

溃堤引起的洪水淹没和洪水危险图

1. 目的

日本是个自然灾害多发的国家，台风频繁袭击日本列岛，洪水灾害每年发生。加上近年受到地球温暖气候的影响，集中暴雨已经不罕见。一旦大的洪水灾害发生，将对城市居民的生命和财产造成重大损失。日本政府对这方面非常重视，要求对每条有潜在危险性的河流，以及城市排水道流域，进行淹没模拟分析，制作洪水风险图，分发到各个城市和乡村的居民，提供洪水灾害时的避难途径的同时，提高国民的防灾意识。

大城市的共同特征是，人口和财产高度集中，防灾环节很薄弱，一旦降雨量超过河道，排水道的过水能力，可能引起城市河流溃堤，破坏城市公共设施，洪水迅猛流进地下铁，地下街等，造成巨大的灾害。日本国民对 2000 年发生的东海暴雨给名古屋造成的损害记忆犹新。

2. 洪水溃堤模拟方法

2.1 计算模式图

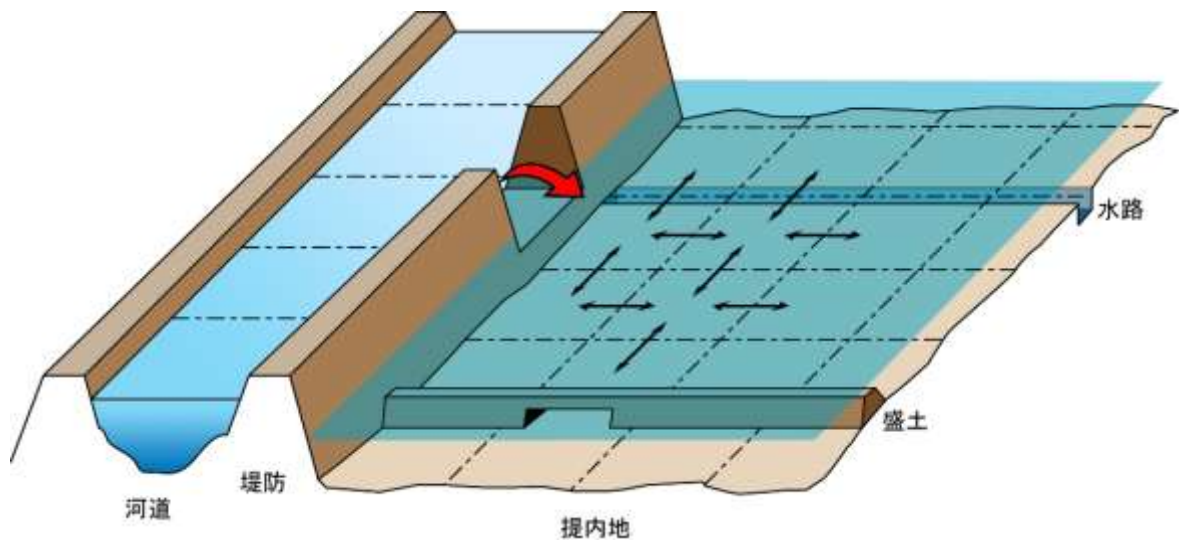


图-1 淹没计算的模式图

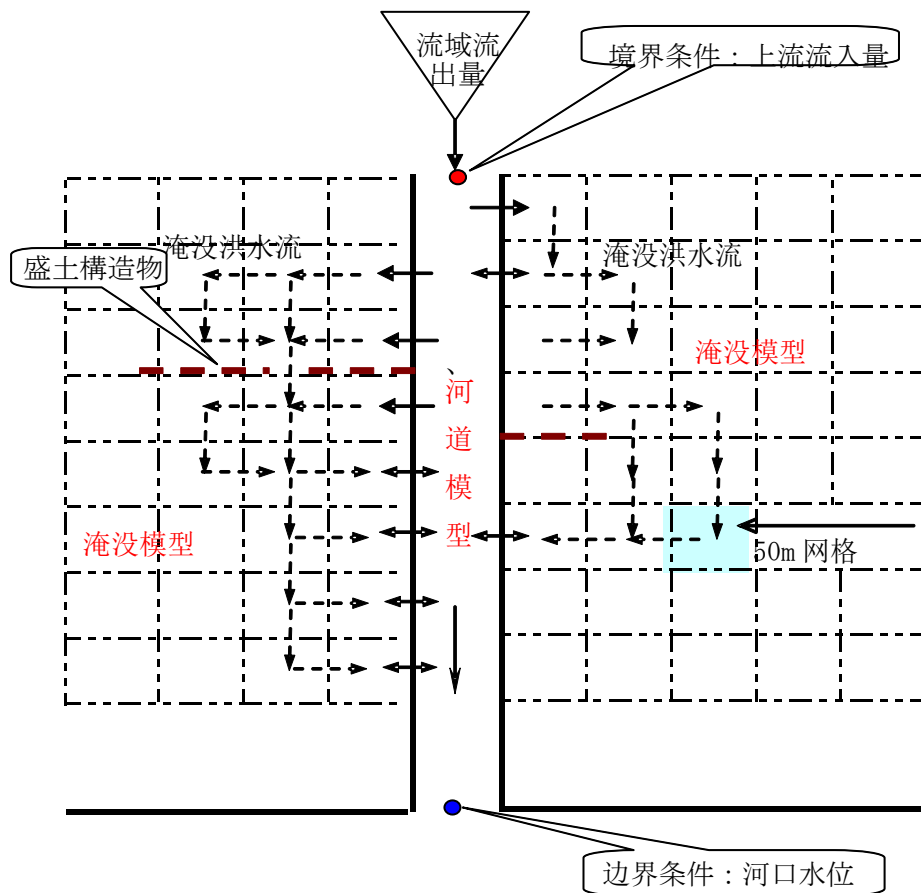


图-2 淹没计算的概念图

【解说】

洪水发生时，河道水位急剧上涨。在河道过水能力小或者堤防脆弱的河段，一旦河道水位超过安全水位，就会发生溃堤。

如果现状堤防薄，小于过水流量所需的宽度（规划堤防宽度），说明现状堤防不具备条件，需要进行 slide down 处理，直到 slide down 以后的堤防宽度满足规划堤防宽度要求（参考图-2）。当河道水位上涨到安全水位，可以认为图-2 中涂色部分的堤防被瞬间冲走。

安全水位 = max(slide down 高度 - 富余高, 高滩高度, 淹没域地形高度)

溃堤底部高度（涂色部分下部高度） = max(高滩高度, 淹没域地形高度)

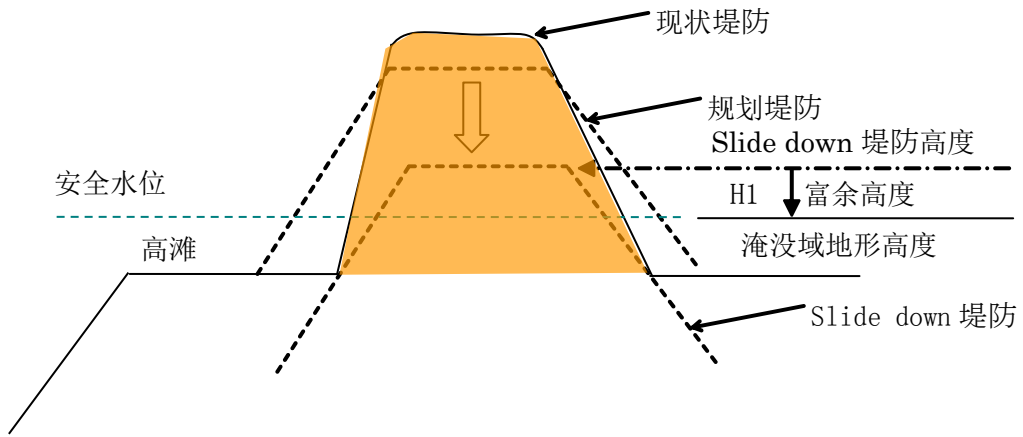


图-3 slide down 概念图

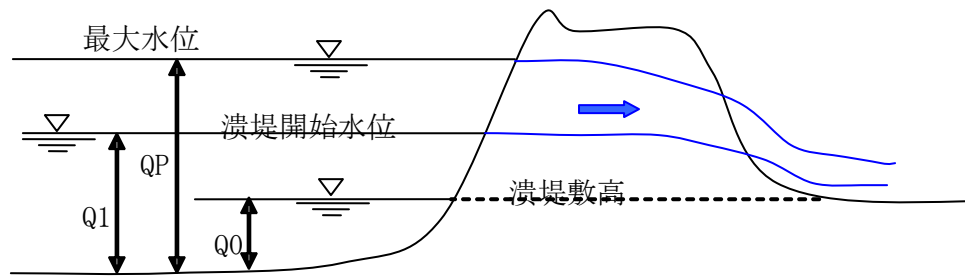


图-4 溃堤概念图

2.2 溃堤流量计算公式

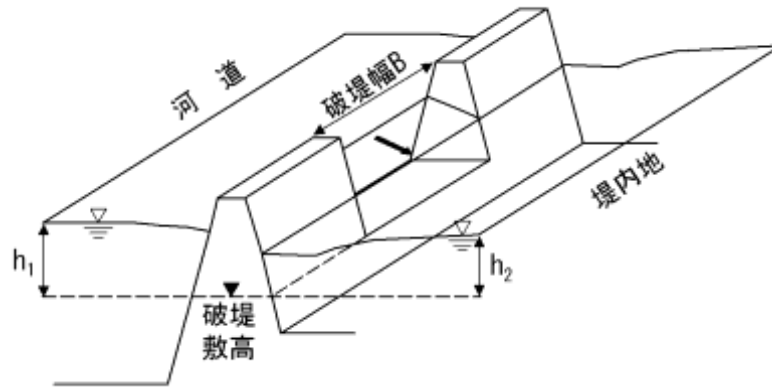


图-5 溃堤流量计算

$$\frac{h_2}{h_1} < \frac{2}{3} \text{ のとき} \quad Q = 0.35 \cdot h_1 \sqrt{2gh_1} B \dots\dots\dots$$

$$\frac{h_2}{h_1} \geq \frac{2}{3} \text{ のとき} \quad Q = 0.91 \cdot h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} B \dots\dots\dots$$

ただし h_1 : 破堤敷高を基準にして高い方の水位

h_2 : 破堤敷高を基準にして低い方の水位

【解说】

溃堤流量采用堰流公式计算，考虑双向流动。当河道水位高于淹没域水位时，水流从河道流向淹没域。淹没域的水位高出河道水位时，水流从淹没域流向河道。

式中： $h_1 = \max(\text{河道水位}, \text{淹没域水位})$ $h_2 = \min(\text{河道水位}, \text{淹没域水位})$

B 是溃堤宽度

溃堤宽度采用日本国内的经验公式进行计算。

➤ 支流汇合处附近 $y = 2.0 \times (\log_{10} x)^{3.8+77}$

➤ 支流汇合处以外 $y = 1.6 \times (\log_{10} x)^{3.8+62}$

式中，x 是河道宽度，y 是溃堤宽度

至于溃堤的时间变化，认为溃堤瞬间的溃堤宽度是上述计算值的 1/2，1 小时后溃堤宽度达到最终值 y，1 小时内的溃堤宽度扩大属于线性变化。

溃堤底部高度在溃堤瞬间就达到最终值。

2.3 土坝漫流计算公式

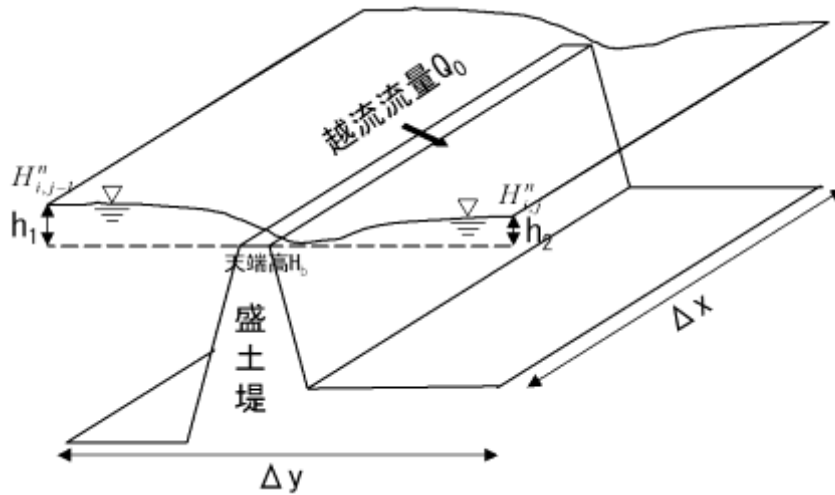


图-6 土坝漫顶流量计算

$H_{i,j-1}^n > H_{i,j}^n$ かつ $H_{i,j-1}^n > H_b$ であれば

$$h_1 = H_{i,j-1}^n - H_b, \quad h_2 = H_{i,j}^n - H_b, \quad L = \Delta x$$

として越流流量 Q_0 は

$$\frac{h_2}{h_1} \leq \frac{2}{3} \text{ のとき } \quad Q_0 = \mu_\alpha L h_1 \sqrt{2gh_1} \dots\dots\dots$$

$$\frac{h_2}{h_1} > \frac{2}{3} \text{ のとき } \quad Q_0 = \mu_\beta L h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \dots\dots\dots$$

ここで、 μ_α 及び μ_β は完全越流及び潜り越流時の越流係数であり、それぞれ 0.35 及び 0.91 とされる。

【解说】

假设淹没域范围内有高出低洼地的土坝（比如道路），当淹没域的洪水水位上涨时，水流漫过土坝流向另一侧。

漫流流量采用堰流公式， $h_1 = \max(\text{土坝左侧, 土坝右侧})$ $h_2 = \min(\text{土坝左侧, 土坝右侧})$

2.4 culvert 过流计算公式

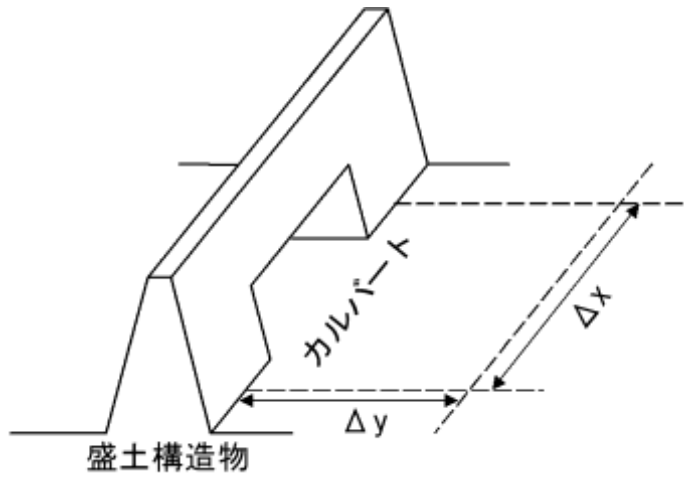


图-7 culvert 过流流量计算

水位の関係		計算式
$h_2 \geq H$		潜り流出 : $Q = 0.75BH \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$
$h_2 < H$	$h_1 \geq 3/2H$	中間流出 : $Q = 0.51BH \sqrt{2gh_1}$
	$h_1 < 3/2H$	自由流出 : $Q = 0.79Bh_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$ $h_1 / h_2 \geq 3/2$ の場合は $h_2 = 2/3h_1$

【解说】

假设土坝（比如道路）下面有通道或者过水闸口，洪水将会经过这个 culvert 从一侧流向另一侧。

流量计算采用堰流公式， $h_1 = \max(\text{culvert 左侧}, \text{culvert 右侧})$

$h_2 = \min(\text{culvert 左侧}, \text{culvert 右侧})$

2.5 河道一维计算

➤ 連續方程式

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + q_* = 0$$

➤ 運動方程式

$$A \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\beta Q^2)}{\partial x} - \frac{\beta Q^2}{A} \frac{\partial A}{\partial x} + gA^2 \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{A}{\rho} T_r = 0$$

式中， A ：过水面積

Q ：流量

x ：流下方向距離

t ：時間

H ：水位

T_r ：作用于河床单位长度的应力

(= 潤边内的平均剪应力 τ_b × 潤边長)

U ：断面平均流速

β ：運動量補正係数

q_* ：流入流出河道的单宽流量

$$\beta = \frac{1}{A} \int \frac{u^2}{U^2} dA$$

$$T_r = \rho g A \frac{Q^2}{\left(\sum \frac{1}{n_i} R_i^{2/3} \cdot A_i\right)^2}$$

【基本方程式離散化】

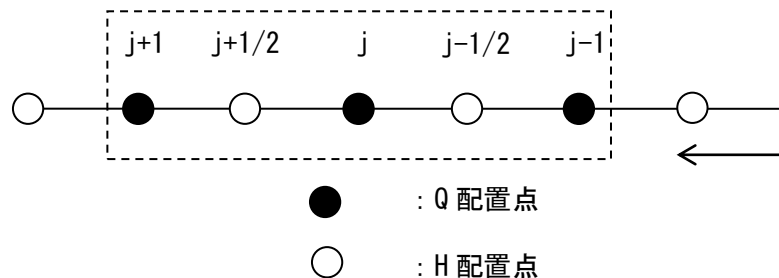


图-8 利用有限体積法計算时的变量配置

➤ 連続方程式

$$\frac{A_{j+1/2}^{n+1} - A_{j+1/2}^n}{\Delta t} + \frac{Q_{j+1}^n - Q_j^n - q_{in\ j}}{\Delta x} = 0$$

➤ 運動方程式

$$A_{j+1/2}^n \frac{Q_j^{n+1} - Q_j^n}{\Delta t} + \frac{\beta_j^n (Q_j^n)^2 - \beta_{j-1}^n (Q_{j-1}^n)^2}{\Delta x} - \beta_j^n \frac{(Q_j^n)^2}{A_j^n} \frac{A_{j+1/2}^n - A_{j-1/2}^n}{\Delta x} +$$

$$g(A_{j+1/2}^n)^2 \frac{H_{j+1/2}^n - H_{j-1/2}^n}{\Delta x} + \frac{g(A_{j+1/2}^n)^2 Q_j^n}{\sum \frac{(R_{k\ j+1/2}^n)^{2/3} A_{k\ j+1/2}^n}{n_{k\ j+1/2}}} Q_j^{n+1} = 0$$

2.6 淹没域二维计算

連続方程式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

運動量方程式

A) x方向運動量方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uM) + \frac{\partial}{\partial y}(vM) = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \tau_{bx}$$

B) y方向運動量方程式

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uN) + \frac{\partial}{\partial y}(vN) = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \tau_{by}$$

ここに, h :水深, H :水位, g :重力加速度, ρ :水の密度,

$M=uh$:x方向流量フラックス, $N=vh$:y方向流量フラックス,

u :x方向流速, v :y方向流速,

【基本方程式離散化】

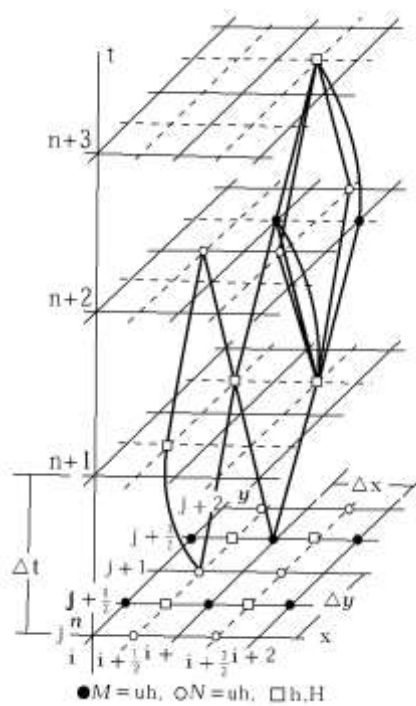


图-9 变量的配置和差分网格

➤ x 方向运动方程式

$$\begin{aligned}
& \frac{M_{i,j+1/2}^{n+2} - M_{i,j+1/2}^n}{2\Delta t} + \left\{ \begin{array}{l} \frac{u_{i,j+1/2}^n M_{i,j+1/2}^n - u_{i-1,j+1/2}^n M_{i-1,j+1/2}^n}{\Delta x} : u_{i,j+1/2}^n \geq 0 \\ \frac{u_{i+1,j+1/2}^n M_{i+1,j+1/2}^n - u_{i,j+1/2}^n M_{i,j+1/2}^n}{\Delta x} : u_{i,j+1/2}^n \leq 0 \end{array} \right. \\
& + \left\{ \begin{array}{l} \frac{\tilde{v}_{i,j+1/2}^n M_{i,j+1/2}^n - \tilde{v}_{i,j-1/2}^n M_{i,j-1/2}^n}{\Delta y} : \tilde{v}_{i,j+1/2}^n \geq 0 \\ \frac{\tilde{v}_{i,j+3/2}^n M_{i,j+3/2}^n - \tilde{v}_{i,j+1/2}^n M_{i,j+1/2}^n}{\Delta y} : \tilde{v}_{i,j+1/2}^n \leq 0 \end{array} \right. \\
& = g \frac{h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1}}{2} \cdot \frac{h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} + z_{b_{i+1/2,j+1/2}} - h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1} + z_{b_{i-1/2,j+1/2}}}{\Delta x} \\
& - \frac{g \left(\frac{n_{i-1/2,j+1/2} + n_{i+1/2,j+1/2}}{2} \right)^2 \frac{M_{i,j+1/2}^{n+2} + M_{i,j+1/2}^n}{h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1}} \sqrt{(u_{i,j+1/2}^n)^2 + (\tilde{v}_{i,j+1/2}^n)^2}}{\left(\frac{h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1}}{2} \right)^{1/3}} \quad .)
\end{aligned}$$

➤ y 方向运动方程式

$$\begin{aligned}
& \frac{N_{i+1/2,j}^{n+2} - N_{i+1/2,j}^n}{2\Delta t} + \left\{ \begin{array}{l} \frac{v_{i+1/2,j}^n N_{i+1/2,j}^n - v_{i+1/2,j-1}^n N_{i+1/2,j-1}^n}{\Delta y} : v_{i+1/2,j}^n \geq 0 \\ \frac{v_{i+1/2,j+1}^n N_{i+1/2,j+1}^n - v_{i+1/2,j}^n N_{i+1/2,j}^n}{\Delta y} : v_{i+1/2,j}^n \leq 0 \end{array} \right. \\
& + \left\{ \begin{array}{l} \frac{\tilde{u}_{i+1/2,j}^n N_{i+1/2,j}^n - \tilde{u}_{i-1/2,j}^n N_{i-1/2,j}^n}{\Delta x} : \tilde{u}_{i+1/2,j}^n \geq 0 \end{array} \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\tilde{u}_{i+3/2,j}^n N_{i+3/2,j}^n - \tilde{u}_{i+1/2,j}^n N_{i+1/2,j}^n}{\Delta x} \quad : \quad \tilde{u}_{i+1/2,j}^n \leq 0 \\
= & g \frac{h_{i+1/2,j-1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1}}{2} \cdot \frac{h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} + z_{b_{i+1/2,j+1/2}} - h_{i+1/2,j-1/2}^{n+1} + z_{b_{i+1/2,j-1/2}}}{\Delta y} \\
- & \frac{g \left(\frac{n_{i+1/2,j-1/2} + n_{i+1/2,j+1/2}}{2} \right)^2 \frac{N_{i+1/2,j}^{n+2} + N_{i+1/2,j}^n}{h_{i+1/2,j-1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1}} \sqrt{\left(v_{i+1/2,j}^n \right)^2 + \left(\tilde{u}_{i+1/2,j}^n \right)^2}}{\left(\frac{h_{i+1/2,j-1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1}}{2} \right)^{1/3}} .
\end{aligned}$$

式中、

$$u_{i,j+1/2}^n = 2M_{i,j+1/2}^n / (h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1}) \dots\dots\dots$$

$$v_{i+1/2,j}^n = 2N_{i+1/2,j}^n / (h_{i+1/2,j-1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1}) \dots\dots\dots$$

$$\tilde{u}_{i+1/2,j}^n = (u_{i,j-1/2}^n + u_{i+1,j-1/2}^n + u_{i,j+1/2}^n + u_{i+1,j+1/2}^n) / 4 \dots\dots\dots$$

$$\tilde{v}_{i,j+1/2}^n = (v_{i-1/2,j}^n + v_{i-1/2,j+1}^n + v_{i+1/2,j}^n + v_{i+1/2,j+1}^n) / 4 \dots\dots\dots$$

➤ 连续方程式

$$\frac{h_{i+1/2,j+1/2}^{n+3} - h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1}}{2\Delta t} + \frac{M_{i+1,j+1/2}^{n+2} - M_{i,j+1/2}^{n+2}}{\Delta x} + \frac{N_{i+1/2,j+1}^{n+2} - N_{i+1/2,j}^{n+2}}{\Delta y} = 0 \dots\dots$$

3. 设定洪水流量

3.1 流域分割



图-10 流域分割

【解说】

根据流域地形分割流域，设定各个流域的集水面积。

3.2 流量计算模式图

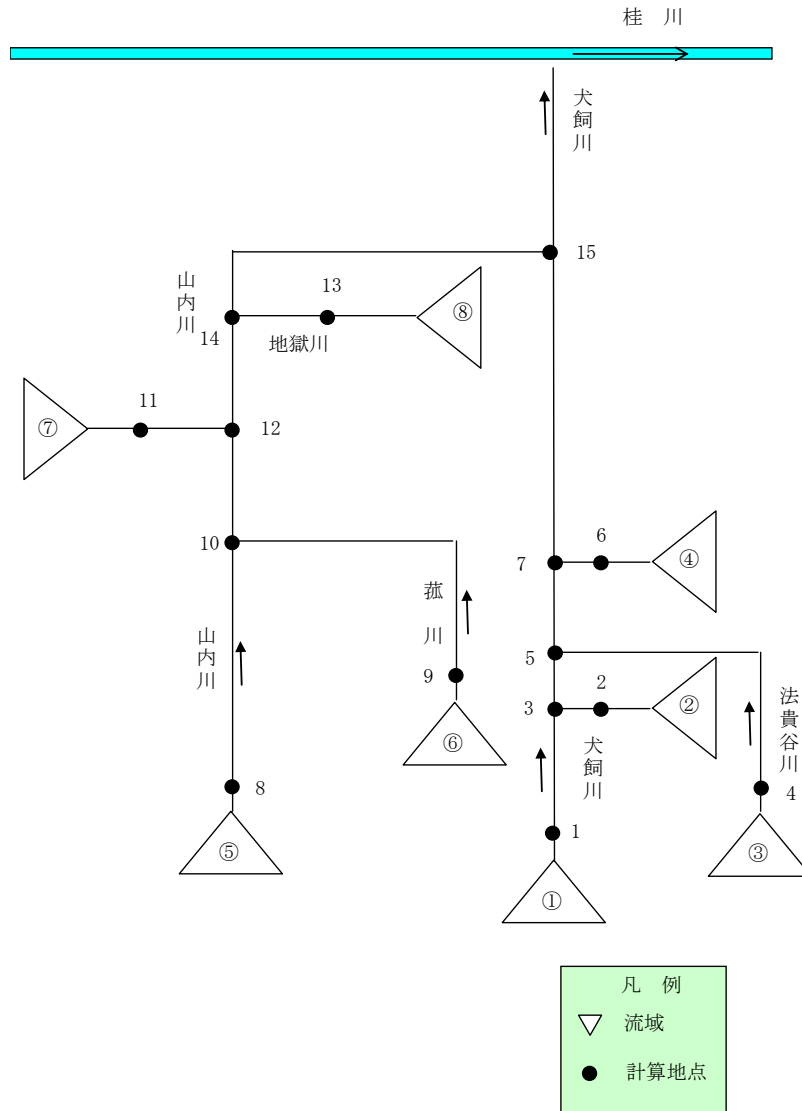


图-11 计算模式图

【解说】

流域流量合成计算时需要模式图。

3.3 流量计算结果

➤ 流量计算方法：貯留関数法

➤ 流量计算结果

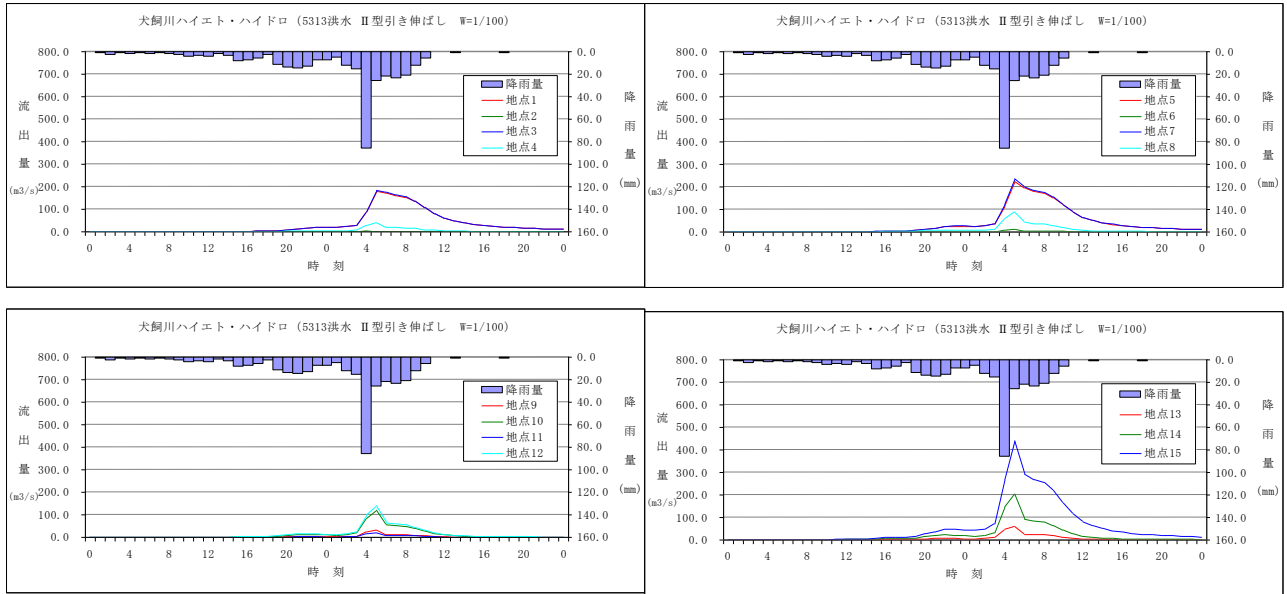


图-12 洪水流量波形

【解说】

上图是第 3.2 节流量计算模型中的计算点的洪水波形。利用这些洪水波形，设定河道溃堤计算的边界条件。

3.4 设定洪水边界条件

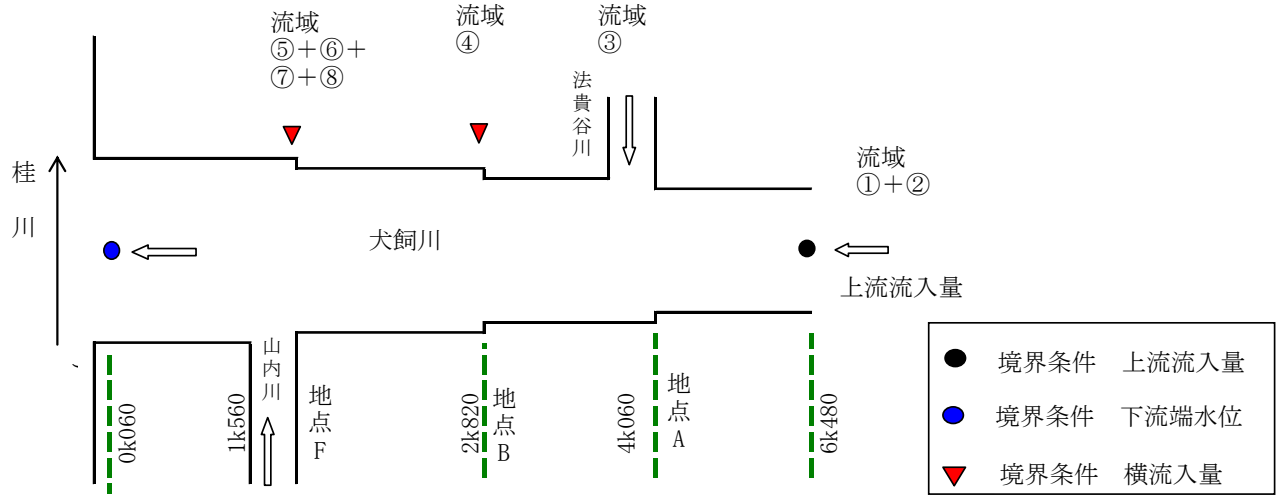
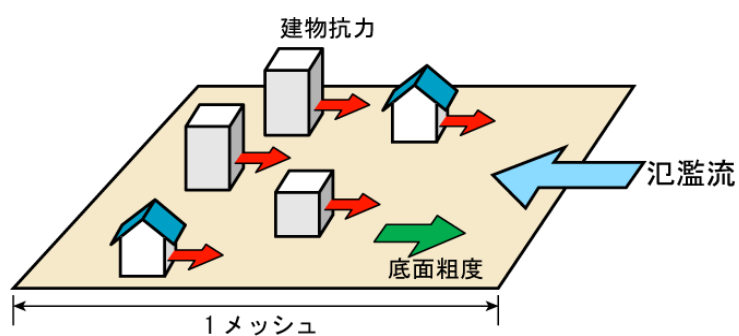


图-13 边界条件模式图

【解说】

把流域①和②叠加后的流量作为主河流上游边界，流域③流量作为支流的上游边界条件，其他的直接投入主河流，投入地点如图所示。由于山内川独立计算，这里没有把它当成支流来计算。

4. 淹没域的粗率设定



$$n^2 = n_0^2 + 0.02 \times \frac{\theta}{100 - \theta} \times h^{4/3} \quad (\theta : \text{建物占有率}, h : \text{水深})$$

$$n_0 = \frac{n_1^2 A_1 + n_2^2 A_2 + n_3^2 A_3}{A_1 + A_2 + A_3}$$

n_1 : 農地粗度 0.06、 n_2 : 道路粗度 0.047、 n_3 : その他粗度 0.05
 A_1 : 農地面積、 A_2 : 道路面積、 A_3 : その他面積

【解说】

对淹没域进行平面二维计算时，需要设定每个网格的粗率。设定粗率时，考虑网格水深，建筑物密度，土地利用情况等因素

5. 洪水危险图

把河道中过水能力小的断面作为溃堤候补地点，对每个溃堤候补地点进行溃堤计算，得出每个溃堤地点产生的淹没范围。如果淹没范围重叠，在重叠区域内取淹没水深大的数值。

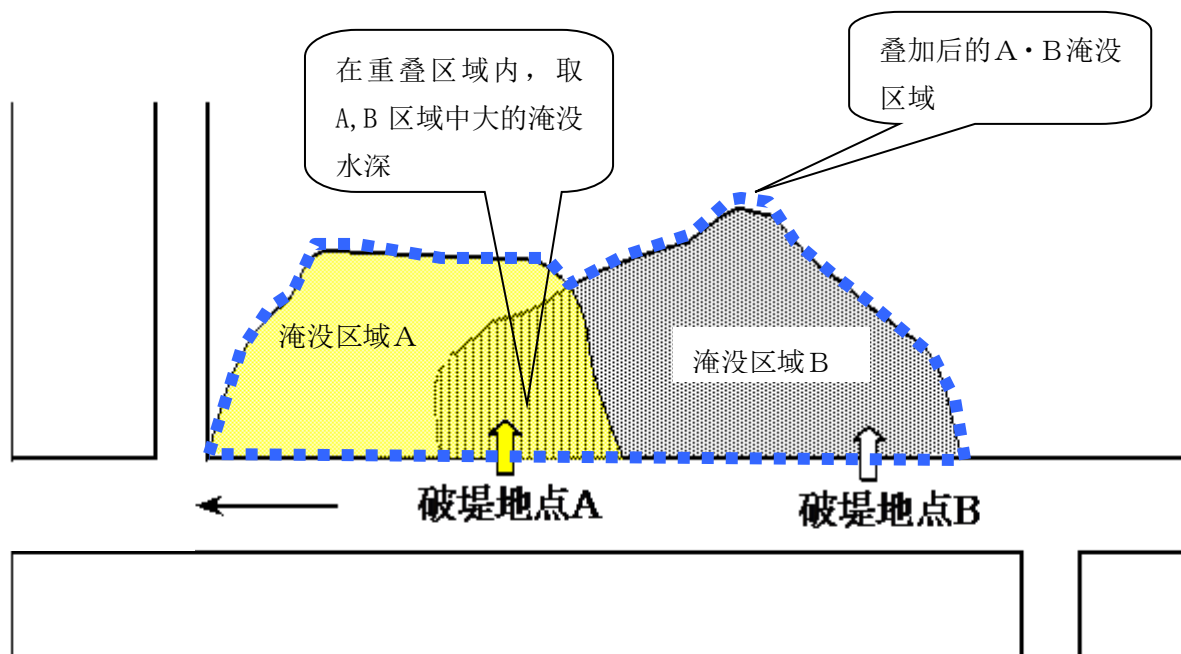


图-15 淹没水深叠加图的做法

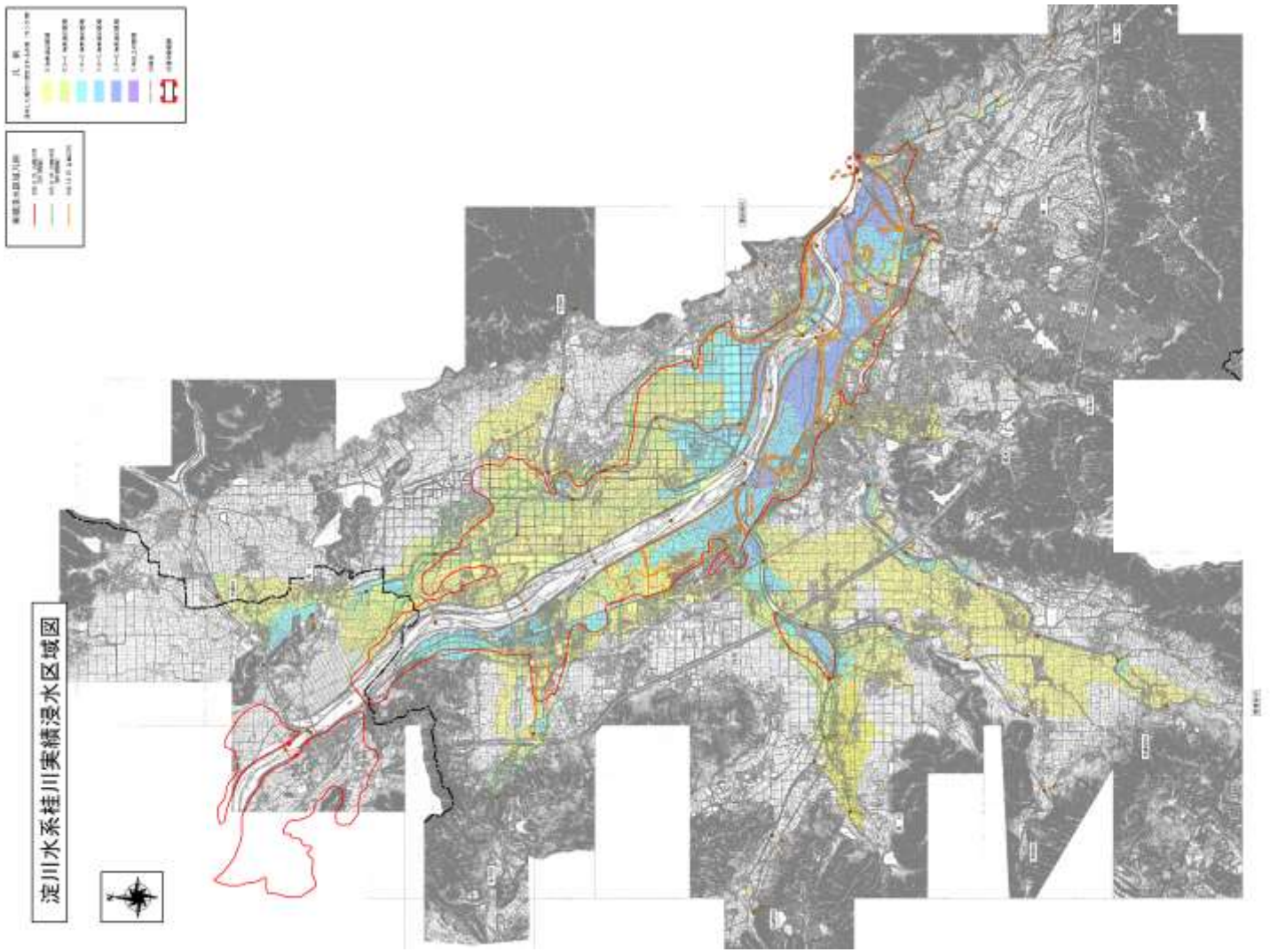


图-16 洪水风险图