

論文はフォーマルな日本語で書いているので、ここではザックバランに書きますネ!

本川の超過洪水に伴う支川背水の影響に関する調査 ～高梁川支川新本川を対象として～



石川忠晴(東京工業大学)・河内敦(東京建設コンサルタント)・赤穂良輔(岡山大学)

研究の背景-1・・・Back waterによる水害

近年は、一級河川でも計画洪水位を超える出水が増加しています。国が管理する本川の堤防は十分な余裕高を持っているので破堤に至ることは稀ですが、県管理の支川の築堤は相対的に遅れているため、本川からの背水(Back water)による被災事例が増加しています。テレビ等での専門家の解説によりBack waterという言葉が一次流行しました。(流行語大賞にnominateされることはありませんでしたが・・・)

一例として、**図-1**に2019年の19号台風出水による阿武隈川直轄管理区間上流部の氾濫地点と、本川の主要水位観測地点における超過水位(ピーク水位-計画高水位)を示します。被災が合流点付近の支川に集中したことがわかります。一方、本川堤防の余裕高と余盛は合計1.5 mあったので、多少の溢水はあっても破堤しませんでした。

河川管理施設等構造令は合流部の堤防高について**図-2**に示すように定めています。支川逆流防止施設が設けられている場合を除き、支川計画流量が500 m³/s以下の場合は本川堤防天端を水平に延長して支川計画流量見合いの堤防天端に接続します。支川計画流量が500 m³/s以上では背水計算を行い、水位上昇分を加えます(紫色の点線)。この規定通りに築堤されていれば支川のみ越水は生じないはずですが。



図-1 2019年阿武隈川上流支川破堤地点

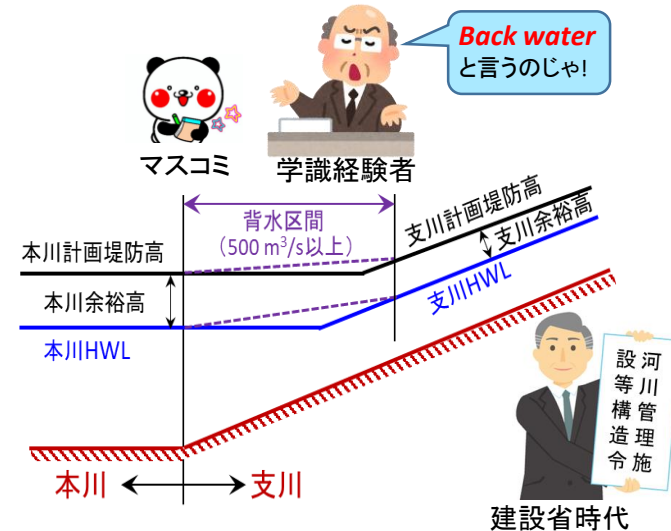


図-2 合流点近傍の支川堤防高に関する規定

(注) 図表番号は論文に対応しておりますが、省略している図もあります) 論文にない図はアルファベットを付しています。

研究の背景-2 ……流域治水型災害復旧制度

河川合流部はもともと氾濫しやすい土地であり、本川の洪水ピークを緩和する効果を有しています。実際、遊水地の多くは河川合流部の近くに設置されています。そこで国交省は図-3に示す「流域治水型災害復旧制度(2022)」を創設し、輪中堤等による集落の保護と合流点近傍の氾濫原の遊水機能保全を含めた事業も災害復旧事業として認めることとしました。(図-3は国交省の原図のまま)

このような手法は、2000年の社会資本整備審議会中間答申「流域での対応を含む効果的な治水の在り方」に基づく水防災対策特定事業(2001)や土地利用一体型水防災事業(2006)で用いられており、元来は事前防災手段ですが、それを復旧事業にも適用するわけです。

ところで、図-3下段の×の下に「追加対策(河道掘削等)」とあります(不鮮明なので上に書き足しました)。Back water 問題を根本的に解消するには本川水位を低下させねばなりません、それはかなり大変だからです。Back water 問題の原因は、本川堤防を嵩上する際に支川背水区間の堤防を構造令通りに改築しなかったことと考えられます。しかしテレビ報道等に登場する学識経験者は明確には言いません(図-1)。加えて、本川は国管理、支川は県管理になっていることが多いので、予算措置の問題もあると思います。

河川改修工事の遅れの原因は詰まるところ治水予算の制約です。近年の治水関係の当初予算は約1兆円、補正予算を含めても1.5兆円です。因みに令和5年の当初予算は約9000億円で、そのうち「流域治水の本格的実践」が約6000億円、インフラ老朽化対策が2300億円を占めています。参考までに防衛関係費の当初予算は約7兆円、少子化対策関係費は3.5兆円です。ですから、国交省は自身が管理する河川区間だけで手一杯で、国管理区間の築堤が原因で県管理区間で災害が起きて、手が回らないのが現状なのだと思います。

しかし、このような災害形態が国管理の本川の河川整備事業の進展に伴い増加するとすれば、各水系の河川管理者は管理区間のBack waterによる県管理支川での災害の恐れを調査して自治体および地域に伝え、事前防災としての流域治水氾濫原対策を促す必要があると思われます。

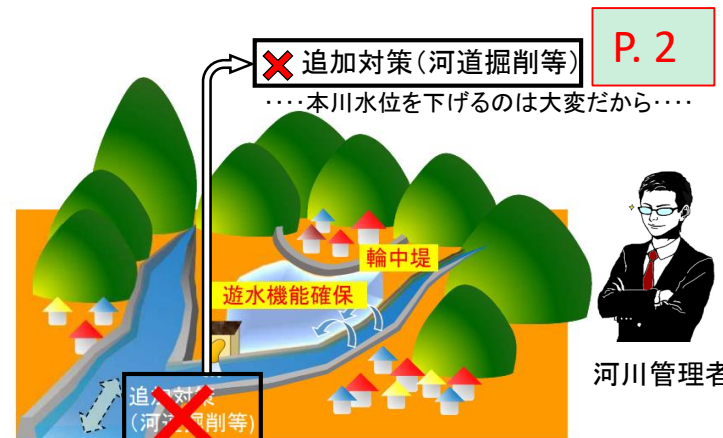


図-3 流域治水型災害復旧制度解説図

- Q-1 昔(昭和51年?)に国が定めた構造令が未だに満足されていないのはどうして?
- Q-2 国管理の本川堤防ばかり高くしたからBack waterが深刻になったのでは?
- Q-3 流域治水は元来は事前防災では?



本研究の目的と対象区域

前節の最後に述べたように、本川からのBack waterに対する支川合流部の安全性調査が全国的に必要と考えられます(調査だけなら金はかかりません)。しかし私の知る限りでは、被災区間以外で調査された例はないように思われます。Back waterが問題となるのは本川水位がHWL以上の場合(超過洪水時)なので、直ちに対策を講じなければならないというわけではありません。しかし調査をすることは必要でしょう。そこで本研究では、事前防災としての流域治水対策を河川管理者が地元自治体等に伝えるための資料作りという観点でケーススタディを行いました。

対象河川は、岡山県を流れる高梁川右支川の新本川(しんぼんがわ)という二級河川です(図-4参照)。流域面積は35.6 km²、計画高水流量は240 m³/sで、構造令の規定によれば背水計算は不要です(図-2の黒実線)。新本川に接する氾濫原は伊與部山で上流と下流に分けられ、上流氾濫原は主に水田として利用され、集落は自然堤防およびその周辺にあります(図4(a)の黒斑点は住宅)。下流氾濫原は図の下部にある小田川に向かって勾配1/800で傾斜しており、南北に走る数本の旧河道跡は曾ての高梁川流路と考えられます。なお下流氾濫原には2018年西日本豪雨時の小田川支川堤防決壊により大水害を被った真備町があります。

図-5に合流点(高梁川16 KP)の河道横断面図を示します。HWLは17.57 T.P.mで、余裕高2 mを加えた19.57 T.P.mが計画堤防高とされています。左岸側は概ね計画通りですが、右岸堤はやや低く約19.3 T.P.mとなっています。この高さが高梁川からの背水の最高水位となります。因みに高梁川本川の目標治水安全度は1/150なので、Back waterが問題となる頻度は150年に1回あるかないかです。



なんだ、減多に起きないんだ。でも安全性調査は必要だね。

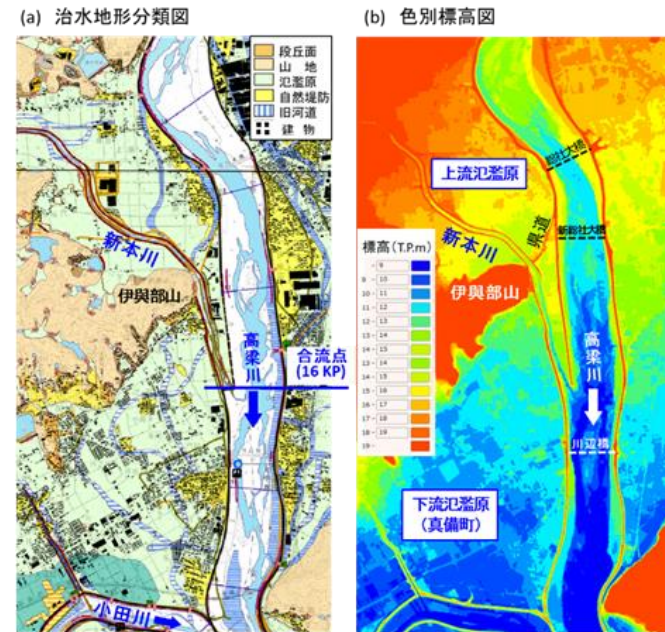


図-4 検討対象区域の地形特性

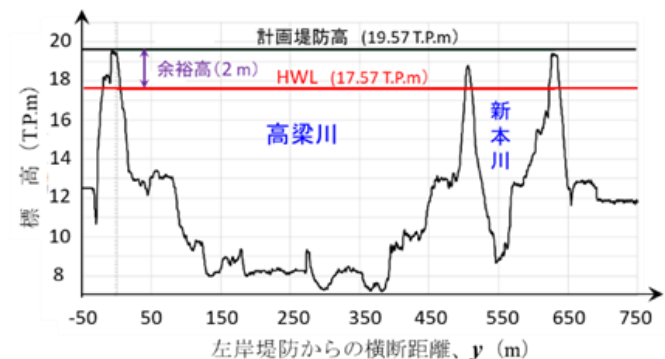


図-5 合流部の河道断面図(図-4とは左右が逆)

数値シミュレーションの条件

図-6に新本川の堤防天端縦断形を示します。伊與部山より下流の左岸は無堤であり、右岸堤も $x > 500$ mでは合流点での本川右岸堤より低くなっています。また伊與部山より上流では兩岸とも $x=2000$ mより下流で低いので、超過洪水時に本川からの背水で越水する恐れがあります。なお図中の①, ②, ③は氾濫計算で破堤

させる予定の場所を示しており、破堤延長はそれぞれ70 mと仮定しています。なお、国と県の管理の境は新本川合流点(高梁川16KP)であり、図-6に示す区間は全て県管理となっています。

超過洪水の水位波形を図-7に示します。従来の高梁川河道形状において計画流量波形で不定流計算を行い、新本川合流点での最高水位がHWLに一致するよう河道粗度係数を調節し、それに相当する計画水位波形(青点線)を求めました。続いて最高水位を図中記載の値となるよう引き延ばし、超過洪水の水位波形としました。なお赤の横点線は図-6の最低天端高(18.5 T.P.m)で、黒点線(19.0 T.P.m)は地点①, ②, ③で堤防決壊が生じると仮定した水位です。

表-1に示す7条件について検討しました。Case-1では新本川堤防は現況で、合流点水位が19.0 T.P.mに達した時点において3か所(①, ②, ③)で天端が堤内地盤に等しくなるとしました。この計算結果を踏まえ、Caes-2のシリーズでは、伊與部山下流の堤防が構造令を満たすよう嵩上げし、上流堤防は耐越水化するものとしました。Case-3のシリーズでは、後述する氾濫域対策を施した状況での氾濫分布と遊水効果を調べました。なおCase-2とCase-3のシリーズでは、流域対策の限界の予備検討結果に基づき、最高水位を19.0 T.P.mまでとしました。

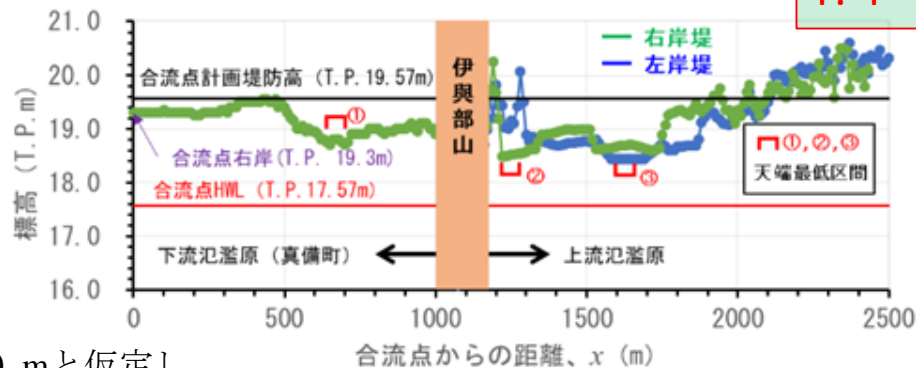


図-6 新本川堤防の縦断図

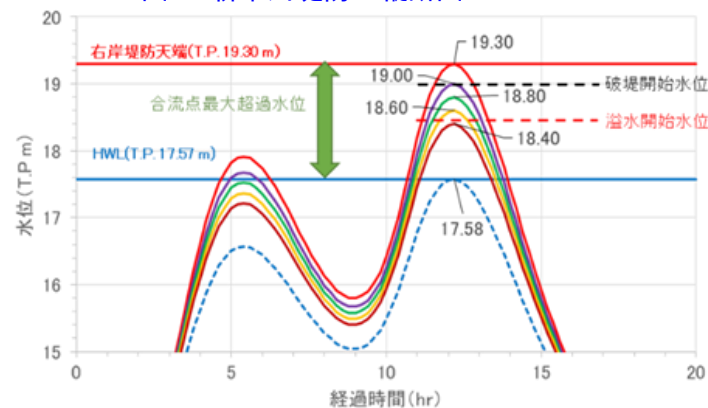


図-7 合流点での超過洪水水位

表-1 検討ケース

Case	最高水位	堤防条件	越水	破堤	流域対策
1	19.3 T.P.m	現況	あり	あり	なし
2-1	19.0 T.P.m	下流嵩上	あり	なし	なし
2-2	18.8 T.P.m				
2-3	18.6 T.P.m				
2-4	18.4 T.P.m				
3-1	19.0 T.P.m	下流嵩上	あり	なし	あり
3-2	18.8 T.P.m				

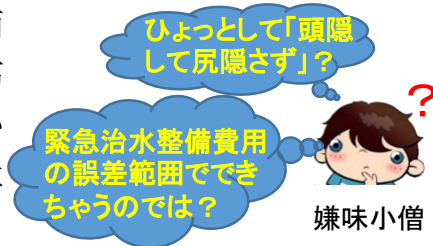
数値シミュレーション結果（現況河道）

P. 5

現況条件における氾濫水深空間分布の時間変化を図-10に示します。図中の t は計算開始からの時間、 τ は破堤後の経過時間です。堤防決壊時間は計算開始から約11.5時間後です。

伊與部山下流の氾濫原では、小田川に向かって地盤が下がっているため、氾濫水は氾濫原を流下して急速に広がっていきます。そして小田川堤防によって行く手を遮られるため湛水し、地形的に自然排水が困難なため、最下流の最終浸水深は5 mにも達します。その結果、2018年の西日本豪雨における水害と同程度の浸水深になる恐れがあるわけです。

そこで大型の排水ポンプ場の設置も考えられなくはありません。しかし、伊與部山下流の新本川右岸の堤高不足区間は高々1 km、不足高さは50 cmなので(図-6参照)、そこを構造令に従って嵩上げる方が容易でしょう。なお、西日本豪雨災害の後の緊急治水整備により小田川筋の堤防強化が進められ、ほぼ完成していますが、“搦め手側”の弱点についてはほとんど注意されていないわけです。



一方伊與部山狭窄部上流でも5 m程度の氾濫水深が発生し、自然堤防上の集落(図-4(a)参照)でも2 m浸水します。しかし上流に向かって地盤が高くなるので氾濫域は比較的狭く、また氾濫水が決壊口から速やかに排水されます。加えて氾濫域のかなりの部分が水田地帯であることから、輪中堤・二線堤による流域治水型の対応が可能だと考えられます。この点について次に検討しました。

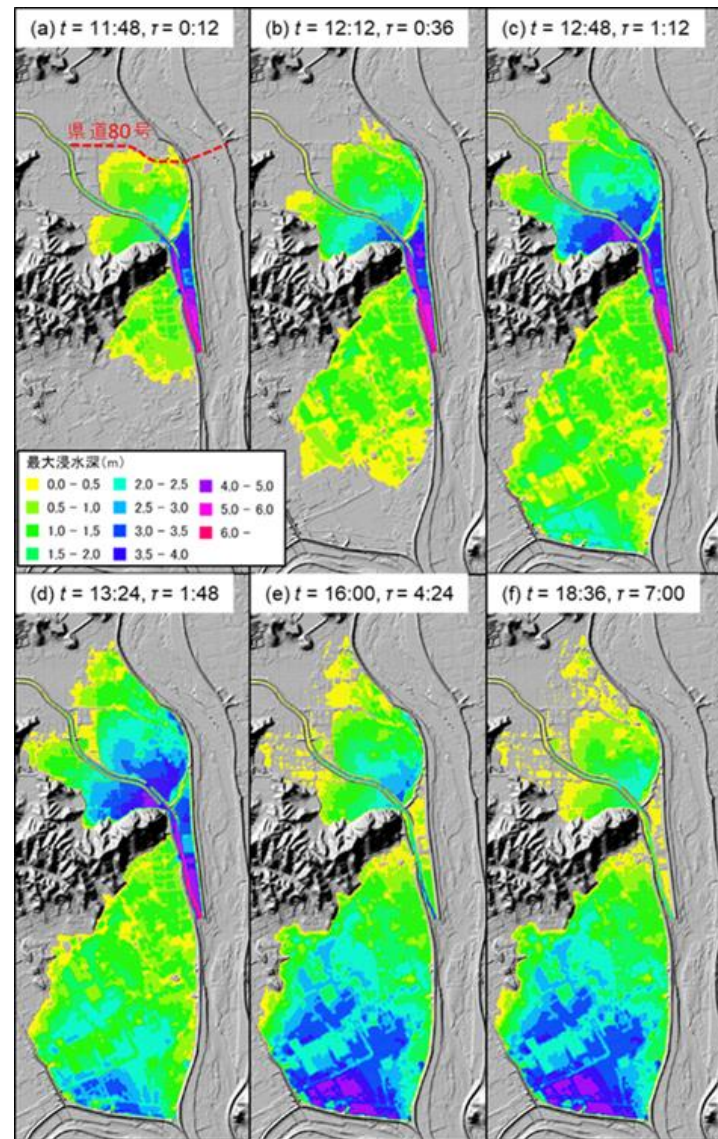


図-10 現況堤防における氾濫解析の結果 (Case-1)

流域治水型対応について-1 (堤防の耐越水化)

前節の数値シミュレーションでは決壊幅を70 mとしたが、そこで止まる保証はありません。そこでまず堤防の耐越水化を考えました。余談ですが、私は40年以上前に建設省土木研究所で耐越水堤防の研究を担当しておりました。図-11と図-Aは昭和57年度報告書に掲載した図で、膨大な堤防越水の調査資料を解析した結果です(データの収集者は私ではありません)。

図-11は“越水したが破堤しなかった事例”のプロットです。苗点の意味は論文中に説明をしていますので参照してください。越水したから即決壊するわけではないことがわかります。図-Aは、破堤・非破堤の因子を数量化解析Ⅱ類で分析した結果です。上が因子別のカテゴリースコア、下が破堤・非破堤の分離度を示しています。この図より、天端の総体幅を大きくして舗装すれば破堤しにくくなることがわかります。

図-Bは、2005年の五ヶ瀬川出水(延岡)で生じた堤防越水の状況です。国道として上質の舗装がなされていたのでほとんど損傷しませんでした。耐越水堤防というイメージがarmor leveeがイメージされますが、天端舗装だけでも耐越水性はかなり向上するのです。

図-Cは、新本川で堤高が不足している区間の天端の状況を示しています。左岸堤の裏法尻の道路は舗装されていますが、堤防天端は無舗装です。一方右岸堤の天端は一車線の細い道路で、上質の舗装ではありません。それらをきちんと舗装すれば堤防の耐越水性能は増加するでしょう。

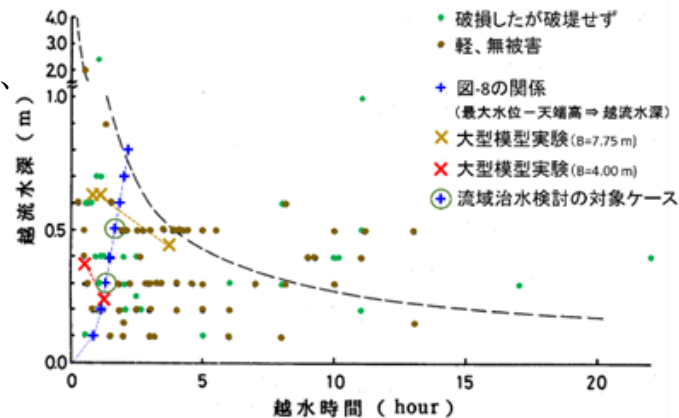


図-11 最大越流水深と越水時間

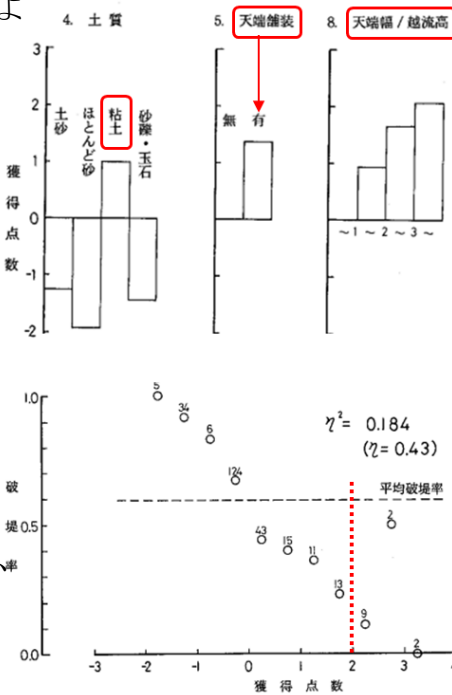


図-A 天端幅拡大と舗装の効果

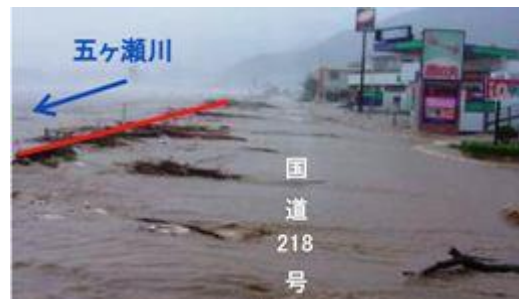


図-B 2005年五ヶ瀬川出水



図-C 新本川背水区間の堤防天端

流域治水型対応について-2 (二線堤と輪中堤)

堤防が決壊しないとするCase-2のシリーズについて、浸水区域最大時点での浸水深分布を図-12に示します。ピンクの点は建物(主に一般住宅)を表しています。(c)に記入しているように県道80号線が東西に走り、(a)と(b)ではそこで水深が若干小さくなっています。図-13に示すように県道面は50 cmほど高くなっているため、道路改良事業でさらに50 cm程度盛土すれば、そこより北への氾濫水侵入を防ぐ二線堤として機能すると思われます。

一方、県道以南の集落については輪中堤ないし二線堤で守ることになりますが、対象範囲をどこまでにするかが問題です。高梁川からの背水の本川堤防嵩上げにより生じるようになったわけですから、少なくとも古くからある集落は守るべきと思われます。図-14に示す明治後期の地形図には、赤矢印より北の集落が既に存在し、また赤丸で示す位置にも小規模の集落と小学校がありました。

以上を勘案して、図-15に赤実線で示す位置に輪中堤を設置し、赤点線で示す県道80号線を改良して二線堤とするのが適当と考えられます。なお同地区で東西に走る町道と農道が輪中堤と交差しますが、普段は開口しておき、いざという時に図-15左下に示す角落しで閉鎖できるようにしておくことが考えられます。

ところで、図-10に示した計算結果で上流側氾濫域が比較的速やかに縮小した理由は、減水時に堤防決壊口から排水されたからです。したがって堤防の耐越水化を行う場合は排水手段を用意しなければなりません。そこで数値シミュレーションでは、図-15に★で示す2か所にフラップゲート付きオリフィスを設置し、堤内水位>堤外水位になると次式に従い排水されるものとししました。

$$Q_d = A \sqrt{2g(H_f - H_r)} \quad \dots \text{オリフィスゲートの排水能力}$$

ここに Q_d は排水量、 H_f と H_r はそれぞれ氾濫原水位と河道水位、 A はオリフィスの開口部合計面積で、本解析では5 m²に設定しました。

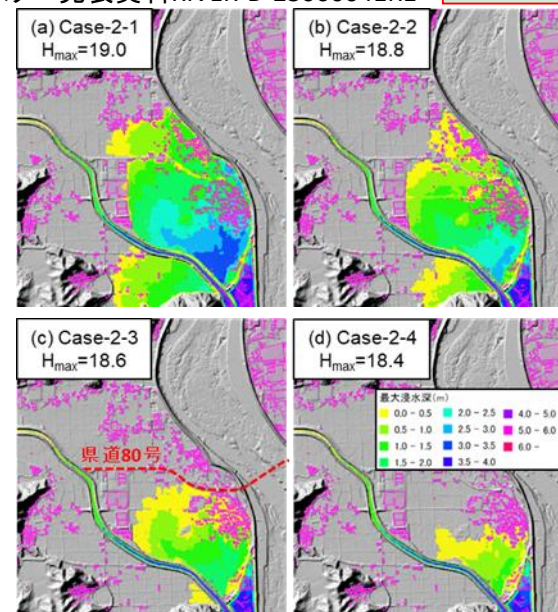


図-12 Case-2での最大氾濫水深分布

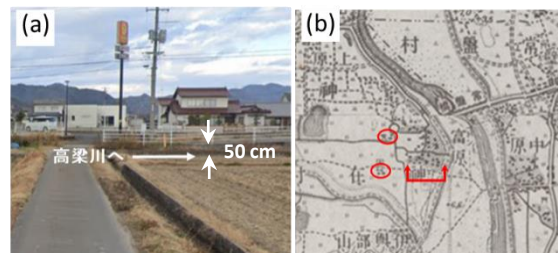


図-13 県道80号線

図-14 1908年地形図



図-15 流域治水型超過洪水対策の施設配置

流域治水型対応の効果

二線堤と輪中堤を配したCase3の最大浸水深分布を図-16に示します。(a)のHmax=19.0 T.P.mでは自然堤防上集落の南端の輪中堤で浸水深が3.5 m、(b)のHmax=18.8 T.P.mでは2.5 mに達しており、二線堤、輪中堤を設ける以前の図-12に比べて大きくなっていることがわかります。これは輪中堤等により氾濫面積が狭められたことによります。

図-17に、Case-3-1での氾濫水量の時間差分から得られる遡上氾濫流量(氾濫増加が負)を青線で、合流断面における高梁川流量を赤線で示しています。それぞれの座標軸は左右にスケールを変えて示しています。後者から前者を差し引くと高梁川流量波形が赤点線のように減少することがわかります。厳密には新本川への遡上に伴う合流点の水位低下を考慮しなければなりません、本川流量と支川遡上量が1オーダー以上異なるので、近似的に支川氾濫に伴う遊水効果と考えてよいでしょう。この図より、新本川上流氾濫原の遊水効果による洪水ピーク低減率は高々3.0%であることがわかります。

本調査のまとめ

新本川の堤防は、約2 kmにわたって構造令基準より低く、本川河道がほぼ満杯になるような超過洪水時にはBack waterによる災害が生じます。特に、伊與部山より下流の右岸堤が決壊した場合には、氾濫原傾斜に従って小田川まで短時間に流下し、2018年の西日本豪雨水害に匹敵する浸水の発生が懸念されます。一方、伊與部山より上流の氾濫原では、農地は冠水するものの早期の排水が可能であり、二線堤や輪中堤による流域治水型の対策で家屋浸水の軽減も(ある程度)可能であると思われます。なお、流域治水型対策で上流氾濫原の遊水機能を保全する場合、本川ピーク流量の低減率は高々3%程度であると考えられます。

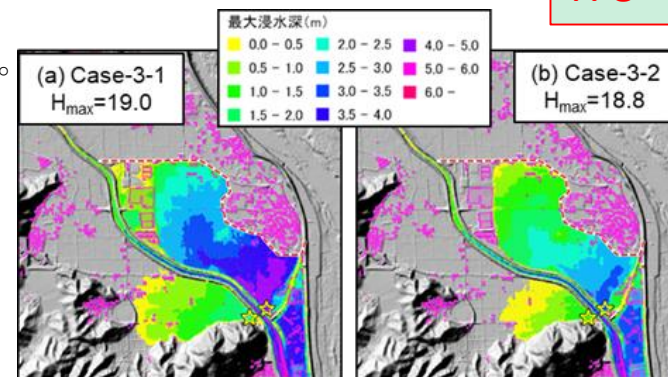


図-16 流域治水型対策での最大浸水深分布

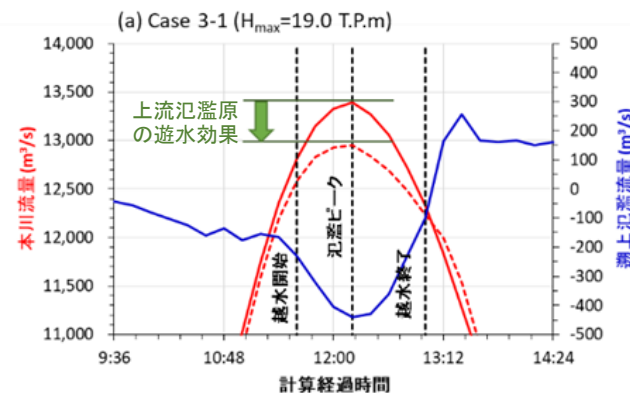


図-17 上流氾濫原での遊水による洪水ピーク低減効果

Back water型支川災害への対処について(意見-1)

P. 9

本川からのBack waterによる支川災害は、本川が満杯に近くなる場合(超過洪水ピーク時)に生じるわけですから、発生頻度は極めて低いです。また、整備計画途中段階でもHWLを超えた出水での災害は河川管理者の責任の範囲外と考えられています。ではBack water型支川災害は不可抗力なのか。次の3点を忘れてはならないと思います。

- (1) 一河川では発生頻度が低いとはいえ、一級河川だけでも109水系ありますから、どこかの河川で発生する頻度は低いとは言えません。実際、2019年東日本豪雨での阿武隈川や2020年九州豪雨時の球磨川で超過洪水が発生しました。また現時点の各河川の流下能力は計画高水流量より小さく、2015年の関東東北豪雨での鬼怒川洪水では、目標治水安全度より小さい流量で河道満杯になりました。ですから、決して珍しいことではないのです。
- (2) 河川管理施設等構造令(昭和51年)には「支川背水区間の堤防は本川堤防と同等にする」とありますが、本論文の検討対象である新本川では満たしていませんでした。他の河川でどうなっているか、正確なところは知りませんが、新本川だけが特別だったとは考えにくいでしょう。それを調査するのは河川管理者の仕事です。
- (3) というのは、国が本川の安全性のみを考えて堤防嵩上げを行っている節があるからです。構造令にある余裕高(および余盛基準)は相当大きいので、[図-1](#)に示したように、本川河道はHWLを超えても下流にバンバン流します。つまり考えようによっては、本川の河川管理者が支川へのBack waterを増大させていると言えます。

とは言え、本川で破堤が起きると、その影響は広範囲に及び、人命・資産の損失が拡大するでしょう。そこで、[図-3](#)で紹介した流域治水型災害復旧制度の解説図はよくできると私は思います。特に支川上流側でのみ氾濫を許容する点は重要です。[図-10](#)に示した氾濫計算の結果からわかるように、下流側で堤防が決壊すると地盤傾斜のために氾濫流が止まらなくなるからです。ですから下流側の支川堤防は構造令に従った強化が(いずれ)必要でしょう。

また、上流側氾濫原の遊水機能の保全も重要です。本川の超過洪水ピークを低減することは、支川も含めた下流の安全性向上に不可欠だからです。新本川上流氾濫原の遊水効果のピーク流量低減率は高々3%ですが、超過洪水対策として多数の小規模氾濫原での計画的氾濫は効果的です。具体的には以下の例を参照してください。

- 石川：今後の超過洪水対策における計画的氾濫について、水・水学会誌、**33** (6), 2020.
- 石川・原田：盆地地形を利用した超過洪水用遊水地について、土論B1, **77** (2), 2021.
- 妹尾・石川：河川上流部における超過洪水用分散型遊水地と阿武隈川を対象とした試算、河川技術, **28**, 2022.
- 石川・名本：築堤に伴い谷底平野に発生する閉鎖的氾濫原での治水対策に関する提案と試算、土論B1, **78** (2), 2022.

河道計画と流域治水の連携(意見-2)

図-Dの背景図は国交省が使っている流域治水の解説図です。種々の施策が、水色枠内の河川区域対策とオレンジ枠内の氾濫域対策に分けて示されています。左上は河川法にある河川区域の定義で、堤防裏法尻が(通常は)民地との境界です。従来型の治水事業は河川区域におけるもので、流域治水でも河川区域対策は河川管理者が専ら行い、民間人の口出しの機会はありません。このため河川区域対策と氾濫域対策は十分リンクしてはいません。

上段に描き込んだように。気候変動で[人間の力<<自然外力]となるにつれ、洪水を河川区域の中で処理できないケースが増加します。そこで洪水の一部を民地に流すための施策が次々立案されています。青枠は流域治水発表以前からあるもので、右側の2つは2000年の社会資本整備審議会中間答申「流域での対応を含む効果的な治水の在り方」に基づいています。左の青枠の地役権設定方式遊水地は、河川管理者が地役権料を支払い、地権者の所有権を残したまま建設する遊水地です。土地利用上の制約はあるものの営農は継続できます。100%の用地買収が不要なため、河川管理者にとってもメリットがあります。緑枠の部分は昔は多数ありました。戦後の連続堤方式の治水により一旦消えかけましたが、近年は復活の兆しがあります。一方、赤枠の施策はごく最近のもので、流域治水の重要施策としてアピールされています。

一方、欧米では近年、氾濫原を河川の一部として洪水管理と自然環境保全を両立するgreen infrastructureという考えが支配的になっています。図-Eは、河川合流点付近の既存堤防(白点線)を緑線の位置までセットバックした例で、そこで生まれる広大なスペースがgreen infrastructureとなります。そこで日本でも“グリーンインフラ”を導入する動きがあります。しかし日本の地形および土地利用の条件では「箱庭的」ないし「盆栽的」なグリーンインフラになりがちです(⇒次頁)。



図-D 河川区域から民地への氾濫を許容する制度



図-E: 河川合流点のGreen infrastructure

河道計画と流域治水の連携(意見-2……続き)

P. 11

国土の70%が山地である日本では“皺のように細長い”氾濫原がほとんどであり、スペースは限られています。加えて、氾濫原の大部分は高度に利用されています。表-Aは大陸と日本の河川氾濫原の比較です。ただし氾濫原面積の統計はないので、氾濫原≒可耕地としています。上段の数値から日本の氾濫原がいかに狭いかがわかります。下段は農業企業体あたりの農地面積で、この2種類の統計を組み合わせると、日本では多数の小規模経営の農家が狭い氾濫原にひしめいていることがわかります。彼らを氾濫原から締め出せば生計を立てられなくなる人が続出するでしょう。したがって、グリーンインフラと言っても、既に河川区域になっている高水敷での箱庭あるいは盆栽づくりが関の山となってしまいうでしょう。

表-A: 日本と大陸の氾濫原の比較

	日本	米国	EU	豪国
可耕地面積/人口 (ha)	0.03	0.48	0.22	1.19
企業体平均農地 (ha)	2.87	179.0	16.1	3124.5

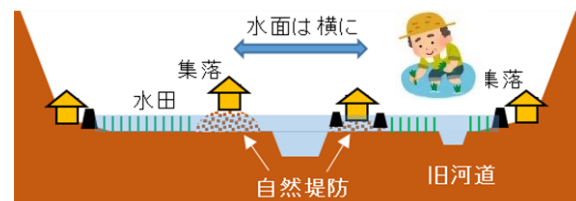


図-F: 日本の河川の上流域

日本におけるグリーンインフラは、古来より、上中流域の水田地帯だったのです。図-Fのイラストは河川上流部の断面イメージです。出水時には洪水が横に広がり、農業に必要な栄養分を含む細粒土砂が堆積しました。また水面が広がることにより遊水効果も増大しました。しかし1964年の新河川法公布以来、連続堤防により河道と氾濫原を分離する治水体系が一般化し、上流農民もそれを望むので、築堤が徐々に上流に延伸しています。ですから、水田をグリーンインフラの一種とみなして図-Fのような状態に戻すことは不可能です。

しかし1997年の河川法改定により30年を目途する段階的目標設定での河川整備事業が義務付けられました。それを前提として、目標以上の出水(その時点の超過洪水)におけるピーク部分だけを上流農地に安全に氾濫させる「段階的氾濫計画」を考えました。図-Gはそのイメージです。整備計画での目標堤防安全度の上昇に併せて、それ以上の洪水を安全に氾濫させる計画のレベルも上げていくのです。その方法については、P.9の下段に示した論文を参照してください。それが河川計画と流域治水の連携ということです。本論文の主題である超過洪水に伴う支川背水問題の解決策も同じベース上に位置づけられるものです。

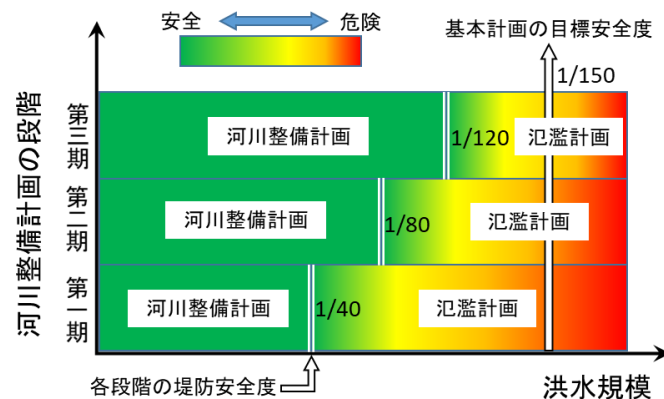


図-G: 段階的整備計画

本川の超過洪水に伴う支川背水の影響に関する調査 ～高梁川支川新本川を対象として～

石川忠晴(東京工業大学)・河内敦(東京建設コンサルタント)・赤穂良輔(岡山大学)

