

レクリエーション海浜における突堤・離岸堤の汚濁拡散に対する影響

佐藤 昭二*・木村 久雄**・高松 恭文**

1. はしがき

レクリエーション海浜においては、波による砂浜の浸食を防ぐために、突堤や離岸堤が建設されることが多い。しかし、このような構造物の設置は、前浜近くの海水を停滞させ水質を悪化させるおそれがある。特に、レクリエーション海浜では、夏期は比較的水温が高く、波もない上に海水浴客の有機物の放出も加わるので、この海水の停滞については留意する必要がある。

著者らは、先に神戸市須磨レクリエーション海浜の養浜計画に基づく突堤や離岸堤の海水交換に対する影響を実験的に検討し本講演会に報告した¹⁾。

今回は、平行直線状の等深線を持つ海浜をとりあげ、突堤や離岸堤を数基並べた場合についての定常流実験と、その数値シミュレーションおよび潮汐変動を加えた非定常流の場合の数値シミュレーションを行なったので²⁾、その一部を報告する。

2. 実験方法

この実験に用いた模型は、廻流装置を有する平面水槽内に図-1に示すように作った。この場合、海浜は直線平行等深線とし、その断面は図左下に示すように前浜で1/10、-0~2 cmで1/25、-5~10 cmで1/40~1/60となっており、-10 cm以深は一樣水深とした。この断面は神戸市須磨海岸の平均的な断面を1/100縮尺としたも

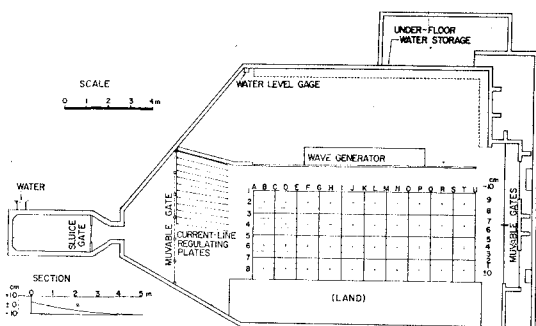


図-1 実験水槽と模型

のに相当する。模型床はモルタル刷け仕上げとし、染料分布の撮影に便なるよう表面に白色ペイントを塗り、黒色ペイントで一辺1 mの格子を画いた。

実験条件は模型を現地の1/100の縮尺と考え、水位を+0.85 cm、流速を沖側で4.6~5.0 cm/sec、岸寄りで1.8~2.0 cm/secの海岸に平行な定常流が起るように流量を調整した。

実験ケースは、構造物のない状態を現況とし、構造物の配置を色々変えて行なった。この場合、突堤は図-1の格子番号C, G, K, O, Sを通る縦線上に、離岸堤は番号6を通る横線上に設けた。

次に海水交換の状況を調べるために、500 ppmのウラン染料液を汀線の8点すなわち、格子番号D, F, H, J, L, N, P, Rを通る縦線と±0 cmの等深線の各交点に始めの15分間のみ投入した。その間の投入量は各点につき0.222 cm³/secであった。この場合の測定方法は、第22回海岸工学講演会論文集¹⁾で述べたものと同じでカラー撮影し、目視で濃度分布を画いた。

3. 実験結果

図-2は、定常流における現況および構造物の配置を変えた場合の染料投入開始より30分後の濃度分布の状態を比較したものである。図中の(a)は現況、(b)は突堤のみ、(c)は突堤中間に離岸堤、(d)は突堤先端に離岸堤を設けた場合である。

この図において、構造物を設けたケースが現況と比較して前浜で染料が停滞している。これは、突堤によって前浜の流れが遮断されるためである。

まず、現況の場合は染料は多少沖に広がった後、海岸

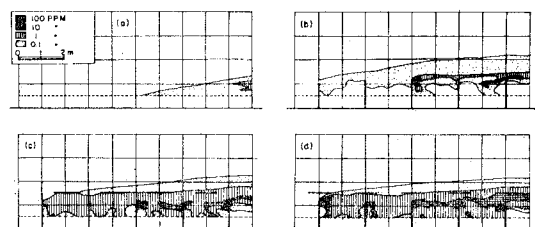


図-2 定常流における現況および構造物の配置を変えた場合の30分後の濃度分布の比較

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所
** 運輸省港湾技術研究所

にはほぼ平行に拡散し、右端 1 ppm の染料が残っている程度である。突堤のみの場合は、現況より染料は沖側に広がった後に流下拡散している。これは、前に述べたように突堤によって流れが遮断され、汀線に投入された染料は反流によって沖側に引き出されるためである。染料の拡散は現況と比較して極端に遅いわけではなく、右端の突堤先端付近に 10 ppm の染料がみられるが、さらに 60 分経過すると染料は図示の測定範囲からすべて流出したことを付記する。一方離岸堤を設けた場合については、離岸堤が突堤の間にあるケースが、突堤の先端にあるケースよりも染料の拡散流出が速い。その他離岸堤の配置を変えたケースを行なったが、離岸堤の長さが同じであれば、突堤の中間に設けた方が海水の交換は良化することを確認した。

4. 計算結果

(1) 数値モデルと境界条件

模型実験結果の一般性を高めるために、数値シミュレーションを行なうのであるが、まず初めに前述した実験と境界その他の条件が同じになるよう努力した。そこで数値モデルとしては、Leendertse による ADI 法で一部改良されたプログラム^{3),4)}を用いた。それにもとづき計算領域を示したのが図-3 である。なお、図中の右上方には流速計算上の座標を示す。

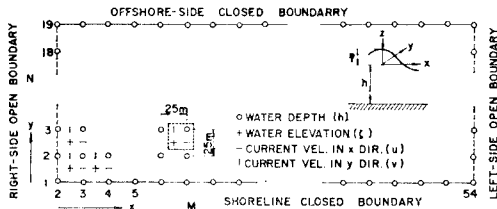


図-3 定常流数値シミュレーションの計算領域と座標系

図から明らかなように、数値シミュレーションの計算領域は、長方形 1 300 m × 450 m (現地換算) の範囲とした。格子間隔は $\Delta x, \Delta y$ とともに 25 m とし、 x 方向の格子点を $M=2$ から 54、 y 方向は $N=1$ から 19 とした。境界は $N=1$ および 19 の行を開境界とし、 $M=2$ および 54 の列を開境界とした。水深 h 、水位 η 、流速 u および v を計算する点は、お互いに格子間隔の半分すなわち、12.5 m に配置し、それらを一組とし同じ格子番号を与える。たとえば、図中の点線で囲まれたものには同じ格子番号 ($M=7, N=3$) を与える。この計算範囲は、図-1 に示した模型を 1/100 の縮尺と考えると、実験の主要範囲を含むことになる。

次に開境界に与えた定常流は、図-4 の (a) に示す。白丸が実験値、黒丸が数値シミュレーションに用いた値であり、縦軸には図-3 に示した水深点の格子番号 N

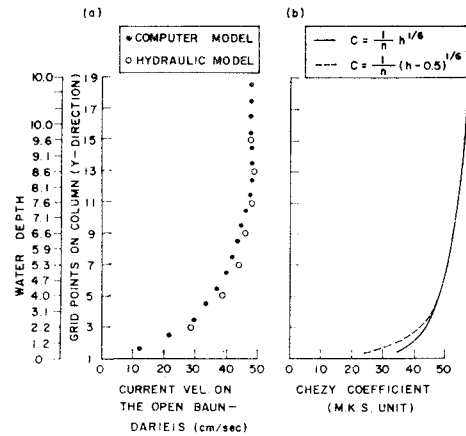


図-4 開境界における流速および Chezy の流速係数

値とその水深を示している。

次に流速計算の運動方程式中に表われる Chezy の係数は Manning の粗度係数 n によって次のように表われる。

$$C = 1/n \cdot h^{1/6} \quad (\text{M.K.S. 単位}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

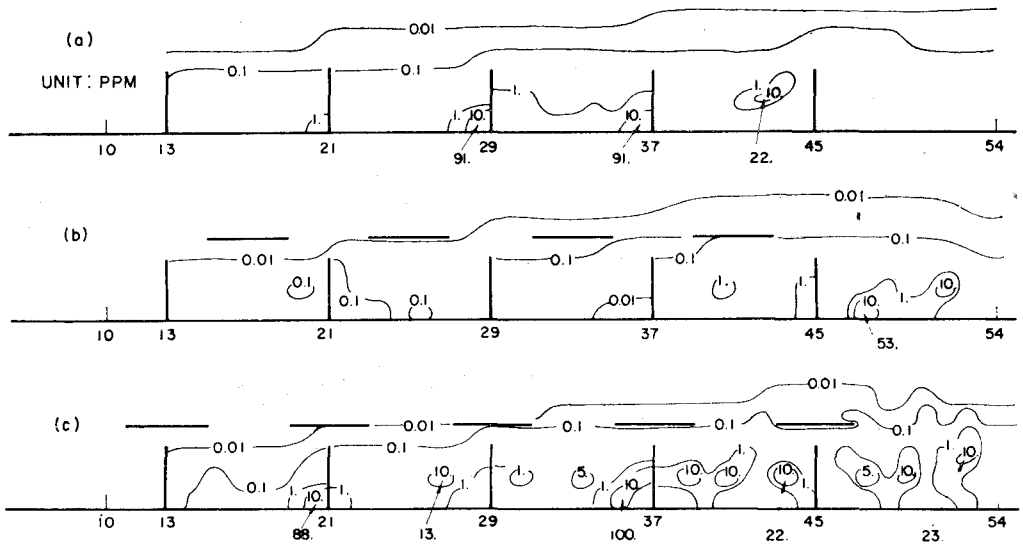
この n に 0.026 (M.K.S. 単位) を与え、前に述べた実験値を両側開境界に与えて計算したところ、計算領域の流れの上手側では沖から岸へ、また下手側では岸から沖へ向う流速成分が顕著に現われ、結果として汀線近くの流速が実験値より大きくなった。そこで、種々開境界の流速を変えてみたが同じようなことが起った。したがって、水深が浅い所では流速抵抗をより大きくする必要があることに気づいた。そこで汀線に近い部分で係数 C が十分小さくなるように C を次のように変更した。

$$C = 1/n \cdot (h - \alpha)^{1/6} \quad (\text{M.K.S. 単位}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

C は水深の $1/6$ 乗に比例するので、すべての水深 h から一定値 α を引くと水深の浅いほど C の値が小さい方向に顕著に変化する。 α については、2, 3 の値を用いて流速計算をし最終的に 0.5 m と決定した。図-4 の (b) は (1) 式で α を 0 および 0.5 m としたときの係数 C の比較である。汀線に近い所で両者の差が顕著に現われている。その結果、計算領域の各断面において図-4 の (a) とほぼ同様な流速分布となった。

次に流速計算におけるその他の入力条件としては、流速計算の時間ステップ $\Delta t/2$ は 6 sec、水平混合項の計算時間ステップは 300 sec、水平渦動粘性 AI は $0.06 \text{ cm}^2/\text{sec}$ とし、突堤や離岸堤の取扱いは線境界とした。ここで $\Delta t/2$ が 6 sec と通常の計算より小さくなっているのは、格子間隔が 25 m と小さいからであり、 AI も比較的大きな値にしているのも格子間隔が小さいためである。

拡散係数 K_x および K_y は、流速の関数である



図—5 定常流連続区間の場合の染料拡散シミュレーションの結果 (染料投入後 300 分)

Leendertse による次式を用いた⁴⁾。これは対象水域の流速 v が u に比べて非常に小さいため、 K_x と K_y を同じ値にとると実験値と比較して冲向きの拡散が大きくなるためである。

$$K_x = 5.93\sqrt{g|\bar{u}|h/c} \quad (\text{m}^2/\text{sec}) \quad (\text{M.K.S. 単位})$$

$$K_y = 5.93\sqrt{g|\bar{v}|h/c} \quad (\text{m}^2/\text{sec})$$

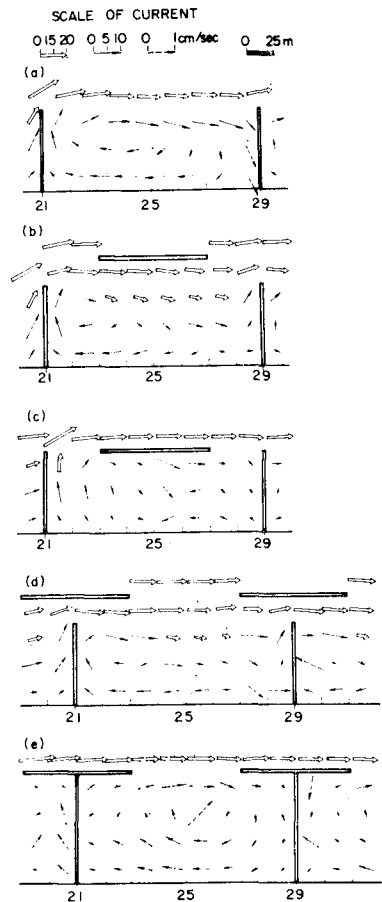
.....(3)

(2) 定常流の数値シミュレーション

図—5 は連続区間の場合の染料拡散シミュレーションの染料投入後 300 分の結果を示す。図で (a) は突堤のみ、(b) は突堤の間に離岸堤を設けた場合、(c) は突堤の先端に離岸堤がある場合であり、濃度のコンターで染料分布を示している。この場合、シミュレーションの 300 分は 図—2 に示した実験の 30 分に相当する。両者を比較するとシミュレーションの方が拡散がやや速い。これは、シミュレーションでは模型の表面流速を鉛直方向平均流速としたこと、および染料が投入と同時に格子内 ($25 \times 25 \text{ m}$) に均等に混合したことなどによる。しかし、全体として両者は類似した拡散パターンを示している。

図—5 から明らかなように、離岸堤を突堤の先端に設けた場合よりも、突堤の間に設けた場合の方が、堤内の汚染拡散がよいことは実験結果と同じである。しかし、突堤の間に離岸堤を設けると、突堤のみの場合よりも拡散がよくなることは実験結果とは異なる。これは、実験においては染料が投入と同時に水底をはったため、その地点の流速の大小が全体の拡散パターンに大きい影響を与えた。突堤のみ場合は次に示す 図—6 からわかるように、汀線の近くの流速が中間に離岸堤がある場合より速い。したがって、実験では前者が後者より染料の拡散がよかったものと思われる。一方数値シミュレーションでは染料が深さ方向に均等に混合されるという条件で

行なっているので汀線近くでの流速が小さいことが、さほど影響しなかったのであろう。しかし、いずれにしても非常に流速が小さいときは、実験のような結果になる



図—6 定常流単区間の場合の流速シミュレーション

ことは十分考えられる。なお、本文で示していないが、波（波高 5 m/m, 周期 0.8 sec）を加えた場合には、中間離岸堤がある場合が突堤のみの場合より染料拡散がよかった。これは、砕波によって染料が流れの中に混り合ったため数値シミュレーションと同じ状態になったのであろう。

図-6 は単区間の場合の流速シミュレーションの結果を示す。ここで海岸線に示す 21, 25, 29 は図-3 の M 列に相当し、図中の (a) (b) および (d) は図-5 の (a) (b) および (c) の構造物配置に対応する。

図から明らかなように、(a) と (d) は下手側の突堤の根本近くで流速が弱く、流向が突堤の基部に向っている。これが図-5 でみられるその部分に染料の高濃度が現われる原因である。しかし、(b) の場合は平行流のすぐ内側にほぼ 15 cm/sec の強い流れが (a) と (d) の場合より幅広く入り込んでおり、かつ突堤に沿う沖向きの流速成分が大きい。これらの点が海水交換を促進させ、汚染拡散を良好化させる原因と思われる。また、(c) および (e) のように離岸堤を突堤先端を結ぶ線上に設けた場合は、堤内の流速は弱く、(a) (b) および (d) に比べ染料の堤外への拡散がよくないことが推定される。

(3) 非定常流の数値シミュレーション

計算領域としては、計算時間を節約するために図-3 に示す N 行と M 列の内、 $N=1$ で $M=2$ から 37 までを汀線の閉境界、 $M=2$ および 37 で $N=1$ から 12 を潮流が流出入する開境界とした。そして両端開境界における流速 U_N を次のように与えた。

$$U_N = \alpha_N \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (\text{M.K.S. 単位}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで (4) 式中の α_N は $N=2, 3, 4, \dots, 12$ に対してそれぞれ 0.12, 0.22, 0.30, ..., 0.475 m/sec でそれらの中間の N に対しては直線的に変化する。すなわち、振幅 α_N は定常流シミュレーションの場合の開境界の流速、すなわち図-4 の (a) に示した $N=12$ までの値と同じである。

なお、水位を潮汐にしたがって変化させるため、沖側開境界 ($N=12$ で $M=2$ から 37 まで) から弱い流れを流出させることにした。そこで、沖側開境界の長さ l , その境界における干潮面からの水深を h , 計算区域内の水面積を S , 潮汐の振幅を η とすれば、干潮から満潮までの間に流入する水量 $2\eta S$ は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} 2\eta S &= \int_0^{T/2} l \left\{ h + \eta + \eta \sin \left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{\pi}{2} \right) \right\} v_0 \sin \frac{2\pi}{T} t dt \\ &= v_0 (h + \eta) \left[\frac{T}{\pi} \right] l \end{aligned}$$

したがって流速振幅 v_0 は

$$v_0 = \frac{2\eta S T}{\pi (h + \eta) l} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。(5) 式で $2\eta = 1.4$ m とすると $v_0 = 0.003352$ m/

sec が得られ沖側境界の各格子における流速 v を次のように与えた。

$$v = 0.003352 \sin \left(\frac{2\pi}{T} t - \pi \right) \quad (\text{M.K.S. 単位}) \quad \dots\dots (6)$$

ここで (6) 式が (4) 式より 180° だけ位相を遅らせてあるのは、汀線に平行方向の流れが正の向きのとき沖側開境界から海水を流入させ、満ち潮時に相当するようにしたためである。

次に水平混合項は、前述の定常流の計算と同様な条件で計算したところ発散してしまった。そこで計算時間ステップを 150 sec, 水平渦動粘性項 $0.03 \text{ cm}^2/\text{sec}$ とした。計算は干潮面から開始して 3 潮汐まで行ない、最後の 3 潮汐目の 1 潮汐分の流速、水位の変化を繰り返し用いて拡散計算を行なった。

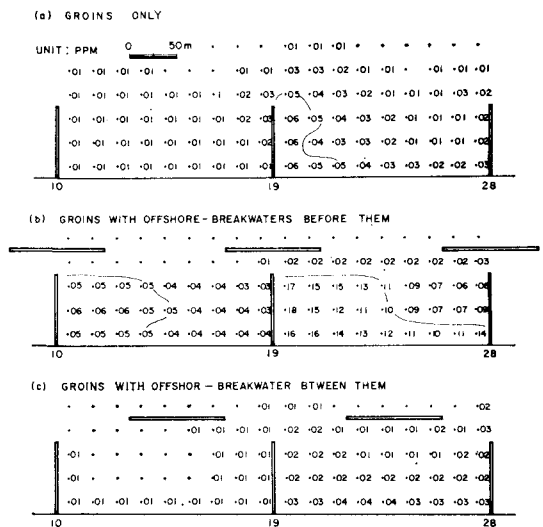


図-7 非定常流 1 潮汐半後の染料分布の比較

図-7 は、非定常流の 1 潮汐半後の染料分布の比較を示す。染料投入は $M=11$ から 28 までの汀線に最も近い各水位点で、各々 0.277 g/sec の割合で 1 潮汐間投入した。この場合は左から右へ流れる上げ潮流の影響が強く現われ、(a) の突堤の場合の右側区間、(b) の突堤の先端に離岸堤を設けた場合などで右側突堤寄りで濃度が高くなっている。しかし、定常流の場合のように、突堤の基部近くに極端な高濃度部分が残るということはない。各ケースの比較では、離岸堤が突堤先端にある (b) が最も濃度が高く、それが突堤中間にある (c) が最も濃度が小さく、突堤のみの (a) よりもさらに濃度が小さい。なお、図で黒丸印のみの部分は濃度が 0.01 ppm 未満である。

5. ま と め

直線平行等深線の海浜に突堤や離岸堤を設けた場合についての堤内の汚染の堤外への拡散について実験では定

常流, 数値シミュレーションでは定常流および潮汐の干満に伴う潮流変化を加味した非定常流の場合について行なった。その結果次のようなことが明らかになった。

- (1) 自然海岸に突堤を設けると, 汚染の堤外への拡散を阻害する。しかし, 堤内には堤外を流れる潮流の一部が流入あるいは廻流するので極端な汚染の停滞は起らない。
- (2) 離岸堤を設ける場合, 突堤の先端を結ぶ線より少し沖側に設けた方が, 堤内の汚染拡散の観点からはよい。その方が堤外の海水がより多くの堤内へ流れ込むからである。
- (3) 離岸堤は突堤前面に設けるよりも, 突堤間に設けた場合の方が汚染拡散上からはよい。
- (4) 突堤間に離岸堤を設けると, 潮流が非常に小さい場合を除いて汚染拡散は一般にはよくなる。しかし両者の差は大きくない。

以上, レクリエーション海浜の海水交換や海水汚濁に対する突堤や離岸堤の特性について述べた。

終りに, 本研究の遂行に当って海洋水理部加藤水理研究室長から御助言を戴くと共に, 数値シミュレーションに当っては, 海洋水理部堀江海水浄化研究室長, 海水汚染水理研究室村上, 亀山両技官から多くの貴重な助言と協力を得た。これらの諸氏に厚く感謝いたします。

参考文献

- 1) 佐藤昭二・加藤 始・木村久雄: レクリエーション海浜における突堤・離岸堤の海水汚濁に関する実験的研究, 第22回海岸工学講演会論文集, 1975年11月
- 2) 佐藤昭二・木村久雄・高松恭文: レクリエーション海浜における突堤・離岸堤の汚濁拡散に対する影響, 港湾技術研究所報告, Vol. 16, No. 2, 1977年6月
- 3) 金子安雄・堀江 毅・村上和男: ADI法による潮流と汚染拡散の数値計算——大阪湾に適用した場合——, 港湾技術研究所報告, Vol. 14, No. 1, 1975年3月
- 4) 堀江 毅・金子安雄・村上和男・細川恭文・亀山豊: 潮流計算における境界の取扱い, 港湾技術研究所報告, Vol. 15, No. 2, 1976年6月