樋門等設置部における一連堤防としての 安全管理に関する研究 EVALUATION METHODS AND SAFETY MANAGEMENT

FOR CAVITY AROUND SLUICE IN CONTINUOUS LEVEE

蛯原雅之¹・伊藤豊²・楊雪松³・横田圭史⁴・登坂博行⁵ Masayuki EBIHARA, Yutaka ITO, Xuesong YANG, Keiji YOKOTA and Hiroyuki TOSAKA ¹正会員 工修 株式会社建設技術研究所 (〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1) ²非会員 株式会社建設技術研究所 (〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1) ³非会員 工博 株式会社建設技術研究所 (〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1) ⁴非会員 工修 株式会社建設技術研究所 (〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1) ⁵正会員 工博 東京大学工学系研究科 (〒113 8656 東京都文京区本郷7-3-1)

Conventionally, we use communicating vessel test or cavity exploration test to check presence or absence of the cavity around sluice pipe, and fill it as needed. However, understanding of causal relationship between the cavity and progressive destruction of river levee with seepage has become more and more important for making rational and effective evaluation and countermeasure. In this paper, we introduce a numerical technique that can simulate the 2-phase flows in porous media and cavities around sluice pipe simultaneously, and discuss how to manage sluice pipe safety through the results of several case studies on the seepage level of levees during a flood.

Key Words : sluice pipe, cavity, seepage, continuous levee, numerical simulation

1. はじめに

従来より,樋門・樋管等の堤防横断構造物設置部にお ける河川堤防の被災要因として,圧密や土粒子流失によ る構造物周辺空洞化に起因する進行性破壊が指摘され, 巡視点検・変状調査や連通試験・空洞探査等による空洞 管理や,埋め戻し等の補修が行われている¹²³.

しかしながら、「再空洞化の可能性があるため、ある 一時点の調査・対策で将来的な安全まで担保できない」 といった堤防劣化の時間管理に関わる課題、「連通試験 では高水位時の高い圧力状態までは通常考慮していな い」、「空洞化や連通の状況(程度・分布)と、それが 進行性破壊や破堤を引き起こす危険性との対応は解明さ れていない」等の安全性評価に関わる課題、さらには

「周辺の堤防一般部との相対的な安全性照査(弱点か否か)が定量的になされていない」といった一連堤防としての質的管理に関する課題等,議論すべき課題は多い.

また,空洞調査・対策を行った直後であっても,「急 激な内部浸食進行」,「止水矢板の脱落」等により突発 的な被災を生じる可能性があるといった特性を認識し, そのような状況が生じても、極力「破堤」を回避するための危機管理や、容易に崩壊しない対策を付加することが望ましいといえる.

このような背景から、本研究では、「堤体内構造物, 空洞等を適切に考慮でき、一連堤防における浸透破壊に 対する弱点部を検討するための解析手法の開発」、「洪 水時における、空洞・連通状況と堤体内水頭分布の対応 に関する感度解析及び考察」、「浸透破壊の弱点部にお ける安全管理に関する考察」を行った.

2. 解析手法の開発

河川堤防の浸透に対する安全性照査(本稿では浸透破 壊を対象とする)では基本的に断面二次元飽和不飽和浸 透流解析が用いられており,その前提として,堤防をい わゆる「金太郎飴」的な線状構造物とみなし,代表断面 あるいは要注意箇所等の弱点断面で解析している².

しかし,堤防は縦断方向に土質構成が変化する盛土構 造物であり、よりミクロには、築堤履歴や築堤年代等に も土質構成が左右されている.この点を踏まえれば、あ る特定の堤防横断面に対して,法面形状や土質断面を厳 密にモデル化する断面二次元解析で高精度の安全率を算 出するアプローチの一方,横断面のモデル化を多少簡略 化してでも,縦断方向を考慮した堤防一連としての検討 を行うことも有用と考えられる.

特に,樋門設置部のように断面二次元解析の適用条件 を満たさない場合には縦断方向の考慮がより重要であり, また,樋門周辺空洞が,浸透流解析の前提である多孔質 媒体ではないため,空洞内の水の挙動の適切な取り扱い も必要となる.

そこで、下記の要件を満たす解析手法を開発した.

- ・堤防縦断方向の条件変化や,堤体内構造物等による 浸透流の面的な迂回・集中等を考慮できること
- ・ 樋門周辺空洞における不飽和から飽和にいたる貯留, 流動状況を適切に考慮できること
- ・検討目的から求められる解析精度と計算負荷・モデル化負荷の低減を両立すること

解析手法の概要,及び数値実験による従来手法との比 較を以下に示す.

(1)解析手法の概要

a)堤防縦断方向及び堤体内構造物の考慮

ー連堤防の中での樋門設置部の安全性を検討する点, 及び縦断方向における堤防断面や土質分布の変化,樋 門・樋管,橋台,遮水矢板等の堤体内構造物の空間配置 等を考慮できることを考慮し三次元モデルとした.

空洞分布は、空洞調査結果や沈下計算結果に基づく範 囲・形状設定を想定しており、また、任意の箇所で水頭、 間隙水圧・空気圧、流速ベクトル、動水勾配等の時間変 化を出力できる仕様としている.

b) 樋門周辺空洞等の考慮

空洞の有無による浸透流動や圧力伝播への影響を適切 に考慮するため、筆者らは土質内及び土質と空洞間の流 れには式(1)に示す一般化ダルシー流れの式を適用する 一方、空洞内の水の挙動には開水路運動方程式の拡散波 近似モデルを式(2)に示す圧力単位の式に変換して導入 し、従来の飽和不飽和解析の機能を一部拡張している⁴⁵. 以下に、適用した流れの式と支配方程式を参考文献⁵よ り引用する.

$$M_{p,x} = -\frac{\rho_p K_x k_{rp,x}}{\mu_p} A_x \frac{\partial \Psi_p}{\partial x}$$
(1)

$$M_{w_{DW,x}} = -\rho_{w} \frac{R^{2/3} WHS_{w}}{n \sqrt{\rho_{w}g}} \frac{\frac{\partial \Psi_{w}}{\partial x}}{\sqrt{\left|\frac{\partial \Psi_{w}}{\partial x}\right|}}$$
(2)

ここで、添え字pは水相wまたは気相gを示し、 $M_{p,x}$ は流体相pの質量流速[kg/s]、 ρ_p は密度[kg/m³]、 K_x は絶対浸透率[m²]、 μ_p は粘性係数[Pa・s]、 $k_{rp,x}$ は p相のx方向相対浸透率、 A_x [m²]は流動断面積、nは マニング係数, R [m]は径深, H [m]は空洞高, S_w は 飽和率である.また, Ψ_p は圧力単位の水理ポテンシャ ν [Pa]である.

これらと質量保存則により式(3a)及び式(3b)の支配 方程式を得て,陰的に連成(カップリング)して解く.

$$\sum_{k=x,y,z} \left(\alpha M_{w,k} + \beta M_{w_{D}W,k} \right) - \rho_{ws} q_{ws}$$

$$- \frac{\Delta V}{\Delta t} \left\{ \left(\rho_w \varphi S_w \right)^{(t+\Delta t)} - \left(\rho_w \varphi S_w \right)^t \right\} = 0$$
(3a)

$$\sum_{k=x,y,z} (\alpha + \beta) M_{g,k} - \rho_{gs} q_{gs}$$

$$- \frac{\Delta V}{\Delta t} \left\{ \left(\rho_g \varphi S_g \right)^{(t+\Delta t)} - \left(\rho_g \varphi S_g \right)^t \right\} = 0$$
(3b)

ここで、 α 及び β は以下の定義による指標、 ΔV は微小 領域の体積、 q_{ps} は格子からの標準状態の流出入量、 φ は間隙率である.

$$\alpha = \begin{cases} 0 : \underline{\mathcal{Q}} \\ 1 : \underline{\mathcal{U}} \\ \underline{\mathcal{U}} \end{cases} & \beta = \begin{cases} 0 : \underline{\mathcal{U}} \\ 1 : \underline{\mathcal{U} \\ 1 : \underline{\mathcal{U}} \\ 1 : \underline{\mathcal{U}} \\ 1 : \underline{\mathcal{U}} \\ 1 : \underline$$

c)解析精度の確保と計算負荷・モデル化負荷の低減

三次元モデルを基本とする場合,実用的に用いるため には計算負荷やモデル化負荷を従来より大幅に軽減する ことが望ましい.

断面二次元解析が実用で用いられる背景には「洪水時 には堤防横断方向の流れが卓越するため、金太郎飴的な 構造を前提とする断面二次元モデルで評価可能」との前 提がある.これと同じ考えに基づき、本モデルでは堤防 縦断線形を直線とみなす.

また、特定断面に対して厳密に法面形状や土質断面を モデル化する絶対評価より、ここでは縦断方向における 弱点抽出や相対評価を趣旨とする.この点から、堤体法 面の微小形状までは考慮せず、断面形状誤差±10cmを許 容する階段状の差分格子(最小格子幅20cm)で堤体を設 定した.但し、各格子の中心点(計算点)を堤体法面上 に配置して計算格子のコントロールボリュームと実際の 堤体ボリュームを一致させる.なお、解析結果に直接的 に影響する境界水位や変動水位等は厳密に設定する.

これらの前提により有限差分法を適用し、特に以下の 点で計算負荷・モデル化負荷の軽減を図った.

- ・有限要素法に比べて計算負荷が小さく,三次元解析 においても比較的計算所要時間が短い
- ・要素メッシュ分割の必要が無く、入力データをテキ ストエディタ、エクセル等で簡便に作成できる.
- ・遮水矢板を格子間の透水性で設定できるため、矢板の配置変更等に伴う要素メッシュの再設定等が不要

(2) 数値実験による従来手法との比較

従来の飽和不飽和浸透流解析手法に対して拡張した空 洞考慮機能の部分を対象に,連通試験を想定した数値実 験により、従来手法と本手法の比較を行っている.以下 に、概要を参考文献⁹より引用して示す.

数値実験には図-1 の格子モデルを用い, 0.5m×0.5m ×0.5m×15格子の空洞中央部に, 全く水を含まない初期 状態から, 空洞中央に毎秒0.005m³(毎分0.3m³)で継続 注水を設定した⁵.

空洞内流れを従来の飽和不飽和解析で取り扱う場合に は、実務的に高透水媒体を仮定し、十分粗い礫程度の透 水係数を与える場合がある.この点を考慮し、空洞部分 の絶対浸透率を $K = 1E-9m^2$ (透水係数1E-0cm/s相当)か ら $K = 1E-6m^2$ (透水係数1E+3cm/s相当)まで段階的に変 化させ、間隙率は1.0とした.また、地盤の毛管圧力曲 線及び相対浸透率の設定には、「河川堤防構造検討の手 引き」の砂礫地盤のデータを用いている²⁶).

結果は図-2 に示すとおりであり,絶対浸透率を1E-6m²程度(透水係数では約10³cm/s)とし,擬似毛管圧を 使うことで,空洞内注入水の滑らかな広がりが計算され るものの,絶対浸透率が小さい場合や擬似毛管圧を使わ ない場合には,初期の広がりに誤差を生じる傾向があり, 客観性や一意性の点で課題があることがわかった⁵.



図-2 従来の飽和不飽和解析の結果 (水深分布の経時変化)





一方,空洞に開水路運動方程式を導入する開発手法の 場合は,粗度係数をn=0.025として,擬似毛管圧力を用 いて水面勾配を考慮し,1ケースを実施した.なお, 水深勾配を表現するため,毛管圧力として式(4)に示す 擬似毛管圧力を設定した⁴⁵.

$$P_c = \rho_w g H (0.5 - S_w) \tag{4}$$

結果は図-3 に示すとおりで、実現象をできるだけ忠 実に考慮する目的で開水路運動方程式を導入したことに より、空洞内の水の流動、空洞内気相の昇圧、地盤と空 洞間の流動等が適切に表現されることを確認した⁵.

3. 感度解析及び考察

柔構造樋門が導入されてから10年以上が経過している が,現在も既設樋門の多くは剛構造樋門であり,空洞点 検や連通調査等が引き続き行われている¹⁾.

しかしながら、空洞や連通の有無・分布等を調査・対 処する一方、それらが洪水時に堤体内の浸透状況へ及ぼ す影響について分析した事例は少ない⁶⁷.

そこで本稿では、空洞の有無・連通状況等により洪水 時の堤体内水頭分布等がどのような影響を受けるのか、 前述の解析手法を用いた感度解析を行い考察した.

(1) 解析モデル

樋門を中心に縦断方向片側20m,堤体幅20m,裏のり尻から堤内側に60m,堤体高4m,のり勾配2割,最小格子幅20cmの設定で三次元モデルを設定し,堤体と基礎地盤の透水性は,表-1に示す3パターンの組合せとした.

(2) 計算条件

a)外力条件

洪水時を想定し,図-5 に示す降雨波形と河川水位波 形を設定して非定常解析を行った.

b)計算ケース

地盤定数の組合せ3パターン各々に対して,表-2に示 す空洞・連通条件による感度解析を行った.

なお、空洞の配置は図-4 に示す通りである.





図-5 設定外力(降雨波形·河川水位波形)

表-2 計算ケース番号一覧(後述の追加計算を含まない)

堤防一般部	case-d30, d40, d20	
樋門設置時	case-d31, d41, d21	
	遮水機能維持	空洞部が連通
中央のみ空洞化	d41c, d31c, d21c	d41cr, d31cr, d21cr
中央と川裏側が空洞化	d41u, d31u, d21u	d41ur, d31ur, d21ur
中央と川表側が空洞化	d410, d310, d210	d41or, d31or, d21or
川表〜川裏が空洞化	d41a, d31a, d21a	d41ar, d31ar, d21ar

(3) 解析結果及び考察

「堤防一般部(樋門設置前)」「樋門設置時」「中央のみ空洞化」及び「中央と川裏側が空洞化」のケースについて、各遮水工の表側及び裏側(図-4 中のa~f)の水頭変化を図-6 に示す.



「堤防一般部(樋門設置前)」と「樋門設置時」を比較すると、設置時に川表側a,bで若干水頭差を生じるものの、両ケースに大きな相違はみられない.これは、堤体幅や堤防縦断方向の延長に比べて遮水工の幅が小さい点に加え、低透水性のcase-d4とcase-d3では河川水位境界からの距離により、また、高透水性のcase-d2では面的な迂回浸透により、変化が生じにくい状況である.

また、「中央のみ空洞化」した場合と、「中央と川裏 側が空洞化」した場合も、空洞部の連通の有無によりc とdの一致、dとeの一致等の変化は見られるものの、全 体的な水頭分布は樋門設置時と大きく変わらない.

ただし基礎地盤の透水性が大きなcase-d2の場合では, 図-7 のとおり「中央と川裏側が空洞化かつ連通」の川 裏側e,fの水頭が「堤防一般部(樋門設置前)」の中央 c,dの値程度まで上昇し,周辺堤防一般部や樋門設置前 に比べて浸潤線が高く,浸透破壊を助長する可能性があ る.よって,沈下予測や点検調査等からこのような状況 (高透水性の基礎地盤・川裏側に空洞・遮水部も連通)

が想定される場合は、周辺堤防一般部や樋門設置前と比較して相対的な弱点箇所になっていないか評価すること が望ましい.

一方,図-8 に示す「中央と川表側が空洞化」では,「中央のみ空洞化」に比べて川表水位境界と空洞が近接するが,透水性により水頭分布への影響は異なる.



図-8 解析結果(中央と川表側が空洞化)

「遮水工が機能」しているケースでは、基礎地盤の透水性自体が大きなcase-d2では全体的な水頭に大きな変化はなく、川表側bと中央cの水頭が、「中央のみ空洞化」ケースでの値の平均程度で一致する.一方、case-d4とcase-d3では、川表側bと中央cの水頭が、「中央のみ空洞化」ケースでの中央cの値程度となった.

これは、case-d2はそもそも高透水性のため、上下流 周辺一般部も水頭が高く、川表側と中央cの水頭が高い 位置で連動・一致するのに対して、case-d4とcase-d3は 低透水性のため、川表水位境界の影響を比較的受けにく い上に、空洞部から周辺への浸透を生じて水頭が比較的 低い状況と考えられる.

空洞部から周辺への浸透を生じている点は,「空洞部 が連通」したケースの結果で川表aの水頭が低下してい る点からも示唆される.

次に,「川表から川裏まで全区間が空洞化」の結果を 図-9 に示す.

基礎地盤の透水性が大きなcase-d2で遮水工が全て連 通した場合では川裏側の水頭が上昇し、周辺堤防一般部 や樋門設置前に比べて浸潤線が高く、浸透破壊を助長す る可能性がある.よって、このような状況(高透水性の 基礎地盤・川表〜川裏側に空洞・遮水部も連通)が想定 される場合は、周辺堤防一般部や樋門設置前と比較して 相対的な弱点箇所になっていないか評価することが望ま しい.ここで、弱点評価が望ましいとする場の条件は、 前述図-7 の状況(高透水性の基礎地盤・川裏側に空 洞・遮水部も連通)に含まれている.

なお,全区間で空洞化や遮水部の連通が生じた場合に, 川裏側の水頭が大きく上昇するケースと上昇しないケー スがある.

そこで最も厳しい境界条件を仮定して、「川表から川 裏まで全区間が空洞化」かつ「連通」とする各ケースに 対して、更に「空洞が川表護岸に達して河川水が直接流 入する状況」、及び対策例として「川裏側の遮水機能を 回復した場合」の試算を行った.

図-10 によると、いずれのケースも河川水の直接流入 を受けて、川表側aは河川水位と同程度となるが、空洞 内ではあっても必ずしも水頭を維持するわけではなく、 川裏側ほど低下する.これは、case-d2は高透水性のた め上下流堤防と同程度の水頭に近づき、case-d4は空洞 部から上下流堤防へ浸透している状況である.

また、川裏側の遮水機能を回復した場合、高透水性の case-d2では高透水性の面的な迂回浸透のため、その他 のケースでは上下流堤防への浸透で水頭低下しているた め、結果的に大きな変化は生じない.

一方で、透水性や土質構成によっては、図-11の裏の り鳥瞰図に示すように、堰上げ・迂回浸透に伴う上下流 堤防における裏のり浸潤線の上昇が懸念される場合もあ るため、樋門設置部を含む一連堤防全体として、堤体内 浸透水の面的な挙動にも留意する必要がある.





裏のり尻付近の浸潤面分布・流速ベクトルの解析結果鳥瞰図 図-11 遮水工による堰上げ・迂回浸透等の状況(case-d2)

ただし、ここで想定した「川表護岸まで空洞が達する 状況」や「川表から川裏まで空洞化が生じ、かつ連通し ている状況」は、本来は日常の維持管理において事前察 知及び措置すべきものである.

よって、そのような状況は例外とした上で、水頭上昇 に起因する裏のり浸透破壊を主に考えるとすれば、今回 の感度解析からは下記の点が示唆される.

- ・基礎地盤の透水性が大きく(本検討では1.0E-2cm/s の場合),かつ沈下予測や点検調査等から川裏側の 空洞化と連通が想定される場合には、周辺堤防一般 部や樋門設置前と比較して相対的な弱点箇所になっ ていないか評価することが望ましい.また川裏側の 遮水が機能している状況では、樋門設置部を含む一 連堤防全体として、堤体内浸透水の面的な挙動にも 留意する必要がある.
- ・ただし、そのような厳しい状況が重ならない場合は、 空洞の有無や分布、連通状況によらず周辺堤防一般 部や樋門設置前と同様の浸潤状況である場合が多い.
- ・遮水工が水頭伝播の抑制として寄与する状況は必ずしも多くなく、むしろ川表護岸まで連通する万一の状況が生じたとしても、流出水そのものを止めることにより土粒子の流出をも防ぎ、急激な内部侵食拡大による進行性破壊を防ぐ役割が主である。

4. 安全管理に関する考察

前述の「安全性評価に関わる課題」,「堤防劣化の時間管理に関わる課題」,「一連堤防としての質的管理に関する課題」の観点から,今後は下記の手法による安全管理を付加することが有用と考えられる.

(1) 安全性照査における一連堤防としての解析検討

土質構成,空洞分布,連通状況等によっては,周辺堤防一般部や樋門設置前に比べて浸潤線が上昇して浸透破壊が助長されたり,また,遮水工による堰上げ・迂回浸透に伴い上下流堤防の浸潤線が上昇する場合もある.

よって、樋門等設置部における堤防の安全性照査や対 策検討に際しては、樋門設置部を含む一連堤防全体とし て縦断方向を考慮した解析を行い、堤体内浸透水の面的 な挙動や弱点化にも配慮することが望ましい.また、橋 台等の堤体内構造物による上下流堤防への影響や内部侵 食・浸透破壊の助長等に関しても同様である.

(2) 洪水時の水頭変化による空洞・連通状況の察知

経年的な堤防劣化を考慮した安全管理の面では,空 洞・連通状況の継続的な把握あるいは予測が重要である が,連通試験・空洞探査等は,平常時の,ある一時点の 状態を把握するものである.

一方,ある時点で空洞調査を行った後に,引き続き水 頭分布やその経時変化のモニタリングを継続すれば空 洞・連通状況の変化を察知することが期待でき,また, 空洞拡大や新たな連通による水頭分布変化を事前予測解 析すれば,継続管理や水防活動における危険察知チェッ クリスト等への活用も考えられる.

(3) 空洞起因の破堤を防ぐための対策の付加

ー連堤防における弱点箇所の定量評価を行えば補修や 対策の緊急度・優先度等を議論できるが、それを維持補 修計画等に反映する場合は、川表護岸までの空洞拡大に よる河川水の直接流入や矢板脱落・連通といった万一の 状況への備えも重要と考えられる.

今回の感度解析では、遮水工が浸透路長を確保するこ とによる水頭伝播の抑制として寄与する状況は多くなく、 流出水そのものを止めることにより土粒子の流出をも防 ぎ、急激な内部侵食拡大による進行性破壊を防ぐ効果が 主と解釈されたが、一方で河川水が直接流入するケース を除けば、空洞内は徐々に湛水する傾向であった.これ らを踏まえると、万一への備えとして、ある程度の裏の り漏水量を許容し、透水性ジオテキスタイルやドレーン を配置することにより、安全に水を受け流すといった、 堤防一般部に準じた対策が有効な場合もあるといえる.

5. まとめ

樋門設置部の管理においては、外観調査や連通試験・ 空洞探査等が成果を上げている.しかし、財政的な制約 の中で、定期的に繰り返して空洞点検調査等を続ける負 担は大きく、少なくとも破堤だけは回避するといった危 機管理としてのアプローチも議論する必要があると思わ れる.そのような観点における具体化検討の端緒として、 本稿では、洪水時における空洞・連通状況と堤体内水頭 分布との対応に関する感度解析、及び安全管理に関する 考察を試みたものである.

今後は、実際の現場データに基づき、経年的な空洞・ 連通状況や充填処置・残留沈下量等に応じた浸透破壊の 生じやすさ、樋門設置部を含む一連堤防としての弱点箇 所、新たな空洞・連通に伴い予想される水頭分布変化等 による危険察知と水防活動への反映等について検討した いと考えている.

参考文献

- 1) 国土交通省河川局: 樋門等構造物周辺堤防点検要領, 2001.
- 2) 財団法人国土技術研究センター:河川堤防の構造検討の手 引き,2002.
- 中山修,金石勝也,勝山明雄:連通試験法を適用した樋門 周辺堤防の漏水危険度の検討,河川技術に関する論文集, Vol.6, pp. 49-52, 2000.
- 4) 登坂博行:地圏水循環の数理,東京大学出版会,2006.
- 5) 蛯原雅之,伊藤豊,楊雪松,横田圭史,登坂博行:地中空 洞流れを考慮した浸透流解析手法の研究,土木学会論文集 B1 Vol. 68, No. 4, 2012.
- 6) 荒金聡: 樋門・樋管構造物周辺堤防の空洞化対策選定手法 に関する研究,土木研究所資料, No. 4155, 2009.
- 7) 恒岡伸幸,古本一司,小畑敏子,若狭聡:樋門・樋管にお ける矢板の遮水効果に関する解析的検討,第37回地盤工学 研究発表会発表講演集,pp. 1293-1294,2002.

(2012.4.5受付)