

降雨時の水収支解析に基づく堤体内の水分分布の推定法

ESTIMATION OF MOISTURE DISTRIBUTION BASED ON WATER BALANCE ANALYSIS IN EMBANKMENT DURING RAINFALL

白石芳樹¹・福岡捷二²

Yoshiki SHIRAISHI and Shoji FUKUOKA

¹正会員 修士(工学) 中央大学大学院(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

²フェロー Ph.D. 工博 中央大学研究開発機構(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

河川堤防の降雨浸透現象には、表面流と浸透流の分配機構、間隙空気の影響、初期飽和度分布などの課題が残されている。従来から広く用いられているRichards式に基づく浸透流解析法は、不飽和浸透現象を表現可能である一方、強降雨時における急激な飽和度変化や浸透遅延現象の再現には課題がある。本研究では、堤体内部をタンク群でモデル化し、土木研究所の堤防大型模型における降雨量、表面流出量、堤体内飽和度の観測データを用いて水収支の考え方に基づく水理解析法を提案した。さらに他の堤防大型模型実験に対し本解析法で導入した表層浸透量 R_s 、浸透流移動開始貯留高 h_{mc} 、間隙空気移動開始貯留高 h_{ma} を用いることで、降雨浸透に伴う堤体内の飽和度上昇や、間隙空気の影響による浸透遅延現象を概ね再現できることを確認した。また、実堤防内の水分分布を再現できるよう、実験で得られたパラメータの値を考察し、課題を示した。

Key Words: rainfall, water balance analysis, large embankment

1. はじめに

近年、気候変動の影響を受け、集中豪雨や長時間降雨が頻発化している。このため河川堤防への降雨浸透およびそれに起因する堤体の不安定化・浸透破壊リスクが顕在化している。このような背景のもと、堤体内の浸透挙動を適切に把握し、健全性を評価することがますます重要となっている。

堤防における降雨浸透解析には、従来からRichards式に基づく飽和—不飽和浸透流解析が広く用いられてきた¹⁾。この手法は、不飽和土中の水分移動解析法として多くの実務・研究に適用されている。しかし「河川堤防の構造検討の手引き」²⁾においては、降雨による浸潤面上昇量の算定法について一定雨量強度で、計画降雨量を与える等をしており、実堤防の浸透流解析としては課題が残っている。特に降雨時に見られる表面滞水や間隙空気の閉じ込め・排気の影響が考慮されていないこと、また、強い降雨条件を与えた場合、表層の飽和度が急激に変化し、数値計算が不安定化しやすくなること、解析が実施できた場合でも、土の内部が一様に湿潤化する傾向が強く、局所的または突発的な浸潤の進行を再現することが困難であること等課題が多い。このように降雨浸透を対象とした堤防問題においては、浸透流と表面流への分配機構、間隙空気、初期飽和

度の設定という3つの未解明の問題が存在し、従来のRichards式に基づく浸透流解析法は、解決すべき課題が多く、従来解析法の信頼度を高めるためには、実務への適用を見据えた解析手法の改善が求められている。

河川流域では、流域内に降った降雨分布と本支川上流の洪水観測水面形時系列の観測結果を用いた小流域をタンクモデルで表現し、流域内に降った雨がいつ、どこに、どのような量がどのような状態で貯留され、流下しているかについて流域水収支分布を求め、水文学と河川工学を繋いだ解析技術の活用が進められている^{3),4)}。

本論文では流域水収支の考え方を、堤防の降雨浸透問題に適用する。堤防に降った降雨量と堤防表面からの流出量、および堤体内の水分量の時空間変化の観測値から、堤体内の水分量の時空間変化の観測値を説明することができる水収支モデルを作る⁵⁾。いま、堤体内部を複数のタンク群とし、降雨浸透過程を間隙空気の影響を受けた浸潤の遅れ現象として捉え、堤防表面に与えられた降雨が堤体内へ浸透する量と、表面流として流出する量に着目し、堤体内の貯留量分布と流出量、降雨時の浸透量の推定を検討する。具体的には、久楽ら⁶⁾による土木研究所の大型模型堤防を用いた降雨実験結果等を基に、水収支解析法に基づく堤体内の飽和・不飽和流れの解析

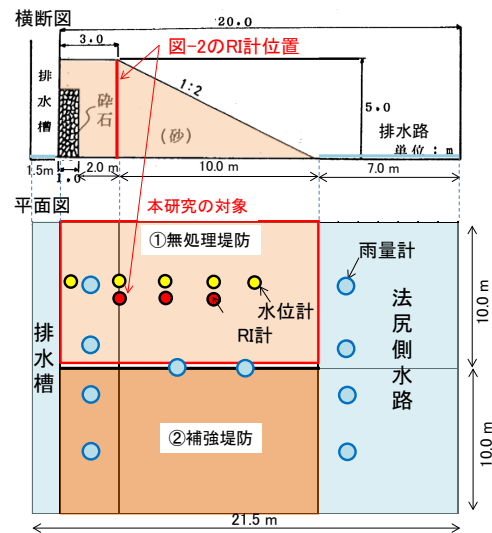


図-1 土木研究所⁹⁾の模型大型堤防実験装置
(上：横断面図，下：平面図) 概要

法を構築し、さらに他の大型模型盛土実験に対して本解析法で用いたパラメータの比較・検証を通じて、降雨浸透過程と不飽和特性について考察する。

2. 水収支分布に基づく飽和・不飽和流れの支配方程式

(1) 土木研究所の堤防大型模型の降雨実験

久楽ら⁹⁾は土木研究所の実験室内で図-1に示す堤防大型模型を設置し、湛水実験及び降雨実験を行い、破堤防止の研究を行った。本研究では、図-1の無処理堤防での降雨実験データを用い、堤体内の不飽和流れについて検討する。

図-2は、降雨実験における堤防法肩部の深度方向における飽和度の時系列変化を示したものである。これによると、降雨開始直後に堤体内の飽和度が一様に上昇するのではなく、まず堤体表面付近（底面から約4.5 m）で飽和度の上昇が生じ、その後、時間の経過とともに段階的に鉛直下方へと進行していることがわかる。底面から1.5mの位置で飽和度の上昇が確認されるまで、約20時間を要している。

このように、降雨浸透が段階的に鉛直下方へ伝播する挙動は、土中のサクションや間隙空気の影響により鉛直方向の水移動が抑制され、降雨は直ちには浸透しにくいことに起因していると考えられる。浸透遅延すると、浸透水は側方へ配分される⁷⁾ことから、飽和状態に至る過程には、サクションおよび間隙空気の影響により、ほとんど水が移動しない段階、横断方向に水が移動する段階、間隙空気の影響によって鉛直下向きには移動しにくい段階、といった水の複数の移動段階が存在することが確認された。

(2) 水収支分布に基づく新しい水理解析モデル

a) 多数のタンクを連結した水理解析モデル

河川堤防では、詳細な土質情報や飽和度の時間変

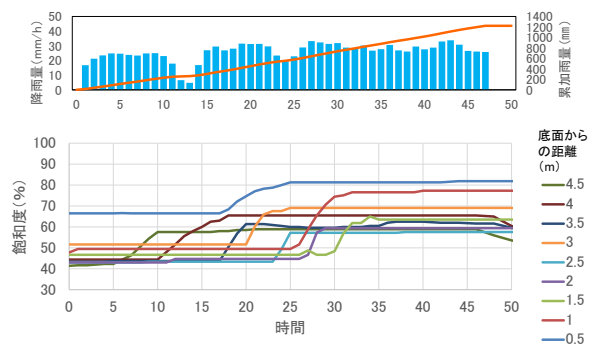


図-2 無処理堤防の降雨グラフ（上）とRI計
による深度毎飽和度変化図（下）

化率を時空間的に把握することは困難である。このため有限要素法や有限体積法により飽和・不飽和浸透流方程式を直接離散化して解く手法が一般的に用いられている。従来のRichards式に基づく浸透流解析法では、初期条件は堤体底部に地下水位が存在する状態を想定し、静水圧分布を仮定する方法が用いられている²⁾。しかしこの方法では、堤体内の飽和度が空間的に分布している実際の状態を十分に反映できない場合がある。

水収支の考えに基づく水理解析モデルでは、状態量を体積含水率、すなわち飽和度として扱うことで、質量保存の精度を高め、飽和度の空間分布を多数のタンクによって表現し、これを貯留高に換算することで、堤体内の水移動を簡潔かつ物理的に解釈可能な形で記述しようとしている。図-3に示すように堤体断面を多数のタンクに分割し、各タンク内の平均的な水分状態は飽和度で把握できるため、これを貯留高 h_t に換算することで水収支を考える。貯留高 h_t は、土中の飽和度 S_r と間隙比 e を用いて式(1)に示すように表現できる。

$$h_t = S_r \frac{e}{1+e} \sigma D \quad (1)$$

ここに、 h_t :タンク貯留高(m)、 S_r :タンク内の飽和度(%), e :タンク内の間隙比、 D :各地点での堤体厚(m)、 $\sigma=(z-z_0)/D$, z は鉛直座標、 z_0 は堤体底面の基準高さである。

貯留高 h_t を用いることで、圧力分布や毛管圧の局所変化を直接解くことなく解析できる。また、観測に基づく初期飽和度を解析条件として組み込むことができ、初期の不飽和状態が解析結果に与える影響を考慮している。

b) 支配方程式とパラメータ

堤体内の支配方程式には、図-3に示すように、堤防の天端と斜面形状に沿った流れを計算するため、鉛直座標を $\sigma=(z-z_0)/D$ と定義した座標変換を導入した連続式と運動方程式(式(2)～式(7))を用いて解析する。

式(4)に示す堤防表層タンク(最上段のタンク)の連続式には、降雨による堤体内への浸透量及び堤体外への滲出量 R_i を考慮しており、これにより降雨は、堤体内部への浸透する成分と、堤体表面を流下する

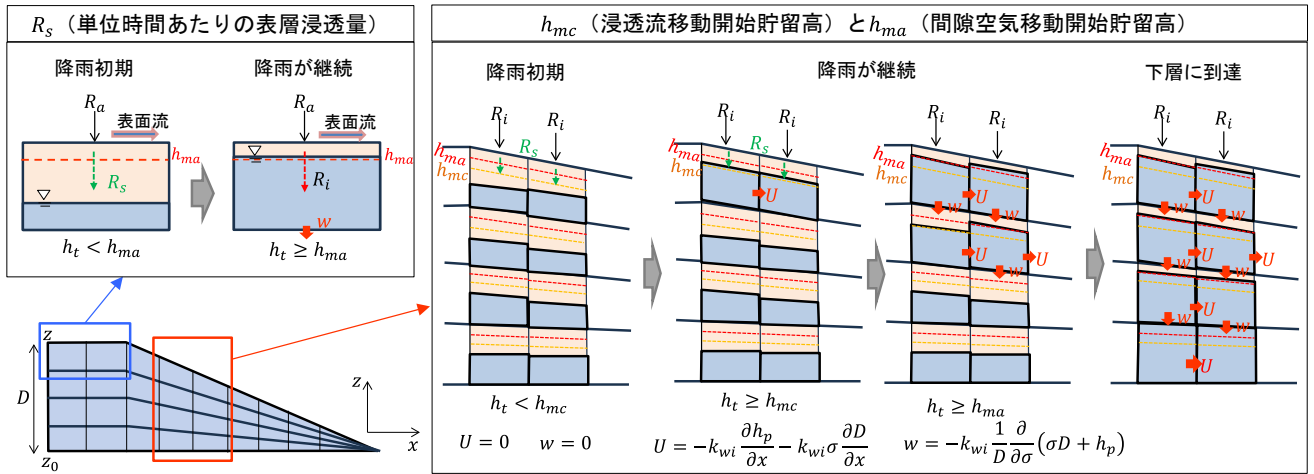


図-3 水収支分布に基づく新しい水理解析モデルの概要

表面流に区別して取り扱うことができる。堤体上の表面流は、浅水方程式を用いて解いている。また、運動方程式で用いる透水係数は、式(8)に示す不飽和状態を表現できるMualem-Van Genuchtenモデル⁸⁾に基づく関係式により与えるものとした。降雨浸透が進行してタンク内の貯留高 h_t が増加し、飽和状態に達した場合はタンク内に貯留しきれない雨水が堤体外へと滲出するものとして、式(9)から滲出量を算定する。

ここに、 h_s :表面流の水深(m)、 U_s :表面流の流速(m/s)、 R_a :降雨量(mm/h)、 R_i :堤体への雨水浸透・滲出量(mm/h)、 R_s :単位時間あたりの表層浸透量(mm/h)、 z_s :表面流の水面高(m)、 n :マニングの粗度係数($m^{-1/3}$ s)、 g :重力加速度(m/s^2)、 θ_b :堤防表面の角度、 h_t :タンク貯留高(m)、 U :堤体内の水平方向流速(m/s)、 w :堤体内の鉛直方向流速、 $w_{t\sigma}$:タンク上面に垂直方向の流速(m/s)、 $w_{\sigma b}$:タンク底面に垂直方向の流速(m/s)、 θ_t :タンク上面の角度、 θ_b :タンク底面の角度、 k_a :飽和透水係数(m/s)、 D :各地点での堤体高さ(m)、 h_{mc} :浸透流移動開始貯留高(m)、 h_{ma} :間隙空気移動開始貯留高(m)、 k_{wi} :不飽和透水係数(m/s)、 S_e :有効飽和度、 ξ :間隙結合関数、 m :無次元パラメータである。

(表面流の連続式と運動方程式及び表層の連続式)

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial U_s h_s}{\partial x} + \frac{1}{3.6 \times 10^6} (R_i - R_a) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial U_s h_s}{\partial t} + \frac{\partial U_s U_s h_s}{\partial x} + U_s \frac{1}{3.6 \times 10^6} (-R_a + R_i) = -g h_s \frac{\partial z_s}{\partial x} - \frac{1}{\cos \theta_b} \frac{g n^2 U_s |U_s|}{h_s^{\frac{1}{3}}} \quad (3)$$

$$\frac{\partial h_t}{\partial t} + \frac{\partial U h_t}{\partial x} + \frac{1}{3.6 \times 10^6} R_i - \frac{w_{b\sigma}}{\cos \theta_b} = 0 \quad (4)$$

$$(R_i = R_s \ (R_a \geq R_s), \quad R_i = R_a \ (R_a < R_s))$$

(堤体内部の連続式と運動方程式)

$$\frac{\partial h_t}{\partial t} + \frac{\partial U h_t}{\partial x} + \frac{w_{\sigma t}}{\cos \theta_t} - \frac{w_{\sigma b}}{\cos \theta_b} \quad (5)$$

$$U = 0 \quad (h_t < h_{mc})$$

$$U = -k_{wi} \frac{\partial h_p}{\partial x} - k_{wi} \sigma \frac{\partial D}{\partial x} \quad (h_t \geq h_{mc}) \quad (6)$$

$$w = 0 \quad (h_t < h_{ma})$$

$$w = -k_{wi} \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (\sigma D + h_p) \quad (h_t \geq h_{ma}) \quad (7)$$

(不飽和透水係数の推定式)

$$k_{wi} = k_a \cdot S_e^\xi \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right\}^2 \quad (8)$$

(飽和後の滲出量の式)

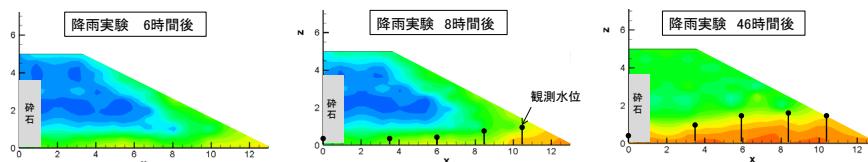
$$R_i = -\frac{\partial}{\partial x} \int_0^1 U h_t d\sigma \quad (9)$$

式(4)では、堤体への雨水浸透・滲出量 R_i に対し、パラメータ R_s を、式(6)～式(7)では、貯留高 h_t に対し、2つのパラメータ浸透流移動開始貯留高 h_{mc} と間隙空気移動開始貯留高 h_{ma} を設定することで、不飽和時において水の複数の移動段階を表現する。

図-3の右側は、降雨による各タンクの水の移動の考え方を示したものである。降雨が与えられた初期段階では、サクシオン及び間隙空気の影響により、巨視的には堤体内の水はほとんど移動しない。この状態をモデルで以下のように考慮する。本モデルではタンクの貯留高 h_t が h_{mc} (浸透流移動開始貯留高(m)) 以下のとき、水は移動しないものとした。 h_{mc} はサクシオンの影響下において、水が移動する前の貯留状態を表すパラメータである。 h_t が h_{mc} を超えると水は水平方向には移動するが、鉛直方向に着目したとき、下層に存在する間隙空気により鉛直下向きの移動は依然として制限される。このため h_t が h_{ma} (間隙空気移動開始貯留高(m)) 以下の範囲では、水平方向の移動のみが生じ、鉛直方向の水の移動は生じないとした。 h_{ma} はタンクの貯留高の上昇に伴い、間隙空気の影響が緩和され、鉛直方向の水移動が開始される貯留状態を表すパラメータである。

降雨浸透過程では、浸潤線の前方に間隙空气が閉じ込められることで空气圧が上昇し、浸透が抑制されることが実験および理論の両面から報告されている⁹⁾。特に強い降雨条件では、間隙空气の排出が浸透に追従できず、空气閉塞や空气圧縮による抵抗が顕在化するため、浸透量が一定値以上に増加しにくく、浸透超過分が表面流として流出しやすくなる。

実験



解析 h_{ma} = 飽和度0.70に相当する h_t
 h_{mc} = 飽和度0.65に相当する h_t
 $R_s = 1.5\text{mm/h}$

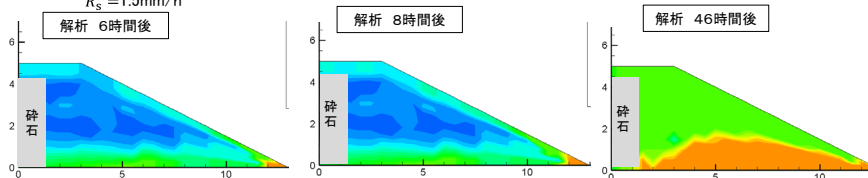


図-4 土木研究所⁶⁾の堤防大型模型の降雨実験と水理解析での飽和度分布の比較

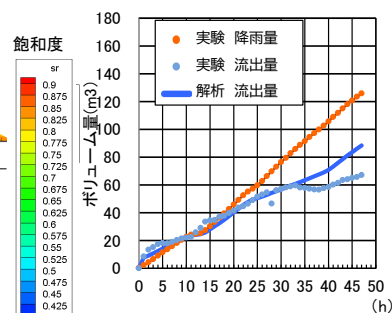


図-5 土木研究所⁶⁾の堤防大型模型の実験結果と水理解析での水収支分布図

堤体表面への降雨浸透も同様にサクシオンや間隙空気の影響により、降雨浸透した水は直ちには堤体内部に浸透しにくいと考えた。そこで表層タンクにおいては、図-3の左側に示すように $h_t < h_{ma}$ の場合、浸透能の低下が生じるため、降雨量 R_d に対し少量のみが表層に浸透し、残りは表面流として流出するものとした。このときの浸透量は R_s （単位時間あたりの表層浸透量(mm/h)）とし、降雨強度に関連した浸透能力を表すパラメータである。降雨が強いほど排気が追いつかず浸透能が低下する現象を表現しているものである。また降雨が継続し、表層タンクの貯留高 h_t が h_{ma} 以上になると全降雨量が堤体内に浸透するものとした。

3. 大型模型実験に基づく水理解析と考察

(1)土木研究所の堤防大型模型での降雨実験

本章では土木研究所⁶⁾の大型模型堤防における降雨実験を対象として、提案する水収支分布解析法を適用し、解析結果と実験結果と比較を行った。解析にあたっては、式(1)～(9)を同時に解き、実験で計測された堤体内の飽和度分布および流出量を再現できるよう、モデルパラメータである h_{mc} 、 h_{ma} 、 R_s を試行錯誤的に設定した。初期条件として、降雨開始前に各タンクの貯留高は観測された飽和度分布に基づいて与え、その他の境界条件および諸条件は実験諸元に合わせて与えた。

図-5に計測値および解析結果による水収支分布を示す。さらに、図-4には降雨開始後6時間、8時間および46時間における飽和度分布について、実験結果と解析結果の比較を示す。実験結果では、降雨開始後6時間から8時間にかけて、法尻付近を中心に飽和度が上昇し、法肩方向へと飽和領域が広がりながら飽和度0.7程度に達している様子が確認される。解析結果においても、同時時間帯に法尻付近で飽和度0.6～0.7程度の領域が形成されており、飽和度の増加傾向およびその空間分布は実験結果と概ね一致している。また、実験結果では、8時間経過後においても天端表層付近では飽和度の変化が小さく、降雨

が継続しているにもかかわらず浸透が遅延する現象が観測されている。解析結果においても、降雨初期には表層タンクに水が徐々に貯留され、直ちには下方へ移動しない挙動が再現されており、降雨浸透の遅れを表現できている。さらに、46時間後の解析結果における飽和度分布では、飽和度0.8の等値線が実験により確認された浸潤線とほぼ同程度の位置に現れており、法尻付近から碎石側へと飽和領域が拡大・移動していく過程を捉えている。

(2)鉄道総研の大型盛土模型での降雨実験

佐藤ら¹⁰⁾は、鉄道総研で降雨に対する鉄道盛土の性能を評価することを目的とし、実物大の盛土模型（幅12.0m、奥行き6.0m、高さ5.0m、細粒分混じり砂）を対象とした降雨実験及び各崩壊段階での载荷実験を実施した。実験では降雨強度30mm/hの降雨条件で、堤体内部の飽和度変化過程を水収支分布解析法で検討を行った。図-6に示す実験装置全体に30mm/hの降雨を与えたとき、法面で崩壊が生じたため、斜面にブルーシートが張られ、法面から降雨が入らないようにした。解析はブルーシートの設置後から小規模な法面崩壊が発生するまでの時間とした。なお、実験では堤体からの流出量は算定されていない。このため、堤体内の計算された飽和度分布を実験結果と整合するようモデルパラメータである h_{mc} 、 h_{ma} 、 R_s の各値を調整した。

図-6に、降雨開始後20時間から70時間までの実験結果と解析結果の飽和度分布の比較を示す。実験結果は、降雨開始後約40時間までは天端付近で飽和度が上昇し、その後、飽和領域が鉛直下方へと移動していく様子が確認できる。解析結果においても同様に50時間以降に飽和度の高い領域が下方へ分布しており、飽和領域の移動過程については実験結果と概ね整合している。図-7は、解析の水収支分布を示す。流出量はブルーシート上の降雨も積算しているため、最初は流出量が多い。40時間後からは流出量の傾きが小さくなっていることから、天端から徐々に浸透した分だけ貯留にまわっていると推測される。

70時間以降においては、実験では法尻付近まで飽

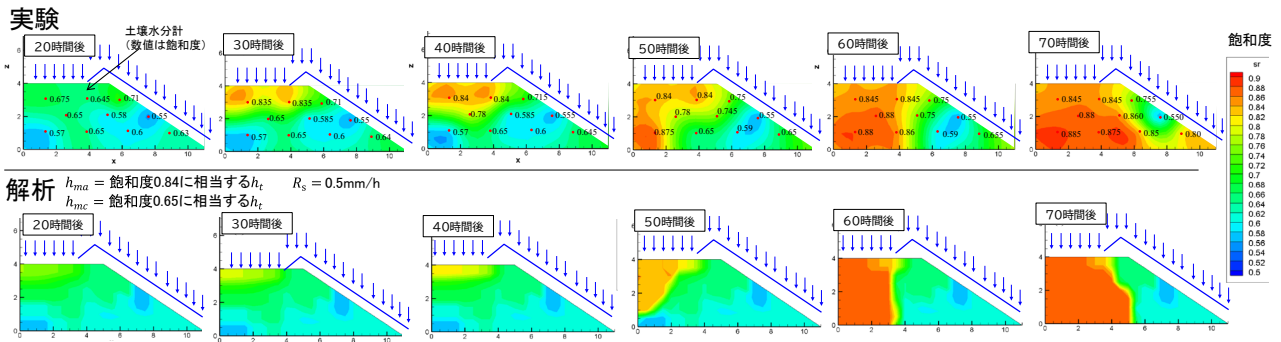


図-6 鉄道総研¹⁰⁾の降雨実験と水理解析での飽和度分布の比較

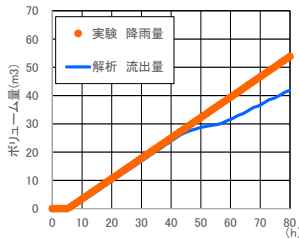


図-7 鉄道総研¹⁰⁾の降雨実験と水理解析での水収支分布図

表-1 各パラメータ一覧表

実験事例	土質	パラメータ			間隙比 e	透水係数 m/s	降雨強度 mm/h
		h_{ma}	h_{mc}	R_s			
土研	砂	0.70	0.65	1.5	0.764	3.65×10^{-5}	20~30
鉄道総研	細粒分混じり砂	0.84	0.65	0.5	0.580	2.98×10^{-5}	30
釧路川(表面)	シルト質土	0.90	0.70	10.0	1.140	7.24×10^{-5}	10
釧路川(内部)	砂	0.80	0.65		0.800	1.27×10^{-5}	

和度の上昇が確認されるのに対し、解析では法尻付近の飽和度は、初期値から大きく変化しておらず、法尻方向への水平方向の水の移動が十分に再現できていない。水平方向の水移動については、今後検討が必要である。

(3) 各パラメータの物理的意味について

大型模型堤防および大型盛土模型の2つの実験に対して、水収支分布解析法を適用し、導入したパラメータを調整することにより、降雨が段階的に浸透し、堤体内の水分分布が時間とともに変化していく過程を概ね再現できることを示した。これらのパラメータは、各実験における不飽和特性や浸透挙動を巨視的に表現するために設定したものであり、モデルの汎用性を高めるためには、各パラメータの物理的意味や堤体材料との関係について検討する必要がある。

表-1には、各実験において適切と思われる h_{mc} 、 h_{ma} 、 R_s の値に堤体材料を加えて、釧路川現地で行われた大型堤防模型^{11),12)}での降雨実験の再現パラメータを示す。河川堤防の構成材料としては、砂質土およびシルト質土が一般的である。本研究で再現解析を行った既往実験の土質材料も、砂およびシルト質土及び細粒分混じり砂である。表-1によると、 h_{mc} はいずれの実験においてもおおよそ0.65前後の値を示している。 h_{mc} は、サクシジョンの影響下において水が移動を開始する前の貯留状態を表すパラメータであることから、この結果は、不飽和状態においてサクシジョンによって水が拘束された後、移動可能となる水分量は、材料や堤体規模が異なっても大きくは変化しない可能性を示唆している。

次に、 h_{ma} は、0.7~0.9の値をもち、細粒分混じり

砂やシルト質土を用いた実験において相対的に大きな値を示している。 h_{ma} は、間隙空気の影響が緩和し、鉛直方向の水移動が始まる状態を表すパラメータである。このことから、細粒分を多く含む材料ほど透気性が低下するため間隙空気が保持されやすく、鉛直方向への浸透が生じにくいという土質特性を反映しているものと考えられる。このことは、 h_{ma} が、材料の粒径特性や土粒子構造の対応関係を有している可能性を示している。

さらに、 R_s は単位時間あたりの降雨の表層浸透量である。降雨強度が大きい条件ほど、 R_s は相対的に小さく評価される傾向にある。異なる土質材料での結果であるため、降雨強度のみに関係するパラメータではないが、土木研究所⁶⁾と鉄道総研¹⁰⁾の実験では砂質土であり、これらの材料においては降雨が強くなると間隙空気の排出が追いつかず、表層において浸透が抑制され、表面流として流出しやすくなる現象を反映していると考えられる。

(4) 実堤防へのパラメータの適用

新清ら¹⁾は、阿武隈川の実堤防を対象に、Richards式に基づく複数の浸透流解析モデルで、観測地下水位の再現計算を行った。その結果、用いたモデル間の差異よりも初期条件、土質定数、および境界条件の設定が解析結果に大きな影響を及ぼすことを見出した。

この実堤防に本研究の水理解析モデルを適用する。堤体の土質材料は細粒分質礫質砂であり、土木研究所⁶⁾や鉄道総研¹⁰⁾の土質材料より粒径加積曲線の幅が広く、礫分が多い。このため、間隙空気の影響は小さくなると考えられ、各パラメータには $h_{mc}=0.65$ 、 $h_{ma}=0.68$ を与えた。また降雨は丸森観測所の実績降

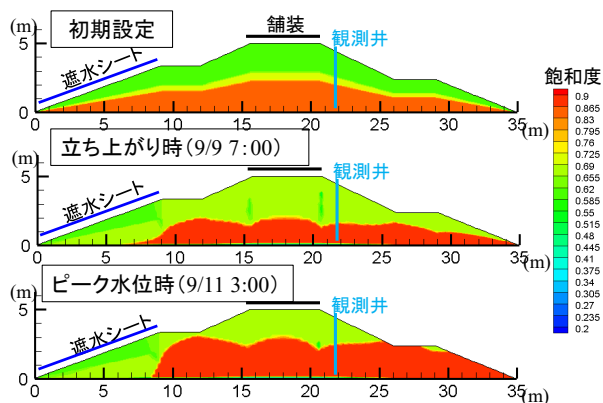


図-8 阿武隈川の実堤防における解析飽和度分布

雨を与えた。 R_s は雨量強度が0～30mm/hと変動するため試行錯誤の上、 $R_s=1.0\text{mm/h}$ とした。検証は、観測地下水位データを用いるものとし、該当するタンクの飽和度が0.8以上になると地下水位の浸潤線が形成されるとした。また、初期飽和度分布は図-8に示すように、計算開始時の観測地下水位と整合するよう、下層ほど飽和度が高くなる分布を設定した。川表側の一部に遮水シートが施工されていることから、そこからは降雨浸透しないものとした。

図-8に初期、立ち上がり時、ピーク水位時の解析飽和度結果を示す。これによると、時間経過とともに下層で飽和度が高まり、浸潤線が形成されることがわかる。図-9は降雨ハイトグラフと観測地下水位と解析水位を表す。解析水位は、観測地下水位と比較して立ち上がり時にはやや過小評価となり、ピーク時には過大評価となる傾向が認められた。しかし、新清ら¹⁾の解析結果と比較すると、立ち上がり時の差異はあるものの、ピーク時付近における地下水位変化の傾向は概ね再現できている。

以上より、本解析法はパラメータを適切に設定できれば、実堤防における降雨浸透に伴う地下水位変化の把握が可能であると考えられる。

4. 結論

本研究では、近年顕在化している集中豪雨・長時間降雨に伴う河川堤防の降雨浸透の検討のため、堤体への降雨浸透過程を間隙空気の影響を受けた浸潤の遅れの現象を反映可能なように、堤体内部をタンク群でモデル化し、堤防の水収支解析に基づいて降雨、表面流、堤体内貯留および流出を一体的に取り扱う手法を提案した。降雨浸透に対し間隙空気およびサクシンの影響を段階的な貯留・移動過程として説明する3つのパラメータを導入した。導入したパラメータにより、降雨浸透時に観測される浸透遅延、段階的な飽和度上昇、および飽和領域の発達過程を大型模型実験で概ね再現できることを示した。

また実堤防への適用上の問題点を明らかにするため、阿武隈川堤防に対し本解析手法を適用した。これによると実験で得られたパラメータの値を参考とすることによって、本解析法の適合度や問題点を明

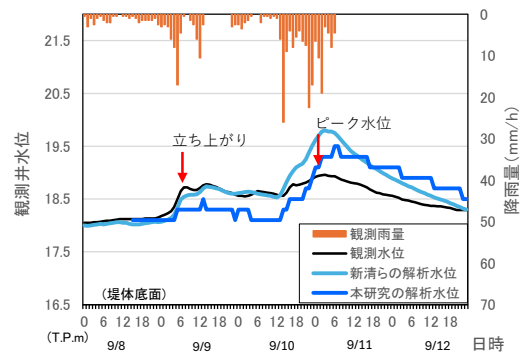


図-9 阿武隈川の実堤防における観測地下水位¹⁾と解析水位の比較

らかにできた。今後は、実堤防への適用例を増やすことによって、本解析の3つのパラメータについて体系的な検証を進める。

参考文献

- 1) 新清晃, 西村聡, 藤澤和謙, 竹下祐二, 河井克之, 佐古俊介, 森啓年, 山添誠隆, 太田雅之: 河川堤防への降雨浸透と浸潤状態予測に関する一斉解析からの知見, 土木学会論文集(部門C), Vol.75, No.4, 土木学会, 2019.
- 2) 国土技術研究センター: 河川堤防の構造検討の手引き(改訂版), pp. 64-65, 2012.
- 3) 福岡捷二: 近年の洪水災害を踏まえた流域治水を考える, 河川技術論文集, 第28巻, pp.457-462, 2022.
- 4) 石井優太郎, 福岡捷二: 降雨流出と河道洪水流の一体解析による流域水収支分布図の作成と応用, 土木学会論文集, Vol.81, No.7, 2025.
- 5) 白石芳樹, 竹村吉晴, 後藤岳久, 福岡捷二: 模型大型堤防における降雨時の水収支解析に基づく堤体内の水の貯留及び流出過程の検討, 河川技術論文集, 第31巻, pp.241-246, 2025.
- 6) 久楽勝行, 丹羽薫, 斉藤義章, 石塚廣史: 堤防補強に関する大型模型実験(1), 土木研究所資料, 第1772号, 1982.
- 7) Touma, J., Vauclin, M.: Experimental and numerical analysis of two-phase infiltration in a partially saturated soil, Transport in Porous Media, Vol.1, pp.27-55, 1986.
- 8) Van Genuchten, M.Th.: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol.44, pp.892~898, 1980.
- 9) Wang, Z., Feyen, J., van Genuchten, M. T., Nielsen, D. R.: Air entrapment effects on infiltration rate and flow instability, Water Resources Research, Vol. 34, No. 2, pp. 213-222, 1998.
- 10) 佐藤武斗, 杉山健太, 阿部慶太, 笠原康平, 松丸貴樹, 富田佳孝: 実物大鉄道盛土の降雨・載荷実験による崩壊規模に応じた安定性評価, 地盤工学ジャーナル Vol.19, No.1, pp.101-115, 2024.
- 11) 釧路川堤防技術検討委員会: 釧路川堤防技術検討委員会報告書, 2019.
- 12) 岡村健斗, 川尻峻三, 濱中昭文, 大串正紀, 鈴木智之, 不動充, ベンコーンせん断試験を用いた実大試験堤防の強度特性変化の観察と安定性評価, 第10回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.63-66, 2022.

(2026. 4. 2受付)