

航路埋没の数値計算

入 江 功*

1. はしがき

港湾の航路埋没については、これまで種々の対策が試みられてきており、今日では砂浜海岸における大型港湾の建設が可能となっている。これは、一つには港内水域を十分広く確保するため防波堤を長く伸ばし、これが侵入漂砂をも阻止し得たこと、またいま一つには、浚渫機械の能力がアップしたため、維持浚渫がさして困難でなくなったことにもよるであろう。しかし、砂浜海岸に建設された港口部の水深が浅い漁港等の中小港湾や今後とも需要が増大すると思われるマリナなどにおいては、漂砂による港内航路埋没はきわめて重大な問題であり、計画段階での適切な措置が必要である。しかし、航路埋没についての解析的手法がないため、計画段階での判断はきわめて困難となっている。航路埋没の現象を定量的にあつかうには、漂砂の定量的特性の把握が必要であるが、縮尺効果のため模型実験によるアプローチに限界があることなどのため、まだそこまで至っていない。著者は、浮遊砂に関する現地定量観測を実施し、昨年発表した¹⁾が、本論文では、その結果をもとに回帰分析して浮遊砂量分布、拡散係数を数式化し、その現地観測地点より漂砂の下手側に開削された航路の埋没について、電子計算機による数値計算と実際起こった埋没とを比較検討した結果について述べるものである。

2. 航路埋没計算のプログラム

(1) 浮遊砂量分布の表現

浮遊砂量分布式を

$$\log z = \alpha \log C + \beta \dots \dots \dots (1)$$

(または $C = 10^{-\beta/\alpha} \cdot z^{1/\alpha}$, z は海底よりの高さ, cm) と表わしたときの α および β と最大摩擦速度 u_B^* (cm/sec) との関係についての現地観測結果から、回帰分析により関係式を求めると、図-1、図-2 のようになる。

すなわち、

$$\alpha = -\exp(0.344u_B^*) + 1 \dots \dots \dots (2)$$

$$\beta = \exp(0.641u_B^*) - 1 \dots \dots \dots (3)$$

また、現地観測によれば、浮遊砂の中央粒径に相当する沈降速度 W_0 (cm/sec) と u_B^* との関係は 図-3 に示すとおりで、 W_0 は u_B^* の増大とともに大きくなる。これは、 u_B^* の増大に伴い、海底砂を構成する粒径の大きい砂の浮遊砂に占める割合が増大するために生ずるものであるが、簡単にするため、両者の関係を直線関係と仮

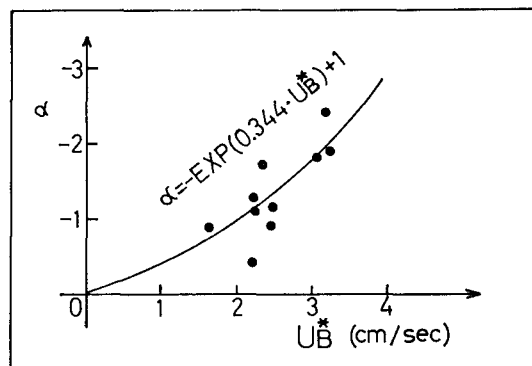


図-1 α と u_B^* との関係

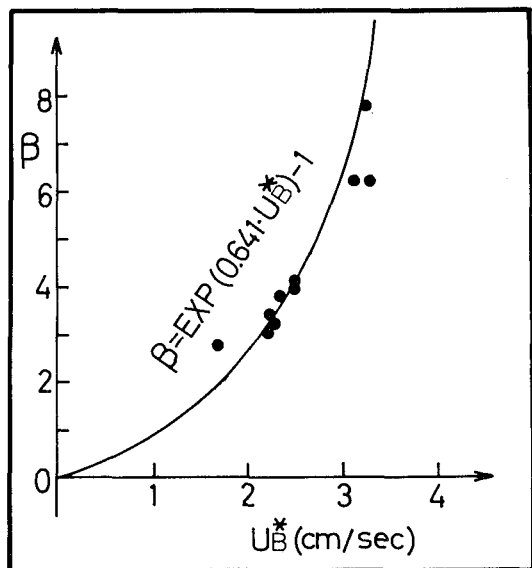


図-2 β と u_B^* との関係

* 正会員 運輸省港湾局防災課

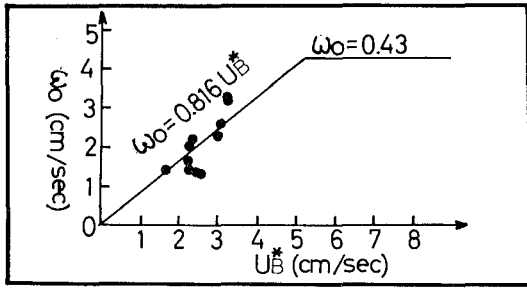


図-3 W_0 と u_B^* との関係

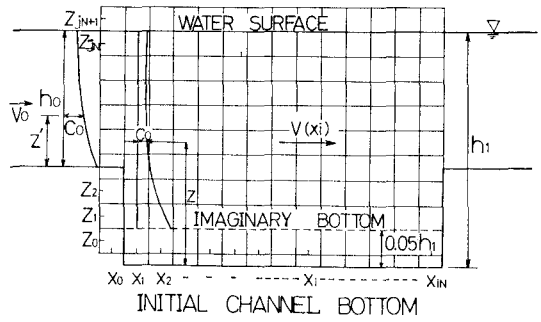


図-4 空間メッシュの切り方

定した。すなわち、

$$W_0 = 0.816 u_B^* \quad \dots\dots\dots (4)$$

浮遊砂は、 u_B^* の増大とともに大きくなるが、海底を構成する底質の中央粒径相当沈降速度 ($W_0 = 0.43 \text{ cm/sec}$) 以上にはなり得ない。したがって、図-3 のように、上限値があるものと仮定した。

拡散係数は、式 (1) より

$$\varepsilon = -W_0 \alpha z \quad (\text{cm}^2/\text{sec}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

最大摩擦速度は、

$$u_B^{*2} = \sqrt{2\pi\nu/T} \cdot \pi H/T \sinh kh \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\pi = 3.1416$ 、 $\nu = 1.52 \times 10^{-2} (\text{cm}^2/\text{sec})$ 、 $H =$ 波高 (cm)、 $T =$ 波の周期 (sec)、 $h =$ 水深 (cm) である。式 (5) より、鉛直拡散係数は、 u_B^* の増大とともに大きくなる二つの要素、すなわち、中央粒径相当沈降速度 W_0 と、浮遊砂濃度分布勾配 α との積に関係していることがわかる。

(2) 計算モデルの設計

基本方程式を

$$\frac{\partial \{V(x) C(x, z)\}}{\partial x} = W_0 \frac{\partial C(x, z)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \varepsilon(x, z) \cdot \frac{\partial C(x, z)}{\partial z} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

とし、航路断面を横切る漂砂による航路埋没を考える。

$$\text{ここに、} \begin{cases} V(x) = \text{航路を横切る流れの速度} \\ C(x, z) = \text{浮遊砂濃度} \\ W_0 = \text{浮遊砂の沈降速度} \\ \varepsilon(x, z) = \text{鉛直方向の渦動拡散係数} \\ x, z = \text{流れおよび鉛直上向き方向} \end{cases}$$

図-4 に示すように、航路断面に対し空間メッシュを与える。

x 方向: 航路幅 B を I_N 等分し

$$\Delta x = B/I_N, \quad x_{i+1} = x_i + \Delta x, \quad (0 \leq i \leq I_N)$$

とし、 $I_N = 100$ とした。また、境界条件を与えるため、左端に列メッシュ設けた。

z 方向: 海底付近の基準高さを、水深の 0.05 倍と仮定して、その位置を仮想底面と呼んだ。

航路の初期水深を h_1 とし、

$$\Delta z = \frac{(h_1 - 0.05h_1)}{J_N}, \quad J_N = 16$$

とした。

式 (7) を差分化して、

$$\begin{aligned} \frac{V(x_{i-1})}{\Delta x} \cdot C(x_{i-1}, z_j) &= \frac{V(x_i)}{\Delta x} \cdot C(x_i, z_j) \\ &- W_0 \frac{C(x_i, z_{j+1}) - C(x_i, z_j)}{\Delta z} \\ &- \frac{1}{\Delta z^2} \{ \varepsilon(x_i, z_{j+1}) [C(x_i, z_{j+1}) - C(x_i, z_j)] \\ &- \varepsilon(x_i, z_j) [C(x_i, z_j) - C(x_i, z_{j-1})] \} \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

また、境界条件としては、

$$\begin{aligned} \text{海面において、} \quad & \begin{cases} C(x_i, z_{JN+1}) = C(x_i, z_{JN}) \\ \varepsilon(x_i, z_{JN+1}) = \varepsilon(x_i, z_{JN}) \end{cases} \\ \text{海底において、} \quad & \begin{cases} C(x_i, z_0) = C(x_i, z_1) \\ \varepsilon(x_i, z_0) = \varepsilon(x_i, z_1) \end{cases} \end{aligned}$$

とした。

航路埋没過程を計算するに際し、以下のように、さらにいくつかの仮定を設けた。

① 流速分布および浮遊砂粒径は、鉛直方向に一様である。

② 航路上手では、浮遊砂は定常状態にあり、その分布は式 (1) で与えられるものとし、その条件下で式 (4) で与えられる沈降速度に相当する粒径の砂が、粒径を変えることなく以後の沈殿過程を経ていくものとする。

③ 海象の変化は、砂の浮遊現象の時間的变化に比べきわめて緩慢である。したがって、浮遊砂の沈殿過程はつねに定常化している。

④ 航路上手の水深は変化しない。また、浮遊砂の沈殿量に相当する分だけ、航路が浅くなって行く。

(3) 計算の順序

① 航路上手の水深 h_0 での定常化した浮遊砂量分布を求める。

式 (1) より、

$$C_0 = 10^{-\beta' \cdot \alpha' (z')^{1/\alpha'}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 z' は航路上手海底面からの高さである。

② 航路に入った直後の浮遊砂量分布を求める。

$$C_0 = 10^{-\beta'/\alpha'} (z \cdot h_0/h_1)^{1/\alpha'} \dots\dots\dots(10)$$

このように、航路内に入り、水深が増大したときは、浮遊砂量分布は鉛直方向に比例配分的に拡がると仮定した。一般に、航路水深に比して航路幅は非常に大きいので、この仮定は妥当と思われる。航路内へ入る漂砂量は

$$S(\text{cm}^3/\text{cm} \cdot \text{sec}) = \sum_{j=1}^{JN} V(x_0) \cdot \Delta t \cdot C_0(z_j) \cdot \frac{1.5}{2.65} \times 10^{-6} \dots\dots(11)$$

③ 航路内の鉛直拡散係数の計算

式(5)により求める。この場合、航路全幅にわたって、波高、周期は一定と仮定した。

④ 差分方程式を用い、航路断面全域における定常化した浮遊砂量分布を求める。

$i=1, 2 \dots I_N$ の順に ($j^* \leq j \leq J_N$) に関する連立方程式を解く。ただし、 j^* は、浮遊砂の沈殿により埋没した新しい海底面高さに相当する j の値である。

⑤ 単位時間、単位幅当りの浮遊砂沈殿量を求める。

$$\Delta P(x_i) = \sum_{j=j^*(x_{i-1})}^{JN} V(x_{i-1}) \cdot C(x_{i-1}, z_j) \cdot \frac{\Delta z}{\Delta x} - \sum_{j=j^*(x_i)}^{JN} V(x_i) \cdot C(x_i, z_j) \cdot \frac{\Delta z}{\Delta x} \dots\dots(12)$$

Δt 時間内の埋没厚みは、

$$\Delta d(x_i)(\text{cm}) = \Delta P(x_i) \cdot \Delta t \cdot \frac{1.5}{2.65} \times 10^{-6} \dots\dots(13)$$

⑥ 埋没厚み $\Delta d(x_i)$ だけ、航路を浅くして、再び以上の計算を繰り返す。

(4) 代表例についての計算

以上に述べた計算法にて、典型的なケースに対して計算した例を以下に述べる。

まず、入力条件として、

波高 $H_{1/3} = 150 \text{ cm}$ 、周期 $T = 8.0 \text{ sec}$ 、航路内初期流速 $V = 50 \text{ cm/sec}$ 、航路上水深 $h_0 = 440 \text{ cm}$ 、航路内初期水深 $h_1 = 780 \text{ cm}$ 、航路幅 $B = 100 \text{ m}$ 、底質は図-16に示すように、今回調査対象現地海岸の底質特性 ($d_{50} = 0.44 \text{ mm}$) を有するものとする。

図-5 は、上記の条件の下に計算した航路内における浮遊砂量鉛直分布の場所的变化を示したものである。右端より、航路上手から $x=0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 \text{ m}$ の地点における分布を示し、 $x=0 \sim 100 \text{ m}$ における浮遊砂量分布の差が、航路内への総沈殿量となる。また、図-6 は、同じ条件下での航路内への砂の沈殿による海底断面の変化を、 $\Delta t = 12 \text{ 分}$ 、1時間、2時間後について示したものである。航路埋没は、航路上手付近が最もはげしく、下手へ行くにつれて減少している。

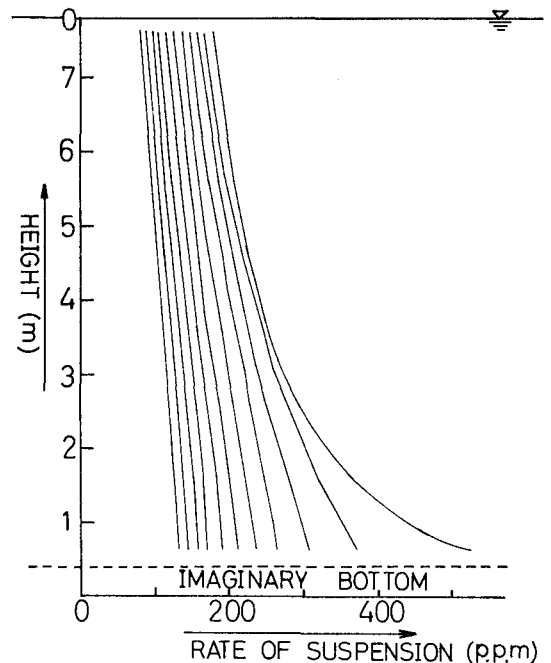


図-5 航路内での浮遊砂濃度分布の変化

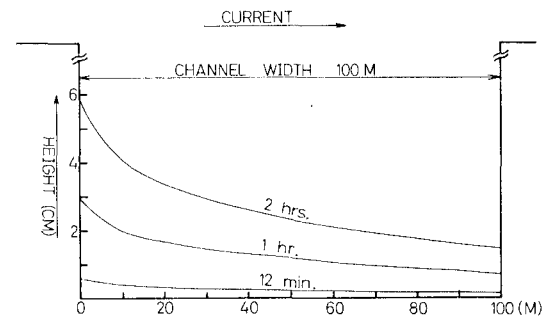


図-6 航路断面の変化

3. 現地への適用

本計算法は、モデル設計に際して種々の仮定を設けた。そこで、実際に起こった航路埋没に対して本計算法を適用し、どの程度実際の現象を再現できるかを調べてみた。

(1) 現地の諸条件

図-7 は、今回対象とした現地の諸施設の配置を示したものである。北防波堤が1118m 延びており、港内側に計画水深 -7.5 m 、幅 100 m の航路が掘削された。浮遊砂量分布を示す式(1)、(2)等は、航路のすぐ南側(漂砂の上手側)の突堤先端の採水調査により求めたものである。港内波高は、図中に示す波高桿により観測し、港外波高は、沖合水深 -20 m における超音波式波高計、港外波向はレーダーによりそれぞれ連続観測されている。ここで、港外波高 (H_I) と港内波高 (H_D) と

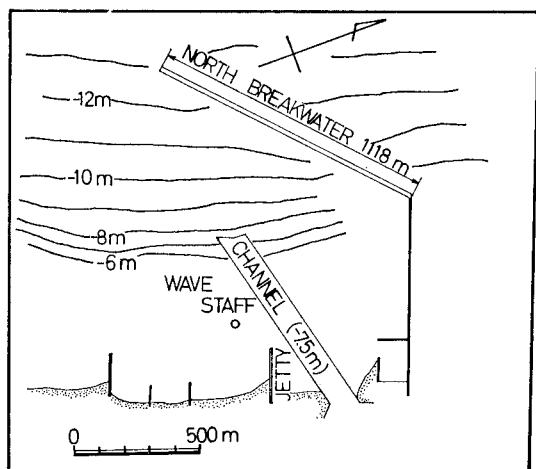


図-7 施設の配置図

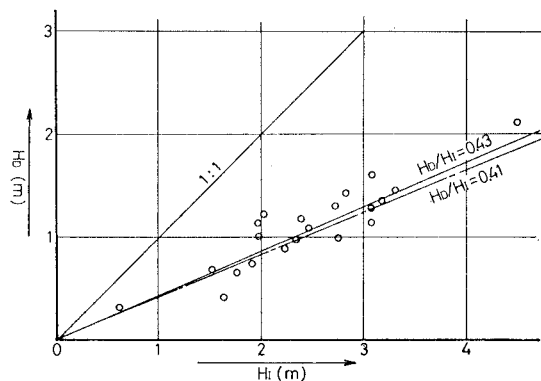


図-8 港外波高と港内波高との関係

の関係を、昭和 50 年 1 月から 3 月にかけての観測値をもとに示すと 図-8 のようになる。観測値の平均値は、図のように、 $H_o/H_i=0.43$ で与えられるようである。これに対し、著者が秋田港をモデルにして、防波堤による波の回折係数を調べ、現地波浪の方向スペクトルを表わす方向分散係数 $\cos^2 \theta$ について、 $n=6\sim 8$ としたときの不規則波に関する回折計算値が最も現地の現象と一致することを発表した。これを今回の場合に適用したのが、図-8 の $H_o/H_i=0.41$ という値である。両者は非常に近い値を示しており、 $n=6\sim 8$ の妥当性がここでも再確認できる。

現地の航路埋没は、航路掘削の直後の昭和 49 年 10 月 11 日の深浅図と、昭和 49 年 11 月 28 日の深浅図との比較により調べたが、図-9 は、その間の港内の波高標位置での波高の変化を、図-8 の関係により示したものである。波の周期は、回折による変化が小さいので、港外波高に対するものを用いた。図-10 は、航路掘削値後の昭和 49 年 10 月の深浅図を示し、図-11 は、昭和 49 年 11 月 28 日の深浅図と比較して求めた海底地形変動図である。図において、打点により示された領域は堆積、斜線で示された領域は欠壊を示す。図中の ABCD 区域で示される著しい堆積は、航路上手から航路を横切って移動する漂砂が埋没したものである。図-11 には、昭和 50 年 1 月 31 日 15 時 10 分に投入したボールフロート(糸の長さ約 3m)の位置の変化を 4 分ごとに示してあるが、これからも航路埋没土砂の移動経路が推定できる。

(2) 航路埋没土量の計算

入力としては、まず波については、図-9 に示す波高、周期を 1 日 1 データ(午前 4 時)として与え、水深、底質特性および航路の条件は、現地の諸元をあらわすところの前述の代表例についての計算の場合と同じ諸元を与え、昭和 49 年 10 月 11 日から昭和 49 年 11 月 28 日までの間を連続計算して埋没過程を追跡した。航路内の流速は、図-11 に示すフロート観測結果から、 $V=20$ cm/sec と一定にした。図-12 は、計算の初期の頃、すなわち埋没により航路内海底が浅くならないときの航路へ侵入する浮遊漂砂量 Q_i 、航路埋没土量 Q_p 、埋没せずに航路下手へ出て行く土量 Q_o と航路付近の波高との関係を計算結果に基づき示したものである。港内波高 $H_{1/3}=50\sim 60$ cm 以下になると、埋没土量が非常に少なくなることがわかる。

図-13 は、航路埋没による断面の変化について、現地と計算結果を比較したものである。現地の断面は、図-11 の ㊦-㊦ 断面について示したもので、計算による断面は、埋没現象を完全に二次元的に扱ったときの断面

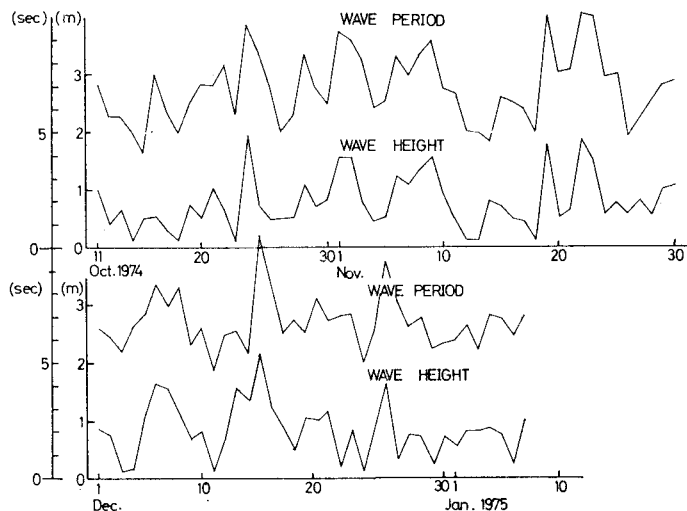
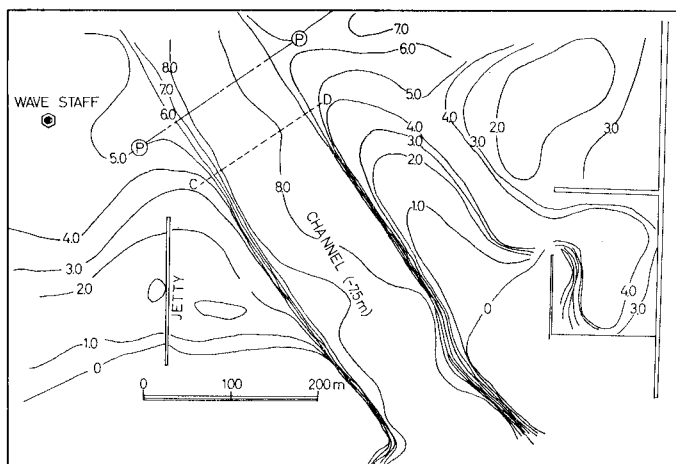
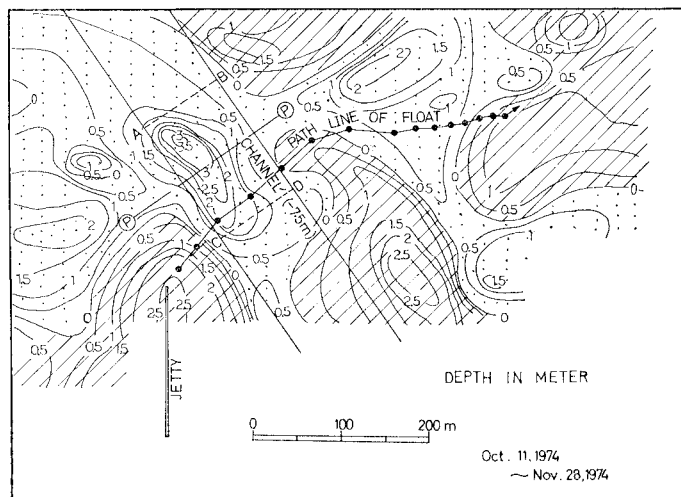


図-9 港内波浪の変化



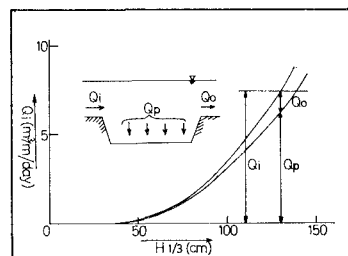
図—10 航路掘削直後の海底地形



図—11 海底地形変動図

である。図によれば、昭和 49 年 11 月 28 日の埋没断面は、現地と計算とでかなり似ているようである。しかし、昭和 50 年 1 月 7 日には、現地では、航路上手に著しく発達した砂州が航路内へ達したため、航路は掘削前の海底より浅くなったが、計算では、昭和 49 年 12 月 16 日で、航路は完全に埋没し、航路上手と航路内とは波の条件が同じにとってあったので、それ以上、埋没が進んでいない。

土量計算によれば、昭和 49 年 10 月 11 日～11 月 28 日までに航路が埋没した現地の実績は 47760m^3 であった。一方、本計算では、 $200\text{m}^3/\text{m}$ となったが、埋没の幅については推定によらざるを得ない。図—11 によれば、埋没の幅は、AC or BD=150m 程度と考えられる。もしそうとすれば、 $200\text{m}^3/\text{m} \times 150\text{m} = 30000\text{m}^3$ が計算で得られた航路埋没土量となり、現地の実績に比して約 18000m^3 はどくなる。この差異の主な原因としては、



図—12 航路埋没土量と港内波高との関係

- ① 計算には、掃流砂による埋没土量が考慮されていない。
- ② 計算では航路内での波高は航路上手と同じと仮定したが、現地では航路内下手側に近いほど防波堤による波のしゃへいにより波高は小さくなっている。

などが考えられる。

4. 浮遊砂の粒度分布について

これまでの計算では、浮遊砂粒径の鉛直分布は一定と仮定した。著者は、さきの浮遊砂の現地観測において、浮遊砂の粒径のデータも取得していたのでこれについて二、三の考察をおこなう。

浮遊砂量の鉛直分布は、

$$C = 10^{-\beta/a} z^{1/a} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで、海底面よりの基準高さ a ($a = 0.05 \sim 0.1h$, h は水深) における濃度は、

$$C_a = 10^{-\beta/a} \cdot z^{1/a} \quad \dots\dots\dots (15)$$

式 (14) と (15) との比をとって、

$$C/C_a = (z/z_a)^{1/a}$$

浮遊砂を構成する各粒径域 i ごとに上式が成立すると仮定すれば、

$$C_i/C_{ai} = (z/z_a)^{1/a_i} \quad \dots\dots\dots (16)$$

沈降速度 w_i の浮遊砂の粒度分布は、式 (16) より、

$$f(w_i) = C_i / \sum_i C_i \\ = C_{ai} (z/z_a)^{1/a_i} / \sum_i C_{ai} (z/z_a)^{1/a_i} \quad \dots\dots\dots (17)$$

$z = z_a$ でも同じ考えがなりたち、しかもそこでの浮遊砂の粒度分布は、底質の粒度分布 $f_b(w_i)$ と同じと考えると、

$$f_a(w_i) = C_{ai} / \sum_i C_{ai} = f_b(w_i) \quad \dots\dots\dots (18)$$

より、

$$C_{ai} = f_b(w_i) \cdot \sum_i C_{ai}$$

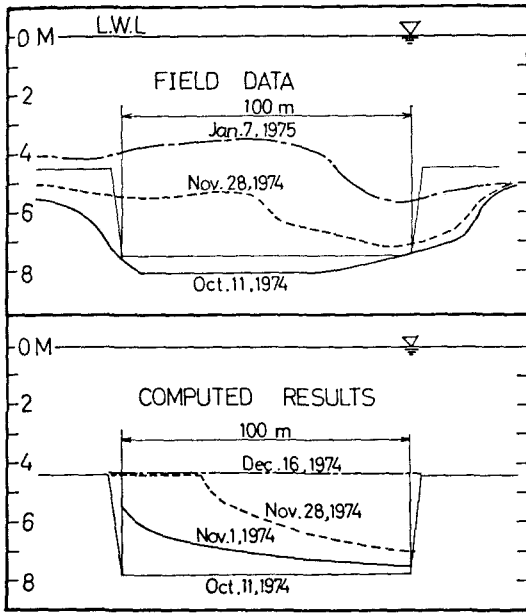


図-13 航路埋没断面の現地実績と計算結果との比較

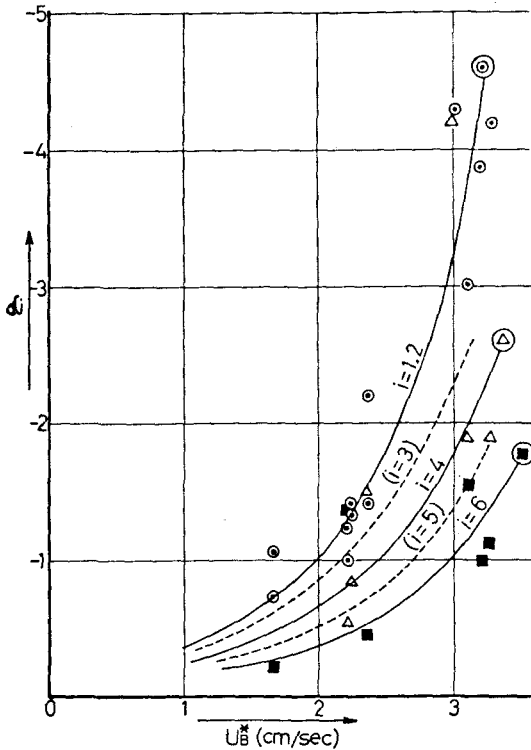


図-14 α_i と u_B^* との関係

また,

$$\begin{aligned} \sum C_{ai}(z/z_a)^{1/\alpha_i} &= \sum_i [f_b(w_i) \cdot \sum_i C_{ai}] \cdot (z/z_a)^{1/\alpha_i} \\ &= (\sum_i C_{ai}) \sum f_b(w_i)(z/z_a)^{1/\alpha_i} \dots (19) \end{aligned}$$

より,

$$f(w_i) = f_b(w_i)(z/z_a)^{1/\alpha_i} / \sum_i f_b(w_i)(z/z_a)^{1/\alpha_i} \dots (20)$$

そこで、粒径域 i を、 $i=1$ ($d=0.074$ mm 以下)、 $i=2$ ($d=0.074 \sim 0.105$ mm)、 $i=3$ ($d=0.105 \sim 0.25$ mm)、 $i=4$ ($d=0.25 \sim 0.42$ mm)、 $i=5$ ($d=0.42 \sim 0.84$ mm)、 $i=6$ ($d=0.84 \sim 2.0$ mm) としたときの α_i と u_B^* の関係を現地データにより整理したのが 図-14 である。さらに、これより、 z/h と $(z/z_a)^{1/\alpha_i}$ との関係を求めると、図-15 のようになる。図-16 の底質粒度分布を用いれば、鉛直方向各点の浮遊砂粒径を求めることができる。

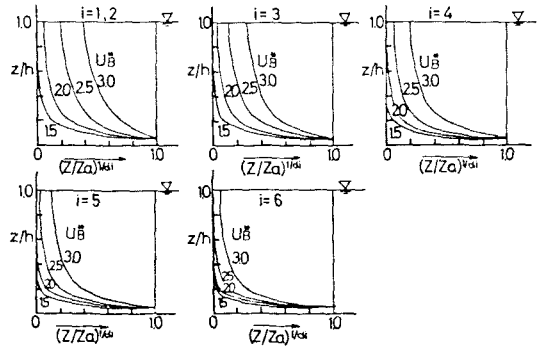


図-15 浮遊砂粒度の鉛直分布

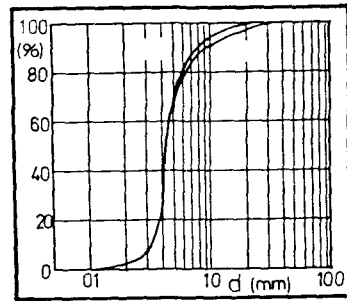


図-16 海底砂の粒度組成

図-16 の底質粒度分布を用いれば、鉛直方向各点の浮遊砂粒径を求めることができる。

5. 結 語

本回は、二次元的にみた浮遊、埋没数値計算を行ったが、今後は三次元的取扱へ進めたいと思っている。なお、本研究の遂行に際し、絶えず御指導、御協力いただいた港湾技術研究所水工部漂砂研究室長田中則男氏以下各位に深く感謝するものである。