

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

STUDY OF WATER STORAGE AND DRAINAGE IN THE EMBANKMENT BASED ON WATER BALANCE ANALYSIS DURING RAINFALL IN A LARGE EMBANKMENT MODEL

白石芳樹¹・竹村吉晴²・後藤岳久²・福岡捷二³

Yoshiki SHIRAISHI, Yoshiharu TAKEMURA, Takahisa GOTOH 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正会員 博士(工学) 中央大学研究開発機構 機構准教授(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

³フェロー Ph.D. 工博 中央大学研究開発機構 教授(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

不飽和層を有する堤防への降雨の浸透は、降雨強度や降雨分布によって堤体内部の水分分布が影響を受ける。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計測値の時間変化が観測できれば、不飽和流れの水理解析法を用いることで、降った雨がいつ、どこに、どのような量が存在しているかを示す水収支分布が得られ、降雨の浸透や堤体内部の水分分布の推定が可能と考える。本研究では、模型大型堤防を用いた降雨実験結果をもとに、境界適合型水理解析モデルを開発し、水収支分布を再現することで堤体内の水の貯留及び流出過程を検証し、今後の堤防における水収支解析の有効性を示した。その結果、新たな指標 R_{imax} 、 h_{mc} 、 h_{cmax} を実験結果の水収支分布図を再現するように設定し、解析の流出量と堤体内の水分分布が実験値と同様の傾向を示し、他の降雨実験でも概ね再現できることがわかった。

Key Words: rainfall, water balance analysis, storage and drainage, large embankment, boundary-fitted model

1. はじめに

近年は超過洪水が頻発し、河川水位が堤防高を超え堤防破壊に伴う氾濫被害が発生している。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発生している。利根川のように川裏のり勾配が7割となる堤防では、浸潤面が長くなり法尻からの崩壊を抑制することができるが、堤体表面積が増加することで降雨の浸透量が増加する。

従来の浸透流解析では、堤体への降雨浸透量を境界条件として、Richards式により堤体内の不飽和浸透流解析が行われる。しかし、堤防への降雨浸透特性は、土質特性だけでなく雨の降り方(降雨強度や継続時間)による水の動きに影響され¹⁾、降雨量のうちどの程度の量が堤体に浸透し貯留されるのか判断することは難しい²⁾。これに対し、堤防は災害のたびに嵩上げや腹付けが行われ、締固め方法や築堤工法が基準化されており、堤防表層付近の内部の土質構造は、信頼度の高いデータが蓄積されている。したがって、堤体への降雨浸透量を適切に評価できれば豪雨時における堤体内に貯留されている水の時空間分布をある程度の精度で推定可能と考えられる。しかし、現状では降雨浸透量を直接計測することは

難しく、また解析の信頼性も低いことから、新たな解析手法が必要と考える。

河川流域では、流域内に降った降雨分布と本支川の洪水観測水面形時系列の観測結果があれば、流出解析と洪水流解析を用いることによって、降った雨がいつ、どこに、どのような量が流域内に貯留され、流下しているかを流域水収支分布³⁾⁴⁾⁵⁾で示すことが可能となっている。

この考え方は堤防がひとつの流域と考えると、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計測値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が可能になると考える。本研究では、久楽ら⁶⁾の模型大型堤防を用いた降雨実験結果をもとに、境界適合型水理解析モデルを開発し、水収支分布を再現することで堤体内の水の貯留及び流出過程を説明する。さらに他の堤防降雨実験にも適用し、水収支解析の有効性を示すとともに堤体内の水収支分布について考察し、今後の課題を示す。

2. 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

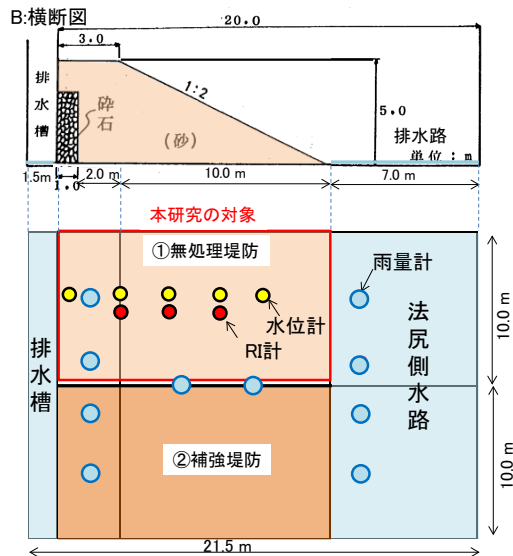


図-1 久楽ら⁶⁾の模型大型堤防実験装置の概要

本章では、まず久楽ら⁶⁾の大型模型実験の実験概要と計測結果と境界適合型水理解析モデルに基づいた、降雨時における堤防の水収支分布解析の考え方を説明する。その後、久楽ら⁶⁾の実験、鉄道総研⁷⁾及び釧路川堤防の事例⁸⁾で水収支分布解析を行い、その適用性を検討した。

(1) 久楽ら⁶⁾による大型模型実験装置の概要

久楽ら⁶⁾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ための堤防の補強工法の効果を確認するために、模型大型堤防を用いた湛水実験及び降雨実験を実施した。模型の諸元及び実験装置の概要を図-1に示す。具体的には、縦20m、横20m、深さ6mの土槽に、幅10mの「補強堤防」と幅10mの「無処理堤防」が作製され、無処理堤防の材料は実際の河川堤防の砂質土の特性（透水係数 $3.65 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ）に近いものが使用され、補強堤防は堤防表層(1.5m)が粘性土からなる難透水性材料（透水係数 $1.03 \times 10^{-8} \text{m/s}$ ）により被覆されている。なお、補強堤防と無処理堤防の間には仕切りがあり、その間の浸透流は生じないようにしている。

実験装置内の堤防には、外水位及び降雨の浸透による堤内水位、飽和度の変化ならびにのり面変形を観測するためにテンシオメータ、RI測定用パイプ、水位計、地表面変位計の各計測器が埋設され、さらに10箇所の雨量計ならびに堤体からの流出量が記録されている。

図-2は、土壌水分計による降雨実験開始時の無処理堤防内の飽和度のコンター図である。降雨実験は湛水実験の実施後1ヶ月程度の間隔を置いて実施されており、堤体内に水が残留した状態から48時間継続して人工降雨が与えられた。その間、堤体からの流出量および堤体内の飽和度及び堤体内の水位の時系列データが計測されている。本研究では無処理堤防に着目して次の検討を行った。

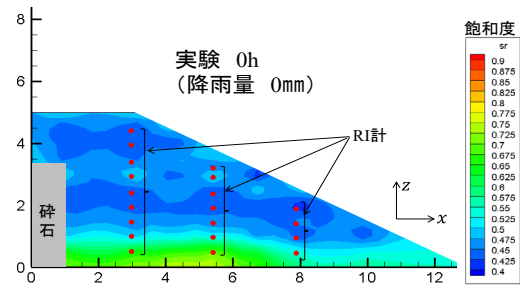


図-2 無処理堤防における初期飽和度分布

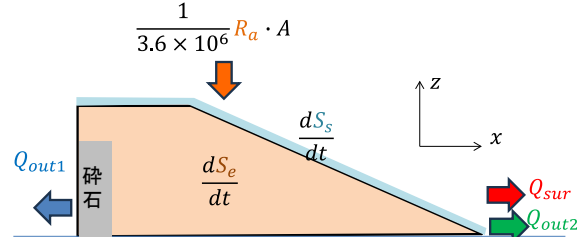


図-3 無処理堤体の貯留、流出過程に着目した水収支の概念図

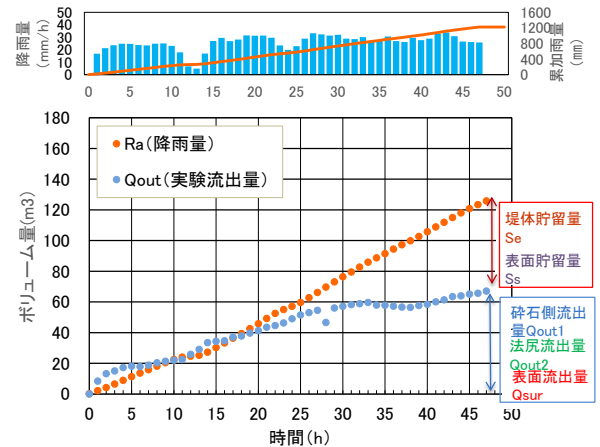


図-4 無処理堤防における水収支分布図

(2) 降雨実験の計測結果に基づく水収支分布式

図-3は降雨実験における降雨量と堤防からの流出量、堤体内及び堤体表面での水の貯留量の関係を模式的に示したものである。式(1)はこれらの関係を示す降雨時における堤防の水収支分布式である。

$$\frac{dS_e}{dt} + \frac{dS_s}{dt} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} R_a \cdot A - Q_{out1} - Q_{out2} - Q_{sur} \quad (1)$$

ここで、 S_e :堤体内の水の貯留量(m^3)、 S_s :堤体表面の水の貯留量(m^3)、 R_a :堤体への降雨量(mm/h)、 A :堤体表面の投影面積(m^2)、 Q_{out1} :碎石側からの流出量(m^3/s)、 Q_{out2} :堤体法尻からの流出量(m^3/s)、 Q_{sur} :堤体表面からの流出量(m^3/s)である。図-4は、実験の無処理堤防を対象として、式(1)の右辺に実測の堤防への降雨量と堤防からの流出量を用いて描いた水収支分布図である。降雨ボリュームはほぼ一定の傾きで増加するのに対して、流出量ボリュームは、8時間後までは、降雨ボリュームを上回るが、その後33時間後以降は、降雨ボリュームの増加率よりも小さくなり、堤体貯留量が増加している。

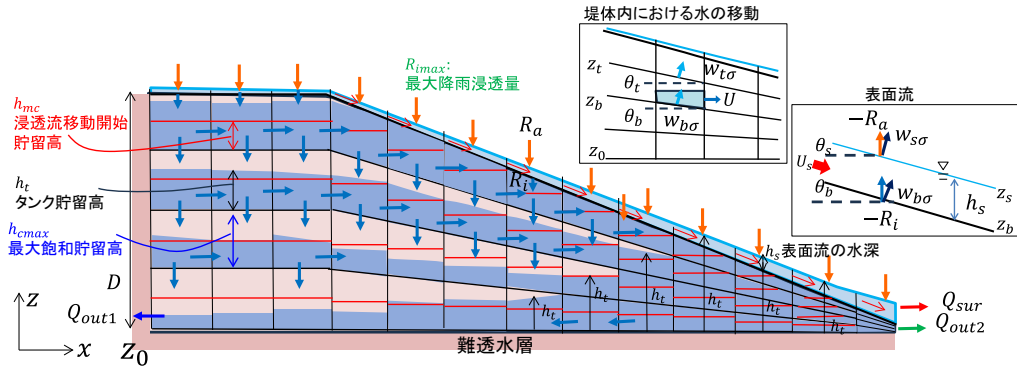


図-5 水収支分布に着目した境界適合型の水理解析モデルの概要

(3) 境界適合型水理解析モデル

降雨の浸透条件は、降雨量を堤体表面に与え、 R_{imax} :最大降雨浸透量 (mm/h)以下の降雨量が堤体内に浸透するものとし、それ以上の降雨量は表面流として扱う。また h_t :タンク貯留高(m)が h_{tmax} :最大飽和貯留高(m)に達した場合、堤体に貯留しきれない雨水が堤体から表面に滲出するものとした。

堤体の表面流は一般的な浅水流方程式によって評価する。以下に具体的解析方法を説明する。

表面流は式(2)、(3)に示す降雨量 R_a と堤体への雨水浸透・滲出量 R_i を考慮した水深積分の連続式と運動方程式で解析する。

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

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

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 :マンニングの粗度係数($m^{-1/3} s$)、 g :重力加速度(m/s^2)、 θ_b :堤防法面の角度である。

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 h_t で表現する。不飽和時にはサクションにより土中の水の移動速度が極端に低下するため、タンク内に水が貯まるとし、 h_{mc} :浸透流移動開始貯留高(m) (圃場容水量)を与え、 h_t がそれ以上になると土中の水の運動はDarcy則で移動する考え方とした。 h_{mc} とは、乾燥した土層に雨水が浸透すると最初に土粒子周りに吸着され、さらに含水率が增大していくと、やがて自由水として流動するという不飽和特性を表現したパラメータである。本モデルでは、 h_t が h_{tmax} を超えると上層タンクと連結し飽和領域でも適用できると考えた。

堤体内における雨水の貯留・流出過程は、図-5に示す堤防形状に沿った流れを適切に計算するため、鉛直座標を $\sigma = (z - z_0)/D$ のように定義した境界適合型の連続式と運動方程式(式(4)～式(8))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、堤体への雨水浸透・滲出量 R_i が考慮

されており、表面流との雨水の交換が行われる。 $w_{\sigma t}$ と $w_{\sigma b}$ は、図-5に示す各タンクの上面と底面の高さにおける w_σ であり、式(8)よりそれぞれ計算される。

$$\left(\text{堤体表層タンク} \right) \quad \frac{\partial h_t}{\partial t} + \frac{\partial U h_t}{\partial x} + \frac{1}{3.6 \times 10^6} R_i - \frac{w_{b\sigma}}{\cos \theta_b} = 0 \quad (4)$$

$$\left(\text{堤体表層より下層のタンク} \right) \quad \frac{\partial h_t}{\partial t} + \frac{\partial U h_t}{\partial x} + \frac{w_{\sigma t}}{\cos \theta_t} - \frac{w_{\sigma b}}{\cos \theta_b} = 0 \quad (5)$$

$$\left(\text{堤体最下層のタンク} \right) \quad \frac{\partial h_t}{\partial t} + \frac{\partial U h_t}{\partial x} + \frac{w_{\sigma t}}{\cos \theta_t} \quad (6)$$

$$U = -k_a \frac{\partial h_t}{\partial x} - k_a \sigma \frac{\partial D}{\partial x} \quad (7)$$

$$w_\sigma = -k_a \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (h_t + \sigma D) \quad (8)$$

ここに、 h_t :タンク貯留高(m)、 U :堤体内の水平方向流速(m/s)、 w_σ :堤体内の σ 方向流速、 $w_{\sigma t}$: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 :堤体透水係数(m/s)、 D :各地点での堤体高さ(m)である。

堤防への雨水浸透・滲出量 R_i は、次式により評価する。

$$R_i = \begin{cases} R_a & (R_a \leq R_{imax}) \\ R_{imax} & (R_a > R_{imax}) \end{cases} \quad (9)$$

堤体の雨水浸透が進み、堤体法尻付近が飽和状態に達した場合、堤体に貯留しきれない雨水が堤体から滲出するものとして、次式から滲出量を算定する。

$$R_i = -\frac{\partial}{\partial x} \int_0^1 U h_t d\sigma \quad (10)$$

(4) 久楽ら⁶⁾の計測値に基づく水収支分布解析と考察

久楽ら⁶⁾の模型大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)～(10)を同時に解き、本解析法のパラメータであ

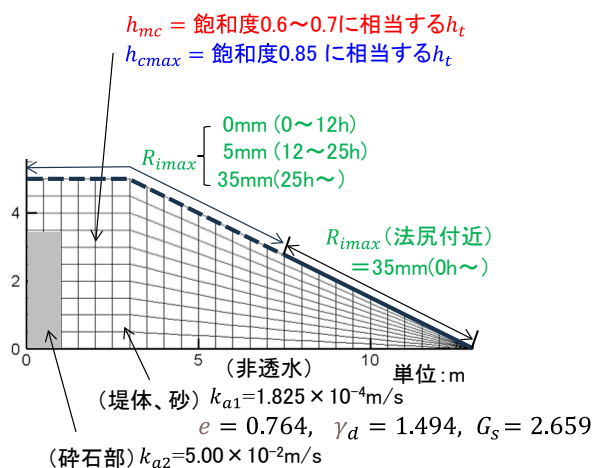


図-6 模型大型堤防実験の解析モデル図と計算条件

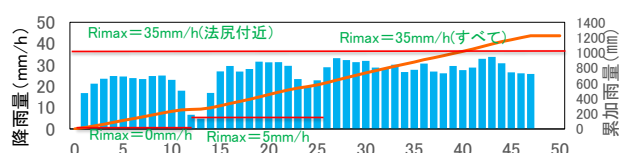


図-7 降雨条件\$R_a\$の時系列分布と\$R_{imax}\$の設定結果

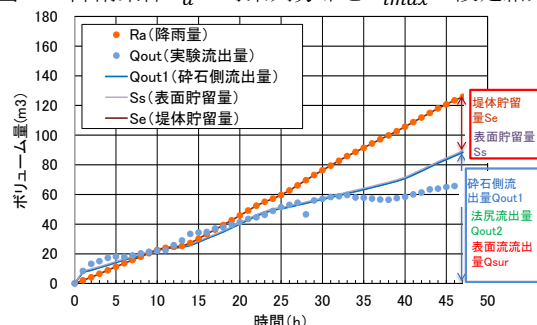


図-8 模型大型堤防実験と水理解析での水収支分布図

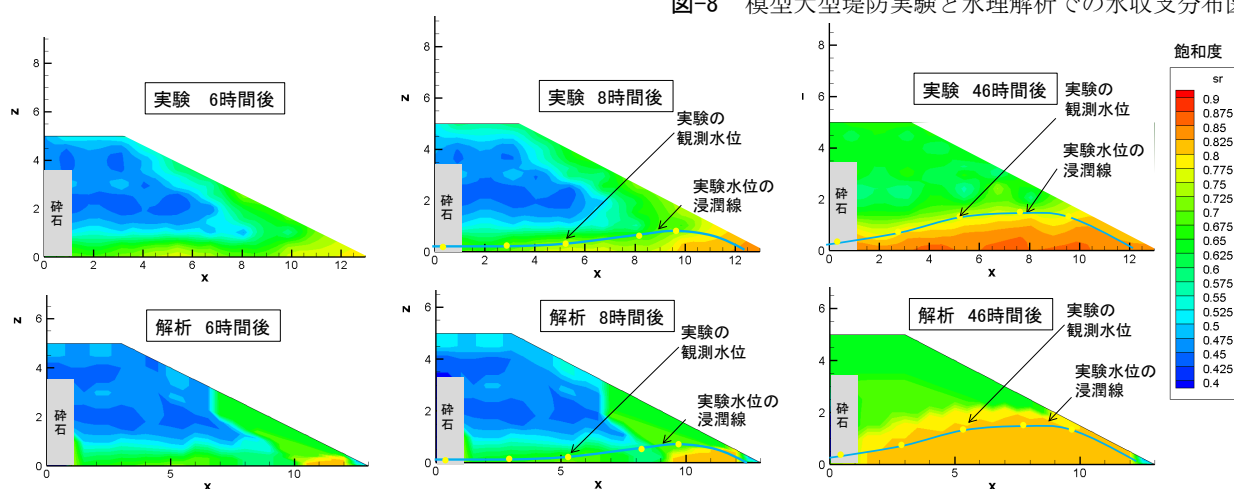


図-9 模型大型堤防実験と水理解析での飽和度分布の比較

る h_{mc} , h_{cmax} , R_{imax} の値を調整することにより図-4に示した実験で計測された堤体内の飽和度分布により堤体内の水の貯留及び流出過程を明らかにする。

実験堤防は奥行10mであるが、本研究では鉛直2次元モデルとして扱い、図-6に示すように堤体形状に適合した連結したタンクから構成されるモデルを作成した。本研究では無処理堤防上に降った各時間の降雨量を平均して一様に与えた。 R_{imax} は、図-6に示すように法尻付近とそれ以外の範囲で異なる設定とした。この理由は降雨実験の前に湛水実験が行われ、法尻付近が飽和状態であったためである。図-7は降雨分布に対する表面からの流入降雨量 R_{imax} の与え方を示す。この分布は、久楽ら⁶⁾の実験結果の飽和度分布を見て設定したが、今後の課題でもある。初期 h_t は図-2に示す実験の飽和度観測分布を用いて設定した。 k_a はタンク間の水の移動であるため、実験堤防の透水係数を調整して与えた。

図-8は計測値と解析結果の水収支分布図の比較を示し、図-9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。図-8より、解析における各流出量の合計値(Q_{sur} , Q_{out1} , Q_{out2})は33時間目までは実験値と同様の傾向を示している。図-8の R_a (降雨量) と Q_{out}

(実験流出量) から、9時間目までは降雨量よりも流出量が多くなっていること、かつ6時間目までは飽和度があまり増加していないことから、本実験では20mm/h程度の強い降雨では降雨が堤体内に浸透しにくく、表面流として流れているものと考え、 R_{imax} は12時間まで0に設定した。図-9より、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尻に向かって飽和度 $Sr=0.7$ 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 $Sr=0.7 \sim 0.9$ 程度となっている。一方、34時間目以降では、解析結果は実験結果の水収支分布と乖離が見られる。実験結果の貯留ボリュームが解析結果よりも大きくなっていることから、法尻付近での盤ぶくれなどの土構造の変化の影響があると考えられる。図-9には解析における46時間目の飽和度分布を示しており、解析の $Sr=0.8$ の境界線と実験の浸潤線は同程度となっている。しかし、上述したように34時間目以降、解析と実験の水収支分布には乖離が見られるため、さらなる検討が必要である。

(5) 鉄道総研による盛土降雨実験への適用

佐藤ら⁷⁾は、崩壊した鉄道盛土の性能を実証的に評価することを目的に、図-10に示すような実物大

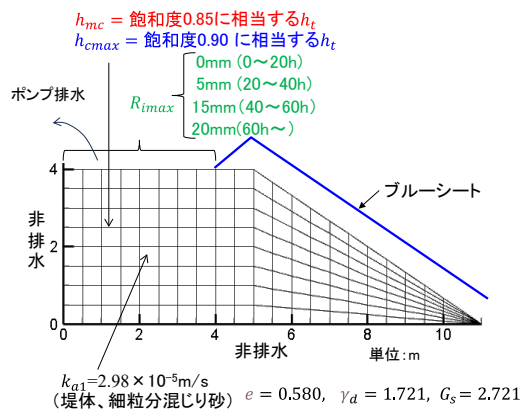


図-10 鉄道総研降雨実験の解析モデル図と計算条件

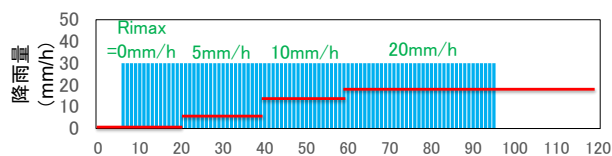


図-11 降雨条件 R_a の時系列分布と R_{imax} の設定結果

の盛土模型（幅12.0m，奥行き6.0m，高さ5.0m，細粒分混じり砂（透水係数 $2.98 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ）を対象とした降雨実験及び各崩壊段階において载荷実験を行った。盛土内部では土壌水分計，間隙水圧計，変位計が設置されており，下部と内側は非排水条件とされ，盛土天端の表面の水は排水ポンプで排水している。

斜面にはブルーシートが設置され，本実験装置全体に30mm/hの降雨を与え，堤体内部の飽和度の変化について，図-10に示すような境界適合型モデルを適用し検証を行った。本実験では全体の流出量は算定されていないため，飽和度分布が実験結果に整合するよう，各パラメータ（ h_{mc} ， h_{cmax} ， R_{imax} ）を調整した。

図-11は降雨量の計測値と解析結果の水収支分布図の比較を示し，図-12は検証開始後，40時間後，60時間後，80時間後の実験飽和度分布と解析飽和度分布の比較を示す。降雨量は30mm/hと多かったが，実験飽和度は20時間後までほぼ変化がなかったため，この時間帯まで降雨が堤体内に浸透しないものと考え R_{imax} は0とした。この理由として，降雨強度が大きく間隙空気の影響があることに加え，堤体土がFC=12.1%の細粒分を含んだ砂であることから，間隙が小さく，雨水の浸透が困難であったものと考えている。その後，天端の表面付近から飽和度が上昇し，80時間後に下層で飽和度が上昇している現象が表現できている。しかし，60時間後の解析結果は，実験結果に対し，ブルーシート下部付近の不飽和領域の境界において飽和度の値が極端に変化している。

(6) 釧路川試験堤防降雨実験への適用

釧路川では，平成28年8月に降雨による堤防の法面すべりが発生し，その原因を解明するため，実物大の試験堤防による現地実験⁸⁾が実施され，その後，緩勾配化による堤防強化の効果を長期観測によって

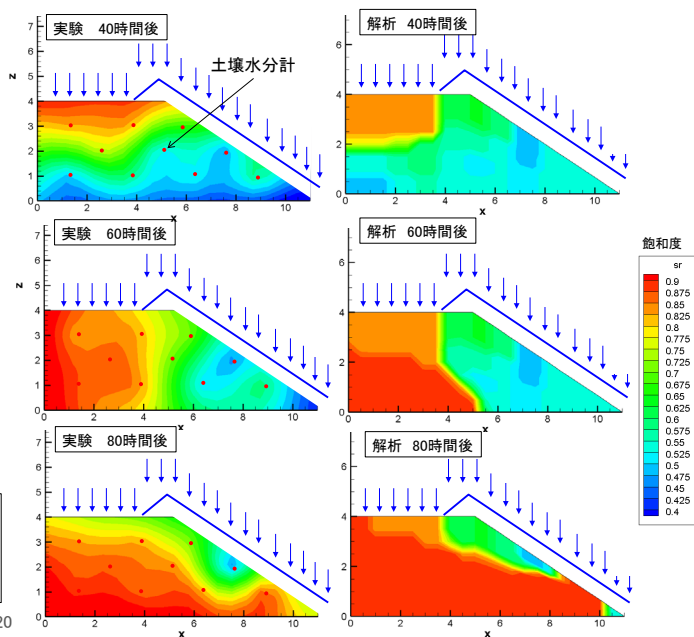


図-12 鉄道総研降雨実験と水理解析での飽和度分布の比較

確認することを目的として試験堤防が構築された⁹⁾。実験は被災箇所の下流の高水敷にて，図-13に示す堤防を現地の土を使って製作し，法勾配1:3.0の堤防拡幅部にシルト質土が施工されている。

本実験では，最大20mm/hとなる実験降雨を約30時間を降らせた。拡幅部分に設置された土壌水分計で飽和度が計測されているため，その変化について，境界適合型モデルを適用し検証を行った。

図-13は降雨量の計測値と検証開始後，24時間後，30時間後の実験飽和度分布と解析飽和度分布の比較を示す。24時間後の実験結果は，川裏よりも川表で飽和度が高く，解析結果は表層から内部方向に飽和度が低下するが，川表に比べ川裏の方が低く，実験結果と同様の傾向を示している。30時間後の実験結果では，川表及び川裏で $Sr=0.9$ を示しており，解析結果も $Sr=0.85 \sim 0.9$ を示しており，概ね再現できている。このとき降雨量は10mm/hと弱い降雨であったことから，降雨量がすべて浸透するとして， R_{imax} を高い値に設定している。

(7) 境界適合型水理解析モデルへのRichards式の適用

これまでのモデル解析では各パラメータ（ h_{mc} ， h_{cmax} ， R_{imax} ）の物理的意味は説明できていない。そのため h_{mc} ， h_{cmax} を使用せず，不飽和領域の各タングの水分量に応じて運動方程式及び不飽和透水係数を変化する機構を取り込んだRichards式を用いた。不飽和時の運動方程式を式(11)，(12)で表現し，飽和後は式(7)，(8)になると考えた。

$$U = -k_{wi} \frac{\partial}{\partial x} (h_p + \sigma D) - k_{wi} \sigma \frac{\partial D}{\partial x} \quad (11)$$

$$w_\sigma = -k_{wi} \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (h_p + \sigma D) \quad (12)$$

ここに， h_p :圧力水頭(m)， k_{wi} :不飽和透水係数(m/s)である。不飽和透水係数はVan Genuchtenの水分特性

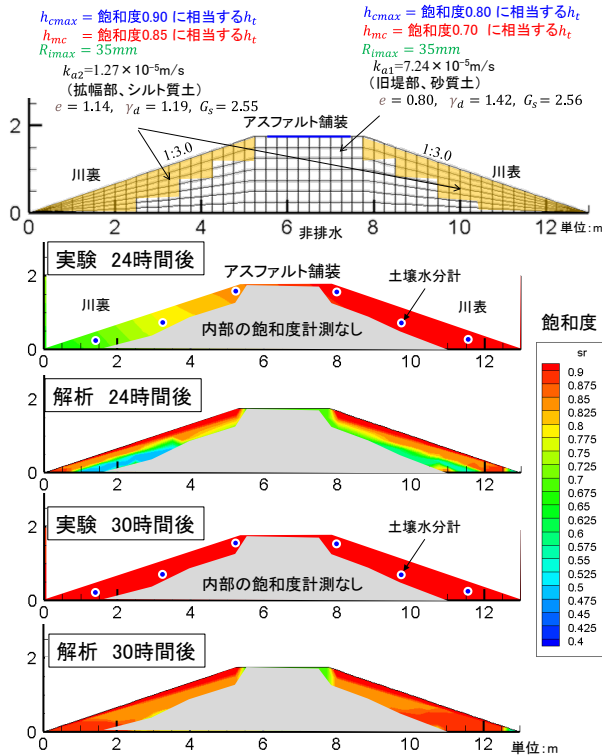


図-13 釧路川試験堤防実験の解析モデル図と水理解析での飽和度分布の比較

曲線で近似し、各パラメータは一般的な砂の定数を入力した。図-14は久楽ら⁶⁾の実験と解析の飽和度分布の比較を示す。ここでは R_{imax} は2.4(4)で用いた方法を採用した。この図では6及び8時間後法尻付近から飽和していく過程が再現できているが、46時間後は実験飽和度分布に対し、解析結果は過大となっている。これは鉄道総研による盛土降雨実験⁷⁾の再現結果でも同様であり飽和・不飽和の境界付近で水の移動に課題があると認識している。今後は2.4)と2.7)で示され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をさらに検討し、モデルの改善を目指す。

3. 結論

本研究では、最初に久楽ら⁶⁾の模型大型堤防を対象として、降雨実験結果と、境界適合型水理解析モデルに基づいた水収支分布解析を行い、堤体内の水の貯留及び流出過程の再現性を検証した。さらに他の実験事例（鉄道総研による盛土降雨実験⁷⁾、釧路川試験堤防降雨実験⁸⁾）に適用することで水収支解析の有効性を検討した。その結果を以下に示す。

- h_{mc} は不飽和時のサクシオンに影響し、 h_{cmax} は有効飽和度に定義される飽和時の含水率を表現したものであり、その値は、 $h_{mc} = 0.6 \sim 0.85$ 、 $h_{cmax} = 0.8 \sim 0.9$ 程度となる。
- R_{imax} は表面流の発生しやすさに関するパラメータであり、降雨強度が20～30mm/h程度と強くなると、堤体内への降雨浸透量が少なくなる。

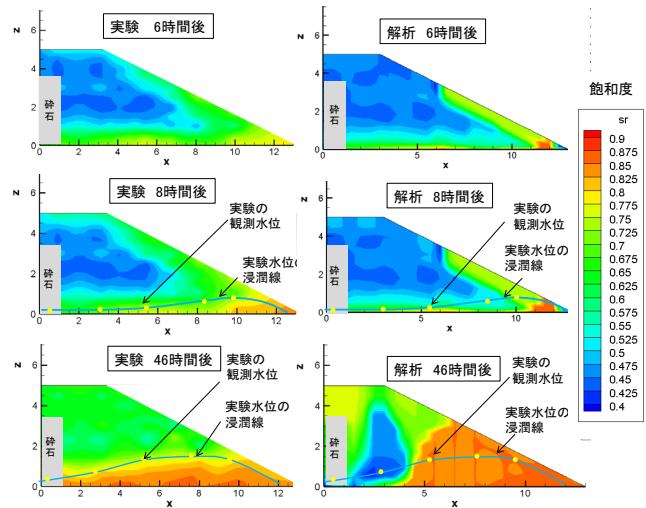


図-14 模型大型堤防実験とRichards式を適用した水理解析での飽和度分布の比較

- さきのモデルパラメータの物理的意味を明らかにすることを目的にRichards式を適用した境界適合型水理解析モデルに基づいて久楽ら⁶⁾の実験の再現を試みた。その結果、堤体内の水の移動を一部再現できるが、飽和領域と不飽和領域の水の移動に課題がある。

参考文献

- 1) 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.
- 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) 石井優太郎，吉村俊彦，福岡捷二：石狩川下流域における支川群の洪水流出特性と本川洪水への影響，河川技術論文集，第28巻,pp.121-126,2022.
- 4) 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.
- 5) 小谷哲也，後藤岳久，福岡捷二：斐伊川の降雨流出・洪水流・土砂移動の一体解析法の開発と流域治水に向けた活用，河川技術論文集，第30巻,pp.453-458, 2024.
- 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) 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.
- 8) 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.
- 9) 岡村健斗，川尻峻三，濱中昭文，大串正紀，鈴木智之，不動充，バ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.

(2025.4.3受付)