

焼却灰由来の再生利用砂と脱水ケーキを用いた植生土の開発

DEVELOPMENT OF THE VEGETATION SOIL USING THE REUSE SAND OF INCINERATOR ASH AND THE SLUDGE CAKE OF STONE DUST

今井忠男*、山形悟**、木崎彰久***、近藤洋司****

by Tadao IMAI, Satoru YAMAGATA, Akihisa KIZAKI and Yoji KONDO

1. はじめに

採石場では、発電所や工場から排出される焼却灰を、産業廃棄物として受入れている例は多く、さらに受入れた焼却灰を破碎・分級処理し、再生利用砂として販売する試みも進められてきている。現在、焼却灰の主な用途は、ほぼ建設用土に限られているが、再生利用砂として加工された製品の用途が広がれば、採石場の処分場としての機能が認知され、経営の持続性が高まるものと期待される。また、自社の砕砂プラント等からも、砕石製品の10%以上の石粉が、脱水ケーキとして排出され、この処分コストも大きな問題となっていることから、同様に再利用の用途が望まれている。

これら再生利用砂の用途として、採石場の緑化を進めるための植生土への応用が考えられる。最初に自社利用を進めることで、焼却灰の処分量が減り、再生利用砂の植生土としての評価が高まれば、今後の販路が拡大するものと思われる。

本研究では、各焼却灰（クリンカアッシュ、ペーバースラッジ灰、バイオマス灰）を原料とする再生利用砂および脱水ケーキを原料とする植生土を開発するため、それぞれの物理的特性（支持力、透水性、保水性）および土性を測定し、植生土としての特性を評価した。さらに、粘土分の少ないクリンカアッシュと、微粉量の多い脱水ケーキとを配合し、植生土としての性能が向上する配合比を検討した。以下に、研究の詳細を述べる。

2. 植生土に求められる基礎物性

2.1 土性分類

土壌は粒度によって、砂(2~0.02mm)、シルト(0.02~0.002mm)、粘土(0.002mm以下)の3つの成分

に分けることができ、これら粒度特性によって土性が決まる。ここで土性とは、土に含まれるこれら砂、シルト、粘土粒子の相対的な割合によって決定される土の特性をいう。土性は、土性三角図として表される3つの土粒子の配合割合によって分類¹⁾され、土の基本的な性質を評価する指標として利用されている。一般には、植生土に適している土性は、砂壤土または壤土であり、砂分が多く、粘土やシルト分の少ない土である²⁾。

2.2 基礎物性値

植物の生育に適した土壌には、物理特性として、通気性および透水性が良く、十分な保水性を持ち、さらに適度な土壌硬度が求められる。表1に、植生土として必要な基準物性値を示す²⁾³⁾。

土壌には、吸着性(水ポテンシャル、pF値)の異なる様々な吸着状態の水が存在し、このうち植物の根が利用できる水分は、pF値が1.8~3.0で土中に吸着されている吸着水である。とくに、このポテンシャル領域の含水率に、根の深長(40cm)を乗じたものを生長有効水分量(RAM、mm/40cm、容易有効水分量とほぼ同値)といい、これが植生土の保水性を評価する値である。普通畑の生長有効水分量の基準値は、20mm/40cm以上である。

また、土壌が通気性および透水性を持つため必要な、普通畑の透水係数の基準値は、 10^{-3} ~ 10^{-4} cm/sである。とくに、保水性が良く、かつ透水性を良くするには、土の粒子が相互に結合し団粒化する必要がある。図1に示すような土の団粒構造において、団粒内では、土粒子の狭い孔隙に毛管水を保持することができ、また団粒外の大きな孔隙構造では、重力水や空気を通すことができる。よって、団粒構造は、透水性と保水性という相反する性質を併せ持つことができる。

さらに、土壌には適度な硬度が必要であり、支持力として1078~2450kPaが適正であると考えられている。これより軟らかすぎると、土壌が乾燥しすぎてしまい、また硬すぎると根が伸長できない。な

* 秋田大学大学院 教授 国際資源学研究科 (〒010-0852 秋田市手形学園町1-1)、 ** 元秋田大学大学院生、*** 秋田大学 准教授、**** 辻村建設株式会社

表1 植生土の基準物性値²⁾³⁾

植生土	土性	生長有効水分量 RAM(mm/40cm)	透水係数 k(cm/s)	支持力 q _c (kPa)	pH
普通畑基準値	砂壤土・壤土	20以上	10 ⁻³ ~10 ⁻⁴	1078~2450	5.0~7.5

お、土壌のpHは中性から弱酸性の領域が、植物の育成には良いことが知られている²⁾³⁾。

3. 実験方法

3.1 再生利用砂試料

本研究で使用した再生利用砂の原料等の一覧を表2および写真1に示す。再生利用砂は、原料となる各焼却灰（クリンカアッシュ、ペーパースラッジ灰、バイオマス灰）を発電所や工場等から受入れ、塊状の灰を粉砕し、3mm以下に分級したのち、洗浄および化学的に安定化処理した加工品である。各焼却灰については、化学組成に関する分析を行い、環境上、有害基準を超える元素はないことを確認した。また、脱水ケーキは、砕砂生産過程で生じたもので、廃水をフィルタプレスし乾燥させた状態である。なお、実験に用いた砕砂は、コンクリート骨材用の製品であり、対照試料として用いた。

3.2 基礎物性試験

本実験で用いた試料の基礎物性値について、それぞれの測定方法を表3に一覧表としてまとめた。

(1) 粒度試験：JIS A 1204 土の粒度試験にしたがって、網ふるいを用いてふるい分けし、粒度分布

を求めた。試料は、完全乾燥した状態のものを、質量0.4 kg程度用いた。

(2) 密度試験：JIS A 1202 土粒子の密度試験にしたがい、ピクノメーターを使用して真密度の測定を行った。用いた質量は10gである。

(3) 土の締め固め試験による最適含水比の決定：JIS A 1210 突き固めによる土の締め固めのD-a法によって、モールド内での試料の突き固めを行ったのち、モールドから試料を30g程度採取し、乾燥密度を求めた。試料の含水比を変化させながら本試験を繰り返し行い、乾燥密度が最大となる含水比を最適含水比とした。

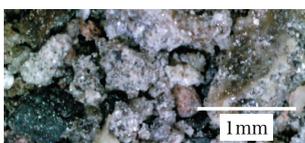
(4) 支持力試験：最適含水比で締め固めたモールド試料の表面について、JGS 1431 ポータブルコーン貫入試験にしたがって支持力の測定をおこなった。今回用いたコーンの断面積は3.24cm²である。

(5) 透水試験：最適含水比で締め固めたモールド内の試料を、サンプリング管(φ5×5cm)内に採取し、これを24時間水中で飽和させたのち、JIS A 1218 土の変水位透水試験にしたがって試験を行った。

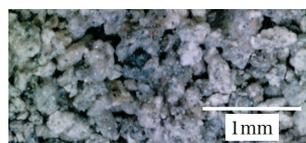
(6) 保水試験：透水試験で用いたサンプリング管

表2 再生利用砂の原料等の一覧

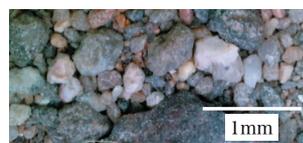
試料	排出場	原材料	加工後の性状
クリンカアッシュ	火力発電所	石炭	砂状
ペーパースラッジ灰	製紙工場	紙繊維、石炭	砂状
バイオマス燃焼灰	バイオマス発電所	木質廃材、下水汚泥	砂状
脱水ケーキ	砕石工場	岩石	粘土状
砕砂	砕石工場	岩石	砂状



クリンカアッシュ



ペーパースラッジ灰



バイオマス燃焼灰



砕砂

写真1 再生利用砂の原料等の拡大写真

表3 基礎物性値試験の一覧

基礎物性値	試験方法	試験条件
粒度分布	JIS A 1204 土の粒度試験	乾燥状態、質量0.4kg
真密度	JIS A 1202 土の密度試験	質量10g
最適含水比	JIS A 1210 土の締固めD-a法	モールド中の試料30g
支持力	JGS 1431 ポータブルコーン貫入試験	最適含水比で締固めた試料 (コーンの底面積3.24cm ²)
透水係数	JIS A 1218 土の変水位透水試験	最適含水比で締固めた試料 (サンプリング管φ5×5cm)
生長有効水分量	加圧法	空気圧10~200kPa
pH	土壌のpH測定法	試料質量20g、水50mL、5分攪拌

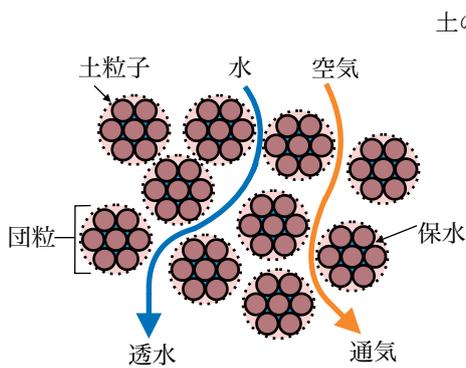


図1 土の団粒構造

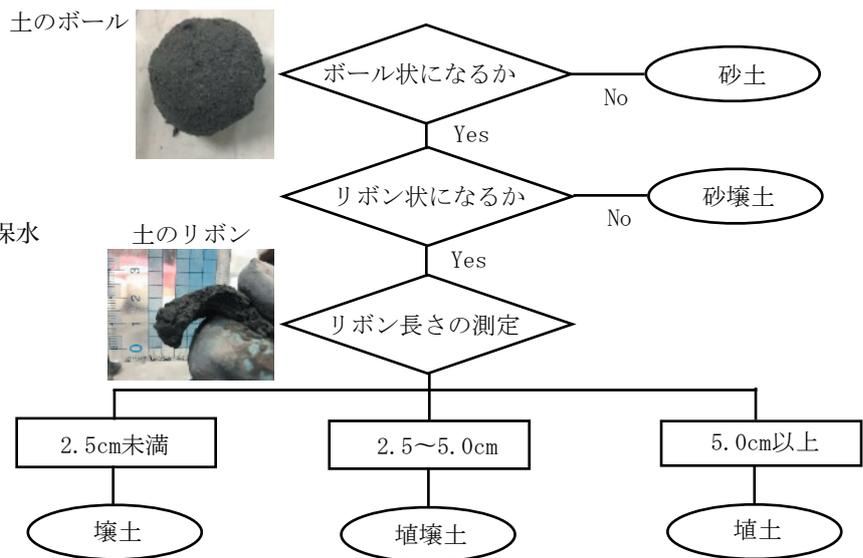


図2 土性判定法の流れ¹⁾

内の飽和試料を用い、加圧法によって保水量曲線を測定した。具体的には、サンプリング管を加圧器の中に入れ、加圧器内を10~200kPaの範囲の空気に加圧し、サンプリング管内の試料から加圧器の外へ脱水された水分量を測定した。

(7) pH試験：本研究では、各砂20gに50mLの水道水を加え、これを5分間攪拌した後、2分程度静置し、試料が沈降した上澄み液について、pHメーターを用いてpHを測定した。

3.3 土性試験

表1の土性の判定は、手ざわりによる土性の判定法(指頭法)にしたがって行った¹⁾。判定試験の流れを図2に示す。まず、片手にゴルフボール程度の土

の量を取り、乾燥試料が適度な粘着性になるまで水を加えながらこね、さらに、シルトや粘土の粉塊がなくなるまで十分こねたのち、ボール状にする。この時、ボールを作れない土は、砂土に分類される。次に、片手に試料を取り親指と人差し指で押し出すようにして、リボン状の土を垂らしていき、切れるまでのリボン長を粘土含有の指標として、図のように砂土、砂壤土、壤土、埴壤土、埴土の分類(日本農学会の土性区分)が可能となる。

3.4 配合土の作製

各砂の物性試験の結果をもとに、さらに植生土として各物性値に優れた土を開発するため、各試

表4 再生利用砂の配合割合

試料	配合比
クリンカアッシュ	10
脱水ケーキ	1~8

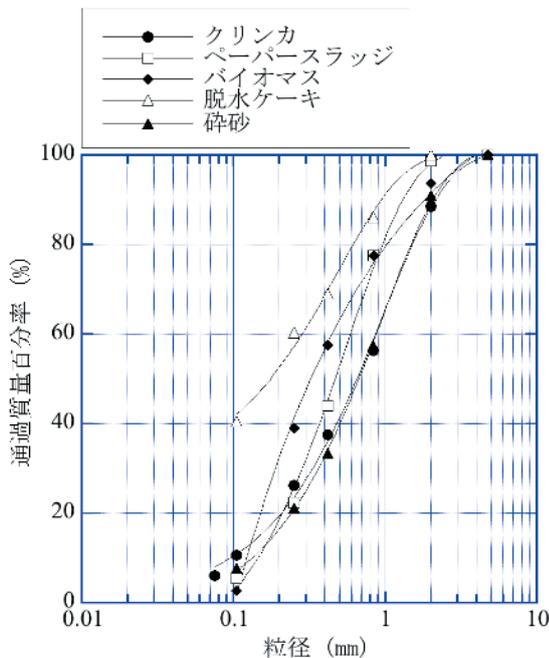


図3 試料の粒度分布

料の特性を活かした配合を検討した。具体的には、再生利用砂には、シルトおよび粘土分(0.02mm以下)が足りないと予想されることから、微粒子の多い脱水ケーキと配合することを検討した。今回は、表4のように、クリンカアッシュと脱水ケーキの配合土を作製し、各物性試験を行い、植生土としての評価をおこなった。

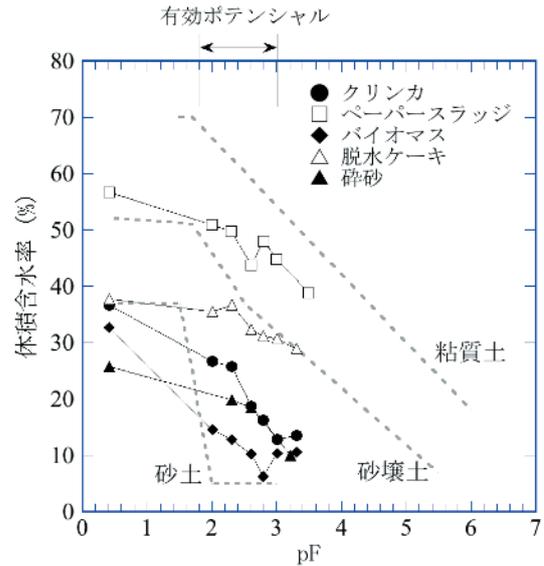


図4 試料の保水特性

4. 実験結果および考察

4.1 各再生利用砂の物性

(1) 基礎物性値

図3に、各試料の粒度分布を示す。クリンカアッシュと砕砂の粒度分布は良く似ており、平均粒径は約0.7mmだが、ペーパースラッジ灰は多少小さめで平均粒径は約0.5mm、バイオマス灰は小さい粒子が多く平均粒径は約0.3mmであることがわかる。このことから、ペーパースラッジ灰やバイオマス灰は、生産段階で微粒子が発生しやすいことがわかった。なお、脱水ケーキは0.1mm以下の微粒子が40%以上あり、微粒分が極めて多く含まれている。

次に、図4に各試料の保水曲線を示す。このカーブのうち、pF値が1.8~3.0の範囲の含水率に40cmを乗じた値が、生長有効水分量RAMである。また、図中の破線は一般的な各土性の保水曲線を示している。図より、ペーパースラッジ灰は、粘質土の保水曲線に近く、脱水ケーキよりも含水性が高い

表5 各再生利用砂の基礎物性値

再生利用砂	平均粒径 (mm)	密度 (g/cm ³)	最適含水比 (%)	支持力 (kPa)	透水係数 (cm/s)	生長有効水分量RAM (mm/40cm)	pH
クリンカアッシュ	0.707	2.10	14.9	1400	3.93×10 ⁻⁴	59	8.3
ペーパースラッジ灰	0.470	2.58	38.3	1680	3.37×10 ⁻⁴	28	10.1
バイオマス燃焼灰	0.324	2.61	12.7	1330	1.48×10 ⁻³	26	9.9
脱水ケーキ	0.176	2.62	15.9	1960	1.16×10 ⁻⁶	22	8.3
砕砂	0.673	2.63	9.0	1470	1.76×10 ⁻³	36	7.8

表6 各試料の土性判定試験の結果

試料	ボール状	リボン状	リボン長さ (cm)	砂の感触	土性
クリンカアッシュ	○	×	-	○	砂壤土
ペーパースラッジ灰	○	×	-	○	砂壤土
バイオマス燃焼灰	○	×	-	○	砂壤土
脱水ケーキ	○	○	5.0cm	×	埴土
砕砂	×	×	-	○	砂土

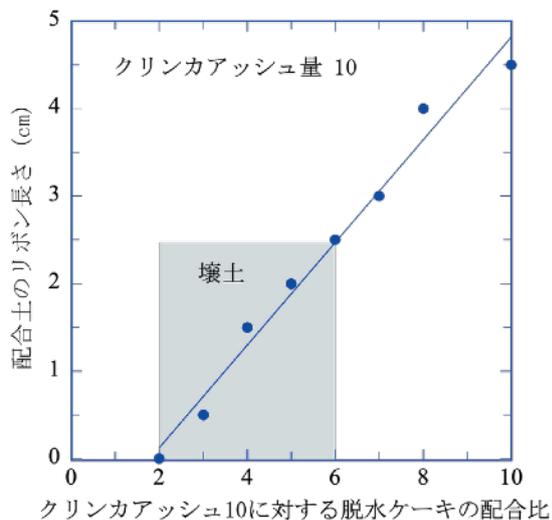


図5 脱水ケーキの含有量と土性の変化



写真2 配合土の団粒状態 (配合比10:3)

ことがわかる。このことより、微粒子の他に、ペーパースラッジ灰の粒子には、微細な空隙が発達していると推定される。

次に、本実験で測定した試料の基礎物性値を、まとめて表5に示す。表より、すべての試料が支持力および生長有効水分量RAMの基準値を満たしており、透水性も脱水ケーキ以外は良好である。また、各試料ともpHはアルカリ性ではあるが、とくにペーパースラッジ灰とバイオマス灰のpHは高く、このままでは植生土には適さない。以上の結果から、植生土には、とくにクリンカアッシュと砕砂が適しており、とくにクリンカアッシュは、保水性に富む植生土として期待される。なお、締固め曲線に明確なピーク値は得られなかった。この原因は今後の検討課題である。

(2) 土性評価

表6に各試料の土性判定試験の結果を示す。表より、クリンカアッシュ、ペーパースラッジ灰、バイオマス灰の3つの再生利用砂は、ボール状にはな

るが、リボンが形成できず砂壤土に分類される。また、脱水ケーキは、リボン長が5cmを超え、砂の手触りがなかったことから、埴土に分類できる。なお、砕砂はボールも形成できず、砂土の分類である。以上のことから、再生利用砂に多少の脱水ケーキを配合すれば、リボンが形成され、植生土に適する砂壤土あるいは埴土が作製できると考えられる。

4.2 配合土の評価

図5に、クリンカアッシュ100gに加えた脱水ケーキの質量と、その配合土のリボン長の関係を示す。図より、配合比10:2では、リボンは形成されないが、10:3からは、脱水ケーキの含有量に比例してリボン長が長くなる傾向にある。埴土の判定は、リボン長2.5cm以下であることから、配合比は10:3～10:6まで可能である。しかし、脱水ケーキの配合によって、透水性が大きく低下する可能性を考慮すると、適切な配合比は、10:3あるいは10:4程度と考えられる。ここで、配合比10:3の試

表7 配合土の基礎物性値と土性

配合比	最適含水比 (%)	支持力 (kPa)	透水係数 (cm/s)	生長有効水分量RAM (mm/40cm)	土性
10 : 3	14.1	1400	2.46×10^{-5}	38	砂壤土
10 : 4	14.4	1400	8.82×10^{-5}	32	砂壤土

料を手でこねてみたところ、写真2のように、簡単に団粒構造が形成されたことから、植生土として適切な土性になっていることがわかる。

表7に、クリンカアッシュと脱水ケーキの配合土の基礎物性値および土性を示す。配合土には、割合が10:3および10:4の2種類を用意した。表より、どちらの試料も、支持力および保水性は、基準値を満たしているが、透水係数が基準値を少し下回っており、配合比が高くなると透水係数が低くなる傾向になることがわかった。このことから、脱水ケーキの配合量はある程度少なくし、透水性の良い土として用いる方が良いと考えられる。

5. おわりに

本研究では、各再生利用砂（クリンカアッシュ、ペーパースラッジ灰、バイオマス灰）と脱水ケーキおよび砕砂それぞれの物理特性（支持力、透水係数、生長有効水分量）および土性を測定し、植生土としての特性を評価した。さらに、粘土分の少ないクリンカアッシュと脱水ケーキとを配合し、より適切な植生土の開発をおこなった。その結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 実験に用いた全ての再生利用砂は、植生土としての、支持力および生長有効水分量RAMの基準値を満たしており、透水性も良好である。
- (2) ペーパースラッジ灰とバイオマス灰は、pHが高く、植生土として用いるには工夫が必要である。
- (3) 実験に用いた全ての再生利用砂は、このままでは植生土としての土性の条件を満たさない。
- (4) クリンカアッシュ再生利用砂と脱水ケーキを10:3の比で配合すると、土性が植生土として適正となり、他の基礎物性もあまり低下しない。

引用文献

- 1) 岩田進午編集(1997)：土の環境圏、フジテクノシステム、pp.61-64.
- 2) 林野庁監修(1997)：自然をつくる緑化工ガイド、林業土木コンサルタンツ.
- 3) 農山漁村文化協会編(2009)：土壌診断・育成診断大辞典、pp.109-131.

(2023年2月27日受付 2023年6月7日受理)