

パキスタン、カシム港の航路埋没対策について

矢 木 秀 雄*・佐 藤 淳**

1. ま え が き

カシム港は、パキスタン第2の国際貿易港として、また製鉄所を中核とした工業港として、カラチ港の東方に90 km のインダス河の河口跡地のクリークを利用して建設され、1980年に開港した港である。周辺は浅く、港から沖に出るには延長29 km の内洋航路（クリーク）と水深6 m の砂州を掘削して造られた延長16 km の外洋航路を通らなければならない。これらの地理的な位置を図-1に示す。ところが、外洋航路、特に図のAB（8 km）の航路にはSWモンスーン中の波浪により底質が攪乱され、浮上したものが流れ込み大量の土砂の浚渫撤去を余儀なくされた。建設工事は1980年4月に終了したが、埋没対策としての浚渫工事が1980年10月から、5000 m³ ホッパ容量のドラグサクシオン船1隻で行なわれ、SWモンスーン期間中に堆積した土砂の撤去に当たった。筆者らの業務は、年間を通して、維持浚渫コストをできるだけ少なく、いかに航路設計断面を確保維持するか、という航路埋没対策であった。初年度には年間の埋没量が400万 m³ に及び、設計断面を確保できなかった。そこで、浚渫断面を検討し、2年度に2 km の区域にトラップ水域を試行的に設置して、その効果を調べた。その結果、トラップ水域の設置が有効であることが分かったので、翌年は更に、この水域を広げ、外洋航路5 km に設置したところ、航路の埋没量は大幅に減り、所期の目的を達成することが出来た。

日本の港の多くは海港で港外の海底勾配が大きいので航路維持の問題は、導流堤、防波堤などの建設により、ある程度解決することができる。一方アジア諸国では、河港、もしくは浅海部に造られた港が多く、船舶の大型化とあいまって、航路維持が大きな問題となっている。加えて、建設、維持を通して、総コスト、総便益を考える習慣から維持コストを少なくなるようにするため、漂砂移動量等の推計には、より正確で、精度の高い推定方法が求められている。

本文では、埋没対策の検討結果を報告し、更にその計画断面に対する埋没量を推算し、実測値と比較検討した。

浚渫航路埋没量の推算法には入江⁴⁾、Skafel, Bijker^{1),2)}などの研究があるが、今回は現地と似たモデルで研究している Bijker の方法を用いて推算した。

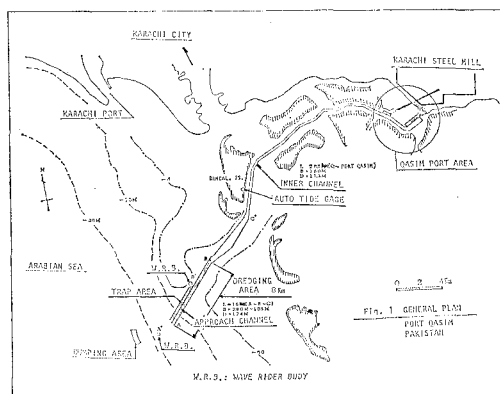


図-1 カシム港の位置図

2. 海象及び底質の観測結果

この海域は、亜熱帯モンスーン地帯に属し、4～9月にはSWモンスーンが卓越し、10～3月にはNEモンスーンとなるが、図-2の月平均風速の年変化（カラチ空港）に見られるようにSWモンスーンは顕著であり、特に6～8月は発達するので、アラビア海では、連日2.5～3.5 m の波が発生する。これに対してNEモンスーンは陸風なので、波は小さく海は穏やかである。

(1) 波 浪

波浪は、外洋航路入口沖(A')の水深-20 m に超音波式波高計を設置し、1979～1983年のSWモンスーン期間(5～9月)中1日4回(1回20分)観測した。又この波高と浚渫航路内の波高とを比較するために1983年にB'点(水深-6 m)に同機種波高計を設置して、1シーズン観測した。SWモンスーンの波は定常性があり、波向は225～235°(航路法線となす角は15～18°である)で、波高の変動は比較的緩慢なので、浮遊砂量の

* 正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) 港湾部 顧問

** パシフィックコンサルタンツ(株) 港湾部 技術課長

計算には1週間平均の波高及び周期を用いることにした。

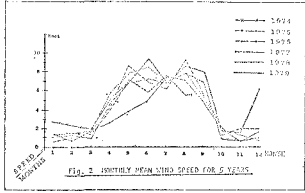


図-2 5カ年の月平均風速記録

図-3にA'における1980～1983年のSWモンスーン期間中の1週間平均波高と周期の変化を示す。図を見ると毎年似たような変動をしており、6～8月には平均波高で2～3mの波が発生している。これからもこの海域に夥しい漂砂が運ばれていることが分かる。又周期はSWモンスーン初期と末期には7～8秒、最盛期には8～10秒でほとんどがうねりである。

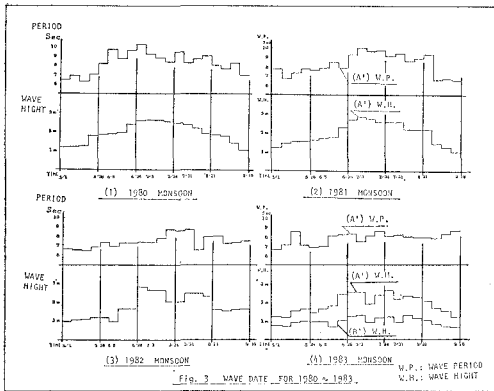


図-3 4カ年の波浪条件の経年変化

次に外洋航路(A')と渡渚航路(B')における波高の関係を図-4に示す。これを見ると、 $H_1/H_0 \approx 0.50$ となっている。これは水深-6m砂州の海底摩擦によるものと考えられる。Bretschneiderの減衰式を用い、次の条件で計算した結果を図の1点鎖線で示した。

条件: 水深-6m, 減衰距離 $\Delta x = 3000$ m, 摩擦係数 $f = 0.03$, 周期 $T = 9$ 秒。

以上の結果から航路の波高は $f \approx 0.03$ とすれば、外洋航路沖の波高から推定できることが分かる。

(2) 潮流

潮流は海面が穏やかなNEモンスーン期間に外洋航路入口(A)と航路(B')で潮流25時間観測及びフロートによる流向観測を実施した。図-5に上潮時及び下潮時の流速と流向を示す。図を見ると外洋航路入口では、上、下潮共に余り大きい変動はない。航路付近の平均流速は

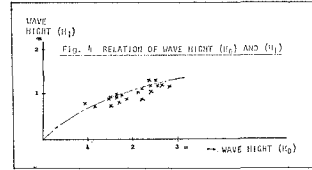


図-4 入口の波高(H_0)と航路の波高(H_1)の関係

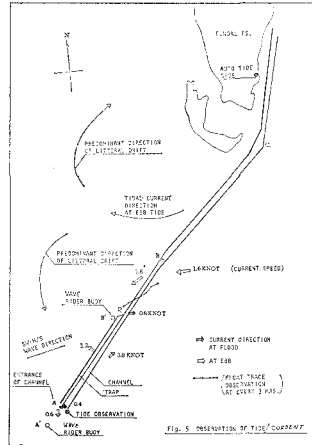


図-5 流況観測図

50 cm/sec で、上潮、下潮共に流れは航路を横断していることが確認された。

(3) 潮位

潮位は内洋航路の入口に自記潮位計を設置し、連続観測を行ない、これによって外洋航路の工事基準を設定した。外洋航路の渡渚工事区域とは約15km離れているので、外洋航路入口(A)で25時間の同時観測を行ない、潮位差を調べた。図-6に両地点の潮位曲線を示す。

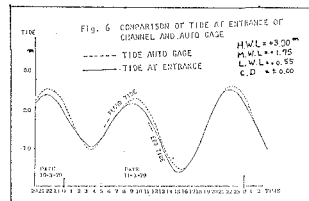


図-6 潮位計と航路入口との潮位の比較

図を見ると上潮時に、最低及び最高潮位の付近で約20cmの差がある。時間的な差は約30分である。そこで深浅測量は上潮時で両地点の潮位が一致している時間帯に行なった。

(4) 原地盤の底質特性

原地盤の底質特性は $D_{50} = 0.01$ cm で、細砂が90%以上の砂質土であったのが、渡渚後の埋没土砂は年々細か

くなる傾向が見られた。埋没土砂の表層は60%がシルトであった。

(5) 砂州の漂砂移動

当海域における沿岸砂州の漂砂は、SWモンスーンの波によって支配される。外洋航路の海域では、漂砂は局部的な地形の影響を受けて、図-5に示すように、バンドル島の沖合で漂砂の卓越方向が変わっている。北側では北へ、南側では南へ向う漂砂が卓越している。

3. 外洋航路の埋没とその対策⁵⁾

外洋航路浚渫の本工事は1980年4月に終了し、その後は航路埋没対策としての浚渫工事が1980年10月から行なわれ、1984年4月までに2100万 m^3 が掘削、撤去された。浚渫土砂は、入口から南へ5.5km沖合で、水深20mに投棄した。図-7には1979年～1983年のSWモンスーン直後に観測された埋没現象と、それを参考に検討した浚渫計画を示す。各年の浚渫工事は計画水深とほぼ同じ深さで掘削を終っているので、計画水深を掘削水深とみなしてよい。左図は航路入口から2.5km、右図は5kmの航路横断面である。以下、これらについて述べる。なお、深浅測量は波高50cm以下の穏やかな時に超音波式測深機によって行った。

(1) 1979年の埋没について

この年はSWモンスーン中も浚渫が継続されたが、航路の西側の底幅60mについては浚渫しないことにし、そこで土砂の堆積分布を観測した。図(a)を見ると航路入口近くでは堆積厚は1m程度であるが、入口から5km(右図)では1:20の法面が崩れ1:80～100となり、堆積厚は3～4mに達した。これは航路周辺の水深の相違によるものと考えられる。この年の外洋航路の埋没量は浚渫量と堆積量を加えたものとなるので、約600万 m^3

であった。

(2) 1980年の埋没について

1980年以後は確実な埋没現象を把握するために、SWモンスーン中は浚渫を中止した。この年も外洋航路入口から2～5kmの西側法面の崩れは著しく、航路全体に堆積し、水深-11mの航路巾は100m程度に狭まってしまった。又法面勾配は西側では1:80～100で前年と同じであったが、東側の法面では航路を横断した土砂が堆積し、設計勾配1:20より多少急になった。この年の埋没量は約400万 m^3 であった。[図(b)]

(3) 1981年の航路埋没対策について⁵⁾

堆積の平面分布を見ると周辺の深い所では航路の堆積量が比較的少なくなっていた。したがって航路周辺に深い水域を設ければ、周囲からの漂砂はそこに沈澱し、その堆積土砂を定期的に撤去するようにすれば、航路埋没量は少なくなり、航路の所要水深が確保され、工事も経済的に実施できるものと考えられた。そこで埋没量の多かった航路入口から3～5kmの航路底幅を波の卓越方向に80m広げ、水深12mに掘削し、更に航路も水深を14mと深くした。[図(b)の右図余掘断面]。

その結果、1981年のSWモンスーン後には埋没土砂の大部分が80mのトラップに堆積したため図(c)右図のように、水深12mの航路幅150mを確保できた。これに対して、トラップ水域を設けなかった1～3kmの航路[図(c)左図]では法面の崩れが烈しく、水深12mの航路幅は80m程度であった。この年の埋没量は380万 m^3 であった。

(4) 1982年の航路埋没対策について

前年の結果から、トラップ水域を100mに広げ、これを入口から1～5kmの航路に設け、水深を12mとした。又航路は1～8kmを水深14.5mに掘ることにした。航路法面は掘削しないことにした。[図(c)]。

この結果、図(d)に見られるように水深12.4mの航路設計断面を確保でき、両側法面も1:20～30で法面の崩壊は見られなくなった。東側法面勾配は1:10～15で安定した。埋没量は290万 m^3 であった。

(5) 1983年の航路埋没対策について

前年の浚渫断面が効果的であったので、1983年のトラップ水域は同じ断面とし、航路水深を14.7mとした。[図(d)]。但し航路入口付近では水深が13mで、これまで変化がなかったが、航路(1～8km)を深くしたため不自然な縦断面となった。そこで今回はこの付近を水深14mに掘削し、航路に沿う潮流のフラッシュ効果を高めるために入口付近の縦断面をほぼ水平にした。その結果、図(e)に見られるように外洋航路の水深は13m以上となり、所要航路幅を確保でき、早期に航路維持の目的を達成することができたが、これはトラップ水域の導入

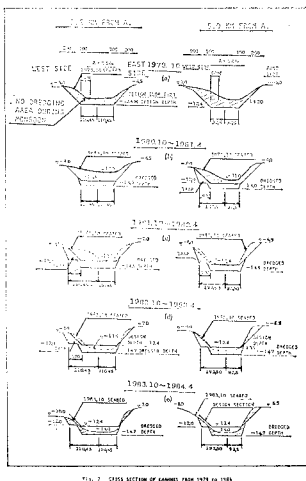


図-7 航路横断面の経年変化

によるものと考えられる。この年の埋没量は 260 万 m^3 であった。

(6) SW モンスーン期間中の埋没量の観測

SWモンスーン期間中に航路縦断方向に深浅測量を3回実施し、短期間の変動状況を調べた。図-8にその結果を示す。これを見ると、埋没は縦断方向にはほぼ一様に生じている。これは波浪条件が場所でも余り変わらないこと、土砂の粒径が細かいなどによるものと思われる。

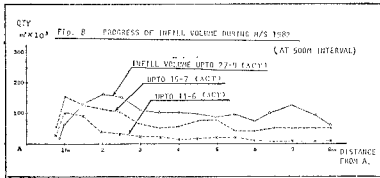


図-8 1982年モンスーン中の埋没量の変化

(7) 航路周辺の地形の経年変化

図-9に、1980～1983年のSWモンスーン直後に観測された航路周辺の地形変化を示し、埋没対策の効果を見る。図(a)は1980年モンスーン直後の深浅図で、12.4m以上に掘削されたのが、モンスーン後には12mの等深線は入口に後退し、10mの等深線が航路内に進出した。その後トラップ水域を設置したことにより、図(d)に見られるように10mの等深線は西側航路上手に移動し、航路内では大部分が13m以上となり、入口では14mとなった。東側の航路下手水深の等深線は変わらない。

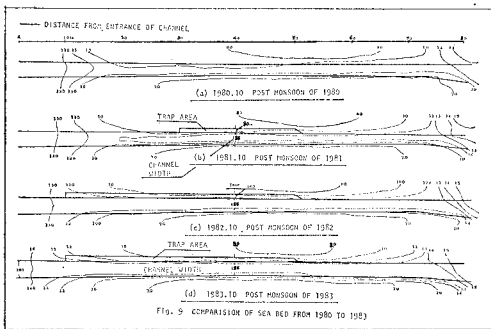


図-9 航路周辺の地形の経年変化

(8) 埋没量の経年変化

航路に堆積した埋没量を法面、トラップ、航路底とに分けて表-1に示した。これを見ると、西側のトラップの堆積量は、上手水深が深くなるにつれて、70万から50万 m^3 へと減少する傾向を示すが、東側法面の堆積量は70万から60万 m^3 と変っていない。又航路底の量が1982年から著しく減少している。これはトラップ水域の効果によるものと考えられる。

表-1 航路内区域別埋没量の経年変化

		×1,000 m^3			
区域	年	1980	1981	1982	1983
西側法面トラップ		720	670	600	440
航路底		2,630	2,510	1,560	1,540
東側法面		710	600	750	620
合計		4,060	3,780	2,910	2,600

4. 航路の埋没量の計算^{1),2)}

航路にトラップ水域を設けることにより埋没量が大幅に減少することが分かったが、任意の航路断面に対して埋没土砂量が予測できれば浚渫計画に大変有益である。

ここでは現地の条件と似たモデルで研究しているBijkerの式を用いて、1980～1983年までの埋没量の推算を行ない、実測値と比較検討することにする。

(1) 計算条件

初期航路横断面： 各年の計画断面(図-10)。

航路横断方向の平均流速： $V=0.50 \text{ m/sec}$ 。

底質粒径： $D_{50}=0.05 \times 10^{-3} \text{ m}$ 。

航路進入波の波高及び周期： 1980～82年は4週間の平均値、1983年は1週間平均値(図-3)。

(2) Bijkerの堆積土砂量の計算式^{1),2)}

$$S_0 = C_b W (1 - h_1 \epsilon_2 / h_2 \epsilon_1) \dots\dots\dots (1)$$

$$C_b = S_b C / 6.34 V r \sqrt{g} \dots\dots\dots (2)$$

$$S_b = \frac{BDV \sqrt{g}}{C} \exp \left[\frac{-0.27 \Delta DC^2}{\mu V^2 (1 + 0.5 (\xi u_0 / V)^2)} \right] \dots\dots\dots (3)$$

S_0 : 堆積土砂量, S_b : 底面流砂量,
 C_b : 底面浮遊砂量, W : 粒子の沈下速度, r : 粗度³⁾,
 $u_0 = \pi H / T \sinh(2\pi h / L)$, Δ : 相対密度,
 B : 係数(5を採用), μ : 係数, g : 重力の加速度,
 $\xi = 0.575 C^2$, $C = 18 \log(12h/r)^{1/2}$,
 h_1 : 航路上手水深, h_2 : トラップ水深, h_3 : 航路水深,
 H, T, L : 航路進入波の波高, 周期, 波長.
 ϵ_1, ϵ_2 : 各水深における拡散係数。

(3) 埋没量の計算結果

上式を用いて、次の条件及び仮定により航路横断方向の堆積土砂量を計算した。(tは時間)。

- h_1 = 一定,
- $t=0$ で, $h_2 = h_{2,0}$, $h_3 = h_{3,0}$ (4)
- トラップ及び航路巾(B_2 及び B_3)は不変としTime Step 4週間(1983年は1週間)の各区域の堆積量を平均堆積厚で表わし、この時点の h_2 及び h_3 を求めた。このような方法でモンスーン期間の堆積土砂量を計算した。
- 航路上手からの漂砂量は S_0 に応じて航路内で変化するが、ここではそれを考慮しなかった。

以上は単位長の土砂量で、トラップのある航路延長を L_1 、トラップのない延長を L_2 とすると、

$$\text{トラップ内の堆積量} = S_{v1} L_1 B_2 \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{トラップのある航路の堆積量} = S_{v2} L_1 B_3 \dots\dots (6)$$

$$\text{トラップのない航路の堆積量} = S_{v3} L_2 B_3 \dots\dots (7)$$

$$\text{総埋没量} = S_{v1} L_1 B_2 + S_{v2} L_1 B_3 + S_{v3} L_2 B_3 \dots\dots (8)$$

これらの式により各年の堆積量を計算し、平均水深で表わした結果を図-10 に示し、実測の断面と比較した。

図を見ると 1983 年は計算と実測とが良く合っていることを示している。

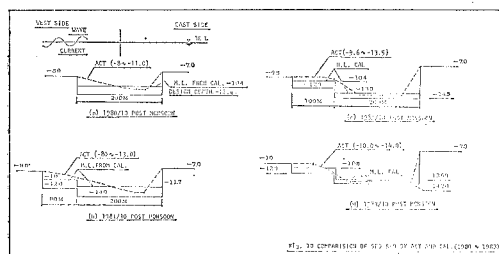


図-10 断面の水深の計算値と実測値との比較

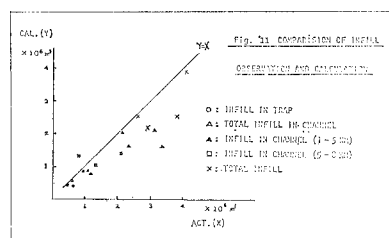


図-11 航路埋没量の計算値と実測値との比較

次に 図-11 に各年の堆積量をトラップと航路内に分け、計算値と実測値とを比較したものをグラフで示す。

図を見ると計算値は実測値より小さく 0.7~0.8 倍となっている。これは航路上手からの漂砂量が航路内で変化するのを考慮しなかったためと思われるが、その他に Bijker の S_b の式に用いられている係数についても検討の余地があると考えられる。

5. む す び

周辺が浅い浚渫航路は埋没する宿命なので、航路維持のためには絶えず、浚渫を行なう必要がある。それには浚渫量をできるだけ少なく、しかも航路の稼働率を良くするような計画が望ましいので、今回カシム港外洋航路維持の浚渫にあたり、海象、埋没現象等の資料に基づいて、浚渫断面を検討、試行した結果トラップ水域を設けることが有効であることが分かった。したがって、種々な横断面に対して、埋没量が予測できれば浚渫計画が容易になり、経済的な施工計画を検討出来る。そこで土量計算モデルとして、Bijker の式を用いて埋没量を推算して実測値と比較検討した。その結果 1983 年については良い整合を見た。しかしその他の年は計算値が少くなくこれは漂砂量の変化を考慮しなかったことと思われる。次にはこれを考慮に入れて、横断方向の堆砂分布について検討するつもりである。

最後に、本港は日本政府の技術援助 (JICA) で、1971 年と 1973 年にそれぞれ、国際港湾協会事務局長、佐藤肇氏、及び鶴田千里氏を団長とする調査団によって、調査、計画されアジア開発銀行の融資で建設された。その後外洋航路埋没が問題となり、その埋没対策の検討では、団員であった港湾技術研究所次長、合田良実氏から貴重など意見を賜った。筆者の 1 人佐藤は調査団員として参加し、施工管理で 1984 年まで本工事に従事した。本報文の作成に際しては、港湾技術研究所水工部漂砂室長 入江功氏からご指導をいただいた。

ここに、皆様各位に心から深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) Bijker, E. W.: Sedimentation in channel and trenches, Conf. Coastal Eng., pp. 1708~1718, 1980.
- 2) Bijker, E. W.: Longshore transport computation Proc. A.S.C.E., Journal of Waterways, Harbour and Coastal Eng., Div. WW4, pp. 687~701, Nov. 1971.
- 3) 堀川清司: 海岸工学, 東京大学出版会, pp. 191~241.
- 4) 入江 功: 航路埋没の数値計算, 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 206~211.
- 5) 合田良実・佐藤昭二: 海唇港湾, 彰国社, pp. 335~357.