

離岸堤周辺の海浜地形変化と沿岸漂砂量の岸沖分布について

橋 本 宏*・宇 多 高 明**・竹 淵 勉***

1. ま え が き

近年、河川流出土砂量の減少や大規模な海岸構造物の建設などの影響によって、海岸侵食を受けている箇所が全国的に増加しているが、通常これらの対策工法としては離岸堤や突堤などが用いられている。

これらの構造物の建設に際しては、その機能性の検討と、周辺海岸へ及ぼす影響予測が行われる必要があるが、現段階では三次元的な地形変化を定量的に予測する方法は存在せず、このため三次元的な地形変化を予測可能なモデルの開発が望まれている。

この種の問題に関して、著者らは海浜地形変化の特性を経験的に論ずるために、経験的な海浜変形モデルを提案した¹⁾。また移動床実験への適用を図るとともに、汀線変化モデルと合体させることにより、限定的な条件のもとではあるが三次元的な地形変化の予測が可能な場合があることを明らかにした²⁾。

しかしながらこの方法を一般化するためには、モデルが経験的なものであるために、海浜形状や波浪条件を変えた場合について検討することが必要であった。本論文の一つの目的は、当モデルを離岸堤模型実験に適用することによって構造物周辺の地形変化を解析し、波浪および地形条件が変化したときの固有関数の特性の変化を明らかにすることにある。また第二の目的は、生じた地形変化より、沿岸漂砂量の岸沖分布を算出し、これと捕砂器による測定値との比較検討を行い、漂砂量の岸沖分布形について議論することにある。

2. 実験方法

実験は図-1に示すように幅 25.6m、長さ 22m の移動床平面模型海浜を用いて行った。海浜は中央粒径が 0.17mm の砂を用いて初期海底勾配が 1/10 となるよう整形した。離岸堤は不透透構造とし、図-1 のように水槽左端に設置し、また右端には捕砂装置を設けた。この装置は長さ 1m、高さ 0.1m、幅 0.25 または 0.5m の

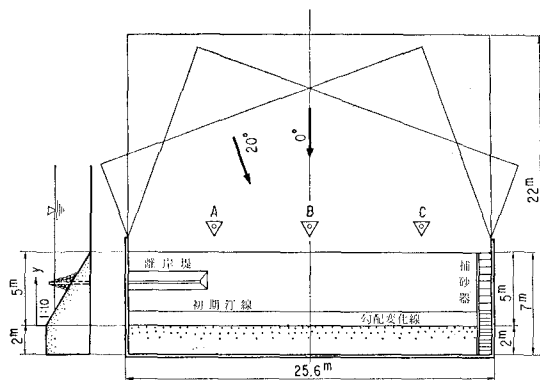


図-1 実験装置

箱を並べたものであり、上部は穴あき板で覆ってある。実験は海浜に波を 20 時間作用させ、その間の地形変化や波高分布などを測定した。入射波高は図-1の A, B, C 3 点で測定した。また碎波波高は波の作用後 10, 20 時間後において物差しによって測定した。地形変化については、10 時間おきに海浜形状を沿岸方向に 0.5m、岸沖方向に 0.1m 間隔で測定した。また捕砂量は、1 時間おきに捕砂器に入った砂の量を測定した。

実験は平坦部水深を 40cm に保ち、波高、周期、波向を変えて表-1に示す条件で 3 ケース行った。

表-1 実験条件

ケース	入射角(°)	入射波高(cm)	周期(秒)
①	0	4.0	1.6
②	0	8.0	1.15
③	20	4.0	1.6

3. 海浜地形変化の解析

3.1 直角入射の場合

ケース①と②は共に直角入射の条件であり、波浪条件のみが異っていたが、生じた地形変化はほぼ同一の特性を有していた。このためケース①について特に詳しく議論することにする。まず図-2は初期地形に波を作用させたときの地形変化を示している。図中左端の離岸堤背後部では局所的に汀線は前進しているが、その他の

* 正会員 建設省土木研究所海岸研究室長
 ** 正会員 工務 建設省土木研究所海岸研究室主任研究員
 *** 正会員 建設省土木研究所海岸研究室

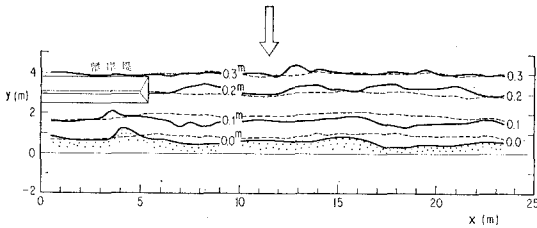


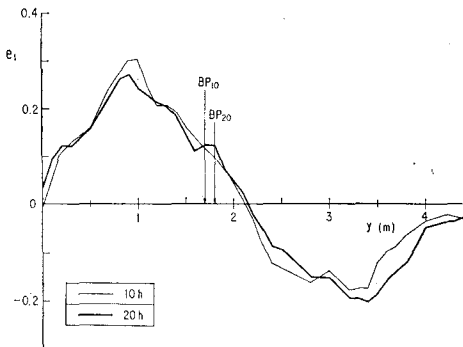
図-2 地形変化(直角入射, ケース ①)

部分では汀線付近が侵食され、侵食された土砂は沖合に堆積している。この種の変化は、堀川・砂村ら³⁾の分類のⅠ型の変化である。

固有値解析は、10, 20時間後の形状により初期形状を差し引いたデータ(Δh)を用いて行い、沿岸方向距離 x 、岸沖方向距離 y 、時刻 t_0 の関数として Δh を次のように展開した。

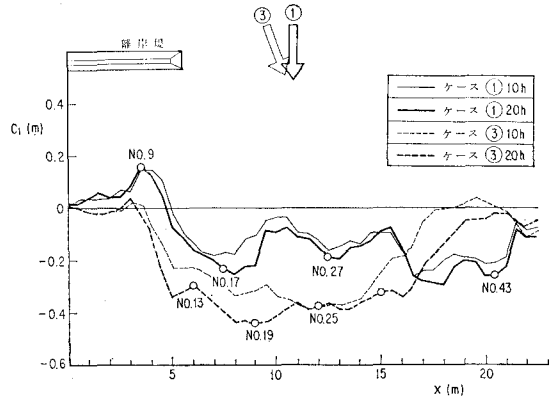
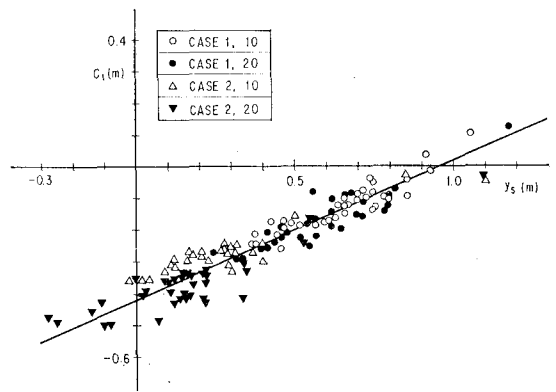
$$\Delta h(x, y, t_0) = \sum_{k=1}^n c_k(x, t_0) \cdot e_k(y, t_0) \dots\dots\dots (1)$$

計算結果によると、第1位の固有関数の全変動量に占める割合は10時間で72%、20時間で76%であり、第2位以下のものより卓越しており、地形変化はほぼ1組の関数によって表示されることがわかった。図-3は固

図-3 固有関数 e_1 の分布形(ケース ①)

有関数 e_1 の分布形を示している。ただし原点($y=0$)は図-1に示したように壁面より2m離れた勾配変化線上にあり、したがって初期汀線は $y=1$ mに位置する。10, 20時間の形状はほぼ一致しており、関数 e_1 は測定時刻にそれほど依存しない形状となっている。また図には10, 20時間後における砕波点位置がBPで示されているが、関数 e_1 が正より負へ符号が変化する位置は砕波点よりわずかに沖合に位置していることがわかる。

図-4は沿岸方向の変化関数 c_1 の分布を示している。 c_1 は10, 20時間で比較すると全体的に絶対値が増大しており、また離岸堤の背後部を除き負値を有する。関数 e_1 は初期汀線付近で正、ほぼ砕波点より沖合で負という特性を有するために、 e_1 と c_1 の積として考えたとき、離岸堤の背後部を除いたほぼ全域で陸側が侵食され、沖合に堆積するという岸沖漂砂が生じたことがわかる。

図-4 関数 c_1 の沿岸方向分布図-5 関数 c_1 と汀線距離 y_B の相関(ケース ①, ②)

岸沖方向の地形変化の大きさを表わす関数 c_1 については何らかの物理量との相関関係が見出されると考えられたので、汀線位置の基準点からの距離(汀線距離)との相関を調べた。この結果が図-5である。図-5にはケース①と②の結果がまとめて示されているが、 c_1 と汀線距離 y_B との間には次式が成立する。

$$c_1 = 0.43y_B - 0.42 \dots\dots\dots (2)$$

なお、ケース②の固有関数の形状についてはここでは割愛したが、その概形は次のようであった。すなわち岸沖漂砂であるという特徴は変化しないが、波形勾配が約4倍となったために砕波点が沖へ移動し、また固有関数の岸沖方向の長さのスケールが増加した。

図-4によれば、関数 c_1 は沿岸方向に周期的変化特性を有する。ケース①の場合の地形変化は岸沖方向の土砂移動によって特徴付けられるが、このような岸沖漂砂は底質粒径、海底勾配、周期が一定の場合には波高が高いほど大きいと考えられる³⁾。したがって関数 c_1 または汀線距離の沿岸方向変化の原因は、波高の沿岸方向変化に起因するのではないかと考えられた。このため砕波波高と汀線距離の関係を図-6のように整理した。図にはケース②の場合も同時に示されているが、両者の間には次式が成立することがわかる。

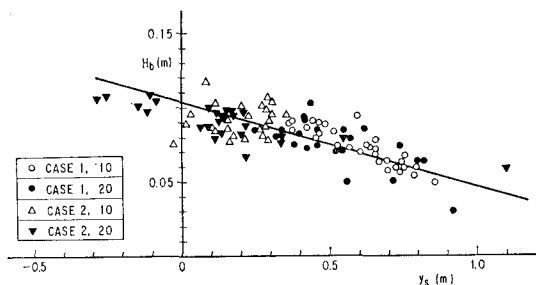


図-6 汀線距離と碎波波高の相関

$$H_b = 0.10 - 0.057y_s \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(2), (3)は地形変化が生じた状態においては, 碎波波高と汀線距離, および地形変化量の大きさを示す関数 c_1 が相互に関連していることを示している. このような波高分布が生じた理由としては, エッジ波や海底地形変化の影響などが考えられるが, 波の位相関係などが不明のためここでは詳しい検討は行うことができなかった.

以上の議論は初期値と10, 20時間後のデータを用いたものであり, 時間的変化過程は明らかではない. このため汀線距離についてその経時変化を調べることにし, 図-4に丸印で示される代表地点の変化を図示することにした. ただしその変化を基準化して論ずるために20時間後の汀線距離をほぼ平衡状態にあると仮定して, 式(4)により無次元汀線距離 y_s^* を求めた.

$$y_s^* = \frac{y_s - (y_s)_0}{(y_s)_{20} - (y_s)_0} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに $(y_s)_0$ は初期値, $(y_s)_{20}$ は20時間後の汀線距離である. 図-7は y_s^* の経時変化を示している. ただし

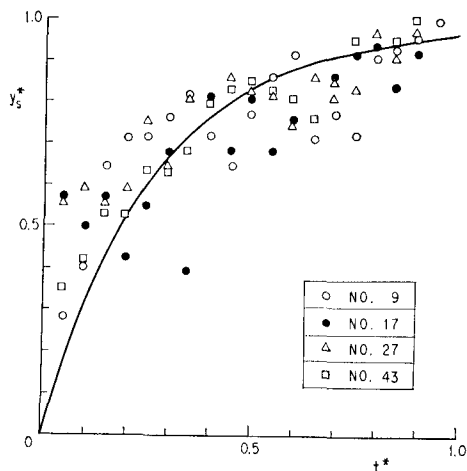


図-7 無次元汀線距離の経時変化(ケース①)

図の横軸は測定時刻(t)を20時間で割った値である. 各地点の汀線変化は, 図中実線で示されるようにほぼ式(5)で表わされる.

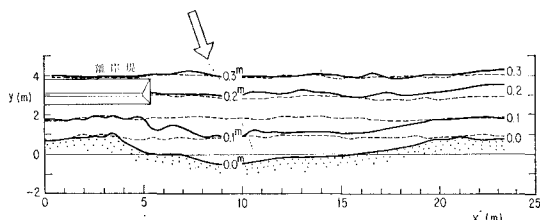
$$y_s^* = 1.0 - e^{-3.5t^*} \quad \dots\dots\dots (5)$$

関数 c_1 と汀線距離 y_s の間には測定時刻にそれほど依

存することなしに式(2)の関係が成立したが, 式(5)によると汀線距離は10時間($t^*=0.5$)では最終形状に至る変化の約80%が生じている. このことは式(2)の y_s の時間的変化量は全変化量の約20%のみであったことを示している. したがって $t^* < 0.5$ の任意の時刻においても式(2)が成立するかどうかは基本的問題として残されているが, 仮りに式(2)が $t^* < 0.5$ の任意の時刻が成立するとすれば, ケース①の地形変化は関数 e_1 と式(2), (3), (5)によって時空間分布がほぼ定まることになる.

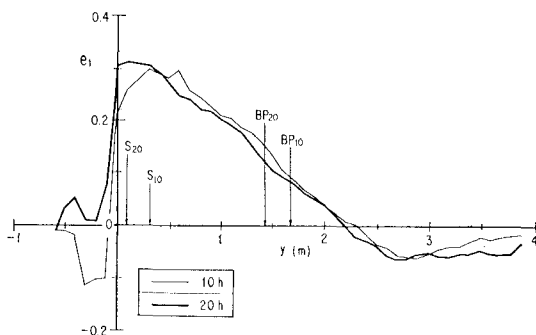
3.2 入射角 20° の場合

沿岸漂砂が卓越する場合について検討する. 図-8は,

図-8 地形変化(入射角 20° , ケース③)

初期海浜に矢印の方向より波を作用させたときの20時間後の地形を示している. 離岸堤の背後部を除いた広い領域で侵食が起きている. また, 侵食された土砂は漂砂の下手側に配置された捕砂器によって水槽外へ出されている.

固有値解析はケース①と同様な方法で行ったが, この場合第1位のは全変動の約77%を占めていた. 図-9は固有関数 e_1 の分布形を示している. 図中の $BP_{10,20}$

図-9 固有関数 e_1 の分布形(ケース③)

は各々10, 20時間後の平均碎波点である. また最初 $y=1$ mの位置にあった汀線は時間とともに移動するが, このときの平均汀線位置は式(6)で与えられる.

$$|\bar{y}_s - y_{s0}| \cdot (\bar{y}_s - y_{s0}) = \frac{1}{n_x} \sum_{i=1}^{n_x} |y_{si} - y_{s0}| \cdot (y_{si} - y_{s0}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに, y_{s0} は $t=0$ における汀線位置の沿岸方向平均値, n_x は沿岸方向の測定点数である, S_{10} , S_{20} は式(6)によって求められた平均汀線位置を示している. 関数 e_1 は各時刻の平均汀線付近で正の極値を持ち, 岸向きには

急速に減少するが、沖向きには緩やかに減少し、砕波点より約 0.5 m 沖合でほぼ 0 となっている。

沿岸方向の変化を示す関数 c_1 については、ケース①の関数 c_1 の沿岸方向分布と同一の図(図-4)に示す通りであるが、これは図-8に示した汀線変化と良い対応を示す。両者の間には式(7)が成立する。

$$c_1 = 0.36y_s - 0.31 \quad \dots\dots\dots(7)$$

関数 e_1 は汀線付近で正の極値を有し、砕波点の沖合でほぼ 0 となること、および関数 e_1 と汀線距離 y_s の相関関係より、この関数は沿岸漂砂による地形変化に対応するものと考えられる。

一方、汀線の時間的変化については、図-4に示された代表4地点の変化を式(4)によって無次元化して図示すると図-10が得られた。図中の実線は次式の関係を

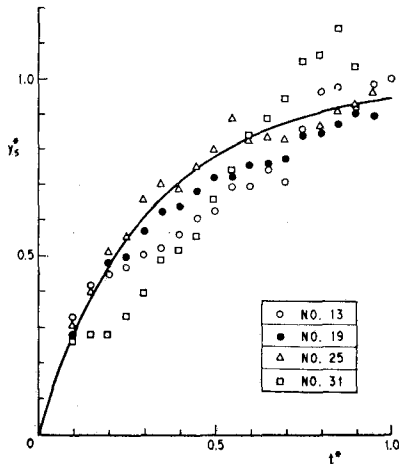


図-10 無次元汀線距離の経時変化(ケース③)

$$y_s^* = 1.0 - e^{-3.0t^*} \quad \dots\dots\dots(8)$$

図-10の変化は図-7とほぼ同様な変化であるが、海浜のほぼ中央部に位置する No. 19, 25 と端に近い No. 13, 31 では変化形状がわずかに異っており、No. 13, 31 では他の点と比較して位相遅れが存在している。このことはまず中央部で侵食が起り、それが次第に両端へ伝わって行ったことを意味しよう。しかしながら、この原因についてはここでは明らかにすることはできなかった。

以上の結果は、測定値をそのまま (x, y) 座標系で展開して得られたものであるが、計算の精度を向上させるためには汀線上に原点を定めた座標系で展開することが望ましい。このため岸沖距離の代りに、各時刻における汀線位置からの距離 y^* を用い、新しい座標系 (x, y^*) で展開を行った。この結果、第1位の固有関数の全変動に占める割合は平均 86% となり、相当良好に改善されたことがわかった。得られた固有関数 e_1^* は図-9の関数 e_1 と比較すると図に示された各時刻の平均汀線位置に関数

e_1^* の原点を重ねたとき、その分布形はほぼ重なり合うものであった。また沿岸方向の変化を示す c_1^* は関数 c_1 とほぼ同一の分布形となり、したがって c_1^* と汀線距離の間には次式が成立した。

$$c_1^* = 0.40y_s - 0.33 \quad \dots\dots\dots(9)$$

以上のように、ケース③では汀線上に座標を定めた移動座標系での解析が有利であることがわかる。

4. 沿岸漂砂量の岸沖分布の比較検討

まず最初に実験値について明らかにしておく。ただし測定はいくつかのケースで行ったが、それらのうちケース③の結果を明らかにしよう。漂砂量 q は岸沖距離 y と時刻 t の関数として与えられるので、その特性を明らかにするため次の方法で整理を行った。まず各測定時刻において断面内の最大漂砂量 $q_{\max}(t)$ の値とその位置を求めた。次いでこの最大漂砂量の時間的変化を調べるために、この漂砂量を $t=0$ における値 $q_{\max}(0)$ で次のように無次元化した。

$$q_{\max}^* = q_{\max}(t)/q_{\max}(0) \quad \dots\dots\dots(10)$$

また時刻 t は全測定時刻 20 時間で割って無次元時刻 t^* に変換した。図-11は $q_{\max}^*$ の時間的変化を示している。 $q_{\max}^*$ は図中の $k=2$ で示された次式によってほぼ表わされよう。

$$q_{\max}^* = e^{-2.0t^*} \quad \dots\dots\dots(11)$$

式(11)は最大漂砂量が時間的には指数関数的に減少することを示している。

一方、岸沖方向の分布形については、各断面内の測定値を各時刻の最大漂砂量 $q_{\max}(t)$ を用いて無次元化し、その分布 $q'(y)$ を図-12に示した。図には実験開始後 1, 5, 10, 15, 20 時間後の分布形と、それらの平均値(実線)が示されている。汀線はこの位置では時間的に変化せず、常に図中Sで示された位置にあり、また砕波点はBPで示されている。この図によると、無次元漂砂量の

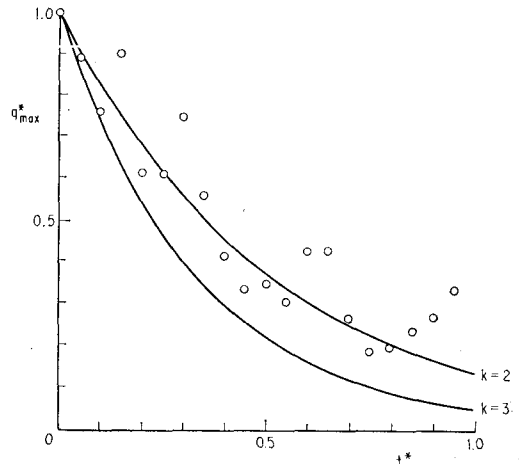


図-11 無次元断面最大漂砂量の経時変化

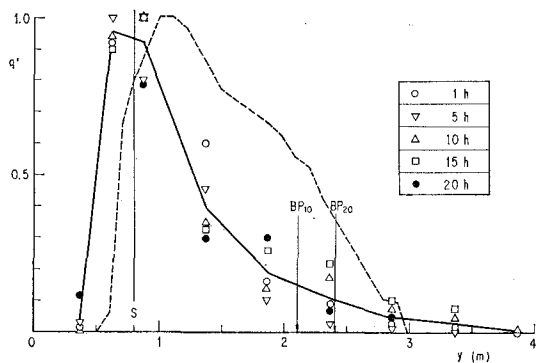


図-12 無次元化された沿岸漂砂量の岸沖分布

極大値の生ずる位置はほぼ汀線付近であり、また分布形は時刻にそれほど依存しないものとなっている。

以上、測定値が明らかとなったので、次に地形変化より漂砂量分布を求めよう。まず、海底高 h は沿岸方向距離 x 、汀線位置からの岸沖距離 y^* 、時刻 t_0 の関数として与えられるが、前節の議論により近似的に式(12)のようにおくことができよう。ただし関数 e_1^* はほぼ時刻に独立と仮定し、また $h_0(x)$ は初期形状とする。

$$h(x, y^*, t_0) = h_0(x) + e_1^*(y^*) \cdot c_1^*(x, t_0) \quad \dots\dots(12)$$

ここに、 t_0 は特定の時刻であるが、 c_1^* は汀線距離と同様に時間とともに連続的に変化しうる性質を有するため、一般性を損なうことなしに t_0 は t におき換えられよう。また y^* は汀線位置からの岸沖距離であるために、

$$y^* = y - y_s(x, t) \quad \dots\dots(13)$$

とおける。

漂砂量の連続式は、 y 方向の漂砂量が x 方向のものに比較して小さいと仮定すれば、

$$\frac{\partial q}{\partial x} = -(1-\lambda) \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots\dots(14)$$

となる。ここに q は x 方向の漂砂量、 λ は空隙率である。ただし(14)式が成立するためには、岸沖漂砂量が沿岸漂砂量に比較して小さく、また沿岸漂砂量の y 方向成分が小さいと仮定されなければならない。これらの仮定のもとでは x 方向の漂砂量 q はほぼ沿岸漂砂量に等しくなる。

式(12)、(13)を式(14)へ代入すると、式(15)となる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial x} = & -(1-\lambda) e_1^*(y^*) \frac{\partial c_1^*}{\partial t} \\ & + (1-\lambda) \frac{d e_1^*}{d y^*} \cdot \frac{\partial y_s}{\partial t} \cdot c_1^*(x, t) \quad \dots\dots(15) \end{aligned}$$

汀線距離 y_s については、 $t=0$ において $y_{s,0}$ 、 $t \rightarrow \infty$ では $y_{s,\infty}$ となるとすれば式(4)、(8)の関係より、

$$y_s(x, t) = y_{s,\infty}(x) + \{y_{s,0}(x) - y_{s,\infty}(x)\} e^{-0.15t} \quad \dots\dots(16)$$

とおくことができる。式(16)を式(9)へ代入し、 $y_{s,0}$ が初期値であることを考慮すると、

$$c_1^*(x, t) = 0.40 \{y_{s,0}(x) - y_{s,\infty}(x)\} (e^{-0.15t} - 1) \quad \dots\dots(17)$$

が得られる。最後に式(16)、(17)を式(15)へ代入し、 x について積分すると、 q が求まる。

$$\begin{aligned} q(x, y^*, t) = & 0.06(1-\lambda) e_1^*(y^*) e^{-3t} \int_0^x \{y_{s,0}(\xi) \\ & - y_{s,\infty}(\xi)\} d\xi + 0.06(1-\lambda) \frac{d e_1^*}{d y^*} \\ & \times e^{-3t} (1 - e^{-3t}) \int_0^x \{y_{s,0}(\xi) - y_{s,\infty}(\xi)\}^2 d\xi \quad \dots\dots(18) \end{aligned}$$

式(18)は、 t が十分小さいときは第1項のみで表わされる。また t が十分大きいときは q は 0 となる。いま時刻が小さいとしてその分布形を測定値と比較してみる。まず時間の変化に関して式(18)は指数型の変化となっており、その減衰は e^{-3t} で表わされる。一方測定値は e^{-2t} であり減衰の割合が小さく、各時刻の漂砂量がより大きい値となることがわかる。

一方、岸沖分布形については、時刻 t が小さい場合は式(18)の第1項のみで表わされ、その岸沖分布は $e_1^*(y^*)$ と相似形となるために $e_1^*(y^*)$ の最大値を用いて $e_1^*(y^*)$ を無次元化し、図-12に破線で示した。ただし e_1^* が負となる部分は誤差と考慮して省略した。計算による漂砂量分布は、測定値よりも沖合に約0.2mずれており、また沖合での値が測定値よりも相当大きい値となっている。これらの相違については明確な結論を出すことはできないが、計算に使用した汀線が静水時汀線であって、砕波に伴う wave set-up によって汀線が陸側へ進んだことが計算で考慮されていない点や、捕砂器の機能性などが問題点と考えられよう。

ま と め

本報では経験的海浜変形モデルを用いて離岸堤周辺の海浜地形変化を解析し、岸沖漂砂が卓越する場合固有関数、汀線距離、砕波波高の間には比較的良好な相関関係が見出されることを明らかにした。また沿岸漂砂量が卓越する場合については、地形変化より漂砂量分布を算出し、これと測定値の比較を行ったが、これによるとこの実験では沿岸漂砂量は汀線近傍で極大値を有することが明らかになった。

参 考 文 献

- 1) 橋本 宏・宇多高明：経験的海浜変形モデルの小川原湖海岸への適用，第26回海岸工学講演会論文集，pp. 215～219，1979。
- 2) 橋本 宏・宇多高明・竹淵 勉：経験的海浜変形モデルによる構造物周辺の地形変化予測，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 300～304，1981。
- 3) 堀川清司・砂村縫夫・鬼頭平三：波による海浜変形に関する一考察，第20回海岸工学講演会論文集，pp. 357～364，1975。