回転式破碎混合工法による津波堆積物の 分別処理と土質改良を目的とした適用性について[†]

角 脇 三 師* 中 島 典 昭* 横 田 季 彦**
山 本 仁* 山 野 雅 彦*

Applicability of the Rotary Crushing and Mixing Method to the Separation of Tsunami Deposits and Soil Improvement

by

Mitsushi KADOWAKI*, Noriaki NAKAJIMA*, Suehiko YOKOTA**,
Hitoshi YAMAMOTO* and Masahiko YAMANO*

The tsunami deposits that were produced during the Great East Japan Earthquake are mixtures of various types of waste. They are classified as a specified item and disposed of as waste. The national guidelines stipulate that the tsunami deposits that meet all the requirements (e.g. requirements for separation and disposal and freedom from toxic materials) and have been identified by prefectural or municipal governments should not be classified as waste. Under the circumstances, tests were conducted concerning the applicability of the rotary crushing and mixing method (NETIS KT-090048-V) that had been adopted for soil improvement for the purpose of expanding the use of the method for separating and disposing of tsunami deposits and modifying the separated deposits into recycled materials for use in public works.

Separating tsunami deposits that are in the form of soil mass using solely vibrating sieves is extremely difficult. It was found that deposits could be separated much better by crushing and grinding soil masses using rotary crushing and mixing machines. It was also became clear that making an effective use of concrete produced as disaster waste or crushing and mixing tsunami deposits using quicklime as an additive was highly effective for separating and disposing of deposits. As a result of adding concrete waste or quicklime for separating and mixing deposits, separation and mixing were improved and the trafficability was enhanced owing to the improvement of separated soils. The soils modified using the rotary crushing and mixing method were considered applicable as recycled fill materials.

Thus, using the rotary crushing and mixing method enables the separation of tsunami deposits, which are generally disposed of as waste unless modified, into waste and deposits and the use of separated deposits as recycled materials. Removing the deposits attached to waste as much as possible is expected to contribute to the reduction of the quantity of waste that needs to be treated at disposal sites.

Disaster waste will be disposed of at high speed in the affected areas. We propose the rotary crushing and mixing method as a useful method that can meet diverse requirements.

Key words : The rotary crushing and mixing method, Tsunami deposit, Waste separation, Soil improvement, Recycling

1 緒 言

東日本大震災において発生した津波堆積物は、様々な廃棄物が混入した土砂で、その性状は泥状のものから土砂と廃棄物が塊りとなった塊状のものまで多種多様ある。

東日本大震災に係る災害廃棄物の処理においては、「東日本大震災に係る災害廃棄物の処理指針（マスタープラン）」（環境省，平成23年5月16日）¹⁾をはじめとし、「東日本大震災からの復興に係わる公園緑地整備に関する技術的指針」（国土交通省，平成24年3月27日）²⁾「東日本大震災からの復旧復興のための公共工事における災害廃棄物由来の再生資材の活用について（通知）」（環境省，平成24年5月25日）³⁾など、国が基本的な指針を策定し、本格的な取組が行われ始めている。災害廃棄物は、

「可燃物」「不燃物」「特定品目」「その他」に区分される。その内、「特定品目」に分類される津波堆積物は、そのままでは廃棄物として処理されるため、国の指針、通達では、全ての要件（分別・処理、有害物質を含まないなど）を満たし、県や市町村が確認した津波堆積物については、廃棄物に該当しないこととしている。

このような状況を踏まえ、地盤改良技術として適用してきた回転式破碎混合工法（NETIS KT-090048-V）を津波堆積物の分別処理および分別した土砂を公共工事に利用される再生資材へと改良する工法の拡大を目指し、実規模大のプラントを用いた適用性を確認した。また室内試験を実施し、改良された土砂の物理特性を把握した。

[†] 原稿受理 平成25年5月9日 Received May 9, 2013 ©2014 The Society of Materials Science, Japan

* 日本国土開発㈱ 〒243-0303 神奈川県愛甲郡, Japan Development and Construction Co., Ltd, Aiko-gun, Kanagawa, 243-0303

** 正 会 員 日本国土開発㈱ 〒243-0303 神奈川県愛甲郡, Japan Development and Construction Co., Ltd, Aiko-gun, Kanagawa, 243-0303

2 試験概要

2・1 実規模プラントによる試験方法

試験に使用した津波堆積物Ⅰは、プラスチック類、木くず、紙くず、陶器等の廃棄物が多数混入した材料で、自然含水比 $w_n = 30.5\%$ 、礫分 11.4% 、砂分 61.7% 、細粒分 26.9% の地盤工学的分類上「礫混じり粘土質砂」に区分される。試験は、3 ケース実施した。Case 1 は、回転式破碎混合機を用いず、振動ふるい機のみで津波堆積物を分別した。Case 2 は、回転式破碎混合機と振動ふるい機を用いて、津波堆積物に生石灰を $30\text{kg}/\text{m}^3$ 程度（湿潤添加率 3% ）添加し、廃棄物と土砂とに分別した。Case 3 は、Case 2 と同様に回転式破碎混合機と振動ふるい機を用いた。Case 2 で使用した生石灰の代わりに、災害廃棄物でもあるコンクリートくずを流用し、これを 20% 程度になるように添加し分別した。回転式破碎混合工法の設備概要を Fig. 1 に示す。

なお、振動ふるい機に設置したメッシュ径を、事前の試験で得られた結果を反映して 40mm とした。

2・2 室内試験の実施方法

(1) 改良土のトラフィカビリティ

回転式破碎混合工法によって改良された土砂のトラフィカビリティを確認するため、津波堆積物と生石灰およびコンクリートくずの配合試験を行った。津波堆積物とコ

ンクリートくずは、実規模プラントを用いた津波堆積物の分別処理に使用した津波堆積物Ⅰとコンクリートくずを用いた。生石灰は粒径 $0 \sim 5\text{mm}$ を用いた。津波堆積物Ⅰに生石灰とコンクリートくずの配合割合を変化させ、回転式破碎混合機で破碎混合し、改良土を製造し、コーン指数試験 (JIS A 1228) を実施した。室内試験での廃棄物の分別処理は、実規模プラントで使用したメッシュ径 40mm とは異なるが、コーン指数試験に用いる試料の最大粒径が 4.75mm と規定されているため、回転式破碎混合機で破碎混合した改良土を、直接、手作業にて標準網ふるい 4.75mm で分別し、その分別した 4.75mm 以下の材料を試験に使用した。

(2) 回転式破碎混合機の解砕効果

回転式破碎混合機は、シルト・粘土が主体の塊状の土（以下、「塊状土」と称する。）を細かく解きほぐすことが可能であり、この解きほぐす効果（以下、「解砕効果」と称する。）を利用して、津波堆積物中の廃棄物と土砂を分別するものである。

本項では、解砕効果を確認するため、破碎前後の津波堆積物を気中ふるいと称した試験と、水洗い試験と称した試験を行い、津波堆積物中の廃棄物と土砂の分別性を確認した。試験に用いた試料は、津波堆積物Ⅱと称した自然含水比 $w_n = 47.1\%$ 、礫分 0.0% 、砂分 11.0% 、細粒分

Fig. 1 Outline of facilities used by the rotary crushing and mixing method.

Table 1 Results of separation of tsunami deposits.

	Case1	Case2	Case3
Separated deposits or modified soil
Separated waste
Effectiveness of separation	Low	High	High

89.0%の地盤工学的分類上「砂混じり細粒土」である。

気中ふるい試験は、試験に供する全湿潤土砂質量を測定後、110℃の乾燥炉で24時間乾燥させた後、乾燥した塊状土の塊を崩さないように標準網2mmふるいまで分級し、各ふるいに残留した塊状土、2mm以下の試料の乾燥土砂質量を測定して通過質量百分率を求めるものである。一方、水洗い試験は、気中ふるい試験で使用する試料を供して、全量を標準網ふるい0.075mmで水洗いし、炉乾燥させて各標準網ふるいで分級し、乾燥土砂質量を測定して通過質量百分率を求めるものである。この2つの試験方法により、塊状土の状態の粒径加積曲線を得られることができると共に、通常行われるJIS A 1204粒度試験で得られる水洗いした粒径加積曲線を得ることが可能となる。

なお、回転式破碎混合工法の破碎効果については、第28回土木学会関東支部発表論文「回転式破碎機によるフィルダム材料の粒度特性」(平成13年)⁴⁾においても評価しているので参照されたい。

(3) 改良土の物理特性と締固め特性および透水特性

津波堆積物とコンクリートくずの配合試験を実施した。試験に用いた津波堆積物は、津波堆積物Ⅲ、津波堆積物

Ⅳおよび津波堆積物Ⅴの3材料を用いた。コンクリートくずは、実規模プラントによる試験に使用したコンクリートくずを用いた。津波堆積物とコンクリートくずの配合割合は、解した状態の容積比で1:0.5と設定し、回転式破碎混合機を用いて破碎混合した。津波堆積物Ⅲ、ⅣおよびⅤの湿潤密度は、1.85、1.89および1.72g/cm³であり、含水比は、32.4、22.9および24.9%であった。コンクリートくずの湿潤密度は、1.4g/cm³であり、含水比は、0%であった。

本項における分別処理は、2・2節(1)項と同様に手作業にて分別を行った。メッシュ径は、標準網ふるい37.5mmと19.0mmである。試験ケースは、コンクリートくずを破碎混合したケース(以下、「ConF試料」と称す。)と、津波堆積物を回転式破碎混合機に通さずに手作業のみで分別したケース(以下、「F試料」と称す。)の2ケースとした。この2つのケースについて、物理、締固め、透水特性を調査した。

なお、粒度については、津波堆積物Ⅲ、Ⅳ、Ⅴの「F試料」とした単体材料と、コンクリートくず単体材料を破碎した粒度試験を行い、その結果から、津波堆積物Ⅲ、Ⅳ、Ⅴの「ConF試料」の粒度を計算より求めた。

Fig. 2 Results of evaluation of modified soil.

(left : quicklime added, center : concrete waste added, right : grain-size accumulation curve).

3 実規模プラントを用いた試験の結果と考察

振動ふるい機によって津波堆積物を廃棄物と土砂とに分ける分別性を、目視観察により評価した。津波堆積物の分別処理の結果を Table 1 に示す。Case 1 の津波堆積物は、振動ふるい機の振動により土砂が団粒化されて、ふるいに残留した。また、廃棄物として分別されたものには、土砂が多く付着していた。分別された廃棄物と土砂は Table 1 の写真から概ね同量であった。Case 2, 3 の津波堆積物は、生石灰、あるいはコンクリートくずを添加することで塊状が解砕され易くなり、回転式破砕混合機より解砕され、廃棄物と土砂が分離し、ふるい機の振動で団粒化することなく廃棄物と土砂に分別された。

以上から、回転式破砕混合機は、振動ふるい機の分別性を向上させたことが推察された。

4 室内試験の結果と考察

4・1 改良土のトラフィカビリティ

改良された土砂のトラフィカビリティを評価するため、改良土のコーン指数を測定して確認した。また、津波堆積物Ⅰ単体とコンクリートくず単体を破砕した粒径加積曲線から、試験で実施した津波堆積物とコンクリートくずの3配合の改良土の粒径加積曲線を計算より求めた。その合成粒度を Fig. 2 に示す。

改良土のコーン指数は、生石灰およびコンクリートくずの増加に伴って大きくなることが認められた。また、Fig. 2 から、津波堆積物にコンクリートくずを破砕混合することで、粒径加積曲線の傾きは緩やかになり、再生資材として適用範囲の広い土木材料へと改良されることが認められた。

4・2 回転式破砕混合機による解砕効果

津波堆積物Ⅱの気中ふるいと解砕された津波堆積物Ⅱの気中ふるいおよび JIS A 1204 の水洗いによって得られた粒径加積曲線を Fig. 3 に示す。解砕前後の津波堆積物Ⅱを Fig. 4 に示す。

Fig. 4 から津波堆積物Ⅱは、回転式破砕混合機の解砕効果によって、細かく解きほぐされ細粒化していることが認められる。また、Fig. 3 から津波堆積物Ⅱの最大粒径は 80mm から 20mm に細粒化されており、実規模プラ

Fig. 3 Grain-size accumulation curve.

(a) Before crushing

(b) After crushing

Fig. 4 Tsunami deposit II before and after crushing.

ントの振動ふるい機のメッシュ径 40mm で分別した場合、回転式破砕混合機を用いずに振動ふるい機のみで分別すると、津波堆積物Ⅱは、全量の半分程度の量がふるいを通過できないと考えられる。このことは、Table 1 に示す Case 1 を示唆している。

津波堆積物を分別する場合は、回転式破砕混合機の解砕効果を利用し、土砂を細粒化することで、土砂がふるいを通過し易くなり、津波堆積物の土砂と廃棄物が分別し易くなると推察された。

4・3 改良土の物理特性と締固め特性および透水特性

回転式破砕混合機による破砕前後の津波堆積物を Fig. 5 に示す。Fig. 5 から津波堆積物は、回転式破砕混合機の解砕効果によって、細かく解きほぐされ細粒化していることが認められる。

物理、締固め、透水試験結果を Table 2 に示す。物理試験結果から、「F 試料」と称した3種類の津波堆積物は、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴの順で含水比、細粒分、強熱減量が増加しており、3種類の津波堆積物中でⅤが最も取扱いの悪い、有機物を多く含有している津波堆積物であることが認められる。一方、「ConF 試料」と称した3種類の改良土の物性は、「F 試料」の津波堆積物に比べて含水比、細粒分は小さくなっているものの、強熱減量はほぼ同様の値を示す。また、pH は、コンクリートくずを混合したため、増加したと推察される。

Fig. 5 Tsunami deposits before and after crushing.

Table 2 Results of physical, compaction and permeability tests.

Item		Tsunami deposit III		Tsunami deposit IV		Tsunami deposit V		Crushed concrete waste
		ConF	F	ConF	F	ConF	F	
Soil particle density (g/cm ³)		2.687	2.694	2.705	2.708	2.685	2.685	—
Natural water content (%)		17.2	23.0	14.7	22.9	16.8	27.1	—
Grain Size	Maximum grain size (mm)	37.5	26.5	37.5	37.5	38.1	38.1	37.5
	Gravel (%)	29.2	7.9	29.4	9.6	49.0	42.0	68.4
	Sand (%)	66.8	86.6	61.0	76.4	33.6	33.0	30.5
	Fine particle (%)	3.9	5.5	9.7	8.0	17.4	16.0	1.1
					6.0		9.0	
Consistency	Liquid limit W _L (%)	NP	33.7	36.2	39.1	49.9	54.2	—
	Plastic limit W _p (%)		23.2	29.5	27.1	29.3	32.8	—
	Plasticity index I _p (%)		10.5	6.7	12.0	20.6	21.4	—
Classification symbol		SG	S-FG	SG-F	S-FG	GFS	GFS	GWS
Chemical Parameters	Ignition loss L _i (%)	3.8	2.4	4.1	3.4	9.8	8.9	—
	pH	10.9	8.4	10.8	7.8	10.3	7.8	—
Compaction	Test method	B-c	B-c	B-c	B-c	B-c	B-c	—
	Maximum dry density (g/cm ³)	1.690	1.648	1.778	1.761	1.653	1.631	—
	Optimum water content (%)	17.0	17.0	16.9	15.5	18.0	18.4	—
Cone index (kN/m ²)		12213	2069	10087	620	5744	174	—
Permeability coefficient (m/sec)		5.16×10 ⁻⁵	8.51×10 ⁻⁶	7.97×10 ⁻⁶	1.64×10 ⁻⁷	6.45×10 ⁻⁶	2.43×10 ⁻⁶	—

Fig. 6 Compaction characteristics and permeability.

締固め試験は、最大粒径を考慮してB-c法とした。締固め試験の結果から、回転式破碎混合工法で破碎混合した「ConF試料」と称した改良土の密度は、「F試料」の密度と比べて増加した。これは、コンクリートくずを添加したことによる密度増加と、細粒化され、均質に混合された改良土の粒度改良によるものと推察される。

透水試験は、最大粒径を考慮して直径 $\phi 150\text{mm}$ とし、変水位法により透水係数を測定した。この時の密度は、「河川土工マニュアル」(国土技術センター、平成21年4月)⁵⁾に示された平均締固め度 $D_c = 90\%$ 以上を参考に、本試験では締固め度 $D_c = 90\%$ に設定して試験を行った。また、含水比は、自然含水比が最適含水比よりも乾燥側であれば、最適含水比に調整し、自然含水比が最適含水比よりも湿潤側であれば、自然含水比のまま供試体を作製した。

締固め特性と透水特性を Fig. 6 に示す。透水試験の供試体作製条件と一致する点を赤色×印で図示した。また、「高規格堤防盛土設計・施工マニュアル」(リバーフロント整備センター)⁶⁾の安定計算に用いた高規格堤防としての新規盛土部分の透水係数を緑色点線で図示した。

透水試験の結果から、回転式破碎混合機によりコンクリートくずと混合した「ConF試料」と称した改良土の透水係数は、コンクリートくずと混合しない「F試料」と比べて増加した。これは、コンクリートくずを添加したことにより、密度は増加するものの、細粒分が減少したことにより透水係数が増加したと推察される。津波堆積物III-ConF試料の透水係数は、目標値の高規格堤防としての新規盛土部分の透水係数範囲から外れる結果となっ

た。それ以外の改良土の透水係数は、目標範囲であることより、津波堆積物IVと津波堆積物Vは、高規格堤防としての新規盛土材料に適用できる可能性があると示唆された。

5 結 言

振動ふるい機単体で廃棄物を分別することが極めて困難な土塊状の津波堆積物を、回転式破碎混合機で土の塊りを細かく解きほぐし、細粒化することで振動ふるい機の廃棄物と土砂とに分ける分別性は、大きく向上することが分かった。また、災害廃棄物であるコンクリートくずの有効活用、あるいは、生石灰を添加材料として津波堆積物と破碎混合した場合、振動ふるい機の分別性は飛躍的に向上することが分かった。ならびに、コンクリートくずや生石灰を添加して破碎混合することで、分別処理、さらに、分別した土の改良がなされてトラフィカビリティの向上が認められた。回転式破碎混合工法の改良土は、津波堆積物の性状にもよるが、再生資材(例えば、高規格堤防)としての盛土材料に適用可能と考えられる。

以上のことから、回転式破碎混合工法を使用することで、そのままでは廃棄物となる津波堆積物を廃棄物と土砂に分別し、分別土砂の再生資材への利用が可能となり、廃棄物においては、付着した土砂をできるだけ除去することで、処分場の減量化に寄与すると考えられる。今後、被災地においては、災害廃棄物の処理は急ピッチで行われる。津波堆積物においては、多種多様の性状を有するため、分別し、改良するためには、広範囲の材料を処理する能力が問われる。回転式破碎混合工法は、様々な要求に適用可能な有用な工法として提案するものである。

参 考 文 献

- 1) “Guidelines (master plan) for disposing of disaster waste produced during the Great East Japan Earthquake” (2011) Ministry of the Environment.
- 2) “Technical guidelines for improving parks and green space as part of the reconstruction in the wake of the Great East Japan Earthquake” (2012) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism.
- 3) “Use of materials recycled from disaster waste in public works for the rehabilitation and reconstruction in the wake of the Great East Japan Earthquake (notice)” (2012) Ministry of the Environment.
- 4) N. Nakajima, H. Yoshizawa and S. Mizuno, “Characteristics of grading of fill dam materials produced using rotary crushers”, Paper presented at the 28th meeting of the Kanto Branch of Japan Society of Civil Engineers, pp.812-813 (2001).
- 5) “Manual for river earthwork” (2009) Japan Institute of Country-ology and Engineering.
- 6) “Fill design and construction manual for high-standard embankments” (2000) Foundation of Riverfront Improvement and Restoration.