

河川堤防の浸透に対する構造ヘルスモニタリング

Structural Health Monitoring for Seepage in River Levees

竹下 祐二¹⁾



1) Yuji TAKESHITA, 特命教授 (研究), 岡山大学, yujitake8@gmail.com

河川堤防の浸透に対する安全性照査のためには、堤防内の浸透挙動を精度良く計測し、可視化することが重要である。堤防の浸透に対する構造ヘルスモニタリングは、堤防内の水位（水圧）や土中水分量などの動態を常時計測して堤防の状態や性能を診断し、洪水時に発生する浸透動態を予測する技術である。実在の一級河川堤防での構造ヘルスモニタリングとして、堤体のり面の土中水分動態および堤防基盤透水層の水位変動を計測し、土中水分動態による降雨浸透量および不飽和浸透特性値の推定方法、そして水位変動の時系列を学習させた回帰モデルを用いた洪水時の基盤透水層の水位予測方法を提案した。

キーワード：堤防、浸透、現場計測、土中水分量、回帰モデル (IGC : C-07, D-04, E-07)

1. はじめに

河川堤防の浸透に対する安全性を照査するためには、堤体内の浸潤線や堤防基盤透水層の水位または間隙水圧の変動、および堤体内の土中水分動態などの浸透挙動を精度良く計測し、可視化することが重要である。現在、国の管理河川においては、洪水時の河川水位観測に特化した「危機管理型水位計」を設置して河川水位の把握が行われている¹⁾。しかし、堤防の調査や維持管理では、堤防の浸透動態を常時監視して地盤工学的な健全性を把握するための「構造ヘルスモニタリング (Structural Health Monitoring ; SHM)」は普及していない。

堤防の浸透に対する SHM は、堤防内に設置した各種センサによって水位（水圧）や土中水分量などの物理量を測定し、それらの計測値の解析処理によって堤防状態の診断および洪水時に発生する浸透動態の予測を行う技術である。SHM によれば、平常期間における河川水位の上昇や降雨などの比較的小さな外力に対する応答を活用した堤防の性能評価や経年劣化の把握も期待される。SHM による堤防の浸透モデルの構築はデータ駆動型処理 (Data-driven Processing) であり、堤防固有の地盤工学特性を具現化した浸透モデルとして、堤防の維持管理および防災対策に利活用できる。

本文では、実在する一級河川堤防での浸透に対する SHM 事例として、堤体のり面の土中水分動態計測および堤防基盤透水層の水位変動計測を報告する。土中水分動態の計測では、堤体のり面内の降雨浸透挙動を可視化し、降雨浸透量および不飽和浸透特性値の推定方法を提案した。水位変動計測では、河川水位に応答して変動する基盤透水層の水位の時系列を学習させた回帰モデルを用いて、洪水時に発生する基盤透水層の水位変動を準リアルタイムに予測する方法を提案した。これらの事例により、

河川堤防での浸透に対する SHM の有用性および今後の展望について考察する。

2. 堤防のり面での土中水分動態計測

2.1 土中水分動態計測によって構築される浸透モデル

河川堤防は不飽和土構造物であり、降雨や河川水の浸透によって堤体内的土中水分量が増加すると堤体土の重量増加および強度低下により堤体が弱体化するため、すべり破壊が発生することが知られている。特に、堤体内に生じた浸潤線が裏のり面や裏のり先に到達した場合には、裏のり面のすべり破壊が懸念される。降雨や河川水による堤体内的不飽和浸透状況を把握するためには、堤体内での土中水分動態の計測が有用であり、堤体のり面の複数地点および多深度において土中水分量の動態を計測することが望ましい。

のり面内の複数点での土中水分動態を把握すれば、のり面内の断面 2 次元浸透モデルを構築できる。また、降雨イベントの前後で生じた土中水分量の深度分布の変動により、鉛直 1 次元浸透場での降雨浸透量を簡易的に推定できる。ここで、降雨浸透に起因した土中水分動態の連続計測は、降雨を自然外力とした長期間の原位置透水試験と同義であると言える。そのため、計測された土中水分動態を飽和～不飽和非定常浸透流解析によりシミュレートし、不飽和浸透特性値の関数モデルを同定することで、堤体固有の不飽和浸透特性値を推定できる。このように、堤体内での土中水分動態の計測と評価によって構築された浸透モデルは、堤防の浸透に対する検討実務に多用されている飽和～不飽和非定常浸透流解析²⁾の数值モデルに必要な初期条件、降雨境界条件、および不飽和浸透特性値の設定に活用できる。

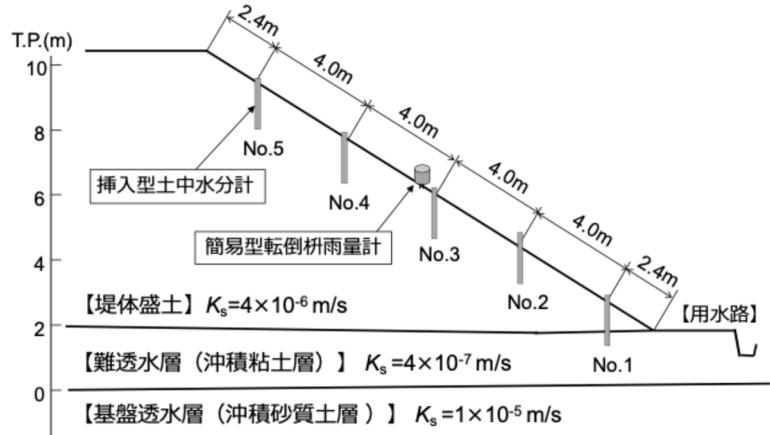


図-1 高梁川 4k900 右岸堤防の推定地層断面および計測機器配置（2014 年 8 月）

2.2 堤防のり面での土中水分動態の計測事例

2.2.1 対象堤防およびモニタリングの概要

対象とした河川堤防は一級河川高梁川右岸 4k900 地点（岡山県倉敷市船穂町）である³⁾。堤防はシルト混り砂～シルト質砂（飽和透水係数 $K_s=4 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ）で築堤され、堤体盛土下部には難透水層（沖積粘性土、 $K_s=4 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ）が層厚 0.8～2.8 m 程度で分布し、その下方に基盤透水層（沖積砂質土、 $K_s=1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ）が河床の標高付近に層厚 2.0～2.5 m 程度で存在する。堤防裏のり面（2 割勾配、のり面長約 21 m）では、降雨後、のり先部からの漏水が頻繁に発生しており、すべり破壊が懸念された。そこで、のり面内の降雨浸透状況を把握するために、複数の挿入型土中水分計を用いて土中水分動態を計測した。図-1 に堤防の推定地層断面および計測機器配置を示す。

挿入型土中水分計⁴⁾は、のり面上にはほぼ等間隔に 5 本設置した。これらの土中水分計では、地表面からの計測中心深度 (GL.- m) が 0.07, 0.17, 0.27, 0.37, 0.57, および 0.97 の 6 深度それぞれにおいて、高さ 100 mm、直徑 120 mm 程度の円筒領域の平均的な体積含水率（測定精度±0.06）が計測される⁵⁾。そのため、対象のり面では計 30 測点（のり面 5 地点×6 深度）での土中水分量が同時に計測される。また、簡易型転倒枠雨量計⁶⁾（測定精度 0.2 mm/h）をのり面中腹付近の地表面上に設置した。土中水分計および雨量計の計測間隔はいずれも 30 分であり、専用データロガー⁷⁾を用いて制御した。

各土中水分計の近傍において、地表面より深度 0.3 m 程度の領域を対象とした原位置透水試験および土の粒度試験を実施した⁸⁾。のり肩付近では、のり先部および中腹部に比較してシルトおよび粘土分は少なく、礫分を多く含んでおり、現場飽和透水係数は、のり肩部では $2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 程度、のり面中腹部では $4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 程度、のり先部では $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 程度が測定された。

2.2.2 降雨浸透挙動の断面 2 次元評価

対象のり面では、2016 年 6 月 19 日から 6 月 25 日に 251.8 mm の累加降雨量を観測した。この期間に計測された土中水分量の断面 2 次元分布の変化を図-2 に示す。の

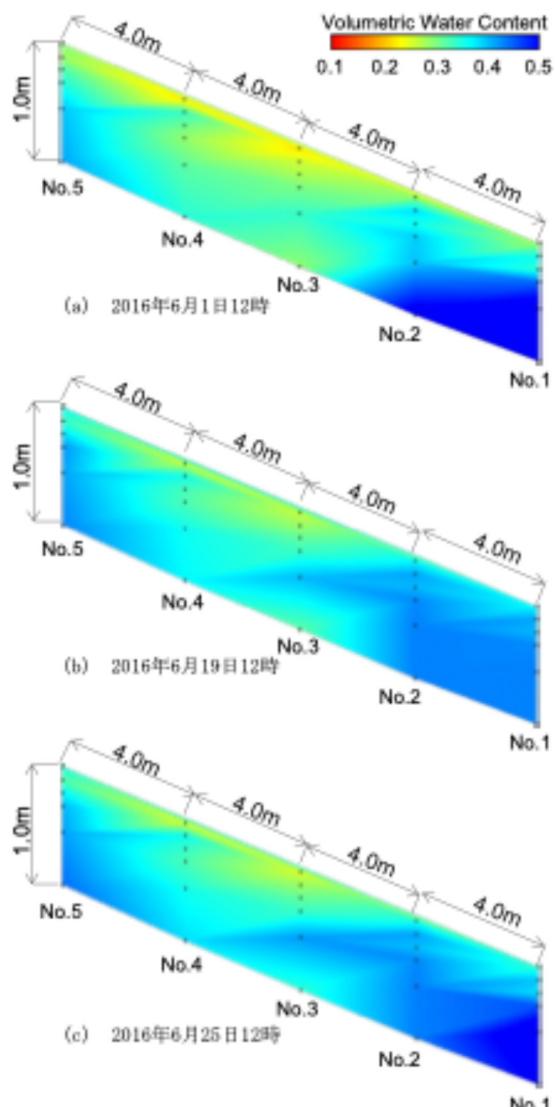


図-2 降雨浸透によるのり面断面の土中水分量分布

り面に浸透した雨水はのり先に向かって流下し、のり先部分で貯留されている状況が見られる。のり先部分では、表層の土中水分量は降雨や蒸発散に応答して変動するが、

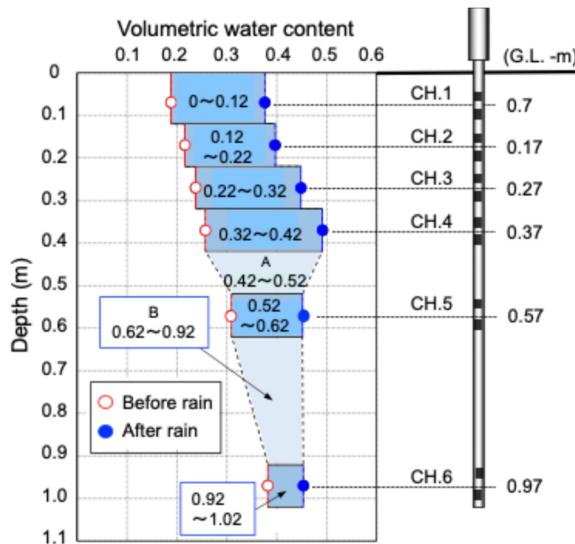


図-3 土中水分量の深度分布の変化による降雨浸透量の算定

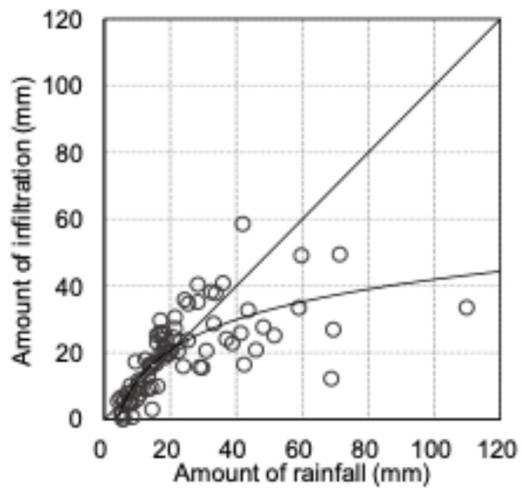
それ以深の土中水分量は蒸発散による変動が小さいために常に高い状態にあり、貯留された雨水による飽和領域が形成されている。このように、可視化された土中水分動態によれば、のり面に浸透した雨水は時間遅れを伴ってのり先部より浸出していると考えられた³⁾。

複数の土中水分計によって計測された局所的な土中水分動態を面的に補完する方法としては、牽引式電気探査や地表設置型地中レーダ探査などの物理探査法の併用が提案できる。堤防上の同一測線上において、これらの物理探査を堤防内の土中水分状態が異なる複数の日時に実施し、探査画像の差異や変化を差分断面図として抽出すれば、堤体内の浸透に対する特異な弱部をフィールドスケールで評価することが期待される^{9), 10)}。

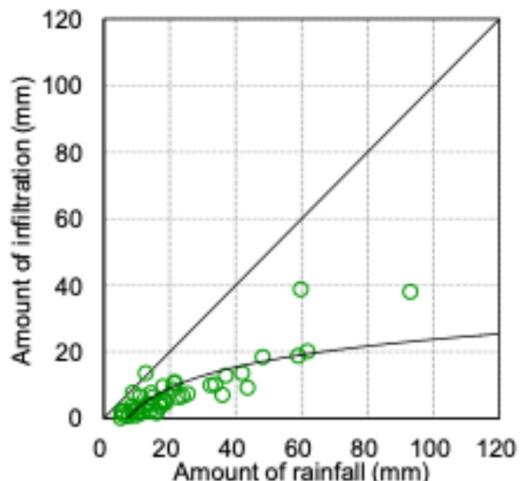
2.2.3 鉛直1次元浸透場での降雨浸透量の推定

用いた土中水分計では、図-3に示す6深度区間(GL.-m: 0.02~0.12, 0.12~0.22, 0.22~0.32, 0.32~0.42, 0.52~0.62, および0.92~1.02)において、それぞれ平均的な土中水分量が計測される⁵⁾。未計測である深度区間AおよびB(GL.-m: 0.42~0.52および0.62~0.92)での土中水分量の鉛直分布は、上下の深度区間で計測された土中水分量によってそれぞれ線形補間し、地表面から深度0.02 mまでの土中水分量は深度区間(GL.-m: 0.02~0.12)と等しいと仮定した。以上により、降雨イベント前後での土中水分量の鉛直分布の変動量を図-3中の着色した四角形部分の面積の総和により算出し、これらを土中水分計の設置点における鉛直降雨浸透量と考えた。

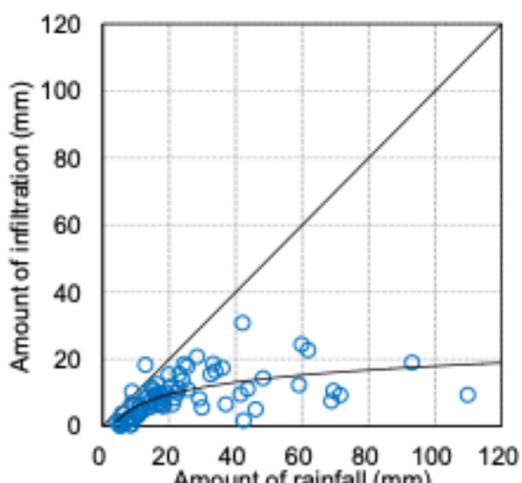
2015年および2016年に計測された累加降雨量5 mm以上の降雨イベントに対して、算出した降雨浸透量と累加降雨量との関係を図-4に示す。降雨浸透量は累加降雨量の増加に伴って増加する傾向が見られるが、その絶対量はのり面位置によって異なり、のり肩での降雨浸透量は、のり先や中腹よりも増加している。これは前述したのり面表層土の粒度および透水性の特徴に一致している。



(a) 土中水分計 No.5 (のり肩)



(b) 土中水分計 No.3 (のり中腹)



(c) 土中水分計 No.1 (のり先)

図-4 降雨浸透量と累加降雨量の関係

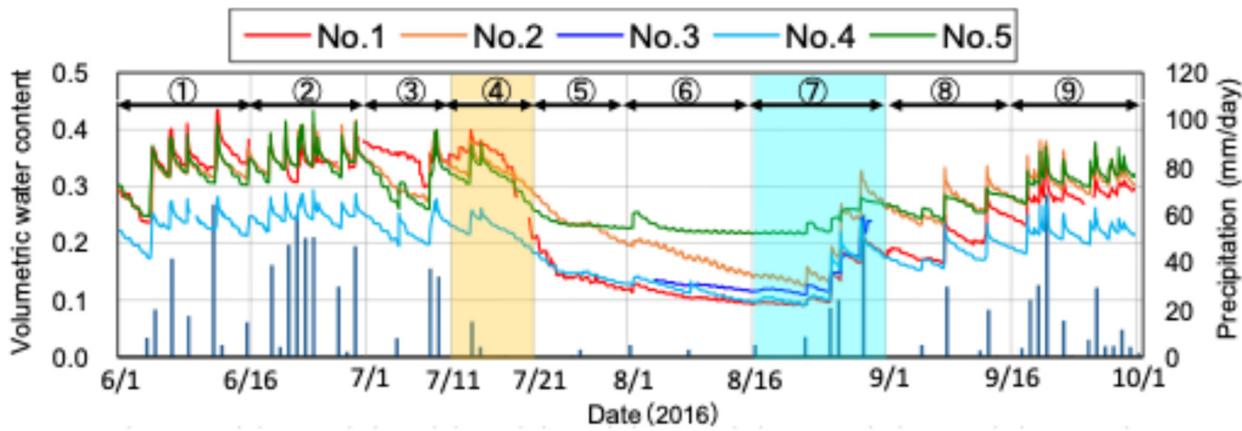


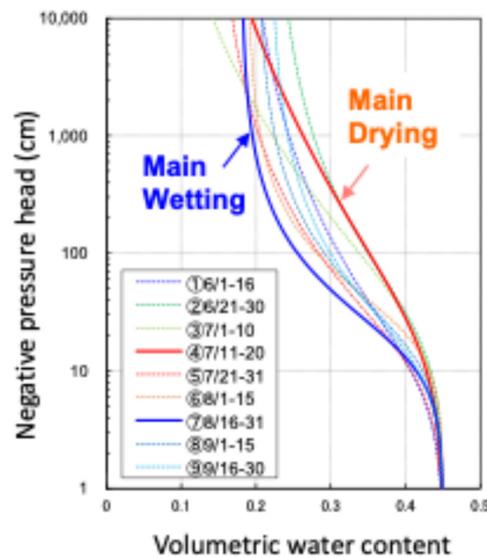
図-5 計測された土中水分動態と降雨量（計測深度区間 GL. -0.02～0.12 m）

2.2.4 不飽和浸透特性値の推定

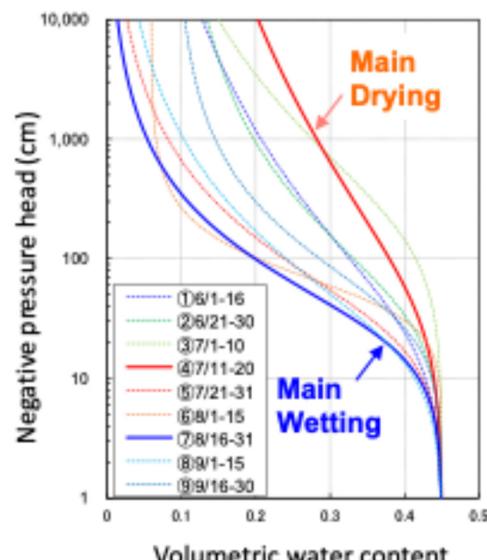
5 本の土中水分計 (No.1～No.5) における計測深度区間 0.02～0.12 (GL.-m) にて、2016 年 6 月～9 月の出水期間に計測された土中水分動態を図-5 に示す¹¹⁾。土中水分量は降雨に応答して迅速に増加し、蒸発散により緩やかに減少している。特に、図中の期間④は期間中の累加降雨量 (20 mm) によって土中水分量が増加した後、蒸発散によって単調に減少する排水過程の不飽和浸透であり、期間⑦は土中水分量が低い状態から累加降雨量 (115.7 mm) によって増加する浸潤過程での不飽和浸透が生じている。このような土中水分動態は、のり面位置によっても異なっており、土中水分計 No.5 (のり肩) では、No.1 (のり先) に比較して高い土中水分状態で変動している。

期間①～⑨に計測された体積含水率の動態をそれぞれ再現できる van Genuchten の不飽和浸透特性モデル (VG モデル)¹²⁾を同定した。VG モデルの同定には非線形最小二乗法による逆解析機能を有する浸透流解析¹³⁾を用いた。浸透流解析には軸対称均質地盤モデルを用い、解析領域は地表面から深さ 1.02 m、直径 0.12 m の範囲とした。解析領域の下端は重力排水境界であり、地表面は降雨浸透境界として、のり面原位置で計測された降雨量および Hamon 式による推定可能蒸発散量¹⁴⁾を与えた。

同定された VG モデルによって推定された水分特性曲線を図-6 に示す。のり面位置や計測期間によって異なる水分特性曲線が推定されている。この要因は不飽和浸透特性が強い非線形性を有することや、のり面位置における透水性や保水性の差異および降雨量や蒸発散量によって不飽和浸透挙動が変化するなどが考えられる。特に、水分特性曲線は排水過程と浸潤過程での形状が異なるヒステリシス現象¹⁵⁾を示すことから、期間④での水分特性曲線は主排水曲線 (Main Drying Curve) に相当し、期間⑦では主浸潤曲線 (Main Wetting Curve) に相当する水分特性曲線がそれぞれ推定されていると思われる。このように土中水分動態の計測値を用いて不飽和浸透特性値をフィールドスケールで推定する方法は、堤防の浸透モデル構築に有用であり、実務での普及が期待される。



(a) 土中水分計 No.5 (のり肩)



(b) 土中水分計 No.1 (のり先)

図-6 VG モデルにより推定された水分特性曲線

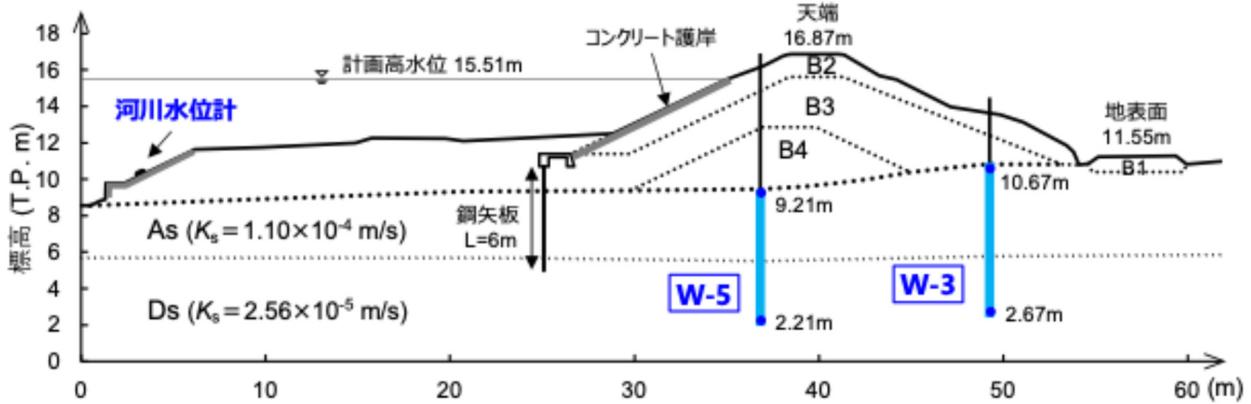


図-7 小田川 5k600 右岸堤防の推定地層断面および水位計測配置（2017 年 4 月）

3. 堤防基盤透水層での水位動態計測

3.1 水位動態計測によって構築される浸透モデル

河川水位の上昇によって堤防基盤透水層の水位あるいは間隙水圧（以後、水位と表記）が上昇し、裏のり先付近の動水勾配が過大になった場合には、基盤透水層からの漏水や浸透破壊（盤膨れ、噴砂、パイピング現象など）の発生が懸念される。そのため、基盤透水層の水位を低下させる堤内基盤排水対策が重要となる¹⁶⁾。その対策工の必要性や対策効果が維持されていることを確認するためには、河川水位外力に対する基盤透水層および堤体内の水位応答を継続的にモニタリングする必要がある。

モニタリングされた基盤透水層あるいは堤体内の水位と河川水位との相関を説明変数として構築された回帰モデルは、対象堤防内で発生した水位変動パターンを具現化し、堤防の複雑な地質構造や浸透特性値などを反映した浸透モデルであると言える。そのため、これらの回帰モデルを用いれば、洪水時に計測された河川水位および堤防内水位の変動状況を入力情報として、現時刻から任意の時間経過後における堤防内水位を準リアルタイムで予測することが可能となる^{17), 18), 19), 20)}。回帰モデルの代表的な学習アルゴリズムは、線形回帰モデルではスパースモデリング（Sparse Modeling）²¹⁾であり、非線形回帰モデルでは深層学習を用いたニューラルネットワーク（Deep Neural Network）²²⁾である。本文では、基盤透水層での水位動態計測に基づく浸透モデルとして、これらの学習アルゴリズムを用いて、線形回帰モデルおよび非線形回帰モデルを構築した。

3.2 堤防基盤透水層における水位動態の計測事例

3.2.1 対象堤防およびモニタリングの概要

対象とした河川堤防は一級河川小田川右岸 5k600 地点（岡山県倉敷市真備町服部地内）である。本堤防では、堤体裏のり先や基盤透水層からの漏水や噴砂による浸透破壊の発生が懸念された²³⁾。図-7 に堤防の推定地層断面および水位計測位置を示す¹⁹⁾。堤体盛土層（B1～B4）はシルト混り砂～シルト質砂であり、基盤透水層は透水性の

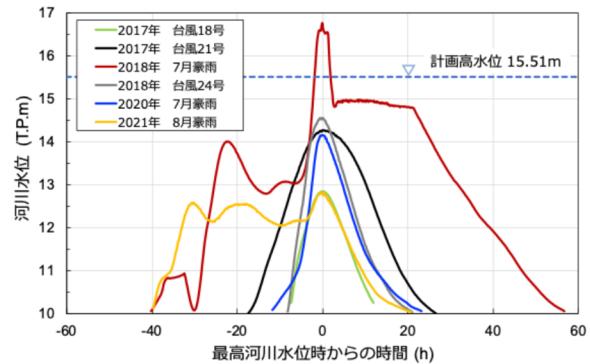


図-8 洪水時の河川水位変動

良好な沖積礫質砂層 As ($K_s=1.10 \times 10^{-4} \text{ m/s}$) と層厚 4 m 以上の洪積砂礫層 Ds ($K_s=2.56 \times 10^{-5} \text{ m/s}$) が概ね水平に堆積している。As 層上部には透水性の低い被覆土層は確認されていない。ボーリング調査時に確認された As 層および Ds 層の平均水位標高は河川水位と同等であることから、両層内の浸透水は河川水と連続しており、不圧地下水状態にあると推察された。

基礎透水層の水位（以後、基盤水位と表記）としては、As 層および Ds 層の両層に連続したストレーナを設けた観測井 W-5 および W-3（図-7 中にストレーナ区間の標高値を表記）での計測水位を用いた。河川水位は対象堤防の低水護岸部において計測した。これらの水位計測にはメモリ内蔵型絶対圧水位計（測定範囲 9 m, 分解能 3 mm）²⁴⁾を用いて 10 分間隔で実施した。

3.2.2 水位変動の時系列を学習させた回帰モデル

対象堤防では 2017 年から 2021 年に台風や豪雨による 6 件の洪水が発生した。これらの洪水時に計測された河川水位の変動を図-8 に示す。河川水位の変動は、台風による洪水時には単調な水位上昇と下降を示し、豪雨による洪水時には高水位が長時間継続した状態で複数回変動している。図-9 に洪水時の基盤水位と河川水位の関係を示す。いずれの洪水時においても、基盤水位は河川水位の上昇に対してやや時間遅れを伴って上昇しており、両者には有意な相関が認められる。そこで、図-8 に示した

洪水時に計測された河川水位および基盤水位の変動の時系列を説明変数とした回帰モデルを構築した。

説明変数は基盤水位の変動に影響を及ぼす時刻での水位計測値を包含するように計測時刻を選定した。図-9によれば、洪水時の基盤水位は河川水位に比べて3時間程度の時間遅れを伴って変動する傾向が見られた²³⁾。そこで、説明変数には図-10に示すように現時刻および現時刻から3時間前までの30分毎の7時刻(0, 30, 60, 90, 120, 150, および180分前)において計測された河川水位($r_1 \sim r_7$)および基盤水位($h_1 \sim h_7$)を用いた。回帰モデルによって予測すべき目的変数は、任意の予測時刻(現在時刻からN時間後)の基盤水位であり、該当する時刻に計測された基盤水位を教師データとして学習させた。

回帰モデルによる洪水時の基盤水位の予測性能は、2018年に発生した台風24号および7月豪雨による洪水に対して検証した。それぞれの洪水時の予測に用いる回帰モデルの説明変数および目的変数には、前述した6例の洪水のうち、一部欠測が生じた2020年7月豪雨および予測対象とした洪水を除外した計4例の洪水時に計測された河川水位および基盤水位を用いた。基盤水位の予測では、学習済み回帰モデルに説明変数である現時刻から3時間前までの計測水位を入力すれば、現在時刻からN時間後の基盤水位が outputされる。本文では、現在時刻から1時間後の基盤水位予測を行った事例を示す。

3.2.3 回帰モデルによる洪水時の基盤水位予測

台風24号による洪水は、短時間に急激な河川水位の上昇と低下が発生し、単調な基盤水位変動が生じた事例である。水位予測期間は、河川水位が上昇を始めた9月30日15時から洪水前の河川水位に降下した10月1日21時までを選定した。それぞれの回帰モデルによって予測された基盤水位および計測された基盤水位の比較を図-11に示す。水位予測精度の評価指標として、両水位の平均平方二乗誤差(Root Mean Square Error; RMSE)を用い、図中に矢印で示した3つの水位変動区間のそれぞれにおけるRMSE(mm)を表記した。いずれの回帰モデルにおいてもRMSEに有意な差は見られず、良好な基盤水位予測がなされている。基盤水位の最高値およびその到達時刻もほぼ正確に予測されている。

7月豪雨による洪水は、西日本豪雨²⁵⁾によって河川水位が長時間高水位状態にあり、2回目の河川水位上昇時には計画高水位を超過した特異な事例である²³⁾。小田川堤防右岸4k400~6k200区間では内水氾濫が発生(7月7日0時頃と推測²⁵⁾)し、堤内地側から堤体および堤防基盤層への浸水が発生した。そのため、水位予測期間は河川水位が上昇を始めた7月5日7時30分から河川水位が最高水位に上昇した7月7日0時30分までとした。それぞれの回帰モデルによって予測された基盤水位および計測基盤水位の比較を図-12に示す。図中に矢印で示した3つの水位変動区間のそれぞれにおいて、算出されたRMSE(mm)を示した。いずれの回帰モデルにおいても、基盤水位が再上昇する7月6日18時以降において予測精

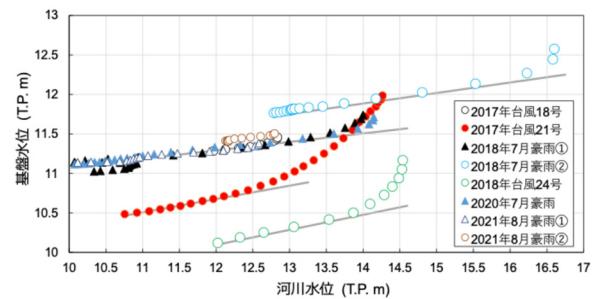


図-9 洪水時の基盤水位と河川水位の関係

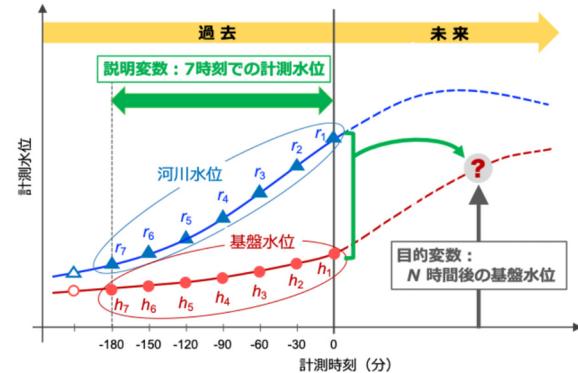
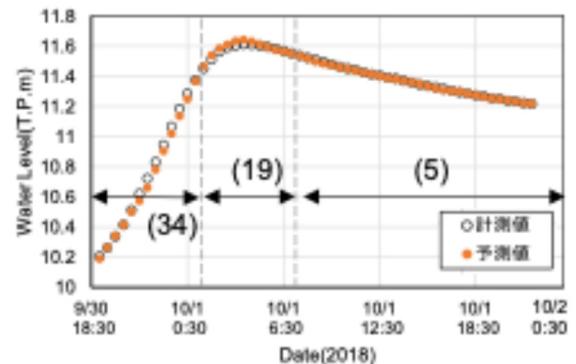
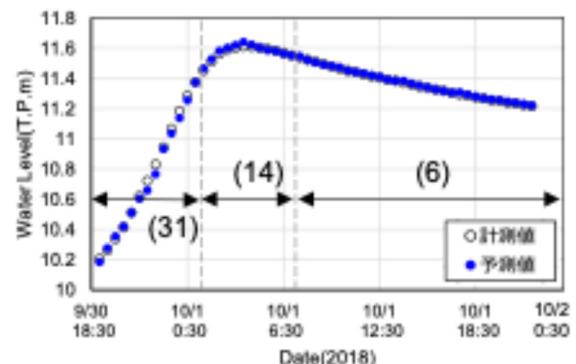


図-10 回帰モデルの説明変数および目的変数



(a) 線形回帰モデルによる予測



(b) 非線形回帰モデルによる予測

図-11 基盤水位の1時間後予測(台風24号)

度はやや低下しているが、基盤水位が最高水位に到達した時刻は的中している。このような複雑な水位変動を有する洪水での水位予測では、非線形回帰モデルの方が線形回帰モデルに比べて水位変動のトレース性に優れており、良好な予測精度が得られている。

3.2.4 回帰モデルによる水位予測の留意点

回帰モデルによる水位予測では、対象堤防で過去に実測された水位変動を学習させるため、予測精度の担保が期待できる。予測精度を向上させるためには、学習させる説明変数の質と量が重要である。対象堤防にて発生する多様な水位変動パターンを蓄積し、隨時学習することで回帰モデルを更新していくことが望ましい。

水位予測は回帰モデルに学習させた水位変動の内挿区間での予測が前提であり、外挿区間での予測値の妥当性は保証されない。例えば、学習させる洪水事例がない場合や未曾有の洪水に対する水位予測では、予測性能は不明である。ただし、内挿区間に近い外挿区間において、予測すべき真値が内挿区間と大きく異なる非線形性などを持たず、内挿区間の延長として扱える場合には、比較的妥当な予測値が得られることが期待される。

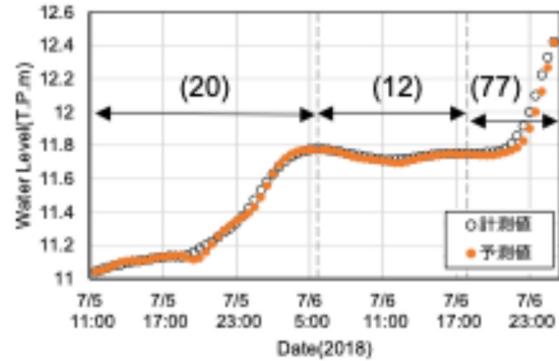
内挿区間での水位予測に近づける工夫として、変動スケールの異なる計測水位を扱う場合には、それぞれの平均および分散を考慮した標準化を行うことや目的変数に計測水位の差分を用いるなどの前処理が行われる²⁶⁾。また、予測すべき水位時刻が現時刻から長くなる場合には、非線形回帰モデルの学習アルゴリズムとして、時系列データのパターンを認識するように設計された再帰型ニューラルネットワーク²⁷⁾(Recurrent Neural Network) や時系列データのプリプロセス手法²⁸⁾の適用が提案されている¹⁸⁾。

4. おわりに

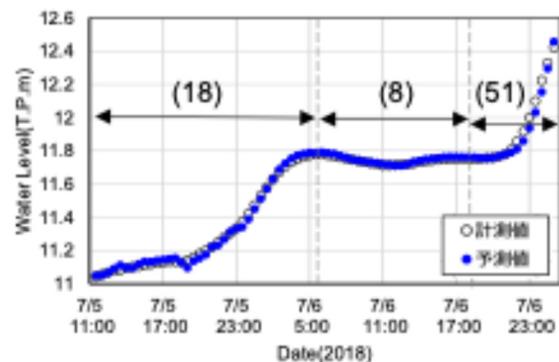
河川堤防の浸透に対する構造ヘルスモニタリングでは、堤防内の浸透挙動を評価するための本質的な計測物理量の選定とそれらの計測点配置および計測間隔の設定が重要である。近年、センサー技術の向上によって、堤防内の浸透挙動に関する多種多様な計測値を大量かつ遠隔にて収集することが可能になってきている。そのような計測システムが河川堤防に実装されることが望まれる。

構造ヘルスモニタリングによって蓄積された浸透挙動を回帰モデルに学習させる過程は、堤防の浸透問題に対する地盤工学的な検討姿勢を示唆していると言える。構築された浸透モデルは、堤防の維持管理における日常点検のみならず、防災対策としても活用できる。例えば、洪水時に、予測された浸透挙動に基づいて堤防の損傷や決壊発生の可能性およびその程度を推定することが可能になれば、リードタイムを確保した早期避難支援のための情報発信ツールとして期待される。

河川堤防の調査、検討、および維持管理において、「計測は力なり」と提言したい。



(a) 線形回帰モデルによる予測



(b) 非線形回帰モデルによる予測

図-12 基盤水位の1時間後予測（7月豪雨）

謝辞

本研究は国土交通省中国地方整備局岡山河川事務所受託研究費（平成21年度～令和7年度）およびJSPS科研費JP18K04347, JP22K04313の助成によって遂行されました。河川堤防の構造ヘルスモニタリングに関しては、復建調査設計株式会社上熊秀保氏、岡山地下水調査有限会社西村輝氏、応用地質株式会社赤松洋介氏より多くの技術支援をいただきました。スペースモデリング手法に関しては、東京都市大学珠玖隆行教授より多くのご助言をいただきました。計測データの解析および浸透モデルの構築には岡山大学竹下研究室の修了生および卒業生の皆さんに多大な協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 國土交通省 水管理・國土保全局河川計画課：危機管理型水位計設置の手引き（案），2019.
- 2) 地盤工学会編：河川堤防の調査・検討から維持管理まで，pp.57-60, 2020.
- 3) 竹下祐二，片山頌嵩，津國遼太郎，児子真也：漏水が発生している河川堤防における浸透挙動の計測事

- 例, 地盤工学ジャーナル, Vol.13, No.1, pp.100-107, 2018.
- 4) Delta-T Devices Ltd.: User Manual for the Profile Probe type PR2, Ver.PR2-UM-3.0, 2008.
 - 5) 井上光弘: プロファイルプローブによる土壤水分測定とその応用, 第 57 回農業土木学会中国四国支部講演要旨, pp.113-114, 2002.
 - 6) Delta-T Devices Ltd.: User Manual for Raingauge type RG2, Ver.RG2-UM-1.1, 2003.
 - 7) Delta-T Devices Ltd.: DL-6 Data Logger Quick Start Guide Ver.1.2, 2016.
 - 8) 竹下祐二, 三木愛実, 池田 結: 簡易型変水位透水試験による現場飽和透水係数の原位置測定方法, 土木学会論文集 C(地盤工学), Vol.77, No.3, pp.314-324, 2021.
 - 9) 小西千里, 新清 晃, 斎藤秀樹, 阿部知之, 佐藤喜一郎, 小林 剛, 山下善弘: 牽引式電気探査による比抵抗の差分断面図を用いた堤防の浸透性評価, 第 52 回地盤工学研究発表会, pp.977-978, 2017.
 - 10) 竹下祐二, 片山頌嵩, 津國遼太郎, 金 乗洙, 新開竜大, 児子真也: 地中レーダによる河川堤防表層における浸透挙動の調査事例, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp.1015-1016, 2018.
 - 11) 竹下祐二, 片山頌嵩, 後藤竜二, 児子真也: 河川堤防表層における土中水分量計測を用いた不飽和浸透特性値の推定方法に関する考察, 土木学会第 73 回年次学術講演会III-230, pp.459-460, 2018.
 - 12) van Genuchten, M. Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America Journal, 44, pp.892-898, 1980.
 - 13) Rassam, D., Simunek, J. and van Genuchten, M. Th.: Modelling variably saturated flow with HYDRUS-2D, International Ground-water Modeling Center, 2003.
 - 14) Hamon, W.R.: Estimating potential evapotranspiration, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 87(HY3), pp.107-120, 1961.
 - 15) 地盤工学会編: 不飽和地盤の挙動と評価, pp.27-29, 2004.
 - 16) (国研) 土木研究所 地質・地盤研究グループ土質・振動チーム: 堤内基盤排水対策マニュアル(試行版), 2021.
 - 17) 竹下祐二, 鳥越友輔: 深層学習を用いた出水時における河川堤防内水位の予測方法, 土木学会論文集 C(地盤工学), Vol.76, No.4, pp.340-349, 2020.
 - 18) 竹下祐二, 山本純也: 深層学習を用いた洪水時における河川堤防内水位の変動予測, 地盤工学会誌, Vol.70, No.7, pp.17-20, 2022.
 - 19) 竹下祐二, 川田勇希: スパースモデリングを用いた洪水時における河川堤防基盤水位の変動を表す回帰モデル作成に関する考察, 第 10 回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.59-60, 2022.
 - 20) 竹下祐二, 川田勇希, 上熊秀保: 洪水時の河川堤防基盤水位予測モデルにおける深層学習とスパースモデリングの適用性, 第 58 回地盤工学研究発表会発表講演集, 12-2-2-07, 2023.
 - 21) 染田貴志, 木虎直樹, 宇佐見一平, 増井隆治, 田辺広樹: IT エンジニアのためのスパースモデリング入門, 翔泳社, 74p., 2021.
 - 22) 斎藤康毅: ゼロから作る Deep Learning-Python で学ぶディープラーニングの理論と実装, オライリージャパン, 298p., 2016.
 - 23) 竹下祐二, 片山頌嵩, 鳥越友輔, 佐藤亜海: 出水時における河川堤防内の浸透挙動の計測事例, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.75, No.1, pp.155-164, 2019.
 - 24) 応用地質 (株): 取扱説明書 MODEL-4800 S&DL mini, Rev.12b, 2020.
 - 25) 土木学会中国支部: 2018 年 7 月西日本豪雨災害調査報告書, pp.59-68, 2018.
 - 26) 竹下祐二, 川田勇希, 西村 輝, 上熊秀保: 洪水時の河川堤防基盤水位予測モデルにおける計測水位の前処理に関する考察, 第 59 回地盤工学研究発表会発表講演集, 23-10-3-306, 2024.
 - 27) 斎藤康毅: ゼロから作る Deep Learning—自然言語処理編, オライリージャパン, pp.175-258, 2018.
 - 28) 徳田大輔, Eunho KOO, 金 炯俊: 深層学習と簡易な前処理による洪水予測手法の日本域への適用: 鬼怒川を例として,
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jshwr/31/0/31_42/_pdf/-char/ja(参照 2025.9.30).

(2025 年 9 月 30 日 受付)

Structural Health Monitoring for Seepage in River Levees

Yuji TAKESHITA¹

¹ Project Professor, Okayama University

Abstract

For safety verification against seepage in river levees, it is important to accurately measure and visualize the seepage behavior within the levee. Structural health monitoring for seepage in levees is a technique that continuously measures the behavior of the water level (water pressure) and soil water content in the levee, thereby diagnosing the condition and performance of the levee and predicting the seepage behavior that occurs during flooding. As structural health monitoring on an actual Class 1 river levee, soil water content behavior within the levee slope and water level changes in the permeable foundation layer of the levee were measured. A method was proposed for estimating rainfall infiltration volume and unsaturated soil hydraulic properties based on soil water content behavior. Furthermore, a method for predicting water levels in the permeable foundation layer of the levee during floods using regression models trained on time series data of the water level changes within the levee was proposed.

Key words: levee, seepage, field measurement, soil water content, regression model