

人工リーフ被覆ブロックに作用する碎波衝撃力

(株)エイトコンサルタント 正会員 ○森本 茂之
鳥取大学工学部 正会員 木村 晃
鳥取大学大学院 学生員 玉江 祥和

1. はじめに

人工リーフは、珊瑚礁の持つ消波機能を模倣して作られており、幅の広い天端と浅い天端水深をもつ没水型の消波構造物である。その消波効果は、人工リーフの沖側法面上または天端上において波を強制的に碎波させることで生まれるものである。人工リーフは通常捨石を用いて本体となるマウンドを施工するが、それだけでは捨石が波にさらわれる恐れがあるので、表面をコンクリート製の被覆ブロックで覆っている。この被覆ブロックの安定重量の算定は、建設省から提案された公式に基づいて行われてきた。しかし、実際にこの公式を用いて施工された人工リーフにおいて数多くの被覆ブロックの被災が報告されており、この公式に問題があることが指摘されている。人工リーフは、沖端ブロック1個の被災が周辺ブロックに対して被災の連鎖反応を引き起こす原因となるため、安定重量の高い信頼性が求められている。被覆ブロックの被災の大きな要因はリーフ法先に作用する碎波による衝撃力と考えられており、その現象の解明が求められている。

そこで本研究では、まず水理模型実験によりブロックの被災が主として碎波衝撃力によるものであることを明らかにした。さらにポテンシャル理論を用いて碎波時のブロック周辺の流況を詳細に近似したものとブロック周辺の流況を簡単に近似したものによる2つの算定モデルの開発を行った。

2. ブロックに作用する波力と安定性

従来、人工リーフ被覆ブロックの安定性は式(1)、式(2)によって評価されてきた。

$$(W - B) \cos \alpha > F_L \quad (1)$$

W ; ブロックの所要重量 B ; 浮力
 α ; 斜面が水平面となす角 F_L ; 揚力

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_w C_L A u^2 \quad (2)$$

A ; 投影面積 u ; 水粒子速度
 C_L ; 揚力係数 ρ_w ; 流体の密度

しかし、沖端以外のブロックは、式(2)中の投影面積が0になることから式(1)は必ず成立することになるが、沖端以外のブロックの被災例は少なからず報告されている。本研究では、ブロックに作用する揚力が式(2)のみで表されていることを問題とする。すなわち、式(2)以外にベルヌーイ圧力による揚力が被災の要因であることに着目して碎波衝撃力をモデル化する。

3. 碎波による流体挙動特性と碎波衝撃力

人工リーフ天端上沖端の被覆ブロックに波を作用させた時にブロックに作用する力を測定するために、模型装置を用いて実験を行った。実験ではまず、波がブロックに作用したときに最も被覆ブロックが不安定となる状況を特定した。すなわち、波の周期、波高等の条件を変えてブロックに作用する揚力が最大となるケースを特定した。この条件のもとでブロックに作用する鉛直力を測定するとともに、碎波の状況を高速ビデオカメラで撮影し、流体の挙動状況を観察した。その結果、ブロックに大きな揚力が作用するときは波力の時間波形に一定のパターンがある事が分かった。波力の時間波形を模式的に示したものが図-1である。図-1よりブロックに作用する碎波衝撃力は2つの力に分けることができる。1つは図-1(Ⅱ)の上向きの揚力であり、もう1つは図-1(Ⅲ)の下向きの衝撃力である。波力の発生を流体の挙動状況とあわせて説明する。波が衝突した直後は衝突した水が水平方向に運動を変えるので下向きに衝撃力が生じる。

その後の水平方向の流れがベルヌーイ圧力による揚力を引き起こし、碎波帯内の速い流れが作用すると揚力にピークが表れる。流れの最強時がブロックを通過すると揚力は徐々に減少してくる。ブロックには図-1(Ⅰ)のように揚力と衝撃力の和が作用していると考えられる。

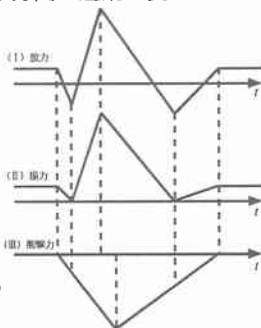


図-1 波力のモデル

4. ポテンシャル理論によるモデル化について

人工リーフ天端上沖端に作用する碎波状況を平板に一樣流が作用する状況に置き換えることによって、碎波形状及び碎波帯内部の流れ場をポテンシャル理論により近似して碎波衝撃力のモデル化を行う。z 平面上の x 軸上に置かれた長さ 4a の平板を速度 U、入射角度 α で過ぎる一樣流の複素速度ポテンシャル $W_\zeta(x, y)$ は、 ζ 平面上の半径 a の円柱を過ぎる一樣流の複素速度ポテンシャル $W_\zeta(x, y)$ (式(3)) を Joukowski 変換 ($z = \zeta + a^2/\zeta$, $a > 0$) を用いて写像することによって式(4)で表される。

$$W_\zeta(x, y) = U \left(e^{-i\alpha} \zeta + a^2 e^{i\alpha} / \zeta \right) + i\kappa \log \zeta \quad (3)$$

$z = x + iy$ $2\pi\kappa$; 円柱周りの循環

$$W_z(x, y) = U \left(z \cos \alpha - \sqrt{z^2 - 4a^2} i \sin \alpha \right) + ik \log \frac{1}{2} \left(z + \sqrt{z^2 - 4a^2} \right) \quad (4)$$

ここに、 $W_z(x, y) = \Phi(x, y) + i\Psi(x, y)$ であり、 $\Phi(x, y)$ ；速度ポテンシャル、 $\Psi(x, y)$ ；流れ関数を表す。また、流れの複素速度 $\omega_z(x, y)$ は、式(5)によって表される。

$$\omega_z(x, y) = \frac{U \left(e^{-ia} - a^2 e^{ia} / \zeta^2 \right) + ik / \zeta}{1 - (a^2 / \zeta^2)} \quad (5)$$

ここに、 $\omega_z(x, y) = u(x, y) + iv(x, y)$ であり、 $u(x, y)$ ；水平方向水粒子速度、 $v(x, y)$ ；鉛直方向水粒子速度を表す。式(4)、(5)より、平板で近似した場合の碎波形状および内部の流れ場を表すことができる。以上の式によって表される流れが人工リーフ天端上沖側から岸方向に速度 βc で移動すると考えると、ブロックに作用する波力は運動量理論、ベルヌーイの定理および式(2)より式(6)で表される。

$$F(t) = L \int_{M_2}^{M_1} \{ PL(x, t) + PW(x, t) \} dx + FL(t) \quad (6)$$

$$\begin{cases} PL(x, t) = \varpi_0 u(x)^2 / 2g \\ PW(x, t) = -\varpi_0 Q V_A \sin \alpha / gD \\ FL(t) = \varpi_0 C_L A \{ u(M_1) \}^2 / 2g \end{cases} \quad (7)$$

$$Q = DV_A \sin \alpha \quad (-ct < x < ct)$$

$$M_1 = M + L/2 + \beta ct, \quad M_2 = M - L/2 + \beta ct$$

M；ブロックの中心位置から衝突位置の距離

L；ブロックの幅 β ；波速の影響率

D；波の衝突幅 V_A ；波の衝突速度

5. 算定モデルの簡略化について

ポテンシャル理論によって流れ場を表すことは非常に複雑であるため、碎波形状および流れ場を簡単に近似することによって碎波衝撃力算定モデルの簡略化を行う。ブロックに作用する碎波の形状を図-2のように簡単に近似する。内部の流れは衝突速度 V_A のみで近似し、 V_A は時間的に減衰するものとする。また、波が岸向きに移動する速度は長波（極浅海波）の波速とする。以上の簡略化によりブロックに作用する波力は式(7)を式(8)に変換することで表される。

$$\begin{cases} PL(x, t) = \varpi_0 V_A(t)^2 / 2g \\ PW(x, t) = -\varpi_0 Q(t) V_A(t) \sin \alpha / gD \\ FL(t) = \varpi_0 C_L A \{ V_A(t) \}^2 / 2g \end{cases} \quad (8)$$

$$(D/2 - \int_0^t V_A(t) dt \leq x \leq D/2)$$

$$c = \sqrt{gh}$$

$$M_1 = M + L/2 + ct$$

$$M_2 = M - L/2 + ct$$

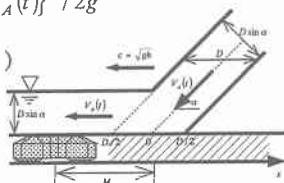


図-2 碎波の簡単な近似

$$Q(t) = DV_A(t) \sin \alpha \quad h; \text{天端水深}$$

ここで、 $V_A(t)$ は波が衝突した直後から減衰するとし、波の影響がなくなる0.3(s)後（入射波周期の約1/5）に0(cm/s)となるように近似する。

6. 碎波衝撃力算定モデルの妥当性

2つの碎波衝撃力算定モデルの妥当性を検討する。まず、算定モデルは V_A, α, D, β, M の未知パラメータを含んでいるので実験によりパラメータの測定を行った。測定方法は、高速ビデオカメラによる画像測定を行った。波速の影響率 β については測定不可能であったため、変数パラメータとして取り扱った。以上の測定により求めたパラメータについて算定モデルの計算を行い、実験値との比較を行った。実験値には大きな波力の表れているものを3ケース用いた。実験値と比較するとポテンシャル理論を用いた算定モデルでは（ $M=6.0\text{cm}$ 、 $\beta=0.7$ ）、簡略化したモデル化では（ $M=7.0\text{cm}$ ）の波形が揚力ピーク値、ピーク出現時間ともに実験値とよく一致しているという結果が得られた。2つのモデルと実験値の波力の時間波形を図-3、図-4に示す。図からも分かるように、2つの算定モデルは揚力のピーク値、ピーク値出現時間ともによく実験値と一致しており、実験データの平均的な傾向をよく説明していると思われる。

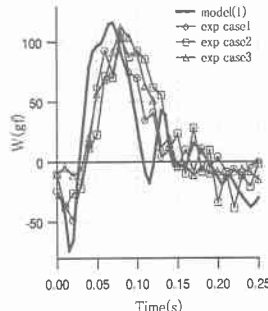


図-3

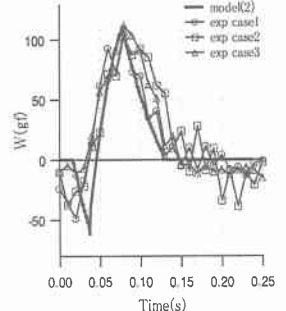


図-4

7. 結論

本研究では、人工リーフ天端上の被覆ブロックに作用する碎波衝撃力のモデル化を試みた。従来の考え方と異なった運動量理論、ポテンシャル理論、ベルヌーイの定理を用いて流体力を表し、方法の異なる2つの算定モデルの開発を行った。結果はどちらも実験値と良い対応が見られたが、ポテンシャル理論を用いた算定モデルは複雑であることや、適応範囲の限定などの問題が残る。簡略化した算定モデルは沖端以外のブロックについても適応が可能であり適用性に優れているが、流れを単純に近似しているので水平方向水粒子速度に若干の問題が残る。以上より、本研究で提案した2つの算定モデルは、若干の問題は残るが運動量理論とベルヌーイ圧力を用いることで、ブロックに作用する碎波衝撃力を推定することは可能であると結論する。