

「護岸の力学設計法」の適用にあたって 考慮すべき不確実要因

UNCERTAINTIES TO BE CONSIDERED
IN APPLYING THE “MECHANICAL DESIGN METHOD” FOR REVETMENT WORKS

中山修¹・佐古俊介²・藤堂正樹³・中村裕一⁴・赤石直也⁵

Osamu NAKAYAMA, Syunsuke SAKO, Masaki TODO, Yuuichi NAKAMURA, Naoya AKAISHI

¹正会員 財団法人 国土技術研究センター 調査第一部 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門2丁目8-10 第15森ビル)

²正会員 工修 財団法人国土技術研究センター 調査第一部 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門2丁目8-10 第15森ビル)

³正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ株式会社 河川部 (〒163-0730 新宿区西新宿2-7-1)

⁴パシフィックコンサルタンツ株式会社 河川部 (〒163-0730 新宿区西新宿2-7-1)

⁵パシフィックコンサルタンツ株式会社 河川部 (〒163-0730 新宿区西新宿2-7-1)

“Mechanical design method for revetment works” released in 1998 was written to decide such required hydraulic factors in revetment design such as depth of footing of foundation works, weight of slope protective works, and thickness of stay. In the “Mechanical design method”, both external force such as velocity of flow and scouring depth that affect bank in flood events and yield strength that is decided by the revetment block formation are evaluated by using present hydraulic knowledge and are clearly reflected in design, as well as based on the experiences through the past disasters.

On the other hand, there are still many hydraulic factors that need further accumulation of data in evaluation, because some calculation results of these factors may be unreliable.

This paper indicates unreliable factors and the degree of uncertainties in case of designing revetments and checking them, and makes clear the items that need further accumulation of data and examination for these factors.

Key Words : *Revetment design, River bank protection, unreliable factor, uncertainties*

1. 目的

平成10年度に発刊された「護岸の力学設計法：財団法人 国土技術研究センター」¹⁾は、護岸設計で必要となる基礎工根入れ深、法覆工重量・控え厚等について、洪水時に作用する流速や洗掘深等の外力と護岸ブロックの形状等によって定まる耐力とを評価し、必要諸元を算定する手法を提示したものである。これは、護岸工の諸元決定に関する性能規定ととらえることができる。設計法の提示に際しては、従来の災害から学んだ経験に加えて、現時点での水理学的知見を活かすことに工夫がなされた。

一方、現時点では、評価式中に含まれるブロック固有の水理諸元等にはさらなるデータ集積が必要な不確実要因も存在する。このことは、必要諸元の計算結果にも影響を与えるため、不確実要因となる項目、程度について明らかにし、どのようなケースに留意が必要であるかを示すことが本報の目的である。

2. 検討内容

洪水時の流体力による侵食に耐えるために、護岸の各構成要素には以下の性能が求められる。

表-1 護岸の構成要素と求められる性能

構成要素	想定する外力	要求される性能 (耐力)
法覆工	流速	流速に耐え得る重量 (控え厚), 石径.
基礎工	洗掘深	最大洗掘が生じた場合でも、法覆工を支えるための根入れ深さ.
根固め工	洗掘深・流速	最大洗掘が基礎工前面まで及ばないような敷設幅, 必要重量.

因みに、これまでの護岸設計では、法覆工の控え厚や基礎工の根入れ深については、特に設計を行わず、標準的な値を用いている場合が多い。

3. 設計法に内在する不確実要因

(1) 外力評価に内在する不確実要因

a) 外力の評価方法

「護岸の力学設計法」では以下のように外力評価をすることとしている。

①設計水深 (H_d) の算出

$$H_d = H.W.L - Z$$

$H.W.L$: 計画高水位・ Z : 平均河床高

②平均流速 (V_m) の計算

$$V_m = \frac{1}{n} \cdot H_d^{\frac{2}{3}} \cdot I_e^{\frac{1}{2}}$$

n : 粗度係数・ I_e : エネルギー勾配

③平均流速の補正 (代表流速 V_0 の算定)

$$V_0 = \alpha \cdot V_m$$

$$\alpha = (1 + \alpha_1 + \alpha_2) \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4$$

α : 補正係数

α_1 : 湾曲の影響による補正

$\alpha_1 = B/2r$ (B : 河幅・ r : 曲率半径)

α_2 : 河床洗掘の影響による補正

$\alpha_2 = \angle Z/2H_d$ ($\angle Z$: 洗掘深)

α_3 : 高水敷と低水路との流れの干渉の影響による補正

(「護岸の力学設計法」参照)

α_4 : 根固め工の設置を配慮した補正

b) 内在する不確実性要因

外力評価に関する不確実要因は、算出をおこなうプロセスでの設定・推定方法に内在する。不確実要因を列挙すると以下のとおりである。

①平均河床高 (H_d) の推定

②粗度係数 (n), エネルギー勾配 (I_e) の設定

③各種補正係数の評価プロセスに内在する

不確実要因

α_1 : 湾曲半径(r), 川幅(B)の設定

α_2 : 洗掘深 ($\angle Z$) の推定

α_3 : 高水敷幅の設定

c) 不確実要因の感度分析

以下では③各種補正係数の評価プロセスに内在する不確実要因に的を絞って、セグメント毎にモデル河道を設定し、外力評価法に内在する不確実要因の感度分析をおこなった。

表-2 モデル河道の設定

セグメント	エネルギー勾配 I_e	低水路部			高水敷部			適用
		水深 H_d (m)	粗度係数	平均流速 V_m (m/s)	水深 H_d (m)	粗度係数	平均流速 V_m (m/s)	
2-2	1/4000	10	0.028	2.62	5	0.026	1.78	
2-1	1/1000	8	0.030	4.22	4	0.032	2.49	
1	1/250	6	0.036	5.80	3	0.038	3.46	

①湾曲の影響による補正 (α_1)

湾曲に対する補正係数は、河道湾曲部に生じる自由渦、強制渦による流速増加を補正するものである。補正は河幅及び曲率半径により算出される。図-1は、河幅・曲率半径比(B/r)と補正係数及び補正した流速をプロットしたものである。 r/B の下限値を3程度と判断し、 B/r の上限値は1/3程度とした。これより湾曲による補正係数 $1 + \alpha_1$ を算定すると、1.2程度以下となり、大きな補正要因とはならない。 B/r の評価が振れた場合の補正係数への影響も小さい。平均流速の大きなセグメント1の河道においても、最大で1m/s程度の流速増加が上限である。

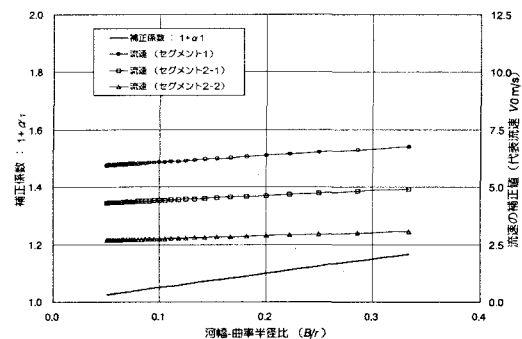


図-1 湾曲の影響による補正に関する感度

②河床洗掘の影響による補正 (α_2)

直線部で砂州のある河道区間や湾曲の影響により河床洗掘がある区間ではその影響を考慮した補正をおこなう。河床洗掘の影響による補正は、代表流速が水深の2乗に比例するものとして、設計水深(H_d)と洗掘深($\angle Z$)により算出される。

図-2は洗掘深・水深比($\angle Z/H_d$)と補正係数及び補正した流速をプロットしたものである。既往の研究成果等によれば、直線河道で砂州のある河道の場合の補正係数 $1 + \alpha_2$ は最大2程度¹⁾とされており、他の要因と比べて大きな補正要因となることがわかる。

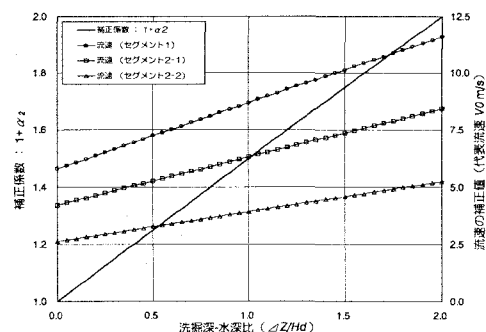


図-2 洗掘の影響による補正に関する感度

図-3は、セグメント1~2-2の河道をもつ代表的な3河川の横断図より確認した $\angle Z/H_d$ の読み取り値の頻度を取りまとめたものである。その $\angle Z/H_d$ の平均値と

その標準偏差(s)は河床勾配が急になるほど大きな値となることを確認できた。したがって急流河川ほど洗掘による補正係数の値とその変動幅が大きくなる傾向にあり、設計時には留意が必要である。

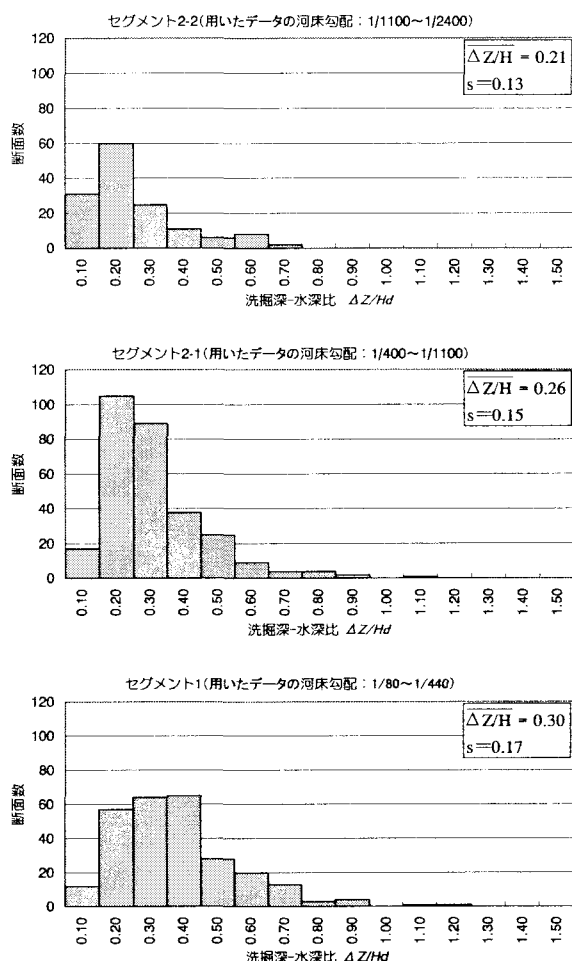


図-3 代表的な河川の $\Delta Z/H_d$ の頻度

③流れの干渉の影響補正 (α_3)

高水敷上の流速と低水路内の流速は、差が大きく、高水敷部と低水路部との間で運動量交換が生じる。高水敷幅 b_p ・高水敷水深 H_p 比 (b_p/H_p) が小さい場合には、高水敷の流れは低水路の流れの干渉を強く受けるため、補正をおこなう。

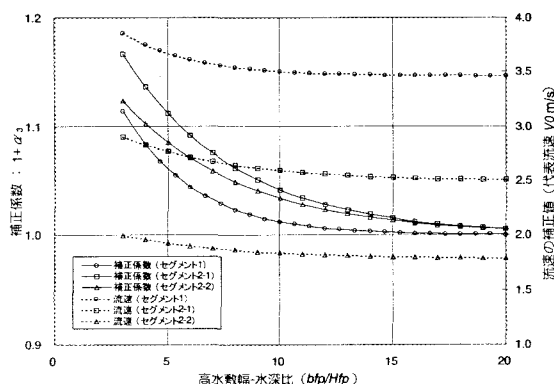


図-4 流れの干渉の影響による補正に関する感度

図-4は b_p/H_p と補正係数及び補正した流速をプロットしたものである。補正係数は最大でも1.2未満であり、高水敷上の流速は、低水路部の流速と比較して小さいため、流速の増加は、セグメント1でも0.6m/s程度と小さい。 b_p/H_p の振れに対する補正係数への影響も小さい。

d)外力評価の感度分析結果の集計

想定した河道に対し低水路部、高水河岸部毎に仮定した補正係数の変動による外力評価の変動値を算出した。補正係数の変動幅は、補正係数算出に含まれる不確実要因が50%程度変動すると仮定して算出している。表-3、表-4及び図-5はその算定結果である。低水路部の流速は、セグメント1で仮定値が7.54m/s、50%変動後が8.56m/s程度となっている。流量の増分の大部分が洗掘による補正であることより、変動要素としては、洗掘の影響が大きいと言える。

また、50%変動させた流速の増分を粗度係数の減分に換算すると0.004程度に相当する。

なお、高水河岸部の不確実要因として高水敷幅・水深比を50%程度変動させた場合でも流速の変動は最大で0.3m/s程度である。これを低水路部と同様に粗度係数の減分に換算すると0.002程度に相当する。

表-3 低水路部の感度分析の集計

セグメント	平均流速 Vd (m/s)	α_1 (湾曲)		α_2 (洗掘)		代表流速 V0 (m/s)	流速増加の 粗度換算値 (減少分)
		r/b	流速補正	$\Delta Z/H$	流速補正		
セグメント 2-2	仮定 値	0.10	0.13	0.50	0.66	3.41	
	50% 変動後	0.20	0.26	0.75	0.98	3.87	-0.0033
セグメント 2-1	仮定 値	0.10	0.21	0.50	1.05	5.48	
	50% 変動後	0.20	0.42	0.75	1.58	6.22	-0.0036
セグメント 1	仮定 値	0.10	0.29	0.50	1.45	7.54	
	50% 変動後	0.20	0.59	0.75	2.18	8.56	-0.0043

表-4 高水河岸部の感度分析の集計

セグメント	平均流速 Vd (m/s)	α_3 (干渉)		代表流速 V0 (m/s)	流速増加の 粗度換算値 (減少分)
		b_p/H_p	流速補正		
セグメント 2-2	仮定 値	10.0	0.06	1.84	
	50% 変動後	5.0	0.15	1.93	-0.0012
セグメント 2-1	仮定 値	10.0	0.10	2.59	
	50% 変動後	5.0	0.28	2.77	-0.0020
セグメント 1	仮定 値	10.0	0.04	3.51	
	50% 変動後	5.0	0.21	3.67	-0.0017

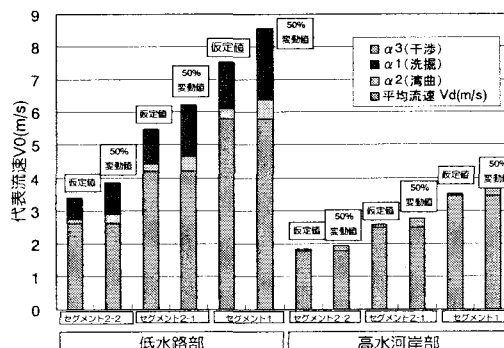


図-5 感度分析の集計結果

(2) 耐力評価に内在する不確定要因

以下では、護岸の構成要素のうち法覆工の設計を対象に考察する。この場合、外力は流速、法覆工が有すべき性能は、「流速に耐え得る重量（控え厚）」を確保することである。

例えば、練張り護岸の場合、ブロック1個に求められる必要重量は次式で示すことができる。

$$\mu (W_w \cos \theta - L) \geq ((W_w \sin \theta)^2 + D^2)^{1/2} \quad (1)$$

W_w ：法覆工の水中重量

μ ：コンクリートの摩擦係数 (0.65)

揚力 $L = \rho_w/2 \cdot C_L \cdot A_b \cdot V_d^2$

抗力 $D = \rho_w/2 \cdot C_D \cdot A_D \cdot V_d^2$

A_b ：ブロックによって定まる、揚力を受ける面積

A_D ：ブロックによって定まる、抗力を受ける面積

ρ_w ：水の密度 $102(\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4)$

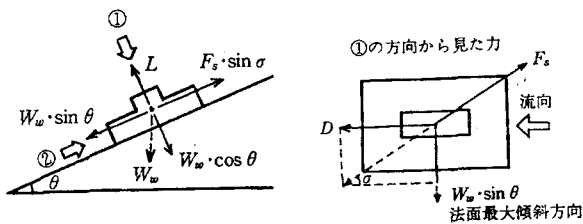


図-6 力のつりあいモデル図例

ここで、 C_D 、 C_L は、やはりブロックの種類によって定まる抗力係数、揚力係数であり、通常は風洞実験によって測定される。

現在、ブロックの性能を明らかにするためには、これらの値の測定が不可欠であり、市販のブロックについては、係数の測定が鋭意進められており、成果の一部が公開されている。図-7、8は、8種類のブロックについて C_D 、 C_L を算定した結果である²⁾。

詳細は当該文献を参照されたいが、測定には4分力計が用いられ、それぞれのブロックを、「群体：横断方向に5個以上設置」、「単体」、「上流端」の3通りの設置法とした場合の測定結果が記されている。

なお、測定時の水深は、ブロック高の5倍、突起高の10倍以上を確保するようにしている。また、抗力の作用面積は、流れに対する全投影面積、揚力作用面積は、設置面に垂直な全投影面積としている。

抗力・揚力の算定に用いる流速値は、群体の場合は、対数則分布を仮定した場合の相当粗度高さ k_s の流速値、単体の場合は、ブロック天端位置での流速値としている。

図-8から、ブロック形状、設置形態（群体、単体、上流端）によって C_D 、 C_L に差があることが判る。したがって、同一のブロックを用いた場合でも何らかの理由で、不陸や段差の発生など、想定した設置状態からの変化が生ずると C_D 、 C_L の値は変動する。式(1)に

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

図-7 測定に用いたブロックの形状寸法²⁾

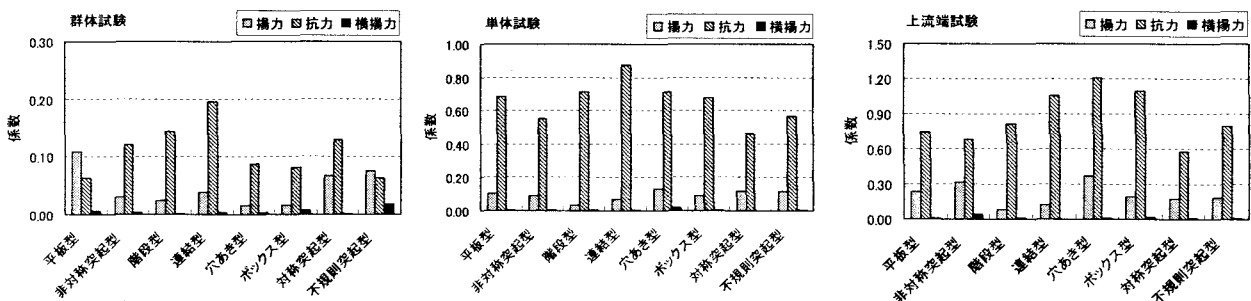


図-8 ブロック別係数 (C_D 、 C_L) 測定結果²⁾

よる必要重量（控え厚）の計算を行えば、使用ブロック及びブロック設置状況によって値は異なる。

以下では、護岸の力学設計法に紹介されている 2 種類の護岸工法を対象にして、水理諸量評価の不確実性に伴う必要諸元の変動量について感度分析を行った。

a) 練張り護岸の C_D, C_L 評価の不確実性と影響

練張り護岸は、隣接したブロックが群体となって流水に抵抗する構造である。図-9 に示す平張りブロックを用いて、2 割勾配の練張り護岸を設計する際の必要重量を式(1)により算定した。式中の C_D, C_L の評価を変動させて必要重量を算定し、ブロックの平面寸法から必要控え厚に換算した。その結果が図-10, 11 である。

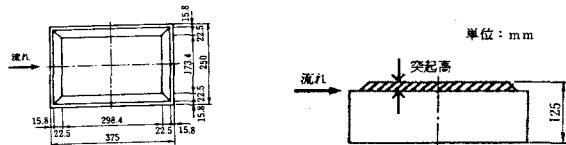


図-9 平張りブロックの形状

このブロック形状の場合は、必要控え厚さに影響を与えるのは C_L であり、突起高が小さいため C_D はほとんど影響しないことが判る。

風洞実験によって得られている既存の測定値³⁾は、 $C_D=0.70$ 、 $C_L=0.10$ である。もし、 C_L の値が 0.05 となれば、必要控え厚さは 0.55 倍程度となる。

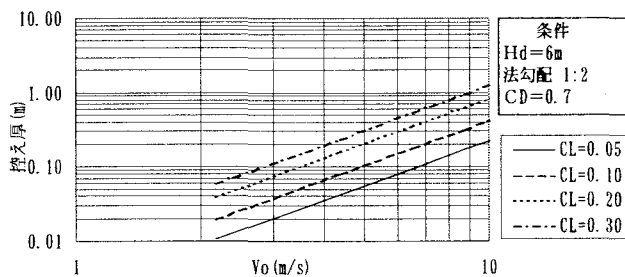


図-10 揚力係数 C_L を変化させた場合

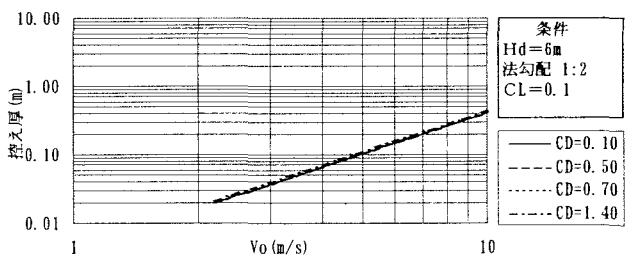


図-11 抗力係数 C_D を変化させた場合

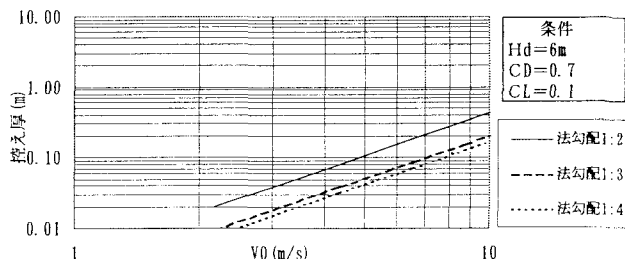


図-12 法勾配を変化させた場合

別途、 C_D, C_L 値は既存測定値を用いて、法面勾配を変化させた場合の必要控え厚との比較をおこなった。この図から明らかなように、 C_L の値が 0.1 から 0.05 に変化することは、法面勾配が 2 割 (1:2) から 3 割 (1:3) に変わることとほぼ同等の効果があることが判る。

b) 空石張り護岸の k_s 評価の不確実性と影響

空石張り護岸は、ほぼ等しい大きさの部材（切出し石など）が、かみ合わせ効果を期待できるよう隙間に碎石などの胴込め材が施工されて、整然と設置されている構造である。十分なかみ合わせ効果が期待できる場合の石 1 個に求められる必要径は次式で示すことができる。

$$D_m \geq V^2 / [\{ 6.0 + 5.75 \log_{10}(H_d/k_s) \}^2 \cdot \tau_{sd} \cdot s \cdot g] \quad (2)$$

D_m : 部材の必要径

H_d : 設計水深

k_s : 相当粗度

s : 河床構成材料の水中比重

斜面補正

$$\tau_{sd} = \tau_{sd} \times \cos \theta \sqrt{1 - \frac{\tan^2 \theta}{\tan^2 \Phi}}$$

θ : 斜面角度

Φ : 部材の水中安息角

この基本式を用いて、2 割勾配の空石張り護岸を設計する際に用いる必要径を算定した。式(2)の中の相当粗度 k_s の評価に不確実性が内在する。ここでは、 $k_s=0.5 \sim 3.0 D_m$ と変動させて必要径を算定した。図-13 は、その結果である。「護岸の力学設計法」では、 $k_s=D_m$ と仮定しているが、もし、相当粗度 k_s を $k_s=0.5 D_m$ した場合の、必要径は 0.72 倍程度となる。

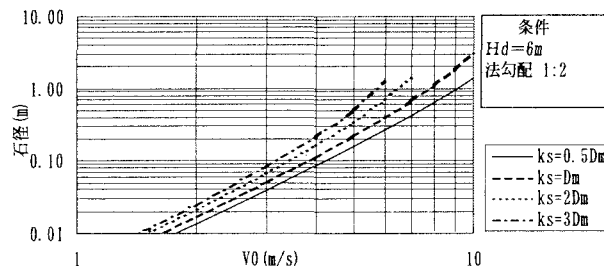


図-13 k_s を変化させた場合

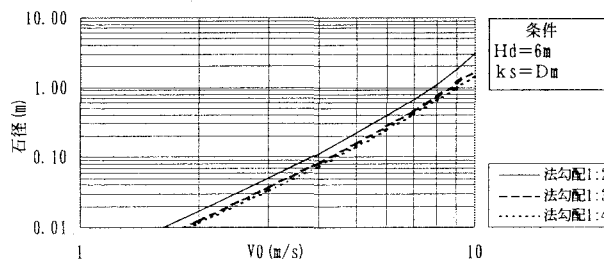


図-14 法勾配を変化させた場合

別途、相当粗度 k_s の値を $k_s=D_m$ として、法面勾配を変化させた場合の必要径との比較を行った。図-14 から明らかなように k_s の値が D_m から $0.5D_m$ に変化することは、法面勾配が2割(1:2)から3割(1:3)に変わることとほぼ同等の効果があることが判る。

4. 結論

(1) 不確実要因とその程度、範囲

護岸の水理設計をする場合に、現時点で評価の不確実な要因について、その影響程度が明らかとなった。

a) 外力評価に内在する不確実要因

流速評価を行う際の各種補正係数の評価プロセスで現れる不確実要因について感度分析を行った。

その結果、湾曲による補正、高水敷と低水路との流れの干渉の影響による補正に比べて、河床洗掘の影響による補正の程度が大きいことが明らかとなった。また、実河川の横断データの読取り値から、急流河川ほど $\Delta Z/H_d$ の平均値、標準偏差が大きくなり、補正係数の値が大きくなる傾向となる。加えて急流河川では、 $\Delta Z/H_d$ のばらつきが大きいことから補正係数評価の振れ幅も大きくなることが推察される。

実際の護岸設計における、 ΔZ の評価の重要性が確認できた。

b) 耐力評価に内在する不確実要因

耐力評価に必要な C_D 、 C_L 、 K_s 値を変化させた場合の必要控え厚(石径)について、平張りブロックを用いた練張り護岸、空石張り護岸を例として感度分析を行った。

その結果、 C_D 、 C_L の変化と共に作用する投影面積の影響も大きいため、必要諸元にはブロック形状も大きく影響することが明らかとなった。また、平張りブロックの必要諸元に影響を与える C_L を、仮に測定値の半分程度とすると、ブロック控え厚は0.55倍程度となることが判った。

現在、 C_D 、 C_L 値の明らかとなっているブロックはわずかであり、類似のブロック形状の測定値を参考とせざるを得ない状況である。

法覆工に用いるブロックの性能規定化を進めていく上で、実際の配置法に基づく C_D 、 C_L 相当粗度等の水理諸量の評価が必要であるといえる。

(2) その他の不確実要因

本報では、設計法のつりあい式中に現れる、 C_D 、 C_L 等に着目して不確実要因を記述した。これらの諸量は、物理的な意味も明確であり、風洞実験等による測定方法も確立しつつある。

護岸の設計・照査を行う場合は、これ以外にも定量化の難しい要因が挙げられる。

① 評価法そのものが定まっていない要因

- ・ 護岸背面の空洞化
- ・ 不陸の発生
- ・ 既設護岸の強度劣化

② 特徴的な工種の強度評価法に内在する不確実要因

- ・ ブロックを連結した場合の強度
- ・ 鉄線籠の強度：籠本体の強度。また、間仕切りなどを入れた場合の強度の増分

外力、耐力評価に内在する不確実要因とその程度を小さくするために、必要なデータ集積と評価法の検討を進めると共に、これらの要因についても評価法そのものを明らかにするよう努める必要がある。

謝辞：本報をまとめるにあたって、国土交通省のご協力を得た。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) (財) 国土開発技術研究センター：護岸の力学設計法，山海堂，1999.2
- 2) 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方法について，水工学論文集第44巻，pp.1053-1058，2000.2
- 3) 建設省土木研究所河川部河川研究室：護岸法覆工の水理設計法に関する研究，土木研究所資料代2635号，1988.4

(2001. 4. 16 受付)