

振動流と定常流の共存場における直立円柱底面付近の 3 次元流体場の数値解析

金沢大学工学部 正会員 ○樫田真也, 由比政年, 石田 啓

金沢大学大学院 小清水信生

1. はじめに

海中構造物周辺で発生する洗掘機構を解明・予測するために, 著者ら¹⁾は, 一様流および振動流中の直立円柱底面付近の流体場を対象とした研究を行い, 後流渦や馬蹄形渦などの 3 次元的な内部構造を明らかにしてきた. 一方, 現実の海象条件の下では, 波浪と共に海流, 潮流や沿岸流などによる流れが同時に作用するため, 波・流れ共存場における流況特性を理解することが重要となる. しかしながら, 波・流れ共存場における構造物底面付近の流体場に関する研究例は, Sumer ら²⁾の実験的な研究成果を除くと, ほとんど報告されていない. 特に, 共存場における 3 次元速度場や圧力場に関する知見は不足している. そこで, 本研究では, 著者らが開発・検証してきた数値モデルを用いて, 振動流と定常流の共存場に設置された直立円柱周辺の流体場に対する数値解析を行い, 定常流速の違いによる流況および底面せん断力特性の変化を検討する.

2. 解析条件

一様流場および振動流場に対して開発・検証してきた一般曲線座標系に変換された Navier-Stokes 方程式の解析モデル¹⁾を利用して, 直立円柱周辺の振動流と定常流の 3 次元共存場に関する数値解析を行った. ここでは, 振動流に対して定常流が平行に作用する場合の共存場を対象とする. この時, 円柱周辺の流況は, 振動流成分に関する KC 数および β 数(あるいは, Reynolds 数 = $KC \cdot \beta$)に, 定常流成分の効果を表す相対速度 V_r を加えた次式の 3 つの無次元パラメータにより特徴づけられる.

$$KC = \frac{U_m' T'}{D'}, \quad \beta = \frac{D'^2}{\nu' T'}, \quad V_r = \frac{V_c'}{U_m'} \quad (1)$$

ここで D' は円柱直径, T' は振動流の周期, ν' は動粘性係数, V_c' は定常流速, U_m' は最大振動流速を表す. $V_r = 0$ は振動流単独の場合に対応する. 今回は, β 数を 775 と固定し, KC 数と V_r を変化させて計算した.

3. 解析結果

図 1 は, 振動流と定常流が同方向となる最大流速時($u = V_c' + U_m'$)における円柱周辺の渦の 3 次元構造を vortex core(渦の整構造を表す渦管)を用いて示したものである. KC 数は 10 で, 最大振動流速に対して定常流速が相対的に小さい場合(a) $V_r = 0.5$ と大きい場合(b) $V_r = 1.5$ を比較する. 円柱上流側の底面付近における U 字型の渦管が馬蹄形渦を, 下流側の非常に複雑な渦管群が後流渦を表す. 定常流速が大きくなるに従い, 馬蹄形渦の渦径が増大し, 存在時間が長くなり, 一様流場に見られるような明確な馬蹄形渦構造が発達する様子が確認された. 振動流と定常流が同方向の位相では, 後流渦径が拡大し, 定常流速と KC 数に比例して渦放出個数が増加するのに対して, 逆方向となる位相では, 渦放出が抑制され, 個々の渦管は非常に小さくなる.

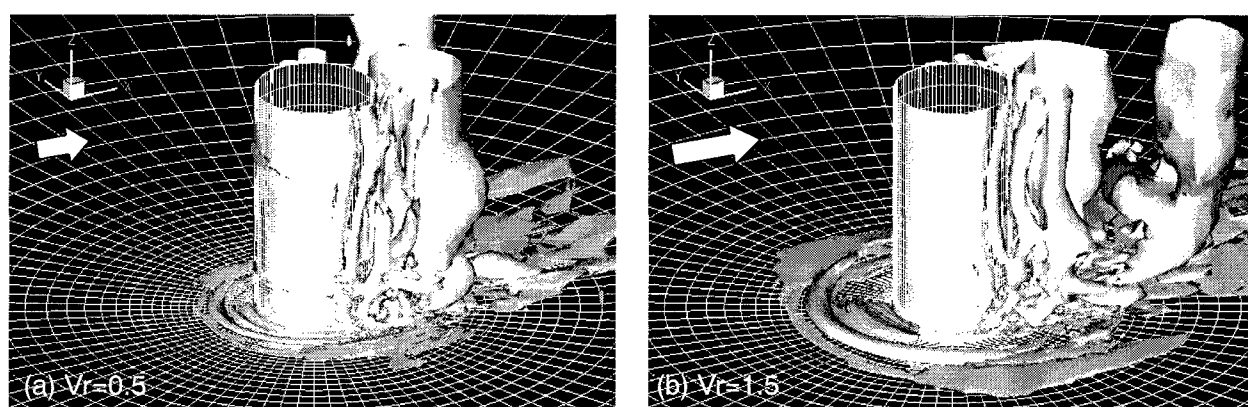


図 1 最大流速時の円柱周辺の vortex core 分布 (KC=10, $t/T=4.25$, (a) $V_r=0.5$, (b) $V_r=1.5$)

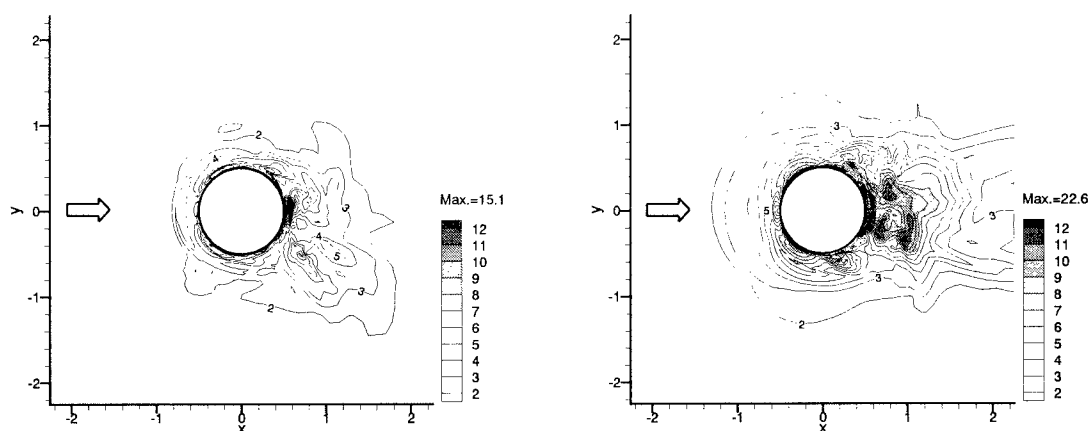


図2 円柱周辺の底面せん断力の増幅率 ($KC=10$, (a) $V_r=0.5$, (b) $V_r=1.5$)

図2は、図1に対応する条件の振動1周期間における底面せん断力の最大値の分布を示す。せん断力値は主流域下における底面せん断力の最大値で基準化した値(底面せん断力の増幅率)を表す。円柱上流域では、馬蹄形渦および縮流効果による円柱側面の加速流れによって底面せん断力が最大となる。一方、円柱下流域では、定常流と振動流成分が同方向となる位相で発達する後流渦内部で生じる鉛直流の存在によって、非常に大きな底面せん断力が引き起こされる。特に、後流渦による戻り流れが後方よどみ点付近で鉛直流を生じ、底面境界層厚さが減少した時にせん断応力が激増することが分かった。また、定常流速が増加するに従って、円柱斜め側方および後流域下の底面せん断力が増加し、一様流場のせん断力分布に良く似た分布となることが確認された。最後に、底面せん断力の増幅率の空間的な最大値と相対速度 V_r および KC 数との関係を図3に示す。低 KC 数領域($KC=2.5, 5$)では、相対速度に比例してせん断力の最大増幅率は増加する。一方、高 KC 数領域($KC=10, 20$)では、 $V_r=1.0$ の最大増幅率は $V_r=0.5$ の値より若干小さい。相対速度が $V_r=1.5$ の場合、 $KC=5$ の最大増幅率は振動流場における増幅率の2.8倍、 $KC=20$ で1.8倍である。底面せん断力に対する共存流れの効果は低 KC 数領域でより顕著に現れる。この傾向は共存場における円柱の受ける流体力特性(高 KC 数領域で流体力に対する共存流れの効果が大きい)³⁾とは反対である。

4. まとめ

振動流と定常流の共存場に設置された直立円柱底面付近の3次元流体場に対する数値解析を行い、馬蹄形渦や後流渦の内部構造および底面せん断力の基本特性について検討した。定常流速の増加につれて渦構造が大規模化し、底面せん断力が後流域で増加すること、低 KC 数領域での増幅率に与える共存流れの効果が大きいことなどが明らかになった。

参考文献

- 1) M. Yuhi, H. Ishida and S. Umeda, A numerical study of sinusoidal oscillatory flows around a vertical wall-mounted circular cylinder, Coastal Engineering Journal, Vol.41, Nos. 3 & 4, pp.225-246, 1999.
- 2) Sumer, B.M., Christiansen, N. and Fredsoe, J.: The horseshoe vortex and vortex shedding around a vertical wall-mounted cylinder exposed to waves, J. Fluid Mech., Vol.332, pp.41-70, 1997.
- 3) 株田真也・馬替敏治・由比政年・石田 啓, 振動流と定常流の共存場に設置された円柱に作用する流体力特性の数値解析, 海岸工学論文集, 48巻, pp.886-890, 2001.

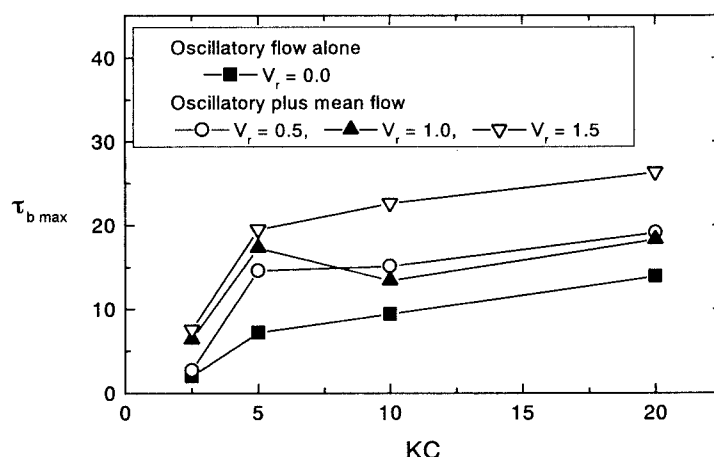


図3 増幅率の最大値と KC 数, V_r との関係