

# 管中混合固化処理にドラム型ミキサを適用した 高品質な浚渫固化処理土製造法の開発

DEVELOPMENT OF MANUFACTURING TECHNIQUE FOR HIGH QUALITY  
STABILIZED DREDGING SOIL USING A COMPRESSED-AIRMIXTURE  
PIPELINE WITH A DRUMSTYLE MIXER

岩田秀樹<sup>1</sup>・奥村雄二<sup>2</sup>・川内勝<sup>3</sup>・佐藤芳則<sup>4</sup>・斎藤武久<sup>5</sup>・石田啓<sup>6</sup>

Hideki IWATA, Yuji OKUMURA, Masaru KAWAUCHI, Yoshinori SATOU,  
Takehisa SAITOH and Hajime ISHIDA

<sup>1</sup>正会員 株式会社 本間組 土木本部 (〒951-8650 新潟県新潟市西湊町通三ノ町3300番地3)

<sup>2</sup>株式会社 本間組 エンジニアリング企画部 (〒101-0033 東京都千代田区神田岩本町4番地)

<sup>3</sup>株式会社 本間組 土木本部機械部 (〒951-8650 新潟県新潟市西湊町通三ノ町3300番地3)

<sup>4</sup>株式会社 本間組 土木本部土木部 (〒951-8650 新潟県新潟市西湊町通三ノ町3300番地3)

<sup>5</sup>正会員 博(工) 金沢大学大学院助教授 自然科学研究科(〒920-1192金沢市角間町)

<sup>6</sup>フェロー 工博 金沢大学大学院教授 自然科学研究科(〒920-1192金沢市角間町)

A manufacturing technique of high quality stabilized dredging soil is newly presented in this study. In the technique, a simple drumstyle mixer without power-driven machinery is used at the process of mixing dredging soil with cement through a compressed-airmixture pipeline in order to improve the mixing of two materials. The prototype tests for the producing of stabilized dredging soil are conducted in the cases with and without the drumstyle mixer, and it is found that the strength of the stabilized dredging soil using this new technique becomes greater comparing with the case using the previous technique without the mixer under the same transporting distance of two materials. The systematic tests are also conducted with different mixer's height  $h$  and diameter  $d$ , for the discussions about the optimal mixer's shape. Furthermore, the practicalness of this technique is discussed through the test producing the amount of stabilized dredging soil per hour that is needed under actual construction of reclamation.

**Key Words :** High quality stabilized dredging soil, Compressed-airmixture pipeline with drumstyle mixer

## 1. 緒論

港湾整備などに伴う埋立工事等では、建設副産物のリサイクル推進の観点から、浚渫土をリサイクルした固化処理土が活用されている。現在、その固化処理方法として、浚渫土の空気圧送過程で固化材を投入し、目的とする場所に固化処理土を直接打設することのできる管中混合固化処理工法が採用され、多くの施工実績をあげることができる<sup>1)</sup>。この工法は、埋立工事などの大規模急速施工が求められる条件下では特に有効とされている。一方で、管中混合固化処理では、空気圧送時の気液二相流れの中で、管中に投入した固化材が気相部に偏って完全な混合ができず、固化処理土の品質低下を招くことが指摘されている<sup>2)</sup>。

本研究では、空気圧送過程における浚渫土と固化材の混合促進を目的に、圧送管路途中に中空円筒状のシンプルな構造の非動力型ミキサを設置する新たな圧送方法、ドラムミキシング工法を提案し、現地施工例を含めた各種の実験結果から、本研究で提案した圧送方法の有用性について検討する。さらに、ミキサの形状を変化させた系統的な実験結果から、最適なミキサ形状について検討するとともに、検討されたミキサ形状で設計製作したミキサを適用した実用規模施工実験を実施することで本工法の実用性について検証する。

## 2. ドラムミキシング工法の概要

本研究で提案するドラムミキシング工法と従来の管中

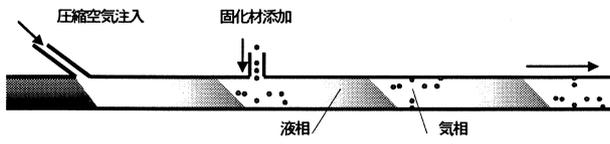


図-1 管中混合固化処理の概念

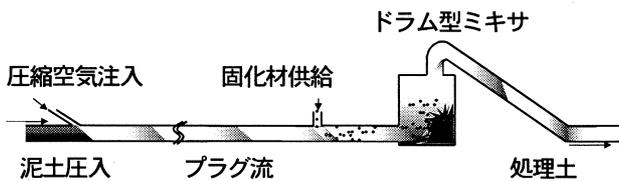


図-2 ドラムミキシング工法の概要

混合固化処理工法との違いを明確にするため、図-1に、まず管中混合固化処理の概要を示す。管中混合固化処理は、空気圧送時の気液二相流れの途中で固化材を添加することで、管路圧送中に泥土と固化材の混合を行い、目的の場所に固化処理土を直接打設する工法である。問題点として、管中に添加した固化材が気相部に偏って完全な混合ができず、固化処理土の品質低下を招くことが指摘されていることは前述している。

これに対して本研究で提案するドラムミキシング工法は、泥土と固化材の圧送途中に何らかの方法で気相と液相の混合を促進させることを目的として、図-2に示すように、管途中に中空円筒状のシンプルな構造の非動力型ミキサ（以下、ドラム型ミキサと略記する）を設置し、圧送する泥土と固化材の混合促進を実現するものである。本工法では、固化材は従来通り、ドラム型ミキサ流入前の空気圧送管路途中で、圧送される泥土の送泥量に対して定量的に添加される。このため、ドラム型ミキサ上流の流入管路内では、空気圧送時の気液二相流れにより、管中に添加した固化材が気相部に偏って完全な混合はできないが、空気圧送の際に生じるプラグ流が、ドラム型ミキサ内に高速で流入した際に発生する衝突をともなう乱流状態を利用して、泥土と固化材の混合の促進を達成させる。この際、複数のプラグを同時に混練することになるので固化材添加量の均等化が図られることも同時に期待できる。

### 3. プロトタイプ実験

ドラムミキシング工法における圧送方法の有用性を検討するために、現地規模への対応が可能なプロトタイプ実験による浚渫固化処土の製造を行った。使用資機材および実験装置の概要を表-1および図-3に示す。実験では浚渫土を送泥量 $50\text{m}^3/\text{h}$ に設定したコンクリートポンプに投入して圧送を行い、汎用コンプレッサにより圧縮空気を管路途中から注入することで空気圧送を行った。また、送泥量および空気量の管理は管路に流量計を設置し、混相流の流動様式を示す図-4のベーカー線図<sup>3)</sup>を指標として送泥量および空気量についてプラグ領域内となるよう

表-1 主要使用資機材

名称	規格・能力	数量
コンクリートポンプ車 (送泥用)	油圧ピストン式 $110\text{m}^3/\text{h}$	1
コンプレッサ (空気圧送用)	$11\text{m}^3/\text{min}$ 110PS	1
圧送管	$\phi 150\text{mm}$ $L=400\text{m}$	1式
ドラム型ミキサ	$\phi 800\text{mm}\times H1,500\text{mm}$	1
コンプレッサ	$19\text{m}^3/\text{min}$ トラタイプ	1
改良材供給装置	$150\text{kg}/\text{min}$	1式
改良材サイロ	30t	1

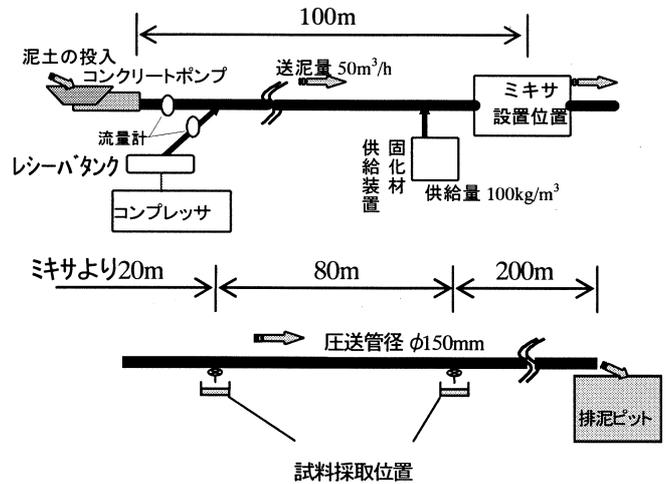


図-3 実験装置の概要

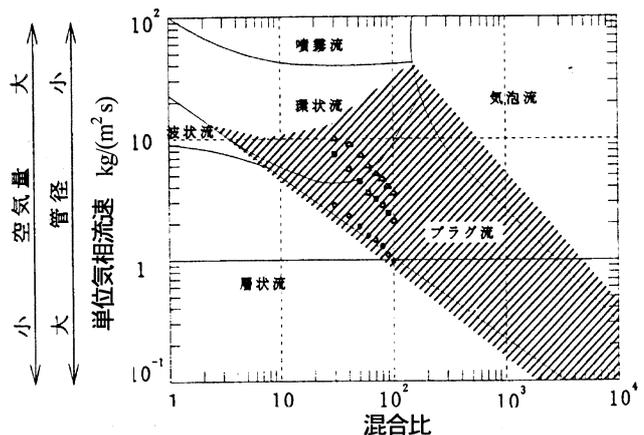


図-4 ベーカー線図

調整・管理して圧送を行った。図-4の横軸は、圧送管内に供給する圧縮空気と泥土の混合比を示す。縦軸は圧送管内の粘性土流を示し、供給された圧縮空気と管径によって定義される。使用したドラム型ミキサの試作機は、内径 $800\text{mm}$ 、内空高さ $1500\text{mm}$ の鋼製中空円筒状（図-5参照）で、流入管および排出管がそれぞれ約 $100\text{m}$ および $300\text{m}$ となる位置（内径は共に $150\text{mm}$ ）に設置し、固化材を流入管に取り付けた供給装置から送泥 $1\text{m}^3$ 当たり $100\text{kg}$ 添加した（図-3参照）。なお、圧送途中の混合状態の把握は極めて困難なため、本工法の有用性は、最終

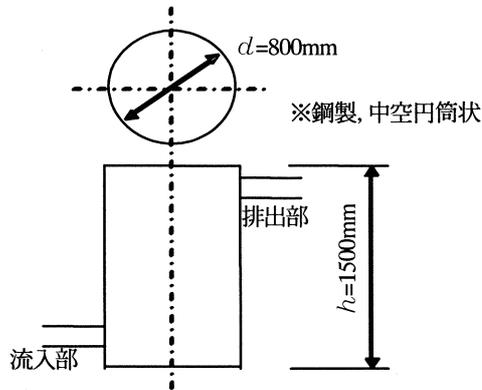


図-5 ドラム型ミキサ試作機

表-2 原料土の物理性状

単位体積質量		g/cm <sup>3</sup>	1.322
土粒子の密度		g/cm <sup>3</sup>	2.538
自然含水比		%	154.1
粒度特性	礫分 (2~75mm)	%	0.0
	砂分 (75μm~2mm)	%	48.3
	シルト分 (5μm~75μm)	%	11.1
	粘土分 (5μm以下)	%	40.6
コンシステンシー	液性限界	w <sub>L</sub>	% 82.3
	塑性限界	w <sub>p</sub>	% 39.3
	塑性指数	I <sub>p</sub>	43.0
強熱減量		L <sub>i</sub>	% 10.4
土のpH 試験			6.9
日本統一土質分類			粘土

的に生成された固化処理土の強度を、ミキサを設置しない従来工法の場合と比較することで検討した。この際、ドラム型ミキサの混練性能とミキサ下流管路圧送時における泥土と固化材の混合性についても確認するため、固化処理土の採取はミキサ下流20mおよび80mの位置で行った。採取した固化処理土はモールドに詰めて28日間養生を行い一軸圧縮試験を実施した。表-2に本実験で使用した原料土の物理性状を示すが、比較的有機質分が多かったため、固化材は高有機質土用セメント系固化材を選定した。また、事前に実験で使用した原料土を対象に室内配合試験を行い一軸圧縮試験を行っている。

図-6にプロトタイプ実験で得られた処理土の強度特性を示す。横軸は処理土の採取位置、縦軸は実験処理土と室内配合試験で製作した供試体の一軸圧縮強度の比（以下に強度比と略記する）を示す。従来工法の場合、強度比は0.4~0.6に留まり、その変動係数CVと共に圧送距離による変化が見られた。一方、ドラム型ミキサを設置した本工法では、強度比は輸送距離に関わらず、およそ0.8の水準に達し、一般的な施工機械による処理土の強度比の一般値0.4~0.8と同等もしくはそれ以上の値となることが分かった。さらに、変動係数は圧送距離に関わらず10%の水準に抑えることができていた。なお、排泥ピットには改良土が一定間隔で断続的に排出されていたことから、ミキサ内でいったん乱流状態となった後、ミ

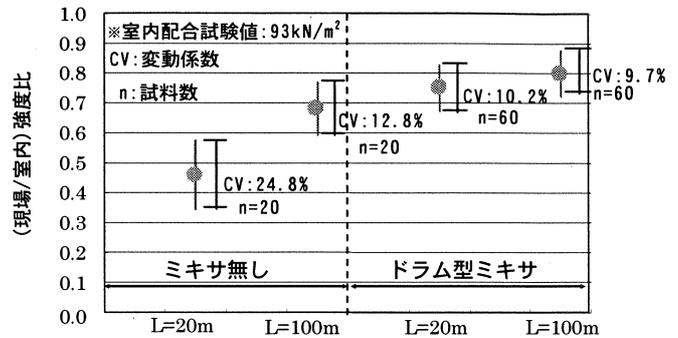


図-6 処理土の強度比(現場/室内)および変動係数特性(プロトタイプ実験)

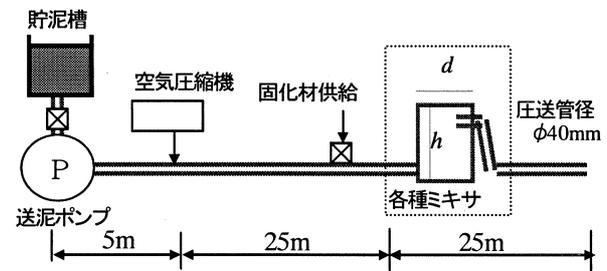


図-7 実験装置(ミキサ形状検証実験)

キサ下流の圧送管路でプラグ流が再び形成されていることが確認できた。以上の結果は、ミキサの設置により、浚渫土と固化材の混合が促進され、短い圧送距離でばらつきの少ない高い強度の処理土が得られることを示すものであり、施工性、経済性の観点から本工法の有用性を示唆するものである。一方で、圧送距離を比較的長く確保できる場合など、圧送距離とドラム型ミキサ設置の有用性については、さらに検討が必要である。

#### 4. ミキサ形状検証実験

本工法は、ミキサ内で発生する乱流により、泥土と改良材の混合を促進するものであるため、ミキサの形状により、ミキサ内の流動の状態が変化し、固化処理土の品質に影響を与えるものと考えられる。そこで、泥土と固化材から効率的に固化処理土を製造するためのミキサの適切な形状を検討するため、ミキサの高さ $h$ 、直径 $d$ および容積 $V$ をパラメータとした異なる5種類のミキサを製作し、ミキサ形状検証実験を行った。この時に使用した実験装置、使用資機材を図-7および表-3に示す。また、ミキサ形状の設定パラメータおよび原料土の物理性状を表-4および表-5に示す。圧送はベーカー線図を指標としてプラグ流が確保できるように、混合比50、単位気相流速を16.5kg/m<sup>2</sup>sとし、送泥量および空気量を設定した。

実験では、貯泥槽に泥土を貯泥し、送泥ポンプにより液相部が目視可能な直径40mmのビニル製管路に泥土を圧入し、圧縮空気を注入することで空気圧送を行った。

表-3 主要使用試機材

名称	規格・能力	数量
チューブポンプ	3.7kw	1
圧送管	φ40mm L=55 m	1式
空気圧縮機	15kw	1
チューブポンプ	3.7kw	2
スラリー製造プラント	LAM-250 v=250L,2.2kw	1
電磁流量計	40A	2
水槽	20m <sup>3</sup>	2
ドラム型ミキサ	Standard,slim, fat,small,big	1式

表-4 設定パラメータ (ミキサ形状検証実験)

ミキサタイプ	直径 d(mm)	高さ h(mm)	容積 V(m <sup>3</sup> )	h/d	V/F*
Slim	120	450	0.005	3.75	10
Fat	200	160	0.005	0.80	10
Big	231	361	0.015	1.56	30
Small	111	173	0.0016	1.56	3
Standard	160	250	0.005	1.56	10

\*F:管内プラグ流中の液相部代表体積

$$= \pi \phi^2 / 4 \times 10 \phi, \phi: \text{圧送管径}$$

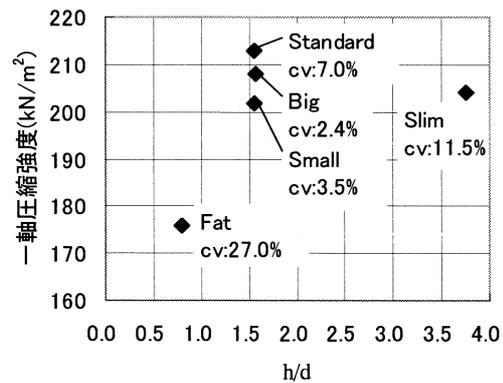
なお、φは混相流の流動様式に準じ、おおむね以下の様に規定される。  
送泥量100m<sup>3</sup>/h-φ=200mm, 送泥量300m<sup>3</sup>/h-φ=400mm  
送泥量600m<sup>3</sup>/h-φ=600mm

圧縮空気注入場所から25mの位置にドラム型ミキサを設置し、ドラム型ミキサの上流部から固化材を注入した。実験はミキサタイプごとに実施し、採取した改良土の強度とばらつきについて比較した。なお、ミキサ形状を評価するパラメータとして、本研究では、ミキサ高さhをミキサ直径dで除した値h/d (ミキサ形状比) とミキサ容積Vをプラグ流中の液相部代表体積Fで除した値V/F (ミキサ容積比) を定義する。ただし、液相部代表体積Fの評価には、多くの議論があるが、本研究では、空気圧送中の液相部1個あたりの長さを写真撮影により測定して整理し、それらの結果と既往の実験結果<sup>4)</sup>を参考に評価を行った。具体的には、実験で計測されたプラグ流の液相部平均長さは307mm~480mmの範囲で、平均値が403mmであり、この結果は、液相部の平均長さLに関する既往の実験結果と同様に、その長さを圧送管直径φの10倍 (L=10×φ) として評価することを支持するものであった。このため、液相部1個あたりの代表体積Fの評価式として、 $F=(\pi \phi^2 / 4) \times L$ を用いている。本実験の場合、液相部1個あたりの代表体積は、 $F=(\pi \times 0.040^2 / 4) \times 10 \times 0.040=5.03E-04$  (m<sup>3</sup>) となる。実験ではミキサ形状比 h/d とミキサ容積比V/F をパラメータとして固化処理土の強度特性を比較評価することで、最も効率的に固化処理土の製造ができるミキサ形状について考察した。

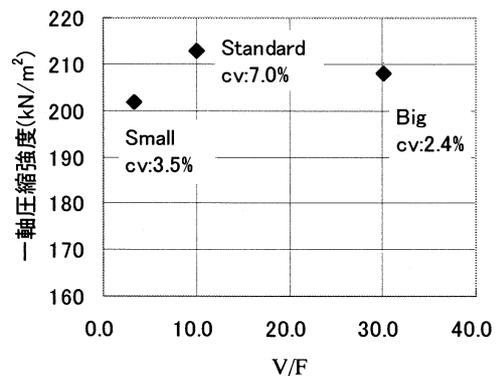
図-8にミキサ形状比h/dおよびミキサ容積比V/Fと処理土の平均強度との関係を示す。(a) 図より、ミキサ形状比は0.8の場合と比較して、1.56の場合に処理土の強度が高く変動係数が小さくなった。また、ミキサ形状比

表-5 原料土の物理性状

土粒子の密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.657	
自然含水比(%)	85.7	
単位体積質量(g/cm <sup>3</sup> )	1.498	
粒度特性	レキ分 (%)	0.0
	砂分 (%)	10.2
	シルト分 (%)	51.6
	粘土分 (%)	38.2
コンシステンシー	液性限界W <sub>L</sub> (%)	61.7
	塑性限界W <sub>P</sub> (%)	34.9
	塑性指数I <sub>P</sub> (%)	26.8
強熱減量(%)	7.9	
pH	8.1	
日本統一土質分類	粘土	



(a) h/dと処理土の強度との関係



(b) V/Fと処理土の強度との関係(h/d=1.56)

図-8 ミキサ形状特性の変化に伴う処理土の強度特性 (ミキサ形状検証実験)

3.75に達すると平均強度の顕著な低下は見られないが変動係数が若干高いことから、ミキサ形状比は、1.5付近に設定することが適切と考えられる。ミキサ容積比については、実験結果より、液相部代表体積は、約±20%の変動が認められるが、ミキサ形状比を1.5付近に設定した場合、(b) 図のように、3~30の範囲で設定することにより比較的ばらつきの少ない処理土を得ることができる。ミキサ内の流動は、様々な因子が複雑に影響しており流動状況を把握する事は困難であるが、本実験で得られた最適な形状比と容積比で見られるミキサ内の流動状態が泥土と固化材を混合する上で最もバランスのとれた

表-6 実験規模

送泥規模	
圧送管直径 φ(mm)	610
送泥量 Q (m <sup>3</sup> /h)	600
ミキサ緒元	
直径(m)	2.6
高さ(m)	4.0
ミキサ形状比 h/d	1.5
ミキサ容積比 V/F	11.9

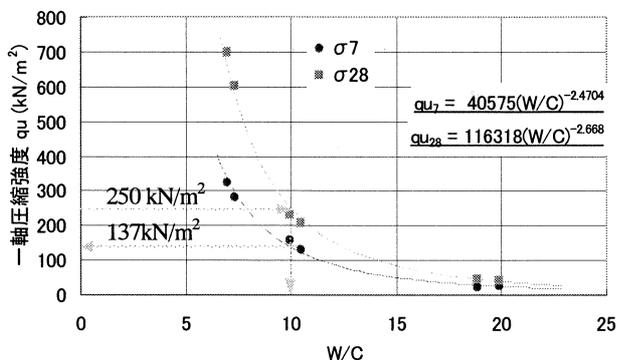


図-9 水セメント比と一軸圧縮強度の関係

状態であったと考えられる。

### 5. 実用規模施工実験

本工法の実用規模における有効性を確認するため、港湾埋立工事規模を想定した実用規模施工実験を行った。ここでは、ミキサ形状検証実験で得られたミキサ形状をもとに設計製作したドラム型ミキサを使用した。

#### (1) 実験規模

実験規模を表-6に示すが、実験ではミキサ形状検証実験と同様な流動様式を確保するため、泥土の単位体積質量を1.498 t/m<sup>3</sup>、混合比50、単位気相流速を17.0kg/m<sup>2</sup>sとして計画した。なお、実験にはミキサ形状検証実験と同じ試料を使用した。

#### (2) 室内配合試験

実験を行う前に室内配合試験を実施し、固化材添加量と強度発現の関係について把握した。固化処理土の強度は一般的に固化処理土中の水分とセメントの重量比（水セメント比:W/C）と高い相関関係にあることが知られていることから、含水比を2水準、改良材添加量（高炉セメントB種）を3水準設定し、固化処理土の水セメント比と一軸圧縮強度の関係を把握した。図-9より、水セメント比と一軸圧縮強度が高い相関関係にあることが確認できる。実験では、図-9を指標として固化材添加量を設定した。

#### (3) 実験概要

実験概要を図-10に示す。圧送用の土砂を実験フィー

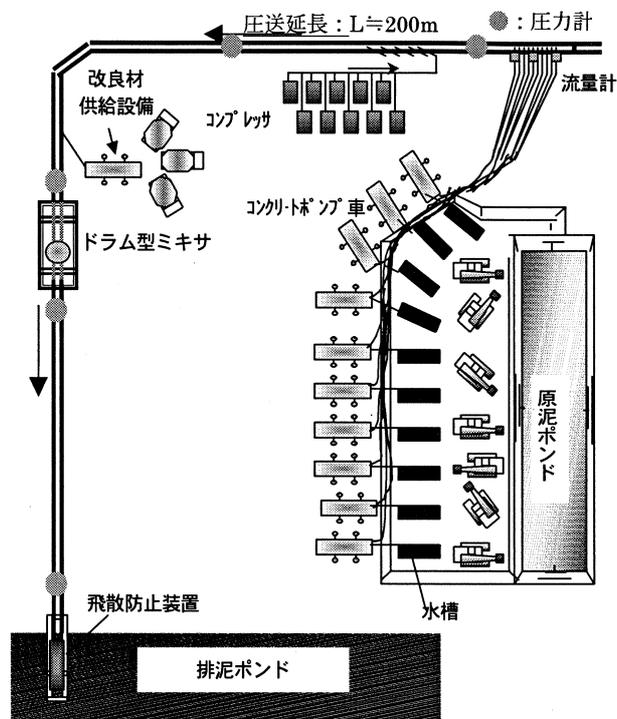


図-10 実験配置

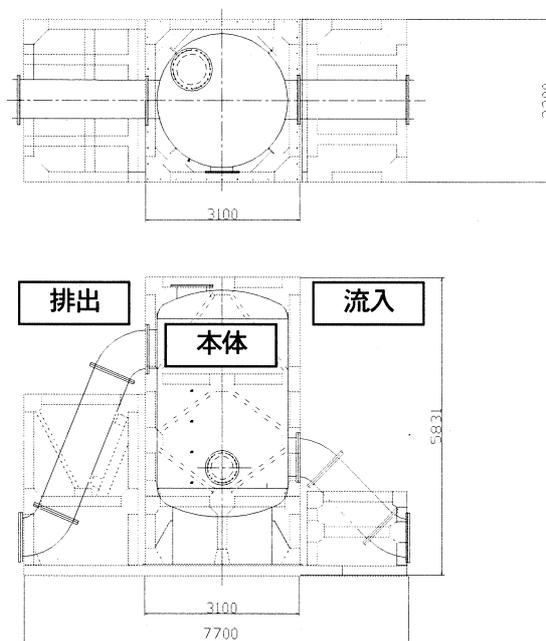


図-11 ドラム型ミキサの概略構造

ルド内の原泥ポンドに2000m<sup>3</sup>確保した。ドラム型ミキサは管路延長のほぼ中間点に設置した。圧送管内への土砂供給は、原泥ポンドから水槽に投入した泥土をスクイーズタイプのコンクリートポンプ車を使用し、600m<sup>3</sup>/hで定量供給し、圧縮空気を供給した。固化材は高炉セメントB種を使用し、スラリー状（水重量/セメント重量=1）で添加した。スラリーは生コン工場からアジテータ車で実験ヤードまで運搬し、コンクリートポンプ車で供給した。実験で用いた使用資機材を表-7に示す。圧送開始後、排泥ポンドで固化処理土を採取し、供試体を作製した。また、圧力計を圧送元、ドラム型ミキサ上下流、

表-7 主要使用資機材

名称	規格・能力	数量
圧送設備		
コンクリートポンプ車	クイズタイプ 80m <sup>3</sup> /h	10
水槽	30m <sup>3</sup>	10
バックホ	1.2m <sup>3</sup>	11
コンプレッサ	19m <sup>3</sup> /min. 0.69MPa	10
圧送管	φ610mm L=200m	1式
ドラム型ミキサ	内径2.6m 高さ4.0m	1
減勢装置 (飛散防止)	L12m×h2.0m×w3.0m	1
改良材供給設備		
コンクリートポンプ車	油圧式 100m <sup>3</sup> /h	1
クレーン車	10t	27
計測装置	電磁流量計, 圧力計	1式

吐出口付近に合計5箇所設置し、実験中の管内圧力を連続計測した。ドラム型ミキサの概略構造を図-11に示す。ミキサは機動性を考慮し、ミキサ本体部、流入部、排出部の3ユニットで構成し、分解、組立することにより陸上搬送が可能な組立可搬式とした。実証実験では、目標強度を $q_{u28}=250\text{kN/m}^2$ に設定し、図-9に示す $W/C$ と一軸圧縮強度の関係式より、 $W/C$ を10に設定した。この場合、改良材添加量は、圧送土1m<sup>3</sup>当たり77kgとなる。

#### (4) 実験結果

図-12に材令28における固化処理土の一軸圧縮強度の度数分布を示す。実験結果より（現場/室内）強度比は平均0.83（最小0.75, 最大0.88）、変動係数5.3の処理土の製造に成功しており、本工法の実用性について確認できた。また、固化処理土はヤード内の造成材料として活用した。次に、図-13に実験中の管内圧力分布を示す。図中のプロットデータは、各測定点における管内圧力の平均値を表す。ドラム型ミキサによる圧力損失は、概ね30kPaであった。また、圧送元圧は約130kPaであり、汎用コンプレッサの仕様や作業船の圧送機仕様を考慮すれば実用上問題のない値である。

#### 6. 結論

本研究では、空気圧送過程における浚渫土と固化材の混合促進を目的に、圧送管路途中に中空円筒状のシンプルな構造の非動力型ミキサを設置する新たな圧送方法を提案し、プロトタイプ実験により施工性、経済性の観点から本工法の有用性を確認した。さらに、ミキサの形状

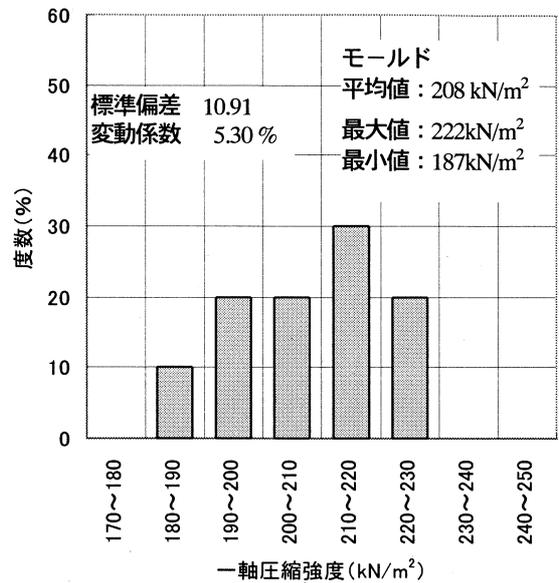


図-12 材令28日の処理土の強度分布

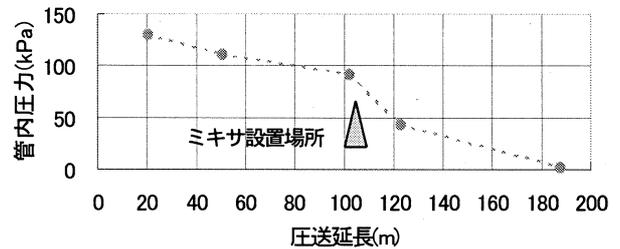


図-13 圧送管内圧力分布

を変化させた系統的な実験により、適切なミキサ形状について明らかにすると共に、最適ミキサ形状をもとに設計製作したドラム型ミキサを使用した実用規模施工実験結果から、本工法の実用性を確認した。

謝辞: 本研究を行うに際し、御指導、御協力を惜しまなかった関係諸氏に厚く謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 車田佳範他: 石炭灰を活用した浚渫粘性土の管中混合固化処理工事, 電力土木, No.291, pp.131-133, 2001.
- 2) 坂本暁紀: 管中混合固化処理工法, ヘドロ, No.73, pp. 41-46, 1998.
- 3) 財団法人沿岸開発技術研究センター: 管中混合固化処理工法技術マニュアル, pp.55-56, 2001.
- 4) 財団法人沿岸開発技術研究センター: 管中混合固化処理工法技術マニュアル, pp.58-59, 2001.