

学位請求論文要旨

河川堤防の基盤漏水における旧河道の影響評価と弱点箇所抽出方法に関する研究

Effects of shapes of abandoned rivers on the levee foundation leakage
and the estimation of potential locations of the levee collapse

都市人間環境学専攻 佐藤豊

Civil human and Environmental Engineering , Yutaka Satoh

【研究の背景と目的および研究成果】

近年、地球温暖化の影響と思われる異常な豪雨によって、災害が多発している。2019年の台風19号では、東日本の広範囲で計画高水位を超える洪水が発生し、多くの河川で堤防決壊が発生した。IPCCの予測では21世紀末までに気温が4°C上昇した場合には、降雨量が現在の約1.3倍、洪水流量が約1.4倍、洪水発生頻度が約4倍になるとされている。近年の豪雨では、矢部川、鬼怒川、小田川など全国の河川で堤防破堤被害が発生している。2015年9月の鬼怒川洪水では、鬼怒川中流部河道には河道貯留を持たせる地形上の余裕があったことから、福岡はダム群と河道を一体に捉えた「流域治水」の推進が今後の治水政策に必要であることを示している。また、河道及び堤防内に対する洪水流の動きを捉えることで、堤防破壊原因を弱め危険箇所を少なくする河道と堤防の一体的設計の考え方を示している。これらの考え方を実行していくには、堤防の破壊リスクを正しく捉えることが重要となる。国土交通省では、平成19年から堤防の安全性照査を全国の直轄河川で実施し、2019年には「河川砂防技術基準 設計編」に位置づけた。洪水時の堤防構造の照査技術は、非定常浸透流計算(断面二次元飽和-不飽和浸透流解析)及び円弧すべり計算(修正フェレニウスによる全応力法)である。この安全性照査は、現時点での技術手法であり、洪水による堤防不安定化、変形メカニズム等を考慮しているが、これらの機構は十分に確立されたものとはなっていない。非定常浸透流計算(FEM解析)は、降雨及び河川水を外力として、時間ごとの堤体内浸潤線等の把握が可能であるが、解析にあたって各層の層厚、透水係数の設定と不飽和透水係数や水位の境界条件等の計算にあたっての条件が多く、漏水の原因の解明には課題を残している。福岡は、洪水時の縦断的な水面形が河道で定まっている多様な水理現象を捉える有力な手段であることに着目し、堤防浸透破壊危険箇所の推定には、河川堤防内における浸潤線の横断水面形とその法先での泥濁化のタイミングの重要性を指摘している。このために、基本式より無次元パラメータである浸透流ナンバーを導き、これを堤防破壊に関係する洪水外力と堤体の構造特性から堤防浸透流の脆弱性指標 t^* を得た。脆弱性指標 t^* は、その値によって浸透破壊の規模を規定することができ、さらに実堤防と模型堤防の力学的相似条件を与えることが示され、堤防模型実験のもつ意味が明確化された。これらの技術進展により、堤防の浸透破壊の原因解明が進みつつある。近年、締固め管理された均一な土質材料で築堤された部分が堤防断面の大部分を占めるようになり、堤体の主要部の構造が明らかになってきており、堤防脆弱性指標等によって、堤防破壊リスクを評価することが可能となってきた。これに対して堤防基礎地盤は、明治期の河川改修によって直線化堤防が築造され、堤防直下にはかつての蛇行河川跡等が複雑に分布している。したがって、基盤漏水に対しての安全性照査手法を確立することが、治水安全度向上にとって重要である。近年の地質調査技術では、表面波探査、電気探査を組み合わせた統合物理探査等の非破壊探査技術による基礎地盤の可視化が進められているが、堤防破壊に最も密接に関係する表層土質構造を明確にできていない。この基礎地盤の土質を連続的に精緻に把握することができれば、堤防基礎地盤の弱点箇所をより高い精度で抽出することが可能になる。

本研究の目的は、基礎地盤の漏水(以下、基盤漏水)に着目し、地形学、地質学の広い視点から河道形成を調

べ、堤防被害形態と地形分類(特に旧河道)との関係を検討する。また、これまで整理されてきた約 80 箇所の漏水被災データを分析し、旧河道の土質構成、地下水状況を調べ旧河道の影響を検討する。それらの結果をもとに普遍的法則にもとづいた堤防基盤漏水の弱点箇所の抽出方法(調査方法、評価手法)を見つけ出すことである。

本研究では、空中写真判読等で詳細な旧河道分布を示した地形分類図を作成し、河道の形成過程を読み取ることで、漏水発生に影響がある旧河道を区分できることを示した。また、周辺支川の地形分類、旧河道分布も把握することで広域地下水の影響を把握することができ、漏水発生箇所を抽出することも可能である。堤防弱点箇所の抽出では、堤防脆弱性指標のように基礎地盤の水理作用を考慮した浸透しやすさで評価することで、千曲川で発生するすべての漏水形態を区分できることを示した。

【本論文の内容と成果】

本論文は、8章で構成される。各章の内容と成果の概要は、以下のとおりである。

第1章「序論」では、研究の背景と目的、研究概要を述べた。

第2章「旧河道と堤防弱点箇所に関する既往の研究」では、旧河道に係る治水地形分類図の課題、広域地下水と漏水の関係を整理した。また、堤体浸透に着目した評価項目である平均動水勾配、堤防脆弱性指標 μ^* 、堤防破壊危険確率を評価し、基礎地盤浸透に着目した抽出方法として堤防詳細点検、模型実験の現状を述べている。堤防詳細点検では、不飽和透水係数、境界条件の設定、降雨と河川水の外力を同時に与えていることから、被災した漏水の検証を行う場合に何が漏水の要因があったかを特定することが困難である。解析には、国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究室の1~2km間隔のボーリング試験データが用いられている。水位差は、定期横断測量によって200~500mの間隔で求められている。この間においても地質が複雑に変化しており、地形分類を反映した堤防沿いの連続的な地質構成の把握、土質特性の把握が重要であることを示した。

第3章「研究方法と対象河川、漏水形態」では、主に千曲川研究地の概要、研究方法、漏水形態を述べた。漏水形態は、(1)堤体漏水、(2)基盤漏水、(3)堤体被覆層による漏水、(4)狭窄部区間の漏水、(5)広域地下水の影響を受けた漏水、(6)常襲型漏水がある。堤体漏水、基盤漏水は、非定常浸透流計算(断面二次元飽和・不飽和浸透流解析)及び円弧すべり計算(全応力法)で検証することができるが、その他の漏水は、土質定数や境界条件等を変更し検討することもできるが、得られた結果だけでは漏水発生機構の説明は難しい。これに代えて、空中写真判読で作成した旧河道分布図によれば、ほとんどが旧河道付近で発生していることが明らかになった。

第4章「地形・地質分布図の作成と堤防基盤漏水の発生位置」では、空中写真判読で抽出した旧河道河道分布を記載した地形分類図に断層等を記入することで盆地、平野及び河道の形成過程が読み取れることを示した。千曲川の旧河道は、主に傾動運動によって形成され、現在の河道位置周辺を流れ、右岸側(東側)に旧河道が分布している。漏水発生位置との関係を見ると、犀川・裾花川扇状地は典型的な扇型を呈し、周辺丘陵から離れているため、支川等の影響はなく、漏水は発生していない。千曲川扇状地では、谷底堆積低地状を示すため、支川扇状地が河道付近に形成され、支川合流付近で漏水が発生している。飯山盆地では断層活動による地盤の沈降・隆が河道の変遷をもたらしており、旧河道の形状が網状、蛇行状、直線状に変化していること、旧河道の新旧は、河道の連続、不連続や現地調査で交差付近の段差状況から区分することができ、漏水発生箇所は蛇行幅、川幅の形状変化に着目して描いた4つの連続した蛇行状の旧河道が堤防と交差する箇所で漏水が発生していることを明らかにした。狭窄部では、人工的に埋め立てた粘土や腐植土の存在によって漏水が発生していることがわかった。梯川では縄文海進の影響を受けた範囲では表層に粘性土が分布しており、かつての汀線付近(古府地区右岸8.4kp付近)では、粘性土に深に透水性の高い砂礫が分布している。

第5章「基盤漏水・破壊形態に及ぼす旧河道の影響」では、5.1「旧河道の土質構成、透水性と基盤漏水発生箇所の検討」、5.2「旧河道の地下水分布と堤防周辺の基盤漏水発生箇所の検討」、5.3「旧河道位置と堤防破壊形態の検討」を行っている。「旧河道、基礎地盤透水性と基盤漏水発生箇所の検討」では、梯川堤防の基盤漏水形態

と表層土質構成の検討を行った。地表面から透水層までの表層土質において細粒分の多い土質の場合には、漏水のみの現象であり、粒径均一で細粒分の少ない砂層が分布する場合には噴砂が発生する。噴砂の発生する砂質土の粒度組成は、液状化しやすい粒度の範囲と同範囲であることがわかった。表層土質構成を単純な4パターンに整理し、漏水形態と模型実験結果と類似するケースをまとめた。

「堤防裏のり尻付近の土質縦断面図と基盤漏水発生箇所の検討」では、千曲川の基盤漏水について、堤防裏のり尻付近の土質縦断面図を作成し、氾濫原、旧河道の土質を整理し、漏水発生箇所との関係を検討した。扇状地では旧河道と氾濫原の土質の明瞭な区分は無く、礫混り土が主体に分布し、噴砂発生の粒度範囲外であることから、漏水のみの発生である。長野盆地の氾濫原(河床勾配1/700)では、蛇行幅が130mとなり、氾濫原の砂質土は噴砂発生の粒度範囲内にあり、旧河道との境界付近で噴砂を伴う漏水が発生している。飯山盆地の氾濫原(河床勾配1/1,100)では、蛇行幅が1,350mとなり、氾濫原と旧河道の土質は、細粒分と砂分の混合で類似した土質となり、オーガーボーリングによる目視観察により区分できることを示した。千曲川全体について旧河道と氾濫原の表層土質の粒度特性を調べた結果、旧河道の表層土質は粘性土が主体であり、氾濫原の表層土質は砂質土であることがわかった。さらに、旧河道と氾濫原の透水層(主に砂礫層)の透水係数の関係図から、旧河道部分の透水層の平均透水係数(累乗平均)は、 $k=8 \times 10^{-5} \text{m/s}$ であり、氾濫原の透水層の平均透水係数(累乗平均)は $k=8 \times 10^{-6} \text{m/s}$ と旧河道の透水係数が1オーダー大きいことがわかった。

「堤内地の地下水位観測データから見た本川と旧河道の関係」では、千曲川飯田地区、信濃川須田地区の地下水コンター図、地下水位変動図から、旧河道と氾濫原の地下水位を比較すると旧河道水位が高く、河川水位変動と連動していることを明らかにした。「旧河道沿いで繰り返し発生した基盤漏水」では、山王島地区において旧河道沿いで繰り返し漏水が発生しており、漏水対策は完全に旧河道を塞ぐことが必要であることを明らかにしている。「広域地下水の影響を受けた漏水」では、地形分類図と地下水コンター図の整理から五十嵐川の扇状地では、周辺丘陵からの地下水の涵養を受け、透水性が異なる氾濫原との境界付近で高い地下水位を形成し、旧河道を通じ本川へ伏流して漏水が発生するケースがあることがわかった。千曲川扇状地や木島地区のように支川の合流付近では、広域地下水の影響を受けた漏水が発生しやすい状況にあり、河川水のみの影響による漏水よりも低い河川水位で漏水が発生する。これらを抽出するためには支川扇状地の旧河道を判読することが重要である。これらの検討により、河川水が旧河道を浸透し、周辺氾濫原へ流れていくことがわかり、旧河道の土質構成は、氾濫原と比較して、水圧分布が高くなることを浸透流解析でも確認した。

「基礎地盤構造と堤防破壊形態」では、梯川の古府地区で発生した噴砂、すべり破壊箇所について検討を行った。噴砂、すべり破壊が発生した8.4kpのすべり形状はポータブルコーン試験結果、変状状況から円弧すべりに近い形状であることがわかった。堤防詳細点検で求めたすべり安全率は、1以上で実現象と一致しておらず、模型実験で確認される土塊移動によってせん断抵抗力が低下し、すべり破壊に至ったものと考えられる。「旧河道位置と堤防破壊形態」では、旧河道(粘性土)と堤防の位置関係と漏水形態の検討を行った。すべり破壊は、円弧すべり計算で求められるすべり円弧で噴砂が発生する砂層円弧長さの割合が大きさに影響することを示した。堤防と旧河道との位置関係では、千曲川の福島地区のように旧河道上に堤防がある場合、または相之島地区のように裏のり尻付近に旧河道が平行する場合には、抵抗側のすべり円弧に粘性土が厚く分布することで噴砂によるすべり破壊の影響は少なく、漏水のみの現象となることがわかった。

第6章「堤防弱点箇所の抽出方法」では、堤防基盤の漏水に及ぼす旧河道の影響検討から、堤防変形プロセスに応じた評価として、浸透による漏水のしやすさ、漏水を伴う噴砂のしやすさ、すべり破壊のしやすさの3段階の評価を行い、これらを総合的に勘案し、弱点箇所の抽出方法を行うことの必要性を明示した。

「抽出方法の手順」では、抽出方法全体の手順を示し、(1)検討区間の設定、(2)代表断面での弱点箇所の抽出、(3)詳細調査による弱点箇所の抽出の3段階による抽出方法を示した。「検討区間の設定」では、千曲川全体にお

ける表層粘性土層の層厚と漏水発生の関係図、基礎地盤の透水層の透水係数と漏水発生関係を整理し、扇状地、氾濫原、狭窄部、海岸平野に分けて区間設定した。

「代表断面での弱点箇所抽出」では、浸透による漏水のしやすさの評価では、堤防脆弱性指標 t^* が浸透流の一般的な支配方程式である Richards の式の無次元化から導き出されたものであることから、基礎地盤浸透においても t^* を準用できることを示した。それにより、千曲川で発生している広域地下水の影響を受けた漏水、常襲型漏水、漏水、噴砂、狭窄部区間の漏水を、浸透による漏水のしやすさの t_b^* で概略区分可能であることを示した。漏水、噴砂の変形プロセスの関係性でみると漏水発生範囲は $t_b^*=0.20\sim 1.20$ にあり、噴砂発生範囲は $t_b^*=1.20$ 以上であり、 t_b^* の大きさに応じ変形が大きくなること、 $t_b^*=1.20$ 以上の噴砂発生基礎地盤の表層土質構成をみると上位から粘土、砂、砂礫の土質構成で噴砂が発生していること、広域地下水の影響を受けた漏水、常襲型漏水は、 $t_b^*=0.03\sim 0.20$ の範囲で発生していることがわかった。これらの漏水は、進行性パイピングや広域地下水の影響で低い河川水位で漏水が発生することから、漏水、噴砂の発生範囲の t_b^* よりも低い範囲にあると考えられる。

「弱点箇所の抽出方法の妥当性」では、抽出された弱点箇所が3回の漏水が発生している常襲型漏水であり総合評価方法が妥当であると判断される。総合評価で噴砂、漏水と判断され、実際には発生していない箇所(64.25～67.5k 付近)は、犀川と千曲川の合流付近で川幅が1.1kmと最大幅の区間であり、2006年洪水では下流区間ではH.W.L.付近であったが当該区間ではH.W.L.-1.5m程度であったことから、漏水程度であったと考えられる。また、縦断方向の粒度特性(20%粒径)と透水係数の関係を整理すると千曲川扇状地よりも大粒径であることから、笹岡、上野らの砕石の模型実験のパターンと類似するもので噴砂が発生しなかったことも考えられる。

広域地下水の影響を受けた漏水の t_b^* の大きさと実現象を比較すると、常時から湧水がみられる箇所でも最低値を示していることを明らかにした。以上から、浸透による漏水のしやすさ t_b^* は、堤体の浸透を評価できる堤防脆弱性指標 t^* と同様に変形プロセスに応じた値で評価可能であると考えられる。

「詳細調査方法」では、扇状地、狭窄部、氾濫原ごとに漏水の詳細調査の手順および調査方法を示した。長野盆地や飯山盆地の氾濫原では200m程度四方を旧河道に囲まれた部分で噴砂を伴う漏水が発生することを示した。

第7章「旧河道の影響評価を踏まえた既設対策工の考察」では、基盤漏水に及ぼす旧河道の影響検討から、千曲川の対策工について考察した。影響を及ぼす旧河道を完全に塞がない場合には次洪水で再び漏水が発生しており、旧河道を完全に塞ぐ必要がある。千曲川で発生している漏水形態ごとに対策工の考え方、対策工を示した。

第8章「結論及び展望」では、本研究で得られた成果を総括し、今後の展望について述べている。本研究では、地形分類ごとの詳細な旧河道分布図を示し、断層等を加えることにより、河道の形成過程が読み取れ、旧河道の新・旧区分を行うことができる。弱点箇所の抽出では、堤防浸透評価に用いられる堤防脆弱性指標の考え方を基盤漏水にも適用できること、抽出方法は変形プロセスを踏まえた3段階の評価を総合的に評価することで抽出可能であること、特に浸透による漏水のしやすさでは、その大きさに応じて、漏水、噴砂、広域地下水の影響、常襲タイプ、狭窄部の漏水が区分できること、詳細調査では堤防裏の尻付近の土質縦断図作成のためのサウンディング調査を行い、土質縦断図に河川水位との関係を示し、漏水発生箇所の抽出を行うこと、表層土質構成、粒度特性、円弧すべり安全率から漏水形態(漏水のみ、噴砂を伴う漏水、すべり破壊)の抽出を行うことができることを示した。

今後の展望は、浸透による漏水のしやすさの t_b^* について、他の河川データやすべり破壊に至ったデータを分析することで破壊プロセスまでの範囲を求めることが必要と考えられる。また、基礎地盤漏水に主体をおいた堤防模型と相似な現場堤防の t_b^* を比較することで、基盤漏水における t_b^* の力学的相似が確立すること、さらに基礎地盤漏水による破壊研究を流域全体の河川水、広域地下水の一体解析による精度の高いモデルの構築により、弱点箇所の抽出方法を確立していくことが今後求められる。