

海浜変形モデルの富士海岸への適用

橋 本 宏*

1. ま え が き

日本においては地形が急峻で平野が少ないために、沿岸部の利用が盛んである。埋立による工業用地の造成や流通の拠点としての大規模な港湾の建設が行われている。これらの計画に際しては構造物による沿岸地形への影響をあらかじめ明確にしておく必要がある。また陸上からの供給土砂の減少に伴って近年はげしくなった海岸侵食を防止する場合にも、各種対策手法の効果を明らかにすることが望まれる。沿岸方向の漂砂が卓越する場合の地形変化を予測する手法として海岸線の変形モデル¹⁾が提案されているが、ここではそれを地形変化のほげしい富士海岸に適用し、計算に際して必要となる定数の推定法とモデルの妥当性について検討を行なったので、その結果について報告する。

2. 海浜変形モデル

海岸における砂の移動現象は沿岸方向のものと、海岸に直角方向の移動に分けることができるが、ここで考えるのは沿岸方向の移動である。これは砂の移動についての基本式を海岸線の方に積分を行ったものと考えられる。沿岸漂砂量公式としては外力となる波の入射方向と海岸線の方を漂砂量と結びつけた関係を使用する。すなわち沿岸漂砂量を q とすると

$$q = F \sin \alpha_0 \cos \alpha_0 \dots \dots \dots (1)$$

と考える。ここで、 α_0 は砕波点での波の入射角、 F は波高、周期、海底地形、底質などによって変化する係数である。また連続の式は次のようになる。

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial h y}{\partial t} = 0 \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 x を沿岸方向の距離、 y を $x=0$ から海岸線までの距離、 $h y$ を地形変化の生じる海岸に直角方向の断面積、 t を時間としている。

境界条件としては、海岸線が固定され移動しない場合は y の値を、また漂砂量が与えられる場合はその値を与える。十分に長い防波堤や突堤の場合には、その位置で

沿岸漂砂を完全に阻止すると考えられるので $q=0$ となる。しかし短い突堤では堆積を生じると砂は突堤を通過するようになるために、漂砂の上手側の海岸線は突堤先端を越えて堆積しない。また海岸線が後退する場合についても、海岸線が突堤先端より沖にある場合には突堤は海浜変形に影響を考えないが、後退した海岸線が先端に達した場合には、漂砂の上手側の海岸線はそれ以上後退しないと考えられる。海岸が海岸堤防や消波ブロックなどによって保護されている場合においても同様で、海岸線が後退しても堤防よりは後退しないと考えることができる。

海岸線の変形モデルを実際の海浜変形現象に適用する場合には次のような問題点がある。まず第1はどのような沿岸漂砂量公式を用いるかである。沿岸漂砂量は入射波の波高、周期、波向、海底勾配、底質の粒径と比重などに関係づけられているが実際には波浪観測、特に波向観測の資料がないこと、また公式自体の信頼性についても問題のあることなどから種々の方法によって検討する必要がある。

第2は海岸の堆積、侵食が生じると海岸線の方が変化し、これに伴って波の入射方向が変化しなくても海岸線に対する相対的な入射角が変化するために、式(1)の α_0 としてどのような値を採用すべきかが問題となる。沿岸漂砂量に関連する波の入射角としては砕波点での値を使用するのが妥当と考えられるが、このためには堆積または侵食の形状を仮定しなければならない。これに対する一つの考え方として一般には砕波点より岸側では海底の勾配がきつく、沖側では緩いということ、また砕波点付近の勾配は入射波と底質に対応して平衡なものとなっていることなどを考慮し、一定の勾配を持って海底が前進または後退するという考え方がある。この場合には海岸線の変化を直接砕波点における入射角の変化と結びつけることができる。

第3は式(2)の h としてどのような値を採用すべきかという問題である。これはモデル化に際して生じた一つのパラメーターであり、入射波の波高、周期と底質に関連すると考えられるが十分信頼できる関係は得られてい

* 正会員 建設省土木研究所 海岸研究室長

ない。以上述べた問題に関して富士海岸での海浜変形を取り上げ検討を行った。

基本式の解は簡単な場合を除いては解析的に解くことは困難であり、一般に数値計算²⁾が用いられる。この場合には F, h, α_b を x および t の関数として与えることができる。計算方式としては x と t をそれぞれ Δs および Δt の区間に分割し、式 (1) で q を求め、これを用いて式 (2) から y を求める計算を繰返すのが簡単でよい。この場合計算を安定に行うため Δt にある制限がある。

3. 富士海岸の自然条件³⁾

富士海岸は駿河湾の湾奥に位置し、富士川からの流出土砂によって形成された海岸であり、その延長は約 25 km におよぶが、ここで検討の対象としたのは富士川河口から田子の浦港までの区間である。駿河湾は急深であり、海岸のすぐ近くにまで巨大な波がうち寄せる。富士川からの流出土砂量の減少、田子の浦港防波堤の建設による漂砂の阻止などによってはげしい侵食を生じている。

富士海岸に襲来する波浪に関しては田子の浦港において波高、周期および波向観測が行われており、その特性を知ることができる。海岸線の変化を計算するには来襲波の方向について知らなければならない。ここで検討の対象としたのは数年間にわたる変形であるので、波の入射方向の時間的変化は考慮せずに平均の来襲方向を求める。

海岸に襲来する波の平均の方向を求める方法としては波浪観測の結果から波向についてある重みをつけて平均する方法と、沿岸漂砂が明らかに存在しないと考えられる場所での海岸線の方向を波向とする方法が考えられる。サベージによる沿岸漂砂量公式では漂砂量は沿岸方向の波エネルギーと結びつけられており、波のエネルギーで重みをつけ平均の方向を求めることとする。昭和 33 年 2 月 1 日から昭和 38 年 12 月 31 日の間の 1 日 3 回行われた波向観測の結果⁴⁾ から、次式で表わされる沿岸方向に単位時間に輸送される砕波点での波エネルギー E_b を計算した。

$$E_b = \frac{w}{8} n C_b H_b^2 \sin \alpha_b \cos \alpha_b$$

$$= E_0 K_r^2 \sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_b \cdots \cdots (3)$$

ここで、 w : 海水の単位体積重量、 n : 波速と群速度の比、 C : 波速、 H : 波高、 α : 入射角、であり添字 b は砕波点での値を、また添字 0 は深海での値を示す。 $E_0 = w C_0 H_0^2 / 16$ であり、 K_r は砕波点での屈折係数を表わす。砕波点での入射角と屈折係数の計算においては、平均周期 8.6 sec の波が海底勾配 1/10 の等深線が平行な

海岸に入射する場合の関係をを用いた。計算結果は 表—1 に示してある。

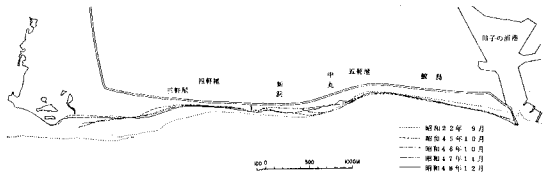
この海岸には漂砂を止める防波堤などがあり、その近くの海岸線の方を昭和 43 年から 48 年まで毎年 1 回行われている測量の結果より求めると、入道樋門の西側で S 11.7°E、田子の浦港西防波堤西側で S 6.2°E、東防波堤東側で S 12.2°W であった。これらの構造物で完全に漂砂が止められているとは考えられないが、波の入射方向を予測することができよう。

計算の対象とした海岸においては 図—1 に示すように富士川の河口から三四軒屋にかけて海岸線が 100m 以上も後退し、また田子の浦港西防波堤の西側では前進している。その変化状況は田子の浦の防波堤の建設によって防波堤の西側では堆積を、東側では侵食を始め、その後富士川河口付近の海岸が後退し始めた。昭和 41 年の 26 号台風によって三四軒屋地先では破堤し、侵食は東へと移っている。また侵食対策として入道樋門付近には多量のブロックが投入されている。

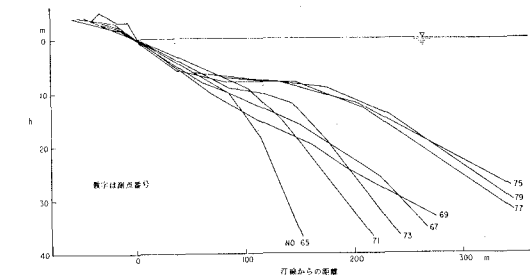
海浜の形状としては水深 8~10m より浅い部分では海底勾配が 1/10 程度であり、それより深い場所ではきついところでは 1/3 にも達する。図—2 は代表的な海浜形状を示したものであるが、富士川河口に近い No. 75~77 では海岸が侵食され、漂砂の卓越する水深 10m 以浅で後退を生じ、10m 付近の海底勾配が緩くなっている。

表—1 波浪条件

波の全エネルギー	E_0	$1.41 \times 10^7 \text{ ton} \cdot \text{m} / \text{m} \cdot \text{year}$
沿岸方向のエネルギー	E_b	$1.67 \times 10^8 \text{ ton} \cdot \text{m} / \text{m} \cdot \text{year}$
$K_r^2 \sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_b$ の平均値		0.118
波の入射方向	α_b	6.8° (ただし $K_r=1$)
海岸線の方向		S 13°20'E



図—1 富士海岸の汀線変化



図—2 富士海岸の海浜形状

一方田子の浦の西側の No. 65 付近では汀線付近に堆積を生じており、海底の勾配もきつくなっている。

漂砂量の場所的变化を海岸線の変化と結びつけるためには式(2)の h の値を確定しなければならない。田子の浦港防波堤の建設に伴って汀線および海浜形状が大きく変化しており、この資料³⁾を用いて汀線の変化量 l と断面積の変化量 A の関係を調べると図-3と図-4に示すようになる。図-3は西側の堆積状況を示しているが、砂の移動高としては $h=10\text{ m}$ 程度になっている。また図-4は侵食する場合であるが h は小さくなる傾向

を示している。以上の地形変化の状況から侵食、堆積いずれの場合においても海底勾配はほぼ一定であり、また移動する高さとしては $h=10\text{ m}$ という結果が得られた。海浜変形の計算においては沿岸漂砂量と入射波の関係が明らかになっていなければならない。さきに求めた沿岸方向の波のエネルギーからサベージの公式によって係数を0.2として沿岸漂砂量を計算すると $q=3.3\times 10^5\text{ m}^3/\text{year}$ となる。一方沿岸漂砂のある海岸に十分長い防波堤が設けられると漂砂は完全に止められるために、堆積量を求めると漂砂量を推定することができる。この場合には堆積にともない海岸線の変化し、漂砂量も変化するために堆積または侵食形状から漂砂量を求めることにする。

式(1)、(2)を F と h が x と t によって変化せず、 $\sin \alpha_0 \cdot \cos \alpha_0 \div \tan \alpha_0 - \partial y / \partial x$ で近似すると次のようになる。

$$q = F \left(\tan \alpha_0 - \frac{\partial y}{\partial x} \right) \quad \cdots \cdots (4)$$

$$\frac{\partial q}{\partial x} + h \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad \cdots \cdots (5)$$

ここで、 α_0 が x によって変化しなければ次の関係が得られる。

$$\frac{\partial y}{\partial t} = a \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad \cdots \cdots (6)$$

ここで、 $a = F/h$ である。防波堤のある場合には $q=0$ であり、 $x=0$ で $q=0$ 、 $t=0$ で $y=0$ という条件で式(6)の解を求めると次のようになる。

$$\frac{\sqrt{\pi} y}{\tan \alpha_0 \sqrt{4at}} = \left\{ \exp \left(-\frac{x^2}{4at} \right) - \frac{\sqrt{\pi} x}{\sqrt{4at}} E \left(\frac{x}{\sqrt{4at}} \right) \right\} \quad \cdots \cdots (7)$$

ここで、

$$E(n) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_n^\infty \exp(-q^2) dq \quad \cdots \cdots (8)$$

である。

田子の浦港西防波堤の建設が昭和34年5月に開始され、それ以後に汀線の変化を生じているが、防波堤からの距離 x 、汀線の前進または後退量 y 、防波堤建設後の時間 t から $y/\sqrt{t}$ と $x/\sqrt{t}$ の関係を西海岸と東海岸について求めると図-5のようになる。さきに求めた波の入射角 $\alpha_0=6.8^\circ$ を α_0 に等しいとおいて式(7)と観測値が一致するように a の値を決定すると $a=1.06\times 10^5\text{ m}^3/\text{year}$ となる。この場合の関係も合せて図-5に実線で示してある。防波堤がない場合には漂砂量は $q=1.25\times 10^5\text{ m}^3/\text{year}$ となり、また $F=1.06\times 10^6\text{ m}^3/\text{year}$ である。なおこの場合に h の値としてはさきに求めた $h=10\text{ m}$ を使用している。またサベージ型の沿岸漂砂量公式で係数を求めると0.075となる。防波堤の建設は段階的に行われ

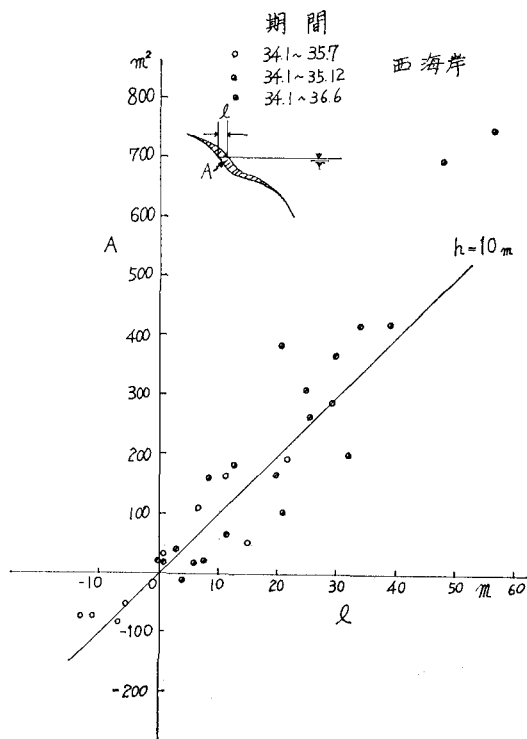


図-3 汀線と断面積の変化の関係(西海岸)

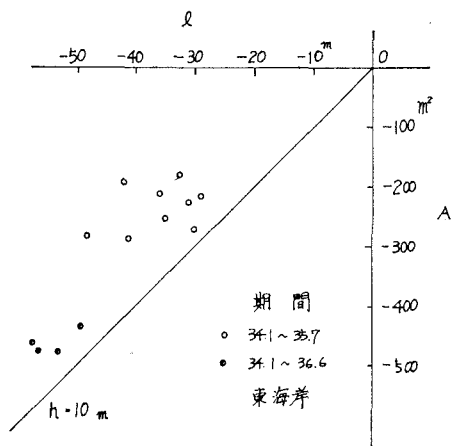


図-4 汀線と断面積の変化の関係(東海岸)

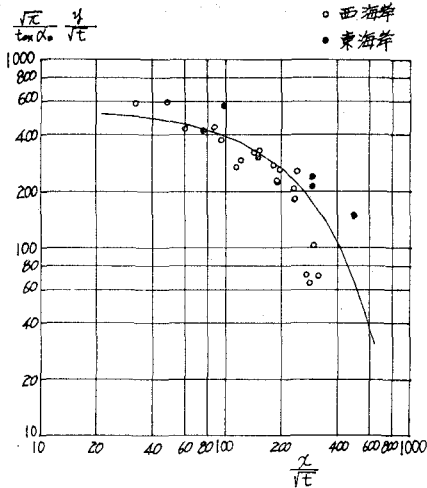


図-5 田子の浦における汀線の変化

たために、漂砂を完全に阻止しているとは考えられず、実際にはこれより多くなる可能性を持っている。

4. 海岸線の変形計算

これまでに検討を行ってきた数値を使用し海岸線の変化を計算し、その妥当性について調べた。計算範囲としては富士川河口から田子の浦港西防波堤までの延長 5.8 km であり、初期の海岸線の形状としては図-1 に示した昭和 22 年 9 月を基準とし、昭和 48 年 12 月までの変化量について検討した。昭和 22 年を基準とした変化量を図-6 に示す。2.7 km 付近に入道樋門があり、海岸線はこれより後退しない状況にあり、またそれより東側延長約 1 km にわたっては消波ブロックが投入されている。

波の平均の入射方向は富士川河口が漂砂の供給源であり、東への沿岸漂砂が存在するためにこの区間でも場所的に変化していると考えられるが場所的にどのように変化するかが明確でないために、一応ここでは全区間について昭和 22 年の海岸線に入射する方向は同じと考えて計算を行ってみた。入射角としてはさきに求めた $\alpha_0 = 6.8^\circ$ を基本とし、 13.2° 、 20.4° について計算した。

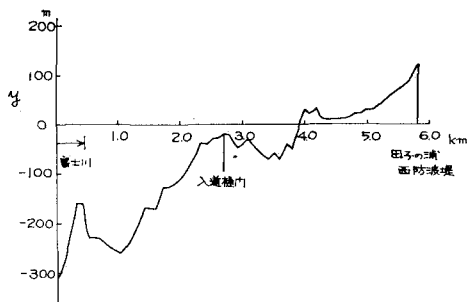


図-6 富士海岸の汀線変化量

富士川河口からの流出土砂量については、河口からの流出土砂の減少が海岸線の後退をもたらしており、減少していることは間違いないが、その時間的な変化および減少量は明らかでない。したがって流出土砂量 $Q=0$ の場合と $Q=5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{year}$ の場合について計算を行った。なおこの量はすべて海岸の漂砂に寄与していると考えているが、河口の東西両側に移動するものとし、東側にはこの半分が動いていると仮定した。

河口の流出土砂量 $Q=5 \times 10^4 \text{ cm}^3/\text{year}$ 、 $q=1.25 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{year}$ 、 $h=10 \text{ m}$ とし、 α_0 を 6.8° と 20.4° に変化させた場合の海岸線の変化状況を図-7 と図-8 にそれぞれ示す。まず河口に侵食を、防波堤の西側に堆積を生じ、それが進行し海岸線の方向が波向と直角になるように変化する。入射角が大きいほど変化は部分的である。田子の浦では 5 年程度で海岸線は防波堤の先端まで達し、それ以後は漂砂が通過するようになる。実際の変化と比較してみると変化の速度が遅く、これは沿岸漂砂量が少ないためと考えられた。

次に $Q=0$ 、 $h=10 \text{ m}$ 、 $q=2.4 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{year}$ とし、 α_0 を 6.8° と 10° に変化させて海岸線の変化を計算したのが図-9 と図-10 である。富士川河口から入道樋門の間では計算値はほぼ実際の変化と一致しているが入道樋門と田子の浦の間では細かいところで異なっている。その違いは防波堤の西側での堆積した場合の海岸線の方向に表われている。この原因として考えられるのは防波堤先端の条件が適当でなく、漂砂は海岸線が先端に達する以前に先端を通過し始めること、波の入射角が沿岸方向に変化することなどが考えられる。またこの計算では初めから防波堤はあるものとしているが図-11 に示す沿岸漂砂量の変化などから最終的な形状には大きな影響は

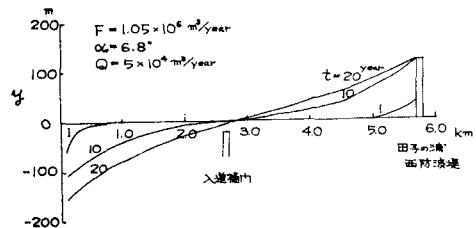


図-7 海岸線の変化 (1)

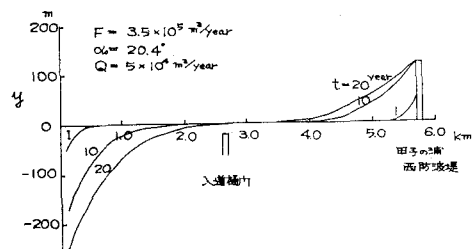


図-8 海岸線の変化 (2)

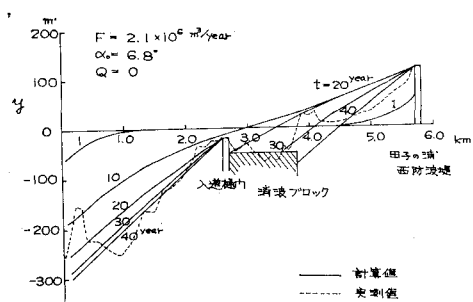


図-9 海岸線の変化 (3)

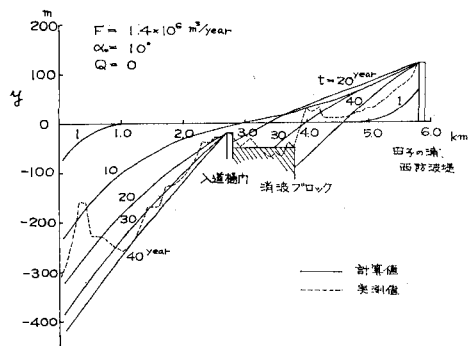


図-10 海岸線の変化 (4)

ないと考えられる。以上の計算結果から波の入射角を 6.8° 、沿岸漂砂量を初期の形状で $2.4 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{year}$ 程度にすれば平均的には海岸線の変化をモデル化できるが、細かな変形を再現するには入射角、河口流出土砂量、構造物の設置条件を場所および時間的に変化させて計算する必要がある。また計算には入っていないが防波堤の西側では沖への移動も考慮する必要があると考えられる。

5. あとがき

富士海岸の海岸線の変化を波浪や地形に関する資料を

用いて計算を行ったが、沿岸漂砂量を適当に選定すれば計算値と実測値を平均的に一致させることができた。しかしこの方法を一般的に使用するには波浪観測資料や地形変化の資料を必要とし、かなり困難であろう。また計算の精度は主として沿岸漂砂量によって支配されるために信頼できる沿岸漂砂量公式の確立が望まれる。

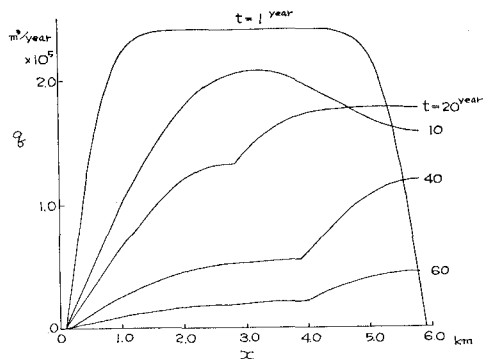


図-11 沿岸漂砂量の変化

参考文献

- 1) Pelnard-Considère, R.: Essai de théorie de l'évolution des formes de rivages en plages de sable et de galets, IV^{ème} Journées de l'Hydraulique, 1954.
- 2) 橋本 宏: 離岸堤による隣接海岸への影響予測モデル, 第21回海講論文集, pp. 181~185, 1974.
- 3) 建設省中部地建沼津工事事務所: 富士海岸保全対策報告書, 1970.
- 4) 市川 武・落合治美・富田一夫・室伏久治: 駿河湾田子の浦海岸の波と漂砂, 第8回海講論文集, pp. 161~167, 1961.
- 5) 前出 4)