

底開バージから投入される捨石の出来型予測システム

岡田 凌太* ・ 土谷 政治* ・ 今井 貫爾**
池谷 毅***・ 秋山 義信****・ 田川 寿美*****

1. はじめに

捨石工は、海洋・港湾・海岸工事において、頻繁に行われる工種の一つである。捨石工の敷設に当たっては少量の場合はグラブ船等を用いて行われるが、大量の敷設の場合は写真-1に示すような底開バージが用いられることが多い。この底開バージからの直投工法は、捨石工の大規模・急速な施工法として知られている。本方法は施工能率の面では極めて効率的であるが、捨石の堆積位置・形状等が施工条件により変化するため、細かい制御が難しい。

底開バージからの直投された捨石に関する研究としては実験によって堆積形状の特性を求めた小田ら(1987)、奥出ら(1982)の研究が挙げられる。また、捨石出来型の予測としては梅谷ら(1988)、武藤ら(1984)の研究が挙げられるが、両者とも、静水時の平坦床への捨石投入に対するモデル化である。

捨石の敷設を考えた場合、その出来型が事前に予測できると施工計画ならびに施工管理の上で有効である。そこで、本報では、はじめに、水理模型実験を行い、捨石出来型の基本特性の把握を行った。つづいて、現場における使用を前提とし、比較的簡単なモデル化を行い、従来の研究では十分な考慮が払われていなかった、①潮流速、②重ね投入、③海底傾斜、④構造物の影響を考慮して、捨石出来型予測システムの構築を行ったので、それについて紹介する。

2. 水理模型実験

底開バージから投入された捨石の出来型の基本特性を把握するために実施した水理模型実験の概要を示す。

2.1 実験条件および実験方法

実験条件を表-1に、実験概要を図-1に示す。実験は、奥出ら(1982)に従い縮尺1/100とし、相似則はフルード則を使用した。また、縮尺1/100の実験と合わせ、縮

尺1/60の実験も行ない、相似性の確認を行った。投石時に作用する最大潮流速が2.0 m/sで水深約45 mの海域を想定し実験を行った。底開バージ模型は、1,500 m³積みのスプリット式全底開バージを想定した。模型の概略形状を図-2に示す。底開バージは、投石と同時に荷が軽くなり浮上するため、厳密には浮体式としなくてはならない。しかし、今回の実験では、想定している水深が45 mと浮上高さに比べて大きいため、捨石の堆積形

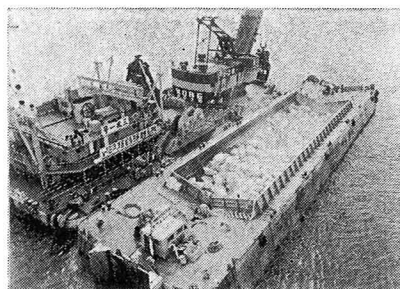


写真-1 底開バージによる捨石敷設

表-1 実験条件

捨石重量	1 ton 級碎石	バージ投入量	1500m ³
水深	45m	バージ開口形式	全底開型
潮流速	0.0~2.0m/s	海底勾配	0~1/2
バージ開口速度	0.2m/s	海底面材料	砂(固定 or 移動)

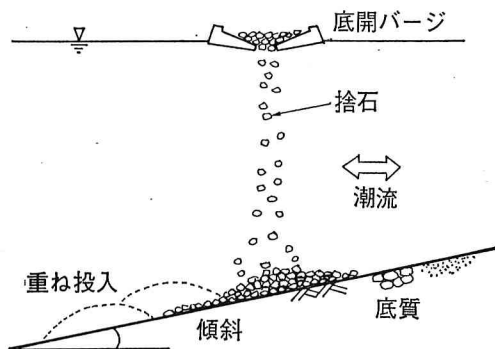


図-1 水理模型実験概要

* 本州四国連絡橋公団垂水工事事務所
** 正会員 Ph. D 鹿島建設技術研究所
*** 正会員 工 博 鹿島建設技術研究所
**** 正会員 工 修 鹿島建設技術研究所
***** 正会員 工 修 鹿島建設株式会社明石 2P 下部工 JV

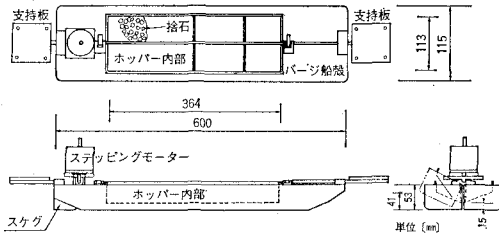


図-2 底開バージ模型形状

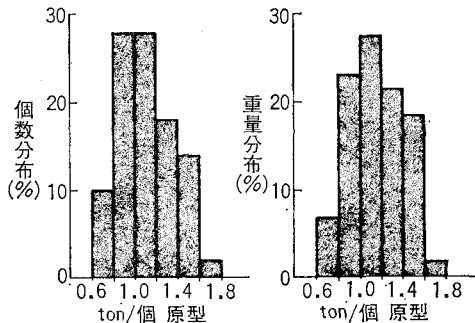


図-3 捨石模型の個数・重量分布

状に与える浮上の影響は無視し固定式の模型とした。バージの開口は、ステッピングモータを用い、モータの回転速度を変化させることにより開口速度を実際で想定される速度に制御を行った。また、実験に使用した捨石模型は、図-3 に示す個数・重量分布を持つものとし、製作にはコンクリート骨材用砕石を用いた。

2.2 実験結果ならびに考察

ここでは、従来余り知られていない、①流れ、②重ね投入、③海底面の傾斜等の捨石出来型に与える影響について示す。

a) 流れの影響

図-4 に、流速の大きさの変化に伴う捨石の出来型形状の変化（堆積範囲）について示す。図より、堆積形状はほとんど変化しないものの、堆積位置が下流にずれる。捨石の沈降速度を計測した結果 $4\sim5\text{ m/s}$ となり、沈降時間は 10 秒程度となることから、ほぼ捨石は潮流と同じ速度で流下しながら落下していることがわかる。

b) 重ね投入の影響

図-5 に、同一地点からの重ね投入の捨石出来型形状を、図-6 に投入点をずらした場合の結果について示す。図より、同一地点からの重ね投入の場合、堆積範囲は広がらず、上部へ堆積し、堆積端部の勾配は次第に安息勾配に近づく傾向を示す。これに対し、投入点をずらした場合は、1 回の投入でつくられる断面を足し合わせた堆積形状を呈する。

c) 海底面傾斜の影響

図-7 に海底面の傾斜を変化させた時の捨石出来型形

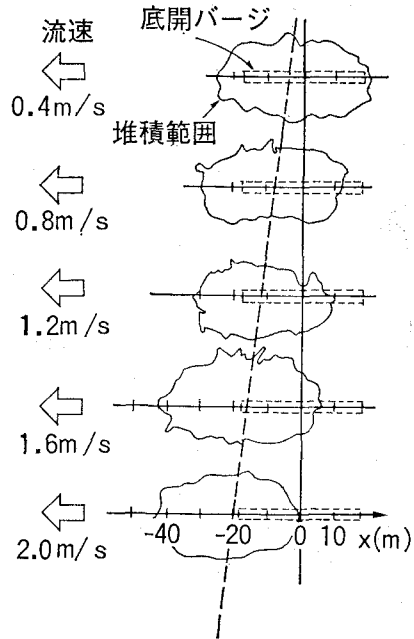


図-4 流速が捨石出来型に与える影響

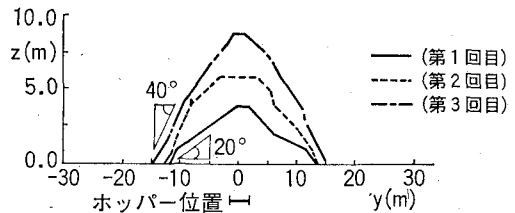


図-5 重ね投入の影響（同一地点投入の場合）

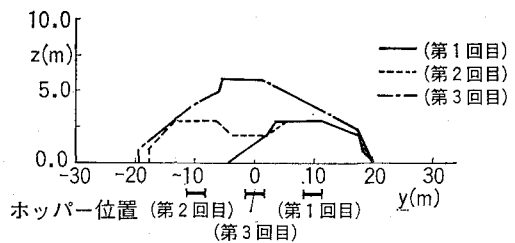


図-6 重ね投入の影響（投入点をずらした場合）

状の変化を示す。図より、傾斜面に投入される捨石は、堆積中心位置が法尻側にずれ、断面形状は法尻側に厚く法尻側に薄い形となる。堆積位置のずれは、勾配が大きいくほど大きくなり、捨石・底面に到達してから、斜面に沿って移動したものと思われる。

d) 主要な結果

①底開バージから投入された捨石が落下ならびに静止するまでの挙動は、捨石が海底面に到達するまでの沈降過程と、捨石が海底面に落下し静止するまでの堆積過程

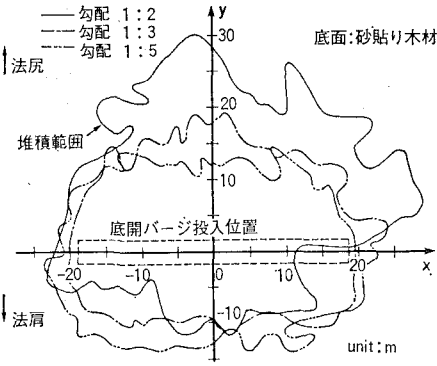


図-7 海底面傾斜が捨石出来型に与える影響

にわけて考えられる。②潮流作用下において沈降する捨石は、平均的には潮流速度と沈降速度との和で運動を近似できる。③斜面上に堆積する捨石は堆積位置が法尻側にずれ堆積範囲が広がる。

3. 解析モデル

3.1 解析仮定

水理模型実験より得られた知見をもとに、解析モデルとして図-8に示すものを考えた。このモデルは捨石の沈降ならびに堆積過程が移流・拡散問題であると考え、さらにホッパーを長手方向に等分割し、堆積形状が各分割点からの点投入の和として表されると仮定し解析を行った。

3.2 解析方法

解析は図-8に示すように、はじめに、沈降・堆積過程の各々の移流量を、捨石群中心位置の変位計算を行うことにより評価する。これにより、捨石群代表点の海底面の落下位置ならびに静止位置が求まり、次に、静止位置より、沈降・堆積過程両者の捨石の拡散の計算を行うものである。

a) 沈降過程での移流

底開バースからの全投入量を Q とすると、図-8に示

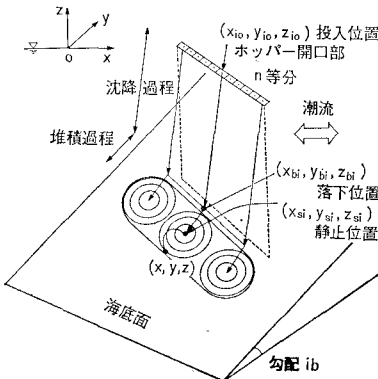


図-8 解析モデル

した分割点からの投入量は次式で示される。

$$q_i = Q/n \quad (i=1 \sim n) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 q_i は i 番目の分割点から投入される捨石量である。分割された捨石群の中心位置を代表点として沈降過程の移流（潮流影響）に伴う計算を行う。 i 番目の分割点から投入された捨石群中心位置の、 j 番目時間ステップの位置 $(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$ を次式で示す。

$$(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j}) = (x_{i,j-1}, y_{i,j-1}, z_{i,j-1}) + (u(x_{i,j-1}, y_{i,j-1}), v(x_{i,j-1}, y_{i,j-1}), w_0) \Delta t \quad \dots\dots\dots (2)$$

代表点の初期位置は次式で示す。

$$(x_{i0}, y_{i0}, z_{i0}) = (x_{i0}, y_{i0}, 0.0) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 u, v は水平方向の流速で各々 x 軸、 y 軸方向流速成分、 w_0 は捨石の沈降速度である。 Δt は時間間隔である。式 (3) を初期値とし、式 (2) の時間差分式を用い次式で示される条件（捨石の着底を示す）を満たすまで計算を行う。

$$z_{i,j} \leq h_b(x_{i,j}, y_{i,j}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 h_b は海底面の水深である。また、式 (4) の条件を満たす時の代表点の位置（落下位置）ならびに沈降時間を $(x_{bi}, y_{bi}, z_{bi} = h_b(x_{bi}, y_{bi}))$, T_i とする。

b) 堆積過程での移流

堆積過程の移流は、海底面に着底した捨石が斜面勾配の影響により転がった後に静止する位置 (x_{si}, y_{si}, z_{si}) が、単純に斜面勾配に比例するとし、次式で示すものとする。

$$\begin{aligned} x_{si} &= x_{bi} + \Delta x_i = x_{bi} + a_1 i_{bi} \frac{-\partial h_b / \partial x}{i_{bi}} \\ y_{si} &= y_{bi} + \Delta y_i = y_{bi} + a_1 i_{bi} \frac{-\partial h_b / \partial y}{i_{bi}} \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

$$z_{si} = h_b(x_{si}, y_{si})$$

ここに、 a_1 は比例係数である。また、 i_{bi} は捨石が海底面に着底した位置における勾配で次式で示す。

$$i_{bi} = \sqrt{\left(\frac{\partial h_b}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial h_b}{\partial y}\right)^2} \Big|_{x=x_{bi}, y=y_{bi}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

c) 沈降ならびに堆積過程での拡散

ここまで求められた捨石群代表点の海底面における静止位置に対し、一樣流作用下における点源の拡散方程式の基本解を適用し、沈降ならびに堆積過程における拡散影響を考慮する。また、拡散影響にともなう分割点間の足し合わせは単純和とし、その結果を次式に示す。

$$\begin{aligned} q_b(x, y) &= \sum_{i=1}^n q_i \frac{1}{4\pi(K_1 T_i + R_1)} \\ &\times \exp\left\{-\frac{(x-x_{si})^2 + (y-y_{si})^2}{4(K_1 T_i + R_1)}\right\} \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

ここに、 K_1 は沈降時の拡散係数、 T_i は沈降時間である。また、 R_1 は堆積するまでの間の拡散を表すもので、海底勾配に比例するとし次式で評価を行った。

$$R_1 = a_2 i_{bi} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに a_2 は比例定数である。

なお、捨石が構造物に衝突する場合は、構造壁で完全反射させ予測を行うものとした。また、捨石の拡散影響の計算に当たっては出来型の視野部分で捨石が1個以下の部分は堆積なしの状態とし計算を実施した。

3.3 流速計算

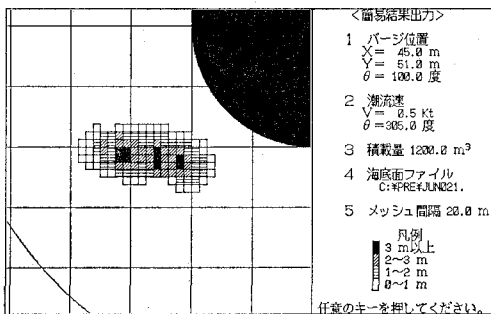
本システムでは、潮流作用下における円筒構造物周辺の流速変化を考慮するために、潮流の流速計算を行った。計算には、田村(1985)が示した平面2次元の離散渦点法を使用し、計算が定常に達した後に、5周期程度の渦を発生させ平均流速成分を求め、それを式(2)における平面流速成分として使用した。

4. システム概要

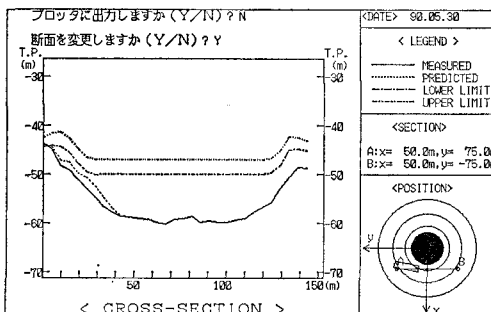
今回開発した捨石出来型予測システムは NEC 製パソコン PC9801 単独で用いることができるもので、現場に

表—2 システム入力条件

項 目	備 考
現地海底面標高	2.5m メッシュ 101×101個
バージ位置	平面位置のみ
バージ諸元	全長・全幅・ホッパー位置・長さ
捨石諸元	投入量
自然条件	潮流速・流向



a) 等高線図表示



b) 断面図表示

図—9 マイコンディスプレイ表示例

比較的簡単にセットできるものである。データの入力は対話形式で行え、予測結果は画面に表示される。表—2に入力条件を示す。マイコンの予測結果の等高線図ならびに縦断面図のディスプレイ表示例を図—9に示す。

5. 実施例

明石海峡大橋の神戸側主塔基礎(直径 80 m 鋼製ケーソン)は強潮流(最大約 7 kt)・大水深下(約 46 m)の砂礫地盤上に設置されるために、主塔基礎の施工時および完成後の洗掘の発生による基礎への影響が懸念された。そこで、基礎設置前にすりばち状(約 60 m)に事前掘削を施し、そこに基礎を設置し、その周辺に洗掘防止工として広範囲に渡り捨石の敷設が行われた。

上記工事の捨石敷設に、出来型予測システムを適用したので、ここでは、その実施の一例を以下に示す。

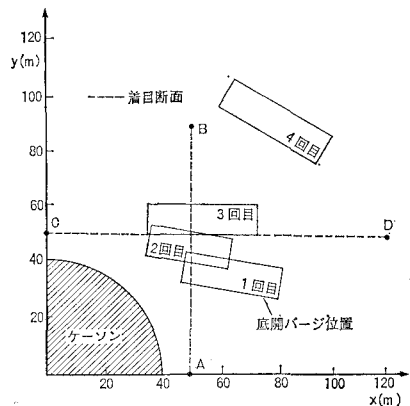
4回の底開バージの捨石投入に対し予測を行った。投入条件を表—3に、また解析モデルに使用した係数を表—4に、投入地点と予測と実績の比較断面位置を図—10に示す。なお、表—4に示す係数は水理模型実験結果

表—3 底開バージ投入条件

回数	投入量	潮流速	流向	備 考
1	1500m³	0.5m/s	東流	投入位置なら
2	1200m³	0.3m/s	東流	びにホッパー
3	1500m³	0.6m/s	西流	形状は図—10
4	1500m³	0.3m/s	東流	参照とする。

表—4 解析パラメータ

捨石沈降速度	W_0	-4.0m/s
堆積過程の移流に関する係数	a_1	20.0m
沈降過程の拡散係数	K_1	1.0m²/s
沈降時間	T_1	15.0sec
堆積過程の拡散に関する係数	a_2	2.0m²



図—10 投入地点と比較断面位置

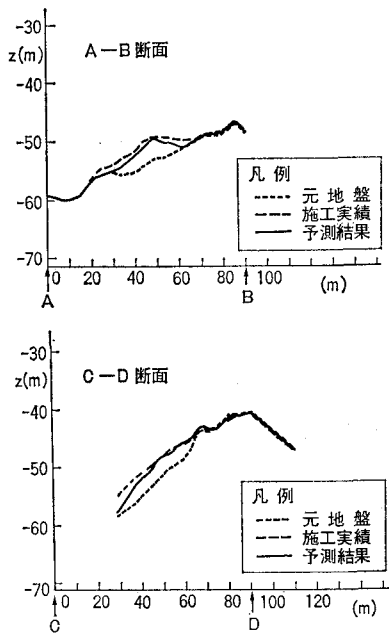


図-11 捨石出来型予測結果と実績

ならびに施工実績結果より決定した。

図-11に4回投入した後の予測結果ならびに実施結果の海底面形状の縦断面図を示す。なお、現地海底面形状の計測には、高精度超音波式測深装置を使用した。

図より、両断面とも、施工実績の方が予測結果より高めとなる部分があるが、堆積位置・形状を全体的に良く表現できることがわかる。

なお、本システムを実工事で利用することにより情報

化施工が行え、工程短縮ならびに施工精度の向上に有効であることが確認された。

6. おわりに

水理模型実験結果をもとに作成した本予測システムにより、比較的粒径が大きい捨石の出来型をある程度予測できることが、施工実績により確かめられた。しかし、より広範な条件に対してはこの限りではない。今後より精度良く、また捨石以外の土砂等の出来型予測を実現するためには、以下の項目が今後の課題として残されることがわかった。① 海底面に到達した捨石や土砂等の堆積過程ならびに土砂の運動により生ずる水の運動に対する影響の明確化。② 実施工のデータを収集し、合理的なパラメータ決定方法の確立。

参考文献

- 梅谷登志文・木原純孝・根本孝志・篠原丈人 (1988): 捨石マウンド築造工事の効率化に関する研究——捨石投入シミュレーションプログラム (天端面用) および施工管理図面作成プログラムの開発——, 港湾技研資料, No. 630, 1988, pp. 1~24.
- 奥出 律・山本弘幸・松本 茂 (1982): 底開式バージによる捨石マウンドの造成に関する実験, 港湾技術研究所報告, 第21回, 第4号, pp. 131~171.
- 小田一紀・沢田充弘・樋口俊光・岩田 潔 (1987): 底開式バージから投入された捨石粒子群の堆積形状に関する研究, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 281~285.
- 田村幸雄 (1985): パソコンによる円柱回りの流れの解析——渦点法——, 日本風工学会誌, 第26号, pp. 49~59.
- 武藤硯夫・吉井聰介 (1984): 底開バージから投入された土砂の堆積形状と底面衝撃圧の予測, 第28回水理講演会論文集, pp. 653~658.