(昭和 29 年 11 月 造船協会秋期講演会に於て講演)

波浪伴流中における平板の抵抗試験

正員 工学士 田 宮 眞

Abstract.

Resistance Experiment of a Flat Plate in Wave Wake.

By Shin Tamiya, *Kogakushi, Member.*

A flat plate of 2.5 m long was towed on the middle line of two wall-sided ships of the same length placed symmetrically with respect to the flat plate, the distance between the outside walls of the ships being 0.6 m and 0.7 m. The draft of the plate was about 0.30 m and that of ships 0.362 m.

The total resistance of the plate was obtained by a magneto-strain type dynamometer and the wave profiles on the surface of the plate, as well as the velocity distribution, were also recorded.

After recognizing the fact that the wetted surface area and the mean velocity on the plate were nearly equal to the values in open water test, or the test with the plate alone, the air resistance, the proper resistance of trip wire and the correction for laminar area were subtracted from the total resistance and finally the pressure resistance due to the difference of the wave height at the fore and after edges was estimated and subtracted.

The frictional resistance of the flat plate thus obtained were compared with that in open water.

The author had given formerly a method for calculation of form effect K , which was applied in this case assuming the two dimensional potential flow.

The difference of the resistances in open and wake flow was fairly well in accord with the calculated value of form effect, the discrepancies in some regions of velocity being mostly due to the undue estimation of pressure resistance.

緒 言

船体の摩擦抵抗計算の際、これを平板の均一流中における摩擦抵抗に等しいと仮定するのが慣例であるが、実際には船体表面の流速分布は造波現象を含む形状影響のために複雑に変化する。この不均一流の影響を通常の船形模型で見出すことは多大の困難を伴うので、著者は平板の左右に対称に梯形船を配置し、両船の造る波浪伴流中で平板を曳航し、この平板の抵抗値と、平板単独時のそれとを比較することによって船体上におこる不均一流の摩擦抵抗におよぼす影響を求めようと企てた。以下その実験結果を報告する。

2. 第一回抵抗試験

2-1. 模型寸法および配置

模型寸法および配置は Fig. 1 に概略を示した。平板は長さ 2.50 m、厚さ 14 mm、実験時の吃水はほぼ 300 mm である。前縁から $0.03L=75\text{mm}$ の位置に直径 1.0 mm の Trip Wire を取付けた。側船は平板と同じ長さとし、吃水は之より大きく、肋骨線は垂直である。前後縁は半径 10 mm の円弧とした。側船は互に強固な梁で結合され、外壁間距離 B を 600 mm とし、曳引車に固着される。平板は東大抵抗実験室の特別のフレームで鉛直に懸吊される。動力計は小型磁歪式で 1 gr までは確実に記録出来る。側船間の最小距離は 300 mm を予定したが、実際には 296 mm となつた。実験にあつては両側船と平板とを正しく進行方向に平行に、且つ対称の位置におく様十分の注意を払つた。

2-2. 単 独 試 験

Trip Wire だけを装着して平板単独試験を行つた。この時の水温は平均 14.7°C で対応する ν は $1.15 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{sec}$ である。単独時の全抵抗 R_t から 1. 空気抵抗 R_a 2. Trip Wire の固有抵抗 R_{TW} を減じ、更に

Fig. 1 模型配置

Trip Wire 前方の層流域 (仮定) に対し修正を行つて先端から完全に乱流中にあるものとした際の単独時摩擦抵抗 $R_0 \equiv R_t - R_{cor.}$ を Fig. 2 (白丸) に示す。 R_a は V^2 に比例するものとし、比例常数は実験により定めた。又 R_{TW} は抵抗係数を 1.0 とし、生産研究 Vol.5, No.9 及び Vol.6, No.1 にのべた式で計算した。 $R_{cor.}$ は $V=1, 1.5, 2, 2.5\text{m/sec}$ でそれぞれ約 6, 20, 50, 100 gr である。

Fig. 2 R_1 及び R_0

R_0 を $\frac{\rho}{2}SV^2$ ($S=1.50\text{m}^2$ とした) で除して c_{r0} を求め、これを $\Re = \frac{VL}{\nu}$ に対し置点した。(Fig.3 白丸) この c_{r0} は Schoenherr line とかなりよく一致するが、傾斜は高速で急になる。

2-3. 伴流中試験

Fig. 1 の配置で波高上許せる限りの速度まで抵抗試験を行つた。この時の平均水温は 14.7°C である。2-2 と同じ $R_{cor.}$ の値を用いて $R_t - R_{cor.} \equiv R_1$ を求め、これを Fig. 2 に黒丸で示す。 R_1 と R_0 との差は平板の前後面に生ずる圧力抵抗と摩擦抵抗における形状影響とが大部分を占めるものである。

平板自身の造波抵抗は平水中における値を理論計算で求めたが全く実験誤差の範囲に入る微量にすぎないので省略出来ると考えられる。平板の圧力抵抗は波浪伴流中ではじめて生ずるもので、主として前後縁部の波高の

差によつてきまる。之については後に2-5項でのべる。

2-4. 波形および流速分布

浸水面積および平板面上の平均流速を求めるためにこれ等の観測を行つた。波形は平板を計測板とし、Hydroquinon-diacetate を塗布して記録せしめようとした。実験の結果附近より前方は忠実に波形を記録し得たが、前縁より1.5乃至1.8mの点より後方には跳波或は堰返波に似た現象がおき、横水平方向に軸をもつ大きな渦流が生じて殆ど記録がとれなかつた。そこで止むをえず後方から0.7mの範囲は25mm間隔に水平線を入れ、曳引車上より目測することによつて概略の波高を求めた。Fig.4には流速0.822, 1.273, 1.60, 1.905 m/sec.における波形を示す。点線の箇所は推定による。又目測値は独立に速度をかけてよんだので、各 ordinate 毎に速度を base として均齊した曲線から

らよみとつた。これをもとにして浸水面積を算出したがその変化は非常に小さく、Fig.4 右上に示す通りである。よつて以後諸係数の算出にはすべて $S=1.50 \text{ m}^2$ を用いることとした。

次に平均流速を求めるため N.P.L 型標準 Pitot 流速計を三本一組とし、平板のおかれた位置で、静止水面より 50, 150, 250 mm (波の谷にあたる位置前縁より 1.625 m では 150, 250, 350

Fig.3 摩擦抵抗係数

Fig.4 波形及び浸水面積

mm) の深さにこれを置き、曳引速度を 0.5~2.0 m/sec に変化して測定を行つた。計測箇所的前後方向の位置は側船をつなぐ横梁等が妨害となつたため、前縁より 132, 625, 1250, 1625, 2500 mm の 5 点に制限された。波の運動を考えるとこれでは細かい流速分布は到底求められないので、波形の計測された流速について、自由表面の流速をベルヌイ式によつて定め、以下を観測値を通る曲線で流速分布を推定し、5 計測箇所における平均流速 $\bar{V}$ を求め、更に之等より中間の変化を無視して平板面上の平均流速 $\bar{V}$ を算出した。これを Fig.5 に示す。平均

Fig.5 平均流速

Fig.6 前後縁部の波高

mm に増大したほかは Fig.1 と全く同じである。計測は単独時および伴流中の抵抗と伴流中実験における前後縁部波高について行つた。第一回試験終了後、平板に僅かな損傷が生じたので、できる限りの手直しを行つたが、このため単独試験の結果を直接第一、二回の間で比較するわけには行かない。ただ第二回の方が抵抗が低く出たのは不思議である。ここでは伴流中抵抗と単独時のそれとの比較のみを行つて、第一回試験との関係を調べた。波高は前縁部は写真撮影した記録をもとにし、後縁部は目測により抵抗実験時に同時測定を行つた。流速分布と全長に亘る波形との計測は行わなかつた。

3-2. 実験結果

抵抗に対する修正（空気抵抗等）は、第一回試験と同じ考えで空気抵抗、Trip Wire 固有抵抗は変らぬものとし、層流域の修正値にのみ温度変化の影響を考慮したが、 R_{cor} の値は殆ど第一回の時とかわらない。因みに平均水温は単独試験のとき 19.6°C ($\nu=1.017 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$), 伴流中試験のとき 18.8°C ($\nu=1.036 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$) であつた。 R_1, R_0 を Fig.2 に示す。両者の温度差による抵抗差は無視してある。 c_{f0} は Fig.3 に示す。平均的には Schoenherr line によく近似する。 ζ_f, ζ_a は Fig.6 に、 C_p および R_1-R_0 は Fig.7 にそれぞれ第一回試験とあわせて示した。 ζ_f, ζ_a 共に傾向的には第一回の結果とよく似ている。

流速の変化も比較的小さいことがわかる。以後の伴流中試験結果の整理において平板の前進速度としては曳引車の速度 V を採用した。

2-5. 圧力抵抗

圧力抵抗は前後縁のテーパ部の圧力差から生ずる。これを平板上で実測することが出来なかつたので、 FP, AP よりそれぞれ奥の方へ 50mm の位置の波高(∞ 上流水面より測る) ζ_f, ζ_a を用い、波長が $\lambda=2\pi V^2/g$ なる重力波の圧力分布を仮定して前部及び後部に働く平均全圧力を算出し、その差から圧力抵抗 R_p を求めた。(附録 1) ζ_f, ζ_a は波形記録から読取り均齊したものを Fig.6 に示す。

又 Fig.7 に $C_p=R_p/\frac{\rho}{2}SV^2$ を示す。Fig.6 に於て $V=1.9\text{m/sec}$ の ζ_a は異常に高い。前後の状況から推すと点線の様に変化するのが自然にみえる。実際に Δ 印の ζ_a を用いると R_p は非常に大きい負の値を示しありそうもない結果となる。Fig.7 の C_p は点線の方の ζ_a を用いてある。最初この R_p の項はごく小さいものと考えていたが、意外に大きな Order で驚いた。Fig.7 には黒丸で $(R_1-R_0)/\frac{\rho}{2}SV^2$ をも示してある。これと C_p とがほぼ平行であることは興味深い。

3. 第二回抵抗試験

3-1. 実験方法

第一回試験の結果 R_1 と R_0 とに予想以上の差を生じたので、 B を変化して流速分布を均一に近づけて第二回試験を行つた。配置は B が 700

4. 不均一流における摩擦抵抗;

計算値との比較

4-1. 伴流中における摩擦抵抗係数 c_f

2-5 で推定した圧力抵抗値を信用できるものと考えて R_1 から控除し不均一流における摩擦抵抗 R_f を求めた。 $c_f = R_f / \left(\frac{\rho}{2} SV^2 \right)$ の形で之を Fig.3 に黒丸で示す。

第二回試験では Re が 3.2×10^6 附近で c_f が c_{f0} より下に出ているが、おそらく c_p の推定が全面的には正しくないためと思われる。第一、二回を通じて Fig.3 の c_f と c_{f0} との距離はそれぞれの case についてほぼ一定である。

4-2. c_f および K の計算値

著者が昭和 25 年秋に発表した方法に従って c_f および $K = (c_f - c_{f0}) / c_{f0}$ の数値計算を行つた。(附録 II) 流速分布の実際が推定困難であつたため、これを極めて略率的に二列の Donblet 分布による二次元流の流速分布でおきかえて計算した。一つには著者の形状影響係数 K の計算が波を無視して行われたからでもある。計算の結果は次の通り。

第一回	$B=600\text{mm}$	$K=0.101$
第二回	$B=700\text{mm}$	$K=0.067$

この K をつかい $c_f = (1+K)c_{f0}$ によつて c_f を算出したものが Fig.3 に書入れてある。

一方 $(R_1 - R_0) / \left(\frac{\rho}{2} SV^2 \right) = (R_p + KR_0) / \left(\frac{\rho}{2} SV^2 \right) = c_p + Kc_{f0}$ と考えられるから、Fig.7 において c_p の上に Kc_{f0} をとつて細実線でむすんでみた。Fig.3 又は Fig.7 のいずれからみても、 c_f の計算値はかなりよく実測値と一致するが $Re = 2.5 \times 10^6$ (第一回) 及び $Re = 3.2 \times 10^6$ (第二回) 附近は一致がよくない。これはおそらく R_p の推定に無理があるためであろうが、2-4 にふれた異常造波現象がその一因である可能性は多い。高速になると計算値と実験値とが B の大小共に非常によく一致するのは意外に感ぜられる位である。

5. 流れの不連続

摩擦抵抗には直接の影響をもたないので、本論文ではごく簡略に二梯形船の間に起される異常な波の現象にふれておく。何かの参考になれば幸である。Fig.4 からみられる様に、翼後方で波面は谷から山へ急激な上昇をみせている。この急上昇面は一般に低速では翼に近く、速度の増すとともに後方へ移動し、その傾斜が急になる。ある速度をこすとこの上昇の極大点が A.P. に一致する様になり、両船間の流れは安定するが、それまでは谷から A.P. までの間は不安定で、波高に於て大略 10mm 内外の変動が間断なくおこっている。又最後の波頂から後方はほぼ水面が一定の高さをもっている。流れは幅方向には大略不変の様にみえる。急上昇の斜面のあたりは、高速では大きな横水平軸をもつ渦を有することが観測された。Hydroquinon のこん跡から判断すると、Dead water の部分はごく少い様である。

Fig.1 の様な配置のおこす流れをまともに取扱うことは非常に困難なので、附録 III の方法で臨界速度と位置とを計算した。ここで水深 h は仮定の値であるが、これを今 50cm と仮定して臨界位置 x を求め、最後部波頂の位置と共に速度に対して plot すると Fig.8 の如く

Fig.7 C_p 及び $(R_1 - R_0) / \left(\frac{\rho}{2} SV^2 \right)$

Fig.8 臨 界 速 度

なりほぼ相似の曲線がえられる。ほぼ流速 2m/sec をこすと異常な不安定現象が消失することもこの計算と一致している。更に立入った説明がえられれば特に後縁部の圧力分布推定に有益と思う。 h は両側船の吃水のほぼ二倍にあたるが、 B との関係があるから一般化するには資料不足である。

6. 総合考察と結論

本実験の結果は平板が造波に伴う二種の伴流分布中において曳行せられるとき、ほぼ二次元計算による値に等しい摩擦抵抗の増加を来すことを明らかにした。ただ実際の船形と航行速度とで決定せられる流速分布と、平板上のそれとの直接的な関連は成立っていないことと、必然的に流れが平板上では一平面内に存在するため、三次元的な曲率影響が含まれぬこと、および長/吃水の比が実際よりかなり小さくなっている点がなお検討の余地がある。もつとも長/吃水の比については流速分布計測の結果からみると大した影響はないものと思われる。一番問題になるのは圧力抵抗であつて、これについては近い将来、圧力分布の実測を行つて推定値をたしかめる予定である。Trip Wire の効果は $\eta \approx 2.5 \times 10^6$ あたりからきいている様で他の方法をとつた方がよかつたかと思われる。修正値のうちかなりの部分をこの固有抵抗が占めていることも不利である。

可能ならば両側船の Lines をかえ、吃水も変化して同様な計測を行うことを望んでいる。平板の厚さはなお薄くして圧力抵抗を十分減ずる必要がある。又両側船の内壁側には窓をあけて写真撮影に便利ならしめる必要があつた。

以上総合して次の結論が得られる。

1. 造波伴流中にある平板の全抵抗は、一様流中の全抵抗より大きい。
2. 抵抗の増加分は一部は前後縁部の圧力抵抗で、他は不均等流速分布による摩擦抵抗増分である。
3. 摩擦抵抗増分は、二次元流をもととして行つた計算値とかなりよく一致する。
4. 圧力抵抗は重力波の理論にもとづいて推定した値が大体の傾向として良い結果をあたえるが、ある速度範囲では実験結果と合わない。あるいは計算による（圧力抵抗+摩擦抵抗増分）はある速度範囲を除き、よく実験的にえられた全抵抗の差と一致する。
5. 異常な造波現象があつたにも拘らず 3., 4. の結論がえられたことは、船体の摩擦抵抗増分についても、造波の影響を無視して大過ないことを示す。
6. 相似模型船抵抗試験から導かれる結果に対し、本実験の結果は恐らくそのよい裏付となるものである。

終りに実験の実施に協力せられた東大抵抗実験室職員ならびに渡辺、別所両君に深く感謝の意を表して筆を擱く。

附録 I 圧力抵抗

∞ 上流の水面を $y=0$, y を鉛直上方にとる。波長 λ の重力波を考え、水面の盛り上がりとなる点の鉛直線上の圧力 p は

$$p = \rho g(-y + \xi e^{2\pi y/\lambda}) \dots \dots \dots (1)$$

であたえられる。平板の厚さを b とし、有効吃水を d_1 前後縁部の平均波高をそれぞれ ξ_f , ξ_a とすると、抵抗 R_p は次の通りになる。

$$\begin{aligned} R_p &= \left[\int_{-a_1}^{\xi_f} p b dy \right]_f - \left[\int_{-a_1}^{\xi_a} p b dy \right]_a \\ &= \rho g b \left[-\frac{\xi_a^2}{2} - \frac{\xi_f^2}{2} + \frac{V^2}{g} \left\{ \xi_f \left(e^{\frac{g\xi_f}{V^2}} - e^{-\frac{g d_1}{V^2}} \right) - \xi_a \left(e^{\frac{g\xi_a}{V^2}} - e^{-\frac{g d_1}{V^2}} \right) \right\} \right] \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

但し $\lambda = \frac{2\pi V^2}{g}$ とする。ここに d_1 は下縁のテーパ部を考慮して 25cm とし、 $b=14\text{mm}$ である。

附録 II c_f , K の計算式

$$c_f = 2(0.0162)^{-\frac{1}{5}} \left(\frac{v}{VL} \right)^{\frac{1}{5}} \int_0^{X_8} \xi \cdot f^{\frac{2}{5}} \left[\int_0^X f^4 dX \right]^{-\frac{1}{5}} dX \dots \dots \dots (1)$$

$$K = \frac{c_f}{c_{f0}} - 1 \dots \dots \dots (2)$$

$$c_{r0}=0.074\left(\frac{v}{VL}\right)^{\frac{1}{5}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

但し $X_s=\frac{x_s}{L}$ x_s は剝離点と前縁との距離

$$f=\frac{v}{V} \quad \text{流速の無次元値}$$

$$\xi=f(\Gamma)$$

$$\Gamma=0.0162f^{-\frac{5}{3}}\frac{df}{dX}\left[\int_0^X f^{\frac{1}{3}}dX\right] \quad \dots\dots\dots(4)$$

本例では $X_s=1.0$ であつた。即ち Γ は到る所 -0.06 より大であつた。

流れのポテンシャルとして FP, AP で 0, 𐄂で最大となる直線的に変化する Doublet が, B だけはなれて 2 列に分布によるものを考えると f は次の如くなる。

$$f\equiv\frac{v}{V}=1+2Mn\left(\frac{r_1r_2}{r^2}\right)$$

$$M=0.05016 \quad H=\frac{B}{L}$$

$$r_1=1/\sqrt{4(X-1)^2+H^2} \quad r_2=1/\sqrt{4X^2+H^2} \quad r=1/\sqrt{(2X-1)^2+H^2}$$

M は梯形船の幅に比例する。

附録 III 臨界速度と臨界位置

無限遠で幅 B , 水深 h なる矩形断面の真直な溝の中の流れを考える。その途中に幅の小さい部分があるものとする。溝の中心線を x 軸に、之に直角に y 軸、鉛直上方に z をとる。原点の高さは ∞ 上流水面に一致せしめる。水面の盛上りを ξ とし、 ∞ 流速を u_0 , 任意断面の平均流速を $\bar{u}$, 水路幅を b とすると連続方程式 (1) ベルタイの式 (2) が次の様にかける。

$$u_0Bh=\bar{u}b(h+\xi) \quad (1)$$

$$\frac{u_0^2}{2}+gh=\frac{\bar{u}^2}{2}+g(h+\xi) \quad (2) \quad (\text{水面において})$$

ここで $u=\bar{u}$ とする。今

$$\frac{b}{B}\equiv y, \quad \frac{\xi}{h}\equiv Z=-Z', \quad \frac{gh}{u_0^2}\equiv\kappa$$

と無次元化すると (1)(2) から $\bar{u}$ を消去して

$$y^2(1+2\kappa Z')=\frac{1}{(1-Z')^2} \quad 1\geq y>0, \quad 1>Z'\geq 0 \quad (3)$$

がえられる。(3)は流速と ξ との関係を任意の y (ここでは 1 より小) についてあたえる。この方程式は $0\leq Z'<1$ の範囲で一般に 2 箇以下の実根を有する。之が実根をもたない臨界値は (3) の左辺 (Z' の一次式) が右辺に切する条件から

$$\frac{1-3Z'}{(1-Z')^3}=y^2 \quad (4)$$

をいってえられる。この臨界値を y_c, Z'_c とすると

$$\kappa_c=\frac{1}{2Z'_c}\left[\frac{1}{y_c^2(1-Z'_c)^2}-1\right]\equiv\frac{gh}{u_c^2} \quad (5)$$

となる。 u_c は臨界速度である。 $y_c=1.0$ のとき $Z'_c=0, \kappa_c=1$ である。 $u_0>u_c$ ならば異常流れは起らない。次表は y_c, Z'_c, κ_c の関係を示す。

y_c	1.0	0.95	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
Z'_c	0	0.155	0.189	0.239	0.270	0.292	0.307	0.317	0.325
κ_c	1.0	1.77	2.36	3.56	5.24	7.78	11.94	19.55	36.00

Fig. 8 は $h=0.5\text{m}$ としたとき y_c に対応する点の前縁からの距離 x_c を示したものである。