

底開バージから投下された土砂の堆積形状と底面衝撃圧の予測

Prediction of Sand Heap Shape and Bottom Impact Pressure at Reclamation

by Bottom-Dump Barge

三菱重工業(株) 大阪支社 正員 武藤碩夫

三菱重工業(株)高砂研究所 正員 ○吉井總介

1. まえがき

海域の埋立工事には、通常、船底部に開閉できる底扉を有する土砂運搬バージ（一般に“底開バージ”といわれる）を用いて、山砂を海中へ直接投下する方法（一般に“直投”という）が多く用いられる。これは他の埋立手段と違い、底開バージでは一度に数千 m^3 もの大量の土砂を直投できる利点があるからで、当然ながら、できる限り浅い水深（一般に“直投限界水深”という）までバージで直投する方が経済的である。ところが、この直投限界に到るまでの埋立過程に於て、バージから投下された土砂が海底で如何なる堆積形状をし、また、海底面に如何なる衝撃圧を与えるかについては、それらが海域の埋立計画を行なう場合の敷砂厚さ、直投限界水深の設計から日々の埋立状況の把握に至るまで、利用範囲が広いにも拘らず、研究成果の報告例は少ないのが現状である。^(1,2) 筆者らは、以前に、当社試設計の底開バージに関して直投限界水深を調査する為の水理実験を行なった際、海底での土砂堆積形状が水深、埋立土量などとの関連で複雑に変化することを見出した⁽²⁾。本論文では、この実験調査内容をより理論的な観点で見直し、新たに実験調査した内容も含めて検討すると共に、海底での土砂堆積状況の予測値と実測値の比較を行ない、その予測精度を評価してみた。また、投下土砂が海底面に与える衝撃圧についても、理論的な検討を行ない、実験値との比較も行なった上で、予測手法としての提案を行なっている。

2. 海底の土砂堆積形状の予測

2.1 水理実験の概要

底開バージより投下された土砂の海中での挙動、及び、海底での土砂堆積形状を調査する為以下の内容の水理実験を実施した。

- (1) 実験はバージの船首尾方向に直角な断面を対象とする二次元実験である。

これは、図1に示す如く、底開バージの土砂倉（ホッパー部）が船首尾方向に長く、土砂倉端部を除けば、投下土砂の挙動は一般に、二次元的とみなせるからである。

- (2) バージが土砂投下と共に浮上し、吃水を浅くする現象を再現する。

- (3) 現象を単純化する為、海底面は平坦とする。

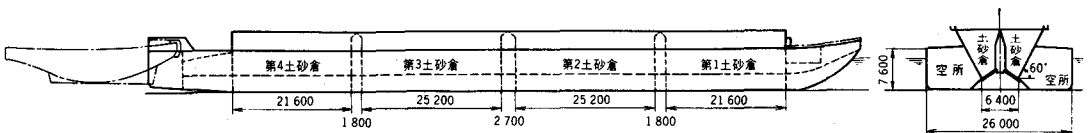


図1 7500 m^3 型バージ概要図

尚、バージの船型、特に、特に、船首尾方向に直角な鉛直断面形状は、一般に、積載土砂量に比例する傾向にあり、底開バージの断面形状はマクロにみれば相似とみなすことができる。この観点からは、図1に示したバージは今回の模型実験を実施する上での一つの実船例にすぎないともいえる。

2.2 実験相似則

底開バージから投下された土砂の海底での堆積形状を決定する要因は多くあるが、模型実験ではその内の主要なものを再現することになる。関与する現象の内、主要なものは次の5項目であろう。

- (1) 土砂投下に伴うバージの浮上現象
- (2) 土砂が水中を落下する現象
- (3) 土砂が海底を動く現象
- (4) バージの土砂倉（ホッパー部）での土砂の動き
- (5) バージ底扉の動き

この実験では上記の内、(1)(2)を主要現象として、相似則を検討して模型上へ再現することを行ない、他の(3)～(5)については、実現象との比較などを通じて、実験に使用する土砂との関連で、模型上への現象再現性を確認することとした。

(1)(2)の現象に関して、主要相似則はフルード則であり、次式で示される。

$$(u / \sqrt{gL})_r = 1 \quad (1)$$

ここに、 u は速度、 L は代表長さ、 g は重力加速度であり、添字 r は（模型値／実船値）を示す。

また、バージ浮上現象に関し、満載時、軽荷時の吃水を実船と相似にするには次の条件が必要である。

$$(\gamma_B)_r = 1 \quad (2)$$

ここに、 γ_B はバージの平均比重量である。

更に、土砂が水中を落下する現象については、水の浮力効果を加味して、次の条件が相似則となる。

$$(\gamma_s - \gamma_w)_r = 1 \quad (3)$$

ここに、 γ_s は土砂の真比重、 γ_w は水の比重である。

これらの諸式を相似則として実験した場合の前記(3)～(5)の現象の模型上への再現性を後述する実験装置を用いて、本格的な実験に入る前に調査した。この種の実験では、模型土砂材料の選択が難かしいが、筆者らは、粒径1～3mmの洗い砂を使用した。その根拠は、微粒径泥質にみられる粘性がないこと、及び、後述する様に、バージからの土砂落下量の時間変化が実船とほぼ相似になることの2点である。

まず、土砂が海底を動く場合、底面粗度の影響が懸念されるが、小川、竹内⁽¹⁾は粗度は土砂拡散に影響しないと報告しており、筆者らも鋼板地盤と砂地盤の両者について調査した結果、投下した土砂の堆積形状に大きな相違は見出されなかった。次に、バージの土砂倉内の土砂の動きについては、今回の実験目的を考慮し、バージから落下する土砂の時間変化が実船と相似であれば良いと考えられる。土砂投下と共にバージは浮上するから、結局、バージの時間的な浮上変化が実船と模型で相似になれば良い。この観点から、実船の土砂投下状況を実際に観測し、模型と比較したのが図2である。図2で横軸は時間を全土砂落下時間で除した値で、縦軸はバージの浮上割合 η で次式で表わされる。

$$\eta = (d_f - d) / (d_f - d_\ell) \quad (4)$$

ここに、 d_f 、 d_ℓ はバージの満載吃水、軽荷吃水で、 d は任意時間のバージ吃水である。

図2によれば、模型は実船の状況を良く再現している。即ち、今回の実験調査にとり最も重要な、バージの浮上と共に土砂が落下する現象が模型上へ再現されていると考えられる。次に、バージの底扉の動きの影響については、実船の土砂投下時に、底扉支持索を支える滑車、油圧ピストンの動きを観察して得られた底扉開放時間を基準にして、模型上で開放時間を種々変えて調査したか、海底の土砂堆積形状には殆ど影響のないことが判明した。これらの検討より、先述した(1)～(3)式を相似則とすれば、実現象を模型上へ再現し

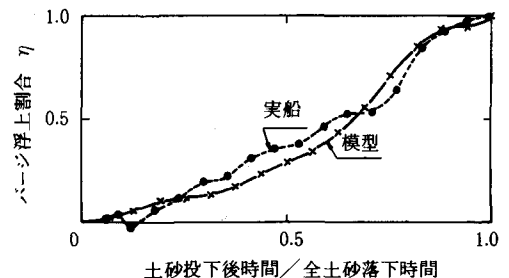


図2 バージ浮上状況の比較

うると考えられる。

2.3 実験装置

実験装置機能図を図3に示す。バージ模型は土砂投下と共に浮上する方式の二次元断面模型でありバージの軽荷吃水を錘により調整した後、所要量の土砂を積載するとバージは満載吃水となる。バージの供試模型として、図1に示す7500㎡型の1/15、1/30の2種

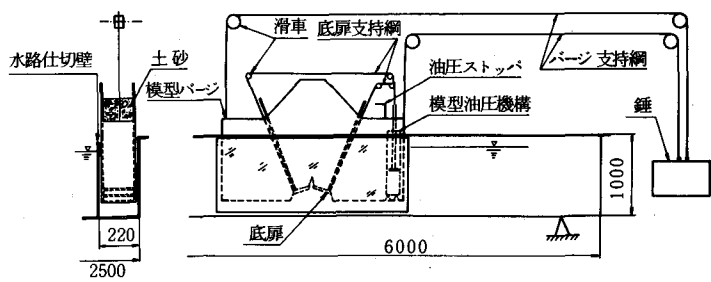


図3 模型実験装置

の模型を用いたが、実船の前後部の土砂倉のない部分の浮力効果を含めて(2)式を満足する為に、模型の船幅で調整を行なっている。土砂を積載した状態で底屏を支持している油圧ストッパを外すと、実船と同様、土砂圧により底屏が開き土砂が落下する。尚、実験に使用した土砂は前述した如く、粒径1～3mmの洗い砂で、真比重2.66、空隙率0.43、平均粒径1.8mmである。

2.4 土砂挙動の定性的観察

バージから投下された土砂は、種々の粒径の粒子より構成される為、海底へ落下する過程では1つの流れを形成すると共に、その中へ周囲の水を強力に吸引する。これは、重力が土砂の速度を増大させ、土砂空隙率が大きくなることに起因する。この様に、土砂が大量の水と共に高速で動いている時、土砂の動きは流体とみなすことができるが、底面衝突後、土砂が海底に沿って動き始め、次第に速度が小さくなると、土砂と水とは分離し始め、土砂は元々の固体としての挙動を示す。また、投下水深が小さい場合には、バージから投下された土砂は周囲の水を吸引することなく、直ちに海底面へ着地するので、流体としての性質よりも、むしろ、粒子物質の固体としての性質が土砂の挙動を支配する。これらの土砂挙動の特性により、バージから投下された土砂の海底での堆積形状は図4の様に变化する。また、土砂は海底へ落下途中、周囲の水を吸引するが、その土砂流の拡がり巾は変化しないことも観察された。

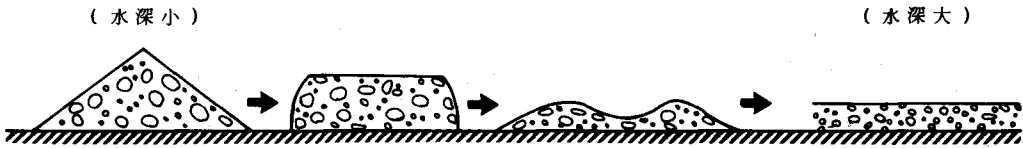


図4 海底の土砂堆積形状の変化

2.5 土砂堆積形状の調査結果と実測値との比較

バージから投下された土砂の海底での堆積形状を表わす変数として、最大堆積厚さ、拡散巾、及び、堆積の山が2つになった場合(図4参照)の山の間隔と中心部の堆積厚を取上げ、投下水深、積載土砂量などを变化させた場合について実験調査を行なった。その結果を図5～図8に示す。

これらの図では、バージの積載土砂量を表わす変数として、満載吃水 d_f 、軽荷吃水 d_ℓ の差 ($d_f - d_\ell$) を用いて堆積形状を表わす変数を無次元化した。また、次式に示す内部フルード数 F が土砂の最大堆積厚 S に反比例するという仮定を用いてデータを整理した。

$$F = u / \sqrt{\Delta \gamma / \gamma (d_f - d_\ell) g} \tag{5}$$

$$u = Q / B L t \tag{6}$$

ここに、 u はバージからの平均土砂落下速度、 Q は投下土砂量、 B は土砂倉底部開口巾、 L は土砂倉部有効長さ、 t は土砂落下時間、 γ は土砂見掛け比重、 $\Delta\gamma$ は γ と海水比重の差、 g は重力加速度である。

土砂堆積形状を調査する模型実験では、土砂投下量、水深などをパラメータにして多くの実験を実施したが、これらの図でわかるように、この実験値と、実船による実測データの解析値とは、非常に良く一本の曲線上に載っており、模型と実船との適合性が良いといえる。

前述の如く、この模型実験では土砂粒径が実船とは相似でない為、得られた実験結果と実現象の整合性の検討が不可欠であるが、これらの図をみる限り、今回の実験が実現象を良い精度で模擬したものであったと考えて良いようである。

尚、ここに利用した実測値は神戸市ポートアイランド埋立の際、1100㎡型底開バージにより投下された土砂の堆積形状を計測したものであり、数値を表1に示す。⁽⁸⁾バージからの土砂落下時間は約5秒、海底面は平坦な砂地とされている。

この様に、土砂積載量の異なる底開バージによる直投土砂の堆積形状を比較できるのは、底開バージの仕様の中で、土砂の挙動、落下時間に大きく関与する単位長さ当りの積載土砂量と底扉巾の関係が、いずれのバージでもほぼ同じ、換言すれば、土砂量に関係なく、バージ断面形状が相似であることによる。

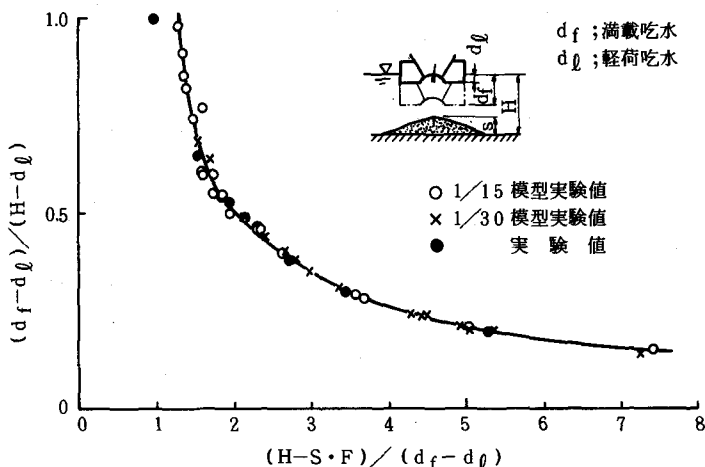


図5 土砂堆積厚さ

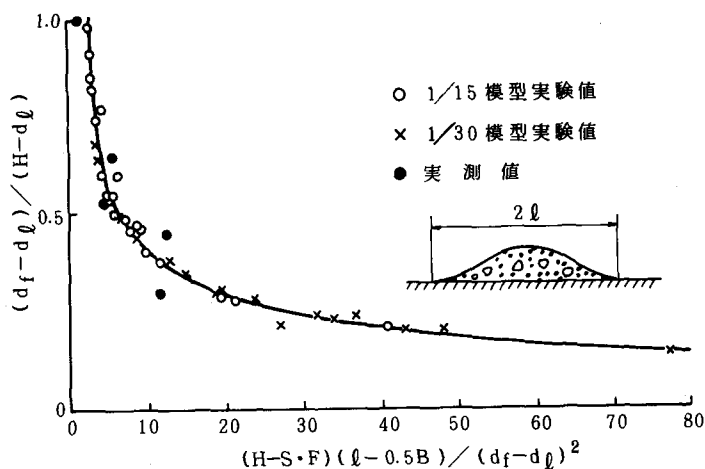


図6 土砂拡散巾

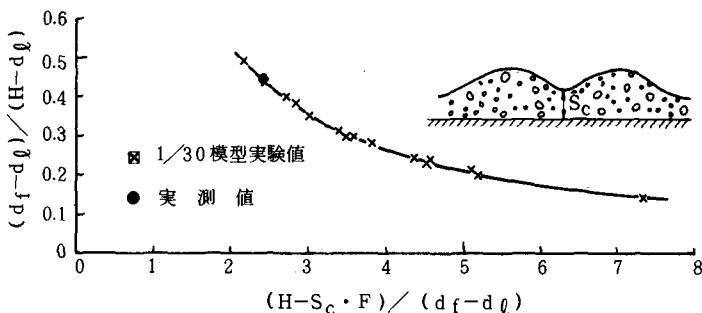


図7 堆積土砂山間の中心堆積厚

尚，土砂堆積形状が山2つになる条件は
次式で表わされる。

$$(H - S \cdot F) / (d_f - d_\ell) > 2.3 \quad \dots\dots(7)$$

表1 1100m³型バージ埋立実測値⁽⁸⁾

投下水深 H(m)	3.5	5.0	6.0	8.0	10.0	15.0
土砂たい積厚 S(m)	2.0	1.8	1.2	1.0	0.8	0.6
土砂拡散幅 2ℓ(m)	12.0	—	16.0	—	22.0	—

2.6 予測値と実測値の比較

図5～図8を用いれば，土砂投下量，土砂投下時間を与えることにより，海底の土砂堆積形状の概略を予測できる。但し，バージの断面形状の相似が前提条件である。

実際の埋立現場では模型実験で対象とした様な平坦な硬い地盤は比較的少なく，不陸のある場合が多い。ここでは両者の場合の実測値，予測値を比較してみる。尚，実測値は神戸市開発局殿の御好意により提供されたものである。

図9は平坦で硬い地盤上へ1100m³型バージ2隻で同時に土砂投下した場合の実測値と予測値の比較を示す。この実測値はポートアイランド埋立時に得られたものである⁽⁸⁾。

予測値が実測より少し大きい，形状を含め予測精度はかなり良いといえる。

次に，六甲アイランドの埋立現場で元地盤上と一層埋立実施後の不陸状態へ10,000ton型バージで土砂投下した時の土砂堆積形状を予測値と比較する。海底不陸のある時，投下された土砂は凹部で堆積，凸部で流下し，複雑に動き，実測値にバラツキ

があるがこれらを検討した結果，図11 元地盤上の土砂堆積状況(めり込み量補正，水深12.8m)

中央部付近のデータが平均的であるので，これを実測値とした。図10に一層埋立実施後に土砂投下した場合の実測と予測の比較を示す。傾向的には良く一致しているが，量的には，土砂投下前の地盤への土砂のめり込みの影響で実測の方が少し小さめである。次に，図11に元地盤上へ土砂投下した場合の実測値と予測値の比較を示す。この場合には，投下土砂は元地盤の粘土層へめり込むので，潜水夫の測深棒により計測されためり込み量を基に，元地盤を直線に引直して実測値とした。ばらつきはあるものの，予測値と実測値は傾向的には一致する。これよりみて，不陸などのある場合にも，図5～図8から求めた予測値は一つの目安として実用しうると考えられる。

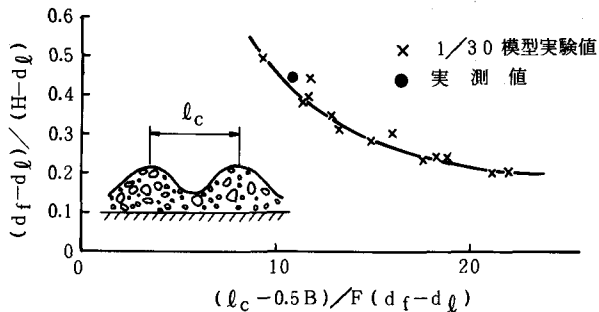


図8 堆積土砂山の間隔

(↓土砂落下中心点)

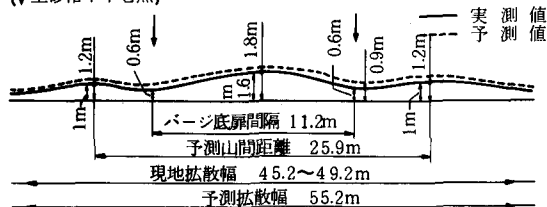


図9 土砂堆積形状の実測値・予測値の比較(水深7m)

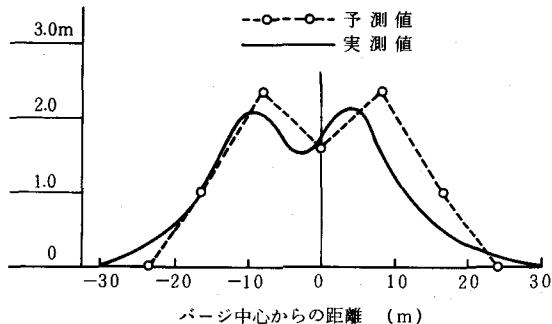
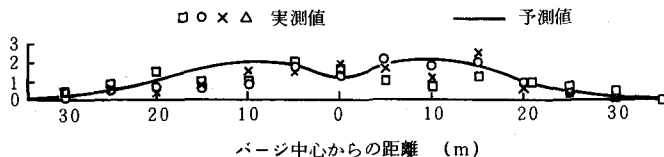


図10 一層埋立地盤上での実測値・予測値の比較(水深10.3m)



バージ中心からの距離 (m)

3. 投下土砂による海底衝撃圧の予測

土砂はバージから流出後、重力により加速されて海底へ衝突する。海底の受ける衝撃圧は平均的に考える
と次式で与えられる。

$$P = u_{\ell}^2 / 2g \cdot \{ (\gamma_s - \gamma_w)(1 - \varepsilon_{\ell}) + \gamma_w \varepsilon_{\ell} \} \quad (8)$$

ここに、 P は衝撃圧、 u_{ℓ} は土砂流の底面衝突速度、 γ_s は土砂の真比重、 γ_w は水の比重、 ε_{ℓ} は土砂流
の底面衝突時の空隙率である。上式によれば、 u_{ℓ} 、 ε_{ℓ} を求めることにより、衝撃圧 P を求められる。

今、土砂流の流路断面積を実験観察結果から変化しないと仮定し、かつ、水の見掛け質量を無視すると、
土砂流がバージ底部から海底まで流れている場合には土砂の連続の式として次式が成り立つ。

$$u_0(1 - \varepsilon_0) = u(1 - \varepsilon) = u_{\ell}(1 - \varepsilon_{\ell}) \quad (9)$$

ここに、 u は速度、 ε は空隙率で、添字の 0 、 ℓ は各々、バージ出口、及び、海底衝突部分の値を示す。
落下している土砂流の中間の流速 u の微小部分に対する運動方程式は次式で与えられる。

$$\{ (1 - \varepsilon) \gamma_s + \varepsilon \gamma_w \} / g \cdot du/dt = (1 - \varepsilon)(\gamma_s - \gamma_w) \quad (10)$$

時間 T の間に落下する距離 ℓ は $\ell = \int_0^T u dt$ で表わされるが、これに(9)(10)式を代入すると次式を得る。

$$\ell = \int_{u_0}^{u_{\ell}} f(u) du \quad (11)$$

但し、上式で、 $f(u)$ は速度 u の関数である。

$$u_{\ell}^3 + \alpha u_{\ell}^2 + (\beta \ell + \alpha u_0^2 + u_0^3) = 0 \quad (12)$$

$$\text{ここに、} \alpha \equiv 1.5 u_0 (1 - \varepsilon_0) (\gamma_s - \gamma_w) / \gamma_w, \quad \beta \equiv 2 g \alpha \quad (13)$$

上式より u_{ℓ} を求めることができ、(9)式により ε_{ℓ} も求められるので、結局、(8)式により土砂による衝撃
圧を計算できることになる。

実際には、バージは土砂投下と共に浮上するのに対し、上記の方法はバージ位置固定であるから、計算上
は土砂の落下距離としてバージ浮上距離中間点から海底までの長さを設定すれば良い。

上記の計算手法の精度を確認する為に、模型実験で海底の受ける衝撃圧を計測した。その詳細は前報⁽²⁾
に示しているが、そのピーク圧力と上記理論による計算値の比較を表2に示す。これによれば、理論値の方が実験値より少
し小さいが、これは投下土砂流の衝突する部分の圧力分布を

表2 海底衝撃圧の理論値と実験値の比較

土砂投下水深(m)	実験値(kg/cm ²)	理論値(kg/cm ²)
15	0.28	0.20
20	0.35	0.26
26	0.42	0.32

理論では一様としている為と考えられる。表2によれば、両
者の比率は1.3～1.4であり、実用上は上記理論による計算
値を1.4倍することにより、海底面に生じる最大衝撃圧を予測して良いと考えられる。

4. ま と め

底開バージから直投された土砂の海底での堆積形状を調査する水理実験を実施し、バージの断面形状が相
似であることを利用し、得られた実験結果を実船の場合の実測データと共に汎用計算図として整理した。こ
れを用いた予測値は実測された堆積形状と比較的良く一致することが確認された。

また、土砂投下により海底の受ける衝撃圧について、理論計算手法を提案し、実験値との比較を行なった
結果、計算値を1.4倍すれば、海底の受ける最大衝撃圧を求められることが判明した。

【参 考 文 献】

- (1) 小川元、竹内益雄；土捨船による投棄土砂の分散、土木学会論文報告集、第161号、1969
- (2) 武藤碩夫、吉井紹介、石田勉；大規模埋立用底開バージによる土砂投下の研究、三菱重工技報、Vol.
11 No.1、1974
- (3) 運輸省第3港湾建設局工事事務所；神戸港ポートアイランドの建設工事について、1969