

大水深防波堤捨石マウンド築造に関する技術的検討

運輸省 第二港湾建設局 横浜機械整備事務所

中川 英 毅

宮古港工事事務所

外山 進 一

横浜調査設計事務所

上 園 晃

1. はじめに

釜石港湾口防波堤は、最大水深が 60m を越える大水深の場所に建設される世界でも最大級の防波堤である。現在日本各地で建設されている防波堤は設置水深が 20～30m 以下であり、捨石マウンドの上にケーソンを設置した混成堤型式が一般的である。釜石港湾口防波堤でも今までの検討結果では、この型式を基本とし若干の改良を加えたものが最も有利となっているが、このような 60m を越えるような大水深での防波堤の建設事例はなく、これまでに経験したことのない技術上の課題が多い。そのため、計画決定以来、施工のための調査研究を進めているところである。本論においては、釜石港湾口防波堤が大水深であることから、従来浅い水深での技術では対処できない特に重要な施工上の 2 つの課題 (i) マウンド築造の施工法 (ii) ケーソン据付面の機械均しについて調査検討の概要を紹介する。

2. 大水深防波堤マウンド築造の課題

釜石港湾口防波堤の構造については、種々の型式について比較検討し、経済性及び施工性等の点で優れているケーソン式混成堤が最適と選定され、現在北堤深部については、図-1 の標準断面が提案されている。

日本各地で建設されている第一線防波堤の設置水深は最大でも 30m 程度であり、釜石港湾口防波堤のごとく、水深 60m、マウンド厚 35m の大水深・大規模マウンドの施工においては、従来の施工技術では対応できない多くの課題がある。主なものを列挙すると、

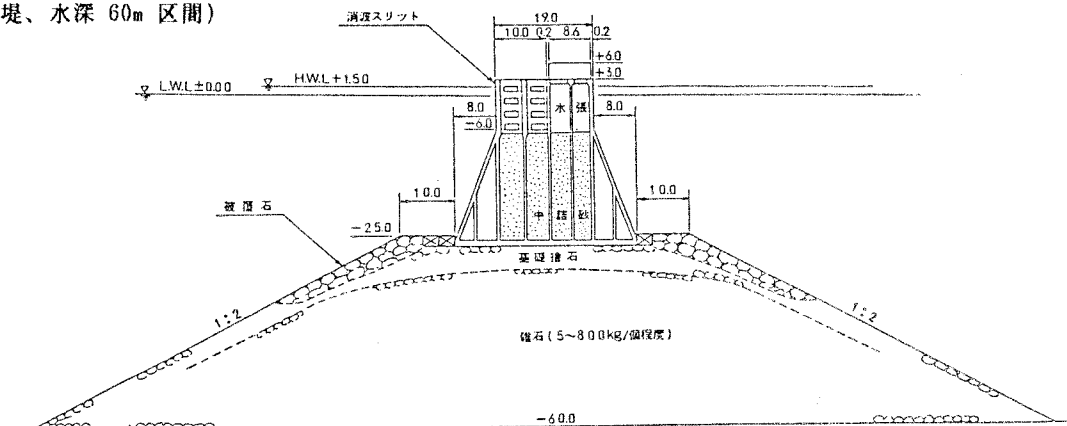
- ① 年間 50 万 m^3 に上る大量の石材を経済性・効率的に投入する施工システムの開発。
- ② 大水深のため投入捨石の拡散が大きい状況下で、所要断面を形成するための適切な投入方法の開発。
- ③ マウンド厚が大きい場合、将来の沈下量を抑制するための強固なマウンドの形成法の開発。
- ④ 大水深でのマウンド形状の施工精度が低下すること、及び大水深での測量が困難であることから、所要精度を確保するための測量技術の開発。
- ⑤ 大水深のため、潜水夫によるケーソン据付面の均し等の作業が困難であることから、機械化施工法の開発。
- ⑥ 効率的投入を行うため、出来高確認から投入位置決定までを円滑に行う施工システムの開発。
- ⑦ 気象・海象条件が厳しい中での稼働率の確保及び荒天時の避難対策。
- ⑧ 大規模施工のための総合施工管理システムの開発。

その他、各種の課題があげられるが、これらの各課題については、必ずしも各項目が独立しているのではなく、それぞれ相関の深いものである。

本文においては、これらの課題のうち、①及び②に関係する大水深・大規模マウンドの施工法について及び⑤のケーソン据付面均しの機械化施工の開発・現地実験について報告する。

図-1 標準断面案

(北堤、水深 60m 区間)



3. 捨石マウンドの施工について

1) 捨石マウンドの築造法

前述のごとく、大水深・大規模マウンドの施工は、いかに合理的・経済的にマウンドの断面を形成するかが焦点となる。図-1にみられるような、大断面の捨石マウンドに対する施工法としては次のような方針が考えられる。

- ① 捨石マウンドは大型石運船によって層積み方式で施工することにより、天端の凹凸を減少させるとともにケーソン据付後の沈下量の減少を期待する。
- ② 捨石マウンドの造成に当っては、断面外への散乱をできるだけ防止するような施工法を確立する。
- ③ 捨石マウンドの形成状況については迅速に測量し実績をもとにした次の投入指示を行う等の施工管理手法を定める。

以上の方針をもとに、釜石湾口防波堤の施工にあたっては、 300m^3 及び $1,000\text{m}^3$ 積底開式石運船(図-2)にて施工を行うこととしたが、石運船の船型・構造・投入水深などにより、石材の拡散・堆積の状況が変化するため、捨石投入拡散実験を行い、適切な施工法及び施工管理計画の検討を行なった。

2) 捨石投入拡散実験

① 実験方法

釜石湾口防波堤のマウンド敷において、前記 $1,000\text{m}^3$ 石運船により、水深 60m の地点(ケースA)及び水深 20m の地点(ケースB)で行なった。ケースAは図-3に示すような形成断面を想定し、11回の投入を行い、ケースBは5回の投入を行なった。

使用石材は、平均重量 $75\text{kg}/\text{個}$ のものを、 $16\text{千}\text{m}^3$ 投入した。

測定項目は、船舶誘導状況、捨石中の船の挙動、船艙内の落下状況、投入中の石の拡散状況、捨石の堆積状況(直接・間接測量)等である。

② 誘導時の操船性及び投入中の船の挙動

操船者の熟度がある程度高くなったケースAの場合について、誘導時の船の操船性について航跡記録より検討すると、誘導時に船尾に対して潮流・追風・追波が作用した場合に航跡図の乱れが大きく法線に入ることすら困難であり、逆に船首・船側方向から潮流・風・波を受ける場合は乱れが少なく、投入時の誘導距離・投石時間を短縮するためには、後方からの力を受けない方法をとることが望ましいことが判明した。

また、投入中の船の挙動について、トランシット観測による記録と、オーディスタ記録の例の代表的なものを図-4に示す。全ケースについて投入中の移動量をみると、船首を風上に向けた場合は、前後方向の移動量をある程度修正でき士 2m 以内に納まるが、逆の場合は最大 4m 程度になることがわかり、投入中の船の移動についても、誘導時と同じく、波に向かい、風の抵抗を小さくする必要があることが判明した。

③ 船艙内の落下状況

捨石投入中の石運船の開扉寸法及び捨石投入量(5秒間隔)の時間変化の関係を示したのが図-5である。この図より捨石開始後

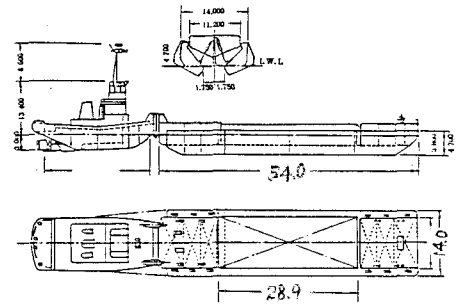


図-2 大型石運船

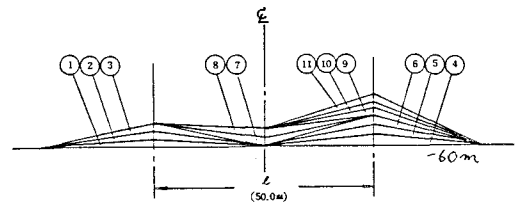


図-3 投入状況図(ケースA)

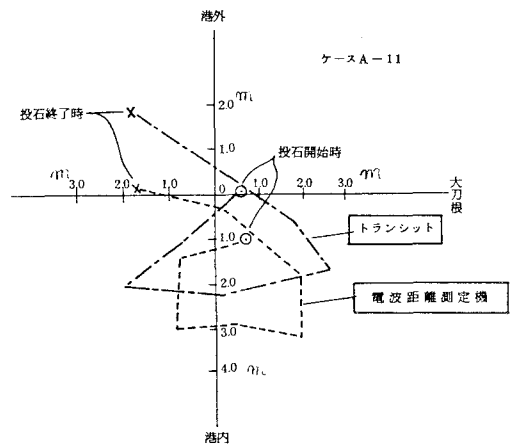


図-4 投入中の航跡図

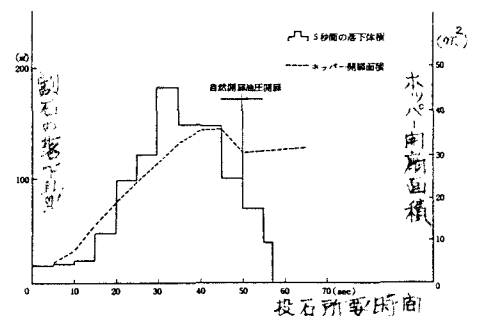


図-5 開閉面積と落下量

40～45秒までは等速度で開扉しその後は逆に閉じる傾向を示すことがわかった。これは、バージの開閉機構が油圧弁開放による自然開閉のため重量と水圧のバランスにより起こると考えられる。

また、捨石の落下量をみると、20～50秒間に全体の8割が落下し、最大落下量は開扉面積が最大となる5～10秒前に現われることがわかった。

④ 堆積・拡散状況

ケースAについて堆積状況を示したのが図-6である。

図よりわかるように、堆積はほぼ円形になっており、拡散は投入中の石群衝突や海底面でのバウンドで、法尻の周囲に広くまばらに散乱していた。

ケースBは、細長い形状に緩やかな勾配を持った山型を形成しており、水深が浅かったせいか、マウンドの周囲に拡散はせず、法尻は比較的きちっとしていた。

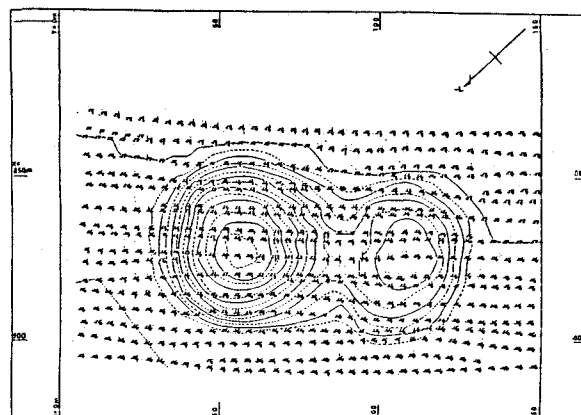


図-6 ケースA第11投後水深図

⑤ 堆積・拡散についての数値的検討

捨石の拡散・堆積状況についての石運船に対する横断方向及び縦断方向について図示したのが図-7及び図-8である。

石の散乱状況については、ケースBについては長さ及び幅ともに想定された広がり角を示しているが、ケースAについては、予想よりも縦方向には拡がらず、横方向には考えていた数値には近い拡がり角を示している。縦と横の拡がり角の割合(B/L)はケースBでは0.52～0.58、ケースAでは0.86～0.95であり、ケースBでは長だ円で、ケースAでは円に近い拡がり角を示した。

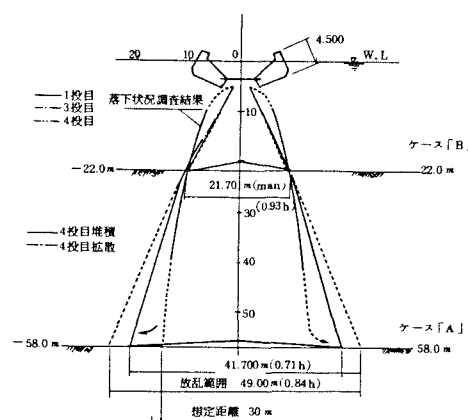


図-7 横断方向の水深と堆積(拡散)範囲

この形状の違いの大きな理由は次のことが考えられる。水深が深くなるに従い割石自身による横方向の動きと割石が互いにおつかり合うために起こる横方向の動きとが増幅されてその拡がり角が大きくなると考えられる。形状については、今回使用した石運船の船艙の幅(11.2m)と長さ(28.9m)の比が1:2.58のものでは-57m付近では円形になったが、この比が大きい船艙の場合については何とも言えない。

横方向の堆積巾(B)と水深(h)の関係については、

$$\text{ケースA} \quad B = 0.72 \sim 0.78h$$

$$\text{ケースB} \quad B = 0.92 \sim 1.05h$$

となっており、ケースA、Bを比較すると一般的に言われている $B = 0.8h$ の関係はすべての水深にあてはまるものではなく、水深と堆積巾の関係(B/h)は水深が深くなるほど小さくなることがわかった。

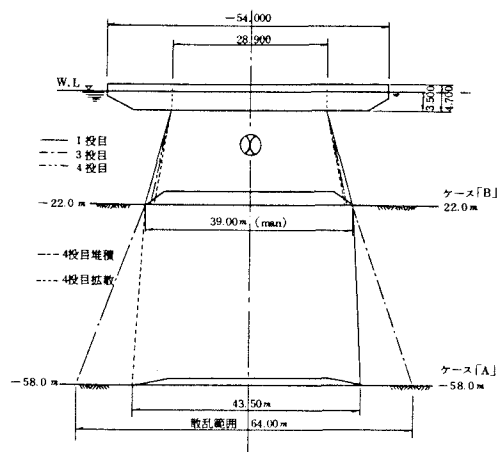


図-8 縦断面方向の水深と堆積(拡散)範囲

3) 現地施工結果

釜石港湾口防波堤のマウンドの施工は、昭和54年度の先行捨石の投入を開始して以来、北堤及び開口部に捨石投入しており、年間投入量も昭和59年度より約50万 m^3 となっている。

昭和60年度までに約200万 m^3 (全体計画量の約3割)の投石を行ない、既に北堤及び開口部については水深約3.5mまでのマウンドが概成している。

捨石の投入方法については、前記実験結果に基づき1,000 m^3 石運船及び300 m^3 石運船により、3投2投3投方

式(図-9)により行なっている。

現在のところ設計断面の中詰部の投入であり、最終的な法面形成ではないが、現在までに施工されたマウンド形状を図-10に示す。

現在の施工は、常に試験工事的要素も含まれており理想的な手順どおり進むことは期待していないが、実験等に基づき投石パターンを定型化し、能率よくかつ所定の断面を得よう努力しているものであり、今後精度を要求される法面部の施工方法についてはさらに各種の検討を進めることとしている。

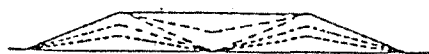


図-9 投石方式

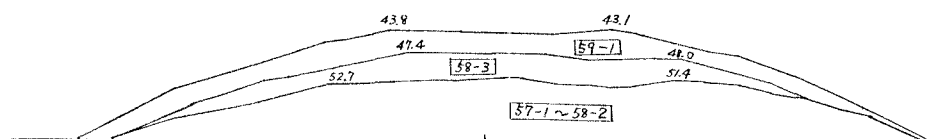


図-10 施工断面図

4. 機械均し現地実験について

1) 開発の背景・目的

従来よりケーソン据付等の捨石均し作業は、大部分潜水士による人力施工に依存していたが、この工法では今後の施工条件の変化に十分対応することが、人材確保、労働安全環境の面からも難しくなっている。従って機械化施工が強く要請されている。

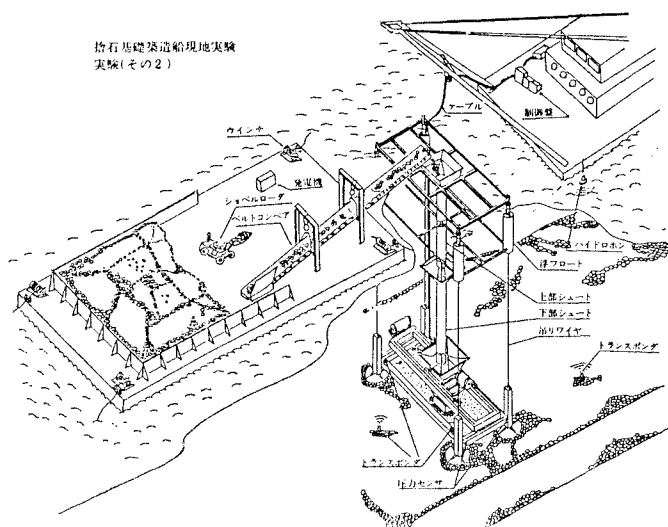
以上のような背景のもとに第二港湾建設局では、捨石(割栗石)の捨込みと均し作業を同時に行うシュート方式による捨石均し装置の開発を進めている。

今迄に模型実験、ケーソンドック実験等により基礎実験段階での確認項目は大部分求められた。しかしながら、現地における海象気象条件、捨石の供給、船団の耐候性、位置出し等を含めての全体システムでの実験確認が必要であるとの認識にたち、昭和60年10月に釜石港において初の現地実験を実施したもので所期の成果を収めることが出来たので概要について以下に述べる。

2) 二建式捨石均し装置の機構・主要目

本装置は、30mを越える水深下において捨石均し作業が可能な構造、駆動機能を有し、一回の着底にて約32平方メートルの均し出来る。上部側より捨石供給装置、捨石供給シュート、捨石均し装置に大別される。捨石供給装置はTLP方式(テンション・レグ・プラットフォーム)と呼ばれている方式を採用している。この方式の特徴は、構造物が水面を切る部分の断面積を小さくすると共に、海底に設置した構造物(捨石均し装置)とを接続する索に常に張力を作用させることによって、水面での波浪動揺特性の向上が図れることである。

捨石均し装置は、規定の水平面を確保する水平架台、脚、シュート口の移動を分担する走行台車、シュート台車、捨石を受取るホップ及びシュートより構成されている。



項 目		要 目
捨 石 供 給 装 置	方 式	テンション・レグ・プラットフォーム
	高 さ	12.5m 海上部 0.5m/φ 水没部 1.8m/φ(浮力タンク)
	供給シュート	1.5m/φ 2本連結
	吊ワイヤーロープ	42.5mm/φ
	全 高	約40m
重 量		約130t

3) 二建式捨石均し機の原理

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、一定期間置いた後、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、その均し作業を行うことが多い。従って、マウンド天端面のある層厚の捨石の投入とその均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。

二建式捨石均し機は、図-11に示すように、石運船等によって捨込まれた概成マウンド上に、均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、均し作業も行なわせようとするものである。

本工法の原理は、図示のように、従来の水平機械力均し工法における均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ずられていく(停滞域)。本工法における捨込み均し抵抗力は、この停滞域での捨石厚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、捨込み均し層厚(h)、捨込み均し速度(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、捨込み均しマウンドを一定高さ(H)に形成することが出来る。しかし、停滞域の拡大は捨込均し抵抗力の増大に関連するので、最適捨込均し条件が存在するものと思われる。

捨込均し工法では、このようなシュートを水平に移動させると、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次のものがある。

- ① 捨込み均し捨石の性状 ② 基礎マウンドの性状 ③ シュートの形状 ④ 捨込み均し層厚
- ⑤ 捨込み均し速度 ⑥ 捨込み均しマウンド重合わせ幅 ⑦ シュート内捨石重量

本稿では、個々の実験的検討は省略するが、2)に述べる仕様が決定された。

4) 現地実験

(1) 調査計測項目

本現地実験においては、全体システムでの確認を行うことであるが、項目としては次の通りである。

- (イ) 使用捨石の粒径
- (ロ) 均し作業時の起重機船・捨石供給台船の係留状態の把握
- (ハ) 捨石均し装置の運転特性確認
- (ニ) 捨石均し装置の設置状況・据付精度
- (ホ) 捨石均し装置の水平度維持システムの性能確認

項 目		要 目
脚 車 装 置	脚 方 式	伸縮式4脚 2m脚距付
	油 圧 シリンダ	ストローク2.5m
	油 圧 変 換 装 置	ストローク0.5m
	油圧ポンプ 圧力	常用 180kgf/cm ²
水 車 装 置	電 動 機	AC200V、60Hz、22KW 1台
	架 台 寸 法	13m×6m幅
走 行 装 置	寸 法	13m×2.6m幅
	走 行 速 度	2%/min 一定
	走 行 方 式	ピンアンドスプロケット走行
	油圧ポンプ 圧力	常用 180kgf/cm ²
架 台 装 置	電 動 機	AC200V、60Hz、30KW 1台
	油 圧 モーター	4tonf-m 減速機付 2台
シ ャ ー ト	寸 法	5m全長×3m幅
	走 行 速 度	2%/min 一定
	走 行 方 式	ラックアンドピニオン走行
	油圧ポンプ 圧力	常用 180kgf/cm ²
台 車 装 置	電 動 機	AC200V、60Hz、30KW 1台
	油 圧 モーター	4tonf-m 減速機付 2台
ホ ッ プ 式	形 式	ホッパー・シュート一体型
	ホ ッ プ 寸 法	1.9m×1.6m幅
	ホ ッ プ 容 量	(12m ³ 以上) 貯石後 27m ³
	シ ャ ー ト 寸 法	1.3m×1.6m幅

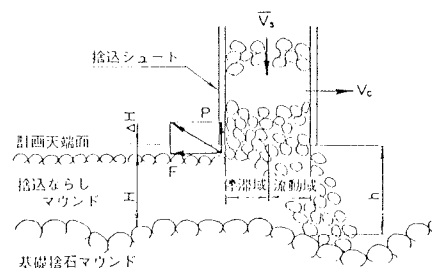


図-11 シュート方式捨込ならし工法の原理図

- (ヘ) 捨石均し装置の着底時衝撃力の計測
 - (ト) 均し抵抗力
 - (チ) 均し精度
 - (リ) 捨石の供給、装置の誘導、設置、均し作業、均し面の計測等の各工程所要時間
- (2) 実験方法・捨石径・実験場所
- (イ) 泉地区 実験(その1)

釜石港の泉地区(-8.5m)において実施するもので、捨石径・押圧が均し精度におよぼす影響、在来
 の水中スタッフ測量と音響測深の比較等について調査する。

捨石径：5～10、5～30、5～100、50～100kg/個の4種類

捨石供給方式：台船上のベルトコンベア直投

押圧方式：摺動、転圧の2種類
 - (ロ) 湾口地区 実験(その2)

湾口地区の北堤(-35m)において捨石供給装置を使用し、全体システムの作動、施工能力等について
 調査する。

捨石径：5～30kg/個

捨石供給方式：TLP方式の捨石供給装置
- (3) 実験結果
- (イ) 使用捨石の粒径

本実験に使用した捨石は、主に塊状のものであり、適していたと考えられる。
 - (ロ) 船団構成・係留状態

捨石均し装置の吊上げ用に起重機船(150t吊)、捨石供給用に台船(1,500t積)、その他各種支援船を
 使用して実験を行ったが、船団構成、係留等の不具合点は特になかった。

TLP方式の捨石供給装置は、大水深下の捨石均し機までの捨石供給に際して、閉塞や機械的トラ
 ブルはなく、動揺、振回りは殆どなく良好であった。
 - (ハ) 運転特性確認

全実験を通して捨石均し装置の各油圧ポンプユニット・電動機等の圧力、温度上昇、電圧、電流等
 は正常であり問題はなかった。
 - (ニ) 設置状況・据付精度

捨石均し装置は均しマウンド面、基礎マウンド面に設置するが、両方とも良好に設置出来た。両地
 区とも据付に対する実績とのずれは、トランシット・光波測距儀ともに0.1m、トランスポンダは
 0.5mとなった。
 - (ホ) 水平度維持システム

水平架台の水平度は許容誤差である不感帯に依存し、十分許容値内に水平が保たれることが確認さ
 れた。
 - (ヘ) 着底時衝撃力

衝撃吸収装置が正常に作動し、着底時の脚に作用する衝撃力は設計値に比べてかなり小さい値であ
 り、安定した着底が出来た。
 - (ト) 均し抵抗力

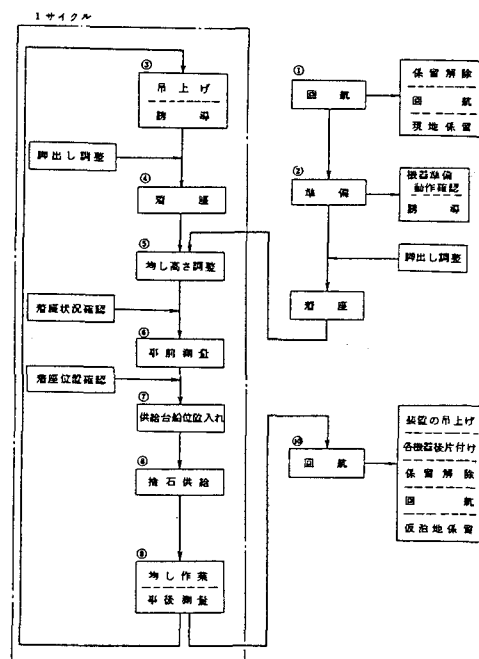
均し抵抗力の最大値は、始動時に発生し、5～30kg/個では6tと求められた。
 - (チ) 均し精度

シュート上面に設置した音響測深機の計測により均し精度を求めたが、押圧効果が顕著であること
 が判明した。
 - (リ) 各工程所要時間

泉地区では1サイクル：約90分、湾口地区：約120分であった。



No.	供試捨石	実験ケース	標準偏差	実験ケース	標準偏差	摘 要
1	5~10 kg/個	I-5~I-7	3.99 cm	I-13	2.26 cm	押圧実験
2	5~30 kg/個	I-3~I-4 W-1~W-6	3.91 cm 4.79 cm	I-14	2.28 cm	
3	5~100 kg/個	I-8~I-10	1.13 cm	I-15	8.27 cm	
4	50~100 kg/個	I-11~I-12	1.18 cm	I-16	4.82 cm	



最後にこれまで御尽力いただいた関係各位に感謝するとともに、これからも、世界最大級の防波堤の建設を成功させるべく、新たな取り組みを進めてゆく所存である。