

# 放射性物質で汚染された港内海底土を封じ込める新しい被覆土と施工方法

秋本 哲平<sup>1</sup>・熊谷 隆宏<sup>2</sup>・福田 守芳<sup>3</sup>・古川園 健朗<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2712 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)  
E-mail: teppei.akimoto@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>2</sup> 正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2712 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)  
E-mail: takahiro.kumagai@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>3</sup> 正会員 五洋建設株式会社 東京土木支店 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)  
E-mail: moriyoshi.fukuda@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>4</sup> 正会員 東京電力 HD㈱ 福島第一原子力発電所 (〒979-1301 福島県双葉郡大熊町大字夫沢字北原 22-1)  
E-mail: zono.ken@tepcō.co.jp

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震とそれに伴って発生した津波により、福島第一原子力発電所は大きな被害を受け、高濃度の放射性物質を含む汚染水が漏洩した影響等により、港湾内海底土から放射性物質が検出された。放射性物質を含む海底土が巻き上がり、港湾外へ拡散することが懸念されたため、固化処理土による海底土被覆を行った。2012年度に第1期工事として72,600m<sup>2</sup>を被覆し、2014年度から第2期工事として、180,600m<sup>2</sup>を被覆した。第2期工事では、波浪条件が厳しい港口部を含んでいたことから、被覆土には早期強度が求められたため、砂質土を主材とする固化処理土を選定した。砂質土を主材とする固化処理土の課題であった水中打設時の材料分離は、特殊添加剤や打設治具を開発することで解決し、港湾内全域を被覆することができた。

**Key Words :** Radioactive material, cement mixed soil, coating soil, floating mud, construction method,

## 1. はじめに

東日本大震災で福島第一原子力発電所は大きな被害を受け、高濃度の放射性物質を含む汚染水が専用港湾内に漏洩した影響等により、港内海底土から放射性物質が検出された。波浪等の作用により放射性物質を含む海底土が巻き上がり、港湾外へ拡散することが懸念されたため、固化処理土による海底土被覆を行った。海底の一部には、密度の低い浮泥が存在していたことから、浮泥の巻き上がりを防止する軽量性と長期的な安定性に優れた固化処理土が求められたため、2種類の異なる固化処理土を2層に分けて打設することとした。2012年度に第1期工事<sup>1)</sup>として建屋前面の72,600m<sup>2</sup>を被覆したが、2014年度からの第2期工事では、波浪条件が厳しい港口部を含むため(図-1)、第1期工事以上の性能が固化処理土に求められた。そのため、第1期工事とは異なる新しい被覆材を開発して180,600m<sup>2</sup>の海底を被覆した。本稿では、第2期工事の固化処理土の選定および施工方法について紹介する。

## 2. 海底調査

被覆工を実施する前に海底土の性状を把握するため、対象となる港湾内全域で、海底土の調査を実施した。写真-1に調査状況を示す。30mm×30mm×4mのアルミパイプ2本、φ50mmのフート弁およびφ50mmのアクリルパイプからなる採泥器(写真-2)を調査船上から人力で水深3.5~8.0mの海底に挿入して海底土を採取し、浮泥の有無や浮泥の密度と層厚を確認した。全16箇所の調査のう

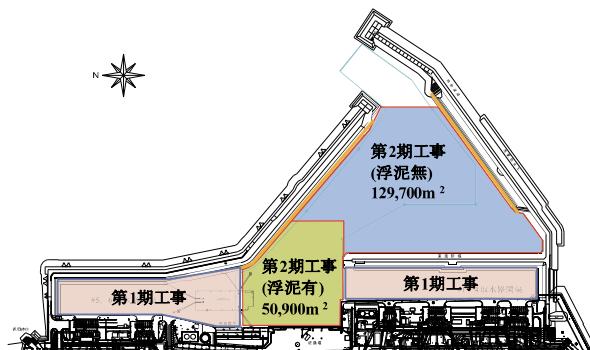


図-1 施工範囲平面



写真-1 海底土採取状況

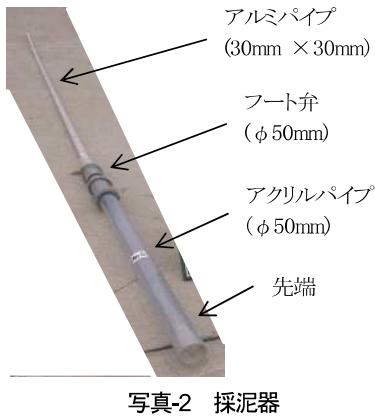


写真-2 採泥器

ち、4箇所から浮泥が確認され、浮泥の密度は1.20～1.38g/cm<sup>3</sup>、浮泥の層厚は1.0～3.0cmであった。

### 3. 配合設計

#### (1) 固化処理土に必要な強度

固化処理土は、波浪に対する長期的な耐久性が必要であることから、第1期工事と同様に、底泥の流送限界強度を必要強度と設定した<sup>1)</sup>。これは、設計波来襲時に巻き上がらないための被覆土の必要強度となっている。

設計波高Hと対象箇所の水深hから、(1)式により被覆土に作用する流速を算定し、(2)式により被覆土に作用するせん断応力 $\tau_b$ に変換する。(3)式<sup>2)</sup>の底泥の降伏値と巻き上げ限界掃流力の関係から底泥の降伏値を算定する。

$$U_b = \frac{H}{2h} \sqrt{g \cdot h} \quad (1)$$

$$\tau_b = \rho g \frac{n^2 U_b^2}{h^{1/3}} \quad (2)$$

ここに、 $U_b$ :底面流速振幅の最大値(m/s),  $H$ :波高(m),  $h$ :水深(m),  $g$ :重力加速度(m/s<sup>2</sup>),  $\tau_b$ :底面せん断応力(N/m<sup>2</sup>),  $\rho$ :海水の密度(1,030kg/m<sup>3</sup>),  $n$ :マニングの粗度係数(0.025)

$$\tau_y = \exp \left( \frac{\ln \tau_b - \ln 0.27}{0.56} \right) \quad (3)$$

ここに、 $\tau_y$ :底泥の降伏値(N/m<sup>2</sup>)

$\tau_y$ は、せん断強度の0.07～0.12倍とされているため<sup>3)</sup>,

安全側の0.07倍とし、一軸圧縮強さ $q_u$ はせん断強度の2倍であるとして、固化処理土に必要な流送限界は(4)式により算定される。

$$q_u = \frac{2}{0.07} \tau_y \quad (4)$$

100年確率波から算定される波高4.02mと、港内の最浅水深3.5mから底泥の流送限界強度は、286.5kN/m<sup>2</sup>と算定されたため、材令28日の固化処理土に必要な一軸圧縮強さ $q_{u28}$ を300kN/m<sup>2</sup>に設定した。

#### (2) 固化処理土の層厚

海底土を被覆する固化処理土は、長期的な安定性を必要とするが、海水中へのカルシウム分溶脱による劣化が指摘されており<sup>4)</sup>、劣化深さは(5)式により推定される。

$$D = A \times (t/t_0)^{0.5} \quad (5)$$

ここに、 $D$ :劣化深さ(mm),  $A$ :係数,  $t$ :経過時間(年),  $t_0$ :基準経過時間(1年)

経過年数を50年とし、一軸圧縮強さ300kN/m<sup>2</sup>における係数 $A=14.0$ とした場合<sup>5)</sup>、劣化深さは99mmと算定されるため、長期耐久性が必要な固化処理土の層厚は10cm以上と設定した。

#### (3) 施工方法の選定

被覆工施工時の浮泥の巻き上がりを防止するためには、被覆材に軽量性が必要である。また、海底土を確実に被覆するためには、高い流動性および充填性が必要である。さらに、長期的な耐久性を実現するために高い強度も必要とされる。このような性能をすべて併せ持つ材料の選定は極めて困難であるため、第1期工事<sup>1)</sup>を参考として、2種類の異なる固化処理土を2層に分けて打設する方法を選定した。浮泥が存在する範囲は、1層目の固化処理土として、軽量性を有する処理土Aを打設し、長期耐久性を有する処理土Bを2層目として打設する。浮泥が存在しない範囲は、施工に伴う浮泥の巻き上がりの心配はないものの、放射性物質拡散リスクの早期低減が必要であることから、1層目は薄層で早期に全域を被覆し、2層目で10cm以上の層厚を確保する、処理土Bの2層施工を実施した。

#### (4) 処理土Aの配合選定

処理土Aは、浮泥の巻き上がりを防止する必要があることから、浮泥の最小密度1.20g/cm<sup>3</sup>より軽い材料として、第1期工事を参考にベントナイトの膨潤を利用した高含水比の固化処理土を選定した。ただし、第1期工事と比べ、波浪条件が厳しくなっていることから、水中打設時の材料分離が懸念されたため、分離防止性能を向上させる検討を行った。図-2に施工システムを示す。固化材混合船のパドルミキサー内でベントナイト泥水とセメント

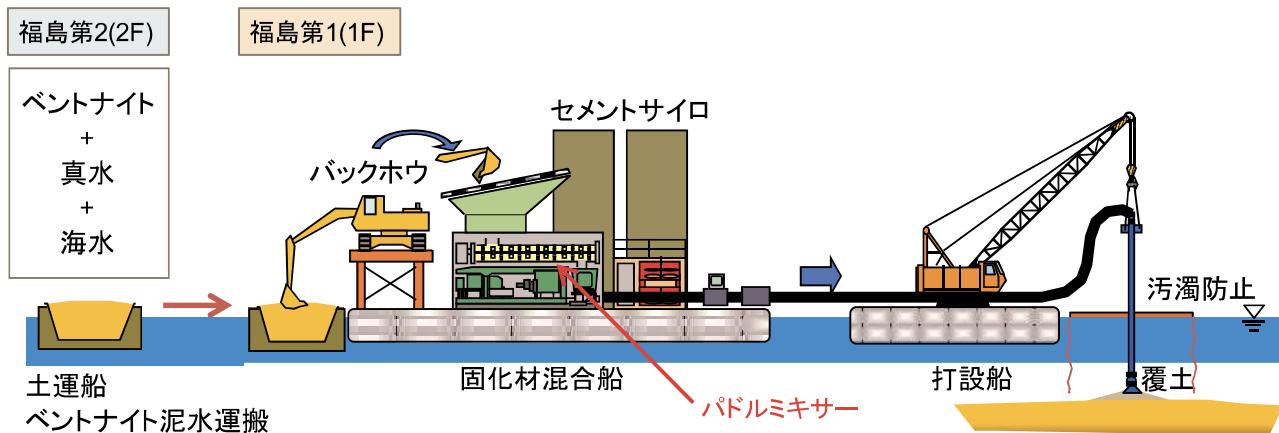


図-2 施工システム

表-1 処理土Aの配合

工事	配合(1m <sup>3</sup> あたり)					性能確認		
	ベントナイト 重量 (kg)	真水 重量 (kg)	海水 重量 (kg)	セメント 重量 (kg)	スラリー水 重量 (kg)	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	泥水 フロー値 (cm)	処理土 フロー値 (cm)
第1回工事	78.9	434.0	433.0	88.6	88.6	1.106	35以上	23
第2回工事	78.9	591.8	93.4	88.6	265.8	1.114	25	21

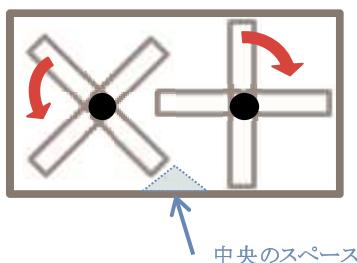


図-3 パドルミキサー内スペース

スラリーを混合して固化処理土が製造される。処理土Aの配合を表-1に示す。ベントナイトの膨脹度は、海水と比べて真水の方が高いため、真水の割合を増やすことで、第1期工事において35cm以上であったベントナイト泥水のフロー値を25cmに改善した。ベントナイト泥水とセメントスラリーを混合する2軸のパドルミキサーの断面を図-3に示す。ベントナイト泥水の粘性を上げることにより、攪拌翼で攪拌されずにパドルミキサー内の底面にある中央のスペースを通り抜けてしまうベントナイト泥水量を減少させた。これにより、材料の混練性能向上させることで、材料の分離防止性能を高めた。

### (5) 処理土Bの配合選定

第2期工事では波浪条件が厳しいことから、施工時の波浪に対する施工条件を設定し、厳格な施工管理を行った。施工条件の算定にあたり、施工エリアを5分割し(図-4)、想定される入射波高(港口波高)に応じて、各エリアでの作用波高を算定するとともに、そのような波の擾乱作用に対して安定性を確保するために必要な固化処理

表-2 施工条件(波除堤前面①)

港口波高(m)	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
作用波高(m)	0.92	1.22	1.53	1.83	2.14	2.44	2.75	3.05
水深(m)	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
必要強度(kN/m <sup>2</sup> )	1.5	4.1	9.0	17.2	29.9	48.1	73.4	107

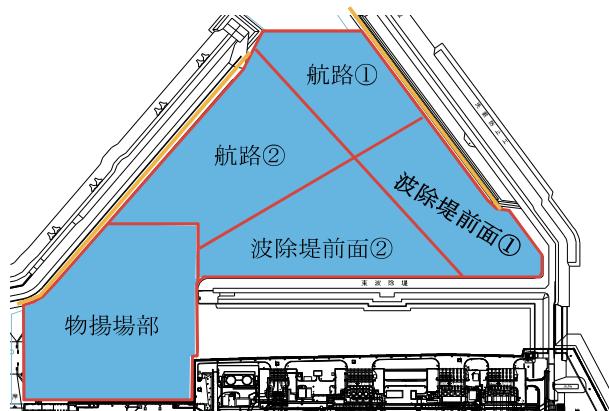


図-4 エリア分割平面

土の強度を算定した。なお、港口波高に対する各エリアの作用波高を算定するための波高比は、10年確率波における各エリアの最大値を用いた。最も厳しい条件となった波除堤前面①の施工条件を表-2に示す。施工後3日以内に来襲する波浪の港口波高を予測し、対応する港内波高および必要な固化処理土の強度を評価する。来襲波浪に対し、打設した固化処理土が十分な強度を保持すると予測される場合のみ施工を実施することとした。したがって、工期を厳守するためには、早期の強度発現が求められた。

表-3 处理土Bの配合

工事	配合( $1m^3$ あたり)							性能確認	
	ベントナイト重量(kg)	真水重量(kg)	海水重量(kg)	セメント重量(kg)	スラリー水重量(kg)	砂重量(kg)	添加剤重量(kg)	湿润密度(g/cm <sup>3</sup> )	処理土フロー値(cm)
第1回工事	120.4	541.6	173.4	187.7	187.7	-	-	1.210	20
第2回工事	-	-	442.1	120.0	120.0	1100.0	1.5	1.725	19

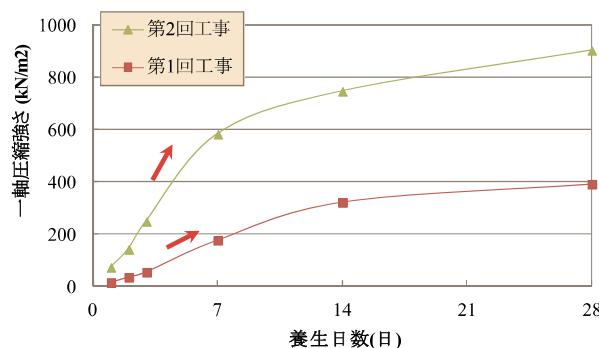


図-5 処理土Bの一軸圧縮強さ

第1期工事の固化処理土の配合に基づき、ベントナイトやセメントの添加量を増加することにより、強度を増加させることは可能であると考えられたものの、それらの材料の供給能力の限界や、固化処理土の打設時流動性の低下に伴う海底土の被覆性の低下などが懸念された。そこで、ベントナイトを使用せず、砂質土を主材とする固化処理土の使用を検討した。砂質土を主材とする固化処理土は、早期に高い強度を確保することができ（図-5）、2日強度で  $139.8\text{kN}/\text{m}^2$  となることから、2日後に波高5mの波浪が予測されても施工が可能となった（表-2より波高5m時の必要強度は  $107\text{kN}/\text{m}^2$ ）。しかし、ベントナイトと比較して粘着力が弱いことから、水中打設時に材料分離が発生してしまう。そこで、天然材料の特殊添加剤を開発し、流動性を保持したまま、材料分離防止性能が確保できる配合を選定した。処理土Bの配合を表-3に示す。水中分離抵抗性試験<sup>6)</sup>を実施した結果、懸濁物質濃度 SS=10.3mg/l、水素イオン指数 pH=8.0、水中と気中の強度比 0.9 となり、十分な分離防止性能を有していた。

#### (6) 水中打設実験

配合試験により決定した2種類の固化処理土を用いて、室内にて水中打設実験を実施した。実施状況を写真-3に示す。75cm×75cm×h50cmの矩形の容器内に、海底土を模擬した基盤層および密度  $1.20\text{g}/\text{cm}^3$  以下に設定した浮泥を設置して現地模型を作製し、トレミー管を模擬した打設管を用いて処理土Aと処理土Bを順次打設し、浮泥の巻き上げなく、海底土の被覆が可能であることを確認した（写真-4）。

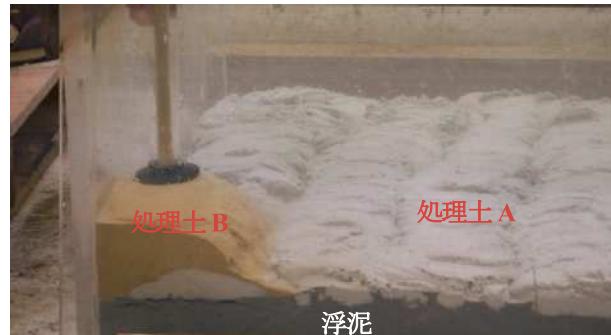


写真-3 水中打設実験状況（断面）



写真-4 水中打設実験後（断面）

## 4. 施工方法の検討

### (1) 打設治具の検討

現地海域での試験施工において、固化処理土の打設後に採泥器（写真-2）を用いて固化処理土を採取し、固化処理土の流動範囲や浮泥の封じ込め状態を確認するとともに、最適な打設方法の検討を実施した。室内での水中打設実験とはスケールが異なるため、固化処理土を打設するトレミー管筒先からの落下衝撃による海底土の巻き上がりが懸念されたため、筒先に打設治具（スプレッダー）を設置して、海底面に対し水平方向に固化処理土を吐出した。第1期工事を参考に作製したスプレッダーを図-6に示す。図中グレーのハッチング部分は、固化処理土が通過するエリアを示し、赤矢印は固化処理土の流れ

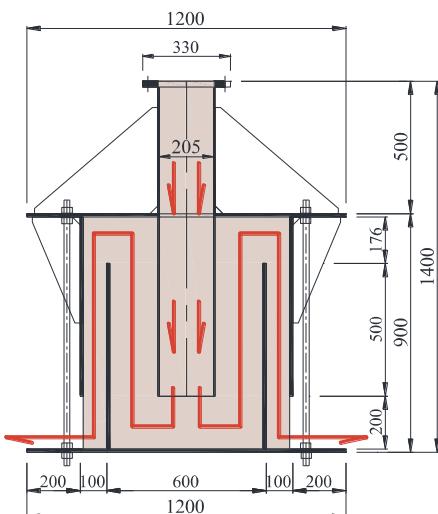


図-6 スプレッダー（処理土A用）

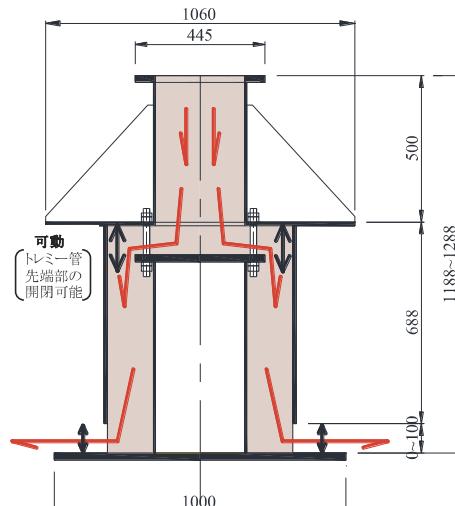


図-8 スプレッダー（処理土B用）

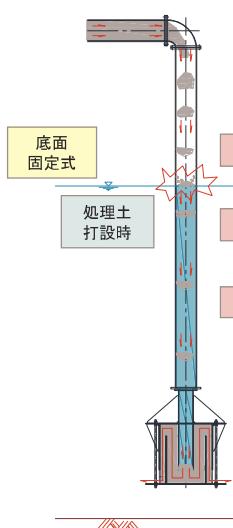


図-7 トレミー内処理土充填方法

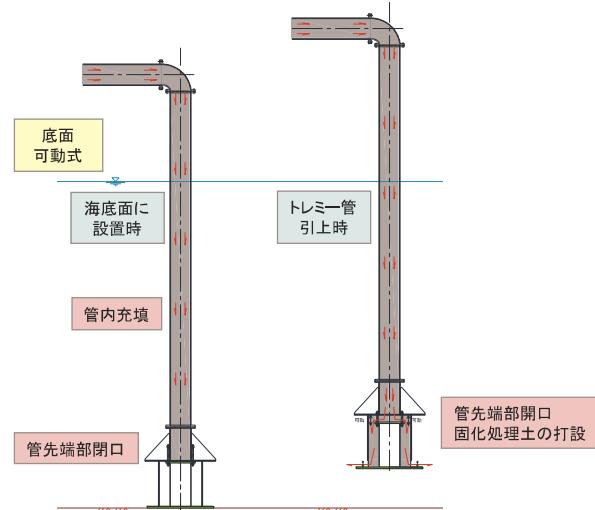


図-9 スプレッダー使用方法

る方向を示している。固化処理土Aは、このスプレッダーを使用することで、浮泥の巻き上がりを防止しながら打設することが可能であった。固化処理土Bも同様のスプレッダーを用いて試験施工を実施したが、トレミー管内部で固化処理土が海面に衝突し、水中を落下するため、材料分離が発生しやすいことが判明した(図-7)。そこで、トレミー管内部を処理土で充填するために、図-8に示すような底面が可動式のスプレッダーを開発した。このスプレッダーの適用方法を図-9に示す。スプレッダーを海底面に設置する際は、トレミー管の先端部は閉口状態であり、その状態でトレミー内に処理土を充填する。その後トレミー管を引き上げると、管先端部が開口しながら処理土は水平方向に打設される形態となるため、固化処理土が乱されることなく材料の分離が防止される。

## (2) 打設方法の検討

固化処理土Aは、薄層で広範囲に打設して、早期に海底土を被覆することが求められたため、最低厚さを1cm

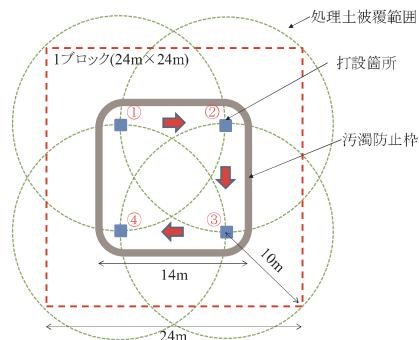


図-10 処理土A打設方法

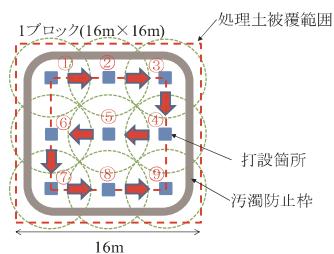


図-11 2層目の処理土B打設方法

と設定して試験施工を実施した。1箇所あたりの打設量を $25.2\text{m}^3$ と設定した場合の流動範囲が約10mであったことから、 $14\text{m}\times 14\text{m}$ の汚濁防止枠内で4箇所打設して、 $24\text{m}\times 24\text{m}$ の範囲を被覆することとした（図-10）。

2層目の処理土Bは、10cmの層厚が必要である。試験施工により、流動範囲が約3.5mであることを確認したため、 $16\text{m}\times 16\text{m}$ の範囲を1ブロックとして、9箇所打設することとした（図-11）。ただし、出来形管理として、ブロック端部での試料採取による層厚確認を実施し、層厚が不足する場合は、補充打設を実施することとした。

### （3）施工管理

室内実験と現地での試験施工により、要求性能が確保できたため、本格的な施工を実施した。本施工での処理土の品質は、フロー値、湿潤密度および一軸圧縮強さ( $q_u28$ )で管理した。出来形管理として、ブロック端部で採泥機（写真-2）による処理土採取での層厚確認を実施し、1層目は1cm以上、2層目は10cm以上を管理基準とし、管理基準値以上であることを確認してから次ブロックの施工を実施した。また、ブロック端部での層厚確認以外にナローマルチビームによる深浅測量を施工前後に実施し、打設層厚が10cm以上であることを確認した。また、固化処理土打設時には、港口部にて施工前・施工中・施工後に懸濁物質濃度SSと水素イオン濃度pHの計測を実施し、異常が無いことを確認しながら施工を行った。

## 5. おわりに

福島第一原子力発電所専用港湾内の海底土から放射性物質が検出され、港湾外への拡散が懸念されたことか

ら、固化処理土による海底土被覆を実施した。第1期工事と同様に第2期工事も2種類の異なる固化処理土を2層で打設する施工方法を選定したが、波浪条件が厳しく、早期強度が必要であったため、砂質土を主材とする処理土を2層目の被覆材に選定した。材料分離を防止するために、特殊添加剤や打設治具を開発することで、浮泥の拡散を防止しつつ長期的に安定した固化処理土による被覆が可能となり、専用港湾内全域の被覆を実施することができた。本施工の完了により、少しでも福島の風評改善と地元住民の帰還促進、そして福島第一の早期廃炉に貢献できれば幸いである。

### 参考文献

- 秋本哲平、樋口雅好、田中康之、新舎博、香田一哉、佐藤航：固化処理土を利用した汚染物質を含む浮泥の封じ込め施工、第10回環境地盤工学シンポジウム、pp.325-330、2013。
- 大坪国順、村岡浩爾：底泥の物性および限界掃流力に関する実験的研究、土木学会論文集、第363号／II-4、1985。
- 五明美智男、三村信男：現地不搅乱泥の強度特性、海岸工学論文集第39巻、1992。
- 佐藤英樹、池上正春、一場武洋、大即信明、西田孝弘、寺師昌明、大石幹太：セメント安定処理土の劣化進行に関する簡便予測手法、土木学会第59回年次学術講演3-537、2004。
- 渡邊雅哉、新舎博、野口孝俊、北詰昌樹：羽田再拡張事業D滑走路における管中混合固化処理土の長期的特性、地盤工学会、第54回シンポジウム、pp.497-502、2009。
- 軽量混合処理土工法技術マニュアル（改訂版）、（財）沿岸技術研究センター、pp.151-156、平成20年7月。

(2017.2.2受付)

## CONSTRUCTION METHOD AND SELECTION OF CEMENT MIXED SOILS FOR COATING RADIOACTIVELY - CONTAMINATED SOIL ON THE SEABED IN A HARBOR

Teppei AKIMOTO, Takahiro KUMAGAI, Moriyoshi FUKUDA  
and Kenrou FURUKAWAZONO

The Fukushima Daiichi Nuclear Power Station suffered great damage due to the Tohoku Regional Pacific Offshore Earthquake that occurred on March 11, 2011 and the accompanying tsunami. Due to the influence of the leakage of contaminated water including high concentrations of radioactive materials, Radioactive substances were detected from the seabed soil in the harbor. In order to prevent seabed soil containing radioactive material from diffusing out of the harbor, seabed soil was coated with cement mixed soil. In FY 2012, we covered  $72,600 \text{ m}^2$  in the first construction and covered  $180,600 \text{ m}^2$  in the second construction in FY 2014. In the 2nd construction work, cement mixed soil mainly composed of sand was selected, as it required earlier strength than the cement mixed soil used in the 1st construction. Material separation at underwater casting, which is a problem of cement mixed soil mainly composed of sand, was solved by developing special additives and casting jigs.