

超過洪水時における 堤防破堤確率評価手法に関する研究

STUDY ON EVALUATION METHOD FOR PROBABILITY OF LEVEE FAILURES DURING LARGE SCALE FLOOD

田端幸輔¹・福岡捷二²・瀬崎智之³

Kosuke TABATA, Shoji FUKUOKA and Tomoyuki SEZAKI

¹正会員 中央大学大学院理工学研究科都市環境学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²フェロー 工博 Ph.D. 中央大学研究開発機構教授 (同上)

³正会員 国土交通省北陸地方整備局信濃川下流河川事務所 (〒951-8153 新潟県新潟市中央区文京町14-13)

It is important to establish an evaluation method for probability of levee failures during large scale floods for planning adaptation measures for a whole river basin. In this study, the evaluation method for probability of levee failures are presented. This method consists of the flood flow analysis and reliability analysis based on soil modulus investigated by longitudinal boring surveys on the levee. The present method was applied for the lower Shinanogawa River and the probability of levee failures were evaluated for large scale floods whose water levels reached the freeboard of levees. Finally we discuss issues to be solved and future works toward the crisis management plan for large scale flood.

Key Words : *probability of levee failure, reliability analysis, flood flow analysis, soil modulus, crisis management for large scale flood*

1. 序論

近年、洪水外力の増大による甚大な水災害が毎年のように発生している状況にあり、流域が抱えるリスクを踏まえた有効な減災適応策が強く求められている。このためには、大規模洪水時の洪水流下・河床変動特性を説明できる物理モデルと、破堤個所の推定技術の構築が喫緊の課題である。平成16年7月、平成23年7月と二度に亘って計画規模に相当する大規模洪水を経験した信濃川下流域は、これら一連の検討を行うためのモデルケースに位置付けされている¹⁾。前者の課題について、著者らは、観測水面形の時間変化に基づいた洪水流・河床変動の一体的解析法を適用することで、複雑な河道システムを有する信濃川下流域全体の洪水伝播と河床変動を的確に説明できることを示している²⁾。一方、後者の堤防破堤については、H.W.L. (暫定堤防区間ではスライドダウン高一計画余裕高) を基準とし、これ以上の水位となると破堤するとして実務上は評価されてきた³⁾。しかし、整備途上である多くの河川では、現実には、超過洪水発生時に洪水流はH.W.L.を超えて堤防余裕高部分も流れることになる。このような水位外力による堤防の破壊危険性を評価することは、水害リスクを考慮した流域の治水適応

策の検討上重要である。

オランダ、イギリス、アメリカ等では、堤体材料の不均質性等に起因して堤防の力学強度に変動性を有することを考慮し、破堤現象を確率的に捉えることで、破堤リスクを評価する手法が採用されている⁴⁾。破堤確率は、構造や土質の分野で多く用いられる信頼性解析法⁵⁾により検討されることが多い。破壊モードには、越流、パイピング、浸透、侵食等が想定されており、各モードの破壊を説明する性能関数によって発生確率が評価されている。海外の河川は、河川延長が長大で洪水継続時間が長いことから、定常状態を仮定したものが多く見られる⁶⁾。また、性能関数に含まれる多くの不確実なパラメータについては、経験的に得られた参考値がデータベース化されている。国内においても、堤防の破壊現象を確率的に捉えた研究が行われている。これまで、松尾⁷⁾は、被災事例のある河川を対象に、滑り破壊による破堤確率の算出を試みている。しかし、得られた土質データの数に限りがあったことから、数断面のみの検討であり、長大な堤防を縦断的に捉えたものではない。森・高木ら⁸⁾は、仮想流域を対象にフラジリティカーブを用いて、堤防破壊確率を求め、H.W.L.で破堤するとして現行方式との被害規模の違いについて比較を行っている。ここで、堤防破壊確率には、全国の中小河川堤防の被災事例データに

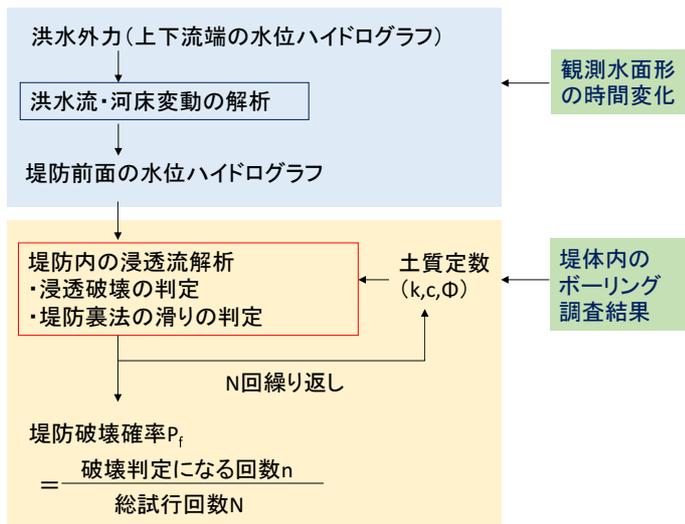
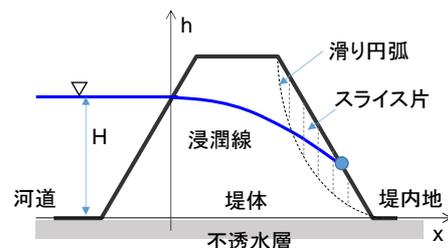


図-1 破堤確率算定の流れ

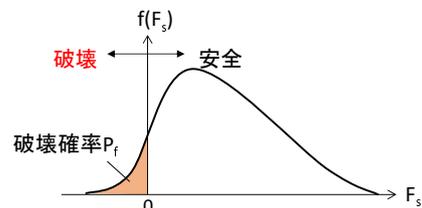
基づいて推定されたロジスティックモデル (宇野ら⁹⁾) によるフラジリティカーブが用いられている。ロジスティックモデルには、堤防形状や堤体土質等がパラメータとして入っており、水位を入力することで破壊確率が算出されるが、物理モデルでなく重回帰分析による相関モデルであるため、他河川への汎用性は高いとはいえない。本城¹⁰⁾は、実河川の堤防10km区間を対象とし、堤防の安全性を評価する上で信頼性解析法がどの程度有効であるかについて検討している。ここでは、堤防設計に用いられる一般的な計算手法を用いて、土質定数と堤防破壊を回帰式により関係付けた応答曲面を用いて信頼性解析を行っている。なお、土質定数に加えて、回帰式と設計モデル化誤差による不確実性を考慮しており、要因毎の不確実性が結果にどの程度影響するかについて検討している。また、精度向上に向けた課題が示されており、今のままでは定量的に堤防の安全度を評価することが難しいため、堤防設計で与えられる土質定数や設計法、結果の解釈について統一した見解が必要であるとしている。

このように、国内外において破堤現象を確率的に扱う手法について検討がなされ、適用性や課題が議論されている。堤防破壊確率を精度よく推定するには、学術的に多くの課題があるが、現在入手できる測定データを活用し、余裕高部分を通る超過洪水時における長大堤防の破壊確率を、堤防毎に縦断的に見ていくことは、危機管理対策を講じていく上で、実務上重要である。しかし、このような危機管理の視点で破壊確率や治水機能を検討した研究は見られない。

本研究では、最初に長大な堤防の超過洪水に対する危機管理対策に向けた堤防機能評価手法の確立を目指し、水理解析と堤体ボーリング調査結果に基づき、土堤防の破壊確率縦断分布の算出方法を提示する。次に、本手法を信濃川下流域の平成23年7月洪水に適用し、堤防の破壊確率を評価すると共に、超過洪水時における危機管理



(a) 堤体内の浸潤線と滑り円弧



(b) 安全率の確率密度分布

図-2 堤体内の浸潤線と滑り円弧及び安全率に関する確率密度分布の概念図

対応としての堤防治水機能評価と水害リスク検討に向けた課題を示す。

2. 破堤確率の算出方法

(1) 破堤確率の計算手順

図-1に、本研究における破堤確率算定の流れを示す。堤防前面の水位ハイドログラフの縦断分布を入力条件とし、土質定数をパラメータとした信頼性解析によって、堤防破壊確率を算出する。堤防前面の水位ハイドログラフの縦断分布は、検討対象領域において観測された水面形の時間変化に基づいた洪水流・河床変動解析の結果を用いるものとする²⁾。破壊モードとしては、越流やパイピング、堤体漏水、滑り破壊が挙げられる。しかし、越流やパイピングに関しては、物理モデルによる解析^{11),12),13)}や、地形・地質調査等の蓄積をベースとした分析によって、発生個所や危険性を概ね推定可能となると考えられることから、本検討では対象外とする。本文では、堤体の粒度分布や土質定数の値が不確実なため推定が困難となる浸透 (堤体漏水) と裏法の滑り (図-2(a)) を扱うものとする。

(2) 破壊基準の考え方

a) 浸透 (堤体漏水)

堤防詳細点検等で実施される堤体内浸透流の計算には、土層毎の土質定数分布や、飽和度に応じた透水係数の変化等が考慮できる鉛直二次元浸透流解析手法を用いるのが一般的である¹⁴⁾。しかし、この手法は、ボーリング調査結果が無い区間において、詳細な土質構造と土質定数を設定することに限界があること、計算時間に時間を要することから、長大区間の堤防破壊確率の縦断分布を検討するには不向きである。

そこで本研究では、浸透流の水面形の評価には式(1)に

示す内田¹⁵⁾が提案した非定常浸潤線の推定式を用いる。

$$\frac{h(x,t)}{H} = 1 - \left\{ \frac{x/H}{\sqrt{8/(3\lambda)}\sqrt{k\Delta t/H}} \right\}^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

ここに、 h ：水位、 H ：外水位、 k ：透水係数、 Δt ：浸透時間、 λ ：空隙率である。本手法は、不透水地盤上に設置された盛土内の非定常水平浸透流の近似解であり、洪水継続時間と河道水位の時間変化を考慮することができる。式(1)は、ダルシー則が成り立つ浸透流場におけるラプラス方程式を、図解法によって解かれたものであり、模型実験との比較によって手法の妥当性が示されている。内田の式は、今日においても堤体裏に浸透流が到達するまでの時間の推定等に多く用いられている。堤体の浸透破壊の技術基準は確立されていないため、本手法では、式(1)で計算される浸潤線が、裏法面のいずれかの地点に達した場合に破壊と判定する。

b) 堤体裏法滑り

河川水位が上昇し、堤体内の浸潤線位置が高まるにつれて、堤体裏法面の滑り破壊の危険性が増大する。ここでは、堤体裏法の滑り面の力の釣り合いを円弧滑り法¹⁴⁾ (式(2))によって評価する。粘着力と内部摩擦角によるせん断抵抗に対して、滑り土塊の重量が大きくなる場合、すなわち安全率が1より小さくなった場合に滑り破壊が生じるものとする。

$$F_s = \frac{\sum cl + (w - ub)\cos\theta \tan\phi}{\sum w \sin\theta} \quad (2)$$

ここに、 F_s ：裏法滑りに対する安全率、 c ：粘着力、 l ：スライス片の円弧長、 w ：スライス片の重量、 θ ：スライス片の斜面勾配、 u ：間隙水圧、 b ：スライス片の幅 (1mで設定)、 ϕ ：内部摩擦角である。通常は、円弧の中心点と半径を変化させ、安全率が最小となる滑り円弧を探索する。しかし、ある程度粘着性土を含有する信濃川下流堤防では、裏法面全体を含む大きな円弧の時に安全率最小となったため、ここでは、裏法肩～法尻を包絡する円弧を仮定して計算する。

(3) 破堤確率の算出

式(1)、(2)に含まれる透水係数、粘着力、内部摩擦角は、堤体内の土質構造や築堤材料の不均質性等により不確実性を有する。本研究では、堤体内の土質定数を代表値で扱うものとする。そして、不確実パラメータは平均値の周りをばらついているものと仮定し、モンテカルロ法⁵⁾によって定数をランダムに抽出し式(1)、(2)を入力する。この操作を十分な回数実施することで、図-2(b)に示すような確率密度分布が得られる。ここで、破壊判定となった回数を総試行回数で除することで破堤確率を算出する。また、「浸透または裏法滑りが生じる確率」は、2つの破壊モードの和事象で表される。しかし、和事象



図-3 信濃川下流の流域図

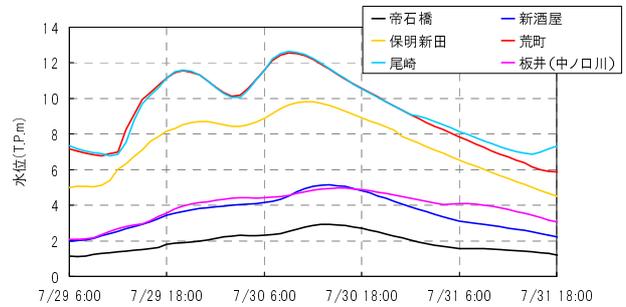


図-4 平成23年7月洪水の水位ハイドログラフ

の確率は、相互の相関の程度によって値に幅を持つため、正確に求めることが困難であることから⁵⁾、ここでは式(3)に示す範囲で表すものとする。

$$P_f = P_{f1} \cup P_{f2}, \quad (3)$$

$$\max(P_{f1}, P_{f2}) \leq P_f \leq P_{f1} + P_{f2} - P_{f1} \cdot P_{f2}$$

ここに、 P_f ：破堤確率、 n ：破壊判定となった回数、 N ：総試行回数、添え字 i ：破壊モード(1：浸透、2：裏法滑り)である。

3. 信濃川下流域における破堤確率の推算

(1) 検討条件

図-3に示す信濃川下流域の平成23年7月洪水を対象に、近年実施されたボーリング調査で計測された堤体の土質定数データを用い、物理解析と信頼性解析により堤防破壊確率の縦断分布の算出を行った。堤防の浸透計算の境界条件には、洪水流・河床変動解析²⁾で得られた堤体前面の水位ハイドログラフを与えるものとした。図-4に水位観測点における水位ハイドログラフを示す。なお、水位低下時には浸潤線の浸入は無視できるものとし、水位上昇期のみを対象に破堤確率の算出を行った。

(2) 堤体内の土質定数縦断分布の設定

信濃川下流では、平成16年7月洪水による被害を受け、本川の堤防嵩上げ及び前腹付けが実施されてきた。整備実施に先駆け、平成17年から平成20年にかけて、左右岸堤防について計79断面のボーリング調査が実施され、堤体内の粒度分布や土質定数等が計測されている。これらのデータは、全国の一級河川で実施されたボーリング調査結果として公表されている（国土技術総合政策研究所HP参照）。本検討では、ボーリング調査位置図及びボーリング柱状図（信濃川下流河川事務所提供資料）を参考に、堤体部分に相当するデータ（粒度分布、N値、10%粒径、20%粒径、粘着力c及び内部摩擦角φの力学試験値）を抽出し、土層厚で荷重平均することで、調査地点における代表値を設定した。透水係数は、以下に示すHazenの式及びCreagerの式¹⁴⁾により推定した。

$$\text{Hazenの式} : k = 0.0001CD_{10}^2 \quad (4)$$

$$\text{Creagerの式} : \begin{cases} D_{20} \geq 0.003; k = 0.0036D_{20}^{2.368} \\ D_{20} < 0.003; k = 0.000647D_{20}^{1.885} \end{cases} \quad (5)$$

ここに、k：透水係数(m/s)、C：係数(=100)、D₁₀：10%粒径(mm)、D₂₀：20%粒径(mm)である。集計した信濃川の左岸堤防の土質定数の縦断分布を図-5に示す。これによると、8kより下流側では砂分が多く存在し、透水係数が相対的に大きく、20～38k区間では主にシルト・粘土分により構成され、透水係数は小さい。このように、堤体内の粒度分布や透水係数は、縦断的に大きく変化している。一方、粘着力cに関する力学試験値は全体的に20kN/m²を超える大きな値が分布しており、φは0～30度の範囲で大きくばらついている。また、これらの値と土質特性との対応関係も明確でなく、例えば15k付近では、シルト・粘土分が少ないにも関わらずcが60kN/m²を超えている。したがって、これらのデータを直接使用すると裏法滑りの危険性を過小評価することになる。石原ら¹⁶⁾は、堤体法面滑りに関しては、cとφを独立に決めるのではなく、土質特性に応じた適切な組み合わせが重要であると、全国の河川堤防のボーリング調査結果に含まれている非排水三軸試験から得られた膨大な数の強度定数を、cとφの組み合わせで整理し、頻度の高い組み合わせを土質区分とN値によって分類している（表-1）。本研究では、cとφを石原らの方法によって設定した。図-5の青色及び緑色プロットは、石原らの方法によって設定されたcとφを示す。設定したc、φは土質特性に応じて縦断的に変化し、cに関しては、赤色プロットの力学試験値よりも全体的に小さめの値となることが確認できる。

透水係数の縦断分布は、ボーリング調査が実施されている箇所では調査データを直接与え、調査データが無い区間については、近隣の調査データから内挿することで設定した。なお、透水係数はHazen及びCreagerの式による推定値の間に有意な差が見られないことから、ここで

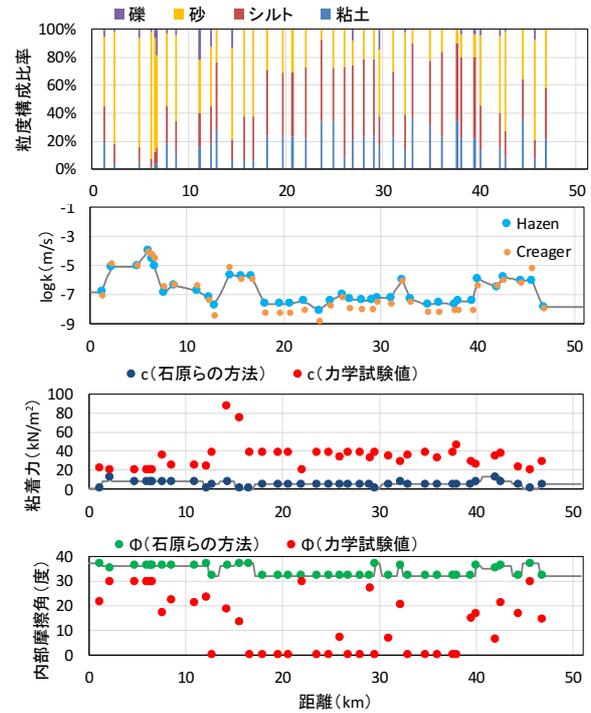


図-5 信濃川下流左岸堤防の土質定数の縦断分布

表-1 土質、N値による河川堤防の粘着力と内部摩擦角の分類¹⁶⁾

土質	N値	粘着力 (kN/m ²)	内部摩擦角 (度)
砂質土	16 ≤ N	13	35
砂質土	6 ≤ N ≤ 15	8	36
砂質土	0 ≤ N ≤ 5	1	37
粘性土	0 ≤ N ≤ 5	5	32

表-2 全国のボーリング調査結果から推計した各パラメータの変動係数と分布形

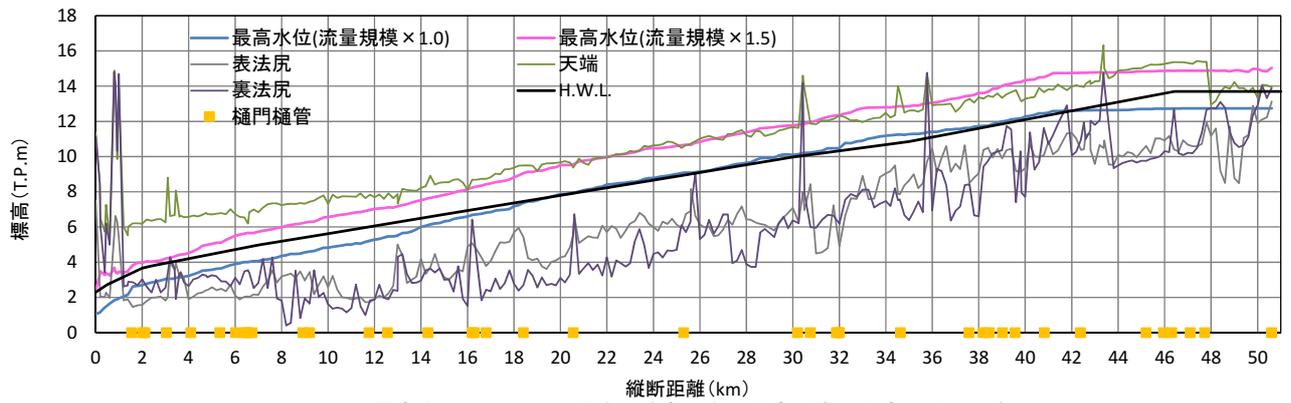
パラメータ	変動係数	分布形
透水係数	0.3	対数正規分布
粘着力	0.2	対数正規分布
内部摩擦角	0.3	正規分布

はHazenの式による推定値を用いるものとした。透水係数、粘着力、内部摩擦角のばらつきは、全国の一級河川で実施されたボーリング調査結果の公表値を基に、集計した結果から得た変動係数(=標準偏差/平均値、表-2)で与えた。なお、本研究ではモンテカルロ法の総試行回数を1万回とした。こうすることで、想定した土質定数の確率密度分布を十分な精度で表現できることを確認している。

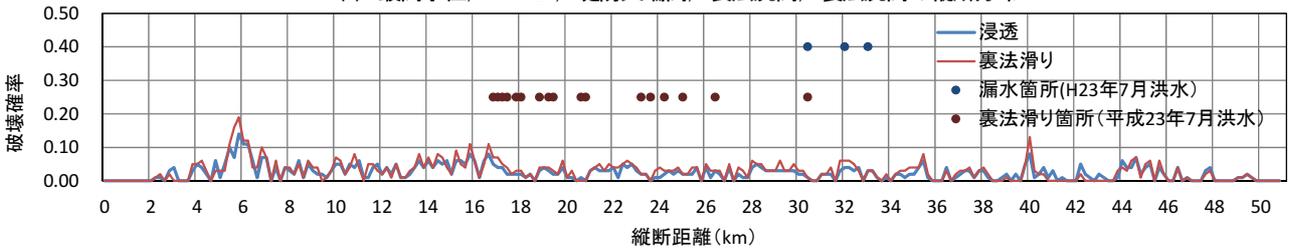
(3) 破堤確率の算定結果

a) 平成23年7月洪水規模における破堤確率縦断分布

図-6に、信濃川下流の左岸堤防の破堤確率縦断分布を代表して示す。図-6(a)には最高水位、H.W.L.、堤防高、樋門・樋管位置の縦断分布を、図-6(b)には破堤確率の縦断分布を実績の堤防被災箇所と共に示している。これによると、透水係数が大きい6k付近において破堤確率が相対的に大きく算出される。また、浸透が生じやすい箇所



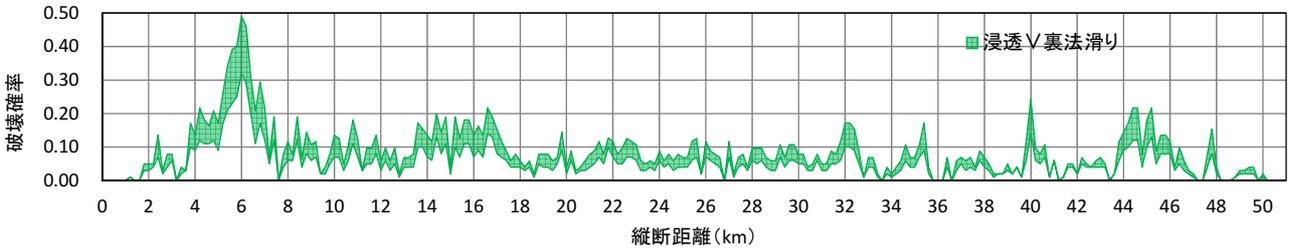
(a) 最高水位, H.W.L., 堤防天端高, 表法尻高, 裏法尻高の縦断分布



(b) 浸透, 裏法滑りによる破堤確率の縦断分布 (平成23年7月洪水)



(c) 浸透または裏法滑りによる破堤確率の縦断分布 (平成 23 年 7 月洪水)



(d) 浸透または裏法滑りによる破堤確率の縦断分布 (平成 23 年 7 月洪水 × 1.5)

図-6 信濃川下流の水位・堤防高と破堤確率の縦断分布 (左岸堤防)

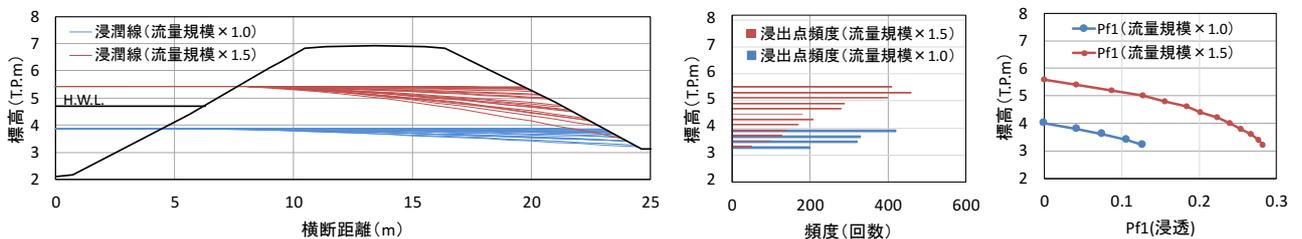


図-7 浸潤線と裏法浸出点位置の発生頻度及び浸透破堤確率の鉛直分布 (左岸 6k 堤防の例)

所において裏法滑りの発生確率も大きくなっており、浸潤線の上昇が滑り破壊に対して危険になることが表現できている。破堤確率が大きい箇所と漏水及び裏法滑りの実績箇所は必ずしも一致しないが、算出した破堤確率は、全ての被災実績箇所において0より大きくなることが確認できた。また、堤体に砂分が70%以上含まれ、透水係数が相対的に大きい箇所破堤確率が大きくなる傾向が確認された。

b) 洪水外力を増大させた場合の破堤確率縦断分布

大規模な外力が発生し、洪水水位がH.W.L.を超え堤防満杯に近い水位で流下する場合を想定し、破堤確率を検討することは危機管理対策を議論する上で必要である。流量規模を平成23年7月洪水の1.5倍 (1/255流量確率規模) に増大させた場合について、縦断的な破堤確率を検討した。図-6(a)に流量規模を増大させた場合の水位縦断分布を、図-6(c), (d)に破堤確率縦断分布をそれぞれ示

す。ここでは浸透または裏法滑りが生じる確率を示している。なお、水位が堤防高を超えた箇所については、堤防高を上限として破堤確率を評価している。これによると、外力が増大すると破堤確率は全体的に増大するが、主にシルト・粘土分により構成される左岸20k~38k区間では、外力が増大し堤防満杯程度になっても破堤確率は小さいままである。一方、砂分を多く含み透水性が高い6k付近では、外力の増大に伴い、破堤確率の増加率が大きくなる。

次に、裏法における浸出点位置と浸透破壊確率の関係を検討する。図-7に、破堤確率が大きくなる6k左岸堤防のピーク水位時における浸潤線と、裏法の浸出点位置の発生頻度及び浸透破壊確率の鉛直分布をそれぞれ示す。なお、裏法に到達した時には既に法先部分が飽和状態になり、浸出面が生じていると考え、裏法面における浸出点出現頻度を鉛直下向きに積分することで、破壊確率の鉛直分布を表現した。これによると、法面上部で浸出点出現頻度が高くなる傾向が見られる。これは、透水係数が大きいと浸潤線が上昇し、浸透長が短くなるためである。また、破壊確率の鉛直分布は、法先部分で最も大きくなる結果となり、その大きさは流量規模が大きくなると増大する。本検討結果は、余裕高部分を洪水が流下するとき、堤体浸透により法先部分が崩壊しやすくなる傾向を表しているものと考えられる。

4. 堤防の破堤確率を用いた水害リスク評価に向けた課題

堤体は長い線状構造物であり、土質構造の十分な情報がない等の理由から、堤体の破壊がいつ、どこで、どのように起こるか極めて不確実性が高い。本研究の主要な狙いは、現在活用可能な、測定された堤防土質データを用いて、超過洪水時における長大堤防の破堤確率の縦断分布を求め、河川及び流域の危機管理適応策に資する手段を見出そうとするものである。本手法を、河川及び河川流域の水害リスクを検討する具体的な手段とするためには、次の三つ点について検討する必要がある。一点目は、密なボーリング調査と堤体被災に関するデータの蓄積である。特に堤体土質の粘着力と内部摩擦角の空間分布の値の算定精度を高めることは、滑り破壊箇所の推定精度の向上に繋がる。また、洪水時における漏水や法面滑り発生箇所の調査は、堤防危険箇所の推定結果の適合性確認のための有益な情報となる。二点目は、多くの河川において、本手法を用い堤防破堤確率の検討事例を増やしていくことである。河道特性や堤体形状、堤体材料と破堤確率の関係を調べることは、求めた破堤確率の値の持つ意味を検討していく上で重要である。三点目は、堤防破堤確率の意味が明らかになったときに、地域特性を考慮した水害リスク評価を行うために、どのようなことが検討されねばならないか具体的に考えることである。

5. 結論

本検討で得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 信濃川下流域を対象とし、物理モデルと信頼性解析モデルによって洪水中の堤防破壊確率を算出し、危険箇所を評価した。
- 2) 堤体に砂分を多く含み、透水係数が相対的に大きい箇所では破堤確率が大きくなる傾向が確認された。また、浸透が生じやすい箇所では裏法滑りの発生確率も大きくなっており、浸潤線の上昇が滑り破壊に対して危険になることが表現できることが確認された。
- 3) 外力が増大し、H.W.L.~堤防満杯までの余裕高を使って流下する場合、透水係数の大きい箇所では堤防裏法面における浸潤線到達位置が高くなり、破堤確率が増大することが確認された。

参考文献

- 1) 平成23年7月新潟・福島豪雨水害の検証を踏まえた治水方策に関する懇談会：新潟・福島豪雨水害を教訓とする今後の治水方策について、国土交通省北陸地方整備局，2011。
- 2) 田端幸輔，福岡捷二，中平善伸：複雑な河道システムを有する信濃川下流域の治水機能の評価と今後の治水対策のあり方，水工学論文集，第58巻，pp.1483-1488，2014。
- 3) 治水経済調査マニュアル（案），国土交通省，2005。
- 4) 米英蘭の水災害・水資源管理に係る気候変動適応策に関する事例調査，国土交通省国土技術政策総合研究所，2012。
- 5) 星谷勝，石井清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版社，1986。
- 6) H.M.G.M. Steenbergen, B.L. Lassing, A.C.W.M. Vrouwenfelder1, and P.H. Waarts : Reliability analysis of flood defense systems, HERON, Vol. 49, No. 1, pp.51-73, 2004。
- 7) 松尾 稔，上野 誠：洪水時の堤防の浸透解析と破壊予知に関する一考察，土木学会論文報告集，第299号，pp.73-84，1980。
- 8) 森寛典，高木朗義：堤防の破堤確率を考慮した洪水被害額の算定方法に関する基礎的考察，河川技術論文集第13巻，pp.297-302，2007。
- 9) 宇野尚雄，森杉壽芳，杉井俊夫，中野雄治：被災事例に基づく河川堤防の安定性評価，土木学会論文集 第400号/III-10, pp.161-170, 1988。
- 10) 本城勇介：信頼性解析法の河川堤防への適用 一問題点の整理一，国土技術研究センター堤防委員会基調講演，2012。
- 11) 内田龍彦，福岡捷二，構造物を越流する流れの解析法の開発，河川技術論文集，第18巻，pp.351-356，2012。
- 12) 水谷英朗，中川一，奥田敏明，川池健司，張浩，砂質堤防越水時の浸透とすべり破壊を考慮した越流破壊解析法の検討，京大防災研年報，pp.459-469，2013。
- 13) Sellmeijer, J.B. : On the mechanism of piping under impervious structures, PhD-thesis, Delft University of Technology, 1988。
- 14) 河川堤防の構造検討の手引き（改訂版），財団法人国土技術研究センター，2012。
- 15) 内田茂男：自由境界を有する非定常浸透流について，土木学会誌，pp.58-62，1952。
- 16) 石原雅規・平林 学・吉田直人・佐々木哲也，圧密非排水三軸試験による強度定数と標準貫入試験及び物理試験結果の関係，第58回地盤工学シンポジウム，pp.211-216，2013。

(2014. 9. 30受付)