

# 報 文 下水汚泥焼却灰を添加した新埋戻し材の埋戻し技術

赤木 寛一\* 辻 雅行\*\* 斉藤 泰久\*\*\*

## 1. はじめに

建設汚泥に対しては、最終処分場の残余年数問題、環境への影響、依然として低い建設汚泥再利用化率の3つの問題が存在する。近年、都市再開発事業や地下鉄工事などで発生する建設汚泥に関しては、適切な処理を行い廃棄せず再利用することが求められており、シールド掘進に伴い発生した建設汚泥は、埋戻し材(流動化処理土)やインパート材などとして既に有効活用されている。

また各自治体では、下水処理施設の整備に伴い下水汚泥の排出量が年々増加している。その大部分は焼却処理され、残渣である下水汚泥焼却灰は産業廃棄物として埋立処分されている。下水汚泥焼却灰は、二次製品化、粒度調整による建設資材への流用などにより一部は活用されているものの、その発生量は膨大であり、最終処分場への負担軽減の観点から、低コストで大量に活用できる技術の開発が求められている。

そこで、地下鉄建設工事より排出される建設発生土および下水汚泥焼却灰の有効利用を図るため、下水汚泥焼却灰を建設汚泥に添加し、掘削後の埋戻しに使われる流動化処理土(新埋戻し材)としての利用を検討している。

## 2. 新埋戻し材に要求される品質

### 2.1 下水汚泥焼却灰の特性

下水汚泥焼却灰は、1990年代からその有効活用を目指し、基本的な化学特性、コンクリート材料等への活用方法、有害物質の溶出特性や除去技術に関して研究が行われている。土木建設資材としての実用化に向けた基礎的研究としては、下水汚泥焼却灰に含まれる有害物質の特徴に着目した研究が行われており、下水汚泥焼却灰には土壤環境基準を超過する砒素とセレンが含まれ、土壤環境基準値(砒素、セレンとも0.01mg/L)を超過する場合が多いことが報告されている<sup>1)</sup>。砒素とセレンの溶出特性は、pHが7程度であっても土壤環境基準を超過する場合が多く、pHに強く依存してpHが小さい環境において溶出しやすくなる傾向が指摘されている<sup>2), 3)</sup>。

また、固化材(セメント)による下水汚泥焼却灰から

の砒素とセレンの溶出量は、固化材を添加することによって抑制されることが報告されている<sup>4)</sup>。さらに、流動化処理土に下水汚泥焼却灰を添加しても、目標の強度を得ることができることや、水銀、カドミウム、鉛、六価クロムについては土壤環境基準値を満足することが報告されている<sup>5)</sup>。

### 2.2 新埋戻し材に求められる品質

新埋戻し材は流動性を有する埋戻し材であり、表-1に示す流動化処理土と同等の品質基準に準じる。また新埋戻し材は、産業廃棄物である下水汚泥焼却灰を使用することから、生活環境や人の健康への影響に留意する必要がある。関連する環境法令に従い安全性について確認を行う必要がある。

関係法令としては、「水質汚濁に係わる環境基準について」(環境庁告示第59号、昭和46年12月28日、改正平11環告14)、「地下水の水質汚濁に係わる環境基準について」(環境庁告示第10号、平成9年3月31日、改正平11環告16)、「土壌の汚染に係わる環境基準について」(環境庁告示第46号、平成3年8月23日、改正平13環告16)、「土壌汚染対策法」(平成14年法律第53号、平成14年2月15日施行)などがある。

これらの関係法令のうち、新埋戻し材は実用上、地下水位よりも深い位置に打設されることはなく、打設された上面はアスファルト等で被覆されることを考えると、

表-1 東京都の流動化処理土の品質基準

試験項目	基準値
原料土の土質区分	火山灰質粘性土、粘性土、砂質土
最大粒径	管回り部……13mm以下
	その他……40mm以下
一軸圧縮強度	交通開放時 13N/cm <sup>2</sup> 以上 (1.3kgf/cm <sup>2</sup> 以上)
	後日復旧の場合 28日後 55N/cm <sup>2</sup> 以下 (5.6kgf/cm <sup>2</sup> 以下)
フロー値	180~300mm
ブリージング率	1%未満
処理土の密度	1.5t/m <sup>3</sup> 以上

\*AKAGI Hirokazu 早稲田大学 理工学部 社会環境工学科教授, 工博  
\*\*TSUJI Masayuki 東京地下鉄(株) 建設部 早稲田工事事務所 所長  
\*\*\*SAITOU Yasuhisa パシフィックコンサルタンツ(株) 環境事業本部地盤技術部 課長

東京都新宿区大久保3-4-1  
東京都新宿区高田馬場1-1-5 早稲田工事事務所  
東京都新宿区西新宿2-7-1 新宿第一生命ビル

表-2 土質材料の物性

	川砂	調整泥水	下水汚泥焼却灰				
			焼却灰1	焼却灰2	焼却灰3	焼却灰4	焼却灰5
土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.67	2.59	2.61	2.64	2.57	2.92	2.56
液性限界 $\omega_L$ (%)	NP	70.29	NP	NP	NP	NP	NP
塑性限界 $\omega_P$ (%)	NP	28.15	NP	NP	NP	NP	NP
塑性指数 $I_P$ (%)	—	42.14	—	—	—	—	—
粒度分布	礫 (%)	11.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	粗砂 (%)	59.97	0.54	7.26	0.10	0.11	22.48
	細砂 (%)	25.26	21.80	15.38	24.41	5.34	39.51
	シルト (%)	2.88	37.52	57.09	65.64	44.41	23.75
	粘土 (%)	0.00	40.14	20.27	9.85	50.14	14.26
強熱減量 $\omega$ (%)	0.94	4.46	0.94	0.58	0.56	2.32	1.65
pH	8.51	8.46	8.67	7.46	6.48	11.07	8.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 含有率 (%)	—	—	12.59	12.38	18.48	6.65	15.38

表-3 下水汚泥焼却灰の重金属含有量 単位 mg/kg

項目	下水汚泥焼却灰				
	焼却灰1	焼却灰2	焼却灰3	焼却灰4	焼却灰5
カドミウム	0.86	10.80	3.90	0.46	6.90
鉛	24.0	161.0	265.0	33.4	181.0
砒素	3.3	27.7	13.3	5.8	14.8
セレン	<0.05	2.30	12.70	3.00	10.90
ふっ素	100.0	77.8	61.7	95.7	13.6
ほう素	43.0	100.0	231.0	96.7	143.0
水銀	0.003	0.170	0.790	0.020	0.030
六価クロム	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
シアン	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0

※<: 定量下限値未満

表-4 下水汚泥焼却灰の重金属溶出量 単位 mg/L

項目	下水汚泥焼却灰					環境基準値
	焼却灰1	焼却灰2	焼却灰3	焼却灰4	焼却灰5	
カドミウム	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01
鉛	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.01
砒素	0.0137	0.3400	0.1600	<0.005	0.0640	0.01
セレン	0.0198	0.0340	0.2900	<0.005	0.2800	0.01
ふっ素	0.60	0.63	4.10	0.26	1.00	0.80
ほう素	1.10	1.40	0.92	0.25	0.89	1.00
水銀	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.001
六価クロム	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.050
シアン	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	不検出
pH	8.7	6.6	7.1	11.5	8.6	—

■: 環境基準を超過 ※<: 定量下限値未満

「水質汚濁に係わる環境基準について」および「地下水の水質汚濁に係わる環境基準について」は直接関係する法令ではないと考えられる。したがって、環境法令としては「土壌の汚染に係わる環境基準について(以下、「土壌環境基準」とする)」を満足すればよいと考えられる。

表-5 実験の配合ケース

Case No.	灰種	川砂 (kg)	固化材 (kg)	焼却灰 (kg)	調整泥水 (kg)		
1	焼却灰1	430	70	20	986		
2				30	981		
3				35	979		
4				80	25	980	
5					30	977	
6					40	973	
7				90	25	976	
8					35	971	
9					45	966	
10					焼却灰2	80	25
11				焼却灰3			
12				焼却灰4			
13				焼却灰5			

※流動化処理土1m<sup>3</sup>当りの配合量

なお、「土壌汚染対策法」では、新埋戻し材の打設後の溶出等による人の健康への影響や掘削時に土壌環境基準を超過するなど、将来的な有害物質による影響が関係する。このため、新埋戻し材の埋戻しに当っては、長期的な溶出特性についても留意する必要がある。

### 3. 新埋戻し材の配合検討

新埋戻し材の実用化に向け、流動化処理土に下水汚泥焼却灰を用いた際に、これが流動化処理土の強度特性に及ぼす影響や砒素等の重金属の溶出状況を調査し、品質基準を満足する配合を把握するために実験を行った<sup>(6),(7)</sup>。

#### 3.1 実験の概要

実験に用いた土質材料と下水汚泥焼却灰の物性値を表-2に示す。使用した5カ所の下水汚泥焼却灰の重金属含有量と溶出量は表-3および表-4に示すとおりである。含有量および溶出量ともプラントごとにばらついた状況となっている。溶出量は、ふっ素とほう素が2つの焼却灰で基準値を超えているが、砒素とセレンは4つの焼却灰で基準値を超え、既存資料<sup>(2),(3)</sup>の報告と同様の状況となった。

これらの実験試料は、表-5に示す配合で混練りを行った。川砂を流動化処理土1m<sup>3</sup>当り430kgとし、固化材(高炉B種セメント)、焼却灰の配合比率を変化させた。そして、配合試料全体の密度が1.5g/cm<sup>3</sup>以上、フロー値が180~300mm、ブリージング率が1%以内となるように調整泥水を加え、これらをハンドミキサーにより約1分程度練り混ぜ、流動化処理土を作成した。

強度特性は、一軸圧縮試験(供試体寸法φ50mm×100mm)より得られた材齢28日強度を用い評価した。重金属の溶出特性は砒素、セレン、六価クロムについて溶出試験(環告46号)を行い、土壌環境基準との比較を行った。

#### 3.2 実験結果

焼却灰量/固化材量比と28日強度の関係は、図-1に示すとおりである。焼却灰量/固化材量が0.5を超える

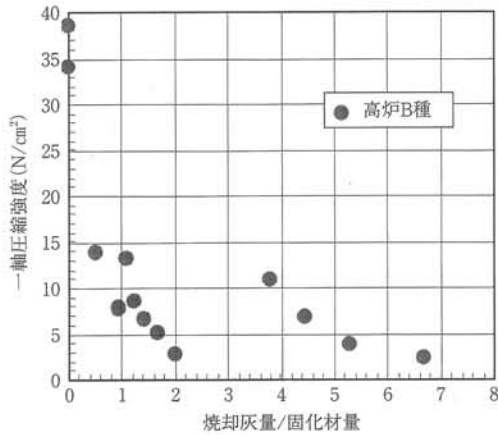


図-1 下水汚泥焼却灰量と固化材量の比と一軸圧縮強度の関係

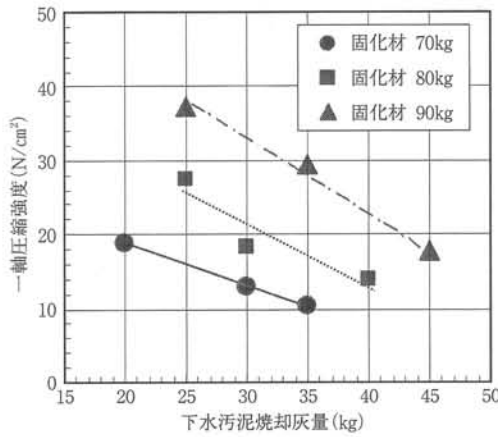


図-2 下水汚泥焼却灰量と一軸圧縮強度の関係

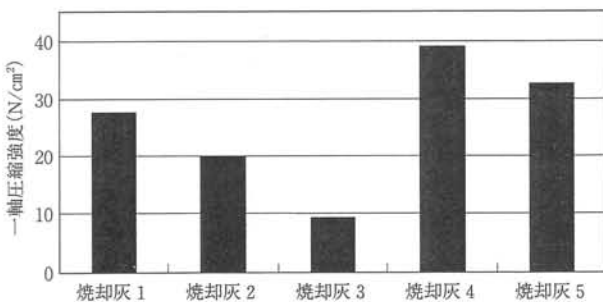


図-3 異なる下水汚泥焼却灰量の一軸圧縮強度

と急激に強度が低下する。基準強度である $13\text{N}/\text{cm}^2$ を満足するためには、焼却灰量/固化材量比を $0.5$ 以下とするのが適切であると考えられる。

また、焼却灰1を用い、焼却灰の添加量を変化させ流動化処理土を作成したときの一軸圧縮強度の変化を図-2に示す。いずれの固化材量においても、焼却灰量が増加するにつれ一軸圧縮強度が低下しており、下水汚泥焼却灰が強度特性に影響を及ぼすことが推察できる。一軸圧縮強度の低下要因としては、下水汚泥焼却灰の配合量の違いによる細粒分の影響を考えられるが、流動化処理土全体の細粒分含有率から見ると、下水汚泥焼却灰の配合量の違いによる細粒分含有率は数%しか変わらないため、一軸圧縮強度が低下する支配的要因とは考えられない。

図-3は、表-2に示す5種類の異なる下水汚泥焼却灰を用い、一軸圧縮強度試験を行った結果である。図-3

表-6 溶出試験結果

焼却灰量	試験項目	焼却灰 2		焼却灰 3	
		7日	28日	7日	28日
25kg	砒素	N.D.	N.D.	N.D.	0.0003
	セレン	N.D.	N.D.	0.006	N.D.
	六価クロム	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	pH	12.11	11.95	12.09	11.97
30kg	砒素	N.D.	N.D.	N.D.	0.0003
	セレン	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	六価クロム	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	pH	12.11	11.98	12.11	11.95
40kg	砒素	N.D.	N.D.	N.D.	0.0003
	セレン	N.D.	N.D.	0.002	N.D.
	六価クロム	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	pH	12.09	11.94	12.05	11.94

\*N.D.は定量下限値未満。  
\*単位は $\text{mg}/\text{L}$

項目	環境基準値	定量下限値
砒素	0.01	0.0003
セレン	0.01	0.002
六価クロム	0.05	0.015

に示した実験ケースは、表-5に示す各焼却灰における固化材 $80\text{kg}$ 、焼却灰 $25\text{kg}$ のケースを対象とし、使用材料の配合比はすべて同じとして、焼却灰の種類のみ異なる配合条件としている。図-3に示すとおり、焼却灰4で $39.1\text{N}/\text{cm}^2$ を示した一方で、焼却灰3では $9.1\text{N}/\text{cm}^2$ であり、下水汚泥焼却灰の種類によって一軸圧縮強度は最大約 $1/4$ に低下している。

重金属の溶出特性は、下水汚泥焼却灰からの砒素の溶出量が最も大きい焼却灰2と、砒素とセレンの両方が大きい焼却灰3の2つの焼却灰について、固化材 $80\text{kg}$ 、焼却灰 $25, 30, 40\text{kg}$ の配合に対し、材齢7日と材齢28日の供試体について確認した。試験結果は表-6に示すとおりである。砒素、セレン、および六価クロムは、すべての配合で土壤環境基準を満足する結果となった。

### 3.3 下水汚泥焼却灰の添加が及ぼす新埋戻し材への影響

下水汚泥焼却灰の添加量・種類が流動化処理土の強度特性に与える影響が把握された。これらの要因として、下水汚泥焼却灰中に含まれるリン( $\text{P}_2\text{O}_5$ を指す)に着目し、一軸圧縮強度との関係を図-4のように整理した。多少のばらつきがあるものの、リンの含有率の増加に伴い一軸圧縮強度が単調に低下しており、リンは強度に影響を与えていると考えられる。このことから、流動化処理土に下水汚泥焼却灰を用いる場合には、焼却灰中のリンの含有率に留意する必要があると考えられる。

下水汚泥焼却灰に含まれるリン含有率と細粒分含有率との関係は図-5に示すとおりである。これらには相関が見られ、焼却灰中の細粒分含有率の増加に伴いリン含有率も増加する。したがって、流動化処理土に下水汚泥焼却灰を用いる場合には、焼却灰の細粒分含有率を調査することにより、ある程度リンの含有率を把握でき、強

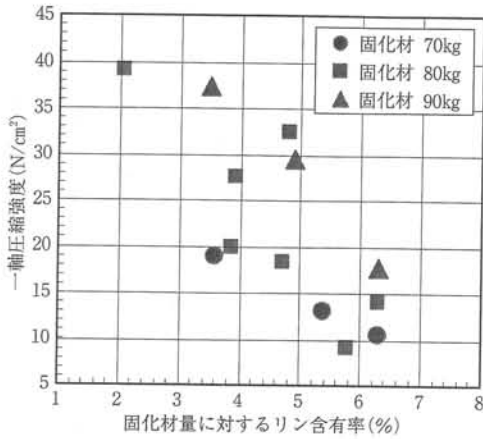


図-4 リン含有率と軸圧縮強度の関係

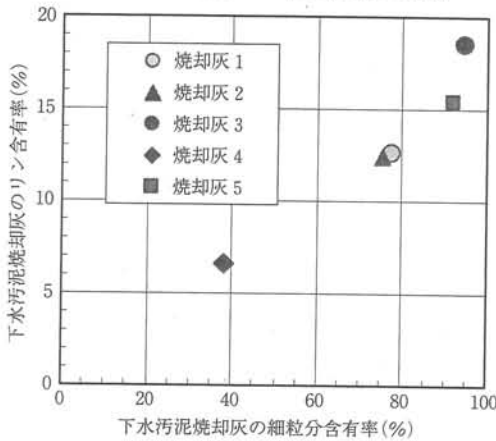


図-5 リン含有率と細粒分含有率の関係

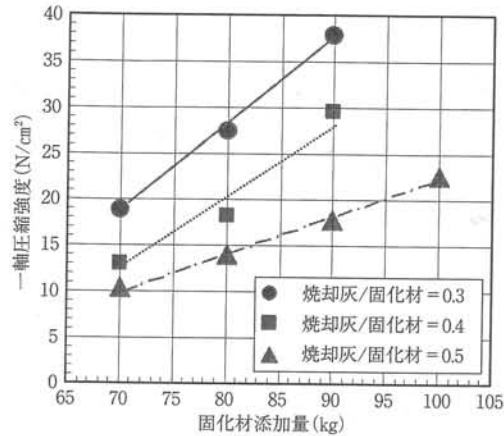


図-6 固化材添加量と28日強度の関係

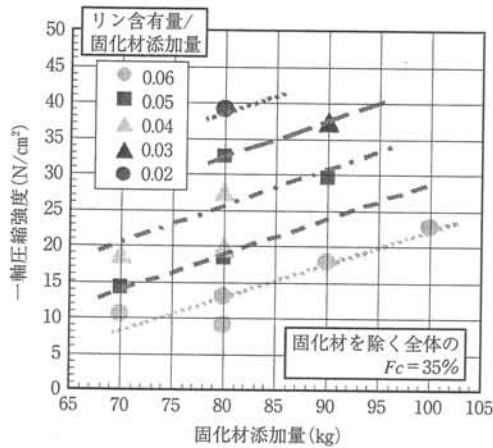


図-7 リン含有量/固化材添加量と28日強度の関係

度低下の予測ができる可能性があると考えられる。

### 3.4 下水汚泥焼却灰を添加した新埋戻し材の配合設計の1例

新埋戻し材への添加材料が異なるとその細粒分含有率に変化するので、同一の細粒分含有率 $F_c$ を有する試料について、固化材添加量の違いによる強度変化を図-6のようにまとめた。実用化を考慮し安全率を見込んだ管理強度を $25\text{N/cm}^2$ とすると、実験個数は十分でないが、 $F_c=35\%$ の場合に管理強度を満たす配合は、焼却灰/固化材比が0.3の場合で流動化処理土 $1\text{m}^3$ 当り固化材量は $77\text{kg}$ 以上となる。また、 $F_c=35\%$ の場合について、添加した下水汚泥焼却灰の固化材添加量に対するリン含有量をパラメータとして、固化材添加量と28日強度との関係を取りまとめると図-7のようになる。同じ固化材量であれば、リン含有量が大きいほど28日強度が低下することがわかる。図-7は、下水汚泥焼却灰を利用した流動化処理土の強度発現に影響する固化材量、焼却灰添加量および細粒分含有率の関係を一元的に表現しており、配合設計に利用できるチャートとなっている。

### 4. おわりに

下水汚泥焼却灰を流動化処理土に使用した新埋戻し材(下水汚泥焼却灰を用いた流動化処理土)の強度発現特性と重金属の溶出状況、並びに配合設計の1例を示した。その結果は以下のように要約できる。

- ① 下水汚泥焼却灰の添加量や種類は、新埋戻し材の強度へ影響を与える。
- ② 下水汚泥焼却灰に含まれるリンは、新埋戻し材の強度低下に影響を及ぼす。
- ③ 下水汚泥焼却灰の細粒分含有率を調査することにより、焼却灰中のリンの含有率が把握でき、それによる強度低下の程度を予測できる可能性がある。
- ④ 新埋戻し材では、下水汚泥焼却灰に含まれる砒素等の重金属の溶出は生じないと考えられる。
- ⑤ 下水汚泥焼却灰の細粒分含有率とリン含有率を把握することにより、適切な配合設計を行うことができる。

今回の実験によって、下水汚泥焼却灰を流動化

処理土へ使用した新埋戻し材の品質を確保するための適正配合の方針について有用な情報が得られ、その実用化の可能性を議論できる土壌を形成することができたと考えられる。今後さらに実験を継続するとともに、現場規模での強度発現と溶出状況についても調査を行う予定である。

なお、本報は(株)トンネル技術協会「平成16年度新埋戻し材の調査・研究特別委員会」において実施された調査・研究成果の一部を取りまとめたものであり、記して関係各位に謝意を表します。

### 【参考文献】

- 1) 宇野ほか：下水汚泥焼却灰を用いたシールドセグメントの研究開発，佐藤工業株式会社技術研究年報，No28，2002。
- 2) 伊藤ほか：下水汚泥焼却灰に含まれる重金属類の溶出に関する研究，下水道協会誌，Vol. 37，No458，pp. 166～180，2004。
- 3) 川嶋ほか：焼却灰の重金属溶出特性に関する研究，工業用水，第528号，pp. 2～9，2003。
- 4) 宮島ほか：焼却灰からの有害物質溶出防止に関する調査，平成14年度東京都下水道局技術調査年報，2002。
- 5) 寺田ほか：下水汚泥焼却灰の流動化処理土への有効利用，平成8年度東京都下水道局技術調査年報，pp. 349～355，1996。
- 6) 神谷ほか：下水汚泥焼却灰中のリンが流動化処理土の強度特性に及ぼす影響，第40回地盤工学研究発表会，pp. 599～600，2005年6月。
- 7) 神谷ほか：下水汚泥焼却灰を利用した流動化処理土の強度特性と配合設計，第60回土木学会発表会，pp. 747～748，2005年9月。