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

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	〇白石	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.河川堤防の構造検討の手引き いによると,浸透に対する堤防の安全性照査のための浸透流解析の降雨条件は計画降雨量を一定ハイエトで与えており,浸透流解析における堤防への降雨浸透条件(降雨をどのように堤防に浸透させるか)は明記されていない.新清ら 2)が指摘するように,堤防への降雨浸透条件は,堤防内部の水分分布の解析結果を左右する大きな要因のひとつであるが,実態把握が難しいこともあり,その考え方は十分に整理されていないように思われる.

降雨時の堤防の安定性を考えるとき,降雨時に堤防に降った雨と堤防からの流出量の時間変化が観測できれば,その 差分から堤防でいつどの程度の水が貯留されているか(水収支分布)を知ることができる.このため,降雨時の水収支分 布解析と観測データに基づき,堤体内及び堤体表面での水の貯留・流出過程を解析することにより,堤防への降雨浸透 条件や堤体内部の水分分布の推定が可能と考えられる.本研究では,降雨による堤体内の飽和・不飽和時の水の貯留及 び流出過程について,水収支分布に着目した境界適合型の水理解析モデルを開発し,久楽ら 2の模型大型堤防を用いた 降雨実験結果の再現を試み,今後の水収支解析における課題を整理する.

2. 模型大型堤防を用いた降雨実験の概要と計測結果に基づく水収支分布

2.1 実験の概要

久楽ら³⁾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.具 体的には,図-1に示すように縦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 3.65×10⁻³m/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 1.03×10⁻⁴m/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なっている.

堤体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 テンションメータ, 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

A:降雨ハイエト図 1000 800喇 600座 400 戻 200账 00 (4/30 ● ■ 20 10 実験装置全体の平均雨量 1 20 25 30 50 15 35 40 45 B:横断図 20.0 3.0 排 1:2 降石 水 5.0 槽 排水路 (砂) BXX. 単位 48h 1.5m <u>1.0</u> <u>2.0 m</u> C.平面図 10.0 m 累加降雨量 (mm) 雨量計 1300 1200 1100 900 800 700 600 500 400 300 200 100 Ŗ拾 ①無処理提防 0 O 仕切り板 O 0 Ξ 10.0 ②補強堤防 0 C 図-1 久楽ら³⁾の模型大型堤防実験装置と降雨量コンター図

図「I 久栄ら『の模型入型堤防夫駛装直と降雨重コンダー』 (A:降雨ハイエト図,B:横断図,C:平面図)

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たため,堤 体内に水が残留した状態から図-1に示す降雨が48時間継続して与えられた.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う.

2.2 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り,式(1)はこれらの関係を示す堤防の水収支分布式である.

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

ここで, *Se*:堤体内の水の貯留量(m³), *S*_s:堤体表面の水の貯留量(m³), *Ra*:堤体への降雨量(mm/h), *A*:堤体表面の投影面

Study of Water Storage Volume and OutflowY. ShiraProcesses of Water within an EmbankmentY. TakeBased on Water Balance Analysis in LargeT. GotoScale Model Experiment during RainfallS. Fuku

Y. Takemura, Research and Development Initiative, Chuo University

T. Goto, Research and Development Initiative, Chuo University S. Fukuoka, Research and Development Initiative, Chuo University

Y. Shiraishi, Chuo University



積(m²), *Q*_{out1}:砕石側からの流出量(m³/s), *Q*_{out2}:堤体法尻から の流出量(m³/s), *Q*_{surface}:堤体表面からの流出量(m³/s) であ る. 図-4 は,実験の無処理堤防を対象として,式(1)の右辺の 堤防への降雨量と堤防からの流出量の累積値(降雨ボリューム と流出ボリューム)を示したものである.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,堤 体内及び堤体表面の貯留量が時空間的に変化する影響を受けて 複雑に変化している.





図-4 久楽ら³⁾の無処理堤防における水収支分布

3. 堤体の境界適合型水理解析モデルの構築と計測された水収 支分布に基づく解析

3.1 堤体の境界適合型水理解析モデル

本研究では、図-5 に示すように堤体境界に適合した複数のタンクを連結し、その土中の水分量を貯留高h_tで表現し、 土中の水の運動を Darcy 則と連続式で解析する.不飽和流れ特性は、堤体形状に応じて変化するタンク容量と、浸透流 移動開始貯留高(圃場容水量)h_{mc}を導入することによって評価している.浸透流移動開始貯留高(圃場容水量)h_{mc}とは、 乾燥した山腹の土層に雨水が浸透すると最初に土粒子の周りに吸着され、さらに含水率が増大していくと、やがて自由 水として流動する 4)という不飽和特性を表現したパラメータである.本解析では降雨量を堤体表面に与えて、最大浸透 能R_{imax}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堤体に浸透しないものとして堤体表面流が発生 するものとした.また、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.以下に具体の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.

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

$$\frac{\partial U_s h_s}{\partial t} + \frac{\partial U_s U_s h_s}{\partial x} + U_s \frac{1}{3.6 \times 10^6} (-R_a + R_i) = -gh_s \frac{\partial z_s}{\partial x} - \frac{1}{\cos\theta_b} \frac{gn^2 U_s |U_s|}{h^{1/3}}$$
(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*:マニングの粗度係数(m^{-1/3} s), *g*:重力加速度(m/s²), *θ*_b:堤防表面の角度である.

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_{ot}とw_{ob}は、図-5に示す各タンクの上面と底面の高さにおけるw_oであり、式(8)よりそれぞれ計算される.

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

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

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

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

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

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、 $w_{t\sigma}$: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 :堤体透水係数(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_{tmax} :最大飽和貯留高(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.

$$R_{i} = \begin{cases} R_{a} & (R_{a} \le R_{imax}) \\ R_{imax} & (R_{a} > R_{imax}) \end{cases}$$
(9)

ここに, *R_{imax}*:最大降雨浸透量 (mm/h)である.本研究では,タンク貯留高*h_tがh_{tmax}*に達した場合を飽和状態と定義し, タンク内にそれ以上は雨水が貯留されないものとしている.堤体への雨水浸透が進み,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.

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

3.2 久楽ら³⁾の計測値に基づく水収支分布解析と考察

式(1)と式(2)~(10)を同時に解くことにより,降雨時にど の程度の量の水が堤体内および堤体表面に、どのような状態 で存在しているのかを推定することができる.構築した堤体 境界適合型の水理解析モデルを久楽ら²)による模型大型堤防 を使った降雨実験における降雨条件,境界条件,土質条件に 適用し,計測された水収支分布の関係に基づいて解析する. 実験は奥行 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 クを作成した.図-1 に示したように降雨は分布を持つが,本



図-6 水理解析モデルにおける連携タンクの設定

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.堤体底部は非透水とし,図-4 に示した実験で 計測された水収支分布を説明するように、本解析法のパラメータである k_{a1} , k_{a2} , h_{mc} , h_{cmax} , R_{imax} の値を決定した. 法尻付近の R_{imax} は、降雨実験の前に湛水実験が実施されていたことを踏まえ最大降雨以上の値を設定した.初期のタン ク貯留高 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、その他の諸条件は**表-1**に示す.

表-1 水理解析計算条件				
パラメータ	実験値	計算条件	備考	
k _{a1} :堤体透水係数	3.65×10⁻⁵m∕s	1.825×10 ⁻⁴ m/s	計算の透水係数は実験の5倍を設定	
k _{a2} : 砕石透水係数	-	$5.00 \times 10^{-2} \text{m/s}$	水収支分布図から調整	
hmc:浸透流移動開始貯	留高 -	Sr=0.6∼0.7	飽和度 Sr の実験値より ht に換算	
h _{cmax} :最大飽和貯留高	-	Sr=0.95	水収支分布図から調整	
R _{imax} :最大降雨浸透量	-	図-6参照	水収支分布図から調整	

図-7は計測値と解析結果の水収支分布図の比較を示し、図-8は降雨開始後4時間目、9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-7より、解析における各流出量の合計値(Q_{surface},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.実験結果の水収支分布図より、4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時間目までは堤体の貯留量および飽和度があまり増加していないことから、図-1の砕石 部および表面流による流出量が多くなっていたと推測し、砕石側の透水係数およびh_{mc}、表面流の発生し易やすさに関



するパラメータであるR_{imax}を実験結果の水収支分布図を再現するように設定している.図-8 より,実験結果では 4 時間目から 9 時間目にかけて法尻付近から法肩に向かって飽和度 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=0.7~0.9 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.また図-1 に示す降雨コンター図を見ると降雨分布にばらつきがあり,実験では堤体内の水の移動が 3 次元的であった可能性がある.そのため,解析ではそれらの影響を捉えきれなかったものと考えられる.図-8 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=0.9 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.

4. まとめ

本研究では、降雨による堤体内の飽和・不飽和時の水の貯留及び流出過程について、水収支分布に着目した境界適合型の水理解析モデルを開発し、久楽ら 3の模型大型堤防を用いた降雨実験結果をどの程度再現できるか、再現するためにはどのような考え方が必要かを検証した.

観測した降雨量と流出量を用い,実測の水収支分図に基づいて降雨時の堤防における水の貯留・流出過程を解析する ことにより,堤体内部の実測水分分布を把握するには,降雨浸透条件や堤体土質パラメータ等をどのように考えればよ いかを中心に本研究では考察した.今後,降雨と堤体流出量,堤体内部の飽和度や水位が計測された他の模型大型堤防 に適用し,本手法の一般性を高める検討を引き続き進める予定である.

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) 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. 4) 椎葉充晴,立川康人,市川温,堀智晴,田中賢治:圃場容水量・パイプ流を考慮した斜面流出モデルの開発,京都大 学防災研究所年報,第41号,B-2,pp.229-235,1998.