

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

中村吉男¹・今山真治²・○小島淳一²・小澤一喜³・藤崎勝利³・池尻健⁴
¹愛知工業大学工学部・²アイコ・³鹿島建設・⁴セントラル技研

1. はじめに

盛土地盤の品質管理は、一般に含水比と乾燥密度に着目した締固め度に基づき行われる。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、含水比を測り土の状態を調べ、締固めによって得られる乾燥密度を測って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いる。一方、廃棄物層や災害廃棄物由来の分別土砂の力学物性については、研究途上にあり十分な知見が得られておらず、これらの材料を用いた盛土工事においては、せん断強度（ c 、 ϕ ）や変形係数などの力学定数を迅速かつ簡便に測定し、設計数値を満たすことを確認して施工を進める管理手法が求められることが少なくない。本研究は、木片の混入した模擬分別土砂を作成し、室内試験と原位置試験法（落球探査試験）で得られる変形係数を比較することにより、落球探査試験を用いた分別土砂地盤の物性評価と品質管理の適用性について議論するものである。

2. 落球探査試験における応力伝播特性について

2.1 落球探査法の概要¹⁾

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-1に示す通りであり、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ものである。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¹⁾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 を推定することができ、経験的な相関式を用いるのではなく式（1）による Hertz の理論式に接触時間を代入して E を算出する。ただし、式（1）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²⁾による補正方法を適用した。

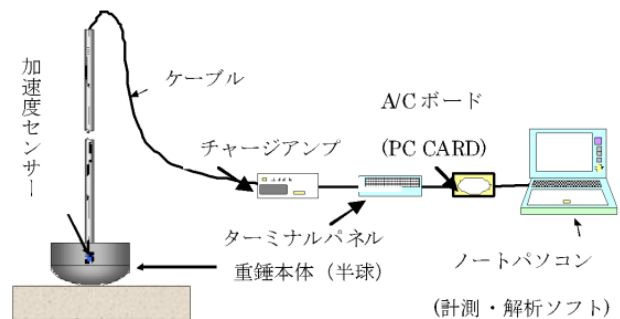


図-1 落球探査の機器構成²⁾

$$T = a \left[\frac{m \left(\frac{1 - \nu_s^2}{E_s} + \frac{1 - \nu_f^2}{E_f} \right)}{\sqrt{rV_0}} \right]^{0.4} \quad (1)$$

ここに、 T ：接触時間、 m ：落球の重さ、 r ：落球の半径、 E_s 、 E_f ：落球と地盤の変形係数、

ν_s 、 ν_f ：落球と地盤のポアソン比、 V_0 ：着地速度 $= (2gH)^{0.5}$ 、 g ：重力加速度、 H ：落下高さ、 a ：定数（ ≈ 4.53 ）

2.2 落球探査試験における応力伝播特性について³⁾

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； $ML^{-1}T^{-2}$ ）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シネスクにより理論的に求められている。ただし、ブシ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⁴⁾については、その荷重範囲で積分し式（2）として与えられる。

Applicability of Falling Ball Inspection Test on the Quality Control for Separate Waste Soils containing Wood Chips
 Nakamura Y.¹, Imayama S.², Kojima J.², Ozawa K.³, Fujisaki K.³, Ikejiri K.⁴ (¹Aichi Institute of Technology, ²AICO Co., Ltd, ³Kajima Corporation, ⁴Central Giken Co., Ltd)

KEYWORDS: Disaster debris, Quality Control, Fall Ball Inspection, Modulus of Deformation

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

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

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 $B=10\text{cm}$ と想定すると、(2) 式において σ_z が $0.1p_0$ または $0.05p_0$ となる 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て $0.1p_0$ 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 $D=20\text{ cm}$ 程度あればよいことになる。また、弾性半無限地盤を想定した場合、落球探査試験における荷重伝達は球状であり、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るが、球体の直径 20 cm であることから試験時における球体とモールドの接触等を考慮して直径 30 cm と 50 cm のモールドを使用することとした。

(2) E_{50} と E_f の比較

実験に使用した材料は、日本統一分類の細粒分質砂質礫 (GFS) に属し、試料の最大粒径 37.5 mm 、自然含水比 $w_f=30.8\%$ で JIS $\times 1\text{Ec}$ 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 $\phi 15\text{ cm} \times H30\text{ cm}$ で行った。応力～ひずみ曲線から求めた変形係数 E_{50} と側圧 σ_3 の関係は、図-2 に示すとおりであり、 $\sigma_3=50\sim 150\text{ kPa}$ における E_{50} は、 $20\sim 40\text{ MPa}$ の範囲にあることが分かった。また、落球探査試験において、試験土層は 1 層 5 cm 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 5 cm (1 層)、 10 cm (2 層)、 15 cm (3 層)、 20 cm (4 層) の 4 つの土層を作製し実験を行った。図-3 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、 $D=5\text{ cm}$ で得られた変形係数は試験土層直下の鉄板と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 E_{50} とほぼ一致していることから、深さ $15\sim 20\text{ cm}$ 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、 $D=20\text{ cm}$ における落球探査試験において生じた落球の載荷痕は $B=9.0\text{ cm}$ 程度であり、(1) 項で示したブシ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、試験の容易さ (手間) を考慮し $\phi=30\text{ cm}$ とし、 $D=20\text{ cm}$ の土層を使用することとした。なお、本節では土層規模の選定に着目して礫質土 (GFS) を用いた実験結果を示したが、後述する模擬分別土砂においても同様に E_{50} と E_f の相関性を確認しており、土層寸法の適用条件は満足するものと思われる。

3. 分別土砂の品質管理における落球探査試験の適用性

3.1 実験試料

木片などの夾雑物が混入した分別土砂を用いた盛土工事において、落球探査試験により物性を評価して品質の管理を行うことの有効性を吟味するため、砂 (5 号珪砂：K と表記) と粘土 (岐阜県土岐市産、クレイサンド：Cs と表記) 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土層実験を行った。ここで、模擬分別土砂の粒度組成は、気仙沼処理区⁵⁾における津波堆積物由来の分別土砂の粒度分布を参考として砂 (K) と粘土 (Cs) を乾燥重量比で $1:1.5$ の

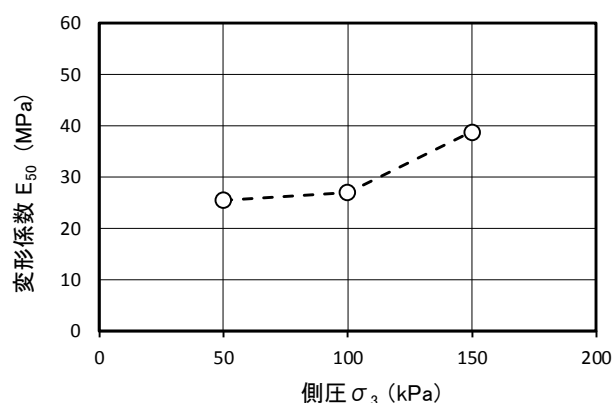


図-2 側圧と E_{50} の関係

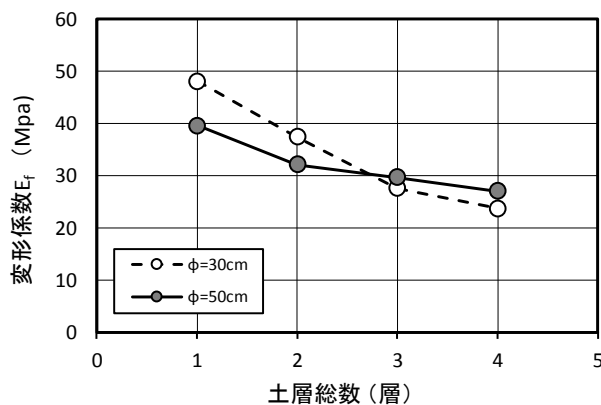


図-3 土層厚と E_f の関係

割合で混合した。模擬分別土砂の物理特性と粒度分布をそれぞれ表-1 および図-4 に示す。また、分別土砂中に混入する木片は最大径 10~30 mmの園芸用のバーク材を使用して、乾燥重量比で $P_w=0, 2, 4, 8\%$ 加えて模擬分別土砂とした。そして、前章で検討した落球探査試験の応力伝播特性を参考として半無限地盤と見なし得る土層 ($\phi=30\text{cm}$ 、 $D=20\text{cm}$) に、模擬分別土砂を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試験体を作成し、変形特性を調べることで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。

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 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	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

3.2 実験結果

各試験体の変形係数は表-2 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-5 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、 $P_w=0\sim4\%$ 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。

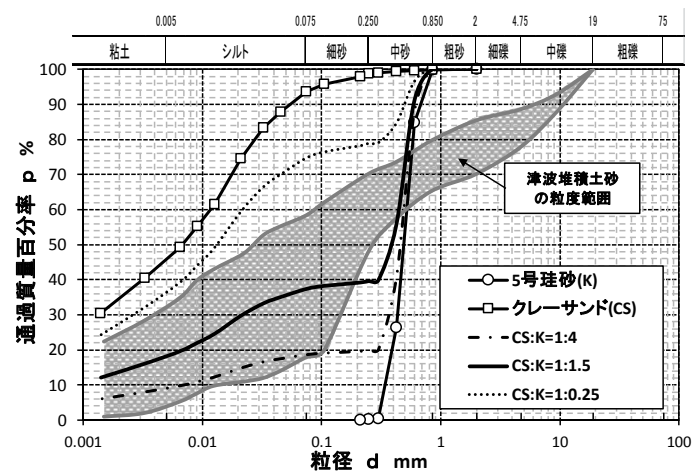


図-4 模擬分別土砂の粒度組成

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 $\pm 1\%$ で区分し P_w と E_f の関係を図-6 のように整理した。 $w-w_{opt}<-1$ 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、 $1 \leq w-w_{opt}$ の締固め状態では $P_w=0\sim9\%$ の間でほぼ一定値を取ることが分かった。また、図-7 は、 $w-w_{opt}$ と E_f 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る。分別土砂の変形係数を支配する要因として土粒子の摩擦に着目すると、土が乾燥しているときは、粒子相互の摩擦が高く、また木片の混入に伴い締固め密度は低下するので土粒子間の接触点は少なくなり木片の混入が分別土砂の変形係数に与える影響は大きい。一方、含水比が $w_{opt}-1\%$ より湿潤側に移行するにしたがって土粒子相互の摩擦は低下する。よって、木片は土粒子の移動が容易になったマトリックス部で存在することになり、変形係数に与える木片の影響は徐々に緩和され、木片の重量比率が増えても分別土砂の変形係数は大きく変化しなくなるものと推定される。

表-2 模擬分別土砂における落球探査試験結果

$P_w(\%)$	$\rho_{dmax}(\text{g}/\text{cm}^3)$	$w_{opt}(\%)$	呼称	$w(\%)$	$\rho_d(\text{g}/\text{cm}^3)$	$w-w_{opt}(\%)$	D値(%)	$E_f(\text{Mpa})$
0	2.023	9.6	D _{95dry}	7.0	1.922	-2.6	95.0	41.58
			D _{100opt}	9.6	2.023	0.0	100.0	11.92
			D _{95wet}	12.5	1.922	2.9	95.0	2.37
2	1.846	11.4	W _{opt} -3.1	8.3	1.675	-3.1	90.7	28.09
			W _{opt} -1.4	10.0	1.826	-1.4	98.9	28.97
			W _{opt} +0.6	12.0	1.842	0.6	99.8	7.14
			W _{opt} +2.6	14.0	1.797	2.6	97.3	3.01
			W _{opt} -4.8	10.0	1.545	-4.8	88.4	21.49
4	1.748	14.8	W _{opt} -2.1	12.7	1.666	-2.1	95.3	35.87
			W _{opt} -0.7	14.1	1.739	-0.7	99.5	10.68
			W _{opt} +1.9	16.7	1.703	1.9	97.4	4.13
			W _{opt} +4.3	19.1	1.637	4.3	93.6	1.66
			W _{opt} -4.5	13.1	1.348	-4.5	90.0	13.81
8	1.498	17.6	W _{opt} -1.1	16.5	1.344	-1.1	89.7	16.30
			W _{opt} +0.6	18.2	1.493	0.6	99.7	9.59
			W _{opt} +1.3	18.9	1.435	1.3	95.8	5.06
			W _{opt} +2.2	19.8	1.375	2.2	91.8	2.88
			W _{opt} +5.2	22.8	1.327	5.2	88.6	2.24

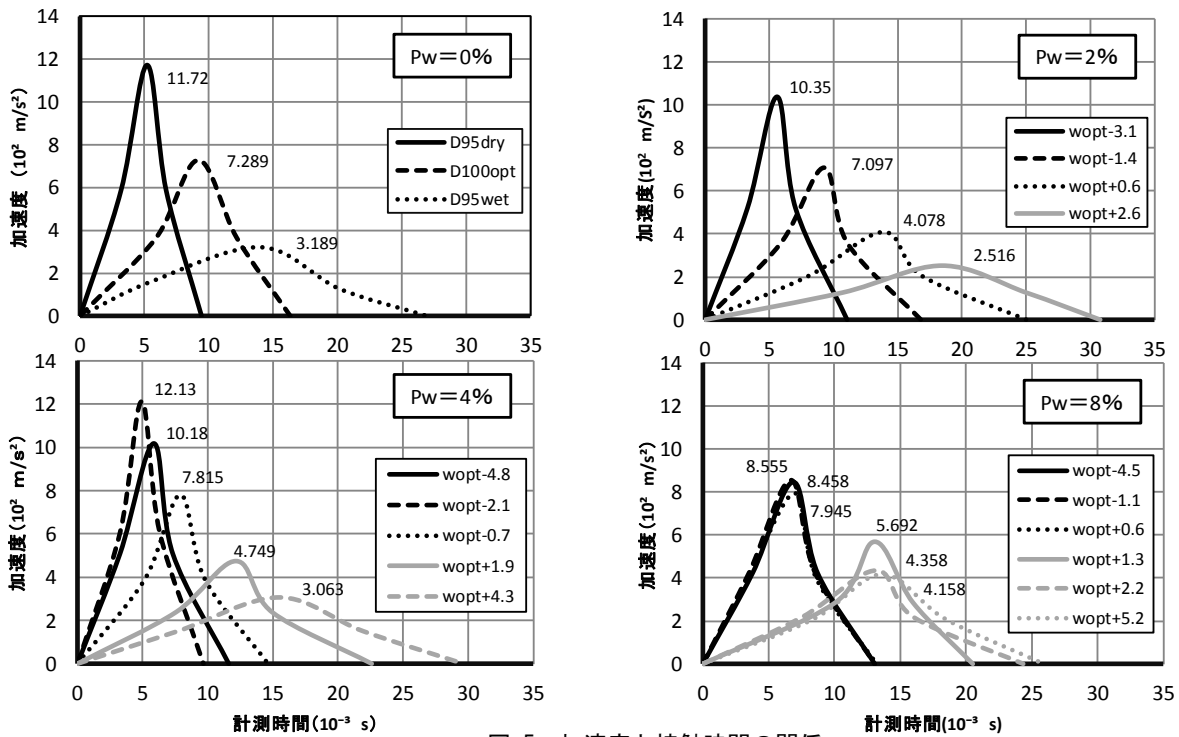


図-5 加速度と接触時間の関係

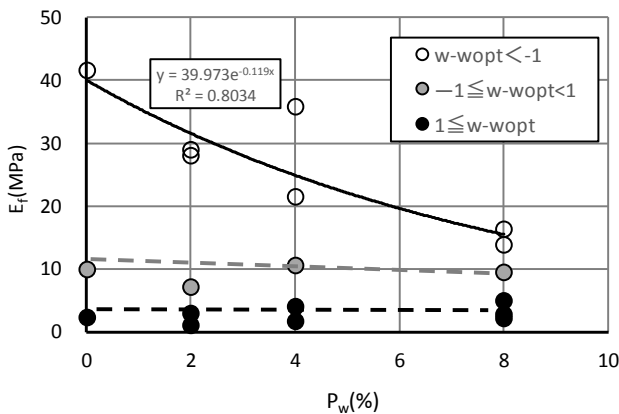


図-6 P_w と E_f の関係

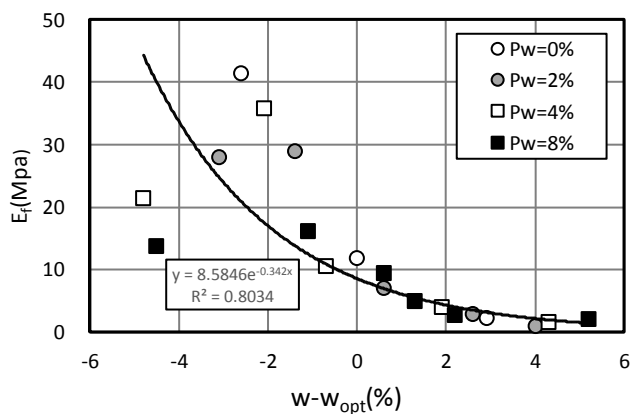


図-7 $W - W_{opt}$ と E_f の関係

4. おわりに

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得られておらず、今後とも原位置での力学定数を迅速かつ、簡便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、木片を含む模擬分別土を対象としても $w_{opt}-1\%$ 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。フィルダム等⁶⁾の土工管理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、試験に供した模擬土と同等の性状を有する分別土砂を対象とした場合、例えば、 $w_{opt}-2 \leq w \leq w_{opt}+1$ で得られる変形係数を品質管理基準値として、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。

謝辞：本研究は、環境省の環境研究総合推進費（3K163011）により実施された。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Goldsmith W.: Impact the Theory and Physical Behavior of Colliding Solid, Richard Clay and Company, Ltd., pp.83-91, 1960
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 日下部治：土質力学，コロナ社，pp.133-134, 2004
- 5) 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
- 6) 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