多点同時水位計測による貯水池の水面振動解析

Analysis of water surface oscillation in a dam reservoir
using the data of water level from the multiple water gauges

石田享平* 長谷川和義** 鈴木洋之***
By Kyohei IHSIDA, Kazuyoshi HASEGAWA and Hiroyuki SUZUKI

It is important to know the exact amount of water flowing into a dam reservoir for operating a dam. Usually, this inflow is estimated from a data of the water level. Accuracy of measurement of water level necessarily reflects the accuracy of estimation of inflow into the reservoir. But, data of water level include many kind of noise, for example, seiche, wind wave, swell, and so on. In this paper, we analyzed the data of water level obtained from multiple water gauges installed in Jozankei Dam Reservoir. We found characteristic of water surface oscillation such as several kind of seiche, swell, and wavy displacement by wind. We could confirm that the wavy displacement of water surface caused by wind gives much error to estimate the inflow into the reservoir.

key word: estimation of inflow seiche, swell, wavy displacement by wind, multiple water gauge

1. はじめに

ダム貯水池への流入量推定は、ダムの操作運用にとって非常に重要な問題である。現在大部分のダムにおける流入量の推定は、貯水池の水位変化から貯留分流入量を推定し、これに放流量を加えて流入量とする方法によって行われているため、水位の測定値がダム貯水池への流入量の推定に大きく影響することになる。著者らが検討した定山溪ダム貯水池では、1 cmの水位計測誤差が約2万トンもの流入量推定誤差をもたらす。しかし、貯水池の水位データはセイシュ、風波などをはじめとする様々な水面変動のノイズを含んでおり、真の静水面を捉えることは非常に難しい問題となっている。このような理由からダム貯水池にどのような水面変動が生じているかを把握し、かつその水面振動の発生機構を知ることはダム操作には必要不可欠なものになっている。

本研究は、定山溪ダムを対象に5点の水位同時計測の方法結果を示すとともに、解析した結果見いだしたダム貯水池特有の水面変動を、前報^{1) 2)}の結果の一部を含めて報告するものである。

2. 定山溪ダムの概要

定山溪ダムは、洪水調節、上水道用水供給および、発電を目的として豊平川水系小樽内川に建設された総貯水量8230万 m^3 、湛水面積2.3 km^2 、堤高117.5mの重力式コンクリートダムである。この貯水池は図-1に示すように北西-南東方向に長軸を持つほぼ矩形の平面形を有しているが、堤体より約400mのところまで折れ曲がっている。また、滝の沢流入点を境にしてこの上流側で貯水池は急縮しており、ダム堤体から滝の沢流入点までが主要域となっている。図-2は貯水池最深部の縦断形状を示すものであるが、これをみて明らかにようにダム貯水池の水深はほぼ直線的に

図-1 定山溪ダム貯水池平面図

* 正会員	北海道開発局豊平川ダム統合管理事務所	(北海道札幌市中央区南32条西8丁目)
** 正会員 工博	北海道大学工学部土木工学科	(北海道札幌市北区北13条西8丁目)
*** 学生員	北海道大学大学院工学研究科土木工学専攻	(北海道札幌市北区北13条西8丁目)

変化している。また図-3はこの貯水池の堤体より400 m上流の位置での横断形状を示すものである。図から側岸は1.5から2割の急な勾配を持っているのが分かる。

図-2 最深部縦断面図

図-3 堤体から400mでの横断形状

3. 水位多点同時計測法

1994年7月から図-1に示す5カ所の位置に圧力式水位計を設置し、5地点の同時水位計測を開始した。現在もこの計測は継続して行われている。なお、No.2水位計がNo.3と200 m程しか離れておらず、ほぼ同様の波高が記録されていることから、1995年11月からこのNo.2の水位計をNo.6としてNo.5の水位計より更に上流に移設した。

これらの水位計は水面下約5 mのところに図-4のように固定されている。使用した水位計の計測時間間隔は2秒であるが、94年のデータについては1秒ごとにサンプルしてロガーに記録し、また、95年のデータについては計測時間間隔とサンプル時間間隔を共に2秒として収録している。これらロガーのデータは、1日に1回収収している。このようにこれらのデータは前例を見ない非常に貴重なものになっている。

また、定山溪ダム管理所では風向、風速、気圧などの観測を同時に行っており、これらは毎時データとしてまとめられている。

図-4 No.2 圧力式水位計設置状況

図-5 収納箱詳細

図-6 保護管先端部詳細

4. 貯水池に発生する振動現象

4.1 セイシュの検出

貯水池に流入流量の推定に影響を与えるほどの振動が現れるのは、低気圧や台風の通過にともなう強風が吹き続く日である。これまでに蓄積されたデータのうち、最も強い風が吹き続き、変動の振幅が最大となったのは94年10月13日であり、はじめにこの日の水面変動の特性を調べる。なお、以下に取り上げる水面変動の時系列データは検討対象の周期成分に合わせてトレンドを除去したものである。図-7の1～5は、94年10月13日0時から0時30分にNo.1～No.5の各水位計で観測された水面変動時系列を示している。図-8の1は、このうちのNo.1水位計による水面変動についての自己相関をとったものである。同図の2、3、4、5は、それぞれNo.2、No.3、No.4、No.5データに対するNo.1データの相互相関を示している。これらの図から周期約210秒の周期変動をみて取れる。また、No.2とNo.3の点ではNo.1と同位相、同周期の水面変動が現れているのに対して、No.4とNo.5の点ではNo.1と逆位相、同周期の水面変動が現れている。このことは、No.3とNo.4の間に節を持つ周期210秒のセイシュがこの時間帯に発生していることを意味している。

このような水面振動は、同日の異なる時間帯にも発生している。図-9、図-10はそれぞれ94年10月13日2時30分から3時までの水面振動につき自己相関 (No.1) と相互相関 (No.1 と他の点) をとって示したものである。この図から分かるようにこの時間帯では周期約80秒の周期変動が見られ、かつ、No.1に対してNo.4が同位相であり、No.2、No.3、No.5が逆位相となっている。このことは、No.1とNo.2の間、No.3とNo.4の間およびNo.4とNo.5の間に節を有するセイシュがこの時間に発生していることを表している。次に、図-11は、やはり強風日の95年11月29日の0時から1時までの時間帯に各点で観測された波高である。また、図-12の6はNo.6で観測された波高の自己相関であり、1、3、4、5はNo.1、3、4、5の各点で観測された波高とNo.6で観測された波高の相互相関である。ここで、No.2が欠けNo.6が現れているのは水位計移設後のデータのためである。この時間帯ではNo.1、3、4はNo.6に対して逆位相の水面変動を示しており、No.5ではどちらとも異なる振動を示している。このことはちょうどNo.5付近で節をもつ周期約700秒のセイシュが発生していることを表しているものと考えられる。

長辺 a 、短辺 b をもつ長方形閉鎖水域のセイシュ理論周期は次の式で示される。³⁾

図-7 94.10.13 0:00-0:30 の水面変動

図-9 94.10.13 2:30-3:00 の水面変動

図-11 95.11.29 0:00-1:00 の水面変動

図-8 94.10.13 0:00-0:30 自己相関と相互相関

図-10 94.10.13 2:30-3:00 自己相関と相互相関

図-12 95.11.29 0:00-1:00 自己相関と相互相関

$$T = 2 / \sqrt{gh\{(m/a)^2 + (n/b)^2\}} \quad (1)$$

ここに g : 重力加速度、 h : 平均水深、 m : a 方向のモード数、 n : b 方向のモード数である。ここでセイシュが長辺方向のみに発生すると仮定し、貯水池端部を滝の沢流入点とする、さらに、最深部水深の平均を与えると $a = 2800$ m、 $h = 67$ m となる。図-13は、(1) 式で与えられる各モードのセイシュ理論周期とセイシュ解析より得た実測周期の関係を示すものである。図中の実線は各モードのセイシュ理論周期を示し、プロット点はセイシュ解析の結果得た実測周期である。3種のセイシュの内80秒周期と210秒周期のものは理論式に良く一致する。次に700秒周期のセイシュについてNo.6の点までを貯水池と見なし、(1) 式を当てはめると約600秒となり実測より短い周期となってしまう。これは実際の貯水池平面形状が複雑な形をしているか水深が変化しているためと考えられ、No.6の点までをもって長方形近似することに限界があるためである。700秒という長周期変動を単純移動平均で消去するにはその正数倍の平均化時間を要し、現行の600秒平均法では対処できない。後に述べる「うねり」に対する処理も含めて、適切な重み付き平均を行う必要があるであろう。

図-13 セイシュ理論周期と実測値の関係

4. 2 うねり

図-14は95年11月3日3時から6時の水面変動を示しており、うねりと思われる振動が現れている。図-15はNo.4の点での波高の計測データに対してMEM法によってスペクトルを求めたものである。図によればNo.4において210秒、181秒、156秒の卓越周期が現れており、うねりの原因はこれら互いに非常に近い周期を持つ波の合成にあるものと判断される。したがって、先に相互相関から見いだされた210秒という周期は、この周期の近傍で生ずる多くのセイシュの1つにすぎず、実際には複雑な境界形状を反映した多種類のセイシュが生ずるものといえる。

図-14 95.11.3 3:00-6:00の水面変動

図-15 95.11.3 3:00-6:00 No. 4での波高のスペクトル

5. 風による吹き寄せ現象

図-16と図-17はそれぞれ94年9月30日18時から24時の水面変動時系列、およびこのデータの900秒移動平均を示すものである。また、図-18と図-19は、それぞれ94年10月13日0時から7時の水面変動時系列、およびその900秒移動平均である。図-17、図-19をみるとそれぞれ20時から23時にかけてと3時から5時にかけて、No.1、No.4、No.5とNo.2、No.3の間で水位の逆転が現れている。この水面変動は約2時間から3時間におよんでおり、また、一回の山または谷しか現れていない。したがってこの長時間変動は振動現象とは考えられず、風による水面の吹き寄せ現象と考えるのが最も妥当である。

図-20は94年9月30日の20時から23時と94年10月13日3時から5時の貯水池の水面形を、各測定点ごとに900秒移動平均を行って得た平均水位によって表したものである。図中の矢印の向きはこの時間帯の貯水池長軸方向の風向を表し、矢印の上下にある数字は平均風速と最大風速をそれぞれ表している。これをみると、水面形の風下側が高くなる吹き

寄せ型の水面勾配を形成しているのが分かる。軸方向風速成分による水面摩擦係数 f' を求めたところ、図-20の94年9月30日のデータに対して0.0016、94年10月13日のデータに対して0.017の値を得た。鶴谷ら⁴⁾の報告ではおよそ $f'=0.002$ となっており、1についてはほぼ一致しているが、2についてはオーダーの1つ大きい値を得た。この水面摩擦係数より風の吹き寄せを完全に確認することはできないが、現時点では、風による吹き寄せがこの水面変動の原因として最も可能性が高いと考えている。また、このデータを記録している風速計が湖面から約40m近く離れており、この風速計に記録される風向、風速が湖面上で吹く風のものとは異なる可能性があることや、水位データが毎秒データなのに対して風は毎時データであることなどを考えれば、単純にこの風データと水位データにより水面摩擦係数について議論することは難しいかもしれない。このようなことから、湖面上を吹く風データの蓄積が望まれる。

次に風速・風向と各点の水位差の関係を知るために、図-17、図-19のデータのように変動が上下1cm程の大きい変動から上下1mm程の小さい変動まで含め、さらに検討を行った。図-21は、水位差と風速の関係を表している。ここでの水位差は図-17、図-19に示したような移動平均データを用いて、No.1の曲線と他の点の曲線が閉じる時間帯で時間平均した2点間での水位差から求めたものである。No.1を基準とした各点間の水位差をさらに空間的に平均してこの図での水位差とした。これはNo.1での水位を仮の静水位とし、その静水位からの差を求めることを意味している。また、風速に関しては平均時間最大風速を貯水池長軸方向とこれに垂直な方向(貯水池短軸方向と呼ぶ)に成分分解し、これら2つの風速成分のうち大きい方の風速を示している。図中のプロット点は長軸卓越型と短軸卓越型で分けて表示してある。この図から風速の長軸成分、短軸成分のうち卓越する方の成分が各点間の水位差をもたらすこと、風速の2乗に比例して開きが大きくなることが分かる。図のプロット点を利用して求めた両者の関係は平均水位差(m)

$=8.3028 \times 10^{-8} (U \text{ (m/s)})^2$ であった。また、この結果から風速が小さくてもそれに応じた小さい水面変動が生じ、水位の逆転現象が生じていることがわかる。

図-16 94.9.30 18:00-24:00の水面変動

図-17 900秒移動平均
(94.10.13 0:00-7:00)

図-18 94.10.13 0:00-7:00の水面変動

図-19 900秒移動平均
(94.10.13 0:00-7:00)

図-20 平均水位で表した水面形

図-21 卓越方向風速成分と水位差の関係

6. ダム貯水池流入量推定における諸種の水面変動の影響

現行のダム貯水池流入量推定は10分間（＝600秒）移動平均による水位データの平滑化を基本としている。風波のようなランダム成分ならびにセイシュ、うねりといった貯水池固有の一定周期の振動はこの処理法により原理的には除去できる。しかし、上述のように長周期セイシュやうねりによる変動を除去するには長時間の平均が必要となるのでダムごとの固有振動周期に合わせた重み付き平均化法を試みる必要があろう。最も困難な問題は風の吹き寄せによる水面変動であり、これは除去不可能である。しかも、変動が大きく問題は一層重要である。例えば、図-17の移動平均データを用いて流入量を推定するとNo.1、No.4、No.5のみの水位データを用いれば貯水池への流入があるように推定され、No.2、No.3のみの水位データを用いると放流した結果を得るというように全く逆の推定結果となってしまう。このように最大の問題は風に起因する水面の吹き寄せであり、現時点でこれに対処するためには最低2つの水位計を適切な場所に設置して従来の移動平均を適用し、さらに、それぞれの移動平均データを算術平均することなどがもっとも簡単な方法として必要であらう。風に対する計測を充実し、吹き寄せによる変動の推定もあわせて追求する必要がある。

7. まとめ

定山溪ダム貯水池周辺に5カ所の水位計測ステーションを設けて同時水位計測を行った結果、以下のような強風下の水面変動特性がはじめて明らかになった。

- 1) 多点同時水位計測データの自己相関、相互相関から80秒、210秒、700秒などのセイシュを明確に捉えることができた。
- 2) セイシュ周期が多数現れるケースがあり、互いに接近した周期の波が重なることで、うねりが成長することが認められた。
- 3) 風の吹き寄せによって2～3時間にわたる水面傾斜が生じていることが分かった。吹き寄せ現象は風速の小さいときにも相応の水位差を生じ、流入量の推定を困難にする。この際の水面変動の大きさは、風速を貯水池長軸方向と短軸方向に分解した際に卓越する方の風速成分に大きく影響を受け、その風速の2乗にはほぼ比例することが認められた。
- 4) 以上の諸種の水面変動は同時に発生しており、流入量の推定を著しく難しくしている。風波のようなランダム成分やセイシュ、うねりのような周期変動に対しては重み付き移動平均法を含む平均化法によって対処しうるものと判断される。しかし、吹き寄せによる変動に関しては1地点のみの水位計測では対処が困難であり正確な流入量推定のためには最低でも2点の水位を測定し推定を行う必要があるであろう。

8. おわりに

本計測によってダム湖上を吹く風のデータの重要性が明らかになった。とりわけ吹き寄せ現象の解析にとっては精度の高い風向・風速のデータが不可欠である。このため、今年度、湖面に近いNo.3水位ステーションのそばに新たに自記風速計を設置して記録を収録している。これらのデータによる解析結果はあらためて報告したいと考えている。

参考文献

- 1) 長谷川和義、藤田睦博、橋本雄、石田享平、高瀬眞雄：ダム貯水池の水面変動特性の計測と解析：土木学会北海道支部論文報告集、第52号(B)、pp.168～173、1996。
- 2) Ishida, K., K. Hasegawa, H. Suzuki and M. Fujita: Characteristic of Water Surface Oscillation in Jozean Dam Reservoir, Proceeding of The First Korea-Japan Bilateral Seminar on Water Resource and Environment Research, pp.73～80, 1996
- 3) 水理公式集 土木学会編、1980。
- 4) 鶴谷広一、中野晋、加藤始、一戸秀久：吹送流に関する実験的研究、第30回海岸工学講演会論文集、pp.79～83、1983