

水道施設の安全度の指標に関する一考察

九州大学 正員 上田 年比古

九州大学 学生員 河村 明

九州大学 ○学生員 大森 功

1. はじめに

現在人口過密ないくつかの都市では水需要の逼迫が重大な問題となっていて、水道施設の安全度の向上、つまり渇水に対して強い施設にすることが重要な課題である。しかし、現在の施設が基準渇水年を10年としていることから、予定通りの水源施設が得られても異常渇水対策は必要となる。福岡市は昭和53年に記録的な渇水に見舞われ社会問題となり、渇水対策の必要性と緊急性が再認識された。本報では、水道施設の安全率を年間需要量中の水不足量または不足率により明らかにしようとしたもので、昭和53年の福岡市と北九州市を例にとり渇水不足率の期待値を求めたものである。また、施設の余裕量による稼働率および渇水補給ダムの容量などの施設能力の増加によって渇水不足率の期待値がいかに改善されるかを検討した。

2. 計算手法

いま基準渇水年が10年の施設、つまり10年に1回の渇水に対して需要量 S (m³/年) を完全に供給できる水道施設(施設能力 S) があるとし、この施設の安全率を次のように考える。渇水に対する安全率すなわち抵抗する強さは逆にいえば、渇水に対する弱さから考えてもよい。よって渇水不足率を安全率の指標とする。いま1/10より少ない確率の渇水の水不足量 D (m³/年)、したがって水不足率 $D/S = v$ を考えると図-1のようになる。ここで縦軸は渇水の発生確率 W の対数を取り、横軸は年当りの水不足率をとる。いま $v \sim \log W$ の関係が直線的に変化すると仮定し、 $v = 0$ の時 $W = 1/10$ を通り $v = 1$ の時 $W = W_L$ とした。 $v \sim W(v)$ は超過確率分布であり、これを $F(v) = 1 - W(v)$ とすると非超過確率分布となり、これを v で微分したもの $-dW/dv$ が確率密度関数 $f(v)$ となる。ここでは、一端渇水が生じた時点での渇水不足率の期待値、すなわち条件付確率を求めることにして、 $f(v)$ を $1/10$ で割ったものを求める。それが図-2で示したものである。ここでは例として、 W_L に $1/1000$ 、 $1/2000$ 、 $1/10000$ を与えて $f(v)$ の変化を示した。このようにすると、いま考えている水道施設の渇水不足率の期待値 L は、 $L = \int v f(v) dv$ で求められる。これを計算すると、 $L = (10W_L - 1)/A \ln 10 \cdots (1)$ ここで $A = 1 + \log W_L$ となる。図-2

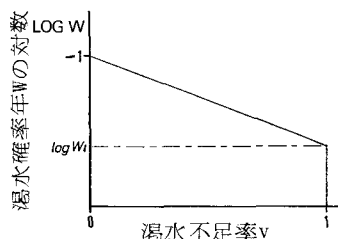
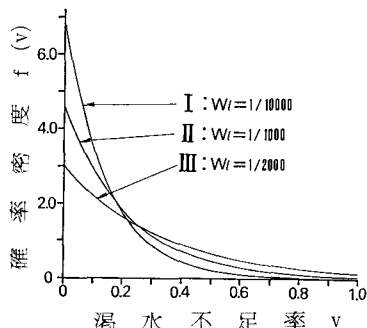


図-1 渇水確率年と渇水不足率との関係

図-2 W_L に対する確率密度関数の変化

次に稼働率、つまり施設に余裕がある場合の渇水不足率を求める。1/10渇水年に対して余裕量 q (m³/年) をもつ水道施設を考え、余裕量は W と共に減少し、 $W = W_L$ で $q = 0$ になるようにすると図-3の破線で示される。 q/S は施設能力の増加率であり $q/S = \gamma$ とおくと渇水不足率の期待値 L' は、 $L' = 10^{B\gamma} (10^B - 1) / B \ln 10 \cdots (2)$ ここで $B = (1 + \log W_L) / (1 + \gamma)$ となる。次に渇水補給ダムをもつ場合の水道施設の渇水不足率を求める。渇水補給ダムの容量を z (m³/年) とすると、この量は W について一定であり図-4の破線で示したものである。傾きは(1)と同じであり、 $v = 1$ の時の値が W_L よりも小さくなる。 z/S は施設能力の増加率であり $z/S = \gamma$ とおくと渇水不足率の期待値 L'' は、 $L'' = 10^{A\gamma} (10W_L - 1) / A \ln 10 \cdots (3)$ ここで $A = 1 + \log W_L$

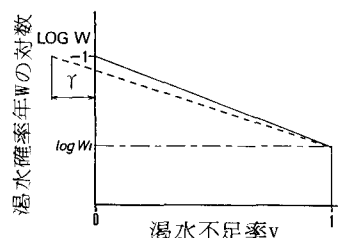


図-3 施設に余裕がある場合の渇水確率年と不足率との関係

となる。以上より、基本式(1)、稼働率の式(2)、湧水補給ダムの式(3)が算出される。

3. 式の適用

いま、福岡市と北九州市の水道施設について湧水不足率の期待値 L を求め、福岡市が北九州市と同じ L をもつための施設余裕量および湧水補給ダム容量を求める。昭和53年について考えると、福岡市の需要量は $S=1.376 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{年}$ 。ここでは、 S を1/10湧水年に対する施設能力と考えておく。昭和53年の給水実績は $284,996 \text{ m}^3/\text{日} \times 365 \text{ 日} = 1.040 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{年}$ 。したがって水不足量は $D=1.376 \times 10^9 - 1.040 \times 10^9 = 3.36 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{年}$ 。よって水不足率 $v=D/S=0.2442$ が得られる。次に昭和53年の降水量の確率年を求めると、福岡管区気象台において

1890～1981年の92年間で昭和53年は湧水第3位である。Hazen式 $W=(2n-1)/2N$ ここに、 $n=3$ 、 $N=92$ より $W=1/36.8$ が得られる。これらを図-1に当てはめると、 $v=0.2442$ の時 $\log W=\log(1/36.8)=-1.5658$ を通る直線となり、これより $\log W_L=-3.3171$ 、ゆえに $W_L=4.8184 \times 10^{-8}$ となる。これを式(1)に代入すると $L=0.1865=18.65\%$ が得られる。よって福岡市の湧水不足率の期待値は18.65%である。

次に北九州市については、昭和53年は需要量 $S=4.22 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{日} \times 365 \text{ 日} = 1.540 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{年}$ 。給水実績は $368,326 \text{ m}^3/\text{日} \times 365 \text{ 日} = 1.344 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{年}$ 。したがって水不足量は $D=1.540 \times 10^8 - 1.344 \times 10^8 = 1.96 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{年}$ 。よって水不足率 $v=D/S=0.1273$ となる。北九州市の昭和53年の降水量の確率年は、小倉空港において1890～1981年の92年間で昭和53年は福岡市と同じく湧水第3位であり、 $W=1/36.8$ が得られる。福岡市と同じように計算すると、 $\log W_L=-5.4450$ 、 $W_L=3.589 \times 10^{-6}$ となり、式(1)より $L=0.0977=9.77\%$ が算出される。よって北九州市の湧水不足率の期待値は9.77%となり福岡市のそれより小さい。したがって北九州市の方が福岡市に比べて湧水に対する安全率すなわち抵抗する強さが大きいと言える。

次に福岡市の湧水不足率の期待値が北九州市と同じ値をもたせるために必要な施設余裕量および湧水補給ダム容量の算出を行なう。式(2)において $L'=0.0977$ とすると、 $\gamma=0.1774$ となる。 $\gamma=q/S$ より $q=0.1774 \times 1.376 \times 10^9 = 2.44 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{年} = 66,900 \text{ m}^3/\text{日}$ となり、施設余裕量を $66,900 \text{ m}^3/\text{日}$ とすれば北九州市と同じ安全率になる。また式(3)において $L'=0.0977$ とすると、 $\gamma=0.1212$ となる。 $\gamma=z/S$ より $z=0.1212 \times 1.376 \times 10^9 = 1.67 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{年} = 45,700 \text{ m}^3/\text{日}$ となり、湧水補給ダム容量を $45,700 \text{ m}^3/\text{日}$ とすれば北九州市と同じ安全率になる。

次に、福岡市の施設能力の増加率 γ と湧水不足率の期待値の関係を調べてみる。福岡市の昭和53年時点の施設能力に対し取流域一定のもとに新たな水源開発による施設能力の増加率 γ に対する湧水不足率の期待値を計算して表したものが図-5である。Iは式(2)の施設余裕量の増加率($=q/S$)、IIは式(3)の湧水補給ダム容量の増加率($=z/S$)に対応する。IもIIも γ が増加するに伴って湧水不足率の期待値は減少しているが、Iが湧水の程度が大きくなるにつれてその施設能力が低下してしまい、 $W=W_L$ で余裕量が0になるのに対して、IIは湧水の程度に拘らず湧水補給能力が低下しないため、IIの方がIに比べて湧水不足率の期待値が全般に小さくなり、ここに湧水補給ダムの効果をみることができる。

4. むすび

本報で提案した湧水不足率の期待値を、水道施設の安全率算定のための指標として用いることにより、各都市の水道施設の安全率を客観的に評価でき、さらに目標の安全率を確保するための施設余裕量および湧水補給ダム容量を算定することが可能と考える。

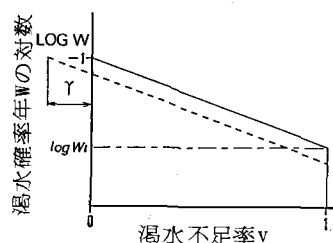


図-4 湧水補給ダムがある場合の確率年と不足率との関係

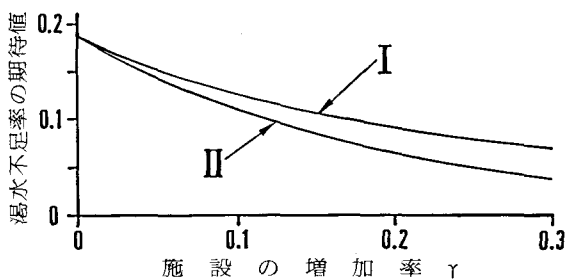


図-5 施設の増加率に対する湧水不足率の期待値の変化