

京都大学防災研究所 正 員 池淵周一

京都大学防災研究所 正 員 小尻利治

京都大学 大学院 学生員 飯島 健

1. はじめに

利水システムは、水利用の高度化に伴って広汎・多岐かつ複雑化の様相を呈してきている。本研究は、こうした複雑な利水システムをいくつかの基本ユニットの組合せとして構成するとともに、入力である河川流量をある確率分布として与えたときの水量・水質両面からみたシステムの安全度を評価するものである。さらに、このシステムの安全度を導入した利水システムの最適計画手法を提示するものである。

2. 利水システムの基本構造

(i) 利水システムの入出力関係：空間的に複雑な利水システムをその水利用形態から分類すると、(i)量や質の変化をもたらす利水施設、(ii)水質の浄化をおこなう処理施設、(iii)水の取水・放流をおこなう分岐・合流施設、(iv)河川表流水の流れを変えるダム貯水池、の4つの基本ユニットから構成されており、実際にはそれらが多数組み合わせられているといえよう。そこで、ある固定された時間（たとえば夏の需要期）で不確実な入力に対する各基本ユニットの安全度を算定し、それらを統合して水系全体の安全度を評価することを考える。なお、計画規模以上の渇水に対する安全度の評価指標としては不足状態である $\% \cdot \text{day}$ とか、渇水被害であるものなども考えられるが、ここでは計算を単純化するために、超過確率あるいは非超過確率で評価する方法を用いている。

(i) 利水施設の特徴を表わすパラメータとして、還元率を α 、原単位当りの汚濁負荷量を $\bar{c}$ としよう。ただし、 $\bar{c}$ は利水した水量の原単位当りに加えられる汚濁物質（たとえばBOD）の負荷量を表わす。これらのパラメータを用い、さらに汚濁濃度 C_0 なる流入が Q_0 であったときの水利用後の流出量および流出汚濁負荷量は、次のような線形関数で表わされようとする。

$$Q_1 = \alpha Q_0, \quad C_1 Q_1 = \alpha (C_0 + \bar{c}) Q_0 \quad (1)$$

(ii) 処理施設の特徴を表わすパラメータとして、処理率を ε としよう。その結果、 C_0, Q_0 の流入に対し、処理後の流出量および負荷量は次式で与えられる。

$$Q_1 = Q_0, \quad C_1 Q_1 = \varepsilon C_0 Q_0 \quad (2)$$

(iii) 分岐については分岐の割合を a で与えてやれば、分岐後の流出量および負荷量は次式で与えられる。

$$Q_1 = a Q_0, \quad Q_2 = (1-a) Q_0, \quad C_1 Q_1 = a C_0 Q_0, \quad C_2 Q_2 = (1-a) C_0 Q_0 \quad (3)$$

また、合流についても合流前の流量がそれぞれ最上流流量 Q_0 の線形1次関数で与えられることから、流量・負荷量の連続条件式から、合流後の流量を求めることができる。

(iv) ダム貯水池操作においては、規準値 $Q_{\min}$ 以下の流入に対してはすべて放流し、それ以上の流入に対しては一定量 $Q_{\min}$ を放流、さらに $Q_{\max}$ 以上の流入に対しては、 $Q_{\max} - Q_{\min}$ を貯水するといった簡単なルールを用いることにより、流出量を流入量の線形1次関数で表現することができ、また、放流される汚濁負荷量は、ダム貯水池のもつ浄化作用を無視すれば、次式で与えられる。

$$C_1 Q_1 = C_0 Q_0 \quad (4)$$

(2) 確率的入力分布に対する安全度評価：(1)のようにシステム通過後の流量や負荷量がすべて最上流流量の線形1次関数で与えられるとき、任意地点における安全度算定の手順は次のようになる。つまり、最上流流量の確率分布が対数正規分布 $f(Q)$ （分布のパラメータを μ, σ とすると）で近似されるとき、評価地点 i における流量が $Q_i = k_i Q$ 、負荷量が $C_i Q_i = f_i Q$ であるならば、 $Q_i, C_i Q_i$ それぞれの確率密度関数は次のように表現できる。

$$f_i^k(Q_i) = \frac{1}{k_i} f(Q_i/k_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sum Q_i} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln Q_i - (\ln k_i + \lambda)}{\sum} \right)^2 \right] \quad (5)$$

$$f_i^h(C_i Q_i) = \frac{1}{h_i} f(C_i Q_i/h_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sum C_i Q_i} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln C_i Q_i - (\ln h_i + \lambda)}{\sum} \right)^2 \right] \quad (6)$$

したがって、安全度は、水量に関しては基準値 Q_i^* を下まわらない確率、水質に関しては基準値 $C_i Q_i^*$ を上まわらない確率として、それぞれ次式で与えられる。こゝに、 $\Phi(\cdot)$ は、標準正規分布関数である。

$$R_i^k = 1 - \int_0^{Q_i^*} f_i^k(Q_i) dQ_i = 1 - \Phi \left(\frac{\ln Q_i^* - (\ln k_i + \lambda)}{\sum} \right) \quad (7)$$

$$R_i^h = 1 - \int_{C_i Q_i^*}^{\infty} f_i^h(C_i Q_i) dC_i Q_i = \Phi \left(\frac{\ln C_i Q_i^* - (\ln h_i + \lambda)}{\sum} \right) \quad (8)$$

3. 利水システムの安全度評価

直列型配置の利水システム、並列型配置の利水システムいずれにおいても評価地点における k_i 値や h_i 値を算定することができ、ここではより複雑な系として右図に示すような流域下水道や再利用を含んだシステムを考えよう。 N 個の利水施設が図のように再利用を含んだ形で存在するとし、 m 番目の利水施設のもつ水量パラメータ、水質パラメータを、

$$S_m = (1 - A_m) \alpha_m, \quad \bar{S}_m = A_m \prod_{j=1}^m (1 - a_j) \quad (9)$$

$$t_m = E_m \alpha_m (1 - A_m), \quad \bar{t}_m = C_1 A_m \prod_{j=1}^m l_j (1 - a_j) + E_m \alpha_m (1 - A_m) \bar{C}_m \cdot k_{5N-3} \quad (10)$$

とおくことにより、たとえば、システム通過後の k_{5N+1} 値および h_{5N+1} 値は、

$$k_2 = \alpha_1 = \bar{S}_0, \quad \alpha_0 = \bar{S}_m, \quad \alpha_{j+1} = \alpha_j \cdot S_{m-j} \cdot \bar{S}_{m-j-1} / \bar{S}_{m-j} \quad \text{および} \quad h_2 = C_1 \alpha_1 = \bar{t}_0,$$

$$\alpha_0 = \bar{t}_m, \quad \alpha_{j+1} = \alpha_j \cdot t_{m-j} \cdot \bar{t}_{m-j-1} / \bar{t}_{m-j} \quad \text{といった2つの漸化式を、} \quad \omega_m = \alpha_m A_m$$

なるパラメータを用いて、

$$k_{5N+1} = \sum_{m=1}^N (\omega_m \prod_{j=0}^{m-1} \alpha_j) + \prod_{m=1}^N (1 - a_m) \quad (11)$$

$$h_{5N+1} = E \sum_{m=1}^N (\omega_m \prod_{j=0}^{m-1} \alpha_j) + C_1 \prod_{m=1}^N l_m (1 - a_m) \quad (12)$$

と表現することができ、こゝに、 a_m は取水率、 α_m は還元率、 $\bar{C}_m$ は原単位当りの汚濁負荷量、 E_m は処理率、 $1 - A_m$ は再利用への還元率、 l_m は河川の自浄効果、それぞれ m 番目の利水システムにおける値であり、 E は最終処理施設の処理率である。なお、 $k_{5(m+1)-3} = \prod_{j=0}^{m-1} \alpha_j$ 、 $h_{5(m+1)-3} = \prod_{j=0}^{m-1} \alpha_j$ の関係がある。

もちろん、最終評価地点 $5N+1$ 以外の評価地点においても k_i 値および h_i 値が同様に算定できるので、それらの値を(7),(8)式に代入することによって、安全度 R_i^k 、 R_i^h が求められる。したがって、いま、各評価地点の重要度を同一とすると、各評価地点の安全度の中で最も小さい値を系全体の安全度評価 RA とみなすこともできよう。

$$RA = \min \{ R_1^k, R_2^k, \dots, R_i^k, R_1^h, R_2^h, \dots, R_i^h \} \quad (13)$$

4. 利水システムの最適計画

3.では利水施設への取水率や、再利用率、処理施設の処理率などが与えられたとき、最上流流量の確率密度関数にしたがってシステムの安全度を評価することができたが、逆に、システムの安全度に基準を設けて、その基準を満たす範囲での、たとえば総費用を最小にする最適な取水率、再利用率、処理率などを決定する問題も考えられる。すなわち、 $P_h[Q_i \leq Q_i^*] \leq P_{ch}^k$ 、 $P_h[C_i Q_i \geq C_i Q_i^*] \leq P_{ch}^h$ なる確率的制約条件を課すわけである。このように考えると、本問題は目的関数 $Z = \sum_{j=1}^n A_j x_j$ を以下の制約条件のもとで最小化することに帰着する。

$$k_i = F_i^k(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq \exp[\ln Q_i^* - \lambda - \sum \Phi^{-1}(P_{ch}^k)] \quad , \quad h_i = F_i^h(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq \exp[\ln C_i Q_i^* - \lambda - \sum \Phi^{-1}(1 - P_{ch}^h)] \quad (14)$$

こゝに、 x_j は取水率などの決定変数、 A_j は費用係数である。

以上、最上流流量の確率分布を用いた利水システムの安全度評価を試みたが、安全度をある簡単な漸化式の形で表現できることは、各利水システム代替案の安全度評価が容易に行なえることを意味している。今後、実データの分析をすすめるとともに、望ましい利水システムの策定・運用に活用してきたい。

