

貯留施設の治水効果に関する実際的な評価の例

Examples of Practical Evaluation of Risk in Flood Control by a Storage Facility

近畿大学理工学部 正員 中西 祐啓

大阪大学 工学部 正員 室田 明

近畿大学理工学部 正員 江藤 剛治

1. はじめに

洪水ハイドログラフには高いピークを持つ尖ったハイドログラフ、ピークはそれほど大きくないが総流量の大きいもの等様々の形状のハイドログラフがある。貯留施設を持たず、河道により洪水を全て流下させる治水システムでは、ピーク流量のみを確率評価して治水安全度の評価、あるいは下流疎通能の決定を行えば良い。貯留施設を持つ治水システムでは、同じピークを持つハイドログラフであっても、総流量の大きいハイドログラフをコントロールするにはより大きな貯留施設を必要とする。よって貯留施設を持つ治水システムでは、ハイドログラフの形状も考慮した確率評価により治水安全度の評価、治水施設の規模決定を行わなければならない。

江藤・室田はピーク流量と洪水継続時間（総流量）の結合確率分布を考慮した理論解析により、所与の治水安全度を確保するために必要な、排水施設の容量と貯留施設の容量（以後排水容量、治水容量とよぶ）の関係を表わす方程式を導いた¹⁾²⁾。これを等危険度線の方程式と呼んでいる。本論文の第一の目的は、等危険度線の理論を実際の遊水地計画に適用した例を示すことにより、この理論が実務的にみても非常に有効な手法であることを示すこと、および実務におけるこの理論の適用法をわかり易く説明することである。

実務において、各治水施設の計画の都度、あるいは防御地点ごとに等危険度線を描くことは面倒な場合がある。とくに都市河川においては、比較的小さな流域内に多くの治水施設と多くの洪水防御対象地点がある。よって1流域について時間雨量に対する等危険度線を一つだけ描いておき、これに適当な係数を乗じて任意の地点の治水効果の評価、施設規模の決定に利用することができればその実際的な意義は極めて大きい。江藤・室田は実際の観測資料に基づいて等危険度線を描く方法を提案した。しかしこの方法では観測されたすべてのハイドログラフを用いた統計解析により等危険度線を描く。年最大値系列を用いて等危険度線を描くことができれば、その実務的な意義は大きい。本論文の第二の目的は、実務におけるより簡便かつ有効な等危険度線の理論の利用の方法を提案することである。

2. 遊水地の段階的拡張計画への適用例⁴⁾

2.1 等危険度線の式

残流域がない場合の等危険度線の式を示す。貯留施設の操作方式は一定量放流とする（図-1参照）。

横軸に排水施設容量、縦軸に貯留施設容量をとる（以下排水容量、貯留容量とよぶ y_0, z_0 で示す）。

安全度 κ_0 を一定とする。このとき、等危険度線の方程式は、

$$z_0/z_0^0 = \{(y_0^0 - y_0)/y_0^0\}^s \dots\dots\dots(1)$$

ここに通常、 $s = 2 \sim 3$ （ $s = 2$ が安全側）。また、 $z_0^0 = f_z(\kappa_0)$, $y_0^0 = f_y(\kappa_0)$

F_z は総流量（総雨量）の確率分布関数、 F_y はピーク流量（ピーク雨量）の確率分布関数である。

y_0^0 は貯留施設がまったくなく排水施設のみによって治水を行うとときに所与の安全度 κ_0 を保つに必要な排水施設の容量を意味する。 z_0^0 は逆に排水施設がまったくなく、洪水をすべて溜め込むと考える場合に所与の安全度 κ_0 を保つに必要な貯留施設の容量を意味する。

y_0^0 はピーク流量の確率分布関数、あるいは実測ピーク流量を確率紙にプロットしたものから非超過確率 κ_0 に対応する値として簡単に推定することができる。同様に z_0^0 は総雨量（総流量）の確率分布関数あるいは確

率紙から容易に推定することができる。すなわち、 y_0^u, z_0^u の評価においてはピーク値と総量の結合確率分布に関する情報は全く必要ないという点が非常に重要な点である。あとは $(y_0^u, 0)(0, z_0^u)$ を結ぶ等危険度線の形状がどうなるかという問題を解決すればよい。著者らはすでに、結合確率分布に基づく理論的検討により、この2点の間の曲線を式(1)に示すような、2～3次のパラボラで近似することができることを示した。

種々の K_0 に対して等危険度線を描いたものが図-2である。

2.2 資料

1974年～1983年7月の9.54年間の遊水地地点の時間雨量資料を用い、これを流出解析により流量に変換したものをを用いて検討を行った。

雨量資料としては、測定期間中ある程度以上の強度を持つすべてのハイレグラフを用いた。すなわち非毎年資料に基づいて統計解析を行った(補遺参照)。

雨量資料のうち洪水とみなせるものをビック・アップする。本論文では次のようにした。流域全体一様に5mm/hrの降雨があったときの流量を y_B とし、それを越す流量を洪水と見なした。また、計算で得られたハイドログラフから5mm/hr相当流量(y_B)を差し引いたものを洪水のハイドログラフと考えた。このようにすると、ピーク流量が過少評価されることになるので、最終的に得られた等危険度線の排水容量に y_B を加える。

次に一雨降雨を定義しておく必要がある。12時間以上無降雨が続けばその前後の雨は別々の雨であると判断した。このようにすると1974年～1983年7月の間に82個のハイドログラフが得られた。これらのハイドログラフから等危険度線を求めた。

2.3 資料の確率評価と等危険度線のプロット

得られたハイドログラフのピーク流量、総流量をワイブル・プロット法(トーマス・プロット法)により対数生起確率紙にプロットした。

これより、ある危険度を与えたときのピーク流量、総流量の値を読み取る。その値が y_0^u, z_0^u である。 y_0^u, z_0^u から2次放物線近似で等危険度線を描く場合に必要プロットはここまでである。

実際の資料を用いて、それにあり s を推定して等危険度線を描くには以下の手順が必要となる。

下流の疎通能 y_0 を何段階かに分けて、その時必要な貯留容量、すなわち y_0 以上の総流量を求め、確率紙にプロットする。このとき、より大きな洪水だけをビックアップすることになるので、確率評価に使えるハイドログラフの数は少なくなる。

確率年 T を固定して考えると、確率紙にプロットした枚数分の等危険度の点を得られる。この点から式(1)の s を推定する。式(1)の対数をとれば、

$$\log(z_0/z_0^u) = s \cdot \log\{(y_0^u - y_0)/y_0^u\} \dots\dots\dots (2)$$

となり、 $\log-\log$ 座標上にプロットしたものの勾配から簡単に s が求まることがわかる(図-3右上)。その s によって $(y_0 - z_0)$ 座標上に曲線を描けば、それが等危険度線である。本論文では、確率年 $T=5, 10, 20, 50, 100$ 年について調べたところ、傾き s は3～4となったので、 $s=3.5$ として等危険度線を描

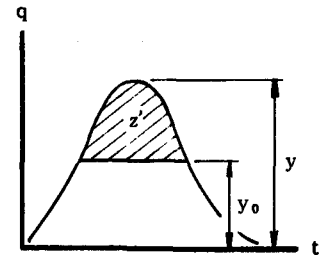


図-1 一定量放流方式

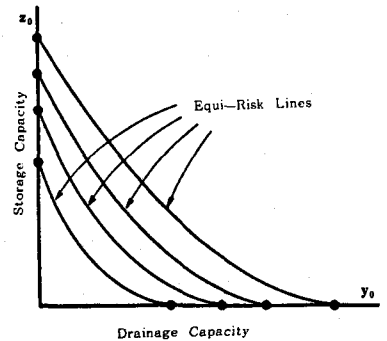


図-2 等危険度線

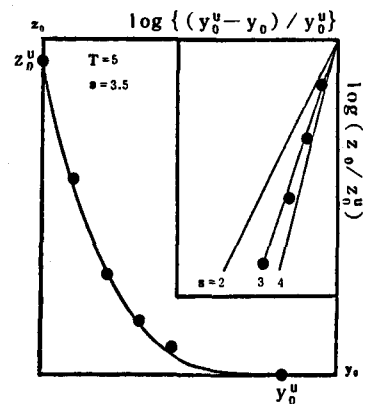


図-3 Sの推定

いた(図-3左下の図参照)。

完成した等危険度線を図-4.aに示す。洪水ハイドログラフは、計算で得られたハイドログラフから y_B を差し引いたものとしていたの、図上でそれを加えている。

2.4 流域状態が変化した場合

本論文で検討の対象としている流域は、現在と将来でかなり異なった状態になることが予想されている。現在、一部の部分流域からの流出量は計画対象の排水施設・貯留施設に流入させないようにしているが、基本計画によれば、将来これを計画対象流域に編入させる。言い替えると、全流域面積が基本計画では現状の4/3倍になる。流出率も大きくなる。よって将来の状態での等危険度線も描いて治水計画の安全度を評価する必要がある。将来の流域状態を考慮した場合の等危険度線を図-4.bに示す。

2.5 拡張計画の評価

まず、現在の流域の状態での等危険度線(図-4.a)を用いて各段階(図中A,B,C,D点)での治水安全度を評価する。次に、将来流域の状態が変化した場合の等危険度線(図-4.b)を用いると治水安全度がどのように変化するのか比較する。

(i) 現在の流域状態の場合(図-4.a)

- ① 河道の1期工事のみを行った場合(図中A点)には、治水安全度は1/5以下である。
- ② 河道・貯留施設とも1期拡張工事計画が終了した時点(図中B点)では、治水安全度は1/20となる。
- ③ 河道の1期工事、貯留施設の3期工事が終了した時点(図中C点)では、治水安全度は1/50である。
- ④ 基本計画が終了した時点(図中D点)では、流域の状態が現在のままであれば、治水安全度はかなり高くなる。むしろ過剰投資となる。

(ii) 流域の状態が変化した場合(図-4.b)

- ① 河道、貯留施設ともに1期工事が終了した時点(図中B点)の治水安全度は、現在の流域状態では1/20程度であったものが1/5以下にさがってしまい、かなり危険な状態となる。
- ② その他の計画段階においても①と同様のことが言える。当然流域がこのように変化する前に基本計画を完了する必要がある。

以上示したように、等危険度線を用いれば河道・貯留施設の規模をどのくらい上げれば、安全度がどのくらい上昇するのか明確に把握することができる。また等危険度線は、どの部分から着工するか、最初の重点投資目標を河道にするのか、貯留施設の1期工事・2期工事にするのか等を判断する場合にも非常に有益な情報となる。

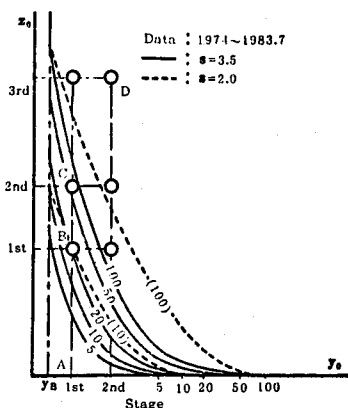


図-4.a 現在の流域状態での等危険度線

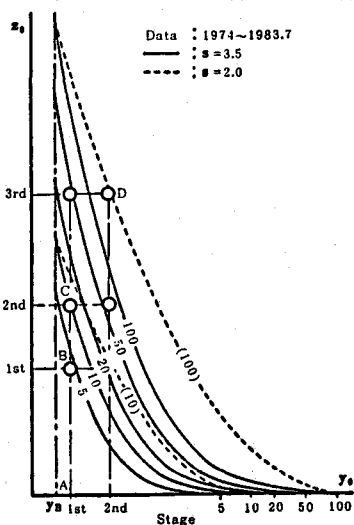


図-4.b 将来の流域状態での等危険度線

3. 都市河川における時間雨量の等危険度線の利用

3.1 意義

都市河川においては1流域内に多数の治水施設の築造が想定されている。また流域内のほとんどの地点が洪水防御の対象地点となる。これら多くの治水施設・地点に対して治水効果の検討が必要となる。その都度等危険度線を描くのは繁雑である。

都市河川における洪水の到達時間は数10分～2,3時間である。また流出率は流出の全期間を通じて不浸透面積率にほぼ等しい。よって時間雨量ハイトグラフとハイドログラフの相似性は極めて高い。以上より、1流域について時間雨量に対する等危険度線を一つだけ描いておき、これに適当な係数を乗じて任意の地点の治水効果の評価、施設規模の決定に利用することが可能であることが予想される。もしそのようなことが可能であればその工学的意義は極めて高い。

3.2 手法

次の仮定を置く。

- ① 到達時間数10分～2,3時間の地点のハイドログラフから得られる等危険度線の式(1)の s は、時間雨量に対する s の値にほぼ等しい。
- ② ピーク流量は合理式により推算可能。
- ③ 流出量 f 、ピーク流出係数 f_p とも流出期間、各洪水を通じて一定(不浸透面積率にほぼ等しい)。
- ④ 洪水到達時間は降雨強度によらず、各地点に対してほぼ一定と仮定して良い。(時間雨量50mm程度の降雨に対する到達時間を用いる。)
- ⑤ DD関係、DA関係ともに降雨強度によらず相似。

以上は都市河川の実際の計画評価において用いる仮定としては、それほど無理のない仮定である。

仮定①より、式(1)において、各地点に対して s の値は変わらない。地点ごとに変わるのは、 (y_0, z_0) のみである。すなわち時間雨量についてその流域に対する s の値を求めておけば、T年確率ピーク流量、総流量を地点ごとに個別に推定することにより、当該地点の等危険度線を求めることができる。ここで再現期間Tと安全度 κ_0 、危険度(超過確率) q との間には次のような関係がなりたつ。

$$q = 1/T, \kappa_0 = 1 - q$$

②～⑤より、

$$z = \Sigma Q = f \cdot A \Sigma r, y' = Q_p = 1/3.6 f_p A (\beta \bar{r}_1) \quad (\text{合理式}) \quad \cdots \cdots (3)$$

また、係数 $(f \cdot A)$ 、 $(1/3.6 f_p A \beta)$ は一定。ここに $z = \Sigma Q$ は総流量、 $y' = Q_p$ はピーク流量、 A は流域面積、 β はDAD関係を考慮したときの、流域代表1時間平均雨量と、当該地点の到達時間内の時間平均雨量 $\bar{r}_0$ の比($\bar{r}_0 = \beta \bar{r}_1$)。例えば到達時間が1時間より小さい時は $\bar{r}_0 > \bar{r}_1$ 、よって $\beta > 1$ 。次のようにおく。

$$c_z = f \cdot A, c_y = 1/3.6 f_p A \beta$$

また時間雨量換算排水容量、貯留容量(時間雨量資料から作った等危険度線の横軸、縦軸)を y_{0r}, z_{0r} で表わす。

以上より、実際あるいは計画の排水施設の容量 y_0 、貯留施設の容量 z_0 が与えられた時、その治水システムの安全度を評価するには、 y_0, z_0 をそれぞれ c_y, c_z で割って y_{0r}, z_{0r} を求め、これを時間雨量から作った等危険度線の上にプロットして安全度(パラメータ)を読みとれば良い。逆に時間雨量から作った等危険度線から所与の安全度を確保するに必要な時間雨量換算排水容量、貯留容量 y_{0r}, z_{0r} が求まると、これらに c_y, c_z を乗じて実際の排水容量、貯留容量を簡単に求めることができる。

一般の河川流域においては、条件①～④が成立しない場合が多いので、上記の簡便な手法を用いることはできない。

4. 年最大値系列を用いた等危険度線の推定

4.1 意義

著者らは実測水文資料を用いて等危険度線を描く手法を提案した。この手法では年最大値系列(AMS: Annual Maximum Series, 補遺参照)ではなく、観測期間内の全部の一雨降雨(洪水)資料を用いた統計処理により、等危険度線を描く。本論文では年最大値系列から等危険度線を描く手法を提案する。

4.2 全資料を用いる場合

資料の観測期間を T_0 年、観測期間内の一雨降雨の総数を N 、年平均一雨降雨生起回数を λ とすれば、 $\lambda = N/T_0$ となる。洪水災害の再現期間を T 年とする。

- ① 全てのハイドログラフのピーク流量 y 、総流量 z を確率紙にプロットし、 T 年確率ピーク流量 y_0 、総流量 z_0 を求める。確率紙上で $q = 1/(\lambda T)$ に対応する値を読み取れば良い。
- ② 排水容量 y_0 を仮定する。
- ③ ピーク流量が y_0 以上の全てのハイドログラフを選ぶ。その個数を N' とする。
- ④ 選ばれた N' 個のハイドログラフの各々に対して、 y_0 以上の部分の流量の総和 z' を求める。
- ⑤ z' を確率紙にプロットする。
- ⑥ 超過確率 q' に対応する z' の値を読み取る。この値を z_0 とする。ここに $q' = 1/(\lambda' T)$, $\lambda' = N'/T_0$ 。
- ⑦ y_0 の値を変えて①～⑤をくり返す。変えた y_0 のレベルの数だけ (y_0, z_0) の値の組が求まる。
- ⑧ 各 (y_0, z_0) の組について $\{(y_0 - y_0)/y_0, z_0/z_0\}$ を計算し、結果を $\log - \log$ 座標にプロットする。
- ⑨ これらの点に直線を当てはめる。勾配が s である。

4.3 年最大値資料による方法

- ①～④, ⑦～⑨は全資料を用いる場合と同じ。よって異なる部分(⑤, ⑧)についてのみ説明する。
- ⑤ 各年について z' の最大値を求める。
- ⑧ z' を確率紙にプロットし、 $q = 1/T$ に対応する z' の値を読み取って z_0 とする。

4.4 実測降水資料を用いた検討

大阪管区気象台の台風期の時間雨量資料に対して、全資料を用いる方法と年最大値資料を用いる方法で等危険度線を描き、結果を比較した。1900～1965年の7～10月の降雨資料を用いた。結果を図-5に示す。図より以下のようなことがわかる。

- ① 再現期間が小さいところではわずかな差が見られるが、全資料を用いる方法と年最大値資料を用いる方法で描いた等危険度線は、実用上完全に一致すると見てよい。
- ② 実測値を用いて描いた等危険度線に対する式(1)の適合度は悪い。
後者の理由として次のようなものを上げることができる。
- ① 前提条件も含めて、式(1)を導く過程に改善の余地がある。
- ② これは大阪の雨量に対して偶然得られた結果であり、一般的には式(1)が十分良い近似式となる。

よって第一段階としては、より多くの地点の水文資料に対して、式(1)が適合するかでうか検討を進める必要がある。

4.5 その他のコメントとまとめ

年最大値系列から等危険度線を描くことの利点としてつぎの2点を上げることができる。

- ① 確率紙へのプロットの段階で労力が大いに軽減される。
- ② 確率分布の当てはめ、あるいは確率紙へプロットされた点への曲線の当てはめにおいて、標本点が多くかつ計画対象とはならない中小洪水の影響を除くことができる。

一方、資料の観測年数が短い時は、年最大値の数が少なくなるので、安定した統計的推定が困難になる。よって、各年2位以下の資料も無駄なく使える全資料に基づく方法を用いるべきである。

以上より資料の観測年数が十分長い時は年最大値に基づく方法を用いればよい。資料の観測年数の長さにより不安があるときは全資料に基づく方法を用いることができる。

5. おわりに

等危険度線の理論を実際の貯留施設計画の治水安全度評価に適用した。等危険度線は、排水施設と貯留施設を併用する実際の治水計画において、極めてわかりやすく、かつ合理的な安全度評価の手段であることを明らかにした。

都市河川流域において、時間雨量資料に基づいて、ただ一つの等危険度線図を描いておき、これより流域内の各治水施設・各地点の治水安全度を簡便に評価する方法、貯留量の年最大値系列を用いて等危険度線を描く方法など、等危険度線理論をより使い易くするための試みを示した。実測資料に対する等危険度線理論の適合度に改善の余地があることも明らかになった。

(補遺)

年最大値系列 (AMS: Annual Maximum Series) を毎年資料、観測期間内の全部の資料を英語では Partial Duration Series (PDS), 日本語では非毎年資料と呼んでいるようであるが、的確な表現とはいえないので、新たに適当な用語を考えるべきである。

参考文献

- 1) 江藤剛治・室田明：一雨降雨の1確率模型，土木学会論文集，No.345/II-1，1984年5月。
- 2) 江藤剛治・室田明：単一貯留施設による治水の安全度に関する理論的研究，土木学会論文集，No.351/II-2，1984年11月。
- 3) 江藤剛治・室田明・柳本速雄：貯留施設と排水施設を併用した高水計画の安全性，第28回水理講演会論文集，1984年2月。
- 4) 中西祐啓・江藤剛治・室田明：等危険度線による遊水地計画の安全度評価の例，近畿大学理工学部研究報告20号，1984年9月。

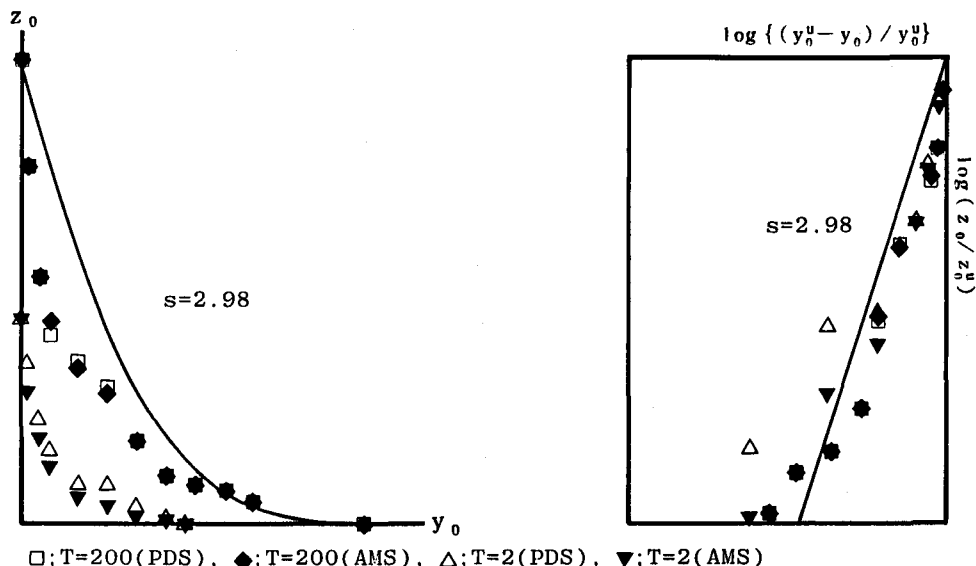


図-5 全資料を用いた等危険度線と年最大値資料を用いた場合との比較