

## 管内混合システムによる固化処理技術の研究開発

松尾 龍之 西林 清茂

## 概 要

軟弱泥土や泥水などの固化処理は、従来から機械エネルギー駆動の各種攪拌装置を用いているが、一般的に施工能力のわりに装置が大型になる場合が多い。本論文で報告する管内混合システムは、施工能力の向上、混合装置の小型化を目的に研究を進めてきた固化処理技術で、流体エネルギーで攪拌混合するジェットミキサーを採用したものである。ジェットミキサーは、パイプ端部から流体を噴射する際に発生する負圧を利用して被混合物を吸引し、管内で噴流体と攪拌しながら圧送する混合装置である。筆者らは、これまでセメントスラリーを噴流体とし、軟弱泥土を吸引・混合する浚渫土改良処理、および石炭灰を吸引・混合する石炭灰流動化処理、また泥水を噴流体とし、セメント粉体を吸引・混合する泥水固化処理の三つの管内混合システムについて実験的に検討し、ジェットミキサーの有効性を確認するとともに実用システムを構築した。

## 1. はじめに

近年、環境保全、資源の有効利用の面から、従来廃棄処分している高含水泥土や使用済み掘削泥水などの建設廃棄物、あるいは石炭灰やパルプスラッジなどの産業廃棄物の有効利用が叫ばれており、現在官民一体となって再利用技術を研究開発している。再利用技術で最も多いのは、これらの廃棄物にセメントなどの硬化材を加えて混合処理し、地盤の埋立、埋戻し材や盛土材などに利用する方法である。使用している攪拌装置は、一般的に攪拌翼やスクリーンの回転による機械攪拌方式のミキサーが主体であるが、混合処理能力のわりに装置が大型になり、工事規模によっては不経済になる場合が多い。そこで、小型、軽量でしかも施工能力が大きな混合装置の開発を目的として、流体エネルギーで攪拌混合するジェットミキサーを用いた管内混合システムによる固化処理技術を研究した。

本報告は、高含水浚渫土の埋立材としての有効利用を目的とした泥土改良システム、石炭灰の地中空洞充填材への有効利用を目的とした石炭灰流動化処理システムおよび掘削泥水の原位置循環固化为目的とした泥水固化処理システムの3システムについてモデル試験、実大規模試験を実施しながら実験的に研究した結果について述べるとともに、これらの試験結果をもとに構築した実用システムの概要を紹介する。

## 2. 管内混合システムの概要

Fig.1は、管内混合システムの概念図である。システ

ムの中心はジェットミキサーで、T字型に成形されたパイプ、パイプ端部から流体を噴出するノズル、排出側パイプの内部に挿入されている噴射管から構成されている。

流体は、駆動ポンプによってジェットミキサーの端部から噴射される。その際噴射ノズル周辺に負圧が発生し被混合物を吸引する。噴射流体と吸引された被混合物は管内混合され搬送される。吸引物質が流動体の場合は、吸入口を直接その中に入れた状態で自吸可能であるが、粉体のような固体の場合には、吸入口に定量供給装置を設け、規定量の物質を吸わせるようにする。

ジェットミキサーは、上記したように攪拌翼や弁など機械的に運動する部分が内部にないため、構造が極めて簡単であることが大きな特徴であるが、被混合物を吸引する能力が流体の噴射エネルギー、噴射管径、圧送抵抗(揚程)などによって変化するため、混合システムの計画に当たっては吸引能力の予測が重要になる。

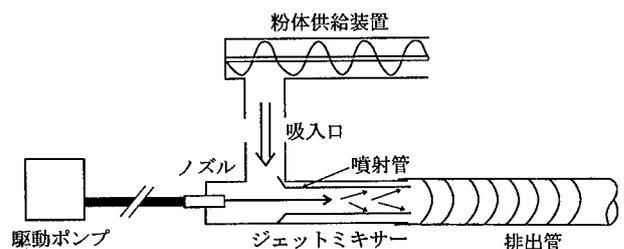


Fig.1 管内混合システム概念図  
Concept Figure of the Mixing in a Tube System

Table 1は、当システムで混合が可能な物質の組合せと主な用途である。

### 3. 処理システム A (泥土の固化処理)

処理システムAは、浚渫した高含水泥土をセメントスラリーと混合して改良し、埋立材や埋戻し材として再利用することを目的に開発したシステムである。したがって、ジェットミキサーの噴射流体はセメントスラリー、吸引物質は泥土となる。

これまでモデル試験、実大規模試験を実施しながらジェットミキサーの泥土に対する吸引能力、混合性能を実験的に検討し、実用システムを構築した。

#### 3.1 モデル試験

モデル試験は、口径50mm×長さ790mmのジェットミキサーを使用した。Fig.2は、その試験概要である。噴射流体は水・セメント比W/C=1.5(密度 $\rho=1.37\text{g/cm}^3$ )のセメントスラリーとし、被混合物は、ベントナイト、フライアッシュ、水の配合比によって粘度、含水比などの性状を変えた模擬泥土を使用した。

(1) 泥土吸引量 ジェットミキサーの吸引能力は、前述したように圧送抵抗に大きく影響される。圧送抵抗の一つに排出管内の摩擦抵抗があり、セメントスラリーと泥土が混合された処理スラリーの粘性によって変化する。Fig.3は、混合泥土の粘性と吸引量の関係である。水に対する吸引量に比べると、処理泥土の絶対粘度が6ポアズ程度までは能力低下が小さいが、これ以上になると能力は急激に低下している。

(2) 混合効果 Fig.4は、ジェットミキサーの混合効果を示している。横軸の混合比 $\alpha$ は、セメントスラリー噴射量 $Q_j$ と吸引泥土量 $Q$ の比 $Q_j/Q$ を容積百分率で表したものである。処理土の一軸圧縮強度の値は、ソイルミキサーを用いた室内配合試験の値とほとんど等しく、ジェットミキサーの良好な混合性能を確認することができた。

Table 1 混合物質の組合せと主な用途  
Combination of Mixable Materials and Main Uses

混合物質の組合せ		主な用途
噴流体	吸引物質	
セメントスラリー	泥土	①護岸背面埋戻し材 ②矢板背面埋戻し材 ③二重締切り中詰材
セメントスラリー	石炭灰	①人工島埋立材 ②マスコン中詰材 ③空洞充填材
泥水	セメント	①泥水固化壁造成(原位置固化方式) ②杭頭埋戻し材 ③空洞充填材
水	セメント	セメントスラリー作製
水	ベントナイト	ベントナイト泥水作製
水	ポリマー	ポリマー泥水作製

#### 3.2 実大規模試験

実大規模試験は、実工事への適用の可能性を判断するために実施したもので、施工能力、大量施工時の混合性能を中心に試験した。Fig.5は、試験概要を示している。

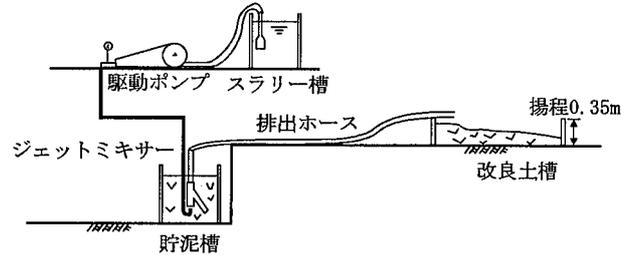


Fig.2 モデル試験の概要 (システムA)  
Outline of Model Mixing Test (System A)

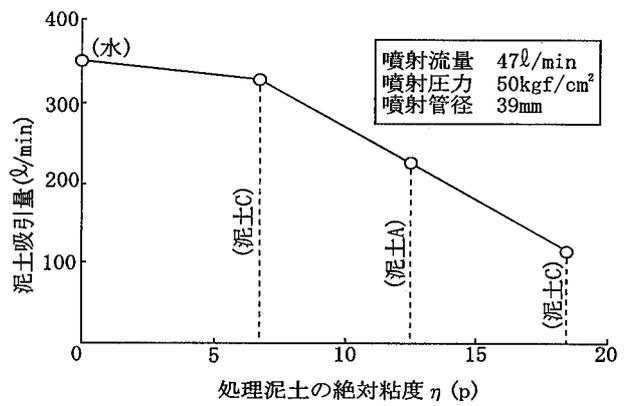


Fig.3 処理泥土の絶対粘度と吸引量の関係  
Relationship between Absolute Viscosity of Mixed Improved Soil and Suction Quantity

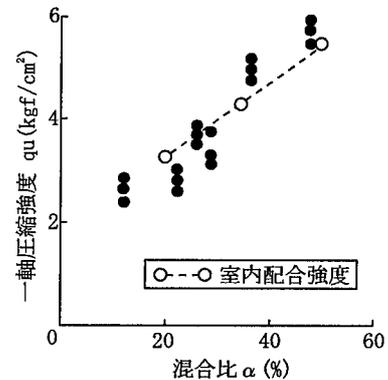


Fig.4 ジェットミキサーの改良効果  
Improvement Effects of Jet Mixer

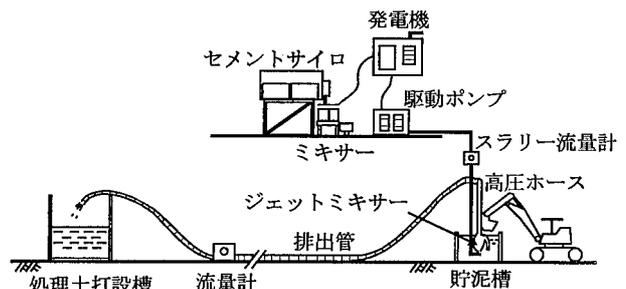


Fig.5 実大規模試験の概要  
Outline of Actual Scale Mixing Test

使用したジェットミキサーは、口径100mm×長さ1.5m、運転仕様は、噴射流量 $Q_j=150\text{l}/\text{min}$ 、噴射圧 $P_j=230\text{kgf}/\text{cm}^2$ である。ジェットミキサーはバックホウのアームに装着し、貯泥槽の浚渫土を吸引混合、50m離れた打設槽まで圧送した。2種類の浚渫土の性状をTable 2に示している。また、噴射流体は、水・セメント比 $W/C=1.5$ のセメントスラリーを使用し、セメント添加量は浚渫土 $1\text{m}^3$ 当たり $100\text{kg}$ を目標とした。

(1) 施工能力 Fig.6は、泥土1、泥土2に対するジェットミキサーの吸引量である。水の吸引量に比べて両泥土とも約80%程度であるが、1時間当たり $50\text{m}^3$ の施工能力を得ており、実工事に対して十分使用可能であることが確認された。

(2) 混合効果 高さ2mの打設槽に投入された処理土の深さ方向の改良強度分布を示したのがFig.7である。含水比が390%と高い泥土1の強度は、一軸圧縮強度で平均 $0.4\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、含水比340%の泥土2は、平均 $1.1\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度であった。また、強度分布は、打設槽上下に大きなバラツキがみられず、均一性に優れた処理土が得られた。

#### 4. 処理システムB（石炭灰の流動化処理）

このシステムは、火力発電所などから毎日大量に発生する石炭灰を改良するためのものであり、石炭灰にセメントと水を加えて流動化処理し、埋立材や空洞充填材などへの再利用を目的としている。

したがって、ジェットミキサーの噴射流体はセメントスラリー、吸引物質は石炭灰となる。

##### 4.1 モデル試験

Fig.8は、モデル試験の概要である。石炭灰のような

粉体状物質は、ジェットミキサーの負圧によって自吸が出来ないため、吸入口までは定量に石炭灰を供給するスクリーフィーダーを使用している。また、噴射流体であるセメントスラリーの配合は、改良強度とともに流動化処理の重要目的である改良スラリーの流動性も考慮し、Table 3の基本配合をもとにして決定した。

なお、ジェットミキサーは口径50mm×長さ790mm、石炭灰はフライアッシュを使用した。

(1) 石炭灰吸引量 ・ジェットミキサーの粉体に対する吸引能力については、過去に事例や参考文献がなく全く未知であった。そこで、実験的に石炭灰に対するジェットミキサーの吸引能力を調査した。

Table 2 浚渫土の性状（実大規模試験）  
Properties of Dredged Soil (Actual Scale Test)

項目		泥土A	泥土B
粒 度 組 成	礫分 (%)	0	0
	砂分 (%)	3	4
	シルト分 (%)	36	35
	粘土分 (%)	61	61
含水比 $w$ (%)	390	340	
単位体積重量 $\gamma_t$ ( $\text{gf}/\text{cm}^3$ )	1.146	1.154	
絶対粘度 $\eta$ (p)	4.6	7.0	

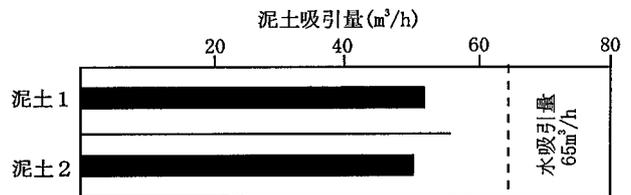


Fig.6 泥土吸引量（実大規模試験）  
Suction Quantity of Muddy Soil in Actual Scale Mixing Test

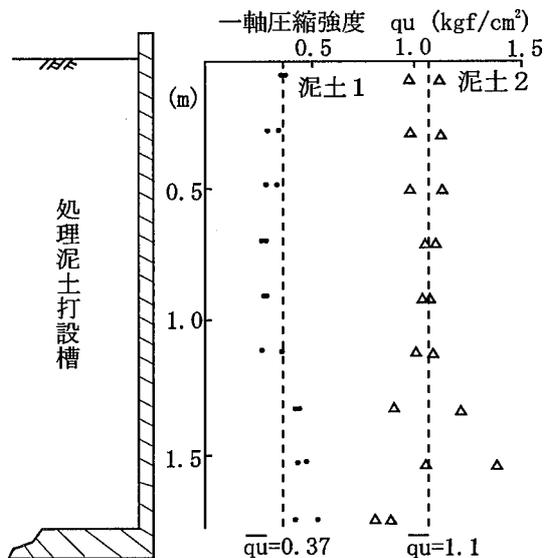


Fig.7 実大規模試験での改良効果  
Improvement Effects in Actual Scale Test

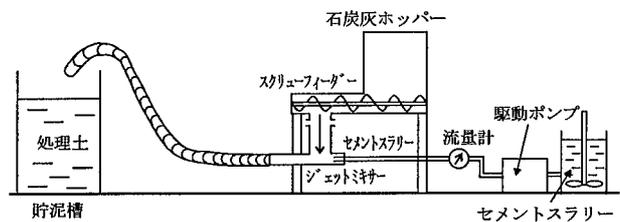


Fig.8 モデル試験の概要（システムB）  
Outline of Model Mixing Test (System B)

Table 3 処理スラリーの配合（モデル試験）  
Mix Proportion of Improved Slurry  
(Model mixing Test)

材料名	処理スラリー $1\text{m}^3$ 当たり	試験配合	セメントスラリー配合
石炭灰	905kg	60kg	$w/c=5.7$
高炉セメント	100kg	6.7kg	
水	570 $\text{l}$	37.8	

モデル試験は、ジェット噴射量 $Q_j=40\text{l/min}$ 、噴射圧 $=30\text{kgf/cm}^2$ 一定とし、噴射管径 $\phi 50\text{mm}$ と $\phi 39\text{mm}$ の2種類のジェットミキサーについて揚程と吸引量の関係を求めた。試験結果をFig.9に示しているが、石炭灰の吸引量は、揚程が高くなると直線的に減少しており、吸引物が水の場合と同様な傾向がみられる。

Fig.10は、同一試験条件における石炭灰と水の吸引量を比較したものである。噴射流量 $40\text{l/min}$ に対して石炭灰吸引量が $W=40\text{kg/min}$ 以上、すなわち $W/Q_j > 1$ では、石炭灰の吸引量は、水の約20~30%程度である。

(2) 改良効果 Fig.11は、ジェットミキサーで混合し、貯泥槽に投入した処理スラリーの改良強度試験結果である。貯泥槽の3箇所から試料を採取したが、採取位置、採取深さとも改良強度に大きな差がみられず、一般的に混合が難しい粉体-液体混合に対してもジェットミキサーの優れた混合性能を確認した。

#### 4.2 実大規模試験

石炭灰改良システムの実大規模試験は、大型ジェットミキサーの混合施工能力を中心に調査したもので、モデル試験と同じ機械構成で行った。Table 4に実施した2種類の試験条件を示しているが、Case 1では口径100mm、Case 2では口径200mmのジェットミキサーを使用している。

Fig.12は、同一条件での石炭灰と水の吸引量を比較したものである。石炭灰の吸引量はCase 1で $250\text{kg/min}$ 、Case 2で $570\text{kg/min}$ が得られており、スラリー製造量に換算すると、

- ・ Case 1…… $250/2.28 + 200 = 310\text{ l/min}$  ( $18.6\text{m}^3/\text{h}$ )
- ・ Case 2…… $570/2.28 + 300 = 550\text{ l/min}$  ( $33\text{m}^3/\text{h}$ )

ただし、石炭灰の比重 $\rho = 2.28$ となり、能力的に実工事への適用が可能であることを確認した。

また、この実大規模試験でもジェットミキサーの石炭灰に対する吸引量は水の約20%程度であった。

#### 5. 処理システムC (泥水の固化処理)

処理システムCは、地中連続壁や各種場所打ち杭の施工に使用される掘削用安定液にセメント粉体を加えて混合固化するシステムで、泥水固化壁造成工、杭頭埋戻

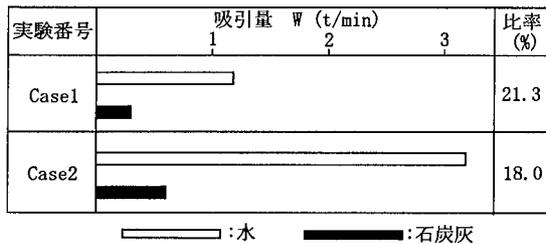


Fig.12 水、石炭灰吸引量比較 (実大規模試験)  
Comparison of Suction Quantity of Water and Coal Ash (Actual Scale Test)

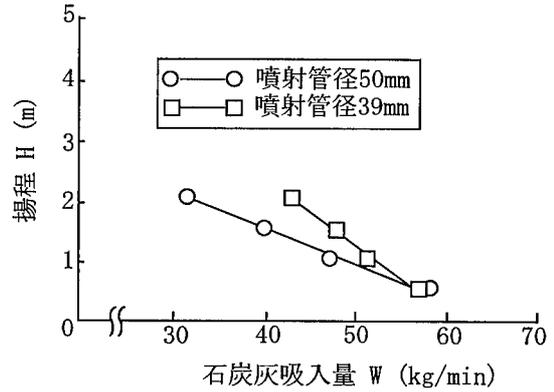


Fig.9 石炭灰吸入量と揚程の関係  
Relationship between Suction Quantity of Coal Ash and Pump Head

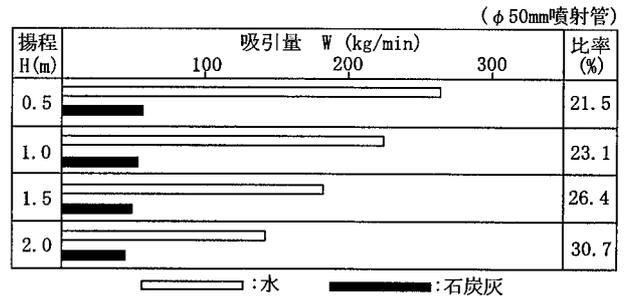


Fig.10 水、石炭灰吸引量比較 (モデル試験)  
Comparison of Suction Quantity of Water and Coal Ash (Model Mixing Test)

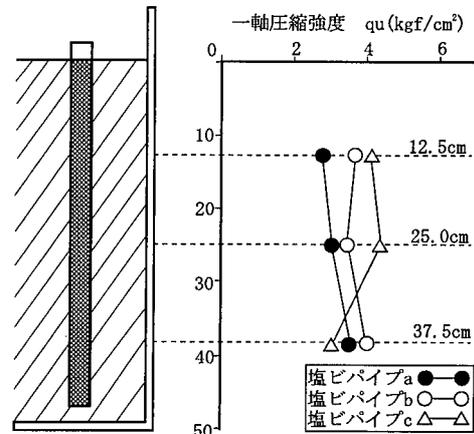


Fig.11 流動化処理石炭灰の改良強度  
Improved Strength of Liquefied Stabilized Coal Ash

Table 4 ジェットミキサーの運転使用 (実大規模試験)  
Performances of Work Condition (Actual Scale Test)

項目	Case1	Case2
ジェットミキサー口径 (mm)	100	200
噴射管径 (mm)	78	150
噴射流体の種類	セメントスラリー (w/c=10.5)	水
噴射流量 (l/min)	200	300
噴射圧力 (kgf/cm²)	50	50
実揚程 (m)	1.5	0.35

し工等への適用を目的としている。当システムの噴射流体はこれまでのセメントスラリーとは異なり泥水を使用し、吸引物質はセメント粉体である。また、ジェットミキサーの駆動ポンプは、噴射流量に比べて吸引量が比較的少ないことを考慮し、水中ポンプを使用した。

噴射流体を泥水とし水中ポンプを使用するジェットミキサーは、全く新しい試みであった。そのため、モデル試験では水中ポンプの低圧、多吐出型噴射条件下でのジェットミキサーの吸引能力、混合性能を中心に調査するとともに水中ポンプで噴射可能な泥水の性状限界を実験的に把握した。

(1) セメント吸引量 モデル試験の概要をFig.13に示している。地中連続壁の掘削用安定液の固化を想定したもので、地下の水槽の泥水を水中ポンプで上部から吸引揚げ、ジェットミキサーのノズルから噴射する。スクリーフィーダーで送られてくるセメントと管内混合し、水槽下部から吐出して水槽内の泥水を処理スラリーと置換しようとするものである。駆動ポンプとして使用している水中ポンプは、その揚水機構から噴射ノズル径を与えれば自動的に噴射流量、噴射圧が決まる。そこでモデル試験では、ノズル径を10mmと14mmにしたTable 5の運転仕様でセメントの吸引量を調べた。

Fig.14は、ジェットミキサーの実揚程が0mと1mの時の試験結果である。( )内の数値は、泥水1m<sup>3</sup>当たりのセメント添加量を示している。一般的に泥水固化の場合、当然改良強度にもよるが、泥水1m<sup>3</sup>に対して200kg前後のセメントを添加する機会が多いが、この試験結果からジェットミキサーの揚程を低くする、すなわち圧送抵抗を少なくするように機械配置を工夫することによって、泥水固化への適用が可能であることが判った。

(2) 改良効果 改良効果の試験は、密度が1.15g/cm<sup>3</sup>、ファンネル値が19.3secの粘土泥水について実施した。Fig.15は、水槽の2箇所から採取した処理土の改良強度試験結果である。セメント添加量190kg/m<sup>3</sup>の一軸圧縮強度の値は、2kgf/cm<sup>2</sup>前後に分布しており、採取場所、深さによる強度のバラツキが少ない良好な品質固結体が得られた。

(3) 噴射可能泥水の性状 水中ポンプでの噴射可能泥水の性状限界を把握するために、密度と粘性をパラメータとしたTable 6に示す粘土泥水とベントナイト泥水の2種類を使用した。

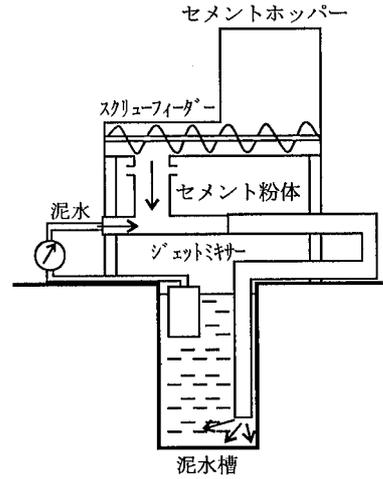
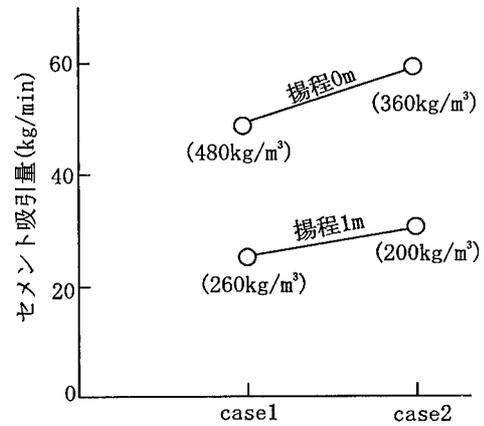


Fig.13 改良効果調査のためのモデル試験概要  
Outline of Model Mixing Test for Examination of Improvement Effects



ジェットミキサーの運転仕様  
Fig.14 2種類の運転仕様でのセメント吸引量  
Suction Quantity of Cement by Two kinds of Work Condition

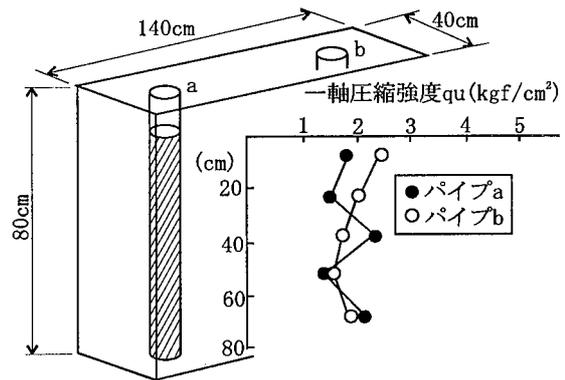


Fig.15 粘土泥水の改良効果  
Improvement Effects of Clay Slurry

Table 5 水中ポンプによるジェットミキサー運転使用  
Performances of Work Condition of Jet Mixer  
by Submerget Pump

項目	Case1	Case2
ノズル径 Dj(mm)	10	14
噴射流量 Qj(l/min)	100	160
噴射圧 Pj(kgf/cm <sup>2</sup> )	2.2	1.6

Table 6 2種類の泥水の性状  
Properties of Two Kinds of Slurry

泥水の種類	密度調整範囲 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	粘性調整範囲 ファンネルf (sec)
粘土泥水	1.10~1.44	19.0~30.3
ベントナイト泥水	1.06~1.13	21.0~50.0

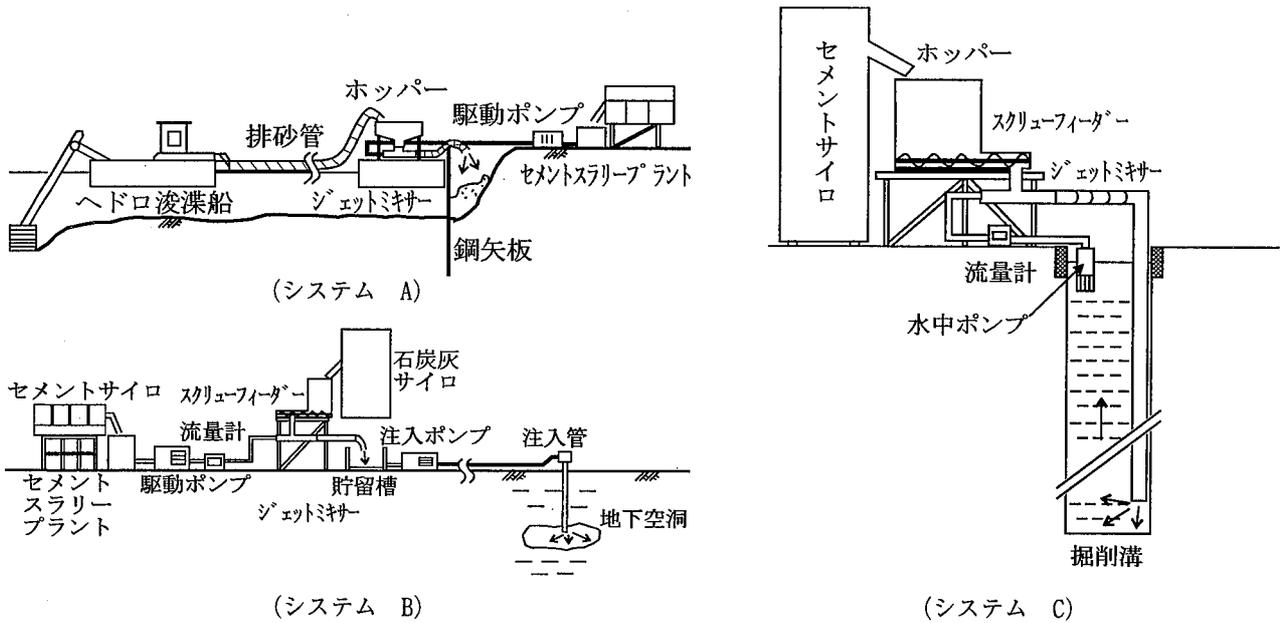


Fig.17 実用システムの概念図  
Concept Figure of Practical Systems

試験結果は、Fig.16 に示している。密度に関しては、 $1.35\text{g}/\text{cm}^3$  程度までの泥水に対して水中ポンプの能力はほぼ一定であるが、 $1.4$  を越えると揚泥量は少なくなる。

一方、粘性に関しては、ファンネル粘度が  $40\text{sec}$  程度までの泥水に対して揚泥量は、粘性の増加とともに微増しているが、 $50$  以上になるとポンプ吸入口のストレーナに泥土が詰まり、揚泥不能になった。

以上の結果、水中ポンプで噴射可能な泥水の性状は、密度が  $1.35\text{g}/\text{cm}^3$  でかつ粘性が  $40\text{sec}$  が限界と考えられる。なお、泥水掘削用安定液の管理値は、ほとんどこの限界範囲内であり、当システムを泥水固化に適用することが可能であると判断された。

## 6. 実用システムの構築

Fig. 17 は、以上の実験結果をもとに構築した3種類の実用システムの概念図である。システムAは、河川、湖沼の底泥浚渫土を改良し、護岸背面に埋立てる方法、システムBは、石炭灰を流動化処理し、地中空洞に充填する方法、システムCは地中連続壁の掘削泥水を比重差を利用して現位置で循環置換する方法である。施工能力はシステムA, Bは  $200\text{m}^3/\text{日}$ 、システムCは  $50\text{m}^3/\text{時}$  を想定している。

## 7. あとがき

ジェットミキサーの優れた攪拌性を利用した3種類の管内混合システムについて、基礎的なモデル試験から本工事に適用できる能力の実大規模試験まで実施しながら開発をすすめてきた。その結果、同種工事に適用されてい

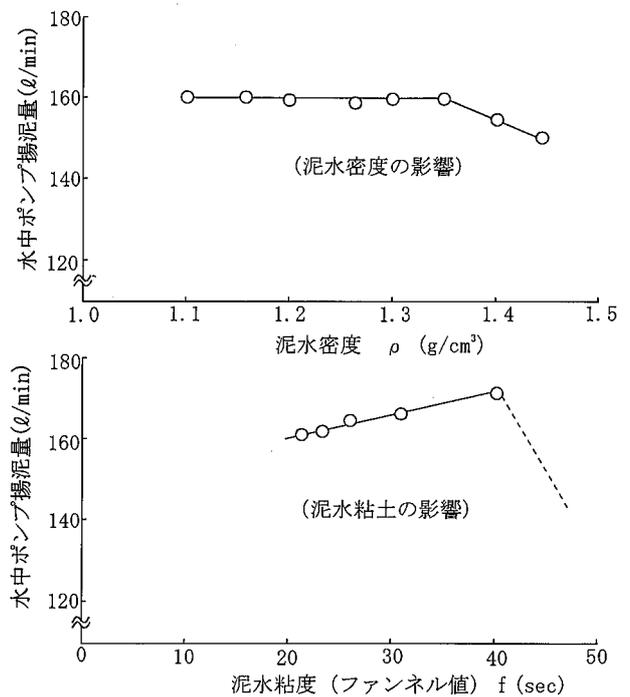


Fig.16 泥水の性状と水中ポンプ能力の関係  
ORelationship between Property of Slurry and Ability of Submerged Pump

る従来の施工方法に比べて性能面、経済面で十分競争が可能であることが判った。今後は、積極的に実際に工事に適用し、より優れたシステムになるように改良、改善を進めていきたい。