

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

○秋本哲平¹, 樋口雅好², 田中靖之², 新舎 博¹, 香田一哉³, 佐藤 航⁴

¹五洋建設(技術研究所), ²五洋建設(東京土木支店), ³東亜建設工業(東京支店),

⁴東京電力(福島第一原子力発電所)

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所の港湾内(図1, Image © 2013 TerraMetrics Image © 2013 GeoEye に加筆)において, 港湾内に少量ではあるが, 浮泥が確認された. この浮泥は粒径が小さいという特性上, 汚染物質が付着しやすいことが懸念されたため, 固化処理土を利用した浮泥の封じ込め施工を実施した. 浮泥の封じ込め施工に関しては, これまでに実績がなく, 覆土材を浮泥の上に置いて, 浮泥が横方向に移動して覆土が困難になると考えられるので, 浮泥に直接外力を与えない状態で覆土する方法を検討した. 現地調査の結果によると, 浮泥の密度は 1.05g/cm^3 と小さく, これを封じ込めるためには, 浮泥が巻き上がらない程度の低い密度の処理土を打設するとともに, 浮泥を封じ込めるための施工方法の工夫が必要であると考えられた. そこで, 浮泥を堆積させた模擬海底地盤を室内で作製し, 処理土の水中打設実験を実施した. その結果, 湿潤密度が 1.10g/cm^3 の処理土 A を打設すると, 間隙径の大きい処理土塊が形成され, この空隙内に浮泥を取り込むことが可能であること, 次に, 湿潤密度が 1.30g/cm^3 の処理土 B₁ をその上に打設すると, 処理土 A 層を全体的に覆い, 浮泥の封じ込めが可能であることが明らかとなった. しかしながら, 試験施工 I および試験施工 II において, 現地で処理土 B₁ を施工すると, 打設の際の圧送流量が大きいことから, 処理土 B₁ が予想以上に広く堆積し, むしろ流動性がやや低い湿潤密度が 1.21g/cm^3 の処理土 B₂ の方が適していることが判明した. そこで, 本工事では第1層として処理土 A, および第2層として処理土 B₂ を採用し, 浮泥を封じ込めた.

本文は, 現地調査から封じ込め施工までの流れに沿って, 固化処理土を利用した浮泥の封じ込め施工について述べたものである.

2. 調査から施工までの流れ

調査から施工までの流れを, 図2に示す. 現地では, 最初に浮泥調査を実施して, 浮泥の密度と堆積状況を調査した. 次に, 室内において, 浮泥を堆積させた模擬海底地盤を作製し, 37種類の処理土を水中打設して浮泥の巻き上げ防止と封じ込めの観点で, 処理土の配合選定と施工方法を検討した. 現地では試験施工 I と試験施工 II を実施して浮泥の封じ込め効果と処理土の堆積状況を確認し, その後に本施工を実施した. 以下, 図2の流れに沿って内容を記述する.

3. 浮泥調査

浮泥調査は, 1~4号機取水路前面において12箇所, および5, 6号機取水路前面において12箇所の計24箇所で行った. 浮泥を採取した場所は各施工場所を $20\text{m} \times 80 \sim 120\text{m}$ の格子状に区切った交点であり(図1参照), 施工区域を全体的に網羅した. 浮泥サンプラーとしては, 図3に示すように, 直径 5cm × 高さ 1m のアクリル円筒を用い, 船上から長さ $5 \sim 8\text{m}$ の円筒ガイド管を取り付けてサンプラーを地盤内に押し込み, 押し込み後に円筒内を通した紐を引っ張り, 紐の先端につけたゴムキャップ(重り)で容器先端を密封して試料を採取した. 水深は $4 \sim 6\text{m}$ である. 潜水作業は環境上の制約から困難であった.

調査結果によると, 浮泥は, 粒径が粘土~シルトの範囲にあり, 砂層の上に堆積していた. 層厚の平均値は 3.5mm であり, 最大層厚は 10.0mm であった. また, 湿潤密度 ρ_1 の平均値は 1.05g/cm^3 であり, 最大密度は 1.10g/cm^3 であつ

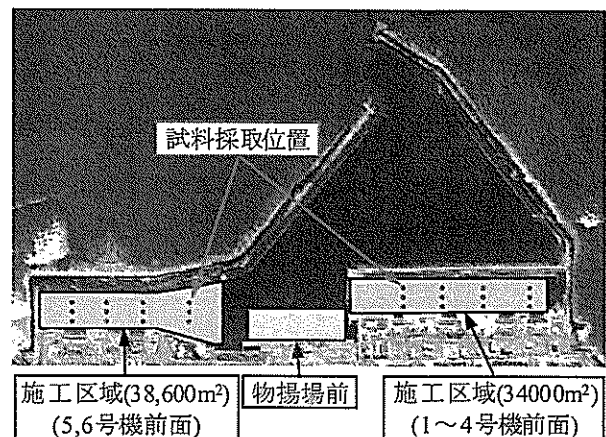


図1 施工平面図

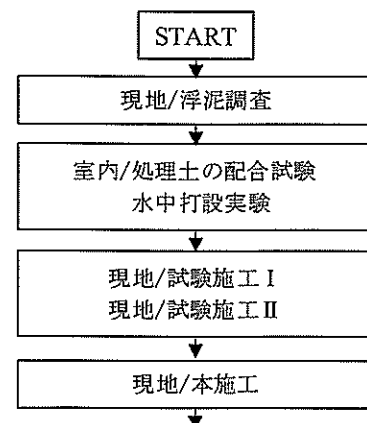


図2 調査~施工フロー

Execution of cement treated soils for containing fluid mud: Teppei Akimoto¹, Masayoshi Higuchi¹, Yasuyuki Tanaka¹, Hiroshi Shinsha¹, Kazuya Kouda² & Wataru Satou³ (¹Penta-Ocean Construction, ²Toa Corporation, ³Tokyo Electric Power)

KEY WORDS: Fluid mud, Cement treated soil, Mix proportion, Execution

た。海成粘土の一般的な湿潤密度が 1.50g/cm^3 程度であることと比較すると、浮泥の密度は非常に小さいことがわかる。浮泥のせん断強度はほぼ零に等しく、浮泥は波浪などの作用によって、容易に移動するものと考えられた。

4. 室内水中打設実験

最初に、処理土の配合試験を実施して、処理土の流動性と強度特性を調査した。表 1 に、処理土の配合試験結果を示す。詳細は文献¹⁾を参照されたい。処理土の水中打設実験は幅 75cm ×奥行き 75cm ×高さ 50cm のアクリル容器を用い、次のように実施した。

4.1 模擬地盤の作製

水槽内に厚さ 5cm の細砂と高さ 40cm の海水を入れ、その後、密度を 1.05g/cm^3 に調整した浮泥（海成粘土で作製）を厚さ 10mm で堆積させて模擬海底地盤を作製した。

4.2 処理土 A の打設

次に、処理土を内径 12mm のパイプを用いて、水槽の中央部にポンプ打設した。打設にあたってはトレミー管の筒先にあて板を置き、処理土の吐出を水平方向とした。打設速度は 65cm/s (6.3 で述べるスプレッターを用いた場合の現場打設速度とほぼ同一) であり、層厚は 10cm である。写真 1 は、処理土 A の打設状況を示している。処理土 A は湿潤密度が 1.106g/cm^3 と小さいことから、浮泥の巻き上がりがまったく生じないことが確認された。また、厚さ 10cm で打設すると、打設時には流動性がほとんどないことから（水中フロー値 87mm ）、打設管の周囲に無数の処理土塊が形成され、塊の隙間に浮泥が取り込まれることが明らかとなった。処理土 A の製造方法は、最初に、ベントナイト（クニゲル U） 79kg/m^3 と真水 434kg/m^3 を混合してベントナイトスラリーを作製し、18 時間放置して膨潤させた。次に、ベントナイトスラリーと海水 433kg/m^3 を混合した。この海水との混合により、ベントナイトの膨潤を止めることが可能である。また、海水 89kg/m^3 とセメント（高炉セメント B 種） 89kg/m^3 を混合して $1:1$ 質量比のセメントスラリーを製造した。最後に、ベントナイトスラリーと海水の混合物とセメントスラリーを混合した。

4.3 処理土 B₁ の打設

処理土 A が固化した後に、処理土 B₁（湿潤密度 1.306g/cm^3 ）を、処理土 A 層の上に厚さ 10cm で打設した。処理土

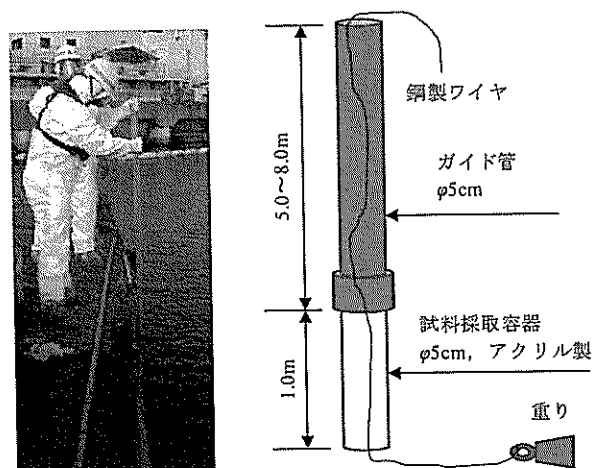


図 3 浮泥サンプラー

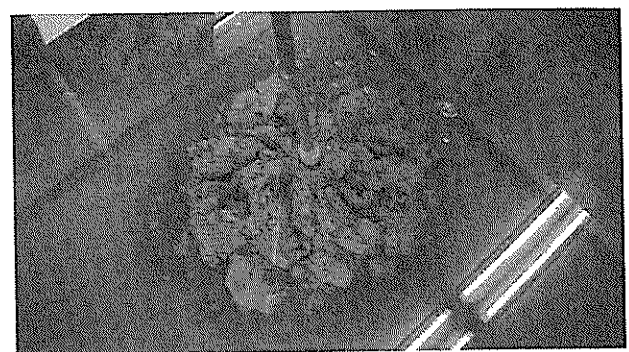


写真 1 処理土 A 打設直後



写真 2 処理土 B₁ 打設直後

表 1 処理土の配合

実験 ケース	配合					一軸圧縮強さ			湿潤密度 (g/cm^3)	気中フロー値 水中フロー値 (mm)
	砂	セメント	ベントナイト	海水	真水	q_{u3}	q_{u7}	q_{u28}		
	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kN/m^2)	(kN/m^2)	(kN/m^2)		
Case32 処理土 A	0.0	89	79	522	434	18.1	39.9	79.4	1.106	230 87
Case36 処理土 B ₁	0.0	150	346	842	0	119.2	290.5	612.2	1.306	312 246
Case37 処理土 B ₂	0.0	188	120	361	542	138.4	252.7	441.9	1.210	199 105

B₁は処理土Aよりも流動性が大きい(水中フロー値246mm)ことから、写真2に示すように、表面はなだらかとなり、処理土A層を全体的に覆うように、処理土B₁からなる覆土層が形成された。配合はベントナイト346kg/m³、海水842kg/m³および固化材150kg/m³を同時に混合したものである。

4.4 処理土断面の観察

処理土B₁の打設後3日時点において、処理土を切り出し、処理土層の断面を観察して浮泥の封じ込め状況を確認した。写真3は、その状況を示している。浮泥は処理土Aの打設の際に形成された処理土塊の隙間に封じ込まれていることが確認できた。

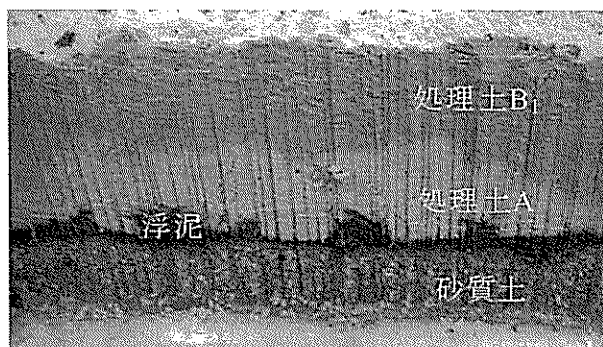


写真3 処理土層の断面

5. 処理土の要求品質

浮泥を封じ込め、かつ安定した覆土層を形成するための処理土の要求品質は、以下の検討と水中打設実験の結果を踏まえると、表2のようであった。以下、個別に説明する。

表2 処理土の要求品質

要求品質	気中フロー値 mm	強度 q_u		湿潤密度 g/cm ³	層厚 cm
		3日強度 kN/m ²	28日強度 kN/m ²		
処理土B (第2層)	160~300	11.8以上	300以上	1.30程度	10以上
処理土A (第1層)	160~300	11.8以上	なし	1.10程度	10以上

5.1 流動性

処理土の流動性はフロー試験(JHS A 313)で求めた。この方法は直径80mm×高さ80mmの亚克力円筒容器内に試料を入れ、容器をゆっくり持ち上げて試料の拡がり測定するものであり、処理土を管路輸送して打設する場合には、フロー値は180±20mm以上が必要であると言われている²⁾。

また、現地では水中打設することを考慮して、水中フロー試験も実施した。その方法はJHS A 313の試験と同様であるが、幅50cm×奥行き50cm×高さ30cmの容器内で、直径80mm×高さ80mmの容器に試料を入れ、その後、10cmの高さまで水を入れた後に容器を持ち上げて、フロー値を測定したものである。その他に、水中分離抵抗性試験²⁾を実施した。この試験は受け容器内に3ℓの海水を入れ、工事で想定される速度で処理土をポンプ打設し、上水の懸濁物質濃度が100mg/ℓ未満、水素イオン指数が10.5未満、および水中打設した試料の7日強度が気中強度の50%以上であると、材料分離が生じないと判断する方法である。本目的で使用できる処理土の下限フロー値を管路輸送の観点から160mm、上限フロー値は水中での材料分離を生じさせないという観点で300mm程度と設定した。

5.2 強度

処理土の耐波浪性に関しては、波高に対する流送限界強度を確保することとした。処理土に必要な流送限界強度の算定方法は、以下のものである。最初に、波高 H から底面せん断応力 τ_b を(1)式を用いて算定した。

$$\tau_b = \rho_w \times g \times n^2 \times U_b^2 / h^3 \quad (1)$$

ここに、 ρ_w ：海水の密度で、1030kg/m³、 g ：重力加速度で、9.8m/s²、 n ：マンシングの粗度係数で、0.025、 h ：水深であり、 U_b は(2)式で表される。

$$U_b = H \times (g \times h)^{0.5} / (2 \times h) \quad (2)$$

次に、底泥の降伏値 τ_y (kN/m²)を(3)式で求めた³⁾。

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

τ_y はせん断強度の0.07~0.12倍とされており⁴⁾、安全側の観点から0.07倍、さらに一軸圧縮強さはせん断強度の2倍であることを考慮すると、処理土に必要な流送限界強度 q_{uy} は(4)式で表される。

$$q_{uy} = 2 \times \tau_y / 0.07 \quad (4)$$

以上の式に、本施工範囲における100年確率波の波高として $H=1.8$ m、および水深 $h=4.0$ mを代入すると、処理土に必要な強度は11.8kN/m²となる。本施工にあたっては、この強度を3日経過時で確保することとした。

5.3 層厚

処理土の長期耐久性に関しては、海水中へカルシウム分が溶脱し、処理土の表面から劣化が生じることが指摘されており、劣化深さ D は(5)式で表される^{5),6)}。

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

ここに、 A ：係数、 t ：経過時間(年)、 t_0 ：基準経過時間(1年)である。ここで、処理土の必要強度を300kN/m²と設定すると、 A が14.0になり⁶⁾、50年経過時の劣化深さは9.9cmとなる。よって、処理土の層厚は10cm以上が必要となる。

5.4 湿潤密度

水中打設実験の結果からは、湿潤密度は第1層（処理土A）として $1.1\text{g}/\text{cm}^3$ 程度、および第2層（処理土B）としては $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ 程度が適していると考えられる。

以上の条件を踏まえると、表1に示す処理土Case32およびCase36は、それぞれ処理土Aおよび処理土Bの基準を満足していることがわかる。なお、表2の処理土Bは第2層の総称であり、処理土B₁とB₂は処理土Bに属するものである。

6. 施工

処理土の海上施工設備を図4、船舶配置を図5、使用船舶機械一覧表を表3、作業全景を写真4、および処理土による覆土作業状況を写真5に示す。処理土の製造・打設に際しては、港湾内に資材置き場を確保することができなかつたので、次のように施工した。ここでは、処理土B₂の施工を述べる。配合は表1を参照、

- (1) ベントナイトは、東京電力福島第二原子力発電所の港湾内において、管路ミキサーを用いてベントナイトと水を混合し（3分以上放置）、次に、混合物と海水を混合してベントナイト泥水を作製し、土運船で現地に運搬した。
 - (2) セメントは、セメントサイロ船を現地に係留し、固化材供給船内のミキシングプラントを用いてセメントスラリーを製造した。
 - (3) ベントナイト泥水とセメントスラリーの混合は、固化材供給船内の二軸パドルミキサーを用いて行い、製造した処理土は管路輸送した。
 - (4) 処理土の打設はクレーン台船を打設位置に配置し、トレミー管の筒先をクレーンで移動させながら打設した。
- 施工管理は、水中カメラで処理土の堆積状況を確認するとともに、50cm間隔毎のナローマルチビーム測量⁷⁾により、処理土層厚を測定した。

6.1 試験施工I

試験施工Iは、福島第一原子力発電所1～4号機取水路前面区域で実施した。施工は、図6に示すように、14m×14mの汚濁防止枠内に、1層目（処理土A）は1方向で57m³を打設し、2層目（処理土B₁）はコの字を描くように108m³を打設した。処理土の層厚は、表4に示すように、1層目処理土Aが10～24cm（平均11.8cm）、2層目処理土B₁が10～27cm（平均14.6cm）であった。この結果、1層目および2層目とも、層厚が10cm以上という要求品質を満足することができた。なお、処理土の層厚に対して打設量が多いが、この要因としては汚濁防止膜が海底に接触していなかったことが考えられる。2層目施工後の水中カメラによる観測結果によると、処理土表面は滑らかであり、浮泥は確認されなかった。

表4に、物揚場前面で測定した懸濁物質濃度ssと水素イオン指数pHの結果を示す。ssは、打設前は5.5～7.0mg/lであり、打設後は5.3～7.0mg/lであった。pHは、打設前は8.0であり、打設後は8.1であった。この結果、水質汚染を生じることなく、施工することができた。

表3 使用船舶機械一覧表

種類	規格	単位	備考
測量船	550PS	1隻	深浅測量
ナローマルチビーム測量機	240KHz	1式	深浅測量
固化材供給船	300m ³ /h	1隻	被覆材の練混・圧送
セメントサイロ船	450t積	1隻	セメント積込・運搬・供給
クレーン台船	150t吊	1隻	被覆材打設
土運船	1,500m ³	3隻	ベントナイトスラリー運搬
土運船	650m ³	1隻	水運搬
交通船	734PS	1隻	人員輸送
ベントナイト混合施設	—	1式	ベントナイトスラリー製造

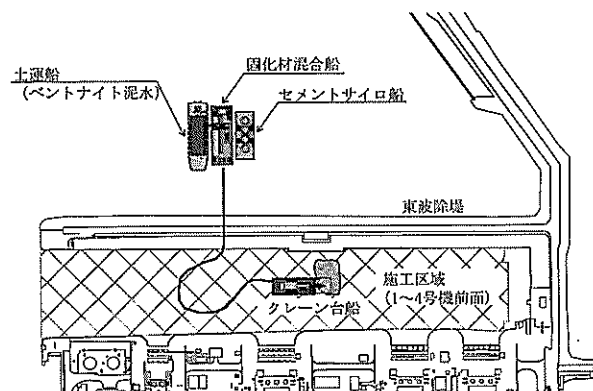


図5 船舶配置図

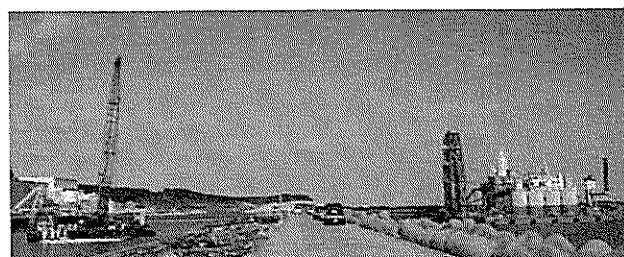


写真4 作業全景



写真5 処理土による覆土の作業全景

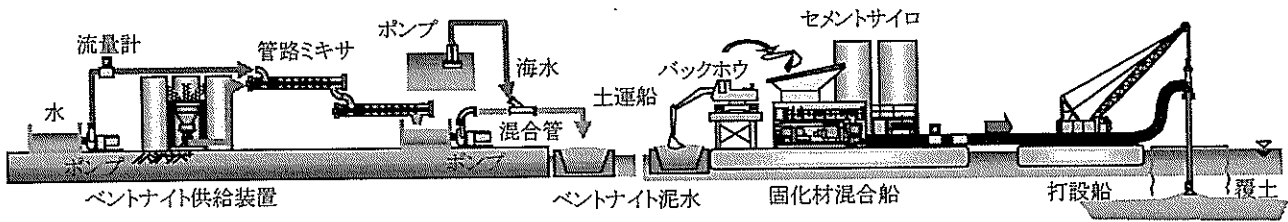


図4 処理土の海上施工設備（処理土B₂の場合）

6.2 試験施工II（2層目が対象）

試験施工Iでは、処理土B₁を打設すると、層厚10cm以上の確保（覆土層の形成）に関しては満足のいく結果が得られたが、一方で、層厚10cmの確保に55cm厚の処理土量（108m³）が必要となり、多くの処理土が施工範囲外へと流出する結果となった（サンプリング、歩留まり率は29.9%）。このことは、処理土の打設速度は約65cm/sで、室内とほぼ同一であったが、現地での打設量は約226m³/hr（室内の打設量は、0.265m³/hr）であり、室内の約850倍と大きかったためと考えられる。

そこで、処理土の歩留まり率（施工範囲内に留まる率）を増加させるために、図7に示す区域で、処理土B₁および処理土B₂の試験施工IIを実施した。配合は、表1を参照されたい。1箇所の施工範囲は、試験施工Iの結果を考慮して、16m×16mに拡大した。処理土B₁はベントナイトと海水を混合したため、ベントナイトの膨潤がなく、水中フロー値は246mmで、流動性が大きかった。一方、処理土B₂は流動性を幾分小さくする目的で、ベントナイトを真水と混合して膨潤させ、かつベントナイトの量を低減したので、水中フロー値は105mmであった。

図8は、処理土B₂について、ベントナイトと真水の混合時間と処理土のフロー値との関係を示している。フロー値は3分程度の混合時間ではほぼ一定になることがわかる。

現場での処理土B₂の製造方法は、最初に、ベントナイト120kg/m³と淡水542kg/m³を3分間混合してベントナイトスラリーを作製し、次に、ベントナイトスラリーと海水173kg/m³を混合した。海水を混合すると、ベントナイトの膨潤をほぼ停止させることができる。また、海水188kg/m³とセメント188kg/m³を混合して1:1質量比のセメントスラリーを製造し、最後に、ベントナイトスラリーと海水の混合物とセメントスラリーを混合した。40cm厚相当の処理土を打設すると、処理土B₁の場合は、平均層厚が25.9cm（深浅測量）、19.0cm（サンプリング）となり、処理土B₂の場合は、平均層厚が36.7cm（深浅測量）、31.5cm（サンプリング、歩留まり率は78.8%）となり、処理土B₂の方が施工範囲内に多く留まることが判明した。また、処理土B₂を打設後に、水中カメラで処理土表面を観察したところ、処理土B₁と同様、滑らかな表面を持つ覆土層が確認された。処理土B₂の水中フロー値は処理土B₁よりも小さいが、時間当たりの打設量が大いことから、流動性が増加し、滑らかな覆土層が形成されたと考えられる。浮泥は確認されなかった。

6.3 本施工

そこで、本施工では処理土B₂を採用し、2層目の層厚10cmを確保するために、歩留まり率（78.8%）と地盤の不陸や勾配などの影響（施工量が必要量の2倍）を考慮して、25cm厚で施工した。1箇所の施工範囲は16m×16mである。また、1層目は地盤の不陸や勾配などの影響（施工量が必要量の2倍）を考慮して20cm厚とし、1箇所の施工

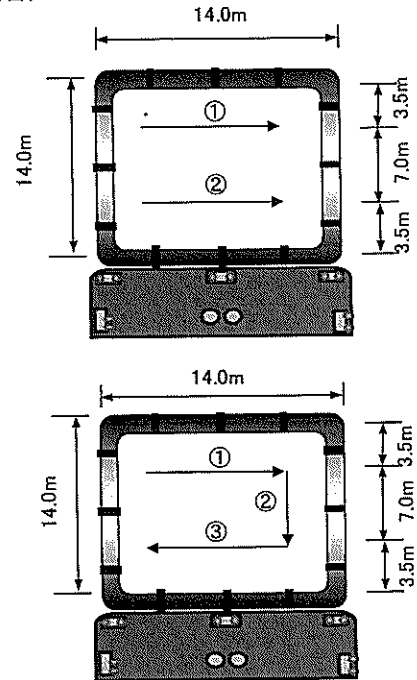


図6 試験施工Iの打設順序

表4 試験施工Iの計測結果

項目	層厚H cm		物揚場前面	
	深浅測量	サンプリング	pH	ss mg/l
1層目	10~18	10~24	前：8.0	前：7.0
	平均10.8	平均12.8	後：8.1	後：7.0
2層目	10~15	10~27	前：8.0	前：5.5
	平均12.6	平均16.5	後：8.1	後：5.3

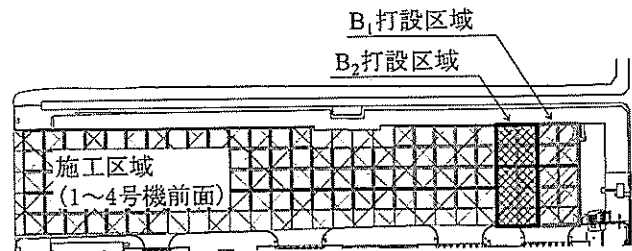


図7 試験施工IIの施工場所

範囲は試験施工Ⅰの結果を考慮して、24m×24mとした。

また、試験施工Ⅱと本施工においては、処理土を水平方向に打設するために、図9および写真6に示すスプレッターを作製し、トレミー管の先端に取り付けた。この装置は管路輸送された処理土の流速を低減し、より均一なまき出し厚さを確保するためのものである。

本工事における各区域の1層目および2層目の平均層厚を、表5に示す。打設にあたっては、層厚を50cm間隔毎のナローマルチビームで測量しているため、層厚が10cm未満の場所では処理土の継ぎ足し施工を実施した。この結果、層厚は1層目および2層目とも、10cm以上を満足している。

工事の期間中において、物揚場前面で懸濁物質濃度 ss と水素イオン指数 pH を測定したが、両者とも打設前とほとんど変化がないことが確認されている。

7. おわりに

固化処理土を利用して浮泥を封じ込める試みは、過去に例がないと思われる。本施工にあたっては、2種類の低密度の処理土を打設した。すなわち、第1層は、湿潤密度が $1.10g/cm^3$ で、水中フロー値が87mmの処理土Aを打設して、処理土層内に大きな空隙を造り、その部分に浮泥を取り込んだ。2層目は、湿潤密度が $1.21g/cm^3$ で、水中フロー値が105mmの処理土B₂を打設して、覆土層を形成した。こうした施工方法を見つけ出すためには、多くの室内水中打設実験が必要であった。また、施工にあたっては試験施工Ⅰと試験施工Ⅱを実施し、より均一な厚さの処理土層の形成に努めた。

浮泥の封じ込めに関して、本事例が今後の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 大久保泰宏・秋本哲平・海野寿康・新舎博・井熊孝樹・江森吉洋：浮泥の封じ込めを目的とした固化処理土の配合と施工方法，第38回海洋開発シンポジウム，投稿中。
- 2) 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，平成20年7月。
- 3) 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。
- 4) 五明美智男・三村信男：現地不攪乱泥の強度特性，海岸工学論文集第39巻，1992。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 田淵郁男：ナローマルチビーム測量の現状と課題，港湾空港技術研究所試料，No.1014，2001。

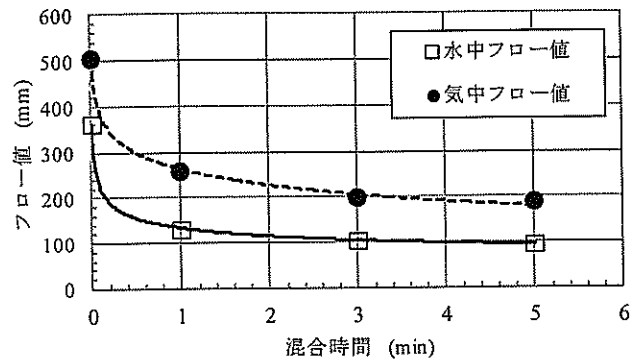
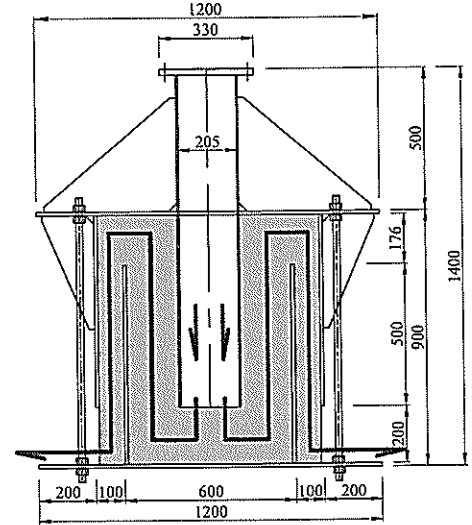


図8 処理土 B₂ のフロー値



単位：mm

図9 スプレッター構造図

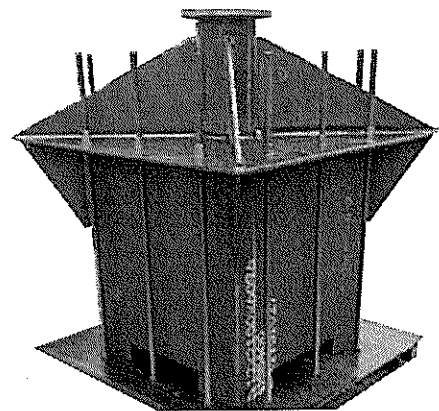


写真6 スプレッター

表5 本工事での平均層厚

項目	1~4号機取水路前面		5, 6号機取水路前面	
	深浅測量	サンプリング	深浅測量	サンプリング
1層目	22.3	15.5	25.7	20.3
2層目	27.2	19.9	31.2	24.1
計	49.5	35.4	56.9	44.4

単位：cm