

規則波中水平柱状部材の低 KC 数領域での質量力減少と循環流

新井 信一*・大鳴 伸治**・近藤 圭央***

1. 緒 言

海洋構造物の形式として柱状部材を組み合わせたジャケットや半潜水式浮体がある。通常、これ等に働く波力の算定にはモリソン式を用いるが、水平部材は、鉛直部材に比べて研究例（例えば、小寺山ら，1978；上北ら，1980；増田ら，1985；都築ら，1986；Arai，1993）が少なく、波力の特性が解明されているとはいいがたい。すなわち、一方向往復振動流として取り扱える鉛直部材とは異なり、水平部材では断面に対して波動流が円軌道を描くため固有の特性が出てくる。その一つにクーリガン・カーペンター数 (KC 数) が約 3 以下で起こる質量力の減少がある。この領域では、流体の粘性効果のために断面回りに循環流が誘起され波力が減少するとの指摘がある。波力減少は設計上は安全側の現象とも言えるが、外力特性の正確な把握は構造物の性能向上のためには重要事項である。しかるに循環流の実体は未だ解明されていない。

そこで本研究では、循環流の可視化を試み、波力も計測して、循環流と質量力減少との関係を実験的に明らかにしようとした。

2. 質量力係数

図一1 に示す様に幅が 800 mm の水槽に長さ 790 mm の柱状部材模型を水平に設置した。使用した模型は断面幅 B が 45 mm の円形、正方形および長方形 (高さ H が 24 mm) の 3 種類で、模型中心深さ d は 93 mm である。波周波数は 0.95 Hz で波高を変えて、模型に働く x 方向水平波力と y 方向鉛直波力を検力計で計測した。モリソン式はベクトルで取り扱う方法と、水平と鉛直成分に分ける方法とがあるが、ここでは後者の方法によった。すなわち円柱の単位長さあたり波力を次のように置く。

$$F_x = CM_x \cdot \rho \cdot A \cdot \dot{u} + 0.5 \cdot CD_x \cdot \rho \cdot H \cdot u \cdot |u| \quad \dots (1)$$

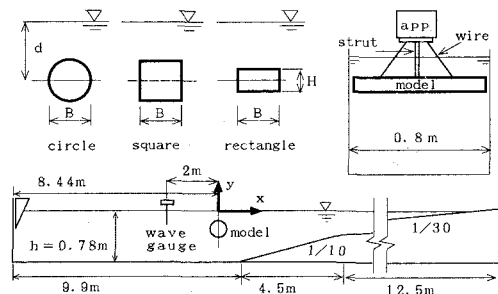
$$F_y = CM_y \cdot \rho \cdot A \cdot \dot{v} + 0.5 \cdot CD_y \cdot \rho \cdot B \cdot v \cdot |v| \quad \dots (2)$$

ここに F は波力、 CM は質量力係数、 CD は抗力係数で、

添え字 x と y は方向を示している。また、 ρ は流体密度、 A は部材断面積、 u と v は夫々模型中心位置における水平および鉛直方向の水粒子速度で、上付き \cdot は時間微分である。断面高さ H は円形と正方形では B となる。計測された波力をフーリエ展開し、波周波数成分を、非線形項を等価仕事で線形化した(1)と(2)式にあてはめ、 CM と CD を求めた。実験の範囲では、抗力に対して質量力が卓越しているため、以下では質量力のみを論ずる。

波力はフルード数 (Fr) とレイノルズ数 (Re) とクーリガン・カーペンター数 ($KC = V/fB$) の関数である。ここでは Re 数の代わりに $\beta = Re/KC = B^2 f/\nu$ なる周波数パラメータを用いる。ここに f は波周波数、 V は水粒子速度、 ν は動粘性係数である。あらかじめ模型深さを変えて実験し水面影響のほぼ無い深さにしているため Fr の影響はなく、また波周波数を固定しているため β はおよそ一定である。従って、本実験では KC に対する波力の変化を観ることになる。以下では KC の V に水平方向の最大水粒子速度 u_{max} をとる。

まず、得られた質量力係数を図一2 に示す。円形、正方形及び菱形印が実験値である。図中の水平矢印は完全流体の CM 値を示している。KC 数が小さくなると粘性効果が小さくなるため実験値もこれに近づく必要があるが、良好な結果が得られている。円断面の例には比較のため、1 方向振動流の Sarpkaya (1981) の結果を実線で、また水粒子が円軌道を描く波動流 (以下、単に波動流と称する。) の Chaplin (1984) の結果を破線で示した。こ



図一1 実験水槽と模型

* 正会員 工博 足利工業大学教授工学部土木工学科
 ** 学生会員 足利工業大学大学院工学研究科
 *** 工修 (株)日本港湾コンサルタント

のように、1方向振動流の場合は、渦の放出効果のためKC数が約5を越えるとCM値が減少しはじめるが、水平部材のような波動流の条件下ではKC数が1以下から減少を開始する。Chaplinは、この現象が粘性境界層効果によることを指摘し(3)式の実験式を示すとともに、断面回りに循環する流れの発生することを指摘した。

$$CM = 2 - 0.21 KC^2 \dots\dots\dots (3)$$

大塚ら(1993)は流場の観察から半周期間に生成される渦の強さより後述の揚力を計算し、結果として(3)式とほぼ同じ(4)式を導いた。

$$CM = 2 - (2/\pi^2) KC^2 \dots\dots\dots (4)$$

実験結果は、Chaplinが指摘する如くKC数が増加するにつれ減少し、KC数が約3を越えると増加に転じる。以後、前者の領域を減少域、後者の領域を増加域と称するが、本研究の興味の対象は減少域にある。

水粒子がほぼ円軌道を描く条件のため、円形断面の例では、水平方向と鉛直方向のCM値がほぼ等しい。正方形断面でも同様であるが、長方形断面になると鉛直方向が水平方向の約2倍となる。いずれの断面でもCM値はKC数の増加につれ減少し、次に増加に転じている。

ここで完全流体での値を CM_i と置き、実験値のこの値からの減少量

$$\Delta CM = CM_i - CM \dots\dots\dots (5)$$

を調べると図-3を得る。このようにしてみると、質量係数の減少量の変化がよく分かる。特に長方形断面では水平方向と鉛直方向の減少の様子がKC数がおよそ2までは同じであることに気づく。

3. 流場の可視化

先に述べたように、水平部材に見られる質量力の減少は循環流が発生するためであるといわれているが、これを調べるために「乱れ場解析システム」(新井ら, 1992)で流場を可視化した。

(1) 流線の可視化

流場の状況を観察するため、まず流線を可視化した。比重が約1の直径0.3から0.5mmのダイヤイオンビーズを模型回りに投入し、図-4に示すように、シート状にしたアルゴンイオンレーザー光を模型下部と上部から連続光で照射し、ビーズの挙動を所定のシャッタースピードのCCDカメラで記録した。

質量力係数の増加域での流線の例を図-5に示す。3種類の断面共に波が谷の位相の例であり、波は右へ進む。模型右下部に模型断面寸法と同程度の規模の渦が生成されており、渦が流れに大きな影響を与えている状況がわかる。この渦は、波の山の位相で模型上部に発生し、成長しながら時計回りに移動し、谷の位相で図示の規模となる。これに対して図-6は質量力係数減少域での円形断面の例で、波の谷から始まる1周期の連続映像である。波は右へ進む。このように、減少域では渦の放出はまだ視認できず、a図の模型下部に見られる部分的に速い流れが模型の回りを時計回りに移動していることが確認される。

(2) 流跡線による可視化

図-4でカメラのシャッターを開放としてレーザー光

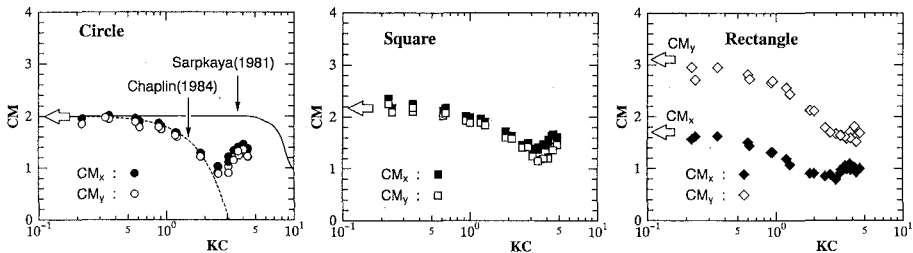


図-2 柱状部材の質量力係数

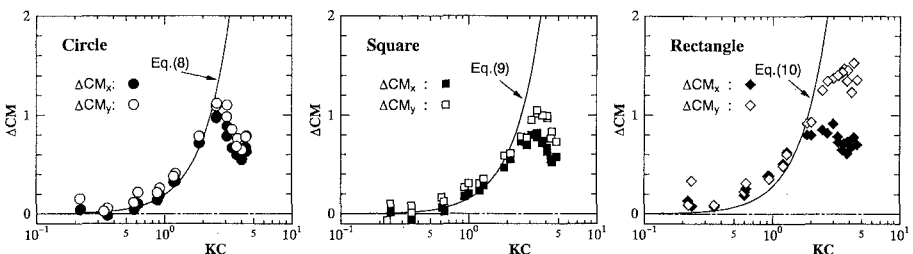


図-3 質量力係数の減少量

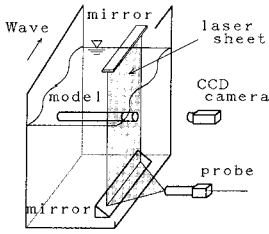


図-4 流れの可視化法

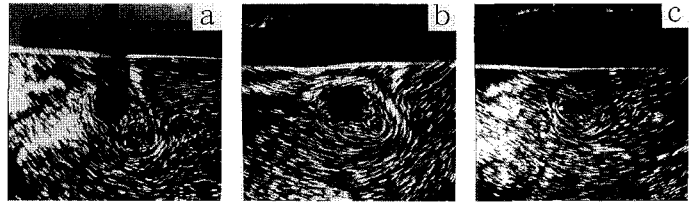


図-5 断面回りの流線 (a:円形断面・ $KC=3.82 \cdot \beta=1690$, b:正方形断面・ $KC=3.89 \cdot \beta=1670$, c:長方形断面・ $KC=3.71 \cdot \beta=1720$)

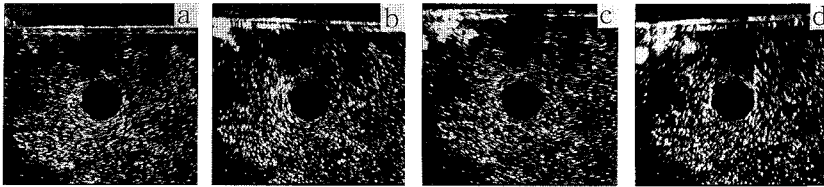


図-6 円形断面回りの流線の時間変化 ($KC=1.50$, $\beta=1690$, a:谷, b:ゼロアップ, c:山, d:ゼロダウン)

を所定の間隔で点滅させると粒子の流跡線を記録できる。その画像を解析して粒子の位置と速度を数値化した後、改めて1周期分描画した例が図-7である。図中央の円形が模型断面であり、粒子はすべて時計回りに移動している。線分が速度で、その中央の点が位置を示している。速度の尺度として u_{max} を示してある。また、 KC 数と β 数も表示している。波は、以下の図も含めて、右に進む。図からわかるように、粒子は1周期後にもとの位置に戻らず、漂流している。これは周期運動以外の場の流れのためと考えられ、この流速を図-8に示す方法で求めた。すなわち粒子は番号の順に移動していくが、破線矢印で示す No. 1とその丁度1周期後の No. 11の距離が1周期間の軌道上で受けた漂流の積分量であるから、実線矢印の様に軌道平均位置の量とし、これを周期で除して時間平均でもある漂流速度を求めた。実験の波周波数と計測器設定による点滅時間間隔の組み合わせで丁度1周期後の点が計測されるとは限らないので、その時は、粒子が漂流しても速度の大きさとその方向には周

期性があるとして補間した。図-8はその補間法の精度を確認するためのデータであるが、No.11の白丸印が実測点、それに重なる黒丸印がNo.9, 10, 1および2のデータから内挿して求めた補間点であり、良好な結果を得ている。この方法は粒子の漂流量あまり大きくないほうが精度上好ましいので、大きな渦がまだ発生しない KC 数が1から2の間で使用してみた。

まず、模型が無いときの例を図-9に示した。これらの粒子漂流速度は極めて小さいので個々のデータの精度に問題はあがるが、平均的にはピーズの沈降速度と進行波の質量輸送速度に対応している。以後の漂流速度の計測例からはピーズの沈降速度は除去してある。

次に模型があるときの粒子漂流速度を図-10に示す。各断面とも KC 数を2例ずつ示してある。円形と長方形断面の場合には明確でかなり強い時計回りの流れが可視化されている。この模型回りに誘起された2次流を、以後、循環流と称する。正方形の例では少しまとまりに欠けるくらいがあるけれどやはり時計回りの循環流の存在

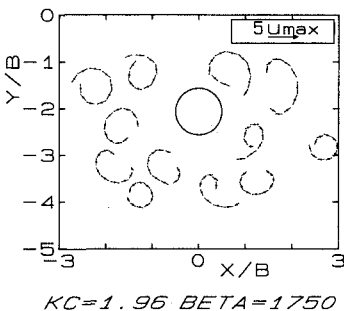


図-7 流跡線の計測例

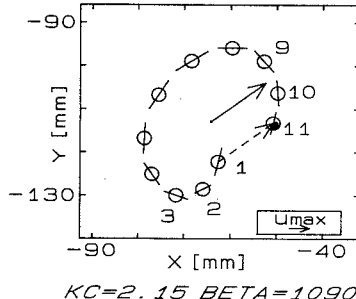


図-8 粒子漂流速度の算出法

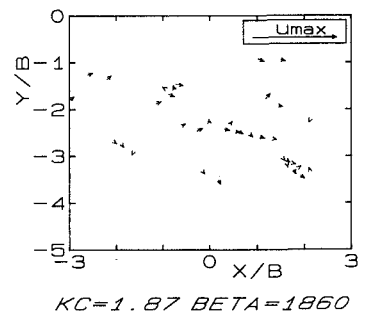


図-9 模型無し時の粒子漂流速度

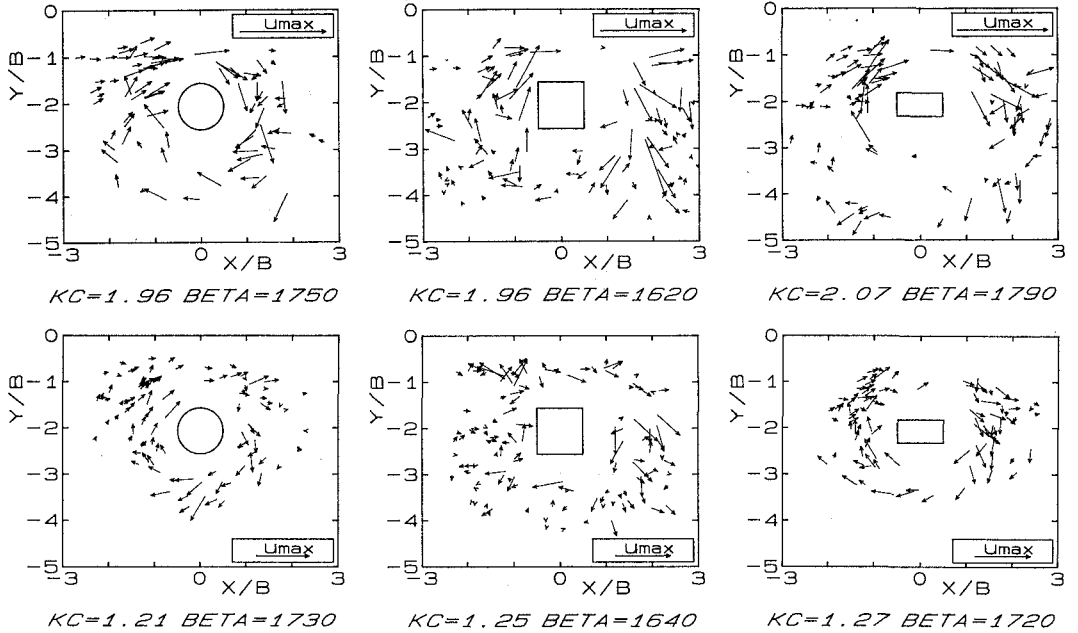


図-10 粒子漂流速度により可視化された循環流

が認められる。いずれも KC 数が大きいと循環流も強い。

4. 循環流と揚力

循環流が確認されたので次にマグヌス効果による揚力を調べてみる。図-11 に示すように、進行波の水粒子軌道回転方向に模型を回る循環値 Γ の流れが発生し、これに流速 V の波動場の流れが組み合わさると、波動流進行方向の左向きに (6) 式の揚力が発生する。

$$F_L = \rho V \Gamma \dots\dots\dots (6)$$

一方、水粒子加速度に比例する質量力は常にその右向きに作用する。波動流の方向が変化してもこの関係は常に成立するから、揚力は質量力を減ずる力となる。そこで可視化された循環流からこの揚力を求めてみる。

まず循環値の算出の例を図-12 に示す。積分路を断面形状と相似形にとり、その大きさを変えた結果である。積分路により循環値が変化しているのは、視認されないほど小さいとはいえ渦が放出されているためと思われる。そこで複数の積分路の結果から外挿で模型表面 ($B_c/B=1$) での値を求めることにした。

図-13 に KC 数に対する模型 3 断面の循環値の変化を示した。正方形の結果の 1 個が外れているが、これらの結果は両対数座標上で 1 本の線上に全て乗ってることが分かる。そこで図示の全データを用いて最少自乗法で実験式を求めると、実線で示す (7) 式を得る。

$$\Gamma = 18.0 \cdot KC^2 [\text{cm}^2 \cdot \text{s}] \dots\dots\dots (7)$$

比較のため、円断面に対する大塚らの (4) 式の揚力相当

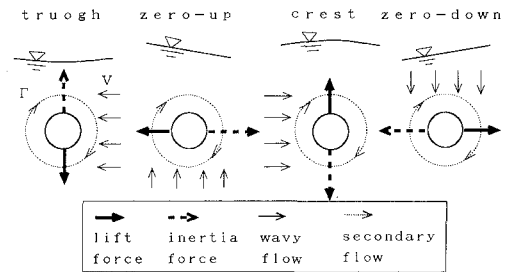


図-11 循環流とマグヌス効果

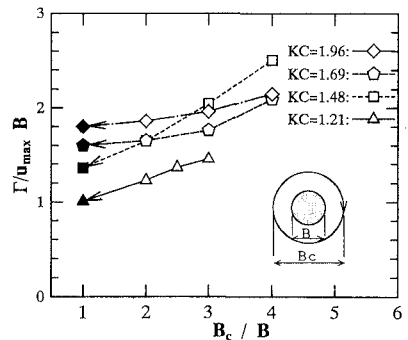


図-12 積分路と循環値

分を、本例の場合にあてはめると破線のごとくなり、本実験式に近い結果となる。

このように断面形状にかかわりなく KC 数に対する循

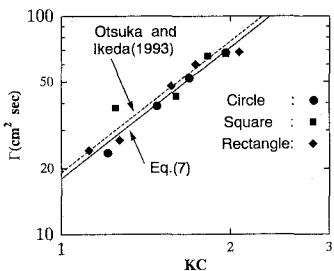


図-13 KC数対循環値

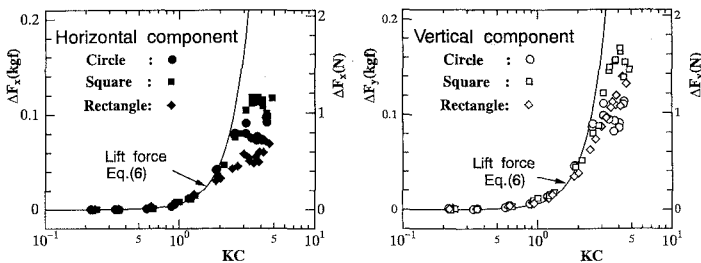


図-14 質量力の減少量と循環から求めた揚力

環値の変化が同じだとすると、(6)式から揚力も同様で、よって質量力の減少量も断面形状に無関係となるはずである。そこで(5)式による質量力係数の減少分を模型全長に働く力に換算した結果の ΔF を、 Γ から求めた揚力とともに図-14にまとめた。予測通り、力の減少量はKC数が2程度までの減少域においてどの断面も同じ値であり、また(7)式の Γ による(6)式の揚力ともよく対応していることが分かる。この揚力は、質量力係数と同じ無次元化をすると、

$$\Delta CM = 0.19 KC^2 : \text{円形} \dots\dots\dots (8)$$

$$\Delta CM = 0.15 KC^2 : \text{正方形} \dots\dots\dots (9)$$

$$\Delta CM = 0.28 KC^2 : \text{長方形} \dots\dots\dots (10)$$

となり、これを先に示した質量力係数減少量の図-3に実線にて描画すると、減少域においてよく実験値と一致することが確認される。

以上から、質量力係数の減少は模型回りに誘起された循環流のマグナス効果により発生するといえる。

5. 結 言

円形、正方形および長方形の断面の水平部材の質量力係数を実験的に調べ、以下の結果を得た。

1) 質量力係数は、単一方向往復振動流の場合よりも小さいKC数で減少し始める。

2) いずれの断面でもKC数の増加につれ質量力係数は減少しその後増加に転じる。減少域では渦の放出は視認されないが、増加域では顕著な渦が確認される。

3) 質量力係数減少域で水粒子漂流速度である2次流を可視化してみると、波の粒子軌道回転方向と同一方向に模型をまわる循環流が確認される。その循環値はKC数の自乗に比例し3断面とも同じ値となる。

4) 循環流のマグナス効果による揚力が質量力係数の減少の原因であることが定量的に説明された。

参 考 文 献

新井信一・岩崎敏夫・上岡充男 (1992): 水平没水矩形柱体回りの波動流場の可視化, 足利工業大学研究集録, 第18号, pp. 163-170.

大塚耕司・池田良穂 (1993): 低KC数域における波浪中水平没水円柱の質量係数の推定方法, 関西造船協会誌, 第219号, pp. 135-141.

上北征男・山崎秀勝 (1980): 水平円柱に作用する質量力に関する研究, 第27回海講論文集, pp. 358-362.

小寺山 亘・田代昭正 (1978): 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, pp. 136-144.

都築 進・渡辺 晃・堀川清司 (1986): 波動流場におかれた水平円柱に作用する波力の数値シミュレーション, 第33回海講論文集, pp. 526-530.

増田進弘・渡辺 晃・堀川清司 (1985): 波動場におかれた水平円柱に作用する波力と周辺流速場, 土木学会第40回年次講演概要集, II, pp. 541-542.

Arai, S. (1993): Forces on and flows around a horizontal rectangular cylinder submerged in regular waves, Proc. 3rd Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Vol. III, pp. 288-293.

Chaplin, J. R. (1984): Nonlinear force on a horizontal cylinder beneath waves, J. Fluid Mech., Vol. 147, pp. 449-464.

Sarpkaya, T. and M. Isaacson (1981): Mechanics of wave force on offshore structures, Van Nostrand Company, New York, 651 p.