

# 苫小牧港の係留施設における石炭灰を有効活用した改良土の強度特性について

室蘭開発建設部 苫小牧港湾事務所 第1工務課 ○ 佐藤 篤志  
横山 大介  
今林 弘

苫小牧港西港区及び東港区では、老朽化対策や大規模地震時の物流を確保する耐震機能を有した岸壁などの改良工事を進めている。改良工事のうち埋立工においては、火力発電所から発生する石炭灰を活用した土砂改良工法を採用している。本改良工法については、平成22年度に配合設計と施工方法について報告を行った。本報告では、現地で実施工を行った改良土の強度試験の結果を踏まえ、改良土の強度特性について報告する。

キーワード：土砂改良、石炭灰、耐震強化岸壁、リサイクル

## 1. はじめに

苫小牧港は、北海道南西部太平洋岸に位置する国際拠点港湾である。北海道の港湾取扱貨物の約5割、外資コンテナ貨物の約7割を扱っており、北海道の経済、産業を支える役割を担う重要な港である。しかしながら、大規模地震が発生し、港湾機能が麻痺した場合には、苫小牧周辺地域の経済・生活はもとより北海道の経済全体に多大な影響を与えることが懸念される。このため、苫小牧港西港区及び東港区において、老朽化対策や大規模地震時の物流を確保することなどを目的として耐震機能を有した岸壁へ改良工事を進めている。現在の進捗状況としては、東港区中央ふ頭国際海上コンテナターミナル12.0m岸壁（耐震）が、平成22年4月より一部供用開始となり、西港区西ふ頭においては、内貿ユニットロードターミナル3バースのうち9.0m岸壁（耐震）1バースが、平成25年9月より供用を開始した。現在も、引き続き両港区の改良工事を進めている。

改良工事のうち埋立工においては、火力発電所から発生する石炭灰を有効活用した土砂改良工法を採用している。本報告では、現地で実施工を行った改良土の強度試験の結果を踏まえ、改良土の強度特性について報告する。

## 2. 苫小牧港において石炭灰を有効活用した実績

苫小牧港において、これまでに石炭灰を有効活用した実績と得られた主な知見は以下のとおりである<sup>1)2)3)</sup>。

① 配合試験等により、フライアッシュの配合量は、

300kg/m<sup>3</sup>で材料分離が最もしにくい。

- ② フライアッシュを用いることは、水中打設時における材料分離の危険性が少ない。
- ③ スラリー配合の条件において、粘着力 $C_d$ は、セメント量が多くなるほど強度発現が大きくなる傾向にある。一方、せん断抵抗角 $\phi_d$ については、セメント量による影響は少なく、概ね $\phi_d=40^\circ$ 程度の値が得られた。
- ④ シルトを使用した改良土の強度は、フライアッシュの灰種によるばらつきが比較的小さい。その他の土質における、フライアッシュの灰種の違いによる強度特性については未解明な点があった。
- ⑤ シルト・粘性土を用いた場合の室内配合試験より、養生温度10°Cにおいてセメント量40kg/m<sup>3</sup>、フライアッシュ300kg/m<sup>3</sup>を添加混合することにより、設計基準強度である一軸圧縮強度 $q_u=200\text{kN/m}^2$ を満足する。
- ⑥ セメント添加量の増大とともに1週強度、4週強度が増加する傾向を示している。
- ⑦ セメント添加量が多いほど4週と1週の強度比の値が大きい。

## 3. 対象施設について（東港・西港）

本報告の対象施設となる、西港区西ふ頭耐震強化岸壁の標準断面図を図-1、東港区中央ふ頭における耐震強化岸壁の標準断面図を図-2に示す。両港区の施設とも、控え直杭式鋼管矢板構造を採用しており、東港区については、ガントリークレーンの基礎（鋼管杭）を有している。

要求性能を満足させるための一つとして土砂の液状化対策も必要となり、改良土の設計強度は一軸圧縮強度  $qu=200\text{kN/m}^2$  となった。

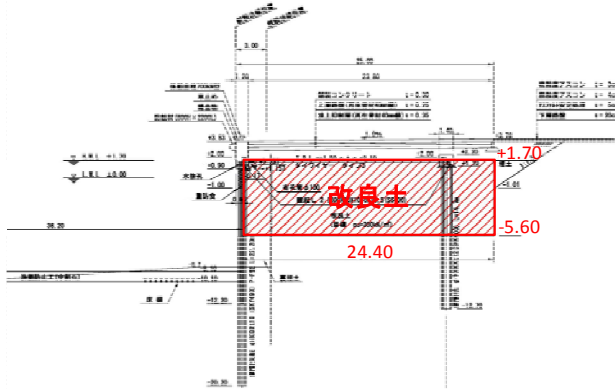


図-1 西港区岸壁西-9.0m (耐震) 標準断面図

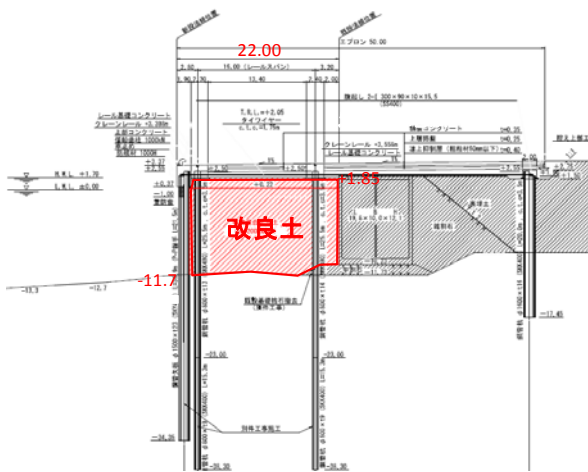


図-2 東港区岸壁-12.0m (耐震) 標準断面図

#### 4. 施工について

##### (1) 改良土打設方法

西港区における改良土の施工状況を写真-1 に示す。西港区における施工は、これまでの東港区の岸壁改良工事とほぼ同様の施工規模・施工条件となることから、東港区の過年度工事と同様に事前混合処理プラントを施工箇所を設置し、圧送管により打設するトレミー工法とした。

##### (2) 事前混合処理プラント

事前混合処理施工フローを図-3 に示す。投入した土砂にセメントと分離防止剤（フライアッシュ）、海水を混合しスラリー状の改良土とする。この事前混合処理プラントでは、使用する土砂の最大粒径が 40mm 程度までの改良土の製造ができる。

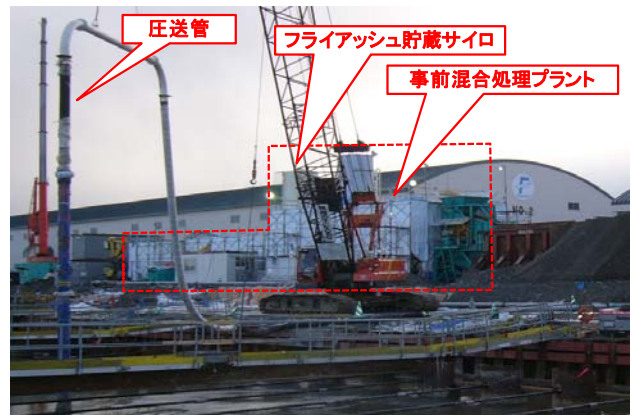


写真-1 改良土打設状況 (西港区)

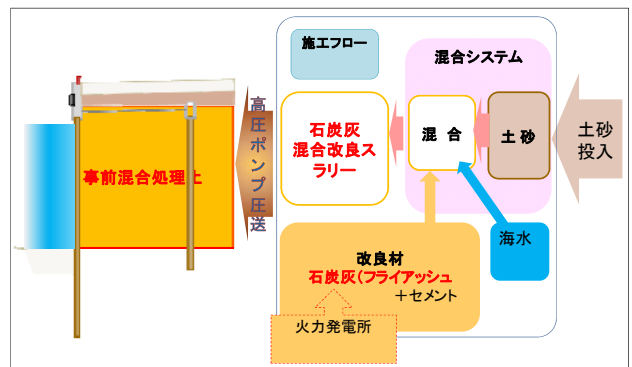


図-3 事前混合処理施工フロー

#### 5. 石炭灰（フライアッシュ）について

水中部に改良土を埋立ることとなるため、改良土の材料分離防止を考慮する必要がある。苫小牧港は、図-4 に示すように、苫東厚真発電所に近いこともあり、材料分離防止材となるフライアッシュを入手しやすい。

苫東厚真発電所における石炭灰の発生量と有効利用量の推移を図-4 に示す。年間 40 万 t 程度の石炭灰が有効利用されていることが分かる。苫小牧港の整備においても、石炭灰の使用により有効利用の促進に寄与している。

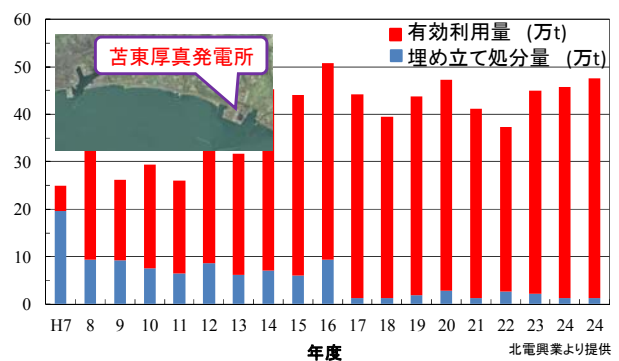


図-4 石炭灰の発生量と利用量

## 6. 強度特性について

### (1)改良土の配合の決定および品質確認について

改良土の設計強度を満足するために、目標強度の設定を行う。配合の決定および品質確認は、図-5に示す試験フローにより行った。現地着工前に目標強度と配合の設定を行い、施工時では、現地着工前の室内配合試験結果を踏まえ、打設時期の海水温など現場条件を考慮して配合を決定する。さらにプラントサンプリング・原位置サンプリング等による改良土の品質確認を行う。

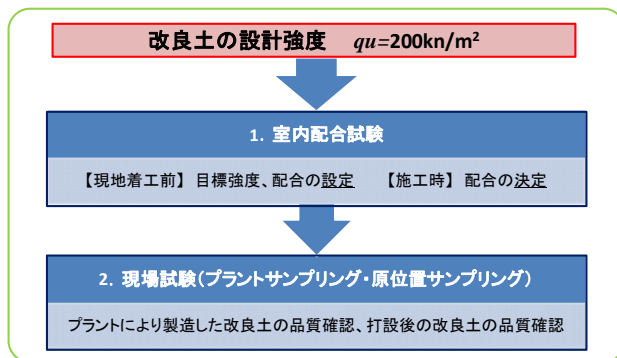


図-5 試験フロー

### (2)室内配合試験

#### a)目標強度の設定

目標強度の設定にあたっては、事前混合処理工法技術マニュアルにより、割増係数( $\alpha$ )は 2.0 (液状化対策)とし、これを設計強度に乘じることで目標強度は  $qu=400\text{kN/m}^2$  とした。

#### b)試験項目

室内配合試験における検討内容を表-1に示す。

表-1 室内配合試験・検討内容

種類	目的
土質試験 粒度分布 含水比	・使用する母材による強度特性の傾向を把握するため ・施工時の海水添加量の管理のため
ミニスランプ スランプ	・改良土の品質確保のため
養生温度の設定	・【現地着工前】20℃、5℃ ・【現地着工時】施工時期の海水温を考慮
一軸圧縮試験	・改良土の強度確認 ( $\sigma_7$ 、 $\sigma_{28}$ )

#### ① 土質試験 (粒度分布、含水比)

改良土に使用した土砂は、平成 21、22 年度は、東港区中央水路航路・泊地の浚渫土砂の排砂地および築堤に堆積した土砂を使用している。平成 25 年度以降は、西港区の岸壁改良工事で発生した原地盤の土砂を使用している。土砂の採取箇所が異なることから、土質を把握するために粒度分布試験を行う。

含水比試験は、海水添加量の決定にあたり土砂に含ま

れる含水量を把握するために行う。

#### ② ミニスランプ・スランプ試験

ミニスランプ・スランプ試験は、改良土の打設時における品質確保およびワーカビリティ確保のために行う。ミニスランプの管理値は  $7.0\text{cm}\pm 1.0\text{cm}$  とした。これは最も水中不分離性を発揮するためである。なお、西ふ頭で発生する土砂は粗礫分を含み、最大粒径が  $40\text{mm}$  程度であることから、改良土はフレッシュコンクリートの性状に類似している。このことより、礫質砂はミニスランプではなくスランプ値による評価とした。スランプ値は同一試料によるミニスランプ試験とスランプ試験で得られた値の相関により決定した。規格値は、コンクリート標準示方書により  $\pm 2.5\text{cm}$  とした。

#### ③ 養生温度の設定

養生温度は、改良土の強度に影響を与えることが知られている<sup>4)</sup>。改良土は海中に埋立を行うため、施工時期の海水温度について考慮する必要がある。現地着工前の室内配合試験では、養生温度は通常の養生温度 20℃のほか、冬季における苦小牧海水温として 5℃とした。一方、施工時の室内配合試験においては、打設時期を考慮した養生温度とした。

#### ④ 一軸圧縮強度

①～③により決定した配合により作成した試料が所定の目標強度  $qu=400\text{kN/m}^2$  を満足しているかを確認するため、一軸圧縮強度試験  $\sigma_7$  および  $\sigma_{28}$  を行う。現場試験については後述する。

### c)試験結果

現地着工前、施工時における室内配合試験およびサンプリング等で得られたデータより分析した結果を以下に示す。

#### ① 土質試験 (粒度分布、含水比)

土砂の粒径加積曲線を図-6に示す。粒度試験結果から、浚渫土砂は採取場所の違いによりシルト～礫質砂に分類される。シルトの場合は、フライアッシュの添加前後で差は見られない。一方、礫質砂は、細粒分 (シルトおよび粘土) が 3%前後のため、フライアッシュの添加により土砂の粒度が調整されたことが確認できた。これは土砂の空隙にフライアッシュが充填されたためと考えられる。

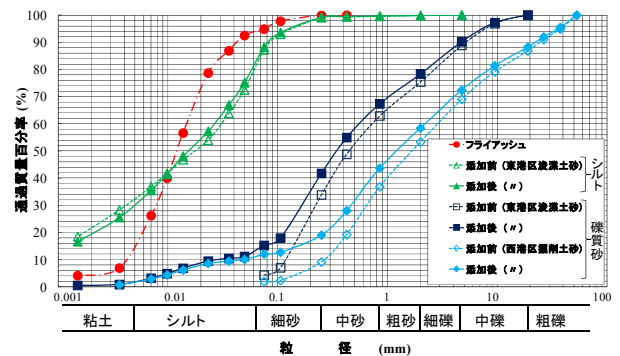


図-6 粒径加積曲線

土砂の含水比の試験結果を図-7 に示す。ここでは、サンプル数の多い施工時における結果を示している。シルトの含水比は、ばらつきはあるものの 40%~60%である。一方、礫質砂の含水比は、5%~10%前後である。

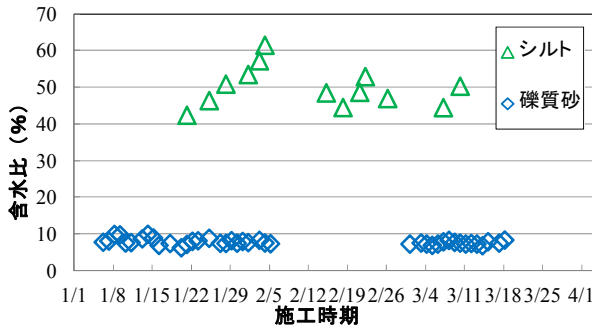


図-7 土砂の含水比

② ミニスランプ・スランプ試験

礫質砂におけるミニスランプ・スランプの関連の結果を図-8 に示す。ミニスランプ値とスランプ値にはバラツキが見られるものの、ミニスランプが大きくなるに伴いスランプ値が大きくなる傾向がみられた。これにより目標スランプ値は、概ね 20cm とした。

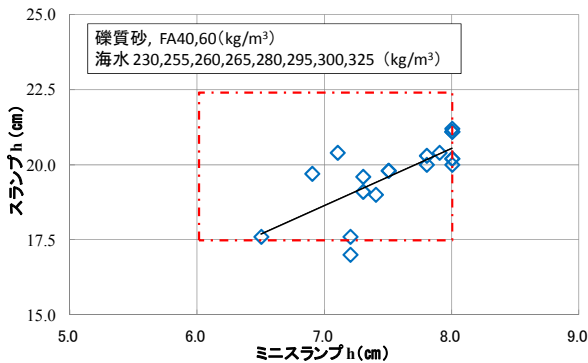


図-8 スランプとミニスランプの関係

③ 養生温度の設定

苫小牧港における海水温度の傾向を図-9 に示す。平均海水温度は季節変動による変化があり、海水温の差は最大約 15℃であった。施工時では、打設時期により養生温度は 3℃~15℃の設定となった。

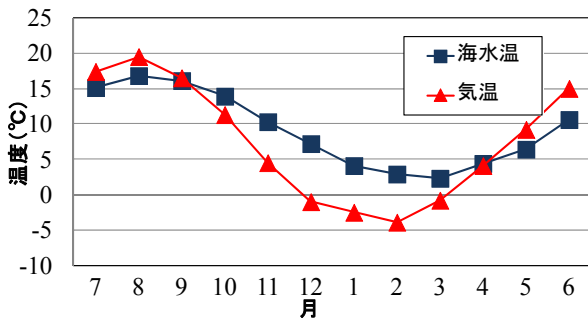


図-9 月別平均海水温度の推移

(3)室内配合試験【現地着工前】

一軸圧縮試験（礫質砂（西港区））の結果を図-10 に示す。主な結果は以下のとおりである。

- ・強度は、養生温度が高いほど、またセメント量が多くなるに従い大きくなる。すなわち強度は、養生温度およびセメント量による影響が大きい。
- ・養生温度の違いによる強度比は、セメント量が多くなるに従い大きくなる。フライアッシュとポリアクリルアミドについても同様にその傾向は大きくなる。
- ・フライアッシュの方がポリアクリルアミドと比較して少ないセメント量で所定の強度を満足する。

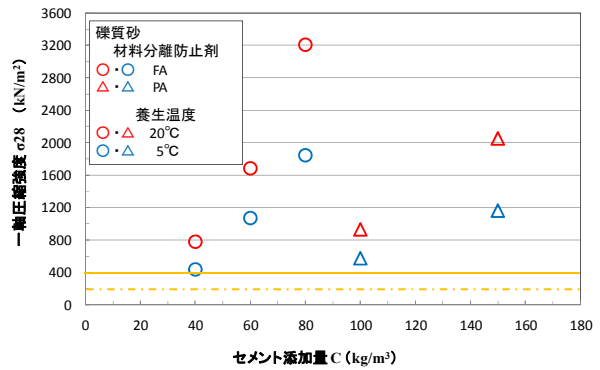


図-10 室内配合試験【現地着工前】σ<sub>28</sub>結果

礫質砂（西港区）における配合の設定結果を表-2 に示す。ミニスランプ値 7.0±1.0cm を得るためのセメント量は、材料分離防止材がフライアッシュの場合 40kg/m<sup>3</sup>、ポリアクリルアミドを使用した場合 100kg/m<sup>3</sup> となった。コスト比較の結果、フライアッシュを採用した方がポリアクリルアミドを採用するよりも 25%~30% 程度低減することができる。

表-2 配合の設定（礫質砂（西港区））

高炉B種 BB (kg/m <sup>3</sup> )	フライアッシュ FA (kg/m <sup>3</sup> )	海水 ρ=1.03g/m <sup>3</sup>	ミニスランプ値 (cm)
40	300	308	6.9
60	300	308	6.9
80	300	308	7.5

高炉B種 BB (kg/m <sup>3</sup> )	分離防止剤 PA (mg/kg)	海水 ρ=1.03g/m <sup>3</sup>	ミニスランプ値 (cm)
100	90	395	7.1
150	90	385	7.0
200	90	380	7.3

(4)室内配合試験【施工時】

一軸圧縮試験（礫質砂（西港区・東港区）、シルト（東港区））の結果を図-11 に示す。

- ・強度は、養生温度が高いほど、またセメント量が多くなるに従い大きくなる。
- ・砂礫土砂においては、養生温度を 3℃とした冬期では

セメント量 60kg/m<sup>3</sup>、海水温度を 8℃とした冬期外ではセメント量 40kg/m<sup>3</sup> の場合に、目標強度  $q_u=400\text{kN/m}^2$  を満足する。一方、養生温度 15℃において、セメント添加量を 30kg/m<sup>3</sup> とした場合は目標強度を満足しなかった。

・礫質砂においては、セメント量 60kg/m<sup>3</sup> の場合、養生温度の違いによる強度比は大きくなる。

・養生温度、セメント量が同じであっても強度にばらつきがみられる。

・養生温度が同じである場合は、礫質砂の方がシルトよりも少ないセメント量で所定の強度を発現する。これは、礫質砂のほうがシルトと比較して空隙率が大きいためフライアッシュとセメントが土砂の空隙に充填されやすく、均一な改良土となるためであると考えられる。

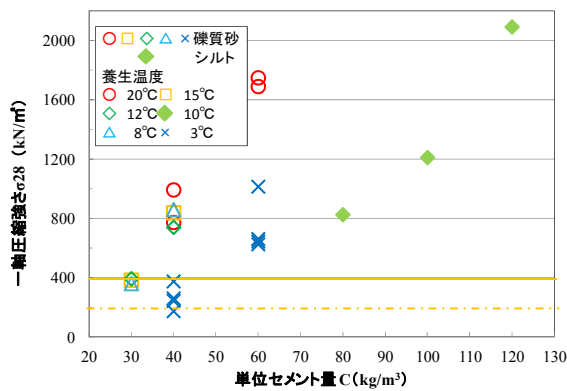


図-11 室内配合試験【施工時】 $\sigma_{28}$ 結果

### (5) プラントサンプリング・原位置サンプリング

#### a) サンプリング方法

・プラントサンプリング

事前混合処理プラントで製造された改良土の品質確認のため、プラントサンプリングを実施した。サンプリングの方法は、プラントで製造された直後の改良土を採取し、作成した供試体を現地の海水にて養生を行う。強度確認は、室内試験と同様とした。

・原位置サンプリング

打設後における改良土の品質確認のため、現地サンプリングを行った。サンプリングの方法は、①改良土の打設後に打設箇所から直接改良土を採取する方法。②改良土打設後に 28 日目にボーリングによりコアを採取する方法とした。強度確認方法は①、②ともにプラントサンプリングと同様とした。

#### b) サンプリング結果

シルトにおける各サンプリングで得られた一軸圧縮強度試験結果を図-12に示す。

・プラントサンプリング・現地サンプリングともに設計強度  $q_u=200\text{kN/m}^2$  を満足している。

・室内試験強度に対し、プラント・現地サンプリング強度は小さくなる。

・養生温度を 5℃とした冬期では、プラント・現地サンプリングともに強度が小さくなる傾向があり、且つ強度の最大値と最小値の幅が大きくばらつきがみられる。

・一方、ボーリングにより採取したコアの強度は、室内試験強度よりも大きい。

砂礫質土砂における各サンプリングで得られた一軸圧縮強度試験結果を図-13に示す。

・プラントサンプリング・現地サンプリングともに設計強度  $q_u=200\text{kN/m}^2$  を満足している。

・室内試験強度に対し、プラント・現地サンプリング強度は小さくなる。

・養生温度が低く、打設時期の海水温度に変化があるほど、強度にバラツキが生じる。

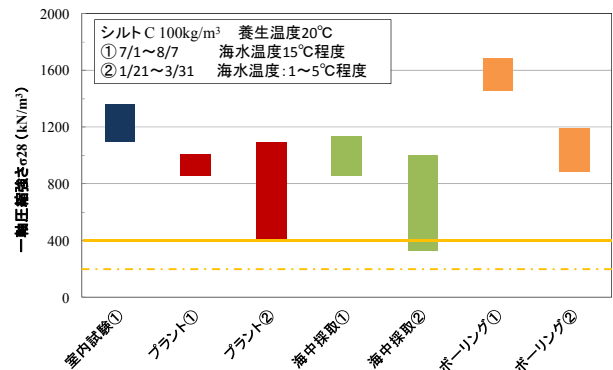


図-12 各サンプリング結果  $\sigma_{28}$  (シルト)

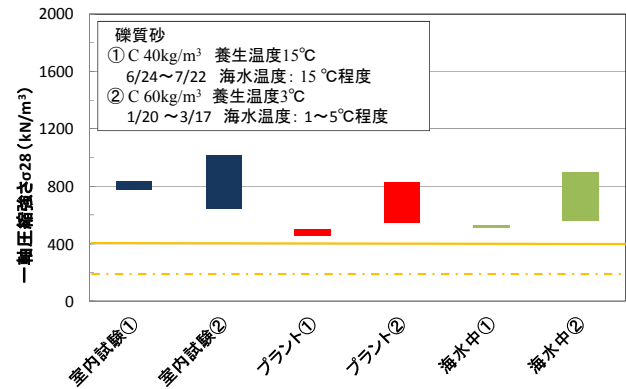


図-13 各サンプリング結果  $\sigma_{28}$  (礫質砂)

#### c) 改良土の強度のばらつきの要因

改良土の強度はセメント量と養生温度の影響が大きいことがわかった。ばらつきの要因は以下のことが考えられる。

- ① 工事で発生した土砂を使用するため、土砂の性状が一定しない。施工時では大量の土砂を使用するためその傾向はより顕著となる。
- ② 使用前の土砂は外気に影響を受けやすい。特に冬期は土砂の表面部と内部とで温度差が生じやすい。
- ③ 海水温は変動があることから室内配合試験と違い施工時は養生温度が一定しない。
- ④ 冬期では圧送管が冷やされてしまい、圧送中に改良土の温度が下がる場合がある。
- ⑤ プラント各種計量器は施工による振動

の影響があり、使用実績から計量誤差は、土砂±5%改良材±3%となっている。実施工ではこれを考慮した各材料配合が求められ、静的な環境で各材料を計測した室内配合試験時とは異なる。

## (6)コアボーリングについて

コアボーリングは、乱れが少ない試料の採取が可能な3重管サンプリングを試みた。

シルトにおける採取コアによる試験結果では、強度にばらつきはみられるものの、深度が深くなるに従い強度が大きくなる傾向がみられた。これは、フライアッシュを添加した改良土は、打設後28日を経過しても強度が伸びる特性があり、下層になるほど打設後の経過時間が長いと考えられる。

一方、西港区の土砂(砂礫質)を用いた改良土についてはコアの採取が不可能であった。これは改良土に粗礫(最大粒径40mm程度)を含んでおり、ボーリングのビットに粗礫が引掛り回転時に試料がかき乱されてしまうためである。そのため、平成26年度では打設時に塩ビ管を設置し、28日目に塩ビ管に入った改良土で供試体を作成し強度試験を行うこととした。

## 7. まとめ

強度特性に関して、これまでに得られた知見および本報告で得られた結果を踏まえ以下にまとめる。

- ・フライアッシュは、西港区の土砂にみられる粗礫を含む土砂においても粒度分布を均一にでき材料不分離効果が期待できる。さらに、セメント量を低減できコスト縮減となる。
- ・強度は、土砂の粒度分布のほか、セメント量、養生温度に大きく影響される。
- ・シルトよりも礫質砂の方がフライアッシュの効果は大きく、少ないセメント量で所定の強度を満足する。
- ・西ふ頭における礫質砂においては、養生温度を3℃とした冬期の場合、セメント量60kg/m<sup>3</sup>、海水温度を8℃以上とした冬期外の場合、セメント量40kg/m<sup>3</sup>で目標強度400kN/m<sup>2</sup>を満足する。
- ・強度のばらつきは、室内配合試験よりも現場における各サンプリングの方が大きい。これは土砂の性状が一定でないことと、施工時における養生温度の変化という、強度に影響を及ぼす要因がみられるためである。
- ・粗礫を含む土砂で海中に打設される改良体の強度確認にあたっては、海中よりサンプルした供試体による一軸圧縮強度試験が可能であった。

## 8. 今後の課題

改良土の品質をより一定にしていくためには、ばらつきの要因を可能な限り取り除くことが必要である。課題-1・室内配合試験を実施工の条件にどれだけ近づけるか。

- ① 強度に影響する養生温度の設定を慎重に行う。
- ② また、同じ採取箇所においても母材の粒径や性質が違ふ箇所がないか十分調査を行う。

課題-2・施工時の品質管理をどの様に向上させるか。

- ① 土砂の性質の違い(含水比)によるきめ細やかな配合の管理。
- ② 土砂に含まれる玉石などは事前にバケット等でふるい分けを行い除去する。
- ③ 計量誤差を少なくするため、土砂改良機の清掃等のメンテナンス。
- ④ 原位置サンプリングでは、粗礫を含む改良体の強度確認のためのコア採取は難しいことが判った。原置試験による方法についても今後検討したい。

## 9. おわりに.

粗礫を含む砂礫土砂においてもフライアッシュを有効活用した改良土は所定の強度を満足することが明らかとなった。今後のより適切な配合のため、データを蓄積・分析し、施工・品質を確保しつつ、さらなるコスト縮減に向け検討していきたい。

本報告にあたり、データの取りまとめ・分析にご指導いただいた北電興業(株)ご担当者様、ならびに工事関係者の皆様にこの場を借りて御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 高橋昌之・浮津憲一・田中則和(1999)：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、土木学会年次学術講演会講演概要集第5部、54巻 pp.30-31
- 2) 山口和良・上久保勝美・高橋啓司(2003)：リサイクル材(石炭灰)を用いた大型岸壁背後の地盤改良について、平成15年度技術研究発表会、港-31
- 3) 森昌也・新垣英隆・高田稔年(2010)：苫小牧港東港区耐震強化岸壁における石炭灰を有効活用した土砂改良について、平成21年度技術研究発表会、技-49
- 4) 財団法人 沿岸技術研究センター(2008)：事前混合処理工法技術マニュアル(改訂版)