

護岸ブロックの抗力・揚力係数、および相当粗度の計測方法について

Measuring method of drag coefficient ,lift coefficient and equivalent roughness of revetment block

山本晃一¹・林建二郎²・関根正人³・藤田光一⁴・田村正秀⁵・西村晋⁶・浜口憲一郎⁷

Kouichi YAMAMOTO , Kenjiro HAYASI , Masato SENKINE , Kouichi FUJITA , Masahide TAMURA ,
Susumu NISIMURA and Kenichirou HAMAGUCHI

¹正会員 工博 河川環境管理財団 東京都中央区入船1丁目9番12号

²正会員 工博 防衛大学校 神奈川県横須賀市走水1-10-20

³正会員 工博 早稲田大学理工学部 東京都新宿区大久保3-4-1

⁴正会員 工博 建設省土木研究所河川研究室長 茨城県つくば市旭一1

⁵正会員 工博 財団法人土木研究センター 専務理事 東京都台東区台東1丁目6-4

⁶正会員 財団法人土木研究センター 研究開発一部主任研究員 東京都台東区台東1丁目6-4

⁷正会員 農修 パシフィックコンサルタンツ(株) 筑波実験場 茨城県つくば市作谷642-1

This study examines measuring methods of drag coefficient ,lift coefficient and equivalent roughness that are necessary for mechanical design of revetment blocks set on river banks. The setting method of blocks and the influence of the Reynolds number on drag force and lift force are examined by checking the experimental results. A standard testing method which is capable to estimate the characteristics of blocks, taking the error of mesurment into account and the treatment of fluctuation of hydraulic force on the block are shown in this paper.

Key Words : Hydraulic force ,Revetment block ,Equivalent block,Roughness,Drag coefficient
Lift coefficient

1. はじめに

護岸は堤防および低水路河岸を降水や流水の浸食作用に対して防護することを目的として設置されるものである。近年では親水性・景観・生態系の保全・再生などの機能を有する新しい護岸工種の開発が進められている。護岸の設計法は現場の実践・経験を通して工夫されたものであり、力学的な設計法となっていないため、新たな護岸ブロックの安全性の照査はすぐにはできないものであったが、平成11年2月に財団法人国土開発技術研究センターより「護岸の力学設計法」が発刊され、護岸ブロックに関する照査が可能となってきた。

しかしながら、護岸ブロックの流水に対する安定性の照査には、護岸ブロックの水理学的特性を示す抗力・揚力係数や相当粗度が必要であるが、標準的な試験法については定められていなかった。

そこで、財団法人土木研究センターに大学・建設省土木研究所・建設省の関係者をメンバーとする「護岸ブロック試験法検討委員会」を設置し、実際に水理実験を実施して、問題点の抽出、計測法の改良、試験法の確定を行ってきた。

計測方法の検討にあたっては、護岸ブロックの種類が多いことから、計測が限られた試験装置を持つ所でしか実施できないものにならないよう配慮した。

本論文に示した実験計測により得られた知見

を「護岸ブロックの試験法マニュアル」に反映し、試験法として整理を行う予定である。

2. 実験の概要

(1) 測定項目

実験では、「護岸の力学設計法」に用いられる以下の4つの項目について計測を行い、各値の計測方法について検討を行った。

- ① 単体設置時の抗力・揚力係数
- ② 群体設置時の抗力・揚力係数
- ③ 群体上流端のブロックに作用する抗力・揚力による回転半径
- ④ 相当粗度

実験では、計測用のブロックを単体、群体の中央、群体上流端に設置し、各状態でのブロックに作用する抗力・揚力・回転モーメントについて分力計を用いて計測を行い、測定法の改良を加え、試験法の立案を図った。

(2) 水路施設

試験検討に用いた水路は図-1 に示す幅 1m、長さ 26m の直線水路であり、計測用ブロックは水路上流から 16.5m 地点の水路中央部に設置した。

(3) 通水条件

実験では、レイノルズ数の変化による抗力・揚力

への影響等を把握するため、水位を一定 (30cm 程度) に保った状態で流量を変化させ通水を行った。流量は最大 300l/s とし、5 段階に流量を変化させ計測を行った。

(4) 計測機器

ブロックに作用する抗力・揚力の流体力については、表-1 に示す 4 分力計を用いて計測を行った。

流体力はブロック重量に較べ小さい事が予想されたため分力計については下記に示す精度の機器を用いた。また、流速については鉛直 2 次元電磁流速計を用いて水深方向に 10mm 間隔で計測を行った。

表-1 4 分力計機器性能表

型式	歪みゲージ式 4 分力計
定格負荷	Fx=2.04kg (20N) Fy=2.04kg (20N) Fz=2.04kg (20N) My=1.02kg-m (10N-m)
定格出力	約 1000×10 ⁻⁶
非直線性	±0.2%FS
ヒステリシス	±0.2%FS
干渉度	±3%FS/FS
ゼロ点の温度影響	±0.01%FS/°C
感度の温度影響	±0.05%Reading/°C

(5) 試験ブロックの形状

試験ブロックは図-2 に示す 8 ブロックについて試験を行った。

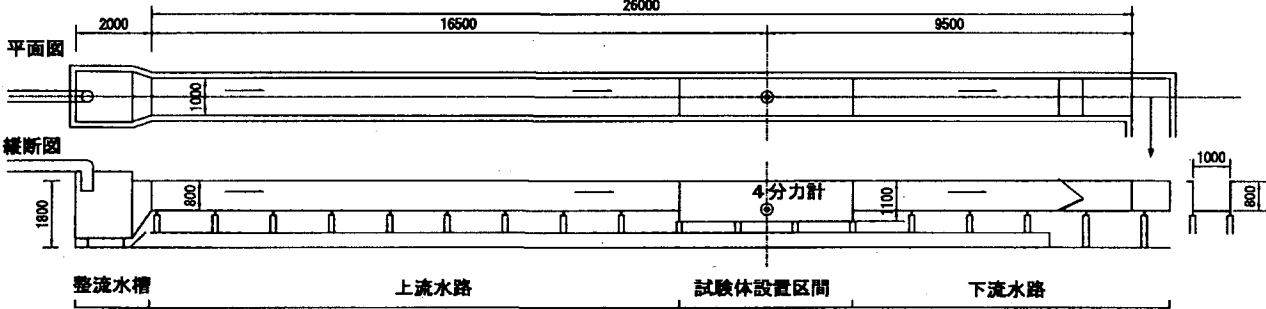


図-1 試験水路施設 (単位 mm)

不規則突起型 143×143×43 (mm) 	連結型 283×138×36 (mm) 	階段型 110×444×62 (mm) 	ボックス型 150×145×43 (mm)
非対称突起型 142×142×33 (mm) 	穴あき型 143×143×29 (mm) 	平板型 143×143×21 (mm) 	対象突起型 222×111×56 (mm)

図-2 試験ブロック一覧

(6) ブロックの設置について

ブロックの抗力・揚力の計測は、現地における流れと同様な状況となるような条件下で実験を行う必要がある。

実験においては、水路特性による影響、境界層の発達状況を考慮し以下のようにブロックを設置した。

- ①ブロックの設置：群体試験では横断方向に5個以上設置した。
- ②水深：ブロック高の5倍、突起高の10倍以上を確保し、側壁の影響を考慮して水路幅の1/3程度の水深とした。(楠津⁴⁾らによるとB/Hは5以上とされているが、底面と側壁の粗度が大きく異なることから試験施設を考慮してB/Hを3程度とした。)
- ③水路長：境界層の発達状況を考慮し、単体ブロック試験では、水路底面に現地換算2cm程度の突起型粗度(2~3mm 砂粒)を設置し、試験ブロックの位置に置いて境界層が十分発達するように上流区間を設けた。

(7) 抗力、揚力係数、相当粗度の表示

本試験における表示している値は以下の算定式による。

- ①レイノルズ数の代表長
 - 単体ブロック時：ブロック高さ
 - 群体ブロック時：ブロック突起高
- ②抗力・揚力係数
$$D = \frac{1}{2} \rho C_d A_d V_d^2 \quad L = \frac{1}{2} \rho C_L A_L V_d^2$$

C_d (C_L)：抗力係数(揚力係数)
 A_d (A_L)：抗力(揚力)作用面積(m^2)
 V_d ：ブロック近傍流速(m/s)
 D (L)：計測された抗力(N)、(kgf)
 ρ ：流体の密度($kgf/m^3 \cdot S^2/m^4$)
抗力作用面積：流れに対する全投影面積
揚力作用面積：設置面に垂直な全投影面積
- ③ブロック近傍流速 V_d
 - 単体ブロック時：ブロック天端位置での流速
 - 群体ブロック時：相当粗度高さでの流速
- ④相当粗度
$$\frac{V_0}{U_*} = 6.0 + 5.75 \cdot \log_{10} \frac{H_d}{K_s}$$

K_s ：相当粗度(m)、 V_0 ：平均流速(m/s)、 u_* ：摩擦速度(m/s)、 H_d ：水深(m)
・摩擦速度を水面勾配から算定

$$U_* = \sqrt{g h_m i}$$

ここに、 i ：水面勾配 h_m ：水深(m)

・摩擦速度を群体中の抗力から算定する方法

$$U_* = \sqrt{\frac{D}{\rho \cdot A_b}} \quad (\text{抗力から算定})$$

3. 実験結果に基づく考察

(1) 計測値のフィルタリング

分力計を用いた抗力・揚力の計測は、分力計からの出力を30hzのサンプリング間隔によりデータ収録を行い、計測された波形から抗力・揚力の平均値の算定を行った。

計測結果の評価にあたっては分力計の振動特性について以下の状態での固有振動特性の検討を行い、計測値のフィルター処理の方法について検討した。

- ① 分力計単体の固有振動特性
- ② 分力計水路水中設置状態の固有振動特性
- ③ ブロックを設置した流体中の振動特性

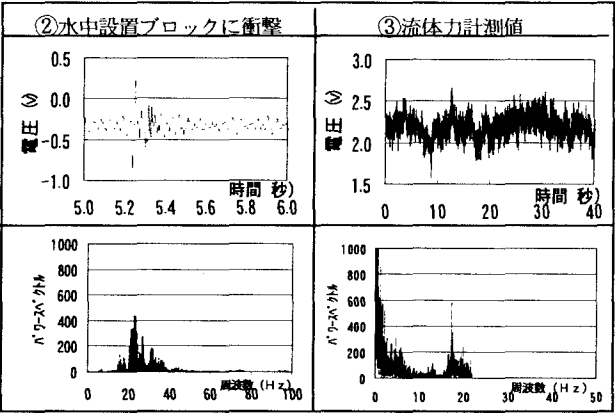


図-3 計測波形とパワースペクトル

②、③の状態での分力計の計測波形、パワースペクトルを図-3に示す。①の分力計自体は約120Hz程度の高い固有振動数特性を示すが、水路に設置した状態では給水ポンプなどの振動が水路から分力計に影響を及ぼすとともに、ブロックの設置棒やブロック重量による慣性力等により固有振動数の低減が見られる。

通水中の計測値を見ると5Hz以下の周波数帯に卓越したスペクトルが見られ、また、スペクトル値としても卓越した値を示しており、これが流体力による抗力・揚力の周波数と判断される。そこで、実験の計測値については5Hzのフィルターにより平均化を行い係数の算定などを行った。

ブロックを設置し流体中で計測したブロックの振動の平均値からのずれの分布特性を図-4に示すが、振動波形はほぼ正規分布となっていることから、振動特性として標準偏差(σ)を求めることとした。

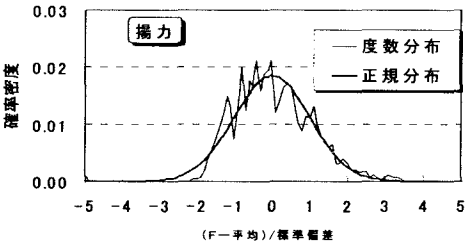


図-4 振動波形の分布特性

(2) 計測の精度

分力計による抗力・揚力の計測においては計測器の定格負荷に対する計測値の比率が小さくなった場合、計測値の精度が問題となる。図-5に抗力値から評価した摩擦速度を用いて求めた群体の相当粗度と抗力対レンジ比の関係を示す。群体設置時には、単体設置時などに比べブロックに作用する抗力は小さく、計測された抗力対レンジ比が0.5%を下回ると抗力が計測器の精度から過大に計測され、相当粗度が大きく評価される事となる。レイノルズ数は 10^4 の領域であり、これは主に計測器の精度によるものと判断される。

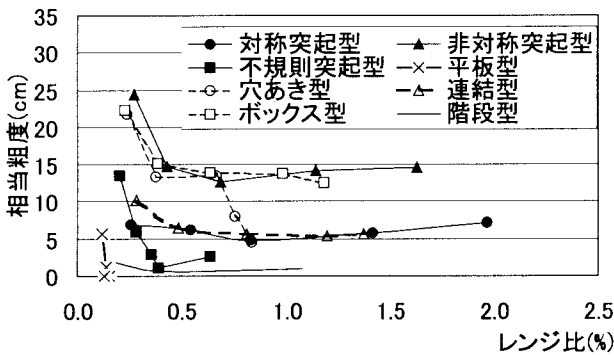


図-5 対レンジ比に対する相当粗度

(3) ブロック設置長の影響

群体にブロックを敷設した場合の群体中央部のブロックに作用する抗力・揚力は、試験ブロック上流部に設置されるブロック数により上流境界層の発達が異なり抗力・揚力が変化する。

そこで、上流に設置するブロック数を変化させて

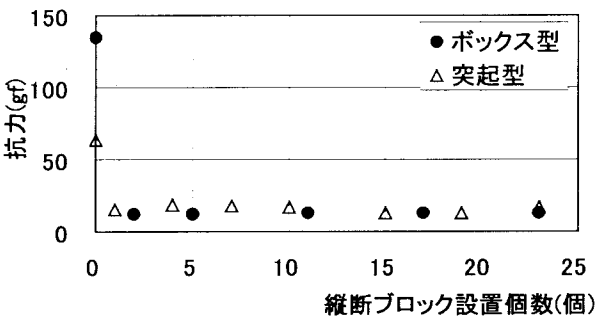


図-6 ブロック設置範囲と抗力の関係

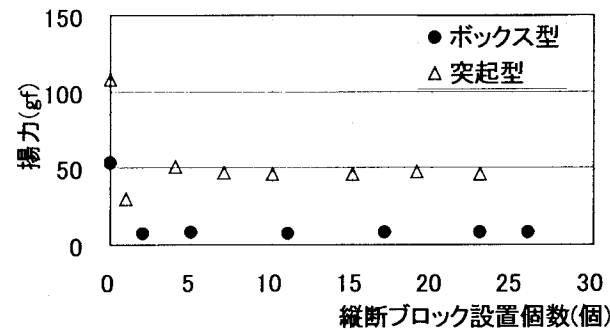


図-7 ブロック設置範囲と揚力の関係

設置個数による抗力・揚力の影響を検討した。図-6、-7にブロック個数の変化に対する揚力・抗力の変化を示す。突起型ブロックでは上流ブロックの設置個数が5個程度からほぼ一定となっているが³⁾、ボックス型のブロックでは2個程度から一定の抗力・揚力となる。これは、ボックス型が全面的な剥離を伴う流れとなるのに対し、突起型では突起部下流部においてのみ剥離渦が生じるためと考えられる。

(4) レイノルズ数の影響

流体中に置かれたブロックに作用する抗力・揚力はレイノルズ数の変化によって影響を受ける。実河道でのレイノルズ数が $10^5 \sim 10^6$ 程度であることを考慮すると同程度のレイノルズ数の条件で試験を行うことが望ましいが、施設規模が巨大となり実際には実施不可能である。抗力・揚力係数は、レイノルズ数がある値以上を境に一定の傾向を示すことが分かってる。そこで、各ブロックについてレイノルズ数を変化させた試験を行い、レイノルズ数の変化が抗力・揚力に影響を及ぼす範囲について検討した。

試験結果について図-8、10に示すように抗力係数はレイノルズ数が 5×10^4 程度ではほぼ一定の傾向を示した。また、図-9、11に示すように揚力係数については 10^4 のオーダーではほぼ一定の値となることが確認された。ほぼ一定になると判断されるレイノルズ数についてはブロック形状により差異はあるが、ほぼ 5×10^4 以上の範囲においては一定の傾向を示すと判断される。

図-8に示す単体試験において対称突起型や連結型など表面抵抗が大きなブロックは、レイノルズ数の低減により抗力係数の著しい増加が見られ、一定値に比べ約2倍程度大きな値となっている。レイノルズ数が小さな範囲では形状抵抗に比べ表面抵抗が大きな比率になると考えられるが、増加率については表面抵抗のみでは大きすぎると考えられ、その要因については今後検討する事が必要である。なお、群体についてはレイノルズ数が小さい場合は(2)に示したように測定精度に問題があるが、単体時には抗力が大きく計測器の精度を原因とするわけにはいかない。

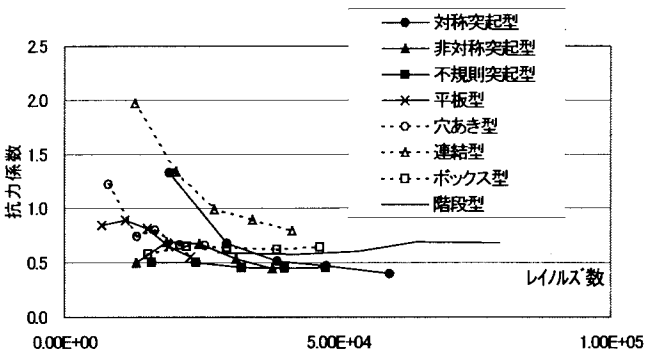


図-8 レイノルズ数と抗力係数の関係(単体試験)

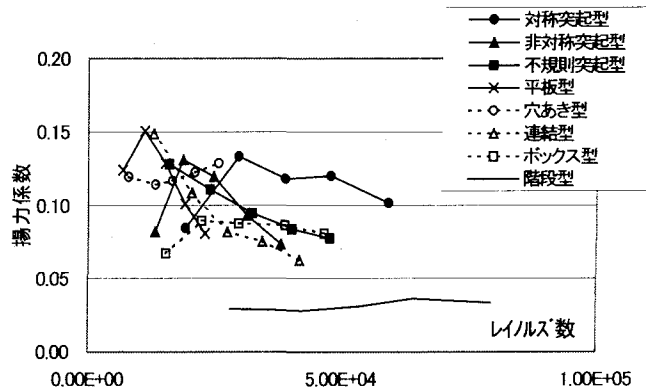


図-9 レイノルズ数と揚力係数の関係(単体試験)

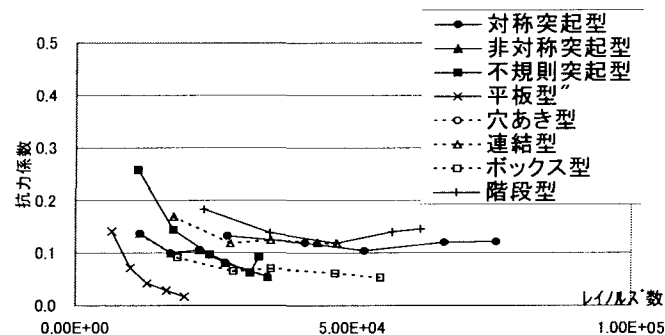


図-10 レイノルズ数と抗力係数の関係(群体試験)

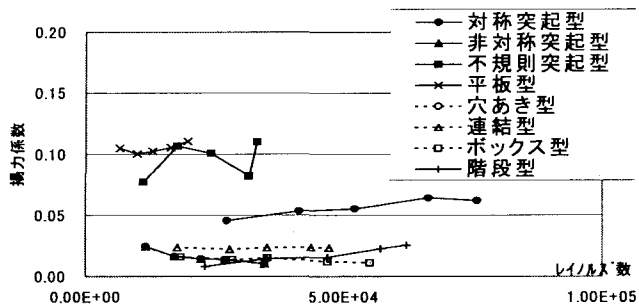


図-11 レイノルズ数と揚力係数の関係(群体試験)

(5) ブロック固定方法による抗力・揚力係数への影響

試験ブロックを分力計に設置する方法としては図-12 に示すように分力計に設置した载荷棒にブロックを取り付ける方式とした。载荷棒については剛性が小さいと固有振動数が低減するため、10mmのステンレス鋼棒を用いた。载荷棒と水路床の隙間は極力狭く設置する事とし、本試験では1mm程度とした。

ブロックと水路床の隙間については隙間が広いと水路床とブロック底面に流れが生じ、揚力に影響が生じると考えられた。そこで、試験では水路床とブロック底面の隙間を変化させた場合のブロック底面の圧力分布と揚力について計測を行い、その影響を調べた。図-13 にブロック底面の圧力水頭を計測したマンメータ位置を示し、図-14 には水深と底面圧力水頭を示し、図-15 には底面圧力の平均値とブロックと河床の隙間の関係を示す。単体ブロック試験においては境界層の発達のため河床に粗度(k_s : 2~3mmの砂)を設置している。粗面での鉛直流速仮想原点を粗度頂部から $\delta = k_s/4$ の距離とすると、原点下層厚に相当する隙間高(約2mm)に対してはブ

ロック底面圧力は静水圧とほぼ同様な値となっている。しかし、原点下層厚以上にブロック設置隙間が開いている場合は、ブロック底面圧力により揚力が影響を受ける。ブロックの設置精度を考慮するとブロック底面への流れの防止を図るスカートを設置し、試験を行う必要があると判断される。

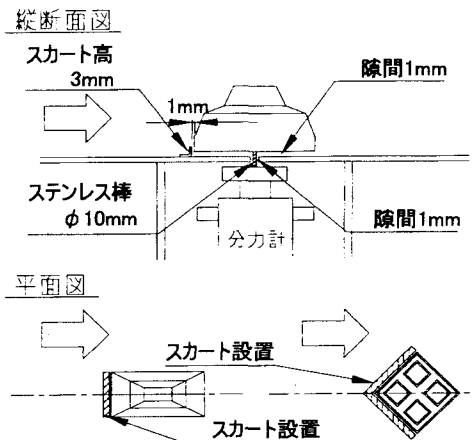


図-12 ブロック設置方法

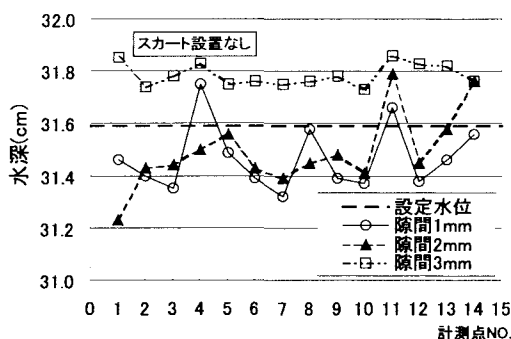


図-14 ブロック底面水頭

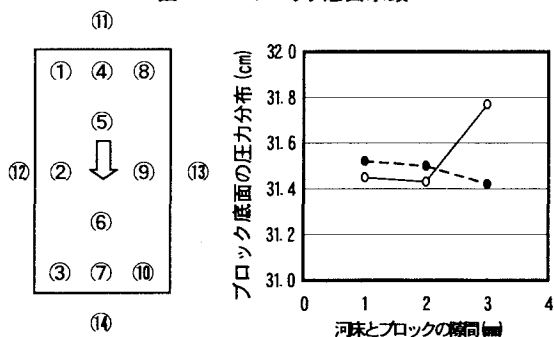


図-13 マノメータ設置位置

図-15 ブロック底面隙間による影響

(6) 相当粗度の計測

相当粗度の計測は、①水面勾配と水深により摩擦速度を求める方法、②ブロックに作用する抗力から摩擦速度を求める方法の2方法より摩擦速度を求め、平均流速公式から相当粗度を算定する事とした。試験においては試験ブロック位置で境界層が水面まで十分発達している必要があり、境界層の発達については流速の断面分布計測により確認を行った。

図-16 の試験ブロック設置地点の流速分布図に示すように試験水路において境界層が十分発達してい

る事が分かる。このような流れの状態、水面勾配から摩擦速度を求めて算定した相当粗度と水面勾配の関係を図-17 に示す。水面勾配が緩勾配になると相当粗度が小さくなる傾向が見られる。水面勾配が1/500 以下の結果については水面勾配の測定精度に問題が生じるが、1/500 以上の勾配についても勾配が大きくなると相当粗度が大きくなる傾向となっている。抗力から求めた掃流力による相当粗度は 5×10^4 のレイノルズ数を越えると一定の傾向を示している。水面勾配が急になるとフルード数が大きくなり、また相対水深 H/h が小さい (3~6) ことを考えると水面の乱れ等の造波抵抗係数などの底面の摩擦損失以外の損失が生じていると考えられる。ブロックの物性値の把握という観点から言うと相当粗度の計測は抗力の測定による方法が良いと考えられるが、勾配の急な河川での使用を考えると両者の実験を行っておくべきである。

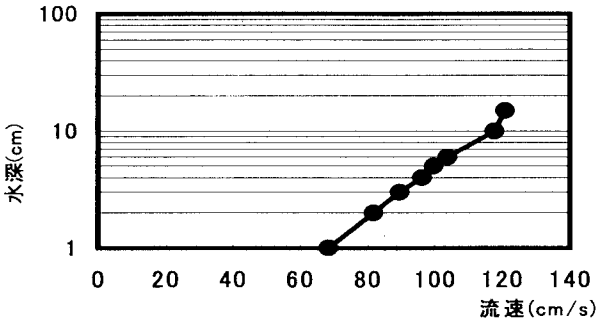


図-16 流速分布

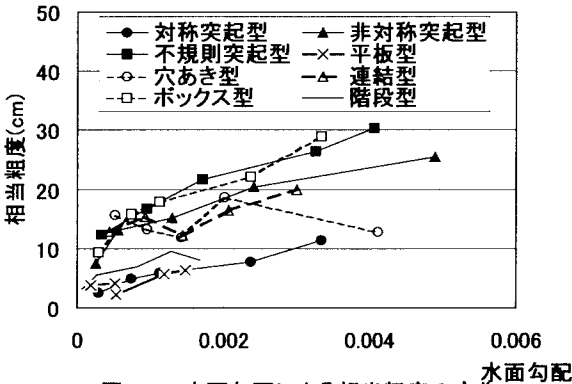


図-17 水面勾配による相当粗度の変化

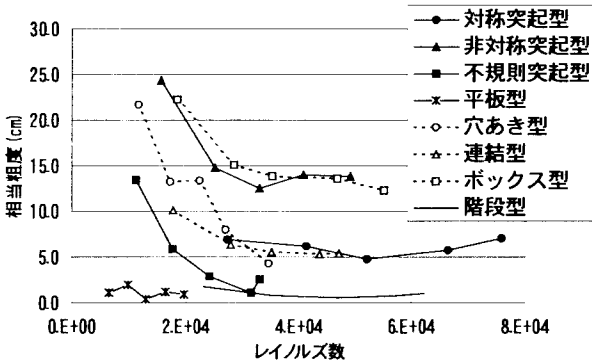


図-18 抗力から求めた相当粗度の変化

なお、平板型のブロックでは群体時に作用する抗力が小さいため抗力の計測精度に問題が生じ、このようなブロックについては水面勾配による計測精度に問題が生じない十分な区間長を確保して相当粗度など計測する事が必要である。

4. おわりに

本論文では8種類の形状の異なるブロックについて抗力係数、揚力係数、相当粗度を計測し、ブロックの水理特性を示すと判断される試験条件や計測方法について整理を行った。

試験条件としては、抗力係数、揚力係数がほぼ一定の値を示すと判断されるレイノルズ数は 5×10^4 程度であり、試験は比較的大きなレイノルズ数の領域で行う事が必要である。

試験法としては、単体設置ブロック計測で揚力が影響を受けるため、ブロックと水路床の間に流れが生じないようにブロックを設置する事が必要であり、計測値については計測器の振動特性を把握しフィルター処理を行う事が必要である。

相当粗度の計測は、群体に設置したブロックに作用する抗力から算定するが、計測器に対するレンジ比が0.5%を下回ると誤差が大きくなる。また、相当粗度が小さいブロックでは設置長を長くして水面勾配から相当粗度を計測することが必要である。

既存ブロックの種類、新型ブロックの開発などを考慮するとより簡易でブロック特有の水理特性を正確に計測可能な手法について今後も試験法の改良を行う事が必要であると考えている。

謝辞：本研究を行うにあたり協力を頂いた、建設省治水課・海岸防災課、建設省土木研究所、財団法人国土開発技術研究センター、ならびに実験資材の提供を頂いた共和コンクリート工業株式会社、三菱マテリアル建材株式会社、株式会社アドバンス、技研興業株式会社の諸氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会編：水理公式集
- 2) 財団法人国土開発技術研究センター編：護岸の力学設計法、山海堂
- 3) 笠木信秀・木村龍治・西岡通男・日野幹雄・保原充：流体実験ハンドブック、朝倉書店
- 4) 裾津家久：水理学・流体力学、朝倉書店
- 5) 福岡捷二・藤田光一・森田克史：護岸法覆工の水理設計法に関する研究、土木研究所資料第2635号、昭和63年4月

(1999. 9. 30 受付)