

東日本大震災で発生した津波堆積物の分別土砂中の夾雑物混入率に関する文献調査

○ 嶋田稔¹・野口真一²・中村吉男³・中野正樹⁴・加藤雅彦⁵

¹(株) アイコ・²(一社) 泥土リサイクル協会・³愛知工業大学・⁴名古屋大学・⁵明治大学

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災により、東北から関東にかけての東日本沿岸部は甚大な被害を受け、膨大な量の災害廃棄物と津波堆積物が発生した。災害廃棄物は倒壊家屋や家財道具、がれき類、草木等が混ざり合ったものであり、津波によって運ばれた津波堆積物の砂泥が相当量混在していることが特徴であった¹⁾。一方、津波堆積物は水底や海岸に存在していた砂泥が津波により陸上に打ち上げられて堆積したものであり、主要構成要素は土砂であるが、東日本大震災では処理困難物をはじめ、化学物質や有害物質も含めたあらゆる災害廃棄物が混入した“土砂系混合物”の状態にあり、そのままでは再利用することが難しい状態のものも数多くあった²⁾。これら災害廃棄物等は早期復旧・復興の支障となることから、国や県はいち早く処理に関する基本的な指針等^{3)~7)}を策定した。これを受けて被災した各自治体では処理業務の受委託手続きを進め、独自処理の自治体では発災後速やかに処理業務に着手したが、市町村が県に処理業務を委託したところでは事務手続き等で着手までに7~14箇月要した。しかし、民間事業者の創意工夫に基づく様々な技術を組み込んだ破碎・選別ライン⁸⁾を各自治体が採用したことや、処理時間の延長、広域処理⁹⁾の導入等により、岩手県及び宮城県においては、計画どおり2014年3月に災害廃棄物処理業務を終えている。

災害廃棄物処理業務は破碎と選別により利用可能な資材に再生することを基本とし、可燃物と不燃物を分別して焼却施設への負荷を軽減するとともに、最終埋立処分量を縮減することにある。災害廃棄物等から混合物を分離・選別した土砂分(以下、「分別土砂」と称す。)のうち、津波堆積物に由来する比較的夾雑物が少ないものは、宅地を嵩上げするための盛土材や、決壊あるいは流失した海岸堤防の築堤材等としての利活用を目的として地盤材料に再生された。しかし、不燃系混合物や可燃系混合物を由来とする分別土砂は、土砂とその他混合物とを完全分離することは、技術的・時間的・費用的にも現実的ではないため、除去しきれない木屑等の夾雑物が混入した状況にあった。こうした木屑混じり土砂は、その地盤工学的性質や、木屑等の腐朽に伴う地盤の変形等に関する中・長期的な挙動が十分に解明されていないことから、一部はセメント原材料として利活用されたが、廃棄物として埋立処分され利活用されなかったものもあった。こうした背景を踏まえ、我々の研究グループでは、将来、発生が予想される南海トラフ巨大地震等が発生したあとの早期復興に資するべく、木屑等の夾雑物が混入した分別土砂の特性を把握するとともに、分別土砂中に許容される木屑等の夾雑物の混入率を解明するため、模擬分別土を作製しての実験を計画しており、今回、その基礎資料を取得するために、分別土砂中の木屑等の夾雑物に関する文献調査を行った。本報は、文献調査に基づく分別土砂中の夾雑物の混入率と、既往の調査・研究に基づく夾雑物に関する知見等について述べるとともに、分別土砂に混入している木屑等の夾雑物の定量について考察し、今後の課題を提起するものである。

2. 文献調査の目的

分別土砂を復興資材として利活用するには、目的用途に応じた地盤材料として必要な品質を確保していることが不可欠である。震災直後から行われた調査・研究により、分別土砂の地盤工学的特性の解明が進められ多くの知見が得られているが、中・長期的な挙動も含め、木屑等の夾雑物の混入率^{注1)}がどこまで許容されるかは明らかにされていない。

そこで分別土砂中の木屑等の許容混入率の解明と、将来的にはそれを満足する処理技術を確立することを目的に、東日本大震災で発生した災害廃棄物等の処理によって得られた分別土砂中の木屑等の夾雑物の混入率を文献等により調査した。

注1) 分別土砂中の夾雑物混入率に関して、現状では明確な定義はないが、本報では(1)式で定義する。

$$\text{夾雑物混入率} = \frac{\text{組成分析又は強熱減量によって定量した木屑等の夾雑物質量}}{\text{木屑等の夾雑物を含めた分別土砂の質量}} \quad (1)$$

3. 文献調査の方法

文献調査にあたっては、数多くの文献からレビューすべき文献を効果的かつ効率的に絞り込む必要がある。近年では学術情報のオープンアクセス化が普及したことから、インターネットを利用したキーワード検索や、学術資料専用検索

Literature Survey about Mixing Rate of Impurity in the Separated Soil of Tsunami Deposits Generated by the Great East Japan Earthquake.

Minoru Tokita¹, Shin-ichi Noguchi², Yoshio Nakamura³, Masaki Nakano⁴, Masahiko Katoh⁵ (¹AICO Co., Ltd., ²Mud Recycling Association, ³Aich Institute of Technology, ⁴Nagoya University, ⁵Meiji University)

KEY WORDS: East Japan earthquake, separated soil, impurity

エンジン“Google Scholar”で検索した。また、(公社)地盤工学会の学会誌電子版配信導入に伴い電子図書館へのアクセス制限が緩和されたことから、学会の過去の刊行物も閲覧に供した。なお、選定した文献の参考文献にも着目し、本研究に関連するものをピックアップした。

4. 文献調査結果

4.1 抽出した文献の内容

収集した文献は1995年から2016年に発表あるいは報告された100編で、その内訳は表-1に示すとおりである。論文や報文に関しては、発表媒体や年度が異なるものはそれぞれ1編とカウントし、また、内容が多分野にまたがっているものはそれぞれで計上しているため、抽出文献数と編数の合計とは一致しない。

表-1 抽出した文献の内容

内 容	編 数
災害廃棄物、津波堆積物及び分別土砂の地盤工学的特性に関すること(物性、力学的特性、化学的特性-含、臭気、など)	51
災害廃棄物、津波堆積物の処理方法(システム、設備、機械、技術、など)に関すること	27
分別土砂中の夾雑物に関すること(分別土砂に混入している異物の種類と割合、異物混入量の評価方法、など)	39
災害廃棄物、津波堆積物の利活用に関すること(事例、提言含む)	16
災害廃棄物の発生量予測に関すること	5
処理業務の記録及び報告	8
土質試験、分析方法などに関すること	12
その他、研究を推進する上で重要と思われること	33

注1) 発表媒体や発表年度が異なるものはそれぞれ1編としてカウント

注2) 1編の論文等で、内容が複数項目に該当する場合はそれぞれに計上

4.2 分別土砂中の木屑等の夾雑物混入率の定量方法

文献調査によれば、分別土砂中の木屑等の夾雑物の定量は組成分析か強熱減量によって行われておりいずれも質量比で示されている。組成分析は分別土砂を各種網ふるいでふるい分けし、各網ふるい残留分または通過分を手作業により可燃系混合物(木屑、プラスチック、繊維、紙、など)、不燃系混合物(金属、ガラス、コンクリート、陶磁器類、など)及び土砂に分別し、可燃系混合物(木屑)質量を測定して混入量あるいは混入率を算定するものである。強熱減量は物質を強熱して揮発・消失する成分の量からその物質の特性を判断するもので、分野によって名称や定義、強熱条件が異なっている。わが国の強熱減量に関する主な基準類を表-2に示す。

表-2 わが国で基準化されている強熱減量試験

適用分野	規格・基準	名 称	目 的	定義及び試験方法
地盤工学	JIS A 1226-2009	強熱減量	土に含まれている有機物量及び結合水や結晶水の水分量の目安を把握	2mmふるいを通過した土を(110±5)℃で一定質量になるまで炉乾燥し、(750±50)℃に保持した炉で1時間強熱し、恒量になるまで繰り返し戻したときの減少質量を炉乾燥後(強熱前)の土の質量に対する百分率で表したものの
土壌診断	北海道立総合研究機構(H24.08) ¹⁰⁾	強熱減量	北海道での土壌診断基準における草地の“土砂含量”(=100-強熱減量)を評価する	含水比が判っている風乾土を電気炉で550℃、4~5時間強熱したときの減少質量を乾土質量に対する百分率で表したものの
セメント	JIS R 5202-2015	強熱減量	セメントの新鮮度(風化程度)を判定	セメントを酸化雰囲気(空气中)で(950±25)℃で恒量になるまで強熱したときの減量質量を、強熱前の試料の質量に対する百分率で表したものの
フライアッシュ	JIS A 6201-2015	強熱減量	フライアッシュ中の未燃炭素含有率を把握する	フライアッシュを(975±25)℃に調整した電気炉で15分強熱し、その後デシケータ内で放冷して質量を測り、それを15分ずつ繰り返し戻して恒量になったときの減量を求め、強熱前の試料の質量に対する百分率で表したものの
廃棄物処理	衛環22号(H02.02.01)	(焼却残渣の)熱灼減量	ごみ焼却炉の燃焼効率を評価する尺度で、焼却残渣中の未燃分を把握する	焼却残渣を乾燥器等により(105±5)℃で恒量となるまで乾燥し、10mm以上の不燃物を除去した後、(600±25)℃で3時間強熱灰化処理を行い、強熱前の質量に対する減量質量を百分率で表し、大型不燃物混入率を考慮して換算したものの
工場排水	JIS K 0102-2013	強熱減量	工場排水中の揮発性有機物量を把握	工場排水を蒸発乾固した時に残る「蒸発残留物」とを(600±25)℃で30分間強熱灰化させたときに消失する物質で、「蒸発残留物」とそれを強熱した時に残る「強熱残留物」との差分として表す
焼却灰受入基準	灰リサイクルシステム(H16.03) ¹¹⁾	強熱減量	貯留散水施設内において散水洗浄された廃棄物焼却灰をセメント製造のための代替原料として受け入れるにあたり、化学組成分析のための採取方法、分析項目及び分析方法について定めたもの	750℃、1時間の加熱による減量

4.3 分別土砂中の木屑等の夾雑物混入率

文献調査に基づく、組成分析及び強熱減量による分別土砂中の木屑等の夾雑物混入率を表-3、表-4に示す。組成分析に関して、現行では木屑等の夾雑物を定量する試験法や結果の表記に関する規定がない^{注2)}ため、試験条件（分析に供した試料の分級サイズ）は必ずしも同一ではない。一方、強熱減量に関してはJIS A 1226に準拠して行ったものが多いが、後述するように、JIS法に対する問題を踏まえ、適切な強熱条件を見出すための実験的検証も行われている。組成分析、強熱減量とも分別土砂の発生地区や起源（由来）が異なり、試験法も違うため数値自体を比較することには意味がないが、東日本大震災で発生した災害廃棄物等の処理業務で得られた分別土砂中の木屑等の夾雑物混入率に関して分析結果を総括すれば、組成分析で0.2～20.7%、強熱減量で4.2～24%（いずれも質量比）となっている。

注2) 関連事項として昭和52年11月4日に通知された環整95号（平成2年2月1日改定，衛環22号）がある。

表-3 組成分析による可燃性夾雑物混入率

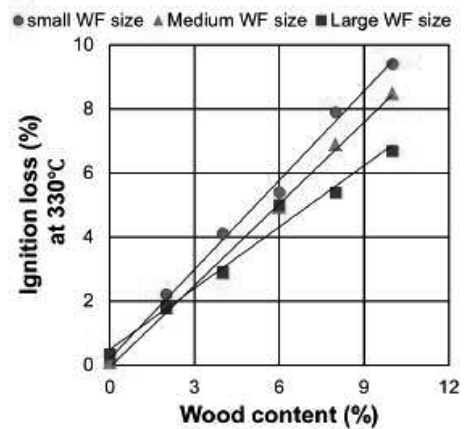
整理番号	夾雑物混入率	摘 要
No.6 ¹²⁾	0.21～14.34%	試料を2mmふるいにかき、残留した土砂及び夾雑物を手作業により選別した可燃物（木くず等）含有率
No.15 ¹³⁾	分級サイズ20mm:2.4% 分級サイズ5mm:1.1%	津波堆積物の仮置場分別土を分級サイズを20mm、5mmアンダーとし、その中に混入している2mm以上の廃棄物混入比（乾燥重量比率）
No.16 ¹⁴⁾	3.4～8.7%	混合廃棄物由来の20mm篩以下残さから、超音波洗浄機を用いた浮力選別と手選別によって求めた木くず含有率
No.36 ¹⁵⁾	5mm以上:1.1% 2～5mm:1.6%	津波堆積物由来の10mmふるいを通過した分別土砂の、2mmおよび5mmふるい残留分を手選別により分級して求めた乾燥質量比による可燃物混入率
No.42 ¹⁶⁾	植物質:15.3%	ガレキから分別（約1cmの現場フルイ通過分）されたガレキ泥を室内で1～2mm組成成分を分析
No.48 ¹⁷⁾	850μm以上:0.3～1.3% 2mm以上:0.1～0.9%	津波堆積分別土を37.5mmから850μmでふるい分けして得られた各ふるい残留分の木くず含有率（=木くず乾燥質量/津波堆積物分別土乾燥質量）
No.49 ¹⁸⁾	6.2～20.7%	分別土砂及びふるい下くずを2mmふるい上で水洗いし、付着した細粒分を洗い流した後、炉乾燥させた試料を対象に各画分に手選別して求めた含有率
No.54 ¹⁹⁾	土砂混合くず:5～7% ふるい下くず:7～18%	土砂混合くずおよびふるい下くずを対象に、2mmふるい上で水洗いして付着した細粒分を洗い流した後、炉乾燥させた試料を対象に各画分に手作業により選別して求めた含有率
No.78 ²⁰⁾	10.2%（質量） 24.3%（体積）	分別土砂B種を用いて9.5mm、4.75mm、2mmで試料のふるい分けを行い、手選別で木片を取り除いた試料の重量及び体積別の木材含有率
No.81 ²¹⁾	分級サイズ40mm:約7% 分級サイズ9.5mm:約3%	40mm振動ふるいでふるい分けした土砂分（分別土）中の1cm以上の夾雑物の湿潤質量 9.5mmふるい通過試料を2mmふるい上で水洗いしたときに残留した可燃物の乾燥質量

表-4 強熱減量による可燃性夾雑物混入率

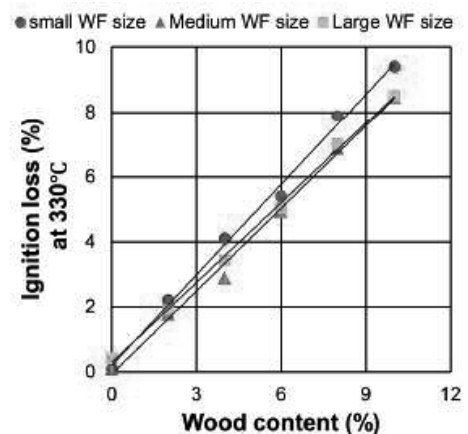
整理番号	強熱減量	摘 要
No.13 ²²⁾	5mmふるい下:13.37% 3mmふるい下:8.90%	破碎選別された後、乾式で30mmふるいを通過したふるい下土砂を、5mmベンチ穴の振動ふるい選別機にかけた「5mmふるい下」と、それをさらに3mmベンチ穴の風力選別特殊ふるいを通過させた「3mmふるい下」に対し、JIS A 1226に基づいて実施
No.15 ²³⁾	分級サイズ20mm:8.3% 分級サイズ5mm:8.2%	津波堆積物の仮置分別土を、分級サイズを20mm、5mmとして強熱減量を測定（強熱条件未記載）
No.16 ²⁴⁾	750℃、2時間:9.1～13.2% 450℃、2時間:9.5～11.1% 350℃、2時間:6.8～7.8% 250℃、2時間:6.1～7.7%	混合廃棄物由来の20mm篩以下残さを、強熱温度750、450、350、250℃で2～8時間強熱
No.36 ²⁵⁾	750℃:12.2% 600℃:8.7% 330℃:4.2%	津波堆積物由来の10mmふるいを通過した分別土砂を、JIS A 1226の750℃、衛環第22号の600℃および有機物の発火点とされる330℃の3水準で強熱（強熱時間未記載）
No.39 ²⁶⁾	土砂混合くず:330℃ 6.0% 土砂混合くず:750℃ 9.6% ふるい下くず:330℃ 15.3% ふるい下くず:750℃ 21.8%	混合廃棄物の一次ふるいを通過した土砂混合くず、高度選別処理の最終ふるいを通過したふるい下くずに対し、強熱温度を330℃と750℃の2水準で実施（強熱時間未記載）
No.44 ²⁷⁾	6.1%	選別過程を経た粒径40mm以下の災害廃棄物を用い、振動ふるいを用いて20mmおよび9.5mmふるいを通過させた試料に対する強熱減量（強熱条件未記載）
No.48 ²⁸⁾	2mm通過試料:6.3～11.8% 9.5mm通過試料:4.7～11.8%	津波堆積分別土のうち、2mm通過試料と9.5mm通過分を粉碎した試料の強熱減量（強熱条件未記載）
No.51 ²⁹⁾	7.1%	40mm以下の災害廃棄物処理物（分別土B種）を破碎混合し、9.5mmまでふるい選別した試料をすりつぶして2mm以下にしたものの強熱減量（強熱条件未記載）
No.54 ³⁰⁾	土砂混合くず（JIS）:7～17% 土砂混合くず（全量）:9～24% ふるい下くず（JIS）:8～17% ふるい下くず（全量）:9～22%	土砂混合くずおよびふるい下くずを対象に、JIS A 1226に基づいた2mmふるい通過分と、木片等を粉碎・破碎して全量を分析する2水準の強熱減量試験を実施
No.55 ³¹⁾	4.59～12.83%	未選別の混合土砂、混合土砂を粗選別する際に生じた残渣、トロンメルや磁選機等で二次選別処理した試料を対象に、JIS A 1226に基づいて実施
No.70 ³²⁾	6.7%	選別過程を経た粒径40mm以下の災害廃棄物（分別土）のうち、0.85mmふるいで分級したふるい下の木片等を取り除いた試料の強熱減量（強熱条件未記載）
No.81 ³³⁾	全体:7.2%（体積比:16.2%） 9.5mm以上:14.7% 9.5～4.75mm:18.1% 4.75～2.0mm:15.1% 2.0mm未満:5.6%	40mm振動ふるいでふるい分けした土砂分のうち、9.5mmふるいを通過した分別土砂の粒径ごとの強熱減量（強熱条件未記載）
No.90 ³⁴⁾	6.1%	選別過程を経た粒径40mm以下の災害廃棄物由来の分別土に対し、振動ふるい機を用いて19mm、9.5mmふるいを通過した試料をさらに2mmでふるい分けした後、2mmふるい通過試料を用いてJIS A 1226に準拠して実施した強熱減量

4.4 分別土砂中の木屑等の夾雑物混入率評価方法に関する問題

分別土砂中の木屑等の夾雑物混入率を評価する方法は組成分析と強熱減量であることは前述のとおりであるが、いずれも分別土砂の利活用可否を判定する試験法として制定されたものではないため、試験方法や結果の表記に関していくつかの問題が指摘されている。本項では組成分析と強熱減量により分別土砂中の木屑等の夾雑物混入率を評価する際の問題について、文献調査から得られた知見について述べる。組成分析による木屑等の評価は、土の粒度試験において、各ふるいに残留または通過した木屑等を手作業で分別してその質量を量ることにより混入率を算定するものであるが、3つの問題が指摘されている。第1番目の問題は試験法に関することである。前述のように、組成分析はふるい分けによるふるい残留または通過分を画分して構成成分の組成比率を求めるものであるが、山根ら³⁵⁾はふるい残留試料を用いた場合には通過分について評価できないことを指摘している。これは分別土砂に混入している木屑の混入率を過少に評価するとともに、分級するふるい目によって結果が異なることを意味する。第2番目の問題として、組成分析による木屑等の夾雑物総量把握の限界である。遠藤ら³⁶⁾は示差熱分析、組成分析、強熱減量の比較実験（後述）より、組成分析の結果が最も乖離したことから、組成分析で分別した不燃物や土砂中に繊維状に破碎された木屑が残存していたことを報告している。第3番目の問題は土砂が付着した夾雑物の取り扱いである。分別土砂中に混入している木屑等の夾雑物には土砂が付着しているのが通常であるが、分析精度を向上させるためには夾雑物と土砂を分離する必要がある。その手法として一般的なのは密度差を利用した水中分級であるが、分別土砂をそのまま水中に入れた場合には、土砂が付着している木屑等は沈降することが想定され、何らかの人為的操作によりそれぞれを分離する必要があるが、その方法についても統一する必要があると考えられる。また、今西ら³⁷⁾は20mmの篩下残渣から取り出した木粒子の密度は水の密度より大きいことを確認しており、単純に浮沈をもって土粒子と木粒子を分級できないことを示唆している。こうした問題に対し、高井ら³⁸⁾は組成分析の前処理として、「2mmふるい上で水洗いして付着した細粒分を洗い流した後、炉乾燥させた試料を対象に可燃性廃棄物、不燃性廃棄物、土粒子の各画分に手作業により選別」する方法を考案しており、2mmふるいを通過する微細な木屑の評価はできないが、残留分に関しては分析精度の向上が期待される。強熱減量は試験目的により強熱条件が異なるのは前述のとおりであるが、強熱減量によって分別土砂中の木屑等の夾雑物混入率を評価する際の問題点として以下の3点が指摘されている。第1番目としては試料の強熱条件である。地盤工学の分野で適用されるJIS A 1226は、土に含まれている有機物量や結合水、結晶水の水分量を把握することが目的であり、750±50°C、1時間の強熱は木屑等の夾雑物とは関係ない物質も評価してしまうため、将来的に腐朽して地盤特性に影響を及ぼす恐れのある木屑等の夾雑物混入率を定量する手法としては適さないというものである。勝見ら³⁹⁾は木材を構成している主成分の熱分解温度⁴⁰⁾（物質を加熱した際に、より安定な化合物へと分解移行する際に質量が減少し始めるときの温度）に着目し、模擬分別土で行った実験から、図-1に示すように木屑混入率と強熱減量の間には、混入する木屑が小さい場合には330°Cで11時間強熱した場合でも高い相関性があることと、木屑が大きくなるにつれて同一混入率に対する強熱減量が小さくなることを実験的に検証した。さらに強熱時間を長くすることで、木屑の大きさの影響を小さくできることを明らかにした。一方、遠藤ら⁴¹⁾は図-2に示すように示差熱の炭化物減量値と強熱減量の比較から、最大で1%程度の誤差が認められるものの、350°Cで2時間強熱するのが最も近いことを見出し、強熱温度を350°C程度にすることを提案している。2番目の問題は試験に供する試料の粒径である。JIS A 1226では2mmふるいを通過する試料を対象としているが、当然この方法では2mmふるい残留分を定量することができない。勝見ら⁴²⁾はJIS法に基づいて作製した試料と、木屑等の粗大物を可能な限り細かく粉碎・破碎して全量を強熱する2通りの実験から、図-3に示すように試料全量を分析に用いた方が強熱減量が大きいくことを確認し、山根ら⁴³⁾は分別土本来の性状を把握するためには全量分析法で得られる結果で議論することを提唱している。3番目の問題は分別土の処理に関することである。災害廃棄物等を処理する過程で、分別土砂の選別率向上や特性改善を目的にコンクリートがらやセメント等を添加する例があるが、強熱減量は添加材の影響を大きく受ける⁴⁴⁾と分析されており、強熱減量によって分別土砂中の木屑等の夾雑物混入率を評価する場合にはどのように処理して得た分別土砂なのか確認が必要である。



(a) 燃焼温度 330°C, 燃焼時間 11 時間



(b) 燃焼温度 330°C, 燃焼時間 48 時間

図-1 強熱減量試験結果³⁹⁾

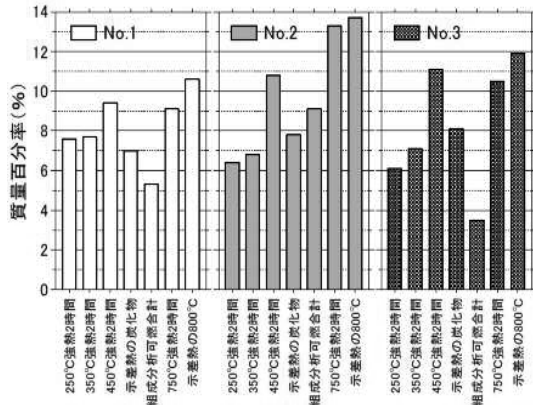


図-2 各種試験で推定される可燃物量⁴¹⁾

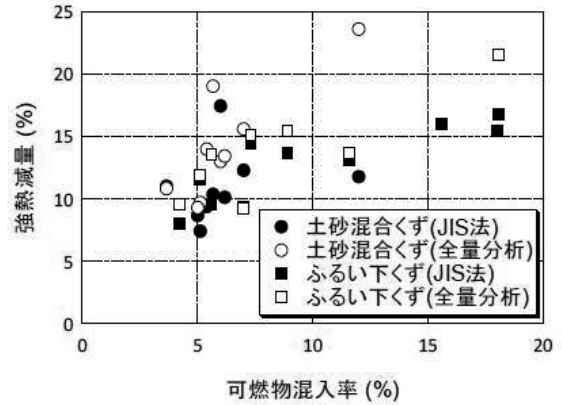


図-3 可燃物混入率と強熱減量の関係⁴²⁾

5. 分別土砂中に混入している木屑等の夾雑物の定量に関する考察

文献調査の結果、分別土砂中の木屑等の夾雑物の混入率に関する報告は39編あったが、それ自体が目的となるものではなく、含水比や粒度などと同じように、分別土砂の地盤工学的特性を解明する際の基礎情報として調べている。木屑等の夾雑物が分別土の地盤材料としての特性に及ぼす影響については多くの研究者や技術者がその解明に取り組んでいるが、基礎情報となる木屑等の夾雑物の混入率に関する試験方法が確立されていないため、試験結果である数値を見ただけでは分別土砂の特性を推定することが困難になっている。前項で文献調査結果に基づく分別土砂中の木屑等の夾雑物混入率評価方法に関する問題についての知見を述べたので、ここでは定量について考察する。

5.1 試験方法

分別土砂中に混入している木屑等の夾雑物の評価方法に関して、組成分析にも強熱減量に問題があることは前述のとおりであるが、いずれも精度向上のための改善検討が行われ一定の成果が得られている。本来、ある特性値を把握するための試験方法は試験誤差等を考慮すればクロスチェックができることが望ましいと考える。しかし、森田ら⁴⁵⁾が推論したように、木屑等の大きさが分別土砂の特性に影響を与えるとすれば、木屑等の夾雑物の混入率を評価するには粒径ごとの混入量を定量する必要があるため、強熱減量で定量する場合は粒径別に試験を行う必要がある。また、遠藤ら⁴⁶⁾や高井ら⁴⁷⁾が指摘しているように、分別土砂中にセメント等の改質材が混入されると強熱減量は影響を受けることから、改質材が混入されている場合は強熱減量により木屑等の夾雑物混入率を評価することは避けなければならない。これらのことを踏まえると、組成分析は手作業によるため見落としや選別の限界はあるが、強熱減量では再現できないこともあるため、高井ら⁴⁸⁾が提案しているように、簡便に可燃物混入率を把握しうる新たな評価方法の確立が急務といえる。

5.2 試験結果の表示方法

千葉ら⁴⁹⁾は、津波堆積土特有の木屑混じり土の粒度は粒径加積曲線上に示しても、実際の目視による粒度の違いほど表現できていないことを指摘しており、密度の異なる粒状体からなる混合物の試験方法や表記方法に関する研究を行ってきた。その結果、体積表示による粒径加積曲線などの提案をしている。現行は、組成分析でも強熱減量でも質量表示となっているが、100gの木屑というよりは100cm³の木屑といった具合に、質量より体積の方が感覚的には捉えやすいと思われる。例えば質量比で $p_m\%$ (分別土砂全体を100%とする)の木屑が混入している分別土砂中には体積比で

$$p_v = (p_m / \rho_w) / \{p_m / \rho_w + (100 - p_m) / \rho_s\} \times 100 \quad (2)$$

ここに p_m : 質量比で表した木屑混入率 [%]

p_v : 体積比で表した木屑混入率 [%]

ρ_w : 木粒子 (木屑) の密度 [g/cm³]

ρ_s : 土粒子密度 [g/cm³]

の木屑が混入していることとなり、木粒子 (木屑) の密度として細胞壁の密度⁵⁰⁾である $\rho_w=1.5\text{g/cm}^3$ 、土粒子密度として標準的な $\rho_s=2.6\text{g/cm}^3$ を用いると、 $p_m=10\%$ のとき $p_v=16\%$ となり、同一質量の木屑が混入した場合、木粒子の密度が小さくなるほど体積で表示した混入率は大きくなる。今回調査した文献の中にも、分別土砂中に混入している木屑等の夾雑物の混入比率を組成分析、強熱減量とも質量と併記して体積表示しているものがあるが、いずれも体積表示の混入率は質量表示の2倍以上の値^{51) 52)}を示している。体積表示の場合は木粒子の密度が必要になるが、分別土砂中から採取した木粒子の密度は粒径が小さくなるほど大きくなるという粒径依存性が報告⁵³⁾されており、しかも粒径によっては木の細胞壁の密度 ($\rho_w=1.5\text{g/cm}^3$) を超えていることから、体積表示を導入するためにはもう少し詳細な検討が不可欠と

なる。

5.3 夾雑物を評価する試料の粒径

分別土砂中に混入している木屑等の夾雑物の評価方法に際しての試験法とも関連するが、強熱減量に関して JIS A 1226 と JIS K 0102 は 2mm ふるい通過試料と規定されているが、他の規格は特に規定がない。また、組成分析はそれ自身が規格化されたものではないため、対象とする試料の粒径はまちまちであるが、2mm ふるい残留分に対して分析している事例が多いようである。木屑等の夾雑物が分別土砂の特性に及ぼす影響を粒径別に評価することにより、試験に供する試料の粒径が導かれると考えられることから、今後の検証の積み重ねが重要となる。

5.4 組成分析と強熱減量の相関性

組成分析も強熱減量も、分別土砂中に混入している木屑等の夾雑物の混入率を算出する手法として適用できる可能性は認められているが、精度的にはまだ課題がある。組成分析は見落としや選別の限界からどちらかといえば過少に評価され、強熱減量は本来把握したい物質以外にも定量してしまうためどちらかといえば過大に評価されることが想定され、文献調査からもその傾向が伺える。森田ら⁵⁴⁾が行った夾雑物の大きさが分別土砂の物性に及ぼす影響を解明する目的で行った模擬分別土の実験によれば、図-4 に示すように、木片混入率と強熱減量との間には相関係数 $R=0.99$ という完全な正の相関性が認められ、同じく模擬分別土で行った図-1 と同様の傾向を示した。しかし、可燃系混合物を起源とする実際の分別土砂では、図-3 に示すように、両者の関係は大きくばらついている。これは、各地区で得られた分別土砂の試験結果を取りまとめてプロットしたものであり、発生条件をはじめ処理条件等が様々であること、特に元々の土に含まれる有機物や結晶水の影響と推察している。さらに、試験条件が一律ではないことも要因と考えられる。今後の課題として、同一の分別土砂で行った組成分析と強熱減量が一致する分析方法を見出し、結果をクロスチェックできることが望ましいと考える。

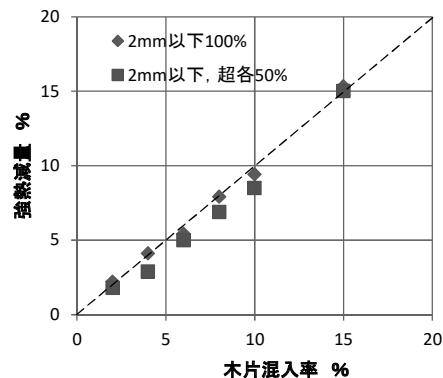


図-4 木材混入率と強熱減量の関係⁵⁴⁾
(森田らの実験結果を筆者らが図化したもの)

6. おわりに

本研究では、東日本大震災で発生した分別土砂中の木屑等の夾雑物の混入率に関して、既往の調査・研究結果を文献調査により調べた。以下に得られた知見とそれに基づく今後の課題を述べる。

1. 組成分析から求めた木屑等の夾雑物の混入率は 0.2~20.7% (質量比) である。
2. 強熱減量から求めた木屑等の夾雑物の混入率は 4.2~24% (質量比) である。
3. 組成分析は試験法が規格化されていないため、同一試料に対して異なった混入率が算定されることがある。
4. 組成分析では分析対象をふるい残留分とした場合にはふるい通過分を、一方、分析対象をふるい通過分とした場合にはふるい残留分を評価できない。
5. JIS 法に基づく強熱減量は分析対象が 2mm ふるい通過分であるため、2mm ふるい残留分については評価できない。
6. 組成分析は人力で行うため、見落としや選別の限界がある。
7. JIS A 1226 で規定されている強熱減量試験は、分別土砂中に混入している木屑以外にも定量してしまうため、適正に評価するための強熱条件を見出すことが不可欠であるが、実験の結果、350℃前後で 2~48 時間強熱することで、他の試験との差異を最小化にしたり、夾雑物の大きさの影響を軽減できることが示唆された。
8. 強熱減量では粒径別の木屑等の混入率を評価する場合には粒径ごとに試験を行う必要があり、また、選別精度を向上させるなどの目的で改質材を添加した場合にはその影響を受けることがあるため、注意が必要である。
9. 組成分析も強熱減量も現行は質量表示としているが、木屑等の夾雑物の混入率を評価するには体積表示の方が捉えやすいので、今後の検討が望まれる。
10. 組成分析と強熱減量の関係は、模擬分別土では強い相関関係が認められるが、実際の分別土では諸条件が異なるためにバラツキが大きい。
11. 今後、分別土砂中に許容される木屑等の夾雑物の混入率と合わせて、混入率を適切に評価できる試験法の確立が望まれる。

謝辞：本研究は、環境省の平成 28 年度環境研究総合推進費補助金【3K163011】の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) 環境省：東日本大震災の経験を踏まえた災害廃棄物処理の技術的事項に関する概要報告書—仮置場と混合物処理—、平成 28 年 3 月、http://kouikishori.env.go.jp/document_video/pdf/wg_report_02.pdf

- 2) 環境省：東日本大震災における災害廃棄物処理概要報告書，平成 28 年 3 月，http://kouikishori.env.go.jp/document_video/pdf/wg_report_01.pdf
- 3) 環境省：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），平成 23 年 5 月 16 日，https://www.env.go.jp/jishin/attach/haiki_masterplan.pdf
- 4) 環境省：東日本大震災津波堆積物処理指針，平成 23 年 7 月 13 日，<http://www.env.go.jp/jishin/attach/sisin110713.pdf>
- 5) 岩手県：岩手県災害廃棄物処理実行計画～岩手県における災害廃棄物処理の基本的考え方～，平成 23 年 6 月 20 日，http://www.pref.iwate.jp/dbps_data/_material/_files/000/000/003/215/230620shorijikkou.pdf
- 6) 岩手県：岩手県災害廃棄物処理詳細計画，平成 23 年 8 月 30 日，http://www.pref.iwate.jp/dbps_data/_material/_files/000/000/028/927/keikaku.pdf
- 7) 宮城県：宮城県災害廃棄物処理実行計画（第 1 次案）—災害廃棄物処理の基本的考え方—，平成 23 年 7 月，<https://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/2164.pdf>
- 8) 日本建設業連合会：東日本大震災 災害廃棄物処理の報告，平成 26 年 6 月，<http://www.nikkenren.com/doboku/saigai/report.html>
- 9) 環境省東北地方環境事務所，一般財団法人 日本環境衛生センター：東日本大震災により発生した被災 3 県（岩手県・宮城県・福島県）における災害廃棄物等の処理の記録，平成 26 年 9 月，http://tohoku.env.go.jp/files/pdf/2014/0901ae_2.pdf
- 10) 土壌・作物栄養診断のための分析方法 2012：地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 農業研究本部，平成 24 年 8 月，<https://www.hro.or.jp/list/agricultural/center/bunseki2012/index.html>
- 11) 都市ごみ焼却灰の国内広域処理システム構築に関する調査報告書（経済産業省 3R 政策），一般財団法人 日本土地センター，平成 16 年 3 月，http://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/research/150711-3_jilc.html
- 12) 勝見武・大河原正文・遠藤和人・今西肇・風間基樹：地震・津波により発生した廃棄物混じり土砂の特性と有効利用，第 23 回廃棄物資源循環学会研究発表会，2012.10，https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmcwm/23/0/23_179/_pdf
- 13) 今村眞一郎・西田秀紀・佐藤靖彦：東日本大震災における津波堆積物の調査報告，西松建設技報，VOL.35，http://www.nishimatsu.co.jp/solution/report/pdf/vol35/g035_03.pdf
- 14) 遠藤和人・鈴木弘明・勝見武：災害廃棄物処理残さにおける木くず含有量の判定に関する一考察，第 35 回全国都市清掃研究・事例発表会，平成 26 年 1 月，（インターネット非公開）
- 15) 野口真一・中村吉男・肴倉宏史・勝見武：分別土砂と循環資材を現位置混合し生成した復興資材による試験盛土（第 1 報）—復興資材の物理・力学特性および施工性の評価と利用環境における環境安全性について—，第 11 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp.127-134，2015.7，（JGS 電子図書館）
- 16) 日比野忠史・高橋敦嗣・福井勝吾・二瓶昭弘：不安定な有機物を含んだガレキ泥の再資源化手法の確立：土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.69，No.2，I_25-I_30，2013，https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejoe/69/2/69_I_25/_pdf
- 17) 多田有汰・小竹望・山中稔・山内聡士：津波堆積物分別土の土質特性と締固め特性，平成 27 年度土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集，Vol.21，III-21，pp.157-158，2015，<http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00550/2015/21-03-0021.pdf>
- 18) 藤川拓朗・今西肇：災害廃棄物の特性を考慮した土質試験法の検討，地盤工学会誌，Vol.63，No.1，pp.10-13，2015，（JGS 電子図書館）
- 19) 高井敦史・大河原正文・大塚義一・阪本廣行・今西肇・遠藤和人・大嶺聖・風間基樹・加藤雅彦・小竹望・珠玖隆行・鈴木弘明・中川雅夫・中野正樹・西村伸一・藤川拓朗・松山祐介・山中稔・勝見武：災害廃棄物処理過程で発生する分別土砂の特性評価，第 10 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp.355-360，2013.9，（JGS 電子図書館）
- 20) 大嶺聖・杉本知史・中川雄介・幸論志：災害廃棄物や津波堆積物の地盤材料としての活用技術，第 10 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp.409-414，2013.9，（JGS 電子図書館）
- 21) 三反畑勇・坂本守・弘末文紀・砂山浩紀：災害廃棄物処理時に発生した夾雑物混じり土砂の特性について，第 48 回地盤工学研究発表会講演集，地盤工学会，pp.141-142，2013.7，（JGS 電子図書館）
- 22) 森友宏・風間基樹・大沼清孝・大山浩一・相川良雄：震災がれきおよび津波堆積物由来の木屑混じり発生土の有効利用のための土質力学特性と社会的コストの評価，地盤工学ジャーナル，地盤工学会，Vol.10，No.1，pp.67-79，https://www.jstage.jst.go.jp/article/jgs/10/1/10_67/_pdf
- 23) 前掲 13)
- 24) 前掲 14)
- 25) 前掲 15)
- 26) 勝見武・乾徹・高井敦史・UDDIN, Mohammed Nasir, 森田康平：廃棄物混じり土砂の特性化と、混入可燃物の Deterioration の影響，科学研究費助成事業 研究成果報告書 [課題番号；25630202]，<https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-PROJECT-25630202/25630202seika.pdf>

- 27) 岡野雄馬・中野正樹・野々山栄人・酒井崇之・新木毅・岡崎稔・大塚義一・濱谷洋平・中島典昭：震災復興に向けた災害廃棄物の地盤材料としての有効利活用に関する基礎的研究，第 62 回理論応用力学講演会講演論文集，日本学術会議，OS20-03，2013.3，https://www.jstage.jst.go.jp/article/japannctam/62/0/62_112/_pdf
- 28) 前掲 17)
- 29) 野々山栄人・中野正樹・新木毅・浜島圭佑・岡崎稔・大塚義一・濱谷洋平・中島典昭：腐朽過程を考慮した木片混じり土の力学特性の把握に関する研究，地盤工学会特別シンポジウムー東日本大震災を乗り越えてー，pp.102-108，(JGS 電子図書館)
- 30) 前掲 19)
- 31) 森田康平・勝見武・高井敦史・乾徹：地震・津波に伴い発生した廃棄物混じり土砂の締固め特性，第 47 回地盤工学研究発表会講演集，pp.1953-1954，2012.7，(JGS 電子図書館)
- 32) 中島典昭・稲永隆彦・赤神元英・中野正樹・野々山栄人・酒井崇之・岡崎稔・大塚義一：災害廃棄物の地盤材料としての有効利活用に向けた検討（災害廃棄物の選別・改質），第 48 回地盤工学研究発表会講演集，地盤工学会，pp.153-154，2013.7，(JGS 電子図書館)
- 33) 前掲 21)
- 34) 中野正樹・野々山栄人・酒井崇之・岡野雄馬・新木毅・岡崎稔・濱谷洋平・大塚義一・中島典昭：災害廃棄物の破碎・コンクリートダスト混合による改良土の強度特性，第 48 回地盤工学研究発表会講演集，地盤工学会，pp.155-156，2013.7，(JGS 電子図書館)
- 35) 山根華織・勝見武・高井敦史・森田康平・乾徹：災害廃棄物から分別した土砂の物性と可燃物混入の影響：第 48 回地盤工学研究発表会講演集，地盤工学会，pp.143-144，2013.7，(JGS 電子図書館)
- 36) 前掲 14)
- 37) 今西肇・千葉祐太郎：津波堆積土などの土粒子の密度試験方法の提案，第 48 回地盤工学研究発表会講演集，地盤工学会，pp.147-148，2013.7，(JGS 電子図書館)
- 38) 前掲 19)
- 39) 前掲 26)
- 40) 加藤貴史・大原聖美：木質系バイオマス組成成分の熱分解特性，福岡大学工学集報，Vol.78，pp.9-13，https://fukuoka-u.repo.nii.ac.jp/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=1768&item_no=1&page_id=13&block_id=39
- 41) 前掲 14)
- 42) 勝見武・遠藤和人・肴倉宏史・保高徹生・乾徹・今西肇・大嶺聖・大河原正文・風間基樹・加藤雅彦・小竹望・小峯秀雄・佐藤研一・高井敦史・中野正樹・西村伸一・山中稔・佐々木秀幸：災害廃棄物分別土砂・篩下残渣の物性評価と、戦略的有効利用に向けた基準化，【3K133003】環境研究総合推進費補助金循環型社会形成推進事業（平成 25 年度～平成 27 年度），http://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/kadai/syuryo_report/h27/pdf/3K133003.pdf
- 43) 山根華織・勝見武・高井敦史・乾徹・森田康平：地震・津波で発生した災害廃棄物処理物の物性に及ぼす再ふるいの影響：第 10 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp.371-376，2013.9，(JGS 電子図書館)
- 44) 高井敦史・川島光博・勝見武・乾徹・岩下信一・大河原正文：東日本大震災で発生した岩手県の災害廃棄物分別土砂の品質とその変化，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol.72，No.3，pp.252-264，2016，https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej/72/3/72_252/_pdf
- 45) 森田康平・Uddin Mohammed・高井敦史・乾徹・勝見武：第 49 回地盤工学研究発表会講演集，地盤工学会，pp.2001-2002，2014.7，(JGS 電子図書館)
- 46) 前掲 14)
- 47) 前掲 44)
- 48) 前掲 19)
- 49) 千葉祐太郎・今西肇：津波堆積土などの粒度試験方法の提案，第 48 回地盤工学研究発表会講演集，地盤工学会，pp.149-150，2013.7，(JGS 電子図書館)
- 50) 林産試だより：地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 森林研究本部，2012 年 12 月号，pp.4-7，<https://www.hro.or.jp/list/forest/research/fpri/dayori/1212/1212-2.pdf>
- 51) 前掲 20)
- 52) 前掲 21)
- 53) 今西肇・千葉祐太郎：津波堆積土の密度試験および粒度試験方法の提案，第 10 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp.361-366，2013.9，(JGS 電子図書館)
- 54) 前掲 45)