

海浜変形モデルの人工海浜計画への応用

田中常義*・野呂清司*・末広忠雄*・宇多高明**

1. ま え が き

近年、レクリエーションに対する欲求の高まりとともに、人工的に砂を供給して砂浜を造る養浜事業が脚光を浴びるようになった。横浜市では、従来から行われてきた埋立事業によって失われた自然海浜に代って海の自然をとり戻し、また様々なレクリエーションおよびスポーツの場とするために、横浜市金沢区に海の公園を造りその中に人工海浜を造成する計画があり、昭和 53 年度より実施に移される予定である。このため当地域において数カ年にわたって水質、生物、漂砂、気象、海象等の調査¹⁾を行って来たが、本報では特に海岸工学上興味のある養浜の問題について報告する。

ところで、養浜は漂砂現象の充分な認識を必要とする一方、その現象が極めて複雑なために現状では確立した設計法は存在しないと言えよう。このため従来提案されている方法を考慮するとともに、昭和 50 年と 51 年の 2 度にわたり現地実験を行い、約 6 カ月間地形変化の追跡調査を行った。更にこのデータを橋本²⁾の提案した汀線変化モデルによって解析し、また比較的単純な条件のもとで解析解を求め、三者の比較を行った。この結果、実験値に対してほぼ妥当な解が得られ、また人工島の設置等を考慮した場合の予測計算が可能になった。

2. 人工海浜計画

横浜市が人工海浜を計画している金沢湾は 図-1 に示すように、東京湾の南西に位置し、三方を陸地に囲まれ、北東に開口部を有する水面積約 7.75 km² の小湾である。この湾の中に 図-2 に示されるように、延長約 1 000 m の人工海浜および釣場、広大な園地、ヨットハーバー等のレクリエーション施設を備えた人工島を造ることが計画されている。この人工海浜の断面形状としては、前浜勾配 1/30、沖浜勾配 1/100 とすることに決定し、緩やかな斜面にはアサリが生息できるようにし、潮干狩等が可能なものとする予定である。

更に、天然の砂浜の美観は単純な形状が長く続くこと

より得られることを考慮して、できる限り構造物を用いない単純な海浜とすることにした。

しかしながら実施に当っては、種々の問題点が解決されねばならない。特に養浜砂が湾外へ流出して当該海域から失われることはないか、また安定した海浜形状はいかなる形

状か等は重要な点であると考えられるので、以後これら

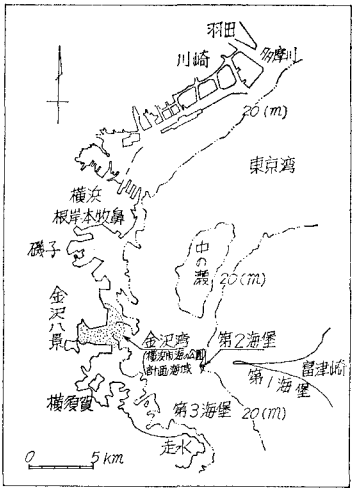


図-1 金沢湾一般図

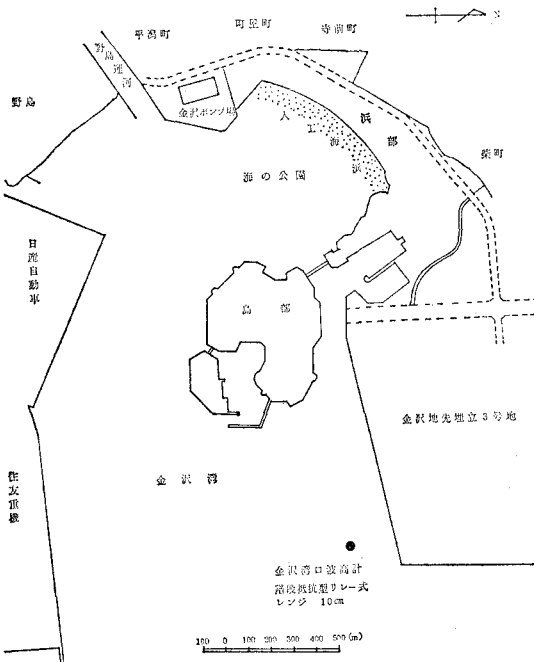


図-2 人工海浜計画図

* 正会員 横浜市港湾局開発部
** 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室

の点について考察する。

3. 基礎方程式と解析解

ここでは実験データの解析法について述べる。まず、現地実験では平面海浜形状の変化が大きいために、従来提案²⁾されている式をそのまま用いることには問題が残る。このため地形変化が相当大きい場合にも適用可能な式を導くことにした。

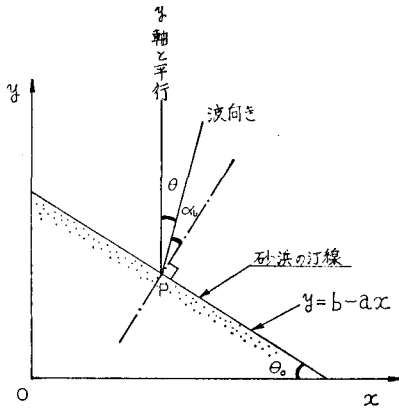


図-3 座標系

まず座標系を図-3に示すように決める。このとき入射角 α_0 は式(1)のように表わされる。

$$\alpha_0 = \theta_0 - \theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで流砂量を q とすれば、 q は Komar³⁾ の定義にしたがえば、式(2)となる。

$$q = \frac{K(H^2 C_n)_0}{8(\rho_s/\rho - 1)a'} \sin \alpha_b \cos \alpha_b = F \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 a' : 間隙率、 ρ_s : 土粒子密度、 ρ : 海水の密度、 H : 波高、 C_n : 群速度、 K : 定数である。また添字 b は砕波点を表す。式(1)を式(2)へ代入し、 $\cos \theta_0 \sin \theta_0$ 等を dx, dy で表示し、更に y は時間 t の関数でもあることを考慮すれば、式(3)が得られる。

$$q = F \cos^2 \theta \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2} \left(-\frac{\partial y}{\partial x} - \tan \theta\right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(3)において θ および θ_0 が小さいと仮定すれば従来の式と一致する。次に流砂量の連続式は代表高さを h とし、更に h が一定値を取るとすれば、

$$\frac{\partial q}{\partial x} + h \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

と表わされる。式(3)、(4)が基本式であるが、式(3)が更に単純化される条件について考えてみる。まず簡単のために $\theta = 0$ とおき、式(3)を式(4)へ代入すると、

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{F}{h} \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2}{1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2} \right] \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。式(5)において大カッコ内が仮に 0.9 程度になるとすれば、 $\partial y / \partial x \sim 0.18$ となり、海岸線の勾配は約 11° となる。したがって $\partial y / \partial x \leq 0.18$ 程度であれば、式(3)の分母はほぼ 1 と近似されても良いであろう。

さて、現地実験は図-3の実線で示されるような単純な三角形に養浜を行ったため、解析的に扱える可能性があり、この検討も加えることにした。この場合の基礎式は式(3)、(4)である。ただし式(3)の分母は 1 と近似する。境界条件は、

$$\left. \begin{aligned} x=0 \text{ で } \frac{\partial y}{\partial x} &= -\tan \theta + \frac{q_0}{F \cos^2 \theta} \\ x=+\infty \text{ で } y &\rightarrow 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots (6)$$

である。この種の問題は Bakker⁴⁾ がとり扱っているが、現地条件に合う解を得るために多少の計算を行うことにする。解析解は式(3)、(4)より q を消去し、熱伝導型の式を誘導した後、ラプラス変換を行えば変換座標では、

$$\begin{aligned} \bar{y}(x, s) = & \left\{ A(s) - \frac{1}{2\sqrt{F_0 s}} \int_0^x y(x', 0) \right. \\ & \times \exp\left(-\sqrt{\frac{s}{F_0}} x'\right) dx' \Big\} \exp\left(\sqrt{\frac{s}{F_0}} x\right) \\ & + \left\{ B(s) + \frac{1}{2\sqrt{F_0 s}} \int_0^x y(x', 0) \right. \\ & \times \exp\left(\sqrt{\frac{s}{F_0}} x'\right) dx' \Big\} \exp\left(-\sqrt{\frac{s}{F_0}} x\right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。ただし $F_0 = F \cos^2 \theta / h$ である。式(7)の定数 A, B を境界条件を考慮して定め、逆変換を行えば式(8)に示す解が得られる。

$$\begin{aligned} y(x, t) = & \frac{x}{\pi} \left(\tan \theta - \frac{q_0}{F \cos^2 \theta} \right) \int_0^t \frac{(t-\tau)^{1/2}}{\tau^{3/2}} \\ & \times \exp\left(-\frac{x^2}{4F_0 \tau}\right) d\tau \\ & + \frac{1}{2\sqrt{\pi F_0 t}} \int_0^\infty y(x', 0) \exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4F_0 t}\right) dx' \\ & + \frac{1}{2\sqrt{\pi F_0 t}} \int_0^\infty y(x', 0) \exp\left(-\frac{(x+x')^2}{4F_0 t}\right) dx' \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$y(x', 0)$ として図-3の形状を与えて計算すると最終的な解として式(9)となる。

$$\begin{aligned} y(x, t) = & \frac{x}{\pi} \left(\tan \theta - \frac{q_0}{F \cos^2 \theta} \right) \int_0^t \frac{(t-\tau)^{1/2}}{\tau^{3/2}} \\ & \times \exp\left(-\frac{x^2}{4F_0 \tau}\right) d\tau + \frac{b}{\sqrt{\pi}} \int_{x+A}^{x+A} \exp(-\zeta^2) d\zeta \\ & + \frac{a\sqrt{F_0 t}}{\sqrt{\pi}} \{ \exp(-(X+A)^2) \\ & - 2 \exp(-X^2) + \exp(-(X-A)^2) \} \\ & + \frac{ax}{\sqrt{\pi}} \int_{x-A}^x \exp(-\zeta^2) d\zeta \\ & + \frac{ax}{\sqrt{\pi}} \int_x^{x-A} \exp(-\zeta^2) d\zeta \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし, $X=x/2\sqrt{F_0t}$, $A=b/2a\sqrt{F_0t}$ である.

4. 数値モデル

この場合の基礎式は式 (3) と (4) である. 解法としては, Implicit 法を用い, 次のように差分化する.

$$\frac{h}{\Delta t}(y'_i - y_i) + \frac{1}{\Delta x}(q'_{i+1} - q'_i) = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$q'_i = F_i \cos^2 \theta_i \frac{1}{1 + \left(\frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta x} \right)^2} \cdot \left\{ -\frac{1}{\Delta x} (y'_i - y'_{i-1}) - \tan \theta_i \right\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

式 (10), (11) は境界条件が与えられれば解くことができる. この方法の有利な点としては, Explicit な差分法では Δt と Δx の間に,

$$\Delta t_c \leq \Delta x^2 \cdot \frac{h}{F} \quad \dots\dots\dots (12)$$

の関係が成立する必要があるが, ここで提案した方法はこの制限を受けない点である. ただし Δt が過大であると精度が低下する. この点を検討するために, 現地条件にほぼ適合するモデルとして,

$$\left. \begin{aligned} y &= 27.0 - 0.27x & (0 \leq x \leq 100 \text{ m}) \\ y &= 0 & (100 \leq x) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (13)$$

という初期形状を考え, θ を 0° と 10° , F を $50 \text{ m}^3/\text{day}$,

q_0 を 0 とおいて式 (9) による解と差分解を比較した. この結果, 例えば代表点として $x=100 \text{ m}$ 地点を選んで汀線位置の比を求めたのが表一である. 表によれば, 式 (12) で与えられる Δt_c の約 50 倍程度まで Δt を伸ばしても誤差は高々 5% 程度である.

表一 差分解の精度
($F=50 \text{ m}^3/\text{day}$, $\theta=0^\circ$)

$\Delta t/\Delta t_c$	20日後	50日後	100日後
1	1.00	1.00	1.00
2	1.00	1.00	1.00
5	0.97	0.99	1.00
10	0.97	0.99	1.00
20	0.96	0.98	1.00
50	0.94	0.97	0.99
100	0.90	0.95	0.99

5. 現地実験とモデルの検証

人工海浜の計画されている海域は特殊な条件におかれ, 直接予測計算を行うことは危険であるために, まず現地試験を行い, その資料を基礎として将来の予測を行うことにした.

まず, 波向に重要な効果を持つ風向は図-4 に示す特長を有している. これは第2海壁における昭和40年より44年までの資料であるが, 湾口が東向きであることを考慮すると, 卓越風向としてほぼ NE ないし NNE であると言えよう.

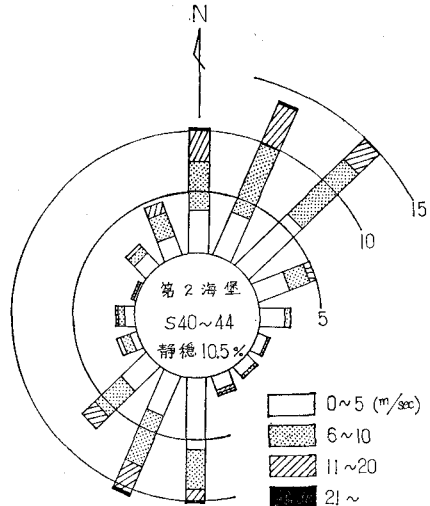


図-4 風況図 (第2海壁)

次に波浪条件に関しては, 昭和50年10月より金沢湾口 (図-7 参照) にステップ式波高計を設置し, 観測を行って来た. この結果のうち, 昭和50年8月より51年9月までの1年間の有義波高の分布を示すのが図-5である. 平均して 30 cm 程度の波高がほぼ 60% 近く出現している. また図-6は有義周期を示しているが, 平均的な周期としては 2.5~3.0 秒と言えよう.

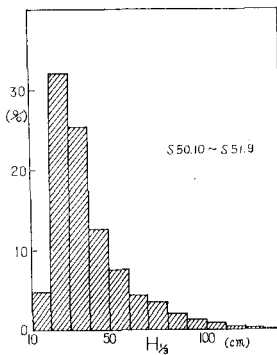


図-5 有義波高分布 (金沢湾口波高計)

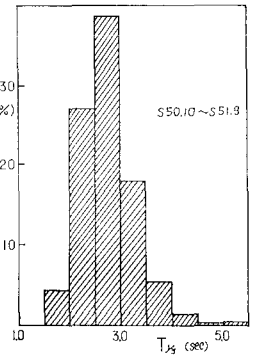


図-6 有義波周期分布 (金沢湾口波高計)

以上のように波浪条件は極めて良好に測定されているものの, 測定点が湾口にあり, 養浜地点に到達するまでに護岸による反射や屈折・回折を受けて波高は相当変化してしまい, 直接外力として用いることができない点が問題であった. この点を検討するために, 現地実験を行って実際に移動条件を調べることにした. 試験は昭和50年9月から51年3月までと, 昭和52年3月より7月まで2度行った. 第1回目の養浜は図-7に示す位置に, 約 5 000 m^3 の浅間山山砂 ($d_{50}=0.25 \text{ mm}$) を図-8の実線で示される形状に10月15日にまき出し, その後

の地形変化を追跡した。図-8 において白丸印は 11 月 2 日 (18 日後) の、また黒丸印は 3 月 4 日 (91 日後) の形状を示している。この場合の断面変化としては 図-8 の AA' 断面の変化は 図-9 に示す通りであり、代表水深としては約 1 m 程度であることが予想される。実際、図-9 の断面変化量を A (m^2)、図中の berm の後退距離を y として図示すると 図-10 のようになる。すなわち A と y は $A=1.0y-7.5$ という関係が成立する。これより代表水深としては $h=1.0m$ とおくことができる。

さて、 h の値が既知となったので、 F の値を定めれば

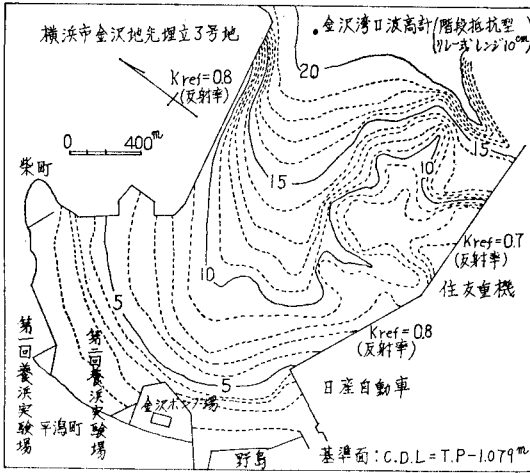


図-7 金沢湾深浅図

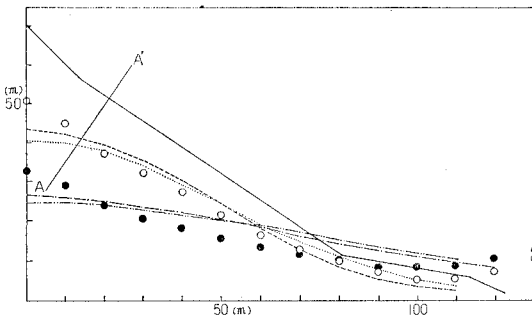


図-8 第1回養浜実験場汀線変化 (実線: 初期, ○印: 18 日後, ●印: 91 日後形状)

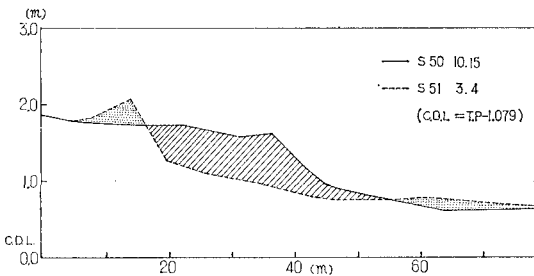


図-9 第1回養浜実験場断面変化

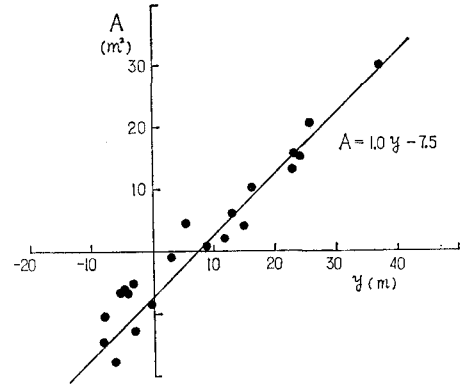


図-10 第1回養浜実験場 $A \sim y$ 特性

計算が可能である。このため、 $a'=0.6$, $\rho_s/\rho=2.65$, $\theta=0$ とおき、また K としては波浪が弱いことを考慮して $K=0.35$ とおき、更に碎波波高を約 8 cm とおけば、 $F \approx 30 m^3/day$ となる。また 図-10 では断面変化がなくても後退が生じているが、これは初期において berm の位置を人工的に定めたために、まき出し直後に汀線と直角方向の移動が起きたためであろうと考え、計算では最初に 7.5 m の移動を考慮して計算を行った。ただし解析解では $a=0.68$, $b=66$ とおいた。この結果、白丸印に対応するのが解析解は点線、差分解析は破線であり、黒丸印には各々一点鎖線および二点鎖線が対応している。11 月 2 日の地形については、原点付近を除けばほぼ妥当な解が得られている。また解析解は線型化した割にはかなりの精度を有している。しかし 3 月 4 日の地形に関しては予測値と測定値は多少異なっている。最も、計算では $\theta=0$, $F=const.$ という単純な条件であるためにこの程度の差は許容されうると考えられる。

次に、同様にして昭和 52 年 3 月 19 日に行った第 2 回の養浜形状が 図-11 の実線で示されている。また図中、白丸は 4 月 29 日、黒丸は 6 月 30 日の測定結果であ

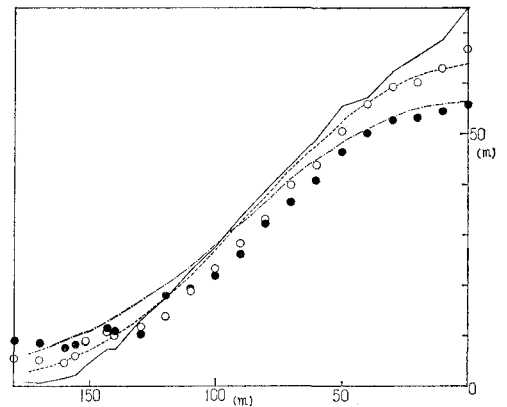
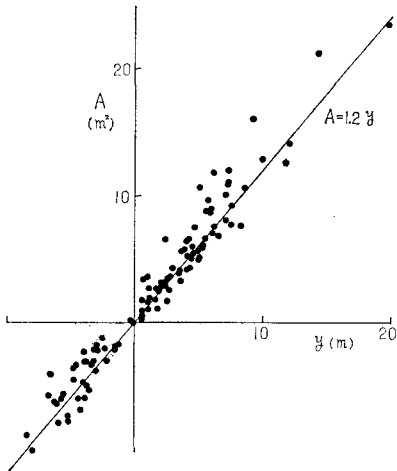


図-11 第2回養浜実験場汀線変化 (実線: 初期, ○印: 41 日後, ●印: 103 日後形状)


 図-12 第2回養浜実験場 $A \sim y$ 特性

る。このときの $A \sim y$ 特性は 図-12 に示す通りであり、代表水深としては約 1.2 m とすることができよう。

計算は $\theta = 0^\circ$ 、 $F = 20 \text{ m}^3/\text{day}$ とおいて行ったが、その結果が 図-11 に示されている。中央の $x = 100 \text{ m}$ 付近では差があるが、他の場所では妥当な値が得られている。

6. 将来予測

金沢湾に入射する波は風向資料よりほぼ NE 方向が卓越し、また波の周期としては約 3 秒が卓越しているので、NE 方向より 3 秒の波を入射させて湾内の波高分布を計算¹⁾した。また屈折計算を行って、人工海浜前面の入射角と波高比の分布を描いた。図-13 において人工島のない場合の波高比は一点鎖線で示されているが、この曲線において現地実験を行った前面の波高比はほぼ 0.45 程度である。このためこの値を基準とし、また養浜実験で用いた波高約 8 cm を考慮して波高分布を求め、入射角と F を場所的に変えて計算を行った。この結果が 図-14 である。太い実線が初期形状を、点線が人工島のない場合の 1 年後地形を、また 2 年後の地形が二点鎖線で示されている。一方、人工島のある場合がそれぞれ一点鎖線、破線で示されている。人工島のない場合は典型的な地形変化が生じているが、人工島のある場合は中央より左側の区域ではほとんど変化が起らないが、中央より右側では平面的に相当の変化が起り得る。以上の点は、人工島と海浜の施行順序にも影響を及ぼすと考えられる。

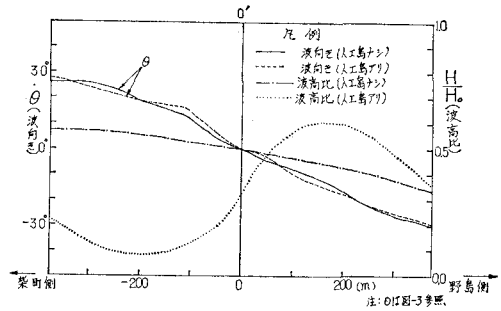


図-13 波向きおよび波高比の場所的变化

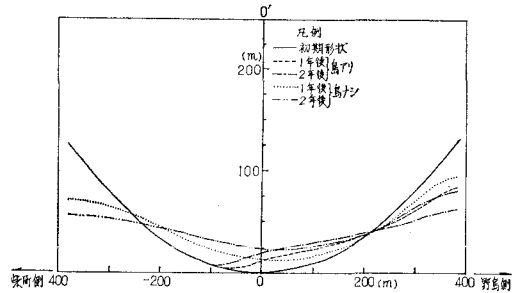


図-14 将来予測 (人工島アリ・ナシ)

7. あとがき

本論文では海浜変形モデルを人工海浜計画にとり入れる手法について考察した。特に、計画を推進するに当たって、現地実験を行い、それをモデルとして検討しつつ計画全体を再検討して行く方法はかなり有効な方法であろう。また養浜砂の移動についてはその後も調査が続いているが、年間を通じて砂の移動限界はほぼ 1 m 程度という結果も明らかになって来ており、養浜砂が湾外へ流出する可能性は低いと言えよう。ただし台風時のような極めて大きな波浪が発生する場合については更に検討を行う必要があろう。

参考文献

- 1) 横浜市都市開発局臨海開発部：金沢地先埋立海の公園砂浜基本計画報告書，p. 193，昭和 52 年 3 月
- 2) 橋本 宏：海浜変形モデルの富士海岸への適用，第 23 回海講論文集，pp. 218～222，1976。
- 3) Komar, P. D.: Beach sand transport: Distribution and total drift, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Div., Proc. ASCE, Vol. 103, No. WW2, 1977, pp. 225～239.
- 4) Bakker, W. T.: The dynamics of a coast with a groyne system, Proc. 11th Conf. on Coastal Engg., 1968, pp. 492～517.