

**補助事業名** 環境研究総合推進費補助金循環型社会形成推進研究事業（平成 25 年度～平成 27 年度）

**所管** 環境省

**研究課題名** 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

**課題番号** 3K133003

**研究代表者名** 勝見 武（京都大学）

**国庫補助金** 43,222,000 円（うち平成 27 年度：11,115,000 円）

**研究期間** 平成 25 年 5 月 15 日～平成 28 年 3 月 31 日

**本研究のキーワード** 東日本大震災、災害廃棄物、分別土砂、再資源化、地盤材料特性、室内試験、盛土試験、巨大災害

**研究分担者**

遠藤 和人（国立環境研究所）	小竹 望（香川高等専門学校）
肴倉 宏史（国立環境研究所）	小峯 秀雄（早稲田大学）
保高 徹生（産業技術総合研究所）	佐藤 研一（福岡大学）
乾 徹（京都大学）	高井 敦史（京都大学）
今西 肇（東北工業大学）	中野 正樹（名古屋大学）
大嶺 聖（長崎大学）	西村 伸一（岡山大学）
大河原正文（岩手大学）	山中 稔（香川大学）
風間 基樹（岩手大学）	佐々木秀幸（岩手県）
加藤 雅彦（明治大学）	

## 研究概要

### 1. はじめに（研究背景等）

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震とその後の津波により壊滅的な被害を受けた太平洋沿岸部では、合計で約 3,000 万トンにもものぼる膨大な量の災害廃棄物や津波堆積物が発生した。災害廃棄物等は震災で発生した様々なものが混合状態となっていたが、重量比で約 3 分の 1 を土砂が占めていたことから、地盤材料としての再資源化が期待された。混合状態の災害廃棄物中に存在する土砂分には可燃物や不燃物といった夾雑物が混在しており、これらを取り除くことで土砂として再資源化されるが、処置が施されなければ廃棄物の処理及び清掃に関する法律に基づき全て廃棄物として処分される。そのため高度な分離能力が求められ、被災各地区では各自治体や受託業者の創意工夫で様々な技術を組み込んだ選別処理システムが導入されたものの、完全な分離は技術的、時間的にも非現実的であるため、分別土砂には除去しきれない細かい木片を主とする夾雑物の混入が避けられず、写真 1 のような木片混じり土砂とも言うべき分別土砂の活用策を決定することは極めて重要であった。

このような分別土砂に含まれる細かい木片は、一般環境で遭遇するいわゆる有機質土や腐植土等に含まれる有機物とは異なる性質を有しており、(1)多品種の可燃物や不燃物および土砂などが混合状態となったものが大量に存在すること、(2)海水を被ったり海底へのドロが混入したものが多く存在すること、(3)解体家屋や防潮林に由来する有機物の多くは腐植が進行していないこと、(4)有機物の腐植分解に伴うガスの発生や盛土地盤の沈下が懸念されること、(5)仮置き状態によっては悪臭や火災の発生が問題となっており、さらに PCB・石綿や油、その他有害物質の混入なども懸念されることなど、これまでの経験知が適用できない。木片を含む分別土砂は、東日本大震災だけでなく通常の建設工事で遭遇する廃棄物混じり土砂、さらには 2014 年 8 月の広島県での土砂災害や 2015 年 8 月の鬼怒川の氾濫等の大規模な水害でも相当量の災害廃棄物



写真 1 木片を含む分別土砂

として発生しており、今後の巨大自然災害時にも発生が不可避であることから、分別土砂の特性を解明するとともに、処理システムとの関係を明らかにし体系化しておくことは、将来的にも有用な知見となり得る。

## 2. 研究開発目的

図1に示すように、被災各地から仮置き場に搬入された災害廃棄物は、手選別や重機による粗選別を経て大まかに種類ごとに分けられた後、破碎やふるい等を組み合わせた高度選別処理がなされ地盤材料として再生された。しかし、今回のような膨大な災害廃棄物等の発生とその対応はこれまでに経験がなく、平時の廃棄物処理や地盤改良等に関する既存の知見や技術を組み合わせて処理システムを構築せざるを得なかった。そのためシステム設計の考え方は自治体や受託業者によって様々であり、さらに選別後の廃棄物の受入業者の要求品質も異なっていたため、そのような要求される品質を達成するために導入された機材や設備システムも、地区によって大きく異なっていた。

そこで本研究では、初めに実際に現地で行われている災害廃棄物処理で得られる土砂分の地盤工学的特性、環境安全性を評価し、現場ごとの材料品質を明らかにするため室内試験、現場試験の各種試験を行った。次に、2013年度末で災害廃棄物処理を終えた岩手県と宮城県を中心に処理実績に関するデータを解析し、現場ごとに導入された処理スキームと分別土砂の品質の関係を統計的に評価した。得られた成果から汎用性のある知見を体系的に取りまとめ、具体的な技術マニュアルを整備し、環境政策に貢献することを最終的な目的とした。これらの実施により、東日本大震災での廃棄物の最終処分量を低減しうるとともに、将来的な災害発生時においても迅速かつ適切な災害廃棄物対応への貢献が期待できる。

## 3. 研究方法

### (1) 分別土砂の特性評価と復興資材としての要求品質の明確化（テーマ1）

本研究では、初めに分別土砂の材料特性を評価するため、岩手県や宮城県で排出された分別土砂を対象とした各種実験を実施した。「岩手県復興資材活用マニュアル」では、災害廃棄物処理を経て排出される分別土砂は、図2に示すとおりインプットとなる災害廃棄物の種類や処理物の性状に応じて、分別土A種、B種、土砂混合くず、ふるい下くずに分類されている。分別土A種、B種は木くず等の混入が少ないことから、地盤材料として再生利用が当初から期待されていたが、混合廃棄物を起源とする土砂混合くずやふるい下くずには、解体家屋等に由来する細かい木くずの混入が多く、腐朽等の長期挙動も含めた特性が未解明であるため、主にセメント原料として利用された。前処理としての振動ふるいのみを通過した後の土砂混合くずは、高度選別処理の破碎処理等で発生する細かい木くずの混入が少ないため、岩手県マニュアルにおいても土砂混合くずは性状判定次第で分別土B種と同様に地盤材料として活用することが明記されている。処理システムや名称は異なるものの宮城県でも同様の処理が行われ、本試験では、このような岩手県や宮城県の沿岸部で実際に処理を経て排出された分別土砂を対象とし、各種室内試験と現場試験により地盤材料特性を評価した。

次に、分別土砂を用いた実規模盛土の動態を評価するため、岩手県山田町と宮城県気仙沼市に試験盛土を構築し、盛土の挙動を評価した。山田町での盛土試験は、分別土A種、B種を用いた2種類の盛土の長期挙動を把握するために実施し、気仙沼市では改質材の添加による盛土安定性の改善効果を明らかにするために実施した。

岩手県山田町での試験盛土の構築にあたっては、転圧後の厚さが1層当たり25cmになるように調整して撒き出し、層厚管理によって施工した。盛土寸法は幅15m×奥行11m×高さ3mであり、天端が幅6m×奥行き2mとなる勾配1:1.5の形状である。モニタリングでは、盛土構造の将来的な変位、発熱、汚濁成分の放出、腐敗性ガスの放出の有無を評価することを目的として、鉛直/水



図1 災害廃棄物の再資源化フロー

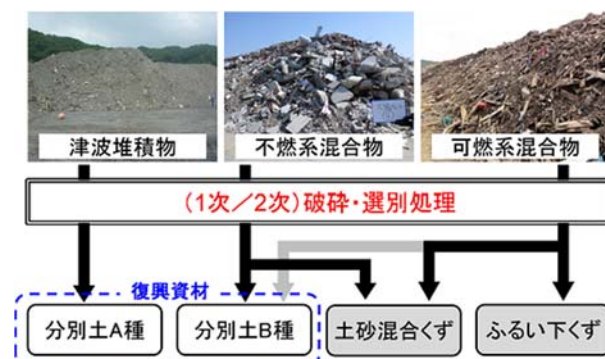


図2 岩手県での災害廃棄物処理フローと処理物

平変位、盛土内の温度、浸透水量、浸透水の水質、盛土内のガス組成を測定するためのセンサーや器具類を設置した。宮城県気仙沼市での試験盛土は、10 mm ふるい通過分の分別土砂単体に加え、40 mm ふるい通過分のコンクリート再生砕石（以下、再生砕石）、石炭灰、製鋼スラグ、製紙スラッジを原位置で混合した資材を用いて試験盛土を構築した。試験盛土の形状は、幅 7 m×奥行 7 m×高さ 1.5 m、勾配 1:1.0、盛土天端は 4.0 m×4.0 m である。盛土底部には盛土を浸透した雨水を採水することを目的として、盛土と基盤の境界部には遮水シートを敷き、盛土中央部に砕石と有孔管を配置した幅 0.5 m×深さ 0.5 m の底設暗渠を設置した。また、盛土の転圧仕様は、道路土工、河川土工などで用いられる標準的な重機構成とし、7 t 級ブルドーザーによる敷均し、10 t 級タイヤローラーによる転圧、仕上がり厚 30 cm、転圧回数 4~8 回で行った。

災害廃棄物処理の完了後に、岩手県山田町の災害廃棄物仮置き場跡地を対象に第二種特定有害物質の濃度を測定し、仮置き場での災害廃棄物とその処理による環境影響を評価した。測定に用いた試料は仮置き場の中でも特に土壤汚染の想定される廃棄物が集積された箇所から 8 試料とし、5 地点均等混合により分析を行った。

## （2）分別土砂の品質決定要因の解明と合理的な処理スキームの確立（テーマ 2）

分別土砂の品質と処理スキームの関係、ならびに分別土砂の品質の経時変化を明らかにするため、処理物約 3,000 m<sup>3</sup> ごとに岩手県が発行した品質判定証のデータ計 404 件を分析した。分別土砂の排出に際し岩手県では品質を管理するため種々の管理項目を設定した。本研究ではそれらのうち地盤材料特性に着目し、粒子密度、粒度分布、液・塑性限界、コーン指数、塩化物含有量、電気伝導率（EC）、pH、強熱減量の 8 項目についてデータ解析による精査を行った。岩手県の災害廃棄物処理二次仮置場が設置された久慈、宮古、山田、大槌、釜石、大船渡、陸前高田の計 7 地区を対象とした。この他に独自に処理を行った地域があったが、岩手県全域で発生した 618 万トンの災害廃棄物と津波堆積物のうち、615 万トンが上記の 7 地区で処理されている。このうち分別土砂の発生量は約 184 万トンであり、約 3,000 m<sup>3</sup> ごとの 404 検体、約 120 万 m<sup>3</sup> を対象とした。これは岩手県で発生した大部分の分別土砂を評価したことになる。

実施事業者の経験や創意工夫に基づき、各地区では様々な処理設備や機材が異なる系統で導入されたため、排出される処理物の性状も多種多様であったが、大きくは乾式での振動型スクリーンや比重差選別、手選別による分別工程と、重機による破碎工程から成る。久慈、宮古、山田、大槌の 4 地区では、資機材の仕様や系統は異なるものの、これら 2 つの工程により災害廃棄物等が処理されたが、釜石、大船渡、陸前高田の 3 地区では改質材による追加処理がなされた。釜石地区では、分別効率の向上と品質改善を目的に、鉄鋼スラグを分別土砂に混合しており、大船渡地区では震災で発生したコンクリート塊を破碎することで得たコンクリートがらを添加して強度改善を行った。同じく大船渡地区では、塩分濃度の高い一部の試料を別途設置した除塩施設で湿式処理しており、湿式サイクロンを用いて砂分と細粒分に分級した上で、重量比で 10% の生石灰を添加して含水比調整を行った。陸前高田地区では、そもそも処理物の農地利用を目的に処理システムが設計されており、他地区のように地盤材料としての再資源化を目的に行ったわけではなく、所要の性状を満足するよう砂分と細粒分を任意の割合で混合し、粒度調整を行った。このように、釜石、大船渡、陸前高田の 3 地区では、改質材の添加や異なる処理目標などの特殊性を有しており、これらがどのように分別土砂の材料品質に影響したか実績データに基づき評価した。なお、久慈、宮古、山田、大槌の 4 地区で導入された機材の仕様や系統の違いは処理物の特性に大きく影響しないと仮定し検討を行った。

また、処理の方法や順序などの処理システムは、処理速度や処理物の品質も左右し、処理事業全体のコストにも影響しうる。特に、復興資材として利用される分別土砂等の分別物の製造・品質に関わる評価は重要であることから、岩手県山田地区の災害廃棄物処理業務にて取得・蓄積された実績データを整理し、質量・体積観点による災害廃棄物処理の進捗状況、処理された廃棄物の時間推移、高度選別処理前後における廃棄物のマテリアルバランス、処理物の密度の時間的変動を評価した。当該地区では、災害廃棄物は大まかな品目ごとに分散して集積されており、処理業務の進捗に合わせてそれらを処理ヤードに順次運搬し、土砂・木材・コンクリートがら・金属類等の十数種類に選別・破碎された。指定された処理・処分先は廃棄物の種類ごとに異なり、最大 70 台/日の大量のダンプトラックが走行したため、廃棄物ごとの重量管理や車両運行管理が必要であった。この過程では 1 日に 150 人から 190 人という多くの人員と手間を要したことから、各処理工程や全体の進捗状況等をいかに効率的に管理するかが課題であり、この管理業務の効率化を図るために「廃棄物統合管理システム」が開発され、各種のデータ管理を行った。このシステムでは、処理期間を通して、12 種類、425 台の車両による運搬を自動計測し、運搬した廃棄物の種類、重量、運搬ルート等の項目のデータを自動取得できるため、トラック 1 台

につき約 24 万の情報が含まれ、それらが日時と紐付けされている。自動取得したデータをクラウド・コンピューティング環境に蓄積し、遠隔システムでモニタリング可能であり、ICT 技術を用いた施工管理の効率化を実現したと言える。本研究ではこのシステムにより得られたビッグデータを高機能グラフ化ソフトウェアを用いて解析し、処理進捗、処理精度とそれらの推移を明らかにした。

### (3) 巨大災害時の災害廃棄物対応に関する方針の整備（テーマ3）

公益社団法人地盤工学会に「災害からの復興における災害廃棄物、建設副産物及び産業副産物の有効利用のあり方に関する提言検討委員会」（略称：復興資材提言委員会、委員長：勝見）が国立環境研究所の委託を受け 2013 年 9 月に設置され、本推進費プロジェクトは技術的内容について実質的な貢献をした。この委員会では本プロジェクトの主要メンバーが委員長（勝見）、委員、事務局として参画し、他の委員やオブザーバーとともに、災害廃棄物再生資材を使うための提言や技術指針・ガイドラインを検討した。マニュアルの実効性を考える上で行政・現場との結びつきが極めて重要なことから、環境省、復興庁、国土交通省、農林水産省、ならびに岩手・宮城・福島県の廃棄物および土木建設担当者（岩手県県土整備部、岩手県環境生活部、宮城県土木部、宮城県環境生活部、福島県土木部、福島県生活環境部）にオブザーバーとして参画頂いて活動を進めることが重要であった。準備会合を含めて合計 7 回開催された委員会は毎回 30 名前後の委員ならびにオブザーバーの出席を得て、様々な立場からの意見交換が活発に行われた。また、メールによる意見聴取においても極めて多くの意見があった。そのような議論と情報共有を踏まえて、活動の成果として「災害からの復興における社会基盤整備への復興資材等の利用のあり方に関する提言・解説（2014 年 3 月 28 日）」ならびに「災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用ガイドライン（2014 年 10 月 2 日）」を公表した。

## 4. 結果及び考察

### (1) 分別土砂の特性評価と復興資材としての要求品質の明確化（テーマ1）

各室内試験の結果、分別土砂には 5～6%程度の可燃物が含まれており、JIS 規格に準拠した強熱減量は 9～13%程度の値を示すことがわかった。粒度の観点からはいずれの試料も細粒分まじり砂に分類され、明瞭なピークを有する締固め曲線が得られた。コーン指数は最適含水比前後で約 2000 kN/m<sup>2</sup> 以上の高い値を示したことから、第 2 種建設発生土相当としての利用が期待できるが、図 3 に示すとおり小さい孔径で再ふるいし木片を除去すれば更なる材料特性の改善が見込めることから、再利用が困難であったふるい下くず等も再資源化できる可能性も示された。海水の影響により電気伝導率と塩化物含有量は一部の試料で高い値を示したものの、pH は 7.5～7.8 の中性域であり、重金属の溶出量も基準を超過しない。さらに可燃物の分解による硫化水素ガス発生の可能性を検証したが、嫌気条件下でのバイアル培養試験において、硫化水素濃度が 25 日経過時点でも 4 ppm 程度と極めて低く、有機物分解の分解性は高くないと判断できる。

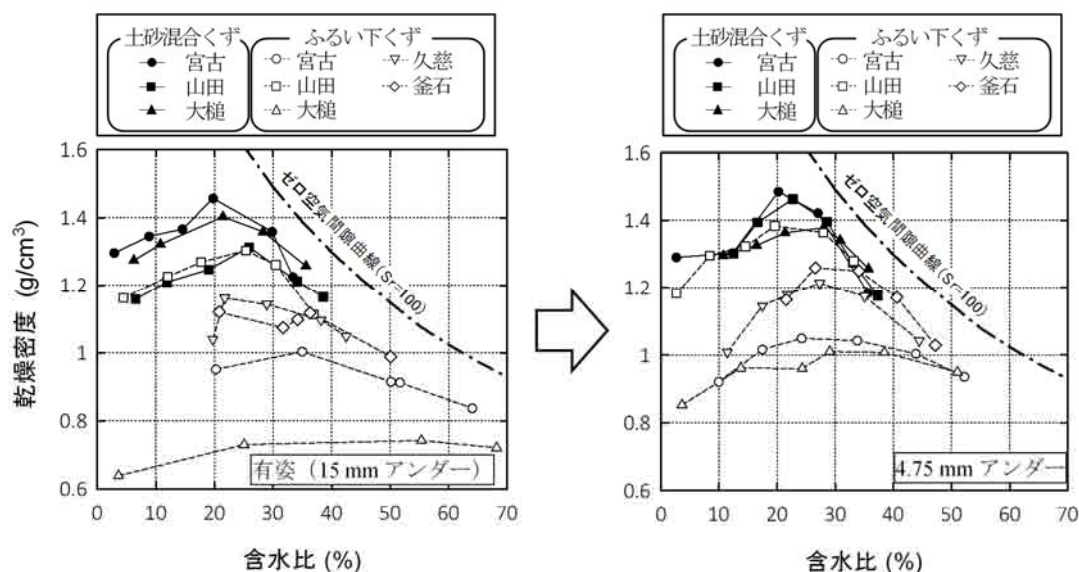


図 3 再ふるいによる締固め特性の改善効果

分別土砂に含まれる木片の腐朽は、長期的な材料特性に影響を及ぼしうる。このことは分別土砂の利用が敬遠された最も大きな要因の一つであったことから、極めて重要な検討事項である。木片の腐朽による力学特性の変化を把握するため、木材腐朽菌（カワラタケ）の添加により長期挙動を評価した。初めに分別土砂を滅菌処理して締め固めて作製した供試体表面に木材腐朽菌を接種したところ、内部に木片があっても腐朽菌は供試体内部に侵入できず、強度に変化がないことがわかった。そこで建材廃棄物由来の木片に木材腐朽菌を接種し1ヶ月腐朽させた木片を、現場採取した岩手県の分別土砂の9.5 mm 通過試料に混合し、モールドに充填した状態で腐葉土内に放置し木片の腐朽を促進させた上で、1、3、4ヶ月経過後に掘り起し一軸圧縮試験を実施した。図4に一軸圧縮試験で得られた一軸圧縮強さと腐朽期間の関係を示す。図4から、腐朽期間によって各供試体の一軸圧縮強さの推移はあるものの、いずれの腐朽期間においても一軸圧縮強さが密詰め供試体が40~75 kPaの範囲に、緩詰め供試体が15~45 kPaの範囲に分布している。このことから、本研究で実施した試験期間内では、締め固め度によらず木材の腐朽が一軸圧縮強さに与える影響は大きくないことが分かった。

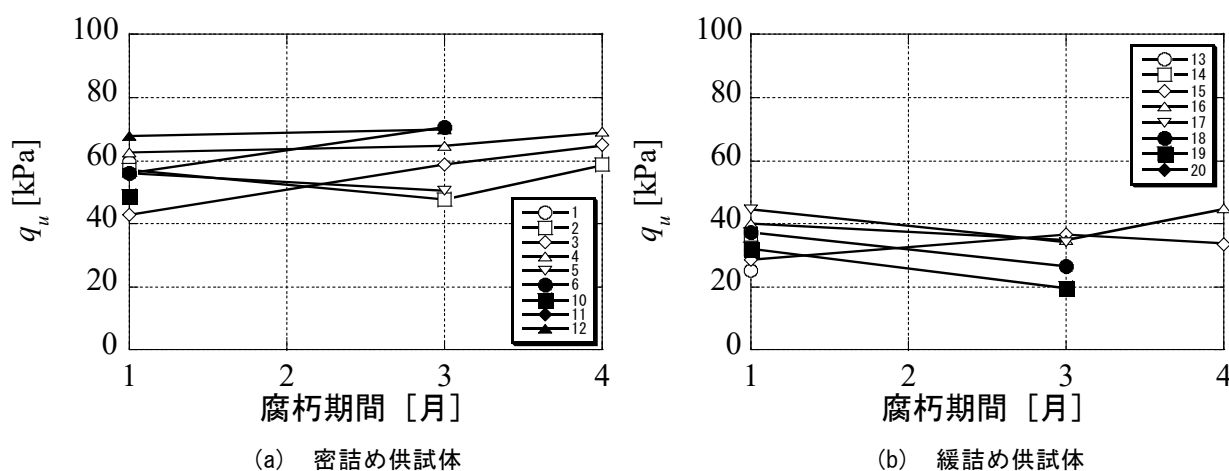


図4 混入木片の腐朽による一軸圧縮強さの変化

分別土砂に残存する木片量によって材料特性が左右されるため、現場での品質管理にも適用できる分別土中の木くず含有量の評価手法を確立することは重要である。地盤工学の分野では JIS A 1226:2009 による 750 °C での強熱減量試験が土の有機物含有量の指標とされているが、この試験法では有機物以外の揮発や対象粒径等により分別土の木くず含有量評価には適していない。そこで、模擬分別土を用いて強熱減量試験を応用した木片含有量定量化手法を検討した。その結果、有姿試料に対しては強熱時間が1時間あるいは3時間の場合、木くず添加率に関わらず木くずの燃焼が不十分であるが、強熱時間12時間以上では燃焼の程度が大きく変化せず、木くずが十分に燃焼している可能性が高いことが分かった。木片の寸法や前処理条件等の様々な条件で試験を行った結果、有姿試料を用いる場合には、350°Cの強熱温度、12時間の強熱時間を確保することで、木くずの大きさに関わらず含有量を評価できること、前処理として試料を粉砕してから試験を行うことで、燃焼時間を短縮しうることを明らかにした。

岩手県山田町の盛土試験において、天端に設置した測量杭、ならびに試験盛土内に設置した沈下板から試験盛土の変形挙動を評価した。水平変位の測定結果は図5に示すとおりで、天端法肩の水平方向への移動は1年間で数mm~十数mm程度に収まっており、実用上支障の無い範囲であると考えられる。鉛直方向には、分別土B種で1年間で40mm程度、A種では50mm程度の沈下量で、天端での最大ひずみ ( $\epsilon_{max}$ ) はA種で1.6%、B種で1.3%であった。気温と試験盛土内の温度変化を計測したところ、深さによる温度変化の時間的な差異はあるが、用いた分別土砂による違いはほとんどなく、同様の変化を示した。有機物の多い廃棄物等を高さ3m程度で堆積すると、発熱が生じて気温変化とは異なる温度変化となるが、分別土を堆積させてもそのような発熱は確認されず、気温を追随する形で温度が変化した。このことは、分別土A種、B種共に発熱を伴うような易分解性の有機物を多く含んでいるわけではないことを意味しており、硫化水素ガス発生ポテンシャルの評価結果も考慮すると、分別土砂に含まれる木片の腐朽は盛土構造物の安定性に影響しないことを示している。宮城県気仙沼市での試験盛土における浸出水の水質分析の結果、盛立2ヶ月後に地下水基準を上回る砒素の溶出が認められ

たが、それ以降の試験では基準値を上回る砒素の溶出は検出されなかった。仮置き場跡地の分析結果でも、海水由来とみられるふっ素やほう素の検出は見られたものの基準値を満足しており、他の重金属類の溶出濃度は検出下限値未満であったことから、災害廃棄物由来の地盤汚染の可能性は低いと言える。

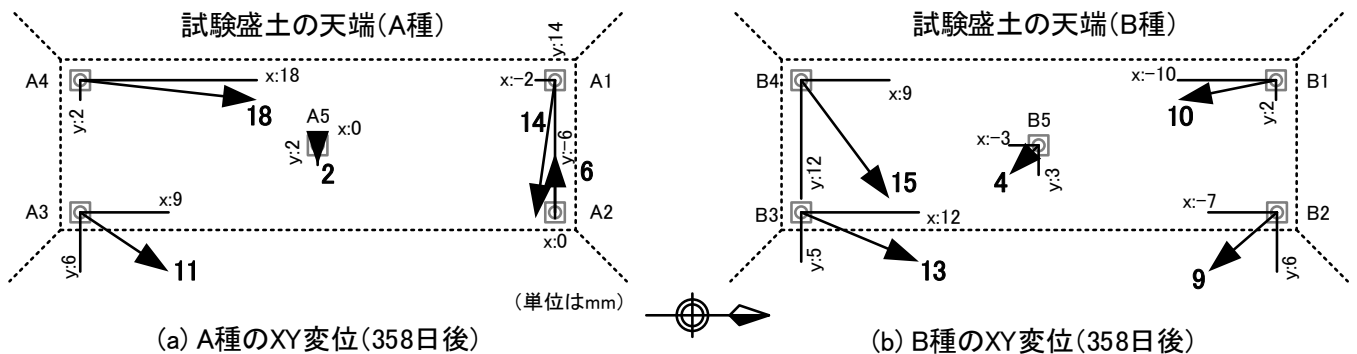


図5 山田町の試験盛土の水平変位の測定結果

(2) 分別土砂の品質決定要因の解明と合理的な処理スキームの確立 (テーマ2)

改質の有無や処理地区の違いに関わらず、また処理の時期に関わらず、分別土は高いコーン指数と砂質土相当の良い粒度を有していた。図6に示すように分別土A種の6.5%、分別土B種の38.0%が第1種建設発生土に相当し、分別土A種の77.3%、分別土B種の59.3%が第2種建設発生土相当した。コンクリートがらの添加は、粒度の改善とコーン指数の増加に寄与するが、コンクリートがらに含まれるセメント水和物の分解により、強熱減量が高くなり、pHは10~14のアルカリ性を示すこと、鉄鋼スラグの添加は強度増加には寄与しないものの、構成要素である酸化物の溶解によりpHと電気伝導率が上昇すること等を明らかにした。2014年3月までの全期間で排出された分別土砂の品質を精査した結果、一般的な処理を経て排出される分別土砂の特性は、表1のように一般化できると言える。

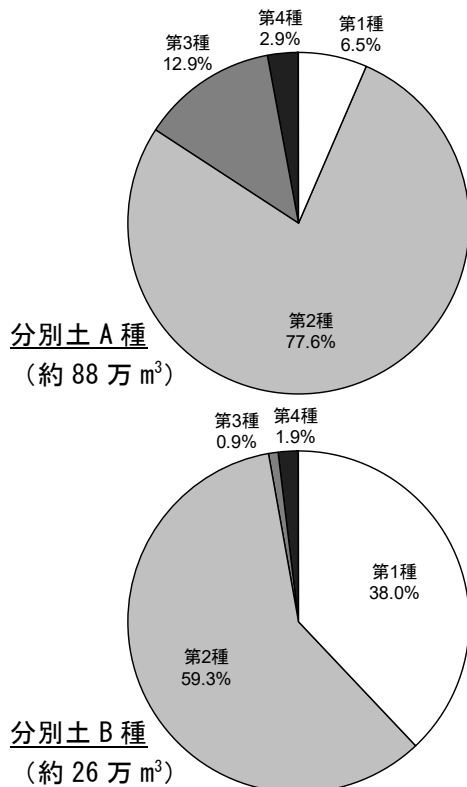


表1 分別土砂の特性

項目	代表的な値
強熱減量	3~10%
細粒分含有率	10~40%
粒子密度	2.6~2.8 g/cm <sup>3</sup>
液性限界	NP
塑性限界	NP
pH	7~9
電気伝導率	< 150 mS/m
塩化物含有量	< 1.0 mg/g
水溶性有機炭素量	< 0.2 mg/g
最大乾燥密度	1.6~2.0 g/cm <sup>3</sup>
最適含水比	9~20%
コーン指数	3000~4000 kN/m <sup>2</sup>
修正 CBR (95%)	9~16%
せん断抵抗角	40~50°
粘着力	35~65 kN/m <sup>2</sup>

図6 発生土利用基準に基づく分別土A種とB種の区分

### (3) 巨大災害時の災害廃棄物対応に関する方針の整備（テーマ3）

本推進費プロジェクトは地盤工学会復興資材提言委員会の活動に参画し、まず「災害からの復興における社会基盤整備への復興資材等の利用のあり方に関する提言」の策定に関わった。これは、特に災害廃棄物由来の復興資材の活用に関する地元行政との意見交換・情報共有、ならびに国立環境研究所が実施した復興資材等の需給バランス、利用に際しての環境負荷、フィージビリティスタディなどに関する業務に基づいて議論し完成させたものである。提言は、①「本提言の前提」、②「社会基盤整備への復興資材等の利用のあり方に関する基本方針」、③「基本方針の実現を目指すために必要な取り組み」の3部からなっている。①で建設リサイクルをはじめとする循環型社会構築に向けてこれまでの取り組みを継承することの必要性、分別土砂の特性の観点からみた東日本大震災の災害廃棄物処理の実情、復興における資材確保の必要性といった「前提」を示した上で、②基本方針として、(1) 強靱な社会基盤の整備、(2) 復興資材等の利用の推進、(3) 複数事業の総和としての最適化を目指す取り組み、の3点を掲げた。そして③基本方針の実現に向けて、(1) 復興資材等の利用を促進する枠組・制度の整備が必要なこと、(2) 強靱で環境安全な土構造物を構築するためにガイドラインの整備を行うこと、(3) より高次の「資材マネジメント」の実施が必要なこと、(4) 啓発活動と継承のための活動を行うこと、を提示した。この内容を説明するためのA4版16ページからなる「解説」も同時に作成、公開した。

復興に向けた社会基盤整備事業では、環境負荷に配慮しながら安全で品質の良い強靱な社会基盤を残していく必要がある。一方、災害廃棄物等（津波堆積物を含む）から再生した復興資材は、地域によって、そして処理の方式によって様々であり、また、自然由来の重金属を含むものも存在する。このため、「復興資材等の品質管理のための基準や設計施工を行う上でのガイドラインやマニュアルの整備は重要である。」との考えに基づき、復興資材等の利用に関して、地盤工学特性と環境安全性の観点に基づく利用用途に応じた合理的な品質基準に依拠して有効利用を推進することを目的とし、品質管理や設計施工を行うためのガイドライン、すなわち「災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用ガイドライン」を整備した。本ガイドラインは、地盤材料として用いられる復興資材のうち、分別土砂に力点をおいたものである。また、用語の定義の重要性や、環境リスクを考慮した有効利用と管理のあり方についても、踏み込んだ記述をしている。その構成は図7に示すとおりであり、第1章では本ガイドラインの基本的な考え方、用語、関連する法律等の基本事項を示した。第2章では復興資材を様々な用途へ有効活用する際の範囲、記録・保存、品質評価等の共通事項を示した。第3章では用途と活用方法を参考とすべき技術指針とともに示した。第4章と第5章は共通事項から特出しして、循環資材による改良とモニタリングの考え方をそれぞれ示した。

これら2つのマニュアルは、いずれも（公社）地盤工学会のホームページで一般公開されており、入手可能である（URL：[https://www.jiban.or.jp/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1540&Itemid=148](https://www.jiban.or.jp/index.php?option=com_content&view=article&id=1540&Itemid=148)）。

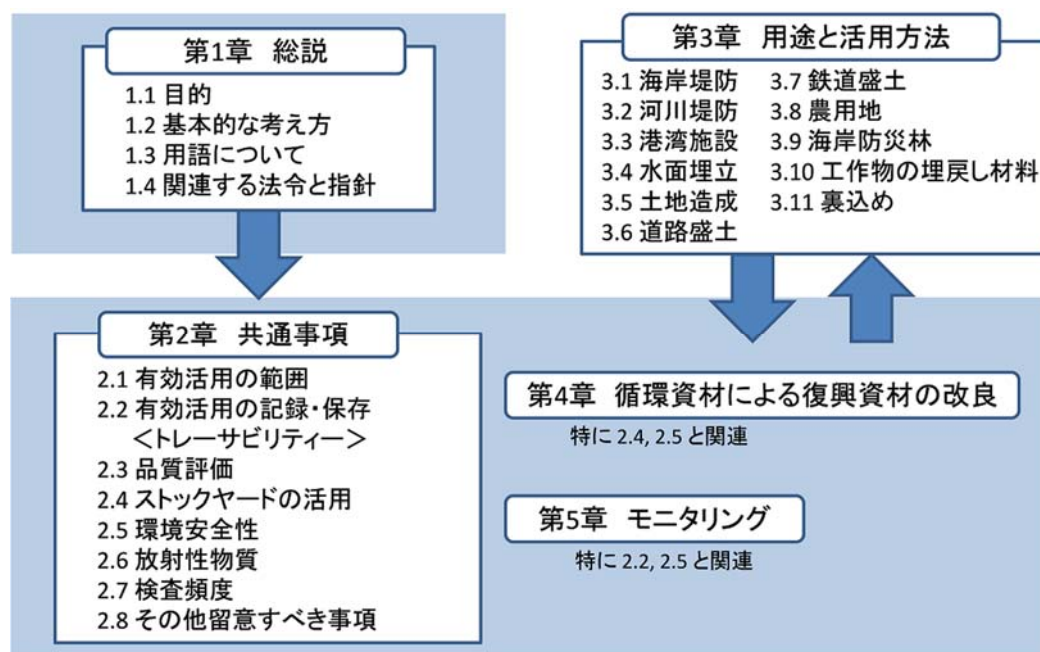


図7 「災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用ガイドライン」の構成

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1) 科学的意義

- テーマ1では災害廃棄物処理の過程で排出される分別土砂の材料特性を評価するため、室内試験と現場試験を行った結果、海水の影響によりECは一般的な地盤材料と比較しやや高いものの、砂分が主体であり高い強度を有していることが分かった。さらに分別土砂に残存する木片の分解性は高くないことを明らかにし、木片の腐朽に伴う硫化水素ガスの発生リスクは低く環境安全性の観点からも問題ないこと、盛土構造物などの間隙構造は長期に渡り大きく変化せず長期に渡り高い安定性が期待できること、が明らかとなった。これらの結果から、分別土砂は通常の土質材料と同等の物性・品質を有しており、通常の土質材料と同様に資材として活用することは適切であると総括できる。
- 分別土砂に含まれる木片量は、現状試験法では十分に評価できないが、有姿試料の場合には350℃、12時間の強熱条件で評価しうること、前処理として試料を粉碎する場合には350℃、3時間で同等の値が得られること、試料量を30g確保することで高い測定精度が期待できること、を明らかにした。これらの知見は現場でも活用できるものであり、災害廃棄物処理における分別土砂の生産品質管理にとって重要である。
- テーマ2では岩手県での災害廃棄物処理に関する実績データを解析し、化学特性は改質目的で添加した資材の影響を受けるものの、発生した分別土砂の99%の試料が200 kN/m<sup>2</sup>以上のコーン指数を、85%が800 kN/m<sup>2</sup>を満足し、ほぼ全ての試料が細粒分まじり砂に分類されたことから、処理内容・システムに関わらず同様の物理特性を有する分別土砂が排出されていたことを明らかにした。
- テーマ3では、「災害からの復興における社会基盤整備への復興資材等の利用のあり方に関する提言」、「災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用ガイドライン」の整備に貢献し、復興資材等の利用のあり方に関する基本方針や、環境リスクを考慮した分別土砂の有効利用方法ならびに管理のあり方等の具体的な技術指針を提示した。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

- 東日本大震災からの復興における災害廃棄物分別土砂の利用の促進： 東日本大震災で発生した災害廃棄物・津波堆積物から再生された分別土砂の適切な処理は災害廃棄物の処理における課題であったが、本研究は分別土砂が通常の土とほぼ同等の特性・品質を有し地盤材料として利用可能であることを示し、被災地における分別土砂の利用と処分量の低減に貢献した。関係省庁や県の担当者等との意見交換・情報共有を積極的に行い、特に本研究のメンバーが監修に関わった「岩手県復興資材活用マニュアル（平成25年2月改訂）」の内容を科学的に裏付けるデータを示し、分別土砂の有効活用に貢献した。
- 東日本大震災の災害廃棄物処理の検証と、将来の巨大災害への対応： 災害廃棄物分別土砂の物性・品質の体系化や、災害廃棄物処理における処理物と時間経過の分析などの成果は、将来の災害廃棄物処理事業の計画・設計等への反映が見込まれ、「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（平成28年3月 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部）」には「災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用ガイドライン」が記載されている。また、本研究の取り組みに基づき、研究代表者ならびに地盤工学会がD. Waste-Net（災害廃棄物処理支援ネットワーク）に参画することとなった。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

- 事故由来の放射性汚染土壌への対応： 除染により発生する除去土壌等は2000万m<sup>3</sup>を超えると見積もられていて、分級等の処理によって再生された極低濃度土壌について再生利用を進め、最終処分量を低減することが求められている。環境省「中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略検討会（平成27年度）」委員会資料には、再生された土の利用に関する技術指針の基礎資料の例として、「災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用ガイドライン」が掲載され、廃棄物由来の再生土の利用の参照とされている。
- 自然由来の重金属等を含む発生土への対応： 土壌汚染に関する現行の法制度では、自然由来であっても基準超過土壌は汚染土壌処理施設にて処理することが定められているが、「土を資源として活用する」という観点から、低濃度の基準超過土壌を一定の管理下で活用する制度を整備することは環境政策上も有意義と考えられる。「災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用ガイドライン」では、有害物質を基準を超過して含有しうる分別土砂について、一定のリスク管理（利用用途の制限とモニタリング）のもとで資材として利用する方策を示しており、土壌分野への活用が見込まれる。



## 6. 研究成果の主な発表状況

### (1) 主な誌上発表

#### <査読付論文>

- 1) 風間基樹, 森 友宏, 大沼清孝, 大山浩一, 相川良雄 (2014): 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の評価, 地盤工学会特別シンポジウム - 東日本大震災を乗り越えて - 発表論文集, pp. 93-101.
- 2) 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 (2014): 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 - 東日本大震災を乗り越えて - 発表論文集, pp. 102-108.
- 3) 西村伸一 (岡山大学)・後藤丹十郎・山本千絵・村上賢治・珠玖隆行 (2014): 震災復興資材 (分別土 C 種) の植栽土壌としての利用, 地盤工学会特別シンポジウム - 東日本大震災を乗り越えて - 発表論文集, pp. 109-113.
- 4) 勝見 武, 遠藤和人, 乾 徹, 大河原正文, 肴倉宏史, 保高徹生 (2014): 東日本大震災における地盤環境課題への取り組み, 地盤工学会誌, Vol. 62, No. 10, pp. 20-23.
- 5) Kazama, M., Mori, T., Onuma, K., Oyama, K., and Aikawa, Y. (2014): Quality evaluation of the soil generated from disaster waste and tsunami deposition soil which include wood waste - Effective use as a construction earth material -, Proc. of International Symposium on Geohazards: Science, Engineering and Management, Kathmandu, Nepal, pp. 481-492.
- 6) 森 友宏, 風間基樹, 大沼清孝, 大山浩一, 相川良雄 (2015): 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, Vol. 10, No. 1, pp. 67-79.
- 7) 山口拓也, 加藤雅彦, 佐藤 健 (2015): カラム試験による災害廃棄物の処理過程で発生した分別土砂からの透水に伴う元素溶出挙動の変化, 第 11 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp. 89-92.
- 8) 山根華織, 高井敦史, 勝見 武, 乾 徹, 三方浩允, 大河原正文, 川島光博 (2015): 東日本大震災で発生した岩手県における分別土砂の特性評価第 11 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp. 93-98.
- 9) 野々山栄人, 中野正樹, 新木 毅, 浜島圭佑, 神野琢真, 吉村 剛 (2015): 災害廃棄物分別土の木片腐朽過程を考慮した力学試験の試み, 第 11 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp. 121-126.
- 10) 小竹 望, 山中 稔, 多田有汰, 山内聡士 (2015): 津波堆積物分別土に混入する木くずが一面せん断強さに及ぼす影響, 第 11 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp. 143-148.
- 11) Kazama, M. and Mori, T. (2015): Evaluation and usage of the soil generated from disaster waste - Case history of Great East Japan Disaster, Proc. of International Conference on Geotechnical Engineering, ICGE-Colombo-2015, Colombo, Sri Lanka, pp. 161-164.
- 12) Katsumi, T. (2016): Contribution of environmental geotechnics for disaster recovery, Proceedings of the Second Japan-India Workshop in Geotechnical Engineering, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol. 3 (accepted for publication).

### (2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) 森田康平, Uddin, M. N., 高井敦史, 乾 徹, 勝見 武 (2014): 災害廃棄物から分別した土砂の土質特性に及ぼす木片の影響, 第 49 回地盤工学研究発表会
- 2) 森 友宏, 風間基樹, 大沼清孝, 大山浩一, 相川良雄 (2014): 震災廃棄物混入土の有効利用のための強度品質評価, 第 49 回地盤工学研究発表会
- 3) 浜島圭佑, 新木 毅, 中野正樹, 野々山栄人, 岡崎 稔, 濱谷洋平, 大塚義一, 中島典昭 (2014): 災害廃棄物の木片混合率に着目した力学挙動の把握, 第 49 回地盤工学研究発表会
- 4) 新木 毅, 浜島圭佑, 中野正樹, 野々山栄人 (2014): 木材腐朽菌による腐朽促進させた災害廃棄物の力学特性の把握に向けた基礎的研究, 第 49 回地盤工学研究発表会
- 5) 今西 肇, 千葉祐太郎, 神宮佑哉 (2014): 人工土の粒度試験方法に関する一考察, 第 49 回地盤工学研究発表会
- 6) 多田有汰, 小竹 望, 山中 稔, 山内聡士 (2015): 津波堆積物分別土の一面せん断試験によるせん断強度

の評価, 第 50 回地盤工学研究発表会

- 7) 浜島圭佑, 中野正樹, 野々山栄人, 新木 毅, 神野琢真 (2015): 災害廃棄物の木片腐朽過程を考慮した力学特性の把握に関する試み, 第 50 回地盤工学研究発表会
- 8) 多田有汰, 小竹 望, 山中 稔, 山内聡士 (2015): 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
- 9) 赤間拓朗, 高井敦史, 乾 徹, 勝見 武 (2016): 災害廃棄物由来分別土の木くず含有量評価における試料量と強熱時間の影響, 平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会
- 10) 赤間拓朗, 高井敦史, 乾 徹, 勝見 武 (2016): 災害廃棄物由来の分別土に含まれる木くず量の評価, 第 51 回地盤工学研究発表会

## 7. 研究者略歴

研究代表者: 勝見 武

京都大学大学院工学研究科修了、博士 (工学)、現在、京都大学大学院地球環境学堂教授

研究分担者

- 1) 遠藤 和人  
京都大学大学院工学研究科修了、博士 (工学)、現在、国立環境研究所主任研究員
- 2) 肴倉 宏史  
北海道大学大学院工学研究科修了、博士 (工学)、現在、国立環境研究所主任研究員
- 3) 保高 徹生  
横浜国立大学大学院環境情報学府修了、博士 (環境学)、現在、産業技術総合研究所主任研究員
- 4) 乾 徹  
京都大学大学院工学研究科修了、博士 (工学)、現在、京都大学大学院地球環境学堂准教授
- 5) 今西 肇  
九州大学大学院工学研究科修了、博士 (工学)、現在、東北工業大学都市マネジメント学科教授
- 6) 大河原 正文  
北海道大学大学院工学研究科修了、博士 (工学)、現在、岩手大学工学部准教授
- 7) 大嶺 聖  
九州大学大学院工学研究科単位修得退学、博士 (工学)、現在、長崎大学大学院工学研究科教授
- 8) 風間 基樹  
東北大学大学院工学研究科修了、博士 (工学)、現在、東北大学大学院工学研究科教授
- 9) 加藤 雅彦  
名古屋大学大学院生命農学研究科修了、博士 (農学)、現在、明治大学農学部講師
- 10) 小竹 望  
京都大学大学院工学研究科修了、博士 (工学)、現在、香川高等専門学校建設環境工学科教授
- 11) 小峯 秀雄  
早稲田大学大学院理工学研究科修了、博士 (工学)、現在、早稲田大学理工学術院教授
- 12) 佐藤 研一  
九州大学大学院工学研究科修了、博士 (工学)、現在、福岡大学工学部教授
- 13) 高井 敦史  
京都大学大学院工学研究科修了、博士 (地球環境学)、現在、京都大学大学院地球環境学堂助教
- 14) 中野 正樹  
名古屋大学大学院工学研究科修了、博士 (工学)、現在、名古屋大学大学院工学研究科教授
- 15) 西村 伸一  
京都大学大学院農学研究科修了、博士 (農学)、現在、岡山大学大学院環境生命科学研究科教授
- 16) 山中 稔  
長崎大学大学院工学研究科修了、博士 (工学)、現在、香川大学工学部准教授
- 17) 佐々木 秀幸  
岩手大学大学院工学研究科修了、博士 (工学)、現在、岩手県環境生活部課長

## 3K133003 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

## [要旨]

本研究は災害廃棄物の処理過程で発生する分別土砂を対象とし、材料特性の解明とマニュアル整備を通して再資源化することを目指したものである。初めに、各種試験を行い被災地で発生した分別土砂の地盤材料特性、環境安全性、細かい木片の腐朽の影響を評価するとともに、分別土砂への現行試験法の妥当性を検証した。次に、災害廃棄物処理に関する実績データを解析し、処理システムと分別土砂の品質の関係を統計的に評価した。これら得られた成果に基づき、最終的に技術マニュアルとして体系化を行った。

室内試験と実績データ分析に基づき分別土砂の特性を一般化し、海水の影響により EC や塩化物含有量は一般的な地盤材料より若干高い値を示すものの、処理内容の違いによらず分別土砂は砂分が主体で強度は高く、地盤材料として十分な特性を有していることを明らかにした。さらに室内試験と現場試験により、分別土砂に残存する木片の微生物活動による分解性は高くないことを明らかにし、分解に伴う有機酸や硫化水素ガス等の発生は限定的で環境安全性の観点からも問題がないこと、盛土等の地盤構造物の間隙構造は大きく変化せず構造安定性は長期に渡り高いこと、を示した。試料量 30 g、350 °C、12 時間の強熱条件で分別土砂中に残存する木片量を精度良く評価しうる可能性を示し、分別土砂の生産品質管理への貢献も期待できる。このような科学的知見の提示に加え、「災害からの復興における社会基盤整備への復興資材等の利用のあり方に関する提言」「災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用ガイドライン」の 2 つのマニュアルを(公社)地盤工学会を中心に関連省庁、自治体と連携して策定し、省庁や県の行政担当者・実務者との綿密な意見交換・情報共有を継続的に行った結果、岩手県での分別土砂の 100%再利用など、被災地における分別土砂の再資源化、最終処分量の大幅な低減に貢献した。本研究で得られた科学的知見ならびに 2 つのマニュアルは、東日本大震災への貢献だけでなく、将来的に発生しうる自然災害時の円滑な災害廃棄物処理の実現にも貢献するものであり、汎用性は高い。

## 1. はじめに

## (1) 研究背景

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震とその後の津波は、東北地方から関東地方にかけて未曾有の被害をもたらした。特に津波により壊滅的な被害を受けた太平洋沿岸部では、膨大な量の災害廃棄物や津波堆積物が発生し、写真 1 のように集積され、被災地の衛生環境の面からもこれら災害廃棄物等の処理は復旧・復興に向けて早急に取り組むべき最重要課題の一つであった。環境省が発表した発生量は、災害廃棄物が岩手県で 423 万トン、宮城県で 1111 万トン、福島県で 173 万トン、津波堆積物が岩手県で 161 万トン、宮城県で 758 万トン、福島県で 175 万トンであり<sup>1)</sup>、これらは「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)」<sup>2)</sup>や「津波堆積物処理指針(案)」<sup>3)</sup>の方針に従って適切に処理され、当初目標通り福島県を除いては 2014 年 3 月末までに災害廃棄物等の処理を終えたが、福島県の一部の地域では現在も処理が継続されている状況にある<sup>1)</sup>。災害廃棄物と津波堆積物は混然一体となって集積されたが、最終処分量を低減させるべくできる限りの分別を行った上で再資源化することが求められ、「岩手県災害廃棄物処理詳細計画第二次改訂版」<sup>4)</sup>や「宮城県災害廃棄物処理実行計画(最終版)」<sup>5)</sup>のような各自治体が策定した独自の方針も踏まえて処理システムが構築された。

災害廃棄物等は震災で発生した様々なものが混合状態となっていたが、重量ベースで約 3 分の 1 を土砂が占めていたことから、地盤材料としての再資源化が期待された。混合状態の災害廃棄物中に存在する土

砂分には可燃物や不燃物といった夾雑物が混在しており、これらを取り除くことで土砂として再資源化されるが、処置が施されなければ廃棄物の処理及び清掃に関する法律に基づき全て廃棄物として処分される。そのため高精度の分離能力が求められ、被災各地区では各自治体や受託業者の創意工夫で様々な高度な技術を有する選別処理システムが導入されたものの、完全な分離は技術的、時間的にも非現実的であるため、分別土砂には除去しきれない細かい木片を主とする夾雑物の混入が避けられず、木片混じりの土砂の活用方法が重要であった。写真 2 の再生されたコンクリートがらと比較すると、写真 3 から明らかなように、分別土砂には細かい木片が残存していた。このような分別土砂に含まれる細かい木片は、一般環境で遭遇するいわゆる有機質土や腐植土等に含まれる有機物とは異なる性質を有しており、(1) 多品種の可燃物や不燃物および土砂などが混合状態となったものが大量に存在すること、(2) 海水を被ったり海底のヘドロが混入したものも多く存在すること、(3) 解体家屋や防潮林に由来する有機物の多くは腐植が進行していないこと、(4) 有機物の腐植分解に伴うガスの発生や盛土地盤の沈下が懸念されること、(5) 仮置き状態によっては悪臭や火災の発生が問題となっており、さらに、(6) PCB・石綿や油、その他有害物質の混入なども懸念されることなど、これまでの経験知が適用できなかったため、利用用途の決定には至らず分別処理後も仮置きされているものが当初は多く存在していた。木片を含む分別土砂は、東日本大震災だけでなく通常の建設工事で遭遇する廃棄物混じり土砂、さらには 2014 年 8 月の広島県での土砂災害や 2015 年 8 月の鬼怒川の氾濫等の大規模な水害でも相当量の災害廃棄物として発生しており、今後の巨大自然災害時にも発生が不可避であることから、分別土砂の特性を解明するとともに、処理システムと処理品質の関係を明らかにし体系化しておくことは、将来的にも有用な知見となり得る。



写真 1 災害廃棄物の仮置き状況



写真2 再生コンクリートがら



写真3 木片を含む分別土砂

## (2) 研究体制

本研究の分担者は、研究代表者の勝見が委員長を務めた(公社)地盤工学会の地盤環境研究委員会(2011～2014年度)の参画メンバーであり、委員会活動を通して被災地の状況や社会的ニーズに精通しているだけでなく、現地調査や災害廃棄物・津波堆積物に関する室内分析を数多く行い、研究を遂行するのに必要な高いスキルを有している。本研究では分別土砂の特性を学術的に明らかにするとともに、利用策の提案やマニュアル整備等の環境政策にも貢献するものであることから、地盤工学分野だけでなく、地盤環境工学、廃棄物工学、地盤施工学、防災地盤工学の各分野から本研究の遂行に必要な第一人者で構成されており、さらに実務で災害廃棄物処理を担当した岩手県の行政担当者も参画していることから、個々の知識・経験に基づいた議論・展開・連携が可能な体制となっている。表1に本研究の実施メンバーと専門分野を示す。

表1 本研究の実施体制

氏名	専門分野	現所属
勝見 武	地盤環境工学	京都大学大学院地球環境学堂・教授
遠藤 和人	廃棄物工学	国立環境研究所・主任研究員
肴倉 宏史	廃棄物工学	国立環境研究所・主任研究員
保高 徹生	地盤環境工学	産業技術総合研究所・主任研究員
乾 徹	地盤環境工学	京都大学大学院地球環境学堂・准教授
今西 肇	地盤施工学	東北工業大学工学部・教授
大河原 正文	防災地盤工学	岩手大学工学部・准教授
大嶺 聖	地盤力学	長崎大学工学部・教授
風間 基樹	防災地盤工学	東北大学大学院工学研究科・教授
加藤 雅彦	地盤環境工学	明治大学農学部・講師
小竹 望	地盤施工学	香川高等専門学校建設環境工学科・教授
小峯 秀雄	地盤環境工学	早稲田大学理工学術院・教授
佐藤 研一	地盤施工学	福岡大学工学部・教授
高井 敦史	地盤環境工学	京都大学大学院地球環境学堂・助教
中野 正樹	地盤力学	名古屋大学工学研究科・教授
西村 伸一	地盤力学	岡山大学大学院環境生命科学研究科・教授
山中 稔	防災地盤工学	香川大学工学部・准教授
佐々木 秀幸	廃棄物工学	岩手県環境生活部・課長

## 2. 研究目的

図1は災害廃棄物の再資源化のイメージ図であるが、このように被災各地から仮置き場に搬入された災害廃棄物は、手選別や重機による粗選別を経て大まかに種類ごとに分けられた後、破碎やふるい等を組み合わせた高度選別処理がなされ、地盤材料として再生された。しかし、今回のような膨大な災害廃棄物等の発生とその対応はこれまでに経験がなく、平時の廃棄物処理や地盤改良等に関する既存の知見や技術を組み合わせて処理システムを構築せざるを得なかった。そのためシステム設計の考え方は自治体や受託業者によって様々であり、さらに選別後の廃棄物の受入業者の要求品質も異なっていたため、そのような要求される品質を達成するために導入された機材や設備系統も、地区によって大きく異なっていた。写真4は岩手県と宮城県で実際に導入された処理設備の例であるが、このように仮設の屋根を設置しクローズド環境で処理を行った地区もあれば、分別土砂の品質向上のため添加材を用いた地区もあり、一概に災害廃棄物処理システムと言っても仕様は大きく異なる。そのため排出された分別土砂も地区によって異なる特性を有していたことから、分別土砂の特性を包括的に解明し、地盤材料あるいは植栽基盤としての利用可能性を評価するとともに、分別土砂の材料品質と処理システムの間関係を明らかにする必要がある。このような得られた知見を体系的に取りまとめマニュアル等として継承することは、将来的な自然災害時において円滑な災害廃棄物処理を実現させるために重要な基礎資料となり得る。

そこで本研究では、初めに実際に現地で行われている災害廃棄物処理で得られる土砂分の地盤工学的特性、環境安全性を明らかにするため、室内試験、現場試験の各種試験を行った。次に、2013年度末で災害廃棄物処理を終えた岩手県と宮城県を中心に処理実績に関するデータを解析し、現場ごとに導入された処理システムと分別土砂の品質の間関係を統計的に評価した。得られた成果から汎用性のある知見を体系的に取りまとめ、東日本大震災のみならず将来的な災害発生時においても迅速かつ適切な災害廃棄物処理を可能にする具体的な技術マニュアルを整備し、環境政策に貢献することを最終的な目的とした。



図1 災害廃棄物の再資源化フロー



写真4 各地区で導入された処理システムの例

### 3. 研究方法

本研究の実施内容は、図 2 に示すように 3 つのテーマで構成される。テーマ 1 では分別土砂の特性評価を行い、テーマ 2 では実績データに基づいて分別土砂の品質を明らかにするとともに、品質決定要因を検討した。さらに得られた成果に基づき、テーマ 3 では処理技術の俯瞰的評価とマニュアル化を行った。

#### 本研究の実施方法・内容

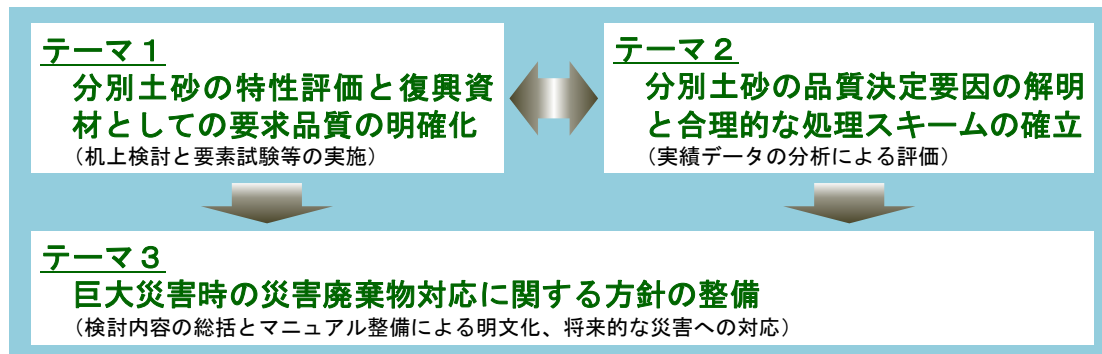


図 2 本研究での実施内容

#### (1) 分別土砂の特性評価と復興資材としての要求品質の明確化（テーマ 1）

分別土砂の特性に関する知見が不十分であったことから、本研究では、①分別土砂の材料特性を評価すること、②特性評価を行うため、分別土砂の特殊性を考慮した試験方法を提案すること、を目的として図 3 に示す構成で以下の検討を行った。

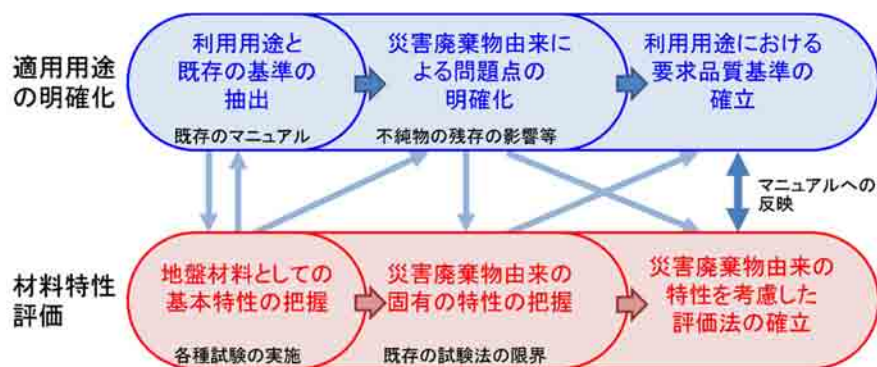


図 3 テーマ 1 の構成と流れ

#### 1) 室内試験による評価

本研究では、初めに分別土砂の材料特性を評価するため、岩手県や宮城県で排出された分別土砂を対象とした各種実験を実施した。「岩手県復興資材活用マニュアル<sup>6)</sup>（以下、岩手県マニュアル）」では、図 4 に



示すように風力選別や破碎処理、振動ふるい等の高度選別処理を経て排出される分別土砂は、インプットとなる災害廃棄物の種類や処理物の性状に応じて、分別土 A 種、B 種、土砂混合くず、ふるい下くずと呼ばれている。分別土 A 種、B 種は木くず等の混入が少ないことから、地盤材料として再生利用が当初から期待されていたが、混合廃棄物を起源とする土砂混合くずやふるい下くずには、解体家屋等に由来する細かい木くずの混入が多く、腐朽等の長期挙動も含めた特性が未解明であるため、主にセメント原料として利用された。前処理としての振動ふるいのみを通過した後の土砂混合くずは、高度選別処理の破碎処理等で発生する細かい木くずの混入が少ないため、岩手県マニュアルにおいても土砂混合くずは性状判定次第で分別土 B 種と同様に地盤材料として活用することが明記されている。

本試験の対象試料は、岩手県、宮城県の沿岸部で実際に処理を経て排出された分別土砂である。実施した分析項目および方法、準拠した基準を表 2 に、実施機関を表 3 に示す。分析に際しては、原則「地盤材料試験の方法と解説<sup>7)</sup>」の記載内容に準拠して実施した。その他の特記事項は以下のとおりである。

●組成分析（対象地区：久慈、宮古、山田、大槌、釜石）

2 mm 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。選別項目としては廃棄物処理法と同法施行令で指定されている廃棄物のうち、手作業で分別可能なものである。可燃性廃棄物にはプラスチック・紙・木・繊維等が、不燃性廃棄物には金属・ガラス・コンクリート・陶磁器等がそれぞれ該当する。

●強熱減量（対象地区：久慈、宮古、山田、大槌、釜石）

試料中には粗大な木片等が混入しているが、2 mm のふるい通過分を試験に供する JIS 規格ではその多くが除去されてしまうため、①JIS 規格に準拠する方法、②木片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全量分析法の 2 通りを実施した。

●粒子密度（対象地区：宮古、山田、大槌）

強熱減量と同様、①JIS 規格に準拠する方法、②木片等粗大物を粉碎・破碎して全量の粒子密度を測定する方法の 2 通りを実施した。

●液性限界・塑性限界（対象地区：久慈、宮古、山田、大槌、釜石）

JIS 規格に準拠した。ただし 425  $\mu\text{m}$  ふるいを通過する程度まで試料を細粒化するのは困難であるため、試料の破碎は行わずに裏ごしし、試験を行った。

●pH・EC（対象地区：久慈、宮古、山田、大槌、釜石）

非乾燥法により試料を調整した後、①有姿、②10 mm ふるい通過分、③10 mm ふるい残留分のそれぞれを試験に供した。固液比 5 で 1 時間振とうして検液を作製し測定した。

●塩化物含有量・水溶性有機炭素（TOC）（対象地区：久慈、宮古、山田、大槌、釜石）

固液比 10 で 6 時間振とうした後、20 分間遠心分離、0.45  $\mu\text{m}$  メンブレンフィルターで濾過を行い検液を作製した。塩化物含有量はイオンクロマトグラフを、水溶性有機炭素（TOC）は燃焼酸化-赤外線式 TOC 分析法を用いて測定を行った。なお pH、EC、塩化物含有量、水溶性有機炭素については各値の粒径依存性を評価するため、有姿の試料に加えて 10 mm 以上、10 mm 未満の各画分についても分析を行った。

●硫化水素ポテンシャル（対象地区：宮古、山田、大槌）

各試料を 4.75 mm ふるいを用いて調整後、液固比 2 となるよう乾燥試料 20 g に対し蒸留水 40 g を加えバイアル瓶に投入した。ヘッドスペース部分を窒素置換し嫌気状態にした後、40  $^{\circ}\text{C}$  の恒温条件下で培養を開始した。7、14、25 日経過後にヘッドスペース部分のガスについて、ガスクロマトグラフによって硫化水素ガス濃度を測定した。

●縮固め特性・コーン指数（対象地区：宮古、山田、大槌）

A-a 法による縮固めを行い、各含水比においてコーン指数を測定した。木くず等の破砕が考えられるが、試料量の関係から繰り返し法で実施した。なお、ふるいによる試料調整や粗大物の除去は行わず、有姿のまま試験に供した。

●吸水膨張・CBR（対象地区：宮古、山田、大槌）

上記の縮固め特性、コーン指数の測定と同様、ふるいによる試料調整や粗大物の除去は行わず、有姿のまま試験に供した。なお、吸水膨張試験は変位の有無に関わらず 96 時間で打ち切った。

●強度変形特性（対象地区：山田、石巻）

岩手県の分別土 A 種を用い、有姿試料の強度変形特性を評価するため、直径 200 mm、高さ 100 mm の供試体でせん断可能な一面せん断試験装置を作製し、50、100、150 kN/m<sup>2</sup> の垂直応力で沈下がほぼ収束するまで圧縮した後、0.66 mm/min のせん断速度で水平変位が 23 mm に達するまで載荷した。

岩手県山田地区で採取したふるい下くずを対象とし、木材腐朽菌（カワラタケ）により混入する木片の腐朽とそれに伴う強度の変化を一軸圧縮試験により評価した。木材腐朽菌添加後の養生期間は 2、5、10、11、13 ヶ月とした。

宮城県石巻ブロックで排出されたふるい下土砂と、それに更に二段階の工程を加え有機物等を除去した土砂、津波堆積土砂の 2 mm 以下の水洗い試料、津波堆積土砂を用いて一般的な圧密試験により評価した。

●植栽基盤としての利用可能性（対象地区：山田）

ふるい下くず有姿、不燃物除去後のふるい下くず、まさ土、培養土の 4 種類を対象に異なる栽培環境下で複数の植物の栽培し、発芽個体数、地上部生体重、葉数、最大葉の葉長等から植物の生育を評価した。

●溶解物質の移動性（対象地区：山田、気仙沼）

1 週間風乾後の分別土砂を粉砕し、円筒型カラムに約 1.50 g/cm<sup>3</sup> の密度で充填し、定流量ポンプを用いて蒸留水を上向流または下向流で通水した。回収した検液に対し、pH・EC を pH・EC 計で、Cu、Zn、Cd、Pb、As を ICP-MS にて、陽イオン（Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>）陰イオン（F<sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sup>3-</sup>、SO<sup>4-</sup>）をイオンクロマトグラフを用いて測定した。さらに想定される水収支から塩分濃度の低下に必要な時間をシミュレーションした。

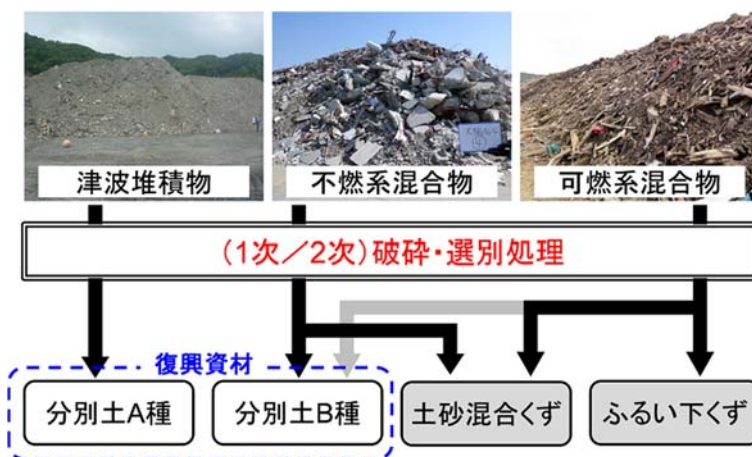


図 4 岩手県での災害廃棄物処理フローと処理物

表 2 試験項目と準拠した基準

分析項目	要求品質*1	分析方法・基準	
組成分析		手選別による組成分析	なし
強熱減量		土の強熱減量試験方法	JIS A 1226:2009
粒度分布	$D_{max} \leq 300 \text{ mm}$	土の粒度試験方法	JIS A 1204:2009
粒子密度		土粒子の密度試験方法	JIS A 1202:2009
液・塑性限界		土の液性限界・塑性限界試験方法	JIS A 1205:2009
pH	6~9	土懸濁液の pH 試験方法	JGS 0211-2009
電気伝導率 (EC)	200 mS/m 以下	土懸濁液の電気伝導率試験方法	JGS 0212-2009
塩化物含有量*2	1 mg/g 以下	土の水溶性成分試験方法	JGS 0241-2009
水溶性有機炭素量 (TOC) *3		同上	同上
硫化水素発生ポテンシャル		バイアル瓶を用いた培養試験	—
溶解物質の移動性		鉛直カラム通水試験	—
締固め特性		突固めによる土の締固め試験方法	JIS A 1210:2009
コーン指数	200 kN/m <sup>2</sup> 以上	締固めた土のコーン指数試験方法	JIS A 1228:2009
吸水膨張・CBR		CBR 試験方法	JIS A 1211:2009
強度変形特性		土の段階载荷による圧密試験方法	JIS A 1217:2009
		土の圧密定圧一面せん断試験方法	JGS 0561-2009
		土の一軸圧縮試験方法	JIS A 1216:2009
植栽基盤としての利用可能性		プランターを用いた植害試験	—

\*1 岩手県復興資材活用マニュアルより

\*2 イオンクロマトグラフにより測定

\*3 燃焼酸化-赤外線式 TOC 分析法により測定

太字は岩手県での管理項目

表3 各項目の実施機関

分析項目	試験実施機関
組成分析 強熱減量	京都大学、岡山大学、福岡大学
粒度分布 粒子密度 液性限界・塑性限界	名古屋大学、香川高専、香川大学、東北工業大学
pH 電気伝導率 (EC) 塩化物含有量 水溶性有機炭素量 (TOC)	京都大学、長崎大学、福岡大学
硫化水素発生ポテンシャル	国立環境研究所
溶解物質の移動性	岐阜大学 (明治大学)、茨城大学 (早稲田大学)
締固め特性 コーン指数 吸水膨張・CBR	岐阜大学 (明治大学)、東北大学
強度変形特性	東北大学、名古屋大学、長崎大学、香川高専、香川大学
植栽基盤としての利用可能性	岡山大学、岐阜大学 (明治大学)、長崎大学

研究開始時の機関。カッコ内は体制変更後の機関。

## 2) 現場試験による評価

### a 試験盛土による動態観測

本研究では、分別土砂を用いた実規模盛土の動態を評価するため、岩手県山田町と宮城県気仙沼市で実施された試験盛土の結果の解釈に貢献した。山田町における盛土試験の目的は、分別土 A 種、B 種を用いた 2 種類の盛土の長期挙動を把握することであり、気仙沼市では改質材の添加による盛土安定性の改善効果を明らかにするために実施した。それぞれの概要を以下に示す。

岩手県山田町での試験盛土に用いた分別土砂は、図 4 の分別土 A 種と B 種であり、組成分析の結果から、木・竹・わら類といった木くずに相当する組成が分別土 A 種よりも B 種の方が多いことが確認されている。木くず等の混入による汚濁成分の溶出特性を評価したところ、分別土 B 種の全窒素 (T-N) と全有機炭素量 (TOC)、化学的酸素消費量 (COD) が、A 種の約 2 倍となっており、木くず等含有量が多いために水への汚濁成分の溶出も多い試料である。溶出試験の結果から、重金属類は砒素、フッ素、ホウ素以外の全ての項目は N.D. (検出下限値未満) であり、含有量についても鉛、フッ素、ホウ素以外は N.D. という結果であった。検出された項目についても土壤汚染対策法第 6 条の基準を下回る結果となった。分別土 A 種と B 種の均等係数  $U_c$  はそれぞれ 57.50、69.25 であった。分別土 B 種の方が A 種よりも細粒分がやや多いが、これは

破碎等の処理工程に起因すると考えられる。最大乾燥密度  $\rho_{dmax}$  はそれぞれ  $1.772 \text{ g/cm}^3$ 、 $1.445 \text{ g/cm}^3$ 、最適含水比  $w_{opt}$  は  $15.3\%$ 、 $22.6\%$  であった。最大乾燥密度における透水係数（変水位法によって算出）は極めて小さく、それぞれ  $2.49 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 、 $4.52 \times 10^{-9} \text{ m/s}$  であった。このような低透水性を示したのは、最適含水比が自然含水比よりも大きく、動的な締め固め過程で供試体の一部が泥濘化したことが要因と考えられる。

構築した試験盛土の平面図と断面図を図 5 に、施工完了後の状況を写真 5 に示す。試験盛土の構築にあたっては、転圧後の厚さが 1 層当たり  $25 \text{ cm}$  になるように調整して撒き出し、層厚管理によって施工した。モニタリングでは、盛土構造の将来的な変位、発熱、汚濁成分の放出、腐敗性ガスの放出の有無を評価することを目的として沈下量等の変位、盛土内の温度、浸透水量、浸透水の水質、盛土内のガス組成を測定するためのセンサーや器具類を図 6、図 7 のように設置した。

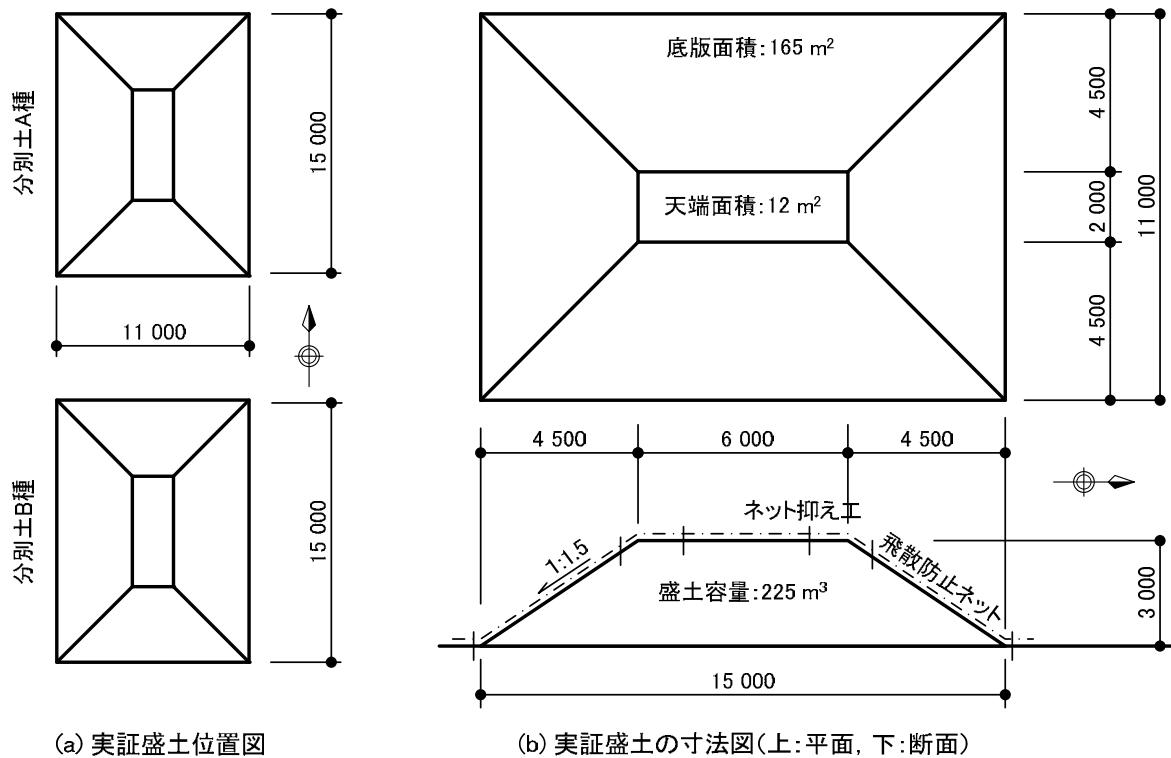


図 5 岩手県山田町における試験盛土の見取図



写真5 施工完了後の様子

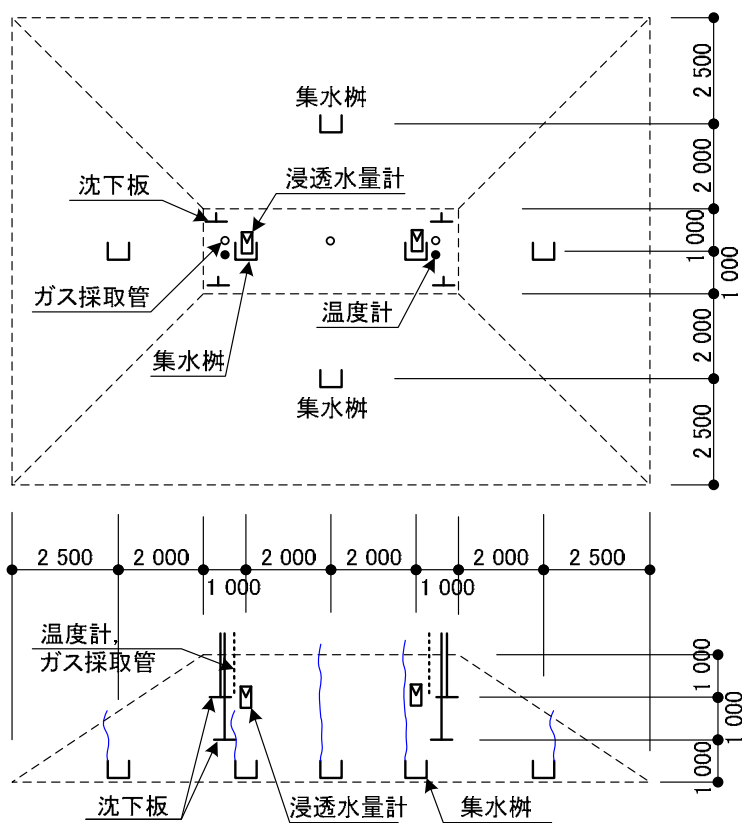


図6 センサーや装置類の設置位置図

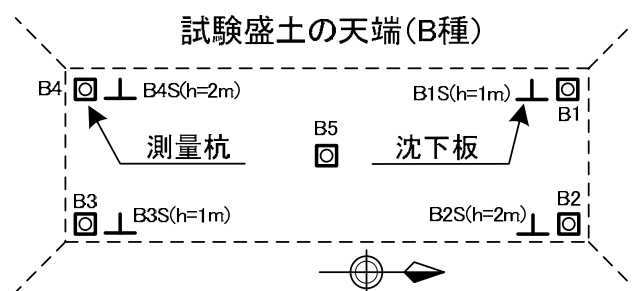


図7 沈下板と測量杭の位置と番号

宮城県気仙沼市での試験盛土は、10 mm ふるい通過分の分別土砂単体に加え、40 mm ふるい通過分のコンクリート再生砕石（以下、再生砕石）、石炭灰、製鋼スラグ、製紙スラッジを原位置で混合した資材を用いて試験盛土を構築した。ここで、各材料の名称は次のとおりである。

- ・分別土砂の単体材料・・・TD
- ・分別土砂と再生砕石の混合土砂・・・TR
- ・分別土砂と石炭灰（クリンカーアッシュ）の混合土砂・・・TC
- ・分別土砂と製鋼スラグの混合土砂・・・TS
- ・分別土砂と製紙スラッジ焼却灰を主原料とした石灰系固化材の混合土砂・・・TP

分別土砂と再生砕石および循環資材の混合は、写真 6 に示すように、均質な混合攪拌を目途として定量供給装置と一軸式油圧連続式ミキサーを用いた可搬式混合処理設備により行った。TR の混合比率は容積比で 1 : 0.2（＝分別土砂：再生砕石）、分別土砂と循環資材の混合では分別土砂の敷均し時の密度を想定したジッキングによるかさ密度から換算した 100 kg/m<sup>3</sup> の循環資材を分別土砂に添加した。盛土に使用した材料の基本的性質は表に示すとおりである。分別土砂および混合土砂の細粒分含有率 ( $F_c$ ) は 50%以下であり、工学的分類では細粒分質礫質砂 (SFG) と細粒分質砂質礫 (GFS) に区分される。各材料の最大乾燥密度  $\rho_{dmax}$  は、TD : 1.414 g/cm<sup>3</sup>、TR : 1.500 g/cm<sup>3</sup>、TC : 1.400 g/cm<sup>3</sup>、TS : 1.395 g/cm<sup>3</sup>、TP : 1.212 g/cm<sup>3</sup> が得られた。透水係数は  $3.3 \times 10^{-6} \sim 2.2 \times 10^{-9}$  m/s の範囲にあり、半透水～不透水性材料の透水性を持つことから、堤防などの水利構造物において遮水性が求められる築堤材料として活用が見込まれる。また、各材料の透水係数の最小値が得られる締固め条件は、最適含水比より若干高い含水比での締固め状態で得られており、このような特性は一般的な土質材料の特性と一致している。

試験盛土の横断形状は、図 8 に示すように高さ 1.5 m、勾配 1 : 1.0、盛土天端は 4.0 m × 4.0 m である。盛土底部には盛土を浸透した雨水を採水することを目的として、盛土と基盤の境界部には遮水シートを敷き、盛土中央部に砕石と有孔管を配置した幅 0.5 m × 深さ 0.5 m の底設暗渠を設置した。また、盛土の転圧仕様は、道路土工、河川土工などで用いられる標準的な重機構成とし、7 t 級ブルドーザーによる敷均し、10 t 級タイヤローラーによる転圧、仕上がり厚 30 cm、転圧回数 4～8 回により行った。



写真 6 分別土砂と循環資材の原位置混合状況

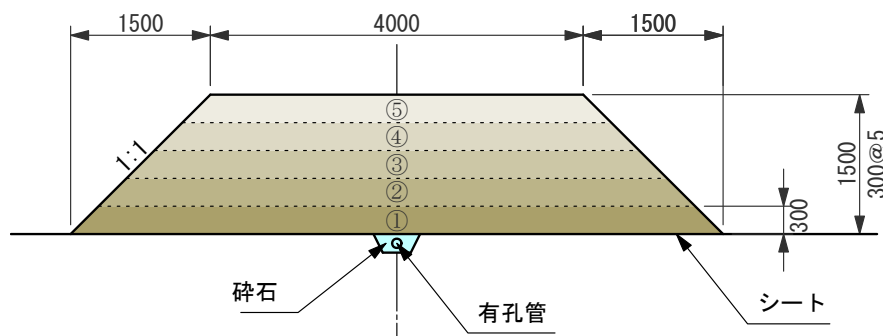


図 8 試験盛土断面図

## b 災害廃棄物仮置き場での環境影響評価

災害廃棄物仮置き場の跡地返還に関連し、溶解性物質の移動性を現場サンプリングにより評価した。対象としたのは岩手県山田町であり、この地区の一次仮置き場は海拔 3 m の海岸沿いに設けられた。範囲は東西約 450 m、南北約 1260 m、面積約 56.7 万  $\text{m}^2$  である。災害廃棄物は、木材及び粉碎チップ、廃家電、土砂、混合ごみに大別され仮置き場に集積されていたが、土砂には空き缶、プラスチック容器などが混入するなど、焼却処理や再利用にあたり、破碎・分別が必要であった。当該地区の地盤特性を調べるため、仮置き場全域を網羅するように東側 (E 測線) と西側 (W 測線) に分け、東西それぞれ 7 箇所より計 14 個採取した (図 9)。試料採取にはスコップを使用したほか、不攪乱試料の採取には内径 4.5 cm の塩ビ管を取り付けた電動ドリル、ハンドオーガーに内径 10 cm の塩ビ管を取り付けた手製の採取器を使用した。第二種特定有害物質の測定に用いた試料は、仮置き場の中でも特に土壤汚染の想定される廃棄物が集積された箇所から 8 試料採取した。試料の採取には 5 地点均等混合法を採用した。





図9 土質試験試料採取地点

## (2) 分別土砂の品質決定要因の解明と合理的な処理スキームの確立 (テーマ2)

東日本大震災で発生したような膨大な量の災害廃棄物等の処理はこれまでに経験が無かったことから、処理システムの設計から処理物の管理に至るまで、十分な制度設計が事前になされていなかった。今回の経験は将来的に想定される巨大災害への対応にとっても重要な知見であり、①実績データをどのように見える化するか、②このような取り組み・成果から、既に実施した災害廃棄物処理がどのようなものであったのか、③今後の災害廃棄物処理においていかにデータをとって進捗管理をしていくか、について検討する必要がある。

### 1) 災害廃棄物処理のシステムと分別土砂の品質の関連性の評価

分別土砂の品質と処理内容の関係、ならびに分別土砂の品質の経時変化を明らかにするため、処理物約3,000 m<sup>3</sup>ごとに岩手県が発行した品質判定証のデータ、計404件を分析した。分別土砂の排出に際し岩手県が直接的に管理した項目は、表2の太字で示した項目に加え放射線量と放射能濃度であるが、本研究では地盤材料特性に着目し、粒子密度、粒度分布、液・塑性限界、コーン指数、塩化物含有量、電気伝導率(EC)、pH、強熱減量の8項目について精査した。岩手県の災害廃棄物処理二次仮置場が設置された久慈、宮古、山田、大槌、釜石、大船渡、陸前高田の計7地区を対象とした。この他に独自に処理を行った地域があったが、岩手県全域で発生した618万トンの災害廃棄物と津波堆積物のうち、615万トンが上記の7地区で処理されている。このうち分別土砂の発生量は約184万トンであり、約3,000 m<sup>3</sup>ごとの404検体、約120万 m<sup>3</sup>を対象とした。これは岩手県で発生した大部分の分別土砂を評価したことになる。

実施事業者の経験や創意工夫に基づき、各地区では様々な処理設備や機材が異なる系統で導入されたため、排出される処理物の性状も多種多様であったが、大きくは乾式での振動型スクリーンや比重差選別、手選別による分別工程と、重機による破碎工程から成る。久慈、宮古、山田、大槌の4地区では、資機材の仕様や系統は異なるものの、これら2つの工程により災害廃棄物等が処理されたが、釜石、大船渡、陸前高田の3地区では表4に示すような特徴的な処理がなされた。釜石地区では、分別効率の向上と品質改善を目的に、鉄鋼スラグを分別土砂に混合しており、大船渡地区では震災で発生したコンクリート塊を破碎することで得たコンクリートがらを添加して強度改善を行った。同じく大船渡地区では、塩分濃度の高い一部の試料を別途設置した除塩施設で湿式処理しており、湿式サイクロンを用いて砂分と細粒分に分級した上で、重量比で10%の生石灰を添加して含水比調整を行った。陸前高田地区では、そもそも処理物の農地利用を目的に処理システムが設計されており、他地区のように地盤材料としての再資源化を目的に行ったわ

けではなく、所要の性状を満足するよう砂分と細粒分を任意の割合で混合し、粒度調整を行った。このように、釜石、大船渡、陸前高田の3地区では、改質材の添加や異なる処理目標などの特殊性を有しており、これらがどのように分別土砂の材料品質に影響したか評価する必要がある。久慈、宮古、山田、大槌の4地区で導入された機材の仕様や系統の違いは処理物の特性に大きく影響しないと仮定し、以下の検討を行った。

本研究の対象データの地区毎、種類毎の内訳を表5に示す。基本的な分類は、岩手県マニュアルに準ずるが、大船渡地区の分級後に生石灰を添加した材料や、陸前高田地区の農地利用用の粒度調整試料、農地堆積物等をまとめて「その他」と称することとする。これらの各データ数は他の処理物と比較し相対的に少なく、傾向を評価する上で有意でないため便宜上一括して評価した。

表4 特徴的な処理を行った地区での処理内容

地区名	内容
釜石	<ul style="list-style-type: none"> <li>鉄鋼スラグを重量比で約40%添加して、分別土A種とB種を改質。</li> <li>コンクリートがらを任意の割合で添加して、分別土B種を改質。</li> </ul>
大船渡	<ul style="list-style-type: none"> <li>塩分濃度の高い一部の試料を湿式で除塩。除塩後、湿式サイクロンで砂分と細粒分を比重差選別により分けて排出。</li> <li>分級後の試料には、含水比調整の目的で重量比で10%の生石灰を添加。</li> <li>農地の基盤部への利用を目的に処理。</li> </ul>
陸前高田	<ul style="list-style-type: none"> <li>農地上に堆積した津波堆積土は、他の災害廃棄物と分けて単独で運搬・処理。</li> <li>一部の試料は、湿式分級後、砂分と細粒分を混合して粒度調整。</li> </ul>

表5 処理物の種類と評価したデータ件数

地区名	分別土A種	分別土B種	土砂混合くず	ふるい下くず	その他	計
久慈地区	20	5				25
宮古地区	69	13	2	1		85
山田地区	15	8	3	1		27
大槌地区	52	16		1		69
釜石地区	16	34				50
大船渡地区	2	35		8	15	60
陸前高田地区	77				11	88
計	251	111	5	11	26	404

## 2) 災害廃棄物処理の進捗と処理物の生成量、品質に関する評価

処理の方法や順序など処理システムの構築方法により処理速度や処理物の品質が左右され、処理事業全

体のコストにも影響しうる。特に、復興資材として利用される分別土砂等の分別物の製造・品質に関わる評価は重要であることから、岩手県山田地区の災害廃棄物処理業務にて取得・蓄積された実績データを整理し、質量・体積観点による災害廃棄物処理の進捗状況、処理された廃棄物の時間推移、高度選別処理前後における廃棄物のマテリアルバランス、処理物の密度の時間的変動を評価した。当該地区では、災害廃棄物は大まかな品目ごとに分散して集積されており、処理業務の進捗に合わせてそれらを処理ヤードに順次運搬し、土砂・木材・コンクリートがら・金属類等の十数種類に選別・破碎された。

指定された処理・処分先は廃棄物の種類ごとに異なり、最大 70 台/日の大量のダンプトラックが走行したため、廃棄物ごとの重量管理や車両運行管理が必要であった。この過程では 1 日に 150 人から 190 人という多くの人員と手間を要したことから、各処理工程や全体の進捗状況等をいかに効率的に管理するかが課題であり、この管理業務の効率化を図るために「廃棄物統合管理システム」が開発され、各種のデータ管理を行った。このシステムでは、処理期間を通して、12 種類、425 台の車両による運搬を自動計測し、図 10 に示した項目のデータを自動取得できるため、トラック 1 台につき約 24 万の情報が含まれ、それらが日時と紐付けされている。自動取得したデータをクラウド・コンピューティング環境に蓄積し、遠隔システムでモニタリング可能であり、ICT 技術を用いた施工管理の高効率化を実現したと言える。本研究ではこのシステムにより得られたビッグデータを、高機能グラフ化ソフトウェアを用いて解析、可視化し、処理進捗、処理精度とそれらの推移を明らかにした。



図 10 廃棄物統合管理システムで取得したデータの種類

### (3) 巨大災害時の災害廃棄物対応に関する方針の整備 (テーマ 3)

本プロジェクトを開始した 2013 年度当初は発災から 2 年が経過しており、東日本大震災の災害廃棄物の処理事業はほぼ軌道にのっていたが、分別土砂の復興事業への利用は必ずしも十分に進んでいるとは言えない状況であった。被災地では復興に関わる多くの社会基盤整備事業が進められつつあり、相当量の土砂が資材として必要とされていたため、災害廃棄物や津波堆積物の混合物から再生された分別土砂を利用することが期待されたが、関係者間のさらなる理解が求められていた。

本プロジェクトでは「災害廃棄物の処理と再資源化に関するマニュアル」を策定する計画としていた。一方、上記の課題解決にあたるべく公益社団法人地盤工学会に「災害からの復興における災害廃棄物、建設副産物及び産業副産物の有効利用のあり方に関する提言検討委員会」(略称：復興資材提言委員会、委員長：勝見)が 2013 年 9 月設置され、災害廃棄物再生資材を使うための提言や技術指針・ガイドラインを策定す

ることとなった。そこで、本プロジェクトの主要メンバーが復興資材提言委員会の委員長（勝見）、委員（風間、大河原、今西、佐藤、大嶺、保高）、ならびに事務局（肴倉、遠藤）として参画し、他の委員ならびにオブザーバーらとともにガイドライン策定にあたることで、当初の研究計画を達成することとした。地盤工学会の復興資材提言委員会は、研究代表者（勝見）がやはり委員長を務めていた地盤工学会の地盤環境研究委員会（2011～2014年度）の活動実績に基づいて国立環境研究所の委託により設置されたものであり、本推進費プロジェクトはその技術的内容についての実質的な貢献をした。本課題の推進にあたっては行政・現場との結びつきが重要なことから、この委員会に環境省、復興庁、国土交通省、農林水産省、ならびに岩手・宮城・福島の実務担当者（岩手県土木整備部、岩手県環境生活部、宮城県土木部、宮城県環境生活部、福島県土木部、福島県生活環境部）にオブザーバーとして参画頂いて活動を進めることができた。これらの関係性を図11に示す。その他、リサイクルポータル推進協議会ならびに泥土リサイクル協会の協力を得ている。準備会合を含めて合計7回開催された委員会は毎回30名前後の委員ならびにオブザーバーの出席を得て、様々な立場からの意見交換が活発に行われた。また、メールによる意見聴取においても極めて多くの意見があった。そのような議論と情報共有を踏まえて、活動の成果として「災害からの復興における社会基盤整備への復興資材等の利用のあり方に関する提言・解説（2014年3月28日）」ならびに「災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用ガイドライン（2014年10月2日）」が公表された。成果の内容は4（3）にて説明する。

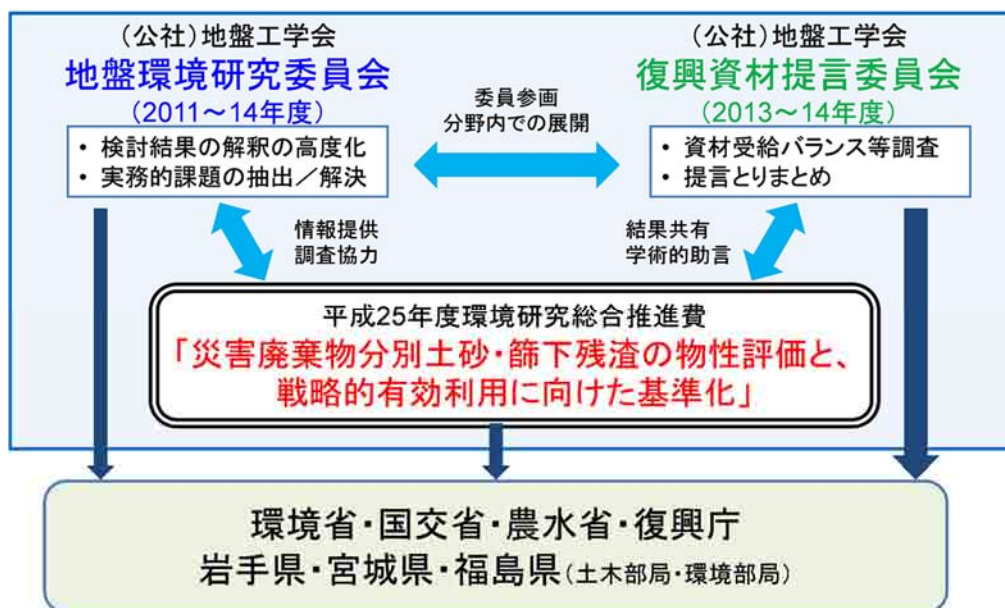


図11 災害廃棄物再生資材活用のためのガイドラインを策定するにあたっての、本推進費プロジェクトと省庁・県ならびに地盤工学会委員会との関係

## 4. 結果及び考察

### (1) 分別土砂の特性評価と復興資材としての要求品質の明確化（テーマ1）

以下の1)で述べるように、初めに各種室内試験で分別土砂の特性を評価した。次に2)のとおり、特性評価の過程で明らかとなった現行試験法の課題について検証し、分別土砂の特性評価に適用しうる室内試験方法を提案した。さらに、3)で分別土砂を利用した盛土の実規模、実環境での挙動を現地試験により評価した。

### 1) 室内試験の結果と考察

#### a 物理化学特性

図12に、土砂混合くずとふるい下くずの組成分析結果(N=3)を示す。この結果から、排出されている土砂混合くずはいずれの地区も概ね同様の組成を有しており、2mm以上の可燃物が乾燥質量で5~7%、不燃物が2~5%含有されていることがわかる。一方でふるい下くずの組成は現場によるばらつきが大きく、かつ土砂混合くずと比較すると相対的に可燃物が多いと言える。特に大槌地区では、2mm以上の可燃物含有率が18.1%と高く、2mm以上の土粒子が多い点で他地区と異なっているが、これは分離後に排出される木片への土粒子の付着を極力減らす目的で処理が行われたためであり、分別土砂の純度改善を目的にシステムが構築された他地区とは設計思想が異なるためである。ふるい下くずであっても、宮古地区や山田地区は土砂混合くずと類似した組成を有している。

図13に試料の強熱減量(N=3)を示す。2mmふるい通過分を対象に分析を行った土砂混合くずの強熱減量は7~17%の範囲にあるが、試料全量を分析に用いる方が全体的に値が大きいことがわかる。組成分析で得た可燃物混入率と強熱減量は正の相関を有する傾向にあるものの、強熱減量10%前後の範囲ではばらつきが大きい。これは、2mmアンダーの有機物に加え、元々の土中に含まれる有機物や結晶水などが影響したためであると考えられる。例えば可燃物混入率が6.0%、18.1%と大幅に異なる試料でも強熱減量が約17%と同等になる場合があることから、微細な木片も含めて統一的に木片混入率を評価しうる評価法の確立が求められる。

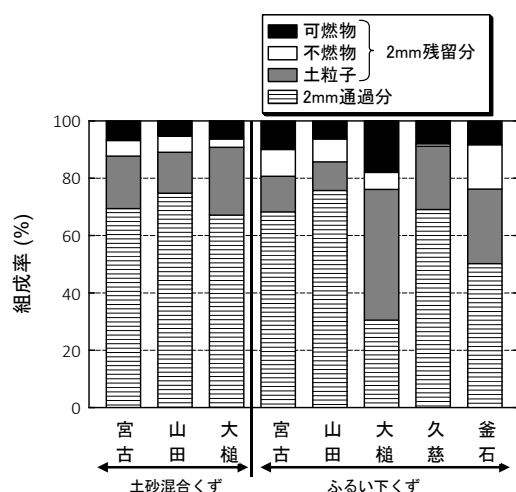


図12 土砂混合くずとふるい下くずの組成

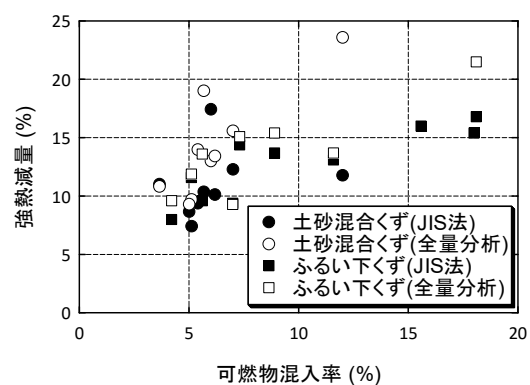


図13 可燃物混入率と強熱減量の関係

表 6 に各試料の粒子密度試験結果 (N=4) を示す。いずれの試料も差異は小さく、JIS 規格に準拠した場合の粒子密度は 2.56~2.63 g/cm<sup>3</sup> の範囲にある。一般的な砂質土の土粒子密度である 2.60~2.70 g/cm<sup>3</sup> と比較するとやや低い値を示しているが、これは 2 mm ふるいを通過した微細な木くずが影響したためであると考えられる。試料全量を供した場合、密度の小さい木片の占める割合が大きくなるため、JIS 規格による測定結果と比べやや低い値を示している。

図 14 に土砂混合くずの粒径加積曲線 (N=4) を示す。この結果からいずれの試料も同様の粒度を有しており、粒度幅の良い性状であることがわかる。図中の灰色着色部分は河川堤防に用いられる土木資材の適正粒度範囲<sup>8)</sup>を示したものであるが、いずれの試料もこの範囲内にあり粒度の観点からは地盤材料として適正であると判断できる。ただし分別土砂の粒子密度は密度の小さい木くず等の影響を受けることから、体積換算で粒度組成を評価する方が粒子密度の異なる材料の存在を適切に評価しうると考えられ、既存の試験法の改良も検討する必要がある。このように分別土砂は砂分主体であり粘土分が少ないため液・塑性限界は NP であり、保水力は低い。

表 6 粒子密度 (単位: g/cm<sup>3</sup>)

	宮古	山田	大槌
JIS 規格	2.587	2.565	2.621
全量分析法	2.573	2.522	2.575

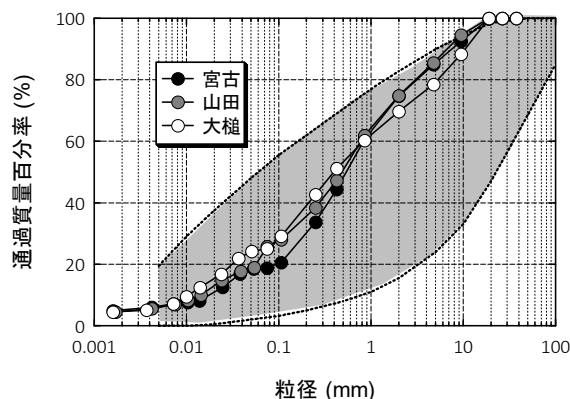


図 14 土砂混合くずの粒径加積曲線

表 7 に各試料の化学特性 (N=3) を示す。土砂混合くず、ふるい下くずともに pH=7.5~7.6 の中性域の値を示しており、10 mm オーバー、10 mm アンダーのそれぞれの pH に差はなく粒度依存性は確認できない。有姿試料の EC は 200~400 mS/m 程度であり、一般的な土壌が 10~50 mS/m 程度の EC を示すことを考慮すると、海水の影響で高いことが分かる。また 10 mm オーバーの粗粒分に比べ、細粒分の粒子表面に電解質がより強く収着されるため、高い値を示す傾向にあることが伺える。国土交通省より示されている表 2 に示したように岩手県マニュアルでは再生資材の品質基準として EC が 200 mS/m 以下であることを挙げており、土砂混合くず、ふるい下くずの EC はやや高い。土砂混合くずの有姿試料の塩化物含有量は、0.5~3.2 mg/g 程度と試料によるばらつきが大きい。投入される災害廃棄物の性状や地域性にも影響を受けると考えられるが、岩手県ガイドラインに示されている塩化物含有量の品質基準が 1 mg/g であることから、試料によっては分別土砂の塩化物含有量はこの基準を超過する。ただし高度選別処理の攪乱・洗浄効果により、ふるい下くずの塩化物含有量は土砂混合くずに比べ低い値を示している。また有姿試料の TOC は 0.07~0.18 mg/g-dry であり、通常の土壌と同程度であった。強熱減量が総じて高いにも関わらず TOC が低いことから、分別土砂中の水溶性の有機炭素量は限定的であり、硫化水素ガス発生の可能性は極めて低いと考えられる。

表 7 分別土砂の化学特性結果 (pH・EC・塩化物含有量・水溶性有機炭素)

土砂混合くず	宮古地区			山田地区			大槌地区			
	> 10 mm	< 10 mm	有姿	> 10 mm	< 10 mm	有姿	> 10 mm	< 10 mm	有姿	
pH	7.8	7.5	7.5	7.6	7.5	7.6	7.6	7.5	7.5	
EC (mS/m)	260	414	394	279	306	299	180	241	239	
塩化物含有量 (mg/g)	2.59	3.15	3.01	0.98	1.14	1.05	0.60	0.56	0.57	
水溶性有機炭素 (mg/g)	0.07	0.07	0.08	0.10	0.12	0.12	0.13	0.18	0.17	
ふるい下くず	宮古地区			山田地区			大槌地区			
	> 10 mm	< 10 mm	有姿	> 10 mm	< 10 mm	有姿	> 10 mm	< 10 mm	有姿	
	pH	7.6	7.6	7.6	7.7	7.6	7.6	7.9	7.9	7.9
	EC (mS/m)	326	327	323	219	251	250	229	320	297
	塩化物含有量 (mg/g)	1.07	0.97	0.88	0.39	0.36	0.39	1.04	1.39	1.22
	水溶性有機炭素 (mg/g)	0.13	0.17	0.17	0.08	0.17	0.09	0.18	0.18	0.21
	久慈地区			釜石地区						
	> 10 mm	< 10 mm	有姿	> 10 mm	< 10 mm	有姿				
	pH	7.4	7.4	7.5	7.9	7.7	7.7			
	EC (mS/m)	341	344	344	175	201	192			
	塩化物含有量 (mg/g)	1.53	1.50	1.27	0.18	0.13	0.15			
	水溶性有機炭素 (mg/g)	0.16	0.17	0.17	0.14	0.14	0.14			

※> 10 mm : 10 mm オーバー, < 10 mm : 10 mm アンダーの試料を意味する。

図 15 に、土砂混合くずのバイアル瓶による硫化水素発生ポテンシャルの評価結果(N=3)を示す。この結果からわかるとおり、25 日経過時点での硫化水素濃度は平均で 4 ppm 程度と極めて低い。再生石こう等の廃棄物では最大で数千 ppm の硫化水素発生ポテンシャルを有していること<sup>9)</sup>、日本産業衛生学会における硫化水素に対する許容濃度が 5 ppm であることを考慮すれば、分別土砂からの硫化水素の発生は僅かであり、環境安全性の観点からも再生利用可能と判断できる。

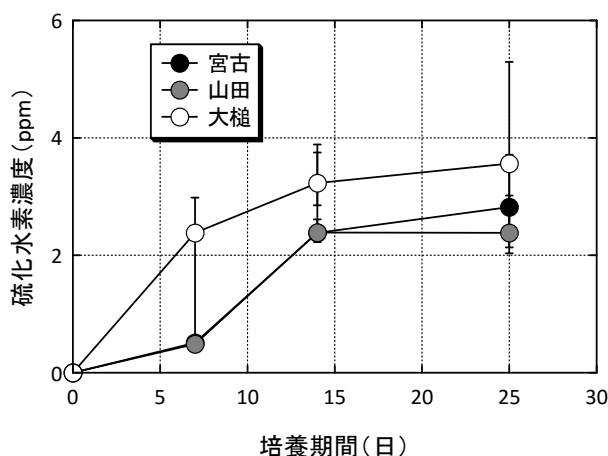


図 15 硫化水素濃度の経時変化

図 16 にカラム試験による各パラメータ、物質濃度の経時変化を示す。透水初期の pH は 7.7 の値であったが通水量の増加とともに pH は上昇傾向を示し、最大で 8.1 となった。EC は透水初期に 408 mS/m と大きな値を示した。その後は、16 PV まで約 230 mS/m で一定であったが、徐々に低下し、36 PV 以降は 20 mS/m 未満で推移した。カルシウムイオン濃度は EC と同様の挙動を示し、通水量 18 PV まで 547~632 mg/L の範囲で一定に推移したがその後低下し、26 PV 以降カルシウム濃度は 28~42 mg/L の範囲に収束した。ナトリウムイオンは透水初期にイオン濃度 291 mg/L と大きな値を示したが、その後濃度は急速に減少し 12 PV 以降 1 mg/L で一定となった。カリウムイオン、マグネシウムイオンは透水初期にピーク濃度が観測され、その後濃度は減少していき通水量 26 PV 以降で一定となった。硫酸イオン濃度は EC と同様に透水初期に 2276 mg/L と高い値であったが、16 PV 以降低下し、36 PV 以降 2~17 mg/L の範囲で一定となった。塩化物イオン、硝酸イオンはナトリウムイオンと同様に透水初期に大きな値であったが、急速に減少し 8 PV 以降は 1 mg/L 以下で一定に推移した。フッ素イオンはイオン濃度が透水初期から 1 mg/L で一定であったが、通水量 18 PV から増加し始め、26 PV で 3 mg/L の値で最大となった。その後は緩やかに減少した。これらより、EC の経時変化には硫酸イオンとカルシウムイオンが影響を与えており、中でも硫酸イオンが最も影響が大きいことが示唆された。また、その他のイオン類 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) はカラム試験において透水初期以外ほとんど溶出せず、EC の挙動にカルシウムイオンや硫酸イオンに比べ影響を与えないことが示唆された。また、土砂混合くずから硫酸イオンとカルシウムイオンが多量に溶出し、そのモル濃度がおよそ 1:1 の関係にあったことから、本試験で使用した試料には硫酸カルシウムを主成分とした石膏が混入していると推察された。そのため土砂混合くずは、カルシウムイオンと硫酸イオンの溶出濃度が高くなったと考えられる。カドミウムはカラム試験において通水量 60 PV の間で溶出は確認できなかった。銅、亜鉛濃度は透水初期に高い値を示したが通水量が増加するにつれ、元素濃度は低下する傾向を示した。その一方で、鉛、ヒ素濃度は透水初期に低濃度であったが、通水量 20 PV 以降、元素濃度は増加傾向にあった。これはカルシウムイオン、硫酸イオンが低下し始めた PV とほぼ一致している。そのため、硫酸イオンやカルシウムイオンなどの分別土内に含まれる多量なイオン類が溶出したことで、分別土内の化学平衡関係が変化し、ヒ素濃度、鉛濃度が増加したことが推察された。以上の結果から、分別土内を水が移動することによって、元素溶出挙動が変化することが明らかとなった。津波によって運搬された海底土砂中には自然的原因等で



重金属等が含まれていることが多いことから、土木資材等で再生利用する場合には、トレーサビリティを確保し、利用場所周辺の土壌や地下水等への影響を観測するため定期的なモニタリングを継続する必要があると言える。

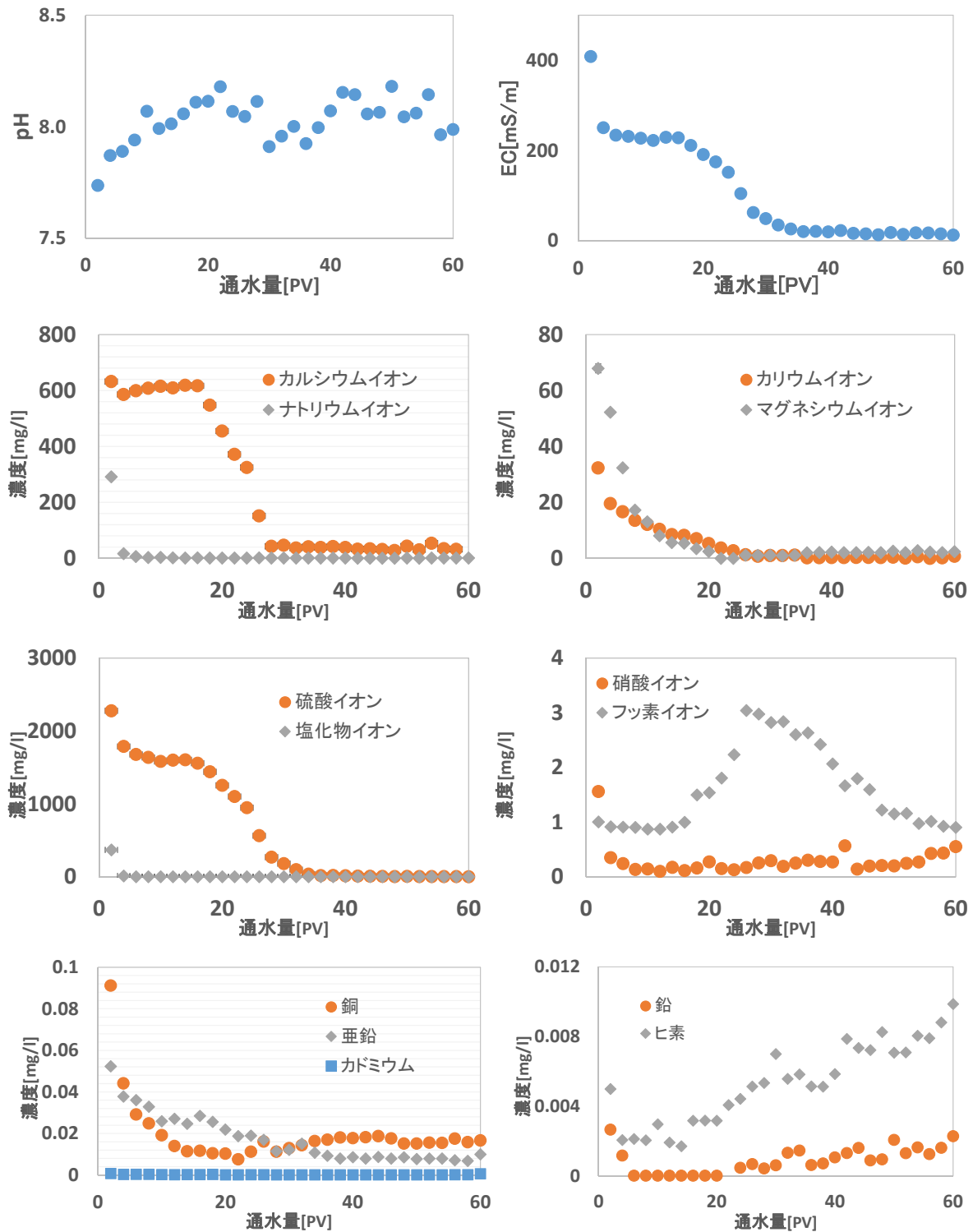


図 16 カラム試験における各パラメータ、物質濃度の経時変化

また宮城県気仙沼市および岩手県山田町の分別土の仮置き場を縦幅 5 m、横幅 5 m、土層の厚さ 5 m の体積 75 m<sup>3</sup> と仮定して、分別土の塩分が除去されるに要する液固比と累積通水量から塩分除去に必要な時間を予測した。その結果、表 8 のシミュレーション結果からわかるように、仮置き状態における各種分別土の降雨による除塩だけでは長時間を要する可能性が示唆された。

表 8 塩分の除去に要する時間のシミュレーション

発生場所	宮城県気仙沼市	岩手県山田町
種類	分別土 A 種	土砂混合くず
累積浸透量 (mm/y)	434	475
自然含水比 (%)	10.4	18.8
乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.25	1.01
仮置場の体積 (m <sup>3</sup> )	75	75
乾燥質量 (t)	94	76
塩分除去に要する液固比 (L/kg)	0.6	2.3
必要な時間 (年)	5.0	14.7

## b 力学特性

図 17 に各試料の締固め曲線 (N=3) を示す。ここでは複数回の試験で得られた含水比、乾燥密度を基に 2 次元フーリエ級数で近似した曲線を示している。またゼロ空気間隙曲線は  $\rho_s = 2.557 \text{ g/cm}^3$  を用いた。この結果から、土砂混合くずの締固め性は良好であり、明確なピークと比較的高い最大乾燥密度を示すことがわかる。最適含水比は試料に関わらず約 20% であり、最大乾燥密度は 1.40~1.45 g/cm<sup>3</sup> 程度である。一方ふるい下くずは現場によるばらつきが大きく、山田地区のように土砂混合くずと同等の最大乾燥密度を有する試料もあれば、宮古地区や釜石地区のように締固め曲線が極めてなだらかで、締固めが困難な試料も存在した。図 18 は 2 mm 以上の可燃物混入率と最大乾燥密度の関係を示したものである。この結果から、木くずの粒子密度が小さいため、可燃物含有率が大きくなるほど最大乾燥密度が小さくなる傾向にあることがわかる。コーン指数はいずれも 1500 kN/m<sup>2</sup> 以上であり、岩手県マニュアルでも規定されている 400 kN/m<sup>2</sup> を十分に満足している。これは木くず等の繊維分が補強材としての効果を発揮したと考えられる一方で、先端コーンが粗大な繊維分そのものを直接押し込んだために、貫入面積の増大につながり、結果として高いコーン指数を示した可能性がある。

岩手県山田町の分別土砂を用い、室内で再ふるいにより最大粒径を調整し、締固め特性の改善の可能性を図 19 のとおり評価した。左図の有姿試料の締固め曲線と比較すると、4.75 mm アンダーの試料は特にふるい下くずに対して締固め特性が改善していることが分かる。例えば釜石地区のふるい下くずに着目すると、有姿試料の最大乾燥密度が 0.75 g/cm<sup>3</sup> 程度であったのに対し、4.75 mm 通過分では 1.0 g/cm<sup>3</sup> 程度にまで高くなっている。一方で土砂混合くずは再ふるいにより除去される夾雑物が少なく、再ふるいによる締固め曲線の変化は小さい。

表 9 に各試料の吸水膨張比および修正 CBR (N=3) を示す。JIS 規格で規定されている 96 時間経過時点

での吸水膨張比はいずれも 1.3%未満であり、品質基準の 3%を十分に満足するが、一方で木片の吸水により 96 時間では膨張は収束しておらず膨張を続けていたことから、最大膨張量を評価するためにはより長期的な試験が必要といえる。修正 CBR はいずれも 6.9~16.0%の範囲にあり、特に  $D_c=95\%$ で締固めを行った場合には路床材として必要な強度を確保できることから、地盤材料としての利用可能性が示された。

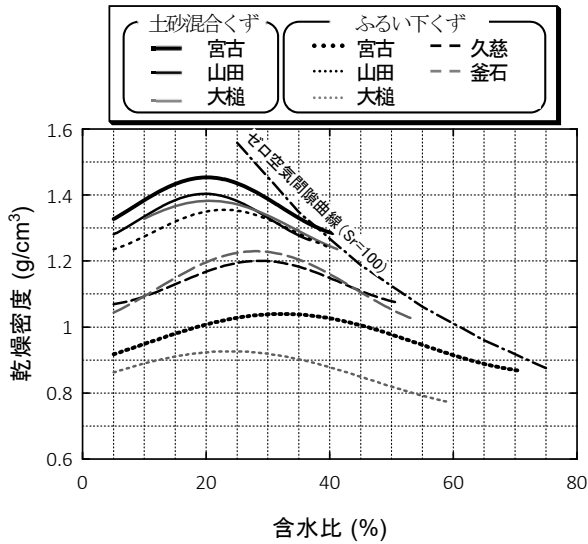


図 17 分別土砂の締固め曲線

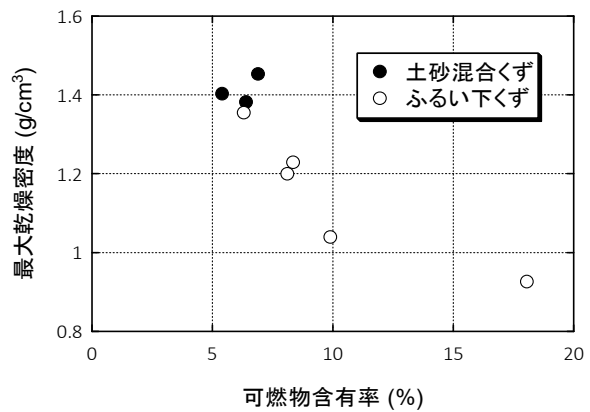


図 18 可燃物含有率と  $\rho_{dmax}$  の関係

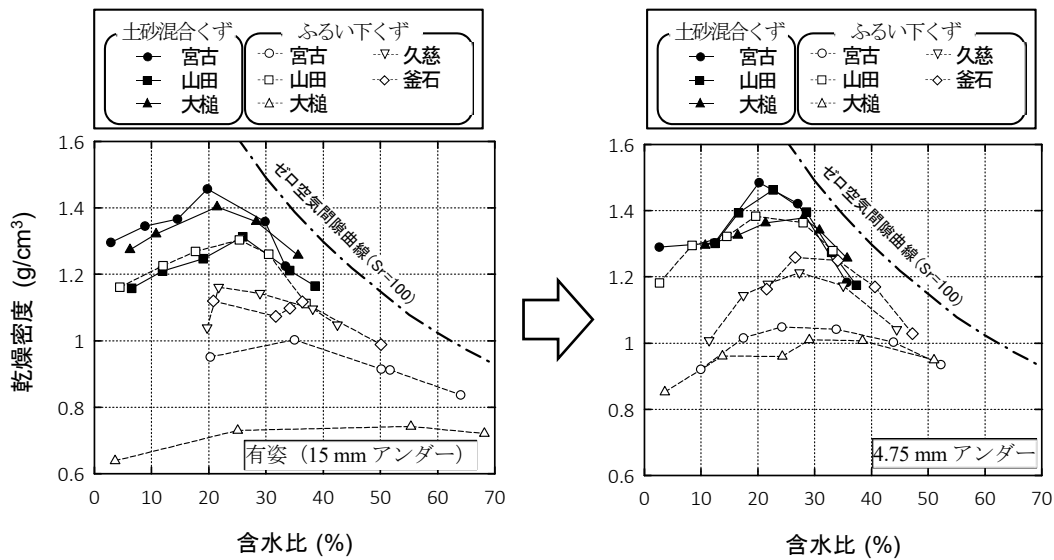


図 19 再ふるいによる締固め特性の改善効果

表9 吸水膨張比及び修正 CBR (単位: %)

		土砂混合くず			ふるい下くず				
		宮古地区	山田地区	大槌地区	宮古地区	山田地区	大槌地区	野田地区	釜石地区
膨張比 (96 h)	92 回	0.72	1.09	0.97	0.92	0.45	0.29	0.85	0.56
	42 回	0.81	1.23	0.71	1.02	0.62	0.24	0.86	0.58
	17 回	1.20	1.09	0.90	0.97	0.57	0.44	0.84	0.63
修正	90%	9.0	9.3	6.9	7.5	7.3	9.6	6.4	7.3
CBR	95%	16.0	16.0	13.6	10.1	10.4	11.3	8.8	9.9

圧縮特性の評価に使用した宮城県石巻ブロックのふるい下土砂、5 mm ふるい下、3 mm ふるい下の試料の外観を写真7に示す。室内で5 mm、3 mm のふるい径で行った選別により粗大な木片は除去されているものの、5 mm ふるい下、3 mm ふるい下にも細かい木片等の有機物が残存している。ふるい下土砂は最大粒径が30 mm であるため、通常の圧密試験容器（直径6 cm×高さ2 cm）では試験が行えないことから、新しく直径10 cm×高さ8 cm の圧密セルを作製して試験を行った。他の試料に関しては、通常の圧密試験容器（直径6 cm×高さ2 cm）で試験を行った。試料には有機物が混入していることから、乾燥状態と湿潤状態における圧縮性の違いを評価するため、風乾試料を圧密、除荷した後、水を加えて飽和させ、通常の圧密、除荷、再圧密を行った。原土の圧密降伏応力はとりわけ小さく、圧密降伏応力は乾燥状態で28 kPa、湿潤状態で62 kPaであった。これは、原土内に含まれる大型の有機物に局所的に応力が加わり、小さな圧密応力でも変形が進行しているからである。一方で、5 mm ふるい下と3 mm ふるい下では、圧密降伏応力は乾燥状態、湿潤状態ともに150 kPa程度で再選別前のふるい下土砂に比べると大きくなっている。これは、試料に含まれる有機物の粒径がふるいによって均質化されることによって、有機物に局所的な応力が加わらず、有機物および土粒子に加わる圧密応力が平準化していることによる。湿潤試料の圧縮指数は、いずれの試料も大きな違いは無く0.35～0.45の範囲にあった。

各試料の圧縮曲線を図20に示す。原土の圧密降伏応力だけが小さいため、157 kPaまでの圧密降伏応力の範囲でも大きく沈下しており、間隙比の変化は約0.45である。5 mm ふるい下、3 mm ふるい下は圧密降伏応力が150 kPa付近にあるため、157 kPaの圧密応力の範囲ではそれほど大きな沈下は生じず、間隙比の変化は約0.18であった。再ふるいを行った試料の結果を見ると、各試料とも圧密降伏応力を超えると沈下が大きくなっている。湿潤圧密開始から再圧密後までの間隙比の変化量は、5 mm ふるい下で約0.44、3 mm ふるい下で約0.40である。157 kPaまでの圧密応力の場合には、除荷前と再圧密後の間隙比が異なっているが、1256 kPaの圧密応力の場合には除荷前と再圧密後の間隙比が等しくなっていることから、試料中の有機物等の圧縮が完了しているものと推察される。



写真7 圧縮特性の評価に使用した試料

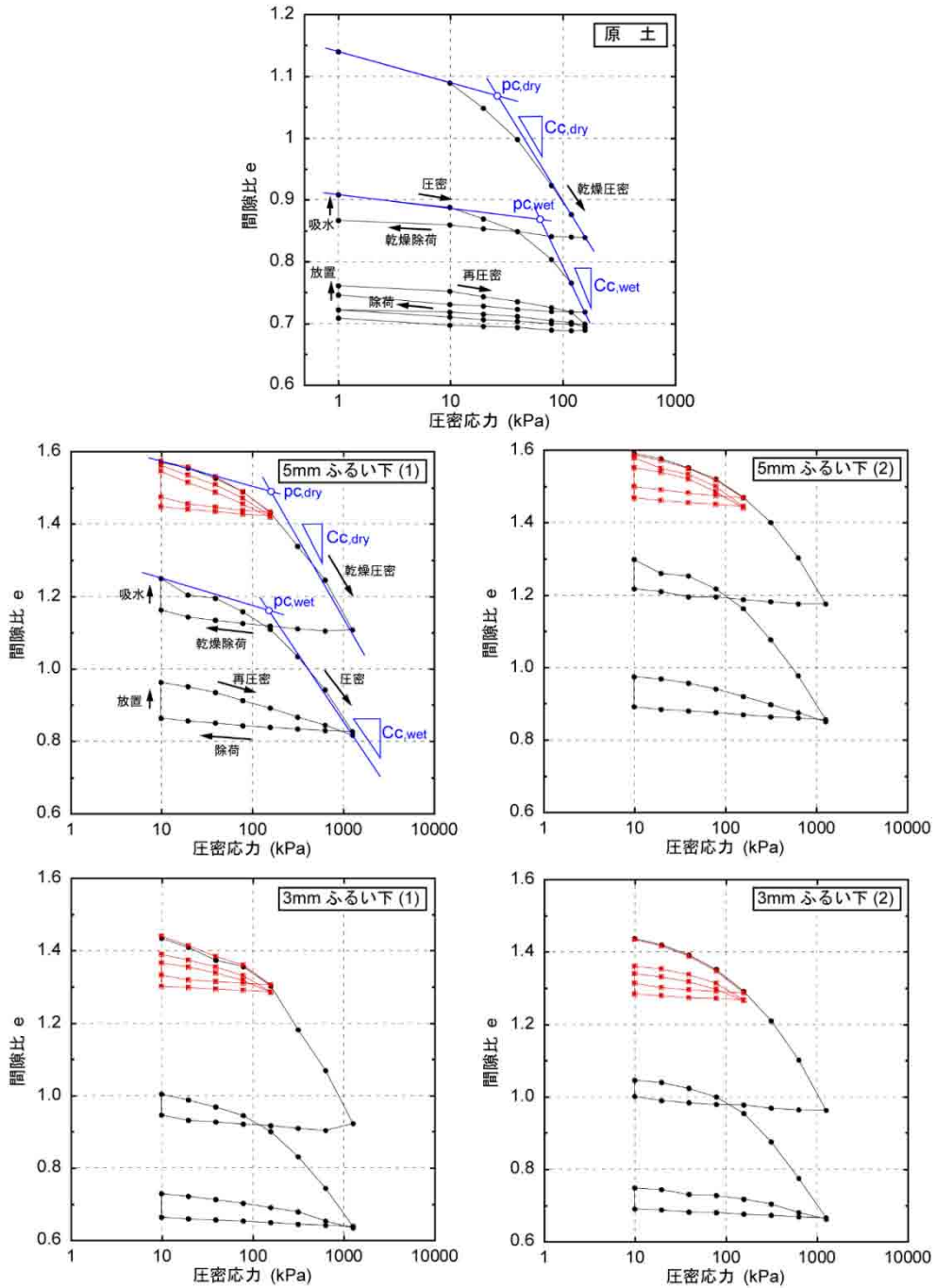


図20 ふるい下土砂の圧縮特性

現場で排出される分別土砂は 15 mm あるいは 20 mm のふるい通過分であり、粗大な木片を多く含むことから、有姿試料のせん断特性を評価するため、写真 8 に示す直径 200 mm、高さ 100 mm の供試体寸法でせん断可能な大型一面せん断装置を新たに作製した。この装置を用い、木くず混入試料と木くず除去試料の差異に着目して一面せん断試験により強度変形特性を評価した結果、表 10 に示す強度定数を得た。試料 A、B、C はいずれも分別土 A 種であり、最大粒径が 19 mm、26.5 mm、37.5 mm となるようふるい選別されている。個別には図 21 に示すとおりであり、せん断応力  $\tau$  ~ せん断変位  $\delta$  の関係 (a 図) からいずれの試料もせん断変位  $\delta = 0 \sim 10$  mm のせん断初期段階において、せん断応力  $\tau$  は木くず混入試料よりも木くず除去試料の方が大きく、木くず除去により初期の剛性が大きくなる傾向が見られた。木くず除去により供試体の密度が高くなるのが主な原因であると考えられる。垂直変位  $\Delta H$  ~ せん断変位  $\delta$  の関係 (b 図) から、木くず混入試料と木くず除去試料とも垂直応力が小さい試験 ( $\sigma = 50$  kN/m<sup>2</sup>) では、せん断初期で収縮し、その後膨張する正のダイレイタンスが明瞭に現れる。これに対し、垂直応力が大きい場合には ( $\sigma = 100$ 、150 kN/m<sup>2</sup>)、せん断初期に体積収縮が進み、せん断変位が大きくなっても膨張傾向を示さなくなる。この状況から、木くず除去によって土粒子間の接触、かみ合わせがよく働くようになり、正のダイレイタンスが大きくなる傾向が現れると考えられる。せん断応力  $\tau$  ~ 垂直応力  $\sigma$  の応力経路 (c 図) から、木くずを除去することによる応力経路の大きな変化はみられない。なお、応力経路に示す垂直応力は、せん断面に発生する垂直応力として上側 (载荷側) と下側 (反力側) の平均値とした。この平均値は下側の垂直応力よりも大きな値になる。これは、せん断初期段階では供試体が圧縮して周面摩擦が上向きに働くためである。

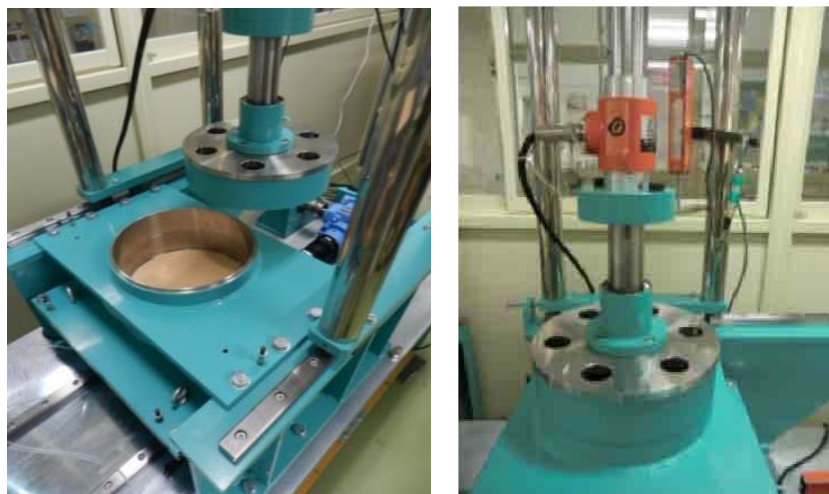
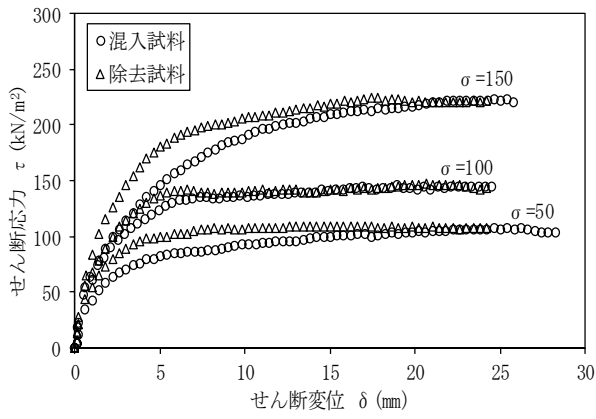


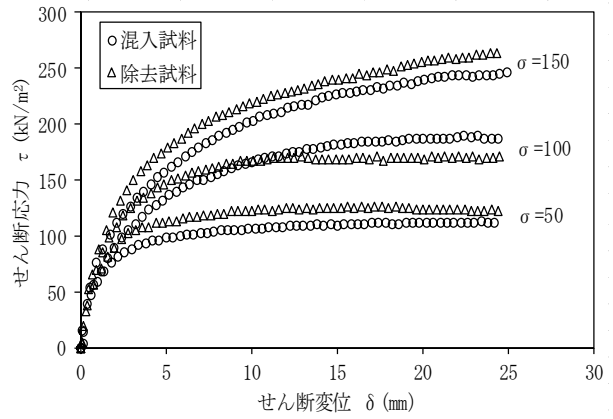
写真 8 大型一面せん断試験装置

表 10 分別土の強度定数

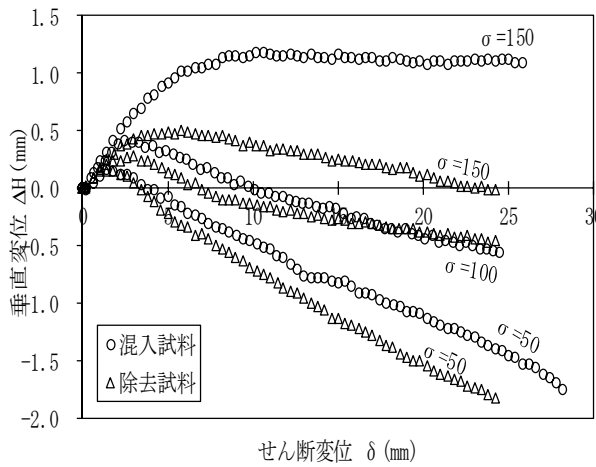
試料 強度	A		B		C	
	混入	除去	混入	除去	混入	除去
c (kN/m <sup>2</sup> )	37.0	49.6	51.7	46.8	64.2	63.7
$\phi$ (°)	43.3	42.00	46.3	46.1	46.8	49.4



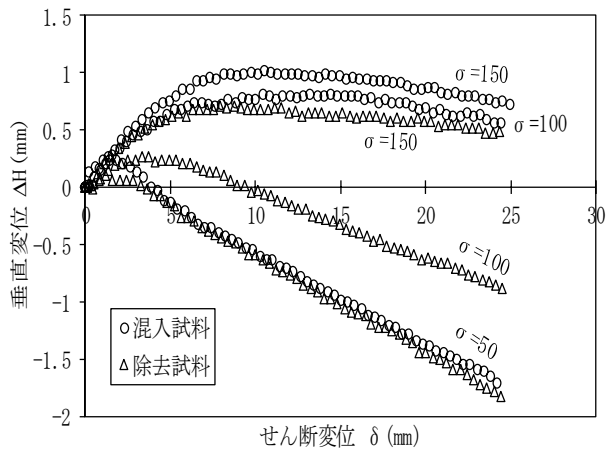
a) せん断応力～せん断変位の関係



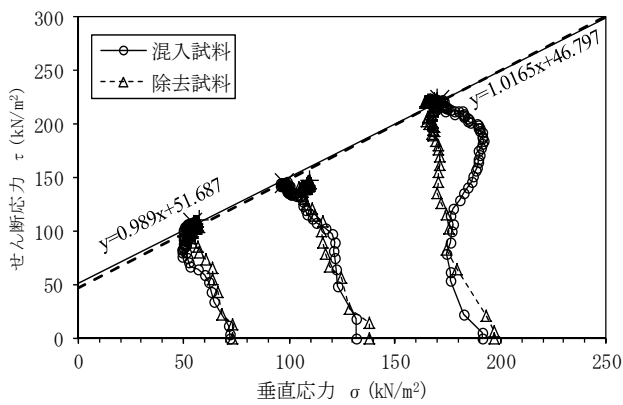
a) せん断応力～せん断変位の関係



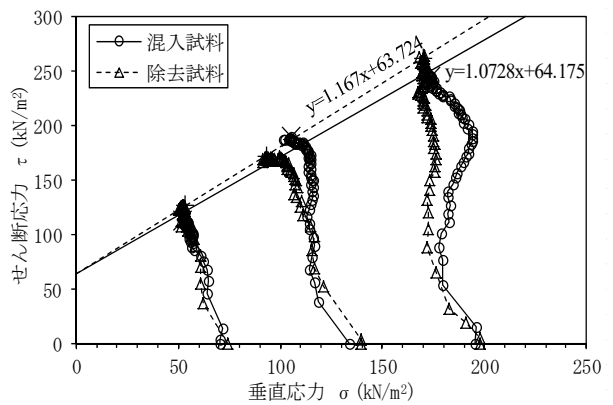
b) 垂直変位～せん断変位の関係



b) 垂直変位～せん断変位の関係



c) せん断応力～垂直応力の応力経路



c) せん断応力～垂直応力の応力経路

図 21 一面せん断試験結果：(左)  $D_{max}$ : 37.5 mm、(右)  $D_{max}$ : 26.5 mm

次に、木片混じり土に含まれる木片の腐朽による力学特性の変化を把握するため、木材腐朽菌の添加により長期挙動を評価した。

初めに木片混じり土を滅菌処理し、木材腐朽菌など様々な菌のない木片混じり土の一軸圧縮試験を実施

した。分別土の 9.5 mm 通過試料に災害廃棄物由来の木片を 4.0%添加した試料を用い、締固め試験結果に基づき最適含水比、締固め度が 100%となるよう供試体を作製した。供試体寸法は直径 5 cm×高さ 10 cm の円筒供試体である。試験方法は以下の通りである。

- 1) 締固め度 100%で作製した供試体に対し、オートクレーブを用いて供試体表面、内部や供試体を入れる培養瓶を高温高圧（120 °C、20 分間）で滅菌処理を行った。
- 2) その後、空気中から他の菌が供試体につかないようにするために、クリーンベンチ（写真 9）内で木材腐朽菌（カワラタケ）を接種した。今回の菌の接種の方法として、菌体を供試体上端にのせ（写真 10）、供試体内部まで菌が成長するように室温 26 °C 一定に保った培養室内で放置した。放置期間としては、2、5、10、11、13 か月とした。
- 3) 所定の放置期間が経ったら供試体を培養室から取り出し、表面を観察して、一軸圧縮試験を行い、腐朽菌を接種した供試体の一軸圧縮強さを確認した。

図 22 に各腐朽期間における一軸圧縮試験の結果 ((a)一軸圧縮強さ  $q_u$ ~腐朽期間、(b)含水比  $w$ ~腐朽期間)を示す。本試験は、腐朽期間ごとに一軸圧縮試験を行うことから、図 22 に示す腐朽期間ごとの一軸圧縮強さのプロットは、それぞれ違う供試体となっている。供試体作製にはなるべく均質になるよう、四分法による材料採取、締固め層厚ごとの土重量計測、層厚が等しくなるようにモールド内に高さ 3 等分線をつけたりした。そして、各腐朽期間における一軸圧縮強さは、目標締固め度と最適含水比に最も近いものを代表値として示す。図 22 から腐朽期間に応じた木片混じり土の一軸圧縮強さ  $q_u$ を比較する。(b)に示すように 5、10、11 ヶ月は低い含水比の供試体となっている。(a)に示すように、含水比が低いほど、一軸圧縮強さ  $q_u$ は増加している。13 ヶ月後には初期含水比とほぼ等しい含水比となっており、やはり、それに依じて一軸圧縮強さ  $q_u$ も初期の  $q_u$ とほぼ同じ値を示している。すなわち、木片の腐朽菌を除去した木片混じり締固め供試体は、供試体周り（今回は供試体上部）に木材腐朽菌が接種され、さらに腐朽菌の進行を促進する環境下であっても、含水比が等しければ、その一軸圧縮強さは変化しない。

木材腐朽菌の進行について詳しく見るために、腐朽期間に応じた供試体表面の観察結果を示す。写真 11、写真 12 にそれぞれ腐朽 2 か月、腐朽 13 か月の腐朽菌の進行状況を示す。腐朽 2 か月と腐朽 13 か月の供試体上端において菌糸の広がり十分見られ、腐朽が進行していることがわかる。一方で写真 13 に示すように一軸圧縮試験後の供試体の内部も菌糸の広がりが確認できない。木片混じり土内を滅菌し適切な締固め度により、外部からの菌糸は内部へ進行せず一軸圧縮強さも変化しなかったと考えられる。



写真 9 クリーンベンチ

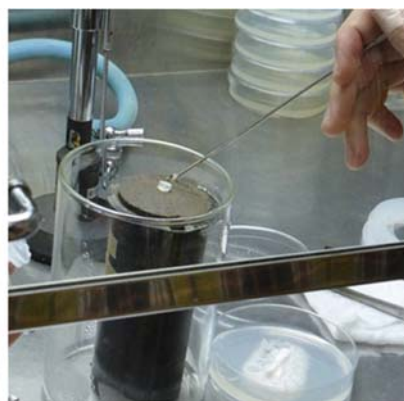


写真 10 木材腐朽菌の接種



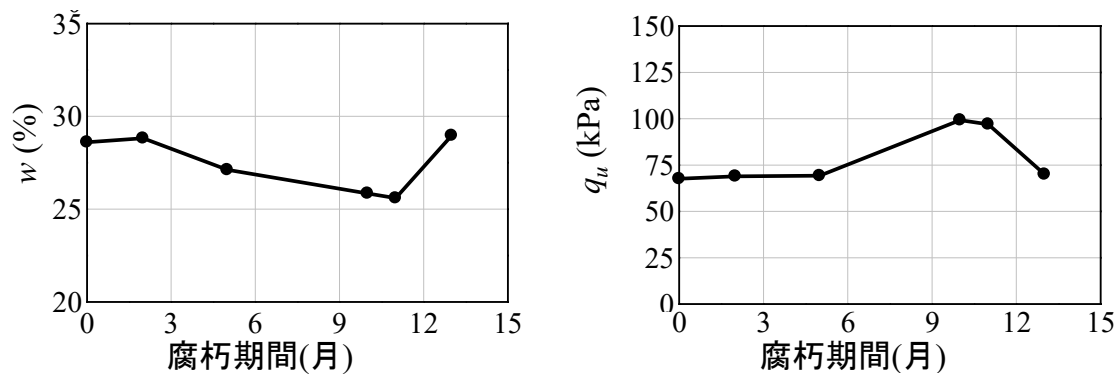


図 22 腐朽期間による一軸圧縮強さの変化

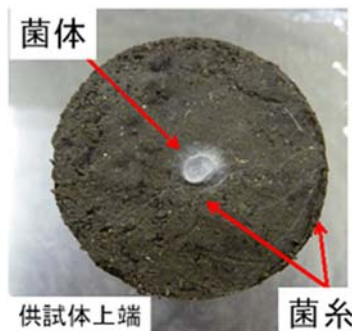


写真 11 腐朽期間 2 ヶ月

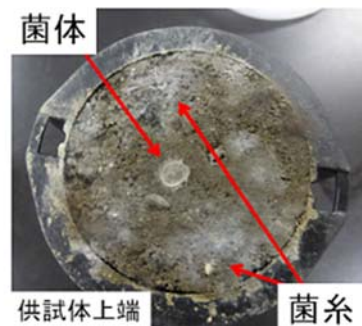


写真 12 腐朽期間 13 カ月



写真 13 供試体中部

木片混じり土内部に木片があっても木材腐朽菌などのない状態で締固めると、腐朽菌は供試体内に侵入することができないことがわかった。そこで建材廃棄物由来の木片に木材腐朽菌を接種し 1 ヶ月腐朽させた木片を、現場採取した岩手県の分別土砂の 9.5 mm 通過試料に混合した。この試料を用い、直径 5 cm×高さ 10 cm の鋳鉄製のモールドに密詰め（締固め度 90~95%、12 本）、緩詰め（締固め度 85%前後、8 本）となるよう供試体を作製した。その後、腐葉土内に供試体を埋め木片の腐朽を更に促進させた上で、1、3、4 ヶ月経過後に掘り起し一軸圧縮試験を実施した。

図 23 に一軸圧縮試験で得られた一軸圧縮強さと腐朽期間の関係を示す。この結果から、腐朽期間によって各供試体の一軸圧縮強さの推移はあるものの、いずれの腐朽期間においても一軸圧縮強さが密詰め供試体が 40~75 kPa の範囲に、緩詰め供試体が 15~45 kPa の範囲に分布している。このことから、本研究で実施した試験期間内では、締固め度によらず木材の腐朽が一軸圧縮強さに与える影響は大きくないことが分かる。

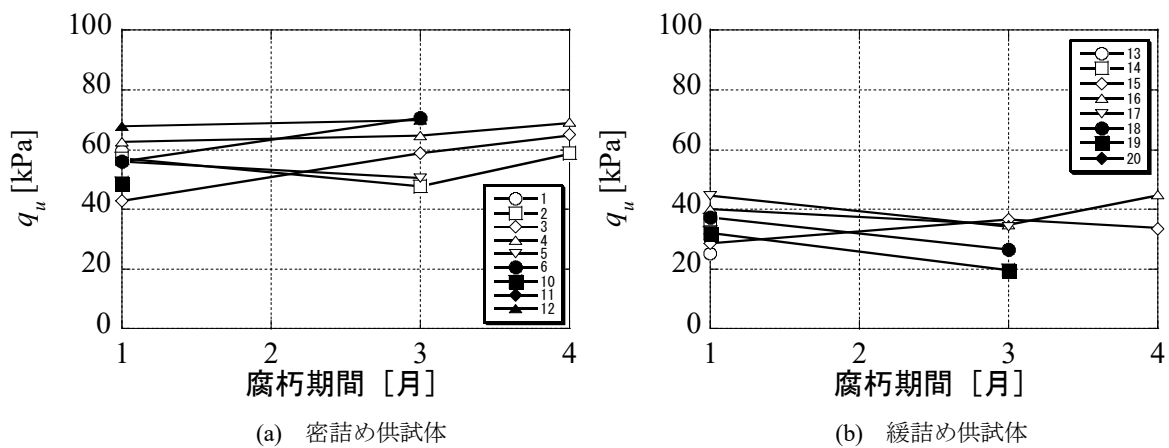


図 23 腐朽期間による一軸圧縮強さの変化

### c 植栽基盤への利用可能性

分別土砂への木片の混入は地盤材料としては不利であるが、植栽土壌としては土壌に空隙を作り有利に働く可能性も考えられることから、プランターを用いた植害試験を行った。本研究では、生長が速い葉作物であるコマツナと、耐塩性の高いハウレンソウを基準植物とし、栽培環境の生育状況への影響を把握した。直径 10.5 cm ポットに、ふるい下くず、まさ土、タキイ育苗培土（市販培養土）を 0.4 L 入れ播種し、コマツナは 30 日後に植物体地上部生体重、最大葉の葉長、葉数、最大葉の葉身の緑色度（SPAD 計を用いて測定）を、ハウレンソウは 70 日後に植物体地上部生体重、最大葉の葉長、葉数を測定した。

コマツナの生育試験では、写真 14 に示すようにふるい下くずはまさ土よりも地上部生体重や最大葉葉長の値は大きかったが、SPAD の値が低く葉の緑色が薄かった。市販の育苗用培養土と比較すると、ふるい下くずは生体重が 1/4~1/5、最大葉の葉長は約 2/3、展開葉数も約 3 枚少なく生育が劣ったが、植物体の形態は正常であった。ハウレンソウの生育試験の結果は写真 15 に示すとおりであり、コマツナと同様にふるい下くずではまさ土よりも地上部生体重や最大葉葉長が大きかったものの、市販の育苗用培養土と比較すると、震災復興資材は生体重が約 1/3、最大葉の葉長は約 2/3、展開葉数は約 1/2 でコマツナと同様に生育がかなり劣った。

これらの結果から、分別土を植栽基盤に用いた場合、他の一般的な培養土と比較すると生育が抑制されるものの、清浄土との混合や塩分の溶脱促進によって塩分濃度を低減すれば植栽土壌として利用可能であると言える。



写真 14 コマツナの生育状況（左から、市販培養土、まさ土、ふるい下くず）



写真 15 ホウレンソウの生育状況（左から、市販培養土、まさ土、ふるい下くず）

#### d 分別土砂の特性評価のための試験法の提案

##### <分別土砂に残存する木片量の評価>

分別土砂に残存する木片量によって材料特性が左右されるため、現場での品質管理にも適用できる分別土中の木くず含有量の評価手法を確立することは重要である。地盤工学の分野では JIS A 1226:2009 による 750 °C での強熱減量試験が土の有機物含有量の指標とされているが、この試験法では有機物以外の揮発や対象粒径等の分別土砂固有の事項が考慮できず、木くず含有量評価には適していない。その他にも表 11 に示すように様々な分野でそれぞれの目的に応じて強熱減量が定義されているものの、いずれも木片等の有機物量のみを評価することには不適である。本研究では、市販のヒノキ木材をニューパワーミル (PM-2005) で粉砕したものを 2 mm 以下と 2~4.75 mm に分級し、宮城県気仙沼ブロックの分別土砂から 2 mm 以上の木片を取り除いた母材に、乾燥質量比で 3%、5%となるよう木くずを添加して模擬分別土を作製した。強熱温度は 350 °C で一定とし、1、3、6、12、24 時間の強熱時間、2 g と 30 g の試料量、粉砕の有無の各要因が試験結果に及ぼす影響を評価した。本研究では、ある強熱条件において木くずが程度燃焼したか表す指標として、図 24 に示す「強熱減量補正值」を新たに定義した。強熱減量補正值とは添加した木くずの強熱による減少質量を模擬分別土全体の乾燥質量で除した値であり、この値が木くず添加率 (3%または 5%) に近いほど測定精度が高いと判断できる。厳密には添加した木くずと母材に含まれる木くずの特性が異なり、かつ母材には木くず以外の揮発性成分の存在が考えられるが、同時間、同温度で強熱すれば両者の燃焼率は等しいと仮定している。

図 25 に強熱時間と粉砕の有無と強熱減量値補正值の関係を示す。強熱時間が 1 時間あるいは 3 時間の場合、木くず添加率に関わらず強熱減量補正值が木くず添加率に達しておらず、木くずの燃焼が不十分であると考えられる。一方、強熱時間が 6 時間以上となると、強熱減量補正值が木くず添加率に近づき、強熱時間 12 時間以上では大きく増加しない傾向にあることから、木くずが十分に燃焼している可能性が高い。木くず添加率 5%、強熱時間 24 時間では強熱減量補正值が木くず燃焼率に達していないが、12 時間の強熱で 5%に達していることから、母材に残存する細かい木くず量の不均質性によるものと考えられる。次に試料粉砕の有無に着目すると、試料を粉砕した場合には 1 時間や 3 時間の短時間の強熱で強熱減量補正值が添加した木片量に近づいており、粉砕しない場合よりも短時間で木くずが十分に燃焼していると考えられる。これは粉砕することで木くずの比表面積が大きくなり燃焼効率が上がったためであると考えられる。これらの結果から、有姿試料を用いる場合、350 °C の強熱温度であれば強熱時間を 12 時間確保することで、木くずの大きさに関わらず含有量を評価できること、前処理として試料を粉砕してから強熱減量試験を行うこ

とで、木くずの燃焼時間を3時間程度に短縮しうること、試料量を30g確保することで測定精度が大きく向上すること、等が明らかとなった。

表11 各強熱減量の考え方<sup>12)</sup>

分野と規格	分析方法と目的
地盤工学 (JIS A 1226)	750±50 °C で1 時間強熱。主に土壌中の揮発成分（有機物と結晶水、結合水が対象）を測定することが目的。
セメント	975±25 °C で強熱。高炉セメントの場合は700±25 °C。不純物含有量（クリンカーや水和物等からの脱水、石灰石の脱炭酸、石こう結晶水の脱水が主な要因で最大4.78%の減量値）を測定することが目的。
廃棄物 (環整95号)	600±25 °C で3 時間強熱。名称は「熱しゃく減量」。焼却残さの燃え残りを評価することが目的。埋立基準は熱しゃく減量15%。平成10年の環境庁告示第34号にて工作物の新築、解体由来の安定型産業廃棄物の埋立基準5%の方法としても利用。
工業廃水 (JIS K 0102)	600±25 °C で30 分間強熱。名称は「強熱残留物」。工業排水中の強熱による非揮発性残留物量（無機物）を測定することが目的。
VS (Volatile Solid)	550 °C で15～30 分強熱。諸外国における一例。

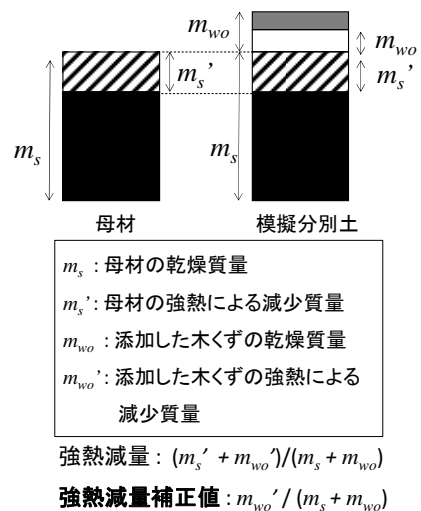


図24 強熱減量補正值の概念図

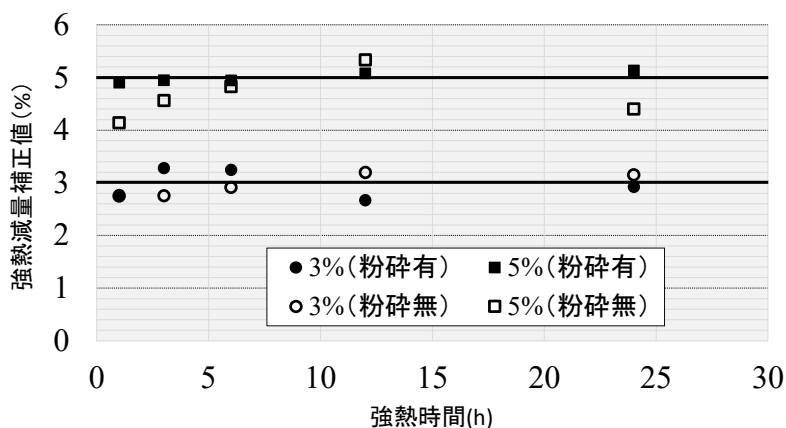


図 25 強熱時間、粉碎の影響 (試料量 2 g)

### <含水比測定方法>

「土の含水比試験方法 (JIS A 1203 : 2009)」では乾燥炉を用いて試料を  $110 \pm 5$  °C、24 時間乾燥させることとしている。試験に供する試料量は粒径に応じて異なっており、分別土砂が 20 mm ふるい通過分であることを考慮すれば、300 g 程度を用いる必要があると判断できる。本研究では表 12 に示す複数の試料量で含水比測定を行い、JIS 規格に規定される試料量の妥当性を検討した。また地盤工学会基準では別に「電子レンジを用いた含水比試験方法 (JGS 0122-2009, 以下電子レンジ法)」を定めているが、燃焼が懸念される有機質土や金属鉱物が析出している土は対象外とされており、鉄片などを混入させないように、試験前に良く確かめ、取り除くことが留意事項として挙げられる。現場での簡易な含水比試験方法としては電子レンジ法は有用であることから、この適用性についても検証した。

図 26 に試験に供した試料量と炉乾燥により測定した含水比の関係を示す。グラフでは、試験に供した 5 試料の平均値を代表値としてプロットするとともに、各試料の最大値、最小値を併せて示している。この結果から、総じて試験に供する試料量を多く取るほど測定結果のばらつきは小さくなっていることがわかる。試料量が 50 g の場合では試料に関わらずばらつきが極めて大きく、最大で 11.4%もの差異が生じた。この結果から、分別土のように不均質な試料を対象とする場合には供試試料量は極めて重要な因子であり、JIS 規格で規定されている 300 g は測定精度を確保するために必要であると言える。図 27 に JIS 規格の炉乾燥法 (試料量 300 g) 及び電子レンジ法 (試料量 50 g) による含水比測定結果を示す。電子レンジ法では金属等の不燃系夾雑物を磁選により取り除いて含水比を測定したが、恒温乾燥炉の試験結果と同程度の含水比を示している。また測定値のばらつき (最大値と最小値の差異) も相対的に小さく再現性が高いことから、電子レンジ法の有効性が確認できた。

表 12 乾燥炉を用いた実験条件

炉乾燥条件	試料量
110 °C, 24 時間 (JIS) 電子レンジ法 (JGS)	50 g
	100 g
	150 g
	300 g

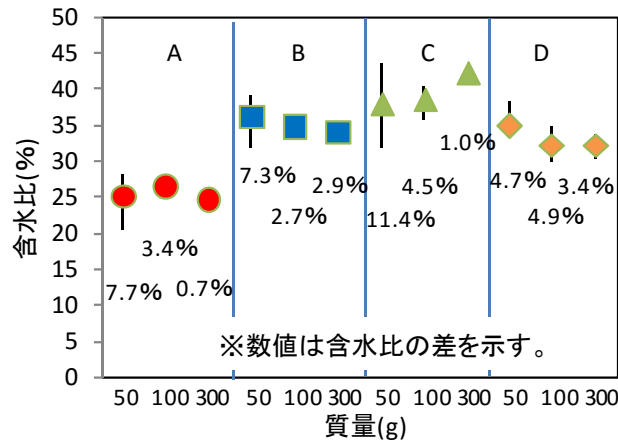


図 26 試料量が測定結果に及ぼす影響

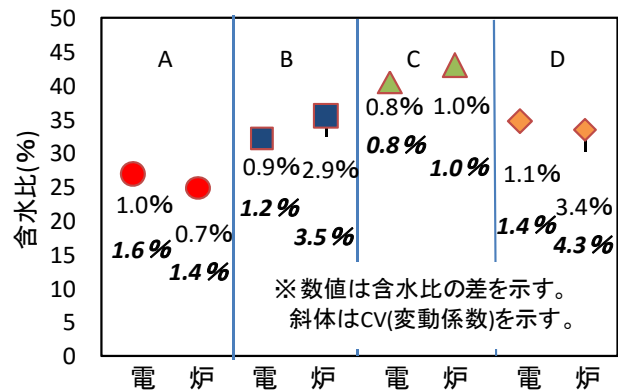


図 27 電子レンジ法と炉乾燥による測定結果の比較

<粒子密度、粒度分布>

土質試験法において粒径加積曲線は通過質量百分率で表示されているが、これは土粒子密度が一定で粒径によって変化しないという前提である。図 28 に、分別土砂を構成する土粒子と木粒子の各粒子密度と粒径の関係を示す。この図から、土粒子単体では各ふるいでの密度はほぼ一定であるのに対し、木粒子単体は粒径が大きくなるにつれて密度が小さくなる事が分かる。図 29 は岩手県で採取した分別土 A 種の粒径加

積曲線であるが、粒子密度の粒径依存性を考慮した体積百分率では、一般的な質量百分率と乖離していることが明らかであり、分別土のような粒子密度の異なる混合材料の各指標を評価する場合には、体積換算による評価の方が実態を正確に表しうることを示唆している。

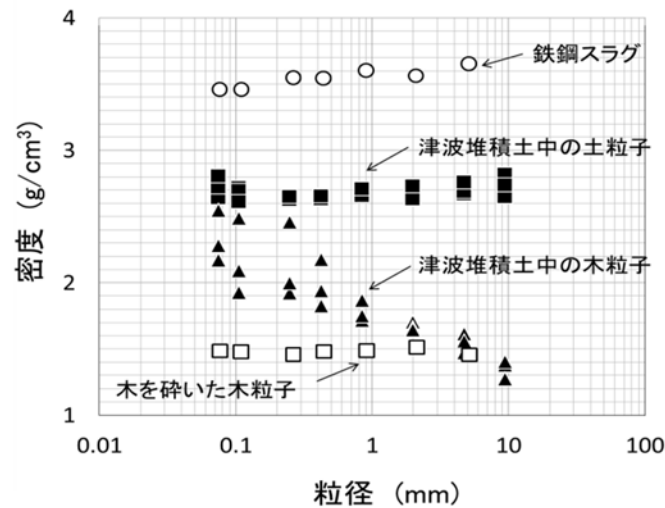


図 28 分別土 A 種を構成する土粒子と木粒子の密度の粒度依存性

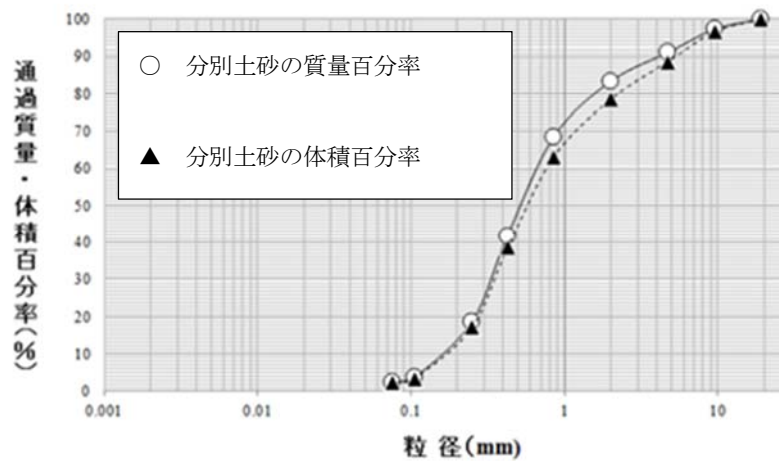


図 29 質量と体積で表現した分別土 A 種の粒径加積曲線

## 2) 現場試験の結果と考察

### a 試験盛土による動態観測結果

#### <分別土 A 種と B 種を用いた盛土の安定性>

岩手県山田町試験盛土の築造が終了した後、天端で 2 カ所、法面部で 2 カ所ずつ現場密度試験を実施した。現場密度は「砂置換法による土の密度試験方法 (JISA 1214)」と「RI 計器による土の密度試験方法 (JGS

1614-2003)」の両方を実施した。測定結果を表 13 に示す。砂置換法と RI 法の差は小さく、分別土に対しては、どちらの方法で現場密度を測定しても問題ないと考えられる。また天端に比較すると法面部の方が密度が高いが、2×8 m という狭い天場におけるローラー転圧よりも、法面バケットを用いた整形の方が実施しやすかったことが原因と思われる。分別土 A 種の乾燥密度の方が B 種よりも大きいですが、A 種の締固め度 ( $D_c$ ) が 81.6%以上であるのに対し、B 種は 90.8%以上であり、締固め度としては B 種の方が大きな値となった。

表 13 現場密度試験結果と締固め度

ヤード	位置	砂置換法				RI法			
		$\rho_t$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	$w$ %	$D_c$ %	$\rho_t$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	$w$ %	$D_c$ %
A種	天端	1.815	1.548	17.2	87.4	1.802	1.547	16.5	87.3
		1.733	1.483	16.9	83.7	1.706	1.455	17.2	82.1
	法面	1.921	1.655	16.1	93.4	1.959	1.674	17.0	94.5
		1.701	1.445	17.7	81.6	1.716	1.450	18.3	81.8
B種	天端	1.691	1.350	25.3	93.4	1.683	1.312	28.3	90.8
		1.768	1.421	24.4	98.3	1.767	1.396	26.6	96.6
	法面	1.799	1.411	27.6	97.7	1.817	1.419	28.1	98.2
		1.801	1.403	28.4	97.1	1.786	1.347	32.7	93.2

天端に設置した測量杭、ならびに試験盛土内に設置した沈下板を用いた変位の測量結果を図 30 に示す。水平変位 (XY 変位) については測量杭を用いた結果を、沈下量 (Z 変位) については測量杭と沈下板を用いた結果を示している。なお、水平変位については設置から約 1 年後 (358 日後) の値のみを示している。水平変位の図中(a)と(b)を見ると、分別土 A 種、B 種共に北東もしくは東方向に移動していることが確認できる。試験盛土の東は海側となるが、基準点を盛土から数メートル離れた基盤に設置していることから、地盤自体が移動したのではなく、試験盛土が変形したと考えられる。天端法肩の水平方向への移動は 1 年間で数 mm~十数 mm 程度に収まっており、実用上、問題の無い範囲であると想定される。図中(c)と(d)の沈下量をみると、分別土 B 種の場合、1 年間で 40 mm 程度、A 種では 50 mm 程度の沈下量となっていることが確認できる。層別の沈下が分かるように設置した沈下板では、基盤面から高さ 2 m (天端から深さ 1 m) の位置での沈下量は天端のそれよりもやや小さい程度であり、高さ 1 m (天端から深さ 2 m) の沈下量は B 種で 20 mm 程度、A 種では 10 mm 以下となっていた。天端での最大ひずみ ( $\epsilon_{max}$ ) は A 種で 1.6%、B 種で 1.3%程度であった。また、経過日数に対する沈下量の挙動をみると、B 種は沈下曲線の傾きが緩くなってきており沈下速度がやや落ちてきているように見えるが、A 種の沈下は直線的であり、沈下が長期に及ぶ可能性が伺える。B 種は混合廃棄物由来であり、A 種は津波堆積物由来であるため、B 種の方が沈下するように想像していたが、結果的には A 種の方が沈下がやや大きく、かつ沈下が長期にわたって継続する傾向が確認された。これは、初期の締固め度の影響もあると考えられる。

気温と試験盛土内の温度変化を図 31 に示す。北側と南側の測点 1 と 2 では概ね同じ値となっており、深さ 0.5 m よりも深さ 1.0 m の温度変化がやや遅れているが、これは分別土砂の熱伝導率によって時間遅れが生じたことが原因である。分別土 A 種と B 種での違いもほとんどなく、同様の変化となっていることも確



認される。有機物の多い廃棄物等を高さ 3 m 程度で堆積すると、発熱が生じて気温変化とは異なる温度変化となるが、分別土を堆積させてもそのような発熱は確認されず、気温を追従する形で温度が変化している。分別土には有機物が多く含まれると言われているが、このような温度変化をみる限り、分別土 A 種、B 種共に発熱を伴うような易分解性の有機物を多く含んでいるとは言えない結果となった。

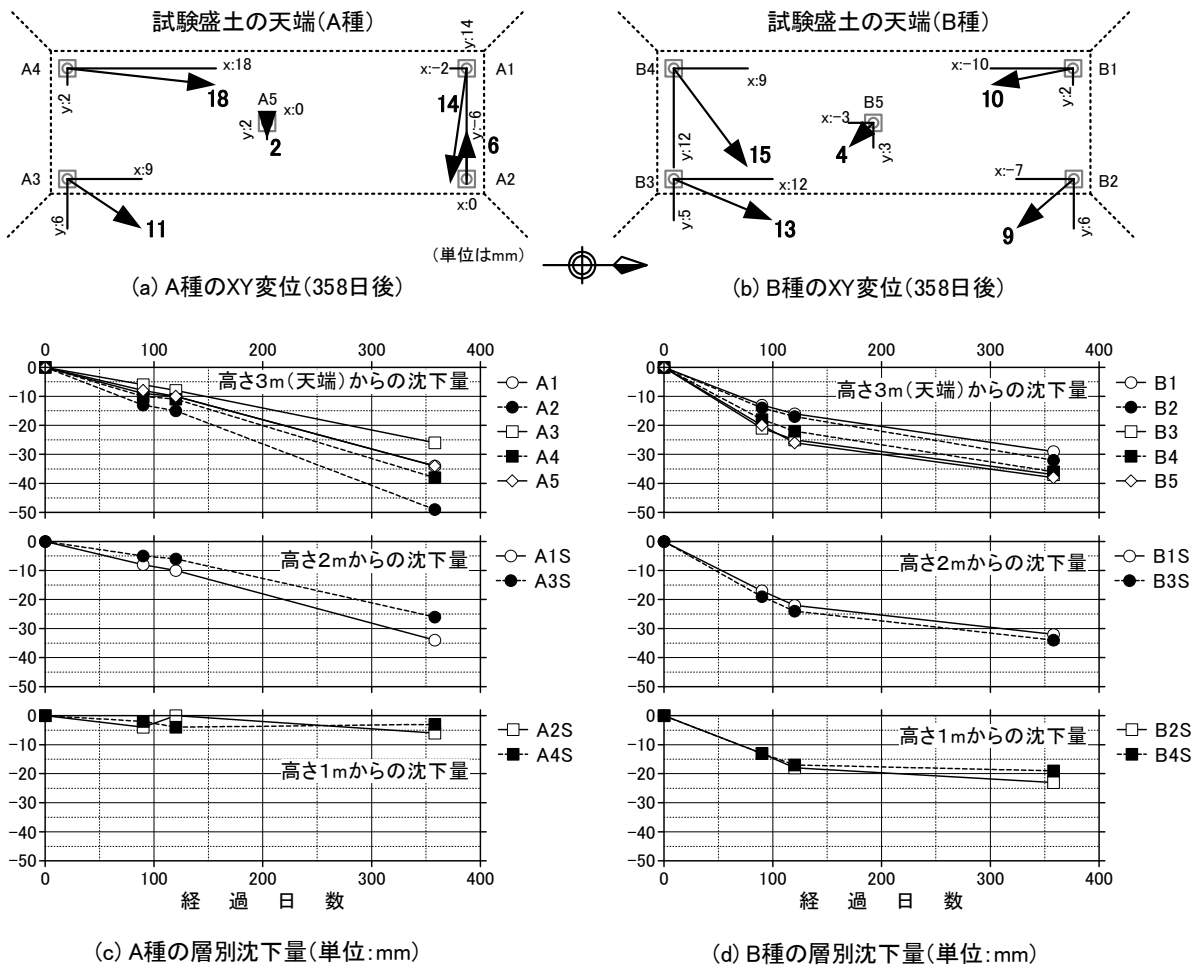


図 30 山田町の試験盛土の XY 変位と沈下量 (Z 変位) の測定結果

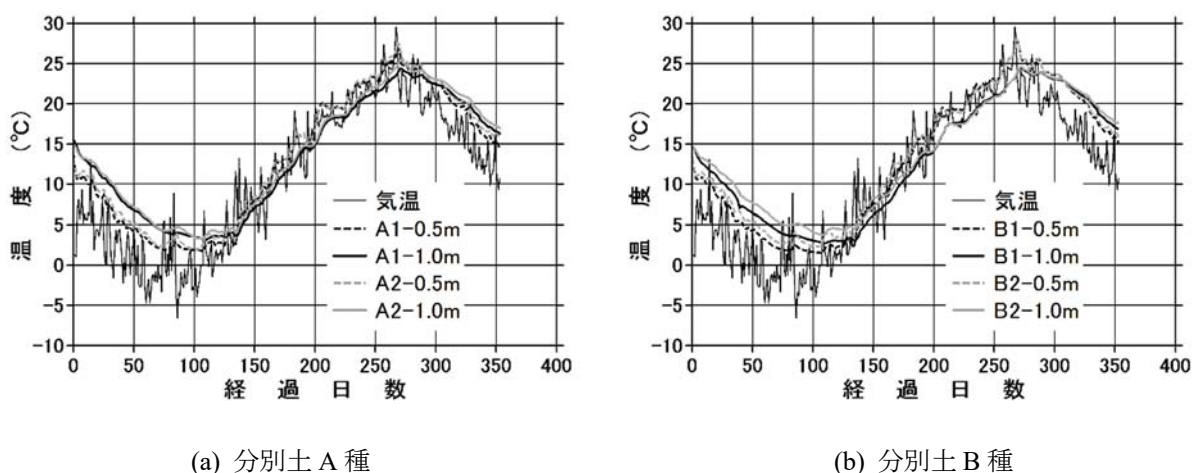


図 31 盛土の内部温度と外気温の変化

試験盛土内に設置した転倒枒雨量計によって測定された浸透水量と近傍に設置した転倒枒雨量計による降雨量の結果を図 32 に示す。経過日数 100 日前後にまとまった雨が降っており、浸透水量もそれに合わせてカウントされている。ただし、分別土 A 種の A1 と A2 を比較すると、その浸透水量は大きく異なっており、かつ、A1 では降雨量よりも大きな浸透水量が記録される等、測定結果は信頼性に欠ける結果となっている。この傾向は B1 でも同様であり、100 日前後の降雨量よりも浸透水量が多い。しかしながら 300 日前後の降雨時には浸透水量がほとんど記録されていない結果となった。200 日前後では降雨が発生していないものの、浸透水量が増加しているが、これは雪解け等の影響と考えられる。これらの結果から、浸透水は確かに存在しているが、定量的な観測には至らず、浸透水量計自体、もしくは測定方法に更なる改善が必要であることがわかった。

試験盛土に設置した浸透水集水枒で集められた浸透水は、不定期にサンプリングし水質を分析した。水質の内、生活環境項目について得られた結果を表 14 に示す。水温と ORP は浸透水を採取後、現地で測定した値であり、それ以外は持ち帰り後に分析を行った結果である。また、342 日後の試料に対しては、水道水検査等において難分解性溶存有機物(腐植質等)の指標として用いられる紫外部(260 nm)の吸光度(E260)についても追加分析した。土壌由来の腐食物質が増加すると E260 と TOC の比も増加する傾向が報告されており<sup>13)</sup>、分別土における溶存有機物の指標として適している可能性があったため採用した。

分別土 A 種の ORP はプラス側であるが、B 種については初期からマイナス側であり、やや嫌気的な状況となっていることが確認できる。A 種、B 種共に、時間が経過するにしたがって ORP は減少しており、A 種の約半分は 1 年経過後にマイナスとなっている。ただし、ORP については採水頻度等も影響することから、盛土内の全てが嫌気的に変化したとは断言しにくい状況である。

pH は初期に中性から弱アルカリ性であったものが、時間とともに弱酸性側に移行しており、A 種よりも B 種の方がやや小さい pH となる傾向が観察される。電気伝導率( EC )には大きな違いは無く、概ね 800～1000 mS/m の範囲で変動しており、時間と共に減少傾向にあることが確認できるが、その変化は緩慢であるといえる。

生物化学的酸素要求量( BOD )については、総じて低く、易分解性の有機物の溶出は、A 種、B 種共に少ないと思われるが、A 種では BOD が微増している傾向も確認されている。化学的酸素要求量( COD )につ

いては、A種とB種で明確な差があり、B種の方がA種に比較して数倍大きな値となっている。ORPが低いのも、このCOD成分が影響していると考えられる。全有機炭素（TOC）も同様の傾向となっており、A種に比較するとB種が数倍大きな値となっている。TOC成分の具体までは特定できていないが、BODが低く、COD、TOCが高いことから、難分解性の有機物が多いと推測される。

次いで、有機汚濁成分の指標として、BOD/COD、E260/TOCについて評価した。図33(a)と(b)に各測点における計算値を示す。また、BOD/CODとE260/TOCの関係を図中(c)に示す。なお、本来であればTOCではなくてろ過後のDOCを用いるべきであるが、本分析ではろ過を実施していないのでTOCを用いた。廃棄物という観点で考えると、易分解性と難分解性有機物の指標としてBOD/CODが用いられることが多いが、試験盛土浸透水のBOD/CODは0.1以下であり易分解性有機物量は極めて少ない状況であることがわかる。E260/TOCの値は分別土A種で12~27程度であり、A1~A4に比較してA5とA6が大きな値となっている。これは、A1~4は法面部の下部の基盤層に設置しているが、A5~6は天端の下部の基盤層に設置しているため、分別土の層厚が異なっていることが原因と考えられる。分別土B種のE260/TOCについては、A種に比較すると総じて大きな値となっている。ただし、B6についてはA種よりも低い結果となり、分別土A種とは異なる挙動も確認されている。E260/TOCに明確な基準値はないが、長野県の湖沼水のE260/DOCの値は11~38程度と報告されており<sup>14)</sup>、大阪市の河川水域では12~18程度であることから<sup>15)</sup>、A種の浸透水は河川水域とほぼ同等、B種の浸透水は湖沼水とほぼ同等の汚濁指標といえる。

BOD/CODの指標を用いる場合、BOD試験には少なくとも5日間を要することから、災害時における有機物指標としては適していないと考えられる。そこで、E260/TOCを有機汚濁の大体指標として用いる可能性について検討した。図33(c)をみると、BOD/CODの増加と共にE260/TOCが減少している傾向が確認できる。線形で近似するとBOD/CODが増加したときにE260/TOCの値が負になることから、ここでは累乗近似とした。E260/TOCが減少することは水質が改善される方向であるが、BOD/CODが増加するのは水質が悪化している指標になることから、この関係は辻褄が合っていない。BOD/CODは易分解性有機物量を測る指標であるが、E260/TOCは難分解性有機物の指標であるため、BOD/CODが0.1以下のような汚濁成分の少ない環境下では、両者に明確な相関が無い可能性もある。そのため、E260/TOCをBOD/CODの代替指標としてではなく、有機汚濁成分の指標としてE260/TOCそのものの値を用いる方が無難な気がしている。

各試験盛土に設置した3本のガス採取管から採取された土壌ガスの組成を表15に示す。酸素濃度はいずれの分別土においても大気に近い値となっている。“B中”の初期数十日は酸素が消費されていることが伺えるが、その後に大気濃度にほぼ等しくなっていることから、酸素消費速度がかなり低減したと推察される。窒素も同様であり、ほぼ大気と同値となっている。二酸化炭素は大気よりも高く、酸素濃度が明確に低下するような発熱を伴う速度ではないものの、好気性分解による微生物反応が進行していることが伺える。ただし、ガスフラックスを測定していないため、この二酸化炭素が分別土中に停滞しているのか、常にこの濃度になるようなガスが発生しているかは、濃度の検証だけでは明らかにすることができなかった。ただし、酸素濃度が大きく減少していないことから、活発な微生物活動が無いことは確認できる。

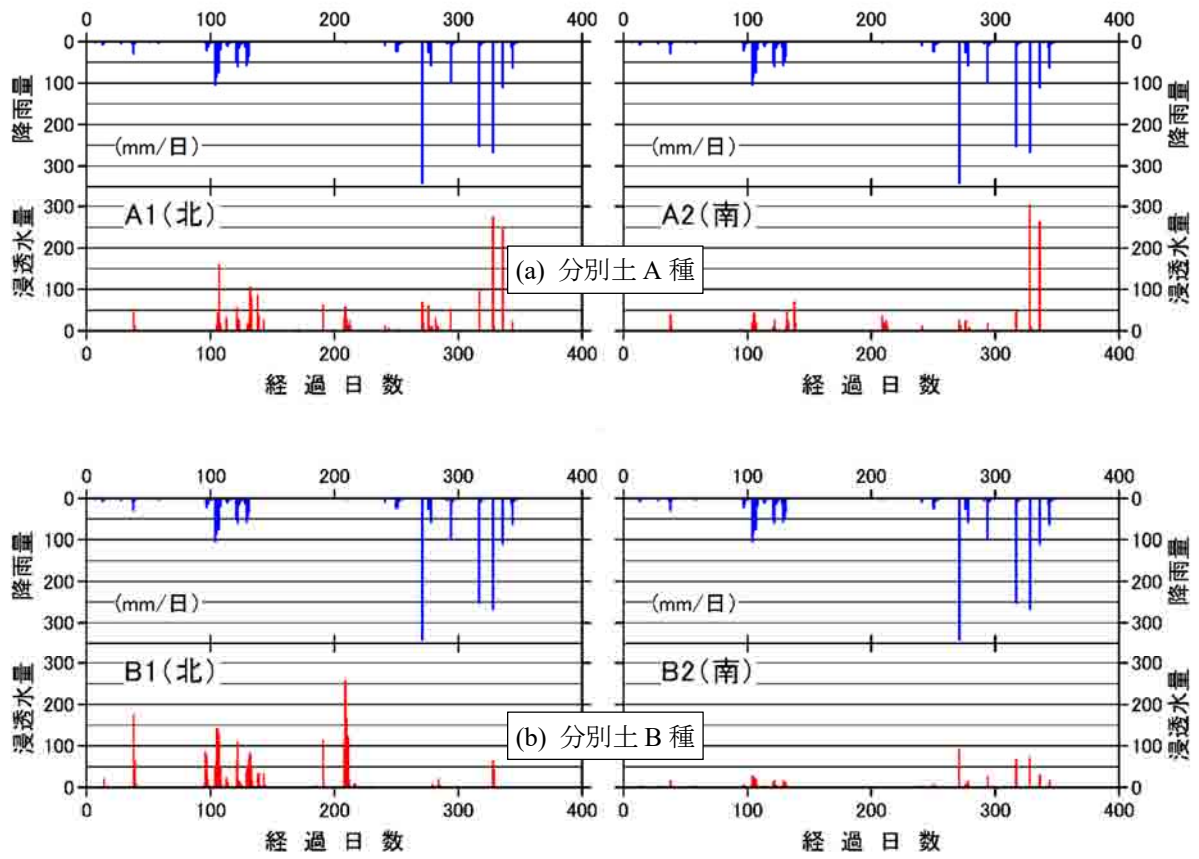


図 32 分別土層内への浸透水量と日降雨量の関係

表 14 浸透水の水質分析結果

項目	日数	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
水温 (°C)	82	5.0	5.5	6.2	5.0	8.1	6.0	5.0	5.5	8.0	6.0	-	9.7
	124	-	7.0	7.5	7.0	7.8	7.6	-	6.6	7.5	6.8	-	7.8
	342	19.1	19.5	20.2	19.4	19.9	20.2	19.8	20.7	20.8	20.0	-	20.5
ORP (mV)	82	133	157	147	150	123	120	-100	-100	-82	-82	-	-91
	124	-	146	157	149	110	109	-	-116	-117	-124	-	-118
	342	-35	5	154	5	-133	-94	-130	-158	-148	-137	-	-103
pH (-)	82	7.2	7.2	7.3	7.3	7.9	7.8	7.0	7.1	7.1	6.9	-	7.0
	124	-	7.1	7.1	7.1	6.9	6.6	-	7.2	6.8	7.0	-	7.0
	342	6.7	6.7	6.7	6.7	6.8	6.7	6.8	6.7	6.7	6.9	-	7.2
EC (mS/m)	82	880	860	890	880	840	790	930	990	1000	980	-	930
	124	-	760	940	890	980	1000	-	1000	1000	980	-	1000
	342	660	780	740	670	830	790	780	690	760	750	-	750
BOD (mg/L)	82	2.8	-	-	0.9	2.2	2.1	4.9	4.8	7.0	5.3	-	7.4
	124	-	-	-	-	0.6	1.2	-	-	1.8	7.6	-	13
	342	6.0	2.1	1.9	3.1	2.9	2.5	3.4	4.0	2.6	5.4	-	-
COD (mg/L)	82	33	31	33	32	54	54	150	160	170	150	-	170
	124	-	23	28	26	29	30	-	140	100	240	-	490
	342	71	46	33	36	74	49	130	130	100	210	-	120
T-N (mg/L)	82	95	93	91	100	36	18	14	13	13	13	-	15
	124	-	51	66	70	52	54	-	15	9	17	-	30
	342	3	6	2	7	7	14	17	18	17	17	-	15
TOC (mg/L)	82	39	38	36	45	54	55	110	130	140	120	-	100
	124	-	19	24	21	24	23	-	85	62	110	-	180
	342	40	44	33	36	50	39	68	55	60	60	-	71
E260 (mAbs)	342	502	648	551	574	1273	1085	2709	2045	2039	2027	-	1284

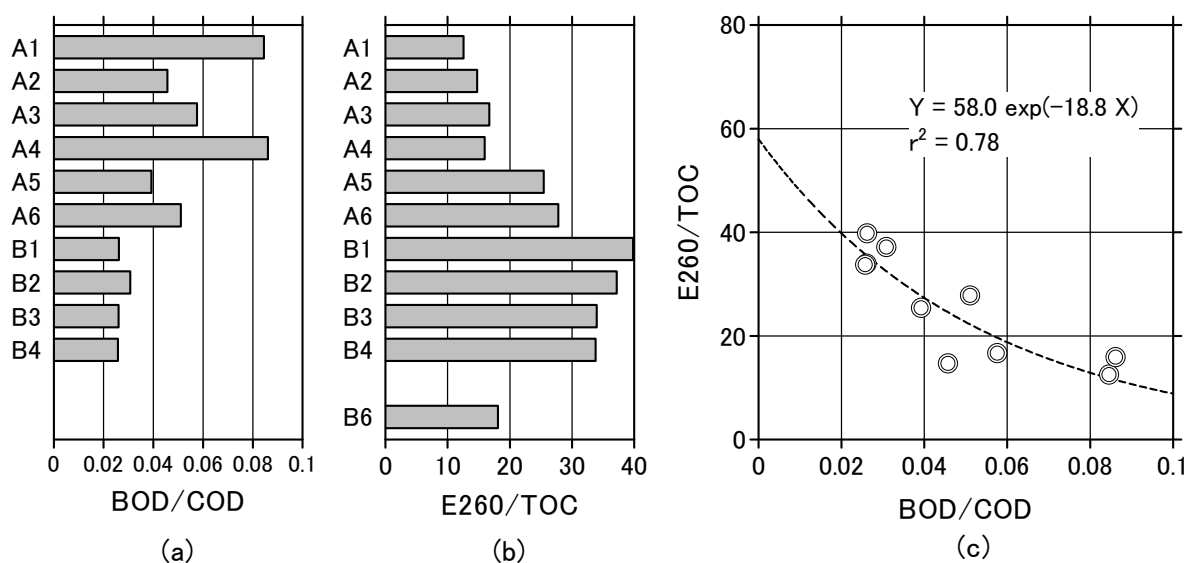


図 33 浸透水の有機汚濁成分の評価

表 15 土壌ガスの分析結果

項 目	日数	A北	A中	A南	B北	B中	B南
酸素 (%)	82	19	18	20	17	14	20
	90	20	18	20	18	14	21
	104	19	18	20	18	19	17
	124	20	20	20	19	21	19
	342	20	18	20	17	20	19
二酸化炭素 (%)	82	1.3	1.9	0.6	1.8	1.0	0.4
	90	1.0	2.0	0.7	2.0	1.3	0.4
	104	1.3	1.9	0.7	1.5	0.5	1.4
	124	0.4	0.3	0.8	1.6	0.2	1.0
	342	0.4	1.8	0.9	3.1	1.0	3.3
窒素 (%)	82	80	80	78	80	85	79
	90	79	80	79	81	85	78
	104	79	79	79	79	79	81
	124	78	78	79	78	79	80
	342	78	79	78	79	79	79

#### <改質材が盛土の安定性に及ぼす影響>

一般土工における転圧の標準仕様（撤出し：7 t級ブルドーザーによる敷均し、転圧：10 t級タイヤローラー、仕上がり厚：30 cm、転圧回数：4～8回）により現地盛立試験を行い施工性の確認を行った。図 34 は、撒き出し厚 ( $t_0$ ) と仕上がり厚 ( $t_1$ ) の関係の一例として TD と TS の試験結果を示したものである。他の材料も同様な傾向を示しており、 $t_0$  と  $t_1$  の関係から  $t_0$  を 35～39 cm で行えば、 $t_1$  は 30 cm 以下となることが確認された。図 35 は、TD と TS における締固め曲線と現場転圧密度の関係を示したものである。TD の自然含水比は D 値 90%の湿潤側( $D_{90w_{wet}}$ )の含水比状態にあるが、鋼製スラグを混合することにより最適含水比( $w_{opt}$ )状態に改良される。TR、TC 材料も同様な結果を得ているが、TP は固化反応によりさらに含水比が低下して乾燥した状態となり十分な締固め効果が得られなかった。その他の材料は、図 36 に示すとおり一般土工の品質管理で規定される D 値 90%の密度を 4 回の転圧で満足する結果が得られた。現場 CBR と室内 CBR の関係は、図 37 に示すように TP を除き、室内 CBR と現場 CBR はほぼ一致しており一般的な土の特性（室内 CBR=0.5～1.5×現場 CBR）<sup>7)</sup>と類似した傾向にある。

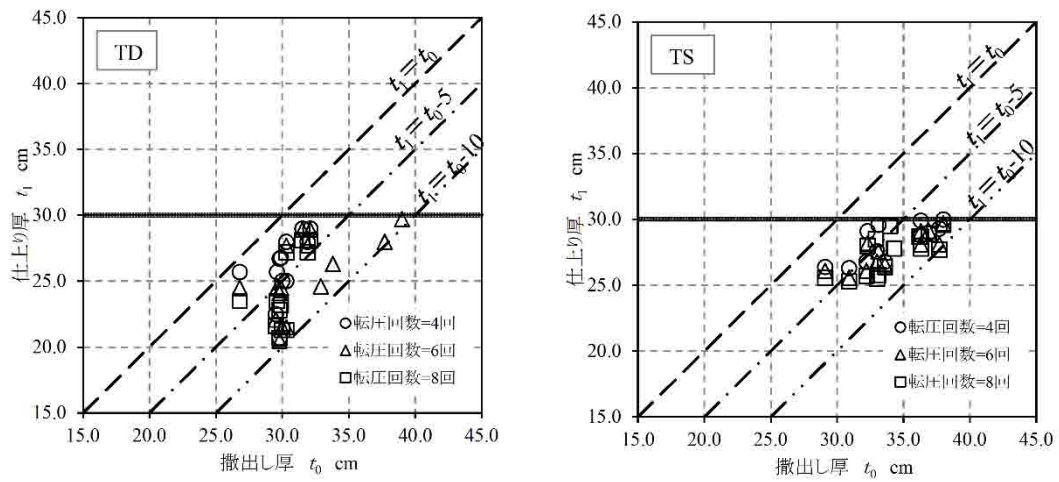


図 34 撒き出し厚と仕上がり厚の関係 (TD、TS)

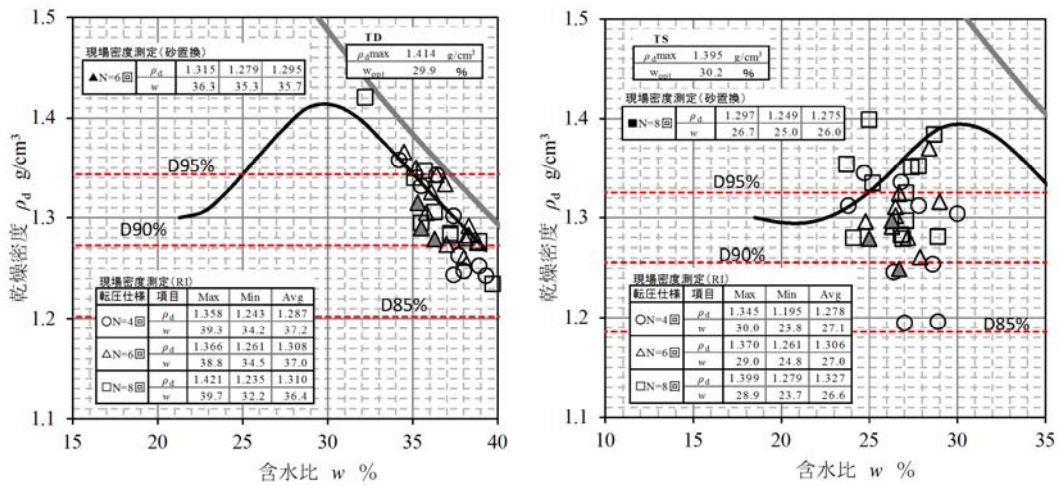


図 35 締固め曲線と場転圧密度の関係 (TD、TS)

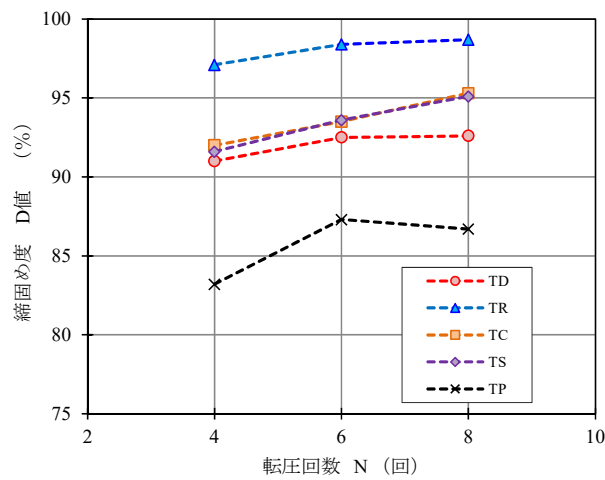


図 36 転圧回数 (N) と締固め度 (D 値) の関係

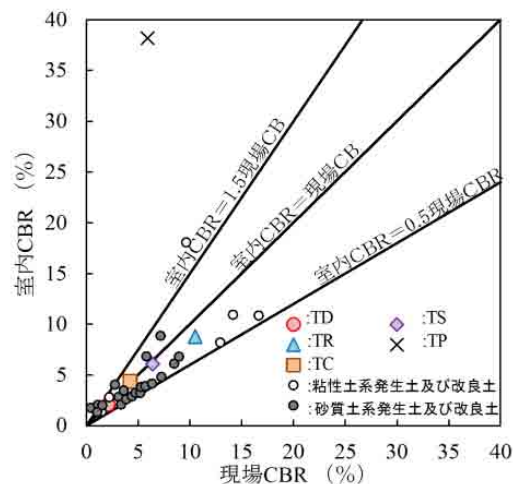


図 37 現場 CBR と室内 CBR の関係

バックホウのバケットによる軽度な土羽打ち法面（東面）と入念な土羽打ち法面（北面）において 40 cm × 40 cm の観測面を設定し、土壌硬度を中山式硬度計により測定した。図 38 は土壌硬度の経時変化を整理したものであり、試験盛土の近傍の気象庁宮城県気仙沼観測所の水文データ（気温・降雨量）を併記している。モニタリング期間の累積降雨は、約 1,400 mm、1 月初旬より 3 月中旬の最低気温は 0℃ 以下となる日が続き、盛土表面では凍上が生じていたことが予測される。港湾緑地の植生設計・施工マニュアル<sup>16)</sup>によれば、中山式硬度計による土壌硬度を指標とし、植生の活着の目安値を土壌硬度 23 以下としている。今回の試験盛土においては入念な土羽打ちを行った場合においても凍上や乾湿の繰り返しにより盛土表面の土壌硬度は 23 程度となっており盛土構築当初は植生の活着が認められなかった。一方、軽度な土羽打ち法面の土壌硬度は、整形時より目安値の 23 以下でありその後の土壌硬度の低下は顕著でなく、次項で示すように法面には植生が活着する結果となっている。写真 16 は、平成 26 年 10 月 7 日に行った TR 盛土の土壌硬度測定状況を示したものであり、植生の活着の相違および累積降雨約 1,400 mm/年に曝されても、ガリー浸食が生じていないことが観察された。

試験盛土天端において現場 CBR 試験を行い強度の経時変化を把握した。試験結果は図 39 に示すように、盛り立て後約 2 ヶ月後の強度増加がみられ、それ以降若干の強度低下がみられるものもあるが強度はほぼ横ばいで推移している。

軽度な土羽打ち法面に対して表層（GL-0.0 m）・GL-0.1 m・GL-0.3 m から採取した試料に対して pH を測定したところ、図 40 に示すように造成直後の試験盛土の pH はアルカリ域にあるが、時間経過とともに pH は低下し、TP 盛土の表層より 10 cm 以深のデータ以外は中性域を示す範囲に達している。

試験盛土に設けた底設暗渠パイプに連結させた貯留タンクから浸透水を採水して、環境省告示第 17 号（平成 15 年 3 月 6 日）に準拠した水質試験を行った。試験結果は表 16、表 17 に示すとおりであり、盛立 2 ヶ月後に行った試験では土壌汚染対策法の地下水基準を上回る砒素の溶出が認められたが、それ以降の試験では基準値を上回る砒素の溶出は検出されていない。試験盛土で使用した材料は、溶出試験による土壌環境基準を満足したものを使用している。この試験は土に水を 10 倍量（重量比）加えて溶かし出す試験であり、盛土などの実際の条件では、盛土直後に 10 倍量の水が一度に供給される可能性は低く、盛土構築初期の段階で溶出してくる物質の場合、1 倍量の雨水の浸透では 10 倍の濃度で溶出する可能性もあると考えら



れる。その後、地下へ浸透後に希釈や吸着などの影響を受けるので溶出量は低下する傾向にあると想定されるので、今回のようなモニタリングのように暗渠等に集水される水等では、環境行政上の目標値である地下水環境基準ではなく、排水基準を管理値として運用するのが適当であると考えられる。

また、2014/10/8の採水の水質試験からはTR盛土とTC盛土においてほう素の溶出量が環境基準を上回る値が計測された。この値はそれまでに測定された10倍近い値であり、その原因の一つとして海水の混入による可能性が考えられたので塩化物イオンの試験を行うとともに再試験を行うため2014/10/25に採水し、あわせて試験盛土から採取した土壌の溶出試験を行った。試験盛土は津波堆積物由来である材料による盛土であることから、塩化物イオンの値は一般の土壌と比べて相対的に高い値を示すが、塩化物イオンと相関性の高い電気伝導率の推移から判断して2014/10/8の採水に海水が混入した可能性は低いものと判断される。また、2014/10/25の再試験においても同様な結果が得られた一方で、試験盛土から採取した土壌に対する溶出試験においては環境基準値を満足する結果となった。ほう素などの重金属類が遅延して溶出する現象は、カラム試験でも見られる溶出特性の特徴的な現象であり、この種の現象の解明については、さらに実験・実測データを集積し議論すべき課題であると考えられる。

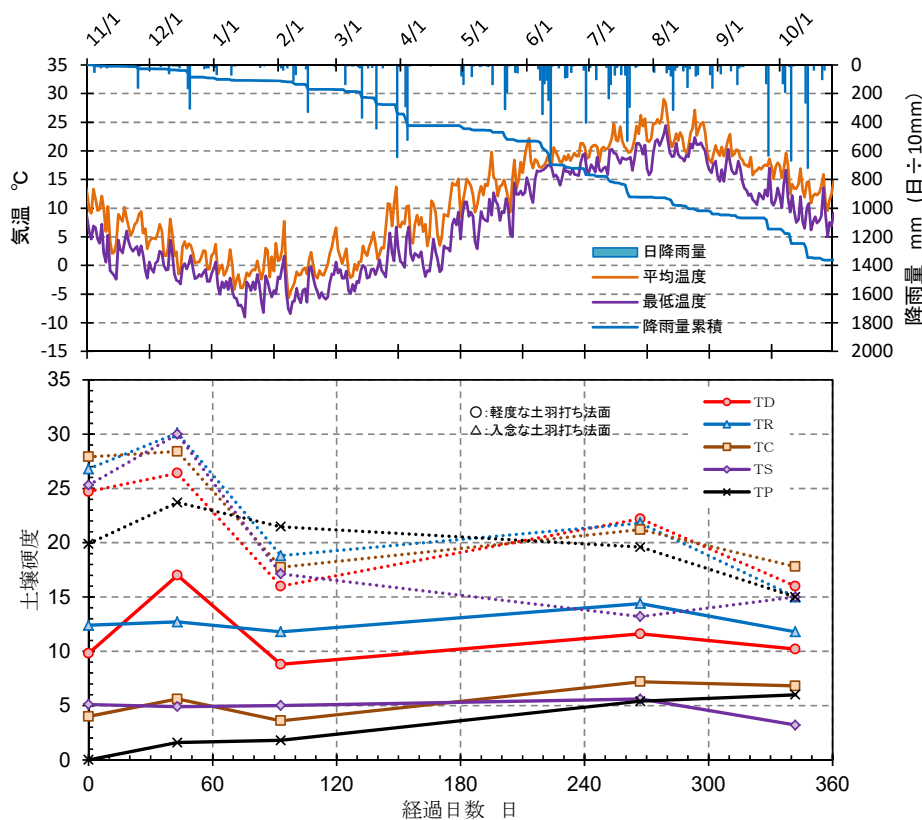


図 38 法面の土壌硬度計測結果



軽度な土羽打ち法面（東面）



入念な土羽打ち法面（北面）

写真 16 土壌硬度測定状況（TR 盛土）

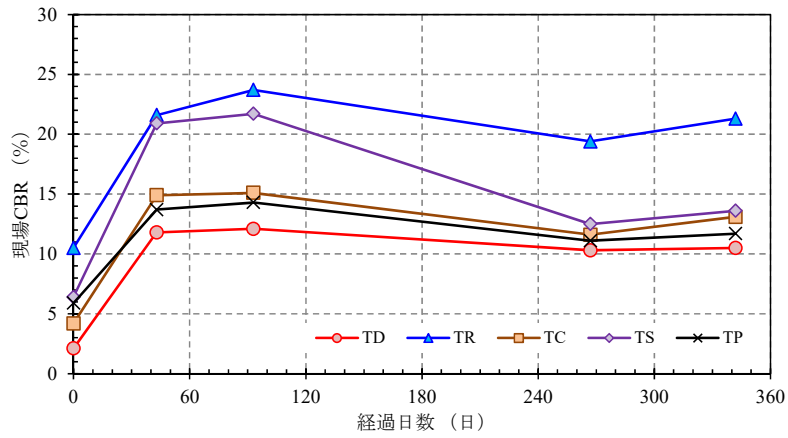


図 39 現場 CBR の経時変化

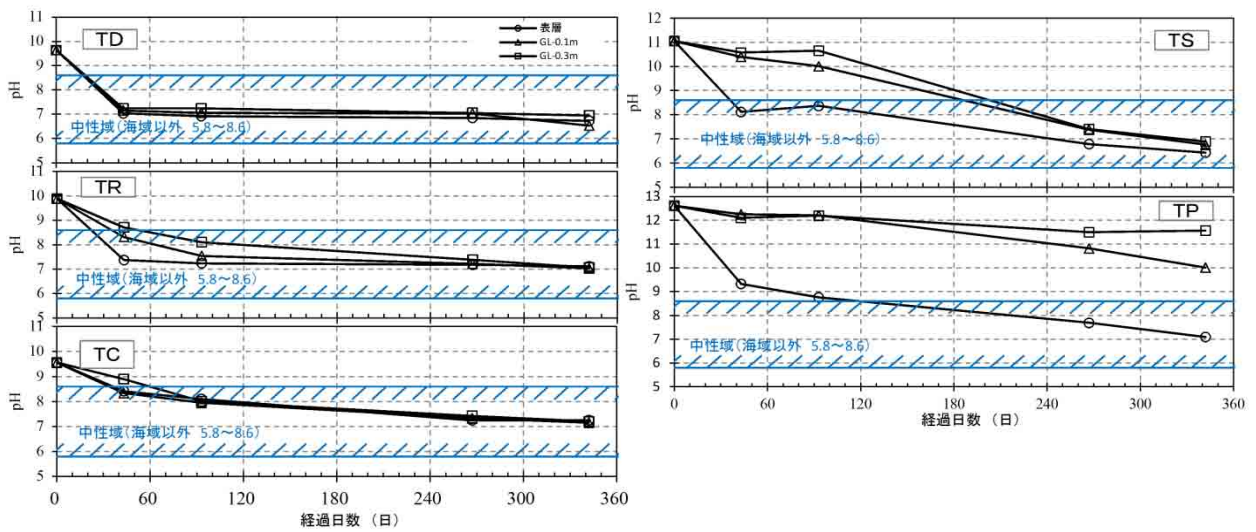


図 40 pH 計測結果

表 16 浸出水の水質分析結果 (1)

分析項目名	単位	土壌汚染対策法 地下水基準	TD						
			2013/10/30	2013/12/12	2014/1/30	2014/8/26	2014/10/8	2014/10/25	
			土壌 溶出試験	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠
カドミウム	mg/L	0.01以下	0.001	浸 出 水 不 足	0.0003未満	0.0003未満	0.0003未満	-	-
鉛	mg/L	0.01以下	0.005未満		0.005未満	0.005未満	0.005未満	-	-
六価クロム化合物	mg/L	0.05以下	0.01未満		0.01未満	0.01未満	0.01未満	-	-
砒素	mg/L	0.01以下	0.009		0.006	0.005未満	0.005未満	-	-
水銀	mg/L	0.0005以下	0.0005未満		0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	-	-
セレン	mg/L	0.01以下	0.002未満		0.002	0.002未満	0.002未満	-	-
ふっ素	mg/L	0.8以下	0.14		0.09	0.21	0.22	-	-
ほう素	mg/L	1以下	0.13		0.27	0.17	1.0	0.51	0.28
水素イオン濃度	-	5.8~8.6 (排水基準) 6.0~7.5 (農業用水基準)	9.6		6.9(23℃)	7.6(23℃)	7.3(23℃)	-	-
電気伝導率	mSm	30mSm以下 (農業用水基準)	-		690	170	350	-	-
有機体炭素 (TOC)	mg/L	3以下 (水道水質基準)	-		120	9	35	-	-
塩化物イオン	mg/L	200mg/L以下 (水道水質基準)	-		-	-	286	-	-

分析項目名	単位	土壌汚染対策法 地下水基準	TC						
			2013/10/30	2013/12/12	2014/1/30	2014/8/26	2014/10/8	2014/10/25	
			土壌 溶出試験	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠
カドミウム	mg/L	0.01以下	0.001未満	0.0006	0.0005	0.0003未満	0.0003未満	-	-
鉛	mg/L	0.01以下	0.005未満	0.005未満	0.005未満	0.005未満	0.005未満	-	-
六価クロム化合物	mg/L	0.05以下	0.01未満	0.01未満	0.01未満	0.01未満	0.01未満	-	-
砒素	mg/L	0.01以下	0.009	0.011	0.007	0.005	0.005未満	-	-
水銀	mg/L	0.0005以下	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	-	-
セレン	mg/L	0.01以下	0.002未満	0.002未満	0.004	0.002未満	0.002未満	-	-
ふっ素	mg/L	0.8以下	0.15	0.08未満	0.08	0.13	0.16	-	-
ほう素	mg/L	1以下	0.16	0.21	0.21	0.13	1.2	1.3	0.34
水素イオン濃度	-	5.8~8.6 (排水基準) 6.0~7.5 (農業用水基準)	9.6	6.9(20℃)	6.8(23℃)	7.8(22℃)	7.5(23℃)	-	-
電気伝導率	mSm	30mSm以下 (農業用水基準)	-	660	690	140	340	-	-
有機体炭素 (TOC)	mg/L	3以下 (水道水質基準)	-	150	170	11	42	-	-
塩化物イオン	mg/L	200mg/L以下 (水道水質基準)	-		-	-	227	-	-

分析項目名	単位	土壌汚染対策法 地下水基準	TP						
			2013/10/30	2013/12/12	2014/1/30	2014/8/26	2014/10/8	2014/10/25	
			土壌 溶出試験	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠
カドミウム	mg/L	0.01以下	0.001未満	0.0003未満	0.0003未満	0.0003未満	0.0003未満	-	-
鉛	mg/L	0.01以下	0.005未満	0.005未満	0.005未満	0.005未満	0.005未満	-	-
六価クロム化合物	mg/L	0.05以下	0.01未満	0.02	0.01未満	0.01未満	0.01未満	-	-
砒素	mg/L	0.01以下	0.005	0.007	0.006	0.006	0.005未満	-	-
水銀	mg/L	0.0005以下	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	-	-
セレン	mg/L	0.01以下	0.002未満	0.002未満	0.004	0.003	0.002未満	-	-
ふっ素	mg/L	0.8以下	1.4	0.08未満	0.07	0.14	0.27	-	-
ほう素	mg/L	1以下	0.02	0.04	0.04	0.37	0.49	0.29	0.02
水素イオン濃度	-	5.8~8.6 (排水基準) 6.0~7.5 (農業用水基準)	12.6	11.6(20℃)	9.0(21℃)	7.5(22℃)	7.5(22℃)	-	-
電気伝導率	mSm	30mSm以下 (農業用水基準)	-	650	490	600	240	-	-
有機体炭素 (TOC)	mg/L	3以下 (水道水質基準)	-	430	310	120	10	-	-
塩化物イオン	mg/L	200mg/L以下 (水道水質基準)	-		-	-	436	-	-

表 17 浸出水の水質分析結果 (2)

分析項目名	単位	土壌汚染対策法 地下水基準	TR						
			2013/10/30	2013/12/12	2014/1/30	2014/8/26	2014/10/8	2014/10/25	
			土壌 溶出試験	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠
カドミウム	mg/L	0.01以下	0.001未満	浸 出 水 不 足	0.0005	0.0003未満	0.0003未満	-	-
鉛	mg/L	0.01以下	0.005未満		0.005未満	0.005未満	0.005未満	-	-
六価クロム化合物	mg/L	0.05以下	0.01未満		0.01未満	0.01未満	0.01未満	-	-
砒素	mg/L	0.01以下	0.009		0.010	0.005未満	0.005	-	-
水銀	mg/L	0.0005以下	0.0005未満		0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	-	-
セレン	mg/L	0.01以下	0.002未満		0.004	0.002未満	0.002未満	-	-
ふっ素	mg/L	0.8以下	0.39		0.21	0.21	0.28	-	-
ほう素	mg/L	1以下	0.04		0.13	0.15	1.6	1.5	0.21
水素イオン濃度	-	5.8~8.6 (排水基準) 6.0~7.5 (農業用水基準)	9.9		6.9(23°C)	7.6(22°C)	7.3(23°C)	-	-
電気伝導率	mS/m	30mS/m以下 (農業用水基準)	-		690	170	500	-	-
有機体炭素 (TOC)	mg/L	3以下 (水道水質基準)	-		180	13	85	-	-
塩化物イオン	mg/L	200mg/L以下 (水道水質基準)	-		-	-	520	-	-

分析項目名	単位	土壌汚染対策法 地下水基準	TS						
			2013/10/30	2013/12/12	2014/1/30	2014/8/26	2014/10/8	2014/10/25	
			土壌 溶出試験	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠	採水 底設置暗渠
カドミウム	mg/L	0.01以下	0.001未満	0.0003未満	0.0005	0.0003未満	0.0003未満	-	-
鉛	mg/L	0.01以下	0.005未満	0.005未満	0.005未満	0.005未満	0.005未満	-	-
六価クロム化合物	mg/L	0.05以下	0.01未満	0.01未満	0.01未満	0.01未満	0.01未満	-	-
砒素	mg/L	0.01以下	0.009	0.016	0.005	0.005未満	0.005未満	-	-
水銀	mg/L	0.0005以下	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	-	-
セレン	mg/L	0.01以下	0.002未満	0.002未満	0.006	0.002未満	0.002未満	-	-
ふっ素	mg/L	0.8以下	0.39	0.08未満	0.05	0.13	0.23	-	-
ほう素	mg/L	1以下	0.04	0.10	0.05	0.16	0.35	0.51	0.21
水素イオン濃度	-	5.8~8.6 (排水基準) 6.0~7.5 (農業用水基準)	11.1	7.1(19°C)	7.0(23°C)	7.6(23°C)	7.2(23°C)	-	-
電気伝導率	mS/m	30mS/m以下 (農業用水基準)	-	790	910	180	370	-	-
有機体炭素 (TOC)	mg/L	3以下 (水道水質基準)	-	350	360	19	48	-	-
塩化物イオン	mg/L	200mg/L以下 (水道水質基準)	-	-	-	-	539	-	-

次に、モデル盛土における降雨浸透特性を飽和—不飽和浸透流解析により明らかにし、復興資材を用いた盛土の降雨浸透予測に対する解析手法の適用性・妥当性について、算定された浸透水量と計測された浸透水量を比較して検証した。また、上向流カラム通水試験により砒素・ほう素の溶出特性（溶出速度・積算溶出量等）を定量評価し、通水量を指標とした液固比と積算溶出量の関係を求めた。実環境下における砒素・ほう素の溶出特性については、同様な観点から、浸透水量を指標とした液固比と浸透水の水質分析結果から積算溶出量濃度を算出し、両者を比較して室内試験と現場で観測される双方の溶出メカニズムについて議論した。

降雨浸透を考慮した浸透流解析は、FEMによる二次元（断面）飽和—不飽和浸透流によるものであり、解析に用いたプログラム（SAUSE Ver3.1.2：ニタコンサルタント株）は、河川堤防の構造検討などで汎用的に使用されているものである。解析モデルは、図41に示すように底部暗渠排水溝に沿った二次元断面（B

—B断面)とした。底部暗渠はφ100の有孔管が設置されているが、排水溝は透水性の高い砕石層によりモデル化を行った。盛土及び基盤の表面を浸出面および降雨浸透面とし、基盤の地下水位は試験盛土区域が漁港に位置していることから漁港の平均的な朔望水位とした。また盛土の基盤面には不透水の遮水シートが設置されているのでこれをモデル化した要素を与えた。暗渠に集水される浸透水量は砕石層への浸透量を積算し単位幅(砕石層の幅)0.5mを乗じて算出した。砕石層への降雨浸透は、図41のA-A断面に示すように、側方からの流入が考えられるが今回の計算においてはこの量を積算していない。

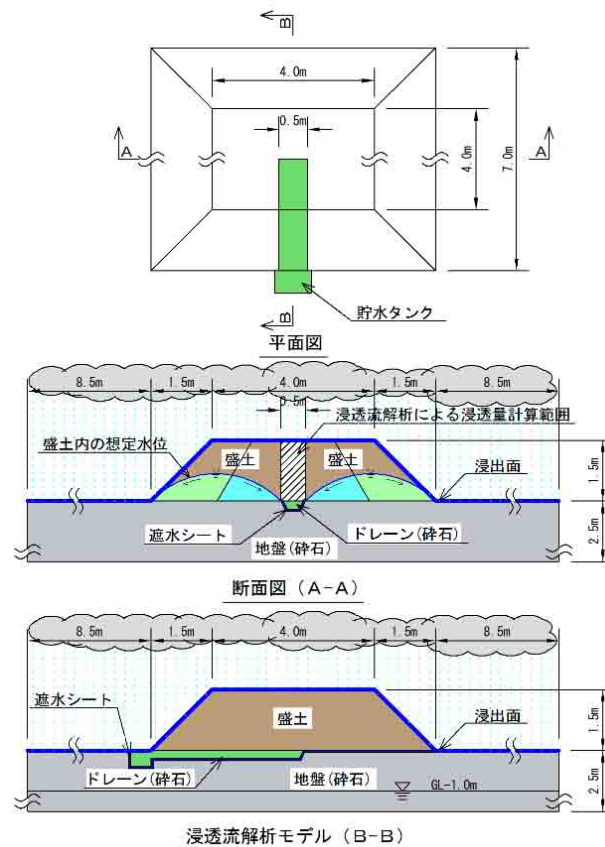


図41 試験盛土平面図および解析断面図

解析の期間は、試験盛土の設置期間を踏まえて平成25年11月1日より平成26年10月31日の1年間とした。この間の降雨データは近傍の気象庁宮城県気仙沼観測所の降雨データを用いた。また、浸透流解析に用いた物性値については、盛土材の鉛直方向の飽和透水係数( $k_v$ )は試験盛土の平均含水比を指標として室内透水試験結果より算定した。また、水平方向の飽和透水係数( $k_h$ )はタイヤローラーにより転圧された盛土であることを考慮し、一般に提案されている $k_h/k_v = 20 \sim 30$ の平均値25を採用し設定した<sup>17)</sup>。盛土の透水係数において、締め固め密度が低く、含水比( $w_n$ )が最適含水比( $w_{opt}$ )より乾燥側にあるTP盛土は、他の盛土に比べて透水係数が2オーダー程度大きいことが特徴的である。ドレーン材、遮水シート、再生砕石により造成された基盤の透水係数は、材料特性を考慮して仮定した。比貯留係数及び不飽和浸透特性は「河川堤防の構造検討の手引き(改訂版)<sup>18)</sup>」を参考として設定した。各物性値を表18、図42に示す。

表 18 飽和透水係数および比貯留係数

名称	飽和透水係数 (m/s)		比貯留係数 (1/m)	備考 (盛土管理:平均値)	
	$k_v$	$k_h$			
盛土	TD	$8.3 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$\rho_d = 1.308 \text{ g/cm}^3$ , $w_{opt} = 29.9\%$ , $w_n = 37.0\%$ , $\rho_s = 2.683 \text{ g/cm}^3$
	TR	$3.4 \times 10^{-8}$	$8.5 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$\rho_d = 1.476 \text{ g/cm}^3$ , $w_{opt} = 25.0\%$ , $w_n = 24.5\%$ , $\rho_s = 2.724 \text{ g/cm}^3$
	TC	$5.6 \times 10^{-9}$	$1.4 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$\rho_d = 1.309 \text{ g/cm}^3$ , $w_{opt} = 30.5\%$ , $w_n = 31.1\%$ , $\rho_s = 2.645 \text{ g/cm}^3$
	TS	$2.4 \times 10^{-8}$	$6.0 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$\rho_d = 1.306 \text{ g/cm}^3$ , $w_{opt} = 30.2\%$ , $w_n = 27.0\%$ , $\rho_s = 2.766 \text{ g/cm}^3$
	TP	$1.6 \times 10^{-6}$	$4.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$\rho_d = 1.058 \text{ g/cm}^3$ , $w_{opt} = 35.3\%$ , $w_n = 27.6\%$ , $\rho_s = 2.672 \text{ g/cm}^3$
ドレーン	$1.0 \times 10^{-5}$	$2.5 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	—	
遮水シート	$1.0 \times 10^{-11}$	$1.0 \times 10^{-11}$	$1.0 \times 10^{-3}$	—	
基礎地盤	$1.0 \times 10^{-5}$	$2.5 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	—	

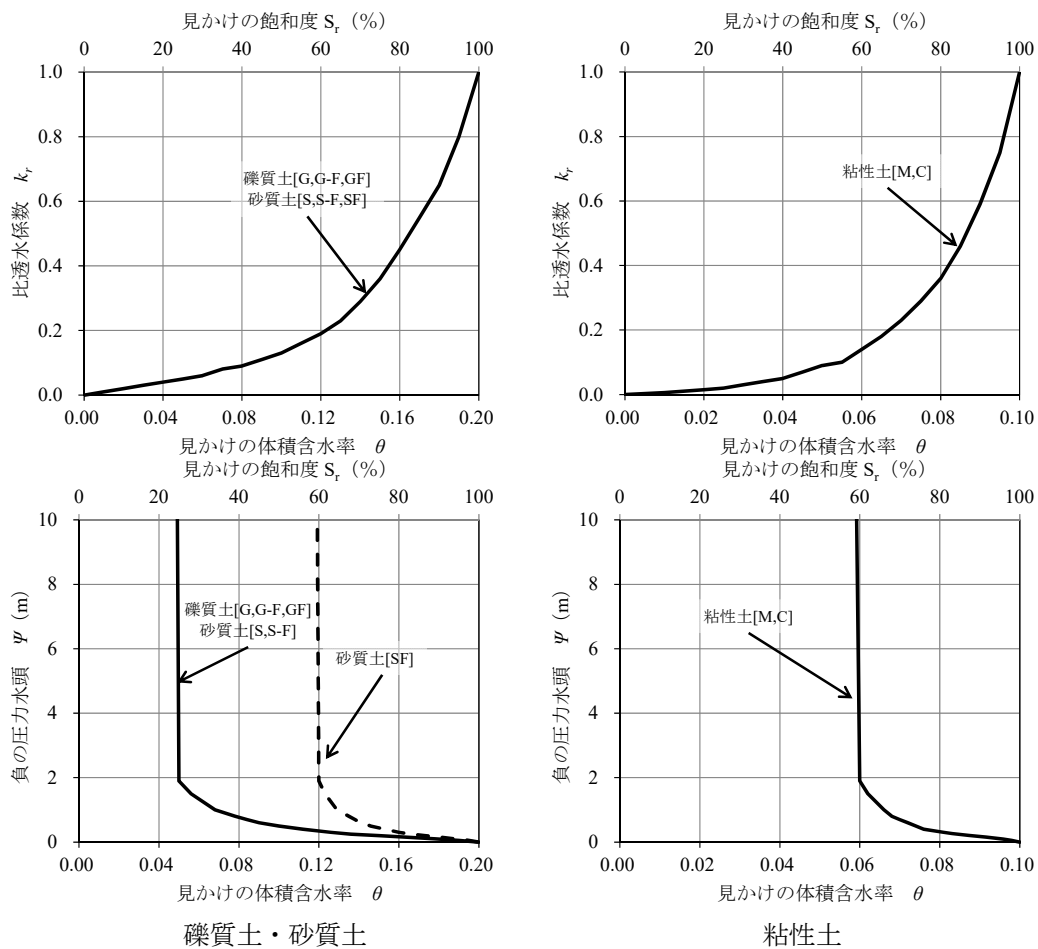


図 42 浸透流計算に用いる体積含水率と比透水係数・負の圧力水頭の関係<sup>18)</sup>

盛土への降雨浸透現象に影響する要因としては、土の種類、締固め度など土質材料に関連する要因、降雨強度、降雨パターンのような降雨に関わる要因およびのり面形状などが考えられる。また、盛土の初期状態に違いがあれば同じ降雨が作用しても、浸透挙動に差異が生じ、盛土内に形成される飽和域に及ぼす影響も異なってくる。木村は、降雨強度 ( $r$ ) と飽和透水係数 ( $k$ ) の比を指標とし、 $r/k < 1.0$  での降雨浸透においては、降雨開始と共にのり面表面から湿潤前線が降下していき、のり面表面に近いのり面先から順次基盤面に到達し、これにより飽和域が形成され、一方  $r/k > 1.0$  の場合は、盛土内に浸透した降雨が盛土表層部の飽和度を高め飽和域を形成しながら、以後飽和域が下方へ移行して湿潤前線が順次基盤面に到達し飽和域を形成することを実験と解析により明らかにした<sup>19)</sup>。また、降雨終了後における飽和域は、図 43 に示すように、いずれの場合においても基盤面上に形成されるとしている<sup>19)</sup>。

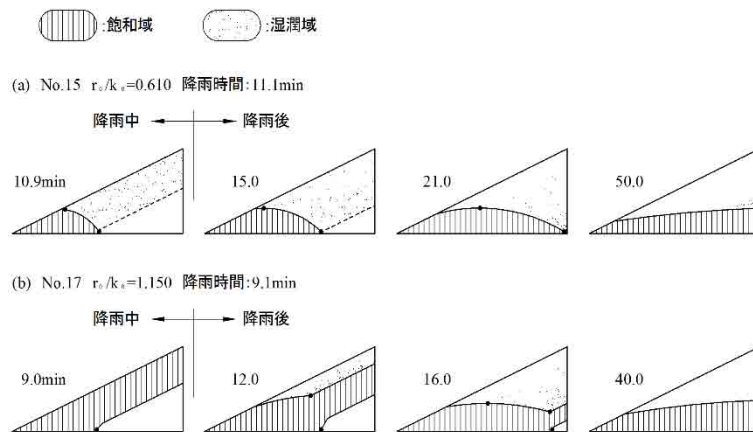


図 43 降雨による盛土の浸透<sup>19)</sup>

図 44 は、試験盛土の降雨浸透状況を調べるため、後述する盛土内の圧力水頭が最大となる 2014/7/21 を選定し、等ポテンシャル線と流向および飽和域の形成を整理したものである。図中飽和域は、圧力水頭値 0 を浸潤面と考え、 $\psi > 0$  を飽和域、 $\psi < 0$  を不飽和域としている。図より、何れの盛土においても盛土内の降雨の浸透は鉛直浸透が卓越し、木村が指摘しているような飽和域が基盤面に形成されている。また、TD と TC、TR と TS は、流向、浸透域、飽和域の形成状況において比較的類似した傾向にあるのに対し、TP 盛土はドレーン流下する浸透範囲が狭くなり底面に形成される飽和域も小さく他の 4 つの盛土と比べて若干異なった流況を示している。これは、TP の透水係数は他の盛土に比べて 2 オーダー程度大きく盛土内での降雨の浸透速度が速くなり、また湿潤域を形成するのに必要な水分量がいち早く盛土内部へ供給されるが、同時にドレーンやのり先からの排水も早く生じることが影響しているものと考えられる。

図 45 は、TD、TR、TP の浸透量および圧力水頭の経時変化を日降雨量、累積降雨量と対比して整理したものである。累積採水量（実測値）と累積浸透量（解析値）関係は、図 45 において実測値を●印、解析値を実線で示している。両者の数値は同じオーダーであることから、復興資材を用いた盛土の浸透特性を実務的な手法により一般土の特性を用いて評価することは、信頼性と妥当性を十分に有し、実務に活用できる方法であるものと考えられる。また、図 44 に示した流向からドレーンに流入する浸透範囲は、天端部 (2.8

m、3.4 m) とのり部 (1.5 m) の水平長さにドレーン幅を乗じた面積 (集水面積) を考え、これに降雨量を乗じることで盛土に流入した水量とみなし、盛土に浸み込んだ水量 (採水量、浸透量) から蒸発散量を無視した見かけの浸透能を両者の比として定義すると、この浸透能は数%オーダーであり、復興資材は降雨が浸み込み難い材料であるといえる。図 45 に示した盛土の圧力水頭の変動に着目すると、TP の圧力水頭は、TD、TR の圧力水頭の経時変化に比べ昇降が激しいことがわかる。これは前述したように、TP の透水係数は他の盛土に比べて 2 オーダー大きく盛土内での降雨の浸透速度が速くなり、また湿潤域を形成するのに必要な水分量がいち早く盛土内部へ供給されるが、同時にドレーンやのり先からの排水も早く生じることが影響しているものと考えられる。このことは、累積浸透量の履歴においてもみられ、TD、TR の浸透量は比較的なだらかに推移しているのに対し、TP の浸透量は降雨強度に鋭敏に反応して階段状を呈した浸透流出を呈していることから理解される。さらに透水係数の差は、TR の圧力水頭の変動が TD に比べ大きいことや、基盤の A~D の圧力水頭が正值となり、基盤との境界に飽和域を形成し始める時期は、TR の 2 ヶ月 (2014/1/1 頃) であるのに対し、TD は 3.5 ヶ月 (2014/2/15 頃) 要していることにも表れている。TD の A~E の圧力水頭は、2014/2 中旬以降、負値をとることなく推移しており、この領域は恒常的に保水された状態にあるものと考えられる。ただし、水頭値は 0.2 m 以下であり、この種の盛土において採水を目的として基盤から約 0.2 m 上部の位置に水平方向の水抜き孔を設置しても浸透水を得ることはできないことを意味し、a~f の基盤 0.2 m 直上の圧力水頭が正值を取る期間が極めて短期間であることから理解される。



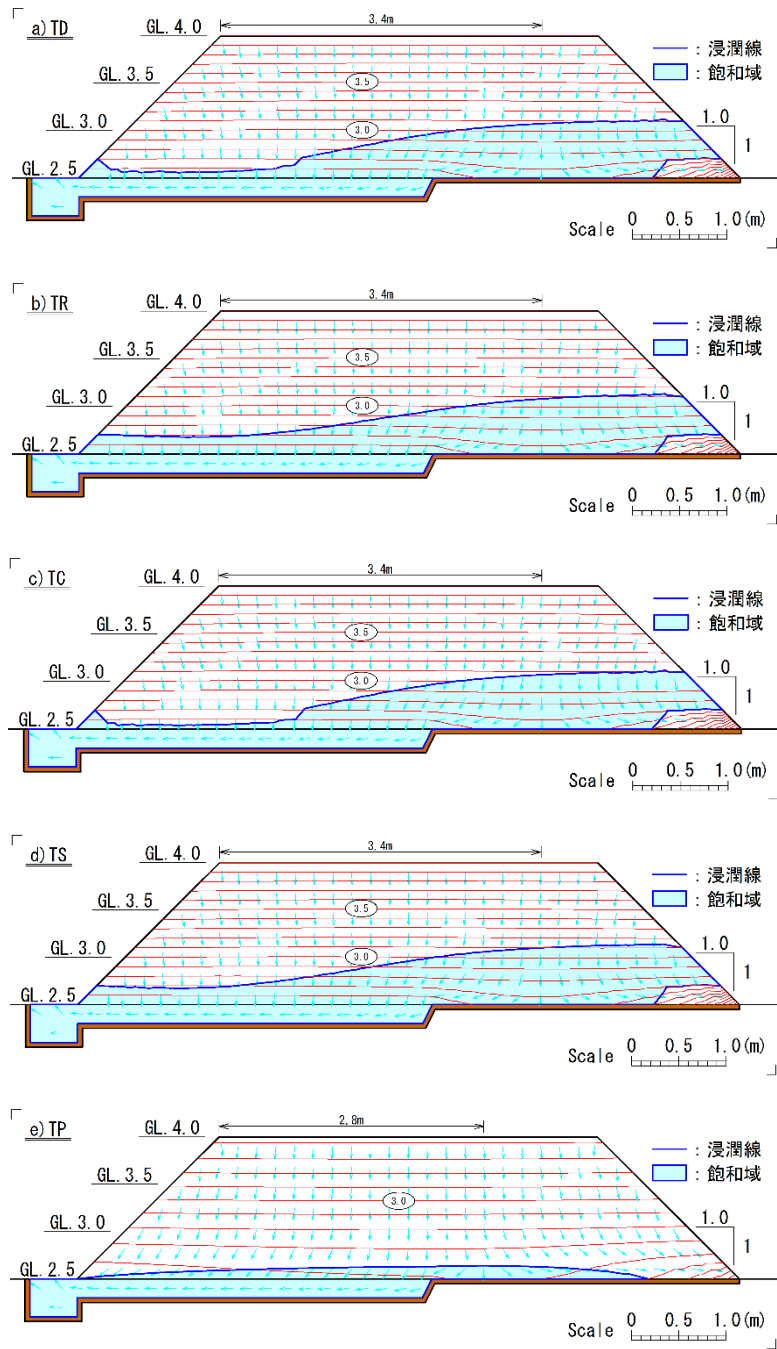


図 44 降雨浸透状況 (2014/7/21)

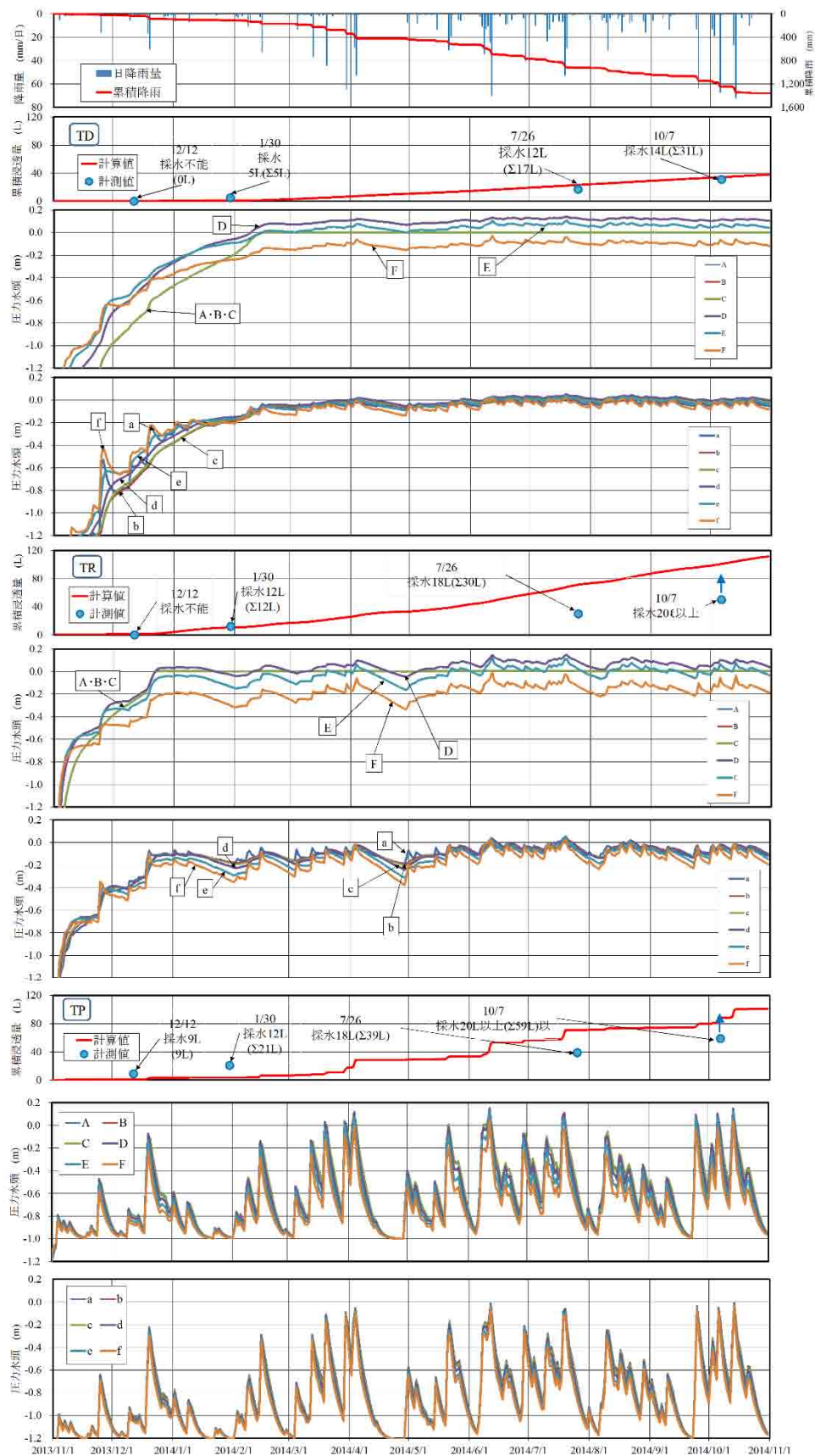


図 45 日降雨量・累積降雨量と浸透量・圧力水頭の推移 (TD、TR、TP)

## b 災害廃棄物仮置き場での環境影響評価

土壌汚染対策法に基づく第二種特定有害物質の測定結果を表 19 に示す。測定の結果、カドミウム、六価クロム、セレン、ヒ素はいずれの地点においても検出限界以下となった。溶出試験の結果から分かる通り、全ての試料からふっ素が検出されたが、当地区は津波が通過した箇所であることから海水や海底底質由来と考えられる。海水には通常 1.3 ppm 程度<sup>20), 21)</sup>のふっ素が含まれているが、それと比較するといずれも海水濃度未満であり濃度は低い。ほう素についても全ての試料から検出されたが、いずれも基準値以下であった。含有試験の結果、全試料から鉛、ふっ素、ほう素が検出されたが、いずれも基準値未満であった。No.2 のみでシアンが検出されたが、これも基準値未満であった。これらのことから、当該地区においては第二種有害物質による土壌地下水汚染の可能性は低く、汚染対策の必要性はないと判断できる。

表 19 第二種特定有害物質の分析結果

	基準値	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	
溶出量試験	カドミウム及びその化合物 (mg/L)	0.01以下	0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.001未満	
	六価クロム化合物 (mg/L)	0.05以下	0.005未満	0.005未満	0.005未満	0.005未満	0.005未満	0.005未満	0.005未満	
	シアン化合物 (mg/L)	検出されないこと	未検出	未検出	未検出	未検出	未検出	未検出	未検出	
	水銀及びその化合物 (mg/L)	0.0005以下	-	-	-	-	-	-	-	
	セレン及びその化合物 (mg/L)	0.01以下	0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.001未満	
	鉛及びその化合物 (mg/L)	0.01以下	0.001未満	0.001未満	0.002	0.003	0.001未満	0.001未満	0.001	0.001未満
	砒素及びその化合物 (mg/L)	0.01以下	0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.001未満	0.001未満
	ふっ素及びその化合物 (mg/L)	0.8以下	0.67	0.55	0.65	0.39	0.56	0.85	0.59	0.67
	ほう素及びその化合物 (mg/L)	1以下	0.03	0.05	0.08	0.04	0.09	0.09	0.04	0.04
含有量試験	カドミウム及びその化合物 (mg/kg)	150以下	15未満	15未満	15未満	15未満	15未満	15未満	15未満	
	六価クロム化合物 (mg/kg)	250以下	25未満	25未満	25未満	25未満	25未満	25未満	25未満	
	シアン化合物 (mg/kg)	50以下	5未満	1.38	5未満	5未満	5未満	5未満	5未満	
	水銀及びその化合物 (mg/kg)	15以下	-	-	-	-	-	-	-	
	セレン及びその化合物 (mg/kg)	150以下	15未満	15未満	15未満	15未満	15未満	15未満	15未満	
	鉛及びその化合物 (mg/kg)	150以下	4.8	6.4	8.1	115.3	7.5	2.1	3.5	4.2
	砒素及びその化合物 (mg/kg)	150以下	15未満	15未満	15未満	15未満	15未満	15未満	15未満	15未満
	ふっ素及びその化合物 (mg/kg)	4000以下	96.9	101.5	86.1	92.8	100.2	104.0	144.8	101.9
	ほう素及びその化合物 (mg/kg)	4000以下	6.1	6.7	5.8	5.8	25.9	4.5	3.2	3.4

### (2) 分別土砂の品質決定要因の解明と合理的な処理スキームの確立 (テーマ 2)

#### 1) 災害廃棄物処理のシステムと分別土砂の品質の関連性の評価

品質判定証に記載のデータを解析し、ヒストグラムを用いて各特性を地区ごとに比較するとともに、表 20 に示すとおり平均値と標準偏差を評価した。いずれの図も、地図上で北から南に向かうよう、久慈、宮古、山田、大槌、釜石、大船渡、陸前高田の順に示している。なお検体数が地区毎に異なるため、ヒストグラムの縦軸の範囲は地区ごとに異なる。

表 20 各特性の平均と標準偏差（上段：平均値，下段：標準偏差）

地区名	土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	細粒分含 有率 (%)	コーン指数 (kN/m <sup>2</sup> )	強熱減量 (%)	pH (-)	電気伝導 率 (mS/m)	塩化物含有 量 (mg/g)
久慈	A種 2.598 ±0.060	28.8 ±8.2	3572 ±3318	5.7 ±1.8	7.6 ±0.7	30 ±14	0.26 ±0.43
	B種 2.605 ±0.110	26.2 ±2.6	4163 ±2324	8.0 ±0.7	7.5 ±0.2	182 ±40	1.17 ±0.94
宮古	A種 2.672 ±0.028	24.0 ±8.1	3934 ±3763	4.4 ±1.3	7.8 ±0.4	88 ±50	0.54 ±0.56
	B種 2.636 ±0.049	17.7 ±12.5	9037 ±5709	6.6 ±3.5	8.7 ±1.5	64 ±41	0.20 ±0.21
山田	A種 2.653 ±0.044	24.6 ±5.5	4795 ±3462	4.9 ±1.1	7.8 ±0.4	103 ±25	0.16 ±0.10
	B種 2.610 ±0.044	25.0 ±6.1	5306 ±7536	8.7 ±2.2	8.1 ±1.4	119 ±37	0.44 ±0.25
大槌	A種 2.691 ±0.015	27.5 ±7.0	4965 ±2923	5.7 ±0.8	7.7 ±0.2	118 ±33	0.70 ±0.92
	B種 2.664 ±0.019	27.5 ±6.9	4564 ±2263	8.1 ±2.0	7.8 ±0.2	120 ±41	0.29 ±0.18
釜石	A種 3.028 ±0.059	24.4 ±2.2	7973 ±2194	4.0 ±0.6	12.2 ±0.7	197 ±103	0.15 ±0.07
	B種 2.954 ±0.143	26.2 ±3.9	4808 ±1852	3.9 ±0.6	12.2 ±1.7	274 ±111	0.10 ±0.04
大船渡	A種 2.641 ±0.003	22.9 ±1.9	4598 ±974	10.0 ±0.0	7.6 0.0	165 ±7	5.1 0.0
	B種 2.701 ±0.022	14.6 ±5.6	10975 ±4453	11.3 ±4.0	11.1 ±0.7	69 ±27	0.29 ±0.11
陸前高田	A種 2.707 ±0.023	35.5 ±10.3	2117 ±1770	6.4 ±1.4	7.9 ±0.4	51 ±46	0.36 ±0.91

土粒子密度のヒストグラムを図 46 に示す。添加材による改質を行っていない久慈、宮古、山田、大槌、陸前高田地区では、粒子密度は約 2.60～2.71 g/cm<sup>3</sup> の平均値を有しており一般的な土質材料と同程度の値であることが分かる。北から南に向かうほど最頻値や平均値が若干大きくなる傾向にあるが、表 20 のとおり強熱減量の値に明確な差異がなく、木片の粒子密度による影響は同程度であることを考慮すると、分別土砂に含まれる海底由来の土砂そのものの特性が地域によって異なることが示唆される。処理物の種類で比較すると、分別土 A 種の方が、残存する木片が多い分別土 B 種や土砂混合くず、ふるい下くずより高い値

を示している。鉄鋼スラグを混合して改質を行った釜石地区では、 $2.90\sim 3.20\text{ g/cm}^3$  の高い値を示した。鉄鋼スラグの粒子密度が  $3.3\sim 3.6\text{ g/cm}^3$  であり、処理物に対して質量比で約 40%添加していたことを考慮すれば妥当な値である。

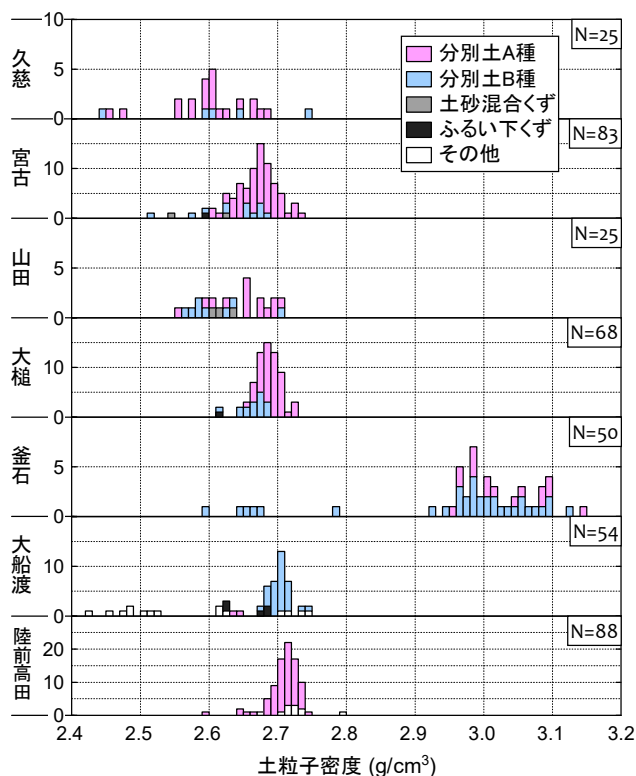


図 46 土粒子密度の地区別ヒストグラム

細粒分含有率のヒストグラムを図 47 に示す。一般的な処理が行われた久慈、宮古、山田、大槌の 4 地区の細粒分含有率は、分別土砂の種類に関わらず 35%未満の範囲に分布しており、粗粒分が相対的に多いものの、処理後も細粒分がある程度残存していることが分かる。大船渡地区の処理物是他地区と比べ低い細粒分含有率を示しているが、これは混合したコンクリートがらに含まれる細粒分が少ないためである。細粒分含有率が 90%を越える試料が存在しているが、これらは湿式サイクロンによって分級された粘土分である。表 20 に示すとおり、釜石地区と大船渡地区では細粒分含有率の標準偏差が小さく、ばらつきが小さい。陸前高田地区では農地利用を目的として任意の割合で粘土分と砂分を混合調整したため、他地区と異なり 10~60%の広い範囲に値が分布しており、平均値は最も高い。

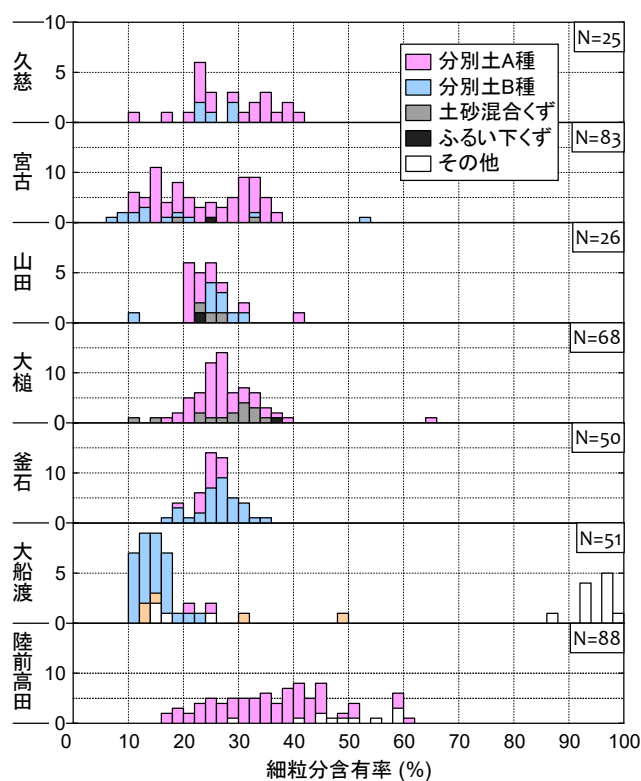


図 47 細粒分含有率の地区別ヒストグラム

図 48 は JGS 0051-2009 に準拠した工学的分類（中分類）を示したものであるが、いずれの地区においても多くの試料が細粒分まじり砂{SF}に区分されることが分かる。陸前高田地区の細粒分含有率は相対的に高いものの、一部の試料を除き 50%未満であるため他地区と同様に細粒分まじり砂{SF}に区分された。粗大なコンクリートがらを混合した大船渡地区の処理物は{GS}や{GF}などの礫質土に分類されるものの、多くは砂質土に分類されることが分かる。

コーン指数のヒストグラムを図 49 に示す。表 20 のとおりいずれの地区においても、木片の混入が少ない分別土 A 種に比べ分別土 B 種の方が高いコーン指数を示した。このことから、混在する木片が補強材のように作用し、強度の増大に寄与したと考えられる。一般的な処理を行った 4 地区と釜石地区の分別土は同程度のコーン指数を有しており、鉄鋼スラグの混合による強度増加は小さい。一方、大船渡地区の分別土 B 種のコーン指数は他地区よりも高く、コンクリートがらの添加が強度増加に寄与したと考えられる。陸前高田地区では農地利用が処理目的のためコーン指数は相対的に低い範囲に分布している。分別土砂の種類に関わらず、395/397 検体の試料が発生土利用基準<sup>10),11)</sup>に基づく第 4 種建設発生土相当の 200 kN/m<sup>2</sup>以上のコーン指数を有しており、そのうち 337 検体が第 2 種建設発生土相当の 800 kN/m<sup>2</sup>を満足した。

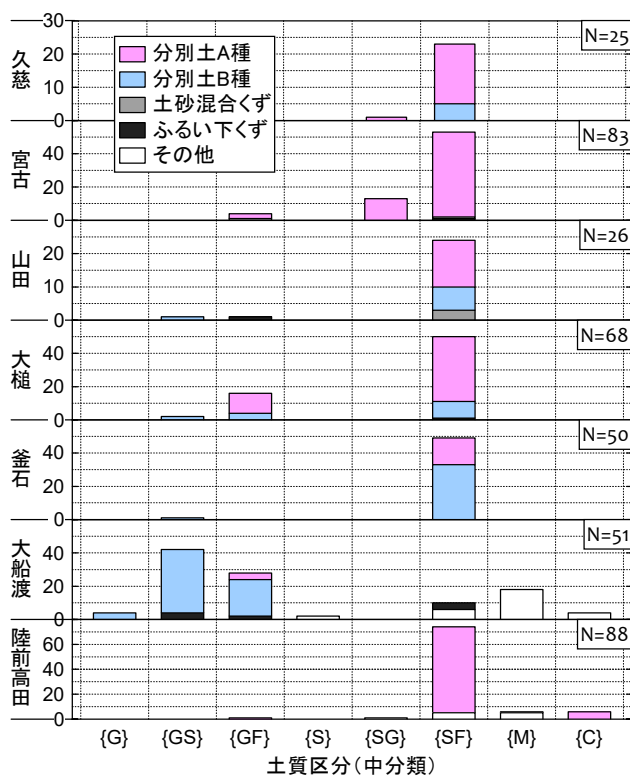


図 48 工学的分類（中分類）の地区別ヒストグラム

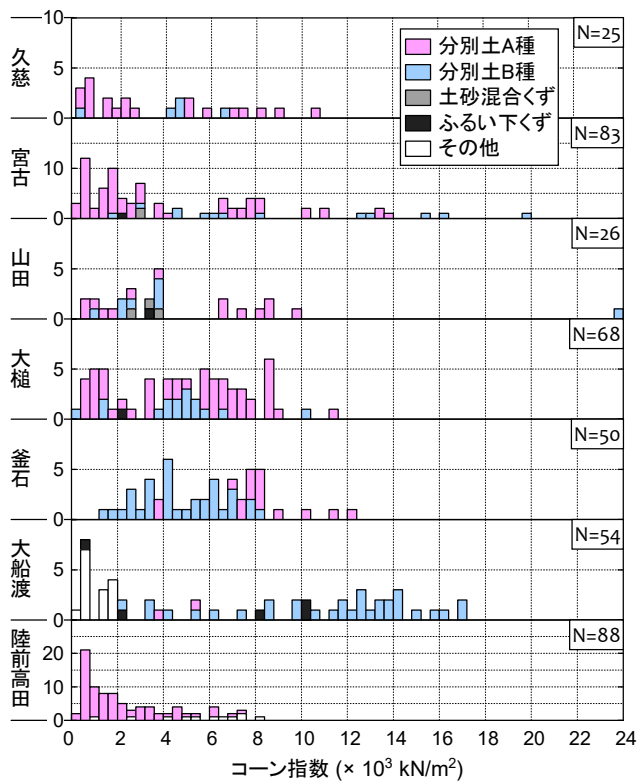


図 49 コーン指数の地区別ヒストグラム

上記の発生土利用基準<sup>10)</sup>に基づき工学的分類とコーン指数から分別土砂を区分すると、図 50 に示すとおり分別土 A 種では 6.5%が、分別土 B 種では 38.0%が、それぞれ第 1 種建設発生土に相当する。第 1 種建設発生土相当の分別土 B 種 41 検体のうち大船渡地区の試料が 32 検体を占めることから、コンクリートからの混合により強度が増大し、前述の適用範囲の拡大につながったと考えられる。同様に分別土 A 種の 77.6%、分別土 B 種の 59.3%が第 2 種建設発生土相当であり、泥土に区分される試料は無く、貫入抵抗と粒度の観点からは分別土砂は高い品質を有しており地盤材料として利用可能と判断できる。

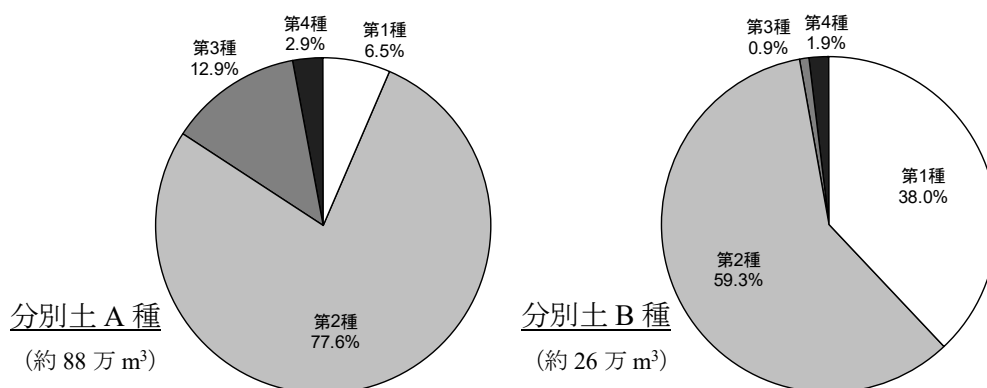


図 50 発生土利用基準に基づく分別土 A 種と B 種の区分

塑性指数が NP (非塑性) であった地区別の試料数を表 21 に示す。一般的な処理を行った 4 地区の中でも久慈地区は NP の検体数が少なく、相対的に高い値を示した。表に示すとおり、釜石地区は添加した鉄鋼スラグの影響により多くの試料が NP であり、値が得られた試料についても平均で  $I_p = 3.5$  の小さい値を示した。大船渡地区で高い値を示したものは湿式サイクロンにより得られた粘土分であり、湿式処理を施した後も高い保水力を有していることが分かる。陸前高田地区の分別土砂も混合調整した粘土分の影響により、塑性指数は相対的に大きい。先述のとおり 2012 年 9 月に採取した土砂混合くずとふるい下くずの液・塑性限界は、採取場所に関わらず多くの試料で NP であったが、処理期間全体を通して同様の傾向を示すことが分かる。分別土 A 種と B 種で NP を示した試料は全体で 49%であるが、釜石地区と大船渡地区における NP 試料の割合がそれぞれ 90%、85%であることから、粗粒分の添加が試料のコンシステンシーや保水力に大きく影響したことが分かる。分別土 A 種と比較し分別土 B 種の方が NP を示す比率が高いが、木くずの混入量が増えることで相対的に土砂分の割合が低くなったためであると考えられる。



表 21 塑性指数が NP の検体数

地区名	分別土 A 種	分別土 B 種	土砂混 合くず	ふるい 下くず	その他
久慈	2/20	0/5			
宮古	32/67	7/13	2/2	1/1	
山田	12/15	2/8	3/3	1/1	
大槌	11/51	3/16		0/1	
釜石	16/16	29/34			
大船渡	2/2	27/32		3/5	4/15
陸前高田	33/77				0/11
計	108/248	68/108	5/5	5/8	4/26

注) NP 検体数/対象試料数

図 51 に強熱減量のヒストグラムを示す。一般的な処理を行った 4 地区では、分別土 A 種より分別土 B 種が高い値を示しており、分別土 A 種は 4.4~5.7%、分別土 B 種は 6.6~8.7%の平均値を有していた。大船渡地区では、分別土 B 種のみでも標準偏差は 4.0%と他地区より大きく、広範囲に値が分布している。これは分別土砂に含まれる木片等の有機物だけでなく、全粒径を燃焼に供したためコンクリートがらに含まれるセメント水和物の分解が影響したためである。15.0%以上の高い値を示したものは湿式分級で得られた粘土分であり、海底由来の有機物や鉱物に含まれる結晶水に加え含水比調整のために添加された生石灰由来の水和水が影響したと考えられる。鉄鋼スラグを添加した釜石地区では、表 20 に示すとおり他地区より小さい値を示し、かつ標準偏差も小さい。これは鉄鋼スラグの強熱減量が極めて小さく、かつ粒子密度が大きいために、燃焼分の相対量が小さく評価されるためである。このように処理物の強熱減量は添加材の影響を大きく受けることが分かる。強熱減量は分別土砂の利用判断基準にも挙げられているものの、基準値は明確に設定されておらず、目的に応じた品質管理基準を今後確立する必要がある。

pH のヒストグラムを図 52 に示す。釜石地区と大船渡地区を除く地区では pH = 8 前後の中性~弱アルカリ域に概ね分布している。釜石地区と大船渡地区では、鉄鋼スラグあるいはコンクリートがらに含まれる酸化カルシウム等と水の反応により生成される水酸化物イオンの影響を受け、pH = 10~14 の高い値を示した。セメント系改良材による地盤改良は一般的に広く採用されており、さらに経験的にも時間経過とともに周辺地盤と同程度の pH に戻ることが知られており、岩手県マニュアルでも地盤改良や安定化処理等の品質改善対策により利用が可能になる場合 pH の上限値 (pH=9) は適用しないことが記されている。ただし、海域あるいは公共用水域に隣接する箇所で使用する場合には、地盤材料からの溶出水が流出しないよう対策を検討する必要がある。

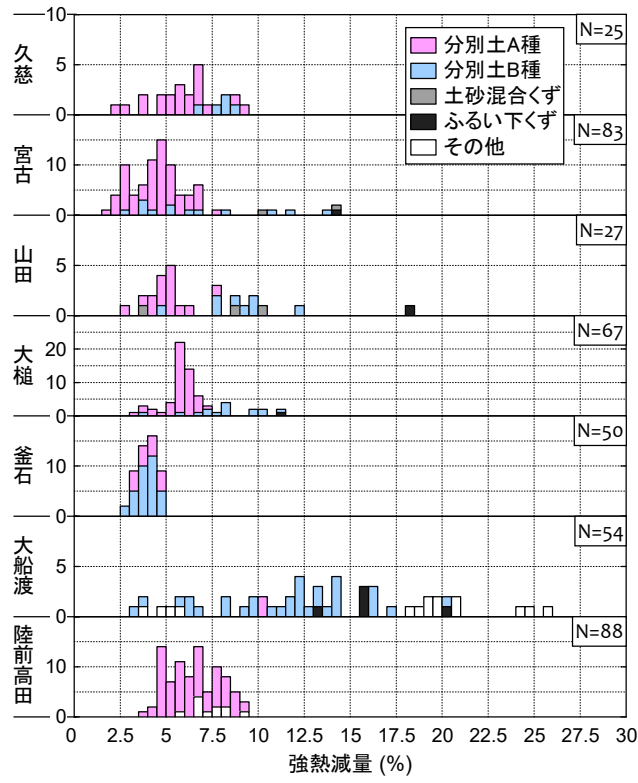


図 51 強熱減量の地区別ヒストグラム

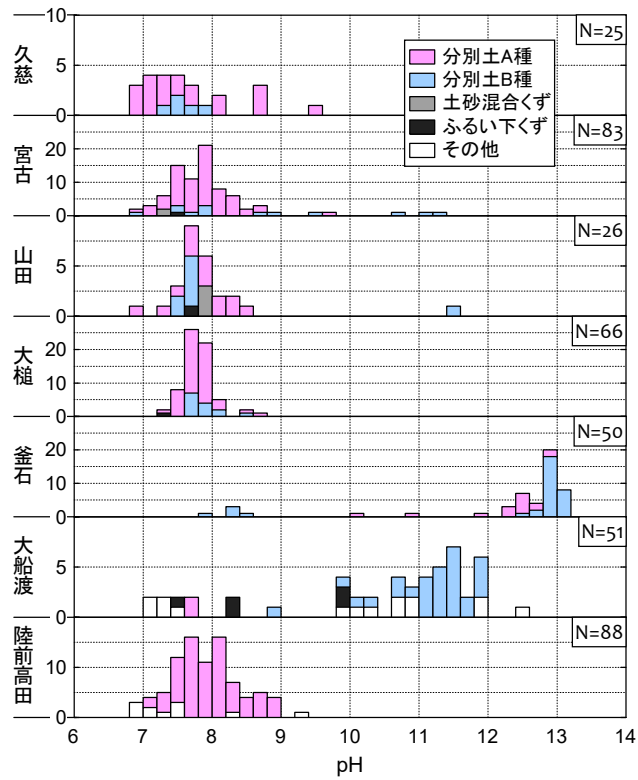


図 52 pH の地区別ヒストグラム

塩化物含有量の分布を図 53 に示す。塩化物含有量の要求品質である 1.0 mg/g を超過した試料は全体で 35/405 検体であり、グラフ表示外では大槌地区で 6.6 mg/g が 1 検体、大船渡地区で 5.1 mg/g の 2 検体、陸前高田地区で 7.4 mg/g の 1 検体（計 4 検体、全て分別土 A 種）がそれぞれ存在した。種類別には分別土 A 種の超過率が最も高く、13.8%と処理を経ても海水由来の塩分が残存していたことが伺える。地区別では、久慈地区で 3 検体（A 種 2 検体、B 種 1 検体）、宮古地区で 16 検体（A 種 14 検体、土砂混合くず 2 検体）、山田地区で 1 検体（ふるい下くず）、大槌地区で 5 検体（A 種 4 検体、ふるい下くず 1 検体）、大船渡地区で 3 検体（A 種 2 検体、ふるい下くず 1 検体）、陸前高田地区で 6 検体（A 種）であった。釜石地区の塩化物含有量は、他地区と比べ平均値、ばらつきともに小さいが、これは強熱減量と同様に鉄鋼スラグそのものの塩化物含有量が低く、粒子密度が大きいためと考えられる。塩化物含有量の要求品質は、鋼材の腐食を防止するための基準であるが、被災地沿岸部を含めた海岸近傍の地域では従来から塩化物含有量が高かったと考えられる。そのため、岩手県マニュアルでも海岸近くでの活用、埋設物や植生を伴わない場所での活用が明確な場合にはこの規定を適用しないことが記載されており、鋼材を利用せざるを得ない場合には、防食技術を併用して分別土砂の利活用に努めることが必要である。

電気伝導率の分布を図 54 に示す。電気伝導率は懸濁液中の電解質濃度の指標であるため、地区に関わらず要求品質の 200 mS/m を概ね満足していること、久慈地区、陸前高田地区は他地区と比べ低い値を示していることなど塩化物含有量と同様の傾向が釜石地区を除いて確認される。釜石地区では、塩化物含有量が相対的に低いにも関わらず高い電気伝導率を示した。これは鉄鋼スラグが水と反応し、主要な構成要素である酸化カルシウムや酸化マグネシウムが溶解したためであると考えられ、高 pH を示した結果とも整合が取れる。

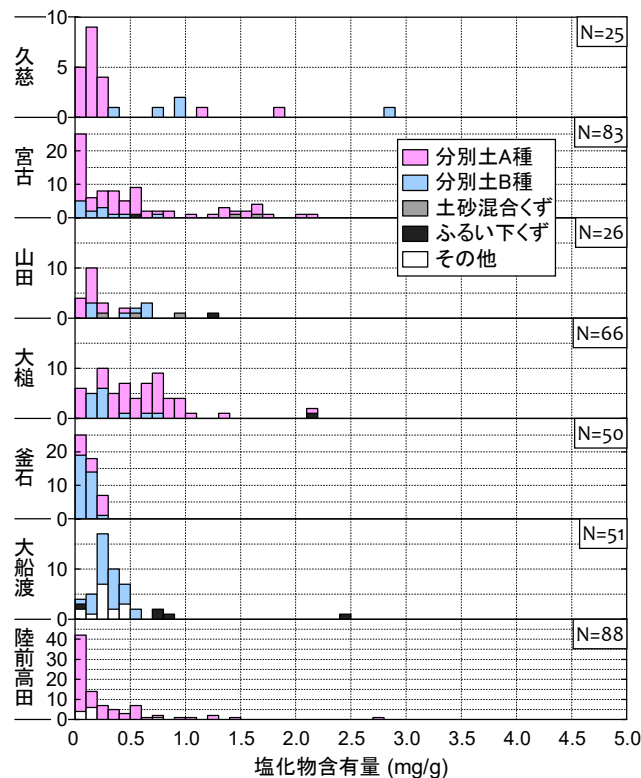


図 53 塩化物含有量の地区別ヒストグラム

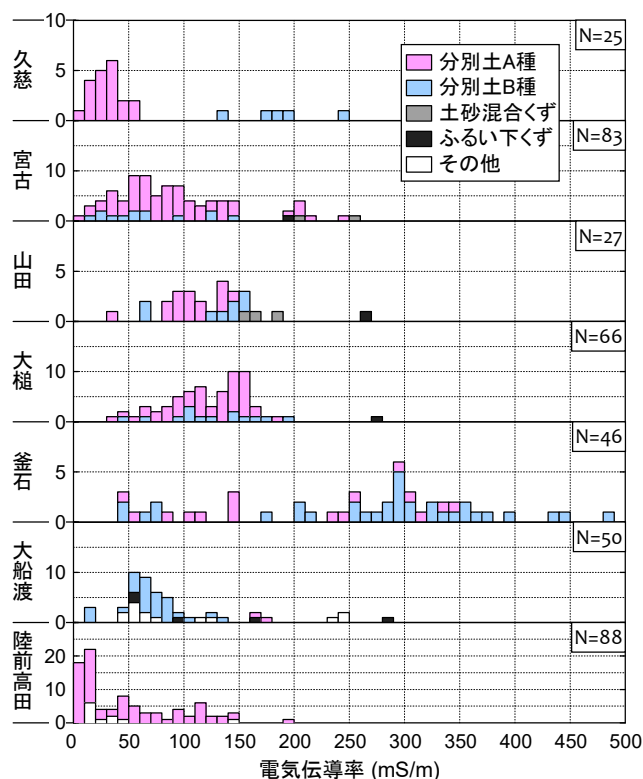


図 54 電気伝導率の地区別ヒストグラム

次に、分別土 A 種と B 種に着目し、各特性の経時変化を調べた。一般的な処理を行った 4 地区の特性について傾向を評価するため、単純回帰分析を行った。図中に示す赤線と青線が、それぞれ分別土 A 種、分別土 B 種の回帰直線を表している。

物理特性の経時変化を図 55 に示す。宮古地区の分別土 A 種、大船渡地区の分別土 B 種は 2012 年度初旬からデータが存在するが、他地区では 2013 年度に集中して分別土砂が排出、分析されたことが分かる。土粒子密度は、前述のとおり釜石地区の分別土が  $3.0 \text{ g/cm}^3$  程度の高い値を示している。回帰分析結果から、一般的な処理を行った 4 地区では、漸減傾向を示していたことが伺える。分別土 A 種の変化量は小さいものの、分別土 B 種の土粒子密度は約 1.5 年で約  $0.1 \text{ g/cm}^3$  低下している。細粒分含有率は、大船渡地区の分別土 B 種が期間を通して相対的に低く、陸前高田地区の分別土 A 種は処理後半になるほど高い値を示していたことが分かる。全体としては、一見すると期間後半になるほど細粒分含有率が高くなっているように見えるが、回帰分析結果から時間の経過とともに細粒分含有率は低下していることが分かる。特に分別土 A 種は処理期間の前半と後半で細粒分含有率は約 11% 低くなっていた。コーン指数は、大船渡地区の分別土 B 種はコンクリートがらを混合しているため初期から高い値を示している。一般的な処理の 4 地区では、時間の経過とともに僅かに値が低下しているが、期間を通してばらつきが大きく相関は低い。塑性指数については、明確な傾向は見られなかった。

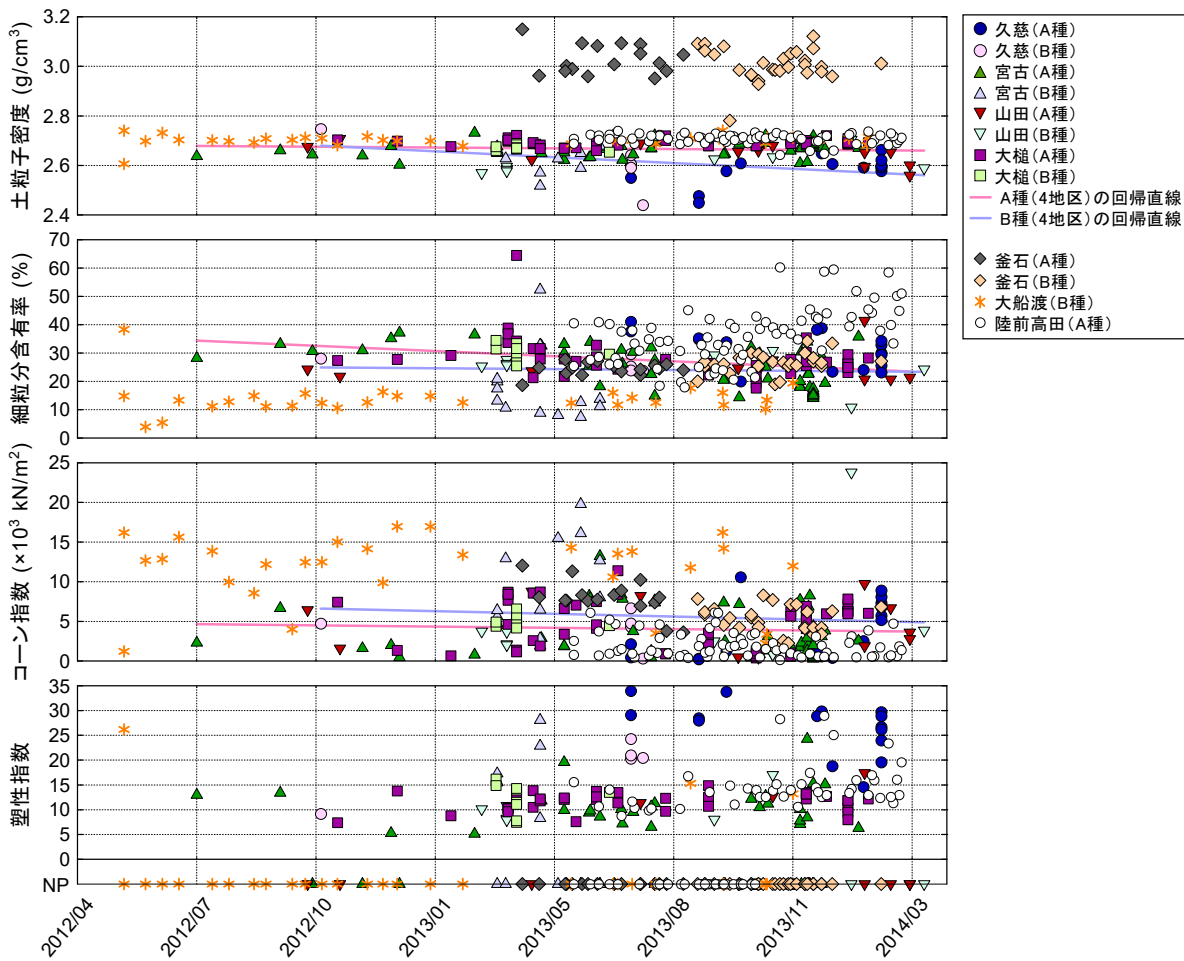


図 55 分別土 A 種と B 種の物理特性の経時変化

化学特性の経時変化を図 56 に示す。大船渡地区の分別土 B 種の強熱減量は混合したコンクリートがらの影響により期間を通して相対的に高いが、2012 年度後半に 15%を超える値まで増加し、その後低下する傾向にある。陸前高田地区の細粒分含有率は時間の経過とともに漸増傾向を示したが、細粒分に含まれる吸着水の量も増えるため強熱減量も増加傾向を示したと考えられる。一般的な処理の 4 地区では、期間を通してほぼ同等の強熱減量を示しており大きな変動は見られない。細粒分含有率は経時的に低下しており、細粒分由来の吸着水が時間とともに減少した可能性を考慮すれば、木くず由来の有機物量が経時変化に対して比例的に増加していた可能性も示唆されるが、有機炭素量等のデータが無いため確定的に判断することは難しい。大船渡地区の高い強熱減量は、混合したコンクリートがらに由来すると考えられるが、含有される酸化カルシウムは pH にも同様に影響を与える。このことを考慮すると、大船渡地区の分別土 B 種で、強熱減量と pH が同様の経時的な変動傾向を示したことは整合性がある。釜石地区の分別土の pH は漸増傾向を示しているが回帰分析の結果から、一般的な処理の 4 地区の pH は期間を通してほぼ一定であり、時間との相関は低い。塩化物含有量に関しては、要求品質の 1.0 mg/g を超える試料は 2012 年度に相対的に多く、全体的に処理期間後半にかけて低下傾向にあることが伺える。同様の傾向は回帰分析結果からも分かる。釜石地区の処理物は鉄鋼スラグ由来のカチオンが溶脱し高い電気伝導率を示している。一般的な処理の 4

地区では、塩化物含有量と同様に漸減傾向を示している。

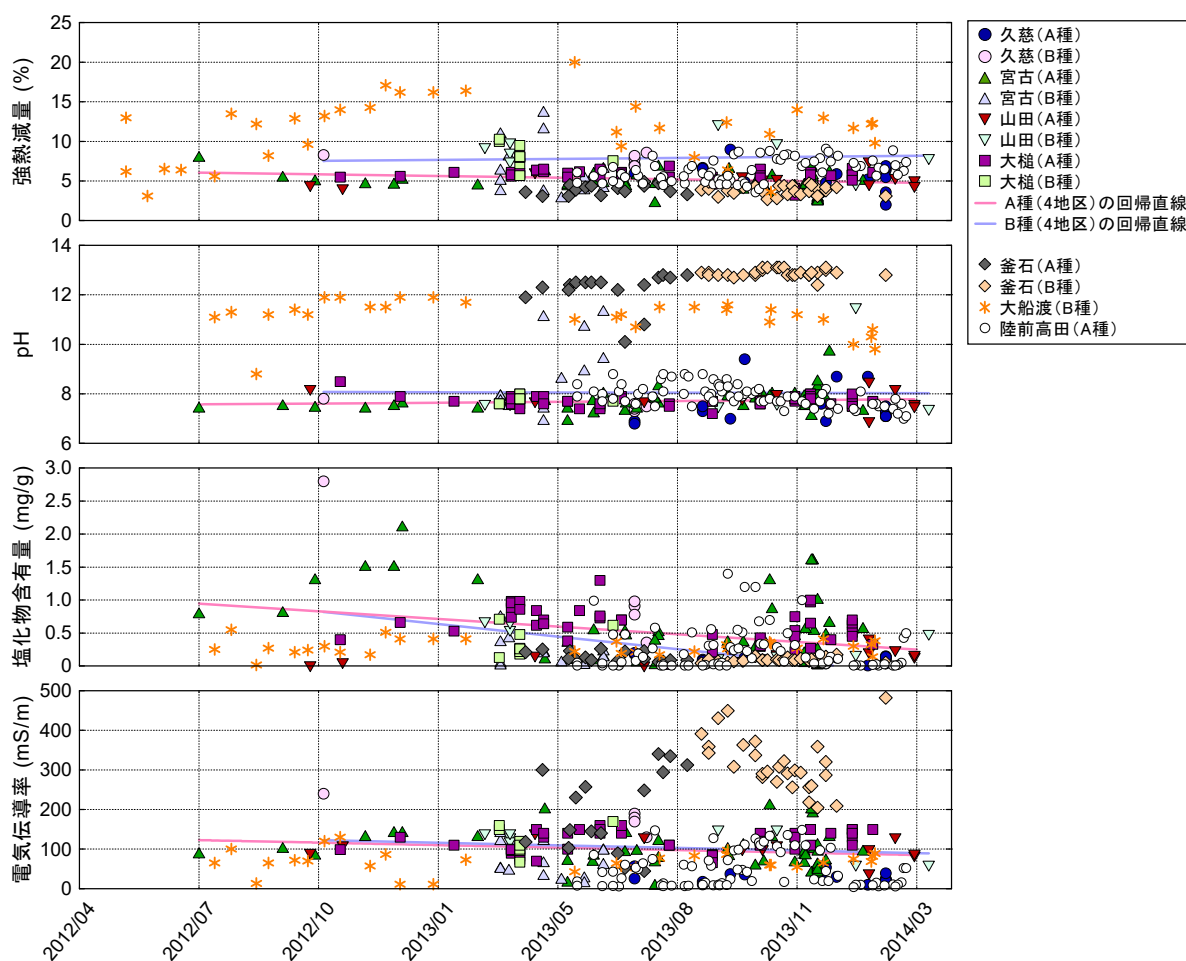


図 56 分別土 A 種と B 種の化学特性の経時変化

## 2) 災害廃棄物処理の進捗と処理物の生成量・品質に関する評価

図 57 に一次仮置場から搬出された廃棄物の時間推移を質量とレコード数で示す。レコード数は処理体積をあらわしていると考えることができ、処理前半では質量よりもレコード数でみた進捗率が高いことがわかる。例えば、2013 年 3 月末での進捗率は質量で 26.4%であるのに対し、レコード数では 44.5%と、約 1.7 倍に達している。つまりレコード数のみでは処理量の実態を評価することは難しく、実質的な処理実績を評価する際には、処理重量ベースと処理体積ベースの二つの指標を用いることが重要であることが示唆された。

図 58 は二次仮置場（可燃・不燃）からの処理生成物の質量割合を、3 つの期間に分けて示したもので、土砂・不燃系の処理物（不燃物、分別土、復興資材）が I 期で 58.5%、II 期で 88.3%、III 期で 93.6%と時間の経過とともに増加している。これは受入先に関わって初期に可燃物の処理を優先させたことや、一次仮置場での集積山において処理の進捗に伴い選別範囲が内部に移行すること（内部にかけて密度の高い土砂

類が多くなる) が影響していると考えられる。

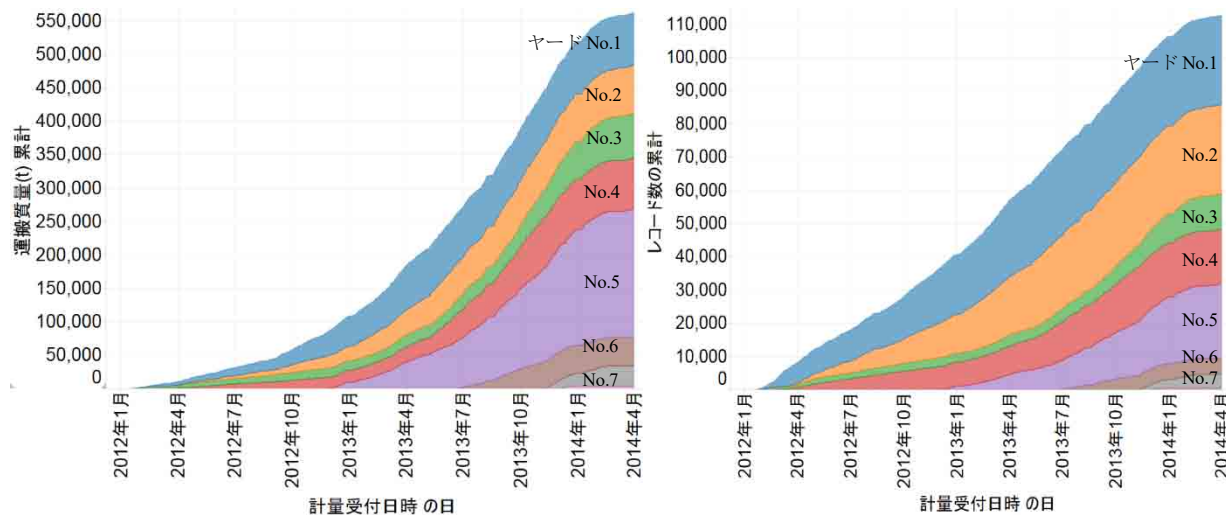


図 57 一次仮置場から搬出された災害廃棄物の質量とレコード数の累計

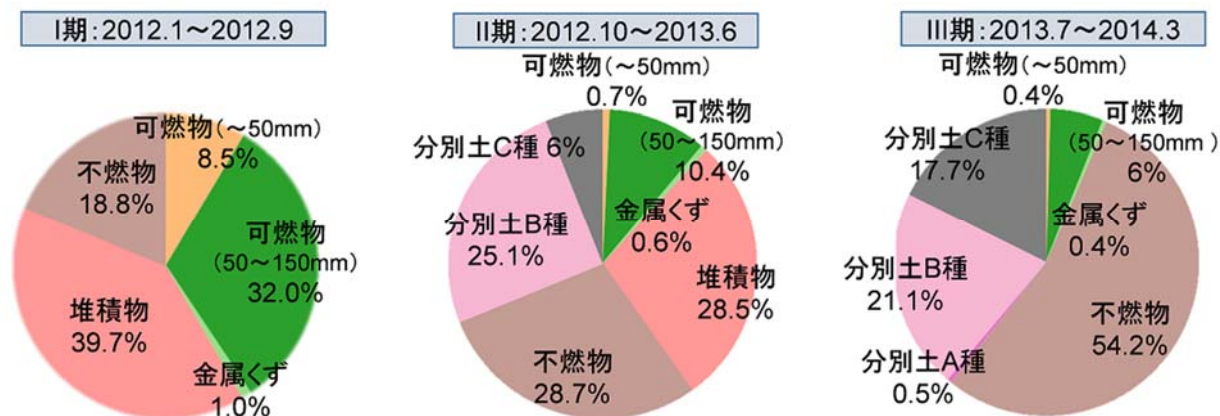


図 58 処理物の内訳の推移

二次仮置場 (可燃・不燃) での高度選別の前後の廃棄物の月ごとの質量割合を示したのが図 59 と図 60 である。それぞれ処理前と処理後の廃棄物の全質量に対する各画分の割合を示した。図 59 に示すように、高度選別前の「混合物 (40 mm 以下)」は、選別後の「不燃物」と「分別土 (B 種、C 種)」の合計と相関がみられた。また、高度選別前の「混合物 (150 mm 以上)」と選別後の「可燃物」についても、図 60 に示すように相関がみられた。処理前に粒径が小さいものが多い混合物は処理後には土砂等を多く含み、処理前に径が大きいものが多い混合物からは、処理後に可燃物を多く含むと考えられる。選別物として「土砂類」あるいは「可燃物」を増やすためには、それぞれ「寸法の小さい混合物」あるいは「寸法の大きい混合物」を優先して処理すればよいと考察できる。

二次仮置場（可燃・不燃）で処理された分別物の密度のばらつきを検討するため、可燃物、不燃物、分別土 B、C 種のそれぞれについて、ある程度の量をコンスタントに運搬しているトラックを含むトラックコード（同積載体積のトラックを管理する識別子）に着目し、トラック一台あたりの積載質量を日ごとにプロットしてその変動を考察した。図 61 は分別土 B 種の質量の時間変化を示したもので、上記の分別物の中では最も変動が小さく（平均値から $\pm 30\%$ 以内）、安定した品質の分別土 B 種が製造されていたと考えられる。また、密度は時間とともに若干増加しており、処理システムの改良等によって分別土の品質もより改良されたと言える。最もばらつきが大きかったのは可燃物を多く含む分別土 C 種で平均値から $\pm 50\%$ の変動があったが、これは密度の低い木くず等に密度の高い土砂が混じって密度が大幅に変化したと考えられる。可燃物および不燃物は、それぞれ平均値から $\pm 45\%$ および $\pm 35\%$ の変動があった。

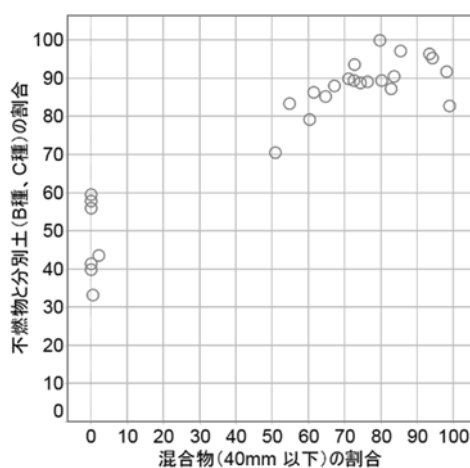


図 59 「混合物（40 mm 以下）」と「不燃物+分別土（B 種、C 種）」の割合

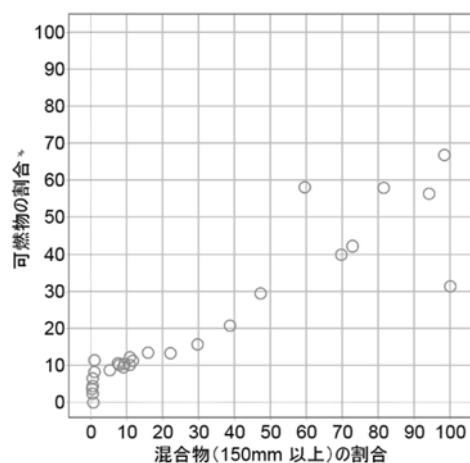


図 60 「混合物（150 mm 以上）」と「可燃物」の割合



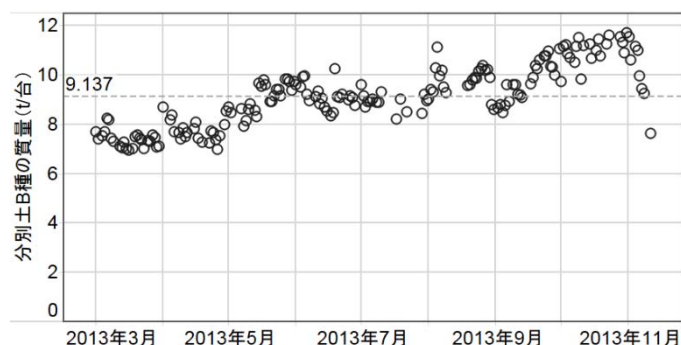


図 61 分別土 B 種の車両 1 台あたり積載質量の経時変化

### (3) 巨大災害時の災害廃棄物対応に関する方針の整備 (テーマ 3)

#### 1) 災害復興における資材利用の方向性

東日本大震災の被災地では復興に関わる多くの社会基盤整備事業が進められたが、相当量の土砂が必要との見込みがあった。そこでこの一部を賄うために、災害廃棄物や津波堆積物の混合物から再生された分別土砂を復興事業の資材すなわち復興資材として有効活用することが期待された。このような復興資材の有効活用は、最終処分される廃棄物の量や自然改変を伴い調達される土砂の量を減らせることから、環境負荷低減や社会便益等の観点においても、大震災からの復旧・復興における地盤工学の重要な貢献である。しかしながら、復興資材は新しい土木資材であるため、その一部は、土構造物としての性能確保や環境安全性の懸念などから有効活用が躊躇され、利用用途の確保が課題となった。

この課題の解決のため、**3 (3)** に記したように本推進費プロジェクトは地盤工学会復興資材提言委員会の活動に貢献し、まず、「災害からの復興における社会基盤整備への復興資材等の利用のあり方に関する提言」の策定に関わった。これは、特に災害廃棄物由来の復興資材の活用に関する地元行政との意見交換・情報共有、ならびに国立環境研究所が実施した復興資材等の需給バランス、利用に際しての環境負荷、フィージビリティスタディなどに関する業務に基づいて議論をし、完成させたもので、その全文を表 22 に示す。提言は、①「本提言の前提」、②「社会基盤整備への復興資材等の利用のあり方に関する基本方針」、③「基本方針の実現を目指すために必要な取り組み」の 3 部からなっている。①で建設リサイクルをはじめとする循環型社会構築に向けてこれまでの取り組みを継承することの必要性、分別土砂の特性の観点からみた東日本大震災の災害廃棄物処理の実情、復興における資材確保の必要性といった「前提」を示した上で、②基本方針として、(1) 強靱な社会基盤の整備、(2) 復興資材等の利用の推進、(3) 複数事業の総和としての最適化を目指す取り組み (図 62 参照)、の 3 点を掲げた。そして③基本方針の実現に向けて、(1) 復興資材等の利用を促進する枠組・制度の整備が必要なこと、(2) 強靱で環境安全な土構造物を構築するためにガイドラインの整備を行うこと、(3) より高次の「資材マネジメント」の実施が必要なこと、(4) 啓発活動と継承のための活動を行うこと、を提示した。なお、この内容を説明するための A4 版 16 ページからなる「解説」が、委員会によって同時に作成されている。

表 22 「災害からの復興における社会基盤整備への復興資材等の利用のあり方に関する提言」の全文

2014年3月28日

## 災害からの復興における社会基盤整備への復興資材等の利用のあり方に関する提言

**はじめに**

本提言は、(公社)地盤工学会「災害からの復興における災害廃棄物、建設副産物及び産業副産物の有効利用のあり方に関する提言検討委員会(以下、復興資材提言委員会)」において、岩手県、宮城県、福島県、復興庁、農林水産省、国土交通省、環境省ほか関係機関・団体からの情報提供、調査協力、助言等のもと、とりまとめたものである。

**本提言の前提**

- 我が国は循環型社会の構築に向け、廃棄物の発生抑制、廃棄物・副産物の有効利用の推進、最終処分量の低減に取り組んできた。社会基盤整備の分野においても「建設リサイクル」として、副産物の発生抑制・有効利用促進・処分量低減に取り組んできた。
- 2011年東北地方太平洋沖地震と大津波で大量に発生した災害廃棄物(津波堆積物を含む)の約3分の1(重量比)は、「土砂」である。関連する諸機関の様々な取り組みにより、これらの土砂は廃棄物と適切に分離・選別され、その多くは通常の土砂と同レベルの品質を有する「分別土砂」として再生されている。また、災害廃棄物の約3分の1(重量比)は「コンクリートガラ」であり、適切に処理することによって「再生砕石」等の資材とすることができる。
- 災害復興のための社会基盤整備事業では多量の資材を必要とする。その資材として新材を使うことは、土取り場開発による新たな自然改変などの環境影響をもたらすことにつながる。一方、災害廃棄物を処理して得られた分別土砂等の利用にあたっては、新たな取り組みとしての理解が必要である。
- 東日本大震災における災害廃棄物処理と復興資材利用の取り組みは世界的にも初めてのものであり、将来起こる災害においても参考とすべきものであることが求められる。

**社会基盤整備への復興資材等の利用のあり方に関する基本方針****(1) 強靱な社会基盤の整備**

東日本大震災からの復興に関して現在多くの社会基盤整備事業が実施されているが、これらの事業では、今後再び来るであろう災害への備えも考慮し、将来世代への負担を減らすためにも、安全で品質の良い強靱な社会基盤を残していく必要がある。

**(2) 復興資材等の利用の推進**

社会基盤整備事業そのものが環境負荷を生じうることに鑑み、可能な限り環境負荷を少なくする取り組みが求められる。そのために、「分別土砂」や「コンクリート再生砕石」などの災害廃棄物を処理した材料(復興過程から産み出された資材であることも踏まえ、これらを「復興資材」と呼ぶ)や、発生土や産業副産物などの循環資材を積極的に利用することが推奨される。また、資材の運搬等による環境負荷も考慮し、地産地消を進めることが推奨される。

**(3) 複数事業の総和としての最適化を目指す取り組み**

復興のための社会基盤整備事業は様々な事業主体により行われている。一方、復興資材の製造や発生土・副産物の発生も、異なる事業主体によって行われている。それぞれ個別の事業の最適化を目指すだけでなく、地域で行われている複数の事業の「総和としての最適化」を目指す取り組みが必要である。

**基本方針の実現を目指すために必要な取り組み****(1) 復興資材等の利用を促進する枠組・制度の整備**

- 復興事業を個別にみれば、必要な資材の調達で購入土で対応できれば、再生資材や副産物の活用は躊躇されるのは当然である。しかし、復興資材提言委員会が示すように、分別土砂などの再生資材や副産物を復興事業の材料として優先的に有効利用することは、処分場の容量消費の抑制や新材利用による環境負荷増大等の観点から重要である。そのため、例えば国土交通省が経済性には関わらず可能な範囲で積極的に再生資源の利用を促進するために「リサイクル原則化ルール」として直轄工事を対象に定めているように、「復興資材利用原則化ルール」を制定するなどの枠組みが必要である。
- 復興資材の活用にあたっては、経済支援も含めたストックヤードの整備や運搬費用の負担の問題などをクリアする必要がある。関連する諸機関が連携して制度の整備に取り組むことが求められる。

**(2) 強靱で環境安全な土構造物の構築**

- 災害廃棄物からの「分別土砂」は地域によって、そして処理の方式によって様々あることがわかっている。また、土砂の中には、自然由来の重金属等を含むものも存在することがある。これらのことに鑑み、地盤工学特性と環境安全性の観点に基づく利用用途に応じた合理的な品質基準に依拠して有効利用を推進する。復興資材等の品質管理のための基準や設計施工を行う上でのガイドラインやマニュアルの整備は重要である。

**(3) 高次な「資材マネジメント」の実施**

- 個々の事業のレベルではなく、地域全体のマテリアルバランスと環境負荷を考慮した資材の割当のためのマネジメントが求められる。これには行政・事業主体間の連携が重要で、ときには管轄・所掌を超えた取り組みも求められよう。必要があればそのための事業主体を立ち上げることも考えられる。
- この資材マネジメントが適切に行われているかを評価するための第三者機関の参画も有効と考えられる。

**(4) 啓発活動と継承**

- 復興資材の利用を促進するための啓発活動に取り組むことが必要である。具体的には、「分別土砂」の特性と有効利用可能性への正しい理解が普及されるよう努める。言葉の定義も重要で、「災害廃棄物」や「コンクリートくず」という呼び名は、これらの材料のそもそもの成り立ちと特性を考え資材としての有効利用を推し進めるにあたって望ましくなく、災害廃棄物から再生された復興資材の正しい理解のための取り組みを続ける必要がある。
- 将来の災害への備えも踏まえ、ここで提示する取り組みとそれにより産み出される知見を継承するための必要な情報を、国として記録を保存・活用し、未来に伝達する。



図 62 総和としての最適化

## 2) 災害廃棄物再生資材の利用のためのガイドライン

復興に向けた社会基盤整備事業では、環境負荷に配慮しながら安全で品質の良い強靱な社会基盤を残していく必要がある。一方、災害廃棄物等（津波堆積物を含む）から再生した復興資材は、地域によって、そして処理の方式によって様々であり、また、自然由来の重金属を含むものも存在する。このため、本推進費プロジェクトでは地盤工学会復興資材提言委員会に協力する形で、「復興資材等の品質管理のための基準や設計施工を行う上でのガイドラインやマニュアルの整備は重要である。」との考えに基づき、復興資材等の利用に関して、地盤工学特性と環境安全性の観点に基づく利用用途に応じた合理的な品質基準に依拠して有効利用を推進することを目的とし、品質管理や設計施工を行うためのガイドライン、すなわち「災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用ガイドライン」の整備に貢献した。本ガイドラインは、地盤材料として用いられる復興資材のうち、分別土砂に力点を置いたものである。また、用語の定義の重要性や、環境リスクを考慮した有効利用と管理のあり方についても、若干踏み込んだ記述をしている。図 63 はガイドラインの構成を示したものである。第 1 章では本ガイドラインの基本的な考え方、用語、関連する法律等の基本事項を示した。第 2 章では復興資材を様々な用途へ有効活用する際の範囲、記録・保存、品質評価等の共通事項を示した。第 3 章では用途と活用方法を参考とすべき技術指針とともに示した。第 4 章と第 5 章は共通事項から特出しして、循環資材による改良とモニタリングの考え方をそれぞれ示した。

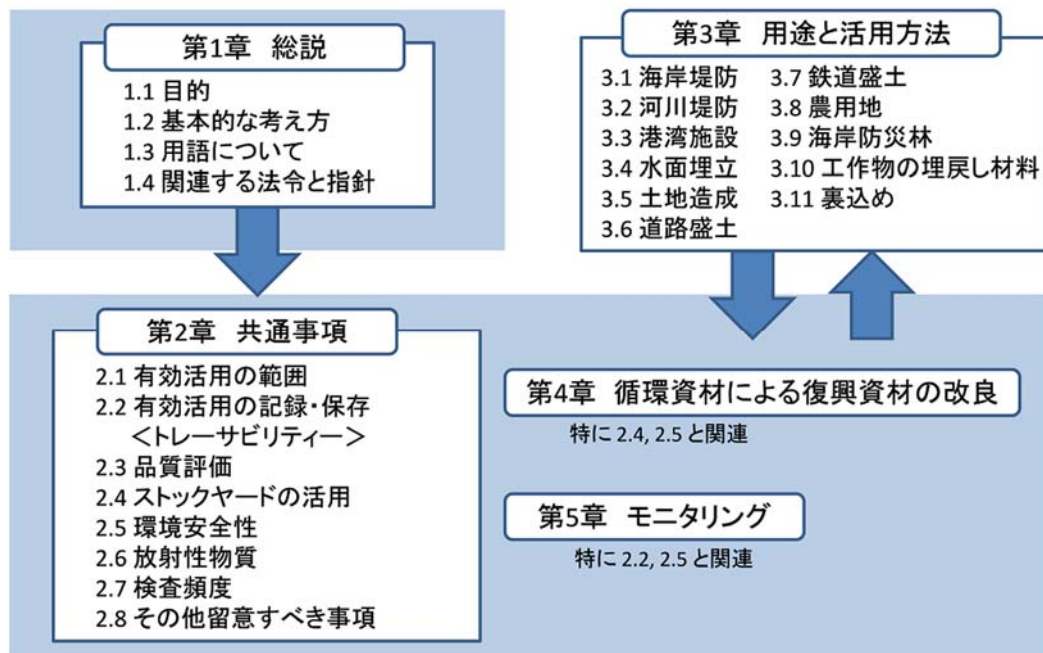
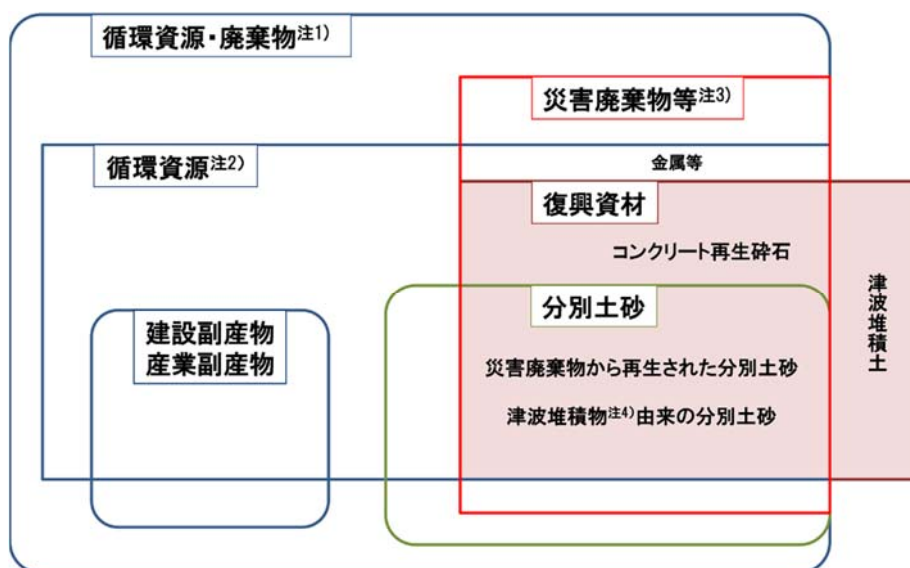


図 63 「災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用ガイドライン」の構成

#### <復興資材の位置づけ>

ガイドラインの第1章は、基本的事項として目的、基本的な考え方、用語、関連する法律等を示している。そのうち1.3節では、用語について整理を行っている。用語の正しい使用は、多くの関係者と認識を共有するために大変重要である。図64は様々な用語の中での復興資材の位置づけを整理したものである。ガイドラインでは、復興資材はコンクリート再生砕石、災害廃棄物から再生された分別土砂、津波堆積物由来の分別土砂、および、津波堆積土から構成されることとした。

本ガイドラインでは分別土砂を公共工事等の資材として活用することを提案している(2.1節)が、自然的原因により基準をわずかに超過する分別土砂も含むため、そのような分別土砂の利用にあたっては厳格な管理が必要となる(2.2節、第5章：後述)。



注1) 循環型社会形成推進基本法のいう「廃棄物等」と同義である。循環型社会形成推進基本法：<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H12/H12H0110.html>

注2) 循環資源のうち、建設資材として利用可能なものを「循環資材」という。「循環資材」は、本ガイドラインで定義している。

注3) 災害廃棄物および津波堆積物（注4）参照）をいう。

注4) 津波堆積物処理指針(<http://www.env.go.jp/jishin/attach/sisin110713.pdf>)の定義による。

図 64 復興資材の位置づけ

#### <用途と活用方法>

ガイドライン第3章では、復興資材の用途と活用方法を図63の図中に示す11種類の用途に整理した。各用途における要求品質は、既存のガイドラインやマニュアルを引用してとりまとめており、本ガイドラインは、様々な地盤材料の要求品質に関する情報が一覧できる点においても価値がある。例えば、盛土としての利用であっても表面がコンクリート二次製品等で被覆される場合、河川水に常時接する場合、繰り返し荷重を受ける場合などで、用途ごとの要求品質は異なってくる。さらに、農用地や海岸防災林への利用では土木構造物とは異なり塩分濃度やpHが重要となる。

#### <環境安全性>

環境安全性は廃棄物から再生された資材の活用にあたって重要な事項の一つであり、ガイドライン2.5節では環境安全性に関する考え方を整理した。復興資材のうち特に分別土砂は、「土壤の汚染に係る環境基準（土壤環境基準）」と、「土壤汚染対策法」の汚染状態に関する基準が重要となる。

表23に示す土壤環境基準は、政府が定める環境保全行政上の目標基準である。カドミウム、鉛、六価クロム、砒（ひ）素、総水銀、セレン、ふっ素およびほう素は、土壤が地下水面から離れており、かつ、原状において当該地下水中のこれら物質の濃度が地下水環境基準の値を超えていない場合には、3倍相当の基準値（3倍値基準）を適用できるものとしている。なお、3倍値基準の適用は「原状において」の制約条件があり、盛土等に適用された事例はない。また、「原状において」は盛土等への利用後の状態を指すこととなるため、盛土等への利用のためには、「地下水面から離れており」の状態を担保する必要がある。方法としては、地下水位の上昇を防止する施工方法および構造とすること、あるいは盛土等に利用する範囲が地下

水面から離れた状態であることを、施工中ならびに施工後のモニタリングで確認すること等が考えられる。ガイドラインでは3倍値基準を適用した千葉県建設発生土管理基準<sup>22)</sup>の事例を紹介した。

表 23 土壤環境基準（重金属等（全シアンを除く。）を抜粋）

基準項目	環境上の条件（環境基準）	
		地下水から離れて、かつ原状において地下水が汚染されていない土壤
カドミウム <sup>注1)</sup>	0.01 mg/L以下	0.03 mg/L以下
鉛	0.01 mg/L以下	0.03 mg/L以下
六価クロム	0.05 mg/L以下	0.15 mg/L以下
砒（ひ）素	0.01 mg/L以下	0.03 mg/L以下
総水銀	0.0005 mg/L以下	0.0015 mg/L以下
アルキル水銀	検出されないこと	
セレン	0.01 mg/L以下	0.03 mg/L以下
ふっ素	0.8 mg/L以下	2.4 mg/L 以下
ほう素	1 mg/L以下	3 mg/L 以下

注1) カドミウムについては、地下水の水質汚濁に係る環境基準が平成23年10月27日に“0.003 mg/L以下”に見直されており、土壤の環境基準等の見直しについて現在諮問されているところである。

土壤汚染対策法では汚染状態に関するいわゆる規制基準として溶出量基準と含有量基準を定められている（さらに、対策の内容に関連するものとして地下水基準と第二溶出量基準を定めている）。溶出量基準は、土壤環境基準と同値となっている。このため、復興資材の利用に際して、土壤環境基準における3倍値基準を含め、土壤溶出量基準以上の値で運用する場合は、将来の形質変更の可能性を考慮し、土壤汚染対策法における取扱いに留意する必要がある。土壤含有量基準は、直接摂取の曝露経路であることから、覆土等の対策をした上で活用をすることも考えられる。

分別土砂は沿岸域等での活用が多く見込まれることから、本ガイドラインでは沿岸域等での活用が明確な場合についても整理している。

まず、海面埋立に利用する場合は、海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律第一条で定められている水底土砂に係る判定基準に適合するものであることが求められており、水底土砂の埋立ての場所等に係る土壤であって埋立て終了後も同法に基づく護岸、外周仕切施設等により一般環境（周辺の土壤）から区別されているものは土壤環境基準の適用対象とならないこととされている（平成3年8月28日付け環水土第116号環境庁水質保全局長通知）。一方、埋立後に陸地化され、一般環境と区別されない場合は、土壤環境基準は適用される。沿岸域での利用におけるふっ素・ほう素の取扱いは下記のとおりである。なお、埋立後の土地改変においては土壤汚染対策法が適用される可能性がある。

土壤環境基準における海水由来と考えられるふっ素とほう素の取扱いについては、平成13年3月28日付け環水土第44号環境省環境管理局水環境部長通知に、「人為的な影響と自然的な影響の寄与度等については個別の事例ごとに異なるものと考えられ、人為的な影響と自然的な影響を区別して評価した上で、個別の事例ごとに判断する必要がある」とされている。「海水の影響を受けていると考えられる土壤について

は、もっぱら自然的原因によるものとして一律に土壤環境基準の適用外とすることは、適用外とする土壤の範囲の特定を含めて非常に困難」であり、「汚染原因や周辺地下水への影響等を個別の事例ごとに総合的に評価して、土壤環境基準の適用の是非等を判断するものとする」とされている。

#### <モニタリングとトレーサビリティ>

「復興資材」は新しい材料であるので、信頼確保のためにもモニタリングの実行とトレーサビリティの確保を基本とすることが望ましい。トレーサビリティ確保のためには、「復興資材」の種類に関する情報、利用範囲、品質管理記録、工事記録等を書類として整理し、適切に管理することが必要である。工事発注者は、受領した当該書類を台帳等として整理して必要な期間保存し、台帳等を必要に応じて第三者に公開する。このうち「復興資材」の種類に関する情報としては、復興資材の種類と量、復興資材の中間処理等が行われた場所、中間処理等が行われる前に災害廃棄物として仮置きされていた場所、「廃棄物に該当しないもの」の要件を満たすことを示す根拠、が挙げられる。「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材の活用について」（2012年5月）<sup>23)</sup>では、「廃棄物に該当しないもの」の要件を満たすことを示す書類として①分別または中間処理の方法を記載した書類、②測定会社等が発行する検査証明書等（濃度計量証明書、土質試験データシートが該当する）異物混入の有無の記録（目視確認の記録）、③当該物を資材として活用する公共工事の設計図書、④公共工事の名称および施工場所を記載した書類、⑤当該物の品質が要求条件を満たすことが確認できる書類（設計図書）、⑥記録および保存方法を記載した書類、を定めている。

環境安全性に関する基準超過した復興資材の有効活用にあたっては、「公共事業で」、「管理が継続され」、「地下水汚染が生じない状態が確認されている」ことによる、リスク管理が求められる。そこでガイドライン第5章では復興資材の環境安全性に着目して、リスク管理不要、緩やかなリスク管理（レベル1）、厳格なリスク管理（レベル2）の三つのレベルに整理し、それぞれに対するモニタリングとトレーサビリティの考え方を提案した。

モニタリングは表24に示すとおり、土壤分析の有無やタイミングと基準の適否、中間処理における添加材の有無等を指標とし、利用先の制限と施工後のモニタリングのレベルを示している。緩やかなリスク管理（レベル1）では、例えば、土壤汚染対策法における原位置不溶化措置完了の確認の考え方（地下水質の基準適合を2年間確認すること）等が準用できる。厳格なリスク管理（レベル2）としては、利用場所・環境に応じて求められる環境安全性に対して、地下水質等を継続してモニタリングすることが考えられる。

次にトレーサビリティの考え方は図65に示すとおりであり、ガイドライン2.2節で示した利用材料・利用部位等の記録に加えて、供用中の環境モニタリングの結果を反映させることとした。特に、表24中のNo.1は処理前・処理後とも基準適合しているが、試験結果等を記録・保管することで将来の形質変更時における環境分析等が不要となることも踏まえ、材料としての記録を保存することが望ましい、とした。

なお、ここで示した考え方は、自然由来の重金属等によって土壤環境基準をわずかに超過する分別土砂等に適用することを想定しており、現状有姿や利用形態を勘案して適切な評価を行い、利用後の管理・保管・モニタリング方法を含めた有効活用の方法を考えることが重要である。

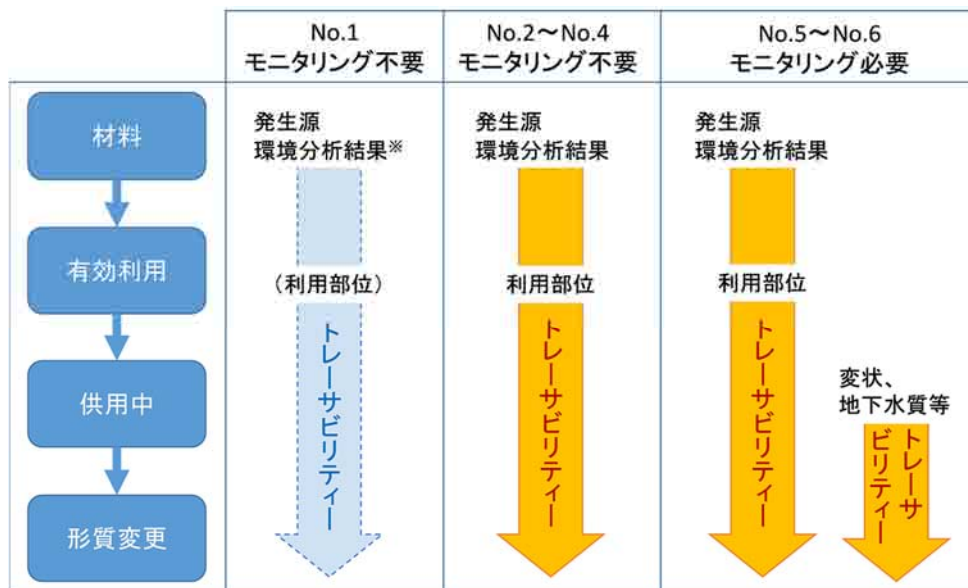
この他の視点として、分別土砂には木くず等の有機物・可燃物の残存の影響が考えられる。具体的には、材料がおかれた環境や木くずの混入率によっては木くずが分解し、沈下や汚水・ガス発生の可能性があるため、それによる環境影響の防止・監視を目的としてモニタリングを行う必要があることを述べている。モ

モニタリング項目は施工時と施工後に分けて項目立てを行い、施工時は表流水、地下水質および大気・気象について、施工後は地下水とガスについて、モニタリングを行うこと、としている。

表 24 復興資材を有効利用する場合の、有害物質による環境影響に関するモニタリングの考え方

No.	材料履歴と環境分析結果				利用先制限	施工後 モニタリング <sup>注)</sup>
	分別処理前 分析	他の材料との混合	分別土砂の 改質	分別・改質 処理後分析		
1	基準適合	無	無	基準適合	制限なし	不要
2	基準適合	無	無	分析なし	制限なし	不要
3	実施の有無を問わ ない	有	無	基準適合	制限なし	不要
4	実施の有無を問わ ない	有	有 不溶化を目的としな い改質－石膏や石灰 等－に限る	基準適合	制限なし	不要
5	基準超過	実施の有無を問わ ない	有 不溶化を目的とした 改質－キレート処理 等－を含む	基準適合	制限なし	「緩やかなリスク管理 (レベル1)」の考え方で モニタリングを実施
6	基準超過／基準適 合が確認できてい ないもの	実施の有無を問わ ない	実施の有無を問わ ない	基準超過／基準適 合が確認できてい ないもの	制限あり	「厳格なリスク管理 (レ ベル2)」の考え方でモニ タリングを実施

注) 有効利用後に環境安全性が継続して確保されていることの確認



※No.1については、環境安全性が確保されていることから、必ずしもトレーサビリティを確保する必要はない。なお、この場合においてもトレーサビリティを確保することにより、形質変更時の環境安全性に関する分析は不要となる。

図 65 復興資材の有効利用におけるトレーサビリティの考え方



## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

#### ● 分別土砂の特性評価と試験法の提案

テーマ1では、災害廃棄物処理の過程で排出される分別土砂の材料特性を評価するため、各種試験を行った。その結果、表25に示すとおり海水の影響によりECは一般的な地盤材料と比較しやや高いものの、分別土砂は砂分が主体で高い強度を有していることが分かった。室内試験により分別土砂に残存する木片の分解性は高くないことを明らかにし、木片の腐朽に伴う硫化水素ガスの発生リスクは低く環境安全性の観点からも問題ないこと、盛土構造物などの間隙構造は長期に渡り大きく変化せず長期に渡り高い安定性が期待できること、が明らかとなった。同様の結果は盛土試験でも得られており、①1年経過後の盛土の水平変位は数mm～十数mm程度に収まること、②盛土内部での発熱は確認されず内部温度は気温を追従するように変化すること、③酸素濃度が大きく減少しないこと、から高さ3m程度の盛土内部では活発な微生物活動が起こらないことを示した。

表25 代表的な分別土砂の特性

項目	代表的な値
強熱減量	3～10%
細粒分含有率	10～40%
粒子密度	2.6～2.8 g/cm <sup>3</sup>
液性限界	NP
塑性限界	NP
pH	7～9
電気伝導率 (EC)	< 150 mS/m
塩化物含有量	< 1.0 mg/g
水溶性有機炭素量 (TOC)	< 0.2 mg/g
最大乾燥密度	1.6～2.0 g/cm <sup>3</sup>
最適含水比	9～20%
コーン指数	3000～4000 kN/m <sup>2</sup>
修正 CBR (95%)	9～16%
せん断抵抗角	40～50°
粘着力	35～65 kN/m <sup>2</sup>

分別土砂に含まれる木片量は、有姿試料の場合には350℃、12時間の強熱条件で評価しうることを、前処理として試料を粉砕する場合には350℃、3時間で同等の値が得られること、試料量を30g確保することで高い測定精度が見込めること、を明らかにした。

- 分別土砂品質決定要因の解明

テーマ2では東日本大震災のける災害廃棄物処理の実績データを解析し、岩手県で発生した分別土砂の99%の試料でコーン指数が200 kN/m<sup>2</sup>以上を、85%が800 kN/m<sup>2</sup>を満足し、さらにほぼ全ての試料が細粒分まじり砂に分類されたことから、強度と粒度の観点から処理時期に関わらず地盤材料として十分な品質を有していることを明らかにした。またpHや電気伝導率等の化学特性は、改質目的で添加した資材の影響を受けるものの、いずれの処理内容・システムで排出された分別土砂も同様の物理特性、強度特性を有することを示した。

- 災害廃棄物の処理と再資源化に関するマニュアルの策定

テーマ3で取り組んだ「災害からの復興における社会基盤整備への復興資材等の利用のあり方に関する提言」「災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用ガイドライン」の2つのマニュアルの整備により、復興資材等の利用のあり方に関する基本方針やそれを実現するために必要な取り組みと行った概念を示すとともに、環境リスクを考慮した分別土砂の有効利用方法、管理のあり方等の具体的な技術的な指針を提示した。これら2つのマニュアルは、いずれも(公社)地盤工学会のホームページで一般公開されている (URL: [https://www.jiban.or.jp/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1540&Itemid=148](https://www.jiban.or.jp/index.php?option=com_content&view=article&id=1540&Itemid=148))。

## (2) 環境政策への貢献

本研究の実施による環境政策への貢献としては、(1) 東日本大震災の復興における災害廃棄物分別土砂の利用の促進、(2) 東日本大震災の災害廃棄物処理の検証と、将来の巨大災害の対応、(3) 事故由来の放射性汚染土壌への対応、(4) 自然由来の重金属等を含む発生土への対応、が挙げられる。そのうち、(1)と(2)については、岩手県を中心に議論を進め、東日本大震災からの復興に関わる環境政策と実務に既に反映されており、さらに(2)の一部は将来の災害対応の政策と実務への活用が見込まれるものである。(3)と(4)は、現在環境政策上の議論が進みつつある中で本研究の成果が会議資料に記載されるなど、政策実務への反映が見込まれるものである。したがって、下記は「行政が既に活用した成果」として(1)と(2)の内容を、「行政が活用することが見込まれる成果」として(3)と(4)の内容を記載する。

### <行政が既に活用した成果>

- 東日本大震災からの復興における災害廃棄物分別土砂の利用の促進

本研究の実施により分別土砂が通常の土とほぼ同等の特性・品質を有し、地盤材料として利用可能であることを示し、被災地における分別土砂の利用と処分量の低減に大きく貢献した。東日本大震災で発生した災害廃棄物・津波堆積物は約1/3(重量)が土砂で占められていて、その適切な処理は災害廃棄物の処理における課題であった。災害廃棄物の分別土砂を活用する事例は過去にはみられなかったことから、その促進にあたっては制度の整備と科学的なエビデンスが求められた。特に、分別土砂の製造を所掌する地方自治体の環境部局と利用を所掌する土木建設・農林部局との連携・相互理解が必要であったが、そのための科学的知見に基づく裏付けが必要であった。本研究では分別土砂の特性・品質について網羅的・体系的な検討を行っており、分別土砂への理解と利用に貢献をした。地盤工学会とも連携して積極的に情報発信を行い、省庁や県の行政担当者・実務者との綿密な意見交換・情報共有にも貢献し、特に岩手県では、本研究のメンバーが監修に関わった「岩手県復興資材活用マニュアル(平成24年6月策定、25年2月改訂)」の内容を科学的に裏付けるデータを示し、分別土砂の100%再生利用に貢献した。

- 東日本大震災の災害廃棄物処理の検証と、将来の巨大災害への対応

東日本大震災における災害廃棄物処理は、これまでにない大きな規模と様々な内容を含む事業であったことから、その実態を整理・レビューし、将来起こりうる災害対応に活かしていくことが求められる。本研究では、災害廃棄物分別土砂の物性・品質の体系的なレビューや、岩手県某処理区での災害廃棄物処理における処理物と時間経過の分析などを実施しており、これらの成果は将来災害が生じた場合の災害廃棄物処理事業の仕様策定や計画・設計に反映されることが見込まれる。具体的には、環境省「大規模災害発生時における災害廃棄物対策検討会（平成 25～27 年度）」によりとりまとめられる「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（平成 28 年 3 月 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部）」に、「災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用ガイドライン」が記載されている。また、本研究の成果に基づく講演（環境省関東地方環境事務所主催、「災害廃棄物処理セミナー」2015 年 2 月 17 日開催）はデジタル映像としてアーカイブ化されており、環境省のホームページ「災害廃棄物対策情報サイト」から無料閲覧できるようになっている（URL: [http://kouikishori.env.go.jp/document\\_video/materials\\_movies/movie/FLASH\\_0320/start.html](http://kouikishori.env.go.jp/document_video/materials_movies/movie/FLASH_0320/start.html)）。

なお、本プロジェクトの知見と経験から、研究代表者は前述の「大規模災害発生時における災害廃棄物対策検討会」の技術・システムワーキンググループの座長を務め、災害廃棄物処理に関する技術・システムの整理と検証に貢献している。また、本推進費プロジェクトの取り組みによって、研究代表者ならびに地盤工学会が、新しく組織された D. Waste-Net（災害廃棄物処理支援ネットワーク）に参画している。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

- 事故由来の放射性汚染土壌への対応

原子力発電所事故により放射性セシウムが広い範囲に拡散し、被ばく量を低減するため除染事業が行われているが、除染により発生する除去土壌等は 2000 万 m<sup>3</sup> を超えると見積もられていて、分級等の処理によって再生された極低濃度土壌について再生利用を進め、最終処分量を低減することが求められている。この要求にこたえるべく取り組みが進められているが、そのうち環境省「中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略検討会（平成 27 年度）」第 1 回委員会資料には、再生された土の利用の技術指針の基礎資料の例として、「災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用ガイドライン」が掲載され、廃棄物由来の再生土の利用の参照とされている。

- 自然由来の重金属等を含む発生土への対応

本研究がその策定に貢献した「災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用ガイドライン」では、有害物質を基準を超過して含有しうる分別土砂についても、廃棄物として処分するのではなく、一定のリスク管理（利用用途の制限とモニタリング）のもとで資材として利用する方策を示している。これは、復興の公共事業を対象として限定したものであり、災害復興という状況下での方策の提案であるが、基本的な考え方は災害時のみならず通常時の資源リサイクルにもつながりうるものである。一方、土壌汚染対策法のもとでは、自然由来であっても基準超過土壌は汚染土壌処理施設にて処理することが定められているが、「土を資源としてできる限り活用する」という観点から、低濃度の基準超過土壌を一定の管理下で活用する制度を整備することは環境政策上も有意義と考えられる。そのため、土壌の分野において、同じ自然由来特例区域間での土壌の移動や、一定管理下における土壌の利用などを認める方向での

議論が環境省内で始まりつつあるが（研究代表者は本件に関して中央環境審議会土壌農薬部会土壌制度小委員会や土壌汚染対策法施行状況（制度）検討業務に参画）、この考え方は「災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用ガイドライン」をもとにしていると考えることができる。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文(査読あり)>

- 1) 風間基樹, 森 友宏, 大沼清孝, 大山浩一, 相川良雄 (2014): 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の評価, 地盤工学会特別シンポジウム—東日本大震災を乗り越えて—発表論文集, pp.93-101.
- 2) 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 (2014): 腐朽過程を考慮した木屑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—東日本大震災を乗り越えて—発表論文集, pp.102-108.
- 3) 西村伸一, 後藤丹十郎, 山本千絵, 村上賢治, 珠玖隆行 (2014): 震災復興資材(分別土C種)の植栽土壌としての利用, 地盤工学会特別シンポジウム—東日本大震災を乗り越えて—発表論文集, pp.109-113.
- 4) 勝見 武・遠藤和人・乾 徹・大河原正文・肴倉宏史・保高徹生 (2014): 東日本大震災における地盤環境課題への取り組み, 地盤工学会誌, Vol.62, No.10, pp.20-23.
- 5) Kazama, M., Mori, T., Onuma, K., Oyama, K. and Aikawa, Y. (2014): Quality evaluation of the soil generated from disaster waste and tsunami deposition soil which include wood waste - Effective use as a construction earth material -, *Proc. of International Symposium on Geohazards: Science, Engineering and Management*, Kathmandu, Nepal, pp.481-492.
- 6) 森 友宏, 風間基樹, 大沼清孝, 大山浩一, 相川良雄 (2015): 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, Vol.10, No.1, pp.67-79.
- 7) 山口拓也, 加藤雅彦, 佐藤 健 (2015): カラム試験による災害廃棄物の処理過程で発生した分別土砂からの透水に伴う元素溶出挙動の変化, 第11回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.89-92.
- 8) 山根華織, 高井敦史, 勝見 武, 乾 徹, 三方浩允, 大河原正文, 川島光博 (2015): 東日本大震災で発生した岩手県における分別土砂の特性評価, 第11回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.93-98.
- 9) 野々山栄人, 中野正樹, 新木 毅, 浜島圭佑, 神野琢真, 吉村 剛 (2015): 災害廃棄物分別土の木屑腐朽過程を考慮した力学試験の試み, 第11回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.121-126.
- 10) 小竹 望, 山中 稔, 多田有汰, 山内聡士 (2015): 津波堆積物分別土に混入する木くずが一面せん断強さに及ぼす影響, 第11回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.143-148.
- 11) Kazama, M. and Mori, T. (2015): Evaluation and usage of the soil generated from disaster waste - Case history of Great East Japan Disaster, *Proc. of International Conference on Geotechnical Engineering, ICGE-Colombo-2015*, Colombo, SriLanka, pp.161-164.

- 12) Katsumi, T. (2016): Contribution of environmental geotechnics for disaster recovery, *Proceedings of the Second Japan-India Workshop in Geotechnical Engineering, Japanese Geotechnical Society Special Publication*, Vol. 2, pp.103-108.
- 13) Katoh, M., Yamaguchi, T. and Sato, T. (2016): Characteristics of Elemental Release from Recovered Soil Separated from Disaster Waste Generated by the Great East Japan Earthquake and Tsunami, *Geo-Chicago 2016*. (accepted)

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) Katsumi, T., Inui, T., Takai, A., Morita, K., Yamane, K., Endo, K., Sakanakura, H., Otsuka, Y. and Okawara, M. (2013): Soils recovered from disaster wastes generated by the 2011 East Japan earthquake and tsunami, *5th KGS-JGS Geotechnical Engineering Workshop*, Korean Geotechnical Society, pp.37-44.
- 2) 勝見 武 (2013) : 災害廃棄物の処理と土木資材への有効利用, 地盤工学会誌, Vol.61, No.11/12, pp.53-54.
- 3) 勝見 武 (2014) : 災害廃棄物の処理と土砂の再生に挑む, 土木学会誌, Vol.99, No.3, pp.26-29.
- 4) 風間基樹 (2014) : 震災廃棄物有効利用への取り組みおよび復旧現場の処理状況, 建設リサイクル, Vol.66, pp.4-13.
- 5) 勝見 武・遠藤和人・乾 徹・大河原正文・肴倉宏史・保高徹生 (2014) : 東日本大震災における地盤環境課題への取り組み, 地盤工学会誌, Vol.62, No.10, pp.20-23.
- 6) Katsumi, T., Endo, K., Imanishi, H., Inui, T., Kazama, M., Okawara, M., Otsuka, Y., Sakamoto, H., Sakanakura, H., Suzuki, H., Takai, A. and Yasutaka, T. (2014): Soils recovered from disaster debris – Characterization, Standardization, and Strategic Utilization –, *3RINCs and SWAPI 2014: The First 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management* (on USB).
- 7) Uddin, M.N., Takai, A., Morita, K., Yamane, K., Inui, T., Katsumi, T. and Flores, G. (2014): Geotechnical properties of soil fraction recovered from disaster wastes generated by the Great East Japan Earthquake, *Proc. of the 13th Global Joint Seminar on Geo-Environmental Engineering – GEE 2014*, Sapporo, Japan, pp.129-135.
- 8) 藤川拓朗, 今西 肇 (2015) : 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.
- 9) 勝見 武 (2015) : 災害廃棄物から再生した分別土砂の復興資材への活用, セメント・コンクリート, No.815, pp.17-20.
- 10) 勝見 武 (2015) : 土の有効利用に関する取り組みと課題, 建設リサイクル, Vol.71, pp.9-15.
- 11) 勝見 武, 切川卓也 (2015) : 災害廃棄物の選別技術・システムのあり方, 廃棄物資源循環学会誌, Vol.20, No.5, pp.397-410.
- 12) 風間基樹 (2015) : 「東北復興の取り組みの課題」－4年が経過して－(総説), 基礎工, 特集 東日本大震災からの復旧・復興(その1)－道路, 鉄道, 港湾・空港, Vol.43, No.7, pp.3-6.
- 13) 勝見 武 (2015) : 災害廃棄物から再生された分別土の利用の取り組みを通して(総説), 地盤工学会誌, Vol.63, No.11/12, pp.1-3.
- 14) 中野正樹, 野々山栄人 (2015) : 高度選別処理された災害廃棄物分別土砂(木片混じり土)の力学特性の把握, 地盤工学会誌, Vol.63, No.11/12, pp.8-9.

## (2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 森田康平, Uddin, M.N., 高井敦史, 乾 徹, 勝見 武 (2014) : 災害廃棄物から分別した土砂の土質特性に及ぼす木片の影響, 第 49 回地盤工学研究発表会
- 2) 森 友宏, 風間基樹, 大沼清孝, 大山浩一, 相川良雄 (2014) : 震災廃棄物混入土の有効利用のための強度品質評価, 第 49 回地盤工学研究発表会
- 3) 浜島圭佑, 新木 毅, 中野正樹, 野々山栄人, 岡崎 稔, 濱谷洋平, 大塚義一, 中島典昭 (2014) : 災害廃棄物の木片混合率に着目した力学挙動の把握, 第 49 回地盤工学研究発表会
- 4) 新木 毅, 浜島圭佑, 中野正樹, 野々山栄人 (2014) : 木材腐朽菌による腐朽促進させた災害廃棄物の力学特性の把握に向けた基礎的研究, 第 49 回地盤工学研究発表会
- 5) 今西 肇, 千葉祐太郎, 神宮佑哉 (2014) : 人工土の粒度試験方法に関する一考察, 第 49 回地盤工学研究発表会
- 6) 多田有汰, 小竹 望, 山中 稔, 山内聡士 (2015) : 津波堆積物分別土の一面せん断試験によるせん断強度の評価, 第 50 回地盤工学研究発表会
- 7) 浜島圭佑, 中野正樹, 野々山栄人, 新木 毅, 神野琢真 (2015) : 災害廃棄物の木片腐朽過程を考慮した力学特性の把握に関する試み, 第 50 回地盤工学研究発表会
- 8) 多田有汰, 小竹 望, 山中 稔, 山内聡士 (2015) : 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
- 9) 赤間拓朗, 高井敦史, 乾 徹, 勝見 武 (2016) : 災害廃棄物由来分別土の木くず含有量評価における試料量と強熱時間の影響, 平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会
- 10) 赤間拓朗, 高井敦史, 乾 徹, 勝見 武 (2016) : 災害廃棄物由来の分別土に含まれる木くず量の評価, 第 50 回地盤工学研究発表会

## (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

## (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

以下は、講習会・講演会等の実績である。研究代表者のものに限っている。

- 1) 岩手県復興資材活用促進に係るセミナー (主催: 岩手県、2013 年 5 月 9 日、岩手県山田町内、参加者約 50 名) にて、「より一層の復興資材の特性の理解と活用促進」と題して講演
- 2) 第 12 回 COBRA 講演会 (主催: NPO 法人建設副産物リサイクル促進機構、2013 年 6 月 11 日、大阪市内、参加者約 80 名) にて、「東日本大震災を受けて、地盤環境工学を考える」と題して講演
- 3) 一般社団法人泥土リサイクル協会平成 25 年度総会基調講演 (主催: 一般社団法人泥土リサイクル協会、2013 年 8 月 9 日、名古屋市内、参加者約 100 名) にて、「東日本大震災により発生した災害廃棄物の処理と復興資材活用への取組み」と題して講演
- 4) 日本コンクリート工学会近畿支部講演会 (主催: 日本コンクリート工学会近畿支部、2013 年 9 月 30 日、大阪市内、参加者約 30 名) にて、「より一層の復興資材の活用に向けた地盤環境工学の取組み」と題して講演

- 5) イブニングセミナー第5回講演会（主催：公益社団法人地盤工学会中部支部、2013年11月29日、名古屋市・名古屋工業大学、参加者約50名）にて、「2011年東日本大震災による地盤環境課題への取り組み」と題して講演
- 6) リサイクルポートセミナー（主催：リサイクルポート推進協議会、2014年1月17日、東京都内、参加者約200名）にて、「建設リサイクルと復興資材 ―地盤工学会復興資材提言委員会における検討状況―」と題して講演
- 7) 建設リサイクル講演会（主催：建設副産物対策近畿地方連絡協議会、2014年3月12日、大阪市内、参加者約200名）にて、「復興資材の活用からみた建設リサイクルの課題と貢献」と題して講演
- 8) The 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management (3R International) and the 13th Expert Meeting on Solid Waste Management in Asia and Pacific Islands (SWAPI)（2014年3月11日、京都市・京都大学、参加者約100名）にて、「Soils Recovered from Disaster Debris – Characterization, Standardization, and Strategic Utilization –」と題して講演
- 9) 関西ライフライン研究会 第102回定例勉強会（主催：関西ライフライン研究会、2014年7月8日、大阪市内、参加者約30名）にて、「東日本大震災における災害廃棄物の処理と復興資材への活用について」と題して講演
- 10) KG-NET・関西圏地盤情報協議会 平成26年度総会（主催：KG-NET・関西圏地盤情報協議会、2014年7月22日、大阪市・近畿地方整備局内、参加者約30名）にて、「東日本大震災の災害廃棄物処理と復興資材活用への取り組み」と題して講演
- 11) 資源・素材2014（熊本）平成26年度資源・素材関係学協会合同秋季大会 企画講演「自然由来汚染土壌の取り扱いを改めて考える」（主催：資源・素材学会、2014年9月15日、熊本市・熊本大学、参加者約50名）にて、「土木資材としての土に求められるもの」と題して講演
- 12) おおさかATCグリーンエコプラザビジネス交流会 水・土壌汚染研究部会セミナー（第61回）「震災復興と地盤環境問題」（主催：おおさかATCグリーンエコプラザビジネス交流会、2014年12月9日、大阪市内、参加者約50名）にて、「東日本大震災後の地盤環境問題への取り組み」と題して講演
- 13) 一般社団法人環境地盤工学研究所設立総会（主催：一般社団法人環境地盤工学研究所、2014年12月10日、東京都内、参加者約100名）にて、「東日本大震災からの復興への環境地盤工学の役割」と題して講演
- 14) 災害科学研究所平成26年度特別講演会「巨大地震災害とどう向き合うか ―東日本大震災に学び、明日の巨大地震に備える―」（主催：災害科学研究所、2015年2月16日、大阪市・大阪大学中之島センター、参加者約50名）にて、「災害廃棄物等への対応と復興における調和」と題して講演
- 15) 災害廃棄物処理技術セミナー（主催：環境省関東地方環境事務所、2015年2月17日、東京都内、参加者約100名）にて、「災害廃棄物再生資材の有効活用について」と題して講演
- 16) 国連防災会議・サイドイベント「あの日」から、土木技術者がしたこと（主催：土木学会・宮城県、2015年3月16日、仙台市・宮城県庁、参加者約200名）にて、「復興資材としての「土」に求められるもの」と題して講演
- 17) 日本地球惑星科学連合2015年大会「A-HW25 都市域の地下水・環境地質」（主催：日本地球惑星科学連合、2015年5月27日、千葉市・幕張メッセ、参加者約40名）にて、「発生土や分別土の利用と地盤環境への影響」と題して基調講演



- 18) 第 21 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会（主催：土壌環境センター・廃棄物資源循環学会・地盤工学会・日本地下水学会・水環境学会、福岡市・九州大学、2015 年 6 月 18 日、参加者約 200 名）にて、「災害廃棄物再生資材利用の取組みを通して」と題して講演
- 19) 平成 27 年度 NPO 法人廃棄物地盤工学研究会セミナー「東日本大震災から 4 年：災害廃棄物の有効利用に関するこれまでの成果」（主催：NPO 法人廃棄物地盤工学研究会、2015 年 6 月 26 日、福岡市内、参加者約 50 名）にて、「災害廃棄物への対応と復興における調和」と題して講演
- 20) 横浜国立大学先端科学高等研究院シンポジウム「リスク共生から見た地盤工学上の課題」（主催：横浜国立大学先端科学高等研究院、2015 年 7 月 16 日、横浜市・横浜国立大学、参加者約 150 名）にて、「地盤環境リスクと発生土問題への対応」と題して講演
- 21) JCI's 50th Anniversary International Symposium “New Possibilities for Construction Materials: Proposals for application of underutilized resources as construction materials”（主催：日本コンクリート協会、2015 年 7 月 13 日、東京都内、参加者約 50 名）にて、「Soils recovered from disaster debris - Characterization, standardization, and strategic utilization -」と題して基調講演
- 22) 建設工事で発生する自然由来重金属等含有土対応ハンドブック」に関する講習会（主催：国立研究開発法人土木研究所・一般財団法人土木研究センター地盤汚染対応技術検討委員会、2015 年 8 月 24 日、大阪市内、参加者約 100 名）にて、「復興資材利用の取組みを通して」と題して講演
- 23) セメント系固化材の利活用セミナー「大規模災害に対してセメント系固化材による地盤改良が果たす役割」（主催：セメント協会、2015 年 9 月 8 日、福岡市内、参加者約 100 名）にて、「発生土や分別土の利用と地盤環境への影響」と題して講演
- 24) CCP、RJP、MJS 協会地盤改良技術説明会（主催：CCP、RJP、MJS 協会、2015 年 11 月 13 日、大阪市、参加者約 60 名）にて、「発生土や分別土の利用と地盤環境への影響」と題して特別講演
- 25) 平成 27 年度循環型社会形成推進研究発表会公開シンポジウム「廃棄物処理システムの強靱化と災害対応」（主催：環境省、2015 年 12 月 14 日、東京都内、参加者約 80 名）にて、「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」と題してパネリストとして講演
- 26) おおさか ATC グリーンエコプラザビジネス交流会水・土壌汚染研究部会セミナー（主催：おおさか ATC グリーンエコプラザビジネス交流会、2015 年 12 月 17 日、大阪市内、参加者約 40 名）にて、「発生土の有効利用と地盤環境問題」と題して講演
- 27) 日本学術振興会 建設材料第 76 委員会 第 429 回会議（主催：日本学術振興会 建設材料第 76 委員会、2016 年 1 月 8 日、東京都・日本学術振興会、参加者約 80 名）にて、「土の利用と環境安全評価」と題して講演
- 28) 一般社団法人日本建設業連合会災害廃棄物部会・環境技術部会（主催：一般社団法人日本建設業連合会、2016 年 2 月 5 日、東京都・日本建設業連合会、参加者約 40 名）にて、「東日本大震災における災害廃棄物再生資材活用の取組みを通して」と題して講演
- 29) JAEA 公開シンポジウム「福島環境回復における安心・安全を支える科学を考える」（主催：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、2016 年 2 月 21 日、東京都内、参加者約 150 名）にて、「土の利用と環境安全評価について」と題して講演

**(5) マスコミ等への公表・報道等**

- 1) 環境新聞 (2013年6月19日、全国版、「災廃由来の復興資材 有効利用促進に尽力 岩手のマニュアル策定を支援」)
- 2) 建設通信新聞 (2014年3月31日、全国版、「分別土砂復興に活用 地盤工学会 利用原則化で提言」)
- 3) 建設工業新聞 (2014年3月31日、全国版、「地盤工学会 復興資材利用促進を 6月にも指針案ルール制定提案」)
- 4) 環境新聞 (2014年4月9日、全国版、「復興材利用進め総和の最適化を 6月にガイドライン案」)
- 5) 日経コンストラクション (2014年4月28日号 (第590号)、日経BP社、「復興に分別土の活用を、地盤工学会がルール化を提言」)
- 6) 環境新聞 (2014年6月4日、全国版、「復興資材等 利活用のあり方提言 地盤工学会が宮城県に」)
- 7) 建通新聞 (2014年10月6日、オンライン版、「災害廃棄物分別土砂のガイドライン策定」)
- 8) 環境新聞 (2014年10月22日、全国版、「再生復興資材の品質管理、環境安全性など 地盤工学会 有効活用へガイドライン」)

**(6) その他**

- 1) 公益社団法人地盤工学会 東北支部賞最優秀賞 (2014年4月、受賞者：遠藤和人、肴倉宏史ほか3名)
- 2) 公益社団法人地盤工学会 関西支部社会貢献賞 (2014年4月15日、受賞者：勝見 武ほか1名2機関)
- 3) 公益社団法人土木学会 特別表彰 (2015年3月16日、受賞者：地盤工学会地盤環境研究委員会 (委員長：勝見 武) ならびに復興資材提言委員会 (委員長：勝見 武))
- 4) 公益社団法人地盤工学会 地盤工学会誌年間最優秀賞 (2015年6月11日、受賞者：勝見 武・遠藤和人・乾 徹・大河原正文・肴倉宏史・保高徹生)

## 8. 引用文献

- 1) 環境省：東日本大震災に係る災害廃棄物の処理の実績（平成26年6月末時点）について，<http://www.env.go.jp/recycle/waste/disaster/earthquake/committee/07/mat04.pdf>（2016年3月24閲覧），2014.
- 2) 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），[http://www.env.go.jp/jishin/attach/haiki\\_masterplan.pdf](http://www.env.go.jp/jishin/attach/haiki_masterplan.pdf)（2016年3月24閲覧），2011.
- 3) 廃棄物資源循環学会：津波堆積物処理指針（案），<http://eprc.kyoto-u.ac.jp/saigai/archives/files/SedimentManagementGL%20by%20JSMCWM.pdf>（2016年3月24閲覧），2011.
- 4) 岩手県：岩手県災害廃棄物処理詳細計画第二次改訂版，[http://www.pref.iwate.jp/dbps\\_data/\\_material/\\_files/000/000/003/212/keikaku.pdf](http://www.pref.iwate.jp/dbps_data/_material/_files/000/000/003/212/keikaku.pdf)（2016年3月24閲覧），2013.
- 5) 宮城県：宮城県災害廃棄物処理実行計画（最終版），<https://kioku.library.pref.miyagi.jp/miyagi/index.php/ja-menu-item-search.html?action=detail&uniqid=13250010000000096>（2016年3月24閲覧），2013.
- 6) 岩手県：岩手県復興資材活用マニュアル（改訂版），[http://www.pref.iwate.jp/dbps\\_data/\\_material/\\_files/000/000/003/225/manual.pdf](http://www.pref.iwate.jp/dbps_data/_material/_files/000/000/003/225/manual.pdf)（2016年3月24閲覧），2013.
- 7) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，地盤工学会，2009.
- 8) 国土開発技術研究センター：河川土工マニュアル，2009.
- 9) 遠藤和人・中川美加子・肴倉宏史・井上雄三・井真宏・杉原元一：再生石こう・石灰系地盤改良における硫化水素ガス発生挙動に関する研究，材料，Vol. 61, No. 1, pp.31-36, 2012.
- 10) 国土交通省：発生土利用基準について，2006.
- 11) 土木研究センター：建設発生土利用技術マニュアル（第4版），丸善出版，2013.
- 12) 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，都市清掃，Vol.67, No.317, pp.120-122, 2014.
- 13) Zumstein, J. and Buffle, J.: Circulation of Pedogenic and Aquagenic Organic Matter in an Eutrophic Lake, *Water Research*, Vol.23, No.2, pp.229-239, 1989.
- 14) 小澤秀明・今井章雄・福島武彦：長野県内のいくつかの湖沼水のトリハロメタン生成能，長野県環境保全研究所研究報告，Vol.1, pp.1-8, 2005.
- 15) 新也将尚・西尾孝之・藤原康博・大島 詔・北野雅昭・福山丈二：大阪市内水域における難分解性有機物の特性解析，大阪市立環科研報告，Vol.69, pp.31-36, 2007.
- 16) 運輸省港湾局：港湾緑地の植栽設計・施工マニュアル，みなと総合研究財団，1999.
- 17) 山口柏樹・大根義男：フィルダムの設計及び施工，技報堂，p.214, 1973.
- 18) 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き（改訂版），pp.54-55, 2012.
- 19) 木村勝行：フィルダム取り付け地山部における浸透流に関する水理学的研究，中央大学学位論文，1990.
- 20) Bowers, J.M., Miller, G.R., Kester, D.R. and Warner, T.B.: Rapid Changes in the Fluoride to Chlorinity Ratio south of Greenland Nature, *Nature*, Vol.242, No.122, 99.142-143, 1973
- 21) 野崎義行：最新の海水の元素組成表とその解説，日本海水学会誌，第51巻，第5号，pp.302-308, 1996
- 22) 千葉県：建設発生土管理基準，<http://www.pref.chiba.lg.jp/gikan/koukyoujigyuu/documents/hasseidokanrikijun3.pdf>, 2008.
- 23) 環境省：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），<https://www.env.go.jp/jishin/attach/no120525001.pdf>（2016年4月1日閲覧），2012.

[研究概要図]

【3K133003】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 京都大学・教授 勝見 武



## 科学的意義と社会・環境政策への貢献

### 1. 分別土砂の特性の解明

- ✓ 通常の土砂と同等の材料特性を有する
- ✓ 混入する木片の腐朽に伴う分解性は高くない
- ✓ 盛土としての長期安定性も高い

### 2. 分別土砂の特性を評価しうる試験法の提案

- ✓ 350 °C での強熱減量値で木片含有量を評価しうる
- ✓ 粒子密度を考慮した特性評価が必要である

### 3. 災害廃棄物処理のシステムと分別土砂の品質の検証

- ✓ 処理内容によらず地盤材料として利用しうる
- ✓ 化学特性等は添加材による影響を受ける

### 4. 災害廃棄物の処理と再資源化に関するマニュアルの構築

- ✓ 災害からの復興における社会基盤整備への復興資材等の利用のあり方に関する提言
- ✓ 災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用ガイドライン

土の利活用促進による**最終処分量の低減**  
 将来の災害における**円滑な災害廃棄物処理の実現** に貢献

## [英文概要]

## Soils Recovered from Disaster Debris – Characterization, Standardization and Strategic Utilization

Principal Investigator: Takeshi KATSUMI

Institution: Graduate school of Global Environmental Studies, Kyoto University  
Yoshida-honmachi, Sakyo, Kyoto 6068501, JAPAN  
Tel: +81-75-753-5114 / Fax: +81-75-753-5116  
E-mail: katsumi.takeshi.6v@kyoto-u.ac.jp

Cooperated by: National Institute for Environmental Studies, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Iwate University, Tohoku University, Tohoku Institute of Technology, Waseda University, Meiji University, Nagoya University, Okayama University, National Institute of Technology, Kagawa College, Kagawa University, Fukuoka University, Nagasaki University, Iwate Prefecture Government

## [Abstract]

Key Words: Recovered soil, Disaster debris, The Great East Japan earthquake

Utilization of soils recovered from disaster debris as geomaterials has been strongly desirable after the 2011 Tohoku earthquake and tsunami, because the soil fraction accounted for a third of the approximately 30 million-ton disaster debris and tsunami deposits. Soils recovered after treatment, however, generally contain a considerable fraction of small wood pieces derived from wooden waste. Since the clarification of the characteristics of such soils containing woodchips future is important for utilization of the recovered soils as geomaterials, this study focused on the material properties of recovered soils through laboratory and field tests. Actual data accumulated for management of recovered soils were statistically assessed to verify spatial and temporal change in quality and relationship between disaster waste treatment systems and the quality.

Laboratory tests confirmed that soils recovered from disaster debris have the mechanical properties high enough to be utilized as geomaterials as general soils. Specifically, a sandy fraction is a main component of the recovered soils, and the high strength can be achieved because fibrous substances such as fine woodchips can act as a reinforcing material. Because no negative impact on the long-term behavior of the recovered soils was observed in laboratory- and pilot-scale tests, degradation of woodchips in recovered soils by microorganisms would not significantly affect the stability of geostructures where the recovered soils are used from the chemical and mechanical point of views. We also suggested some new testing methods for the assessment of characteristics in view of uniqueness of recovered soils through laboratory-scale tests.

Statistical analysis about the material properties of recovered soils indicated that recovered soils in Iwate prefecture had the sufficient mechanical properties as geomaterials regardless of the treatment system and the progress of treatment, while several chemical properties were affected by additive materials used for the improvement of the quality.

Based on these achievements obtained in this study, several guidelines have been published in cooperation with various relevant associations and institutions to provide specific directions for the removal and the treatment of disaster debris, the utilization of recovered materials. These scientific knowledge and social frameworks could achieve the reduction in waste volume by promotion of active utilization of recovered materials, and can contribute to the prompt and adequate disaster waste treatment on the occurrence of future disasters.