

Pipe Mixing工法による 建設副産物のリサイクル事例

大久保泰宏¹・新舎博²・池田省三³

¹正会員 五洋建設株式会社 技術研究所（〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町1534-1）

²正会員 五洋建設株式会社 技術研究所（〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町1534-1）

³ 五洋建設株式会社 技術研究所（〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町1534-1）

港湾においては、浚渫工事で発生する浚渫土の処分地の確保が大きな課題となっている。また、石炭火力発電所においては、石炭灰のリサイクル法の適用により、大量発生する石炭灰の有効活用の促進が急務である。これらの浚渫土および石炭灰などの建設副産物に関しては、裏埋材および埋立材としての大量消費が可能である土木材料へのリサイクル利用の要望が高い。著者らは、浚渫土および石炭灰の有効活用方策として管中混合固化処理工法の一つであるPipe Mixing工法の施工を行い、建設副産物のリサイクル方策として同工法が非常に有効であることを実証した。

キーワード：石炭灰、浚渫土、地盤改良、管中混合固化処理工法

1. はじめに

中枢・中核港湾においては、船舶の大型化に伴い、航路の増深、航路や泊地の整備が行われており、浚渫工事中において発生する浚渫土の処分地の確保が大きな課題となっている。また、石炭火力発電所においては、石炭灰のリサイクル法の適用により、大量発生する石炭灰の有効活用の促進が急務である。これらの浚渫土および石炭灰などの建設副産物に関しては、裏埋材および埋立材としての大量消費が可能である土木材料へのリサイクル利用の要望が高い。

Pipe Mixing工法¹⁾は、管中混合固化処理工法の一つであり、浚渫土の輸送・打設方式として一般的である空気圧送方式を利用し、軟弱な粘性土に固化材を混合して十分な強度を持つ高品質の材料に改良するため、近年浚渫土の有効利用方策として埋立などに適用される事例が多くなっている。

著者らは、浚渫土および石炭灰の有効活用方策としてPipe Mixing工法の施工を行ってきた。ここでは、Pipe Mixing工法の概要とその施工事例として、①石炭灰を有効活用した埋立工事、②浚渫土の有効活用方策として固化処理土を利用した築堤工事についての工事概要を報告し、処理土の強度特性などについて考察を行う。

2. Pipe Mixing工法の概要

Pipe Mixing工法（以下PM工法とする）は、管中混合固化処理工法²⁾の一つであり、浚渫土を埋立地まで空気圧送にて輸送する際に、圧送管内で固化材を添加し、その圧送エネルギーによって粘性土と固化材を攪拌混練することにより、排出後はそのまま改良地盤として早期に有効利用しようとするものである。管中混合固化処理工法は、特別な混練装置が

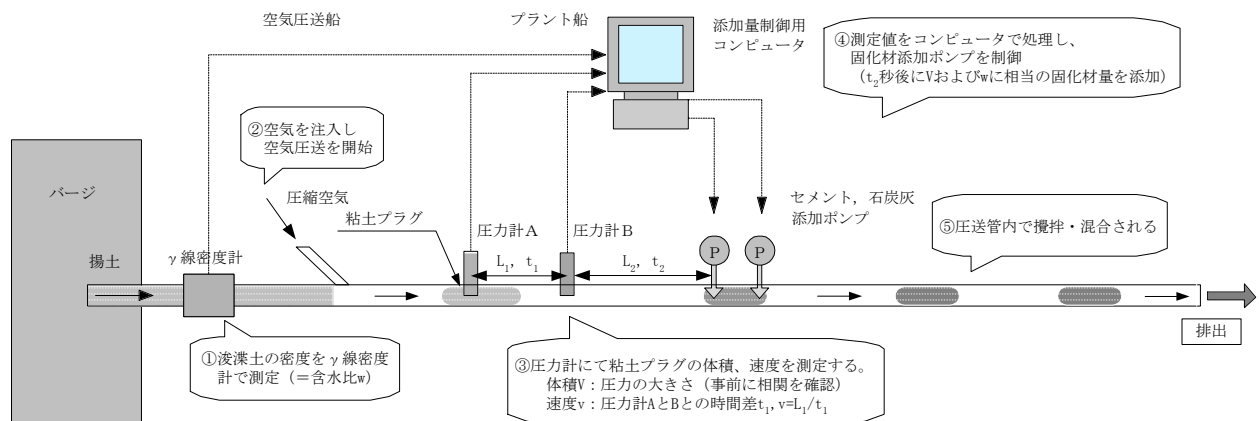


図-1 PM工法におけるプラグ検知の仕組み

不要であることから、従来の固化処理工法よりも経済的となり、グラブ浚渫土や高濃度浚渫土においては有利な工法である。

PM工法は、プラグ検知システムとパイプシャワ式固化材添加装置を有しており、固化材をプラグだけに断続添加でき、プラグ毎の固化材濃度は一定となり、固化処理土の強度のバラツキを小さくすることができる工法である。図-1に、PM工法におけるプラグ検知の仕組みを示す。

① γ 線密度計にて浚渫土の密度(含水比; w)を測定。

② 圧縮空気を注入し空気圧送を開始。

③ 圧力計にて粘土プラグの体積、速度を測定。

体積 V ：圧力の大きさ（事前に相関を確認）

速度 v ：圧力計AとBとの時間差 t_1 、 $v = L_1 / t_1$

④ 測定値をコンピュータで処理し、固化材ポンプを制御。

（ t_2 秒後に V および w に相当の固化材量を添加）

⑤ 圧送管内で攪拌され、処理土として排出。

3. 石炭灰を有効活用した埋立工事

(1) 工事概要

本工事は、中国電力(株)新小野田発電所揚炭棧橋前泊地に堆積した粘性土 14,000 m^3 を高濃度浚渫船にて浚渫し、その有効利用方策として、約 2km 離れた処分場に固化処理するものである。本工事の特徴は、以下の3点である。

① 固化処理にあたっては、埋立地の早期利用の観点より、管中混合固化処理工法を採用した。

② 固化処理の混練性を高めることを目的に、同発電所から発生する石炭灰を固化助剤として利用した。

③ 浚渫土の含水比の変動に対して適切な固化材料を添加するために、リアルタイムで含水比を測定し、固化材添加量をコンピュータ制御した。

図-2 に、工事の概要を示す。写真-1 に船団の全景を、写真-2 には処理土の打設状況を示す。

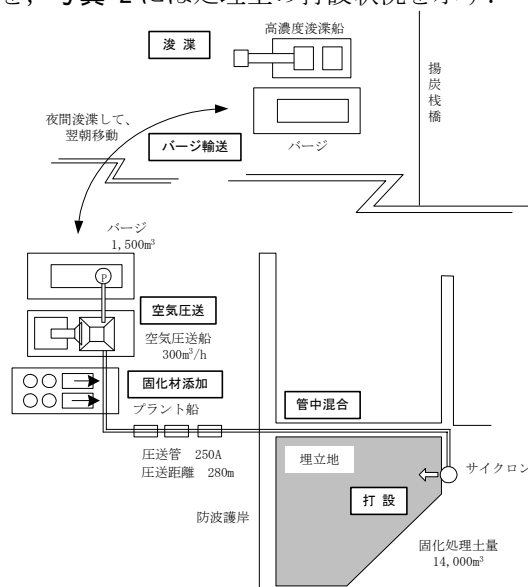


図-2 工事の概要



写真-1 船団全景



写真-2 打設状況

(2) 石炭灰改良材の効果

粘性土の固化処理においては、対象土の含水比が強度に大きく影響を与える。よって通常のセメントのみの処理では、含水比が大きく変動する土質を対象とした場合には均質な改良は困難であると考えられた。そこで固化助剤として、同発電所から発生する石炭灰を利用することにした。

石炭灰を添加することによる改良効果としては、軟弱な粘性土が砂質土へと土性改善される効果とポズラン反応による緩やかな硬化作用が主体であり、この他に石炭灰が乾燥状態であることによる脱水効果が期待できる³⁾。また、石炭灰の粒子形状が球形であることから、ベアリング効果を発揮し、管中混合における粘性土と固化材の混練性を更に高めることも期待できる。

(3) 室内配合試験

施工に先立ち、現場での含水比の変化に対応するため、含水比200～300%の範囲で室内配合試験を実施した。表-1および表-2に、試験に用いた浚渫土および石炭灰の物理化学特性を示す。使用した固化材は高炉セメントB種であり、W/C=1のスラリーで添加した。また石炭灰は、粘土1 m^3 に対して高炉セメントと同量添加した。これらは現場での条件と同様である。

本工事にあたっては、埋立終了後、構造物の建設時に基礎部分の掘削が予想されるため、現場目標強度 $qu_{28} = 100kN/m^2$ とし、過去の実績より、室内/現場強度比=2として、室内強度 $qu_{28} = 200kN/m^2$ を満足する配合をそれぞれの含水比における必要固化材添加量として決定した。図-3に、室内配合試験の結果

を示す。固化材添加量は、 $w=200\%$ のとき 70kg/m^3 、 $w=250\%$ のとき 80kg/m^3 、 $w=300\%$ のとき 90kg/m^3 となる。これらの結果を、固化材添加量制御用コンピュータにプログラミングし、浚渫土の含水比の変化に対して固化材量を増減できるように配慮した。

表-1 浚渫土の土質特性

項 目		試験結果
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.641
自然含水比 W_n (%)		200.68
粒度組成	砂分 (%)	3.39
	シルト分 (%)	42.11
	粘土分 (%)	54.50
コンシ ステンシー	液 性 限 界	121.0
	WL (%)	
	塑 性 限 界	46.0
	WP (%)	
	塑性指数 IP	75.0
強熱減量 Li (%)		12.49

表-2 石炭灰の物理化学特性

項 目		試験結果
粒子の密度 $\rho \text{ s (g/cm}^3\text{)}$		2. 31
粒度組成	砂分(%)	5. 6
	シルト分(%)	81. 4
	粘土分(%)	13. 0
成分組成 (%)	SiO ₂	45. 1
	Al ₂ O ₃	23. 5
	Fe ₂ O ₃	4. 3
	CaO	13. 6
	MgO	1. 5
	その他	12. 0

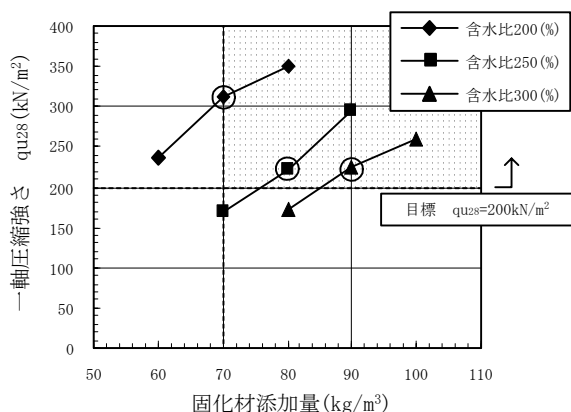


図-3 室内配合試験結果

また固化処理にあたっては、各材料の溶出試験を実施した。表-3に溶出試験結果を示す。試験方法は環境庁告示46号法に基づく。石炭灰、固化処理土（高炉セメントB種・石炭灰同量添加： 80kg/m^3 の場合）ともに重金属の溶出は認められない。

表-3 主要重金属の溶出試験結果

項目	溶出試験結果 (単位: mg/l)			基準値 (土壌汚染)
	小野田粘土	小野田石炭灰	固化処理土	
カドミウム	0.0002 未満	0.0002 未満	0.0002 未満	0.01 以下
鉛	0.003	0.01	0.002 未満	0.01 以下
六価クロム	0.005 未満	0.029	0.005 未満	0.05 以下
砒素	0.006	0.0002 未満	0.003	0.01 以下
総水銀	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005 以下

(4) 施工結果

a) 固化材添加量の管理

図-4 に、実施工における固化材および石炭灰添加量の制御結果を示す。PM工法において、各粘土プラグの含水比の変化に応じて固化材添加量を制御

したのは今回の施工が初めてであったが、添加量は含水比と高い連動性があり、概ね高い精度で管理されていることがわかる。なお今回、添加量の制御は含水比 200%~350%の範囲で行い、200%以下は添加量を 70kg/m^3 、350%以上は添加量を 100kg/m^3 と一定にした。

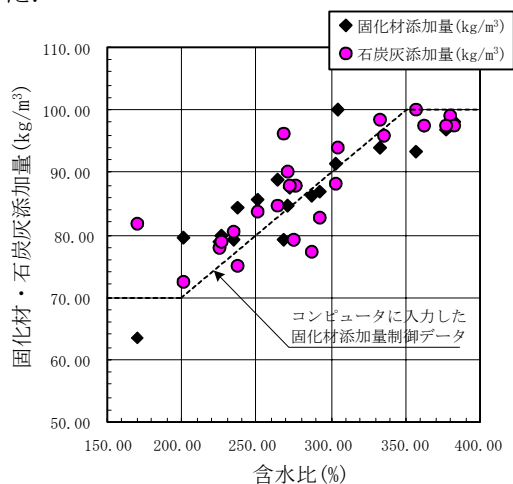


図-4 浚渫土含水比と固化材添加量の制御結果

b) 品質管理

固化処理土の品質管理を行うために、原位置採取土の含水比試験および一軸圧縮試験を行った。図-5に、試料の採取場所を示す。図-6に、浚渫土の含水比と一軸圧縮強さ q_{u28} の関係を示す。図-6より、含水比が 200%~350%の範囲において、モールド試料および原位置サンプリング試料ともに一軸圧縮強さはほぼ設計範囲内に収まっていることがわかる。

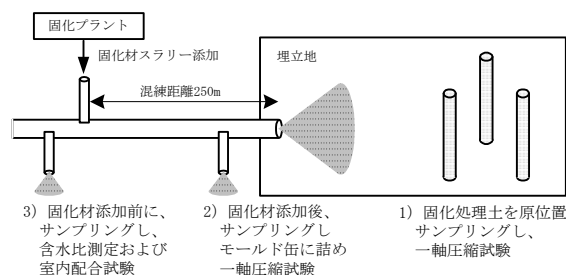


図-5 試料採取位置

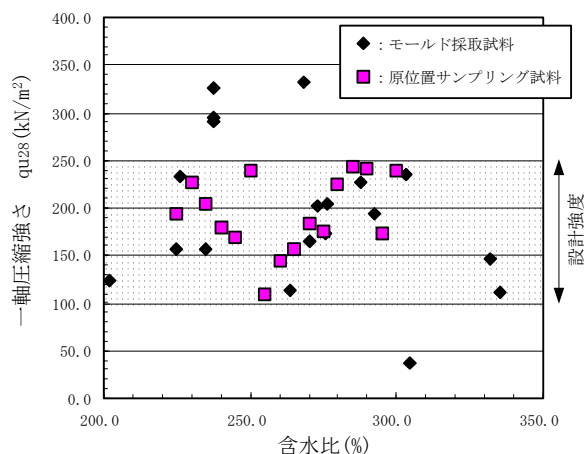


図-6 含水比と一軸圧縮強さの関係

また図-7 は、含水比が 200%～350%の範囲における全試料に対する一軸圧縮強さ qu_{28} の分布をヒストグラムで示したものである。モールド試料の一軸圧縮強さは平均 195.0kN/m² であり、設計強度である 100～250kN/m² の範囲に 8 割以上の割合で収まっており、浚渫土含水比の変動に従って固化材添加量を制御した成果が現れていると考えられる。

これらの結果より、PM工法においては、含水比がばらついている浚渫粘土への固化材添加量の制御、さらには石炭灰添加による含水比の低減効果などにより、含水比のばらついた浚渫土に対して目標の設計強度を十分に確保できることがわかった。

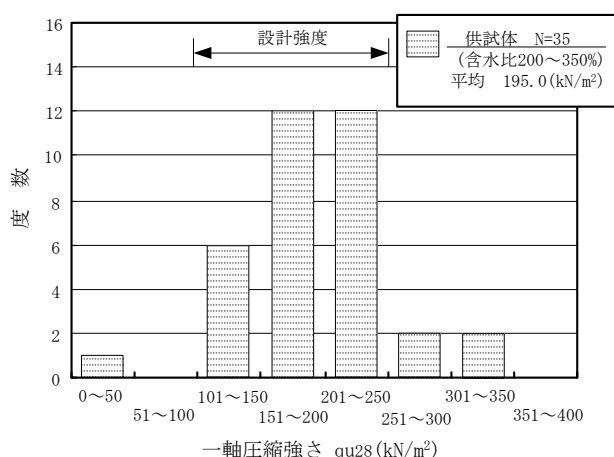


図-7 一軸圧縮強さ qu_{28} の分布

4. 浚渫土の有効活用方策として固化処理土を利用した築堤工事

(1) 工事概要

平成 12 年度に名古屋港第三ポートアイランド内にて汚濁防止対策を目的とする築堤工事⁴⁾が行われ、中仕切堤の一部分についてPM工法により施工を行った。施工概要について表-4 に示す。

表-4 施工概要

工 法 名	Pipe Mixing 工法
施 工 場 所	名古屋港第三ポートアイランド B 工区 A 工区法線から L=470 m
主 要 船 舶 機 械	空気圧送船 (6,000ps 級) プラント船 (固化材供給船) 泥上機

名古屋港第三ポートアイランドは港湾整備に伴って発生する浚渫土砂の処分地であるため、築堤を造成するにあたり、極力処分場の容量を購入材料によって減量することなく、浚渫土を有効に利用して施工を行うという必要性があった。以上のことから、築堤の施工には、管中混合固化処理工法が採用された。

本工事を実施した中仕切堤は、名古屋港第三ポートアイランド B 護岸から高潮防波堤（中央堤）へ向

かう直線堤であり、下部堤体（計画高+4.0m）と上部堤体（計画高+7.0m）より構成されている。そのうちPM工法による施工は中仕切堤の南側、A工区法線から 470mの施工を行った。施工位置図を図-8 に、第三ポートアイランドの全景を写真-3 に、また、中仕切堤の施工状況を写真-4 に、標準断面図を図-9 に示す。

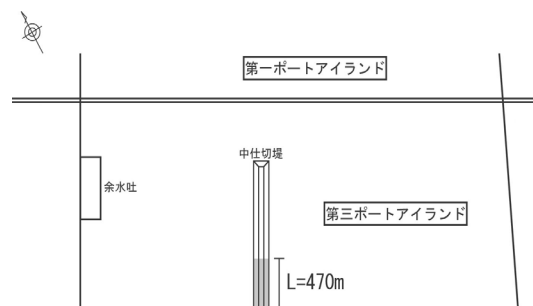


図-8 施工位置図



写真-3 名古屋港第 3 ポートアイランド全景



写真-4 中仕切堤全景

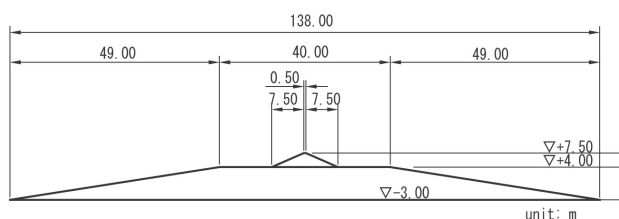


図-9 標準断面図

(2) 室内配合試験

施工に先立ち、施工時の固化材添加量を決定するための室内配合試験を行った。原料土は、名古屋港における港湾整備によって発生する浚渫土を使用した。表-5 に原料土の土質試験結果を示す。

表-5 原料土の土質試験結果

土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.620
含水比 w_0 (%)		92.0
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)		1.506
粒度組成	砂分 (%)	9.1
	シルト分 (%)	59.4
	粘土分 (%)	31.5
液性限界 w_L (%)		72.9
塑性限界 w_p (%)		35.2
塑性指数 I_p		37.7
強熱減量 Li (%)		8.96

管中混合固化処理工法は空気圧送の過程において攪拌混合と圧送を行うので、圧送性や固化材との混練性などを考慮して浚渫土に加水する必要がある。室内配合試験では含水比を 125% にして試験を行った。また、固化材については、設計強度が 100kN/m² の場合、50kg/m³ 程度の固化材添加量とするのが一般的であるが、土質試験結果から浚渫土の強熱減量が 8% 前後あり、過去に名古屋港にて採取した試料と比較して強熱減量が多いので強度が発現しない可能性が懸念された。よって、使用する固化材の種類については、高炉セメントB種、普通ポルトランドセメント、高有機質粘土用固化材の3種類を使用して室内配合試験を行った。

図-10 に材令 28 日における室内配合試験の結果を示す。

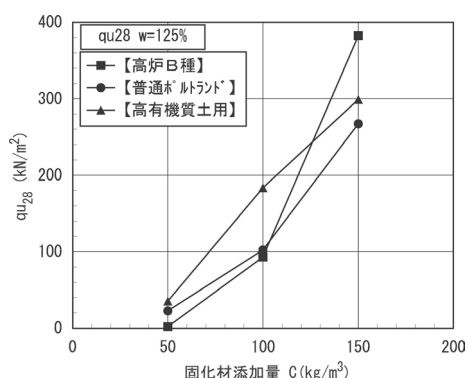


図-10 室内配合試験

固化材添加量を 50kg/m³ とした場合、使用した3種類の固化材すべてのケースにおいて処理土の一軸圧縮強さが 40kN/m² 以下となり、従来の名古屋港における浚渫土に比べると非常に強度発現性の良くないことが判明した。また、固化材添加量が 100kg/m³、材令 28 日においては、高有機質粘土用固化材を使用した処理土のほうが、ほかの2種類の固化材に比べて約2倍近くの強度発現があった。しかし、実際の施工では、経済性などを考慮して、普通ポルトランドセメントを固化材として使用した。

(3) 目標強度の設定

現場における打設後の作業機械は泥上車であり、このため、作業足場の強度としては湿地ブルが走行できる程度で十分と考えられた。よって、目標強度は、コーン指数 $q_c = 200 \text{ kN/m}^2$ 以上とし、処理土の一軸圧縮強さに換算すると、 $q_c = 6.5 \times q_u$ より²⁾ 現場における目標強度は $q_u \approx 31 \text{ kN/m}^2$ とした。

(4) 築堤の施工方法

管中混合固化処理工法による打設直後の法勾配は、中仕切堤の上部堤体（計画高+7.0m）の設計の 1:3 よりも緩くなり、およそ 1:20 程度となった。よって、築堤上部の施工は、打設後 3 日の弱材令の処理土を泥上車にて掻き上げて整地する方法にて施工を行い、目的の断面を築造した。



写真-4 泥上車の掻上げによる築堤造成状況

(5) 施工結果

a) 品質管理

実施工においては目標強度を満足しているかの品質確認のために、処理土の強度試験を実施した。測定方法は、30,000m³ 毎に打設直前に採取したモールド試料の処理土を対象に、材令 28 日において一軸圧縮試験を行なった。

モールド試料の一軸圧縮強さの強度分布を図-11 に示す。材令 28 日における一軸圧縮強さの平均値は、70.8kN/m² となり、目標強度である $q_u \approx 31 \text{ kN/m}^2$ を大きく上回る結果となった。また、変動係数は、25.6%となった。

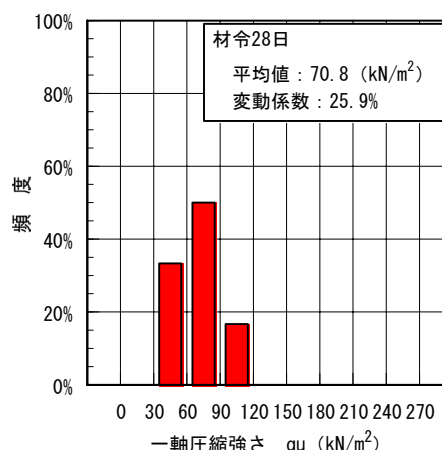


図-11 モールド試料の一軸圧縮強さ（材令 28 日）

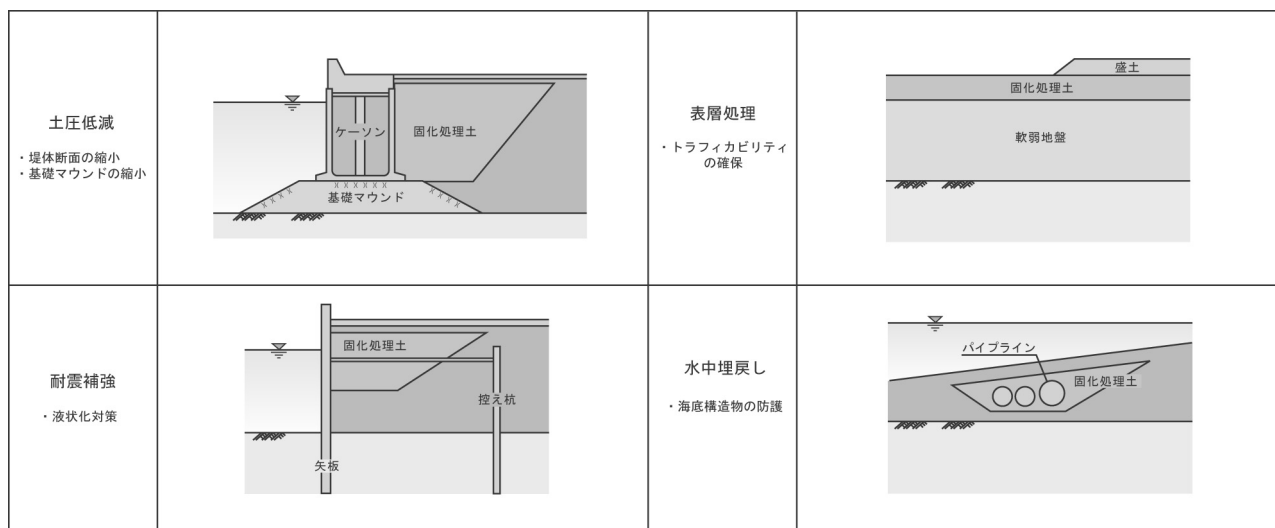


図-12 固化処理土の利用用途

b) 施工実績データ

本築堤工事における施工実績データを表-6 に示す。

表-6 施工実績データ

処理土量 (日平均)	約 129,800 m ³ (約 4,500 m ³)
総打設日数	29 日
平均固化材添加量	約 68 kg/m ³
出来形 (天端高・天端幅)	上部堤：平均天端高＝7.12 m, 天端幅＝6.0 m 下部堤：平均天端高＝5.44 m, 天端幅＝40.0 m
単位時間打設量	757.4 m ³ /hr

6. まとめ

PM工法を用いた建設副産物のリサイクル方策の事例として①石炭灰を有効活用した埋立工事，②浚渫土の有効活用方策として固化処理土を利用した築堤工事を紹介した。その結果，含水比のばらついた浚渫土に対して，目標の設計強度を十分に確保でき

ることが明らかになり，一方，処理土を築堤部材の一部に適用できることが確認できた。また，処理土は，護岸背面に作用する土圧低減のための裏埋め材としてなど，他にも図-12 に示すような様々な用途⁵⁾が考えらるので今後さらなる利用用途の事例を増やしていくとともに，要求される処理土の特性について更なる研究・開発を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 池田省三：空気圧送式管中固化処理工法 (Pipe Mixing 工法)の開発，港湾学術交流会年報，No.36, pp.157 - 173 , 1999.
- 2) 運輸省第五港湾建設局中部国際空港調査室：管中混合固化処理工法,1999.3
- 3) 斉藤直 他：石炭灰を使った地盤改良材の改良特性，第34回地盤工学研究発表会, pp.931-932, 1999.
- 4) 櫻井日出伸：浚渫土のリサイクルと技術開発,土木技術, Vol.56,No.8, pp. 73-80, 2001.
- 5) (財)沿岸開発技術研究センター：管中混合固化処理工法, 2001.3