

製紙工場から排出されるペーパースラッジ灰の土木材料としての特性

Characteristics of Paper Sludge Ash Discharged from Paper Mills as for Civil Engineering Materials

城戸 優一郎* 西本 聡** 佐藤 厚子***

Yuichiro KIDO, Satoshi NISHIMOTO, and Atsuko SATO

北海道は製紙業が盛んで苫小牧市、江別市、釧路市などに製紙工場がある。製紙業では古紙を再生するときにペーパースラッジが発生し、減容化を目的として燃焼することからペーパースラッジ灰（PS 灰）が発生する。北海道で発生する PS 灰のほとんどは埋立処分され、有効利用が進んでいない。そこで土質基礎研究室で行ってきた石炭灰の土木材料への改良手法を適用できないか検討することにした。また製紙工場は火力発電を行っているためさまざまな燃焼灰（石炭灰、灰プラスチック固形燃料灰（RPF 灰））が発生する。これらも土木材料への検討対象とした。

土木材料としての改良方法は2種類検討した。粉体状の燃焼灰に加水後、セメントを添加する利用、もうひとつは燃焼灰を造粒機に入れ、水、セメントを添加し、粒状にしての利用とした。これら2種類の方法により改良した燃焼灰について、施工性、盛土としての強度、周辺土壌へ与える影響について検討した結果、次のことが明らかになった。

- ① 今回検討した燃焼灰はセメントと水を添加することで有害物質の溶出が抑制され、盛土材としての強度も満たし、盛土材として利用可能である。
- ② 石炭灰を造粒化することで凍上抑制材、下層路盤材として利用できる。

《キーワード：燃焼灰；盛土材；造粒化；環境基準》

In Hokkaido, where the paper industry flourishes, there are paper mills in the cities of Tomakomai, Ebetsu and Kushiro and other areas. In the paper industry, paper sludge is generated when used paper is recycled. The paper sludge is combusted to reduce the total volume, and, as a result, paper sludge (PS) ash is produced. Most PS ash generated in Hokkaido is disposed of and its effective reuse is not promoted. This study investigates the potential application of the technique to convert coal ash into a civil engineering material, as developed by Geotechnical Division, to address the absences of the effective reuse of PS ash. Since paper mills generate thermal power, a variety of combustion ash (coal ash and RPF ash) is consequently discharged. The application of these types of ash as civil engineering materials is also to be covered by this study.

Two methods of converting ashes into civil engineering materials are studied: one is to add water and then cement to combustion ash for powder form usage, and the other is to put combustion ash in a granulating machine and add water and cement for granule form usage. Based on the study of processed combustion ash's potential for effective use, strength as embankment and impact on the surrounding soil, the following points were clarified:

- ① By adding cement and water to combustion ash used in this study, the elution of harmful substances is inhibited, and combustion ash becomes strong enough to be used as an embankment material and also feasible to be used for such purposes.
- ② By granulating coal ash, it can be used as anti-frost and subbase course materials.

《Keywords: combustion ash, embankment material, granulated, environmental quality standards》

1. はじめに

製紙業では古紙を再生するときにペーパースラッジ (PS) が発生し、これを減容化するために燃焼している。このため、ペーパースラッジ灰 (以降 PS 灰) の処分が問題になる。北海道では PS 灰が埋立処分され、有効利用が進んでいる状況にない。

そこで石炭火力発電所から搬出される石炭灰の土木材料への改良方法^{1) 2)}を PS 灰に適用し有効利用ができないか検討した。また製紙工場は火力発電を行っているため PS 灰以外にもさまざまな灰が排出されている。今回検討した王子製紙苫小牧工場では石炭灰と RPF 灰が発生し、これらの燃焼灰も検討対象とした。本報は王子製紙苫小牧工場から排出される 3 種類の燃焼灰について、加水して締固めたものや造粒化したものを①盛土材としての利用、②凍上抑制材としての利用、③下層路盤材としての利用について室内試験を行うとともに、石炭灰、RPF 灰について盛土を試験施工した結果をまとめたものである。

2. 燃焼灰の性質

試験には石炭灰、PS 灰、RPF 灰を使用した。各燃焼灰の物性値を表-1に示す。写真-1は上に各発電燃料、下に燃焼灰を示している。

いずれの燃焼灰もほとんど水を含まず細粒分が多いので、施工時の飛散が懸念される。燃焼灰の土壤環境基準項目³⁾の溶出量は表-1に示す。通常、土壤環境基準は工場跡地など人為的な汚染の可能性がある場合に適用するが、燃焼灰の周辺土壌への影響がないこ

とを確認するために準用した。測定項目は27項目あり、表-1には基準値を超えた項目および六価クロムの溶出量のみ示している。

石炭灰はオーストラリア、中国、ロシア産等の石炭を燃やしたものである。黒色で細粒分が多く90.5%を占め、フッ素、ホウ素、セレンの溶出量が土壤環境基準を満たさない。

PS 灰は製紙工程で発生するペーパースラッジ (PS) とバーク (樹皮)、助燃材として石炭を燃焼させた灰である。ペーパースラッジは古紙から再生パルプを取り出す時に再生できない紙の繊維が短いものや紙に含まれている顔料を分離したものである。PS 灰は灰色で石炭灰に比べ最大乾燥密度が低い。PS 灰はフッ素の溶出量が土壤環境基準を超過した。

RPF 灰は RPF (Refuse Paper & Plastic Fuel)、石炭、ペーパースラッジ、廃材チップ、廃タイヤの燃焼灰である。RPF は事業所が排出する紙とプラスチックゴミをペレット状にしたものである。RPF 灰は茶色で、pH や最大乾燥密度は石炭灰と同じ値を示す。フッ素、セレンの溶出量が土壤環境基準を超えた。

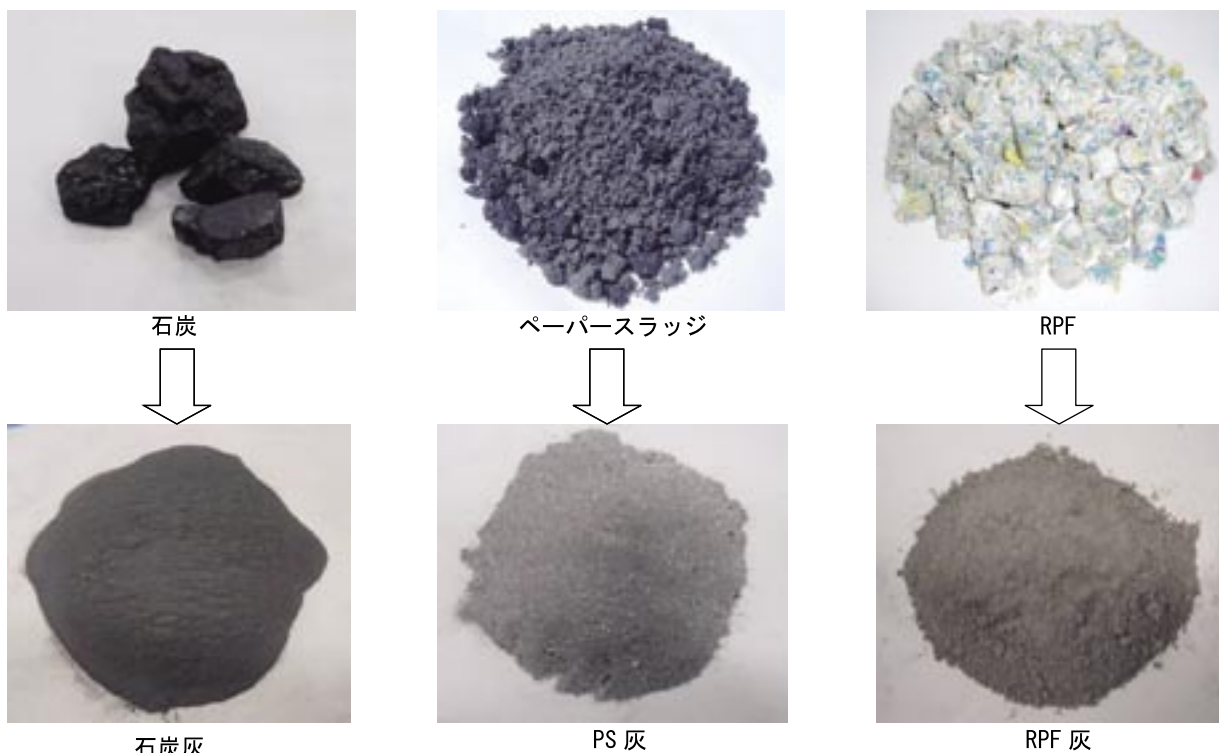
3. 試験方法

3.1 燃焼灰の改良方法

石炭灰、PS 灰、RPF 灰は土壤環境基準項目を満足せず、周辺地盤を汚染する恐れがあり、そのままの状態では土木材料として利用することはできない。また燃焼灰には水がほとんど含まれず、加水しなければ施工が難しい。以上のことを改善するため、加水による施工性と盛土強度の向上、セメント添加による有害物質

表-1 燃焼灰の物性値

灰種		石炭灰	PS灰	RPF灰
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)		2.167	2.232	2.200
含水比 (%)		0	0	0.4
粒度特性	礫分 2mm~75mm (%)	0	0	0
	砂分 75 μ m~2mm (%)	9.5	73.5	7.8
	細粒分 75 μ m以下 (%)	90.5	26.5	92.2
液性限界 LL (%)		N.P.	N.P.	N.P.
塑性限界 PL (%)		N.P.	N.P.	N.P.
pH		11.9	11.6	12
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)		0.956	0.670	0.966
最適含水比 W_{opt} (%)		48.1	85.0	54.4
土壤環境基準項目		基準値		
フッ素 (mg/L)		0.8	5.2	3.7
ホウ素 (mg/L)		1.0	4.78	0.22
セレン (mg/L)		0.01	0.161	0.005
六価クロム (mg/L)		0.05	0.014	0.008
				0.044



写真－１ 発電燃料と燃焼灰

の溶出を抑制する効果と盛土強度の増加を期待し、燃焼灰に水とセメントを添加することにした。本検討では燃焼灰を加水して締固める方法と造粒化する方法で改良した。造粒化は燃焼灰にセメントと水を加え、ドラム状の容器の中で回転して行う。造粒物は作製直後に強度がないため、１ヶ月程度の気中養生が必要となる。造粒物は粒径を大きくする（写真－２に示す）ことで下層路盤材に適用できる粒度分布⁴⁾となる。また粒径が大きくなるため造粒化したものは飛散しない材料となる。

3.2 改良の目標値

燃焼灰を盛土材として利用する際には、必要となる強度と周辺の土壌へ悪影響を与えないことを満足していなければならない。基準となる強度は施工性、盛土の安定性の両方を満足させる値である。

施工性を満足させる目標強度は普通ブルドーザが走行可能なコーン指数 $q_c = 500 \text{ kN/m}^2$ 以上⁵⁾とした。盛土の安定性は「北海道における不良土対策マニュアル（案）」⁶⁾に従い７日養生後の一軸圧縮強度 $qu_7 = 150 \text{ kN/m}^2$ 以上とした。一軸圧縮試験は６日気中１日水浸養生した供試体で行い、盛土が水浸することを考慮している。周辺の土壌への影響評価は土壌環境基準で行うこととした。

造粒化した石炭灰、PS 灰について盛土材以外に凍



写真－２ 造粒化した燃焼灰

上抑制材、下層路盤材としての検討を行った。凍上抑制材としての適否は、凍上試験⁷⁾を行い、凍上様式がコンクリート状凍結で凍上率が20%未満を判定基準とした。下層路盤材は修正 CBR 試験による修正 CBR 値が30%以上⁴⁾とした。なお、2003年度に地盤工学会により「凍上性判定のための土の凍上試験方法」⁸⁾が基準化されており、凍上速度による凍上性判定の目安が示されている。今後、地盤材料の凍上性を判定するには地盤工学会基準を適用するのが望ましいと考える。

4. 試験方法

4.1 加水後に締固めた燃焼灰

各燃焼灰について改良の目標値を満足する含水比、セメント添加率を求めた。含水比は締固めが可能な最少の含水比、最適含水比そして、最少含水比と最適含

水比の中間値とした。

それぞれの含水比について適量セメントを添加した。使用したセメントの種類は六価クロムが溶出する恐れのない高炉セメントB種とした。施工性、盛土の安定性の両方を満足する配合条件のうち、実際に作製した供試体について粉体状利用で基準値を超えた環境基準項目と六価クロムの溶出量を測定した。

4.2 造粒化した燃焼灰

燃焼灰の造粒化はそれぞれ次のように行った。

石炭灰を造粒する含水比は最適な造粒ができる30%前後とし、セメント添加率を2、5、10%とした。

PS灰を造粒する含水比は40%前後とし、セメント添加率を2、5、10%とした。

RPF灰は含水比40%前後とし、セメント添加率を5、10、15%とした。

5. 土木材料としての検討結果

5.1 加水後に締固めた燃焼灰

5.1.1 石炭灰

所定の水とセメントを混合した石炭灰を締固め、コーン貫入試験を行った結果、含水比20、34、48%で、セメント添加率0～20%の範囲で2000kN/㎡以上を示し、普通ブルドーザが走行可能であることを確認した。

次にセメント添加率と一軸圧縮強さの関係を図-1に示す。セメント添加率が増加するほど一軸圧縮強さが増加する傾向が見られる。同じセメント添加率の場合、含水比が高いほど一軸圧縮強さ大きい。これは含水比が高いことによりセメントの水和反応が促進され⁹⁾、強度が発現したと考えられる。含水比20%ではセメント添加率4%、含水比34%では3%、含水比48%では3.5%で目標値150kN/㎡を満たすことがわかった。

次に加水後に締固めた石炭灰について土壌環境基準を満足するか溶出試験を行った。セメント添加率5%で含水比が20、34、48%について測定し、結果を表-2に示す。含水比20%の場合のみ土壌環境基準を満たしている。以上より含水比20%、セメント添加率5%で盛土材に利用できる。

5.1.2 PS灰

石炭灰と同様に締固めた後、コーン貫入試験を行い、含水比20、40、60%でセメント添加率0～10%の範囲において2000kN/㎡以上を示し、目標値を満足した。

次に加水後に締固めたPS灰のセメント添加率と一

軸圧縮強さの関係を図-2に示す。セメント添加率の増加にしたがって一軸圧縮強さも増加している。含水比20%ではセメント添加率4%、40%ではセメント添加率2.5%で目標値を満たした。一方、含水比60%ではセメント添加率0.4%であり、セメントをほとんど添加しなくても盛土の安定性の目標値に近い一軸圧縮

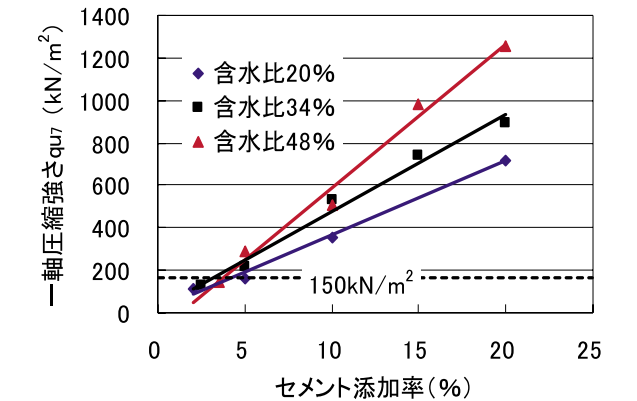


図-1 改良した石炭灰の一軸圧縮強さ

表-2 石炭灰の土壌環境基準項目における溶出量

	石炭灰	セメント添加した石炭灰		
含水比(%)	0	20	34	48
セメント添加率(%)	0	5	5	5
	基準値(mg/L)			
フッ素	0.8	1.2	<0.01	<0.01
ボウ素	1.0	4.78	0.22	0.22
セシ	0.01	0.161	0.008	0.01
六価クロム	0.05	0.014	0.012	0.007

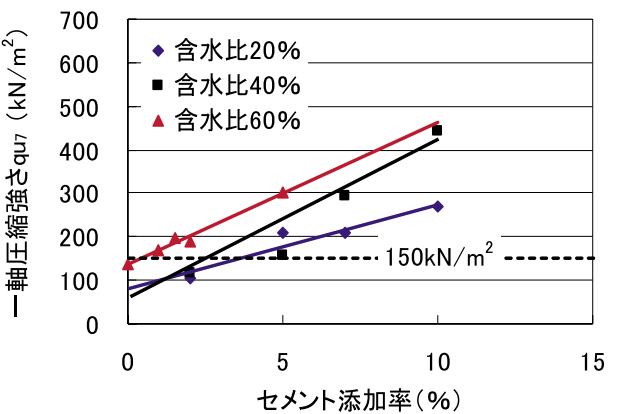


図-2 改良したPS灰の一軸圧縮強さ

表-3 PS灰の土壌環境基準項目における溶出量

	PS灰	セメント添加したPS灰			
含水比(%)	0	60	60	60	60
セメント添加率(%)	0	0	1	2	5
	基準値(mg/L)				
フッ素	0.8	52	<0.01	<0.01	<0.01
ボウ素	1.0	0.22	0.06	0.07	0.06
セシ	0.01	0.005	<0.001	<0.001	<0.001
六価クロム	0.05	0.008	0.004	0.003	0.009

強さが確認できた。セメントの添加量が少ないほど改良費用が少なく済むことから、PS 灰の含水比を60%とし、有害物質の抑制効果を検討した。

表－3 に加水後に締固めた PS 灰から溶出する土壤環境基準項目の溶出量を示す。セメント添加率に関わらず土壤環境基準を満足することがわかった。以上の結果から含水比60%、セメント添加率1%で盛土材に活用できる。実際に使用する盛土高、法面勾配によってはセメントを添加せずに含水比を60%として利用できる。

5. 1. 3 RPF 灰

水とセメントを混合して RPF 灰を締固め、コーン貫入試験を行った結果、含水比20、30、40%、セメント添加率0～5%の範囲において2000kN/㎡以上を示し、目標値を満足した。加水後に締固めた RPF 灰のセメント添加率と一軸圧縮強さの関係を図－3 に示す。石炭灰と同様に含水比とセメント添加率を増加するほど一軸圧縮強さが増加する傾向がある。RPF 灰は含水比に関わらず、セメント無添加においても盛土の安定性を確保できる目標値 $qu = 150\text{kN/㎡}$ を満足した。

含水比20、30、40%において目標値を満足したので、溶出試験を行う配合をセメント添加率1%にして検討を行った。結果は表－4 に示されるように、含水比20、30%で土壤環境基準を満足した。以上より含水比20～30%、セメント添加率1%で盛土材に利用できる。

5. 2 造粒化した燃焼灰

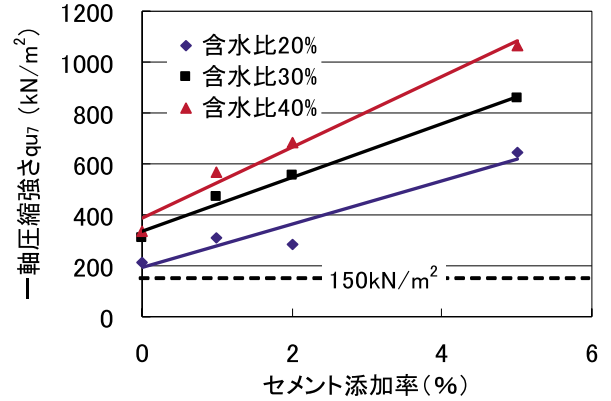
5. 2. 1 盛土材としての利用

造粒化した燃焼灰は作製したすべての条件で $qc = 2000\text{kN/㎡}$ 以上あり、目標値を満足した。そこで、作製した各燃焼灰の供試体について環境基準項目を測定し、結果を表－5、6、7 に示す。

石炭灰はセメント添加率5～10%、PS 灰は2～10%、RPF 灰は5～15%で造粒化を行うことにより土壤環境基準項目を満たし、盛土材に利用できる。

5. 2. 2 凍上抑制材、下層路盤材への検討結果

下層路盤材に適用できる粒度分布⁴⁾を考慮した結果、含水比34%、セメント添加率10%の造粒化した石炭灰と含水比39%、セメント添加率5%の造粒化した PS 灰で凍上抑制材としての検討を行った。表－8、写真－3、4 に凍上試験結果を示す。造粒化した石炭灰は合格、造粒化した PS 灰は不合格となった。造粒



図－3 改良した RPF 灰の一軸圧縮強さ

表－4 RPF 灰の土壤環境基準項目における溶出量

		RPF灰	セメント添加したRPF灰		
含水比(%)		0	20	30	40
セメント添加率(%)		0	1	1	1
	基準値(mg/L)				
フッ素	0.8	3.7	0.7	0.7	0.85
ホウ素	1.0	0.24	0.35	0.5	0.65
セレン	0.01	0.061	<0.001	<0.001	<0.001
六価クロム	0.05	0.044	0.011	0.006	0.008

表－5 造粒化石炭灰からの土壤環境基準項目の溶出量

		石炭灰	造粒化石炭灰		
含水比(%)		0	29	36	34
セメント添加率(%)		0	2	5	10
	基準値(mg/L未満)				
フッ素	0.8	1.2	<0.01	<0.01	<0.01
ホウ素	1.0	4.78	2.1	0.14	0.04
セレン	0.01	0.161	0.012	<0.001	<0.001
六価クロム	0.05	0.014	0.014	0.011	0.011

表－6 造粒化 PS 灰からの土壤環境基準項目の溶出量

	PS灰	造粒化PS灰			
含水比(%)	0	36	39	43	
セメント添加率(%)	0	2	5	10	
基準値(mg/L未満)					
フッ素	0.8	5.2	0.4	<0.01	<0.01
ホウ素	1.0	0.22	0.16	0.1	<0.01
セレン	0.01	0.005	<0.001	<0.001	<0.001
六価クロム	0.05	0.008	0.011	0.02	0.024

表－7 造粒化 RPF 灰からの土壤環境基準項目の溶出量

		RPF灰	造粒化RPF灰		
含水比(%)		0	39	40	42
セメント添加率(%)		0	5	10	15
	基準値(mg/L未満)				
フッ素	0.8	3.7	<0.01	<0.01	<0.01
ホウ素	1.0	0.24	0.3	0.14	0.04
セレン	0.01	0.061	<0.01	<0.01	<0.01
六価クロム	0.05	0.044	0.01	0.011	0.008

表－8 造粒化した石炭灰、PS 灰の凍上試験結果

	基準値	石炭灰	PS 灰
凍上率 (%)	20% 未満	11.2	111.8
凍上様式	コンクリート状凍結	コンクリート状凍結	霜降状凍結
合格判定	—	合格	不合格

表－9 造粒化した石炭灰の修正 CBR 試験結果

	基準値	石炭灰
95% 修正 CBR (%)	30% 以上	79.7

化した石炭灰について下層路盤材への検討を修正 CBR 試験で行った。表－9 に修正 CBR 値を示す。造粒化した石炭灰の修正 CBR 値は30%以上を示し、下層路盤材に適用できることを確認した。なお、下層路盤材としての検討は凍上しないことが前提となるため、造粒化した PS 灰は適用できないと判断した。

6. 試験施工

室内試験の結果より、燃焼灰を土木材料に利用できることがわかった。そこで、苫小牧試験フィールドにおいて実際に施工ができるのか確認した。試験施工を実施した燃焼灰の基本物性値を表－10に示す。盛土は盛高 2 m、法勾配1:1.5、天端幅 4 m、盛土の長さ 6 m でセメント添加率10%とした造粒石炭灰と加水のみの RPF 灰を使用した。施工状況を写真－5 に示す。転圧後の盛土の乾燥密度を砂置換法により測定し、結果を表－11に示す。いずれの盛土も北海道開発局の基準締固め度である85%を満足し、安定した盛土ができた。施工後、9 ヶ月経過した盛土は崩れも見られず、現場で利用できることを確認した。(写真－6 参照)



写真－3 造粒化した石炭灰の凍上試験結果



写真－4 造粒化した PS 灰の凍上試験結果

7. まとめ

今回、試験をした製紙工場から排出される燃焼灰の土木材料への検討結果は次のようになる。

- ・ 石炭灰は適切な含水比とセメントの添加により加水して締固めたものと造粒化したもの、両方を盛土材として利用できる。また造粒化した石炭灰は凍上抑制材、下層路盤材としても利用できる。

表－10 施工に用いた材料の基本物性値

燃焼灰名		造粒石炭灰	RPF 灰
セメント添加率（％）		10	0
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.336	2.619
自然含水比（％）		34.9	24.8
コンシステンシー限界	液性限界（％）	N.P	N.P
	塑性限界（％）	N.P	N.P
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (％)		1.091	0.999
最適含水比（％）		41.2	53.7

表－11 試験盛土の密度

燃焼灰名		造粒石炭灰	RPF 灰
盛土密度 ρ_d (g/cm ³)		1.024	0.869
自然含水比（％）		33.9	25.5
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (％)		1.091	0.999
最適含水比（％）		41.2	53.7
締固め度		93.9	87



写真－5 施工状況



写真－6 9 ヶ月後の盛土状況

- ・ PS 灰は適切な含水比とセメントの添加によって加水して締固めたものと造粒化したもの、両方を盛土材として利用できる。盛土の条件によってセメントを混合せずに、水分調整のみで盛土材として利用することができる。
- ・ RPF 灰は適切な含水比とセメント添加を行うことにより、加水して締固めたものと造粒化したものの両方を盛土材として利用できる。

8. あとがき

石炭灰、PS 灰、RPF 灰に水とセメントを混合し、締固めたものや造粒したものを土木材料として利用が可能であることを確認した。今後は経年変化による有害物質の溶出量に変化がないか確認する予定である。

参考文献

1) 山澤文雄、西川純一、佐藤厚子：石炭灰の土木材

料としての利用、開発土木研究所月報、No.563、pp.4-14、2000.

- 2) 天野公人、西川純一、佐藤厚子：造粒化した石炭灰の地盤材料への適用性検討、No.593、pp.2-8、2002.10
- 3) 環境庁：土壌の汚染に係わる環境基準について、1991
- 4) 北海道開発局：道路・河川工事仕様書、2001.4
- 5) 日本道路協会：道路土工土質調査指針、pp.218-222、1986
- 6) 北海道開発局土木試験所土質研究室：北海道における不良土対策マニュアル（案）、pp.31-33、1985
- 7) 日本道路協会：道路土工排水工指針、pp.238-243、1988.6
- 8) 地盤工学会：凍上量測定のための凍上試験方法、凍上性判定のための凍上試験方法、新制定地盤工学会基準・同解説Ⅶ、2003.11
- 9) セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル、pp.26-27、2003



城戸 優一郎*
Yuichiro KIDO

北海道開発土木研究所
構造部
土質基礎研究室
研究員



西本 聡**
Satoshi NISHIMOTO

北海道開発土木研究所
構造部
土質基礎研究室
室長
技術士（建設・総合）



佐藤 厚子***
Atsuko SATO

北海道開発土木研究所
構造部
土質基礎研究室
主任研究員
技術士（建設・総合）