準二次元非定常浸透流解析に基づいた パイピングによる堤防破壊危険度の評価法

田端 幸輔1・福岡 捷二2

¹正会員 中央大学研究開発機構助教 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27) E-mail: k-tabata@tamacc.chuo-u.ac.jp

> ²フェロー 中央大学研究開発機構教授 (同上) E-mail: sfuku@tamacc.chuo-u.ac.jp

洪水時の河川堤防の破壊危険性を理解し、弱点箇所の堤防強化や危機管理対策を進めていくことは、極 めて重要な治水課題である.著者らはこれまでに堤体浸透に起因した浸透、裏法滑り破壊危険確率の算定 法及び堤防脆弱性指標を提案した.本論文では、基盤漏水に起因した堤防破壊を対象とし、洪水時におけ る基盤透水層内の浸透水の挙動と圧力水頭分布を準二次元浸透流解析の枠組みで見積もることで、被覆土 の盤膨れの発生と、パイピング発生時の砂の抜け出しによる堤体の安定性低下を評価する手法を提案する. そして本手法により、実際に洪水中に起こったパイピングによる堤防破壊及びその危険性を説明できるこ とを示し、今後の検討課題を論じている.

Key Words: levee, ground foundation, levee failure, piping, quasi-2D seepage flow analysis

1. はじめに

河川の氾濫災害から人々を守る長大な河川堤防は,最 も重要な治水施設である.近年の洪水頻発化,洪水外力 の巨大化を踏まえると,洪水時における河川堤防の破壊 の危険性を理解し,弱点箇所の堤防強化や流域の危機管 理対策を検討することは極めて重要な治水課題である.

近年、堤防ボーリングデータ、堤防被災箇所の詳細な 現地調査データ等が得られてきたことから、堤体が不透 水性基盤の上に建設されている場合や、基盤が透水性材 料で構成されている場合、または基盤層の上に不透水性 の土が被覆している場合等、河川堤防の基盤の条件は 様々で、このために堤防の被災形態や規模も異なること が分かってきた. 著者らはこれまで, 洪水時の堤体浸透 による破壊危険性を推定することを目的とし、堤体直下 の基盤を不透水性であると仮定し、洪水流解析と堤防ボ ーリング調査データに基づいた信頼性解析を用いて、堤 体浸透及び裏法滑りに対する堤防破壊危険確率を算定す る手法を構築した¹⁾. 更に, 洪水水位ハイドログラフと 堤体透水係数、堤防諸元から堤防脆弱性指標を導出し、 実際に堤体浸透破壊や滑り破壊が生じた箇所で堤防破壊 危険確率と脆弱性指標が共に高くなることを確認してき た2). 更に、堤体直下の基盤が透水性である場合は、堤 体に浸透した水の一部が基盤層に抜け出ることにより堤 体内浸潤線が低下することで堤体浸透破壊の危険性が軽 減されることに着目し、これを表現できる浸透流解析手 法を考案した³⁾.これより、堤防直下の基盤層の透水性 を考慮に入れた堤体浸透、裏法滑り破壊危険性の評価を 可能とした.ただし、基盤透水層からの局所的な漏水や パイピングが要因となって生じる堤防被災は、堤体浸透 とは破壊メカニズムが異なるため、著者らが提案してき た上記手法を適用することは適切でない.被災が生じた 堤防の堤体、基盤層、被覆土等の土質構造に着目すると、 洪水時の漏水やパイピングによる破壊危険性を評価、分 析できる可能性があり、このような技術を高めていくこ とは喫緊の課題である.

本論文では、堤防を、自然に堆積した基盤の上に建設 された土構造物として捉え、洪水位の上昇及び洪水継続 時間の経過に伴う基盤透水層内の浸透水の挙動と圧力水 頭分布の変化を準二次元浸透流解析の枠組みで見積もる. これに基づいて被覆土の盤膨れ発生とパイピング発生時 の砂の抜け出しによる堤体安定性の低下を評価する手法 を提案する.そして、堤防決壊を含む堤体被災が生じ、 堤防に作用した洪水外力、堤体及び基盤の土質構造、透 水係数が既知な実河川堤防に本手法を適用し、盤膨れ発 生と堤体安定性低下の危険性と被災規模との関係につい て分析し、本手法を用いることの有用性、技術的課題に ついて論じる.

2. パイピング破壊危険性評価の現状と課題

我が国では平成 14 年に堤防照査手法⁴⁰が構築された. この照査法では,堤体の下に不透水層があり,その直下 に透水性基盤層が存在する場合,揚圧力の増大によって 堤防裏法先から行き止まり箇所までの被覆土の盤膨れが 生じるかどうかによってパイピング破壊危険性が評価さ れる.具体的には,堤体と基盤層を含めた断面全体をモ デル化し,設計水位波形に対して鉛直二次元飽和・不飽 和浸透流解析が実施される.盤膨れ発生の有無は,堤防 裏法先から行き止まり箇所までの被覆土層の重量 *G* と 被覆土の下部に作用する揚圧力 *W* の比により算出され る安全率 *GW* が 1 を下回るかどうかによって評価され る.なお,オランダでは,盤膨れ発生後に,経験式であ る Sellmeijer の式⁹を用いてパイピングによる破壊危険性 が評価されている⁹.

堤防照査の主目的は河川毎の個別の堤防構造設計や安 定性照査であるが、実際に発生した堤防破壊現象を説明 し得ていないのが現状である.また,被覆土の盤膨れに よって亀裂が発生し、パイピング破壊に至るプロセスを 考えるには、基盤層内から抜け出る砂の挙動を表現しな ければならない. 土中浸透流場における砂粒子の移動限 界流速がは古くから提案され、室内実験によって検討さ れてきたものの、実験条件によって値がかなりばらつく ことが知られている.この主な理由は、移動限界値が次 元量で定義されているためにスケールの影響が大きく現 れているためと考えられる.また、室内実験によりパイ ピング発生機構に関する研究が行われ⁸⁾,基盤層構造と パイピング発生との関係やダルシー則の適用性等につい て考察されているが、模型でパイピングを発生、観察す るために実河川では起こり得ないような大きな水位上昇 速度を与えていること等に課題が見られる.

近年,堤防ボーリング調査データの蓄積により堤体, 基盤層の土質構造を概略読み取ることが可能となり,堤 防が被災した箇所では詳細な現地調査が行われるように なってきた.本研究ではこれらの現地データに基づいて, 基盤漏水が主要因となる堤防破壊機構を説明できる手法 を提案する.

3. 解析方法

(1) 透水性基盤層内の準二次元浸潤線解析法

本検討では、高水敷は透水性土、堤体直下~川裏部分 は不透水性土で被覆されており、透水性基盤層は川裏側 で行き止まり構造となっている場合を対象とする. 図-1は、このような場合におけるパイピング破壊プロセス のイメージを示している. 洪水中に基盤透水層に浸透し た水が行き止まり箇所に到達した後、揚圧力が増大する



図-1 洪水時におけるパイピング破壊プロセスのイメージ

ことで堤防裏法先から行き止まり箇所までの被覆土で盤 膨れが発生する.その後,亀裂を通って砂が抜け出すこ とで堤体の支持力を失い,堤防が破壊するプロセスを想 定している.

図-2は、堤防の下に厚さ d₀の不透水性被覆土があり、 更にその下に透水係数 k, 厚さ Dの基盤透水層がある場 合の浸透流の動きの模式図を示す.以下では、この図の ような土質構造である場合には、基盤層内の浸透及び圧 力場を準二次元的に捉えることができると考え、連続条 件とダルシー則を適用した運動方程式による準二次元浸 潤線解析法を導く.そして、パイピング破壊危険性を概 略評価するため、堤防裏法先から行き止まり箇所までの 被覆土の盤膨れ発生と、砂の抜け出しに伴う堤体の安定 性低下の危険性を表す指標を提案する.

a) 基盤透水層内の浸透流と圧力水頭の算定方法

基盤透水層内を浸透する水の連続条件は式(1)となる.

$$\lambda D \frac{d\xi(t)}{dt} = q_{in} + q^* \tag{1}$$

ここにんは空隙率, *G*は浸潤線フロント位置である. 浸 透流の運動方程式にダルシー則を適用すると,基盤透水 層への流入量フラックス *q_n*,高水敷を通過して基盤透 水層内に向かう鉛直浸透量フラックス *q**は,それぞれ 以下のように表される.

$$q_{in} = kD \frac{\Psi_b(t) - \Psi_0}{\xi(t)}$$
⁽²⁾

$$q^* = \int_{0}^{B_{f}} w(x,t) dx = \int_{0}^{B_{f}} \overline{k} \frac{\psi_{b}(t) - \psi(x,t)}{d_{0} + D} dx$$
(3)

ここに、 ψは境界部分での圧力水頭で H+d₀+D で表す. ψ は初期の圧力水頭で、平常時の河川水位から与える.



図-2 堤体と基盤層、被覆土の模式図

また、w は高水敷から基盤層に向かう鉛直浸透速度であり、河道水位 z_c と基盤透水層内の圧力水頭 ψ 、平均透水 係数 \overline{k} を用いて表している、平均透水係数は、異なる透水係数を持つ 2 つの土層を直行する方向に浸透すること を考慮した以下の式により求める.

$$\overline{k} = \frac{d_0 + D}{d_0/k_f + D/k} \tag{4}$$

基盤透水層内の圧力水頭 ψ は直線分布で仮定した式 (5)によって表現する.

$$\psi(x,t) = \psi_b(t) - \frac{\psi_b(t) - \psi_0}{\xi(t)} x$$
 (5)

式(3)に式(5)を代入して整理すると、q*は以下のように 表すことが出来る.

$$q^* = \frac{1}{2} \frac{\bar{k}B_f^2}{d_0 + D} \frac{\psi_b(t) - \psi_0}{\xi(t)}$$
(6)

式(1)に式(2),(6)を代入し、微分方程式を解くことで、 浸潤線フロント位置らについて式(7)の解析解が得られる.

$$\xi(t) = \sqrt{(\psi_{b}(t) - \psi_{0}) \frac{2kD(d_{0} + D) + \overline{k}B_{f}^{2}}{\lambda D(d_{0} + D)}t}$$
(7)

基盤透水層内の浸透流が行き止まり箇所に達するまでの間は式(7)によって浸潤線フロント位置を計算し、式(5)により基盤透水層内の圧力水頭分布ψを計算する.

b) 浸潤線が行き止まり箇所に到達した後の圧力変化

基盤透水層が行き止まりになっている場合,基盤層末 端から水が抜け出ないため,層内の圧力が全体的に上昇 することになる.これを表現する方法を以下に示す.

まず,厚さ Dの基盤透水層内の水平方向一次元浸透 流を考える.運動方程式にダルシー則を適用し,連続式 に代入すると,以下の基礎式が導かれる.

$$\lambda \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(Dk \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial x} \right) = 0$$
(8)

次に、基盤透水層内の流速は流入部と行き止まり箇所の圧力勾配により決まることから、行き止まり箇所の流 速をゼロとすると、式(8)は式(9)のように表される.

$$\lambda \frac{d\psi_d(t)}{dt} - \frac{Dk}{\Delta L} \frac{\psi_b(t) - \psi_d(t)}{B_f + B_l + B'} = 0$$
⁽⁹⁾

ここに、 *ΔL* は流速が低減するまでの水平距離、 *B*_{*i*}は 堤防幅、 *B*'は裏法先から行き止まり箇所までの距離であ る.

この微分方程式を解くと,基盤透水層に浸透した水が 行き止まり箇所に到達した後の末端部分の圧力水頭 ψa の時間変化を表す以下の式が得られる.

$$\psi_{d}(t) = \psi_{b}(t) - (\psi_{b}(t) - \psi_{0}) \exp\left(-\frac{\lambda Dk}{\Delta LB}t\right)$$
(10)

また、このときの基盤透水層内の圧力水頭分布(式 (5))は、式(11)のように表現することができる.

$$\psi(x,t) = \psi_b(t) - \frac{\psi_b(t) - \psi_d(t)}{B_f + B_l + B'} x$$
(11)

基盤透水層の浸潤線フロントが行き止まり箇所に到達 した後は、式(10)、(11)を用いて透水層内の圧力水頭の変 化を計算する.

(2) 被覆土に作用する揚圧力の増大に伴う盤膨れ評価

被覆土に作用する揚圧力と被覆土重量から、盤膨れの 安全率 GWを評価する.

$$G/W(x,t) = \frac{\gamma d_0(x)}{\gamma_w(\psi(x,t) - D)}$$
(12)

ここに, γ: 被覆土の単位体積重量, γ_w: 水の単位体 積重量である.

(3) 基盤層内の砂が抜け出す時の堤体安定性評価

本研究では、パイピングの進行に伴い起こる砂の流出 量フラックスを見積もり、これを堤体の体積で無次元化 した指標によって、堤体安定性の低下を表現する.図-3 に基盤層内の砂が抜け出す時の堤体安定性の模式図を示



す.時刻 t=thに被覆土が最も薄い箇所(x=xh)で盤膨れが 発生した後、パイピングにつながる被覆土を通過する鉛 直方向の浸透流フラックス qhは、ダルシー則を適用で きると仮定すると、被覆土に作用する揚圧力y(x=xh)-D, 亀裂幅 a、透水係数 kを用いて次のように表される.

$$q_h(t) = ak_s \frac{\psi(x_h, t) - D}{d_0(x_h)} \tag{13}$$

鉛直方向の浸透流フラックス q_h の内,空隙を除いた 分が砂分に相当すると仮定すると、堤防縦断方向の単位 距離あたりに抜け出る砂のボリューム ΔV_s は以下のよう に表現される.なお、 ΔV_s は基盤透水層内に存在する砂 分の総ボリュームが上限値となる.

$$\Delta V_s(t) = (1 - \lambda) \int_{t_h}^t q_h(t) dt$$
(14)

パイピングによって砂が抜け出ると、堤体が支持力を 失って変形し、最終的に破壊に至ることを考えると、抜 け出る砂のボリュームに対して堤体体積が小さい場合に 破壊につながりやすいと考えられる.よって、抜け出た 砂のボリュームを堤体の体積で無次元化し、逆数をとっ た式(15)により、堤体安定性を表すものとする.無次元 量*S*は、基盤層からの砂の抜け出し時における堤体の体 積ひずみの逆数であり、*S*値が小さいほど破壊時の堤体 変形量が大きく危険となる.本研究では、*S*を堤体安定 性指標と呼ぶ.

$$S(t) = \frac{A \,\delta L}{\Delta V_{s}(t) \,\delta L} = \frac{A}{\Delta V_{s}(t)} \tag{15}$$

ここに、 & は堤防縦断方向の単位距離、A は堤体の断 面積である. 亀裂幅 a には利根川 139k 右岸の大越地先 で計測された噴砂口直径 0.3m を与え、k,には基盤透水 層内に存在する砂の透水係数を与えるものとした.

4. パイピング被災が生じた河川堤防への適用

(1) パイピング破壊危険度の評価

利根川 139k 右岸堤防では、平成 13 年 9 月洪水時に大 規模な基盤漏水が発生した. その後、漏水箇所付近にお いてボーリング調査が実施され、基盤層の土質構造が明



図-4 検討対象とする河川堤防の土質構造と諸元

らかとなった⁹. 図-4(a)に利根川 139k 右岸堤防の土質構 造図と諸元を示す. 透水性基盤層の上に不透水性の被覆 土層が存在しており,基盤層は 12m ほどの厚さで,そ の内の上部 2m が砂,下部 10m が砂礫で構成されている. 堤防の裏法先から約 20m 離れた地点で透水層が行き止 まりとなっていることが確認できる.

矢部川では、平成 24 年 7 月洪水時に漏水や法崩れが 数多く発生し、7.3k 右岸では透水性基盤層のパイピング によって 14 日 13 時 20 分頃に堤防決壊に至った¹⁰. 図-4 (b)に、パイピングの進行によって堤防が決壊した 7.3k 右岸堤防の土質構造図と諸元を示す. 堤体及び被覆土は 粘性土でできており、その下に約 1m ほどの厚さの砂質 土層が存在している. 堤防裏法尻から約 30m 離れた地 点で、利根川 139k 右岸堤防と同様、行き止まり構造と なっている.

3章で提示した手法を,利根川 139k 右岸堤防と矢部川 7.3k 右岸堤防に適用し,洪水時におけるパイピング破壊 危険度を検討した.基盤層厚,被覆土層厚は堤防土質構 造図に基づき設定し,透水係数には各地点での現地調査 結果を与えた.浸透解析の境界条件となる河道水位ハイ ドログラフは,被災箇所近傍の観測所の水位ハイドログ ラフを用い,被災箇所の洪水痕跡水位高となるように調 整したものを与えた.

図-5 に利根川 139k 右岸堤防と矢部川 7.3k 右岸堤防に おける洪水時の基盤透水層内の圧力水頭と G/W, S 値の 時間変化の算定結果を示す.利根川 139k 右岸堤防では, 長時間に及ぶ洪水の継続に伴い,基盤層内の浸潤線フロ ント位置が川裏側に向かって徐々に前進していき, 9/11



テキルまり笛斫に到達する。そして河道水位の

3:00頃に行き止まり箇所に到達する.そして河道水位の 上昇に応じて基盤層内の圧力が高まることが計算できて いる. GW は水位が最大となる 9/11 14:00~21:00 に 1 を 若干下回り盤膨れ判定となる.この時間帯に堤体安定性 を表すS値は低下するが,その量はわずかである.

一方, 矢部川 7.3k 右岸堤防では, 洪水位上昇及び洪 水継続時間の経過に伴い, 基盤層内の浸潤線フロント位 置が進行し, 7/13 18:00 頃に行き止まり箇所に到達する. そして河道水位の上昇と共に基盤層内の圧力が高まる. 水位が最大となる第 3 波の立ち上がり時 (7/14 7:00) に *G/W* が 1 を下回る. そして, 水位ピーク付近にかけて *S* 値は低減していき, 実際に堤防決壊が生じた 13:20 頃に 最低値となる.

矢部川 7.3k 右岸堤防では、現行の堤防照査手法によ り GWが検討されている¹⁰. 透水係数等を変化させた複 数のケースで検討が行われているが、いずれのケースに おいても GW は 7/14 13:00 頃に最小となり、その値は 0.35~0.62(本検討と同様の計算条件を用いたケースで は 0.44)と算出されている.本手法により算出される GWは、これらの値よりやや大きめに算出されているも のの、現行照査手法と概ね同程度の精度で盤膨れの発生 危険性を評価出来ていることが確認された.このことは、 詳細な土質構造の入力を要する鉛直二次元飽和・不飽和 浸透流方程式に基づいた現行堤防照査手法⁴を用いなく ても、本論文で示した準二次元浸透流解析手法を用いる



ことで、基盤漏水に伴うパイピングによって被災が生じ た現地河川堤防の破壊危険性を力学的に説明することが 可能であることを示している.

(2) GM/, 堤体安定性指標Sと被災規模の関係

矢部川 7.3k 右岸堤防,利根川 139k 右岸堤防に加えて, 平成 24年7月洪水時に裏法崩れが生じた矢部川 11.8k 右 岸堤防¹⁰,平成 25年7月洪水時に大規模な堤防裏法崩れ が生じた子吉川 10.8k 右岸堤防¹¹にも本手法を適用し, *GWとS*値を算出した.

図-6 に利根川, 矢部川, 子吉川における GW とパイ ピングに伴う堤体安定性指標 S及び被災規模の関係を示 す.子吉川では,基盤層が透水層と不透水層の互層構造 であるため^{ID},透水性基盤層,川裏側の被覆土厚の与え 方によって G/W, S値が異なる値をとったことから図中 の破線で示す範囲で表した. G/W, S値の大きさは,堤 防が決壊した矢部川 7.3k,裏法崩れが生じた矢部川 11.8k,子吉川,漏水,噴砂が生じた利根川 139k 右岸の 順となる.このことから,実際に起きたパイピングによ る破壊の規模,程度は,本手法により算出される G/W, S値によって概ね矛盾なく説明できている.特に,パイ ピングによって堤防決壊に至った矢部川 7.3k 右岸堤防 では G/W,S値ともに最も小さく評価されることが確認 された.一方,巨大な堤体を有する利根川では,大規模 な噴砂が生じたものの G/W,S値は高めに算出された. このことから,堤体を大きくして構造体としての安定性

を高めることが、パイピング破壊に対する耐性を発揮する上で重要であると考えられる.

5. おわりに

洪水時における基盤透水層内の浸潤線の挙動と圧力水 頭分布を準二次元浸透流解析の枠組みで見積もり,川裏 被覆土の盤膨れの発生と,パイピング発生により基盤層 内の砂が抜け出し堤体の安定性が低減するプロセスを概 略評価する手法を提案した.本手法を基盤漏水,パイピ ングによって被災を受けた利根川,矢部川,子吉川堤防 に適用した結果,パイピングによる堤防決壊に至った矢 部川 7.3k 右岸堤防が,盤膨れの安全率,堤体安定性と もに最も小さくなることが確認された.この結果,実際 に起きたパイピング破壊及びその危険性を本手法によっ て概ね矛盾なく説明できること,パイピング破壊に対す る耐性を発揮するためには堤体を大きくして構造体とし ての安定性を高めることが重要であることを示した.

また、堤体裏法先での浸透水が行き止まり状態になる

ことがパイピング破壊に繋がる可能性が高いことから, 今後は堤防裏法先の土質構造を調べ対応することがパイ ピング対策にとって重要である.そして,さまざまなパ イピング被災箇所に本手法を適用し,基盤土質構造,洪 水外力と破壊規模の関係を明らかにしていく必要がある.

参考文献

- 田端幸輔,福岡捷二,瀬崎智之: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,土木学会論文集 B1(水 工学), Vol.71,No.4, L1273-L1278, 2015.2.
- 2) 田端幸輔,福岡捷二:堤防破壊確率と堤防脆弱性指標に 基づいた堤防危険個所の推定法,第3回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム,pp61-64,2015.12.
- 3) 福岡捷二,田端幸輔:堤体基礎地盤の透水性・堤防強化 対策を考慮した堤体内非定常浸潤線解析法の開発と堤防 破壊危険確率の低減効果の見積りに関する研究,河川技 術論文集,第22巻,pp.261-266,2016.7.
- 4) 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.
- Sellmeijer, J. B.: On the mechanism of piping under impervious structures, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 1989.
- 6) TAW: Technical Report on Sand Boils(piping), 1999.
- 7) 中島秀雄: 図説河川堤防, 技報堂出版, p.109, 2003.
- 佐藤宏明,中山修,佐古俊介:利根川堤防で発生した漏 水に関する調査事例,河川技術論文集,第11巻,2005.
- 午部川堤防調査委員会:午部川堤防調査委員会報告書, 2013.
- 11) 国土交通省東北地方整備局秋田河川国道事務所:子吉川 における堤防被災メカニズムと調査分析結果について, 第二回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム, 2014.

(2016.9.30 受付)

STUDY ON EVALUATION METHOD FOR LEVEE FAILURES BY PIPING BASED ON QUASI-2D UNSTEADY SEEPAGE FLOW ANALYSIS

Kosuke TABATA and Shoji FUKUOKA

Understanding of the mechanism of levee failures by a flood is important for flood risk managements. However, levee failures occurr in various modes and scales according to soil properties of the levee and ground foundation. In our recent studies, levee failure probability due to seepage and slope sliding has been estimated.

In this paper, quasi-2D seepage flow analysis method is developed in order to elucidate the seepage flow and pressure distribution within the levee and ground foundation. It is also used for estimation of the reduction of stability of the levee due to piping. It is clarified that the model developed can elucidate the risk of levee failures due to piping occurred at actual river levees.