

# 下水汚泥焼却灰を用いた土質改良材 の適応性の評価

伊藤孝優<sup>1</sup>・伊藤孝男<sup>2</sup>・平野久史<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 修士(工) 東北工業大学大学院 土木工学専攻 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35-1)  
<sup>2</sup>正会員 博士(工) 東北工業大学教授 工学部建設システム工学科 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35-1)  
<sup>3</sup>正会員 修士(工) パシフィックコンサルタンツ株式会社 東北本社 (〒984-0051 仙台市若林区新寺一丁目4-5)

下水処理場より発生する汚泥は、減量化のために高分子系凝集剤を添加脱水後、焼却され焼却灰の形で管理型処分場に埋立て処理されている。本研究は、この高分子系焼却灰(灰の組成ではCaOが10%未満含有)を建設発生土の改良を目的とした「土質改良材」への適応性について検討を行った。この焼却灰は自硬性に乏しいため、改良助剤として石灰を添加した粉体状土質改良材と石灰・セメントを添加し高加圧造粒した造粒型土質改良材を製造し、不良土とされる建設発生土(粘性土)を改良処理した際、埋戻し土としての強度基準および土壌環境基準を満足する土質改良材としての適応性について検討し、その可能性を確認した。

*Key Words: wastes, sewage sludge, soil stabilization, unconfined compression, california bearing ratio, cone index*

## 1. はじめに

下水道の普及に伴って汚泥の発生量も年々増加している。一方、下水汚泥を含めた廃棄物の最終処分場の確保は極めて困難な状況にあり、天然資源の採取に伴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、これらの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、熔融スラグ<sup>1)</sup>などがあるが、焼却灰は埋戻し処理地の確保等の問題が生じている。

本文は、その焼却灰の有効利用を目的として、①下水工事等により発生する建設発生土を、ストックヤードに搬入し焼却灰と石灰系の助剤を添加した粉体状土質改良材を混合処理後、1～4週後に埋戻し材として転用することを前提に実験検討を行うとともに、②汎用性、施工性および改良効果を高めるための改良材として、焼却灰、石灰、セメントからなる粉体材を高加圧造粒した造粒型土質改良材の性状、改良効果等について実験を行い、「リサイクル材としての利用基準」及び「土壌環境基準」を満足するかを検討し、下水汚泥焼却灰を土質改良材として活用できるか、その実用性を明らかにすることを目的とした。

## 2. 焼却灰, 改良対象土の物理・化学特性

### (1) 物理・力学的特性

使用した焼却灰は、S市の下水処理焼却施設(流動床

表-1 焼却灰および改良対象土の物理・力学特性

試験項目		単位	焼却灰	粘性土	
物理 試験	土粒子密度	g/cm <sup>3</sup>	2.511	2.441	
	自然含水比	%	36.48	46.86	
	粒度	礫分(2~75mm)	%	0.9	3.8
		砂分(75μm~2mm)	%	5.1	15.7
		シルト分(5~75μm)	%	87.2	30.2
		粘土分(5μm未満)	%	6.8	50.3
		均等係数 U <sub>c</sub>	—	2.3	—
	液性限界(LL)	%	—	66.4	
	塑性限界(PL)	%	—	40.3	
	塑性指数(PI)	—	NP	26.1	
日本統一土質分類	—	CH	MorC		
力学 試験	締め 固め	締固め方法	呼称	A-b	A-b
		最大乾燥密度(ρ <sub>d max</sub> )	g/cm <sup>3</sup>	0.944	1.495
		最適含水比(W <sub>opt</sub> )	%	56.5	27.0
	一軸圧縮試験(q <sub>u</sub> )	N/mm <sup>2</sup>	0.15	—	
	室内CBR試験	%	5.4	0.46	
	コーン貫入試験(q <sub>c</sub> )	N/mm <sup>2</sup>	2.36	0.02	

\*供試体の作製法:一軸(自然含水比, 静的締固め法), CBR(自然含水比, 67回/3層締固め法)

表-2 高分子系焼却灰の主要成分含有量試験結果

計量の対象		単位	平成12年6月	平成12年11月
成分分析試験	酸化カルシウム (CaO)	%	8.4	8.7
	二酸化ケイ素 (SiO <sub>2</sub> )	%	31.0	33.0
	酸化アルミニウム (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	15.0	16.0
	酸化マンガン (MnO)	%	0.10	0.09
	酸化ナトリウム (Na <sub>2</sub> O)	%	0.92	1.10
	酸化第二鉄 (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	4.7	5.5
水溶性成分試験	塩素イオン含有率	%	0.006	0.005
	硫酸イオン含有率	%	0.94	0.69

表-3 焼却灰および改良対象土の化学特性

計量の対象		単位	焼却灰	粘性土
成分分析試験	酸化カルシウム (CaO)	%	8.7	1.1
	二酸化ケイ素 (SiO <sub>2</sub> )	%	33.0	6.7
	酸化アルミニウム (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	16.0	3.9
	酸化第二鉄 (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	5.5	2.0
	酸化マンガン (MnO)	%	0.09	0.02
	酸化ナトリウム (Na <sub>2</sub> O)	%	1.10	0.60
水溶性成分試験	塩素イオン含有率	%	0.005	0.032
	硫酸イオン含有率	%	0.69	4.00

式)から排出され冷却のため加水され湿潤状態にある。この灰の物理・力学的特性は表-1に示した。シルト分が全体のほぼ80%を占めており、アッターベルク限界を考慮した日本統一分類によると粘性土「CH」に分類される。また、年間を通じて焼却灰の物理・力学的な性状に大きな違いはないと予想される(表-2)。

さらに、改良対象土としては、当市の下水本管理設工事で発生するであろう土質区分を地域ごとに調査した結果、土質区分上、発生土にシルト分が多く含まれ不良土とされる「粘性土」を対象土に選定した。なお、改良対象土(粘性土)の物理・力学試験結果を表-1に併記した。

(2) 化学的特性

高分子系焼却灰の主要成分は発生汚泥の凝集剤として高分子系凝集剤の使用により、酸化カルシウムの含有量が数%と微量であり、改良材としての強度基準を満足させるためには、新たにカルシウム系の助剤を添加する必要があると推測される。また、改良対象土(粘性土)の化学特性としての主要成分含有量を焼却灰とともに表-3に示した。

3. 焼却灰を用いた粉体状土質改良材<sup>2)</sup>

(1) 粉体状土質改良材の構成

改良対象土である粘性土の状態を、最適含水比の湿潤

表-4 改良対象土、焼却灰、改良助剤添加率配合表

改良対象土 凝結灰 (%)	粘性土：焼却灰 (比率)	改良助剤 (%)
90:10 W<60	消石灰	0, 3, 5, 10
90:10 60<W<80	生石灰	0, 3, 5, 10

側と乾燥側を想定し、高含水比、低含水比の2タイプに含水比を調整し、焼却灰からの有害物質溶出を極力避けるために、焼却灰の混合率を10%、20%とし処理後、高含水比試料には「生石灰」を、低含水比試料には「消石灰」を改良助剤として3%、5%、10%添加し、密封容器にて7日、28日養生後(発生土をヤードで改良7日、28日後に埋め戻し材として利用することを想定。)に、各種実験用の供試体を作製した。なお、配合表は表-4に示すとおりである。

(2) 供試体作製および実験項目

改良助剤を添加後、密封容器にて7日、28日養生後の改良土を用いて、地盤工学会基準「安定処理土の静的締固めによる供試体作製方法(JGS 0812)」に準拠して直径5cm、高さ10cmの供試体を作製し、ポリエチレンフィルムで密封後20±1℃、95%RHの恒温湿潤槽にて7日養生し、一軸圧縮試験(JGS 0511)に供した。また、同様の改良土に対しCBR試験(JGS 0721)〈設計CBR:67回/3層縮め〉を実施し、CBR試験後の供試体を用いてポータブルコーン貫入試験機により、コーン指数試験(JGS 0716)〈コーン沈下:30°〉を行った。さらに、焼却灰、改良助剤を添加することによる物理性状の変化を見るために、含水比(JGS 0111)、土粒子密度(JGS 0131)、液性・塑性限界(JGS 0141)、および、化学性状として土壤汚染に係る環境基準<sup>3)</sup>の溶出試験を実施した。

表-5 処理土および改良土の物理性状(改良土は7日後の試料)

調整 含水比 (%)	焼却灰：発生土 (比率)	灰混合直後 含水比 Wn (%)	改良助剤 消石灰/生石灰 (%)	土粒子の密度			コンシステンシー			粒度特性		
				ρs (g/cm <sup>3</sup> )	WL	PL	PI	—	砂 (%)	シルト (%)	粘土 (%)	
W <60	100	55.5	-	2.44	65.739	825.919	729.950	4				
	90:90	54.3	-	2.44	63.142	320.816	239.844	0				
	10:90	54.3	5	2.49	54.735	119.627	732.140	2				
	20:80	52.5	-	2.45	69.739	730.011	935.853	3				
	20:80	52.5	5	2.50	75.135	920.224	737.437	9				
60< W <80	100	76.5	-	2.44	65.739	825.919	729.950	4				
	90:90	74.3	-	2.46	58.436	322.110	326.937	8				
	10:90	74.3	5	2.50	54.833	621.229	123.847	1				
	20:80	73.5	-	2.46	56.432	523.916	827.156	1				
	20:80	73.5	5	2.50	53.130	822.317	736.246	1				

焼却灰：粘性土 (比率)	含水比 (%)	改良 助剤	養生 日数	
			7日	28日
10 : 90	60%未満	消石灰	—□—	---□---
20 : 80	60%未満	消石灰	—■—	---■---
10 : 90	60~80	生石灰	—◇—	---◇---
20 : 80	60~80	生石灰	—◆—	---◆---

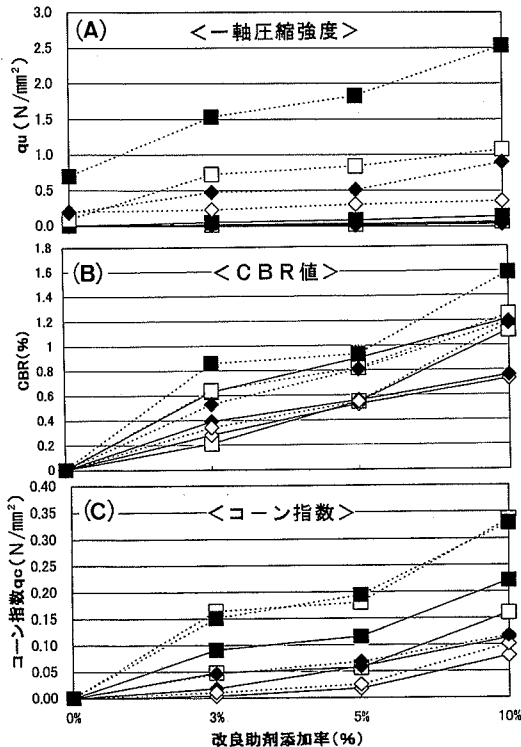


図-1 一軸圧縮強度, CBR値, コーン指数

表-6 改良土からの溶出量分析結果

計量の対象	土壤環境基準*	単位	焼却灰	溶 出 試 験 値				
				粘性土	改良土(W<60%)		改良土(60%<W<80%)	
					灰:土(10:90)	灰:土(20:80)	灰:土(10:90)	灰:土(20:80)
					改良助剤(消石灰5%)		改良助剤(生石灰5%)	
pH	—	—	8.5	5.9	8.0	7.6	9.0	8.3
含水比	—	%	32.00	46.86	36.00	35.00	35.00	33.00
アルキル水銀	不検出(検出限界以下)	mg/l	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
総水銀	0.0005以下	mg/l	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
カドミウム	0.01以下	mg/l	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
鉛	0.01以下	mg/l	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
六価クロム	0.05以下	mg/l	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
砒素	0.01以下	mg/l	0.023	0.011	0.010	0.011	0.009	0.010
シアソ	不検出(検出限界以下)	mg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
PCB	不検出(検出限界以下)	mg/l	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005

\* 土壤環境基準は廃棄物処分場等人の行為による汚染値に対しては適用されない。(参考値として示す)

(3) 実験結果および考察

a) 物理性状

改良対象土(粘性土)に焼却灰を10, 20%混合しても粘性土の土粒子密度はほとんど変化はなかった。粒度分布を見てもシルト, 粘土分の砂質化が生じてないが, 改良助剤を添加すると土粒子密度は増加し, 微粒子が団粒化する傾向が認められ, コンシステンシー限界も低下する傾向が示されている(表-5)。

b) 力学性状

低含水比(60%精)処理土に消石灰を添加した28日養生後の改良土において比較的強い一軸圧縮強度(図-1(A))を示している。しかし, 改良助剤(消石灰, 生石灰)を10%添加混合した改良土のCBR値(図-1(B)), コーン指数(図-1(C))は全て低い値に留まっており, リサイクル材の利用基準(4項の(5))を満足するには, さらに助剤の添加量を増す必要がある。

c) 化学性状

粘性土に焼却灰を10, 20%混合後, さらに改良効果を高めるために助剤として消石灰, 生石灰を3, 5, 10%添加混合した改良土からの有害物質の溶出試験を行った。

その結果, 助剤3, 5%添加改良土から土壤環境基準を上回る砒素の溶出が認められ, 助剤10%添加改良土からは砒素の溶出が抑制され基準値を下回っている。

表-6に助剤5%添加, 養生28日後の改良土の溶出試験結果を示した。

d) 走査型電子顕微鏡写真とX線回折<sup>4)</sup>

焼却灰(20):粘性土(80)の比率で含水比が60%未満の土に助剤として消石灰を10%添加した改良200日後の試料の改良過程における構成元素を, 走査電子顕微鏡写真とエネルギー分散形X線分析(電子線を試料上の一点に固定して定性分析, 定量分析をする方法)で確認した。

(写真-1は粘性土の顕微鏡写真とX線分析を示す。)

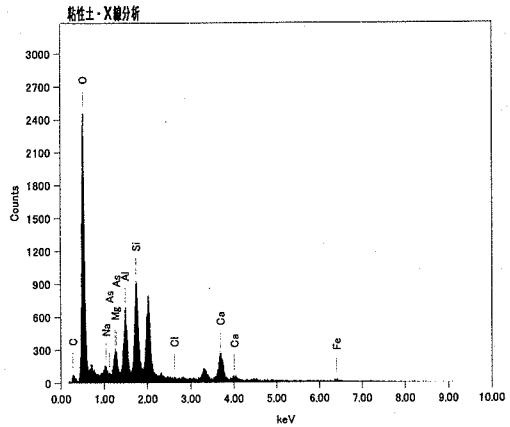
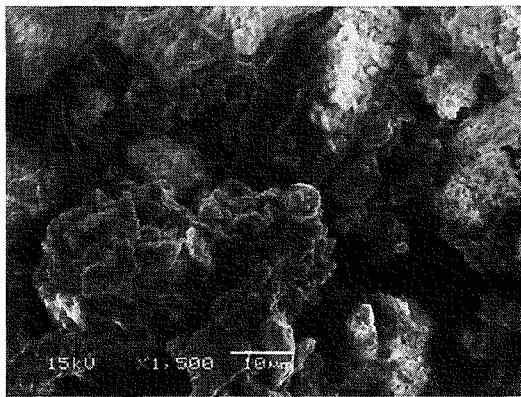


写真-1 粘性土の電子顕微鏡写真とX線分析

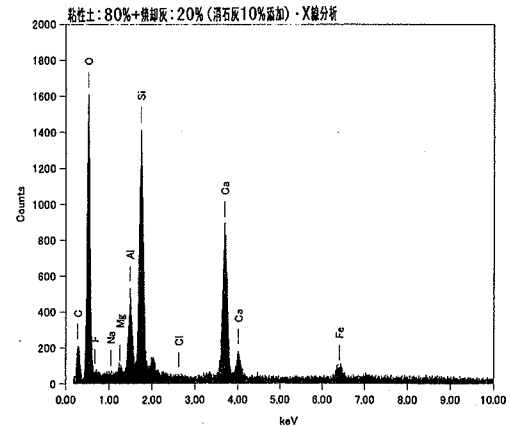
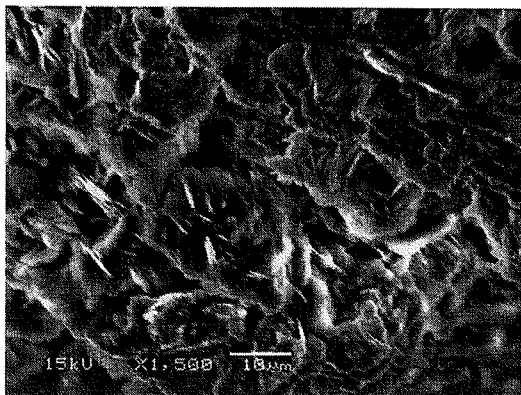


写真-2 粘性土(80%)：焼却灰(20%)に消石灰(10%)添加改良の電子顕微鏡写真とX線分析(養生200日後)

長期養生後に粒子表面のほとんどを反応生成物で覆われ改良が進んでいる(写真-2)。X線分析よりSiが最も多くの比率を占め、改良助剤(消石灰)を添加しない場合に比べAl, Si, Ca, Feの比率が増加し、Ca系塩基性の水和反応で多くの水和化合物が生成されたと推察される。さらに、X線分析からCa塩基が関与した珪酸石灰水和物(CaO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O系化合物)、アルミ酸石灰水和物(CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O系化合物)、酸化鉄石灰水和物(CaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O系化合物)などの安定したポゾラン反応による水和生成物質と考えられる。

これら長期にわたる硬化反応は、改良助剤として消石灰、生石灰を添加することによるCaOの増加、および、焼却灰中(表-3)に多く含まれる二酸化ケイ素(SiO<sub>2</sub>)、酸化アルミニウム(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)、酸化第二鉄(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)が長期にわたる水和物生成に寄与していることが推察され、下水汚泥焼却灰が単に改良対象土の含水比の低下効果をもたらすだけでなく、改良土の長期にわたる強度持続効果をもたらすものと推察される。

以上のように、ストックヤードにおいて建設発生土に焼却灰、改良助剤(消石灰、生石灰)を添加し事前改良する粉体状土質改良材として十分利用可能と考えられる。

#### 4. 焼却灰を用いた造粒型土質改良材<sup>5)</sup>

##### (1) 造粒型土質改良材(固粒体と称す)

下水工事等により発生する建設発生土を、ストックヤードに搬入し焼却灰と石灰系の助剤を添加混合処理後、1~4週後に埋戻し材として転用することを前提に実験検討を行った結果、改良材としての効果が示された。

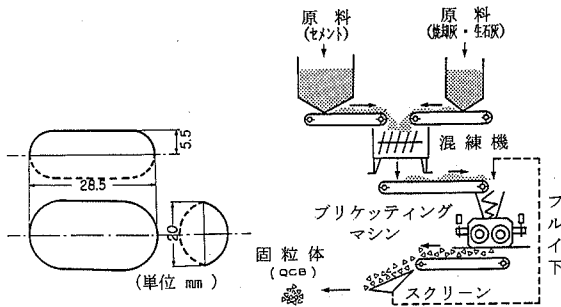
しかし、含水比の高い発生土に対しては粉体状の改良材を攪拌混合する際、均一な混合が困難である。この対処法として粉体改良材を造粒加工することにより、少ない繰返し混合攪拌で改良対象土の物性値を悪化させないことが期待できる。また、粒度が均一で取扱いの困難な高分子系焼却灰に有効な方法であると判断し、固粒体として焼却灰の有効利用法について検討を行ったものである。焼却灰を固粒体として使用することのメリットとして次に挙げるものが考えられる。

- ・密度を高め減容することで、貯蔵や運送を容易にする。
- ・飛散、粉塵発生の防止となり、作業環境を改善できる。
- ・複数成分の粉体の偏在を防ぎ、品質の均一化を図ることが出来る。

表一七 造粒型土質改良材の材料構成

	焼却灰	生石灰	高炉セメント
No. 1	80	20	—
No. 2	30	20	50

\* セメント：高炉セメントB種（太平洋セメント株式会社）  
 \* 生石灰：0～3.0mm（鉄研工業株式会社）  
 \* 下水汚泥焼却灰：表一参照  
 \* 配合比：乾燥重量比（%）  
 \* 造粒時加圧力：2t（16.0 N/mm<sup>2</sup>）



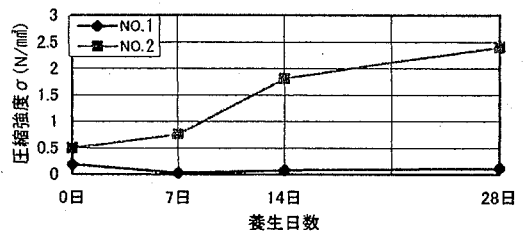
【造粒形状】 【造粒機構】

図一 造粒機構及び造粒形状<sup>1)</sup>

表一八 造粒型固粒体の性状一覧

養生	固粒体	No. 1	No. 2
0	直径 φ (cm)	4.0	4.0
	高さ H (cm)	2.8	2.5
	重量 W (g)	50.0	50.0
	単位体積重量 ρ <sub>t</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	1.422	1.592
	圧縮強度 σ (N/mm <sup>2</sup> )	0.19	0.50
7	直径 φ (cm)	4.5	4.6
	高さ H (cm)	3.6	2.9
	重量 W (g)	82.7	76.4
	単位体積重量 ρ <sub>t</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	1.445	1.586
	圧縮強度 σ (N/mm <sup>2</sup> )	0.03	0.76
14	直径 φ (cm)	4.5	4.5
	高さ H (cm)	3.6	2.9
	重量 W (g)	83.1	73.7
	単位体積重量 ρ <sub>t</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	1.452	1.599
	圧縮強度 σ (N/mm <sup>2</sup> )	0.08	1.81
28	直径 φ (cm)	4.6	4.5
	高さ H (cm)	3.7	2.9
	重量 W (g)	81.4	73.1
	単位体積重量 ρ <sub>t</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	1.324	1.586
	圧縮強度 σ (N/mm <sup>2</sup> )	0.12	2.45

- ・粉体の付着，固結が防止できる。
- ・利用困難な微粉の再利用が可能となる。
- ・粉体の溶解が均一化し，制御可能となる。 等



図一三 固粒体（土中養生後）の圧縮強度

(2) 固粒体の材料構成および作製

焼却灰のみでは改良効果が期待できないことから，助剤として「生石灰」の使用と，焼却灰からの有害物質の溶出を抑制することと，改良効果を高めるために「高炉セメント（B種）」を用いた。なお，造粒型土質改良材の材料構成は表一六に示す2タイプとした。さらに，造粒プラントの機構と造粒形状を図一に示した。

(3) 固粒体の材料特性（試験体：直径4cm，高さ2.5cm，重量50g）

高加圧造粒された各焼却灰固粒体の造粒時および土中養生後の湿潤密度，強度について実験（CBRモールドに粘性土を締固め，各固粒体を5個挿入し養生）を行った。

その結果を表一八に示した。表より配合の異なった焼却灰の多い固粒体（No. 1）の単位体積重量（ρ<sub>t</sub>）は，造粒時，土中養生後とも1.42g/cm<sup>3</sup>程度と変化がない。これは焼却灰が軽量によるものである。また，セメントを配合した固粒体（No. 2）は，反応前・後とも1.59g/cm<sup>3</sup>程度と変化はないがセメントの影響によりやや高めである。さらに，図一三より圧縮強度（σ）は，固粒体（No. 1）が造粒時約0.2N/mm<sup>2</sup>のものが4週土中養生後 0.12N/mm<sup>2</sup>と強度増加は示されないが，固粒体（No. 2）では，造粒時約0.5N/mm<sup>2</sup>であったものが，約5倍の2.45N/mm<sup>2</sup>の硬化強度を示している。このことは，焼却灰だけでは改良材としての強度増加が期待できないことを示している。

写真一三は，高加圧造粒した固粒体の初期状態と埋戻し土等に混合転圧後，土中で吸水膨張・硬化後の固粒体を示す。また，写真一四は，固粒体を空气中に放置または水分を加えることにより固粒体中の生石灰が吸水膨張し崩壊する過程を示す。これらの特性を生かし後述するそれぞれの工法で固粒体の改良効果を発揮する。

(4) 供試体作製および実験項目

粘性土に各固粒体を所定量添加した改良土（一次混合後，約1時間後に二次混合処理：ミキシング効果が高めるため）を，地盤工学会基準「安定処理土の静的締固めによる供試体作製方法（JGS-0812）」に準拠し，直径5cm，高さ10cmの供試体を必要本数作製し，ポリエチレンフィルムで密封後20±1℃，95%RHの恒温湿潤箱にて所定日数の養生を行った。なお，物理試験，力学試験は3.(2)項と同様の実験を実施した。

(5) 実験結果および考察

2タイプの固粒体を添加した改良土の物理・力学試験の結果(1週養生, 軸圧縮強度については2, 4週を併記)を表-9に示した。以下に, それぞれの試験結果について考察する。

a) 物理性状

両固粒体を添加した改良土の含水比は, 同様の低下傾向を示し, 土粒子の密度はセメントを配合したNo. 2の改良土が高く, 粒度分布はシルト分, 粘土分の砂質化が顕著に示され, それに伴い塑性指数の改善が示されている。

b) 力学性状

初期状態では, 自立できず測定不可であった粘性土が,

両固粒体を5, 10, 15%添加した改良土の一軸圧縮強度(図-4(A))は, 増加する傾向を示し, 15%添加4週後の強度で比較すると固粒体(No. 1)で0.32 N/mm<sup>2</sup>, 固粒体(No. 2)で0.57 N/mm<sup>2</sup>を示し, 固粒体(No. 2)改良土が約2倍の強度を発揮している。また, CBR値(図-4(B))は, 初期状態のCBR=0.5%と極端に低い粘性土であるが, 両固粒体を5, 10, 15%添加した改良土においては, 添加率を増すごとにCBRも増加する傾向を示し, 15%添加1週後のCBRで比較すると固粒体(No. 1)で6.3%, 固粒体(No. 2)で16.8%を示し, 一軸圧縮強度と同様に固粒体(No. 2)による改良土が約2倍強の支持力比が得られている。さらに, コーン指数(図-



写真-3 造粒プラントによる固粒体(反応前および土中一次混合養生反応後)

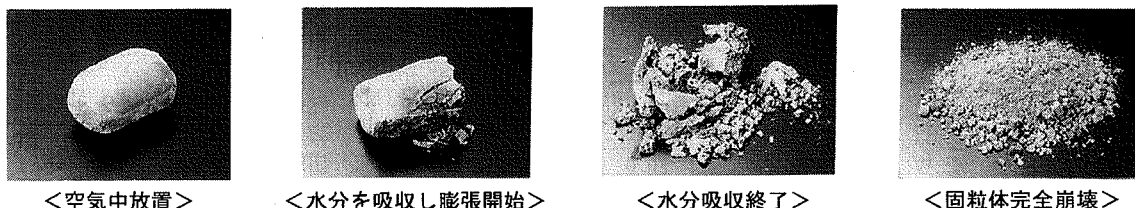


写真-4 固粒体の吸水反応崩壊過程

表-9 造粒型土質改良材・添加改良土の試験結果一覧

試験項目	単位	粘性土	固粒体「No. 1」混合土(1週養生)			固粒体「No. 2」混合土(1週養生)				
		初期状態	5%添加	10%添加	15%添加	5%添加	10%添加	15%添加		
物理試験	土粒子密度	g/cm <sup>3</sup>	2.441	2.531	2.540	2.546	2.545	2.560	2.583	
	自然含水比	%	46.86	43.56	40.15	37.84	42.17	39.96	36.36	
	粒度	砂分	%	20.4	43.9	48.2	51.9	48.3	53.3	54.8
		シルト分	%	29.5	48.1	40.7	35.7	43.9	37.1	34.8
		粘土分	%	50.1	8.0	11.1	12.4	7.8	9.6	10.4
		均等係数	—	—	9.4	20.0	22.5	16.9	17.0	32.0
力学試験	液性限界 LL	%	66.4	56.70	50.90	50.80	49.73	50.86	50.53	
	塑性限界 PL	%	40.3	34.46	35.20	37.74	35.64	40.52	40.75	
	塑性指数 PI	—	26.1	22.64	15.70	13.06	14.09	10.34	9.78	
力学試験	一軸圧縮強度	N/mm <sup>2</sup>	—	0.08	0.14	0.25	0.15	0.31	0.38	
	一軸圧縮強度(2週/4週)	N/mm <sup>2</sup>	—	0.09/0.10	0.17/0.30	0.29/0.32	0.18/0.22	0.33/0.41	0.45/0.57	
	室内CBR	%	0.46	2.00	4.90	6.30	4.30	11.80	16.80	
	コーン指数	N/mm <sup>2</sup>	0.02	0.42	0.96	1.59	0.91	2.70	3.54	

(注) 固粒体「No. 1」(焼灰:生石灰=80:20), 固粒体「No. 2」(焼灰:生石灰:高炉セメント=30:20:50)

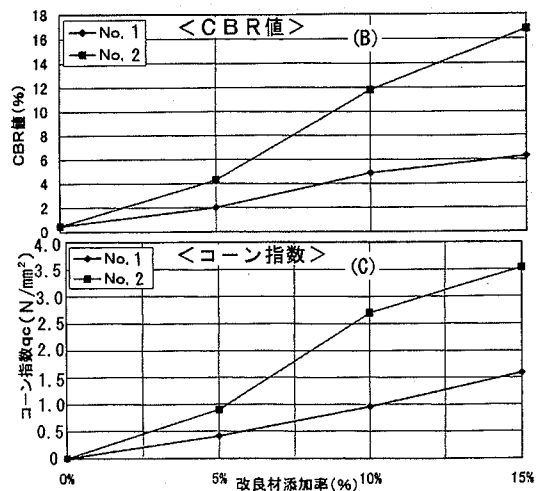
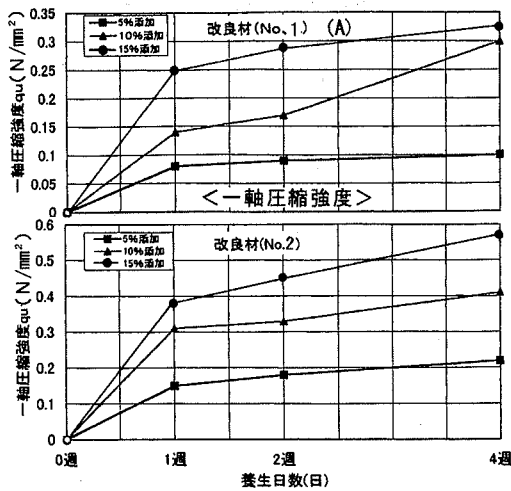


図-4 一軸圧縮強度, CBR値, コーン指数

表-10 改良土の溶出量分析試験結果一覧

計量の対象	単位	土壌環境基準	焼却灰	粘性土	改良土					
					固粒体(No. 1)			固粒体(No. 2)		
					5%	10%	15%	5%	10%	15%
pH	—	—	8.5	5.9	7.6	8.3	8.6	11.0	11.4	11.6
含水比	%	—	36.48	46.86	43.56	40.15	37.84	42.17	39.96	36.36
アルキル水銀	mg/l	検出限界以下	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
総水銀	mg/l	0.0005 以下	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
カドミニウム	mg/l	0.01 以下	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
鉛	mg/l	0.01 以下	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
六価クロム	mg/l	0.05 以下	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
砒素	mg/l	0.01 以下	0.023	0.011	0.015	0.015	0.007	<0.005	<0.005	<0.005
シアン	mg/l	検出限界以下	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
P C B	mg/l	検出限界以下	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005

(註) 〔 〕部は、土壌環境基準値を超過している。

4 (C) については、初期状態のコーン指数が0.02N/mm<sup>2</sup>と極端に低い粘性土が、両固粒体を5, 10, 15%添加した改良土において添加率を増すごとにコーン指数も増加する傾向を示し、15%添加1週後のコーン指数で比較すると固粒体(No. 1)で1.59N/mm<sup>2</sup>、固粒体(No. 2)で3.54N/mm<sup>2</sup>を示し、CBRと同様に固粒体(No. 2)による改良土が約2倍強のコーン指数が得られている。

以上のことより、改良土の物理性状・力学性状の改善は、焼却灰と生石灰よりなる固粒体(No. 1)よりも、さらにセメントを配合した固粒体(No. 2)が改良効果の面で優れている。

#### c) 化学性状

固粒体を添加した改良土の有害物質の溶出試験結果を表-10に示した。

固粒体(No. 1)を5, 10%添加した改良土では、砒素の溶出が土壌環境基準値を超過するが、15%添加改良土

でどうにか基準値を満足する結果が得られている。また、改良土自体のpHは、7.6~8.6と弱酸性から弱アルカリ性を示している。さらに、固粒体(No. 2)を添加した改良土は、全て検出限界以下となり砒素の溶出抑制効果が示されている。

下水汚泥焼却灰および改良対象土である粘性土の溶出試験において、双方とも砒素が土壌環境基準値を超過していたが、固粒体(No. 2)を添加した改良土では、砒素を確実に封じ込める効果が示されたが、セメントの影響によりpHが若干高めになる傾向がある。

これらの結果をもとに、国内におけるリサイクル材の利用のための各分野における基準値および判定等<sup>7) 8) 9)</sup>について取りまとめた表-11より、固粒体(No. 1)では添加率15%以上でそれぞれの基準を満足するのに対し、固粒体(No. 2)では添加率5%以上で、これらの基準値を十分満足する結果が示された。

表-11 リサイクル材としての利用基準一覧表

利用目的 および判定	目標基準値 および判定評価	備 考
埋戻し材 としての利用	室内CBR>10%	67回/3層 締 固 め
盛土材 としての利用	室内CBR>5%	67回/3層 締 固 め
盛土材 としての利用	$q_u > 0.10N/mm^2$	養生7日 強 度
安定処理汚泥 の転圧特性	$q_c > 0.5N/mm^2$ (普通土と同程度)	タイヤローラ 締固め可能
※ $q_u$ : 一軸圧縮強度, $q_c$ : コーン指数		

## 5. まとめ

高分子系下水汚泥焼却灰を土木材料として有効利用することを目的に、建設発生土等を改良するための改良材への適応性について実験検討を行った。まず粉体状の焼却灰を用いた粉状体土質改良材においては、改良助剤の添加量を増すことにより、強度基準、土壌環境基準を満足することが可能となり、その適応性について確認することができた。

また、施工性、改良効果等を考慮した造粒型土質改良材は、下記に示すような利点があげられる。

- ・大型改良機械と広大なストックヤードを必要としない。
- ・飛散、粉塵発生防止ができ、作業環境が改善される。
- ・粉体の偏在を防ぎ、品質を均一化できる。
- ・粉体の付着、固結を防止できる。

さらに、従来の土質改良プラントを設置するより、造粒型土質改良材作製プラントを現状の焼却施設に小規模な造粒プラントを設置する程度の設備投資となり、多大な建設、維持管理費を必要としない。

施工現場での作業は、所定量の固粒体を混合攪拌、埋戻し作業となり、通常の土質改良に比べ工事費を抑えることが可能となる。

なお、下水汚泥は流入する下水の水質や処理方式、凝集剤の種類等によってその特性は様々である。下水汚泥の有効利用は、成分を含めた汚泥の特性と有効利用を行う方法の地域の市場性を踏まえた上で、その事業を進める必要がある。その一助として、造粒型土質改良材への適用は、下水汚泥の有効利用という側面だけでなく、建設発生土の再利用、施工現場における施工性、作業性の向上につながることを期待される。

## 参考文献

- 1) 福島浩一, 長坂勇二, 中野安浩, 笠井淳史; 発生土および産業廃棄物の地盤工学的処理と有効利用, 6. 産業廃棄物の地盤工学的有効利用 (その3), 土と基礎, Vol. 45, No. 5, pp. 55-60, 1997.
- 2) 伊藤孝優, 伊藤孝男, 浅田秋江; 下水汚泥焼却灰の土質改良材への適応性に関する研究, 第47回地盤工学シンポジウム, pp. 365-372, 2002.
- 3) 環境庁告示 第46号; 土壌の汚染に係る環境基準, 1991, 3.
- 4) 松尾 稔, 木村 稔, 近藤寛通, 堤 博恭; 石炭灰の土質改良材への適用に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 603/III-44, pp. 77-88, 1998, 9.
- 5) 伊藤孝優, 伊藤孝男, 浅田秋江; 下水汚泥焼却灰を用いた造粒型複合系土質改良材の改良効果について, 第48回地盤工学シンポジウム, pp. 403-408, 2003.
- 6) Ito, T., Asada, A. and Konno, T; The characteristics of Quick Lime Consolidated Briquette as Soil stabilizer, Soils and Foundations, Vol. 3, No. 3, pp. 85-85, 1990.
- 7) 河村和典; 基礎掘削泥土の再利用(リサイクル工事), 第21回日本道路会議論文集, pp. 58-59, 1995.
- 8) (財) 土木研究センター; 建設発生土利用技術マニュアル, 1997.
- 9) (社) 日本下水道協会; 下水汚泥の建設資材利用マニュアル(案), 1990.

(2003. 10. 28 受付)

## APPLICABILITY OF SEWAGE SLUDGE ASH AS SOIL-STABILIZER COMPONENT

Takahiro ITO, Takao ITO and Hisashi HIRANO

The sludge discharged from sewage treatment plants is disposed of as follows: polymer flocculant is added to the sludge, which is then dehydrated to reduce volume, and then incinerated and buried in controlled landfill sites in the form of incineration ash.

This study examined whether the sewage sludge ash could be used as a soil-stabilizer component, that is, whether the backfill soil obtained as mentioned above meets the applicable strength and environmental quality standards for soil. As a result, the potential of the sewage sludge ash was confirmed.