

開水路中における円柱群に作用する 流体力に関する実験

FLUID FORCES ACTING ON MULTIPLE ROWS OF CIRCULAR CYLINDERS IN OPEN-CHANNEL FLOW

林建二郎¹・藤井優宏²・重村利幸³

Kenjiro HAYASHI, Masahiro Fujii and Tosiaki SHIGEMURA

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

²学生員 防衛大学校理工学研究科 地球環境科学専攻 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

³正会員 Dr. Eng. 防衛大学校教授 建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

Fluid forces acting on a circular cylinder in multiple rows of circular cylinders installed across the whole parts of channel width and partial parts of channel length in an open channel are measured by load cell with three components. Drag coefficient C_D of this circular cylinder with large arrangement density λ is larger than the drag coefficient of circular cylinder in uniform flow. Roughness coefficients known as Manning's n for this multiple rows of circular cylinders are evaluated by using these Drag coefficients C_D measured. Roughness coefficient of multiple rows of circular cylinders in open channel increases with increase of arrangement density λ and water depth. Profiles of gradually varied flow in multiple rows of circular cylinders are evaluated well by using these Manning's n .

Key Words : multiple rows of cylinders,, drag coefficient, roughness coefficient, open-channel flow
Manning's n

1. はじめに

環境問題の高まりとともに、河道内樹木の保護・育成やその積極的な利用が重要視されている。砂防事業においては、樹林帯により流出土砂を捕捉する工法も計画・施工されている。しかし、河道内樹木は大きな粗度であり、その流れに対する抵抗則を精度良く把握することは、洪水対策面から重要である。

植生や樹林がある開水路流れの水理に関しては多くの研究がなされてきた¹⁾。この種の研究分野において、植生や樹林部材に作用する流体力の評価は、流れの抵抗則評価やこれら部材の力学的な設計において重要である。

水山ら²⁾、石川ら^{3),4)}、平野・橋本ら⁵⁾、火箔・橋本ら⁶⁾、渡辺ら⁷⁾は樹林帯の抵抗特性および樹林帯内における掃流砂量や土砂堆積効果に関する研究において、福岡・藤田⁸⁾は洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理特性に関する研究において、清水・辻本⁹⁾らは直立植生層を伴

う流れ場に関する研究において、板倉ら¹⁰⁾、長林ら¹¹⁾、鈴木ら¹²⁾は樹林帯を伴う高水敷の粗度に関する研究において、開水路内に設置された模型円柱群に作用する流体力(抗力)の評価を行なった。

これら研究においては、円柱群区間内でのエネルギー勾配の測定^{2),3),5),8),9),10)}、円柱群内における水深方向の流速分布測定⁶⁾、円柱後流域の流速分布測定¹¹⁾、ならびに円柱群区間において生じる運動量変化の測定¹²⁾に基づき円柱に作用する抗力を評価した場合が多く、直接に円柱に作用する抗力を実測した結果^{4),14)}は少ない。従って、支配パラメータと考えられる樹林帯密度等に対する円柱の抗力係数 C_D 値の変化特性においては散らばりが多く、植生や樹林帯に作用する流体力についてはまだ不明な点も多い。

本研究は、河道内にある樹林帯の流れに対する強度特性やその抵抗則に関する基礎的な実験として、開水路中に鉛直設置された円柱群に作用する流体力の直接計測を行い、円柱群の抵抗則について検討したものである。

2. 実験装置および方法

実験には、図-1に示す長さ16m、幅 $B=0.5\text{m}$ 、高さ0.5mの両面ガス張りの可変勾配開水路を使用した。水路床はステンレス製で表面はペンキ塗装で仕上げられている。水路下流端には、水位調節用の可動堰が設けられている。

水路途中の長さ $L=1.8\text{m}$ の区間には、水路床全幅にわたって樹林帯模型円柱群を鉛直に設置した（一部実験では $L=3.6\text{m}$ ）。流れによる円柱の振動を抑えるために、円柱群の上端はベニヤ板で固定されている。樹木模型には、直径 $D=1\text{cm}$ 、高さ60cmの亚克力製円柱を用い、図-2に示すように千鳥状に配置した。正三角形をなす千鳥状に配置された円柱群の中心間隔 S を変化させ、模型円柱群の樹林帯密度（河床単位面積に占める樹木の断面積比、(2)式参照） λ を変化（ $0 < \lambda < 0.0885$ ）させた。通常の河道に生育している樹林帯の λ は、0.015以下であるが、円柱群を用いた水制^{[16], [17]}や水路式魚道^[18]の λ は大きな値（ $0.02 < \lambda < 0.1$ ）となっている。

図-4に示すように、3分力計に直径 $D=1\text{cm}$ のステンレス棒（力計測用円柱）を鉛直に設置し、円柱群の中央位置（ $x=0\text{m}$ ）における水路中央線上（ $y=0\text{m}$ ）の円柱1本に作用する、流れ方向の流体力 F_x （抗力）、横断方向の流体力 F_y （横揚力）、ならびに F_x による3分力計まわりのモーメント M_y を計測した。 M_y と F_x の計測より、 F_x の合力作用点の計測が可能である。力計測用円柱の下端と水路床との隙間は 1mm 以下とした。3分力計に設置された力計測用円柱の静水中における固有振動数は f_{nw} ＝約18Hzであった。 F_x と F_y は時間変動流体力である。本実験での F_x と F_y の卓越周波数は14Hz以下であり、共振現象は生じていない^[19]。

円柱群内流速の水深方向および水路横断方向分布の計測には、2成分レーザードップラー流速計を用いた。流量 Q の計測には、循環用水路内に設けた全幅堰を用いた。

円柱群内における水面形変化を調べるために、サーボ式波高計および水路側壁ガラス面に設けたスケールを用いて水位を目視計測した。力計測用円柱近傍の水位計測より、局所的な水面勾配を求め、力計測用円柱設置点でのエネルギー勾配 I_e を算定した。

実験では、流量を $Q=0.030, 0.064, 0.073\text{m}^3/\text{s}$ の3種類、水路勾配を $i_0=0, 1/500, 1/100, 1/50$ の4種類と変化した。各実験ケースにおいては、水路下流端に設けた可動堰の高さ s_w を調整し、水路内の水位を数種類変化させた。

力計測用の円柱を設置した位置（ $x=0, y=0\text{m}$ ）での水深は $h_0=0.12\sim 0.32\text{m}$ の範囲であった。

本水路中に同円柱を一本のみ鉛直に設置した場合（単独円柱、 $S=\infty$ と考えられるので $\lambda=0$ ）の F_x, F_y, M_y も同様に計測した。

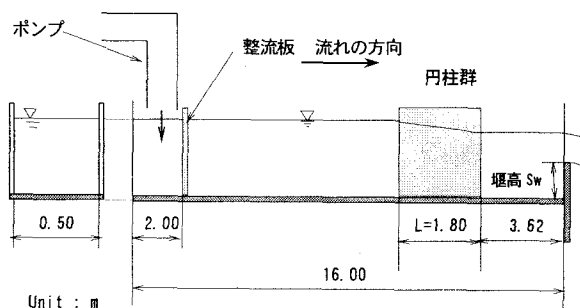


図-1 実験装置の概略

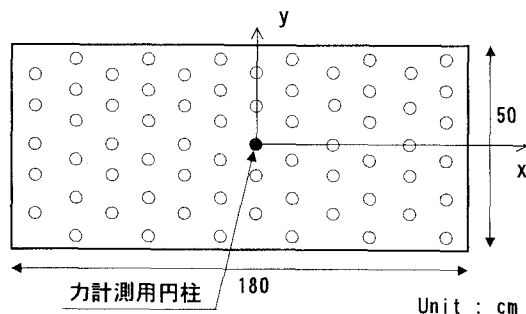


図-2 円柱群の配置図

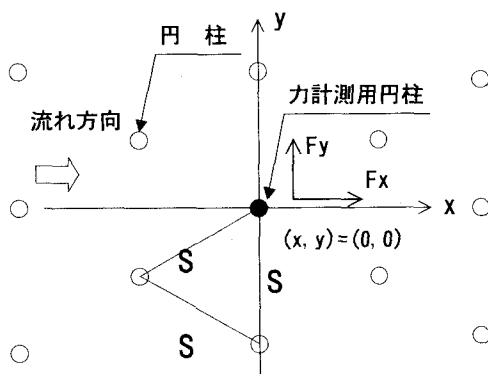


図-3 円柱群の配置間隔

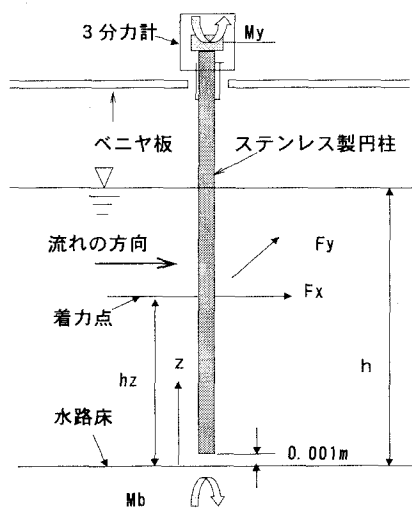


図-4 力計測用円柱の設置概要

3. 円柱群の抵抗評価式

水路幅Bが水深hに比べて十分大きい場合、または側壁部のせん断力は全せん断力に比べて無視できると仮定すると、水路長dx間の漸変不等流において流体塊に対する力の釣り合い式は (1) 式で示される。

$$N F_x B dx + \tau_b B dx (1 - \lambda) = \rho g h B dx I_e (1 - \lambda) \quad (1)$$

式中の、Nは単位床面積当たりの円柱の本数 (/m²)、F_xは直径Dの円柱に作用する抗力F_xである。τ_bは床面に作用する平均せん断力である。ρは水の密度、gは重力加速度である。λは前述の円柱群の樹林帯密度 (=河床単位面積に占める樹木の断面積比) である。正三角形をなす千鳥状に配置された円柱群の中心間隔をSとするとλは(2)式で示される (図-3参照)。

$$\lambda = N(\pi D^2/4) / \text{単位面積} = \pi D^2 / (2 \times 3^{1/2} S^2) \quad (2)$$

円柱1本に作用する抗力F_xを(3)式で評価する。

$$F_x = (1/2) C_D \rho D h V^2 \quad (3)$$

ここに、C_Dは抗力係数、hは水深である。Vは円柱群内流れの断面平均流速であり(4)式で示される。

$$V = Q / \{(1 - \lambda) B h\} \quad (4)$$

(1) 式中の床面せん断力τ_bは、水路床の粗度係数をn_bとすると(5)式で示される。

$$\tau_b = \rho g v^2 n_b^2 / h^{1/3} \quad (5)$$

(1) 式に(2)～(5)式を代入すると、樹林帯密度λで床面に鉛直設置された円柱群が有する粗度を床面の粗度係数に含めた合成粗度係数n_{tc}は、(6)で示される。

$$n_{tc} = n_{tc} = [n_b^2 + C_D 2 \lambda h^{4/3} / \{g \pi D (1 - \lambda)\}]^{1/2} \quad (6)$$

λが小さい場合は、n_{tc}は(7)式で近似できる。

$$n_{tc} = n_{tc} = \{ n_b^2 + C_D 2 \lambda h^{4/3} / (g \pi D) \}^{1/2} \quad (7)$$

円柱群の密生度a (流体単位体積当たりの樹木の遮蔽面積比、a = 2D / (3^{1/2} S²) = 4λ / (πD))を用いると(7)式よりn_{tc} = n_{tc}は(8)式で示される。

$$n_{tc} = n_{tc} = \{ n_b^2 + C_D a h^{4/3} / (2g) \}^{1/2} \quad (8)$$

一方、合成粗度係数n_{tc}は、エネルギー勾配I_e、水深h、断面平均流速を用いると、(9)式で示される。

$$n_{tc} = n_{tc} = (1/v) h^{2/3} I_e^{1/2} \quad (9)$$

4. 結果および考察

(1) 円柱群内の流速分布

水路方向流速成分の時間平均値をU、その乱れ強度をu'とする。樹林帯密度λ=0.013の円柱群中央に設置した力計測用円柱の上流x=-3.6cm、水路床からの距離zが水深hの1/2の位置におけるUとu'の、水路横断方向分布の一部 (-0.15cm < y < 0.15cm) を図-5に示す。円柱後流域で円柱の直下となる位置 (y=±4.15cm, ±12.45cm) では、著しく流速Uが低下し、乱れ強度u'は増加している。これらUおよびu'の周期的な横断方向変化は水路幅全域に渡って一様である。円柱群内においては、このような水路横断方向流速分布が水路側壁の近傍まで存在する³⁾。

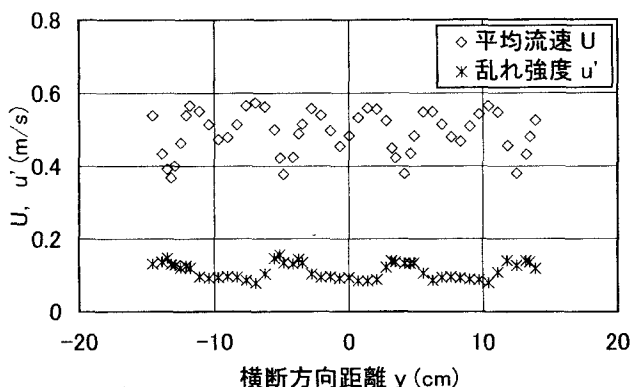


図-5 水路横断方向の流速分布 (x=-3.6cm, z=h/2)

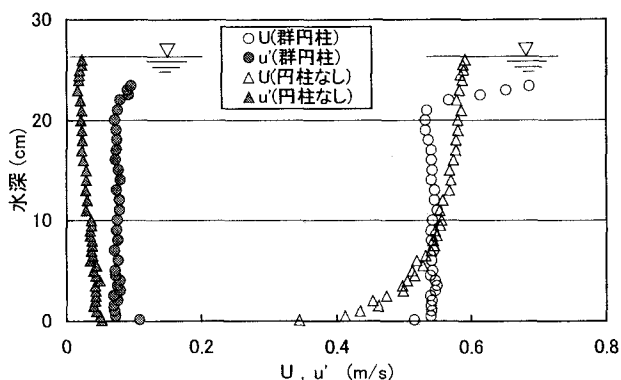


図-6 水深方向の流速分布 (x=-3.6cm, y=0cm)

λ=0.015の円柱群内に設置された力計測用円柱の直上流x=-3.6cm、y=0cmの位置におけるU、u'の水深方向分布を図-6に示す。流量はQ=0.073m³/s、水路勾配はi₀=1/100、水深はh=約27cmである。同じQ、i₀、hで円柱群が無い場合のUおよびu'の水深方向分布を比較のために図-6中に示す。円柱群が無い場合のUは、水路床近傍では小さく、水路床から水表面に向かって大きくなって

いるが、円柱群の U は、水路床近傍から水表面付近まで一様であることが分かる。これは、鉛直に設置された円柱群からの後流渦により、円柱群内の流れ構造が水深方向に一様化されたためと考えられる。円柱群内の乱れ強度 u' は、円柱が無い場合より大きく、水深方向に一様となっている。このような壁面せん断流としての特徴を有しない円柱群内の流れ場は、固有浸透流場⁹⁾と呼ばれている。この流速分布の一様化は、石川ら³⁾によっても報告されている。橋本ら⁶⁾は、円柱群内の空間平均を施した流速分布においても、水深方向への一様化が存在する結果を報告している。水表面近傍流速 U の急激な増加は、円柱群の存在による気泡混入の結果と考えられる。

(2) 抗力係数の評価

樹林帯密度 $\lambda=0.015$ の円柱群内において実測された抗力 F_x 、平均流速 V ならびに力計測用円柱近傍の水深 h_0 を、(3)式に代入して得られた抗力係数 C_D と Re 数($=V \cdot D/\nu$)、 ν :水の動粘性係数)の関係を、水路勾配 i_0 をパラメータとして図-7に示す。全幅堰による測定流量 Q 、および円柱近傍における水深の時間・空間平均値 h を(4)式に代入し、断面平均流速 V を算定した。この V 値とレーザー流速計を用いた円柱近傍の流速分布計測より求めた平均流速との一致は良好であった。 $\lambda=0.015$ の円柱群中の円柱の C_D は、図中に示す一様流中の円柱の $C_D \approx 1$ より大きい $1.3 \sim 1.55$ であり、 Re 数に対する変化は少ない。

図-7に示した C_D の F_r 数($=V/(g \cdot h_0)^{1/2}$)に対する変化を図-8に示す。本実験での F_r 数の範囲($F_r < 0.5$)では、 C_D の F_r に対する変化は認められない。一方、石川²⁰⁾は急勾配水路($i_0=1/10, 1/20, 1/50$)を用いた実験を行い、 F_r 数が増加(約 $0.5 < F_r < 2$)すると C_D は F_r の増加に伴い減少する結果を報告している。この原因としては、 F_r 数の増加に伴い円柱前面での水位の盛り上がりや円柱後流域での空気混入現象が顕著となることが考えられる。

C_D の Re 数に対する変化特性を λ をパラメータとして図-9に示す。 C_D は λ の増加に伴い大きくなっている。 $\lambda=0$ の結果は、本水路中央線上に円柱を1本のみ設置した場合(単独円柱)である。この場合の水路方向流速分布の計測結果においては、円柱群の場合のような横断方向分布の一様性が認められなかった。従って、(3)式中の代表流速 V には、単独円柱の直上流 $X=-20\text{cm}$ の位置での U の水深方向流速分布の平均値を用いた。単独円柱の C_D は $0.6 \sim 1$ であり、図中に示す一様流中に置かれた円柱の $C_D \approx 1$ より小さい。境界層厚さ δ_n の乱流境界層中に直立する高さ $H_L (= \delta_n)$ の円柱の抗力係数は、1以下となる結果が空気流を用いた実験において報告されている¹³⁾。

(3) 抗力の合力作用点(着力点)

3分力計で計測された抗力 F_x と F_y による3分力計まわりのモーメント M_y より F_x の合力作用点を算定した。水路床面から抗力の合力作用点までの距離 h_z は、(11)式で示さ

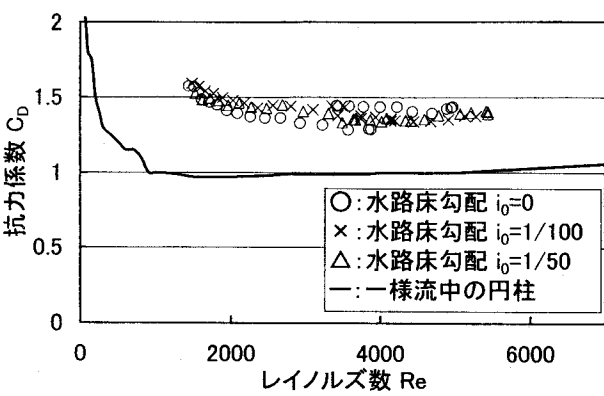


図-7 C_D と Re 数の関係(円柱群 $\lambda=0.015$)

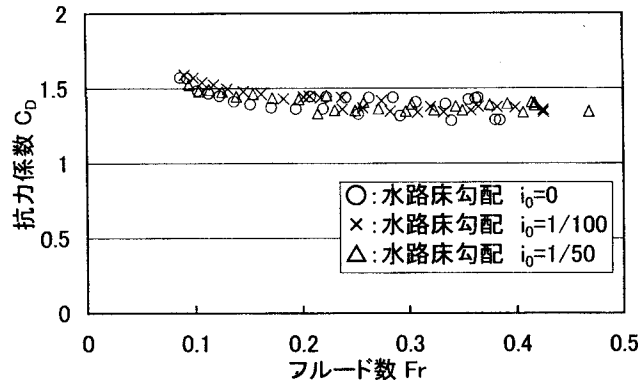


図-8 C_D と F_r 数の関係(円柱群 $\lambda=0.013$)

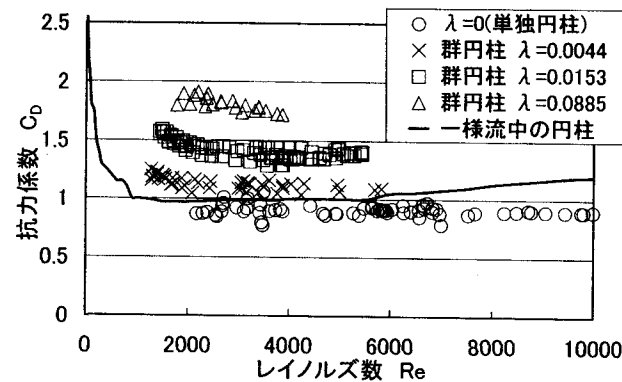


図-9 C_D と Re 数の関係(円柱群と単独円柱 $\lambda=0$)

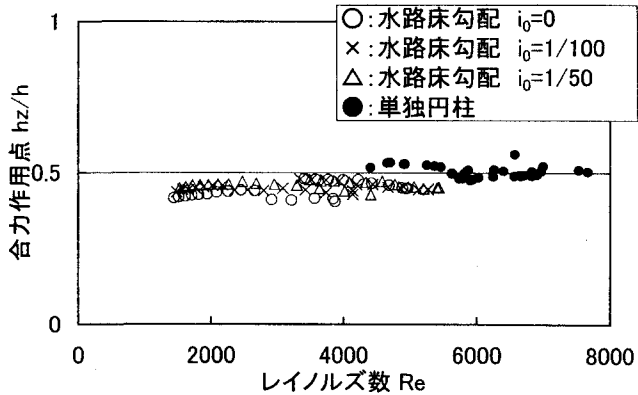


図-10 抗力の合力作用点(着力点)

れる。式中の p_z は、水路床面から3分力計内の M_y 計測点までの距離である。従って、 F_x による水路床面まわりのモーメント M_b は(12)式で示される。 M_b は、流水による樹木倒伏の判定等において重要となる外力モーメントである¹²⁾。

$$h_z = p_z - M_y / F_x \tag{11}$$

$$M_b = F_x h_z \tag{12}$$

F_x と M_y の実測値を(11)式に代入して得られた h_z とRe数の関係を図-10に示す。円柱群内では水深方向流速分布が一様化する結果、円柱群の h_z は単独円柱の場合と比べて若干小さく水深 h のほぼ1/2となっている。

(4) 床面における合成粗度係数の評価

実測された円柱群内の平均流速 V 、水深 h 、エネルギー勾配 I_e を、(9)式に代入して得られた床面の合成粗度 n_t を n_{te} とする。 V 、 h 、 λ 、 D 、ならびに抗力係数 C_D の計測値を(6)式に代入して得られた n_t を n_{tc} とする。ただし、(6)式中の床面の粗度係数 n_b には、円柱群が無い場合の本水路の粗度係数 n_b を水深方向流速分布の測定結果より評価した値(n_b =約0.01)を使用した。

$\lambda=0.015$ の場合における n_{te} および n_{tc} の、水深 h に対する変化特性を図-11に示す。図中に示す実線は、 $C_D=1$ 、1.4、2を用いた(6)式による計算値である。 n_{tc} は、 $C_D=1.4$ とした計算値と概ね一致し、水深 h の2/3乗に比例して増加している⁸⁾。 n_{te} も n_{tc} と同様に水深 h の増加に伴い増加しているがその散らばりは大である。この原因としては、円柱群内においては円柱近傍で大きな水面変動が存在するために、水面勾配やエネルギー勾配 I_e を精度良く測定することが困難なためと考えられる。

n_{te} と n_{tc} は物理的には等しい。従って、(6)式と(9)式より円柱群内における河床の粗度 n_b を逆算評価できるが^{10,7)}、 F_x と同程度に I_e を精度良く測定することは難しいため、その精度は不十分である。円柱群中では流速が水深方向に一様化する結果、円柱群内の水路床近傍の流速 U_b は、水深方向平均流速を同じとする円柱群が無い場合の U_b に比べて増加している(図-6参照)。その結果、円柱群内の河床せん断力は、水深方向平均流速を同じとする円柱群が無い場合より増加し、円柱群が有る床面の粗度 n_b は、円柱群が無い場合より大きくなると考えられる。

λ をパラメータとして、 n_{tc} の水深 h に対する変化を図-12に示す。図中に示す曲線は、各 λ において実測された C_D の代表値(図-9参照)を用いた、(6)式による計算値である。床面の合成粗度係数 n_{tc} は、 λ の増加に伴う C_D の増加と水深 h の増加に伴い大きくなっている。

(5) 円柱群内の水位評価(不等流計算)

不等流計算を行い円柱群内の水面形を算定し、実測値と比較を行った。 $L=3.6\text{m}$ 、 $\lambda=0.013$ 、 $i_0=0$ 、 $Q=0.064\text{m}^3/\text{s}$

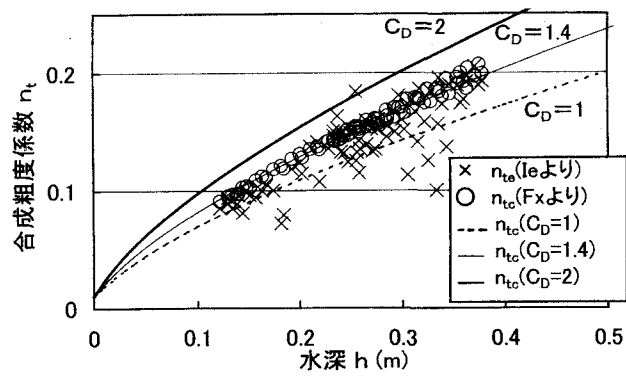


図-11 床面における合成粗度係数($\lambda=0.015$)

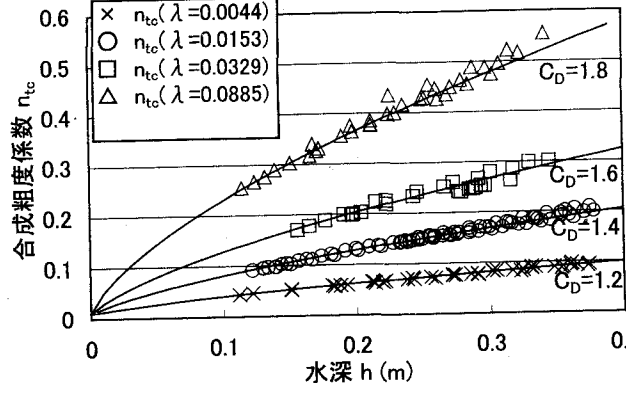


図-12 樹林帯密度 λ と合成粗度係数 n_{tc} の関係

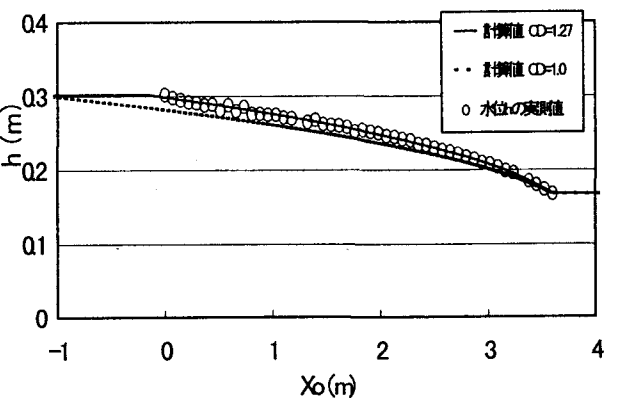


図-13 円柱群内の水位変化の評価(不等流計算)

の結果を、一例として図-13に示す。円柱群の上流端($X_0=0\text{m}$)および下流端($X_0=3.6\text{m}$)での水深は、0.305mと0.17mである。限界水深は $h_c=0.118\text{m}$ であり、流れは全領域で常流である。不等流計算式中の合成粗度係数 n_t の算定には(6)式を使用した。水路床の粗度係数は $n_b=0.01$ と仮定した。(6)式中の抗力係数に実測された $C_D=1.27$ を用いた水位の計算値と実測値の一致は良好である。

(6) 抗力係数 C_D と樹林帯密度 λ の関係

円柱群内の一本円柱の抗力係数 C_D と樹林帯密度 λ との

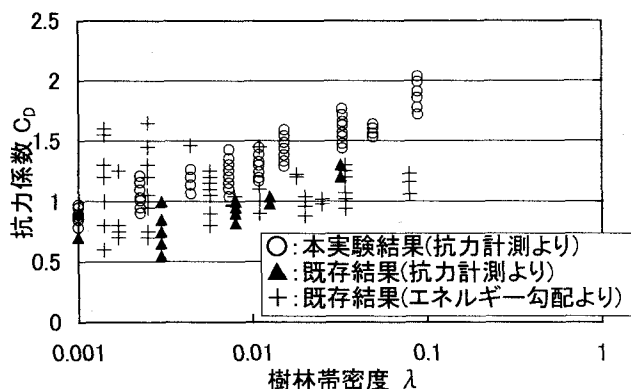


図-14 抗力係数 C_D と樹林帯密度 λ の関係

関係を図-14に示す。+印は、エネルギー勾配 I_e 、水深 h 、断面平均流速 V 等を(9)式等に代入して求めた合成粗度係数 n_c を、(7)式等に代入して逆算された C_D の既存値(9, 1), 5), 9), 10)を示す。抗力の実測値より算定した C_D 値(○印：本実験値、▲印：既存値^{1), 5), 20)})は、 λ の増加に対して増加している。エネルギー勾配より算定した C_D 値にはこのような関係は認められない。これは、エネルギー勾配 I_e の精度良い測定が困難なためと考えられる。

5. おわりに

本研究で得られた主要な成果は次の通りである。

- 1) 樹林帯密度 λ の増加に伴い、円柱の抗力係数 C_D は増加し、一様流中に置かれた円柱の $C_D \approx 1$ より大きくなる。
- 2) 円柱に作用する抗力の実計測は、円柱群が存在する河床の合成粗度 n_c の評価法として有効である。
- 3) 円柱群がある河床の合成粗度 n_c は、樹林帯密度 λ の増加と水深 h の $2/3$ 乗に比例して増加することを確認した。
- 4) 円柱に作用する抗力の実測値より評価した床面の合成粗度 n_c を用いた不等流計算を行うと、円柱群内の水面形変化を精度良く評価できる。

謝辞：本研究は文部省科学研究費補助金（基盤研究(B) (1)、課題番号 10555176、代表研究者：橋本晴行）の補助を受けたものである。記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 水理講演会10年の歩みとこれからの基礎水理学の展開、土木学会水理委員会基礎水理部会、1999. 3.
- 2) 水山高久・天田高白・栗原淳一・小林幹男：樹林帯の抵抗特性と土砂堆積促進効果、新砂防、Vol. 42、No. 4、pp. 18-22、1989.
- 3) 石川芳治・藤田英信・水原邦夫・成富 靖：溪畔林をもつ河道における掃流砂量に関する研究、新砂防学会誌、Vol. 51、No. 3、pp. 35-43、1998.
- 4) 石川芳治・芦田真亜・水原邦夫：河道に存在する樹林に作

用する抗力と密生度に関する実験的研究、平成11年度砂防学会研究発表会概要集、pp. 70-71、1999.

- 5) 平野宗夫・橋本晴行・多川博章・玉松潤一郎：樹林帯に作用する土砂・水混相流の流体力と土砂堆積、水工学論文集、第41巻、pp. 699-704、1997.
- 6) 火箔貴文・橋本晴行 他：樹林帯を伴う開水路流れの底面剪断力に関する研究、土木学会54回年次学術講演会概要集第2部、pp. 238-239、1999.
- 7) 毛利知広・渡辺 満・H. M. Nagy・渡辺訓甫：植生流れにおける掃流力と掃流砂量に関する実験的研究、土木学会55回年次学術講演会概要集第2部、pp. 610-611、2000.
- 8) 福岡捷二・藤田光一：洪水流に及ぼす河道樹木群の水理的影響、土木研究所報告、第180号、pp. 129-192、1990.
- 9) 清水義彦・辻本哲郎・中川博次・北村忠彦：直立性植生層を伴う流れ場の構造に関する実験的研究、土木学会論文集、No. 438/II-17、pp. 31-40、1991.
- 10) 板倉忠興・黒木幹男・森 明巨：高水敷の粗度に関する研究、河道の水理と河川環境シンポジウム論文集、pp. 199-206、1993.
- 11) 藤井 誠・長林久夫：河道内樹木の抵抗評価に関する調査・検討、土木学会54回年次学術講演会概要集 第2部、pp. 250-251、1999.
- 12) 河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン(案)、山海堂、1994.
- 13) 谷口清一・坂本弘志・有江幹男：乱流境界層の中に存在する直立円柱周辺の流れ、日本機械学会論文集 (B編)、46巻405号、pp. 802-812、1980.
- 14) 林建二郎・坂口 誠・藤井優宏・重村利幸：開水路中に設置された円柱群に作用する流体力に関する実験、土木学会第54回年次学術講演会概要集 第2部、pp. 226-227、1999.
- 15) 鈴木辰規・高橋一彦・福井吉孝：開水路中に樹木群を有する流体力について、土木学会第55回年次学術講演会概要集第2部、pp. 614-615、2000.
- 16) 秋草 薫・吉川秀夫・坂上洋次郎・芦田和男・土屋昭彦：水制に関する研究、土木研究所報告、第107号の6、pp. 1-93、1960.
- 17) 山本晃一：日本の水制、山海堂、1996.
- 18) 野中典理・G. S. Kumar・柏井条介：円筒を用いた水路式魚道の遮へい率と粗度係数の関係、土木学会第54回年次学術講演会概要集 第2部、pp. 258-259、1999.
- 19) 山本晃一・林建二郎・関根正人・藤田光一・田村正秀・西村 晋・浜口憲一郎：護岸ブロックの抗力・揚力係数・および相当粗度の計測について、水工学論文集、第44巻、pp. 1053-1058、2000.
- 20) 石川芳治・水原邦夫・芦田真亜：河道に存在する樹林に作用する抗力と密生度：樹林帯を利用した土砂災害対策工の開発、文部省科学研究費補助金（基盤研究(B) (1)、課題番号 10555176、代表研究者：橋本晴行）、pp. 28-41、2000.

(2000. 10. 2受付)