

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

Mechanical Properties and their Influence on Foundation behaviors of Separated Waste Soils with Wood Chips

辻 直紀[†], 中村 吉男^{††}
Naoki Tsuji, Yoshio Nakamura

Abstract : This paper concerns mechanical properties and their influences on foundation behaviors of the separated disaster waste soils containing wood chips. Compaction tests were carried out on several separated soils in order to discuss allowable amount of chips (Pw) to form adequate skeleton structure in soils. Series of tri-axial compression tests were also made to examine decomposition effects of wood chips on the deformation/strength properties and long-term behavior of the separated soils. The test results revealed that the separated soils having less than 8% of Pw can have appropriate stiff skeleton structure through compaction, which therefore showed little effect of decomposition on the reduction of their deformation/strength properties. Also noted in the paper are applicability of the falling ball inspection test on the quality evaluation and control of the separated waste soils and some mechanical aspects of the relationship between compaction conditions and the amount of chips (Pw).

1. はじめに

1・1 研究背景

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災に伴い、被災地では約 3,000 万トンの災害廃棄物が発生した。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、全重量の約 3 分の 1 以上が土砂で占められていたことから、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¹⁾。しかし、分別土砂の中には除去しきれない木片等が夾雑し、これが将来的に腐朽して腐植劣化することが懸念され、積極的な利活用を阻む要因となった。地盤工学の分野において有機質土²⁾あるいは廃棄物混じりの土砂の工学的性質³⁾に関する研究は幅広く行われ、その利活用方法についても多くの知見が得られているが、災害廃棄物由来の分別土砂の地盤特性に関する研究は、東日本大震災を契機として緒に就いたばかりであり十分な研究がなされ

ていない。災害廃棄物を復興資材として利用を促進させることは、災害からの復興・復旧における地盤工学の重要な役割であり、将来的に発生が予測される巨大災害において、迅速な復旧・復興および災害廃棄物由来の分別土砂を積極的に有効利用し資源循環に貢献する上で、この種の材料の地盤特性の究明は重要なテーマである。

1・2 研究目的

本研究では、木片類の混入が地盤材料の特性にどのような影響を及ぼすのか、木片類が夾雑する分別土砂を利活用する際、地盤の品質をどのように評価するべきかといった課題に対し、以下の観点から議論するものである。

- 1) 木片の混入が分別土砂の締固めに与える影響
- 2) 木片の腐朽が分別土砂の強度・変形特性に与える影響
- 3) 分別土砂地盤の品質管理（落球探査法）の適用性

2. 木片の混入が分別土砂の締固めに与える影響

2・1 木片粒形の表示方法⁴⁾

木材は繊維方向に異方性を示すことから、分別処理に伴い破断した木片は扁平な形状や棒状を呈することが少

[†] 愛知工業大学大学院工学研究科（豊田市）

^{††} 愛知工業大学 工学部 土木工学科（豊田市）

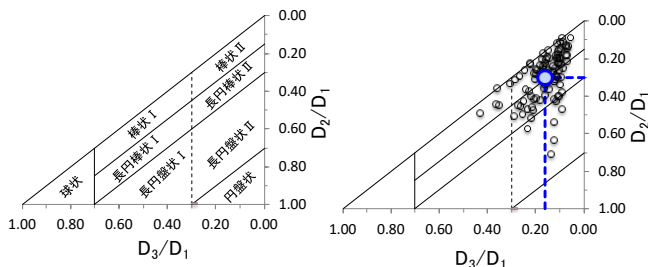


図-1 碎石の粒形表示²⁾による分別土中の木片粒形分布

ない。一方、粒状材料の締固めにおける粒状の形状の影響は、丸いものの方が角張っているものより、立方体に近いものは扁平なものより締固め密度は大きくなるとされている。その為、分別土砂の締固め特性を議論する上で、木片の粒状は重要な因子の1つであると考えられる。砂、砂利などの形状表示については、様々な方法がされているが、本研究では簡便で汎用性の高い松尾・小暮⁵⁾により提案された粒形表示法を用いて実際に宮城県気仙沼地区(K地区)で処理された分別土砂から100片の木片を任意に選定し、粒径を計測し図-1に示す結果が得られた。詳細は文献6)に譲ることとし、本研究では、この結果から棒状を呈する平均粒径比、 $D_2/D_1=0.30$ 、 $D_3/D_1=0.16$ を参考とし、工作用の檜材をこの粒径比になるよう加工して使用した。ここに、 D_1 、 D_2 、 D_3 はそれぞれ長径(最大径)、中径、短径(最小径)を表す。

2・2 分別土砂の締固め特性

Walker-Holtz⁶⁾は、粗粒分を含む土の締固めにおいて、粗粒分と細粒分に着目し、全材料の締固め密度はある粗粒分混入率含有率まで次第に大きくなるが、それ以上の含有率になると密度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、その締め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定をたて実験を進めた。そして、この仮定は礫の混入率が小さい時成り立ち、混入率が大きくなると締め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は減少し仮定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、この仮定が設立する礫の混入率は30%~40%程度であるとされている。また、礫分の混合割合に対する締め固め密度は、(1)式で評価できる。

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

ここに、 ρ_{dt} :礫と土の全体の乾燥密度、 ρ_{ds} :土の締め固め乾燥密度、 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入土砂の締め固め密度について整理すると、木片混入率を P_w 、木片混入土砂の全体乾燥密度を ρ_{dwt} 、木片を除く土の乾燥密度を ρ_{ds} とするとそ

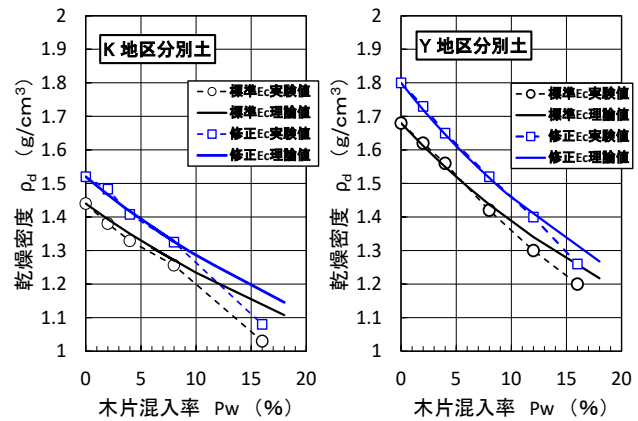


図-2 木片混入率と乾燥密度の関係(分別土砂)

れぞれ、(2)(3)式で示される。

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

ここに、 M_w :木片の乾燥重量、 M_s :土の乾燥重量

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

なお、 $\rho_{dw}(=0.54\text{g/cm}^3)$ は木片の単位体積質量試験より求めた。

実際に処理された宮城県K地区と岩手県Y地区の分別土砂に人工木片を混合させ、JIS A 1210:2009に準じ、標準モールド($\phi 100\text{mm}\times h 127\text{mm}$)を使用して乾燥法・繰返し法による締め固め試験を行い、Walker-Holtzの理論式を用いて木片の阻害効果を調べた。なお、締め固め試験においては、標準プロクターと修正プロクターの2種類の締め固めエネルギー(E_c)を与え、図-2に締め固め試験結果を示す。横軸に木片混入率を縦軸には締め固め曲線から求めた最大乾燥密度をとり、標準プロクターによる試験値を○印で、修正プロクターによる試験値を□印で示し、(2)、(3)式で求めたそれぞれの理論値を実線で表示している。K地区分別土砂とY地区分別土砂でそれぞれ $P_w\leq 8\%$ 、 12% までは理論値と試験値は一致しており、木片による土の締め固めは十分に行われていることが理解でき、また、 $P_w=16\%$ では締め固めエネルギーの違いによる乾燥密度の差が小さくなることから、木片の混入率が高くなると締め固めエネルギーを高めても締め固めの効果は上がらないことが示唆される。すなわち、木片が8%(K地区分別土砂)~12%(Y地区分別土砂)程度混入していても土の骨格形成には支障がなく、締め固めの観点からは、分別土砂の利用において、 $P_w\leq 10\%$ が1つの目安となるものと思われ。

2・3 模擬分別土砂の締固め特性

前節では、実際に処理された分別土砂を用いた締め固め試験を行い木片の混入による締め固め特性を評価した。本節では粒度組成を変化させた模擬分別土を用いて、木片混入と締め固めエネルギーの伝達効果について議論する。

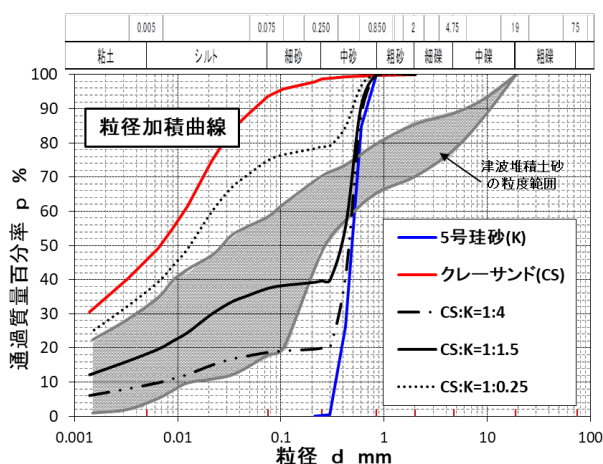


図-3 津波堆積土および模擬分別土の粒度分布

表-1 模擬分別土砂の物理特性

項目	K	Cs:K=1:4	Cs:K=1:1.5	Cs:K=1:0.25	Cs
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.647	2.652	2.657	2.666	2.671
最大粒径(mm)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
礫分(%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
砂分(%)	100.0	82.4	62.6	23.4	6.4
シルト分(%)	0.0	8.9	18.6	37.2	44.4
粘土分(%)	0.0	8.7	18.8	39.4	49.2
工学的分類名	S	SF	SF	C	CL

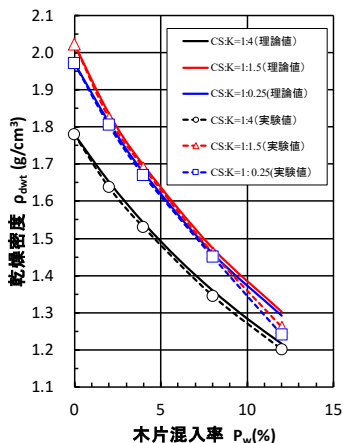


図-4 木片混入率と乾燥密度の関係(模擬分別土砂)

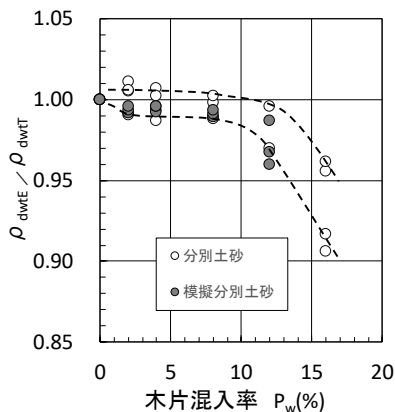


図-5 木片混入率と実験/理論乾燥密度比の関係

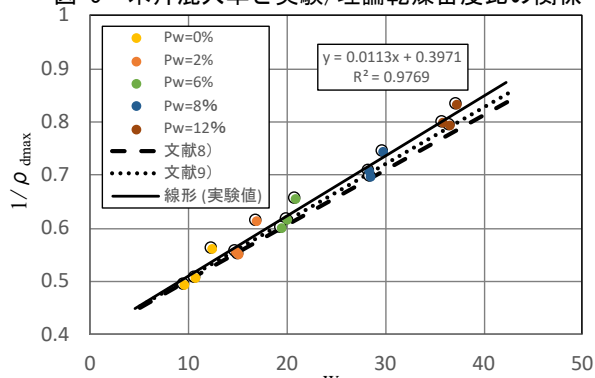


図-6 W_{opt} と ρ_{dmax} の関係

表-2 a, bの代表値

項目	a	b
模擬分別土砂	0.0113	0.3971
文献8)	0.0103	0.3993
文献9)	0.0107	0.4000
文献10)	0.0106	0.3935
	0.0109	0.3818
	0.0109	0.3800

図-3は気仙沼処理区⁶⁾における津波堆積物由来の分別土砂の粒度分布を示したものであり、粒度組成は礫分8~30%、砂分37~58%、シルト分7~37%、粘土分5~32%にあることが報告されている。本研究では、津波堆積物の5号珪砂(以下Kと表記)とクレイサンド(以下CSと表記)を用いて粒度組成の異なる模擬分別土を作成し、これに前節と同様、工作用の檜材による人工木片を混合してJIS 1210 Aに準じた標準締固め試験を行った。模擬分別土砂の物理特性を表-1に示す。

模擬分別土砂における木片混入率と乾燥密度の関係は図-4に示す通りであり、分別土砂の試験結果と同様、 $P_w \leq 10\%$ において理論値と実験値の整合性があることが分かる。また、実験値(ρ_{dwtE})を理論値(ρ_{dwtT})で除し、 P_w との関係を整理すると、図-5のとおりとなる。図中、分別土砂の結果を○印で、模擬分別土砂の結果を●印で表しているがいずれの結果も $P_w \leq 10\%$ を超えると実験値と理論値の差が明確に表れことから、木片の混入による土の締固めの阻害に影響する木片混入量 P_w は10%程度と考えることがよいものと判断される。

一方、最大乾燥密度(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⁸⁻¹⁰⁾。

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

図-6は横軸に W_{opt} を、縦軸に ρ_{dmax} の逆数を取り実験

値をプロットしたものである。最小二乗法近似を行うと図中に示す相関式が得られ、(4)式の係数 a、b が算定される。図-6において、木片混入率 P_w が増すと最適含水比は大きくなり最大乾燥密度は低下するが、 w_{opt} と $1/\rho_{dmax}$ の直線関係が保たれており、一般の土に見られる特性と変わりが無いことがわかる。また、既往研究で提示されている式(4)中の a、b の値については表-2 に示すとおりである。図中には文献 8)、9) で示されている相関関係を併記しているが、いずれも模擬分別土砂の相関関係と大差ないことがわかる。

3. 木片の腐朽を考慮した分別土砂の強度・変形特性

3・1 試験概要

地盤材料の長期安定性は、圧密特性とそれに伴う強度試験によって把握することができ、木片を夾雑する分別土砂においては、これらに加えて木片の腐朽に伴う沈下及び強度低下を吟味する必要がある。本研究では、5号珪砂(以下珪砂)にミョウバンを混入し、ミョウバンの水溶性を利用して木片類の腐朽・消失の再現を試みた。すなわち、分別土砂を珪砂とし、ミョウバンを木片とし、珪砂とミョウバンの混合割合と締固め度を変化させ締固めた土を三軸圧縮試験機にセットし、所定の拘束圧を付加した状態で通水しミョウバンを溶解させ、体積の変化を求めて変形特性を把握した後、せん断試験を行って強度特性を評価するものである。実験フローを図-7に実験ケースを表-3に示す。

3・2 変形試験結果¹¹⁾

変形試験では、体積変化量(ΔV)と初期体積(V_0)から変形の程度を表す諸量として体積ひずみ($\epsilon_v = \Delta V/V_0$)が求められる。図-8はミョウバンの混入率 $P_m=0\%$ のときの σ_3 と ϵ_v の関係を示したものである。 σ_3 の増加に伴って ϵ_v も増加し、相対密度が小さくなるにつれて ϵ_v が増加している。図-9は、分別土砂中にミョウバン混入させた場合の σ_3 と ϵ_v の関係を示したものである。 σ_3 の増加に伴って ϵ_v は増加するとともに、ミョウバンの混入率が大きくなるにつれて、 ϵ_v も増加する。また、相対密度が小さくなるにつれて ϵ_v が大きくなっている。しかし、 σ_3 の増加に伴う ϵ_v の増加は減少傾向にあり、しかも $Dr=60\%$ 、 $P_m=7\%$ での試験条件では σ_3 が増加しても ϵ_v はほぼ一定となっている。このときの供試体の間隙比を求めると、ミョウバンが消失したことにより生じた間隙には等方圧力の作用によって土粒子が充填され、供試体の初期間隙比と等方圧縮後の間隙比は等方圧力の大きさにかかわらず一致していることが確認されている。図-10は、等方圧力 σ_3 とミョウバンの消失に伴い生じるひずみ $\Delta \epsilon_v$ の関係を示したものである。 $\Delta \epsilon_v$ は図-

9におけるミョウバンを混入したときの ϵ_{vm} から、ミョウバン混入率 $P_m=0\%$ のときの ϵ_{v0} を差し引いたものである。すなわち、本研究ではこれを消失ひずみ ($\Delta \epsilon_v$) と称し、 $\Delta \epsilon_v = \epsilon_{vm} - \epsilon_{v0}$ として定義する。この結果から、ミョウバンの消失に伴う変形量 $\Delta \epsilon_v$ は、ミョウバン混入率が高くなると大きくなること、相対密度が大きくなると大きくなることに加え、等方圧力の大きさには依存しないことが伺える。ここでミョウバンの質量混入率 (P_m)、ミョウバンの粒子密度 (ρ_m) および締固め乾燥密度 (ρ_d) からミョウバンの体積混合率 (P_v) は形式的に $P_v = P_m \times \rho_d / \rho_m$ で表され、 P_v とミョウバンの消失に伴う $\Delta \epsilon_v$ の関係を整理すると図-11のようになる。 $Dr=60\%$ の試料においては、 $P_v \approx \Delta \epsilon_v$ を呈するが、ミョウバンの混入量が少なく、相対密度が大きくなると $\Delta \epsilon_v < P_v$ なる関係を呈することから、 $\Delta \epsilon_v$ の抑制には土の締固めが重要であるものと推定される。これには、ミョウバンが消失しても、土粒子の骨格が変形に抵抗していることが起因しているものと考えられる。木屑が完全に消失した場合の地盤の変形は木屑が消失した体積分の変形が生じるとして、分別土の利用が躊躇されてきたが、この結果から、締固めが十分行われるならば、木屑の消失により木屑が占める体積が全て空隙となったとしても、土の骨格等により空隙の全てが変形に寄与するものではないことが示唆される。

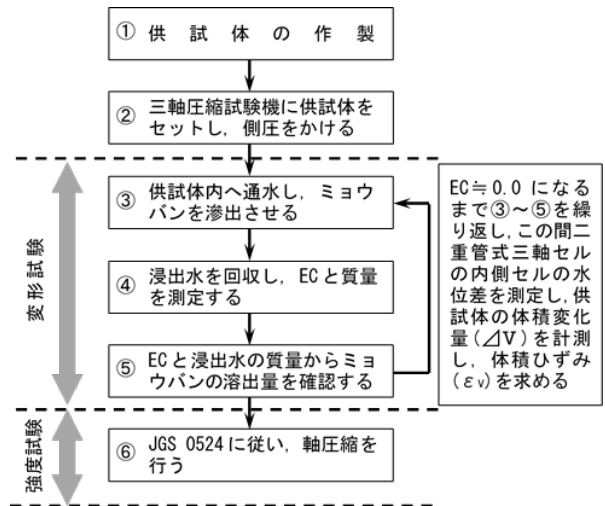


図-7 木片の腐朽を模擬した実験フロー

表-3 実験要因と水準

要因	水準	摘要
相対密度 (Dr)	3	95, 80, 60 (%)
ミョウバン混入率 (P_m ^{注1)})	4	0, 5, 7, 10 ^{注3)} (%)
等方圧力 σ_3 ^{注2)}	3	100, 200, 300 (kPa)

注1) $P_m = M_m / (M_s + M_m)$
 P_m : 分別土砂中のミョウバン混入率 (%)
 M_m : ミョウバンの乾燥質量 (g)
 M_s : 珪砂の乾燥質量 (g)
 注2) JGS 0524において規定される“圧密圧力”
 注3) $P_m=10\%$ は $Dr=95\%$ のみ実施

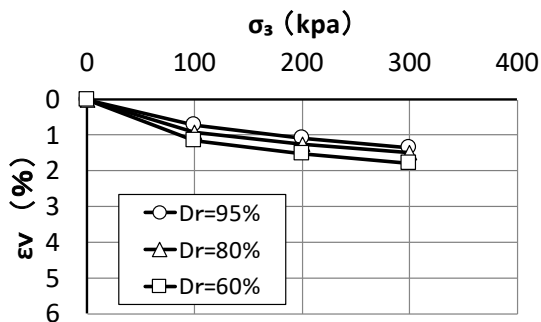


図-8 σ_3 と ε_v の関係 ($P_m=0\%$)

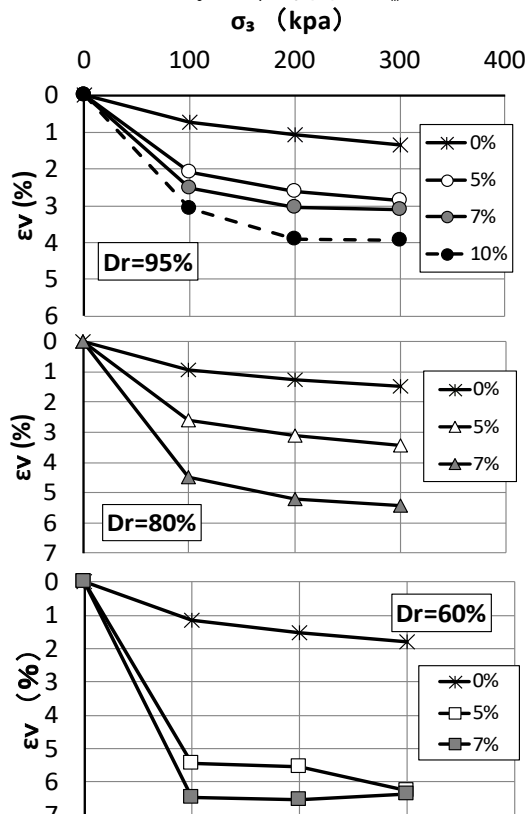


図-9 σ_3 と $\Delta \varepsilon_v$ の関係 ($P_m=0, 5, 7, 10\%$)

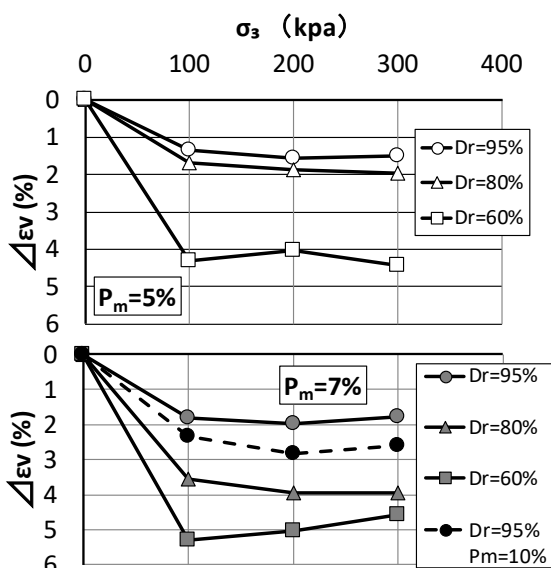


図-10 σ_3 と $\Delta \varepsilon_v$ の関係

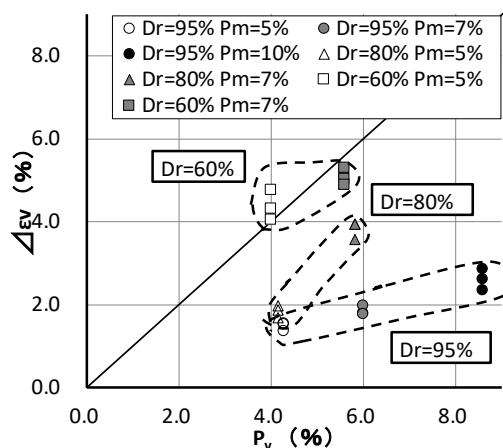


図-11 P_v と $\Delta \varepsilon_v$ の関係

3・2 強度試験結果¹²⁾

強度試験結果を総括して表-4 に整理した。表に示した ρ_s は模擬分別土砂の土粒子密度であり、珪砂の土粒子密度 ($\rho_k=2.625 \text{ g/cm}^3$) とミヨウバンの粒子密度 ($\rho_m=1.760 \text{ g/cm}^3$) および P_m から求めた。 ρ_{d0} は締固め時の初期乾燥密度であり、 ρ_{ds} はミヨウバンを空隙とした場合の初期乾燥密度である。 ρ'_d は変形試験後の乾燥密度であり体積変化量から算出された ε_v との関連で整理される。 e_0, e_s, e' はそれぞれ $\rho_{d0}, \rho_{ds}, \rho'_d$ に対応した間隙比であり、 e_0 は ρ_s を、 e_s と e' は ρ_k を用いて算定した。なお ε_v, ρ'_d と e' は等方圧力毎に算出されるが表には平均値を示した。また、 ϕ_d は図-12 に示す破壊時のモール円を包絡線し求めた。すなわち、圧縮強さ ($\sigma_1 - \sigma_3$) f と圧密圧力の関係¹³⁾による方法で行った。なお、本実験では BP を与え供試体は完全飽和させていること、母材は非粘着性材料である珪砂を用いていることから $C_d=0$ となるよう ($\sigma_1 - \sigma_3$) f と σ_3 の直線近似において切片をゼロとして ϕ_d を計算している。

土のせん断強度は締固め密度、間隙比に支配されるが、本実験では軸圧縮過程に至る等方圧縮段階で締固め状態が種々変化しており、表-4 に示すような密度・間隙比が提示される。 P_m, Dr の各因子によりこれらの値の相互関係は異なるが、例えば $P_m=0\%$ の場合は締固め条件に関わらず、 $e' < e_0 = e_s$ なる関係を呈し初期状態より密実になっていることがわかる。これに対し、ミヨウバンが混入すると、 $e_0 < e' < e_s$ あるいは $e_0 = e' < e_s$ なる関係となるが、いずれの条件においても e_0, e' は e_s より小さくなり、程度の差はあるものの等方圧力の作用によりミヨウバンの消失に伴う空隙は土粒子により充填された状態となっている。ただし、 $P_m=7\%, Dr=60\%$ を除き $e_0 < e'$ となっていることより、分別土砂中の木屑が消失しても、地盤の体積減少は木屑等の消失体積より小さく、また木屑の消失により地盤内に木屑が占める体積分の空隙が生じたとし

表-4 強度試験結果

P_m	(%)	0			5			7		
D_r	(%)	95	80	60	95	80	60	95	80	60
ρ_s	(Mg/m^3)	2.625			2.562			2.538		
ρ_{d0}	(Mg/m^3)	1.511	1.464	1.405	1.437	1.391	1.335	1.406	1.362	1.307
ρ_{ds}	(Mg/m^3)	1.511	1.464	1.405	1.285	1.245	1.195	1.195	1.157	1.110
ρ'_d	(Mg/m^3)	1.527	1.482	1.427	1.400	1.392	1.346	1.347	1.334	1.354
e_0		0.74	0.79	0.87	0.78	0.84	0.92	0.80	0.86	0.94
e_s		0.74	0.79	0.87	1.04	1.11	1.20	1.20	1.27	1.36
e'		0.72	0.77	0.84	0.87	0.89	0.95	0.95	0.97	0.94
ε_v	(%)	1.05	1.22	1.48	2.52	3.06	5.75	2.90	5.04	6.45
ϕ_d	($^\circ$)	41.7	39.0	36.5	39.2	37.0	35.6	38.5	37.0	35.5

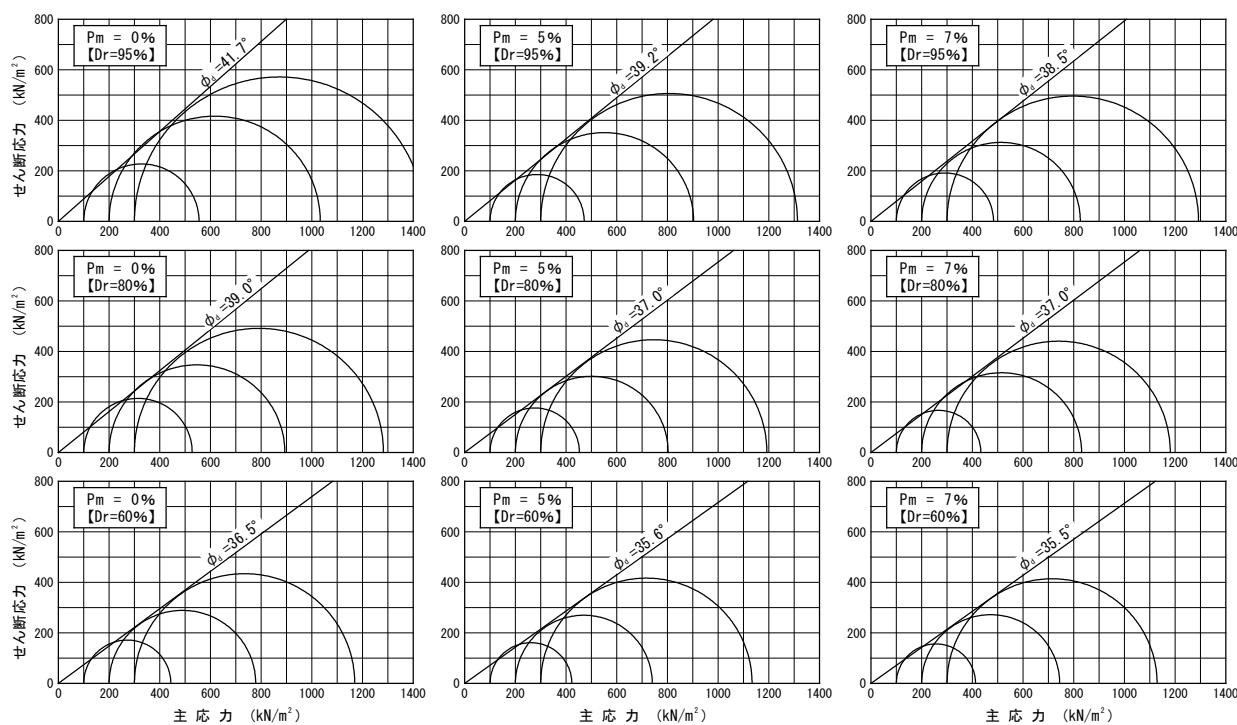


図-12 破壊時のモール円と破壊包絡線

でも、土の骨格等により空隙の全てが変形に寄与するものではないことが示唆される。図-12 に示す破壊時のモール円と破壊包絡線の関係から、木屑等の混入率が同じ場合、締め固めがルーズなほどせん断強度は小さくなり、地盤の締め固め具合が同じ場合、木屑等の混入率が少ないほどせん断強度は大きくなることわかる。ただし、せん断強度に与える影響因子は P_m より D_r の方が強く、例えば $P_m=5\%$ 、 $D_r=95\%$ の ϕ_d は 39.2° であり $P_m=0\%$ 、 $D_r=80\%$ の ϕ_d 39.0° より大きい。また、 $P_m=5\%$ 、 7% 、 $D_r=80\%$ の ϕ_d はそれぞれ 37.0° 、 37.5° であり、 $P_m=0\%$ 、

$D_r=60\%$ の ϕ_d 36.5° より大きな値を持つ。さらに $D_r=60\%$ の ϕ_d は $35.5^\circ \sim 36.5^\circ$ の範囲にあり P_m の因子の与える影響は小さくなっており、 ϕ_d に及ぼす支配な因子として D_r の影響が高いこと伺える。締め固め度と締め固めエネルギーには密接な関係があり締め固めエネルギーの付加は土の骨格構造に影響を与える。すなわち、 $P_m=0\%$ 、 $D_r=60\%$ の締め固め土と $P_m=5\%$ 、 7% 、 $D_r=95\%$ の締め固め土では後者の方が締め固め時に付加されるエネルギーは大きく、このことが少なからず ϕ_d におよぼす影響因子となっているものと推察される。

4. 落球探査法による分別土砂地盤の品質管理

盛土構造物の品質管理においては、含水比と乾燥密度に着目した締固度に基づく管理方法が一般的であるが、廃棄物層や災害廃棄物由来の分別土砂を用いた盛土の物性については十分な知見がえられておらず、原位置での力学定数を迅速かつ、簡便に測定する管理手法の開発と確立が望まれている。本研究では、その管理手法の一つとして落球探査試験法を用いた品質管理手法の適用性について吟味・検討する。落球探査法の適用性に関する現時点での到達度は、落球探査試験の特徴である衝撃荷重の応力伝播特性を評価する目的で室内実験を行い半無限地盤として適用しうる土層規模の検討を行うとともに、締固め条件と木片の混入量を変化させた模擬土層での実験から分別土砂地盤の品質管理における落球探査法の適用性について議論した。

4・1 落球探査法の概要¹⁴⁾

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る。機器構成は図-13 に示すように、球体を高さ 50cm の位置から自由落下させ加速度と接触時間の関係を観測する。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(接触時間)は地盤が軟らかい(=E が小さい)ほど長く、硬いほど短くなるため、接触時間と加速度の関係から地盤の硬軟を表す変形係数(E)と密接に関係しているものと考えられる。落球探査試験では、Hertz(ヘルツが提案した弾性球体の接触理論¹⁵⁾に基づき、重錘の着地を半径無限大の球体とみなされる地球(地盤)と、もう一つの球体である重錘との接触事象ととらえ、その挙動から地盤の変形係数 E を推定することが出来、経験的な相関式を用いるのではなく式 (5) に示す Hertz 理論式に接触時間を代入して E を算出する。

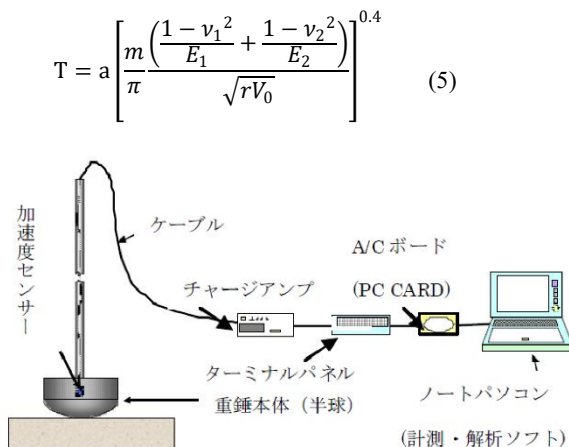


図-13 落球探査の機器構成¹⁴⁾

ここで m : 落球の重さ、r : 半径、E₁、E₂ : 落球と地盤の変形係数、

ν_1 、 ν_2 : 落球と地盤のポアソン比、V₀ : 着地速度 = (2gH)^{0.5}、g : 重力加速度、

H : 落下高さ、a : 定数(≒4.53)を示す。

ただし、上式は理想弾性体を対象としたものであり、地盤に適用する際は探査結果をもとに上式による推定値を補正する必要がある。ここでは、既往研究¹⁴⁾による補正方法を適用した。

4・2 落球探査試験における応力伝播特性について¹⁶⁾

落球探査試験法の工学的意義を究明するため、落球探査試験の特徴である衝撃荷重の応力伝播特性を評価する目的で室内実験を行った。具体的には、土層厚さと側方の拘束効果に着目し変形係数(地盤変形を線形弾性論で評価する際のヤング率に等しい次元 (ML⁻¹T⁻²) の変化を把握し、半無限地盤として適用しうる土層規模と探査深度について考察した。

(1) 土層規模

半無限弾性地盤の応力分布はブジネスクにより理論的に求められている。ただし、ブジネスク解は集中荷重を想定していることから均等な円荷重が作用した場合の応力解¹⁸⁾については、その荷重範囲で積分し(6)式として与えられる。

$$\frac{\sigma_z}{p_0} = 1 - \frac{1}{\left\{ 1 + \left(\frac{B}{2z} \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} \quad (6)$$

ここに、B : 基礎幅、 σ_z : 荷重中心軸上の鉛直応力、 p_0 : 等分布荷重、z : 鉛直深度である。ここで、土層規模を設定するにあたり、基礎幅 B に相当する載荷幅を、落球探査試験において生じる落球の載荷痕から B=10cm を想定すると、(6)式において 0.1 p_0 および 0.05 p_0 になる z はそれぞれ 1.5B (15 cm)、2.0B (20 cm) 程度と試算される。基礎の設計において応力の伝播状況伝達範囲とし

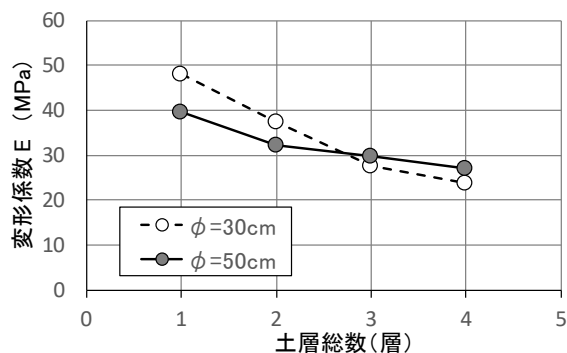


図-14 土層厚と E の関係

て 0.1p₀ 程度の範囲を対象としていることを考慮すると、土層の深さは D=20 cm 程度あればよいことになる。また、側方の拘束効果についても同程度の範囲を考えればよいものと思われが、球体の直径 20 cm を考慮して直径 30 cm と 50 cm のモールドを使用することとした。

(2)実験結果

試験に用いた材料は日本統一分類の細粒分質砂質礫 (GFS) に属し、自然含水比 W_f=30.8%で JIS×1Ec の突固めエネルギーで得られる締固め密度となるように試料調整を行い同一粒度で三軸試験と落球探査試験を行った。三軸圧縮試験は非圧密非排水条件 (UU) にて、JGS 0521 に準じ、供試体寸法 φ 15cm×H30 cm で実施した。応力～ひずみ曲線から求めた変形係数 E₅₀ は、σ₃=50～150 kPa の範囲において E₅₀=20～40 MPa の値をとることが分かった。また、落球探査試験において、試験土層は 1 層 5cm として所定の密度になるようにランマーで均一に締め固め、土層厚 5cm (1 層)、10cm (2 層)、15cm (3 層)、20cm (4 層) の 4 つの土層を作製し試験を行った。図-14 は土層厚 (層数) に対して得られた変形係数の関係を示したものである。土層モールドの径に関わらず層厚が増すにしたがって変形係数は低下する傾向にあり、D=5 cm で得られた変形係数は試験土層直下の鉄板と基礎のコンクリートに伝播した載荷荷重の影響が表れて変形係数が大きくなっているものと考えられる。3 層目から 4 層目で締め固めた土層の試験結果は値が収束し、三軸圧縮試験の E₅₀ とほぼ一致していることから、深さ 15～20 cm が落球探査における土層内の応力伝播域での値であるものと考えられる。なお、D=20cm における落球探査試験において生じた落球の載荷痕は 9.0 cm 程度であり、(1)項で示したブジネスク解による応力伝播域とも整合性のとれた結果となっている。

以上、室内試験結果から、半無限地盤を想定した原地盤での探査試験を室内試験で再現するためには、φ=30cm、D=20 cm の土層を使用すればよく、応力の伝播の状況がブジネスク解で評価できるものと考えれば、落球探査試験で得られる変形係数は比較的弾性変形に近い領域での物性値を与えているものと思われ。これについては、これについては文献 17) にて若干の考察を加えているので参照されたい。

4・3 分別土砂の品質管理における

落球探査試験の適用性

前節で検討した落球探査試験の応力伝播特性から、φ=30cm D=20cm の土層を用いて 2・3 節で示した Cs:K=1:1.5 の模擬分別土砂をベースとし、木片混入量 (P_w=0、2、4、8%) を変化させ、締固めエネルギー一定の条件で含水比を変化させて突き固めて作成した試験体の変形特性を調べることにより、分別土砂の品質管理に

おける落球探査試験の適用性を検討した。なお土層を作製するにあたり多量の木片が必要となることから本実験では、図-15 に示す園芸用のパークを木片として使用した。

各試験体の変形係数は表-5 に示すとおりであり、試験の締固め条件と対比して整理した。同表に示す w-w_{opt} は試験含水比と最適含水比の差を表し、D 値は試験体の乾燥密度を最大乾燥密度で除した値で、土工品の品質管理において規定される締固め度に対応している。

図-16 は、加速度と接触時間の関係について木片混入量毎に整理したものである。図中のインデックスはピークの加速度を記入したものであり、含水比(w)の増加に伴って加速度のピーク値は低下し接触時間が増加していることが分かる。ただし、この関係は、P_w=0～4%の試験においては明瞭であるが、P_w=8%は 2 つのグループに大別されていることが特徴的であり、少なからず木片の混入の影響が分別土砂地盤の変形性影響を及ぼすことが考えられる。そこで、木片の混入が変形特性に与える影響を調べるため、(w-w_{opt})の差を±1%で区分し P_w と E の関係を整理した(図-17)。W-w_{opt}<1 の乾燥側の締固めでは P_w の増加に伴い指数的に変形係数が低下するが、1 ≤ w-w_{opt}



図-15 落球探査試験で使用した木片

表-5 分別土砂における落球探査試験結果

P _w (%)	呼称	w-w _{opt} (%)	D値(%)	w(%)	ρ _d (g/cm ³)	E(Mpa)
0	D95dry	-2.6	95.0	7.0	1.922	41.58
	D100opt	0.0	100.0	9.6	2.023	11.92
	D95wet	2.9	95.0	12.5	1.922	2.37
2	wopt-3.1	-3.1	82.8	8.3	1.675	28.09
	wopt-1.4	-1.4	90.3	10.0	1.826	28.97
	wopt+0.6	0.6	91.1	12.0	1.842	7.14
	wopt+2.6	2.6	88.8	14.0	1.797	3.01
4	wopt-4.8	-4.8	76.4	10.0	1.545	21.49
	wopt-2.1	-2.1	82.4	12.7	1.666	35.87
	wopt-0.7	-0.7	86.0	14.1	1.739	10.68
	wopt+1.9	1.9	84.2	16.7	1.703	4.13
	wopt+4.3	4.3	80.9	19.1	1.637	1.66
8	wopt-4.5	-4.5	66.6	13.1	1.348	13.81
	wopt-1.1	-1.1	66.4	16.5	1.344	16.30
	wopt+0.6	0.6	73.8	18.2	1.493	9.59
	wopt+1.3	1.3	70.9	18.9	1.435	5.06
	wopt+2.2	2.2	68.0	19.8	1.375	2.88
	wopt+5.2	5.2	65.6	22.8	1.327	2.24

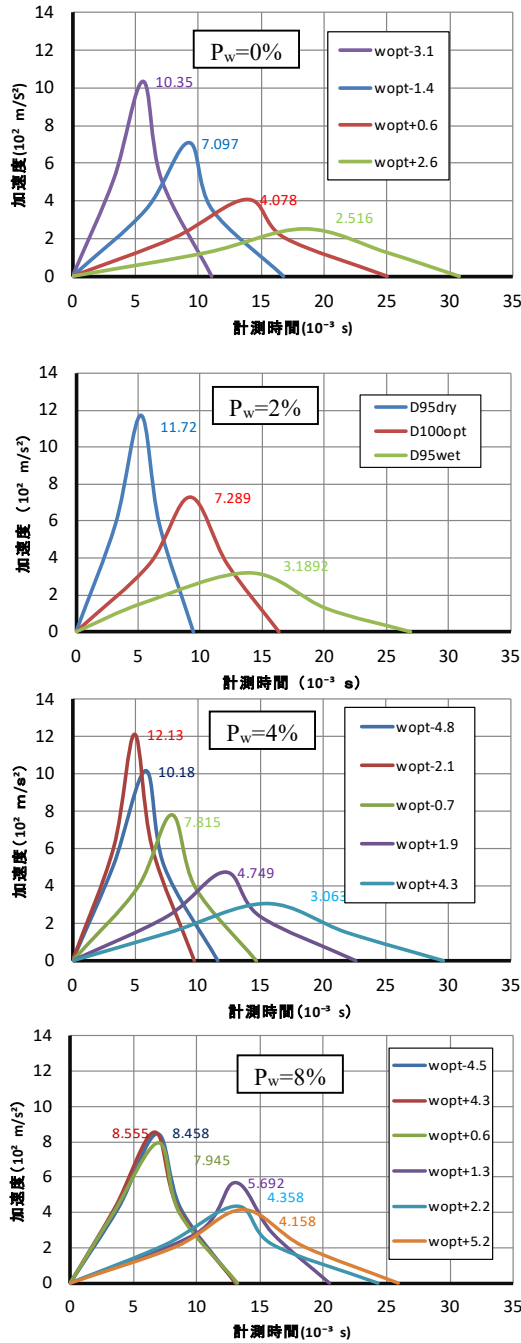


図-16 加速度と接触時間の関係

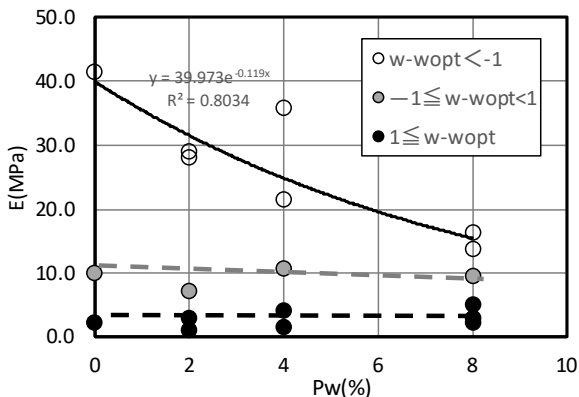


図-17 P_w と E の関係

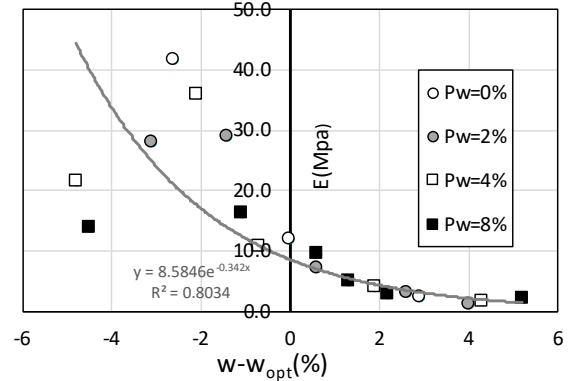


図-18 $w - w_{opt}$ と E の関係

の締固め状態では $P_w = 0 \sim 9\%$ の間でほぼ一定値を取ることが分かった。また、図-18は、 $w - w_{opt}$ と E の関係を示したものであり $w_{opt} = -1\%$ より湿潤側において、変形係数は木片の混入量の影響はほとんど受けず、変形係数は含水比状態に支配されることが分かった。フィルダム等の土工管理¹⁹⁾において許容される含水比は $w_{opt} \pm \alpha$ とされることがあり、例えば、 $-2 \leq w_{opt} \leq 1$ のような基準値を設け、落球探査による管理を行えば、 $P_w \leq 8\%$ の分別土砂を利用した盛土工事において均質な地盤の構築が可能であるものと思われる。

5. 結論

本研究で得られた成果と知見をまとめると以下のよう整理される。

- (1) 松尾・小暮の方法に従って分別土砂中の混入木片の粒形を調べたところ、平均的な粒径比は $D_2/D_1=0.3$ 、 $D_3/D_1=0.16$ となり棒状Ⅱに区分された。木材は繊維方向に沿う異方性を示すことから、分別時の破碎工程により棒状を呈する形状を持った木片が卓越して生成されるものと推察される。
- (2) 木片の形状を考慮した人工木片を作成し、分別土砂の混入による締固め特性を Walker-Holtz の理論に基づき検討した。この結果、木片の混入による土の締固めの阻害は、木片が $8\% \sim 12\%$ 程度混入していても土の骨格形成には支障がでないことが分かった。締固めの観点からは、分別土砂の利用において、 $P_w \leq 10\%$ が一つの目安となるものと思われる。
- (3) 木片の混入する分別土砂の締固めにおける ρ_{dmax} と w_{opt} の相関関係は、 $P_w = 0 \sim 12\%$ の範囲において一般の土と同様な傾向を示すことが分かった。
- (4) 分別土砂中の木屑が消失した場合の地盤の変形・強度特性に関して、ミョウバンを用いた模擬実験を行ったところ、①木屑等の混入率が同じ場合、締固めがルーズなほど変形は大きくなる。②地盤の締まり具合が同じ場

合、木屑等の混入率が大きくなるほど地盤の変形は大きくなる。③分別土砂中の木屑が消失しても、地盤の体積減少は木屑等の消失体積より小さく、木屑の消失により木屑が占める体積が全て空隙となったとしても、土の骨格等により空隙の全てが変形に寄与するものではないことが示唆された。

(5) 分別土砂中の木屑が消失した場合の地盤の強度特性に関し、分別土砂の強度の支配因子は P_w が 8% 以下の範囲において、締固め度が支配的であることが知れた。

(6) 災害廃棄物由来の分別土砂を用いた盛土の物性についてはいまだ十分な知見がえられておらず、原位置での力学定数を迅速かつ、敏速に把握できる品質管理を行って施工することが求められる。この観点から、落球探査試験による品質管理の適用性を吟味した結果、 w_{opt} -1%より湿潤側において、分別土砂地盤の変形係数は、木片の混入量の影響はほとんど受けず含水比状態に支配されることが分かった。これより、 $P_w \leq 8\%$ の分別土砂を用いた盛土工事との制限があるものの、均質な地盤を構築するうえで、落球探査試験による品質管理は有効な手法であることが確認された。

参考文献

- 1) 宮城県：災害廃棄物処理業務の記録, p54, 2014
- 2) 小暮敬二：高有機質土の地盤工学、東洋書店、1995 年
- 3) 財団法人土木研究センター：建設工事で遭遇する廃棄物混じり土対応マニュアル、鹿島出版会、2009 年
- 4) 中村吉男、野口真一、肴倉宏史、鵜田稔：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
- 5) 松尾新一郎・小暮敬二：碎石の透水性に関する実験、土と基礎 18-2 (144)、pp5-10、1970
- 6) Walker, F.C. and Holtz, W.G : Control of Embankment Material by Laboratory Testing, Proc. ASCE, Dec.1951. Sep. No.180
- 7) 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、地盤工学会誌、Vol.63 No.11/12, No.694/695, pp.20-23, 2015
- 8) 野田健二：盛土の急速試験法、農業土木研究、vol.28, No.3, pp.15-20, 1960
- 9) 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
- 10) 宇梶文雄：フィルダム技術ノート、日刊工業新聞社、p.81, 1979
- 11) 中村吉男、辻直紀、野口真一、鵜田稔、肴倉宏史：分別土砂中の木屑の分解・消失を模擬した土の変形特性の評価、第 53 回地盤工学研究発表会, pp.2353-2354, 2018
- 12) 中村吉男、辻直紀、野口真一、鵜田稔、肴倉宏史：分別土砂中の木屑の分解・消失を模擬した土の強度特性の評価、第 53 回地盤工学研究発表会, pp.2355-2356, 2018
- 13) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説 一二分冊の 2一、p.638、2009
- 14) 吉田、北本、川野、池尻：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
- 15) Goldsmith W.,: Impact, the Theory and Physical Behavior of Colliding Solid, Richard Clay and Company, Ltd., pp.83-91. 1960
- 16) 中村吉男、小島淳一、小澤一喜、藤崎勝利、池尻健：落球探査試験における締固め土の応力伝播特性について (その 1)、第 53 回地盤工学研究発表会, pp.297-298, 2018
- 17) 中村吉男、小島淳一、小澤一喜、藤崎勝利、池尻健：落球探査試験における締固め土の応力伝播特性について (その 2)、第 53 回地盤工学研究発表会, pp.299-300, 2018
- 18) 日下部治：土質力学、コロナ社、pp.133-134、2004
- 19) 土質工学会編：フィルダムの調査・設計から施工まで、p.304, 1983

(受理 平成 31 年 3 月 9 日)