

海浜変形と海岸構造物

野田 英明

1. はじめに

海岸構造物は種々の目的で建設される。とくに、漂砂の制御あるいは海岸侵食対策を直接の目的としない構造物の設計にあたっては耐波力および主目的とする機能が十分発揮されるように考慮されるのが普通である。ところが、こうした構造物の築造は周辺海岸に予期せぬ変化をもたらすことがしばしばある。したがって、漂砂の制御を目的としない構造物であっても、漂砂の問題を無視して取り扱うことは危険な場合が多い。ただ、漂砂の問題は海岸工学のなかでも取り扱いの最もやつかいなるものであって、その手法も確立されているとはいいがたい。そこで、ここでは、構造物と海浜変形の問題を取り上げ、従来の研究成果を紹介しつつ、できるだけ体系化したいと考えている。

一般に漂砂の問題を取り扱う場合、漂砂の移動方向から分類して岸・沖向き漂砂と沿岸漂砂になる。ここでも、従来のこの分類にしたがい、岸・沖向き漂砂が主体の場合と、沿岸漂砂が主体の場合に分けて検討する。

2. 海岸構造物による海浜変形

2.1 岸沖向き漂砂による海浜変形

海岸構造物は種々の目的で築造される。そのなかで、海岸護岸あるいは海岸堤防は海岸侵食対策として用いられることが多い。これら海岸堤防の設計にあたっては通常波の作用に注目する。構造物の設置位置や天端高も含めた断面形状は波のうちあげ高さや越波量、波力が判断の基準として採用されている。

ところが、近年、既設の海岸堤防について調査した結果、その前面にわずかに残っていた砂浜が急速に侵食されるとともに前面の海浜が洗掘され、海岸堤防自体が崩壊するという事例が数多く報告されるようになってきた。図-2.1は豊島¹⁾によって報告された被災例の一つである。図中の破線で示される海浜で、汀線から50mほど陸側の浜崖の前面に堤体の70%以上を埋設し、さらにAのように異形ブロック根固工も砂面下にまったく埋め殺して施工された海岸堤防が、竣工後3か月目に来襲した風浪によって施工延長のほぼ半分が崩壊し、実線で示す海浜形状となり、異形ブロックの根固工もA'のようになって、その効果を発揮しなかった。前浜の洗掘量も直高4mにも及んだと報告されている。

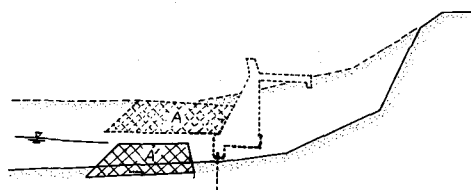


図-2.1 海岸護岸の被災例（豊島による）

図-2.2は海岸堤防あるいは護岸がある特定の場所のみを保護するために築造された場合の汀線の変化を模式的に示したものである。高波浪時、海岸堤防の前面には沿岸砂州を形成しようとする営力が働く。もし、

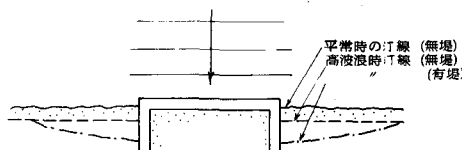


図-2.2 護岸による侵食の模式図

海岸堤防がなければ砂州の砂は岸から供給され汀線が後退することになる。ところが海岸堤防があれば前面がより深く洗掘され、その漂砂によって沿岸砂州が形成されるようになる。一方沿岸漂砂があれば海岸堤防に隣接する砂浜から漂砂が供給され、図に示すように隣接の砂浜が海岸堤防のない場合より多く後退することになる。

こうした海浜変形過程を示すと図-2.3 のようになる。すなわち、通常の波および小暴風によって侵食傾向にある海浜に、海岸侵食対策として海岸堤防を築造すると、竣工後の高波浪によって大きく侵食され、従来の長期の侵食傾向をより助長することになる。したがって、海岸堤防や護岸の計画・設計にあたっては、波の問題のみでなく、海浜変形についても十分な考慮をしなければならないことになる。現在、海岸堤防の設計にあたって海浜変形を考慮した設計法が確立されているとはいいがたい。そこで、ここでは従来の実験結果を中心に海岸堤防（含む護岸）の前面における洗掘の問題を取り上げ、現象面から説明を試みる。

海岸堤防前面の洗掘については、樫木・川崎²⁾(1960)、佐藤・田中・入江³⁾(1966)、細井⁴⁾(1967)、樫木⁵⁾(1967)、Herbich⁶⁾(1968)、細井ら⁷⁾(1968)、樫木⁸⁾(1971)、野田⁹⁾(1972)、沼田¹⁰⁾(1973)、樫木ら¹¹⁾(1974)、および服部ら¹²⁾(1976)の研究がある。これらの研究は主として、図-2.4(a)に示すように、まず最初無堤の状態で平衡海浜断面形状を作り、その後、鉛直堤を設置して、海岸堤防前面における洗掘深 Δh を実験的に求めようとするものである。同図(b)は直立堤設置後、一定条件の波を作用させたときの洗掘深の時間的変化を模式的に示したものであつて、ここで、 Δh_m

は最大洗掘深さ、 Δh_f は海底地形がこれ以降変化しなくなるという最終洗掘深さを表わしている。洗掘深 Δh の時間的変化は、波の条件、底質の特性および直立堤の設置位置によりことなり、佐藤ら³⁾はこれをつぎの4つの形式に分類している。

- I 急激に掘れた後、埋まる。
- II 急激に掘れた後、そのままの状態が続く。
- III 急激に掘れた後、徐々に掘れる。
- IV 初めから徐々に掘れる。

以上の4形式からIは $\Delta h_m > \Delta h_f$ であるが、II、IIIおよびIVは $\Delta h_m = \Delta h_f$ であることがわかる。

さて、最大洗掘深 Δh_m に関する従来の実験結果を一括して示すと、図-2.5、図-2.6、図-2.7 および図-2.8 のようになる。これらの図は縦軸に最大洗掘深と沖波波高の比 $\Delta h_m/H_0$ 、横軸に無堤時汀線から堤防設置位置までの距離 X と碎波点までの距離 X_b の比をとり、 H_0/L_0 および H_0/d をパラメータとして示

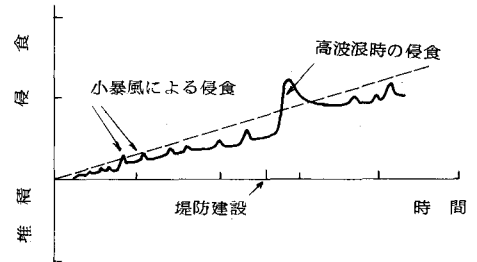


図-2.3 海岸堤防建設による侵食過程

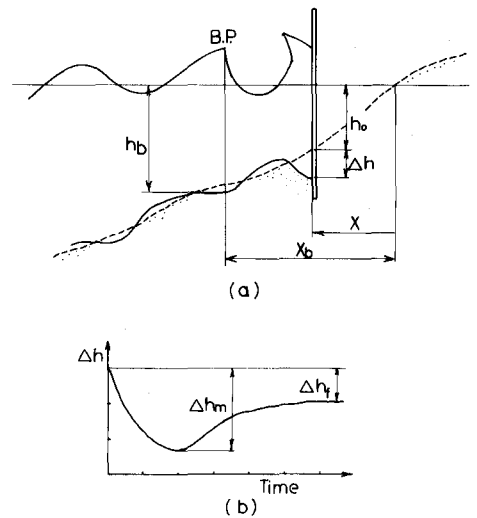


図-2.4 洗掘の説明

してある。ただし、図-2.5に示す樫木ら²⁾の結果は、横軸が無次元の設置水深 h_0/L_0 (L_0 は沖波波長) で示されているので、同図には無次元砕波水深 h_b/L_0 の値も参考のために示した。なお、この実験結果は H_0/d の値がほぼ 200 のものである。この図から明らかかなようにすべての結果は、砕波点より岸側に直立堤が設置されていることを、また $h_0/L_0 < 0$ は汀線より陸側に堤防が設置されたことを示している。さらに、すべての $\Delta h_m/H_0$ の値が負であることから洗掘が生じていることがわかる。図-2.6 に示す細井ら⁷⁾の結果は、堤防が汀線より陸側に設置されている場合を主として示しているが、これによると、汀線より陸側では $\Delta h_m/H_0 > 0$ となり、堤防の前面に漂砂が堆積する場合のあることがわかる。図-2.7 および図-2.8 はそれぞれ佐藤らおよび著者の実験結果を示すものであって、直立堤の設置位置は $-1.5 \leq X/X_b \leq 1.5$ と広範囲に及んでいる。これらの図からわかることは、(1) $0 \leq X/X_b \leq 0.5$ で最大洗掘深 $\Delta h_m/H_0$ が最も大きくなること、その値は $H_0/L_0 \approx 0.01$ 程度で $\Delta h_m/H_0 = -2.0 \sim -2.5$ であること、(2) X/X_b の値が負、すなわち堤防が初期汀線より陸側にある場合、堤前面が洗掘されたり、あるいは前面に砂が堆積することがあり、波や底質の特性によってその状況が異なるが、現状では統一的な説明がなされていないこと、(3) $X/X_b > 1.0$ すなわち砕波点より沖側に堤防が設置された場合、 $\Delta h_m/H_0$ の値はせいぜい -1.5 程度であること、および、(4) 波形勾配 H_0/L_0 の値が大きくなるほど $\Delta h_m/H_0$ の値は小さくなる傾向にあることおよび H_0/d の値に対しては系統的な変化の傾向が明らかでないこと

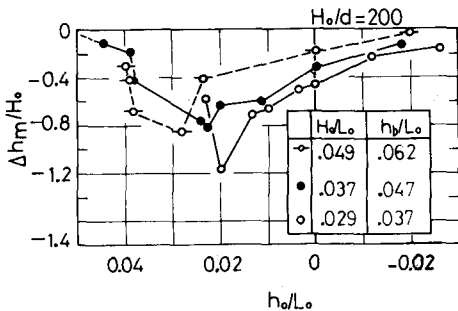


図-2.5 最大洗掘深の実験結果 (樫木)

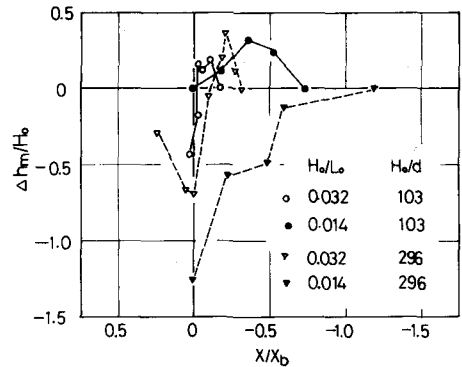


図-2.6 最大洗掘深の実験結果 (細井)

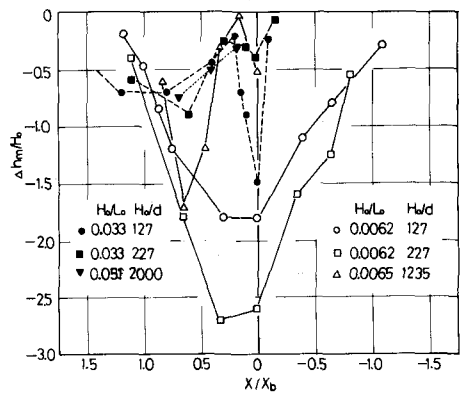


図-2.7 最大洗掘深の実験結果 (佐藤ら)

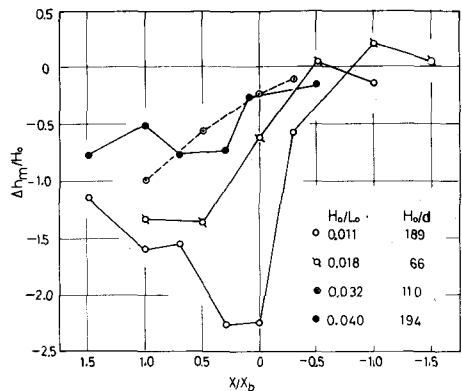


図-2.8 最大洗掘深の実験結果 (著者)

などである。なお市川¹³⁾によると、静岡県田子の浦海岸にある防波堤の前面が $H_0 = 8\text{m}$, $T = 13\text{sec}$, $h_0 = 3.5\text{m}$ の状態で $\Delta h_m = -5\text{m}$ であったことが報告されている。この結果によると、 $\Delta h_m/H_0 = -0.62$, $h_0/L_0 = 0.013$ となり、またこの程度の深さのところの底質粒径は $d = 0.5 \sim 5\text{cm}$ であるので、 $H_0/d = 1600 \sim 160$ となり、上述した実験の結果ともほぼ一致することがわかる。

以上、最大洗掘深さを中心に直立堤前面における洗掘について現象面から検討を加えてきたが、堤防の設置位置や波、底質の特性などどのような関係にあるかが系統的に説明されているわけではない。こうした説明がなされるためには波による堤前面の洗掘機構ならびに境界条件の変化（堤防を設置することにあたる）による海浜の変形機構に関する知見がえられねばならない。

(A) 砕波点より沖側に堤体を設置した場合

従来の研究によると、砕波点より沖側 ($X/X_b > 1.0$) と岸側 ($X/X_b < 1.0$) に堤体を設置した場合、洗掘機構が異なるといわれている。 $X/X_b > 1.0$ の場合、堤体前面に発達する部分重複波の質量輸送が、また $X/X_b < 1.0$ の場合、堤体前面のもどり流れが堤脚部の洗掘に対して支配的な要因となる。図-2.9 は部分重複波による層流境界層の質量輸送に及ぼす反射率 r の効果を示す一例であって、 $r = 0.5$ および 0.8 の場合について $x/L = 1/8, 1/4, 3/8$ の位置における無次元質量輸送速度 U^* と z/δ の関係を示している。

ここに、 x は直立壁からの水平距離であり、 z は底面からの高さ、 δ は境界層の厚さである。ここで注目すべきことは $r = 0.8$ の場合、質量輸送の方向が空間的にかなり異なり、底面近くにおける逆転層の存在が顕著になることである。また乱流境界層の場合、その質量輸送速度は $R_e = u_0 \delta/\nu$ および z_0/δ (z_0 : 粗度長) に影響されきわめて複雑な挙動をする。著者の研究¹⁴⁾によると、滑面の場合、境界層の上層において質量輸送の方向は重複波の節から腹へ、下層ではその逆になる。粗面の場合、 R_e と z_0/δ の値の増加とともに逆転層の厚さが増大し、重複波の腹から節に向う流れが卓越するようになる。以上の結果から、部分重複波がよく現われる海岸堤防の前面では、底面近くの質量輸送が反射率、堤体からの距離、および底面からの高さによって速さも方向も異なることになる。したがって、波動による1次のオーダの周期的往復運動が底質を運動させうるならば、この2次のオーダの流れである質量輸送と底質の移動形態（掃流か浮遊か）によって底質移動の卓越方向が決定され、最終的には海浜地形の変化に支配的役割をはたすであろうことが予想される。

図-2.10 は、重複波（反射率 $r = 1.0$ ）による地形の変化を著者が¹⁴⁾が実験によって求めたものであって、使用した底質は粒径 $d = 0.13\text{mm}$, 水中比重

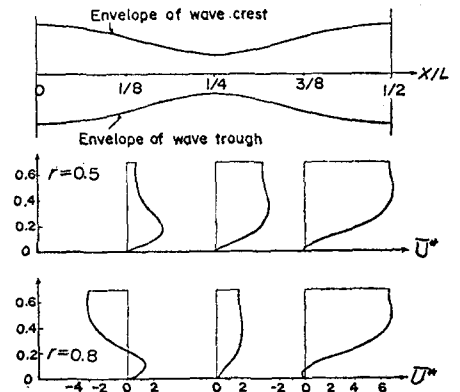


図-2.9 部分重複波による底面近くの質量輸送速度

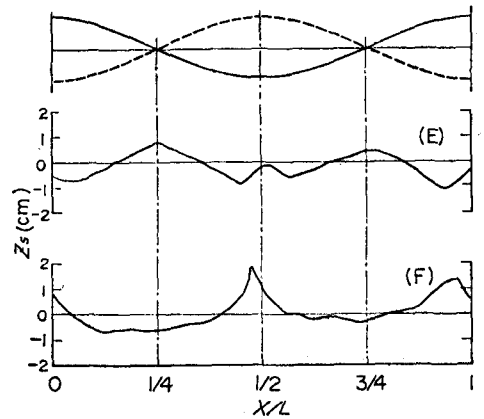


図-2.10 重複波による地形変化

$s = 0.15$ の塩化ビニール粒子である。実験結果(D)は $R_p = 75$, $H/sd = 1800$ であつて、底質は掃流の状態
で移動し、重複波の節の部分に堆積し腹の部分の周
辺で洗掘され、この状態が発生すると堤体前面が洗
掘されることになる。一方、実験結果(F)の条件は、
 $R_p = 125$ (乱流), $H/sd = 10^4$ であつて、底質が
浮遊し、腹の部分に底質が堆積し、堤体前面の洗掘
が起こらないことを示している。さらに、佐藤らの
実験によると、 $r = 0.36$, $R_p = 323$ でも実験結果

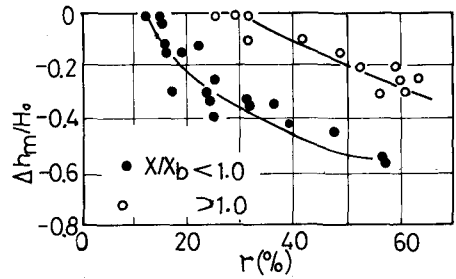


図-2.11 洗掘深に及ぼす反射率の影響

(D)と同じ変化がえられている。図-2.11 は榎木が示した最大洗掘深に及ぼす反射率 r の影響を示すもので
あつて、白印で示される $X/X_b > 1.0$ の場合、 r の値の増大とともに洗掘深も増大することがわかる。なお、
Herbich は傾斜堤の洗掘に対して

$$\frac{\Delta h_m}{H_0} = \frac{H_I}{H_0} \left[\frac{h_0}{H_I} - \frac{1}{2} (1+r) \right] \left[(1-r) \left(\frac{3}{4} C_D \frac{\cot \theta}{s_{gd}} U_*^2 \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (2.1)$$

を与えている。ここに、 H_I : 入射波高、 C_D : 底質粒子の抗力係数、 θ : 底質の静止摩擦角、 U_* : 境界層
内の水平水粒子速度である。

以上の結果からも明らかなように、洗掘の条件を規定する物理諸量の関係はまだ明確にされているとは
いいがたい。この点に関する試みが服部によってなされているが、いまだ定説をうるにはいたっていない。

(B) 碎波帯に堤体が設置されている場合

碎波帯内に堤体が設置された場合の洗掘深に及ぼ
す反射率の効果については、すでに図-2.11で示
したようである。ところが、こうした反射の影響によ
つてのみ洗掘深が規定されるのではなく、堤防のり
面をそ上した水塊がふたたび流下するときのもどり
流れによって支配されることを榎木・出口¹¹⁾が指摘
している。榎木らの実験によると、もどり流れの流
速 V_s が最大洗掘深 Δh_m に大きく影響し、それらの関
係を示すと図-2.12のようになる。ここに h_i は堤
脚部の初期水深である。この図によると、 $\Delta h_m/H_0$

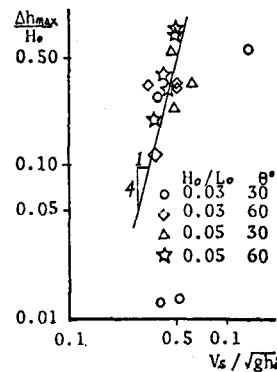


図-2.12 もどり流れによる洗掘

は $V_s/\sqrt{gh_i}$ の4乗に比例することがわかる。ただここで問題となるのはもどり流れの流速 V_s である。榎
木らの実験では堤脚付近でこれを実測し、それをを用いてデータを整理しているが、一般には流速 V_s が波の
特性によって定まるものと考えられる。したがって、これらの間の関係を明確にしないかぎり、洗掘機構
は説明しえても、実用上問題が残ることになる。

2.2 海浜断面形状定式化の試み

上述したように構造物による海浜地形の変化は、境界条件の相違によって起こるものである。いずれに
しても、こうした海浜地形が波や底質の特性と関連づけて表示しうることが、基本的には重要である。
Swart¹⁵⁾ は、図-2.13に示すように、海浜断面を階段状に分けて侵食型の平衡断面形状を定式化する試

みを行っている。ここではこの Swart の取り扱いについてできるだけ平易に解説したい。

図-2.13に示すように、海浜変形の顕著でなくなる深さおよび岸側の限界点に基準点Oをとり、水平沖向きにY軸、鉛直上向きにZ軸をとる。曲線a-b-cは平衡形状であり、変形の顕著でなくなる岸および沖側の限界点をそれぞれaおよびcとする。つぎに、基準点から静水面までの深さを h_m 、静水面から陸側移動限界点aまでの高さを h_0 とし、 $Z_0 = h_m + h_0$ とする。いま、点bの高さをZとし、高さZで平衡形状を二領域に分け上側を岸側、下側を沖側断面とし、

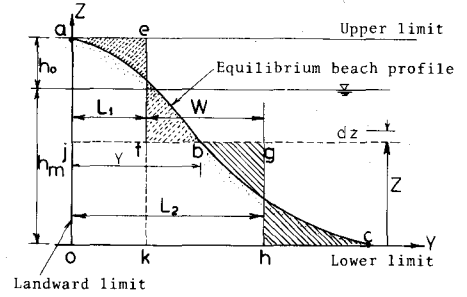


図-2.13 平衡断面形状の説明図

$$\text{面積}(aefj) = \text{面積}(abj), \text{面積}(jgho) = \text{面積}(jbco)$$

となるようなe-kおよびg-hという二つの鉛直線を考え、長さ $ok = L_1$ 、 $oh = L_2$ とおき、つぎの量Wを定義する。

$$W = L_1 - L_2 \tag{2.2}$$

さらに沿岸方向に単位幅を考えると

$$\text{面積}(aeko) + \text{面積}(fghk) = \text{面積}(abco)$$

面積 $(abco) = V_e$ と表わすと、上の関係はつぎのようになる。

$$L_1 \cdot Z_0 + (L_2 - L_1) Z = V_e$$

あるいは

$$L_1 Z_0 + WZ = V_e \tag{2.3}$$

つぎに岸側断面の面積を V_{e1} とおくと、

$$V_{e1} = L_1 (Z_0 - Z) = \int_z^{Z_0} Y dZ \tag{2.4}$$

となる。そこで $Z = Z_r (\equiv h_m)$ において $W = W_r$ 、 $L_1 = L_{1r}$ 、 $L_2 = L_{2r}$ とすれば、

$$W_r = L_{2r} - L_{1r}$$

したがって

$$V_e = L_{1r} Z_0 + W_r Z_r \tag{2.5}$$

式(2.3)と(2.5)とから V_e を消去すると、結局

$$L_1 = L_{1r} + W_r \frac{Z_r}{Z_0} - W \frac{Z}{Z_0} \quad (2.6)$$

がえられ、上式と(2.4)から L_1 を消去すると、

$$\int_z^{z_0} Y dZ = (Z_0 - Z) \left(L_{1r} + W_r \frac{Z_r}{Z_0} - W \frac{Z}{Z_0} \right) \quad (2.7)$$

となる。この式で Z_0, L_{1r}, W_r, Z_r は波および底質の特性によって定まる値であつて、 Z には無関係である。

式(2.7)を Z に関して微分すると、

$$\frac{Y}{W_r} = \frac{L_{1r}}{W_r} + \frac{Z_r}{Z_0} + \frac{W}{W_r} \left(1 - 2 \frac{Z}{Z_0} \right) + \frac{Z}{Z_0} \left(1 - \frac{Z}{Z_0} \right) \frac{d}{dZ} \left(\frac{W}{W_r} \right) \quad (2.8)$$

となる。ここでいくつかの例について検討しよう。図-2.14(a)に示すように、

$$\frac{Y}{Y_b} = -\frac{Z}{Z_0} + 1$$

という直線の平衡海浜形状を考えよう。この場合、

$$L_2 = Y + \frac{1}{2} (Y_b - Y) \frac{Z}{Z_0} = \frac{1}{2} (Y_b + Y)$$

$$L_1 = \frac{1}{2} Y$$

となるので、

$$W = L_2 - L_1 = \frac{1}{2} (Y_b + Y) - \frac{1}{2} Y = \frac{1}{2} Y_b$$

となり、 $W_r = \frac{1}{2} Y_b$ となる。したがつて、 $W/W_r = 1$ であり、またこの直線の勾配 m_r は $m_r = Z_0/Y_b = Z_0/2W_r$ で与えられる。

つぎに、同図(b)で示されるように、

$$\frac{Y}{Y_b} = \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^2 - 2 \left(\frac{Z}{Z_0} \right) + 1$$

で与えられる放物線の海浜形状を考えよう。

この場合、

$$L_2 = Y_b \left[2 + \frac{1}{3} \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^2 - \left(\frac{Z}{Z_0} \right) \right]$$

$$L_1 = \frac{1}{3} Y_b \left[1 - 2 \left(\frac{Z}{Z_0} \right) + \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^2 \right]$$

したがつて、

$$W = L_2 - L_1 = \frac{Y_b}{3} \left(5 - \frac{Z}{Z_0} \right), \quad W_r = \frac{Y_b}{3} \left(5 - \frac{Z_r}{Z_0} \right)$$

$$\frac{W}{W_r} = \frac{5 - (Z/Z_0)}{5 - (Z_r/Z_0)}$$

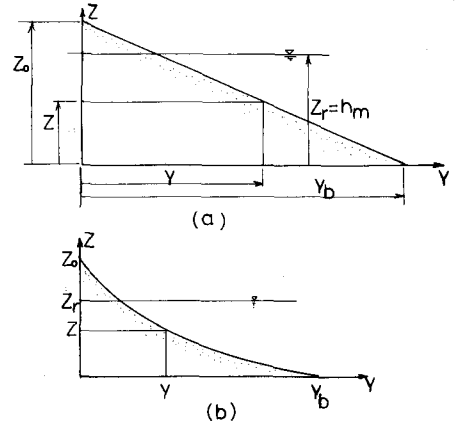


図-2.14 計算例

となる。Swartの表現にしたがうと、 $Z_0 = \delta$ 、 $Z_r = h_m$ であり、 $\Delta r = (h_m - Z)/\delta$ であるから、 $h_m/\delta = 0.8$ を考慮して、

$$\frac{W}{W_r} = 1 + \frac{1}{5 - (h_m/\delta)} \Delta r = 1 + 0.23 \Delta r \quad (2.9)$$

と表わされる。Swartは多くの実験結果より、侵食型の海浜は

$$\left. \begin{aligned} W/W_r &= 1 + 0.7 \Delta r + A_1 \Delta r^{B_1} \\ A_1 &= 3.97 \times 10^7 b \times d_{50}^2 \\ B_1 &= 1.36 \times 10^4 \times d_{50} \\ b &= \begin{cases} 1 & \Delta r > 0 \\ 0 & \Delta r \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \right\} (2.10)$$

h_m 、 δ 、 z および中央粒径 d_{50} の単位はm

であるとしている。これらの関係式を式(2.8)に代入すると、結局、平衡形状 Y は

$$\begin{aligned} \frac{Y}{W_r} &= \frac{L_{1r}}{W_r} + \frac{h_m}{\delta} + \left\{ (1 + 0.7 \frac{h_m}{\delta}) - 0.7 \frac{Z}{\delta} + A_1 \left(\frac{h_m - Z}{\delta} \right)^{B_1} \right\} \times \\ &\times \left(1 - 2 \frac{Z}{\delta} \right) - \frac{Z}{\delta} \left(1 - \frac{Z}{\delta} \right) \left\{ 0.7 + A_1 B_1 \left(\frac{h_m - Z}{\delta} \right)^{B_1 - 1} \right\} \end{aligned} \quad (2.11)$$

によって計算できることになる。さらに、Swartは W_r 、 h_m および h_0 に対しても

$$\left. \begin{aligned} \frac{W_r}{\delta} &= \frac{1}{2} \left(\frac{H_0}{L_0} \right) \left[1.51 \times 10^3 \times \left\{ H_0^{0.32} d_{50}^{-0.447} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.717} \right\}^{-2.38} + 0.11 \times 10^{-3} \right]^{-1} \\ \frac{h_m}{L_0} &= 0.0063 \exp \left(4.347 \frac{H_0^{0.473}}{T^{0.894} d_{50}^{0.093}} \right) \\ \frac{h_0}{d_{50}} &= 7644 - 7706 \exp \left(-0.000143 \frac{H_0^{0.488} T^{0.93}}{d_{50}^{0.786}} \right) \end{aligned} \right\} (2.12)$$

で与えている。ただし、式(2.12)の右辺は次元をもっているのので、長さの単位はmを、また時間の単位secを用いる必要がある。

最後に注意すべき点は、式(2.11)における L_{1r} についても波や底質の特性の関数として与えるべきであるが、

$$Y'/W_r = (Y - L_{1r})/W_r$$

のように座標原点を移動し、 $Z = h_m$ (汀線の位置)を式(2.11)に代入して、汀線からの距離 Y'/W_r を求めれば何ら問題はない。さらに、 q_y を定数とすれば、岸・沖向き漂砂量 Q_y は

$$Q_y = q_y \{ W - (L_2 - L_1) \} \quad (2.13)$$

によって与えられることもSwartによって示されている。図-2.15は計算結果の一例である。

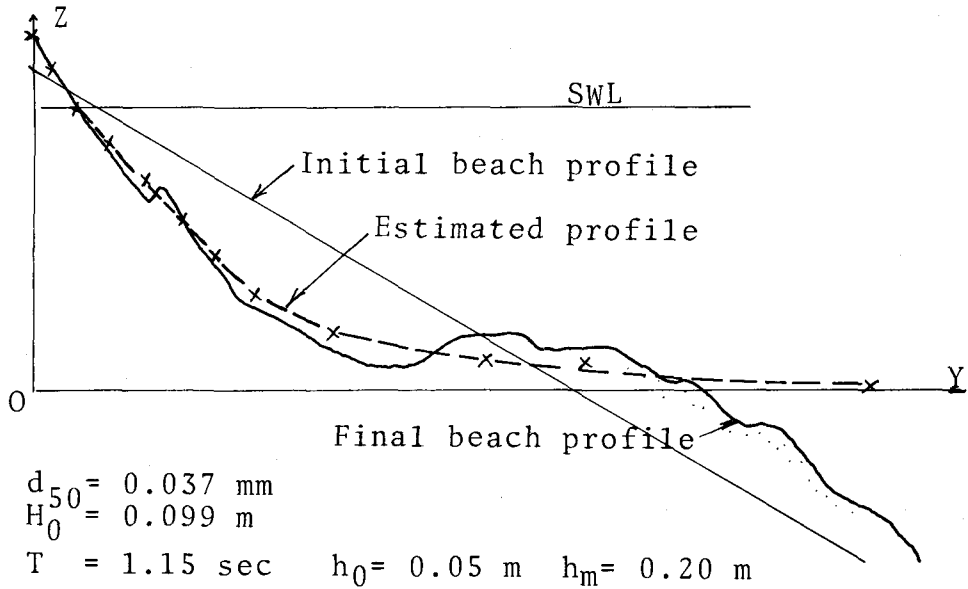


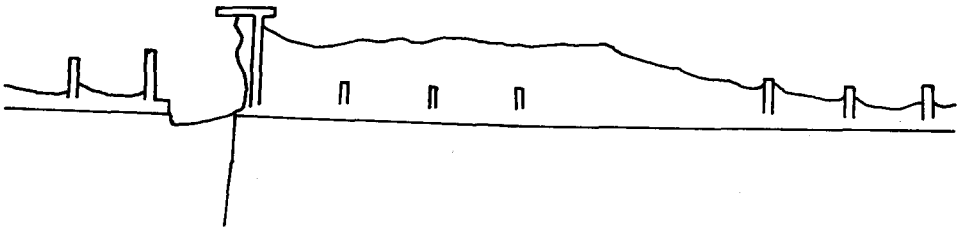
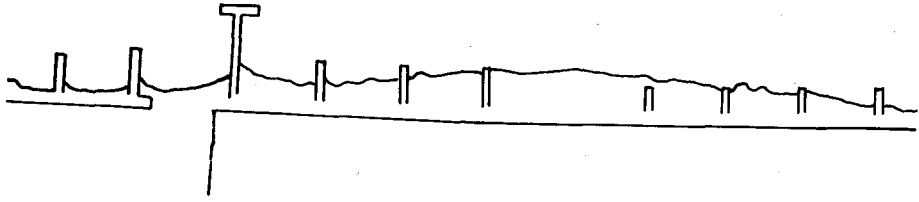
図-2.15 計算結果と実験断面の比較

2.3 沿岸漂砂による海浜変形

突堤や離岸堤、防波堤、導流堤、埋立護岸は何らかの意味で沿岸漂砂に制約を加えたり、移動に変化をもたらす。また浚渫された航路も人工構造物とはいいがたいが同じような作用をする。ここでは、比較的単純な突堤を取り上げて構造物が海浜変形に及ぼす影響を検討しよう。突堤は沿岸漂砂を阻止して海岸侵食を防止しようとする目的と、沿岸漂砂の下手側にある港湾等への漂砂の侵入を防止しようとする目的で建設される。図-2.16は皆生海岸における突堤の漂砂阻止機能を示す一例であつて、1970年12月から1971年11月の約11月間に多量の漂砂が漂砂移動の上手側に堆積していることがわかる。一般に突堤によって沿岸漂砂を阻止すると、その下手側は侵食される。その侵食がどの程度かを予測することが重要となる。また同図にみられるように、突堤はかなり短時間で沿岸漂砂の制御能力を失うことが多い。したがって、突堤を建設する場合には突堤の漂砂透過率を含めて、これらの問題を十分に検討し予測しておく必要がある。

こうした考え方で、海岸構造物周辺の海浜変形とくに汀線形状の変化を予測しようとする試みがなされている。その最初の試みは Pelnard-Considére¹⁶⁾ によってなされ、その後、Grijm,¹⁷⁾ Bakker¹⁸⁾ らによっていわゆる one-line theory から two-line theory へと発展してきた。また、これら一連の研究については土屋¹⁹⁾ (1973)、橋本 (1974)²⁰⁾ ならびに西村²¹⁾ (1978) らによって解説がなされている。ここでは、従来の解説と重複する部分もあるかもしれないが、汀線に直角に突堤をおいた場合の海浜変形計算法について、その方法を具体的に説明する。

図-2.17は地形とくに汀線の変化を計算するための流れ図である。計算の最初は初期地形と沖波の特性（沖波波高 H_0 、周期 T 、波向）を入力する。その後の計算は大きくわけて二つになる。その第一は浅海における波浪の変形計算であり、つづいて地形変形の計算を行う。これらをいまいし詳細に述べるとつぎのようになる。



図一.2.16 突堤による漂砂の堆積例

(A) 浅海における波浪の変形計算

漂砂の問題を取り扱うとき、地形変化の計算の精度を考えると、浅海に來襲する波は微小振幅波として取り扱うのが普通である。浅海における波は水深変化に伴って、波高、波長、波速、波向が変化する。これらは普通、波の屈折計算、もし構造物があれば、反射、回折波の計算を順次行ない、沖波の条件に対する碎波の特性を計算領域全体にわたり算出する必要がある。

Munk・Arthur²²⁾によれば、波向線方程式および波向線間隔方程式はそれぞれ、

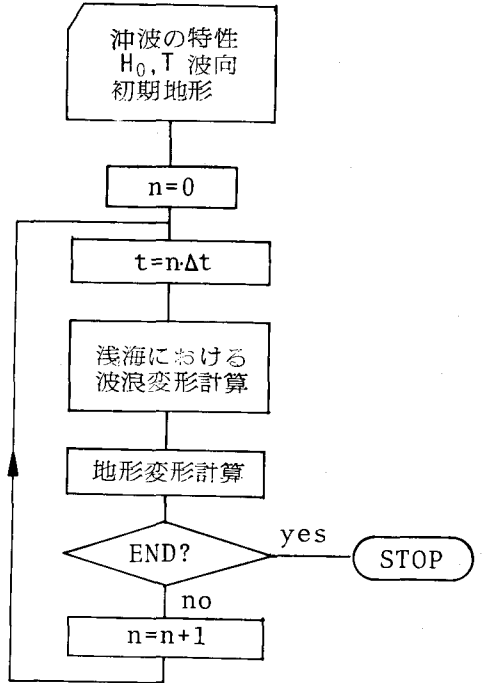
$$\frac{d\alpha}{dt} = \sin \alpha \frac{\partial c}{\partial x} - \cos \alpha \frac{\partial c}{\partial y} \quad (2.14)$$

$$\frac{d^2 \beta}{dt^2} + p \frac{d\beta}{dt} + q\beta = 0$$

$$p = -2 \left(\cos \alpha \frac{\partial c}{\partial x} + \sin \alpha \frac{\partial c}{\partial y} \right)$$

$$q = c \left(\sin^2 \alpha \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - 2 \sin \alpha \cos \alpha \frac{\partial^2 c}{\partial x \partial y} + \cos^2 \alpha \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right)$$

$$\beta = K_r^{-2} \quad (2.15)$$



図一.2.17 計算法の流れ図

で与えられる。ここに、 α : x 軸と波の入射方向とのなす角度、 c : 波速、 β : 波向線間隔係数、 K_r : 屈折係数であり、 x, y は汀線に平行およびそれに直角な方向である。式(2.14)および(2.15)を解けば、波向線の方向および波向線に沿う屈折係数が求まるが、波浪の変形は shoaling によるものもあるから、波向線に沿う波高の変化は、

$$H = K_r K_s H_0 \quad (2.16)$$

で与えられる。ここに、浅水係数 K_s は水深を h とすると、

$$K_s = \sqrt{\frac{1}{2n} \frac{C_0}{C}}, \quad n = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right\} \quad (2.17)$$

である。なお構造物等による回折、反射、散乱波の計算は三井ら²³⁾の修正近似解を用いると簡便である。

さて、このようにして、岸近くまで波浪の変形計算を進めるが、波が砕波するかどうかを判定するためには種々の方法が考えられる。山口²⁴⁾は最も簡単な孤立波理論を用い、計算を進めてきた波高 H とその点の水深 h の比が $H/h = 0.78$ となったところで砕波するとしている。また別の方法では、砕波点における波高 H と水深 h との間につきの関係を用いることもある。

$$\frac{H}{L_0} = 0.15 \left[1 - \exp \left\{ -1.5 \frac{\pi h}{L_0} (1 + 15 \tan^{4/3} \theta) \right\} \right] \quad (2.18)$$

ここに $\tan \theta$: 海底勾配である。

(B) 地形変形計算

岩垣²⁵⁾が示した漂砂の連続式を若干変形するとつぎのようになる。

$$\frac{\partial y_0}{\partial t} = \frac{B}{h_i} \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} - \left(1 - \frac{\bar{h}}{h_i}\right) \frac{\partial h_i}{\partial t} - \frac{1}{1-\lambda} \frac{1}{h_i} \frac{\partial Q_x}{\partial x} \quad (2.19)$$

ここに、 \bar{h} : 漂砂移動帯の平均水深、 B : 漂砂移動帯幅、 h_i : 移動限界水深、 Q_x : 沿岸漂砂量、 x および y は図-2.18 のようにとられ、 y_0 は x 軸から汀線までの距離である。

いま、汀線変化に伴って海浜断面が変化しなくて、一様に前進後退すると仮定すると、式(2.19)はつぎのように簡単になる。

$$\frac{\partial y_0}{\partial t} = -\frac{1}{1-\lambda} \frac{1}{h_i} \frac{\partial Q_x}{\partial x} \quad (2.20)$$

さらに、図-2.18 に示すように、 α_b を初期汀線に対する砕波の入射角とし、 θ_b を汀線変化後におけるそれとすると、汀線の変化が初期汀線に対して小さいものとすれば、つぎの関係がなりたつ。

$$\alpha_b - \theta_b = \tan^{-1} \frac{\partial y_0}{\partial x} \quad (2.21)$$

つぎに、沿岸漂砂量 Q_x は、一般に

$$Q_x = \frac{K}{16} \rho_g H_b^2 \frac{L_b}{T} \sin 2\theta_b \quad (2.22)$$

で表わされる。ここに K は定数であって、それぞれ

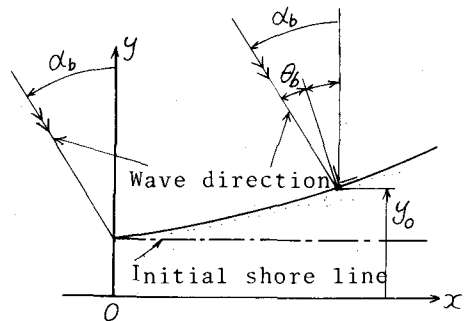


図-2.18 汀線変化の説明図

の海岸に適した値を採用すればよい。また ρg は海水の単位重量である。

いま、初期汀線が直線で、それに直角に1本の突堤をだした場合を想定すると、初期および境界条件は、

$$\left. \begin{array}{l} t=0 \quad \text{で} \quad y_0 = 0 \\ x=0 \quad \text{で} \quad Q_x = 0 \quad (x=0 \text{ に突堤をおく}) \\ x \rightarrow \pm\infty \quad \text{で} \quad y_0 = 0 \end{array} \right\} \quad (2.23)$$

となる。式(2.20)～(2.22)を差分化し、境界条件(2.23)を満足する解を数値積分によって求めると、突堤による汀線の変化を予測できることになる。なお、式(2.21)および(2.22)における a_b , H_b , L_b は波浪変形計算によって求められる。また移動限界水深 h_c は対象とする海岸の底質粒径と与えられる沖波の特性によって求められるが、実際の計算にあたってはなお問題点を残している。さらに、突堤が沿岸漂砂の一部を透過する場合には境界条件(2.23)の第2式が $Q_x = 0$ でなく、透過率を考慮しなければならないことも自明であろう。

図-2.19は Bakker²⁶⁾が計算した結果の一例を示すものであって、漂砂下手側の破線は回折波を考慮しない場合、実線はそれを考慮した場合であって、どの程度の時間で、突堤に砂が堆積し、阻止機能がなくなるかがわかる。

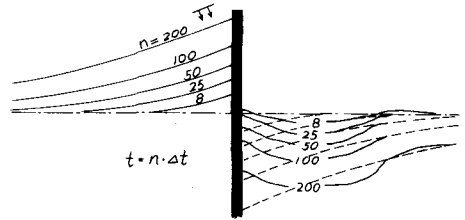


図-2.19 突堤による汀線変化の計算例(Bakkerによる)

3. おわりに

構造物によって海浜地形がどのように変わるかという問題について、岸沖向き漂砂ならびに沿岸漂砂に分けて検討を加え、体系化を試みようとしたが、浅学な著者にはいささか重荷になり、結局龍頭蛇尾の結果になってしまった。海浜変形の問題でも構造物が入ってくると、境界条件が複雑となり、数学的な取り扱いがきわめて困難となる。また模型実験の結果もすぐに現地に適用できるかどうかはなほ疑問であり、多くの課題を残している。これらの問題を解決するためには今後とも多くの努力が必要と考えられるが、この一文がこうした問題に興味をもつ人々のお役に立てば著者の幸とするところである。

参考文献

- 1) 豊島 修：現場のための海岸工学，侵食編，森北出版，pp. 146-147，1971.
- 2) 榎木 亨・川崎芳一：海岸堤防堤脚部の洗掘，京大防災研年報第4号，pp. 1-12，1960.
- 3) 佐藤昭二・田中則男・入江 功：直立壁堤脚部の波による二次元洗掘実験，第13回海講，pp. 156-161，1966.
- 4) 細井正延：堤防設置による海浜変形について，第14回海講，pp. 325-328，1967.
- 5) 榎木 亨：海岸堤防基部の洗掘機構に関する研究(その1)，第14回海講，pp. 329-335，1967.
- 6) Herbich, J. B. and Stephen, C. K.: Scouring of sand beaches in front of seawalls, Proc. 11th Conf. on Coastal Engg., pp. 622-643, 1968.
- 7) 細井正延・荒川忠昭：堤防前面の海浜変形に関する一考察，第15回海講，pp. 136-140，1968.
- 8) 榎木 亨・高畑市三：海岸堤防堤脚部の局所洗掘機構について(そのII)一特にのり面上のもどり流れの特性について一，第18回海講，pp. 371-376，1971.

- 9) 野田英明：海岸堤防堤脚部の洗掘に関する研究，第19回海講，pp. 53-57, 1972.
- 10) 沼田淳・和田信：護岸前面海底地形の変化に関する一実験，第20回海講，pp. 495-499, 1973.
- 11) 榎木 亨・出口一郎：波による質量輸送速度と堤防前面の海浜変形過程との関係について，第21回海講，pp. 155-159, 1974.
- 12) 服部昌太郎・川又良一：海岸堤防による二次元海浜の地形変化，第23回海講，pp. 234-239, 1976.
- 13) 市川 武：直立防波堤の洗掘災害，第13回海講，pp. 165-171, 1966.
- 14) 野田英明：波動境界層における質量輸送と海底の洗掘，第17回海講，1970.
- 15) Swart, D. H.: Predictive equations regarding coastal transport, Proc. 15th Coastal Engg. Conf., pp. 884-900, 1976.
- 16) Pelnard-Considère, R.: Essai de théorie de l'évolution des formes de rivage en plages de Sable et de galets, Quatrième Journées de l'Hydraulique, Les Énergies de la Mer, pp. 289-298, 1954.
- 17) Grijm, W.: Theoretical forms of shoreline, Proc. 9th Coastal Engg. Conf., pp. 219-235, 1964.
- 18) Bakker, W. T.: The dynamics of a coast with a groyne system, Proc. 11th Coastal Engg. Conf., pp. 492-517, 1968.
- 19) 土屋義人：海岸土砂収支と海浜変形，1973年水工学に関する夏期研修会講義集，73-B-3, 1973.
- 20) 橋本 宏：海岸線の変形モデルについて，海岸14号，pp. 55-61, 1974.
- 21) 西村仁嗣：海浜変形の数値シミュレーション，1978年水工学に関する夏期研修会講義集，78-B-5, 1978.
- 22) Munk, W. H. and R. S. Arthur: Wave intensity along a refracted ray, Gravity Waves NBS, 1952.
- 23) 三井 宏・筒井茂明：海岸構造物不連続部の波高分布について(第5報)，第17回海講，pp. 85-90, 1970.
- 24) 山口正隆・土屋義人・大津正司：数値計算にもとづく1次元海浜変形特性に関する一考察，愛媛大学紀要第9巻第3号，pp. 323-334, 1980.
- 25) 岩垣雄一：海岸侵食論，1966年度水工学に関する夏期研修会講義集，B-17, 1966.