

◆ 特集：水資源・水管理 ◆

ダムの洪水調節容量に計画上の余裕が必要となる要因とその定量的評価

金銅将史* 安田成夫** 筋野晃司***

1. はじめに

日本においては、洪水調節をその目的に含むダムの計画において洪水調節に必要なダムの貯水容量（常時満水位からサーチャージ水位までの容量）を決定する際、安全上一定の余裕を加えた容量として設定されている。

このような余裕が必要となる要因としては、流入洪水の予測に関する不確実性、現実の洪水調節操作に際して生じる様々な制約、貯水池内への堆砂の影響等、様々なものが想定されるが、各々の要因に対してどの程度の余裕を確保すればよいのか、定量的な評価は必ずしもなされていない。

このようなことから、本稿では、ダム貯水池における洪水調節操作において計画以上の洪水調節容量が必要となりうる様々な要因を抽出する。また、幾つかのダムを用いたケーススタディにより、各要因が必要となる洪水調節容量に与える影響について、定量的評価を試み、これらの結果を報告

する。さらに、その結果を踏まえ、ダムの治水・利水機能を最大限発揮させ、ダム貯水池の有効利用を図っていくための今後の課題についても触れることとしたい。

2. 洪水調節操作における不確実要因等の抽出

2.1 流入洪水の予測に関する不確実性

2.1.1 洪水波形（流入ハイドログラフ形状）

実際に発生する洪水の流出特性（流入量の増加率、流入開始からピーク流量に到達するまでの時間、洪水の継続時間等）は、洪水調節計画において設定される対象洪水とは必ずしも一致しない。このため、たとえピーク流量が計画の値と同等であっても、流入ハイドログラフの形状によっては、洪水調節に必要な容量は計画よりも大きくなる可能性がある。（図-1）

2.1.2 洪水規模

実際に発生する洪水の規模（ピーク流入量およ

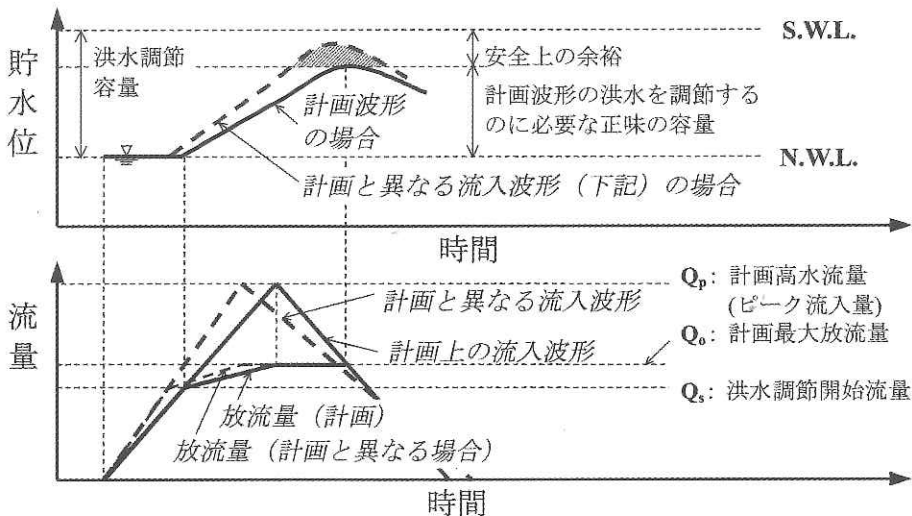


図-1 洪水波形が洪水調節に必要な容量に及ぼす影響

Factor and its Evaluation for "Marginal Capacity for Safety" of Flood Control Capacity

び総洪水ボリューム)は、洪水調節計画において設定される規模とは必ずしも一致しない。

2.2 現実の洪水調節操作における制約

2.2.1 放流開始の時間差

治水と利水双方の目的を持つ多目的ダムにおける洪水調節は、通常、洪水を迎える時点での貯水位が、基本的には常時満水位(制限水位方式のダムでは洪水期制限水位。以下同じ。)にあることを前提に計画されている。よって、貯水位が常時満水位よりも低い場合には、貯水位が常時満水位に到達するまでは放流を開始せず、利水目的の貯水位回復操作(貯留操作)が優先して行われることがある。

この場合、貯水位が常時満水位に達した時点において、その流入量に対応した放流を行わなければならない。しかし、放流量は急激に増加させることはできないことから、その時点の流入量が大い場合には、必要量の放流ができず、結果的に洪水調節操作中の水位上昇が大きくなる可能性がある。

2.2.2 「放流の原則」によって生じる制約

日本のダムでは、下流河道の安全確保を目的として、洪水時における放流による水位上昇速度を一定量以下(例えば30分間あたり30cm以内など)に抑えるために、ダムからの放流量の増加に制限を設けている。この制限は「放流の原則」と呼ばれ、ダムの操作規則に定められている。

流入量に応じて放流量を決定する方式のダムでは、予測できない非常に急激な流入量の増加を伴

う出水があった場合等には、流入量と同じ量の放流ができず、その結果、「放流の原則」による制約がない場合に比べ、洪水調節中の水位上昇が大きくなる可能性がある。(図-2)

2.3 貯水池内への堆砂による影響

ダム計画上、貯水池内への堆砂は、有効貯水容量より下部の計画堆砂容量内に生じることが前提とされている。しかしながら、実際には一部有効貯水容量内にも堆砂が生じることがある。このため、有効貯水容量内(特に洪水調節容量内)に堆砂が進行したダムでは、洪水調節に伴う水位上昇が大きくなる可能性がある。

2.4 その他の要因

上記の他にも、例えば、洪水時の流入量増加が連続的であるのに対し、安全上ゲートの開操作(開度調節)における1回あたりの操作量等に制約が設けられているために放流量増加が段階的になることによる影響が考えられる。

さらに、計画時に想定された貯水池容量と実際の貯水地容量の差(測定の誤差)による影響、洪水時における貯水位計測の誤差(放流量の決定誤差をもたらす)による影響等の要因も考えられる。しかし、これらの影響は他に比べて重要なものではないと考えられる。

3. 影響要因の定量的分析

以下では、ケーススタディとして、上記2.1~2.3で抽出した各要因によって洪水調節に必要な容量がどの程度増加する可能性があるかを、日

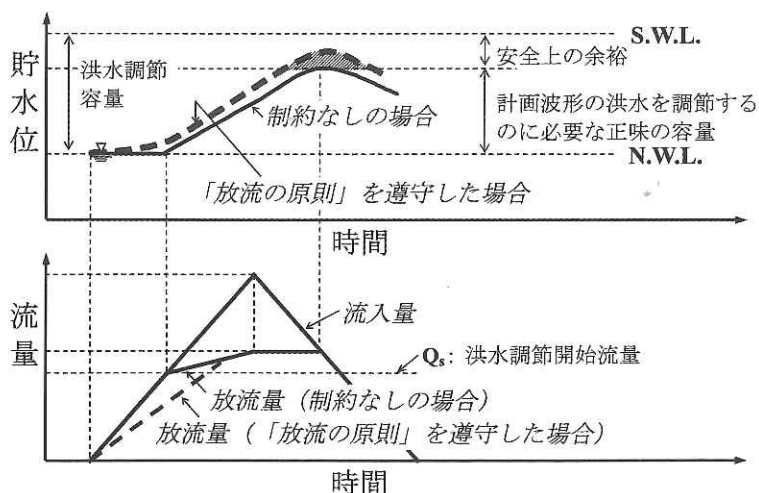


図-2 下流河道の安全確保のための放流量増加の制約が洪水調節に必要な容量に及ぼす影響

表-1 ケーススタディ対象ダム

ダム名	ダム形式 ^{注1}	堤高 [m]	総貯水容量 [10 ⁶ m ³]	洪水調節計画		洪水調節実績		
				洪水調節容量の割合 ^{注2} [%]	調節率 ^{注3} [%]	洪水調節方式 ^{注4}	年平均洪水調節回数 ^{注5}	洪水調節容量の使用率 ^{注6} [%]
A	A	103	47	43	83	RD	0.2	37
B	GA	90	114	68	82	D	1.3	23
C	GF	50	47	72	44	RD	0.7	13
D	GA	95	27	81	47	RD	0.9	16
E	G	78	33	52	41	RD	1.0	15
F	GF	75	58	56	24	RD	0.1	7
G	G	89	21	35	70	N	1.5	19
H	G	60	16	22	23	RD	0.4	49
I	G	73	13	68	76	N	1.5	20
J	G	118	123	61	48	RD	2.1	48
K	G	106	316	28	57	RD	2.4	25
L	A	82	27	31	59	D	0.3	63
M	G	140	61	33	66	RD	0.7	32

- 注1 G：重力式コンクリート A：アーチ
 GA：重力アーチ GF：重力式コンクリートとフィルの複合ダム
- 注2 総貯水容量に対する割合
- 注3 計画高水流量（ピーク流入量）に対するダム調節流量（ピークカット量）の割合
- 注4 RD：一定率一定量調節方式、D：一定量調節方式、N：自然調節方式
- 注5 運用開始から2001年までの総回数
- 注6 洪水調節容量に対する平均貯留量（総ボリューム）の割合

本の幾つかのダムにおける洪水調節記録等をもとに試算した。

3.1 対象ダム

検討対象とした13ダムの諸元を表-1に示す。対象は、必要となる洪水調節容量に対する影響が大きいと思われる流入洪水の予測に関する不確実性の影響を評価しやすいよう、運用開始後10年以上経過しており、かつ洪水調節実績の比較的多いダムを中心に選定した。また、できるだけ一般的な傾向を把握できるよう、わが国で採用されている代表的な洪水調節方式をカバーするよう配慮し

た。

3.2 定量的分析の方法

3.2.1 流入予測に関する不確実性の影響の分析

(a) 洪水波形の影響

ダムの洪水調節容量を決定する根拠となる洪水波形（流入ハイドログラフ）は計画上一定のものとして設定されているが、実際の降雨パターンは様々に異なる。この違いを考慮した場合に、結果的に必要となる洪水調節容量にどの程度の影響が生じるかを以下の手順により定量的に分析した。

- i) 各ダムにおいて既往洪水時に実際に観測された様々な洪水波形について、その影響を比較分析するため、管理移行後の洪水時におけるピーク流入量が上位10位までの洪水（上位10洪水）を選定。
 - ii) 各洪水時において観測された実績降雨データを計画規模に引き伸ばしたものを作成。
 - iii) 上記の引き伸ばした各降雨データをもとに、ダム流域の流出特性を考慮した流出解析（貯留関数法）を実施して、それぞれのダム地点における様々な形状の洪水波形を作成。
 - iv) 作成された洪水波形に対して、各ダムの操作規則に定められている所定の条件で洪水調節操作を実施した場合に必要な容量を算出。
- なお、管理移行後の既往上位10洪水時の実績降雨データを計画規模に引き伸ばしたのから算定されるダム地点での流入波形を検討対象とした理由は、流入ハイドログラフの形状の違いに着目し、それが必要洪水調節容量に及ぼす影響のみを調べるためには、各洪水の規模を同等のものとして比較する必要があると考えたからである。

(b) 洪水規模の影響

ケーススタディダムのうち、洪水調節方式が異なる3ダムについて、計画規模を超える洪水（超過洪水）が発生した場合に、その調節にどの程度の容量が追加的に必要になるかを以下の方法により検討した。

- i) 各ダムにおける計画上の洪水波形を、そのピーク流入量が計画値の1.1倍および1.2倍となるように引き伸ばした波形を作成。
- ii) 作成された洪水波形に対して、各ダム所定の方式で洪水調節操作を実施した場合に必要な容量を算出。

ここで、引伸ばし率を1.1倍および1.2倍とした

のは、日本では、多くのダムで超過確率1/100程度に相当する降雨による流量をもとに洪水調節計画が規定されているのに対し、ダムの構造設計において安定計算上考慮される最高の水位（ダム設計洪水水位）となるとき流量（ダム設計洪水流量）としては少なくとも超過確率1/200に相当する流量が考慮されていること、および統計的に1/200確率流量は1/100流量のおよそ1.1～1.2倍に相当することを考慮したためである。

3.2.2 現実の洪水調節操作における制約による影響の分析

(a) 放流開始の時間差による影響

ケーススタディ対象ダムのうちゲート操作のない自然調節ダムを除く計11ダムについて、各ダムの管理移行後の上位10洪水時の操作記録から、貯水位が常時満水位（または洪水期制限水位）に達した時刻と流入量（＝放流量）が洪水調節開始流

量に達した時刻を比較した。その結果、両者に有意な時間差が認められたケースは8ダムの計29洪水であった。これらの各洪水について、放流開始の時間差を算定した。さらに、これにより増えたと考えられる貯留量（余分に貯留せざるを得なかった量）を算定した。

(b) 「放流の原則」の制約による影響

「放流の原則」は、今回ケーススタディ対象としたダム中、自然調節方式のダムを除くほとんどのダムで定められている。この制約が洪水調節に必要な容量に影響を及ぼす可能性があるのは、定められたダム放流量の増加割合の制限値を超える非常に急激な流入量の増加が起こるような洪水が発生した場合である。この影響について検討するため、自然調節方式の2ダムを除く各ダムの実績洪水波形を用い、放流の原則を遵守した場合に生じる貯留量の増分を試算した。なお、洪水開始時

表-2 各種の不確定要因や制約が洪水調節に必要となる容量に及ぼす影響

ダム名	計画洪水の調節に必要な正味の容量に対する洪水調節の余裕の割合 [%]	各要因に起因して必要となる洪水調節容量の増分 (計画洪水の調節に必要な正味の容量に対する割合) [%]									
		[1] 流入洪水の予測に関する不確実性による影響				[2] 現実の洪水調節操作にして生じる制約による影響			[3] 堆砂による影響 ^{注3}	総合評価	
		a) ハイドログラフの形状の影響 ^{注1}	b) 洪水規模の影響		a) 放流開始の時間差の影響 ^{注2}	b) 放流の原則による制約の影響					
			計画波形 × 1.1	計画波形 × 1.2			堆砂による影響 ^{注3}	最大値 ^{注4}	平均値 ^{注5}		
A	20	18.3 (24.1)	14.3	28.8	3.6 (3.6)	0.1	0.0	18.3	4.4		
B	9	-	14.5	29.0	9.6 (25.8)	-	2.0	9.6	5.8		
C	4	-	-	-	4.2 (3.8)	-	4.8	4.8	3.1		
D	0	-	-	-	-	2.2	9.7	9.7	4.3		
E	16	-51.6 (-4.2)	-	-	4.8 (2.2)	2.6	-	4.8	3.1		
F	20	-	-	-	7.3 (10.0)	20.1	-	20.1	9.9		
G	20	-23.0 (-13.6)	-	-	-	-	-	-	-		
H	13	-1.5 (161.3)	-	-	6.6 (6.6)	-	14.8	14.8	9.0		
I	18	-4.7 (7.2)	12.9	25.6	-	-	4.0	4.0	4.0		
J	19	-	-	-	-	-	-	0.4	0.4		
K	2	-	-	-	9.9 (4.4)	1.0	4.6	9.9	4.0		
L	11	-	-	-	2.9 (3.6)	0.3	0.0	2.9	1.5		
M	20	-	-	-	3.6 (4.4)	0.2	1.4	3.6	1.4		
最大	13	18.3	14.5	29.0	9.9	20.1	14.8	18.3	9.9		
平均	13	-12.5	13.9	27.8	5.8	3.8	4.6	7.7	4.2		

注1 各ダム管理移行後上位10洪水の波形を引き伸ばしたハイドログラフにより計算した平均値。最大値を()内に付記。

注2 各ダム管理移行後上位10洪水の平均時間差により計算した割合。最大時間差により計算した割合を()内に付記。

注3 計画堆砂容量内が満砂になった場合の推定値。

注4 「b) 洪水規模の影響」に係る値を除く。

注5 負の値（洪水調節容量の増分が必要とならず、余裕がある場合）を除く平均値。

の貯水位（迎洪水位）は常時満水位と仮定した。

3.2.3 貯水池内への堆砂による影響の分析

堆砂は経年的に進行する現象であるため、将来、計画堆砂容量（100年間に予測される堆砂量に基づき設定されることが多い。）が満砂になった場合を想定し、その影響を試算した。なお、試算にあたっては、総堆砂量の計画堆砂容量に対する割合と洪水調節容量内の堆砂量の洪水調節容量に対する割合が直線関係で推移するものと仮定した。

3.3 結果

以上の検討により、各々の要因に起因して洪水調節のために必要となる容量の増分を求めた結果を表-2に示す。なお、同表には、各ダムの洪水調節容量の中で、安全上確保されている余裕容量の割合（計画どおりの洪水調節操作を実施した場合に必要な正味の容量に対する比率）もあわせて示している。

3.4 考察

3.4.1 流入予測に関する不確実性の影響

(a) 洪水波形の違いによる影響

この検討では、管理移行後の実績降雨データを計画規模に引き伸ばした降雨を仮定して洪水波形（流入ハイドログラフ）を想定する。従って、計画降雨と管理移行後の実績降雨のデータおよび流出解析モデルが必要である。これらを全て入手できた5ダムについて、上記の方法による検討の結果を表-2の[1]-a) 欄に示す。参考として、Aダムにおいて検討に用いた管理移行後の既往の洪水波形（上位10洪水）の例を図-3に示す。

表-2より、各ダムでの平均値で見た場合、5ダム中1ダム（Aダム）において、想定される洪水波形の洪水を調節するのに必要となる容量は、計画波形の洪水を調節するのに必要となる容量を上

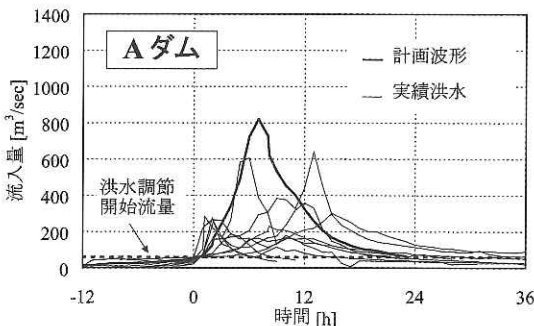


図-3 洪水波形の比較（計画と実績）

回る（約18%程度）結果となった。しかし、当該ダムでは、洪水調節容量として予め約20%の余裕容量を加えた容量が確保されているため、実績洪水から想定される様々な流入波形の不確実性を考慮しても、計算上は洪水調節容量内での対応が可能と考えられる。

なお、Aダム以外の4ダムについては、平均値でみると、負の値となった。試算結果における負の値は、これまでの洪水調節実績をもとにした今回の試算の範囲では、計画上で想定されている容量以内で調節が可能であったこと示している。

(b) 洪水規模の違いによる影響

表-2の[1]-b) 欄より、現在の基準¹⁾において、原則として考慮することとされている20%程度の余裕容量を持つダムでは、仮に洪水波形（継続時間やピーク流量時までの時間等）が計画と同様で、その規模（ピーク流量）が計画値を上回る出水が発生した場合、ピーク流量が計画値を10%程度上回っても洪水調節容量の設定上確保されている余裕量の範囲でおおむね対応できることがわかる。

3.4.2 現実の洪水調節操作における制約の影響

(a) 放流開始の時間差による影響

放流開始の時間差および放流開始が遅れたことにより増えたと考えられる貯留量（余分に貯留せざるを得なかった量）を算定した結果を表-2の[2]-a) 欄に示す。各ダム上位10洪水の平均値でみると、その影響は約3~10%の範囲となった。

(b) 「放流の原則」による制約による影響

表-2の[2]-b) 欄より、放流の原則を遵守することによって生じる貯留量の増分は、計画波形の洪水を調節するのに必要な正味の容量に対して1ダムで20%程度となったが、他のダムでは0~3%程度であることがわかる。

3.4.3 貯水池内への堆砂による影響

表-2の[3] 欄より、堆砂の進行に対して仮に何ら対策が採られなかった場合、有効貯水容量内への堆砂が将来的に洪水調節容量に与える影響は最大で15%程度となる。

3.5 評価

今回のケーススタディにより得られた定量的な分析結果（表-2）から、各種の不確定要因や制約が洪水調節に必要な容量に及ぼす影響について以下のように整理できる。すなわち、今回抽出

した各種の不確定要因や制約のうち、洪水調節に必要となる容量に比較的大きな影響を与える可能性があるのは以下のものである。

- a) 流入洪水の予測に関する不確実性 (検討対象ダムごとの平均値でみて最大約18%)
- b) 「放流の原則」を遵守することによる放流量の増加率の制限 (同最大約20%)
- c) 有効貯水容量内へ堆砂の進行による洪水調節容量の減少 (同最大約15%)

ただし、このうちc) は時間をかけて進行する現象であり、定期的にその状況を把握し、必要に応じて排砂等の対策を講じることにより洪水調節容量を維持・回復することも可能である。したがって、ダムの洪水調節計画上、より重要となるのはa) およびb) の要因である。特に、最も根元的な要因は降雨という外力に起因するa) の要因である。なぜなら、b) についても結局はa) の流入波形 (特に洪水初期の流入量の増加割合) との関係に左右されるからである。

このようなダムの洪水調節に係る不確定要因に対する対応策として、計画上必要となる容量に対して、安全上、一定の割合の余裕量を加えた容量を洪水調節容量として確保することとなっている。この確保すべき余裕量は、現在の基準¹⁾ では、原則として20%程度とされている。上記に示した今回のケーススタディの結果をみる範囲では、各ダムの平均値で評価した場合、この値は概ね妥当なものと考えられる。

4. まとめ・今後の課題

以上、限られたケースでの分析ではあったが、洪水調節を目的に含むダムにおいて、計画上、洪水調節容量を一定の余裕を考慮して設定すること

は、流入波形の不確実性等の諸要因に対し、合理的な対処法であることが改めて示された。

一方で、個々のダムの洪水調節実績を分析すると、洪水調節容量の余裕分に相当する容量の活用割合はダムによって差が見られることも明らかになった。

近年の局地的な集中豪雨の増加傾向や異常渇水の発生などダムに対するニーズが高期中、財政面や環境面の制約、また適切なダムサイトの減少等により新規のダム建設が厳しさを増しており、既設ダムの一層の有効活用を図っていくことが極めて重要な課題となっている。

ダムの有する治水・利水機能を持続的かつ最大限発揮させることができるよう、実情に照らしてダムの操作・運用の高度化を図っていくことはその有効な手段となることから、本稿で検討した計画上確保されている洪水調節容量の余裕についても、各ダムの実情を踏まえた上で、例えば、超過洪水時における一時的な貯留や、異常渇水時に備えるための容量などとして、その積極的な活用の可能性を検討していく必要がある。

5. おわりに

本稿で紹介したケーススタディに用いた洪水記録等の収集においては、国土交通省および水資源機構のダム関係者に協力を得た。また収集したデータの整理においては、長原 寛 前国土技術政策総合研究所河川研究部ダム研究室研究官 (現北海道開発局) の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局：河川・砂防技術基準計画編 (2004)

金銅将史*



財団法人ダム技術センター企画部企画課長 (前 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部ダム研究室主任研究官)
Masafumi KONDO

安田成夫**



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部ダム研究室長、工博
Dr. Nario YASUDA

筋野晃司***



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部ダム研究室主任研究官
Koji SUJINO