

魚にやさしい落差工形式についての提案

前研究第一部 主任研究員 名取 哲哉

1. はじめに

最近、多自然型川づくりが全国各地で推進されるようになってきた。これに伴い、河床の安定を目的として設置される落差工についても、従来の画一的な形式のものばかりでなく、魚の上り下りのしやすさや、景観に配慮した多段式、粗石付斜路式などの新しいタイプの落差工が全国で設置されつつある。

従来型の落差工については、建設省河川砂防技術基準(案)や河川管理施設等構造令より、ほぼ画一的に構造諸元が決定されていたが、これらの新しいタイプの落差工に関しては、基準や、構造令の適用が困難であったり、あるいは新しく検討しなければならない事項が生じたりしているとも思われ、新しい考え方に基づく設計法の検討が必要であると考えられる。

ここでは、まずこれらの新しいタイプの落差工に関して平成5年度に建設省や各都道府県から提供していただいた事例をもとに現状を把握し、実態の整理を行い、その中からどんなことが問題となっているのか、課題を抽出する。

また、これらの課題に対して、河川の構造物や魚道、魚類の生態に関する専門家で構成する研究会を通じて出た意見をもとに、今後の落差工のあり方について提案してみたい。

2. 事例調査及び整理

建設省で、平成5年度に各都道府県に対し、新しいタイプの落差工について調査を実施したところ、全国北海道から沖縄県までほとんどの県で広く実施または計画されており、130例余りの多段式落差工などの事例が収集された。

以下にこれらの事例について、形式や目的など項目別に整理した結果を示す。

ここで、粗石付斜曲面式とは、粗石付斜路式の斜面の中心部の勾配を急にして、両側の勾配を次第に緩くなるようにとし、中央に流れを集中させることで、両側に柔らかい流れを作り出す設計思想の落差工のことをいう。

また、ハイブリッド式とは、例えばこの斜曲面式の中央部に魚道を配置したもののように、機能の異なるものを組み合わせ合わせた複合タイプの落差工のことをいう。

形式別に見ると、多段階式が全事例のほぼ6割をしめていることがわかる(図-1)。

目的は、魚類の遡上や降下に配慮したものがほぼ8割を占める(図-2)。

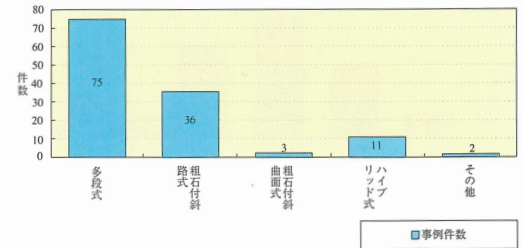


図-1 形式別の事例件数

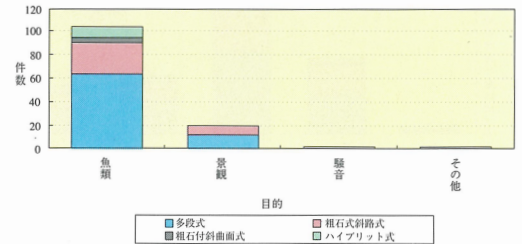


図-2 目的別の事例件数

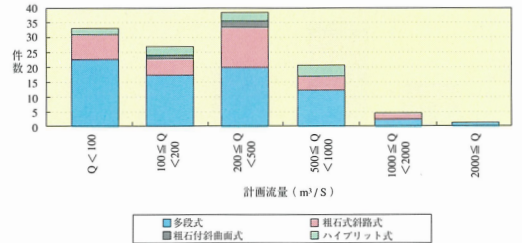


図-3 計画流量別の事例件数

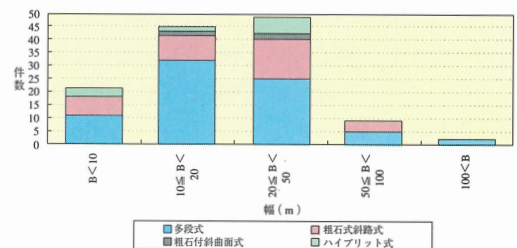
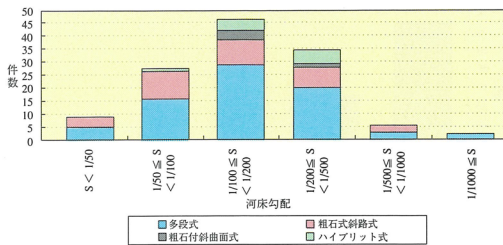


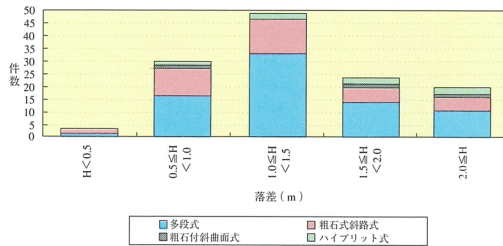
図-4 河川幅別の事例件数

図-3～図-5に示したデータについては、落差工の構造やタイプの問題というよりむしろ落差工を設置している河川の状況としてとらえるべきであろう。

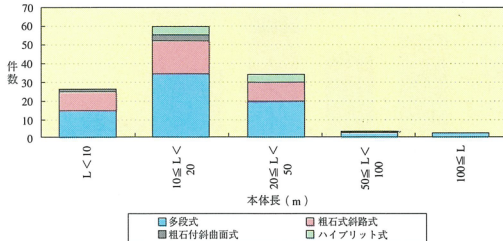
落差高としては、河川砂防技術基準(案)で定められている2m以下が大半で(図-6、図-7)、中でも1.0m～1.5mのものが多い。本体長は多段式等にすることによって従来の落差工よりはかなり長くなっており、10m～20mのものが約半数を占める。さらに20m～50mのものを加えると8割を占めている。



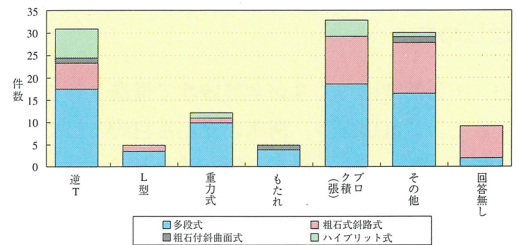
図一 河床勾配別の事案件数



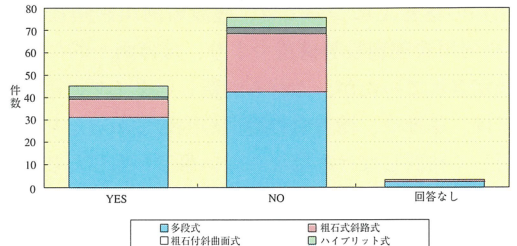
図一六 落差高別の事案件数



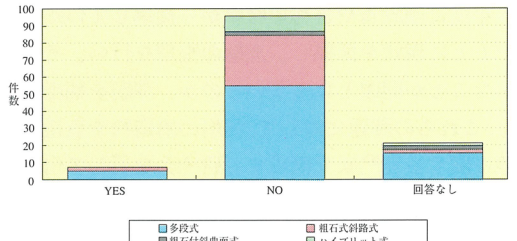
図一七 本体長別の事案件数



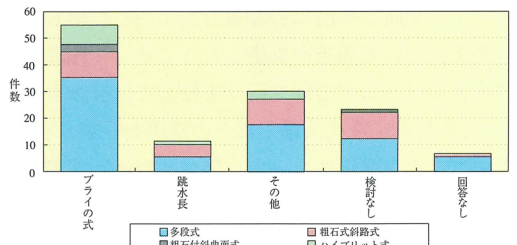
図一八 取付擁壁構造別の事案件数



図一九 本体の安定計算について



図一十 本体の断面計算について



図一十一 水叩き長の計算について

河川砂防技術基準(案)によれば、原則としてRC逆T擁壁構造になるが、擁壁長が、本体長に対応してかなり長くなるため、ブロック積み等に対応している例が多くなっていると思われる(図一八)。

次に本堤や水叩工の安定計算や断面計算などの取り扱いや、減勢効果についての調査結果を示す。6割近い落差工について安定計算が行われていない(図一九)。

多段式などの落差工は、従来の落差工と違い、どちらかというと版構造に近いと考えられ、本体長の長いものには、応力計算を必要とするケースもあると思われる(図一十)。

水叩工については、従来どおりプライの式や揚圧力による検討が半数を占めているが、なお検討していないものも2～3割ある(図一十一、図一十二)。

従来型の落差工については、水流を落下させることでエネルギーが減勢することが明らかのため特に計算はしていなかったが、多段式等の場合は水が走り、エネルギーが減勢しない可能性が高く、下流水位が安定しなかったり、河

床洗掘がおこることが予想されるが、計算しているものの1割程度にとどまっている(図一十三)。

落差工の設計法に関する課題として、以上の調査結果をまとめると次の3点があげられる。

- ・ 現行基準の安定計算等の手法の適用が困難なため、計算していない例が多くなっていると考えられ、これらへの新しいタイプの落差工に対応できる計算手法の確立がまさに望まれているといえる。
- ・ また、取付擁壁構造について、現行基準では「床止め

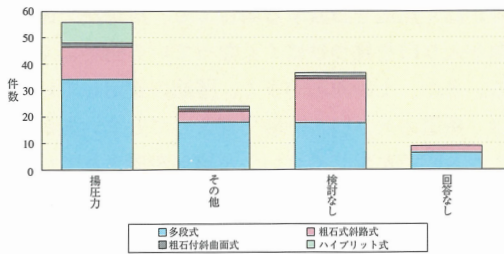


図-12 水叩き厚の計算について

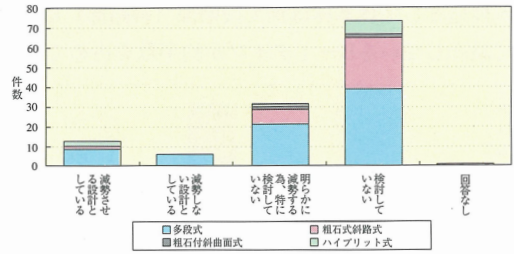
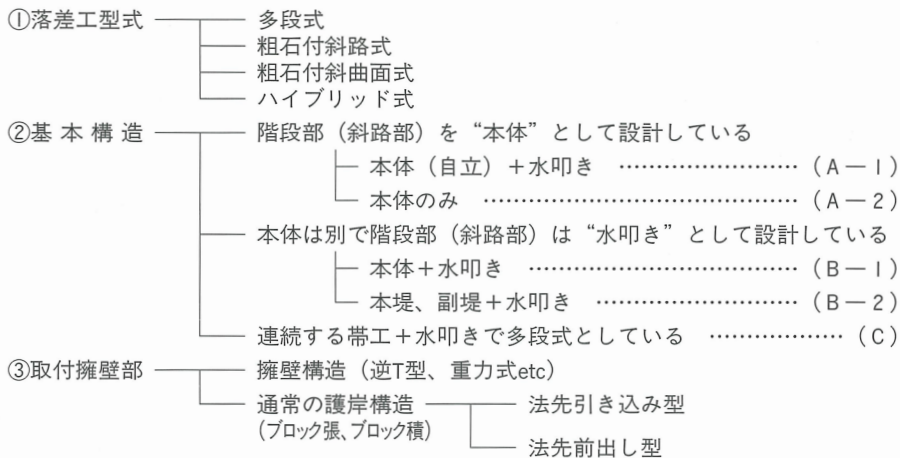


図-13 洪水時の減勢効果について

取付部の上下流を擁壁構造の護岸とすることを原則とする。」となっているが、張りブロックや積みブロックといった通常タイプの護岸を施工している例も多い。
 ・多段式や斜路式とした場合、洪水時における流水の減

勢がうまく行かず、落差工下流の河床洗掘等が問題となることも予想されるが、減勢について検討していない事例が多い。

また、全事例を構造上の考え方から大きく分類すると以下のようなになる。



それぞれの構造タイプの断面形を示す。

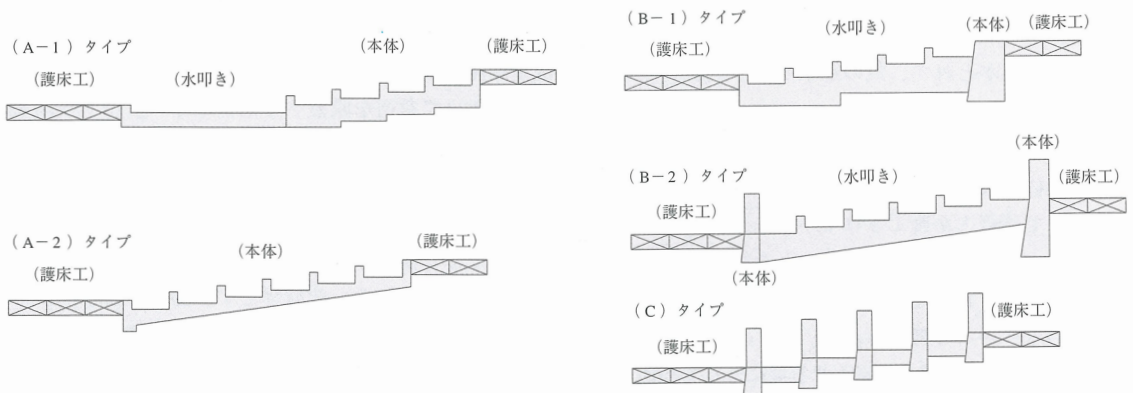
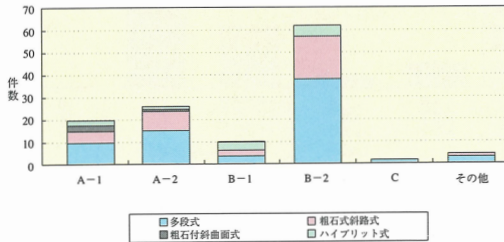


図-14 落差工基本構造タイプ

基本構造としては本体は別で段階部（斜路部）は水叩きとして設計しているB-1タイプが約半数を占めている。



図一15 タイプ別件数

3. 魚からみた河川砂防技術基準（案）や河川管理施設等構造令の課題

2.では新しいタイプの落差工の設計法の課題について実施事例をもとに整理してきたが、ここでは、魚道の機能としての現行基準における課題について整理する。

現行の基準や構造令のなかでは、河川砂防技術基準（案）の設計編の床止めの箇所に「必要に応じて魚道を設置する。」という記述があるにとどまり、床止めの本体構造について設計上配慮する記述はない。

アユの跳躍高は、流水中では30cmから70cmであるが（白石1955、小泉1965）魚を疲労させないための落差は30cm以内であるといわれている。（小山1967）

平成5年度に行われた「河川横断施設の概略点検」の際に作成した点検マニュアル（案）に従い、ここでは白石のデータ（1955）をもとにアユの跳躍高の上限を50cmと考え、一般に落差が50cm以上あるものについては、魚道が必要になると判断することとした。

また、落差が50cmに満たないものであっても、現行基準の落差工では、水叩工部分の水深が無いため、ジャンプするための十分な助走がとれず、魚の遡上という観点からは問題があると思われる。

水叩工部分に水深が無いことは、降下魚に対しても落下衝撃による減耗につながることも考えられる。

また、連続して落差工が施工されているような場合に河床が平滑化していることがある。こういった河床の平滑化が瀬や淵を消失させ、必要な水深が無いため、魚の遡上経路を遮断しているケースも考えられる。

以上の様に現行の基準で遡上や降下する魚にとって問題となることは、50cm以上の落差と、水叩工部分の薄層流化、及び上流にもたらす河床の平滑化の3点に凝縮する事ができる。

落差が高く魚道を設置する場合でも、魚道が下流に突出し、魚が入り口を見つけにくくなっている例がよく見受けられる。また、土砂流出が多く、滞筋の安定していない河川では、魚道の入り口が土砂で埋まってしまう魚が遡上できなくなる問題が生じやすい。魚道が設置されていても、増水時に流されて降下するときには、魚道以外の場所から落下する事が多く、やはり水叩工部分の問題に帰着する。

4. 魚にやさしい落差工形式の提案

3.で述べたような現行基準による落差工の問題点を踏まえて、魚の上り下りしやすい落差工型式を提案する場合、現行基準を準用して水叩工を下げ十分な水深を確保し魚道を付加するタイプ（魚道付加型）と、落差工の形状そのものを変更し多段式等にするタイプ（全断面魚道式）の二通りが考えられる。

これらについて、設計法、魚の遡上のしやすさ、降下魚に対する配慮、治水安全性（洪水時の水利）、景観、構造施工性、維持管理の項目について別表のとおり形式ごとの整理を行った（表一1、図一16、図一17）。

魚道付加型か全断面魚道式かの使い分けについては安定した滞筋が形成されているかどうかをキーポイントとなりどんな場合でも全断面魚道式落差工で計画する事は不経済である。

4-1 魚道付加型落差工の考え方

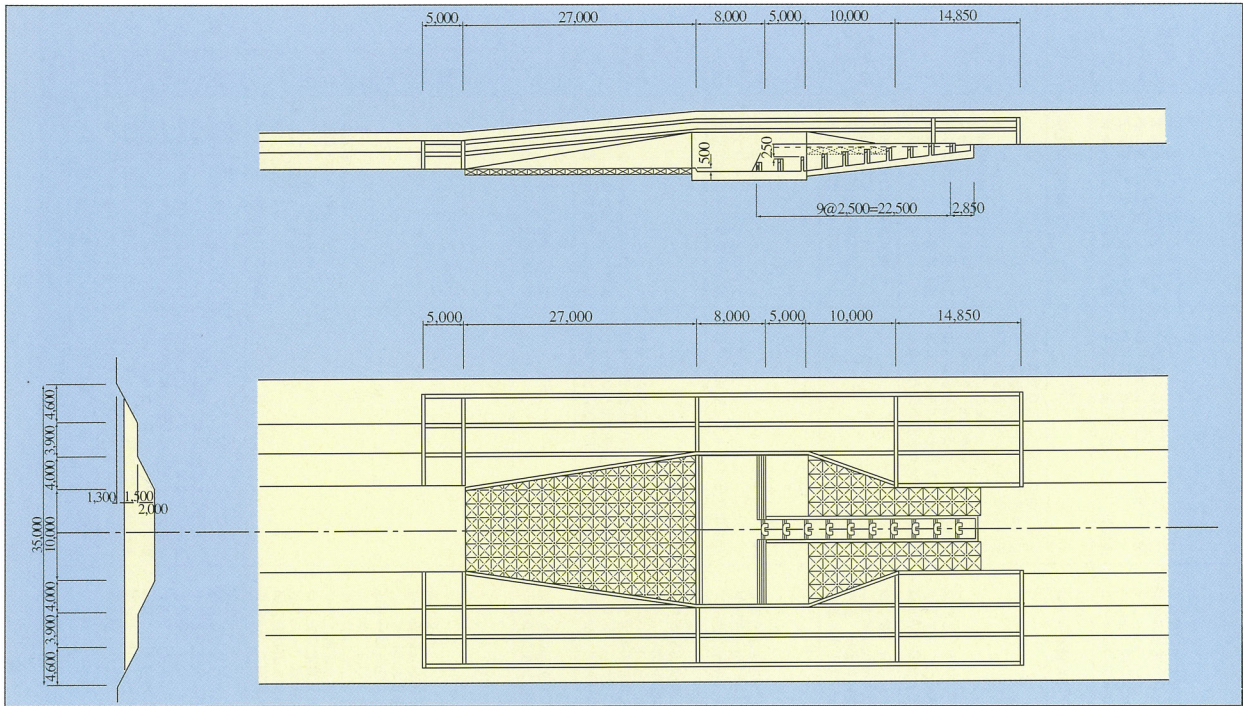
魚道の入り口を見つけやすい構造とするため、落差工の上流側に魚道を突出させるケースが多くなっている。この場合第一に注意しなければならないことは、洪水時に流水のエネルギーが魚道部分に集中しやすいことである。これによって例えば魚道の隔壁等は破壊されても、側壁や上流呑み口部分は破壊されないように、落差工本体と同等の安全性を確保する必要がある。これには、①案～落差工の一部を切り欠いて魚道を設置する案と②案～落差工本体構造を上流に突出させ魚道を設置する案の2案が考えられる（図一18）。

①案については魚道部を単体と考え転倒、滑動の計算を行う。ただし側壁や上流呑み口部分は流水や流下する土石等により破壊されない部材厚とする必要がある。また、落差工部は、従来同様単位幅あたりの転倒、滑動の計算となる

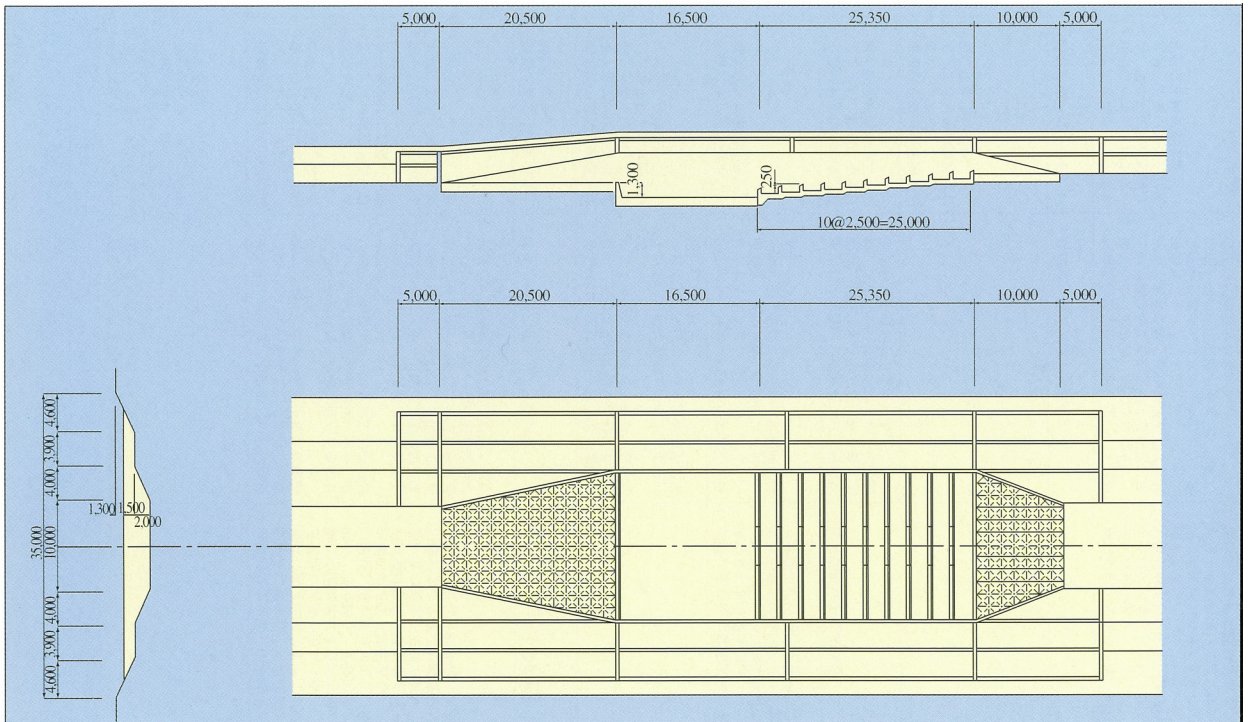
二点目として洪水時の流水のエネルギーが魚道部分に集中する結果、落差工下流の局所洗掘を生じることが予想され、護床工の延伸などの対応策が必要となる。

表一 落差工型式比較表

項目	① 水叩き部を下げる＋魚道			② 全断面魚道式落差工		
	魚道突出型	魚道引き込み型	多段式	粗石付斜路式	粗石付斜曲面式	ハイブツ式(粗石付斜曲面＋魚道)
登り口の切り易さ	・河川水が魚道のみに流れる場合は登り口を尻止つげるのは容易であるが、尻止工からも流下へ逃入する可能性がある。 ・水叩き部の堆砂で登り口が埋まり易い。	・尻止工の登り口と魚道登り口が一致している為、登り口が比較的に登りやすいため、増水時に魚道内に流量が集中しやすいため、登り口部が堆砂によって埋まりにくい。	・全断面から越流する為、小流量時を除いて登り口は見つけやすい、特にみお筋が安定していない河川に対しては有効である。 ・小流量に対しては切り文きを抜けるなどして対応が可能である。	・特に流量が小さく水深が浅くなる場合を除けば、全断面から流下する為、問題は無い。特にみお筋が安定しない河川には有効である。	・尻止工下流部で流れが中央に集中する為、魚が登り口を出口し易い。	同 左
上し易さ	・魚の通りやすさは魚道型式に依存する。と魚道形式にもよるが、深流が増大し魚道として機能しなくなる可能性が高い。	同 左	・基本的には段階式魚道と同様の水理特性であるが切文き、スリット、非越流部穿孔を設けるなど複雑な構造を工夫することで越流水深、流速に変化をつけることにより、魚の休息場所を型魚への対応が容易。 ・フルール内に休息場所が設けられる為、持続力の小さい魚にも対応できる。	・流量変化による流速の變化が激しい。 ・魚の遊泳能力に合わせて、勾配を緩くする必要がある。 ・水深が深くなると、流速が速くなり、流れが落ちやすくなるため、崩れやすくなる。 ・粗石が粗大で、流れが乱れればする程、流れが乱れる。	・増水時は流水は、中央部(骨魚勾配部)に集中し、その結果として周辺に縁流に縁流部がたまってしまう。 ・周辺の縁流部は比較的水深のある部分、浅い部分が生じ、色々な流速の速い部分、遅い部分が生じ、色々な流速に対する対応が可能である。 ・小流量時は流水が中央部のみに集中し、流速が速く、また、周辺の縁流部が薄く細くなる為、魚の週上は困難である。休息場所は無いに等しく、一気に魚が週上せざるをえない為、週上経路は短い程良いが勾配がきつくと、流速が遅くなる。勾配の決め方が難しい。	・増水時は流水は、中央部(骨魚勾配部)に集中し、その結果として周辺に縁流に縁流部がたまってしまう。 ・周辺の縁流部は比較的水深のある部分、浅い部分が生じ、色々な流速の速い部分、遅い部分が生じ、色々な流速に対する対応が可能である。 ・小流量時は中央部の魚道を流下する為、魚道の週上が可能であり、流量が増大すると周辺の縁流部が週上可能経路となり斜曲面の欠点をカバーできる。
水理特性(週上し易さ)	・水叩き部に十分な水深を確保している為、基本的な問題ない。	同 左	・小落差の連続で落ちている為、特に問題はない。	・斜路上を流下させる為、問題は無い。	・斜面上を流下する為、問題は無い。	・魚道部についても斜曲面部についても問題はない。
降下し易さ	同 左	同 左	同 左	同 左	同 左	
治水安全性(洪水時の水理)	・現行基準の尻止工と基本的な何らかの対策が必要。 ・洪水時の減勢に対する水理特性は左案と同様に良い。	・増水時魚道部に流水が集中する為、河川水が集中する為、減勢が期待できない。 ・左案同様、良い。	・洪水時に流水は斜面を落下する流れとなり、段階部における減勢は期待できない。 ・下流部にはエンソル、パツソルピア、水橋脚等を設けて減勢する必要がある。	・洪水時の流水は斜面を落下する流れであるが、減勢させるにはエンソル、パツソルピア、水橋脚等が必要となる。	・洪水時の流況は斜面を落下する流れとなり、且つ下流部で中央部に水が集中し、水面が盛り上がる事が予想される。 ・下流部の減勢は左案と同じであるが、中央に流れが集中する分、流れの不安定化が懸念される。	・流量が多い時は自然河川の早瀬に見せることもできる。 ・流量が少ない時は、特に魚道のみを流れる時は、コンクリート面が広く表面に出る為、景観的に好まない。
景観性	・尻止工下流側に魚道が突出しており、パランスの良くない景観となる。	・魚道が突出していない左案よりは良い。	・人工的な景観となるが隔壁に自然石を用いることなどで改善はできる。	・全面に水が流れる為、早瀬状をなす景観は良い。	・流量が多い時は自然河川の早瀬に見せることもできる。 ・流量が少ない時は、両側にコンクリート面が広く表面に出る為、景観的に好ましくない。	・斜曲面部は左案と同様。 ・見せることもできる。 ・流量が少ない時は、特に魚道のみを流れる時は、コンクリート面が広く表面に出る為、景観的に好まない。
魚道として設計法	・通常の魚道設計であり、水理条件、対象魚種に適した設計が容易。 ・魚道位置に配慮が必要	同 左	・魚道(尻止工)内の平水時の流量、流速は越流公式によって予測が可能であり、対象魚種に適した設計が容易。	・流速の計算は、等流速計算によるが、粗石による粗度の評価が難しい。 ・基本的な構造は単純である。 ・尻止工としての設計法が確立されていない。	・平水時の流速は斜曲面の形状、粗石の配置、形状に大きく左右される為、流量、流速の予測は困難であり、水理模型実験での検証が必要である。	・斜曲面部は左案と同様。 ・見せることもできる。 ・流量が少ない時は、特に魚道のみを流れる時は、コンクリート面が広く表面に出る為、景観的に好まない。
構造設計	・構造的に簡易である。 ・基本的に尻止工と魚道は構造上は別れており、尻止工と魚道についてはそれぞれ設計法は確立されている。	・基本的な本体構造は設計法は確立されているが、魚道と引き込んだ部分の構造的に留意点となる可能性がある為、別途留意が必要。 ・魚道内に三方から流入する可能性がある為、魚道側壁を尻止工天端より高出させるなどの工夫が必要となる。	・構造的に複雑な為、施工性は落ちる。 ・フルール内に土砂が堆積しやすいため、維持管理の必要がある。 ・流速が弱まりつらいため、運床工下流の河床が速く進む可能性がある。	・土砂の堆積やゴミ、流木が引掛かることは少ない。 ・基本的な維持管理は容易である。粗石の流失が生じる事がある。	・斜曲面内には砂の堆積はない。下流部で土砂堆積は、水橋脚、パツソルピア、水橋脚等が自然に水がらみ出される為、維持管理面では容易である。 ・河道中央部への流水の集中により、河道中央部の河床が拡大し、護床工の維持が困難である。	・斜曲面部、左案と同様に維持管理面が容易である。土砂、ゴミ、流木が集中しやすいため、維持管理の可能性がある。 ・河道中央部への流水の集中により、護床工の維持が困難である。
施工性	・施工性に優れる。	同 左	・構造が複雑な為、施工性は落ちる。	・粗石の張り付けが難しい。	・斜曲面、粗石の施工が難しい。	同 左
維持管理性	・魚道部には、土砂やゴミ、流木が集中しやすいため、定期的な維持管理が必要。 ・維持管理は魚道部のみであり、比較的容易にできる。	・左案より更に土砂、ゴミ、流木が魚道部に集中しやすいため、維持管理は魚道部のみであり比較的容易にできる。	・フルール内に土砂が堆積しやすいため、維持管理の必要がある。 ・流速が弱まりつらいため、運床工下流の河床が速く進む可能性がある。	・土砂の堆積やゴミ、流木が引掛かることは少ない。 ・基本的な維持管理は容易である。粗石の流失が生じる事がある。	・斜曲面内には砂の堆積はない。下流部で土砂堆積は、水橋脚、パツソルピア、水橋脚等が自然に水がらみ出される為、維持管理面では容易である。 ・河道中央部への流水の集中により、河道中央部の河床が拡大し、護床工の維持が困難である。	・斜曲面部、左案と同様に維持管理面が容易である。土砂、ゴミ、流木が集中しやすいため、維持管理の可能性がある。 ・河道中央部への流水の集中により、護床工の維持が困難である。



图—16 鱼道付加型落差工一般图



图—17 多段式落差工一般图

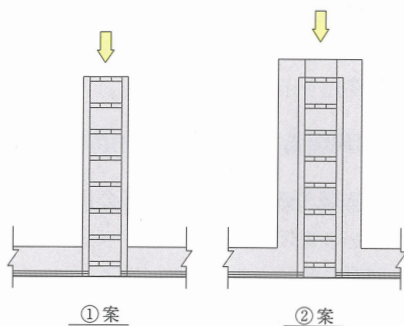


図-18

三点目として魚道呑み口部分以外から流水が流入すると流量制御が困難になるため、魚道側壁を嵩上げする必要がある。嵩上高は魚道設計流量時の水深に余裕（10cm～20cm程度）を見込むものとする。

また、水叩工部分の水深に関しては計画河床より、最低50cm以上を確保するものとする。

4-2 全断面魚道式落差工の考え方

土砂供給が多く、滞筋の安定しない河川に魚道を設置する事は維持管理上非常に難しいことが予想される。こういった場所については全断面魚道式が有利である。仮に土砂で一部埋塞したとしてもどこかに遡上経路が確保されるし、入り口を見つけづらいといった問題も発生しない。

構造上の考え方については、現行基準では、本体と水叩きを計算上は分離しているが一体構造として扱っている。

多段式等の場合も基本的には同様の考え方で転倒、滑動の安定計算を行う。ただし、縦断延長が長くなり構造的に分割する場合は、それぞれのユニットについて同様に安定計算を行えばよいと考えられる。その際、各ユニット間の継ぎ手は水密でかつ不同沈下に対応できる構造として、ダウエルバー方式で行うのが望ましい。多段式等の場合は、揚圧力の検討で床版厚がかなり厚くなることが予想され、床版そのものの応力計算が必要になるケースは少ないと思われる。

次に水理上の考え方として、多段式の様に本体勾配を緩くした場合は洪水時において完全跳水が起きにくく、したがって減勢せず、下流の流れが不安定となることが予想される。こういった場合の対応として、水叩きを下げた下流端に段上りを設けたり、水叩き下流端にシルやバップルピア等の減勢工を設ける検討が必要になる。特に減勢工については、模型実験等で形状を決定することが望ましい。

最後に取付擁壁の構造として、現行基準では、RC逆T

擁壁等の直立した構造を原則としているが、多段式等の場合、縦断的な延長が長くなり、この直立したコンクリートの壁が河川景観を損ねる原因となることも考えられる。特に中小河川などで川幅が比較的小さい場合は、取付擁壁が景観上重要な要素となりやすい。

現行の落差工では、落差が高く水流を一気に落下させる構造のため、跳水等により複雑な流れとなり、側部については強固な構造とする必要があったが、多段式等では一段あたりの落差も小さいため、必要な強度をもたせながら上下流の護岸構造と整合のとれた形状で検討するべきである。

ただし落下水による破損を防ぐため、堤防側へ後退させた位置に設けるのがベターである。

5. おわりに

以上、課題の抽出、整理、魚にやさしい落差工形式の考え方を述べてきたが、これまでに落差工本体の安定計算についての外力の考え方や手法などについては整理されつつあるが、魚道機能としての設計流量の考え方や、断面形等については今後さらに検討していかなければならない。また、専門家の間では落差工の機能そのものを変更するよりダイナミックな考え方も検討されている。今後、専門家を交えた研究会を通じさらに検討を加えより具体的な提案をしていきたい。