

降雨時における水収支解析に基づく堤体内の水の挙動と水分分布の検討

降雨貯留, 水収支解析, 模型大型堤防実験

中央大学大学院 正会員 ○白石 芳樹
 中央大学研究開発機構 正会員 竹村 吉晴
 中央大学研究開発機構 正会員 後藤 岳久
 中央大学研究開発機構 フェロー 福岡 捷二

1. 序論

近年, 既往最大となる降雨を毎年のように観測し, 堤防が崩壊する事例が増加している. 外水位だけでなく, 堤防への降雨量も増大しており, 緩傾斜堤防であっても法すべりによる崩壊事例が生じている. 利根川のように川裏のり勾配が7割となる堤防では, 堤体表面積が増加することで降雨の浸透量が增大し崩壊をもたらす可能性もある. 一般的な浸透解析法で降雨浸透現象を計算する場合, 流量境界として降雨強度から降雨境界面上に浸透流量を与えるが¹⁾, 地表での圧力水頭がゼロになるとそれ以上降雨が浸透しない条件に変更される. 堤体内に浸透した雨は Richards 式により土質定数や水分特性曲線に基づいて堤体内の圧力水頭分布が計算され, 地下水面が求められる. その場合, 実際にどれくらいの降雨量が浸透したかはわからないこと, 間隙空気が存在することによって降雨初期に水が浸透しにくい現象が見られ, これを再現するためには気液二相混合浸透流解析など複雑な計算を行う必要があることが課題である²⁾.

これまで, 堤防に降った雨と堤防からの流出量と堤体内の飽和度等の時間変化が観測できれば, 表面流と不飽和流れの一体的な水理解析法を用いることで, 降雨浸透量や堤体内部の水の時空間貯留量の推定に用いることができる水収支解析法の有用性を示した³⁾. しかし構築した水理解析モデルにおいても, 降雨が浸透する量はわからないため, 流出量と内部の飽和度が合うように設定したものであった. また間隙空気などによって浸透しづらい内部の水分分布についても再現できておらず, 時系列的な変化を捉えられていない. 本研究では, 土木研究所⁴⁾の大型模型堤防を用いた降雨実験結果と鉄道総研の模型盛土を用いた降雨実験結果をもとに, 水収支解析法に基づいて堤体内の飽和・不飽和流れの解析法を改良し, 本解析法で新たに定義したパラメータを比較・検証することで, 降雨浸透と不飽和特性について考察し, 今後の水収支解析における課題を整理する.

2. 本研究での飽和・不飽和流れの支配方程式の考え方

2.1 土木研究所の大型模型堤防の実験概要と不飽和特性

土木研究所⁴⁾は, 堤防に作用する外力となる高水位及び降雨が長時間続いた場合に破堤を防止することを目的として, 堤防の補強工法の効果を確認する大型模型堤防実験を行っている(図-1). この実験では湛水実験及び降雨実験が実施されているが, 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, 検討する. 無処理堤防(砂質土, 透水係数 $3.65 \times 10^{-5} \text{ m/s}$)では降雨量, 流出量, 堤体内の飽和度分布が計測されている.

図-2は降雨実験における堤体法肩の深度方向の飽和度時系列変化を示す. これによると降雨開始後, 堤体内の飽和度はすぐに上昇せず, 堤体表面(底面から4.5m)から, 段階的に飽和度が上昇していき, 底面から1.5mの飽和度が上昇するまで約20時間経過していることがわかる. このように水が段階的に下方向に移動する現象はサクシオンや間隙空気が流れを阻害することによって降雨量が浸透しづらい現象と考えられる.

実験結果から, 飽和状態に至るまでにサクシオンと間隙空気の影響でほとんど水が移動しない状態, 横断方向には水が移動するが, 間隙空気により鉛直下向きには移動しづらい状態がある.

2.2 不飽和特性を考慮した水理解析モデルの改良

本研究では, 降雨実験時に浸透した水がサクシオンや間隙空気の影響で段階的に移動する点に着目した. これらの土中の水の移動を考慮するため, まず堤体内を複数のタンクで構成し, 堤体内の水分分布は, 体積含水率に該当する土中の水分量を各タンクの貯留高 h_t で表現するものとした.

図-3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

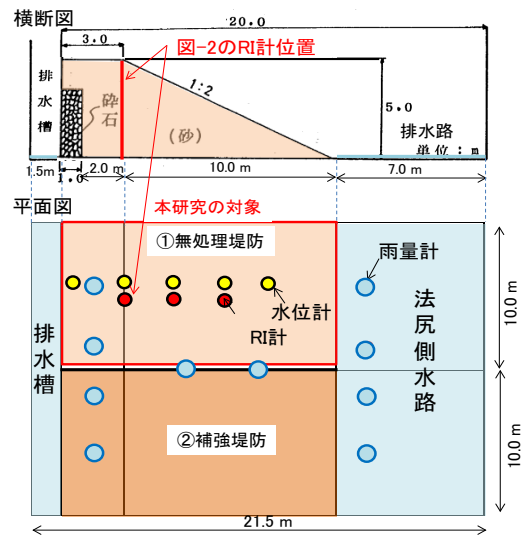


図-1 土木研究所⁴⁾の模型大型堤防実験装置 (上: 横断面図, C: 平面図)

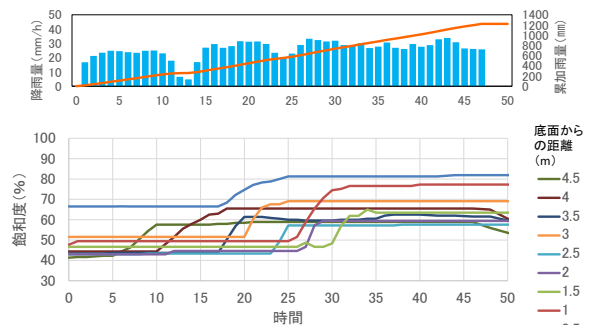


図-2 無処理堤防の降雨グラフ(上)とRI計による深度毎飽和度変化図(下)

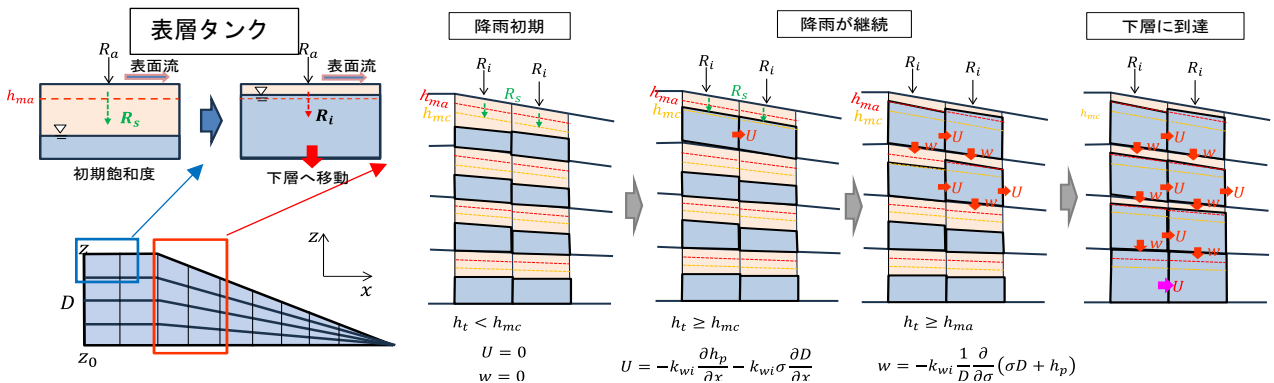


図-3 水理解析モデルにおける各段階のタンクの水の移動イメージ

である。降雨が与えられた最初の段階では、サクシオンと間隙空気の影響で水がほとんど動かない。これを考慮すると、タンクの貯留高 h_{mc} :浸透流移動開始貯留高(m)以下のときは移動しないと。 h_{mc} を超えると水は水平方向に移動するが、下層にある間隙空気により鉛直下向きの移動は制限される。このため h_{ma} :間隙空気移動開始貯留高 (m)以下では水平方向は移動するが、鉛直方向は動かないとした。堤体表面からの降雨浸透も同様にサクシオンや間隙空気の影響で水が浸透しづらい。このため表層タンクには、 $h_t < h_{ma}$ のときは降雨量 R_a に対し少量の降雨量 R_s が表層に浸透され、残りが表面流として流れるとした。 R_s は単位時間あたりの表層浸透量(mm/h)と定義し、降雨が間隙空気の影響によって浸透しづらい一方で、地表付近で徐々に水と空気との交換が行われる現象⁵⁾を表現したパラメータである。降雨が継続し、表層の h_t が h_{ma} 以上になると全降雨量が堤体内に浸透することとした。

堤体内の支配方程式は、堤防形状に沿った流れを計算するため、鉛直座標を $\sigma = (z - z_0)/D$ のように定義した連続式と運動方程式(式(1)~式(8))を用いて解析する。式(3)に示す堤防表層タンク(最上段のタンク)の連続式には、堤体への雨水浸透・滲出量 R_i が考慮されており、表面流との降雨の分離が行われる。

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)、 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_{σ} :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)、 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。また、不飽和時の透水係数は Mualem-Van Genuchten の式⁶⁾による関係式を用いて与えるものとした。

(表面流の連続式・運動方程式)

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

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

(堤体表層の連続式)

$$\frac{\partial h_t}{\partial t} + \frac{\partial U h_t}{\partial x} + \frac{1}{3.6 \times 10^6} R_i - \frac{w_{b\sigma}}{\cos \theta_b} = 0 \quad (R_i = R_s (R_a \geq R_s), \quad R_i = R_a (R_a < R_s)) \quad (3)$$

(堤体内部の連続式)

$$\frac{\partial h_t}{\partial t} + \frac{\partial U h_t}{\partial x} + \frac{w_{\sigma t}}{\cos \theta_t} - \frac{w_{\sigma b}}{\cos \theta_b} = 0 \quad (4)$$

(堤体下部の連続式)

$$\frac{\partial h_t}{\partial t} + \frac{\partial U h_t}{\partial x} + \frac{w_{\sigma t}}{\cos \theta_t} = 0 \quad (5)$$

(堤体内部の運動方程式)

$$U = 0 \quad (h_t < h_{mc}) \quad U = -k_{wi} \frac{\partial h_p}{\partial x} - k_{wi} \sigma \frac{\partial D}{\partial x} \quad (h_t \geq h_{mc}) \quad (6)$$

$$w = 0 \quad (h_t < h_{ma}) \quad w = -k_{wi} \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (\sigma D + h_p) \quad (h_t \geq h_{ma}) \quad (7)$$

(不飽和透水係数の推定式)

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

3. 大型模型実験の計測値に基づく水理解析と考察

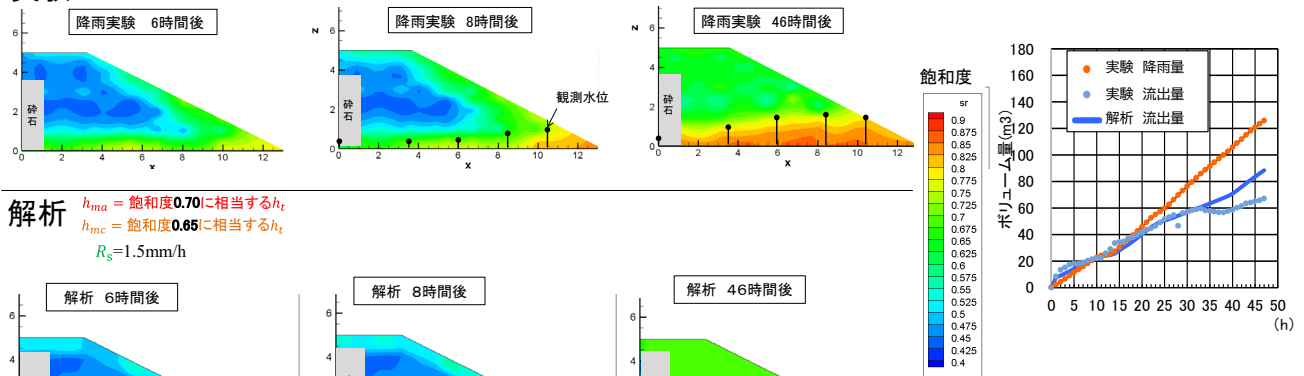
3.1 土木研究所の降雨実験結果

土木研究所⁴⁾の大型模型堤防において降雨時の水収支分布解析を適用するが、その考え方を説明する。式(1)~(8)を同時に解き、実験で計測された堤体内の飽和度分布を説明するようにパラメータである h_{mc} 、 h_{ma} 、 R_s の値を試行錯誤的に与え、堤体内の水分分布と流出量が合うようにし、現象について明らかにする。初期のタンク貯留高 h_t は降雨実験の飽和度観測分布を用いて設定し、その他の諸条件は実験諸元と合わせた。

図-4は降雨開始後6時間目、8時間目、46時間目における実験結果と解析結果の飽和度分布図の比較を示す。実験結果では6時間目から8時間目にかけて法尻付近から法肩に向かって飽和度0.7程度まで上昇しており、解析結果においても、法尻付近は飽和度0.6~0.7程度となっている。また、実験結果では8時間目でも天端表層付近では、飽和度の変化が少なく、降雨後に浸透しづらい現象が観測されている。解析結果では、表層に徐々に貯留され、降雨後に浸透が遅れる現象が再現できている。その後46時間目の解析飽和度分布では飽和度0.8の境界線と実験の浸潤線は同程度となっており、法尻から碎石側に飽和領域が移動していく現象を捉えている。図-5は計測値と解析結果の水収支分布図を示す。

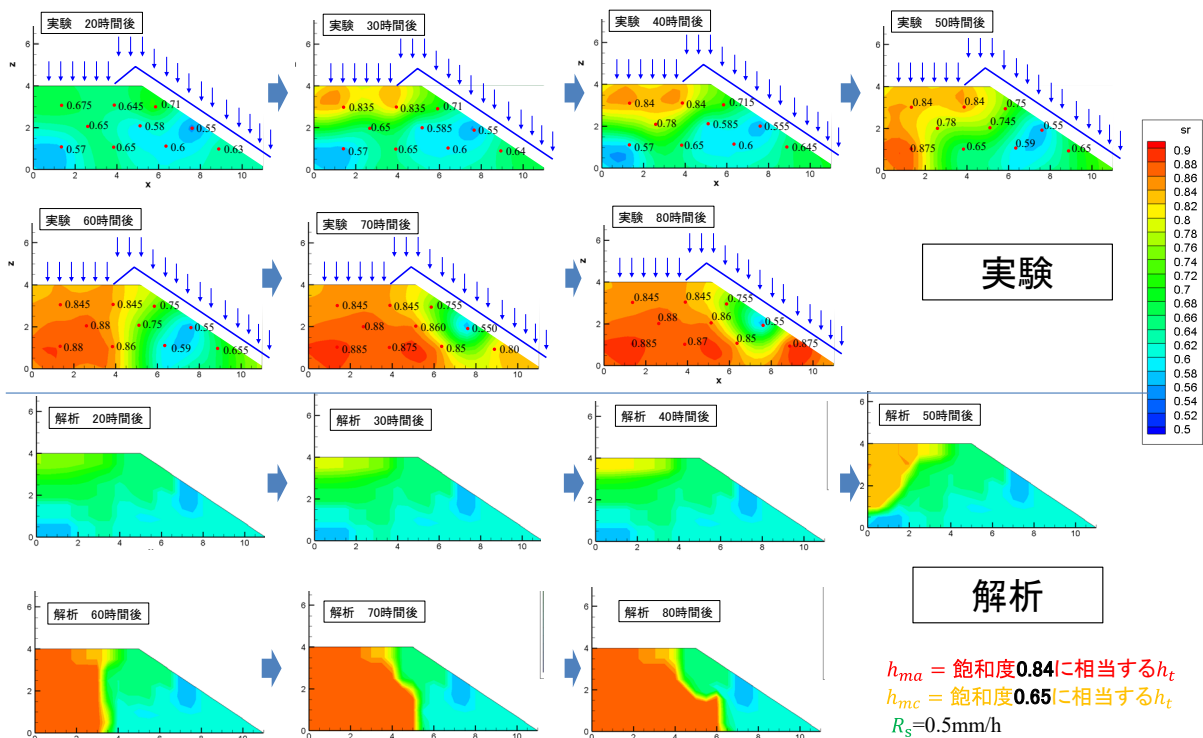
3.2 鉄道総研の降雨実験の適用

佐藤ら⁷⁾は、降雨に対する鉄道盛土の性能を評価することを目的に、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ている。降雨強度30mm/hの降雨実験



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-5 模型大型堤防実験と水理解析での水収支分布図



解析 h_{ma} = 飽和度0.84に相当する h_t
 h_{mc} = 飽和度0.65に相当する h_t
 $R_s = 0.5\text{mm/h}$

図-5 鉄道総研降雨実験と水理解析での飽和度分布の比較

表-1 各模型大型堤防実験と有効飽和度による h_{mc} , h_{ma} , R_s の比較

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	砂細粒分 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}	-

雨が与えられている。この堤体内部の飽和度の変化について水理解析モデルを適用し検討を行った。なお本実験では堤体からの流出量は算定されていない。堤体の飽和度分布が実験結果に整合するよう、 h_{mc} , h_{ma} , R_s の各値を調整した。

図-5は降雨開始後20時間目から80時間目における実験結果と解析結果の飽和度分布図の比較を示す。実験飽和度は降雨開始から40時間目まで天端付近で飽和度が高まった後、鉛直下向きに飽和度が移動している。解析結果においても同様に50時間以降、飽和度が下向きに分布している。一方、70時間目以降においては、実験飽和度が法尻付近まで高くなっているが、解析飽和度は法尻付近において初期飽和度からあまり変化していないことから、水平方向の水の移動についてはさらに検討が必要である。

3.3 各パラメータの物理的意味について

2つの大型模型堤防及び盛土実験に対し本研究での水理解析モデルに各パラメータを導入することで、降雨量が段階的に浸透し堤体内の水分分布を再現できることが分かった。しかしこれらのパラメータの値はそれぞれの実験の不飽和特性を表現するために設定したものであり、各値の物理的意味を検討する必要がある。表-1は各実験における h_{mc} , h_{ma} , R_s 設定値と堤体材料について、新たに計算した釧路川⁸⁾の再現結果のパラメータを加えたものを示す。これによると、 h_{mc} はどの実験においても0.65程度を示しており、これは不飽和時のサクションによって移動する水分量はどのような実験でもほぼ同等の値である可能性を示唆している。また h_{ma} は細粒分混じり砂やシルト質土で高くなっていることから、細かい粒径を含む材料では浸透しづらいという特性を示している。さらに R_s と降雨強度の間には逆相関があることがわかった。

4. まとめ

本研究では、土木研究所⁴⁾の模型大型堤防、鉄道総研⁷⁾の模型大型盛土における降雨実験を対象として飽和・不飽和流れの水理解析モデルを用いた水収支分布解析を実施し、水収支を考慮した降雨による堤体内の水分分布の検討を行った。その結果、本研究で定義したパラメータによって降雨によって生じる間隙空気やサクションによる不飽和特性を考慮でき、段階的な飽和度変化を再現することができることを示した。以下に今後の課題を示す。

本研究では、大型模型実験を対象として境界条件が明確である事例について確認したが、実際の堤防では基盤層への排水や堤体内部の土質構成が様々であることから境界条件や土質条件によってパラメータの値が変わる可能性がある。そのため解析手法については今後、様々な現地実験にて検証する必要がある。今後各パラメータと土質特性及び降雨特性との関係が明らかになれば、この解析手法を用いることで広範囲の堤防を対象とした降雨浸透解析が可能と考える。また、水収支解析法に基づいて降雨境界条件を与えることができれば、堤体内部の水分分布の計算は一般的な飽和・不飽和浸透流解析法でも実施でき、その精度の向上にも寄与できると考える。

参考文献

- 1) 赤井浩一, 大西有三, 西垣誠: 有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析, 土木学会論文集, 第264
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 久楽勝行, 丹羽薫, 齊藤義章, 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.
- 5) 大津宏康, 堀田洋平, Soralump, S, 新村知也: 熱帯性豪雨による斜面降雨浸透特性に関する研究, 材料, Vol. 59, No. 3, pp.192-198, 2010.
- 6) 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.
- 7) 佐藤盛斗, 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.
- 8) 岡村健斗, 川尻峻三, 濱中昭文, 大串正紀, 鈴木智之, 不動充: ベー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.