

護岸ブロックの水理特性値の評価法について

EVALUATION OF HYDRAULIC CHARACTERISTIC VALUE OF BANK PROTECTION BLOCK

田代洋一¹・飯干富広²
Youichi TASHIRO and Tomihiro IIBOSHI

¹正会員 財団法人土木研究センター 河川・海岸研究部 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4)

²正会員 工修 財団法人土木研究センター 河川・海岸研究部 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4)

PWRC published “Hydraulic characteristic examination manual of bank protection block” to evaluate the hydraulic characteristic value such as drag coefficient, lift coefficient, and roughness, etc, and stability of block.

However, some blocks which velocity distribution come out from the logarithm distribution, and roughness is too higher than the block height are examined.

Therefore, reexamination of velocity measuring point of the block crown, and the velocity measuring point, the fluid force line of the upper end blocks are started by the fundamental study.

Key Words : Drag coefficient, Lift coefficient, Equivalent roughness, Logarithm velocity distribution, Sheared force

1. はじめに

財団法人土木研究センターでは、「護岸の力学設計法」¹⁾にもとづく安定照査に必要な、護岸ブロックの抗力係数・揚力係数・相当粗度など水理特性値を評価する試験法を平成11年7月に「護岸ブロックの水理特性試験法マニュアル(以下マニュアル)」²⁾として定め、平成15年7月にその後の知見を加えて第2版を発行した。

現在、これにより水理特性値が明らかになったブロックは157個になる。護岸ブロック88個、根固めブロック29個の合計117個は、財団法人土木研究センターのホームページで公開されている。

しかし、これらの中には相当粗度が大き過ぎるものや、流速分布が対数分布から外れるものなどがいくつか存在する。また、これまで認証してきたブロックの中には、控厚のみを厚くして重量を割増した規格とするものが多々あり、これらブロックに対しては元となるブロックの水理特性値は適用できないといった課題点がある。

本研究では、はじめに、幅3mの大型水平水路を用いて水理模型実験を行った。その結果を受けて、現在の試験方法および解析方法の課題点についての再検討と、控厚のみが変わったブロックの水理特性値の推定法についての考え方について整理を行った。本稿はそれら結果を報告するものである。

2. 水理特性値の解析における課題

(1) 対象ブロックと安定照査

ブロックの水理特性値は、水路床上に理想的な状態で置かれた単体、群体、群体上流端ブロックを対象として解析する。単体ブロックとは、ブロックが単独で置かれた状態、群体ブロックとは群中に敷設されたブロック、群体上流端ブロックとは、群としておかれたもののうち最上流端のブロックのことを意味する。

群体ブロック試験では、滑動の安定照査を行うために必要な水理特性値と相当粗度の評価、群体上流端ブロック試験では、めくれの安定照査を行うために必要な水理特性値を明らかにする。単体ブロック試験は、多種多様なブロックの基本的な特性を知るために実施される。

小口止めを施工する護岸ブロックでは、群体中に敷設されたブロックの滑動に対する安定と河道粗度との適合性の照査が重要となる。一方、根固めや水制工に使用する根固めブロックは、一般的に小口止めがないため、群体中の滑動に対する安定照査や粗度の適合性照査に加えて、上流端ブロックのめくれに対する安定照査が最も重要となる。

(2) 群体ブロックに作用する流体力

群体ブロックの水理特性のうち、抗力係数と相当粗度

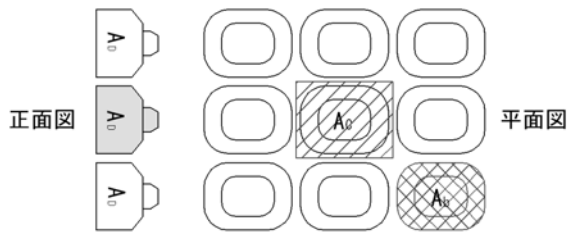


図-1 ブロック作用面積の定義

は次の理論に基づき解かれている。

群体ブロックに作用する抗力を D 、粗度要素支配面積を A_c 、抗力作用面積を A_b 、液体の密度を ρ 、作用するせん断力を τ_* 、摩擦速度を U_* とすると次のようになる。

$$D = \tau_* \times A_b = \rho \times U_*^2 \times A_c \quad (1)$$

これにより、ブロックに作用する抗力 D ・揚力 L ・横揚力 L_x ・モーメント M の4成分を分力計で計測すれば、ブロックに作用する U_* は次式で求まる。

$$U_* = \sqrt{D / \rho \times A_c} \quad (2)$$

これに対して、ブロック上の流速を V_d 、抗力係数を C_D とすると抗力 D は次のように表せる。

$$D = 0.5 \times \rho \times C_D \times A_b \times V_d^2 \quad (3)$$

①と③式より次式を得る。

$$C_D = (A_c \times U_*^2) / (0.5 \times V_d^2 \times A_b) \quad (4)$$

次に、ブロックの上面の流速分布が対数分布するものと仮定し、流速原点（流速のゼロ点）を y_0 とし、相当粗度 K_s の高さのブロック近傍流速 V_d をブロックに作用する流速とすると次式を得る。

$$U / U_* = 8.5 + 5.75 \log((y - y_0) / K_s) \quad (5)$$

これより、 $y = K_s$ 、 $y_0 = 0$ を代入すると、

$$V_d = 8.5 \times U_* \quad (6)$$

④と⑥式より⑦式を得る。

$$C_D = (2 / 8.5^2) \times (A_c / A_b) \quad (7)$$

これより次のことが分かる。

- 抗力係数は流速に無関係で、粗度要素支配面積と抗力作用面積比 A_c/A_b の関数となる。
- 抗力係数は、 A_c/A_b が1のサイコロ体のブロックが最小となる。

なお、 A_c と A_b の定義は図-1のとおりで、 A_c は群体中のブロック1個が流体力を受け持つ面積である。 A_b は揚力作用面積で、図は左から右に流れる状況を示している。

(3) 群体ブロックの流速原点

(6)式を導くにあたり、流速の原点つまり流速ゼロとなる位置を y_0 としたが、マニュアルではブロック平均高 h_0 を y_0 と定義している。

$$h_0 = \text{ブロック体積}V / \text{粗度要素支配面積}A_c \quad (8)$$

マニュアル初版では、ブロック体積 V を揚力作用面積 A_b で除したブロック平均高を用いて解析していたが、(1)式の理論に基づいて(8)式による h_0 に改訂された。

しかし、ブロックに近接した流速は、電磁流速計の不感帯に近く、ブロックの突起、空洞、脚、空隙などの影響を受けて乱れており、抗力 D と精度の高い流速分布が計測されない限り、(5)式で定義した対数分布と一致しない。

また、(8)式では粗度要素支配面積を分母に用いるため、空洞を持つブロックでは空洞が大きいほど平均高さが低下し、流速ゼロの位置とは無関係の高さを与える不都合が生じる。(1)式に基づけば、ブロックに作用する抗力はブロック天端に発生する近傍流速に関係するため、ブロック全体高 h_a が基本となる。

以上より、改めて流速分布を評価することで流速原点の定義を再検討した。

(4) 群体ブロック試験における試験水深

群体ブロック試験では、マニュアルによりブロック突起高 h_b の10倍程度水深とするように規定されている。ブロック突起高 h_b は次式で定義される。

$$h_b = \text{ブロック全体高}h_a - \text{ブロック平均高}h_0 \quad (9)$$

しかし、消波・根固めブロックとして分類されるものは概ねブロック平均高 h_0 が極めて小さくなる傾向があり、結果として試験水深を大きくとる必要が生じる。しかし、試験水路や使用するポンプ性能などの制約があるため、設定可能な試験水深は限られてくる。

そこで、マニュアルで規定している水深と、それよりも浅い場合、深い場合の水理特性値試験を実施し、水深が結果に及ぼす影響について検証を行った。

(5) 単体、群体上流端ブロックの流速計測位置

これまで、単体および群体上流端ブロックに作用する流体力を評価する流速は、ブロック前方10cm位置で計測されてきたが、ブロックに近接した位置はブロックの背圧の影響を受ける。仮に背圧の影響を受ける範囲での流速で特性値を評価した場合には、実際の設計に用いる河道の設計流速よりも過小に評価される可能性がある。

そこで、ブロック前方の流速分布を計測し、ブロックによる背圧の影響範囲について検証を行った。

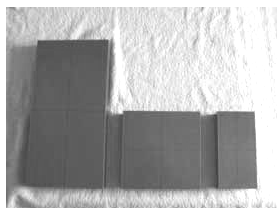
3. 水理特性値試験

実験は、幅3m×長さ60m×高さ2mの最大流速1.0m/s、最大流量3.0m³/sの大型二次元水平水路を使用した。

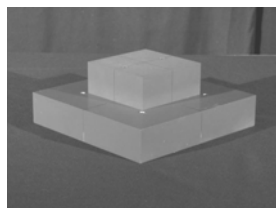
実験では、基本形状となる「矩形」、矩形の天端面に突起をつけた「突起」、中心部に孔を設けた「孔口」、

表-1 模型ブロック諸元 単位: m, m²

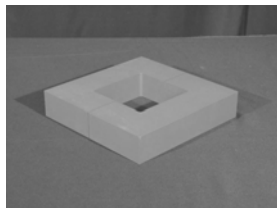
名称	記号	矩形1		矩形2		矩形3	
		原型	模型	原型	模型	原型	模型
ブロック幅	B	0.50	0.125	1.00	0.25	1.00	0.25
ブロック長	L	1.00	0.25	1.00	0.25	2.00	0.50
ブロック高	h _a	0.20	0.05	0.20	0.05	0.20	0.05
空隙	e	0.05	0.013	0.05	0.013	0.05	0.013
抗力作用面積	A _D	0.10	0.006	0.20	0.013	0.20	0.013
揚力作用面積	A _b	0.50	0.031	1.00	0.063	2.00	0.125
粗度要素面積	A _C	0.578	0.036	1.10	0.069	2.15	0.135
A _b /A _D	—	5.00		5.00		10.00	
A _C /A _D	—	5.78		5.51		10.76	
体積m ³	V	0.100	0.002	0.200	0.003	0.400	0.006
平均高	h ₀	0.173	0.043	0.181	0.045	0.186	0.047
名称	記号	突起		孔口		脚付	
ブロック幅	B	1.00	0.25	1.00	0.25	1.00	0.25
ブロック長	L	1.00	0.25	1.00	0.25	1.00	0.25
ブロック高	h _a	0.40	0.10	0.20	0.05	0.40	0.10
空隙	E	0.05	0.013	0.05	0.013	0.05	0.013
抗力作用面積	A _D	0.30	0.019	0.20	0.013	0.30	0.019
揚力作用面積	A _b	1.00	0.063	0.75	0.047	0.75	0.047
粗度要素面積	A _C	1.10	0.069	1.10	0.069	1.10	0.069
A _b /A _D	—	3.33		3.75		2.50	
A _C /A _D	—	3.68		5.51		3.68	
体積m ³	V	0.250	0.004	0.150	0.002	0.200	0.003
平均高	h ₀	0.227	0.057	0.136	0.034	0.181	0.045



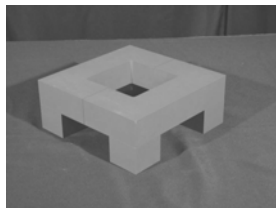
(a) 矩形ブロック



(b) 突起ブロック



(c) 孔口ブロック



(d) 脚付ブロック

写真-1 模型ブロック

孔口ブロックの底面4隅に脚部を設けた「脚付」を用いた。模型縮尺は全て原寸値の1/4とした。各模型ブロックの諸元を表-1に、模型写真を写真-1に示す。

4. 水理特性値の評価法について

(1) 群塊ブロックの流速分布と流速原点

図-2は、矩形ブロックの実験流速分布で、上段の図

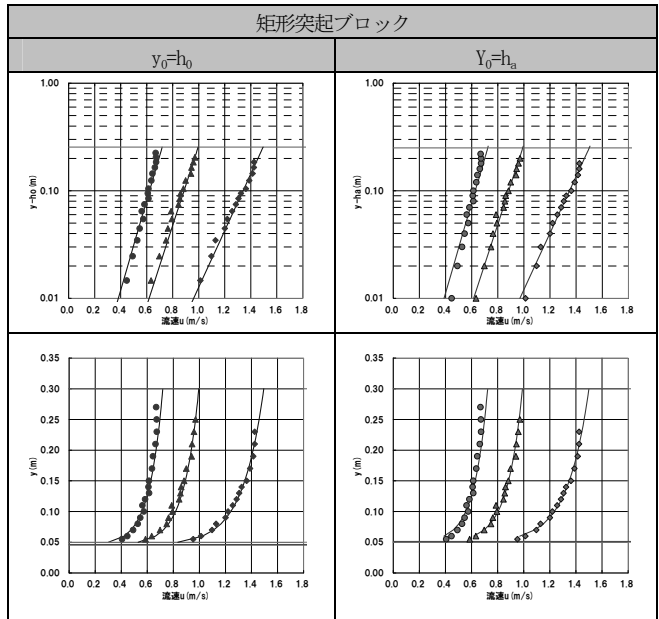


図-2 矩形ブロックの実験流速分布

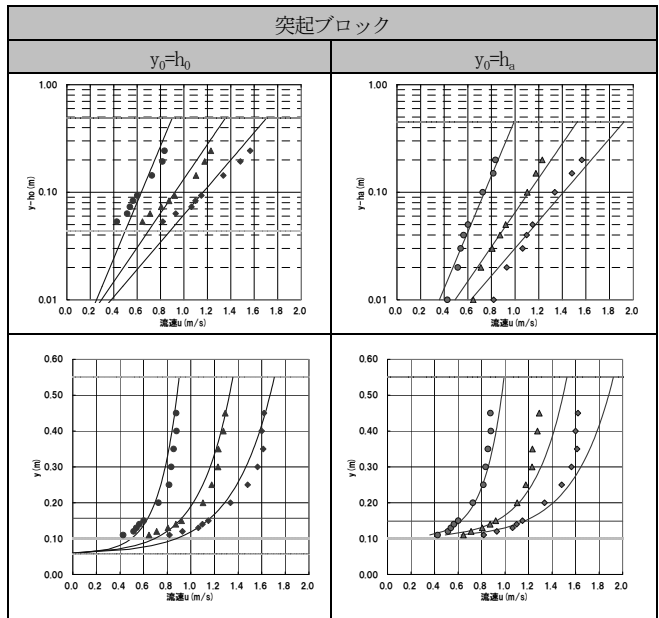


図-3 突起ブロックの実験流速分布

は実験流速分布を片対数の図に描くことで直線性と乖離状況を確認したものである。下段の図は、水路床基準とした実際の流速分布である。

下段左側は模型ブロック平均高 $h_0=0.045m$ 基準、右側はブロック全体高 $h_a=0.05m$ 基準の流速分布で、曲線は双方の基準高をゼロ点として(5)式で算出した対数流速分布である。右側の2流量の中央水深より表層の流速分布がやや乖離しているが、基準高がわずか5mm程度の差に過ぎないこと、双方とも流速原点の違いに関わらず相当粗度 K_s が1mm程度と小さいため、全体としては双方とも対数流速分布にほぼ一致する結果となった。上段の図で見ても、流速分布は(5)式で定義した対数分布にほぼ一

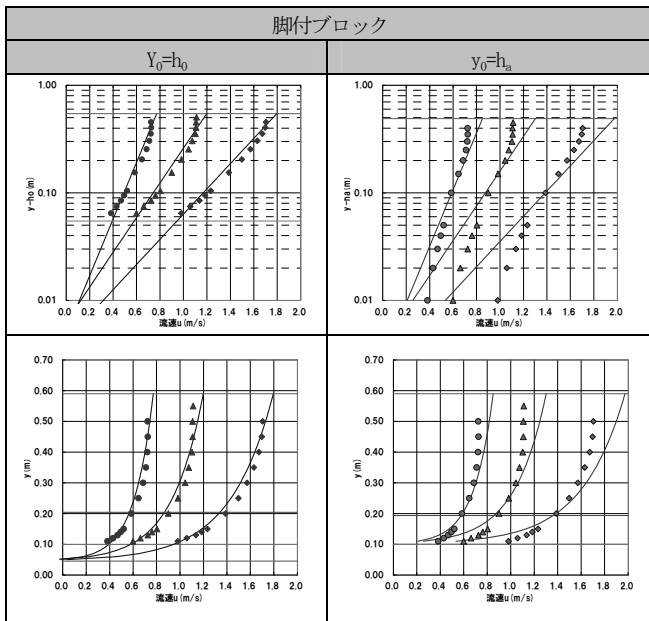


図-4 脚付ブロックの実験流速分布

表-2 ブロック諸元と水理特性値 原型値

名称	種別	流速原点 y_0 (m)	相当粗度 K_s (m)	揚力係数 C_{Lg}	抗力係数 C_{Dg}
矩形	平均高 h_0 (m)	0.182	0.006	0.066	0.040
	全体高 h_a (m)	0.200	0.005	0.153	0.107
突起	平均高 h_0 (m)	0.227	0.400	0.098	0.036
	全体高 h_a (m)	0.400	0.231	0.102	0.038
孔口	平均高 h_0 (m)	0.136	0.110	0.131	0.032
	全体高 h_a (m)	0.200	0.065	0.153	0.036
脚付	平均高 h_0 (m)	0.181	0.635	0.093	0.020
	全体高 h_a (m)	0.400	0.375	0.102	0.022

致しており、流速原点の違いによる差は確認できない。

次に、図-3に突起、図-4に脚付の結果を同様に示す。図より、全てに共通して流速原点 y_0 をブロック全体高 h_a として解析すると、相当粗度 K_s より上方の流速は、理論値に比べて実験値は小さくなる。一方、ブロック平均高 h_0 を流速原点 y_0 として解析すると、脚付ブロックなどブロック表面に大きな粗度が存在しない場合には比較的良好的な整合性を示すが、突起のように表面に大きな凸部を持つ場合には、平均高 h_0 から相当粗度 K_s までの流速は、理論値に比べて小さくなる。

以上のことから、群体ブロックの流速原点の設定は、ブロック形状により最適となる位置が異なる。現状は、ブロック平均高 h_0 を流速原点として解析した水理特性値を認証値として取り扱っている。表-2に示すように、係数への影響は大きくないが、相当粗度は倍程度異なる。

今後は、ブロック平均高 h_0 を用いた解析と併せて、任意に流速原点を変化させ、最適となる位置についての検証も行っていくことが必要である。多くの知見を得た後には、類似形状による流速原点 y_0 の設定の目安等について再度検証を進める必要がある。

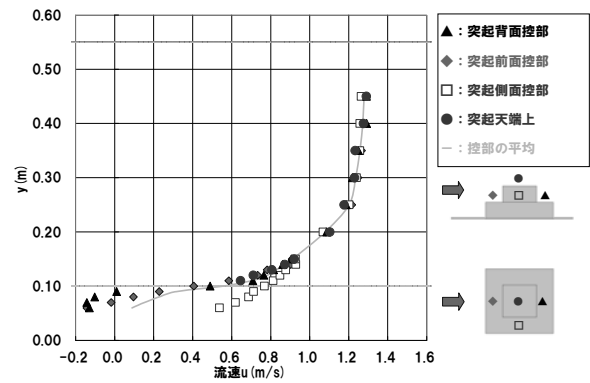


図-5 粗度要素周辺の流速分布

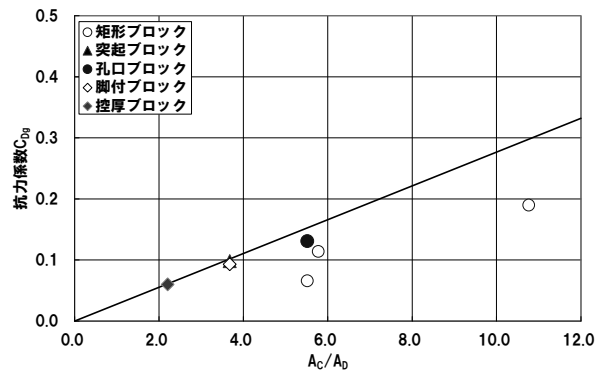


図-6 群体ブロックの抗力係数 C_{Dg}

(2) 群体ブロックの流速計測位置

図-5は、突起ブロックの①突起天端上、②突起前面、③突起背面、④突起側面の4地点の流速計測結果を表したものである。図より、突起近傍ではわずかながら計測位置により流速が異なる。しかし、現在の解析で用いている突起天端上の流速分布は、実線で示した突起前面、背面、側面の流速を平均した流速分布とほぼ等しいため、突起近傍の平均的な流速を計測していると判断できる。

よって、群体ブロック試験の現在の計測手法は妥当であるといえる。

(3) 群体ブロックの抗力係数・揚力係数

図-6は、抗力係数 C_D の実験値と(7)式に基づいて理論値を比較したものである。

図より、ブロック天端面が平滑である矩形ブロックでは、分力計で計測される抗力 D 自体が小さいことも関係して、理論直線から乖離する傾向が見られる。特に、 A_c/A_0 が10を超える矩形3では理論値と実験値の違いが大きくなる。一方、突起、孔口、脚付ブロックは、概ね理論値と実験値は一致している。以上ことから、矩形ブロックの表に表面が平滑で群体中で抗力を受けにくい形状では、理論式を用いるとやや係数を大きめに評価してしまう可能性がある。しかし、ある程度表面に凹凸があるものや、孔口、脚を有するような形状では(7)式に基づくことで抗力係数 C_D は概ね推定することが可能である。

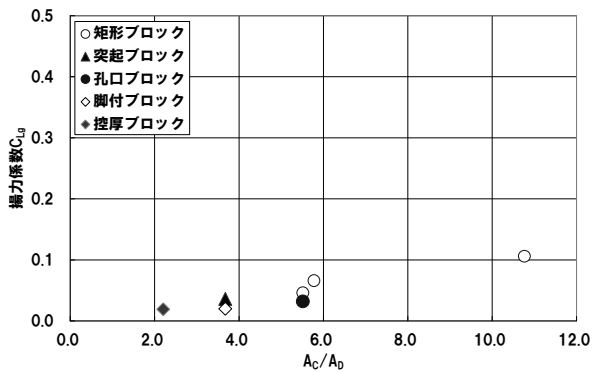


図-7 群体ブロックの揚力係数 C_{Lg}

表-3 群体ブロックの抗力係数・揚力係数

	抗力作用面積 A_b	粗度要素面積 A_c	A_c/A_b	抗力係数 C_D		揚力係数 C_L
				実験値	理論値	
矩形1	0.100	0.578	5.78	0.114	0.160	0.066
矩形2	0.200	1.103	5.51	0.066	0.153	0.046
矩形3	0.200	2.153	10.76	0.190	0.298	0.106
突起	0.300	1.103	3.68	0.098	0.102	0.036
孔口	0.200	1.103	5.51	0.131	0.153	0.032
脚付	0.300	1.103	3.68	0.093	0.102	0.020
控厚	0.500	1.103	2.21	0.060	0.061	0.019

図-7には揚力係数の実験結果を示す。図より、概ね揚力係数は0.1以下であることが分かる。

以上のことから、群体ブロックの抗力係数は⑦式により、揚力係数は最大で0.1程度を想定すれば、概略で水理特性値の認証を持たないブロックの安定照査も可能である。ただし、田代ら³⁾により指摘されているように認証している特性値は平均値であり、ブロックに作用する抗力・揚力は形状ごとに変動幅や振動周期が異なるため、詳細検討までにはブロック特性を知る上でも実験により確認を行うことは必須である。

(4) 控厚のみが異なるブロックの水理特性値

「突起ブロック」の控厚のみを2倍にした「控厚ブロック」の実験結果を図-6、7と表-3に併せて示す。

抗力係数については(3)でも述べたように、(7)式の理論線とほぼ一致することから推定が可能である。一方、揚力係数については、突起ブロックが0.036に対して控厚ブロックが0.019と元のブロックよりも小さくなる。揚力自体は作用面積に変化は無いため大きく変動することはない。しかし、抗力作用面積が増えた分ブロックに作用する抗力が増加する。そのため、突起ブロックよりも相当粗度が大きくなり、結果として係数の評価に用いる近傍流速が大きな値となる。この影響で揚力係数は元のブロックよりも小さくなる。

以上のことから、控厚のみを変えた群体ブロックの抗力係数は(7)式により、揚力係数については最大0.1もし

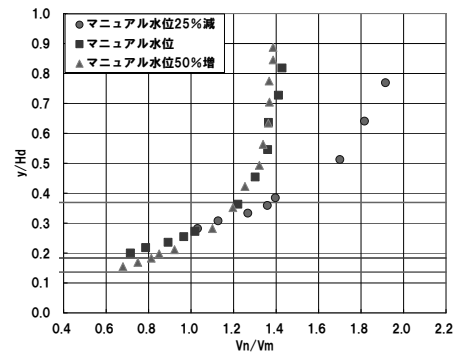


図-8 試験水深と流速分布の関係

表-4 試験水位と水理特性値

突起		マニュアル水位	マニュアル水位40%増	マニュアル水位89%増
単体	揚力係数 C_L	0.199	0.223	0.231
	抗力係数 C_D	0.555	0.596	0.560
上流端	揚力係数 C_L	0.205	0.280	0.279
	抗力係数 C_D	0.900	0.812	0.834
突起		マニュアル水位25%減	マニュアル水位	マニュアル水位45%増
群体	揚力係数 C_L	0.021	0.036	0.026
	抗力係数 C_D	0.089	0.098	0.094
	相当粗度 K_s	0.789	0.400	0.499

くは元のブロックの係数を用いれば、概略の安定照査は可能である。ただし(3)でも述べたように抗力・揚力の振動特性は全く別のものとなるので、詳細検討時には実験によりブロックの特性を確認するが必須である。

(5) 群体ブロック試験の試験水位が及ぼす影響

図-8に、群体ブロック試験の試験水深をマニュアルの規定に沿った45cm、25%浅くした30cm、45%深くした65cmの流速分布の結果を示す。横軸は各鉛直計測位置の流速と水路内平均流速比 V_n/V_m 、縦軸は鉛直計測位置高と実験水深比 y/H_b で表記した。つまり、 y/H_b が1.0に近づくにつれ水面近傍になることを意味する。また、表-4には試験水位と水理特性値の関係を示す。ここでは突起ブロックを対象とした。

図-8より、マニュアル規定水深よりも浅い場合には、相当粗度より低い位置では他水深に比べて流速が低下傾向にあり、逆にそれよりも上方では流速が増加する傾向がある。つまり、水深が浅すぎて、かつブロック自体に凹凸が大きい場合には水路内に粗度の影響が大きく現れてしまうといえる。

次に、試験水深がブロックの水理特性値に与える影響について検証を行う。表-4より、抗力係数および揚力係数には試験水深による影響はさほど顕著には現れない。最も顕著となるのが相当粗度への影響であり、試験水深を浅くするとマニュアル規定水深時に解析された相当粗度よりも約2倍程度大きな結果が得られる。一方、試験

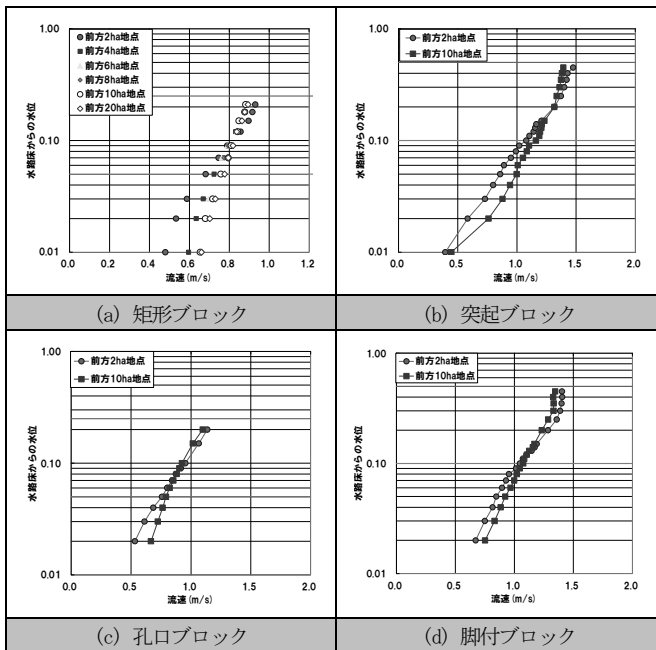


図-9 群体上流端の水路上の流速

水深を深くした場合には若干相当粗度が大きくはなるが、許容誤差内にあると判断できる。

つまり、ブロックの形状にもよるが、マニュアルで規定した水深よりも実施水深が低い場合には相当粗度を大きく評価してしまう可能性をもつ。消波・根固めタイプの試験では、マニュアル規定の水深を確保することが難しいが、可能な限り水深を取った実験を実施することが望ましい。

(6) 単体、群体上流端ブロックの流速計測位置

図-9(a)は、矩形2を用いた群体上流端ブロック先端を基準として $2h_a$ から $20h_a$ の水路上の流速分布の計測結果である。図より、群体ブロック直上流の流速は、ブロックの背圧の影響によって流れに上向きに剥離する状況であることがわかる。その影響は少なくともブロック高 h_a の10倍長まで及んでいる。

次に、ブロック形状による背圧の影響の度合いを検証するために、突起・孔口・脚付ブロックの $2h_a$ と $10h_a$ 地点の流速分布の結果を図-9(b)～(d)に示す。ブロック形状により、流速低下の割合にバラつきはあるが、いずれも上流端ブロック直上流では流速が小さくなる。

これまで、単体および群体上流端ブロックの水力特性値の評価には、ブロック直上流10cm位置での流速を用いてきた。しかし、この位置の流速は背圧の影響により流速が低下している。そのため、抗力係数および揚力係数が大きく評価されてしまう。係数が大きいということは、安定照査の上では、作用する抗力・揚力が大きく算出され、設計面からは流れに対して安全なものを選定する考え方となる。ただし、背圧の影響は形状により異なるため、場合によっては過大すぎる設計になる可能性もある。そのため、今後、新たにブロックの評価を行う場合には、

10cm上流と $10h_a$ 上流位置の流速を計測し、当面は背圧の影響を受けない $10h_a$ 地点の流速で評価を行う。また、ブロック形状による流速低下率の傾向を蓄積し、既存の水力特性値の補正の検討を行う。

5. 結論

本研究では以下のことが明らかとなった。

- (1) 群体ブロックの抗力係数は、 A_c/A_0 の関係から成り立つ理論式(7)により推定が可能である。また、揚力係数については概ね0.1以下である。この考え方により、類似形状のブロックや控厚のみが異なるブロックの推定が可能である。
- (2) 群体ブロックの流速原点は、ブロック形状により最適となる点が異なる。そのため、当面はマニュアルに沿った解析と併せて流速原点を任意に変えた場合の解析も実施する。
- (3) 群体配置した突起天端上の流速は、粗度要素周辺の流速を代表したものである。そのため、特性値の評価にこの地点の流速を代表値として考えることに妥当性は確認できた。
- (4) 単体、群体上流端ブロックの特性値の評価に用いる流速は、ブロック直上流では背圧の影響を受けた流速となってしまう。このため、背圧の影響が極めて小さなブロック上流 $10h_a$ 地点の流速により評価を行う。
- (5) 群体ブロック試験時の水深をマニュアルに規定したものより小さくとりすぎると、ブロック粗度の影響が顕著となり、水路内の流速やブロックの相当粗度の評価に影響を及ぼす。そのため、可能な限りマニュアル規定の水深を確保することが望ましい。

謝辞：最後に、本研究は(株)アドヴァンス、共和コンクリート(株)、技研興業(株)、日建工学(株)、ランデス(株)とジャパンテクノメイトの多大な協力を得て実施したものである。御協力頂いた各社には感謝の意を表す。また、本論文の取りまとめにあたり「護岸ブロック水力特性値評価委員会」の関根早稲田大学教授、林防衛大学校准教授、坂野土木研究所総括主任研究員の御指導を頂いた。

参考文献

- 1) 財団法人国土開発技術センター編：護岸の力学設計法 山海堂, 1999.2
- 2) 財団法人土木研究センター：護岸ブロックの水力特性試験法マニュアル, 1999.7, 2003.7
- 3) 田代洋一, 飯干富広ら：護岸ブロックの水力特性値に関する実験的研究, 河川技術論文集, 第15巻, pp.357-362, 2009. (2010. 4. 8受付)