

京大防災研究所 正員 石原 安雄

○瀬能 邦雄

1. まえがき

合理的な治水計画は水系内に散在する各防災対象地区における破堤はんら

人の危険度の合理的な評価によって始めて可能であることはいうまでもない。本研究はこの合理的な評価とはいかなるものであるかを明らかにするとともに、その具体的な手法の一例として、簡単ではあるが問題の本質を適確に包含しているある水素モデルに対して、とくに河道改修状況と洪水調節状況の変化による破壊はんらん危険度の変化状況を、系統的な分析と総合に基づいて、多次元確率の理論を応用して求める手法を示すとともに、その計算例を示し、降雨の相互相関係数の効果等を検討したものである。

2. 破堤はんらんの危険度の合理的な評価

河川は一般に複雑な集水系を構成しており、

しかもその中に点々と防災対象地区が存在していて、その大部分のものは河川堤防によって洪水のはんらんを防止する方式をとっているが、その防止機能は on-off 的であり、ひとたび破壊すれば堪大な被害が起る。ところで、一般に出水時の破壊形態には浸透破壊、洗堀破壊、越水破壊等がある

被害が起る。ところで、一般に出水時の破堤形態には浸透破壊、洗堀破壊、越水破壊等があるわけであるが、ある程度堅固な堤防をつくり維持管理を十分に行なえば越水破壊だけを考えればよいはずである。この越水の条件は第一義的には河道のもつ洪水疏通能力とその河道を流下する洪水のピーク流量との大小関係によって与えられると考えてよい。すなわち、破堤はんらんの危険度の合理的な評価は対象地点に生起する洪水ピーク流量の生起確率の合理的な評価に依存している。出水時に

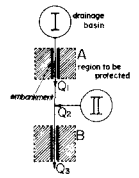
評価は対象地点に生起する洪水ピーク流量の生起確率の合理的な評価に依存している。出水時に水系内のある地点を流下する洪水のピーク流量の大きさは、その地点より上流地域における降雨状況、流域状況、河道状況、洪水調節状況などによって変化する。降雨状況はいわば出水過程の入力であって、現在のところ純粋な自然現象とみなすべきであろう。流域状況とは雨水流出場の性質であって、集水面積、地形、地質、支川分布などである。大規模な土地利用形態の変化、大面積に及ぶ森林の伐採、流域変更などによって下流部の出水状況はかなりの変化をうける。また、上流地区で河道改修が行なわれたり、洪水調節池や遊水池がつくられたりすると、下流部の洪水が変化することも周知のとおりである。すなわち、水系内の特定の地点を対象として洪水のピーク流量の生起確率を評価するには、それより上流域における自然的・人工的状況の変化を総合的に把握したのち、変化を起さないと考えてよい降雨の生起確率分布から間接的に評価しなければ合理的とはいえない。もちろんこうしたこ

い降雨の生起確率分布から間接的に評価しなければ合理的とはいえない。もちろんこうしたことは従来からいわれていて、水系一貫の治水計画といった言葉があるが、具体的な表現は皆無といつてよく、とくに上流における破堤・はんらんが下流の洪水ピーク流量、したがって下流の破堤・はんらんの危険度に及ぼす影響を系統的な分析に基づいて評価することも行われていないように思われる。

3. 上流地区の破壊を考慮した洪水ピーク流量の生起確率の多次元的評価

(A) 簡単な水素モデルについて；図-1に示すように，上流部の河道に沿って一つの防災地区Aがあり，下流部の河道に沿って他の防災地区Bがあり，両者とも堤防で防護されている場合を考えよう。ここに，Iは地区Aより上流の集水域を，IIは地区Aと地区Bとの間の集水域を表わし， Q_1 ， Q_3 はそ

それぞれA,B両地区の堤防が高く、破堤しないと仮定したときの、またはA,B地区の入口におけるピーク流量、 Q_2 は流域ⅡからA,B間に流入するピーク流量で、この区間には破堤すべき堤防がないと考える。このような流域に洪水が起った場合、つぎのような4つの事象が考えられる。



1) いずれの地区にも破堤が起らない、2) 地区Bのみで破堤が起る、3) A,B両地区で破堤が起る、4) 地区Aのみで破堤が起る。これらの各事象あるいはその粗事象の生起確率はつぎのようにして求められる。

図-1

いま、A,B両地区の河道の洪水疏通能力をそれぞれ QB_1 , QB_3 、 Q_1 に対する Q_2 の合流率を c 、さらにAで破堤した場合にBへ伝達されるピーク流量を $k \cdot QB_1$ とすると、上記の4つの事象が起る条件はそれぞれつぎのようになる。

1) いずれも破堤しない条件: $Q_1 \leq QB_1$ かつ $Q_1 + c \cdot Q_2 \leq QB_3$ ----- (1)

2) Bのみで破堤する条件: $Q_1 \leq QB_1$ かつ $Q_1 + c \cdot Q_2 > QB_3$ ----- (2)

3) 両方に破堤する条件: $Q_1 > QB_1$ かつ $k \cdot QB_1 + c \cdot Q_2 > QB_3$ ----- (3)

4) Aのみで破堤する条件: $Q_1 > QB_1$ かつ $k \cdot QB_1 + c \cdot Q_2 \leq QB_3$ ----- (4)

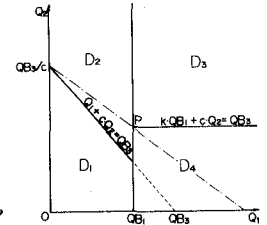


図-2

これらの条件を c, k 共に一定として図示したものが図-2であり、領域 D_1, D_2, D_3, D_4 がそれぞれ、条件式(1), (2), (3), (4)に対応する。そこで、 Q_1 と Q_2 の同時生起確率密度関数を $p(Q_1, Q_2)$ とすると、たとえば、“B地区で破堤が起る”という事象の生起確率を P_{23} とすれば、これはこの事象が上記の排反事象2)と3)の粗事象であるから、つぎのように表現できる。

$$P_{23} = \iint_{D_2+D_3} p(Q_1, Q_2) dQ_1 \cdot dQ_2 \quad \text{----- (5)}$$

(B) 一般的水系について；ある地区を河川堤防で守るといっても実際にはいろいろな形態がある。たとえば、図-3について考えよう。(a)は1つの堤防 E_1 のみによって守られている最も簡単な場合であり、その地区の破堤危険度はその上

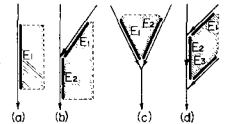


図-3

流に防災地区がなければ1次元解析によって評価できる。(b)または(c)は、2つの異なる河道区間に接した堤防 E_1, E_2 によって守られているから、その地区は、どちらか一方の、あるいは両方の堤防が破堤することによって被害を受け、その危険度はその上流に他の防災地区がない場合は2次元解析によって評価できる。(d)は3つの異なる河道区間に接した堤防 E_1, E_2, E_3 によって守られているため、それらのうちのいずれか1つ、いずれか2つ、あるいはすべてが破堤することによって被害を受ける(この場合の区別できる事象の数は $(\frac{3}{1}) + (\frac{3}{2}) + (\frac{3}{3}) = 7$ となる)。そしてこの地区の危険度は上流に他の防災地区がなくても3次元の解析によって評価されねばならない。

一般の水系は上記のような部分的水系が複雑に組合わされているわけであり、したがって(A)で示した条件式(1)~(4)あるいは確率評価式(5)のような表現を一般的に行なうことは非常に困難であるが、具体的に水系が与えられた場合には可能である。すなわち、こうした研究はcase studyとして行なうことができるわけである。

4. 計算例と考察

ここでは、前項で述べた図-1のような水系モデルに淀川水系内のある小河川の水文資料をあてはめ、A,B両地区の河道改修状況の変化、A地区上流の洪水調節状況の変化、および流域Ⅰ,Ⅱの降雨の相関性が、下流B地区の破堤危険度に及ぼす効果を検討する。ピーク流量の生起確率の評価の方法として、まず年最大日雨量の生起確率分布を求め、それと、日雨量とピーク流量の平均的関係式から決定する方法をとった。流域Ⅰ,Ⅱそれぞれの年最大日雨量 R_1, R_2 (mm)は対数正規分布に従い、それらの標準化変量 x_1, x_2 はつぎのようになった。

$$x_1 = 3.2436 \log_{10} \{(R_1 - 12)/87\} \text{ -----(6)}, \quad x_2 = 3.0193 \log_{10} \{(R_2 - 30)/102\} \text{ -----(7)}$$

また、 R_1 と Q_1 、 R_2 と Q_2 (m/s)の関係式はそれぞれつぎのようである。

$$Q_1 = 7.3R_1 - 620 \text{ (for } R_1 \geq 100), \quad = 1.1R_1 \text{ (for } R_1 < 100) \text{ -----(8)}$$

$$Q_2 = 3.3R_2 - 305 \text{ (for } R_2 \geq 100), \quad = 0.25R_2 \text{ (for } R_2 < 100) \text{ -----(9)}$$

さらに、 x_1 と x_2 の同時生起確率密度関数 $p(x_1, x_2)$ はそれらの相関係数を ρ とすると、よく知られているように、

$$p(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left\{-\frac{(x_1^2 - 2\rho x_1 x_2 + x_2^2)/2(1-\rho^2)}{1-\rho^2}\right\} \text{ -----(10)}$$

と表わせ、(6)、(7)および(8)、(9)式によって、 R_1 と R_2 あるいは Q_1 と Q_2 の同時生起確率密度関数に変換される。その一例を $\rho = 0.5$ として示したものが図-4で、年輪状の線上の数値はその線の外側に標本点が落ちる確率を示している。さらに、ここでは ρ の効果を見ることを

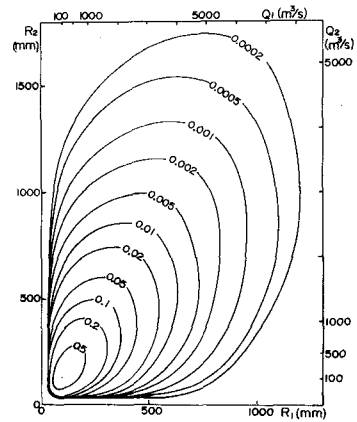


図-4

主目的の一つとしていたため、簡単に、 $c=1$ 、 $k=1$ と仮定する。すると図-2は図-5のようになる。以上に述べた条件のもとで、 $\rho=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$ の各場合に、 QB_1 と QB_3 のいろいろな組合せに対して、(5)式(ただし $\rho=1$ の場合は1次元の周辺分布関数の積分)で表わせるB地区の破壊確率 P_{B3} を計算した結果について検討する。その前にまず、計算しなくてもわかる一般的性質について述べておこう。(i) $0 \leq \rho < 1$ の場合； 図-5において QB_3 を固定し、 QB_1 が

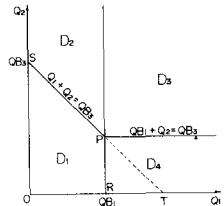


図-5

変化する場合を考えると、 $QB_1 < QB_3$ の場合(R点がT点より左にある場合)、領域($D_2 + D_3$)は QB_1 が大きくなるにつれながるが、 $QB_1 \geq QB_3$ の場合は QB_1 が大きくなっても変化しない。すなわち後者の場合、 P_{B3} は一定となり、その値は $QB_1 = QB_3$ の場合のものである。(ii) $\rho = 1$ の場合； これは Q_1 と Q_2 に1対1の

対応があることを意味し、 $Q_2 = F(Q_1)$ -----(11) と表わせ、一般に $F(Q_1)$ は Q_1 の単調増加し偏関数である。図-5でP点がこの曲線(11)より上にあれば、 P_{B3} はつぎの式で求められる。

$$P_{B3} = \int_{Q_1}^{\infty} p_1(Q_1) dQ_1 = \int_{Q_2}^{\infty} p_2(Q_2) dQ_2 \text{ -----(12).} \quad \text{ここに、} p_1(Q_1), p_2(Q_2) \text{ はそれぞれ } Q_1, Q_2 \text{ の周辺分布密度関数であり、} (a_1, a_2) \text{ は曲線 (11) と線分 } Q_2 = QB_3 - QB_1 \text{ (} Q_1 \geq QB_1 \text{) との交点座標である。この場合、} QB_3 \text{ を固定して } QB_1 \text{ を大きくすると } P_{B3} \text{ は大きくなる。また、} QB_1 \text{ と } QB_3 \text{ を同時に同じだけ大きく(小さく)すると、線分 } Q_2 = QB_3 - QB_1 \text{ は動かないから、} P_{B3} \text{ も変化しない。すなわち、} P_{B3} = \text{const. の線は } QB_1 - QB_3 \text{ 平面の上で } 45^\circ \text{ の傾きをもつ直線となる。一方、P点} \text{ が曲線 (11) より下にあると、} P_{B3} \text{ はつぎのようになる。}$$

$P_{B3} = \int_{b_1}^{\infty} p_1(Q_1) dQ_1 = \int_{b_2}^{\infty} p_2(Q_2) dQ_2 \text{ -----(13).} \quad \text{ここに、} (b_1, b_2) \text{ は曲線 (11) と線分 } Q_1 + Q_2 = QB_3 \text{ (} Q_2 \leq QB_3 \text{) との交点座標である。この場合、} QB_3 \text{ を固定すると } QB_1 \text{ を変化させても } P_{B3} \text{ は一定値をとり、その値はP点} \text{ が曲線 (11) 上にあるときの値に等しい。さて、計算結果であるが、図-6は } QB_1 \text{ と } QB_3 \text{ の関係を } P_{B3} \text{ をパラメータとして示したものであり、} P_{B4} \text{ はA地区の破壊確率すなわち } Q_1 > QB_1 \text{ となる確率を示している。これからつぎのことがいえる。1) } QB_1 \text{ の変化によって } P_{B3} \text{ が変わる領域では、} P_{B3} = \text{const. の線群は右上方に向かっており、} QB_1 \text{ のある値に対する } P_{B3} \text{ の値は} QB_3 \text{ が大きくなるにつれて小さく} \text{ なっている。これは、この場合 } QB_3 \text{ を固定すれば } QB_1 \text{ の増加が} P_{B3} \text{ の増加をもたらし} \text{ ことを意味する。このことをもっと明白に示しているのが図-7で、} QB_1 \text{ と } P_{B3} \text{ の関係を } QB_3 \text{ をパラメータとして示されている。2) } \rho \text{ の効果をさらに明確に見うために、図-6を重ね合したものが図-8である。この図から、} \rho \text{ が大きくなるにつ$

れて、 $P_3 = \text{const.}$ の線は右へ移動する、すなわち QB_1 と QB_3 のある組合せに対して、 P が大きいかほど P_3 が大きくなるということがわかる。3) $QB_1 = \infty$ すなわち上流で破壊が決して起らないと

したときの P_3 の値は図-6.7で QB_1 軸に平行な線群で示されており、それはある特定の QB_3 に対して最大値である。したがって、一般にある水系で各地点の破壊確率を評価する際、それより上流地区の破壊を考慮しなければ(実際このような方法が一般にとられている)、それは過大評価となることは明らかである。たとえば $P=0.5$ として、地区Aでの破壊確率が0.02($QB_1=2150 \text{ m}^3/\text{s}$)で、上流の破壊を考慮しない地区Bの破壊確率を0.01($QB_3=3850 \text{ m}^3/\text{s}$)とすると、上流の破壊を考慮した場合は、図-6.7から0.0041と見極められる。4) さらに、図-6.7から、A地区の上流に設けられた洪水調節池の効果を評価できる。たとえば、

そのような調節池が Q_0 を常に Q_0 だけcutするとすれば、それは QB_1 と QB_3 を共に Q_0 だけ大きくしたと同じことであるからである。たとえば、先の例で $Q_0=500 \text{ m}^3/\text{s}$ とすれば、地区Bの危険度は0.003と見極められる。また、図8からわかるように、点(QB_1, QB_3)および(QB_1+Q_0, QB_3+Q_0)が曲線 $QB_3 = F(QB_1) + QB_1$ (P 点が曲線(II)上にある条件)の下領域にある場合、 P が大きいかほどそのような洪水調節池のB地区に対する効果は小さくなり、とくに $P=1$ の場合は全くない。5) 最後に、このような図によって各地点の危険度を等しくしたり、あるいは重要度に応じた危険度を与えるような河川計画が合理的に行なえるといえよう。

なお、この計算は京都大学大型計算機センター FACOM 230-60 によって行なったことを記しておく。

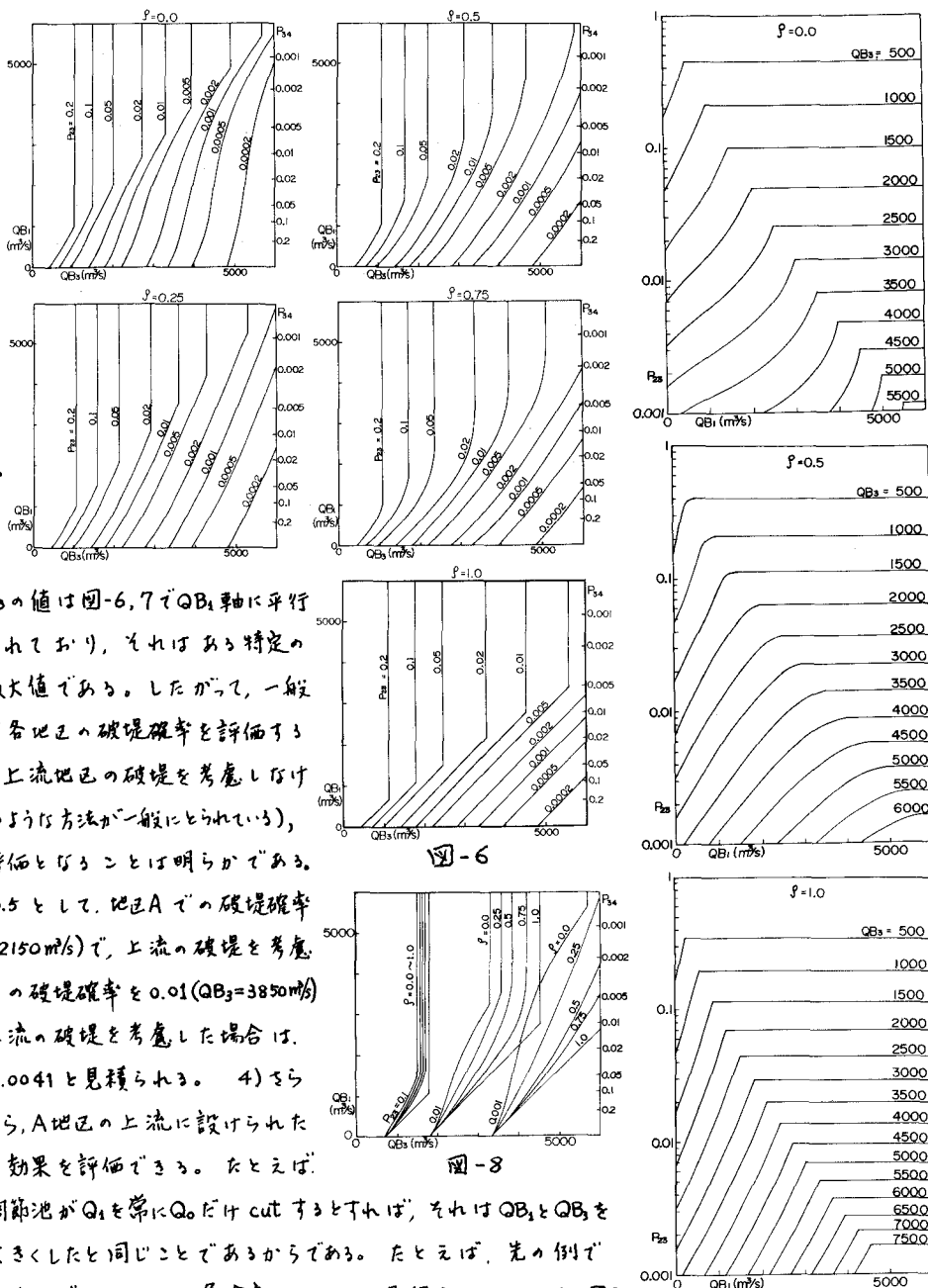


図-6

図-8

図-7