

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次元流体場特性

榎田 真也*・馬替敏治**・由比政年***・石田 啓****

振動流と定常流が平行、斜交および直交する場合の共存場に設置された直立円柱周辺の3次元流体場に関する数値解析を行った。交差角度、KC数および流速比に対する渦流れおよび底面せん断力の変化を系統的に解析し、馬蹄形渦や後流渦の発生・発達過程、渦流れと底面せん断力の関連および底面せん断力の増幅特性について検討した。交差角度が増加するにつれて馬蹄形渦の存在時間は長くなるものの渦径や強度は低下すること、平行共存場の底面せん断力は、円柱前面から側面で集中的に増加するが、直交のせん断力は円柱周辺で一様に増加すること、底面せん断力の増幅率は交差角度に反比例し、その傾向は高KC数域で顕著であることなどが分かった。

1. 序 論

海岸・海洋構造物の基礎部周辺で生じる局所洗掘は、構造物の被災の主要な原因である。その洗掘機構は、流れ収縮、馬蹄形渦や後流渦の形成、波の反射・回折、碎波、地盤内の圧力変動などの現象に支配される(Sumer・Fredsoe, 2002)。小口径の柱状構造物周辺の洗掘は、特に縮流、馬蹄形渦および後流渦などの渦流れの影響を強く受ける。これに関して、一樣流場および振動流場(波動場)における直立円柱周辺を対象に、流況および底面せん断力特性に関する豊富な知見が蓄積されている。しかし、潮流や海浜流等が卓越する沿岸域および河口域における構造物周辺の流体運動を正確に理解するには、波と流れの相互干渉を考慮した研究が不可欠である。

波・流れ共存場に関する研究の大部分は、波と流れが平行に作用する場合に関するものである。Sumerら(1997)は、相対的に弱い流れが共存する場合に関して、共存流による馬蹄形渦の大きさや存在時間の変化を実験的に明らかにしている。著者らは、比較的強い定常流と振動流の平行共存場に関する3次元流体場の数値解析を行い、共存流速の変化が渦構造や底面せん断力特性に与える影響について検討した(榎田ら, 2002)。一方、波・流れが直交および斜交する場合を取り扱った研究例はごく僅かであるので、交差角度の変化が底面付近の3次元流体運動に与える影響については未解明な点が多い。

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直立円柱底面付近の3次元流体場に関する数値解析を行い、(1)交差角度の変化が渦構造に与える影響、(2)渦流れと底面せん断力分布との関係、(3)底面せん断力の増幅率と交差角度、Keulegan-Carpenter数(KC)および流速比との関係を明らかにする。

2. 解析条件

平坦な底面上に固定された直立円柱に対して振動流と定常流が同時に作用する共存場を対象とする。振動流の向きに x 軸を固定し、定常流の交差角度 α を 0° から 90° まで変化させる。共存場における直立円柱周辺の流体場は、振動流成分に関するKC数とStokes数 β 、および定常流成分の相対的な強度を表す流速比 V_r の3つのパラメータで特徴づけられる。

$$KC = \frac{U_w T}{D}, \quad \beta = \frac{D^2}{\nu T}, \quad V_r = \frac{U_c}{U_w} \quad \dots\dots (1)$$

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。今回は、Stokes数を775に固定し、 $KC \leq 20$ 、 $V_r \leq 1.5$ の範囲を対象とした。主流域における振動流の境界層厚は約 $0.1D$ 、定常流の境界層厚は約 $0.3D$ である。以下では、座標値は円柱直径で、流速は最大振動流速で規準化した値を表記する。なお、解析モデルは、移動一般曲線座標系表示の3次元非圧縮性Navier-Stokes方程式に基づくもので、その詳細はYuhiら(1999)を参照されたい。

3. 解析結果および考察

(1) 馬蹄形渦および後流渦

図-1は、 $KC=10$ 、 $V_r=1$ の場合の平行、斜交および直交共存場における円柱周辺の渦構造の時間変化を示す。渦領域は、Jeong・Hussan(1995)により提案された λ_2 法を用いて特定したものである。図中には、定常流および振動流の作用方向を、実線および点線の矢印で表した。平行共存場の場合(図-1(a))、振動流と定常流が同方向に作用する前半周期において、馬蹄形渦が円柱上流域で発生・発達し、 $t/T=2/4$ の時、渦は円柱表面から $1D$ 以上の範囲まで拡大する。後半周期になると、馬蹄形渦は上流方向($-x$ 方向)に移動し、消滅する。これは、定常流成分が相対的に大きくとも、底面付近においては、振動流成分は逆流するためである。直交共存場の場合(図-1(c))、馬蹄形渦は位置や形状を変えながら存続す

* 正会員 工博 金沢大学助手 大学院自然科学研究科
** 正会員 金沢大学教授 大学院自然科学研究科
*** 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 大学院自然科学研究科

る。振動流速がゼロの時($t/T=2/4$ および $4/4$)、馬蹄形渦は、定常流のよどみ点 $p_s(x, y)=(0, -0.5)$ を境に円柱両側面へ回り込むように形成されるのに対して、それ以外の場合は、振動流によって渦は円柱左右に移動する。渦の円周方向への移動範囲は、点 p_s を中心に両側面へ約 45 度である。斜交共存場の流況は、平行と直交共存場の両者の特徴を合わせ持つ(図-1(b))。すなわち、前半周期には、平行共存場と同様に馬蹄形渦が発生・成長し、後半周期には、渦は円柱側面に回り込むように移動する。ただし、 $t/T=0$ 前後で、馬蹄形渦が一旦消滅するのは、斜交共存場の特徴である。

図-2 は、 $t/T=1/4$ の時の底面境界層の剝離点距離 r_s と公差角度 α の関係を示すものである。剝離点は、底面近傍断面で描いた流線図の鞍点で求め(Visbal, 1991)、 r_s は円柱中心からの距離で定義した。公差角が増加するにつれて r_s は減少する。馬蹄形渦は剝離点の下流に形成されるので、渦は公差角度の増加にしたがって縮小することが分かる。馬蹄形渦は、主流下の底面境界層で生じ

る渦度がよどみ点付近に集中すること、および円柱前面の逆圧力勾配によって下降流が上流側に湾曲することの主に2つの作用によって形成される(Niedoroda・Dalton, 1982)。平行共存場の場合、両者の現象が $(x, y)=(\pm 0.5, 0)$ 付近で集中的に生じるため、馬蹄形渦は大きく発達する。一方、直交共存場の場合、主に振動流に起因する前者の現象は $(x, y)=(\pm 0.5, 0)$ 付近で、定常流に起因する後者の現象は $(x, y)=(0, -0.5)$ 付近で生じるため、馬蹄形渦は比較的小さく、非対称な平面形状になる(図-1(c) (ii))。また、底面境界層内の渦度は KC 数、円柱前面の下降流は流速比 V_r と共に発達するため、馬蹄形渦の範囲も同様に KC 数および V_r に比例する。

表-1 は、計算結果より求めた1周期間に放出される後流渦の数を示す。渦放出個数が周期ごとに変化する場合、最大・最小個数を表記した。平行共存場に比べて直交共存場における放出渦の個数が増加傾向にあることが分かる。これは、側面方向に作用する定常流によって、円柱両側面から発生する後流渦間の干渉過程が渦成長の

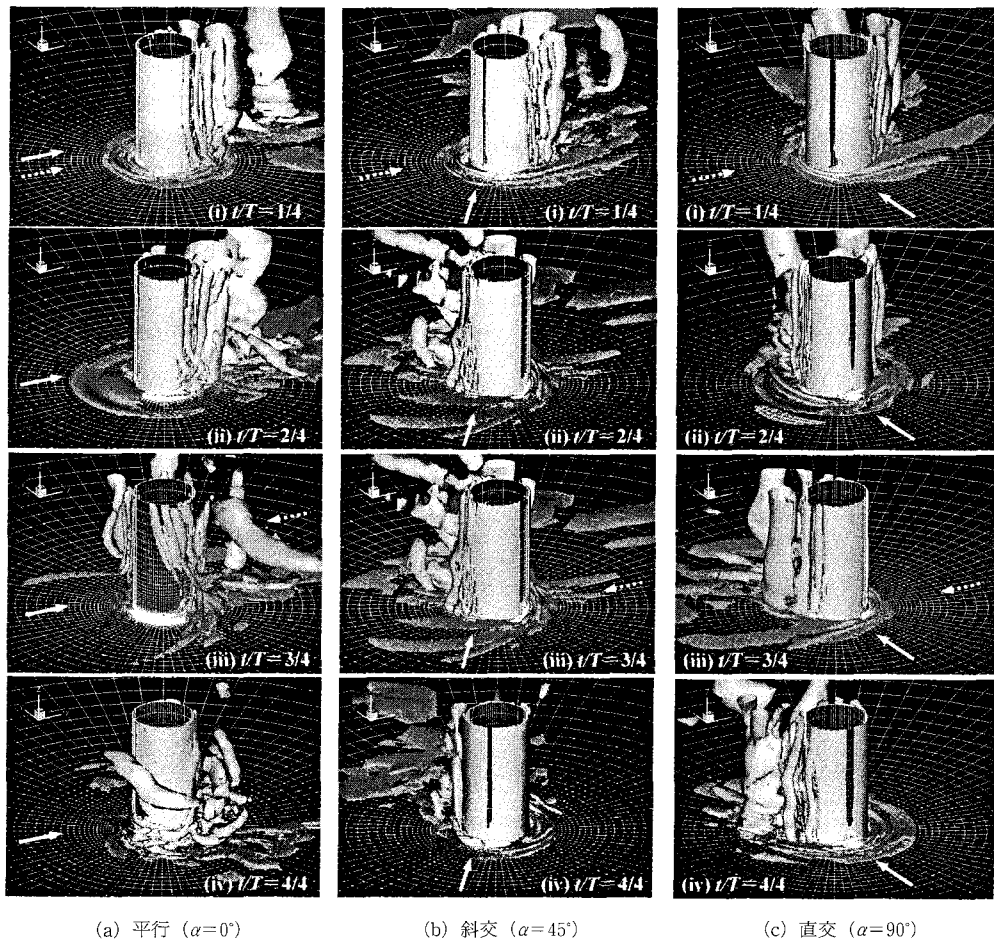


図-1 円柱周辺の渦構造の時間変化 ($KC=10$, $V_r=1$)

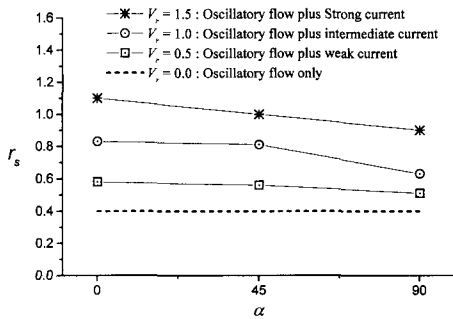


図-2 剥離点距離と交差角の関係 (KC=10)

比較的早い段階に進行し、放出現象が促進されるためである。一方、個々の渦の強度は、後流渦が十分発達した状態で放出される平行共存場のものが最大となる。

(2) 底面せん断力分布

図-3は、図-1の渦流れ下の底面に作用するせん断力の時間変化を示す。せん断力の値は、円柱から5D以上離れた主流域下の底面せん断力の時間最大値で基準化したものである。平行共存場の場合(図-3(a))、 $t/T=1/4$ の時、馬蹄形渦および後流渦下において底面せん断力は最大で主流6倍程度まで増加する。発生後の初期段階の後流渦は局所的に大きな底面せん断力を引き起こすものの、円柱から1D程度離れるとせん断力は半減することが分かる。 $t/T=1/4$ の後、馬蹄形渦が半径方向に拡大する間(図-1(a))、その影響下の底面せん断力は急激に減少する。その結果、 $t/T=2/4$ の馬蹄形渦下のせん断力は主流と同程度の値になる。後半周期は、新たな渦の発達はないために、底面せん断力の局所的な増加はない。その後、 $t/T=4/4$ になると、円柱側面付近で主流が縮流するのに伴って、せん断力が円柱近傍に集中する。その最大値は主流の4倍に達する。

直交共存場の場合(図-3(c))、発生する渦は平行共存場のものに比べて全体的に弱いために、底面せん断力のピーク値は比較的小さい。しかし、長期間存在する馬蹄形渦および後流渦により2~3倍程度のせん断力が作用する。 $t/T=1/4$ および $3/4$ の時、馬蹄形渦下の底面せん断力の増加が顕著である。この時の馬蹄形渦の平面形状が非対称であることと対応して、振動流を受ける円柱左右面($x, y)=(\pm 0.5, 0)$ 付近にせん断力が集中する。一方、定常流を受ける円柱下面($x, y)=(0, -0.5)$ 付近では、せん断力は比較的大きい範囲に分布する。 $t/T=2/4$ および $4/4$ の時点では、馬蹄形渦下のせん断力は全体的に減少し、後流渦下で比較的大きなせん断力が生じる。また、斜交共存場の場合のせん断力分布の時間変化(図-3(b))は、前半周期は平行共存場、後半周期は直交共存場の分布特性に良く類似することが分かる。

表-1 1周期間の後流渦の放出個数

KC 数 KC	流速比 V_r	平行共存場 $\alpha=0^\circ$	斜交共存場 $\alpha=45^\circ$	直行共存場 $\alpha=90^\circ$
2.5	0.5	0	0	0
	1.0	2	1	2
	1.5	2	2	2
5	0.5	1-2	2	2-3
	1.0	1-2	1-2	2
	1.5	2-3	3	3
10	0.5	2	3-4	4
	1.0	4	4	4
	1.5	6	6	6
20	0.5	4	5	7
	1.0	7-8	6-8	9
	1.5	10-11	10	12

図-4は、時間平均化した底面せん断力の分布を示す。図-3の瞬間の底面せん断力と比較すると、後流渦の下では、瞬間的に主流せん断力の5~6倍のせん断力が発生するが、平均的には2~3倍程度に留まることが分かる。一方、馬蹄形渦や縮流は比較的安定して作用するため、平均せん断力も主流の約4~6倍に達する。交差角度に関わらず、せん断力は定常流のベクトルに対してほぼ対称に分布することから、平均せん断力分布への影響は定常流成分の方が大きいと考えられる。この状況は流速比 V_r に強く依存するが、KC数にはほとんど関係しない。定常流に対する上流側の円柱側面付近では、馬蹄形渦および縮流に起因するせん断力の集中が見られる。この局所的なせん断力の増加は、平行および斜交の場合の特徴である。直交の場合は、平均せん断力は一様に分布する。また、直交の場合、後流渦は円柱の右上と左上方に交互に放出されるために、主流の2倍程度の平均せん断力が発生する領域が比較的大きくなる。この傾向は、渦流れが底面せん断力に与える影響が比較的大きくなる高KC数域(KC>5)で顕著である。

(3) 底面せん断力の増幅率

図-5は、流速比 $V_r=1$ の場合の底面せん断力の空間的な最大値 $\tau_{\max}$ と交差角度およびKC数との関係を示す。ここで、 $\tau_{\max}$ は各周期の平均値であり、その変動係数は10%前後である。振動流の振幅が比較的小さい低KC数域(KC=2.5)では、馬蹄形渦や後流渦はあまり発達しないため、底面せん断力は主流の縮流下において最大となる。この最大せん断力は、交差角度に依存せずほぼ一定値をとる。これは、低KC数の場合、振動流の加速運動により底面せん断力の絶対値は高KC数の場合に比べて非常に大きいことが影響している。一方、高KC数の場合、交差角度の増加につれて $\tau_{\max}$ は減少する。これは、高KC数の場合の最大せん断力は馬蹄形渦および後流渦の運動に依存し、その渦強度は交差角度の増加に伴い低下するためである。また、交差角度の増加に伴うせん断力の減少割合は流速比 V_r に比例する。

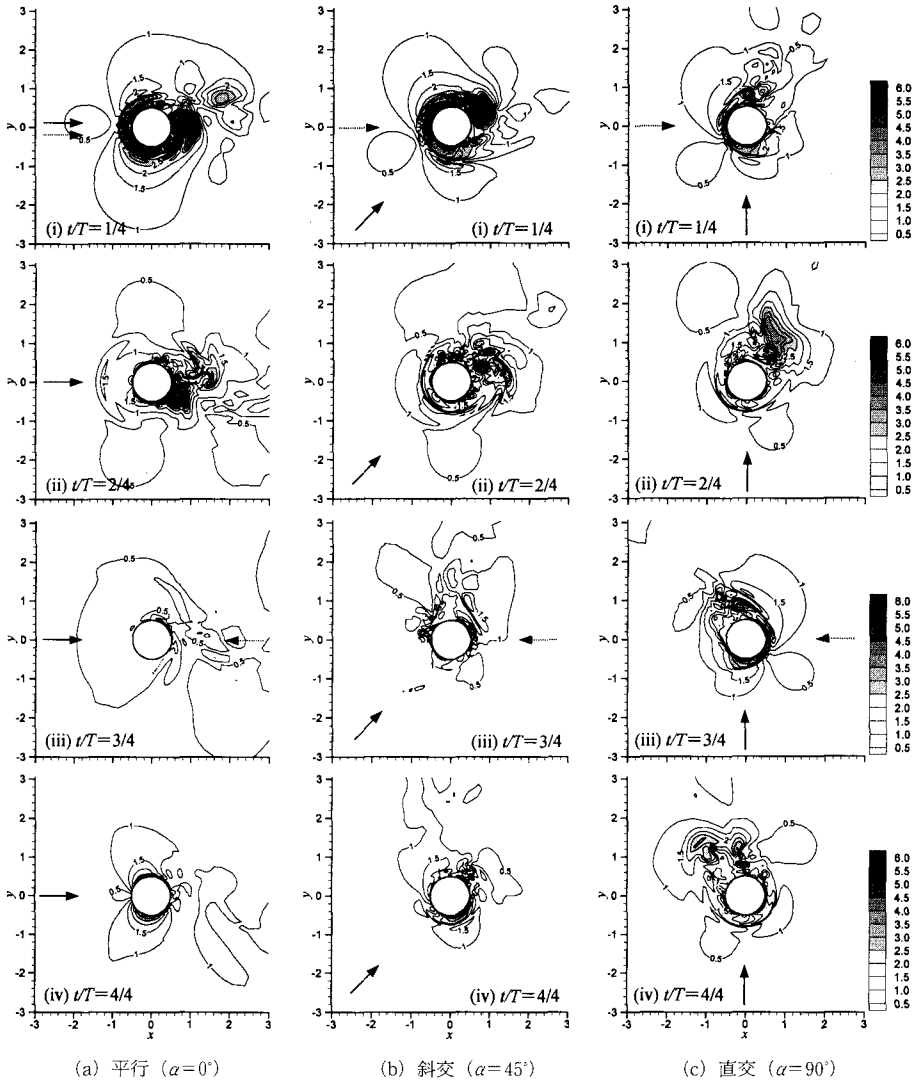


図-3 底面せん断力の時間変化 ($KC=10$, $V_r=1$)

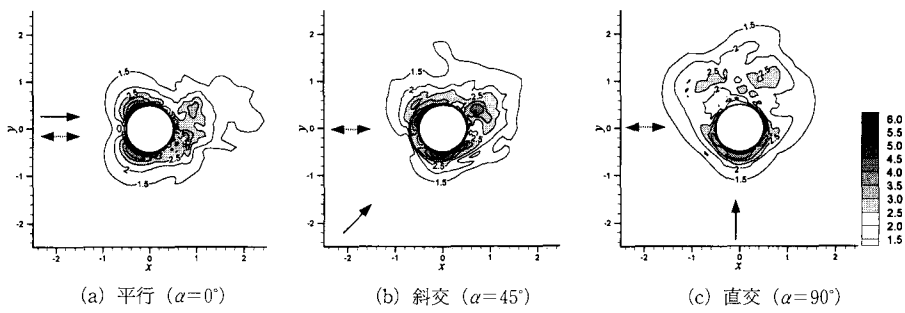
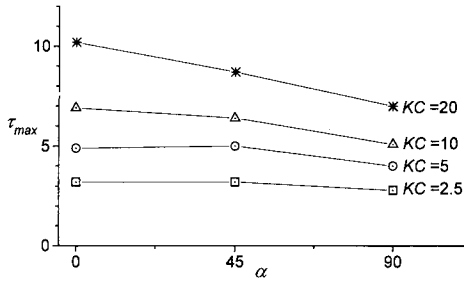
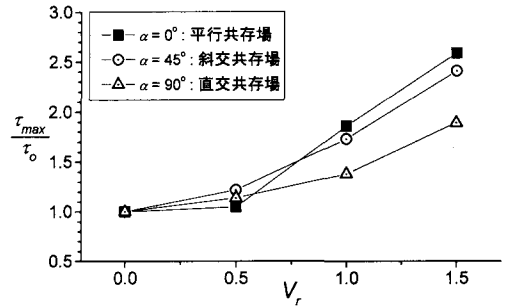


図-4 平均底面せん断力分布 ($KC=10$, $V_r=1$)

図-5 底面せん断力の最大値 ($V_r=1$)図-6 底面せん断力の増幅率 ($KC=10$)

次に、流速比に対する底面せん断力の変化を図-6に示す。同図では、最大底面せん断力 τ_{max} を振動流単独の場合の最大せん断力 τ_0 で基準化して求めた増幅率を用いた。ここで、 $KC=10$ である。振動流単独の場合 ($V_r=0$) から流速比が増加するにつれて増幅率は上昇する。今回の計算範囲においては、平行共存場の上昇率が最も高い。ただし、流速比が比較的小さい $V_r=0.5$ においては、最も低くなる。その増幅率は約1であり、相対的に小さい定常流が振動流に平行に作用する場合、最大底面せん断力は変化しないことを示す。斜交および直交の場合は、約1.1~1.2倍に増加する。振動流と同程度の定常流が共存する場合は ($V_r=1$)、増幅率は1.3~1.8程度に増加する。また、流速比に対する増幅率の増加傾向は、高 KC 数の場合に顕著であり、低 KC 数で直交の場合の増幅率の変化が最も小さいことも確認された。

4. 結 論

Navier-Stokes 方程式を移動一般曲線座標系に変換した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直立円柱底面付近の3次元流体場に関する数値解析を行った。馬蹄形渦や後流渦の発生・発達過程および底面せん断力に対する交差角度、 KC 数および流速比 V_r の影響について検討した。本解析条件 Stokes 数 $\beta=775$ 、交差角度 $\alpha \leq 90^\circ$ 、 $KC \leq 20$ 、 $V_r \leq 1.5$ の下で得られた結果を以下にまとめる。

(1) 平行共存場の場合、半周期おきに大規模な馬蹄形渦が発生・消滅するのに対して、直交共存場の場合、馬蹄形渦は定常流に対する円柱の上流側面を左右に移動しながら存続する。馬蹄形渦の存在時間は交差角度の増加につれて長くなるものの、渦径や剥離点距離は減少する。後流渦については、放出される渦の数は増加するものの、個々の渦の強度は低下する傾向にある。

(2) 交差角度に関わらず底面せん断力は定常流のベクトルに対してほぼ対称に分布する。平行や斜交共存場

の場合、円柱前面から側面にかけて、馬蹄形渦および縮流に起因する底面せん断力が集中し、直交の場合は、定常流を受ける円柱側面でせん断力は一様に分布する。後流域では、直交共存場の底面せん断力が広範囲で増加する。

(3) 底面せん断力の最大値は、低 KC 数域では、交差角度にあまり依存しないが、高 KC 数域では、交差角度の増加につれて減少する。振動流に対する共存場の底面せん断力の増幅率は流速比とともに上昇し、平行共存場の上昇率が最も高い。振動流と同程度の定常流が共存する場合の増幅率は1.3~1.8程度である。

謝辞：本論文を作成するにあたり、狩谷樹生氏（和歌山県）および増田悦子氏（吹田市）の多大な助力を得た。また、本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金（課題番号：15560442）の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 樺田真也・由比政年・石田 啓 (2002): 共存流による直立円柱底面付近の3次元流体場の変動特性, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 706-710.
- Jeong, J. and F. Hussain (1995): On the identification of a vortex, J. Fluid Mech., Vol. 285, pp. 69-94.
- Niedoroda, A. W. and C. Dalton (1982): A review of the fluid mechanics of ocean scour, Ocean Engng., Vol. 9, No. 2, pp. 159-170.
- Sumer, B. M., N. Christiansen and J. Fredsøe (1997): The horseshoe vortex and vortex shedding around a vertical wall-mounted cylinder exposed to waves, J. Fluid Mech., Vol. 332, pp. 41-70.
- Sumer, B. M. and J. Fredsøe (2002): The mechanics of scour in the marine environment, World Scientific Co. Pte. Ltd. p. 536.
- Visbal, M. R. (1991): Structure of laminar juncture flows, AIAA Journal, Vol. 29, No. 8, pp. 1273-1282.
- Yuhi, M., H. Ishida and S. Umeda (1999): A numerical study of sinusoidal oscillatory flows around a vertical wall-mounted cylinder, CEJ, Vol. 41, No. 3 & 4, pp. 225-246.