

RPF 木質混焼灰混合材料の物理・力学特性と軟弱地盤への施工事例

Physical and Mechanical Properties of RPF and Biomass Co-combustion Ash and Example of Construction on Soft Ground

中村公一 Koichi NAKAMURA (鳥取大学工学部)
来海弘樹 Hiroki KIMACHI (平井建設(株))

近年、化石燃料の代替として木質バイオマス、RPF、廃タイヤなどを燃料とする事例が増加している。発生する焼灰を埋立処分せずに有効利用する方法として、微細な石炭灰を主原料として製造される石炭灰混合材料と同様な手法で製造されたリサイクル材料が土木工事に利用されはじめている。本事例報告では、RPFと木質バイオマスを主な燃料として発生するRPF木質混焼灰を主原料として製造されたRPF木質混焼灰混合材料の物理・力学特性と、島根県内と鳥取県内で軟弱地盤に施工された事例を報告する。

キーワード：リサイクル材料、RPF 木質混焼灰、軟弱地盤 (IGC : D-06, E-02)

1. はじめに

近年、化石燃料の代替として増加したバイオマス資源やRPF (Refuse derived Paper & Plastics densified Fuel)、廃タイヤを焼却することで発生する灰の処理が課題となっている。RPFとは、主に産業系廃棄物のうち、マテリアルリサイクルが困難な古紙及び廃プラスチック類を主原料とした固形燃料のことである。RPFの特徴は、化石燃料代替の他に、熱量のコントロールが可能であること、高カロリーであり石炭やコークスの代替が可能であることがあげられる¹⁾。近年、CO₂削減を目的としたバイオマス発電の増加、他国の廃プラスチック類や古紙の輸入規制によりRPFの利用が増加しつつある。燃料の種類に関わらず焼却灰は、特別な理由が無い限り管理型最終処分場に埋め立てられる。したがって、焼却灰の有効利用は最終処分場の延命となるため、重要な課題である。そこで、石炭灰を造粒・固化処理して石炭灰混合材料を製造²⁾し土木工事に用いられている³⁾ように、バイオマス資源やRPF (Refuse derived Paper & Plastics densified Fuel)、廃タイヤの焼却灰を主原料にリサイクル材料を製造し、土木工事に用いられる事例が増加している。しかし、このようなリサイクル材料は製造方法により物理・力学特性が土砂とは異なる場合もあることに留意が必要なこと、また利用事例がまとめられていないことも利用が進まない要因のひとつである。

本事例報告では、RPF木質混焼灰を主原料としたリサイクル材料(以降、RPF木質混焼灰混合材料と呼ぶ)に対し、物理・力学特性の検討結果とその特徴を示し、土木工事に用いた事例を報告する。本事例報告で用いたRPF木質混焼灰は、製紙工場の発電ボイラーから排出されたものである。この発電ボイラーではRPFと木質チップが燃料の大部分を占めており、RPFが最も多く次に木質チップであるため、本論文ではRPF木質混焼灰と呼んでいる。このRPF

木質混焼灰より製造したRPF木質混焼灰混合材料は、その製造方法から表-1に示す石炭灰混合材料の分類では、破砕材に相当する。この破砕材は、製造方法にもよるが破砕しやすいという点の特徴とされている。この破砕しやすいという特徴が、締固め方法により乾燥密度へ影響を与えることが考えられる。また、破砕しやすいという特徴は、締固め方法により供試体の骨格構造が異なり、力学特性へ影響することが考えられる⁴⁾。このような点について室内試験と、原位置試験により検討を行った。施工事例は、軟弱地盤に対しRPF木質混焼灰混合材料を用いた事例を紹介する。

表-1 石炭灰混合材料の分類¹⁾

形態(種別)		概要(製造方法)
土砂代替材	破砕材	石炭灰にセメント、水、必要に応じて土砂、石膏等を混合して一旦固化させた後、掘削・破砕した土砂代替品
	造粒材	石炭灰にセメント、添加剤および水を加えて造粒して製造した砂質土代替材
	塑性材	工事現場近傍において、石炭灰にセメント、土砂および水を攪拌混合して製造した石炭灰混合材料
スラリー材		施工場所において、石炭灰にセメント、水を混合しスラリー状にしたもの
クリンカ混合物 クリンカアッシュ		クリンカアッシュに建設発生土または浚渫土を混合して製造した土砂代替材 クリンカアッシュ単体での使用も可能

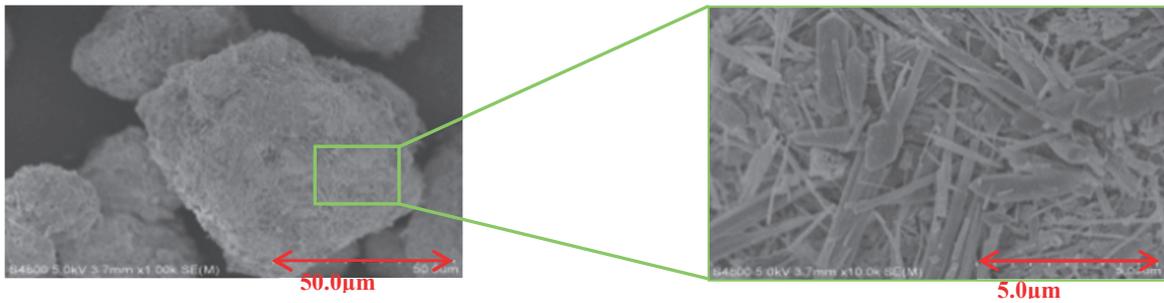


図-1 電子顕微鏡撮影画像

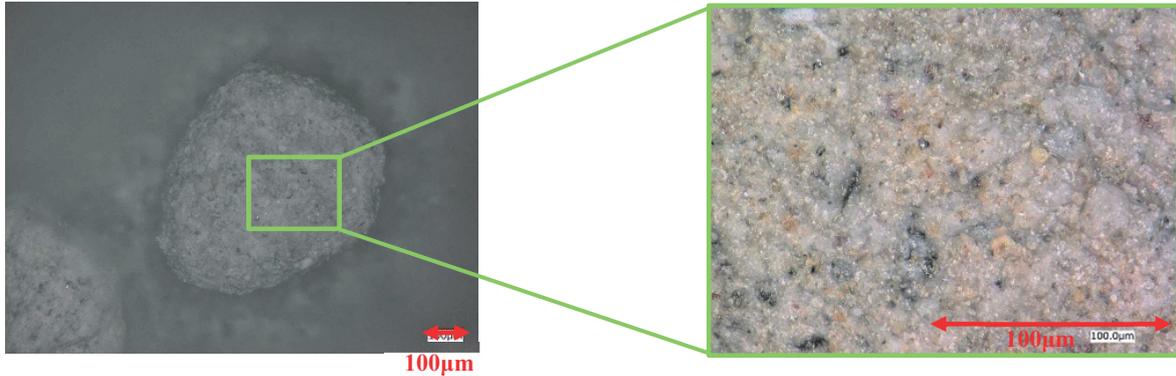


図-2 デジタルマイクロスコープ撮影画像

2. 生成過程と物理特性

2.1 製造過程と試料の状況

本リサイクル材料は、RPF 木質混焼灰、セメント、無機性汚泥、混練水を原料に作られたリサイクル材である。RPF 木質混焼灰が約 7 割であることから、RPF 木質混焼灰混合材料と呼んでいる。これらの原料を計量し、混合機械に投入してミキシングする。スラリー状となった材料を重機転圧した後養生し、固化後に破碎して製品になる。このような製造過程であるため、本材料は、表-1 の破碎材に分類される。そして、地盤材料の代替品として灰を再利用する場合、製造されたものは環境省が告示する「土壌の汚染に関わる環境基準について」⁸⁾（以下、土壌環境基準と呼ぶ）を満たす必要がある。有害物質の溶出量は燃料により変動があるが、用いた RPF 木質混焼灰は、セメントを添加することで有害物質の溶出を抑制し、物理化学的に不溶化することができる。これより、セメントを添加することで RPF 木質混焼灰を不溶化させ土壌環境基準以下となり、運搬・施工時の取扱いが容易なリサイクル材料としている。なお、セメント添加量により物理・力学特性が変化することに留意する必要がある。

RPF 木質混焼灰混合材料の画像として、図-1 に 75µm 以下の通過試料の電子顕微鏡による撮影画像、図-2 に 425µm ~ 850µm の試料のデジタルマイクロスコープによる撮影画像を示す。図-1 より、針状結晶が確認できる。この針状結晶は、製造過程の化学反応により生成されたものである。また結晶間には空隙が確認できることから、多孔質であるといえる。図-2 より、RPF 木質混焼灰混合材料の色調は暗い灰色であるが、拡大すると灰褐色であることと、大きな空隙は確認できないことがわかる。

2.2 土粒子密度と粒度分布

2.2.1 土粒子密度

粒径 2mm 以下の試料を用いて土粒子密度試験 (JIS A 1202) を行なった。本試料は多孔質であることを考慮し、ピクノメーターに試料と蒸留水を入れ真空下に 1 日以上放置し、その後煮沸を行なった。これより、土粒子密度は 2.865g/cm³ と求めた。

2.2.2 粒度分布

図-3 に粒径加積曲線を示す。破碎して製造する材料であるため、粒度調整が可能である。図-3 には、実際の施工では粒径 40mm 程度に破碎したものをを用いるため最大粒径を 37.5mm とした試料、三軸圧縮試験で用いた最大粒径 9.5mm の試料、突固めによる締固め試験で用いた最大粒径 0.425mm の試料、以上 3 試料の粒径加積曲線を示した。なお、試験で用いた試料は、製造後の試料をさらに破碎させたものではなく、最大粒径のふるいを通過したものをを用いている。

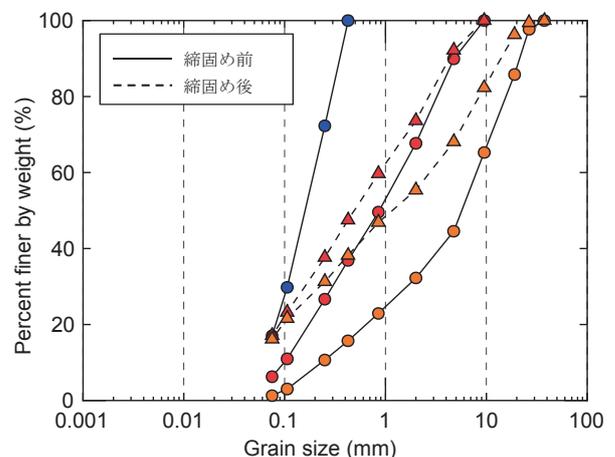


図-3 粒径加積曲線

2.3 破砕に関する検討

2.3.1 骨材破砕試験

RPF 木質混焼灰混合材料は微細な灰を主として固結させたリサイクル材料であるため、鉱物で構成される土よりも破砕しやすいと考えられる。そこで、JISA 5023:2012⁹⁾による 100kN 破砕値について検討を行なった。また、比較のため再生砕石、自然砕石に対しても試験を行った。100kN 破砕値試験は、粒径 5~20mm の試料に対し载荷を行ない、载荷後に 2.5mm ふるいを通過する試料の質量を測定する試験である。表-2 は試験結果、図-4 は载荷状況、図-5~図-7 は試験後のふるいわけ結果であり、写真左が 2.5mm ふるい残留分、写真右が 2.5mm 通過分である。表-2 に示すように、RPF 木質混焼灰混合材料は再生砕石や砕石に比べ、破砕しやすいことがわかる。

表-2 100kN 破砕値試験結果

破砕値 (%)	リサイクル 材料			再生砕石			砕石		
	29	30	35	6	6	6	1	1	1
平均値 (%)	31			6			1		

2.3.2 すりへり試験

すりへり試験¹⁰⁾は、ロサンゼルス試験機を用いてドラム内の骨材と鋼球を衝突させ、骨材の耐摩耗性を判定するものである。すりへり試験を実施した理由は、2.3.1 で記載した破砕しやすい特徴と、現場で使用した際に砕石よりも RPF 木質混焼灰混合材料はすりへりやすいと考えられる現象がみられたため、すりへり試験を実施し検討することとした。

図-8 に試験状況、図-9 にふるいわけ後の状況を示す。RPF 木質混焼灰混合材料に対して試験した結果を表-3 に示す。すりへり減量の実態調査¹¹⁾より、ほとんどの砕石はすりへり減量は 20%以下であるのに対し、RPF 木質混焼灰混合材料のすりへり減量は 40%以上と、砕石よりすりへりやすい材料であることがわかる。

表-3 すりへり減量試験条件と試験結果

粒径範囲 (mm)	試料の質量 (g)	鋼球の 数	すりへり減量 (%)
2.5~5.0	5000	6	41.4
2.5~5.0	5000		48.9
5.0~10.0	(各 2500)		

2.4 締固め特性

突固めによる締固め試験結果を図-10 に示す。粒径は施工で用いる粒径とほぼ同じ最大粒径 37.5mm の試料、三軸試験で用いる最大粒径 9.5mm、最大粒径 0.425mm に対して実施した。最大粒径 37.5mm の試料は自動突固めハンマーを用いて E-b 法により実施した。その他の粒径は、自動突固めハンマーを用いず C-b 法で実施した。粒度分布が異なる 3 種類の試料に対し試験を実施した理由は、砕石よりも破砕しやすくなりすりへりやすい材料である RPF 木質混焼灰混合材料は締固め時に破砕やすくなりすりへりが生じることが

考えられ、これらの特徴と粒度分布が締固め特性に影響を及ぼすのか検討するためである。最大粒径 0.425mm に対して突固めによる締固め試験を実施した理由は、最大粒径が締固め特性に及ぼす影響を検討するため、実施工に用いる最大粒径、三軸圧縮試験で用いる粒径に追加して実施することとした。

乾燥密度は、含水比と粒度分布に影響されることが知られており、一般的には粒径が小さいほど、乾燥密度は小さくなる¹²⁾。図-10 より、最大粒径 37.5mm と 9.5mm は含水比が変化しても乾燥密度の変化が小さく、明確に最適含水比と最大乾燥密度を読みとれないことがわかる。最大粒径 0.425mm は含水比の増加とともに乾燥密度も増加し、 $w=47.1\%$ で $\rho_d=0.992\text{g/cm}^3$ となった。また、乾燥密度のとりうる範囲は小さく、最大粒径 37.5mm は $\rho_d=1.031\sim 1.219\text{g/cm}^3$ 、最大粒径 9.5mm は $\rho_d=1.030\sim 1.081\text{g/cm}^3$ 、最大粒径 0.425mm は $\rho_d=0.789\sim 1.017\text{g/cm}^3$ である。突固めによる締固め試験が粒度分布に与える影響を検討するため、最大粒径 37.5mm と 9.5mm に対して締固め後に粒度試験を実施した結果を図-3 に示す。なお、締固め時の含水比は約 10%である。最大粒径 0.425mm は粒度分布の変化はみられなかったため図に示していない。このように粒度分布が変化していることが確認できる。図-11 に最大粒径 37.5mm に対して突固めによる締固め試験後の供試体の状況を示した。図に示すように大きい粒径が残存していることが確認できる。これより破砕が発生するのは主にランマーが直接衝突する部分であり、その他の部分は粒子同士の摩擦によりすりへりが発生し、図-3 に示した粒度変化が発生したものと考えられる。このように、破砕しやすくなりすりへりやすい特徴をもつ RPF 木質混焼灰混合材料は、最大粒径 37.5mm と 9.5mm は含水比によらず乾燥密度は約 1.1g/cm^3 の値を示し、明確な最大乾燥密度を読みとれなかった。

一般的な土と異なる締固め特性となった理由は、以下のように考えられる。RPF 木質混焼灰混合材料は破砕しやすくなりすりへりやすいため、締固め時には破砕や、粒子が移動する際の摩擦により粒子のすりへりが発生する。細粒土では含水比を増加させても各粒子接点に配分される水の量は少ないため、含水比の変化に対する粒子間結合力の変化は小さく、その結果として砂質土に比べてなだらかな締固め曲線を示すとされている¹³⁾。最大粒径 37.5mm と 9.5mm の試料は、最大粒径 0.425mm の試料と同程度まで細粒分含有率が増加するが最大粒径は変化していない。これより締固めにより発生した大きな粒子間の細粒分が、細粒土を締固めたときにみられる役割をしたため、明確な最大乾燥密度が読みとれない結果になったものと考えられる。

図-10 には、後述する平板载荷試験と同時に実施した原位置密度試験結果 (A~D) を示した。現場ではコンパインド振動ローラ (4t) または重機により転圧しているが、突固めによる締固め試験結果とほぼ同様な値となった。



図-4 100kN 破砕値試験状況



図-9 すりへり減量試験後
(すりへり減量試験後)



図-5 RPF 木質混焼灰混合材料 (破砕試験後)



図-6 再生砕石 (破砕試験後)

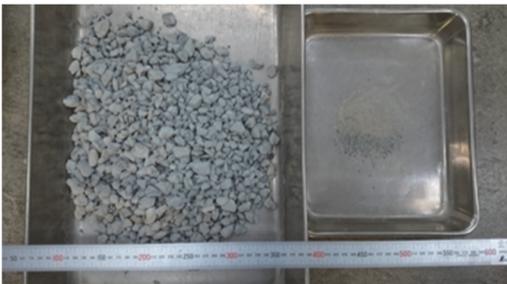


図-7 砕石 (破砕試験後)

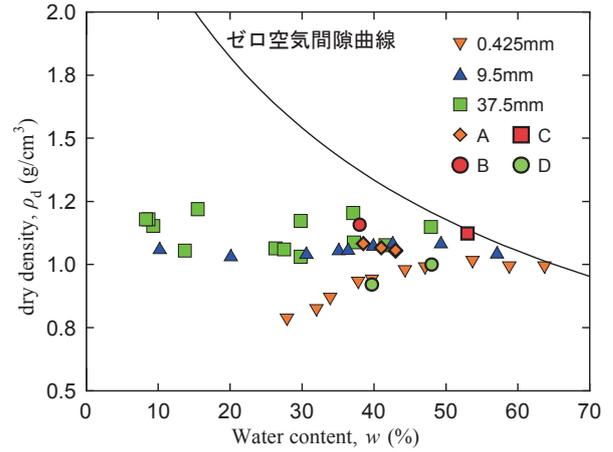


図-10 突固めによる締固め試験結果と原位置乾燥密度試験結果



図-11 最大粒径 37.5mm に対する突固めによる締固め試験後



図-8 すりへり減量試験状況

3. 力学特性

3.1 試験装置

試験装置の概要を図-12 に示し、供試体サイズは直径 100mm・高さ 200mm である。また、図-13 に示すように、小さいひずみ領域の変形特性を把握するため、軸方向に GapSensor、直径方向に LDT を取付けている。図に示した体積ひずみは排水量から計算している。

3.2 試験条件

最大粒径 9.5mm の試料を用いて、突固めによる締固めと、静的載荷による締固めそれぞれの方法で供試体を作製した。これは締固め方法が力学特性に影響を及ぼすことが既

往の研究より指摘されていること、破碎しやすいリサイクル材料では締固め方法の違いが力学特性に与える影響を確認するためである。締固め方法によらず、目標乾燥密度は 1.0g/cm^3 とした。突固めによる締固めは10層にわけて、4.5kg ランマー（落下高さ45cm）で各層12回ずつ突固めている。静的载荷による締固めは、CBR試験装置を用いて10層ごとに目標乾燥密度となるよう载荷を行なった。

原地盤表面で転圧して使用されていることから、有効拘束圧を10, 20, 50kPaとして圧密排水三軸圧縮試験を実施した。なお軸ひずみ速度は $0.005\%/\text{min}$ 、二重負圧法により飽和作業を行い、B値0.98以上であることを確認している。

3.3 試験結果

圧密による供試体の変形は、有効拘束圧50kPaでも0.1%以下であり小さいため、図を省略している。

せん断時の外部変位計と局所変位計（GapSensor）の比較を図-14に示し、図-14(a)は突固めによるもの、図-14(b)は静的载荷により供試体を作製している。最大強度時の軸ひずみを、同じ有効拘束圧で供試体作製方法が異なるものと比較すると、突固めよりも静的に締固めた供試体のほうが0.4~0.5%程小さい。したがって、以降の図では軸ひずみを局所変位計で計算したものとしている。このように、計測方法が軸ひずみの計算結果に与える影響が大きいことがわかる。これはベディングエラーによるものと考えられる。ベディングエラーとは、供試体上下端面の緩みや、供試体とキャップ・ペDESTAL間の接触状態などの影響による変位の測定誤差のことである。

図-15の軸ひずみ-軸差応力関係より、最大軸差応力は静的载荷による供試体の方が2倍程度大きいことがわかる。また、载荷初期の傾きは、突固めによる供試体は有効拘束圧ごとに異なるが、静的载荷による供試体はほぼ同じ結果となった。このような結果になった理由は、突固めにより作製した供試体は2.3で述べたような破碎とすりへりが発生しているが、静的締固めの供試体では主にすりへりが発生しているものと考えられる。このため、突固めにより作製した供試体は静的締固めの供試体よりも不均一であるため拘束圧の影響を受けやすくなり、図のような結果になったものと考えられる。

図-15の軸ひずみ-体積ひずみ関係より、突固めによる供試体は拘束圧が小さいほど膨張しやすいことがわかる。静的载荷による供試体は、圧縮から膨張に転じる軸ひずみは異なるものの、圧縮量は拘束圧によらない結果となった。

図-16に示す粘着力とせん断抵抗角より、突固めでは $c=28\text{kPa}$ 、 $\phi=47^\circ$ 、静的载荷では $c=66\text{kPa}$ 、 $\phi=51^\circ$ となった。既往の研究¹⁴⁾においても、静的に締固めた方が土構造が配向した構造となり、強度増加することが指摘されている。今回の結果も静的载荷の方が強度が大きく、同様な結果となった。しかし、一般的な土と異なり、粘着力、せん断抵抗角ともに大きい。この理由として、図-1や図-2に示したように粒子表面の状態が土とは異なること、2.3に

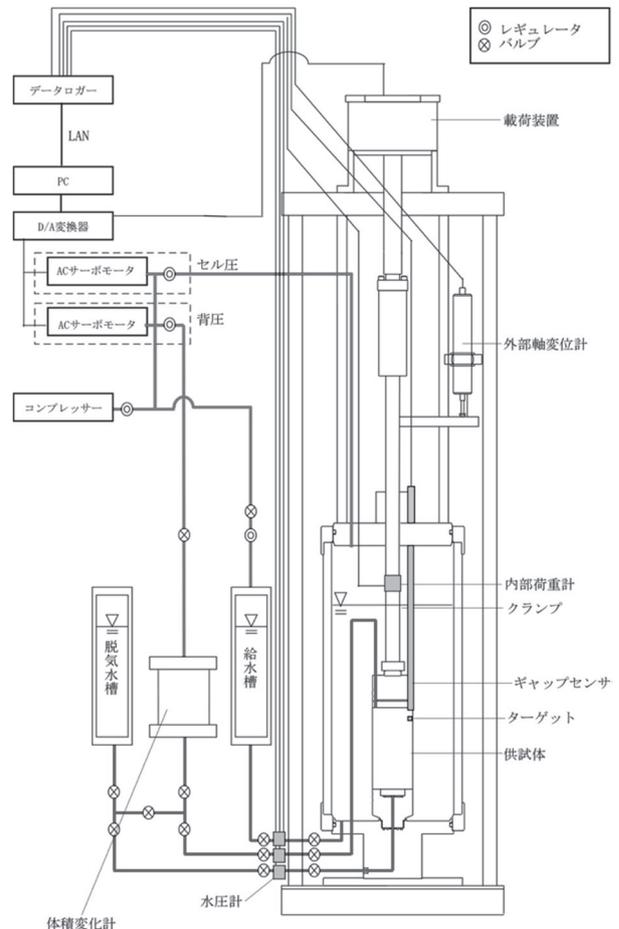


図-12 三軸試験装置概要

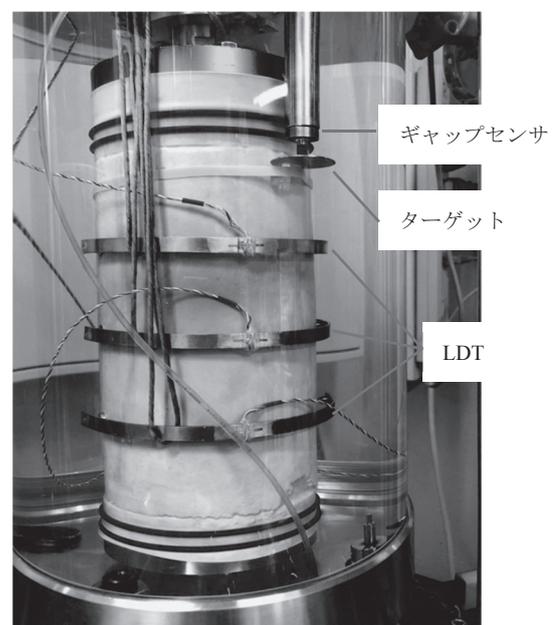


図-13 実験状況

示したように破碎やすりへりやすいたことが骨格構造に影響をあたえることが考えられる。

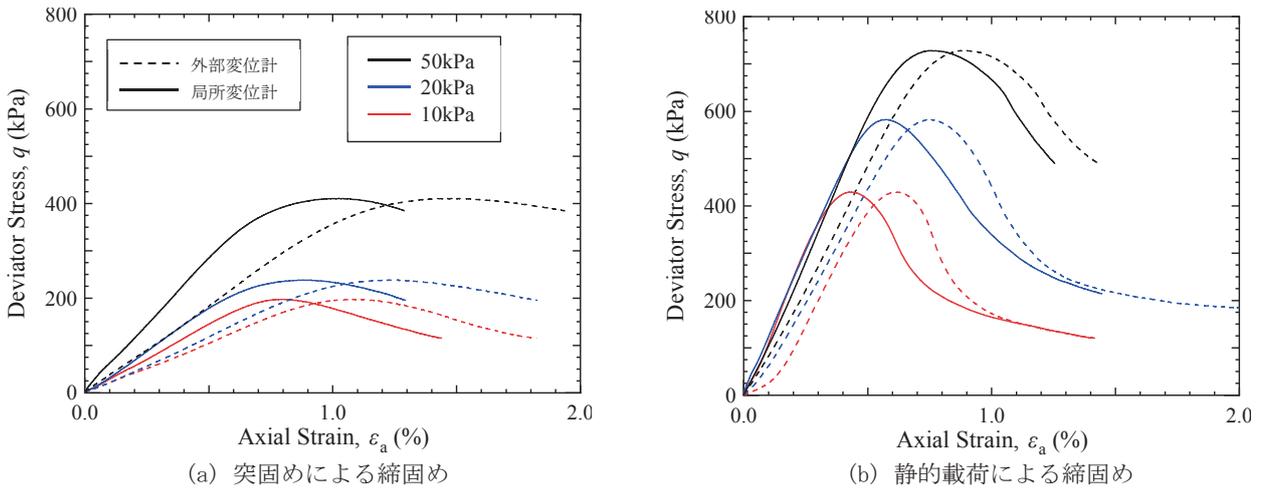


図-14 外部変位計と局所変位計の比較

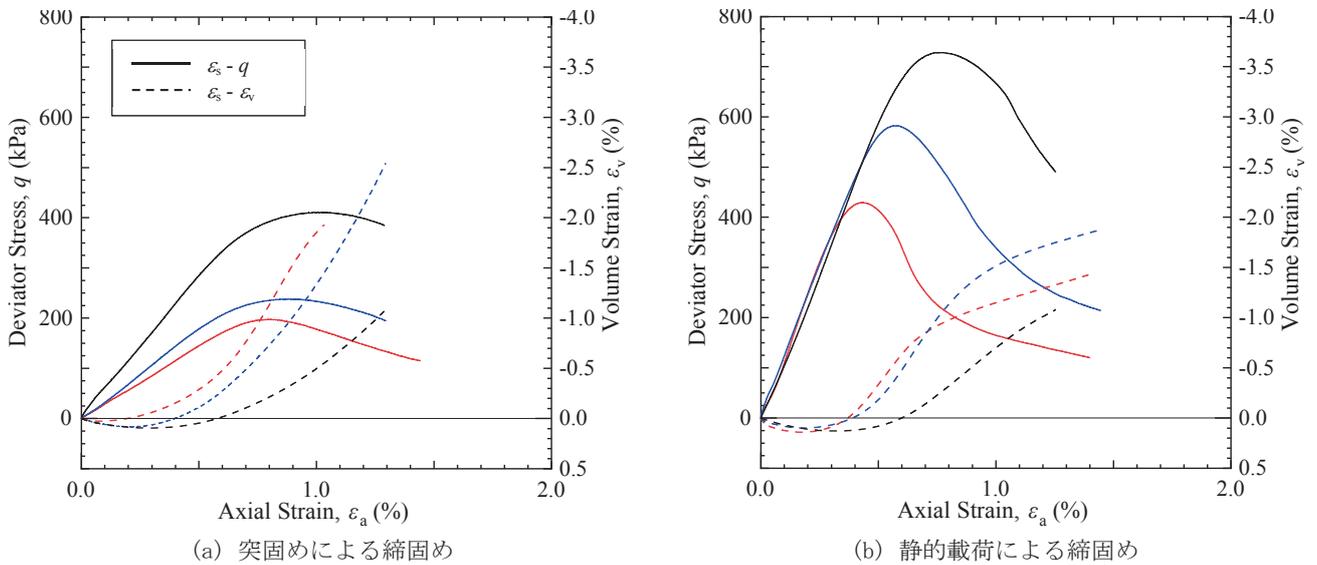


図-15 軸ひずみ-軸差応力・体積ひずみ関係

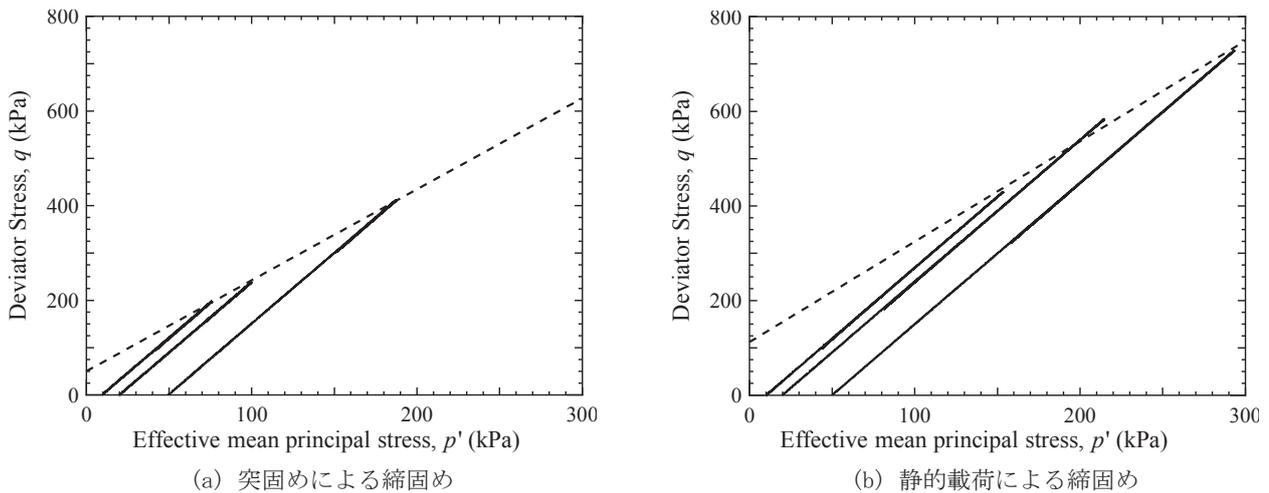


図-16 有効応力経路と破壊線

4. 施工事例

4.1 ため池内の橋梁下部工工事

路線の一部が橋梁によりため池を通過する工事に、RPF木質混焼灰混合材料を盛土材として用いた。図-17に地質構成と盛土断面図を示す。写真-1と写真-2は底泥撤去状

況、写真-3は施工状況、写真-4は下部工工事終了後の状況である。なお、写真-4には図-17の断面位置をP-P'として示している。

このため池は工事中も農業用水として利用するため、12月から10月まで湛水する必要があるため水を抜いて工事を実施できるのは約1ヶ月であること、ため池の水位は最

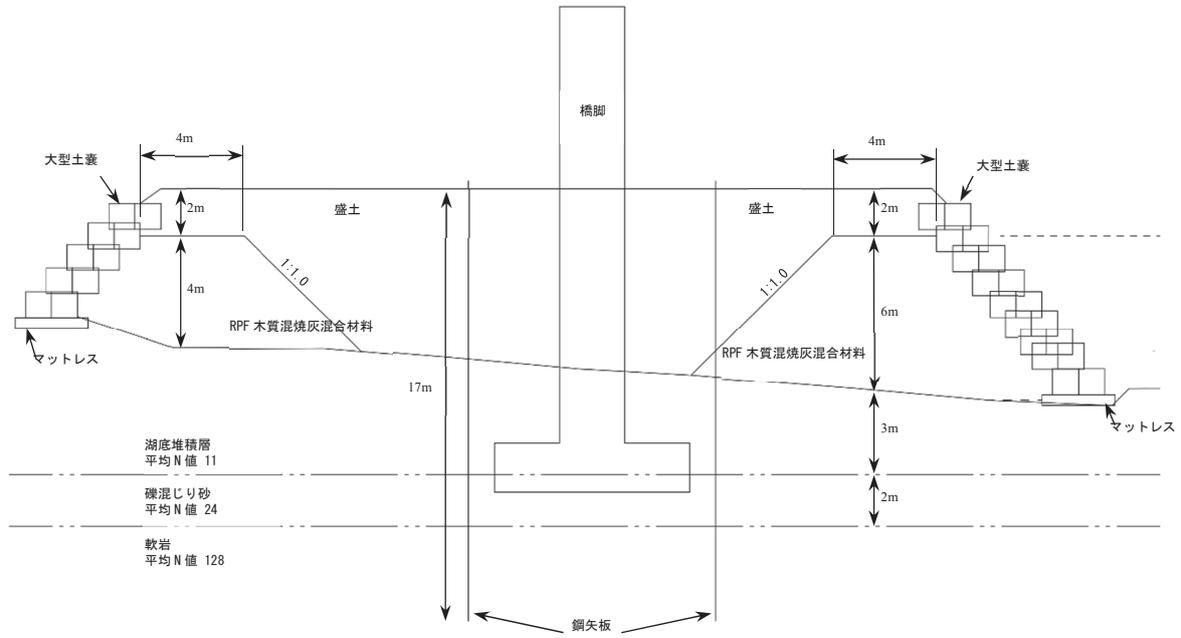


図-17 地質構成と盛土断面図 (P-P'断面)



写真-1 空撮写真 (2017/11/4 撮影)



写真-3 施工状況 (2017/11/17 撮影)



写真-2 底泥撤去状況



写真-4 空撮写真 (2019/4/20 撮影)

大約 6m 上下すること、工事終了後は盛土を撤去することに対応する必要がある。このような条件とともに、図に示したボーリング調査により、湖底堆積層と礫混じり砂層が盛土により変形や、湖底堆積層ですべり破壊することも懸念された。当初は、盛土材に流用土（主にまき土）を用いて、大型土嚢下部の湖底堆積層部に対して地盤改良が検討

されていた。しかし、地盤改良は工期が長くなりため池の利用に支障がでることが考えられる。また、盛土撤去時には地盤改良体も撤去する必要があるが、軟弱地盤であるためこれも工期が長くなることが考えられる。そこで検討の結果、図-17 に示すように、RPF 木質混焼灰混合材料を盛土の一部として利用し、大型土嚢直下はマットレス工

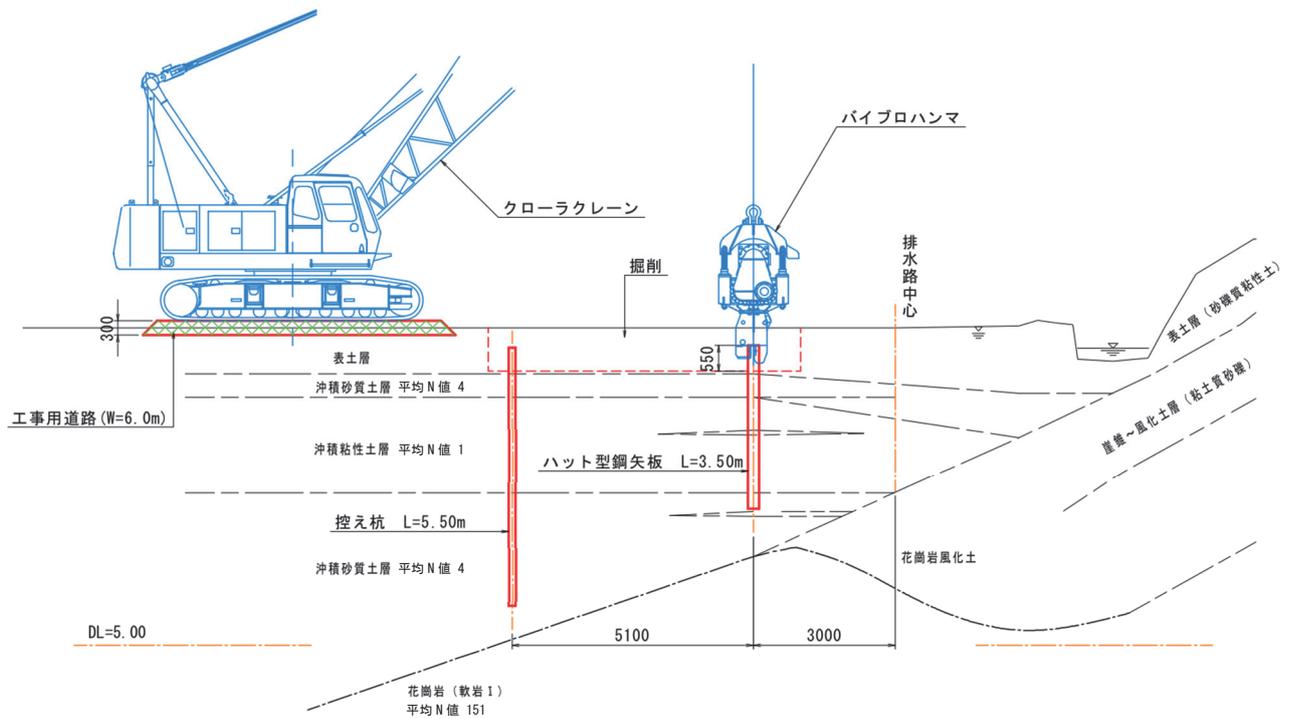


図-18 地質構成と代表断面図



写真-5 施工状況



写真-7 空撮写真 (2018/5/1 撮影)



写真-6 鋼矢板打設状況



写真-8 現場状況

法で施工することとした。RPF 木質混焼灰混合材料を用いた理由は、2.1 や 3.3 で示したように流用土よりも強度が大きいこと、単位体積重量が $\gamma = 10\text{kN/m}^3$ と軽量であることから、軽量盛土材として利用した。施工手順は、盛土設

置箇所の上層の約 1m~2m の底泥を撤去、大型土嚢直下にマットレスを敷設、軽量盛土部と盛土部を 30cm まきだしでコンパインド振動ローラにより転圧して施工した。写真-1 は、底泥を撤去しマットレスを敷設するための矢板を

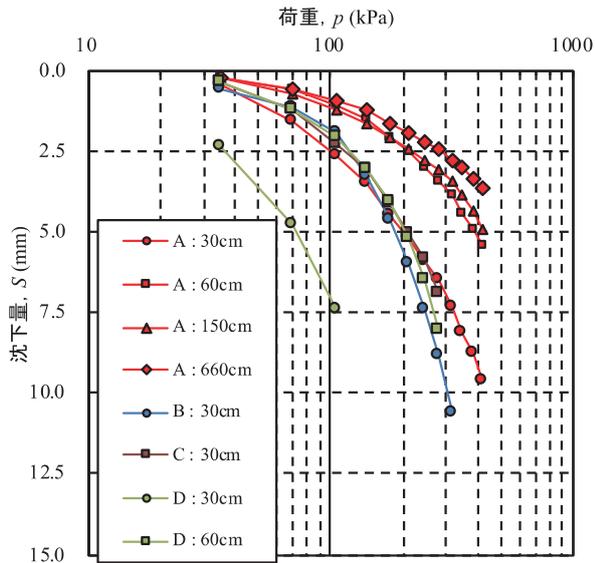


図-19 道路の平板载荷試験結果

準備した状況である。写真-2 は底泥撤去状況であり、約 1m の厚さがある。なお、撤去した底泥はダンプで運搬できないほど軟弱であるため、粒径約 40mm 以下の RPF 木質混焼灰混合材料と混合させることで短時間でダンプ運搬可能となるよう処理し、場内運搬を行った。写真-3 は、土嚢 1 段目の施工が終了し、排水ポンプを撤去して湛水を開始した状況である。このように、盛土の施工とともに湛水を行い、盛土を施工完了後から、ため池用水を利用することが可能となった。

4.2 軟弱地盤への仮設道敷設

本項では、耕作地の水路工事に伴い敷設された仮設道について説明する。軟弱地盤へ機械走路および作業ヤードとなる仮設道を確保する方法として、安定処理を行い敷鉄板を敷設する方法がある。これに対し RPF 木質混焼灰混合材料を用いる利点として主に 2 つあげられる。それは、RPF 木質混焼灰混合材料は仮設道撤去後に他の工事に転用して有効利用が可能であることと、敷鉄板は後発工事への引継ぎ時の費用負担または運搬費が発生するが、盛土材は別途の運搬比が不要となる。また、安定処理は適切な添加量の把握、周辺で稲作などがされている場合は粉塵抑制型固化材などの配慮が必要であること、固化材攪拌から使用可能になるまで期間が必要などの点も検討対象となる。安全面からは、敷鉄板は危険作業となる玉掛け作業が必要であるが、土工事では必要ないこともあげられる。

図-18 に現場図面を示す。図-18 に示す地層区分に示すように、基盤となる花崗岩まで N 値は 10 以下と軟弱地盤である。また、水路工事のため鋼矢板を 50t 級クローラークレーンとパイプロハンマにより打設することから、地耐力不足が懸念された。そこで、安定処理（厚さ 0.5m）と敷鉄板の敷設と、RPF 木質混焼灰混合材料（厚さ 0.3m）が比較検討された結果、RPF 木質混焼灰混合材料を用いて仮設道が施工された。写真-5 に RPF 木質混焼灰混合材料の施工状況、写真-6 にクローラークレーンとパイプロハンマによる矢板打設状況を示す。なお、RPF 木質混焼灰混合材料を

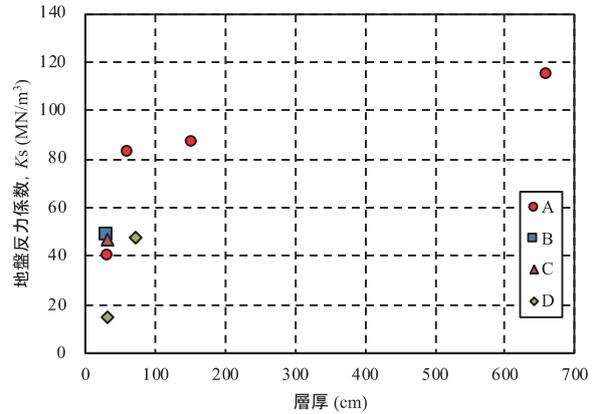


図-20 層厚と地盤反力係数の関係

用いた仮設道は、支持特性も問題ないことから最終的に道路盛土の一部としてそのまま用いている。

4.3 平板载荷試験

RPF 木質混焼灰混合材料の物理・力学特性は 2. と 3. に示したが、これまで施工時に原位置試験を行われたことがない。そこで、軟弱地盤に対し RPF 木質混焼灰混合材料を用いた現場を対象に、原位置密度試験¹⁵⁾と道路の平板载荷試験¹⁶⁾を実施した。ここでは、4 つの施工現場で実施した試験結果を紹介する。以降、図で示す凡例の A~D の各現場は、A 現場は 4.1 の事例、B 現場は 4.2 の事例、C 現場は 4.2 の同じ工事現場で、4.2 の実施地点より 200m ほど離れた地点、D 現場は倉吉市内のため池堤体改修工事である。D 現場の状況を写真-7 と写真-8 に示す。D 現場では、まきだし厚 30cm として層厚 60cm の仮設道を施工した。また、ポータブルコーン貫入試験より深度 1m までコーン貫入抵抗 $q_c=200(\text{kN/m}^2)$ 以下であることと、湛水側に仮設道を設置しているため降雨により雨水が貯まりやすく、暗渠により排水しているが写真-8 に示すように地表面に水がある状態となっている。このため、コンバインド振動ローラによる転圧ができず、重機転圧のみ（バックホーの履帯による転圧）である点が他現場と異なる。

各現場の原位置密度試験結果により得られた乾燥密度は図-10 に示した。これより、A・B・C 現場は $\rho_d \approx 1.1 \text{g/cm}^3$ 、D 現場は $\rho_d \approx 0.9 \text{g/cm}^3$ であり乾燥密度が異なっている。これは、D 現場は重機転圧のみであることが原因と考えられる。

この軟弱地盤に敷設された 4 現場において、道路の平板载荷試験を実施した。図-19 に荷重-沈下量の関係、図-20 に層厚と地盤反力係数の関係を示した。図-18 の凡例に示した数値は、試験を実施した層厚である。平板载荷試験によって求められる支持特性は、载荷板直径の 1.5~2.0 倍程度の深さの地盤が対象とされている¹⁴⁾。したがって、平板载荷試験で通常用いられる载荷板直径 30cm では、地盤表面から深さ約 60cm までの支持特性を表すことになる。図

-19 のコンバインド振動ローラで転圧した A~C 現場の層厚 30cm は、ほぼ同様な荷重-沈下量関係であることがわかる。これに対し重機転圧のみの D 現場は、層厚 30cm では A~C 現場よりも同じ荷重のとき沈下量が約 3 倍となり、層厚 60cm としたとき A~C 現場の層厚 30cm と同様な荷重-沈下量関係となった。乾燥密度はコンバインド振動ローラによるものの方が大きくなったが、これは重機転圧よりもコンバインド振動ローラによる転圧のほうが締固め能力が高いためと考えられる(図-10 参照)。この乾燥密度の違いが、荷重-沈下量関係に影響を与えたものと考えられる。

A 現場では層厚 60cm, 150cm, 660cm でも試験を実施した。なお、平板載荷は同じ地点で実施している。図-22 に示すように、載荷板直径 30cm を用いているため層厚 60cm 以上では結果がほとんど変わらないことが確認できる。図-20 に示した地盤反力係数は、沈下量 2.5mm で求めている。層厚 30cm でコンバインド振動ローラにより転圧した場合は約 40~50MN/m³ となり、層厚 60cm 以上では約 90MN/m³ となった。一般的な土の地盤反力係数の一例として、盛土地盤(碎石)243 MN/m³、埋立て地盤 88~103 MN/m³ と示されている¹⁶⁾。これと比較すると本論文で示した現場では、コンバインド振動ローラで締固めた場合、埋立て地盤と同程度の数値を得られたといえる。

5. まとめ

本報告では、RPF 木質混焼灰混合材料の物理特性と力学特性について検討し、軟弱地盤への施工事例と原位置試験結果を示した。以下に検討結果を示す。

- 1) RPF 木質混焼灰混合材料の締固め特性は、一般的な土とは異なり、締固め時の含水比の影響が小さい。この理由として、一般的な土よりも破碎やすりへりやすい特性が影響しているものと考えられる。
- 2) 三軸圧縮試験より、供試体作製方法が強度特性に影響を与え、突固めよりも静的に締固めたほうが強度が大きい。また、粘着力は一般的な土よりも顕著に大きいことがわかった。
- 3) 平板載荷試験により、軟弱地盤へ用いた場合の層厚の影響を検討した。各現場で軟弱地盤の状態は異なるが、コンバインド振動ローラで締固めるとほぼ同様な荷重-沈下量関係となることがわかった。

微細な灰を主原料としたリサイクル材料は今後さらに増えていくものと考えられる。このようなリサイクル材料は、製造方法により物理・力学的特性が大きく異なることが考えられる。この異なる点を把握したうえで、有効利用されていくことが望まれる。

謝辞

島根県松江県土整備事務所広瀬土木事業所、島根県松江県土整備事務所農林工務部、鳥取県中部総合事務所農林局

地域整備課には、現場試験の実施にあたりご配慮頂きました。平板載荷試験は、(有)銅山道路試験所にお世話になりました。

室内試験で用いた試料は、(株)大協組から提供して頂きました。100kN 破碎値試験とすりへり減量試験は、(公財)鳥取県建設技術センターで実施しました。ここに記して関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 一般社団法人日本 RPF 工業会：RPF とは、<http://www.jpfp.gr.jp/rpf-1>, (2019 年 4 月)。
- 2) 一般財団法人石炭エネルギーセンター：石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン(統合改訂版), 2018。
- 3) 高橋正樹：石炭灰のリサイクル技術を利用した道路施工事例, 基礎工, 530 号, pp.76-79, 2017。
- 4) Seed, H.B., Mitchell, J.K. and Chan, C.K. : Structure and strength characteristics of compacted clays, Journal of SMFD, Proceeding of ASCE, SM5, pp.87-125, 1959。
- 5) Lambe, T.W. : The structure of compacted clay, Journal of SMFD, Proceeding of ASCE, Vol.84, SM2, pp.1655-1-1655-35, 1958。
- 6) Yong, R.N. and Warkentin, B.P. : Introduction to Soil Behavior, Macmillan, pp.106-107, 1966。
- 7) 鬼塚克忠, 林重徳, 吉武茂樹, 大石秀隆：締め固めた土の圧縮及び強度異方性について, 土質工学会論文報告集, Vol.19, No.3, pp.113-123, 1979。
- 8) 環境省：土壌の汚染に係わる環境基準について, <http://www.env.go.jp/kijun/dojou.html>, 2019 年 4 月。
- 9) 公益社団法人日本コンクリート工学会：JIS A 5023:2012, 2012。
- 10) 公益社団法人日本コンクリート工学会：JIS A 1121, 2007。
- 11) 社団法人日本道路協会：舗装調査・試験方法便覧, pp.24-29, 2007。
- 12) 公益社団法人地盤工学会：地盤調査の方法と解説 第 5 編第 2 章 突固めによる土の締固め試験, pp.373-385, 2013。
- 13) 公益社団法人地盤工学会：土の締固め 地盤工学・実務シリーズ 30, pp.7-15, 2012。
- 14) 川尻峻三, 川口貴之, 澁谷啓, 高橋正和：締め固めた地盤材料の変形・強度特性に及ぼす締固め時の含水比および締固め方法の影響, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.67, No.4, pp.532-543, 2011。
- 15) 公益社団法人地盤工学会：地盤調査の方法と解説 第 9 編第 2 章 砂置換法による土の密度試験, pp.770-779, 2013。
- 16) 公益社団法人地盤工学会：地盤調査の方法と解説 第 8 編第 3 章 平板載荷試験, pp.697-735, 2013。

(2019 年 6 月 8 日 受付)