

VI-52

信頼性設計法に基づく発電所取水ダム仮締切の規模決定(続報)

東北電力(株) 正員 氏家 久芳
同上 正員 佐々木 明
(株)大崎総合研究所 正員○石井 清

1. はしがき

文献1において、表記の題目に対する考え方や確率計算モデル、さらに実際の工事を対象とした計算結果を紹介した。今回、工事が完了したことから工事記録等をもとにモデルや計算の内容の見直しを行なった。

本報告では、その結果の一部を紹介し、提案した方法の適用性を示す。

取水ダムは最大取水量を $6.0 \text{ m}^3/\text{s}$ として、高さ 12.0 m 、堤頂長さ 22.2 m である。仮締切は土堰堤による下流締切と上流一次締切および重力式コンクリート堤による上流二次締切よりなる。転流仮締切が平成3年7月中旬に始まり、工事期間として約14ヶ月を要する。但し、冬季積雪のため12月から翌月4月まで工事は中断する。

2. 確率計算モデル

検討の結果として、計算に際しては次のような仮定を設けた。

① 施工段階を次の3つに分ける。施工段階1: 一次仮締切から二次仮締切工完成まで(1ヶ月)、施工段階2: ダム岩盤掘削から岩盤検査まで(3.5ヶ月)、施工段階3: ダムコンクリート打設(3.5ヶ月)。② 洪水による被害は一次および二次仮締切の越流によるものととする。③ 被害想定は物損のみとして人的な損失(人身事故)は対象外とする。④ 河川流量(洪水量)の統計的な特性を考慮するため毎月の河川流量の最大値分布を用いる。⑤ 施工段階毎に最大越流回数を設定する。⑥ 越流後の片付け・復旧に要する日数は各施工段階の期間内に収まるものとして、工事の遅延による工程への影響は考えない。⑦ 越流による被害額を計算するために各施工段階における1回当たりの被害金額を設定する。⑧ 各施工段階において越流が発生する確率は1ヶ月を単位に計算する。ただし、開始時期と終了時期が月の半ばであるときには、それを正しく計算に考慮する。

確率計算の要点を以下に示す。いま、施工段階 j において k 回の越流が発生する確率 P_{K_j, k_j} は二項分布を用いて

$$P_{K_j, k_j} = C_{K_j}^{k_j} P_{f_j}^{k_j} (1 - P_{f_j})^{K_j - k_j} \quad (1)$$

と与えられる。ここで、 P_{f_j} は1回の試行(この例では洪水なり降雨)により越流が発生する確率、 K_j は施工段階 j における最大越流回数である。さらに、施工段階 j において越流が1回も発生しない確率は次式で与えられる。

$$P_{K_j, k_j=0} = C_{K_j}^0 P_{f_j}^0 (1 - P_{f_j})^{K_j - 0} = (1 - P_{f_j})^{K_j} \quad (2)$$

一方、施工段階 j において越流が発生しない確率 $P_{s,j}$ は、河川流量の最大値分布 $F(x)$ から、

$$P_{s,j} = F(x \leq Q) = \{F_{j,1}(x \leq Q)\}^{\alpha_j} \cdot F_{j,2}(x \leq Q) \cdots \{F_{j,m}(x \leq Q)\}^{\beta_j} \quad (3)$$

と与えられる。ここで、 Q は設計洪水量、 x は河川の最大流量である。 $F_{j,1}(x \leq Q)$ 、 $F_{j,2}(x \leq Q)$ 、 $\cdots$ は施工段階 j が始まる月、2月日、 $\cdots$ の河川流量の最大値分布である。また α_j 、 β_j は期間が1月未満になったときの補正係数であり、半月であれば0.5となる。

いま、式(2)と式(3)を等しいと置くことにより、 P_{f_j} を決定することができ、さらに式(1)から施工段階 j において k 回の越流が発生する確率 P_{K_j, k_j} ($k_j = 1, 2, \cdots, K_j$) が計算できる。

次に、施工段階1, 2, $\cdots$ における越流の回数を $k_1, k_2, \cdots$ ($k_1 \leq K_1, k_2 \leq K_2, \cdots$) としたときの発生確率 $P(k_1, k_2, \cdots, k_j)$ は次式で与えられる。

$$P(k_1, k_2, \cdots, k_j) = P_{K_1, k_1} \cdot P_{K_2, k_2} \cdots P_{K_j, k_j} \quad (4)$$

また、各ケースに対する片付け・復旧に要する費用は、施工段階 j における越流の被害金額を L_j として、

$$L(k_1, k_2, \cdots, k_j) = L_1 k_1 + L_2 k_2 + \cdots + L_j k_j \quad (5)$$

となる。経済性の評価に用いられる期待総建設費 C_T は、初期建設費 C_I と、式(4)と式(5)との積の期待値(期待損失費)との和により与えられる。

3. 工事記録等の分析結果

仮締切越流に関して種々の情報が建設所の協力により工事中に収集された。たとえば、越流の発生日時、越流の時間帯、作業の休止時間、被害の状況、被害金額等である。実際の越流は施工段階1~3で0回、8回、5回と、計画段階において当初設定した最大越流回数(2回、3回、3回)よりも施工段階2, 3において上回った。仮締切ダム位置における推定流量は下流にある測水所自記記録より越流当日の最大瞬間水位に流域面積の補正をして求められるが、この計算値が設計洪水量 $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ を越えるのは2回だけであり、河川の推定流量は実際よりも小さ目の評価となっていた。越流の継続する時間は平均で8.7時間と短い。また、実績からみた被害金額(基準化したため単位は無し)は施工段階1~3で1.5, 1.5, 3.5程度と、当初、設定した3.5, 7.7, 18.4と比べて大幅に小さくなって

いる。これは、計画段階ではより危険側の想定に立って被害金額を積算しているのに対して実際の施工では状況に応じて種々の工夫がとられるためである。例えば、出水の状況に応じた対策、すなわち、降雨の後、まもなく出水が発生することやその頻度から、天気状況への注意や出水の警報の仕方、建設機材の退避方法の検討、さらにはダムコンクリートの施工ではできる限りコンクリートの打設規模を小さくして越流に伴う被害金額を低減する等の種々の工夫が現地の建設所において積極的に図られている。

4. 計算結果

3. より、パラメータを次のように見直し、再計算を行なった。(i) 河川流量を3.3倍する。(ii) 越流の最大回数を施工段階1～3で2回、5回、5回とする。(iii) 越流時の1回当たりの被害金額を、施工段階1～3で1.5, 1.5, 3.5とする。さらに、(iv) 河川流量の月別最大値分布を求めるために昭和50年から平成4年までの17年間の統計資料を用いた（文献1では昭和60年までの11年間を使用。ただし、この変更による計算結果への影響は小さい）。

再計算の結果を表-1に示す。表には、各設計代替案に対する無被害確率（越流を1回も経験せず工事が無事に完了する確率） P_s 、期待総建設費 C_T 等が示されている。無被害確率 P_s は、いずれの設計代替案においても小さく、工事は越流を覚悟して行なわれねばならないことがわかる（施工計画段階では、C案が期待総建設費を最小とする案であり、各施工段階における越流回数の期待値やその確率等からD案を工事の実施案とした）。

また、期待総建設費 C_T が最小となるのはA案（設計洪水量 $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ）となっている。ここで、A案は「安かろう・悪かろう」という最適解であり、越流による被害金額が小さいことから、平年並の河川流量を処理できるだけにして越流の回数が増えることには目をつぶる案である。越流の回数が増えれば、工期の遅れや工事担当者の士気など金銭では換えがたいものへの影響が生じると考えられ、実際に採用することはできない（計算仮定の⑥が成立しなくなる恐れがある）。したがって、越流の回数や工事の遅れ、被害金額の増大などを考え合わせて総合的に最適案を選択することになろう。

次に、工事に採用されたD案について各施工段階における回数別の越流発生確率について検討すると、越流の発生確率が最も大きくなるのは、施工段階1～3でそれぞれ1回、2回、3回であり、越流の発生確率に幅をもたせると、1～2回、2～3回、2～4回程度になる。施工段階2における越流回数の実績値（8回）は計算結果よりも多いが、施工段階1と2を合わせれば両者の回数は近づく。

以上の点から、各種のパラメータが正しく設定できれば、計算結果は実際に十分似通ったものになることがわかる。なお、計画段階において河川流量が推定値を上回る可能性が高いということがわかっていれば、D案の越流回数が問題となったであろう。さらに、越流に対する被害金額を修正しなければ、D案よりも安全側の案が採用された可能性もある。しかしながら、このような場合、被害金額等の見直しが行なわれ、結果的にはD案、あるいは一段階安全側のE案が最適案となったものと考えられる。（現地の建設所はD案を選択したこと間違いはなかったとの判断を下している。）

5. まとめ

信頼性設計法の発電所取水ダム仮締切規模決定への適用検討として、実際の工事記録等をもとに、確率計算モデルの適用性を再度検討した。結果として、確率計算モデル作成における仮定の妥当性が確認されるとともに、パラメータを見直した計算の結果は、実際の工事記録と十分似通ったものとなることを示した。また、正しい計算結果を得るためには種々のパラメータを適切に設定する必要があり、今回の対象では河川の最大流量（月最大値分布）の評価と越流による被害金額の設定が重要であることがわかった。

参考文献：佐々木、他：信頼性設計法に基づく発電所取水ダムの仮締切の規模決定、土木学会第47回年次学術講演会、VI部門、1992。

表-1. 代替案の計算結果（工事記録等によりパラメータを修正）

	代 替 案						
	A	B	C	D	E	F	G
設計洪水量	30	36	43	50	65	84	94
無被害確率 P_s	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-7}	3.0×10^{-6}	5.0×10^{-5}	1.8×10^{-3}	0.021	0.046
初期建設費 C_i	67.00	72.10	77.90	84.90	90.50	104.60	117.60
期待総建設費 C_T	90.52	93.47	96.73	101.20	102.42	112.64	124.23

（単位：設計洪水量 m^3/s 、初期建設費および期待総建設費 なし）

「 1.0×10^{-9} 」は 1.0×10^{-9} を意味する。