

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

Hydraulic Stability of New Flat Type Armor Block with Large Openings for use in Artificial Barrier Reef

浜口正志¹・久保田真一²・松本 朗²・半沢 稔¹・山本方人³

Masashi HAMAGUCHI, Shin-ichi KUBOTA, Akira MATSUMOTO
Minoru HANZAWA and Masato YAMAMOTO

The purpose of this study is to develop a new flat type armor block with large openings aiming at high stability and economical advantage. Wave force measurements were performed to investigate the effect of the size and placement pattern of openings for both horizontal and vertical wave forces. Stability tests were conducted to evaluate the stability number for use in the Hudson formula. Stability test results clearly show that the stability of new flat type armor block has improved drastically in comparison with the existing X-shaped block. New flat type armor block reduced the amount of concrete needed by 25% that of the existing X-shaped block, indicating that it can contribute to an outstanding cost reduction as well.

1. はじめに

近年, 公共事業に対する建設コスト縮減の要請が高まる中で, 経済性に優れた海岸港湾構造物の建設が望まれている。被覆ブロックにおいて, 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, 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。

被覆ブロックの安定性を向上させる手法としては, ブロックに開口部を設けることが知られている。例えば, 宮崎ら (1991) は, 揚圧力を効果的に低減させるための開口部の配置方法を検討しており, 開口部を分散して設けることが効果的であることを示している。しかしながら, ブロック模型の下に捨石マウンドを設置し実際の流れ場を模した状態で開口部の大きさや配置方法がブロックの安定性に及ぼす影響について系統的な検討を行った例は少ない。

そこで本研究では, 安定性・経済性に優れた新しい被覆ブロックの形状を明らかにすることを目的として, 基礎的な波力実験を実施し, 安定上有利となる新型被覆ブロックの形状を系統的に検討した。さらに, 新型被覆ブロックの現地への適用性を検討するために, 近年全国各地の海岸でその計画および施工が進められている人工リーフを対象とした波力実験および安定実験を実施し, 人工リーフマウンド被覆材としての有用性を明らかにした。

2. 開口部による作用波力低減効果の基礎的な検討

(1) 実験方法

はじめに, 表-1 に示す方塊ブロックを対象とした波力計測 (規則波実験) 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。二次元造波水路 (長さ 55 m, 幅 1.2 m, 高さ 1.5 m) 内のモルタル床 (勾配 1/30) 上に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-1)。実験では規則波 ($T=2.5$ s) を作用させ, 方塊模型に作用する水平力, 鉛直力を計測した。方塊ブロックに作用する基本的な波力を明らかにした後に図-1 の

表-1 方塊ブロックの形状

			
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 $a=30$ cm, 厚さ $0.5a=15$ cm)

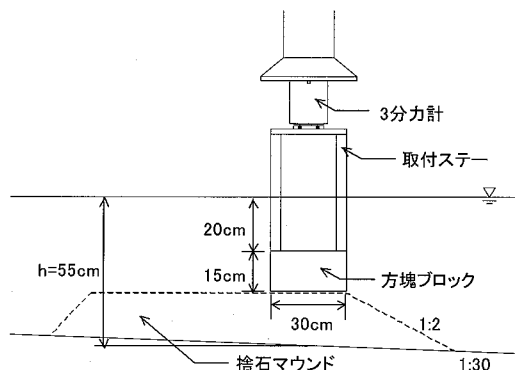


図-1 実験装置 (方塊ブロック)

1 正会員 工修 (株)不動テトラ ブロック環境事業本部
2 正会員 工修 (株)不動テトラ 総合技術研究所
3 正会員 工博 (株)不動テトラ 総合技術研究所長

点線で示す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。

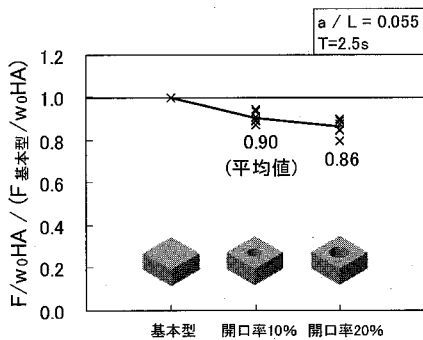
(2) 実験結果

a) 波力低減に及ぼす開口率の影響

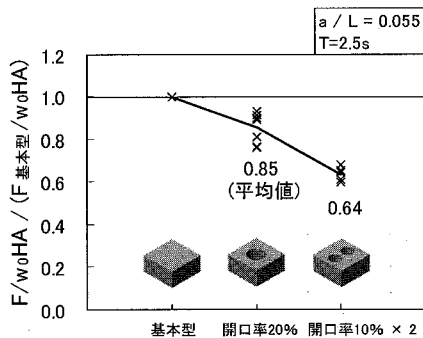
捨石マウンドが無い条件で得られた、無孔方塊ブロックに対する有孔方塊ブロックの鉛直上向きの波力低減率を図-2(a)に示す。縦軸における F は鉛直波力、 w_0 は水の単位体積重量、 H は波高、 A は方塊模型の鉛直方向の投影面積であり、凡例における a はブロックの基本長、 L は入射波の波長を示している。図-2(a)より、開口率10%と20%では、20%の方が鉛直上向きの波圧が小さくなることから、開口率10%と20%の比較において、開口率の増大による自重(抵抗力)の減少を加味しても、開口率が大きい方が安定上有利であると判断される。

b) 波力低減に及ぼす孔の分散の影響

実際の流れ場を模した捨石マウンド有りの条件において得られた、孔の分散による波力低減率を図-2(b)に示す。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は、現実的に被覆ブロック



(a) 開口率の影響 (捨石マウンド無)



(b) 孔の分散の影響 (捨石マウンド有)

図-2 有孔方塊ブロックの波力低減率

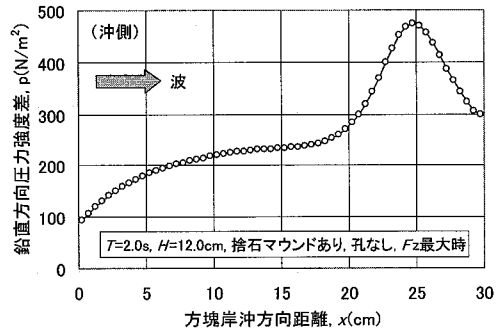


図-3 ブロック上下面に働く圧力強度差

クに設けることができる程度の孔の数であれば、孔を分散して配置する方が安定上有利であると判断される。

孔の分散による波力低減効果の要因を探るために、2次元数値波動水路を用いた数値計算(例えば磯部ら, 1999)を行った。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)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-3に示す。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。このことから、圧力強度差が正(鉛直上向き)のピークとなる近辺に孔があれば、効率的な波力低減が可能であると考えられる。よって、ブロック中央部に集中して一つの孔を配置するよりも、数個の孔を分散して配置する方が、鉛直上向きの波力が低減するものと考えられる。

3. 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

(1) 実験方法

上記の検討結果に基づき、図-4(a), (b)に示す既存の被覆ブロック(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, ブロック本体の厚さはBL1の1/2, 投影面積に対する開口率32.8%)を対象とした、詳細な波力計測を行い、流体力と耐波安定性の関係について検討した。

実験は、2.と同様の水路、模型床および捨石マウンドを用いた。L字型のパ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(基本長 $a=15$ cm)を取り付け、天端沖側端部のブロックに作用する水平および鉛直波力を測定した。マウンドは透過性とし、碎石を用



図-4 被覆ブロックの形状

いて製作した。実験では規則波 ($T=2.5$ s) を作用させた。

(2) 実験結果

BL1 および BL2 の波力計測結果を図-5(a), (b)に示す。横軸は、式 (1) で定義される安定数 N_s である。

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

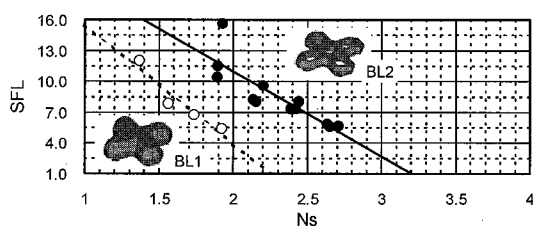
ここで、 ρ_r はブロックの密度、 ρ_w は水の密度、 M はブロックの質量、 H は波高である。縦軸は、式 (2) あるいは (3) で定義される浮き上がり (SFL) あるいは滑動 (SFS) に対する安全率である。

$$SFL = \frac{Mg}{Fz} \quad (2)$$

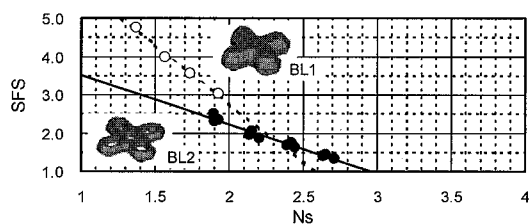
$$SFS = \frac{\mu (Mg - Fz)}{Fx} \quad (3)$$

ここで、 Fx および Fz は水平および鉛直波力、 Mg 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。作用波高の増加とともに N_s が増大し、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。

人工リーフの被覆に用いられるブロックは揚圧力による浮き上がりで被災することが知られているが、図より、ブロック (BL2) は、既存のブロック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、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。



(a) SFL



(b) SFS

図-5 浮上りおよび滑動に対する安全率

4. 人工リーフマウンド被覆材への適用

(1) ブロック形状

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、新型被覆ブロックの基本となる形状 (基本形) を決定した。基本形を対象とした波力実験を実施し、人工リーフ被覆材として用いた場合の波力特性を明らかにするとともに、ブロックの構造強度確保の観点より、図-6 に示す新型被覆ブロックを考案した (開口率 23.5%)。さらに耐波安定実験を実施し、人工リーフ基礎マウンド被覆材としての適用性を検討した。

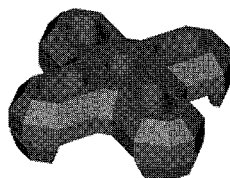


図-6 新型被覆ブロックの形状

(2) 波力実験

a) 実験方法

人工リーフの被覆に用いられる既存のブロックは、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。そこで、初期被害が想定される人工リーフ法肩周辺に位置する新型ブロックを対象とした波力実験を実施し、作用波力の特性を把握することとした。あわせて、無孔ブロック (新型ブロックの開口部を全て埋めたブロック) 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-7 にブロック設置状況を示す。実験では規則波 ($T=2.0$ s) を作用させた。ブロック天端水深 R については、野口ら (2002) の施工例調査を参考に決定した。調査によれば、9 割の人工リーフにおいて天端水深 R が 1.0 m 以上であることから、模型量で R を 2.0 cm (現地量で 1.0 m 程度) とした。

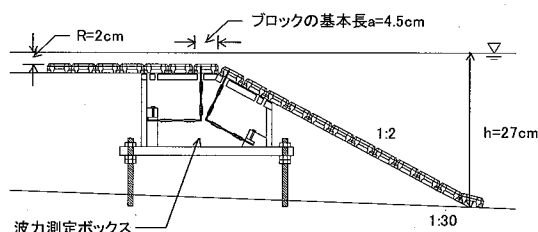


図-7 実験断面 (新型ブロック波力実験)

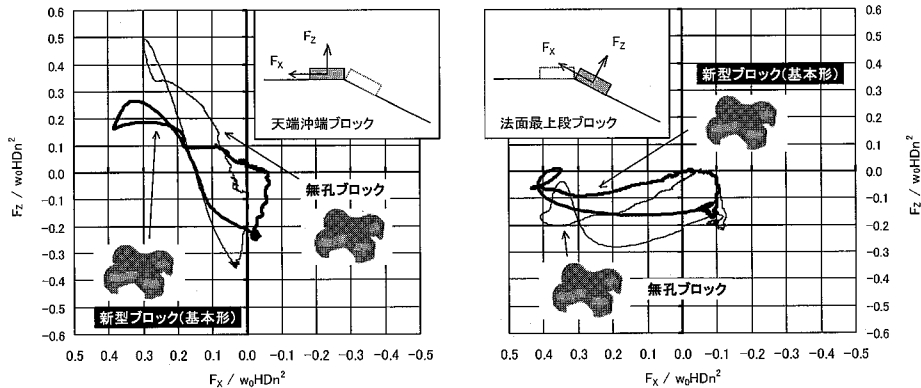


図-8 作用波力のホドグラフ

b) 実験結果

図-8に、天端沖端ブロックおよび法面最上段ブロックに作用する波力をホドグラフ（水平波力 F_x および鉛直波力 F_z を $w_0 H D n^2$ 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、 Dn は新型ブロックの体積の3乗根である。）として示す。天端沖端ブロックの作用波力は、新型ブロックおよび無孔ブロックで大きく様相が変わる。鉛直波圧強度のピーク値は無孔ブロックの方が大きい。一方、水平波圧強度のピーク値は新型ブロックの方が大きい。法面最上段においては、新型ブロックおよび無孔ブロックへの波力の作用形態に顕著な差異は見られない。いずれも接線方向波力のピーク時には法線方向波力は下向きに作用している。このことから、法面最上段ブロックには捨石マウンドに押さえつける方向に力が作用することがわかる。

ここで、天端沖端ブロックの式(4)で定義される岸側隣接ブロックの沖側上端を中心とした回転に対する安全率(SFO)を検討した(図-9参照)。

$$SFO = \frac{M_{F_x} + M_{M_g}}{M_{F_z}} \quad (4)$$

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_{M_g} は水平波力と自重による抵抗モーメントである。結果を図-10に示す。安定限界を超える程度の大きな波を作用させており、両ブロックともにSFOが1.0を下

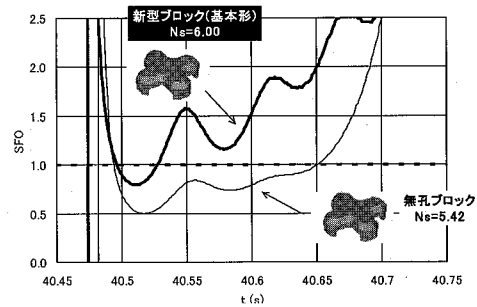


図-10 回転に対する安全率

回っている。しかし、その極小値は新型ブロックの方が大きく、1.0を下回る時間も短い。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新型ブロックは、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

表-2に実験条件を示す。実験では、不規則波 ($T_{1/3} = 1.5$ s, 2.0 s) 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波を標準とした。波高を増加させる際、ブロックの積み直しは実施しなかった。本実験では、転落（ブロックの大きさの1個以上移動）、移動（ブロックの大きさの半分以上移動）およびめくれ上がり（ブロックの高さ以上移動）を被害ブロックとして計上した。実験に用いた捨石は、「人工リーフ設計の手引き（改訂版）」を参考に（10～500 kg/個）、模型量で0.06～1.5 g/個程度の混合粒径の砕石を使用した。

b) 実験結果

実験結果を図-11に示す。横軸はブロック天端水深 R と作用有義波高 $H_{1/3}$ の比であり、縦軸は安定数 N_s であ

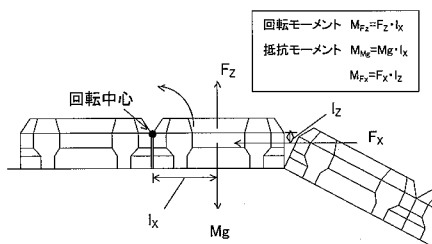


図-9 天端沖端ブロックに働く力のつり合い

表-2 実験条件 (安定実験)

法先水深 h	25 cm
ブロック天端水深 R	0, 2, 4, 6, 8, 10 cm
マウンド天端幅 B	100 cm
法面勾配	1 : 2
不規則波 有義波周期 $T_{1/3}$	修正 Bretschneider- 光易型スペクトル 1.5 s, 2.0 s
ブロック模型 質量 M	29.3 g
基本長 a	4.5 cm
高さ D	1.62 cm
密度 ρ_r	2.3 g/cm ³

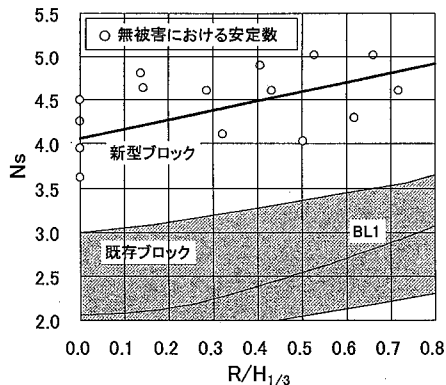


図-11 安定実験結果

る。ここで、無被害 ($D=0\%$) における安定数 (被害の生じなかった最大の波高に対する安定数) の平均的な値を実線で示した。実験においては波高を漸増させているため、図-11 に示した実線がほぼ安定限界に相当するものと考えられる。新型ブロックは、既存の被覆ブロックと比較して著しく安定性が向上していることが確認された。

初期被害は、既存ブロックにおいて生じる天端沖端ではなく、法面最上段あるいは法面上で生じた。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-8 に示した波力の作用特性および SFO の検討結果と符合する。

また、波高の漸増に伴い、法肩周辺のマウンド石が移動し、構造的な不連続点である法肩が徐々に緩やかとなり、法肩周辺のブロックもその動きに追従して緩やかに変形する。法肩が緩やかになる現象は、ブロックの安定上有利と考えられる。その過程において小さい粒径の石が若干抜け出すことが実験で確認されているが、人工リーフの断面形状に大きな変形をもたらす程の著しい下層石の抜け出しは観察されなかった。

5. む す び

本研究の成果をまとめると、以下のようになる。

- ①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、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。
- ②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による、浮き上がりおよび滑動に対する安定性向上が示唆されたことを踏まえ、新型ブロックの基本的な形状を決定した。
- ③新型ブロックを人工リーフマウンド被覆材として用いた場合の法肩周辺のブロックに作用する波力特性を明らかにした。新型ブロックは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することがわかった。
- ④新型ブロックを人工リーフ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。
- ⑤新型ブロックを人工リーフ被覆材として用いることで、単位面積当りを被覆するのに必要なコンクリートが BL1 と比較して 25 % 程度削減でき、耐波安定性を確保しつつ建設コストの縮減が可能となる。また、省資源により循環型社会の形成にも寄与できることになる。

最後に、本研究の実施にあたり、(独法)港湾空港技術研究所耐波研究室の下迫健一郎室長、国土交通省国土技術政策総合研究所海岸研究室の福濱方哉室長、(独法)水産総合研究センター水産工学研究所水理研究室の中山哲殿室長から貴重なご助言とご指導を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 磯部雅彦・高橋重雄・余錫平・神山 勉・藤間功司・川崎浩司・蔣勤・秋山 実・大山洋志(1999): 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究 - VOF 法基本プログラムの作成 -, 海洋開発論文集, Vol. 15, pp. 321-326.
- (社)全国海岸協会(2004): 人工リーフの設計の手引き (改訂版), 95p.
- 野口賢二・鳥居謙一・人見 寿・笹田俊治・丸山 準・岸田弘之・山崎真嗣(2002): 人工リーフと緩傾斜堤に関する平成 13 年全国実態調査, 第 49 回海講論文集, pp. 921-925.
- 宮崎基夫・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, 第 38 回海講論文集, pp. 616-620.