

破堤リスクの軽減を目的とした 遊水地の最適設計

OPTIMAL DESIGN METHOD FOR RETARDING BASINS
THAT REDUCES RISKS ASSOCIATED WITH BANK FAILURE

清治 真人¹
Masato SEIJI

¹正会員 (財)建設物価調査会 (〒103-0011 東京都中央区日本橋大伝馬町11-8)

Rivers under improvement are at high risk of flooding when excess flooding occurs. Such rivers are also threatened by increases in climate-change-derived external forces. Conventional river planning cannot provide sufficient measures against excess flooding, because the goal is to keep the channel water level within the design high-water level, a level that accommodates discharge up to design high-water discharge. This study proposes a method for setting design parameters for retarding basins that accommodate excess flooding, in order to mitigate risks arising from bank failure. Using a simplified hydraulic model, calculations and comprehensive assessments investigated the optimal design parameters for retarding basins that accommodate excess flooding under different combinations of channel conditions, flooding scale and retarding basin structures. This approach will help against excess flooding by assigning higher flood protection priority to some sections of the floodplain.

Key Words : retarding basin, climate change, excess flooding, bank failure

1. はじめに

河川の整備途上における外水氾濫のリスクは治水の整備水準と降雨による外力条件を相乗して評価されねばならない。治水の整備水準も気候変動による外力条件の生起確率評価も時系列的に変動していくとすれば、これらを総合的に考慮した河川整備計画を用意することが賢明な対応と考える。

治水施設の根幹をなすのは、「流す施設」である河道と「貯める施設」であるダムや遊水地である。

「流す施設」の能力及び効果が主として洪水流量により評価されるのに対して、「貯める施設」の能力は洪水容量により、効果は洪水調節後流量により評価される。これらの特性を十分理解して治水計画を論じることが肝要である。

本研究は、改修の進捗により増強されていく河道流下能力と気候変動による洪水生起確率の変化とをパラレルに考慮した遊水地の最適設計手法について検討したものである。

2. 河川の整備段階と治水外力の推移

河川の整備段階 (ステージ) は河積 (河道断面) の確保、堤防整備、洪水調節施設の整備を行うこと

により向上していく。一方、洪水外力は降雨現象の生起頻度という捉え方から、データ取得量による信頼度はあるものの、不変の条件として考えられてきた。ここでは、その両者ともに時系列的に変化していくものと捉え、その時々を超過洪水に対して最善を尽くす手法を検討する。

外水氾濫による洪水被害を回避することを治水の第一目標と設定すれば、河積の確保やダム等の洪水調節施設による河道水位の低下を最優先するとともに、堤防の整備強化を進めることが鉄則である。

図-1は、中流域区間の流下能力確保が遅れている実在の大規模河川を整備シナリオの検討例として示したものである。この中流域区間に遊水地を設置するものとして、当該地点での河道流量及び洪水時ピーク水位に着目して時系列的 (整備ステージ毎) に概観してみる。

各整備ステージは以下のように設定している。

【Stage-1】現状であり、河道は現況断面、洪水調節施設は現況施設群が運用されている段階を表す。

【Stage-2】河川法第16条の2により策定された河川整備計画 (概ね20~30年後を想定) が達成された時点であり、整備計画河道が確保され、整備計画に位置づけられた洪水調節施設が完成して加わった状況を表す。

【Stage-3】河川法第16条により策定された河川整備基本方針段階への過渡期であり、河道は基本方針河道が確保され、洪水調節施設は便宜上、整備計画段階のものまでを仮定した状況を表す。

【Stage-4】河川計画上の最終形であり、河道、洪水調節施設ともに河川整備基本方針段階まで整備が完了した状況を表す。

水系の河道整備が進むとピーク流量は増加しているが、Stage-4では洪水調節施設の整備が加わるため、概ねStage-1と同規模の流量に落ち着いていくことが判る。一方、各整備ステージにおけるピーク流量に対応する河道内水位は、河積の増加を反映して漸次低下している。

超過洪水対応としては、このような整備ステージの進行過程において何時生起するかわからない不定規模の洪水管理を連続的に実施していくことになるのである。この際、堤防の機能をどのように評価するかが河川管理上の重要課題となっている。

従来の堤防整備は計画高水位に構造上必要な高さを加えた高さを有する定規断面を、経験的に完成型として量的整備に邁進してきた。Stage-4に相当する段階で洪水外力が基本高水で与えられた場合の河道内水位が計画高水位以下に収まることまでを対象にしているため、(整備途上も含めて)超過洪水対応はソフト対策が主とならざるを得ない。

しかし、超過洪水を考慮した検証を行う場合には堤防の質的強化についても積極的に評価すべきものとする。即ち、計画高水位という最も基本的な基準値の壁(呪縛)を超越し、計画堤防高までの間の流下能力をも積極的に評価して超過洪水に備える河道検証が、気候変動に備える局面での重要な視点である。

国土交通省社会資本整備審議会の答申(平成20年6月)において、気候変動による日本の各地域の100年後における年最大日降水量の変化率が示されている¹⁾。

答申によると、計画降雨生起確率の現況評価は気候変動により変化し、その生起確率は相対的に高まっていくことになる。現在1/500に相当する降雨規模が1/150程度になってしまう試算もある。これが時系列的に変化していくと仮定すると、整備ステージと洪水外力との組合せによる適応策を検討しておかなければならない。

ここで用いる洪水外力規模は基本高水に対応する降雨量を、1.1~1.5倍に引き伸ばしたもので、100年後における年最大日降水量変化率(1.06~1.24)¹⁾を中間に挟むように設定している。

気候変動により予想される洪水外力の増大に対して実質的な治水安全度を確保していくためには、従来からの計画高水位に固執した計画論では不十分と言わざるを得ない。

3. 遊水地の調節効果検討

本研究では、遊水地の計画に当たり河道整備の進捗、気候変動による外力条件の変化に対する普遍性をより高めるため、従来方式による計画論の先入観を排除し、最適設計手法に向けての検討を行った。

河川砂防技術基準同解説計画編では、遊水地等の計画に際しての留意点が以下のような抽象的表現で述べられている²⁾。

【4.3.1 調節施設の計画】遊水地等の調節施設は、調節の目的に応じた効果を確実に挙げるような十分な調節機能を有するように計画するものとする。

【4.3.2 調節開始流量】調節開始流量は、調節の目的、洪水流出の特性などを考慮して、所期の効果を確実に挙げるよう決定するものとする。

この中でも特に重要な要素は「調節の目的」であろう。従来通り遊水地の調節効果により河道内水位を計画高水位以下に治めることを目的とすれば、ある整備段階において対処可能な洪水規模と遊水地への冠水頻度が求まるだけのことである。

この「調節の目的」を河道整備途上における超過洪水に対して、河道流下能力を最大限活用し、遊水地容量を極力温存することにすれば計画論は従来と大きく異なった成果をもたらすことになる。このことは、その「裏返し効果」として遊水地への冠水頻度を大きく減少させることにもなる。

本研究では、遊水地の「調節の目的」を「破堤リスクの軽減」としてとらえて計画諸元検討を行うことにした。

多くの遊水地計画諸元(越流堤高と越流堤幅)を設定し、表1のような整備ステージ(時間軸)と洪水外力規模(生起確率軸)を組み合わせた条件での洪水波形を与え、洪水調節トライアル計算を実施した。

なお、「本間の公式」による横越流遊水地簡易計算モデル(図2)は、「Excel関数マクロ」によりプログラミングした。

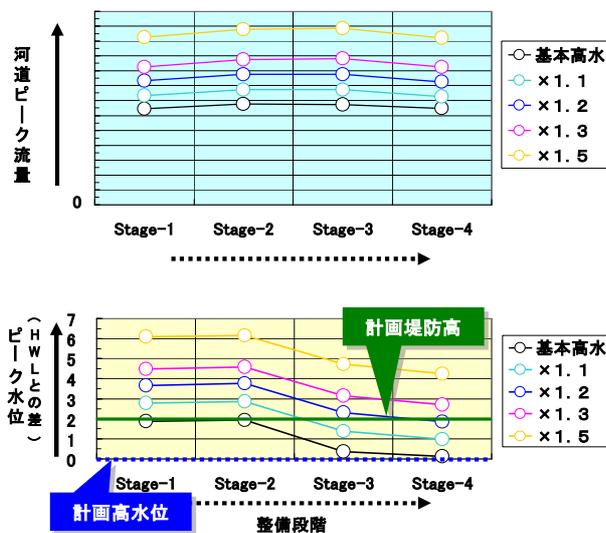


図-1 河川の整備ステージと治水外力の推移

完全越流 ($h_2 / h_1 < 2/3$)の時

$$Q_0 = 0.35 \times h_1 \sqrt{2gh_1} \times B$$

潜り越流 ($h_2 / h_1 \geq 2/3$)の時

$$Q_0 = 0.91 \times h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \times B$$

河床勾配 $I > 1/12000$ で横越流量 Q は、

$$Q / Q_0 = \cos(155 - 38 \times \log_{10}(1/I))$$

本研究で用いた仮想遊水地の設定諸元は以下の通りである。以下、高さ関係は計画高水位 (HWL) との高低差で表す。

【遊水地規模】面積=9.5km²、地盤高=HWL-4.60m

【越流区間】計画堤防高=HWL+2.0m

【越流堤高】HWL-1.5m~計画堤防高

<0.10m刻みで40通り>

【越流堤幅】50~2,000m <50m刻みで36通り>

【横越流係数】 0.97 (河床勾配1/5,000)

計算プログラム作成にあたり、計算結果の振動を制御するため、河道水位の上昇期、下降期における遊水地水位との相互関係に理論的制御回路を設けることとして、計算の効率化、安定化を実現している。

また、計算時間間隔は、試行計算の結果、水位計算結果の精度が1cm以下となる6分を採用している。

遊水地効果計算は、表-1の整備ステージ4ケース、洪水外力規模5ケースに対して、のべ28,800 (=40×36×4×5) 通りとなる。

膨大な計算結果を判定するためにグラフ表示で工夫したものの一部が図-3の三次元グラフ (3D図) である。X軸が越流堤幅の設定 (40刻み)、Y軸が越流堤高の設定 (36刻み) であり、Z軸がその設定諸元組合せにおける水位低下効果を表現している。水位低下効果の値は、洪水波形における河道のピーク水位低減結果としてのピーク計算水位が計画

表-1 遊水地効果検討ケース一覧表

整備段階	Stage-1	Stage-2	Stage-3	Stage-4
洪水外力				
基本高水	●	○	○	○
×1.1	○	●	○	○
×1.2	○	○	●	○
×1.3	○	○	○	●
×1.5	○	○	○	○

○: 遊水地効果の検討ケース
●: 標的洪水規模の検討ケース

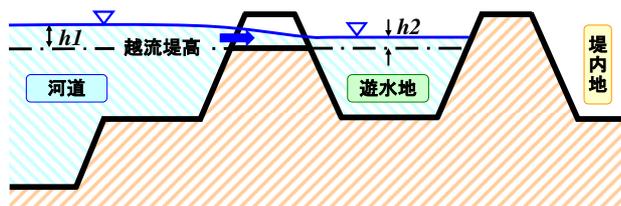


図-2 横越流遊水地計算モデルのイメージ図

堤防高から何m低いかで表現している。計算結果全体は20枚 (=4×5) の3D図に集約される。

例示の図<Stage-1、基本高水>は、現況河道を基本高水波形が水系内の洪水調節施設機能後の流量で流下したケースの計算結果である。遊水地の有無に関わらず、計画堤防高よりも0.13m低い水位は保証されているが、遊水地計画諸元の組合せにより、最大0.90m (越流堤高=HWL+0.80m、越流堤幅1,100m)のケース)まで低減できることが読み取れる。

図-3の下図はStage-1で、洪水外力が1.1倍のケースであるが、水位低下効果の最大値は0.27mに止まり、治水安全度は急激に低下している。

3D図手前のトレイ状に低い部分は、越流堤高を低く設定したために洪水の早い時期から遊水地へ流入し、河道水位がピークを迎える時点で貯水余力を失っており、ピーク低減効果を発揮できない状態を表現している。一方、図の奥方向における効果低下

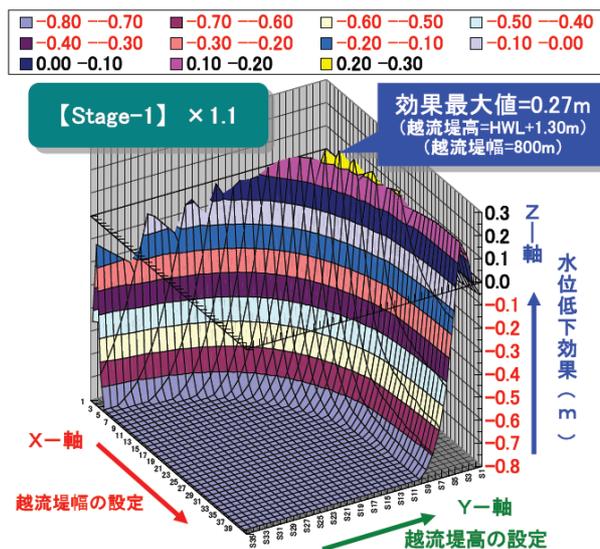
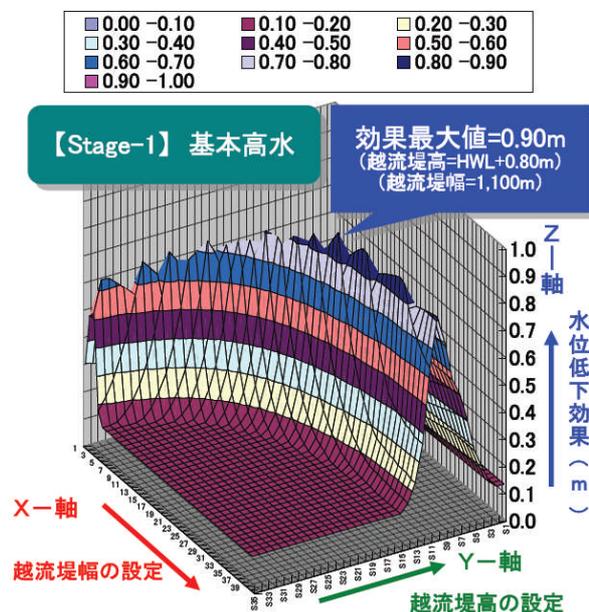


図-3 計画堤防高からの水位低下効果3D図

は、逆に越流堤高を高く設定したために遊水地への流入が少なく、貯水能力を使い切れなかったことによるものである。このように越流堤高と越流堤幅の組み合わせを平面座標として、水位低下効果は3D図において放物線状の尖鋭な山脈を形成していることが判る。

4. 標的洪水規模の検討

これらの計算結果から、水位低下効果をより判りやすく再整理してみる。越流堤高（3D図のY軸）として計画高水位（HWL）、HWL+0.50m及びHWL+1.00mの3ケースのみ設定し、水位低下効果データ（Z軸）を抜き出す。横軸に越流堤幅（X軸）、縦軸に洪水規模毎の遊水地上流水位、調節後の下流水位（その差が3D図のZ軸）をプロットしていく。即ち、3D図においてY軸に直交する3つの面（抽出越流堤高の3ケース）で切った場合のZ軸の値を上下反転させて、5枚の3D図のデータ（洪水外力規模5ケース）を1枚の図に重ねて表示したことになる。

Stage-1の条件では、基本高水規模に対して、越流堤高=HWLのケースでは、越流堤幅350m、同様に+0.50mでは650m、+1.00mでは1,650mが最大の水位低下効果を発揮している。Stage-1では、すべてのケースで基本高水規模の洪水を計画堤防高と計画高水位の範囲内で流下させることができる（図-4）。Stage-2では、1.1倍規模に対して、越流堤高=HWL+1.00mの場合のみ越流堤幅500~550mの極めて狭い範囲で計画堤防高をクリアできる。Stage-3では、1.2倍規模までの洪水に対してすべてクリアできる。最終段階であるStage-4では、同様に1.2倍規模まで、さらに低い水位で流下できるが、この程度までが限界である（図-5）。

このように各整備ステージにおいて標的とする洪水規模を検討し、整備水準の段階的なレベルアップを図る認識を持つことが重要である。即ち、表-1において黒丸で表示した組み合わせケースが、河道整備と遊水地整備を中核とする河川の整備シナリオにおいて基本とすべきターゲット（標的）である。

5. 洪水生起確率と堤防破堤確率を考慮した遊水地の最適設計諸元

次に、遊水地による洪水調節効果を総合的に評価する手段として、「洪水の生起確率及び堤防の破堤確率の視点」を導入し検討を進める。従来の河道計画が計画高水位以下で流下させることを前提としているため、それ以上の越流堤高を有する遊水地には違和感がある。しかし、河川整備過程における超過洪水対応を検討する視点からは、堤防の安全度議論とともに避けて通るわけにはいかない。

ここでは、堤防の安全性を簡易な評価手段として河道水位と破堤確率に置き換えて評価してみる。

完成堤防における破堤確率についての確立された理論はないが³⁾、過去の破堤事象や現在の整備水準を踏まえ以下のように仮定する。

破堤確率を、河道水位が計画高水位までは0.0、さらに上昇し計画堤防高で1.0とし、直線的に変化するものと仮定すると、河道水位Hの場合の破堤確率Rは以下のように簡素化できる。

$$R = (H - \text{計画高水位}) / (\text{計画堤防高} - \text{計画高水位})$$

この式を用いて、遊水地が無い場合の下流水位と遊水地が効果を発揮した場合の下流水位について破堤確率を求め、さらに、洪水の生起確率（1,000倍値として計算）を乗じて、その差を計算する。このような数値効果がカウントできるもの（遊水地が機能を発揮したもの）を洪水規模別に累積加算したものを総合評価値とする。

例えば、越流堤高をHWLに設定する場合、整備

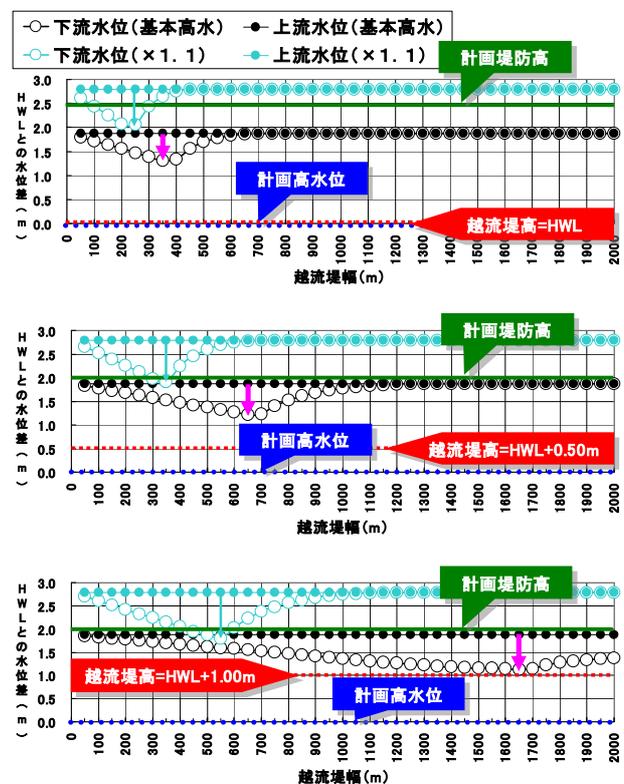


図-4 水位低下効果図【Stage-1】

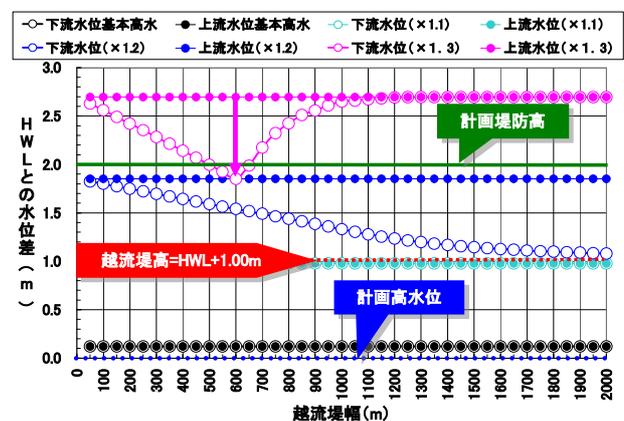


図-5 水位低下効果図【Stage-4】

ステージ毎にこの総合評価値が計算される。図-6で、それぞれの整備ステージにおける曲線が示されるが、これら4つのステージの総合評価値を合計したもの（黒い曲線）が生起確率軸に時間軸も含めた一つの総合評価値ということになる。

越流堤高=HWLに対応する越流堤幅は350mで明瞭なピーク値が現れている。同様に、越流堤高=HWL+0.50mの場合の越流堤幅は650m、越流堤高=HWL+1.00mの場合の越流堤幅は1,150mでピーク値が現れる。

このようにして、①各種設定条件を組み合わせた場合の遊水地の挙動、②各整備ステージ毎の標的洪水規模、③洪水の生起確率及び堤防の破堤確率を考慮した水位低下効果の総合評価等の検討により、上記3組の最適計画諸元を提案するものである。

6. ゲート付越流堤の効果及び検討結果総括

さらに遊水地機能を向上させるとともに遊水地の使用頻度を低下させる可能性を求めて越流堤ゲート自動調節計算を行った。越流堤ゲートは全幅にわたって同じ高さのものを設置し、初期ゲート高、河道制御目標水位及びゲート高制御刻みを与え計算するマクロモデルを作成した。

Stage-1における標的洪水（基本高水）のケースで、越流堤高=HWL、越流堤幅350mに設定した場合、下流ピーク水位低下効果は越流堤ゲートの有無に関わらず同一（-0.56m）であったが、ゲートありのケースでは遊水地貯水量の約27%が温存された。

一方、Stage-2における標的洪水規模（1.1倍）の

ケースではゲート調節の効果が顕著に現れる。越流堤高=HWL+1.00m、越流堤幅1,150mに設定すると、1.1倍洪水では遊水地容量が不足し、結果として遊水地効果は期待できないが（図-7）、ゲート調節を組み込んだ（制御目標水位=計画堤防高-0.20m）ことにより、調節流量、水位低下ともに大きな効果を発揮させることができた（図-8）

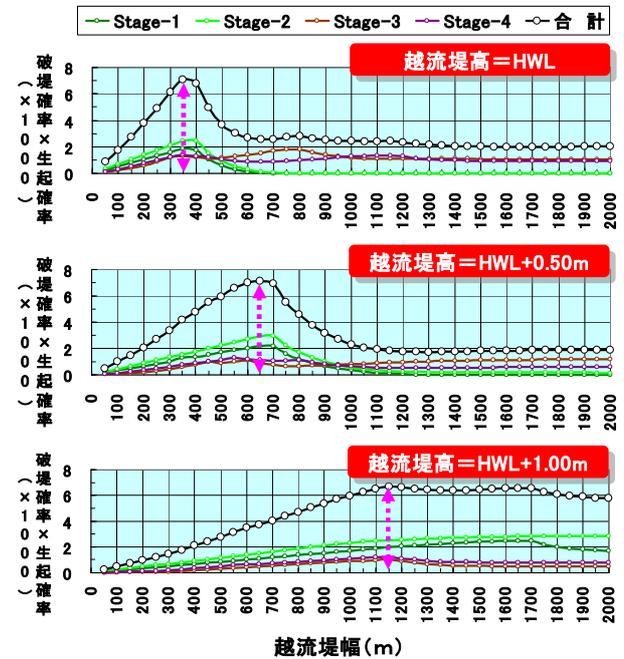


図-6 破堤確率と生起確率による総合評価

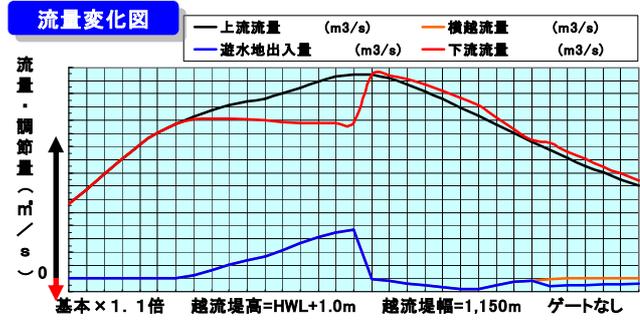
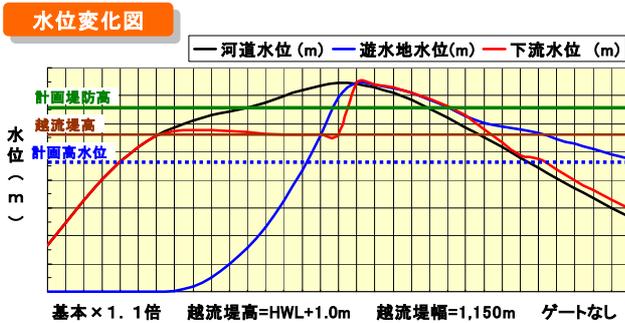
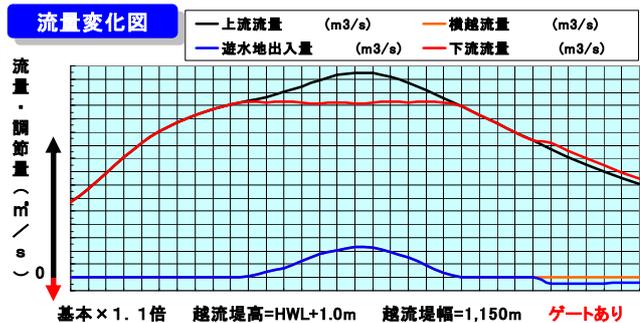
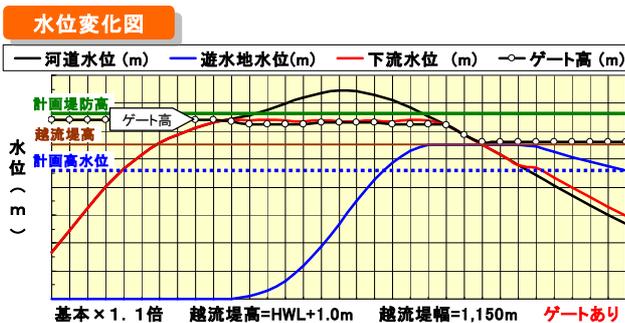


図-7 遊水地調節効果図【Stage-2】ゲートなし



(初期ゲート高及び制御目標水位 = 計画堤防高-0.20m、ゲート高制御刻み = 0.05m)

図-8 遊水地調節効果図【Stage-2】ゲートあり

このような越流堤ゲートを設置した事例は少ないが⁴⁾、北上川水系迫川の南谷地遊水地（昭和33年完成）には延長366mを有する越流堤ゲートが設置されている（写真-1）。

このゲートは木製自動転倒ゲートであり、迫川の水位が上昇し水圧がかかると自動的に錘重とのバランスにより自然越流する構造（動力なし）になっている。平成14年洪水時（完成から44年）に初めて機能し効果を発揮したが、経済的な簡易構造であり遊水地の冠水頻度を低下させるとともに貯水容量の有効活用にも大いに役立っている。

検討結果の総括として、条件設定した遊水地それぞれの機能を、各ケースにおける洪水調節効果として（ゲートの有無も合わせて）図-9に示す。

同規模の遊水地でも越流堤高や越流堤幅等、最適計画諸元を検討することにより、その機能を著しく向上させることができることが判った。

そのような意味から、固定の越流堤に対しても、整備ステージに合わせて越流堤高や越流堤幅を段階的に改造していくことも有効であろう。また、各整備ステージを通じて、多様な洪水波形に柔軟に適応していく方策として、管理が容易な越流堤ゲートも積極的な検討に値すると考える。

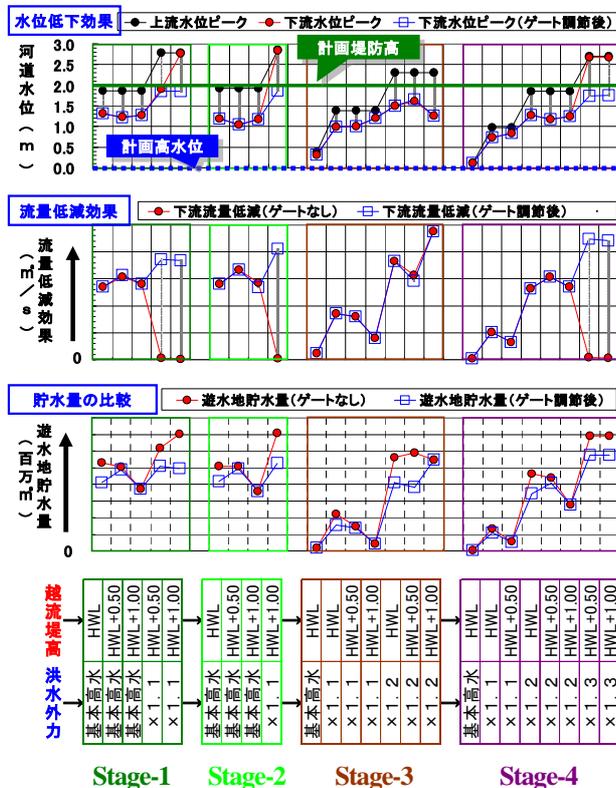


図-9 仮想遊水地の効果比較

7. おわりに

今後、大規模河川において中長期にわたる整備シナリオを検討する際には、気候変動に対する適応策として、外力規模の変化をも考慮した超過洪水対策を組み込んでいく必要がある。

本論は、その中核となる河道整備（河道掘削及び堤防強化）と遊水地の適切な組み合わせによる一つの整備シナリオの方向性を提示するものである。遊水地を計画規模内の洪水調節装置として考えるか、超過洪水時における限定氾濫域の創出及びその氾濫域管理として捉えるかは、治水思想の転換とも言える重要課題である。河道や堤防の機能を向上させ維持し、その潜在能力を確保することと、利用価値の高い（冠水頻度の低い）限定氾濫域を創出していくことで、超過洪水や気候変動の脅威を克服することは可能であると考え⁵⁾。土地利用計画、地域再編計画、事業展開への制度設計も含めて、今後さらに検討を進める価値がある。

<参考文献>

- 1) 社会資本制度審議会：水災害分野における地球温暖化に伴う気候変動への適応策のあり方について（答申）、pp.17-18, 2008.6
- 2) 日本河川協会編：河川砂防技術基準同解説、計画編、山海堂、pp.141-142, 2005.
- 3) 湧川勝己、柳澤 修：今後の治水対策の方向性に関する研究 洪水保険制度を切り口とした今後の動向検討 JICE REPORT vol.4 pp.22, 2003.11
- 4) 佐藤裕和、磯部雅彦：利根川中流調節池群における越流堤への可動堰設置による洪水調節効果の評価、水工学論文集 第53巻、pp.595, 2009.2
- 5) 清治真人：気候変動に対処する拡張河川計画手法の提案、水工学論文集、第53巻、pp.560-561, 2009.2

(2009.9.30受付)



写真提供：宮城県

写真-1 北上川水系 迫川南谷地遊水地越流ゲート

はぎまがわみなみやち