

仙台市における 下水汚泥の有効利用に関する 共同研究(その2)

1. 研究の目的と内容

1.1 研究の目的

仙台市は、市内8箇所下水道処理場から発生する汚泥の集約処理を行う目的から、流動床式汚泥焼却システムによるMスラッジセンターを平成8年9月に一部完成し、将来的には施設の拡充を行う予定である。

今後、下水道普及率の向上や高度処理化、さらに合流改善対策等によって、ますます汚泥量は増加すると推測される。一方、既存の処分場における残存容量の減少や新たな処分場の確保が困難になってきていることから、下水汚泥の有効利用は、重要な下水道事業の施策の一つにあげられる。本業務は下水汚泥の安定的なリサイクルシステムの構築を目的として、地域特性に適合した経済的、かつ効率的な有効利用の方策を調査・検討したものである。

1.2 平成8, 9年度の研究概要

平成8, 9年度は仙台市における下水汚泥の有効利用状況および、同市における下水汚泥処理の現状と見通しについて調査し、有効利用計画として土質改良材への適用を考え、下水道処理場から発生する汚泥の石灰系焼却灰の適応性を検討した。

その結果、石灰系焼却灰と改良対象土(CBR値が0.6%程度の中間土)の混合割合が2:8の場合、改良助材(生石灰で40kg/m³)を用いることでCBR

値10%を確保できることがわかった。

1.3 今年度の研究内容

仙台市の下水道処理場の脱水システムが近く石灰系から高分子系へ切り換えることが計画されることを受け、高分子系焼却灰の土質改良材への適応性の検証と同市における建設発生土の発生状況などの調査を通して市場性と流通性の検討を行った。

図-1に調査の全体フローを示す。

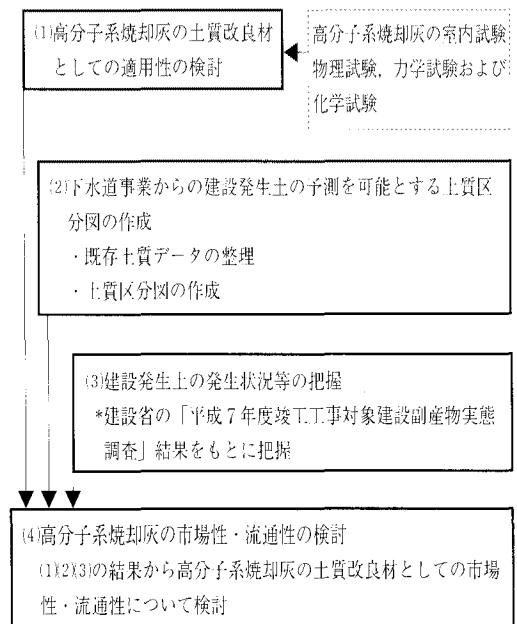


図-1 調査の全体フロー

2. 高分子系焼却灰の土質改良材としての適用性の検討

2.1 焼却灰を土質改良材として用いるための各種基準等

(1) 強度基準

下水道工事の埋戻土として用いる場合の改良土の強度的な基準を表-1に示す。

表-1 用途に応じた改良土の目標強度

(「下水道汚泥の建設資材利用マニュアル(案)」、日本下水道協会)による)

改良の目的	目標強度	備考	
埋戻し材としての利用	室内CBR=10%	3層67回締固め後 6日空中養生 4日水浸後のCBR	
参考	ハンドリングの改善	qu=0.1~0.5kgf/cm ²	1日強度
	トラフィックビリティの改善	qu=0.5kgf/cm ²	7日強度
	盛土材として	qu=1.0kgf/cm ²	7日強度

※qc=5qu

(2) 環境基準

土質改良材を用いる場合には、改良土の周辺環境に及ぼす影響が問題となる。

この場合の改良土の環境基準を表-2に示す。

表-2 土壌の汚染に係る環境基準(抜粋)

(環境庁告示第46号、平成7年3月改正)

項目	環境上の条件
カドミウム	検液1リットルにつき0.01mg以下であり、かつ、農用地においては、米1kgにつき1mg未満であること。
鉛	検液1リットルにつき0.01mg以下であること。
六価クロム	検液1リットルにつき0.01mg以下であること。
砒素	検液1リットルにつき0.01mg以下であり、かつ、農用地(田に限る)においては、土壌1kgにつき15mg未満であること。
総水銀	検液1リットルにつき0.005mg以下であること。
銅	農用地(田に限る)においては、土壌1kgにつき125mg未満であること。
セレン	検液1リットルにつき0.01mg以下であること。

(3) 焼却灰の廃棄物処理法上の取扱い

下水汚泥焼却灰は、有価物として取り扱われない限りは、廃棄物の処理および清掃に関する法律(廃棄物処理法)上の産業廃棄物として処理する必要がある。

埋立処分をする場合は、埋立地からの浸出液によって公共の水域および地下水を汚染することがないように必要な措置(管理型処分場で処分)が必要となる。なお、有毒物質を含む指定下水汚泥(下水道法施行令第13条の四で規定)は、特定有害産業廃棄物として遮断型処分場で適正に処分する必要がある。

しかし、下水道事業管理者が下水汚泥焼却灰を有価物である土質改良材として活用する場合は、廃棄物処理法の適用外となり、処理施設の廃棄物処理法上の設置許可が不要となるとともに、焼却灰による土質改良土も土壤環境基準を満足すれば埋戻土として利用可能となる。

2.2 高分子系焼却灰の土質試験結果

(1) 物理および力学試験結果の概要

前年度の結果より石灰系焼却灰は、焼却灰の混合率が増すほどCBR値が増加することから、土質改良効果が認められる。また、改良助材として用いる生石灰の混合土1m³当たりの添加量が、焼却灰と普通土の混合割合(湿土重量比)が1:9の混合土に対し90kgのときおよび、混合割合が2:8の混合土に対して60kgのとき、CBR値が10%以上となることがわかった。

一方本年度の結果から、高分子系焼却灰は、対象とした普通土の強度が高い(CBR値=24%)こともあり、その土質改良効果ははっきりと認められなかった。しかし、改良対象土を本年度用いた「細粒分混砂質礫」(CBR値=23.8%)とする場合には、改良助材である生石灰を混合土に対し40kg/m³の添加で高分子系焼却灰と普通土の混合土(混合比率=1:9~2:8)は十分な強度(CBR値=130%)が得られることがわかった。

物理および力学試験結果の概要を表-3に示す。

表-3 物理および力学試験結果の概要

高分子系焼却灰w%	配合割合		土粒子密度 g/cm ³	細粒分含有率 %	含水比 %	qc (CBR後) kgf/cm ²	CBR値 %
	普通土 w%	改良助材 w%					
100	0	0	2.641	98.7	48.7	18.4	9.7
0	100	0	2.659	6.6	14.9	18.4	23.8
10	90	0	2.694	13.5	16.1	9.2	4.9
10	90	40	-	-	17.1	25以上	134.8
20	80	0	2.685	22.1	19.5	14.2	4.4
20	80	40	-	-	19.7	25以上	130.9

注1) 混合材料の試験値は、養生期間7日の値を示す

注2) 普通土の分類は、前年度用いたものが「細粒分混砂質礫」、本年度用いたものが「細粒分混砂質礫」

2.3 高分子系焼却灰の土質改良材としての適用性の検討

本年度の土質試験では、同市の下水道管渠工事の雨水枝線工事から発生した普通土(細粒分混砂質礫)に高分子系焼却灰を10%~20%混合した場合の物理試験、力学試験および、化学試験を実施した。

この結果から、高分子系焼却灰の土質改良材としての適用性を表-4にまとめた。

表-4 土質試験結果による高分子系焼却灰の土質改良材としての適用性

混合ケース	強度 (室内CBR 試験結果)	安全性 (金属溶出 試験結果)	適用性、課題性
高分子系焼却灰 100%	概ね室内CBR<10%であり、埋戻材としての利用は困難	砒素、セレンの溶出量が土壤環境基準値を上回り、埋戻材としての利用は困難	高分子系焼却灰単体での埋戻材としての利用は困難
普通土(細粒分混砂質礫) + 高分子系焼却灰 10%~20%	室内CBR(養生7日) ①高分子系焼却灰10%混合のとき =4.9%<10% ②高分子系焼却灰20%混合のとき =4.4%<10% であり、埋戻材としての利用は困難	砒素の溶出量が ①高分子系焼却灰10%混合のとき =0.018mg/l ②高分子系焼却灰20%混合のとき =0.02mg/l と土壤環境基準値を上回り、埋戻材としての利用は困難	強度確保、有害金属溶出防止の両方の観点から埋戻材としての利用は困難
普通土(細粒分混砂質礫) + 高分子系焼却灰 10%~20% + 生石灰	生石灰40kg/m添加で室内CBR(養生7日) ①高分子系焼却灰10%混合のとき =134.8%>10% ②高分子系焼却灰20%混合のとき =130.9%>10% であり、埋戻材としての利用可能	生石灰の添加量が40~120kg/m ³ で、有害金属の溶出が基準値以下であり、埋戻材として利用可能	生石灰の添加量が40kg/m ³ であれば埋戻材として利用可。(生石灰をプラントに均一に混合するには、40kg/m ³ 程度必要となる。ただし強度の出過ぎに注意)

事場所別の建設発生土土質に関する予測を可能とする土質区分図を作成する。また、土質区分図は土質改良必要量算定のための基礎資料として活用する。

3.1 既存土質データの整理

既存土質データは、図-2のフローにしたがって整理し、処理区毎の土質改良必要区域を想定し、土質区分図を作成する。

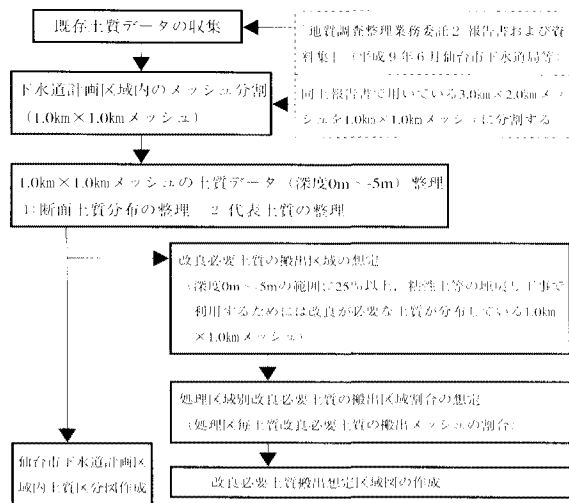


図-2 既存土質データの整理フロー

2.4 適用性のまとめ

高分子系焼却灰の適用性については、次のような結論を得た。

- ① 高分子系焼却灰を土質改良材としての適用する条件
改良対象土を細粒分混砂質礫とすると、高分子系焼却灰と改良対象土の混合割合を、2:8とし、生石灰を混合土に1m³に対して40kg添加する。
- ② 土質改良材の各材料の効果
高分子系焼却灰は、主に改良対象土の含水量を抑え、生石灰は改良対象土に強度発現性を寄与するはたらきがある。
- ③ 土質改良材として適用するに当たって
①であげた条件は、改良対象土により変化すると考えられるため、適用に当たっては改良対象土毎に高分子系焼却灰との混合割合および生石灰の添加量を設定する必要がある。

3. 下水道事業からの建設発生土の予測を可能とする土質区分図の作成

既存の土質データを整理し、下水道事業からの工

3.2 改良必要土質の搬出想定区域の検討

(1) 埋戻土の要求品質の整理

建設発生土を埋戻土として利用する場合の適用用途標準は「建設発生土利用技術マニュアル(財)土木研究センター」(以下、発生土マニュアルと呼ぶ)に定められている。

また、発生土マニュアルによる土質区分と本調査で作成した土質区分図との対応は、日本統一土質分類との関係等から、表-5のとおりとなると考えられる。

表-5 発生土マニュアルによる土質区分との対応と埋戻で利用可能な土質

地質年代	記号	本調査での土質区分		建設発生土利用技術マニュアルによる土質区分	
		土質	岩相		
埋戻に改良が必要な土質	第四紀	現世	表土、盛土	(N値等から改良必要土質と考える)	
		完新世	Ap	腐食土	第1種建設発生土
		Ac	粘性土	第3b種、第4種建設発生土	
		As	砂質土 (N≤10)	第2b種、第3種建設発生土	
埋戻にそのまま使用可能な土質	第四紀	更新世	Cc	粘性土	第3b種、第1種建設発生土
		完新世	As	砂質土 (N>10)	概ね、第2b種建設発生土
		Ag	砂礫土	第1種、第2a種建設発生土	
		Ds	砂質土	概ね、第2b種建設発生土	
新第三紀	更新世	Dg	砂礫土	第1種~第2a種建設発生土	
		I	極軟土 (Vp=1.2~2.5km/S程度)	第1種建設発生土	
		II	軟岩、中硬岩 (Vp=2.5~4.5km/S程度)	第1種建設発生土	

注) 埋戻にそのまま使用できるかどうかの判断は、「建設発生土利用技術マニュアル」の適用用途標準(工作物の埋戻)から第1種~第2b種建設発生土とした。

下水道の埋戻用には、「第2b種発生土」以上であれば問題ないことが示されている。

「第2b種発生土」は、本調査で用いた土質区分では概ね砂質系のA_{s2}以上の地質と考えられる。

したがって、本調査では、埋戻土の要求品質として、表-5に示すとおりA_{s2}以上の地質（第2b種発生土以上）と考える。

(2) 改良必要土質の搬出区域の想定

本調査では、発生土マニュアルで工作物の埋戻用に要求している第2b種建設発生土の細粒分混入率を25%以下としていることから1.0km×1.0kmメッシュで深度0m～-5m範囲に25%以上の改良必要土質が分布しているメッシュを改良必要土質の搬出区域と考える。

処理区別改良必要土質の搬出区域割合を表-6に示す。

表-6 処理区別改良必要土質の搬出区域割合の想定結果

	南蒲生 処理区	宮城 処理区	秋保温泉 処理区	仙塩流域 関連 公共下水道区域	阿武隈川流域 関連 公共下水道区域	合計
処理区の総 メッシュ数 ^{注1)}	167	42	6	72	17	304
改良必要土質 搬出区域 メッシュ数 ^{注2)}	111	11	0	42	15	179
改良必要土質 搬出区域割合 ②/① (%)	66.5	26.2	0.0	58.3	58.2	73.3

注1) メッシュ数は、1.0km×1.0kmメッシュ数。

注2) 改良必要土質搬出区域メッシュは、1.0km×1.0kmメッシュで深度0m～-5mの範囲に25%以上粘性土等の改良必要土質が分布しているメッシュの数。

4. 下水汚泥焼却灰の土質改良材としての市場性・流通性の検討

4.1 建設発生土の発生状況等の把握

(1) 建設発生土の発生状況等の把握方法

建設省による「平成7年度竣工工事対象建設副産物実態調査」(以下、H7センサスという)のデータを用いて、仙台市内の公共工事、民間工事に伴う建設発生土搬出、土砂利用の状況をまとめた。

市発注工事についてはH7センサスにより全数推計されているが、工種別にはベースとした工事発注統計の区分上「下水道・公園」工事として把握されている。このため、下水道工事単独での発生量等の推計は困難であり、下水道工事については、H7センサスのアンケートデータを単純集計することにより、発生量の下限値(アンケートで回答があった量は少なくとも発生している)を算定した。

(2) 建設発生土の発生状況等の把握結果

平成7年度の建設発生土の現場外搬出量は、市内

全工事(民間工事を含む)で266万m³、市発注工事はこの59%を占める157万m³である。

平成7年度の市内での民間を含めた総土砂利用量は138万m³である。

下水道工事からの建設発生土量は、統計区分上、下水道と公園工事が合わせて調べられているため、量を推定することが困難であるが、H7センサスで14.5万m³のアンケートの回答があり、少なくともこの量の搬出はある。

購入土(新材)の利用量は、市発注工事全体で96万m³あるため、市全体としての改良土需要は大きいことが窺える(下水道工事での購入土利用量は推定困難であるが、H7センサスの回答状況から7.0万m³以上あることがわかる)。

4.2 高分子系焼却灰の市場性・流通性の検討

(1) 改良土需要の推定

市発注の下水道工事のうち改良土需要は、開削工法から発生する建設発生土量から、前年度報告書により次のとおりに推定される。

平成7年度の開削工法施工延長 = 84,500m

標準土工定規図による掘削断面積 = 0.85m×1.80m = 1.53m²

平成7年度開削工法による発生土量 = 84,500m×1.53m² = 129,300m³

なお、上記の発生土量は、「4.1 建設発生土の発生状況等の把握」で平成7年度建設副産物実態調査の結果から下水道と公園工事が合わせて推定される

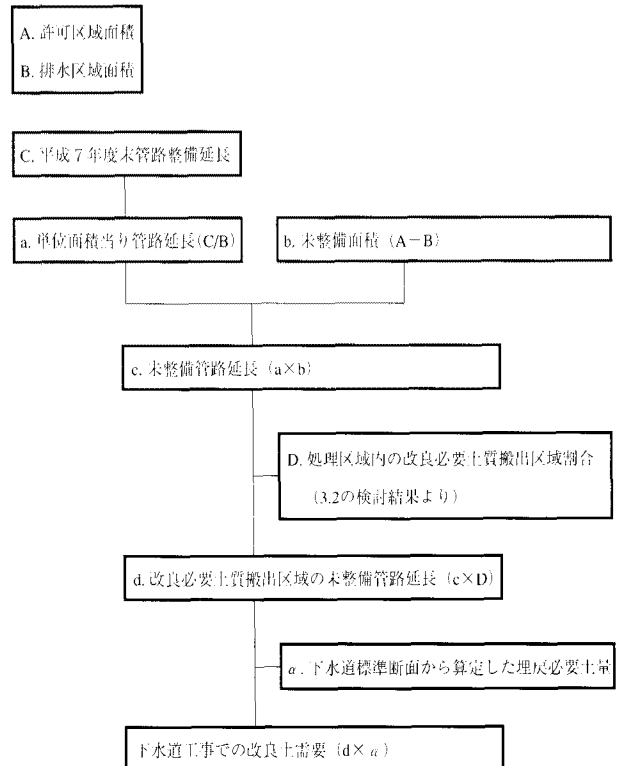


図-3 改良土需要推定フロー

14.5万m³と大きく矛盾がないことがわかる。

したがって、今後の下水道管渠工事での改良土需要を図-3に示すフローのように試算する。

上記試算結果から、今後の下水道整備工事で改良必要土が搬出される可能性がある延長は全市で、413.2kmとなった。したがって、未整備延長(L=795km)に対する改良必要土が搬出される可能性がある延長の割合(α)は、

$$\alpha = 413.2\text{km} / 795\text{km} = 52.0\%$$

となる。

また、標準土工断面から、改良土需要を算出すると次のとおり、49,100m³/年となる。

表-7に改良土需要の推定結果を示す。

表-7 改良土需要の推定結果

諸元	全区域	不良土発生区域	
下水道敷設延長 m/年	84,500	43,900	
掘削量 発生土量 m ³ /年	129,300	67,200	
舗装部	28,700	14,900	
埋戻量	機械埋戻し m ³ /年	57,500	29,900
	人力埋戻し m ³ /年	37,000	19,200
	改良土需要 m ³ /年	-	49,100

(2) 高分子系焼却灰と建設発生土および、改良土の需給バランスの検討

下水汚泥を焼却して発生する焼却灰量は、下表のとおり平成16年度までは市内で、年間5,500t、月間458t(平均)である。

2.3の土質試験の結果と4.2の改良土需要の推定結果から、汚泥焼却灰の混合比と利用の可能性をみると表-8のとおりとなる。

表-8 汚泥焼却灰の混合比と利用の可能性

改良の目的	改良土需要量	焼却灰発生量	改良対象土量	混合比(湿土重量比)	適用	
平成16年度まで	m ³ /年	49,100	5,500	43,600	1:14.3	焼却灰混合割合は20%以下 生石灰40kg/m ³ 添加で焼却灰 全量利用可
	t/年		5,500	43,600	=2:28.6	
平成17年度まで	m ³ /年	49,100	11,000	38,100	1:6.2	
	t/年		11,000	68,600	=2:12.4	

注1) 単位体積重量は、土=1.8t/m³、焼却灰=1.0t/m³とした。
注2) 土質試験で用いた改良対象土は、細粒分混じり砂質礫(室内CBR値=24%)。

表-8の結果から、改良対象土を今回の土質試験で用いた細粒分混砂質礫(室内CBR値=24%)相当とし、生石灰を40kg/m³添加する場合(高分子系焼却灰の最高混合割合=20%)は、平成17年度以降も汚泥焼却灰の全量を土質改良用として用いることが

可能なことが推定される。

(3) 土質改良プラントの採算性の評価

土質改良プラントの処理量と建設費、運営費の関係については、「建設副産物再利用促進方策に関する調査検討・報告書・平成8年3月・建設省・(株)日本能率協会総合研究所」の中で調べられている。これを用いて、土質改良プラントの採算性を評価した。

土質改良を行う場合と行わない場合の総コスト(土質改良を行う場合の工事現場⇄土質改良プラントの運搬費用はみていない)の差は、平成16年度までは年間総費用で約1000万円程度土質改良の場合が高く、平成17年度以降は概ね同じ(200万円程度土質改良の場合が安い)になった。このため、改良対象土に今回用いた「細粒分混砂質礫:CBR=24%」に相当する土質のものをを用い、土質改良プラントから改良土を必要とする各工事現場に近い場合には、焼却灰の土質改良材への適用の可能性があることが窺える。

土質改良プラントの採算性を左右する主要因としては次のものがある。

ア) 改良助材(生石灰)の添加量

イ) プラント設備のグレード等(事務所設備のグレード、地盤条件に起因する基礎構造、周辺環境対策の有無等)

ウ) 改良土需要量(プラント処理量)

ア) の生石灰の添加量については、採算性の試算結果から平成17年度以降で、40kg/m³添加した場合に総費用が土質改良する場合としない場合で同程度であることから、生石灰を40kg/m³以上添加することが必要となる場合は採算性の確保が難しくなる。

このため、前年度に土質試験の対象としたようなあまり強度がない土を改良対象土とする場合は採算性の確保が難しい。(前年度は、石灰系焼却灰とCBR=0.6%の普通土の混合割合が1:9~2:8の材料を対象とし、目標CBRを得るための生石灰の必要添加量は90kg/m³~60kg/m³となっている。)

イ) のプラント設備のグレード等については、本試算では、周辺環境への配慮をあまり考える必要がなく、地盤が良好で、管理施設も簡易な施設を想定しているため、事務所棟を鉄筋コンクリートで建設するなど、これらの条件を満たさない場合には採算性の確保が難しくなる。

ウ) の改良土需要に関しては、下水道事業以外の市の他事業(道路・河川事業等)と連携が可能とな

れば改良土需要が増大し、採算性が向上する。

また、採算性の試算は現在の焼却灰処分単価をもとに行っているため、将来的に処分場の確保が難しくなり、処分単価が高騰する場合には、採算性が確保されることも考えられる。

さらに、山砂採取や残土処分、焼却灰処分は環境負荷を伴うため、これらの観点を踏まえて事業実施の方向性について考える必要がある。

(4) 市場性・流通性の評価

焼却灰を下水道工事の埋戻用の土質改良材として用いることを考える場合、改良土需要が十分にあるため、平成17年度以降の焼却灰発生想定量に対しても、発生量の全量を土質改良材として用いることが可能である（平成17年度以降の焼却灰と土の混合重量比率＝1：6.2＝2：12.4＞2：8）。よって、焼却灰リサイクル先あるいは処分先確保の観点からは、焼却灰の土質改良材としての活用は有用な施策である。

5. 課題整理

今回の課題を以下に示す。

(1) 環境への配慮

新材採取や残土処分は環境負荷を伴うため、これらを踏まえて発生土の再利用の方向性を探る必要がある。

(2) 改良土の市場性

下水道分野だけで考えると、改良土需要も限られることから他事業との連携を検討する必要がある。

(3) 他事業との連携の検討

埋戻材として、改良土を利用する場合、道路部局との調整が必要となる。このようなりサイクル事業は、市場・流通の確保が重要なポイントであることから、他事業との連携を検討する必要がある。

●この研究に関する問い合わせは 研究第二部長
研究第二部主任研究員
研究第二部研究員
研究第二部研究員

篠田 康弘
長谷川隆之
中西 康博
藤浦 哲士