

潜堤構造物の海浜流制御と海岸保全機能

信岡尚道* ・村上啓介** ・入江 功***
松永厚彦**** ・木原康成***** ・牛房幸光*****

1. はじめに

最近、海岸保全施設を設置する場合には、景観や水質交換を考慮する必要がある、海岸保全施設として離岸堤に代わって潜堤や人工リーフ等が採用され始めている。

しかしこの潜堤や人工リーフ等は、天端上で波を碎波させるため、堤体の岸側水域において平均水位が上昇し、図-1(a)に示すような天端上で岸向き、その両端の開口部で沖向きの海浜循環流を発生させやすい(宇多ら, 1988; 佐々木ら, 1990)。このような循環流は、堤体を越えて流入するので砂を含まず、開口部では沖向きの流れにより浮遊砂が沖に流出し、海岸保全機能を低下させることがあり、留意する必要がある。

ところで、図-1(b)に示すような天端上で沖向き、開口部で岸向きとなる全く逆の循環流であると、開口部より堤体内に砂が流入し、海浜の安定を促進すると考えられる。このような循環流を起こすには、碎波させずに波を減殺させ、堤体背後の平均水位を上昇させない構造物が必要である。著者らは、このような水位上昇を制御する潜堤構造物の開発を行ってきている(入江ら, 1991, 1992)。

今回対象とする構造物は、図-2に示す没水した壁を

連続に並べたもの(以下、連立壁潜堤と呼ぶ)である。この連立壁潜堤について、2次元実験で水理特性を、平面実験と数値計算より海浜流制御機能を調べ、広く用いられている離岸堤や潜堤と比較検討した。

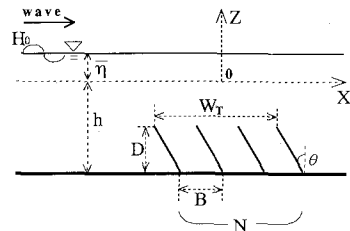


図-2 連立壁潜堤

2. 2次元および平面実験の概要

2次元実験は、長さ28m、幅30cm、高さ50cmの造波水路を用いた。水深 h を35cmとして、各堤体を造波板から約12m離して設置した。図-2に示す連立壁潜堤の実験では、天端高 $D=0.5h$ 、壁枚数 $N=4$ 枚、壁間隔 $B=2.0h$ 、全天端長 $W_t=6.0h$ で、壁傾斜角(壁が直立から沖側に傾いた角度) θ を $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ と変化させて、波高分布と平均水位を測定した。また天端高 D 、全天端長 W_t が同一の矩形潜堤についても同様の実験を行った。各堤体において、入射波高 H_0 を6cm、波の周期 T を1.83, 1.27, 1.02sと変化させた。堤体前後の現象が安定するまでの区間において0.2または0.4h間隔で、容量式波高計を用いて測定を行った。

平面実験は図-3に示すように、長さ246cm、幅170cm、深さ30cmで造波装置、消波装置およびフィルターを有する小型平面水槽を用いた。水深 $h=10$ cmの水平床として、堤体(60×60cm)を造波板側フィルターから約50cm離れた水槽中央に設置し、海浜流を調べた。連立壁潜堤の諸元は、天端高 $D=0.65h$ 、壁間隔 $B=2.0h$ 、壁枚数 $N=4$ 枚、壁傾斜角 $\theta=30^\circ$ 、全天端長 $W_t=6.0h$ とし、矩形潜堤の諸元は、天端高 D と全天端長 W_t を連立壁潜堤と同一にした。各堤体においての波の条件は、周期 T を1.1, 0.76s、入射波高 H_0 を1.7cmとした。

流況測定には、フロートとして直径1cmの釣り用浮

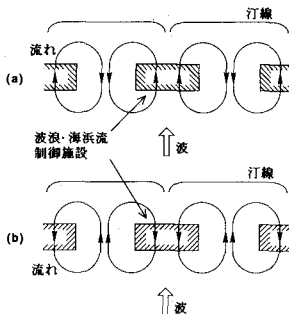


図-1 波浪・海浜流制御の2つの方法

- * 正会員 工修 茨城大学助手 工学部都市システム工学科
- ** 正会員 工修 九州大学助手 工学部建設都市工学科
- *** 正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科
- **** 准准水建設
- ***** 学生員 九州大学院 工学研究科
- ***** 九州大学技官 工学部建設都市工学科

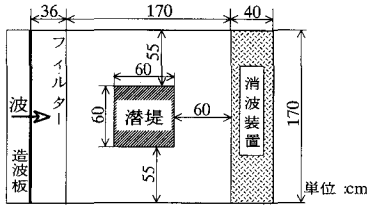


図-3 平面実験図

きを用い、水槽の上からビデオカメラでフロートの移動を撮影し、画像から、各層での移動の速さに応じて5s、または10sおきにフロートの位置をプロットした。

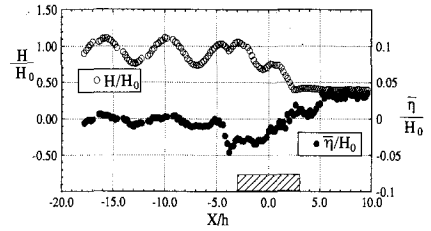
3. 実験結果

(1) 2次元実験による連立壁潜堤の水理特性

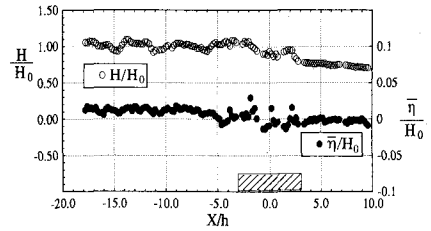
図-4は、矩形潜堤と連立壁潜堤($\theta=30^\circ$)についての無次元波高分布 H/H_0 (○) と無次元平均水位変動 $\bar{\eta}/H_0$ (●) の空間分布を示す。波の周期 T は1.83sである。

波高分布をみると、矩形潜堤では、通過率が約40%であること、堤体から沖側に入射波と反射波による重複波が存在していることがわかる。一方、連立壁潜堤では、通過率が約70%であり、堤体沖側に重複波がほとんど存在していない。連立壁潜堤の壁傾斜角度を変えた実験でも通過率が60~70%であった。連立壁潜堤付近の観察では、碎波は起こらず、壁上端に大規模な渦が発生していたのを確認した。矩形潜堤付近の観察では、大きな碎波を確認した。よって、矩形潜堤の波浪減殺は碎波と波の反射、連立壁潜堤は渦によるエネルギー損失によると考えられる。なお、連立壁潜堤の諸元を変えたときの波浪減殺効果の詳細は、入江ら(1992)が報告している。

両堤体付近の平均水位を比較すると、矩形潜堤では堤体岸側で沖側に比べ入射波高の4%ほど上昇しているのに対し、連立壁潜堤では逆にわずかであるが下降しているのがわかる。堤体背後の平均水位が海浜流に大きく寄与すると考えられていることから、連立壁潜堤は矩形潜堤と異なる海浜流起因力を有すると予測される。連立壁潜堤の壁傾斜角と波の周期を変化させて実験を行った結果、平均水位は、沖側では堤体より水深の2倍の距離から、岸側では堤体直後から一定になる傾向があった。それぞれ一定となった位置での平均水位差 $\Delta\bar{\eta}$ と周期 T の関係について壁傾斜角をパラメータとして示したものが図-5である。 $\Delta\bar{\eta}$ は、沖側に比べて岸側の水位が高い時を正としている。壁傾斜角が直立の場合、矩形潜堤と同じく岸側平均水位が上昇するが、壁傾斜角が大きくなると、平均水位が下降、つまり岸側に比べ沖側の平均水位が高くなるのがわかる。またこの実験範囲では、波の周期が長くなる、つまり相対水深 h/L が小さくなると、平均水位差が大きくなっている。



(1) 矩形潜堤



(2) 連立壁潜堤 ($\theta=30^\circ$ $N=4$)

図-4 平均水位と波高分布
($D=0.5h$, $W_T=6.0h$, $T=1.83s$, $H_0=6.0$ cm)

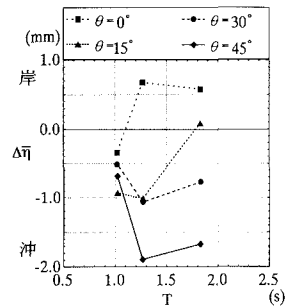


図-5 連立壁潜堤前後の平均水位差
($D=0.5h$, $N=4$, $H_0=6.0$ cm)

(2) 海浜流実験結果

図-6(1)は矩形潜堤周辺、(2)は連立壁潜堤($\theta=30^\circ$)周辺の海浜流(表層)実験結果を示す。波の周期は、 $T=1.1s$ である。プロット●は、5秒おきのフロートの位置を示すものであり、中央の長方形が潜堤を表す。

矩形潜堤の周辺では、堤体上で強い岸向きの流れ、その両端の開口部で沖向きの流れとなっているのがわかる。図には示していないが、底層では開口部で表層と同方向のゆっくりとした循環流を形成していた。なお、実験では、天端上で波は碎波していた。

連立壁潜堤の周辺では、堤体上で沖向き、開口部で岸向きの全く逆の循環流が起こっているのがわかる。2次元実験結果で矩形潜堤の場合とは逆に沖側平均水位が高かったことが、堤体上沖向きの循環流をつくる原因となっていると考えられる。底層では、水槽全体でゆっくりと岸に向かう流れが起こっていた。波の周期を0.76sとした表層の実験結果でも、循環はあまり明瞭ではないが、

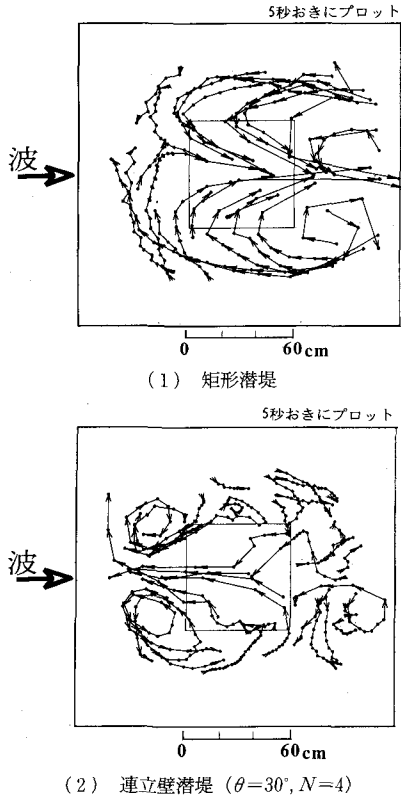


図-6 潜堤周辺海浜流
($D=0.6h, W_t=6.0H, T=1.1s, H_0=1.7cm$)

堤体上冲向き開口部岸向きの流れを確認している。

4. 連立壁潜堤の海岸保全機能についての考察

ここでは、潜堤構造物周辺の海浜流を数値再現して、実験ケース以外の海浜流の予測を行い、潜堤構造物の海岸保全機能について検討する。

(1) 計算条件と方法

海浜流計算で一般に用いられているように、流速分布が鉛直方向に一様と考え、radiation 応力を外力として、連続の式および運動方程式を連立させて解く方法を用いた。基礎方程式は以下である。

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial u(\bar{\eta} + h)}{\partial x} + \frac{\partial v(\bar{\eta} + h)}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + F_x - M_x + R_x + g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + F_y - M_y + R_y + g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 u, v は海浜流の x, y 方向成分、 $\bar{\eta}$ は平均水位、 F_x, F_y は底面摩擦項、 M_x, M_y は水平混合項、 $R_x,$

R_y は radiation 応力項である。マニング粗度係数は実験水槽の床がベニア板であったので $0.013m^{-1/3}s$ とし、これ以外の各項詳細は、佐藤ら (1978) が行った方法を用いた。

(1)～(3) 式について ADI 法により計算を行った。海浜流の外力となる radiation 応力の求め方であるが、波の重合の場合は、ある評価算定方法が必要とされている(渡辺ら, 1982; 樫木ら, 1981)。本計算では、波高については、平面および二次元実験値より、一部ポテンシャル接続法(吉田ら, 1992)による数値計算結果を参考にして、進行波のみを選びだしたものを用いた。波向きについては、平面実験で撮影した波峰線から読み取ったものと上記計算結果を参考に求めた。

矩形潜堤付近では、radiation 応力勾配による運動量の他に、天端上での波の砕波による岸向きの運動量が存在する。この砕波による効果を計算式に組み入れないと、実際の流れの再現は不十分になる(佐々木ら, 1990)。そこで本計算では、堤体上一点の流速が実験値と計算値で一致するように、砕波点から岸側の堤体上で通常の radiation 応力勾配を割り増す方法を用いた。また、堤体端で水深が急激に変化する所では、実験結果より経験的補正を行った。連立壁潜堤周辺計算の外力については、4. (2) で述べる。

計算領域は、平面実験に合わせて $1.7 \times 1.7m$ の水平床で水深 h を $10cm$ とし、外側境界は閉境界とした。潜堤および連立壁潜堤の諸元および設定位置、波の条件も平面実験に合わせた。離岸堤周辺の計算も行った。離岸堤の諸元は $20 \times 60cm$ で越波を許さないものとし、設置では各潜堤と中央の位置が同一になるようにした。

(2) 連立壁潜堤の海浜流起因力の評価

3. で述べた連立壁潜堤の実験結果は、壁が傾斜した場合、2次元では沖側平均水位の方が高くなり、平面では循環方向が堤体上冲向きとなる従来の潜堤構造物と逆の現象であった。この現象は、外力に radiation 応力勾配だけを用いた場合は数値再現できない。そこで、この現象について考察をしてみる。図-7 に示すように、連立壁潜堤上の水塊(図中斜線)に働く力は、radiation 応力勾配による応力 (F_R) の他に壁上端で発生する渦の岸沖方向非対称による応力 (F_V) が存在しており、これらの力の相対値が現象を左右しているとする。そして、 F_V が F_R より大きい場合に沖側水位が上昇していると考えるのである。この仮定を実験結果の図-5 に当てはめてみる。壁上端部に発生した渦は、壁面に沿って上層に飛び出していく。ゆえに、沖側に壁傾斜角が大きくなるほど、冲向きの応力を増加させることになる。さらに、壁傾斜角が大きくなるほど、流れが岸向きか冲向きかにより壁の抵抗力に差が生じ、壁の岸側と沖側に発生する渦の規模の

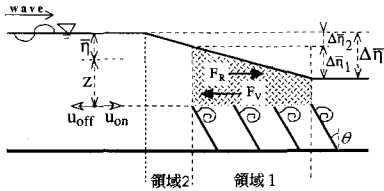


図-7 連立壁潜堤の海浜流起因力モデル

差も増大する。これらより沖側平均水位が相対的に上昇したと思われる。また、周期が長くなるほど壁上端の岸沖最大流速の差が大きくなり、壁上端に発生する渦の規模の差も大きくなることと、平均水位差が大きくなる関係も一致する。ここで、 F_v が海浜流起因力となるので推算する。まず堤体上の領域1でのモデル式(4)を立てた。

$$\Delta \eta_1 = -\frac{1}{\rho g(\bar{\eta} + h)} \Delta S_{xx} + \alpha \frac{1}{g} (U_{on(max)}^2 - U_{off(max)}^2) \quad \dots\dots\dots (4)$$

左辺は領域1区間の水位差、右辺第一項は F_R (領域1区間の radiation 応力勾配；水深は水面から天端までと仮定)、第二項は F_v を表す。 F_v は壁傾斜による非対称渦運動による力の差を壁上流速の岸沖差による運動量差で考えたものである。壁上流速の岸向き及び沖向き一周期平均値は、水平床の壁上端と同じ高さにおけるストークスの第二近似による岸向き(U_{on})及び沖向き(U_{off})の流速最大値と関係あると仮定し、 U を代表流速とした。 α はパラメーターであり、各傾斜角度別に周期 T (=2.0, ~0.8 s)の radiation 応力、平均水位差(図-5より回帰計算したもの)、および代表流速 U を求め、式(4)の回帰計算を行い、さらに角度について回帰計算を行って求めた(式(5))。領域2は、堤体より沖側であるが平均水位が変化していた。そこで、この領域2にも渦運動が及んでおり、 F_v の力の一部がこの領域まで作用していると仮定して、領域1と同様の方法でパラメーター β を求めた(式(6))。

$$\alpha = -0.021 \times (\text{壁傾斜角 deg.}) - 0.033 \quad \dots\dots (5)$$

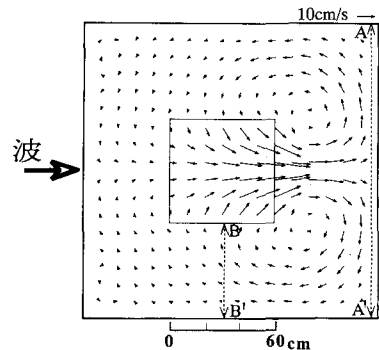
$$\beta = -0.014 \times (\text{壁傾斜角 deg.}) - 0.023 \quad \dots\dots (6)$$

連立壁潜堤周辺の平面計算を行う時、モデル化した F_v の項を運動方程式(2)に加えるが、そのまま平面に適用すると流れが実験値より大きくなる結果となった。この理由は、流れが2次元の場合と異なること、領域1の水深を天端水深としたことなどが考えられる。そこで、堤体上沖端の一点で平面実験と計算の流速が一致するように、補正パラメーター γ を求め α および β に乗じた。

$$\gamma = 1.2 - 0.88T \quad \dots\dots\dots (7)$$

(3) 海浜流計算結果

海浜流実験の再現計算結果を図-8に示す。波の周期 T は1.1sである。まず矩形潜堤周辺の計算結果が図-8(1)である。図-6(1)に示した同条件の実験結果は5秒おきのフロート軌跡、計算結果は平均流速ベクトルであることに注意してもらいたい。堤体上岸向き、開口部冲向きの循環流が発生しており、堤体背後への流れなど良い一致をしている。次に連立壁潜堤周辺の計算結果が図-8(2)である。図-6(2)の実験結果と比較すると、堤体上冲向き開口部岸向きとなる矩形潜堤とは全く逆の循環流が発生しており、さらに堤体上への流入の様子なども良い一致をしている。堤体沖側に存在する循環中心については、若干計算結果の方が岸に寄っているが、底層の実験ではこの付近で岸に流れていたこと、計算は断面平均流速を表していること等を考慮すると計算による再現は成功したと考えられる。図に示していないが、周期 $T=0.76$ sの条件での連立壁潜堤付近の流れの実験および計算結果を比較すると、計算結果の方が堤体上で冲向きの流れが多少強いなどの違いはあるが、おおまかな流れは一致していた。したがって、4.2で示した海浜流起因力のモデルで現象をかなりの程度表わすことが



(1) 矩形潜堤

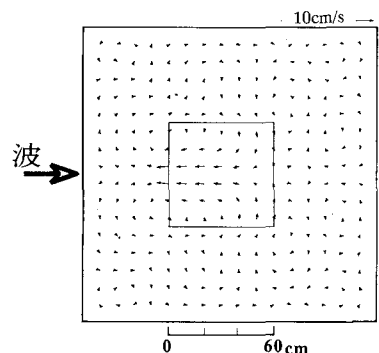
(2) 連立壁潜堤 ($\theta=30^\circ, N=4$)

図-8 海浜流計算値
($D=0.5h, W_T=6.0h, T=1.1s, H_0=1.7$ cm)

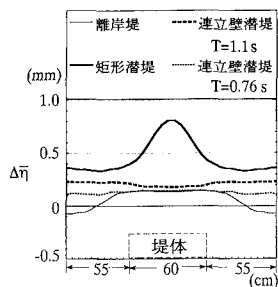


図-9 岸側境界付近の平均水位
($D=0.5h$, $W_T=6.0h$, $T=1.1s$, $H_0=1.7$ cm)

できるものと思われる。

(4) 平均水位からみた潜堤構造評価

各堤体周辺の計算結果より、岸側境界断面(図-8(1) AA'線)の平均水位を示したものが図-9である。横軸は沿岸方向距離、縦軸は平均水位の上昇量であり、連立壁傾斜角 θ は 30° である。図より矩形潜堤の場合では堤体背後での平均水位上昇が大きいが、離岸堤と連立壁潜堤の場合はその上昇が小さいことがわかる。

(5) 開口部流量からみた構造物評価

各構造物周辺の計算結果より、堤体の切れた部分(開口部)断面(図-8(1)のB, B'線)の総流量 Q (m^3/s) を示したのが図-10である。連立壁潜堤での計算は、壁傾斜角を変えた場合と波の周期 T を $0.76s$ とした場合を加えている。プラスが岸向き流量である。離岸堤及び連立壁傾斜角 15° の場合は他の構造物の場合に比べ流量が小さいためグラフに値が現れなかった。矩形潜堤の場合は沖向きの流れ、連立壁潜堤では壁傾斜角が大きくなると岸向きの流れが起こっている。1.で述べたように、開口部での沖向き流れは侵食が問題になるが、傾斜角の大きい連立壁潜堤は逆の岸向き流れで、砂を沖から岸に供給する可能性があることを示している。

5. 結 論

本研究で以下のことが明らかになった。

- (1) 2次元実験では、連立壁潜堤前後の平均水位が、矩形潜堤の場合と逆で、堤体岸側水域より沖側水域のほうが高くなる。
- (2) 壁を傾斜させた連立壁潜堤周辺の海浜流は、堤体

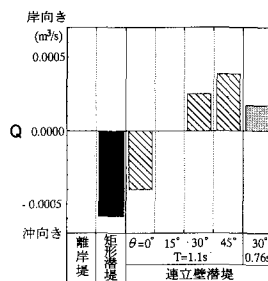


図-10 開口部断面総流量
($D=0.5h$, $W_T=6.0h$, $T=1.1s$, $H_0=1.7$ cm)

上沖向き開口部岸向きとなる。これは、矩形潜堤周辺と全く逆の循環流である。

- (3) 数値計算による保全機能評価として、連立壁潜堤の壁を直立から沖向きにある程度傾けた場合、堤体背後では離岸堤を設置した場合と同じような平均水位の現象になること、堤体開口部で岸向きの流れになることが予測できた。

したがって、傾斜角のついた連立壁潜堤は砂を沖から岸に供給する可能性があり、海浜の安定に有効であると考えられる。今後の課題として、連立壁潜堤の適切な諸元と傾斜海浜での適用を検討する必要がある。

参 考 文 献

- 入江 功・信岡尚道・小島治幸・三原泰司 (1991): 底版型潜堤の波浪減殺効果, 海岸論文集, 第38巻, pp. 504-508.
- 入江 功・村上啓介・吉田明徳・木原康成 (1992): 連立壁潜堤による波浪減殺, 九州大学工学集報, 第65巻, pp. 189-195.
- 宇多高明・小俣 篤・横山揚久 (1988): 人工リーフの機能と設計法, 土研資料, 第2696号, 79 p.
- 佐々木幹夫・首藤 啓・竹下 彰 (1990): 潜堤周辺の海浜・海浜変形数値計算法の検討, 海岸論文集, 第37巻, pp. 404-408.
- 佐藤昭二・永井紀彦・小笹博昭 (1978): 波による海浜流数値計算例, 港研資料, No. 290, 15 p.
- 榎木 享・出口一郎・泉 雄士 (1981): 離岸堤及び潜堤周辺で生じる海浜流セルに関する研究, 第28回海講論文集, pp. 310-314.
- 吉田明徳・村上啓介・小野雅人 (1992): ポテンシャル接続法の選点解法による3次元波動境界値問題解析法, 海岸論文集, 第39巻, pp. 756-760.
- 渡辺 晃・塩崎正孝 (1982): 構造物周辺の波浪・海浜流場について, 第29回海講論文集, pp. 110-114.