人工リーフ被覆ブロックの初期移動の予測手法

Numerical Prediction of Incipient Motion on Armor Block for Submerged Breakwaters

松本 朗¹・真野 明²・半沢 稔³・山本方人⁴

Akira MATSUMOTO, Akira MANO, Minoru HANZAWA and Masato YAMAMOTO

An evaluation method of incipient motion on armor block for submerged breakwater is proposed. The method is based on a wave induced flow field around the submerged breakwater, which is calculated by a numerical wave flume CADMAS-SURF (Isobe *et. al.*, 1999), and successive wave force calculation based on the Morison equation. Trial computation and comparison with experimental results demonstrate the validity and usefulness of the proposed method.

1. はじめに

近年、景観や環境面への配慮から人工リーフの施工事例が増えている。人工リーフを被覆するコンクリートブロックの所要質量は、安定定数Nsを用いたハドソン式(Hudson, 1959)により算定するのが一般的である(人工リーフの設計の手引き, 2004)。現在までに、ハドソン式をベースとしたブロックの安定性に関する実験的な検討が数多く実施されてきている(たとえば浅川ら, 1992; 中山, 1993; 福島ら, 1999; 浜口ら, 2007)。ハドソン式は実用的であり多くの施工事例により実務における妥当性が確認されている。一方、精度など問題点も指摘されている。たとえば、設計条件が式の適用範囲を外れる場合には、個々の設計条件に対応した模型実験による検討が必要となるが、全ての場合について実施するのは費用、時間の点で困難である。これらを踏まえ、著者らは数値計算による流速場を利用して人工リーフの被覆ブロックの汎用的で精度の高い所要質量算定方法確立することを目的として研究を行っている。この設計法では以下の効果が期待される。①人工リーフの形状、あるいは波の条件の違いを的確に考慮することができる。②被覆ブロックの位置による所要質量の違いを表すことができる。

被覆材の安定性の議論では被害のばらつきを考慮した確率的な取扱や被害の進展を考慮することが重要であるが、本論文ではまず被覆ブロックの初期移動の予測手法を開発することを目的として研究を行った。すなわち、人工リーフ周辺の流速場を数値計算で求め、その流速場に基づいて移動の有無を判定する。流速場の数値計算法

として、数値波動水路(磯部ら1999)を用いた。被覆ブロックの波力の算定にはモリソン式を用いた。

2. 水理模型実験

本研究は、既報(浜口ら, 2007)で示した孔あき被覆ブロックを例として検討を行った。実験結果は今回の解析でも用いており、その概要を以下に述べる。詳細については既報を参照されたい。

(1) 波力実験

図-1にブロック設置状況を示す。用いた波浪は周期2sの規則波である。ブロック天端水深R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1.0m以上であることから、Rを1.0m(模型量で2.0cm)とした。

図-2は、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のホドグラフである。水平波力 F_x および鉛直波力 F_z を $\rho_w g H D_n^2$ で除した波圧強度で表している。ここで、 ρ_w は水の密度、 g は重力の加速度、 H は波高、 D_n は孔あきブロックの体積の3乗根である。実験は孔あきブロックと孔なしブロックについて行った。天端沖端の鉛直波圧強度のピーク値は孔なしブロックの方が大きく、水平波圧強度のピーク値は孔あきブロックの方が大きい。法面最上段においては孔あきブロックおよび孔なしブロック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

図-1 波力実験装置

1 正会員	工修	(株)不動テトラ総合技術研究所
2 フェロー	工博	東北大学教授 災害制御研究センター
3 正会員	工修	(株)不動テトラブロック環境事業本部
4	工博	(株)不動テトラ総合技術研究所

図-2 波力測定結果
(上：天端沖側端部，下：法面最上段)

向きに作用しており，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。

(2) 安定実験

表-1に実験条件を，図-3に実験断面を示す。有義波周期 $T_{1/3}=1.5, 2.0\text{s}$ の不規則波を作用させ，ブロックの挙動を観察した。捨石は人工リーフの設計の手引き（2004）を参考に，現地量 $10\sim 500\text{kg/個}$ ，模型量で $0.06\sim 1.5\text{g/個}$ 程度の混合粒径の砕石を用いた。

通常，人工リーフの被覆に用いられるブロックは，天

図-3 安定実験断面

端沖側端部のブロックが揚圧力を受け，隣接する岸側のブロックの沖側上端を中心として岸側へ回転することで被害が生じることが多い。孔あきブロックの初期被害は，既存ブロックにおいて生じる天端沖側端部ではなく，法面最上段あるいは法面上で生じた。このことは，天端沖側端部に位置する孔あき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-2に示した波力の作用特性に符合する。

3. ブロックの初期移動の予測手法

(1) 基本的考え方

前章で述べた水理模型実験の結果を踏まえ，予測手法を構築した。抗力と慣性力に関する簡易な理論によれば，人工リーフ被覆ブロックでは慣性力の寄与が大きいことが示される。したがって，流速，加速度の双方を考慮してモリソン式で作用波力を求め，自重による抵抗力と比較してブロックの安定性を判定した。これは，流速のみを考慮してイスバッシュ数でブロックの安定性を議論する既往の手法（たとえば大熊ら，2003；近藤ら，2009）と異なる点である。ただし，①孔の効果により揚圧力は低減されており，初期に被災するのは法面最上段ブロックであるため，揚圧力の効果は考慮していない。②被覆ブロックは群体で設置されるので着目するブロックの抵抗力には上流側のブロックによる流れの遮蔽効果を考慮している。③沖側法肩部分が構造上の弱点となるため，その位置における抵抗力を周辺部分よりも低減させている。これらの流れの遮蔽効果および法肩の形状効果はモデルパラメータとし，計算結果と実験結果の比較によりその値を定めた。また，④被覆ブロックの被害は不規則波中の最大波1波で生じるわけではない。繰返される波作用によりブロック間の隙間が広がり移動に至る。従って本研究では，1/10最大波力に着目して手法を構築した。

(2) 作用波力の算定

ブロックに作用する波力を次のモリソン式で算定する。

$$F = F_D + F_I = \frac{1}{2} C_D \rho_w S u |u| + C_M \rho_w V \frac{du}{dt} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで， F_D は抗力， F_I は慣性力， C_D と C_M は抗力係数および慣性力係数， S と V はブロックの流れ方向の投影面積と体積， u は流速である。流速 u は予め数値計算で求めており，水平・鉛直方向流速を人工リーフ表面の接線方向流速に変換して用いている。ここで，平松・佐藤

表-1 実験条件

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

(2010) に倣い、抗力と慣性力の大きさについて検討する。簡単のために立方体で考える。波動場を長波で近似すると抗力の最大値 F_{Dmax} と慣性力の最大値 F_{Imax} は以下のように表せる。

$$F_{Dmax} = \frac{1}{8} C_D \rho_w V^{2/3} g \frac{H^2}{h} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$F_{Imax} = C_M \rho_w V \frac{H\pi}{T} \sqrt{\frac{g}{h}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

さらに構造物が碎波帯内に設置されているものとして $H=0.78h$ とし、また、抗力係数と慣性力係数の大きさが同程度であると仮定すると最終的に以下の式を得る。

$$\frac{F_{Dmax}}{F_{Imax}} = \frac{0.78 C_D}{8\pi C_M} \frac{\sqrt{ghT}}{V^{1/3}} = \frac{L}{32D_n} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 h は水深、 T は周期、 H は波高、 L は波長である。すなわち、波長とブロックの代表長さとの比が32よりも小さければ慣性力が卓越することになる。たとえば人工リーフの天端上水深 $R=5\text{cm}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=2.0\text{s}$ の場合、天端上での波長 $L_{1/3}$ は1.39mであり、ブロックの代表長さを辺長0.045mとすると $L_{1/3}/D_n=31$ となり、慣性力が卓越する領域であることがわかる。

4. 実験結果の再現計算

(1) 予測手法のキャリブレーション

はじめに先に述べた模型実験結果を対象に、パラメータの同定を行った。図-4に流速場の計算領域を示す。人工リーフの設置水深 $h=25\text{cm}$ 、天端水深 $R=2, 4, 7, 10\text{cm}$ とした。波浪は不規則波であり、その有義波周期 $T_{1/3}$ は2.0sとした。解析には波浪場が定常となった後の204.8sの時系列を使用した。図示していないが、計算領域の左右両端に長さ4mの吸収帯を設け、反射波の発生を抑制している。

図-5に1/10最大波力の空間分布の例を示す。天端上水深 $R=10\text{cm}$ のケースであり、入射有義波高 H_s が増加するのに従って波力も大きくなるのがわかる。1/10最大波力がブロックの自重に基づく滑動抵抗力よりも大きくなる

図-4 計算領域

と被災することになる。図-6は滑動抵抗力の設定について模式的に表したものである。滑動抵抗力 F_s は以下のよう

$$F_s = \begin{cases} C_E \mu W & (\text{天端}) \\ C_R C_E W (\sin \theta + \mu \cos \theta) & (\text{斜面}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 θ は斜面勾配、 μ は摩擦係数、 W はブロックの水中重量である。 C_E は遮蔽効果を表す係数であり1.0よりも大きい。 C_R は斜面上のブロックに対する補正係数であり、斜面下部と中間部は1.0、斜面上部は1.0未満となる。試行錯誤の結果、 C_E は4.5とした。 C_R は斜面上段2個について0.3と設定した。

図-7に算定された1/10最大波力と抵抗力の比率の空間分布を示す。この値が1.0を越えるとブロックが滑動する。有義波高が13.9cmと14.6cmの間の条件で被災すると予測される。波力と抵抗力の比率は沖側斜面上端で大きな値を取り、天端で再び極大値を示した後に急激に減少する。人工リーフの設計の手引きには、天端岸側の被覆材の質量は沖側よりも小さくできることが示されており、その知見と一致している。

図-8に実験と計算による限界安定定数 N_s の存在範囲を

図-5 1/10最大波力の空間分布 (R=10cm)

波力: F
抵抗力: $F_s = C_E \mu W$ (天端上)
 $F_s = C_R C_E W (\sin \theta + \mu \cos \theta)$ (斜面上)

C_E : 遮蔽効果係数

単体では1、群体では1より大

C_R : 斜面上の補正係数

斜面下方と中間は1、斜面上方は1より小

図-6 滑動抵抗力の設定

示す。Nsは次式で定義される。

$$N_s = \frac{H_{1/3}}{(\rho_r / \rho_w - 1) D_n} \dots\dots\dots (6)$$

ここで ρ_r はブロックの密度である。被害が生じなかった最大の安定定数と被害が生じた最小の安定定数を線で結んで表示している。実験データのばらつきは大きい、 R/H_s が大きくなるに従って安定定数が大きくなる傾向にある。計算による限界安定定数は、 $R=4, 7, 10\text{cm}$ のケース (R/H_s が0.3以上) では実験の傾向をよく再現しているが、 $R=2\text{cm}$ のケース (R/H_s が0.2程度) では安定性が過小評価されている。本モデルは被覆ブロック法線方向の力を考慮していない。図-2で見たように、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おり、安定上有利に作用することになる。このことが R が小さい条件での実験結果と計算結果の不一致の原因になっている可能性があり、詳細な検討は今後行いたい。

(2) 適用性の確認

前節で同定したパラメータを異なる構造条件の人工リーフに用いて、手法の適用性を検討した。表-2はモデル

の構築と適用性の検討に用いた人工リーフの構造を比較したものである。適用性の検討に用いた人工リーフ断面は法面勾配が1:3とモデル構築に用いた断面よりも緩勾配であり、斜面上の流れ場とブロックの滑動抵抗の特性が変化するものと思われる。

図-9に適用性検討断面における1/10最大波力と抵抗力の比率の空間分布を示す。計算では、有義波高 $H_s=12.8\text{cm}$ の条件で波力と抵抗力の比が1.00、 $H_s=13.3\text{cm}$ の条件では1.05と算定され、ブロックが移動する条件となった。模型実験においても、 $H_s=13.2\text{cm}$ の条件で、法面最上段のブロックが斜面上を岸沖方向に激しく振動する様子が観察された。最終的には被害に至らなかったが、安定限界に近い状態であることが確認されており、モデルによる予測通りの結果となっている。開発した予測手法の適用性は高いと言える。

模型実験では、ブロックの質量を増加させた検討も実施した。図-10は2種類の模型質量に対する波力と抵抗力の比率の空間分布を示したものであり、ブロックの質量増加に伴う安定性の向上が定量的に把握できることが本予測手法の長所である。

表-2 人工リーフ構造の比較

	モデルの構築	適用性の確認
法先水深 h	25cm	19.3cm
ブロック天端水深 R	4,7,10cm	5.3cm
法面勾配	1:2	1:3
有義波周期 $T_{1/3}$	2.0s	1.8s
ブロック質量 M	29.3g	32.6, 64.6g

図-7 1/10最大波力と抵抗力の比率の空間分布 ($R=10\text{cm}$)

図-8 実験と計算による限界安定定数の存在範囲

図-9 1/10最大波力と抵抗力の比率の空間分布 ($R=5\text{cm}, M=32.6\text{g}$)

5. むすび

本研究の結果をまとめると以下のとおりである。

- ①数値計算による人工リーフ被覆ブロックの初期移動の予測手法を提案し、実験結果との比較によりモデルに使用するパラメータの値を定めた。
- ②同定したパラメータを異なる構造条件の人工リーフに

図-10 1/10最大波力と抵抗力の比率の空間分布
($R=5\text{cm}$, $H_s=13.3\text{cm}$)

用いて、手法の適用性を検討した。①で定めたパラメータの値はマウンドの形状が異なる場合にも適用できることが確認された。

③算定した波力と抵抗力の比率は、天端上の被覆材の所要質量の場所的な分布についての既往の知見と一致するものであった。すなわち、本手法により場所ごとに異なるブロックの質量を定めることが可能である。

④予測された限界安定定数の存在範囲は、 R/H_s が0.3以上では実験結果の傾向をよく再現しているが、 R/H_s が0.2程度の条件では安定性を過小評価する場合が見られた。これは、ブロック法線方向の波力をモデルに組み込むことにより改良できる可能性があるが、詳細な検討は今後行いたい。

本論文では予測手法の基本的な考え方を示し、モデルの構築と適用性の確認を行うことに重点が置かれたため、検討したブロックは1種類である。被覆ブロックの設計用の N_s がブロックの種類ごとに異なる値を取ることからわかるように、耐波安定性はブロックの形状に依存するが、異なる形状のブロックについても、既存の実験結果からパラメータのキャリブレーションを行っておけ

ば、マウンドの形状や波浪条件などが異なる場合にも初期移動を予測することが可能であると思われる。

今後、より多くの設計条件に対して検討を加え、予測手法の適用性を確認していく。また、被害のばらつきを考慮するために、確率的な取り扱いを付加する予定である。

参考文献

- 浅川 勉・佐藤弘和・口ノ町誠・野口正昭 (1992)：人工リーフ被覆材の安定性に関する実験的研究，海岸工学論文集，第39巻，pp.656-660.
- 磯部雅彦・高橋重雄・余 錫平・榊山 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，第15巻，pp.321-326.
- 大熊義夫・興野俊也・柴崎尚史・安田勝則・中野 修 (2003)：流速場における混成堤断面の被災状況の相違によるブロック安定性検討，海岸工学論文集，第50巻，pp.751-755.
- 近藤圭央・有川太郎・関 克己・村川はるみ (2009)：3次元数値波動水路を用いた防波堤堤頭部の被覆材移動による被災の検討，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol.65, No.1, pp.861-865.
- (社)全国海岸協会 (2004)：人工リーフの設計の手引き (改訂版)，95p.
- 中山哲蔵 (1993)：人工リーフの水理特性及び被覆材の安定に関する実験的研究，海岸工学論文集，第40巻，pp.816-820.
- 野口賢二・鳥居謙一・人見 寿・笛田俊治・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.
- 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，海岸工学論文集，第54巻，pp.961-965.
- 平松遥奈・佐藤慎司 (2010)：サンドバック潜堤の安定性と海岸侵食緩和機能，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol.66, No.1, pp.656-660.
- 福島雅紀・山本幸次・佐藤慎司・山本吉道 (1999)：低天端離岸堤の被覆ブロック被災機構に関する研究，海岸工学論文集，第46巻，pp.896-900.
- Hudson, R. Y. (1959): Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters, Proc. ASCE, Vol.85, WW3, pp.93-121.