の受入分別処理で使用する選別補助材は、次の全ての条件を満たす必要があった。

- a. 埋立て土壌とするため、無機物主体であること
- b. 土壌からの重金属等の溶出リスクを小さくするため、改質後の pH 変化が小さいこと
- c. 固化しないこと
- d. 少量の添加かつ短時間で効果を発揮すること
- e. 汚染物質を含まないこと

従来の選別補助材のうち無機物主体の材料は石灰と半水石膏であるが、石灰は pH が高くなり反応時間が一晩と長い。また半水石膏は pH 変化が小さいが、添加量が多く必要という課題があった。そこで、全ての条件に合致した新材料として泥DRY(以下、本補助材)(Photo 1)を開発した。

1. 原理

本補助材は、吸水性を有する天然鉱物を主原料として高分

1) 土木管理本部 Civil Engineering Management Division

キーワード: 除去土壌, 中間貯蔵施設, 高性能選別補助材, 改質・選別システム
Keywords: removed radioactive-contaminated soil, intermediate storage facility, high functional soil improvement additive, soil improvement and sieving system



Photo 1 高機能選別補助材 泥DRY
(High Functional Soil Improvement Additive -Dei-DRY)

子材料を配合した材料である。これらの材料の複合的な働きにより、土粒子周囲の自由水が急速に捕捉され、土粒子間の付着力が低下するとともに、土粒子の小団粒化が促進される(Fig.1)。水和反応等が生じないため、養生時間はほぼ不要であり、また、改質後の土壌の飛散や粉じん発生も抑制できる。

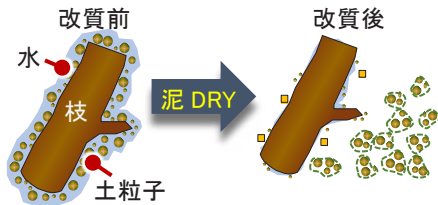


Fig. 1 泥DRYの改質イメージ
(Conceptual Diagram of Improvement by Dei-DRY)

2. 特長

本補助材は、中間貯蔵施設における土壌改質のための補助材として、従来技術では難しかった高含水や高粘性の除去土壌も含めた様々な除去土壌に対して、少量の添加で迅速な改質が可能であり、また、pHが中性であることを特長としている。添加量が少ないことは材料添加による貯蔵量増加の低減に繋がり、従来材料を使用した場合の質量増加率10%に対し、本補助材では約2%と1/5程度に縮減可能である。また、本補助材はpHが中性で改質後土壌のpHが変化しないことから、周辺自然環境への影響が小さく、有機土壌がアルカリ性となった場合に発生するアンモニアガスの発生もない。そのため、作業安全性も担保され、さらに硫黄分を含まないため、貯蔵中に硫化水素ガスも発生しない。

Ⅲ. 現場実験と選別システムの検討

1. 改質実験と選別システムの検討

高含水・高粘性の農地土壌に対し、本補助材と従来の材料を用いた改質実験を行い、改質性能を比較した。また、本実験では、実現場での適用を想定した選別システム検討し、汎用性の高い装置を採用した。

(1) 実験手順

実験土壌には、事前に草刈を行った後バックホウで表土を約10cmまでの深さに限定して採取した福島県内の農地土壌

を用いた。採取場所によって、畑土壌を母材A、水田土壌を母材Bとした。それぞれの土壌の細粒分含有率(φ75mm未満)は母材Aで74%、母材Bで58%である。なお両材ともに乾燥していたため、土質改良前に高含水状態になるように液性限界と塑性限界の間の含水比まで加水・調整し、母材A 60.0%、母材B 45.2%とした(Table 1)。

実験に用いた装置は Fig. 2 のとおりである²⁾。実験土壌は0.5m³を1バッチとして、生石灰、本補助材の各改質材を投入し攪拌機(強制二軸攪拌機)で攪拌を行った。改質材の添加率は、本補助材で母材A・Bともに20kg/m³、生石灰では母材Aが120kg/m³、母材Bが100kg/m³であった。混合攪拌時間はともに4分である。添加率と混合攪拌時間については、事前に予備実験を行い、改質後土壌を9.5mm目のふるいで手ふるいした時に残留する割合(残留土壌率、式(1))が15%程度以下となる値に決定した。

Table 1 実験土壌の特徴
(Characteristics of Soils Used for an Experiment)

試験土壌	改質材	コンシステンシー分析			含水比 [%]	含水率 [%]
		液性限界	塑性限界	塑性指数		
母材A	なし	68.5	48.1	20.4	60.0	37.5
	生石灰	67.1	49.3	17.8	42.9	30.0
	泥DRY	74.1	49.3	24.9	55.0	35.5
母材B	なし	60.8	32.3	28.5	45.2	31.1
	生石灰	63.3	39.3	24.0	34.1	25.4
	泥DRY	74.9	42.1	32.8	44.8	30.9

$$\text{残留土壌率} = \frac{W_u}{W_{ul}} \times 100 \dots (1)$$

ただし、 W_u : 残留土壌質量

W_{ul} : 実験土壌全体質量

改質後土壌は、ふるい目50mmのロールスクリーンで粗選別を行い、通過分をベルトコンベヤで接続されたふるい目20mmの振動ふるいにて再度細かい土壌のみに選別した。ロールスクリーンは、そろばん状に配列された多角形ディスクが回転してふるい目以上に残留した土壌等を重量物と軽量物に分けて分別できる。振動ふるい装置は傾斜据付タイプのふるい機で、ロールスクリーン通過土壌をより小さい大きさの草木・礫等を土壌と分別する。

20mmふるいまでを行った実験結果から、残留土壌率の割合が小さいほど草木等や礫と土壌との分別がやり易く、改質がよく行われていると判断した。また、20mm通過土壌のコ

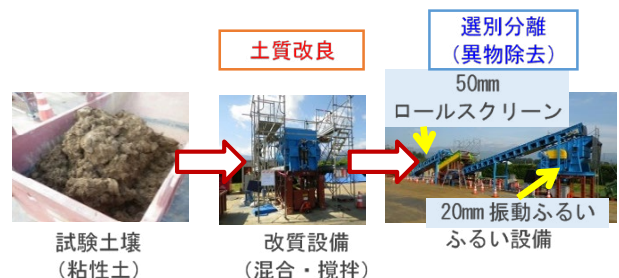


Fig. 2 実験装置
(Soil Improvement and Sieving System)

ーン指数(JIS A 1210, JGS 0711)によって改質後土壌の重機のトラフィカビリティを, 原土と 20mm 通過土壌の pH(JGS 0211-2009)から化学的安定性を評価した。コンシステンシー分析(JIS A 1205, ただし $\phi 425 \mu\text{m}$ 未満の試料のみでなく, 本実験では $\phi 2\text{mm}$ 未満の土壌全体を用いた)は土壌含水状態の基礎データの収集を目的に実施した。

(2) 実験結果

改質前と改質後の 20mm 通過土壌の外観を比較すると, 改質後土壌には両改質材ともに大きな土塊がなくなった(Photo 2)。Table 2 に実験結果を示す。本補助材による改質後土壌の含水比は, 生石灰より 10%程度高い(Table 1)。しかし, 残留土壌率は, 本補助材 5.2~7.0%, 生石灰 10.7~14.0%と本補助材の方が低かった。また, 改質後の 20mm 通過土壌は, 本補助材が pH7.7 程度(中性付近)で, コーン指数は 500~1,000kN/m² 程度であり, 生石灰が pH11.6(アルカリ性)で, コーン指数は 2,000~5,000kN/m² 程度を示した。



改質前 本補助材改質後(20 mm 通過)
Photo 2 実験土壌と改質後土壌
(Experimental Soil and Improved Soil)

Table 2 20mm 通過土壌の物性試験結果
(Results of Soil Improvement and Sieving Tests)

項目	母材 A (pH 7.8)		母材 B (pH 6.4)	
	泥DRY	生石灰	泥DRY	生石灰
残留土壌率	5.2 %	14.0 %	7.0 %	10.7 %
pH	7.6	11.6	7.8	11.6
コーン指数 qc	1,050 kN/m ²	4,850 kN/m ²	490 kN/m ²	1,920 kN/m ²
	15~21t 級ブルドーザ 走行可能	ダンプトラック 走行可能	15~21t 級ブルドーザ 走行可能	ダンプトラック 走行可能

(3) 考察

本補助材による改質後土壌は, 添加率が生石灰の 1/5 以下であるにも関わらず, 残留土壌率は 7 %以下と低く, 改質効果が高いことが確認された。また, 本補助材改質後土壌の pH は中性付近であるが, 生石灰改質後土壌はアルカリ性となり, 除去土壌からの放射性セシウム・重金属等の溶出リスクと中和などの水処理負荷が上がる傾向となった。車両のトラフィカビリティ²⁾については本補助材でも 15~21t 級ブルドーザの走行が可能であることを確認した。

本実験とは別に行った半水石膏と本補助材による模擬除去土壌改質実験では, 残留土壌率は, 半水石膏では添加量

200kg/m³で 43.5 %, 本補助材では添加量 20kg/m³で 14.8% となり, やはり本補助材の方が少ない添加率で高い選別効果を発揮することが確認されている。

2. 盛土試験

本試験では, 本補助材により改質された土壌の盛土としての施工性や安定性を評価するため, 改質土を材料とした試験盛土を実施し, 構築した盛土の状況観察や強度評価から盛土材料としての物性把握を試みた。

(1) 実験手順

試験土壌は, 改質実験で用いた母材 A を用いた。本試験では加水調整後の含水比は 51%となった。選別補助材の添加率は, 改質実験と同じく本補助材は 20kg/m³, 生石灰は 120kg/m³とした。改質土の 20mm 通過土壌を用いて Fig.3 に示す形状に試験盛土を行った。試験盛土は 2 層で構築し, 4t 級のコンバインドローラーで 4 往復(8 回)走行することにより各層の転圧を行った(Photo 3)。

(2) 実験結果

転圧面の状況として, 未改質土では全体的に不陸が見られた。一方, 改質土は, コンバインドローラーの轍が見られ多少の不陸が発生しているものの, クラックや極端な凹凸はなく概ね良好な転圧状況であると判断できた。また, 生石灰による改質土の転圧面は, 未改質や本補助材の転圧面と比較して平滑であるが, 水和反応によって水分が消費されたためか乾燥によるものとみられるクラックが発生していた。また, 改質により車両走行性が良好になることも確認した³⁾。

試験盛土の構築後にコア採取により現場密度を測定し, 締固め試験の結果との比較を行った(Table 3)。締固め度は, 生石灰, 本補助材ともに 90%以上となっておりよく締固まっていることが分かる。事前の締固め試験の結果から最適含水比は母材 A 43%, 生石灰改質土 43.6%, 本補助材改質土 49.2%であり, 試験時の含水比は母材 A 37%, 生石灰改質土 38.5%, 本補助材改質土 56.3%であった。母材 A と生石灰改質土については最適含水比より乾燥側であったことから締め固まり易い条件であったと考えられる。一方, 本補助材は, 最適含水よりも湿潤側でありながら高い締固め度が確保されていた。

盛土の強度推定や車両走行性を定量的に評価するため, 試験盛土上でポータブルコーン貫入試験を実施した。その結果, コーン指数は, 母材 A は 157kN/m²であったが, 改質により生石灰は 2,000kN/m²以上(5cm 以上の貫入困難), 本補助材は 1,046kN/m²となった。改質後のコーン指数は 1,000kPa 以上であることから, ブルドーザー(21 t 級程度)の走行にも問題が無いレベルの車両走行性⁴⁾を確保しているといえる。

(3) 考察

生石灰は, 水和反応により固化する作用があるため改質土のコーン指数が非改質土と比較して大きくなる結果は妥当

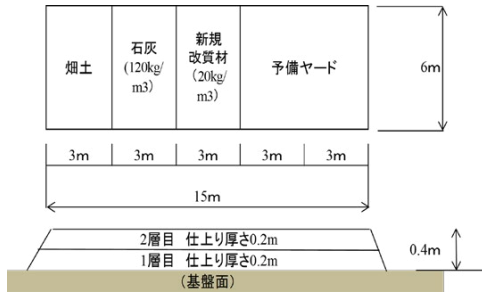


Fig. 3 試験盛土の概要 (Outline of Test Banking)



Photo 3 盛土状況 (Status of Fill Work)

(Result of Test Banking)

	母材 A (非改質)	生石灰	本補助材
最大乾燥密度 (Mg/m ³) (室内締固め試験)	1.15	1.16	1.04
現場乾燥密度 (Mg/m ³)	1.08	1.11	0.96
締固め度 (%)	93.9	95.7	92.3
最適含水比 (%) (室内締固め試験)	43	43.6	49.2
試験時含水比 (%)	37	38.5	56.3

である。一方で、本補助材は吸水材を含む無機系の材料であり、元々土粒子に保持されていなかった水分を保持することによって改質を行うものであり、改質材自体は固化作用を有していない。しかしながら、非改質の母材 A と比較すると本補助材のコーン指数は大きく向上している。このことから、

本補助材による改質では固化させることなく、本来の目的である高含水比土壌を低粘性化・小団粒化させるという作用に加え、土中の水分を保持することで、土の含水比を変えることなく盛土材料としての安定性向上が図れたと考えられる。

IV. おわりに

貯蔵対象土壌の減容化は施工費・工期の大幅な低減・圧縮に繋がる。また、本補助材は固化成分を含まず、自由水を吸水することで土壌を改質し、締固め特性が向上する。これにより、改質土を転圧することで、重機走行に十分なトラフィック能力の確保が可能となることを確認した。

今後、中間貯蔵施設の受入分別での本補助材の適用が期待されるが、システムとしての適用性評価は今後の課題である。また、土壌貯蔵施設における盛土についても、本補助材による改質土の盛土品質管理に関するポータブルコーン試験と室内三軸試験等による物性取得が計画されており、本手法の妥当性評価などについては現場施工支援の中で実施する予定である。

なお、本報告には、環境省「平成 27 年度除染・減容等技術実証事業」で行った実証試験の成果の一部を含んでいる。

参考文献

- 1) 環境省；被災地再生に向けた取組の現状，2018.3，http://josen.env.go.jp/chukanchozou/situation/pdf/current_situation_of_efforts_fukushima_180302.pdf
- 2) 田中真弓ほか；無機系改質材を用いて改質した高含水・高粘性の除去土壌の改質効果，地盤工学研究発表会，51，2016.7，pp.2173-2174.
- 3) 小澤一喜ほか；草木選別のために無機質中性改質材を添加した除去土壌の盛土材料としての性能評価，土木建設技術発表会，2016.12，pp.212-215.
- 4) 日本道路協会；道路土工要綱，平成 21 年版，p.28，2013.

Development and Deployment of a New High Functional Soil Improvement Additive on Removed Radioactive-Contaminated Soil at an Intermediate Storage Facility

Mayumi Tanaka, Maiko Ohashi, Tatsushi Kawai and Kazuki Ozawa¹⁾

It is important to reduce the volume of polluted soil and waste of contaminated areas around the first nuclear power plant in Fukushima, which should be kept at an intermediate disposal facility. This study examined a soil improvement and sieving system using a new high functional soil improvement additive on agricultural soil having a high moisture content and viscosity, which accounts for approximately half of the radioactive-contaminated soil accumulated in Fukushima Prefecture. The soil sieved by this system using a small amount of the improvement additive can be reused as a material for earth structures.