

II - 80

都市河川の洪水時における植生の影響 — 精進川を例として —

開発土木研究所 正会員 ○佐藤 耕治
 渡邊 康玄
 坂井 一浩

1. はじめに

近年、自然環境に配慮した河道整備が行われている一方で、河道面積の減少や樹木による流れの影響など治水安全度に関する問題が指摘されている。

平成10年9月16日の低気圧の影響による大雨の累計降雨量は札幌市内でも日雨量140mm以上を記録した。市内を流れる豊平川では高水敷まで水位が上昇し、その他の河川でも一部で浸水するなどの被害が出た。

開発土木研究所内を流れる精進川においても、今回の大雨でヤナギや草本などの影響と思われる水位の上昇が見られた。本研究では今回の精進川での水位を観測し、植生が流れに及ぼした影響について調査した結果を報告するものである。

また、同様の方法を用いて、平成9年8月の美唄川洪水における樹木の影響を検討した鳥谷部ら¹⁾の計算結果との比較を行った。

2. 精進川調査概要

精進川は札幌市南区真駒内を源として、途中ミュンヘン大橋上流付近で豊平川に通ずる放水路と分岐し、豊平区中の島の幌平橋下流付近で豊平川に注いでいる都市河川である。

精進川では近年、河川改修に多自然型工法が採用されており、当所より上流の地点では河道断面も拡幅され植生が繁茂しており、景観や環境に配慮されている。一方、下流の当所内においても写真-1にも見られるようにコンクリートに覆われた河道内に草本やヤナギが繁茂している状況になっている。

本研究での調査箇所はこの下流域にあたる当所内のおよそ200mの区間であり、上流域と同様に非常に密に植生が繁茂している様子が確認できる。

調査内容は洪水時に、3次元ドップラー流速計による流下方向の流速を上流端付近の植生のほとんど生えていない地点で観測し、それと同時に4カ所で水位観測を行った。観測の結果、流速は最大1.0m/secであり、流速及び水深から流量を計算すると2.6m³/secとなった。水面勾配は1/176となっている。

また、洪水後には表-1に示すように河道断面を20m間隔で測量し、併せて30cm四方当たりの植生の本数や径、高さを測定した。測量の結果、河床勾配は1/251、植生の平均的な高さは40cm程度と測定された。



表-1 精進川植生密度

下流端からの距離 m	植生数 m (本)	植生径 d (cm)	植生高さ (m)	植生密度 a (1/cm)
0.0	114	0.2	1.2	0.228
17.5	52	0.3	1.4	0.156
37.5	48	0.5	1.5	0.240
57.5	47	0.2	0.8	0.094
77.5	23	0.5	1.1	0.115
97.5	20	0.4	1.3	0.080
117.5	49	0.2	1.1	0.098
137.5	30	0.6	1.2	0.180
157.5	44	0.5	1.5	0.220
177.5	0	0.0	0.0	0.000

3. 既往の不等流計算手法

一般断面において、樹木や草本などの植生の影響を考慮した不

写真-1 精進川植生繁茂状況

等流計算を行う方法としては、粗度係数を植生の影響も考慮した形で与える方法や、粗度係数とは別に境界混合係数を設けて植生の影響を考慮する手法が考えられる。しかし、前者においては粗度係数に様々な抵抗要因が加わってしまうため、水位の変動や植生の生育状況に応じて粗度係数も刻々と変化し、定量的ではない。一方、後者においても洪水の発生した後に痕跡水位を測定し、その結果から境界混合係数を算定するために、一度洪水が発生しなければ計算することはできない。また、境界混合係数は正確に算定しなければ結果に大きな影響を与える。

精進川に繁茂していた植生は洪水後の調査からかなり密な状態であり、また植生の高さも 40cm 程度と水深の半分近くある部分もあった。このため、植生が単に存在していただいだけの影響を考慮することでは河床の正確な粗度係数を計算することはできない。したがって、植生が振動している場合の流れに与える影響や植生が密な状態でほとんど流れていないと考えられる場合は死水域と仮定するなどして検討する必要がある。

植生が密になっていることから、植生を死水域と仮定した場合の計算を行うことにした。

計算は一般断面の不等流計算手法を用いているが、下流端から 40m 付近で射流が発生し、上流側で著しい水位上昇が見られた。原因としては、植生の高さだけが河床高が上昇したために、左右岸の水深が 10~20cm 程度と浅くなり、中央部の流速が早くなったためと考えられる。このため図-1 のように植生域を除く有効断面について平均河床高を求め、単断面による不等流計算を行い、粗度係数を試行錯誤的に変化させ、実測水位に近い水位となるような計算を行った結果が図-2 である。なお、この時の粗度係数は $n=0.030$ であった。

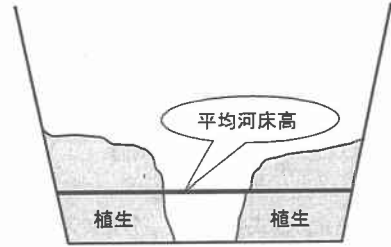


図-1 有効断面の平均河床高

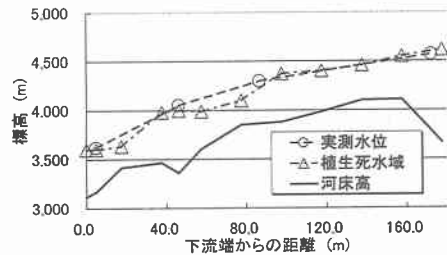


図-2 植生を死水域とみなした場合

4. 植生の影響を考慮した不等流計算手法

まず、既往の一般断面不等流計算の式²⁾に着目し、(1)式において左辺第4項のような植生の影響を考慮した損失項を追加した。^{3), 4)}

$$\frac{dH}{dx} + \frac{d}{dx} \left(\alpha \frac{V^2}{2g} \right) + i_e + \frac{1}{2g} a C_d V^2 = 0 \quad (1) \quad , \quad a = \frac{md}{A_i} \quad (2)$$

(1)式において、 H は水位、 x は河道縦断距離、 α はエネルギー補正係数、 V は流速、 g は重力加速度、 i_e はエネルギー勾配、 a は(2)式で表わされる樹木密度、 C_d は樹木の抗力係数であり、 A_i は樹木を計測した範囲の面積、 m は計測した樹木の本数、 d は計測した樹木の平均樹径である。次に(1)式を図-3のように分割、(3)式のように差分表示し、植生の影響を考慮した不等流計算を行う。ただし、 (i) が下流側断面、 $(i+1)$ が上流側断面である。また、樹木の影響が顕著であるために、各断面において断面を $j(=1, 2, \dots, N)$ 個に分割し、植生の影響を考慮する。

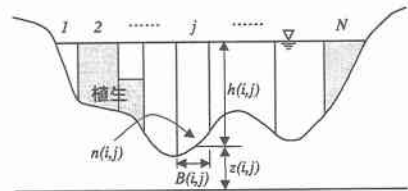


図-3 一般断面の分割

$$\begin{aligned}
 & H_{(i)} + \frac{Q^2 \cdot D_{(i)}}{2g \cdot E_{(i)}^3} + \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{Q^2}{E_{(i)}^2} + \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{C_d}{2gA_t} \cdot F_{(i)} \cdot d_{(i)} \\
 & = H_{(i+1)} + \frac{Q^2 \cdot D_{(i+1)}}{2g \cdot E_{(i+1)}^3} - \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{Q^2}{E_{(i+1)}^2} - \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{C_d}{2gA_t} \cdot F_{(i+1)} \cdot d_{(i+1)} \quad (3)
 \end{aligned}$$

(3)式のうち、 $D_{(i)}$ 、 $E_{(i)}$ 、 $F_{(i)}$ は以下のとおりである。

$$D_{(i)} = \sum_{j=1}^N \left\{ \frac{h_{(i,j)}^3}{n_{(i,j)}^3} \cdot B_{(i,j)} \right\}, \quad E_{(i)} = \sum_{j=1}^N \left\{ \frac{h_{(i,j)}^{5/3}}{n_{(i,j)}} \cdot B_{(i,j)} \right\}, \quad F_{(i)} = \sum_{j=1}^N \left\{ \frac{m_{(i,j)} Q_{(i,j)}^2}{B_{(i,j)}^2 h_{(i,j)}^2} \right\}$$

(3)式において、各断面における分割断面の分担流量 $Q_{(i,j)}$ を求めるにあたり、各断面ではエネルギー勾配 i_e が等しいことから、次の(4)、(5)式を連立して解くことにより、分担流量 $Q_{(i,j)}$ を求めることができる。

$$i_{e(i)} = \frac{Q_{(i,j)}^2}{B_{(i,j)}^2} \cdot G_{(i,j)} \quad (4), \quad \sum_{j=1}^N Q_{(i,j)} = Q \quad (5) \quad G_{(i,j)} = \frac{n_{(i,j)}^2}{h_{(i,j)}^{10/3}} + \frac{C_d}{2g} \cdot \frac{a_{(i,j)}}{h_{(i,j)}^2}$$

上記の連立方程式を解くと、分担流量 $Q_{(i,j)}$ は以下のようになる。

$$Q_{(i,j)} = \frac{QB_{(i,j)}}{\sqrt{G_{(i,j)}} \sum_{j=1}^N \frac{B_{(i,j)}}{\sqrt{G_{(i,j)}}}} \quad (6)$$

5. 再現計算結果

洪水流を妨げる要因は河床の形状や植生の存在など様々である。

(1)式において、左辺第4項を考慮せず、植生の影響をすべて粗度係数に含ませた形（すなわち、今まで通常行われている不等流計算）で実測水位を再現した結果、粗度係数は $n=0.110$ となった。この実測水位の算定にあたっては試行錯誤的に計算結果が実測水位に適合するよう粗度係数を見積もる必要がある。

一方、今回の手法を用いて植生が繁茂している状態での不等流計算を行った結果は図-4に示すとおりであり、粗度係数は $n=0.030$ となった。したがって、植生の粗度として粗度係数に換算すると $n=0.080$ という結果が得られる。このように試行錯誤的に行わなくても、求めることが可能である。

植生が振動している場合については、植生が繁茂している段階で植生以外の粗度係数が $n=0.030$ と小さいため、精進川に関しては植生の振動の影響はほとんどないものと考えられる。

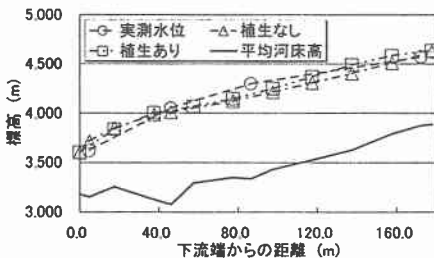


図-4 粗度係数算出時の再現水位

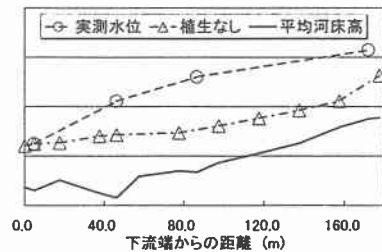


図-5 植生がないと仮定した予測水位

6. 植生の影響による水位上昇

次に、植生が繁茂していなかった場合についても同様な検討を行った。

図-5において、下流端から40m付近までを着目したとき、実測水位は上昇しているが、植生がないと仮定した場合については水位上昇が見られず、植生がある場合と最大で50cm程度の水位差が生じ、植生の影響

が極めて大きいことがわかる。

精進川の調査結果から、草本は樹木に比べると植生高や径などが遥かに小さく細いため植生密度の値も小さくなり、一見すると、とても流下断面を大きく阻害するほどの影響を与えるとは考えにくい。しかし、今回調査した精進川は流量もピーク時でも $3 \text{ m}^3/\text{sec}$ を下回る程度であり、河道断面も小さい河川であったために草本が樹木並みの影響を及ぼしたのではないかと考えられる。

7. 美唄川における不等流計算

次にもう少し規模の大きな河川で樹林が影響して水位の上昇が発生したと考えられる事例を考えることとする。

平成9年8月に発生した美唄川の洪水について、本研究で行った植生の影響を考慮した不等流計算と鳥谷部ら¹⁾の境界混合係数を用いた計算結果との比較を行い、整合性について検討を行った。

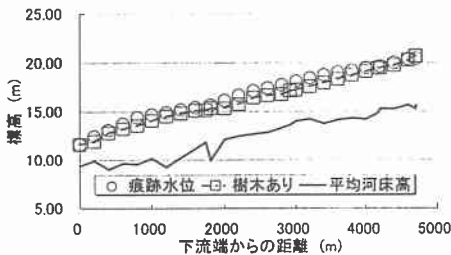


図-6 不等流計算結果の再現水位

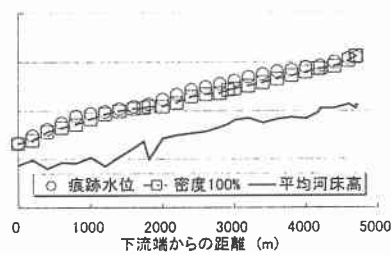


図-7 樹木の影響を考慮した再現水位

図-6は精進川と同様に樹木の影響を考慮した不等流計算を行った結果である。美唄川の樹木に関するデータが幾分不足していたため、全体的には水位が若干低くなった。このとき用いた粗度係数は低水路で $n=0.035$ 、高水敷で $n=0.040$ である。しかし、渡邊⁹⁾の研究によると『樹木群を含む河道の平面流況計算において水深方向平均流速を用いる場合、樹木群内と樹木群外では水深方向の流速分布が異なることから、この影響を取り込む必要がある。』としている。そこで、樹木群の存在する場合の粗度係数の変化量を表わす(7)式を示す。

$$\frac{\tilde{n}'_m}{\tilde{n}'_{m0}} = \left(\frac{2}{\kappa} \sqrt{C_b} + 1 \right) \frac{\left\{ \sqrt{\frac{2}{ahC_d} + \frac{\kappa}{3ahC_d} C_0 [1 + \exp(2\chi)]} \right\}}{\left\{ \sqrt{\frac{2}{ahC_d} - \frac{\kappa}{3ahC_d} C_0 [1 - \exp(2\chi)]} \right\}} \quad (7)$$

(7)式において、 $\frac{\tilde{n}'_m}{\tilde{n}'_{m0}}$:粗度係数の変化量、 κ :カルマン定数、 C_b :河床の抵抗係数、である。ただし、 C_0 、

χ については以下のとおりである。

$$C_0 = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha}, \quad \chi = \left(\frac{72ahC_d}{\kappa^2} \right)^{1/4}$$

$$\alpha = \frac{2\kappa}{3a^2h^2C_d^2} C_b [1 + 2\exp(2\chi) + \exp(4\chi)], \quad \gamma = \frac{12C_b}{\kappa ahC_d}$$

$$\beta = \left(\frac{32C_b^2}{a^3h^3C_d^3} \right)^{1/2} [1 + \exp(2\chi)] - \left(\frac{8\kappa^2}{9a^3h^3C_d^3} \right)^{1/4} [1 - \exp(2\chi)]$$

(7)式から、粗度係数の変化量を算定し、図-7のような再現水位の結果が得られ、上流側で痕跡水位より若干高くなっている傾向が見られるが、おおむね再現できているものと思われる。

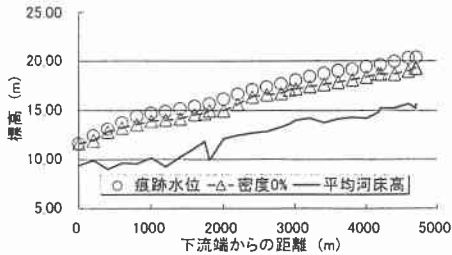


図-8 樹木がないと仮定した予測水位

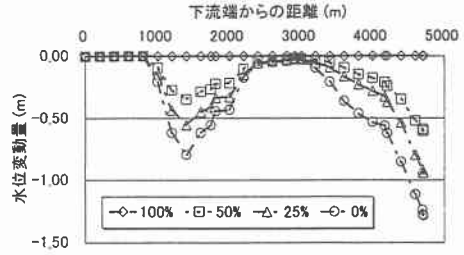


図-9 樹木密度別水位変動量

図-8では河道内の樹木が全くないものと仮定したときの予測水位について同様に不等流計算を行った結果である。縦断的に見ても、おおよそ1m程度の水位低下が確認できることがわかる。

さらに、図-9では現況河道での予測水位を0mとして、樹木密度の違いによる水位変動量を計算した。1500m付近で水位変動量が増大しているが、これは低水路に樹木があったためであり、全体的には樹木密度が低くなるに従って、水位変動量が大きくなっていることがわかる。

8. 複断面における樹木の影響を考慮した不等流計算

河川管理において、治水安全度を確保するために樹木を伐採する場合における樹木伐採方法としては縦断的に一定の密度で伐採する方法と、同一の樹木密度でも縦断的に全て伐採する箇所と全く伐採しない箇所を設ける方法とが考えられる。また、後者の場合には伐採する区間と伐採しない区間のパターンによって様々な場合が考えられる。ここでは伐採の方法によって、どの程度の水位の変化が生じるのかを検討した。

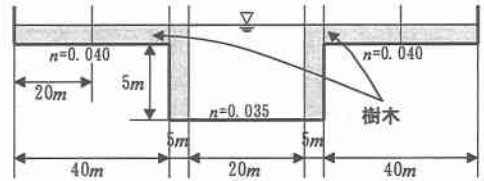


図-10 想定した一般断面形状図

そこで、美唄川をモデルとして、低水路と高水敷で構成される単純な複断面を想定して、前述したような条件について縦断方向に水位がどのように変化するかを計算した。

図-10に想定した横断面図を示す。この断面において河道延長10km、河床勾配1/1000、流量484m³/sec、粗度係数は低水路が0.035、高水敷が0.040、高水敷の高さは低水路より5m高い。樹木は樹径0.05mが10m²に10本で、低水路左右岸に5mと高水敷に繁茂していると想定する。なお、下流端水位には等流水深5.5mを与えている。

樹木を伐採する前と低水路の樹木のみ伐採した場合の不等流計算の結果では10km地点で伐採前の水位が20.03mに対し、低水路伐採後は17.63mとなり、低水路の樹木を伐採しただけでも2.5m程の水位低下が見られ、低水路に繁茂している樹木の影響が大きいことがわかる。

次に低水路の樹木は伐採し、さらに高水敷の樹木を前述したような様々な方法で、全体的に樹木密度が50%となるように伐採した場合について計算を行った。このときの水位の変化を図-11に示す。10km地点での水位は高水敷の樹木伐採前での17.63mに比べ、17.22mとなり、40cm程低下している。

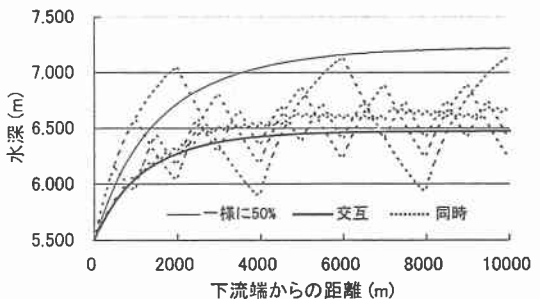


図-11 樹木の配置を縦断的に変化させた場合

一方、樹木密度50%を満たす方法としての伐採する区間と伐採しない区間を交互に設定した場合についても、図-11に示した。それぞれ縦

断方向に左右岸同時に伐採した場合と交互に伐採した場合の低水路における水深を示した。図-11から、左右岸同時に伐採を行った場合（点線）、樹木の有無の区間距離が大きくなるに連れて、水深の変動が激しくなる。それに比べて、左右岸交互に樹木の伐採を行った場合（実線）は、それ程水深に変化が認められない。これは1次元の不等流計算ではどちらか一方に樹木が固まっている場合と同様な計算結果となってしまう、各断面における横断方向の流れの影響が考慮されないためと考えられる。しかし、実際には縦断方向にはジグザグな流れが発生し、結果として水位も縦断的に徐々に上昇していくのではないかと考えられる。

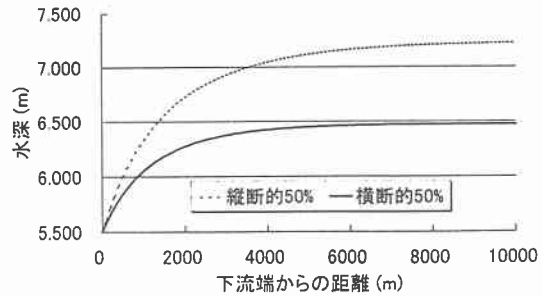


図-12 樹木の配置を横断的に変化させた場合

図-12は、図-11と同様に縦断的に樹木密度50%を満たす方法として、高水敷を横断的に樹木がある区間とない区間に分割した場合の水深を示したものである。縦断的に一様の密度で伐採した場合の水位が17.22mであったのに対し、横断的に50%伐採した場合の水位は16.47mと、70cm程水位が低下した。

どちらの場合からも、一様の密度で樹木を伐採するよりは部分的に樹木を全て伐採するほうが水位の低下を期待する上では効果的であると考えられる。

9. おわりに

今回の検討の結果、精進川のような都市小河川では草本類も流れに対して大きな抵抗として働き、維持管理を必要とすることが判明した。精進川における洪水時の水位計算で用いた植生の影響を考慮した不等流計算では実際に洪水が発生していなくとも、河道内の植生の繁茂状況を調査することにより、洪水時の水位をおおよそ把握することができる方法として役立つと思われる。

また、美唄川のような河道内樹木が影響して洪水時に著しい水位上昇を招くと予測されたときに、河川環境の保全が求められている現状では、全て伐採してしまうことには強い抵抗があり、どの程度の伐採を行えば計画高水位以下の水位を保つことができるのか、といった検討が非常に重要になってきている。

今後は横断方向の流れも考慮した計算を行うことで、より再現性のある不等流計算が行えるのではないかと考えられる。

参考文献

- 1) 鳥谷部寿人、馬場仁志、藤田隆保：美唄川平成9年8月洪水について、第41回北海道開発局技術研究発表会発表概要集(2)、p. 39～44、1998
- 2) 北海道開発局土木試験所河川研究室：現場のための水理学、北海道開発局土木試験所月報、No. 411～415、1987
- 3) 建設省河川局治水課：河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン（案）、1994
- 4) 石川忠晴、田中昌宏：開水路流中のかん木の抵抗特性に関する研究、第31回水理講演会論文集、p. 329～333、1987
- 5) 渡邊康玄：沖積地河川の河道維持に関する研究、北海道開発局開発土木研究所報告、第105号、1994