

# 沖縄における石炭灰有効利用検討調査

Utilization of unused fly ash for port construction projects in Okinawa

森浩章\* 鶴谷広一\*\*

MORI, Hirofumi and TSURUYA, Hiroichi

\* (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部 研究員

\*\* (財) 沿岸開発技術研究センター 理事・リサイクル研究部長

In order to achieve the goal of using fly ash in port construction projects in Okinawa, a study of its usability in surface treatment work and backfill work was carried out. The study organized technical challenges related primarily to design and confirmed that fly ash can be used for both types of work.

Key Words : fly ash , recycle , surface treatment work , backfill work , Okinawa

## 1. はじめに

一般産業も含んだ全国の石炭灰の発生量は年々増加傾向にあり、環境保全の観点から処分場の新規確保が困難になってきている。沖縄県内の石炭火力発電所から発生する石炭灰についても、現状の灰捨場埋立率の増加傾向から、5、6年後には灰捨場が満杯になるという問題を抱えている。

これまでも、石炭灰の有する軽量性やポゾラン活性等の物理的・化学的特性を生かし、石炭灰を表層処理やケーソン裏込め、SCP改良地盤等へ有効利用する試みが、官民あがいで調査・研究されている。また、旧運輸省の「港湾の技術開発五箇年計画」においても、建設費の縮減、リサイクル材料の実用化等が重点技術開発テーマとして掲げられている。

このような背景のもとで、沖縄における港湾整備事業への石炭灰の有効利用の実現を目指し、平成11、12年度の2ヶ年にわたり、発電所で発生する石炭灰の港湾工事への利用可能性について調査が行われた。

本論文は、沖縄において石炭灰利用の可能性が高いと考えられる表層処理工と裏込め工への検討結果について記述するものである。

## 2. 表層処理工への適用可能性

### 2.1 工法の検討

軟弱地盤上の人間の歩行や施工機械のトラフィカビリティ確保等を目的とした表層処理工は、従来、覆砂や、シートに覆砂をした工法が採用されていた。ここでは、これらの従来工法に代わる以下の2工法について検討を行った。

#### (1) 浚渫土混合方式

本方式は、セメントや石炭灰等を混合した石炭灰改良材を軟弱地盤の表層土と浅層混合機により攪拌・混合して強度を高め、版を形成して施工機械のトラフィカビリティを確保する工法である。表層土の性状が品質に大きな影響を与えるため、仕上がり品質にバラツキを生じる可能性が高いが、新規プラント建設の必要はない。設計に際しては、版の強度を大きくしようとするとき非常に多くの石炭灰改良材が必要となるため、強度と改良版厚を勘案して、石炭灰改良材の量が最小となるようにする。

#### (2) 石炭灰スラリー方式

本方式は、スラリー製造プラントにおいて、セメント、石炭灰および水を混ぜてスラリー状にしたものを、軟弱地盤の表層にポンプ圧送により打設し、施工機械のトラフィカビリティを確保する工法である。石炭灰スラリーの厳密な施工管理が可能であるため、所定の品質が確保しやすい。設計に際しては、石炭灰スラリーの厚みが工費に大きく影響するため、改良版厚を可能な限り薄くするようにする。

### 2.2 現場施工試験

上記2工法の実用化を図るためには、現場施工時の品質特性や施工性、ペーパードレーンによる打抜き可否等を確認する必要がある。今回、中城湾港新港地区において、各工法毎に広さ約20m×20mのヤードを確保し、現場施工試験及びペーパードレーンによる打抜き試験を実施した。表-1に試験概要を、表-2に基準配合を示す。なお、試験現場の原地盤は比較的良好な地盤であり、改良版の変形に関する評価は出来なかつ

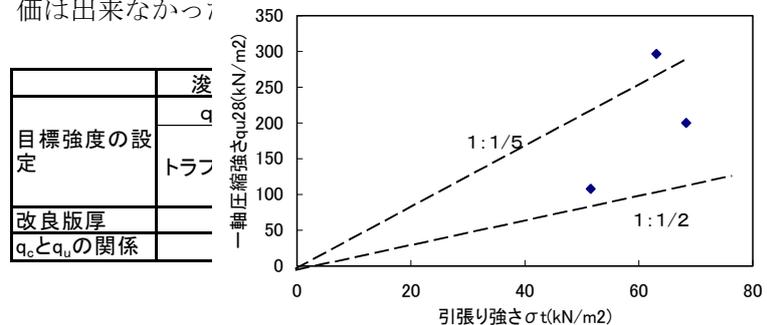


表-2 基準配合

浚渫土混合方式				
石炭灰	セメント	水	石膏	乾燥重量比
100	10	10	15	
浚渫土への改良材添加率は10%(乾燥重量比)				
石炭灰スラリー方式				
石炭灰	セメント	水	石膏	乾燥重量比
F(kg/m <sup>3</sup> )	C(kg/m <sup>3</sup> )	W(kg/m <sup>3</sup> )	W/C+F+B(%)	
966	30	548	55	

現場試験の結果、両工法とも計画通りの方法で問題なく施工できることが確認できた。ペーパードレーンによる打抜き最大圧力については、従来工法（覆砂+シート工法）による実績値よりも貫入圧力が下がり、打抜き時の状況においても機械の能力に十分余裕があることが確認できた。また、溶出試験結果より、含有重金属類が全て土壤環境基準以下であることも確認した。

## 2.3 強度特性の検討

### (1) 浚渫土混合方式

本方式は原地盤土の影響を受けるため、原地盤土の含水比に応じた最適な石炭灰改良材の添加率を把握する必要がある。ここでは、含水比 80, 120, 180% の試料に対する室内配合試験を行い、最適な改良材添加率や改良土の強度特性を確認した。

目標強度を確保するための石炭灰改良材の添加率を表-3 に示す。高含水比（120,180%）の土質では、単位セメント量が強度に対して支配的となり、セメント量を増やすことにより所要の強度を確保するための改良材添加率を低減できると考えられる。

割裂試験から求めた引張強さは図-1 に示す通り  $\sigma_t = 0.2 \sim 0.5q_u$  の範囲であり、設計上安全側の  $\sigma_t = 0.2q_u$  を採用した。

表-3 石炭灰改良材の最適添加率

含水比(%)	石炭灰改良材添加率(%)	qc計算値(kN/m <sup>2</sup> )
80	32	1440
120	45	1461
180	72	1450

### (2) 石炭灰スラリー方式

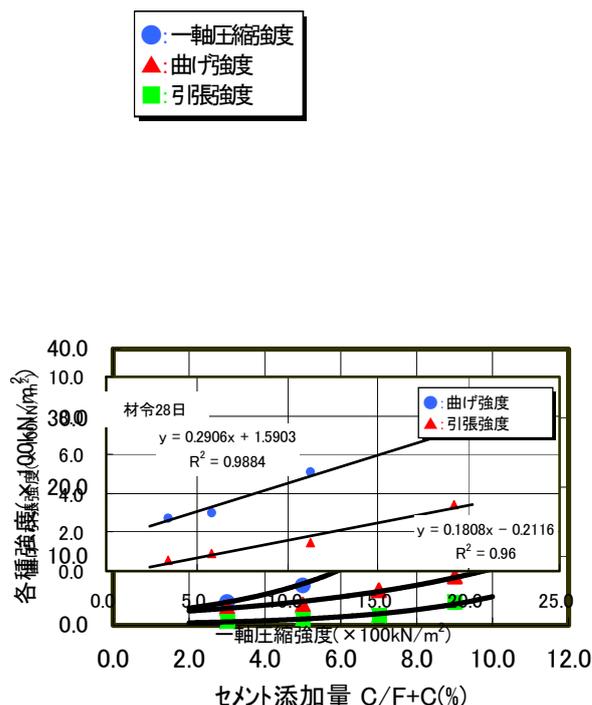
原地盤上に改良版を打設する石炭灰スラリー方式は、配合設計が原地盤土の影響を受けないが、設計上、最も厳しくなる曲げ応力と一軸圧縮強度との関係を把握することが重要である。また、経済性を高めるためには目標強度を高くして、改良版厚を薄くすることが有効である。よって、ここでは改良版の曲げ及び引張強度試験やペーパードレーンの限界貫

入圧力を把握するための改良版貫入試験を行った。

今回の試験により得られた一軸圧縮強度に対する曲げ強度の比率は改良版の強度特性上の値と比べて小さくなった。これは、図-2 に示すように、一軸圧縮強度がセメント添加量の増加に伴い指数関数的に増加しており、コンクリートに近い強度となれば、曲げ強度との比率もコンクリートにおける比率と同程度になることが予想される。従って、一軸圧縮強度と曲げ強度の関係は、図-3 に示す通り、切片を持つ直線となっているが、これは今回の試験の範囲における結果であり、実際は切片の無い全体としてはカーブを描いた曲線になると考えられる。

限界貫入圧力については、実機のペーパードレーン能力 25000kN/m<sup>2</sup> に相当する一軸圧縮強度は 360kN/m<sup>2</sup> となり、当初の目標強度 200kN/m<sup>2</sup> をより高くして、改良版厚を薄くできることを確認した。

なお、一軸圧縮強度は、材齢 28 日以降の増加が見られないため、設計上は材齢 28 日強度を用いて問題がないと判断した。



## 2.4 改良版厚の設計及び経済性の比較

浚渫土混合方式と石炭灰スラリー方式の試設計結果を表-4、表-5 に示す。ここで、改良版厚は、パンチングシェア法、二層地盤の支持力（曲げ応力、せん断応力）および地盤係数法により検討を行った結果 1,2) 地盤係数法による曲げ応力がクリティカルとなり、この地盤係数法により必要版厚を算出した。地盤係数法は三次元 FEM 解析よりも 3 割増し程度

図-2 セメント添加量と各種強度の関係

の値となるが、この増分は、実際の埋立地盤の不均一性等に対する安全率と考えた。

浚渫土混合方式は、含水比 80%の場合、計算上では改良版厚が 1m でも許容値以下であるが、施工時の仕上がり安定性を考慮し、版厚 1.5m についても試算した。石炭灰スラリー方式は、最大曲げ応力に対する許容曲げ応力に十分な余裕があるが、実地盤においては地盤の不均一性や不陸が予想されるため、最低版厚を 0.5m として試算した。

表-4 浚渫土混合方式の試設計結果

	ケース1	ケース2	ケース3	
含水比(%)	180	120	80	80
改良版厚 d(m)	1.5	1.5	1.0	1.5
改良版一軸圧縮強度(kN/m <sup>2</sup> )	82.0	82.0	82.0	82.0
改良材添加率(%)	72	45	32	32
許容引張応力(kN/m <sup>2</sup> )	16.0	16.0	16.0	16.0
最大曲げ応力(kN/m <sup>2</sup> )	8.80	3.90	9.43	2.51

表-5 石炭灰スラリー方式の試設計結果

	ケース1	ケース2	ケース3	備考
含水比(%)	180	120	80	
埋立地盤一軸圧縮強度 qu(kN/m <sup>2</sup> )	1.0	5.0	10.0	
改良版厚(m)	0.75	0.50	0.50	
最大曲げ応力(kN/m <sup>2</sup> )	50.4	22.2	14.0	
許容曲げ応力(kN/m <sup>2</sup> )	91.7	91.7	91.7	安全率3.0
許容引張応力(kN/m <sup>2</sup> )	51.1	51.1	51.1	

従来工法（覆砂＋シート）との経済性を比較した結果、今回の検討条件のもとでは、図-4 に示すように、浚渫土混合、石炭灰スラリー両工法とも、直接工事費で約 4 割程度安価となった。また、原地盤強度が低い場合は石炭灰スラリー方式が、逆に高い場合は浚渫土混合方式がわずかに安価となり、埋立地盤の性状に応じた両工法を使い分ければ、より経済性が発揮できると考えられる。

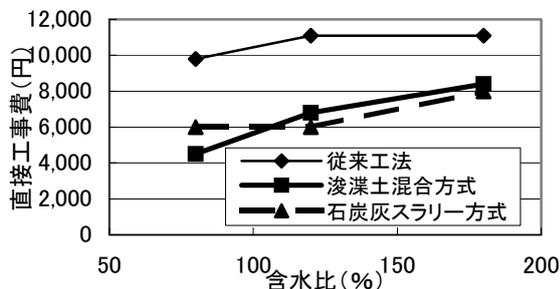


図-4 表層改良工の経済性比較

### 3. 裏込め工への適用可能性

#### 3.1 配合設計の検討

灰捨場内の既成灰を裏込め材として利用する場合は、目標強度を確保できる配合を把握するとともに、

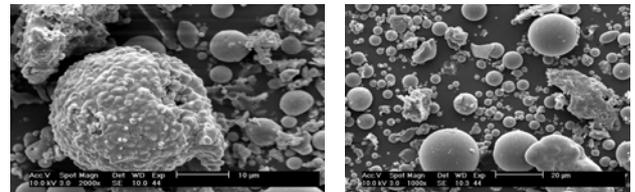
溶出試験を行い環境上の無害性を確認した上で、最も経済的な配合を決定する必要がある。

実施した配合設計の概要を表-6 に示す。その結果、以下のことが分かった。

表-6 配合設計の概要

使用石炭灰	具志川火力及び石川火力発電所より採取した既成灰
試験項目	物理・化学特性・物理・化学分析試験
	流動性・施工性・P-O-T、テーブルロ、スランプ試験
	環境特性・溶出試験

- ① 強度特性として、目標強度 400kN/m<sup>2</sup> を確保できるセメント添加量は、具志川産、石川産とも 5% となった。
- ② 流動性・施工性については、目標値（スランプ 20cm）を確保できる最適水粉体比は具志川産 53.8%、石川産 37.7% となった。また、無型枠による水中打設が可能となるスランプ 10cm を確保できる最適な添加剤（硫酸アルミニウム）の量は、具志川産 2%、石川産 1.7% となった。なお、無型枠による水中打設については 3.3 節で述べる。
- ③ 図-5 の電子顕微鏡写真のように、具志川産の石炭灰は石川産に比べ比表面積が大きいことから、所要のコンシステンシーを得るための単位水量が増大し、②のように必要なセメント添加量が多くなったものと考えられる。



具志川産

石川産

図-5 既成灰の電子顕微鏡写真

#### 3.2 最適形状の検討

石炭灰スラリーは従来の裏込め雑石よりも軽く、ケーソンの裏込めに使用すれば、ケーソン本体に作用する土圧を軽減できる可能性がある。

ここでは重力式岸壁の裏込め材として石炭灰スラリーを使用した際の最適な形状について、模式的な 3 タイプ（長方形、台形、L型）を対象とした試設計を行った。土圧の算定には、SGM等の固化地盤で適用される分割法を用いた。各裏込めタイプの最適形状を検討する際のパラメータを図-6 に示す。なお、基礎地盤の土質は沈下や液状化を起こさない良質な地盤と仮定した。

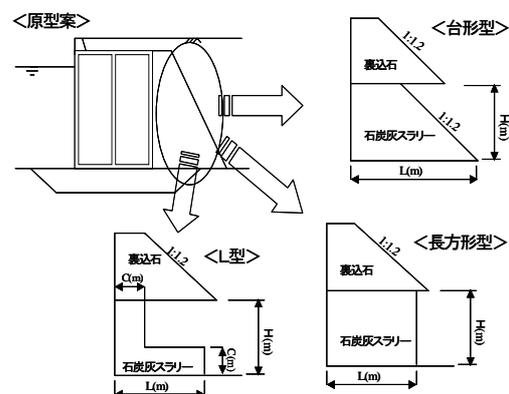


図-6 裏込め形状の最適形状検討時のパラメータ

検討の結果、ケーソン本体と裏込工における直接工事費のみを比較すると、表-7に示す通り、台形タイプが最も経済的となった。また、ケーソンの前面側にフーチングを付けることにより転倒に対する安全率を高め、よりケーソン幅を小さくできることが分かった。

表-7 裏込め最適形状の比較結果

	寸法(m)				幅m当たりの直接工事費(千円)						合計
	裏込高さ	裏込幅	裏込厚	ケーソン幅	ケーソン本体	ケーソン掘削	裏込石	水中型枠	裏込フーチング		
原案	—	—	—	85	1920	264	870	—	—	3054	
台形	5	11	—	75	1814	264	378	0	223	2679	
長方形	5	7	—	85	1920	264	378	188	149	2899	
L型	5	5	4	65	1920	264	378	195	179	2936	

### 3.3 無型枠水中打設の検討

石炭灰スラリーを台形状に打設するためには通常型枠が必要となるが、無型枠による施工が可能となれば、一層のコストダウンが図れる。そのためには、製造・運搬工程において過度の流動性を有しているスラリーを、打設時に短時間に硬化させ、スラリーの施工効率を上げる必要がある。そこで、コンクリートポンプ車での打設直前に微量の硬化促進剤（硫酸アルミニウム）を添加すればスラリーの流動性が抑えられ、設計上の断面を確保できる。

今回、裏込め勾配を上記の無型枠打設が可能となる最大勾配 1:2 に変更した場合の経済性について検討した結果、緩勾配にしたことによる裏込め材の体積増加分はあったものの、約 4%の直接工事費の削減が可能となった。

### 3.4 試設計による経済性の検討

実地盤を対象とした試設計に際して、原地盤は地盤強度が弱く、サンドコンパクションパイル工法（改良率 80%）により改良された地盤を想定した。

検討の結果、捨石に比べ重量の軽い石炭灰スラリーを裏込めに利用することにより、ケーソンに作用する土圧が軽減され、円弧滑りが起こりにくくなり、地盤改良範囲が小さくなった。今回仮定した条件においては、石炭灰スラリーを使用することにより、直接工事費で約 9%のコスト削減が可能となった。また、地盤がより軟弱であり、その軟弱地盤層が厚くなるほど、石炭灰の利用効果が大きくなることが分かった。

## 4 おわりに

沖縄における石炭灰利用検討として、表層処理工と裏込め工について、主に設計に関する技術課題について整理し、両工種への石炭灰の利用可能性を確認した。今後は、本検討で得られた成果を踏まえ、実工事への適用を進めていく必要がある。特に、表層処理工は、施工区画毎にその土質性状に応じた配合設計を行い、より経済性の高い施工を実現することが重要である。

石炭灰は、火力発電所等から発生する副産物であるが、低比重やポゾラン活性による潜在水硬性等の特長を有しており、これらを有効に活用できれば構造断面の縮小等、建設コストの縮減効果が期待できる。また、これら石炭灰等の産業副産物の港湾整備事業への利用用途拡大が、天然資材の使用量削減、処分場の延命化といった循環型社会の形成に貢献できるものと考えている。

### 謝辞

なお、本論文は、沖縄総合事務局発注の「沖縄における石炭灰利用検討会」（事務局：（財）沿岸開発技術研究センター）において実施された研究成果を取りまとめたものである。

### 参考文献

- 1) （財）沿岸開発技術研究センター：フライアッシュを軟弱地盤の表層処理に利用するための手引書（案），7p.，1995.
- 2) （社）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，56p.，1983.