

1. 本論文の位置づけ

1. では本論文の背景、基本的な考え方、研究の新規性について述べた。本論文は、河川構造物の洪水に対する「応答特性」を、洪水による構造物災害の年間調査、現地調査、既往の災害教訓知見、水理実験、簡便な計算による考察から抽出整理する。本論文における構造物の洪水に対する「応答特性」とは、洪水流と構造物、構造物と周辺の地形変化、洪水流と構造物周辺地形変化間の相互作用を言う。さらに減災に役立てる視点から、堤内地の物的・人的・社会的な応答特性を整理・考察し、そこから得られる減災への工夫を提案する。

応答特性の抽出・整理に際して実施する考察は、力学的な考察を基本とする。次に「応答特性」から得られる知見を構造物や周辺河道の点検、減災上の工夫に反映する。なお、応答特性から得られる知見の反映先は、構造物の設計法とする研究が一般的であるが、本論文は、応答特性から得られる知見の反映先を設計に限定するのではなく、点検や被害軽減・減災上の工夫を中心とする点に独創性がある。

老朽化の懸念が高まっている近年、構造物点検の目的は、材料の経年劣化を未然に発見して予防保全を行うことにより構造物の長寿命化を目指すものが指向されている。本論文が提案する点検は、構造物の老朽化抑止による長寿命化を目指すことを主とするのではなく、被害軽減や減災上の工夫を目指すことに重点をおく。

この理由の1つは、構造物被災の実態つまり構造物の寿命が、老朽化による材料劣化で決まるのではなく、設計超過状態にさらされるあるいは設計時に想定した状態が変化し設計で考慮していない外力が作用することによって決まっていることによる。

2つめの理由は、河川特有の設計超過状態が生じる堤防設計・河川管理の考え方にある。具体的には、河川堤防には堤防自体の構造上の余裕をもたせる必要、河川を横断する橋梁等構造物と河道の流下能力確保の必要から、設計水位の上に余裕高を持たせる。さらに線状長大構造物である堤防はダムのように基礎地盤を選ぶことができないので、軟弱な地盤上に設置せざるを得ない場合も多い。そのような中では堤防完成後の基礎地盤の圧密沈下や堤体自身の圧縮変形は避けられないので余裕高の上に施工上の必要性から余盛を行う。河川堤防に囲まれた洪水を流す器である河道には、設計水位の上に洪水流が流れる空間が存在せざるを得ない。設計水位より高い設計超過状態が生じる構造を内在する河川特有の状況である。設計水位は計画や構造物の管理瑕疵と密接にかかわるので、変えるのは容易でない。また、仮に設計水位の基準を変えたところで、これに適合させるよう構造物を作り替えるには長い時間と多額の投資が必要となる。以上のような構造物の設計超過状態との共存を考慮する必要性は減ることはないという現実を踏まえ、「応答特性」から得られる知見の反映対象を減災の工夫とする。

2. 堤防の洪水に対する応答特性

2. は堤防を中心とした河川構造物の洪水に対する応答特性を検討した。2.1 既往研究との関係、2.2 堤防の被災実態、2.3 護岸根固め工の応答特性、2.4 浸透に関する堤防の応答特性、2.5 越流に関する堤防の応答特性、2.6 落差工・堰等の応答特性を踏まえた減災、2.7 河川構造物の応答特性からなる。

2.1 では、代表的な既往堤防研究をレビューし、本論文との違いを整理した。本論文の最大の特徴は、堤防の洪水に対する応答特性の知見を、河川管理者の視点ではなく、河川管理者が責任を負うことができない施設能力超過洪水に対して、自衛すなわち水防の立場から活用する点にある。

2.2 では堤防の被災実態を整理し、以下の知見を得た。①一般被害に直結する破堤は越流によるものが圧倒的に多い。②侵食破堤はセグメント1の計画高水位を上回る洪水において警戒を要する。高水敷幅が狭い堤防はセグメント1以外でも警戒が必要であり、それは護岸・根固め工の安全性検討となる。③浸透被災はどの河道特性でも起こる。かつて降雨だけで法崩れが生じていたが土工品質管理の普及により降雨法崩れが減少した。④セグメント3・湖沼では風浪越波被災が生じる。

2.3 では侵食破堤に直結する護岸・根固め工の洪水に対する応答特性を検討し、以下の知見を得た。①護岸の主たる破壊は、洗掘・河床低下による基礎からの吸出し破壊、大洪水時の護岸天端・のり肩からの侵食破壊、施工範囲不足による施工端からの破壊の3つである。②警戒を要するのは、基礎からの吸出し破壊、天端・法肩からの破壊、流体力によるめくれ・基礎吸い出しと複合した上下流侵食破壊である。③必要重量が確保された根固め工は、個別ブロックは安息角で沈下変形し、変形後の斜面を被覆するブロック間隔と水理条件が平衡する安定斜面を形成して落ち着く。④減災上警戒を要する根固め工の不具合は、敷設幅不足、敷設厚不足、重量不足である。①～③は様々な現地河川の被災実態と水理模型実験により実証的に整理されたものであり、新規性が高い。

2.4 では、浸透に対する応答特性を検討し、以下の知見を得た。①堤体内浸潤面上昇によるすべり破壊は研究が進展しており、現地の浸潤面観測・変状点検でチューニングすることにより福岡ら（2018）の堤防脆弱性指標 t_* や岡村ら（2017）の ϕ' とのり面勾配を用いたすべり領域の感度分析で河川毎・地先毎の危険性を評価できる可能性がある。②パイピング破壊は強化優先順位検討や現地でのパイピング発見に関する研究、パイピング空洞の進行応答・パイピング堤防破壊の類型に関する研究が進んでいる。③杉井ら（2018）が、粒子間距離が近接している砂層内のパイピング限界流速が干渉沈降速度の概念を用いた補正沈降速度で評価できることを理論的に説明し、限られた砂材材料の実験ではあるが評価可能であることを実証した。④小高・李（2018）が注意喚起している「広義のパイピング」すなわち砂層液状化による堤体崩壊が減災上警戒である。⑤パイピング破壊の本質は高透水性地盤の水圧上昇なので、現場で基礎地盤礫層の出水時水圧を観測し危険性を実証的に確認すべきである。⑥抜けあがりが発見された樋門は函体内部の変形・損傷の目視調査、函体からの漏水を確認する注水試験を行うことが重要である。⑦樋門函体と堤防の境界部だけでなく、被覆土がある場所では接続水路が警戒箇所である。⑧パイピングにおける砂粒子の応答状態は「パイピング」、「噴砂状態」、「浮遊状態」に分けられる。⑨応答状態を規定する流速・実流速の範囲は漏水口と砂層内で異なる。場所に応じた流速・実流速目安を用いて評価すべきである。⑩応答状態の目安となる実流速は、砂層内は空隙比に応じた体積密度の干渉沈降速度で、噴砂口は単粒子沈降速度及び粒径の5倍の管径長を代表長さとするフルード数1を用いることができる。⑪特に警戒を要するのは次の2つである。噴砂口でフルード数1以上の（進行性でない）制御不可能なパイピング状態が生じること。堤防下の砂層内で噴砂状態・パイピングとなって液状化し小高・李（2018）指摘の広義のパイピング崩壊が生じること。特に後者は現行基準類のパイピング照査で明瞭に示されていないので注意を要する。⑫は観測通信技術の進歩を踏まえて各現場で実証的に確認することを目的としており独創性がある。⑧～⑪は従来のパイピング発生限界の把握のみを追求する研究とは異なり場所毎の応答状態を把握可能とするものであり新規性が高い。

2.5 では、越流に対する堤防の応答特性を検討し、以下の知見を得た。①堤防3次元形状に凹部があると越流水が集中しその法尻が危険である。②越流水の集中がなくても堤内地の浸水深が小さく減勢しない場合には大きな裏法尻洗掘が生じて危険となる。③吸出し防止材による裏法補強は、吸出し防止材と堤体土羽の隙間が抵抗の大きな平板間流れとなって土羽に作用する流速を抑え裏のり侵食を抑制する。④吸出し防止材補強の前提として、ドレーン・土留め・水叩き機能を有する裏法尻保護工の設置が重要である。⑤礫や土塊があると吸出し防止材下でアーミング効果を発揮する場合がある。一方、礫や土塊がない砂質土堤体は侵食に弱いので減災上警戒である。⑥堤体土羽及び堤体植生の状態がよく（耐力が大きく）、堤内地側が浸水してウォータークッションが期待できる（外力の低減が期待できる）場合には越流しても破堤を免れるチャンスがある。⑦堤体の越流耐力把握は、

植生根毛量鉛分布と引張り破壊応力の測定が有効である。越流外力は裏のり面の等流流速とエネルギー保存流速で評価可能である。⑧ウォータークッション減勢を行う遮水構造フェーシングの越流堤は、高速流の突入による池水面押し下げを見込んで設計・照査する必要がある。⑨フェーシングの破壊は従来の設計で用いられる単位要素の揚力・重量比ではなく曲げ応力で決まる。⑩フェーシングの強化は、逆止弁付き排水工と遮水構造の徹底による揚圧力の低減、鉄筋網によるフェーシングの曲げ破壊耐力強化が考えられる。①～⑩はいずれも新規性を有するが、特に⑧～⑩は既往研究で把握できていなかった知見を付加したものであり有用性が大きい。

2.6 では堤防以外の落差工、堰等河川構造物の被災事例から各構造物の応答特性を考察し、減災への反映事項を提案し、2.7 では河川構造物の洪水に対する応答特性をとりまとめた。

3. 応答特性を踏まえた減災（氾濫許容）と実現上の障害

3.1 は、3.1 堤内地の応答特性、3.2 本論文が考える減災とその障害からなる。3.1 では、堤内地の応急段階、再建復興段階・準備段階における応答特性について、既往文献から検討考察した。①氾濫被害・それを助長する要因には、「生産の場として成立しないことによる貧困スパイラル」、「山地河川洪水・土石流・流木、中下流の破堤口付近で発生する高流速による流体力等」、「氾濫域を動き回らる中で溺死」、「要介護者が溺死」、「氾濫・浸水の長期化」、「事前準備情報の不足による不意打ち」、「交通・電気通信等インフラ被害から波及」、「生活再建がうまく支援できない等による復旧・復興の失敗」がある。②水害訴訟と主な最高裁判例から河川管理瑕疵は、改修途上の河川においては改修計画に著しい不合理がある場合・改修計画の手順を変える特段の理由が生じている場合、改修済河川では計画の洪水流量・計画高水位以下の洪水を安全に流せない状態にある場合に成立すると整理された。③水害被害者の救済には設計外力以下で破堤氾濫した場合の国家賠償、自立再建を支援する被災者再建支援制度等がある。資産集中河川で水害が起きた場合、支援金額が制度の能力を超える可能性が高いこと、国家賠償金額も莫大となる課題がある。④氾濫区域の制御は江戸時代の主たる治水手段であったが氾濫の痛みを強いる地域に対するケアがないため、受益地と当該地域、地先間・輪中間の利害対立が深まる副作用が大きかった。⑤氾濫区域限定に伴う利害対立や水資源開発に伴う受益地と水源地の利害対立の克服事例から、痛みを強いられた側に対するリスクを持ち利害対立する双方にプラスとなる解決策を提示できる良質な調停者の存在が重要である。⑥復旧・復興支援は統治（人材・財政）が安定していないと機能しない、復興の成功例には視野の広いリーダーがいる場合が多い、復興には「希望が持てること」が重要である、撤退や高齢化社会の生活再建に「希望が持てる成功事例」を作ることができていないことがわかった。

3.2 では、氾濫を前提に氾濫流を制御する減災を提案するとともに、実現する上での障害とそれを克服する手がかりを整理し、新たなリスクガバナンス、治水のパラダイムシフトを提案した。①氾濫に伴う痛みを受ける地域と結果受益者となる地域の利害対立克服が重要である。そのためには、両者が運命共同体となることが重要であり、氾濫・浸水を被った側に便益をうける側が自力再建支援を行うことが考えられる。ダム事業における水没地・下流受益地の対立への対処経験、第3者を立てての調停、強大な実力と信頼を持つ良質な調停者の存在が手がかりとなる。②現行の氾濫対策にはリスクテイクの自衛目線が欠けており、減災手段の選択肢を狭めている。平等に安全を保証し・瑕疵を避けねばならない河川管理と多少のリスクや未知なことがあっても減災のチャンスをつかもうとする自衛は戦略が異なる。意図的に越流区間やヒューズ区間を設けて、二線堤や宅地盛土で氾濫流を制御する減災は、河川管理者よりも地域の自衛水防の目線からの法が実施しやすい。ただし、水防責任者の自覚・リーダーシップが必要となる。③河川構造物の破壊は設計時にわからない現象により発生するものもあること、自衛の減災活動は失敗のリスクをとりつつチャレンジするものなので成功要因と教訓要因を積み重ねて共有する必要がある。原因究明と改善策を検討する本質的議論の場は、訴訟とは別に用意される必要がある。本質的な議論・検討とその結果を共有するシステムを実装するためには、人災への責任転嫁が障害となる。それらを克

服する手がかりとして、米国のアフター・アクション・レビュー（事後責任追及の免責を法律に位置づけ）がある。④本論文提案の氾濫流制御減災と社整審の流域治水、清治（2011）提案の包括的治水対策は、超過洪水対策が重要でそのためには氾濫原対策に乗り出す必要があることを指摘している点が共通している。一方で、超過洪水対策の実施者に違いがある。社整審流域治水と清治提案包括的治水対策は、河川管理者目線から河川管理者による危機管理行為、いわゆるトップダウンのリスクガバナンスとして扱うのに対し、本論文は自衛及び水防というボトムアップ・ミドルアップダウンも加える点に違いがあるが、両者は相互補完する関係にある。

4. 結論

4.では、1～3.までに得られた本論文の成果を総括した。本論文には、減災の提案、応答特性に着目する検討の有効性提示、の2つの側面がある。

減災の提案については次の4点の結論を得た。①破堤氾濫に対する減災は、越流や計画高水位を上回る設計超過洪水に対する工夫が必須である。減災の工夫は、意図的な越流区間やヒューズ区間設定による破堤危険箇所絞り込み・暫定含めた越流強化と二線堤・宅地自衛策による氾濫流制御、それを反映した土地利用対策が有効と考えられる。②超過洪水における上下流・左右岸のバランス・調整の方法が大きな論点である。治水計画・河川管理で培ってきたバランスを踏襲する方向、治水計画・河川管理とは別に上下流・左右岸のバランスを新たに作る方向が考えられる。本論文は新たなバランスとして、余盛含む堤防天端高で流下能力を評価した場合に下流に流量増をしない制約の下、氾濫の痛み固定について合意形成をとりまとめたブロックが優先される「健全な競争」を提案する。③減災は被害発生が避けられず、被害を受けた氾濫ブロックと被害を回避できた氾濫ブロックの利害が対立する。被害を受けた氾濫ブロックの再建・復興過程において、結果受益地となった対岸・下流の氾濫ブロックが自立復興を支援する共助、その体制構築を通じた運命共同体化が重要である。④「法と経済学」の観点で合理性が見いだせない水害被害の国家賠償が、被害者救済の手段とされることが原告側と被告側の間に意図しない対立を産んでいる可能性がある。資産集中河川における自立再建支援制度・国家賠償制度の支払能力超過の課題とともに、制度限界・改善の検討が必要である。⑤河川構造物の破壊は、設計時に未知の現象、想定外の状態への変化により生じる場合があり、改善が欠かせない。自衛減災は成功を保証することはできず、絶えず改善することが重要である。これらの改善のための本質的検討が整理・蓄積され、関係者で共有されることにより減災対策が改善されることが重要である。事後の損害賠償や刑事責任追求との分離あるいは適切なバランス整理が望まれる。

応答特性に着目する検討の有効性の要点は次のようにまとめることができる。1)堤防等河川構造物の設計超過状態も含め洪水に対する応答の把握と考察を行うことで、破壊・被害拡大に至る構造物の本質的な応答が見えてくる。2)構造物の応答考察は力学的に幅広い外力範囲について見るのが、本質に迫る鍵である。3)堤内地の応答特性は、応急段階と再建・復興段階・準備段階に分けて、構造物の破壊から一般被害が発生・拡大する過程における建物や地物・人・社会の応答の把握と考察を通じて、本質的な応答・最も改善すべき部分・テコ入れすべき部分が見えてくる。4)それらの改善を行う上で障害となる事項は、教訓とすべき事例、手本とすべき事例を整理・考察することで見えてくる。5)堤内地応答と改善の障害を考察する際には、洪水以外の災害も加えて広く見る・復興まで視野に入れて見るのが重要である。6)被害発生を前提とする「減災」は、現行制度から外れることも視野に入れないと選択肢が広がらない。7)自衛のための減災の工夫検討においては、仮説段階から取り入れる姿勢が重要である。

気候変動により設計超過洪水の頻発が懸念される中、施設管理者だけでなく幅広い関係者が関わる減災を追求せざるを得ない中、「応答特性」に関する研究及び「減災」への反映研究の益々の発展が必要とされている。本論文はその先駆けとなるものである。