

横波中のロワー・ハル型プラットフォームに働く定常力の計算

別所正利 (防衛大学校)

経塚雄策 (防衛大学校)

1 概要

前年度の研究では、3次元漂流力の公式とゲリツマの抵抗増加式の関係を明確にするとともに、2次元浮体の係留系インピーダンスを適当に選ぶことによって所望の周期で漂流力を0とするための条件式を導いた。また、それを実験的にも確認した。

ところで、係留系のインピーダンスを変更するにしても、元々の漂流力は小さな方がそれを0とするためには有利であると思われるし、実際の海洋構造物を考えた場合には2次元浮体では現実味が薄れると思われる。その点では、3次元計算が待望される訳であるが、問題の見通しを計る上では複雑となるばかりで得策とも思われない。そこで、本研究ではストリップ法の適用を考え、横波中のロワー・ハル型海洋構造物について考えることとした。その場合には、大部分のストリップでは双胴の没水体となっているが、特に没水円柱では全ての波数の入射波に対して全透過、従って漂流力は常に0であるという、まさに求めようとしている解の一つを我々は既に知っている訳である。そこで、一般的な角柱の特性を調べるために、始め単体について解き、次いで大橋の近似により双胴の問題に拡張した結果、没水体では単体・双胴体にかかわらず没水深度が極端に浅くなければ漂流力は浮体に比較して格段に小さいことがわかった。これに反して、物体固定時の上下方向の定常力を計算してみたところ力の絶対値も小さくなく、この型の海洋構造物で問題となっているトルク・モーメントへの寄与は漂流力よりも大きいのではないかと思われる結果を得た。

2. 双胴体に働く流体力の計算法

波の中の双胴船あるいは多胴船に働く流体力の問題は、大楠により初めて取り扱われ、船体間の相互干渉として発散波項だけを考慮した近似計算によっても極端な場合を除いて、厳密解との一致は良好であるとの結果が示されている。¹⁾ この方法によれば、単胴の流力特性がわかっていれば多胴時の計算が簡単に求められるので、数値計算上も有利である。ここでは、Srokosz-Evans²⁾ の記述に習って双胴体に働く流体力の計算法を概説する。

Fig. 1 において、 $x=p$ にある物体を 1, $x=-p$ にある物体を 2 とし、1 の物体が j -モードの動揺をするときのポテンシャル ϕ_{ij}^r を

$$\left. \begin{array}{l} \text{1の近傍では } \phi_{ij}^r(x-p, y) + \varepsilon_1 \phi_{1-}^s(x-p, y) \\ \text{2の近傍では } \eta_1 \phi_{2+}^s(x+p, y) \end{array} \right\} \quad (1)$$

ただし、 ϕ_{ij}^r ; i の物体の j -モードの動揺による放射ポテンシャル
 $\phi_{i\pm}^s = e^{-ky \pm ikx} + \phi_{i\pm}^\pm$; $(\pm)$ 方向から i の物体に入射波がある時の散乱ポテンシャル
 ε_1, η_1 ; 未定定数

のように表すことにする。

ここで、 $\phi_{ij}^r, \phi_{i\pm}^s$ の無限遠における漸近解は

$$\left. \begin{array}{l} \phi_{ij}^r \rightarrow i H_{ij}^\pm e^{-ky \mp ikx}, \text{ as } x \rightarrow \pm \infty \\ \phi_{i+}^s \rightarrow \begin{cases} (e^{ikx} + r_{i+} e^{-ikx}) e^{-ky}, & \text{as } x \rightarrow +\infty \\ t_{i+} e^{-ky + ikx}, & \text{as } x \rightarrow -\infty \end{cases} \\ \phi_{i-}^s \rightarrow \begin{cases} t_{i-} e^{-ky - ikx}, & \text{as } x \rightarrow +\infty \\ (e^{-ikx} + r_{i-} e^{ikx}) e^{-ky}, & \text{as } x \rightarrow -\infty \end{cases} \end{array} \right\} \quad (2)$$

ただし、 $H_{ij}^\pm$ は i の物体が j の動揺をする時のコチン函数

$$r_{i\pm} = \frac{1}{2} \left(\frac{H_{i2}^{\pm}}{H_{i2}^{\pm}} + \frac{H_{i1}^{\pm}}{H_{i1}^{\pm}} \right) ; \text{反射波係数}$$

$$t_{i\pm} = \frac{1}{2} \left(\frac{H_{i2}^{\pm}}{H_{i2}^{\pm}} - \frac{H_{i1}^{\pm}}{H_{i1}^{\pm}} \right) ; \text{透過波係数}$$

であることがわかってるので、(2)を(1)に代入し発散波について Matchingすれば

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{i H_{1j}^- r_{2+}}{e^{i4Kp} - r_{1-} r_{2+}} \\ \eta_1 &= \frac{i H_{1j}^- e^{i2Kp}}{e^{i4Kp} - r_{1-} r_{2+}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

となり解が求められる。

次に、同様にして2の物体が動揺する時の解を求めておけば、1と2の物体が同時に動揺する場合の解はこれらのたし合わせによって求められる。本研究の場合は、左右対称断面の双胴体であるので

$$\left. \begin{aligned} H_{1j}^{\pm} &= H_{2j}^{\pm} = H_j^{\pm} \\ H_2^+ &= H_2^- \\ H_j^+ &= -H_j^- , \quad j=1,3 \\ r_+ &= r_- = \frac{1}{2} \left(\frac{H_2^+}{H_2^+} + \frac{H_1^+}{H_1^+} \right) \\ t_+ &= t_- = \frac{1}{2} \left(\frac{H_2^+}{H_2^+} - \frac{H_1^+}{H_1^+} \right) \end{aligned} \right\}$$

などの関係を使って簡単化ができるので、1の物体近傍では

a) 左右揺に対し

$$\phi_{11}^r + \frac{i H_1^+}{e^{i2Kp} + r} \phi_{1-}^s = \phi_{11}^r + \varepsilon_{11} \phi_{1-}^s \quad (4)$$

b) 上下揺に対し

$$\phi_{12}^r + \frac{i H_2^+}{e^{i2Kp} + r} \phi_{1-}^s = \phi_{12}^r + \varepsilon_{12} \phi_{1-}^s \quad (5)$$

c) O' 点まわりの横揺れに対し

$$\begin{aligned} \phi_{13}^r + \frac{iH_3^+}{e^{i2Kp} + r} \phi_{1-}^s + p(\phi_{12}^r - \frac{iH_2^+}{e^{i2Kp} + r} \phi_{1-}^s) \\ = \phi_{13}^r + \varepsilon_{33} \phi_{1-}^s + p(\phi_{12}^r + \varepsilon_{32} \phi_{1-}^s) \end{aligned} \quad (6)$$

となり、

d) Diffraction では

$$\left. \begin{aligned} 1 \text{ の物体近傍で } \phi_1^d &= e^{iKp} \phi_{1+}^s + \frac{tr e^{iKp}}{e^{i4Kp} - r^2} \phi_{1-}^s \\ &= e^{iKp} \phi_{1+}^s + \varepsilon_{41} \phi_{1-}^s \\ 2 \text{ の物体近傍で } \phi_2^d &= \frac{te^{i3Kp}}{e^{i4Kp} - r^2} \phi_{1+}^s \\ &= \varepsilon_{42} \phi_{1+}^s \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

なる結果を得る。

これによる流体力は、コチン函数を使って

$$H_{ij}^{\pm} = \int_c \phi_{i\pm}^s \cdot \frac{\partial}{\partial n} \phi_{ij}^r ds \quad (8)$$

とすれば簡単に求められる。

これらの結果、双胴体が波の中で動揺する場合の全ポテンシャルは、

$$\left. \begin{aligned} 1 \text{ の物体近傍で } \phi_1^m &= \phi_1^d + K \sum_{j=1}^3 X_j \phi_{1j}^r \\ 2 \text{ の物体近傍で } \phi_2^m &= \phi_2^d + K \sum_{j=1}^3 X_j \phi_{2j}^r \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

で与えられ、コチン函数のたし合わせから反射波係数も求められるので、丸尾の式から漂流力の計算ができる。また、漂流力を任意の波数で 0 とするための、完全透過条件についても前報と全く同じ手法が使えるので 2 次元問題としては浮体も没水体も変わらないと考えられる。

3. 固定物体に働く2次の定常力の計算

セミサブ型の海洋構造物では、漂流力と同時に垂直の定常力、チルトモーメントが重要であるといわれている。³⁾ ここでは、前章の結果を利用して、単胴に働く2次の定常力から双胴となった時の定常力およびチルトモーメントを計算する。

固定物体では、2次の定常力は

$$f_{ij}^{(2)} = \frac{\varepsilon^2 F_j^{(2)}}{\frac{\rho}{2} g a_w^2} = -\frac{1}{2K} \int_c |\nabla \phi_i^d|^2 \frac{\partial \bar{x}_j}{\partial n} dS \quad (10)$$

ただし $\varepsilon = a_w / b$; 擾動パラメータ

a_w ; 入射波振幅

として求められる。⁴⁾ 没水体では、Wetted surface の時間変化分を考
える必要がないので積分は物体全周をとる。

物体表面条件によって

$$\frac{\partial \phi_i^d}{\partial n} = 0, \quad i = 1, 2$$

であるから (7) を使うと、1 の物体では

$$\begin{aligned} |\nabla \phi_1^d|^2 &= \frac{\partial \phi_1^d}{\partial s} \cdot \frac{\partial \bar{\phi}_1^d}{\partial s} \\ &= (1 + |\varepsilon_{41}|^2) \left| \frac{\partial \phi_{1+}^s}{\partial s} \right|^2 + 2 \operatorname{Re} \left\{ e^{iKp} \bar{\varepsilon}_{41} \left(\frac{\partial \phi_{1+}^s}{\partial s} \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

2 の物体では

$$|\nabla \phi_2^d|^2 = |\varepsilon_{42}|^2 \left| \frac{\partial \phi_{1+}^s}{\partial s} \right|^2 \quad (12)$$

となる。(11), (12) を (10) に代入すれば物体 1, 2 の定常力が独立に求められる。なお、動揺する場合に (9) によって計算すれば良いが、通常の擾動法に従うと動揺変位の影響が圧力と物体表面上の法線にもあらわれるので、やや複雑な計算となる。

4. 数値計算例

Fig. 2 に示されているような3種類のローハル断面について、Table 1 のような要目を与えて計算した。数値計算は特異点法によっており、片半面30分割とした。ここで、単位長さとしては $\sqrt{bd}$ を選んであるが、これは同じ排水量を与えた時の力の絶対値の比較を容易にするためで、波数および没水深度なども

$$\left. \begin{aligned} \bar{K} &= \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{bd} = \frac{\omega^2}{g} \sqrt{bd} \\ \bar{T} &= T / \sqrt{bd} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

の無次元化を行っている。

次に、比重1の没水体では現実的でないと考えられるので、カラムの影響分を長波近似して、その流体力を

$$F_{CLM} = -\rho g A_w (X_2' - a_w) \quad (14)$$

ただし

A_w ; カラムの水線面積
 $X_2' - a_w$; カラム位置での水面との相対変位

とし、これによって、上下揺、横揺の復元力を与えた。

Fig. 3, 4 は S-1 のローハルが没水深度 $\bar{T}=3$ で左右揺、上下揺する時の付加質量係数と発散波振幅比の計算結果である。比較のために単胴の流体力を単純にたし合わせて求められる値および発散波振幅比について双胴間距離の修正をした値

$$\bar{A}_1 e^{iKp} + \bar{A}_2 e^{-iKp} = 2\bar{A} \cdot |\cos Kp| \quad (\because A_1 = A_2 = A)$$

も書きいれてある。

Fig. 5, 6, 7 は3種類のローハルに対する1次の動揺の応答の比較である。左右揺は O' 点(今の場合は重心位置にも等しい)での値となっている。この結果から判断すると、1次の動揺ではローハルの形状の違いによる差が結構あり、S-3のような縦長断面の方が動揺が少ないようである。

Fig. 8, 9はS-3のロー・ハルが固定されたときと動揺自由のときの反射波係数を2種類の没水深度について求めた結果である。これを見ると、没水体では固定時、動揺自由時にかかわらず反射波が少ないように思われる。漂流力はこの値の自乗に比較するから、適当に深ければ浮体の場合と比べて格段に小さいと思われる。従って、現実のセミサブ型海洋構造物で計測される漂流力の大部分は、カラム部分での波の反射が原因ではないかと思われる。もし、そうだとするとカラム部分での反射波は円筒波となるであろうから、前報で考えたような2次元理論はこの場合への適用が難しいと考えられる。さらに、この場合の漂流力を小さくするにはカラム部分での反射波を極力小さくするように工夫すべきであると思われる。

最後に、Fig. 10は3つのロー・ハルが単胴で固定された時の垂直方向の定常力、Fig. 11はS-1の双胴が固定された時の垂直方向の定常力を没水深度を変えて比較したものである。Fig. 10の結果からはロー・ハルの形状の違いによる差は顕著でなく、3種類ともに同程度の垂直上向きの定常力を発生することがわかる。Fig. 11によれば垂直上向きの定常力は没水深度が小さな時に急激に大きくなることわかる。なお、没水体では部材自身に働くチルトモーメントは極めて小さく、これは反射波が少なく流場の対称性が保たれるためと考えられる。この点に関して、左右非対称断面での特性に興味を持たれるが左右対称断面では、双胴の場合にも右側と左側の単胴に働く定常力はほとんど差がなく単胴の場合の計算の単純和でよい結果となっている。しかしながら、動揺を許した場合については実際に計算してみないと断定的な事は言えない。また、1次の動揺ではロー・ハルの形状の違いによる差が小さくなかったことも考えると2次の定常力についてはどうであるのが興味のあるところである。

5. 結 論

以上、セミサブ型海洋構造物の波の中での流力特性を調べるためにストリップ法の考え方によって、2次元没水双胴体と近似して若干の数値計算を行った結果、

- (1) 没水体の双胴間の流力的干渉は、浮体の場合ほどではないにしろ小さくないので考慮すべきである。
- (2) 没水体の断面形状の違いによる1次の動揺応答の差は小さい。縦長ロワーハルの方が揺れにくい。
- (3) 没水体の反射波係数は単胴であれ、双胴であれ没水深度が極端に小さくなければ浮体に比較してかなり小さく、従って漂流力はその2乗で小さい。
- (4) 波の中で固定された没水体に働く垂直方向の定常力は常に上向きで、絶対値も小さくない。また、双胴の場合には単胴の結果をたし合わせても良い近似となる。これは、没水体では入射波がほとんど透過することによる。

などの結論を得た。

[参考文献]

1. 大楠丹: Multihull Shipの波の中の運動について, 西部造船会々報, 第40号, 昭和45年7月
2. Stokosz, M.A., Evans, D.V.: A Theory for Wave-Power Absorption by Two Independently Oscillating Bodies, J.F.M., Vol. 90, Part 2, 1979.
3. Takarada, N., et al.: The Stability of Semi-submersible Platforms in Waves, 2nd Int. Conf. of Stability of Ships and Ocean Vehicles, Tokyo, 1982.
4. 経塚雄策: 二次元物体に働く非線型流体力について(第1報 散乱問題), 日本造船学会論文集, 第148号, 昭和55年12月.

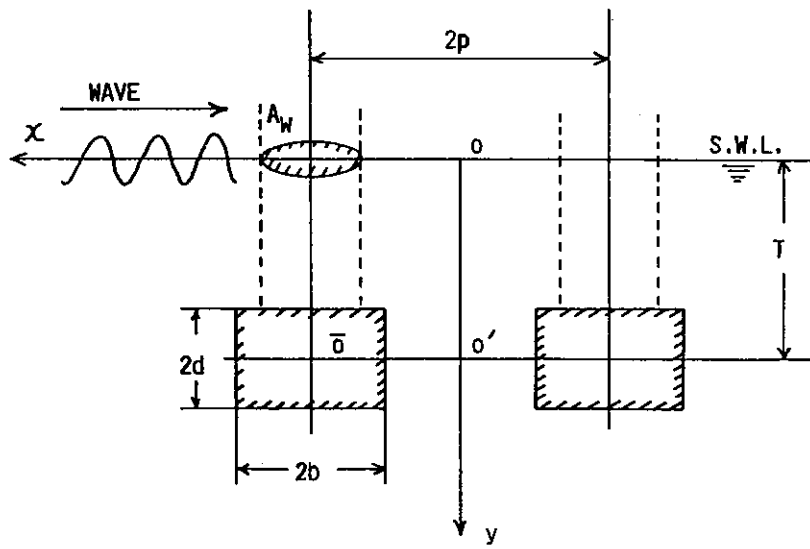
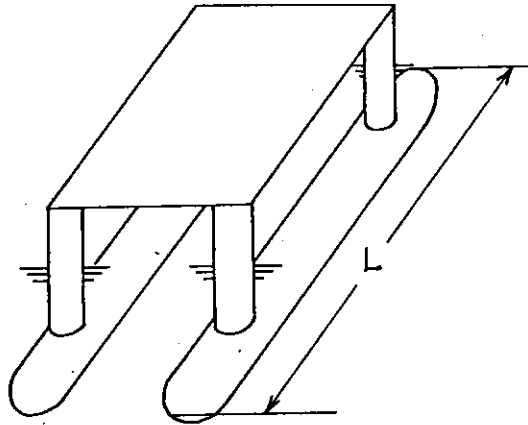


Fig.1 Coordinate system

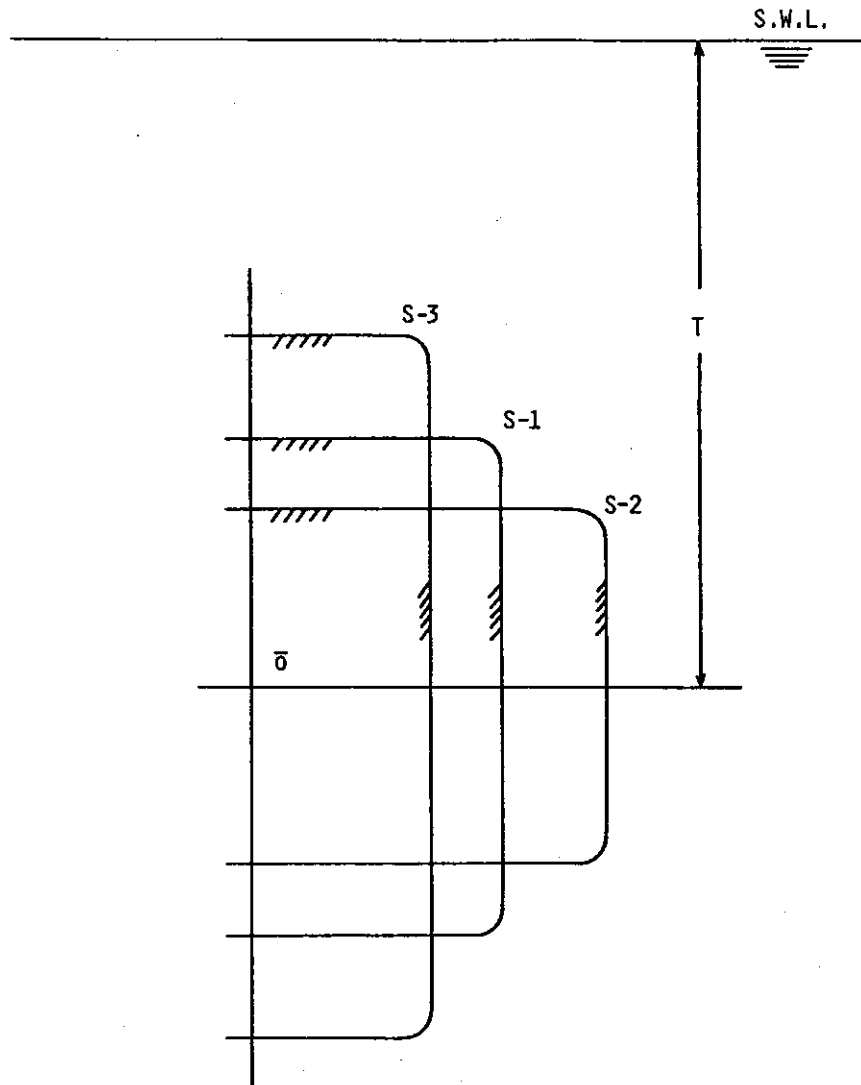


Fig.2 Sectional form of lower-hull

Table 1. Principal particulars of a semi-submerged platform

Item	Lower-hull section		
	S-1	S-2	S-3
Breadth/Height : b/d	1.0	2.0	0.5
Sectional area coef. : S/bd	0.991	0.991	0.991
Depth : $T/\sqrt{bd}$	3.0	3.0	3.0
Catamaran space : $p/\sqrt{bd}$	2.0	2.0	2.0
Waterline area of column : $A_w/\sqrt{bd}L$	0.4	0.4	0.4
Center of gravity : $\bar{O}'G/\sqrt{bd}$	0.0	0.0	0.0
Metacenter height : $\bar{GM}/\sqrt{bd}$	0.05	0.05	0.05
Radius of gyration : $r_G/\sqrt{bd}$	3.0	3.0	3.0

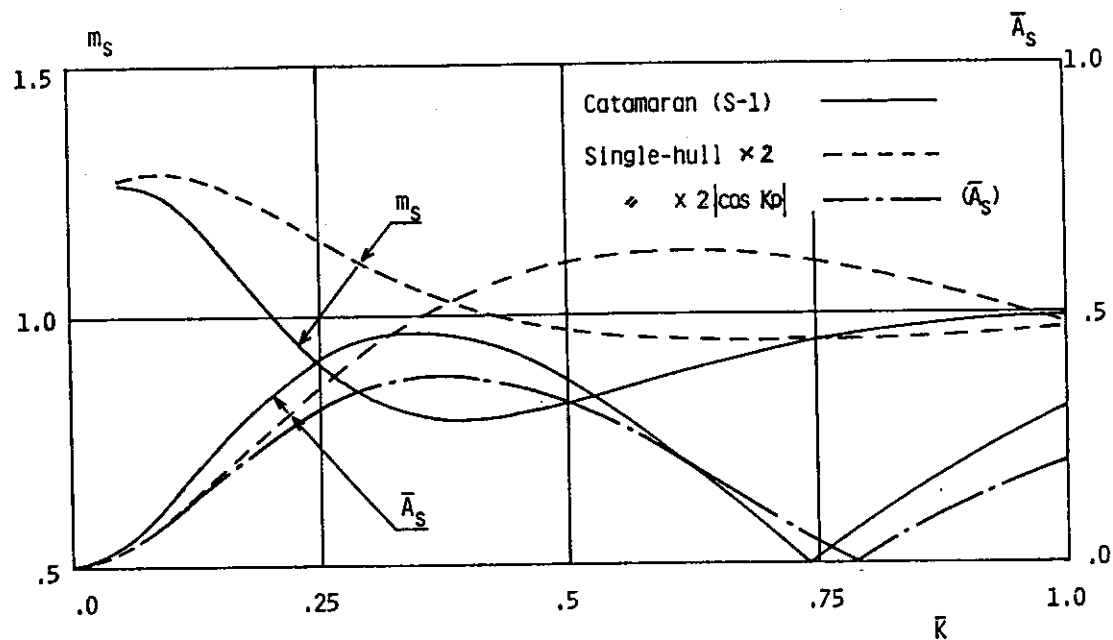


Fig.3 Added-mass coef. and wave amplitude ratio in sway of a submerged catamaran (S-1)

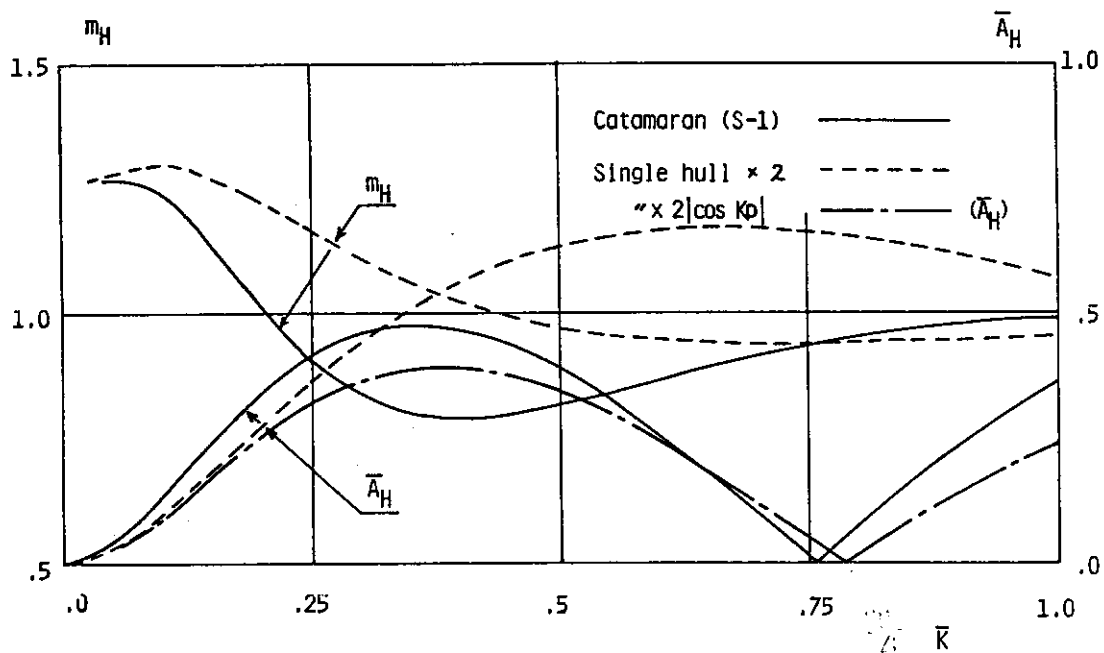


Fig.4 Added-mass coef. and wave amplitude ratio in heave of a submerged catamaran (S-1)

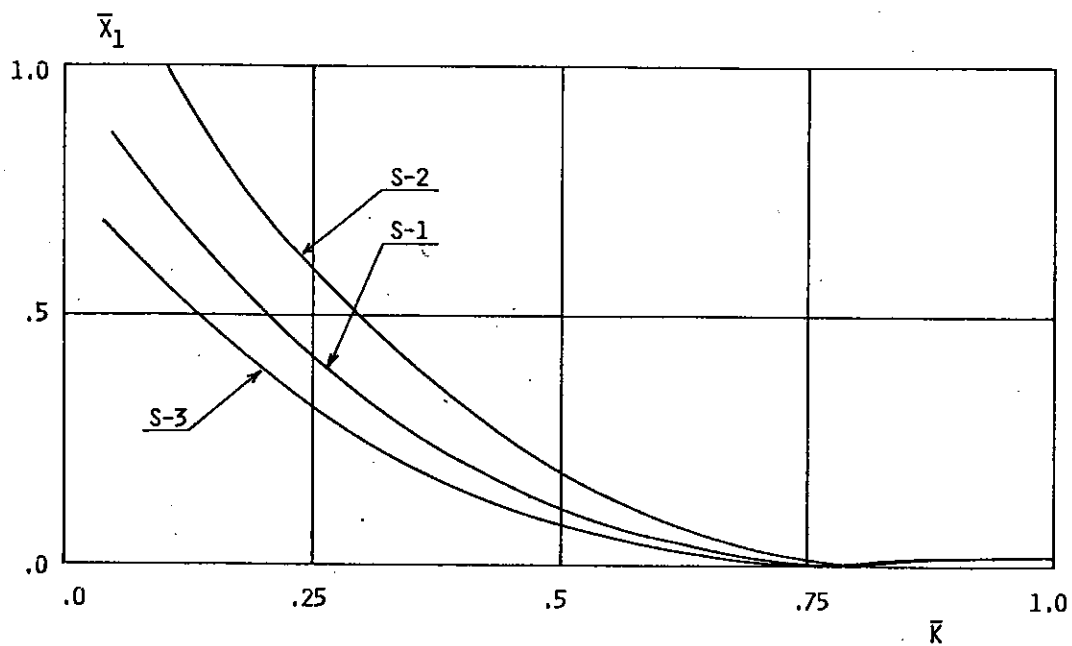


Fig.5 Sway response of a semi-submerged platform in waves (at o')

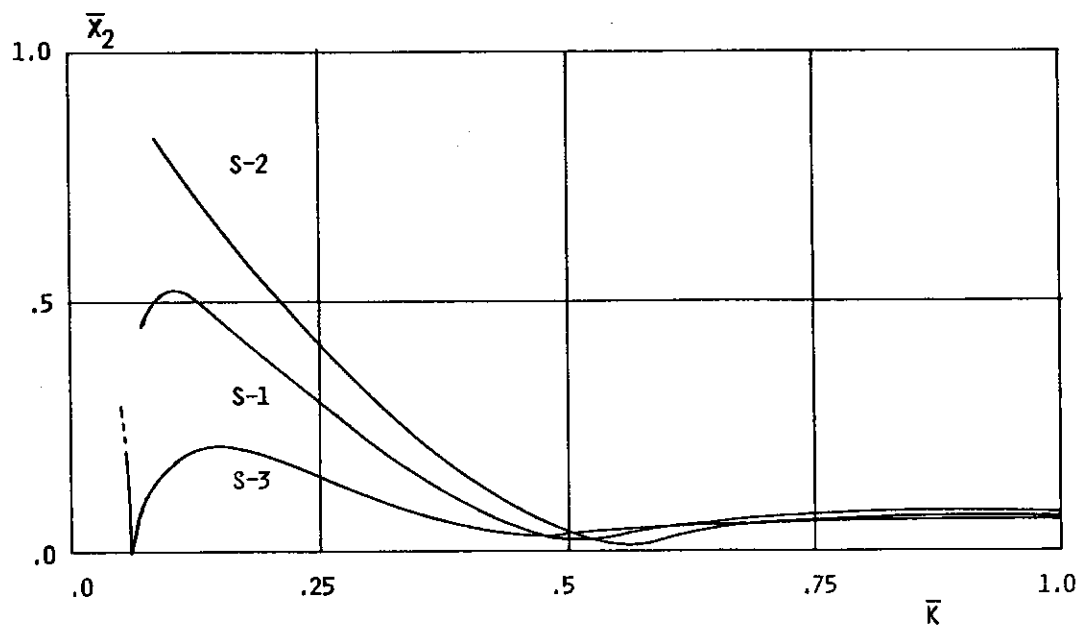


Fig.6 Heave response of a semi-submerged platform in waves

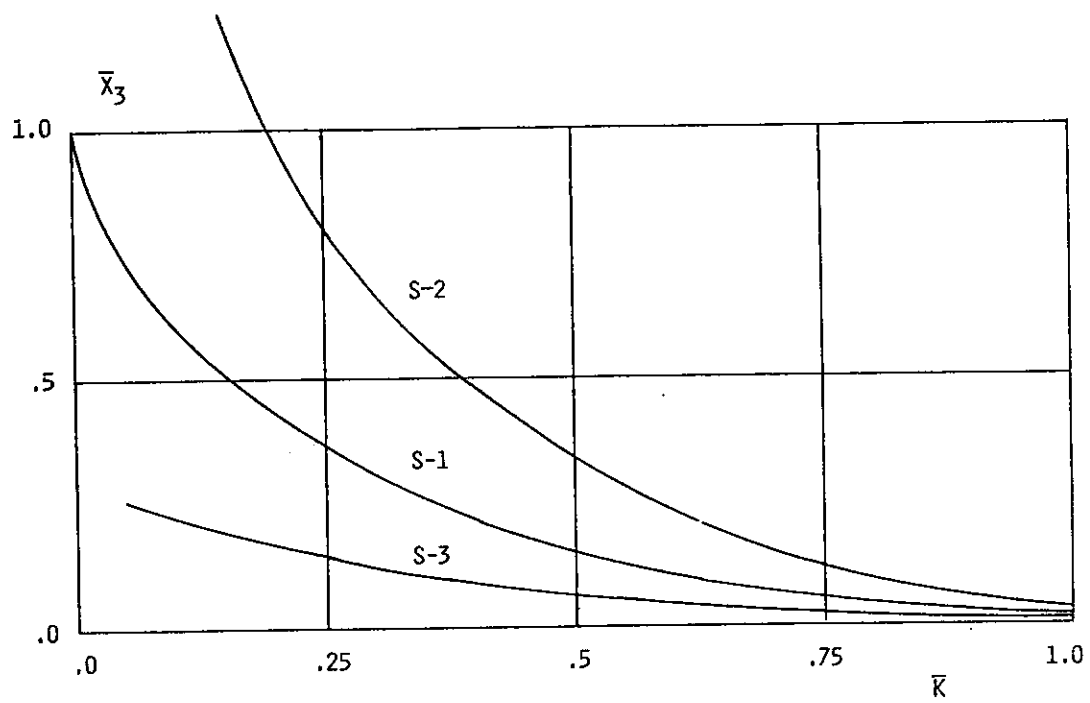


Fig.7 Roll response of a semi-submerged platform in waves

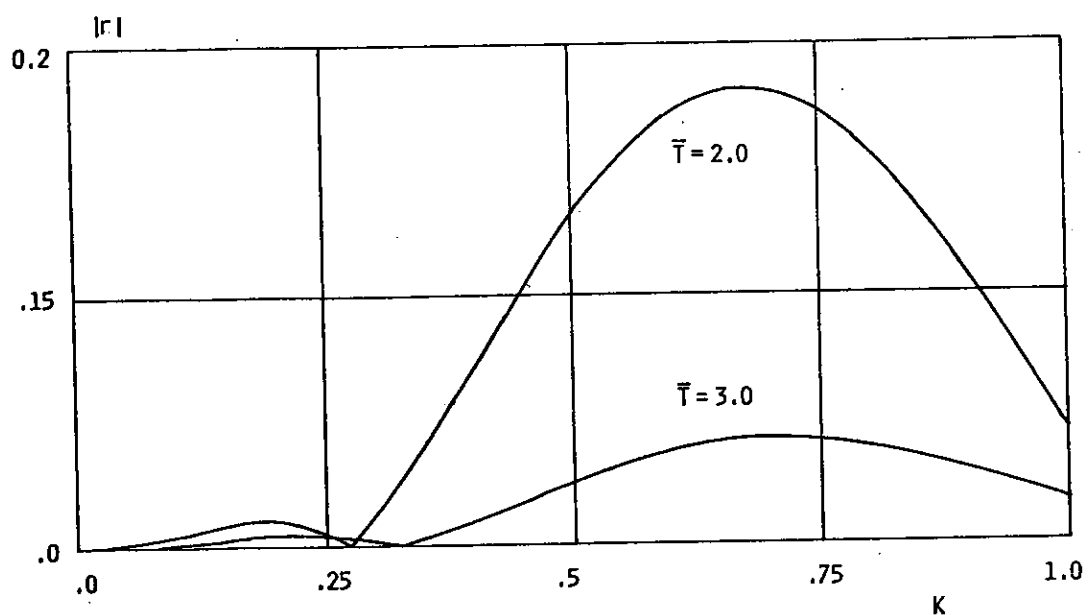


Fig.8 Reflected-wave coef. of a submerged catamaran in case of fixed condition (S-1)

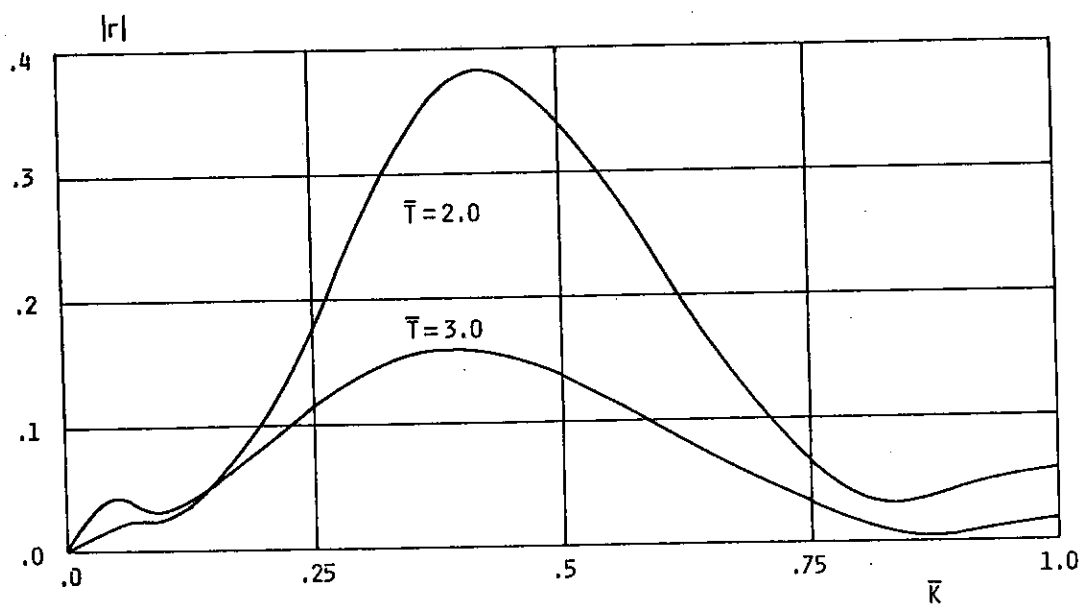


Fig.9 Reflected-wave coef. of a submerged catamaran in case of freely floating condition (S-1)

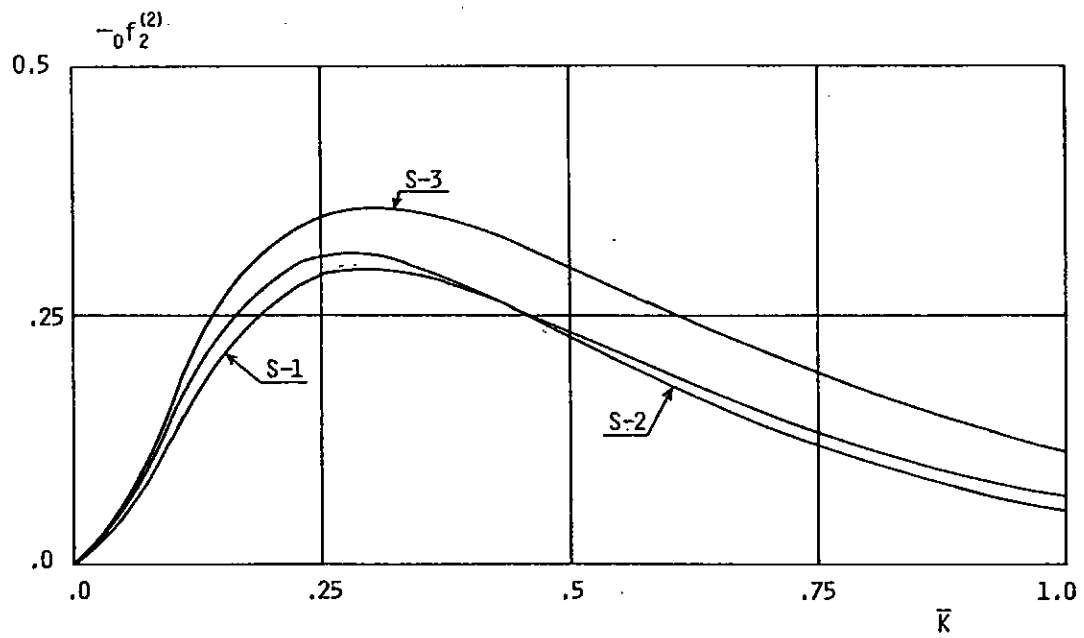


Fig.10 Vertical steady-force of a submerged single body in waves (fixed condition)

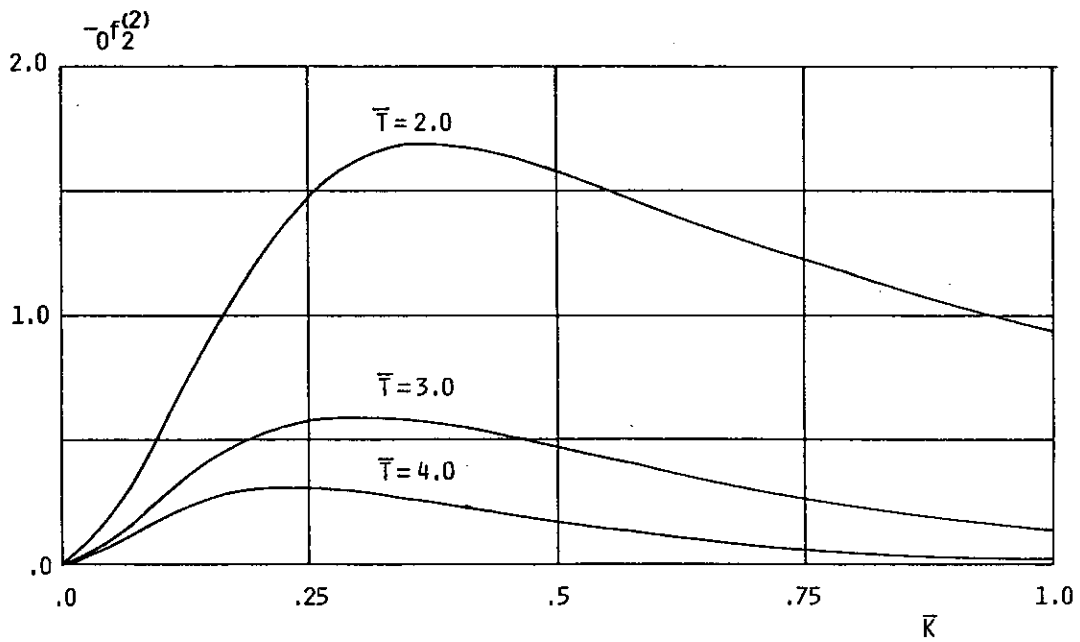


Fig.11 Vertical steady-force of a submerged catamaran in waves as a function of its depth (S-1, fixed)