

◆ 下水道特集 ◆

下水汚泥焼却灰の有効利用技術

川嶋幸徳* 森田弘昭**

1. はじめに

下水汚泥の発生量は、下水道の普及とともに年々増加し、平成9年度には約1,860千DS-ton/年(発生時DS(乾燥固体物)ベース)に達している。今後、下水道普及率が向上し、高度処理が広く行われるようになると、汚泥の発生量はさらに増加するものと考えられる。図-1に、下水道普及率と発生汚泥量の推移を示す。

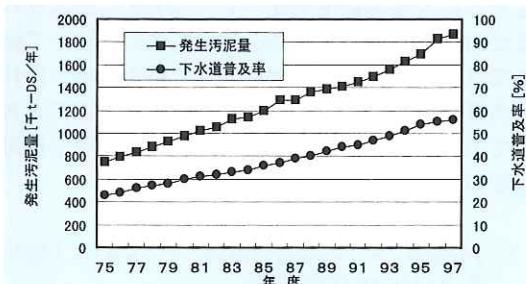


図-1 下水道普及率と汚泥発生量の推移

一方、下水汚泥を含めた廃棄物の最終処分場の確保はきわめて困難な状況にあり、天然資源の採取にともなう環境負荷の発生や、資源の逼迫を背景にした資源確保の観点からも、これら廃棄物のリサイクルを推進する必要がある。

下水汚泥を有効利用する際の形態としては、乾燥汚泥、コンポスト、焼却灰、溶融スラグなどがある。また、汚泥の利用方法としては、緑農地利用、建設資材利用およびエネルギー利用に大別される。本報文では、このうち下水汚泥焼却灰の特性および利用に関する研究例を紹介しながら、有効利用を行うに当たっての課題について述べることとする。

2. 下水汚泥の処理・処分の現状

表-1および図-2は、既存の統計資料¹⁾をもとに汚泥研究室で行った平成9年度における下水汚

泥の発生状況および処理・処分の現状についての調査結果である。本調査は、汚泥処理とともに薬品等の添加や焼却等による増減の影響を排除するため、濃縮汚泥乾燥固体物ベースでまとめたもので、各公共団体から民間の廃棄物処理業者に引き渡された後の処理・処分方法についても聞き取りによる追跡調査を行っている。

表-1から、平成9年度に発生した下水汚泥の処分・利用状況を見ると、全体の約65%が焼却処理され、そのうち約60%が埋立処分されている。緑農地利用と建設資材利用の割合は、それぞれ全体の14.4%、30.1%である。有効利用時の形態は、緑農地利用はコンポストとしての利用が大半を占め、建設資材利用は大部分が焼却灰の形で利用されている。また、図-2に示す処分・利用状況の推移を見ると、緑農地利用量はほぼ横這いであるのに対し、近年における建設資材利用の伸びは著しいことがわかる。

これらのことから、下水汚泥の有効利用をより促進するためには、汚泥焼却灰の利用をいかに進めるかが重要な鍵となっているかがわかる。

表-1 下水汚泥の処分・利用状況
(千トン-DS/年)

最終安定化 状態	最終安定化先					計 (%)
	埋立	緑農地	建設資材	海洋還元	その他	
液状汚泥	0	0	0	5	0	5 0.3
脱水ケーキ	246	49	15	5	3	318 17.1
コンポスト	3	181	1	0	0	184 9.9
乾燥汚泥	12	18	0	0	0	31 1.7
焼却灰	745	21	441	0	6	1,212 65.1
溶融スラグ	2	0	104	0	6	113 6.1
計 (%)	1,009	269	561	10	15	1,863 100
	54.1	14.4	30.1	0.5	0.8	

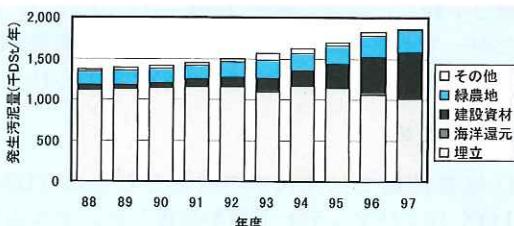


図-2 下水汚泥の処分・利用状況の推移

3. 下水汚泥焼却灰の一般的性状

3.1 下水汚泥焼却灰の分類

下水汚泥焼却灰とは、脱水した下水汚泥をおよそ800～900°Cの温度で燃焼させた後の無機分のことと、脱水時に添加する凝集剤の種類により高分子系焼却灰と石灰系(無機系)焼却灰に大別される。焼却灰の性状は、凝集剤の種類によって異なるが、多段炉や流動床炉など焼却炉の形式、焼却温度、灰捕集の方法等によっても異なる。また、下水の排除方式(分流・合流)、地域、季節によっても若干その性状が異なる。

3.2 物理的特性

3.2.1 粒度分布

下水汚泥焼却灰の粒径は焼却炉の形式によって異なり、一般にストーカー炉、多段炉、流動床炉の順に微細な灰となる。図-3は、下水汚泥焼却灰の粒度分布測定例を示したものである。

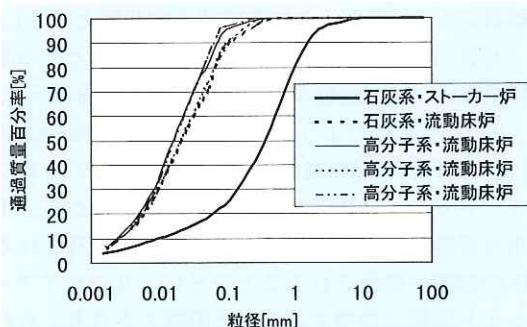


図-3 下水汚泥焼却灰の粒度分布測定例

現在、使用されている下水汚泥焼却炉の主流は流動床炉であるが、このデータから、流動床炉で発生する焼却灰は大部分が0.1mm以下の微細な粒子であることがわかる。

3.2.2 比重およびその他の物性

表-2に下水汚泥焼却灰の物性を他の材料と比較した例を示す²⁾。

下水汚泥焼却灰の比重は脱水時に用いた凝集剤の影響を大きく受け、一般に高分子系焼却灰に比較して無機系の比重は大きい。また、この表からわかるように、下水汚泥焼却灰は、比重や粒径な

表-2 下水汚泥焼却灰およびフライアッシュの物性

	A	B	C	D	E
	下水汚泥 焼却灰 (無機系)	下水汚泥 焼却灰 (高分子系)	微粉炭燃焼 石炭灰 (国内炭)	微粉炭燃焼 石炭灰 (海外炭)	微粉炭燃焼 石炭灰 (海外炭)
強熱減量 (%)	4.4	0.4	1.9	1.6	20.7
SiO ₂ (%)	13.3	49.8	53.9	63.2	63.7
Al ₂ O ₃ (%)	15.4	12.4	19.7	20.2	28.3
Fe ₂ O ₃ (%)	8.2	3.8	9.9	4.6	3.1
CaO+MgO (%)	46.1	8.6	10.4	8.2	2.8
Na ₂ O+K ₂ O (%)	1.1	3.3	3.8	1.6	0.6
SO ₃ (%)	0.3	0.1	1.3	1.3	1.3
Cl (%)	0.820	0.020	0.0008	0.0004	0.0012
P ₂ O ₅ (%)	14.7	21.9	0.8	0.7	0.1
pH	12.5	6.7	12.0	11.8	11.0
比重	3.31	2.01	2.30	2.18	2.01
平均粒径 (mm)	14.1	25.5	16.5	16.6	14.9
比表面積 (m ² /g)	4.07	10.60	1.28	1.36	20.26

ど物理的性状においてフライアッシュセメント等に用いられる微粉炭燃焼石炭灰(以下、フライアッシュという)と比較的類似している。

3.3 化学的特性

3.3.1 焼却灰の組成

表-2において下水汚泥焼却灰とフライアッシュの化学的組成を比較すると、特に高分子系の焼却灰の組成は、P₂O₅を除いた各成分比がフライアッシュのそれと良く似ていることがわかる。また、無機系焼却灰と高分子系焼却灰を比較すると、無機系焼却灰では脱水時に加えられる消石灰および塩化第二鉄に起因してCaおよびClの含有率が高くなっている。

3.3.2 焼却灰の吸水性および水和特性

下水汚泥焼却灰は、細孔構造を有する微細な粒子で、その主成分は、CaO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃などの酸化物と考えられる。このような焼却灰が水分と接触すると、CaO + H₂O → Ca(OH)₂などの化学反応や結晶水あるいは灰表面への水分子の吸着により水分が吸収される。また、CaOなどの酸化物はセメントを構成する主成分であり、焼却灰によっては水分子との水和反応にともなう水硬性を示す。特に、CaOの割合が大きい無機系焼却灰は水和反応性が大きく、一般に無機系焼却灰の中でもCa含有量が大きく焼却温度の高い焼却灰ほど水和反応性が高い傾向がある。これは、灰中CaO量およびCaOとCa(OH)₂の比が影響しているものと考えられている³⁾。

3.3.3 焼却灰の熱化学的特性

下水汚泥焼却灰を加熱すると、乾燥収縮、未燃

有機物の燃焼、水和物や炭酸塩の分解、低沸点化合物の揮散、分子再配列による結晶構造の転移、焼結にともなう収縮、融解等が生じる。焼却灰を利用したレンガ等の焼成製品を製造する場合には、焼却灰の熱化学的特性を把握することが重要である。一般に、焼却灰の熱化学的特性を知るための方法としては、示差熱分析 (DTA)、熱重量分析 (TGA) や熱収縮分析 (TMA) が用いられる。

示差熱分析 (DTA) は、水和物や炭酸塩の分解、結晶構造の転移、融解など、反応が吸熱または発熱をともなうことを利用して、熱的に不活性な基準物質と試料を一定の加熱速度で熱した場合の温度差を測定することで、試料の熱化学的な性状を知る手法である。熱重量分析 (TGA) は、試料を加熱した際の重量変化を測定するもので、水分、結晶水、低沸点化合物の量の推定などに用いられる。また、熱収縮分析 (TMA) は、成形した試料を加熱した場合の体積変化を測定するものである。成形した試料を加熱すると、比較的低温の領域では膨張を続けるが、ある温度域に達すると試料の焼結が始まり、試料は急激に収縮する。なお、焼結とは、融点以下の温度域で成形した粉体を加熱した際に、表面エネルギーを減少させようとする方向つまり表面積が減少する方向に物質移動が起こり、粒子どうしが結合することで、焼成レンガなどはこの現象を利用したものである。

図-4 は、下水汚泥焼却灰（無機系）の DTA 分析例を示したもので、1,150 °C 付近に焼結によるものと考えられる発熱のピークが見られ、1,340 °C と 1,450 °C 付近に溶融によるものと考えられる吸熱のピークが見られる。

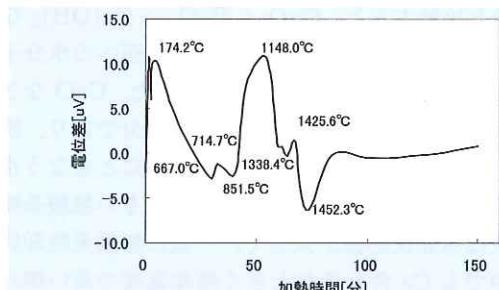


図-4 下水汚泥焼却灰の熱化学分析例 (DTA)

4. 下水汚泥焼却灰の利用上の問題点と対策

4.1 下水汚泥焼却灰利用上の問題点

下水汚泥焼却灰を利用する場合の問題点の多く

は、その形状、物性および含有成分から生じるものである。すなわち、形状に関わる問題点としては、微細な粉体であることにより飛散しやすいという取り扱い上の問題があり、物性については、吸水性や乾燥収縮が比較的大きいことにより、コンクリート混和材や陶器材料として多量に用いた場合、強度が低下したり出来形管理が困難になる可能性がある。また、下水汚泥に比較的多く含まれているリン (P) はコンクリートの凝結反応に影響し、強度低下を招くことが知られており、嫌気好気法などリン除去を目的とした水処理を行った場合などリン含有率の高い汚泥の利用に当たっては注意が必要である。さらに、汚泥中に含まれる重金属等の有害物質については、含有量は微量であるものの、焼成度の低い再生資材等では土壤環境基準を満足できないケースも認められる⁴⁾。

4.2 球状化焼却灰とそのセメント・コンクリート

用混和材料としての利用

4.2.1 球状化焼却灰の物性およびモルタル特性

先に示した下水汚泥焼却灰の熱化学的特性を利用し、下水汚泥焼却灰を高温（約 1,200~1,500 °C または約 2,100 °C）の火炎中に噴霧することにより溶融状態になると、粉体自身の表面張力により球状になる（以下、これを球状化焼却灰という）。

写真-1、2 に、それぞれ球状化焼却灰とその原料である下水汚泥焼却灰の電子顕微鏡写真を示す。

表-2 で示したように、下水汚泥焼却灰の性状は、セメント混和材料として用いられているフライアッシュと類似している。しかしながら、下水汚泥焼却灰は吸水性が大きいこと、含有される P の影響が懸念されることなどによりフライアッシュと同様に使用することは困難であると考えられており、近年多く行われているセメント原料としての利用においても、添加率にして数%程度の使用に留まっている。しかしながら、この球状化焼却灰の場合、溶融固化することで、空隙の減少にともない吸水量が低減し、さらにガラス質で覆われることにより P など含有成分の溶出が抑制されるものと考えられる。

表-3 は、下水汚泥焼却灰、球状化焼却灰および対照として高炉水砕スラグ微粉末、アスファルト用石灰石微粉末、石炭灰フライアッシュの物性試験結果を示したものである⁵⁾。

これを見ると、焼却灰でも無機系凝集剤を用い

たものは pH が高く、単位水量比の平均が 100%以下であることから、モルタルやコンクリートの混和材として用いることは可能であると推測されるが、現在主流となっている高分子系凝集剤を用いた焼却灰の場合、pH が中性域を示し、単位水量比がすべてのサンプルで 100%以上であることから、混和材料としては適さないことがわかる。

一方、球状化焼却灰では、溶融処理により比表面積が著しく減少するとともに、単位水量比も減少し、数値の上では高炉スラグ水碎微粉末に近い値となっている。

図-5、6 は、この試験結果の一部を用い、平均粒度と単位水量の関係および 25%スラリー pH と中性化深さの関係を示したものである。それぞれ

の粉体毎にその特性は異なるものの、一般的に平均粒度が小さくなるほど単位水量も小さくなる傾向が認められ、25%スラリー pH が小さいほど中性化深さは深い傾向がみられる。フライアッシュと比較すると球状化焼却灰の pH の変動は小さく、同じ pH の場合、球状化焼却灰の方が中性化深さはやや小さい傾向が見られる。これは、球状化焼却灰の場合、溶融固化により灰成分の溶出が抑制されるため組成の影響を受けにくく、さらに比表面積が小さいため酸性成分の付着が少ないことが影響していると推測される⁶⁾。

4.2.2 球状化焼却灰の高流動コンクリートへの適用

高流動コンクリートは、施工性の改善を目的としてコンクリートの流動性を高めたもので、粉体量の増加や増粘剤の添加により流動性および材料分離抵抗性の向上を図っている。しかし、粉体量を増加させるためにセメント量を増加させた場合、水和反応による発熱量が大きくなり、コンクリートの膨張・収縮にともなうひび割れなどを

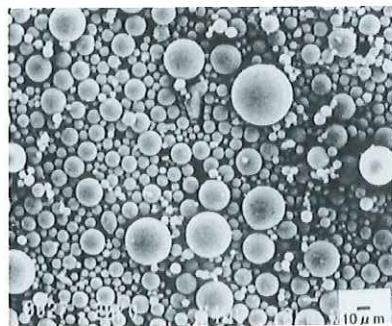


写真-1 球状化焼却灰

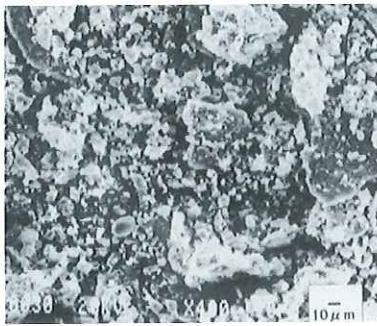


写真-2 原灰 (下水汚泥焼却灰)

表-3 下水汚泥焼却灰および類似材料の物性測定例

	球状化焼却灰 微 粉末 (高分子系)	下水汚泥焼却灰 (無機系)	下水汚泥焼却灰 (高分子系)	下水汚泥溶融水 冷スラグ微粉末 (高分子系)	高炉水碎スラグ 微粉末	アスファルト用 石灰石微粉末	石灰火力フライ アッシュ JIS 品
Lot 数	15	6	24	7	7	7	90
SiO ₂ 量 (%)	37.1~46.0 Av.41.8(6.7)	12.2~34.4 Av.33.2(5.3)	27.4~51.3 Av.35.9(8.7)	29.4~47.8 Av.35.2(5.0)	32.2~34.4 Av.33.2(5.3)	0.3~1.8 Av.0.6(0.5)	45.2~70.5 Av.57.4(5.5)
CaO 量 (%)	7.0~15.3 Av.8.8(4.3)	26.9~50.1 Av.39.9(0.6)	3.0~16.3 Av.7.7(4.3)	7.2~33.5 Av.13.8(5.5)	41.1~42.9 Av.42.2(0.6)	54.3~55.3 Av.54.9(0.3)	0.0~10.9 Av.4.1(2.8)
25% スラリー pH	7.0~7.9 Av.7.2(0.3)	11.4~12.9 Av.11.8(0.9)	6.1~8.3 Av.7.2(0.6)	7.0~8.1 Av.7.7(0.5)	10.7~11.8 Av.11.2(0.6)	8.1~9.9 Av.8.9(0.9)	1.9~13.0 Av.10.4(2.1)
強熱減量 (%)	0.1~1.3 Av.0.5(0.2)	0.1~0.5 Av.0.3(0.1)	0.1~1.6 Av.0.8(0.2)	0.1~0.6 Av.0.4(0.1)	0.1~0.5 Av.0.3(0.1)	40.4~43.4 Av.42.6(1.0)	0.2~14.5 Av.2.6(2.3)
比重	2.28~3.01 Av.2.65(0.35)	2.99~3.55 Av.3.18(0.21)	1.88~2.81 Av.2.05(0.55)	2.81~3.24 Av.3.08(0.24)	2.89~2.91 Av.2.90(0.01)	2.70~2.79 Av.2.74(0.01)	1.98~2.46 Av.2.18(0.09)
平均粒度 (μm)	2.9~148 Av.37.9(12)	13.1~35.4 Av.19.6(3.6)	6.9~74.3 Av.30.4(16.2)	5.2~38.3 Av.17.7(6.3)	7.0~12.4 Av.9.9(1.6)	1.7~12.1 Av.7.1(3.7)	4.6~35.4 Av.14.6(6.5)
比表面積 (m ² /g)	0.231~3.24 Av.1.13(0.93)	0.98~5.37 Av.3.15(2.11)	3.21~15.5 Av.8.67(2.5)	0.88~1.21 Av.1.03(0.10)	0.93~1.24 Av.1.12(0.11)	1.09~2.14 Av.1.61(0.31)	0.88~8.90 Av.2.52(1.62)
球形粒含有率 (%)	50~90 Av.74(28)	1~5 Av.1.8(1.3)	1~6 Av.1.4(1.9)	1~3 Av.1.7(0.8)	1~3 Av.1.7(0.8)	1~4 Av.2.1(1.2)	20~99 Av.81(18)
単位水量比 (%)	91.0~115.1 Av.97.0(5.9)	95.0~100.3 Av.96.1(1.1)	103.5~130.3 Av.115.4(10.4)	92.3~100.1 Av.97.2(2.0)	95.0~98.4 Av.96.1(1.1)	96.3~99.1 Av.97.5(1.0)	89.0~108.1 Av.97.7(3.2)
空気連行量 (%)	15.9~20.0 Av.18.1(2.3)	10.5~15.1 Av.12.6(2.0)	5.2~14.3 Av.9.8(7.3)	11.5~16.6 Av.13.3(2.2)	10.5~15.1 Av.12.6(2.0)	10.9~17.5 Av.14.7(2.3)	1.9~18.5 Av.9.1(3.9)

* 表中の Av. は平均値を、() 内は標準偏差を示す。

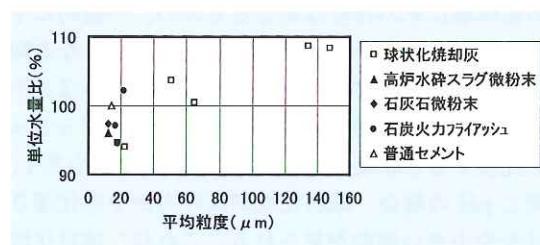


図-5 平均粒度と単位水量の関係

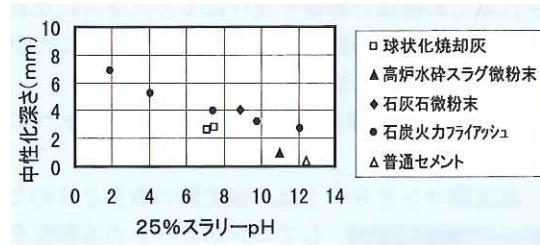


図-6 25%スラリー pH と中性化深さの関係

生じる恐れがある。このため、セメントの一部をフライアッシュ、高炉スラグ微粉末および石灰石微粉末で置換することが行われている。以下に、球状化焼却灰をこれらの材料の代替として高流动コンクリートの混和材として用いた試験について述べる。

表-4 に試験に用いた球状化焼却灰の物性を、表-5、6 にそれぞれ高流动コンクリートの製造に用いた材料および配合を示す。なお、球状化焼却灰 A、B は炉のメーカー、形式が異なる試料である。

表-7 は、製造した高流动コンクリートのフレッシュ性状を示したものである。ここで、スランプフロー試験は、拘束のほとんどない条件下で、コンクリート自身の重さにより、鋼板との摩擦抵抗およびコンクリート自身の変形抵抗に打ち勝って変形できる能力を判定する試験で、材料分離を生じない範囲ではスランプフロー値が大きいほど変形性に優れていると言える。V ロート試験は、拘束のある条件下でコンクリート自身の重さにより、鋼板との摩擦抵抗およびコンクリート自身の変形抵抗に打ち勝って変形する速度を判定する試験で、一種の間隙通過試験と考えることができる。材料分離を生じない範囲ではロート通過時間が短いほど間隙通過性に優れていると言える。なお、表中の目標値は岡村らの示した値である⁷⁾。

これを見ると、スランプフロー値で球状化焼却灰 A が、V ロート流下試験で球状化焼却灰 B が目標範囲からはずれているが、材料分離は認められなかった。

次に、球状化焼却灰を用いた高流动コンクリートの圧縮強度試験結果を図-7 に示す。各試料とも普通コンクリート以上の値を示した⁵⁾。

4.4.3 球状化焼却灰の安全性

球状化焼却灰は、焼却灰を高温火炎中で溶融し球形化させたものであることから、灰表面は溶融スラグと同様に主としてガラス質であると考えられる。このため、球状化焼却灰は一般の焼却灰に比較して重金属等有害物質の溶出という点では有利と考えられる。

表-4 高流动コンクリートに用いた球状化焼却灰

	強熱減量 (%)	比重	比表面積(ブレーン法) (cm ² /g)
球状化焼却灰 A	0.0	2.52	1,620
球状化焼却灰 B	0.0	2.34	2,280

表-5 高流动コンクリートに用いた材料

水	水道水
セメント	中庸熟ボルトランドセメント(比重 3.22)
砂	比重 2.59、吸収率 1.65%
粗骨材(大)	比重 2.65、吸収率 0.80%
粗骨材(小)	比重 2.57、吸収率 1.11%
SP 剤	ポリカルボン酸系 AE 減水剤(比重 1.06)
増粘剤	生物系高分子粉末

表-6 高流动コンクリートの配合

	Vw/Vp	配合量 (kg/m ³)						
		水	セメント	粉体	砂	粗骨材(大)	粗骨材(小)	SP
球状化焼却灰 A	73.0	178.1	398.9	311.7	741.1	526.9	219.0	3.90
球状化焼却灰 B	85.0	189.5	373.8	270.5	741.1	526.9	219.0	9.00
								0.10

表-7 高流动コンクリートのフレッシュ性状

	スランプフロー値 (cm)	V ロート流下時間 (秒)
球状化焼却灰 A	58.8	11.54
球状化焼却灰 B	65.8	8.49
目標値	65±2cm	10~20秒

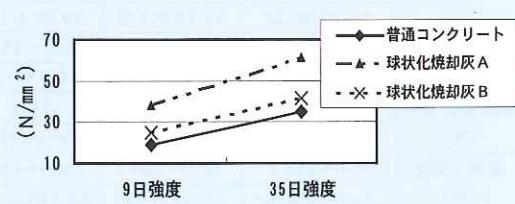


図-7 高流动コンクリートの圧縮強度

表-8、9に、球形化焼却灰の溶出試験結果および球状化焼却灰を用いて製造した高流動コンクリートの7日目硬化体ペースト部分を、土壤環境基準に係る溶出試験方法(環境庁告示第46号)で試験した結果を示す。これを見ると、球形化焼却灰および硬化体ともにSe、Asの溶出が認められたが、産業廃棄物に係る基準値を超えるものはなかった。さらに、硬化体については土壤環境基準も満足した⁵⁾。

表-8 球状化焼却灰の溶出試験結果

	球状化焼却灰A	球状化焼却灰B	産業廃棄物基準値
Pb	N.D	N.D	0.3
Cd	N.D	N.D	0.3
Hg	N.D	N.D	0.005
Se	N.D	0.092	0.3
As	0.037	0.028	0.3
Cr (M)	N.D	N.D	1.5

表-9 高流動コンクリート硬化体の溶出試験結果

	球状化焼却灰A	球状化焼却灰B	産業廃棄物基準値
Pb	N.D	N.D	0.3
Cd	N.D	N.D	0.3
Hg	N.D	N.D	0.005
Se	N.D	N.D	0.3
As	N.D	N.D	0.3
Cr (M)	N.D	N.D	1.5

5. おわりに

下水道の普及率が向上し、住民の生活環境や河川等の水質改善が進む一方、下水処理とともに発生する汚泥の処分は各自治体にとって切迫した問題となっている。また、天然資源の枯渇や、CO₂などの温暖化ガスの問題に代表される地球規模の環境問題を考えたとき、建設資材あるいはエネルギー源として、あるいはその中に含まれる肥効成分の利用により汚泥の有効利用率を向上させることは、下水道事業者のみならずわが国全体で取り組むべき重要な課題のひとつである。

今回は、焼却灰のもつ欠点を改良することで、その成分や粉体材料であるという特性を有効に利用するという新たな視点に立った「球状化焼却灰」について紹介したが、下水汚泥の有効利用技術はこれ以外にも様々な機関やメーカー等によって研究され、多様な技術、製品が生み出されている。しかしながら、このことは、反面で下水汚泥の有効利用が容易でないことを示しており、多くの場合、品質の安定性、コスト、安全性などの点で、

競合する他の資材に対して十分な優位性を持てないというのが実状である。

今後、下水汚泥の有効利用をさらに進めるためには、従来から行ってきた技術開発、用途の開拓、品質管理の向上、コストの低減を図ることはもちろん、ライフサイクルアセスメントの手法を用いるなど、従来のコスト・施工性などを中心とした資材の評価方法を見直すことも必要となる。さらに、安全性評価についてもユーザーや住民の理解が得られる評価手法を確立し、これら評価データの公開などアカウンタビリティの向上を図ることが一層求められる。

参考文献

- 日本下水道協会：平成9年度版下水統計, 1999.5
- 田野崎隆雄、松本匡史、野崎賢二、和泉一志、中村和史、南部正光、丸田俊久：日本の焼却灰の性状, Inorganic Materials, Vol.5, pp.149-158, 1998.3
- 大島吉雄、佐藤和明、櫻井克信、増田隆司、白石隆、久樂勝行、三木博史、林義之、鎌田修、日比野雅司、長野健司：下水汚泥焼却灰の土質改良材としての利用マニュアル(案), 土木研究所資料第2908号, 1990.11
- 渡部春樹、尾崎正明、松原誠：下水汚泥の建設資材利用の高度化に関する調査, 下水道関係調査研究年次報告集, 建設省土木研究所, 1995.10
- 尾崎正明、久保忠雄、田野崎隆雄、松本匡史：バイオス粉体の高流動コンクリート混和材料としての利用, 第9回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.204-206, 1998.10
- 田野崎隆雄、浅田信二：下水汚泥溶融球形粉体のモルタル・コンクリート用混和材料としての適用, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.283-288, 1997
- 岡村甫、前川宏一、小澤一雅：ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, 1993.9

川嶋幸徳*



建設省土木研究所下水道部汚泥研究室主任研究員
Yukinori KAWASHIMA

森田弘昭**



同 汚泥研究室長
Hiroaki MORITA