

建設汚泥ケーキの低温焼成物の物性について

PHYSICAL PROPERTY OF THE HEATED SLUDGE ON CONSTRUCTION IN A LOW TEMPERATURE

林原 茂*・田窪祐子*・小口深志*

by Shigeru HAYASHIBARA, Yuko TAKUBO, and Fukashi OGUCHI

1. はじめに

建設工事で発生する汚泥ケーキは、これまで、「汚泥」として産廃処分されてきたが、近年の処分場の逼迫と建設汚泥利用の気運の高まりから、改質・利用の具体策が検討され始めている。

建設汚泥ケーキは、これまで主に土木用資材と農業（植生）用資材への利用が試みられている。

土木用資材化については、セメント系改質が主体であり、強アルカリに対する環境面への配慮がなされれば、セメント系改質が低コストであり、最も現実的である。また、造粒焼成による土木用骨材化の技術も開発されている。造粒・焼成処理については含水比調整、造粒、乾燥、焼成の各工程を経て、最終的に 1,000℃ 以上の焼成物として製品化される。ただし、造粒・焼成材は強度、すり切れ、吸水などの品質面で碎石等の骨材より劣るという課題が残されている。

農業（植生）用資材化については、セメント系改質の場合、強アルカリを呈するため植生用土壌としては不適切である。また、高分子系材料等による改質は、「汚泥」としての強度上の制約 ($q_c \geq 0.2N/mm^2$) を長期的にクリアできるかの課題が残り、発生源を離れた利用が困難な状況にある。造粒・焼成物の農業（植生）用資材への利用については、土壌材料としては骨材状であることがかえって障害となり、あまり利用されていないのが現状である。

以上をまとめてみると、建設汚泥ケーキのセメント系改質材は、土質材料としては適切であるが、植生用土壌材料としては不適切である。また、高分子系等の改質材は、現場外利用が困難である。

そこで、汚泥ケーキを土質的あるいは土壌的に利用するのであれば、わざわざ造粒し、高温焼成する必要はなく、同じ熱的改質でも低コスト・低品質な改質でよいものと考えられる。すなわち、造粒等の工程を極力省き、低温焼成によって、「汚泥」の範疇からはずされる程度の物性が得られればよい。

この考え方に基づいて、汚泥ケーキを小型電気炉により低温で焼成した。その結果、650~800℃に加熱されたケーキ（以降、低温焼成物と称する）は粘土鉱物の変成や粒子の団粒化等の諸現象が生じ、「汚泥」の範疇からはずされる可能性を示した。

以上の経緯を受けて、本試験は実際の焼成キルンによりケーキを低温焼成し、焼成物の物性を確認し、植生用土壌や土質材料への適用性を把握するものである。

2. 低温焼成方法について

2.1 低温焼成物の作成方法

(1) 材料（建設汚泥ケーキ）

コンクリートダムの骨材プラントにおける濁水処理工程での脱水ケーキ（約 $1m^3$ ）を試験に供した。

(2) 低温焼成フロー

焼成キルンによる低温焼成フローを図1に示す。

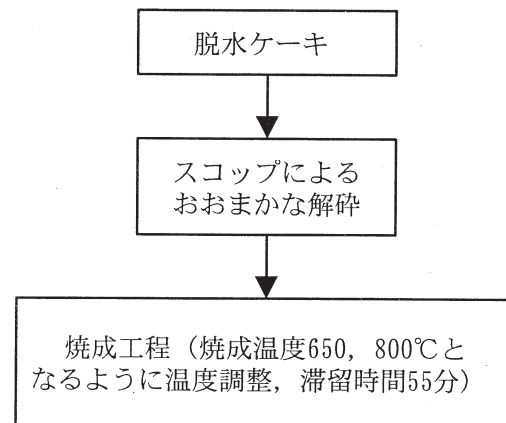


図1 低温焼成フロー

2.2 低温焼成物の製造条件

低温焼成物を製造した時の焼成キルンと運転の諸元を表1に示す。

3. 低温焼成物の物性試験

3.1 物性試験

次頁に示した2項目の用途について、適用可能かどうかを試みるために物性試験を行った。

*前田建設工業株式会社技術研究所第3gr.
(〒179-8914 東京都練馬区旭町1-39-16)

- ・ 土質材料（骨材、路盤材料などの利用を想定）
- ・ 農業材料（植生用土壌を想定）

汚泥ケーキ（原土）、650℃焼成物、800℃焼成物について、表2、表3の物性試験を行った。なお、表3の試験については3種類の材料すべて実施した。

表1 焼成キルンと運転の諸元

項目	仕様と運転条件	
キルン内径×胴長	φ397mm×5,600mm L	
キルン傾斜角	2.5/100	
キルン回転数	2 rpm	
焼成温度	650℃	800℃
原料投入速度	60 kg/h	
滞留時間	55 min	
総製品量	130 kg	190 kg
ダスト率	7.2%	7.7%

表2 土質試験および土木材料試験

試験項目	基準番号	脱水ケーキ		
		原土	650℃ 焼成物	800℃ 焼成物
含水比	JSF T 121	○	○	○
土粒子の密度	JSF T 111	○	○	○
粒度分布	JSF T 131	○	—	—
強熱減量	JSF T 221	○	○	○
締固め	JSF T 711	○ A-c	○ A-b	○ A-b
コーン指数	JSF T 716	○	○	○
吸水率	JIS A 1110	—	○	○
骨材の破碎試験	BS 812	—	○	○

※A、b、cは試験条件を表す。このうち、Aは7mm質量2.5kg、モル内径10cm、突固め3層のことであり、bは乾燥法非繰返し法、cは湿潤法非繰返し法のことであり。

3.2 土質試験および土木材料試験の結果とその評価

土質試験、土木材料試験の他、土壌試験、鉱物学試験の結果の一覧を表4に示す。

(1) 土粒子密度、含水比、強熱減量

土粒子の密度については焼成温度が高いほど密度が上がる傾向を示した。これは、結晶水や有機物の減量分の違いによるものと考えられる。一般には700～800℃においてこの現象が起こると言われている²⁾。

脱水ケーキの含水比は45%であり、焼成したものについては水分がほとんど含まれていなかった。

強熱減量については、原土以外は焼成した履歴を受けており、650℃、800℃で焼成した時に有機物や結晶水がすでに損失されていることが考えられる。

表3 土壌試験および鉱物学試験

試験名	分析方法	参考文献
pH(H ₂ O)	ガラス電極法	土 壌 標 準 分 析 ・ 測 定 法
腐植	チューリン法	
全窒素	硫酸分解法	
リン酸吸収係数	リン酸アンモニウム液法	
陽イオン交換容量	ショーレンベルガー法	
有効態リン酸	トルオーグ法	
CaO	酢酸アンモニウム-フレーム原子吸光法	
MgO		
K ₂ O		
Na ₂ O		
有効水分保持量	100ml円筒試料により 加圧板法(pF1.8)・遠心法(pF3.0)	
飽和透水係数	100ml円筒試料により 定水位法及び変水位法	
耐水性粒度分布	水中篩分法	
X線回折	X線回折分析器	
最大容水量	ヒルガード法	*

*:京大農芸化学実験書

(2) 粒径

ケーキ原土は2mm以下の粒径が多く、シルト分が特に多い材料である。均等係数は10以上ではないが、曲率係数は土質材料としての適正範囲に入ることがわかった。これは2mm以下の土粒子が多く、シルト分の占める割合が大きいためと考えられる。

(3) 締固め

締固め試験を行ったが、どの材料についても最大乾燥密度はおよそ1.32g/cm³であった。また、最適含水比についても32～34%程度と材料の違いによる差異は小さかった。これより、ケーキ原土を低温焼成することによって締固め特性が変化する傾向は認められなかった。

(4) コーン指数

脱水ケーキ原土の場合、突固め回数が増えるほどコーン指数は低下した。つまり、フィルタープレスにより絞られた密実な脱水ケーキが、ランマーにより攪乱されコーン指数が低下したものと考えられる。一方、低温焼成物の場合、25回/層の締固めのとき、最大のコーン指数を示した。これはいわゆる1Ecのエネルギーであり、1Ec以下ではコーン指数が他と比較して低く、1Ec以上では緩やかな低下傾向を示す。したがって、現場締固めを想定した場合、1Ecを目安にエネルギーを付与する必要がある。

(5) 骨材試験

吸水率については 650℃, 800℃の焼成物のどちらも約 55%であった。コンクリート用粗骨材(碎石)の吸水率が 3%以下(JIS A 5005-1993), 人工軽量骨材の吸水率³⁾が粗骨材で 25~28%程度, 細骨材で 15%程度であることを考えれば, はるかに大きい数値である。したがって, 低温焼成物がコンクリート用骨材には不相当であることがわかった。なお, 建設汚泥ケーキを 1000℃以上に焼成した材料の吸水率は 20%程度となることより, 低温焼成したケーキは粒状物の細孔が連続性を持っており, このために吸水性が高いものと考えられる⁴⁾。

次に, 骨材の破碎試験方法を簡単に述べる。この試験は試料を所定の円筒容器内に満たし, 40t 載荷後の破碎量から破碎値を算出するものである。ただし, 40t 載荷後の細粒百分率が 10%以上になるときは, 細粒百分率が 10%になったときの荷重を求めるとされている。

ところが, この試験の前準備として所定の円筒容器内に試料を満たす際に, 付き棒により 3 層に分けて各層を 25 回突く操作時点で, すでに細粒百分率が 20~25%になり, 試験前の段階で, 骨材としての品質を確保することができなかった。

3.3 土壌試験および鉱物学的試験結果とその評価

(1) 物理的特性

有効水分保持量や飽和透水係数および耐水性粒度分布については, ケーキ原土が植生用土基準値以下であるのに対し, 低温焼成物は植生用土基準値を満たしており, それぞれ保水性や排水性の向上が認められた。

(2) 理化学的特性

植生用土壌としての理化学的特性には, 植生生理への影響や肥効に関する pH, 有機物, 窒素, リン, 交換性イオンの諸量が挙げられる。

pH については, 既報告⁵⁾の場合と同様に焼成温度の上昇に伴って pH が高くなった。これは, 炭酸カルシウムの脱炭酸に伴う生石灰化が進んだためと推定される。したがって, 焼成温度が低い方が植生生理への影響は小さいと考えられた。

腐食, 全窒素, 有効態リン酸については, 本試験に供したケーキが無機性の石粉を主体としたものであるため, ケーキ原土, 低温焼成物のいずれにおいても低く, 全窒素, 有効態リン酸については, 植生用土としての基準値を下回った。大半の建設汚泥ケーキが無機性の汚泥であることを考慮に入れば, 建設汚泥ケーキの低温焼成物を植生用土として利用するには所要の肥料を添加する必要があるといえる。

表 4 ケーキ原土と低温焼成材の諸物性

測定項目	ケーキ 原土	低温焼成材		植生用土 基準値 ^{*1}	
		650℃	800℃		
土粒子密度 [g/cm ³]	2.70	2.71	2.73	—	
含水比 [%]	45	0.3	0	—	
粒 2~75mm [%]	2	—	—	—	
75μm~2mm [%]	20	—	—	—	
5~75μm [%]	67	—	—	—	
<5μm [%]	11	—	—	—	
度 均等係数Uc	8.0	—	—	≥10 ^{*4}	
曲率係数Uc'	1.1	—	—	1<Uc'≤√Uc ^{*4}	
液 液性限界 [%]	NP	—	—	—	
塑 塑性限界 [%]	NP	—	—	—	
性 塑性指数 [%]	—	—	—	—	
最大乾燥密度 ρ _d max [g/cm ³]	1.32	1.32	1.32	—	
最適含水比 [%]	34	32	34	—	
コーン 指数 ^{*2}	10回/層×3層	17	62	66	—
	25回/層×3層	14	100	100	—
[kgf/cm ²]	55回/層×3層	13	97	94	—
	90回/層×3層	13	93	91	—
吸水率 [%]	—	54	56	—	
骨材の破碎試験	—	不合格	不合格	—	
最大容水量 [%]	44	63	57	—	
有効水分保持量 [l/m ³]	74	183	235	≥80	
飽和透水係数 [cm/s]	3×10 ⁻⁵	4×10 ⁻⁴	7×10 ⁻⁴	10 ⁻³ ~10 ⁻⁴	
*3] ≥2mm [%]	0	37	37	20~40	
耐 1~2mm [%]	0	9	11		
水 0.5~1mm [%]	1	6	9		
性 0.25~0.5mm [%]	2	12	7		
粒 0.1~0.25mm [%]	13	5	8		
度 <0.1mm [%]	84	31	28	30~80	
pH(H ₂ O)	7.9	8.9	12.1		4.5~8
強熱減量 [%]	2.4	0.6	0.2	—	
腐食 [%]	0.7	0.1	0.1	—	
全窒素 [%]	0.03	<0.01	<0.01	≥0.06	
有効態リン酸 [mg/100g]	0.8	0.6	2.5	≥10	
リン酸吸収係数 [mg/100g]	880	840	490	—	
陽イオン交換容量 [me/100g]	9.0	4.3	1.5	≥6	
交換性 陽イオン	CaO [me/100g]	23	18	15	≥2.5
	MgO [me/100g]	0.5	4	1.9	—
	K ₂ O [me/100g]	0.6	0.8	0.5	—
	Na ₂ O [me/100g]	0.2	0.3	0.2	—

*1 植生用土壌基準値: 日本造園学会「緑化事業における植栽基盤整備マニュアル(1984)」において「優・良」の場合を参考

*2 コーン指数: 最適含水比で締固めた供試体について実施

*3 耐水性粒度: 水中で篩い分けを実施し, 浸水による団粒性保持能力を評価するための試験

*4 日本統一土質分類の粒度分布の良否¹⁾

また, 陽イオン交換容量については焼成温度の増加に伴い, 減少する傾向がみられた。これより, 焼成温度が低いほど保肥力が保持されることが示された。昇温による陽イオン交換容量の減少傾向は鉱物学的な熱変質に伴うものと考えられる。

(3) 鉱物学的特性

粘土鉱物組成については, 石英, 角閃石, 白雲母, 緑泥石, 灰長石により構成されていた。X線回折結果を図2に示す。これによれば 650℃, 800℃のいずれの焼成物においても緑泥石の X 線スペクトルに変化が見られた。これは緑泥石における層間の水酸化物シートが分解して OH が脱水することによるものと考えられる⁶⁾。この結果より, 650℃で焼成したものでもケーキの X 線の構造の変化が起きていることが確認された。

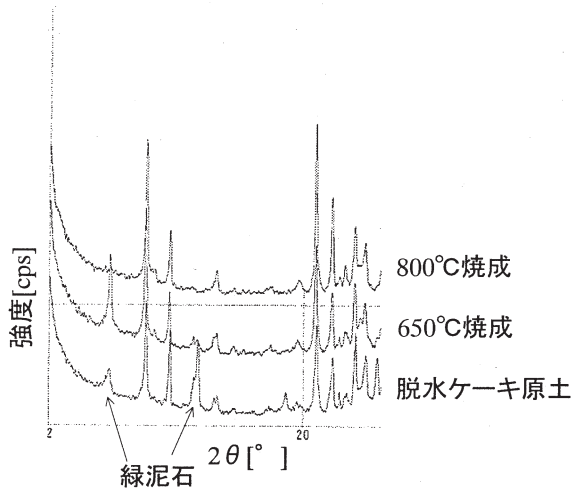


図2 X線回折分析結果

4. まとめ

(1) 土質試験および土木材料試験から

- ・ダム骨材プラントの濁水処理で発生する脱水ケーキを 650～800℃低温焼成した材料は最大乾燥密度や最適含水比においてケーキ原土と変わらないが、1 E_c 付近の締固めエネルギーで最大のコーン指数を示す。
- ・骨材試験として吸水率試験および破碎試験を行った結果、低温焼成物については、吸水率が高く、破碎試験を行えないほど強度が弱いので、骨材としては不適当な材料であった。

(2) 土壌試験および鉱物学的試験から

- ・焼成温度の上昇に伴い、脱水ケーキの pH は上昇するため、焼成温度が低い方が植生生理への影響は小さいと考えられた。
- ・保水性、透水性、団粒性については、ケーキを低温焼成することにより改良される傾向にあり、いずれも植生用土としての基準値を満足するものとなった。
- ・ケーキ原土および低温焼成物のいずれにおいても全窒素、有効態リン酸が不足しているため、植生用土壌として利用する場合、肥料添加などの理化学的改良が必要である。
- ・陽イオン交換容量は焼成温度の上昇に伴い、低下する傾向にあり、焼成温度が低いほど保肥性の高いことが示された。

5. おわりに

実際の焼成キルンによる建設汚泥ケーキの物性が明らかにされた。その結果、締固め材料や植生用土としての適用が示唆された。今後は低温焼成物による植生試験を実施する予定である。

参考文献

- 1) 土質工学数式入門, 土質工学会, pp.35-37,1984
- 2) 土質試験の方法と解説, 土質工学会, pp.132-151, 1990
- 3) 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 日本建築学会, pp.381-383, 1997
- 4) 小口, 林原, 田窪: 低温焼成した建設汚泥ケーキの植生用土等への適用性について, 土木学会 54 回年講VII, pp.110-111,1998,480-481,1999
- 5) 田窪, 小口: 建設汚泥ケーキの低温焼成材の物性について, 土木学会 53 回年講VII, pp.110-111,1998
- 6) 日本粘土学会: 粘土ハンドブック 第二版, 技報堂出版, p.53

(1999年11月19日受付 2000年1月28日受理)