

境界層の吸込みによる流況の変更

—フランス文化使節としての来日に際して—

Leopold ESCANDE



フランス水理工学の第一人者として、またツールーズ大学教授としてのエスカンド教授は、フランス学士院会員、フランス科学技術会議委員、国際水理学会副会長なども兼任されている。同教授の研究は、サージタンク、水撃作用等の水理過渡現象に関するものも多いが、また、ここに示すような越流、流出等の問題についても独自の労作があり、その活動は、発電水力関係の水理学全般にわたっている。本文は、昭和37年9月13日、同教授が日仏文化交流の公式使命を帯びて来日された折りに、土木学会と日仏工業技術会との共催により、東京神田駿河台日本化学会講堂で行なわれた学術講演会における講演の要旨である。(訳者注)

1. ダムの越流頂に生ずる負圧による越流係数の改善

以下に述べる研究は、ツールーズ大学の水理研究所で行なった、ダム越流頂の研究から発展したものである。図-1の越流面の圧力水頭分布に示されるように、流れが直線的な部分では圧力は静水圧分布を示すが、流れが曲る場所では遠心力の加速度の影響が支配的となり、圧力は静水圧に等しくならず、頂部ではこの力が氷脈をダムから引き離そうとする方向に働くため圧力は低下する。そして図の場合のように圧力水頭線がダム表面の線より下に下がるときには、圧力は大気圧以下の負圧となる。理論的ないし実験的研究によれば、越流頂の圧力が小さくなればなるほど、越流係数は大きくなるものである。したがって、この負圧は越流係数を向上させ、洪水吐容量を増加させるので、好ましいものと考えられる。しかし、実際に過去において、あるダムにおいては、

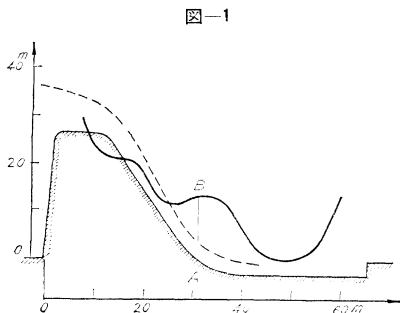


図-1

越流部形状に欠陥があるため不安定な負圧を生じ、越流状況も定常性を欠いていることが観察された。すなわち越流水脈の裏側に、空気が間けつ的に吸い込まれては水とともに流し去られるために流れがバタつき、振動を生じる事実があった。このことのために、それ以来、長い年月の間、ダム越流頂には、いっさいの負圧を生じさせるべきでないと、一般に信じられるようになってきている。しかし、圧力が小さいほど越流係数は大きくなるわけであるから、最も望ましい越流部形状は、圧力がどこでもゼロ、すなわち大気圧に等しくなるものでなければならぬとされてきた。そこで図-2に示すように、鋭縁ぜきの自由越流水脈形状を基本として研究が行なわれ、クリーガの形状が定められた。ここでは若干の安全率をとるため、水脈下縁の線よりも少しふくらませた形になっている。以来20年間、クリーガ形状が、最適の越流頂形状であるとみなされてきた。

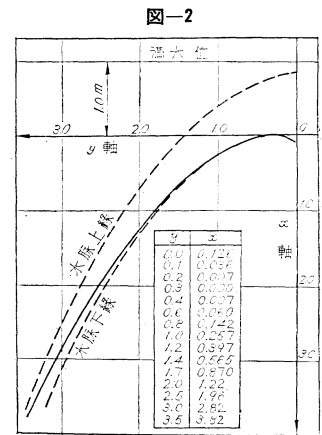


図-2

しかし、このことは明らかに行きすぎであり、過去において、負圧をとともうあるダムの流れが不安定であったからというだけの理由で、負圧をとともうあらゆる越

流頂形状を、すべてしりぞけてしまうことは早計であるという反省が、実際に最近ようやくきかんになってきた。負圧の分布を合理的にしさえすれば、安定した越流状況が得られ、越流係数の値も改善されるはずであり、グルノーブルのネールピック研究所や、マドリードの Beceril 教授、および私どもの研究所（ツールーズ大学国立水理学研究所）などにおいて、この点の検討が行なわれてきている。

私どもの研究によれば、安定した負圧を生じる越流部形状の定め方としては、クリーガ形状を用い、これに、その設計水頭（越流部プロフィールを、その越流水脈の下縁とするような鋭縁ぜきの自由越流水頭）以上の越流水頭で越流を起こさせることにより、うまく目的を達しうることがわかった。実験の一例として、設計水頭 14 cm のクリーガ型越流頂に、21 cm の越流水頭（すなわち設計水頭の 50 % 増し）で越流を起こさせた場合について実験値と、Prasil の解法による理論値とを対比させて図

図-3

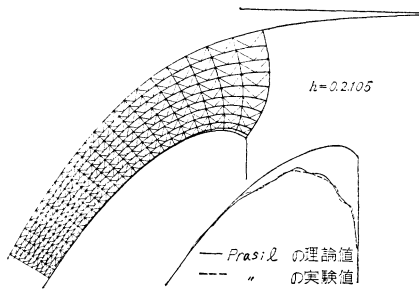


図-3 に示すが、両者の一致は良好である。またゲートやピアが存在する場合の流れの安定性についても、検証を行なった。これらの結果からクリーガ形状を採用して、水脈の振動や空気の吸込みなどの障害を生じさせない範囲内で、越流水頭を設計水頭の 1.66 倍まで増大させることができ、またこの

図-4 クリーガの越流頂形状を用い、振動や、空気吸込みを起こさせない範囲

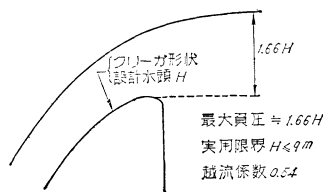
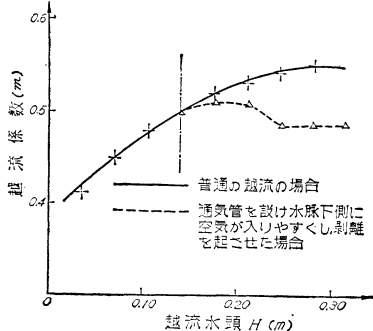


図-5 クリーガ型越流頂 (設計水頭 0.14 m, ダム高さ 1.70 m, 越流係数 m と越流水頭 H との関係)



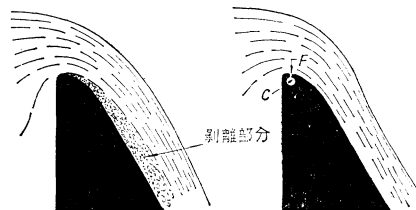
場合、越流係数を 0.54 ——すなわち普通のクリーガの係数 0.50 の 8 % 増し——まで高めることができることがわかった (図-4)。図-5 に越流係数を越流水頭の関数として示す。この 図-5 の曲線について考察した結果、私どもは以下に述べるような大水利構造物の流れの状況の変更に關しての研究のいとぐちを見出したわけである。

2. 境界層の吸込みによる越流係数の向上

図-5 に示すように、越流水頭の増加とともに、越流係数は、はじめのうちは増加してゆくが、水頭がある値に達すると係数の増加は止ってしまう。本来ならば、水頭の増加とともに流速が増加し、したがって遠心力の加速度 V^2/R も増加し、負圧が大きくなり、越流係数も増大すると期待しても良いところであろう。ところが寧ろは、そうならない理由を実験的に検討した結果、水頭がある値以上になると、水脈はダム越流面からはく離を起こし、その間に渦流領域を生じることがわかった。このようにはく離が起こると、曲率半径 R は急増し、 V^2 の増加と相殺してしまう。したがって、もし、はく離を防ぐことができれば V^2/R を増大させることができ、大きい水頭に対しても負圧を保つことができ、もっと大きい越流係数をうることはできるはずである。

はく離を防止する方法として、私どもは航空流体力学の分野で古くから用いられている、スロットにより境界層を吸込む方法を利用する。すなわち、粘性の小さい流体が壁面に沿って流れるとき、摩擦の影響は壁面に近いごく薄い境界層の内部だけに限られると見られる。この

図-6



境界層の内部に逆流を生じ、これが流れのはく離の原因となるものである。したがって、スロットにより境界層を吸い取ってしまえば、はく離の根源を除去することができ、したがってはく離そのものを防ぎうるわ

図-7

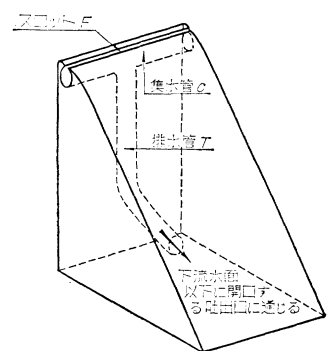


写真-1



写真-2

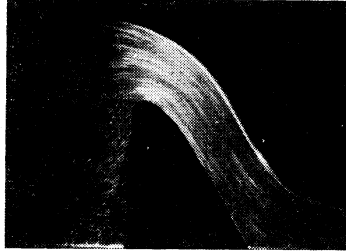


写真-3



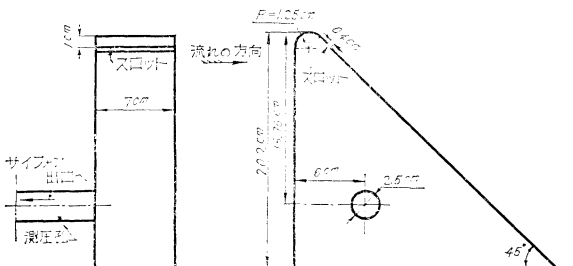
けである。

ダムの場合、図-6および図-7に示すように、スロットF、集水管Cおよび排水管Tのシステムにより境界層を吸込めば、はく離を防ぐことができる。長さ40m、高さ20m、越流水頭3mのダムの場合、CおよびTの直径は2m程度で十分である。

写真-1,2,3は、側面ガラス張り水路中の模型の状況を示すもので、写真-1は、吸込みを行わずはく離を生じている場合、写真-2は吸込みを行なってはく離が消えている場合、写真-3は水脈を貫いて管をさしこみ水脈とダム面との間に人工的に空気を入れた場合であるが、この空気は越流水に逐次連行させられてなくなり、やがて吸込管の中に水が充満して自動的に吸込みが始まり、はく離は消えてしまう。

図-8に、スロット付きダムの一例を示す。またあるダムの実験結果によれば、越流係数は0.59に達し、クリーガ規準値(0.50)の18%増しになっている。許

写真-4

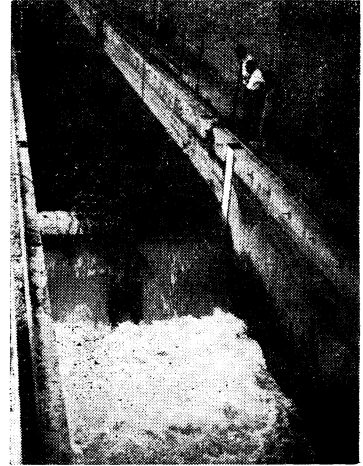
図-8 スロット付きダムの一例 E₂型

容最大越流水頭はキャビテーション防止のため3.5mにおさえられるが、スロットからの流量は、全越流量の1%程度にすぎない。

この問題について、私もは大型模型による検証も行なった。使用した模

型のうち最大のもは、研究所内の大型試験水路に設けられた高さ2.2m、長さ4.0mのもので、最大越流水頭は1.0mにおよび、なかば実物に近い規模のものであった(写真-4)。これにより、計算では定めにくい諸現象の検証を行なったが、その一つとして、洪水時の流木の流下による支障の有無を調べた(写真-5)。結果はもちろん満足すべきものであった。

写真-5



3. 境界層吸込みの、他の水理構造物への応用

境界層吸込みによる流れの状況の改善の方法は、ダム洪水吐のみでなく、他の水理構造物にも応用できる。

第一の例として写真-6は越流型ダムに接して設けられる取水口であるが、洪水越流時にダムのゲートが開かれると水はダムのほうに引かれ、取水口入口の幅がきわめて広く、そのすりつけが十分にゆるくない限り取水口入口に流れのはく離が起こり、渦流領域ができ、土砂の滞積なども生じよう。この場合でも、図-9のようにスロットFにより境界層を吸込めばはく離を防ぐことができる。スロットFは、立坑Cに連なり、これから地下の排水管Tが、ダム下流の河道に通じている。洪水時には、Tの途中にあるバルブを開くと、ダム上下流の水位差により、FCTのシステムを通じて水が流れ、吸込みが行なわれ、はく離が防止される。

写真-6

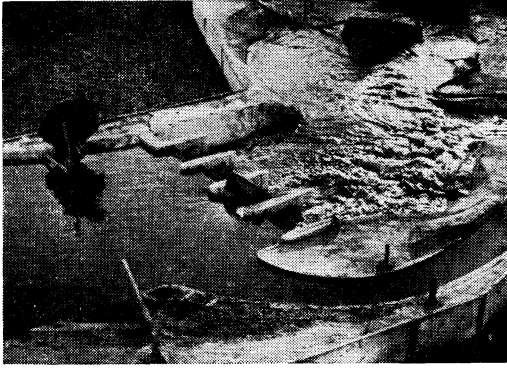


写真-7 は吸込みをしない状況（模型では写真のようにスロットに栓をしている）を示すが、渦流領域は取水口全幅の、ほぼ半分近くに達している。写真-8 は吸込み中の状況で渦流は全く消えている。

第二の応用例として、拡散流出口の場合を示す。写真-9 は、ガラス張り水路中に設置された模型の側面図である。ここでまず、最初に下流水位（写真の右側水位）を高めておき、つぎにこれを徐々に低下させて流出水脈が空気中に現われるまでの過程の実験を行なう。このとき、もし上側の吸込口（図-10 の F）だけに単独に吸込みを行なわせると、きわめて特異な現象を生じ、空中に出る流出水脈は拡散流出口の上側の壁の裏に、はりついてしまう（図-10、写真-10）。

写真-7

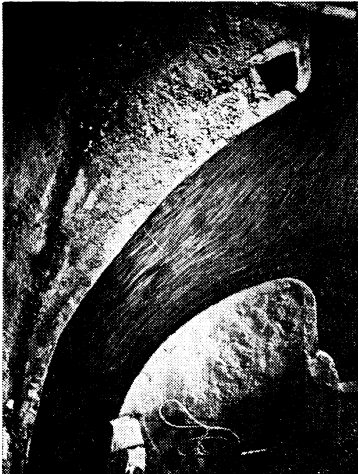


写真-8



図-10

第三の応用例として、橋脚あるいは、越流型ダムのピアの場合をとれば、ここでも、吸込みスロット F を設けることによりその下流の乱れを防ぐことができる（図-11）。

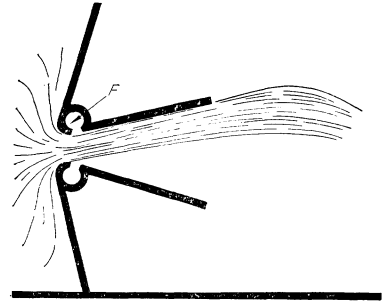
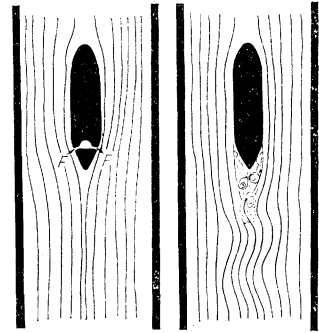


図-11

写真-11 は吸込みをしない場合の下流の乱れの状況を、また写真-12 は吸込みをした場合の乱れの消失状況を示す。



第四の例として、開水路の 90° 屈曲部の場合を示す。スロット F により吸込みを行なうと、屈曲部内側の角から発生する渦流領域を消すことができる（図-12）。写真-13 は吸込みをしない場合の渦をともなう流れを、また写真-14 は吸込みにより渦流領域が消失した状況を示す。

最後の例として、吸込みスロットの効果を確認し珍しい流れの状況を呈する 図-13 の場合をあげる。こ

写真-9

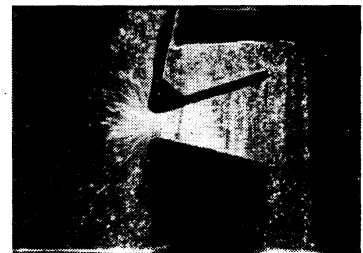


写真-10

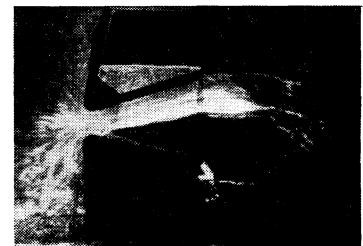


写真-11



写真-12



写真-13



写真-14

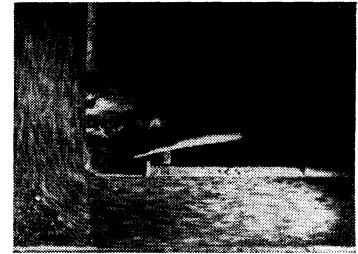


図-12

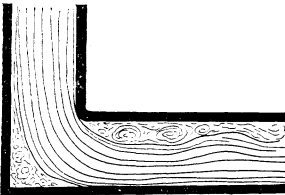
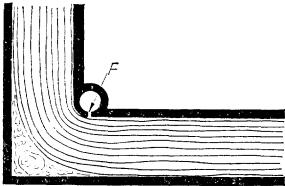


写真-15

これは自由水面をもつ貯水池の底面に、トンネルから圧力水が噴出する場合の模型の側面図である。写真-15は吸込みをしない状態で、水脈は水槽底面にはりつき、その上に渦流領域を生じる。写真-16は吸込みを生かした場合のもので、流れの状況は一変し、高速水脈は底面からはなれ、壁

写真-16

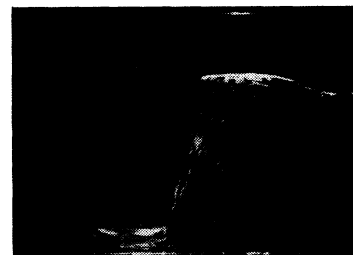


図-13

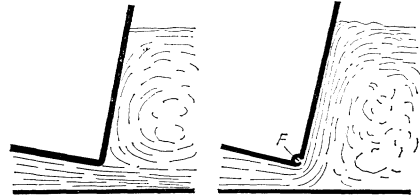
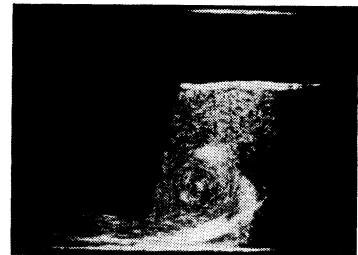
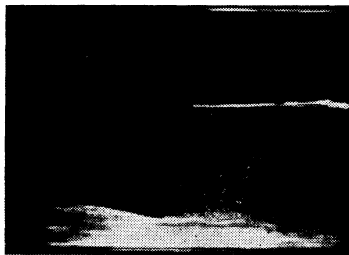


写真-17

に沿ってほぼ鉛直上方に向かって上昇し水面に達している。もし、ここで吸込みを止めれば、水脈は写真-17に示すように、みごとな渦をともなう遷移状態を経て、再び底面に沿って流れるようになる。



以上の説明により、大水理構造物の流れの状況を変更させるために、境界層の吸込みが、きわめて有効なことを示したが、特に越流型ダムの場合や、取水口の場合などは、余分の水のエネルギーを活用するわけであるから、外部からの特別な動力源を必要とせず、吸込みを実施しやすいであろう。すでに、多くの取水口において、この吸込みスロットが設置されて、きわめて満足すべき成績をあげている。私もは、将来、もっと多くの効果的な応用面がひらかれることを望むものである。

— L. ESCANDE (エスカンド) 教授の横顔 —

フランス学士院会員
フランス科学研究理事会顧問
Toulouse (ツールーズ) 大学教授, 同大学国立電気工学・電子工学・水理学研究所所長
フランス科学研究上級委員会元会長
国際水理学会副会長
その他・世界諸国の 10 の大学の名誉教授, 19 の国の科学アカデミーの会員または通信会員

(1963. 1. 8・受付)

(訳者: 中山謙二・正員 電源開発 KK)