

# 混成堤の被覆ブロックおよび根固方塊の耐波安定性に関する合理的な形状の検討

On the Hydraulically Rational Shape of Armor Block and Foot-Protection Block for Rubble Mound of Composite Breakwaters

久保田真一<sup>1</sup>・下迫健一郎<sup>2</sup>・浜口正志<sup>3</sup>・松本 朗<sup>1</sup>・半沢 稔<sup>3</sup>・山本方人<sup>4</sup>

Shinichi KUBOTA, Kenichiro SHIMOSAKO, Masashi HAMAGUCHI, Akira MATSUMOTO, Minoru HANZAWA and Masato YAMAMOTO

A rubble mound of composite breakwater is usually covered with armor blocks and foot-protection blocks to prevent its deformation. Although the design method for armor blocks and foot-protection 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. Wave forces acting on the armor blocks were measured and the rational shape of block which reduces the uplift force was proposed. Hydraulic stability tests for foot-protection blocks with various scales were conducted and the rational designs were investigated.

## 1. はじめに

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ている。防波堤の主要な形式として実績のある混成堤は、ケーソン前面に根固方塊を設置し、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が、未だ検討課題が残されているといえる。例えば、被覆ブロックに関しては、コンクリート使用量を減らすことができればコスト縮減に結びつく。既に著者らは、ブロックの厚さを薄くし、単位被覆面積当たりのコンクリート使用量を低減することで経済性を確保するとともに、分散した開口部を設けることで、効率的に揚圧力を低減可能な新型ブロックを開発し、人工リーフ被覆材としての有用性を示している(浜口ら, 2007)。こうした形状のブロックが混成堤マウンド被覆材としても有用であれば、防波堤の建設コスト縮減に寄与するものと考えられる。また、根固方塊の設計では、その厚さは波高に対して算定され、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

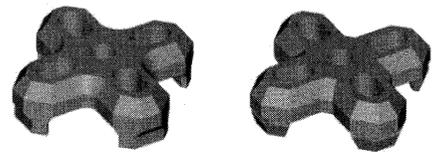
動との関連から、根固方塊の大きさや質量、開口率等に関する合理的な設計法を検討する余地が残されているといえよう。

以上のような背景を踏まえ、本研究は、混成堤マウンドの設計に関し、被覆ブロックおよび根固方塊の合理的な形状の検討を行ったものである。

## 2. 被覆ブロックの合理的な形状と耐波安定性

### (1) 検討対象形状

著者らは既に、揚圧力低減効果、施工性、経済性等を考慮して新型ブロックの基本となる有孔ブロック(図-1(a))を決定し、さらに構造強度を考慮して、脚部形状に改良を加えた新型ブロック(図-1(b))を開発した。形状決定にいたる詳細は、浜口ら(2007)を参照されたい。



(a) 有孔ブロック (b) 新型ブロック

図-1 ブロック形状

本研究では、新型ブロックを混成堤マウンド被覆材として用いた場合の有用性について検討した。基本的な波力特性について、有孔ブロックを対象とした波力実験により把握した後に、新型ブロックを対象とした耐波安定実験を実施した。

1 正 会 員	工 修	(株) 不動テトラ 総合技術研究所
2 正 会 員	博(工)	(独法) 港湾空港技術研究所 海洋・ 水工部 海洋研究領域 耐波研究チ ームリーダー
3 正 会 員	工 修	(株) 不動テトラ ブロック環境事業 本部
4 正 会 員	工博	(株) 不動テトラ 総合技術研究所長

(2) 被覆ブロックに作用する波力特性

a) 実験方法

初期被害が想定されるマウンド法肩付近に位置する有孔ブロックを対象として、作用波力の特性を把握することとした。また、有孔ブロックの開口部を全て埋めた無孔ブロック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-2に実験断面を示す。波力の測定は、ひずみゲージを貼ったL字型の板バネ先端にブロック模型を取り付け、規則波(T=2.0s)を作用させて行った。板バネに生じるひずみ量より曲げモーメントを検出し、波力に換算した。

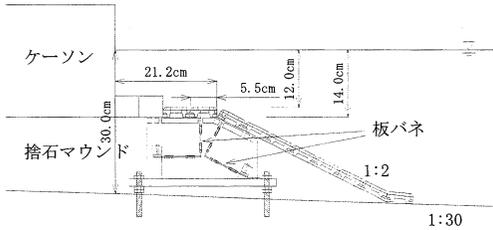


図-2 実験断面

b) 実験結果

図-3および図-4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時間変化を示したホドグラフで、図中の太線が有孔ブロック、細線が無孔ブロックである。有孔ブロックと無孔ブロック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、マウンド面に垂直方向の波力Fzおよびマウンド面に平行方向の波力FxをρgHAzおよびρgHAxで除した波圧強度で表している。ここで、ρは水の密度、gは重力加速度、Hは波高、AzおよびAxはマウンド面に対して垂直方向および平行方向のブロック投影面積である。天端沖端においては、垂直方向(鉛直方向)の波圧強度のピーク値は無孔ブロックのほうが大きく、揚圧力の低減には有孔ブロックが効果的といえる。一方、平行方向(水平方向)の波圧強度のピーク値は有孔ブロックのほうが大きくなる。マウンド近傍の流れが有孔ブロックの開口部壁面に直接作用することで平行方向(水平方向)の波力が増加したためと考えられる。すなわち、流れに対するブロックの迎え角に応じて、平行方向の波圧強度が変化するものと考えられる。法面最上段においては、垂直方向の波圧強度のピーク値は両者とも同程度である。平行方向の波圧強度のピーク値は、天端沖端とは異なり無孔ブロックのほうが大きい。明確な要因は不明であるが、天端沖端と法面最上段で、流れに対するブロックの迎え角が異なることが一因と考えられる。

ここで、天端沖端ブロックについて、式(1)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-5参照)。

$$SFR = \frac{M_{F_x} + M_{W'}}{M_{F_z}} \tag{1}$$

ここに、M<sub>Fz</sub>は鉛直波力による回転モーメント、M<sub>Fx</sub>およびM<sub>W'</sub>は水平波力と水中自重による抵抗モーメント

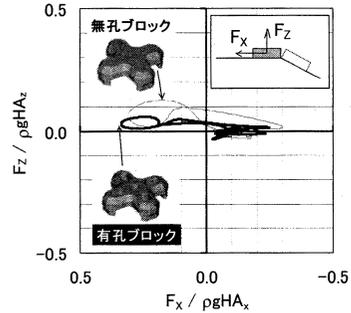


図-3 天端沖端ブロックに作用する波力

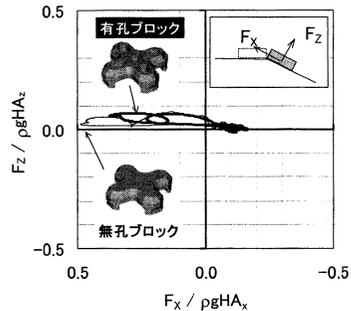


図-4 法面最上段ブロックに作用する波力

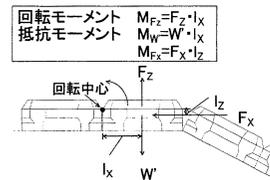


図-5 天端沖端ブロックに働く力のつり合い

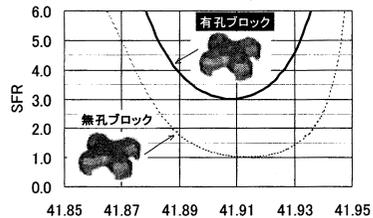


図-6 天端沖端ブロックの回転に対する安全率(SFR)

である。計測された水平波力  $F_x$  および鉛直波力  $F_z$  より算定された  $SFR$  を図-6に示す。横軸は、経過時間  $t$  (s) である。 $SFR$  の値は、有孔ブロックが無孔ブロックを大きく上回っており、回転に対して安定であることが分かる。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有孔ブロックは、回転による被害が生じにくいと考えられる。

(3) 耐波安定実験

a) 実験方法

実験は、縮尺1/42.5 (小縮尺実験) および縮尺1/10 (大縮尺実験) で行った。表-1に実験条件を示す。実験波は、修正 Bretschneider-光易型スペクトルを有する不規則波とし、同一波高レベルでの波の作用は約1000波とした。小縮尺実験は新型ブロックを用いて行い、耐波安定性の傾向を把握した。大縮尺実験は新型ブロックの形状に極めて近い2種類の模型を用いて行い、小縮尺実験で得られた結果の妥当性を検証するとともに、開口部からのマウンド石の抜け出しの有無を確認した。

表-1 安定実験条件 (被覆ブロック)

	小縮尺実験	大縮尺実験
水深 $h$	25.0cm-36.7cm	2.50m
マウンド天端幅 $B$	17.7cm-55.5cm	1.14m
相対マウンド水深 $d/h$	0.2-0.8	0.568
周期 $T_{1/3}$	1.50s-2.25s	3s, 4s, 5s
波高 $H_{1/3}$	10cm-18cm	0.6m-1.4m
マウンド石の質量	0.4g-4.7g	10g-200g
模型質量 $M$	51.8g	7.80kg, 8.14kg

b) 実験結果 (小縮尺実験)

小縮尺実験結果の一例を図-7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、式(2)で定義される安定数  $N_s$  である。

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

ここで、 $\rho_r$  はブロックの密度、 $\rho_w$  は水の密度、 $M$  はブロックの質量、 $H_{1/3}$  は有義波高である。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条件においても、新型ブロックは安定であり、さらに波高が増した場合でも、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、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-3に示した波力の作用特性および図-6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。

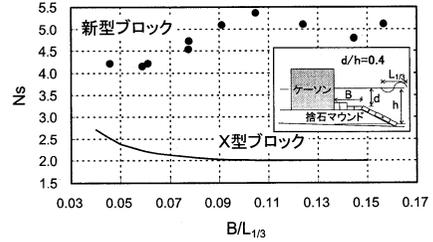


図-7 新型ブロックの耐波安定性 ( $d/h=0.4$ )

c) 実験結果 (大縮尺実験)

大縮尺実験結果を図-8に示す。安定限界および被害時の  $N_s$  を示しており、実線は、小縮尺実験で得られた  $d/h=0.4$  と  $0.6$  の結果より内挿して求めた、 $d/h=0.568$  の場合の被害と無被害の境界線である。大縮尺実験の結果は、使用した模型の種類により小縮尺実験における安定限界を上回るものと下回るものに分かれたが、いずれの結果も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、ブロック開口部からの、マウンド捨石の顕著な抜け出しは観察されなかった。波作用中にブロックが動揺し、ブロック脚部が徐々にマウンドに沈み込む現象も確認され、この現象が顕著な実験ケース ( $B/L_{1/3}=0.045$ ) においては、高い安定性を示した。

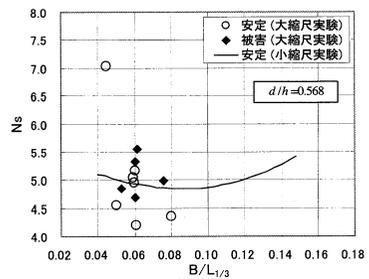


図-8 実験結果 (大縮尺実験)

3. 根固方塊の合理的な形状と耐波安定性

(1) 検討対象形状

現行基準 ((社) 日本港湾協会, 2007) において、根固方塊の耐波安定性は、式(3)で算定される厚さ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。

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

ここに、 $t$ は根固方塊の必要厚さ (m)、 $H_{1/3}$ は設計有義波高 (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。所要厚が厚くなると質量が増加し、施工性に制約を与えることが想定されるが、方塊の安定性が厚さのみに依存するものであれば、平面形状を小さくすることで質量の低減が可能と考えられる。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)、2分割してさらに厚さを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(3)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検討した。検討対象とした方塊の諸元を表-2に示す。

表-2 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 $l(\text{m})$	幅 $b(\text{m})$	厚さ $t(\text{m})$
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

(2) 耐波安定実験

a) 実験方法

実験は、縮尺1/50 (小縮尺実験) および縮尺1/10 (大縮尺実験) で行った。実験条件を表-3に示す。実験波は、修正 Bretschneider-光易型スペクトルを有する不規則波とし、同一波高レベルでの波の作用は約1000波とした。大縮尺実験における実験断面を図-9に示す。根固方塊以外のマウンド被覆ブロックは、移動しないよう固定した。

b) 被害基準

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-4に示す移動、傾斜、回転および離脱を被害とした。

c) 実験結果 (無孔方塊)

図-10に無孔現行型の結果を示す。横軸は相対水深 ( $h/L_{1/3}$ )、縦軸は方塊厚さと有義波高の比 ( $t/H_{1/3}$ ) を示している。取得した全データを白抜き記号で記しており、被害等が生じた場合は、凡例に示す記号を重ねて記した。横線は式(3)より算出される値 ( $t/H_{1/3}=0.27$ ) で、根固方塊の安定限界を示す。この値より小さな領域は、設計波高以上の波が作用している状態である。根固方塊の動揺

は、設計波高以下の波高ランクより始まるが、石の抜けは生じていない。設計波高を上回ると、ケーソンと方塊の隙間より石が抜け出す場合もあり、傾斜あるいは離脱といった被害が生じた。しかしながら、設計波高以下では安定であり、式(3)による所要厚算定の妥当性が確認された。

表-3 安定実験条件 (根固方塊)

	小縮尺実験	大縮尺実験
水深 $h$	50.0cm	2.50m
マウンド天端幅 $B$	26.5cm	1.14m
マウンド天端水深 $h'$	30.0cm	1.50m
周期 $T_{1/3}$	1.50s, 2.00s	3s, 4s, 5s
波高 $H_{1/3}$	9cm-23cm	0.6m-1.4m
マウンド石の質量	1.8g-4.7g	10g-200g

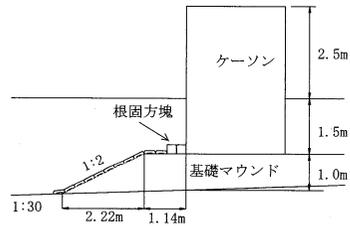


図-9 実験断面 (大縮尺実験)

表-4 根固方塊の被害基準

状態	根固方塊の動き
移動	25cm (現地量) 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
回転	方塊がその場で回転
離脱	方塊のその場からの抜け出し

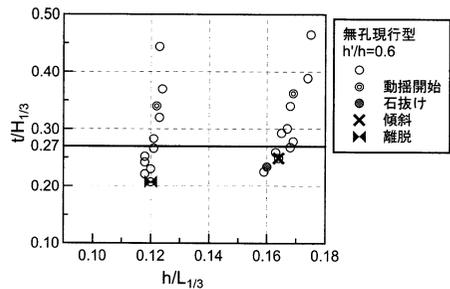


図-10 実験結果 (無孔現行型)

図-11に無孔現行型を2分割した無孔分割型の結果を示す。設計波高以下で傾斜が生じており、現行基準における安定性を確保できない。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。厚さを増した無孔分割厚型でも、設計波高以下で傾斜が生じ、所要厚の算定式を適用できないことが分かった。

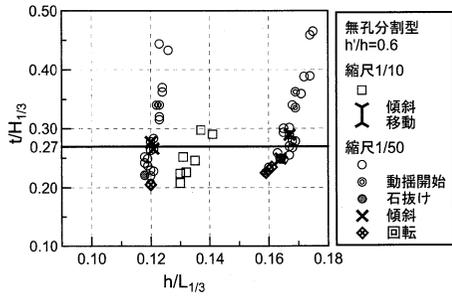


図-11 実験結果（無孔分割型）

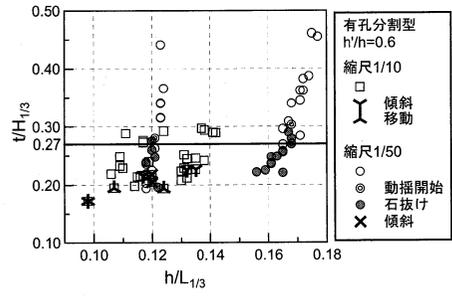


図-13 実験結果（有孔分割型）

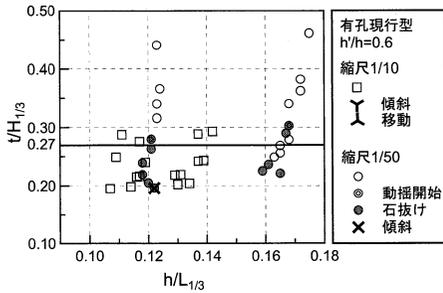


図-12 実験結果（有孔現行型）

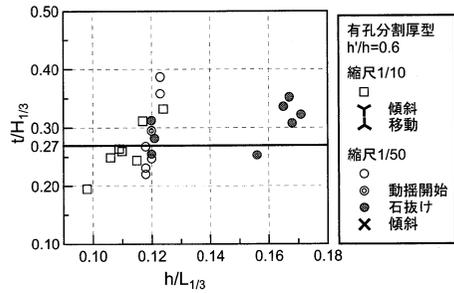


図-14 実験結果（有孔分割厚型）

d) 実験結果（有孔方塊）

図-12に有孔現行型の結果を示す。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。設計波高以下においても、開口部より若干の石の抜けが生じる場合もあったが、安定性に影響を及ぼすものではなかった。しかしながら、現地において、石の抜き出しが顕著となる場合には、マウンド下部の砂の吸い出しが懸念されるため留意する必要がある。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、有孔型は安定であることが分かった。

図-13に有孔型を2分割した有孔分割型の結果を示す。設計波高以下で被害は生じておらず、設計波を上回る領域で傾斜が生じた。無孔分割型では安定性を確保できないが、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。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、根固方塊に孔をあけることは安定上有利であると判断される。

図-14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。分割して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(3)が

適用可能であることが示された。

4. 結論

本研究では、混成堤における被覆ブロックと根固方塊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薄く大きな開口部を有する新型ブロックを混成堤マウンド被覆材として適用し、その波力特性および耐波安定性について検討した。その結果、新型ブロックは、無孔ブロックと比較して、天端沖端に位置する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。
- ②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。
- ③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。

参考文献

牛島龍一郎・水野雄三・井本忠博(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。  
 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。  
 (社)日本港湾協会(2007)：港湾の施設の技術上の基準・同解説(下)，pp. 851-852。  
 浜口正志・久保田真一・松本朗・半沢稔・山本方人(2007)：大きな開口部を有する新しい被覆ブロックの開発と人工リーフへの適用，海工論文集，第54巻，pp. 961-965。