

石炭灰の有効利用例について

Study on the effective use of the fly ash

(社)寒地港湾技術研究センター

パブリックコンサルタント(株)

北海道開発局室蘭開発建設部苫小牧港湾建設事務所

北海道開発局室蘭開発建設部苫小牧港湾建設事務所

○正員 金森 剛 (Tsuyoshi Kanamori)

下山裕也 (Hironari Shimoyama)

田中一章 (Kazuyuki Tanaka)

正員 北原繁志 (Shigeshi Kitahara)

1. 調査目的

我が国の土木材料におけるリサイクルは、施工上の副産物としてコンクリート塊等の再生利用が進められている。その一方、石炭火力発電所で発生する石炭灰の量は年々増加しており、産業廃棄物を有効利用する観点から、各種の検討が行われている。^{1), 2), 3)}

石炭灰の有効利用は現在セメント分野が大部分を占めているが、土木分野においても今後も増加していく石炭灰に対して、より有効な利用技術を開発していく必要がある。

石炭灰の性質は吸水性がよく、水硬性等の硬化特性を持つ。この性質を利用し、岸壁背後の裏込材として投入することにより、土圧の低減を図り、より経済的な設計を行うための研究を行った。この研究にあたっては、石炭灰の物性値を確認し、岸壁背後に利用するための設計及び施工方法を知る必要がある。

以上から、本研究は石炭灰の物性試験を行うことにより、必要な強度を得るための最低セメント配合量等石炭灰を用いた配合特性を把握すると共に、岸壁の裏込材としての機能を確保するための方法を検討したものである。

2. 調査項目

(1) 室内試験

裏込材に利用する事を目的として、必要な室内試験を行い設定条件に合った最適配合を定めた。

(2) 解析・検討

物性試験より得られたデータ及び軽量混合土に関する既存資料を元に施工・設計手法の検討を行った。

3. 室内試験

3.1 試験内容

石炭灰を岸壁の裏込材として利用するため、設定条件に合った最適配合を定める目的で以下の試験を実施した。

試験方法は「軽量混合処理土の配合試験」⁴⁾に準じて実施した。

(1) 石炭灰の物性試験

物性試験は、物性試験で使用する苫東厚真発電所2号炉から発生した石炭灰(WA)の、基本的な特性を把握する。

(2) 含水比設定試験

含水比設定試験は、石炭灰に海水を混ぜてスラリー状にしたものに、固化材を添加混合して作成した処理土の湿潤密度及び流動性を把握し、施工・品質を満足できる良好な

配合(最適含水比)を求める。

(3) 一軸圧縮強度試験

一軸圧縮強度試験は、含水比設定試験で得られた良好な含水比に固定して、固化材の添加量を変化させた処理土を作成し、その流動性、材料分離抵抗性、一軸圧縮強度等の特性を把握し、施工・品質を満足する良好な配合を求める。

なお、ここで目標とする一軸圧縮強度は軽量混合処理土の場合⁴⁾と同様に材令28日で200kN/m²の2倍の安全(割増率2)を見込んだ400kN/m²とした。

(4) 水中分離抵抗性試験

水中分離抵抗性試験は、一軸圧縮強度試験により得られた良好な配合の処理土について、室内水槽(水中分離抵抗性試験槽、図3-1)の海水中にトレミー管によって水中打設を行い、図3-2に示す場所から試料を採取し、湿潤密度、一軸圧縮強度の測定を行い、水中分離の抵抗性を把握する。

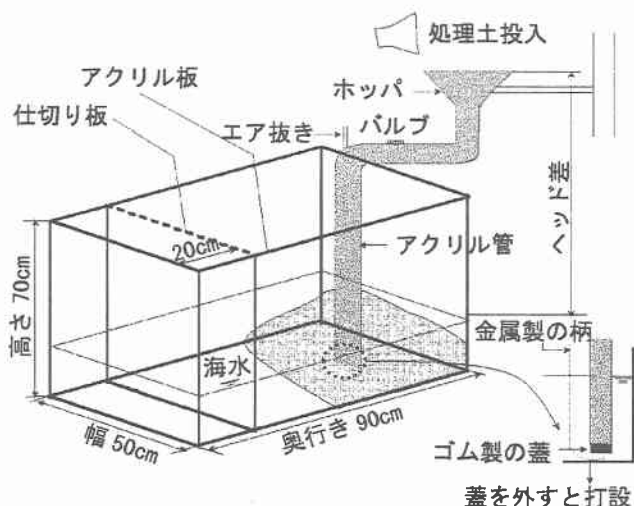


図3-1 水中分離抵抗性試験装置図

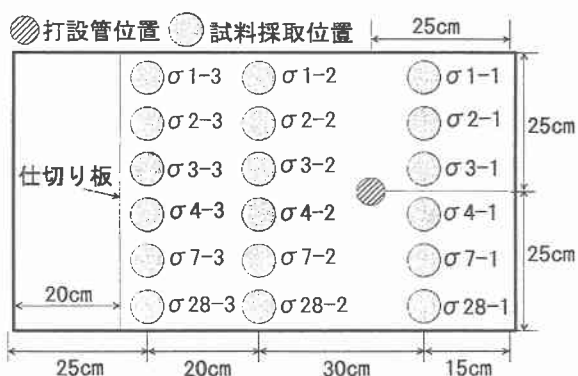


図3-2 試料採取位置

なお、ここで目標とする一軸圧縮強度は材令 28 日で、割増率を見込まない 200kN/m²とした。

3.2 試験結果

(1) 石炭灰の物性値

- 今回使用した石炭灰の物性値の特徴は以下の通り。
- ・土粒子の密度は 2.17g/cm³を示し、一般的な土（2.60～2.75g/cm³）と比べると小さい値である。
 - ・粒度組成は、シルト分主体で構成されている。
 - ・同種石炭灰の過去の文献^{1),2),3)}による特性と比較すると、土粒子の密度は下限値と類似し、粒度組成はシルト分がやや少なく粘土分がやや多く含まれている。

(2) 含水比設定試験

含水比設定試験による、フロー値と含水比の関係は図 3-3 に示す通りであった。過去の施工例^{5),6)}より得られた軽量混合土と同等な打設時のフロー値 200mm を示す含水比は 41%であった。

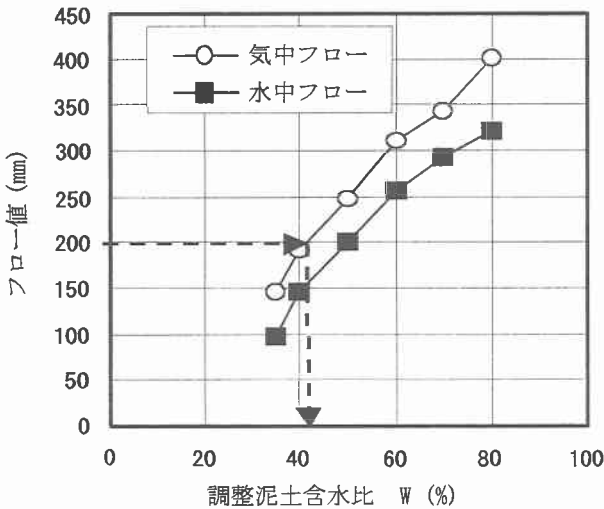


図 3-3 調整泥土含水比とフロー値の関係

(3) 一軸圧縮強度試験

一軸圧縮強さと固化材添加量毎の材令変化の関係を図 3-4 に示す。この中で目標強度 400kN/m²(28 日)は、固化物添加量が 30kg/m³以上で満足していた。

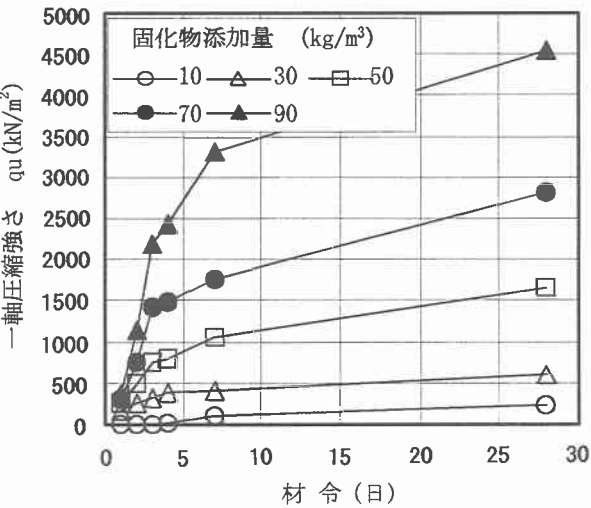


図 3-4 材令と一軸圧縮強さの関係

(4) 水中分離抵抗性試験

水中分離抵抗性試験における、一軸圧縮強さと固化材添加量毎の材令変化の関係を図 3-5 に示す。なお、目標強度 200kN/m²(28 日)は、全ての固化材添加量について満たしていた。

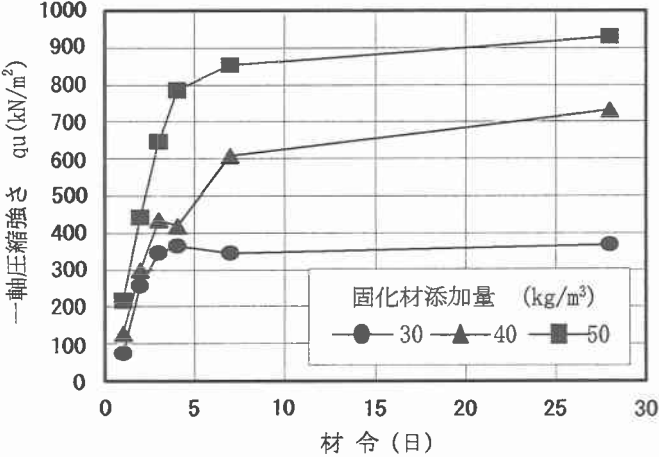


図 3-5 材令と一軸圧縮強さの関係

また、28 日の一軸圧縮強度について、採取位置による違いを示したものが表 3-1 である。これによると、セメント添加量 30kg/m³を除いて、打設位置から遠いほど強度が低下した。

表 3-1 採取位置による強度変化(材令 28 日、kN/m²)

		セメント添加量(kg/m ³)		
		30	40	50
採 取 位 置	σ 28-1	316.0	712.0	956.0
	σ 28-2	397.0	845.0	1052.0
	σ 28-3	394.0	637.0	786.0

4. 解析・検討

試験結果・整理により得られたデータを用いて、施工方法、施工管理、品質、設計（施工時の土圧、完成時の土圧）、利用に際した課題検討について検討を行った。

4.1 施工方法検討

投入方法は、過去の施工例^{5),6)}(表 4-1)より、軽量混合土がコンクリートポンプ車で圧送が可能たフロー値と同等の 200mm とし、含水比はこのフロー値を満たす値とした。

表 4-1 改良土別流動特性

改良土	気泡混合 処理土	発泡ビーズ 混合処理土	過去の石炭 灰投入事例
フロー値	200 mm	150 mm	150～250 mm
含水比	規定なし	規定なし	50～60%

また土圧は、施工時は型枠に液圧としてスラリー圧が作用し、硬化に従い静止土圧に変わるので、施工時の最大圧力は打設直後であるとした。スラリー単位体積重量(15.7 kN/m³)はコンクリート単位体積重量(22.6 kN/m³)より小さいため、型枠は水中コンクリートが打設可能なもので

あれば問題はない。過去に施工を行った例⁶⁾では、打設高は1m以内で、施工機械の能力は圧送ポンプの施工量は90～100m³/h程度であった。よって1回の施工高さは、利用する施工機械の能力で決定されるものとした。

4.2 施工管理検討

一軸圧縮強度試験結果から養生期間と強度の関係を把握し、打設1段あたりの養生期間設定の検討を行った。

水中分離抵抗性試験によると、3ケース全てにおいて2日目以降に目標強度の200kN/m²を超えた(表4-2参照)。

表4-2 セメント量と養生期間ごとの圧縮強度 (kN/m²)

セメント量 (kg/m ³)	養生期間 (日、水温 20℃)			
	1	2	3	4
30	75.4	256.0	343.7	363.3
40	129.7	297.3	435.7	419.7
50	215.3	440.7	646.0	785.3

注) 圧縮強度の数値は3供試体の平均値

過去の資料⁷⁾では、水温が5℃では25℃の時に比べ、同一養生期間で一軸圧縮強度が1/2以下であったため、打設水域の水温により養生期間の検討が必要となる。

4.3 品質検討

施工・設計上及び経済性を考慮し、含水比・固化材量(セメント添加量)の最適配合の検討を行った。

(1) 含水比

含水比の最適配合はポンプ圧送の施工性から決定されるため、その基準としてのフロー値(200mm)が得られる値(40%)を用いることとした。

(2) 固化材量(セメント添加量)

図3-4によれば、セメント量10kg/m³のケースは28日強度(400kN/m²)を満足しない。また、70及び90kg/m³のケースは強度が過大に発生するので経済性を考慮し、検討から削除した。

以上より一軸圧縮試験結果から最適セメント量を30～50Kg/m³と判断した。更に、水中分離抵抗性試験結果より、全てについて目標強度の200kN/m²(28日)を得られることを確認した。

4.4 設計検討(施工時の土圧)

石炭灰を裏込として打設する場合、石炭灰はスラリー状のものを利用する。この場合、土圧として構造物に働く荷重は液荷重であり、数時間後に硬化体となる。

過去に行われたスラリー土圧を求めた試験結果⁸⁾とスラリー圧を液圧として扱った場合を比較すると、試験より得られた土圧(0.3kgf/cm²)よりも計算値(0.384kgf/cm²)の方が高い結果であるのは、スラリー圧を液圧として求めたためである。実際の土圧はスラリーの状態により変化するが、流動性が上がればより液圧に近づく事となる。その為、危険側を想定して液圧の計算値を採用することとした。

【液圧とした計算値】

$$P = \gamma \times h = 1.60 \times 2.4 = 3.84 \text{ tf/m}^2 = 0.384 \text{ kgf/cm}^2$$

P: スラリー圧(tf/m²)

γ : スラリーの単位体積重量 … 1.60(t/m³)

h : スラリー打設高 … 2.4(m)

4.5 設計検討(完成時の土圧)

(1) 設計計算手法

完成時の土圧検討としては、土田(1999)⁹⁾の論文を参考にして、分割法による土圧計算を行うこととした。

分割法による土圧算定方法は、構造物の背後にすべり面を仮定し、すべり面と壁面に挟まれた土塊を分割し、それぞれの分割片の重量、浮力、すべり面上のせん断力、地震力に関する力のつり合いから土圧を計算するものである。

仮定した滑り面は、以下の①～③(図4-1)の通りである。

①モードⅠ: 固化処理土内部を切るすべり

②モードⅡ: 固化処理土に仮想き裂を考慮したすべり

③モードⅢ: 固化処理土の境界に生じるすべり

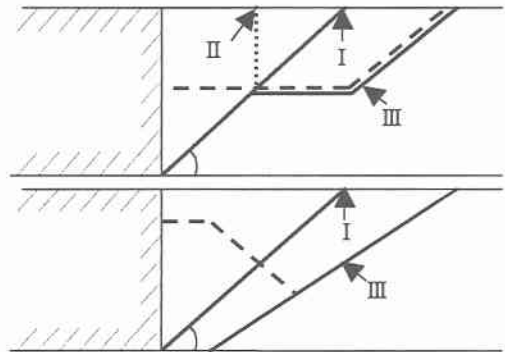


図4-1 固化処理土内の滑りモード(破線内が処理土)

(2) 他の施工との比較ケース

概略設計計算モデルは図4-2に示す3ケースとし、これらの土圧により堤体形状の比較を行った。

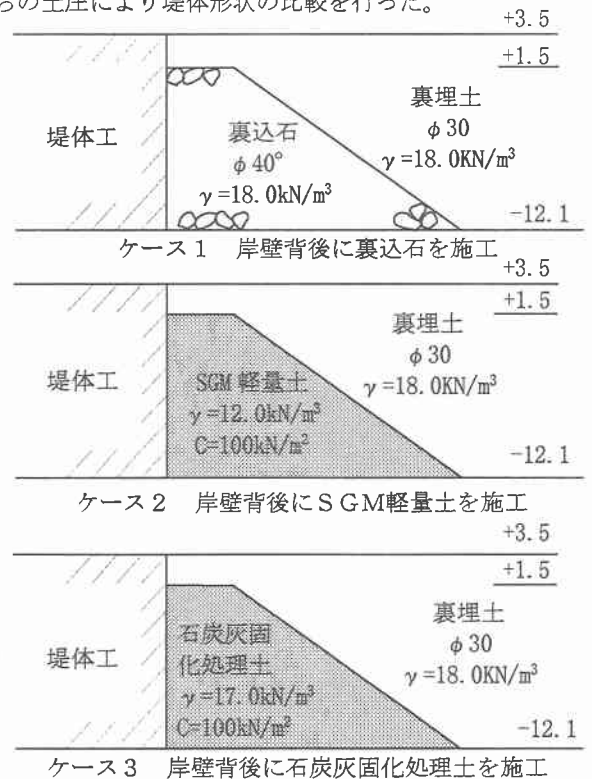


図4-2 検討ケース図

なお、この検討は滑動及び転倒に対して検討するものとし、地盤支持力等の考慮は行わないものとした。

(3)他の施工との比較結果

裏込石と改良土を比較すると堤体幅で大幅な縮減が図れた。SGM と石炭灰の堤体形状は同じであったが、安全率に違いがみられた。これは、単位体積重量の違いが影響を及ぼしている事によるものと考ええる。石炭灰の地震時計算結果で処理土下面付近に破壊モードⅠの土圧が発生しており、重量が重くなるにつれて自重により改良土が破壊され易くなると想定される。また、常時は石炭灰の単位体積重量が重い場合、静止土圧係数を使用する改良土範囲で土圧が大きくなり、安全率が多少下回る結果となった。

概算工費は、堤体幅の増加に関わる堤体工・基礎工のコストの影響が大きい結果となった。SGM と石炭灰との比較では石炭灰の材料費をゼロと考え、材料費はセメントのみであるとした事から結果的に石炭灰の投入の方がSGMの投入に比べ770千円/㎡程度安価となった。

4.6 利用に際した課題検討

今回の検討結果より、石炭灰を裏込材として利用する場合の課題を設計、施工、品質管理別にとりまとめた。

(1) 設 計

設計における課題を整理すると以下の通りである。

- ・一般的な裏込石形状（圧縮強度、単位体積重量、処理土勾配1:1.2）を想定して検討を行ったが、実施工時には規定値に拘らない最適形状及び強度を施工状況に合わせて検討する必要がある。
- ・処理土の破壊により発生する土圧は、処理土の強度の強化で防ぐことが可能となる。しかし、強度を上げるためのセメント量の増加は、単位体積重量の増加に影響を与えるため、設計時にある程度の余裕を見込む必要がある。
- ・処理土の載荷重が土圧発生の要因となる場合、軽量土または発泡樹脂系の材料を使用して載荷重を低減する複合処理工法も有効と思われる。
- ・土圧低減効果としては、施設背後に出来るだけ多く投入することが有効である。よって、土圧は処理土内部（発生モードⅠ）で発生させることが望ましく、土圧内部であれば改良強度を上げれば土圧低減効果は向上する。改良範囲が狭い場合は、処理土外の土圧となるため、土圧が最小となる投入範囲等の検討が必要である。

(2) 施 工

施工における課題を整理すると以下の通りである。

- ・施工時に1回の処理土投入量から打設高を決定する必要がある。
- ・処理土の流動性は打設速度とセメント量にもよるが、室内試験から打設勾配は1:12～13程度となっている。試験槽では打設位置を変えず、鉛直方向に3回に分けて打設を行った。実施工では投入面積から水平方向への打設管の移動手法の検討が必要である。
- ・単位体積重量の増加は土圧発生の要因となるため、処理土の打ち継ぎは、下段が上段処理土の荷重による圧密の影響が少なくなる強度が発生してから上段処理土の施

工を行うことが望ましい。

(3) 品質管理

処理土の破壊による土圧の増加が見込まれるため、処理土の強度については特に注意を払う必要がある。処理土品質の課題を整理すると、以下の通りである。

- ・試験結果より打設管から離れた位置で採取した試料については密度が減少傾向にあることから、材料分離による強度の低下について考慮する必要がある。
- ・実際の施工に関しては事後調査としてチェックボーリングのサンプリング試料から密度、一軸圧縮強度、含水比等の試験を行い、処理土の品質を確認する必要がある。

5. あとがき

今後も石炭の利用量の増加と共に、発生量が増加していくものと考えられている石炭灰の有効、かつ多量の利用が可能な方法の一つとして、セメントを適正に混合して固化処理をした石炭灰を、岸壁の裏込材として利用する事を想定し、室内試験及び設計・施工の検討を行った。結果、石炭灰は30kg/㎡のセメント混合で所定の強度を保つことが判った。更に、施工時は液体として検討し、完成後は硬体として分割法で取り扱い、設計することで、裏込材の材料として利用することが可能であると判断された。今後は、試験施工や実施工を通して問題点の再抽出や施工後の継続調査による精度の向上を図ることにより、石炭灰を有効かつ多量利用の方向性が確立されるものと考ええる。

6. 参考文献

- 1) 山澤 他(1998.2)：石炭灰による不良土改良効果、地盤工学会 北海道支部技術報告集 第38号 119p～124p
- 2) 松尾 他(1998.2)：石炭灰による高含水比埋込材の改良について、北海道開発局技術研究発表会 No.42 35p～42p
- 3) 山澤 他(1999.2)：石炭灰による流動化処理土への適用性に関する検討、地盤工学会 北海道支部技術報告集 第39号 197p～202p
- 4) (財)沿岸開発技術研究センター(1999)：港湾・空港における軽量混合処理土工法技術マニュアル
- 5) 運輸省酒田港工事事務所 他(1997.3)：平成8年度 酒田港石炭灰利用方策調査 報告書
- 6) 若築建設(株)北陸支店(2000.2)：フライアッシュ・セメント混合スラリーの施工報告(酒田港(外港地区)岸壁(-14m)工事)
- 7) 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所(1998.11)：酒田港における石炭灰の岸壁裏込め材への活用について、平成10年度 港湾技術シンポジウム(土質・構造部門：1998.11.5～6)資料
- 8) 小笹 他：石炭灰を護岸裏込材に利用する現場実証調査
- 9) 土田(1999.6)：港湾空港事業における軽量混合処理土工法の開発と適用事例、港湾技術研究所報告 第38巻 第2号、131p～167p