

1. 空気圧送式管中固化処理工法“Pipe Mixing工法”の開発と試験工事への適用

五洋建設㈱：池田 省三，*野元 義一

1. はじめに

近年、軟弱な浚渫土を固化処理し、埋立材料や護岸、岸壁の裏込材料として活用したいという要請が急速に高まりつつある。

従来埋立地に転用された軟弱土は、圧密促進工法による改良を施すことで力学的安定を図ってきたが、圧密改良に要する工期、コストが大きくなり、採算性を圧迫することもしばしばであった。

一方、固化処理改良の利点は圧密促進を必要とせず、埋立造成の工期を大幅に短縮できることであるが、改良処理コストが重むことが課題であった。これは固化処理プラント船の設備が高価であるため、簡易で低廉な固化処理方法の実現が望まれていた。

そこで、固化処理プラント船に替わる大量急速施工が可能な方法として、空気圧送船の圧送圧力を利用した管中固化処理技術が最近注目され始めている。

空気圧送式の管中固化処理技術は、従来の空気圧送船の土砂圧送ラインの中途に固化材添加装置を設置するだけで施工できるため、経済的で大規模施工への適用性も高い。

しかし、管中固化処理技術は、空気圧送時に生じる土砂プラグの大きさや速度が一様でないため、固化材の混練度や定量添加方法が課題となっている。

本稿では、これらの課題を解決した Pipe-Mixing 工法という新しい管中固化処理技術の概要と、現場実証実験を通じて得られた本工法の混練性能など固化処理施工上の有効性を述べる。

2. Pipe Mixing 工法の概要

図 2-1 に Pipe Mixing 工法の施工概要図を示す。

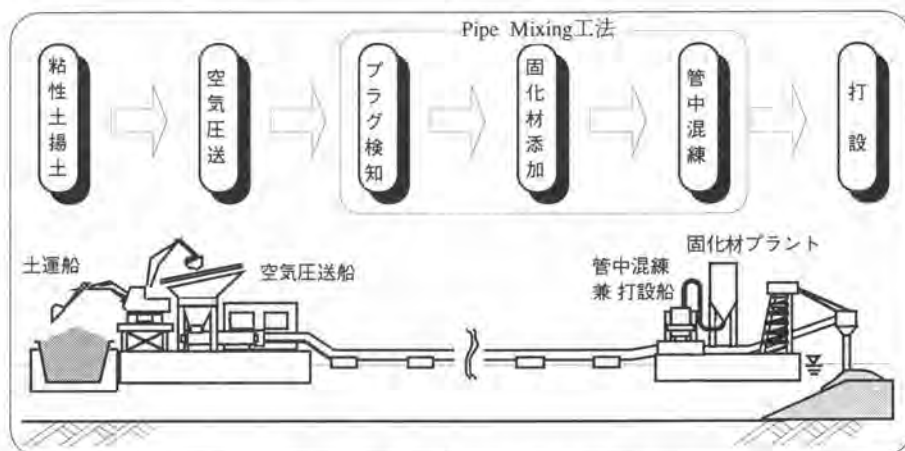


図 2-1 パイプミキシング工法概要

Pipe-Mixing 工法は、揚土・圧送機能を有する空気圧送設備（船）と、固化材添加・混練機能や打設機能を有する固化処理設備（船）、圧送ラインなどで構成される。

これまで管中固化処理工法は、固化材を連続的に噴射していたが、この方法では、粘土プラグは一定ではなく断続的に送られてくるため、固化材は各プラグごとに異なった量が添加されることになる。また、固化材の添加時期を空気圧送前にすれば、圧送管内への固化材の付着の問題により、長い時間洗浄が必要となり、また圧送抵抗が増大するという問題点があった。

そこで Pipe Mixing 工法は、空気圧送船により揚土・空気圧送されてきた圧送管内の土砂に対し、圧送土砂の速度および量を検知し、それに見合った固化材を定量的に添加する。さらに排砂管の末端近くで圧送管内に固化材を添加することにより、圧送の元圧の上昇を抑えることを可能にした。固化材を添加された圧送管内の土砂は、「パイプシャワー式固化材添加システム」の補助効果により短距離で圧送エネルギーにより圧送管内で混練される。

2. 1 管中固化の原理

空気圧送状況と管中混練状況をあらわす模式図を図2-2に示す。

空気圧送中の管内では、粘性土はプラグ流（乱流状態）となって圧送されているので、粘土プラグは形成と崩壊を繰り返している。固化材スラリーを添加するとこの乱流効果によって、粘性土と固化材を十分に混練することができる。

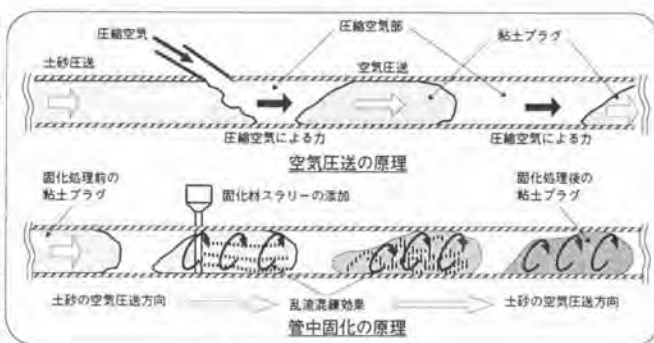


図2-2 管中混練の原理

2. 2 Pipe Mixing 工法の特長

管中混練方式「Pipe Mixing 工法」の主な特長を以下に示す。

(1) 固化材スラリー定量添加システム

本システムは、空気圧送中の粘土プラグの来るタイミングと量を把握し、プラグだけに定量の固化材スラリーを添加するものである。連続添加システムは、空気層にも固化材スラリーを添加していたため、プラグ毎の固化材濃度にバラツキがあった。新しい断続添加システムを使用すると、プラグだけに固化材を添加するので、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。連続添加と断続添加の違いをあらわす模式図を図2-3に示す。

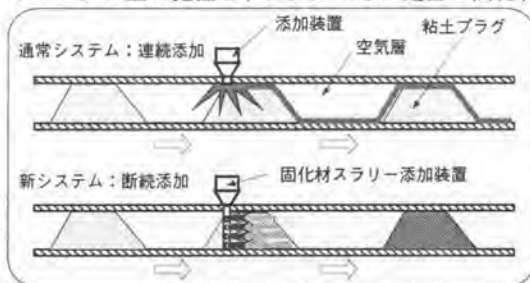


図2-3 添加システムの比較

この断続添加システムを実現させるために新たにプラグ検知システムを開発した。以下にその内容を述べる。

●プラグ検知の原理

プラグ検知システムの概要を図2-4に、プラグ検知・制御のフローを図2-5に示す。図2-4に示すように、システムは、振動計、圧力計、制御用コンピュータ、固化材添加用ポンプなどにより構成されている。

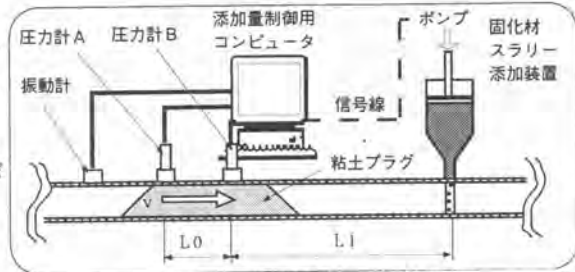


図2-4 プラグ検知システム概要

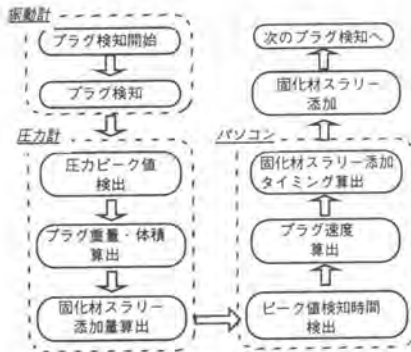


図2-5 プラグ検知フロー

プラグ検知・添加フローは、まずプラグ検知を開始すると振動計により、管内を流れるプラグを検知する。次に圧力計により圧力のピーク値を検出する。検出したピーク値よりプラグの重量と体積を算出する。(図2-6に模型実験で求めた「プラグ重量-管内圧力」の関係の一例を示すが、このグラフから、「プラグ重量-管内圧力」には比例関係があることを模型実験により見いだした。この関係に基づいてプラグの重量および体積を算出する。)算出したプラグの体積に合わせて、固化材スラリーの添加量を算出する。ついで添加量制御用パソコンによって、圧力ピーク値の時間を検出し、圧力計A,Bの検出時間の差よりプラグの速度を算出する。プラグのスピードと固化材スラリー添加装置までの距離L1より、固化材スラリーの添加タイミングを算出し、プラグが添加装置の場所を通過するとき、プラグの量に見合った固化材スラリーをポンプによりプラグ内へ添加することができる。

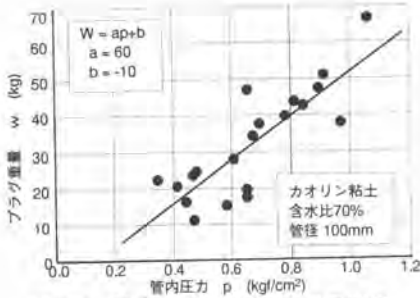


図2-6 管内圧力とプラグ重量の関係

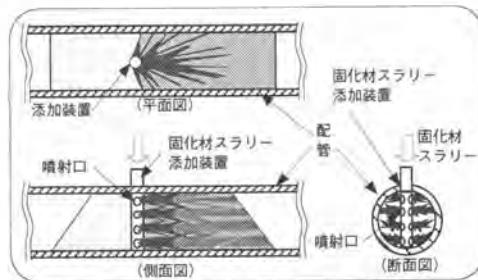


図2-7 バイブシャワー式固化材添加システム

(2) バイブシャワー式固化材添加システム

バイブシャワー式固化材添加システムは、固化材スラリーの噴出口を備えたパイプを圧送管中に複数設置し、固化材スラリーを添加ものである。粘土プラグ内部へ直接添加するため、混練効果が高い。図2-7にバイブシャワーの概要を示す。

PL	P1	P2	PL70	PL70	PL70	PL70	PL70	PL70
入力	圧力	通過時間	速度	体積	長さ	点灯開始	消灯時間	
20	618.76	1.15	618.93	14.29	0.383	5.423	612.30	612.87
1.83	616.92	1.13	618.84	16.67	0.377	5.929	620.15	620.44
1.66	625.73	1.04	626.26	6.05	0.347	4.904	629.36	630.16
1.7	622.81	1.07	633.82	9.52	0.357	5.046	635.12	635.64
1.7	641.77	1.04	641.92	13.53	0.347	4.904	643.41	643.77
1.69	649.53	1.28	646.84	16.67	0.400	5.659	647.83	648.16

写真3-1 制御用コンピュータ表示画面



写真3-2 プラグの検知状況 (可視化実験)

3. 現場実験

平成9年度、当社技術研究所にて配管径 $\phi 100 \times 100\text{m}$ 、圧送量 $20\text{m}^3/\text{h}$ の模型実験を行い、粘土プラグの流速や、重量と圧力の関係、プラグのバラツキ度合などの基礎データを収集し、Pipe Mixing 工法の考察とともにその有効性を確認した。

平成10年度に九州地区の現場において、本工法の実大規模の実用性実証のために現場実験を行った。

3. 1 現場概要

実験は、当社保有の空気圧送船「五盛号」($300\text{m}^3/\text{h} = 150\text{m}^3/\text{h} \times 2$ 系統)の1系統の管路($\phi 300 \times 180\text{m}$)を利用し、中間に Pipe Mixing 工法設備を設置して行った。図3-1 に実験現場の平面図を示す。

本実験は、空気圧送船より圧送されてきた粘土をプラグ検知装置により検知し、固化材添加装置により固化材を添加、処理土サンプリング装置により固化処理された粘土のサンプリングを行った。サンプリングした処理土の強度のバラツキは、コーン貫入試験(1H,3H)、一軸圧縮試験(7D,28D)により評価した。

表3-1 実験使用機器一覧

実験主要機器名称	機器仕様
空気圧送船「五盛号」	$300\text{m}^3/\text{h}$ (排砂管 $\phi 300$)
プラグ検知装置	
固化材スラリープラント	$24\text{m}^3/\text{h}$
固化材添加プランジャポンプ	$400\text{L}/\text{min} \times 4$ 台
パイプシャワー式固化材添加装置	$\phi 50 \times 4$ セット
減勢サイクロン	$\phi 1200 \times 2$ 連



写真 3-1 空気圧送船「五盛号」



写真 3-2 固化材プラント

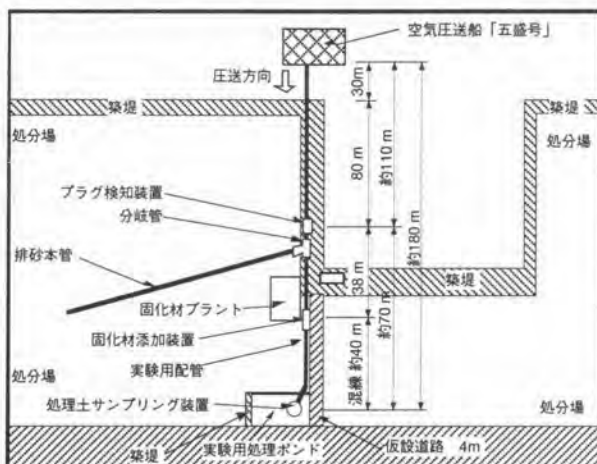


図3-1 実験現場平面配置



写真 3-3 パイプシャワーシステム
ノズルパイプ



写真 3-4 パイプシャワー設置状況

3. 2 現場実験結果

(1) プラグ検知および定量添加システム試験結果

図3-2～4に「振動の検知→圧力の検知→プラグ検知システムからの命令値」の結果のグラフからなる、実験時におけるプラグ検知結果および定量添加システムの作動結果のグラフを示す。

実施工規模におけるプラグの検知度は、

かなりの高精度でプラグ

が検知され、そのプラグに合わせて固化材が添加されていることがわかる。このことから、本プラグ検知システムが実施工規模においても十分に作動することが確認できた。

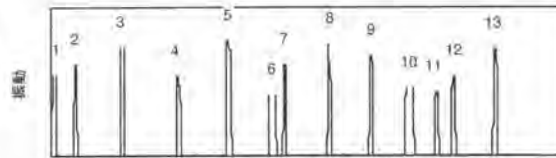


図3-2 振動計プラグ検知結果

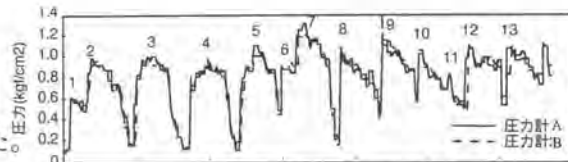


図3-3 圧力計プラグ検知結果

(2) 混練処理土の土質試験の結果

本現場実験に使用した供試粘土の土質試験結果を表3-2に、現場実験時の土質条件と固化材添加量を表3-3に示す。

表3-2 供試粘土土質試験結果

特性	結果	
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.68~2.74	
圧送時の粘土含水比 w(%)	80~105	
粒度組成	砂分 (%)	13~35
	シルト分 (%)	37~57
	粘土分 (%)	28~30
コンシステンシー	液性限界 wL (%)	40~49
	塑性限界 wP (%)	25~26
	塑性指数 IP	15~23
強熱減量 Li (%)	7	

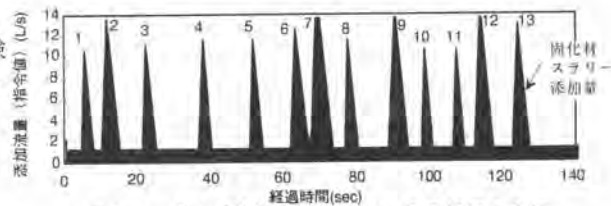


図3-4 プラグ検知システムからの添加量命令値

表3-3 現場実験実験条件

	圧送時の粘土含水比 (%)	固化材添加量 (kg/m ³)
case 1	107	81
case 2	88	62
case 3	91	75

現場実験においては、処理土の強度発現の評価として、「経過時間による強度の変化」および「経過時間における変動係数の変化」を計測した。計測結果を図3-5、3-6に示す。

図3-5より、各土質条件・添加条件で固化処理した粘性土は、各ケースとも同様の強度変化を示している。このことから、本工法は混練装置として十分に効果を発揮することが確認できた。また、図3-6より、各ケースとも強度のパラッキ（変動係数）が20%以下程度に収まっていることから、（室内試験における変動係数は、15.5%）本工法にて混練した処理土は、非常に高品質であることが確認できた。

また、各実験条件における強度のパラッキの計測も合わせて行った。図3-7に実験ケース2の各材令における強度分布のグラフ、図3-8に室内実験時の強度分布のグラフを示す。この結果より、本工法に

よって混練処理を行った粘土は機械混練で行う、室内試験とほぼ同等のバラツキ程度であった。

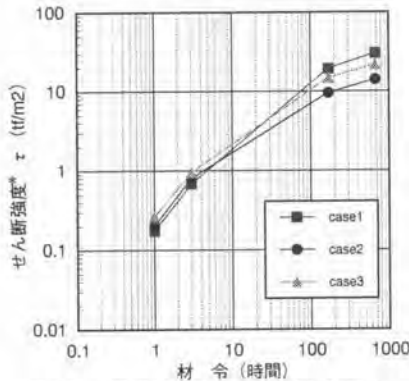


図 3-5 経過時間による強度の変化

*：せん断強度 (τ) = 軸圧縮強さ (qu) / 2

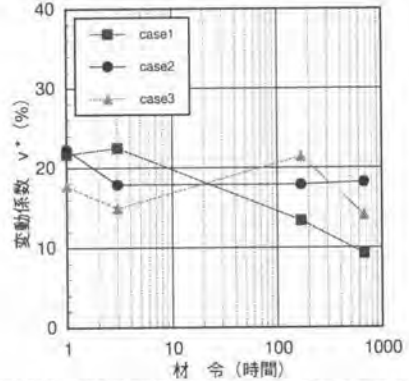


図 3-6 経過時間による変動係数*の変化

*：変動係数=標準偏差/平均強度

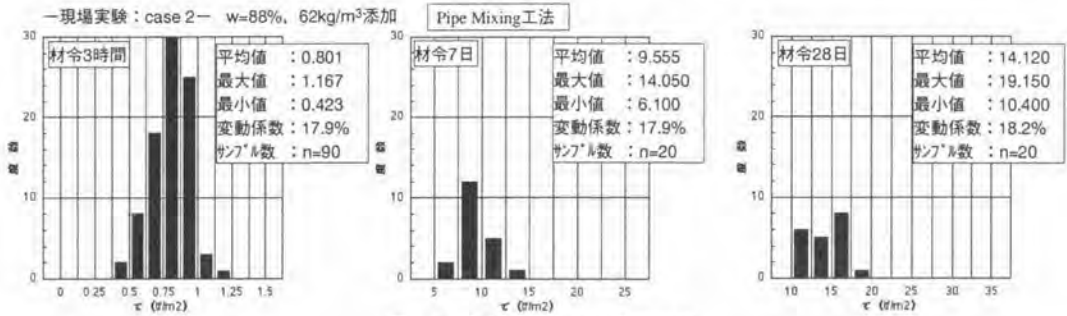


図 3-7 各材令における強度分布

以上の計測結果より、Pipe Mixing 工法により固化処理を施した粘土は、施工条件を十分に満たす強度発現と品質を確保することが可能であることが確認できた。

4. まとめ

当社の開発した Pipe Mixing 工法が、机上検討・模型実験・現場実験を経て、実施工においても十分な施工性と混練効果を確保できることが確認できた。

今後も大規模施工に対応可能な工法として、技術を確立するために研究・開発を進めていく所存であります。

最後に本工法の模型実験・現場実験に御尽力頂いた関係各位に感謝の意を表します。

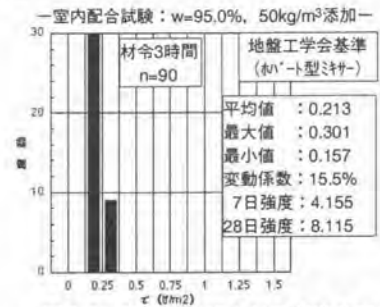


図 3-8 室内試験における強度分布



写真 3-5 固化処理土 (処理日の翌日)