

表面被覆型対策工が設置された堤防裏法部の流れと堤体侵食を評価する解析手法の開発と堤体表面に形成された初期侵食が及ぼす影響評価

DEVELOPMENT OF AN ANALYTICAL METHOD FOR EVALUATING FLOW AND EROSION OF LEVEE SLOPE WITH SURFACE-COVERING COUNTERMEASURES AND EVALUATION OF THE INFLUENCE OF INITIAL EROSION FORMED ON THE LEVEE SURFACE

後藤岳久¹・福岡捷二²

Takahisa GOTOH and Shoji FUKUOKA

¹正会員 博士(工学) 中央大学研究開発機構 (〒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 機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

本研究では、堤防裏法部に接続ブロックと吸出し防止シートを設置する表面被覆型対策工周辺の越流時の流れと、それに伴う堤体侵食を解析している。解析では、接続ブロックより上層の流れを解析する空気混入の影響を考慮した非静水圧準三次元解析法(Q3D-FEBS)と、接続ブロックの隙間と吸出し防止シート内部、その下の流れを解析する各材料の不透過領域の占有率を考慮した多層流モデルを組み合わせ、吸出し防止シート下の堤体表面の流れを解析し、それに応じた堤体侵食を評価できる解析法を構築した。解析法は、国総研で実施された堤体表面に初期侵食がある場合と無い場合の堤防越流侵食実験に適用され、初期侵食が堤体侵食に及ぼす影響について検討した。

Key Words: levee erosion, overflow, countermeasures covering the levee with sheets and blocks, 3D and quasi-3D coupling flow analysis model, initial gap

1. 序論

令和元年東日本台風で発生した堤防決壊のうち、約86%は越水による堤防決壊であるため、越水した場合においても決壊しにくく、かつ、決壊までの時間を長くすることの出来る粘り強い堤防の技術開発が進められている。堤防を粘り強い構造に強化するためには、越流水による堤防裏法部の侵食を抑制することが重要であり、堤防裏法の侵食抑制対策として、裏法部に連節ブロックを設置し、さらに、その下の裏法材料の吸出しを防止するため、吸出し防止シートで裏法材料を被覆する「表面被覆型対策工」が提案されている²⁾。

表面被覆型対策工を実施した堤防においては、既設のアーマーレビーやフロンティア堤防の開削調査結果²⁾が示すように、雨水等の影響により吸出し防止シート下に空隙が形成される、又は、不等沈下等により堤防裏法面に不陸が形成される可能性がある。このため、堤防を越流する流れが生じた際には、これら空隙・不陸の存在が

堤防裏法部の侵食を助長させる恐れがある。従って、表面被覆型対策工の具体的な設計検討のためには、接続ブロック周辺の三次元流れ、吸出し防止シート内の流れ及びシートと堤体土表面との隙間の流速を解析し、それに応じた侵食を見積もることが必要である。

一方、堤防の設計を検討する際には、断面のみでの検討ではなく、河道の縦横断形状や河道線形、河床変動、洪水の非定常性等の影響が含まれた洪水流の全エネルギー分布を計算し、これを用いて河道と堤防を一体的に設計する必要があることが示されている³⁾。

本研究では、実河川の広域の流れと河床変動を計算可能な準三次元解析法(Q3D-FEBS(竹村・福岡, 2019⁴⁾))の枠組みで、空気混入を伴う複雑な接続ブロック上の流れと吸出し防止シート内とその下の流れ、それに伴う堤防裏法部の侵食の算定が可能な解析手法を構築する。さらに、表面被覆型対策工の堤体表面に形成された初期侵食が、その後の侵食に与える影響について検討する。

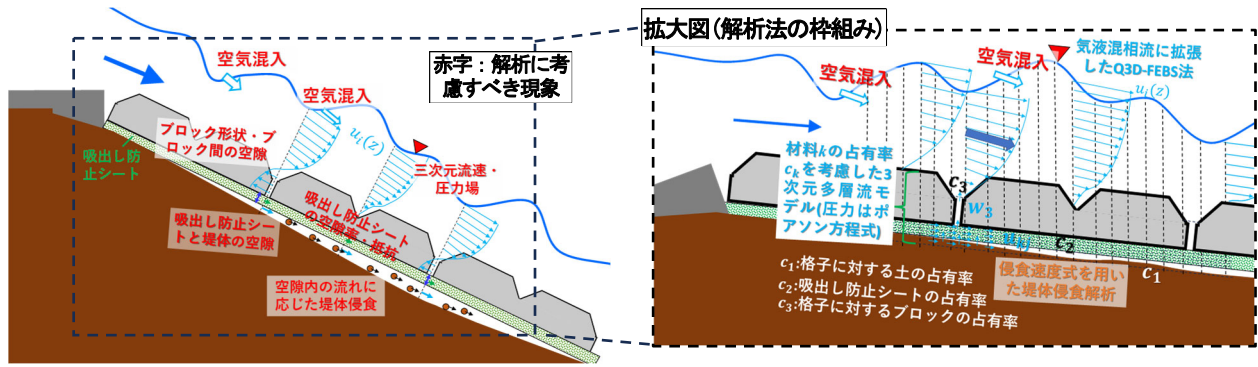


図-1 本解析法の枠組み

2. 本解析法の支配方程式

図-1、図-2は本解析法の枠組みとフローチャートを示す。接続ブロック上の流れは空気混入を伴うことから、Q3D-FEBS(竹村・福岡, 2019⁴⁾)を気液混相流モデルに拡張し解析する。堤防裏法部に設置された接続ブロック間の隙間、吸出し防止シート内部及びその下の堤体との隙間の流れについては、各材料の不透過領域の占有率を考慮した多層流モデルにより解析する。

堤体侵食については、土の粘性、締固め土等の影響を考慮するため侵食速度式を用いて評価し、侵食された土砂は土砂の移流方程式により輸送されるものとした。具体の支配方程式を以下に示す。

(1) 接続ブロック上の流れの解析

本解析では空気と水を1流体モデルの混相流として扱い、混相流の密度 ρ を式(1)に示すように、空気混入率 C で重み付けして評価する。ここで、 ρ_a は空気の密度であり、 ρ_w は水の密度である。混相流の運動量 ρu_i については、水中に混入した気泡は水の流速に速やかに追従するものとし、空気の流速 u_{ai} は水の流速 u_{wi} に等しいものと仮定し、式(2)に示すように空気混入率 C で重み付けして評価する。ここで、 u_i は混相流の流速で、 $i=1,2,3$ である。

$$\rho = \rho_a C + \rho_w (1 - C) \quad (1)$$

$$\rho u_i \approx u_i (\rho_a C + \rho_w (1 - C)) \quad (2)$$

式(3)は混相流の水に関する連続式を水深積分したものであり、左辺第三項には接続ブロックの隙間からの水の流入・流出の影響を考慮している。ここで、 w_3 は接続ブロックの隙間の水の鉛直流速、 c_3 は格子内におけるブロックの占有率、 h_w は混相流の水の実質水深であり、水中の空気を含んだ混相流の水深 h は水深平均の空気混入率 C_a を用いて式(4)で表す。

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} + \frac{\partial u_j h_w}{\partial x_j} - (1 - c_3) w_3 = 0, \quad j = 1, 2 \quad (3)$$

$$h = h_w / (1 - C_a) \quad (4)$$

水中の空気混入率については、混相流の空気に関する3次元連続式(式(5))より計算する。空気混入条件について

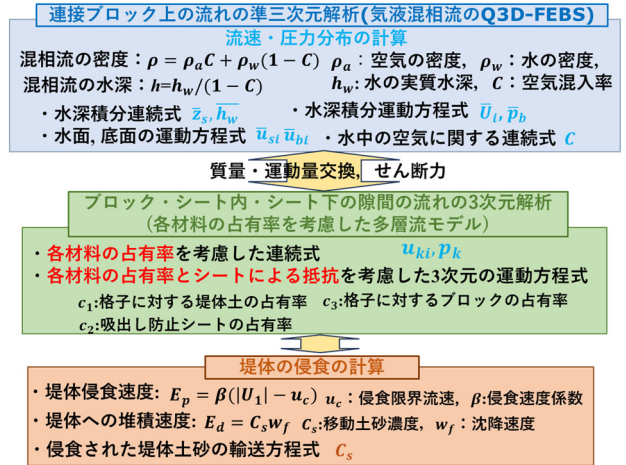


図-2 本解析法のフローチャート

は、水面形の最急勾配を計算し、実験値を再現するように水面勾配2/5で、かつ、 $Fr > 2.5$ 以上の場合(N. Rajaratnam(1967)⁵⁾)は空気混入するとし、周囲の水面に囲まれた単位面積当たりの空気塊 V_{air} が水面流速 u_{si} で輸送されるとして空気混入フラックス F_{inair} を評価した。単位面積・単位時間当たりの空気の流出量 F_{outair} は、気泡の終端速度 w_{airt} と水面付近(最上層の格子内)の空気混入濃度 C_{as} を用いて式(6)で評価した。また、気泡は吸出し防止シートを通過しないものとした。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C u_j}{\partial x_j} = 0, \quad j = 1, 2, 3 \quad (5)$$

$$F_{inair} = V_{air} u_{si}, \quad F_{outair} = C_{as} w_{airt} \quad (6)$$

式(7)は気液混相流の水深積分された水平方向運動方程式であり、右辺第1項の静水圧の圧力勾配項については、混相流の密度の鉛直分布を考慮して評価する。 ρ_{ave} は混相流の密度の水深平均値である。また、左辺第三項には接続ブロックの隙間から水の流入・流出による運動量交換の項である。

$$\frac{\partial u_i h}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j h}{\partial x_j} - (1 - c_3) w_3 u_{bi} = -\frac{1}{\rho_{ave}} \int_{z_b}^{z_s} \left(\frac{\partial (\rho g (z_s - z) + dp)}{\partial x_i} \right) dz - \frac{\tau_{bi}}{\rho_{ave}} + \frac{1}{\rho_{ave}} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (7)$$

水面流速・底面流速の運動方程式においても、同様に、その場の混相流の密度分布を考慮して計算した。

(2) 接続ブロックの隙間・吸出し防止シート内部・吸出し防止シート下の隙間の流れと堤体侵食の解析

接続ブロック間の隙間と吸出し防止シート内部、吸出し防止シート下の隙間の流れについては、ブロック等の不透過物質の格子内占有率 c_k を考慮した3次元解析を行う。ここで、 c_1 は堤体土の占有率、 c_2 は吸出し防止シートの占有率、 c_3 は接続ブロックの占有率である。 p_s は圧力の静水圧成分、 p_d は圧力の非静水圧成分、 δ_k は格子の鉛直厚さである。

$$\frac{\partial(1-c_k)u_{kj}\delta_k}{\partial x_j} = 0, \quad k = 1, 2, 3 \quad (8)$$

$$\frac{\partial(1-c_k)u_{ki}\delta_k}{\partial t} + \frac{\partial(1-c_k)u_{ki}u_{kj}\delta_k}{\partial x_j} = -\frac{(1-c_k)}{\rho} \frac{\partial p_s \delta_k}{\partial x_i} -$$

$$\frac{(1-c_k)}{\rho} \frac{\partial p_d \delta_k}{\partial x_i} - g_i(1-c_k)\delta_k + \frac{(1-c_k)}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij} \delta_k}{\partial x_j} -$$

$$\frac{(1-c_k)}{\rho} F_k \delta_k \quad (9)$$

吸出し防止シートによる抵抗 F_{2i} については、透過係数 K を用いて次のように表す。

$$F_{2i} = \frac{\rho g u_{ki}}{K^2} \sqrt{u_k^2 + v_k^2}, F_{1i} = 0, F_{3i} = 0, K: \text{透過係数}$$

堤体侵食は式(10)に示す侵食速度式を用いて評価する。ここで、 u_c は侵食限界流速、 β は侵食速度係数である。

$$E_p = \beta(|U_1| - u_c) \quad (10)$$

堤体変形については、格子内に堤体土がある場合と無い場合の条件に分け、格子内に堤体土がある場合は格子内の土砂の占有率を変化させ(式(11))、

$$\delta_1 \frac{\partial c_1}{\partial t_b} = -E_p + E_d \quad (11)$$

格子内に堤体土が全て流出した場合($c_1 = 0$)、格子の高さを変化させるようにしている(式(12))。

$$\frac{\partial \delta_1}{\partial t_b} = -E_p + E_d \quad (12)$$

侵食された堤体土砂の輸送については、式(13)に示す土砂の移流方程式で評価する。

$$\frac{\partial C_s \delta_1}{\partial t_b} + \frac{\partial u_{1j} c_s \delta_1}{\partial x_j} = E_p - E_d \quad (13)$$

堤体への単位時間当たりの土砂堆積 E_d については、諏訪ら⁹⁾に倣いRichardson-Zakiによる干渉沈降速度 w_f (式(14))を用いて式(15)で評価する。

$$w_f = w_{f0}(1 - \varphi)^{2.4} \quad (14)$$

$$E_d = C_s w_f \quad (15)$$

3. 吸出し防止シートと接続ブロックが設置され、吸出し防止シートと堤体との隙間の流速が計測された小規模越水実験(国総研実施)への適用と検証

(1) 接続ブロックと吸出し防止シートが設置された小規

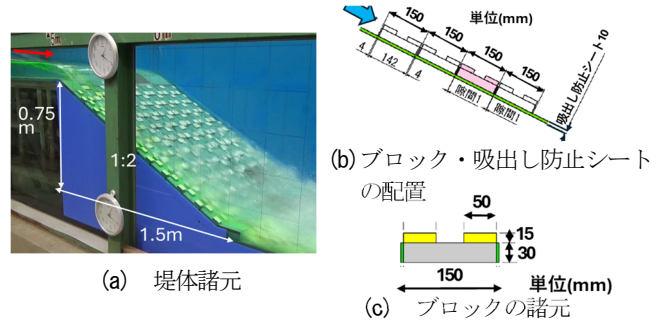


図-3 小規模越水実験(国総研実施)の堤体・ブロック諸元

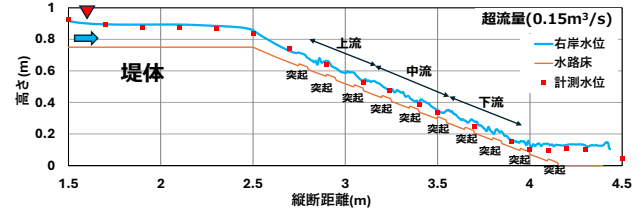


図-4 水位縦断分布の計測値と解析結果

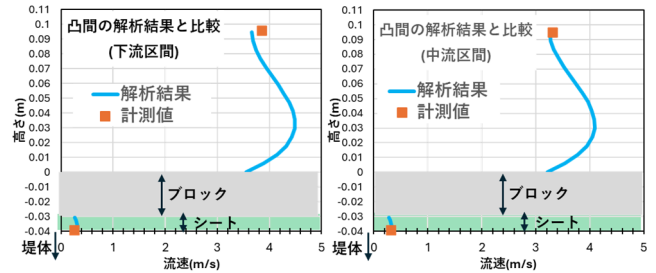


図-5 流速分布の計測値と解析結果の比較

越水実験(R4年度国総研実施)の条件と解析条件

構築した解析法を、接続ブロックと吸出し防止シートの両方が設置され、吸出し防止シートと堤体との隙間の流速が計測された小規模越水実験(国総研実施)に適用し、本解析法を検証する。

図-3は小規模越水実験の堤体諸元および接続ブロックの諸元、吸出し防止シートの配置を示す。実験水路の幅は1mであり、そこに堤体高0.75m、天端幅0.50m、裏法面勾配2割の模型堤防が設置されている。堤防裏法面に設置されたブロック1つの大きさは縦0.15m×横0.15mであり、ブロックの突起の高さは0.015m、ブロック突起部の大きさは縦0.05m×横0.05mである。吸出し防止シートの材質はPET不織布であり、その空隙率は0.91、吸出し防止シートの厚さは10mmである。

実験の越流水深は20cmであり、越流量は越流公式により0.15m³/sである。本解析では上流端に0.15m³/sを与え、下流端には計測された水位と圧力勾配・流速勾配をゼロの条件を与えた。

(2) 解析結果

図-4は水位縦断分布の計測値と解析結果を示す。実験・解析ともに、法肩から2つ目のブロックの突起の直上流から空気が混入しており、空気混入を考慮した解析水位縦断分布は計測水位縦断分布を再現している。

図-5は堤防裏法部の中流部および下流部における流速

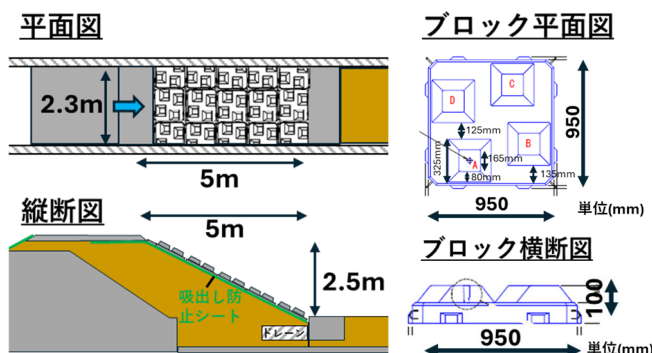


図-6 大規模越水実験(国総研実施)の堤体・ブロック諸元

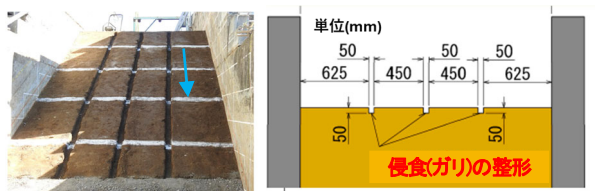


図-7 ガリの設置状況

鉛直分布の解析結果と水面流速の計測値、吸出し防止シートと堤体の隙間の流速の計測値を示す。接続ブロックは不透過であるため、流速鉛直分布は不連続な形状となっている。解析結果における水面流速は3.0~4.0(m/s)であり、水面流速の計測値をほぼ説明している。吸出し防止シートと堤体との隙間の流速の解析結果は0.2~0.3(m/s)であり、解析結果は計測値をほぼ再現している。ここで、吸出し防止シートによる抵抗を評価する透過係数については、計測値を説明する $K=0.5(m/s)$ を使用している。

4. 構築した解析法による表面被覆型対策工の設置された堤防裏法部の侵食機構

(1) 堤防裏法部に接続ブロックと吸出し防止シートが設置された大規模越水実験(国総研実施)の概要

構築した解析法を表面被覆型対策工が設置され、堤体侵食の生じた大規模越水実験(国総研実施)に適用し、堤防裏法部の侵食機構について検討する。図-6は、R5年度国総研実施の大規模越水実験における堤防・接続ブロックの諸元を示す。模型堤防が設置された水路の高さは4.8m、幅は2.3mであり、設置された堤防の天端幅は2m、堤防高は2.5m、堤防裏法面の勾配は2割であり、堤防裏法には粗度高さ100mmの接続ブロックが設置されている。1個当たりのブロックの質量は(305kg/m²)である。接続ブロックの下には、厚さ10mmの吸出し防止シートが設置されている。

実験は初期の堤防裏法部にガリ(溝)が存在する場合と、ガリ(溝)が存在しない場合の2つの堤体条件に対して通水実験が行われており、本章では両条件に対して流れと堤体侵食を計算し、初期に堤体にガリがあることによる堤体侵食への影響を検討する。図-7は、

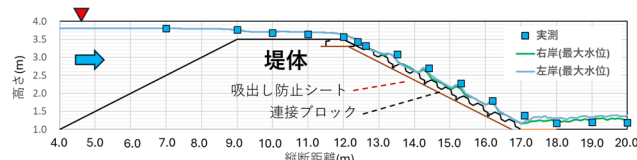


図-8 水位縦断分布の計測値と解析結果(通水30分後)

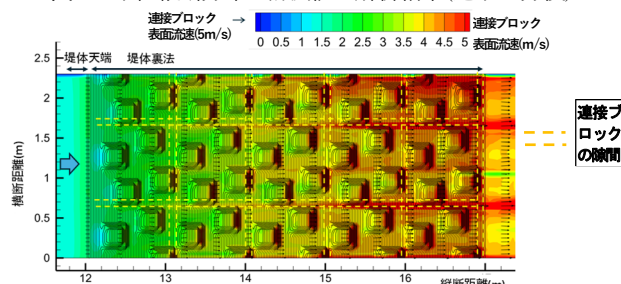


図-9 接続ブロック表面沿いの流速分布(通水15分後)

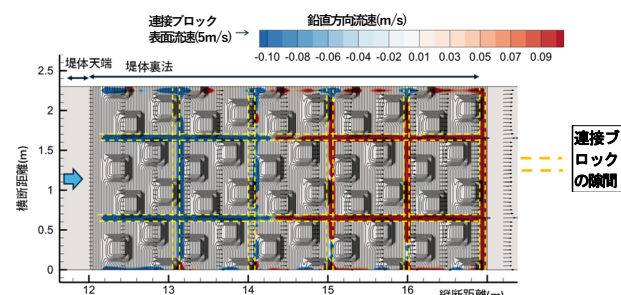


図-10 接続ブロック上から吸出し防止シートに流入・流出する流れの鉛直方向流速(通水15分後)

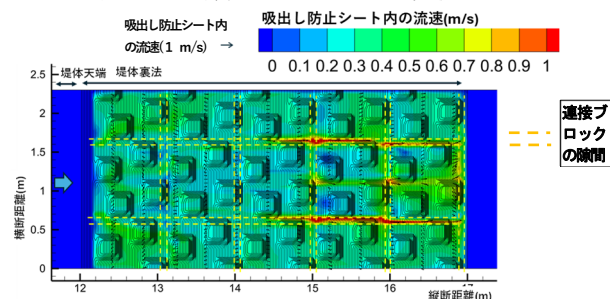


図-11 吸出し防止シート内の流速場(通水15分後)

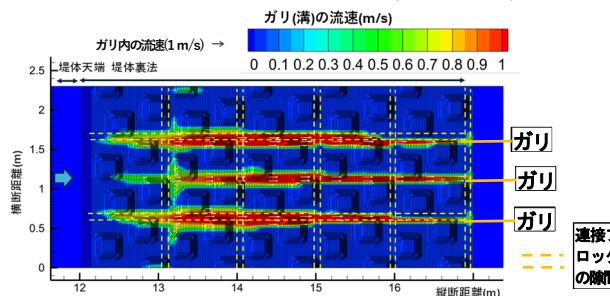


図-12 堤体表面およびガリ内の流速分布(通水15分後)

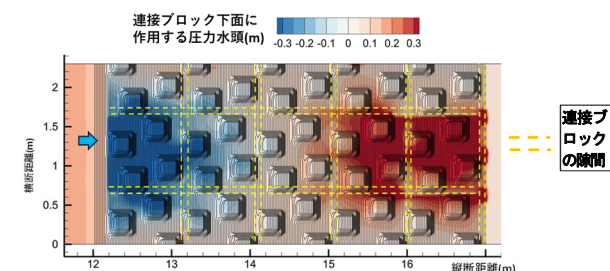


図-13 接続ブロック下面に作用する圧力水頭分布(通水15分後)

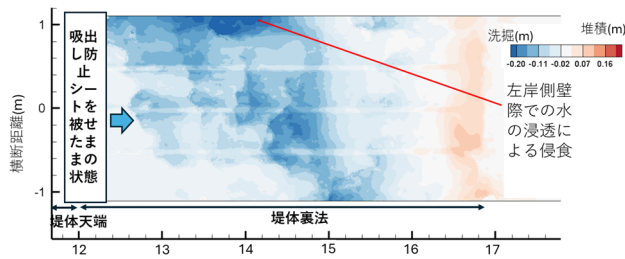


図-14 実験結果における通水60分後の堤体侵食

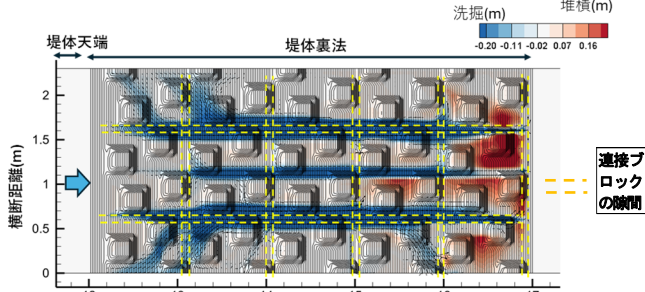


図-15 計算結果における通水60分後の堤体侵食

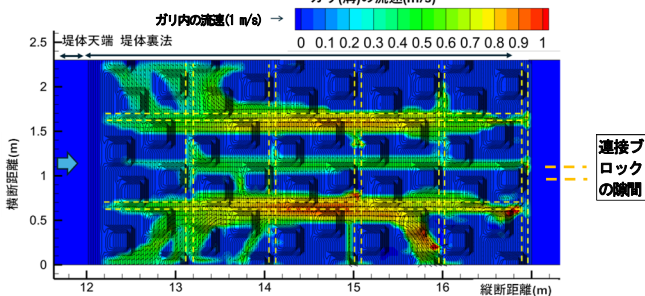


図-16 堤体表面およびガリ内の流速分布(通水60分後)

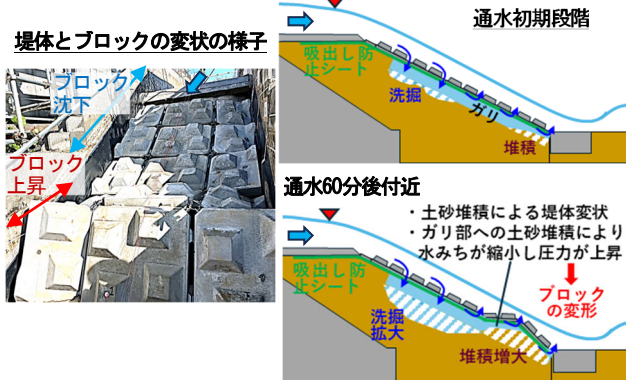


図-17 越流水による堤体とブロックの変形機構のイメージ

堤防裏法部における初期のガリの設置状況を示す。ガリは堤防裏法部に幅0.05m×深さ0.05m×長さ4.4mで、左右岸側及び中央部の計3本設置されている。このうち、左右岸側の2本のガリは、接続ブロックの継ぎ目の位置と一致するように設置され、中央のガリは接続ブロック中央の下に設置されている。実験における越流水深は、両実験とも30cmである。

(2) 解析条件

解析では接続ブロックの凸部の形状を考慮できるように、格子間隔は縦断方向5cm、横断方向5cm間隔とした。鉛直方向の格子については、堤体土表面から接続ブロックまでを鉛直方向に8分割した。最上層の格子には接続

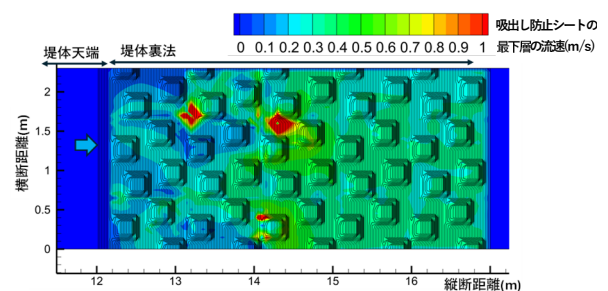


図-18 通水180分後の吸出し防止シート最下層(堤体表面)の流速分布の解析結果(ガリ無し)

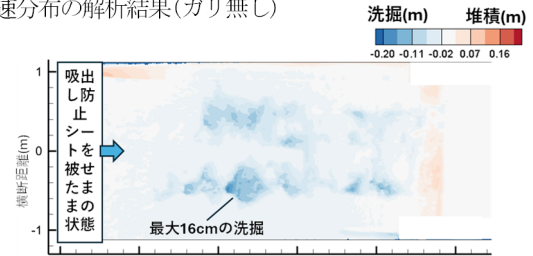


図-19 通水180分後の堤体侵食の実験結果(ガリ無し)

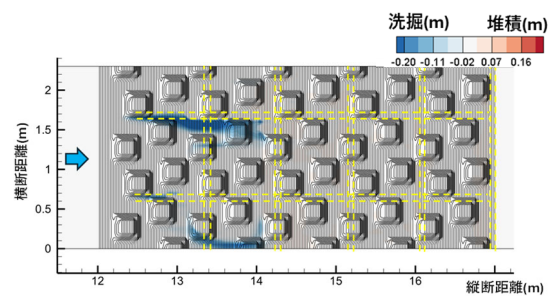


図-20 通水180分後の堤体侵食の解析結果(ガリ無し)

ブロックおよびその空隙部を割り当て、接続ブロックの鉛直厚さの空間変化に応じて最上層の格子間隔を12~22cmと設定した。吸出し防止シート内の格子については、吸出し防止シート厚を等分割で6分割し、鉛直方向の格子間隔は0.16cmとした。最下層の格子には堤体土表面を割り当て、鉛直方向の格子間隔は初期のガリの深さと一致させて5cmとし、堤防裏法部の侵食の進行に伴い鉛直方向の格子間隔が拡大するようにしている。

解析における接続ブロックの継ぎ目は幅方向に2メッシュで評価することとし、該当するメッシュにおいてブロックの占有率を設定することで継ぎ目の空隙を評価した。また、水路側壁とブロックの隙間からも水が進入していたため、同様に評価した。堤体表面のガリについても幅方向に2メッシュで評価し、該当メッシュの堤体土の占有率を設定することにより評価した。

実験の堤体材料の代表粒径は0.8mmである。シートの占有率 c_2 、透過係数 K_1 は3章と同様とした。侵食限界流速 u_c と侵食速度係数 β は、既往文献⁷⁾を参考として実験値を再現するように $u_c=0.3(\text{m/s})$ 、 $\beta=0.00024$ とした。

(3) 初期堤体にガリ(溝)が設置された場合における流れ場とそれに伴う堤体侵食の解析結果

図-8は水位縦断分布の計測値と解析結果の比較を示し、解析結果は観測された水位縦断分布よりもやや低めに計

算されているものの、実測値をほぼ説明している。

図-9は、堤体変形がそれほど生じていない通水15分後の接続ブロック表面における斜面沿いの流速ベクトルを示しており、接続ブロック表面では接続ブロックの継ぎ目付近で高速流が生じている。図-10は通水15分後の接続ブロック間の隙間から吸出し防止シートへ流入・流出する鉛直流速のコンター図を示し、鉛直上向き流速を正としている。図より、堤防裏法上流付近では、接続ブロック間の隙間から吸出し防止シート内に流れが進入し、進入した水は堤防裏法下流付近で接続ブロック間の隙間から接続ブロック表面に流出していることが分かる。図-11は通水15分後における吸出し防止シートの最下層の流速を示し、図-12は同時刻の堤体表面およびガリ内の流速の解析結果を示す。解析結果より、図中の黄色破線で示す接続ブロックの継ぎ目と同じ位置の左右側のガリに水が集中し、その付近の吸出し防止シート内の流速も大きくなっている。図-13は、同時刻の接続ブロック下面に作用する圧力水頭分布を示す。ガリに集中した流れは法尻部で行き止まりとなり、その付近の圧力を上昇させ、その結果、前述の様に鉛直上向き流速が生じている。

図-14は通水60分後における堤防裏法部の侵食の実測値を示し、図-15は同時刻の堤防裏法部の侵食の解析結果、図-16は同時刻の堤体表面及びガリ内の流速の解析結果を示す。通水60分後の実測・解析結果より、左岸側壁際から水が進入し、それに伴い堤体左岸側および裏法中流部付近から侵食が発達し、侵食された土砂が法尻付近に堆積している。図-17より、実験では通水60分後に法尻付近で接続ブロックの変形が生じている。この変形は、上記の結果より、土砂がガリを含む法尻付近に堆積し堤体変形が生じたこと、法尻付近の土砂堆積によって、初期のガリに比べて水みちが縮小しブロック下面の圧力が上昇したことが影響したものと考えられる。

(4) 初期堤体にガリ（溝）が無い場合における流れ場とそれに伴う堤体侵食の解析結果

図-18は、初期に堤体表面にガリが無い場合における通水180分後の吸出し防止シート内の最下層流速の解析結果を示す。通水180分後までは、一部で流速がやや大きくなっているが、吸出し防止シート最下層の流速は全体的に0.2m/s～0.3m/s程度に抑制されている。ここで、本実験では水路側壁際から水が浸透しないように対策が行われたため、解析においても水路側壁際からの水の浸透は無いものとした。図-19は実験結果における通水180分後の堤体侵食を示し、図-20は解析結果における通水180分後の堤体侵食を示す。解析結果は実験結果と同様に、法肩部から2段目と3段目のブロックの継ぎ目付近で最大10～20cmの洗掘が生じているが、堤体初期にガリが無い場合には、越流水が3時間継続してもほぼ堤体形状を維持していることが分かる。

6. 結論

本研究は、2つの主な結論から成る。第1は準三次元解析法の枠組みで空気混入を伴う接続ブロック上の流れと吸出し防止シート内部とその下の流れ、それに伴う堤防裏法部の侵食を算定可能な解析法を構築した。

第2は、本解析法を国総研で実施された接続ブロックと吸出し防止シートの両方が設置され、かつ、初期の堤体表面にガリ侵食がある場合と無い場合の実験に適用し、解析法を検証・検討した。その結果、初期の堤体表面にガリがある場合、ガリ付近に流れが集中し、その付近で洗掘を生じさせ、洗掘した土砂は法尻付近に堆積し、堤体変形を引き起した。また、法尻付近に土砂が堆積したことにより、初期のガリに比べて水みちが縮小したため、その付近のブロック下面の圧力が上昇した。これらが接続ブロックの変形を引き起こしたのと考えられる。一方、ガリが無い場合、本研究が対象とした条件で通水3時間までは、堤体表面の流速は概ね一様に0.3m/sで抑えられ、堤体変形は殆ど生じなかった。

今後、洪水流の3次元エネルギー分布³⁾に基づき、堤防裏法部の侵食対策が必要な箇所を選定する。そして、その場の流れやエネルギー条件や堤体調査に基づく空隙分布を与え、本解析法に基づく表面被覆型対策工の設計検討を行い、現地河川に適用することを考えている。

謝辞：本研究は、令和5年度採択 国土交通省河川砂防技術研究開発制度河川技術・流域管理分野の助成を受けた。また、国総研河川研究室より、実験データを提供頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 福島雅紀，笹岡信吾，田端幸輔：越水による河川堤防の壊れ方に関する考察，河川技術論文集，第28巻，pp.85-90，2022。
- 2) 国土交通省：河川堤防の強化に関する技術検討会資料，2022。
- 3) 福岡捷二，加藤宏季：超過洪水流の時空間三次元エネルギー分布に基づく河道計画・設計法，河川技術論文集，第30巻，pp.411-416，2024。
- 4) 竹村吉晴，福岡捷二：波状跳水・完全跳水及びその減勢区間における境界面（水面・底面）上の流れの方程式を用いた非静水圧準三次元解析（Q3D-FEBS），土木学会論文集B1（水工学），Vol.75，No.1，pp.61-80，2019。
- 5) N. Rajaratnam：Hydraulic Jumps, Advances in Hydrosience, Vol.4, pp.197-280, 1967。
- 6) 諏訪義雄：三木ら(1996)大型実験結果の再整理から見出された砂粒子のパイピング応答状態，河川技術論文集，第27巻，pp.181-186，2021。
- 7) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法：治水と環境の調和した川づくり，森北出版，2005。

(2025. 4. 3受付)