

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.47 NO.2 June 2008

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 47 卷 第 2 号 (Vol. 47, No. 2), 2008 年 6 月 (June 2008)

目 次 (CONTENTS)

- 太平洋北東岸GPS波浪計観測網が捉えた大水深域における海象特性
.....永井 紀彦・清水 勝義・佐々木 誠..... 1
(Characteristics of the Observed Offshore Data by the Northern Pacific GPS Buoys
..... Toshihiko NAGAI, Katsuyoshi Shimizu, Makoto Sasaki)
- T型あるいは浮き型SCP工法によって改良された粘性土地盤の支持力特性
.....高橋 英紀・市川 栄徳・北詰 昌樹..... 53
(Bearing Capacity of T-shaped or Floating-type Sand Compaction Pile Improved Ground
..... Hidenori TAKAHASHI, Eitoku ICHIKAWA, Masaki KITAZUME)
- 混成堤における根固方塊および被覆ブロックの合理的な形状とその設計法
.....下迫健一郎・久保田真一・浜口正志・松本 朗・半沢 稔・中野史丈.....89
(A Rational Design of Foot-Protection Block and Armor Block Covering Rubble Mound
of Composite Breakwaters
..... Ken-ichiro SHIMOSAKO, Shin-ichi KUBOTA, Masashi HAMAGUCHI,
Akira MATSUMOTO, Minoru HANZAWA, Fumitake NAKANO)
- 産業副産物(製鋼スラブ・フライアッシュ・高炉スラブ)を有効利用したコンクリートの品質
および耐久性に関する研究
.....審良 善和・山路 徹・濱田 秀則.....111
(Research on Quality and Durability of the By-Products Concrete Using Steel Making Slag,
Fly ash and Blast Furnace Slag
..... Yoshikazu AKIRA, Toru YAMAJI, Hidenori HAMADA)

混成堤における根固方塊および被覆ブロックの 合理的な形状とその設計法

下迫健一郎*・久保田真一**・浜口正志**・松本 朗**・半沢 稔**・中野史文***

要 旨

防波堤の主要な形式である混成堤においては、ケーソンの前面に根固方塊を設置し、さらに捨石マウンドをコンクリート製のブロックで被覆する形式が主流である。この形式は長年の歴史があり、その設計手法はかなり確立されてきているものの、港湾整備がより自然条件の厳しい地区へと向かう現状において、新しい技術開発や施工法を含めた、より合理的で高度な設計法の検討の余地が残されている。

本研究は、混成堤マウンドに関して根固方塊および被覆ブロックに着目し、耐波安定性の確保とともに新たな施工法やコスト縮減につながる知見を得ることを目的として、広範囲な縮尺での水理実験を実施し、捨石の挙動をも含めた耐波安定性に関する系統的な検討を行ったものである。根固方塊に関しては、その形状と耐波安定性の関係について検討し、その結果、現行の有孔型を2分割したタイプおよび2分割して厚さを増したタイプについても、根固方塊所要厚の算定式が適用可能であること示した。被覆ブロックに関しては、作用波力の低減に有効な形状を波力実験により検討し、その結果、開口部を分散して配置することが有効であることが分かった。さらに、こうした波力低減に有効な形状要素を取込むことで、耐波安定性および経済性に優れた合理的なブロック形状を提案し、混成堤マウンド被覆材としての有用性を示した。

キーワード：混成堤マウンド被覆，根固方塊，被覆ブロック，開口率，揚圧力，耐波安定性

* 海洋・水工部 耐波研究室長

** (株)不動テトラ

*** 海洋・水工部 耐波研究室

A Rational Design of Foot-Protection Block and Armor Block Covering Rubble Mound of Composite Breakwaters

Ken-ichiro SHIMOSAKO *

Shin-ichi KUBOTA**

Masashi HAMAGUCHI**

Akira MATSUMOTO**

Minoru HANZAWA**

Fumitake NAKANO***

Synopsis

A rubble mound of composite breakwater is usually covered with foot-protection blocks and armor blocks to prevent its deformation. Although the design method for foot-protection blocks and armor blocks seems to have been almost established, nowadays, the site conditions are becoming severer. Therefore more rational design methods are required.

The purpose of this study is to obtain the new knowledge correlating to the stability and cost reduction for the foundation of composite breakwater. Hydraulic stability tests for foot-protection blocks with various scales were conducted and the rational designs were investigated. Wave forces acting on the armor blocks were measured and the rational shape of block which reduces the uplift force was proposed. The hydraulic stability tests for the proposed armor block were conducted and the improved stability was confirmed.

Key Words: Composite breakwater, Foot-protection block, Armor block, Opening ratio, Uplift force, Stability

* Head, Maritime Structures Division, Maritime Environment and Engineering Department

** FUDO TETRA CORPORATION

*** Maritime Structures Division, Maritime Environment and Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-8445043 Fax : +81-46-8427846 e-mail: shimosako@pari.go.jp

目 次

要 旨	89
1. まえがき	92
2. 混成堤基礎マウンドの設計法の現状とその問題点	92
2.1 根固方塊の設計	92
2.2 被覆ブロックの設計	93
3. 根固方塊の合理的な形状と耐波安定性	94
3.1 検討対象形状	94
3.2 小縮尺水理模型実験	94
3.3 大縮尺水理模型実験	98
4. 被覆ブロックの合理的な形状と耐波設計法	101
4.1 開口部による波力低減効果についての基礎的な検討	101
4.2 大きな開口部を有する被覆ブロックに作用する波力特性および安定性	104
4.3 合理的なマウンド被覆ブロックの波力特性と耐波安定性	105
5. 結論	108
6. あとがき	109
謝辞	109
参考文献	109

1. まえがき

近年、港湾事業においては経済性および、環境に配慮した港湾構造物の建設が望まれている。また、港湾整備もより自然条件の厳しい海域の整備へと向かい、工事費や工事期間が増大する傾向にあり、関連する新しい技術や工法の開発が課題となってきた。

防波堤の主要な形式である混成堤においては、ケーソン前面に根固方塊を設置し、さらに、捨石マウンドをコンクリート製のブロックで被覆する形式が主流である。この形式は長年の歴史があり設計手法もかなり確立されてきてはいるものの、未だ検討課題が残されている。例えば、根固方塊の設計では、その厚さは波高に対して算定されるようになっているが、平面的な形状（縦横寸法）や開口率については経験的に定められている。こうした方法は実績もあり、結果として妥当なものとは考えられるが、単体としての安定性あるいは、下部の捨石の挙動との関連から、より合理的な設計法（根固方塊の大きさや質量、開口率等）を検討する余地が残されている。こうした検討は、ひいては、コスト縮減にもつながると考えられる。また、被覆ブロックに関しては、ブロックを薄型化することができれば、使用するコンクリート量が減少するため、その結果としてコスト縮減に結びつくことが予想される。しかしながら、薄型化した場合、ブロック単体の質量が低下するため耐波安定性の向上を図る必要がある。そのためには、ブロックに開口部を設け揚圧力を効果的に軽減させ、耐波安定性を向上させることが考えられる。従来から、開口部が安定性向上に寄与することは知られているが（例えば宮崎ら,1991）、開口率と安定性の関係や、根固方塊と同様にブロック下部の捨石の挙動との観点を含めた系統的な検討という点では未だ不十分と考えられる。

以上のような背景を踏まえ、本研究は、根固方塊および被覆ブロックに着目し、混成堤マウンドの設計に関して新たな知見を得ることを目的として実施した。また、本研究の実施にあたっては、近年、進歩の著しいVOF法等の数値計算も有効活用することにより、検討の効率化並びに合理性追求も図るものとした。本報告の構成は以下のとおりである。

2章において混成堤基礎マウンドの設計法の現状と問題点についてふれることで、合理的な設計に向けて検討すべき課題を示した。3章では、根固方塊の合理的な形状と耐波安定性について考察した。4章では、合理的な被覆ブロック形状を提案するとともに、耐波安定実験を実施することで、混成堤マウンド被覆材としての有用性

を検討した。

2. 混成堤基礎マウンドの設計法の現状とその問題点

2.1 根固方塊の設計

混成堤においては、根固方塊が直立部の前面に置かれるのが普通である。根固方塊は、直立堤下部の捨石マウンドに対して、波や流れの作用による洗掘や吸出しが起こらないよう保護する役目を有する。根固方塊が移動したり、その場より取り去られてしまうと、直立部下部の捨石マウンドが洗掘され、直立部の安定に影響を及ぼす。そのため、根固方塊は波浪外力に対して十分に安定である必要がある。

根固方塊の耐波安定性は、その厚さで評価される。厚さの算定においては、式(2-1)に示す算定式(木村ら,1996)が用いられている。

$$t/H_{1/3} = d_f (h'/h)^{-0.787} \quad (2-1)$$

ここに、 t は根固方塊の必要厚さ(m)、 $H_{1/3}$ は作用有義波高(m)、 d_f は堤幹部では0.18、堤頭部では0.21、 h は設計水深(m)、 h' はマウンド天端水深（ブロック・方塊を含まない）(m)であり、適用範囲は $h'/h=0.4\sim 1.0$ とされている。

形状諸元は、算定された所要厚 t に応じて表-2.1により与えられる。 l は法線方向の長さ、 b は幅である。図-2.1にその形状を示す。

表-2.1 根固方塊の所要厚と諸元（例）
（港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007）

根固方塊所要厚 t (m)	寸法 l (m) × b (m) × t (m)	質量(t /個)	
		有孔型	無孔型
0.8 以下	2.5 × 1.5 × 0.8	6.23	6.90
1.0 以下	3.0 × 2.5 × 1.0	15.64	17.25
1.2 以下	4.0 × 2.5 × 1.2	24.84	27.60
1.4 以下	5.0 × 2.5 × 1.4	37.03	40.25
1.6 以下	5.0 × 2.5 × 1.6	42.32	46.00
1.8 以下	5.0 × 2.5 × 1.8	47.61	51.75
2.0 以下	5.0 × 2.5 × 2.0	52.90	57.50
2.2 以下	5.0 × 2.5 × 2.2	58.19	63.25

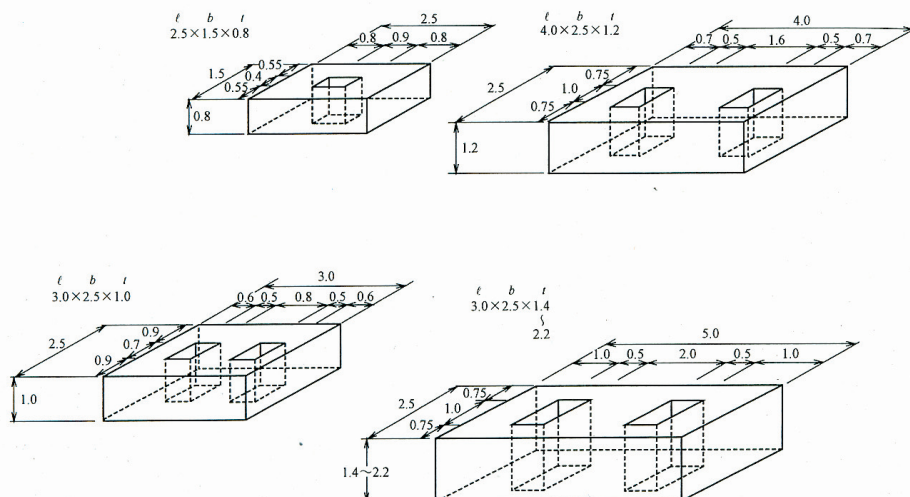


図-2.1 根固方塊の形状 (港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007)

このように、設置水深 h 、マウンド天端水深 h' 、設計波高 $H_{1/3}$ に応じて根固方塊の形状寸法が定まるが、以下の項目が問題点として残されている。

- ①所要厚の算定式の適用範囲：所要厚の算定式である式(2-1)は、その適用範囲が $h'/h=0.4\sim 1.0$ とされている。それ以外の条件においては、所要厚の算定が不可能である。
- ②所要厚が 2.2m を越える場合の形状決定：現行の設計においては、所要厚が 2.2m までを対象として形状を定めている。所要厚が 2.2m を越える場合の形状決定に関しては情報が無い。
- ③根固方塊の平面形状が安定性に及ぼす影響：耐波安定性を所要厚のみで評価しており、方塊の平面形状が安定性に及ぼす影響が不明である。根固方塊の設置位置がケーソン前面であるため、水粒子運動を考慮すると鉛直力が卓越するため、厚さを確保することは重要である。しかしながら、根固方塊を複数列で設置する場合、沖側の根固方塊は相対的に鉛直力が小さくなることが考えられ、更に開口部を設けるとその傾向が強まることが推定される。その場合には、耐波安定性の評価において、厚さのみならず、平面形状によって異なる抵抗モーメントを考慮した手法も考えられる。
- ④最適な開口率：開口部を設けることは、鉛直波力の低減に有効であり、その開口率は 10% が適当とされている。しかしながら、ブロック厚さや、平面形状に応じて、波力低減に最適な開口率は変化すると考えられるため、系統的な検討により、最適な開口率を再確認する必要がある。

- ⑤根固方塊の設置範囲：現行では、海側に 2 個、陸側に 1 個設置するのが望ましいとされているのみであり、合理的に設置範囲が定められているわけではない。

2.2 被覆ブロックの設計

被覆ブロックは、捨石マウンドの著しい散乱あるいは変形を防ぐ目的で設置される。捨石マウンドが安定していることは、防波堤全体の安定性に関わる重要な問題であり、設計においては、捨石マウンドを保護する被覆ブロックの質量を適切に決定する必要がある。

被覆ブロックの安定質量算定には、式(2-2)に示す安定数 N_s を用いたハドソン式を用いることができる。

$$M = \frac{\rho_r H_{1/3}^3}{N_s^3 (\rho_r / \rho_w - 1)^3} \quad (2-2)$$

ここに、 M はブロックの質量、 ρ_r はブロックの密度、 ρ_w は水の密度、 $H_{1/3}$ は作用有義波高である。安定数 N_s は、水深、波の諸元、マウンドの形状、被覆ブロックの特性のみでなく、設置位置によっても異なり、条件に適した模型実験などによって適切に与える必要がある。

被覆ブロックの設計については、以下の項目が問題点として残されている。

- ① N_s 算定における種々のパラメータの取り込み：上述したように、波浪条件、構造条件等により N_s は変化する。その算定に際しては、安定性に影響を及ぼすパラメータを適切に取り込む必要がある。
- ② 設計に用いる N_s の値：被覆ブロックに作用する流体力はその設置位置ごとに異なり、当然、 N_s もこれによって異なる。そのため、設置位置に応じた N_s を用いた被

覆ブロックの設計が合理的といえるが、現状の設計においては、最も不安定な設置位置（例えば、混成堤マウンドの法肩近傍）で得られた N_s をブロック設置全範囲に適用して、一律に所要質量を与えている。

- ③安定性の確率論的な取り扱い：被覆ブロックの安定性は本質的にばらつきを有するものであるが、現状では決定論的に取り扱われるにとどまっている。
- ④耐波安定性と経済性の両立：現状においては、より大きな波浪外力に対しては、ブロックの質量（抵抗力）を増すことで安定性を確保するのが主流である。しかしながら、ブロックの安定性は、抵抗力と外力のバランスによって左右される。例えば、被覆ブロックに開口部を設けると抵抗力としての質量は低下するものの、外力としての鉛直波力は減ずると考えられる。流体力の観点より、効果的に力のバランスを保ちうる形状を検討することで、被覆ブロックの経済性と安定性を両立させることが可能と考えられる。
- ⑤開口部の大きさと石の抜出しの関係：開口部を設けると捨石が抜け出すことが懸念されるため、両者の関係を把握しておく必要がある。

3. 根固方塊の合理的な形状と耐波安定性

3.1 検討対象形状

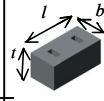





3章における検討は、2.1に示した根固方塊の設計における問題点の内、「②所要厚が2.2mを越える場合の形状決定」および「③根固方塊の平面形状が安定性に及ぼす影響」に関連したものである。なお、①については一般的な混成堤において $h'/h < 0.4$ となる条件はほとんどないこと、また、④、⑤については、今後検討の余地はあるものの、現行の方法ですでに多数の実績があり、新たな知見を得るためには系統的に実験や数値計算等を数多く行わなければならないことから、今回は対象外とした。

現行基準（港湾の施設の技術上の基準・同解説、2007）において、根固方塊の耐波安定性は、その厚さ（所要厚）のみで評価されており、平面形状が耐波安定性に及ぼす影響については明確に示されていない。また、現行基準においては、表-2.1に示すように、所要厚が2.2m以下の場合について、縦横寸法の諸元の例が示されており、現地ではこれらに準じた形状の方塊が使用されている。しかしながら、所要厚が2.2mを越える場合には、その重量は相当なものとなり、据付におけるクレーンの規格等の施工性に制約を与えることが想定される。

国栖ら(1986)が方塊に作用する外力として揚力が支配的であることを明らかにしているように、方塊の安定性

が厚さのみに依存するものであれば、所要厚が2.2mを越えるような場合においても、平面形状を小さくすることで、根固方塊1個当たりの質量を小さくすることが可能と考えられる。このことは、現地における施工において有益である。そこで、現行の最大厚さ($t=2.2\text{m}$)の有孔型と無孔型のそれぞれについて、2分割した方塊（分割型）、さらに2分割して厚さを2.5mまで増した方塊（分割厚型）を検討対象として耐波安定実験を実施し、各々の形状に対して所要厚の算定式である式(2-1)の適用性を検討するとともに、根固方塊の合理的な形状を探ることとした。検討対象とした方塊の形状諸元を表-3.1に示す。

表-3.1 検討対象方塊諸元（現地量）

	形状図		寸法(現地量)		
	有孔	無孔	長さ l(m)	幅 b(m)	厚さ t(m)
現行型			5.0	2.5	2.2
分割型			2.5	2.5	2.2
分割厚型			2.5	2.5	2.5

3.2 小縮尺水理模型実験

(1) 実験概要

a) 実験水路と使用機器

実験は、断面水路（長さ50m、高さ1.5m、幅1.0m）を用いて実施した。測定には、表-3.2に示す計測機器を用いた。

表-3.2 計測機器一覧

計測機器	用途
容量式波高計	波高の計測
自動昇降機	波高計の較正
電磁流速計	流速の測定
パソコン	造波機の制御および計測データの収集・解析
カメラ、ビデオ	安定実験の状況撮影

b) 使用模型と実験断面

実験には、縮尺1/50に相当する模型を用いた。模型の

諸元を表-3.3に示す。

表-3.3 検討対象方塊諸元（模型量）

		方塊寸法			孔の諸元			質量 (g)
		<i>l</i> (cm)	<i>b</i> (cm)	<i>t</i> (cm)	長さ (cm)	幅 (cm)	個数	
現行型	無孔	10.0	5.0	4.4	—	—	—	506.0
	有孔	10.0	5.0	4.4	2.0	1.0	2	465.5
分割型	無孔	5.0	5.0	4.4	—	—	—	253.0
	有孔	5.0	5.0	4.4	2.0	1.0	1	232.8
分割厚型	無孔	5.0	5.0	5.0	—	—	—	287.5
	有孔	5.0	5.0	5.0	2.0	1.0	1	264.5

図-3.2は、実験断面および根固方塊の配置状況の一例を示したものである。根固方塊の前面に位置する被覆ブロック（ブロック長 $a=10.0\text{cm}$ 、ブロック厚 $t=1.5\text{cm}$ ）は、移動しないように固定した。被覆ブロックと根固方塊の厚さの比 r は、0.34（根固方塊：現行型、分割型）および0.30（根固方塊：分割厚型）である。 r は設置する被覆ブロックに応じて変化するものであり、現地における値は0.4から0.7程度と想定される。現行基準では、根固方塊の安定性から、被覆ブロックと根固方塊との段差は、できるだけ小さい方が望ましいとされており、本実験における $r=0.34$ および 0.30 は、比較的厳しめの条件と位置づけられる。根固方塊は被覆ブロックから5mm離して設置し、方塊間および方塊とケーソンの間には、間隔を設けていない。基礎マウンドには、質量1.8~4.5g(現地量で225kg~562.5kg)の砕石を用いた。なお、水深 $h=50\text{cm}$ 、マウンド天端水深 $h'=30\text{cm}$ を式(2-1)に適用すると、逆算される設計波高は、方塊厚さ $t=4.4\text{cm}$ および 5.0cm に対して $H_{1/3}=16.4\text{cm}$ および 18.6cm となる。

c) 波浪条件

表-3.4は実験波の諸元を示したもので、()内の数字は縮尺を1/50と想定した場合の現地換算値である。実験波は修正Bretschneider-光易型の周波数スペクトルを有する不規則波を用いた。

d) 実験手順

水路内のモルタル床上に、図-3.2に示す混成堤模型を設置した。堤体に不規則波を作用させ、根固方塊の挙動を観察した。根固方塊の移動が生じないような小さな波から作用させ、約1cmピッチで順次波高を増加させた。同一波高レベルでの波の作用は1000波を標準とした。波

高を増加させる際に根固方塊の積み直しは行わず、被害を計上した。

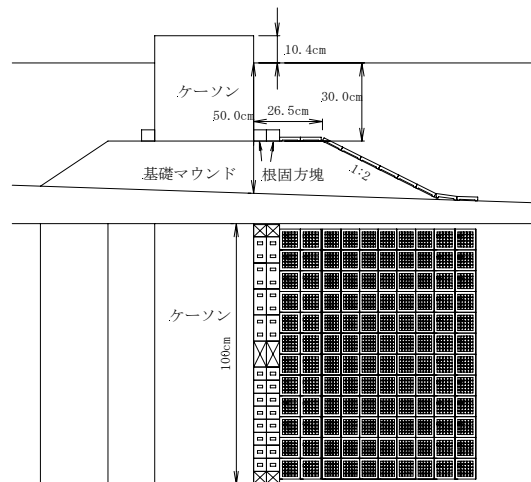


図-3.2 実験断面および根固方塊の配置状況

表-3.4 実験波諸元

	周期	波高
不規則波	$T_{1/3} = 1.5\text{s}$ (10.6s)	$H_{1/3} = 9\sim 21\text{cm}$ (4.5~10.5m)
	$T_{1/3} = 2.0\text{s}$ (14.1s)	$H_{1/3} = 10\sim 23\text{cm}$ (5.0~11.5m)

e) 被害基準

耐波安定性の評価において、被害基準をどのように設定するかは、重要な問題である。牛島ら(1988)は平面実験において、根固方塊が移動して方塊間の目地より150kg以下の捨石の吸い出しが起りうる状態を不安定と定義し、平面実験において、表-3.5におけるD状態を被害と判定している。断面実験においては、この判定基準が表-3.6におけるレベルIVに相当するとしている。なお、これらの判定基準は規則波実験におけるものであり、不規則波を長時間作用させたものではないことを考慮して、少し厳しい条件として設定されている。

木村ら(1996)は、混成堤堤頭部における被害基準を表-3.7におけるレベルVと定義している。これは、堤頭部における被害の状況として、根固方塊が抜け出し、基礎洗掘に至るケースが多いことを考慮して設定されたものである。

表-3.5 牛島ら(1988)による
根固方塊の移動状況の定義（平面実験）

状態	模型移動量	現地換算量	球形と仮定したときの基礎捨石の直径($\gamma=2.6$)					
			30kg	60kg	100kg	150kg	200kg	300kg
			28cm	35cm	42cm	48cm	53cm	60cm
A	0mm	0cm	○	○	○	○	○	○
B	0~1mm	0~5cm	○	○	○	○	○	○
C	2~5mm	10~25cm	○	○	○	○	○	○
D	8~10mm	30~50cm	×	△	△	△	○	○
E	11~15mm	55~75cm	×	×	×	×	×	△

注) ○印は、方塊が各状態の範囲で移動しても捨石の直径を超えない場合。
 △印は、方塊が各状態の範囲で移動すると捨石の直径を超えるときがある場合
 ×印は、方塊が各状態で移動すると捨石の直径を超える場合

表-3.6 牛島ら(1988)による
根固方塊の移動状況の定義 (断面実験)

状態	根固方塊の動き
I	まったく動かない。
II	微少な動きをする。
III	一定方向に移動する。ブロックの四辺が浮上する。ブロックの片側が厚さの1/4以上浮上する。
IV	ブロックの前後動が非常に大きくなり、堤体に当たってはね返りようになる。ブロックの四辺が厚さの1/4以上浮上する。ブロックの片側が厚さの1/3以上浮上する。
V	ブロックの四辺が厚さの1/3以上浮上する。ブロックの片側が厚さの1/2以上浮上する。
VI	ブロックが完全に移動する。

表-3.7 木村ら(1996)による
根固方塊の変位状況の定義 (平面実験)

	変位状況	変位置
安定	レベルI	安定
	レベルII	1~5mm
	レベルIII	5~10mm
	レベルIV	変位11mm以上
不安定	レベルV	抜け出し、回転、転落

表-3.8 根固方塊の挙動

状態	根固方塊の挙動
動揺	揺れ動くがほぼ元の位置に戻る。
石抜け	基礎マウンドの石が抜け出す。
傾斜	沖側方塊が天端上の被覆ブロック端部に乗り上げて傾斜する(被覆ブロック高さ1.5cm)。方塊片側が方塊厚さ(4.4cm)の1/3(1.47cm)浮上に相当
回転	方塊がその場で回転する。
離脱	方塊がその場より抜け出す。

表-3.8に、本実験において波作用時に観測された根固方塊の特徴的な挙動を列記した。ここでは、牛島ら(1988)

および木村ら(1996)の被害基準を参考にして、表中に示した挙動の内、傾斜、回転および離脱を被害とすることとした。ここで定義した傾斜とは、根固方塊の前面に設置した被覆ブロックに方塊が乗り上げた状態を示す。本実験で用いた被覆ブロックの厚さは、方塊厚さの約1/3であることから、表-3.6における牛島ら(1988)の被害基準である状態IV(ブロックの片側が方塊厚の1/3以上浮上する)に相当すると判断した。

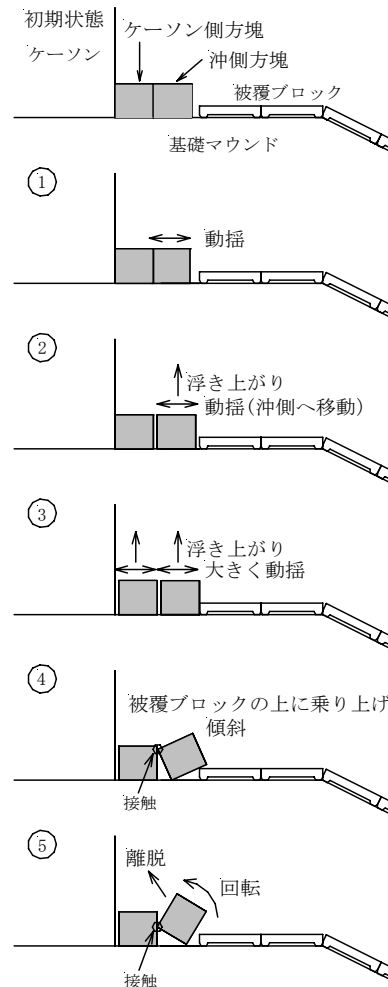


図-3.3 根固方塊の挙動 (模式図)

(2) 実験結果

a) 根固方塊の挙動

実験において観察された特徴的な挙動について、図3-3に示す。まず、沖側に設置した根固方塊(沖側方塊)の動揺が始まる(図中①)。波高の増大とともに、浮き上がりを伴う動揺となり、沖側方塊が、徐々に被覆ブロック側(沖側)へと移動して、沖側方塊とケーソン壁面に沿って設置した方塊(ケーソン側方塊)との間に間隔が生

じる(図中②)。ケーソン側方塊の動きも大きくなり、沖側へと徐々に移動し、ケーソン側方塊とケーソン壁面との間にも間隔が生じる(図中③)。こうして、当初、規則的に設置されていた方塊の配列が乱れてくる。沖側方塊と被覆ブロックが接近した状態において、浮き上がりに伴う大きな動揺が生じると、沖側方塊は被覆ブロック端部に乗り上げて傾斜するとともに、ケーソン側方塊に接触する(図④)。さらに波高が増すと、沖側方塊が接触箇所を支点として、その場で回転したり、離脱する場合がある(図中⑤)。このように、被害は、すべて沖側方塊において生じた。

また、波高の増大とともに基礎マウンドから石が抜け出すようになる。無孔方塊の場合は、ケーソン側方塊とケーソン壁面に生じた隙間からの石の抜け出しが観察された。有孔方塊の場合は、開口部からの石の抜け出しが生じた。しかしながら、こうした石の抜け出しによって、基礎マウンドが著しく変化することはない、ケーソンの安定性に影響を与えるものではなかった。

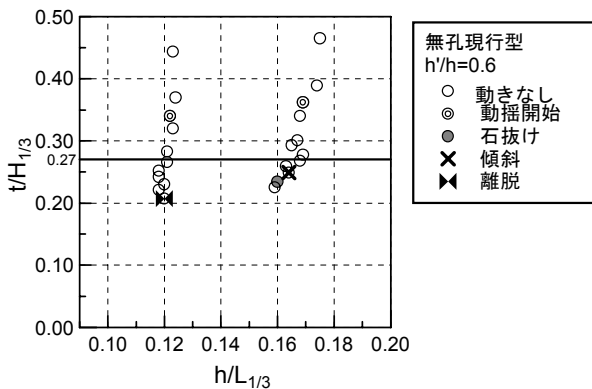


図-3.4 根固方塊の挙動(無孔現行型)

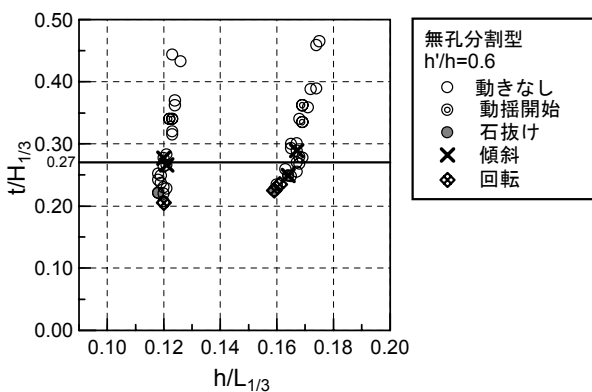


図-3.5 根固方塊の挙動(無孔分割型)

b) 方塊長さの影響

図-3.4 および図-3.5 に無孔型の実験結果を示す。横軸

は相対水深($h/L_{1/3}$, $L_{1/3}$ は有義波周期 $T_{1/3}$ に対する波長)、縦軸は方塊厚さと有義波高の比($t/H_{1/3}$)を示している。横線は式(2-1)より算出される値($t/H_{1/3}=0.27$)であり、根固方塊の安定限界を示すものである。この値より大きな領域は、設計波高以下の波が作用している状態であり、小さな領域は、設計波高以上の波が作用している状態を示している。根固方塊の動揺は、全てのケースにおいて設計波高以下の波高ランクより始まっている。設計波高以下において石の抜けは生じていないが、設計波高を上回る波高ランクにおいては、ケーソンと方塊の隙間より石が抜け出す場合があった。

現行の無孔型は、設計波高以下では被害は生じておらず、式(2-1)による方塊厚算定の妥当性を示している。設計波高を上回る波高において、沖側方塊の傾斜あるいは離脱といった被害が生じた。しかしながら、現行の無孔型を2分割した無孔分割型においては、設計波高以下で、沖側方塊の傾斜が確認されており、現行基準における安定性を確保することができないことが分かる。また、波高が増大すると、傾斜した沖側方塊において回転が生じた。

図-3.6 および図-3.7 に有孔型の実験結果を示す。方塊の動揺は、全てのケースにおいて設計波高以下の波高ランクより始まっている。設計波高以下においても開口部より石の抜けが生じる場合があるが、安定性に影響を及ぼすものではない。

有孔型は、無孔型と比べて質量が減少しているものの、無孔型と同等以上の安定性を示しており、設計波高以下では被害は生じていない。方塊の動揺が始まる波高に着目すると、無孔型と有孔型で明確な差が生じており、無孔型で動揺が生じる波高においても、有孔型は安定している。このことは、無孔型と有孔型で、安定性に本質的な差があることを示していると考えられる。

有孔型を2分割した有孔分割型でも、設計波高以下で被害は生じておらず、設計波高を上回る領域で傾斜が生じた。無孔分割型においては安定性を確保することができないが、有孔分割型は、現行基準における安定性を確保可能であるといえる。また、波高が増大しても、無孔分割型で観察された沖側方塊の回転は生じなかった。沖側方塊に作用する水平力と鉛直力(揚圧力)のバランスを考えると、有孔分割型に作用する揚圧力が低減したため、回転が生じにくくなったものと考えられる。これらの結果より、これまでも言われているように、根固方塊に孔を設けることは安定上有効であると判断される。

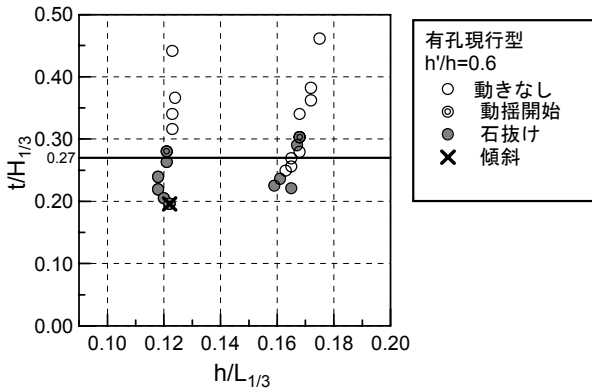


図-3.6 根固方塊の挙動（有孔現行型）

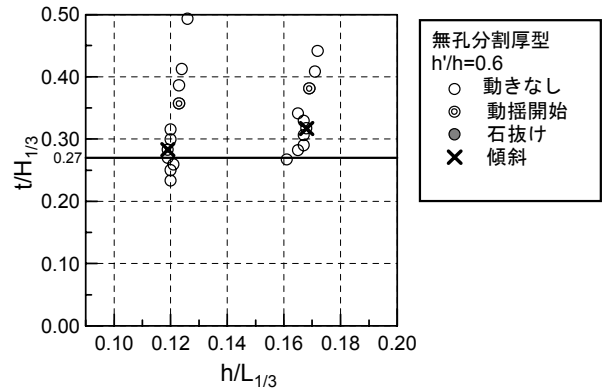


図-3.8 根固方塊の挙動（無孔分割厚型）

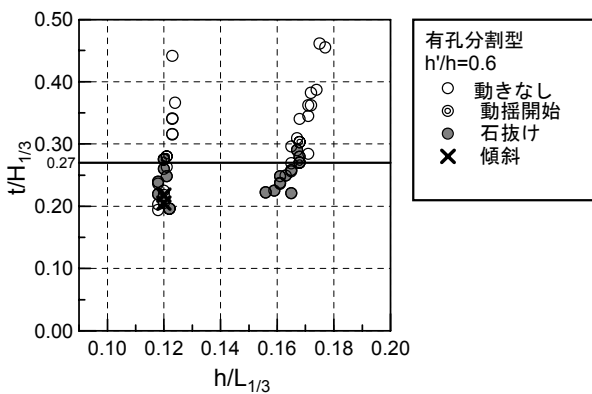


図-3.7 根固方塊の挙動（有孔分割型）

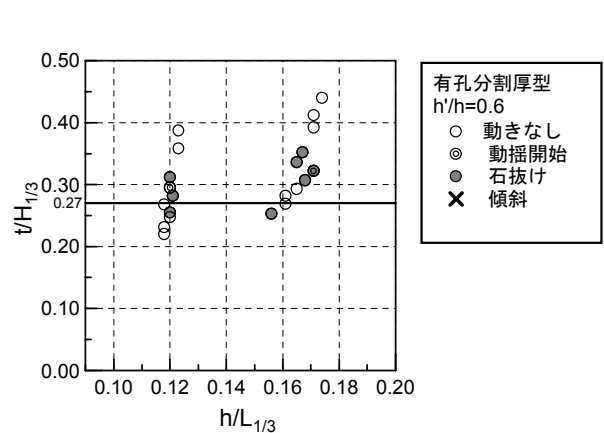


図-3.9 根固方塊の挙動（有孔分割厚型）

c) 方塊厚さの影響

図-3.8 に無孔分割厚型の実験結果を示す。ここで、方塊の厚さは現地量で2.5mとしており、設計波高がb)の検討で対象とした値の1.14倍(=2.5m/2.2m, 2.2mは現行方塊の厚さ)まで増加した状況を想定したことになる。既にb)で検討したように、無孔型においては、分割した場合には式(2-1)で見積もられる安定性は確保できなかったが、厚さを増した場合にも設計波高以下で傾斜が生じており、現行の耐波安定性を満たさないことが分かる。

図-3.9 に有孔分割厚型の実験結果を示す。設計波高以下において被害は生じていない。このことから、有孔分割厚型は、現行の安定性を満足しており、方塊の厚さを増した場合においても、所要厚の算定式である式(2.1)が適用可能であることが示された。

3.3 大縮尺水理模型実験

(1) 実験概要

a) 実験水路と使用機器

実験は、当所の大規模波動地盤総合水路(長さ184.0m, 高さ12.0m, 幅3.5m)を用いて実施した。測定には、表-3.9 に示す機器を用いた。

表-3.9 計測機器一覧

計測機器	用途
容量式波高計	波高の計測
電磁流速計	流速の測定
パソコン	造波機の制御および計測データの収集・解析
カメラ, ビデオ	安定実験の状況撮影
レベル	根固方塊の姿勢変化の把握

b) 使用模型と実験断面

実験には縮尺1/10に相当する模型を用いた。模型の諸元を表-3.10に示す。大縮尺実験においては、小縮尺実

験で確認された、有孔分割型および有孔分割厚型の安定性を検証するものとした。実験では、有孔型方塊に加えて、安定性の比較検討の為に無孔分割型も検討対象とした。

表-3.10 検討対象方塊諸元 (模型量)





	方塊寸法	方塊寸法			孔の諸元			質量 (kg)
		l (m)	b (m)	t (m)	長さ (m)	幅 (m)	個数	
現行型		0.50	0.25	0.22	0.10	0.05	2	58.19
分割型		0.25	0.25	0.22	0.10	0.05	1	29.10
		0.25	0.25	0.22	-	-	-	31.63
分割厚型		0.25	0.25	0.25	0.10	0.05	1	33.06

図-3.10 は、実験断面および根固方塊の配置状況の一例を示したものである。水路の半分を根固方塊の試験区域として使用した。もう一方は、後述する被覆ブロックの試験区域として用いている。根固方塊の試験区域においては、マウンド上に設置した被覆ブロック（ブロック長 $a=30.0\text{cm}$ 、ブロック厚 $t=8.1\text{cm}$ ）が移動しないように固定して実験を行った。被覆ブロックと根固方塊の厚さの比 r は、0.37（現行型および分割型）および0.32（分割厚型）である。方塊間、方塊とケーソンの間、および方塊と被覆ブロックの間には1cmの間隔を設けている。基礎マウンドには質量10~200g(現地量で10kg~200kg)の砕石を用いた。マウンド天端水深と水深の比 h'/h は、小縮尺実験と同一としている。想定している設計波高は、方塊の厚さ $t=0.22\text{m}$, 0.25m に対して $H_{1/3}=0.82\text{m}$, 0.93m である。

c) 波浪条件

表-3.11 は実験波の諸元を示したもので、()内の数字は縮尺を1/10と想定した場合の現地換算値である。実験波は修正 Bretschneider-光易型の周波数スペクトルを有する不規則波を用いた。

d) 実験手順

水路内のモルタル床上に、図-3.10に示す混成堤模型を設置した。根固方塊の移動が生じないような小さな波から作用させ、順次波高を増加させた。同一波高レベルでの波の作用は500波ずつ2回作用させることを基本とした。波高を増加させる際に根固方塊の積み直しは行わず、被害個数を計上した。

e) 被害基準

大縮尺実験における被害基準を表-3.12に示す。被害基準は、小縮尺実験の場合において定義した、傾斜、回転および離脱に加え、移動を被害とすることとした。ここで定義した移動とは、現地における水平移動量が25cmを越える状態であり、表-3.5に示した牛島ら(1988)の移動状況における状態Cを越える場合に相当している。実験終了時に方塊目地間隔の測定を行い、その値を方塊の水平移動量とした。傾斜については、各波高ランクの波作用後に、レベルを用いた測定を実施することでブロックの姿勢を確認し、被覆ブロックの高さ以上傾いた場合に傾斜と判断した。

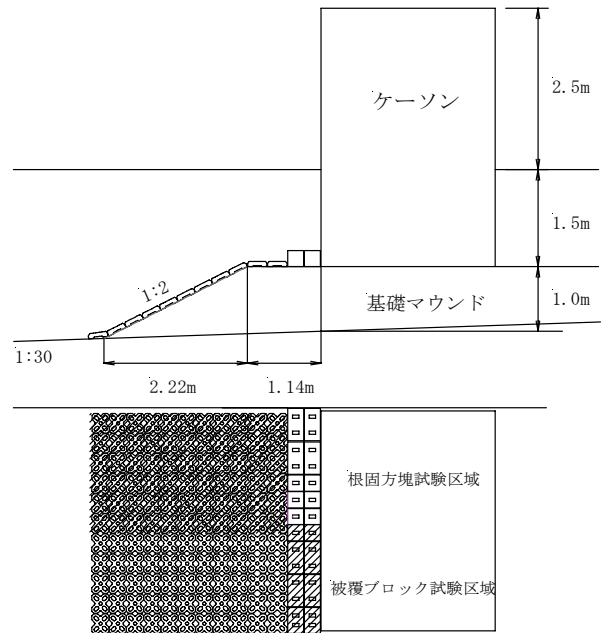


図-3.10 実験断面図 (大縮尺実験)

表-3.11 実験波諸元

	周期	波高
不規則波	$T_{1/3} = 3.0\text{s}$ (9.5s)	$H_{1/3} = 0.6 \sim 1.0\text{m}$ (6.0~10.0m)
	$T_{1/3} = 4.0\text{s}$ (12.6s)	$H_{1/3} = 0.8 \sim 1.1\text{m}$ (8.0~11.0m)
	$T_{1/3} = 5.0\text{s}$ (15.8s)	$H_{1/3} = 0.8 \sim 1.4\text{m}$ (8.0~14.0m)

表-3.12 根固方塊の被害基準（大縮尺実験）

状態	根固方塊の動き
移動	2.5cm（現地換算量25cm）を越える水平移動
傾斜	沖側方塊が天端上の被覆ブロック端部に乗り上げて傾斜する（被覆ブロック高:8.1cm）. 方塊片側が厚さ（22.0cm）の1/3（7.3cm）以上浮上に相当すると解釈（表-3.6 状態IVに相当） 各波高ランク波作用終了後の鉛直変位測定結果より判断
回転	方塊がその場で回転する。
離脱	方塊がその場より抜け出す。

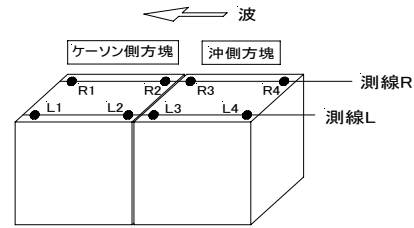


図-3.11 測線および測点

(2) 実験結果

a) 根固方塊の姿勢変化

実験水路側壁の観測窓より、根固方塊の挙動の観察を試みたが、観察対象の根固方塊が観測窓から離れた位置に設置されていたこと及び水路内の視界が悪かったため、目視による挙動の観察は不可能であった。そこで、各波高ランクの波作用後に、レベルを用いた測量を実施してブロックの姿勢を確認することとした。波の入射方向に対して、方塊の天端面に2測線（測線L：沖側から見て左側、測線R：沖側から見て右側）を設けた。各測線毎に4点の測点を設け、沖側方塊および岸側方塊の端部の高さを計測した。測線および測点の位置を図3-11に示す。なお、測点は、方塊の天端面外周より2.5cm内側に設けている。

有孔分割型と無孔分割型に関しては、両者の安定性に差異が生じることが、小縮尺実験によって確認されている。そこで、大縮尺実験 ($T_{1/3}=4.0s, h/L_{1/3}=0.141$) で得られた、有孔分割型と無孔分割型の姿勢変化を図3-12から図3-15に示す。縦軸は各測点における初期位置からの鉛直変位を示している。波高の増大に伴って沖側方塊が傾き、ケーソン側方塊が沈下する傾向は、いずれの方塊形状においても同一である。有孔分割型の沖側方塊は、設計波高を上回る $H_{1/3}=0.97m$ で、被覆ブロックに乗り上げ傾斜しているが、無孔分割型および有孔分割型ともに、設計波高 ($H_{1/3}=0.82m$) 以下において、被害は生じていない。

ケーソン側方塊の沈下は、無孔分割型において顕著であり、傾きながら沈下していることが分かる。小縮尺実験において確認されたように、ケーソン側方塊とケーソン壁面の隙間から基礎マウンドの碎石が吸い出されたために、こうした沈下が生じたと考えられる。

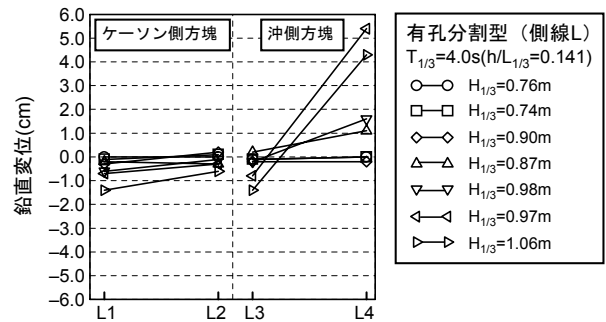


図-3.12 有孔分割型の鉛直変位（側線L）

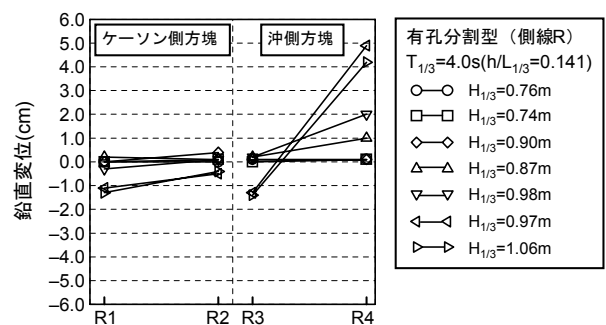


図-3.13 有孔分割型の鉛直変位（側線R）

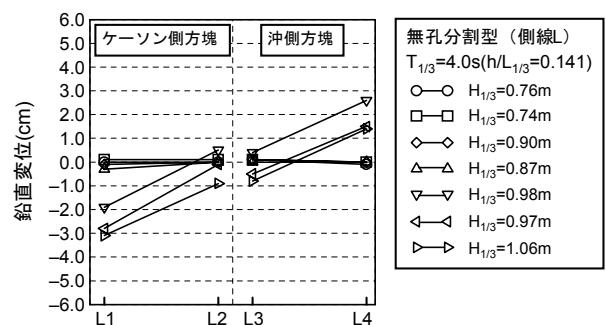


図-3.14 無孔分割型の鉛直変位（側線L）

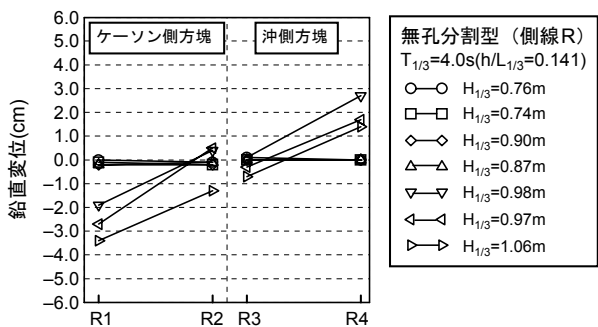


図-3.15 無孔分割型の鉛直変位 (側線R)

b) 根固方塊の安定性

図-3.16 から図-3.19 に実験結果を示す。小縮尺実験の結果 (縮尺 1/50) に重ねて大縮尺実験の結果 (縮尺 1/10) を示している。大縮尺実験においては、根固方塊下部の捨石の挙動を含めて、現地に近い状況で、石の抜け出しやブロックの浮き上がりに起因するブロックの傾斜を被害基準として、安定限界を確認したが、被害が生じないケースもあり、小縮尺実験において確認された安定限界と同程度以上の結果となった。このことから、小縮尺実験で得られた知見に基づき設計された根固方塊を現地で用いることの妥当性が示された。

小縮尺実験において、設計波高以下で被害が生じた無孔分割型については、大縮尺実験では設計波高を上回る条件においても被害が生じなかった。既に a) で述べたように、無孔分割型のケーソン側方塊は、波作用に伴い沈下する (図-3.14, 図-3.15)。沖側方塊もケーソン側へ落ち込むような姿勢をとるため、被覆ブロックへ乗り上げ傾斜する状態には至らなかったと考えられる。しかしながら、小縮尺実験で観察された方塊の挙動を勘案すると、無孔分割型は、有孔分割型よりも動きが激しく不安定と考えられ、大縮尺実験における波作用時においても、その挙動は大きなものであったと推察される。

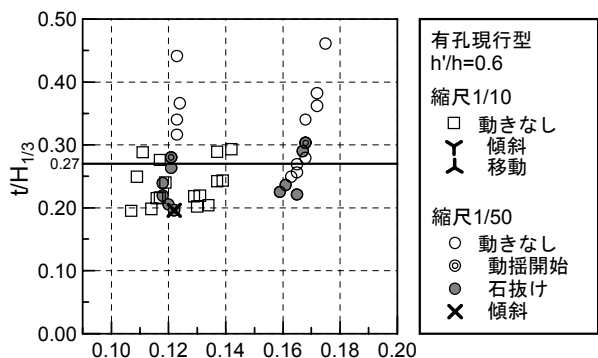


図-3.16 実験結果 (有孔現行型)

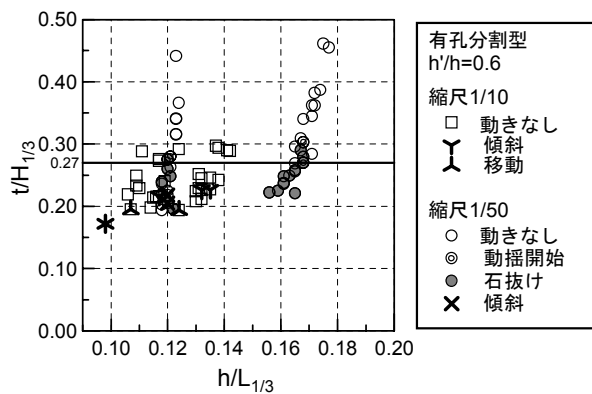


図-3.17 実験結果 (有孔分割型)

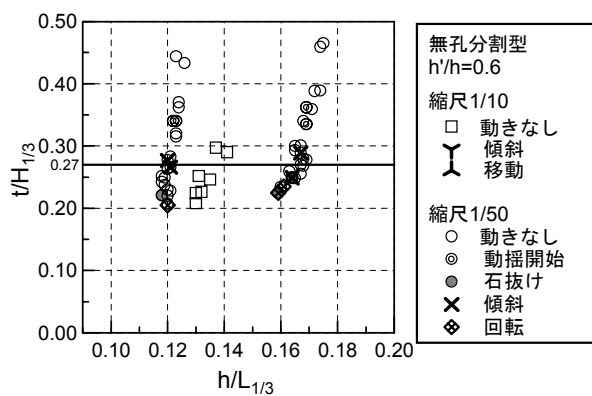


図-3.18 実験結果 (無孔分割型)

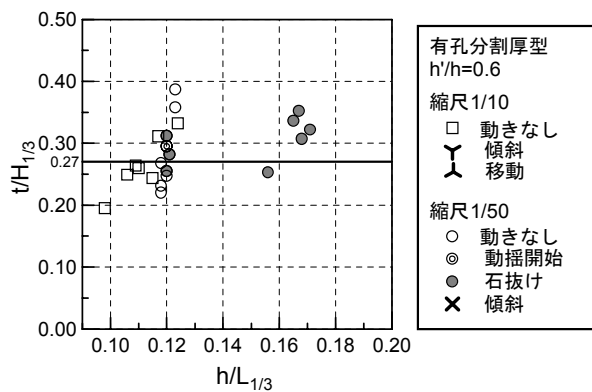


図-3.19 実験結果 (有孔分割厚型)

4. 被覆ブロックの合理的な形状と耐波設計法

4.1 開口部による波力低減効果についての基礎的な検討

(1) 基礎実験

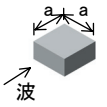
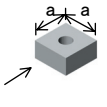
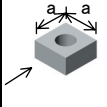
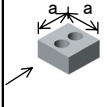
a) 実験方法

4章における検討は、2.2 に示した被覆ブロックの設計における問題点のうち、「④耐波安定性と経済性の両立」

および「⑤開口部の大きさと石の抜け出しの関係」に関連したものである。なお、①については、現在の技術基準においても砕波の影響や作用波数などについてある程度考慮されているが、基本的にはブロックごとの特性も影響すると考えられるので、今回は検討していない。②については、すべての設置位置での安定性を検討するためには、各位置での流速や波力を数値計算等により正確に求める必要があり、現段階では一律の所要質量を与える方法が現実的である。また、③については、確率論的な取扱を行うためには多数の実験データが必要であり、今回の研究では実験ケースが限られているため、検討対象外とした。

まず、被覆ブロックに作用する一般的な波力の特性を明らかにするため、もっとも単純な形状である方塊ブロックを対象とした波力計測を行い、開口部(孔)の有無、その大きさ、配置方法等が作用波力に及ぼす影響について検討した。検討対象とした方塊ブロックの諸元を表-4.1に示す。開口部が無い方塊ブロックを基本形として、開口率10%の孔を1個設けたもの、開口率20%の孔を1個設けたもの、開口率10%の孔を2個設けたものを対象とした。

表-4.1 検討対象方塊ブロック諸元

			
基本形	開口率 10%	開口率 20%	開口率 10% × 2

(※ 方塊の形状諸元: 基本長 $a=30\text{cm}$, 厚さ $0.5a=15\text{cm}$)

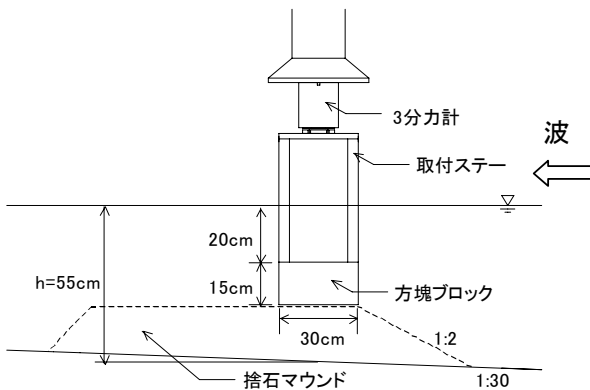


図-4.1 実験断面図

実験は、断面水路(長さ55m, 幅1.2m, 高さ1.5m)を用いて実施した。水路内のモルタル床(勾配1/30)上に、

検討対象とした各種方塊ブロックを取付ステーを介して3分力計に設置した(図-4.1)。実験では、はじめに捨石マウンドが無い状態で規則波($T=2.5\text{s}$)を作用させ、方塊ブロックに作用する水平力および鉛直力を計測し、作用波力の基本的な特性を明らかにした。その後、図-4.1に点線で示した捨石マウンドを構築して、捨石マウンド上の方塊ブロックに作用する波力を計測した。

b) 実験結果

捨石マウンドが無い場合で得られた、無孔方塊ブロックに対する有孔方塊ブロックの鉛直上向きの波力低減率を図-4.2に示す。縦軸は、単位面積当たりの鉛直上向き波力の低減率(波圧の低減率)を示しており、 F は鉛直波力、 w_0 は水の単位体積重量、 H は波高、 A は方塊模型の鉛直方向の投影面積であり、凡例における a はブロックの基本長、 L は入射波の波長を示している。図中には、低減率の平均値もあわせて示している。開口率10%と20%では、20%の方が鉛直上向きの波圧が小さくなることから、開口率10%と20%の比較において、開口率の増大による自重(抵抗力)の減少を加味しても、開口率が大きい方が安定上有利であると判断される。

捨石マウンド有りの条件において得られた、孔の分散による単位面積当たりの鉛直波力の低減率(波圧の低減率)を図-4.3に示す。方塊ブロックの設置水深は、捨石マウンドが無い場合と同一である。開口率20%と10%×2個では、10%×2個の方が鉛直上向きの波圧が小さくなることから、開口部を設ける場合に、現実的に被覆ブロックに設けることができる程度の孔の数であれば、分散して配置する方が安定上有利であると判断される。

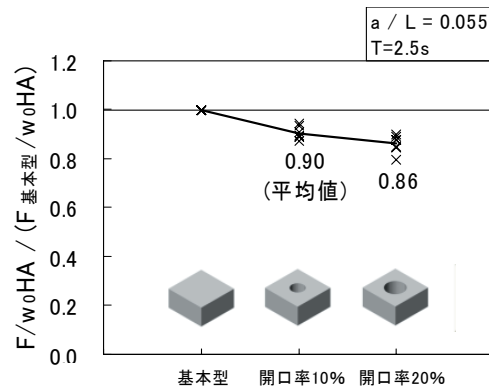


図-4.2 波力低減に及ぼす開口率の影響(マウンド無)

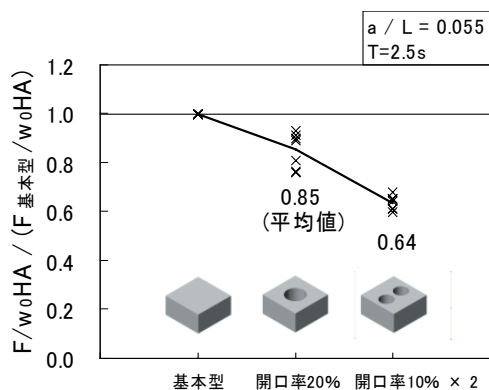


図-4.3 波力低減に及ぼす孔の分散の影響 (マウンド有)

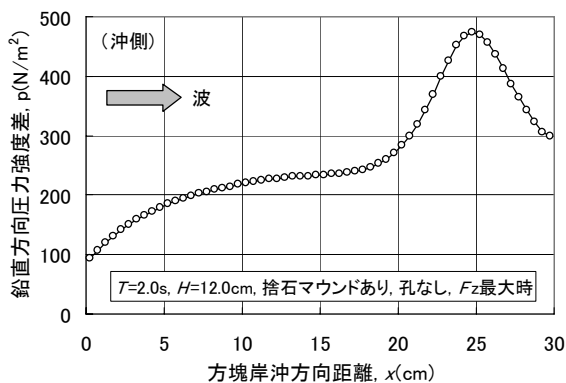


図-4.4 ブロック上下面の圧力強度差 (計算結果)

(2) 開口部の配置に関する検討

a) 孔の分散による鉛直波力低減効果の検証

孔の分散による波力低減効果の要因を探るために、2次元数値波動水路 (沿岸開発技術研究センター, 2001) を用いた数値計算を行った. 図-4.1 に示した実験断面 (捨石マウンド有り) に規則波 ($T=2.0s, H=12.0cm$) が作用する場合を対象として、マウンド天端沖側端部に設置した矩形ブロック (開口部なし, ブロック長 $b=30cm$) に作用する圧力を算出した. 圧力を積分して得られる鉛直上向きの波力が最大となる時刻における、ブロック上下面に働く圧力強度の差 (圧力強度差) を図-4.4 に示す. 横軸は、マウンド天端沖側位置 ($x=0cm$) からの距離を示している. 圧力強度差はブロック岸沖方向で一定ではなく、分布をとることが分かる. 本ケースにおいては、 $x=25cm$ 付近に正 (鉛直上向き) のピークを取る. このような鉛直上向き波力がピークとなる位置の近くに孔があれば、ブロック全体に作用する波力の低減が可能であり、耐波安定性が向上すると考えられる. 反射による戻り流れやブロックの対称性も考慮すると、ブロック中央部に集中し

て一つの孔を配置するよりも、2箇所 (今回のケースでは $x=5cm$ 付近と $x=25cm$ 付近) に孔を分散して配置するほうが、効果的に波力を低減できるものと考えられる.

b) 鉛直波力低減に有効な開口部の位置

合計開口率が 20% であるブロック模型において、開口部の位置を種々変化させた場合の鉛直波力の変化について a) と同一の計算手法を用いて検討した. 図-4.5 に計算対象としたブロック模型を示す. 2次元の計算であるので、開口部をスリットで模している. ここで、 e はスリットの間隔、 b はブロックの波進行方向の長さである. 図-4.1 に示した実験断面 (捨石マウンド有り) に規則波 ($T=2.0s, H=12.0cm$) が作用する場合を対象として、マウンド天端沖側端部に設置したブロック模型に作用する鉛直波力を e/b を変化させて計算した. 図-4-6 は、 e/b と鉛直波力の関係を示したものである. $e/b=0.0$ は開口率 20% のスリット 1 個が中央にあるケース、それ以外は開口率が 10% のスリット 2 個が中央から対象に配置されたケースである. 鉛直波力は、スリットが 1 個の場合 ($e/b=0.0$) の鉛直波力で無次元化されている. スリットが 1 個のものよりもスリットが 2 個のものの方が、鉛直波力が低減することが分かる. また、スリットが 2 個のものどうしを比較すると、スリットの位置を中央から端部にずらすに従って鉛直波力は小さくなり、さらに端部に近づけると鉛直波力は大きくなる. 本計算結果より、鉛直波力が極小となる $e/b=0.5$ 付近に開口部を配置することが、波力低減において最適といえる.

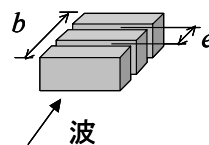


図-4.5 ブロック長 b とスリット間隔 e

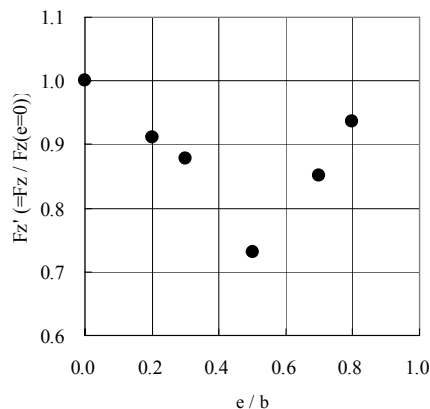


図-4.6 スリットの間隔と鉛直波力の関係 (計算結果)

4.2 大きな開口部を有する被覆ブロックに作用する波力特性および安定性

(1) 波力実験

a) 実験方法

上記の検討結果に基づき、表-4.2 に示す既存の X 型ブロック (BL1) および BL1 を薄型化するとともに分散した孔を設けたブロック (BL2) を対象とした波力計測を行い、作用波力と耐波安定性の関係について検討した。

実験は、4.1 と同じ水路、模型床および捨石マウンドを用いた。実験断面を図-4.7 に示す。L 字型のバネにひずみゲージを貼り付けた波力測定装置にブロック模型を取り付け、天端沖側端部のブロックに作用する水平・鉛直波力を測定した。マウンドは透過性とし、砕石を用いて製作した。実験では規則波 ($T=2.5s$) を作用させた。

表-4.2 被覆ブロックの形状

	BL 1	BL 2
開口率	0%	32.8%
ブロック長 a	15cm	
ブロック厚 t	5.1cm	3.0cm

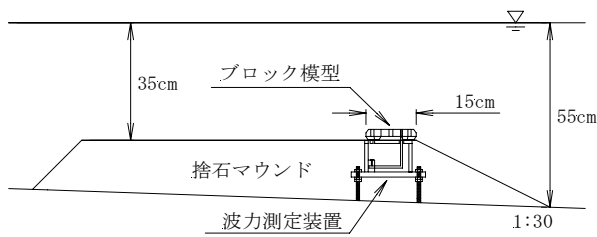


図-4.7 実験断面

b) 安全率を用いた安定性の検討

計測した水平波力 F_x および鉛直波力 F_z を用いて式(4-1)および式(4-2)で定義される浮き上がりに対する安全率(SFL)および滑動に対する安全率(SFS)を用いてブロックの安定性を検討した。

$$SFL = \frac{W'}{F_z} \quad (4-1)$$

$$SFS = \frac{\mu(W' - F_z)}{F_x} \quad (4-2)$$

ここに、 W' はブロックの水中重量、 μ はブロックと捨石の摩擦係数(=0.6)である。図-4.8 に力の作用状況の模式図を示す。

SFL あるいは SFS が 1.0 を下回ると、浮き上がりあるいは滑動が発生する可能性がある。

図-4.9 および図-4.10 に SFL および SFS の算定結果を示す。横軸は、式(4-3)で定義される安定数 N_s である。

$$N_s = \frac{\rho_r^{1/3} H}{M^{1/3} (\rho_r / \rho_w - 1)} \quad (4-3)$$

ここに、 ρ_r はブロックの密度、 ρ_w は水の密度、 M はブロックの質量、 H は波高である。マウンド天端沖端に位置する BL1 は揚圧力による浮き上がりで被災することが多いが、図-4.9 より、BL2 は、BL1 と比較して浮き上がりに対する安全率が増加していることが確認される。また、図-4.10 において、滑動に対する安全率を見ると、力学的な安定限界である安全率 1.0 付近の条件において、BL2 の N_s は、BL1 のそれと比較して大きいことがわかる。これらは、同一質量の場合、薄型化とともに孔を分散して設けたブロックの耐波安定性が向上することを示唆している。

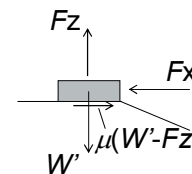


図-4.8 力の作用状況

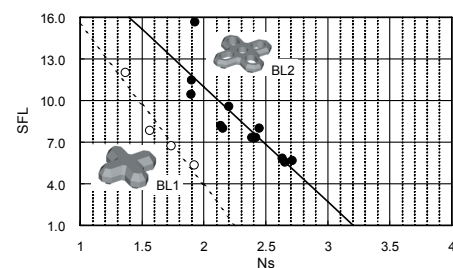


図-4.9 浮き上がりに対する安全率 (SFL)

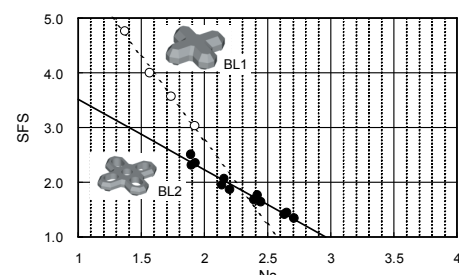


図-4.10 滑動に対する安全率 (SFS)

(2) 安定性予備実験

a) 実験方法

上述した、BL2の耐波安定性の向上を確認するために、天端法肩部におかれたブロック（BL1, BL2）を対象に予備的な安定実験を実施した。ここでは、BL1とBL2の安定性の相対評価を目的としているため、波力実験と同様に波は規則波とし、直立壁を設置しない簡易的な条件で実験を実施した。実験断面を図-4.11に示す。天端沖端部に観察対象ブロックを設置し、その背後にダミーブロック（動かないように固定）を設置して、規則波($T=2.5s$, $H=10\sim 25cm$)を作用させた。同一ブロック長のBL1($a=5.9cm$, $t=2.0cm$, 質量 95.8g, 密度 $2.37g/cm^3$)及びBL2($a=5.9cm$, $t=1.2cm$, 質量 39.4g, 密度 $2.46g/cm^3$)を観察対象ブロックとして、その挙動を観察した。図-4.11は、観察対象ブロックがBL2の場合の実験断面を示している。

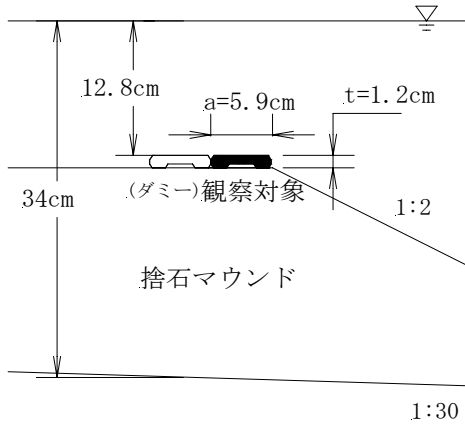


図-4.11 実験断面

b) 実験結果

BL1は、波高の増大に伴い、鉛直方向の動揺が増し、 $H=11.1cm$ でダミーブロックの沖側上端部を支点として岸側へ回転して離脱した。図-4.12はブロックの回転の状況を模式的に示したものである。BL2は、波高の増大とともに若干の岸沖方向の動揺が見受けられたが、本実験における最大の入射波高 $H=28.8cm$ においても、その場から移動することはなかった。この結果は、安全率を用いた安定性の検討結果（図-4.9, 図-4.10）において示唆されたブロックの挙動と合致するものである。本実験条件におけるBL2の N_s は、BL1の N_s の3.3倍であり、薄型で開口部を分散したブロックの耐波安定性が大幅に向上することが示された。

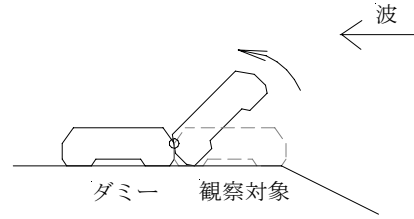


図-4.12 BL1の回転

4.3 合理的なマウンド被覆ブロックの波力特性と耐波安定性

(1) 波力特性

a) 実験方法

上記の検討結果から得られた知見に加えて、施工性、経済性等を考慮してBL2を改良し、新型ブロックの基本となる形状(BL-A, 開口率 23.5%)を決定した(図-4.13)。BL-Aを混成堤マウンド被覆材として用いた場合の波力計測を行い、作用波力の特性について検討した。



図-4.13 新型ブロック基本形 (BL-A)

混成堤マウンド被覆に用いられるX型ブロック(BL1)は、天端沖端ブロックが揚圧力を受け、岸側隣接ブロックの沖側上端を中心として回転することで被害が生じることが知られている(図-4.17参照)。そこで、初期被害が想定されるマウンド法肩付近に位置するBL-Aを対象として、作用波力の特性を把握することとした。また、無孔ブロック(BL-Aの開口部を全て埋めたブロック、BL-B)を用いた波力実験も実施し、開口部の有無による作用波力の違いについても検討を行った。図-4.14に実験断面を示す。実験は規則波($T=2.0s$)を用いて行った。

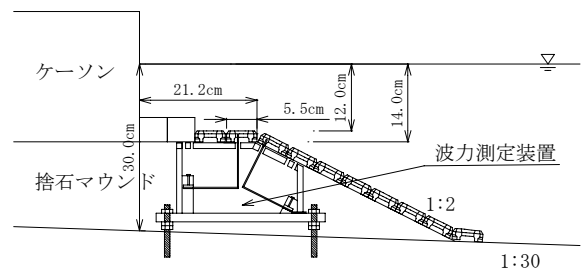


図-4.14 実験断面

b) 実験結果

図-4.15 および図-4.16 は、天端沖端ブロック及び法面最上段ブロックに作用する波力の水平成分と鉛直成分の時間変化を示したホドグラフで、図中の太線が BL-A、細線が BL-B である。BL-A と BL-B の各ケースにおける作用波高 H は、おのおの 20.3cm および 18.4cm である。縦軸および横軸は、鉛直波力 F_v および水平波力 F_x を w_0HA_z および w_0HA_x で除した波圧強度で表している。ここで、 w_0 は水の単位体積重量、 H は波高、 A_z および A_x はブロックの鉛直および水平方向の投影面積である。天端沖端ブロックの作用波力は、BL-A および BL-B で大きく様相が異なっている。鉛直波圧強度のピーク値は BL-B のほうが大きい。一方、水平波圧強度のピーク値は BL-A のほうが大きい。法面最上段においては、鉛直波圧強度のピーク値は両者とも同程度である。水平波圧強度のピーク値は、天端沖端に位置する場合とは異なり、BL-B のほうが大きい。マウンド法肩近傍の流れの作用方向と開口部壁面の位置関係により、有孔ブロック(BL-A)と無孔ブロック(BL-B)の作用波力の大小関係が変化したものと考えられる。

ここで、天端沖端ブロックについて、式(4-4)で定義される岸側隣接ブロックの沖側上端を支点とした回転に対する安全率(SFR)を検討した(図-4.17 参照)。

$$SFR = \frac{M_{F_x} + M_{W'}}{M_{F_z}} \quad (4-4)$$

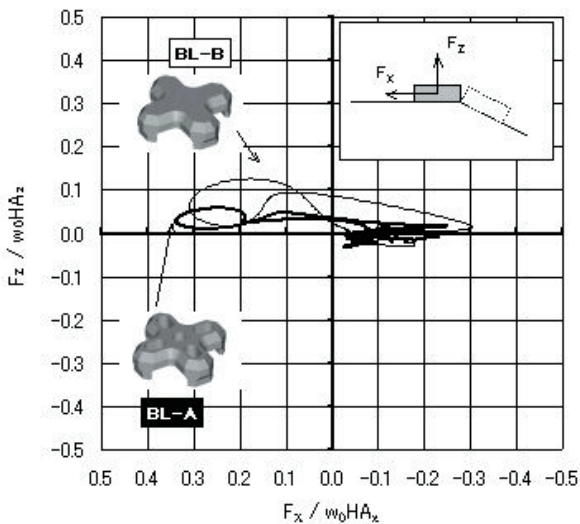


図-4.15 天端沖端ブロックに作用する波力

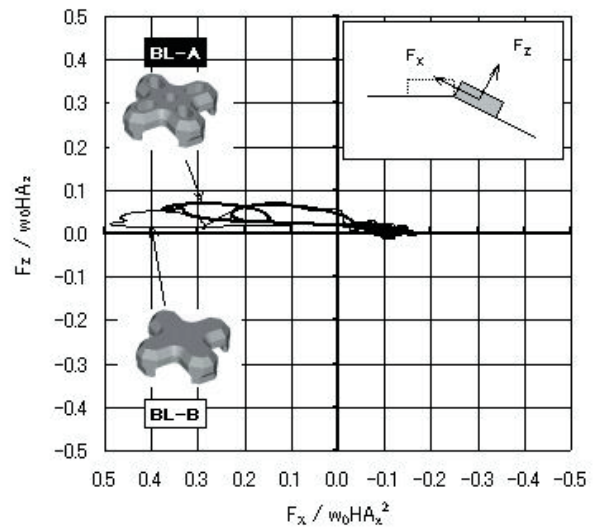


図-4.16 法面最上段ブロックに作用する波力

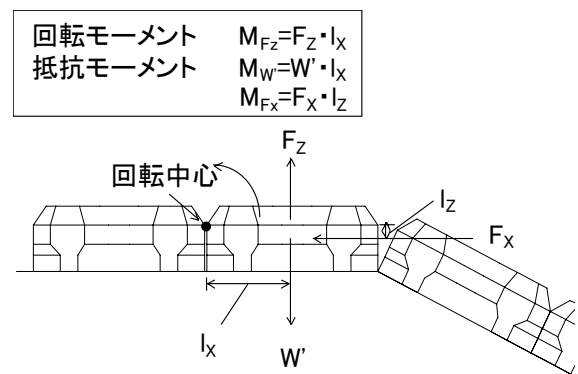


図-4.17 天端沖端ブロックに働く力のつり合い

ここに、 M_{F_z} は鉛直波力による回転モーメント、 M_{F_x} および $M_{W'}$ は水平波力と水中自重による抵抗モーメントである。計測された水平波力 F_x および鉛直波力 F_v より算定された SFR を図-4.18 に示す。横軸は、経過時間 t (s) である。SFR の値は、BL-A が BL-B を大きく上回っており、BL-A が BL-B と比べて回転に対して安定であることが分る。これは、開口部による鉛直上向き波力の低減および水平波力の増加により、回転モーメントが減少し抵抗モーメントが増加したためである。したがって、天端沖端位置における BL-A は、回転による被害が生じにくいと考えられる。

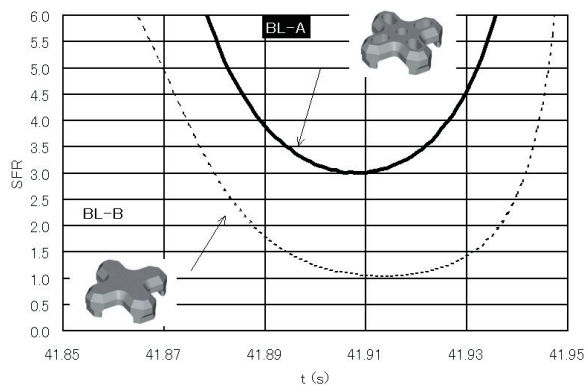


図-4.18 天端沖端ブロックの回転に対する安全率(SFR)

(2) 小縮尺耐波安定実験

a) 実験方法

ブロックの構造強度確保の観点から、BL-Aをさらに改良し、最終的なブロック形状として、図-4.19に示す新型ブロックを考案した。開口率は23.5%であり、BL-Aとの相違点として、天端沖端および法面最上段ブロックの脚部先端の接触による発生応力を低減するために、脚部にテーパが設けられている。

この新型ブロックを対象として、耐波安定実験を実施し、混成堤マウンド被覆材としての適用性を検討した。

表-4.3に実験条件を示す。実験では、不規則波($T_{1/3}=1.50s \sim 2.25s$)を作用させ、ブロックの挙動を観察した。ブロックの移動が生じないような小さな波から作用させ、波高を増加させて安定限界を把握した。同一波高レベルでの波の作用は1000波を標準としている。波高を増加させる際、ブロックの積み直しは行わなかった。本実験では、移動(ブロックの大きさの半分から1個分移動)、転落(ブロックの大きさの1個分以上移動)およびめくれ上がり(ブロックの高さ以上の移動)を被害ブロックとして計上した。

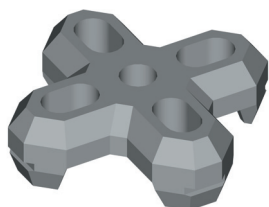


図-4.19 新型ブロック

表-4.3 耐波安定実験条件

縮尺	1/42.5
海底勾配	1:30
水深 h	25.0cm-36.7cm
マウンド天端幅 B	17.7cm-55.5cm
相対マウンド水深 d/h	0.2-0.8
実験波	不規則波 修正 Bretschneider-光易型スペクトル
周期 $T_{1/3}$	1.50s-2.25s
波高 $H_{1/3}$	10-18cm
模型質量 M	51.8g

b) 実験結果

実験結果の一例を図-4.20に示す。横軸は、マウンド天端幅 B と堤体設置水深 h における入射波の波長 $L_{1/3}$ の比($B/L_{1/3}$)であり、縦軸は安定数 N_s である。図中には、既存の被覆ブロックのひとつである X 型ブロック(BL-1)の N_s も併せて示している。両者を比較すると新型ブロックの安定性が著しく向上していることが分かる。天端沖端に位置する X 型ブロックがめくれ上がる N_s においても、新型ブロックは安定であり、さらに N_s が増した場合でも、天端沖端ブロックが単独でめくれ上がることはなかった。このことは、天端沖端に位置する新型ブロックが揚圧力を効率的に低減させていることを示しており、図-4.15に示した波力の作用特性および図-4.18に示した SFR の検討結果と符合する。新型ブロックの被災形態としては、天端沖端ブロックおよび法面最上段ブロックが同時に移動するケースが主であった。

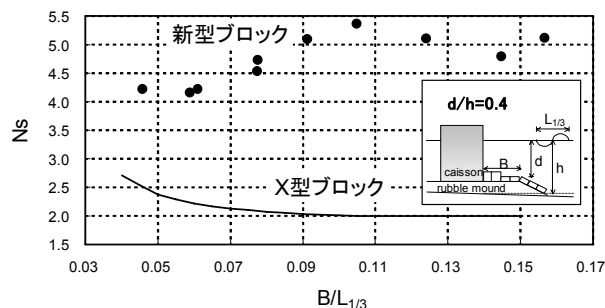


図-4.20 新型ブロックの耐波安定性($d/h=0.4$)

図-4.21は、種々の d/h における安定数 N_s の平均的な値を実線で示している。実験結果より、他の被覆材と同様に、ブロック天端水深 d と設置水深 h の比 d/h が小さい場合 N_s が小さいことが分かる。また、 $B/L_{1/3}$ に関する N_s の変化は、 d/h によって異なる。 $d/h=0.2$ および 0.4 では、 N_s は $B/L_{1/3}$ の増加に伴い大きくなる。 $d/h=0.6$ では

$B/L_{1/3}=0.1$ 付近で最小となる。 $d/h=0.8$ では、ほとんどのケースが無被害で被害が確認できなかったため、造波した最大の有義波高に対応する N_s の値を連ねた一定値となった。

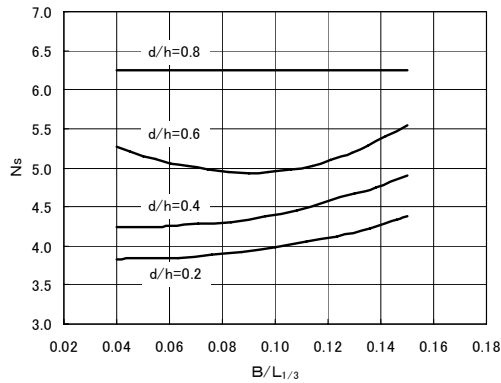


図-4.21 新型ブロックの耐波安定性($d/h=0.2\sim 0.8$)

(3) 大縮尺耐波安定実験

より実海域に近い状態でのブロックの挙動および石の抜け出しについて検討するために、当所の大規模波動地盤総合水路（長さ 184.0m, 高さ 12.0m, 幅 3.5m）を用いた大縮尺耐波安定実験を実施した。実験条件を表 4-4 に示す。実験は、図-4.19 に示す新型ブロックに極めて近い形状の模型を用いて、3.3 で述べた根固方塊の大縮尺模型実験と同時に実施した（実験断面は図-3.10 参照）。

表-4.4 実験条件（大縮尺）

縮尺	1/10	
水深 h	2.50m	
マウンド天端上水深 d'	1.50m	
マウンド天端幅 B	1.14m	
実験波	不規則波 修正 Bretschneider-光易型スペクトル	
周期 $T_{1/3}$	3.0s, 4.0s, 5.0s	
模型質量 M	7.80kg	8.14kg

b) 実験結果

図-4.22 に本実験で得られた、安定限界および被害時の安定数 N_s を示す。横軸は、マウンド天端幅 B と堤体設置水深 h における入射波の波長 $L_{1/3}$ の比($B/L_{1/3}$)であり、縦軸は安定数 N_s である。ブロック天端水深 d と設置水深 h の比 d/h は 0.568 である。実線は、図-4.21 に示した小縮尺実験（縮尺 1/42.5）の新型ブロックの実験結果における、 $d/h=0.4$ と 0.6 の結果より内挿して求めた $d/h=0.568$ に対応する算定線である。大縮尺実験と小縮尺実験では、

ブロック形状の細部が異なるが、大縮尺実験の結果は小縮尺実験の結果の近傍に分布しており、より現実に近い大縮尺実験において、小縮尺実験で得られた安定性の妥当性が確認された。また、対象としたブロックは大きな開口部を有しているが、マウンド捨石の顕著な抜け出しは観察されなかった。

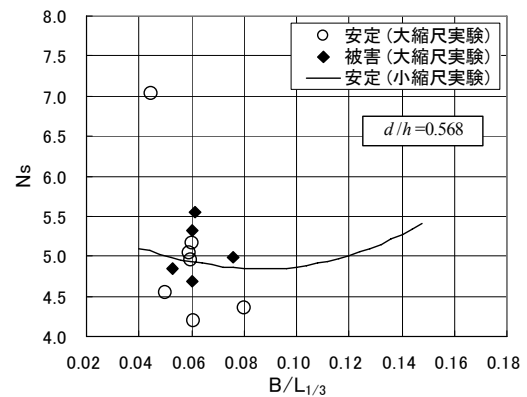


図-4.22 実験結果（大縮尺）

5. 結論

本研究では、混成堤における根固方塊と被覆ブロックの合理的な形状と耐波安定性について検討した。主要な結論は以下のとおりである。

- ① 現行の有孔根固方塊を 2 分割した場合においても、根固方塊所要厚の算定式が適用可能であることを示した。
- ② 現行の有孔根固方塊を 2 分割して、さらに厚さを増した場合も、根固方塊所要厚の算定式が適用可能である。
- ③ 有孔方塊ブロックに作用する波力特性を明らかにした。開口部を大きくすることおよび孔の位置を分散させることによって開口による自重（抵抗力）の減少以上に鉛直上向きの波力が低減することが確認された。
- ④ 被覆ブロックを薄型化するとともに開口部を分散して設けることで、浮き上がりおよび滑動に対する安定性の向上を図ることができる。
- ⑤ 薄く大きな開口部を有する被覆ブロックを混成堤マウンド被覆材として適用し、その波力特性を明らかにした。計測された波力を用いて、ブロックの回転に対する安全率を評価したところ、無孔ブロックと比較して、天端沖端ブロックの回転に対する安定性が向上していることが示された。

⑥被覆ブロックの合理的な形状として、既存のブロックよりも薄く、大きな開口部を有する新型ブロックを提案し、混成堤マウンド被覆材として用いた場合の安定数 N_s を明らかにした。新型被覆ブロックは既存の X 型ブロックと比較して安定性が著しく向上していることが確認された。

根固ブロックに関しては、今回の成果により従来の半分の質量のものを用いることが可能となり、据付におけるクレーン規格の制約が緩和され、特に高波浪海域においてコスト縮減につながることを期待される。また、被覆ブロックに関しては、今回考案した新型ブロックのような薄型で大きな開口部を有する、耐波安定性の優れたブロックを利用することにより、コンクリートの使用量を大幅に減らすことが可能となり、コスト縮減に貢献できる。

6. あとがき

混成堤基礎マウンドの設計における新たな知見を得ることを目的として、根固方塊および被覆ブロックに着目した種々の検討を行った。現在用いられている根固方塊（現行型）以外でも、有孔分割型や有孔分割厚型については、所要厚の算定式が適用できることを示した。また、被覆ブロックを薄型化することでコンクリート量を大幅に減ずるとともに、開口部を効果的に設けることで耐波安定性を向上させた新型ブロックを提案し、設計データとしての安定数 N_s を示した。これらにより、混成堤マウンドの施工性の向上やコスト縮減が期待される。

本研究は、混成堤の基礎マウンド設計法の高度化に向けた取り組みであり、2 章で述べた問題点のうち、現段階で重要かつ検討可能なものについて取り扱った。引き続きこれらについて検討を深めるとともに、今後は、今回検討の対象としなかった他の課題についても研究を進め、より合理的な基礎マウンド設計法を構築していく必要がある。

なお、今回の実験は堤幹部の根固ブロックおよび被覆ブロックを対象とした断面実験による検討であり、堤頭部や斜め入射波に対する安定性については、今後さらに検討を行う必要がある。

謝辞

本研究は、港湾空港技術研究所、(株) 不動テトラによる「混成堤における根固方塊、被覆ブロックの設計法の高度化に関する共同研究」として行ったものであり、関係者の皆様から多大なご協力を得ている。

ここに記して、感謝の意を表する次第である。

(2008 年 3 月 10 日受付)

参考文献

- 牛嶋龍一郎・水野雄三・井元忠博(1988)：根固め方塊の安定性に関する実験的研究，開発土木研究所月報，No. 424，pp. 1-14.
- 財沿岸開発技術研究センター(2001)：数値波動水路の研究・開発，沿岸開発技術ライブラリー，No. 12
- 木村克俊・水野雄三・林倫史(1996)：混成堤堤頭部における根固め方塊の耐波安定性について，開発土木研究所月報，No. 517，pp. 2-8.
- 国栖広志・洞谷邦弘・清水虎重(1986)：混成式防波堤堤頭部根固め方塊ブロックの安定性に関する研究，海岸工学論文集，第33巻，pp. 437-441.
- 社)日本港湾協会(編)(2007)：港湾の施設の技術上の基準・同解説(下)，pp. 851-852.
- 宮崎甚夫・竹沢隆一・野口猛雄(1991)：志賀原子力発電所における揚力減殺型マウンド被覆ブロックの開発とその現地施工，海岸工学論文集，第38巻，pp. 616-620.

港湾空港技術研究所報告 第47巻第2号

2008.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 大成社

Copyright © (2008) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

Characteristics of the Observed Offshore Data by the Northern Pacific GPS Buoys Toshihiko NAGAI, Katsuyoshi Shimizu, Makoto Sasaki	1
Bearing Capacity of T-shaped or Floating-type Sand Compaction Pile Improved Ground Hidenori TAKAHASHI, Eitoku ICHIKAWA, Masaki KITAZUME	53
A Rational Design of Foot-Protection Block and Armor Block Covering Rubble Mound of Composite Breakwaters Ken-ichiro SHIMOSAKO, Shin-ichi KUBOTA, Masashi HAMAGUCHI, Akira MATSUMOTO, Minoru HANZAWA, Fumitake NAKANO	89
Research on Quality and Durability of the By-Products Concrete Using Steel Making Slag, Fly ash and Blast Furnace Slag Yoshikazu AKIRA, Toru YAMAJI, Hidenori HAMADA	111