

セメント添加した石炭灰の岸壁裏込め材への利用

荘司喜博¹・高橋邦夫²・浅井 正³・角野 隆⁴

¹フェロー会員 工修 運輸省第一港湾建設局長 (〒951-8545 新潟県新潟市白山浦 1-332)

²正会員 工博 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所長 (〒951-8131 新潟県新潟市白山浦 1-332)

³正会員 工修 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所 (〒951-8131 新潟県新潟市白山浦 1-332)

⁴正会員 運輸省第一港湾建設局酒田港湾工事事務所長 (〒998-0061 山形県酒田市光ヶ丘 5-20-17)

発電事業などの副産物である石炭灰は、いまだに大量が産業廃棄物として処分されている。石炭灰は、セメントを添加して固化し、必要な強度をもたせることにより、軽量で高強度な地盤材料として利用できる可能性がある。そこで、石炭灰を固化処理した地盤から岸壁に作用する土圧の算定手法を提示し、土圧軽減効果を評価した。また、室内および現地で試験を行い、配合設計と施工条件を検討した上で、酒田港の大型岸壁建設工事で、約5万m³の石炭灰を裏込め工事に使用した。この結果、少量のセメント添加で(c/w = 5%)、碎石に相当する土圧低減効果を発揮する裏込め(地盤強度; $qu \geq 2.0 \text{ kgf/cm}^2 \approx 0.196 \text{ N/mm}^2$)が施工できること、また、建設コスト縮減の面でも効果があることが確認された。

Key Words : fly-ash, recycled materials, backfills of the quay, soil improvement techniques, cement stabilizer

1. はじめに

運輸省第一港湾建設局では、リサイクル材料の有効活用方策に関する種々の技術開発を行っている。本論文は、このうち石炭灰の岸壁裏込め材への利用に際して実施された検討と現地施工の結果について述べるものである。

石炭灰は、セメントの材料等の良好なリサイクル材として、平成8年度実績¹⁾で発生量の70%程度が再利用されているが、なお発生量が大きいため大量に廃棄物として埋立処分されている。しかし、石炭灰は、土と比べて軽量であること、セメントと反応して長期的に硬化強度が増大すること、等といった特徴をもっているため、セメント系の固化材と混合して岸壁等の背後に投入することにより、堤体に作用する土圧の軽減効果を期待できる。すなわち、良質な材料として活用できる可能性がある。

また、石炭灰が岸壁裏込め等の材料として活用されれば、通常用いられる石材の代替として資源のリサイクルが促進されるとともに、未利用灰の処理費用の削減や処分用地の延命などが期待される。さら

には、安価な材料となる可能性も高く、岸壁等の建設コストの縮減効果も期待できる。

そこで、石炭灰を事前混合により固化処理した地盤に対して、配合強度の特性や土圧の作用状態に関する検討を行い、酒田港外港地区(-14m)国際ターミナルの岸壁工事に於いて、現地への適用を試みることにした。

2. リサイクル材としての石炭灰の特性

(1) 石炭灰の基本物性

a) 石炭灰の定義とその物理的な特性

石炭灰とは、一般に、石炭の燃焼した残滓と定義される。石炭の主燃焼部分は、地中で化石化した植物の炭素であるが、燃焼によりほとんどが焼失してしまう。燃焼後には、石炭となる植物の成育過程で採取したミネラルと、植物の地中埋設時・堆積時および石炭採掘時に混入した土砂が灰として残る。これらが、石炭灰の成分の大部分を構成する。

石炭灰は、燃焼後の回収方法によって、フライアッシュとボトムアッシュ(粒径 ϕ 0.1 mm以上)に分

類される。ボイラーで発生した高温ガスとともに浮遊して移動する灰の内、沈降しなかった灰を電気集塵器で強制的に吸着させて排出した灰がフライアッシュである。また、自沈降あるいは強制沈降させて排出した灰をシンダーアッシュと呼ぶ。シンダーアッシュとフライアッシュは混合されて扱われることが多く、この混合物もフライアッシュと呼ばれる。それぞれの粒径は、シンダーアッシュで0.1 mm～1 mm、フライアッシュで0.1 mm以下であるが、化学特性は大差ない。

また、石炭灰のうち、燃焼システムより排出されたばかりの灰のことを新生灰(または乾灰、新灰等)という。新生灰は、水と遭遇すると、含有する遊離CaOの水和反応により硬化する。一方、処理地で加水し、約1年以上経過して、水和反応がほぼ終了した灰のことを、既成灰という。再利用されない石炭灰は、水和反応による熱の発生や体積膨張を防ぐために、加水処理を施して既成灰とした後に、埋立処分される。

今回、有効利用を想定している石炭灰は $d_{50} = 0.03$ mm程度のフライアッシュの既成灰であり、 $\phi > 0.1$ mmの灰の混入率は20%程度である。

b) 石炭灰の化学特性

石炭灰は、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 を主成分とした材料であるが、これは岩石・土・粘土、砂等といった他の土木材料とほとんど同等である。石炭灰中のCaOの含有量は、土砂とくらべると大きい。また、石炭灰には、 SiO_2 を多く含むため、セメントを添加した場合にポゾラン活性が期待できる。

(2) 石炭灰の再利用の状況

フライアッシュセメントおよび混和材としての再利用については、JIS規格(JIS R5213、JIS A6201)や「アスファルト舗装要綱」に利用基準があり、平成8年度は発生量の約40%がセメント原料として再利用されている¹⁾。この他の利用先を含めて、発生量の約70%が再利用されているが、それでもまだ約30%が未利用の状態にあり、その大部分は、通常、海面埋立や陸上処分地での処分が行われている。石炭灰には、

- ・石炭の産地や燃焼条件により、灰の品質が一定でない。
- ・石炭灰の産出場所が偏っており付加価値が低い場合は輸送費が高くつく恐れがある。
- ・一般にpHが高い、等

の課題があるにもかかわらず、水を加えることにより硬化する性質をもつことから、比較的多方面で再利用されている。このため、付加価値の向上、利用

基準の整備などを図れば、さらに再利用が促進されるものと考えられる。このため、通常、路盤材・路床材と同程度あるいはそれ以上の強度を有する材料としての活用やSCP(サンドコンパクションパイル)における砂の代替材としての使用等、様々な方面で新しい技術開発の取り組みが行われている(たとえば、高橋²⁾)。

(3) リサイクル材の有効利用に関連する法規

石炭灰等、通常不要物として廃棄されるものをリサイクル材料として活用を図る場合に、その取り扱いを定める法律として、リサイクル法、廃掃法、海洋汚染防止法等がある。

「再生資源の利用の促進に関する法律(以下、リサイクル法)」は、産業活動および土木工事にともない副次的に得られる副産物や不要物のうち有用なものを「再生資源」と定め、利用の促進を図ることを目的として制定された。同法では、再生資源のうちとくに利用を促進すべきものとしてスラグ、石炭灰および建設副産物等を「指定副産物」に定めるとともに、指定副産物を排出する事業を行う者を「第三種指定業者」としてさまざまな義務を規定している。

また、一般に占有者が不要とし、かつ他者に有償で売却できなくなったものを廃棄物として、その取り扱いを「廃棄物の処理及び清掃に関する法律(以下、廃掃法)」で規定している。石炭灰も、有効活用されない場合には、同法に定める産業廃棄物として扱われる。一旦、廃掃法が適用されれば、それが産業廃棄物である場合、排出事業者が自ら処理するか、または法による許可を得た収集運搬業者と処分業者に処理を委託しなくてはならない。

船舶、海洋施設、航空機などからの、油、有害液体物質、廃棄物の海洋への排出については、「海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律(以下、海洋汚染防止法)」により規定されている。同法によれば、何人も、海域において、船舶等から廃棄物等を排出してはならないとしている。この法律上の廃棄物にあたるかどうかは、物質を海洋に排出する時点で不要物であることが客観的に判断されるか否かによって個別に判断される。

以上、石炭灰等をリサイクル材料として活用する場合には、これらの関係法規における取り扱いに注意し、基準等を満足させる必要がある(たとえば、横田・中島³⁾)。

3. 石炭灰固化処理地盤の設計上の取り扱い

(1) 裏込め材の設計上の効果

石炭灰を岸壁裏込め材としてリサイクルした場合の設計上の取り扱いについて、要求される機能を抽出し、検討を行った。港湾の施設の技術上の基準・同解説(運輸省港湾局監修⁴⁾)では、「重力式係船岸において良質な裏込めを施工した場合、土圧強度を減少させて壁体の設計を行うことができる」とし、裏込めの効果として一般に次の項目を期待している。

- ・内部摩擦角の増大による土圧の軽減
- ・透水性の増加による残留水位の低下
- ・裏込め土砂の流出防止

石炭灰は、それ自身では粘性土と同等の地盤強度しかもたないが、水和反応にともなう材料の硬化やセメントの添加による地盤強度の増加が期待できる。ただし、今回の工事に使用する石炭灰は既成灰であるため、水和反応の効果をほとんど期待できない。

このため、石炭灰にセメントを添加し固化させることにより、地盤強度を増大し、壁体に作用する土圧を軽減させることとした。このときの土圧軽減効果は、地盤の粘着力の増加により考慮することとし、固化処理地盤を粘性土地盤と同様にして評価する

(2) 石炭灰固化処理地盤の土圧の算定法

a) 分割法を用いた作用土圧のモデル化

重力式の岸壁は、作用する外力に対して構造物の自重で抵抗する構造となっている。岸壁に作用する外力としては、通常、載荷重、壁体自重、土圧および残留水圧、浮力、地震力、船舶のけん引力を考慮する。岸壁が大型になるほど、作用土圧が大きくなるため、これに抵抗する構造物の自重を確保する必要がある。このため、石炭灰固化処理地盤の土圧軽減効果について検討し、土圧の計算方法を確立することは、合理的に岸壁の安定検討を行う上で重要である。

通常、土圧を計算するとき用いる物部・岡部の土圧算定式では、土層が水平方向に半無限に成層していると仮定して土圧を与えている。このため、背後の裏埋めの影響を考慮できない。そこで、固化処理地盤の検討では、土田ら⁹⁾の提案した分割法による土圧計算手法をもとに作用土圧を式(1)に示すようにモデル化した。

分割法による土圧算定手法の基本的な考え方は、図-1のようにすべり面の水平からの傾斜角 α を構造物に作用する土圧がもっとも大きくなるように設定し、すべり面と構造物に囲まれた土塊を鉛直方向に微小要素に分割して、この帯片(≒それぞれの分割

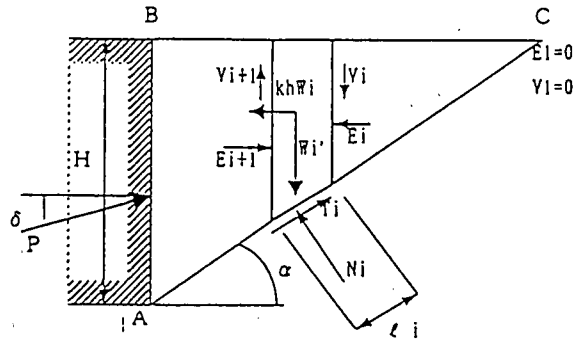


図-1 分割法による土圧計算方法の基本概念

3つの破壊モード

- ・モードⅠ：石炭灰固化処理土内部を切るすべり
- ・モードⅡ：石炭灰固化処理土に仮想き裂を考慮したすべり
- ・モードⅢ：石炭灰固化処理土の境界に生じるすべり

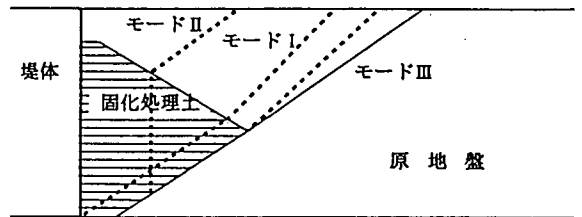


図-2 石炭灰固化処理土の破壊モード

片)同士の力のつり合いから土圧を求めるものである。ここで、 W_i ：帯片の全重量、 W_i' ：帯片の有効重量、 l_i ：帯片のすべり面長さ、 H ：壁面の高さ、 k_h ：水平震度、 α ：すべり面角(≒帯片の傾角)であり、 E_i 、 V_i ：それぞれ、断面力(内面力)の水平成分および鉛直成分、 P ：土圧合力、 δ ：壁面摩擦角である。

式の誘導において、Bishopの式が成り立つと仮定する。さらに、つり合いの状態を仮定しているので、安全率 $F_s = 1.0$ として式を整理すると式(1)のようになる。

$$P \cos \delta = \frac{\sum W_i k_h + \frac{\sum c_i l_i \sec \alpha + \sum W_i (\tan \alpha - \tan \phi_i)}{1 + \tan \alpha \tan \phi_i}}{1 + \tan \delta \frac{\tan \phi_i - \tan \alpha}{1 + \tan \alpha \tan \phi_i}} \quad (1)$$

実際の分割法の計算では、簡易 Bishop 法と同様に、鉛直力 $\sum V_i = 0$ 、壁面摩擦角 $\delta = 0^\circ$ として計算を行っている。また、転倒モーメントの計算のため土圧分布の計算をし、土圧合力の作用位置を求めている。このとき、壁面の各深さ d_i (今回の計算では現地盤の土層をさらに細かく数層に分割して作用位

表-1 分割法を用いた地震時の安定計算結果

裏込材	土圧算定	動水圧	モード	滑動	転倒	端趾圧	支持力
砕石	現行基準	無し	—	1.10	1.99	45.9 tf/m^2 (450) kN/m^2	1.09
	分割法	無し	Ⅲ	1.15	2.08	43.9 (431)	1.14
		有り	Ⅲ	1.02	1.89	48.3 (474)	1.00
固化処理地盤	分割法	無し	Ⅲ	1.29	1.92	47.0 (461)	1.16
		有り	Ⅲ	1.15	1.82	48.9 (480)	1.04
満たすべき安全率等の許容値				>1.0	>1.1	<70 (<686)	>1.0

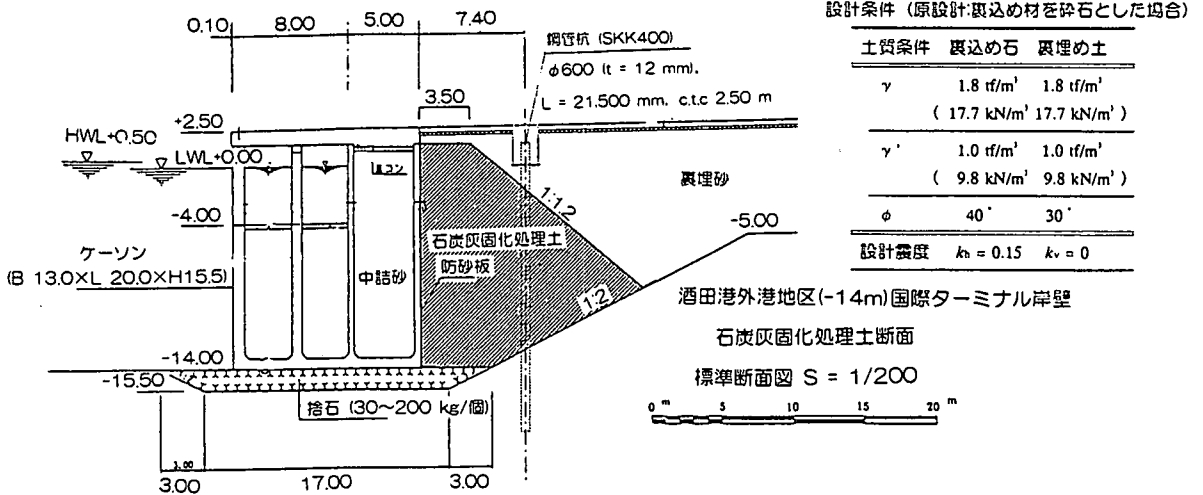


図-3 岸壁の断面図

置を与えた)で土圧合力 P_{dj} を算定し、その差分を用いて土圧 p を表現する。

b) 石炭灰固化処理地盤の破壊形態

分割法を用いて土圧の計算を行う場合、石炭灰の固化処理土の破壊として、土田ら³⁾の提案した

- I. 石炭灰固化処理土内部を切るすべり、
 - II. 石炭灰固化処理土に仮想き裂を考慮したすべり、
 - III. 石炭灰固化処理土の境界に生じるすべり、
- の3つを考える。モードIIの仮想き裂は、北詰・山本⁹⁾が実験結果にもとづき提案した引張クラックを考慮した複合すべりモデルに相当する。それぞれの破壊モードは図-2に模式的に示すとおりである。そして、図中の3つのモードに対して、それぞれ崩壊面を仮定して土圧を計算し、一番危険な場合の値を与える。

また、計算にあたり、固化体の強度を粘着力で与え、粘性土と同様の取り扱いを行っている。

(3) 施工実施断面についての安定計算結果

酒田港外港地区(-14m)国際ターミナルの岸壁は、当初、砕石を裏込め材に使用する条件で設計し、岸

壁ケーソンの断面を決定していた。これを対象として、ケーソン等の諸元は変更せずに、裏込めのみ砕石から石炭灰に変更して施工することを検討し、最終的に実施した。

分割法を用いて、裏込めに砕石を用いた場合と背後地盤を固化処理した場合の岸壁ケーソンの安定計算を行った結果を表-1に示す。比較のために、現行基準にもとづいて安定計算を行った原設計についても併記する。表中、滑動・転倒・支持力の検討結果については安全率で示し、端趾圧については tf/m^2 (kN/m^2 で示した値を併記)でその値を示している。検討に使用した岸壁の断面図は図-3のとおりである。

はじめに、砕石を裏込め材に用いた原設計を分割法の計算結果と比較することにより、計算手法の妥当性を検証した。現行基準による原設計に対して、分割法で動水圧を考慮しない場合の計算結果は全体的に安全率が大きくなり、動水圧を考慮した場合には安全率が小さくなる。現行基準の設計法では、見掛けの震度を簡略法を用いてRWL上も含め全層に一定値で与えることにより、地震時土圧を大きめの値で与え、この安全しろの中に動水圧が含まれるも

表-2 試験した石炭灰の物理特性

試験項目	(単位)		試験項目	(単位)	
土粒子密度	ρ_s (g/cm ³)	2.356	透水係数	k ($\times 10^{-3}$ cm/s)	5.830
自然含水比	w (%)	34.16	CBR	(%)	2.59
粒度			圧縮指数	C_c	0.139
礫分	2 mm - 75 mm (%)	0	一面せん断試験		
砂分	75 μ m - 2 mm (%)	21.8	粘着力	(kgf/cm ²)	0.511
シルト分	5 μ m - 75 μ m (%)	44.6		[(N/mm ²)	0.0501]
粘土分	5 μ m 未満 (%)	33.6	せん断抵抗角 (度)		43.7
最大粒径	(mm)	3.42	三軸圧縮試験		
最大密度	ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.234	粘着力	(kgf/cm ²)	0.336
最小密度	ρ_{dmin} (g/cm ³)	0.907		[(N/mm ²)	0.0330]
湿潤密度	ρ_t (g/cm ³)	1.601	せん断抵抗角 (度)		31.8

表-3 試験した石炭灰の主な化学組成 (%)

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	遊離 CaO	未燃物
68	3.5	21	1.2	0.9	<<0.1	0.2	0.1 以下	3.6

のと考えている。これに対して、分割法では RWL 以下の各層で層毎に見掛けの震度を与えて土圧の計算を行っているため、動水圧を別途考慮する必要があるためと考えられる。次に、分割法を用いた碎石と改良土の計算結果について、最もクリティカルとなっている支持力および滑動安全率を比較してみると、改良土の方がどちらの安全率も大きくなっている。より安定性の高い断面になると判断できる。

上記の設計計算上必要とされる改良強度は、裏込め石の場合と土圧合力がほぼ等しく、滑動安定性が同等となるように設定した。石材の材料強度は ϕ で与えるのに対して、石炭灰固化処理地盤は c 材であり、力学的な取り扱いは異なる。ここでは、 $q_u = 2$ kgf/cm² (≈ 0.196 N/mm²; 粘着力換算 1 kgf/m² ≈ 0.098 N/mm²)とした場合に、岸壁の安定計算結果は、滑動・転倒・端趾圧・支持力のすべてで許容値を満足し、碎石の場合と同等以上のケーソンの安定が確保された。

改良土の単位体積重量は $1.5 \sim 1.6$ tf/m³ ($\approx 14.7 \sim 15.7$ kN/m³)と碎石に比べて小さく、ケーソンへの作用土圧が小さくなるため、滑動安全率については大きな値を示している。したがって、石炭灰固化処理地盤の改良強度を高めることにより、堤体の幅を小さくできる可能性がある。このことは、石炭灰固化処理地盤の適用により岸壁構造物についても、さらに経済的な設計を実施できることを示している。

また、改良土の土圧分布は改良強度が大きくなると壁面に等圧で分布するようになるため、土圧合力

の作用位置が高くなり、転倒安全率は低下する傾向にある。ただし、今回の場合では転倒安全率に余裕があるため、滑動安全率の減少の方が全体の安定性の評価には重要となる。

今回、改良強度から土圧強度を評価するときに、上載圧や側方土圧の影響を含めて、様々な仮定を設けているが、今後はそれらの妥当性について詳細な検討を行う必要がある。このとき、得られた土圧強度の分布形状と構造物全体の安定との関係を様々な構造形式について確かめることが必要である。

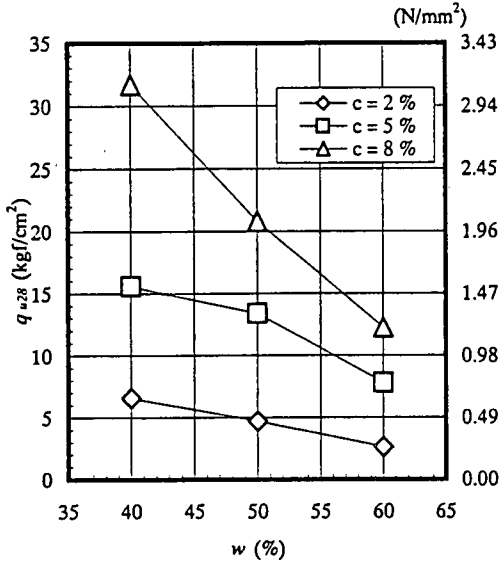
4. 室内配合試験

(1) 試験の目的

本試験は、酒田港臨海部に立地する石炭火力発電所から産出された、実際に有効利用の対象となる石炭灰について、リサイクル材料として利用した場合の有効性の確認と配合決定等の基礎資料を、室内試験により得るために実施した。試験は、配合試験に加えて、物理特性、化学組成、溶出試験についても実施した。以下にそれぞれの室内試験結果を示す。

(2) 石炭灰およびスラリーの基本物性

基本物性試験の試験結果を表-2、3に示す。試験した石炭灰は既成灰で、物理的特性、化学組成ともに、一般的な石炭灰の基本物性^{7),8),9)}と概ね一致している。湿潤密度 ρ_t は 1.6 g/cm³程度と通常の土とくらべると軽い材料であり、土圧の軽減に対して有利



(a) 含水比と28日強度

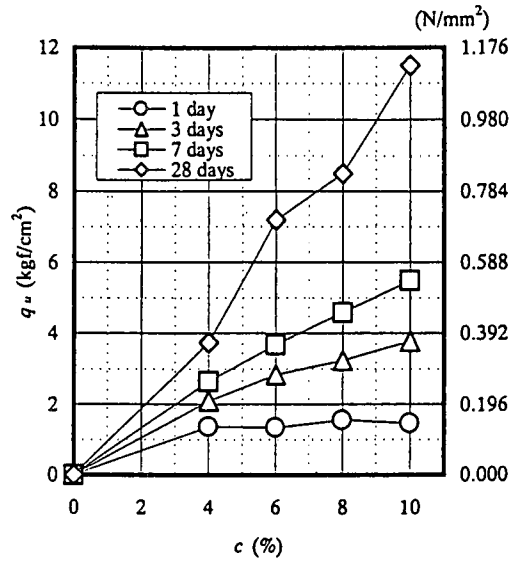
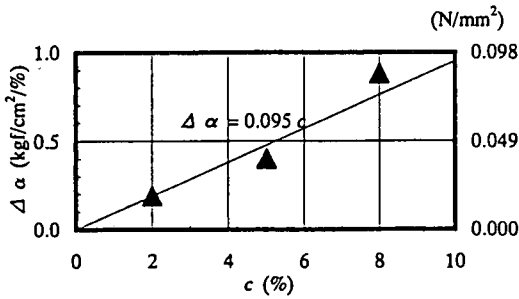


図-5 セメント比と一軸圧縮強度の関係



(b) 含水比の増加による28日強度の減少率

図-4 一軸圧縮強度に与える含水比の影響

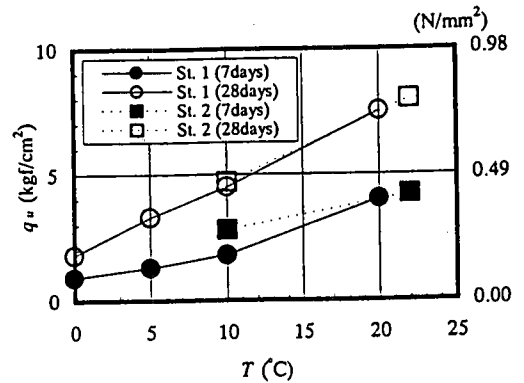


図-6 一軸圧縮強度に与える養生温度の影響

である。また、粒径および透水係数等から砂と粘土の間に分類され、シルトとして扱えるものと考えられる。既成灰なので、遊離 CaO の自硬性による強度の増加が期待できないことから、裏込め等の材料として用いるには、セメント添加などの処理が必要である。この石炭灰中の遊離 CaO は CaO 含有量 1.2 %のうち 0.1 %以下であり、新生灰時(ほぼすべての CaO が遊離状態)と比べて著しく小さく、石炭灰中の水和反応がほぼ完了した既成灰の特徴である。SiO₂ は 60 %以上含んでおり、ポゾラン活性を期待できる。なお、溶出試験の結果から、石炭灰からの有害な重金属等は検出されなかったが、溶出液中の pH は 10 ~ 11 に増大し、強アルカリ性を示した。

(3) 室内配合試験の結果

室内配合試験は、所要の地盤強度を与えるために必要なセメント量を把握するとともに、含水比や養生水温が強度低下に与える影響を検討するために、実施した。

ポンプ圧送によるスラリー打設を想定しているため、石炭灰にセメントを添加してスラリーを作成する場合のスラリーの混合やポンプ圧送等における施工性(ワーカビリティ；流動性、非分離性等)を確保する必要がある。しかし、スラリー中の含水比を大きくすると強度が低下するため、ワーカビリティの確保に最低限必要とされる含水比 50 ~ 60 %以上の範囲において、含水比の変化による強度の低下について検討した。その結果を図-4に示す。

表-4 配合条件

石炭灰	既成灰
セメント	JIS ポルトランドセメント
含水比 w	55 %
セメント混合量 c	5 % (石炭灰乾燥重量に対して)
目標強度	$q_{u28} = 4 \text{ kgf/cm}^2 (\approx 0.392 \text{ N/mm}^2)$
設計強度	$q_{u28} = 2 \text{ kgf/cm}^2 (\approx 0.196 \text{ N/mm}^2)$

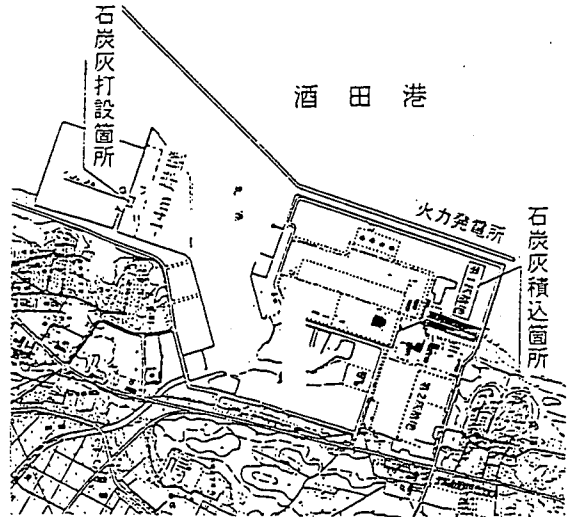


図-7 現地試験場所位置図

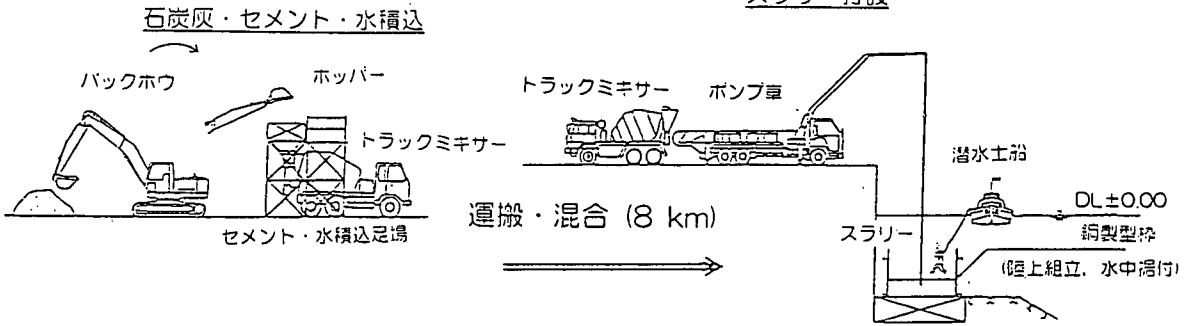


図-8 現地試験概要図

図より、含水比の増大により 28 日強度が低下すること、セメント比 c が大きい程、含水比の増加に応じた 28 日強度の低下の割合が大きいことがわかる。今回対象とした石炭灰では、含水比 1% の増加に対する 28 日強度の減少率 $\Delta \alpha$ ($\text{kgf/cm}^2/\%$) は、セメント比 c に対して $\Delta \alpha = 0.095 c$ の関係にあった。このため、セメントの強度低下を最小に抑えるため、含水比は、施工性を最低限確保できる値として、55% に設定した。

図-5 にセメント比と強度との関係を示す。強度発現が進まぬ材令の若い段階では、セメント比 c による違いは顕著ではないが、材令が高くなると、セメント比 c に比例して強度が増大しているといえる。7 日強度と 28 日強度の強度の比を強度増加率 β として定義すると、セメント比 c に対して平均して $\beta = 1 + 0.11 c$ の割合で強度増大がみられた。

また、対象岸壁が建設される海域は、年間を通して水温が 5 ~ 25 °C 程度の間で変化する。強度は養生温度によって大きく変化するの、水温による

強度の低下について検討した。その結果を図-6 に示す。7 日強度、28 日強度はともに、養生水温が 5 °C (冬季) の場合、25 °C (夏季) の場合とくらべて、同じ配合条件で強度が 1/2 以下となることがわかる。そこで、効率的な施工によって施工時期を夏季に限定し、施工時の養生温度として 25 °C を確保することとした。

以上の知見にもとづいて、配合を検討した結果、含水比 55%、養生温度 25 °C で一定とした場合、一軸圧縮強度の目標値を 28 日強度で確保するためには、セメントの添加量は石炭灰の乾燥重量に対して 5% 必要であると計算された。なお、28 日強度の目標値は、3.(3) で得られた設計上必要な地盤強度に対して安全率を 2 とし、 $q_{u28} = 2 \text{ kgf/cm}^2 \times 2 = 4 \text{ kgf/cm}^2 (\approx 0.392 \text{ N/mm}^2)$ と設定した。安全率の値は、事前混合処理工法の施工事例¹⁰⁾における室内現場強度比の値が 1.0 ~ 2.2 の範囲にあることから、安全側の値として仮に 2 と与え、5. に示す現地打設試験でその妥当性を検討することとした。

5. 現地打設試験

(1) 試験の目的

現地打設試験は、室内配合試験結果と比較することにより、実施工のための配合条件の決定に必要な室内強度と現場強度の比を設定するとともに、現地におけるスラリー打設の施工性の確認を目的として実施した。また、このとき打設時の周辺海域の水質の変化についても観測し、周辺の海域環境への影響についても調査した。

(2) 試験地点および試験方法

現地打設試験は酒田港外港地区内の図-7に示す海域で実施した。実施地点は岸壁の建設現場内にあり、外海とは既に据え付け済みのケーソンにより締め切られている。なお、試験に先立ち、当該地点の水中に4.2 m × 4.2 mの鋼製枠組みを作成し、型枠として使用した。

使用した石炭灰は、4.に述べた灰であり、採取現場で所要量のセメントおよび水と混合させた後、ミキサー車で練り混ぜを行いながら現地まで運搬し、打設を実施した。打設試験の概要は図-8のとおりである。配合条件は、4.に述べたとおり、目標強度 $q_{u28} = 4 \text{ kgf/cm}^2$ (0.392 N/mm^2)を満足するように設定し、現場強度でも目標強度が得られることを確認した。配合条件の詳細は、表-4に示すとおりである。スラリーは3 mの高さまで1回で打設し、打設高さが強度発現に与える影響をみることにした。

スラリーの打設後、層別にコアを採取し、密度、含水比、一軸圧縮強度等の物性の確認を行った。さらに、打設地点の海表面においてpHおよび濁りの発生について観測を行っている。なお、事前に同じ石炭灰を用いて室内溶出試験を実施し、重金属等の溶出がないことを確認している。

(3) 現地での打設状況と施工性の確認

写真-1は現地での石炭灰スラリーの打設状況を示したものである。打設試験により、含水比を55%程度確保すれば、スラリーをパイプ圧送する上で、十分な流動性が確保されることが確認された。しかし、現地試験中、スラリーの流動性は含水比の減少に敏感に影響を受けた。このため、ミキサーから良好に打設するためには、含水比を55%程度確保できているか確認しながら、慎重に作業を進める必要がある。

流動性が十分に確保されている条件下では、打設面の平坦度が良好に保たれることが潜水士により確認された。スラリーの打設開始時には、細粒分の舞

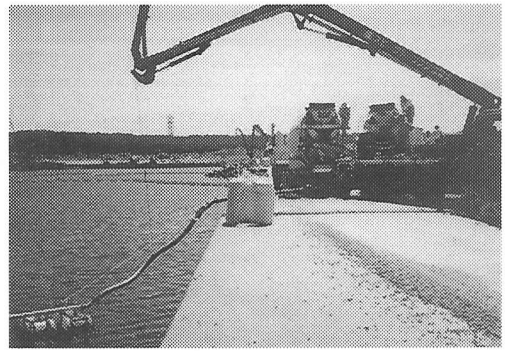


写真-1 石炭灰スラリーの打設状況

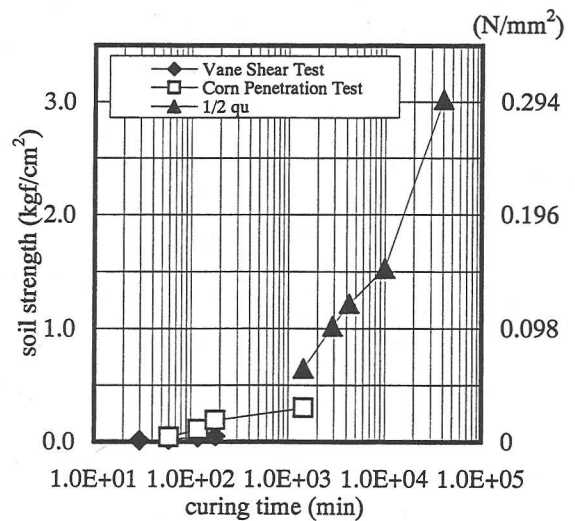


図-9 石炭灰スラリーの短期硬化特性

い上がりにもなう灰白色の濁りが発生するが、数分程度経過すると解消された。その後、連続して打設している間には、濁りの発生は確認されなかった。

また、海水中のpHについては、バックグラウンド(≒打設前の海表面での値)のpH = 8.1に対して、スラリー打設位置のほぼ直上の海表面は、打設時でもpH = 8.3 ~ 8.4と僅かしか変化せず、水質基準上の問題はなかった。

(4) 石炭灰スラリーの短期硬化特性

図-9は、スラリー打設直後からの経過時間による強度の発現特性について試験した値を、粘着力に換算して表示したものである。スラリーの強度は、打設後3時間(= 180分)まではハンドベーン試験で測定した。その後、1日目(= 1440分)まではポータブルコーン試験により測定し、1日目以降は一軸圧縮試験によりスラリーの強度を求めている。なお、こ

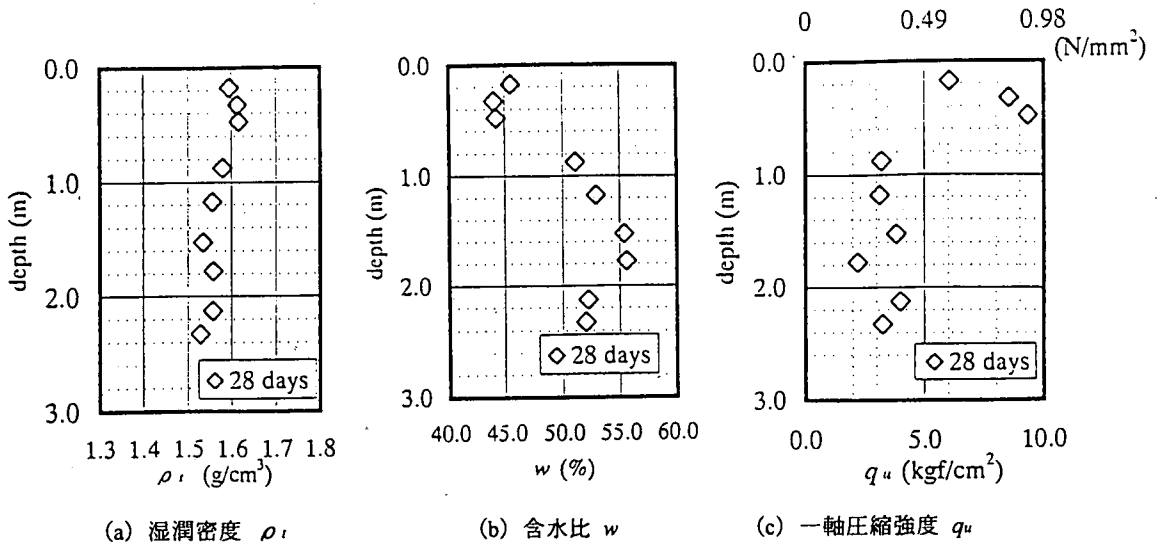


図-10 現地打設試験結果

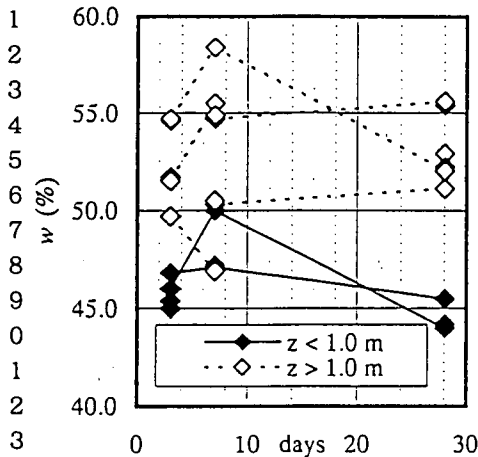


図-11 打設後の各層の含水比の経時変化

これらの試験には、打設時に別の容器に成型して海中養生したスラリーを用いている。

図より、打設後約3時間 (= 180分) 後から、強度の増加がみられ、このあたりの時間帯からスラリーの硬化が始まるものと考えられる。その後、強度は急激に増加し、2日目には粘着力が 1.0 kgf/cm^2 ($\approx 0.098 \text{ N/mm}^2$) 程度にまで強度が増加する。

ここで、スラリーの1回の打設厚が大きな場合には、硬化後もスラリーの流体圧が側方に作用する拘束圧として残留するといわれている。したがって、打設時には、1回の施工厚が大きくなるようにすること、次回に打設するスラリーの自重を下層の前回打設部分が支えられる程度スラリーが硬化していること、を確認する必要がある。下層の強度を、

流出防止を目的としてヘドロや汚泥を原位置に封じ込めるときに必要なとされる地盤強度¹¹⁾と同程度を確保すればよいと考えて、粘着力換算で 1.0 kgf/cm^2 ($\approx 0.098 \text{ N/mm}^2$; $q_u = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$) と設定すれば、新しいスラリーの打設時には、下層の打設後2日間程度間隔をとって打設を行えばよいことがわかる。

(5) 石炭灰スラリーの硬化後の物性

図-10は、打設後28日目の層別に採取された供試体に対する物性試験の結果について、打設深さを縦軸にしてプロットしたものである。なお、打設直後の湿润密度 ρ_i および含水比 w はそれぞれ 1.5 v/m^3 、55% でほぼ一定となるように施工管理されている。

湿润密度 ρ_i は、各層とも $1.5 \sim 1.6 \text{ v/m}^3$ の範囲にあり、ばらつきは小さい。この ρ_i の値は、砂や粘土と比べるとやや軽量であるが、表-2に示す石炭灰の湿润密度よりやや小さい。上層から1 m 程度までの区間で湿润密度がやや大きくなっているのは、養生が進み内部の含水量が小さくなっているためと考えられる。

含水比 w は上層では打設後時間の経過にともない、45% 程度まで減少しているが、打設深さが1.5 m 以上の場所の供試体では28日をすぎても打設時の含水比である55%程度に保たれている。

図-11は、養生日数と含水比の変化の関係を示している。図中、打設深さ1 m 以上の地点での計測結果を白ヌキで示している。打設深さにより含水比の減少に差がみられ、打設深さが1 m 以上の試料では打設から3日を経過した時点ですでに含水比後が45%程度まで減少しているのに対して、1 m 以

深の試料では 28 日を経過しても、打設直後の含水比 ($w = 55\%$) からほとんど減少していない。これは、水和熱が逃げられないなどの理由により、スラリーの硬化が遅れているためと考えられる。

28 日後の一軸圧縮強度 q_u (図-10 (c)) についても、打設深さ 1 m 付近で値が変化している。1 m 以浅の場所で採取された供試体は目標強度を満足しているが、1 m より深い場所では全体的に強度が小さい。これらの試験結果から、今回の試験に使用した配合条件では、スラリーの打設高さによってセメントの養生に影響があると考えられる。このため、現地施工の時の 1 回の打設高さを 1 m 以内と設定した。また、北海道開発局の現地打設試験結果^{12),13)}では、スラリー時に側方に作用する液圧が硬化後も残留することを指摘しており、1 回の打設高さが大きな場合には施工時の外力として考慮している。このことから、必要な地盤強度を確保し、所要の土圧軽減効果を得るためには、施工高さの管理が重要である。

上記の検討結果をもとに、現地施工のための配合条件を設定した。現地強度の平均値を全層にわたって計算すると、 $\mu q_u = 4.827 \text{ kgf/cm}^2$ ($\equiv 0.473 \text{ N/mm}^2$) であり、表-4の目標強度(室内強度を用いて設定)を満足している。室内強度の 2 倍以上の強度を発現している供試体も確認されたが、現地強度の標準偏差は $\sigma q_u = 2.559 \text{ kgf/cm}^2$ ($\equiv 0.251 \text{ N/mm}^2$) であり、室内配合強度と有意な差はあるとはいえない。ただし、現場強度の値にはばらつきが大きく、下層では設計強度 ($= 1/2 \times$ 目標強度) を満足するが目標強度を満足しない供試体もみられた。このため、室内強度と現場強度の比を 1、安全率を 2 として現地強度を設定し、室内配合試験結果を用いて、現地施工時の配合条件を設定することとした。

6. 現地施工

石炭灰の固化処理技術は、平成 10 年度に酒田港外港地区 (-14m) 国際ターミナルの岸壁工事において、リサイクル新材料活用モデル工事として、現地への適用が実施された¹⁴⁾。本岸壁は、図-7に示された現地打設試験の実施区域に整備が計画されている港湾施設である。石炭灰スラリーの打設は、平成 10 年 7 月から 11 月にかけて実施され、図-3の断面図に示す裏込め部分に、石材の代替材料として約 $52,000 \text{ m}^3$ の石炭灰が使用された。

施工時には、写真-2に示す簡易プラントを火力発電所内の石炭灰仮置き場に設置した。プラントへの石炭灰の投入は、写真-3に示すようにバックホウを用いて実施した。プラント内で、セメント添加量、

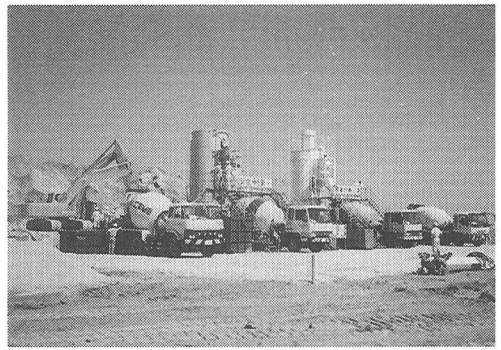


写真-2 施工時の簡易プラントの状況

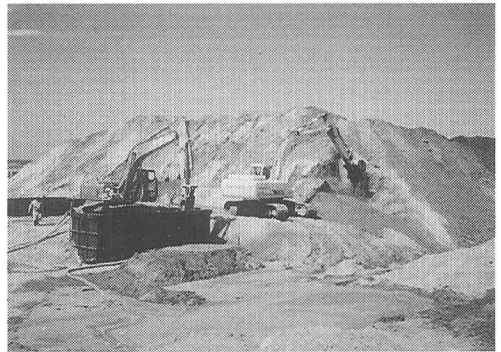
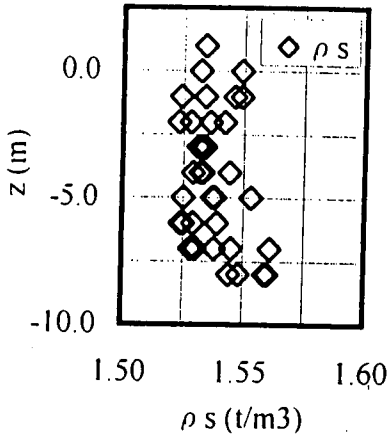


写真-3 簡易プラントへの石炭灰の投入

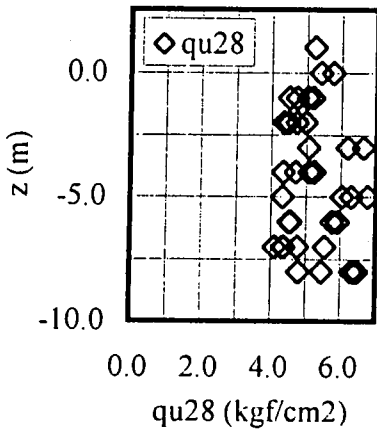
密度およびフロー値を管理しながら、水とセメントを添加し、十分な練り混ぜを行った後、ミキサー車により打設現場へ搬送した。このときの配合条件は、室内強度と現場強度の比を 1 と設定し、表-4と同じ条件を用いた。打設現場では、現地打設試験時と同様に、ポンプ車を用いてスラリーの打設を実施した。

打設時のスラリーの流動性は十分に確保されており、施工性に問題はみられなかった。打設されたものと同じスラリーを室内養生した供試体の 28 日強度は、平均値で 4.0 kgf/cm^2 ($\equiv 0.392 \text{ N/mm}^2$) を満足し、かつ、最小値が 2.0 kgf/cm^2 ($\equiv 0.196 \text{ N/mm}^2$) 以上であるため、設計強度が確保されていることが確認された。また、少量のセメント添加で十分な地盤強度が期待できること、地盤改良のための専用プラントを必要としないこと、石炭灰の仮置き場から簡易プラントまでの石炭灰の運送費が不要であったこと等から、裏込め材料として石材を使用した場合と比べて 10 % 以上のコスト削減を図ることができた。

図-12の (a), (b) は、それぞれ、打設時のスラリーを使用して気中養生した供試体に対する 28 日後の湿潤単位体積重量 ρ および一軸圧縮強度 q_{u28} の計測結果である。両図とも、縦軸は、供試体作成に



(a) 湿潤単位体積重量



(b) 一軸圧縮強度

図-12 現地打設後28日目のスラリーの物性

使用したスラリーの現地施工における打設深さを示している。図-12 (a)より、 ρ_s は平均 1.538 tf/m^3 (最大 1.561, 最小 1.523)と設計条件を満足している。標準偏差は 0.011 と小さく、施工時の品質管理が良好に保たれていることがわかる。図-12 (b)より、 q_{u28} は平均 5.22 kgf/cm^2 (最大 7.25, 最小 3.76)と最小値でも設計上必要な強度を満足しているが、最大値と最小値の幅が大きい。標準偏差も 0.77 と大きな値が得られている。施工管理が良好に保たれていることから、石炭灰の化学的特性のばらつきが強度の発現に影響を与えていると考えられる。

今回の現地施工により得られた知見より、石炭灰の固化処理技術は、リサイクル材として資源の有効活用に資するのみでなく、地盤強度や経済性の観点からも良質な地盤材料として利用するための有効な技術であることが確認された。

7. まとめ

リサイクル材料の利用促進のための技術開発の一環として、石炭灰の岸壁裏込め材への使用について検討を行い、酒田港の岸壁建設工事において実現させた。その結果得られた主要な結論は以下のとおりである。

- (1) セメントを添加し固化した石炭灰を裏込めとする岸壁等の断面設計にあたって、分割法による土圧算定手法を利用した設計手法を導入した。
- (2) 酒田港において入手した石炭灰を対象に室内試験および現地試験を行い、石炭灰およびセメントを添加したスラリーの諸特性について把握し、配合や施工条件の決定に必要な知見を得た。
- (3) 酒田港の岸壁(-14m)建設において、セメントを添加したスラリー状の石炭灰をポンプ車で打設する工法で、約 5 万 m^3 の石炭灰を使用した裏込め工事を実施した。その結果、以下の事項が確認された。

- ① 少量のセメント添加($c/w = 5\%$)により、碎石に相当する土圧軽減効果のある裏込め(地盤強度; $q_u \geq 2.0 \text{ kgf/cm}^2$)ができる。
- ② 施工において、問題となる点は認められない。
- ③ 碎石の裏込めと比較して、裏込め工全体の工事費で 10%以上のコスト削減が図られる。

今後、現地施工をフォローする地盤強度の経年変化等の計測と解析を実施するとともに、より経済的かつ合理的な建設工事に結びつくよう、設計手法等の検討を続けて参りたい。

参考文献

- 1) (財)石炭利用総合センター：石炭灰全国実態調査報告書(平成8年度分), 25p., 1998.
- 2) 高橋邦夫：石炭灰および鉄鋼スラグの活用技術, 港湾技研資料, No. 886, pp.4-16, 1997.
- 3) 横田 弘, 中島 晋：リサイクル材料の港湾工事への活用に関する検討, 港湾技研資料, No. 824, 49p., 1996.
- 4) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説 改訂版, (社)日本港湾協会, 1989.
- 5) 土田 孝, 佐藤正一, 岸田隆夫, 八木英樹, 平野孝行：分割法による地震時土圧の算定と軽量裏込め材への適用, 第31回地盤工学研究発表会, pp.1083-1084, 1996.
- 6) 北詰昌樹, 山本浩司：セメントで改良された石炭灰地盤の破壊強度と土圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第36巻第1号, pp.1-23, 1997.

- 7) 莊司喜博, 富樫浩一: 石炭灰溶出液に関する室内実験, 港湾技研資料, No. 432, 22p., 1982.
- 8) (財)沿岸開発技術研究センター: フライアッシュを路盤・路床に利用するための手引書(案), 41p., 1992.
- 9) (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), 60p., 1992.
- 10) (財)沿岸開発技術研究センター: 事前混合処理工法技術マニュアル, 沿岸開発技術ライブラリー, No.4, 152p., 1999(印刷中).
- 11) (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 [第二版], 6. ヘドロおよび汚泥の固化処理, 技報堂, pp.149-171, 1994.
- 12) Horiuchi, S., Takatsuka, M., Odawara, T., and Kawasaki, H.: Fly-Ash Slurry Island: I. Theoretical and Experimental Investigations, *J. Mater. Engrg.*, ASCE, Vol. 4, No. 2, pp. 117-133, 1992.
- 13) Kawasaki, H., Horiuchi, S., Akatsuka, M., and Sano, S.: Fly-Ash Slurry Island: II. Construction in Hakucho Ohashi Project, *J. Mater. Engrg.*, ASCE, Vol. 4, No. 2, pp. 134-152, 1992.
- 14) 土田吉昭: 岸壁裏込材へのリサイクル材(石炭灰)の活用 - 酒田港国際ターミナル整備工事 -, 月刊建設, Vol. 42, 10月号, pp.12-14, 1998.

(1999. 3. 23 受付)

UTILIZATION OF FLY-ASH CEMENT MIXTURE FOR BACKFILLS OF QUAY

Yoshihiro SHOJI, Kunio TAKAHASHI, Tadashi ASAI and Takashi KADONO

Soil improvement technique is developed for backfills of quay with using the fly-ash cement mixture as the recycled materials with light weight and high strength. Through both of the laboratory and the field experiments, content of cement is determined for the necessary soil strength of backfills. Basic properties of fly-ash cement mixture are also shown in this paper. According to these experimental results, the design procedure is compiled for the calculation of the soil pressure acting on the quay structures from the fly-ash cement mixture backfills. This proposed soil improvement techniques was applied for the backfills of the quay on the Sakata port. Fifty two thousand cubic meter of fly-ash was successfully utilized with addition of five percent of cement.