

# 箱型没水体に働く流体力について

(その1. 強制動揺試験)

大 川 豊\*

## On the Hydrodynamic Forces Acting on Submerged Hexahedrons

(Part 1. Forced Oscillation Tests)

By

Yutaka OHKAWA

### Summary

Recently with the appearance of various floating offshore structures and semisubmersible working barges, studies to improve their seaworthiness are stimulated. To estimate the behavior of these floating structures we have to investigate the hydrodynamic forces of their individual parts such as lower-hulls, columns, bracings etc. of which they consist.

In this paper, the author treats the problems of hydrodynamic forces acting on submerged hexahedrons as a typical form of lower-hulls.

Forced oscillation tests for heave, sway, and roll modes were carried out for six models with variable length breadth ratio and breadth thickness ratio to obtain added mass and damping coefficients. For one of models, same tests were carried out with variant submergence. These coefficients were compared with the values evaluated by Ijima's method which is one of two-dimensional linear potential theories.

It is found that in the case of small submergence the theoretical values deviate from the experimental results due to the nonlinearity of the flow field. This discrepancy becomes smaller at deeper submergence.

In the range of large length breadth ratio the theoretical values can explain the experimental results considerably well.

### 1. 諸 言

近年、海洋開発が盛んになるに伴ない、各種の海洋構造物および海洋開発関連の工事に従事する作業用船舶などの耐波性能の向上を計るための研究が要求される傾向になって来ている。一般に、海洋構造物では、海洋波の中で出現頻度の少ない比較的長い波長の波に同調点をもっていくことをその最大の特徴とする半潜水型の海洋構造物は、動揺性能の面から極めて有効であるという事が、様々な形式の海洋構造物について、立証されつつある。また、作業用船舶であっても、荒

天時には半潜水型となり、稼働率を上げることができ船型が注目されるようになって来ている。これらの海洋構造物や作業用船舶の波浪中における動揺特性を推定するに当たっては、ローハル、コラムおよびブレーシング等の個々の部材に働く流体力を求める必要があり、更に部材間の相互干渉を考慮する必要があると思われる。しかしながら、一般には相互干渉は無視し、個々の部材に働く流体力を単純に加算して全体の流体力として動揺特性を推算している場合が多い。ところで、これらの部材に働く流体力は、微小振幅のポテンシャル理論に基いたいくつかの計算法が開発され、比較的容易に計算できる様になって来ているので、実験的に検証された範囲については運動の計算に

\* 海洋開発工学部

原稿受付： 昭和54年11月1日

とり入れることができる。例えば、円柱や各種のフーティングに関する多くの理論的および実験的研究がある。また、ブレイシングに相当する部材に関しては小寺山等<sup>1)</sup>の研究がある。ところが、半潜水型海洋構造物の主要部材であるローハルに相当する没水体に関しては、若干の計算例はあるが、実験的な研究はほとんど見られない。そこで、ローハルに相当する箱型没水体に働く流体力の特性を把握すると同時に推定精度の向上を計るために、没水体形状、没水深度等を系統的に変化させて、上下揺れ、左右揺れ、横揺れの流体力を強制動揺法で求める水槽試験を実施した。また実験値の傾向を裏付けるために、二次元理論による流体力の計算を行ない、実験値と理論値との比較検討を行なった。この成果を活用することによって、半潜水型の海洋構造物や作業用船舶の半潜水状態における動揺応答特性の推定精度が向上すると思われるので、ここに報告することとした。

## 2. 試験方法

### 2.1 供試模型

試験に使用した模型は、厚さ ( $D$ ) を一定とし、長さ・幅比 ( $L/B$ )、幅・厚さ比 ( $B/D$ ) の異なる 6 種類の木製直方体である。これらの模型の主要目を表-1

Table 1 Principal particulars of models

M. No.	$L$ (m)	$B$ (m)	$D$ (m)	$L/B$	$B/D$	$W$ (kg)	$\overline{OG}/D$	$k_{xx}/B$
1	0.52	0.2	0.1	2.6	2.0	4.15		
2	0.78	0.3	0.1	2.6	3.0	16.78	0.229	0.312
3	1.04	0.4	0.1	2.6	4.0	34.95	0.240	0.319
4	1.30	0.5	0.1	2.6	5.0	58.75	0.234	0.275
5	0.72	0.4	0.1	1.8	4.0	22.10	0.158	0.312
6	0.40	0.4	0.1	1.0	4.0	9.07	0.257	0.280

に示す。表-1 の M. No. 3 を標準模型と称する。没水体と検力装置とは、図-1、図-2 に示す様な 4 本の細い支柱 (直径 16 mm) をもつ治具を介して取り付けられた。なお、表-1 の模型重量は、上述の治具および検力装置を含まない値であり、含んだ場合に模型の比重が約 1.0 に近づくようにしてある。また、横揺れの場合に必要な回転半径と重心位置は、後に述べる様に、空気中における強制動揺試験および静的傾斜試験の結果から推定したものであり、この値は治具および

検力装置を含んでいる。

### 2.2 試験状態

試験状態は、標準模型で没水深度・厚さ比 ( $h/D$ ) が 1.0、上下・左右揺れの振幅が振幅・厚さ比 ( $z_a/D$  または  $y_a/D$ ) で 0.1、横揺れ振幅 ( $\phi_a$ ) が  $2.5^\circ$  を標準状態とし、各パラメーターを系統的に変化させた。各運動モードによって実施した試験状態が若干異なるので、実施した状態を一括して表-2 に○印で示す。

なお、強制横揺れ試験時の回転中心は、没水体の横断面中心とした。

Table 2 Test conditions

$L/B$	$B/D$	$h/D$	$\frac{z_a/D}{y_a/D}$	$\phi_a$ (degree)	Heave	Sway	Roll
2.6	4.0	0.1	0.1	—	○	○	
2.6	4.0	0.25	0.1	2.5	○	○	○
2.6	4.0	0.5	0.1	2.5	○	○	○
2.6	4.0	0.75	0.1	2.5	○	○	○
2.6	4.0	1.0	0.1	2.5	○	○	○
2.6	4.0	1.5	0.1	2.5	○	○	○
2.6	2.0	1.0	0.1	—	○	○	
2.6	3.0	1.0	0.1	2.5	○	○	○
2.6	5.0	1.0	0.1	2.5	○	○	○
1.0	4.0	1.0	0.1	2.5	○	○	○
1.8	4.0	1.0	0.1	2.5	○	○	○
2.6	4.0	1.0	0.2	5.0	○		○
2.6	4.0	1.0	0.3	7.5	○		○
2.6	4.0	0.5	—	5.0			○
2.6	4.0	0.5	—	7.5			○

### 2.3 試験装置

#### 2.3.1 上下揺れおよび左右揺れ

模型を強制的に上下揺れまたは左右揺れさせる強制動揺装置は、ミナーシャモーターの回転をスコッチヨークによって上下または左右方向の正弦運動に変換させる方式である。検力装置は、図-1 にその概要を示すように、上下、左右方向の 2 分力を、板バネおよび 2 個のリングバネにつけた歪ゲージによって検出する方式である。この検力装置を強制動揺装置と模型取り付け治具との間に固定し、強制動揺装置によって模型

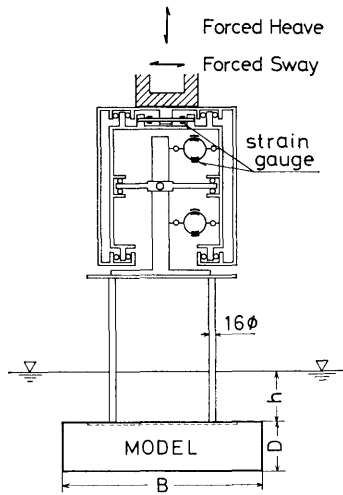


Fig. 1 Schematic view of the forced oscillation test for heave and sway

を上下揺れまたは左右揺れさせた。なお、本試験は当所の係留浮体水槽（長さ 35 m, 幅 8 m, 水深 1.42 m）において実施した。

### 2.3.2 横揺れ

強制横揺れ装置は、概要を 図-2 に示す様に、ミナーシャモーターの回転をスコッチヨークで往復運動に変え、下部の検力装置にロッドで伝え、検力装置を回転させる方式である。検力装置と没水体とをロッドでつなぎ、没水体中心軸を地上に固定した軸受けで支えることによって、没水体が回転運動をするようにした。検力装置は、強制横揺れ時の反力のモーメント

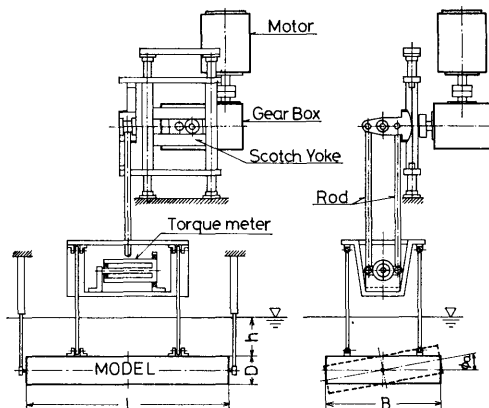


Fig. 2 Schematic view of the forced oscillation test for roll

を、磁歪式のトルク計で検出する方式である。本試験は当所の海洋構造物試験水槽（長さ 40 m, 幅 27.6 m, 水深 1.64 m）において実施した。

### 2.4 試験データの解析法

計測されたデータはすべてデータレコーダーに記録し、当部のデータ処理システム<sup>2)</sup>に従って A-D 変換、フーリエ解析を行ない、各現象の基本波成分の振幅と位相を求め、更に変位に対する位相遅れを求めた。

なお、各運動モードで与えた正弦運動に対する高調波の割合は、フーリエ係数  $a_i, b_i$  を用いて歪率を

$$q = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} (a_i^2 + b_i^2) / (a_1^2 + b_1^2)} \quad (1)$$

で表わした場合、 $i=8$  まで求めた結果では、その平均値が上下揺れで 0.006, 左右揺れで 0.012, 横揺れは 0.011 であった。

求められた振幅と位相差から各運動モードに対する流体力係数を求める方法は次の通りである。

#### 2.4.1 上下揺れ

Pure な上下揺れを線型運動であると仮定すれば、強制上下揺れによって得られる上下方向の反力  $F_z$  は、付加質量を  $A_z$ , 減衰係数を  $B_z$  とすれば、次の式で表わされる。

$$F_z = -(M + A_z)\ddot{z} - B_z\dot{z} - C_z z \quad (2)$$

但し、 $M$  は没水体と取り付け治具および検力装置の板バネ部までを含む全体の質量である。また、 $C_z$  は支柱による復原力係数を表わすが、これによる復原力の大きさは、標準模型において、付加質量による慣性力のたかだか 2% 程度である。 $A_z, B_z$  は厳密には治具の支柱を含む値であるが、その影響は没水体に比して極めて小さいと考えられるので無視することにした。

強制動揺装置によって模型に与えた変位を

$$z = z_a \sin \omega t \quad (3)$$

とすると、その変位によって得られる反力は  $\epsilon_z$  の位相遅れをもつので

$$F_z = F_{z0} \sin(\omega t - \epsilon_z) \quad (4)$$

と表わされる。これらを (2) 式に代入すれば、付加質量および減衰係数は次の式によって求められる。

$$A_z = \frac{F_{z0} \cos \epsilon_z}{\omega^2 z_a} + \frac{C_z}{\omega^2} - M \quad (5)$$

$$B_z = \frac{F_{z0} \sin \epsilon_z}{\omega z_a} \quad (6)$$

なお、付加質量および減衰係数の無次元化は次の式による。

$$a_z = A_z / \rho L B D \quad (7)$$

$$b_z = B_z \sqrt{B/2g} / \rho L B D \quad (8)$$

### 2.4.2 左右揺れ

2つのリングバネで計測されたそれぞれの力は、位相が同じかまたは  $180^\circ$  だけ異なる。(実際はすべて  $180^\circ$  異なっていた。)そこで、その位相を考慮した2つの力の和を  $F_y$  とする。

Pure な左右揺れを線型運動であると仮定し、付加質量を  $A_y$ 、減衰係数を  $B_y$  とすれば、強制左右揺れによって得られる左右方向の反力  $F_y$  は次の式で表わされる。

$$F_y = -(M + A_y)\ddot{y} - B_y\dot{y} \quad (9)$$

但し、 $M$  は没水体と取り付け治具および検力装置のリングバネ部までを含む全体の質量である。

強制動揺時の変位および反力を

$$y = y_a \sin \omega t \quad (10)$$

$$F_y = F_{y0} \sin(\omega t - \varepsilon_y) \quad (11)$$

とすると、これらを(9)式に代入すれば、付加質量および減衰係数は次の式によって求められる。

$$A_y = \frac{F_{y0} \cos \varepsilon_y}{\omega^2 y_a} - M \quad (12)$$

$$B_y = \frac{F_{y0} \sin \varepsilon_y}{\omega y_a} \quad (13)$$

なお、無次元化は上下揺れの場合と同じく次の式による。

$$a_y = A_y / \rho L B D \quad (14)$$

$$b_y = B_y \sqrt{B/2g} / \rho L B D \quad (15)$$

このようにして求められた値は厳密には治具の支柱を含む値なので、支柱の影響の程度を次のようにして調べた。

一本の支柱に働く力を、モリソンの式の様に、加速度に比例する項および速度の自乗に比例する項に分け、自由表面の影響を無視した質量力係数  $C_M$  および抗力係数  $C_D$  を用いて次のように表わすことができるものとする。

$$F_C = \rho \frac{\pi}{4} d^2 h C_M \ddot{y} + \frac{1}{2} \rho d h C_D |\dot{y}| \dot{y} \quad (16)$$

但し、 $d$  は支柱の直径、 $h$  は平水面と没水体上面の距離である。

(16)式に(10)式を代入し、速度の自乗項をフーリエ展開して1次の項だけをとると、支柱に働く力は次の式で求められる。

$$F_C = -\rho \frac{\pi}{4} d^2 h \omega^2 y_a C_M \sin \omega t$$

(136)

$$+ \frac{1}{2} \rho d h \frac{8}{3\pi} \omega^2 y_a^2 \cos \omega t \quad (17)$$

Sarpkaya<sup>3)</sup> および小寺山<sup>1)</sup>によると、 $C_M$ 、 $C_D$  は Keulegan-Carpenter 数  $K_C$  に拠り、定常振動の場合  $K_C$  は周波数に拠らず次の式で表わされる。

$$K_C = 2\pi y_a / d \quad (18)$$

そこで、 $y_a = 10$  mm、 $d = 16$  mm とすると  $K_C \approx 3.9$  となり、Sarpkaya の実験値を用いると  $C_M \approx 2.0$ 、 $C_D \approx 1.1$  である。これらの値を(17)式に代入して標準状態の場合に対する4本の支柱に働く力を求め、その値を(14)式および(15)式と同じ無次元値で表わすと、付加質量係数は0.004、減衰係数はたかだか0.001である。したがって、支柱に働く力は無視できる値であるといえる。

### 2.4.3 横揺れ

強制横揺試験によって、横揺れの流体力係数を求めるには、物体の慣性モーメントおよび重心位置を正確に計測することが必要である。これらの計測には一般にブランコと称する慣性モーメント計測台に模型をのせ、空気中における自由動揺試験と静的傾斜試験が行なわれるが、この場合非常に高精度の計測が要求される。もし、ブランコの重量に比して物体の重量が小さい場合には、通常の工学的精度で計測しても信頼性に乏しいといえる。また、今回の様に治具や計測装置が加わると、その慣性モーメントは別の方法で求めなければならない、計測には一層困難さが増す。この困難を解決するためには、水中での強制動揺試験と同じ状態および同じ計測系で空気中における動揺試験ができるようにすればよい。今回の試験では没水体の両端を軸受けで支えたため、同じ状態で空気中における強制動揺試験が可能であった。そこで、没水時の試験に先立ち、各模型について、空気中における強制動揺試験を実施した。

空気中における強制動揺試験で得られる反力のモーメントを  $M_A$ 、空気中における慣性モーメント、減衰モーメント係数および復原モーメント係数をそれぞれ、 $I_A$ 、 $N_A$ 、 $C_A$  とし、横揺れ角を  $\phi$  とし、次式が成り立つと仮定する。

$$M_A = -I_A \ddot{\phi} - N_A \dot{\phi} - C_A \phi \quad (19)$$

また、強制横揺れ角およびモーメントを

$$\phi = \phi_a \sin \omega t \quad (20)$$

$$M_A = M_{A0} \sin(\omega t - \varepsilon_{\phi A}) \quad (21)$$

とする。(19)式に(20)および(21)式を代入すれば、空気中における慣性モーメントおよび減衰モーメント

係数は次式で求められる。

$$I_A = \frac{M_{A0} \cos \varepsilon_{\phi A}}{\phi_a \omega^2} + \frac{C_A}{\omega^2} \quad (22)$$

$$N_A = \frac{M_{A0} \sin \varepsilon_{\phi A}}{\phi_a \omega} \quad (23)$$

ここで  $C_A$  は静的に傾斜させた時の  $M_{A0}/\phi_a$  の値として得られる。またこの値から重心位置が推定できる。この様にして得られた空気中における慣性モーメントおよび減衰モーメント係数を、後に述べる水中における場合と同じ無次元化をして示したのが 図-3 である。

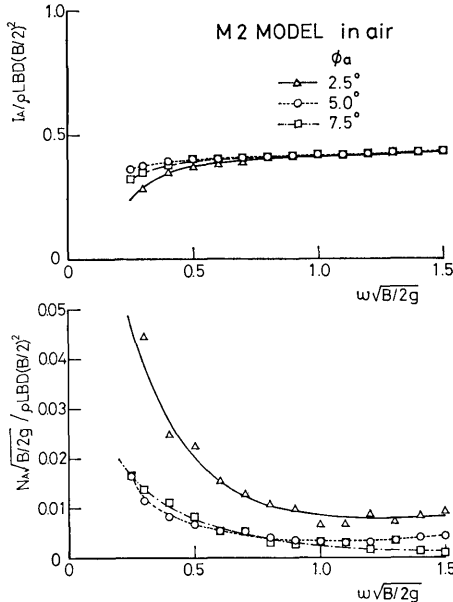


Fig. 3 Moment of inertia and damping moment coefficients in air

この図によれば、慣性モーメントはほぼ一定と考えてよいが、減衰モーメント係数は揺れ角度、周波数によって変化する。低周波数において無視できない大きさであることがわかる。これは、軸受け部の摩擦による減衰効果によるものと考えられる。

次に、水中における試験で得られる反力のモーメントを  $M_W$ 、付加慣性モーメントを  $I_R$ 、減衰モーメント係数を  $N_R$ 、復原モーメント係数を  $C_W$  として、次式が成り立つと仮定する。

$$M_W = -(I_A + I_R)\phi - (N_A + N_R)\dot{\phi} - C_W\phi \quad (24)$$

また、モーメントを

$$M_W = M_{W0} \sin(\omega t - \varepsilon_{\phi W}) \quad (25)$$

とし、この式と (20) 式を (24) 式に代入すれば、没水体の付加慣性モーメントおよび減衰モーメント係数

は次式によって求められる。

$$I_R = \frac{M_{W0} \cos \varepsilon_{\phi W}}{\phi_a \omega^2} + \frac{C_W}{\omega^2} - I_A \quad (26)$$

$$N_R = \frac{M_{W0} \sin \varepsilon_{\phi W}}{\phi_a \omega} - N_A \quad (27)$$

ここで、 $C_W$  は水中において静的に傾斜させた時に得られる  $M_{W0}/\phi_a$  の値である。(26)、(27) 式から、没水体の付加慣性モーメントおよび減衰モーメント係数は、水中における実験値から空気中における実験値を単純に差引けば求められることがわかる。なお、横揺れの流体力係数は次式の様に無次元化した。

$$i = I_R / \rho L B D \left( \frac{B}{2} \right)^2 \quad (28)$$

$$n = N_R \sqrt{B/2g} / \rho L B D \left( \frac{B}{2} \right)^2 \quad (29)$$

また、周波数の無次元化はすべて次の表現を用いた。

$$\hat{\omega} = \omega \sqrt{B/2g} \quad (30)$$

### 3. 理論計算

模型実験は 3 次元の状態で行なったが、没水した直方体の調和振動に関する厳密な 3 次元理論計算はかなり困難である。そこで、 $L/B$  が 2.6 という比較的長い直方体の場合には、2 次元柱状体の調和振動に関する計算によってもある程度実験結果を説明できるのではないと思われるので、2 次元理論による計算を行なって流体力係数を求めた。

計算方法は、微小振幅のポテンシャル理論ではいくつかの方法が考えられるが、今回は没水体の断面が矩形であることを生かして、領域分割法または井島の方法<sup>4)</sup>と呼ばれている手法を用いた。計算法の詳細は文献 (4) に詳しく示されているので参照されたい。

なお、この計算法は有限水深における場合を扱うので、今回の計算では水深を実験時と同じ 1.42 m として計算した。また、水深 1.64 m の場合についても一例だけ計算したが、結果に有意な差は生じなかった。

計算は当所の中央計算機センターの TOSBAC-5600 を使用した。計算時間は、1 つの周波数に対し、3 つの運動モードを含めて、平均約 40 秒である。

### 4. 試験結果と考察

計測された変位および力の記録例を、左右揺れの場合について、図-4 に示す。図中の破線はフーリエ解析の結果得られた基本波成分である。また、力の記録に含まれている高調波は、没水体模型、取り付け治具

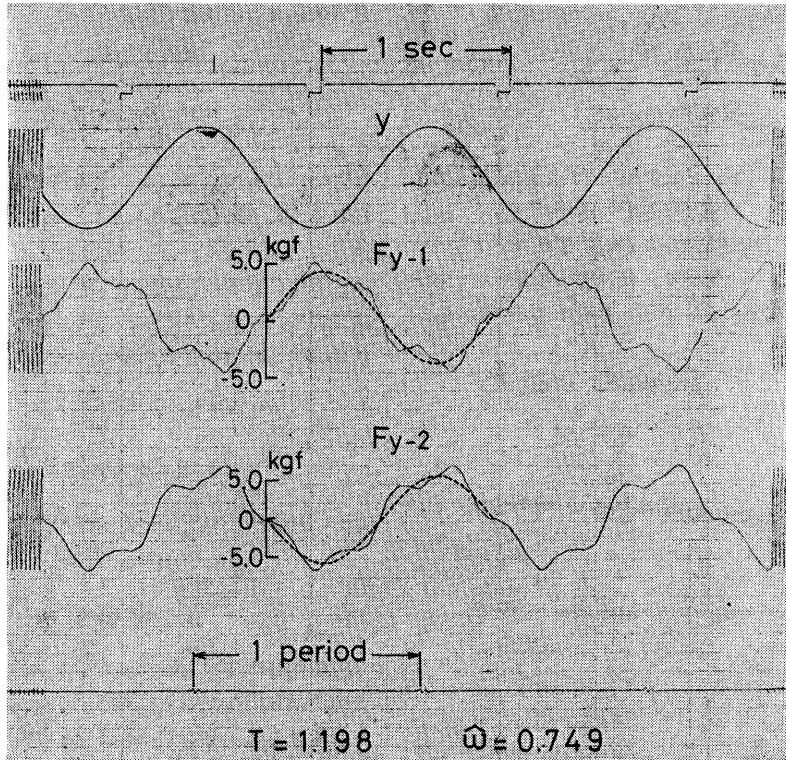


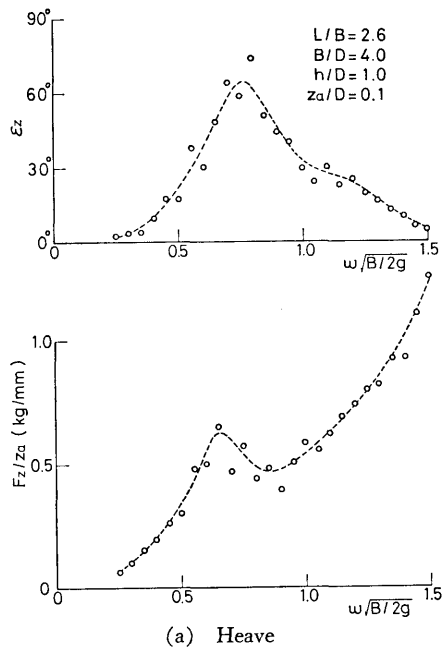
Fig. 4 Example of displacement and force records

および検力装置を含む計測系全体の固有振動に基づくものである。この場合の歪率は  $F_y-1$  で 0.237,  $F_y-2$  は 0.231 である。

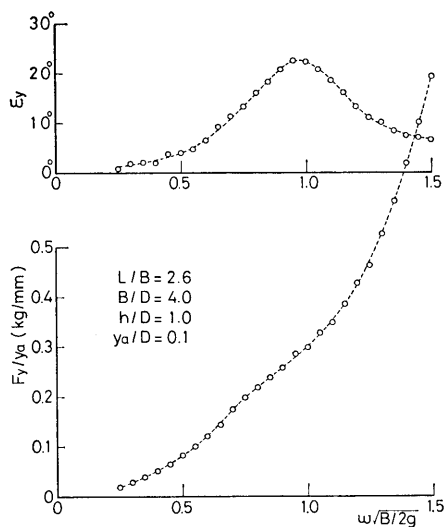
力またはモーメントと振幅の比および位相遅れの実験値の例として、標準状態において得られた結果を、図-5 に示す。上下揺れ、左右揺れの図中における破線は実験の平均的な線であり、後に示す流体力係数の図中の破線はこれらの破線を読みとって再計算した結果である。横揺れの図中における実線は、2次元理論値と図-3 に示した空気中における実験値とから逆算して求めた値である。また、位相中の一点鎖線は、空気中における減衰係数  $N_A$  を考慮しない場合の値である。この図から、低周波側の位相が大きく変化する付近で  $N_A$  を無視できないことがわかる。上下揺れの実験値はバラツキが目立つが、これは上下揺れが最も波を出しやすく、水槽側壁の反射波の影響を受けやすいためと考えられる。

以下に各モードについて付加質量係数および減衰係数の実験値と2次元理論値とを比較して示し、実験値の特性を中心に概説する。

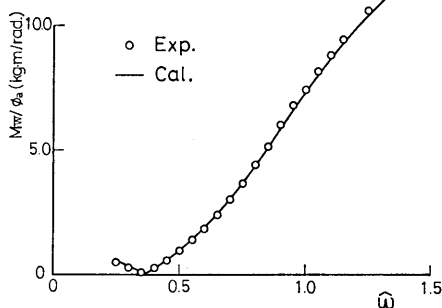
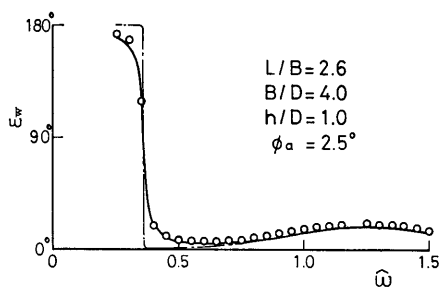
(138)



(a) Heave  
Fig. 5.1 Phase lag and force or moment for standard condition



(b) Sway



(c) Roll

Fig. 5.2 Phase lag and force or moment for standard condition

#### 4.1 上下揺れ

上下揺れの付加質量係数および減衰係数は、図-6に標準状態と  $L/B$  の変化を、図-7 (a)~(e) に  $h/D$  の

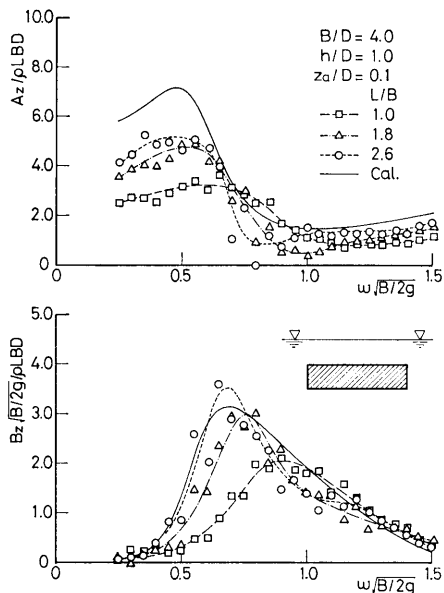


Fig. 6 Added mass and damping coefficients for heave,  $L/B$  series

変化を、図-8 (a)~(c) に  $B/D$  の変化を、図-9 に振幅変化を示す、また  $h/D$  および  $B/D$  の変化についての実験結果をまとめて 図-10, 図-11 に示す。

まず、図-6 の  $L/B$  変化では、 $L/B$  が大きくなるに伴い、両係数とも山が大きくなり、低周波側へ押し縮められよう傾向を示し、理論値に近づく傾向にある。

次に、図-7 (a)~(e) の  $h/D$  変化では、付加質量係数は  $h/D$  が小さくなるに伴い極大・極小の変化が激しくなり、その位置も低周波側にずれる傾向がある。減衰係数も  $h/D$  が 0.5 以上では  $h/D$  が小さくなるに伴いピークが大きくなり、低周波側にずれる傾向にある。理論値と比較すると、 $h/D$  が 0.5 以上では定性的によく一致する傾向を示すが、それ以下では理論値の方が実験値よりもはるかに激しい変化を示し、定性的にも一致しないことがわかる。

図-8 (a)~(c) の  $B/D$  変化では、両係数とも  $B/D$  が大きくなるに従って山が大きくなり、理論値も同じ傾向を示す。

図-9 の振幅変化については、付加質量係数には振幅変化による顕著な差は見られないが、減衰係数はピークより低周波側で、振幅の大きくなるに従ってわずかに大きくなる傾向を示している。

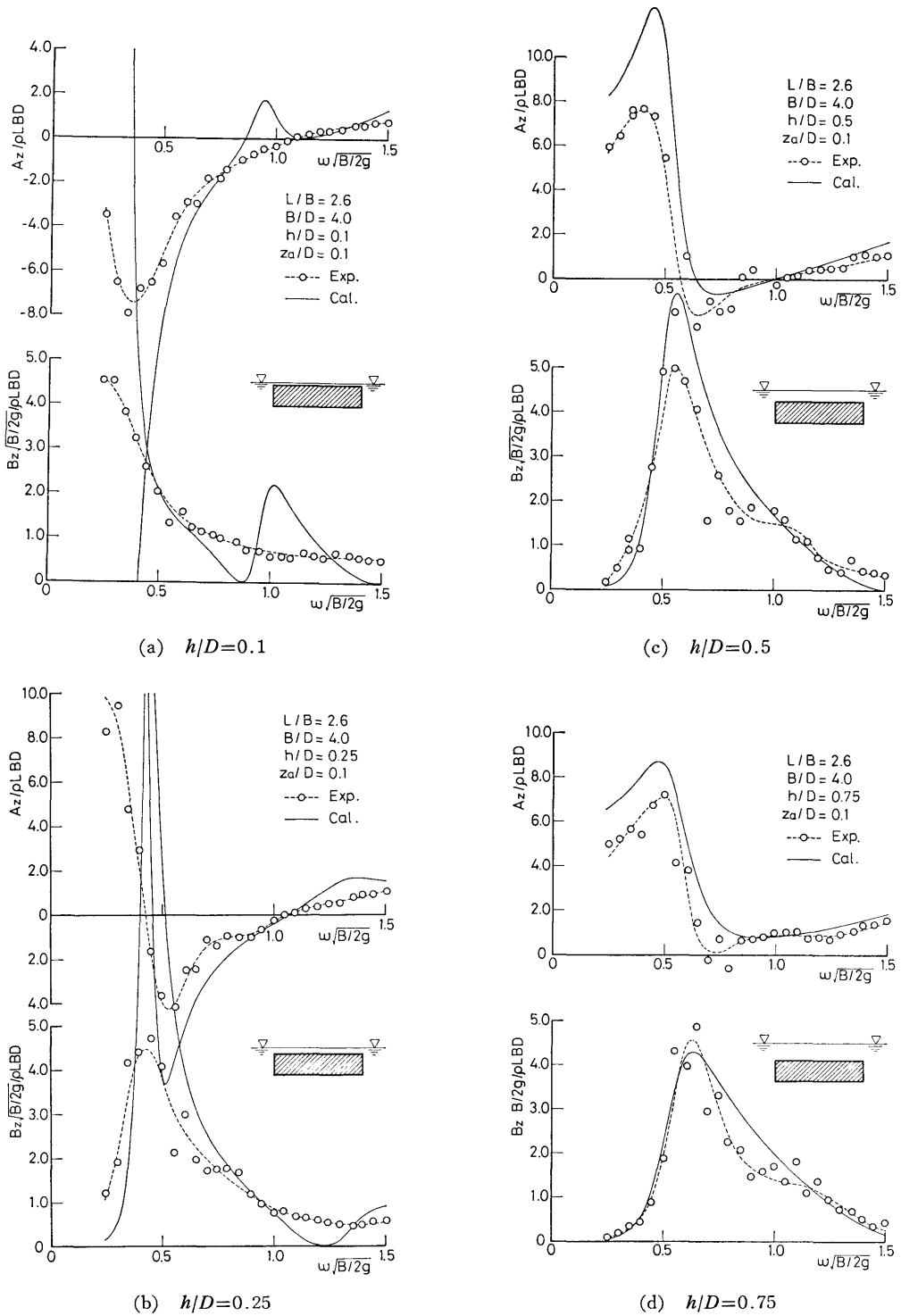
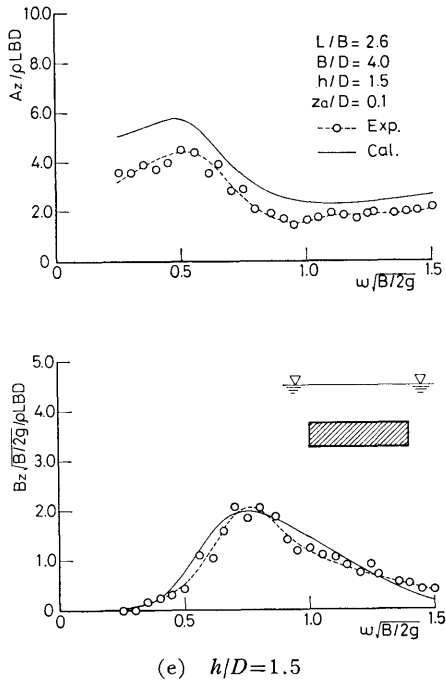
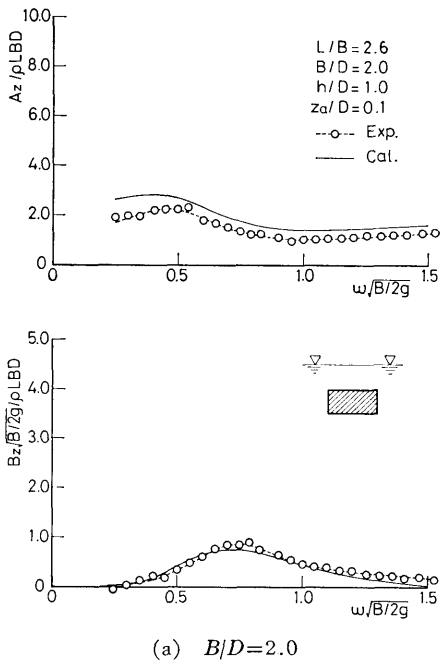
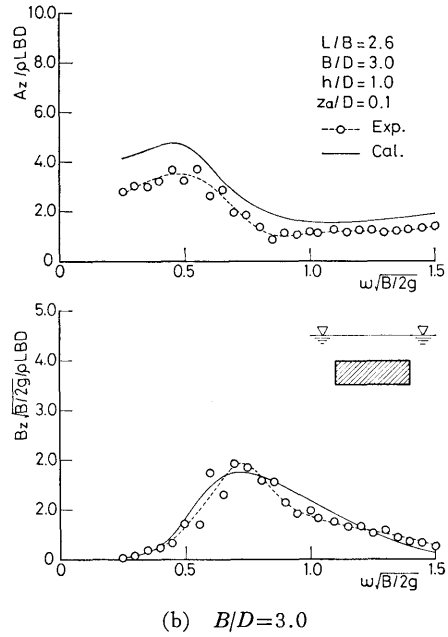


Fig. 7.1 Added mass and damping coefficients for heave,  $h/D$  series

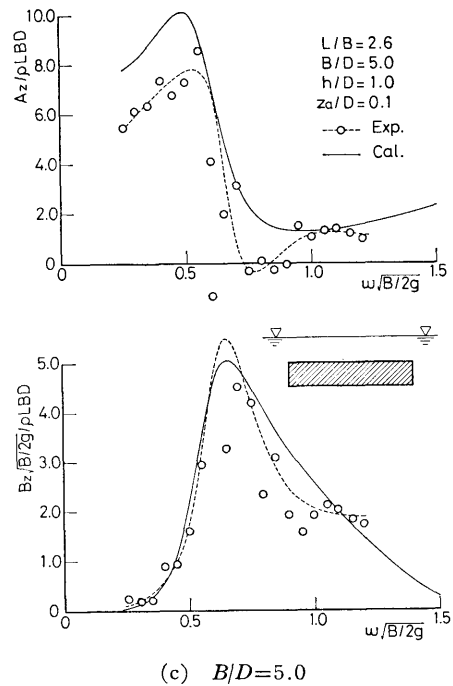




**Fig. 7.2** Added mass and damping coefficients for heave,  $h/D$  series



**Fig. 8.1** Added mass and damping coefficients for heave,  $B/D$  series



**Fig. 8.2** Added mass and damping coefficients for heave,  $B/D$  series

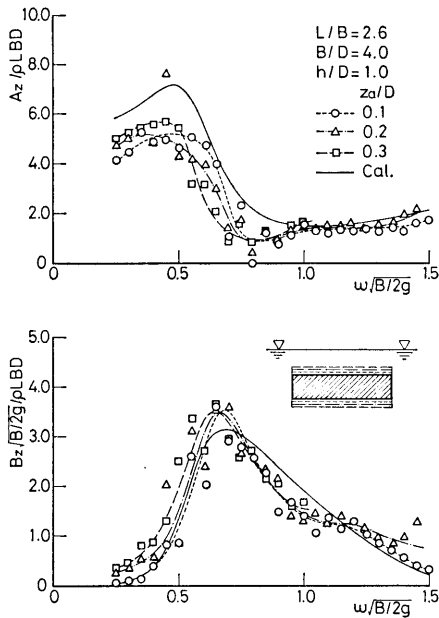


Fig. 9 Added mass and damping coefficients for heave, amplitude effects

4.2 左右揺れ

左右揺れの付加質量係数および減衰係数は、図-12に標準状態と  $L/B$  変化を、図-13 (a)~(d) に  $h/D$  変化を、図-14 (a)~(c) に  $B/D$  変化を示す。また、 $h/D$  および  $B/D$  変化についての実験結果をまとめて図-15、図-16 に示す。

まず、図-12 の  $L/B$  変化に対しては、 $L/B$  が大きくなるに伴って係数は大きくなり、低周波側へずれる。その傾向は上下揺れと同じである。また、定性的な傾向は、 $L/B$  が大きくなるに従って理論値に近づくが、定量的にはかなりの差がある。

図-13 (a)~(d) の  $h/D$  変化に対しても両係数は上下揺れで示された特性と同じ傾向を示す。すなわち、 $h/D$  が小さくなるに伴ない、付加質量係数は極大・極小の変化が激しくなって低周波側へずれ、減衰係数はピークが大きくなって低周波側へずれる。また、 $h/D = 0.1$  では理論値と実験値との傾向は全く異なる。 $h/D$  が 0.25 以上では、付加質量係数は高周波側で周波数が高くなるに従って大きくなり、減衰係数はピーク付近より高周波側で理論値に一定値が加わったような傾向を示しているのが特徴である。

図-14 (a)~(c) の  $B/D$  変化では、付加質量係数の実験値は全体に錯綜し、明確な傾向を示さないが、理

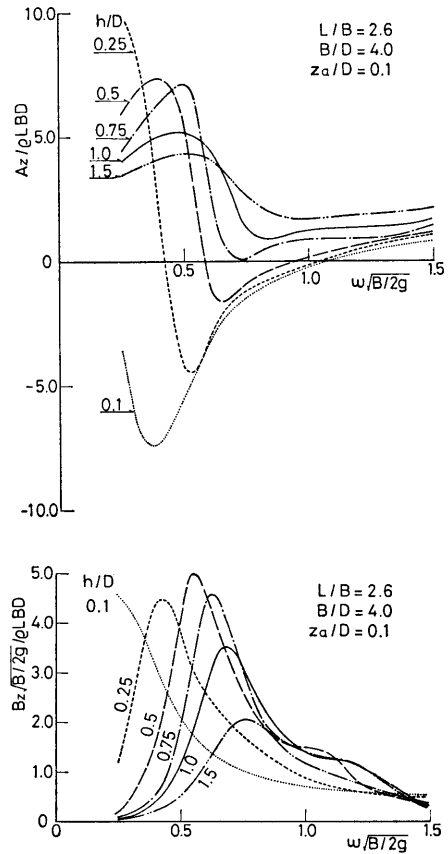


Fig. 10 Summary of experimental results for various  $h/D$  cases

論値の傾向から判断すると、 $B/D$  が小さくなるに従って大きくなる傾向を示す。減衰係数は、高周波側では  $B/D$  が大きくなるに伴って大きくなり、低周波側ではその逆の傾向を示している。

4.3 横揺れ

横揺れの場合は非常にきれいな実験値が得られたので、特に実験点を結ぶ線は引かなかった。これは、上下揺れ、左右揺れに比較して発生波が小さいことと、幅の広い水槽で実験したために、長水槽の場合に考えられる側壁の影響がないためと思われる。

横揺れの付加慣性モーメント係数および減衰モーメント係数は、図-17 に  $L/B$  変化を、図-18 に  $h/D$  変化を、図-19 に  $B/D$  変化を、図-20 に  $h/D=1.0$  および 0.5 における振幅変化を示す。

図-17 の  $L/B$  変化では、横揺れの流体力係数に  $L/B$  の変化が及ぼす影響は、上下揺れ、左右揺れに比して

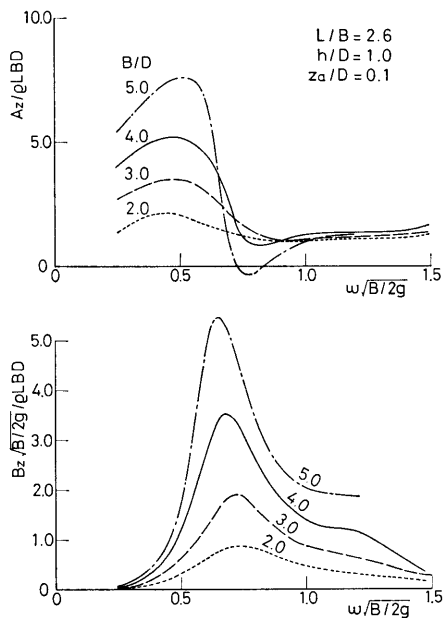
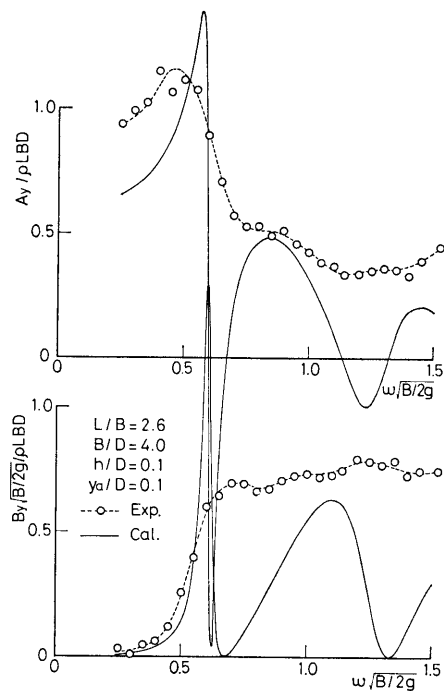


Fig. 11 Summary of experimental results for various  $B/D$  cases



(a)  $h/D=0.1$

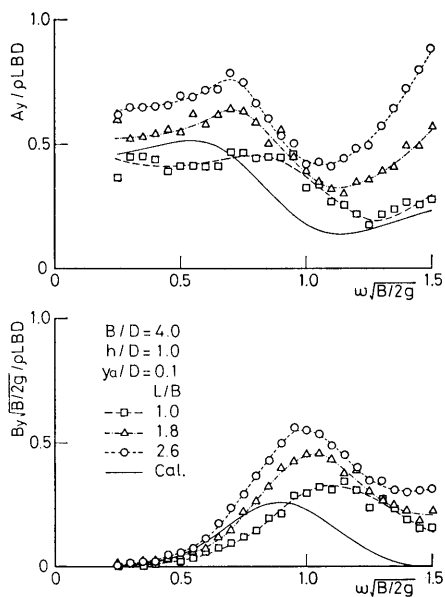
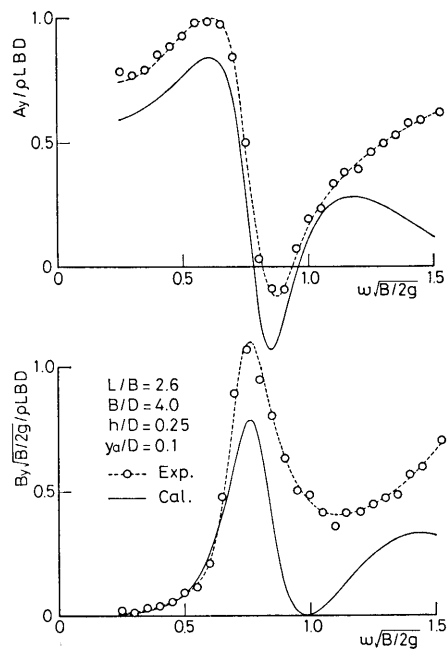
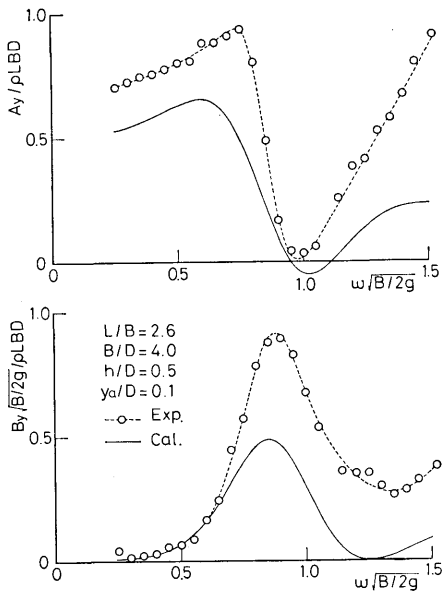


Fig. 12 Added mass and damping coefficients for sway,  $L/B$  series

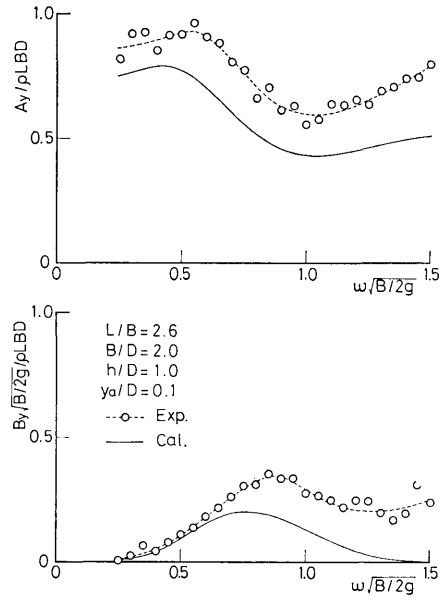


(b)  $h/D=0.25$

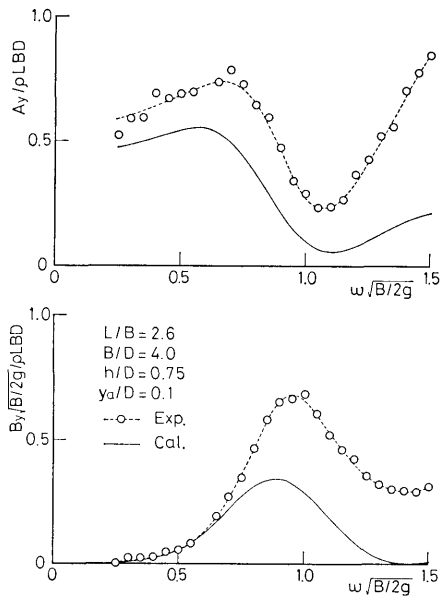
Fig. 13.1 Added mass and damping coefficients for sway,  $h/D$  series



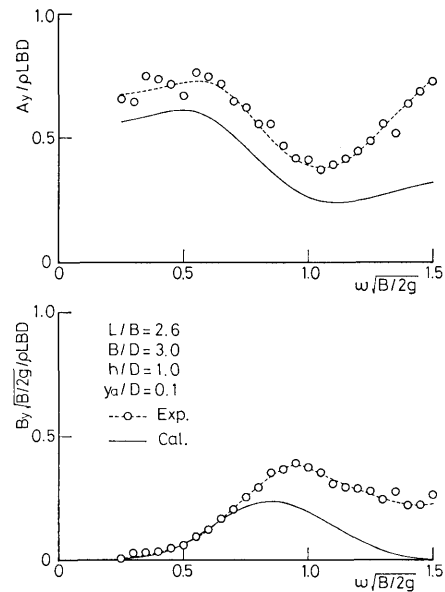
(c)  $h/D=0.5$



(a)  $B/D=2.0$



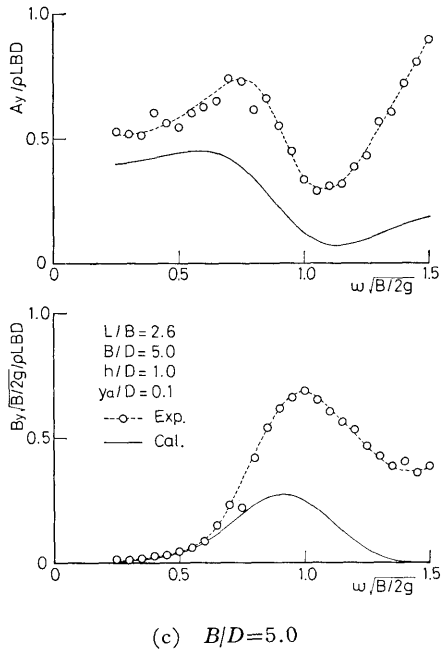
(d)  $h/D=0.75$



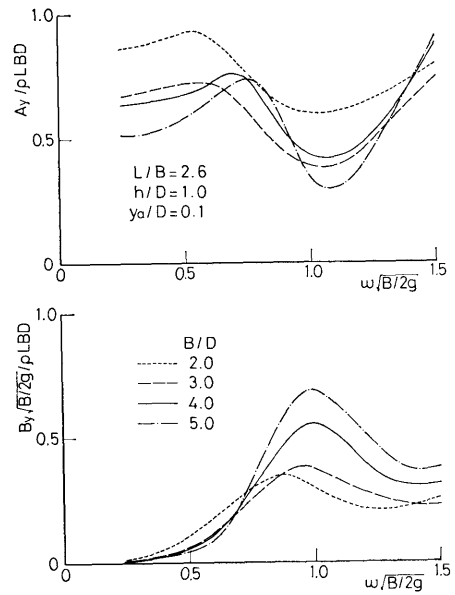
(b)  $B/D=3.0$

**Fig. 13.2** Added mass and damping coefficients for sway,  $h/D$  series

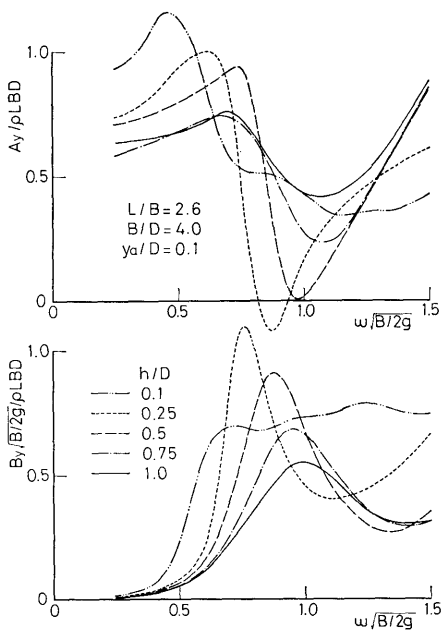
**Fig. 14.1** Added mass and damping coefficients for sway,  $B/D$  series



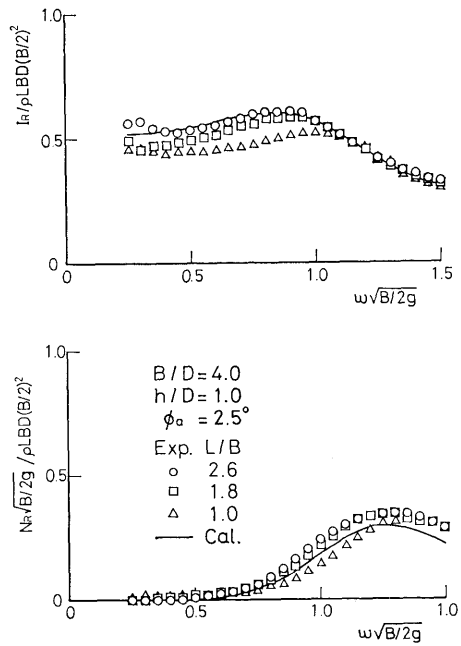
**Fig. 14.2** Added mass and damping coefficients for sway,  $B/D$  series



**Fig. 16** Summary of experimental results for various  $B/D$  cases



**Fig. 15** Summary of experimental results for various  $h/D$  cases



**Fig. 17** Added mass moment of inertia and damping moment coefficients for roll,  $L/B$  series

はるかに少ないことが示され、 $L/B=1.8$  程度でも、実験値と2次元理論値とはよく一致している。すなわち、この範囲までは2次元的に扱ってよいものと考えられる。 $L/B=1.0$  では3次元影響が現われ、その値は小さくなり、高周波側にずれる傾向がある。

$h/D$  の変化に対しては、 $h/D$  が小さくなるに従っ

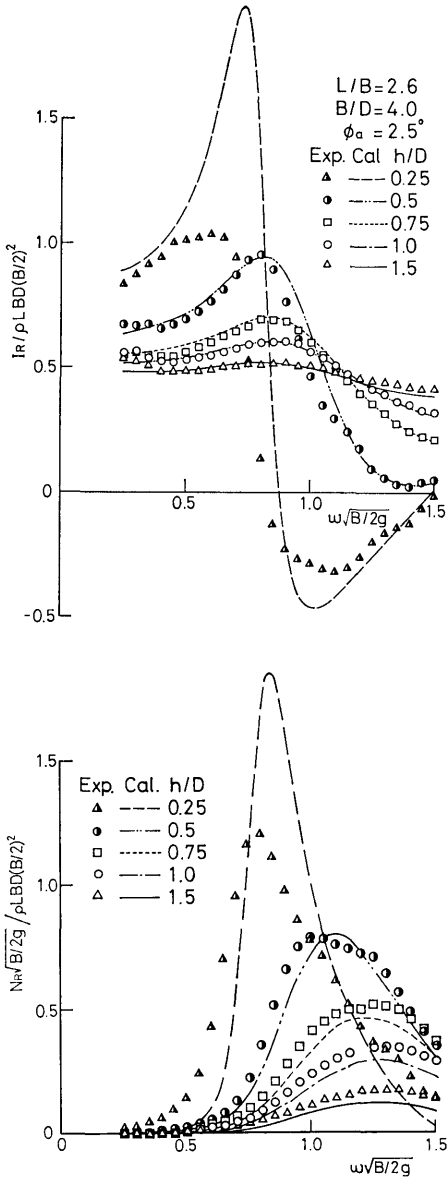


Fig. 18 Added mass moment of inertia and damping moment coefficients for roll,  $h/D$  series

てピークが大きくなり、低周波側にずれるという上下揺れ、左右揺れの場合と同じ傾向をもっているが、周波数域はかなり広がっている。また、付加慣性モーメント係数は  $h/D$  が 0.75 以上では実験値と理論値とは非常によく一致している。 $h/D$  が 0.5 になってもかなりよく一致しているが、中位の周波数域で異なる傾向を示し始め、 $h/D$  が 0.25 になると、実験値の極大値は理論値ほど大きくなりなくなる。減衰モーメント係数は  $h/D$  が 0.75 以上では全体的に理論値よりも実験値の方が大きい傾向を示している。これは粘性による減衰効果が現われるためと考えられる。 $h/D$  が 0.5 および 0.25 における減衰モーメント係数は、付加慣性モーメント係数について述べた事と同様の傾向を示している。

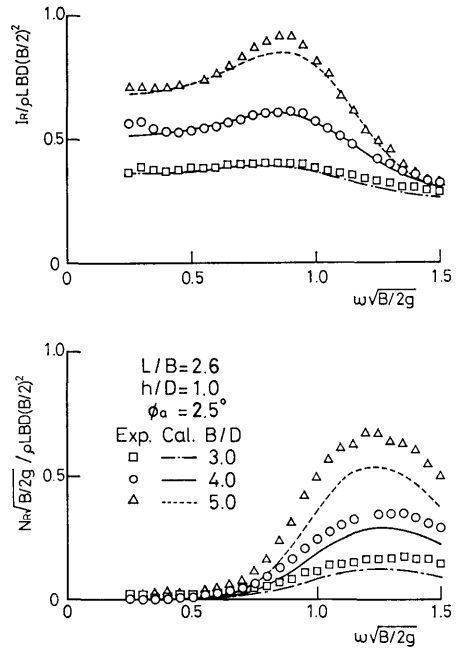
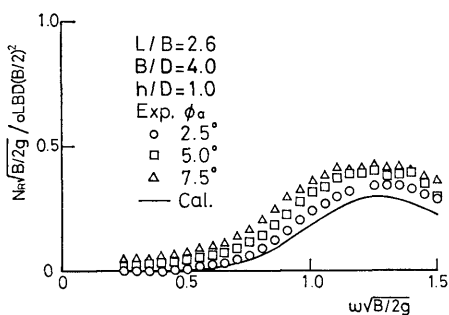
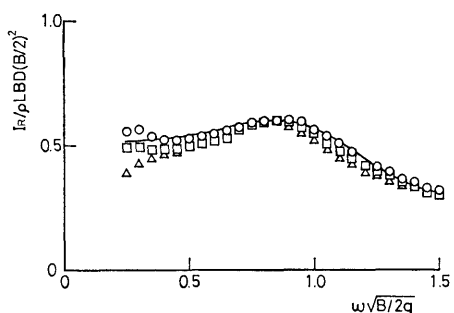


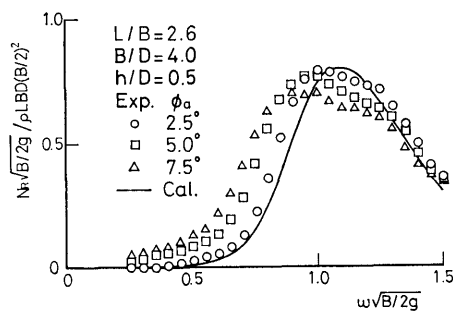
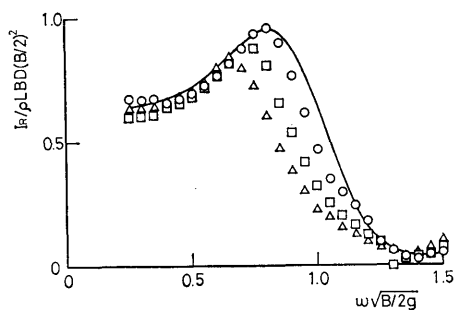
Fig. 19 Added mass moment of inertia and damping moment coefficients for roll,  $B/D$  series

$B/D$  の変化では、両係数とも  $B/D$  が大きくなるに従って大きくなる。この場合も、付加慣性モーメント係数の実験値は理論値とよく一致し、減衰モーメント係数の実験値は粘性によるものと思われる影響で、理論値よりも 2~3 割大きく現われている。

振幅変化は  $h/D$  が 1.0 および 0.5 の場合について試験を実施した。 $h/D=1.0$  では、付加慣性モーメ



(a)



(b)

Fig. 20 Added mass moment of inertia and damping moment coefficients for roll, amplitude effects

ント係数は振幅が変化してもほぼ一致する傾向を示すが、減衰モーメント係数は振幅が大きくなるに従って大きくなる。これは速度の自乗に比例する非線型流体力の存在を示しているものと思われる。一方、 $h/D=0.5$  では、付加慣性モーメント係数は中位の周波数域で振幅が大きくなるに従って小さくなる傾向が現われる。また、減衰モーメント係数は、低周波数域では振幅が大きくなるに従って大きくなるが、中位の周波数域からこの関係は逆転している。これら中位の周波数域における非線型性は、没水深度が浅くなったために現われるものと思われる。減衰モーメント係数もこの範囲では、粘性による非線型性よりも没水深度が浅くなったために現われる非線型性の方が卓越している結果であると考えられる。

#### 4.4 理論値との比較とその適用性

各運動モードを通じて理論値と実験値との対応という観点から考察し、理論値の適用性について論ずる。

まず、どの運動モードでも、没水深度が極めて浅い状態になると、理論値と実験値とは定性的にも一致するとは言えなくなる。実験時の様子を観察した限りでは、没水体上面では、没水体の周囲から押し寄せる波が重なり、中央付近でかなり高い波頂を生ずる現象が現われる。すなわち、このような状態では2次元性が弱くなっていると同時に、没水体上面の自由表面が線型仮定を満足しなくなっていると言わねばならない。またその度合いは、理論値と実験値との相違の大きさが、上下揺れ、横揺れ、左右揺れの順であることから判断して、没水体上面の攪乱の大きさに関係するものと考えられる。また、没水体の全幅にわたってこのような特異な状態になるのであるから、この現象の範囲を表すパラメータとしては、 $h/D$  よりも  $h/B$  の方がより本質的にとらえられると思われる。

横揺れの場合に、 $h/D$  が 0.5 になると粘性影響以外に振幅影響が現われるが、これも没水体上面の条件が変わったことによる非線型性に基づくものであると推測される。従って、上下揺れおよび左右揺れにおいても、 $h/D$  が小さい範囲では振幅影響が現われるものと考えられる。

今回の実験結果から、没水体上面に線型理論を適用し得る範囲は、振幅・厚さ比が 0.1 の場合、上下揺れでは  $h/D$  が 0.5 まで、左右揺れでは  $h/D$  が 0.25 まで、横揺れでは、揺れ角度が 2.5° の場合  $h/D$  が 0.5 までと判断される。

次に、上記の現象が現われない範囲について考え

る。

上下揺れの付加質量係数は全般に理論値の方が実験値よりも大きい、 $L/B$  が大きくなるに伴って理論値に近づく傾向を示すことから、この差は2次元理論値と3次元実験値とによるものと考えられる。減衰係数に関しては、全般に、実用上さしつかえないくらい両者が一致しているといえる。しかし、新井等<sup>5)</sup>が箱型船の波強制力について、平面形状をLewis form 近似して3次元の計算を行ない、Strip 法と比較した結果によると、全般に3次元理論値の方が2次元理論値よりも小さい。この傾向が没水体においても同じだと仮定すれば、3次元理論値はもっと小さくなるものと考えられるので、実験値には粘性による減衰が含まれているものと思われる。なお、実験値は両係数とも理論値に比べて波打っている様子がめだつ。この様な傾向は各種の波強制力の実験においてもしばしば現われることがあり、興味ある問題であるので今後の研究課題の一つと言えよう。

以上のことから上下揺れの流体力係数については、付加質量の一部に実験値の傾向を考慮すれば、概ね2次元理論値を適用し得ると判断される。

左右揺れでは、付加質量係数は全般に実験値の方が理論値よりも大きい。しかし、 $\omega \cong 1.2$  以上で急激に実験値が理論値よりも大きくなる点を除けば、ほぼ一定値だけ実験値の方が大きく、その定性的傾向は理論値とよく一致している。実験値と理論値の差は平均的に無次元値で約0.15であり、これは標準模型では約6 kgf に相当することから、(12)式において差し引くべき  $M$  の誤差とは考えられない。減衰係数は、 $\hat{\omega}$  が0.6以下ではほぼ一致しているが周波数が高くなると共に実験値の方が理論値よりも大きくなる。更に、ピークより高周波側では、実験値は理論値に一定値が加わった様な傾向を示し、その差はかなり大きい。一方、 $L/B=1.0$  の箱型船についての新井等の計算結果による3次元と2次元の違いの傾向は、高周波数域を除いては、今回の理論値と実験値の違いの傾向に類似している。これらの事から、実験値と理論値との相違の一部は、やはり3次元と2次元の違いに帰せられると思われる。しかし、高周波数域で付加質量が大きくなる点、減衰係数の実験値と理論値の相違も上下揺れのそれに比べて大きすぎる点など、不明な点が多い。これらの点は、今後3次元理論の計算法を開発することおよび計測系の詳細な検討を行なうことなどにより解明されるものと考えられる。したがって現在のとこ

ろ、左右揺れの流体力係数については、今回の実験結果を考慮することが望ましい。

横揺れの付加慣性モーメントは、 $L/B=1.0$  の場合を除けば、実験値と理論値とは非常によく一致している。また、減衰モーメント係数も、粘性の影響はあるが、非常によい傾向の一致を示している。したがって、今回実験した  $L/B=1.8$  程度までは2次的に振ってよく、2次元理論値で十分実用になる。これは、上下揺れ、左右揺れでは、没水体の両端の攪乱は変位および力の方向と同一であるため、全流体力に与える影響が大きいものに対して、横揺れの場合の端部の攪乱は、没水体中心軸に関するモーメントに対して寄与が少ないためであると考えられる。

以上述べた様に、横揺れに関する流体力の実験値は使用した水槽の違いや、計測法に払った考慮などの相違から最も理論値と一致する結果となった。しかしながら、一般には海洋構造物はローハルの断面中心を回転軸として横揺れする事はあまりありえないし、長大な海洋構造物に対しては、横揺れ、縦揺れは部材の上下揺れで置き換えることができる。また、多くの海洋構造物にあっては、左右揺れまたは前後揺れに対して最も厳しい設計条件が適用される場合が多い。したがって、今後更に没水深度が浅い場合の推定法を含め、上下揺れ、左右揺れおよび前後揺れの流体力を一層精度よく推定する方法を確立する必要性が認められるので、今後の課題としたい。

## 5. 結 言

箱型没水体に関して、広範囲にパラメーターを変えて系統的な強制動揺試験を行ない、流体力特性を把握するのに十分なデータが得られたと同時に、流体力特性に次の様な傾向があることを明らかにすることができた。

- (1) 没水深度が極めて浅い場合には、没水体上面にできる波は特異な現象を示し、各運動モードの流体力係数は、理論値と実験値とが異なった特性を示すようになる。この主要な原因は、没水体上面の自由表面条件の線型性が成り立たなくなるためと考えられる。
- (2) (1)において述べた現象が起る条件は、没水深度と没水体の幅の比および攪乱の大きさで定まるものと考えられる。この条件になる場合、流体力係数には粘性影響とは別の非線型性によって振幅影響がみられる。



- (3) 横揺れの場合は  $L/B$  が 1.8 程度より大きくなれば 2 次元的条件が成り立ち、理論値と実験値とは非常によく一致している。ただし、減衰モーメント係数には粘性影響と考えられる成分が現われる。
- (4) 上下揺れ、左右揺れの流体力係数は、左右揺れの一部を除いて、定性的には実験値と理論値の対応がよい。定量的に異なる原因の一つは、3 次元の実験に対して 2 次元理論値と比較している点にあると考えられる。しかし、左右揺れの流体力係数には、高周波数域においてまだ不明な点が存在する。

#### 参 考 文 献

- 1) 小寺山亘・田代昭正：水平没水円柱に加わる波力について，日本造船学会論文集，第 143 号，1978.
- 2) 安藤定雄・大川 豊・矢後清和：耐航性実験データの解析処理システムについて，船舶技術研究所研究発表会講演集，第 28 回，1976.
- 3) Sarpkaya, T.: Forces on Cylinders and Spheres in a Sinusoidally Oscillating Fluid, Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol. 42, No. 1, March, 1975.
- 4) 井島武士・田淵幹修・湯村やす：有限水深の波による矩形断面物体の運動と波の変形，土木学会論文報告集，第 202 号，1972.