

グラブ浚渫にともなう浮遊土砂の生産について

中央大学理工学部 首藤伸夫
建設省土木研究所 橋本 宏
〃 宇多高明
中央大学理工学部 戸沢孝吉

1. はじめに

深海での構造物基礎建設にあたって、グラブによる浚渫を行う機会がふえるものと思われる。その際、大量の浮遊土砂が発生し、流れや波によって運ばれ、環境汚染の一因となる可能性がある。ひとたび、汚染源つまり浚渫位置での浮遊土砂の濃度が与えられるならば、拡散係数をどう選ぶかなどの問題は残るにせよ、拡散方程式を数値的に解いて、浮遊土砂の分布や影響範囲をきめることは可能である。しかし、汚染源での浮遊土砂発生量の推定は、現在の所全く未知であるので、この点について数年来おこなってきた実験例、実測例の一部を紹介し、発生の特徴、影響因子などを明らかにするとともに、実験値より原型の発生量を予測するための相似律の一部について述べることにする。

2. 浮遊土砂発生の特徴⁶⁾

グラブ周辺に付着した土砂などが、海水中に流出して浮遊土砂となるが、その発生特徴を観察により、次のように分類する。

- 1) グラブ引揚時：海底面からグラブが離れ、海面にグラブ上端が達するまでをいう。主に、グラブ外側に付着した土砂が水にあらわれて落下し浮遊土砂の供給源となる。グラブの口に礫などがはさまって完全に締切られない時には、そこからおちる量も考慮に入れなければならない。
- 2) グラブ浮上時：海面にグラブ上端が達したのち、グラブ下端が海面を離れる迄をいう。グラブ上面から流れおちる水の速度は、引揚時の流速（≡グラブ引揚速度）とはことなるので、引揚時に流出しなかった付着土も流れおちる。特に、雨笠型グラブに涵杯となっている場合、土砂表面から洗いだされる量が可成りある。
- 3) 水切り時：グラブ内に残っている水を空中で切っている状態である。この時期には、グラブの口の締め具合が、浮遊土砂発生量を左右する大きな因子となる。もし、大きな礫などがはさまっている場合、流出量が増加する。このような偶然性を如何に考慮に入れるかが、最大の問題である。
- 4) グラブ投下時：土捨て後のグラブが口を開けたまゝ水中を下降しながら水に洗われている時期をいう。グラブ内壁に付着した土砂が主な流出源となる。勿論、グラブ外側に付着したまゝ残ったものも流出源となる。
- 5) グラブ着底時：海底土質が堅い場合あるいは着底速度が小さい場合には問題とならないが、軟い土に早い落下速度でグラブが衝突すると、かなりの量の土砂がまきあがる。

3. 発生量に関連のある因子

浮遊土砂量を左右する因子として、次の如きものが考えられよう。

グラブ形状条件（形、大きさ、雨笠型か窓型かの差 など）、グラブ操作条件（引揚・投下速度、グラブ締め操作、水切り操作、掘削土量的大小、掘削場所の水深 など）、海底土の条件（粒度組成、粘着力、掘削深度にともなうこれらの変化）、海象条件（潮流・流速、波の条件、乱流の強さ、成層の度合 など）。

このうち、海象条件を変化させると条件が多様になりすぎるので、静水状態での実験のみを行った。海象条件の差は、浮遊土砂量の多寡よりは、その鉛直分布・水平分布に影響するものと思われる。

4. 実験結果⁶⁾

グラブのおおよその形状は図-1に示すようなものである。図中の斜線部がない場合を開放型、ある場合を密閉型と呼ぶ。模型実験は、幾何縮尺 $1/50$ 、 $1/20$ 、それに対する時間縮尺は $1/50$ 、 $1/20$ とすることとした。ただし、時間縮尺は相似律の確立していない段階では、この値にこだわることはさけた。

各影響因子は、独立ではなく、お互いにかみあひながら作用するので、実験値のなかからひとつだけを取りだして討論するのは大変に難しいし、また誤解のもととなる危険もある。しかし、ここでは事態をなるべく明確にするために、その危険も承知の上で、種々の組合せのうちから、なるべく単独の因子が大きな影響力をもつ特徴的な場合を選びだして討論することとする。

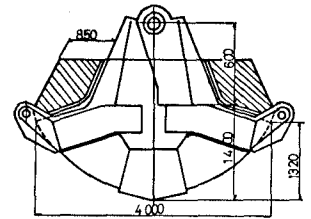


図-1. グラブ形状

1) グラブ締切操作の影響：グラブを肉鎖する操作は、原型では南肉用鋼索によって行い、その最大力はグラブ自重とつがみ土砂重量とで決定される。したがって、がみ合せ部の閉き具合は、礫など大粒至のものがはさまる確率と肉鎖力との組合せによってきまる。模型では、捲上用、南肉用とも、鋼索でなく、鋼棒をもちいた。自重が小さいので、重力のみによることに不安があったからである。

肉鎖用鋼棒を人力で引揚げる肉鎖方法(締切方法1)、人力で引揚げたのちスクルーを利用してさらに引揚げる肉鎖方法(締切方法2)をもちいた。当然、方法2による方が、肉鎖が完全で一定に近いと考えられる。

底質が砂の場合、グラブ外側に付着する砂は殆んどなく、引揚時に落下する砂があっても、浮上時・水切り時にくらべると、一桁以上少なかった。また、密閉型グラブでは、浮上時に土砂表面が水に洗われることもないので、流出土砂のほとんどは水切り時に生じたものである。したがって、水切り時の水もれ速度、つまりはグラブの閉口具合が決定的な要素となる。

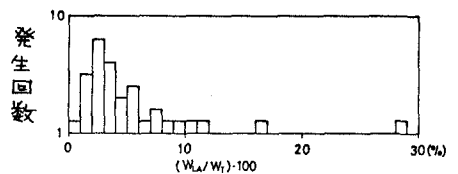


図-2は、 W_{LA} (底質が砂の場合の水切り時発生土砂重量)の、全掘削土量 W_T に対する百分率の発生頻度をしめしたものである。図-2、水切り時の流出土砂量の発生頻度。密閉型、満杯、締切方法1、砂。平均値は5.33%、中央値は3.67%であった。生起確率は対数正規分布となった。中央値の2倍の値の発生する確率は約20%、3倍の値のそれは約10%である。肉鎖状況の差によって流出土砂量が大きく変化する事がわかる。

このように、肉鎖状況のバランスに起因して、流出土砂量が非常に大きくバラツクので、実験としてはモリにくい実があった。その後は、方法2によることとし、均一な肉鎖が行えるようにした。

方法1と2とで、どれだけの差がでるかを、砂に対する開放型グラブの例で比較する。方法1(掘削土量が約半量)の場合、 W_{LA} / W_T は約20%、方法2(掘削土量グラブ満杯)の時、0.4~1.3%であった。実験条件が異なるので直接的な比較はできないが、この前者と W_{LA} が変化しないとしてグラブ満杯の場合にひきなおしてみても約10%程度の値となるから、肉鎖方法によって非常に大きな差の生ずることは明らかである。

2) 引揚(落下)速度の影響：速度の影響は、グラブに付着した土砂を洗い落す効果を有している。

図-3は、砂の場合であって、グラブ外側に付着する土砂は少く、水中で発生した量 W_{LW} は、グラブがみ合せ部から落ちたものが殆んどである。引揚速度の大小は影響していないといえて良い。

図-4は、底質がカオソンの場合についての結果である。引揚速度は $7\%/sec$ 、 $20\%/sec$ の2通りである。引揚速度が大きい程、明らかに発生量が多い。この例では、引揚速度が約3倍となると、発生量も約3倍となっている。

実験に際しては、落下時の発生量は測定しなかった。しかし、捨土後のグラブに付着したまゝになっている土砂が洗われて落ちることは確かである。したがって、引揚時・投下時に発生する量は、主にグラブに付着する土

砂量と等しいと考えれば、これを越えることはない。引揚速度が遅いと、または掘削地盤の水深が浅いときには、付着土砂の全量が流出する訳ではないので、この付着量をいくらか割引いたものだけが流出すると考えれば良い。

3) グラブ形状の差：表-1は、底質がカオリンの場合に、南枚型グラブ、密肉型グラブの比較を行ったものである。水深60cm、グラブ満杯の例である。

W_{Wd} は引揚時に発生する流出土砂量、 W_{Wk} は浮上時・水切り時に発生する量(カオリンの場合、締切方法Zによるとかみ合せ部が良く締められ、細い隙間にはカオリンがつまって、水切りは殆んど行われなかった。したがって、 W_{Wk} は浮上時の発生量とみなして良い)、 W_{Wd} は捨土後のグラブに付着していたもので、 W_k はこの三者の合計である。 W_k は掘削全土量である。密肉型の効果は、浮上時に大きくあらわれることがわかる。

ただし、水中で発生する量は、外側面積の大きい密肉型のほうが大きい。これと同様の傾向は、砂とカオリンを等重量混合したものについても見られた。

W_{Wd} は、接触面積の大きい密肉型のほうが小さくなっているが、この原因は不明である。

4) その他：実験でえられたその他の所見をまとめると、次の通りである。

- i). 密肉型グラブで底質が砂の場合、水深および引揚速度の影響は認められなかった。
- ii). 密肉型グラブでは、掘削量 W_t と流出量 W_L は、ほぼ比例する。
- iii). 南枚型グラブで満杯の砂をつかんだ場合、引揚速度が早い程、浮上時の流出量がふえる。
- iv). 南枚型グラブで砂の場合、 W_t がへっても W_L はそれ程減少しない。その原因は、水切り時に発生量が減少しないからである。
- v). 底質が砂のように付着量の少ない場合、流出土砂は浮上時および水切り時に生ずる。
- vi). 浮上時および水切り時の発生量は、密肉型グラブを用いると非常に減少する。

5. 実測例⁵⁾

現地での作業状況は、おおよそ次の通りである。

東京湾内のある地盤の例では、グラブは公称能力 8 m^3 、掘削地盤の水深は約27mであった。掘削1サイクルには、約3分10秒かかっている。すなわち、水面より水底まで下降するのに約30秒(投下速度 0.9 m/sec)、掘削に20秒、掘削後水面に上昇するのに30秒、掘削土砂をバージ船に運ぶのに50秒、バージ船に捨土して再び掘削地盤までグラブを回転するのに60秒であった。

海底土の性質は、地盤毎に当然異なっているが、粒径 74μ 以下のシルト、粘土などが多量にふくまれている箇所では、浮遊しやすい粒至のものが多いのであるから、これらの成分について十分注目しておかねばならない。

図-5は、グラブから下流約5mの地盤で行った観測結果の一例である。図中には、海面下約2mでの水の流

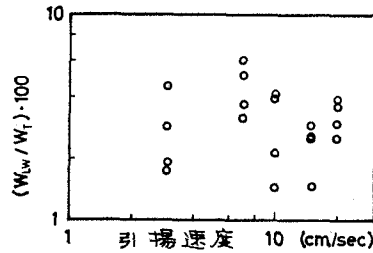


図-3. 水中発生量とグラブ引揚速度。南枚型、砂、締切方法Z、水深30cm。

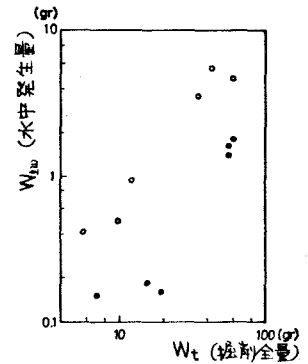


図-4. 水中発生量と引揚速度。密肉型、カオリン、締切方法Z、水深30cm。●引揚速度 7 cm/sec 、○引揚速度 20 cm/sec 。

表-1

グラブ形状	引揚速度	$\frac{W_{Wd}}{W_t} \times 100$	$\frac{W_{Wk}}{W_t} \times 100$	$\frac{W_{Wd}}{W_t} \times 100$	$\frac{W_k}{W_t} \times 100$
南枚型	7 cm/sec	1.68%	6.11%	11.95%	19.74%
	20	2.72	5.17	9.63	17.52
密肉型	7	3.00	0.56	5.77	9.33
	20	6.55	1.51	4.39	12.45

度がしめされている。観測時に流速は、約 $10 \sim 15 \text{ cm/sec}$ であった。グラブ地底からの流下時間は、30～50秒のオーダーである。図中の矢印は、グラブが浮上して水切りを開始した時刻であり観測時の強度のピークは、50～60秒遅れて出現している。つまり、現地においても、強度のピークは浮上時および水切り時に生じている証拠と考えてよい。

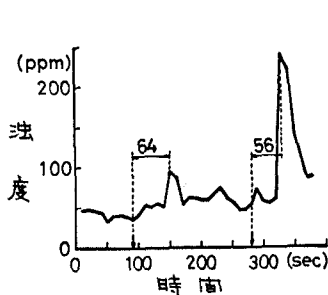


図-5 実測例

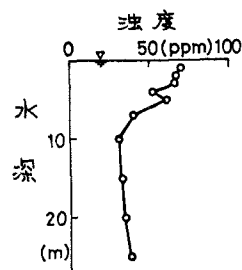


図-6 実測例

また、最初のピークは約 100 ppm、オニのものは約 250 ppm とかなり大きく変動し、これも実験での所見と一致している。

図-6 は、各水深で測定した強度を時間的に平均することによって得られた平均強度である。海水面近くに高濃度がありわれている。また、海底に近づく程、強度値の変動は大きくなかった。このことから、浮遊土砂は主に水面近くでのグラブの浮上時、水切り時に発生することがわかる。

6. 相似律の試み

1) 引揚時および投下時の発生

量：これを左右する主要な因子は、グラブと土砂の接触面積、土砂の粘着力、流水の速度であろう。

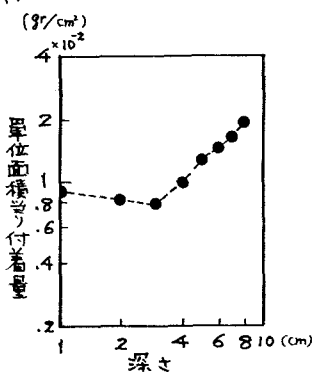


図-7-1

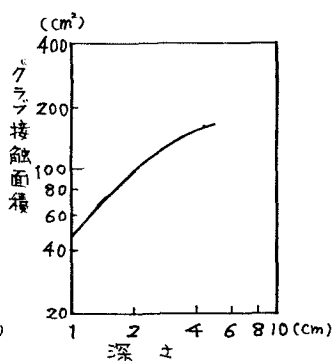


図-7-2

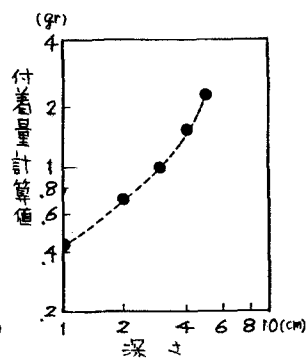


図-7-3

もし、水深が十分深く、またグラブと水との相対速度が十分に大きければ、グラブの外側および内側に付着したものが全て流出した場合が最大の発生量となる。したがって、全付着量の推定ができればよい。もし、単位面積あたりの付着量が同一なら、長さの縮尺が $1/5$ なら、全付着量は $1/5^2$ としてよい事となる。

所が、土によっては単位面積あたりの付着量が、海底面からの深度により異なるので、これを考慮に入れなければならない。その例を以下に示す。

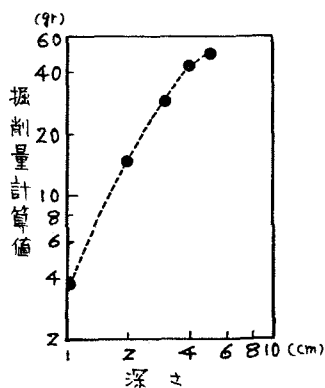


図-7-4

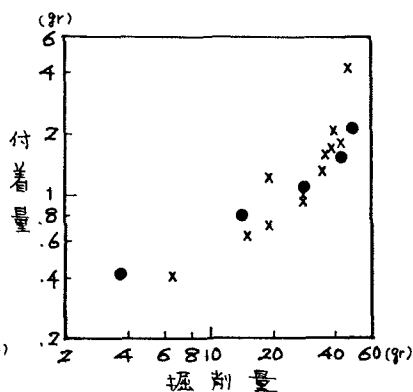


図-7-5

図-7. 空内型グラブへの付着量

カオソンを用いた実験では、まずカオソン(至は 50μ 以下、比重 2.75)を水にとき、作成後 4 日間静置する。カオソンの付着力は、海底面下の深度によって変化し、図-7-1 に示すようになる。模型グラブの掘

削深と土砂との接触面積は図-7-2のように変化するので全付着量は図-7-3のようにもとめることが出来る。全掘削深と全掘削量は図-7-4のようになる。こうして、全付着量と全掘削量の関数として計算でき、図-7-5の丸印のように求められる。図中×印は実験値であり、両者は当然の事ながら良く一致している。

この事から、土の付着力の変化に十分注意すれば、全付着量は容易に計算され、原型での値の推定も可能な事がわかる。

2) 浮上時の発生量

グラブをまき上げる際の荷重変化の測定例がある³⁾。引揚速度の遅い時(6 m/min)と、速い時(57 m/min)とを模式的に図-8に示す。一般には、速度の早い例が良く見られる。このとき、水中での抵抗が大きく、水面に浮上した時にはこの抵抗が急遽になくなり、ついで空気中での巻上げ荷重に変化する。したがって、水面付近での巻上げ荷重の変化は、閉じたグラブ内に入っている水が流れおちるまでの水の重量が附加されるだけであると考えられている。この考え方により、空気中の巻上げ荷重を基準として、水面通過時の最大荷重の変化量をもとめると、図-9のようになる。巻上げ速度 20 m/min 以上で殆んど一定値となるが、これはグラブに水を満した時の重量と等しいことが確認された。

また、水中での抵抗力を $C_D \frac{\rho_w}{2} A V^2$ と表現すると、或る例では、 $C_D \approx 2.7$ (ただし $R_a = 2.1 \times 10^4 \sim 5.3 \times 10^5$) がえられた^{3), 4)}。

引揚時・投下時の流れの速度は、静水中ならグラブの速度に比例しているが、浮上時にはこれとことなる流速があらわれ、そのため流出土砂がふえる可能性がある。

グラブ周辺の水の運動は、上記の水中での抵抗の値(半球で $C_D = 1.33$) からみて、普通の考え方による類推が成立すると判断できよう。

グラブの運動によ、て影響をうける水の総量は、Bをグラブの代表至とすると、 $C_H B^3$ に比例することとなる。グラブ上面にある水の高さは、他の係数 C_s を使って、 $C_s C_H^{1/3} B$ に比例する。ただし、 C_s は、図-9からみて、かなり小さい値であると判断される。

グラブ上面にある高さ $C_s C_H^{1/3} B$ の水が重力の影響のもとに流出すると仮定すると、その流速は時間 t の関数として $u = 3B C_s C_H^{1/3} (2gB)^{1/2} / [C_s C_H^{1/3} (2gB)^{1/2} t + 3B]$ となる。ここに C は新しい定数である。もし、流出土砂量 q が、 $q = K u^n$ とみたとすれば、総流出土砂量は $B^2 \int q dt$ であるから、

$$(\text{浮上時の流出量}) / (\text{全掘削量}) \propto B^{\frac{n-1}{2}}$$

となる。いくつかの大きさの異なる模型を使って n の値をきめれば良い。

3) 水切り時の流出：この時期の流出量に大きく影響するのは、グラブ内鎖の状態である。その例を図-2に示したが、流出量に大きなバラツキの生ずる原因となっていた。図-10は、図-2を書きなおしたものであるが、明らかに対数正規分布となっている。実験においてもグラブ締切操作に、現実に近い状態でバラツキが生ずる必要がある。

そこで、グラブを内鎖する力がどうなるかを考えよう^{1), 2)}。

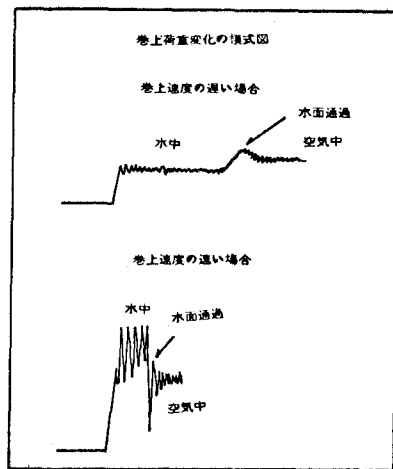


図-8. 巻上荷重変化の模式図

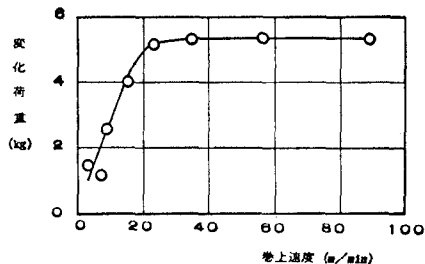


図-9 水面付近を通過する際の荷重変化

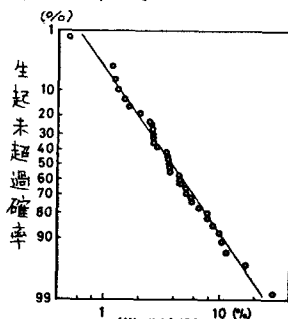


図-10. 水切り時発生量

今、グラブ自重を W_g 、全掘削量を W_T とすると、南内用ワイヤーにかかる力 T_x は、

$$T_x = W_g + W_T$$

であてえられる。また、グラブ筒長さ L 、グラブ刃幅 B とすると、

$$W_T / W_g \propto K L [B / W_g]^{1/2}$$

が成立する範囲でグラブ操作が行われるのが普通である。 K は、グラブ型式、南内用ケーブル巻きかけ数、土質によって変る定数であって、 $kg^{1/2} m^{-3/2}$ の単位を有する。 K はグラブの縮尺によっては変化しない（実例では、 $0.05 m^3$ と $0.005 m^3$ のグラブで、定数であった）。

長さの縮尺を $1/S$ とすると、 $B \propto 1/S$ 、 $L \propto 1/S$ 、 $W_T \propto 1/S^3$ であり、 $W_g^{1/2} \propto W_T L^{-1} B^{-1/2} \propto 1/S^3 \cdot (1/S)^{-1} \cdot (1/S)^{-1/2} \propto S^{-3/2}$ 、つまり、 $W_g \propto 1/S^3$ と縮尺し、 $T_x \propto 1/S^3$ と縮尺することとなる。この力で掘削した時に生ずる障害は、長さの縮尺で縮めたものとなっており、そこを出てゆく水の流速は $1/S^{1/2}$ で縮めたものとなっている。残留水の出て行く時間大は $1/S^{1/2}$ で縮められる。単位時間単位幅あたりの流出土砂量 q が $q \propto v^m \propto (1/S^{1/2})^m$ であつたとすると、全発生量は $q B L \propto (1/S)^{\frac{m-1}{2}}$ の縮尺にしたがう。

7. 発生源濃度分布モデル

浮上時、水切り時、引揚時および投下時では、それぞれ異った相似律を考えなければならぬので、別々にもとめた後、原型にひきなおして、加えあわせる。この時、次の様にすれば良いであろう。

引揚時・投下時に発生する土砂量は、グラブ内外面に付着した量に等しいと考え、これが鉛直方向に一様に分布するものとする。

浮上時、水切り時のものは、別口にもとめたのち加えあわせ、水面下 d (m) の箇に等濃度で分布するとおく。 d の大きさは、成層の発達する夏季では、この成層の厚さと同じとする。3~5 m の程度であろう。冬季に d をきめるのは、非常定重力噴流にともなう乱流強度が場の乱流強度と同程度となる深さであろうが、今後の検討を必要とする問題である。

8. おわりに

グラブ浚業にともなう浮遊土砂発生の機構と問題点が明らかとなった。今後は、実験を重ねるとともに、実測値を増やし、実際の予測に役立つものにして行くつもりである。

引用文献

1. 近藤ほか：浚渫用グラブの研究（オ一報）グラブ自重、寸法比とフガみ土量の関係、港研報告 Vol. 4, No. 7, pp. 1~13, 1965
2. 岩田：浚渫用グラブの研究（オニ報）グラブの相似と掘削限界および南内用鋼索の巻きかけ数について、Vol. 5, No. 7, pp. 1~28, 1966
3. 岩田：浚渫用グラブの研究（オニ報）グラブの部材強度および水中における巻上げ時の抵抗について、Vol. 6 No. 3, pp. 1~17, 1967
4. 岩田・高砂：グラブバケットの落下時衝撃試験およびフガみ特性試験（オZ報）、港研資料 No. 68, pp. 19~42, 1966
5. 建設省土木研究所海岸研究室：昭和50年度道路事業調査報告書 1.3.1 潮流調査, pp. 400~406 昭51
6. 建設省土木研究所海岸研究室：海水汚濁の拡散に関する試験調査, pp. 129~136, 昭51