

振動流と定常流の斜交共存場における円柱に作用する流体力特性

楳田 真也*・馬替 敏治**・由比 政年***・石田 啓****

振動流と定常流が任意の角度で交わる斜交共存場における円柱周辺の流況および流体力に関して、一般曲線座標系 Navier-Stokes 方程式を用いた数値解析を行った。KC 数、交差角および相対流速の変化によって生じる渦流れと流体力の変化を系統的に解析し、後流渦の発生・消滅過程や渦配列と流体力の最大振幅や卓越方向との関係について詳細に検討した。その結果、低 KC 数領域における流体力の最大値は交差角に依らずほぼ一定となること、KC 数や相対流速の増加に従って、交差角の増加による流体力の低下が顕著になること、直交共存場の流体力は振動流単独の場合の流体力と同程度またはそれ以下になる場合があることが分かった。

1. 序 論

潮流や海浜流等が卓越する沿岸域および河口域において海岸構造物の受ける波力特性を解明・予測するには、波と流れの共存場に設置された柱体に作用する流体力の基本特性を理解することが重要である。これに対して、波や流れが単独で作用する柱体周辺の流況や流体力に関する従来の数多くの研究成果 (Williamson, 1985; Sumer・Fredsoe, 1997) に加え、波と流れが平行に作用する共存場を対象に、波・流れの相互干渉が柱体周辺の流況や流体力に与える影響に関する研究も進められてきた (Iwagaki ら, 1983; Sarpkaya・Storm, 1985)。さらに、近年では、振動流と定常流の平行共存場を対象とした数値解析により流体力の基本特性が検討されている (Sarpkaya ら, 1992; Zhou・Graham, 2000)。著者らも、平行共存場における小口径円柱に作用する流体力に関する数値解析を行い、流体力と後流渦の生成・放出過程との対応関係および共存流速の変化に対する流体力係数の基本特性を明らかにしてきた (楳田ら, 2001)。

一方、現実的な海象条件を考慮すると、任意の角度で交差する共存場に関する体系的な知見を得ること、および交差角の変化が流体力に与える影響を定量的に評価することが必要である。しかしながら、波・流れ斜交共存場における流体力特性に関する研究は極めて少なく、直交共存場を対象とした報告も僅かである。異なる方向から入射する波と波の相互干渉が流体力に及ぼす影響に関しては、富田ら (1994) の研究成果が得られているが、波と流れが斜交する共存場における流体力については検討されていない。

そこで、本研究では、振動流と定常流が任意の角度で交差する共存場における円柱周辺の流体場に関して系統的な数値解析を行い、交差角の変化が渦放出パターンに与える影響、渦流れと流体力変動の関連、流体力係数と

交差角、KC 数および相対流速との関係を検討する。

2. 解析条件

円柱周辺の平行共存場に関して、前報 (楳田ら, 2001) で構築した一般曲線座標系に変換した Navier-Stokes 方程式に基づく解析モデルを利用して、任意の角度で交差する共存場に対する数値解析を行った。本モデルによる流体力解析の定量的な有効性は、振動流場および平行共存場における円柱の流体力係数に関して検証済みである (由比ら, 1998; 楳田ら, 2001)。

図-1 に示すように振動流の向きに x 軸を固定し、x 軸に対する定常流の交差角度 α を 0° から 90° まで変化させる。共存場における円柱周辺の流体場は、振動流成分に関する KC 数および Stokes 数 β 、さらに定常流成分の強度を表す相対流速 V_r を加えた次の 3 つの無次元パラメータで特徴づけられる。

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

ここで D' は円柱直径、 T' は振動周期、 ν' は動粘性係数、 U_c' は定常流速、 U_w' は最大振動流速を表す。プライムを付した変数は有次元量であることを意味する。今回は、Stokes 数を 200 に固定し、 $KC \leq 10$ 、 $V_r \leq 1$ の範囲で変化させて解析を行った。初期条件としては、静止流体場を考え、図-1 に示すような斜交共存場を時間発展させ、各ケース 50 周期分の計算を行った。

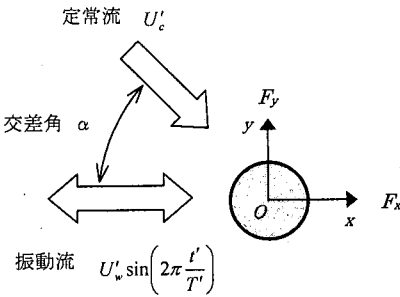


図-1 振動流と定常流の斜交共存場の設定

* 正会員 工博 金沢大学助手 工学部土木建設工学科
** 正会員 金沢大学教授 工学部土木建設工学科
*** 正会員 工博 金沢大学助教授 大学院自然科学研究科
**** 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科

3. 解析結果および考察

(1) 交差角に対する渦放出パターンの変化

図-2および図-3は、 $KC=2$ および $KC=8$ の場合の円柱周辺における圧力分布の時間変化を示す。相対流速は共に $V_r=1$ である。同図では、円柱から十分離れた主流域での圧力値を基準値ゼロとし、実線の等圧力線で正圧、破線で負圧を表示した。ここでは、各図の上段 (a) の平行共存場、中段 (b) の斜交共存場、下段 (c) の直交共存場に見られる代表的な渦放出パターンを比較・検討する。

$KC=2$ の平行共存場の場合(図-2(a))、2つの後流渦は相互干渉しないで減衰・消滅するため、渦放出はなく、流れ場は上下対称である。周期毎に双子渦が形成され、その渦対は定常流に従って移動する。 $\alpha=45^\circ$ の斜交共存場の場合(図-2(b))、円柱下側で発生する後流渦のみが形成・移流する過程が見られる。円柱上側においても渦の発生段階に見られる低圧部を生じるが、振動流成分が反転する時には渦は既に消滅している。一方、直交共存場の場合(図-2(c))、渦に伴う低圧部は円柱付近に限られ、後流渦の成長は十分でない。直交共存場の場合、円柱の前方よどみ点で生じる高圧部の圧力値は、平行および斜交共存場のものより低い。

$KC=8$ の共存場の場合(図-3)、交差角の違いによる渦強度や渦放出個数の変化がより顕著に現れる。平行および斜交共存場の場合と比較して、直交共存場における後流渦は非常に弱小である。図-3(a)は、後流渦が円柱

右斜め下方へと放出される周期の流況を示しているが、次の周期には、右斜め上方に渦が放出される。渦放出方向は1周期毎に交互に変化し、1周期間に3つの渦が発生・放出される流況パターンとなる。振動流が定常流と同方向に作用する前半周期に、円柱上下側面から渦が交互に放出され、後半周期では、渦の形成・放出が抑制される。斜交共存場の場合(図-3(b))、平行共存場と同様に円柱右斜め下方に後流渦が放出される。ただし、1周期あたりの放出渦の数は2つになる。一方、直交共存場の場合(図-3(c))、1周期あたり4つの小さな渦が発生する。円柱の左右に形成された後流渦が定常流に従って流下し、円柱下方に渦列が形成される流況パターンが見られる。その渦挙動の詳細は次の通りである。 $t'/T'=1/5$ の時、円柱下方に前周期中に放出された渦対が存在しており、円柱に付着して左下に渦が発達している。放出された渦対は次第に一方の渦を吸収しつつ、減衰しながら円柱表面から離脱する。振動流が右向きに加速するにつれて、円柱右上で生成された渦が成長を続けながら次第に円柱に沿って下方へ移動する。この間に、振動流反転直後に円柱左下に付着していた渦は、円柱表面に沿って左から右へ移動し、円柱下方へ移動した前述の渦に接近し、渦対を形成する。この渦対は円柱下側に沿って右側から左側へ移動し、振動流の反転後に左下方へ放出される。渦対が形成され放出されるまでの間に円柱右下に新たな渦が発生し、この渦は円柱の下側に沿って左方向へ移動し、その後、円柱の左下で新たに生成された渦と対を成し、この渦対が円柱右下へ放出される。

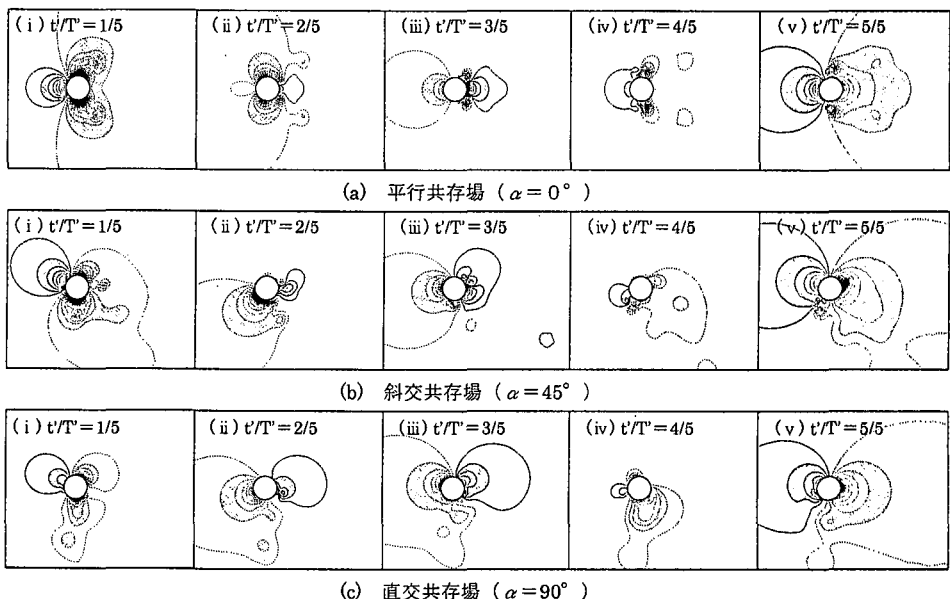


図-2 $KC=2$, $V_r=1$ の場合の円柱周辺の圧力分布の時間変化

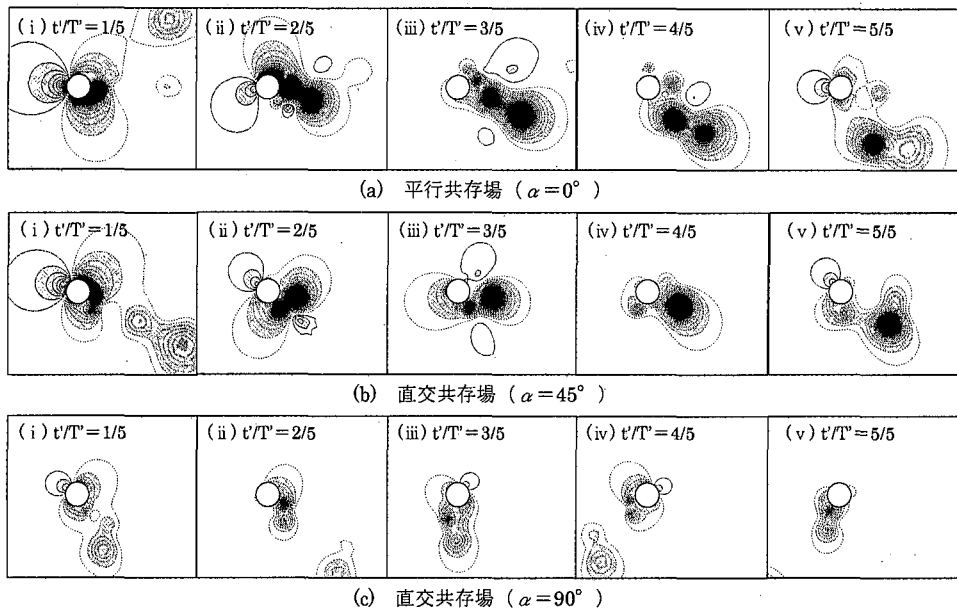
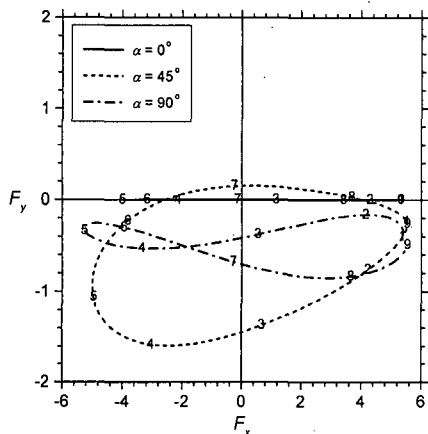
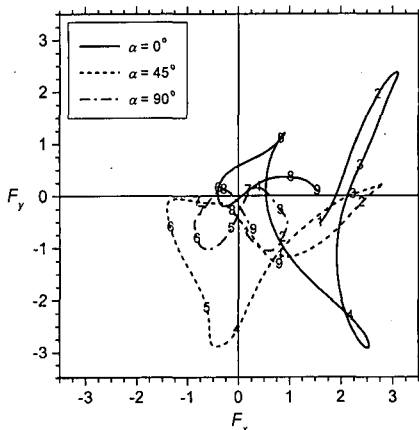
図-3 $KC=8$, $V_r=1$ の場合の円柱周辺の圧力分布の時間変化(a) $KC=2$, $V_r=1$ (b) $KC=8$, $V_r=1$

図-4 交差角に対する流体変動の変化

(2) 交差角に対する流体力の変動特性の変化

図-4は、相対速度 $V_r=1$ で $KC=2$ および 8 の場合の振動方向流体力 F_x と振動直交方向流体力 F_y の代表的な1周期間の時間変化を示したものである。平行、斜交および直交共存場の流体力を実線、破線および一点鎖線で表し、曲線上に1周期の1/8刻み毎に番号を付した。

(a) $KC=2$, $V_r=1.0$ の場合、平行共存場の揚力 F_y はほぼゼロであるので、 F_x-F_y 曲線は直線状になる。これに対して、 $\alpha=45^\circ$ の斜交共存場の軌道は楕円、直交共存場の軌道は8の字を描く。 F_y と F_x の基本周波数が同じ場合は楕円、 F_y の基本周波数が F_x の2倍の場合は8の字(1つの交点を持つ閉曲線)となる。振動直交方向流体力

F_y の振幅は、直交共存場より斜交共存場の方が大きい。

これは、斜交共存場の場合、円柱下方から発生した後流渦が円柱表面に沿って移流する時に大きな直交方向流体力が生じるのに対して、直交共存場の場合、共存流が円柱背後で生成された渦を円柱付近から押し流すため(図-2(c))、円柱には後流渦による低圧が作用しないことが理由であると考えられる。

(b) $KC=8$ の流体力の F_x-F_y 曲線は、 $KC=2$ の場合と比較して変動が激しく、流体力の大きさや作用方向が急激に変化する(図-4(b))。平行共存場の F_x-F_y 曲線が閉曲線とならないのは、前述のように後流渦の放出方向が1周期毎に円柱上方・下方と変化することから、流体

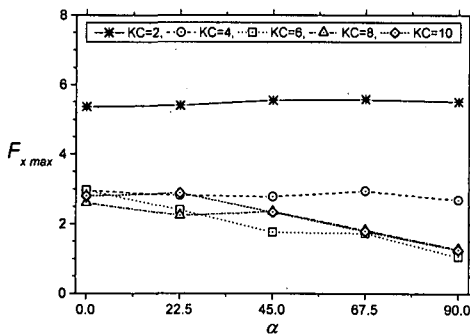
力変動も1周期毎に交互に形状が異なるためである。したがって、2周期分の流体力の軌道はほぼ閉曲線を描き、流体力の変動モードは安定する。振動前半周期の円柱下流域で後流渦が交互に生成される時(2および4), x 軸斜め45°方向に非常に大きな流体力のピークが2つ発生する。その後、3つ目の小さな渦が円柱右斜め上方で生成されるので(図-3(a)), 3つ目の流体力のピーク(5付近)が存在する。斜交共存場の場合、円柱右側で強い渦が発生するので、 x 軸方向に流体力ピーク(2~3の間)が生じる。円柱左側では、後半周期にかけて渦が発生するが、渦は弱く、円柱付近で停滞・減衰するため、流体力変動は小さい。直交共存場の場合、 $KC=2$ と同様に $KC=8$ の F_x-F_y 曲線も8の字を描く。これは、放出渦の個数は異なるものの、後流渦が共存流により速やかに円柱表面から離脱するため、渦運動が流体力変動に与える影響が小さくなったためと考えられる。交差角の変化による流体力変動への影響は、振動方向流体力に対する抗力成分が支配的になる高 KC 数領域でより顕著に現れる。流体力の卓越方向は概ね定常流と同じであるが、流体力の極値は発生段階の渦の強度や配置に強く依存する。

(3) 流体力係数と交差角, KC 数および相対流速の関係

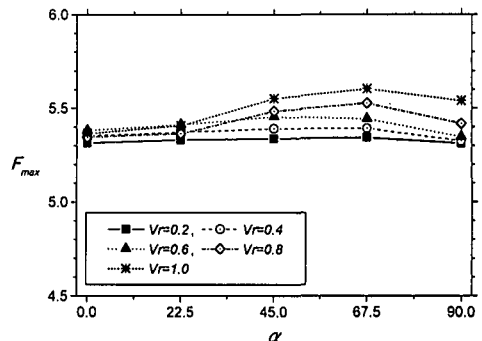
図-5は、 $V_r=1$ の場合の流体力の振動方向成分 F_x および直交方向成分 F_y の最大振幅と交差角, KC 数との関係を示す。最大振幅 $F_{x\max}$ および $F_{y\max}$ の値は、第5~50周期までの周期毎の最大振幅を平均化した値である。

(a) 振動方向流体力の最大振幅 $F_{x\max}$ は、 $KC \leq 4$ では交差角に関わらずほぼ一定値をとり、 $KC \geq 6$ では交差角が増加するにつれて $F_{x\max}$ は低下する。直交共存場($\alpha=90^\circ$)の $F_{x\max}$ は平行共存場の流体力の6割程度になり、 $KC=2$ の振動方向流体力 $F_{x\max}$ は交差角と共に若干増加する。(b) 直交方向流体力の最大振幅 $F_{y\max}$ は、 $KC=2$ の場合、 $\alpha=45^\circ$ の斜交共存場で最大値をとり、その後は交差角の増加につれて流体力は徐々に減少する。 $KC=4$ 以上の場合、平行共存場または交差角が小さい斜交共存場において $F_{y\max}$ が最大となる。交差角が直交に近づくに従って円柱への接近流速の直交成分は増加するものの、円柱周辺で形成される後流渦の強度は低下するため(図-3(c)), 交差角が増加するにつれて、直交方向流体力は振動方向と同様に低下する。

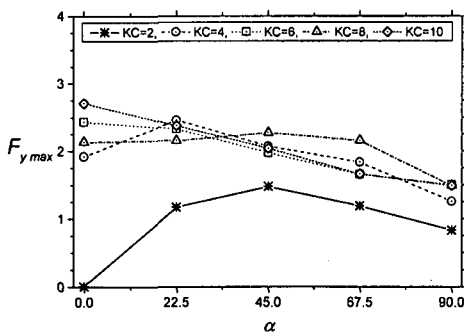
次に、 $KC=2$ および8の場合の流体力の最大値 $F_{\max}$ と交差角, 相対流速との関係を図-6に示す。相対流速



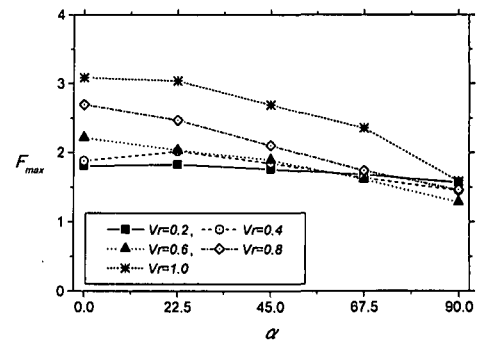
(a) 振動方向流体力の最大振幅



(a) $KC=2$ の流体力の最大値



(b) 振動直交方向流体力の最大振幅



(b) $KC=8$ の流体力の最大値

図-5 交差角に対する流体力の最大振幅の変化 ($V_r=1$)

図-6 流体力の最大値と交差角, 相対流速との関係

V_r が小さい共存場の場合、流体力は交差角に関わらずほぼ一定値となる。(a) $KC=2$ の場合、相対流速の増加に対して最大流体力 $F_{\max}$ は増加する。特に、交差角 $\alpha=67.5^\circ$ の場合の増加割合が高く、 $V_r=1$ の最大流体力 $F_{\max}$ は振動流場の最大流体力より3割程度増加する。最大流体力に対する交差角の影響は $\alpha \geq 45^\circ$ の領域で顕著に現れ、 $\alpha=67.5^\circ$ までは交差角の増加に従って最大流体力 $F_{\max}$ は増加する。一方、(b) $KC=8$ の場合、 $\alpha=0^\circ$ の平行共存場における流体力 $F_{\max}$ が最大となり、その後は交差角の増加につれて $F_{\max}$ は減少する。その減少割合は相対流速が大きくなる程高くなる。しかし、共存流による流況パターンの変化は、高 KC 数域で非常に顕著に現れるため、相対速度が小さくとも $KC=8$ の最大流体力は交差角の影響を受け、交差角の増加により $F_{\max}$ は徐々に減少する。直交共存場の最大流体力は平行共存場の半分以下まで低下し、相対流速 $V_r \geq 0.8$ の場合は振動流単独の場合の流体力値(1.6~1.7)と同程度に、相対速度 $V_r=0.6$ の場合は振動流場の流体力より直交共存場の流体力の方が小さくなることが分かる。この理由の一つは、直交共存場の円柱周辺においては多数の後流渦が発生するが、個々の渦強度は非常に弱く、渦による強い圧力低下が発生しないためである。高 KC 数域においては、交差角の違いが渦放出パターンを大きく変えるため、流体力の変動特性も非常に複雑に変化する。

4. 結 論

一般曲線座標系に変換した非圧縮性 Navier-Stokes 方程式に基づく解析モデルを用いて、振動流と定常流の平行、直交および斜交共存場中に設置された円柱周辺の流体場の数値解析を行った。後流渦の形成・放出の挙動および流体力の変動パターンを解析し、流況と流体力との関連、交差角の変化が渦流れパターンおよび流体力の大きさや卓越方向に及ぼす影響について詳細な検討を行った。本解析条件 Stokes 数 $\beta=200$, $2 \leq KC \leq 10$, $0 \leq V_r \leq 1$ の下で得られた結果を以下にまとめる。

(1) 定常流と正弦振動流の平行、直交および斜交共存場において、 KC 数および共存流の相対流速 V_r の違いによる後流渦の発生・消滅過程の変化および特徴的な渦放出パターンを捉え、共存場における円柱周辺の基本的な流況特性を明らかにした。

(2) 上述の渦放出パターンの変化に対応する振動方向流体力および直交方向流体力の時間変化を解析し、 KC 数および交差角の異なる共存場における流体力の振幅や卓越方向等の変動特性と渦の挙動との関係を見出した。

(3) 各共存場における流体力の最大値と KC 数および相対流速との関係について調べ、流体力変動に対する共存流速および交差角の影響について詳細な検討を行った。その結果、低 KC 数領域における流体力の最大値は交差角に依らずほぼ一定となること、 KC 数や相対流速が増加するに従って、交差角の増加に伴う流体力の低下が顕著になること、さらに、直交共存場の流体力は、振動流単独の場合の流体力と同程度またはそれ以下になる場合があることが判明した。

謝辞: 本論文を作成するにあたり、瀬川和也氏(松井建設)の多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 榎田真也・馬替敏治・由比政年・石田 啓 (2001): 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, 第48巻, pp. 886-890.
- 富田孝史・姜 閔求・倉田克彦・岩田好一郎 (1994): 小口径円柱に作用する斜交波の波力と波力係数に関する研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 846-850.
- 由比政年・石田 啓・榎田真也 (1998): 正弦振動流中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, 第45巻, pp. 736-740.
- Iwagaki, Y., Asano, T. and Nagai, F. (1983): Hydrodynamic forces on a circular cylinder placed in wave-current co-existing fields, Mem. Fac. Engg., Kyoto Univ., 45, 1, pp. 11-23.
- Sarpkaya, T. and Storm, M. (1985): In-line force on a cylinder translating in oscillatory flow, Applied Ocean Research, Vol. 7, No. 4, pp. 188-196.
- Sarpkaya, T., Pulzig, C., Gordon, D., Wang, X. and Dalton, C. (1992): Vortex trajectories around a circular cylinder in oscillatory plus mean flow, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 114, pp. 291-298.
- Sumer, B. M. and Fredsoe, J. (1997): Hydrodynamics around cylindrical structures, World Scientific Co. Pte. Ltd. p. 530.
- Williamson, C. H. K. (1985): Sinusoidal flow relative to circular cylinders, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 155, pp. 141-174.
- Zhou, C. Y. and Graham, J. M. R. (2000): A numerical study of cylinders in waves and currents, Journal of Fluid and Structures, 14, pp. 403-428.