

底質改善工法開発のための底泥回収実験

THE BOTTOM MUD COLLECTION EXPERIMENT FOR DEVELOPMENT OF LAKEBED ENVIRONMENTAL QUALITY IMPROVEMENT METHOD

旭幸司¹・高橋伸次郎²・井上卓悦³・蟹江俊仁⁴・佐藤太裕⁵・鈴木雄太⁶

Koji ASAHI, Shinjiro TAKAHASHI and Takayoshi INOUE
and Shunji KANIE and Motohiro SATO and Yuta SUZUKI

¹正会員 株式会社西村組 工務部 (〒099-6404 北海道紋別郡湧別町栄町133番地の1)

²正会員 株式会社西村組 工務部 (〒099-6404 北海道紋別郡湧別町栄町133番地の1)

³正会員 株式会社西村組 工務部 (〒065-0026 北海道札幌市東区北26条東14丁目1番1号)

⁴正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科 助教授 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

⁵正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科 助手 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

⁶学生員 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

At present, deterioration of water quality in closed water body has become a serious issue for the local fishery and an accumulated mud layer which covers lakebed has been thought as the cause of the deterioration. Then, it can be said that the maintenance and preservation of the water environment by retrieving the mud layer is one of the most important subjects to preserve and to promote the regional economy with maintaining precious marine resources.

In this paper, the authors propose a new retrieving method of lakebed mud on site. This method has been developed as an innovative way that requires neither additional chemicals for condensation of the mud nor a temporary yard for desiccation of the mud. This research aims to obtain fundamental knowledge about the retrieving torque and its efficiency to establish this new method. The experimental result shows that the mud can be retrieved with the fan efficiently enough to adopt the method practically. However, further experiment is necessary under various mud conditions to improve the efficiency.

Key Words : closed water body, environmental quality of lakebed, improvement method, mud retrieving, torque, strength of bottom mud

1. 背景

湖沼など閉鎖性水域は豊富な栄養分から水産物の供給基地となっている半面、赤潮の発生や水質環境の悪化が深刻な問題となっている。また閉鎖性水域は自然環境、特に水質や底質環境の変化を招きやすい特性があり、常に環境の良い状態が続くとは限らない¹⁾。これは養殖産業の盛んなサロマ湖等でも例外ではなく、貴重な水産資源を維持するためにも、また地域経済の活性化のためにも、水質、底質環境の維持・保全是今後の重要な課題と言える。

そこで今回、水質、底質環境悪化の要因の一つである底泥に着目し、底泥を回収する工法(装置)の開発を検討した。この工法は新しい材料も仮置ヤードも必要とせず、底泥を現地湖底土層内に回収することにより底質を

改善するものである。

2. 回収工法の概要

工法の概要図を図-1に示す。この工法では、ケーシングドライバ(CD機)を搭載したスパット付き台船を専用船として用意する。底質改善を行う位置にクレーン付き台船をセットし、その横には土砂積み台船を係留しておく。セット完了後、ケーシングドライバで湖底にケーシングを建て込む。この際、クレーンに装着したハンマーグラブで孔内を掘削し、掘削した良質土砂は土砂積み台船に仮置きしておく。所定の深さまでケーシングを継ぎ足し、掘削を進めて湖底に底泥回収ピットをつくる。底泥層の位置には予め、底泥を落とし込むためのスリットが設けられたケーシングを用意する。そのスリットを通じ

て底泥を落とし込むために、その周りに円盤状の羽根（以後、回収扇と称す）を装着する。回収扇はケーシングに固定され、ケーシングドライバで回収扇付きケーシングを掘削時と同様に回転・降下させることにより回収扇を底泥上端（湖水と底泥の境界面）から底泥下端（底泥と湖底の境界面）まで回転・降下する。よって回収時には湖底表層の底泥を中心部に掻き集め、ケーシングに設けたスリットから孔内に底泥を回収することができる。回収後にケーシングを引き抜き、クラムシェルを使用してピット内を先に掘削していた良質土（土砂積み台船に仮置きしておいた発生土）で被覆する。以上、これにより湖底内に底泥を閉じこめ、湖底表面を良質土に置き換えることができ、また産業廃棄物が発生しないという利点を持った工法である。

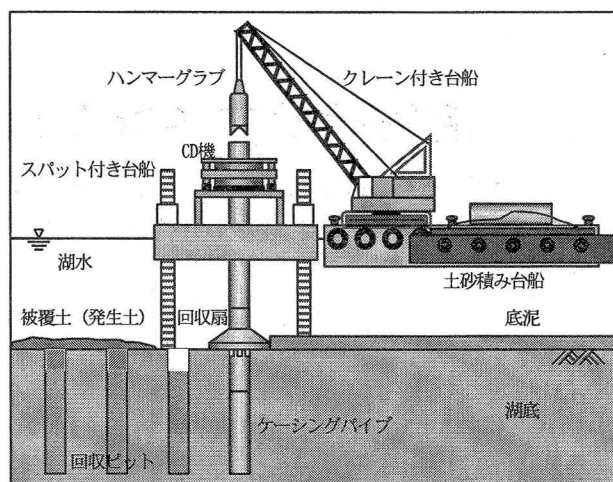


図-1 回収工法の概要図

3. 研究の目的

新工法の装置開発に先立ち現地底泥の強度を知る必要がある。その上で底泥を回収したときに回収扇にはどのくらい力がかかるのか、また回収率はどの程度かが問題となる。そこで本研究は現地底泥の強度を把握することと、室内実験により新工法の装置開発に必要な回収扇にかかるトルク及び回収率に関する基礎データを得る事を目的としている。

4. 実験方法

(1) サロマ湖の現地調査

以前に行った室内実験^{2),3)}では、現地底泥の強度と室内実験に用いた底泥の強度の関係がわからなかった。そこで2004年8月、サロマ湖において底泥の強度を把握するために底泥のせん断強度計測を行った。測定地点は事前の調査により水質底質環境悪化が予想される地点A(流速があまりなく、河川からの堆積が多いと思われる)と、そうでない地点B(湖口付近のため海水交換が良く、底質は良好と思われる)の二箇所である。調査は潜水土により底泥の強度をハンドベーン試験器を使用して直接測定して行った。ハンドベーン試験器のロッドを延長し深さ20cm~100cmまで測定した。

(2) 室内実験

室内実験装置(図-2)は湖底に見立てた水槽(715mm×715mm×300mm)の中心に内径90mm、水槽底面からの深さ500mmのスリット付アクリルパイプ(回収ピット)を設置している。パイプは水槽底面から100mmのところを分割し、水が漏れないようにシールで接続されている。このパイプの底面にロードセルを設置することで下方のパイプ内に土砂が入ると重量変化が計測可能である。回収扇はモーターによって回転速度が調節可能であり、昇降も可能である。また、回収扇上部にはトルクメーター

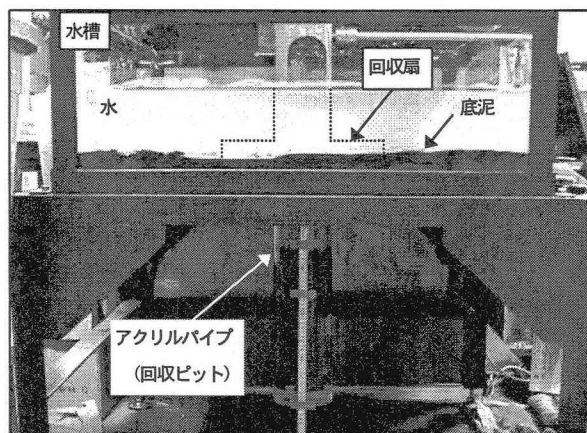


図-2 室内実験装置

を取り付け、回収扇に掛かるトルクを連続的に計測可能である。なお装置は約1/30スケールである。

a) 回収扇を降下せずスリットを閉鎖した実験によるトルクの検討

回収扇に作用するトルクが最大となる回転開始時のトルクと、底泥が回収扇により流動化するまでのトルクならびにエネルギーを把握するため、試料がパイプ内に落ちないようにスリットを閉鎖し、回収扇を降下させない実験を行った。試料準備では実験誤差を少なくするために事前に10mmふるいを通過した現地採取底泥を用いた。実験装置水槽内で現地の底泥の状態を再現するのは困難であるが、試料を十分に攪拌した後に放置し、自然圧密させた。実験水槽内における試料の厚さは約11cmである。回収扇の回転位置は試料に完全に貫入した状態とし、水槽底面と試料とのせん断抵抗の影響を受けないう、水槽底面と回収扇下端が2cm空くようにした。回収扇の回転速度は11.4rpm、トルクの値がほぼ収束したところで実験終了とした。実験にあたっては、水槽内で底泥の圧密日数を変化させて底泥のせん断強度の違いによる影響を検討した。計測項目は回収扇にかかるトルクとハンドベーンによる底泥のせん断強度である。

b) 回収扇を降下せずスリットを開放した実験によるトルクの検討

a)の実験方法と同様で、今回はスリットを開放して底泥回収時の回収扇に作用するトルクを把握するための実験を行った。計測項目は回収扇にかかるトルクと底泥のせん断強度である。

c) 回収扇を降下せずに底泥を回収した実験による回収重量の検討

底泥回収時に回収扇にかかるトルクと回収率の関係を把握するために、回収扇を所定の高さで回転させる実験を行った。試料の準備は(1)の実験と同様である。計測項目は回収扇にかかるトルクと底泥のせん断強度の他にあらたに回収重量を加え、トルクと回収重量の関係について検討を行った。

d) 回収扇を降下させ底泥を回収した実験による回収率の検討

実施工での回収扇にかかるトルクと回収率の関係を把握するために、回収扇を一定の速度で降下させ底泥を回収する実験を行った。試料は強度回復を早めるため強制的に載荷し脱水させて圧密を促進させることとした。

試料の準備方法については、試料を十分に攪拌させた後に放置して土粒子の沈降を待ち、上澄み水をくみ出し試料の上に透水性シートを被せ有孔板を載せ上部から載荷した。この結果、自然圧密よりも約2~5倍の早さで強度回復が可能となった。圧密終了後、有孔板とシートを除去し水槽に水を入れスリットを開放した状態で準備完了とした。

実験は底泥天端より1cm上方から回収扇を回転、降下させ水槽底面のせん断抵抗を受けない水槽底面から2cm上方まで回収扇を一定速度で降下させ、その後回収扇の位置を固定して重量変化がなくなるまで回転させた。回収扇の回転速度は11.4rpm、降下速度は5 mm/minと10mm/min、回収した底泥の厚さは5.0~6.0cmである。なお実験開始前に底泥のせん断強度をハンドベーン試験器により測定し、実験中は回収扇にかかるトルクと回収ピット内の重量変化を自動計測した。また実験終了後に底泥の含水比と飽和状態の単位体積重量を測定し、回収重量から回収率を求め検討を行った。

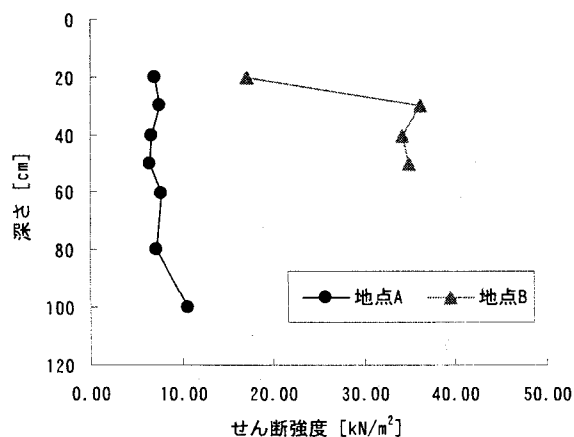


図-3 深さとせん断強度の関係

5. 結果と考察

(1) サロマ湖の現地調査

現地調査結果を図-3に示す。事前の調査により富栄養化された土質は高含水比粘性土であることが確認されている地点Aは、せん断強度が小さく、その値は深くなるに従い緩やかに強度が増加する傾向となった。底質改善の対象としている底泥の深さが1mの場合、回収時に装置に掛かる力は10kN/m²程度となる。一方、地点Bについては底質が砂質土であったため深さ50cm以上はハンドベーン試験器が貫入せず測定不能となったが、地点Aの約4倍の強度となった。よって実機開発に必要なせん断強度はおおよそ地点B程度と思われる。

(2) 室内実験

a) 回収扇を降下せずスリットを閉鎖した実験によるトルクの検討

図-4(上)に室内実験で回収扇を回転させたときのトルクの測定値と総回転量(単位:rad)の関係を示す。スリット閉鎖時、回収扇に作用するトルクは回転初期に最

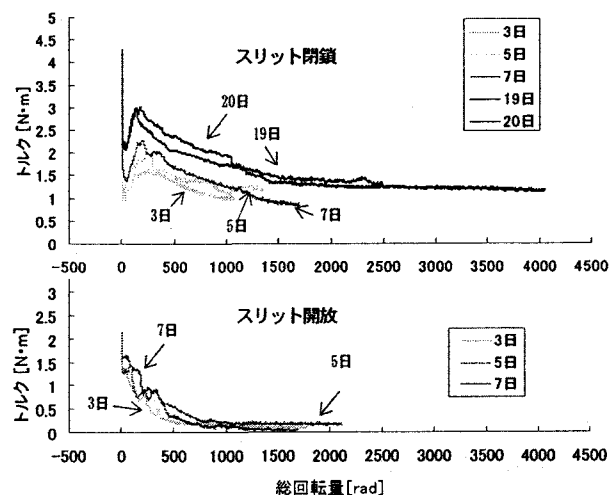


図-4 トルクと総回転量の関係 (上:閉鎖, 下:開放)

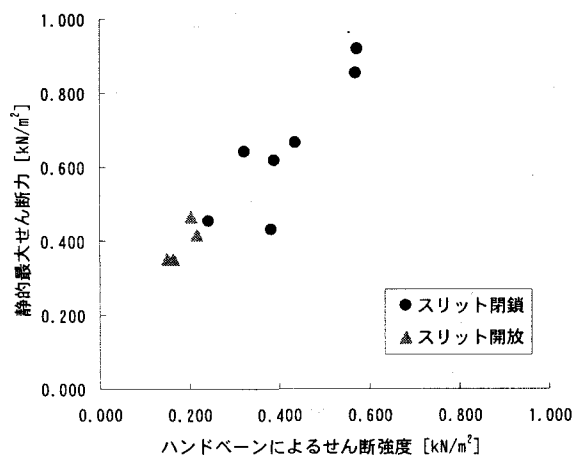


図-5 ハンドベーンによる強度と換算値

大値を記録し、直ちに減少するが200rad前後で上昇し二次ピークをむかえ、その後、緩やかに減少し収束状態となる。この現象の理由として、最初の最大トルクは回収扇が動き出すときに回収扇底面に作用する底泥の静的せん断強度の影響と考えられ、二次ピーク値は、底泥が回転とともに徐々に流動化し、やがて定常状態に達するまでの動的最大せん断強度と考える。

b) 回収扇を降下せずスリットを開放した実験によるトルクの検討

一方、図-4(下)に示す開放時のトルクには二次ピーク値は現われず、早期にトルクが減少している。この傾向から底泥回収は回転開始と同時に進行し、底泥の流動化よりも早く回収が完了するためと考えられる。以上のことから回転初期に現われる最大値が静的せん断抵抗力に起因すると考えられ、装置開発上必要なトルクの最大値であり、開放時の収束トルクが回収完了の目安となる値であると言える。

また、ハンドベーンによるせん断強度と回収扇に作用するトルクから換算した静的最大せん断力の関係を図-5に示す。これらは一次的な関係であることから、現地ではハンドベーン試験器による測定で装置に必要なトルクを把握できると考えられる。

c) 回収扇を降下せずに底泥を回収した実験による回収重量の検討

回収扇を所定の高さで回転させた実験の総回転量とトルク、回収重量変化の関係を図-6に示す。凡例の前半部分は回収扇の降下速度0mm/min、後半部分はそれぞれ底泥のせん断強度をkN/m²単位で表わしている。底泥のせん断強度の違いは回収重量変化のグラフの傾きに違いとして現われ、せん断強度の小さい方が早期に回収重量が収束する傾向となった。またトルクに関しては多少ばらつきがあるものの、せん断強度が小さくなるにつれ小さくなった。

d) 回収扇を降下させ底泥を回収した実験による回収率の検討

回収扇を降下させた実験ではロードセルにより計測し

た底泥重量を回収率Rに換算して検討を行った。総回転量とトルク、回収率Rの関係を図-7に示す。ここで言う回収率Rとは、既存の含水比 ω 、飽和単位体積重量 γ_{sat} のデータから、 γ_{sat} を ω の一次式(1a)で表わし、この式から土粒子の単位体積重量 γ_s を式(1b)のように求め、式(1a)、(1b)から換算した全土粒子の重量 W_s と計測した底泥の重量変化量 ΔW_s の比、式(1c)である。

$$\gamma_{sat} = -0.00536 \times \omega + 1.899 \quad (1a)$$

$$\gamma_s = \frac{\gamma_{sat}}{\frac{\omega}{100} + 1 - \frac{\omega}{100} \times \gamma_{sat}} \quad (1b)$$

$$R = \frac{\Delta W_s}{W_s} \times 100 \quad (1c)$$

凡例は図-6と同様に降下速度、せん断強度を表わしている。回収扇の降下速度が5mm/min(A, B, C)と降下速度が10mm/min(D, E)において明らかな違いが現われた。

まず回収率に着目して降下速度が5mm/minの3データをみるとグラフの傾きの違いから大きく3つの段階に分類できる。実験開始から約500radまでが回収扇内が底泥で満たされるまで降下している第1段階、その後約1000radまでが回収扇内が満たされたまま更に降下を続ける第2段階、約1000rad以降は降下が終了し回収扇内の底泥が徐々に減少し回収が完了する第3段階である。これは降下速度10mm/minのグラフでも同様な結果が得られ、第1段階では回収はあまり進まないがトルクが徐々に増加し、第2段階では回収が急激に進みトルクが最大値をむかえ、第3段階では回収は緩やかに進んだあと収束し、トルクは減少して限りなくゼロに近づくといったそれぞれの特徴をよく表わしている。どちらも回収扇内が底泥で満たされた状態で降下している第2段階が最適な回収率となった。

次に回収扇にかかるトルクに着目するとせん断強度の増加によりトルクも増加するが、降下速度の違いによる

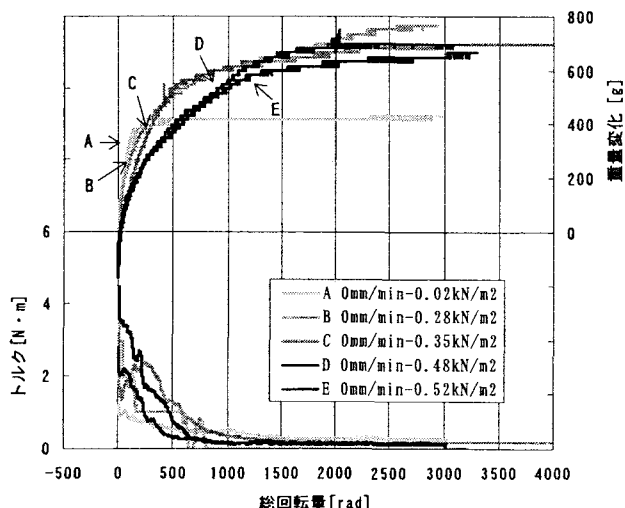


図-6 トルクと回収量の変化 (回収扇位置固定)

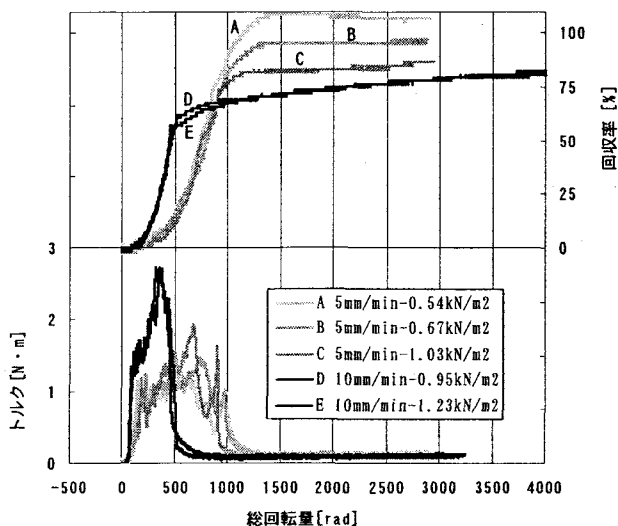


図-7 トルクと回収率の変化 (回収扇降下)

影響が特に大きいことがわかった。トルクが最大になるとき回収率の傾きも最大となり、このトルクの変化を実施工の管理に応用できると考える。また回収扇にかかったトルクが増加すると最終的な回収率が減少する結果となった。回収扇の降下速度が早いと底泥回収が間に合わず回収扇に過剰なトルクがかかり、回収扇とパイプの隙間から底泥が外へ漏れるために回収率の減少に至ったと考える。底泥が回収扇の外に漏れる現象は実験後の水槽内の状態からも確認されている。実施工における降下速度の決定についてはもう少し検討の余地があるが、実機は回収扇とケーシングパイプが一体化した構造を考えているため、回収率の低下は少ないものと考えている。

6. まとめ

以上の結果をまとめると次の通りとなる。

- ・ サロマ湖で行った実験結果から現地底泥の強度が確認できた。
- ・ 室内実験では回収扇にかかるトルクに関する知見から装置に必要なトルクの最大値や施工管理上目安となる値を推定できた。
- ・ 実施工では現地底泥のせん断強度を測定することで装置に必要なトルクを把握できる。

- ・ 回収率は回収扇が底泥で満たされた状態で適度な速度で降下しているときが最適となり、底泥強度よりも降下速度に大きく依存している。

また、今後の課題は次の通りである。

- ・ 現地底泥と室内実験で使用している底泥のせん断強度は数倍の差があるので現在追加実験を行っている。
- ・ 最適な回収率の決定には、さらに実験ケース・回数を増やす必要がある。

今回の実験で新工法のシステムは確認でき、1/30スケールではあるがトルクや回収率の変化が把握できた。しかし実機開発にあたり詳細な数字は明らかになっていないため、室内実験結果をもとに中規模現地実験を行うことにより、今回の基礎データとの関係を解明し実機開発に活用したいと考えている。

参考文献

- 1) 加藤重信：「北海道サロマ湖における生態系漁業と基盤整備」，土木学会誌 第90巻第4号，pp. 25-26，土木学会（2005）
- 2) 旭幸司ほか：「底泥の湖底層内回収工法開発のための基礎実験」，土木学会第59回年次学術講演会，pp. 227-228，土木学会（2004）
- 3) 鈴木雄太ほか：「湖底土層内への底泥回収工法開発に関する基礎実験」，土木学会北海道支部平成16年度論文報告集 第61号，VI-3，土木学会（2005）