

半球型底設魚礁の水理機能に関する研究

鳥取大学工学部土木工学科 正会員 松原雄平
鳥取大学工学部土木工学科 正会員 野田英明
西松建設(株)技術研究所 正会員 西平福宏

1. はじめに

近年、わが国の沿岸域では、魚類資源の保護、培養ならびに魚介類の飼養を目的として、種々の形状を有する底設型のコンクリート魚礁あるいは鋼製魚礁が巨費を投じて数多く設置されている。こうした魚礁の中で大半をしめる小型魚礁は、製作効率を優先して、直線梁材を組み合わせた矩形構造を有しているのが一般的である。しかし、これらの魚礁が集団的に投入設置される事例は増えるものの、設置後の、魚礁の散乱や埋没などはほとんど評価されず、さらに、それら散乱した魚礁が、漁網切断事故を引き起こすなどの問題を生じている。また、矩形断面は構造学的にも、また水理学的にも、必ずしも合理的形状であるとはいえないところから、現在の各種の魚礁は、なお改良の余地が多く残されているといえよう。

この研究は、こうした観点から、従来の矩型魚礁と異なる半球型の底設魚礁の開発をめざすもので、本論文では、その基礎的段階として、波動場における半球型魚礁の水理特性について模型実験を中心に検討したものである。特に、この研究では、微小振幅波の範囲内において(1)半球魚礁に作用する波力の算定法とその精度の検証、(2)波浪特性の変化と半球型魚礁モデル周辺部での流れ特性との関係、(3)魚礁付近での速度分布と流れ特性の関係、の3点の解明について検討を進めた。上記(1)~(3)の検討では、詳細な実験データが必要となるため、とくに実験時の測定精度に注意した。すなわち、半球型モデル周辺の3次元流れ場の様相を把握するために、3成分電磁流速計によって魚礁周辺部の流速測定を行った。また、流体力に関しては、3分力計を用いて、直方向力ならびに揚力の水平2成分と鉛直成分の流体力を測定した。

2. 球形物体に作用する波力に関する従来の研究

球体に作用する流体力に関する研究としては、正弦振動流中に置かれた球に作用する流体力について、中村、池田、高柳らが実験を行い、抗力係数、慣性力係数、揚力係数とKC数との関係、ならびに球の背後にできる渦について報告している。¹⁾また、Surpkayaも正弦振動中に置かれた球に作用する流体から、効力係数、慣性力係数とKC数の相互関係を求めている。²⁾さらに、岩田らは没水球体の波動場での振動特性について詳細な検討をおこなっている。³⁾しかし、底面に固定された半球型物体に作用する流体力、あるいはその水理特性について研究した例は多くなく、わずかにGarrisonらが挙げられるのみである。⁴⁾Garrisonらは、波動場で没水半球体に作用する流体力を回折波理論を用いて算定し、実験結果と比較し、両者がよく一致することを示した。この研究では、Garrisonらの計算法ならびにモリソン式を適用し波力の算定を行うとともに、球体に作用する流体力の変動特性、ならびに周辺流体の運動特性について検討を行う。

3. 実験装置及び方法

波力測定に関する実験は、幅0.6m、長さ25m、深さ1.1mの片面ガラス張り鋼製水槽を用いて行った。この水槽の一端には、2ヒンジフラッター式造波機が、他端には、消波装置が設定されており、その水槽底に図-1に示すような高さ15cmの鋼鉄製床板を設置

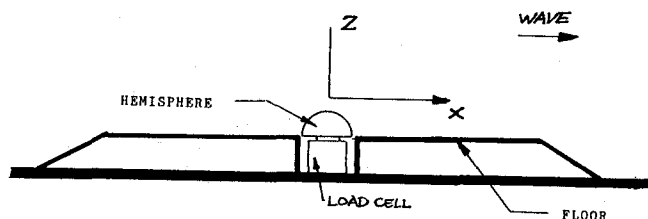


図-1 実験装置模式図

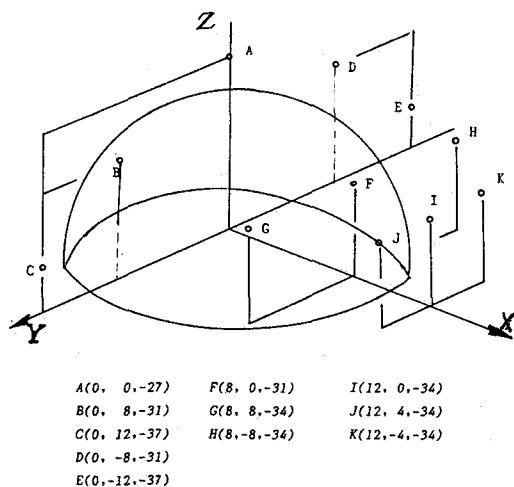


図-2 魚礁模型と流速測定点

し、その中央部分に波力検出装置を固定した。波力検出装置は、防水型 3 分力計の受感部にプラスチック製の半球体を取り付けたものである。X、Y および Z 軸をそれぞれ、波の進行方向、水槽横断方向ならびに鉛直方向にとっている。この 3 分力検出器は、互いに直交する三軸方向の荷重を測定できる多成分ロードセルであり、その定格負荷は、各成分ともに 5kgf で測定前に十分な直線性を確認した。荷重測定分解能は 1gf、干渉度は各分力間に対して、 $\pm 2\%$ 程度であるため各荷重成分の分別もよく、また温度変化の影響を受けないため精度の高い荷重測定が可能である。

実験に用いた球形魚礁模型は、直径 20cm のプラスチック製のブイを 2 分割したものである。

底設魚礁近傍での水粒子速度の測定には、三次元電磁流速計を用いた。図-2 は、半球体周辺部の流速測定点ならびに、その座標を示したもので、水槽底の鋼製床板と同一レベルに取り付けられた半球魚礁模型の上部ならびに岸側の 11 点（図中丸印）において流速測定を行った。測定に用いた電磁流速計は、互いに直交する三方向の流速を同時に検出できるため、3 次元空間内での流速ベクトルならびにその時間的变化を容易に得ることができる。以上の三分力計ならびに電磁流速計の出力信号は、容量式波高計からの出力信号とともにデジタルレコーダに収録後、解析した。

入射波浪の条件としては、水深を 45cm と一定にし、波高を 2.1cm~12.4cm の間に、周期を 1.0sec~2.4sec の間で変化させて設定した。いずれの実験波も微小振幅波理論の適用範囲内である。

4. 結果の検討

4. 1 KC 数と波力算定係数との関係

ここでは、実測波力をもとに算出した抗力係数 C_D 、質量係数 C_M ならびに揚力係数 C_L と KC 数との関係について比較検討を行う。まず C_D, C_M を算定する方法は、この係数を定数と考え、モリソン式から算定される計算波力と実測波力との差を最小にするような C_D, C_M を求める最小自乗法を採用した。また揚力係数 C_L は、最大揚力の実験値を下記のように無次元化して、求めたものである。

$$C_L = F_z / ((1/2) \rho U_m^2 A)$$

ここに、 F_z は、波の 1 周期における最大揚力、 A は、物体の投影面積、 ρ は、流体の密度である。また、 U_m は、1 周期における水粒子速度の最大値であり、本研究では、半球の頂上部における値をもって代表流速 U_m とした。なお U_m は、以下の式で算定した。

$$U_m = (\pi H/T) (\cosh(k(h+z')) / \sinh(kh))$$

ここに、 H : 波高、 T : 周期、 L : 波長、 h : 水深、 z' : 半球頂上部の鉛直座標（上向きを正）である。よって、 $KC \text{ 数} = U_m T / D$ と定義される。

さて、図-3 は、実測結果から最小自乗法を用いて算定された半球型魚礁の抗力係数 C_D ならびに、慣性力係数 C_M および揚力係数 C_L と KC 数の関係を示したものである。図-3 より、半球の抗力係数 C_D は KC 数値が増大するにつれ、若干増加する傾向を示しているが、ほぼ $C_D = 0.5$ となることが分かる。また、この値は、球の抗力係数とほぼ一致することになる。一方、 C_M の値と KC 数の変化に明確な関係が認められず、 C_M は、ばらついてはいるものの、1.5 付近の値をとっている。以上の C_D, C_M の値は、一般に球形物体に対して用いられる波力算定係数の値とほぼ一致することが分かる。しかし、この研究で設定した条件は、KC 数が 3 程度と小さい範囲であるため、さらに広範囲な条件での検討が必要であろう。また、同図中の揚力係数 C_L と KC 数の関係をみると、KC 数の増加に対し、 C_L の値が一定の割合で減少する傾向が認められる。この傾向は、中村、池田らが、制限振動中において球に作用する流体力を測定して得た結果と一致するものである。一般に、KC 数は、物体背後の渦の発生のパターンを規定するものであるため、揚力の出現と結び付けられ論じられているが、底設の半球体に対しても同様に、KC 数の変化、あるいは物体背後の渦の発生の変化と揚力とが関係していることが分かる。

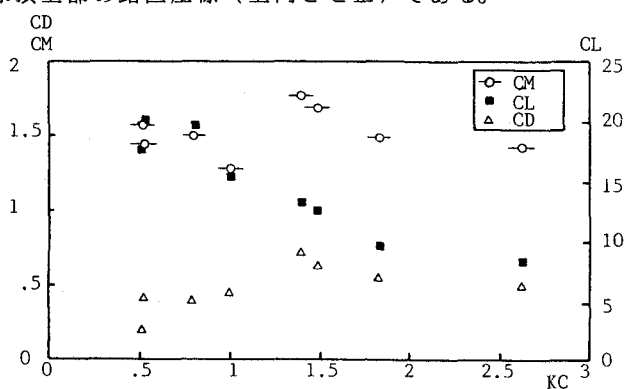


図-3 各種波力算定係数と KC 数の関係

4. 2 半球型魚礁に作用する波力の時間的変化と最大波力

図-4は、波力測定実験から得られた x 、 y 、 z 各方向の波力 F_x 、 F_y 、 F_z および水面変動の時間的変化の一例を示したものである。図より、 x 、 y ならびに z 方向の波力の変化は何れも、規則的な変化を示していることがわかるが、 y 方向の変化には、わずかに高周波の成分が重畳している。また水面変動と直方向力との位相には、 $T/4$ 程の差が生じている。これは、今回の実験条件が、抗力より、慣性力が卓越する領域にあり、加速度成分が顕著に現れ、位相差が生じるものと考えられる。また、 F_z と水面変動の時間的変化の關係に注目すると、きわめて周期波の峰の位相で F_z の上向きの力が最小であり、波の谷の付近では、 F_z の上向きの力が最大となっている。このことは、 F_z の値は、ほぼ、波の存在による静水圧の変動と同位相であることがわかる。

また、ここには示していないが F_z は波高が増大するととともに、上向きの最大波力よりも、下向きのそれの方が大きくあらわれる結果を得た。これは、波高の増大にともなって、有限振幅性があらわれ、非対称な波形となったことが原因と考えられる。

次に波力の X 、 Y および Z 方向成分の最大値 F_{xm} 、 F_{ym} 、 F_{zm} について検討しよう。図-5は、縦軸に y 方向ならびに z 方向の最大波力を直方向力の最大値で除した F_{ym}/F_{xm} 、 F_{zm}/F_{xm} をとり、横軸に KC 数をとって示したものである。この図より、 y 方向の揚力と直方向力の割合は、 KC 数に関係なく、ほぼ0.1と一定となっている。これは、 KC 数の変域が小さいために、 F_{xm} に比べて、とくに大きな値となるような揚力が生じなかったことによるものと考えられる。

一方、 F_{zm}/F_{xm} の結果は、 KC 数の増加とともに直方向力に比べ鉛直方向波力が増大する傾向を示している。特に $KC > 0.5$ の波浪条件では、 F_{zm}/F_{xm} はいずれも1.0より大きく、鉛直方向の波力が、卓越することが認められる。 $KC=2.6$ 付近では F_{zm} は F_{xm} の約1.8倍程にもなることがわかる。これらのことから、底設半球魚礁には直方向力ならび鉛直力が主に作用するといえる。

図-6は、種々の波浪条件に対してMorison式から算定される最大波力と実測波力とを比較したものである。図中の数字は計算に用いた C_D 、 C_M の値を示したものである。この図から、実測値がMorison式による算定値よりやや大きく現われているが、ほぼ両者は一致していることがわかる。

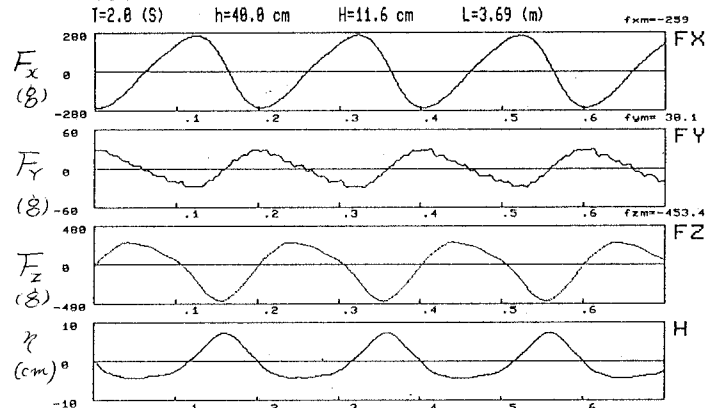


図-4 各成分波力の時間的変化

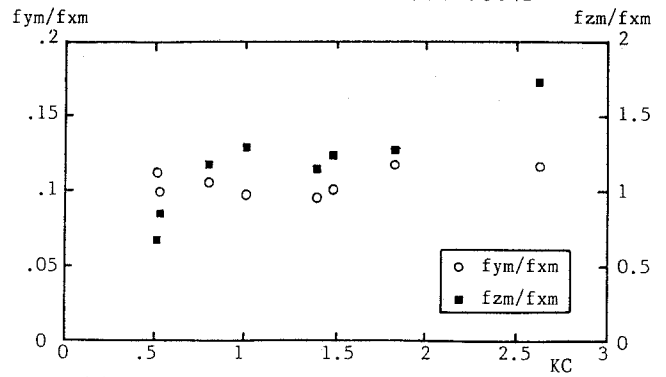


図-5 相対最大波力と KC 数の関係

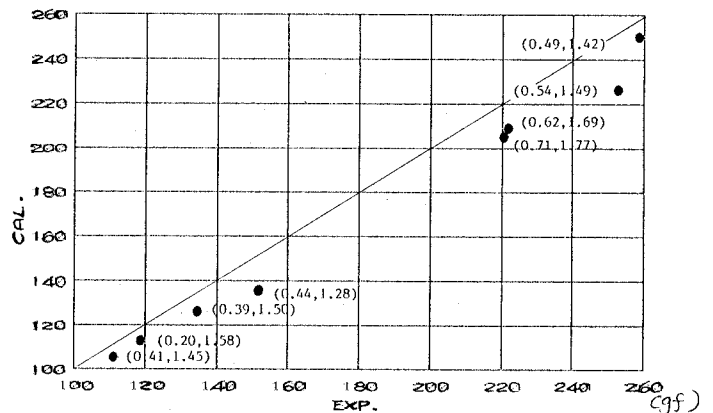


図-6 計算波力と実測値との比較

4. 3 半球形魚礁後背部の流れ特性

図-7 は、測点 I において得られた X , Y , Z 軸方向の水粒子速度 U , V , W と水面波形の時間的変化を示している。図中の実線は実測値、破線は同じ測定点で微小振幅波理論から算定された値である。図中の U の時間的変化より、実測値が計算値よりも若干小さく、またその時間波形も乱れていることがわかる。これは、測点 I が半球体の背部にあることで U の変動に半球体による乱れが含まれていることによるものと思われる。しかし、大半の測定点における結果からは、測定値は理論値とほぼ一致した。次に y 方向成分

V の変動について検討すると、測点 I では、極めて短周期的変動波形と、波動成分とが重畳し、不規則な時間波形となっている。これは、半球が3次元的な形態であるので、その周辺での流れが3次元的に複雑に乱れていることによるものと考えられる。またここには示していないが、測点 A では常に正の流速が現われること、変動のパターンも周期的であるものの、波動成分とは全く異なることがわかった。さらに、G 点でも同じ様な周期的変動が繰り返される結果を得た。

鉛直方向流速成分 W の時間的変化について検討すると、測点 I では周期的な測定結果が得られているが、前述の流速 V の結果と同様に、若干の乱れが波形から認められる。また理論値と比較し、実験値が大きく、また両者の位相が $T/4$ 程度異なっており、鉛直成分流速は、半球の存在で大きく影響を受けることがわかる。また、測点 A, B では水粒子速度の鉛直成分は周期的に変化していること、しかし、流速の時間的変化はなめらかでなく、ほぼ一定の流速から短時間に逆方向の流速へと段階状の変化を繰り返す結果となった。ところが、測点 C では、鉛直流速は常に正（上向き）の値をとり、その変動特性は低い流速レベルから急激に高流速レベルにシフトするパターンを繰り返すことが明かとなった。この一定方向への流速の出現については、その原因は不明である。

次に、各測点における方向の流速ベクトルの大きさと方向について波の位相とともに検討しよう。

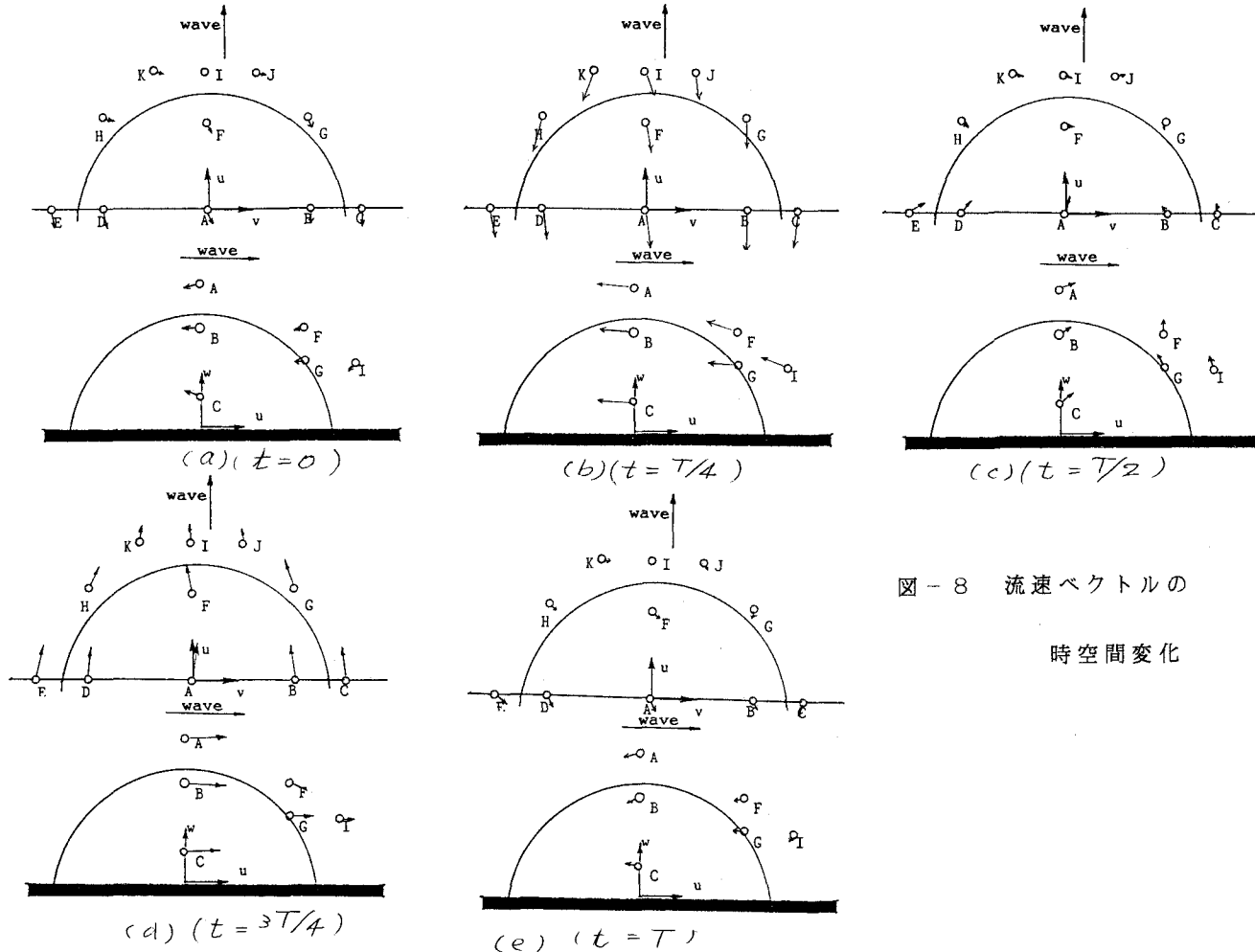


図-8 流速ベクトルの
時空間変化

図-8(a)~(e)は $T=1.6\text{sec}$, $H=6.7\text{cm}$ の波浪条件下で得られた流速ベクトルの空間内での変化を $T/4$ ごとに表わしたものである。各図には、半球体周辺の流速ベクトルの瞬間値について、 z 軸方向(上方)から見た分布ならびに y 軸方向(横方向)から見た場合について示している。また流速ベクトルは各成分毎の流速の出力を合成したものである。波が静水面を切る位相 $t=0$ では、流向の逆転時であるため、測点 F~K で流速は小さく、また、流向もばらついている。しかし、測点 A~E では、半球表面に沿った冲向きの流速が認められる。 $t=T/4$ では、冲向き流速が増大し、A~I の各測点で半球に沿う流向となっている。

$t=T/2$ では、再度、流向が岸向きに変化する位相であるが、測点 F~K では、鉛直上向きの流速が生じている。

$t=3T/4$ では、さらに岸向きの流速が増大して、また半球に沿って流速ベクトルが各測点で得られている。

$t=T$ では再び流れの向きが変化し、各測点での流向、流速の値がばらついている。

以上のことからこの波浪条件では半球体近傍で大きな乱れは生じなく、ほぼ半球体に沿って流速分布が得られた。しかし、半球体をより浅い地点に設置すれば、当然、大きな乱れが起こるものと考えられ、この点については今後の研究課題といえよう。

5. まとめ

本研究では、波動場に設置した半球魚礁模型に作用する流体力、及びその後背部のながれ特性について検討した。またその測定結果により半球体の波力算定係数 C_D , C_M を算定し KC 数との関係についても検討し合わせて Morison 式ならびに回折理論による計算結果もまじえて種々の考察を考えた。得られた結果を要約すると以下のようになる。

1) C_D , C_M は、 KC 数の変化に対しそれぞれ従来球体に対する値として与えられている 0.5, 1.5 近傍のほぼ一定値となる。一方、 C_L については KC 数の増大にともない一定して減少傾向をしめすことが分かった。

2) 直方向力 F_X については、今回の実験条件の範囲では Morison 式から算定される最大波力と実験値とはほぼ一致する。

3) 半球周辺部の水粒子は、半球表面に沿ってながれ、本研究での微小振幅波の適用領域では大きな渦動は認められない。また半球体周辺部での水粒子速度 U に関しては、微小振幅波理論による値によく一致している。一方 V, W は、周期的変動をするが、各測点で特異な変動を示す。

以上であるが、今後はさらに広範な条件の下で同様の測定を行うとともに、理論的な側面から、流れの様相を明らかにしてゆきたい。

参考文献

- 1) 中村廣昭・池田俊介・高柳聰：正弦振動流中に置かれた球に作用する流体力、第29回海溝論文集、pp.443-446, 1982
- 2) Sarpkaya: Force on Cylinder and Sphere in a Sinusoidal Oscillatory Flow at High Reynolds Numbers, Proc. of the Offshore Technology Conference, Vol.11, pp.95-108, 1976
- 3) 岩田好一郎、水谷法美、葛西信三：没水球体に作用する不規則波力の特性、第33回海溝論文集、pp.476-480, 1986
- 4) C.J. Garrison and V. Seetharama: Interaction of Waves with Submerged Objects, Journal of the Waterways and Harbours and Coastal Engineering Division, A.S.C.E., vol.97, 1971