

石炭灰を用いた水中硬化体の開発

小 田 高
林 中 橋
則 昌
仁*
和**
之***

概要 現在、火力発電所から発生する石炭灰の約7割程度が再利用されているが、そのほとんどがセメント原料としての利用である。今後、石炭火力発電所の増設に伴い発生する石炭灰に対処するためには、恒常的かつ大量利用可能な有効利用の技術開発が急務とされている。石炭灰(海外炭フライアッシュ)と浚渫土砂、セメントを使用して開発した水中硬化体の技術で約8,000tの石炭灰を有効利用して約2万㎡の海上築堤の施工を行った。本稿は、最適配合を決定するための室内試験方法と施工時における確認試験等について報告する。

キーワード：石炭灰、海外炭フライアッシュ、浚渫土砂、流動性、水中不分離性

1. はじめに

北海道電力(株)では、海外炭を燃焼する苫東厚真発電所(1～3号機：103.5万kW)が稼動中であり、現在、平成14年10月運開予定の4号機(70万kW)を建設中である。

平成8年3月の総合研究所石炭灰研究プロジェクトグループ発足以来、集中的に土木材料として石炭灰の有効利用研究を行っている。

技術開発に当っては、北海道開発局等のユーザーとの連携を密にして、総合研究所が積極的に技術協力をする形で進めている。

研究テーマの一つに石炭灰を用いた浚渫土砂の改良があり、昨年、石炭灰(海外炭フライアッシュ)と浚渫土砂、セメントを使用した水中硬化体の技術を開発し、実際に約8,000tの石炭灰を有効利用して約2万㎡の海上築堤の施工を行った。今回は、最適配合を決定するための室内試験と施工時の確認試験等について報告する。

2. 施工概要

表-1 工事概要

工事名	苫小牧西港区土砂処分場建設工事
発注者	北海道開発局 室蘭開発建設部 苫小牧港湾建設事務所
施工場所	苫小牧市苫小牧港西港区

施工目的は、埋立護岸に遮蔽されている土砂処分場内において、ポンプ浚渫時に水質汚濁防止のための沈澱池が必要となり、中仕切りの目的で築堤を造成したものである。従来は雑割石等の材料によ

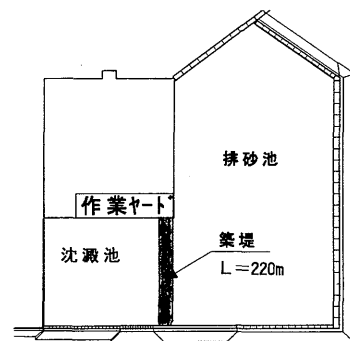


図-1 施工位置図

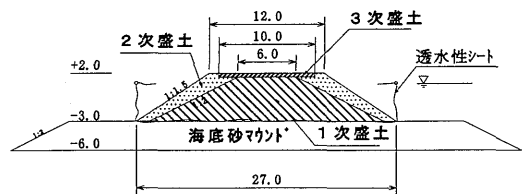


図-2 築堤断面図

り築堤を造成しているが、数年前に浚渫して置きしている土砂に石炭灰、セメント、水を混合した改良土を築堤材料として利用した。

施工方法は、改良土を連続混合システム(DEI-KONシステム)にて製造後、ダンプトラックにて運搬し、改良土を直接バックホウにて海中に投入して、翌日、硬化した築堤の上にバックホウが乗り、投入を繰り返しながら前方に進んで行くという、全国的にも初めての施工である。また、施工に先立ち、築堤の法尻確保と堤体の品質確保のために透水性の防砂シートで囲む補助工法を採用している。

水中部の1, 2次盛土終了後、陸上部の3次盛土の施工を実施している。

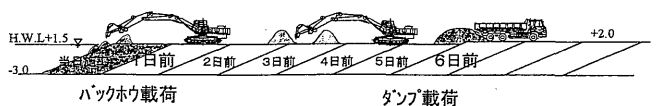
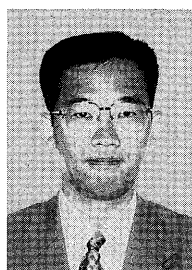


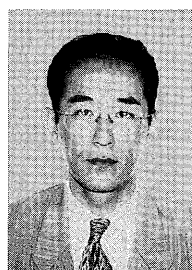
図-3 施工イメージ図



小林 仁



田中 則和



高橋 昌之

*北海道電力(株) 総合研究所 主幹研究員 土木グループリーダー兼務石炭灰研究プロジェクトグループ 会員
 **北海道電力(株) 総合研究所 土木グループ兼務石炭灰研究プロジェクトグループ 会員
 ***北電興業(株) 土木部 副長 会員

3. 水中硬化体の開発

(1) 改良土の求められる品質

施工方法から求められる改良土の品質は以下のとおりである。

- ① 投入時に水中で分離して、水質汚濁や強度低下が発生しない。
- ② 投入後の密実性(各投入毎の材料が一体化する)が得られる。
- ③ 所定の材令で強度発現する。

①～③の品質を満足する配合を決定するために、当社において室内配合試験を実施した。

改良土の設計基準強度は施工方法から、施工時の円形すべり計算により算出した。

材令1日は1.0m²級バックホウ荷重, 材令6日は10tダンプトラック荷重により計算した。

表-2 設計基準強度

材令1日	0.6kgf/cm ²
材令6日	2.1kgf/cm ²

(2) 室内配合試験

石炭灰は、ほぼシルト質(5~75μm)の粒径で球状であることにより、流動性および材料分離抵抗性に優れている特性がある。

この特性を利用して、土砂に混合し、弱流動性になるよう加水調整すると、改良土は水中における不分離性や密実性が得られ、セメントを添加することにより目標強度を確保することができた。

試験に使用した土砂は施工予定の土砂で、石炭灰は苫東厚真発電所2号機から発生した海外炭フライアッシュ(JIS II種相当)である。表-3に土砂および使用した代表的な石炭灰の基本物性を示す。

表-3 土砂および石炭灰の基本物性

		土 砂	フライアッシュ
土粒子の密度		2.807	2.364
粒度試験	礫分 2~75mm (%)	4	0
	砂分 75μm~2mm (%)	81	8
	シルト分 5~75μm (%)	10	82
	粘土分 ~5μm (%)	5	10
締め固め試験	最適含水比 W _{opt} (%)	14.2	19.0
	最大乾燥密度 (g/cm ³)	1.770	1.486
ブレン比表面積 (cm ² /g)		—	2,760
強熱減量 (%)		—	1.5
フロー値比 (%)		—	108

a. フライアッシュ添加量が水中不分離性および強度に与える影響

改良土の流動性はミニスランプ(h=15cm)で測定した。また、図-4に示す透明塩溶性のカラムを使用し、水中落下試験(落下高さ1.2m)による目視観察と透過濁度で水中不分離性と密実性を評価した。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。

目標スランプを固練りの2.5cm(以下S2.5)、セメント量(以下C量)を80kg/m³で一定とし、フライアッシュ量(以下F量)を0~300kg/m³(F0~F300)まで変化させたときの水中落下試験を行った結果、F0では落下中における試料の崩壊が見られたが、F200とF300ではそのような現象が見られなかった。

図-5は、この時のF量と濁度の関係を示したものである。

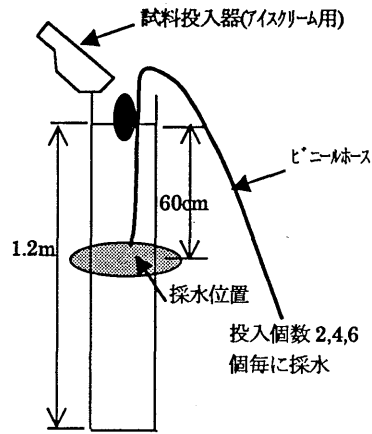


図-4 水中落下試験方法

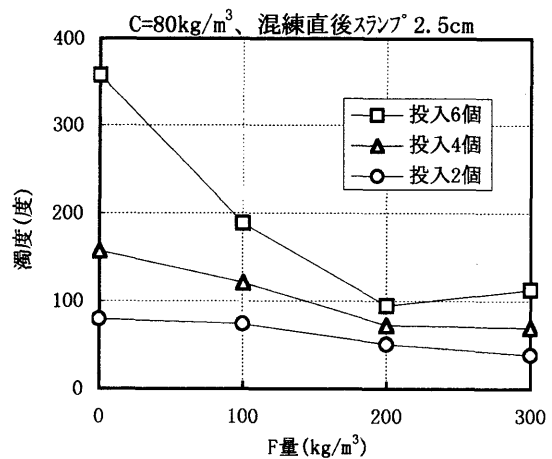


図-5 F量と濁度の関係

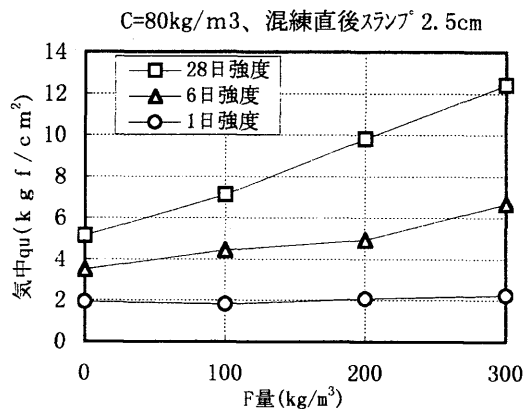


図-6 F量と気中quの関係

濁度はF量の増加に伴い低下する傾向を示し、F300の濁度はF0のそれのおよそ1/2~1/3まで低下していることが分かる。

強度は、気中作製供試体(気中qu)と水中作製供試体(水中qu)を夫々海水中で所定の期間養生したものの一軸圧縮強さ(qu)で評価した。図-6は、気中quをF量との関係で示したものである。

quはF量に伴う増加傾向を示すと同時に、養生期間が長いほど顕著な傾向を示すことから、フライアッシュのポゾラン反応による強度発現が伺える。

以上のことから、フライアッシュの添加は、水中不分離性の改善や強度増進に効果的であることが分かり、施工性、経済性等を総合的に勘案し、フライアッシュの添加量は300kg/m³とした。

b. スラリーの流動性と混合放置時間が水中不分離性と強度に与える影響

C量を80kg/m³、F量を300kg/m³で固定し、スランブを超固め(S1.5cm)～軟らかめ(S6.5cm)まで変化させたときの水中不分離性を目視観察と濁度で評価した。

図-7は、濁度を混練直後のスランブとの関係で示したものである。

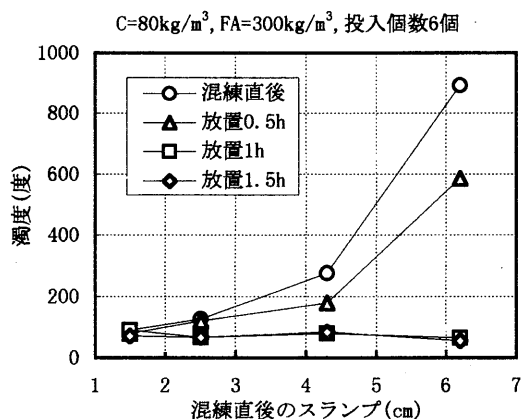


図-7 スランブと濁度の関係

放置0, 0.5時間のケースの濁度は、スランブの増加とともに増加し、特に軟らかめ(S6.5cm)の濁度は超固め(S1.5cm)のそれのおよそ10倍を示した。それと比較して、放置1, 1.5時間の濁度は、スランブの影響をあまり受けていない。すなわち水中不分離性は、混練直後の流動性と混練放置時間の影響を受け、流動性が低いほど、また放置時間を長くともほど分離しづらくなる傾向にある。

一方、これらの落下堆積物をカラムから取り出し観察した結果、固練りを長時間放置したケース(S1.5, S2.5の放置1.5時間)では、投入時の分離が小さいにも関わらず堆積試料が崩れて散在しているのが確認されており、充填時の密実性が劣るものと推察された。

図-8は、目標スランブと混練放置時間の異なる6ケースにおける材齢1日での一軸圧縮強さ(気中qu, 水中qu)を示したものである。

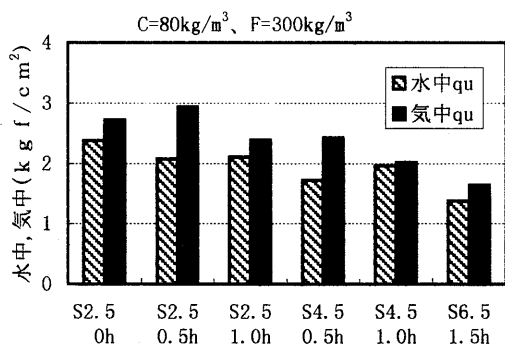


図-8 スランブ、放置時間とquの関係

軟らかめ(S4.5, S6.5)を1～1.5時間放置したケースのquは、固め(S2.5)の混練直後のquに比べて2～4割程度低下しており、流動性と放置時間がともに強度に影響していることが判る。

以上のことから、改良土に求められる品質である①水中不分離性と②密実性は、固練り(S2.5)を長時間放置せずに使用することにより満足することが明らかになり、改良土のスランブは2.5±

1.0cm、施工における製造から投入までの時間等も考慮して混練放置時間30分を基本として次の試験へ移行した。

c. 灰種およびセメント添加量が強度に及ぼす影響について
フライアッシュの品質は、石炭やボイラの性状により大きく影響されるため、その変動は実用上の支障となることが予想された。

このため、フライアッシュ性状とスラリーの配合含水比との関連を13種のフライアッシュを使用して試験を実施した。

スランブ2.5±1.0cmとなる配合含水比は25～32%程度であり、石炭灰の種類によるバラツキが見られたが、図-9に示すフライアッシュの最適含水比との関係から判るように、改良土の配合含水比はフライアッシュの最適含水比と良い相関が見られる。

よって、フライアッシュの性状が既知であれば事前に配合含水比を予測することが可能であることが分かった。

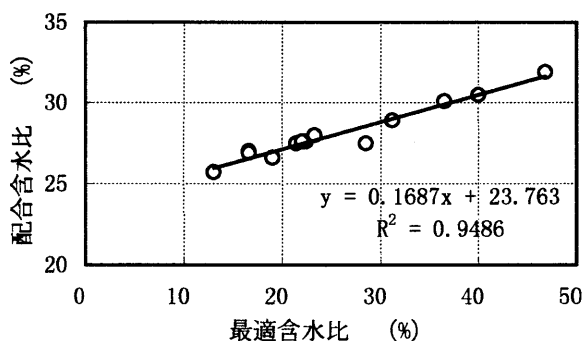


図-9 配合含水比と最適含水比

材齢と気中quの関係を図-10に示した。28日までのquは、材齢の経過に伴いほぼ直線的な増加傾向を示す特徴を有する。

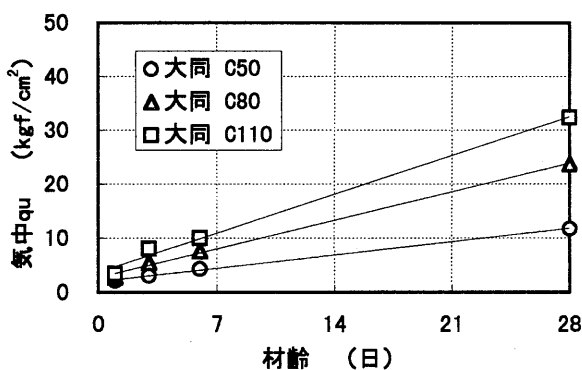


図-10 気中quと材令の関係

スランブ2.5±1.0cmにおける単位セメント量と気中作製供試体の一軸圧縮強さ(気中qu)はC量に応じた増大傾向を示すが灰種によって強度発現に差異がみられた。

よって、室内試験からは、灰種に応じてセメント量を変化させることとした。

(3) 配合設計手法

今回の施工および試験で一番懸念した事項は、バックホウで水中に投入した改良土がどの程度固結するかであり、気中で作製する供試体の他に施工を模擬する形で水中供試体を作製し、強度の低下を設計に反映させることとした。

同一配合における気中quと水中quは図-11のように示され、(1)式の関係が得られた。

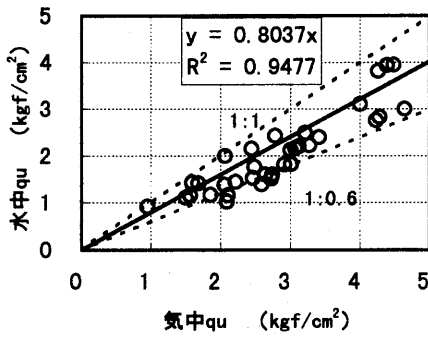


図-11 水中quと気中quの関係

(水中/気中)強度比≒0.6~1.0.....(1)

ここで(水中/気中)強度比は、水中不分離性を表す指標であり、水中打設時の水と改良土の接触による強度低下を示すものである。室内目標強度 q_{ul} は次式で求めた。

$$q_{ul} = q_{uf} \times 1/d_1 \dots\dots\dots(2)$$

q_{ul} : 室内目標強度, q_{uf} : 現場目標強度, d_1 : (現場/室内)強度比
今回、現場目標強度 q_{uf} は、設計基準強度 F_c に安全率を2倍として算出した。

(現場/室内)強度比 d_1 は水中打設時の乱れによる強度低下とプラントの攪拌効率に關係する強度低下等から次式で算出した。

$$(現場/室内)強度比 $d_1 =$$$

$$(プラント/室内)強度比 $d_2 \times (現場/プラント)強度比 $d_3 \dots\dots\dots(3)$$$$

(プラント/室内)強度比 d_2 は当社の研究事例から0.7とした。

(現場/プラント)強度比 d_3 は今回の試験で得られた(水中/気中)強度比の最低値をとって0.6とした。

$$\therefore (現場/室内)強度比 $d_1 = d_2 \times d_3 = 0.42 \dots\dots\dots(4)$$$

以上をまとめたものが表-4である。

表-4 各強度設定

	材齢1日	材齢6日
設計基準強度(kgf/cm²)	0.6	2.1
現場目標強度(kgf/cm²)	1.2	4.2
室内目標強度(kgf/cm²)	2.9	10.0

配合設計手法をまとめると、

- ① 石炭灰は改良土1m³当たり300kgとする。
- ② 改良土のスランプが2.5±1.0cmとなるように配合含水比を決定する。
- ③ 目標強度が得られるようにセメント量を調整する。
使用する石炭灰により表-5に示す配合とした。

表-5 標準配合(kg/m³)

土砂(乾燥)	石炭灰	セメント	海 水
1170~1220	300	90~120	412~456

4. 施工結果

表-6 施工実績

1, 2次盛土施工量	19,670m³
3次盛土施工量	680m³ (400m³は苫東厚真発電所3号灰(PFBC灰)を単身で使用)
工 期	平成10年7月30日~ 平成10年10月20日
盛土施工日数	37日

(1) 強度確認

施工初日に使用する石炭灰の必要セメント量検討した結果、当初はセメント量110kg/m³でスタートとした。

また、室内試験では、スランプロスを考慮して、混練直後スランプ2.5±1.0cm、放置時間30分として試験していたが、実際の施工では、バックホウによる積込み、積下し、ダンプトラックによる運搬等による影響でスランプロスがほとんど生じなかったため、混練直後のスランプロスを1.5±1.0cmに配合を変更して施工した。

ボーリング供試体と室内で混合した供試体およびプラントより採取した供試体の強度を評価し、セメント添加量を再設定しながら施工し、最終的にはセメント量60kg/m³で配合した。

表-7に各調査地点の結果一覧を示す。

表-7 各調査地点の結果一覧(材令6日)

地 点	25m	70m	147m	202m	
灰 種	LI/BA	MS	UP/BA	UP/BA	
セメント量(kg/m³)	110	80	80	60	
室内強度 q_{ul} (kgf/cm²)	14.02	9.31	6.87	4.11	
プラントサンプリング強度 q_{up} (kgf/cm²)	12.32	8.73	6.28	3.74	
現場 コア	データ数	12	8	12	
	平均強度	15.64	6.98	10.63	4.99
	標準偏差	6.612	2.111	5.610	0.902
	変動係数	0.42	0.30	0.53	0.18
強 度 比	(プラント/室内)	0.88	0.94	0.81	0.96
	(現場/プラント)	1.31	0.80	1.91	1.33
	(現場/室内)	1.15	0.75	1.55	1.28

ボーリングコアは、施工日の違いによると思われる打ち継ぎ目においての未固結状の薄層が見られるコアもあったが、各地点とも全体的に固結しており、十分に密実性(バックホウによる各投入毎の材料が一体化する)が得られていると評価できた。

目標強度は、「日本建築センター：改良地盤の設計および品質管理指針」¹⁾を参考に以下のとおり算出した。

$$F_c = (1 - mV) \cdot q_{uf} \dots\dots\dots(5)$$

$$q_{ul}' = q_{uf} \cdot 1/d_1 \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 F_c : 設計基準強度

m : V , q_u , P_y を関係づける定数、指針より1.3とする。

V : 変動係数。 P_y : 不良率、指針では10%

q_{uf} : 現場目標強度, q_{ul}' : 室内目標強度

現場強度の変動係数 V は0.18~0.53であり、調査箇所による差異が極めて大きい結果となった。4地点の V の平均値は0.36であり、検討結果にはこの値を採用したが、今後の同様の施工によりデータの蓄積に努める必要があると思われる。

(プラント/室内)強度比 d_2 は0.81~0.94の範囲であり、良好なプラント混合状態であった事が伺え、地点毎のバラツキが小さいことから、4地点の平均値の0.89を採用した。

(現場/プラント)強度比 d_3 は0.80~1.91の範囲を示しており、4地点中3地点における現場強度がプラント強度を上回る結果となった。通常現場強度が上回ること考えにくいだが、1日の打設が大量(最大800m³程度)であり、かつ、セメントを添加していることから内部発熱により養生効果が促進されていたことも考えられる。

しかし、打設による乱れや気象による養生条件の変化などを考慮すれば1.0以下と考えるのが妥当であり、ここでは(現場/プラント)強度比 d_3 を今回の最低値である0.80とした。

表-8に施工実績による検討結果を示す。

表-8 築堤(水中硬化体)の目標強度比較

		当初設計案		施工実績による検討結果	
		1	6	1	6
設計材齢(日)		1	6	1	6
設計基準強度Fc (kgf/cm ²)		0.6	2.1	0.6	2.1
変動係数V		-		0.36	
安全率 1/(1-1.3V)		2		1.88	
現場目標強度quf (kgf/cm ²)		1.2	4.2	1.1	3.9
(現場/室内)強度比d1	(プラント/室内)強度比d2	0.42	0.7	0.71	0.89
	(現場/プラント)強度比d3		0.6		0.80
室内目標強度qul (kgf/cm ²)		2.9	10.0	1.5	5.5

安全率は当初設計の2に対し、施工実績では1.88とほぼ同様の値となった。

(現場/室内)強度比は当初設計の0.42に対し、施工実績は0.76と高い数値になった。これは、使用した混合プラントの混合精度が良く(プラント/室内)強度比が0.89であったことと、水中における強度低下が室内試験で検討したよりも小さく、(現場/プラント)強度比が0.80であったことによるものである。

しかし、(現場/プラント)強度比は最低値の0.80を採用したものであり、現場における強度増加メカニズムが解明できれば、さらに経済的な配合になると考えられ、今後の課題であると思われる。

(2) 石炭灰の種類による改良土への影響

図-12は目標スランプ1.5cm、C量80kg/m³の一定条件におけるスラリーの配合含水比と密かさ比重試験による充填率との関係を示したものである。両者の間には良い相関が認められ、さらに同試験が比較的簡便かつ短時間に試験可能であることから配合含水比の予測手段として有効である。

図-13は使用したフライアッシュを用いた室内強度試験結果であり、灰種によるバラツキはほとんど見られない傾向が得られた。

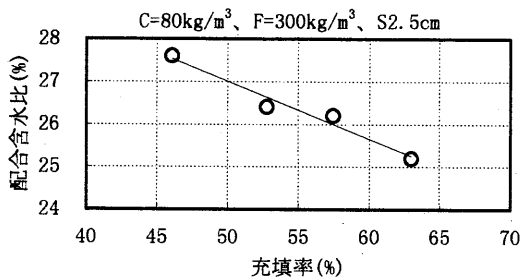


図-12 充填率と配合含水比の関係

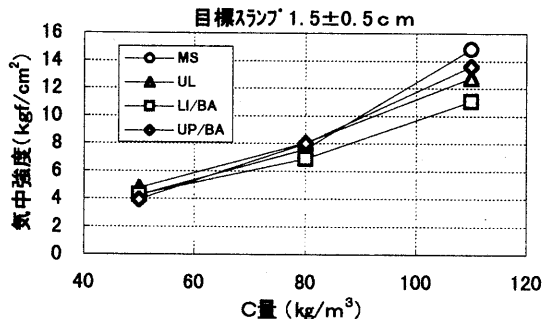


図-13 C量と気中強度の関係(材齢6日)

(3) 環境影響調査

石炭灰はそのほとんどが高アルカリであり、今回施工した改良土もアルカリ性を示すため、築堤の周辺海域および外海への影響を調査した。施工前、施工中、施工後における海水のpHの測定を実施した結果を示したものが図-14であり、施工中の築堤周辺海域のpHは僅かに上昇するが、施工後には低下し、外海においては変化が見られなかったことから、海水のpHへの影響はほとんどなかったと言える。

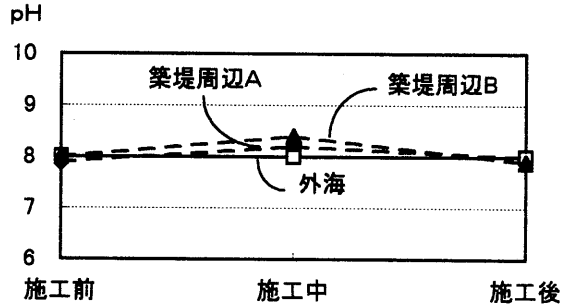


図-14 築堤周辺のpH測定結果

また、改良土の「金属等の溶出試験」を「海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律施行令第5条第1項」に基づき実施した結果、全て基準値以下であった。

5. まとめ

石炭灰(海外炭フライアッシュ)を用いた水中硬化体の性状ならびに施工結果についてまとめると次のとおりである。

- ① フライアッシュは水中不分離性及び強度増進に効果的である。
- ② 改良土の水中不分離性及び密実性を確保するためには、フライアッシュを混合し、流動性を低く配合して、放置時間を長く置かないことにより可能である。
- ③ 改良土の配合含水比は、フライアッシュの最適含水比や充填率と良い相関関係にあり、これらの性状から改良土の配合を予測することが可能である。
- ④ 今回の実施工に基づく検討結果では、水中硬化体の変動係数は0.36、(現場/室内)強度比は0.71となった。

6. おわりに

今回開発した技術は、石炭灰の有効利用と同時に浚渫土砂のリサイクルにも寄与することができ、北海道開発局のリサイクルモデル事業として指定された。

本報告が、今後の石炭灰有効利用の新たな方向性を生む一つの指標として、類似工事等の参考になれば幸いである。

最後に、今回の技術を採用していただいた北海道開発局室蘭開発建設部苫小牧港湾建設事務所および工事関係者の方々に深く感謝の意を示す次第である。

参考文献

- 1) 日本建築センター. 改良地盤の設計および品質管理指針—セメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法—. 1997, p.241-244.
- 2) 高橋昌之; 浮津憲一; 田中則和. 石炭灰を利用した超固練りスラリーの水中盛土材への適用性に関する実験的検討. 土木学会第54回年次学術講習会講演集. 1999. 投稿中.