

# 汚泥の固化処理に関する研究 (第4報)

—MUD-FIX 工法の概説と現場調査例—

喜田大三 炭田光輝  
久保博 辻博和

## Studies on Solidification Treatment of Mud (Part 4) —An Introduction of the “MUD-FIX” Method and Examples of Application—

Daizo Kita Mitsuteru Sumida  
Hiroshi Kubo Hirokazu Tsuji

### Abstract

The disposal system of the “MUD-FIX” method for solidifying mud developed by the Company and the results of investigations of projects using this method are described. (1) The “MUD-FIX” method consists of the three disposal systems of I., method of solidification of in-situ mud, II., method of solidification of transported mud, and III., method of solidification of mud transported to the place of disposal. (2) System I was applied in disposal of mud from river A, the mud being well solidified down to GL -3 m with its strength reaching more than 0.6 kg/cm<sup>2</sup>. In management of this work, not only mechanical tests, but also chemical tests were adopted for measuring cement content and the degree of mixing. (3) System II was applied in disposal of mud from river B and the strength of solidified mud reached 0.6 ~ 1.8 kg/cm<sup>2</sup> after about one month.

### 概要

当社の汚泥（ヘドロ、スラッジ等）固化処理工法，“MUD-FIX 工法”の処理システムを説明し、MUD-FIX 工法の実施例として2現場の施工結果を示した。(1)MUD-FIX 工法には、I. 原位置固化法（原位置で固化し地盤化または掘削・運搬）、II. 輸送固化法（浚渫し輸送途中または仮置地で固化し運搬）、III. 処分地固化法（浚渫し処分地で固化）の3つのシステムがある。(2)I（原位置固化法）を適用したA河川ヘドロ処理では、処理船を用いてセメントによる固化を行なった。その結果、セメントは約3mのヘドロ層全体によく混合され、設計どおり約1ヶ月後には一軸圧縮強度0.6kg/cm<sup>2</sup>以上を確保できた。また、この工事では、処理船の移動速度の決定および施工管理のために迅速でかつ簡易な化学的手法でセメント混入率、混合指数を測定した。(3)II（輸送固化法）を適用したB河川ヘドロ処理では、ポンプで浚渫したヘドロを固定式連続ミキサーでセメントと石膏系助剤を用いて固化し、その結果約1ヶ月後には0.6~1.8kg/cm<sup>2</sup>となり、設計強度を確保できた。

### 1. まえがき

河川・湖沼・港湾などに堆積するヘドロ（底質）あるいは工場、上下水処理場などから発生するスラッジは、人類を含めた広く生物界の生活環境に対する認識の高揚にともない、近年その処理対策が一部で着手されているけれども、なお膨大な量の処理が残されている。当社で開発された“MUD-FIX工法”はこれら汚泥（ヘドロおよびスラッジ等）の処理を目的とした汚泥固化処理工法である。

さて、汚泥を処理する場合に、固化処理はとくにつぎの場合に必要かつ有効である。(1)汚泥を固化地盤と

したり、あるいは盛土材・裏込材などに利用する場合、(2)汚泥の処分地が近くにない場合、(3)汚泥の処分地サイドから要求される場合、(4)汚泥が有害物質を含む場合など。このように、固化処理は汚泥の除去あるいは処分においてよく用いられる工法である。しかし、汚泥はその特徴として、微細粒子からなる高含水、流動状の還元系土で、夾雑物を含みさらに有害成分を含有する場合もある。このため、汚泥の固化処理は従来の土質安定処理工法とは様相を異にし、また土木関係の新分野でありまだ日が浅いので、施工機械と固化剤の両面でなお改良の余地が多く残されている。

以下に報告する MUD-FIX 工法もまだ完全ではな

いけれども、各方面からの協力を得て一応の姿が完成し実績もできた。そこで、この MUD-FIX 工法について説明し、施工調査例を以下に述べる。

## 2. MUD-FIX 工法の概説

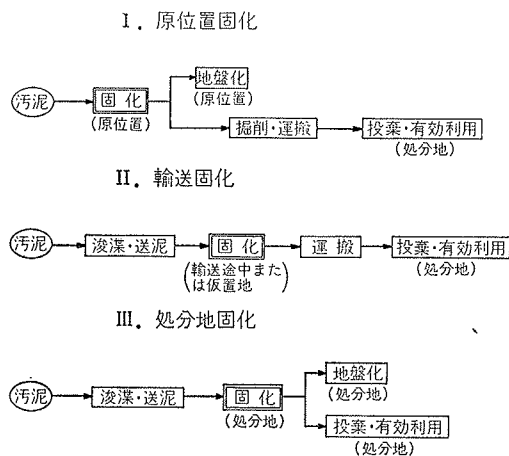
MUD-IX 工法とは、汚泥を薬剤によって凝結硬化させて固化地盤、埋込材、裏込め材などの土木材料に利用し、また汚泥に有害物質を含む場合には、溶出防止剤も併用してその溶出を防止して二次公害を抑止する工法である。

この MUD-FIX 工法には、図一1に示すように3つの基本的な処理システム、すなわち I. 原位置固化法、II. 輸送固化法、III. 処分地固化法がある。

I. 原位置固化法：汚泥をその堆積位置から動かさずにそのままの位置で固化し、汚泥を固化地盤化または固化後に掘削し処分地に運搬して投棄あるいは有効利用する方法。

II. 輸送固化法：汚泥を浚渫、送泥し、その輸送途中または仮置地で固化処理を行なったのちに処分地まで運搬して投棄あるいは再利用する方法。

III. 処分地固化法：汚泥を浚渫し処分地まで送泥したのちに処分地内で固化処理し、固化地盤化または投棄、有効利用する方法。



図一1 MUD-FIX 工法 I, II, III における汚泥処理システム

以上の3つの処理システムは、固化処理が原位置、輸送途中あるいは処分地のいずれで行なわれるかによって分類されたもので、MUD-FIX 工法では現場状況、処理目的などによって適切な施工機械と固化剤を組合せて上述の各システムを完成させる。

さて、MUD-FIX 工法で使用する主な混合処理機械装置の分類と各システムへの適用を表一1に示す。MUD-FIX処理船、MUD-FIX 処理機、クラムセル、

混合方式	混合処理機械装置	I 原位置 固化	II 輸 送 固化	III 処分地 固化
スクリーナー オーガー	MUD-FIX処理船 MUD-FIX処理機	○	○	○
バケツ	クラムセル <small>(クローラ あるいは 掘削機)</small>	○	○	○
	バックホウ <small>(クローラ あるいは 掘削機)</small>	○	○	○
ロータリー	スタビライザー、パル ビライザー、耕運機 (各改良型を含む)	○	○	○
固 定 ミキサー	連続式 コンクリートモーター コンティニアスミキサー		○	
	バッチ式 パン型ミキサー ドリムミキサー		○	

表一1 主な混合処理機械装置の分類と MUD-FIX工法各システムへの適用

バックホウ、スタビライザー、パルビライザーおよび耕運機などはいずれも処理機械が移動しながら汚泥を処理するので、I, II, III いずれのシステムにも適用できる。一方、連続式あるいはバッチ式の固定ミキサーは汚泥をミキサーまで運搬しなければならず、IIのシステムにのみ適用できる。これらの混合処理機械に供給する固化剤の形態は、混合性を良好に保つために通常、ミルク状とする。

また、MUD-FIX工法で使用する固化剤はセメント系、セメント—無機薬剤系、セメント—有機薬剤系、セメント—石膏系、石灰系、石灰—石膏系などに分類される。

## 3. MUD-FIX 工法 I による A 河川へドロの処理 (施工例 1)

### 3.1. 工事概要

旧河川を改修して新たに鉄筋コンクリート三方張水路を構築する工事において、MUD-FIX工法 I を適用して河底のへドロを処理した。

工事は、河川中央部から左岸までの河底にファゴットシートを敷設して流速増大によるへドロの流失を防止したのち、右側半分を縮切って湧水を排水しながらへドロを原位置で固化する。固化したへドロの大部分は運搬処分するが、下層の一部は原位置に残して基礎地盤とする。ついで、この上に鉄筋コンクリート三方張水路を構築して流路を右岸側へ切換え、残された左岸側は同様にへドロを固化して、覆土を行なって緑地帯とするものである。

### 3.2. へドロの性状と柱状図

へドロの性状は河川流の影響をうけて、水平および深度方向にかなりばらついていたが、平均値として含水比=156%、砂分=30%、シルト分=43%、粘土分=27%、LL=89%、PL=44%、真比重=2.56、強熱減量=13.6%で、三角座標分類では粘土質シルト、また統一分類では OH である。そして、平面的にみた場合、河川岸部は中央部に比べて微粒分が多く、また深度別にみた場合、図一2に柱状図を示すように一般に GL-1m 付近に砂質の層をはさんでいた。

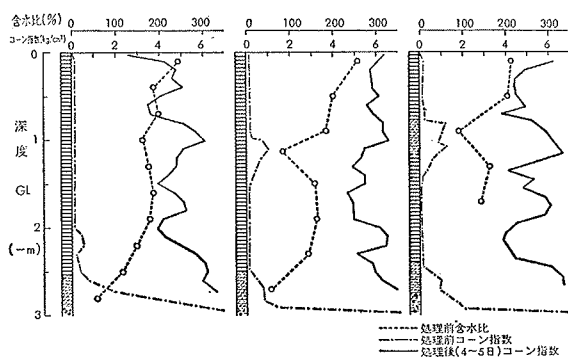


図-2 A河川ヘドロの柱状図 (代表例)

また、図-2 に示すようにヘドロの層厚は約3 mで、そのコーン指数はほとんど $0.2 \text{ kg/cm}^2$  以下であった。そして、A河川は市街地を流れる中小河川であるために、ヘドロ層には各種各様の異物が混入していた。なお、図-2 には処理4～5日後のコーン指数も併記しており、これについては3.4.3. で述べる。

### 3.3. 施工機械と固化剤

主な施工機械は図-3 に示すように、固化剤サイロ、計重器、ミキサー、ポンプ、アジテータ、電磁流量計、発電機、処理船、および電動ウインチである。これによって陸上の固化剤供給プラント (写真-1) からミルク状とした固化剤を処理船まで圧送し、処理船はウインチによってヘドロ上を移動しながら所定量の固化剤を注入し混合する。

処理船は試作機の1号 (写真-1) とその実績を生かして製作された大型かつ大能力の2号 (写真-3) がある。処理船2号は図-4 に示すように全長12.5m、全幅7.0m、全高 (ロッド、スクリー部を除く) 7.0mで油圧駆動方式である。移動は船上のギヤンドルあるいは陸上のウインチで行ない、処理船の前面には必要に応じてゴミ取り装置も装着できる。また、固化剤の注入・混合部は2本の荒砕きスクリー、2本の薬

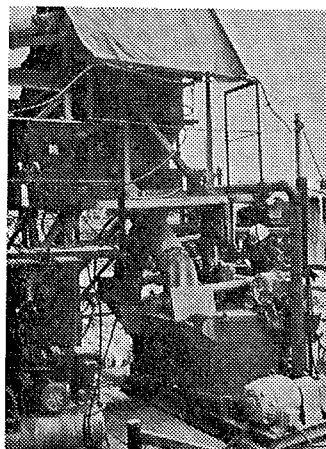


写真-1 固化剤供給プラント

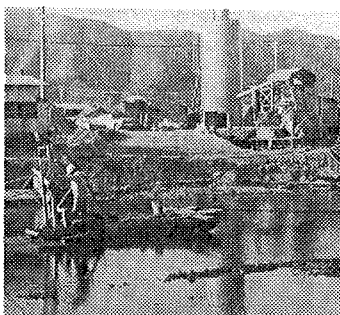


写真-2 処理船1号と固化剤供給プラント

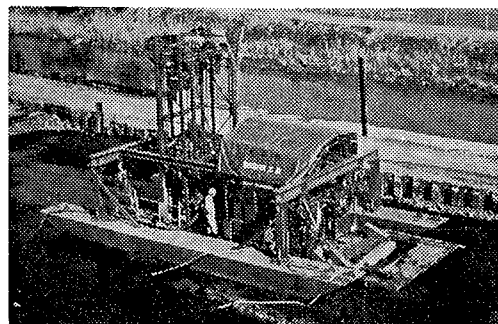


写真-3 処理船2号

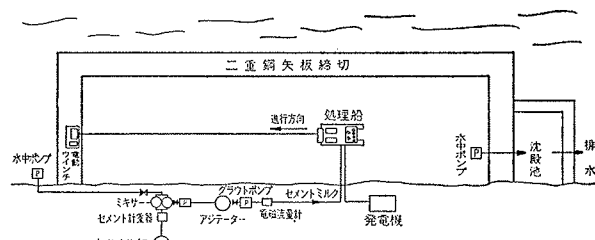
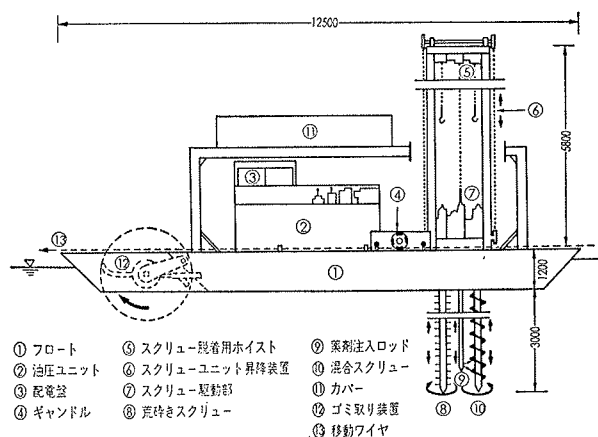


図-3 A河川ヘドロ処理におけるMUD-FIX 工法 I の概略図



- ① フロート
- ② 油圧ユニット
- ③ 電磁計
- ④ ギヤンドル
- ⑤ スクリュー駆着用ホイス
- ⑥ スクリューユニット昇降装置
- ⑦ スクリュー駆動部
- ⑧ 荒砕きスクリー
- ⑨ 薬剤注入ロッド
- ⑩ 混合スクリー
- ⑪ カバー
- ⑫ ゴミ取り装置
- ⑬ 移動ワイヤ

図-4 MUD-FIX 処理2号の概略図

剤注入ロッドおよび4本の混合スクリーを装備して、ヘドロの解膠、混合を良好にし、目的深さまで所定量の固化剤を十分に混合できるように設計されている。

固化剤としては、3種類のセメント系固化剤を用いて試験した結果、設計の一軸圧縮強度 ( $qu$ )  $= 0.6 \text{ kg/cm}^2$  を確保する条件と経済性を考慮して、他よりもやや優れていた普通ポルトランドセメントを用いた。

### 3.4. 測定結果

3.4.1. 処理船の移動速度の検討 処理船の移動速度は施工能力に関係する重要な施工条件である。また、移動速度は、すでに報告したように<sup>1)</sup> 混合時間と関連しており、混合状態の良否に影響する。そこで、処理船1号を用いて7.5, 10, 15cm/分の3種類の移動速

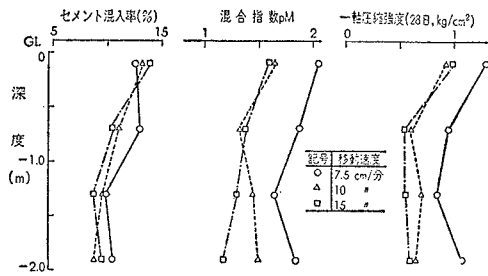


図-5 処理船の各移動速度におけるセメント混入率、混合指数および一軸圧縮強度

度で施工し、施工後の試料を採取して現地で化学分析によって簡易にセメント混入率および混合指数 (pM) を測定した (写真-5, 6)。混合指数の意義と測定については、既報で述べている。その結果、図-5 に示すように、セメント混入率はいずれの移動速度においても9~14.5%でほとんど差異はなかったけれども、混合指数は、10cm/分の1.3~1.6に対して7.5cm/分では1.6~2に増大し、それに対応して強度も増大した。このように、移動速度を上げれば処理能力は増すが、セメントの効果を十分に発揮させるためには移動速度をあまり大きくすることは妥当でない。さらに、移動速度は処理深さ、機械的特性、固化剤の供給能力などによっても制約をうける。処理船2号では、種々検討を行なってこの現場における移動速度を8~12cm/分とした。

3.4.2. 施工能力 現場は3.2.で述べたように、いろいろの夾雑物が混入していたために、しばしば処理

船が停止したけれども、平均150~200m<sup>3</sup>/日の能力をあげた。この場合処理船の混合能力には余裕があり、処理船の移動能力、固化剤の供給能力を向上させれば、施工能力はさらに増大できる。

3.4.3. 施工結果

施工の結果、図-2に示すように施工前にはコーン指数 0.2kg/cm<sup>2</sup>以下の全く軟弱であったヘドロが、4~5日後には3~7kg/cm<sup>2</sup>まで顕著に改良され、写真-4に示すように人が歩行できるようになった。さらに約2週間後には強度はいよいよ増大して、写真-7に示すようにボーリング調査用機械の設置も可能となった。このようにして、約1ヶ月後にはバックホウによって固化ヘドロを掘削し(写真-8)、ダンプトラックによって処分地まで運搬して、河川には新規のコンクリート三方張水路を構築した(写真-9)。

なお、この工事では施工管理を行なう際に、強度を測定する方法は所定期間養生する必要があるもので、これだけでは適切でなかった。そこで、筆者らは迅速かつ簡易な方法でセメント混入率および混合指数を測定し、図-6に一例を示すように、あらかじめ作成しておいたセメント量および混合指数と強度との管理図で

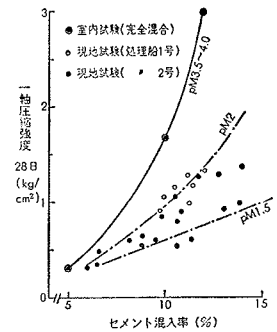


図-6 混合指数およびセメント混入率と強度との関係



写真-4 処理後のヘドロ硬化状況 (処理3日後)



写真-5 処理後のヘドロ試料採取



写真-6 現場仮設試験室におけるセメント混入率および混合指数の測定

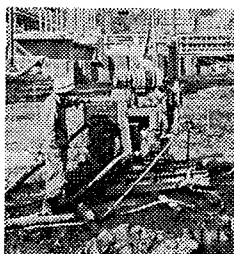


写真-7 処理後のボーリング調査

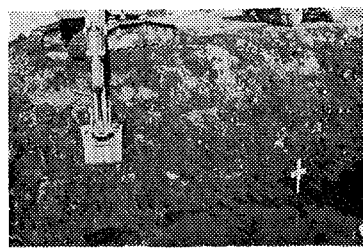


写真-8 バックホウによる固化ヘドロの掘削・搬出

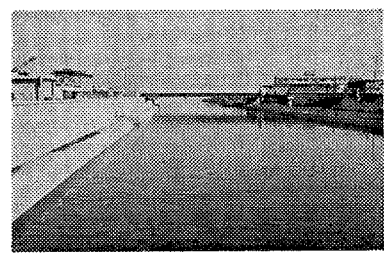


写真-9 完成したコンクリート三方張水路

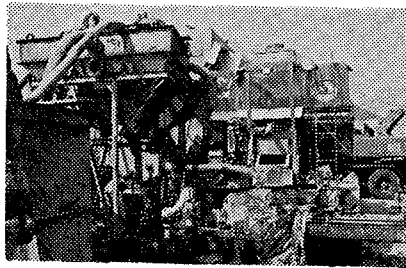


写真-10 ヘドロ定量供給装置  
とミキシングプラント



写真-11 固化処理ヘドロ  
の吐出状況

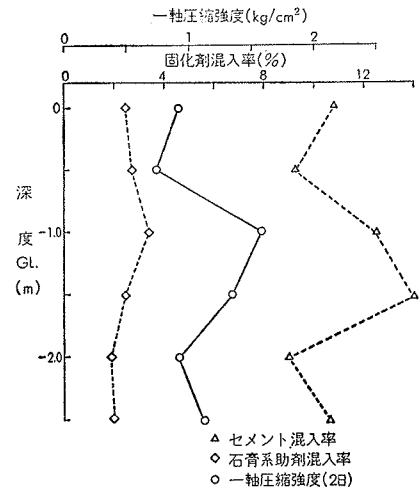


図-7 処理ヘドロの固化剤混入率  
と一軸圧縮強度(28日)の関係

施工の妥当性を管理することができた。

#### 4. MUD-FIX 工法Ⅱによる B 河川 ヘドロの処理 (施工例 2)

##### 4.1. 工事概要と施工機械および固化剤

市街地を流れる中小河川, B 河川の改修工事においてヘドロ約 2000m<sup>3</sup> を浚渫し固化処理を行なった。この工事では, 輸送固化法を適用した。

使用した主な施工機械は油圧ピストン式浚渫ポンプ, 調整タンク, ヘドロ定量供給装置, 固化剤サイロおよびミキシングプラントである (写真-10)。

また, 固化剤としてはセメントと石膏系助剤 (某社製) を併用した。

##### 4.2. ヘドロの性状と施工結果

ヘドロは含水比が 290% と高く, LL=115%, PL=31%, 7 $\mu$  通過分 85%, 強熱減量=16.0% であった。

ヘドロは, 写真-11 に示すように固化剤と連続的に混合され吐出された。処理ヘドロは 3~4 日後には, 人が歩行できるまでに硬化し, 設計どおり 1 ヶ月後には  $qu=0.5 \text{ kg/cm}^2$

以上となった。固化ヘドロを採取して測定した固化剤混入率および一軸圧縮強度の結果を図-7 に示す。また, 処理ヘドロの水分状態を調べるために, 含水比だけでなく pF 水分も測定した結果, 図-8 に示すように, 固化ヘドロは未処理ヘドロに比べて, 自由水が減少し拘束水が増加しており, 固化剤によってヘドロは化学的にも改良されたことが認められた。

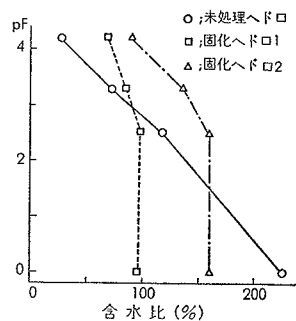


図-8 未処理ヘドロおよび固化ヘドロの pF 水分特性

工法” の処理システムを説明し, MUD-FIX 工法の施工調査例として 2 現場の調査結果を示した。

(1) MUD-FIX 工法には, つぎの 3 つの処理システムがある。汚泥を原位置で固化する I. 原位置固化法, 浚渫して輸送途中または仮置地で固化し処分地に搬出する II. 輸送固化法, 浚渫して処分地で固化する III. 処分地固化法に分けられる。

(2) I. 原位置固化法を適用した A 河川ヘドロ処理では, MUD-FIX 処理船を用いて普通ポルトランドセメントで固化した。その結果, セメントは所定の深さまでよく混合され, 4~5 日後にはコーン指数は 3~7 kg/cm<sup>2</sup> まで増大し, 強度はその後顕著に増大し所定の一軸圧縮強度=0.6 kg/cm<sup>2</sup> を確保できた。なお, この工事では, 処理船の移動速度の決定およびその後の施工管理において, 迅速かつ簡易な化学的手法でセメント混入率および混合指数の測定を行なった。

(3) II. 輸送固化法を適用した B 河川ヘドロ処理では, ポンプで浚渫したヘドロを固定式の連続ミキサーを用いて, セメントと石膏系助剤を併用して固化した。その結果, 1 ヶ月後には一軸圧縮強度=0.6~1.8 kg/cm<sup>2</sup> となって設計強度を確保できた。

#### 謝辞

現場調査において, 御指導と御協力を頂いた両工事事務所の方々に心からの謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 喜田, 久保, 辻: 公害汚泥の固化処理に関する研究 (第 1 報), 大林組技術研究所報, No. 11, (1975), p. 152

#### 5. まとめ

本報告では, 当社の汚泥固化処理工法, “MUD-FIX