

航路の副断面化に伴う航路埋没低減効果について

Reduction of Shoaling of Navigation Channel

Using Composite Channel Slope

出口一郎*・小野正順*・榎木 亨*・裴 基成**

Ichiro. Deguchi, Masanobu. Ono, Toru. Sawaragi and Ki-seong. Bae

A large part of shoaling of navigation channel surrounded by fine sand is caused by suspended sediment in non-equilibrium state. We develop a numerical model for predicting shoaling of navigation channel where concentration of suspended sediment in such state is accurately simulated.

In this study, effect of channel geometry on the shoaling of the channel are investigated numerically. A composite slope of navigation channel is also proposed to reduce non-equilibrium property of suspended sediment. It is found that the composite slope can effectively reduce non-equilibrium property of suspended sediment and the amount of sediment deposited in the main channel.

Keywords: Shoaling of navigation channel, Composite slope of navigation channel,

1. はじめに

航路埋没に最も関与する現象は、航路を横断する漂砂移動の非平衡性（漂砂量フラックスの空間的減衰）である。底質が砂の場合、漂砂の非平衡性は、特に航路法面部で大きく、航路法肩部から侵入してきた漂砂は、法面に沿って流下する間に沈降し、航路埋没を生じる。最近の航路埋没低減工法として、航路法尻部に潜堤を設置し、航路法肩から航路内に侵入してくる漂砂を、せき止め航路水深の維持を行っている例が報告されている。しかし、このような工法では、いずれ航路法肩部が堆積土砂で飽和してしまうと再浚渫する必要があり、再浚渫する場合、潜堤などの海洋構造物があると浚渫作業に困難をきたす。本研究では、構造物を用いない航路埋没制御工法として、航路法肩部に副断面を設ける工法を提案する。この工法では、構造物を用いないため再浚渫が容易で、再浚渫時でも主航路の交通を妨げない利点がある。航路埋没の制御方法としては、副断面を設けることにより段階的に水深を変化させ、航路法面部での漂砂の非平衡性を緩和し、できるだけ航路内で非平衡な漂砂移動を生じさせないようにするものである。この工法で問題となるのは、副断面の形状であり、その長さや深さは現地の自然条件（波の周期・波高・潮流の流速・航路形状・水深・底質粒径）により決定される。その時最も重要となってくるのが漂砂量フラックスの減衰特性すなわち漂砂の非平衡性である。

本研究では、まず浮遊漂砂の非平衡性に起因する地形変化の予測モデルである非定常移流拡散方程式に基づく予測法の適用性について、移動床水理実験を行うことによって検証する。ついで、現地の航路を想定して、実際現地で生じると考えられる埋没のパターンについて種々の条件を対象として数値計算により予測した。そして、それらの中から埋没量の大きい航路に対して、種々に形状の副断面を設けた場合の航路埋没制御効果について比較検討を行い、航路内の埋没量が最小となる副断面形状の決定方法について検討する。

2. 浮遊漂砂の非平衡性を考慮した航路埋没予測法の適用性

2. 1 航路埋没予測法の概要

航路埋没についての数値計算法は、既に著者ら¹⁾によって開発されている浮遊漂砂の非平衡性が考慮できる2次元非定常移流拡散方程式に基づく高精度計算法を用いた。解析を行う際に必要となる鉛直・水平拡散係数 E_z, E_x と基準点濃度 C_0 は、それぞれ次式によって評価した。

$$E_z = \alpha_z \times \kappa \times u_{*w} \times \delta w$$

(1)

* 正会員 大阪大学工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘2-1)

** 正会員 国立統営水産専門大学海洋土木科

$$E_x = \alpha_{Ex} \times \kappa \times u_{cw} \times \delta w \quad (2)$$

$$C_0 = \alpha_{C_0} \times \left[0.688 \times (a_m \times \sigma)^2 / \left\{ 1.13 \times \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \times g \times w_s \times T \right\} \right]^{1.77} \quad (3)$$

ここに、 κ はカルマン定数、 δw は境界層厚で混合距離 l ($=\kappa \times u_{cw} / \sigma$; $\sigma = 2\pi/T$)の4倍で定義した。 a_m は、境界層外縁の波による水粒子軌道振幅である。 α_{Ex} 、 α_{Ex} 、 α_{C_0} は各々比例定数であり、平衡状態と考えられる航路上流側(図-1中のA地点)での鉛直方向の浮遊砂濃度分布の実験結果と比較して決定した。

2. 2 航路埋没実験の概要

実験は、図-1に示すように2次元造波水槽内に航路幅 le 、航路深さ de を有する模型航路を水槽中央部に設置して行い、流れ及び波がこの航路を横断する場合を想定し埋没現象を再現した。航路上流側では平衡状態の浮遊砂濃度分布となるように3mの移動床を設け、この移動床上で侵食が生じないように移動床の上流端で給砂した。用いた底質砂は、中央粒径0.012cmの豊浦標準砂(沈降速度 $w_s=1.16$ cm/sec)である。作用させた波の周期と波高は1.5secと7cmとした。航路の形状は法面勾配1/5と一定とし $le=2$ m、 $de=0.1$ mと $le=2$ m、 $de=0.16$ mの2種類について検討し、断面平均流速 U はそれぞれ19.4、18.8cm/secとした。航路寸法について航路幅 le を変化させた実験も行ったが、漂砂の非平衡性の範囲が le より十分短く航路内で平衡状態に達するため le の航路埋没に及ぼす影響はほとんど観測されなかったためここでは割愛した。鉛直方向の浮遊砂濃度の測定は、採水により砂漣の峰上0.7cmの高さから鉛直方向に1cm間隔の8地点で同時測定した。測定精度は、30ppm程度である。航路上流部の平衡状態と考えられる浮遊砂濃度の鉛直分布は、60cm上流側のA地点で測定した。また、地形変化の測定は、造波開始時間から3.5時間後に行った。

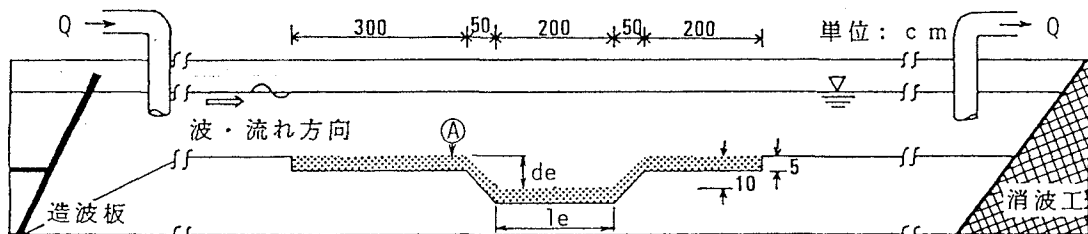
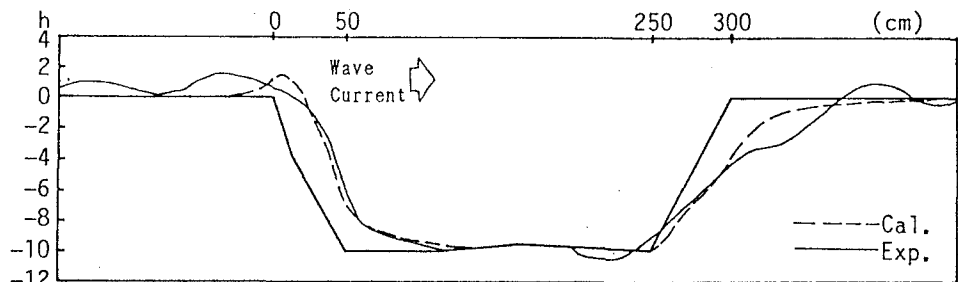


図-1 航路埋没の再現性に関する実験状況 ($le=200$ cm, $de=10$ cmの場合)

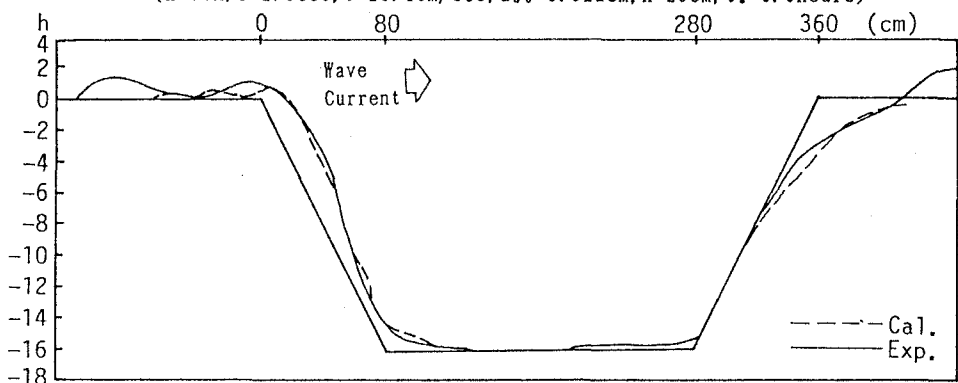
2. 3 航路埋没現象の

予測法による再現性

航路周辺の非平衡状態の浮遊砂の濃度分布については、前報¹⁾で報告した通りほぼ本解析法で予測可能である。図-2(a)は、航路形状が $le=200$ cm、 $de=10$ cmで断面平均流速が $U=19.4$ cm/secの場合、図-2(b)は、航路形状が $le=200$ cm、 $de=16$ cmで断面平均流速が $U=18.8$ cm/secの場合の各々 $t_s=3.5$ 時間後の航路断面形状について実験結果と算定結果との比較を示す。両ケースについて実験結果と算定結果を比較



(a) 航路形状 $le=200$ cm, $de=10$ cmの場合
($H=7$ cm, $T=1.5$ sec, $U=19.4$ cm/sec, $d_{50}=0.012$ cm, $h=20$ cm, $t_s=3.5$ hours)



(b) 航路形状 $le=200$ cm, $de=16$ cmの場合
($H=7$ cm, $T=1.5$ sec, $U=18.8$ cm/sec, $d_{50}=0.012$ cm, $h=20$ cm, $t_s=3.5$ hours)

図-2 航路埋没予測法の適用性

すると定性的にも定量的にもほぼ一致しており、本予測法で埋没現象が十分予測できていると考えられる。両ケース共、漂砂の非平衡性はあまり下流にまで及ばず、航路法尻から下流側に50cm程度までしか堆砂領域が広がらない。その地点から下

流側は漂砂移動が平衡状態に達するため埋没は生じない。従って、本実験で行ったケースでの航路埋没はほとんど航路法面上でしか生じなかった。もう少し漂砂の非平衡性が強く、非平衡性が下流まで及ぶ条件について検討を行う必要があるが、造波機などの実験装置の性能による限界から検討できなかった。

表-1 モデル航路の形状と状況設定

CASE	H(m)	T(sec)	U(m/sec)	d_{so} (cm)	le(m)	h+de(m)	$\Delta A(m^3/m/year)$
a	1.0	6.0	0.4	0.01	150	6+4	20.8
b					130		20.7
c				0.03	150		0.6
d				0.01		5+5	50.2
e						7+3	12.8

3. 現地スケールのモデル航路で生じる航路埋没に影響を及ぼす要因

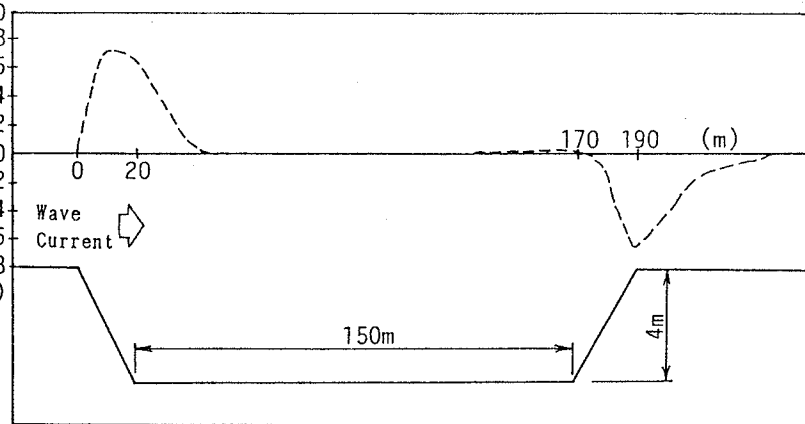
3. 1 モデル航路の形状と状況設定

航路のモデルとしては、潮流及び波浪の影響を受ける中規模港の港外航路を対象とし、1万t級の標準船型を持つ貨物船航路の埋没問題について検討を行う。1万t級貨物船の標準船長さ l 、船幅及び満載喫水 d はそれぞれ144m、23.4m、8.2mである。 Δh このような船舶に対して航路の諸元は、航路水深 $h+de$ が満載喫水下1.0m~2.5mの余裕水深をとり、航路幅 le は通常の航路で(1~1.5) l と決められている²⁾³⁾。従って、ここでは航路水深 $h+de$ は10m、航路幅 $le=150$ mを標準型とし、アップ(

ローチ部の水深 h 及び航路幅 le を変化させた4ケース及び底質粒径 d_{s0} を変化させた1ケースの合計5ケースのモデル航路に対して同一方向から作用する波・流れが航路を横切する場合の航路埋没形状について検討する。波浪の条件は日本周辺で通常生じ得る波高 $H=1$ m、周期 $T=6$ secとし、流れの条件は潮流を想定し最大流速を有する矩形波で置き換え、断面平均流速で0.4m/secの流れを4時間作用させた。表-1に示す5ケースは、それぞれのすべての領域において $U/u_b > 1.0$ (u_b :波による底部の水粒子速度振幅)となり、波による岸漂砂量よりも、平均流による輸送が卓越する場合である。これらのケースについて本予測法を用いて航路埋没量を算定した。

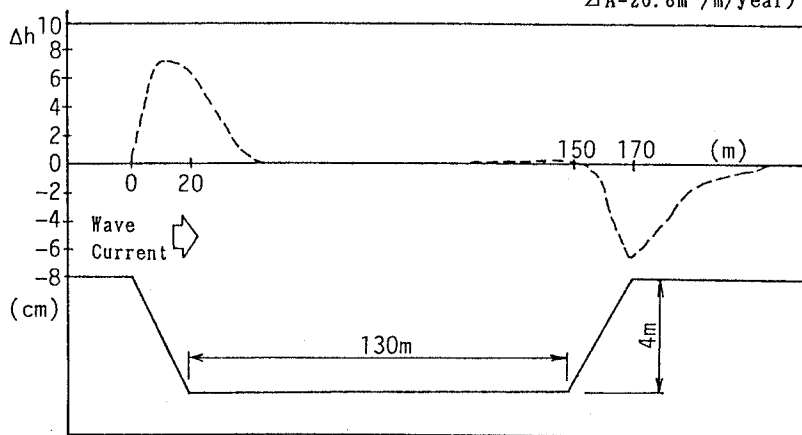
3. 2 航路埋没に及ぼす各航路諸元の影響に対する考察

図-3(a)~(e)は表-1に示す5ケースについて、 $t_s=4$ 時間の間に生じた水深変化量 Δh を示したものである。それぞれの図の下には航路の断面形状を示し、表-1には計算結果から得られた $x=0$ (航路上流側斜面端)から航路上に



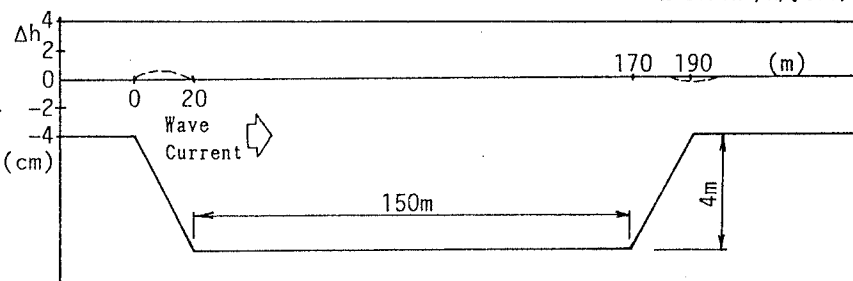
(a) CASE(a)

($H=1.0$ m, $T=6.0$ sec, $U=0.4$ m/sec, $d_{s0}=0.01$ cm, $le=150$ m, $h+de=6$ m+4m, $t_s=4$ hours, $\Delta A=20.8$ m³/m/year)



(b) CASE(b)

($H=1.0$ m, $T=6.0$ sec, $U=0.4$ m/sec, $d_{s0}=0.01$ cm, $le=130$ m, $h+de=6$ m+4m, $t_s=4$ hours, $\Delta A=20.7$ m³/m/year)



(c) CASE(c)

($H=1.0$ m, $T=6.0$ sec, $U=0.4$ m/sec, $d_{s0}=0.03$ cm, $le=150$ m, $h+de=6$ m+4m, $t_s=4$ hours, $\Delta A=0.6$ m³/m/year)

図-3 現地スケールのモデル航路で生じる埋没量

かけて生じた水深変化量から航路単位長さ当りの年間堆積土量 ΔA ($\text{m}^3/\text{m}/\text{year}$)を示す。

a) 航路埋没に及ぼす航路幅の影響

航路幅が $1e=150\text{m}$ 及び 130m の計算結果を図-3 (a), (b) に示す。両図の比較から、航路幅以外の条件が同じでさらに漂砂の非平衡状態の下流への影響範囲が下流側の航路斜面にまで及ばない場合、航路幅をそれ以上長くとっても航路埋没に及ぼす影響はほとんど無い。これは、航路アプローチ部及び下流側の航路斜面までの航路底面で漂砂移動は平衡状態に達しており、それ以上航路幅を長くとり流下距離を長くしても流下方向への漂砂量フラックスは変化しない。従って、航路の埋没量は、航路アプローチ部と航路底部での漂砂量フラックスの差によって決定される。

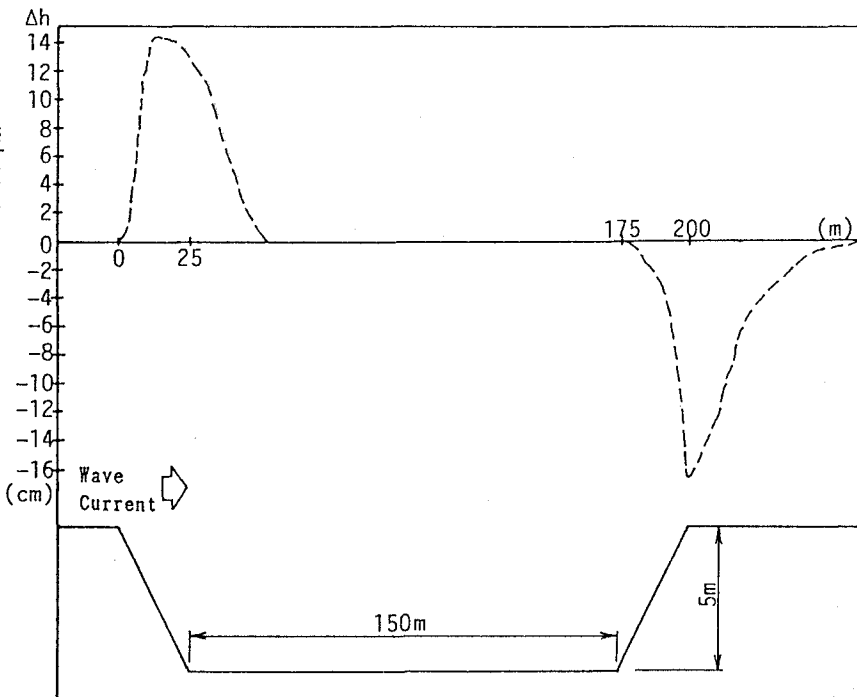
b) 航路埋没に及ぼす底質粒径の影響

図-3 (a), (c) は、航路形状及び波・流れの条件が同じで底質粒径 d_{50} が 0.01cm 及び 0.03cm の場合の計算結果を示す。両図を比較すると、底質粒径が 0.03cm の大きい場合、堆積量は極端に小さくなる。これは、 $d_{50}=0.01\text{cm}$ の沈降速度は $0.9\text{cm}/\text{sec}$ であるのに対し、 $d_{50}=0.03\text{cm}$ の沈降速度は約 $4\text{cm}/\text{sec}$ と4倍以上であり、 $d_{50}=0.03\text{cm}$ の場合航路アプローチ部では $u_{cw*}/w_t \approx 1.0$ 、航路内では $u_{cw*}/w_t < 0.7$ で、航路全域で顕著な底質浮遊は生じないためである。従って、底質粒径が大きいかつ来襲波浪も小さく底質の有意な浮遊が生じない海岸で建設された航路では埋没が生ずる危険性は少ない。しかしながら、底質粒径が 0.03cm の海岸においても、 $u_{cw*}/w_t > 1$ となるような高波浪が来襲した場合は、図-3 (a) に示す $d_{50}=0.01\text{cm}$ の場合と同様の埋没が生じる可能性がある。

c) 埋没に及ぼす航路周辺水深の影響

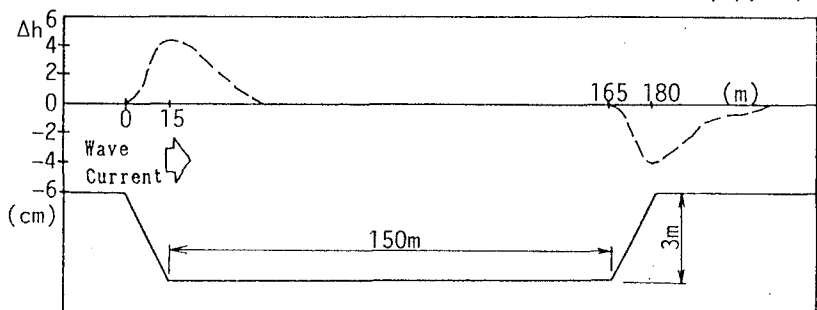
図-3 (d), (e) は、水深 5m 及び 7m の海底に水深 10m の航路を建設した場合の水深変化を示したものである。これらの結果と図-3 (a) に示す水深 6m の地点に建設された水深 10m の航路の堆積形状を比較すると、航路周辺の水深が増加するにつれて堆積量が減少する。すなわち 図-3 (a) に示す $h/(h+de)=6/10$ の場合の堆積量は図-3 (d) に示す $h/(h+de)=0.5$ の場合の約 $1/2$ 、図-3 (c) に示す $h/(h+de)=0.7$ の場合の堆積量は図(d)の場合の $1/4$ となる。これは、水深が増加するに伴って航路内外での水深差が減少し、浮遊漂砂の非平衡性が弱くなるためである。

以上、全てのケースで航路埋没は、航路上流側の斜面上で生じる。これは、底質砂の粒径が大きくその沈降速度が大きいため、航路周辺での底質砂の巻き上げ高さが低く流れによってあまり下流まで移流されず、底質砂が航路内に進入してきてすぐに漂砂量フラックスが減衰してしまうためである。従って、航路底面部に様に堆積するような埋没形状パターンは、本研究で対象とする流速に対しては、底質粒径がかなり小さい(沈降速度が小さい)場合でないと生じないと考えられる。また、埋没量が大きくなるのは、航路へ進入してくる漂砂量フラックスが大きいかつ航路を横断する間に漂砂量フラックスが大きく減衰する非平衡性の強い場合であることがわかった。



(d) CASE(d)

($H=1.0\text{m}$, $T=6.0\text{sec}$, $U=0.4\text{m}/\text{sec}$, $d_{50}=0.01\text{cm}$, $1e=150\text{m}$, $h+de=5\text{m}+5\text{m}$, $t_s=4\text{hours}$, $\Delta A=50.2\text{m}^3/\text{m}/\text{year}$)



(e) CASE(e)

($H=1.0\text{m}$, $T=6.0\text{sec}$, $U=0.4\text{m}/\text{sec}$, $d_{50}=0.01\text{cm}$, $1e=150\text{m}$, $h+de=7\text{m}+3\text{m}$, $t_s=4\text{hours}$, $\Delta A=12.8\text{m}^3/\text{m}/\text{year}$)

図-3 現地スケールのモデル航路で生じる埋没量

4. 航路の副断面化に伴う埋没低減効果

4. 1 航路の副断面化

3. で論じたように、航路周辺の底質粒径が小さくかつ有意な波高をもつ波と流れが存在する場合には、常に航路埋没が生じる可能性がある。特に、埋没量が大きくなるのは、航路へ進入してくる漂砂量フラックスが大きくかつ航路を横断する間に漂砂量フラックスが大きく減衰する非平衡性の強い場合である。従来行われている埋没低減工法としては、航路へ進入してくる漂砂量フラックスを制御するために、防波堤や潜堤などの大規模構造物により

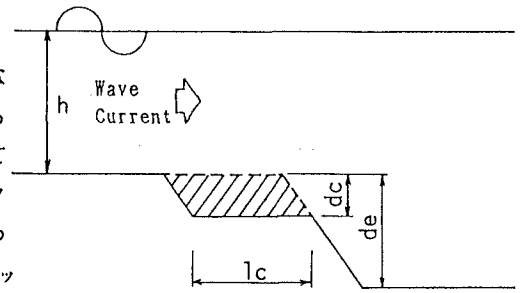


図-4 航路の副断面化

波・流れの外力を制御する工法がとられてきた。本研究では、航路断面形状に着目して、航路内での漂砂量フラックスの減衰を少なくする（漂砂の非平衡性を弱くする）方法について考える。これは、図-4に示すように航路斜面を副断面化し、水深が h から $h+d_e$ まで一挙に変化させるのではなく、途中に緩衝区間を設け、 h から $h+d_c$ 、 $h+d_c$ から $h+d_e$ へと変化させることにより、副断面内で航路内へ進入する漂砂量フラックスを減少させ、航路内で生じる漂砂の非平衡性を弱めて埋没を低減させる方法である。漂砂の非平衡性が航路内でどの範囲まで影響するかということについては、当然、底質粒径、平均流流速、来襲波浪特性及び航路形状に大きく依存している。

従って副断面の形状についても同様に影響を受けるため、状況に応じて副断面形状を設定する必要がある。以下で、2種類のモデル航路において副断面を設けた場合の埋没低減効果について検討し、副断面形状の設定法について検討する。

4. 2 モデル航路の状況設定と副断面形状

モデル航路としては、年間堆積土量の大きかったCASE(a)と(d)の2種類の航路について同一の状況を設定した。また、CASE(a)のモデル航路については、漂砂の非平衡性の範囲に影響を及ぼすと考えられる流速を変化させ断面平均流速が 0.5m/sec の場合についても検討を行った。副断面の形状については、幅を15, 30, 45, 60, 90mの5種類、深さを1, 2, 3mの3種類に変化させた。

4. 3 副断面化による埋没低減効果と副断面形状の決定法

図-5と6は、CASE(a)と同じモデル航路にそれぞれ45mと60mの副断面を設けた場合の4時間後の航路周辺の水深変化量を示す。図中には、それぞれ副断面の深さが1, 2, 3mの場合の算定結果を示している。両図とも副断面の水深が深くなるほど航路内に堆積する堆砂量は小さい。これは、前述したように有義な幅（漂砂移動が平衡状態まで達する程度の幅）を有する副断面は、その水深が深くなるほど航路内水深との水深差が小さく航路内での漂砂の非平衡性が弱くなるためである。一方、副断面の幅については、その深さが1mの場合、幅が長い方が多少埋没量が低減されているが、副断面の深さが深い場合は、幅が長くてほとんど埋没量は変わらない。これは、副断面の深さによって副断面上の非平衡状態の漂砂移動が平衡状態になるまでの流下距離が異なるため、深さ1mの場合は、副断面の長さが45mでは平衡状態に達しないまま航路内に移流してしまうためである。副断面の深さが深い場合は、副断面上で漂砂移動が平衡状

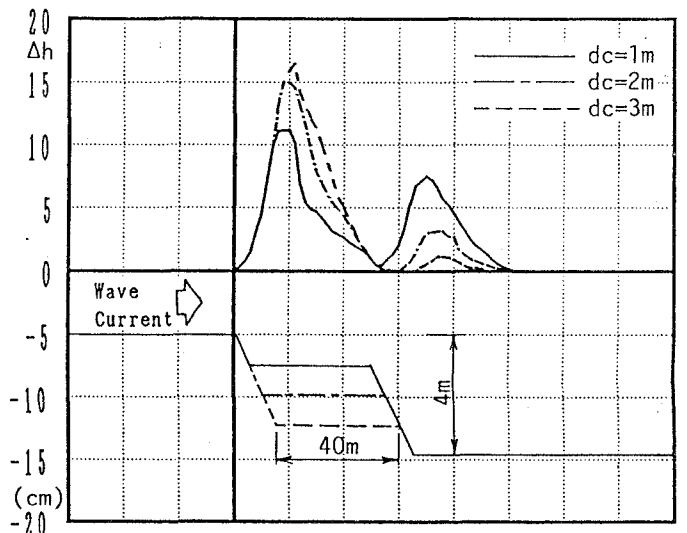


図-5 副断面を設けた場合の航路周辺の水深変化量
($l_c=45\text{m}$, $H=1.0\text{m}$, $T=6.0\text{sec}$, $U=0.4\text{m/sec}$, $d_{s0}=0.01\text{cm}$, $l_e=150\text{m}$, $h+d_e=6\text{m}+4\text{m}$, $t_s=4\text{hours}$)

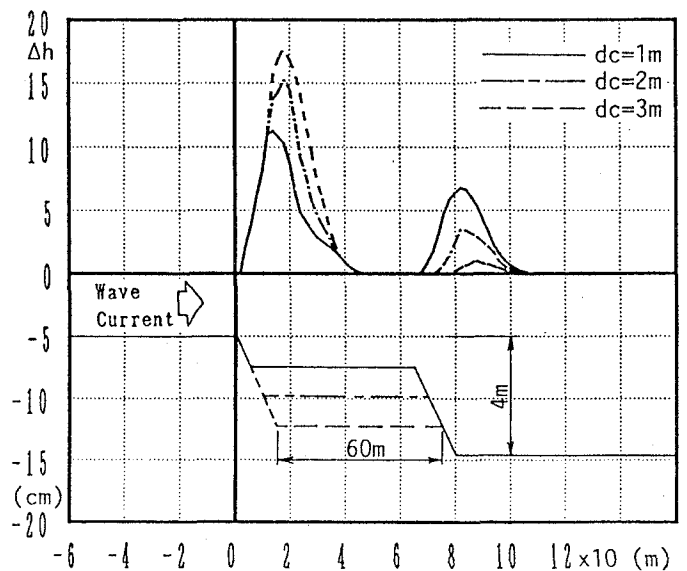


図-6 副断面を設けた場合の航路周辺の水深変化量
($l_c=60\text{m}$, $H=1.0\text{m}$, $T=6.0\text{sec}$, $U=0.4\text{m/sec}$, $d_{s0}=0.01\text{cm}$, $l_e=150\text{m}$, $h+d_e=6\text{m}+4\text{m}$, $t_s=4\text{hours}$)

態に達しているので副断面の幅が45m以上であれば、幅によらず副断面の深さが同じ航路で航路内の埋没量はほとんど変わらないことがわかる。従って、最も経済的に最大の埋没低減効果を期待して副断面の設計を行う場合、副断面の幅については副断面上で漂砂移動が平衡状態に達するまでに要する最小移流距離として決定される。

最後に、副断面形状の決定について参考となる図を示す。図-7は、航路を副断面化した全てのケースについて横軸に副断面の幅の無次元量を、縦軸に航路内に堆積した堆砂量の無次元量を取り示したものである。Qは流量、 ΔA は航路内の堆砂量、qは副断面の上流側からの流入漂砂量フラックス、tは経過時間(4時間)を示す。図中の記号 Δ 、 $\square$ 、 $\circ$ は、それぞれ副断面の深さが1, 2, 3mの場合の算定結果を示している。白抜がCASE(a), 黒塗がCASE(d)を示し、縦線はCASE(a)の断面平均流速が0.6m/secの場合を示す。各流れの条件や航路の深さによって各々のケースで副断面の幅が長くなるほど堆砂量が少なくなりほぼ一定値に漸近する。この時の副断面の幅が各々の条件における漂砂移動が平衡状態に達するまでの最小移流距離で、 $w_f \cdot l_c / Q = 0.12$ 以上に幅を伸ばしてもそれほど埋没量は小さくならないことがわかる。また、副断面の深さについては、深いほど航路内での漂砂移動の非平衡性が弱くなるので埋没量が少なくなるが、副断面水深 d_c が航路水深 d_e の1/2より浅い方がそれ以上の深さの場合と比べると副断面の深さに対する堆砂量の低減率は大きい。

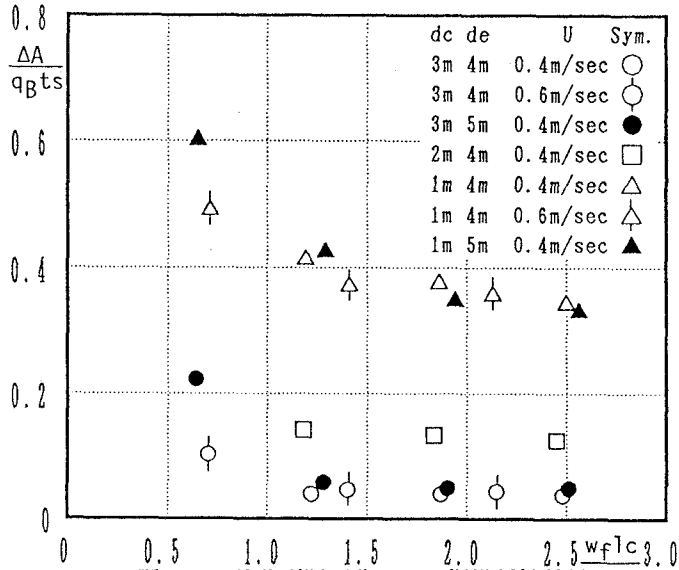


図-7 航路副断面化による埋没低減効果 Q
($H=1.0m$, $T=6.0sec$, $d_{s0}=0.01cm$, $l_e=150m$, $t_s=4hours$)

5. 結語

- 航路埋没の再現性に関する2次元移動床実験で生じた航路埋没形状は、すべて航路上流側法面上の埋没であった。また、これらの埋没形状は、本予測法で精度良く予測できる。
- 現地スケールのモデル航路についても本研究で検討を行った海象条件のすべてのケースで航路上流部の法面上で埋没が生じる結果となった。また、その埋没量は、浮遊漂砂の非平衡性の強さ(航路に進入してくる漂砂量フラックス-航路内の漂砂量フラックス)の大きさにともなって多くなる。
- 現地航路の埋没低減工法に副断面工法を用いた場合、副断面を介在させることで航路内での漂砂移動の非平衡性が弱まるため航路内の堆砂量を低減できる。
- 航路内の埋没量を最小にする副断面形状の決定法は、副断面の幅については副断面上で漂砂移動が平衡状態に達するまでに要する最小流下距離で決定される。しかしながら、漂砂移動が平衡状態に達するまでの流下距離は、副断面上の波・流れの条件より決定されるため、副断面の深さによっても左右される。副断面の深さについては深いほど航路内での漂砂移動の非平衡性が弱くなるので堆砂量が少なくなる。

<参考文献>

- 榎木 亨・出口一郎・小野正順・豊 基成：浮遊漂砂の非平衡性に着目した航路埋没の数値計算法について、海洋開発論文集，pp.295～300，1991。
- 例えば 中山茂雄：港湾工学，山海堂，210p.，1985。
- 運輸省港湾監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，(社)日本港湾協会，500p.，1989。