

石炭灰を用いた水中硬化体の開発(その2)

水田 口 則 洋
下 中 哲 和
北 原 繁 司
志

概要 北海道電力(株)は、北海道開発局等と共同で、今後大幅に増加することが予想される石炭灰の有効利用技術の一つとして、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改良土の水中硬化体を開発した。この工法は改良土を完全に固化する前に水中に投入する技術であり、平成10年度に実施した室内配合試験と施工時の確認試験については、既に報告済みである。¹⁾平成11年度には引続き延長工事を実施しており、今回は長期強度や施工時における確認試験、養生効果について報告するものである。

キーワード：フライアッシュ、PFBC灰、水中盛土材、長期強度、温度養生効果

1. はじめに

北海道電力(株)には、砂川・奈井江・苫東厚真の3箇所に石炭火力発電所があり、平成10年度実績で年間約52万tの石炭灰が発生しているが、半数は海外炭専焼の苫東厚真で発生している。苫東厚真発電所は既設1～3号機(103.5万kW)の他に、現在、平成14年6月運開予定の4号機(70万kW)が建設中であり、運開以降は更に年間約20万tの石炭灰の増加が見込まれている。

これらの石炭灰発生量に対し、石炭灰の有効利用は7割程度であるが、その大半が粘土代替としてのセメント原料になっているものの需要に限界があることから、石炭灰を土木材料として有効利用する技術開発が急務とされている。技術開発に当っては、北海道電力(株)総合研究所がユーザーに対して技術協力する形で実施しており、石炭灰の使用実績では公共工事等において近年、実績を積み重ねているところである。

一方、北海道開発局では、建設コスト縮減や資源の有効活用の観点から、積極的に石炭灰や浚渫土砂を有効利用しており、今回報告する海上築堤もその一例である。

石炭灰を用いた水中硬化体の開発は、浚渫土砂と石炭灰、セメント、水を混合した流動性の低い改良土を水中に投入するものであり、平成10年度の成果は既に報告済みである。¹⁾

平成11年度においても延長工事を実施しており、今回は平成10年

度施工の検証と平成11年度施工について報告するものである。

2. 平成10年度施工概要

施工目的は、埋立護岸に遮蔽されている土砂処分場内で沈殿池が必要となり、中仕切りの目的で築堤を造成したものである。

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	苫小牧市苫小牧西港区	
築 堤 体 積(m ³)	20,400 (H10)	18,900 (H11)
石炭灰使用量(t)	8,300 (H10)	7,400 (H11)

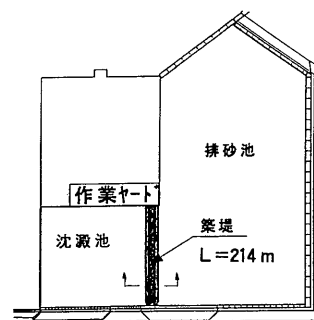
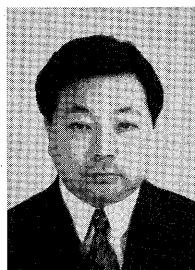


図-1 H10年度施工平面図

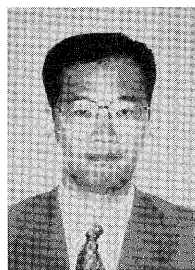
従来は、雑割石等の材料により築堤を造成していたが、1・2次盛土(水中部)は、浚渫土砂にフライアッシュ、セメント、水を混合した改良土を直接バックホウで投入を繰り返しながら、前方に進んで行くことにより施工している。

3次盛土(陸上部)は、PFBC灰を加水、転圧して施工している。

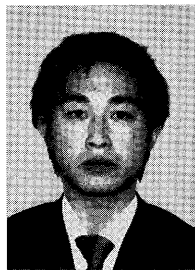
従来工法と比較して約30%のコスト縮減を図っている。



水口 洋



田中 則和



下田 哲司



北原 繁志

*北海道電力(株) 総合研究所 石炭灰研究プロジェクトグループ 副主査 会員 h-mizuguchi@epmail.hepco.co.jp
 **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 nori@epmail.hepco.co.jp
 ***北電興業(株) 土木部 技術グループ 会員 simoda-tetu@hokudenkogyo.co.jp
 ****北海道開発局 室蘭開発建設部 苫小牧港湾建設事務所 第二計画課 課長 kitahara@hda.go.jp

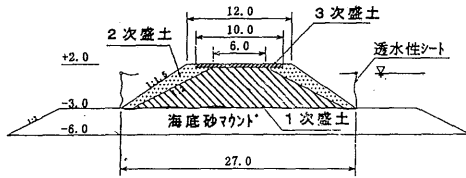


図-2 H10年度施工断面図

3. 築堤(平成10年度の施工箇所)の特性

築堤(1・2次盛土と3次盛土)の長期にわたる強度特性および透水性を調査した。

水中盛土体(1・2次盛土)の標準配合を表-2に、使用した材料の物性値を表-3に示す。

表-2 標準配合(kg/m³)

土砂(浚渫土)	フライアッシュ	普通ポルトランドセメント	海水
1090	300	80	437

表-3 使用した浚渫土砂とフライアッシュの物性値

		土 砂	フライアッシュ
粒度試験	土粒子の密度(g/cm ³)	2.807	2.364
	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

この1・2次盛土における材齢と築堤のボーリングコア強度の関係を図-3に示す。材齢6日から28日で強度の伸びが2~3倍を示し、材齢28日から365日での強度の伸びは1.3~1.5倍を示す。

一般的に、コンクリートの材齢28日から材齢365日までの強度の伸びは約1.25倍⁴⁾であるのに対し、水中盛土体(1・2次盛土)の強度は1.3~1.5倍と大きな伸びを示した。

これは人工ボゾラン材であるフライアッシュ特有の長期強度の増進作用と考えられる。

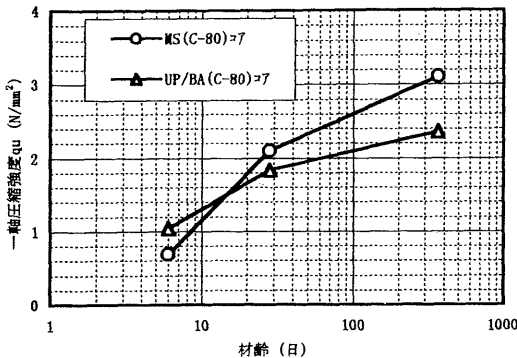


図-3 1・2次盛土における材齢と一軸圧縮強さ

3次盛土(陸上部)は苫東厚真3号機灰を加水して転圧することにより造成している。3号機灰は加圧流動床発電により生成されたPFBC灰であり、水中盛土体にて使用した2号機灰(フライアッシュ)とは石炭灰の生成過程の違いにより、その性状も大きく異なる。

PFBC灰は石炭と石灰石を混合燃焼するため主成分のCaOやSO₃がフライアッシュより多く含まれている。また、フライアッシュのような球形ではなく、3~10μmの不定形でセメントと同程度の比重(2.9~3.2)である。最適含水比で突固めた試料による28日材齢の一軸圧縮強さは5.3~10.4N/mm²を示し、固化すると高い圧縮強度が得られ、自硬性を持った材料である。また、土壤汚染に関わる環境基準に定める溶出試験(カドミウム、鉛、六価クロム、ひ素、セレン)を実施すると、すべて基準値以下である。

表-4にフライアッシュとPFBC灰の化学組成の一例を示す。

表-4 石炭灰の化学組成

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
フライアッシュ	54.9	20.8	6.6	8.7	1.3	0.8
PFBC灰	40.8	18.0	1.3	26.2	0.8	3.1

図-4に3次盛土における材齢と一軸圧縮強さquの関係を示す。

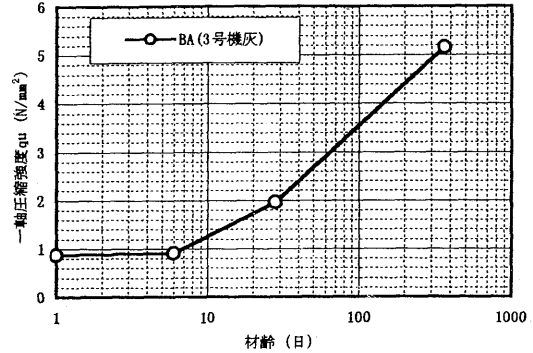


図-4 3次盛土における材齢と一軸圧縮強さ

PFBC灰のみで形成された盛土体の一軸圧縮強さは、材齢1日で0.9N/mm²で、材齢28日で約2倍の強度増加を示し、その後材齢28日から365日までの間にさらに2.5倍の強度増加が確認された。

一般のコンクリートと比較しても、PFBC灰の強度発現は長期強度の伸びが極めて顕著であり、自硬性が長期間に亘って持続する性質を有するものと考えられる。

1・2次と3次盛土材料の気中養生した供試体(材齢28日)の三軸圧縮試験(UU)、一軸圧縮試験結果を表-5に示す。

両者の一軸圧縮強さは共に1.4N/mm²程度とほぼ同じであるのに対して粘着力Cは3次盛土(PFBC灰)の方が若干高い結果を示していた。一軸圧縮強さquとCの関係は、水中盛土材料ではC=0.27qu、PFBC灰ではC=0.39quで示される。

表-5 粘着力と内部摩擦角(現場気中養生)

盛土体材料	1・2次盛土	3次盛土
	水中盛土材(C-80)	PFBC灰単身
粘着力(N/mm ²)	0.37	0.54
内部摩擦角(φ)	26.4	30.1
一軸圧縮強さ(N/mm ²)	1.39	1.40

透水試験結果を表-6に示す。

表-6 透水試験結果一覧表

試験対象・材料	試験方法	透水係数(m/s)	試験数
プラントサンプリング試料 室内養生(材齢28日)	室内透水試験 (JGS 0311)	1~9×10 ⁻⁷	4 試料
築堤コア試料 (材齢365日)	室内透水試験 (JGS 0311)	5×10 ⁻⁶	2 試料
築堤(材齢28日)	現場透水試験 (JGS 1314)	1~2×10 ⁻⁴	2 箇所
築堤(材齢365日)	現場透水試験 (JGS 1314)	1×10 ⁻⁵	2 箇所

室内で養生した供試体は10⁻⁷オーダーであり、実質上不透水性材料に分類される。

一方、築堤における現場透水試験は、材齢28日で10⁻⁴オーダー、1年後は10⁻⁵オーダーと透水係数が小さくなる傾向が見られた。また、1年後の築堤コアを室内試験した結果は10⁻⁶オーダーであり、現場よりも1オーダー小さい透水係数が得られた。

4. 平成11年度施工箇所

平成11年度施工箇所の深度は、平均-5.1m、最深-8.0mであり、平成10年度時の-3mより深い深度であった。

コスト削減を図るため法面勾配をできるだけ急にして全体施工量を縮小する設計とし、このためにシート工法を採用して法尻の固定と法面勾配を確保することとした。

築堤全量を平成10年度と同様に水中盛土体をバックホウで投入する施工方法では、高盛土になり過度な張力が発生するためこれを防ぐために過大なシートの設計となり合理的ではない。そこで、深度-3mまでは、流動性のある材料を用いたポンプ打設のトレミー工法(一次盛土)を採用し、1日の打設高さを1mに制限して、シートへの張力を制限しながら施工することとした。深度-3m以上(二次盛土)は、一次盛土が固化し、シートへの土圧が軽減されてから施工を行うこととし、平成10年度と同様にバックホウによる直接投入工法とした。

ポンプは混合プラントから打設箇所までの最長335mが直接圧送可能となるように、最大吐出量110m³/h、最大コンクリート全面圧力220kg/cm²の長距離圧送に実績のあるコンクリートポンプを使用した。

4.1 一次盛土配合試験

二次盛土はH10年度の1、2次盛土と同配合とし、一次盛土は室内および現場打設試験により決定している。

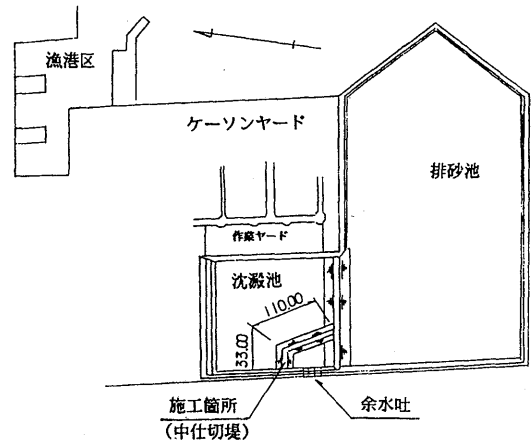


図-5 H11年度施工平面図

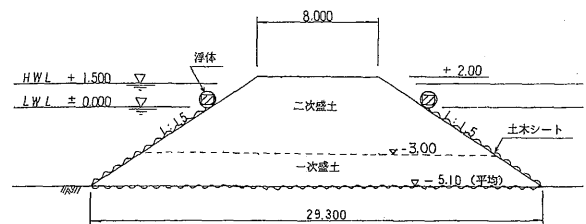
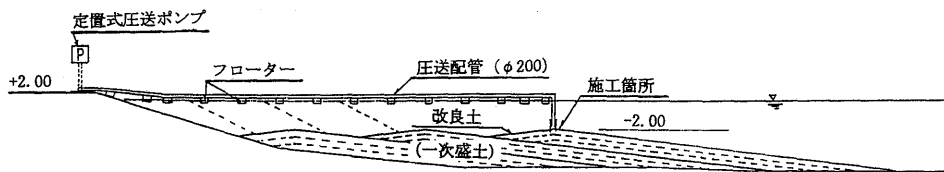


図-6 H11施工断面図

一次盛土



二次盛土

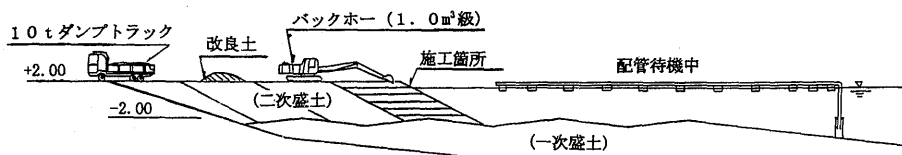


図-7 施工イメージ図

施工方法から、一次盛土の上に二次盛土を打設した状態の円形すべり計算より、材齢4日における一軸圧縮強さ $0.058\text{N}/\text{mm}^2$ を一次盛土の設計基準強度とした。

図-8は、セメント量=80kg/m³を固定し、フライアッシュ量=0kg/m³(F0)と300kg/m³(F300)におけるミニスランプ(JIS A 1173, スランプコン高さH=15cm)の経時変化を示したものである。

図より、フライアッシュを混入した時のほうが、スランプの低下が少なく、流動性維持に優れており、長距離ポンプ圧送を考慮して、フライアッシュを300kg/m³添加することとした。

配合を決定するに当たり、実機のコンクリートポンプを用いて、ミニスランプ値=10, 7.5, 5cmで圧送試験を実施した結果、ミニスランプ値が5cmでも十分に押せることを確認した。

室内試験では、スランプが小さい(配合含水比が少ない)ほど、強度が高く、水中分離も少ないことから、流動性はミニスランプを5cmとした。

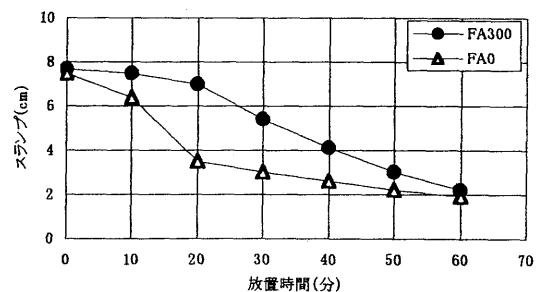


図-8 スランプ値の経時変化

セメント量は、現場を模擬した室内水中打設試験の結果から、80kg/m³とした。表-7に標準配合を示す。

表-7 一次盛土標準配合

土砂(乾燥)	フライアッシュ	高炉セメントB種	海水
1020	300	80	463

4.2 一次盛土の現場強度の検証

施工中に3箇所での打設場所で現場強度を測定して品質管理を行った。サンプリングに当っては、打設直後にダイバーにより、塩ビ管を挿入し、翌日にこれを抜き取り、現場海水中に養生後、設計基準強度の算出日である材齢4日後に一軸圧縮試験を実施したものである。図-9にトレミー管からの打設距離との関係を示す。

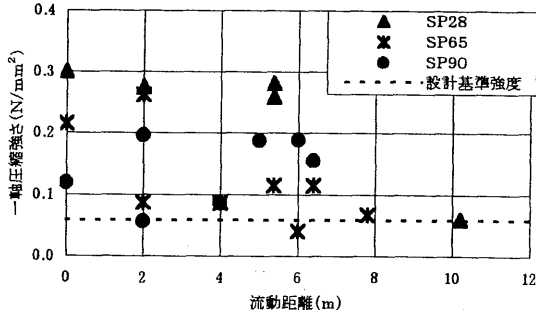


図-9 流動距離と強度の関係

変動係数が0.53とデータにばらつきが多いものの、流動距離が長くなるほど強度が低下する傾向が見られ、流動距離が6mを超えると、低強度を示していた。設計基準強度0.058N/mm²に対して、1データを除いて全て上回っており、築堤は十分な強度を有していると評価できる。しかしながら、流動に伴う強度の低下およびばらつきの評価を考慮した施工方法は、今後の課題であると考えられる。

表-8 強度試験総括表

室内平均強度 (N/mm ²)	0.433
現場平均強度 (N/mm ²)	0.157
(現場/室内) 強度比	0.36
変動係数 (現場)	0.53

4.3 二次盛土の現場強度

二次盛土は、H10年の1・2次盛土と同様に、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施工方法で築堤を造成した。フライアッシュは、改良土の水中不分離性の改善と強度増進に効果的であることから使用している。含水比は、ミニスランプで1.5±1cmの弱流動性となるように配合を決定しており、標準的な配合は表-2と同様である。

施工は①築堤のボーリングコアによる現場強度、②プラント混合・室内養生(20℃・水中)、③室内混合・室内養生供試体の強度を比較し、施工管理を実施した。図-10に現場強度の一例を示す。

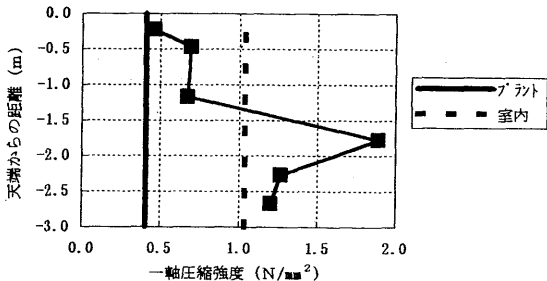


図-10 現場強度試験結果(材齢6日)

設計基準強度0.21N/mm²に対し、全て上回る強度が得られている。また、プラント強度は0.4N/mm²、室内強度は1.0N/mm²であった。現場強度は全てプラント強度を上回り、深度が深くなるほど強

度が大きい傾向が見られ、室内強度を上回る結果が得られた。

通常は混合効率の低下により、現場強度は室内強度と比較して低下し、また、今回のように水中に直接材料を投入する場合は、乱れによってプラント強度より強度低下すると予想されたが、異なる傾向の結果が得られた。

4.4 養生効果の検証

平成10年度施工箇所でも、同様に現場強度が室内およびプラント強度を上回っていたデータが得られていた。要因としては、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たものと推定される。

この内部発熱を調査するため、平成11年度施工箇所において、打設直後から熱電対を用いて築堤内部(天端から-0.7, -1.4, -2.1, -2.8m)および外気温度、海水温度を測定した。図-11はこの測定結果であり、材齢と温度の関係を示したものである。

外気温度は0~18℃、周辺の海水温度は5~15℃を記録している。一方、築堤内部のGL-2.1mの温度は、打設後の測定開始の20℃から5日までに30℃に上昇しており、その後も30℃を維持している。

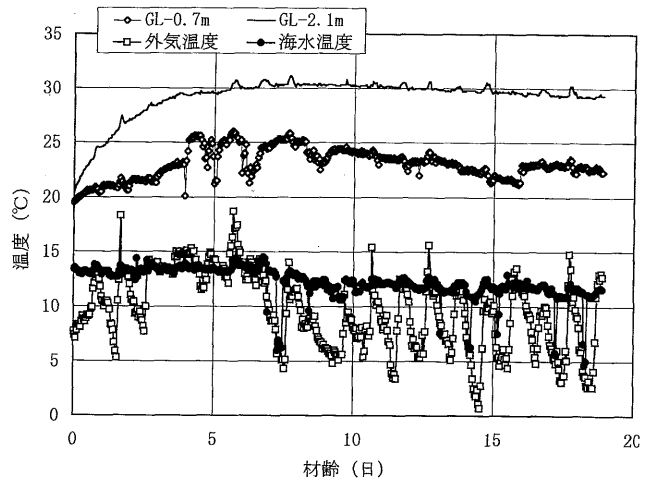


図-11 温度測定結果

図-12に深度別の温度測定結果を示す。

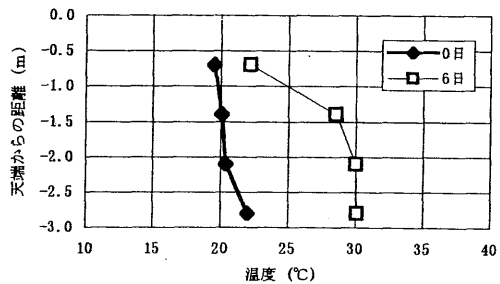


図-12 深度別測定結果

上図より、材齢6日では、深度が深いほど温度が高く、図-10の強度試験結果と同じ傾向が得られた。一方、コアの試験結果から深度方向におけるコアの湿潤密度と含水比はほぼ一定であり、盛土内部はほぼ均質の改良土で築造されていたものと判断される。

養生温度が水中盛土材の強度発現に与える影響を調べるため、室内試験において表-2の配合で供試体を作製し、水中養生温度を20, 30, 40℃に変化させたときの一軸圧縮試験を実施した。

図-13は一軸圧縮強さと材齢との関係を示し、表-9は各材齢毎の強度比を示したものである。

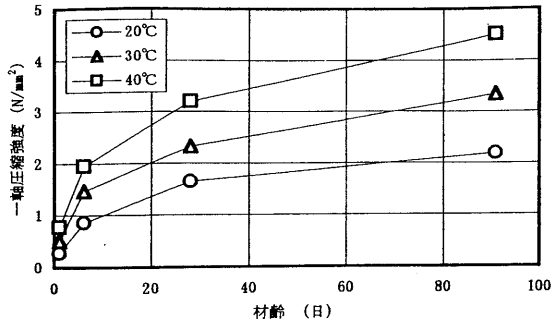


図-13 養生温度別の材齢と強度の関係

表-9 各材齢毎の強度比

材齢	30℃/20℃	40℃/20℃
材齢1日	1.84	2.83
材齢6日	1.70	2.26
材齢28日	1.41	1.94
材齢91日	1.52	2.06

図-13, 表-9 から, 養生温度が30℃の場合の一軸圧縮強さは20℃の場合の1.4~1.8倍, 40℃の場合は20℃の1.9~2.8倍を示しており, 養生温度が強度発現に及ぼす影響は極めて大きいことが分かる。

以上のことから, 築堤の現場強度が室内およびプラント強度より高かったことは, 室内強度およびプラント強度の養生温度が20℃であるのに対し, 1日の打設量が大量(H11年度は最大650m³/日)打設のため, 固化反応に伴う発熱が蓄積され, 内部温度が高いことが原因であったと言える。

一方で, コンクリートの強度増進過程をコンクリート養生温度の積算温度を利用して圧縮強度を推定する方法がある。

積算温度Mは(1)式で示される。

$$M = \sum (\theta - A) \Delta t \dots\dots\dots(1)$$

ここに, θ : Δt 時間中のコンクリート温度(℃)

A : 起算温度(℃ 一般的には-10℃)

Δt : 時間(日)

鎌田らは⁵⁾, 高温域では起算温度をA=+10℃とした方が, 近似誤差が小さくなることを提案しており, 今回の試験データを式(1)に起算温度をA=+10℃として計算し, 積算温度を対数軸でグラフに示したものが図-14であり, 起算温度を-10℃とした場合より, 相関係数の高い近似式(2)が得られた。

$$qu = 0.6541 \ln(M) - 1.5099 \dots\dots\dots(2)$$

qu : 一軸圧縮強さ

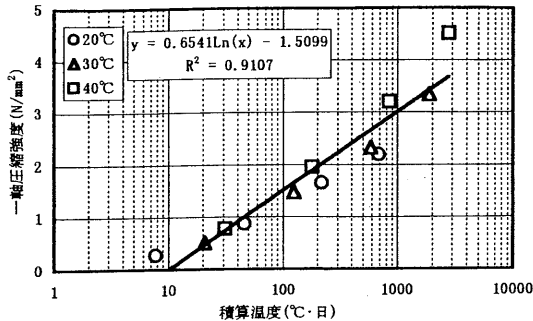


図-14 積算温度と一軸圧縮強さ

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施工を平成10年度と平成11年度に実施した結果, 以下のことを確認できた。

- ① 一年経過した築堤の長期強度(材齢28日~365日)の調査結果から, 水中盛土材の強度の伸びは1.3~1.5倍, PFBC灰の伸びは2.5倍であり, 長期に互る強度発現性を示す材料であることが確認された。
- ② 現場試験における透水係数は, 材齢28日で 1×10^{-4} オーダーで, 材齢365日で 1×10^{-5} オーダーを示し, 長期的に透水性の低い状態を維持していることを確認した。
- ③ ミニスランプ試験結果より, フライアッシュは流動性維持に効果的であると言える。
- ④ トレミー工法において流動距離が長くなるほど強度が低下する傾向がみられたが, ばらつきも大きく, 流動に伴う強度の低下やばらつきの評価が今後の課題であり, それらを考慮した施工方法を確立することにより, さらに施工の最適化が図れると考えられる。
- ⑤ 改良土の圧縮強度は養生温度に強く依存し, 築堤の強度が室内およびプラント強度より高かったことは, 固化反応に伴う発熱による温度養生効果であることを確認した。
- ⑥ 圧縮強度を積算温度の対数で表わす回帰式が得られた。

6. おわりに

今回報告した事例は, 石炭灰を用いた水中硬化体を施工条件に合わせて, 超固練りスラリーからスラリー状で施工し, 海上築堤に適用したもので, 全国的にも例のない施工と思われる。

本報告が, 今後の石炭灰有効利用の一つとして同種工事の参考になり, 石炭灰の有効利用の拡大に繋がれば幸いです。

最後に, 本研究の実施にあたり, ご協力頂いた工事および試験関係者の方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小林 仁; 田中則和; 高橋昌之. 石炭灰を用いた水中硬化体の開発. 電力土木. no.284, 1999, p.9-13.
- 2) 長谷一矢; 北原繁志; 中山学之. 石炭灰を用いた混合土並びに路盤材の長期性状. 北海道開発局技術研究発表会発表概要集(1). 第43回, 1999, p.51-56.
- 3) 田中則和; 水口 洋; 北原繁志. 石炭灰を利用した海上築堤の養生温度が強度に及ぼす影響. 土木学会第55回年次学術講演集. 2000, 掲載予定.
- 4) 社団法人セメント協会. コンクリート便覧. 第2版. 1994, p.229-230.
- 5) 吉野利幸; 大塚隆男; 鎌田英治. 高温域を含む各種養生温度でのコンクリート強度増進性状. セメント・コンクリート論文集. no.45, 1991, p.370-375.