人工リーフ周辺における波と流れの数値解析

鳥取大学工学部　正会員　松原雄平・黒岩正光
鳥取大学大学院　学生会員　○橋本修輔

1. はじめに

近年離岸堤に代わる消波装置として，景観を考慮した潜堤である人工リーフが全国各地の沿岸部に設置されることが多くなっている．しかし人工リーフの開口部において離岸流による海底の洗掘が発生するなど，人工リーフ周辺で発生する地形変化が問題となっている．こうした問題を解決するには人工リーフの形状や設置方法を再検討し，新たな設計基準を設ける必要がある．本研究では，その第１段階として人工リーフ周辺における波高分布と海浜流分布計算において，波浪場計算における砕波限界の与え方，および海浜流場計算での人工リーフの天端水深の深さと開口部における離岸流の関係について，数値実験的に検討した．

2. 本研究で使用する数値モデルについての概要

図-1 に示すフローチャートに従って，波浪場計算と流速場計算を行う．波浪場計算は，式(1)に示す間瀬ら(2004)による流れの影響を考慮した波作用量平衡方程式に回折項およびエネルギー散逸項を導入したものを用いる．なお波浪場の進行方向を示す座標については，図-2 に示すものに従う．θはx軸から反時計回りの方向を正としている．

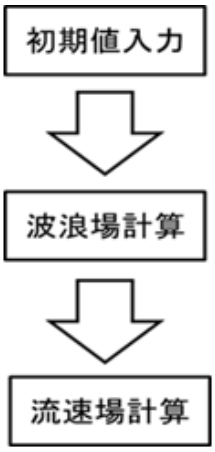

図-1 計算のフローチャート

$$\frac{\partial(C_x N)}{\partial x}+\frac{\partial(C_y N)}{\partial y}+\frac{\partial(C_\theta N)}{\partial \theta}=\frac{\kappa}{2\sigma}\left\{\left(CC_g\cos^2\theta N\right)_y-\frac{1}{2}CC_g\cos^2\theta N_{yy}\right\}-\varepsilon_b N \quad (1)$$

ここで，C_x，C_y，C_θは各方向の特性速度である．Cは波速，C_gは群速度(波エネルギーの輸送速度)，Nは波作用量，κは回折項に関する影響係数である．右辺第一項のyは，yについて微分することを示している．なお右辺第一項は波の回折を示しており，右辺第二項は砕波によるエネルギー散逸を示している．右辺第二項のε_bは砕波減衰係数である．本研究ではε_bについて Battjes and Jannsen(1978)のモデル(以下 BJ モデル)または Chawla and Kirby(2002)のモデル(以下 CK モデル)のいずれかを用いて波浪場計算を行う．なお両者の砕波減衰係数ε_bは以下の式で表される．

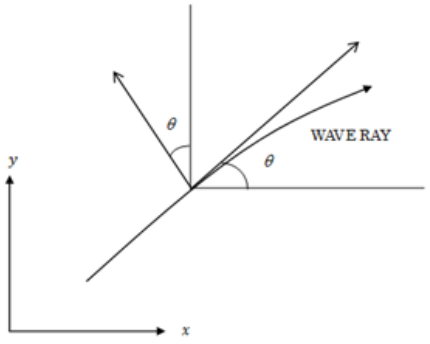

図-2 波の進行方向を示す座標

$$\varepsilon_b=\frac{\langle D\rangle}{(\rho g H_{rms}^2/8)\bar{\sigma}} \quad (2)$$

ここでH_{rms}^2は波高の二乗平均，$\bar{\sigma}$は代表相対角周波数である．$\langle D\rangle$は砕波によるエネルギー散逸率であり，

BJ モデルと CK モデルで理論式が異なる．BJ モデルの砕波によるエネルギー散逸率$\langle D\rangle$については，

$$\frac{1-Q_b}{\ln Q_b} = -\left(\frac{H_{rms}}{H_b}\right)^2 \quad (3) \qquad \langle D\rangle = \frac{\alpha\rho g}{4} Q_b \bar{f} H_{rms}^2 \quad (4)$$

式(3)を近似的に満たすQ_bを式(4)に代入して求められる．ここで$\bar{f}$は波の代表周波数，H_bは砕波限界波高である．αは無次元係数であり本研究では$\alpha = 1$ として計算を行う．CK モデルの砕波によるエネルギー散逸率$\langle D\rangle$については以下の式で求められる．

$$\langle D\rangle = \frac{3\beta\rho}{32\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{(g\bar{k})^3}{tanh\bar{k}h}} \left(\frac{\bar{k}}{\gamma tanh\bar{k}h}\right)^2 H_{rms}^5 \left[1 - \left\{1 + \left(\frac{\bar{k}H_{rms}}{\gamma tanh\bar{k}h}\right)^2\right\}^{-5/2}\right] \quad (5)$$

ここで$\bar{k}$は波数ベクトルである．βとγは無次元係数であり，本研究では$\beta = 0.4$, $\gamma = 0.6$として計算を行う．

また本研究では波浪場の計算結果に基づいて海浜流場の計算を行う．その際には，黒岩(1999)の準三次元の海浜流モデルを用いる．

3. 本研究で使用するモデル地形についての概要

本研究では図-3 に示すような$x = 600$m, 沿岸方向距離 $y = 1000$mのモデル地形を用いて計算を行った．汀線の位置は$x = 500$mとした．海底地形は，海底勾配が 1/50 の平行等深線とした．人工リーフは，左右対称になるように 2 基設置した．人工リーフの大きさは，岸沖方向に 50m,沿岸方向に 200m とした．計算に用いる格子間隔は 10m とした．流速場計算は計算間隔時間を 0.05s とし，40000 ステップ繰り返し計算を行った．

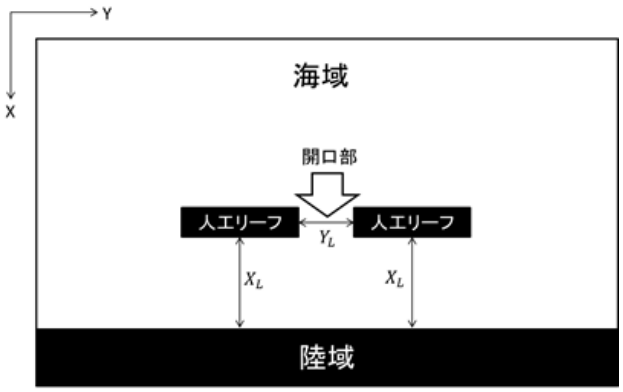

図-3 数値計算に用いるモデル地形

4. 波浪場の数値計算

表-1 に示す条件に従って波浪場の計算を行った．人工リーフの設置条件は開口幅$Y_L = 100m$，離岸距離 $X_L = 150m$，天端水深$h_R = 2m$とした．ここにHは発生させる沖波の有義波高(m), Tは沖波の有義周期(s), H/Lは沖波波形勾配である．BJ は砕波減衰係数について BJ モデルを用いることを示し，CK は CK モデルを用いることを示している．H_bは砕波限界波高(m)で，h_bは砕波限界水深(m)である．H_b/h_bは砕波の発生位置を決定する値である．なお$H_b/h_b = 0.83$は孤立波の理論に基づいて山田らが得た妥当だと思われる値である．図-4 は，case1 と case2 の人工リーフの開口部中央付近についての岸沖方向の波高分布を示したものである．図-5 は，case1 と case2 の汀線から見て左に設置した人工リーフ中央付近についての岸沖方向の波高分布を

表-1 波浪場の計算条件

	BJ. CK	H_b/h_b	H	T	H/L
case1	BJ	0.83	2	5.07	0.05
case2	CK	0.83			
case3	CK	0.40			

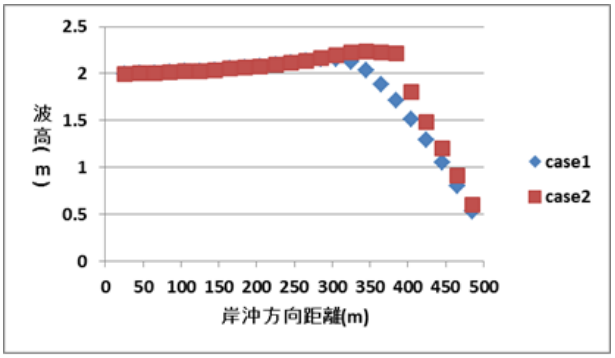

図-4 開口部における岸沖方向の波高分布

示したものである．図-6 は case1 と case3 の人工リーフの開口部の中央付近についての岸沖方向の波高分布を示したものである．図-7 は case1 と case3 の汀線から見て左に設置した人工リーフ中央付近についての岸沖方向の波高分布を示したものである．なお図-4~図-7 については，沖側から岸側に向かう方向を正としている．また岸沖方向距 300m~350m が人工リーフの開口部に相当する．図-4 より，case1 と case2 では開口部における砕波の発生位置が大きく異なる計算結果となっていることがわかる．一方図-6 より，case1 と case3 では，開口部における砕波の発生位置がほぼ等しくなっていることがわかる．図-5 より，人工リーフ上については, case1 と case2 で砕波の発生位置についてはほぼ等しいが，人工リーフよりも岸側の領域における波高が大きく異なる計算結果となっている．一方図-7 より, case1 と case3 の計算結果はほぼ等しくなっていることがわかる．これらの計算結果より今回の人工リーフの設置条件では, 砕波減衰係数に BJ モデルを使用する際には$H_b/h_b = 0.83$として，CK モデルを使用する際には$H_b/h_b = 0.4$として計算を行った場合に，両者の人工リーフ上と開口部における岸沖方向の波高分布がほぼ等しくなることがわかった．

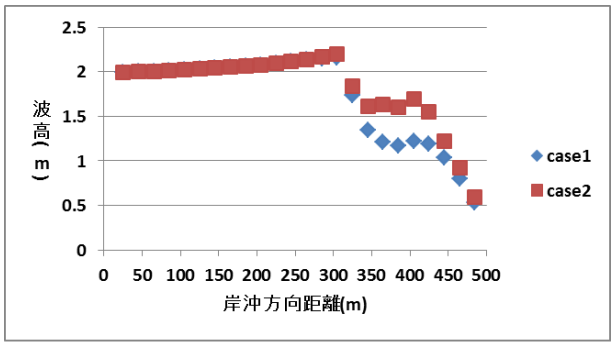

図-5 人工リーフ上における岸沖方向の波高分布

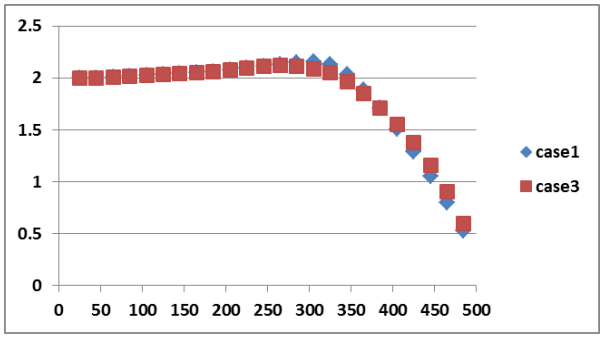

図-6 開口部における岸沖方向の波高分布

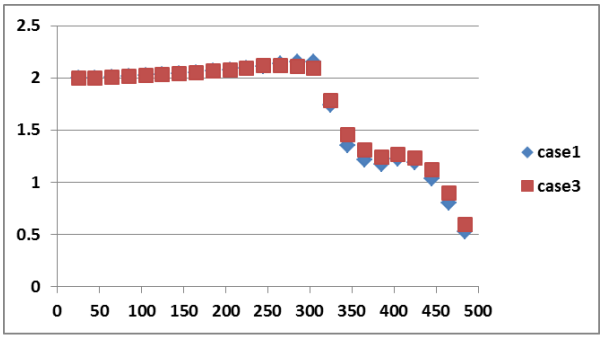

図-7 人工リーフ上における岸沖方向の波高分布

5. 海浜流場の計算

表-2 に示す条件に従って海浜流場の計算を行った．人工リーフの設置条件は開口幅$Y_L = 100m$，離岸距離$X_L = 150m$とした．波浪場の計算結果に基づいて，砕波減衰項係数に BJ モデルを用いた場合と CK モデルを用いた場合とで開口部における砕波の発生位置がほぼ等しくなるように，BJ モデルを用いる場合は$H_b/h_b = 0.83$として CK モデルを用いる場合はH_b/h_b =0.4 とした．図-8 は，代表として case1 の計算領域全体の流速分布を流速ベクトル図と初期地形を重ねた図を用いて示したものである．図-9 は，表-2 に示した海浜流場の計算結果を天端水深h_Rと最大流速の関係図としてまとめたものである．なお最大流速を抽出する領域について岸沖方向は開口部に相当する領域を対象として，沿岸方向は全領域を対象とした．図-10 は表-2 に示した海浜流場の計算結果を天端水深h_Rと岸

表-2 海浜流場の計算条件

	h_R	BJ. CK	H_b/h_b	H	T	H/L
case1	2.0	BJ	0.83	2.00	5.07	0.05
case4	1.8					
case5	1.6					
case6	1.4					
case7	1.2					
case8	1.0					
case3	2.0	CK	0.40			
case9	1.8					
case10	1.6					
case11	1.4					
case12	1.2					
case13	1.0					

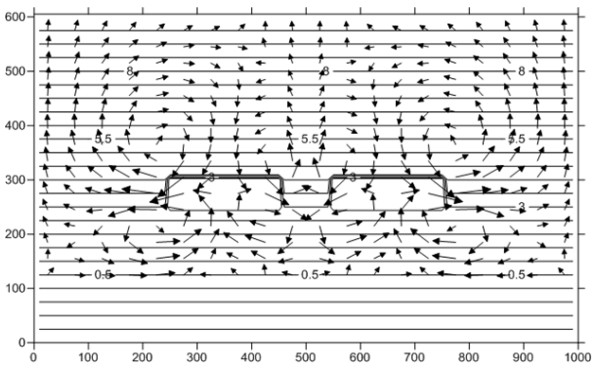
図-8 case1の海浜流分布

沖方向についての最大流速の発生位置の関係図としてまとめたものである．なお岸沖方向は沖側から岸側に向かう方向を正としており．岸沖方向距 300m~350m が開口部に相当する．図-9，図-10 ともに図中において砕波減衰係数に BJ モデルを使用した場合と CK モデルを使用した場合の比較を行っている．図-8 より，人工リーフの開口部において強い離岸流が発生していることがわかる．また人工リーフ周辺では，大きな循環流が発生している．図-9 より天端水深を浅くするにしたがって最大流速が大きくなっていることがわかる．また天端水深が浅い場合は両者の計算結果の差が大きくなり，深い場合は両者の計算結果がほぼ等しくなっている. 図-10 より両者の場合で最大流速の発生位置が異なっていることがわかる. 砕波減衰係数に BJ モデルを使用して天端水深が 1.6m 以上の場合は, 開口部よりも岸側で最大流速が発生しており，それ以外の場合は開口部で最大流速が発生している．また CK モデルを使用した場合は天端水深の変化に伴って，最大流速の発生位置が変化していない．

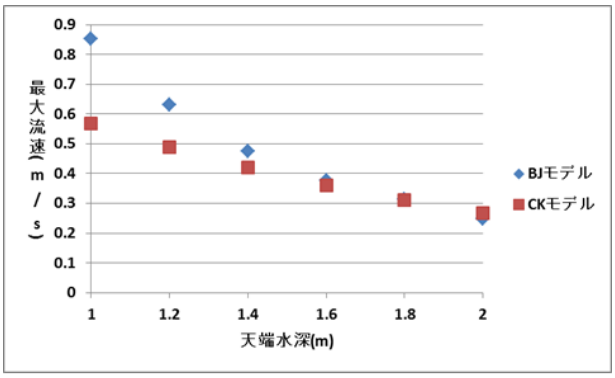

図-9 天端水深と最大流速の関係

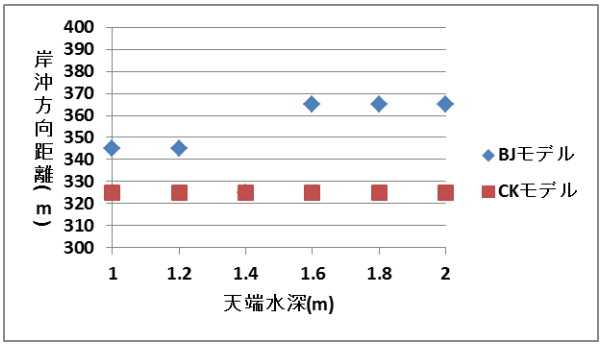

図-10 天端水深と最大流速の発生位置の関係

6. まとめ

本研究では，波浪場モデルにおける砕波限界の与え方，天端水深の深さが開口部の流れに及ぼす影響について数値実験的に検討した．得られた結果を以下に示す.

(1) 波浪場の計算結果から，BJ モデルのH_b/h_b（=0.83）を基準とし，開口部における砕波後の波高分布を比較した場合，CK モデルでは，H_b/h_b=0.4 程度となった.

(2)海浜流モデルにおいては，天端水深を浅くするほど開口部付近で発生する離岸流が著しく大きくなる計算結果となった．また天端水深の大小によって，砕波減衰係数ε_bのモデルに BJ モデルを用いた場合と CK モデルを用いた場合の計算結果に差が生じる場合と，ほぼ等しくなる場合があることがわかった.

参考文献

黒岩正光(1999)：準三次元海浜流モデルの開発とその適用性に関する研究，鳥取大学博士論文

間瀬肇(2004)：波・流共存場における砕波および回折効果を考慮した位相平均波浪予測モデルの構築，海岸工学論文集第 51 巻 pp6~10

平山秀夫ら(2007)：海岸工学，コロナ社，pp46,47