

残流域流出量を考慮した渇水時における利水システムの信頼性評価モデル

鳥取大学工学部 学生員 ○中川 浩作
広島県 正員 上野 正和

鳥取大学工学部 正員 多々納裕一
鳥取大学工学部 正員 岡田 憲夫

1. はじめに 今日、渇水は我々の社会活動において重大な問題であり、渇水発生時の被害を最小限にする対策が要求される。その対策を検討するに先立ち、当該利水システムの渇水に対する安全度を信頼性分析という観点から評価してその特性を把握しておくことが重要となる。そのためには、評価モデルの構築および評価方法を確立しておく必要がある。その際、評価モデルに残流域流出量を考慮することにより適切な評価が得られる。

2. 信頼性評価モデルの定式化 既存利水システムの渇水に対する信頼度を簡単にしかも的確に評価するため、図-1に示すような流域モデルをプロトタイプモデルとして提示する。このモデルでは、現実の貯水池操作に即して、残流域流出量を考慮した貯水池操作方法を内生化している。すなわち、貯水池下流で残流域流出量が合流することを見込んで、ダム貯水池からの放流は必要最小限にするような仮定をしている。そしてこの貯水池操作規則を図に示すと図-2のようになる。したがってこのモデルでは、連続式として式(1)が、放流量方程式および貯水量方程式としてそれぞれ式(2)および式(3)が成立する。またこのモデルでの渇水状態については、貯水池下流の二つの評価地点bおよびcにおいて、どちらか一方でもその地点での流量が必要流量を下回っていれば渇水状態であると定義する。

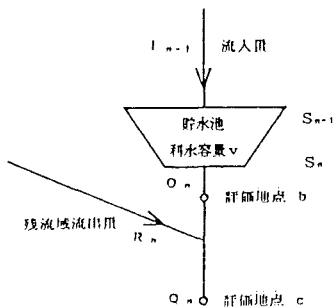


図-1 想定した流域モデル

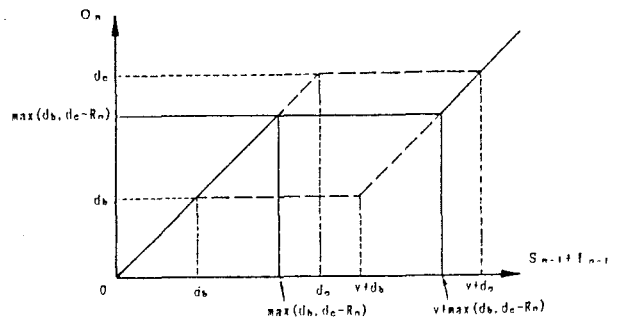


図-2 貯水池操作規則

ここに、 I_{n-1} : 期間 $[n-1, n]$ の貯水池への流入量、 S_{n-1} : 期間 $[n-1, n]$ の貯水量、 S_n : 期間 $[n, n+1]$ の貯水量、 O_n : 期間 $[n-1, n]$ の貯水池からの放流量、 R_n : 期間 $[n-1, n]$ の残流域流量、 Q_n : 期間 $[n-1, n]$ の地点cにおける流量、 v : 貯水池の利水容量、 d_b : 評価地点bで必要とされる流量(以下、必要流量という)、 d_c : 評価地点cでの必要流量であり、単位は単位時間当りの平均流量で統一している。

$$S_n - S_{n-1} = I_{n-1} - O_n \quad (1)$$

$$O_n = \alpha_n^{(1)} (S_{n-1} + I_{n-1}) + \alpha_n^{(2)} \max(d_b, d_c - R_n) + \alpha_n^{(3)} (S_{n-1} + I_{n-1} - v) \quad (2)$$

$$S_n = (1 - \alpha_n^{(1)}) (S_{n-1} + I_{n-1}) - \alpha_n^{(2)} \max(d_b, d_c - R_n) - \alpha_n^{(3)} (S_{n-1} + I_{n-1} - v) \quad (3)$$

ただし、

$$0 \leq S_{n-1} + I_{n-1} < \max(d_b, d_c - R_n) \quad \text{のとき} \alpha_n^{(1)} = 1, \alpha_n^{(2)} = 0, \alpha_n^{(3)} = 0$$

$$\max(d_b, d_c - R_n) \leq S_{n-1} + I_{n-1} \leq \max(d_b, d_c - R_n) + v \quad \text{のとき} \alpha_n^{(1)} = 0, \alpha_n^{(2)} = 1, \alpha_n^{(3)} = 0$$

$$\max(d_b, d_c - R_n) + v < S_{n-1} + I_{n-1} \quad \text{のとき} \alpha_n^{(1)} = 0, \alpha_n^{(2)} = 0, \alpha_n^{(3)} = 1$$

3. 信頼性評価指標の定式化 利水システムの渇水に対する信頼度特性は、渇水に対する頻度・深刻さ・期間といった観点で総合的に評価することにより適切に計られるであろう。その際、当該利水システムの長期間にわたる平均的な信頼度特性を把握することを目的とするので、初期の状態や時点に依存しない定常状

態での信頼性を評価するのが妥当である。そしてその信頼性は、利水システム内の確率特性、具体的には定常状態における貯水量 S 、貯水池からの放流量 O 、地点 c での流量 Q といった各種水文量の状態生起確率をもとに算定される。一方それらの状態生起確率は貯水池流入量 I および残流域流出量 R の状態生起確率あるいは状態推移確率が与えられれば先に挙げた式(1)～式(3)をもとに導出されるが、ここではその導出過程は省略する。ここで、流入量および残流域流出量の独立性は必ずしも保証されないもので、それらがともに時間的な従属性を有する場合も考える必要がある。そこで、流入量および残流域流出量は、①ともに時点によらずかつ時間的に独立である場合と②ともに時点によらないが一期前の状態にのみ依存する（一次のマルコフ性をもつ）場合の二つの場合を想定する。以下に利水システムの渇水に対する信頼度特性を計るための評価指標をいくつか提示する。

1) 渇水状態生起確率 $PF(x)$: 評価地点での必要流量とある時点での評価地点における流量との差 x をもってその時の渇水レベルとすると、 $PF(x)$ はその時点で利水システムが渇水レベル x 以上の渇水状態となる確率を示し、式(4)で与えられる。

$$PF(x) = \sum_{r=0}^{d_c-d_b+1} \Pr(O < \max(d_b, d_c-R) - x \mid R=r) \Pr(R=r) \quad (4)$$

以下、 $\max(d_b, d_c-R)=A$ とおく

$$F(t, x) = \sum_{r=0}^{d_c-d_b+1} \Pr(I < A-x \mid R=r) \Pr(R=r) \quad (5)$$

2) 渇水継続期間確率 $F(t, x)$: 渇水レベル x 以上の渇水が t 期間を通じて継続する確率を示す。

$$F(t, x) = \sum_{r_1=0}^{d_c-d_b+1} \sum_{i_0=0}^A \{F(t-1, x \mid i_0, r_1) \Pr(I_0=i_0, R_1=r_1)\} \quad (6)$$

①の場合は式(5)で②の場合は式(6)で与えられる。ここに、 $F(t, x \mid i, r)$ は不足流量 x のもとで、期間 $[n-1, n]$ における流入量と残流域流出量の状態がそれぞれ i, r であり、それ以降 t 期間渇水である確率を示し、式(7)および式(8)で与えられる。

$$F(0, x \mid i, r) = \begin{cases} 1 & : i < A-x \text{ のとき} \\ 0 & : i \geq A-x \text{ のとき} \end{cases} \quad (7)$$

$$F(t, x \mid i, r) = \sum_{j=0}^{d_c-d_b+1} \sum_{k=0}^A F(t-1, x \mid k, j) \cdot \Pr(I_1=k, R_2=j \mid I_0=i, R_1=r) \quad (8)$$

3) 期待渇水継続期間長 $ED(x)$: ある時点で初めて渇水レベルが x を越えるような渇水状態になったとき、その後渇水レベル x 以上の渇水状態は平均してどれくらいの期間継続するのかわし、式(9)で与えられる。

$$ED(x) = \sum_{t=0}^{\infty} F(t, x) \quad (9)$$

4) 再現期間 $RP(x)$: 定常状態において、渇水レベル x 以上の渇水状態が終わってから再び渇水

$$RP(x) = \frac{T \cdot ED(x)}{PF(x) \cdot T} = \frac{ED(x)}{PF(x)} \quad (10)$$

レベル x 以上の渇水状態となるまでの期間を示し、式(10)で与えられる。ただし、 T はある期間を意味する。

5) 渇水頻度 $FR(x)$: 利水システムでの渇水レベル x 以上の渇水の発生頻度を示し、式(11)で与えられる。

$$FR(x) = \frac{1}{RP(x)} = \frac{PF(x)}{ED(x)} \quad (11)$$

6) 期待不足水量 EF : 定常状態における一期あたりの平均的な不足水量を示し、式(12)で表わされる。

$$EF = \sum_{r=0}^{d_c-d_b+1} \sum_{x=0}^A \Pr(O=A-x \mid R=r) \Pr(R=r) \quad (12)$$

以上のように各種評価指標を提示したが、頻度が渇水頻度 $FR(x)$ あるいは再現期間 $RP(x)$ により評価され、期間が期待渇水継続期間長 $ED(x)$ により評価され、深刻さが期待不足水量 EF あるいは渇水レベル x ごとの期待渇水継続期間長の比較により評価される。また、評価されるべき指標はすべて渇水状態生起確率 $PF(x)$ と期待渇水継続期間長 $ED(x)$ により規定されることがわかる。

4. おわりに 既存利水システムの渇水に対する信頼度特性を評価するにあたり、評価モデルを構築し、貯水池の統計理論に基づいて解析的にその特性を算定する方法を提示した。その際、的確な評価が行えるよう、残流域流出量を考慮した貯水池操作方法を評価モデルに内生化した。今後の課題として、本モデルを実流域に拡張するにあたり、当該利水システムの渇水に対する信頼性評価が行えるようモデルの適用性について検討を行うことが必要である。最後に、本研究において鳥取大学工学部河合一教授には信頼性の観点から始終適切な御指導をいただいた。ここに付記し謝意を表する。