港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 423 June. 1982

捨込ならし工法の開発(その1)
——シュート方式捨込ならし工法の基本特性——

奥出　律
山谷弘幸
白井一洋

運輸省港湾技術研究所

国土技術政策総合研究所 図書室 蔵書

目　　次

要　旨 …… 3

1. まえがき …… 3

2. 捨込ならし工法の原理と実験要素 …… 4

3. 実験概要 …… 6
   3.1 実験装置および実験方法 …… 6
   3.2 計測項目および計測方法 …… 6
   3.3 実験条件 …… 7

4. 捨込ならし実験の結果と考察 …… 9
   4.1 捨込ならし抵抗力の特性 …… 9
   4.2 捨込ならしマウンドの出来形 …… 17
   4.3 捨込ならしマウンドの力学的特性 …… 23

5. まとめ …… 25

6. あとがき …… 25

参考文献 …… 25
記号一覧表 …… 26
付　録 …… 26

Development of Rubble Mound Levelling Technique (Part-1)
– Basic Characteristics of a Chute-type Rubble Mound Levelling Method –

Tadasu OKUDE*
Hiroyuki YAMAYA**
Kazuhiro SHIRAI**

Synopsis

An experimental study was made to investigate the basic characteristics of a chute-type rubble mound levelling method.

Levelling forces acting on chute, geometric configuration of levelled mound and mound porosity were measured through the model experiments, where the factors investigated were configuration of base mound, shape of chute, mound thickness to be levelled, chute travelling velocity and mound overlap rate.

Judging from a movement of stones at the chute mouth, authors assumed that there existed a fluidic zone with continuous outflow of stones and a stationary zone with sliding stones, and the levelling forces on chute were caused by an existence of a stationary zone. The rate of each zone depends on the levelling conditions.

Experimental results were discussed by a parameter ψ_n, which was proposed to express the mound levelling conditions.

It was recognized that levelling forces in a horizontal direction increased with a decrease of ψ_n, and the maximum values appeared at the beginning of chute movement.

As for the geometric configuration of the levelled mound, the top width was equal to the breadth of chute and the grade of slope to the angle of repose. There existed a constant clearance between the chute mouth and the levelled mound surface, which had a small roughness within ±40 mm. The percentage of void in the levelled mound layer was 0.3 to 0.5.

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

捨込ならし工法の開発(その１)

―シュート方式捨込ならし工法の基本特性―

奥 出 律*
山 谷 弘 幸**
白 井 一 洋**

要 旨

捨石を連続してシュートに捨て込みながらマウンドを造成し，同時にならすことのできるシュート方式捨込ならし工法の基本特性を実験により明らかにした。

本工法の施工性能に影響を及ぼす実験要素として，基礎マウンドの性状，捨込ならしシュートの形状，捨込ならし層厚，捨込ならし速度および捨込ならしマウンド重ね合わせ幅を考え，これらが捨込ならし抵抗力，造成されるマウンドの形状，施工精度および力学的特性に及ぼす影響を考察した。

捨込ならしシュートの出口では捨石の流動域と停滞域が存在し，その比率はシュート形状，捨込ならし層厚等の捨込ならし条件によって異なる。捨込ならし抵抗力はこの捨石停滞域の存在に起因すると考えられる。

捨込ならし条件を表示するパラメータとしてΨ_nを導き，Ψ_nと捨込ならし抵抗力との関係を考察した。捨込ならし水平抵抗力は，$\Psi_n < 3$の範囲で増大し，かつシュートの始動時に最大となることがわかった。

造成される捨込ならしマウンドは幾何学的に安定した形状を示した。すなわち，マウンド天端幅はシュート幅に等しく，法尻角度はならし捨石の安息角にほぼ等しくなった。ならしマウンド天端面高さは，シュート出口より捨石の粒径程度低く造成された。

捨込ならしマウンドの天端面不陸精度は，振動締め固め機を併用した場合，ほぼ± 40 mm 以下の精度を満足した。またマウンドの空隙率は 0.3 ～ 0.5 の範囲であった。

1. まえがき

防波堤，護岸などの港湾構造物の建設における技術動向のひとつとして，大水深化，大規模化があげられる。現在建設（計画）中の外海に面した防波堤，あるいは沖合人工島構想の中で検討されている外郭施設など，この範ちゅうに入るものは多い。これらの構造物は，従来のものに比べると，自然条件の厳しい海域に建設されることになるので，設計条件のみならず施工条件も一段と厳しいものになってくる。

防波堤や護岸の基礎としての捨石マウンドの造成は，海上工事の中でも重要な部分を占めている。従来，この作業は，ガット船等により捨石を投入したのち，潜水夫が人力で捨石を１個ずつ移動しながらならし作業を行い，ケーソン据付天端面を成形してきた。昭和 40 年代中頃より大量急速施工への要請が強まるなかで，捨石ならしの機械化施工が注目され，種々の研究開発がなされている。例えば，捨石を水平力でならす方法（ブレード曳航方式，振子型水平振動方式，水中ブルドーザ方式など），捨石を垂直力で締め固めながらならす方法（重錘方式，垂直振動方式など），その他の方法（スクリュー方式，スクリード方式など）がある。[1)~7)] これらの中には一部の本工事に採用されているものもあるが，捨石ならしの機械化施工は遅々として進展していない。その最大の理由は，大形の捨石を規定の精度にならすことが機構的にも難しく，また経済性の面でも優位性に欠けたからであろうと思われる。しかしながら，今後の大水深化，大規模化という施工条件を勘案するとき，捨石ならし作業へ

* 機材部　特殊作業船開発室長
** 機材部　特殊作業船開発室

の機械化の導入は不可欠のものと思われ，早急に適切な技術の開発が必要である。在来工法は個々に特色があるものの，今後の施工条件に対し施工水深，施工精度，施工能力の面で，また機構的な面でも対応が難しいように思われる。

捨石マウンドの造成技術は，単に施工機械の開発というハード的な問題だけでなく，捨石の最小重量，天端面の許容不陸精度，マウンド支持力，ケーソン強度，マウンド検測などのソフト的な問題を念頭に置きながら開発を進めなければならない面で難しさがある。

本研究でとりあげた捨込みならし工法とは，捨石を連続してシュートに捨て込みながらマウンドを造成し，同時にならすもので，原理的にはスクリード工法に近いものである。しかし，スクリード工法がマウンド捨石として砂利・砕石などの比較的小さな石材を用いたのに対し，本工法ではケーソン真下に敷く捨石を対象としており，石材の大きさおよび造成しようとするマウンド層厚において大きく異なる。

本報告では，このシュート方式捨込ならし工法の基本特性，すなわち，捨込ならし抵抗力，造成されるマウンドの形状，施工精度および力学的特性などを実験により明らかにした。

2. 捨入ならし工法の原理と実験要素

現在，防波堤捨石マウンドの造成は，基礎捨石の安定を図る等の理由から，一般に基礎捨石の投入を先行して行い，一定期間置いたのち，ケーソン据付直前に，マウンド天端面の捨石を補充しながら，そのならし作業を行うことが多い。それゆえ，マウンド天端面のある層厚の捨石の投入とそのならし作業とが同時に行えれば，捨石マウンド築造工事の施工能率は著しく向上するものと思われる。

捨込ならし工法とは，図ー2.1に示すように，石運船等によって捨て込まれ概成した基礎マウンド上に，ならし捨石をシュートを用いて連続投入しながらシュートを水平移動させ，ケーソン据付マウンドを造成するとともに，同時にならし作業も行わせようとするものである。

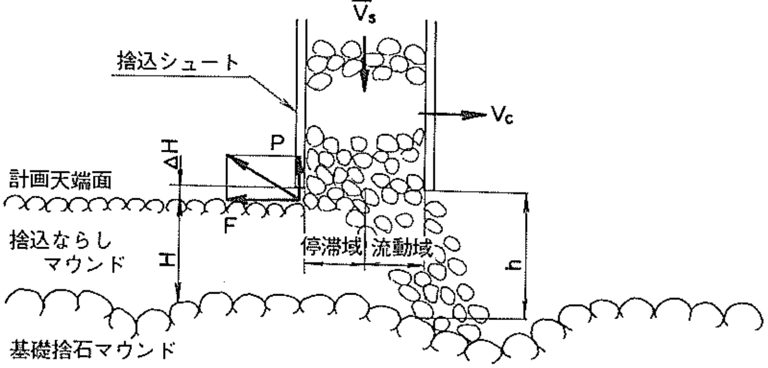
本工法には，図でみるように，従来の水平機械力ならし工法におけるならし板に相当するものが構造的になく，シュートは基礎マウンドに直接接触せず，捨石はシュート底面より連続して流出する。シュート出口における捨石の流動状況を観察すると，シュートの前方からは捨石が連続して流出していくが（流動域），後方の捨石は流動が小さく，時には静止状態のままマウンド上面を引きずられていく（停滞域）。本工法における捨込ならし抵抗力は，この停滞域での捨石層のせん断抵抗によるものと考えられる。

捨石流動域と停滞域の比率は，シュート形状，捨込ならし層厚（h），捨込ならし速度（V_c）等に依存する。捨石の供給が十分であれば停滞域が存在し，捨込ならしマウンドを一定高さ（H）に形成することができる。しかし，停滞域の拡大は捨込ならし抵抗力の増大に関連するので，最適捨込ならし条件が存在するものと思われる。

捨込ならし工法では，このようにシュートを水平に移動させること，必要な捨石量を連続してシュートに供給すること，シュート内で捨石が閉塞を起こさないこと等が基本条件となる。

一方，本工法の施工性能に影響を及ぼす基本要素としては次のものがある。

① 捨込ならし捨石の性状



図ー2.1　シュート方式捨込ならし工法の原理図

② 基礎マウンドの性状
③ シュートの形状
④ 捨込ならし層厚
⑤ 捨込ならし速度
⑥ 捨込ならしマウンド重ね合わせ幅
⑦ シュート内捨石重量

①および②は設計条件あるいは施工条件として与えられる要素である。③〜⑦は施工時に選択できる制御要素と考えることができる。そこで，本研究では，この制御要素が施工性能に及ぼす影響を調べることを目的とした。

ここで，上記各要素について若干の説明を加えると，

a) 捨込ならし捨石の性状

捨込ならし捨石（以下捨石という）の性状として考慮しなければならない因子は，幾何学的なものとして，大きさ，重量，形状，分布であり，力学的なものとして，比重，硬度，安息角，内部摩擦角などである。

捨石ならしの機械化施工を考えるとき，最も問題となるのが捨石の大きさ（重量）である。これまでの研究開発では，捨石が小さいほどならし力は少なく，ならし精度もよいことが明らかにされている。捨石の小形化に対する問題は，水粒子の運動による捨石の流出あるいは吸出し，マウンド支持力などにあるといわれている。しかし最近では，捨石の最小重量に関する研究[8]も行われており，また，マウンド天端水深の大水深化とともに，ケーソン真下の据付マウンドに30〜50 kgf／個程度の捨石を転圧した工事例[4]もみられる。

今回の実験では，これらの動向を参考に比較的小重量の捨石を対象とした。

b) 基礎マウンドの性状

石運船により直投入された基礎マウンドには，マウンド上面にかなりの不陸が残っている。この不陸はガット船で補足投入しても，ならしを不要とする精度までには仕上がらない。

捨石を石運船より潜水夫の指示で投下させれば，捨石山の不陸は最大± 1.0 mの範囲におさえることができたとの報告[9]もある。いま，そのようなマウンドに対し本工法を適用した場合を想定すると，基礎マウンドの凹部に対しては捨石の必要量の算定とそれに連続的に供給する方法の問題となり，また凸部に対しては，捨込ならし層厚の変動に基づく捨込ならし抵抗力の変化特性の問題となる。今回の実験では後者の考察に重点を置いた。

c) シュートの形状

シュートに必要な条件は，捨石がシュート内に閉塞せず，連続して円滑に流出する断面形状であること，捨込ならし抵抗力が小さく，かつならしマウンドの精度が良好となる形状寸法であること，などであろう。

d) 捨込ならし層厚（h）

捨込ならし層厚とは，基礎マウンド上に敷く捨石層厚のことで，シュート出口と基礎マウンド表面との間隔（h）である。捨込ならし層厚が減少すると，シュートから流出する捨石量は減り，捨込ならし抵抗力が増大する。これは，捨込ならし層厚が減少するに伴い基礎マウンドの力学的影響を強く受けるようになるためである。これに対し，捨込ならし層厚が増大すると，シュートから流出する捨石量は増大するが，捨込ならし抵抗力は漸減すると考えられる。

適正な捨込ならし層厚は，基本的には採用する捨石の大きさに依存すると思われる。本実験では，捨込ならし層厚の変化が捨込ならし抵抗力あるいはならし精度に及ぼす影響の考察に重点を置いた。

e) 捨込ならし速度（V_c）

捨込ならし速度は，本工法の施工能力を決める主要因である。土砂掘削に関する研究[10]では，掘削押土速度の影響は実用されている速度の範囲ではあまり顕著でないといわれている。また，粗粒れきに対する水中掘削抵抗に関する研究[11]でも，掘削速度が 50 cm/s 以下では掘削抵抗に及ぼす掘削速度の影響はきわめて小さい。しかしながら本工法では，捨石ならし速度が小さくなると，シュート内の捨石停滞域が拡大するので，捨込ならし速度がならし抵抗力にどのような影響を及ぼすかその関係を調べる必要がある。

f) 捨込ならしマウンド重ね合わせ幅（b_r）

捨込ならしマウンド重ね合わせ幅とは，シュートを横方向に移動しマウンドを面的に造成していくとき，既設マウンドとの継ぎめにおけるシュートのラップ幅のことである。

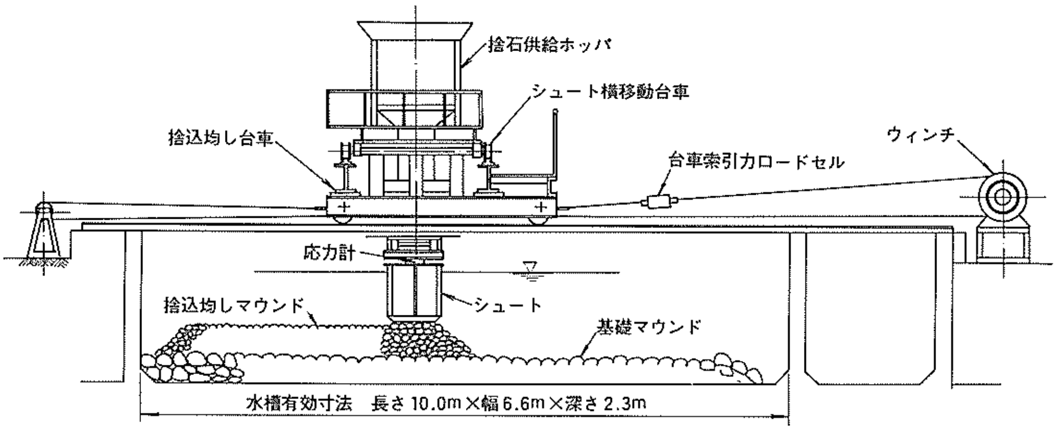
本要素は，捨込ならし速度とともに施工能力を決める主要因である。また，マウンドの重ね合わせ幅により捨込ならし抵抗力がどの程度増大するか，あるいは継ぎめ部のマウンド精度がどう変化するかなどを調べる必要がある。

g) シュート内の捨石重量

シュート内の捨石重量は，シュートの始動時および走行時の捨込ならし抵抗力に関係する要素として重要である。

一方，本研究では，捨込ならし工法の性能の評価を次の点から行った。

① 捨込ならし抵抗力
② 造成されるマウンドの形状
③ 造成されたマウンドの力学的特性



図－3.1　実験装置全体図

3.　実験概要

3.1　実験装置および実験方法

実験装置の全体図を図－3.1 に示す。

実験水槽は，長さ 10 m×幅 6.6 m ×深さ 2.3 m で，長さ方向の水槽壁上には軌条が敷かれている。捨込ならし台車はこの軌条上を電動ウィンチによってけん引され，走行した。捨込ならし台車上にはシュート横移動台車があり，それに捨石供給ホッパ，捨石供給シュートおよびシュート昇降装置，ならびに捨込ならしシュートを装備した。捨石供給ホッパの容積は 2.7 m^3 で，内部を 8 区画に分け，それぞれの区画の底に独立して開閉できる扉を設けた。捨石供給シュートは上部が 800 mm×460 mm，下部が 850 mm × 500 mm のく（矩）形断面で上下に約 800 mm 昇降できる構造となっている。捨込ならしシュートは下部捨石供給シュートの先端に取り付けられた。

実験は，基礎マウンドを人力で造成し，その形状を計測したのち，捨込ならし台車とシュート横移動台車を始動位置に固定した。捨石供給シュートを上下に調整して捨込ならし層厚を設定したのち，捨石供給ホッパから捨石をシュート内に供給した。シュート内に一定量の捨石が入ったことを確認してから，捨込ならし台車を始動させ，1 条めのマウンドを造成した。台車走行中，捨石供給シュート内の捨石量が減ると，捨石供給ホッパの扉を順次開放し捨石を供給した。造成したならしマウンドの 1 条の長さは約 5 m である。

1 条めの実験が終わると捨込ならし台車を始動位置に戻し，シュート横移動台車を 2 条めの位置に移動固定した。その後の実験手順は 1 条めの場合と同様である。実験は，連続して 3 条を造成し 1 ケースとした。

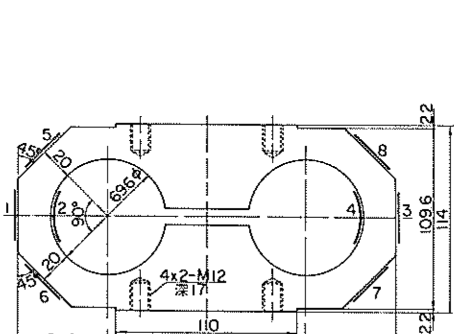
3 条めの造成が終わると，捨込ならしマウンドの形状（法肩幅，法尻幅，マウンド天端面高さ）を計測するとともに，空隙率，振動締め固め試験，平板載荷試験等を行った。計測終了後は捨石を水槽の外に回収し，再び基礎マウンドを次の実験条件に合わせ造成した。

3.2　計測項目および計測方法

計測は，捨込ならし抵抗力に関するもの，マウンドの幾何学的形状に関するもの，および捨込ならしマウンドの力学的特性に関するものについて行った。

a)　捨込ならし抵抗力に関する計測

捨込ならし抵抗力は，図－3.2 の形状をした 3 成分応力計によった。[12] 図のもので，容量は垂直力 4 tonf，水平力 3 tonf，およびモーメント 20 tonf-m である。



図－3.2　捨込ならし抵抗力計

捨込ならし台車のけん引力はけん引側のワイヤーロープに 5 tonf のロードセルを取り付け計測した。なお，けん引力の測定は，捨込ならし抵抗力の絶対値をチェックするために行ったものである。

捨込ならし台車の走行速度は，ウインチドラムの回転数を一定に設定することによって定速が得られるが，負荷時の速度を確認するため，一定区間の台車通過時間を測定した。

b) マウンドの幾何学的形状に関する計測

基礎マウンドの高さは，マウンド中央部の縦 5 m × 横 4 m の区域を 50 cm 間隔に分割し，その格子点で計測した。計測方法は，計測棒を水位計とするマノメータ方式によった。計測棒の先端寸法は直径 110 mm の円板とした。この寸法は供試石材の粒径に近いものであり，また，400 kHz（半減全角 3.1°）の超音波送受波器を 2 m上方から発振したときの捨石マウンド面上でのビーム幅に相当するものである。[13]

一方，造成したならしマウンドについては，法肩幅，法尻幅および天端面高さを計測した。

天端面高さの計測は，マウンドを縦横 25 cm 間隔に分割し，その格子点で行った。計測方法は基礎マウンドの計測方法と同様にマノメータ方式によった。計測棒先端の寸法は直径 30 mm の円板とし，数ケースについて直径 110 mm の円板も併用した。これは，計測棒の大きさの違いが計測したマウンドの精度にどの程度の影響を与えるかを調べるために行ったものである。一方，捨込ならしマウンドの計測に直径 30 mm の円板を採用した理由は，マウンドをできるだけシャープに計測するという意味であり，供試捨石の最小径の 1/2 程度を選択した。

c) 捨石ならしマウンドの力学的特性に関する計測

造成したマウンドの力学的特性に関する計測として，マウンド空隙率，振動締め固め試験および平板載荷試験を実施した。

ならしマウンドの空隙率は，捨石の形状，粒度分布，マウンド造成法等により異なることが推察される。本実験では，1 か所当たり 30 ～ 40 個の捨石を取り除きその重量を測定するとともに，取り除いた穴の中に薄手のビニールシートを敷き，そこに水を張ってその体積を求めた。空隙率の測定位置は，マウンド層厚，捨込ならし速度，振動締め固めマウンド等を考慮して選択した。

振動締め固め試験は，ならしマウンドを締め固めるというよりは，むしろマウンド天端面の不陸精度を向上させるという目的が強い。使用した振動機は道路工事等に使用されている一般機種で小型のものである。その仕様は，転圧盤の寸法 600mm×420mm，振動数 5,800 V/min，遠心力 1,550 kgf，概重量 85 kgf である。振動機をかけた後のマウンドは，直径 30 mm の計測棒で 25 cm 間隔に計測した。

一方，平板載荷試験はならしマウンドの支持力を推定するために試みたものである。捨石などの粒径の大きい地盤層に平板載荷法を適用する場合，載荷板の形状寸法をはじめ種々の問題があると思われる。特に，局所的な載荷データがマウンド全体の支持力にどのような意味をもつか知られていない。実験では，油圧ジャッキの反力を捨込ならし台車の自重に受けさせたため，載荷能力にも限界があった。これらの理由から，今回の実験では，単位面積当たりの載荷重を大きくするために載荷板寸法を直径 40 cm の円板に決めた。試験位置は法面の影響を考えマウンド中央部（マウンド全幅はおよそ 2 ～ 2.4 m）とした。

3.3 実験条件

表－3.1 に実験条件を示す。なお，同表には模型実験を実施するにあたり，想定した原型値を参考として併記した。実験は全部で 28 ケース行った。

a) 捨込ならしシュートの形状

捨込ならしシュートには最適形状が存在すると思われる。その実験要素としては，断面形状，縦横比，基礎マウンドに対する角度などが考えられるが，本実験では図－3.3 に示した形状のもの 2 種類について実験を行った（付録参照）。また，シュート後端部の形状が捨込ならし抵抗力に強い影響を有していると考えられるため，図－3.4 の改造を加えたシュートについても実験を行った。

(b) 基礎マウンド捨石および基礎マウンド性状

基礎マウンド捨石の原型値を 50 ～ 500 kgf /個とすれば，模型値は 3 ～ 32 kgf/個となるが，使用したのは15 ～ 60 kgf/個の割ぐり石，玉石などである。

基礎マウンドの形状は，ほぼ平坦な場合と凹凸がある場合とした。後者における不陸は正弦波形とし，波高×波長が± 0.2 m × 2.4 m の場合と，± 0.4 m × 2.4 m の場合の 2 種類とした。なお，これを原型値に換算すると（± 0.5 m ～± 1.0 m）× 6.0 m 程度の不陸に相当する。波形はシュートの進向方向に直角となる形状に造成した。

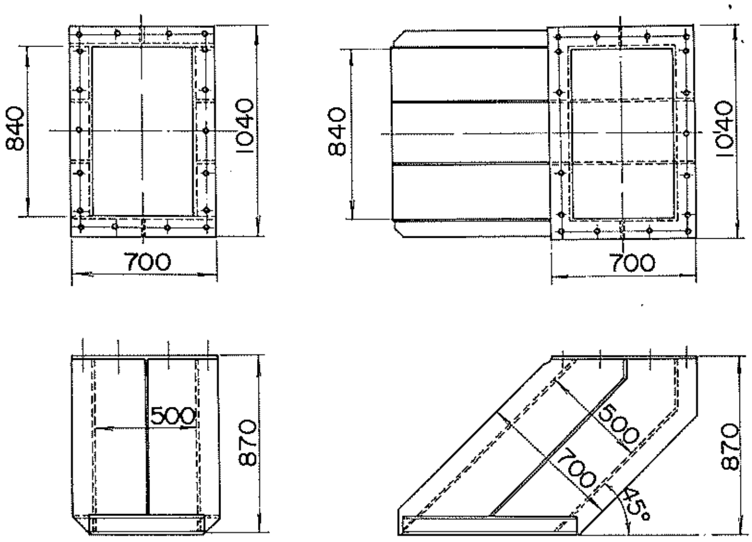
c) ならし捨石の性状

今回の実験で対象とした捨石は，小名浜港で既に施工実績のある[4] 5 ～ 30 kgf /個（原型値）である。実験に供した捨石の重量分布を図－3.5 に示したが，その形状，比重は次のとおりである。

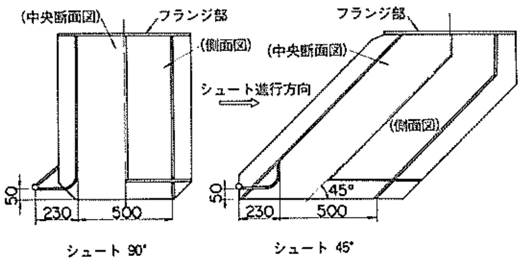
種　類	割ぐり石（安山岩）
比　重	2.65
偏平率	0.01 ～ 0.48 （平均値 0.21 ）

表－3.1　実験条件

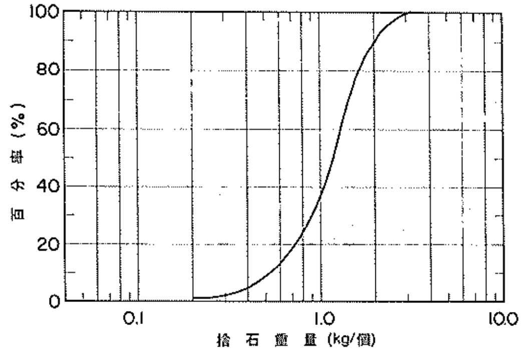
実験要素	想定原型値	模型値	摘要
シュート形状（$a \times b$）	1.25 m × 2.1 m（矩形断面）	0.50 × 0.84 m（矩形断面）	模型比＝1/2.5
シュート角度（θ_c）		90° および 45°	
基礎マウンド捨石	50～500 kgf/個	15～60 kgf/個＊	＊既存のものを使用
ならし捨石	5～30 kgf/個	0.3～1.9 kgf/個	
捨込ならし速度（V_c）	6 m/min（暫定値）	2.5～5.1 m/min	$1/\sqrt{2.5}$（フルード則で換算）
捨込ならし層厚（h）		0.2～1.0 m	
シュート横移動幅		0.56～0.84 m	
基礎マウンド性状	±1 m	平坦および凹凸 ±0.2m×2.4m ±0.4m×2.4m	正弦波形（波高×波長）
雰囲気	海水中	空中および海水中	
その他		空隙率の計測 振動締め固め試験 平板載荷試験	



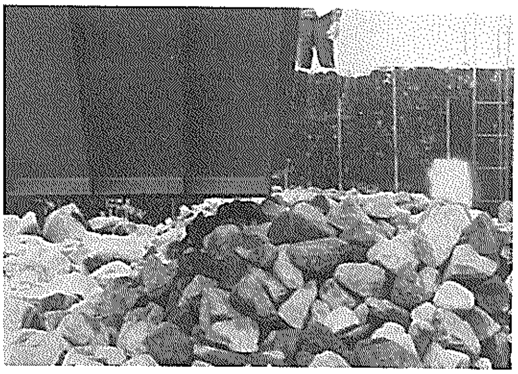
図－3.3　供試シュートの形状



図－3.4　シュート改造図



図－3.5　供試捨石重量加積曲線



写真－1　マウンド継ぎめにおけるシュートの重ね合わせ

細長比　　1.03～1.94　(平均値1.30)
薄ぺらさ　　0.55～1.02　(平均値0.77)

d) 捨込ならし速度

3.8 m/min を標準とし，2.5 m/min と 5.1 m/min の3種類の速度について実験した。捨込ならし速度の換算にはフルードの相似則を適用したので，模型実験値は原型に換算して，4 m/min，6 m/min，8 m/min となる。

e) 捨込ならし層厚

捨込ならし層厚は本工法の最も支配的な要因と考えられる。予備実験の結果から，基礎マウンドに対し捨石粒径の2～3倍以上の間隙がなければシュートから円滑に捨石が流出していかないことが確認されていた。そこで，基礎マウンドが平坦な場合は捨込ならし層厚を 0.3 m，0.4 m，0.5 m の3種類とした。一方，基礎マウンドに不陸がある場合は，山の頂部でシュートと基礎マウンドとの間隙は最小となるが，その前後では間隙が大きくなっているので，最小捨込ならし層厚を基礎マウンドが平坦な場合より小さくとれると考え，0.2 m と 0.3 m の2種類とした。したがって，この場合，捨込ならし層厚の変化する範囲は 0.2～1.0 m であった。

f) 捨石マウンド重ね合わせ幅

捨込ならしマウンド継ぎめでのマウンド重ね合わせ幅（シュートのラップ率）は，シュート幅の0％，10％，20％，33％の4種類とした。これをシュート横移動幅として表せば，0.84m(12)，0.76m(37)，0.67m(3) および0.56m(4) となる。なお，( )内の数字は実験条数を示す。

g) 雰囲気

シュート前端部からの捨石の流出状況，シュート後端部から離れていくならしマウンド表層部の捨石の挙動，マウンド継ぎめにおける捨石の動きなどを観察するために，28ケースの実験中24ケースは空中で実験した。

水中実験は，空中実験の確認とともに相異点を調べるために行った。水深は捨石ならしシュートが約70 cm水没する状態で行った。

4.　捨入ならし実験の結果と考察

4.1　捨込ならし抵抗力の特性

(1) 捨込ならし条件のパラメータ表示

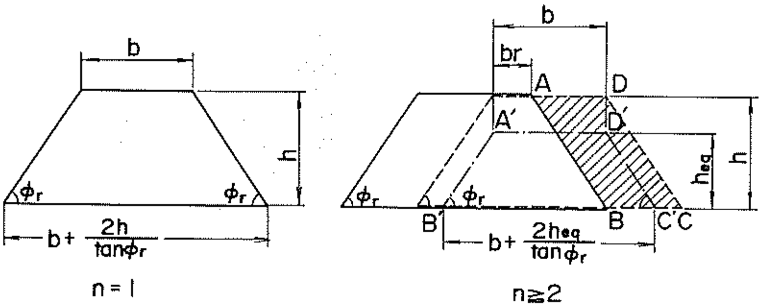
捨込ならしシュートから捨石が流出していくときの状態は，図－2.1のように，シュート出口で流動域と停滞域を形成する。この流動域と停滞域の比率は，捨込ならしシュートの形状，捨込ならし層厚(h)，捨込ならし速度(V_c)，マウンド継ぎめにおけるシュートラップ率(r) 等によって異なることは既に述べた。いま，これらの捨込ならし条件をすべて含むパラメータが見出せれば，実験結果の解析に有効となる。そこで，停滞域の存在が捨込ならし抵抗力に密接に関係があること，停滞域と流動域の比率は捨石供給シュート内の捨石流出速度にも関係があることに注目し，次の考察を行った。

シュートから流出した捨石の量と造成されたマウンドの捨石の量は等しい。捨込ならしマウンドの断面形状は図－4.1のように台形となるから次式が成り立つ。

a) $n=1$（1条め）のとき

$$V_s a b (1-\varepsilon_c) = k_1\left(b+\frac{h}{\tan\phi_r}\right) h V_c (1-\varepsilon_m) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (4.1)$$

ここに，V_s は捨石供給シュート内の平均捨石流出速度(m/min)，a は捨込ならしシュートの長さ(m)，b は捨込ならしシュートの幅(m)，ε_c は捨石供給シュート内の捨石空隙率，k_1はならしマウンドが斜めに造成されていくことによる補正係数，h は捨込ならし層厚，V_c



図－4.1　捨込ならしマウンドの垂直断面図

は捨込ならし速度（m/min），ϕ_r は造成されたマウンドの法尻角度（deg），ε_m は造成されたマウンドの空隙率である。

式（4.1）を V_s について解くと

$$V_s = K_1 \Psi_1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.2)$$

ここに，

$$K_1 = k_1 \frac{1-\varepsilon_m}{1-\varepsilon_c} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.3)$$

$$\Psi_1 = \left(1 + \frac{h}{b\tan\phi_r}\right)\frac{h}{a}V_c \quad \cdots \quad (4.4)$$

である。

b）$n \geqq 2$（2条め以降）のとき

図－4.1のように，マウンド重ね合わせ幅が br の場合を考えると，既設マウンド側には捨石の流出はなく，斜線部の平行四辺形ＡＢＣＤの部分が造成される。いま，この平行四辺形と面積の等しい台形A'B'C'D'を想定し，その上辺A'D'は捨込ならしシュート幅 b に等しく，∠A'B'C'＝∠D'C'B'＝ϕ_r とし，高さを h_{eq} とおくと，

$$b(1-r)h = \left(b + \frac{h_{eq}}{\tan\phi_r}\right)h_{eq} \quad (4.5)$$

となり，これを h_{eq} について解けば，

$$h_{eq} = \frac{b\tan\phi_r}{2}\left\{\sqrt{1+\frac{4(1-r)h}{b\tan\phi_r}} - 1\right\} \quad (4.6)$$

となる。

h と h_{eq} の関係は図－4.2で求まるから，この h_{eq} を式（4.4）の h の代わりに代入すれば，$n \geqq 2$ の場合でも式（4.4）で Ψ_2 を求めることができる。しかし，この方法では計算が煩雑になるので次の方法をとることにする。

捨石供給シュートから流出した捨石の量と平行四辺形ＡＢＣＤに相当するマウンドの捨石量は等しいから，

$$V_s ab(1-\varepsilon_c) = k_2 b(1-r)hV_c(1-\varepsilon_m) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.7)$$

ここに，k_2 はならしマウンドが斜めに造成されることによる補正係数，r はマウンド継ぎめにおけるシュートラップ率である。

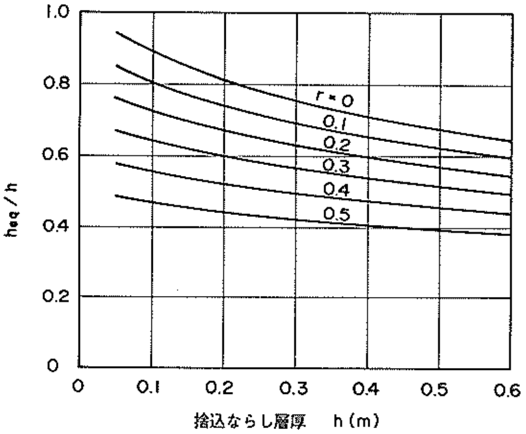
式（4.7）を V_s について解くと，

$$V_s = K_2 \Psi_2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.8)$$

ここに，

$$K_2 = k_2 \frac{1-\varepsilon_m}{1-\varepsilon_c} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.9)$$

$$\Psi_2 = (1-r)\frac{h}{a}V_c \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.10)$$



図－4.2　相当捨込ならし層厚（h_{eq}）の計算図

である。

式（ 4.3 ）および式（ 4.9 ）にみるように，K_1 およびK_2は定数となるので，捨石供給シュート内の平均捨石流出速度はΨ_1またはΨ_2の関数となる。

前述のごとく，捨込ならし抵抗力がシュート出口に存在する停滞域に依存するとすれば，それと密接に関連する流動域から流出する捨石の量，したがって，捨石供給シュート内の捨石流出速度が捨込ならし抵抗力の関数となり，ここで求めたΨ_1およびΨ_2が捨込ならし抵抗力と関数関係にあるといえる。そこで，Ψ_1およびΨ_2を捨込ならし条件を表示するパラメータΨ_nと置き，このΨ_nを用いて以下の考察を進めた。

(2) 捨込ならし水平抵抗力

a) 基礎マウンドが平坦な場合

捨込ならしシュートに作用する水平抵抗力の変動をみると，シュートの始動時が最も大きく，走行時は変動がみられるもののシュート始動時以上の大きな値を示すことはない。これは，シュート始動時と走行時でシュート出口における捨石停滞域の大きさが異なることからも推測される。

図－4.3は，捨込ならしシュートの角度が90°（以下 $\theta_c = 90°$ シュートという）のときのシュート始動時の最大水平抵抗力（F_s）と捨込ならしパラメータ（Ψ_n）との関係を示したものである。

$\Psi_n < 3$の範囲では，Ψ_nの減少とともにF_sは急激に増大するが，$\Psi_n > 3$では，一定値に漸近する傾向がみられる。Ψ_nの減少は，ほぼ捨込ならし層厚（h）の減少と考えることができるので，これよりhが小さいほどF_sが大きくなるということがいえる。

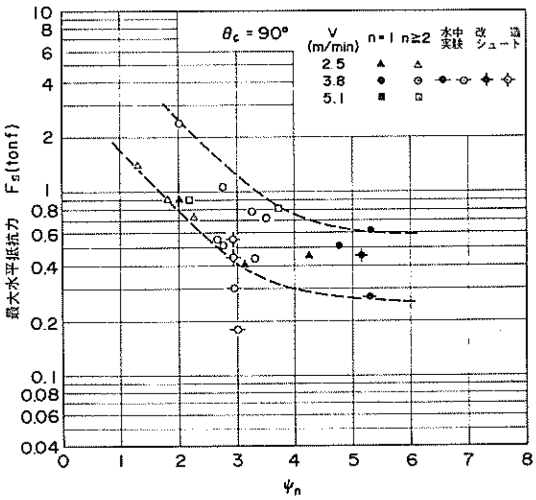
シュート始動時の水平抵抗力は，シュート内の捨石重量と捨石の内部摩擦係数との積から求まるので，hが一定の場合は，F_sはシュート内の捨石重量に依存する。

一方，内部摩擦係数はhと関数関係にあると思われる。hが大きい場合は，シュート出口平面に作用する水平せん断力によってシュート出口と基礎マウンド間のならし捨石層内に変形が起こる。このとき基礎マウンドへ及ぶ力は小さいので反力としてシュートに作用する水平力は小さくなる。これに対しhが小さい場合は，ならし捨石層が薄いためその変形は小さく，力は基礎マウンドにも及びそれを変形させようとする。このため質量の大きな基礎マウンドからの反力が大きくなり，その結果F_sが大きくなるのであろうと考えられる。

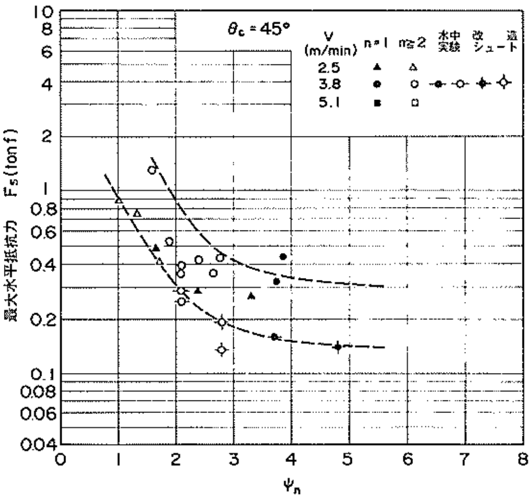
始動時のシュート前進速度の影響ははっきりしない。水中実験および改造シュートの場合はいずれもF_sの減少となって現れている。

次に，図－4.4は，捨込ならしシュートの角度が45°（以下$\theta_c = 45°$シュートという）のときのシュート始動時の最大水平抵抗力（F_s）とΨ_nとの関係を示したものである。図－4.3と同様の傾向が認められるものの，その絶対値は$\theta_c = 90°$の場合に比べ1/2程度となっている。これには次の理由が考えられる。

ひとつは，捨石供給シュート内の捨石量が同じ場合で



図－4.3 シュート始動時の最大水平抵抗力 (1)
；基礎マウンド平担の場合



図－4.4 シュート始動時の最大水平抵抗力 (2)
；基礎マウンド平担の場合

も，シュート出口平面に作用する捨石重量はθ_c= 90°の場合に比べθ_c= 45°のほうが小さくなるためである。もうひとつは，捨石供給下ホッパからシュートへの捨石の投入状況を考えてみると，θ_c= 90°シュートでは捨石が真上から落下し，前に堆積した捨石上に積み重なるので，シュート内での捨石の充填率が高く，捨石粒子間の噛合いも大きくなると思われる。これに対しθ_c= 45°のシュートでは，捨石供給シュート内を落下してきた捨石は一度シュート壁に衝突し，減速し方向を変えたのち堆積する。このためシュート内での充填率が小さくなるであろうと思われる。事実，小型のアクリル樹脂模型実験ではこの現象が観察された。このようなシュート内での充填率の差も水平抵抗力の差の原因となって現れている。

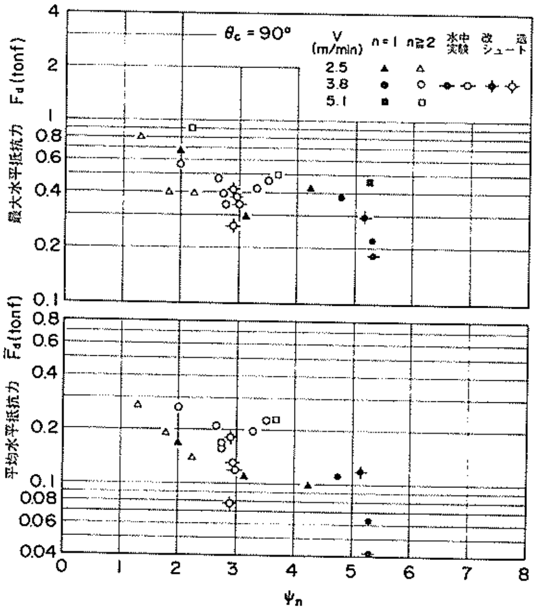
図−4.4においても，始動時におけるシュート前進速度の影響は明らかでない。水中実験および改造シュートの場合は，いずれもF_sの減少となって現れている。

次に，シュート走行時の水平抵抗力を調べると図−4.5（θ_c= 90°の場合）と図−4.6（θ_c= 45°の場合）となった。

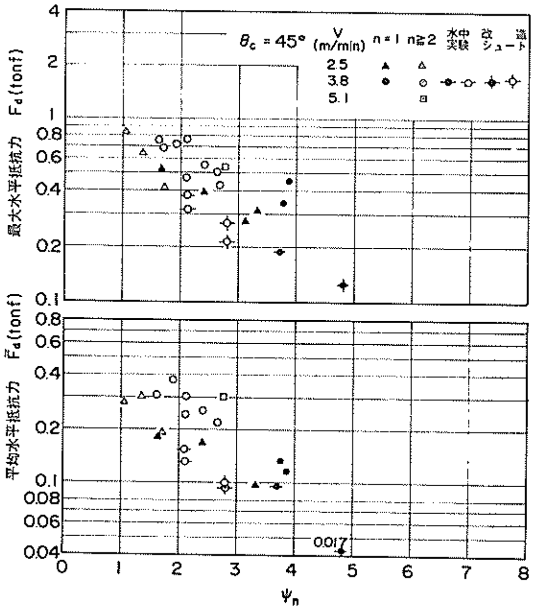
シュート走行時の最大水平抵抗力（F_d)は，捨石供給ホッパから捨石を供給したことによってシュート内の捨石量が一時的に増えた場合とか，基礎マウンドに局所的な凸部があり，その上をシュートが通過し、捨込ならし層厚が一時的に小さくなった場合などに生ずる。なお，基礎マウンドの平坦度は表−4.1に示すようにσ = 4.4〜5.5 cm の範囲の不陸であった。

図−4.3と図−4.5を比べると，シュート走行時にはシュート出口において捨石の流動域と停滞域が共存するため，当然のことながらシュート始動時より停滞域の幅は小さく，よって$F_d < F_s$となる。一方，シュート走行時の平均水平抵抗力（$\overline{F}_d$）は非常に小さく，F_sの1/6〜1/4となっている。それゆえ，シュート内の捨石条件が同じであれば，最大水平抵抗力はシュート始動時に支配されることがわかった。

図−4.4と図−4.6の比較では，$F_s \fallingdotseq F_d$であり，$\overline{F}_d$はF_sの約1/2程度である。θ_c = 45° のシュートはθ_c = 90°のものに比べシュート出口面積が40％近く大きいこと，加えて，その大きくなっている面積は主として停滞域の拡大に関係していることなどのために，θ_c = 90°のシュートのときほど顕著な差が現れないものと考えられる。しかし，θ_c= 45°の改造シュートでは特にシュート後端部を削り，シュート出口面積も40％減としたので，水平抵抗力は改造前に比べ1/2程度小さくなった。これは捨石停滞域が水平抵抗力に大きく関与することを説明するものであろう。



図−4.5　シュート走行時の水平抵抗力 (1)
；基礎マウンド平担の場合



図−4.6　シュート走行時の水平抵抗力 (2)
；基礎マウンド平担の場合

表－4.1　基礎マウンドの平坦度

$\theta_c=90°$		$\theta_c=45°$	
h (cm) [1]	σ (cm) [2]	h (cm)	σ (cm)
40.4	5.2	42.1	4.8
40.5	4.7	41.9	5.5
28.1	5.1	31.9	4.6
49.3	4.4	52.7	4.8
41.5	4.9	42.7	5.1
41.6	5.0	42.1	4.5
40.8	5.0	39.1	5.1

注　1) 平均捨込ならし層厚
2) 直径 110 mm の計測円板で計測したときの標準偏差。

b) 基礎マウンドに不陸がある場合

基礎マウンドに不陸がある場合は，捨込ならし層厚が時々刻々変化するので，必ずしもシュートの始動時に水平抵抗力が最大になるとは限らない。不陸の状態によってその発生状況はかなり異なると考えられる。本実験では，正弦波形の基礎マウンドをシュートが直角に横切るときの捨込ならし抵抗力の変化を調べることによってこの問題を考察した。

図－4.7 は，± 0.2 m × 2.4 m の不陸をもつ基礎マウンドに対し，山の頂部で最小捨込ならし層厚が 0.2 m の場合の最大水平抵抗力（F_d）の変動を示したものである。図中の横軸（h）は，捨込ならしシュート中央部でのシュート出口と基礎マウンド面との間隔を表している。図によると，シュートが上り勾配を移動するとき水平抵抗力が増大し，下り勾配では減少している。前者の状態は捨込ならし層厚が漸減し，Ψ_n が小さくなっていく場合に相当するし，後者の状態はちょうどこれと逆の状況に相当する。

水平抵抗力の最大値が，捨込ならし層厚が最小となる山の頂部ではなくその直前に現れていることに注目すると，シュートの中央部が山の頂部に来たときには，シュートの前端は既に下り勾配に入っており，そこから流出する捨石量はしだいに増え始めている。シュートからの捨石の流出が最少となるのはシュートの前端がちょうど山の頂部近くにきたときであり，このとき，シュート中央部は山の頂部の直前にある。この位置関係はシュート速度，マウンド重ね合わせ幅に関係ないから，図のようにどの捨込ならし条件の場合も同じ傾向を示す。

図－4.8 は，同じ性状の基礎マウンドに対し，最小捨込ならし層厚が 0.3 m のときの最大水平抵抗力の変動を示したものである。全体的な傾向は図－4.7 に似ているが，この場合は全般的に捨込ならし層厚が大きくなっているため，抵抗の変動は鈍く，絶対値も小さくなっている。

図－4.9 および図－4.10 は，$\theta_c=45°$ シュートの場合の結果を同様に示したものである。$\theta_c=90°$ シュートの場合とまったく同じ傾向が認められる。

図－4.11 は，基礎マウンド不陸が ± 0.4 m × 2.4 m，捨込ならし速度が一定で，シュート角度が異なる場合を例示したものである。ここでも基礎マウンドの不陸に対する F_d の変動傾向はシュート角度に関係なく同じであった。

基礎マウンドに不陸がある場合，その平均捨込ならし層厚（$\bar{h}$）を求め，式（4.4）または式（4.10）から $\overline{\Psi}_n$ を計算し，$\overline{\Psi}_n$ と F_d および $\overline{F}_d$ との関係を調べると図－4.12（$\theta_c=90°$ の場合）および図－4.13（$\theta_c=45°$ の場合）となった。この表示でも，$\overline{\Psi}_n$ の減少とともに F_d および $\overline{F}_d$ が増大する概況はわかるが，前述のごとく，この図の F_d は $\bar{h}$ に対するものでなく，山の頂部の直前の h に対するものである。

そこで，捨込ならしシュート前端位置におけるシュート高さ（捨込ならし層厚）h を用いて Ψ_n を計算し，この Ψ_n と F_d との相関を調べたのが図－4.14 である。図－4.5 および図－4.6 は，この図と同様にシュート前端位置での捨込ならし層厚に対する Ψ_n を表しているから，図－4.5 と図－4.14（$\theta_c=90°$ の場合），および図－4.6 と図－4.14（$\theta_c=45°$ の場合）を重ね合わせると，図－4.15 および図－4.16 となった。

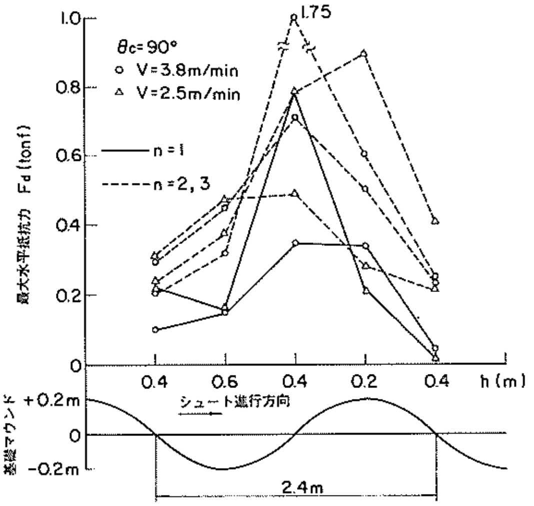
これより，シュート走行時に発生する最大水平抵抗力は，シュート前端位置における捨込ならし層厚を採用することによって，基礎マウンドの性状に関係なく Ψ_n-F_d の関係として表すことができる。そしてその結果は，$\Psi_n<3$ の範囲で F_d は増大し，$\Psi_n>3$ ではほぼ一定値に漸近する傾向をもっており，Ψ_n-F_s の関係と同じ特性である。

また，基礎マウンドが平坦の場合は $\Psi_n\equiv\overline{\Psi}_n$ であるから，図－4.5 と図－4.12，図－4.6 と図－4.13 より図－4.17（$\theta_c=90°$ の場合）および図－4.18（$\theta_c=45°$ の場合）を得る。ここでも，$\overline{\Psi}_n<3$ で $\overline{F}_d$ が増大し，$\overline{\Psi}_n>3$ で一定値に漸近する傾向が認められた。

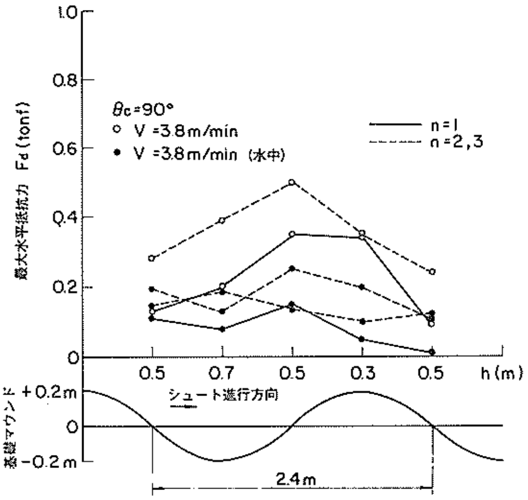
(3) 捨込ならし垂直抵抗力

a) 基礎マウンドが平坦な場合

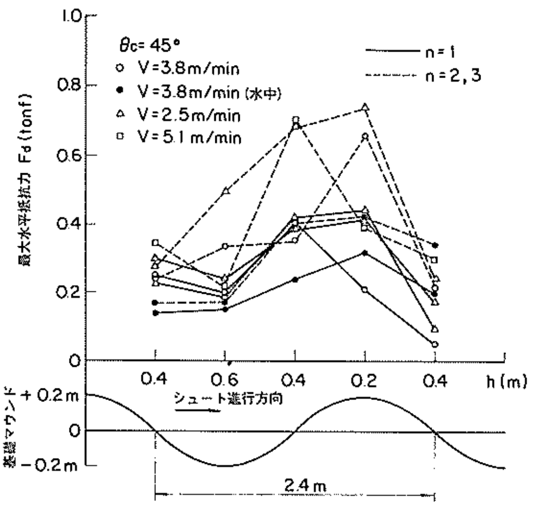
捨込ならしシュートに作用する垂直抵抗力は，ならしマウンド表層部を形成する捨石がシュート後端から抜け出すときに，シュート下縁を持ち上げるために発生する上向き（正）の力と，捨石が流出するときに捨石とシュ



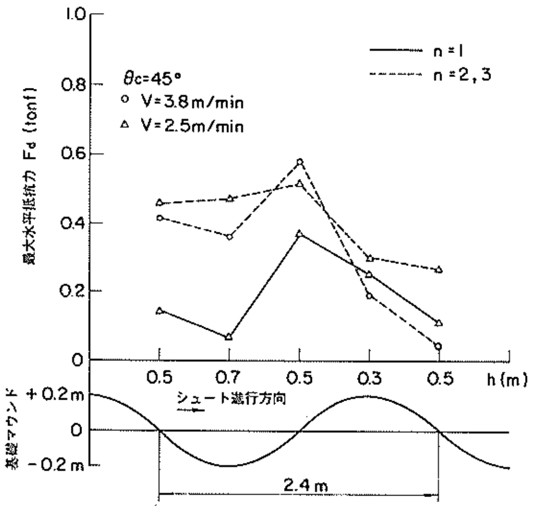
図—4.7　シュート走行時の最大水平抵抗力の変動(1)



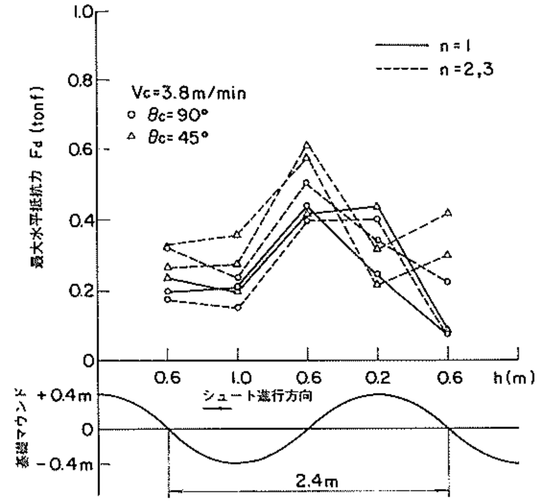
図—4.8　シュート走行時の最大水平抵抗力の変動(2)



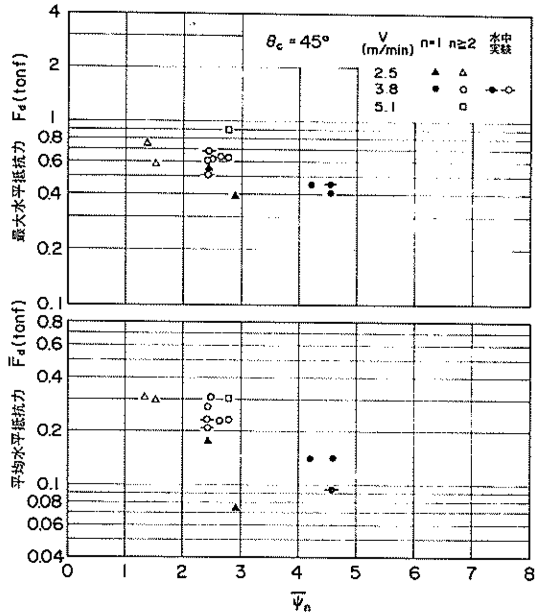
図—4.9　シュート走行時の最大水平抵抗力の変動(3)



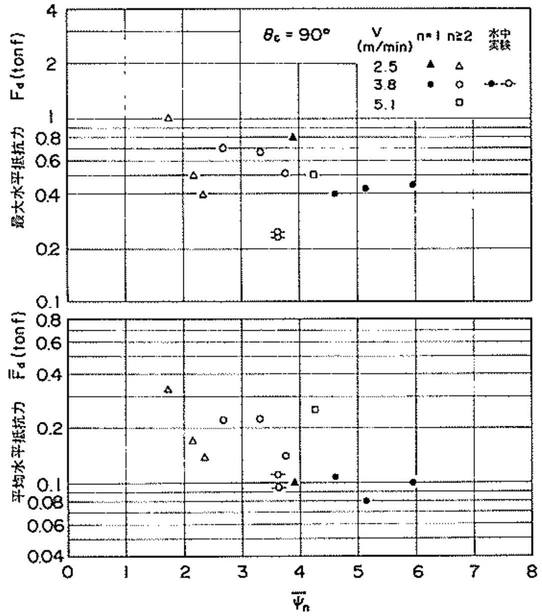
図—4.10　シュート走行時の最大水平抵抗力の変動(4)



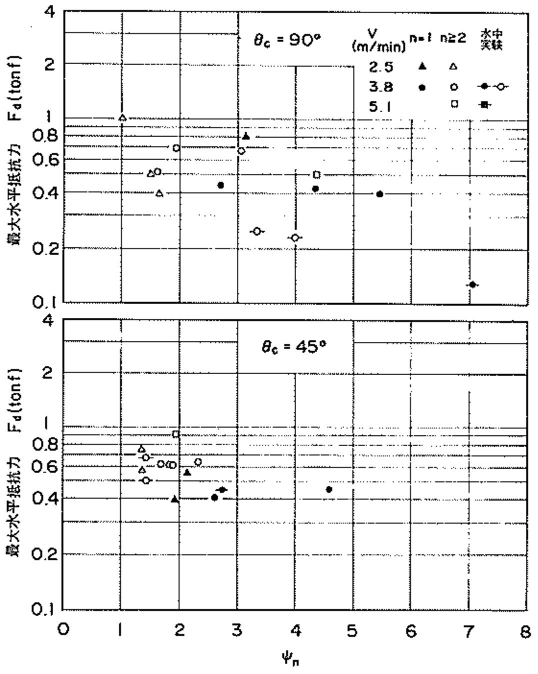
図－4.11　シュート走行時の最大水平抵抗力の変動(5)



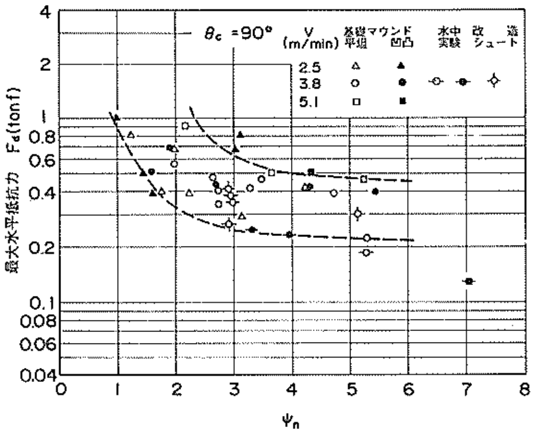
図－4.13　平均捨込ならし層厚に対するシュート走行時の水平抵抗力 (2)



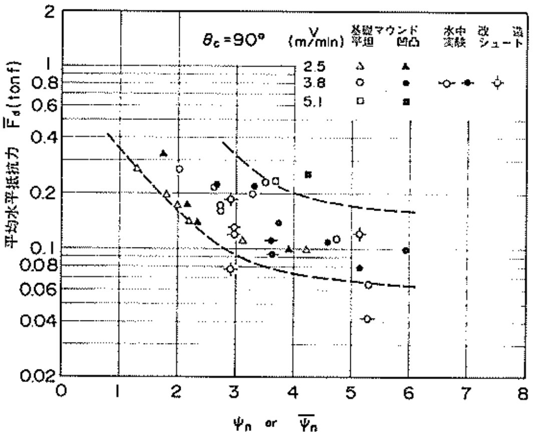
図－4.12　平均捨込ならし層厚に対するシュート走行時の水平抵抗力 (1)



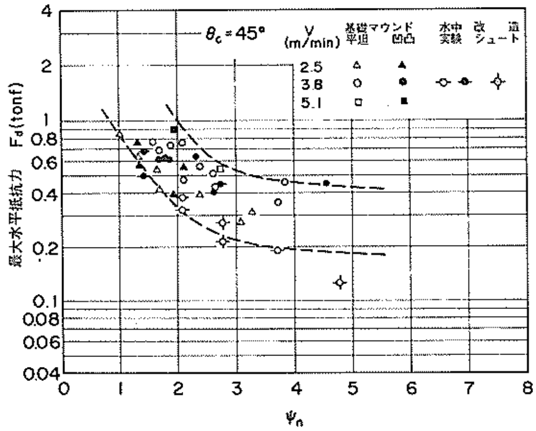
図－4.14　捨込ならし層厚をシュート前端位置としたときのシュート走行時の最大水平抵抗力



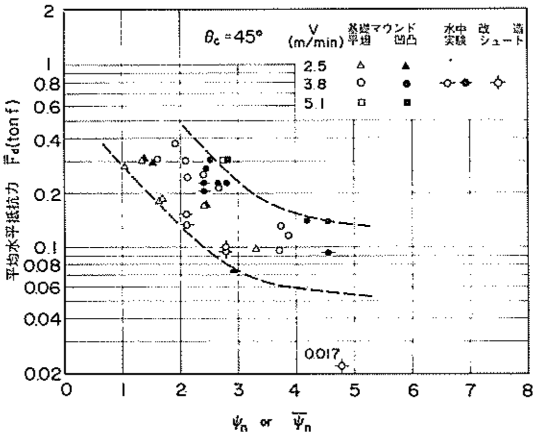
図―4.15 シュート走行時の最大水平抵抗力(1)



図―4.17 シュート走行時の平均水平抵抗力(1)



図―4.16 シュート走行時の最大水平抵抗力(2)



図―4.18 シュート走行時の平均水平抵抗力(2)

ート内壁との間に生ずる摩擦力あるいは捨石重量が直接シュート壁に作用するために生ずる下向き（負）の力の和と考えられる。

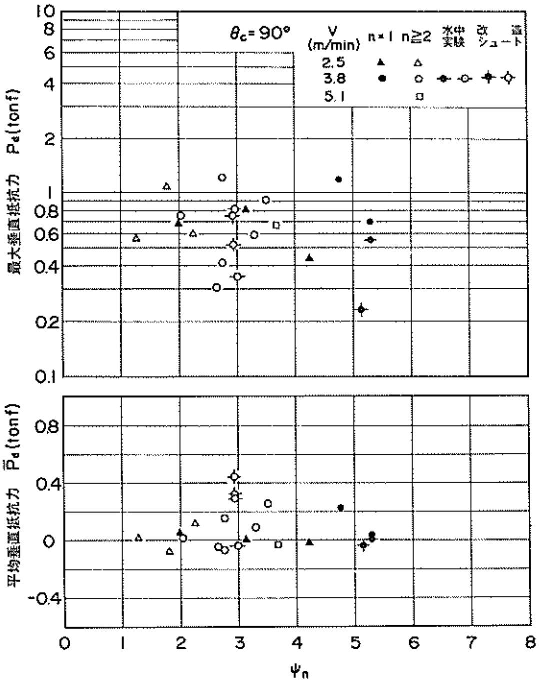
図―4.19（θ_c = 90°の場合）と図―4.20（θ_c = 45°の場合）は，シュート走行時に発生した最大垂直抵抗力（P_d）および平均垂直抵抗力（$\overline{P}_d$）とΨ_nの関係を図示したものである。両図とも絶対値にばらつきはみられるが，Ψ_nやV_cの値に関係なくP_dおよび$\overline{P}_d$が出現している。

P_dの絶対値をみると，θ_c = 90° シュートのほうに3点ほど大きな力が計測されているが，全体的には0.4～0.9 tfの範囲に集中している。改造シュートには水平抵抗力を減少させる効果がみられたが，垂直抵抗力にはその効果はみられない。

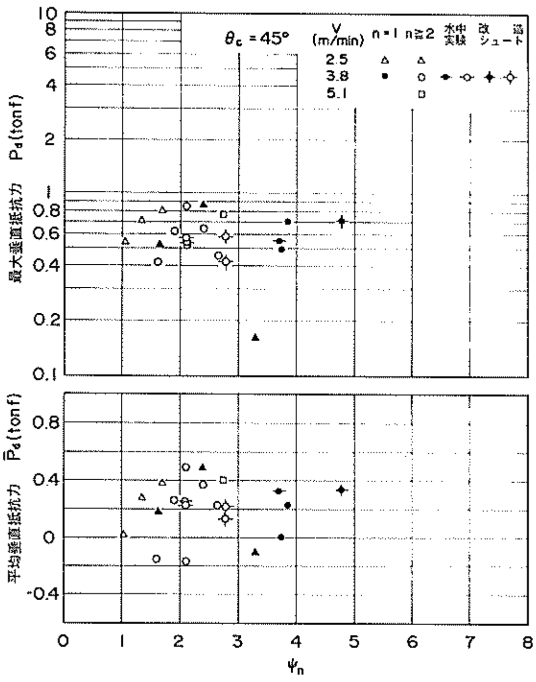
b) 基礎マウンドに不陸がある場合

基礎マウンドに不陸がある場合の垂直抵抗力の変動を調べると図―4.21～図―4.25となった。

図―4.21は，θ_c = 90°シュート，不陸形状が± 0.2 m × 2.4 m，最小捨込ならし層厚が0.2 mのときである。同じく図―4.22は，最小捨込ならし層厚が0.3 mのときである。この2つをみると，捨込ならし層厚が最小となる山の頂部で最大垂直抵抗力が出現しているケースが多い。垂直抵抗力は捨石がシュート下端から抜け出るときに捨石を下方へ押し込むときの反力として発生すると考えれば，捨込ならし層厚が小さいほど基礎マウンドの影響を受けるので垂直抵抗力が大きくなる可能性がある。



図－4.19　シュート走行時の垂直抵抗力 (1)
；基礎マウンド平坦の場合



図－4.20　シュート走行時の垂直抵抗力 (2)
；基礎マウンド平坦の場合

一方，図－4.23 および図－4.24 は，$\theta_c = 45°$ シュートに対するものである。最小捨込ならし層厚が 0.2 m の場合に多少この傾向が認められるが，最小捨込ならし層厚が 0.3 m の場合にははっきりとした傾向は現れていない。しかし，基礎マウンドの不陸が大きくなった図－4.25 の場合には，捨込ならし層厚の最小点で顕著に垂直抵抗力が増大しているのが認められる。

図－4.26 および図－4.27 は，平均捨込ならし層厚 ($\bar{h}$) に対する $\overline{\Psi}_n$ と P_d および $\overline{P}_d$ の関係を図示している。この図の傾向は図－4.19 ($\theta_c = 90°$ の場合) および図－4.20 ($\theta_c = 45°$ の場合) とまったく同様に，P_d および $\overline{P}_d$ は基礎マウンドの性状，捨込ならし速度，マウンド重ね合わせ幅に関係なく出現しており，その絶対値もほぼ同様といえる。

4.2　捨込ならしマウンドの出来形

(1)　捨込ならしマウンドの形状

a)　マウンド天端幅

連続して造成した 3 条のマウンドの法肩幅を全シュート横移動幅で割った値 (ω) を捨込ならし層厚 (h) に対しプロットとする図－4.28 となった。

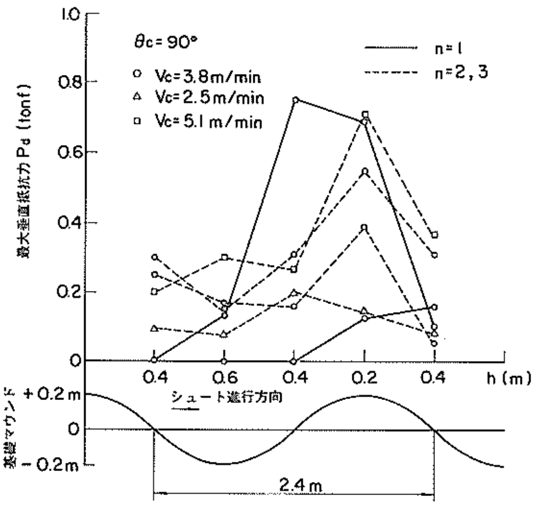
ω の値は h の全域で 0.9 ～ 1.1 の範囲にあり，全測点の平均値は 0.99 となった。これをシュート形状別にみると，$\theta_c = 90°$ シュートの場合 ω の平均値は 1.01となり，$\theta_c = 45°$ シュートの場合は 0.99 となっている。また，基礎マウンドの性状別にみると，基礎マウンドが平坦な場合 ω の平均値 1.02，不陸がある場合は 0.98 である。

ならしマウンドの法肩は幾何学的にははっきりとは出ないので計測時には若干の誤差が入る。それを考慮すると，造成されるマウンドの天端幅は，シュート形状，基礎マウンド性状に関係なく，ほぼシュート幅に形成されるということができる。

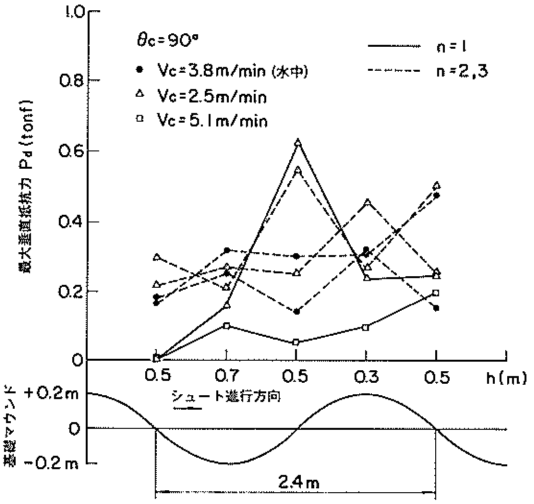
マウンド幅がシュート幅に造成されるということは，マウンド継ぎめにおけるシュートラップ幅をできるだけ小さくできるということを意味しよう。シュートラップ幅の減少は，捨込ならし抵抗力の減少となり，またマウンド精度の向上にもつながる。今回の実験の結果では，シュートラップ率は 0 ～10% の範囲で十分である。

b)　法 尻 角 度

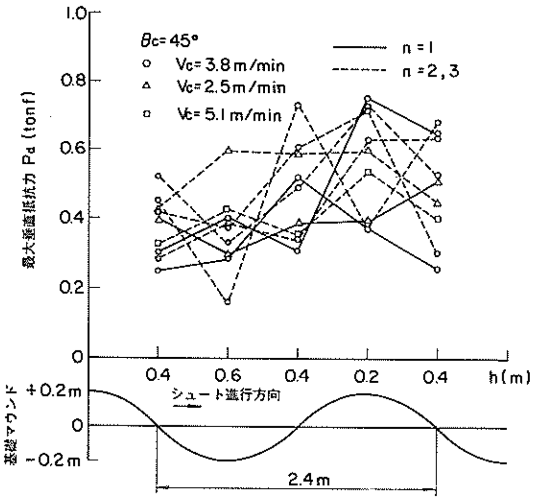
造成されたマウンドの法尻角度 (ϕ_r) を捨込ならしマウンド高さ (H) に対しプロットしたのが図－4.29 (基礎マウンドが平坦な場合) と図－4.30 (基礎マウンドに不陸がある場合) である。



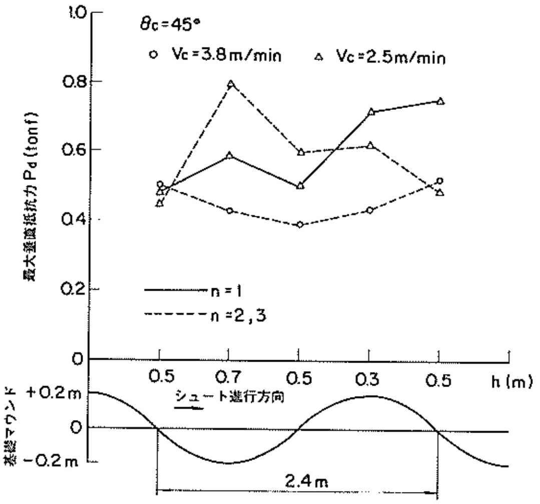
図—4.21　シュート走行時の最大垂直抵抗力(1)



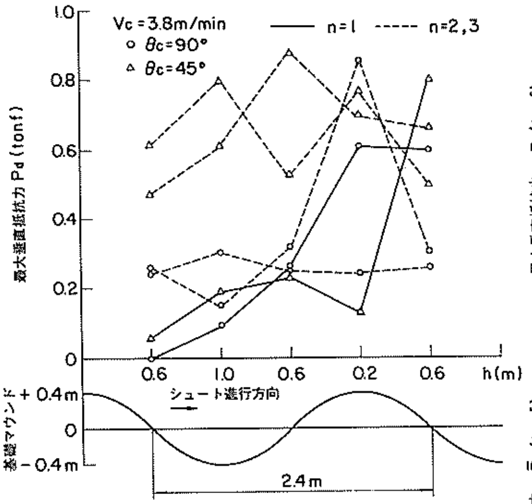
図—4.22　シュート走行時の最大垂直抵抗力(2)



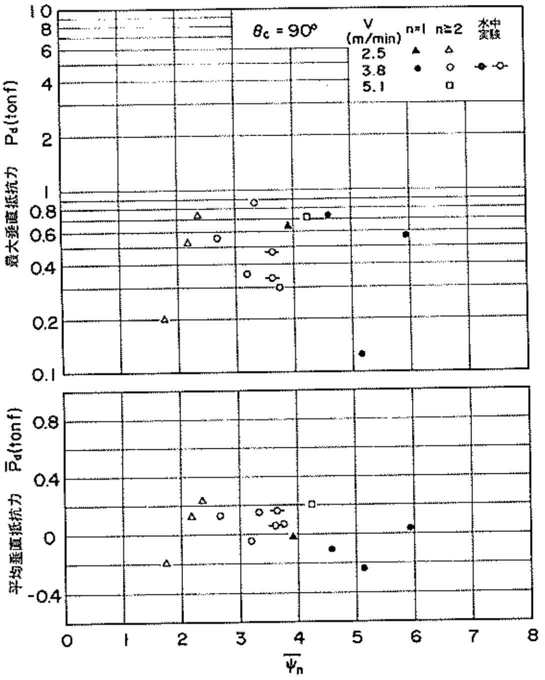
図—4.23　シュート走行時の最大垂直抵抗力(3)



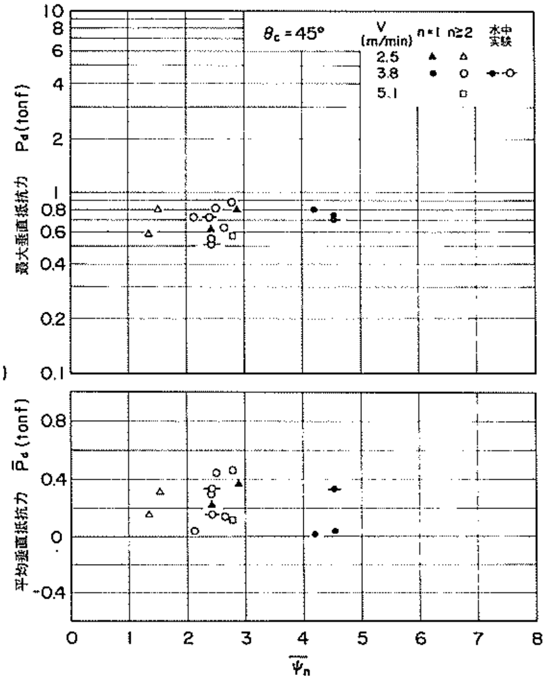
図—4.24　シュート走行時の最大垂直抵抗力(4)



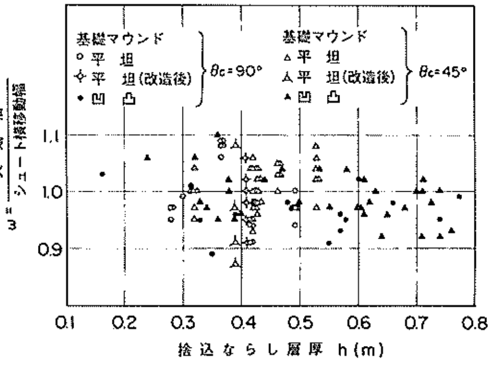
図ー4.25　シュート走行時の最大垂直抵抗力(5)



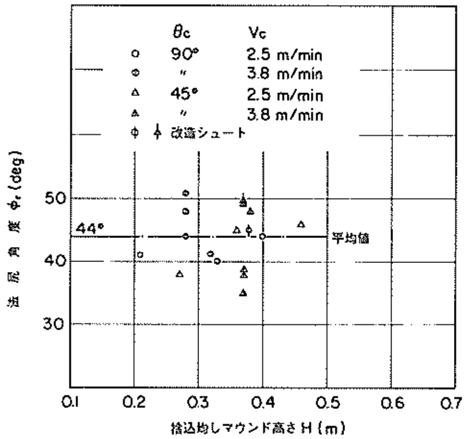
図ー4.26　シュート走行時の垂直抵抗力(1)



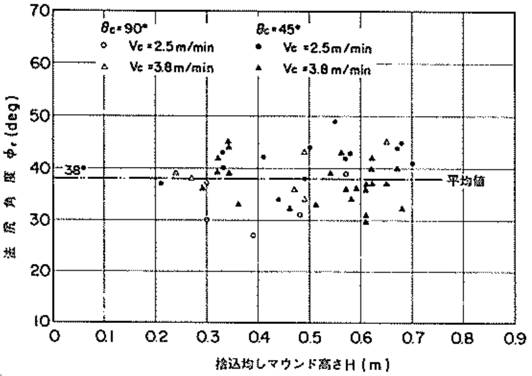
図ー4.27　シュート走行時の垂直抵抗力(2)



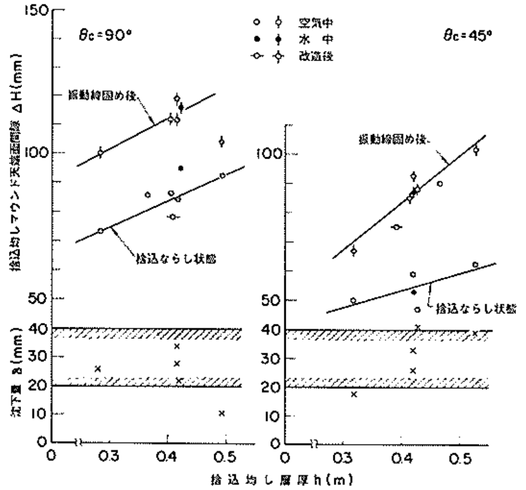
図ー4.28　捨込ならしマウンドの天端幅



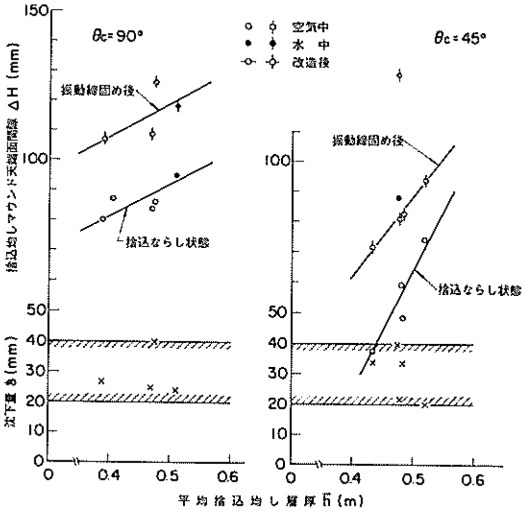
図－4.29　捨込ならしマウンドの法尻角度(1)
；基礎マウンド平坦の場合



図－4.30　捨込ならしマウンドの法尻角度(2)
；基礎マウンドに不陸がある場合



図－4.31　捨込ならしマウンド天端面間隙(1)
；基礎マウンド平坦の場合



図－4.32　捨込ならしマウンド天端面間隙(2)
；基礎マウンドに不陸がある場合

図－4.29では，Hに関係なくϕ_rは35°～50°で平均値は44°である。データ数は少ないがこれをシュート形状別にみると，$\theta_c=90°$シュートの場合$\phi_r=45°$，また，$\theta_c=45°$シュートの場合$\phi_r=42°$となる。

図－4.30でも，ϕ_rはHに関係なく30°～45°の範囲にあり，平均値は38°である。これをシュート形状別にみると，$\theta_c=90°$シュートの場合$\phi_r=36°$，$\theta_c=45°$シュートの場合$\phi_r=39°$である。

基礎マウンド性状の相異による法尻角度の差は最大6°，また，シュート形状の相異による差は最大3°と非常に小さい。法肩および法尻計測時の誤差を考えると，これらの差はほとんど同じと見なしてもよい。

ならしマウンドの法勾配は，捨石がシュートから自由に（かなりゆっくりと）流出し，安定した位置に静止したときのものであるから，法尻角はならし捨石の安息角となるはずである。今回の捨込ならし実験条件の範囲では，法尻角は一定といえる。

c)　捨込ならしマウンドの天端面高さ

造成されたマウンドの天端面の高さ(H)を検討するために，シュート出口とならしマウンド天端面との間隙

(ΔH)を調べ，捨込ならし層厚に対し図示した。図－4.31は基礎マウンドが平坦な場合の$\Delta H-h$の関係であり，図－4.32は基礎マウンドに不陸がある場合の$\Delta H-\bar{h}$の関係である。

ΔHはh（あるいは$\bar{h}$）が増加するとともに若干増加の傾向がみられる。$\theta_c=90°$シュートでは$\Delta H=75$～95 mm（平均値＝87 mm）の範囲にあり，$\theta_c=45°$シュートでは$\Delta H=40$～75 mm（平均値＝58 mm）の範囲となった。

$\theta_c=45°$シュートのほうが絶対値が小さく，またばらつきも大きいのは，$\theta_c=45°$シュートは構造的にシュートに作用するモーメントが大きくなるため，シュート後端部の変位が大きくなったためと考えられる。これはシュートの構造上の問題ではあるが，剛性を強める設計を行えば回避できるので，ΔHは，本来的には，$\theta_c=90°$シュートと同じ程度になると考えられる。

一方，ΔHの値はシュートの改造によっても変っていないので，ΔHの存在は本工法固有の特性と思われる。また，$\Delta H\fallingdotseq 87$ mmという間隙は供試捨石の粒径に近い値であるので造成されるマウンドは，シュート出口よりおよそ捨石の粒径程度低く造成されると結論される。

捨込ならし状態のマウンドに1～2分間振動機を作用させると，マウンドは20～40 mm沈下した。この転圧作用は，マウンド表層の締め固め効果とともに，不陸の整形にも有効である。

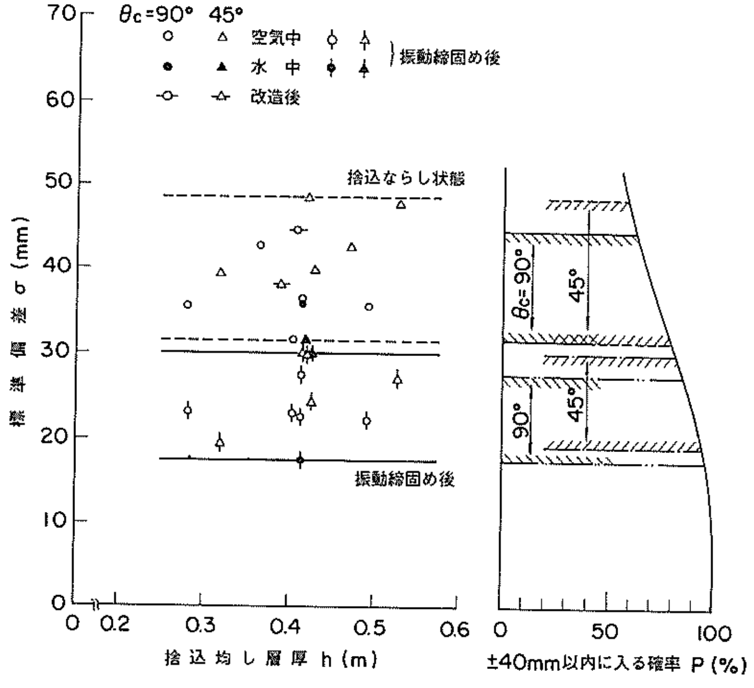
(2) 捨込ならしマウンドの天端不陸精度

捨込ならしマウンド天端面の不陸精度を標準偏差(σ)として表したのが図－4.33（基礎マウンドが平坦な場合）と図－4.34（基礎マウンドに不陸がある場合）である。

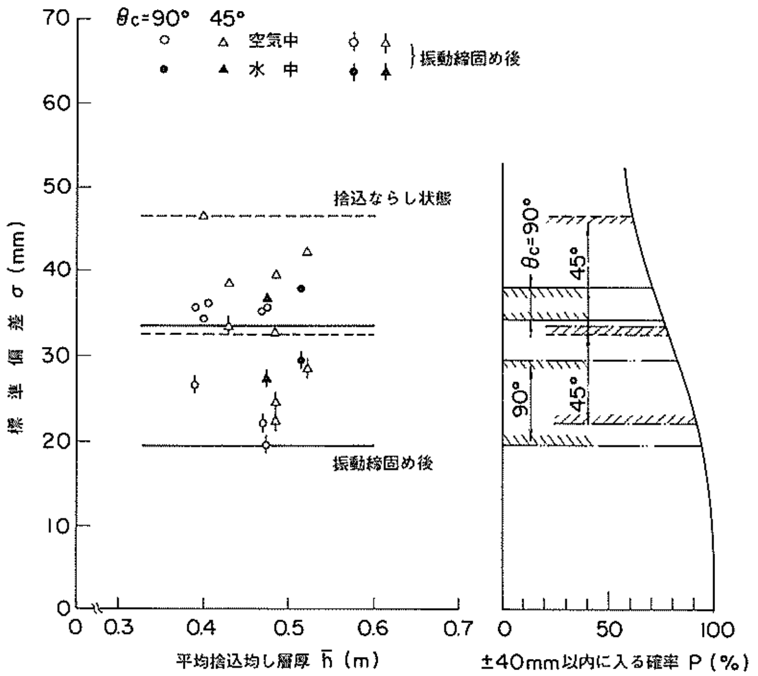
図－4.33では，捨込ならし状態では$\sigma\fallingdotseq 30$～50mmであるが，振動機を作用させると$\sigma\fallingdotseq 17$～30 mmになること，$\theta_c=90°$シュートに比べ，$\theta_c=45°$シュートのσが大きいことがわかる。図－4.44でも絶対値には多少の差はみられるが，図－4.43とまったく同じ傾向を示している。

$\theta_c=45°$シュートのならし精度が悪い原因は，シュート後端部における捨石停滞域が大きいので，ならしマウンド上を捨石をひきずりながら移動すること，シュート後端部の変位が大きいという構造上の問題にある。

振動機を用いることによって精度が向上したのは，表層の捨石を締め固めたとき，同時に整形効果が生じたからである。



図－4.33 捨込ならしマウンド天端面の不陸精度（基礎マウンド平坦の場合）



図－4.34　捨込ならしマウンド天端面の不陸精度（基礎マウンドに不陸がある場合）

一般の防波堤工事では，捨石ならしの天端高の不陸として本ならし±5cm以内の施工精度が要求される。[14] 仕上げ用として細粒の割石を用いて入念に施工する限りでは，これが必ずしも過大な要求ではないことは過去の施工実績によって裏付けられている。しかし，外海の防波堤の基礎ならしには施工中に波浪によってならし面が変化する要素もあり，施工精度の低下は避けがたい。また，ケーソン据付け直後に10～20cm程度沈下してしだいに落ち着くことなどから，西田ら[15]は，捨石のならし精度として±10cm程度が実情に即した値といっている。

いま，捨石のならし精度として±10cm以下を目標とすると，今回の実験では±4cm以下に相当する。そこで図－4.33および図－4.34において±40mm以下の範囲に入る確率（P）を求めると表－4.2のごとくになった。なお，これは計測棒として直径30mmの円板を用いたときの結果である。これによって，振動機の併用がいかに有効であるかわかる。

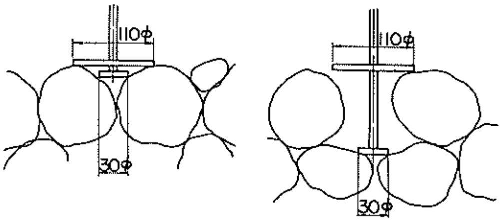
この結果より，捨込ならしシュートの後段に振動機を併設する構造とすれば，マウンドの造成精度を向上させることができ、また，振動機輾圧面とシュート出口平面との位置関係を規定することによって，一定の天端面高さを確保することができる。捨込ならしシュートに振動機を組み込む構造は，技術的に十分可能である。

一方，捨石マウンドの不陸精度の評価は，計測棒の形状寸法によっても異なることに注意すべきであろう。例えば，図－4.35は同じマウンドを大きさの異なる2種

表－4.2　施工精度が±40mmの範囲に入る確率（%）

	振動締め固め前	振動締め固め後
シュート角度 $\theta_c=90°$	62 ～ 80	82 ～ 96
シュート角度 $\theta_c=45°$	58 ～ 80	77 ～ 94

ただし，計測棒の直径は30mm



図ー4.35　計測棒の先端径の相異により生ずるマウンド不陸精度の差

類の計測棒で測ったときの絶対値の違いを示したものである。当然のことながら，小径の計測棒のほうがマウンド面をシャープに計測するため測定値のばらつきは大きくなる。

今回の実験でも，表ー4.3のように，平均値および標準偏差にかなり大きな差が認められている。いま，直径110 mmの計測棒の計測結果で評価すれば，不陸精度は±40 mm以下を十分満足するといえる。

今後，大水深化とともにマウンド検測方法も変わっていくことが予想される。その際，計測条件を明確にしておかなければ，単なる絶対値の比較だけでは意味がないであろう。

4.3　捨込ならしマウンドの力学的特性

(1)　捨込ならしマウンドの空隙率

捨込ならしマウンドの支持力を検討するために，マウンドの空隙率と次項に述べる載荷によるマウンドの沈下量を調べた。

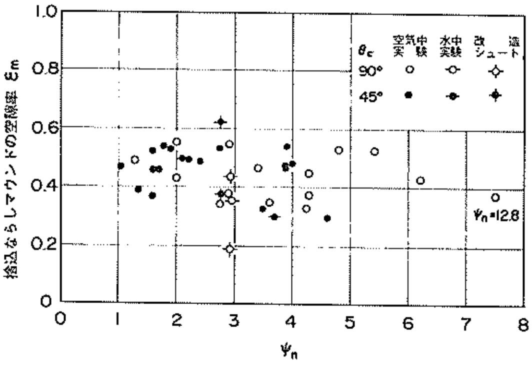
図ー4.36は，捨込ならし状態におけるマウンド空隙率（ε_m）をΨ_nに対し図示したものである。Ψ_n，シュート形状，実験雰囲気に関係なくε_mは0.3～0.6とみなされるので，捨込ならし条件に関係なくほぼ均一なマウンドを造成することができるといえよう。

図ー4.37は，振動締め固め後のマウンド空隙率(ε_m')を同じくΨ_nに対し図示したものである。この場合，ε_m'

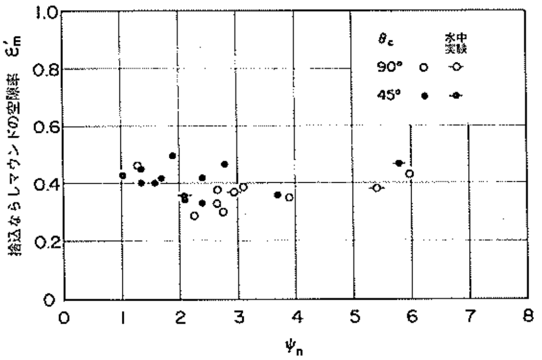
表ー4.3　計測棒の先端径の相異により生ずるマウンド不陸精度の差

θ_c	ΔH (mm)			σ (mm)		
	ϕ 30	ϕ 110	ϕ110/ϕ30	ϕ 30	ϕ 110	ϕ110/ϕ30
90°	95.5	67.5	0.71	35.9	24.7	0.69
	95.3	66.7	0.70	37.8	27.4	0.72
	87.5	61.5	0.70	43.0	32.2	0.75
	91.2	58.4	0.64	38.2	32.1	0.84
45°	53.5	22.1	0.41	31.6	24.3	0.77
	88.9	61.7	0.69	36.6	26.5	0.72
	73.7	37.9	0.51	42.3	29.9	0.71
	102.6	67.8	0.66	46.5	29.2	0.63
	90.0	59.1	0.66	42.3	28.0	0.66

写真ー2　造成されたマウンド



図ー4.36　捨込ならしマウンドの空隙率（捨込ならし状態）



図－4.37　捨込ならしマウンドの空隙率
（振動締め固め後）

＝0.3～0.5とばらつきは減少している。使用した振動機は小型のものであったから，マウンド深層にまでその締め固め効果が及んだとは考えられない。しかし，マウンドの表層部については ε'_m ＝0.3～0.4と締め固め効果が現れていた。

振動締め固めの効果は，装置の自重，起振力，作用時間などによって異なる。今回の実験での締め固め条件は，2～4 m^2/min であった。シュートが造成するならしマウンドの天端面積は 2.1～4.3 m^2/min であるから，シュートの移動とともに振動機を移動させた場合とほぼ同じ条件になっている。

(2)　平板載荷によるマウンドの沈下量

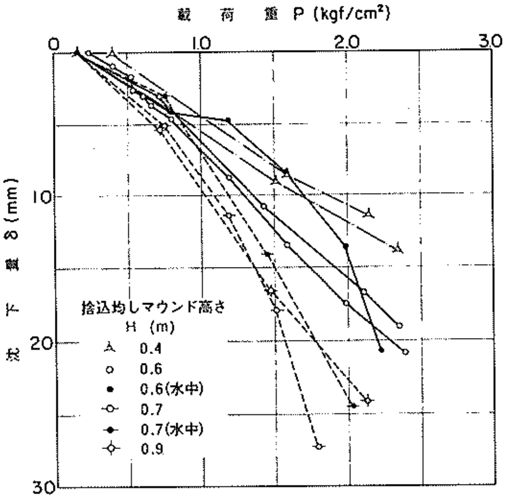
捨石マウンドに静的荷重を作用させると，捨石の粒子間摩擦力より載荷重が大きければすべりが生じバランスがとれる状態まで沈下する。捨石粒子間のすべり量は，載荷重，載荷時間，空隙率等によって異なる。今回の実験では，空隙率による影響は考慮せず，載荷重と載荷時間について考察した。

図－4.38は，載荷板の単位面積当たりの載荷重（P）とマウンド沈下量（δ）の関係を調べたものである。載荷重の増大とともに，ほぼ直線的に沈下量は増大している。一般の防波堤においても，ケーソン据付けから中詰完了までの間，荷重の増大とともに沈下量は直線的に増加していくことが認められている。

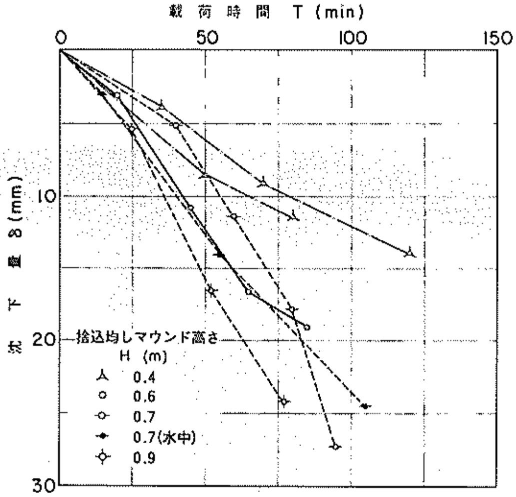
図－4.38によると，捨込ならしマウンド高さ（H）によって沈下量の差がみられる。Hが大きいほど沈下量が大きいということは，まずマウンドの変形は捨込ならし層内で起こり，次いで基礎マウンドへ及ぶことを意味する。それゆえ，Hが小さい場合は，捨込ならしマウンドの変形容量が小さいため，すぐに基礎マウンドの影響が現れている。

このように捨込ならしマウンドの層厚によって，マウンドの局所的支持力が異なることは，ケーソン据付けマウンドとして好ましくないと思われる。この問題を避けるためには，基礎マウンドの不陸をできるだけ小さくすること，捨込ならし層厚を薄くし，基礎マウンドの力学的特性に近いものにすること，捨込ならし捨石を大きくし，基礎マウンドの力学的特性に近づけること，などが考えられる。これらの解決策の検討は，今後の研究課題である。

次に，図－4.39は，載荷時間とマウンド沈下量の関



図－4.38　載荷重に対する捨込ならし
マウンドの沈下量



図－4.39　載荷時間に対する捨込ならし
マウンドの沈下量

係を示している。図では沈下量が飽和せず，直線的に増加しているが，これは時間の経過とともに載荷重を増大していったからである。一定の載荷重に止めておけば，時間の経過とともに沈下量は一定値に漸近する。

5. まとめ

本報告では，捨込ならし工法に関する実験結果を基にその基本特性を考察した。本工法は，基礎マウンド上に，ある層厚を有するならしマウンドを有効に造成することができ，施工能力および施工精度の点でも実用化の可能性があることがわかった。今回の実験で得られた結論を要約すると次のようになる。

1) 捨込ならしシュートの出口では捨石の流動域と停滞域が存在する。その比率はシュート形状，捨込ならし層厚，捨込ならし速度等の捨込ならし条件によって異なる。捨込ならし抵抗力はこの停滞域の存在に起因すると考えられる。

2) 捨込ならし条件を表示するパラメータとしてΨ_nを導き，Ψ_nと捨込ならし抵抗力との関係を考察した。

$\Psi_n < 3$ の範囲では，Ψ_n の減少とともに捨込ならし水平抵抗力は増大した。しかし，$\Psi_n > 3$ の範囲では，ほぼ一定値に漸近する傾向がみられた。Ψ_n の減少は捨込ならし層厚の減少に相当するので，この場合，基礎マウンドの力学的特性の影響を強く受けるためと思われる。

3) 捨石供給シュート内の捨石量が同じ条件であれば，捨込ならし水平抵抗力はシュートの始動時に最大となる。この場合も$\Psi_n < 3$ の範囲では，基礎マウンドの影響を受け水平抵抗力は増大した。

シュート始動時の水平抵抗力は，シュート内の捨石重量と内部摩擦係数に比例するので，捨込ならし層厚の減少とともに，内部摩擦係数に基礎マウンドの影響が入ってくるためと考えられる。

4) 造成される捨込ならしマウンドは幾何学的に安定した形状を示した。すなわち，ならしマウンドの法肩幅はシュート幅に等しく，法尻角度はならし捨石の安息角にほぼ等しくなった。ならしマウンド天端面高さは，シュート出口よりおよそ捨石の粒径程度低く造成された。

5) 捨込ならしマウンドの天端面不陸精度が± 40 mm以下となる確率は，シュート角度が90°の場合 62 ～ 80 %であった。しかし，このマウンドに短時間小型振動機をかけると 82 ～ 96 %まで向上した（ただし，計測棒の先端寸法は直径 30 mm の円板の場合）。この結果より，捨込ならしシュートの後段に振動機を併設する構造が実用的な機構と思われる。

6) 捨込ならしマウンドの空隙率は，捨込ならし条件に関係なくほぼ 0.3 ～ 0.6 の範囲であった。振動締め固め後は空隙率のばらつきが若干小さくなり 0.3 ～ 0.5 となった。

7) 捨込ならしマウンドの厚さが大きいほどマウンドの沈下量は大きかった。これは，ならしマウンド厚さが小さいほど基礎マウンドの影響が強く出るためと思われる。

6. あとがき

捨込ならし工法の全体システムを設計する場合，捨込ならし抵抗力の最大値が必要となる。本報告では，シュートの始動時にそれが最大となることは述べたが，その絶対値については結論を出していない。それは，捨込ならし抵抗力が捨込ならしの初期条件，すなわちシュート内捨石量，捨込ならし層厚およびシュート形状によって異なるからである。換言すれば，初期条件の選び方によっては，捨込ならし抵抗力をかなり小さくできる可能性があるということである。

現在，捨込ならし抵抗力に関する力学的考察を進めているので，その中で最適シュート形状，実用的な捨込ならし抵抗力の算出法等に関する問題を取り扱いたいと考えている。

また，今回の実験では 5 ～ 30 kgf/個（原型値）の捨石を対象としたが，原理的にはより大形の捨石に対しても適用できるので，この問題についても今後検討したいと考えている。

謝　辞

本工法は，運輸省第二港湾建設局と共同開発を進めているものである。実験の実施に際し，横浜機械整備事務所には種々の便宜を図っていただいた。

また，実験装置の製作にあたっては，機材部機械課の大友健課長，前緒方康正係長に協力いただいた。ここに深甚なる謝意を表する次第である。

（ 1982 年 3 月 31 日受付 ）

参考文献

1) 野村忍：捨石ならしについて，第三港湾建設局第 2 回管内工事施工技術研究会資料，1970 年 12 月
2) 小岩苔生ほか：捨石均し機の開発，港湾技術研究所報告，第 9 巻第 1 号，1970 年 3 月
3) 伊丹康夫ほか：水中ブルドーザの開発，土木施工，第15巻第 5 号
4) 第二港湾建設局：大水深および大規模捨石マウンド造成上の諸問題と具体的対策，昭和 55 年 11 月
5) 北海道開発局：捨石均し船開発試験報告書（第 1 報～第 5 報），昭和 49年 3 月～昭和 53年 3 月

6) 第五港湾建設局依浦港工事事務所：依浦港海底トンネル工事報告書第2報，第6回管内直轄港湾工事報告会資料，昭和47年6月
7) 第二港湾建設局京浜港工事事務所：川崎港海底トンネル沈埋函沈設工事，第10回管内工事報告会資料，昭和53年10
8) 和泉進：捨石最小重量の模型実験について，調設広報，運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所，№2，昭和54年7月，pp. 53 − 61
9) (5)と同じ，第1報
10) 藤本義二ほか：ブルドーザ土工板の形状に関する研究，建設の機械化，1969年7月，pp. 2 − 7
11) 室達朗：水中における砂れきの掘削抵抗に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第252号，1976年8月，pp. 87 − 96
12) E.G.Loewen and N.H.Cook：Metal Cutting Measurements and Their Interpretation，Proceedings of S.E.S.A. Vol. XIII，№2，1954. pp. 57 − 62
13) 運輸省第二港湾建設局：大水深構造物用作業船，捨石マウンド計測実験の解析および計測システムの検討報告書，昭和54年3月，p. 84
14) 運輸省港湾局：港湾工事共通仕様書，日本港湾協会，1964年3月，p. 36
15) 西田俊策ほか：外海におけるケーソン防波堤施工方法の研究，土木学会論文報告集，第171号，1969年11月，pp. 43 − 63

記号一覧表

F_d ：シュート走行時の最大水平抵抗力（tf）
$\overline{F_d}$ ：シュート走行時の平均水平抵抗力（tf）
F_s ：シュート始動時の最大水平抵抗力（tf）
H ：捨込ならしマウンド高さ（m）
ΔH：捨込ならしマウンド天端面間隙（mm）
M ：捨込ならし工法の施工能力（m^2/日）
P ：捨込ならしマウンド天端面不陸精度が± 40 mmの範囲に入る確率（%），または平板載荷試験における載荷重（kgf/cm^2）
P_d ：シュート走行時の最大垂直抵抗力（tf）
$\overline{P_d}$ ：シュート走行時の平均垂直抵抗力（tf）
T ：捨込ならし工法の1日の実稼働時間（min/日），または平板載荷試験における載荷時間（min）
V_c ：捨込ならし速度（m/min）
V_s ：捨石供給シュート内の平均捨石流出速度（m/min）
a ：捨込ならしシュートの長さ（m）
b ：捨込ならしシュートの幅（m）
h ：捨込ならし層厚（m）
$\overline{h}$ ：基礎マウンドに不陸がある場合の平均捨込ならし層厚（m）
h_{eq}：相当捨込ならし層厚（m）
k_1 ：補正係数
k_2 ：補正係数
n ：捨込ならしマウンド条数
r ：捨込ならしマウンド継ぎめにおけるシュートラップ率
δ ：振動締め固めによる捨込ならしマウンドの沈下量（mm）
ε_c ：捨石供給シュート内の捨石空隙率
ε_m ：捨込ならしマウンドの空隙率
ε'_m ：振動締め固め後の捨込ならしマウンドの空隙率
θ_c ：基礎マウンドに対するシュート角度（deg）
σ ：捨込ならしマウンド天端面不陸精度の標準偏差（mm）
ϕ_r ：捨込ならしマウンドの法尻角度（deg）
Ψ_n ：捨込ならし条件を表すパラメータ
Ψ_1 は1条め，Ψ_2 は2条以降を表す。
$\overline{\Psi_n}$ ：平均捨込ならし層厚に対するΨ_n
ω ：捨込ならしマウンド幅とシュート横移動幅の比

付　録

本実験に用いた捨込ならしシュートの寸法は次の考え方によっている。

いま，捨込ならし工法の施工能力をM（m^2/日），捨込ならしシュートの移動速度をV_c(m/min)，1日の実稼働時間をT(min/日)，捨込ならしシュートの幅をb(m)とすると，

$$M = (1-r)\cdot\omega\cdot b V_c T \qquad (1)$$

となる。ここに，rは捨込ならしシュートを横移動させるときのマウンド継ぎめでの重ね合わせ率，ωは捨込ならしシュート幅と造成されるならしマウンド法肩幅との比である。

外海に面した大水深防波堤では，膨大な量の捨石を必要とする。それは単に防波堤の全建設費に占める捨石費用の割合が大きくなるだけでなく，捨石そのものの入手も難しくなるだろうと思われる。このような事情から，大水深防波堤の設計のひとつの方向として，捨石マウンド天端水深を下げることが考えられる。この場合，ケーソン自体が大きくなり，したがってケーソン据付マウンドも広くなる。そこでM = 1,000 m^2/日 は必要だろうと仮定した。

施工時間については，荒天による実稼働時間の減少，各種作業効率の低下を考慮してT = 120min/日と仮定した。

捨込ならし速度の最適値は，捨込ならし抵抗力，ならしマウンド精度との関連から決まってくるが，いま暫定値として，ブレード曳航式捨石ならし工法[1]のブレード曳航速度 5.6 m/min を参考に，V_c = 6 m/min とした。

ここで，r = 0.3，ω = 0.95 と仮定すれば，式(1)より

$$b = \frac{1{,}000}{0.7\times0.95\times6\times120} = 2.1\,\mathrm{m} \qquad (2)$$

となる。

一方，シュート断面の奥行寸法aは，捨石がアーチを起こし閉塞しないことが必要条件となり，その限界は経験的に捨石最大粒径の約5倍といわれている。そこで，30 kgf/個の捨石粒径を 25 cm程度と考えると，a=1.25 mとなる。

これを模型比 1/2.5 で換算すると，0.84 m × 0.5 m となった。

港湾技研資料　No.423

1982.6

編集兼発行人　運輸省港湾技術研究所

発行所　運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所　日青工業株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.