堤防周辺地盤の局所的透水性変動に対する 孔内水位変動の応答性に関する感度検証 SENSITIVITY VERIFICATION OF THE WATER HEAD IN THE BOREHOLE ADJACENT TO THE

RIVER LEVEE WITH THE LOCAL VARIATION OF THE PERMEABILITY

松本健作¹·南雲洋平²·小堀圭祐³·小太刀竣⁴·辻和也⁵

Kensaku MATSUMOTO, Yohei NAGUMO, keisuke KOBORI, Shun KODACHI and Kazuya TSUJI

¹正会員 博士(工学) 群馬大学大学院助教 理工学府 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)
 ²非会員 桐生市役所 (〒376-0024 群馬県桐生市織姫町1-1)
 ³会員 群馬大学大学院環境創生理工学専攻 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)
 ^{4,5}非会員 群馬大学理工学部環境創生理工学科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

Numerical Analysis of the seepage flow in the base of the river levee during the flood was performed. Calculated water head in the borehole adjacent to the river showed obvious response to the flood. The characteristics of the response of the water head in the borehole during the flood was formularized by two flood parameters. By the formularized system, the response of the water head in the borehole adjacent to the river during the flood with the variation of the local permeability was valuated as the risk of the failure of the river levee. Three dimensional analysis, the treatment of the heterogeneity soil and the application of the more detailed flood model are the future subjects.

Key Words: borehole, seepage flow, flood, numerical analysis, variation of the permeability

1. はじめに

河川堤防の効率的な維持管理技術の確立が急がれてい る¹⁾. 破場形式の1つである浸透性破場は、他の破場形式 と異なり、外観からは視認できない土中における現象で あるため、その進行過程が把握できない. このため、特に その解明が遅れている破堤形式である.実際,浸透性破堤 リスクの1つである基盤漏水は、ボイリングによる噴砂 痕が地表現象として生じた時点で、発生が確認できるも のであり、その際の十中現象が現地における実現象とし て確認された事例は世界的に見ても存在していない. 噴 砂現象は、地盤内を空洞化するため大きな破堤リスクと なるが、この噴砂およびその後のパイピング伸展による 地盤透水性の局所的な変化を把握することが可能となれ ば、基盤漏水の早期対策が可能となり、より効率的に堤防 を維持管理することができるものと考えられる. 噴砂お よび土中空洞化事例を図-1に示す. 被災後調査のスケッ チから、土中の空隙が確認できた範囲で少なくとも直径 60cm 程の大規模なものとなっていることが確認できる.



図-1 噴砂および土中空洞化(利根川右岸139km)

地盤透水性と相関性の高い観測項目に地下水観測孔内 水位がある.孔周辺地盤の透水係数と孔内水位の相関性 は多くの経験式が提案され現在でも実用されており²,現 場透水係数算定において孔内水位変動特性が用いられて いる.この透水係数と孔内水位変動との関係性を堤防近 傍における両者の関係性として図-2に模式的に示した.





図-2は、河川堤防を横断する断面でみた河川、堤防周辺地盤および堤防近傍堤内地に設置した地下水観測孔を表している.出水時における河川水位の上昇に伴い、堤防近傍地盤内に、堤内地方向への浸透流が発生する.その浸透流の影響を受けて孔内水位も上昇するが、その際の孔内水位の応答特性は地盤の透水性の影響を受けている.

図-2の上図は地盤透水性が低い場合であり、下図は地盤 透水性が高い場合である.河川水位の上昇量が上下図で 同一であった場合,地盤透水性が高いほど孔内水位変動 は高い応答性を示すものと考えられる.ここで、図-2の 上図から下図への変化が局所的な地盤透水性増大によっ て生じた場合を考える.この場合図-2は、同一の観測サ イトにおいて連続的に観測した同一規模の出水に対して、 孔内水位の応答性が変化した状況を表しており、これは 堤防基盤の空洞化等による地盤透水性の変動が生じてい る状態を示唆している.換言すれば、出水時における堤防 近傍観測孔の孔内水位応答特性の有意な変動を検知する ことができれば、終局的な地盤内空洞化発生前の段階で、 地盤透水性変動を検知できる可能性があることを意味し ている.

孔内水位を観測項目として用いることの利点をいまひ とつ示す.図-3は、孔内水位変動の影響圏半径に関する 模式図である.孔内水位変動量と孔周辺における種々の 水頭条件との関係性を示す式は、所謂井戸関数として多 くの提案式がある²⁾.それら井戸関数のほとんどは、孔内 水位変動量が透水係数の関数として孔周辺の一定の影響 圏半径内に影響を及ぼすこと定式化したものである.実 務上多用されている Seichardt 式を式(1)に例示する.

$$R = 3000 s \sqrt{K}$$
(1)

ここで, R は影響圏半径(m), s は孔内水位低下量(m)およびK は透水係数(m)

この影響圏半径の概念は、本研究において地盤透水性変動を検出するための観測項目として孔内水位変動を用いる場合、有感度領域が限定的であり、一定範囲外において生じた地盤透水性変動に対しては、孔内水位変動は感度



図-3 孔内水位変動の影響範囲の模式図

を持たないことを示唆している。しかしながらこのこと は同時に、仮に地盤透水性変動が生じている位置が観測 孔の極至近でない場合であっても, 感度領域内であれば 透水係数の関数として定量的に検知できる可能性がある こと、つまり個々の観測孔を中心として空間的に一定の カバー範囲を有するシステムとして構築できる可能性が あることを示唆している. このことは、河川堤防の現地モ ニタリングシステムとしての構築を検討する上で極めて 重要な意味を持つ、パイピングやボイリングといった基 盤漏水に関連する諸現象は、堤防基盤の高い不均質性と 線状長大性という堤防の本質的な構造特性により、発生 位置およびその時間を決定論的に予測することが現実的 に不可能である. 密なモニタリングが現実的に不可能で ある以上、限られた疎な点観測しか実施できないことを 前提としたシステムでなければ実装できないこととなる. しかし、設置する観測孔が疎であっても、空間離散的な点 データである観測孔の孔内水位変動が、空間的に一定の カバー範囲を有した検知システムとして構築できれば. 疎なデータしか得られないことを前提としながらも線状 長大領域を検知対象とするシステムとして構築できる可 能性があることを示している.

以上より,本研究では,河川堤防近傍に設置した地下水 観測孔の孔内水位変動の出水時応答特性が示す孔周辺地 盤の透水性変動に対する感度検証を行うが,現地観測と しては実際に地盤透水性が変動していることを確認でき ないこと,また実験としては検討条件が多岐に亘るため に,有意な注目項目を選定せずに計測を実施することが 困難であることを鑑み,まずは数値解析を先行実施する ことでシステム化の可能性を検証することとした.

2. 孔内水位変動の出水時応答の定式化

(1) 解析の概要

図-4に、本研究で実施する解析の概念図を示す. 観測孔 を対象とした観測項目には、最も一般的な孔内水位の他 に、孔内流向・流速や種々のトレーサを対象としたものも



ある.このため図-1-(a)中では種々の観測項目に基づ く検討を総括して「観測孔応答性」として示してある.そ の中で本研究では、最も簡易且つ安定的にデータ取得が 可能な孔内水位に着目し、その変動の出水時応答の観測 から孔周辺地盤の透水性変動を検出するためのシステム 構築が可能であるかを検証するものである.しかしなが ら、孔内水位は地盤透水性の変動以前に、出水時における 河川水位変動特性に強く依存するため、仮に、実際に地盤 透水性が変動していたとしても、その孔内水位の出水時 応答性の変化が、出水条件または地況条件のどちらの影 響であるのか判別できない(図-4-(a)参照).

そこで、地盤透水性変動についての検討に先立ち、出水 条件の変化に伴う孔内水位変動の変化を定式化する. す なわち、出水時における孔内水位変動を、河川水位変動パ ラメータを用いた関数として表現することを試みる. 当 該検討においては、地盤透水性は均質且つ不変とし、孔内 水位変動は河川水位変動のみによって生じるものとする. 図-4-(b)に当該検討の概念図を示した.

図 - 4 - (b)において, 孔内水位変動を出水時における 河川水位変動パラメータの関数として定式化したのち, 本研究の目的である,地盤透水性変動に伴う孔内水位変 動の変化の定量評価を試みる.当該解析では,解析領域内 の局所的な地盤透水性を変化させ,それによる孔内水位 変動特性の応答性変化を抽出することで,孔内水位の観 測から孔周辺地盤の透水性を検出できるかについて感度 検証を行う.

(2) 数値解析の概要

前述のように、まず図-4-(b)で示した孔内水位変動の出水時応答の定式化を検討する.解析領域は、解析条件が多岐に亘ることから計算負荷を考慮して鉛直2次元と



し、完全飽和浸透流解析を実施し、被圧帯水層を想定した 水頭変化を求めた.基礎式として用いた水頭の非定常拡 散方程式を式(2)に示す.

$$S_s \frac{\partial H}{\partial t} = K \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + K \frac{\partial^2 H}{\partial z^2}$$
(2)

ここで, H は水頭(m), K は透水係数(m/s), S_sは比貯留 係数(1/m).

図 - 5 に解析領域およびセル配置を示す. 透水層セルに 均質な透水係数および比貯留係数を設定し, 左境界にお いて河川水位変動を与えた. 右および下境界では水頭の ノイマン境界条件を与え, 透水層セル上部には粘土層を 想定した不透水セルを設置し水頭のノイマン境界条件を 与えた. 計算格子は 1.0 m×1.0 mとし, X 方向 24 mを 24 分割, Y 方向 24 m を 24 分割した. 解析領域の X 方向 中央部の不透水層直下から鉛直方向に 5 セルほど観測孔 セルを設定し, 当該観測孔セルにおける水頭の平均値を 観測孔における孔内水位とした. 実際, 現実の観測孔が全 深度で有孔保孔管(ストレーナ)である場合には, 全深度に 亘る水頭の平均値が孔内水位となる. 透水係数は 5.84E-03 m/s, 比貯留係数は 3.00E-01 1/m, 計算時間間隔を 1.00E-03 sec として SOR 法で求解した.

左境界の河川水位変動は、実出水波形から線形近似に より単純化したモデルを用いた.実波形からの抽出過程 を図-6に示す.まず、実際の波形を複数の線形勾配線の 連結で近似し、そのうちの主要な単一の水位上昇および 低下分のみについて抽出する.以下ではこれを単一線形 水位変動モデルと称す.実波形および複数の線形勾配線 で連結した水位変動から単一線形水位変動モデルに簡素 化する過程で、どの程度の誤差が生じるかの検討も実施 しているが、紙面の制約により本論では言及しない.図-7に、本研究で河川水位変動境界条件として用いた単一線 形水位変動モデルの変数定義(左図)および波形(右図)を示 す.出水継続時間をT、ピーク到達時間とT_{Rp}と定義する.



表 - 1 各 Coeffl(TRp-TBp)のT による変化

T(h)	C(T _{Rp} - T _{Bp})			
	А	В	С	D
60	1.54E-12	2.52E-07	2.47E-01	1.55E+05
120	2.54E-13	1.99E-07	3.23E-01	2.47E+05
180	4.35E-14	2.27E-07	3.63E-01	3.15E+05
240	6.05E-16	2.28E-07	3.89E-01	3.68E+05

(3) 解析結果および考察

図 - 8 に、図 - 7 で示した出水継続時間 T を 60 h で固定し、河川水位のピーク到達時間 T_{Rp} を変化させた出水条件における、孔内水位の経時変化を示す、横軸が出水経過時間(h)、縦軸が河川水位上昇開始時点を原点とした孔内水位の増加量(m)である、河川水位のピーク到達時間が遅くなるほど、孔内水位のピーク到達も遅く、且つピーク水位も高くなる傾向が確認できる。この孔内水位のピーク到達時間を T_{Bp} とし、 T_{Rp} と T_{Bp} の相関性を示したものが図 - 9 である、横軸に河川水位のピーク到達時間 T_{Rp} を,



図 - 10 各 Coeff1 (T_{Rp}-T_{Bp})と出水継続時間 T の相関性

縦軸に孔内水位のピーク到達時間 T_{Bp}をとると, 概ね線形 相関を示す.3次項の係数は,最大でも係数 D の 1.E-13 オーダーと極小値であるが,総出水時間 T が 1.E+5 オー ダー程となると,後の感度検証において,線形近似の場合 と比較して有意に差異を生じることとなるため,ここで は3次関数により近似した.近似式を図中に示した.近 似式の一般式を式(3)に示す.

$$T_{Bp} = AT_{Rp}^3 + BT_{Rp}^2 + CT_{Rp} + D$$
(3)

ただし、A、B、CおよびDは各項の近似係数であり、以下これら A~D を総称して $T_{Rp}-T_{Bp}$ 相関性係数として Coeffl(TRp-TBp)と示す.

図 - 9 は、出水継続時間を 60 h に固定した場合の T_{Rp} $-T_{Bp}$ の相関性を示すものであるが、この T_{Rp} $-T_{Bp}$ の相関 性は、いまひとつの出水パラメータである出水継続時間 Tによって変化する.よって次に、出水継続時間 Tを120、 180 および 240 時間として同様の解析を実施した.解析結 果を表 - 1 に示す. A~D の各近似係数が出水継続時間 T に伴って変化していることが確認できる.これは、 T_{Rp} T_{Bp} 相関性係数である A~D の各係数が出水継続時間 T の関 数となっていることを示しており、各係数と出水継続時 間 T との相関性を図示すると、図 - 10 のようになる. Coeffl(T_{Rp} - T_{Bp})と T の相関性を一般式で式(4)のように示 す.

$$Coeff1_{(T_{Rp}-T_{Bp})} = aT^3 + bT^2 + cT + d$$
 (4)

ただし、a、b、cおよびdは各項の近似係数であり、以下これら a~d を総称して Coeffl-T 相関性係数として Coeff2(Coeffl - T)と示す. Coeffl と Coeff2 の対応を、表-2 に示し、式(3)を Coeffl と Coeff2 の相関性も含めて改めて示すと式(5)のようになる.式(5)は、孔内水位のピーク到達時間 T_{Bp} が、単一線形水位変動モデルによる河川水位のピーク到達時間 T_{Rp} と出水継続時間 T の関数として 表せることを示している. 図 - 11 に、 T_{Rp} , T および T_{BP}

Coeff2(a~d) D b с а -1.50E-29 3.10E-23 -2.11E-17 4.81E-12 А Coeff1(A~D) 4.92E-07 В -1.76E-24 3.15E-18 -1.71E-12 С 3.46E-19 -8.24E-13 7.70E-07 1.16E-01 D 1.69E-13 -4.87E-07 6.89E-01 2.70E+04

表-2 Coeffl と Coeff2 の相関性

$$T_{Bp} = AT_{Rp}^3 + BT_{Rp}^2 + CT_{Rp} + D$$

(5)

ただし,

$$\begin{split} A &= a_1 T 3 + b_1 T 2 + c_1 T + d_1 \\ B &= a_2 T 3 + b_2 T 2 + c_2 T + d_2 \\ C &= a_3 T 3 + b_3 T 2 + c_3 T + d_3 \\ D &= a_4 T 3 + b_4 T 2 + c_4 T + d_4 \end{split}$$



の3つのパラメータの相関性に関する3次元サーフェス プロットを示す.水平軸が T_{Rp} およびTであり,鉛直軸 が T_{Bp} である.

3. 地盤透水性変動に対する孔内水位の感度検証

(1) 解析の概要

前章において出水時の孔内水位ピーク到達時間 T_{Bp} を, 均質地盤条件における種々の出水条件で定式化すること ができたため,本章では地盤透水性を局所的に変動させ た場合の孔内水位を定量評価することで,孔内水位の変 動特性から,局所的な地盤透水性の変動を検知できる可 能性があるかを検討する. 図-12 に,本章において検討す る地盤透水性の局所的変動条件を示す.前章において検 討した解析条件を元に,均質地盤透水係数を 1.0E-06 m/s とし,更に図-1 の事例を参照し地表面から深度 1.0m の 位置に透水係数を 1.0E-03 m/s と,3 オーダー透水係数を 増大させた透水性変動層を設置し,透水性変動層として 設定した層長を以下では X_P と定義する. X_P を 0 m (均質 地盤) ~13 m まで伸展させた各条件において,前章同様 の浸透流解析を実施し,孔内水位について考察した.



図 - 12 局所的地盤透水性変動条件



図 - 13 局所的地盤透水性変動に対する孔内水位変動

(2) 解析結果および考察

図 - 13 に、出水継続時間 T を 36 h、ピーク到達時間 T_{Rp} を 12 h に固定した場合の、透水性変動層長毎の孔内水位の経時変化を示す.均質地盤(Xp=0)における解析結果を黒 実線で示し、以下 Xpの伸展長増大に伴って色調が次第に 濃くなるよう黄実線で表記してある.図から、層長増大に 伴って、孔内ピーク水位が大きく、且つ孔内ピーク水位到 達時間が早くなっていることが確認できる.

透水性変動層長 X_Pと孔内水位のピーク到達時間 T_{Bp}の 関係を図-14 に示す. 横軸が透水性変動層長 X_Pであり, 縦軸が孔内水位のピーク到達時間 T_{Rp}である. 均質状態 (X_P=0)と比較して X_P=13 m の場合,最大で3.75 h の差 異が生じていることが確認できる.また,図-15 には,同 じく透水性変動層長 X_Pと,河川水位上昇開始時点を原点 とした増加量で示した,孔内水位増加量のピークとの関 係を示す.透水性変動層長 X_Pの増大に伴い,水位増加量 のピークも上昇していることが確認できるが,その差は 均質状態と最大伸展状態(X_P=13 m)との比較においても, 最大で2.3 cm 程の差しか生じていない.高精度な水位観 測によって検出できる可能性もあるが,自然環境におけ る種々の攪乱要因や,人為的・機械的な誤差を勘案すると, 現実的には2.3 cm の孔内水位差は検出が困難であると考 えられる.よって,地盤透水性変動を本システムで検出す







図 - 15 透水性変動層伸展長と孔内水位増加量ピーク

るパラメータとしては、孔内水位ピーク到達時間 T_{Bp}が有効であると考えられる.

図-13は、出水条件を固定した場合の解析結果であるが、 注目するパラメータである孔内水位のピーク到達時間 TBoは,式(5)および図-11 に示すように出水パラメータ の関数として既に定式化できている.ここで、本章におい て考察した地盤透水性変動の影響を図-11 上に表記して 図-16 に再掲する. 図 - 16 のサーフェスプロットは均質 地盤(Xp=0m), つまり地盤透水性が変動していない条件 において種々の出水条件下における孔内水位ピーク到達 時間 T_{Bp}を示しており、T_{Bp}がサーフェスプロット上を変 化する限りにおいては、出水条件による Tbpの変化を示し ているだけであるため地盤空洞化リスクは増大していな いことを示す. 説明を簡易にするため, 河川水位ピーク到 達時間 T_{Rn}を固定して,種々の出水継続時間 T の出水に, 堤防基盤が継続的に晒されている状況を考える. このと き、地盤透水性が変動していない場合には、縦軸に示した 孔内水位のピーク到達時間 T_{Bp}は, 図-16 中に付した赤破 線上の任意の点に位置する. ここで, 孔周辺地盤の透水性 に変動が生じると、TBnがこの赤破線の上下いずれかにに ずれる.もしTBpサーフェスプロットの上方に位置した場 合には地盤透水性は低下したことを意味し、逆にTBoがサ ーフェスプロットの下方に位置した場合には地盤透水性 が増大したことを意味するため、地盤空洞化リスクが増 大したことを示唆する結果と判断することができる.



図 - 16 孔内水位観測結果を用いた 堤防基盤漏水リスクモニタリングシステム

4. まとめ

本研究によって得られた主要な成果を以下に示す.

- 堤防近傍に設置した地下水観測孔の出水時における 孔内水位のピーク到達時間を, 簡素化した出水モデ ルパラメータによって定式化することができた.
- 2) 孔内水位ピーク到達時間をパラメータとすることで、 孔周辺地盤の透水性変動を、数時間オーダーという 現実的にも実測可能な差異として検出できることを 示し、当該知見と上記の定式化モデルを用いて、孔周 辺基盤の空洞化リスクのモニタリングシステムを構 築することができた。
- 3) ただし本研究成果は、2次元解析であること、均質地 盤を想定していること、出水条件を簡素化している こと、完全飽和浸透流解析であること、地盤透水性変 動のモデル化に実現象との差異が存在する可能性が 高いこと、実験による素過程の検証ができていない ことなど、多くの今後の課題を有している。

謝辞:本研究の推進にあたり,科学研究費補助金(挑戦的 萌芽研究:16K12852)および公益財団法人河川財団の河川 整備基金助成事業による補助を受けた.ここに記し,謝 意を表します.

参考文献

- 河川部会堤防ワーキンググループ,堤防研究小委員会侵食, 浸透破壊,洗堀ワーキンググループ:河川堤防の効率的補 強に関する技術的課題とその取り組みの方向性,河川技術 論文集,第21巻,pp.367-372,2015.
- 山本荘毅著:新版地下水調査法,古今書院,1983.
 (2019.4.2 受付)