

# 降雨による河川堤防の法面すべりに与える植生根茎の影響に関する数値解析

Numerical Analysis for the Influence of Vegetation Rhizome on the Slope Slips of River Levees by Rainfall

下川 大介<sup>1)</sup>, 森 啓年<sup>2)</sup>

1) Daisuke SHIMOKAWA, 博士後期課程, 山口大学大学院創成科学研究科, b004wd@yamaguchi-u.ac.jp

2) Hiroto MORI, 准教授, 山口大学大学院創成科学研究科, mori@yamaguchi-u.ac.jp

近年, 降雨のみによる河川堤防の深い法面すべりが発生している。本研究では, 河川堤防法面の降雨のみによる深い法面すべりの発生メカニズムを解明し, 評価を可能にすることを目的として, 模型実験結果を対象に浸透流解析, 円弧すべり解析および変形量解析 (SPH 法) を行った。その結果, 従来の円弧すべり解析では降雨による河川堤防のすべりに対する安定性を植生根茎も含めて評価することは困難であることが示唆された。一方, SPH 法を用いることで, その影響を概ね再現することが確認できた。

キーワード: 河川堤防, 法面, 模型実験, 数値解析, 粒子法 (IGC: E-02, E-06, E-14)

## 1. はじめに

### 1.1 背景

2015 年 8 月の台風 15 号に伴う降雨により, 筑後川の河川堤防では天端法肩からの深いすべりが図-1 に示すように川表面に発生した<sup>1)</sup>。この原因として堤防天端のアスファルト舗装 (以下, 「天端舗装」) の排水不良により, 縦断方向からも雨水排水が法面すべりの発生箇所集中して流入したためと考えられている。佐古ら<sup>2)</sup>によると, 降雨のみにより法面すべりが発生した箇所は国が管理する河川堤防で過去 10 年間に 20 事例あり, そのうち 16 事例で天端舗装が整備されていた。天端舗装からの雨水排水が法面に流入し, 被災した可能性が示唆されている。

このような降雨のみによる河川堤防の法面すべりが発生している要因の一つとして, 近年全国各地で短時間での集中豪雨が多発していることが挙げられる。近年全国各地で短時間での集中豪雨が多発していることから, このような被災はどこかの河川堤防でも発生する可能性がある。図-2 に示す通り, 最近 10 年間の 1 時間降水量 50mm 以上の年間発生回数は, 統計期間の最初の 10 年間の平均年間発生回数と比べて近年は約 1.5 倍に増加していることが分かる<sup>3)</sup>。

他の要因として, 兼用道路としての利用といった社会的要請や維持管理, 雨水の浸透抑制, 決壊までの時間を引き延ばす等を目的として天端舗装を実施している区間が増えていることが考えられる。しかし, 道路盛土と異なり, 河川堤防は天端舗装の排水施設は設置されていない場合が多い。その理由として, アスカーブや排水溝等により維持管理や水防活動に支障をきたす可能性があることが挙げられる。

以上から, 河川堤防法面の降雨のみによる深い法面す



図-1 被災状況(筑後川, 2015 年 8 月)

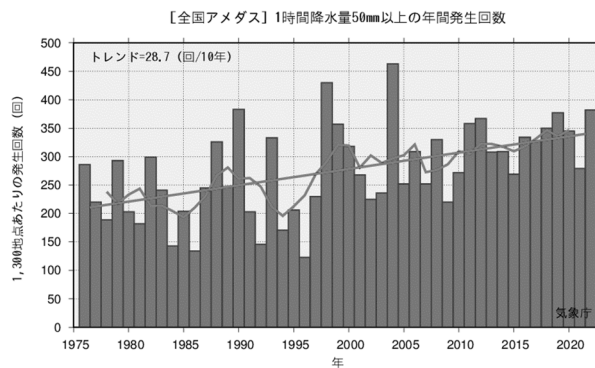


図-2 1 時間降水量 50mm 以上の年間発生回数<sup>3)</sup>

べりの発生メカニズムを解明し, 評価を可能にすることが求められている。

### 1.2 目的

本研究は, 中川ら<sup>4)</sup>が実施した法面すべりに対する植生の影響に関する既往実験結果を数値解析により再現し, 降雨による河川堤防の法面すべりに対する植生根茎の影響を評価することを目的としている。

具体的に, 降雨および堤防天端からの排水集中を与え

表-1 実験ケース

実験の種類	ケース番号	被覆土層厚 (mm)	根茎量 (g/cm <sup>2</sup> )
根茎の量による影響 (実験A)	A-0	0	0
	A-1	15	4.52×10 <sup>-4</sup>
	A-2	15	9.04×10 <sup>-4</sup>
	A-3	15	1.36×10 <sup>-3</sup>
根茎の深さによる影響 (実験B)	B-1	30	4.52×10 <sup>-4</sup>
	B-2	30	9.04×10 <sup>-4</sup>
	B-3	30	1.36×10 <sup>-3</sup>

た際の堤体の変形状況について把握した模型実験の結果を、一般的に河川堤防で用いられる浸透流解析と円弧すべり解析、さらに土構造物の変形も再現できる粒子法の一つである SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法によって再現を試みた。

### 1.3 既往研究

山村ら<sup>5)</sup>は、河川堤防の大型模型を用いて、降雨による堤防の飽和度の変化を計測している。その結果、上部から順に飽和していくのではなく、下部からの浸潤線が上昇する形であることを示している。近年では、齊藤ら<sup>6)</sup>により矢田川及び庄内川の河川堤防に人工的に降雨を与え水分量の変化を計測した事例や、秋葉ら<sup>7)</sup>により浸透流解析や円弧すべり解析を用いた大型模型実験の降雨浸透に伴う浸潤線上昇や法面すべりの再現解析などの研究が実施されている。変形量解析としては、MPM 法や SPH 法などの粒子法を地盤工学の分野において適用に関する研究が進められ、例えば中村ら<sup>8)</sup>、Bui ら<sup>9)</sup>、野々山ら<sup>10)</sup>による斜面崩壊の解析、坂井ら<sup>11)</sup>による河川堤防のパイピング現象の解析を実施した結果などが報告されている。さらに、洪水時の河川堤防の法面すべりに関する進行性破壊についても、森らが SPH 法の適用を試みている<sup>12)</sup>。

一方、実務に目を向けると、河川堤防の法面すべりは、降雨のみによる被災は考慮せず、降雨と河川水位との組み合わせでこれまで安全性評価がなされてきた<sup>13)</sup>。その理由として、一般的に降雨による法面すべりはいわゆる無限斜面の安定計算により評価され、河川堤防においては原理的に浅いすべりとなり、直ちに堤防決壊に結びつく現象ではないと考えられていたことが挙げられる。しかし、前述の筑後川の被災にみられるように、現場状況によっては深い法面すべりが発生する可能性もあることが明らかになってきた。

## 2. 既往実験結果

### 2.1 実験概要

森ら<sup>14)</sup>は、降雨のみを与えた場合と降雨に加えて排水集中の量を変化させることによるすべりへの影響を明らかにした。この研究より、降雨のみでは、深いすべりが

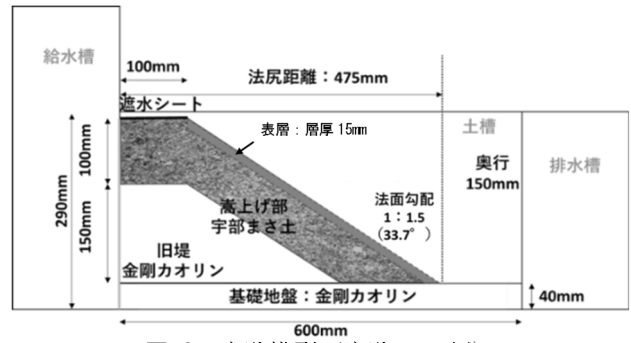


図-3 実験模型 (実験 A の例)

発生する可能性が低く、排水集中が加わることで深いすべりが発生しやすくなることが明らかになった。しかし、これは現地の堤防が有している植生の根茎を考慮していない。そこで、中川ら<sup>4)</sup>は堤防法面への排水集中に対する植生の根茎の効果について、根茎の量と層厚に着目し、実験を行っている。以下に、本論文で再現の対象となる代表的な実験結果の概要を示す。

### 2.2 実験条件

表-1 に実験ケースの一覧を示す。本研究は実験 A 及び実験 B の 2 つの実験から構成されている。実験 A では根茎の量によるすべりへの影響を観察し、実験 B では実験 A との比較より根茎の深さの違いによるすべりへの影響をそれぞれ観察した。

本研究に用いた実験模型の横断面図を図-3 に示す。実験模型は堤高 5.0m の河川堤防の縮尺 1/20 を想定して作製した。実験模型は、筑後川の被災箇所を参考に、旧堤 (粘性土:カオリン粘土) が中心に存在する堤体 (砂質土:宇部まさ土) に、堤体の法面に表層 (宇部まさ土に綿糸を混合したもの) を覆っている。模型は、半断面 (堤高 250mm, 天端幅 100mm, 法勾配 1:1.5, 奥行き 150mm, 締固め度 78.5%) で作製した。また、天端舗装を模擬し、遮水シートを設置した。表層厚は、実験 A で 15mm, 実験 B で 30mm とした。実際の堤防における植生は、実験において再現するのは困難であるため、実験で使用したまさ土と馴染みが良く、実験模型が作製しやすい材料として一般的な径 0.2mm の綿糸を宇部まさ土に混合して用いた。

外力条件は 72mm/hr の非常に激しい雨相当の降雨を 120 分間、実験模型に作用させた。この外力条件は、筑後川での被災事例では時間雨量最大値が 73mm, 2 時間総雨量が約 140mm であったことからこの降雨量に設定した。その後、120 分間降雨を与えた実験模型に天端からの排水不良に見立てた排水集中を 60 分間行った (堤防天端から降雨量の 20 倍相当の水を供給)。なお、排水集中実施中も 72mm/hr の降雨は継続した。

### 2.3 土質条件

本研究で用いた各種土質試験結果を表-2 に示す。宇部まさ土及び綿糸を混入させた土の土質試験に関しては、土の粒度試験 (JIS A 1210, A-b 法)、土の透水係数 (JIS A

表-2 土質試験結果

試料名		宇部 まさ土	金剛 カオリン
施工時含水比	$w$ (%)	10	30
最適含水比	$w_{opt}$ (%)	10.4	—
乾燥密度	$\rho_d$ (Mg/m <sup>3</sup> )	1.551	1.438
最大乾燥密度	$\rho_{dmax}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	1.975	—
縮固め度	$D_c$ (%)	78.5	—
透水係数	$k$ (m/s)	$6.60 \times 10^{-5}$	$1.00 \times 10^{-8}$
粘着力	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	0.2	—
せん断摩擦角	$\phi'$ (°)	29.6	—

表-3 根茎の変化による土質試験結果

	根茎量 (g/cm <sup>3</sup> )		
	0	$1.121 \times 10^{-3}$	$2.241 \times 10^{-3}$
透水係数 $k$ (m/s)	$6.6 \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-4}$	$2.1 \times 10^{-4}$
粘着力 $c'$ (kPa)	0.2	0.5	0.8
せん断摩擦角 $\phi'$ (°)	29.6	32.7	34.8

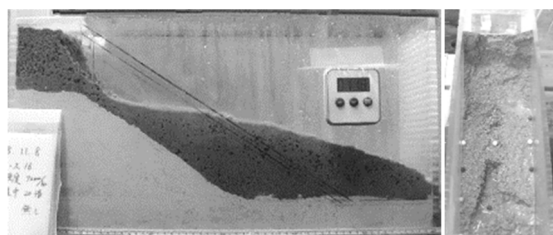
1218, 定水位), 土の三軸圧縮試験(JGS0523, CUB 試験)を実施した. また, 透水試験と三軸圧縮試験の供試体の乾燥密度は, 模型実験の乾燥密度と同値とした. なお, カオリン粘土の透水係数については, 河川堤防の構造検討の手引き<sup>13)</sup>の値を用いた. なお, 根茎量は単位体積当たりの表層に混入させた綿糸の重量で示した. 根茎量を変化させた土質試験結果を表-3に示す. ここでは, 根茎量の違いによる強度変化を明瞭にするため, 模型実験にて崩壊が生じる範囲で混入量を変化させ実験を行った. 模型実験における各パラメータについては模型実験用に配合した試料の根茎量を測定し, 土質試験結果に内挿して算出した. 根茎の混入によりせん断抵抗が大きくなり強度が増加する傾向を示す. また, 透水性についても土粒子と根茎の間に隙間が生じやすく若干ではあるが大きくなる傾向を示す.

## 2.4 実験結果

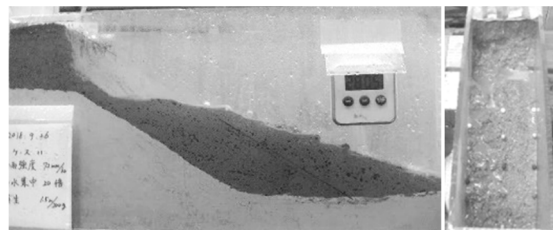
図-4に実験終了時の法面状況の写真を示し, 図-5, 図-6に実験A, 実験Bそれぞれのすべり破壊の進行状況(連続写真)を示す. 実験Aでは, まず, 細粒分の流出や法面のガリー侵食が発生し, その後, 法面すべりに発展する傾向がみられた. また, A-2, A-3については, ガリー侵食が確認されたものの, 法面すべりには至らなかった. また, 根茎密度が大きくな細粒分の流出までの時間が遅くなる傾向が確認された.

実験Bでは, 法面からの細粒分の流出, ガリー侵食等は確認されず, 法面すべりが発生した. 法面すべりは法尻に近いところで発生し, 徐々に法肩まで拡大して破壊する傾向がみられる. また, すべり発生までの時間は根茎密度が大きいほど遅く, 根茎密度が大きいほどすべり深さは大きくなる傾向がみられた.

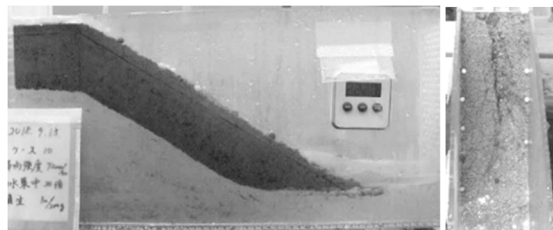
また, 実験Aと実験Bを比較すると, 根茎深さが深い



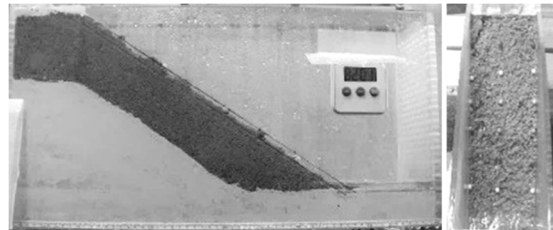
(実験 A-0 (根茎なし))



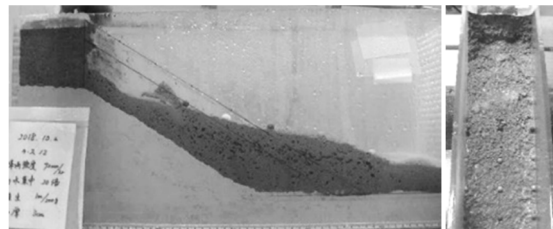
(実験 A-1)



(実験 A-2)



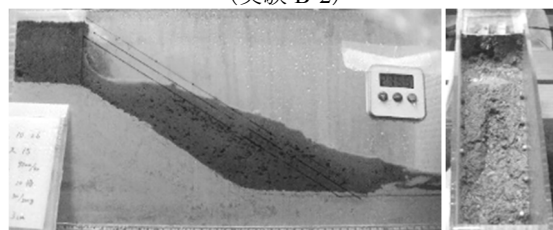
(実験 A-3)



(実験 B-1)



(実験 B-2)



(実験 B-3)

図-4 実験終了時の法面状況



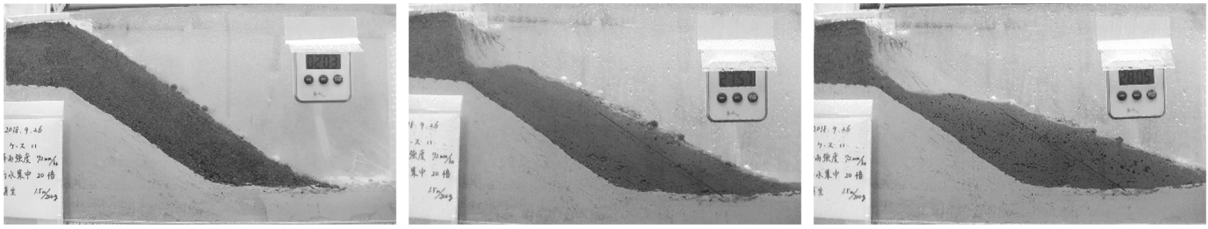


図-5 実験 A の典型的なすべり

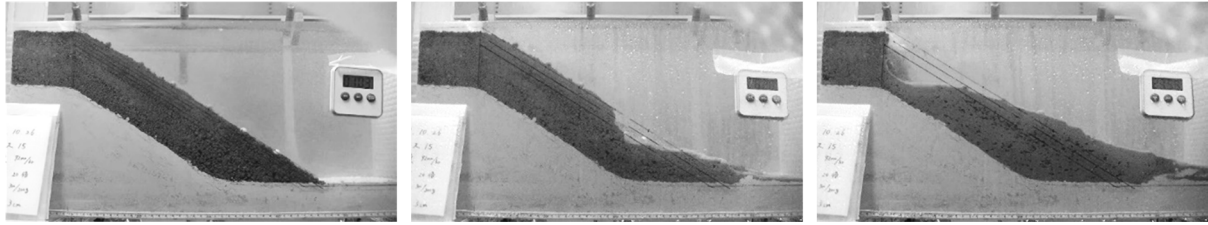


図-6 実験 B の典型的なすべり

場合、細粒分の流出等が抑えられることがわかった。しかし、根茎が深いほど、法面すべりが発生しやすく、最終的に変状が発生する範囲は根茎深さが深いほど大きくなる傾向がみられた。

以上の結果より、①根茎の密度が大きいほど土のせん断強度が増加しすべりが発生しにくくなること、②根茎の深さが大きいほどすべり土塊の重量が増加し深いすべりが発生しやすくなることがわかった。

### 3. 解析方法

#### 3.1 解析概要

本研究では、前述の模型実験結果の再現解析を行った。まず、「浸透流解析」により、降雨による河川堤防の浸潤線と間隙水圧の上昇を再現した。次に、得られた浸透流解析結果の浸潤線により発生する静水圧を外力として用いて「円弧すべり解析」を実施した。さらに、浸透流解析結果のマトリックサクションを含めた間隙水圧分布を外力として用いて、法面すべりの規模を計算する「変形量解析 (SPH 法)」を実施した。

#### 3.2 浸透流解析

浸透流解析では、西垣ら<sup>15)</sup>による Dtransu-2D・EL を用いて、非定常飽和不飽和浸透流解析を行い、平面ひずみ条件で解析を行った。なお、非定常の飽和不飽和浸透の基本式は式(1)のとおりである。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial \phi}{\partial z} + k \right) = (C + \alpha \cdot S_s) \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1)$$

ただし、 $x$  は堤防横断面の水平方向、 $z$  は鉛直方向を示しており、 $k$  は透水係数、 $\phi$  は圧力水頭、 $C$  は比水分容量、 $\alpha$  は 1 の場合は飽和領域、0 の場合は不飽和領域、 $S_s$  は比貯留係数、 $t$  は時間を表している。

#### 3.3 円弧すべり解析

河川堤防の安全性照査や設計に用いられる一般的な方法<sup>13)</sup>であり、式(2)に示す修正フェレニウス法によってすべりに対する最小安全率を算出した。最小安全率が 1.0 未満の場合、すべりが発生したと判断した。

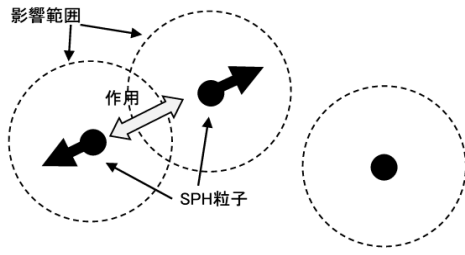
$$F_s = \frac{\sum \{cl + (W - ub) \cos \alpha \tan \phi\}}{W \sin \alpha} \quad (2)$$

ただし、 $F_s$  は安全率、 $u$  はすべり面の間隙水圧、 $W$  は分割片の重量、 $c$  はすべり面に沿う土の粘着力、 $l$  は円弧の長さ、 $\phi$  はすべり面に沿う土の内部摩擦角、 $b$  は分割片の幅、 $\alpha$  はすべり面の傾斜を表している。

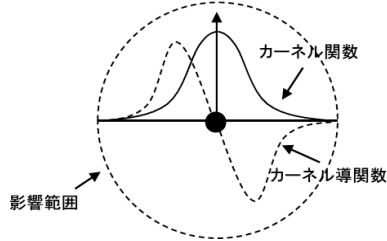
#### 3.4 変形量解析 (SPH 法)

本論文では、変形量解析として森らが作成した SPH 法<sup>16),17)</sup>のコードを用いて解析を行った。森らは、連続体力学に拡張した理論式<sup>18)</sup>に、分子動力学解析ソルバー LAMMPS<sup>19)</sup>を用いた解析を開発している。なお、材料の密度差に起因する数値振動を抑制するため Solenthaler ら<sup>20)</sup>が提案する手法をあわせて用いている。

SPH 法は一定の質量を持った粒子(以下、「SPH 粒子」)を構成要素としている。図-7 のようにそれぞれの SPH 粒子はその「影響範囲」を持ち、重み付け関数の一種である「カーネル関数」と「カーネル導関数」を用いて相互作用を計算している。これらのカーネル関数とカーネル導関数を用いて、自らと影響範囲内の SPH 粒子のもつ応力、位置情報等の状態変数を計算し、計算が行われる。飽和領域、不飽和領域の SPH 粒子の運動方程式は、間隙水圧及びマトリックサクションを考慮し、式(3)のように示すことができる。



(a) SPH 粒子と影響範囲



(b) カーネル関数とカーネル導関数

図-7 SPH 法の概念図

$$\begin{aligned} \frac{dv_{\alpha,i}}{dt} = & m_i \sum_{j=1}^N \left\{ \left( \frac{\sigma_{\alpha,i}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_{\alpha,j}}{\rho_j^2} \right) \nabla W_{ij,\alpha} \right. \\ & + \left( \frac{\tau_{\alpha\beta,i}}{\rho_i^2} + \frac{\tau_{\alpha\beta,j}}{\rho_j^2} \right) \nabla W_{ij,\beta} \\ & \left. + \left( \frac{\tau_{\alpha\gamma,i}}{\rho_i^2} + \frac{\tau_{\alpha\gamma,j}}{\rho_j^2} \right) \nabla W_{ij,\gamma} \right\} \\ & + F_{\alpha} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、飽和領域では

$$\sigma_{\alpha,i} = p_i + \sigma'_{\alpha,i} \quad (4)$$

であり、不飽和領域では

$$\sigma_{\alpha,i} = -S_r p_{sc,i} + \sigma'_{\alpha,i} \quad (5)$$

なお、 $v_{\alpha}$ は速度ベクトル  $v$  の  $\alpha$  方向成分、 $N$ は影響範囲にある SPH 粒子の数、 $m$ は質量、 $\rho$ は密度、 $p$ は間隙水圧、 $S_r$ は飽和度、 $p_{sc}$ はマトリックサクシオン、 $\sigma'_a$ は有効応力  $\sigma$  の方向成分、 $\tau_{\alpha\beta}$ はせん断力  $\tau$  の  $\alpha\beta$  方向成分、 $\nabla W_{ij,\alpha}$ は SPH 粒子  $i$  及び  $j$  間のカーネル導関数の  $\alpha$  方向成分、 $F$ は外力の  $\alpha$  方向成分を示している。なお、下添え字の  $i$  及び  $j$  は SPH 粒子を示しており、 $\alpha$  と同様に  $\beta$  および  $\gamma$  は方向成分を示している。なお、SPH 法の地盤工学への適用に関する詳細な導出過程については、既往の論文<sup>12)</sup>を参考にして頂きたい。

次に SPH 法の土水連成は、本来であれば Biot の法則にもとづき土の体積変化を間隙水圧にも反映させる完全な土水連成を実現することが望ましい。しかし、土の体積変化をそのまま水の状態方程式に反映させると、動的解析である SPH 法では過剰な間隙水圧が発生し、解析モデルが過敏な挙動を示す。

その問題を解決するために、モデルへのダンパーの導

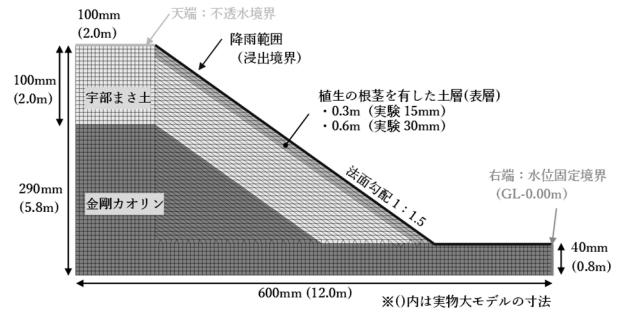


図-8 浸透流解析モデル

入や土の体積変化を間隙水圧に反映させない方法が考えられる。本論文では、過剰なダンパーの使用による解析モデルの挙動が鈍くなる副作用を避けるため後者の方法を取り、土の SPH 粒子に間隙水圧とマトリックサクシオンの情報を持たせることにより、簡易な土水連成を提案している。前節の浸透流解析の結果を用いて、その間隙水圧とマトリックサクシオンの分布をもとに河川堤防の変形モードを計算している。なお、浸透流解析の結果については、任意のステップの間隙水圧とマトリックサクシオンの分布を用い、SPH 粒子の位置に応じて 100 ステップ毎（今回の解析では約 0.04 秒毎）に更新している。設定した初期ステップ以降については、粒子の移動した位置に対応した浸透流解析の間隙水圧になる。

## 4. 解析結果

### 4.1 解析条件

浸透流解析の解析モデルを図-8に示す。一つ目のスケールは既往模型実験と同様とし、メッシュは基本的に一辺 10mm の正方形とした。ただし、法面に関しては浸透水の流れを考慮し、法面に平行にメッシュを切ったため、15mm×10mm の平行四辺形とした。もう一つの解析モデルのスケールについては、後述の通り、模型実験の解析では粘着力に非常に敏感であるため、解析のスケール効果の検討を行うことを目的とし、実物大の河川堤防を想定した解析を実施した。実物大の解析モデルは既往実験模型の 20 倍とした。メッシュの形状は変えず、大きさを 20 倍とした。また、不飽和浸透特性についてもスケール効果の影響が想定されるため、浸透流解析もそれぞれのスケールで実施した。宇部まさ土の法面を降雨対象および浸出境界とし、基礎地盤表層に水頭固定の条件を与えた。天端舗装を再現するため、天端には降雨浸透がないものとした。

初期水頭は、基礎地盤と同じ 40mm とした。所定の降雨を法面に与えることで外力を設定した。なお、設定した降雨量は 72mm/hr を 120 分間与えた後に、実験におけ

表-4 土質定数一覧

材料名	金剛	綿糸	綿糸	綿糸
	カオリン	混入なし	混入小	混入大
根茎密度	—	根茎なし	小	大
湿潤密度 $\rho_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	14.4	16.7	16.7	16.7
飽和密度 $\rho_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	15.4	17.7	17.7	17.7
不飽和浸透特性	[C]	[S]	[S]	[S]
綿糸混入量 (g/cm <sup>3</sup> )	0	0	1.12×10 <sup>-3</sup>	2.24×10 <sup>-3</sup>
粘着力 $c'$ (kPa)	模型実験	10.0	0.2	0.5
	実物大	10.0	0.2	5.0
せん断抵抗角 $\phi'$ (°)	模型実験	0.0	29.6	32.7
	実物大	0.0	29.6	29.6
透水係数 $k$ (m/s)	1.0×10 <sup>-8</sup>	6.6×10 <sup>-5</sup>	1.1×10 <sup>-4</sup>	2.1×10 <sup>-4</sup>

※不飽和浸透特性[C]:粘性土、[S]:砂質土

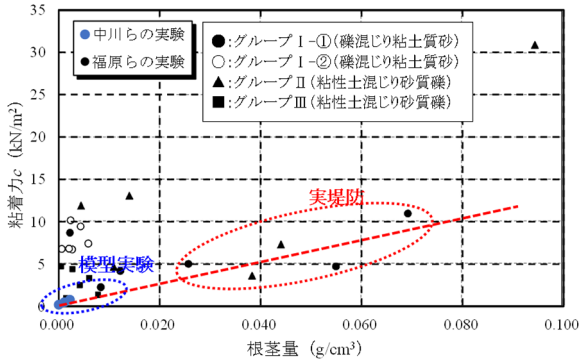


図-9 粘着力の比較図

る排水集中相当の換算降雨量を与えた。実物大の解析についてはスケール効果を考慮し、降雨を与える時間を20倍とした。

解析ケースは降雨すべりに関する既往の模型実験と同等の表層の厚さを15mm(実物大300mm相当、芝の標準的な根茎の深さを想定)と30mm(実物大600mm相当、在来種の侵入した状況を想定)の2通りのモデルを用いた。なお、根茎密度は3水準(根茎なし、根茎密度小、根茎密度大)に変化させて解析を行った。

#### 4.2 土質定数

設定した土質定数の一覧を表-4に示す。既往の模型実験結果で用いた宇部まき土については、綿糸の混入量(=根茎密度)に応じて、三軸圧縮試験(CUB条件)及び定水位透水試験を行った。不飽和浸透特性については、「河川堤防の構造検討の手引き(改訂版)」<sup>15)</sup>のものを使用している。

粘着力 $c$ については、スケール効果の影響が大きく、模型実験と実物大の解析で異なる値を採用した。模型実験では、根茎量の密度と深さの変化が法面の崩壊に及ぼ

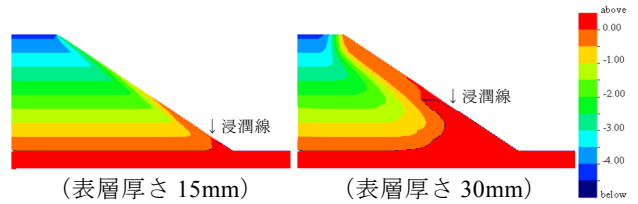


図-10 浸透流解析結果(模型実験)

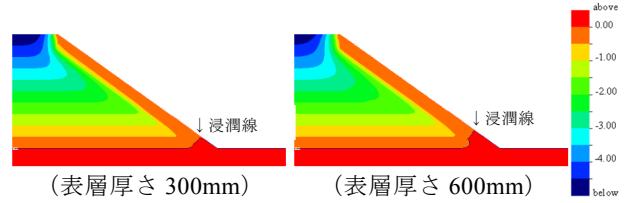


図-11 浸透流解析結果(実物大)

す影響を検討するため、根茎量は模型実験にて崩壊が生じる量に調整した。実物大の解析に用いる粘着力については、福原<sup>21)</sup>が実際の植生の根茎に対して土質試験を行った結果を参考に設定した。図-9に実際の堤防における根茎量と粘着力の関係を示す。福原によると根茎量が0.010g/cm<sup>3</sup>以内の範囲では根茎量と根茎による強度増加に傾向は確認されていないとされているため、根茎量が0.010g/cm<sup>3</sup>以上を対象とした。実際の植生の根茎の土質試験結果に綿糸を用いた実験結果を重ねると、ばらつきはあるものの相関がみられた。そこで、本研究では、模型実験の再現においては綿糸を用いた実験の結果を用い、実物大の解析については実際の植生の根茎の実験結果をもとに $c=5.0\text{kN/m}^2$ (根茎密度小)、 $10.0\text{kN/m}^2$ (根茎密度大)とした。せん断抵抗角については、表層付近のすべり破壊の検討するため、土被り圧が小さく密度が緩い状態と仮定し、模型実験と同様の $\phi=29.6^\circ$ を用いた。

#### 4.3 浸透流解析結果

図-10に模型実験の浸透流解析結果、図-11に実物大の浸透流解析結果を示す。法面安定に影響する法尻付近の水位が上昇し始めた実験開始後30分(実物大600分)の降雨に対する浸潤線及び圧力分布を示す。模型実験における浸潤線を測定できていないため、解析結果については定性的な傾向を把握したものになる。表層部は堤体部よりやや透水性が良いため、表層部を流下する水量が多いため、浸潤線は法尻部より上昇していることがわかる。しかし、堤体全体の透水性がよいため、表層全体に水が溜まる前に、堤体および基礎地盤に排水され、浸潤線の上昇量は大きくないことがわかる。また、外力として降雨のみを与えているため、堤体に比べ、表層付近の圧力水頭が大きくなっていることがわかる。また、模型実験と実物大の解析を比較すると、模型実験の方が表層部の浸潤線が上昇する範囲が大きく、不飽和浸透特性のスケ



ール効果の影響を受けているものと推測される。

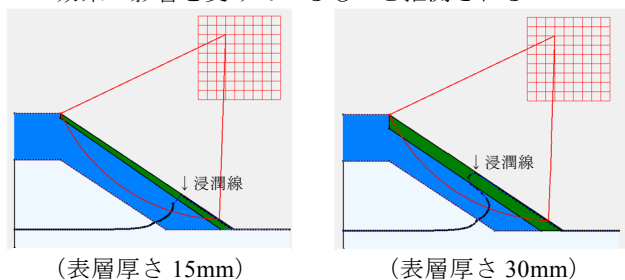


図-12 円弧すべり解析結果 (模型実験)

表-5 円弧すべり解析結果 (模型実験)

表層厚さ	根茎なし	根茎密度小	根茎密度大
15mm	1.49	1.60	1.70
実験状況*	すべりあり	すべりあり	すべりなし
30mm	1.43	1.69	1.95
実験状況*	すべりあり	すべりあり	すべりあり

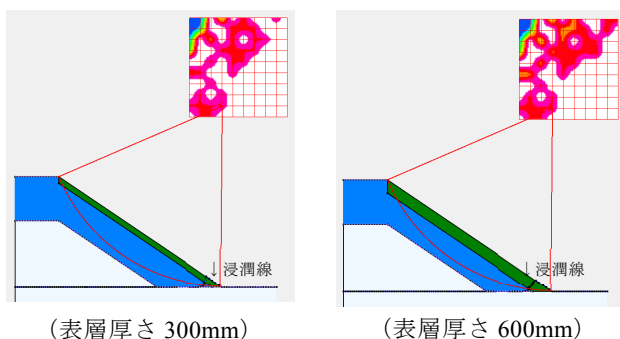


図-13 円弧すべり解析結果 (実物大)

表-6 円弧すべり解析結果 (実物大)

表層厚さ	根茎なし	根茎密度小	根茎密度大
300mm	0.92	1.03	1.10
600mm	0.92	1.10	1.26

#### 4.4 円弧すべり結果

浸透流解析で求めた実験開始後 30 分の浸潤線を用いて、解析を実施した。図-12、表-5 に模型実験の円弧すべり解析の結果、図-13、表-6 に実物大の円弧すべり解析の結果を示す。

解析結果より、模型実験、実物大の解析ともに根茎密度が大きくなるに従い安全率が大きくなる傾向がみられ、解析においても根茎密度の影響は概ね再現できている。

一方、根茎が深いほど安全率が大きくなり、模型実験の結果とは逆の結果となった。模型実験では土塊の重量が増加し深いすべりが発生しやすくなるのに対し、円弧すべり解析では、表層の厚さが大きい場合ほど、せん断抵抗の大きな範囲をより多く円弧内に含むことで抵抗力がより大きくなる影響の方が強いと考えられる。また、解析モデルのスケールを実物大にした場合も同様の結果が得られた。

さらに、円弧すべり解析より得られた安全率に着目すると、模型実験の解析結果は、安全率が高く算出される傾向がみられ、安全率 ( $F_s=1.0$ ) を閾値としてすべりの

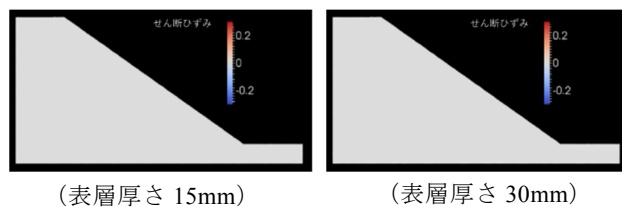


図-14 SPH解析結果 (模型実験)

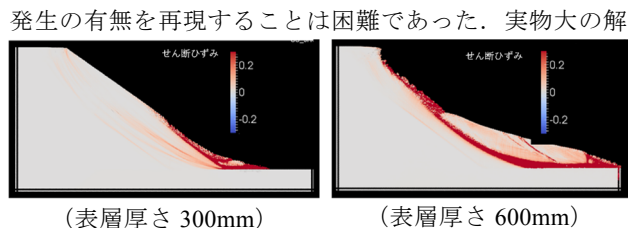


図-15 SPH解析結果 (根茎なし, 実物大)

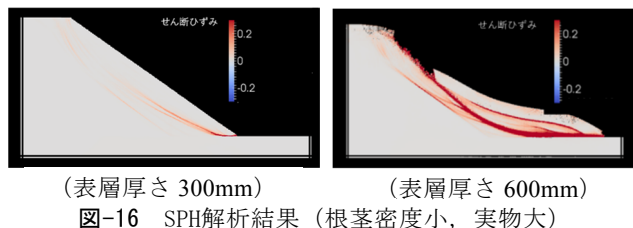


図-16 SPH解析結果 (根茎密度小, 実物大)

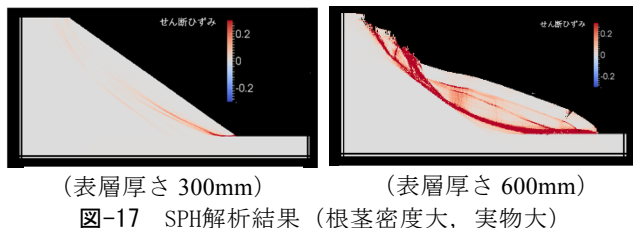


図-17 SPH解析結果 (根茎密度大, 実物大)

析では、粘着力を模型実験より大きくしたにも関わらず、安全率が低くなった。これは解析モデルのスケールが小さく、粘着力の影響が過大に出ており、安全率が大きくなっているものと推測される。

これらの結果より、円弧すべり解析では、植生の根茎の深さによる影響の再現に限界がある可能性があることが確認された。

#### 4.5 SPH 法による解析結果

図-14 に SPH 法による小型模型実験の解析結果を示す。SPH 法では、安定解析と同様に実験開始後 30 分の浸潤線及び圧力分布を用いて解析を行った。境界条件として、モデル左右端にすべり境界、底面に固定境界を設定した。境界には仮想粒子を配置し、境界処理に起因するひずみや応力が発生しないようにした。SPH 法の解析では安全率を算出することはできないため、変形とせん断ひずみの分布を示す。

模型実験の解析では、すべてのケースにてすべりは発生しない結果となった。SPH 法の解析ですべりが発生しなかった理由として、解析モデルのスケールが小さく、粘着力の影響が過大に出ているものと推測される。今後、SPH 法を用いて模型実験サイズの解析を行うためには、各パラメータのスケール効果による影響を検証し、補正を行う必要があると考える。

次に実物大の解析モデルを用いた SPH 法の解析結果を図-15~17 に示す。図より、堤体内の浸潤線が法尻の一部に存在する場合、表層部に変形が発生した。そこから、根茎の層厚の違いによって堤防の変形のモードが異なる結果となった。層厚が小さい場合は法尻部に小さなすべりが発生するに留まり、層厚が大きな場合（土塊重量が大きくなる場合）はより深いすべりとなった。また、根茎密度が大きい場合（着力  $c$  が増加した場合）において、表層厚が小さい方が法面の変形量が小さくなることが確認された。

これらからの結果から、SPH 法では円弧すべり法の解析と異なり、根茎深さの影響を比較的良好に再現できることが示唆された。ただし、今回の検討においては実際の法面の変形量等を定量的に評価したものではないため、定性的な評価を行ったものである。

## 5. まとめ

本研究では、既往の模型実験を円弧すべり解析、SPH 法を用いた解析を行った。本研究で得られた結論を以下に示す。

実験結果より、(1)根茎の密度が大きいほど土のせん断強度が増加しすべりが発生しにくくなること、(2)根茎の深さが大きいほどすべり土塊の重量が増加しすべりが発生しやすくなることが確認された。

円弧すべり解析では根茎密度が大きくなるに従い、安全率が大きくなる傾向は再現できたが、根茎深さについては、実験とは異なる傾向を示した。原因としては、円弧すべり解析では、表層の厚さが大きい場合ほど、せん断抵抗の大きな範囲（根茎を含む土層）をより多く円弧内に含み、高い安全率を示すためと考えられる。

また、解析にて算出されるせん断抵抗力は植生の根茎を含む表層の粘着力に非常に敏感であり、すべりの発生を安全率 ( $F_s=1.0$ ) で区分するのは、現状ではかなり困難であることも確認できた。

SPH法を用いた解析では、模型実験の解析では、すべりが発生しなかったが、実物大の解析では模型実験結果と同様の傾向が確認された。SPH法を用いることで、根茎密度や根茎の深さによる影響を比較的良好に再現できることが示唆された。しかし、SPH法についても粘着力に非常に敏感であり、模型実験サイズの再現については困難であることがわかった。今後、各パラメータのスケール効果による影響を検証し、補正を行う必要がある。

## 謝辞

本研究は河川基金助成事業 2019-5211-027 の助成を受けたものです。厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

1) 国土交通省九州地方整備局筑後川河川事務所：台風

15号に伴う筑後川の被害状況について 第3報、[http://www.qsr.mlit.go.jp/chikugo/newsttopics\\_files/home.pdf](http://www.qsr.mlit.go.jp/chikugo/newsttopics_files/home.pdf), (参照2023.6.19)。

- 2) 佐古俊介, 延常浩次: 河川堤防の雨水排水による被災と対応, JICE レポート, No.31, pp.8-11, 2017.
- 3) 気象庁: アメダスで見た短時間強雨発生回数の長期変化について,  
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/heavyraintrend.html>, (参照2018.10.1)。
- 4) 中川翔太・山本周平・森啓年・佐古俊介・下川大介: 植生の根茎を考慮した堤防天端からの排水集中による法面すべりに関する模型実験, 河川技術論文集, Vol.25, pp.511-516, 2019.
- 5) 山村和也, 久楽勝行: 堤防への浸透と堤体の安定性, 土木研究所報告, No.145, pp.41-71, 1974.
- 6) 齊藤啓, 前田健一, 小林剛, 李兆卿: 実堤防内の降雨浸透挙動に関する多種センサーを用いた計測結果, 第3回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム, pp.35-38, 2015.
- 7) 秋葉俊一, 東拓生, 石原雅規, 佐々木哲也: 大型模型実験の降雨・水位上昇による堤体内浸透挙動に関する検証, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集, III-098, pp.195-196, 2017.
- 8) 中村晋, 阿部慶太, 渡辺健治, 中島進: 実験による崩壊土の流下挙動と衝撃作用の分析およびMPM による再現解析, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.74, No.3, pp.259-274, 2018.
- 9) Bui, H. H., Sako, K., and Fukagawa, R: Slope stability analysis and slope failure simulation by SPH, 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009.
- 10) 野々山栄人, 沢田和秀, 森口周二, 八嶋厚, 伊藤和也: SPH法による実大規模斜面掘削実験の二次元再現解析, 地盤工学ジャーナル, Vol.27, No.4, pp.543-555, 2012.
- 11) 坂井宏隆, 前田健一: SPH 法による固・液・気相三相相互を考慮した地盤の浸透破壊解析, 第55回理論応用力学講演会講演論文集, 2006.
- 12) 森啓年, 福原直樹, 服部敦, 桑野玲子, 曾我健一, 齊藤由紀子, 佐々木哲也: 粒子法による河川堤防の進行性すべり破壊に関する解析的検討, 地盤工学ジャーナル, Vol. 9, No.4, pp.687-696, 2014.
- 13) 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),  
[http://www.jjice.or.jp/cms/kokudo/pdf/tech/material/teibou\\_kouzou02.pdf](http://www.jjice.or.jp/cms/kokudo/pdf/tech/material/teibou_kouzou02.pdf), (参照2018.10.1)。
- 14) 森啓年, 倉田大輔: 天端舗装からの雨水集中による砂質土堤防のすべりに関する模型実験, 河川技術論文集, Vol.24, pp.541-546, 2018.
- 15) 西垣誠, 菱谷智幸, 橋本学, 河野伊一郎飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流の



- 数値解析手法に関する研究, 土木学会論文集, No.511, III-30, pp.135-144, 1995.
- 16) Gingold, R., and Monaghan, J.: Smoothed particle hydrodynamics-theory and application to non-spherical stars, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.181, pp. 375-389, 1977.
- 17) Lucy, L. B.: A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, The Astronomical Journal, Vol.82, No.12, pp.1013-1024, 1977.
- 18) Gray, J., Monaghan, J., and Swift, R.: SPH elastic dynamics, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.190, No.49-50, pp.6641-6662, 2001.
- 19) Plimpton, S.: Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics, Journal of Computational Physics, Vol.117, pp.1-19, 1995.
- 20) Solenthaler, B., and Pajarola, R.: Density Contrast SPH Interfaces, ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, pp.211-218, 2008.
- 21) 福原直樹, 森啓年, 服部敦: 植生の根茎が河川堤防法面の浸透・強度特性に与える影響, 河川技術論文集, Vol.20, pp.491-496, 2014.

(2023年6月19日 受付)