

8. 災害廃棄物再生利用促進に関する調査・研究 ＝災害廃棄物由来の分別土砂の締固め特性と締固め管理の検討＝

中村吉男

1. はじめに

地震や土砂災害および風水害等によって排出された廃棄物（災害廃棄物）は事業活動によって発生した廃棄物ではないことから「一般廃棄物」に該当し、その処理責任は地方公共団体（区市町村）に帰属する。また、環境省が策定した災害廃棄物対策指針¹⁾によれば、災害廃棄物には「住民が自宅内にある被災したものを片付ける際に排出される片付けごみと、損壊家屋の撤去（必要に応じて解体）等に伴い排出される廃棄物がある」とされ、廃棄物は可燃物や木くず、不燃物等の計12種類の要素に分類されている。

平成23年に発生した東日本大震災では、地震と津波により約3,100万トンの災害廃棄物が発生した²⁾。これら大量の災害廃棄物は土砂と混在した状態で仮置きされたが、全質量の約3分の1以上が土砂で占められていた³⁾ことから、土砂とそれ以外の廃棄物に分別処理し、復興資材として利活用すべく再資源化が行われた⁴⁾。今後発生することが確実視されている南海トラフ巨大地震では、太平洋沿岸の広範囲にわたり多量の災害廃棄物が発生されると予測されており、発生量⁵⁾は東日本大震災の経験を基に推計すると約3億トンにおよび、この内約1億トンが土砂混合廃棄物であると想定されている。

被災地で発生した災害廃棄物は、仮置場へと集積され破碎・選別処理が行われる。土砂混合廃棄物の一次処理は、コンクリート殻（以下、「コンガラ」と称す）等を含む不燃系混合物と、木片などを含む可燃系混合物に粗選別するものであり、二次処理として破碎機およびふるい機を用いた選別が行われる。そして、ふるい通過物は分別土砂として取り扱われることになるが、木片やコンガラ等の夾雑物を完全に除去することは時間的にも費用的にも極めて困難である。したがって、夾雑物混じりの分別土砂を復興資材として積極的に活用するためには、夾雑物が混入した分別土砂の地盤工学的特性を把握し、それに応じた部位に適用することが合理的と考えられており、その際留意すべき事項について、マニュアル⁶⁾やガイドライン⁷⁾に取りまとめられている。

本研究では、室内実験に基づく木片混じり分別土砂およびコンガラ混じり分別土砂の締固め特性に基づき、災害廃棄物由来の分別土砂の締固め管理について提言するものである。

2. 分別土砂の締固め特性

2.1 木片混じり分別土砂の締固め特性^{8、9)}

土粒子に比べ剛性と密度の低い木片が土砂に混入すると、土の締固め効率が低下し、締固め密度も低下することは想像に難くない。そこで、礫質土における礫の混入が土の締固めに及ぼすWalker-Holtzの考え方を適用し、木片混じり分別土砂の締固め特性を考察した。

Walker-Holtz¹⁰⁾は、粗粒分を含む土の締固めにおいて、粗粒分（礫）と細粒分（土）の締固め密度に着目し、礫と土が混合した全体材料の締固め密度はある粗粒分混入率まで次第に大きくなるが、それ以上の混入率になると全体密度は低下することを実験的に明らかにした。すなわち、Walker-Holtzは、“土と礫の混合物を締め固めた場合、礫の間隙は土で満たされ、間隙の中の土はその締固め仕事量で土のみを締め固めた場合の密度になる”という仮説を立てて実験を進めた。そして、この仮説は礫の混入率が小さい時に成り立ち、混入率が大きくなると締固めエネルギーが礫の存在によって伝達されにくくなり、間隙を満たす土の乾燥密度 ρ_d は減少して仮説と相

反する結果となることを明らかにした。多くの実験結果から、この仮説が成立する礫の混入率は30~40%程度であるとされ、礫分の混入率を考慮した締固め密度は(1)式で評価される¹¹⁾。

$$1/\rho_{dt} = (1-P)/\rho_{ds} + P/\rho_{dg} \quad (1)$$

ここに、 ρ_{dt} ：礫と土の全体の乾燥密度 ρ_{ds} ：土の締固め乾燥密度 ρ_{dg} ：礫のカサ比重乾燥密度
 P ：礫率（小数点表示）

(1)式を適用して木片混じり分別土砂の締固め密度について整理する。礫率 P を木片混入率 P_w に、全体乾燥密度 ρ_{dt} を木片混入土砂の全体乾燥密度 ρ_{dwt} に、 ρ_{ds} は同様に木片を除く土の乾燥密度とし、 ρ_{dg} を木片の単位体積質量 ρ_{dw} に読み替えると、(1)式は(2)(3)式で表される。

$$P_w = M_w / (M_w + M_s) \quad (2)$$

ここに、 M_w ：木片の乾燥質量、 M_s ：土の乾燥質量

$$1/\rho_{dwt} = (1 - P_w)/\rho_{ds} + P_w/\rho_{dw} \quad (3)$$

実験に用いた分別土砂は、実際に選別処理された宮城県K地区と岩手県Y地区の分別土砂であり、これに工作用の檜材を寸法調整して加工した人工木片を混合させ、JIS A 1210に準じ、標準モード（ $\phi 100\text{mm} \times h 127\text{mm}$ ）を使用して乾燥法・繰返し法による締固め試験を行い、Walker-Holtzの理論式に基づいて木片による締固め阻害影響を調べた。なお、締固め試験は標準プロクター（ $E_c \approx 550\text{kJ/m}^3$ ）と修正プロクター（ $E_c \approx 2,500\text{kJ/m}^3$ ）の2種類の締固めエネルギーで行った。図-1は締固め試験結果に基づく P_w と最大乾燥密度で評価した ρ_{dwt} の関係を整理したもので、(3)式で求めたそれぞれの理論値を実線で併記した。K地区分別土砂では $P_w = 8\%$ まで、Y地区分別土砂は $P_w = 12\%$ までは実験値と理論値とが一致しており、この程度の木片の混入は土の締固めを阻害しないことが理解できる。また、 $P_w = 16\%$ では E_c の違いによる ρ_{dwt} の差が小さくなることから、 P_w が高くなると E_c を高めても締固めの効果は上がらないことが確認された。

さらに、これらの特性を検証するため、5号珪砂とクレイサンドを用いて粒度組成の異なる模擬分別土砂を製作し、同様に、寸法調整した檜材による人工木片を混合してJIS A 1210に基づいた標準締固め試験（ $E_c \approx 550\text{kJ/m}^3$ ）を行った。図-2は、木片混じり分別土砂および木片混じり模擬分別土砂の ρ_{dwt} と P_w との関係を整理したもので、実験値（ ρ_{dwtE} ）をWalker-Holtzの理論値で（ ρ_{dwtT} ）除して正規化している。図中、分別土砂、模擬分別土砂、いずれも $P_w \approx 10\%$ を超えると実験値と理論値の差が明確に表れることから、土の締固めを阻害する P_w は10%程度と考えてよいものと判断される。

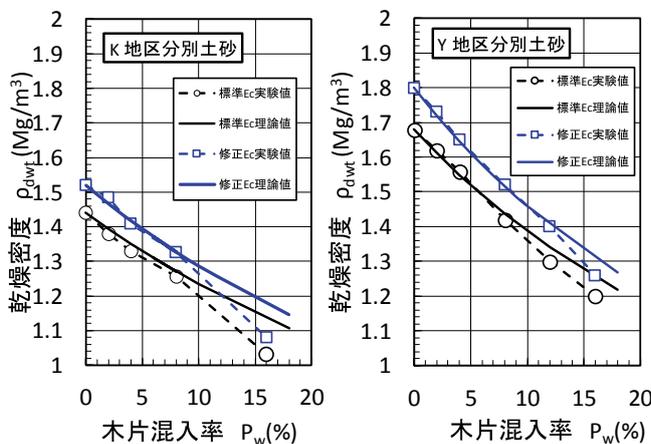


図-1 P_w と ρ_{dwt} 乾燥密度の関係（木片混じり分別土砂）

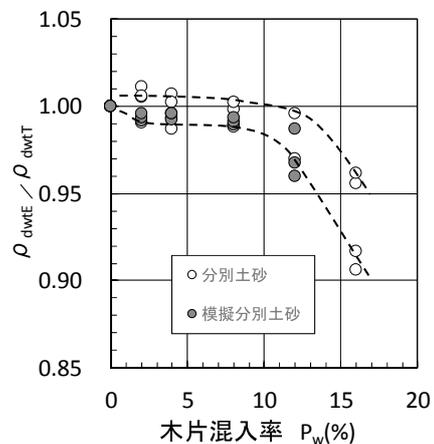
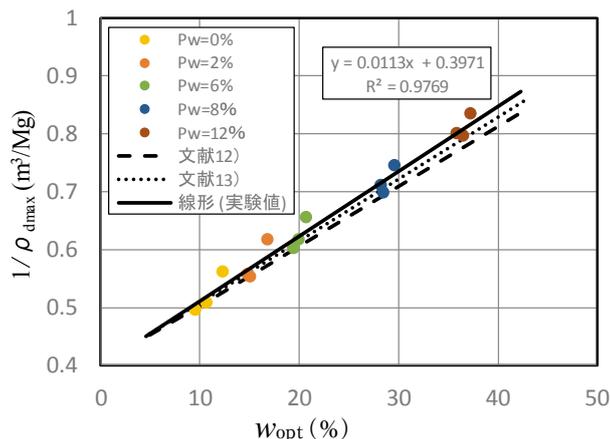


図-2 P_w と乾燥密度比（実験/理論）の関係

図-3 w_{opt} と ρ_{dmax} の関係

一方、 ρ_{dmax} と最適含水比 w_{opt} の間には、(4)式で示す相関関係があることが実験的に確かめられている¹²⁻¹⁴⁾

$$1/\rho_{dmax} = a \cdot w_{opt} + b \quad (4)$$

図-3は横軸に w_{opt} を、縦軸に ρ_{dmax} の逆数をとり模擬分別土砂の実験値をプロットしたものである。最小二乗法による回帰分析を行うと図中に示す回帰式が得られ、(4)式の係数 a 、 b が算定される。図-3より、 P_w が増すと w_{opt} は大きくなり、 ρ_{dmax} は低下することが分かるとともに、決定係数 $R^2=0.9769$ が示すように、回帰式が実験値によくあてはまることを示している。また、図中には文献^{12),13)}で示されている相関関係も併記した。なお、既往研究¹²⁻¹⁴⁾で提示されている(4)式中の a 、 b の値については $a=0.0103\sim 0.0109$ 、 $b=0.3800\sim 0.4000$ であり、一般土と $P_w \leq 12\%$ の木片混じり模擬分別土砂は類似した係数が得られている。前述した木片混じりの分別土砂における木片の混入と礫の混入による土の締め固め阻害状況の類似性等からも、多くの点で一般の土の締め固め特性との共通性があるものと思われ。

2.2 コンガラ混じり分別土砂の締め固め特性¹⁵⁻¹⁶⁾

巨大地震において発生する津波堆積物を想定し、三重県四日市港で採取した2種類の浚渫土を用いた分別土砂の締め固め実験を行った。実験に用いた浚渫土の1つは、粗粒分が卓越した河川堆積物(砂:4.75mmふるい通過試料、以下「S」と称す。)であり他方は、細粒分が卓越した海底堆積物(粘土:425 μ mふるい通過試料、以下「C」と称す。)である。この2つの試料を乾燥質量比3:1、1:1、1:3で混合したものを母材(混合土砂)とし、それぞれS75C25、S50C50、S25C75と呼ぶ。また、コンガラとしては再生碎石(RC-40)の4.75mm通過試料を用いた。津波堆積物由来の模擬分別土砂は、母材にコンガラを混入させて作製したもので、コンガラ混入率(母材に対する乾燥質量比) p は、0、10、30%の3水準とした。図-4にコンガラ混じり模擬分別土の締め固め曲線を示す。図より p 、母材の細粒分組成比率増加に伴い、締め固め曲線は右下にシフトし、母材の細粒分組成比率が多くなるにつれて締め固め特性に及ぼすコンガラ混入の影響は小さくなることがわかった。模擬分別土砂の締め固め特性(含水比 w と ρ_d の関係)および w とコーン指数 q_c の標準的な関係は図-5に示すとおりであり、 w の増加とともに q_c は減少し、 w が w_{opt} より乾燥側に移行して、 ρ_d が ρ_{dmax} より減少しても q_c が増加することが確認された。地盤強度・剛性指標の一つである q_c と w の関係が、図-5のような相関にあることは一般土においても確認されている¹⁷⁾。すなわち、地盤強度剛性の指標(コーン指数、地盤反力係数、CBR等)は、 ρ_d と飽和度 S_r の関数であり¹⁸⁾、 ρ_d が増加すると指標値は増加するが S_r が増加すると低下するため、同一の締め固めエネルギーレベルでの締め固め曲線に沿って、 q_c は図-5に示すような形状を呈するものと解釈されている¹⁸⁾。

図-6は、母材の粒度組成比率および p をパラメータとした w と q_c の関係を示す。これから以下のことが分かる。

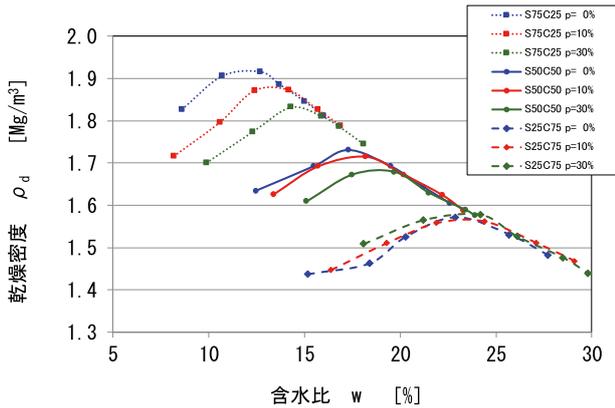


図-4 コンガラ混じり模擬分別土砂の締固め曲線

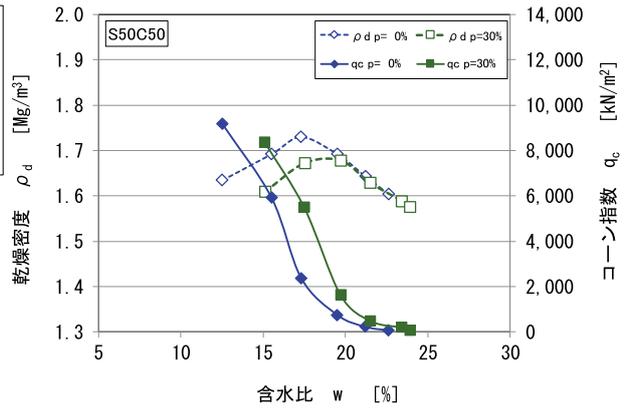


図-5 コンガラ混じり模擬分別土砂の締固め特性およびwとqcの関係

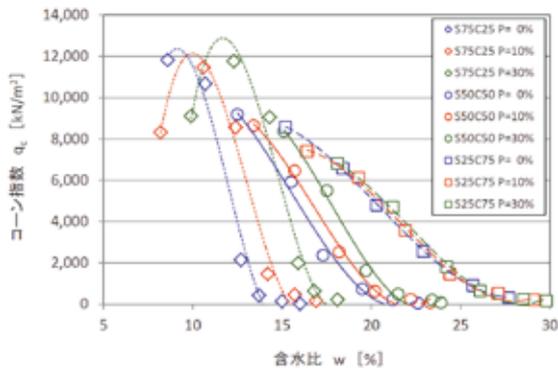


図-6 wとqcの関係

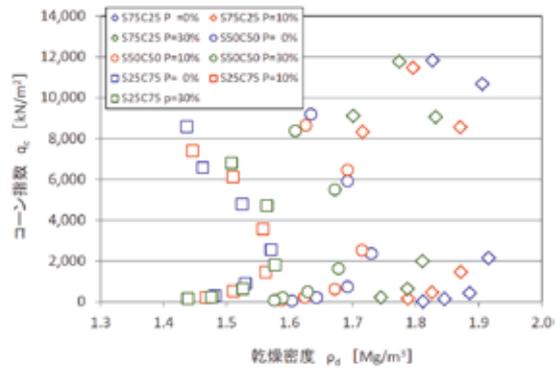


図-7 コンガラ混じり模擬分別土砂のρdとqcの関係

- ① 模擬分別土砂の q_c は、母材の粒度組成比率に拘わらず、 w の増加に伴って低下する。
- ② w の増加に伴う模擬分別土砂の q_c の低下は、母材の粗粒分組成比率が多い方が顕著である。
- ③ 同一 w の場合、 p の増加に伴って模擬分別土砂の q_c は増加する。
- ④ p の増加に伴う模擬分別土砂の q_c の増加は、母材の粗粒分組成比率が多いほど顕著である。
- ⑤ ある q_c を得るための模擬分別土砂の w は、母材の細粒分組成比率が多くなるほど大きくなる。
- ⑥ ある q_c を得るための模擬分別土砂の w は、 p が多くなるほど大きくなる。
- ⑦ 模擬分別土砂の細粒分組成比率が多くなると、コンガラ混入に伴う w および q_c の変化は小さくなる。
- ⑧ 模擬分別土砂の q_c と ρ_d は、 $q_c \leq 2,000 \text{ kN/m}^2$ 以下では正、以上では負の強い相関性が認められ、それは細粒分組成比率が多い模擬分別土砂ほど明確である。
- ⑨ 試験実施範囲の中では母材の粗粒分組成比率が多いほど、模擬分別土砂の q_c は大きくなる傾向を示す。
- ⑩ 模擬分別土砂の細粒分組成比率が多くなるに従い、コンガラ混入に伴う ρ_d の変化は小さくなる。

上記③～⑦に関しては、母材の細粒分組成、或いは p の増加に伴って締固め曲線が右下にシフトし、細粒分組成比率が多くなるとコンガラ混入の影響が小さくなることによるものと考えられる。

図-7は同じく ρ_d と q_c の関係を示し、これより以下のことが分かる。なお、上記⑧に関して、 $q_c \leq 2,000 \text{ kN/m}^2$ となる w は母材の粒度組成比率、 p に拘わらず、概ね w_{opt} に等しい。また、⑨に関して、母材の粗粒分組成比率が多いほど締固め曲線は左上にシフトし、 w が小さくなるためと考えられる。そして、⑩に関しては、母材の細粒分組成比率が多くなると、締固め曲線は右下にシフトし、曲線形状はなだらかになって、 ρ_d のレンジが狭まることに起因していると考えられる。以上より、 q_c を指標としコンガラ混じりの模擬分別土砂の締固め特性を評価すると、 q_c は母材の粒度組成比率、 w 、 p の影響を受けるが、 w を吟味し締固め土砂の q_c を管理することで、目的に応じた用途に利用できることが示唆される。

3. 締固め管理について

盛土地盤の品質管理は、一般に w と ρ_d に着目した締固め度に基づいて行われる。この方法は、せん断強度、透水性、圧縮性等、地盤の力学特性を直接求め、設計数値との関連を照査して品質を吟味するものではないが、 w を測定して土の状態を調べ、締固めによって得られる ρ_d から施工の良否や盛土の機能を評価する方法として広く用いられてきた。しかし、近年、現場での締固め管理技術の合理化の観点から、現場で測定した地盤剛性指標などに基づいて締固め状況を判断して、施工管理と品質管理を合理化する技術の確立が求められている。そこで、落球探査試験¹⁹⁾により物性を評価して品質管理を行うことの有効性を吟味するため、砂（5号珪砂）と粘土（岐阜県土岐市産、クレイサンド）を混合した土砂に木片を混入させた模擬分別土砂を用いた室内土層実験を行った²⁰⁾。ここで、模擬分別土砂の粒度組成は、気仙沼処理区における津波堆積物由来の分別土砂の粒度分布²¹⁾を参考として砂と粘土を乾燥質量比で1：1.5の割合で混合して模擬分別土砂の母材とし、最大粒径10～30mmの園芸用のバーク材を乾燥質量比で $P_w=0$ 、2、4、8%加えて木片混じりの模擬分別土砂を作製した。落球探査試験は、加速度センサーを内蔵した半球状の金属製重錘（直径20cm、重さ19.1kg）を用いるサウンディングであり、自由落下させた重錘の加速度と接触時間の関係を観測し、重錘の着地時に加速度センサーで捉えた衝撃波の継続時間から、Hertz（ヘルツ）が提案した弾性球体の接触理論に基づき、地盤の変形係数 E_f を推定するものである。

各試験体の締固め状態は、土工事の品質管理において規定される締固め度、すなわち、試験体の ρ_d を ρ_{dmax} で除した値（ D_c ）と w と w_{opt} の差（ $w-w_{opt}$ ）を指標とした。図-8は、 w と E_f の関係を示したものである。 w が乾燥側から湿潤側に移行するにつれて、すなわち、飽和度が増加するにつれて剛性が低下しており、 $w=(w_{opt}-1)\%$ より湿潤側において、 E_f は木片の混入量の影響はほとんど受けず、 E_f は含水状態に支配されることが分かった。この要因の一つとして、湿潤側で締め固められた分別土砂では、分別土砂単味（マトリックス部）の E_f が木片の弾性係数に比べて小さくなっていることが考えられる。また、地盤強度と w の関係（図-5、6）および地盤剛性と w の関係（図-8）を比較すると横軸の取り方が相違しているものの、 w の変化に対する強度・剛性の変化は類似することが示唆される。

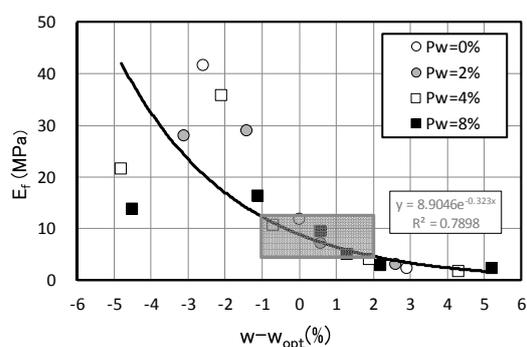


図-8 $w-w_{opt}$ と E_f の関係（木片混じり模擬分別土砂）

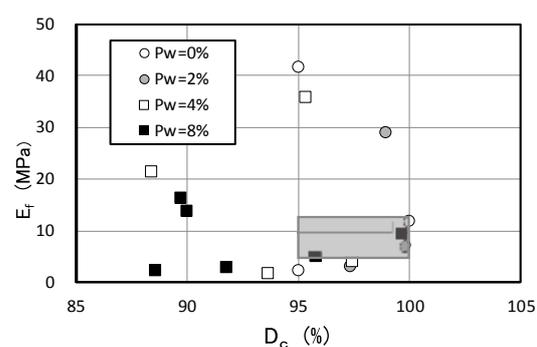


図-9 D_c と E_f の関係（木片混じり模擬分別土砂）

一方、 D_c と E_f の相関は図-9に示すような関係に整理される。 D_c と E_f は、 $E_f \leq 10$ MPa以下では正、以上では負相関性が認められ、 $E_f \approx 10$ MPaとなる D_c は P_w の混合率に関わらず $D_c=100\%$ であり、 ρ_{dmax} すなわち w_{opt} 付近で締め固められた状態で得られる値である。

このことは、図-7で見られる $q_c \approx 2,000$ kN/m²の存在とその時の締固め状態と一致しており、地盤強度・剛性指標を活用した現場での締固め管理の指標になりえるものと考えられる。すなわち w_{opt} 付近の地盤強度・剛性を w の上下限值や D_c 値の下限値を管理値として設定し、現場締固めエネルギーレベルの管理を前提にした地盤強度剛性指標の上下限設定することにより管理を行うことが合理的であり、例えば図-8、9に示す着色部を管理基準とすることが提案される。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、(株)アイコ 技術部技師長 鶴田稔氏、国立環境研究所 資源循環領域室長 肴倉宏史博士には有益な助言を賜った。また、研究の成果として土木・建築基礎工事と機材の専門誌（基礎工；特集 締固め土の物性と設計・施工管理）²²⁾ に寄稿した。記して謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 環境省：災害廃棄物対策指針（改訂版），平成30年3月
- 2) 環境省：東日本大震災等の経験に基づく災害廃棄物処理の技術的事項に関する報告書，平成29年3月
- 3) 高井淳史，川島光博，勝見武，乾徹，岩下信一，大河原正文：東日本大震災で発生した岩手県の災害廃棄物分別土砂の品質とその変化，土木学会論文集C（地圏工学），Vol.72, No.3, 252-264, 2016
- 4) 宮城県：災害廃棄物処理業務の記録，p54, 2014
- 5) 環境省：災害廃棄物の発生量の推計，平成25年度巨大地震発生時における災害廃棄物対策委員会第4回配布資料2, 2014
- 6) 岩手県：岩手県 復興資材活用マニュアル（改訂版），平成25年2月
- 7) 公益社団法人 地盤工学会：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
- 8) 中村吉男，野口真一，肴倉宏史，鶴田稔：木片の混入が分別土砂の締固めに与える影響について，第52回地盤工学研究発表会，pp.817-818, 2017
- 9) 辻直樹，中村吉男：災害廃棄物分別土砂に夾雑する木片類の腐朽を考慮した地盤特性評価に関する研究，愛知工業大学研究報告第54号，平成31年
- 10) Walker, F.C. and Holtz, W.G : Control of Embankment Material by Laboratory Testing, Proc. ASCE, Dec.1951. Sep. No.180
- 11) 山口柏樹，大根義男：フィルダムの設計及び施工，技報堂出版，pp.58-59, 1973
- 12) 野田健二：盛土の急速管理試験法，農業土木研究，vol.28, No.3, pp.15-20, 1960
- 13) 森満男：土の最大乾燥密度と最適含水比について，土と基礎，vol.10, No.9, pp.12-16, 1962
- 14) 宇梶文雄：フィルダム技術ノート，日刊工業新聞社，p.81, 1979
- 15) 鶴田稔，野口真一，中村吉男，酒井崇之，中野正樹：コンクリートがら混じり分別土砂の地盤工学的特性，土木学会第74回全国大会，Ⅲ-446, 2019
- 16) 鶴田稔，野口真一，中村吉男，酒井崇之，中野正樹：コーン指数によるコンクリートガラ混じりの分別土砂の締固め特性評価，第55回地盤工学研究発表会，22-1-2-06, 2020年7月
- 17) 伊藤康弘，坪田邦治，久保裕一，加藤雅也：貫入方法の違いによるコーン指数試験の一考察，全地連「技術フォーラム2015」名古屋，No.2015_12
- 18) 龍岡文夫，橋本毅：実大締固め実験による地盤剛性の法則性と土の締固め管理での活用，基礎工，Vol.48, No.11, pp.76-79, 2020.11
- 19) 吉田輝，北本幸義，川野健一，池尻健：落球探査による地盤の諸特性の評価，第46回地盤工学研究発表会，pp.113-114, 2011
- 20) 中村吉男，今山真治，小島淳一，小澤一喜，藤崎勝利，池尻健：落球探査試験による分別土砂地盤の物性評価と品質管理の適用性について，第13回環境地盤工学シンポジウム，pp.297-300, 2019
- 21) 宇野浩樹，根岸昌範，高畑陽，池田千博：気仙沼処理区における津波堆積物由来の再生資材と盛土材への適用性，地盤工学会誌，Vol.63, No.11/12, No.694/695, pp.20-23, 2015
- 22) 中村吉男，鶴田稔，肴倉宏史：災害廃棄物由来の分別土砂の締固め特性・締固め管理，基礎工，Vol.50, No.4, pp.100~103