

波動場に設置された円柱周りの 床面せん断力の評価

SHEAR FORCES ACTING ON A FLOOR AROUND A VERTICAL CIRCULAR CYLINDER IN WAVES

林建二郎¹・齋藤 良²

Kenjirou HAYASHI and Ryou SAITOU

¹正会員 Ph.D 防衛大学校建設環境工学科准教授 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

²学生会員 防衛大学校大学院理工学研究科前期課程 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

The direct measurements of bed shear stress around a vertical circular cylinder in waves were carried out in a wave flume by using a load cell with small capacity. The wave pressure acting on a bed of wave flume were also measured. The velocities of wave flow just near to the load cell or pressures transducer installed in the bed of wave flume were also measured simultaneously by using two component Laser Doppler Anemometer. The amplification of bed shear stress around a vertical circular cylinder due to the vortex shedding occurring at the lee side of the cylinder were evaluated quantitatively.

Key Words : *Bed shear stress, vertical circular cylinder, load cell vertical, vortex shedding pressures transducer, Laser Doppler 3, amplification of bed shear stress.*

1. はじめに

柱状な海洋・海岸構造物の基礎周りに発達する局所洗掘現象の解明はその防止策の検討において重要である¹⁾。同様な局所洗掘は、海岸域に生育するマングローブ林の樹幹やアマモ茎、および河口域に生育しているヨシ等の抽水植物の茎周りにおいても生じている。これら水辺植生の波・流れに対する底質の安定性は、その生育・保持において重要である。林ら²⁾は、分力計を用いて沈水植物(コアマモ、アマモ)に作用する波力の直接計測を行い、植生が波力によって引き抜かれる可能性は非常に少ないことを明らかにしている。

これら構造物や植生周りの局所洗掘現象を規定する重要な要素の一つとして、構造物や植生周りの床面に作用する底面せん断力 τ が挙げられる。開水路流中に単独円柱(直円柱)を鉛直設置した場合、直円柱周りの床面に発生する馬蹄形渦により、円柱前面には非擾乱場(円柱の影響を受けていない開水路底面)の1.3~1.5倍程度の底面せん断力 τ が発生することが実験等によって確かめられている^{3),4)}。また、中川・鈴木⁵⁾は、開水路粗面上に立てられた円柱橋脚周辺の底面せん断力分布においては場所的に著しい変化が見られる結果を報告している。

波動場に単独円柱を鉛直設置(直円注)した場合

にも、直円柱周りに発達する馬蹄形渦や後流渦により底面せん断力 τ の増加が生じると考えられる。Sumerら⁶⁾は、波動場に置かれた直円柱周りの底面せん断力計測を壁面接着形熱膜センサー(DANTEC製; 55R46)を用いて行なった。結果の一例として、 KC 数($=U_{bmax} \times D/T$, U_{bmax} :底面近傍での波の水平水粒子速度の最大値, D :円柱径, T :波の周期)が10の場合、円柱極近傍の滑面においては非擾乱場の2倍程度の底面せん断力 τ が発生することが報告されている⁶⁾。

石田・楳田ら⁷⁾は、振動流中に設置された直円柱周辺の流体場に対する3次元数値解析をおこない、滑面境界層内の速度勾配より円柱周辺の滑面に作用する底面せん断力 τ を評価した。結果の一例として、 KC 数=10の場合、円柱極近傍においては非擾乱場の6倍程度の底面せん断力 τ が発生すること、および円柱からの放出渦周辺で形成される鉛直方向流れが底面せん断力 τ の増加に大きな影響を及ぼしていることを明らかにしている。

波動境界層内の精度高い流速分布計測を行いその速度勾配より底面せん断力の評価が行われている(例えば、山路・田中ら⁸⁾)。しかし、複雑な場所的・時間的変動を伴う円柱後流渦等の影響を受けている波動境界層内の精度高い流速分布の位相変化計測は困難と思われる。

本研究は、波・流れに対する構造物周りの局所洗掘特性および水辺植生底質の安定性を調べることを目的として、波動場に鉛直設置された円柱周りの滑面に作用する底面せん断応力の直接計測を、片持ち梁形式のせん断力計を用いて試みたものである。

2. 実験装置および方法

(1) 実験装置

実験には、図-1に示す長さ40m、幅0.8m、高さ1mの吸収式造波装置付き2次元造波水槽を用いた。本造波水槽床面下部には回流用管路とポンプが取り付けられており、水路内に開水路流れを発生できる。

柱状海洋構造物や植生の樹幹・茎と見立てた単独円柱（外径 $D=3\text{cm}$ 、長さ $L=1\text{m}$ ）を鉛直設置（直円柱）し、直円柱周りの流れ構造を、2次元レーザー流速計測（DANTEC製）および流れの可視化を用いて調べた。合わせて、後流渦出現による、直円柱周辺床面上の底面せん断応力と変動圧力分布特性を、せん断力計（三計エンジニアリング製、容量 100mgf/cm^2 (0.00098N/cm^2)、固有振動数約 85Hz)と小型圧力計（三計エンジニアリング製、容量 100gf/cm^2 (9800Pa)、固有振動数 2kHz)を用いて計測した。圧力計の受圧孔径は 2mm である。波の水位変化 η を計測するために容量線式波高計を円柱の真横 30cm に設置した。

(2) せん断力計

アクリル板製の滑面床に設置したせん断力計の概略を図-2に示す。本せん断力計は、直径 10mm 、厚さ 0.09mm のステンレス製円盤（shear plate）の中心を幅 2.4mm 、厚さ 1mm 、長さ 22mm のリン青銅製の片持梁支柱に取り付けたものである。Shear plate上面に作用する波進行方向の底面せん断力による曲げモーメントを、支柱下部に貼られた半導体ゲージで測定するものである。この曲げモーメントをゲージとshear plateの距離で割ればshear plateに作用する底面せん断力が算定できる。この底面せん断力をshear plateの表面積で割り、壁面せん断力応力 τ_b を求めた。

この種のせん断力計においては、a)波進行方向の圧力勾配により、shear plate両端厚部に圧力差が生じ力が作用する、b) shear plateの下方の間隙内の流体が運動することにより、shear plateや支柱に流体力が作用すること等が計測誤差として懸念されている^{9)~12)}。また、底面せん断応力が小さいため、ゲージ率確保の面から広面積のshear plateが必要とされる。本せん断力計においては、圧力分布の影響を少なくするために、直径 10mm 、厚さ 0.09mm の薄く小径のshear plateを使用している。ゲージ率確保のため半導体ゲージを使用している。shear plateの側部や下部に付着する小さな異物や空気を排泄するためにせん断力計の間隙部側壁には内径約 1mm の排泄

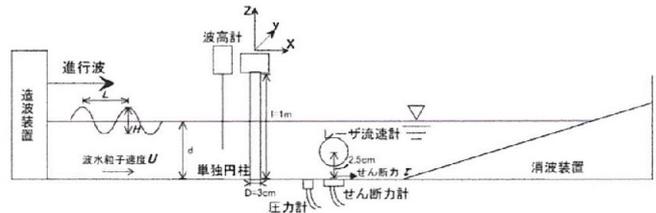


図-1 実験装置概要図

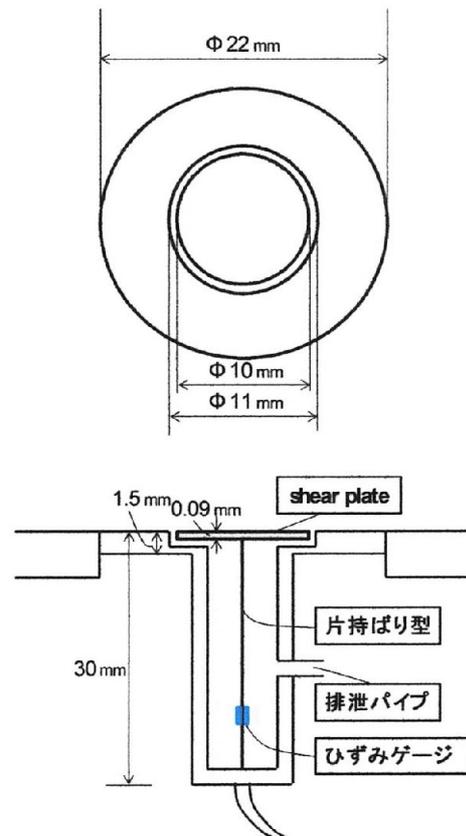


図-2 せん断力計の概略図

パイプを取り付けている。

片持梁形式である本せん断力計のshear plateに圧力が不均一な場合、支柱のゲージ部には新たな曲げモーメントが加わる。この影響を除去するためには、a)高さの異なる支柱の2点にゲージを貼る方法、b)支柱を平行に2本とし、それぞれの支柱にゲージを貼る方法等が考えられるが、現在試作検討中でありまだ良好な出力信号は得られていない。

本せん断力計の精度確認のために、円柱を取り除いた本水槽内に、回流装置を用いて一方向流を発生させ、開水路流れにおける底面せん断力応力計測を行った。また、円柱が無い状態での規則波動場における底面せん断力応力計測も行った。

(3) 実験条件

水槽底底部に設けた砂層ボックス（長さ=2.5m，幅=0.78m，深さ=0.3m）内に豊浦産標準砂（中央粒径 $d_{50}=0.19\text{mm}$ ，比重=2.6）を敷き詰めた。この水平床に外径 $D=3\text{cm}$ のアクリル製円柱を鉛直設置し，円柱周りに生じる局所洗掘特性を各種波浪条件下（水深 $d=50\text{cm}$ ， $T=1\sim 4\text{s}$ ， $H=2\sim 26\text{cm}$ ）で調べた。

円柱周りに非対称渦が周期的に安定した状態で長時間に亘って出現し逆円錐形洗掘^{(13), (14)}が生じる，周期 $T=2\text{s}$ ，波高 $H=9\text{cm}$ ，水深 $d=50\text{cm}$ の規則波を本実験波に選定した。

3. 結果および考察

(1) 開水路滑面の底面せん断力応力計測

使用したせん断力計の精度確認のため，せん断力計の位置における水路方向流速 u ，およびレイノルズ応力 $(-\rho u'v')$ の水深方向分布を二次元レーザー流速計を用いて計測した。水路方向流速成分 u の時間平均値 U の断面平均を代表流速 U_m とした。水深は $d\approx 15\text{cm}$ に固定した。水温は約 22°C であった。

せん断力計で計測した円柱群が無い水路床面の時間平均せん断応力 τ_{mean} の，代表流速 U_m に対する変化特性を図-3に示す。

$U_m=40\text{cm/s}$ の場合における u の時間平均値 u_{mean} の鉛直(z 軸)方向分布を，図-4に示す。 z は壁面からの距離である。摩擦速度 $U_*=(\tau_{mean}/\rho)^{0.5}=1.77\text{cm/s}$ の算定には， $U_m=40\text{cm/s}$ の場合のせん断力計による計測値 $\tau_{mean}=3.2\text{mgf/cm}^2$ を用いた（図-3参照）。この摩擦速度は $U_*=1.77\text{cm/s}$ である。図中には(1)式で示される対数分布式を実線で示している。

$$u_{mean}/U_* = 5.751 \log(U_* z/\nu) + 5.5 \quad (1)$$

実測値 u の流速分布と，(1)式で示される対数分布則式との一致は良好である。従って，水路床面のせん断応力は $\tau_u=3.2\text{mgf/cm}^2$ と推定できる。

$U_m=23\text{cm/s}$ ，および $U_m=50\text{cm/s}$ の場合においても，実測値 u の流速分布と，(1)式で示される対数分布則式との一致は良好であった。

$U_m=40\text{cm/s}$ の場合におけるレイノルズ応力 $(-\rho u'v')$ の鉛直(z 軸)方向分布を，図-5に示す。床面近傍におけるレイノルズ応力 $(-\rho u'v')$ の大きさは $3\sim 3.3\text{mgf/cm}^2$ であり， $U_m=40\text{cm/s}$ の場合のせん断力計計測値（時間平均値） $\tau_{mean}=3.2\text{mgf/cm}^2$ との一致は良好である。以上の結果，本せん断力計で開水路滑面床のせん断応力計測は可能と判断できる。

(2) 波動場滑面の底面せん断力計測

本せん断力計を用いて波動場滑面の底面せん断力計測を行った。使用した規則波の範囲は，静水深 $d=50\text{cm}$ ，周期 $T=2, 3, 4$ 秒，波高 $H=2\sim 24\text{cm}$ である。

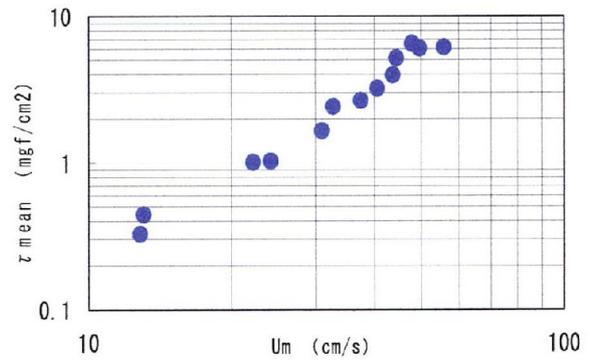


図-3 τ_{mean} と U_m の関係（開水路，水深 $d=15\text{cm}$ ）

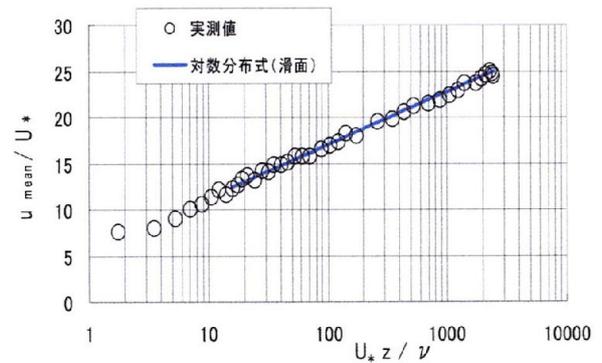


図-4 開水路流速分布（ $d=15\text{cm}$ ， $U_m=40\text{cm/s}$ ，滑面）

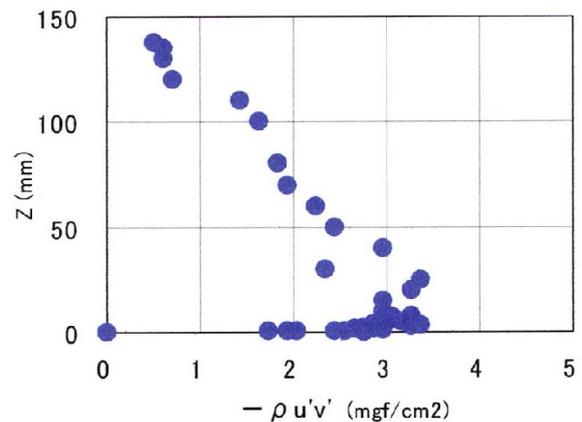


図-5 レイノルズ応力分布（ $d=15\text{cm}$ ， $U_m=40\text{cm/s}$ ，滑面）

$T=2\text{s}$ ， $H=10\text{cm}$ ， $d=50\text{cm}$ の波におけるせん断応力 τ ，その真上 $Z=5\text{mm}$ での水粒子の水平速度成分（=底面流速） u_b ，ならびに水位変化 η の時間変化を図-6に示す。計測されたせん断応力 τ は，波形 η および u_b に対して，位相が約 $\pi/4$ だけ進んでいること^{(15), (16)}が確認できる。

底面摩擦係数 $f_w = \tau_{max} / (0.5 * \rho U_{bmax}^2)$ の軌道振幅レイノルズ数 $R_a = 0.5 * \rho a_m / \nu$ に対する変化特性を図-7に示す。 τ_{max} は底面せん断応力の最大値， U_{bmax} は底面近傍の水粒子の水平速度成分の最大値，

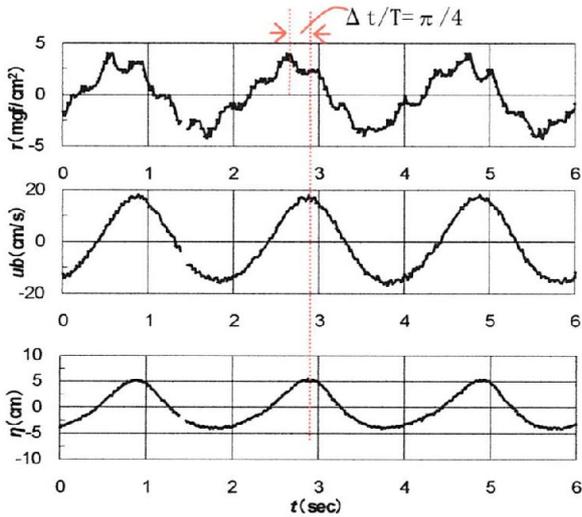


図-6 せん断力 τ , 水粒子流速 u_b , 波高 η の時間変化
($T=2s$, $H=10cm$, $d=50cm$)

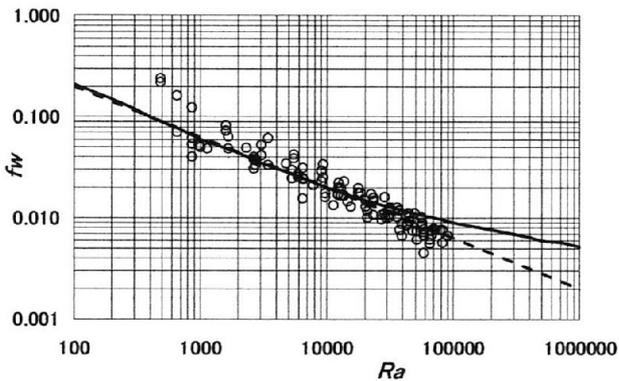


図-7 f_w の軌道振幅レイノルズ数 R_a に対する変化特性

a_m は底面での水粒子軌道半径である。図中には Johnson の結果 (層流+滑面乱流境界層)¹⁷⁾ を実線で、層流境界層に対する理論式 $f_w = 2 / (R_a)^{1/2}$ を点線で記入している。本実験で得られた τ_{max} から算定した f_w と、これら値との一致度は概ね良好である。

(3) 底面近傍における直円柱周りの流れ特性

周期 $T=2s$, 波高 $H=9cm$, 水深 $d=50cm$ の規則波中に設置した直円柱からの後流渦出現状況観察を、水表面に発砲スチロール製の微細粉末を散布しビデオ撮影により行った。円柱周りに非対称渦が周期的に安定した状態で長時間に亘って出現・形成されている流況¹⁸⁾を確認した。

水表面で観察された円柱後流渦挙動の模式図を図-8 示す。波の進行方向 (= 岸方向) を X 軸の正, その横断方向 (上方向) を Y 軸の正とする。水粒子の水平速度 u が岸方向となる位相時には, ①の渦強度が強い渦が $X > 0, Y > 0$ の領域に最初形成され, その後, $X > 0, Y > 0$ の領域に②の渦強度が弱い渦が出現・形成されている。 u が沖方向となる位相時には, ③の強い渦が $X < 0, Y > 0$ の領域に先ず形成され, そ

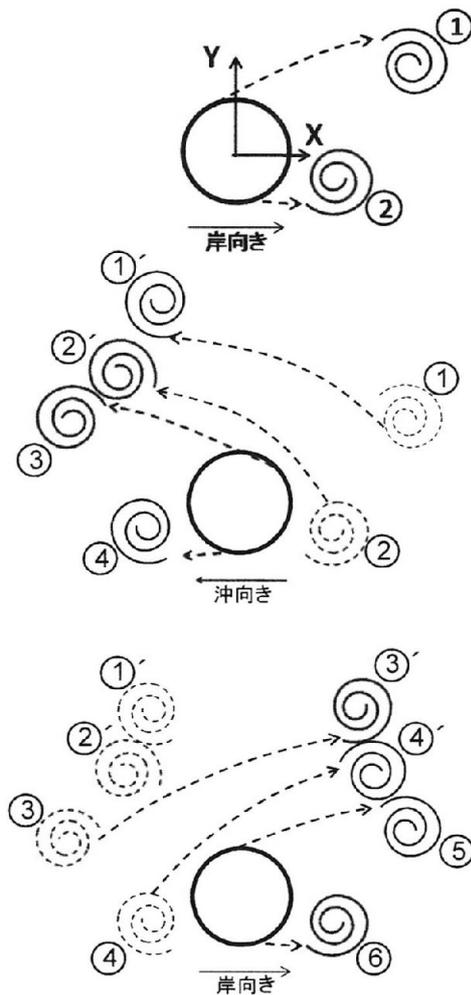


図-8 円柱後流渦挙動の模式図
($X > 0$, 岸方向)

の後 $X < 0, Y < 0$ の領域に弱い④の渦が出現・形成されている。この半周期前に出現・形成された①と②の渦は, 渦列となり渦強度を減衰させながら円柱上方 ($Y > 0$) を通過し, 図中の①', ②' の場所に移動している。その後, u が岸方向となる位相時には, ⑤の強い渦が $X < 0, Y > 0$ の領域に先ず形成され, その後 $X < 0, Y < 0$ の領域に弱い⑥の渦が, 渦①, ②の場合と同様に出現・形成されている。渦③, ④は③', ④' の場所に移動している。半周期前の渦列①', ②' は, Y 軸の正方向 (上方向) に移動し, トランスバース渦列¹⁹⁾を形成し, その後減衰・消滅している。静水表面位置での KC 数 ($= U_{cmax} \times D / T, U_{cmax}$: 静水表面での水粒子速度 u の最大値, D : 円柱径, T : 波の周期) は約15である。

次に, アクリル製の床面上に, 豊浦標準砂 (中央粒径 $d_{50}=0.19mm$, 比重=2.6) を厚さ2mm程度で散布し, 円柱後流渦による砂移動を観察した。その一例を写真-1に示す。円柱設置時の初期には, $X > 0, Y > 0$ の領域に強い渦強度の渦列が形成されるため, 広

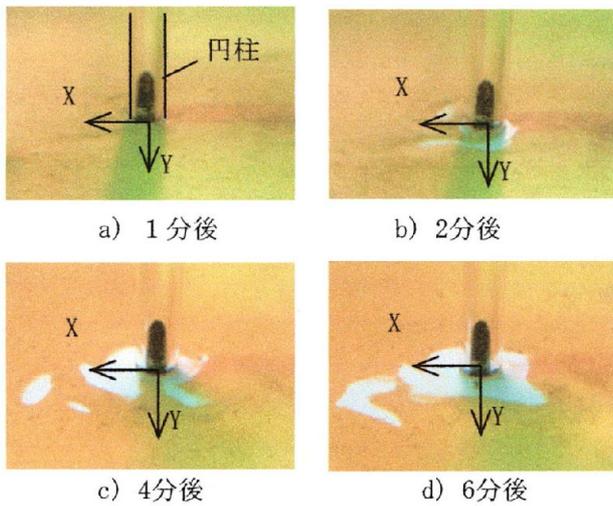


写真-1 円柱後流渦による砂移動
($X > 0$ 、岸方向)

い範囲で砂の移動・洗掘現象が生じる。その後は、
先ず円柱周辺の砂が移動・排除され底面が露出し
(写真-1 b)参照)，その範囲は時間経過に伴い広
がっている。この過程において、円柱から離れた場
所にもパッチ状の露出面が生じている(写真-1 c)と
d)参照)。これは、 $X > 0$ 、 $Y > 0$ の領域に形成される
強い渦強度の渦列が、水粒子速度 u の岸方向から沖
方向への反転時にこの位置に停滞するためである。

(4) 円柱周りの底面せん断力、圧力分布特性

水深 $d=50\text{cm}$ 、 $T=2\text{sec}$ 、 $H=9\text{cm}$ の規則波中に置かれ
た直円柱の水表面において観察された円柱後流渦挙
動の模式図および、底面近傍における渦の発生状況
を図-8と写真-1にそれぞれ示した。静水表面位置で
の KC 数は約15、底面近傍での KC 数($=U_{bmax} \times D/T$)
は12であり、波の1周期間に2回の交番渦が長周期間
安定して出現している場合¹⁸⁾の一例である。

この波浪条件下における直円柱周りの $X/D=1.2$ 、
 $Y/D=1$ の位置における底面せん断力応力 τ 、底面境
界層外縁($Z/D=0.83$ 、 Z :底面から上方向距離)の波
の水平粒子速度 u_b 、ならびに水位変化 η の時間変化
の一例を図-9に示す。比較として、図中には円柱
が無い場合の結果も示している。円柱が無い場合、
図-6の場合と同様に τ は、 u_b に対して位相が約 $\pi/4$
進んでいることが確認できる。直円柱を設置した場
合も、同様にせん断力 τ は u_b に対して位相が約 $\pi/4$
進んでいる。合わせて、円柱からの強い後流渦が通
過する位相では、 u_b の急激な変動(=増加)により τ
も大きく急変(=急増)していることも分かる。

$x/D=1$ 、 $y/D=1$ の位置における底面せん断応力 τ 、
波動境界層外縁($z/D=0.17$)の波の水粒子速度 u 、 v 、
床面での波の動圧 p_b 、ならびに水位変化 η の時間変
化例を図-10に示す。強い渦強度の円柱後流渦の出
現通過時には、 u は大きく増加し高周波変動成分を
有する v の下方向流速が生じている。急激な流速増

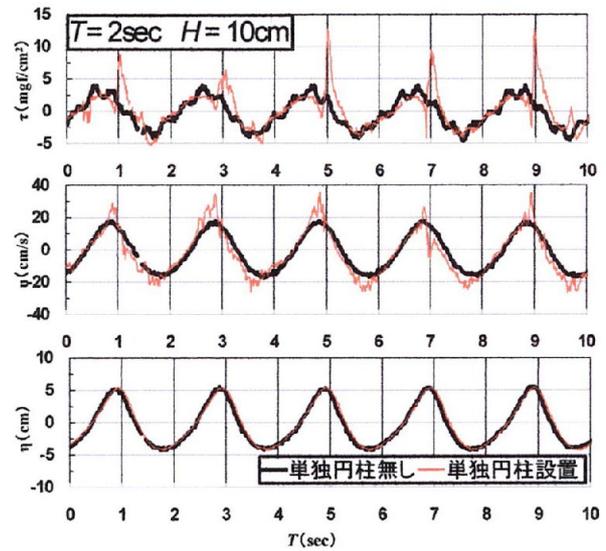


図-9 せん断力 τ 、波の水粒子速度 u 、波の水位変動 η
の時間変化 ($X/D=1.2$ 、 $Y/D=1$ 、 $Z/D=0.83$)

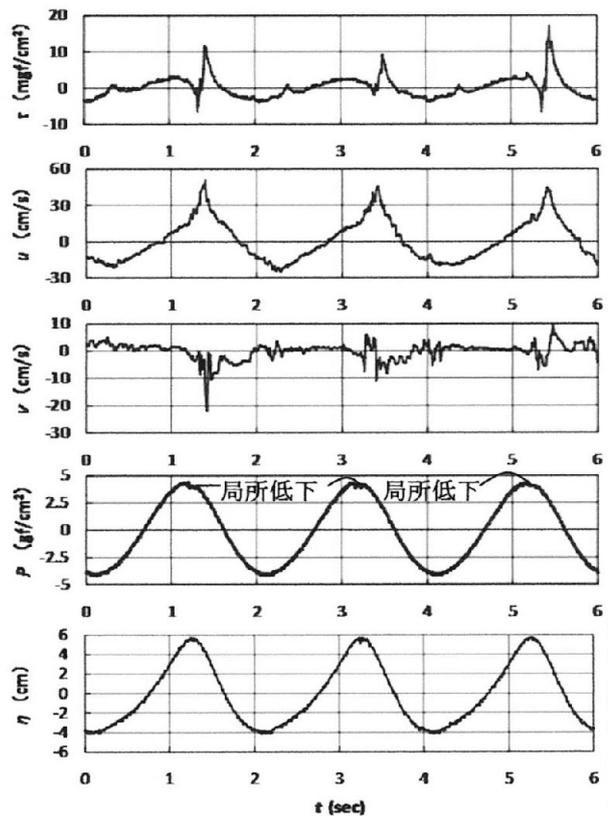


図-10 せん断応力 τ 、水粒子速度 u と v 、波の動圧 p 、
水位変動 η の時間変化 ($X/D=1$ 、 $Y/D=1$ 、 $Z/D=0.17$)

加に伴い、動圧 p の局所低下が生じている。この円
柱後流渦により、円柱周辺の床面近傍に強い下降流
が発生する現象は、振動流中に設置された直円柱周
辺の流体場に対する3次元数値解析結果においても
指摘されている⁷⁾。

円柱周辺の床面に作用する底面せん断応力 τ の空
間分布特性を図-11に示す。図中に示す記号は、底
面せん断応力の増加率($=\tau_{max}/\tau_{0max}$)の範囲を示す。

τ_{max} は円柱周りの床面に作用する τ の片幅最大振幅値, τ_{0max} は円柱後流渦の影響を受けない床面に作用する τ の片幅最大振幅値である. 強い渦強度を有する円柱後流渦が出現通過する領域や停滞する領域では, 底面せん断応力 τ が大きく増幅されていることが分かる (図-8, 写真-1 参照).

円柱周辺の床面に作用する波の動圧 p の空間分布特性を図-12 に示す. 図中に示す●印は, 波の動圧 p の局所低下が明確に生じた領域を示す. ○印は, 動圧 p の局所低下が現れなかった領域を示す. τ の場合と同様に, 大きな渦強度を有する円柱後流渦が出現通過する領域では, 圧力 p の局所低下が生じていることが分かる (図-8, 写真-1 参照).

4. おわりに

片持ち梁形式の小型せん断力計を用い, 波動場に設置された小口径直立円柱周りの床面 (滑面) に作用する底面せん断応力の空間分布特性を明らかにした. 本せん断力計の shear plate に砂粗度を添付することにより, 波動場の粗面底面に作用するせん断応力の評価も可能と期待できる.

参考文献

- 1) 榎木 亨監修: 環境圏の新しい海岸工学, pp. 346-356, フジテクノシステム, 1999.
- 2) 林建二郎, 今野正則, 服部健一: 藻場や水辺植生・樹林帯の消波特性評価, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 685-690, 2005.
- 3) 吉川秀夫, 福岡捷二, 岩間 汎, 曾小川久貴: 橋脚の洗掘ならびにその防止に関する考察, 土木学会論文報告集, 第 194 号, pp. 83-90, 1971.
- 4) 中川博次, 鈴木幸一: 橋脚による局所洗掘深の予測に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 17 号 B, pp. 725-751, 1974.
- 5) 中川博次, 鈴木幸一: 円柱橋脚周辺の局所洗掘に関する実験的研究, 土木学会関西支部年次学術講演会後援概要, II-46, 1971.
- 6) 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. pp.41-70, 1997.
- 7) 石田 啓, 榎田真也, 由比正年: 振動流中に設置された直立円柱周辺の馬蹄形渦および後流渦の特性, 土木学会論文集, No.705/II-59, pp. 115-128, 2002.
- 8) 山路弘人, 田中 仁, Suntouo, 田中 創: 孤立波を模擬する管内振動流発生装置の提案とその作動特性の検討, 応用力学論文集, Vol. 11, 2008.
- 9) Eagleson, P. S.: Laminar Damping of Oscillatory Waves, Proc. of A.S.C.E., Vol. 88, No.HY3, 1962
- 10) 岩垣雄一, 土屋義人, 坂井順行: 海底摩擦による波高減衰の基礎的研究(2)-海底摩擦力の測定について-第 11 回海岸工学講演会講演集, pp.62-68, 1964.
- 11) 松梨順三郎, 川谷 健: 波による海底の変形に関する基礎的研究-海底摩擦力の測定について-, 第 12 回海岸工学講演会講演集, pp.29-30, 1965.
- 12) 榎木 亨, 岩田好一郎, 松本 昇: 砕波後の波の海底摩擦に関する研究-砕波の内部機構に関する基礎的研究 第 4 報-, 第 21 回海岸工学講演会講演集, pp.33-38, 1974.

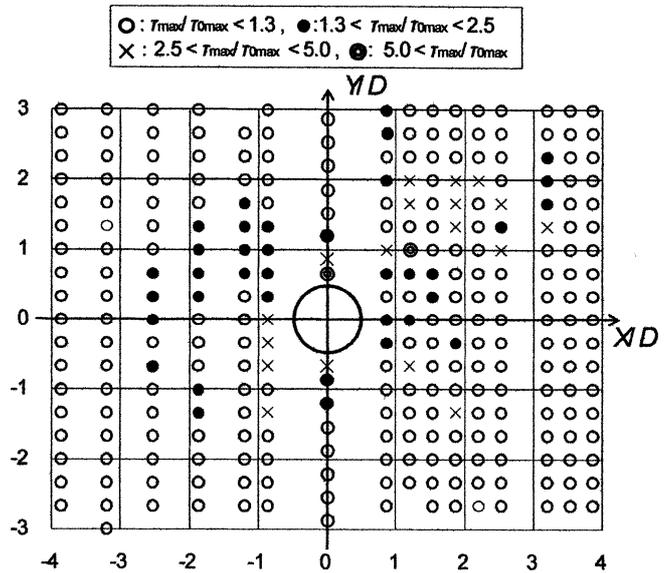


図-11 底面(滑面)に作用するせん断応力 τ の空間分布 ($d=50\text{cm}$, $T=2\text{sec}$, $H=9\text{cm}$, 円柱径 $D=3\text{cm}$)

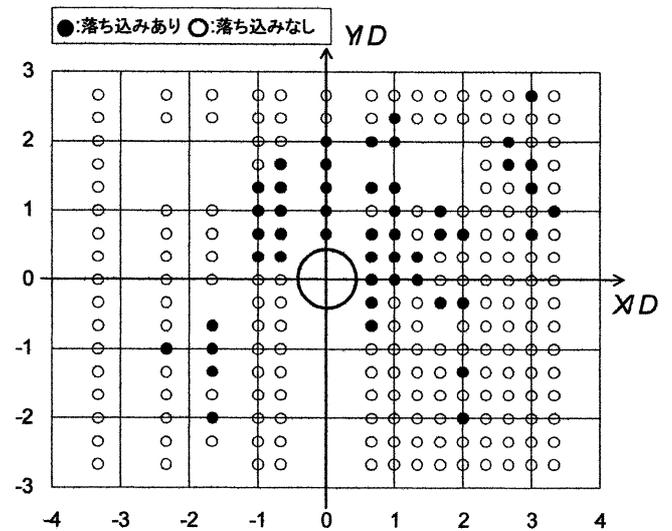


図-12 床面(滑面)に作用する波の動圧 p の空間分布 ($d=50\text{cm}$, $T=2\text{sec}$, $H=9\text{cm}$, 円柱径 $D=3\text{cm}$)

- 13) 水口 優, 小島匡人, 小宮山正二, 佐藤 忍: 波動による小口径円柱まわりの局所洗掘に関する実験的研究, 第 32 回海岸工学講演会講演集, pp.430-434, 1985.
- 14) 西沢 勝, 澤本正樹: 波による円柱まわりの局所洗掘, 第 36 回海岸工学講演会講演集, pp.414-418, 1989.
- 15) 岩垣雄一, 榎木 亨: 海岸工学, pp. 84, 共立出版会, 1979.
- 16) 堀川 清: 「新編」海岸工学, pp. 257, 東京大学出版会, 1991.
- 17) Jonsson, I. G.: Wave boundary layers and friction factors, Proc. 10th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp.127-148, 1966.
- 18) Hayashi, K., and Takenouchi, T.: Unsteady flow around a vertical circular cylinder in a wave, Coastal Engineering Conference CERC/ASCE, pp.914-928, 1988.
- 19) Williamson, C. H. K.: Sinusoidal flow relative to circular cylinders, J. Fluid Mech., Vol.286, pp.117-135, 1985.