

浮体に作用する津波波力の実験と評価方法の提案

池谷 毅* ・ 朝倉良介** ・ 藤井直樹***
大森政則*** ・ 武田智吉**** ・ 柳沢 賢****

浮体に作用する津波波力に関して水理模型実験を実施して, 浮体に津波が作用した場合の流速分布および波力の特性を把握した. その結果, 反射波や渦が存在する沿岸の複雑な津波場においては, 流速の時空間変動が波力に影響を及ぼすことが明らかになった. また, これらの特性を反映して, 数値解析や水理実験より求められる水平流速場から浮体に作用する津波波力(水平分力 2 成分及びヨウモーメント)を評価する方法を提案した. 提案した津波波力評価方法について, 評価値と実験データとを比較し, その妥当性を検証した. その結果, ばらつきはあるものの, 津波波力の全体的な傾向を表現できることが明らかとなった.

1. はじめに

船舶などの浮体が津波により漂流し, 構造物などに衝突すると被害が拡大することが知られている. 浮体の衝突による外力を予測するためには, 津波により浮体を受ける力の特性を理解し, 浮体の漂流挙動を把握することが重要となる. また, 津波による浮体の漂流を防止する方策を考える上でも, 浮体が津波により受ける力の特性を把握する必要がある. 従来, 津波が浮体に与える力は, 一様な流れの場における抗力として評価されている(例えば, (社)日本港湾協会, 1999; 小林ら, 2004; 藤井ら, 2005). しかし, 防波堤などの構造物が存在する沿岸海域においては, 津波の波動場は, 反射波や水平面内の渦の発生に代表されるように, 水位や流速ベクトルが時空間的に変動するため, 従来の方法では精度良い力の評価ができない. そこで, 本研究では, 箱型台船を対象とした水理実験において, 複雑な波動場における津波波力(水平分力 2 成分及びヨウモーメント)の特性を把握し, 津波波力評価方法を提案することを目的とした.

2. 水理模型実験

(1) 実験目的

水理模型実験では, 津波が浮体に与える力の特性を, 流速と関連付けて把握することを目的とした. そこで, 実験では, ①波動場の計測実験, ②浮体に作用する津波波力の計測実験を実施した.

(2) 実験装置及び実験条件

実験では, 津波発生装置を備えた平面水槽(長さ 58 m, 幅 20 m, 深さ 1.6 m)を用いた. 波動場の計測実験では, 平面水槽内に, 1/100 海底勾配を模擬した斜面を設置し, 防波堤を設置した場合と設置しない 2 種類の条件に対し

て長周期波を作用させた(図-1, 図-2 参照). また, 長周期波としては, 表-1 に示す 8 通りの波を用いた.

(3) 実験方法

a) 波動場の計測実験

図-1, 図-2 に示す平面水槽内の各点で, 水位, 流速の時系列を計測した. 水位の計測には容量式波高計を, 流速の計測には 2 成分電磁流速計を用いた.

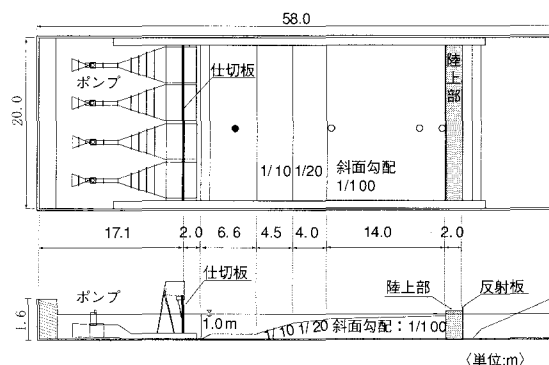


図-1 防波堤無しの場合の模型と水理量計測位置
(●水位の計測地点, ○水位と流速の計測地点)

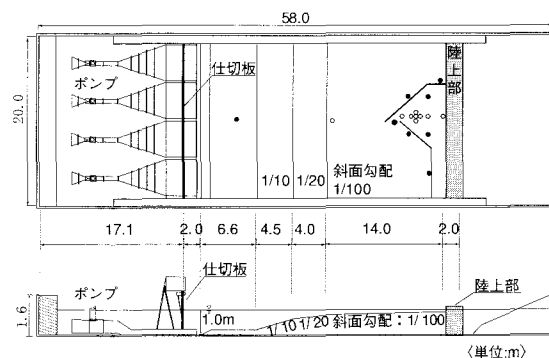


図-2 防波堤有りの場合の模型と水理量計測位置
(●水位の計測地点, ○水位と流速の計測地点)

* フェロー 工博 鹿島建設(株) 技術研究所
** 正会員 工修 鹿島建設(株) 技術研究所
*** 正会員 東電設計(株) 第二土木本部
**** 正会員 工修 東京電力(株) 原子力技術品質安全部

表-1 実験に用いた長周期波

波名称	周期(s)	波高(cm)	初動位相
wave 1	30.0	7.5	押し
wave 2	90.0	10.0	押し
wave 3	90.0	7.5	押し
wave 4	90.0	5.0	押し
wave 5	180.0	7.5	押し
wave 6	30.0	7.5	引き
wave 7	90.0	7.5	引き
wave 8	180.0	7.5	引き

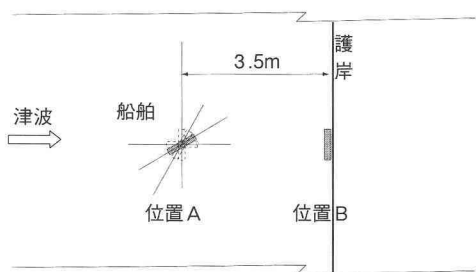


図-3 防波堤無しの場合の浮体模型設置位置

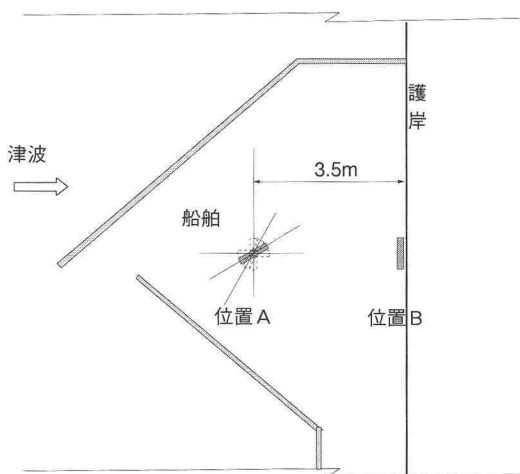


図-4 防波堤有りの場合の浮体模型設置位置

b) 波動場の計測実験

浮体に作用する津波波力の計測実験では、図-3、図-4に位置A、位置Bと示す水槽内の2箇所に浮体模型を設置し、6分力計により分力を計測した。護岸直前に設置した場合は、護岸に平行に浮体を設置しているが、その他の場所では、浮体の向きを変化させて実験している。浮体模型を分力計に固定する際には、ヒービングシャフト（鉛直方向の運動を妨げない治具）を介して行った。（写真-1参照）。なお、浮体模型は、長さ $L=0.544$ m、幅 $B=0.115$ mの箱型のものとし、喫水は満載時を想

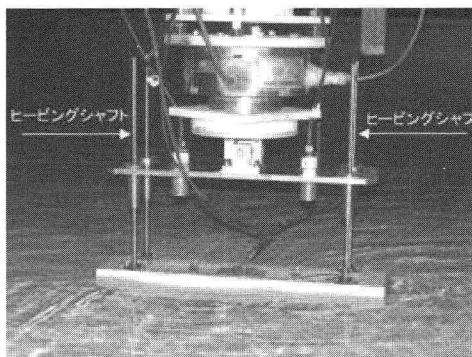
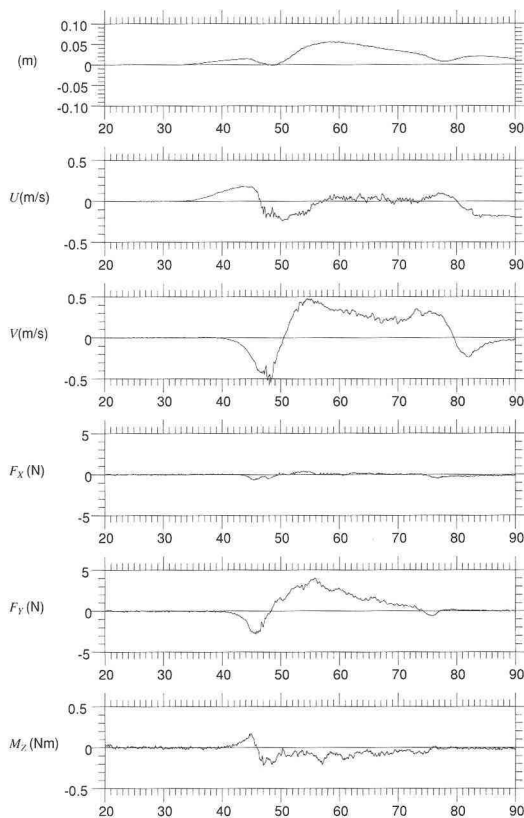


写真-1 ヒービングシャフトを介した浮体模型の設置

図-5 実験結果の一例
(防波堤有り、波条件3、満載時、船首偏角0度)

定した $D=4.0$ cm および軽荷時を想定した $D=2.2$ cm について実験をした。

(4) 実験結果

実験の結果得られたデータの一例（防波堤有り、波条件3、満載時）を図-5に示す。これらの実験結果をみると、護岸や防波堤の建設されている沿岸域における波動場では、水位流速は複雑に変動することがわかる。特に、防波堤の背後では、防波堤からの剥離による渦が形

成されるため、流速の空間分布が形成される。また、浮体に働く津波波力は、流速の二乗に比例する抗力成分だけでは、波力の時系列を必ずしも十分に説明できず、加速度に比例する慣性力を考慮に入れる必要があることがわかる。さらに、流れの向きと浮体の向きにずれがある場合は、浮体の向きを変えるヨウモーメントが作用することもある。

3. 浮体に作用する津波波力の評価モデル

水理模型実験により得られた津波波力の特性を表現できる津波波力の評価モデルを考える。

(1) モリソン式の拡張

浮体に作用する津波波力を評価するために、従来波動場における小口径部材の力の評価に用いられているモリソン式を拡張する。力の発生メカニズムとしては、抗力と慣性力を考える。また、船首尾方向の力 F_X 、舷側方向の力 F_Y 、ヨウモーメント M_Z の3成分について評価する(記号の定義は、図-6を参照)。

$$\left. \begin{aligned} F_X &= (1-w)F_{DX1} + wF_{DX2} + F_{MX} \\ F_Y &= (1-w)F_{DY1} + wF_{DY2} + F_{MY} \\ M_Z &= (1-w)M_{DZ1} + wM_{DZ2} + M_{MZ} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

この式において、右辺第1項、第2項は抗力を、第3項は慣性力を表している。抗力については、流れが浮体の底を潜って通過するために、鉛直面で変形することにより生ずる力(第1項)と、平面内での流れの変形に伴い発生する力(第2項)とに分けて考えている。また、 w は、重み係数であり、水深/喫水(h/D)の関数と考えた。 h/D が大ききときには第1項が、 h/D が1に近い時には、第2項が大きくなるように重みをつける。

鉛直方向の流れの変形によって生じる抗力の評価は、Kitamuraら(1997)が巨大浮体に作用する風力の評価をした方法を参考に、次式で与えられるとする。

$$\left. \begin{aligned} F_{DX1} &= \frac{\rho}{2} \iint_{sm} C_{DX1.sm} U_{sm} |U_{sm}| dYdZ \\ &+ \frac{\rho}{2} \iint_{sn} C_{DX1.sn} U_{sn} |U_{sn}| dYdZ \\ F_{DY1} &= \frac{\rho}{2} \iint_{ps} C_{DY1.ps} V_{ps} |V_{ps}| dXdZ \\ &+ \frac{\rho}{2} \iint_{sb} C_{DY1.sb} V_{sb} |V_{sb}| dXdZ \\ M_{DZ1} &= \frac{\rho}{2} \iint_{sm} C_{DX1.sm} U_{sm} |U_{sm}| YdYdZ \\ &- \frac{\rho}{2} \iint_{sn} C_{DX1.sn} U_{sn} |U_{sn}| YdYdZ \\ &+ \frac{\rho}{2} \iint_{ps} C_{DY1.ps} V_{ps} |V_{ps}| XdXdZ \\ &- \frac{\rho}{2} \iint_{sb} C_{DY1.sb} V_{sb} |V_{sb}| XdXdZ \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $C_{DX1.sm}$ $C_{DX1.sn}$ $C_{DY1.ps}$ $C_{DY1.sb}$ などの係数は、浮体の側壁位置における壁に直角方向の力の抗力係数である。また、式中の U_{sm} 、 U_{sn} 、 V_{ps} 、 V_{sb} などの流速は、図-7に示すように、浮体の側壁位置における船首尾方向、舷側方向の流速成分である。また、浮体の部分を示す記号は、表-2に示す通りである。力の評価をするための流速は、浮体の側壁の位置においての値であるので、流速分布の影響を取り入れることが可能である。

また、水平面内の流れの変形により生ずる力については、次式で表現されるものとする。

表-2 船体位置の略称

場 所	略 称	英 語
船 首	sm	stem
船 尾	sn	stern
左 舷	ps	port side
右 舷	sb	starboard

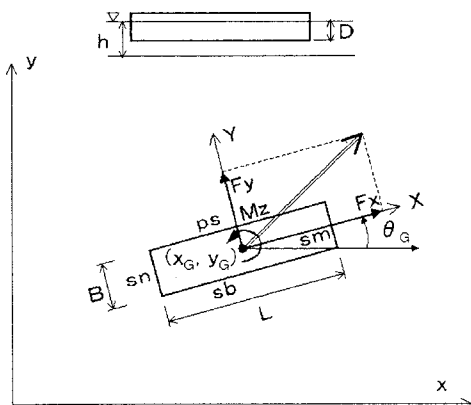


図-6 力に関する座標系の定義

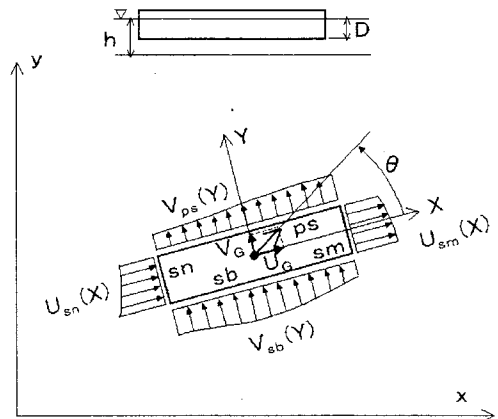


図-7 流速に関する座標系の定義

$$\left. \begin{aligned} F_{DX2} &= \frac{\rho}{2} C_{DX2} (U_G^2 + V_G^2) \frac{U_G}{|U_G|} BD \\ F_{DY2} &= \frac{\rho}{2} C_{DY2} (U_G^2 + V_G^2) \frac{V_G}{|V_G|} LD \\ M_{DZ2} &= l \sqrt{F_{DX2}^2 + F_{DY2}^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 C_{DX2} 、 C_{DY2} は、船首尾方向、舷側方向の抗力係数である。また、流速 U_G 、 V_G は、船体重心位置における船首尾方向および舷側方向の流速である。 l は、モーメントレバーであり、浮体の形状から決まる長さである。

最後に、慣性力については、次式で与える。

$$\left. \begin{aligned} F_{MX} &= \frac{\rho}{2} C_M DL \left(\int_{sm} \frac{\partial U_{sm}}{\partial t} dY + \int_{sn} \frac{\partial U_{sn}}{\partial t} dY \right) \\ F_{MY} &= \frac{\rho}{2} C_M DB \left(\int_{ps} \frac{\partial V_{ps}}{\partial t} dX + \int_{sv} \frac{\partial V_{sv}}{\partial t} dX \right) \\ M_{MZ} &= -\frac{\rho}{2} C_M DL \left(\int_{sm} Y \frac{\partial U_{sm}}{\partial t} dY + \int_{sn} Y \frac{\partial U_{sn}}{\partial t} dY \right) \\ &\quad + \frac{\rho}{2} C_M DB \left(\int_{ps} X \frac{\partial V_{ps}}{\partial t} dX + \int_{sb} X \frac{\partial V_{sb}}{\partial t} dX \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

(2) 津波力評価方法の簡略化

浮体の幅が狭い場合には、上記の式において、船首、船尾における積分を一定とすることにより、線上構造物としてモデル化することが可能である。

流れの空間分布が小さい場合には、各式の積分を例えば重心点における値で代表させることにより、式(2)、式(4)は、以下の式で簡略化される。

$$\left. \begin{aligned} F_{DX1} &= \frac{\rho}{2} (C_{DX1.sm} + C_{DX1.sn}) U_G |U_G| DB \\ F_{DY1} &= \frac{\rho}{2} (C_{DY1.ps} + C_{DY1.sb}) V_G |V_G| DL \\ M_{DX1} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

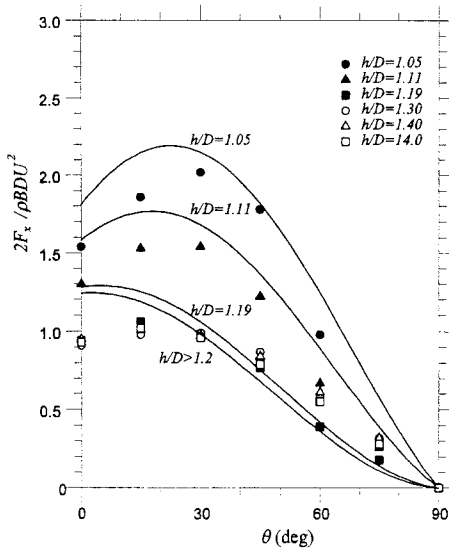
$$\left. \begin{aligned} F_{MX} &= \rho C_M DL B \frac{\partial U_G}{\partial t} \\ F_{MY} &= \rho C_M DB L \frac{\partial V_G}{\partial t} \\ M_{MZ} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

4. 評価モデルと実験結果との比較

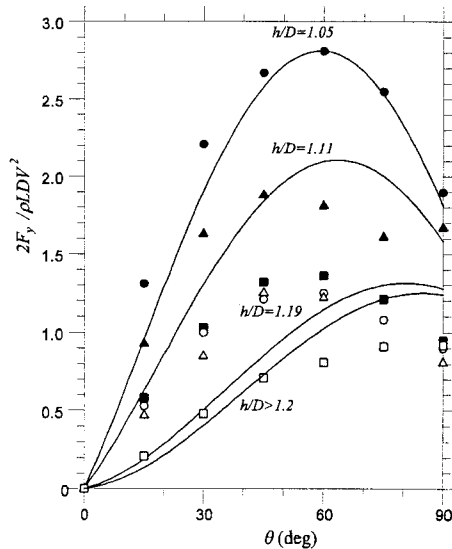
(1) 定常流れに対する検証

はじめに、評価モデルが最も単純な定常一様流れに対して、どの程度の適用性があるのかを、既往のデータ(造船研究協会, 1982) に対して確認した。評価モデル中の各関数、係数は、以下のものを用いた。

重み関数としては、次式を用いた。



(a) 船首尾方向の力 F_x



(b) 舷側方向の力 F_y

図-8 流れによる力の実測値と評価値との比較
($L/B=1.2$ の箱型船の場合, (財)日本造船研究協会, 1982)

$$w = \begin{cases} 1.0 - \frac{0.95}{0.2} \left(\frac{h}{D} - 1.0 \right) & : 1 < \frac{h}{D} \leq 1.2 \\ 0.05 & : 1.2 < \frac{h}{D} \end{cases} \quad \dots (7)$$

抗力係数としては、建物に作用する風圧分布などを参考に次式で評価した。

$$C_{DX1.sm} = \begin{cases} 0.4 & : U_{sm} \geq 0 \\ 0.8 & : U_{sm} < 0 \end{cases} \quad \dots (8)$$

$$C_{DX1.sn} = \begin{cases} 0.8 & : U_{sn} \geq 0 \\ 0.4 & : U_{sn} < 0 \end{cases} \quad \dots (9)$$

$$C_{DY1.ps} = \begin{cases} 0.4 & : V_{ps} \geq 0 \\ 0.8 & : V_{ps} < 0 \end{cases} \quad \dots (10)$$

$$C_{DY1.sb} = \begin{cases} 0.8 & : V_{sb} \geq 0 \\ 0.4 & : V_{sb} < 0 \end{cases} \quad \dots (11)$$

$$C_{DX2} = 2.0 \times (\cos^2 \theta + 1.2 \times \sin \theta \cos \theta) \quad \dots (12)$$

$$C_{DY2} = 2.0 \times (\sin^2 \theta + 2.2 \times \sin \theta \cos \theta) \quad \dots (13)$$

ここに、 θ は浮体の船首尾方向と流向とのなす角である。

船首尾方向力および舷側方向力に関して、実測値と評価値の比較を図-8に示す。同図は喫水の違い、流れ向きによる力の違いを良好に現しており、ここで提案した評価方法の妥当性を示している。

(2) 津波に対する検証

次に、本研究で取得したデータとの比較を行う。はじめに、抗力係数については、一様流れと同じものを用いた。厳密には、船体の形状により抗力係数は変化することが予想されるが、簡単のため同じ値を用いた。また、慣性力係数については、

$$C_M = 2.0 \quad \dots (14)$$

を用いた。さらに、モーメントレバーとしては、日本造船研究協会 (1982) の次式を用いた。

$$l = 0.09 \times L \sin^{1.2}(2\theta) \quad \dots (15)$$

図-9に実測された力と評価式により得られた力の時系列を示す。ばらつきがあるものの、全体の傾向を良好に表現しており、提案する津波波力の評価方法が妥当であることがわかる。

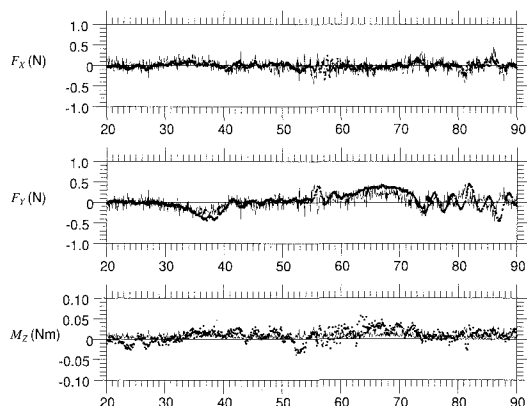


図-9 津波波力の実測値と評価値との比較
(防波堤無し、波条件3、満載、船首偏角45°)
(●：実測値、実線：評価値)

5. おわりに

津波が浮体に及ぼす波力の特性について、水理実験を行い、反射波や渦が存在する複雑な流速場においては、流速の時空間変動が波力に及ぼす影響を明らかにした。また、流速場から浮体に作用する津波波力を評価する方法を提案した。実験データと比較することにより、ばらつきはあるものの、提案する津波波力の評価方法により、定性的な波力の変化特性を表現できることがわかった。

今後、浮体の漂流挙動を解析する上での外力評価などに適用する上では、浮体の運動が波力に与える影響を考慮することが必要である。また、力の評価において、流速分布の影響が小さくないため、流速の予測精度の向上も、今後解決すべき課題である。

参 考 文 献

- 小林英一・越村俊一・久保雅義 (2004)：津波による船舶の漂流に関する基礎的研究，地域安全学会梗概集，pp. 69-72.
- 藤井直樹・大森政則・池谷毅・朝倉良介・入谷剛・柳沢賢 (2005)：津波による漂流物の移動に関する基礎的研究，土木学会海洋開発論文集，Vol.21，pp. 127-132.
- (社)日本港湾協会 (1999)：港湾の施設の技術上の指針同解説，p. 193.
- (社)日本造船研究協会 (1982)：第179研究部会箱型海洋構造物の運動特性及び係留システムに関する研究報告書，研究資料 No.346，pp. 51-61.
- Kitamura, F., H. Sato, K. Shimada and T. Mikami (1997)：Wind loads acting on very large floating structures, 1997 OMAE Vol. VI, Ocean Space Utilization, ASME, pp. 227-232.