

斜路式石組み落差工の環境機能と安定性 に関する研究

ENVIRONMENTAL FUNCTIONS AND RIVER BED STABILITY OF MASONRY FALLING WORKS

赤司信義¹・石川誠²・平畑信彦³・小野輝義⁴

Nobuyoshi AKASHI, Makoto ISHIKAWA, Nobuhiko HIRAHATA and Teruyoshi ONO

¹ 正会員 工博 西日本工業大学教授 工学部環境都市デザイン工学科 (〒800-0394 福岡県京都郡苅田町新津 1-11)

² 正会員 工学 西日本工業大学助手 工学部環境都市デザイン工学科 (〒800-0394 福岡県京都郡苅田町新津 1-11)

³ 福岡県豊前土木事務所 (〒828-0021 福岡県豊前市八屋 2007-1)

⁴ 福岡県豊前土木事務所 (〒828-0021 福岡県豊前市八屋 2007-1)

Functions of falling works are studied on the basis of the environmental functions itemized into the life of river, water quality, view of river, water amenity. It is shown that the masonry falling works are superior to concrete falling works. On the stability of the masonry falling works, the breaking type of the falling works, criteria for moving of stone out of the bed and the drag coefficients of stones on the step of the falling work are studied. There are three breaking types; sliding of stone on the step, moving of stone out of the bed in the pool of falling work, and drawing of stone out of the back in the step. The stone in the pool of falling work is lifted up in the front part and moved away by the impinging flow induced from the step flow. Maximum drag coefficient appears in the case of the minimum water depth on the step caused by negative pressure when the stone height is lower than the water depth on the step.

Key Words: *Masonry falling work, Rubble work, Environmental function, Ground sill
River bed stability*

1. はじめに

近年、堰や床止めなどの河川横断工作物の環境に与える影響への関心が高まっていて、環境機能の確保が強く求められている。特に、中小河川に多く設置されている堰は、魚類等の遡上を困難にしているものが多く、水域の連続性などを確保するため、新たに魚道を整備する箇所も少なくない。また、床止めは、河床変動や自然条件への影響が大きく、河道計画では極力採用しないことが望ましいとされており¹⁾、設置する場合には天端形状や水たたきの水層池化など環境に配慮した整備が必要とされている。水域や生物空間の連続性を確保するため、堰や床止めの構造を小さな段差を連続して構成する石組み構造とすることによって、より自然な河道に近づけることができる。大きな落差を持つ直壁型落差工を傾斜型にする方法も提案されている²⁾。本研究では、小さな段差を連続して構成する石組み構造の落差工を総称して斜路

式石組み落差工と呼び、大きな落差を一段で越流させるコンクリート構造やその他の固定式構造の堰や床止めを一段式越流型落差工と呼んで区別する。

斜路式石組み落差工で斜面に粗石を埋め込んだ場合や石梁構造とした場合の水位流量関係などの概略的な評価法は知られているが、越流部や水衝部に設置すべき石の形や大きさの選定基準、落差を作るための石組みの構造、河道への石組みの配置、洪水時・低水時の流れの評価などには不明な点が多く、整備に当たって多くの経験的技術が必要としている。

堰や床止めを斜路式石組み構造に改造する場合、石組み構造の安定性と減勢機能の確保が要求される。斜路式石組み落差工における護床工の機能や設置方法の検討も必要となるが、本研究は落差工本体となる斜路式石組み構造の環境施設としての機能と設計上の問題を明らかにすることを目的として行われる。環境機能に関する検討では、水質浄化機能、魚類等の生物機能、景観機能への影響に基づいて、一段式越流型落差工との比較を行う。

河床の安定性の検討では、石組み落差工の越流実験を行い、ステップ下流のプール河床の礫の移動状況や移動限界を考察すると共に、落差工ステップ部の石に働く抗力を実験によって調べる。

2. 斜路式石組み落差工の環境機能

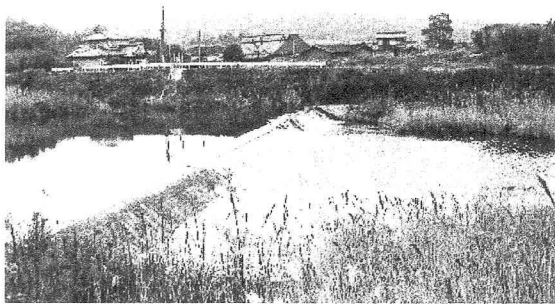
表-1 は、大きな落差を持つ一段式越流型落差工を環境施設とみなした時の機能を、生物機能、水質機能、景観機能、親水機能に分けて、斜路式石組み落差工の場合と比較して示している。

堰では広い貯留水面の形成により水生生物の生息を可能にするが、落差が大きい場合には魚類や底生動物などの遡上を困難にし、降下時には水たたきコンクリート面に叩きつけられることもある。水たたき下流の護床工に護床ブロックを用いる場合、河床面の変化が乏しく、多様な空間の形成が難しくなることもある。堰本体は、堤体の損傷の防止や円滑な水流の形成のため、凹凸のない構造となっていて、本来的に生物の生息を前提にしていない。魚道の設置によって生物機能がかなり回復される場合もあるが、魚道が設置されても機能が発揮されない場合も多い。調査によれば魚道の半数近くが遡上困難となっている³⁾。斜路式石組み落差工では、小さな段差を連続させることによって、魚類の遡上は可能となり降下も容易で、段差間のプールを広く取れる場合には休息や採餌の場になり、下流付近では避難の場にもなりうる。円滑な流下ということより、多様な空間や流れの形成に主眼を置く構造であることから、石組み落差工全体が自然の河道となるように構成されれば、種々の水生生物の生息空間を形成し、採餌のため鳥類も見られるようになる。段差間のプール及び落差工下流の護床工では水辱池としての機能が必要であるが、ここに多様な生物生息空間の広がり期待される。床止めまたは堰の一部を切り欠いて部分的な落差工とする場合、堰に併設した魚道と同等の機能をもつことになるが、生物生息空間の広がり期待されにくい。なお、低水時の水深確保や水流形成のため、全断面石組み落差工とする場合には、石組み落差工の平均天端高を両岸よりみお筋に向けて低下させておくことが必要となる。

堰の水質に与える影響としては、河川への汚濁物質の流入に伴う懸濁物質の沈殿による一時的な貯留と河床微生物による栄養塩等の摂取や吸着があげられ、有機物質除去機能が高くなることが考えられる。水域に植生が繁茂すれば、土砂等を含めてより除去機能が高まる。懸濁物質は流量に対応して大きく変動し、降雨時には河道内に沈殿により残留した物質が流送されて貯留水域に流入するが、底層の沈殿物質等の巻き上げと共に堰を流下する。床止めの上流河床が洗掘されて貯留水面を形成している場合は堰と同様な機能となる。斜路式石組み落差工

表-1 環境施設としての堰や床止めの機能

	直壁コンクリート構造	斜路式石組み構造
生物機能	水域には生物空間形成 堤体には本来的に機能なく遡上困難で魚道必要	水域には生物空間形成 魚類等の遡上可能、 多様な生物生息可能
水質機能	水域での懸濁質の沈殿等	水域での懸濁質の沈殿等 曝気による溶存酸素供給
景観機能	添景として単調	水流の創出 自然景観の創出
親水機能	釣り、休息等	釣り、休息等 川歩き



画像-1 一段式越流型落差工



画像-2 斜路式石組み落差工

の場合、貯留水域の機能は同じであるが、石組み落差工による他の機能が加わる。河川の汚濁物質は、流速や流下時間だけでなく、河床での滞留時間や微生物群との接触時間にも影響され、有機物質量は溶存酸素の時間的変化や溶存酸素不足量に比例し、再曝気がなければ溶存酸素は減少する。段差を連続させることによって連続した曝気を生じて、貯留水域での溶存酸素の減少を回復することになる。堰下流の水たたきでの跳水も曝気作用を持つが、定常的な作用は期待しにくい。また、落差工下層の礫層をフィルター構造とすることによって、礫間浄化の機能を持たせることができる。平常時の水量が少ない川に浸透機能を持たせると水域が減少する事になるが、落差工内に主流が形成されるように石組みを構成して水域を確保する必要がある。

堰や床止めの景観は、護岸が河川景観の全景に影響を与える場合と異なって水門や樋門などと同様に添景を構成している。景観性としては、添景であっても常時水の

流れを見ることができることから、護岸設計の原則として指摘されている⁴⁾ように日常風景としての景観を考える事が必要である。人工美と自然美との調和が求められるが、堰や床止めの場合、構造的な制約のため、形や大きさを変えて水辺景観の中に調和させることはなかなか容易ではない。画像-1は、一段式越流型落差工の事例を示し、画像-2は、斜路式石組み落差工を想定した場合を示している。色合いをコンクリートの灰色から他の色で置き換えることはかえって不釣り合いになりかねない。堰や床止めに目が留まるのは、画像-1や画像-2に見られる越流水面にはじける光や気泡の白さである。従って、景観を構成するためには流れをつくることになる。昭和13年に造られた大分県竹田市の白水の堰堤は、堤体越流時の水流美を生み出した堰堤である。堤体表面への粗石の埋め込みは、堰や床止めの流れをつくる上で有効な方法で、堤体保護工としても考えられる。

斜路式石組み落差工は河道にある玉石や巨石を用いて、堰や床止めの形を変え再構成して流れをつくりだそうとするもので、石組みはアーチ構造の組み合わせが基本になるが、単調にせず、多様な空間が形成される配置が必要である。河床に岩盤が露出した岩質河床の場合自然景観にもっとも近づけることができる。石組みに用いられる単体の石の大きさは堰や床止めの天端高により制約されるが、洪水時に流失されない大きさが必要となる。

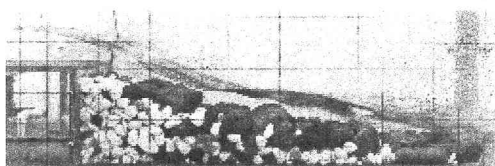


図-1 ステップ状射流

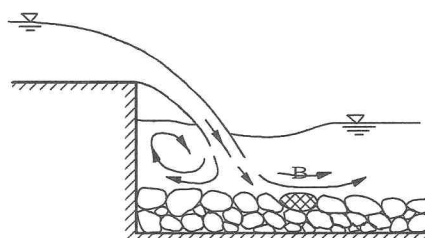
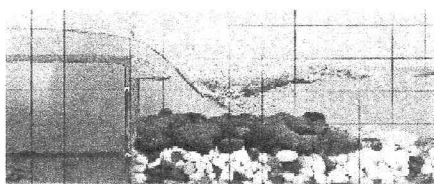


図-2 水面突入流れ

落差が大きく人が容易に越えられない堰本体は管理面や安全性の問題などもあり親水施設になりにくいだが、堰上流に広がる水面や堰下流の水面は良好な親水空間を形成している。斜路に構成される石組み落差工では、石の上を渡り歩くことが可能で、川歩きなど親水施設としての利用も考えられる。一段式越流型落差工の堰や床止めの機能と比較して、斜路式石組み落差工は環境機能を十分に付加できる施設と考えられる。

3. 石組み落差工の安定性

石組み落差工の基本的構成は、ステップ部とプール部からなり、ステップ部は、固定点となる巨石を支点として互いに支え合わせ平面的にアーチ形になるように構成される。ここでは、石組み落差工の越流実験を行って、石組み落差工の不安定になり易い部位と河床衝突流れによるプール部の移動限界を調べた。

(1) 実験装置と実験方法

実験装置は、幅40cm、長さ14mの両面アクリル製の開水路で、下流端から4mの位置に段差20cmの段落ち部が設けられている。石組み落差工は、段落ち部から80cmの区間に設置された。実験は、図-1、図-2に示すステップ状射流タイプと水面突入流タイプとについて、流量を5～30l/secの範囲で変化させて行った。図-2では、下流水深を少しずつ変化させて、石の移動状況を確認しながら行い、石の動きが認められると流量を減少させて石を取り出して大きさを計測した。石の大きさは、長径、短径、中径を測定し、積の三乗根を代表径とした。落差工の石の配置は、水面突入流タイプの場合、1段のステップとして石の高さを5cm、10cmとし、敷き高がほぼ一定になるように設置し、ステップ状射流の場合は、1段あたりの高さを4cm程度として4段のステップとして設置した

(2) 石組みの流失タイプ

石組み落差工の不安定になり易い部位を目視により観察した結果、石の流失の代表的タイプは次の3つであった。図-1のステップ状射流では、ステップ部のA、プール部のB、ステップ背後のCで、図-2の水面突入流れでは図-1のステップ状射流のプール部に相当するBであった。もっとも不安定になり易いのはステップ部で、下流側に支えがなくステップを構成する石相互のかみ合わせがないと簡単に流失する。ステップ部の高さは下流方向から横断面を見ると石の大小により谷と山ができ、山の部分を通過する流れより谷の部分を通過する流れの方が強くなる。山の部分の石は大きく、谷の部分の石は相対的に小さいから、谷の部分の石の方が動きやすい。

プール部の場合、ステップ流れの再付着点より下流側で動き易く、図-2の水面突入流れの衝突点より下流で

動き易いことと対応している。プール部の石の配置は深さ方向にはフィルター構造とし、平面的にはできるだけ凹凸のないよう高さをそろえて、互いの石が接するように配置される。従って、プール部の石が滑動するのは背後の石が抜け出た場合である。最初にプール部の石が動くのは、ステップからの流れが河床に再付着し流れの縮流による加速が強まった地点付近で、石の先端が持ち上げられた時である。ステップからの流れが河床に再付着する地点近傍では河床の石は押さえつけられて動きにくい。石の先端部がいったん浮き上がると、縮流的な流れによって、転動し易くなる。

最後のタイプはステップ背後の石の抜け出しである。ステップ背後ははく離域になり、流速は非常に小さいが、ステップを越える流れは流線の曲がりによる遠心力の作用を受けてステップ背後の圧力を低下させ、かみ合わせがない小さな石は負圧による吸出し作用を受けて抜け出し下流に移動する。ステップ背後の石が抜けるとステップ部の石自体が不安定になり、次々と流失し始めることになる。ステップ背後の石ははく離域を制御しステップ部の石にかかる負圧を軽減する役割を担っている。

(3) プール部の河床の安定性

石組み落差工のプール部の河床の安定性を図-2 の水面突入流れによって検討する。前節で記したように、プール部の河床の不安定は、ステップからの流れの加速的な流れによって石の先端が持ち上げられた時に見られる。図-3 は、石に作用する流れを模式的に描いたものである。河床の石が浮き石状態になっていれば、ステップからの流れは河床の隙間に侵入し、隙間内の圧力を増大させ、石は水平方向と鉛直方向の力を受けることになる。平面的に密着して配置され、石の接点の高さがほぼ同じになるから、石の持ち上げの主因は鉛直方向の圧力となり、その大きさは河床に衝突する流速に規定される。

これまでの河床衝突流れに関する研究により、水面に突入した流れは気泡の混入を伴って河床に衝突し、衝突後の流れは縮流の影響の強い加速域と流れの拡散による減速域に分けられ、加速域周辺では空気混入の影響は少なく、衝突点の圧力は水面突入速度の動水圧にほぼ等

しくなること、加速域の範囲はほぼ水深の 1/2 になること、また、水深が水面突入幅の 5 倍以下の場合、加速域終端では、河床に沿う流れの最大流速は水面突入速度に等しくなり、主流の幅は水面突入幅と同程度になること、などが見出されている。

石組み落差工では、1 段あたりの落差は小さいから、プール部の河床に衝突する流れの最大流速は水面突入速度にほぼ等しく、加速域終端付近の石に働く流れの幅は水面突入幅に近いと考えられる。図-3 に示すように石の径を d とし、石に作用する流れの幅を δ とし、 d が δ より小さい場合を考える。作用圧を水面突入速度の動水圧で与え、作用面積を径 δ の範囲とする。水面突入速度は、水面突入断面とステップ上の支配断面の比エネルギーと等しいとおくと、 $b_i = h_c / \sqrt{2(D + h_c)}$ で与えられる。石の揚力を L 、重量を W とすると、石の先端が浮き上がる条件は、 $W \cdot d / 2 > L \cdot (d - \delta / 2)$ で与えられ、次の関係が導かれる。

$$\left(\frac{d}{h_c}\right)^4 > \frac{3}{4 \cdot s} \cdot \alpha^2 \cdot \left(2 \cdot \frac{d}{h_c} - \alpha\right) \cdot \sqrt{2 \cdot \left(1 + \frac{D}{h_c}\right)} \quad (1)$$

なお、 α は作用面積割合を示し、 $\delta = \alpha b_i$ としている。図-4 は、上式の関係、移動限界の実験結果と共に示している。実験結果は、移動限界状態になる石の径がほぼ限界水深に近い値になることを示している。石の移動は加速域終端付近で観察され、流れの主流幅 δ が b_i に近いことと関係して、 α がおよそ 1~2 の時の移動限界と一致していて、プール部の河床が安定であるためには、限界水深のほぼ 1.3 倍以上、余裕を見込めば 1.5 倍以上の大きさの石が必要となることが認められる。

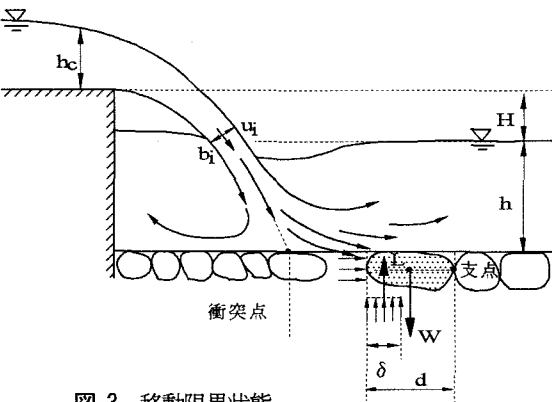
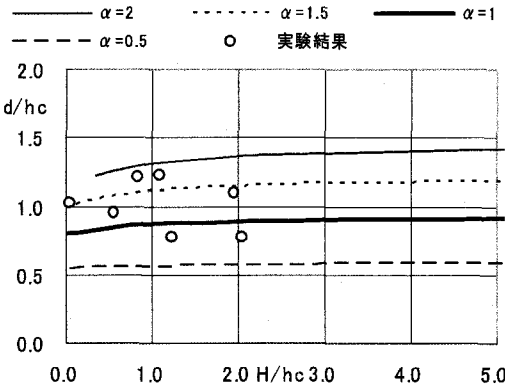


図-3 移動限界状態



平均径 (cm)	hc(cm)	H (cm)	移動径 d (cm)	H/hc	d/hc
3.14	1.90	3.7	2.10	1.94	1.10
3.14	2.69	3.34	2.10	1.24	0.78
3.14	2.69	5.51	2.10	2.05	0.78
5.35	4.10	2.26	3.91	0.55	0.95
5.35	4.10	4.5	5.01	1.10	1.22
5.35	4.72	3.91	5.74	0.83	1.22
7.92	7.43	0.34	7.56	0.05	1.02

図-4 プール部の河床の移動限界

4. 段落ち部の石の抗力係数

石組み落差工を設置する場合、ステップを構成する石の大きさを決めなければならないが、これまでのところステップ部の石に働く流体力は明らかでない。ステップ部の流れは遠心力の作用によりステップ背面の圧力を低下させることから、適切に抗力、揚力を評価する必要があるが、ここでは、ステップ上の流れの抗力への影響を実験によって検討する。

(1) 実験装置と実験方法

実験水路は、前章の石組み落差工の安定性に関する実験水路と同じで、段差 20cm の段落ち部に抗力計を設置した。図-5 は、段落ち部に石を設置した時の概略を示し、図-6 は、抗力計先端部を示している。抗力は、L 字形に曲げたステンレス板にゲージを取り付けた片持ち梁式の抗力計によって計測された。抗力計は、厚さ 4mm、長さ 23cm で、先端は石を接着するため 15mm 上流側に曲げられている。ゲージは、上端より 5cm 下がった位置とその位置からさらに 12cm 下がった位置の前面と後面に取り付けた。また、抗力計は、段落ち背面に近接して設置し、周囲を半円筒のカバーでおおい、石の接着面とカバーとの隙間の間隔は 1mm とした。段落ち部上流側にも石を敷き詰め、最大高さは 3cm で、段落ち部の平均の石の高さは 2.5cm であった。抗力計に取り付けた石は、代表径が 2.95cm、4.18cm、6.30cm、7.48cm の 4 つの玉石とゴルフ球(径 4.27cm)の計 5 種類とした。それぞれの記号を S, M, L, LL, G とする。流量はほぼ 20, 30l/sec に設定され、下流水深を種々変化させて、実験を行った。

(2) 実験結果とその検討

図-7、図-8 は、抗力係数 C_d を、段落ち部断面の流速を代表流速 V として、 $C_d = 2 \cdot F_x / (\rho \cdot \pi d^2 / 4 \cdot V^2)$ により求めた値を Re 数に対して示している。段落ち部の水深 h_s は、下流水深によって変化し、図-2 の流れのように完全越流になると h_s は、段落ち背面の負圧による吸出

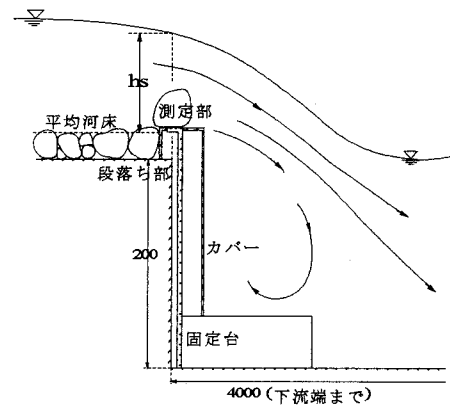


図-5 段落ち部の概略

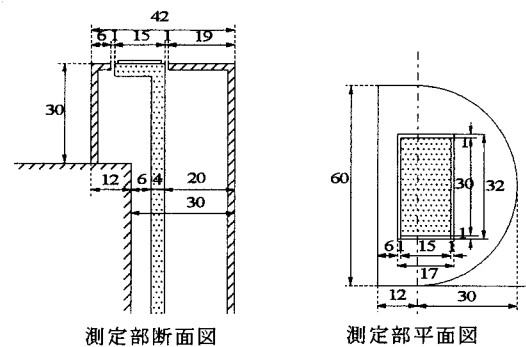


図-6 抗力計先端部

し効果を受けて限界水深より小さくなるから、流速は大きくなる。図中の凡例の記号、S, M, L, LL, G は、段落ち部に設置した材料を示し、数字の 20, 30 は流量 (l/sec) を示している。 h_d は下流水深 h_2 を段落ち高さ D より下げて段落ち部背面が最大の負圧になった時に現れる段落ち部の最小水深を示していて、ほぼ $h_d = 2/3 h_c$ になる。段落ち部に設置した石の高さが h_d より小さい時、大きい時に分けて示している。下流水深 h_2 が段落ち高さ D より十分大きい時、段落ち部の流れは常流で、 C_d は 0.5 ~ 0.8 の範囲の値を示している。 $d/h_d > 1$ の時、下流水深 h_2 を下げると石の頂部が水面上に露出して作用面積が減少するため、 C_d の低下は緩やかになっている。 $d/h_d < 1$ の時、下流水深を段落ち高さより下げても段落ち部水深

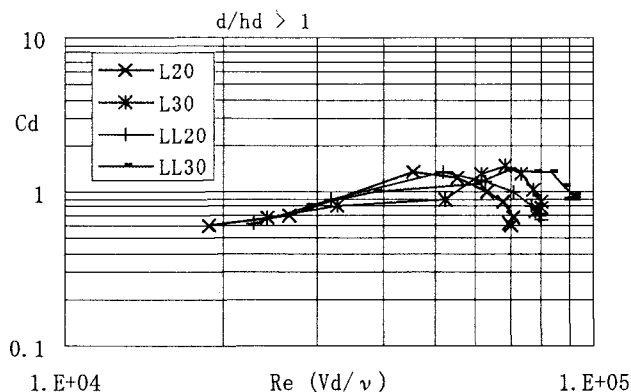


図-7 C_d と Re の関係($d/h_d > 1$)

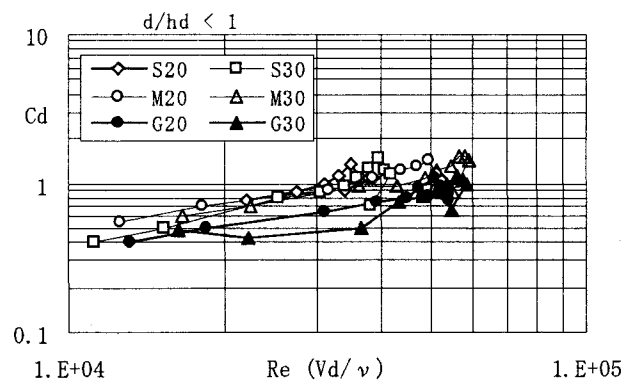


図-8 C_d と Re の関係($d/h_d < 1$)

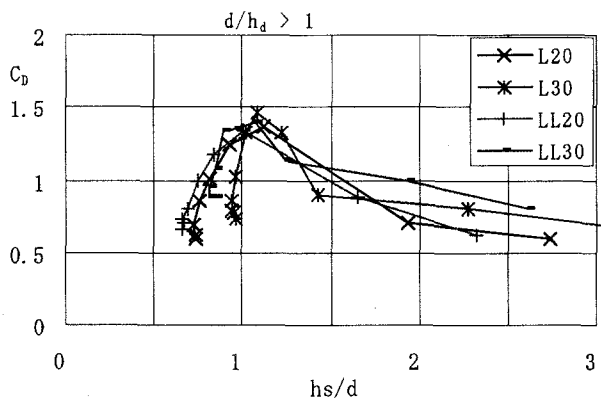


図-9 C_D と hs/d の関係 ($d/h_d > 1$)

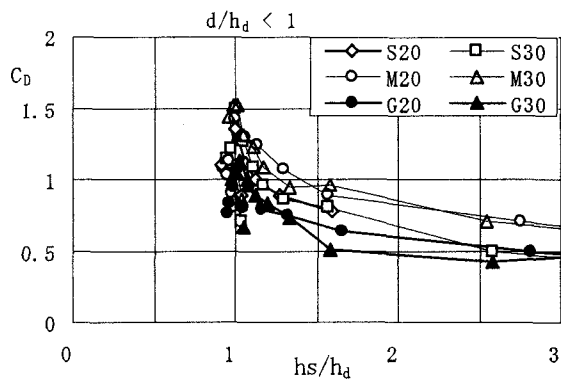


図-10 C_D と hs/h_d の関係 ($d/h_d < 1$)

は h_d 以下には下がらないから、 Re 数は一定になる。段落ち部背面の負圧が大きくなると、段落ち流れが背面に引き寄せられるが、流れの遠心力と背面圧力が釣り合う状態になる。このため、 C_D は、段落ち部背面が通気された状態と負圧最大の状態の範囲の値を示すことになる。

図-9は $d/h_d > 1$ の時で、抗力係数 C_D を hs/d に対して、図-10は $d/h_d < 1$ の時で、抗力係数 C_D を hs/h_d に対して描き直したものである。図-9は、 $hs/d = 1$ で C_D は 1.3～1.5 程度の最大値を示し、 $hs/d > 1$ で緩やかに減少する傾向を示している。図-10は、 $hs/h_d = 1$ で急激に立ち上がり、図-9と同様に 1.3～1.5 程度の最大値を示し、 $hs/h_d > 1$ で緩やかに減少している。ゴルフ球の抗力係数は、石の抗力係数に比べると全体的に 0.3～0.5 低い値を示している。実験に使用した石の形状がやや方形になっていたことと関係することが考えられる。 $d/h_d > 1$ の時、すなわち、ステップ部の水深が石の高さより低い場合、ステップ背面が通気されてステップ流れの遠心力と大気圧が釣り合う状態になる。ステップ部の最小水深は、ステップ部を通過する流れの幅と石の径によって規定される。

段落ち背面の圧力 p_d を、支配断面と段落ち下流断面の区間で運動量の定理により導かれた次式⁹⁾で、評価し、

$$\frac{p_d/w}{h_c} = \frac{2 + (h_2/h_c)^3 - 3 \cdot h_2/h_c - (D/h_c)^2 \cdot h_2/h_c}{2 \cdot D/h_c \cdot h_2/h_c} \quad (2)$$

負圧 p_d の抗力係数への寄与分 C_{D1} を、 $V = q/h_d$ 、

$$-p_d = C_{D1} / 2 \cdot \rho \cdot V^2, \quad \text{とすると、}$$

$$C_{D1} = \frac{-2(p_d/w)/h_c}{(h_c/h_d)^2} \quad (3)$$

となる。下流水深 h_2 が段落ち高さ D より低く完全越流になる $h_2/d = 0.9$ の時を考え、 $D/h_c = 4$ として背面圧力を求めると、 $(p_d/w)/h_c = -0.69$ となり、 $C_{D1} = 0.61$ となって、下流水深が十分に大きく遠心力の影響のない場合の C_D に加えると、 $hs/h_d = 1$ の時の C_D の最大値にほぼ等しいことが分かる。以上より、石組み落差工の抗力係数を考える上で、ステップ背面の圧力が最小になる時を対象にすればよいことが分かる。

5. おわりに

斜路式石組み落差工の環境機能と設計上の問題について検討を行った。環境機能に関する検討では、生物機能、水質機能、景観機能、親水機能への影響に基づいて考察し、落差の大きい堰や床止めの一段式越流型落差工に比較して、魚道としての生物機能や景観機能を十分付加できる施設であることが示された。設計上の問題では、石組み落差工のステップ部、プール部の河床、および、ステップ部背後の石の流失が特徴的な崩壊パターンであることや、プール部河床の安定性の検討を行い、水面突入流れによる衝突圧が揚力として作用して石の抜け出しを誘起するとした取り扱いにより越流流れと安定な礫径との関係が明らかにされた。また、ステップ部の石に働く抗力を実験的に検討し、抗力は、下流水深によって変化し、石の径が限界水深にほぼ等しくなる時最大になることや、通常より倍近くの値となる事などが見出された。今後、揚力の計測を含め系統的な評価が必要である。斜路式石組み落差工は、石組み方法や護床工、材料等の課題はあるものの今後多用されるものと考えられる。なお、抗力の測定には防衛大学校建設環境工学科林建二郎助教授の協力を頂いたこと、本研究は西日本工業大学特別研究費の補助を得て進められたことを付記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土開発技術研究センター編：床止め構造設計の手引き，山海堂，1998.
- 2) 中村俊六監修：多自然型魚道マニュアル，山海堂，1998.
- 3) 財)リバーフロント整備センター編：河川と自然環境，理工図書，2000
- 4) 財)リバーフロント整備センター編：川の風景を考える，景観設計ガイドライン，山海堂，1993.
- 5) 赤司信義，石川誠，斎藤隆：空気混入による段落ち落下水の減勢効果に関する研究，水工学論文集，Vol.34，1990.
- 6) 赤司信義，石川誠，斎藤隆：階段水路の流れ特性に関する研究，西日本工業大学紀要，Vol.18，1988.

(2003. 4. 11受付)