

(13) 下水汚泥焼却灰の土質改良効果に関する研究

STUDY ON SOIL CONDITIONING EFFECT OF
INCINERATED ASH OF SEWAGE SLUDGE

増田 隆司*・白石 隆*・三木 博史*・林 義之*・大嶋 吉雄**

Takashi MASUTA*, Takashi SHIRAIISHI*, Hiroshi MIKI*, Yoshiyuki HAYASHI*, Yoshio OHSHIMA**

ABSTRACT; Sewage sludge generated in Japan amounted to approximately 1.3 million tons per year as solids in 1986, and some 60% of the total amount was incinerated. Currently, most incinerated ash has been disposed by landfill and coastal reclamation, but effective utilization of incinerated ash is urgently required due to a reduction in disposal sites and for reuse of resources. This investigation intended to establish techniques to judge the soil conditioning effect of incinerated ash of sewage sludge when used as a soil conditioning additive for excavated soil and others. It also studied the hydration characteristic of incinerated ash and the strength of the conditioned soil. The results show that the soil conditioning effect of incinerated ash of sewage sludge depends on the degree of the hydration reactivity. In addition, a hydration rate test is proposed as a simple method to judge the soil conditioning effect.

KEYWORDS; Sludge, Incinerated ash, Utilization, Construction material, Soil conditioning additive

1. はじめに

日本における下水汚泥の発生量は、1986年現在、固形物で約130万t/年であり、下水道の普及拡大にともない、発生量は年々増加している。下水汚泥の大部分は現在、陸上及び海面埋立処分されているが、大都市を中心に最終処分場の確保は年々困難になってきている。このため、下水汚泥の減容化・有効利用の必要性が高まっている。減容化については、現在既に約60%の汚泥が焼却処理されている。また、最近ではより一層の減容化・安定化を目的として熔融プロセスを導入する処理場もある。

また、有効利用については、現在のところ、コンポスト汚泥等の緑農地利用が中心であるが焼却灰及び熔融スラグの建設資材等への利用についても、今後積極的に推進すべき方策として各地で試験が行われている。

このうち、塩化第二鉄、消石灰等を添加して脱水を行う真空脱水機及び加圧脱水機から発生する石灰添加汚泥を焼却して得られる焼却灰（以下、石灰系焼却灰とする。）は、脱水時に添加した消石灰のためにカルシウム含有率が高く固結効果がある。この固結効果を利用して、石灰系焼却灰は従来から土質改良材、路盤材等への利用が進められている。しかしながら、焼却灰の性状と土質改良効果の関係については未だ解明されていない点が多い。

そこで、本調査は、石灰系焼却灰を掘削残土等の土質改良材として利用する場合の、焼却灰の水和特性と土質改良効果の関係を把握し、土質改良効果を簡易に判定する指標を確立することを目的として実施した。

*建設省土木研究所 Public Works Research Institute, Ministry of Construction

**日本下水道事業団 Japan Sewage Works Agency

2. 試料及び試験方法

2.1 調査に用いた焼却灰

調査は全国11ヶ所の処理場から発生する石灰系焼却灰を用いて行った。なお、比較のために高分子系焼却灰（1ヶ所；図-1中のL灰）についても同様の調査を行った。図-1には焼却灰の組成を示す。なお、組成分析は、JIS R 52 02（ポルトランドセメントの化学分析法）及びJIS K 0102により行った。ただし、 P_2O_5 については、土壌養分分析法12.2により行った。

2.2 試験方法

12種類の焼却灰について、吸湿による性状の変化をみるために、室温30℃、湿度95%の状態、試料保管箱中に試料を薄く広げて保管した。保管日数は、0, 14, 28, 60日とした。各保管期間における焼却灰を試料として以下の試験を行った。

(1) 含水比、強熱減量試験

測定方法は下水試験方法及び土質試験法に準じて行った。なお、強熱減量は 600℃、1時間によるものである。

(2) 水和速度試験

焼却灰の水和反応性を調査するために、水和速度試験を行った。試験方法は次のとおりである。

試料（焼却灰）300gと蒸留水（25℃）400cc を市販の魔法瓶に入れ、ガラス棒でよく攪拌し、一定時間経過後温度上昇を測定する。測定時間は0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30分とした。なお、試料として焼却灰に消石灰（ $Ca(OH)_2$ ）を10%添加したものについても同様の試験を行った。

(3) 改良土の土質試験

改良対象土は、下水道工事から発生した粘性土及び砂質土を用いた。対象土の物性は表-1に示すとおりである。物性値の測定は土質試験法に準じて行った。なお、粘性土、砂質土の液性限界、塑性限界にあまり差がみられなかったのは、両土ともシルト分を多く含んでおり、コンシステンシーに関する性状が近かったものと考えられる。改良土の作製は、自然含水比状態の土（粘性土 $w=24.6\%$ 、砂質土 $w=20.6\%$ ）に焼却灰を粘性土には乾燥重量百分率で10%、砂質土には5%添加し、モルタル用ミキサーで均一になるよう混合して行った。この改良土の土質改良効果をみるために、改良土を約100 mlの容器に満たし、供試体の表面をラップフィルムで覆い、20±2℃の養生箱の中で乾燥しないように7日間養生し、改良型フォールコーン試験¹⁾を行った。また、A灰、B灰、L灰については、同時にCBR試験を行い、改良型フォールコーン試験との相関を求め、その相関から他の試料についてもCBR値を推定した。なお、CBR試験の供試体の作成は、改良型フォールコーン試験の供試体と密度が同じになるように突固めて行った。

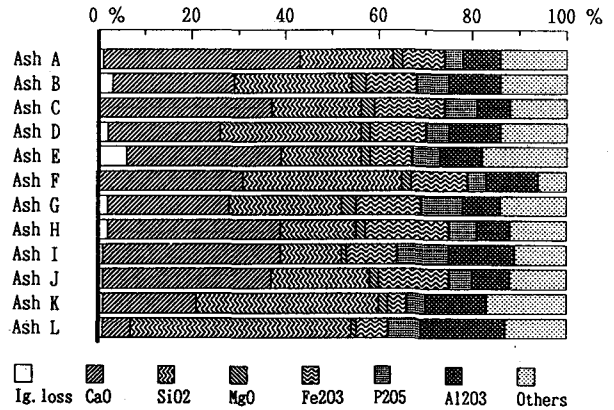


Figure-1 Constitution of Ashes

Table-1 Physical Properties of Soil

		Cohesive soil	Sandy soil
Grain size composition	Gravel	2%	13%
	Sand	9%	44%
	Silt	42%	41%
	Clay	47%	2%
Consistency	Liquid limit	39.3%	34.9%
	Plastic limit	17.3%	17.0%
	Plasticity index	22.0%	17.9%
Japan unified soil classification		CL	SC
Gravity		2.658	2.652

3. 結果

3.1 焼却灰の水和特性

表－2に保管による焼却灰の含水比、強熱減量の経時変化を示す。この結果から、保管前の吸湿の影響を受けていない灰（以下、乾灰とする。）の含水比は、E灰を除いてすべて1％以下であった。また、保管により含水比は増加する傾向にあるが、K灰、L灰は60日後においても含水比が1％以下と小さかった。これらの灰は粒径が小さく、敷きならして保管した場合、下層部まで水分が至らなかったことが考えられる。また、乾灰の状態で既に含水比の高かったE灰においても保管による増加は認められなかった。

強熱減量の変化は大きく分けて次の3種類に分類できる。
①A灰、C灰、F灰、H灰、I灰、J灰は乾灰では1％以下と小さいが、保管による含水比の増加とともに大きくなる。強熱減量として表れるものとしては、焼却灰中の未燃分、水酸化カルシウム、炭酸カルシウムの分解による酸化カルシウムへの変化及びカルシウム化合物の水和による結晶水等が考えられる。このうち、未燃分は乾灰、保管後の灰とも同量であること、炭酸カルシウムの分解は1気圧、898℃であることを考慮すると、保管による強熱減量の変化は、焼却灰中の酸化カルシウムの水酸化カルシウムへの変化及び焼却灰中のカルシウム化合物の水和による結晶水の生成によるものと考えられる。したがって、これらの灰は水和反応性が高いと言える。②B灰、D灰、E灰、G灰は保管前から大きく、保管による変化は小さい。③K灰、L灰は保管前、保管後とも小さい。

図－2に焼却灰の水和速度試験結果を示す。この図は、水和速度試験開始30分後の温度上昇を保管日数毎に比較したものである。この図から、乾灰では、A灰は約30℃、J灰は約20℃と大きな温度上昇を示している。これらの灰は、水と混合することにより急激に水和反応を起こし、発熱したものと考えられる。また、E灰、F灰、H灰、I灰も5～10℃程度の温度上昇が見られた。なお、E灰は上述の含水比、強熱減量の測定においては、保管による変化が小さく、水和反応性も小さいと考えられた。しかしながら、水和速度試験では、ある程度の温度上昇がみられ、水和反応性を持つ結果となり、他の灰とは異なった傾向となっている。各灰とも保管日数の増加とともに温度上昇は減少し、60日保管後にはほとんど温度上昇が見られなくなった。これは、保管中に吸湿により徐々に水和が進行したためと考えられる。

乾灰の状態では温度上昇が小さい灰でも、アルカリを添加することで温度上昇が大きくなる灰がある。図－3は乾灰にCa(OH)₂を10％添加した場合と添加しない場合の温度上昇の差を示したものである。この図から、I灰はCa(OH)₂を添加することで、無添加の場合より約25℃も温度上昇が大き

Table-2 Change of Water Content and Ignition Loss with Storage Days

	Before storage	After 14 days	After 28 days	After 60 days
Ash A	0.0 0.0	2.4 2.1	5.0 4.8	6.0 6.5
Ash B	0.4 3.1	1.2 4.4	2.5 4.3	3.6 5.0
Ash C	0.06 0.3	0.7 2.8	2.2 1.1	3.3 2.0
Ash D	0.4 1.4	1.4 2.3	2.7 2.2	3.2 2.9
Ash E	5.0 6.8	3.3 8.0	4.0 4.9	4.4 5.7
Ash F	0.04 0.1	0.6 0.7	1.1 0.6	1.4 1.5
Ash G	0.6 2.1	1.8 2.6	3.5 2.5	4.1 2.9
Ash H	0.2 1.0	1.6 6.1	3.4 3.3	3.7 3.5
Ash I	0.0 0.6	0.8 1.8	2.1 2.3	4.2 4.9
Ash J	0.1 0.0	2.2 4.4	4.0 3.7	4.3 4.9
Ash K	0.6 0.2	0.5 2.6	0.8 0.2	0.9 0.4
Ash L	0.6 0.6	0.6 0.8	0.7 0.5	0.6 0.6

Upper: Water content (%)
Lower: Ignition loss (%)

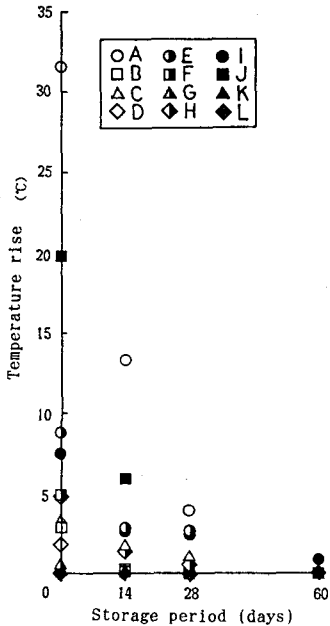


Figure-2 Results of Hydration Rate Test

くなることがわかる。また、C灰、H灰も5℃前後温度上昇が大きくなっている。これらの灰は、アルカリによる刺激を受けてカルシウム化合物の水和が促進されたと考えられる。焼却灰単体で温度上昇の著しかったA灰、J灰は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を添加することで温度上昇が減少している。この原因として、A灰、J灰は水和反応により $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を生成するカルシウム化合物を含んでいることが考えられる。つまり、水中にアルカリが存在するために、水和により溶解すべき $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が溶解しにくくなり、水和反応が抑制されたのではないかと考えられる。他の灰は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の添加による目立った差異は見られず、アルカリ刺激による影響は少ない。

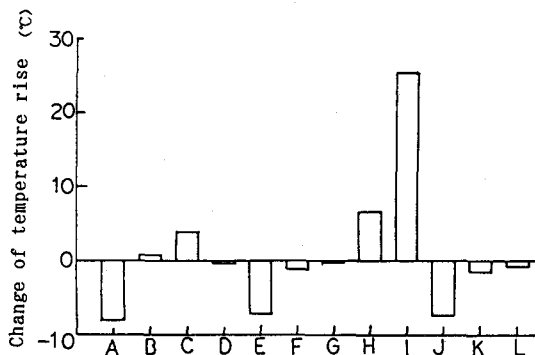


Figure-3 Change of Temperature Rise

3.2 土質改良効果の判定指標

3.1 で述べたように、石灰系焼却灰は、灰によりその水和特性に差が生じる。そこで、この水和反応性の大小と土質改良効果の関係を調査した。水和反応性の指標としては、カルシウム含有率、吸湿による強熱減量の変化及び水和速度試験の温度上昇を取り上げた。

(1) カルシウム含有率と土質改良効果

図-4に焼却灰のカルシウム含有率とそれぞれの焼却灰（乾灰）を添加した改良土のCBR値との関係を示す。この図から、カルシウム含有率の高い灰はCBR値が大きいことがわかる。このことは、脱水時に消石灰の添加率を調整することで土質改良材に適した灰を製造できることを示している。しかし、焼却灰の品質は、保管による吸湿により劣化し、カルシウム含有率の高い灰でも、保管期間が長くなれば強度発現が小さくなり、その改良効果は、カルシウム含有率の小さい灰とあまり差のないものになる。したがって、カルシウム含有率だけでは、保管による焼却灰の劣化を考慮に入れた土質改良効果を評価することが困難である。

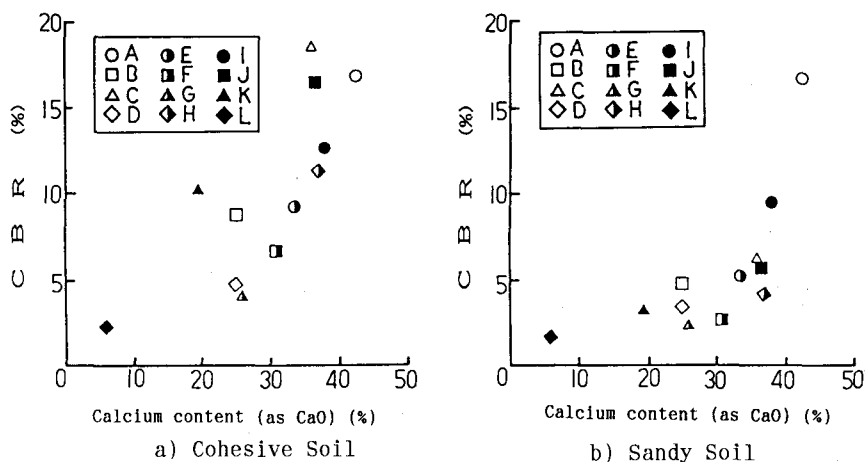


Figure-4 Relation between the Calcium Content and The CBR Value

(2) 強熱減量の変化と土質改良効果

図-5に強熱減量の変化とそれぞれの焼却灰（乾灰）を添加した改良土のCBR値との関係を示す。ここで、強熱減量の変化は、（室温30℃、湿度95%で60日保管時の強熱減量）－（乾灰の強熱減量）である。こ

これらの図から、強熱減量の変化とCBR値の間には良好な相関があり強熱減量の変化で土質改良効果を予測できると考えられる。また、乾灰の強熱減量のかわりに一定期間保管後の灰の強熱減量を使えば、保管後の灰の水和反応性を評価できることから、劣化した灰の品質判定にも利用できる。しかし、今回の方法では、その判定に長時間を要することから、今後は水との反応を速め、結晶水の生成を速めることにより、試験方法の簡略化の可能性を調べる必要がある。

(3) 水和速度試験と土質改良効果

3.1 焼却灰の水和特性でも述べたように、焼却灰単体での水和速度試験だけで長期間養生後の土質改良効果を評価するのは不十分であるため、焼却灰（乾灰）単体での温度上昇及び $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 添加時の温度上昇を説明変数とし、それぞれの焼却灰（乾灰）を添加した改良土のCBR値を被説明変数として重回帰分析を行った。

重回帰分析の結果、重相関係数は粘性土で $R=0.694$ 、砂質土で $R=0.917$ となり、砂質土においては水和速度試験の結果を用いて土質改良効果を精度良く予測できることがわかる。なお、この場合の回帰式は次のとおりである。

$$\text{粘性土: } Y_c = 0.240 t_1 + 0.173 t_2 + 7.017 \quad \text{————— (1)}$$

$$\text{砂質土: } Y_s = 0.258 t_1 + 0.167 t_2 + 2.250 \quad \text{————— (2)}$$

ここで、

Y_c : 粘性土に焼却灰（乾灰）を10%添加した改良土のCBR値（%）

Y_s : 砂質土に焼却灰（乾灰）を5%添加した改良土のCBR値（%）

t_1 : 焼却灰（乾灰）単体での水和速度試験における30分後の温度上昇（℃）

t_2 : 焼却灰（乾灰）に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を10%添加した時の水和速度試験における30分後の温度上昇（℃）

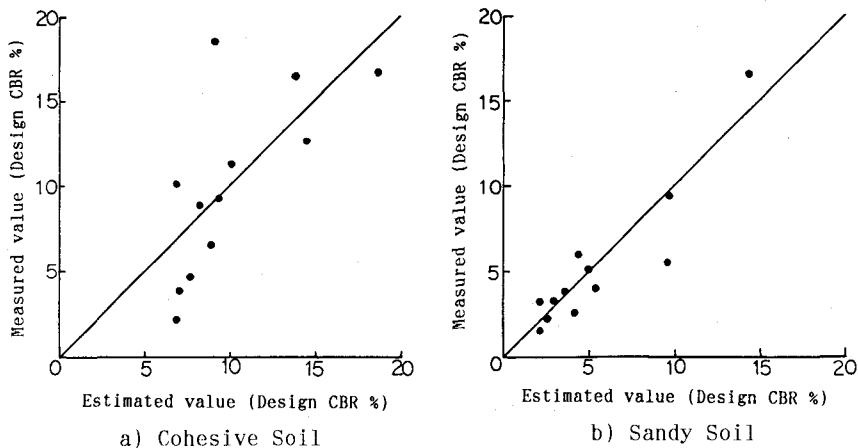


Figure-6 Comparison between the Estimated Value and the Measured Value

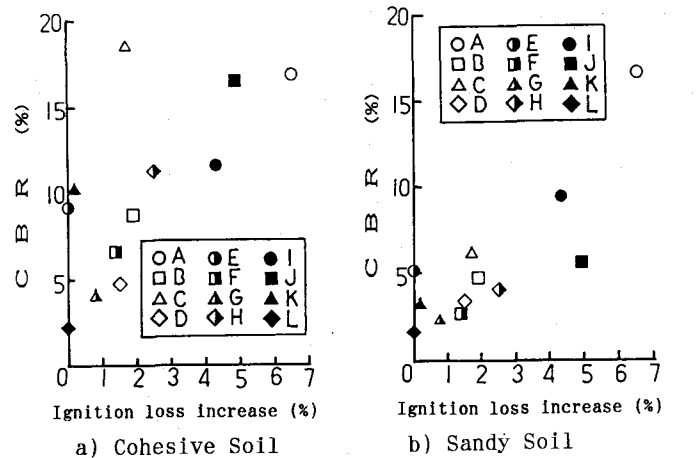


Figure-5 Relation between the Ignition Loss Increase and the CBR Value

図-6は、回帰式による計算値と実測値の関係を示したものである。この図からも、粘性土においてはややばらつきがみられるが、砂質土では良い相関があることがわかる。

また、図-7は水和速度試験の温度上昇とそれぞれの焼却灰（乾灰）を添加した改良土のCBR値との関係を示したものである。ここで、水和速度の指標としては、次式に示すT値（℃²）を用いた。

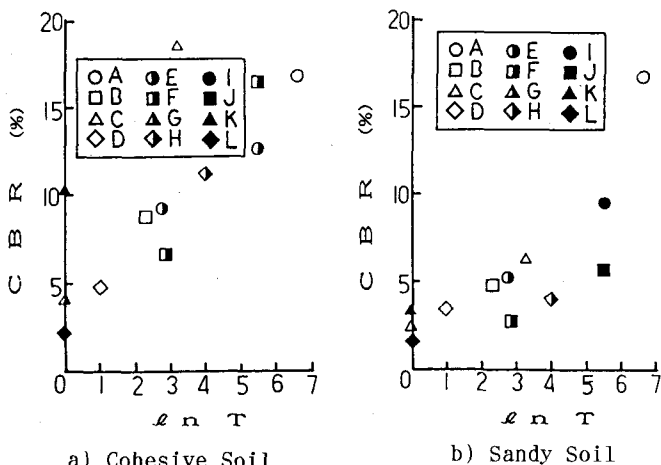


Figure-7 Relation between the T Value and the CBR Value

$$T (\text{℃}^2) = t_1 (\text{℃}) \times t_2 (\text{℃}) \quad (3)$$

ここで、 t_1 、 t_2 は上記のとおりである。

これらの図から、T値とCBR値との間にも良い相関があることがわかる。なお、 $\ln T$ とCBR値の間の相関係数は粘性土で $r=0.781$ 、砂質土で $r=0.795$ であった。ただし、 $T < 1$ の場合は $\ln T$ を0とした。

これらの結果から、石灰系焼却灰を土質改良材として利用する場合には、水和速度試験結果と改良土の強度に関するデータを蓄積し対象土質毎に(1)及び(2)式を作成することが有効と考えられる。また、現場等で簡易に土質改良効果を判定する場合には、(3)式のT値が有効に使えるものと考えられる。

4. まとめ

従来、石灰系焼却灰は水和による固結能力があると言われてきたが、本調査の結果、その水和反応性は焼却灰によって異なることがわかった。また、水和反応性の大小は土質改良効果を左右することがわかった。土質改良効果を判定するための水和反応性の指標としては、水和速度試験が有効である。この試験は簡易、かつ、保管による焼却灰の品質劣化にも対応できることから現時点では一番優れたものと考えられる。したがって、焼却灰の水和速度試験結果と改良土の強度に関するデータを蓄積することで改良土の強度特性を予測することができる。さらに、焼却灰の添加率を変えた場合の改良土の強度を測定することで、目標強度に応じた焼却灰添加量の予測も可能と考えられる。また、乾灰の土質改良効果はカルシウム含有率と相関が高いことから、脱水時の消石灰添加率の調整により、土質改良材としての品質を安定、向上させることが可能と考えられる。

[参考文献]

- 1) 久野悟郎, 久楽勝行, 三木博史, 岡田芳樹: フォール・コーン試験による土質改良効果の簡易判定法, 土木技術資料, Vol. 27, No. 10, pp33~39, 1985
- 2) 岡田清, 六車熙: コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, 1981