

海洋構造物の周辺気流が航行船舶に及ぼす影響に関する研究

永井莊七郎*・岩井 聰**・小田 一紀***・庄司邦昭****

1. 緒 言

かなりの強風が吹送するときは、海面上に設けられた巨大な橋脚や類似の海洋構造物、人工島施設などの周辺には、あたかもビル風と同様の強風域が発生し、その至近を航行する船舶に直接影響し、潮流の場合と同様船舶航行を阻害することが容易に予想される^{1),2)}。

本論は、風洞水槽を用いて模型実験を行い、海面上に設けた構造物周辺における風速の乱れと、その至近距離を航行する船舶に与える非対称流体力を測定し、構造物の大きさ等の影響を調査したものである。

2. 風洞水槽による模型実験

(1) 実験装置および測定方法

模型実験は東京商船大学風洞水槽で行った。

風洞水槽内での実験の状況を図-1に示す。測定部風路は幅 4 m、高さ 0.7 m、長さ 8.6 m で、風路下側に深さ 0.6 m の水槽を備えたもので、海面上を風が吹送する状況を模擬できるようになっている。

風速の測定はピトー差圧マノメータを用いて検出し、この差圧を電気変換して自記させた。

船体に働く風の非対称流体力の測定には、磁歪管方式による検力計を用い水平面内の直角 2 分力と鉛直軸周りのモーメントの 3 成分を測定した。

風洞内の発生風速は、その鉛直方向の分布を広い海面上での鉛直分布に模擬させ、1/7~1/9 の指数法則分布に近似するようあらかじめ調整した。

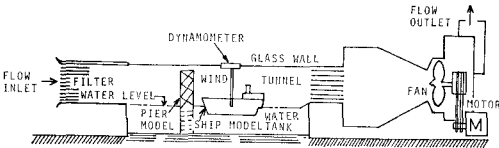


図-1 風洞水槽内での実験状況

(2) 供試模型

模型船は長さ $L=100\text{ cm}$ 、幅 $B=17\text{ cm}$ 、喫水 $d=6.7\text{ cm}$ で、その水面上の船体側面積すなわち風を受ける鉛直面積の平均高さを船の長さの 7% とし、風的作用を比較的強く受ける船型を選んだ。

構造物模型は、その寸法を表-1に示すように水平断面が矩形形状で高さ方向に一樣の直方体のものを主体とし、鉛直断面が台形のものを付加選定した。

表-1 供試模型の寸法と実験条件

構造物 模 型	水平断面寸法			船の長さ(L) 構造物長さ(a)	実験条件	
	縦長さ a(cm)	横 幅 b(cm)	a/b		構造物の 水面上 高さ h(cm)	風 向 $\theta(\text{deg})$
M-25	25	25	1.0	4.0	45	90
M-50	50	25	2.0	2.0	45, 30 20, 10	0, 45 90
M-75	75	50	1.5	1.33	20, 10	45, 90
M-100	100	50	2.0	1.0	20, 10	45, 90
MM-50	* 50	20	2.5	2.0	20, 10	90
	**100	40	2.5	1.0		

MM-50 は台形で、* は頂面、** は底面寸法

(3) 測定の方法ならびに条件

航行船舶は常に図-2に示すように構造物に対して水平断面の長手方向に平行針路をとるものとし、構造物と船の針路との距離（以下針路距離と呼ぶ）並に風向を船首風、斜 45° 風および正横 90° 風の場合について系統的に組み合わせて実験測定した。

また、構造物の高さの影響を調べるため、一部の模型については、その高さを変えて測定した。

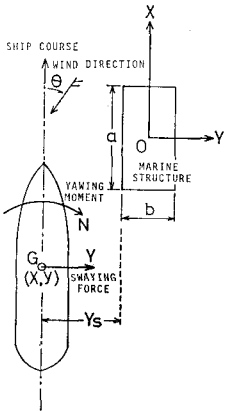


図-2 構造物と航行船舶との相対位置および座標系

* 正会員 工博 大阪市立大学 名誉教授
** 正会員 東京商船大学 教授 商船学部航海学科
*** 正会員 工博 大阪市立大学 助教授 工学部土木工学科
**** 正会員 工博 東京商船大学 助教授 商船学部航海学科

3. 構造物周りに生ずる変動風域パターン

構造物周辺の気流について、風向方向の風速分布を測定した結果は、その一例を図-3に示すようなパターンをとる。

図-3は、M-50 模型についてのものであるが、この実験に供試した構造物の寸法範囲のものに対しては、その周辺気流分布について、ほぼ次のことがわかった。

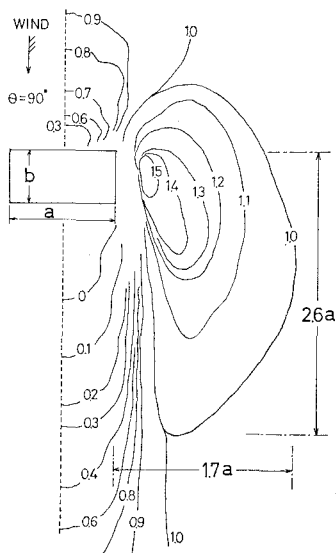


図-3 構造物周辺の風速分布 (M-50, $h/a=0.9$, $\theta=90^\circ$)

a. 構造物の風上側では、構造物の風向に対する投影幅を a として、長さ $1.5a$ 、幅 $2a$ 程度の領域で風速が減少する。

b. 構造物の風下側では、長さ $4\sim 6a$ 、幅 $2a$ 程度の領域で風速が減少する。

c. 構造物側方では風速が増加し、特に風向に対して構造物の肩に相当する部分に強風域を生ずる。この強風域の強さは構造物が高いほど強い。

4. 航行船舶に働く横力および回頭モーメント

前節で述べたように構造物の設置による周辺の風の乱れは、至近で航行する船舶に対して非対称な力を与えることとなる。つまり、船が構造物の影響下に入ると、それ以前の保針状態と違った風圧力を受けるようになり、それは構造物に対する船の相対位置に応じて変化する。

このとき船に働く左右非対称な流体力の変動成分を図-2に示す通り次のように定義する。

$$\text{横力} : Y = Y_i - Y_0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{回頭モーメント} : N = N_i - N_0 \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 Y_i および N_i は構造物に接近した船に働く

全横力および全回頭モーメント、 Y_0 および N_0 は構造物の影響のないときの船に働く横力および回頭モーメントとする。これらの横力および回頭モーメントは次のように無次元化して係数表示する。

$$\text{横力係数} : C_Y = Y / \left(\frac{1}{2} \rho L H V^2 \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{回頭モーメント係数} : C_N = N / \left(\frac{1}{2} \rho L^2 H V^2 \right) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 ρ : 空気の密度、 L : 船の垂線間長、 H : 船の水線上側面投影面の平均高さ、 V : 構造物の影響を受けない一様風速

とする。

(1) 非対称流体力の一般的傾向

図-4は実験による測定結果を式(3)、(4)によって処理して得たもので、航行船舶が構造物にそって航行するときに受ける横力係数および回頭モーメント係数の分布の一例を掲げたものである。

構造物からの船の針路距離別にその変化を示してある。

この図は模型 M-50 に対するもので、その高さ h が長さ a の 0.9 倍、風向が 90° の場合を例示したものであるが、他の構造物の場合も、また高さを変えた場合もほぼ同様の分布パターンを取り、一般に次のような傾向をもつ。

a. 航行船舶に与える横力および回頭モーメントは、船の針路距離 (y または y_s) が大きくなるに従って減少する。

b. この非対称流体力は船が構造物を通過する前後において、その方向が左右舷に交互に働く。

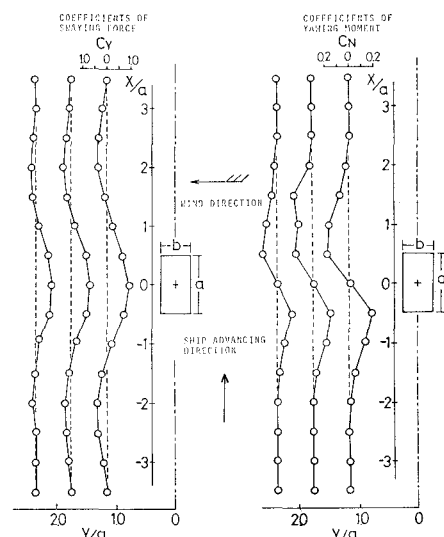


図-4 横力係数および回頭モーメント係数の分布状態 (M-50, $h/a=0.9$)

c. 同一針路上における発生横力および回頭モーメントの極値の位置すなわち構造物と船との縦方向の相対位置は、風向によって決まる。

d. この非対称流体力は、構造物が大きくなって a が増すほど、また高さ h を増すほど増大する。

本論では、構造物の影響する水域範囲がどの程度まで及ぶかを検討することを目的とすることから、船体に働く非対称流体力としての横力および回頭モーメントが卓越する横風（風向 $\theta: 90^\circ$ ）を主体に実験結果を検討する。

表-1 のとおり M-50 を中心に実験を行ったので、以下この M-50 の場合を基準に横力係数および回頭モーメント係数をそれぞれ、

$$C_Y = C_{Y0} \cdot k_{Yy} \cdot k_{Yh} \cdot k_{Yx} \cdot k_{Ya} \cdot k_{Y\theta} \dots\dots\dots (5)$$

$$C_N = k \cdot C_{Y0} \cdot k_{Ny} \cdot k_{Nh} \cdot k_{Nx} \cdot k_{Na} \cdot k_{N\theta} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 k_{Yy} , k_{Ny} : 針路距離による修正係数

k_{Yh} , k_{Nh} : 構造物の高さによる修正係数

k_{Yx} , k_{Nx} : 針路上縦距離による修正係数

k_{Ya} , k_{Na} : 構造物の風に対する投影幅による修正係数

$k_{Y\theta}$, $k_{N\theta}$: 風向による修正係数

C_{Y0} : 構造物の影響を受けないときの船固有の横力係数

kC_{Y0} : C_{Y0} に対応する基準回頭モーメント係数

として、針路距離、構造物の高さ、針路上における船と構造物との相対縦距離、構造物の風に対する投影幅および風向などによってどのように影響されるかを検討し、これらの影響を総合的に考慮したときの非対称流体力を求める実験式を導くこととする。

(2) 針路距離の影響

構造物からの船の針路距離が小さいほど非対称流体力は大きくなる。

このことは、さきに例示した 図-4 から明らかである。

ところで、構造物至近を航過する船の受ける非対称流体力の変化は各針路とも同じパターンをとるので、実験で得た各針路別の横力係数および回頭モーメント係数のそれぞれの最大値をとって、これらを船の針路距離によってどう変化するかを比較してみた。

図-5 (a), (b) はその結果である。

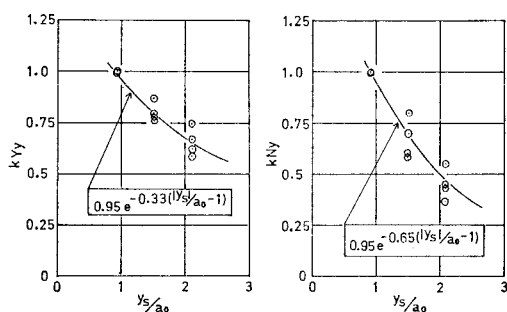
図に示すように、針路距離による修正係数は次のような実験式で近似できる。

針路距離による横力係数の修正係数:

$$k_{Yy} = 0.95 \exp \left[-0.33 \left(\frac{|y_s|}{a_0} - 1 \right) \right] \dots\dots\dots (7)$$

針路距離による回頭モーメント係数の修正係数:

$$k_{Ny} = 0.95 \exp \left[-0.65 \left(\frac{|y_s|}{a_0} - 1 \right) \right] \dots\dots\dots (8)$$



(a) 横力係数 (b) 回頭モーメント係数

図-5 横力係数および回頭モーメント係数におよぼす針路距離の影響

ここに、 $|y_s|$: 図-2 に示す針路距離の絶対値。

(3) 構造物の高さの影響

構造物の高さが高くなるほど風の乱れによる非対称流体力は大きくなる。これは周辺気流の乱れの強さが増すためである。

図-6 (a), (b) は、基準模型 M-50 について高さを変えたときの船の針路別に得られた最大横力係数および最大回頭モーメント係数の変化を示したものである。

その結果、構造物の高さの影響による修正係数は図示のとおり次のような実験式で近似できる。

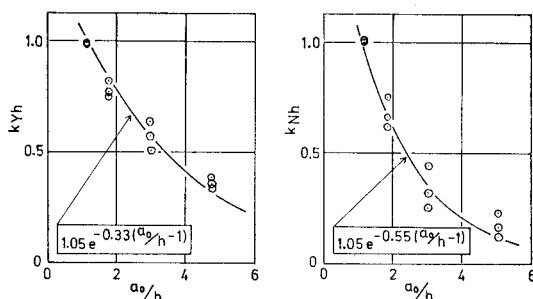
横力係数の構造物の高さによる修正係数:

$$k_{Yh} = 1.05 \exp \left[-0.33(a_0/h - 1) \right] \dots\dots\dots (9)$$

回頭モーメント係数の構造物の高さによる修正係数:

$$k_{Nh} = 1.05 \exp \left[-0.55(a_0/h - 1) \right] \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 h : 構造物の水面上の高さ



(a) 横力係数 (b) 回頭モーメント係数

図-6 横力係数および回頭モーメント係数におよぼす構造物の高さの影響

(4) 船の航過に伴う縦距離の変化

構造物至近を航行する船の受ける非対称流体力は、図-4 から明らかのように、船がその針路上を構造物に近づくに従って増加してゆき、構造物側方を過ぎて遠ざかれば減少し、やがて消滅する。

図-7 (a), (b) は、基準模型 M-50 について、それ

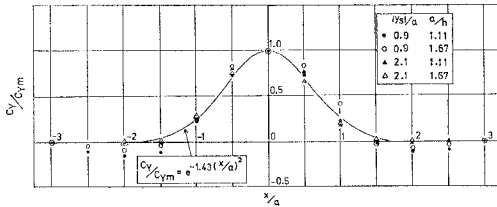


図-7 (a) 航過時の横力係数の変化

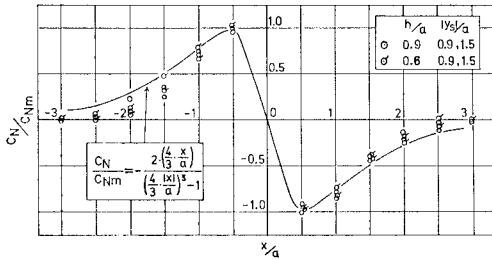


図-7 (b) 航過時の回頭モーメント係数の変化

それぞれの針路についての測得最大横力係数および最大回頭モーメント係数を基準値 1.0 として、構造物と船との縦距離 x による変化率を示したものである。

針路にそっての縦距離による修正係数は図示のとおり次のように近似できる。

横力係数の縦距離による修正係数:

$$k_{Yx} = C_Y/C_{Ym} = \exp[-1.43(x/a)^2] \dots (11)$$

回頭モーメント係数の縦距離による修正係数:

$$k_{Nx} = C_N/C_{Nm} = -2 \left(\frac{4}{3} \cdot \frac{x}{a} \right) / \left[\left(\frac{4}{3} \cdot \frac{x}{a} \right)^2 + 1 \right] \dots (12)$$

ここに、 C_Y, C_N : 針路上任意の縦距離における横力係数および回頭モーメント係数

C_{Ym}, C_{Nm} : 同一針路上での最大横力係数および最大回頭モーメント係数

x : 構造物と船との縦距離

(5) 構造物の風向に対する投影幅による影響

これまで主として解析を進めてきた基準模型 M-50 に対し、他の寸法の模型について測得した横力係数および回頭モーメント係数を用いて、構造物の風向に対する投影幅による影響を比較したのが 図-8 である。

つまり、図-8 は構造物の断面寸法の長さが a の場合の横力係数および回頭モーメント係数を基準模型 M-50 すなわち断面寸法の長さ a_0 に対する係数を基準としたときの修正係数の形で表示したものである。

これらの比は図示のとおり次の実験式で近似できる。

横力係数の投影幅による修正係数:

$$k_{Ya} = C_{Ya}/C_{Ya0} = \exp[-0.50(a_0/a - 1)] \dots (13)$$

回頭モーメント係数の投影幅による修正係数:

$$k_{Na} = C_{Na}/C_{Na0} = \exp[-0.60(a_0/a - 1)] \dots (14)$$

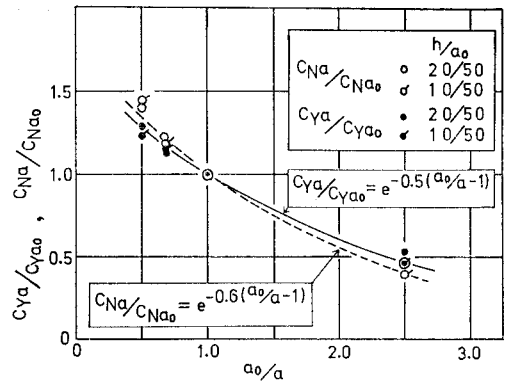


図-8 横力係数および回頭モーメント係数におよぼす構造物の投影幅の影響 (M-50)

ここに、 C_{Ya}, C_{Na} : 断面寸法の長さ a に対する横力係数および回頭モーメント係数

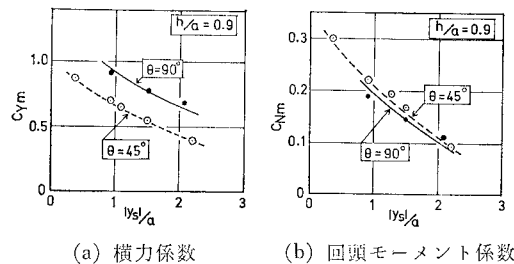
C_{Ya0}, C_{Na0} : 基準模型 M-50 に対する横力係数および回頭モーメント係数

(6) 風向の影響

構造物による風の乱れが船に与える非対称流体力は風向によって異なる。実験結果によると当然のことながら船首風の場合は他の場合に比べて可成り小さいので、ここでは斜め 45° と正横 90° 風の場合を比較する。

実験結果は 図-9 のとおりで航行船の針路が同一であれば船の受ける最大横力係数は正横風の方が大きく、最大回頭モーメント係数は両風向に対しほぼ同じ値をとっており、総合して正横風が最も大きくあらわれる。

したがって、本論で問題とする構造物が航行船舶に及ぼす航行障害の影響水域範囲を検討するに当たっては、風向が正横の場合を扱うことによって他の風向の場合をもカバー出来るとみてよい。



(a) 横力係数

(b) 回頭モーメント係数

図-9 横力係数および回頭モーメント係数におよぼす風向の影響

(7) 構造物が航行船舶に与える横力係数および回頭モーメント係数の総合表示

以上、実験に基づく測得値を解析した結果、構造物からの船の針路距離、構造物の高さ、構造物の大きさ、針路上の相対縦距離など、それぞれの関数に対して構造物周りの風が船に与える非対称流体力すなわち横力係数お

よび回頭モーメント係数がどのように変化するかが求められた。

したがって、これらを総合すると、風の作用が卓越する横風の場合について航行船が構造物に対し任意の位置にあるときに受ける非対称流体力は式(5)～(14)を用いて次のような実験式で近似することができる。

横力係数:

$$C_Y = C_{Y0} \times \exp \left[-0.33 \left(\frac{|y_s|}{a} + \frac{a}{h} - 2 \right) - 1.43 \left(\frac{|x|}{2} \right)^2 - 0.5 \left(\frac{a_0}{a} - 1 \right) \right] \dots\dots\dots (15)$$

回頭モーメント係数:

$$C_N = \frac{-\frac{4}{3} \times \frac{x}{a}}{\left(\frac{4}{3} \times \frac{|x|}{a} \right)^3 + 1} \times 0.408 \times C_{Y0} \times \exp \left[- \left(0.55 \frac{a}{h} + 0.65 \frac{|y_s|}{a} - 1.2 \right) - 0.6 \left(\frac{a_0}{a} - 1 \right) \right] \dots\dots\dots (16)$$

5. 航行船の運動軌跡と構造物への接航可能限界

構造物による風の乱れに基因しての船が受ける非対称流体力の効果は、航過船をその原針路から横偏位させたり針路を偏向させたりする結果を招く。

この間の運動については前論文²⁾に述べたように船の運動方程式に、本論で求めた風の乱れによる横力および回頭モーメントを新たに強制項に加えて解を求めることによって運動軌跡が得られる。

図-10は前論文に示したと同じ手法で、前節で求めた式(15)、(16)を用いて計算した船の運動軌跡を例示したもので、針路から外れてゆく様子が把握できる。

このような運動経過から、構造物側方を通過し終る間に船が原針路から外れる量を系統的に整理したのが図-11である。

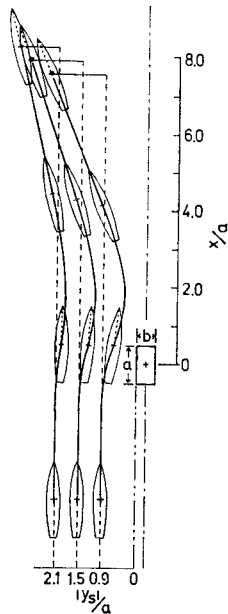


図-10 構造物近傍を航行する船の航跡 (M-50, $h/d=0.6$, $\theta=90^\circ$)

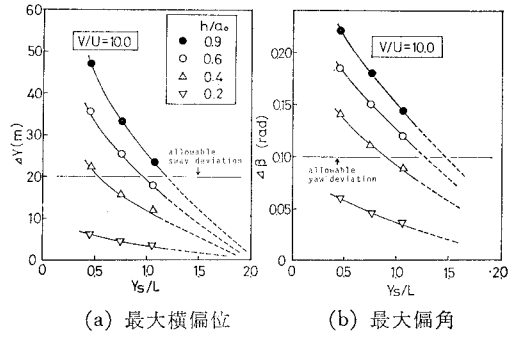


図-11 航過時の船の最大横偏位および最大偏角 (M-50)

船が安全操船してゆくための横偏位並に偏角の許容値を与えると図示のとおりとなり、これらの許容値以下に船の針路を保持するために必要な最小針路距離を図の横軸上に求めることができる。

図-11によれば、針路偏角許容値に対する船の所要針路距離の方が偏位許容値に対するものより大きく、また構造物の高さが高いほど所要針路距離が大きく、船の長さの1.5倍の距離を必要とする。

この所要針路距離が、構造物による航行船舶に対する航行障害水域範囲ということになるわけで、図-11から構造物の高さに応じて求めることができる。

6. 結 言

風が吹送する場合に起る海洋構造物周辺気流の乱れが至近航行船舶に与える非対称流体力としての横力並に回頭モーメントを求めるため風洞実験を行った。

その結果、船の針路距離、相対縦距離、構造物の大きさと高さを関数とする実用計算式を導くことができた。さらに、船の航過時に生ずる針路の外れ量を求めた。

船の航行を阻害する構造物周りの水域範囲は、前論文で扱った流れの場合とほぼ同程度であるが、風の場合は構造物の水面上の高さの影響が強く加わるのが特徴的である。

参 考 文 献

- 1) 永井莊七郎・小田一紀: 橋脚による流況変化が航行船舶に及ぼす影響に関する研究(その1), 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 585-590, 1976.
- 2) 永井莊七郎・岩井 聡・小田一紀・庄司邦昭: 橋脚による流況変化が航行船舶に及ぼす影響に関する研究(その2), 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 433-437, 1977.