

本渡瀬戸航路における航跡波の影響について

高橋 誠*・橋本好時**・井嶋伸二***
三重野秀信****・佐々木 裕*****

1. 調査目的

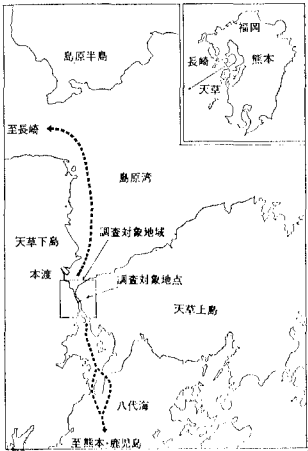
本渡瀬戸航路は、図一1 に示すように、熊本県の南西部、天草諸島の上島と下島の間に位置し、有明海と八代海を延長約5キロメートルで結び、古くから長崎県や天草北岸から八代沿岸や鹿児島県への海上短捷路として重要な役割を果たしている。航路には、現在、年間3万4千隻程度の漁船、客船、フェリー、貨物船等が往来し、そのうち50%以上は小型船である漁船が占めている。

本航路は、通常の港口航路等と異なり航路延長は長くまた屈曲部が多い。さらに航路の両側が開放水面ではなく、加えてその間隔が70メートル程度と狭く、両側の護岸は、低潮時には自然護岸となり消波機能が向上するものの高潮時には直立壁となるために航行船舶は、航路内で発生する航跡波及び護岸からの反射波の影響を受け易い状態にある。また、潮位によっては、船舶の通過に伴って航路両側の護岸で越波及び波の打上げ現象が生じ陸上交通への障害や背後地への塩害が報告されている。

そこで、航路の擾乱状態の定量化と、反射及び越波の防止対策の検討を行なうことを目的として、昭和61年度及び62年度の2年度に渡って航行船舶の航跡波、護岸からの航跡波の反射及び越波の状況について現地調査を実施した。

2. 調査内容

調査は、航路内を航行する種々の船舶によって発生する航跡波及び護岸からの反射波を測定するために航路内に代表断面（測線）を設定し、昭和61年10月16日～17日に、現況（直立式護岸）における調査を実施した。また、昭和62年10月8日～9日には、下島側の護岸の一部（延長40メートル）を消波構造（トライアン1st型）としたときの調査を実施した。両者の結果を比較検討することにより消波工試験設置による消波効果を調べた。



図一1 調査位置図

観測は、波高計を図二2 に示すように計6地点に設置し、そのうちSt. 1及びSt. 6は干潮時に海底が水面上に現われるために水深の制約が比較的小さい水圧式波高計を用い、他のSt. 2～5には超音波式波高計を用いて、試験船及び一般船による航跡波及び反射波の波形を連続測定した。

試験船としては、本渡瀬戸航路通過船舶実態調査から航行船舶の平均トン数が40.7トンであることを参考にして、事務所所属の「かがしま」を用いた。試験船の諸元を表一1に示す。

試験船による航行は、潮位、船速、進行方向の条件を変えて計22回行ない。条件の違いによる航跡波及び反

表一1 試験船「かがしま」の諸元

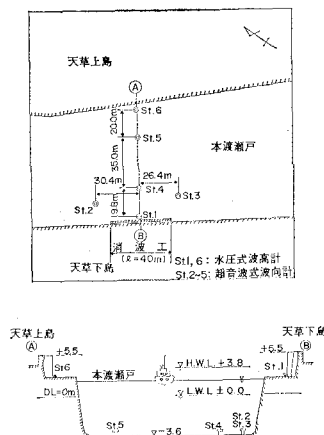
船名	かがしま
所属	八代港工事事務所
船種	監督測量船
総トン数	44t
全長	17.3m
船幅	4.6m
最大速力	23.6kt
機関	395ps×2基

* 正会員 第四港湾建設局八代港工事事務所 所長
** 第四港湾建設局八代港工事事務所 課長
(現)水産庁漁港部防災海岸課 災害査定官
*** 第四港湾建設局八代港工事事務所 係員
**** 正会員 復建調査設計株式会社 港務設計課
***** 技研興業株式会社九州営業本部 次長

表-2 試験船の航行条件

ケースNo.	潮流の条件	船速	進行方向 (順逆流)	船の速度 m/s	kt	潮位 CDL+m	潮流 流速m/s	航行時刻 月日 時分	備考	
1.	満潮時	全速	北行(逆)	11.2	21.8	3.74	南	0.39	10/9 9:18	天候 晴
2			南行(順)	11.2	21.8	3.76	南	0.39	23	
3			北行(逆)	10.5	20.4	3.81	南	0.51	38	
4			南行(順)	10.5	20.4	3.81	南	0.61	50	
5		中速	北行(逆)	7.1	13.8	3.81	南	0.68	59	
6			南行(順)	8.7	16.9	3.79	南	0.70	10:03	
7			北行(逆)	7.0	13.6	3.80	南	0.77	16	
8			南行(順)	8.3	16.1	3.79	南	0.81	20	
9		全速	北行(逆)	10.5	20.4	3.83	南	0.99	51	
10			南行(順)	12.5	24.3	3.80	南	1.05	55	
11		中速	北行(逆)	6.3	12.2	3.88	南	1.03	11:01	
12			南行(順)	8.7	16.9	3.85	南	1.01	08	
13	中間潮	全速	北行(逆)	10.2	19.8	3.40	南	0.94	24	
14			南行(順)	12.1	23.5	3.35	南	1.00	32	
15		中速	北行(逆)	6.9	13.4	3.28	南	1.04	42	
16			南行(順)	8.8	17.1	3.16	南	1.02	50	
17		全速	北行(逆)	10.9	21.2	2.46	南	0.56	12:53	
18			南行(順)	11.6	22.5	2.46	南	0.55	57	
19		中速	北行(順)	7.2	14.9	2.36	南	0.52	13:04	
20			南行(逆)	8.4	16.3	2.28	南	0.50	09	
21		全速	北行(順)	10.5	20.4	2.20	南	0.50	14	
22			南行(逆)	11.8	22.9	2.15	南	0.51	18	

図-2 波高計設置位置図



射波の変化を調べた。表-2 に、試験船の航行条件を示す。

潮位は、超音波式波高計の水深データから5分毎の平均水位と、それと同時に護岸から測定した3回の水位の差が最小となるように補正値を定め、この補正値を用いて波高計の水位から潮位を求めた。潮流は、流速計を用いて瀬戸歩道橋上より航路中央部の中層(水面下4メートル付近)の流速を測定した。船速(対地速度)は、2ヶ所の見通し線を通過する時間をストップウォッチで計測して求めた。

なお、付随して航跡、航跡波の全体像、波の打上げ状況を把握するために写真及びビデオの撮影を行なった。

3. 調査結果と考察

(1) 航跡波の波高と周期

航路内での波の動きは複雑で一連の波群が通り抜けてしばらく経って突然大きな波高が出現することがしばしば見られた。これは、狭い水路内で発生した波が両側の護岸の間で多重反射しある所では増幅され、またある所では相殺し合い複雑な干渉現象を起こしているためと考えられる。そのため、ここでは船舶の通過後1分以内に出現した最高波をそのケースの最大波とした。

試験船航行22ケースについて、潮位、船速別に整理したものを表-3に示す。

表-3 から、潮位と最大波高の関係は、St. 2~5では、St. 5の1ケースを除いて全ての場合で満潮時に波高が大きくなっているが、St. 1とSt. 6では逆に中間潮時に大きくなっている。これは、中間潮時には、St. 1とSt. 6の水深は1メートル以下となり進行してきた波が浅水変形を受け波高が増大したものと思われる。船速と最大波の関係は、全速時よりも中速時に波高が大きくなり周期も長くなる傾向が見られる。

表-3 航跡波の最大波高・周期と諸条件

潮位	船速	上流(順流)波高(m)	下流(逆流)波高(m)	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6
満潮時	全速	H	21.8	31.7	45.4	—	48.3	23.9	—
		T	4.7	2.5	1.7	—	3.3	4.2	—
	中速	H	42.1	49.7	58.5	—	61.8	30.8	—
		T	5.8	3.5	3.4	—	3.9	5.2	—
中間潮	全速	H	27.8	41.6	42.2	—	49.9	30.8	—
		T	2.7	2.6	2.9	—	2.5	2.9	—
	中速	H	21.1	48.1	46.4	—	47.5	31.2	—
		T	3.8	3.2	3.4	—	3.2	4.5	—

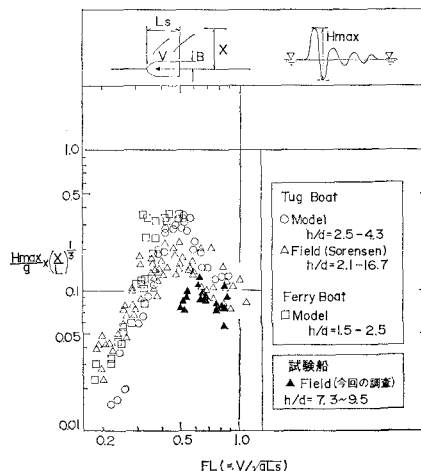


図-3 航跡波高の実験結果と調査結果

図-3 は、船速と航跡波の最大波高に関する大阪市立大学の実験結果¹⁾をもとに今回の調査結果を整理したものである。実験結果と今回の調査結果は似た傾向を示すものの、波高は実験結果に比べ若干低めの値となり、波高ピーク時のフルード数(FL)は、実験結果の0.5に対し0.6程度と若干大きくなっている。これは、主に船形の違いによるものと思われる。

表—4 船種・船の大きさと航跡波高

船の大きさ	船種	漁船	貨物船	客船	フェリー	計
大 (100t以上)	型		23.6 cm (7)	38.4 cm (5)	26.6 cm (8)	28.6 cm (20)
中 (10～99t)	型	30.9 cm (17)	21.3 (4)	36.8 (12)		31.8 (33)
小 (10t未満)	型	26.5 (35)		24.3 (8)		26.1 (43)
計		27.9 (52)	22.7 (11)	37.5 (25)	26.8 (8)	28.6 (96)

(注) 上 段：航跡波の最大波高の平均値
()：データ個数

表—4 は、一般船による航跡波高を船種と船の大きさで整理したものである。船種としては客船で、船の大きさとしては中型船の場合に波高が大きくなる傾向を示すがそれほど顕著ではない。これは、航路の形状により船が大きくなると航行速度が遅くなる傾向にあるためだと思われる。

(2) 航跡波の波向と波速

航跡波の波向と波速をある一つの波が平面的(三角形)に配置された各波高形を通過した時間差より求めた。図—4 に示すように航跡波の進行に伴ない波は $B \rightarrow A \rightarrow C$ の順に通過し、それぞれ通過した時刻を T_B, T_A, T_C とすると、 $B \rightarrow A, A \rightarrow C$ に到達するのに要した時間 t_1, t_2 はそれぞれ次のように表わされる。

$$t_1 = \frac{P_1}{v} = \frac{l_1}{v} \sin \alpha \dots\dots\dots (1)$$

$$t_2 = \frac{P_2}{v} = \frac{l_2}{v} \sin (\beta - \alpha) \dots\dots\dots (2)$$

(1), (2) 式と $\theta = \pi/2 - \alpha$ より波峰線と護岸のなす角度 θ は次のように表わされる。

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \cot^{-1} \left(\frac{t_1 l_2 \cos \beta + t_2 l_1}{t_1 l_2 \sin \beta} \right) \dots\dots\dots (3)$$

また、波速 v は次のように表わされる。

$$v = \frac{l_1}{t_1} \sin \alpha \dots\dots\dots (4)$$

式 (3), (4) より、波峰線と護岸のなす角度は、23 (度)、また波速は 3.5(m/s) であった。

(3) 護岸の反射率

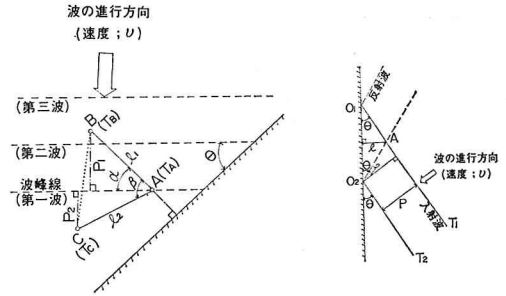
護岸の反射率は、入射波高と反射波高の比として表わした。ここで反射波高は、図—5 に示すように護岸から距離 l にある地点 A を波が通過し、 Δt 秒後に現われた波を反射波とみなし求めた。

Δt は、次のように表わされる。

$$\Delta t = \frac{l}{v} \cdot \frac{\cos \varphi}{\sin \theta} \dots\dots\dots (5)$$

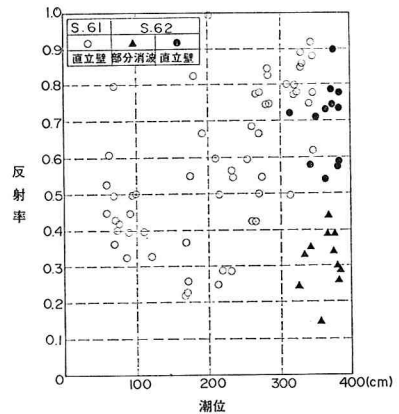
図—6 に、潮位と反射率の調査結果を示す。

図—6 から、高潮時において直立壁の反射率は、平均値で 0.7、消波の反射率は、平均値で 0.3 程度であった。直立壁の反射率は一般に 0.7～1.0²⁾ といわれ、またミッシェの式³⁾を用いて推定すると 0.67 となり調査結果はほぼ妥当な値を示している。また、消波ブロックの反

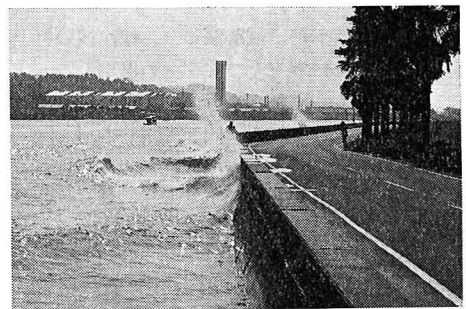


図—4 航跡波の波向と波速

図—5 反射波の到達時間



図—6 直立壁と消波工の潮位と反射率



写真—1 航跡波の護岸(直立壁)への打上げ状況

射率は一般に 0.5 程度といわれているが、今回の調査では、粗石堤の場合と同程度の 0.3 となっている。これは、波が消波ブロックに対して斜めより入射していたことが主な原因だと思われる。

(4) 波の打上げ高

現状では、航路の両側の護岸背後には、道路、民家、農地が近接しており潮位によっては航行船舶による波が護岸を越波し背後地へ被害をおよぼしている。写真—1 にその状況を示す。

越波及び波の打上げ現象は、堤高、設置水深、海底勾配、波浪状態、表のり形状など種々の要素に左右される

複雑な現象である。ここでは、越波量を定量化することが困難なため波の打上げ現象に着目し整理を行なった。

図-7 に、潮位と打上げ高の調査結果を示す。直立壁の場合、高潮時において波の打上げ高は3メートル程度であるのに対し、消波工の場合は、潮位に関係なく1メートル程度となっている。また、護岸背後への越波は認められず消波ブロックの効果が顕著に現われている。船速の違いによる打上げ高は、全速時よりも減速時に高くなる傾向を示すが顕著ではない。

(5) 擾乱時間

航路には、自航船、非航船を問わず種々の船舶が航行しており特に小型船（漁船）の頻度が高い。航路は航路幅が狭くまた曲折部が多く、船舶の離合時や追送時に航行船による航跡波やその護岸からの反射波の影響により操船に非常な困難を伴っている。そのため航路内の擾乱を早期に沈静化させることや航路の拡幅、直線化が望まれている。

航路の両側の護岸は、図-8 に示すように、干潮時には海底地盤が露出し自然の緩傾斜護岸となり反射波は低減され易いのに対し、高潮時には、直立壁となり反射波は低減されにくい状態となる。そのため航路内の擾乱状態の定量化として、低潮時に船舶の通過後2分程度で擾乱が治まることに着目しこれを整備目標とした。また、擾乱が治まるまでの時間を継続時間と定義し、波高が0.1メートル以上の状態を擾乱状態と設定した。

図-9 に代表的な波形の経時変化を表わした波形記録を示す。図-2 に示す波高計の設置位置と船舶の進行方向との関係から St. 2 の波形には、消波ブロックの影響がなく、St. 1, 3 の波形には、消波ブロックの影響が入るものと推定される。図-9 から0.1メートル以上の波高の継続時間をみてみると、St. 1, St. 3, St. 2 の順に短くなり、消波工の効果が現われているのがわかる。

図-10 に一般船の潮位と継続時間の調査結果を示す。継続時間は潮位の増加に伴ない長くなり、満潮時には、

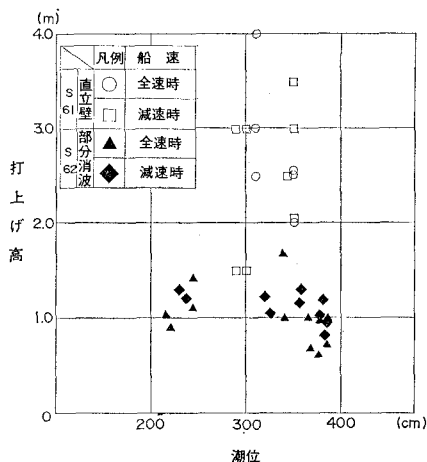


図-7 潮位と打上げ高

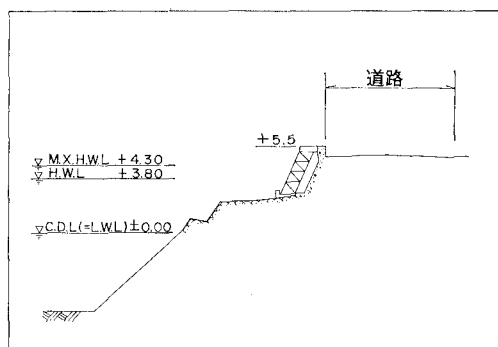


図-8 護岸の横断形状

航路の両側の護岸が直立壁となり航跡波が護岸間で反射を繰り返して沈静化しにくいことを示している。

継続時間は、高潮時において両側が直立壁の場合の7分程度に対し、護岸の一部に消波工を設置した場合は、4分程度に短縮され消波工の効果が現われる。また調査結果をもとに両側を消波構造とした時の継続時間を、両

87年10月9日11時8分 天草本渡瀬戸

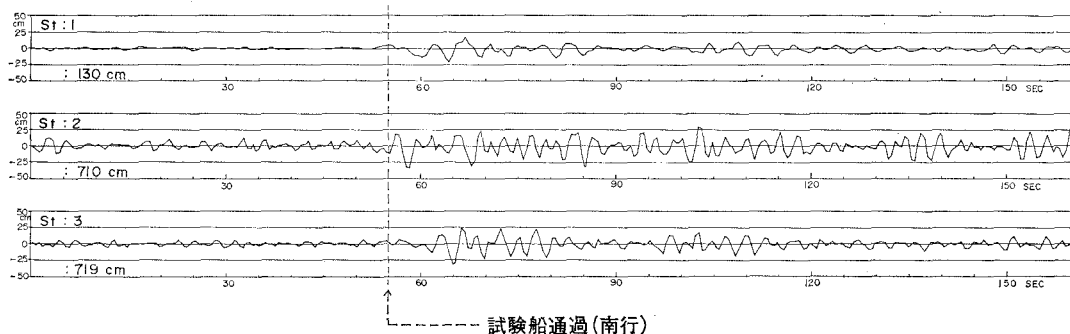
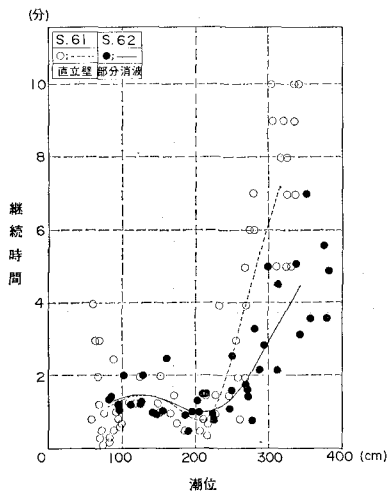


図-9 波の経時変化を表わした波形記録



図—10 潮位と継続時間

側の護岸で反射された波の合成波高が0.1メートル以下となる反射回数をもとめ推定した。その結果、継続時間は満潮時で2分以下となることが予測された。潮位の低下に伴ない消波工の効果は減少し、潮位が2メートル以下ではほとんどみられない。これは、図—8に示す護岸形状によるものである。また、船種別の継続時間に対する有意な差は認められなかった。

4. まとめ

本渡瀬戸航路に対する越波による陸上交通への障害の防止及び背後地への塩害の防止並びに航路内の早期沈静化等の要望に対し、昭和61年度及び62年度の調査により得られた主な結果は次の通りである。

- 1) 護岸を消波構造にすることにより護岸背後への越波は、潮位、船速、船種に関係せず防止された。
- 2) 護岸を消波構造にすることにより満潮時の擾乱時間を海底地盤が露出し自然の緩傾斜護岸となる干潮時と同程度まで短縮することが期待できる。
- 3) 航跡波の波高は、フルード数 (FL) ≈ 0.6 の時に最大値を示し、この時船速は16ノット、波高は0.6メートル程度であった。
- 4) 消波ブロックの反射率は、波の斜め入射による影響で平均値として0.3であった。また、航跡波の波峰線と護岸の成す角度は、およそ23(度)であった。

参考文献

- 1) Kurata, K. and K. Oda: Ship waves in shallow water and their effects on moored small vessel, Engineering, pp. 3258~3273, 1984.
- 2) 合田良實: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 68, 1977.
- 3) 岩垣雄一・樫木 享: 海岸工学, 共立出版, pp. 113~117, 1979.
- 4) 久宝雅史・多賀一允・遠藤茂勝・大橋一彦: 消波のりおいブロックに関する実験的考察, 第14回海岸工学講演会講演集, pp. 193~199, 1967.