

板部材で構成された底設構造物に作用する流体力に関する研究

久保田真一*・小野正順**・出口一郎***・松本 忠****

1. はじめに

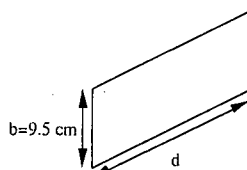
現在、小型構造物に作用する流体力の算定にはモリソン式が用いられており、その適用性は多くの研究により確認されている。例えば魚礁のように、単純な部材で構成された複雑な構造物に作用する流体力算定においてもその手法が用いられており、「沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針」(1984)によると単一部材に作用する流体力を個別に算出し、それらの和をとることで構造物全体に作用する波力とすることが記されている。しかしながら実際に構造物全体に作用する波力は、久保田ら(1996)によると必ずしも単一部材に作用する流体力の和とはならず、部材よりなる構造物に対する適切な流体力算定法の確立が望まれる。そのためには、構造物全体及び各部材に作用する流体力の特性を把握し、波動による構造物まわりの流れ場をふまえ、作用波力の発生機構を議論する必要がある。

これらの観点より本研究では、魚礁の構成部材として多く用いられる板部材を対象とし、単一板、ならびにそれらを複数用いた構造物全体に作用する波力の特性について実験により検討を加え、鉛直板の縦横の寸法を変化させた場合、あるいは複数板の場合の構造物全体に作用する波力の特性について明らかにした。さらに、各面に作用する波圧を測定することで、各面に作用する波圧の特性について検討を行い、これらの考察と鉛直板周辺の流況特性から、板部材により構成される構造物に作用する流体力の発生機構についても考察を加えた。

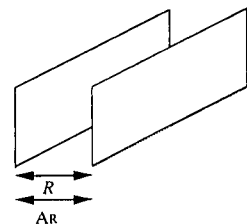
2. 実験の概要

本研究で対象とする底設構造物は、図-1に示す縦(頂高) $b=9.5\text{ cm}$ ×横 $d=4.75\sim 20\text{ cm}$ ×厚さ 0.5 cm の鉛直平板を水底に設置したものである。複数板は2あるいは3枚の鉛直板を、間隔 R を $5\text{ cm}\sim 20\text{ cm}$ に変化させて設置したものとした。板部材の形状は、頂高 b を 9.5 cm と一定とし、横幅 d を $4.75\sim 20\text{ cm}$ の間で4種類に変化

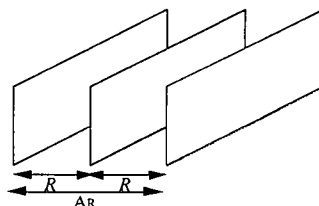
させた。水深は 40 cm と一定とし、周期 T は $0.9\text{ s}\sim 1.6\text{ s}$ 、波高 H は $4\text{ cm}\sim 7\text{ cm}$ の波を作用させた。構造物全体に作用する波力の測定は、波力測定装置を用いた。波力測定装置は、4本の板バネで水平板を支持したものであり、波力を測定する構造物はその水平板上に設置され、板バネの歪みから波力が換算される。圧力の測定は微差圧検出器(共和電業(株)製)を用い、水底上 1.2 cm の位置から 2.4 cm 間隔に4点の位置で測定した。流況の測定には、3次元超音波ドップラー流速計(SonTek社製)を用いた。測定点は、鉛直方向に海底から $4, 7, 10\text{ cm}$ 上方の3地点、水平方向には構造物から $5, 10, 15, 30, 45, 90\text{ cm}$ の透過波側及び反射波側それぞれ6地点である。それぞれの地点で測定された流速時系列から平均流速、波動成分流速振幅、乱れ強度を算定した。また、全体的な流況特性を見るため、水槽側方から流況をビデオ撮影



(a) 単一板



(b) 2枚板



(c) 3枚板

図-1 各底設構造物の設置状況

* 正会員 工修 (株)テトラ

** 正会員 工博 大阪大学講師 工学部土木工学科

*** 正会員 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科

**** 学生会員 大阪大学大学院 工学研究科

した。トレーサーは直径 $1\mu\text{m}$ の白濁の浮遊粒子を用い、注射器により構造物周辺に投入した。

3. 底設構造物に作用する波力特性

図-2 は表-1 に示す各単一鉛直板に作用する波力から抗力 F_R と慣性力 F_I を分離しその比を示した。図より、波力予測時に問題となる短周期側で慣性力が卓越していることがわかる。また、板の横幅が大きくなるほど、慣性力が卓越し、逆に板が細長になるほど、抗力が卓越することがわかる。図中に示す折れ線は、モリソン式によって求められた抗力慣性力比を示している。算定に用いた代表流速は、板頂部の位置での微小振幅波による流速振幅を用い、慣性力係数と抗力係数は板の場合のそれぞれ 1 と 2 を用い、基準体積は板の横幅を直径とする円柱にとっている。モリソン式の計算結果についても、板が細長くなると抗力が卓越し、横幅が大きくなると慣性力が大きくなる傾向が認められるが、本研究の計算範囲内で抗力慣性力比は 1 以下を示し、抗力が慣性力を上回るまでには卓越しない。また本計算結果は実験結果と比較すると半分程度の値を示しているが、本研究の単一板の実験結果から得られた慣性力係数がほぼ 0.6 であることから、この値を慣性力係数として算定し直すとほぼ実験結果と一致する計算結果が得られる。

図-3 は、単一板では慣性力が卓越する $d/b=2.0$ の板を複数設置した場合の複数部材全体に作用する最大波力の特性を示したものである。縦軸に複数部材全体に作用する最大波力を単一部材に作用する最大波力で無次元化した最大波力比 $F_{2,3\text{max}}/F_{1\text{max}}$ をとり、横軸に隣接する鉛直板間隔 R を入射波長で無次元化した無次元設置間隔で示している。鉛直板間隔を小さくすると単一鉛直板と同じ波力すなわち $F_{2,3\text{max}}/F_{1\text{max}}=1$ となり、鉛直板間隔を十分大きくとり各板同志の相互干渉が無くなると $F_{2,3\text{max}}/F_{1\text{max}}=2$ (2 枚板の場合) あるいは 3 (3 枚板の場合) に漸近すると考えられる。しかし、実験では図-3 に示すように長周期波の条件では単一部材の波力に漸近している

が、短周期波の条件においては単一部材の波力の 2 倍あるいは 3 倍以上の波力が測定された。すなわち、複数部材に作用する波力は、単純に各部材に作用する波力の和では表すことができないことが示された。

複数部材全体に作用する波力をモリソン式で予測する場合、慣性力算定時に問題となるのは基準体積のとり方である。基準体積は、部材間が十分離れている場合はそれぞれ単一の基準体積となるが、各部材間距離が小さくなると単一の構造物の基準体積から構造物全体の基準体積に変化することが予測される。図-4 は、図-3 の横軸を隣接する部材間距離 R から図-1 に示す構造物の全幅 A_R にとり、再整理したものである。図-3 よりも 2 枚板と 3 枚板の差は小さくなっている。これは、部材間距離が小さくなることで各部材の基準体積から構造物全体の基準体積に変化しているためと考えられる。従って、部材間に部材が配置されたとしても基準体積は大きく増加せず慣性力も増大しない。

図-5 は中村ら (1982) の断面 2 次元のわきだし分布法を用いて算定された複数部材に作用する慣性力と単一部材に作用する慣性力の比を示している。実験結果と異なり 2 倍あるいは 3 倍以上の慣性力は作用せず、実験結果より多少小さめの傾向を示すが、2 枚板と 3 枚板の場合で慣性力の大きさにあまり差異はなく上述した実験結果と同様の傾向が確認された。なお、図-5 と 4 に現れた計算と実験結果の差異は、実験では有限長の鉛直板を用いていることによる 3 次元的な影響や計算では抗力が無視されていることなどが考えられる。

つぎに、抗力に関する流況に着目して検討を行う。

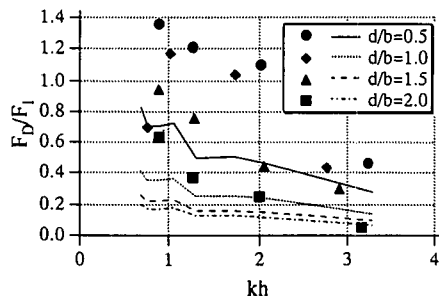


図-2 細長比を変化させた場合の単一板に作用する抗力と慣性力の比

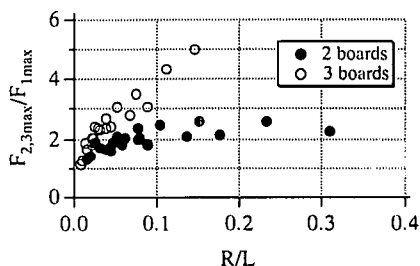


図-3 構造物全体に作用する最大波力

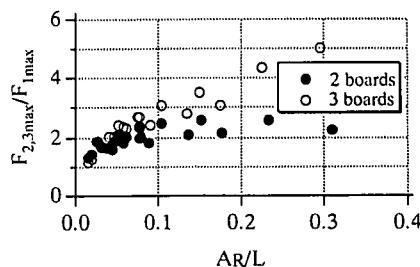


図-4 構造物全体に作用する最大波力

単一鉛直板まわりの流況特性は既に池田ら(1983)によってある程度明らかにされている。図-6は、目視観測により得られた一般的な単一鉛直板周辺の流況を示し、表-1には板頂部に形成された剝離渦の直径を示す。本実験の最も短周期波の条件では剝離渦の形成は確認されなかったが、長周期波の条件になるに従ってより径の大きい剝離渦の形成が見られた。このことから図-2に示された長周期側での抗力の増大が説明できる。図-7は、

K.C.=2.01の場合の板頂上での平均流速の1周期変動を示す。水平・鉛直流速 u 、 w はそれぞれ板頂部の位置での微小振幅波理論から得られる水平流速振幅 U で無次元化されている。 u 、 w ともかなり大きい流速が測定され、特徴的なのは1周期の間で w が常に正となり、剝離渦が明確に形成される場合、板頂部では常に上方の流速が生じていることがわかる。図-8、9は観測された複数板まわりの流況を模式的に示したものであり、図-8は隣接する板の間隔が大きい場合、図-9は板の間隔が小さい場合の流況である。複数板まわりの流況は、隣接する板の間隔と形成される剝離渦の直径により規定される。剝離渦の直径より大きい板の間隔では、それぞれの板頂部での剝離渦の挙動は単一板の場合とほぼ同様であるが、剝離渦の直径より小さい板の間隔では、下流側の板の影響により図-9に示すような両端の板とその間の水塊からなる一つの直方体の構造物の流況に変化する。図-10は、2枚板で板間隔が小さい場合の各板頂上での平均流速の1周期変動を示す。波条件は図-7の単一板

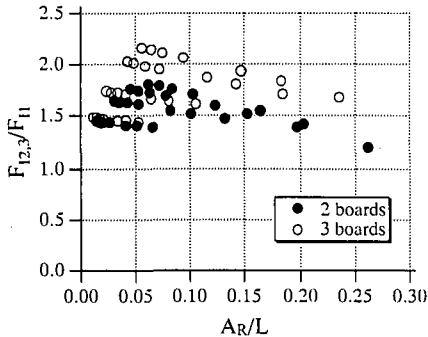


図-5 複数板に作用する慣性力の計算結果

表-1 目視観測された単一板頂部の剝離渦の直径

周期: T (sec)	波高: H (cm)	剝離渦の直径	K.C. = UT/b
0.7	5	確認できない	0.16
0.9	7	1-2 cm	0.68
1.2	6	3-4 cm	0.23
1.4	6.5	5-6 cm	1.77
1.6	6	6-7 cm	2.01

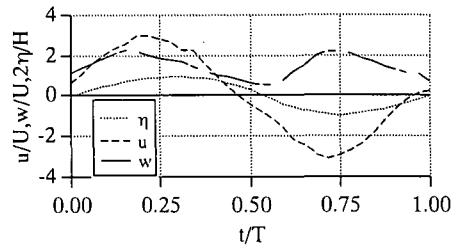


図-7 単一板の板頂上での平均流速の1周期変動

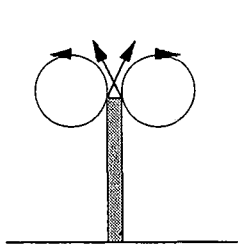


図-6 単一板まわりの流況

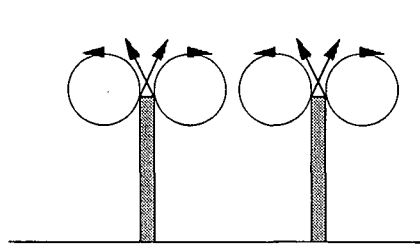


図-8 板の間隔が大きい場合の流況

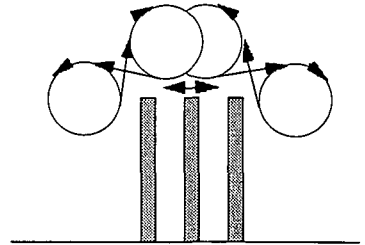
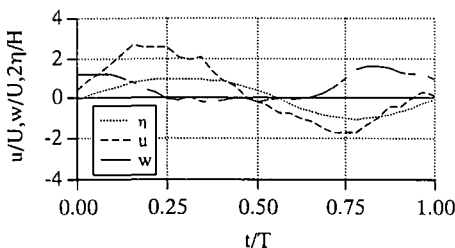
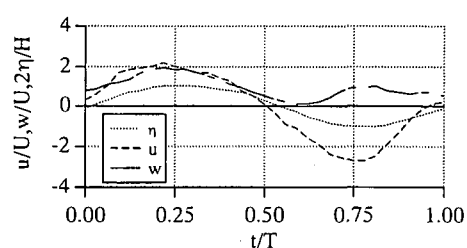


図-9 板の間隔が小さい場合の流況



透過波側の板上での平均流速



入射波側の板上での平均流速

図-10 2枚板で板間隔が小さい場合の各板頂上での平均流速の1周期変動

の条件と同様であるが、隣接する板の影響で明確な w のピークは1周期内に1回しか現れない。この実験結果は、図-9に示す流況と定性的に一致する。従って、抗力においても部材が近接することにより、各部材の抗力から構造物全体に作用する抗力に変化していることが、流況観測から確かめられた。

4. 底設構造物に作用する波圧特性

図-11は、一例として $kh=1.30$ の条件における単一板に作用する波圧分布を示し、図中の実線は中村ら(1982)によるわきだし分布法から算定された計算結果を示す。図の右側が入射波側の前面、左側が透過波側の後面での波圧の振幅を示す。横軸の無次元圧力 p^* は、波高

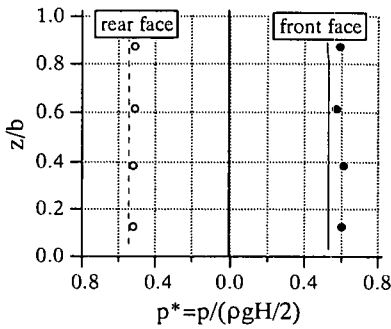
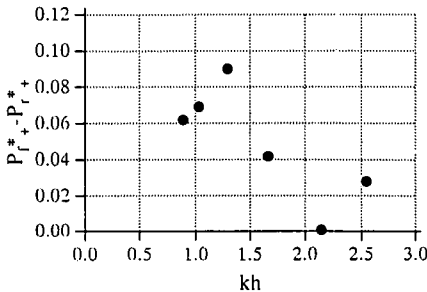
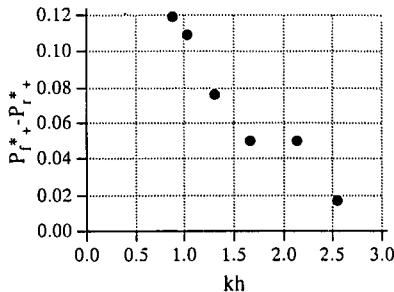


図-11 単一板に作用する波圧分布 ($kh=1.30$)



(a) $z/b=0.87$

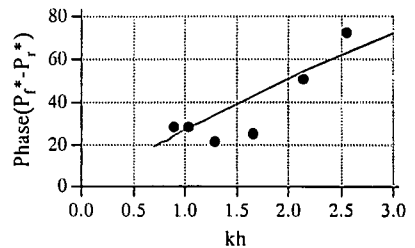


(b) $z/b=0.38$

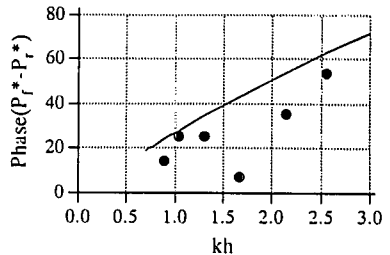
図-12 単一板の前面と後面との圧力波形の振幅差

H で無次元化($p^*=p/\rho gH/2$)されている。図より実験結果と計算結果は良い一致を示す。図-12は、それぞれ $z/b=0.87$ と $z/b=0.38$ の点での正の圧力振幅 p^* をとり、鉛直板の前面 p_{f+}^* と後面 p_{r+}^* との圧力振幅の差を示している。これはポテンシャル理論ではほとんど0になる値であるが、実験結果は長周期側の条件になるに従って、圧力の振幅差は大きくなる。この圧力が正になる位相では、板背後に剝離渦が形成されている。前述した表-1から単一板頂部で形成される剝離渦は、長周期波の条件になるに従って大きな渦が形成されることが示されている。このように板背後では剝離渦の形成による圧力低下が生じ、波圧の振幅差が生じるものと考えられる。そしてその振幅差は剝離渦の径が大きくなるに伴って大きくなっている。従って、板前後の波圧の振幅差により抗力が発生しているものと考えられる。

図-13は、それぞれ $z/b=0.87$ と $z/b=0.38$ の点での鉛直板前面と後面との圧力変動の位相差を示している。図中の実線は中村ら(1982)によるわきだし分布法から算定された計算結果を示す。本実験に用いた板の厚さは5mmであり、水面波形の板前後の位相差は短周期波の条件 $kh=2.6$ で2度程度である。しかしながら図-13に示されるように実験結果では、板前後において約60度程の位相差が生じており、図中に示されているわきだし分布法による計算結果とも良く一致していることがわかる。このような波圧の大きな位相差に関して検討を行うため鉛直板の基準体積を考える。鉛直板の基準体積は図-14に示すように板の幅 d を直径とした円柱と与えられる。ここで、仮想的な直径 d の円柱に作用する圧力



(a) $z/b=0.87$



(b) $z/b=0.38$

図-13 単一板の前面と後面との圧力波形の位相差

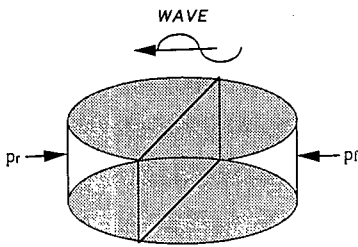


図-14 鉛直板の基準体積

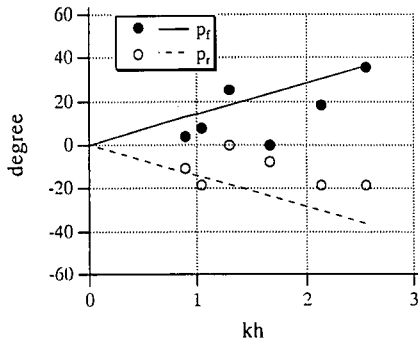
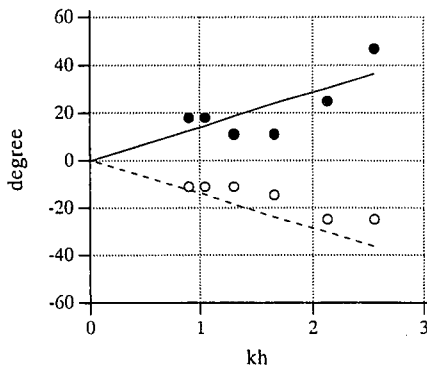
(a) $z/b=0.87$ (b) $z/b=0.38$

図-15 単一鉛直板前後面の波圧の位相差

波形を考え、仮想円柱の前後の波圧の作用面の位置と円柱真上の水面波形との位相差を実験結果と共に示したのが図-15である。各図は圧力の測定点が異なる。図中には、板真上の水面波形と板前面（黒丸）・板背面（白丸）に作用する圧力波形の位相差及び微小振幅波理論で想定される基準体積両端における位相差 p_f (実線)・ p_r (点線)を示している。両者は多少の差異があるものの、短周期波の条件で位相差が大きく、長周期波の条件になるに従って位相差が小さくなる傾向が良く一致している。このように、付加質量を仮想物体（基準体積）とみなし、

その物体に作用する圧力波形を考えると、慣性力を引き起こしうる位相ずれが説明できる。すなわち位相のずれは付加質量の大きさを示すものと考えられる。従って、長周期波の条件においては位相差は小さくなり、慣性力が減少する。

5. 結 論

(1) 一般に、板部材に作用する流体力は、慣性力が卓越している。板の形状（縦横比）を変化させた場合においては、慣性力に比して抗力の増大が見られるが、この傾向は基準体積を板の横幅を直径とする円柱で置き換えて慣性力を評価した場合のモリソン式でほぼ推定できる。

(2) 複数の板（2・3枚）よりなる構造物全体に作用する流体力は、単純に単一板に作用する流体力の整数倍（2・3倍）とはならないことが確認された。このことより構造物全体に作用する流体力を推定する際に部材間の近接による影響を考慮する必要がある。

(3) 板に作用する慣性力は、板前後の圧力波形の位相差により生じており、その位相差は、基準体積を板の横幅を直径とする円柱とした場合のその両端における進行波圧の位相差とほぼ対応する。

(4) 板に作用する抗力は、板前後の圧力波形の振幅差により生じており、その振幅差は板背後における剥離渦の生成による圧力の低下及び板前面での動圧による圧力の上昇により引き起こされる。

(5) 複数の板部材の近接による構造物全体としての作用流体力の変動傾向は、部材数によらず構造物の全幅（構造物の両端の板の設置間隔）をパラメータとして表現できる。

(6) 板部材が近接することで、構造物全体としての慣性力・抗力はともに減少し、板の付加質量は単一板のそれから複数板全体の付加質量へと変化する。

参 考 文 献

- 池田駿介・浅枝 隆 (1983): 波動場に置かれた垂直板付近の流れと砂の移動に関する研究, 海岸工学講演会論文集, pp. 284-287.
- 久保田真一・松本 忠・出口一郎・小野正順 (1996): 部材で構成された底設構造物の波力特性に関する研究, 第51回年次学術講演会講演概要集, pp. 94-95.
- 全国沿岸漁業振興開発協会 (1984): 沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針, pp. 125-140.
- 中村孝幸・高橋和男・中山和典 (1982): わきだし分布法を用いた2次元物体まわりの波変形と流体力の解析法, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 462-466.