

40. 河川断面の狭窄形状の違いによる 河川水位低減効果の分析

早澤 華怜^{1*}・小石 一字²・小山 直紀³・山田 正³

¹中央大学大学院理工学研究科都市人間環境学専攻（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）

²株式会社大林組技術研究所（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640）

³中央大学研究開発機構（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）

* E-mail: a17.3h4j@g.chuo-u.ac.jp

狭窄部における水面形の解明は水理学上基本的かつ実用的な問題としても重要な意義を持つため、理論的、実験的及び数値的に様々な研究がされてきた。一方で狭窄部では、日本各地で背水現象による洪水氾濫が生じている。気候変動による気象現象の激甚化・頻発化に伴う洪水外力の増大に備え、今後は流域全体での多層的・複合的な洪水対策が必要とされている。したがって河道流下能力を高め、狭窄部における浸水被害を軽減する新たな対策の提案を目指し、本研究では狭窄部を持つ河道を対象として狭窄形状が異なる場合の河川水位低減効果を定量的に分析した。平面二次元不定流計算による数値計算の結果、急縮よりも漸縮の河道の方が狭窄部上流側で水位が低くなることが明らかとなり河道形状の違いによる水低減効果を示した。

Key Words : *unsteady flow, steady flow, back water, flood flow*

1. 研究背景・目的

起伏に富む日本の地形上、山間地に限らず平野部においても河川は蛇行や河道断面の拡大縮小を繰り返す複雑な河道断面形状を有する。狭窄部においては、洪水流量が河道の通水能力を上回るために狭窄部上流側で水位が上昇する背水現象が生じる。狭窄部を持つ河川における水面形の解明は水理学上基本的な内容であり、さらに河川計画の策定や河川管理などの実用的な問題としても重要な意義を持つため、理論的、実験的及び数値的に様々な研究がされてきた^{例え(1)~(5)}。例えば、石原・志方¹⁾は川幅が急激に縮小する水路において一次元運動量解析により遷移水面形の形状を明らかにした。石川²⁾は越流を伴う流れの水面形を一次元漸変流的に解析し、越流の有無による水位の違いを明らかにした。福岡・竹村⁴⁾は山地狭隘部における非定常平面二次元解析により洪水流量ハイドログラフの変形・伝播機構を明らかにした。また、山田・小石⁵⁾は一次元不定流の数値計算により急縮部における水面形の形成過程及びその河道貯留効果を明らかにした。このように水理学的

あるいは工学的な視点から、狭窄形状を持つ河道における水位上昇の要因の分析や水面形の解明が進められている。

他方、豪雨時には狭窄部において背水現象による洪水被害が各地で発生している。例えば、1961年6月には梅雨前線の停滞と台風6号の接近に伴う豪雨により天竜川の上流にある鷲流峡呑口部（長野県飯田市松尾・下久堅地区）での河道急縮により鷲流峡上流部で水位の堰上げが生じ、堤防決壊による甚大な浸水被害が生じた。近年では2019年東日本台風により、千曲川の立ヶ花狭窄部上流の穂保地区（長野県長野市）において越水・破堤し、大規模な洪水氾濫が生じた。これらの被害を受け国土交通省は再度災害を防止するための様々な治水対策を講じている^{例え(6)}。狭窄部における洪水氾濫に対するハード面での治水対策として、河道の流下能力を高めるための河道掘削や引堤、堤防の嵩上げなどが考えられる。洪水後の治水対策として例えば、天竜川鷲流峡の松尾・下久堅地区では河道掘削などを実施したほか、千曲川においては立ヶ花狭窄部において河道掘削の治水対策が講じられている。流下面積を増加させ洪

水の流下能力を高める治水対策としてよく用いられる河道掘削は、施工が容易で経済性に優れるという利点がある一方で河川環境への影響や流下能力確保の限界があることが欠点である。また、引堤は大規模な流下断面の確保が可能であり、河川環境への影響が少ないという利点がある。欠点としては用地買収を伴い地域に与える影響が大きいこと、河川横断工作物等の改築が必要になることが挙げられる⁷⁾。今後、気候変動による気象現象の激甚化・頻発化に伴う洪水外力の増大に備えるため、ハード対策の加速化を図るとともに、一つの対策に頼らない流域全体における多層的・複合的な洪水対策が必要とされている。狭窄部においても利点と欠点を考慮し一つの対策のみならず様々な方法を組み合わせた対策が必要だと考えられる。したがって河道流下能力を高め、狭窄部における越水・破堤を伴う大規模浸水被害を軽減するための新たな対策の提案を目指し、本研究では河道の狭窄形状に注目し狭窄部を持つ河道を対象として、狭窄形状が異なる場合の水面形を数値計算により求め、河道狭窄形状の違いによる河川水位低減効果を定量的に捉えることを目的とする。

2. 基本式と数値計算条件

(1) 基本式

平面二次元不定流の基礎式は、以下に示す連続式及び x, y 方向の運動方程式である。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial(z_b + h)}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial(z_b + h)}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

ただし、

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}$$

ここに、 $h[m]$:水深、 $u, v[m/s]$: x, y 方向の流速、 $M, N[m^2/s]$: x, y 方向の流量フラックス($M = uh$,

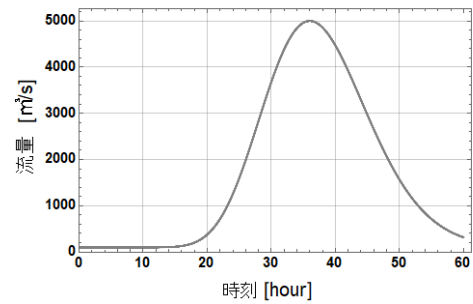


図-1 上流端境界条件に与えた流量ヒドログラフ

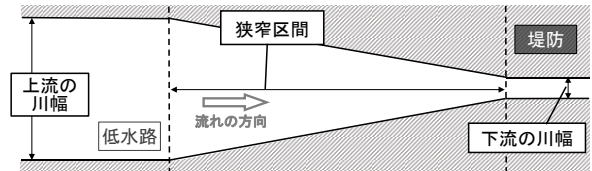


図-2 設定した河道平面図(単断面)

$N = vh$), $z_b[m]$:地盤の標高、 $\tau_{bx}, \tau_{by}[N/m^2]$: x, y 方向の底面せん断応力、 $n[s/m^{1/3}]$:粗度係数、 $g[m/s^2]$:重力加速度、 $\varepsilon[m^2/s]$:水平方向渦動粘性係数である。

(2) 数値計算条件・諸元

河道断面は、単断面を設定し計算を行った。時間差分間隔 $\Delta t = 0.1s$ 、空間差分間隔 $\Delta x = \Delta y = 10m$ の矩形格子とし、staggered格子を用いて計算した。離散化には有限差分法を用い、時間差分は前進差分、空間差分は中心差分を用いた。ただし、移流項に関しては風上差分を用いた。上流端における境界条件は定常的に一定流量を与える場合と(4)式で表される流量ヒドログラフ(図-1)を与える場合でそれぞれ計算した。

$$Q(t) = Q_b + \left(Q_p - Q_b \right) \left(\frac{t}{t_p} \exp \left(1 - \frac{t}{t_p} \right) \right)^c \quad (4)$$

ここに、 t :時刻であり、基底流量 $Q_b = 100m^3/s$ 、ピーク流量 $Q_p = 5000m^3/s$ 、ピーク時刻 $t_p = 36$ 時間(計算開始からの時刻)、ヒドログラフのピーク指数 $c = 10$ として計算した。数値計算の条件は、日本の中山間地の河川を参考に河床勾配 $1/1000$ ⁸⁾、粗度係数は 0.03 ⁹⁾とした。計算延長距離は $25km$ とし、流下距離は狭窄終端断面を基準として流下方向を正として表した。図-2は本計算で設定した単断面の河道の平面図である。河道幅の縮小率が背水現象に与える影響に着目するために、上流の川幅を $1000m$ とし、下流の川幅は $100m$ から $1000m$ まで $100m$ ずつ変化させて計算した。また、狭窄区間の長さが背水現象に与える影響に着目するために狭窄区間の長さ

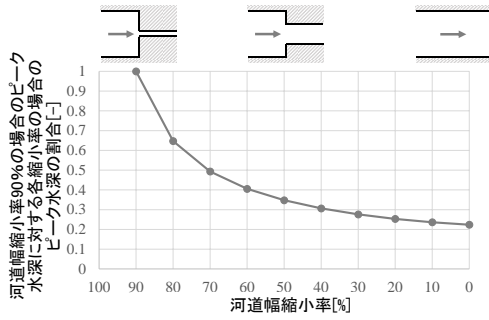


図-3 河道幅縮小率が異なる場合の狭窄部上流における水深の比較
〔河道幅縮小率が小さいほど狭窄部上流側における水深は小さい〕

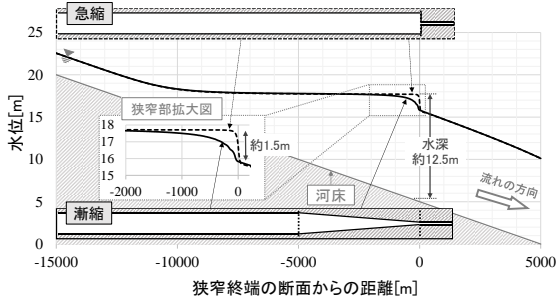


図-4 上流端境界条件に一定の流量を与えた場合の定常時の水路中央における縦断的な水面形
〔漸縮の方が狭窄部上流における水位が低い〕

を0m（急縮）と5000m（漸縮）として計算した。

3. 河道幅縮小率の違いによる水位低減効果

上流の川幅に対する下流の川幅の違いが狭窄部上流の水位に与える影響を分析するために下流の川幅を100mから1000mまで100mずつ変化させて計算を行った。河道幅縮小率 ε は下記の(5)式で定義する。

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{BN}{BW}\right) \times 100 \quad (5)$$

ここに、 ε [%]：河道幅縮小率，BW[m]：上流の川幅，BN[m]：下流の川幅である。

図-3は狭窄部上流の-500m地点における河道幅縮小率を変えた場合の水深の比較を示す。横軸は河道幅縮小率，縦軸は河道幅縮小率を変えた場合の水深の割合であり，水深の割合は，本計算の最大河道幅縮小率である90%の場合の狭窄部上流におけるピーク水深に対する各河道幅縮小率で計算した場合の狭窄部上流におけるピーク水深の割合とした。この割合が小さいほど河道幅縮小率90%の場合のピーク水深と比較し，背水による水深の増加が小さかったということである。図-3より河道幅縮小率が小さいほど狭窄部上流における水深の割合は非線形的に小さくなる。すなわち下流の河道幅が大きいほど狭窄部上

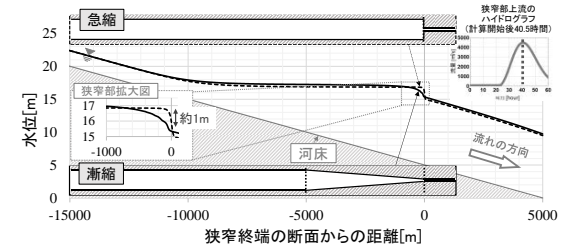
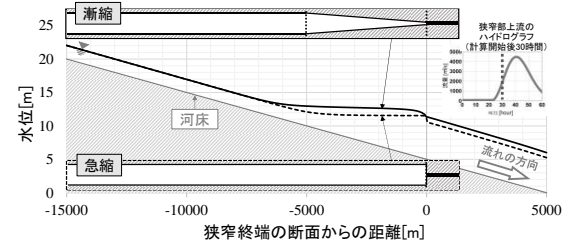
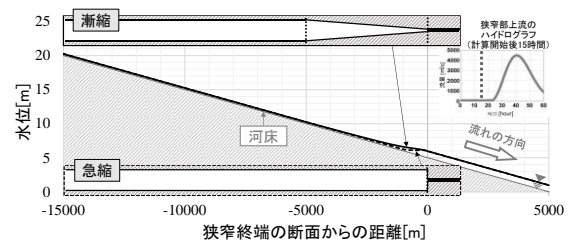


図-5 上流端境界条件に流量ハイドログラムを与えた場合の水路中央における縦断的な水面形の時間変化

流における背水による水深の上昇量は小さくなり，狭窄部上流における水位低減効果がある。

4. 狭窄区間の長さの違いによる水位低減効果

(1) 上流端境界条件に一定の流量を与え，定常状態まで計算した場合

図-4は，上流端境界条件に一定流量（5000m³/s）を与え定常状態まで計算した場合の急縮（狭窄区間：0m）と漸縮（狭窄区間：5000m）の河道における定常時の河道中央での縦断的な水位である。越水に関係するため実現象では堤防付近の水位が重要であるが，本検討における定常時の狭窄部上流での横断面内での水位差は数ミリ程度であったため河道中央での水位を用いた。破線が急縮，実線が漸縮の水位である。狭窄部上流における水位を見ると狭窄部上流の約2kmの範囲において漸縮よりも急縮の方が最大1.5m程度水位が高い。急縮における狭窄部上流の水深が約12.5mであるのに対し，1.5mの水深の差

は急縮の場合の狭窄部上流側における水深の約12%であり、河道狭窄長さの違いによる水位低減効果は大きいと言える。

(2) 上流端境界条件に流量ハイドログラフを与えて計算した場合

図-5は上流端境界条件に流量ハイドログラフを与えた場合の急縮（狭窄区間：0m）と漸縮（狭窄区間：5000m）の水路における水路中央での縦断的な水位の時間変化を示す。上から、初期状態（基底流量に対する定常状態）、水位上昇時（ハイドログラフの立ち上がり）、狭窄部上流における水位ピーク時、水位逓減時（ハイドログラフの逓減）における縦断的な水位である。破線が急縮、実線が漸縮の水位である。水位上昇時すなわちハイドログラフの立ち上がりでは急縮の場合と比較し漸縮の方が早く水位が上昇する。狭窄部上流側におけるピーク時の水位は狭窄部上流の約1kmの範囲において急縮の方が漸縮よりも1m程度水位が高くなっている。これは上流端境界条件に一定の流量を与え定常状態まで計算した場合と同様の結果であり、上流端流量に流量ハイドログラフを与えた場合も河道狭窄長さの違いによって狭窄部上流側における水位に差が生じることが明らかとなった。

(3) 同程度の水位低下をもたらす河道形状の比較

図-4の結果から、狭窄部上流において急縮と漸縮で約1.5mの水位差を生じたことから、河道狭窄形状が急縮のままの程度の河道幅縮小率であれば狭窄部上流で1.5mの水深低下が生じるかを計算した。急縮で河道狭窄率90%の場合のピーク水深は約11.34mであるのに対し1.5m水深が低下したとすると水深は9.84mであり、河道狭窄率90%の場合を1とするとその割合は約0.868である。水深の低下割合が0.868である時の河道幅縮小率は図-3より約87%である。すなわち下流の川幅を100mから130mに拡幅すれば狭窄部上流側で約1.5mの水位低下が見込まれる。本研究で設定した河道と計算条件では、下流の川幅を下流端まで30m拡幅する場合と急縮の河道を5kmかけて漸縮させる場合は狭窄部上流における同程度の水位低減効果を持つと考えられる。

5. まとめと今後の展望

本研究では河道幅縮小率や狭窄長さが背水現象に与える影響を平面二次元不定流の数値計算より明ら

かにした。得られた知見を以下に示す。

- 1) 河道幅縮小率変えて計算した結果、河道幅縮小率が小さい方が背水現象による狭窄部上流における水深の増加量が少ない。
- 2) 上流端境界条件に一定流量を与え、河道の狭窄長さを変えて計算した結果、定常状態で急縮よりも漸縮の方が狭窄部上流で水位が低くなる。
- 3) 上流端境界条件にハイドログラフを与えた場合はピーク水位の時に狭窄部上流における水位は急縮に比べ漸縮の方が水位が低くなる。
- 4) 本計算で設定した河道においては下流の川幅を30m拡幅する場合と急縮の河道を5kmかけて漸縮させる場合は狭窄部上流において同程度の水位低減効果を持つと考えられる。

今後は数値計算の結果と実験との比較検証を行い、狭窄長さの違いが狭窄部上流の水位に与える影響について検討していきたい。

参考文献

- 1) 石原藤次郎，志方俊之：開水路急縮部の水理的性状に関する研究，土木学会論文集，第138号，p.30-38，1967.
- 2) 石川忠晴：堤防越水をとまなう直線矩形断面河道の水面形，第26回水理講演会論文集，pp.417-422，1982.
- 3) 高木隆一，佐藤直良，山田正：幅の変化する水路（狭窄，拡幅）を流れる不等流の水面形解析解，第60回土木学会関東支部年次研究発表会講演概要集，Vol.13，pp.131-132，1986.
- 4) 竹村吉晴，福岡捷二：洪水流の流量と水位ハイドログラフの変形・伝播に及ぼす河道構造の影響—山間狭隘河道を対象として，土木学会論文集B1（水工学），Vol.68，No.1，35-54，2012.
- 5) 小石一字，山田正：急縮部を有する河川における水位の縦断特性と河道貯留効果，土木学会論文集G（環境），vol.73，No.5，I_331-I_337，2017.
- 6) 国土交通省水管理・国土保全局：緊急治水対策プロジェクト，https://www.mlit.go.jp/river/kasen/kinkyu_pro/index.html（2020年7月現在）
- 7) 揖保川流域委員会：第2回治水・利水・自然環境分科会，治水・利水・自然環境に関する説明資料，2003.1.
- 8) 国土交通省河川局：信濃川水系河川整備基本方針，pp.3，2008.6.
- 9) 日野幹雄：明解水理学，pp.142，丸善出版，1983. 第31刷，2017.