

V—37 下水汚泥焼却灰の土工材料への利用に関する実験

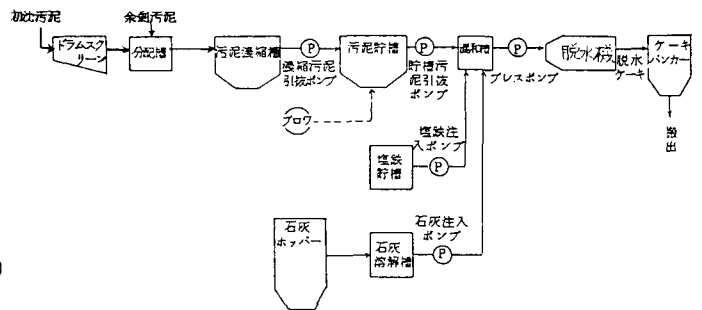
札幌市下水道局工事部 藤田 幸宏
札幌市下水道局工事部 伊藤 隆

1. はじめに

札幌市は創建以来わずかに一世紀あまりのうちに人口150万人の全国5番目の都市に急成長した。この人口増加と共に水質保全・環境保全・浸水防止のため下水道事業も急ピッチで進められ、現在では10人のうち9人までが下水道の恩恵をうけ全国2番目の普及率となっている。しかし、下水道が整備されるにつれ生活環境が改善され河川の清流化が進む一方で、下水処理場での発生する汚泥量は年々増加しており、この汚泥の処理処分に対して早急な対応が迫られている。今までは、脱水ケーキのまま緑農地還元と埋立という処分方法をとってきたが、適当な処分地を確保することが年々困難となってきた現在、本市では下水汚泥を廃棄物としてではなく資源として有効利用すべく肥料(コンポスト)として緑農地に還元する方法と焼却して減量安定化をはかり土工材料等に利用する方法との二本立てで処分を進めている。

今回の報告は、焼却して減量安定化された下水汚泥焼却灰を省資源の観点から直接土工材料として盛土と埋戻しに用いた試験施工について述べるものである。

図-1 汚泥処理フロー(兼注脱水)



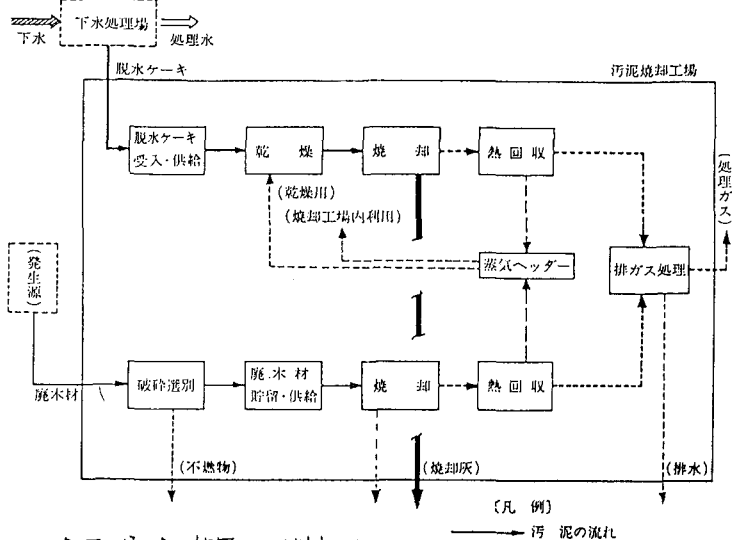
2. 下水汚泥焼却灰の発生過程

本市では、現在8処理場が稼働中であり小規模な定山溪処理場を除き7処理場で汚泥処理を行ない、昭和57年度では1日710,000 m^3 の汚水を処理し463 t (年間169,000 t)の脱水ケーキが発生している。(図-1)

汚泥の処分状況は45%が緑農地還元、23%が熱処理焼却、32%が埋立されたが、このうち埋立処分される脱水ケーキを昭和58年4月に稼働した都市廃木材を重油の代替エネルギーとする省エネタイプの手稲下水汚泥焼却センターで焼却処分している。(図-2)

焼却により生ずる下水汚泥焼却灰は、汚泥処理過程の違いから薬品無添加の熱処理系と兼注脱水の石灰系とに大別される。添加される薬品は凝集剤として塩化第二鉄(FeCl_2)を助剤として消石灰($\text{Ca}(\text{OH})_2$)を使用している。この兼注脱水のケーキを焼却して出来た焼却灰が石灰系焼却灰であり今回の実験に使用した材料である。

図-2 焼却方式基本フローシート



3. 石灰系下水汚泥焼却灰の特性

材料の特性を知るため室内試験を次の仕様で行なった。

物理試験

試験名	仕 様	備 考
(a) 比重試験	JISA1202-1978	突固め試験の試料についても実施
(b) 含水量試験	JISA1203-1978	
(c) 粒度試験	JISA1204 T-1979	
(d) 液性・塑性限界試験	JISA1205-T-1979 JISA1206-1970	
(e) 収縮定数試験	JISA1209-1978	
(f) 熱乾燥量試験	JSP T6-1968	
(g) 遠心含水当量試験	JISA1207-1978	

力学試験

試験名	仕 様	備 考
(h) 締固め試験	JISA1210 T-1979	1-1-C 法
"	"	2-5-C 法 修正CBR に使用
(i) 設計CBR試験	JISA1211 T-1979	アスファルト舗装要綱による 3層67回突固め方法
(j) 修正CBR試験	"	2-5-C 法突固め法適用
(k) 透水試験	JISA1218 T-1979	養水技法
(l) 圧密試験	JISA1217 T-1979	非圧密排水 (UU) 法
(m) 三軸圧縮試験	土質工学会基準	
(n) 凍上試験	道路土工排水工指針	

3-1 物理的特性

表-1の結果より土粒子比重が $G_s=3.057\sim3.075$ と大きく、砂分・礫分の粗粒分が95~98%を占めている。又日本統一分類ではSP~SWに分類され、概ね粒度の良い砂礫土ということができる。

3-2 力学的特性

力学試験結果を次表に示す。

表-1 物理定数一覧表

試料 No	含水比 Wc (%)	比 重 G_s	粒 度 分 析						三角座標による分類	液性限界 LL (%)	塑性限界 PL (%)	塑性指数 IP (%)	収縮限界 (%)	遠心含水当量 (%)	日本統一分類	熱乾燥量 LLg (%)
			礫分	砂分	シルト分	粘土分	P 74	Uc								
1	60.52	3.075	36.0	62.0	2.0	—	2.0	9.0	砂	NP	—	—	45.0	19.4	SP	6.01
2	60.10	3.059	38.0	57.0	5.0	—	5.0	11.6	砂						SW	
3	58.56	3.057	42.0	55.0	3.0	—	3.0	11.7	砂						SW	

表-2

締固め試験 (JISA1210)			CBR試験 (JISA 1211)								修正CBR		設計CBR			
rd max (g/cnf)	wopt (%)	試 料	rd max (g/cnf)	wopt (%)	n=17		n=42		n=92		試 料	締固め度 (%)	修正 CBR (%)	rd (g/cnf)	W (%)	設計 CBR (%)
					rd (g/cnf)	CBR (%)	rd (g/cnf)	CBR (%)	rd (g/cnf)	CBR (%)						
1.055	51.5	非乾燥 非繰返し	1.230	43.6	1.036	28.7	1.166	50.0	1.218	45.5	非乾燥 非繰返し	95	54.5	1.056	51.7	7.7

表-3

透水試験			圧密試験					三軸圧縮試験			
γ_d (g/cm^3)	W (%)	透水係数 (cm/sec)	γ_d (g/cm^3)	W (%)	初期間 びき比 e	圧縮指数 Cc	圧密降伏応力 Pc (kgf/cm^2)	γ_d (g/cm^3)	W (%)	C (kgf/cm^2)	ϕ (°)
1.053	49.3	1.56×10^{-4}	1.070	48.8	1.880	0.204	4.2	1.065	49.9	0.42	32° 40'

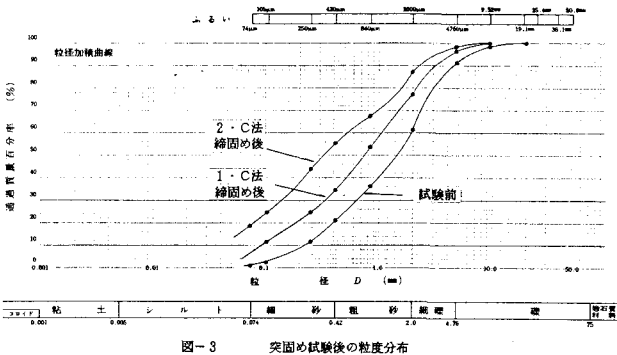
(1) 締固め特性、CBR特性

焼却灰は一般の砂質土が w_{opt} は10~20%、 $\gamma_d \max$ は1.8~2.0 g/cm³であるのに比較すると、いずれも最適含水比 w_{opt} が高く最大乾燥密度 $\gamma_d \max$ が小さいという特性がある。

修正CBRは54.5%であり、下層路盤程度なら使用可能な値となっているが42回突固めと92回とでは逆転している。

これは粒子破碎のための強度低下が原因と考えられる。図-3に突固め試験後の粒度分析結果を示すが2法では0.074mm以下の細粒分が20%程度に増して、このことを裏づけている。

設計CBR値は7.7%で一般の砂質土程度になっていて、路床土としては問題ない。



(2) 透水試験

透水係数は $1.56 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ で透水性は低く、微細砂、シルト等に相当する。

(3) 圧密・三軸試験

変形の特性をあらわす圧縮指数 $C_c = 0.204$ 、圧密降伏応力 $P_c = 4.2 \text{ kgf/cm}^2$ で砂質土並である。

本焼却灰は粘着力がないため、材令が若い段階では一軸圧縮試験は不可能であるため、土工材料としての強度特性は三軸圧縮試験の非圧密・非排水試験によって求めた結果(モール円)を図-4に示す。

強度定数として $C = 4 \text{ kgf/m}^2$ 、 $\phi = 30^\circ$ 程度が見込めるが、砂礫土として取り扱うから中の要素だけとなるが、材令が進むとCがさらに増加する傾向にありCの評価も必要となるだろう。

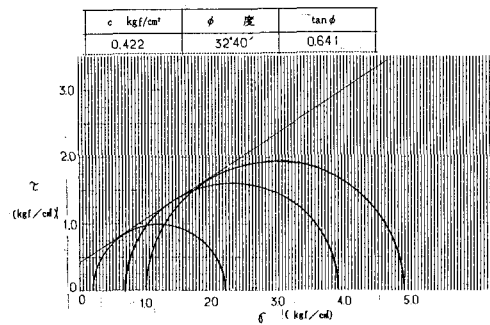


図-4 三軸圧縮試験(UU法)結果

(4) 凍上特性

凍上試験の結果を表-4に示す。

凍上率は15.9%で凍上様式は2であり表-5の判定に従えば要注意となる。データが少ないため、今後データを増して凍上性には検討していくつもりである。

表-4

凍上試験			
r d (g/cm ³)	W (%)	凍上率 (%)	凍上様式
1.083	50.0	15.2	2

表-5

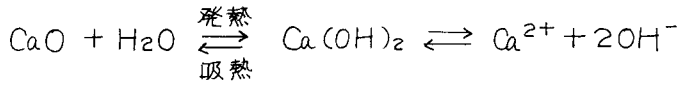
番 号	凍 結 様 式	凍 上 率	判 定
1	コンクリート状凍結 (氷粒散在を含む)	20%未満	合 格
		20%以上	要 注 意
2	部分的な微細霜降状凍結を含む コンクリート状凍結	20%未満	要 注 意
		20%以上	不 合 格
3	微細霜降、霜柱氷層等明らかに氷 晶分離の傾向ある凍結	凍上率の大きさに 関係なく。	不 合 格
4			
5			

3-3 化学的特性

焼却灰の成分は生成過程での添加剤(消石灰と塩化第二鉄)の影響を受けて、主成分は酸化けい素(SiO_2) 25~30%、生石灰(CaO) 25~30%、酸化アルミニウム(Al_2O_3) 5~10%、酸化第二鉄(Fe_2O_3) 10~15%である。

石灰系焼却灰に生石灰が多く含まれているため、石灰分の溶解によって生じるカルシウムイオンが土粒子に吸着し、粒子の結合を促進することや、生石灰の発熱反応により含水比が低下することによるコンシステンシーの改善や強度増加をうながすという特性をえている。

焼却灰はアルカリ性であるが、それは含まれる生石灰(CaO)が水と反応し消石灰(Ca(OH)_2)になり、水溶液中で電離して水酸イオンを多量に生じアルカリ性を示す。このような反応は次式で表わされる。



3-4 溶出試験

溶出試験の結果、表-6で示す通り判定基準値以下であり問題はない。

表-6

(単位: PPM)

	アルキル水銀 R _{Hg}	水銀 Hg	カドミウム Cd	鉛 Pb	有機リン O-P	6価クロム Cr+6	ヒ素 As	シアン CN	PCB	有機塩素 化合物
測定値	ND	ND	ND	ND	ND	0.06	ND	ND	ND	—
判定基準	不検出	0.005	0.3	3	1	1.5	1.5	1	0.003	—

「有害な産業廃棄物に係る判定基準を定める総理府令」

4. 試験概要

昭和58年10月本市豊平川下水処理場敷地内において下水汚泥焼却灰の盛土材料及び埋戻し材料あるいは路床材としての利用可能性を検討するため、試験施工により施工性と施工管理規程を探ると共に経時的な変化を追跡調査した。

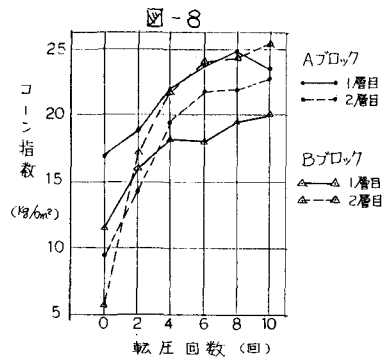
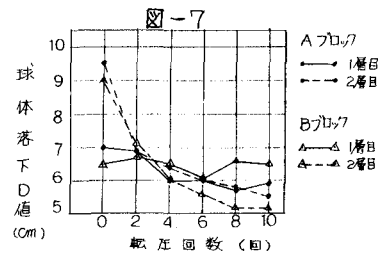
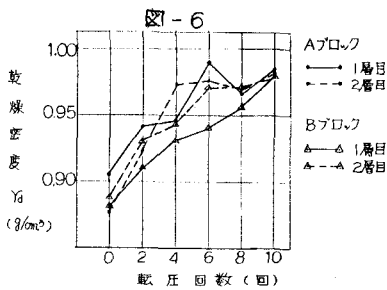
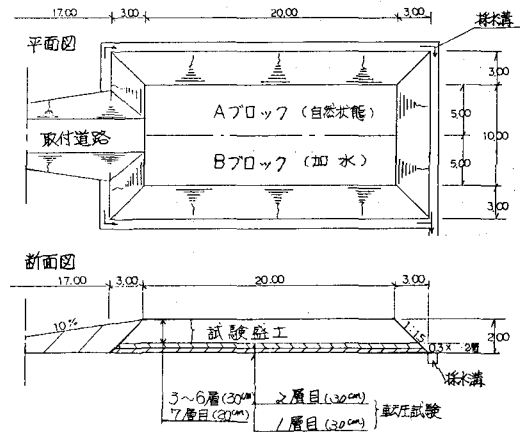
4-1 盛土試験

図-5のように、自然含水比状態のAブロックと加水したBブロックとに分け1層目、2層目で転圧試験を行った。転圧機種は、1層30cmをブルドーザーによりまき出しタイヤローラ8丸により10回まで転圧を行なった。

転圧による締固め密度は、転圧回数が増すに従って差が少なくなり図-6で示すように6回転圧で締固め度90%以上となり良好な締固め状態を得られる。

また自然状態の方がやや密度がでているが大差はなく少量の雨天時でも施工可能である。

図-5



施工管理法検討のために行なった球体落下試験とコーン貫入試験の結果を図-7と図-8に示す。

球体落下D値は転圧回数4回以降収束しており密度が所定以上となる転圧回数6回でのD値は6cmとなり、この値が規準値となりえよう。

コーン貫入抵抗値 q_c 値は転圧6回で $q_c = 20 \text{ kgf/cm}^2$ 以上となり、ハンドコーンペネトrometerの限界である。

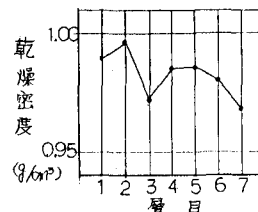
転圧試験の結果をふまえて3~7層をタイヤローラ6回転圧により試験盛土を行なった。

図-9の密度試験の結果、密度 $\bar{\gamma}_d = 0.983 \text{ g/cm}^3$ で締固め度93.1%で十分な密度に仕上がっている。

図-10の土研式コーン貫入試験、図-11の平板載荷試験、図-12の現場CBR試験のいずれの結果をみても時間経過と共に強度が増加することがよみとれる。

盛土直後のCBR値は10~15%程度であり表-7と比較して十分な値である。

図-9 密度試験 (6回転圧) (自然含水比)



層	$\bar{\gamma}_d$ (g/cm³)	含水比 (%)
1	0.990	40.95
2	0.997	41.37
3	0.972	44.65
4	0.985	43.70
5	0.966	42.95
6	0.960	44.95
7	0.968	45.32

図-10 土研式貫入試験

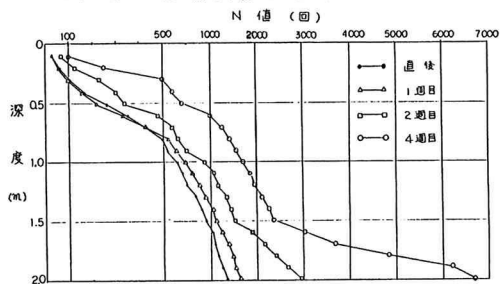


図-11 平板載荷試験

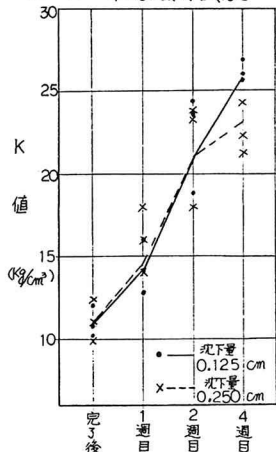


図-12 現場CBR試験

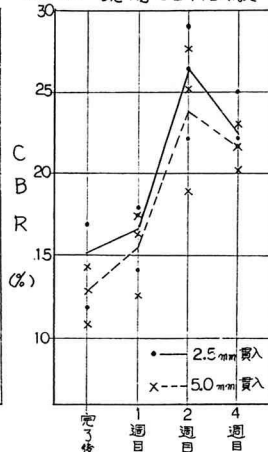


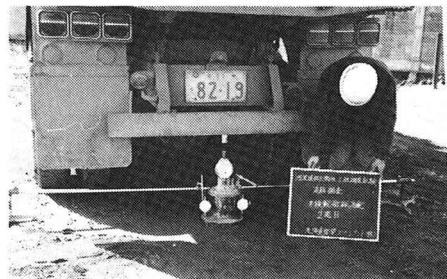
表-7 設計 C B R

(埋入型制層の C B R と路床の C B R とを合成して求めたもの)

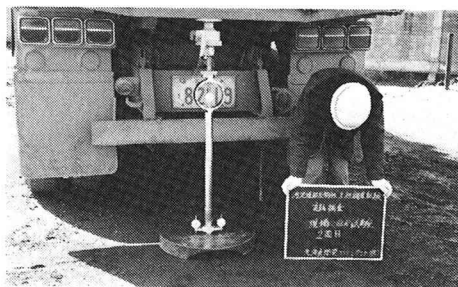
材料	埋入型制層		砂		切込砂利、切込砕石等	
	厚さ (cm)	設計 C B R	厚さ (cm)	設計 C B R	厚さ (cm)	設計 C B R
土		3	54 以下 55 以上	3 4	20 以下 21 ~ 52 53 ~ 78 79 以上	3 4 6 8
火山灰		4			40 以下 41 ~ 72 73 以上	4 6 8
砂					24 以下 24 ~ 65 66 以上	4 6 8
切込砂利、切込砕石						8



土研式貫入試験



平板載荷試験



現場 C B R 試験

4-2 埋戻し試験

下水排水管等の埋戻し工として下水汚泥焼却灰を用いた場合の強度等を他材料と比較しながら試験を行なった。

60mの布設延長を各々20mづつ A, B, C ブロックに分け、Aブロックには砂、Bブロックに焼却灰、Cブロックに火山灰を使用した。(図-12)

各ブロックとも管頂上30cmごと4層の密度、含水比を測定し、表層から土研式貫入試験と現場 C B R 試験を行ない経時変化は埋入式平板載荷を行なった。

試験結果を表-8、図-13、図-14、図-15に経時変化を図-16に示す。

図-12

(i) 横断面

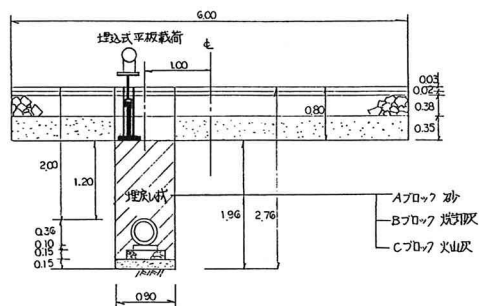


表-8 各層における乾燥密度

材料	Aブロック 砂 $\gamma_{dmax}=1.652$				Bブロック 焼却灰 $\gamma_{dmax}=1.230$				Cブロック 火山灰 $\gamma_{dmax}=1.200$			
層目	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
γ_d (g/cm ³)	1.378	1.352	1.388	1.366	0.903	0.907	0.903	0.888	0.931	0.930	0.931	0.941
含水比 (%)	11.39	11.65	11.69	11.89	46.94	46.59	47.13	48.42	23.19	24.65	23.75	23.73
締固め度 (%)	83.4	81.8	84.0	82.7	73.4	73.7	73.4	72.2	77.6	77.5	77.6	78.4

図-13 土研式貫入試験

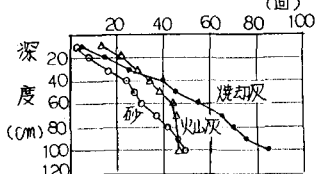


図-16 平板載荷試験結果

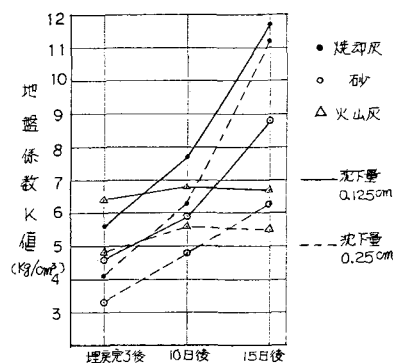


図-14 平板載荷試験

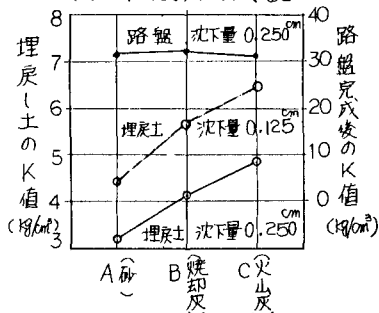
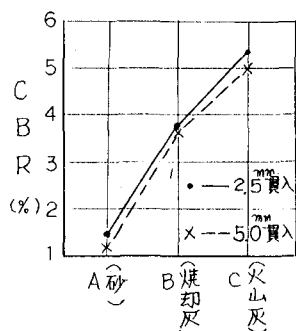


図-15 現場CBR試験



密度管理は締固め試験第2法で行なったが、ABCのいずれのブロックも規準締固め度85%を下まわっており十分に締固まっていなかった。これは、掘削中が90cmと狭く下水道管の沈下を測定するための沈下棒を中央に設置しているので乾圧機の移動に支障となるため小型タンパーで乾圧したこと、及び各層30cmを2回しか乾圧しなかったことを考えると乾圧回数を増やすか乾圧機を大型化すれば問題はないと考える。

土研式貫入試験、平板載荷試験、現場CBR試験結果も締固めが不足しているせいか低い値であるが砂と比較した場合いずれも焼却灰の方が上まわっている。また埋込平板載荷試験結果図-16で判る通り経時的に強度が増加している。

5. 調査結果のまとめ

室内試験、試験施工の結果、下水汚泥焼却灰は砂質土の特性を有し強度的に期待できる材料であり盛土材、埋戻し材として使用することは十分可能である。盛土等の施工管理方法として密度管理は勿論であるが、球体落下試験D値60mmを規準値として採用できそうである。また、経時的に強度が増加するがこれは焼却灰中に含まれる石灰分の影響を受けるためであり、他材料にない特性である。

6. おわりに

昭和58年10月からの試験施工であり十分な資料を提供できなかったが、下水汚泥焼却灰の土工材料としての特性についてある程度把握できたものと思われる。

下水汚泥焼却灰を廃棄物としてではなく土工材料として有効に利用されることは、年々増加する汚泥の処分問題を解決すると共に省資源という観点からたいへん有意義であり、今後に残された問題点を追求しながら下水汚泥焼却灰の有効利用促進のため努力してゆくとおりである。

最後に、本報告について御指導いただいた建設省土木研究所 久保土質研究室長、京才汚泥研究室長ならびに関係各位に深く感謝するのである。

参考文献

廃棄物の建設事業への利用可能性に関する調査報告書 地盤・盛土分科会 (財)国土開発技術センター S58.3
昭和58年度 汚泥焼却灰等土質試験業務報告書 丸嶋市下水道資源公社