

(7-3) 回転式破碎混合工法による地下茎混じり粘性土の築堤土への分別・改良事例

○中島典昭・横田季彦・武田都
日本国土開発

1. はじめに

利根川上流河川事務所管内の渡良瀬遊水地においては、平成22年3月に「渡良瀬遊水地湿地保全・再生基本計画」¹⁾が策定され、遊水地の自然環境保全と治水機能の向上に配慮した「掘削による湿地の再生」を図る河川整備事業を推進している。この掘削により、良好な池沼や湿地を増やし、外来種の増殖を抑制し湿地環境を再生すると共に、周辺地域や利根川下流域の洪水調整機能を向上させ、掘削土は堤防整備等へ有効利用を図るものである。この掘削土のうち、ヨシ原の土砂においては、ヨシの地下茎が多量に含まれる粘土質の含水比の高い塊状を呈する土質（以下、「原料土」と称する。）であり、有機物を含むことから、そのままでは盛土材料等へ利用することは土木資材として望ましくない。そのため、利根川上流河川事務所では、原料土に含まれるヨシ地下茎を除去し、耐浸透性機能の優れた築堤土に改良して、堤防整備等に利用するための諸調査が行われている。調査は、手選別、或いはトロンメルなどの選別機械によるヨシ地下茎の除去が行われたが、作業効率や分別精度で満足するものではなかった。今後、事業を推進するためには、原料土からヨシ地下茎を効率的に、且つ、精度よく土砂とヨシ地下茎とに分別し、築堤土としての品質を満たす施工法の確立が課題であった。

このような状況を背景として、粘土塊の解砕と均質な混合を可能とする回転式破碎混合工法を用いて、原料土を解砕し、土砂からヨシ地下茎を分離し、併設した振動ふるい機でヨシ地下茎を除去する現地適用性試験を行った。その結果、手選別や選別機械のみの分別と比べて、回転式破碎混合工法を用いることでヨシ地下茎を効率的に精度良く分別することが可能であることを確認した。また、分別した土砂の施工性確保を目的に、含水比の高い原料土を土砂とヨシ地下茎とに分別し、同時に石灰改良した結果、築堤土としての品質を確保することが確認された。更には、分別精度の向上と石灰使用量の低減に取組んだ試験施工を行い良好な結果を得た。本報は、それら試験施工について報告する。

2. 試験概要

2.1 使用材料および使用機械

対象とする原料土は、自然含水比 $w_n=30\% \sim 80\%$ 、細粒分含有率 $F_c=60\% \sim 96\%$ の主に粘土、或いは砂質粘土である。図-1に対象とする原料土の粒径加積曲線を示す。また、写真-1には回転式破碎混合工法（以下、「本工法」と称する。）と振動ふるい機を併設したプラントシステムを示す。

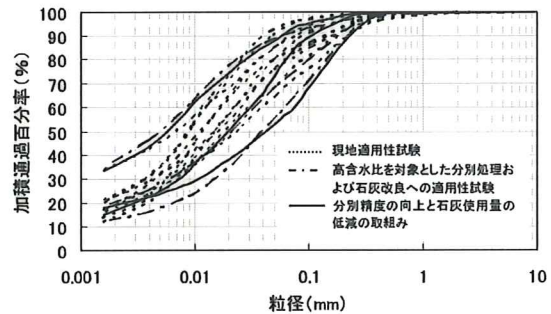


図-1 原料土の粒径加積曲線

2.2 現地適用性試験

現地適用性試験は、2種類の原料土を使用した。A材と称する原料土は、自然含水比 $w_n=51\%$ 程度、細粒分含有率 $F_c=94\%$ 程度の粘土主体の材料である。一方、B材と称する原料土は自然含水比 $w_n=35\%$ 程度、細粒分含有率 $F_c=60\%$ 程度で、A材と比べて含水比の低い砂分を含む材料である。

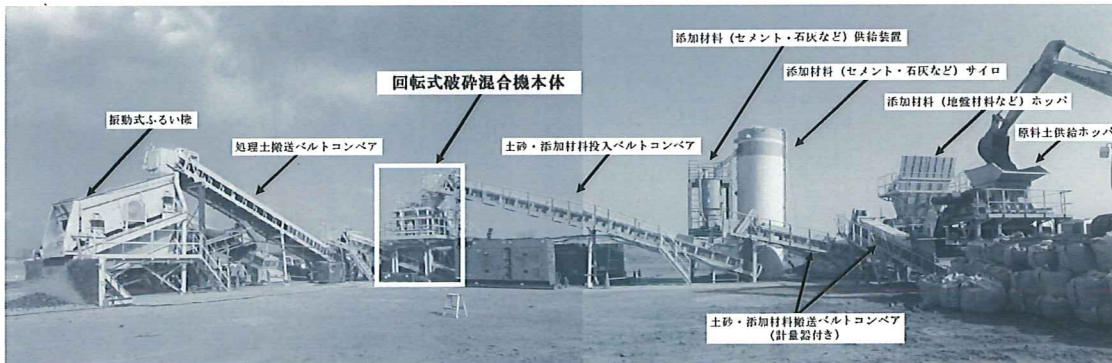


写真-1 回転式破碎混合工法と振動ふるい機を併設したプラントシステム

The embankment soil of the cohesive soil which the rhizome by Rotary Crushing and Mixing Method, and the example of separation and improvement.

Noriaki Nakajima, Suehiko Yokota, Miyako Takeda (JDC Corporation)

2.2.1 原料土解砕試験

原料土からヨシ地下茎を除去するためには、原料土を解砕して土砂とヨシ地下茎とに分離することが一つの要点となる。そのため、粘土塊の解砕の程度がヨシ地下茎の分別に大きな影響を及ぼすと考えられる。そこで、原料土解砕試験では、原料土の解砕に適した回転式破砕混合機（以下、「本機」と称する。）のチェーン回転数の検討を行い、次いで、本機の解砕効果を確認した。

チェーン回転数の検討においては、既往の文献²⁾等を参考にしてチェーン回転数を 300rpm と 500rpm の 2 つを選定し原料土を解砕した。評価基準は、チェーンの打撃によってヨシ地下茎が細断されずに土砂とヨシ地下茎とが分離した状態の回転数とし、目視観察により確認した。

本機の解砕効果においては、塊状の粘土を解砕することによってヨシ地下茎は土砂から分離すると考えられることから、解砕前後の原料土の粒度を測定し解砕の程度を確認した。この粒度試験では、塊状の粘土の粒径を評価するため、JIS A 1204 土の粒度試験とは異なる方法で行った。試験は、掘削し仮置きした状態の原料土、および解砕処理した土砂の塊状の粘土をそのままの状態で天日乾燥させた後、JIS Z 8801 に準拠したふるいを用いて気中で順次ふるい分け、ふるい目ごとに残留した試料の含水比を測定して通過質量百分率を求める方法とした。また、粒度試験に使用するふるいの最小目開きは、気中で試料を崩さずにふるい分けが可能であった 2.00mm とした。

2.2.2 原料土分別試験

原料土から土砂とヨシ地下茎とに分別する際には、ふるい目開き、処理量が分別効率に影響を及ぼすと考えられる。そのため、原料土分別試験では分別に適したふるい目開きと、処理量の関係を確認し、良好な分別効果の得られる条件を選定する目的で実施した。

ふるい目開は、前項で選定した回転数と、粒度試験結果から得た解砕後の最大粒径を勘案した 2 種類のふるい目開を振動ふるいに機に適用し、処理量を 50,75,100m³/hr の 3 設定値に変化させて約 30 分程度連続運転した時の分別効果を確認した。分別効果の確認は、基準化された指標がないため、本試験では除去率と称した指標によって評価した。

ここに、除去率とは式-1 で表される。

$$\text{除去率} = \frac{\text{除去したヨシ地下茎の湿潤重量(g)}}{\text{原料土に含まれるヨシ地下茎の湿潤重量(g)}} \times 100 (\%) \quad (\text{式-1})$$

原料土に含まれるヨシ地下茎の湿潤重量に対する分別した土砂中のヨシ地下茎の湿潤重量比を評価するもので、除去率の大きいほどヨシ地下茎が除去され分別精度の高いことを示す。除去率を求めるための試験は、分別処理前の原料土を湿潤重量で 50kg 程度採取し、ステンレス製の目開き 20mm 程度のメッシュバケットに原料土を入れ、高圧洗浄機で土砂を洗い流し、メッシュバケットに残留したヨシ地下茎をウェス等で表面の水滴を取り除き、ヨシ地下茎の重量測定を行う。同様に、分別処理後の土についても同じ方法で残留するヨシ地下茎の重量測定を行う。

2.3 高含水比原料土を対象とした分別処理および石灰改良への適用性試験

本適用性試験は、実規模工事を想定して、2.6 万 m³ の原料土を対象に連続施工における安定的な分別処理と、石灰改良による施工性確保を目的に行った。評価項目は、分別処理においては除去率を求め分別精度を評価した。施工性については、分別・改良した土のコーン指数を測定し、管内築堤工事で標準的な築堤盛土の施工性の指標とされるコーン指数 $\geq 400\text{kN/m}^2$ を目標に評価した。使用した原料土は自然含水比 $w_n=45\sim 60\%$ 、細粒分含有率 $F_c=72\sim 96\%$ であり、含水比の高い材料が主で、コーン指数は平均で $q_c=120\text{kN/m}^2$ 程度と施工性の悪い材料である。なお、石灰改良においては、事前に配合試験を実施し、コーン指数 $q_c=400\text{kN/m}^2$ が得られる添加量（乾燥土砂重量比）を求め、この配合を現場の品質管理指標とした。

2.4 分別効率の向上と石灰使用量の低減の取り組み

本検討では、大規模工事を想定して、5 万 m³ の原料土を対象に更なる分別効率の向上と、築堤土の施工性確保と植生への影響低減の両面に配慮して、石灰使用量を抑制した効率的な土砂改良システムの確立を目指す取り組みを行った。

分別効率の向上については、塊状の粘土とヨシ地下茎の比重差に着目し、一連工程の中に風力選別機を追加適用し、比重の異なるヨシ地下茎と塊状の粘土を再分別することにより、より多くの土砂を築堤土に活用することを目的として行った。また、石灰使用量の低減については、掘削後、原料土を 1 ヶ月間仮置きして曝気乾燥し、含水比を低下させて石灰使用量の低減を図ることを目的として行った。本検討時の施工期間は、梅雨の 6 月から開始し、曝気乾燥が期待される夏季、台風が多い 9 月、そして冬期前の 11 月までの約 6 ヶ月間で行った。本検討で使用した原料土は、自然含水比 $w_n=30\sim 55\%$ 、細粒分含有率 $F_c=65\sim 95\%$ の材料である。なお、石灰改良においては事前に配合試験を実施し、1 ヶ月養生後にコーン指数 $q_c=400\text{kN/m}^2$ が得られる添加量（乾燥土砂重量比）を求め、この配合を現場の品質管理指標とした。

3. 試験結果

3.1 原料土解砕試験

3.1.1 チェーン回転数の検討

試験の結果、チェーン回転数 500rpm は塊状の粘土は解砕され、土砂とヨシ地下茎とに分離するものの、ヨシ地下茎は 20mm 程度に細断された。一方、チェーン回転数 300rpm は塊状の粘土が解砕され、ヨシ地下茎は細断されずに土砂と分離した状態であった。この結果から、分別に適したチェーン回転数は 300rpm が適当と判断した。

3.1.2 解砕効果

図-2 に原料土の解砕処理前後の粒径加積曲線を示す。図-2 から、A 材, B 材共に解砕前の最大粒径は 150mm~200mm で、塊状の粘土の粒度は石分となる 75mm 以上が 50%程度、礫分となる 2.00mm~75mm が 50%程度であった。一方、解砕後の塊状の粘土の粒度は、75mm 以上の石分の塊状の粘土は解きほぐされて最大粒径が 53mm となり、2.00mm~75mm の礫分に移行している。この結果から、本機の解砕効果を確認した。また、目視観察では塊状の粘土が解砕されて土砂とヨシ地下茎とに分離していることが認められた。

3.2 原料土分別試験

前項 3.1.1, および 3.1.2 項から、チェーン回転数は 300rpm とし、ふるい目開きは解砕後の最大粒径が 53mm であったことから、50mm と 60mm のふるいを採用して分別試験を行った。図-3 に処理量と除去率の関係を示す。図-3 から、ふるい目開き 50mm, 処理量 75m³/hr 程度の時に除去率が大きくなることが認められる。この結果から、本工法と併設した振動ふるい機のプラント構成においては、ふるい目開き 50mm, 処理量 75m³/hr 程度の時に効果的な分別性能が発揮できる設定と判断した。

3.3 高含水比原料土を対象とした分別処理および石灰改良への適用性試験

図-4 に測定頻度と除去率, コーン指数の関係を示す。図-4 から、除去率は平均 94% と良好な分別結果を得た。一方、施工性を確保するためのコーン指数は、原料土の掘削深度, 位置による性状変動の影響等により改良土のコーン指数は $qc=400\text{kN/m}^2\sim 800\text{kN/m}^2$ とバラツキが認められるものの、築堤盛土の施工性の指標となる $qc\geq 400\text{kN/m}^2$ を確保した。

なお、本試験においては、原料土のほとんどがコーン指数 $qc<400\text{kN/m}^2$ であったため、ほぼ全量の原料土に対して石灰改良を行った。そのため、原料土の性状が改善されて分別し易くなり、石灰未添加の 3.2 節の原料土分別試験の除去率 78% と比べて、石灰を添加した本適用性試験では平均 94% と高い除去率が得られたと考えられる。以上から、本工法の分別・改良における適用性においては、石灰改良による分別効率の向上はあったものの、2.6 万 m³ の土量を連続して土砂とヨシ地下茎とに精度よく分別し、築堤土としての品質を満たす改良が行える施工法として適用が確認された。

なお、本工法で石灰改良した築堤土の耐浸透性機能を確認するため、施工時の平均石灰添加量 50kg/m³ で改良した築堤土と、石灰未改良の築堤土の透水係数を測定し、石灰添加の有無による遮水性を確認した。この時の試験条件は、締固め度 90% で変水位とし、石灰改良土においては 1 日密閉養生後に供試体を作製した。透水係数は、石灰未改良土が $k=4.1\times 10^{-8}\text{m/s}$ であり、石灰改良土は $k=3.8\times 10^{-8}\text{m/s}$ であった。この結果から、石灰改良土は石灰未改良土とほぼ同等の遮水性能を有していることが確認された。但し、石灰改良土においては 1 日養生後の透水係数であり、実際の仮置き状態など様々な条件によって遮水性は異なると考えられるため、ここでは一考察とする。

3.4 分別効率の向上と石灰使用量の低減効果の取り組み

3.4.1 分別効率の向上

前節から、除去率は 94% と良好な分別結果を得られたが、分別したヨシ地下茎の中には分別できずにふるいに残留した土砂が 2.6 万 m³ のうち 2% 程度含まれていた。そのため、より多くの土砂を築堤土に活用することを目的に、風力選別による再分別を行った。その結果、ふるいに残留した 2% の土砂のうち、1.9% を築堤土として有効活用することがで

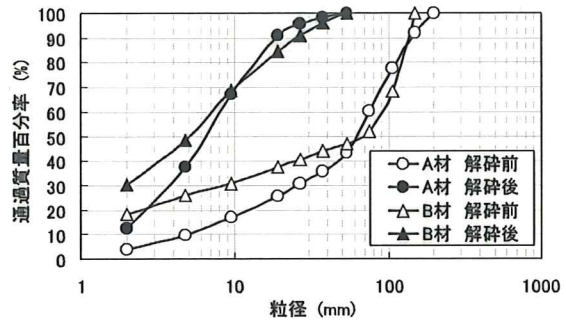


図-2 原料土の解砕処理前後の粒径加積曲線

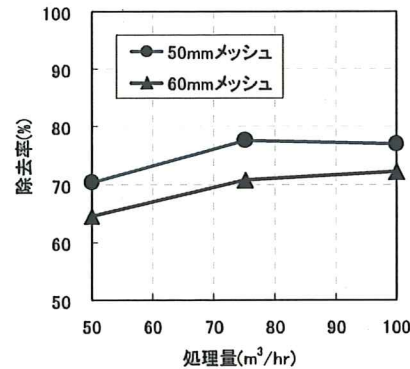


図-3 処理量と除去率の関係

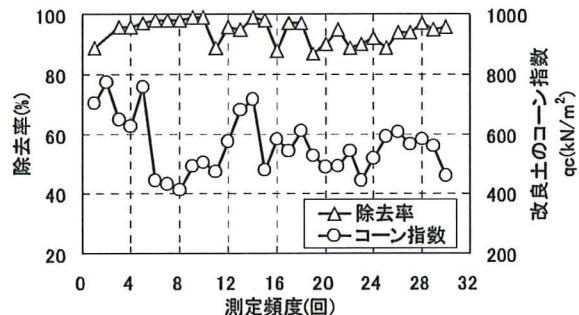


図-4 測定頻度と除去率, コーン指数の関係

き、風力選別による更なる分別効率の向上が図れることを確認した。

3.4.2 石灰使用量の低減効果

(1) 仮置き曝気乾燥効果

図-5 に施工日と調節池内の地下水位と改良前原料土含水比、日平均気温、降水量の関係、図-6 に施工日と調節池内の地下水位と改良前原料土コーン指数、日平均気温、降水量の関係を示す。図-5, 6 から、地下水位の低い6月下旬～9月中旬の含水比は30%～50%程度で、原料土のコーン指数は200kN/m²～1200kN/m²程度と変動は大きい、コーン指数は $q_c \geq 400\text{kN/m}^2$ を示す原料土が多い、一方、地下水位の高い9月中旬以降は含水比が50%前後、コーン指数は100kN/m²～400kN/m²程度と6月下旬～9月中旬に比べ変動は小さい、コーン指数は $q_c \leq 400\text{kN/m}^2$ を示す原料土が多い。図-7 に施工日と改良土のコーン指数の関係を示す。この図から、6月下旬～9月中旬は石灰未添加の原料土が多く、9月中旬以降になると石灰添加を必要とする原料土が多くなるのがわかる。

この結果から、仮置き曝気乾燥効果の高い6月下旬～9月中旬は、原料土の含水比が低下することによって性状が改善され、石灰改良を必要としない施工が可能となった。その一方で、仮置き曝気乾燥効果の小さい9月中旬以降は、原料土の含水比低下は見込めず、性状の改善は得られ難いため石灰改良の必要となる施工が多くなった。なお、調節池内の地下水位は、調節池周囲にある水田の灌漑や9月、10月の強い降雨の影響により、9月以降に上昇したものと考えられる。

(2) 石灰使用量の低減効果

本検討で対象とした原料土5万m³の内、石灰改良を行った土量は2.2万m³で、全体の56%にあたる2.8万m³は石灰改良を必要としない施工となった。また、前回の工事では、ほぼ全量の原料土を平均50kg/m³程度の石灰で改良したのに対して、今回の工事では平均20kg/m³程度の石灰改良であった。この結果から、石灰添加量は前年度に比べて大幅に低下し、仮置きによる曝気乾燥効果が石灰使用量の低減に大きく寄与したものと考えられる。但し、原料土の性状、天候などによっては、仮置き曝気乾燥効果が十分に発揮されないこともある。

4. まとめ

今回の検討結果から、次の内容を確認した。1) 本工法を用いることにより、塊状の粘土にヨシ地下茎を含む原料土を解砕することで、効率的に土砂とヨシ地下茎とに分離し、良好な分別が行えた。2) 連続した施工においては、土砂とヨシ地下茎とに効率的に精度よく分別し、且つ、築堤土としての品質を満たす改良が行える施工法としての適用が確認された。3) 風力選別機を追加適用することで、更なる分別効率の向上を確認した。4) 仮置き曝気乾燥による原料土の性状改善が石灰使用量の低減に効果のあることを確認した。

5. おわりに

渡良瀬遊水地においては、平成24年7月に「ラムサール条約湿地」に登録され、現状の湿地保全と、計画的な掘削による湿地の再生が、今後更に自然環境保全と治水機能の向上に配慮しながら推進される。本工法においては、遊水地内で掘削される様々な性状の土砂を分別し改良できるように、適用の可能性について検討を行う。

【参考文献】

- 1) 国土交通省 関東地方整備局 利根川上流河川事務所：渡良瀬遊水地湿地保全・再生基本計画，2010.3
- 2) 中島典昭，芳澤秀明：回転式破砕混合機の岩の選別方法への適用性について，土木学会全国大会第57回年次学術講演会，pp.1411-1412，2002.9

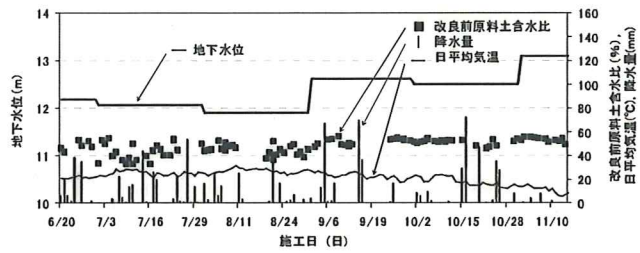


図-5 施工日と地下水位と改良前原料土含水比、日平均気温、降水量の関係

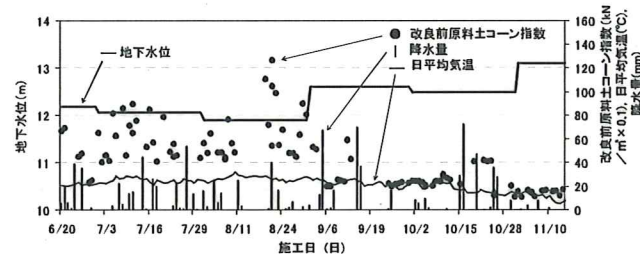


図-6 施工日と地下水位と改良前原料土コーン指数、日平均気温、降水量の関係

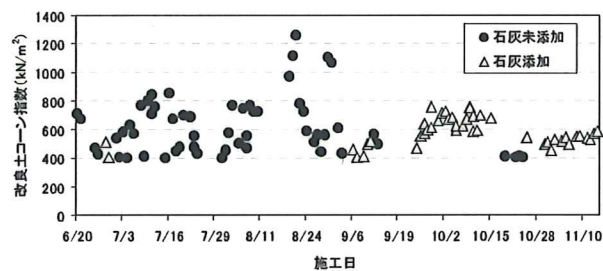


図-7 施工日と改良土のコーン指数の関係