グラブバケット巻下げ・巻上げ操作が 流動場と濁りに与える影響について

金澤 剛¹・辻北 智志²・中村 友昭³

¹正会員 東洋建設(株) 土木事業本部総合技術研究所鳴尾研究所
(〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1丁目25番1号)

E-mail: kanazawa-tsuyoshi@toyo-const.co.jp

²正会員 東洋建設(株) 関東支店土木技術部
(〒135-0064 東京都江東区青海二丁目4番24号 青海フロンティアビル11F)

³正会員 名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

グラブ浚渫を行う際のバケットの種類と操作方法に着目し、水理模型実験と実施工現場における現地計測により、バケットの巻下げ・巻上げ時の流動場の特性を明らかにし、濁りの発生と拡散を抑制する操作方法を検討した。その結果、一律の巻下げ速度でバケットを操作するより、途中で一時停止させ、その後の巻下げ速度を減速させると底面に発生する流速を抑制できることを確認した。密閉型バケットに比較して通常型バケットの場合は、バケット上面の開口部からバケット内部の水塊が抜けるため、この巻下げ時に発生する流動が小さいことも判明した。また、巻上げ操作時においても、バケットの離底時の速度を低減させると周辺に発生する流動を抑制できることを確認した。こうしたバケットの巻下げ・巻上げ速度の減速の効果は現地計測においても確認された。

Key Words : dredging, grab bucket, lowering operation, hoisting operation, flow field, turbidity

1. はじめに

海上工事においては、濁りの発生やその周辺海域への拡散の抑制が求められており、グラブ浚渫工事においても各種の対策が取られている。グラブ浚渫時の濁りの発生要因としては、松田ら¹⁾はバケット着底時の衝突、掘削時の底質の攪乱、地切りと気中旋回時のバケットからの濁水の漏水を挙げている。こうした濁りの発生に対し、代表的な濁り対策の一つに、汚濁防止膜を垂らした汚濁防止枠を水面に浮かべ、その枠内でグラブバケットの巻下げ・巻上げ操作を行うことが挙げられる。また、バケット外への土砂や濁水の流出自体を防止する方策として、バケットシェル上面をシェルカバーで覆ってバケット内を密閉化する機械装置の開発もなされている。さらにグラブ浚渫時の濁りの発生を考えると、松田ら¹⁾が指摘しているバケット近傍の流速による濁りの発生に着目して、グラブバケットの巻下げ・巻上げ速度の低速化によりバケット近傍の流速場を抑制し、濁りの発生を緩和できるものと考えられる。

このグラブバケットの巻下げまたは巻上げ時の周辺水塊の流動に関する研究として、松田ら¹⁾は現地実験と室内実験によりバケットの水中落下速度とバケット周辺

の流速および濁度との関係を検討し、また松田ら²⁾は水理模型実験と数値計算によりバケット着底時の流動特性について研究している。さらに、古牧・金山³⁾はグラブ浚渫における一連の動作やグラブ形状を再現した数値計算によりグラブ浚渫作業に伴う流れの予測を行っている。また、中村ら⁴⁾は、グラブバケットの巻下げ速度に着目した数値実験を実施し、グラブバケット巻下げ時の濁りの発生が抑えられる効果的な操作方法を検討している。ただし、中村ら⁴⁾の研究は計算負荷を考慮して断面2次元の検討であり、3次元現象との相違が懸念される。

本研究は、グラブバケットの巻下げ・巻上げ速度に着目した水理模型実験により、周辺で発生する水塊の流動を把握しようとしたものである。実験はまず中村ら⁴⁾の断面2次元の数値実験に対応したグラブバケット巻下げ時の2次元実験を実施した。これは、中村ら⁴⁾が記した検証実験である。続いてグラブバケット巻下げ時と巻上げ時を対象に3次元実験を実施して、2次元の検討との発生した流動場の相違点、類似点を検討した。加えて、実施工現場における現地計測を実施し、模型実験により把握したバケットの巻下げ・巻上げ時の流動場の特性の現地での再現性を検証した。これらにより濁りの発生と拡散を抑制し、現実的なバケットの操作方法を見出した。

2. 水理模型実験

(1) 実験方法

水理模型実験は、汚濁防止膜が海底に着底している一辺が22mのグラブ枠を使用して、水深13mの地点を23m³級密閉型バケットでグラブ浚渫する現地事例を対象とした。模型縮尺は1/25とし、汚濁防止膜を不動の不透過壁と仮定して、図-1に示すようにグラブ枠の枠内のみを一辺が88.0cmの亚克力製水槽で再現した。以降、数値は実験スケールの値を使用し、適宜、括弧内に原型の値を示す。グラブバケット模型は図-2に示す23m³級密閉型バケットをモデル化し、赤い実線で示した全開時と青い実線で示した全閉時の2種を亚克力で製作した。なお、実際の密閉型バケットの上面を覆うシェルカバーには、バケット内外に生じる圧力差で開閉するエア（水）抜き用の特殊蓋が付属しているが、模型では省略した。また、全開時の密閉型バケット模型の上面シェルカバー部を取り外したものを通常型バケットとして実験対象とした。グラブバケット模型の上下動は電動スライダー（オリエンタルモーター社製）により移動速度等を制御した。実験は静水状態を対象とし、図-1に示すようにバケット模型を水槽中央に配置した3次元実験と、水槽内に仮設壁でバケット模型の奥行きより僅かに広い水路を形成した2次元実験を実施した。

図-1 水理模型実験模式図（左：正面，右：側面）

図-2 23m³級密閉型バケット（単位：mm，赤：全開時，青：全閉時）

バケット巻下げ実験におけるバケットは全開とし、初期位置はバケット下端が底面上 36.0cm となる水面近くに静止させた。バケット内部は水で充満させた。バケット巻下げ挙動は初期位置からの巻下げ速度（一次巻下げ速度 V_1 と称す）を 20.0cm/s（原型 60m/min）で一定とし、そのまま着底させたケースを基本ケースとした。比較ケースは初期状態から 20.0cm/s で巻下げ後、底面上 4.0cm(1.0m)、12.0cm(3.0m)あるいは 20.0cm(5.0m)の高さ（一時停止高さ Z_1 ）で 2 秒間一時停止させ、その後速度を 6.7cm/s(20m/min)あるいは 10.0cm/s(30m/min)に低下させて巻下げた（二次巻下げ速度 V_2 ）。実験ケース一覧を表-1 に示す。なお、中村ら⁴⁾に倣いバケットは底面上 0.4cm で停止させた。一方、バケット巻上げ実験におけるバケットは全開で、初期位置はバケット下端が底面上 0.4cm に静止している状態とした。巻上げ操作方法は巻下げ時と対を成すよう表-2 のように設定した。

計測はトレーサーとレーザーシートを用いた画像計測（カトウ光研社製）により周辺流動を面的にとらえることを試みた。また、電磁流速計（ケネック社製）により固定点での流速を計測した。また、3 次元実験ではレーザー変位計（キーンエンス社製）によりグラブバケット模型の位置も同時計測した。

(2) 2次元実験の結果

2 次元巻下げ実験において、バケットを巻下げ、底面で停止させた際、バケット下部から押し出された水塊とバケットに連行した水塊により、底面近傍には渦を形成しながらバケットから離れる方向の流動が確認された。

図-3 にバケット全開時の全幅と等しい $x=29.3$ cm、底面近傍の $z=1.0$ cm に設置した電磁流速計で計測した水平方

表-1 実験ケース一覧（巻下げ実験）

ケース	一次巻下げ 速度V ₁ (cm/s)	底面上 一時停止 高さZ ₁ (cm)	一時停止 時間 (s)	二次巻下げ 速度V ₂ (cm/s)
D0	20.0	—	—	—
D1		4.0	2.0	6.7
D2				10.0
D3				6.7
D4		12.0		10.0
D5				6.7
D6				10.0

表-2 実験ケース一覧（巻上げ実験）

ケース	一次巻上げ 速度 V_1 (cm/s)	底面上 一時停止 高さ Z_1 (cm)	一時停止 時間 (s)	二次巻上げ 速度 V_2 (cm/s)
U0	—	—	—	20.0
U1	6.7	4.0	2.0	
U2	10.0			
U3	6.7	12.0		
U4	10.0			
U5	6.7	20.0		
U6	10.0			

向流速の時間変化の一例をバケット下端高さの設定値とともに示す。図-3は一次巻下げ速度のまま着底させた基本ケース Case D0 と一時停止高さ $Z_1=12.0\text{cm}$ 、二次巻下げ速度 $V_2=6.7\text{cm/s}$ の Case D3 の場合を示し、水平方向流速は各4回繰り返し実施した計測結果を示してある。図中、横軸はバケット巻下げ開始を0sとした時間、水平方向流速 u はバケットから離れる方向が正である。

基本ケース Case D0 の水平方向流速は、バケットが底面に近づくにつれ正方向に増加し、バケットが底面から10cm程度以下に近づくとき急激に増大した。そして、バケットの着底より少し遅れて水平方向流速は最大値を示し、その後は急速に減衰した。一方、Case D3 では、バケットの一時停止によって、Case D0 に見られた急激な水平方向流速の増大は生じていない。バケットの着底後、水平方向流速は比較的大きなピークを生じているが、そのピーク値は Case D0 の場合に対して半減した。このように、Case D3 の流動は Case D0 に比べかなり緩和された。

各ケースで計測された水平方向流速の最大値を平均して $u_{\max}$ とし、Case D1 から D6 のそれらを Case D0 の値で除した流速比 $u_{\max}/u_{\max}(\text{Case D0})$ と、バケットの着底時の巻下げ速度の減速度合を表す V_2/V_1 の関係を図-4 に示す。Case D1 から D6 の流速比はすべて1より小さく、これらのバケット操作方法が、バケット巻下げにより発生する水平方向流速を低減させていることがわかる。これは松田ら²⁾や中村ら⁴⁾と同じ傾向である。特に、一時停止高さ Z_1 が12.0cm や20.0cm の比較的大きい場合、着底時のバケット巻下げ速度が遅いほど発生する水平方向流速が

(a) Case D0

(b) Case D3

図-3 2次元巻下げ実験時の水平方向流速の時間変化

小さい。一方、一時停止高さが底面に近い $Z_1=4.0\text{cm}$ の場合は、着底時のバケット巻下げ速度の減速度合の違いの影響は見られない。これらより、バケット巻下げにより発生する水平方向流速を低減させる観点からは、バケットを底面上ある程度高い位置で一時停止させ、より遅い巻下げ速度で着底させることが効果的であると言える。

(3) 3次元巻下げ実験の結果

a) 密閉型バケットの場合

グラブバケット模型を水槽中央に配置して3次元実験を実施した(図-1)。3次元実験では、 $y=0$ の x - z 平面および $x=0$ の y - z 平面にレーザシートを照射した画像計測により流速を求めるとともに、電磁流速計による流速を計測した。図-5は、2次元実験と同様に図-1に示す $x=29.3\text{cm}$, $y=0\text{cm}$, $z=1.0\text{cm}$ に設置した電磁流速計で得られた水平方向流速($u|_{\text{EM}}$)と、電磁流速計と z 軸について軸対称の位置における画像計測による水平方向流速($u|_{\text{PIV}}$)の時間変化を2次元実験の図-3と同じCase D0およびCase D3について示したものである。図中にはバケ

図-4 水平方向流速の最大値の低減効果

(a) Case D0

(b) Case D3

図-5 3次元巻下げ実験時の水平方向流速の時間変化

ット下端高さの実測値も示した。図-5によれば、まずバケット下端位置の時間変化（青実線）からバケット模型が緩起動・緩停止していることが確認できる。基本ケース Case D0 では、2次元実験と同様にバケットが底面に近づくにつれ水平方向流速が正方向に増加しているが、図-3(a)のような急激な流速の増大は見られず、バケットの着底後に現れる水平方向流速のピークの大きさは図-3(a)よりかなり小さい。Case D3 の場合の水平方向流速は、Case D0 より全体的に低減しており、2次元実験の結果と同じ傾向を示す。このように3次元の実験で発生した流動は2次元の実験結果と傾向は似ているものの、流動の規模はかなり異なるのが特徴的である。2次元の検討ではバケットの巻下げに伴い発生する流動場を実際より過大に評価しており、その適用には注意を要することが確認できた。なお、画像解析による流速と電磁流速計による流速とは定性的定量的に良く似ており、画像計測による流速の妥当性が確認できたと考え、以降、流速は画像計測の結果を使用する。

画像計測で得た流速から、濁りの発生・拡散に大きく影響すると考えられる最大流速に着目し、各点の計測時間内の水平方向流速の最大値を抽出して水平方向最大流速とした。この水平方向最大流速の鉛直分布を確認したところ、 $z=2\text{cm}$ 程度までの底面近傍で比較的大きな流速を示した。そこで $z=0\sim 2\text{cm}$ の水平方向最大流速を平均して x 軸上および y 軸上の底層の水平方向最大流速の分布を示したのが図-6 である。図中、 x' および y' は x 軸および y 軸上のバケット先端からの距離である。 x 軸上（バケット長軸）底層の水平方向最大流速は、いずれのケースもバケットから離れるに従い急激に低下した。また、基本ケースである Case D0 の流速より、他のケースはバケットを一時停止させた効果や二次巻下げ速度の減速効果により発生した流速は小さい。プロットの色を同じくした一時停止高さが同一のケースで比較すると、二次巻下げ速度が小さい Case D1, D3, D5（それぞれ実線）が二次巻下げ速度が大きい Case D2, D4, D6（それぞれ破線）より小さい。一時停止高さがこの図からは不明確であるが、一時停止高さが高く、二次巻下げ速度が

遅い Case D5 の場合に発生した流速の低減が際立っている。一方、 y 軸上（バケット短軸）底層の水平方向最大流速は、基本ケース Case D0 の流速が x 軸上に発生した流速より大きく、また、一時停止高さが低い Case D1, D2 および一時停止高さは 12cm で二次巻下げ速度が遅い Case D3 ではバケットから離れても流速が増大するといった x 軸上とは異なる傾向を示した。これは、バケット下面から押し出された水塊に加えて、バケット周辺に連行された水塊の影響であると考えられる。 x 軸上と y 軸上で連行された水塊の影響に差が生じた理由は、斜面や曲面からなるバケット長軸方向の形状（図-1：左）と垂直壁である短軸方向の形状（図-1：右）の違いによると考えられた。こうした3次元実験の結果からも、バケット巻下げにより発生する水平方向流速を低減させるため、バケットの一時停止や、より遅い巻下げ速度で着底させることの有効性が示された。

b) 通常バケットの場合

全開時の密閉型バケット模型の上面シェルカバー部を取り外して通常型バケットの巻下げ実験を実施した。図-7 は密閉型バケットの場合（図-6）と同様に、通常型バケットの場合の x 軸上および y 軸上の底層の流速分布を示す。通常型バケットの場合の底層の水平方向最大流速は、全体的に密閉型バケットの場合の流速より小さい。これは、バケット上面からバケット内部の水塊が外部に抜けるため、バケット下面から押し出される水塊の影響が減じたためと考えられた。このように、巻下げ時だけを対象とすると底層に発生する流動が弱い通常型バケットが密閉型より優位となる。これからすると、密閉型バケット巻下げ時には、バケット上面に付属する特殊蓋を活用して、バケット内の水塊を抜くことが有効である。

(4) 3次元巻上げ実験の結果

全閉状態の密閉型バケット模型を底面上 0.4cm に静止している状態から表-2 に示した条件で巻上げ実験を実施した。図-8 は巻下げ実験（図-6）と同様に、バケット巻上げ時の x 軸上および y 軸上の底層の流速分布を示す。バケット巻上げ時に発生した水平方向流速はバケットに

図-6 巻下げ時の底層の水平方向最大流速の分布（密閉型バケット、左； x 方向、右； y 方向）

図-7 巻下げ時の底層の水平方向最大流速の分布（通常型バケット、左； x 方向、右； y 方向）

向かう方向であったため、図-8の流速は負値で示されている。図-8が示すように、巻上げ時に発生した水平方向最大流速は、図-6が示す巻下げ時のそれと比較してかなり小さいものの、バケットから離れると小さくなる傾向を示している。また、巻上げ時にも一時停止や底面から離れる際の巻上げ速度の違いの効果が見て取れる。

3. 現地計測

(1) 現地計測の概要

現地計測は2014年7月に国土交通省関東地方整備局発注の東京港中央防波堤外側地区航路・泊地(-16m)浚渫工事(その3)内で実施した。現地の水深は約17m、使用されたグラブバケットは28m³密閉型バケットで、一边が22mのグラブ枠が併用された(図-9)。なお、グラブ枠に付属する汚濁防止膜の膜丈は9mで着底はしていない。密閉型バケットの巻下げ・巻上げ位置はグラブ枠の中央である。計測はバケットの長手側面中央から3.5m離れた位置の海底面上0.25m、0.5m、1.0mおよび1.5mの4箇所に自記式の濁度計と電磁流速計を設置して、濁度と水平方向流速を計測した。実施ケースを表-3に示す。巻下げ減速時の条件は、水理模型実験の結果を踏まえると、ある程度の高さでの一時停止が望ましいが、実施工で許容される施工サイクルと操作性を勘案して、底面上3m(実験の12.0cm)で一時停止はせずに巻下げ速度を20m/min(同6.7cm/s)に減速させることとした。巻上げ減速時はバケットへの底質の付着と剥落を考慮して、底面上5mまでは20m/minで巻上げる条件とした。巻下げ

図-8 巻上げ時の底層の水平方向最大流速の分布(密閉型バケット、左； x' 方向、右； y' 方向)

図-9 現地計測状況図(左：正面、右：側面)

実験は、①全開状態のバケットを水面下で5分間静止、②所定で速度で巻下げ、③着底寸前で停止、④2分間静止、⑤バケットを開いたままゆっくりと水面下①の位置まで巻上げて停止を1サイクルとし、基本ケースと減速ケースを7回ずつ繰り返した。巻上げ実験もバケット全開で着底寸前で5分間停止した状態から開始して、同様に定めた1サイクルを7回ずつ実施した。

(2) 計測結果

現地計測では、すべてのバケットの軌跡を記録した。その結果、通常速度の基本ケースのバケットは毎回ほぼ同じ動きをしていた。減速ケースでは多少ばらつきがあったものの着底前あるいは離底時の減速を確認した。

電磁流速計による計測結果からバケット中心から計測点に向かう方向の水平流速成分を求め、バケット巻下げ・巻上げに伴い発生した流速が顕著に見られた時間帯の平均値を算出した。図-10はその平均流速の鉛直分布を示す。図中、横軸は流速でバケットから離れる向きが正、縦軸は海底面からの高さである。図-10が示すように、巻下げ時はバケットから離れる方向(正方向)に流速が発生し、基本ケースに比べて減速ケースの流速は小さく、ほぼ半減した。一方、巻上げ時はバケットに向かう方向(負方向)に流速が発生し、その絶対値は基本ケースに比べて減速ケースは小さい。このように、現地においてもバケットの巻下げ・巻上げ速度の減速にとモニ周辺流動の流速が低減するのが確認された。

流速と濁度の時系列データからバケットの移動に起因した濁りを明確に特定するのは困難だった。そこで、バケット移動開始後120s間に計測された濁度はすべて、

表-3 現地計測実施ケース

バケット種類	区分	動作	備考
密閉型バケット 28m ³ (3.30 × 8.00m)	巻下げ	通常速度 一律60m/min	Case D0相当
		減速時 底面上3m以浅 60m/min " 3m以深 20m/min	Case D3相当
	巻上げ	通常速度 一律60m/min	Case U0相当
		減速時 底面上5m以深 20m/min " 5m以浅 60m/min	Case U5相当

図-10 水平方向平均流速の鉛直分布

バケットの移動に由来すると仮定し、バケット移動開始前の30s間の平均濁度とバケット移動開始後120s間の平均濁度を算出した。図-11に巻下げ実験時のバケット移動前後の平均濁度の関係を示す。バケット移動前後の濁度が同一であれば、図中の黒い実線上にプロットされるが、図-11の基本ケースの場合、多くのプロットが黒実線より上側にあり、バケット巻下げ前より巻下げ後の濁度が高い。バケット移動後に計測された濁度がすべてバケットの移動に由来するとの仮定ではあるが、バケットの巻下げにより濁りが発生したと考えられる。一方、減速ケースでは、多くのプロットが黒実線の周辺に分布し、明確にバケットの巻下げによって濁りが発生したとは言いがたい。巻上げ時の結果ではバケット巻上げ前後の濁度に大きな差はなかった。したがって、巻下げの基本ケースでは濁りが発生したが、減速ケースでは発生した流速が低減したために濁りの発生も不明確となり、巻上げ時は基本ケースと減速ケースともに、発生した流速が小さく、濁りの発生も明確でなかったと考えられた。

4. まとめ

本研究は、グラブバケットの巻下げ・巻上げ速度に着目して、水理模型実験と施工現場における現地計測により、バケットの巻下げ・巻上げ時の流動場の特性と濁りの発生に及ぼす効果を検討した。その結果、得られた主の結論は以下のとおりである。

- ・2次元および3次元の水理模型実験の結果、巻下げ速度が一律の基本ケースに対して、途中一時停止し、かつ着底時の巻下げ速度を低下させると、底層に発生する水平方向流速が減少することを確認した。
- ・3次元水理模型実験で発生した流動は2次元の結果よりかなり小さく、3次元での検討の必要性が示された。

図-11 バケット巻下げ前後の濁度の関係

- ・3次元の実験の結果、 x 方向と y 方向で発生する流速に差が見られた。これは、 x 方向と y 方向のバケット形状の違いに起因すると考えられた。
- ・現地計測でも、巻下げ速度・巻上げ速度の減速が底層の水平方向流速の低減と濁りの発生抑制に寄与することを確認した。

これらにより、濁り低減に資するグラブバケット操作方法として、現地計測で設定した条件が施工サイクル的にも許容される現実的な一操作方法であると判断された。

参考文献

- 1) 松田信彦, 五明美智男, 松原雄平, 檜谷 治, 黒岩正光: 密閉グラブ浚渫で発生する濁りの現地実験, 海洋開発論文集, 第20巻, pp.917-992, 2004.
- 2) 松田信彦, 五明美智男, 松原雄平, 檜谷 治, 黒岩正光: グラブ浚渫で発生する流れに関する研究, 海洋開発論文集, 第21巻, pp.331-336, 2005.
- 3) 古牧大樹, 金山 進: グラブ浚渫に伴う流れの予測手法に関する研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.68, No.2, pp.1_390-1_395, 2012.
- 4) 中村友昭, 福田 俊, 鈴木愛美, 菊 雅美, 水谷法美, 金澤 剛: 密閉式バケット降下時の流動場と最適な降下操作方法に関する数値解析, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.71, No.2, pp.1_1203-1_1208, 2015.

(2016.2.4 受付)

IMPACT ON THE FLOW FIELD AND THE TURBIDITY BY LOWERING, HOISTING OPERATION OF THE GRAB BUCKET

Tsuyoshi KANAZAWA, Satoshi TSUJIKITA and Tomoaki NAKAMURA

Hydraulic model experiment and on-site measurement of an actual construction site were carried out focusing on the type and method of operation of the bucket in the grab dredging. The characteristics of the flow field at the time bucket lowering-hoisting is revealed. And it was further investigated bucket operation method for inhibiting diffusion and turbidity occurs. As a result, rather than operating the bucket at a uniform lowering speed, by decelerating the lowering speed on the way, it was confirmed that can inhibit the flow velocity generated in the bottom surface. For normal bucket as compared to a sealed bucket was revealed that flow generated during lowering is small. Further, even when the hoisting operation, when the hoisting speed of the bucket is slow, it was confirmed that it can inhibit the flow generated around. Such an effect of the reduction of the lowering-the hoisting speed of the bucket was also confirmed in the field measurement.