

ダム貯水池における貯水位平滑化手法について

On the Method to Eliminate Fluctuations of
the Measured Water Level in a Reservoir

建設省土木研究所 正員 森 北 佳 昭

建設省土木研究所 振 井 茂 宏

建設省土木研究所 佐々木 元

1. はじめに

ダム貯水池流入量は貯水池管理における最も重要な情報の一つであり、流入量を的確に把握することが安全かつ効果的な貯水池操作を実施する上での必須条件である。現在、流入量の算定にあたって一般に用いられているのは、「一定時間内におけるダム貯留量の増減量と延べ放流量の合算量から貯水池流入量を求める」という間接的方法である。ここで、ダム貯留量は水位計から得られる観測貯水位を基に算出されているが、この観測貯水位には、種々の外的要因による波動変動成分が含まれており、その直接利用はダム貯留量さらには流入量を求める際に誤差を伴うこととなる。このため実管理ダムにおいては、種々の対策が実施されているが、このような波動変動成分を除去し流入量算定精度をさらに向上させるためには、

- ① 測水井の水理、構造特性を明らかにし、水位測定段階で波動変動を除去する。
 - ② 波動変動を含む水位データから貯留変化に対応する貯水位を数学的手法により抽出する。
- というハード、ソフト両面からの対策について検討を加える必要がある。

本研究では、貯水池における水位変動の実態と要因、および測水井の水理特性等の分析を行うとともに、フーリエ級数を利用した貯水位平滑化手法を提案し、その妥当性と問題点について考察する。

2. 水位変動が流入量把握に及ぼす影響

現在、採用されているダム流入量の把握方法としては次の2つの方法がある。

- ① ダム上流の河川水位から当該水位観測地点の流量を求め、これをダム地点流入量に換算する方法。
- ② 一定時間内におけるダム貯留量の増減量と延べ放流量の合算量から流入量を求める方法。

しかしながら、これらいずれの方法においても実務上いくらかの誤差要因を含んでいる。すなわち、①の方法では、河川水位～流量関係のパラツキによる誤差、及び水位観測地点からダム地点への換算によって生じる誤差等がある。②の方法では、ダム水位計による貯水位の測定誤差が主な誤差要因である。

一方、全国の建設省所管の管理ダム中231ダム（昭和58年度現在）におけるダム流入量の算定方法としては、216ダムとほとんどのダムで②の方法が採用されている。また、②の方法でダム流入量の計算を計算機によって自動化しているダムは全体の約58%となっている。

以上のことから本文では②の方法について誤差要因の分析を行ってみる。

貯留量の増減量と放流量からダム流入量を推算する場合、図-1よりダム流入量は次式により示される。

$$Q_{iN} = \frac{2\{V(H_N) - V(H_{N-1})\}}{\Delta T} - Q_{iN-1} + Q_{ON-1} + Q_{ON} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ΔT ；計算時間間隔 ($t_N - t_{N-1}$) (sec), Q_{iN} , Q_{iN-1} ； t_N , t_{N-1} における流入量 (m^3/sec),
 Q_{ON} , Q_{ON-1} ； t_N , t_{N-1} における放流量 (m^3/sec), $V(H_N)$, $V(H_{N-1})$ ； t_N , t_{N-1}
における貯留量 (m^3), H_N , H_{N-1} ； t_N , t_{N-1} における貯水位 (m)

式(1)において、水位観測誤差 (δH_N) が流入量把握に及ぼす影響 (δQ_{iN}) は、

$$\delta Q_{iN} = \frac{dQ_{iN}}{dH_N} \delta H_N = \frac{2}{\Delta T} \frac{dV(H_N)}{dH_N} \delta H_N + \frac{dQ_{ON}}{dH_N} \delta H_N \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。

上式の右辺第2項は第1項に比べてたかだか 10^{-3} オーダーの誤差であり、また、 $dV(H_N)/dH_N = A(H_N)$ ($A(H_N)$: 貯水池表面積(m^2))であるから、式(2)は次のように表わせる。

$$\delta Q_{iN} = \frac{2A(H_N)}{\Delta T} \delta H_N \quad \dots\dots\dots (3)$$

したがって、ダム流入量の推算誤差(δQ_{iN})は水位観測誤差 δH_N とその時の貯水池表面積 $A(H_N)$ の積に比例し、計算時間間隔 ΔT に反比例することがわかる。式(3)において $A(H_N)$ は貯水池の形状から定まる値であるから流入量算定誤差を小さくするためには、① ΔT を長くとする。② δH_N を小さくする。という二つの方法が考えられる。このうち、①については ΔT を長くすることによって時間遅れが大きくなり、結果的に貯留量の増大につながるため、マイナス要素との関連において設定する必要がある。

一方、②の方法ではマイナス要素は見当たらないため、本文においては水位把握誤差 δH_N をいかに小さくするか(貯水位をいかに正確に把握するか)という観点から検討を試みることにする。

なお、参考のために表-1に貯水位に1cmの観測誤差があったとした場合の流入量推算誤差を貯水池面積毎に示す。この時、計算時間間隔は600(sec)としている。

表-1 貯水池水位観測誤差(1cm)に対する流入量推算誤差

貯水池面積 (km^2)	流入量推算誤差 (m^3/s)
1.0	33
2.0	67
3.0	100
4.0	133
5.0	167

ただし、 $\Delta T=600$ sec

3. 水位変動の実態と要因

ダム貯水池の水位観測値(実際には測水井の中の観測値)は貯留量の増減にもとづく水位変化(以下、貯留変化と呼ぶ)とそれ以外の風等の外的要因にもとづく水位変動(以下、波動変動と呼ぶ)が合成されたものであり、後者がダム流入量推算時における誤差成分(δH_N)と考えることができる。

波動変動の外的要因としては次のものが挙げられる。

- ① 風による影響
- ② 洪水時、発電操作時における流入量、あるいは放流量の急激な変化による影響
- ③ 地震あるいは土砂崩れ等の突発的な現象による影響

これらの外的攪乱要因の影響を受けて水面の変動は貯水池の水深、幅、長さ、形状等の因子に支配された動的特性(変動幅、周期、持続時間)を呈し、さらにこれらの水面変動は観測設備(測水井、観測フロート記入部)の特性を通して記録されることとなる。

図-2に波動変動の観測例を示す。(a)は風による水位変動の例であり、水位変動幅は十数cmにも達し、変動周期は短い。

(b)は発電操作に伴い水位変動が誘発された例であり、水位変動幅は10cm程度で周期は1時間程度となっている。また、水位変動幅は時間とともに減衰していることがわかる。

(c)は地震による水位変動の例であるが、突発的で持続時間が短い(約1時間)点が特徴的である。

このような観測例をもとに、水位変動を動的特性に従って分類した結果を表-2に示す。波動変動の周期としては数十秒程度のものから、長いもので数十分に及ぶものもある。また変動幅も様々で10~20cmに及ぶものもある。さらにこのような水位変動は各々の貯水池特有の変動特性を示しており、多発する貯水池とはほとんど発生しない貯水池があることが示された。

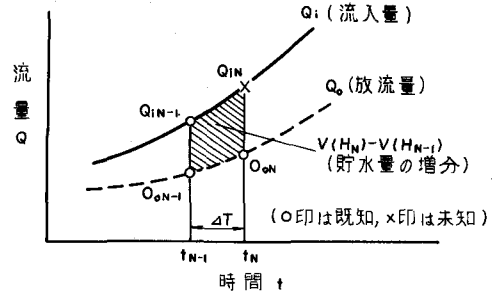


図-1 流入量・放流量・貯水量の関係

表-2 貯水位変動の特徴分類

現象の分類	水位変動幅	周期	継続時間	発生度数	推定される原因・その他
規則的・長周期の変動 ① 持続性の変動	最大 2~4 cm	数分 ~数十分	数時間 ~数十時間	多発するダムと検知しないダムがある	洪水流入時, ゲート操作が誘因, 風が誘因, 原因不明のもの, 変動幅比較的小
② 短時間の変動	最大 3~8 cm	数分 ~数十分	1~5時間	発生するダムが多い	ゲート操作に伴い発生
不規則・短周期の変動 ③ 持続性の変動	最大 3~20 cm	短	数時間 ~数十時間	ダムによって変動幅, 発生度数が異なる。	風浪が主因 水位計の位置・構造の影響大
④ 短時間の変動	最大 3~10 cm	短	0.3~ 1.5時間	発生が稀 突発的	土砂崩落によるもの 地震によるもの
⑤ 複合的変動	(1)と(3), (2) と(3)の複合	長+短	数時間	発生少ない	初期変動大きく減衰早い (1)と(3), (2)と(3)の原因が重なったとき
⑥ 特殊な変動	(最大6 cm)	(約30秒)	(数時間)	(比較的多い)	水位計の設置位置が特殊の場合, その構造特性により発生するもの。

注) 建設省直轄, 公団管理16ダムの水位記録をもとにした。

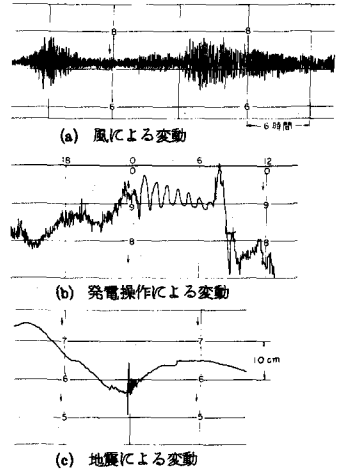


図-2 貯水位の観測例

4. 測水井の水理特性

現在一般に用いられている水位計は, 図-3(a)に示す単構造測水井でフロート式のものである。そこで, 単構造測水井について波動変動の減衰特性および減衰に伴う遅れ時間との関係を分析してみた。結果を図-4に示す。

これによれば, 湖面振動減衰率と減衰に伴う測水井内部の水面振動の遅れ時間は,

湖面振動周期 T と導水孔の絞り率 a/A (導水孔断面積/測水井断面積)に依存し, 湖面振動周期が小さい程, 減衰率は良く, 1,200秒(20分)を超えるものについては導水孔の絞り率に拘らず, ほとんど減衰効果はない。実際に使用されている測水井の絞り率が1/500

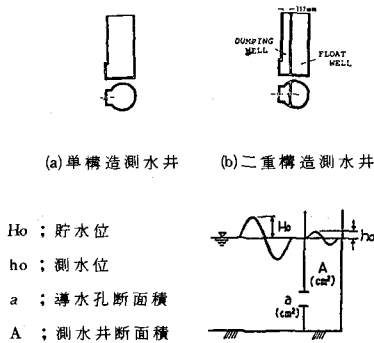


図-3 測水井の模式図

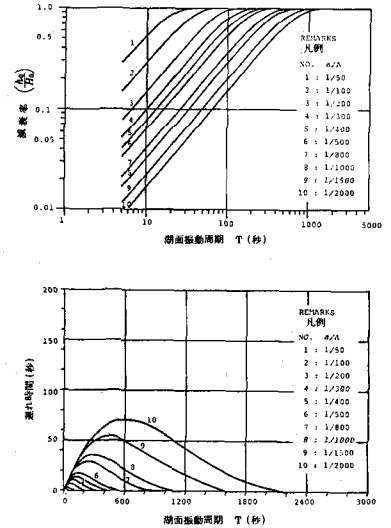


図-4 単構造測水井内水面振動の減衰率と遅れ時間

程度までであることを考慮すると, 単構造測水井が波動変動除去に有効なのは, 湖面振動周期が120秒(2分)程度以下の比較的短周期の変動についてであろう。

一方, 湖面振動の減衰を期待して絞り率を小さくすれば, 測水井内部の水面変動の遅れ時間が問題となってくる。図-4より, 湖面振動周期 T と遅れ時間とは, ある周期で遅れ時間が最大となる指数関数的な関係となっており, 絞り率を小さくする程遅れ時間も大きくなる。しかしながら, 絞り率を1/2,000にしても最大遅れ時間は70秒程度であり, 実際のダム管理上, 測水井の構造的な遅れ時間はさほど問題とならないであろう。

以上より, 湖面振動周期が2分程度までの短周期の波動変動に対しては, このような測水井の構造を工夫することで, それ以上の長周期の変動については, 構造的には効果が期待できないため次章で述べるような

数学的（ソフト）手法で除去するのが適当である。なお、實際上絞り率をあまり小さくすると土砂や藻類の付着により導水孔の閉塞などの欠点が生じ易くなるため、図-3(b)に示すような二重構造測水井にしてこのような欠点に対処するとともに湖面振動の減衰にも効果を挙げている事例もある。

5. フーリエ級数を用いた水位平滑化手法

前章で述べたように、貯水池水位の長周期変動成分の除去については測水井の構造面からは期待できず、数学的手法による必要がある。現在、一般的には移動平均法が用いられているが、長周期成分の除去には移動平均時間長を長くとの必要があり、貯留変化を把握するのに無視し得ない遅れ時間を伴うこととなる。

そこで、本研究では遅れ時間を伴わない数学的手法としてフーリエ級数を利用した水位平滑化手法を提案し、その妥当性を従来の移動平均法と比較、検討した。

5-1 手法の概要

本手法は、水位観測値 $h(t_i)$ を次式によって表現できるものとし、

$$h(t_i) = f(t_i) + P(t_i) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $f(t_i)$ ；貯留変化に対応する水位、

$P(t_i)$ ；波動変動成分であり、風、ゲート操作等の外的影響を受けた水位攪乱項

水位観測値を三角関数の合成関数で表わし、このうち貯水池の最長周期以下の周期を有する三角関数を波動変動成分とみなして除去し、残りを貯留変化に対応する水位とみなす方法である。計算手順は以下のとおりである。

- ① データ長 N 個の観測水位 $h(t_i)$ から2次回帰により第1近似の貯留変化に対応する水位成分 $f_1(t_i)$ を求める。（ $i = 1, 2, \dots\dots\dots, N$ ）
- ② 第1近似の波動変動成分 $P_1(t_i)$ を求める。 $P_1(t_i) = h(t_i) - f_1(t_i)$
- ③ ②で求めた波動変動成分 $P_1(t_i)$ のフーリエ分析を行い、最長周期 T_{max} 以下の周期を有する三角関数の合成波を第2近似の波動変動成分 $P_2(t_i)$ とみなし、第2近似の貯留変化に対応する水位変動成分 $f_2(t_i)$ を求める。 $f_2(t_i) = P_1(t_i) - P_2(t_i)$
- ④ $f_1(t_i) + f_2(t_i)$ を貯留変化に対応する水位とみなせば、 $f_1(t_N) + f_2(t_N)$ が時刻 $t = t_N$ における貯留変化に対応する水位となる。
- ⑤ ①～④を流入量計算時間間隔 ΔT 毎に繰返す。

ここで、貯水池の最長周期については以下に示す方法のどちらかにより決定する。

- (a) 観測水位のスペクトル解析により卓越周期を求め、その中から最長周期を得る方法
- (b) 最長周期を貯水池のセイシュ (seiche) の有する周期とみなし次の概略計算法による方法

$$T = 2 \sum_{i=1}^m \Delta L_i / \sqrt{g h_i} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 T ；基本周期 (sec)， ΔL_i ；区間長 (m)，

h_i ；区間 i の平均水深 (m)， m ；貯水池縦断分割数 (図-5)

図-6 は、(a)、(b)の各方法により求めた最長周期の関係を示したものであり、両者は良く一致している。

5-2 評価方法

本手法を評価するにあたっては、観測水位から求めた貯留変化に対応する水位と当該手法によって計算さ

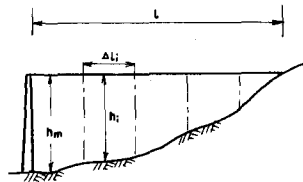


図-5 貯水池縦断形状

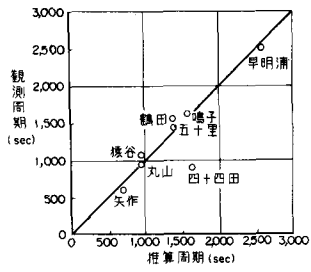


図-6 貯水池の最長周期

れた水位を比較することが考えられるが、現実には貯留変化に対応する水位の“真値”を観測値から求めることは不可能である。

そこで、以下に示す方法および指標により当該手法の評価を実施した。

- ① 前節(a), (b)で示した手法により対象貯水池の水位変動の最長周期を求める。
- ② 検討対象期間内の観測水位の全データを予めフーリエ級数展開し、周期が①で求めた貯水池の最長周期を越える成分を貯水位の“真値” $f(t)$ とする。
- ③ 本手法により水位計算時間間隔毎に貯留変化に対応する水位 $\bar{f}(t_j)$ を逐次計算する。
($j=1, 2, \dots, K$ で K は検討対象期間内の水位計算回数)
- ④ $|f(t_j)-\bar{f}(t_j)| \leq \epsilon_f$ となるかどうかを評価する。
 ϵ_f は水位の許容誤差である。
- ⑤ ②, ③で求めた貯留変化に対応する水位の“真値” $f(t_j)$ および計算値 $\bar{f}(t_j)$ を用いて、式(1)から得られる流入量をそれぞれ $Q_{in}(t_j)$, $\bar{Q}_{in}(t_j)$ とし、 $|Q_{in}(t_j)-\bar{Q}_{in}(t_j)| \leq \epsilon_q$ となるかどうかを評価する。 ϵ_q は流入量の許容誤差である。
- ⑥ 誤差評価指標は、④, ⑤で得られる水位および流入量の誤差の二乗和の平方根(S-D値)を用いる。
- ⑦ 推定された水位および流入量のなめらかさを表現する指標として、次式から求められるスムーズ示数(S値)を用いる。

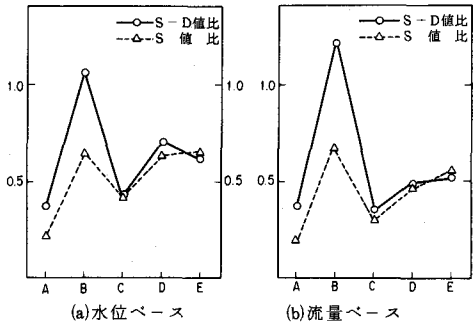


図-7 水位変動対策法の効果比較
(比率は、フーリエ級数法/移動平均法を示す)

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{X(t_{i+1}) - X(t_i) - \{Y(t_{i+1}) - Y(t_i)\}}{\Delta t} \right]^2} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $X(t_i)$ ； i ステップにおける水位もしくはは流入量の推定値

表-3 水位変動対策法の現地適用計算結果

ダム名	水位資料諸元		水位ベースでの比較		注1)				注2)			
					流入量ベースでの比較		計算水位をcm単位まで		計算水位をmm単位まで		計算水位をmm単位まで	
	測定開始時刻	継続時間(h)	フーリエ級数法	移動平均法	フーリエ級数法	移動平均法	フーリエ級数法	移動平均法	フーリエ級数法	移動平均法	フーリエ級数法	移動平均法
Aダム	1982年10月19日	12	0.23	0.62	2.3	5.2	1.9	4.8				
	17時0分0秒		0.017	0.080	0.25	0.73	0.14	0.63				
Bダム	水位	6	2.48	1.73								
	計①		0.238	0.289	19.0	15.4	18.7	15.3				
	水位	6	2.17	3.18	1.92	2.75	1.84	2.83				
	計②		0.259	0.572								
Cダム	1982年9月10日	12	0.23	0.53	19.5	35.3	12.2	27.5				
	21時43分22秒		0.029	0.069	2.36	4.72	1.41	3.38				
Dダム	1980年8月29日	12	0.56	0.80	49.0	81.5	39.6	75.9				
	7時30分34秒		0.070	0.111	7.18	10.95	5.14	10.52				
Eダム	1982年7月19日	12	0.17	0.28	14.2	16.2	8.4	13.1				
	5時52分46秒		0.028	0.043	2.49	2.83	1.55	2.29				

注1) 上段：推定値の“貯水位の真値”からの (S-D値), cm
下段：水位の推定値のスムーズ示数 (S値), cm/min
注2) 上段：計算値の“流入量の真値”からの (S-D値), cm
下段：流入量の計算値のスムーズ示数 (S値), ml/s・min

$Y(t_i)$; i ステップにおける水位もしくは
は流入量の“真値”

n ; 推定水位もしくは流入量の個数

5-3 実測貯水位への適用

本手法を全国5ダムの実測貯水位に適用し、その効果について前節で述べた評価手法により分析した結果を表-3および図-7に示す。なお、比較・検討のため単なる移動平均(データサンプリング間隔が2秒でデータ長1分間)による方法も併せて計算し、掲載している。

これらより以下のことがいえよう。

- (1) 水位の平滑化状況はBダムを除いて $S-D$ 値で1 cm以下となり、入力水位データがcm単位であることを勘案すれば本手法は概ね良好である。Bダムについては揚水発電を行っており、発電の運行状況が何らかの作用を与えているものと思われる。
- (2) 水位ベースでのフーリエ級数法と移動平均法との比較では、 $S-D$ 値はBダムを除いて0.37~0.7倍程度、 S 値は全ダムで0.2~0.65倍程度となり本手法は移動平均法に比しても効果的であることを示している。
- (3) 一方、流量ベースの比較でもBダムを除いて、 $S-D$ 値比、 S 値比共ほぼ0.5以下となり同様に効果的である。
- (4) 表-3より、流入量計算にあたって用いる平滑化水位をcm単位で求めるか、mm単位まで求めるかは、フーリエ級数法の場合、解析結果の精度に大きな影響を及ぼす。

以上の考察により本手法の妥当性が示されると同時に、実ダムで採用する場合にはその適用可能性、特に計算機の演算速度、記憶容量等について十分検討する必要がある。そこで、本手法をAダムに適用し、問題点の検討を行った。結果を図-8に示すが、移動平均法との比較では水位、流入量ともに概ね良好である。さらに、計算機使用上の問題点も特になことが実証された。

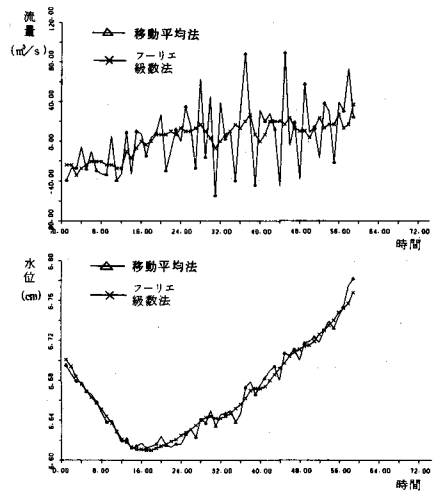


図-8 水位変動対策法のAダムへの適用

6. おわりに

本研究で提案したフーリエ級数を用いた貯水池平滑化手法により、貯留変化に対応した水位を概ね抽出することができ、貯水池操作の必要情報である貯水池流入量も安定して得ることが可能となった。また、実ダム適用にあたっては、貯水池に応じた最長周期、解析データ長等の決定に詳細な検討が必要である。

最後に、本研究を進めるにあたり貴重な観測データの提供ならびに種々の御協力を賜った地方建設局、各ダム管理所関係各位に謝意を表します。

参考文献

- (1) 中村、佐々木; 貯水池水位変動が流入量把握に及ぼす影響とその対策, 土木技術資料23-5
- (2) 建設省河川局, 同土木研究所; 多目的ダムの管理に関する研究(第27回建設省技術研究会), 昭和48年11月
- (3) 大崎順彦; 地震動のスペクトル解析入門, 昭和51年7月, 鹿島出版会