

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

The effect of phosphate leaching on the stabilized soil using incinerate ash of sewage sludge

赤木寛一¹・渡部新太郎²・神谷雄三³

Hirokazu Akagi, Shintaro Watanabe and Yuzo Kamiya

¹正会員 早稲田大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒169-8555 新宿区大久保 3-4-1)

Email:akagi@waseda.jp

²東京地下鉄株式会社 建設部 沿道調整課 課長補佐

³学生会員 早稲田大学大学院理工学研究科建設工学専攻 (〒169-8555 新宿区大久保 3-4-1)

The sewage sludge is disposed as an incinerate ash after the dehydration. Their low cost reuse is required to secure the space of disposal fill, since the magnitude of the incinerate ash volume is huge. The incinerate ash of sewage sludge is aimed to be used as a cement stabilized fill material with construction waste from the underground excavation. The effect of the incinerate ash of sewage sludge on the physical properties and the strength characteristics of the cement stabilized fill material is experimentally investigated. The phosphate leaching from the incinerate ash is demonstrated to reduce the strength of the cement stabilized fill material.

Key Words: Compressive strength, Wastes, Cement, Sewage sludge

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などの問題が存在する。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）やインバ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。しかしながら、その大部分は焼却処分され、残渣である下水汚泥焼却灰は産業廃棄物として埋立て処分されている。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適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、建設汚泥に下水汚泥焼却灰を添加し、掘削

後の埋戻しに使われる流動化処理土（新埋戻し材）としての利用をすることで廃棄量削減を目指している。

2.新埋戻し材に要求される品質

(1) 下水汚泥焼却灰の特性

下水汚泥焼却灰は、1970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¹⁾。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^{2), 3)}。

また、下水汚泥焼却灰からの砒素とセレンの溶出

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	後日復旧の場合	交通開放時 13N/cm ² 以上 (1.3kgf/cm ² 以上)
		28日後 55N/cm ² 以下 (5.6kgf/cm ² 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 ³ 以上	

量は、固化材(セメント)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⁴⁾。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⁵⁾。

(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、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

表-3 下水汚泥焼却灰の重金属含有量

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
ヒ素	3.30	13.30	27.70	14.80	11.60
セレン	<0.05	12.70	2.30	10.90	<0.05
ほう素	43.00	231.00	100.00	143.00	<0.05
六価クロム	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
全リン	12.59	12.38	18.48	15.38	8.43

※<:定量下限値未満

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、「水質汚濁に係わる環境基準について」及び「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。また、最近では排水性舗装が主流になりつつあるが、地表から1.2m以上の深さの場所に打設することを想定しているため、雨水の浸透による周辺への環境影響は無いと考えている。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。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の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あたっては、長期的な溶出特性についても留意する必要がある。

3. 実験概要

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^{6),7)}。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。実験試料は、地下鉄工事より発生する発生土の調整泥水と、川砂、

表-2 使用材料の物性値

				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 ρ_s (g/cm ³)				2.71	3.01	2.70	2.61	2.57
液性限界 w_L (%)				NP	73.88	NP	NP	NP
塑性限界 w_P (%)				NP	39.87	NP	NP	NP
塑性指数 I_P (%)				—	34.01	—	—	—
粒度分布	礫(%)	16.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	粗砂(%)	57.11	0.54	27.22	7.26	0.11	0.10	0.00
	細砂(%)	22.59	21.80	39.69	15.38	5.34	24.41	8.29
	細粒分(%)	3.74	77.66	33.09	77.36	94.55	75.49	91.71

固化材として高炉 B 種セメントを用い、焼却灰は、下水処理施設より発生する 5 種類の焼却灰（以下それぞれ焼却灰 1、焼却灰 2、焼却灰 3、焼却灰 4、焼却灰 5）を使用した。下水汚泥焼却灰の重金属含有量を表-3 に、溶出量を表-4 に示す。なお、ホウ素については稲の生育に悪影響を及ぼすことが知られており、土壌に関する環境項目として監視が必要とされている。

表-4 下水汚泥焼却灰の重金属溶出量

項目	下水汚泥焼却灰					単位 mg/L
	焼却灰1	焼却灰2	焼却灰3	焼却灰4	焼却灰5	環境基準値
ヒ素	0.00137	0.16000	0.34000	0.08400	0.03300	0.01
セレン	0.01980	0.29000	0.03400	0.28000	<0.005	0.01
ほう素	1.10	0.92	1.40	0.89	2.20	1.0
六価クロム	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.01
全リン	0.030	(0.008)	6.400	(0.003)	2.550	—
pH	8.7	7.1	6.6	8.6	8.0	—

環境基準を超過

※<: 定量下限値未満

配合は、川砂を流動化処理土 1m³ 当り 430kg とし、固化材、焼却灰の配合比率を変化させ、全体比重が 1.5、フロー値 180~300mm、ブリーディング率 1(%) 以内となるよう調整泥水を加え、これらをハンドミキサーにより約 1 分程度練混ぜ、流動化処理土を作成した。

流動化処理土の重金属の溶出特性は、下記の配合について調査した。砒素とセレンの両方が大きい焼却灰 2 と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 3 との二つの焼却灰については、固化材 80kg、焼却灰 25、30、40kg の配合に対し材齢 7 日と材齢 28 日の供試体、焼却灰 5 については固化材 70kg で焼却灰量 30kg の配合に対し材齢 1 日と材齢 7 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、及び六価クロムは、すべての配合で土壌環境基準を満足する結果となった。

表-5 配合表

灰種	川砂 (kg)	発生土 (kg)	固化材 (kg)	焼却灰 (kg)	調整泥水 (kg)
焼却灰1 焼却灰2 焼却灰3 焼却灰4 焼却灰5	430		70	20	986
	430		70	30	981
	430		70	35	979
	430		80	25	980
	430		80	30	977
	430		80	40	973
	430		90	25	976
	430		90	35	971
	430		90	45	966
焼却灰1	215	215	80	25	980
	215	215	90	25	976
		430	80	25	980
		430	90	25	976
	430		70	10	991
	430		70	15	989
	430		80	20	983
	430		90	15	981
	430		90	30	974

4. 流動化処理土の強度特性

(1) 焼却灰量／固化材量比と 28 日強度の関係

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。ここでは、焼却灰 1 を用い、焼却灰量の変化による強度変化を調査した。図より、焼却灰量／固化材量比の値が増加すると、急激に強度が低下することがわかる。すなわち、固化材料が少ない場合や焼却灰量が多い場合には基準強度である 13N/cm² を下回るので注意が必要である。

(2) 細粒分含有率と管理強度との関係

新埋戻し材に添加する焼却灰の種類が異なるとその細粒分含有率が変化するので、同一の細粒分含有率 Fc 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-2 のようにまとめた。実用化を考

表-6 溶出試験結果

焼却灰量	試験項目	焼却灰2		焼却灰3		焼却灰5		単位 mg/L
		7日	28日	7日	28日	1日	7日	
25kg	ヒ素	N.D.	0.0003	N.D.	N.D.			
	セレン	0.006	N.D.	N.D.	N.D.			
	六価クロム	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.			
	pH	12.09	11.97	12.11	11.95			
30kg	ヒ素	N.D.	0.0003	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	セレン	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	六価クロム	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.02	N.D.	
	pH	12.11	11.95	12.11	11.98	—	—	
40kg	ヒ素	N.D.	0.0003	N.D.	N.D.			
	セレン	0.002	N.D.	N.D.	N.D.			
	六価クロム	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.			
	pH	12.05	11.94	12.09	11.94			
		環境基準値	定量限界値			※N.D.: 定量下限値未満		
	ヒ素	0.01	0.0003					
	セレン	0.01	0.002					
	六価クロム	0.05	0.015					

慮して、施工時のバラツキに係る安全率を見込んだ管理強度を 28 日強度で 25N/cm² とすると、実験個数は十分でないが Fc=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

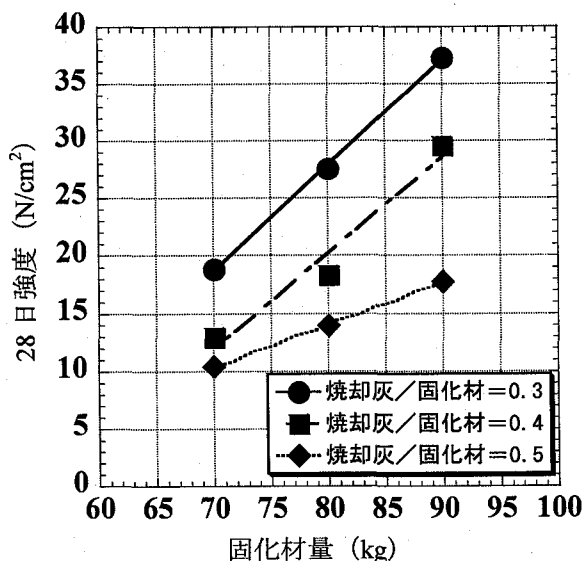


図-1 下水汚泥焼却灰量/固化材量の比と28日強度の関係

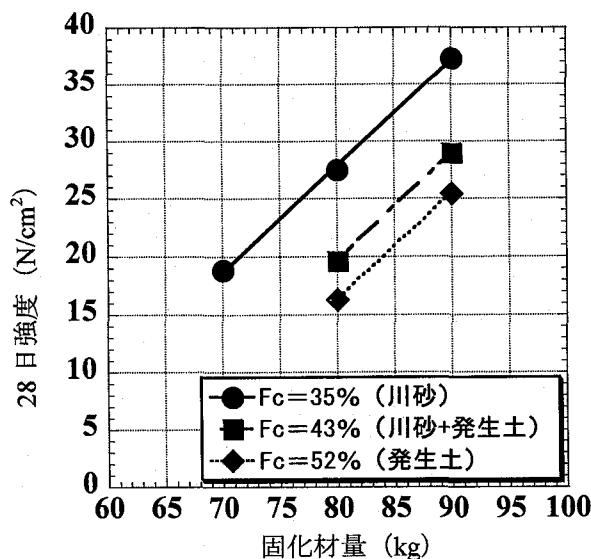


図-2 固化材添加量と28日強度の関係

化処理土 1m³あたり固化材量は77kg以上となる。

(3) 焼却灰の量および種類が強度特性に与える影響

それぞれの焼却灰を用い、焼却灰の添加量を変化させて流動化処理土を作成したときの一軸圧縮強度の変化を固化材量の違いに着目して整理した結果を、図-3および図-4、図-5に示す。図より焼却灰の種類によってばらつくが、焼却灰量が増加するにつれ、一軸圧縮強度が低下する傾向が見られた。

このことより、焼却灰は強度特性に影響を及ぼすため、流動化処理土に用いる際には添加量に注意しなければならないことがわかる。なお、強度低下の要因として焼却灰量の違いによる細粒分の影響も考えられるが、流動化処理土全体の細粒分含有率から見ると、焼

却灰量の違いによって細粒分含有率は数%しか変わらないため支配的でない。

(4) 焼却灰中のリンが強度特性に与える影響

(3)より、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示された。これらの要因として、焼却灰中に含まれるリン（以下、 P_2O_5 のことを指す）の含有量に着目し、一軸圧縮強度との関係を調べた。図-6に固化材量をパラメーターとしたときの固化材量に対するリン含有量の比と一軸圧縮強度の関係を示す。図より、固化材量に対するリンの含有量比が増加するに従い、一軸圧縮強度が減少する傾向が読み取れる。しかしながら、リン含有量を一定として固化材量が増加させたときのデータにばらつきがあり、強度との関係がわかりにくい。

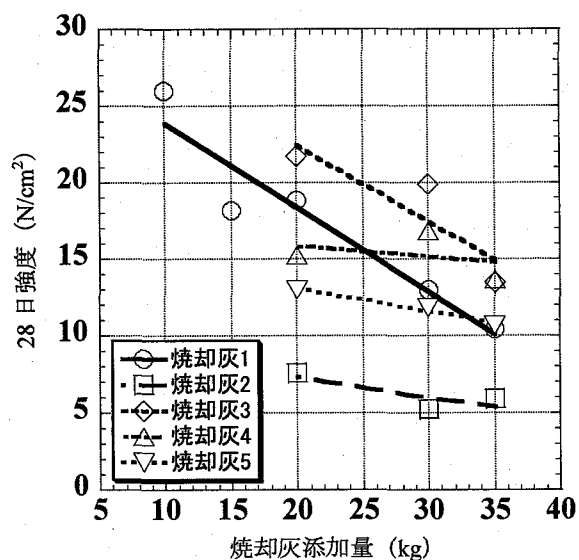


図-3 焼却灰量と28日強度の関係（固化材量70kg）

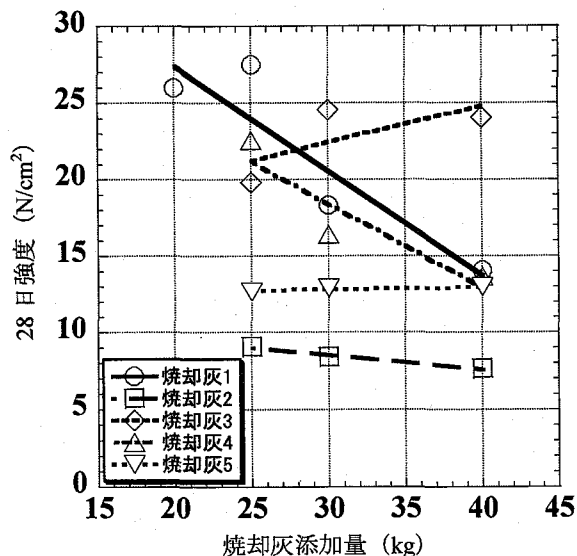


図-4 焼却灰量と28日強度の関係（固化材量80kg）

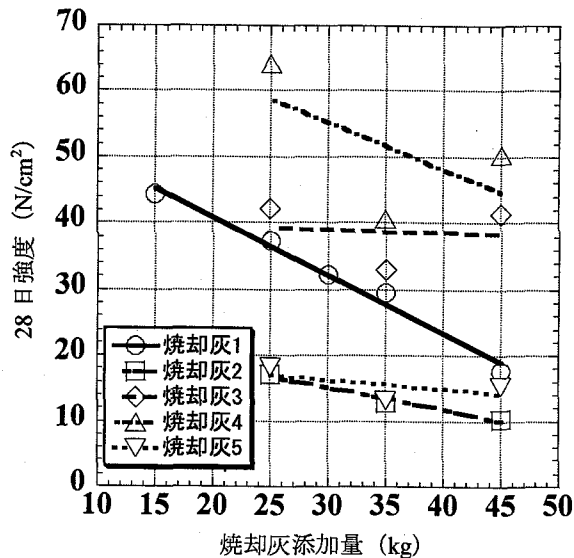


図-5 焼却灰量と28日強度の関係 (固化材量 90kg)

そこで、焼却灰中に含まれるリンの溶出量に着目し、一軸圧縮強度との関係を調べた。各焼却灰のリン溶出量と一軸圧縮強度の関係を図-7に示す。ここで、図-7に示した実験ケースは流動化処理土 1m³あたり固化材量が 80kg、焼却灰量/固化材量比が 0.3の配合を対象とした。図より、リンの溶出量が増加するに伴い、一軸圧縮強度が単調に低下しているのわかる。

リンは固化材のセメントクリンカー化合物に影響を及ぼすことが知られており、具体的には $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ の化学式からなり短期強度発現の要因となるエーライト相を減少させ、 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ の化学式からなり短期強度発現が小さいビーライト相を増加させる働きを有する⁸⁾。また、セメントは水和反応により固化するので、含有リンよりもむしろ溶出リンにより上記のセメント短期強度発現が阻害されるものと

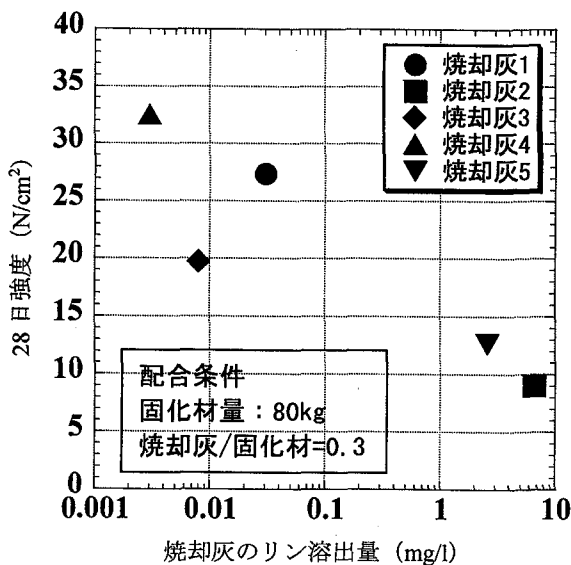


図-7 リン溶出量と28日強度の関係

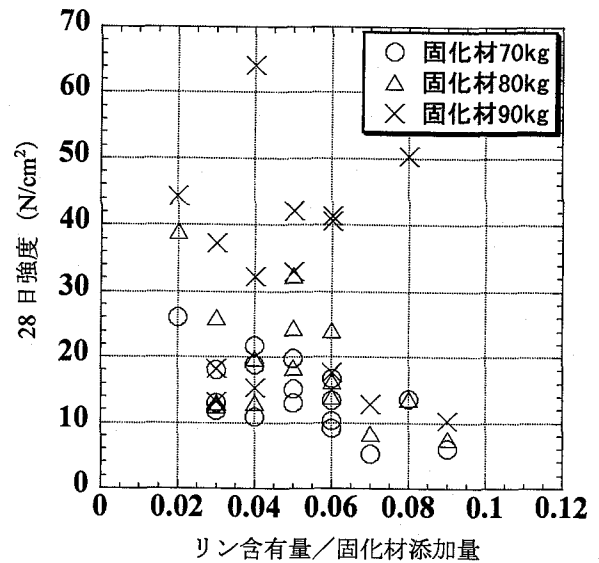


図-6 リン含有量/固化材量と28日強度の関係

推定される。

図-8に5種類の焼却灰を用いた場合の、固化材量をパラメーターとした固化材量に対するリン溶出量の比と一軸圧縮強度の関係を示し、あわせて強度の相関関係を表現する予測式を示した。図より、多少のばらつきがあるものの、リン溶出量/固化材量比の増加に伴い一軸圧縮強度は一義的に減少することがわかる。よって、流動化処理土に焼却灰を用いる場合は焼却灰のリンの溶出特性を調査することにより、強度の予測が可能である。すなわち、リン溶出量は下水汚泥焼却灰を用いた流動化処理土の配合設

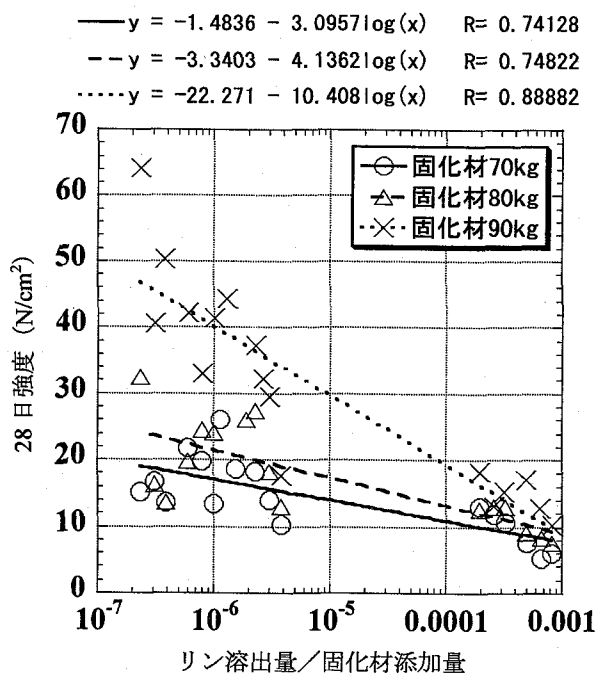


図-8 リン溶出量/固化材量と28日強度の関係

計上重要な要因になりうる事がわかる。

5.まとめ

下水汚泥焼却灰を流動化処理土に使用した新埋戻し材の強度発現特性と重金属の溶出状況、並びに配合設計の一例を示した。その結果は以下のように要約できる。

(1) 下水汚泥焼却灰を添加した流動化処理土において、下水汚泥焼却灰の種類および添加量により強度が変動する。

(2) 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。

(3) 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。

(4) 下水汚泥焼却灰中に含まれるリンの溶出の影響により、流動化処理土の強度低下を引き起こすことがわかった。

(5) 下水汚泥焼却灰のリン溶出量は、新埋戻し材の配合設計上重要な要因となりうる。

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し、長期的な溶出特性を把握するとともに、現場規模での試験施工により強度発現と溶出状況についても調査を行う予定である。

謝辞 本研究は、(社)トンネル技術協会「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する。

参考文献

- 1) 宇野洋志城，弘中義昭，高桑実，矢郷隆浩，小幡靖：下水汚泥焼却灰を用いたシールド工事用セグメントの研究開発，佐藤工業(株)技術研究年報，No.28，pp.1～6,2002.
- 2) 伊藤歩，北田久美子，山田浩司，相澤治郎，武田祐介，海田輝之：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, No.458，pp.166～180，2000.
- 3) 川嶋幸徳，森田弘昭，池田裕一：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) 宮島潔，鈴木清志：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) 寺田武生，富澤千里，米盛昭夫：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) 神谷雄三，山口洋志，辻雅行，赤木寛一：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) 神谷雄三，山口洋志，辻雅行，赤木寛一：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 回土木学会年次学術講演会，pp.747～748，2005 年 9 月
- 8) 金谷宗輝他：クリンカーの品質にリンが及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.53，pp.10-15，(1999)