

数値実験による急流河川霞堤の 機能に関する一考察

NUMERICAL EXPERIMENTAL STUDY ON FLOOD CONTROL FUNCTION OF DISCONTINUOUS LEVEE SYSTEM FOR STEEP RIVERS

妹尾 泰史¹・石川 忠晴²・小島 崇³

Hiroshi SENOO, Tadaharu ISHIKAWA and Takashi KOJIMA

¹正会員 工修 (株)東京建設コンサルタント(〒170-0004 東京都豊島区北大塚1丁目15番6号)

²フェロー会員 工博 東京工業大学 名誉教授(〒251-0035 神奈川県藤沢市片瀬海岸2丁目4番15号)

³正会員 工博 (株)東京建設コンサルタント(〒170-0004 東京都豊島区北大塚1丁目15番6号).

A series of numerical experiments was carried out to evaluate flood control function of a discontinuous levee system which was a variety of *kasumi-levees* not having levee overlaps. Experimental conditions were determined based on the dimensions of Midai River levee system which was constructed before the 16th century. The result clarified that the studied levee system of only one meter in height efficiently restricted the transverse inundation expansion up to the flood discharge of 1/30 (/year) in occurrence probability. Response of inundation expansion to levee dimension change was studied using a wide range sensitivity analysis, and the flood control strategy of those days was discussed.

Key Words : flood control strategy, premodern age, inundation, numerical experiment

1. はじめに

気候変動に伴う水害激甚化の懸念から堤防嵩上げ等の河道改修が望まれているが¹⁾, 予算の制約等により改修速度には限界があり, また堤幅の十分でない嵩上げは破堤水害を却って激化する恐れもある. そこで河道容量を超える出水に対しては, ある程度の溢水氾濫を想定した上で水害を軽減する方法を検討しておく必要があると考えられる. その際, 近世以前に各地に建設されていた不連続堤による氾濫水制御が参考になる可能性がある^{2) 3)}.

不連続堤の代表的パターンは漏斗状に開口した堤防を重複配置したもので, 霞堤と総称されている. 霞堤の機能は, 増水期に洪水流を上流向きに遊水させ流勢を低減し, 減水期に堤内水を速やかに河道還元すると説明されている⁴⁾. しかし大熊⁵⁾によれば, 霞堤という括りは近代に定着したものであり, 急流河川では氾濫水の河道還元, 緩流河川では遊水による下流の負担軽減というように, 水利機能は一様でなかった. また黒部川を対象とした妹尾らの研究⁶⁾では, 堤防開口部の配置は旧河道を臨時の放水路として活用するためのものであったと考えられた. そこで, 霞堤というステレオタイプから離れ, 個々の河

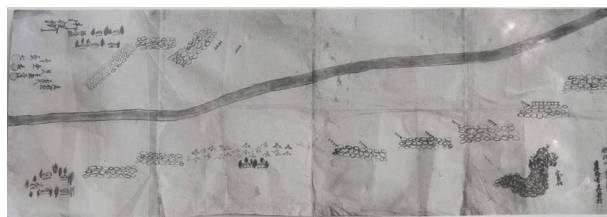


図-1 荒川の不連続堤防 (明治3年: 福島市史編纂室所蔵)⁷⁾

川に設置された不連続堤の水利効果を研究することにより近世以前の氾濫水制御の理解が深まる可能性があると考えられる.

本研究では, 釜無川右支川の御勅使川(河道平均勾配1/50)や阿武隈川左支川の荒川(河道平均勾配1/33)のような超急流河川に設置された不連続堤の水利機能について, 浅水流方程式に基づく数値シミュレーションにより検討する. 明治時代初期の絵図にある荒川の不連続堤の配置を図-1に示す⁷⁾. 常水路からある程度の距離を保ち, 重複部分をほとんど持たないように短い堤防が配置されており, 急流河川であるにも関わらず, 上流部氾濫水の河道還元に寄与するようには思えない. そこで本研究では, 堤防配置が詳細に調査されている御勅使川霞堤の形状を単純化した水路について一連の数値実験を行い, このようなタイプの不連続堤の水利機能を考察した.

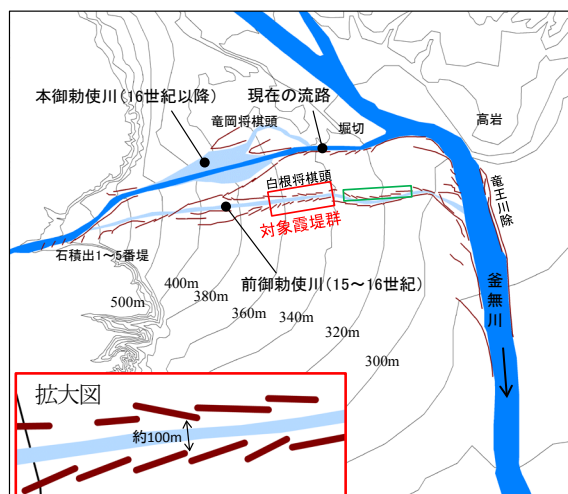


図-2 御勅使川の堤防群^{9), 11)}

2. 研究対象

御勅使川は巨摩山地を水源とし東流する流域面積75km²の山岳河川で、甲府盆地の西側に半径4km、頂角120°、勾配1/50の扇状地を形成し釜無川に合流する(図-2)。16世紀以前の流路は前御勅使川の位置にあったが、武田信玄の時代に本御勅使川筋に付け替えられた。すなわち扇頂部に5基の石積出、中流部に将棋頭を設置し、釜無川合流地点を高岩に移動することにより流勢を殺ぎ、竜王川除(いわゆる信玄堤)による導流で甲府盆地の水害を減少させたと言われている。これらの治水施設の効果については多くの調査研究がある^{9), 10), 11)}。

前御勅使川中流部の兩岸(赤四角部)および下流部の北岸(緑四角部)には、荒川と同様に、重複部を持たない短い不連続堤が常水路から距離をおいて斜めに配置されている。これらの不連続堤の設計者はどのような水理機能を期待していたのか、それが本研究の主題である。誤解のないように付け加えるが、本研究の目的は実在した御勅使川堤防の治水効果を定量評価することではなく、図-2をもとにモデル化した“重複部を持たない斜めの不連続堤防”の基本的な水理特性を数値実験により検討し、当時の河川技術について考察するものである。

3. モデル化および計算条件

(1) 水路形状

図-2の赤四角部における堤防諸元をもとに、重複部を持たない不連続堤防群を図-3に示すようにモデル化した。

中央部に幅35m、深さ1.3mの常水路を設けた。河岸から幅 B の距離をおいて上流側に漏斗状に開いた堤防を間隔150mで規則的に配置した。堤防長を l 、片側開口角を θ 、河床勾配を I とする。堤防高は南アルプス市調査資料¹¹⁾に基づき1mとした。数値実験における θ 、 l 、 I および B の値

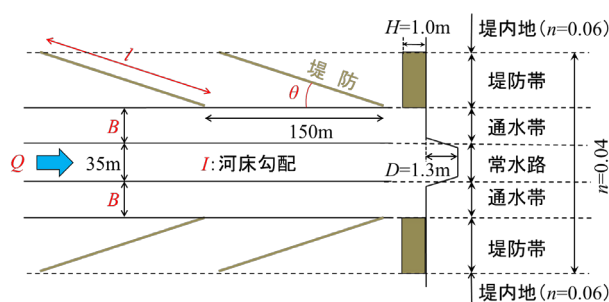


図-3 不連続堤防のモデル化

表-1 堤防諸元

変数	計算条件
θ	10°, <u>18°</u> , 30°
l (m)	0 (堤防なし), 100, <u>150</u>
I	<u>1/50</u> , 1/80, 1/100
B (m)	0, <u>30</u>
Q (m ³ /s)	200, <u>300</u> , 400, 500

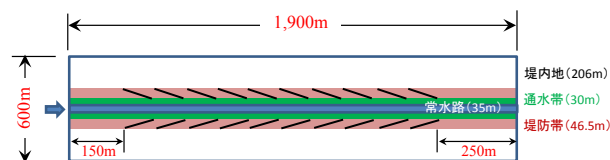


図-4 標準形状における堤防配置

を表-1に示す。このうち下線を付した値は図-2に赤四角部で示した前御勅使川中流部における平均的な値で、その組み合わせを標準形状とした。以下では中央水路を「常水路」、堤防のある区域を「堤防帯」、常水路と堤防帯の間を「通水帯」、堤防帯外部を「堤内地」という。

実験水路長は1,900m、水路幅は600mとし、水路側岸は不透過直立壁とした。標準計算条件における水路平面形を図-4に示す。150mの助走区間の後に10基の漏斗状堤防を設置している。一定流量を常水路上流端に流入させ、下流端は自由流出条件とし、定常状態に達した後の流況を調べた。後に示すように、堤防を設置しなかった場合を除き、第4基堤防までに準等流状態(同じ流況パターンの繰り返し)が達成された。

(2) 流量条件

前御勅使川の流量資料はほとんどないため実験流量 Q を直接的に決めることはできない。そこで釜無川の流量資料を手掛かりに以下のように実験流量を定めた。

図-5に示す富士川水系流量配分図(生起確率1/100)では御勅使川の計画流量は750m³/s、御勅使川合流点より18km下流にある釜無川清水端の計画流量は8,800 m³/sとされている。一方、清水端における年最大流量の確率プロットは図-6のように与えられている。そこで御勂使川と清水端における流量比を750/8,800=0.085と考えると、御勂使川流量200 m³/s, 300 m³/s, 400 m³/s, 500 m³/sの生起確率はそれぞれ約1/3.3, 1/8, 1/14, 1/30となる。

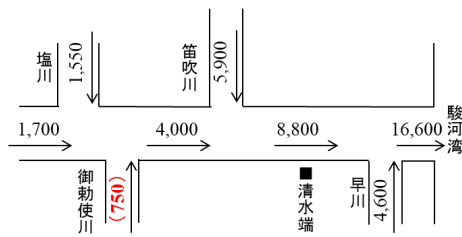


図-5 富士川水系計画高水量配分図

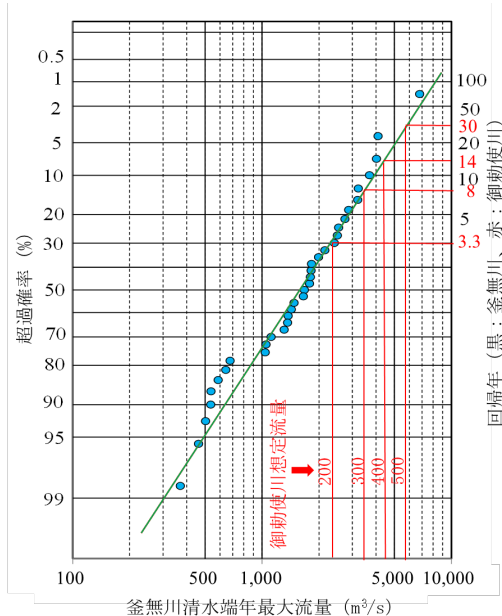


図-6 年最大流量の確率プロット

近世およびそれ以前の我が国の水害発生頻度に関する一般的資料は存在しないが、筆者らが過去に研究した17世紀初頭の旭川(岡山県)と19世紀初頭の黒部川(富山県)の例では、無害流量は前者で約1/6、後者で約1/7と推定されている。したがって近世以前の治水安全度はせいぜい1/10であったと考えられる。そこで実験流量 Q は、300 m^3/s を基準として表-1の下段に示すように200 m^3/s から500 m^3/s の範囲で変化させた。

なお計算には、三角形非構造格子浅水流モデルにおいて堤防越流量を本間公式¹²⁾で表現したモデル^{13), 14)}を用いた。三角形格子は、水路外縁線、常水路河岸および堤防線を基準としてソフトウェアANSYSにより生成した。

4. 計算結果および考察

(1) 標準形状での流れ構造

標準形状での各流量における水深分布を図-7(a)-(d)に示す。また比較のために無堤の場合の計算結果を(e), (f)に示す。 $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ に達すると助走区間での氾濫幅が堤防外縁を越えるが、2基目で堤防帯に収まり以降は同パターンの繰り返し(準等流状態)になっている。 $Q = 400 \text{ m}^3/\text{s}$ までは堤防沿いの水深は堤防高1mより小さいが、 $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ では堤防内縁でわずかに1mを越えている。しかし越流水深は数cmであり、堤防が破損する恐れは

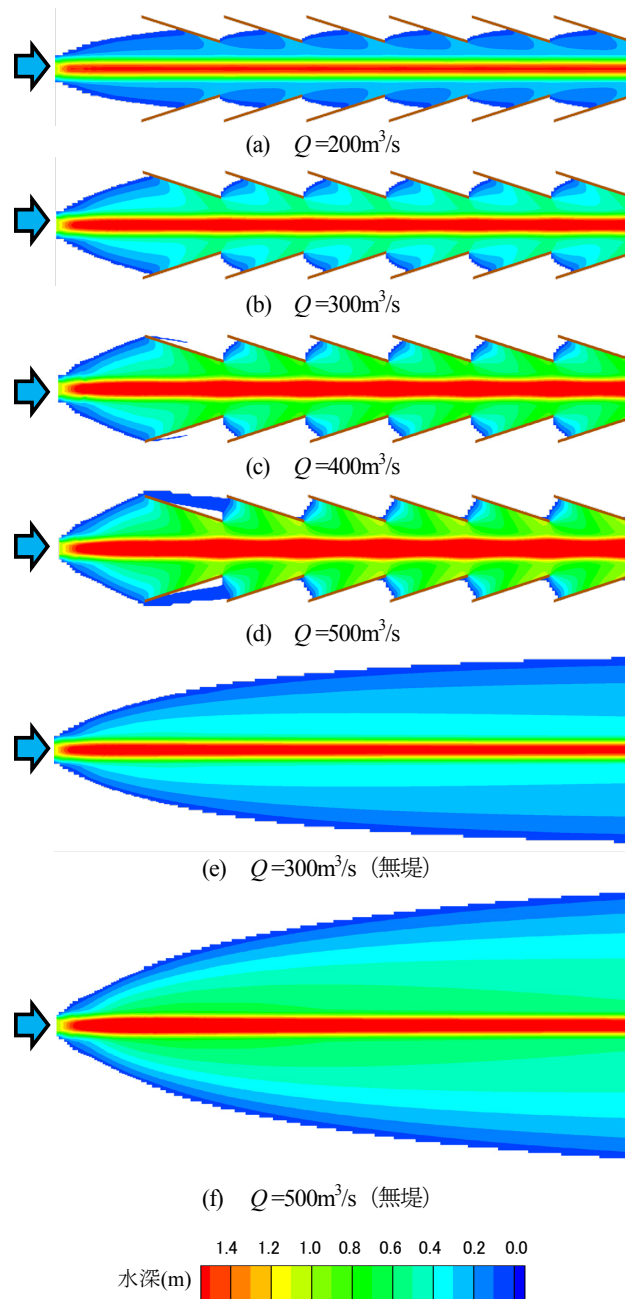


図-7 標準形状における計算結果(水深分布)

小さいと思われる。前述した流量発生確率は絶対的なものではないが、仮にそれを基準として考えれば、前御勅使川不連続堤の流下能力は、1/8程度の発生確率の出水に対して十分な余裕を持ち、1/30程度の出水に対しても氾濫流制御能力を維持していた可能性がある。

無堤の場合、氾濫流は放物線的に広がり、拡大率は流量とともに増大する。超急流河川(本計算では $F=1/50$)では氾濫水の流速が極めて大きくなり、堤内地に甚大な災害をもたらすとともに扇状地上で流路が変遷する恐れがあると考えられる。不連続堤のある場合の同流量に対する計算結果(b)および(d)では、 $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ で、堤防内縁付近でわずかに越水するものの、堤防帯と通水帯で水深が概ね均一化され、氾濫域を効果的に狭めている。

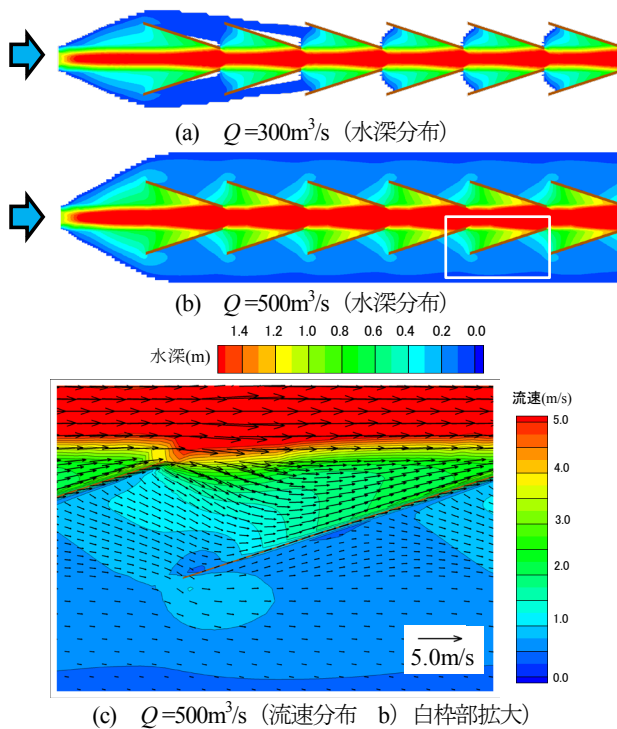


図-8 通水帯のない場合の計算結果

(2) 堤防諸元の変化による流況の変化

a) 通水帯の有無による流況の変化

通水帯がない場合($B=0$)の水深分布を、 $Q=300\text{m}^3/\text{s}$ と $Q=500\text{m}^3/\text{s}$ の場合について図-8(a), (b)に示す。同流量の図-7(b), (d)と比較して、堤内地への氾濫が広がるとともに、堤防内縁側で塞き上げにより水深が堤防高(1m)を越えている。図-8(c)に準等流となった5基目の堤防付近の流速分布を示す。堤防内縁付近の流速は2m/sを越えており、堤防被災の恐れが高くなる。このことから、堤防をセットバックして常水路の間に通水帯を設ける理由は、堤防自体の安全性を高めることにあると思われる。

b) 開口角による流況の変化

図-9に開口角を標準形状より小さくした場合($\theta=10^\circ$)と大きくした場合($\theta=30^\circ$)の水深分布の変化を示す。対応する標準形状の計算結果は図-7(b)および図-7(d)である。 $\theta=10^\circ$ の場合は漏斗状の空間が狭まるので、 $Q=500\text{m}^3/\text{s}$ では堤防領域から外側へ氾濫するようになる。

一方、 $\theta=30^\circ$ の場合は空間に余裕があるので外部への氾濫は生じないが、堤防内端付近が水衝部となって水深が増加し、越水が生じている。

図-10に $Q=500\text{m}^3/\text{s}$ における開口角 $\theta=10^\circ$ 、 18° (標準)および 30° での堤防沿いの水深および流速(絶対値)の分布を比較する。前者における水深1mは堤防天端位置を表している。後者における2m/sは福岡ら¹⁵⁾が提示した堤防法面張芝の限界流速であり、目安として示している。

$\theta=10^\circ$ の場合(青線)は、堤防線が大局的流向に近いので水位上昇は小さく越水は生じないが、流速は大きく堤防長の約半分で2m/sを越えている。 $\theta=30^\circ$ の場合は堤防による流れの塞き上げ効果が大きく堤防内縁付近で越流す

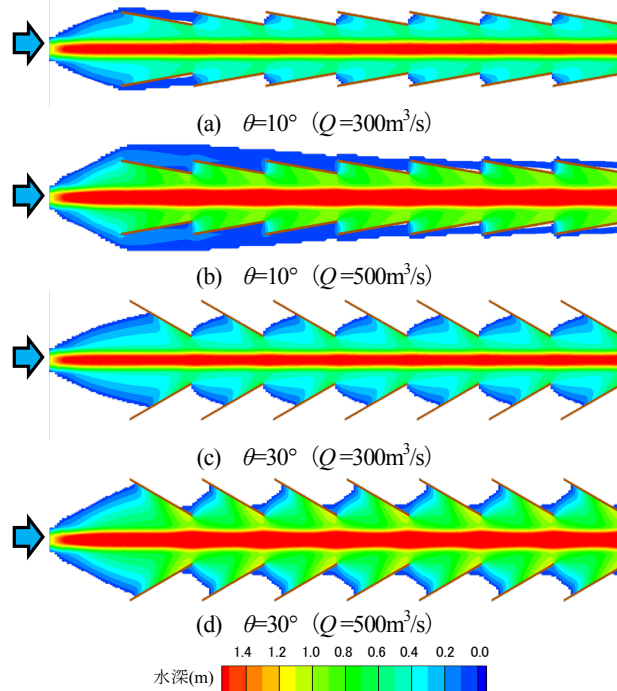


図-9 開口角による水深分布の変化

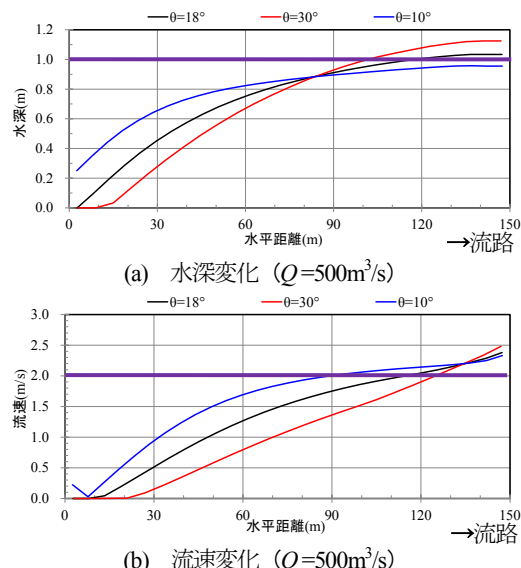
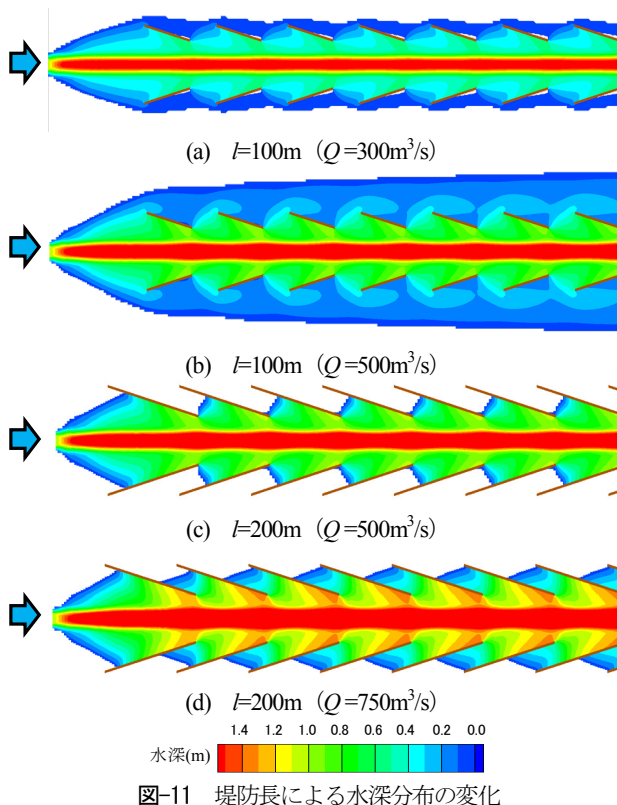


図-10 開口角による堤防沿いの水深と流速の変化

るとともに高流速が生じる。以上の結果を相対的に評価すると、標準形状($\theta=18^\circ$)における流況が最も好ましいと考えられる。

c) 堤防長による流況の変化

図-11に堤防長を標準長さ($l=150\text{m}$)より短くした場合($l=100\text{m}$)と長くした場合($l=200\text{m}$)の水深分布の変化を示す。対応する標準形状の計算結果は図-7(b)および図-7(d)である。 $l=100\text{m}$ では $Q=300\text{m}^3/\text{s}$ (超過確率 1/8)でも堤内地へ溢水する。一方、同流量の $l=150\text{m}$ では $Q=500\text{m}^3/\text{s}$ (超過確率 1/30; 図-7(b))では堤防領域から外側へ氾濫することはない。つまりこの50mの差は治水上の大きな意味を持っていたと考えられる。次に、堤防長を $l=200\text{m}$ に延長した場合では、 $Q=500\text{m}^3/\text{s}$ では延長



した 50m の堤防は機能していない。 $Q=750\text{ m}^3/\text{s}$ (生起確率 1/100)では堤防重複部の間の空間も浸水して堤内地に氾濫が生じないが、この浸水は堤防内端部で 40cm 程度の越水が発生したため、堤防破損の可能性が高い。つまり勾配が 1/50 という超急流河川では、堤防を重複させる水理学的意味がないのではないかと考えられる。

d) 河道勾配による流況の変化

図-12 に河道勾配を標準勾配($I=1/50$)より小さくした場合($I=1/80$, $1/100$)の水深分布を示す。対応する標準形状の計算結果は図-7(b), (c), (d)である。 $I=1/80$ では、 $Q=400\text{m}^3/\text{s}$ (発生確率 1/14)で堤内地に氾濫する。前述したように、堤内地への氾濫は被害を生じるだけでなく、扇状地上での河道変遷を引き起こす恐れがある。また、 $I=1/100$ では、 $Q=300\text{m}^3/\text{s}$ (治水安全度 1/8)でも堤内地の氾濫が生じてしまう。

そこで堤防を 200m に延長した場合の計算を行うと、図-12(e)に示すように、堤防重複部にも浸水が生じ、堤内地への氾濫が軽減される。つまり地形勾配がある程度小さくなると通常の霞堤のように重複部分を持たせる意味が出てくると考えられる。

5. 不連続堤防の効果に関する考察

現行の河道計画では、十分な高さの堤防と低水路浚渫により計画高水を河道内に限定する。その結果、洪水時の河道断面は垂直に増大する(図-13(a))。しかし水位が堤防天端を超えると破堤し、水位の落差により氾濫流の

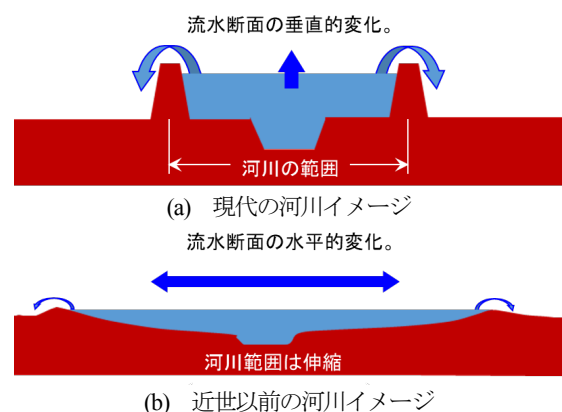
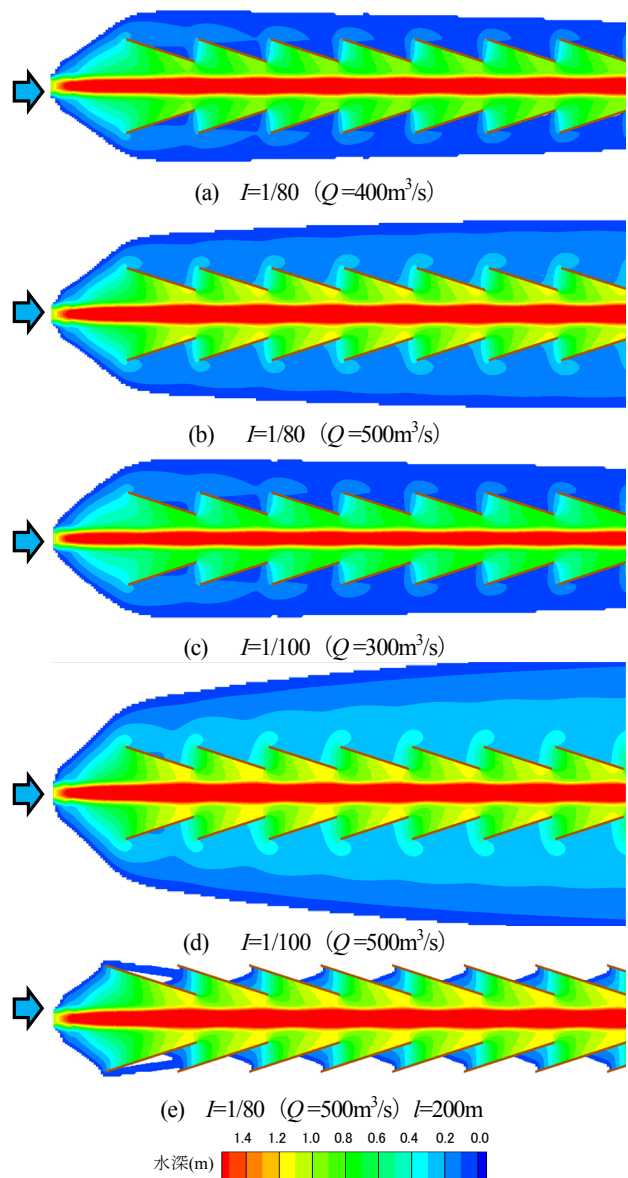


図-13 現代と近世以前の河川イメージの違い

破壊力は多くなる。超過洪水対策が近年議論される背景には、この“安全から危険への急激な変化”の問題があるといえる。

一方、近世以前の堤防高は大河川においてもせいぜい 3m であり^{16), 17), 6)}、御勅使川では 1m にすぎない¹¹⁾。した

がって洪水流水断面積は水平方向に増加させざるを得ず、それが近世以前の河川技術の基本にあったと考えられる(図-13(b))。因みに、水平的な断面積の増加は、現代的考え方によれば氾濫の頻発化ということになるが、当時においては氾濫域の拡大は想定内のことであり、計画的土地利用により対応していた。このような治水方針のもとに、各河川流域の条件にもとづき多様な不連続堤防が工夫されたと考えられる。したがって「霞堤」というステレオタイプ化は、近世以前の治水上の工夫の本質を見失わせる恐れがある。以上の観点から本研究で得られた数値実験結果をまとめると、御勅使川や福島荒川に設置された不連続堤の設計理念が以下のように推察できる。

水面積を広げるといっても、無制限に広げるわけにはいかない。急勾配の扇状地河川では、横方向への河道のシフトは甚大な水害を発生させる恐れがあり、氾濫域の範囲を限定しつつ流水断面積を拡大する必要がある。重複部を持たない不連続堤防は、通常の霞堤より短い堤防の組み合わせで氾濫水深を均一化し、急流河川の横断方向へのシフトを効果的に抑制していたのではないかと考えられる。また図-8に示したように、堤防を常水路からセットバックすることにより、堤防内端への水衝を軽減している。御勅使川の堤防高さは1mに過ぎないが、発生確率1/30の洪水まで制御していた可能性がある。図-9, 11, 12に示した開口角、堤防長、河道勾配の変化に対する氾濫域の感度分析結果を見ると、不連続堤の諸元と配置が驚くほど入念に考えられていたと言える。

6. おわりに

本研究では、超急流河川に設置されていた不連続堤の水利機能を、前御勅使川堤防の諸元を利用して、数値実験により検討した。ただし地形の簡略化や流量規模に関する仮定も多く、数値計算から得られる景色と、当時の河川技術者が見ていた景色の共通性については更に検討が必要であるが、筆者らが行った同種の検討^{6), 16), 17)}を総合すると、近世以前の河川技術者は、氾濫域を安全に広げるための技術を十分研究していたと考えられる。

近年の気候変動に伴う集中豪雨により、特に河川上流域の指定区間における水害が頻発化しているが、治水予算の制約等により、連続堤防による安全度の向上が困難である場合も多い。そこで遊水機能を保全する治水効果の再評価により^{2), 3), 18)}、今後の治水方式において不連続堤防群が組み込まれる可能性がある。その場合、本論文で示したように、地形勾配等により有効な堤防形状および配置が異なってくるものと考えられる。そこで、近世以前の不連続堤防の種々の形態について本研究と同様の検討を積み重ね、特に河川上流部の治水に対して有用な知見をまとめたいと考えている。

参考文献

- 1) 社会資本整備審議会河川分科会気候変動に適応した治水対策検討小委員会：水災害分野における気候変動適応策のあり方について～災害リスク情報と危機感を共有し、減災に取り組む社会へ～答申, 2015.
- 2) 杉尾哲：北川の霞堤をめぐる地域との合意形成について, <http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/renkei/activities/20171207/02-sugio.pdf>.
- 3) 兵庫県：千種川水系河川整備計画, p.74, 2012.
- 4) 国土技術政策総合研究所：河川用語集, <http://www.nilim.go.jp/lab/rcg/newhp/yougo/index.html>.
- 5) 大熊孝：霞堤の機能と語源に関する考察, 第7回日本土木史研究発表会論文集, pp.259-266, 1987.
- 6) 妹尾泰史, 石川忠晴：数値シミュレーションによる江戸時代後期の黒部川扇状地霞堤システムの洪水調節機能の評価, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 74, No.4, I_1411-1416, 2018.
- 7) 横山公一, 伊藤登, 水越崇, 畑井言介：阿武隈川支川荒川沿川に分布する歴史的霞堤について, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, 第 4 部門, pp.377-378, 2008.
- 8) 「信玄堤の再評価」実行委員会：信玄堤の再評価, 2004.
- 9) 和田一範, 岡安哲也, 市山誠, 浜口憲一郎：卓上水利模型を用いた釜無川信玄堤の治水機能の考察(河道現象説明用ツールとしての活用に向けて), 河川技術論文集, 第 10 巻, pp.161-166, 2004.
- 10) 根元裕樹, 中山大地, 松山洋：洪水氾濫シミュレーションを用いた信玄堤の治水能力の再評価, 地理学評論, Vol. 84, No. 6, pp.553-571, 2011.
- 11) 南アルプス市：南アルプス市埋蔵文化財調査報告書, 第 45 集, 前御勅使川堤防址群, 2015.
- 12) 本間仁：低溢流堰堤の越流係数, 土木学会誌, 第 26 巻, 9 号, pp.849-862, 1940.
- 13) R. Akoh, T. Ishikawa, T. Kojima, M. Tamaru, and S. Maeno: High-resolution modeling of tsunami run-up flooding: a case study of flooding in Kamaishi city, Japan, induced by the 2011 Tohoku tsunami, *Nat. hazards Earth Syst. Sci.*, Vol. 17, 1871-1883, 2017.
- 14) Ishikawa, T. and R. Akoh: Estimation of flood risk management in 17th century on Okayama alluvial plain, Japan, by numerical flow simulation, *Int. J. of Safety and Security Eng.*, Vol. 6, No. 3, 455-465, 2016.
- 15) 福岡捷二, 藤田光一：堤防法面張芝の侵食限界, 水工学論文集, 第 34 巻, pp.319-324, 1990.
- 16) 石川忠晴, 赤穂良輔：数値シミュレーションによる江戸期百間川放水路の洪水調節機能の評価, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 72, No.4, I_343-I_348, 2016.
- 17) 石川忠晴, 赤穂良輔, 小林裕貴：数値シミュレーションによる日本堤システムの洪水調節機能の評価, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 73, No.4, I_1387-1392, 2017.
- 18) 武内慶了, 福島雅紀, 諏訪義雄, 天野邦彦：谷底平野における洪水からの逃げ遅れを防ぐ施設設計の提案, 土木技術資料, 59-12, pp.34-37, 2017.

(2018.4.3受付)