

3. 分級と改良を用いたゴミ混じり津波堆積土砂の 再資源化に関する試験施工

東北大学大学院環境科学研究科 高橋 弘
東亜建設工業(株) ○ 泉 信也
(株)森環境技術研究所 柴田 聡

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、日本における観測史上最大のマグニチュード9.0を記録した。この地震により場所によっては波高10m以上の大津波が発生し、沿岸部に未曾有の被害をもたらした。大震災により発生した津波堆積物は約1,300～2,800万トンにもなると報告されている¹⁾。現在、可燃物は焼却処分し、金属類などは分別してリサイクルに回すなどの処理が精力的に行われており、2013年5月末時点で約7割の処理が完了し、目標としていた2013年度末までの処理完了が実現されつつある²⁾。

一方、比較的ガレキ・ゴミの少ない津波堆積物は防潮堤建設への使用が決まるなど、徐々に処分が進みつつあるが、大量のガレキ・ゴミが混ざった津波堆積物は直接利用が困難であり、処理が遅れているのが現状である²⁾。このゴミ混じりの津波堆積物から比較的に容易にゴミを除去でき、かつ津波堆積物の土砂分を復興資材などに再利用できれば、被災地の復旧・復興に大きく貢献できると考えられる。

そこで著者らは、(一社)東北地域づくり協会「技術開支援＜東日本大震災復興関係＞」を受け、東亜建設工業(株)が開発した分級技術(ソイルセパレータマルチ工法)と東北大学と(株)森環境技術研究所が共同で開発した泥土改良技術(ボンテラン工法)を組み合わせ、ゴミ混じり津波堆積物からガレキやゴミを除去し、津波堆積土砂を砂と粘土に分離して、津波堆積土砂の全量を再資源化する実証試験を宮城県大郷町の(株)柿崎工務所大郷工場で実施した。本報ではその内容について報告する。

2. ゴミ混じり津波堆積物

本実証試験では、宮城県が亘理処理区(名取市)で管理するゴミ混じりの津波堆積物を約10m³ほど提供頂き、宮城県大郷町の(株)柿崎工務所大郷工場で平成24年6月11～13日の工程で実施し、6月12日に実証試験の一部を公開した。

写真-1に津波堆積物の外観を示す。津波堆積物

には、大小の木片、木くず、ビニール片、空き缶、プラスチック、鋼材など様々なガレキが混合されていた。試験に先立ち、ゴミ混じり津波堆積物の性状把握のため分級試験を実施した結果、ガレキ・礫、砂、シルト・粘土、水分の質量割合は表-1に示す通りとなった。ただし、水分以外は乾燥質量である。また土粒子の粒度分布を図-1に示す。また確認のため、津波堆積物の放射線量を測定した結果、0.13μSv/hであった。津波堆積物から十分



写真-1 ゴミ混じり津波堆積物

表-1 津波堆積物中の質量割合

ガレキ・礫	砂	シルト・粘土	水分
4%	42%	28%	26%

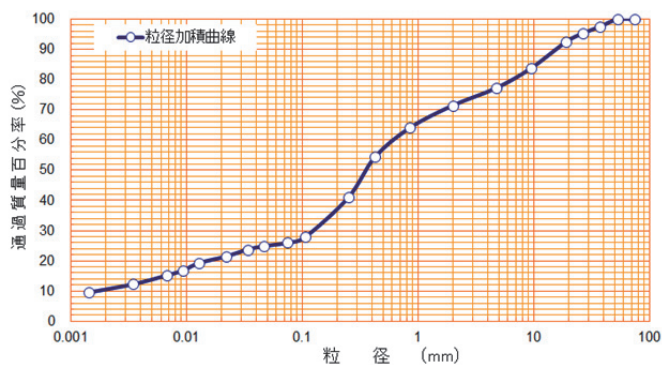


図-1 土粒子の粒度分布

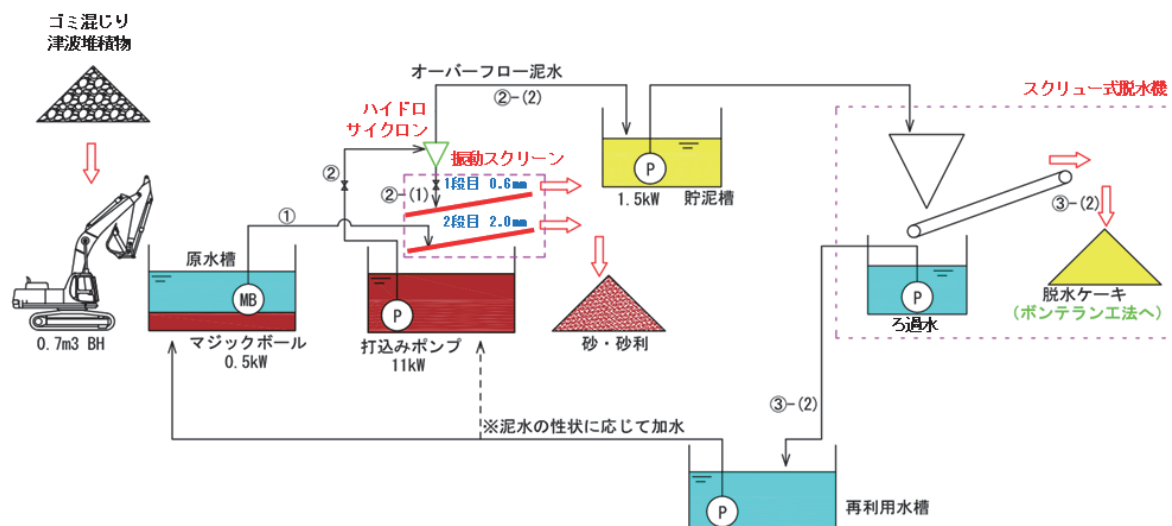


図-2 分級工程の概略

に離れた空間線量は $0.05 \mu \text{Sv/h}$ であり、空間線量と比べるとやや高いものの、放射線量としてはほとんど問題ないレベルであった(写真-1参照)。

3. 実証実験概要

本試験では、分級技術(ソイルセパレータマルチ工法)を用いてゴミ混じり津波堆積物からゴミを除去し、砂を分級した後、分級工程から排出されるフロック(粘土)に改良技術(ボンテラン工法)を適用して緑化基盤材を生成する一連の工程を確認することを目的としている。

分級装置(日処理量 $3 \sim 5 \text{m}^3$)の外観を写真-2に示す。また分級工程の概略を図-2に示す。分級工程は以下の通りである。



写真-2 実証試験に用いた分級装置

- ① ゴミ混じり津波堆積物をホイールローダですくい取り、水槽に投入する。

- ② ゴミ混じり津波堆積物に加水し、サンドポンプを用いて水槽内で津波堆積物を攪拌する。サイズが大きく軽いゴミや木片などのゴミはこの時点で水面に浮いてくるので、網ですくい取る。
- ③ 浚渫装置(マジックボール)を水槽内に沈め、津波堆積物を浚渫する。浚渫装置の吸い込み口はメッシュ状になっており、サイズが大きく重いゴミは、最終的に水槽内に残るので、これは最終処分する。
- ④ 分級装置に流送された泥水は、初めに2段目のスクリーンに入る。スクリーンのメッシュサイズは 2mm であり、ここで 2mm 以上の礫や小さなゴミが除去され、分級装置から排出される。
- ⑤ 2段目のスクリーンを通過した泥水は、スクリーン下部に設置した水槽に落下する。
- ⑥ 水槽中の泥水は、水中ポンプによりハイドロサイクロンに流送される。
- ⑦ ハイドロサイクロンの上部からはシルト・粘土など粒径の小さな粒子が水とともに泥水として流出し、隣に設置した貯泥槽に一旦貯えられる。下部からは粒径の大きい粒子が排出され、1段目のスクリーン上に落下する。1段目のスクリーンのメッシュサイズは 0.6mm であり、ここで砂が分級され、分級装置から排出される。
- ⑧ 貯泥槽の泥水は濁水処理装置に流送され、凝集剤により、フロックと呼ばれる粘土の凝集物を生成させ水と分離させる。
- ⑨ 生成されたフロックは、スクリー式脱水機によって脱水された後、粘土として排出され、改良工程に搬送される。脱水された水は再度、津波堆積物の加水・攪拌に利用されるので、全体の処理システムから外部に水は排水されない。

以上の工程により、ゴミ混じり津波堆積物は、ゴミ、砂、粘土に分級される。砂はそのまま復興資材として再利用できる。例えば、液状化対策として用いられるサンドドレーン工法の砂材として使用する。一方、粘土はそのままでは再利用できないので改良が必要である。本試験では、粘土を緑化基盤材として再資源化するため、粘土の改良工程は以下になる。

- ① フロック(粘土)の含水比を計測し、古紙破砕物の添加量を決定する。粘土を緑化基盤材として再資源化するので、古紙の質量：土粒子の乾燥質量比が1:6になるように古紙破砕物の添加量を定める。この比率は著者らの先の研究³⁾で求められた最適混合比率である。
- ② 上述の計算で決定された量の古紙破砕物を粘土に添加し、攪拌・混合する。
- ③ 水溶性ポリマーを所定量だけ添加し、攪拌する。水溶性ポリマーは繊維質物質と土粒子を結合させる接着剤の役割を果たす。水溶性ポリマーの添加量はこれまでの研究³⁾にならい1.2kg/m³とする。
- ④ 生成された土砂を天日乾燥した後、解砕し、篩により粒度を整え、製品とする。

4. 実証実験結果および考察

ゴミ混じり波堆積物に加水している様子を写真-3に示す。加水する水の量は任意で構わないが、山積みになっている津波堆積物はかなりの乾燥状態であり、土粒子の団粒化も見られたので、水槽内での攪拌を容易にするため、津波堆積物の量に対して数倍の水量を加水した。水槽内に加水する工程で浮上した比較的大型のゴミを写真-4右に、また攪拌工程で土砂から分離・浮上した木片等の小さなゴミを写真-4左に示す。これらのゴミは前述の通り網ですくい取った。

写真-5に浚渫装置(マジックボール)を示す。実証



写真-3 津波堆積物に加水している様子

試験期間中、浚渫自体は特に問題なく、ゴミ混じり津波堆積物中の土砂を円滑に浚渫して分級装置に流送できることが確認された。

上述したように、浚渫土は初めに分級装置の2段



写真-4 水槽内で分離されたゴミ(右:加水時に浮上したゴミ, 左:攪拌過程で浮上した木片)



写真-5 浚渫装置(マジックボール)



写真-6 分級された礫や砂(左:2段目スクリーンの礫, 右:1段目スクリーンの砂)

目のスクリーンに送られ、礫や攪拌水槽では浮上しなかった小さなゴミが除去される。写真-6左に2段目スクリーンから排出された礫などを示すが、小さな木片に泥が付着したものが礫と一緒に排出されていた。写真-6右には1段目スクリーンから排出された砂を示すが、2段目スクリーンから排出された礫や泥混じりのゴミの量に比べて、約1/10程度の量にとどまった。本来であれば1段目スクリーンから多量の洗い砂を排出させたかったが、想定よりも微量にとどまった原因として、今回の実証試験は小型で簡易な攪拌水槽を使用したため水槽内での攪拌が不十分であったことが考えられる。今回の試験で使用したゴミ混じり津波堆積物は、震災後約2年半を経過し、かなりの乾燥状態になっており、土粒子の団粒化・固結化が見られた。つまり砂粒子の周りに粘土・シルトがこびりついた状態で、加水程度では砂粒子の周りにこびりついた粘土・シルトを剥がすことができなかったためであると推察される。その結果、小さな木片の周りに粘土・シルトだけでなく砂分もこびりつき、見かけ上の粒子径が2mmより大きくなってしまったものは2段目のスクリーンで排出されてしまい、ハイドロサイクロンを経て1段目のスクリーンから排出された砂が当初の想定よりもかなり少なくなってしまったと考えられる。

しかし、東亜建設工業(株)が2012年5月に気仙沼市で実施した津波堆積物の分級試験では、機械式の攪拌装置を用いて強力に土砂攪拌を行い、分級装置を用いて津波堆積物から粘土・シルトがほとんど含まれない状態のクリーンな砂の分級に成功しており⁴⁾、また今回の実証試験でもサンドポンプを用いて水槽内での攪拌を十分に行った際には写真-6右のような砂が得られた。つまり水槽内の攪拌を十分に行えば、粘土・シルトが含まれないクリーンな砂の分級は可能であると考えられる。逆に本実証試験を通してゴミ混じり津波堆積物のような団粒化・固結化が見られる土砂を分級してクリーンな砂を取り出すためには、水槽内の攪拌を十分に行う必要があることが確認された。

砂については、上述したように当初の想定よりも微量な回収量にとどまったので、今回の試験で得られた砂を復興工事現場に提供するまでには至らなかった。そこで、水槽内での攪拌が十分に行われ、クリーンな砂が得られたと仮定した場合、どのような粒度分布になるかを東亜建設工業(株)が2012年5月に気仙沼市で実施した津波堆積物の分級試験⁵⁾から推定した。その結果を図-3に示す。図中にはドレーン砂の適用範囲^{6,7)}も併せ示してあるが、想定される砂の粒度分布はほぼこの範囲内に入っており、簡易な粒度調整によりドレーン材として十分使用可能であると推察された。

写真-7にスクリー式脱水機から排出されたブロックを示す。このブロック内には全くゴミは混入しておらず、いわゆるクリーンな粘土状態であった。すなわち、濁水処理・ブロック排出は当初の想定通りの結果が得られた。

上述したように、ブロックはこのままでは再利用し難いので、本実証試験ではブロックにボンテラン工法を適用し、緑化基盤材として再資源化することにした。本実証試験で得られたブロックの含水比は200%であったので、古紙の乾燥質量：土粒子の乾燥質量が1：6になるように古紙破砕物の添加量を70kg/m³と決定した。写真-8にブロックに古紙破砕物を添加・混合している様子を示す。攪拌が終了した後、水溶性ポリマーを添加しさらに攪拌・混合を行った。写真-9に生成された緑化基盤材を示す。写真-9はポリマーの添加・攪拌を終えた直後の写真であり、実際にはこれを天日乾燥し、解砕して粒度を整えて最終的な緑化基盤材に仕上げる。

ところで、濁水処理工程では凝集剤により粘土の凝集物を生成しているの、新たに水溶性ポリマーを添加する必要はないとも考えられる。そこ

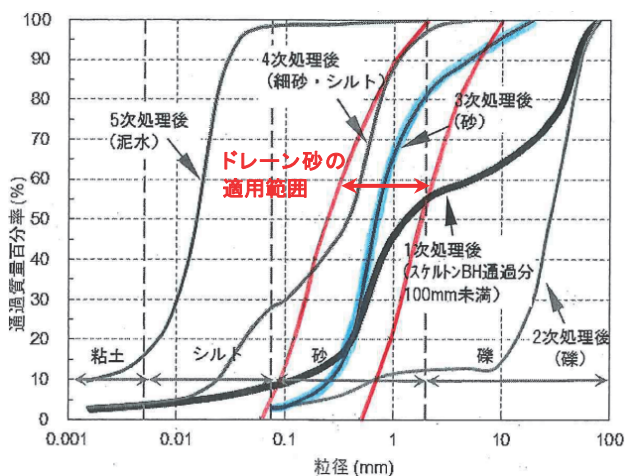


図-3 想定される砂の粒度分布



写真-7 スクリー式脱水機から排出されたブロック



写真-8 古紙破砕物の添加・混合

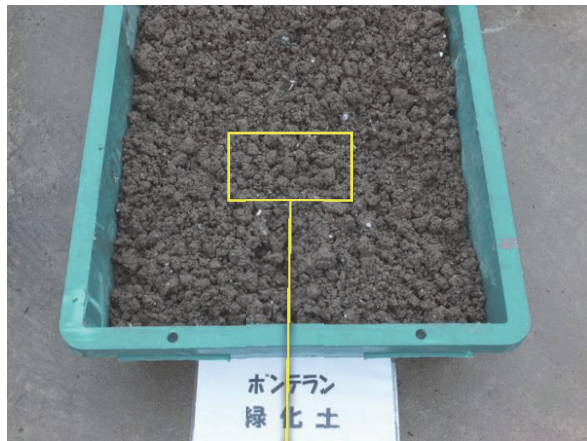


写真-9 生成された緑化基盤材

で、本試験では水溶性ポリマーを添加したものと添加しないものの両方の緑化基盤材を作成し、保水力、軽量性、透水性、保肥力の4つの土壌物理性能を比較した。これらの土壌物理性能は下記の項目で評価した。

- 保水力：pF1.5～3.8における有効水分量
- 軽量性：pF1.5における湿潤比重
- 透水性：透水係数
- 保肥力：塩基置換容量(CEC)

土壌物理性能の目標値は、著者らのこれまでの研究³⁾に従い、以下のように設定した。

- 保水力：100 [Liter/m³]以上
- 軽量性：1.0[-]以下
- 透水性：1×10⁻³[cm/s]以上
- 保肥力：6[cmol(+)/kg]以上

表-2 緑化基盤材の土壌物理性能比較

	目標値	ポリマー 添加	ポリマー 無添加
保水力 [Liter/m ³]	100 以上	143	175
軽量性[-]	1.0 以下	1.17	1.15
透水性 [cm/s]	1×10 ⁻³ 以上	2×10 ⁻³	2.4×10 ⁻⁵
保肥力 [cmol(+)/kg]	6 以上	25.2	30.9

表-2に両者の性能比較を示す。保水力に関しては、ポリマーの添加の有無にかかわらず100[Liter/m³]の目標値を満足している。保肥力については両者とも目標値を大きく超える極めて高い値を示している。軽量性については、両者とも目標値を満足していないが、目標値に僅かに足りない程度であり、ほぼ満足できる値になっている。大きく異なるのは、透水性であり、ポリマーを添加した緑化材は目標値を満足しているが、無添加の緑化材は目標値を大きく下回っており、透水性が悪く湿害を起こす可能性がある。すなわち、ブロックを緑化基盤材に改良するためには、濁水処理工程で添加される凝集剤だけでは不十分であり、改良工程で水溶性ポリマーを添加する必要があることが確認された。

なお、本実証試験で作成した緑化基盤材は、名取市が被災地の地盤を嵩上げする際のイメージとして造成した盛土の一面を緑化する際の基盤材の一部として全量再利用された。写真-10に緑化工事の様子を示す。また写真-11に緑化工事から約1ヶ月後の植生状況を示す。名取市で発生したゴミ混じり津波堆積物を処理して緑化基盤材を作成し、その基盤材を用いて名取市のイメージ盛土を緑化するという、いわゆる廃棄物の地産地消が実現された。今後、被災地のゴミ混じり津波堆積物を有効利用する際の1つの可能性を示すことができたと考えている。



写真-10 緑化工事の様子



写真-11 緑化工事から1ヶ月後の植生の様子

5. むすび

分級(ソイルセパレータマルチ工法)と改良(ボンテラン工法)を融合することにより、ゴミ混じり津波堆積物からゴミを除去し、土砂を全量再資源化することが可能であることを今回の実証試験により確認した。分級された砂は復興資材として利用可能であり、改良された粘土は緑化基盤材として利用可能である。本工法では、砂のみならず粘土も緑化基盤材として売却可能であるので、トロンメル分級と比較しても経済的な工法であると考えている。

なお、改良工程でセメント系固化材を添加すれば、破壊強度・破壊ひずみが大きく、乾湿繰り返しに対する耐久性が高く、液状化し難い地盤材料を生成することが可能である⁸⁾。本実証試験の結果を広く発信し、被災地の復旧・復興に貢献して行きたいと考えている。

謝辞

本実証試験は、(一社)東北地域づくり協会 技術開支援<東日本大震災復興関係>を受けて実施したことを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 一般社団法人廃棄物資源循環学会, 津波堆積物処理指針(案)(平成23年7月5日)。
- 2) 7月2日付け建設工業新聞(1面), 2013。
- 3) 山崎 淳, 高橋 弘, 金成 英夫, 森 雅人: 土壌物理特性の観点から見た緑化基盤材の生成に関する実験的研究, J. of MMIJ, Vol.124, No.12, pp.809-817, 2008。
- 4) 東亜建設工業(株):「津波堆積土砂からのがれき分別と土砂の分級による良質な建設材料の有効利用」総合報告書, pp.3-25~3-31, 2012。
- 5) 居場 博之, 御手洗 義夫: ソイルセパレータ・マルチ工法を用いた津波堆積物の有効利用技術, 地盤工学会誌, Vol.61, No.7, pp.32-33, 2013。
- 6) パック・ドレーン専業者協会: <http://www.packdrain.com/machine/>
- 7) 稲葉 真一, 富谷 昌義, 西田 一彦, 西形 達明: 碎石層のドレーン材としての適性に関する基礎的研究, 土木学会第59回年次学術講演会, pp.967-968, 2004。
- 8) 高橋 弘: 軟弱泥土を高機能性地盤材料に再資源化ーボンテラン工法の原理と特徴ー, 建設の施工企画, No.757, pp.50-55, 2013。