

潮流による掃流砂量の推定について

中 園 清 治*・下 村 嘉 平 衛*・福 岡 隆 志*

1. 概 要

海洋建設工事が徐々に沖合い大水深のところでも行われるようになり、今後漂砂の問題も波の影響が卓越する汀線付近の海域から、潮流の影響が卓越する比較的沖合まで広範囲に取扱う必要が生じてこよう。

筆者らは瀬戸内海のある海峡中央部における大型基礎構造物の計画に伴って、壱掘り跡の埋没量を概略予測する必要が生じたが、今までこの種の問題については工学的な要求が無かったせいか実用的な文献が少なかったため、検討を行うことにした。

対象地点は水深 15m であるので移動限界水深よりかなり深い。また、最大潮流速は 4 ノットなので潮流による掃流砂が支配的であると予想された。このため筆者らは、一般河川における種々の掃流砂量の理論式および実験式などから類推して、流れによる単位時間当りの掃流砂量は流速のベキ乗に比例すると仮定し、潮流の時間的変化と潮流速ピーク値の年間出現状況をモデル化しさらに工学的な処理を行うことにより、潮流による年間の掃流砂量を潮流速ピーク値の平均値より比較的容易に計算できるような式を誘導した。一方対象地点においては、9 個の丸型捕砂器 (直径 0.5m, 高さ 0.2m) と 1 個の角型捕砂器 (2m×2m, 深さ 0.5m) を設置した 2 週間にわたる漂砂量観測が行われたが、提案式の妥当性を見るためこれらのうち後者の実測値と比較することにした。

さらに一般河川での掃流砂を与える提案式のうち、掃流砂が流速のベキ乗に比例する篠原・椿の式と、Brown の式について、適当な境界条件を与えて潮流速ピーク値の年平均値と年間掃流砂量の関係をノモグラム化した。

2. 潮流による掃流砂量計算方法の提案

(1) 計算のための仮定条件

毎秒単位幅当りの掃流砂量 q_B より、1 日単位幅当りの掃流砂量 Q_a および一年単位幅当りの掃流砂量 Q_y を計算するために、潮流のように時間によって流速が変化

するものに対して次のような仮定条件を設けた。

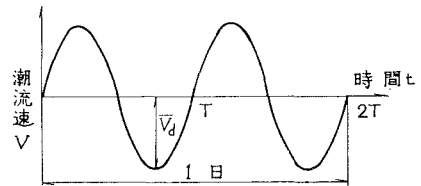
- (1) q_B が流速のベキ乗に比例すること。
- (2) 潮流速の時間的変化は 6 時間を半周期とする正弦曲線で近似できること。
- (3) Q_a を求める場合は、潮流速ピーク値の日平均値が 1 日に 4 回現われること。
- (4) Q_y を求める場合は、潮流速ピーク値の年間出現頻度が正規分布すること。

(2) 1 日単位幅当りの掃流砂量 Q_a

仮定条件より、比例定数を C 、潮流速を V 、ベキ数を n とすると、 q_B は次式で表わされる。

$$q_B = C \cdot V^n \dots\dots\dots (1)$$

潮流速の日変化模式曲線を 図—1 に示す。



\bar{V}_a : 潮流速ピーク値の日平均値
 T : 潮流速変化の周期 = 12×60^2 (sec)

図—1 潮流速の日変化模式図

また、潮流速ピーク値の日平均値を \bar{V}_a とすると、仮定条件より V は次式で表わされる。

$$V = \bar{V}_a \sin \frac{2\pi}{T} t \dots\dots\dots (2)$$

したがって、 Q_a は次のように計算できる。

$$\begin{aligned} Q_a &= 4 \int_0^{T/2} q_B dt = 4 C \bar{V}_a^n \int_0^{T/2} \sin^n \frac{2\pi}{T} t dt \\ &= \frac{2CT \bar{V}_a^n}{\pi} \int_0^\pi \sin^n \theta d\theta = \frac{2CIT}{\pi} \bar{V}_a^n \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここで、 $\theta = \frac{2\pi}{T} t$ 、 $I = \int_0^\pi \sin^n \theta d\theta$ とする。

いまベキ数 $n=2\sim 6$ について考え、式(3)の積分項を計算すると Q_a は求められる。ただし仮定条件より、

$$T = 12 \times 60^2 \text{ (sec)}$$

* 正会員 間組研究開発局

とする。これらの結果を 表-1 に示す。

表-1 正弦曲線のベキ乗の積分値 I と 1 日単位幅当り掃流砂量 Q_a

n	$I = \int_0^\pi \sin^n \theta d\theta$	$Q_a/10^4 \times C$
2	1.57	4.32 \bar{V}_a^2
2.5	1.44	3.96 $\bar{V}_a^{2.5}$
3	1.33	3.66 \bar{V}_a^3
3.5	1.25	3.44 $\bar{V}_a^{3.5}$
4	1.18	3.25 \bar{V}_a^4
4.5	1.12	3.08 $\bar{V}_a^{4.5}$
5	1.07	2.94 \bar{V}_a^5
5.5	1.01	2.78 $\bar{V}_a^{5.5}$
6	0.98	2.70 \bar{V}_a^6

(3) 1 年単位幅当りの掃流砂量 Q_y

いま、年間の潮流速曲線における i 番目の潮流速のピーク値を V_i とすると、 i 番目の掃流砂量 Q_i は式 (3) の計算過程より次式で表わされる。

$$Q_i = \frac{CTV_i^n}{2\pi} \int_0^\pi \sin^n \theta d\theta = \frac{CIT}{2\pi} V_i^n \dots (4)$$

したがって、 V_i の年間出現頻度を f_i とすると、 Q_y は次式で与えられる。

$$Q_y = \frac{CIT}{2\pi} \sum f_i V_i^n \dots (5)$$

ここで、式 (5) 中 $\sum f_i V_i^n$ の値を V_i の年間出現頻度は 図-2 のように正規分布するという仮定より求めることにする。

いま \bar{V}_y を潮流速ピーク値の年平均値、 σ を標準偏差とすると一般に V_i が $\bar{V}_y - 3\sigma \leq V_i \leq \bar{V}_y + 3\sigma$ である確率は 99.7% であるので、 $\sum f_i \cdot V_i^n$ の計算に際してはこの範囲の V_i に対して、計算を行っても実用上差しつかえない。したがって、図-2 に示すように、区間 $[\bar{V}_y - 3\sigma, \bar{V}_y + 3\sigma]$ を m 等分すると、 $\sum f_i \cdot V_i^n$ は次式で近似できる。

$$\sum f_i V_i^n \approx \sum_{i=1}^m \Delta V \cdot y_i \cdot N \cdot V_i^n \dots (6)$$

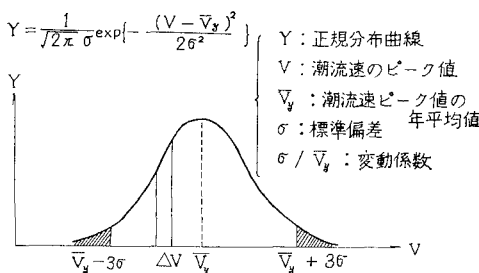


図-2 潮流速ピーク値の正規分布状況

ここで、

$$\Delta V = \frac{6\sigma}{m}$$

m : 正の整数

$$V_i = \bar{V}_y - 3\sigma + i\Delta V$$

$$y_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(i\Delta V - 3\sigma)^2}{2\sigma^2}\right\}$$

N : 潮流速ピーク値の 1 年間の全頻度数

$$N \approx 365 \times 4 - 12 \times 4 = 1,412$$

$$\begin{aligned} \therefore \sum f_i \cdot V_i^n &\approx \sum_{i=1}^m \frac{6\sigma}{m} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \\ &\times \exp\left\{-\frac{(i\Delta V - 3\sigma)^2}{2\sigma^2}\right\} \cdot N \cdot (\bar{V}_y - 3\sigma + i\Delta V)^n \\ &= \frac{6N\bar{V}_y^n}{m\sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^m \left\{1 - 3\left(\frac{\sigma}{\bar{V}_y}\right) + \frac{6}{m}\left(\frac{\sigma}{\bar{V}_y}\right)i\right\}^n \\ &\times \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{6}{m}i - 3\right)^2\right\} \dots (7) \end{aligned}$$

したがって式 (5)、(6)、(7) より Q_y は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} Q_y &= \frac{3CNT\bar{V}_y^n}{m\sqrt{2\pi}^3} \int_0^\pi \sin^n \theta d\theta \sum_{i=1}^m \left\{1 - 3\left(\frac{\sigma}{\bar{V}_y}\right) + \frac{6}{m}\left(\frac{\sigma}{\bar{V}_y}\right)i\right\}^n \\ &\times \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{6}{m}i - 3\right)^2\right\} \\ &= \frac{3CINST}{\sqrt{2\pi}^3} \bar{V}_y^n \dots (8) \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left\{1 - 3\left(\frac{\sigma}{\bar{V}_y}\right) + \frac{6}{m}\left(\frac{\sigma}{\bar{V}_y}\right)i\right\}^n \\ &\times \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{6}{m}i - 3\right)^2\right\} \end{aligned}$$

式 (8) 中の S の計算に際し、 $m=20$ とし、さらに年間の潮流速の変動係数 (σ/\bar{V}_y) は、瀬戸内海の代表的な海峡である鳴門海峡、明石海峡、備讃瀬戸において、おのおの、23.2、43.0、29.6% (2.4 に後述してある)

表-2 変動係数を変化させたときの (8) 式中の項 S の計算結果一覧

n	S の値 ($m=20$ のとき)		
	$\frac{\sigma}{\bar{V}_y} = 0.25$	$\frac{\sigma}{\bar{V}_y} = 0.30$	$\frac{\sigma}{\bar{V}_y} = 0.35$
2	0.443	0.454	0.468
2.5	0.465	0.486	0.510
3	0.494	0.530	0.570
3.5	0.503	0.580	0.640
4	0.508	0.640	0.735
4.5	0.630	0.730	0.855
5	0.695	0.835	1.005
5.5	0.775	0.960	1.195
6	0.870	1.115	1.440

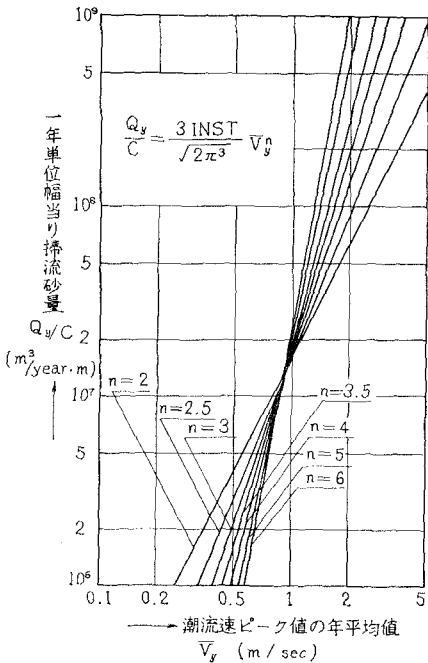


図-3 比例定数 C と比例べき数 n を未知数としたときの1年単位幅当り掃流砂量 Q_y と \bar{V}_y の関係

表-3 比例定数 C と比例べき数 n を未知数としたときの1年単位幅当り掃流砂量 Q_y ($\sigma/\bar{V}_y=0.30$ のとき)

n	$Q_y/10^7 \times C$
2	$1.65 \bar{V}_y^2$
2.5	$1.62 \bar{V}_y^{2.5}$
3	$1.64 \bar{V}_y^3$
3.5	$1.68 \bar{V}_y^{3.5}$
4	$1.75 \bar{V}_y^4$
4.5	$1.90 \bar{V}_y^{4.5}$
5	$2.07 \bar{V}_y^5$
5.5	$2.25 \bar{V}_y^{5.5}$
6	$2.54 \bar{V}_y^6$

であったので、 $\sigma/\bar{V}_y=0.25, 0.30, 0.35$ について計算した。その結果を表-2 に示す。

表-2 より、 n が一定のとき S の値は変動係数を変えてもあまり大きな変化はないといえる。したがって、変動係数が不明の場合はこれを 0.30 と仮定して掃流砂量を計算しても工学的には差しつかえないといえよう。そこで、比例定数 C と比例べき数 n のみを未知数とした1年単位幅当り掃流砂量の計算には $\sigma/\bar{V}_y=0.30$ のときの値を用い、その計算結果を表-3 と図-3 に示す。

(4) 潮流速ピーク値の年平均値 \bar{V}_y 、および変動係数 σ/\bar{V}_y について

潮流速ピーク値の年平均値 \bar{V}_y は、年間の全データよ

り算出するのが最も適当であるが、その計算はかなり複雑である。したがって、より簡単で実用的な平均値の算出方法があれば好都合である。

そのため瀬戸内海での代表的な3か所の海峡部（鳴門海峡、明石海峡、備讃瀬戸）での1974年における潮流速ピーク値の年平均値を、月別平均値および1か月に4回発生するピーク値の平均値、および1か月の最大値と最小値の平均値と比較してみた。また同時に2. (3) で用いた変動係数 (σ/\bar{V}_y) も計算した。

この結果、ある月の潮流速ピーク値の最大および最小値の平均値を用いても実用上差しつかえないといえた。より精度の高い値が必要な時は、ある月の潮流速の全データより平均値を求めればよい。

3. 掃流砂量実測値との比較

(1) 実測値データ¹⁾

瀬戸内海のある海峡において、1日当りの掃流砂量を実測したデータを表-4 に示す。また、その結果を潮流速ピーク値の日平均値ごとに表わしたものを図-4 に示す。実測期間は昭和48年4月2日から16日までの半月間である。調査地点の潮流速が観測されていないので、これを実測地点より約10km 東にある潮流速標準点の昭和44年度潮汐表²⁾の予報値より推定することにした。すなわち、たまたま調査地点での潮流速ピーク値の年平均値が得られたので、これと、標準点での潮流速ピーク値の年平均値との比で潮流速ピーク値の予報値を修正したものを観測期間中の潮流速のピーク値とすることにした。これらの具体的な修正の経過は表-4 に示してある。

なお、調査地点での潮流速ピーク値の年平均値は昭和47年度に調査地点での1か月間の潮流観測より、調和

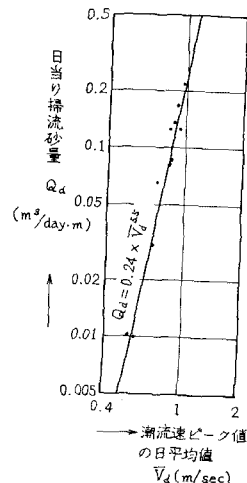


図-4 ある海峡における日当り掃流砂量と平均潮流速の関係

表-4 ある海峡における掃流砂量の実測値と推定潮流速ピーク値

観測日 (1973年)	掃流砂量の実測値 (m ³ /m日)	潮流速ピーク値の推定経過						修正値 (m/s)
		$\bar{V}_y=1.01$ (m/S) 標準点において $\bar{V}_y=0.71$ (m/S) 観測点において						
		潮流標準点下の予報ピーク値						
		第1ピーク値	第2ピーク値	第3ピーク値	第4ピーク値	平均値	平均値	
4月2日	0.085	2.2	2.4	2.2	2.6	2.35	1.21	0.85
3日	0.125	2.4	2.6	2.5	2.9	2.60	1.34	0.94
4日	0.215	2.5	2.6	2.6	3.1	2.70	1.39	0.98
5日	0.215	2.5	2.4	2.7	3.1	2.68	1.38	0.97
6日	0.165	2.4	2.2	2.6	2.9	2.53	1.30	0.91
7日	0.125	2.1	1.9	2.4	2.7	2.28	1.17	0.82
8日	0.030	1.7	1.6	2.1	2.3	1.93	0.99	0.70
9日	0.010	1.4	1.2	1.8	—	1.47	0.76	0.53
10日	0.0	1.9	1.1	1.0	1.4	1.33	0.68	0.48
11日	0.0	1.6	1.0	0.9	1.3	1.20	0.62	0.44
12日	0.0	1.6	1.1	1.1	1.4	1.30	0.67	0.47
13日	0.010	1.7	1.4	1.6	1.7	1.60	0.82	0.58
14日	0.065	2.0	1.8	2.1	2.0	1.98	1.02	0.72
15日	0.080	2.3	2.1	2.5	—	2.30	1.18	0.83
16日	0.135	2.2	2.4	2.4	2.9	2.48	1.27	0.89
合計	1.26						総平均値:	0.74

注 1) 実測値は水深 15 m の地点に、平面 2m×2m、深さ 0.5 m の角型捕砂器を設置し、ダイバーにより観測したものである。
 2) 掃流砂の粒径は捕砂器の内外ともほぼ同一であり、粒径 d_{50} は 0.34 mm であった。
 3) 潮流速の補正は約 10 km 離れた潮流標準点での $\bar{V}_y=1.01$ (m/S) と観測地点での $\bar{V}_y=0.71$ との比を考へ、潮流速の予報値を 0.703 倍したものである。

4) 観測期間中の海底の移動床形態は明確にはつかめなかったが、ダイバーの目視観測によると、波長 25 cm 以下の砂れん (Ripple) が多いようであったと報告されている。事実、摩擦速度 $U_* = n_M \cdot V \cdot g^{1/2} R^{-1/6} = 0.0295$ (m/s) (ここで $n_M=0.02$, $V=0.74$ m/s, $g=9.8$ m/s², $R=15$ m とする) となるので、掃流力(無次元) $\tau_* = U_*^2 / (\alpha/\rho - 1)g \cdot d = 0.17$ (ここで $U_* = 2.95$ cm/s, $\alpha = 265$, $\rho = 1.03$, $g = 980$ cm/s², $d = d_{50} = 0.034$ cm とする) となり、これは、砂れんと砂堆 (Dune) が顕著に発達し、流砂量が増加する領域にあたっている。

分解により潮流速のピーク値の年間予測を行ったものから求めたものである。

(2) Q_d のグラフとの比較

表-1 と 図-4 を比較すると直線の勾配と位置より、

べき数 $n \doteq 5.5$, 定数 $C \doteq 8.7 \times 10^{-6}$

となる。

(3) Q_y のグラフとの比較

表-4 より半月間の全掃流砂量は 1.26 m³ だから、こ

れを4年間の掃流砂量に換算できるものと仮定すると、

$$Q_y = 12 \times 2 \times 1.26 = 30.24 \text{ (m}^3\text{/年} \cdot \text{m)}$$

となる。一方、掃流砂量観測地点の \bar{V}_y は 0.71 m/sec であるから、3. (2) の結果と 図-3 より

$$Q_y/C = 3.42 \times 10^6$$

となる。上式に $C = 8.7 \times 10^{-6}$ を代入すると、

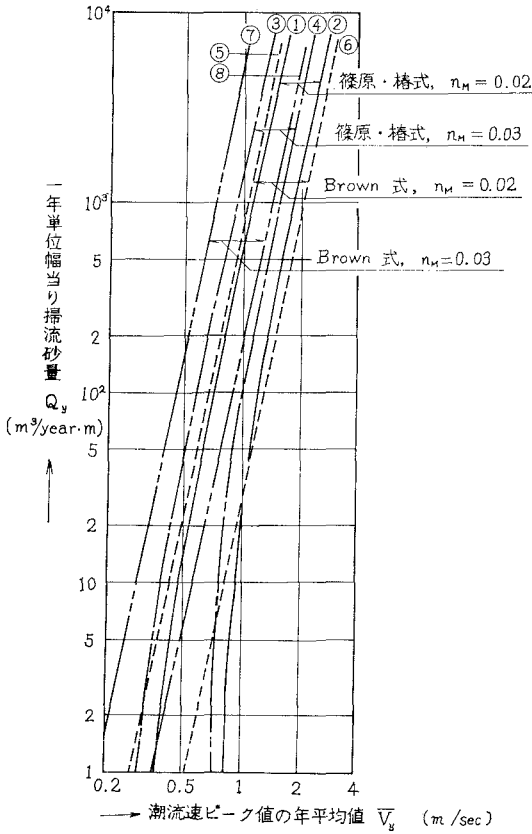
$$Q_y = 29.75 \text{ (m}^3\text{/年} \cdot \text{m)}$$

となり、実測値からの換算値と推定値はよく合致する。

表-5 篠原・椿式および Brown 式に対する計算結果

日当り・年当り	n_M	計算式	篠原・椿の式	Brownの式	条件
Q_d (m ³ /日・m)	$n_M=0.02$	$(Q_d)_{\max}$	$0.925 \times \bar{V}_d^{4.6} - 0.155 \times \bar{V}_d^{2.6}$	$0.98 \times \bar{V}_d^5$	$h=15$ m $d=0.2$ mm
		$(Q_d)_{\min}$	$0.133 \times \bar{V}_d^{4.6} - 0.123 \times \bar{V}_d^{2.6}$	$0.0359 \times \bar{V}_d^5$	$h=50$ m $d=2.0$ mm
	$n_M=0.03$	$(Q_d)_{\max}$	$2.34 \times \bar{V}_d^{4.6} - 0.263 \times \bar{V}_d^{2.6}$	$7.44 \times \bar{V}_d^5$	$h=15$ m $d=0.2$ mm
		$(Q_d)_{\min}$	$0.286 \times \bar{V}_d^{4.6} - 0.256 \times \bar{V}_d^{2.6}$	$0.273 \times \bar{V}_d^5$	$h=50$ m $d=2.0$ mm
Q_d (m ³ /年・m)	$n_M=0.02$	$(Q_y)_{\max}$	$586 \times \bar{V}_y^{4.6} - 65 \times \bar{V}_y^{2.6}$	$691 \times \bar{V}_y^5$	$h=15$ m $d=0.2$ mm
		$(Q_y)_{\min}$	$71.4 \times \bar{V}_y^{4.6} - 51.3 \times \bar{V}_y^{2.6}$	$25.3 \times \bar{V}_y^5$	$h=50$ m $d=2.0$ mm
	$n_M=0.03$	$(Q_y)_{\max}$	$1490 \times \bar{V}_y^{4.6} - 110 \times \bar{V}_y^{2.6}$	$5250 \times \bar{V}_y^5$	$h=15$ m $d=0.2$ mm
		$(Q_y)_{\min}$	$181 \times \bar{V}_y^{4.6} - 86.9 \times \bar{V}_y^{2.6}$	$192 \times \bar{V}_y^5$	$h=50$ m $d=2.0$ mm

注: h =水深, d =粒径



図—5 篠原・椿, Brown 式による年間掃流砂量 Q_y のノモグラム

4. 河川における一般的な掃流砂量を用いた計算式のノモグラム

河川において一般に下記に示す掃流砂量式がある³⁾。

- ① Einstein の式
- ② Meyer-Peter・Müller の式
- ③ 篠原・椿の式
- ④ 佐藤・吉川・芦田の式
- ⑤ Kalinske の式
- ⑥ Brown の式
- ⑦ Shields の式

これらのうち、 q_b が流速のべき乗に比例するという仮定条件に適用できるのは ③、⑥、⑦ 式である。本文ではとりあえず ③ 式と ⑥ 式についてノモグラム化を行う。

表—5 に示すような値を用いて、掃流砂量が最大および最小の値を取るような各係数の組合せを考え、おのお

の組合せについて計算を行う。

計算は $n_M=0.02$ と $n_M=0.03$ とに分けて行い、その計算結果とノモグラムを 表—5、図—5 に示す。

5. あとがき

以上の計算結果より、1口単位幅当りの掃流砂量 Q_d および1年単位幅当りの掃流砂量 Q_y を計算するための次のような仮定条件は工学的に妥当であると考えられる。

- ① 単位時間当りの掃流砂量は流速のべき乗に比例する。
- ② 潮流の時間的变化は12時間を周期とする正弦曲線で表わしてよい。
- ③ 潮流速ピーク値の年間出現頻度は正規分布する。
- ④ 潮流速ピーク値の年間変動係数は少々変化しても、ピーク値の年平均値が同一であれば、掃流砂量に大きな影響を与えない。
- ⑤ 潮流速ピーク値の年平均値として、任意の月の潮流速ピーク値の最大値と最小値の平均を用いてもよい。

なお瀬戸内海のある海峡の観測地点における Q_d および Q_y の推定計算式は、各々 $Q_d \approx 0.24 \bar{V}_a^{5.5}$ ($m^3/日 \cdot m$)、 $Q_y \approx 196 \bar{V}_y^{5.5}$ ($m^3/年 \cdot m$) となった。これら2式における各定数項は、掃流砂の粒径や比重、および海底地形や水深やマンニング係数などによって変化するので、その場所における固有な定数であると考えられる。

なお、本論文で述べたのは潮流による掃流砂についてのみであり、潮流による海峡部の掘削箇所埋没の原因としては、この他に浮遊砂によるものがあることも忘れることができない。

最後に、本論文をまとめるにあたって御指導いただいた運輸省港湾技術研究所の田中則男・小笹博昭両氏に深く感謝する次第である。

なお、本文は昭和50年8月に開催の第3回国際海洋開発会議で発表予定のものに手を加え、実測データを追加して、とりまとめたものである。

参 考 文 献

- 1) (社)土木工業協会: 本州四国連絡橋, BB7A 漂砂調査報告書, 昭和48年4月
- 2) 昭和48年潮汐表, 第一巻, 日本および付近, 海上保安庁, 昭和47年3月
- 3) 「水理公式集」, 土木学会編, 昭和46年度