

水に関する測定

土屋 昭彦*

1. まえがき

水に関するいろいろな計画や、事業、工事などで一番基本となるものは、水の量的な把握である。そして、その量的な把握をどのような物指で行なうかは、それぞれの問題によって異なっている。たとえば、河川の場合には、計画高水流量が河川改修計画の基本となり、築堤工事は、計画流量に基づく計画高水位を基準として行なわれる。同様に、海岸堤防は、その海岸で生ずると思われる波高を予想してその高さが決定される。このように、計画を合理的に行ない、工事を無駄なくするためには、これらの基本となる測定を十分に行ない、また、正確な予想をたてられるように観測の充実をはかることが肝要である。

土木工学の分野で水に関するものといえば、水文、河川、海岸、ダム、上下水道など関係する範囲がきわめて広く、それらの中で水に関する測定としてどのようなものが考えられるか、項目を列挙してみるとつぎのようなものがある。

- ① 気象に関するもの
降雨量、降雪量、積雪深、蒸発量、浸透能
- ② 流水に関するもの
水位、流速、流量、水圧、透水、水温、水質
- ③ 波浪に関するもの
波高、波向、波圧、越波量
- ④ 気体や固体などと、水との相互作用によるもの
高速流における空気混入量、流送土砂量、漂砂、局部洗掘、海岸侵食など

このように、水に関する測定はきわめて種類が多く、限られた紙数でその内容を詳細に説明することは不可能である。そこで、今回は基礎編としてこれらのうちから、② 流水に関するものと、③ 波浪に関するものの2つをとりあげ、残るものについては、応用編において、それぞれ関係の深いところで、説明をお願いすることにする。基礎編においては、これを2回に分け、今月は、

* 正会員 建設省土木研究所 河川研究室長

水位、流速、流量、その他の諸問題について述べることにし、波浪に関する測定については次回の予定である。

2. 水位測定

(1) 測定方法

a) 水位標¹⁾

もっとも簡単な水位計で、地上に物指をたてて水面の位置を読み取ることによって水位を知る。一般に河川で用いられているものは、1~2 mの鉄板に1 cm単位の目盛を施し、これらを木杭やコンクリート柱に固定して使用する。単独に立てられたものや、低水、高水等、数段に分けて設置したもの、また橋脚や護岸、水門などの構造物を利用したものもあるが、一般に構造物周辺の流れは乱れが多く、水面の変動が大きかったり、その付近の平均水位を表現しない場合が多いから、できるだけ避けることが望ましい。

測定は時間を定めて1日に数回観測するのが普通であるが、これはその水面の変動にも関係することであり、目的に応じて時間間隔を選ぶ必要がある。河川の場合には、常時6時と18時の2回観測とし、洪水時には毎時観測を行なうこととしている。

(2) 自記水位計

水位標による測定では、長時間の連続観測はむずかしく、また特に夜間の観測は困難である。そこで、これを自動的に測定するものとして考案されたのが自記水位計であり、今日までに各種のものが研究開発されている。そのうちで主なものはつぎのようなものである。

- ① ロール式自記水位計²⁾
- ② リシャル式自記水位計
- ③ 水研61型自記水位計³⁾
- ④ 水研62型長期自記水位計³⁾
- ⑤ 水圧式自記水位計(菅谷式)²⁾
- ⑥ 気泡式自記水位計
- ⑦ その他

これらの機械の機構や特徴を簡単に説明すると、まず①~④のものは、観測井戸を設けこの中にフロートをつるし、水面の上下によりフロートとワイヤーを介して機械の滑車を回転させ、これをペンの動きに変え自記紙の上記録をさせるものである。自記紙は時計によって駆動され、記録紙の目盛から時間~水位関係を知る。この方式では、かなりな高さの観測井戸を必要とするために建設費がかさむことと、導水管が砂、砂利等のためにつまったり、あるいは建設後に河床が下がって水位が下がり、観測不能になるなどの欠点を持っている。また、これら

の自記水位計は、ほとんどが記録紙の駆動を時計に頼っているため、初期のロール式やリシャル式のものとは時計故障による欠測がかなりあった。しかし、最近の精密工業の技術進歩のおかげで、時計の安定性はいちじるしく増加し水研 62 型のごとく、3 ヶ月巻きのものもかなり安定した観測が期待できる。また機械式の時計の代りに、水晶発振器を用いた非常に精度の高い電子時計も開発されている。

水圧式自記水位計の代表的なものは菅谷式で、観測井戸の建設費用をはぶくために水中に受圧部を沈めて、その圧力変化を地上で観測する装置を考案した。この方式の特徴は、その圧力伝達に液体を用いたことである。つぎの気泡式水位計も原理は水中での圧力測定であるが、その方法として水中に細いパイプで気体を導き、その気体の圧力を水位よりも高くして、わずかな気泡をたえず水中に放出させる。このようにすると、水圧とパイプの中の気体圧とは、ほとんど同一となるから、これらを地上で検出して記録紙上に画かせればよい。この原理を応用して最初に水位計を実用化したのは、スティーブンス社であるが、現在国産化が進められている。

その他、超音波を利用したものや、記録紙によるアナログ標示の代りにデジタル化して数字で表示する⁹⁾ものや、これをタイプするものなど、また計測された水位を解析するに便利のように、電子計算機の入力テープとして、そのまま使えるようなテープさっ孔を可能とする機械なども考え出されてきている。

(3) 遠隔水位計⁹⁾

水位の測定には、これを記録紙に記録させ、後に解析すればよいものもあるが、時々刻々にその変動を知る必要のある場合も多い。しかも、測定地点が非常に離れた所にある場合、遠隔測定の必要性が生ずる。日本では、洪水時のダムのゲート操作に必要な上流山地の雨量や、流入河川の流量を知るためにテレメーター技術が取り入れられ、格段の進歩を遂げている。

テレメーターは、水位測定に限らず雨量や積雪深などいろいろな情報伝達が可能であり、その機構は情報収集部と、これを伝達するための情報変換および伝送部と、受信および伝達記号を再びデジタル量やアナログ量に変換し表示する受信部との3つから構成される。この情報収集部に水位計を用いれば水位テレメーターに、雨量計を用いれば雨量テレメーターとなり、一台の機械で各種の情報をつぎつぎと切換えて送ることも行なわれる。水位テレメーターとしては、既製のフロート式や水圧式の自記水位計を用い、滑車軸に A.D. 変換器を直結して情報量を取り出すタイプのものが多く実用されている。

伝送部は有線と無線の2種類があり、それぞれの用途

に応じて使い分けられるが、一般に無線式は遠距離に用いられ、有線に比べて経費も高い。伝送の安定性は、最近の無線技術の進歩によって格段に高まり、ほとんど問題がないといえる。

このほか特殊な用途に用いられるものとして、最高水位計がある。これはパイプの中にコルク粉を入れたり、水に浸すと変色するテープを用いたりして、最高水位を記録させるもので、価格も安く、内水調査や、洪水痕跡を調べるのに便利である。

a) 計器の選定と測定上の注意

計器の選定は、計測の目的と経費によって決定される。自記水位計の使用は連続した記録の必要性が問題で、潮汐観測や、水位変動の激しい所では自記式が必要である。洪水観測所のように洪水時のみの記録を必要とするならば、水位標によることも可能であるが、設置場所が遠隔地であったり、観測者の確保が次第に困難になりつつある現状から、将来は次第に自記式に切かえらるることになる。

水位観測の上でもっとも大きな問題は欠測であり、つぎに精度である。欠測を生ずる原因はいろいろあるが、時計故障と機械取り扱い上のミスによるものが大部分である。日巻き式では観測者に委託して取り扱かわせることが多いが、機械操作を正確に行なわせることがなかなか困難である。このため、機械を長期巻きにして専門家に取り扱いかわせるのも一法であるが、長期巻きの水位計は時刻の精度が劣る欠点があり、改良の余地が残されている。

精度の面では水位計の基準高を正確に測量することがまず必要で、地盤変動の激しい所(地盤沈下地帯など)では、年数回の測量を実施すべきである。導水管のつまりは水位変動の急激な場合に精度を劣化させるから、常時の整備を心がける。また、井戸内水位と外水位のチェックも重要である。

観測された資料は、時刻水位表⁹⁾や、日水位年表⁹⁾、また年最高水位を集計して超過確率⁷⁾を求めたり、潮汐表を作成したり、流量を求めるなど、それぞれの目的に応じて解析する。これらの作業を自動化するためには、水位計の記録がデジタル化されたりパンチ式になることが必要で今後の機械は次第にその方向に改良されていく気運にある。

3. 流速測定^{8), 9)}

(1) 測定方法

流速測定は、それ自体工学的な意味を持ち、重要なことではあるが、実用的には多くの場合流量を求める手段

として使われている。特に管路の場合、流速分布を求めることはまれであるので、ここでは開水路の流速測定に限ることとする。

a) 浮子による測定

浮子による測定は、ある測線の平均流速を求めることが主であり、断面内の流速分布を求めることはできない。表面浮子と棒浮子があり、棒浮子の長さは水深に応じて異なる。測定結果より平均流速を求めるには更正係数を用いるが、その適用公式の選択によって結果に若干の差異を生ずる。

b) 流速計による測定

実用化されている流速計には種類が多いが、その多くは回転翼を持った形式のものである。つぎにその代表的なものを示す。

① プライス式流速計¹⁰⁾

河川の流量観測にもっとも多く使用されているもので、電音式とメーター式がある。適用範囲は普通の型で 0.30~4 m/sec であり、低流速用として標準型の 2/5 のサイズの小型プライス流速計¹¹⁾があり、その適用範囲は 0.05~1 m/sec である。

② 広井式流速計

プロペラ型の翼を 6 枚つけたもので、聴音式と電音式とがある。適用範囲は 0.05~2 m/sec 程度である。

③ 自記流向流速計

河川の感潮部など、たえず流速が変化し流向も変わるような所では、流速計を常置して観測することが望ましい。この目的のためには自記流向流速計が用いられる。

④ 洪水用流速計²⁾

安定性や精度の面からみて、プロペラ式のものが多いが、いずれも試作品に近く、実用的に完全なものはまだ得られないといってもよい。流速計自体はともかく、観測時の操作や、機械の固定などにも問題が多い。

これらの流速計は、流速 V と回転数 N の間に $V = aN + b$ (a, b は定数) の関係があり、あらかじめ検定を行なって、 a, b の値を求めておく必要がある(直統式では流速と計器の読みとの関係)。この値は、カップが凹んだり、プロペラのピッチが変わると変化するから、観測中にはこれらの変形に注意するとともに、少なくとも 1 年に 1 回は検定をし直す必要がある^{11), 12)}。

c) その他の方法

浮子を流す代りに化学薬品を投下し、これを下流で採水して化学分析により濃度を検出して流下速度を求める方法がある¹³⁾。この場合、水の乱水による混合拡散は余り大きくないので、投入された薬品のうち流速のもっとも早い流心部のものももっとも早く到達して検出され、いわゆる平均流速を求めることはむずかしい。

超音波を利用して流速を計測する方法が最近試みられている^{14), 15), 16), 17)}。水路幅 25 m ぐらいの所での実測結果は、プライス流速計の結果と比較して 2% 以内の精度

であり、現在の技術ではこれより水路幅の狭い所での測定は実用しうるといってもよい。原理的にはきわめてすぐれており、エレクトロニクスの技術向上にともなつて、将来有望な方法といえる。

航空写真測量の普及にともない、河川の表面流速を空中写真によって測定することが可能となった。この方法は、当初海の潮流測定に使用されたが、最近日本では、河川の洪水時の写真を撮影して表面流速や流向などを求めており、他の方法は測定不可能な場合にきわめて有効である。

(2) 測定上の問題点

現地で流速測定を実施する場合、流れは乱流であつて、流速はたえず変動をしている。したがつて、計測された資料は、ある時間内の平均値を示すことになり、その時間をどの程度にとるかが問題である。流れの規模と流れ方との関係はあまり良くわかっていないので、従来経験的に処理されているが、定常流の場合にはできるだけこれを長くすることが望ましい。観測方法の選定は要求される精度と観測場所、流況によって異なるが、一般に浮子によるよりも流速計による方が精度がよい。しかし、流速が大きくなると、流れ抵抗の増大により流速計の操作が困難になるので、現状では、洪水時の河川の観測では浮子によるものが大部分である。

4. 流量測定

(1) 測定方法

流量測定には大別して管路の場合と開水路の場合とに分けられ、前者には各種の流量計が用いられる。後者の場合は、① せきによる方法、② パーシャルフリュームによる方法、③ 断面分割による流速測定による方法、④ 水位流量曲線による方法などがある。

a) 管路の場合

管路に用いられる測定法には、つぎのようなものがある¹⁸⁾。

④ 差圧式流量計

⑤ 面積式流量計

⑥ 電磁流量計

④ オーバル歯車流量計、ルーツ流量計、回転ジラム式流量計、その他

④, ⑤ の流量計は圧力差を読んだり、浮子の位置を測定することによって流量を知るが、その方法には機械的に水銀マンメーターを用いたり、電気的な差圧計を用いて自記や遠隔測定可能なものもあり、必要とする目的によって選ぶことができる。

電磁流量計¹⁹⁾は近年開発されたもので、管路の周囲に強力な磁場をつくり、この中を電導性のある流体が流れば流速に比例する起電力を発生することから、この電圧を測定することによって流量を知る。したがって流体中に砂がふくまれたり、溶解物がある場合にも問題がない。最近大流量のものについても実用されるようになった。この方法を河川に応用し、地磁気を利用して流速測定を行なう試みがなされたが²⁰⁾、地電流の問題があり成功していない。

b) 開水路の場合

① せきによる方法；流量の小さいものでは、三角ぜきや四角ぜきが利用でき精度も高い²¹⁾。流量が大きくなると、たとえば河川では各種用水のためのダムや、砂防ダムを越流する流れを利用して流量を求めることができる。この場合、流れがもぐり越流では下流端水位の影響が入るので、完全越流の状態を利用するのがよい。砂防ダムのような台形断面については、幅厚ぜきの流量計算法²²⁾を用い、標準形、類似標準形の越流ぜきについては岩崎公式²³⁾などで計算するが、一般にこれらのダム越流には、三次元的な要素が強く影響するから（縮脈、ピヤーの影響など）正確には模型実験を必要とする。

② パーシャルフリュームによる方法^{24), 25)}；この方法は、最初アメリカのかんがい用水路で用いられ開発されたもので、比較的流量の少ない用水路で使用するのに適している。

③ 断面分割による流速測定による方法；測定断面を分割し、それらの各断面内の平均流速を測定して区分流量を求め、全流量を算出する方法である⁶⁾。各断面内の平均流速を求めるには、3.で述べた流速測定法のなかから状況に応じて選定する。流速の小さい場合には流速計を用い、大きい場合には浮子観測による。また超音波法による場合は、水平方向に断面を分割して求める必要がある。

断面をどの程度に分割するかは測定精度と関係するので細かいほどよいが、経費の問題もありこれについては竹内・他の研究があり²⁶⁾、また、春日屋の研究によれば、測線の位置をその数に応じて合理的に決めることができる²⁷⁾。

流量計を用いて断面平均流速を求める場合、1測線上でどのような間隔で流速を測定するかについては、1点法、2点法、3点法などがあり、春日屋の平均流速算定式²⁸⁾は合理的である。

④ 水位流量曲線法；普通の流路では一般に水位と流量とは相関があり、その関係は $Q=a(H+b)^n$ (H :水位, a, b, n :定数) のようにあらわされる。この曲線は、断面形状や流速分布によって異なり、一本の曲線のみで表わすことがむずかしいので、一般には期間別にまた水

別別にそれぞれ別の曲線式を用いる。したがって、このような関係を求めるべく、あらかじめ流量観測を各種の流量について行なうことが必要である。

流量は水位のみの関数ではなく、水面勾配の影響がふくまれる。したがって以上のようにして求めた水位流量曲線は、水面勾配が変化すると測点が非常にちらばり、また水位から流量を求める場合にも誤差の原因となるので、これを補正することが必要で¹⁾、それには各種の方法がある。

(2) 流量測定上の問題点

一番問題となるのは精度の点である。大河川の流量測定に比べて用水路や管路などの小流量ほど測定がしやすく、よい精度が期待できるが、しかしどの計測法でも、もっとも精度のよい適用範囲が存在する。たとえば差圧式の流量計では、流量が減少すると限界レイノルズ数以下になるため精度が低下する。また往復ポンプ等の脈動流を測定すると、平均値誤差を生じて常に指示値が実流量を越える現象がみられる。

また、感潮河川などでは流速が小さく、流速計の適用範囲以下の時間が長くなるほど観測精度が落ちる。また洪水中の浮子観測では、浮子が区分断面内を通過するとは限らず、流下区間中の断面積は一定でないからどの程度平均流速を代表したかも不明である。しかし計器の適用範囲を守り、かつキャリブレーションの可能な流量範囲であれば、測定精度を数%以内に収めることはさほど困難ではない。河川のような大流量の場合には真値をつかまえることができないので、現在の測定方法がどの程度の誤差をふくんでいるかを判断することはできないが、定常流の場合には、流速計による断面分割法で区分面積を小さくすることにより、ある程度この問題を解決できそうである。原理的にもっとも誤差の入りにくい方法は超音波による方法であるが、現在の技術レベルではまだ問題を解決するに至っていない。

測定された流量資料の整理解析は、洪水のように変動の激しいものは時刻流量として表現し、また水利用のための資料などは日平均流量として整理される。

5. 水圧測定

水圧測定には、静的な測定と動的な測定とあり、そのいずれかによって測定法も若干異なる。静的な例としては、流量測定のための差圧を測定するような場合で、微小変動をある程度平均化して表示することが望ましい。これに対して動的な例としては、波圧の測定や、ダムにおける水の落下圧力の測定、水力発電のウォーターハンマー時のサージタンク内の圧力測定など、瞬間的な圧力

変化を忠実にとらえてピーク値をおさえることが必要となる。

これに使用する計測器は、静的測定の場合には、水銀マノメーターやペローズなどを利用した機械的な圧力計を利用すればよいが、そのほか低抵抗ひずみ計を利用した差圧計や水圧計も種類が多い。記録を自記させたり遠隔測定をする場合には、機械式のもの使用が困難で、現状は抵抗線ひずみ計のような電気式のものほとんどである。動的な測定に使用されるものは、受圧板と抵抗線ひずみ計を組合わせたものが多く、受圧板を二重にしたり、起歪筒を用いたり各種の製品がある。また半導体単結晶（シリコンやゲルマニウム）を用い、ピエゾ抵抗効果を利用した感度のよい製品も開発されている。これらの計器を用いるときに注意すべきことは、計器の固有振動数および測定範囲で水圧の変動周期が固有振動数に近い所では、記録が現象を忠実に表現しないから計器の選定とデータ解析には十分注意を要する。

6. その他の問題

水温測定はかんがい用水や、冷却用水などの取水の際に問題となるほか、河川の水質汚濁にも関係して観測される例が多くなった。自記水温計には、抵抗線ひずみ計やサーミスターなどを利用したものがある。

地下水調査の主たる目的は、地下水の分布および存在の状態を明らかにすることであり、そのための具体的な方法は、① 地下水位の観測、② 観測井標高の測定、③ 水温、水質の観測、④ 地質調査、⑤ 揚水試験、⑥ 調査結果のまとめ等で、これらをまとめたものに国土調査法に基づいた「地下水調査作業規定準則」がある。これらの測定に関する問題は内容も複雑であり、ここでは参考文献をあげるにとどめる。

7. おわりに

水に関する測定と標題は大風呂敷を広げたが、その内容は限られた項目についての簡単な説明にとどまったことはなほだ本意ながらやむを得ないことである。本文に対する諸賢の御批判が頂ければ幸甚である。

参 考 文 献

- 1) 安芸皎一：流量測定法，森北出版，昭 27 p. 178
- 2) 竹内俊雄ほか：神流川試験地観測報告 (3)一水文観測器，土木研究所報告，第 91 号，昭 30. 8, p. 19
- 3) 水文計器研究会：水研 61 型日巻自記水位計，水研 62 型長期巻自記水位計仕様書，解説書，アテネ出版，昭 38. 3

- 4) 日坂 勲：水位計のデジタル化について，土木技術資料 Vol. 7, No. 10 昭 40
- 5) 高木 昇：遠隔測定と遠隔制御，エレクトロニクス講座，応用編，第 3 巻，共立出版，昭 33.
- 6) 建設省水文研究会：水文観測，全日本建設技術協会
- 7) 水理公式集 p. 56~69
- 8) 前出 (1)：p. 4~110
- 9) 前出 (7)：p. 13~14
- 10) 竹内俊雄，稲田禄次：プライス流速計の取扱い方，アテネ出版，昭 36.12
- 11) 八木亀助：流速計係数検定成績 および二，三の流速計の性能に関する実験 (第 2 報)，土木試験所報告，70 号，昭 18. 4, p. 39
- 12) 山本昌孝：流速計係数の変化度について(4)，土木研究所報告，第 91 号，昭 30.8, p. 19
- 13) 竹内俊雄ほか：河川の流下速度の観測方法，土木研究所報告，第 109 号，昭 36.11, p. 103
- 14) 建設省江戸川工事事務所：超音波応用による流速計の一例について，第 19 回直轄技術研究発表会，昭 40.11
- 15) 望月恵一：超音波による流速の測定，電気三学会連合大会，昭 30.3, No. 143
- 16) 丹羽 登，奥野 裕：電子管切換型超音波流速計，電気学会，東京支部大会，昭 31.11
- 17) Robert, L. Forgacs: Precision Ultrasonic Velocity Measurements, Electronics, 1960, Nov. 18, p. 98
- 18) 前出 (7)：p. 348~352
- 19) 花淵 太：流量の測定，横河技報 1958, No. 3
- 20) 竹内俊雄：地球磁場を利用した河川の流速測定，土木研究所報告，第 123 号，昭 49.1, p. 111
- 21) 流出 (7)：p. 165~166
- 22) 吉川秀夫ほか：幅厚堰の流量係数に関する一考察，土木研究所報告，第 103 号，昭 35
- 23) 岩崎敏夫：越流頂余水吐きの流量係数について，土木学会論文集，43 号，昭 32.
- 24) Parshall flumes of large size, Colorado Agricultural Station, Bulletin No. 386, 1932.
- 25) Parshall, R.L.: Measuring water in irrigation channels with Parshall flumes and small weirs, U.S. Soil Conservation Service, Circular 843, 1950.
- 26) 竹内俊雄ほか：低水流量観測の精度に影響を及ぼす二，三の要素について，土木研究所報告，第 105 号，昭 36.2, p. 157
- 27) 春日屋伸昌：平均値法による流量算定式について，土木学会誌，33 巻 7 号，昭 28
- 28) 春日屋伸昌：開水路の垂直流速曲線における平均流速の位置の分布性について，土木学会誌，40 巻 5 号，昭 30
- 29) 山本莊毅：地下水探査法，地球出版
- 30) 山本莊毅：地下水調査法，古今書院
- 31) 山口久之助：電気式地下探査法，古今書院，昭 27
- 32) 国土調査法：水質調査作業規程準則 (昭和 32 年 3 月府令第 14 号)
- 33) 蔵田・村下：水比抵抗法による水調査について，地学雑誌，63 巻 2 号，昭 29
- 34) 蔵田延男：地盤沈下と地下水開発，理工図書，昭 35.
- 35) 小野寺 透：壺田川伏流水調査について，科学技術庁，資源局，昭 32
- 36) 有泉 昌ほか：放射性同位元素を作用した地下水調査報告，土木研究所報告，98 号，昭 32, 101 号，昭 34 および 103 号，昭 34