

円柱周辺流の大規模乱れに与える杭の効果
(Effect of Piles on Large Scale Turbulence around a Bridge Pier)

株式会社 白 石 正 員 藤田宏一
" " 小田章二
パシフィック・C " 松井 弘
宇都宮大学工学部 " 須賀亮三

1. はじめに

橋脚周辺の洗掘深予測や橋脚の受ける流体力の計測など、流れの中の構造物に関係する研究は、主に現象を支配する要素を取り上げて実験データをもとに次元解析を行なう方法がとられるなど数多く行なわれている。これは、河川構造物周辺の流れは、河床と自由水面の2つの境界を持ち大規模な渦を含んだ三次元的な流れであるために、橋脚周辺の流れには不明な点が多い事によるものと考えられる。構造物周辺の流れを扱った研究は、空気流での研究が多く境界を持つ流れを扱った研究は数少ない。

本研究は、平坦固定床上に自由水面を持つ流れの場に円柱が存在するという条件下で円柱周辺の流れの可視化を行い、円柱前面に発生する馬蹄型渦の特性（馬蹄型渦発生に係わる主流の流れの範囲、馬蹄型渦自身の範囲、強さ、乱れ）について調べた。更に、円柱前面に杭を設置した場合の馬蹄型渦及びその周辺流の特性変化について実験をもとに考察を行った。

2. 従来の研究

構造物周りの流れを扱った研究では、詳細な実験を基に円柱周りの渦の発生機構やその特性を考察した中川・鈴木¹⁾、宇民²⁾の研究が注目される。次にその研究概要をまとめる。

表1 従来の研究

研究者	観測位置	研究 内 容 と 主 な 結 果
中川・鈴木	円柱前面	○円柱の対称面上の水路底面付近で馬蹄型渦内の流速変化を調べ、その最大流速は円柱前面より $l=0.3 \cdot D$ の位置で発生する。○実験範囲では、対称面の底面内のはくり域の限界点は変化せず円柱前面 $l=0.65 \cdot D$ 、また馬蹄型渦の円柱前面の高さは水面底面より $Z=0.60 \cdot D$ である。ここに、 D :円柱直径、 l :円柱前面からの距離 ($h/D=0.43 \sim 1.43$, $Re=uh/\nu=2.6 \times 10^4 \sim 5.9 \times 10^6$)
宇 民	円柱前面	○平坦固定床で層流($Re=2 \sim 5$)・乱流($Re=2.4 \times 10^4$)で流れ可視化実験を行った。○馬蹄型渦は、主流のうち対称軸近く($-D/10 < y < D/10$)からの流れにより発生する。○馬蹄型渦が、主流を排除する範囲は $(r_0 - r_0)/H = \alpha_1 (r_0/H)^{m_1}$ で与えられる。ここに、 r_0 :馬蹄型渦の半径、 r_0 :円柱半径、 α_1 , m_1 : $Re=uh/\nu$ で決まる定数 ($h/D=0.1 \sim 14$, $Re=uh/\nu=1.5 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^6$, $Fr=0.1 \sim 0.7$)
	円柱後方	○円柱位置において、流れの対称面から橋脚の直径にほぼ等しい距離範囲の流れは円柱の後流に巻込まれる。流下型渦の渦軸付近に強い吸込みが存在する。

上記の研究では、流れの平均的な強さによる円柱周辺流の特性に関して詳細に調べられている。また、円柱周辺の流れの変動については、八木田³⁾、有沢⁴⁾による空気流での研究が行なわれている。

3. 研究目的及び実験概要

本研究では、主流の乱れに起因すると考えられる円柱周辺流の乱れ特性を取扱い、円柱前面に杭を数本置いた場合に円柱周辺に発生する馬蹄型渦、下降流の変化及びその乱れに関して実験を行い、宇民、中川・鈴木らの研究結果を参考にしつつ、円柱周辺に発生する三次元流と大規模な渦について考察を行った。

実験水路は、長さ25^m、幅 1.2^m、深さ 0.8^mの鋼製の二次元水路で、水路底面の一部を観測用にガラス張りにしてある。実験は、その方法、目的により次表に示す三項目より成る。

表2 実験目的及び実験方法

Run	実験目的	実験方法	実験条件	模式図
A	馬蹄型渦に巻き込まれる流れの範囲及びその頻度の分布を円柱前面に杭を設置した場合と杭がない(円柱単独)場合の比較を行なう。	トレーサーは、mono C ₆ H ₆ - benzenとnormal-hexsanの混合液を比重1に調整・着色したものであり、この混合液は水に不溶のために水中では、約1~2mmの粒状となる。これを細管により円柱の上流点より、位置を横断方向、水深方向に変化させながら流し、馬蹄型渦に巻き込まれる状況を水路底面及び側面よりビデオ撮影を行った。	(円柱直径) $D = 9.0\text{cm}$ (杭直径) $d = 1.2\text{cm}$ $h/D = 1.0, 2.0$	
B	馬蹄型渦の範囲と渦内の流れの変動及びその周辺流の流向と変動に与える杭の効果調べる。	薄い透明ビニールに1cmメッシュに1.5cm長さの糸をぬいつけ、これを杭と円柱を含む水路底面に張りつける。水路底面及び側面より糸の方向及び変動をシャッター速度を変えつつ、写真撮影を行った。	$Fr = u/\sqrt{gh} = 0.2$ $Re = uh/\nu = 1.4 \times 10^3 \sim 6.3 \times 10^3$ 円柱前面と杭との距離 $L = 10\text{cm}$	
C	杭後流、円柱周辺及び馬蹄型渦内の流速分布の測定を行ない、杭を設置する事による馬蹄型渦の弱まる効果を調べる。それが杭の後流のどのような効果によるものかを調べる。	流速計プローブは常に上流側を向けて設置し、流速測定には小型プロベラ流速計(プロベラ径5mm)を用い、流速の変動値(最大、最小)を、ペンレコーダーで記録を行った。	(杭3本、1本とも、杭と円柱の最短距離を示す。)	

4. 馬蹄型渦の形成

実験Aにより、トレーサー粒子を流す位置を流れの横断方向と水深方向に変化させて、円柱前面に発生する馬蹄型渦に巻き込まれる粒子数及びその分布形状を調べた。まず、馬蹄型渦に巻き込まれる粒子の割合をトレーサーを流す水路底面からの高さ別に合計した(図1)によると、平均水深 $h=9.18\text{cm}$ の場合とも杭本数が増すに従い減少している。また、馬蹄型渦に巻き込まれる粒子の横断方向の分布形状を(図2)に示す。トレーサー粒子を水路底面より $z=0.5\text{cm}$ の位置より流したものの(図1中 $h=9\text{cm}$ ○, $h=18\text{cm}$ △)に着目すると、杭本数が増すに従い中心軸上の粒子数が減少して横方向には広がった分布形状となっている。

この理由は、流れの観察により次のように考えられる。①上流より流したトレーサー粒子は、対称軸上に配置した杭の後流により左右に分けられ、その後、

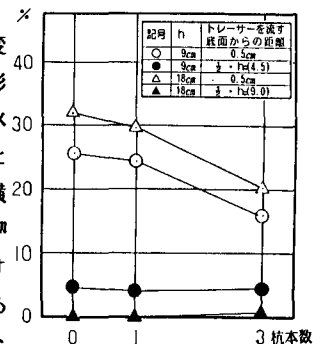


図. 1 馬蹄型渦に巻き込まれるトレーサー数

後流域により横断方向に拡散する。よって、馬蹄型渦に巻き込まれる対称軸上のトレーサー粒子数が減少しているのは、杭がない場合に比べ対称軸上に杭があると粒子の存在密度が減少しているためである。②杭を3本設置した場合に対称軸より離れた所から流した粒子の馬蹄型渦に巻き込まれる粒子数割合が、対称軸上より流した場合に比べて減少していないのは、次のように考えられる。本実験を表面流速で代表される二次元流と仮定すると $Re=U_s \cdot d/\nu=2 \times 10^3 \sim 5 \times 10^3$ であり、 $Str=\eta \cdot d/u=0.2$ である。このような杭後流に発生するカルマン渦の交互離脱に起因する流れの圧力変化により、図3に示すように杭の横を通過する粒子までもが杭後流に巻き込まれ流れが混合平均化される結果、杭がないときには円柱側面を通過するものまでが円柱前面に到達する事によるためである。③図1に示すように杭を設置すると馬蹄型渦に巻き込まれる粒子総数の割合が減少するのは、杭を設置する事によって馬蹄型渦の強さが弱まったものと考えられる。

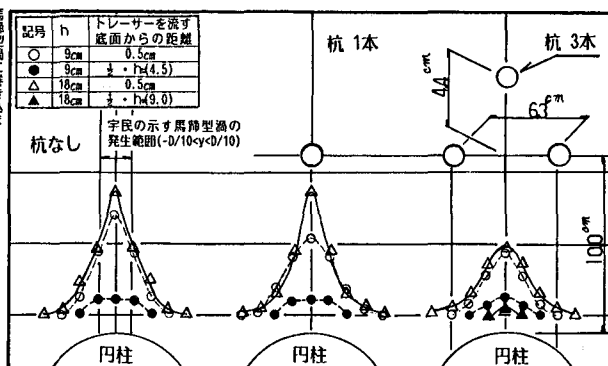


図2 馬蹄型渦に巻き込まれる流れの範囲及び分布形状

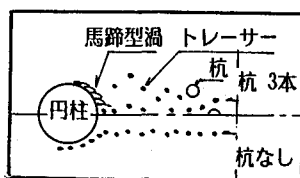


図3 杭による流れの拡散

次に、トレーサー粒子を水路底面より $Z=\frac{1}{2}h$ (図2中 $h=9$ ●, $h=18$ ▲) の高さから流したものに注目すると、水深 $h=9$ cm の場合は、各杭本数とも粒子を水路底面付近 $Z=0.5$ cm より流したとき馬蹄型渦に巻き込まれる総数割合の約17~28%が馬蹄型渦の中に巻き込まれる。一方、 $h=18$ cm の場合は、杭本数3本のときだけが $Z=0.5$ cm のときの約2%の粒子が馬蹄型渦に巻き込まれる。この違いは、流れの観察より次のように考えられる。 $Z=0.5$ cm から流すトレーサーが、直接馬蹄型渦に巻き込まれるのに比べ、円柱前面での馬蹄型渦の高さより高い位置 $Z=\frac{1}{2}h$ ($h=9, 18$) から流したトレーサーは円柱前面に発生する下降流により馬蹄型渦の位置まで降下させられた後馬蹄型渦に巻き込まれる。従って下降流の強さの変動によりトレーサー粒子が馬蹄型渦位置まで降下するものと降下せず主流に流されるものがあるためである。馬蹄型渦の円柱前面での高さ及び下降流の強さは流れの Fr 数が一定でも水深に比例して大きくなる事がわかる。

図2の内、トレーサーを $Z=0.5$ cm の位置から流した場合に馬蹄型渦に巻き込まれる粒子数の分布形状を正規確率紙をプロットするとほぼ正規分布形状を示す。これらの標準偏差 σ を求めると(図4)となり、杭本数が増すと σ は増加傾向にある。これからも杭を設置すると馬蹄型渦に巻き込まれる流れの分布形状が変わる事がわかる。

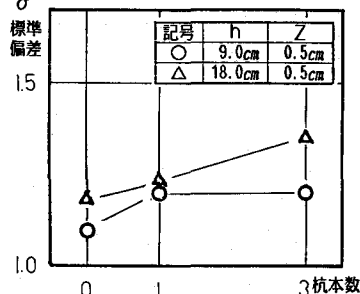


図4 杭本数による標準偏差の変化

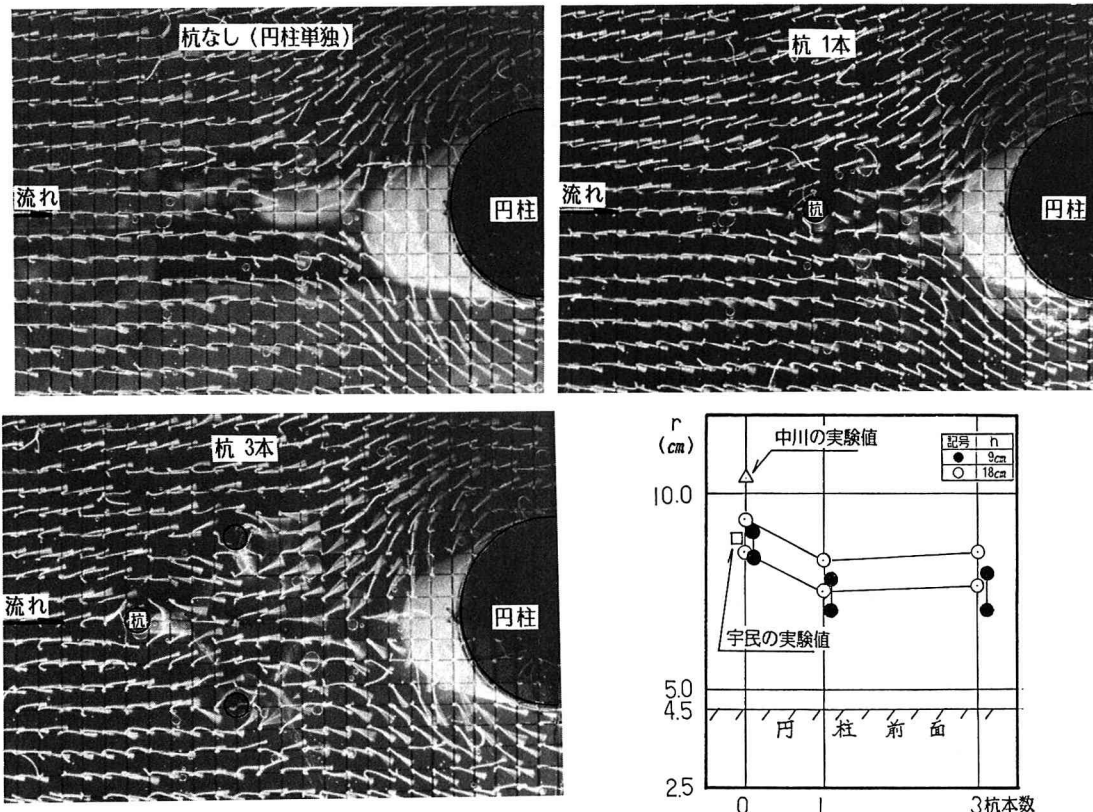
また、宇民は、馬蹄型渦に巻き込まれる流れの横断方向の範囲は円柱前面5cmより染料を流した結果 $-D/10 < y < D/10$ としているが、本研究でトレーサーを円柱前面15cmより流したものと比較すると(図2)の杭がない(円柱単独)場合に示すように、宇民の示す範囲には馬蹄型渦に巻き込まれる粒子総数の全体のうち、約60%占めているが、それより外側のものも40%が馬蹄型渦に巻き込まれている。よって、水路底面から $Z=0.5$ cm より流した粒子分馬蹄型渦に巻き込まれる流れの範囲は $-D/3 < y < D/3$ である。

5. 馬蹄型渦の範囲

馬蹄型渦の範囲を他の研究では次のように定義しその範囲を求めている。まず中川・鈴木は染料を流れの対称軸上の水路底面付近から流し馬蹄型渦の範囲を流れのはくり域内の限界点と定義を行って求めた。次に、宇民は細砂を水路床にまいた実験により円柱と同心円上の縞模様のも最も外側のものと定義を行ってその範囲

を求めた。上記の研究では、馬蹄型渦の範囲を固定した値として求めているが、実際には馬蹄型渦は主流変動により刻々その範囲が変動している。

そこで、本研究では4に示した事項を踏まえて、馬蹄型渦を $-D/3 < y < D/3$ の流れの範囲より円柱前面に発生して底面では主流と逆方向の流れを持つ渦と考え、主流と逆流が釣り合う点を馬蹄型渦領域と定義した。この範囲を実験Bで行った実験結果(写真1～3)により水路底面の糸の方向及び変動より主流と逆流が釣り合う所を糸が水深上方向(z方向)或いは、流れ直角方向(y方向)に向いている所として馬蹄型渦の範囲を求めた。各実験ケースの馬蹄型渦範囲の変動を図5に示す。これによると次の事がわかる。馬蹄型渦の水路底面での範囲は、水深によって大きな変化は示さない。円柱前面に杭を設置すると馬蹄型渦の範囲は若干小さくなる。従って円柱前面の杭は馬蹄型渦範囲の縮小にも効果が有る事がわかる。杭1本の場合と杭3本の場合で馬蹄型渦の範囲が異なっているのは、杭1本と3本の対称軸上の杭の位置の違いによるものと考えられ、対称軸上の杭が、円柱に近い程馬蹄型渦範囲の縮小効果が大きい事がわかる。また、各研究者で馬蹄型渦の範囲が若干異なっているのは、各研究者の馬蹄型渦範囲の定義、変動している馬蹄型渦範囲のどこを測定しているか、及び実験条件の違いによるものと考えられる。



6. 馬蹄型渦の強さ

実験Cで、円柱周辺流の流速分布及びその変動を調べた。円柱前面 $L/D=0.11, 0.22$ の測点の水路底面では、5で定義した馬蹄型渦領域に入っていて流れが一様でないためにプロペラ流速計を用いた計測では、測定値に誤差が見込まれると考えられる。流速分布の測定結果を図6に示す。これによると、円柱前面 $L/D=0.11, 0.22$ の馬蹄型渦領域において逆流が認められる。この逆流速の大きさを杭の有無と比較してみると、図7に示すように杭を設置しない場合には、対称軸上 $L/D=0.1 \sim 0.2$ の範囲で水路床より1cm付近の位置において、 $U_b/U_m \approx 0.5$ となる(ここに U_b :逆流速の最大値, U_m :円柱の影響がないと考えられる円柱上

流2m地点での平均流速)が、杭を設けると $U_b/U_m \approx 0.15$ と小さくなる。この理由は次のように考えられる。①杭を設置すると、その後流で平均流速が減少する。例えば、杭の有無で円柱近傍(円柱前面 $L/D=0.44$)の対称軸上の平均流速比を示すと $U_{pm}/U_{om}=0.91$ となる。(U_{pm} :杭を設置した時の平均流速, U_{om} :杭がない時の同じ位置での平均流速)②杭を設置すると、平均流の流速分布形状が変わる。

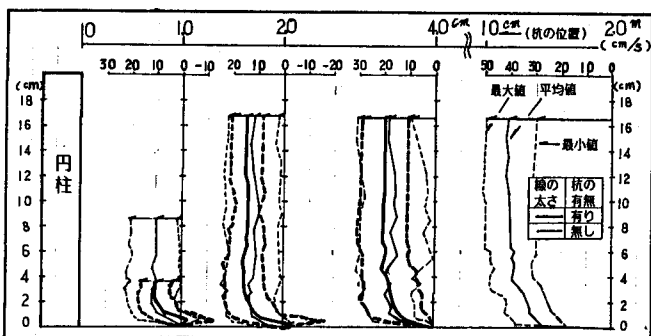


図. 6 対称軸上の流速分布

例えば、 $h=18\text{cm}$ の流速分布は、 $L/D=0.44$ では $Z=4.0\text{ cm}$ 付近で一樣流に近づく、一方、杭を設置した場合には $Z=1.0\text{ cm}$ 付近で一樣流に近づいている。従って、4で示したように馬蹄型渦の発生には、対称軸付近の流れが主に関係する事から考えて、杭による上記の①、②の作用で、馬蹄型渦が弱まりその範囲も縮少する事がわかる。

また、円柱周辺流の平均流向をx軸からの角度で示した図8及び写真より馬蹄型渦の強さの考察を行なう。円柱中心より 45° 及び 90° 側の流れは、円柱前方で発生する馬蹄型渦が円柱に沿って螺旋状の流れとして流下するために、流向(系の方向)は円柱側方の主流と螺旋流のベクトルの合力となる。従って、馬蹄型渦勢力が強いと円柱側方においても系は、円柱に対し外方向を向き系の振れ角は大きくなる。逆に勢力が弱いと系は主流の方向を向き振れ角は小さくなると考えられる。図9によると杭を設けた場合と、杭がない(円柱単独)場合とを比較すると系の振れ角が小さくなって主流方向に向いていることが認められる。これによっても、杭を設置すると馬蹄型渦が弱くなる事がわかる。

7. 馬蹄型渦強さの変動

馬蹄型渦の強さの変動を実験Cによる流速分布の変動及び実験Bの円柱周辺流の流向とその変化の2項目より調べた。まず、図6の最大流速、最小流速の分布に注目すると次の事がわかる。①杭を設置すると流速変動は大きくなる。これは、杭後流に発生し交互離脱するカルマン渦のために杭の後流では流速変動が大きくなったためと考えられる。②この影響を受けて馬蹄型渦内($L/D=0.11, 0.22$)でも流速変動は、杭を設けた場合の方が大きくなっている。

馬蹄型渦の発生に最も影響する対称軸上付近の流向変動の範囲を系の振れ角で表わし、一例として対称軸上($y=0$)のものを図9に示す。これより次の事がわかる。①対称軸上($y=0$)および横断方向に1cmずれた所($y=1$)では、円柱中心を原点として上流側に7~9cm($x=7\sim 9$)の位置で系の振れ角すなわち流向変動が大きくなる事がわかる。これは、図5に示すように $x=7\sim 9$ は頂度、馬蹄型渦領域の境界付近に当たるために主流(杭を設置

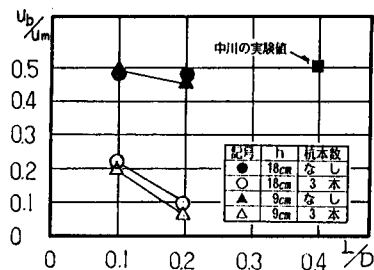


図. 7 馬蹄型渦内の逆流速

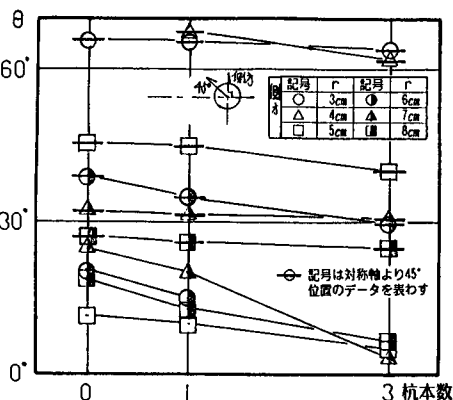


図. 8 杭による円柱周辺の平均流向変化

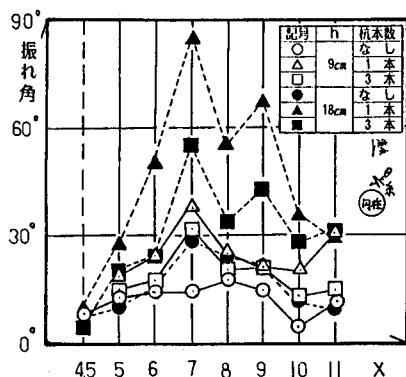


図. 9 円柱周辺の流向変化

した場合は杭の後流)の変動を受け馬蹄型渦の範囲も変化するためと考えられる。②馬蹄型渦領域内($x=6$)で流れの変動を調べると杭を設けた場合は杭が無い場合に比べ変動が大きい。これも、①と同様に馬蹄型渦を形成する $-D/3 < y < D/3$ 範囲の主流変動によるものと考えられる。③杭3本の場合より1本の場合の方が変動が大きいのは、対称軸上の杭の位置が3本に比べ1本の場合の方が円柱に近いため馬蹄型渦に与える杭後流の影響が大きく表われるためと考えられる。

8. まとめ

以上のような円柱周辺流の流れの可視化及び計測に基づき次項の成果を得た。

- (1)円柱前面に杭を設置すると馬蹄型渦に巻き込まれるトレーサー粒子数は減少して馬蹄型渦の強さが弱まる。
- (2)馬蹄型渦に巻き込まれるトレーサー粒子の横断分布形状は、流れの対称軸上が最も大きい正規分布型を示す。
- (3)馬蹄型渦に巻き込まれる流れの範囲は、水位底面付近においては $-D/3 < y < D/3$ である。
- (4)杭を設置すると馬蹄型渦に巻き込まれる流れの範囲が広がり正規分布の標準偏差は大きくなる。
- (5)馬蹄型渦の範囲は主流の流速変動に影響を受けてその範囲も刻々変化する。杭を設置するとその範囲は小さくなるが範囲の変動は杭後流のカルマン渦の影響を受け大きくなる。
- (6)杭の設置により馬蹄型渦の逆流速は小さくなり、杭がない時は $U_b/U_m=0.5$ 、杭を設置すると $U_b/U_m=0.15$ と

参考文献

- 1)中川・鈴木：橋脚による局所洗掘深の予測に関する研究、京大防災研究所年報第17号B（昭和49年 4月）
P.P. 161～ 187
- 2)宇 民 正：橋脚周辺の流れの機構と洗掘防止法に関する研究、学位論文、1975年
- 3)岡本・八木田：一様せん断流中に置かれた有限長円柱まわりの流れ、日本機械学会論文集（B編）
49巻 447号、昭和58年11月、P.P. 2593～2600
- 4)谷口、坂本、有江：乱流境界層の中に存在する直立円柱周辺の流れ、日本機械学会論文選（B編）
46巻 405号、昭和55年 5月、P.P. 802～ 812