

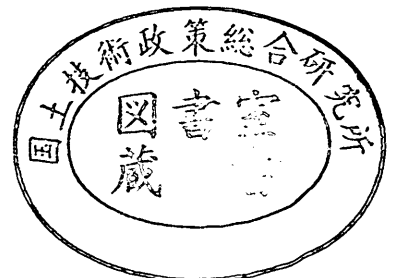
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 21 NO. 4 DEC. 1982

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第 21 卷 第 4 号 (Vol. 21, No. 4), 1982 年 12 月 (Dec. 1982)

目 次 (CONTENTS)

1. 恒流に及ぼす風と淡水流入量の影響
——泉南沖データ (1978~1981) による検討——
……………村上和男・森川雅行・坂口達也…………… 3
(Wind Effect and Water Discharge Effect on Constant Flow
—Discussion Using Observation Data at Off-Sennan (1978~1981)—
……………Kazuo MURAKAMI, Masayuki MORIKAWA and Tatsuya SAKAGUCHI)
2. 鋼矢板壁の透水実験……………莊司喜博・糸田政治・富田幸晴…………… 41
(Experiments on Seepage through Interlocking Joints of Sheet Pile
……………Yoshihiro SHOJI, Masaharu KUMEDA and Yukiharu TOMITA)
3. 深層混合処理工法による改良地盤の地震時挙動
……………稲富隆昌・風間基樹・今村俊博…………… 83
(Observation and Analysis of Seismic Response of Improved Ground by Deep Mixing
Method ……Takamasa INATOMI, Motoki KAZAMA and Toshihiro IMAMURA)
4. 底開式バージによる捨石マウンドの造成に関する実験
……………奥出 律・山谷弘幸・松本 茂…………… 131
(Experimental Study on Construction of Rubble Mound by Split Hopper Barge
……………Tadasu OKUDE, Hiroyuki YAMAYA and Shigeru MATSUMOTO)

4. 底開式バージによる捨石マウンドの造成に関する実験

奥 出 律*・山谷 弘 幸**・松 本 茂**

要 旨

防波堤や護岸の捨石基礎を築造するに際し、底開式バージから捨石を投入した場合、バージからの投石条件と投石水深が海底に堆積する捨石マウンドの形状に及ぼす影響を実験的に研究した。

投石船としてスプリット式バージを選定し、100 m³ 積 1/20 模型船と、1,000 m³ 積 1/25 模型船の2隻を対象に投石実験を行った。投石船に関する実験要素としては、ホッパ断面形状と壁面摩擦係数の問題を取りあげ、投石条件に関する実験要素としては、ホッパ開口速度、開口幅、投石時間および投石量を考えた。施工条件に関しては投石水深を実験要素とし、静水中での投石実験を主体に投石時における波の影響についても考察した。

ホッパ開口速度と投石時間の間には投石量を変数とする双曲線的相関が認められた。ホッパ断面形状や壁面摩擦係数が変化しても、投石量が同じであれば、開口速度と投石時間の関係はほぼ同じ相関式で近似された。

投石条件を表すパラメータとして、投石時間、ホッパ開口幅およびホッパ単位長当たり投石量を変数とする投石変数 ϕ_D を定義した。一方、捨石マウンドの形状に関する7つの無次元捨石マウンド形状係数を定義し、 ϕ_D との相関を考察した。その結果、本実験範囲内では、両者の間に直線的相関が認められたが、そこには投石水深 H_D の影響がみられた。そこで、捨石マウンド形状係数を ϕ_D と H_D を変数とする実験式で表わし、これを現地投石実験データと比較し相似性を考察した。

投石時における波の影響は、バージを係留した状態では、特に顕著なものでなかった。

* 桜材部 特殊作業船開発室長
** 桜材部 特殊作業船開発室

4. Experimental Study on Construction of Rubble Mound by Split Hopper Barge

Tadasu OKUDE*

Hiroyuki YAMAYA**

Shigeru MATSUMOTO**

Synopsis

In case of constructing a rubble mound for deep water breakwater and seawall, a large amount of rubble will be discharged by hopper barges. In this paper an experimental study has been performed to investigate the basic configuration of rubble mound at the sea bed, which may be greatly influenced by a discharging method of rubble and the water depth at the site.

Two types of split hopper barge with different hopper volume were employed in the model tests, where the experimental factors examined were geometry of hopper cross section, coefficient of friction at the hopper wall, hopper splitting rate, split width of hopper, stone discharge time, discharged volume of stone, and water depth. Most of the tests were carried out in quiescent water, but some in waving water.

A hyperbolic correlation was recognized between hopper splitting rate and stone discharge time. The experimental data for a different geometry of hopper cross section and frictional coefficient at the hopper wall gathered on a similar curve as long as the discharged volume of stone was equal.

Authors introduced a stone discharge parameter of split hopper barge, ϕ_D , which is a function of such factors as stone discharge time, split width of hopper and discharged volume of stone per unit hopper length, and also non-dimensional rubble mound shape factors to investigate the relationship between them.

Within the present study, a linear correlation was recognized between them, but the water depth (H_D) at the discharge site had a great influence on them. Then, the empirical formulae with ϕ_D and H_D as parameters were proposed for expressing the basic configuration of rubble mound.

The experimental results were compared with those of field tests and authors discussed the similarity of the model tests.

No distinguishable difference was observed in discharge of stone in waving water as long as the hopper barge was moored.

* Chief of the Working Craft Development Laboratory, Machinery Division

** Member of the Working Craft Development Laboratory, Machinery Division

目 次

要 旨	131
1. ま え が き	135
2. 捨石の形状と水中落下に伴う散乱	135
3. 実 験 概 要	139
3.1 相似則の考え方	139
3.2 実験装置および実験方法	140
4. 100 m ³ 積模型バージによる投石実験	143
4.1 ホッパ開口速度と投石時間	143
4.2 マウンド形状の一般的傾向	144
4.3 投石条件がマウンド形状に及ぼす影響	147
4.4 ホッパ壁面摩擦係数およびポッパ単位長当たり投石量がマウンド形状に及ぼす影響	151
4.5 投石時における波の影響	153
5. 1,000 m ³ 積模型バージによる投石実験	155
5.1 ホッパ開口速度と投石時間およびマウンド形状の一般的傾向	155
5.2 投石条件がマウンド形状に及ぼす影響	157
5.3 ホッパ断面形状がマウンド形状に及ぼす影響	159
6. 投石条件とマウンド形状における相似性の考察	159
7. 結 論	162
参 考 文 献	162
記号一覧表	163
付 録	163

1. ま え が き

防波堤および護岸の建設（および計画）における最近の技術動向のひとつとして、大水深化、大規模化がある。捨石基礎の上にケーソンを設置する混成防波堤では、建設水深が深くなると捨石基礎が膨大となり、防波堤工事に占める捨石基礎築造工の比重が増す。それゆえ、施工面では捨石の投入段階から能率よく合理的に施工し、計画断面に近い形状に基礎マウンドを造成することが要求される。

従来、捨石マウンドの築造工事は原石山から切り出した捨石材をダンプトラックで岸壁まで運び、ガット船等で積み出して海上で投下するという方法がとられており、これまで大きな技術的変革はみられなかった。

しかしながら、最近になって防波堤の施工水深がしだいに深くなり、取扱う捨石量が多くなってくると、ガット船に代って大型の底開式捨石投入船（以下、底開式バージという）が使われ、大量の捨石を短時間に直投入する工法がとられるようになった。

この方法は施工能率の面では極めて効率的ではあるが、投石条件、投石量、投石位置などを細かく制御することが難しく、また海面近くから一瞬に投下するため捨石の散乱が大きくなり、連続投入した場合にはマウンド継目に不陸を生ずるなど、施工管理の面で検討すべき課題が残されている。特に、大水深防波堤ではマウンド天端面の水深が深くなると予測されるので、その捨石ならし工法との関連も重要となる。そこでできるだけ不陸の少ない、設計断面に近い捨石マウンドの造成工法の開発が必要となる。

底開式バージによる捨石の投入とマウンドの形状に関しては、模型実験¹⁻⁶⁾や実船による投石実験⁷⁻¹⁰⁾を通してしだいにその概要が明らかにされつつある。しかし、各調査はそれぞれの現地条件に合わせて独自に行われているため実験条件等に相異があり、まだ一般的取扱いができるまでには至っていない。また、連続して捨石を投入し、マウンドを造成していくときの最適投入工法についての研究はまだなされていない。

そこで筆者らは、捨石投入実験における相似性の研究に重点を置き、捨石の最適投入工法および造成される捨石マウンドの出来形予測に関する研究を進めた。

本報告では、このうちの最も基本的な現象であるバージからの投石条件と投石水深が海底に堆積する捨石マウ

ンドの形状に及ぼす影響について考察した。

2. 捨石の形状と水中落下に伴う散乱

球状粒子が静水中を自由落下する場合、粒子は散乱することなくほぼ真下へ落下する。しかし、非幾何学的な形状の粒子の場合には、反転運動をくり返しながら不安定な軌跡を描いて落下する。非球形粒子の自由落下に対する流体力学的な研究は、粒子形状をいかに表すかにある。この粒子形状係数として、Wadell¹¹⁾は球形度、Pettyjohn¹²⁾は沈降速度比、Alger¹³⁾はshape factorを提案し、それをパラメータとして粒子の流体抵抗係数とReynolds数の関係を研究している。これらの研究は比較的小粒径の物体について研究されており、捨石のような大粒径の粒子についての研究は、高橋¹⁴⁾らの捨石の水中落下速度に関する実測データのほかほとんどみあたらない。

底開式バージから投入した捨石群の水中落下運動は、海底に堆積するマウンドの形状に直接関係するので、捨石粒子の水中散乱特性を知る必要がある。

砂および礫の水中落下と散乱に関する箭内¹⁵⁻¹⁶⁾の研究では、静水中を落下して生ずる目標点まわりの分布確率は、おおよそ平均値を目標点とし、標準偏差は水深と粒径の積の平方根に比例する二項分布に従うことを見出し、実験で確かめている。また、静水中を集団落下する場合の散乱分布は、複合ポアソン分布の重ね合わせにならしている。

箭内が実験に用いた試料は最大粒径が10mmの川砂利であったが、本研究では30~70mmの砕石を対象としたので、粒径および形状において相異がある。そこで、捨石の幾何学的形状がその水中散乱に対しどの程度の影響を及ぼすかを確認しておく必要があると考え、供試試料の形状係数と散乱分布について実験を行った。

(1) 捨石の形状係数

本実験で対象とした捨石の原型値は、外海に面した防波堤の基礎捨石とし200~500kgf/個を想定した。後述のように、実験は模型比1/20と1/25の2種類について行ったので、供試試料としては道路用砕石を調整し、図-2.1の重量分布のものを使用した。

粒状体粒子の形の不規則性を定量的に表すには、その粒子の用途によっていくつかの方法が提案されている。ここでは、基礎捨石の幾何学的形状を調べる方法としてLees¹⁷⁾の形状係数を用いた。すなわち、捨石が水中を

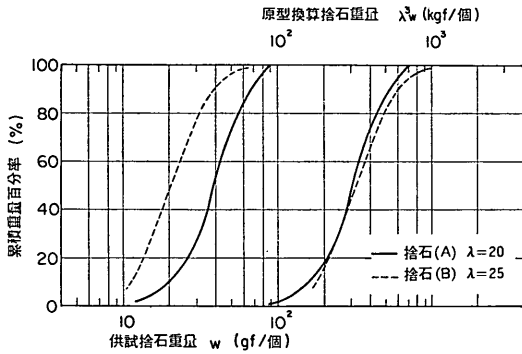


図-2.1 供試捨石の重量分布

落下し海底に着底したときの姿勢を基に、最大長さを a 、それに直角に測った最大長さ(幅)を b 、投影面に垂直に測った最大長さ(厚さ)を c とし、

長短度 (elongation ratio) $q = b/a$
 偏平度 (flatness ratio) $p = c/b$
 形状係数 (shape factor) $F = p/q = ca/b^2$

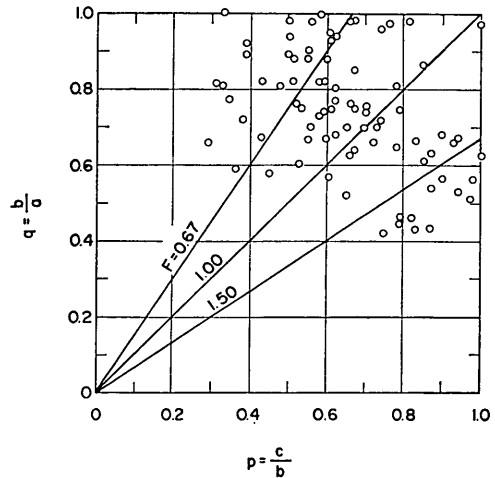


図-2.3 供試捨石の形状の分類

を求めた。図-2.2 は供試捨石の重量に対し p, q, F を図示したものであり、図-2.3 は p, q を両軸として図示したものである。これより、供試捨石は一部に板状あるいは棒状の粒子を含むものの、全体として碗状 (equidimensional) のものであり、捨石試料としては適当な形状といえる。

(2) 捨石の沈降速度

捨石が水中を落下するときの系には、重力、浮力および流体抵抗力が作用している。粒子周辺の流れ状態は粒子の形状によって決まり、基本的には、はく離、渦、循環の3つの現象が生じている。一般に、捨石粒子は揺動、回転、横すべりなどの合成運動を行いながら落下し、落下運動中の粒子の投影面積は一定しない。このため落下速度も終末速度を中心に変動がみられる¹⁴⁾。

非球形粒子の沈降問題では沈降速度あるいは粒子表面積などの導入が必要となるが、不規則な形状の粒子の表面積を求めることは難しいので、ここでは、粒子の沈降速度に着目した。図-2.4 は供試捨石(単粒子)の沈降速度を表したものである。捨石重量が大きいのほど沈降速度が大きくなる傾向が認められる。

捨石沈降速度の実測値¹⁴⁾によると、重量 200 kgf/個の捨石の場合 2.2~3.5m/s となっている。これを模型比 1/20 として模型値に換算すると、重量は約 25 gf/個に、また沈降速度は Froude の相似則により換算して 49~78 cm/s となる。一方、図-2.4 では重量 25 gf/個の捨石単粒子の沈降速度は 50~80 cm/s の範囲であり、先に求めた値とよく一致する。

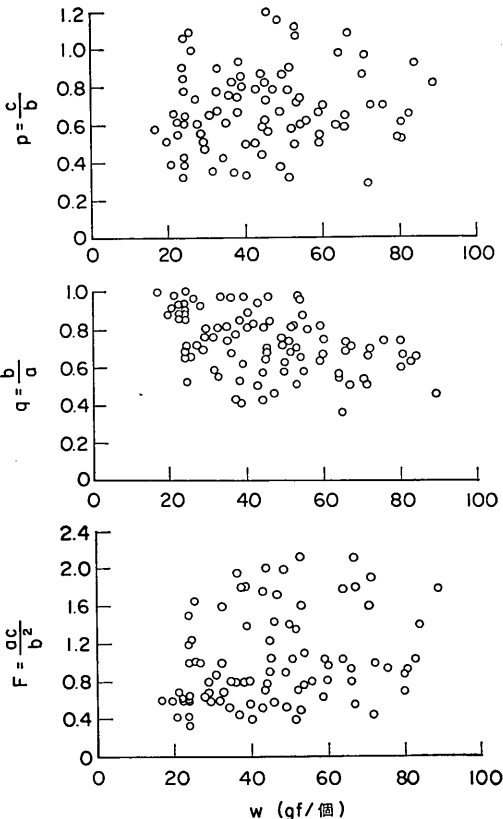


図-2.2 供試捨石の重量と形状係数

底開式バージによる捨石マウンドの造成に関する実験

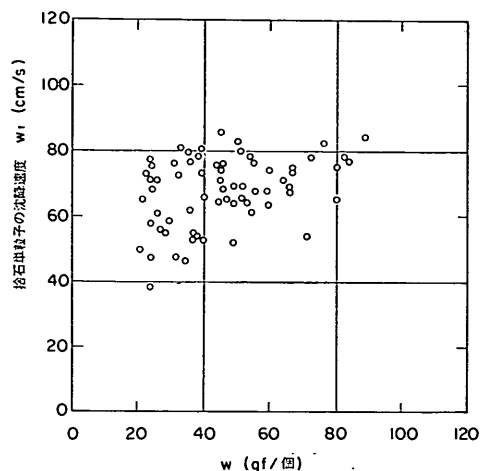


図-2.4 捨石単粒子の沈降速度

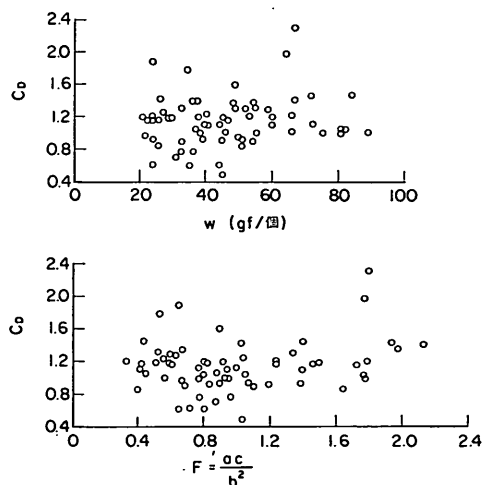


図-2.5 供試捨石の抵抗係数

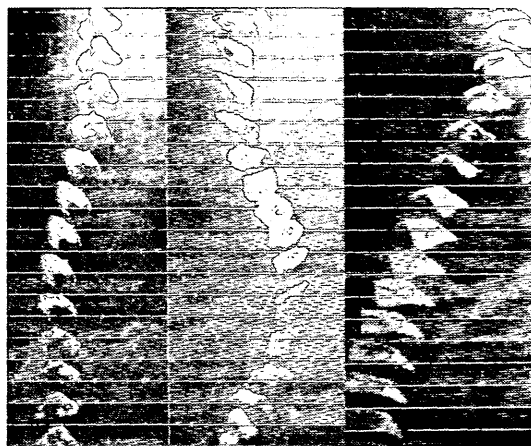
次に、捨石単粒子が静水中を落下するときの抵抗係数を捨石重量および Lees の shape factor F に対し図示すると 図-2.5 となった。実際の捨石を海中に投下したときの抵抗係数は $C_D=1\sim 3^{14)}$ であるので、ほぼその範囲に入っている。

捨石が群粒として落下するときの速度および抵抗係数は単粒子の場合とは異なった値となる。小川ら¹³⁾の実験によれば、粒径 $0.1\sim 2.0\text{mm}$ の砂を 1 粒沈降させたとき、小さじ一杯の砂塊を一度に落したときの沈降速度は、定性的には、砂塊のほうが速くなり、速くなる割合は微粒ほど大きい。これは、微粒ほどかたままま沈降するからと説明されているが、捨石のような粗大粒子

の場合でも、群粒としての性質が顕著になればこれと似た現象が生ずる可能性はある。この問題についてはここではこれ以上触れないことにする。

(3) 捨石の水中落下に伴う散乱

捨石が水中を落下する過程で生ずる散乱は、粒子の形状、粒子間の衝突、伴流、バージからの投入条件、波浪、潮流などの諸要因に起因し、散乱の度合はどの要因が卓越するか、またどの運動様式(揺動、回転、横すべりなど)が現れるかによって異なる。



(i) (ii) (iii)

写真-1 捨石単粒子の水中自由落下時の運動様式例

写真-1 は捨石の水中落下状況の 1 例を示している。(i) は比較的直下に落下したタイプで、落下速度の変動も小さく、ほぼ一定速度で沈降している。均整のとれた形状の粒子に多くみられる。(ii) は周期的に変態しながら落下するタイプで、落下速度の変動率は大きい、散乱の度合はさほど大きくならない。扁平な形状の粒子によくみられる。(iii) ははじめから斜方向に落下していくようなタイプで、落下速度はほぼ一定であるが、散乱の度合は大きい。このタイプは今回の供試捨石の中には比較的少ない。このような捨石の水中落下様式と形状係数を結びつけて考えることは再現性が必ずしもよくないため現在まだ解明できていない。

供試捨石の散乱分布を調べるために、無作為に試料を抽出し、重量別に分類したのち、1 個ずつ水面直下から静かに落下させ、その着底位置を目標点(捨石投下位置の真下に相当する海底位置)からの水平距離で測定した。実験は 3.2 に述べる投石実験水槽において、水深を 0.75m 、 1.0m 、 1.5m の 3 種類に変えて行った。なお、

実験に際して模擬海底には細砂を約 5 cm の厚さに均一に敷いたので、着底後捨石の転動はほとんど見られなかった。

捨石の着底位置は目標点を中心にその周辺に分布した。いま円周方向の着底確率は一定と仮定し、半径方向の分布を目標点からの距離と着底個数の関係として捨石重量および水深別に図示すると 図-2.6 となった。これによると、捨石の散乱分布は目標点を中心に半径 5~10 cm の範囲が最も高く、外周に行くに従って着底

個数が減少していく傾向が捨石重量あるいは落下水深に関係なく認められる。これは既にみたように、捨石の形状係数および抵抗係数から判断して、供試捨石はほぼ同系統の幾何学的形状を有していると考えられるので、水中落下に伴う散乱程度も捨石重量に関係なく同じ傾向を示したものと考えられる。

落下水深と散乱距離に着目すると、予想されるように、水深が深くなるにともない外周に散乱する捨石個数が増えており、特に最大散乱距離においてその傾向が顕

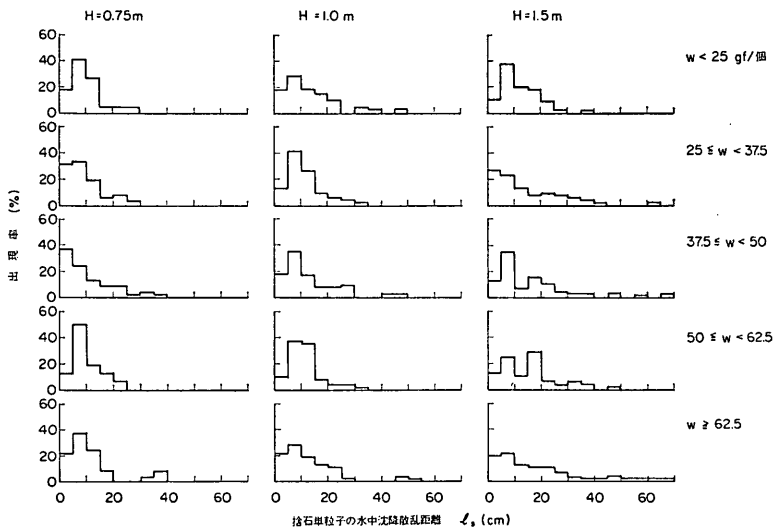


図-2.6 静水中における捨石単粒子の散乱分布（着底個数ベース）

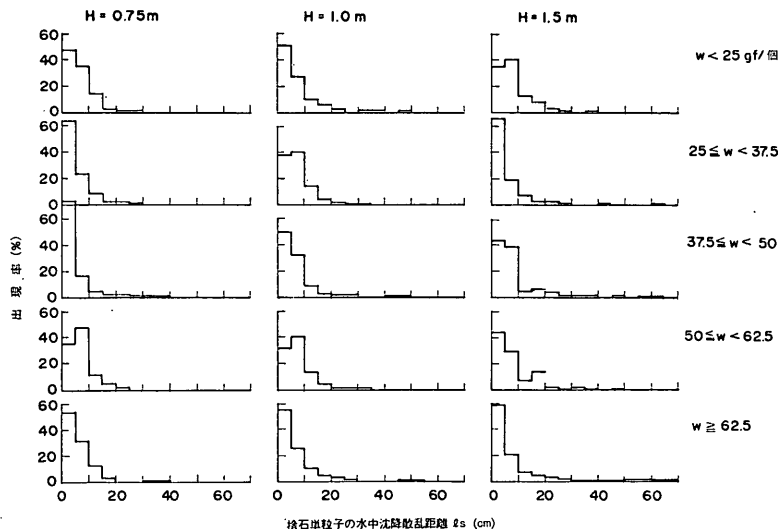


図-2.7 静水中における捨石単粒子の散乱分布（単位面積当たり着底個数ベース）

著に現れている。

図-2.6 では捨石の着底個数のみを問題としたが、半径方向を等間隔に分割する方法では外周に行くに従い目標点を中心とする同心円上の環状（ドーナツ状）部の面積が大きくなっていくので、ある一方向の着底確率を求めるには補正が必要となる。その方法として半径上の各位置における単位面積当たりの着底個数を考えてみた。これは捨石の着底密度に相当する値となるが、図-2.7はその結果を示したもので、捨石の着底分布は中心部において最も大きくなり、外周に行くに従い減少する傾向が顕著に現れた。

バージからの単位時間当たり投石量が少ない場合とか、投石水深が大きい場合には、捨石は単粒子に近い沈降挙動を示すと思われるので、このような単粒子の着底分布に似た形状に捨石は堆積すると考えられる。しかし、捨石が群粒として落下する場合には、あるいは同一地点へ連続して投石した場合などには、海底面に沿って生じる流れのために捨石粒子が転動したり、また既設マウンドの斜面に落下した捨石がその斜面を転がり落ちたりするので、捨石単粒子の着底分布形状が直ちに捨石マウンドの断面形状とはならない（図-4.9 参照）。

3. 実験概要

3.1 相似則の考え方

模型実験が実際の現象と相似であるためには、幾何学的相似性、流れ状態の相似性、力学的相似性が成り立つ必要があるが、これらすべてを満足させることは現実の問題として難しい。そこで現象を最も支配する要素に着目して、その相似性を考えていく方法がとられる。

本実験では相似性を次のように考えた。

幾何学的相似性は捨石粒子とバージの形状について成り立つことが必要である。前者については、厳密には、形状のみならず表面粗度におけるまで相似でなければならないが、実際問題としてこれは非常に難しい。そこで本実験では、捨石の重量分布と形状係数を原型に近似させることで処理した。後者については、底開式バージの実船を参考に模型縮尺した。

粒子周辺における流れ状態の相似性に関しては、粒子の形状が幾何学的に相似でない以上、流線の幾何学的相似性は成り立たない。しかし本実験条件の場合、粒子の沈降時の Reynolds 数は 10^4 オーダとなり、Newton の抵抗則を受ける領域にあるため、流れ状態の相似性が現象を支配する程度は小さいと考えた。

力学的相似性については、流体力学的な力と現象に関与する物理的性質が相似でなければならない。武藤¹⁹⁾らは底開式（底扉式）バージによる土砂投下の研究において、現象の相似性として、バージの浮上現象、土砂の水中落下現象、バージ扉の動き、海底での土砂の動き、およびホッパ内の土砂流動と土砂流出現象を考えたが、底開式（スプリット式）バージによる捨石投下においてもこれと同様の現象が生じており、相似則についてもこれと類似の考え方がとれる。

a) 捨石投入に伴うバージ吃水の変化

船体が縦方向に真ふたつに割れるスプリット式バージでは、ホッパ開口幅が時間とともに増加し、ホッパ壁面の傾斜角度も大きくなる。その結果、単位時間当たりの捨石流出量に変化する。捨石の流出にともなうバージの吃水の変化は、船胴の回転により浸水部の断面形状が変化するので直線的に変化するか否かまだ確められていない。

一般に、バージの浮上現象に働く主要な力は重力と慣性力であるから、Froude の相似則が成り立てば模型と実船の現象は相似と考えてよい。しかしながら、バージの浮上速度に関する実船データがないこと、吃水の変化量は投石水深に比べ小さいこと、また浮上速度の変化は投石時間の変化に直接関係することなどの理由から、ここではこの要素は投石時間に含めて考えられるとした。

b) 捨石の水中落下運動

この現象に作用する主要な力は、重力、慣性力、水抵抗力の3つである。前述のように、粒子の形状係数と流体抵抗係数は模型と原型とでほぼ近似しているので、この現象には Froude の相似則が成り立つと考えることができる。

c) ホッパ開口速度と開口幅

底開式バージでは、捨石を積載したとき左右舷の船体は油圧力で支持される。捨石投下の際にはこの油圧力を開放し、捨石自身の重量を利用して自然に開口させる方式がとられている。それゆえ、油圧装置の設計によって開口速度が一義的に決まってしまう、速度制御することは一般にできない。

ホッパを開口する場合の系に作用する主要な力は、重力、油圧力、船体に作用する水抵抗力である。模型実験ではこれらの要素を考察するために、船体を支持する油圧シリンダーに油圧を作用させホッパ開口速度を制御した。これによって、開口速度と投石時間の関係、それがマウンド形状に及ぼす影響などを研究した。

d) 海底での捨石の運動

捨石と海底との反撥係数、摩擦係数および地盤のかたさなどに関する相似性で、捨石の着底後の転動や埋没に関係する。海底地盤条件は必ずしも一様でなくその取扱方も複雑なため、ここでは海底は平坦な砂地盤であると想定し、模型実験の結果を現地試験データと比較検討することによってその妥当性を確認する方法をとった。

e) ホッパ内の捨石の流動と捨石流出現象

捨石には粘着力はなく、またホッパ壁面傾斜も大きいので、海底での捨石堆積形状に大きく関与するのはホッパ内での捨石粒子の流動様式そのものではなく、むしろマクロ的な捨石流出条件にあると思われる。そこで、ホ

ッパ開口速度、開口幅、壁面摩擦係数、ホッパ断面形状などを変化させ、投石時間を調節することによってこの問題を考察した。

3.2 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

a) 模型底開式バージの仕様

船型にはスプリット式バージを選定し、ホッパ積載量が 100m^3 積と $1,000\text{m}^3$ 積の2隻を対象とした。模型比は前者が $1/20$ 、後者は $1/25$ である。図-3.1 と 図-3.2 に各模型バージの一般配置図を、また 表-3.1 には実船と模型船の主要目を示した。

ホッパ断面形状は、 100m^3 積 $1/20$ 模型バージ（以下

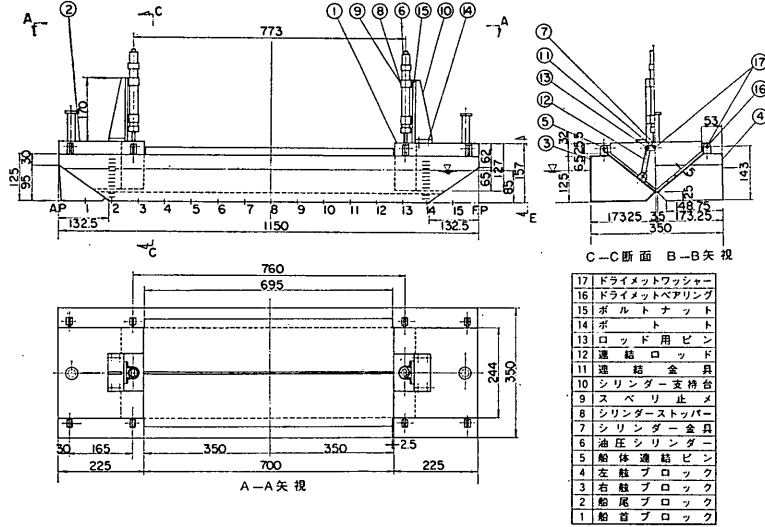


図-3.1 100m^3 積 $1/20$ 模型バージの一般配置図

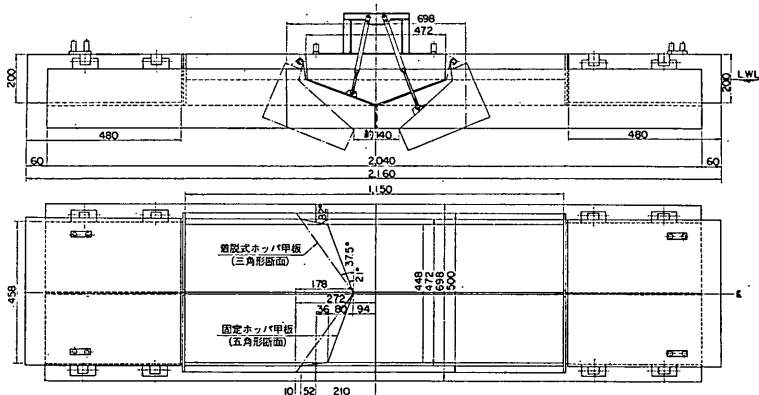


図-3.2 $1,000\text{m}^3$ 積 $1/25$ 模型バージの一般配置図

底開式バージによる捨石マウンドの造成に関する実験

表-3.1 実船と模型船の主要目

要目	船型	100m ³ 積		1000m ³ 積		摘要
		実船	模型船	実船	模型船	
全長	L (m)	23.00	1.150	54.00	2.160	
全幅	B (m)	7.00	0.350	14.00	0.698	
深さ	D (m)	2.50	0.125	4.70	0.210	
満載吃水	d_f (m)	1.90	0.103*	3.80	0.136*	*実測値
軽荷吃水	d_l (m)		0.040*		0.057*	
ホッパ長さ	l_H (m)	12.88	0.695	28.90	1.150	
ホッパ幅	b_H (m)	5.56	0.280	11.20	0.472	
ホッパ容積	V_H (m ³)	100	0.0125	1000	0.064	
ホッパ断面形状		三角形	三角形	五角形	五角形**	**三角形断面も可
模型比		—	1/20	—	1/25	

(注) 模型船は製作時の都合上一部寸法を変更している。

$V_H=100$ バージという)では三角形とした。1,000m³積 1/25 模型バージ (以下 $V_H=1000$ バージという)においては五角形としたが、その甲板の上にさらに甲板を装着し三角形断面とした場合についても実験した。

ホッパの開閉は油圧シリンダにより行い、油の圧力と油量を調整して開口速度を制御した。また油圧ユニットにはタイマーを設け、油圧作動時間を調整することによって開口幅を制御した。

模型バージへの捨石の積載量は次の考えによった。

$V_H=100$ バージの場合

$$100 \text{ (m}^3\text{)} \times 1,600 \text{ (kgf/m}^3\text{)} \times (1/20)^3 = 20 \text{ (kgf)}$$

$V_H=1000$ バージの場合

$$1000 \text{ (m}^3\text{)} \times 1,600 \text{ (kgf/m}^3\text{)} \times (1/25)^3 = 100 \text{ (kgf)}$$

ホッパ甲板の角度は開口幅零のとき三角形断面ホッパで約 40°, 五角形断面ホッパで約 20° (ホッパ底側)である。ホッパ壁の傾斜角度は 図-3.3 のようにホッパ開口幅に比例してほぼ直線的に増加する。五角形断面の場合は三角形断面の場合に比べホッパ傾斜角が小さいので、捨石流出時間にも差が生ずる。

ホッパ甲板と捨石との間の静止摩擦係数は、図-3.4 のようにアルミニウム板の場合 (塗装済) $\mu_H=0.75$, ブリキ板の場合 $\mu_H=0.40$ であった。同図には参考として鋼板と捨石との間の静止摩擦係数も示しているが、この場合、表面に錆の有無によって 0.56~0.95 となった。

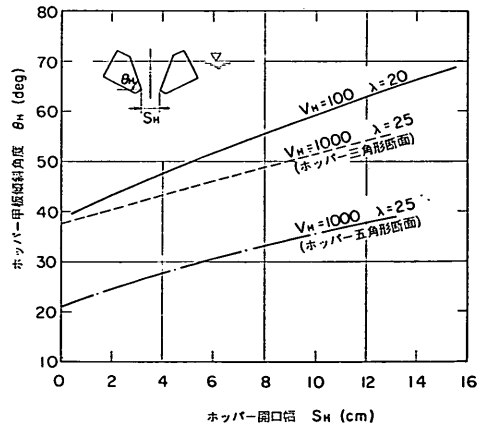


図-3.3 ホッパ開口幅に対するホッパ甲板傾斜角度

b) 模擬海底

長さ 10.0m×幅 6.3m×深さ 2.3m の水槽の中に、縦 3.0m×横 5.0m の鋼製昇降台を作り、その上に細砂を約 5cm の厚さに敷き模擬海底とした。昇降台はウインチで上下する構造となっており、投石水深の設定は昇降台の上下と水槽水位の調整によった。

実験の後半では海底砂の代りに高分子材マットを代用した。これは、捨石が着底後海底面に沿って生じる流れによって転動し、外周へ散乱するのは外周部に着底したものであって、主捨石マウンドの形状 (4.2 参照) に直

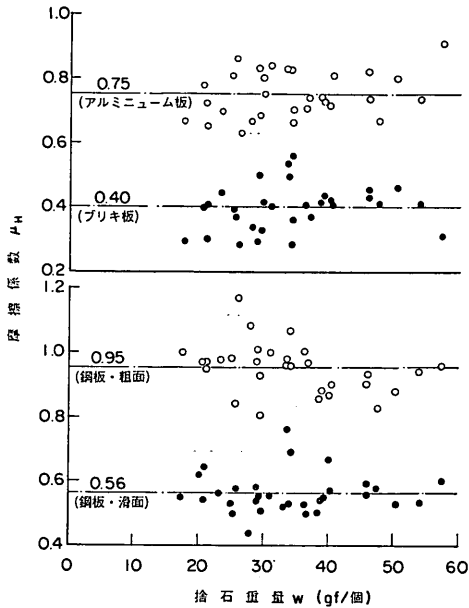


図-3.4 捨石とホップ甲板材との間の静止摩擦係数

接関係しないこと、着底後の転動が捨石マウンドの形状に及ぼす影響よりも、捨石形状の不規則性や投石条件の変化などによる影響のほうが大きいことなどから高分子材マットを代用した。なお、その選定にあたっては捨石の埋没量が細砂の場合と同じ程度になるようにした。

(2) 実験方法

実験水槽は屋外にあるため、模型バージが風圧を受けて流されること、また、ホップ開閉用油圧シリンダーに油圧を供給する油圧チューブの剛性によって模型船が拘束されることなどの理由から、実験は写真-2および写真-3のように4方向から係留索をとり係留した状態で

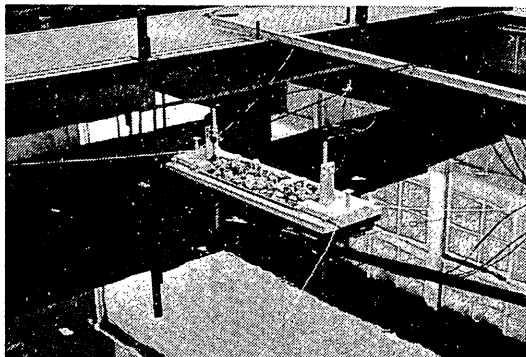


写真-2 100 m³ 積模型船による投石実験の状況

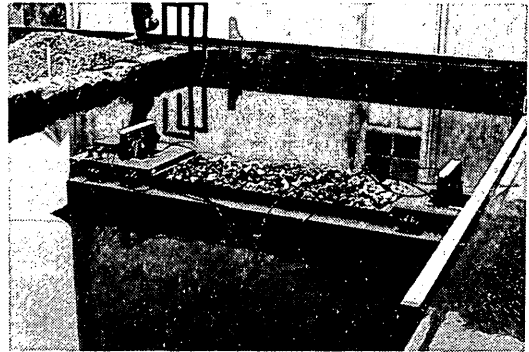


写真-3 1,000 m³ 積模型船による投石実験の状況

行った。この場合、係留索はカタナリ曲線の一部が水面に浸る程度にゆるく張った。

実験は、静水中における投石実験と波を受けたときの投石実験を行った。実験条件は次のとおりである。

a) 投石水深

$V_H=100$ バージでは、原型水深として15~30mを想定し、投石水深を0.75m, 1.0m, 1.5mとした。造波水槽での投石水深は0.6m(底質はコンクリート)としたので、静水中の実験に0.5mと0.6mを追加した。

$V_H=1000$ バージでは、原型水深として20~40mを想定し、投石水深を0.8m, 1.0m, 1.2m, 1.4m, 1.6mおよび1.72mにとった。この場合、特に水深を0.4mと0.6mと浅くとり、捨石マウンド斜面における捨石粒子の転動とか、海底面に沿って生じる水流により生ずる捨石粒子の転動を観察する実験も行った。

b) 投石条件

投石条件とは、ここでは主としてバージ側の投石条件であるホップ開口速度、開口幅、投石時間および投石量をいう。ホップ断面形状および壁面摩擦係数も投石条件の一要因ではあるが、これらは投石時間に含まれる変数とみなすことができる。

投石条件は、ホップ開口速度を制御する方法と、ホップ開口幅を制御する方法の2方法をとった。ホップ開口速度の制御は油圧と流量を調整することにより、またホップ開口幅の制御は油圧作動時間の制御によった。後者の場合、開口幅が狭いと捨石がアーチを起し流出しないか、あるいは小さなアーチを起し流出時間が長くなるなど適正な投石条件とはならなかった。そこで最小開口幅は捨石が連続して流出する幅($V_H=100$ バージで約5cm)以上とした。

投石時間は、油圧シリンダーの作動開始から捨石が全

底開式バージによる捨石マウンドの造成に関する実験

量流出するまでの時間とし、ストップウォッチで計測した。しかしながら、 $V_H=1000$ バージの五角形断面の場合は、油圧シリンダーの作動開始と捨石が流出しはじめるまでの間に時間的な遅れが認められたので、この場合は油圧シリンダー作動開始から捨石が全量流出するまでの時間と、捨石の流出開始から終了までの時間をそれぞれ計測した。

ホッパー開口幅は、捨石が全量流出したときの幅をとった。

ホッパー開口速度は、ホッパー開口幅と油圧シリンダー作動時間とから計算により求め、平均開口速度として処理した。油圧シリンダーのストロークと開口幅との間にはほぼ直線的な関係が確認されているので、ホッパー開口中の各点における開口速度はほぼ一定に近いと考えられる。なお、実船による調査⁹⁾でもホッパー開口中の開口速度はほぼ一定値を示している。

投石量は、船型が決まれば定数となるが、同一船型で1回当たりの投石量を増加した場合どのような変化がマウンド形状に現れるかを調べるために、 $V_H=100$ バージにおいては捨石積載量を 25 kgf に増加した場合の実験も行った。

c) 投石位置

1 投入あるいは 2 投入ごとに船位を横移動させた。同一地点へ 2 回連続して投入する場合は投石条件を一定とした。投石位置の横移動量は海底において外周部に散乱した捨石が混在しないような距離とした。したがって、投石水深の大きい場合ほど横移動間隔は広くとった。

d) 波高条件

造波水槽における波を受けた場合の投石実験は、 $V_H=100$ バージにより水深 0.6 m で行った。水槽の底質はコンクリートである。

実験は、軽荷時と満載時に対する動揺実験をまず行い、デッキを波が洗う状態から最大波高を決めた。投石実験は次の波高条件で行った。

波高 (cm)	0, 2, 4
周期 (cm)	0, 1.0, 1.8
波向	横波 (船体真横から波を受けた場合) および縦波 (船首方向から波を受けた場合)
水深 (m)	0.6
波形	正弦波

波高条件を原型値に換算すると最大 0.8 m (周期 8 sec) に相当する。

投石実験は、バージの 4 方向に係留索をとった状態で行った。この場合、造波水槽の大きさは長さ 25 m × 幅 15 m × 深さ 1 m であるので、係留索の長さは 10 m 以上となっている。

e) 捨石マウンド形状の計測

捨石マウンド形状は、各マウンドごとに長さ、幅、高さおよび散乱捨石量を計測した。

マウンドの高さは直径 10 mm の棒により、マウンドの長軸方向は 10 cm 間隔に、短軸方向は 5 cm 間隔に、その格子点で海底面からの高さを計測した。

4. 100 m³ 積模型バージによる投石実験

4.1 ホッパー開口速度と投石時間

捨石がホッパーから流出していくときの状況を観察すると、はじめにホッパー開口部上部付近の粒子が流出し、しだいにすり鉢状になり、最後にホッパー壁面上の捨石が流出する。前述のごとく、スプリット式バージの実船では捨石の自重を利用してホッパーを自然開口させる方式がとられているので、捨石の流出量がある一定量に達するとホッパー内の捨石重量と船体浮力がバランスしホッパーの開口動作が停止する。それから先は、ホッパー内の捨石重量の減少とともに船体浮力が勝り、ホッパーは逆に閉じる方向へ動く。文献 9) によれば、ホッパー内捨石重量と浮力がバランスする中立点は捨石の流出量が初期積載量のおよそ 80% になったときと推定される。

スプリット式バージでは時間とともにホッパー開口幅が増加し、同時に壁面傾斜角度もしだいに大きくなるので、単位時間当たり捨石流出量は時間とともに増大していくと考えられる。実船調査⁹⁾をみても、前述の中立点直前までは単位時間当たり捨石流出量は増加し、その後は急速に減少している。

このように、捨石がホッパーから流出するときの条件は、ホッパー開口方式、開口速度、開口幅、壁面傾斜、壁面摩擦係数、ホッパー断面形状、捨石粒度分布など多数の要因によって複雑に変化する。捨石が流出しはじめてから流出し終わるまでの時間、いわゆる投石時間は、ある意味では投石条件に関係する諸要因をすべて含んだ変数と考えることができる。しかし、模型実験では投石時間を相似にしたとしても、必ずしも開口幅や単位時間当たり捨石流出量あるいは流出速度が相似になっているという確証は今のところない。いま、海底に堆積する捨石マウンドの形状を問題にするのであるから、捨石の初期運動条件を重視する必要がある、その意味では捨石の流出

速度や単位時間当たり流出量を投石条件として考えるべきであろうと思われる。しかしこの場合、実験を行う上で捨石流出量の時間的変化をどう把握するかが問題となる。バージの吃水に着目する方法もあったが、今回はこの問題には触れず、総合的な投石条件として投石時間を重視した。

実験はホッパー開口速度を一定に保ち、捨石が全量流出するまで連続開口する方法を主体に、その開口を途中で止め一定開口幅で投石する方法を併せ行った。

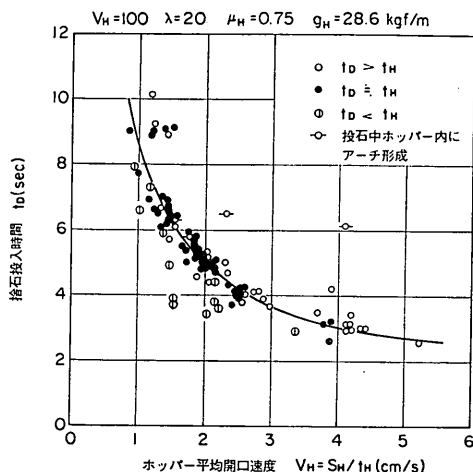


図-4.1 ホッパー開口速度と投石時間の関係

図-4.1 は、ホッパー開口速度を横軸にとり投石時間の変化を調べたものである。 $t_D > t_H$ とはホッパー開口時間より投石時間のほうが大きいこと、したがってホッパー開口幅を制御した条件を意味している。 $t_D = t_H$ は捨石の流出が終わった瞬間にホッパーの開口動作を止めたものである。そして $t_D < t_H$ は初期にタイマーによりホッパー開口時間を設定していたために、捨石が流出後もホッパーが開口し続けた場合である。図中の曲線は $t_D = t_H$ の場合の特性を示している。

これより、ホッパー開口速度と投石時間の間には双曲線相関が存在し、開口速度が小さいほど投石時間が長く、開口速度が大きいほど投石時間は短くなることがわかる。また開口速度が小さい場合は、開口速度の変化が投石時間に及ぼす影響は大きい、開口速度が速くなるにつれその影響は小さくなること、開口速度を速くしていてもある有限の投石時間に漸近することが推察される。

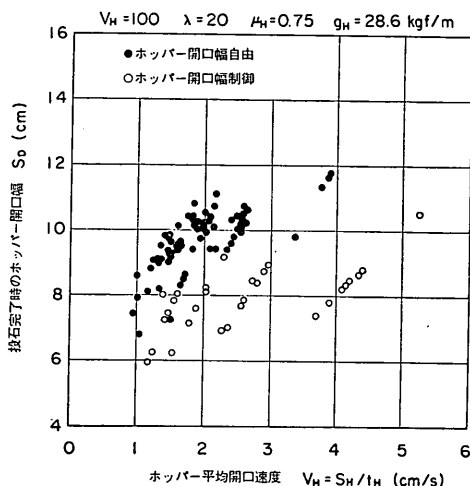


図-4.2 ホッパー開口速度と投石完了時のホッパー開口幅の関係

次に、図-4.2 はホッパー開口速度に対し投石完了時のホッパー開口幅を明示したものである。ホッパー開口幅自由とは、捨石が全量流出し終るまで一定速度でホッパーを開口した場合であり、ホッパー開口幅制御とは、それを途中で止め開口幅を固定した場合である。

前者についてみると、開口速度 (v_H) が速いほど開口幅 (S_H) が広がっている。開口幅 $S_H = v_H \times t_D$ において、 v_H の大きい領域では t_D の変化率が小さいので、結果として S_H が大きくなるのである。逆に、 v_H の小さい領域では t_D は増加するが、 $v_H t_D$ の積すなわち開口幅としてはそれほど大きくなっていない。この傾向は実船データと比較する場合特に留意すべき点である。

図-4.1 と 図-4.2 はホッパー甲板がアルミニウム ($\mu_H = 0.75$) の場合の結果である。壁面摩擦係数が変わったときの結果は 4.4 で述べる。

4.2 マウンド形状の一般的傾向

海底に堆積する捨石マウンドの形状は、平面的には図-4.3 のような楕円形として表せる。マウンドの中央部には密に捨石が堆積するが、外周に行くに従って粗になるこの傾向は、捨石単粒子の散乱分布形状からも類推される。楕円形の大きさは、投石条件と投石水深によって異なる。

ここで、捨石マウンドの形状を定量的に表示するために、最大捨石マウンド長さ (x) および幅 (y)、主捨石マウンド長さ (x_0) および幅 (y_0) を図のように定義した。主捨石マウンドの境界は写真-4 からわかるように明

底開式バージによる捨石マウンドの造成に関する実験

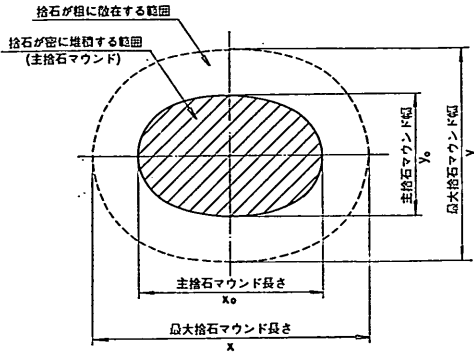


図-4.3 海底に堆積した捨石マウンドの基本形状

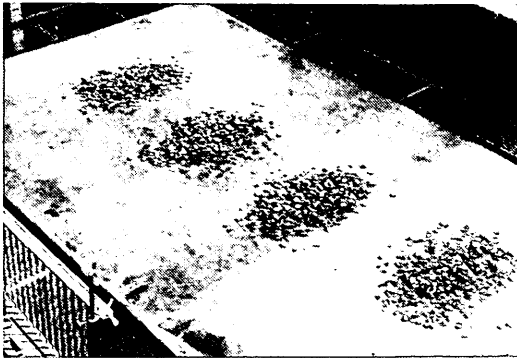


写真-4 1回投石時のマウンドの形状

瞭に現れないので、相対的に捨石が連続して堆積していると考えられる範囲を主捨石マウンドとした。それゆえ、計測者によっては少し判断に差が生ずる可能性がある。最大捨石マウンドは文字どおり散乱した捨石の最大距離をいい、散乱する捨石粒子の量はここでは問題としていない。

次に、捨石マウンドの断面形状を中央断面で示したものが図-4.4である。投石水深あるいは投入回数によって大きさは異なっているが、形状そのものは類似のもの

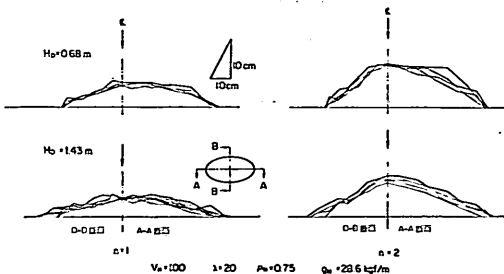


図-4.4 捨石マウンドの中央断面図例 (\$V_B=100\$)

である。マウンドの縦方向 (A-A 断面) は楕円形の円弧の一部に近似しており、横方向 (B-B 断面) は三角形断面に近い。したがって、全体の姿は楕円球の一部と切妻型屋根を合成したような形と表現される。

一方、捨石マウンドの長さおよび幅が投石水深によってどう変化するかを調べたのが図-4.5である。図を求める

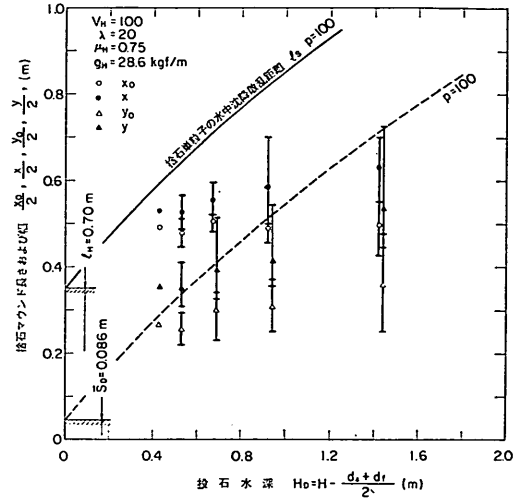


図-4.5 捨石マウンドの長さおよび幅の投石水深による変化

にあたって、捨石マウンドの長さおよび幅は左右対称と考え、投石位置 (ホップ中心位置) を中心に $x_0/2, x/2, y_0/2, y/2$ で表わした。投石水深には海底までの水深にバージの吃水変化を考慮した値、すなわち、

$$H_D = H - \frac{1}{2}(d_f + d_i) \quad (1)$$

を用いた。ここに、 H_D は投石水深 (m)、 H は投石位置の水深 (m)、 d_f, d_i はバージの満載吃水および軽荷吃水 (m) である。

投石水深は捨石の水中落下運動を主に考えればバージの船底から海底までの距離である。その値は捨石の流出とともに時々刻々変化するので、ここで導入した H_D はその平均水深といえることができる。

測定点のばらつきは、主捨石マウンドの境界が明瞭でないことによる計測誤差、捨石の不規則性、投石条件の相異などによるものと思われる。いま主捨石マウンドの測点に着目すると、 $x_0/2$ は投石水深が深くなってあまり増加していない。これに対し $y_0/2$ については投石水深の増加とともに増加の傾向が認められる。つまり、投

石水深が増加するとマウンドの幅方向には散乱が増えるが、長さ方向にはあまり増えないということであり、これはマウンドの平面形状が楕円からだいに円形に変形していくことを示唆している。一方、最大捨石マウンドの測点についていえば、 $x/2$ および $y/2$ とも投石水深の増加とともに最大散乱距離は増加している。これと、供試捨石(A)の単粒子を静水中に落下させたときの最大散乱距離($l_s, p=100$)の投石水深に対する変化とを比較すると、図のように x 方向では単粒子の最大散乱距離のほうが大きく、 y 方向では投石水深の大きいところではほぼ同じ程度、小さいところではバース投入のほうが大きくなっている。なお、この場合 $p=100$ で表示した曲線は、ホップ周辺部から流出した捨石粒子が最大散乱距離を支配すると考え、ホップ縦方向には $l_H/2$ 、幅方向には平均開口幅 $\bar{S}_D/2$ の位置を原点とした。

投石水深の浅いところでバース投入の場合の最大散乱距離が単粒子のそれより大きくなること理由は、水深が小さいと捨石の着底分布は中心圏において大きくなるけれど、マウンド斜面に着底した捨石が転動し周辺に移動すること、海底面に沿って生じる水流によって着底位置より外へ運ばれることなどによるものと考えられ、その現象は実験でも観察された。

ホップの長さ方向と幅方向とでみられる捨石散乱程度の差は、スリット状の開口幅から連続して流出し水中を落下する捨石群と伴流の関係に起因するものと思われる。

次に、捨石マウンド高さとの関係について考察した。図-4.6は捨石マウンドの中央部の平均高さを投石水深に対し図示したものである。投石水深が浅いほどマウンド高さが高くなることはこれまでの考察から推定される結果といえよう。ここで興味深いのは、1回投

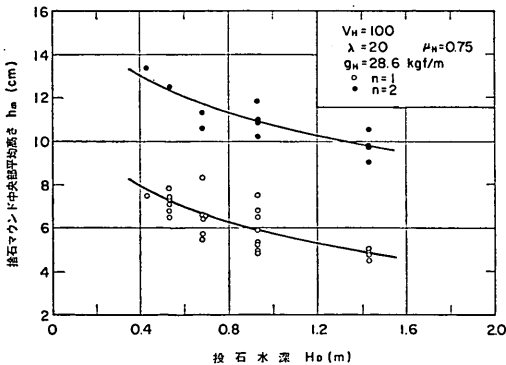


図-4.6 捨石マウンド高さの投石水深による変化

入の場合と2回投入の場合にみられるマウンド高さの増加傾向の相異である。投石水深の大きいところでは後者の値は前者の約2倍となっているが、投石水深の浅いところではその比例関係は認められず、後者は前者の2倍以下である。これは、マウンドの斜面が大きくなるに従い、そこに着底した捨石が転動していくためである。

以上は投石水深がマウンドの基本形状に及ぼす影響をみたものであるが、次に投石条件がマウンド形状に及ぼす基本特性を調べてみる。

投石条件として投石時間(t_D)とホップ開口幅(S_H)をとり、それが捨石マウンドの高さ(h_m)にどのような影響を及ぼすかを調べたのが 図-4.7 および 図-4.8 であ

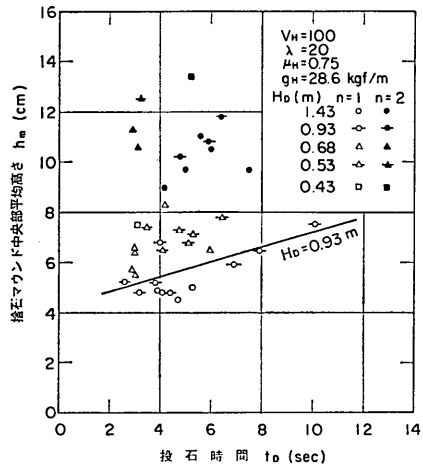


図-4.7 投石時間が捨石マウンドの高さに及ぼす影響

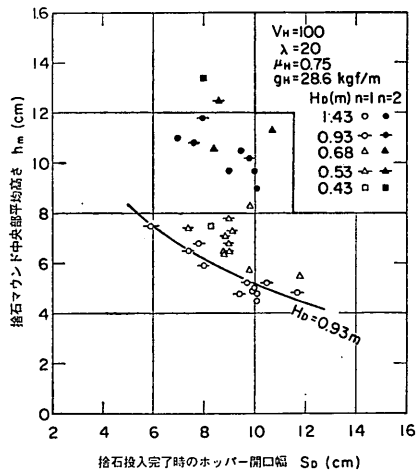


図-4.8 ホッパー開口幅が捨石マウンドの高さに及ぼす影響

底開式バージによる捨石マウンドの造成に関する実験

る。図-4.7において測点の多い $H_D=0.93\text{m}$ に着目すると、 t_D と h_m の間には直線に近い相関が認められ、 t_D が大きくなるほど h_m は増加している。つまり、ゆっくり投石するとマウンドの高さは高くなり、速く投石すると偏平になることがわかる。前者の場合は単粒子の落下様式に近く、後者の場合は群粒の落下様式に近いと考えられる。したがって、この差は捨石粒子が着底するときの速度、伴流などの相異に基づくものと推測される。

他の投石水深のデータについては測点の範囲が限定されているが、 $H_D=0.93\text{m}$ の場合の傾向に近いことが読み取れる。

図-4.8においても $H_D=0.93\text{m}$ に着目すると、 h_m は S_D の減少とともに増加している。既に図-4.1と図-4.2でみたように、 S_D が小さい場合は t_D が大きい場合と同義であるから、この図は図-4.7と全く同じ内容を示しているといえる。

以上のような捨石マウンド形状の一般的傾向をまとめるとすれば、図-4.9の模式図によって説明されよう。

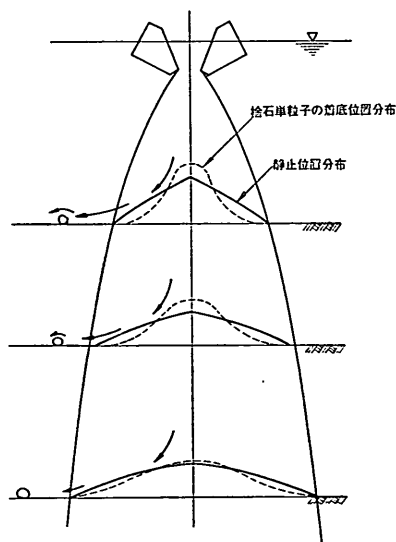


図-4.9 投石水深による捨石堆積形状の変化

投石水深が大きい場合は、捨石が広い範囲に散乱するために、単粒子に近い沈降特性を示す。この場合は捨石粒子着底後の転動も少なく、着底位置付近にほぼ静止する。これに対し投石水深が浅くなると、捨石の着底位置が中央部に多くなるので、その結果、マウンド斜面に落下した捨石はそこで安定せず転がり落ちていく。それに

よってマウンドの法尻がしだいに広がり、マウンドの高さは捨石着底量に比例して増加しない。

一方、投石時間とマウンド形状の関係については、捨石粒子の沈降様式が単粒子的か群粒的かによって異なる。前者の場合には、捨石の着底位置と静止位置との差が少なくなるが、後者の場合は海底もしくは既に堆積した捨石上に衝突するときのエネルギーによって捨石が転動、散乱したり、伴流によって捨石の転動が加速され、マウンド形状はしだいに偏平となる。

この現象をさらに考察するには、バージから投石された捨石群の落下速度、捨石群周囲の流れ状況、海底面への衝突エネルギー、海底面に生ずる放射状流れの強さなどの研究が必要である。これらの本報告の範囲を越えるのでこれ以上は追求しないこととする。

4.3 投石条件がマウンド形状に及ぼす影響

前節において、捨石マウンドの形状は投石条件に影響を受けることが定性的に理解された。そこで本節では、投石条件とマウンド形状の関係を定量的に考察した。

(1) 投石変数

捨石がホッパから流出するときの流出状況をモデル化し次のように仮想する。すなわち、ホッパ開口面積 $S_D t_D$ より流出速度 u_s で捨石が流出したとき、捨石積載量 W_H が全量流出するに要する時間が t_D であると考え

$$S_D t_D u_s \gamma = W_H \quad (2)$$

ここに、 γ はホッパ出口における捨石流出時の捨石の見かけ比重量である。

実際には、開口面積は時間とともに増加し、それに伴い捨石の流出量および流出速度は変化していくので、式(2)の u_s はあくまで仮想の平均流出速度である。

式(2)を変形し

$$u_s = \frac{1}{\gamma} \frac{W_H}{S_D t_D} \quad (3)$$

とおき、さらに

$$\phi_D = \frac{S_D t_D}{W_H} = \frac{S_D t_D}{g_H} \quad (4)$$

ここに

$$g_H = \frac{W_H}{l_H} \quad (5)$$

とする。 g_H はホッパ単位長当たり投石量を表している。

式(3)において、 γ は定数でなく、やはり投石条件によって変わる変数であるので、 u_s は ϕ_D だけによって定まらない。しかし、 ϕ_D は既に考察した投石条件に

影響を与える因子 S_D, t_D, g_H を含んでおり, u_s の支配的要素と考えられる。そこでここでは, ϕ_D を投石変数と定義し, 以後の解析に用いた。捨石流出速度でなく ϕ_D を用いたことによる結果への影響は, 例えば解析データのばらつきなどとなって現れてくると考えられる。

なお, ϕ_D の次元は, S_D を $[L]$, t_D を $[T]$, g_H を $[W/T]$ とすると $[L^2TW^{-1}]$ となり無次元変数ではない。また, ϕ_D^{-1} が u_s に比例するので, ϕ_D が小さいほど (これは式 (4) の形からみて t_D が小さい場合に相当する), u_s は大きくなる。

(2) 捨石マウンド形状係数

捨石マウンドの形状を定量的に表す変数として, 次の7つを定義した。

① 主捨石マウンド長さ係数 (K_L)

投石水深 (H_D) に対する主捨石マウンド長さ (x_0) の増加率を表す量で, 捨石マウンドの長さの基準にはバージのホッパ長さ (l_H) をとった。すなわち,

$$K_L = \frac{x_0 - l_H}{2H_D} \quad (6)$$

② 主捨石マウンド幅係数 (K_B)

投石水深 (H_D) に対する主捨石マウンド幅 (y_0) の増加率を表す量で, 捨石マウンドの幅の基準には投石完了時のホッパ開口幅 (S_D) をとった。すなわち,

$$K_B = \frac{y_0 - S_D}{2H_D} \quad (7)$$

③ 主捨石マウンド縦横比

主捨石マウンドの幅 (y_0) と長さ (x_0) との比で, マウンドの平面形状を表す。すなわち,

$$K_0 = \frac{y_0}{x_0} \quad (8)$$

④ 主捨石マウンド高さ係数 (K_H)

主捨石マウンドの中央部平均高さ (h_m) と楕円相当マウンド高さ (h_{eq}) の比を表す。すなわち,

$$K_H = \frac{h_m}{h_{eq}} \quad (9)$$

ここで, 楕円相当マウンド高さとは, 主捨石マウンドの長さ (x_0) と幅 (y_0) をそれぞれ楕円形の長径と短径とし, 残りの径を h_{eq} としたとき, その楕円体の体積の 1/2 がちょうど投石量に等しくなるような h_{eq} をいう。すなわち,

$$h_{eq} = k \frac{W_H - W_s}{x_0 y_0} \quad (10)$$

ここに, k は比例定数, W_H は投石量, W_s は主捨石マウンドより以遠に散乱した捨石量である。

⑤ 捨石マウンド最大散乱長さ係数 (K_x)

最大捨石マウンド長さ (x) と主捨石マウンド長さ (x_0) の比で, 捨石マウンドの長さ方向への最大散乱の程度を表す。すなわち,

$$K_x = \frac{x}{x_0} \quad (11)$$

⑥ 捨石マウンド最大散乱幅係数 (K_y)

最大捨石マウンド幅 (y) と主捨石マウンド幅 (y_0) の比で, 捨石マウンドの幅方向への最大散乱の程度を表す。すなわち,

$$K_y = \frac{y}{y_0} \quad (12)$$

⑦ 捨石散乱重量比 (K_s)

主捨石マウンド以遠に散乱する捨石の重量 (W_s) と投石重量 (W_H) の比を表す。すなわち,

$$K_s = \frac{W_s}{W_H} \quad (13)$$

K_s は捨石投入における歩留りを想定したものである。連続投入していくときには散乱した捨石の上に次のマウンドが形成されるので, 現実にはここで求まる1回投入時の K_s 値よりも小さくなっている。

以上7つの無次元捨石マウンド形状係数のうち, 特に重要なものは①~④である。

(3) 投石変数と捨石マウンド形状係数の関係

投石変数 ϕ_D を求めるに際し, S_D は (cm), t_D は (sec), g_H は (gf/cm) とした。また式 (10) の定数 k の計算には, 海底に堆積した状態の捨石マウンドの空隙率を 0.44, 捨石の比重量を 2.59 gf/cm³ とした。

ϕ_D と K_L の関係を投石水深 (H_D) 別に示すと 図-4.10 となった。本実験条件の範囲では, 両変数の間に直線的相関があると考えられるので, 最小2乗法によって相関式を求め, 図中に実線で表示した。この実験式は, いずれの投石水深においても ϕ_D の減少とともに K_L が微増する傾向が認められる。前述のごとく, ϕ_D の減少はその最も支配的な要因である t_D の減少に相当するから, 図-4.10 は投石時間が短くなれば, つまり急速投入すれば, マウンドの長さは増加すること, しかしその増加率はあまり大きくないということを示している。

最小2乗法で求めた直線の勾配は投石水深によって少しづつ差がある。この差は, 測点数が必ずしも多くなく, また ϕ_D の範囲が広くないことなどに起因していると思われるので, ここで平均的な勾配を仮定してみた。図中の破線がその考え方に基づく近似相関式である。実

底開式バージによる捨石マウンドの造成に関する実験

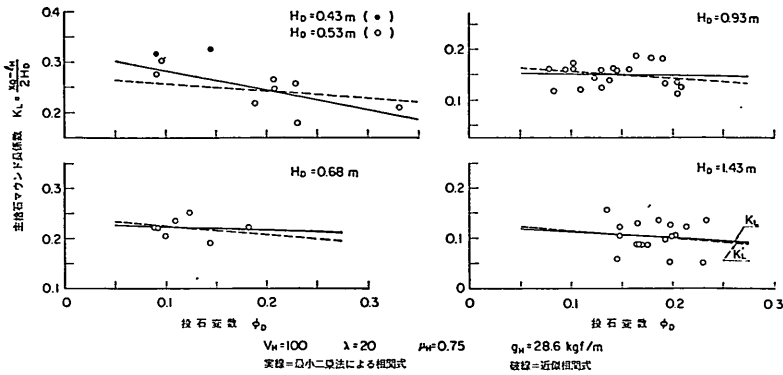


図-4.10 ϕ_D と K_L の関係

線と破線の階差は投石水深によってまちまちであるが、実測点に対してはこの近似式でも十分有効であると考えられる。

次に、 ϕ_D と K_B の関係を H_D 別に図示すると 図-4.11 となった。 K_L の場合と同様に最小 2 乗法で直線相関式を求め、図中に実線で示した。 ϕ_D の減少とともに K_B が増加しており、その増加率は K_L の場合より大きくなっている。つまり、投石時間を短くした場合、捨石マウンドの形状は長さ方向よりむしろ幅方向へ広がっていくことを示している。

図中の破線は最小 2 乗法で求めた相関式の勾配を平均化し、近似相関式として表したものである。この場合も両者の階差は小さくなく、実測点に対してはこの近似式で十分有効であると考えられる。

図-4.12 は ϕ_D と K_0 の関係を H_D 別に示したものである。 ϕ_D の減少とともに K_0 は増加しているが、これは ϕ_D の減少とともに K_L と K_B が増加すること、し

かしその増加率は K_B のほうが大きいということから予測される結果である。 K_0 の増加は捨石マウンドの平面形状が長楕円から円形に近づいていくことを意味する。

図中の実線と破線は K_L および K_B の場合と同様に、最小 2 乗法による相関式と近似相関式を示す。ここでも近似相関式で実測点を十分表しえることがわかる。

ϕ_D と K_H の関係は 図-4.13 に示した。 K_H の分母 (h_{eq}) には K_L と K_B の影響が入ってくるので直感的には理解しづらいが、 ϕ_D の増加とともに K_H は微増傾向を示している。 ϕ_D が小さくなれば x_0 と y_0 が大きくなるので式 (10) より h_{eq} は小さくなるが、そのとき h_m も小さくなっているため、その比 (K_H) がこの図のように変化すると考えられる。

図中の実線と破線の考え方は他と同様である。 K_H についても、近似相関式で精度上も問題はない。

以上の K_L , K_B , K_0 , K_H すべてに対し言えることは、投石水深の最も大きい $H_D=1.43\text{m}$ において実測点のば

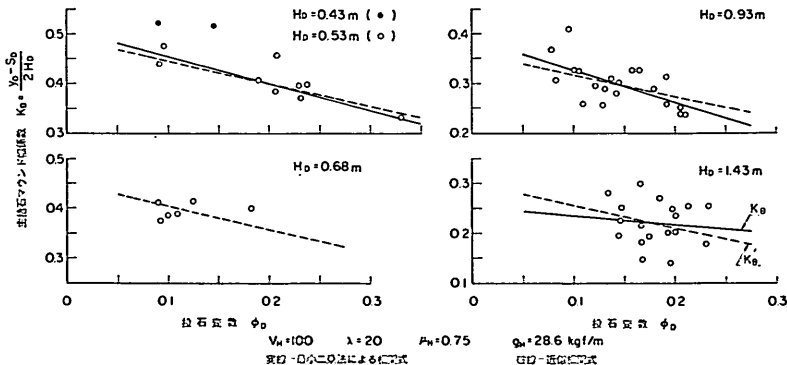


図-4.11 ϕ_D と K_B の関係

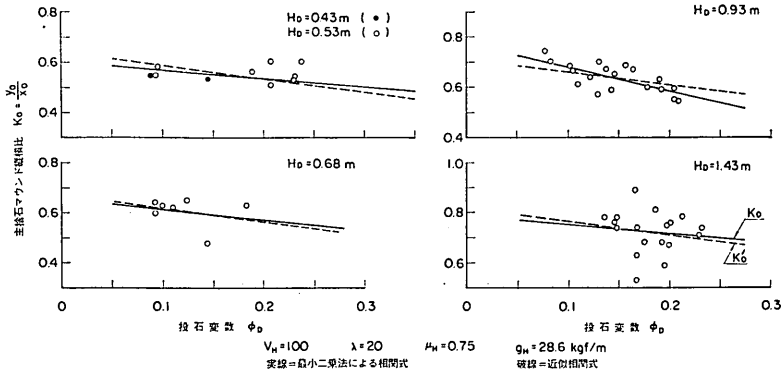


図-4.12 ϕ_D と K_0 の関係

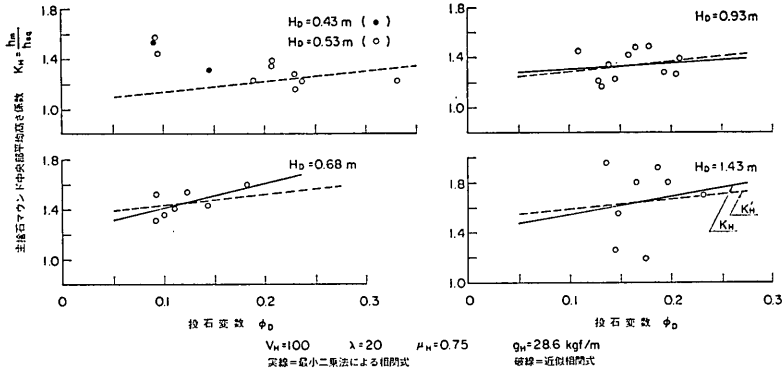


図-4.13 ϕ_D と K_H の関係

らつきが大きいことである。これは投石水深が大きくなるほど捨石の散乱が大きくなり、その結果主捨石マウンドの境界が明瞭でないために、マウンド計測時に誤差（計測誤差というよりもむしろ判断の相異である）が避けられないことによるものである。

一方、 ϕ_D に対する K_x , K_y , K_s については付図-1～付図-3 に示した。

K_x は各投石水深とも ϕ_D の減少とともに微増しているが、 ϕ_D の影響はほとんどないといえよう。 K_L そのものも ϕ_D に対する変化率は小さかったから、マウンドの長さ方向への捨石の散乱そのものが小さいということの意味している。

これに対し K_y は K_B と逆の傾向を示し、 ϕ_D の増加とともに K_y が増加した。これまで、投石時間を短くすれば捨石は群粒として落下するので海底への衝突エネルギーが大きく、転動も加速されマウンド幅が広がると考えた。ここではさらに K_y 値より考えて、そのときのマウンド幅の増加率は最大散乱距離 (y) においてよりも

主捨石マウンド幅 (y_0) においてのほうが大きいということが推測される。

K_s については、 ϕ_D が小さいほど外周に散乱する捨石量は増加し、また投石水深が大きくなるほどその量が増加している。 K_s は、急速投入ほど散乱が大きくなることを量的に示したものである。

投石変数と捨石マウンド形状係数の間には直線相関があり、いずれの係数も近似相関式で表せることがわかったが、近似相関式には投石水深による影響が認められる。そこで、投石水深と投石変数を考慮した捨石マウンド形状係数の実験式を求めると次式となった。

$$K_L = -0.15\phi_D - 0.33 \log H_D + 0.18 \quad (14)$$

$$K_B = -0.45\phi_D - 0.43 \log H_D + 0.37 \quad (15)$$

$$K_0 = -0.52\phi_D + 0.20H_D + 0.53 \quad (16)$$

$$K_H = 0.83\phi_D + 0.24H_D + 1.06 \quad (17)$$

図-4.14～図-4.17 はこれら実験式による計算値と実測値を比較したものである。実験式はほぼ平均的にマウンド形状を表している。

底開式パージによる捨石マウンドの造成に関する実験

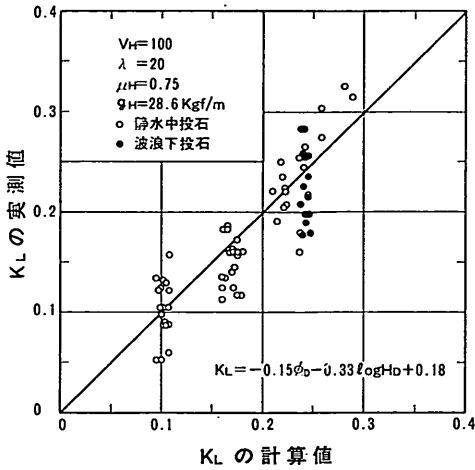


図-4.14 実験式 K_L の精度

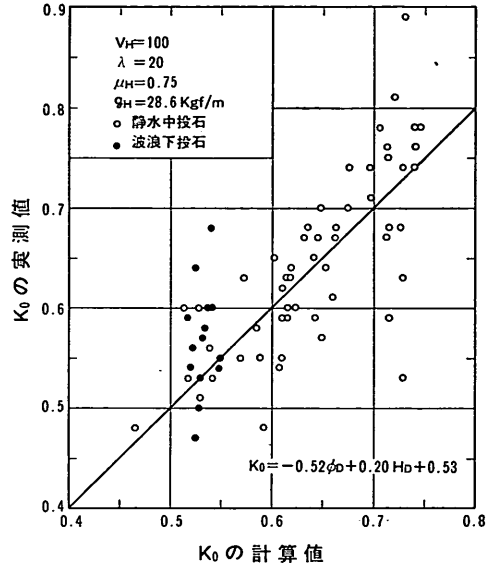


図-4.16 実験式 K_0 の精度

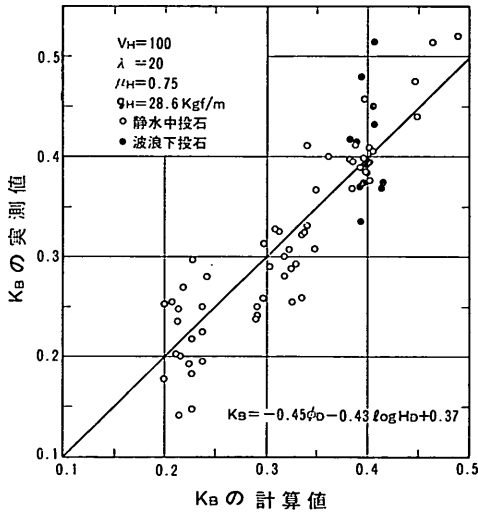


図-4.15 実験式 K_B の精度

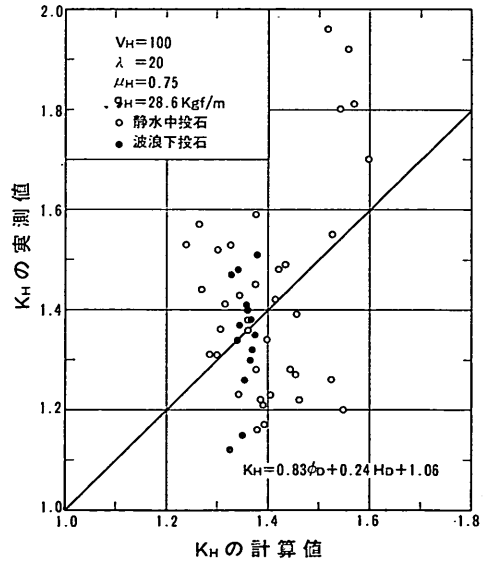


図-4.17 実験式 K_H の精度

一方、図-4.18 には 1 例として、 $\phi_D=0.2$ のときの K_L , K_B , K_0 , K_H が投石水深とともにどのような傾向で変化するかを示した。図中の測点は実測値の平均値であり、実線は式(14)~式(17)の計算値を示す。これによっても式(14)~式(17)は本実験条件の範囲でのマウンド形状を十分有効に表し得るといえよう。

4.4 ホッパ壁面摩擦係数およびホッパ単位長当たり投石量がマウンド形状に及ぼす影響

(1) ホッパ壁面摩擦係数の影響

ホッパ壁面の摩擦係数が捨石の流出条件にどのような

影響を及ぼすか、また捨石マウンドの形状にはどのような変化が生ずるかを調べるために、アルミニウムホッパ甲板上に捨石との静止摩擦係数が $\mu_B=0.40$ のプリキ板を貼り付け、水深 $H=1.0\text{m}$ で投石実験を行った。

ホッパを定速で開口し、捨石が全量流出した時点でその開口を停止させたとき、ホッパの開口速度と投石時

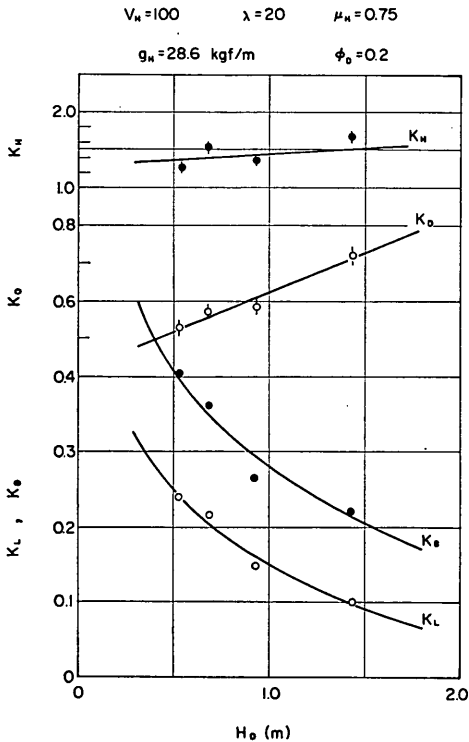


図-4.18 捨石マウンド形状係数の投石水深による変化例

間、および開口幅との関係は図-4.19となった。これを図-4.1および図-4.2と比較すると全く類似の傾向を示し、しかもおのおのの絶対値にも差は認められない。

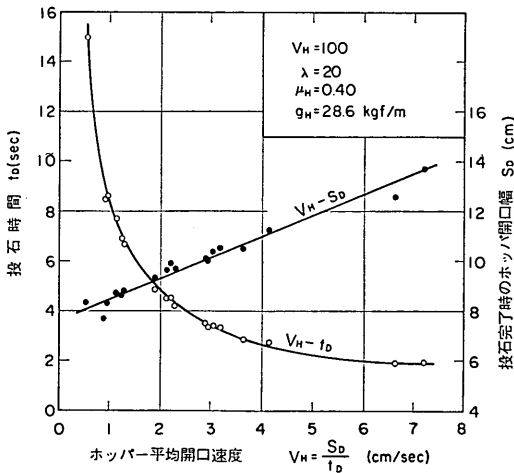


図-4.19 投石時間と開口幅に及ぼすホッパー壁面摩擦係数の影響

壁面摩擦係数が異なるにもかかわらず捨石の流出条件に差が生じていないことに対しては、次のように考えられる。

捨石がホッパーから流出する初期の段階では、捨石粒子相互の摩擦係数やアーチ現象が捨石の流動を支配しており、壁面での摩擦力の影響は小さい。ところがこの摩擦力が支配的となる流出の後期においては、既にホッパー壁の傾角角度は 50° 以上になっており、捨石への摩擦力が問題となる角度（アルミニウム板の場合約 37° 、ブリキ板の場合約 22° ）をはるかに越えてしまっているので、捨石は摩擦係数に関係なく流動すると考えられる。このように、スプリット式バージではホッパー壁の傾斜角度が開口とともに増加するため、ホッパー壁面の摩擦係数の影響が捨石の流出条件に現れないのであろうと推測される。

投石条件に差が生じない以上、捨石マウンドの形状にも変化は生じないと考えられる。図-4.20 および 付図-

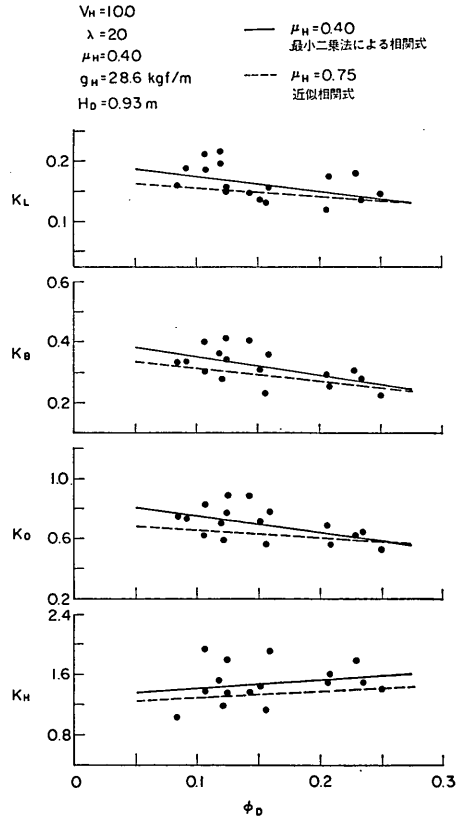


図-4.20 捨石マウンド形状に及ぼすホッパー壁面摩擦係数の影響

底開式バージによる捨石マウンドの造成に関する実験

4 は、 $\mu_H=0.40$ の場合の投石変数とマウンド形状係数の関係を示したものである。図中の実線は最小2乗法により求めた相関式であるが、これと前節で述べた $\mu_H=0.75$ の場合の近似相関式(図中の点線)とを比較しても、ほとんど差が認められない。

(2) ホッパ単位長当たり投石量の影響

同一船型で1投入当たりの捨石量(g_H)を変えた場合、捨石マウンドの形状にどのような変化が生ずるかを調べ

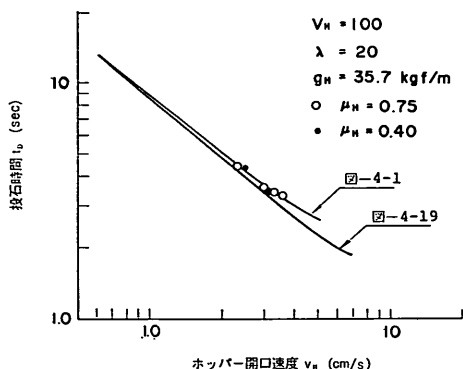


図-4.21 投石時間に及ぼす投石量の影響

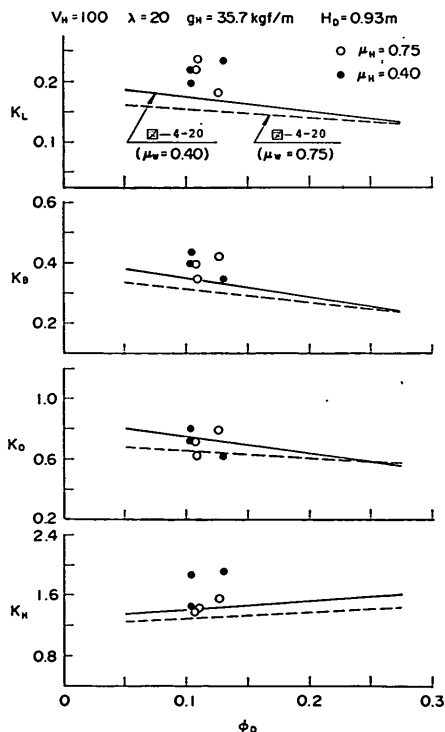


図-4.22 捨石マウンド形状に及ぼす投石量の影響

るために、投石量を 25 kgf ($g_H=35.7 \text{ kgf/m}$) に増加した投石実験を行った。

図-4.21 はホッパ開口速度と投石時間の関係調べたものであるが、図-4.1 ($g_H=28.6 \text{ kgf/m}$, $\mu_H=0.75$) および 図-4.19 ($g_H=28.6 \text{ kgf/m}$, $\mu_H=0.40$) と比べても、投石時間には大きな差は認められなかった。一方、図-4.22 は g_H の変化が捨石マウンドの形状に及ぼす影響を調べたものである。投石量の増加は当然マウンド形状にも及ぶからその変化が認められる。 K_L および K_B は投石量の増加とともに大きくなっていくが、 K_0 があまり変化していないことからみて、長さおよび幅方向への増加率は等しいと考えられる。

この結果より、先に求めた捨石マウンド形状係数の実験式は、さらに投石量(g_H)を変数とする関数であることがわかる。

4.5 投石時における波の影響

波のある海域で底開式バージが捨石を投入する場合、次の3つの点において静水時と投石条件が異なる。その第1は、波を受けて船体が動揺し、開口部の位置が変動することである。第2は、船体の漂流により投石位置そのものが変化することであり、これは特に長周期の波を受けた場合に起こりやすい。第3は、水中を落下する捨石が水粒子の運動の影響を受けて散乱状態が変わることである。第2の問題は船体運動学の問題として船位の変化量を予測することができるが、投石中に時々刻々船位が変わった場合、それが捨石マウンドの形状にどのような影響を及ぼすかを定量的に考察することはかなり難しい。本研究では、静水時との比較という目的もあったが、波による船位の移動に関する問題は対象にせず、第1と第3の問題について考えた。

実験は、静水時と同様に4方向から係留索をとり、波高、周期、波向を変えて行った。水深は0.6mで、海底はコンクリートである。

図-4.23 はバージが横波を受けたときのマウンドの長さおよび幅を表したものである。その値は波高、周期に関係なくほとんど静水時の場合と同じとなっている。またその傾向は1回投入の場合と2回投入の場合とも同じである。一方、バージが縦波を受けた場合のマウンド長さおよび幅を図-4.24に示した。この場合も波高、周期に関係なくほとんど静水時の場合と同じ絶対値を示している。また、捨石マウンドの高さについても静水時の場合と大差はない。

次に、このデータを投石変数と捨石マウンド形状係数

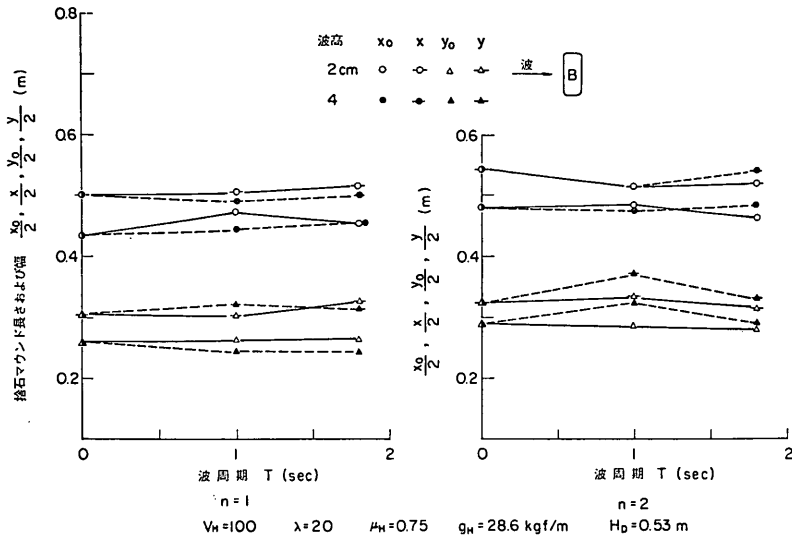


図-4.23 捨石マウンドの形状に及ぼす波の影響 (1)

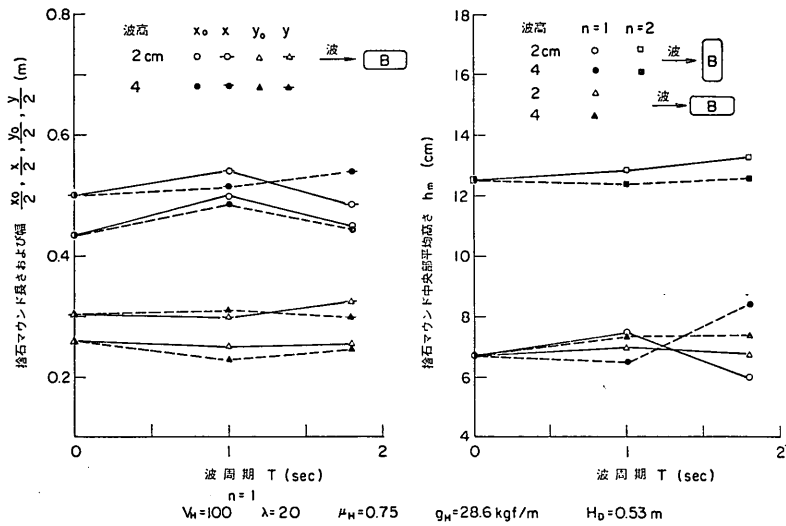


図-4.24 捨石マウンドの形状に及ぼす波の影響 (2)

の関係として調べると図-4.25となった。図中の実線は静水時の場合に求めた近似相関式である。静水時の投石実験は底質が砂およびマットであるので海底面の摩擦係数は大きい。これに対し、造波水槽での実験は底質がコンクリートであるから捨石は転動しやすい状態にあったと考えられる。しかしながら図-4.25ではそのような底質の差を考慮したとしても、投石時における波の影響はほとんど認められない。

ここで、船体が動揺しながら捨石を流出しているときの状態を想像すると図-4.26となる。船体が横波を受けて θ_R だけ傾いたとき、ホッパ開口部は静止時に比べ $\pm 4S$ だけ変位する。しかしこの状態でも捨石の流出方向はホッパ甲板が傾斜しているので大きな変化は生じない。このように、投石時に波を受けてもバージを係留している状態では投石条件が大きく変化しないということが静水時の場合と変わらないひとつの理由と考えられ

底開式バージによる捨石マウンドの造成に関する実験

波高 cm	周期 sec	n=1	n=2	記号	波高 cm	周期 sec	n=1	記号
0	0	x	+	↓ 波	2	1.0	○	↓ 波
2	1.0	○	△		4	"	■	
4	"	●	◇		2	1.8	◇	
2	1.8	△	◇		4	"	●	
4	"	▲	★					

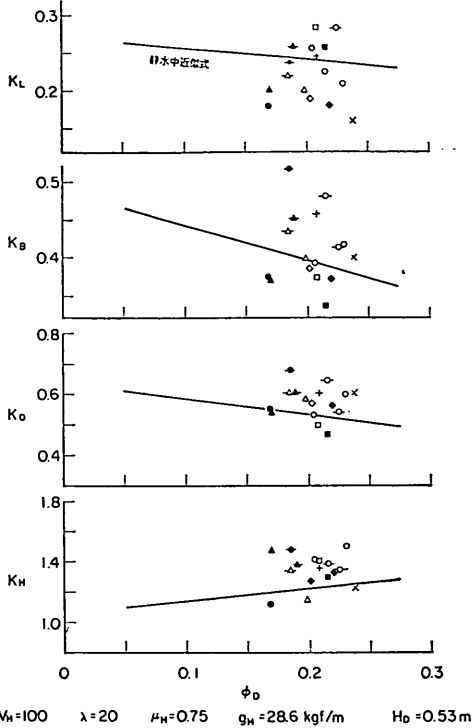


図-4.25 投石変数と捨石マウンド形状係数に及ぼす波の影響

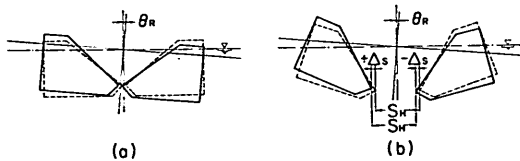


図-4.26 波による船体の動揺とホッパー開口部の変位

る。

一方、水中を落下する捨石への波の影響については前内の研究¹⁰⁾が参考になる。それによると、単粒子の場合は波の影響を受けて静水時より 10~30% 散乱が増加するが、集団落下の場合はその集団個数を十分増加することによって波を静める効果を期待することができるので、その場合の散乱分布は静水時の集団落下に含めて考

えることができるとしている。本実験の場合はちょうどこの集団落下に相当するものであり、全く同じ結果が得られたと考えられる。

バージの位置が保持されている限りにおいては、波によるバージの動揺は海底の捨石マウンド形状にほとんど影響を及ぼさないということは、実船では船位保持の方法が施工管理上最も重要な要件であるということの意味している。

なお、投石時にバージが波を受けても捨石マウンドの形状そのものには大きな変化が生じないことから、この場合も式(14)~式(17)によって捨石マウンド形状を予測することができる。図-4.14~図-4.17には波浪下の投石データも併記したが、 K_L , K_B , K_0 , K_H のいずれにおいても計算値と実測値はよい一致をみている。

5. 1,000 m³ 積模型バージによる投石実験

5.1 ホッパー開口速度と投石時間およびマウンド形状の一般的傾向

(1) ホッパー開口速度と投石時間

ホッパー断面形状が五角形のバージにおけるホッパー開口速度 (v_H) と投石時間 (t_D) および開口幅 (S_D) の関係は図-5.1 となった。この場合、開口速度は $V_H=100$ バー

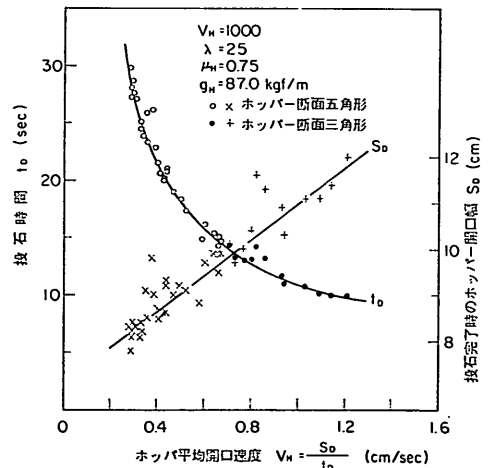


図-5.1 ホッパー開口速度に対する投石時間と開口幅

ジに比べるとかなり小さい範囲でしか実験が行われていないが、投石時間および開口幅とも $V_H=100$ バージの場合とまったく同形の変化特性を示した。

投石時間がかかなり長くなっているのは、開口速度が非常に遅いこと、投石量そのものが多いこと、ホッパー底床

部の壁面角度が小さいことなどに起因するものである。本実験の開口速度範囲が実船に対しどのような関係にあるかについては6章で述べているが、実船の開口速度を今回の場合に換算するとおよそ 0.6 cm/s となり、本実験条件の範囲に入っている。ホッパー壁面角度についてみると、ホッパー底床部において全閉時約 21°, 開口幅 8cm のとき約 33°, 同 10cm のとき約 35° である。三角形断面ホッパーでは全閉時でも約 40° であるから、五角形断面のホッパー角度は非常にゆるいといえる。このため、捨石の流出がゆっくり進行する。

ホッパー開口幅は開口速度に比例して増加している。開口幅が小さいと捨石の流出には時間を要し、大きいと速く流出してしまうという結果は常識的である。

一方、五角形断面ホッパーでは油圧シリンダーを作動させてから捨石が流出しはじめるまでに時間的な遅れが観察された。図-5.2 は油圧シリンダーの作動時間 (t_H) と

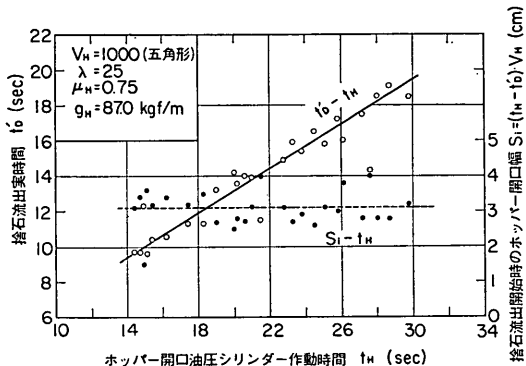


図-5.2 ホッパー開口動作と捨石流出開始の時間遅れおよび捨石流出開始時の推定開口幅

捨石の実流出時間 (t_D') の関係を調べたものである。両者の間にはほぼ直線で近似できる相関が認められた。ここで、 t_H と t_D' の差が捨石が流出しはじめるまでの時間遅れであるから、その時間にどれだけホッパーが開口したかを推定したのが図中の S_0 である。 S_0 は開口速度に関係なくほぼ一定の値 (約 3cm) となっている。実船⁹⁾でもこれと類似の現象が観察されており、ホッパー開口開始後 10~15 秒までは捨石の流出量は積載量の約 5% 程度でしかない。

(2) マウンド形状の一般的傾向

海底に堆積した捨石マウンドの平面形状は図-4.3と同様に楕円形に近い形状を呈した。中央断面形状は図-5.3のごとく図-4.4とほとんど変わらないが、投石量が多いので投石水深によって高さ方向の形状の差がより

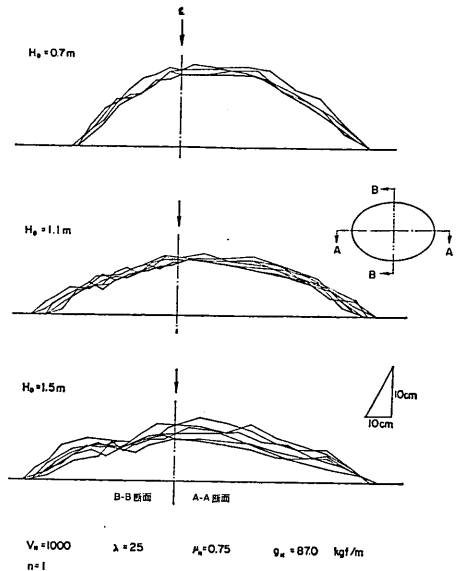


図-5.3 捨石マウンドの中央断面図例 ($V_H=1000$ バージ)

顕著に現れている。

図-5.4 は捨石マウンドの長さおよび幅を投石水深に対し図示したもので、図-4.5と同じ考え方で整理したもの

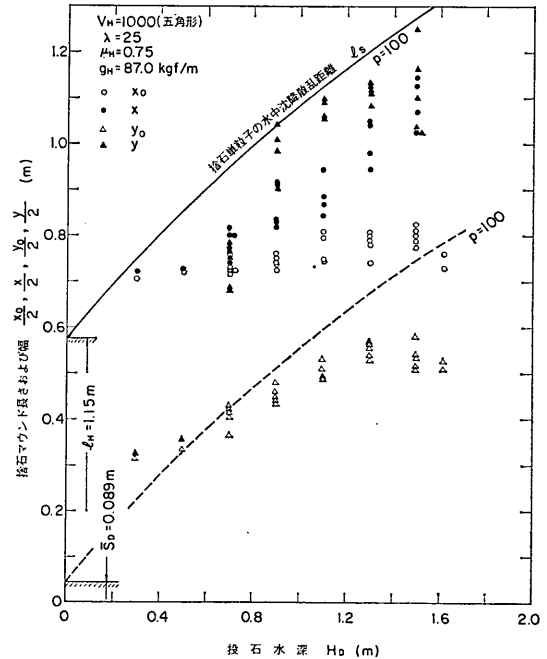


図-5.4 捨石マウンドの長さおよび幅の投石水深による変化

底開式バージによる捨石マウンドの造成に関する実験

である。 $V_H=100$ バージの場合に比べて大きな相異は、マウンドの幅方向への拡散が非常に大きくなっており、特に最大散乱幅は単粒子の最大散乱距離より大幅に大きい。これは、捨石量が多いためにマウンドの斜面上に落下

した捨石が順次転動してその法尻を広げ、また大きな伴流によって海底面での捨石の転動が加速されることによる。このような現象は投石量の少ない $V_H=100$ バージでは強く現れなかったものである。

図-5.5 はマウンド高さを投石水深に対し図示したものである。投石水深が浅くなるに従いマウンド高さは高くなっており、その増加率は $V_H=100$ バージの場合より大きい。

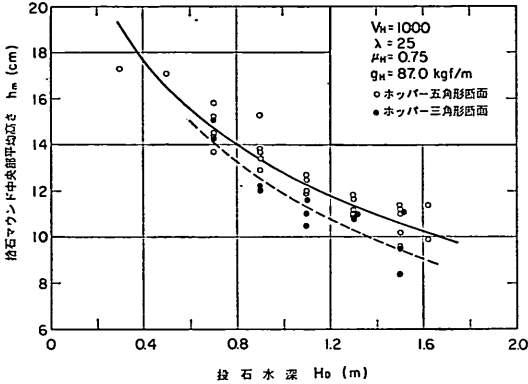


図-5.5 捨石マウンド高さの投石水深による変化

5.2 投石条件がマウンド形状に及ぼす影響

投石変数 (ϕ_D) と捨石マウンド形状係数 (K_L, K_B, K_o, K_H) の関係を投石水深 (H_D) が 0.9 m と 1.3 m の場合を例として図-5.6 と 図-5.7 に示した。前述のごとく、五角形断面のホッパーでは、ホッパー開口時間 (t_H) と投石時間 (t_D') の間には時間的な遅れがあり同値ではなかったが、ここで投石変数を求めるに際しては、ホッパー開口開始から捨石が全量流出するまでの時間 (t_H) を投石時間 (t_D) とした。

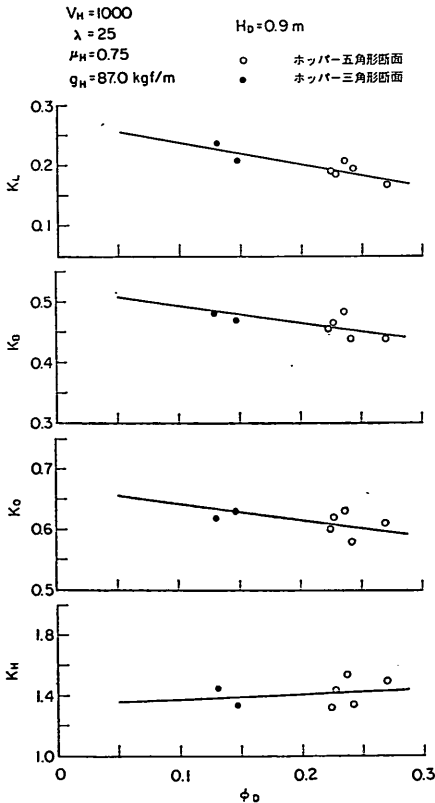


図-5.6 投石変数と捨石マウンド形状係数の関係 ($H_D=0.9$ m)

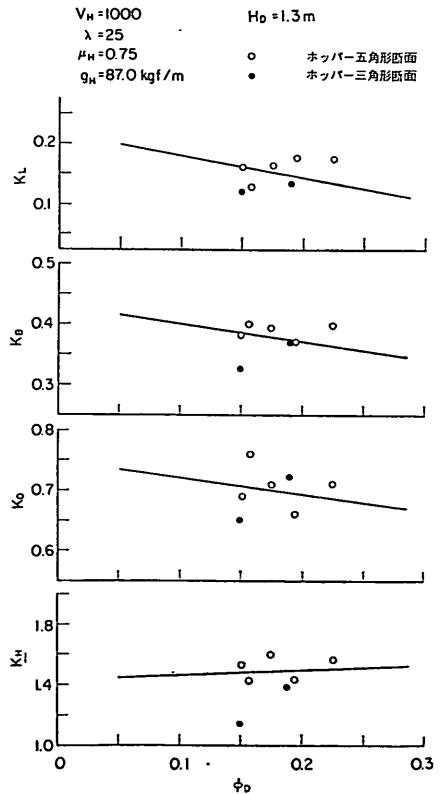


図-5.7 投石変数と捨石マウンド形状係数の関係 ($H_D=1.3$ m)

図中の直線は、 $V_H=100$ パージの場合と同様に、投石変数と捨石マウンド形状係数の間に直線相関があると考え最小2乗法で相関式を求めたのち、その勾配を平均化して得た近似相関式を示している。これらの図の傾向は既に 図-4.10~図-4.13 でみたものとまったく同形である。すなわち、投石時間を短くすればマウンドの長さや幅は大きくなり、高さは低くなる。その場合、幅方向の増加率は長さ方向の増加率より大きく、マウンドの平面形状は長楕円から円形へと変わっている。また投石時間

を長くすればマウンドの高さが高くなる。

$V_H=1000$ パージの場合も捨石マウンド形状係数を投石変数と投石水深を変数とする実験式で表すと次のようになった。

$$K_L = -0.37\phi_D - 0.34 \log H_D + 0.25 \quad (18)$$

$$K_B = -0.29\phi_D - 0.62 \log H_D + 0.49 \quad (19)$$

$$K_0 = -0.27\phi_D + 0.21H_D + 0.47 \quad (20)$$

$$K_H = 0.37\phi_D + 0.11H_D + 1.22 \quad (21)$$

図-5.8~図-5.11 はこの実験式の計算値と実測値を比較したものである。 K_H のばらつきが特に大きくなったが、実験式は平均的にマウンド形状を表している。

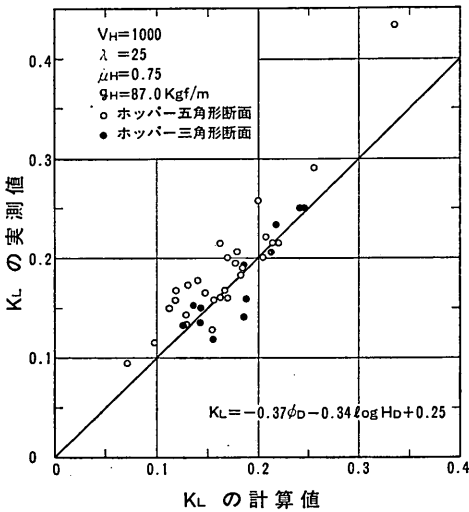


図-5.8 実験式 K_L の精度

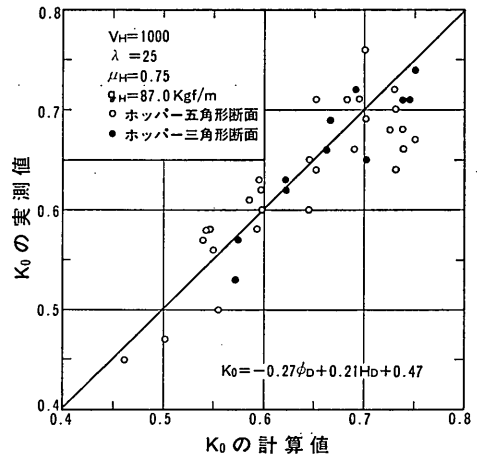


図-5.10 実験式 K_0 の精度

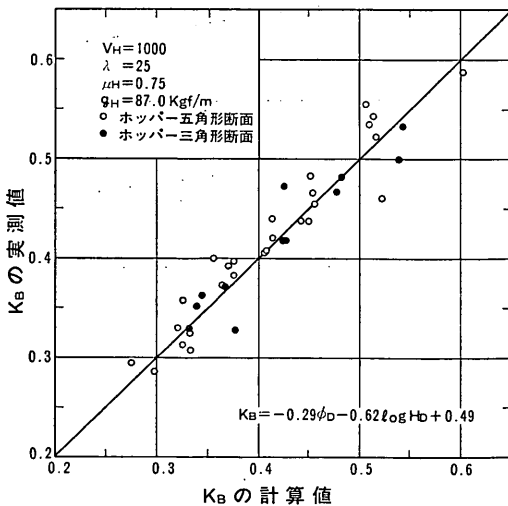


図-5.9 実験式 K_B の精度

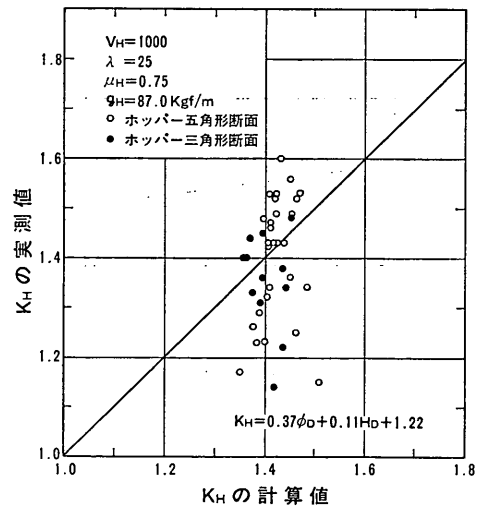


図-5.11 実験式 K_H の精度

底開式バージによる捨石マウンドの造成に関する実験

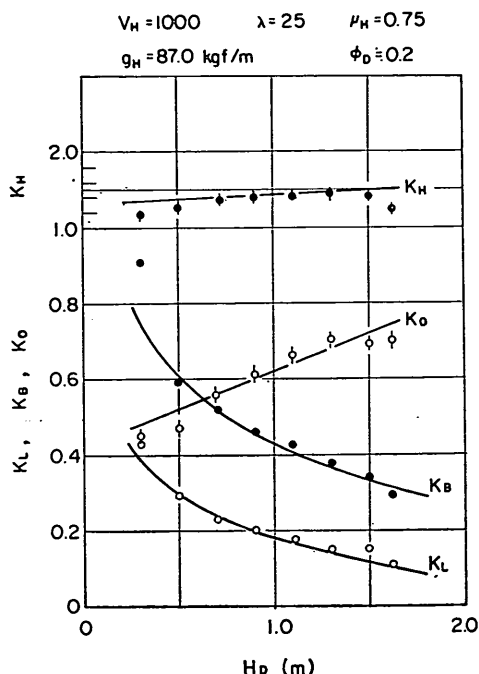


図-5.12 捨石マウンド形状係数の投石水深による変化例

一方、図-5.12 には 1 例として、 $\phi_D = 0.2$ のときの K_L, K_B, K_o, K_H と投石水深との関係を示した。図中の測点は実測値の平均値を、また実線は式 (18)～式 (21) の計算値に示す。捨石マウンド形状係数の投石水深による変化は、 $V_H = 100$ バージおよび $V_H = 1000$ バージとも類似の傾向を示している。

5.3 ホッパ断面形状がマウンド形状に及ぼす影響

同一船型 ($V_H = 1000$ バージ)、同一投石量 ($g_H = 87.0 \text{ kgf/m}$) でホッパ断面形状を五角形から三角形に変えた場合、ホッパ開口速度 (v_H) と投石時間 (t_D) および開口幅 (S_D) の関係は、図-5.1 に併記したように、ちょうど五角形断面ホッパの場合の相関式の延長線上に測点が並んだ。

五角形断面ホッパの場合でも開口速度を大きくしていけば、この三角形断面ホッパの結果に近い相関が得られると推定されるので、ホッパ断面形状の相異は、少なくとも本実験条件の範囲での形状の相異であれば、投石条件の相異として現れると考えることができる。その理由としては、スプリット式バージではホッパの開口とともに開口幅と甲板角度がともに増加していくこと、その場合ホッパ形状は捨石の流出のしやすさを決める要因であ

ることなどが考えられる。

投石条件の差は捨石マウンド形状に直接影響を及ぼす。例えば、図-5.5 はその一例を示したもので、投石時間の短い三角形断面ホッパの場合には、五角形断面ホッパの場合に比べ、マウンド高さが低くなっており、偏平な捨石マウンドを形成している。

一方、投石変数と捨石マウンド形状係数の関係を 図-5.6 および 図-5.7 でみると、いずれの係数も先に求めた五角形断面ホッパの場合の相関式上の上のっている。また 図-5.8～図-5.11 においても、両断面ホッパに対するマウンド形状に大差は認められない。これらのことから、ホッパ断面形状の相異は投石条件の相異として処理できると考えられる。

ホッパ断面形状がともに三角形である $V_H = 100$ バージと $V_H = 1000$ バージを比較すると、捨石マウンド形状係数と投石水深の関係は類似の変化特性を示しているが、絶対値には差が認められる。これより、捨石マウンド形状係数は、投石変数 (ϕ_D)、投石水深 (H_D) に加え、投石量 (g_H) を変数とする関数形であると考えられる。

6. 投石条件とマウンド形状における相似性の考察

本模型実験の結果の妥当性を検討するために、実船試験データ等との対比を行った。引用したデータは参考文献に報告されているものである。なお、付表-1 と付表-2 には模型実験および実船実験別にその研究概要を一覧表として示した。

ここで検討に際して、各研究は実験条件がかなり異なるので、すべて原型値に換算して整理した。

(1) 投石条件の相似性

ホッパ開口速度と投石時間の関係を基に、投石条件の相似性を考察した。図-6.1 において、① は 図-4.1 より $V_H = 100$ バージ ($\mu_H = 0.75$) に対する $v_H - t_D$ の関係を、② は 図-4.19 より $V_H = 100$ バージ ($\mu_H = 0.40$) に対する $v_H - t_D$ の関係を、また ③ は 図-5.1 より $V_H = 1000$ バージ ($\mu_H = 0.75$) に対する $v_H - t_D$ の関係を Froude の相似律により原型値に換算したものである。

文献 5) は、 500 m^3 積と 1000 m^3 積 1/20 模型 (ホッパのみ) による投石実験の結果を Froude の相似律を用い原型値に換算して転写したものである。 1000 m^3 積模型実験の結果は、ちょうど ③ 曲線の延長線上に、また 500 m^3 積模型実験の結果は ① と ③ の間に存在した。この結果から、両模型実験の特性は本実験の結果に近い

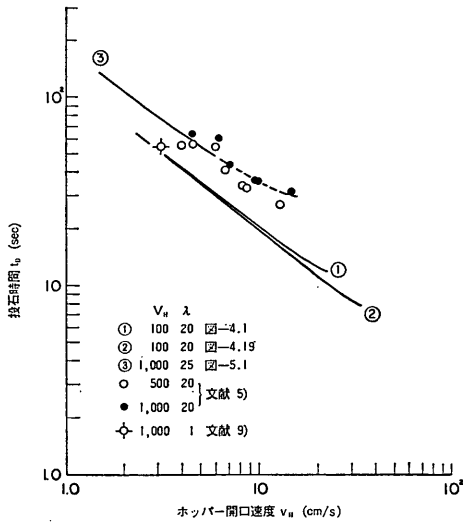


図-6.1 ホッパ開口速度と投石時間の相似性

ものであること、投石量をパラメータとして v_H-t_D 曲線が定まることがわかる。

一方、文献 9) に報告されている唯一の実船試験データを図-6.1 にプロットすると、曲線 ① に近い位置に転写された。このデータは 1000 m³ 積バージにおけるものであるから模型実験値との差が大きい。本実験と実船試験とは捨石の粒度分布が異なること、ホッパ内に積載された捨石層内の応力状態に相異があること、などの理由が想像されるが、今後もう少し検討する必要がある。

(2) 捨石マウンド形状係数 K_L の相似性

図-6.2 は捨石マウンド形状係数 K_L と投石水深の関係を図示したものである。図には式 (14) において $\phi_D = 0.2$ と置いたときの計算値を実線で、式 (18) において $\phi_D = 0.2$ と置いたときの計算値を破線で示した。

各実験データは、投石条件、投石量、捨石粒度分布、海底地形および状況、海象条件、計測方法などの諸実験条件が必ずしも同じでないし、また本実験式そのものも平均的な値を示すものでそれを中心にある程度の幅を有していることを考慮すると、本実験式により捨石マウンド形状を予測しえとえられる。

本実験条件の範囲は $\phi_D = 0.1 \sim 0.25$ であったが、ここで投石条件が異なった場合への適用性について検討してみる。

投石変数 ϕ_D の次元は $[L^2TW^{-1}]$ であるので、模型実験における ϕ_D は原型値に換算したとき $\phi_D/\sqrt{\lambda}$ に相

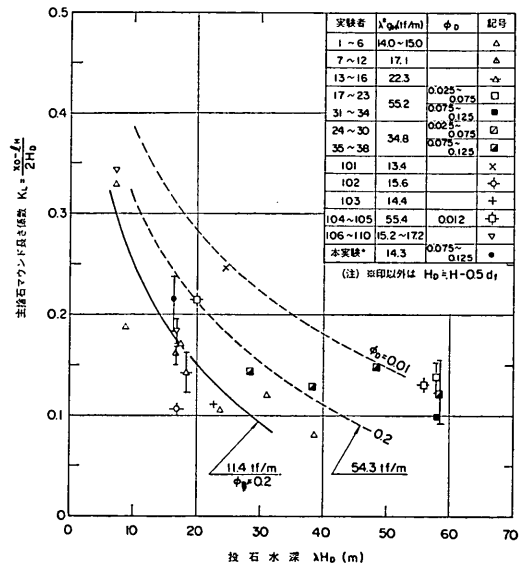


図-6.2 捨石マウンド形状係数 K_L の相似性

当する。いま、文献 9) の投石条件は投石変数にして ϕ_D (原型値) ≈ 0.01 であるから、模型実験では $\phi_D = 0.05$ に相当する。図-6.2 には $\phi_D = 0.01$ のときの計算値を記入してあるが、 $\phi_D = 0.05$ の曲線はそれより少し下側、 $\phi_D = 0.2$ 側に位置する。ただ式 (18) において、 ϕ_D の関係する第 1 項は第 2 および第 3 項に比べ小さいので $\phi_D = 0.01$ と 0.05 の曲線には大差はない。投石水深が 60 m の場合は本実験条件の範囲外であるが、この実験式を外挿して K_L を推定すると、ほぼ現地実験データに近い結果が得られる。

今後さらに本実験式と現地実験データの比較検討を行う必要があるが、上述の結果から本実験範囲外への適用も有効であると判断される。

(3) 捨石マウンド形状係数 K_B の相似性

図-6.3 は捨石マウンド形状係数 K_B と投石水深の関係を調べたものである。この場合、ホッパ開口幅 (S_D) を計測している実験が少ないので、対比できるデータが限られるが、式 (15) あるいは式 (19) で求めた K_B の予測値は定性的には実船試験の結果をよく表している。しかし絶対値の点では必ずしもすべてがよく一致しているとは言えない。

捨石マウンドの幅方向への広がり (y_0) は、投石条件や海底地形、海底摩擦係数などによって異なり、またホッパの開口方式として自然開口 (実船) であるか、強制開口 (模型) であるかの違いによって、ホッパの平均開

底開式パージによる捨石マウンドの造成に関する実験

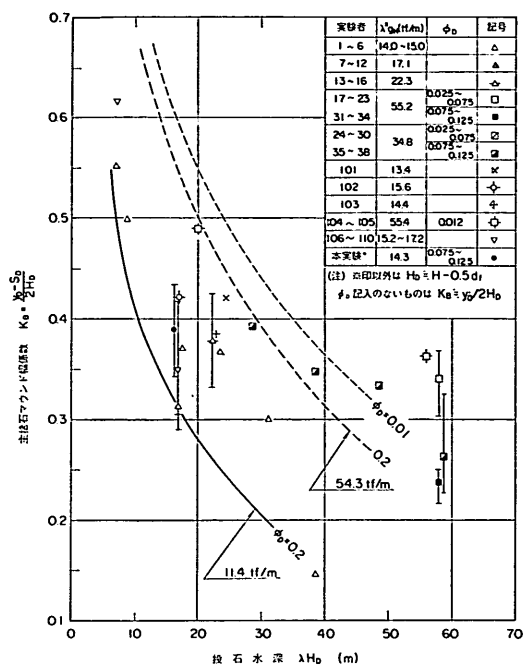


図-6.3 捨石マウンド形状係数 K_B の相似性

口速度を同じにしても開口幅 (S_D) そのものが異なるので、それらの要因を含む K_B の値の変動幅は大きくなることが予測される。

前項と同様に ϕ_D を変数として K_B を表したが、 H_D に比べると ϕ_D が K_B に及ぼす影響は小さい。

(4) 捨石マウンド形状係数 K_0 の相似性

図-6.4 は捨石マウンド形状係数 K_0 と投石水深の関係を示したものである。投石水深の増大とともに K_0 値は 1.0 へ漸近しており、しだいにマウンドの平面形状が長楕円から円形に推移していくようすが明らかとなっている。図中の実線および破線は式 (16) および式 (20) によって計算される K_0 の予測値である。

投石水深が 60m 付近の実験データは、本実験式を外挿した延長線上に位置しているので、 K_0 の予測はかなり有効と考えられる。

(5) 捨石マウンド形状係数 K_H の相似性

図-6.5 は捨石マウンド形状係数 K_H と投石水深の関係を示したものである。式 (17) および式 (20) による予測値は、定性的には実験データをよく表している。しかし絶対値という点では、本実験結果でもみたようにかなりの変動幅が認められる。これは h_{eq} の中に x_0 および y_0 が変数として入っていること、 h_m の計測方法や

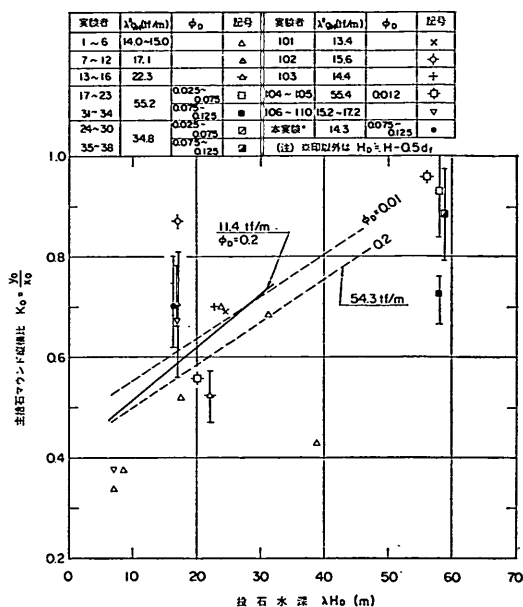


図-6.4 捨石マウンド形状係数 K_0 の相似性

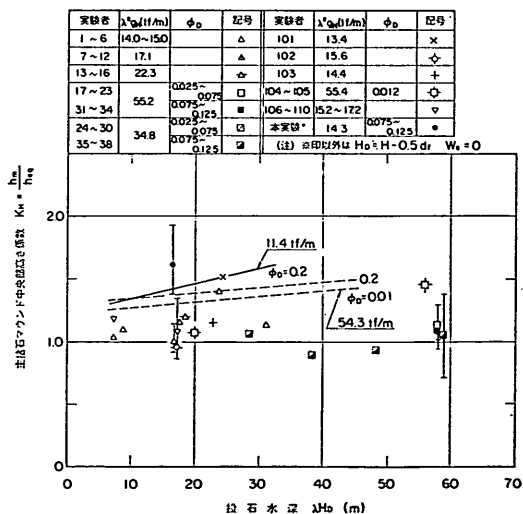


図-6.5 捨石マウンド形状係数 K_H の相似性

計測範囲が各実験によって異なること、海底への捨石の埋没度が異なることなど、さまざまな原因があると思われる。 K_H の実験式についてはもう少し検討する必要があると考えている。

(6) 総合評価

本実験で得られた捨石マウンド形状係数の予測値は、

定性的には実際の現象を正しく表しており、また定量的にもオーダとしては妥当といえる。精度的には本予測値で十分満足できるものもあれば、誤差の大きい場合もみられた。今後もう少し実験式の精度を向上させるための研究を行う必要があると考えている。その際、特に現地実験データの収集と本研究へのフィードバックが重要となる。

また、本研究でいえば、投石変数 ϕ_D を求めるに際しホップ開口幅 S_D を用いたが、その値は捨石が全量流出し終わったときのものであり、捨石流出速度が一番問題となるとき開口幅でない。開口幅は時々刻々増加していくので、その影響を考慮した投石変数を考えていけば、より実験式の精度が上がるだろうと考えている。

7. 結 論

底開式（スプリット式）バージからの投石条件と投石水深が海底に堆積する捨石マウンドの形状に及ぼす影響について実験的研究を行った。その結果を要約すると、

(1) ホップ開口速度と投石時間の間には投石量を変数とする双曲線的相関が認められた。ホップ断面形状や壁面摩擦係数が変化しても、投石量が同じであれば、開口速度と投石時間の関係はほぼ同じ相関式で近似された。

(2) 海底に堆積する捨石マウンドの形状は、バージからの投石条件と投石水深、および1回当たり投石量によって異なる。一般的傾向としては、投石時間が短いほどあるいは投石水深が大きいほど、捨石マウンドの平面形状は大きくなり、全体として偏平な形状になる。その逆の場合は、捨石マウンドの高さが高くなる。1回当たり投石量の増加は、マウンドの縦方向よりも幅方向の拡大にその影響が顕著に現れる。

(3) 投石条件を表すパラメータとして、投石時間、ホップ開口幅およびホップ単位長当たり投石量を変数とする投石変数を定義した。一方、捨石マウンドの形状に関する7つの無次元捨石マウンド形状係数を定義し、投石変数との相関を考察した。その結果、本実験範囲内では、両者の間に直線的相関が認められたが、そこには投石水深の影響がみられた。

(4) 捨石マウンド形状係数を投石変数と投石水深を変数とする実験式で表し、これを現地投石試験データと比較して相似性を考察した。

(5) 投石時に波の影響を受けた場合、バージを係留した状態では、船体の動揺は捨石マウンドの形状に大きな影響を及ぼさなかった。

謝 辞

本報告書は、運輸省第一港湾建設局より依頼を受けて実施した波浪下における捨石投入工法の開発に関する模型実験より、相似性の問題を中心に捨石マウンドの造成に係る最も基本的な現象についてとりまとめたものである。

本研究の実施に際し、本局機械課および新潟機械整備事務所の関係各位に多大な配慮をいただいた。また、運輸省第二港湾建設局からは貴重な資料を提供していただいた。ここに深甚なる謝辞を表す次第である。

(1982年9月30日受付)

参 考 文 献

- 1) 北海道開発局建設機械工作所：捨石投下試験（模型実験），昭和49年度捨石均し船開発試験報告書，昭和50年3月，13p.
- 2) 北海道開発局建設機械工作所：捨石投入船模型試験（第1報 全開式石運船模型実験），大水深用施工機械開発試験報告書，昭和53年3月，46p.
- 3) 北海道開発局建設機械工作所：捨石投入船模型試験（第3報 100m³ 捨込船現地実験及び1/18スケール模型実験），大水深用施工機械開発試験報告書，昭和55年3月，17p.
- 4) 北海道開発局建設機械工作所：捨石投入船模型試験（第4報 300m³ 積全開式捨石投入船の1/25及び1/12.5スケール模型実験），大水深用施工機械開発試験報告書，昭和56年3月，22p.
- 5) 運輸省第二港湾建設局宮古港工事事務所：金石港投石模型実験報告書，昭和56年3月，24p.
- 6) 運輸省第二港湾建設局宮古港工事事務所：金石港投石模型実験報告書，昭和57年1月，28p.
- 7) 運輸省第一港湾建設局秋田港工事事務所：外港地区に於ける工事施工について，第17回管内工事報告会資料，昭和54年2月，pp. 212~246.
- 8) 運輸省第一港湾建設局：防波堤工事の諸問題と構造の再検討——比較的水深の深い防波堤，第26回直轄港湾技術研究会資料，昭和50年10月，pp. 35~48.
- 9) 運輸省第二港湾建設局宮古港工事事務所：金石港湾口防波堤基礎築造工事調査報告書，昭和54年12月，329p.
- 10) 留萌開発建設部：捨石投下試験（現地実験），昭和49年度捨石均し船開発試験報告書，昭和50年3月.
- 11) 例えば，久保輝一郎ほか編：粉体（理論と応用），丸善，1979年，p. 50による.
- 12) 前掲11)のp. 320.
- 13) G. R. Alger and D. B. Simons: Fall Velocity of Irregular Shaped Particles. Proc. of ASCE, Journal of the Hydraulics Division, May, 1968, pp. 721-

底開式バージによる捨石マウンドの造成に関する実験

- 737.
- 14) 高橋英俊ほか：捨石の水中落下速度について，港湾技研資料，No. 249，1976年12月，36p.
- 15) 箭内寛治：砂および礫の水中落下の散らばりに関する研究——静水中における場合，土木学会論文集，第69号，昭和35年7月，pp. 51~57.
- 16) 箭内寛治：砂の集団投下および波を受けるときの平面的な散らばりについて，土木学会論文集，第71号，昭和35年11月，pp. 28~34.
- 17) 最上武雄編著：土質力学，技報堂，1969年，p. 897による.
- 18) 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，1965年1月，pp. 39~49.
- 19) 武藤碩夫ほか：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年1月，pp. 92~104.

記号一覧表

- a : 捨石粒子の最大長さ
- b : a に直角に測った捨石粒子の最大長さ (幅)
- c : 投影面に垂直に測った捨石粒子の最大長さ (厚さ)
- d_f : バージの満載吃水 (m)
- d_l : バージの軽荷吃水 (m)
- F : 捨石の形状係数 ($=p/q$)
- g_H : ホッパ単位長さ当たり投石量 ($=W_H/l_H$)
- H : 投石位置の水深 (m)
- H_D : バージを基準とした投石水深 (m)
- h_{eq} : 楕円相当マウンド高さ (cm)
- h_m : 捨石マウンド中央部平均高さ (cm)
- K_B : 主捨石マウンド幅係数
- K_H : 主捨石マウンド高さ係数
- K_L : 主捨石マウンド長さ係数
- K_x : 捨石マウンド最大散乱長さ係数
- K_y : 捨石マウンド最大散乱幅係数
- K_s : 捨石散乱重量比
- K_0 : 主捨石マウンド縦横比
- k : 比例定数

- l_H : バージのホッパ長さ (cm あるいは m)
- n : 捨石投入回数
- p : 捨石の偏平度 ($=c/b$)
- q : 捨石の長短度 ($=b/a$)
- S_D : 投石完了時のホッパ開口幅 (cm)
- S_H : t_H に相当するホッパ開口幅 (cm)
- t_D : 投石時間 (sec)
- t_D' : 五角形断面 $V_H=1000$ バージにおける実投石時間 (sec)
- t_H : ホッパ開口時間 (sec)
- u_s : 捨石の仮想流出速度
- V_H : バージ船型を表し， $V_H=100$ は 100m^3 積 1/20 模型船を， $V_H=1000$ は 1000m^3 積 1/25 模型船を示す。
- v_H : ホッパ開口速度 (cm/s)
- W_H : バージの捨石積載量 (kgf)
- W_s : 主捨石マウンド以遠に散乱した捨石量 (kgf)
- x : 最大捨石マウンド長さ (m)
- x_0 : 主捨石マウンド長さ (m)
- y : 最大捨石マウンド幅 (m)
- y_0 : 主捨石マウンド幅 (m)
- γ : ホッパ出口における捨石流出時の捨石の見かけ比重量
- λ : 模型比
- μ_H : 捨石とホッパ壁面の静止摩擦係数
- ϕ_D : 投石変数 (式 (4) による)

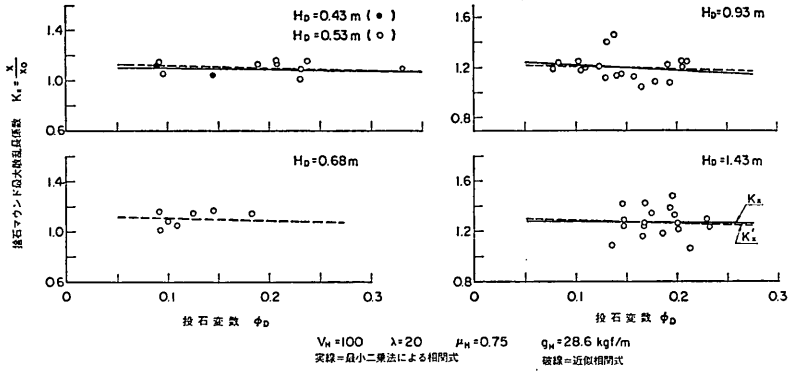
付録-I

(付図-1)~(付図-5)

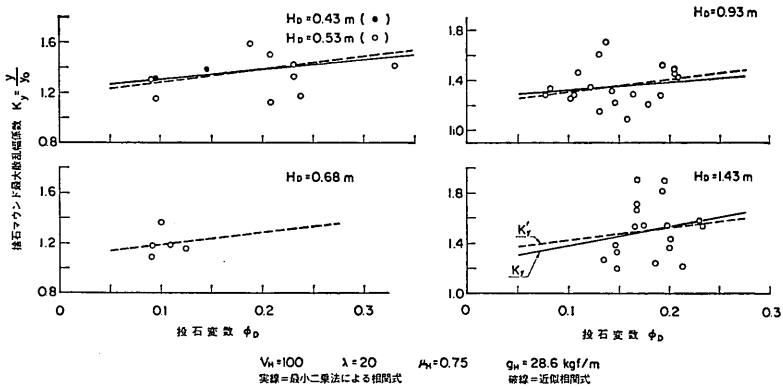
付録-II

捨石の投入とマウンドの形状に関する模型実験および実船試験の概要を付表-1と付表-2に示した。いずれも参考文献に報告されているものである。

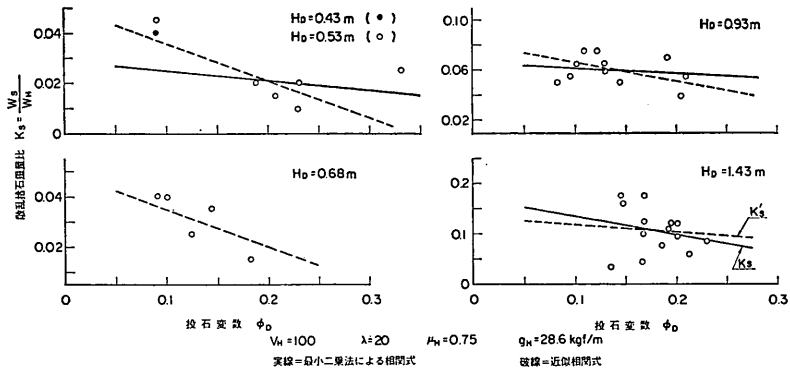
なお，本報告に引用するに際して，詳細なデータが不明なものは推定値を用いている。



付図-1 ϕ_D と K_x の関係



付図-2 ϕ_D と K_y の関係

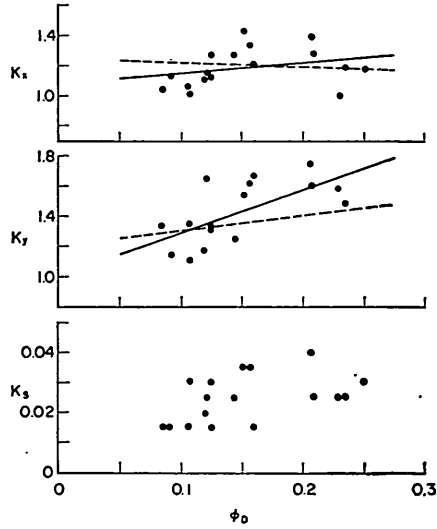


付図-3 ϕ_D と K_s の関係

底開式パージによる捨石マウンドの造成に関する実験

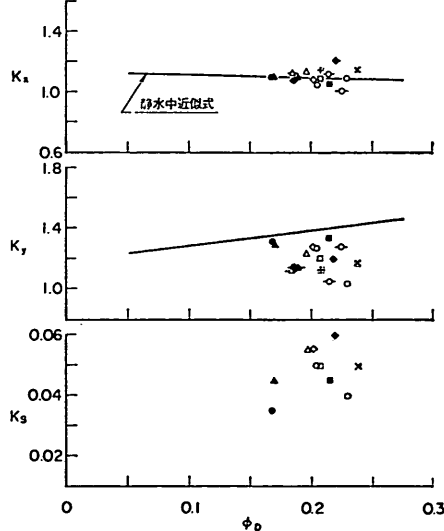
$V_H=100$
 $\lambda=20$
 $\mu_H=0.40$
 $g_H=28.6 \text{ kgf/m}$
 $H_D=0.93 \text{ m}$

— $\mu_H=0.40$
 最小二乗法による相関式
 - - - $\mu_H=0.75$
 近似相関式



付図-4 μ_H が K_x, K_y, K_s に及ぼす影響

波高 cm	周期 sec	n=1	n=2	備考	波高 cm	周期 sec	n=1	備考
0	0	x	+	波 ↓	2	1.0	□	波 ↓
2	1.0	○	○		4	"	■	
4	"	●	◆		2	1.8	○	
2	1.8	△	◇		4	"	◆	
4	"	▲	◆					



$V_H=100$ $\lambda=20$ $\mu_H=0.75$ $g_H=28.6 \text{ kgf/m}$ $H_D=0.53 \text{ m}$

付図-5 K_x, K_y, K_s に及ぼす波の影響

付表-1 模型

番号	実験者	実験条件			捨石 w (gf/個)	模型船				
		水深 H (m)	底質	その他		船型	原型値 $V_H(m^3)$ (模型比) λ	積載量 V_H (ℓ)	満載喫水 d_f (cm)	軽荷喫水 d_l (cm)
1	北海道開発局	0.75	砂鉄	静水中	1.3~3.8cm (1.8cm) ¹⁾	全開式	180 (1/25)	11.52	9.6	
2		0.34								
3	北海道開発局	0.4	砂鉄	静水中	1.3~3.8cm (1.5cm)	全開式	180 (1/25)	12.0		
4		1.0								
5		1.3								
6		1.6								
7	北海道開発局	1.0	砂鉄	静水中	(2.5cm)	全開式	100 (1/18)	17.15	13.3	
8										
9										
10										
11										
12										
13	北海道開発局	0.8	砂鉄	静水中	(2.4cm)	全開式	300 (1/25)	19.2	11.2	
14										
15										
16										
17	釜石港	3.0	砂	静水中	1.0~76 (20) ⁶⁾	全開式 ⁷⁾	1000 (1/20)	125	19.0	
18										
19										
20	釜石港	3.0	砂	静水中	1.0~23 (6.8)	全開式	1000 (1/20)	125	19.0	
21										
22										
23	釜石港	3.0	砂	静水中	7~76 (38)	全開式	1000 (1/20)	125	19.0	
24	釜石港	3.0	砂	静水中	1.0~76 (20.0)	全開式	500 (1/20)	62.5	14.0	
25										
26										

底開式バージによる捨石マウンドの造成に関する実験

実験一覧表

ホ ッ パ 形 状				捨 石 投 入 条 件			捨石マウンド形状(1投後)			
長 さ l_H (m)	幅 b_H (m)	開口幅 S_{max} (cm)	断 面 形 状	投石時間 t_D (sec)	開口幅 S_D (cm)	1回当り 投石量 g_H (kgf/m)	長 さ x_0 (m)	幅 y_0 (m)	高 さ h_m (cm)	堆 積 平 面 形 状
0.76			三角形	5		22.4 ²⁾	1.00	0.52	5.0	楕円
				5		22.4	0.95	0.32	7.7	"
0.80			五角形	5		24.0 ³⁾	0.93	0.35	8.5	楕円
				5		24.0	1.00	0.70	5.0	"
				5		24.0	1.10	0.75	3.5	"
				75		24.0	1.05	0.45		"
0.52	0.36		五角形	7		52.8 ⁴⁾	0.83	0.65	6.5	楕円
				8		52.8	0.83	0.65	6.0	"
				22		52.8	0.83	0.55	9.0	"
				23		52.8	0.82	0.54	8.7	"
				31		52.8	0.80	0.55	7.5	"
				34		52.8	0.81	0.54	8.0	"
0.86			五角形	5		35.7 ⁵⁾	1.10	0.63	7.0	楕円
				10		35.7	1.08	0.58	7.8	"
				15		35.7	1.06	0.54	8.6	"
				20		35.7	1.04	0.49	9.4	"
1.45	0.55		五角形	14.9	8.0	138 ⁸⁾	2.00	1.52	9.3 ⁹⁾	楕円
				9.9	10.0	138	2.22	1.86	8.3	"
				8.7	12.0	138	2.27	1.91	7.0	"
1.45	0.55		五角形	14.9	8.0	138	2.04	1.53	8.7	楕円
				8.2	12.0	138	2.25	2.00	6.3	円
				6.2	12.0	138	2.25	2.10	5.3	"
1.45	0.55		五角形	14.0	9.0	138	2.03	1.35	10.0	楕円
1.15	0.44		五角形	11.5	8.0	87 ¹⁰⁾	1.71	1.44	6.0 ⁹⁾	楕円
				9.3	9.0	87	1.85	1.69	5.0	円
				8.0	11.0	87	1.92	1.71	3.3	"

付 表-1

番号	実 験 者	実 験 条 件			捨 石 w (gf/個)	模 型 船				
		水深 H (m)	底質	その他		船 型	原型値 V_H (m^3) (模型比 λ)	積載量 V_H (ℓ)	満載喫水 d_f (cm)	軽荷喫水 d_l (cm)
27	釜石港	3.0	砂	静水中	1.0~23 (6.8)	全開式	500 (1/20)	62.5	14.0	
28										
29										
30	釜石港	3.0	砂	静水中	7~76 (38.0)	全開式	500 (1/20)	62.5	14.0	
31	釜石港	3.0	砂	静水中	1.0~23 (6.8)	全開式	1000 (1/20)	125	19.0	
32										
33										
34										
35	釜石港	3.0	砂	静水中	1.0~23 (6.8)	全開式	500 (1/20)	62.5	14.0	
36		2.5								
37		2.0								
38		1.5								

- 備考 1) () 内は 60% 粒径
 2) $q_H = 17 \text{ (kgf)} \div 0.76 \text{ (m)} = 22.4 \text{ (kgf/m)}$
 3) $q_H = 12 \text{ (l)} \times 1.6 \text{ (kgf/l)} \div 0.80 \text{ (m)} = 24.0 \text{ (kgf/m)}$
 4) $q_H = 17.15 \text{ (l)} \times 1.6 \text{ (kgf/l)} \div 0.52 \text{ (m)} = 52.8 \text{ (kgf/m)}$
 5) $q_H = 19.2 \text{ (l)} \times 1.6 \text{ (kgf/l)} \div 0.86 \text{ (m)} = 35.7 \text{ (kgf/m)}$
 6) () 内は 60% 相等捨石重量
 7) 船体模型はホップ部のみ、吃水は固定
 8) $q_H = 125 \text{ (l)} \times 1.6 \text{ (kgf/l)} \div 1.45 \text{ (m)} = 138 \text{ (kgf/m)}$
 9) 3 投後の堆積高さの 1/3 とした。
 10) $q_H = 62.5 \text{ (l)} \times 1.6 \text{ (kgf/l)} \div 1.15 \text{ (m)} = 87 \text{ (kgf/m)}$

底開式パージによる捨石マウンドの造成に関する実験

(つづき)

ホ ッ パ 形 状				捨 石 投 入 条 件			捨 石 マ ウ ン ド 形 状 (1 投 後)			
長 さ l_H (m)	幅 b_H (m)	開口幅 S_{max} (cm)	断 面 形 状	投石時間 t_D (sec)	開口幅 S_D (cm)	1 回 当 り 投 石 量 g_H (kgf/m)	長 さ x_0 (m)	幅 y_0 (m)	高 さ h_m (cm)	堆 積 平 面 形 状
1.15	0.44		五角形	12.6	7.5	87	1.69	1.49	6.0	楕円
				7.6	10.0	87	1.96	1.75	3.7	円
				6.0	11.0	87	2.06	2.01	2.3	"
1.15	0.44		五角形	12.4	8.5	87	1.78	1.41	7.3	楕円
1.45	0.55		五角形	7.4	12.0	138 ⁸⁾	2.16	2.18	6.0	円
				7.4	12.0	138	2.21	2.17	6.0	"
				7.4	12.0	138	2.28	2.22	6.3	"
				7.2	12.0	138	2.34	2.26	6.0	"
1.15	0.44		五角形	6.8	11.0	87 ¹⁰⁾	2.01	1.95	3.5	円
				6.0	11.0	87	1.87	1.73	3.8	"
				6.0	11.0	87	1.64	1.45	5.0	楕円
				6.6	11.0	87	1.56	1.23	7.3	"

付表-2 実船

番号	実験場所	実験条件				捨石重量 w (kgf/個)	捨石投入船			
		水深 H (m)	底質	波高 H_w (m)	潮流 (m/s)		船型	積載量 V_H (m ³)	満載喫水 d_f (m)	軽荷喫水 d_l (m)
101	新潟東港	25.5	細砂	0.1~0.5	0.3~0.34	10~100 (30) ¹⁾	側開式	200	1.75	
102	秋田港	17.9	砂	0.3~0.7	0~0.2	200~500 (330)	全開式	120	1.9	
103	小名浜港	24.0	細砂		0.5		全開式	180	2.4	
104	釜石港	22.0	礫・岩盤	0.4~1.6	0.1~0.15	30~300 (75)	全開式	1000	3.8	
105	"	58.0	砂礫	"	"	"	"	"	"	
106	増毛港	8.5	砂礫		0.1	30~300	全開式	180	2.4	
107	留萌港	18	砂・岩盤		0.3	30~300	全開式	180	2.4	
108	留萌港	18	砂			30~300 (45cm)	全開式	100	2.4	
109	"	"	"			"	"	"	"	
110	"	"	"			"	"	"	"	

- 備考 1) () 内は平均値
 2) $g_H \doteq 150 \text{ (m}^3) \times 1.6 \text{ (tf/m}^3) \div 17.9 \text{ (m)} = 13.4 \text{ (tf/m)}$
 3) $g_H \doteq 125.5 \text{ (m}^3) \times 1.6 \text{ (tf/m}^3) \div 12.9 \text{ (m)} = 15.6 \text{ (tf/m)}$
 4) $g_H \doteq 180 \text{ (m}^3) \times 1.6 \text{ (tf/m}^3) \div 20.0 \text{ (m)} = 14.4 \text{ (tf/m)}$
 5) $g_H \doteq 1000 \text{ (m}^3) \times 1.6 \text{ (tf/m}^3) \div 28.9 \text{ (m)} = 55.4 \text{ (tf/m)}$
 6) $g_H \doteq 180 \text{ (m}^3) \times 1.6 \text{ (tf/m}^3) \div 19.0 \text{ (m)} = 15.2 \text{ (tf/m)}$
 7) $g_H \doteq 100 \text{ (m}^3) \times 1.6 \text{ (tf/m}^3) \div 9.3 \text{ (m)} = 17.2 \text{ (tf/m)}$

底開式バージによる捨石マウンドの造成に関する実験

実験一覽表

ホ ッ パ 形 状				捨 石 投 入 条 件				捨石マウンド形状(1投後)				
長さ l_H (m)	幅 b_H (m)	開口幅 S_{max} (m)	断 面 形 状	投石時間 t_D (sec)	開口幅 S_D (m)	1 回 当 り 投 石 量 g_H (tf/m)	投石 回 数	長 さ x_0 (m)	幅 y_0 (m)	高 さ h_0 (m)	堆 積 平 面 形 状	横 断 面 形 状
17.9	6.6	1.0×2 (7.2)		15		13.4 ²⁾	3	~30.0	17.5~23.0 (20.7)	0.60~0.90 (0.77)	楕円	三角形
12.9	5.6	2.6	三角形	15~17		15.6 ³⁾	8	16.0~17.5 (16.5)	12.7~16.0 (14.3)	0.8~1.4 (1.08)	楕円 ~円	球帯
20.0	6.7	2.86	三角形			14.4 ⁴⁾		25.0	17.5	1.0		
28.9	11.8	3.5	五角形	49~62 (54)	1.25	55.4 ⁵⁾	5	36.3~39.0 (37.5)	20.4~21.7 (20.9)	2.60~3.26 (2.89)	楕円	山形
"	"	"	"	"	"	"	11	43.5	41.7	1.70	円	山形
19.0	6.4	1.25	三角形	25		15.2 ⁶⁾		24	9	2.1		三角形
19.0	6.4	1.25	三角形	25		15.2		25	14	1.1		
9.3	6.4	2.6	五角形	35		17.2 ⁷⁾	1	15.0	12.1	1.0	楕円	
"	"	"	"	92		"	1	15.9	10.5	1.7	"	
"	"	"	"	143		"	2	15.6	10.2	1.45	"	

港湾技術研究所報告 第21巻 索引

	論文名・著者名	巻号	頁
水 工 部			
	超音波式波高計の改良とその効果について……………高橋智晴・佐々木 弘……21	1	3~ 29
	レーザー・ドップラー流速計による碎波帯内の流速場の構造の解明 ……………灘岡和夫・近藤隆道・田中則男……21	2	49~106
	不規則波実験による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する研究 ……………谷本勝利・柳生忠彦・村永 努・柴田鋼三・合田良実……21	3	3~ 42
	直立消波ケーソンの反射率に関する理論及び実験的研究 ……………谷本勝利・吉本靖俊……21	3	43~ 77
海洋水理部			
	下層2層流についての実験的研究……………加藤 始・中野 晋・池田高則……21	1	31~ 56
	造波機によって発生する斜め波の特性について……………高山知司……21	2	3~ 48
	ブイ係留船舶の荒天時の振れ回り運動……………鈴木康正・諸石一幸……21	2	107~150
	各種消波工による越波流量の減少効果……………高山知司・永井紀彦・西田一彦……21	2	151~205
	恒流に及ぼす風と淡水流入量の影響 —泉南沖データ(1978~1981)による検討— ……………村上和男・森川雅行・坂口達也……21	4	3~ 39
土 質 部			
	非線形一次元圧密沈下の解析法とその適用……………小林正樹……21	1	57~ 79
	コンクリート舗装の目地部における荷重伝達機能 ……………福手 勤・八谷好高・山崎英男……21	2	207~236
	鋼矢板壁の透水実験……………荘司喜博・条田政治・富田幸晴……21	4	41~ 82
構 造 部			
	7年間海洋環境下に暴露したプレストレストコンクリートはりの 耐海水性について……………大即信明・下沢 治……21	2	237~259
	根入れ鋼板セルの耐震性に関する実験的研究 ……………野田節男・北澤壮介・飯田 毅・森 信夫・田 渕 博……21	3	79 ~167

深層混合処理工法による改良地盤の地震時挙動

..... 稲富隆昌・風間基樹・今村俊博.....21 4 83~129

設計基準部

係船岸におけるたわみ性控え工の設計に関する研究 (第2報)

—実験的考察—..... 松並仁茂・吉田行秀.....21 1 81~121

港湾経済効果の計測手法..... 中野 勉・稲村 肇.....21 2 261~314

機 材 部

付着油除去システムの開発実験..... 奥出 律・松本 茂.....21 2 315~348

底開式バージによる捨石マウンドの造成に関する実験

..... 奥出 律・山谷弘幸・松本 茂.....21 4 131~171

Index of Report of P.H.R.I. Vol. 21

Vol. No. pp.

Hydraulic Engineering Division

Improvement of the Ultrasonic-Wave Wavemeter for the Coastal Wave Observation and its Effect Tomoharu TAKAHASHI and Hiroshi SASAKI.....	21	1	3~ 29
The Structure of Velocity Field within the Surf Zone Revealed by Means of Laser-Doppler Anemometry Kazuo NADAOKA, Takamichi KONDOH and Norio TANAKA.....	21	2	49~106
Stability of Armor Units for Foundation Mounds of Composite Breakwaters Determined by Irregular Wave Tests Katsutoshi TANIMOTO, Tadahiko YAGYU, Tsutomu MURANAGA, Kozo SHIBATA and Yoshimi GODA.....	21	3	3~ 42
Theoretical and Experimental Study of Reflection Coefficient for Wave Dissipating Caisson with a Permeable Front wall Katsutoshi TANIMOTO and Yasutoshi YOSHIMOTO.....	21	3	43~ 77

Marine Hydrodynamics Division

Experimental Study of Lower Two-Layer Stratified Flow Hajime KATO, Susumu NAKANO and Takanori IKEDA.....	21	1	31~ 56
Theoretical Properties of Oblique Waves Generated by Serpent-type Wavemakers..... Tomotsuka TAKAYAMA.....	21	2	3~ 48
On the Slow Motions of Ships Moored to Single-point Mooring Systems Yasumasa SUZUKI and Kazuyuki MOROISHI.....	21	2	107~150
Decrease of Wave Overtopping Amount due to Seawalls of Low Crest Types Tomotsuka TAKAYAMA, Toshihiko NAGAI and Kazuhiko NISHIDA.....	21	2	151~205
Wind Effect and Water Discharge Effect on Constant Flow —Discussion Using Observation Data at Off-Sennan (1978~1981)— Kazuo MURAKAMI, Masayuki MORIKAWA and Tatsuya SAKAGUCHI.....	21	4	3~ 39

Soils Division

Numerical Analysis of One-Dimensional Consolidation Problems Masaki KOBAYASHI.....	21	1	57~ 79
---	----	---	--------

Efficiency of Load Transfer at Joints in Concrete Pavements
..... Tsutomu FUKUTE, Yoshitaka HACHYA and Hideo YAMAZAKI.....21 2 207~236

Experiments on Seepage through Interlocking Joints of Sheet Pile
..... Yoshihiro SHOJI, Masaharu KUMEDA and Yukiharu TOMITA.....21 4 41~ 82

Structures Division

The Study on the Durability of PC Beams after 7 Years' Exposure in
Marine Environment.....Nobuaki OHTSUKI and Osamu SHIMOZAWA.....21 2 237~259

An Experimental Study on the Earthquake Resistance of Steel Plate
Cellular Bulkheads with Embedment
.....Setsuo NODA, Sosuke KITAZAWA, Takeshi IIDA, Nobuo MORI
and Hiroshi TABUCHI.....21 3 79~167

Observation and Analysis of Seismic Response of Improved Ground by
Deep Mixing Method
..... Takamasa INATOMI, Motoki KAZAMA and Toshihiro IMAMURA.....21 4 83~129

Design Standard Division

Studies on the Design Method of Flexible Anchorage of the Quaywall
(2nd Report)—Experimental Studies—
.....Hitoshige MATSUNAMI and Yoshihide YOSHIDA.....21 1 81~121

Development and Application of Synthetic Economic Evaluation Model
for Port Planning..... Tsutomu NAKANO and Hajime INAMURA.....21 2 261~314

Machinery Division

Development of Removal System for Spilt Oil Sticking to Beaches and
Coastal Structures..... Tadasu OKUDE and Shigeru MATSUMOTO.....21 2 315~348

Experimental Study on Construction of Rubble Mound by Split Hopper
Barge..... Tadasu OKUDE, Hiroyuki YAMAYA and Shigeru MATSUMOTO.....21 4 131~171