

# 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

MODEL EXPERIMENTS FOR THE SLIPS OF A SANDY RIVER LEVEE  
CAUSED BY RAINWATER DRAINAGE FROM THE CREST PAVEMENT

森 啓年<sup>1</sup>・倉田大輔<sup>2</sup>・上戸田拓也<sup>3</sup>・岡本吉央<sup>4</sup>

Hirotooshi MORI, Daisuke KURATA, Takuya KAMITODA and Sayo OKAMOTO

<sup>1</sup>正会員 博士 (工学) 山口大学大学院創成科学研究科 (〒 755-08611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

<sup>2</sup>正会員 山口大学大学院創成科学研究科

<sup>3</sup>前 山口大学工学部 (〒 755-08611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

<sup>4</sup>前 山口大学工学部

The slips of a river levee caused only by rain have been taken place in several sites in Japan, such as the Chikugo-River in 2015. This research focused on the mechanism of the slips caused by rainfall on the slope and rainwater drainage from the crest pavement. A series of model experiments, which used a rainfall machine and a rainwater drainage generator, were conducted to observe the mechanism. As the results of the experiments, it has been clarified the influence of the rainfall on the slope is relatively low compared to the rainwater drainage from the crest pavement. In addition to that, the size of slips mostly depend on the amount of the rainwater drainage.

**Key Words:** river levee, seepage, rain, slip

## 1. 序論

### (1) 研究背景

近年, 全国各地で短時間での集中豪雨が多発している。2017年1月から11月までにアメダスが観測した1時間降水量50mm以上(非常に激しい雨)の短時間強雨の1000地点あたりの発生回数は251回であった。さらに, 1時間降水量50mm以上のアメダス1000地点あたりの年間発生回数は, 1976~2016年で10年間あたり約20回の割合で増加している<sup>1)</sup>。

一方, 河川堤防においては, 社会的要請や維持管理, 雨水の浸透抑制等のために天端をアスファルト舗装(以下, 「天端舗装」)している区間が増えている。しかし, 道路盛土と異なり, 河川堤防では天端舗装の排水施設は設置されていない場合がある。その理由として, 河川堤防の川表側にドレーン等の排水施設を設置すると洪水時に堤体内に河川水の浸透を助長することや, 天端のアスファルト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。

その様な中, 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に示すように表法面に発生した<sup>2)</sup>。この原因は天端舗装の排水不良により, 図中の矢印に示すよう



図-1 被災状況 (筑後川, 2015年8月)

に縦断方向からも雨水排水がすべり箇所法面に集中して流入(以下, 「雨水集中」)したためと考えられている。

佐古らによると, 降雨のみにより河川堤防の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事例で天端舗装がなされており, 堤防天端からの雨水排水が法面に流入した可能性が示唆されている<sup>3)</sup>。

河川堤防の降雨や天端舗装からの雨水集中に起因する深いすべりの発生メカニズムを解明し, その知見を被災の再発防止に活用することが求められている。

### (2) 研究目的

本研究は, 河川堤防の降雨や天端舗装からの雨水集中による河川堤防の深いすべりの発生メカニズムを模型実験により解明することを目的としている。

具体的に、河川堤防の小型模型を作成し、降雨のみを与えた場合と雨水集中も与えた場合について実験し、その際の堤体の変形状況について定量的に把握することを試みた。その結果をもとに、河川堤防の特性を考慮した被災防止方法について考察した。

### (3) 既往研究

山村・久楽は、河川堤防の大型模型を用いて、降雨による堤体土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<sup>4)</sup>。近年では、齊藤・前田ら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<sup>5)</sup>や、秋葉・石原らにより非定常飽和不飽和浸透流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の再現解析<sup>6)</sup>などの研究が実施されている。

一方、実務に目を向けると、河川堤防のすべりは、降雨のみによる被災は考慮せず、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>7)</sup>。その理由として、降雨のみで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、筑後川の被災の様現場状況によっては深いすべりが発生する可能性もある。

本研究は既往の降雨の均質な法面への浸透に加え、天端舗装からの雨水集中も考慮し、実験を行ったところに新規性、有用性がある。

## 2. 実験方法

### (1) 実験概要

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 では降雨のみによるすべりへの影響を、実験 B では降雨に加え雨水集中によるすべりへの影響をそれぞれ観察した。

### (2) 実験模型

図-2 に示すように実験模型は実験 A 及び実験 B ともに、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）を、基礎地盤上（粘性土：カオリン粘土）に半断面（堤高 250mm、天端幅 100mm、法勾配 1:1.5、奥行き 150mm、締固め度 78.5%）で作成した。また、天端舗装を模擬し、遮水シートを設置した。低流速の浸透流においては慣性力は無視できるほど小さいため、Froude 数の一致に基づく相似則を採用する必要はないと仮定<sup>8)</sup>し、実験模型は堤高 5.0m の河川堤防の縮尺 1/20 を想定して作成した。なお、Darcy 則のみを考えると降雨や雨水集中の経過時間としては実スケールでは 20 倍相当となる

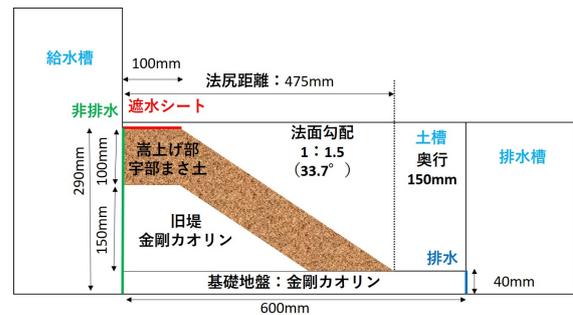


図-2 実験模型

表-1 土質試験結果

		宇部まさ土	カオリン粘土
施工時含水比	%	10	30
最適含水比	%	10.4	-
乾燥密度	$g/m^3$	1,551	1,438
最大乾燥密度	$g/m^3$	1,975	-
締固め度	%	78.5	-
透水係数	$m/s$	$6.60 \times 10^{-5}$	$1.00 \times 10^{-8}$
粘着力 $c'$	kPa	0.2	-
内部摩擦角 $\phi'$	度	29.6	-

が、不飽和領域では毛管上昇により模型の方が不飽和透水係数が大きくなる。

実験模型の作成は、基礎地盤、旧堤、嵩上げ部の順で作成した。実験模型の各部位は乾燥密度  $\rho_d$  で管理を行い、各部位において試料を各層 10 ~ 20mm ずつ撒きだし、指定した乾燥密度となるよう締固めを行った。また、各試料は施工性を考慮し施工時含水比  $w$  をカオリン粘土が 30%、宇部まさ土を 10%としている。なお、宇部まさ土の締固め度  $D_c$  は、現地での植生の繁茂などを考慮し、78.5%と緩い堤体を再現した。

本実験で用いたカオリン粘土と宇部まさ土の各種土質試験結果を表-1、粒度分布を図-3 に示す。宇部まさ土の土質試験に関しては、土の粒度試験（JIS A 1204、ふるい分けのみ）、突き固めによる土の締固め試験（JIS A 1210、A-b 法）、土の透水試験（JIS A 1218、定水位）、土の三軸圧縮試験（JGS0523、CUB 条件）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の値を用いた。

### (3) 実験装置

本実験で用いる小型土槽は給水槽、土槽（内寸：幅 600mm、奥行き 150mm、高さ 300mm）、排水槽の 3 部分から構成され、各部分の境界は多孔アクリル板で仕切られている。実験模型作成にあたり、給水槽と土槽間の多孔アクリル板は土槽から降雨や雨水集中の給水層への流入を防ぐため養生テープにより非排水条件とした。一方、土槽と排水槽間の多孔アクリル板は堤内

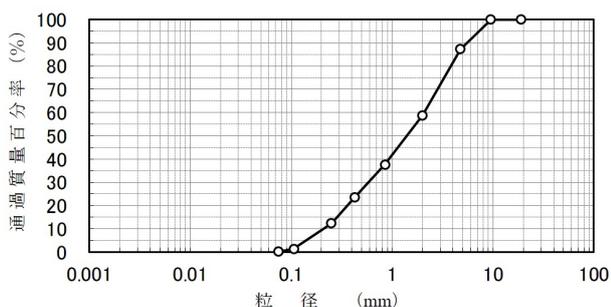


図-3 宇部まさ土の粒度分布

地の湛水を防ぐ為に排水条件とした。

降雨装置は給水ポンプによって供給した水をノズルから霧状に噴出することができる装置である。実験実施前に 10 分間の降雨量を測定し、実験の外力条件で設定した降雨量と相違がないことを確認し、実験を行った。また、雨水集中発生装置は、天端舗装からの雨水集中を再現するため、実験模型の天端へ一定量の水を供給することができる装置である。この装置も、実験実施前に調整を行い、定めた外力となることを確認し、実験を行った。

### 3. 降雨のみによるすべり (実験 A)

#### (1) 実験ケース

実験 A では実験模型に降雨装置を用いて 72mm/hr の降雨を 120 分間作用させ、降雨のみによるすべりへの影響について把握した。なお、時間降雨量は筑後川の被災における最大時間雨量から設定した。

降雨開始後の堤体の変形状況については、目視とスチルカメラ、ビデオカメラによって観察した。降雨開始後すべりが発生し安定した時点、もしくは降雨開始後 120 分が経過した時点で実験終了とした。なお、実験ケースは同様の方法で作成した模型を用いて、同じ外力条件で 15 ケース実施した。

#### (2) 実験結果

実験 A では 15 ケース中 12 ケースではすべりが発生しなかったが、3 ケースでは法尻に浅いすべりが発生した。

紙面の都合のため、図-4 に示す代表的なケースのみについて、実験の変化状況を以下に示す。なお、図中の赤線はすべりの位置であり、時間の表記は、実験における降雨開始後の経過時間である。

##### ①すべり発生なし

2 分 00 秒に天端舗装に雨水が溜まり始め、4 分 30 秒で天端から法肩、法面に雨水排水が流入し始めた。7 分 30 秒で法尻に浸透水が目視で確認でき、8 分 30 秒で宇部まさ土の細粒分の流出がみられた。その後、実験模

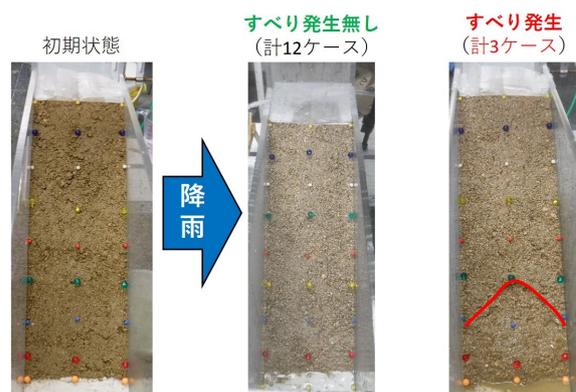


図-4 実験結果 (降雨のみ)

型に目立った変化は見られず、120 分が経過したため実験を終了した。

##### ②すべり発生あり

1 分 30 秒に天端舗装に雨水が溜まり始め、2 分で堤内地と法尻に浸透水が目視で確認できる現象がみられた。その後、3 分 00 秒で宇部まさ土の細粒分が流れ始め、22 分 00 秒で浅いすべりが発生した。発生したすべりは深さが 15mm、幅 90mm の規模で、法尻から水平距離 125mm の位置から発生した。

#### (3) 考察

降雨のみを与えた場合、全 15 ケース中、12 ケースですべりが発生しなかった。また、すべりが発生した 3 ケースも浅いすべりとなった。このことから、本研究で示した条件下においては、降雨のみではすべりが発生する可能性が低く、例えば発生しても法尻での浅いすべりになることが確認された。

すべりが発生した 3 ケースについて、その理由を以下に考察する。実験模型の作成方法で述べたように、同一の作成方法で実験模型を作成した。しかし、1 ケースずつ手作業で作成していることから、局所的に締固めが緩かった箇所等、各ケース間で実験模型に微細なばらつきが生じてしまったためと考えられる。

なお、相似則を考慮すると、本実験における 120 分の降雨は 40 時間の降雨に相当する。したがって、土質や勾配にもよるが、降雨のみでは筑後川の被災の様な深いすべりは現場でも発生する可能性が低いことが示唆された。その一方、局所的に締固めが緩かったりすると、降雨のみでも浅いすべりが発生する可能性もあると考えられる。

### 4. 雨水集中によるすべり (実験 B)

#### (1) 実験ケース

実験 B については、実験 A ですべりが発生しなかった 12 ケースを対象に、雨水集中発生装置を利用し、天端

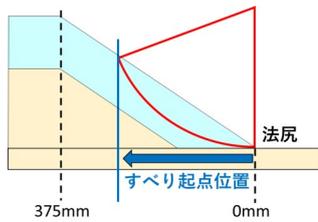


図-5 すべり起点位置

舗装からの雨水集中による影響について把握した。なお、実験中も引き続き 72mm/hr の降雨は継続して与えている。

実験 A と同様に雨水集中開始後の堤体の変形状況については、目視、スチルカメラ、ビデオカメラにより観察した。なお、実験ケースは雨水集中発生装置から供給する水量を変化させ、表-2 に示す 12 ケースについて行った。雨水集中発生装置から供給する水の量は、実験模型の天端面積 (15,000mm<sup>2</sup>) の何倍の範囲からの降雨排水が集中したか (以下、「雨水集中度」) を基準に設定した。雨水集中度は、河川堤防の縦断方向からの雨水集中の程度を示す指標であり、例えば 10 倍の場合、実スケールでは上下流それぞれ 15m の範囲の天端舗装からの排水が幅 3.0m に集中していることを示す。また、雨水集中による法面への浸透量を示すため、雨水集中発生装置から供給する水量を法面面積で割ったものに、時間降雨量を加えたものを「換算降雨量」と定義している。

また、発生したすべりの規模についてはすべり起点位置により評価している。すべり起点位置は、図-5 に示すように、すべり発生時の法尻からの水平距離として定義した。ただし、法肩を超えて天端からすべりが発生した場合のすべり起点位置は 375mm とした。これは、実際の河川堤防では、路盤等の存在により法肩からすべりが発生する機会が多いためである。

実験終了条件は、雨水集中開始後すべりが発生し安定した時点、もしくは雨水集中開始後 60 分が経過した時点とした。

## (2) 実験結果

降雨に加え雨水集中を与えた場合は、雨水集中度が 10 倍以上のケースからすべりが発生した。また、すべり起点位置については、雨水集中度が大きくなるにつれて大きくなる傾向がみられた。

各ケースの変形の発生状況について、以下に示す。時間の表記は実験における雨水集中後の経過時間である。また、すべりが数段階に分けて発生した場合は、最初にすべりが発生した時間をすべり発生時間としている。なお、図中の赤線はすべりの位置であり、正面からの写真はすべり発生前のガリー侵食の状況を示している。

表-2 実験ケース

ケース	雨水集中度 (倍)	換算降雨量 (mm/hr)
1	0	72
2	2	110
3	3	130
4	4	149
5	5	168
6	9	245
7	10	264
8	13	322
9	15	360
10	20	456
11	30	648
12	40	840

### ①すべり発生なし (ケース 1 ~ 6)

図-6 に示すように雨水集中開始後に目立った変化が発生せず、60 分が経過したため実験終了とした。

### ②浅いすべり発生あり (ケース 7, 8, 10)

ケース 7 では 1 分 30 秒で天端舗装の雨水排水が法面に流出し、2 分 00 秒で法尻に達した。その後は実験模型に目立った変化は確認されなかったが、49 分 20 秒で法尻付近に浅いすべりが発生した。その後は大きな変化が見られず実験模型が安定したので実験終了とした。すべりの深さは 10mm、幅は 110mm、すべり起点位置は 125mm であり、実験 A でみられたすべりと同等の規模であった。なお、法肩・法面のガリー侵食は見られなかった。

ケース 8 では 30 秒で天端舗装の雨水排水が法面に流出し、法肩付近に小規模のガリー侵食が発生した。1 分 00 秒ですべりが発生し、1 分 30 秒ですべりの範囲が拡大した。その後は大きな変化が見られず実験模型が安定したので実験終了とした。図-7 に示すように法面中腹付近からすべりが発生した。すべりの深さは 25mm、幅は 150mm、すべり起点位置は 225mm であり、実験 A でみられたすべりより深いすべりであった。

ケース 10 では 30 秒で天端舗装の雨水排水が法面に流出し、1 分 00 秒で法尻に達し、法肩付近を中心に小規模なガリー侵食が確認された。1 分 16 秒で法面中腹付近からすべりが発生し、2 分 8 秒にすべりの範囲が広がった。その後は大きな変化が見られず実験模型が安定したので実験終了とした。すべりの深さは 30mm、幅は 100mm、すべり起点位置は 225mm、実験 A でみられたすべりより深いすべりであった。

### ③深いすべり発生あり (ケース 9, 11, 12)

ケース 9 では 1 分 30 秒で天端舗装の雨水排水が法面に流出し、法面に小規模なガリー侵食が見られた。図-8 に示すよう 4 分 27 秒で法肩付近から深いすべりが発生し、その後は大きな変化が見られず実験模型が安定



図-6 実験結果（ケース 6，右：ガリー侵食状況）

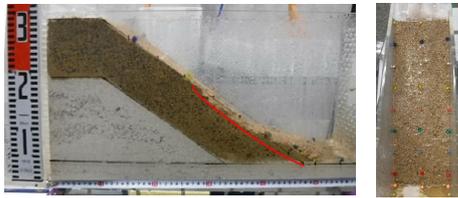


図-7 実験結果（雨水集中あり，右：ガリー侵食状況）

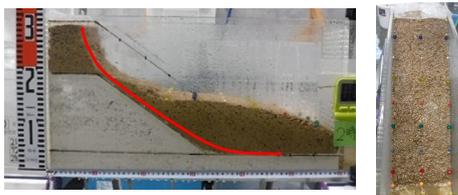


図-8 実験結果（雨水集中あり，右：ガリー侵食状況）

したので実験終了とした。すべりの深さは 100mm，幅は 150mm，すべり起点位置は 375mm であり，筑後川の被災と類似した法肩からの深いすべりがみられた。

ケース 11 では 10 秒で天端舗装の雨水排水が法面に流出し，30 秒で法尻に達した。また，法肩と法面の一部にガリー侵食が確認された。1 分 00 秒で法尻付近においてすべりが発生し，1 分 23 秒で法肩付近まですべりの範囲が広がった。その後は大きな変化が見られず実験模型が安定したので実験終了とした。すべりの深さは 46mm，幅は 150mm，すべり起点位置は 375mm であり，筑後川の被災と類似した法肩からの深いすべりがみられた。

ケース 12 では雨水集中開始と同時に天端舗装の雨水排水が法面に流出した。また，法肩と法面の一部にガリー侵食が確認された。1 分 00 秒で法肩付近から大規模なすべりが発生し，その後は大きな変化が見られず実験模型が安定したので実験終了とした。すべりの深さは 80mm，幅は 150mm，すべり起点位置は 375mm であり，筑後川の被災と類似した法肩からの深いすべりがみられた。

### (3) 考察

すべり起点位置と換算降雨量の関係について図-9に示した。なお，すべりが発生しなかったケースはすべり起点位置をゼロとして示している。本研究で示した条件下においては，換算降雨量が多くなる程，法肩付近からの大規模なすべりとなる傾向があった。逆に換算降雨量が少なくなる程，法尻付近からの小規模なすべりになり，天端面積 9 倍の換算降雨量を下回るとす

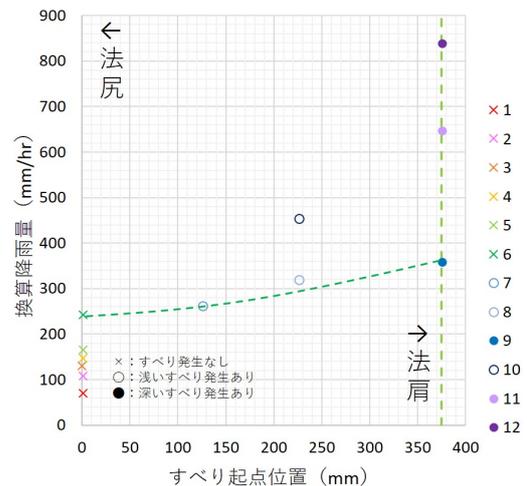


図-9 すべり起点位置と換算降雨量の関係

べりが発生しなくなることが確認された。雨水集中によるすべりの発生の有無及びその規模の大きさは，換算降雨量の影響が大きいことが明らかになった。

雨水集中が開始すると堤体への浸透量が増加し，堤体内の浸潤線と間隙水圧の上昇に伴い，有効応力が低下することにすべりは起因する。特に換算降雨量の多いケースでは，法尻部付近の有効応力が低下する範囲が拡大することで，深いすべりになったと考えられる。一方ですべりが発生しなかったケースでは，法尻から安定して排水が行われていたことから，すべりが発生するほどの有効応力が低下する範囲が拡大しなかったと考える。

なお，集中降雨量とすべり発生位置の下限の関係は図-9の緑の派川の様になった。ケース 10 のように換算降雨量が多くても，法面中腹付近からのすべりにとどまったケースがあった。これは，実験 A と同様に実験模型作成時の微妙なばらつき等に起因して，すべり起点位置に多少の差が生じたためと考える。

次に，すべり発生時間と換算降雨量の関係について図-10に示した。なお，すべりが発生しなかったケースはすべり発生時間を 60 分として示している。本研究で示した条件下においては，換算降雨量が一定量を超えると比較的早いすべり発生時間となることが分かった。相似則を考慮すると，60 分の雨水集中は 20 時間に相当する。一方，実験における深いすべりは遅くとも 4 分 27 秒で発生しており，土質や勾配にもよるが，実際でも深いすべりが発生する場合は雨水集中が開始してから 60 分以内と比較的早い時間に発生する可能性が示唆された。その一方で，法尻からの排水が十分確保されている場合は，深いすべりの発生が抑制されることも示唆された。

最後にガリー侵食の影響について検討する。雨水集中度が 13 倍より大きな換算降雨量を与えたケースでは実験模型にガリー侵食が生じた。ケース 9，11，12 で

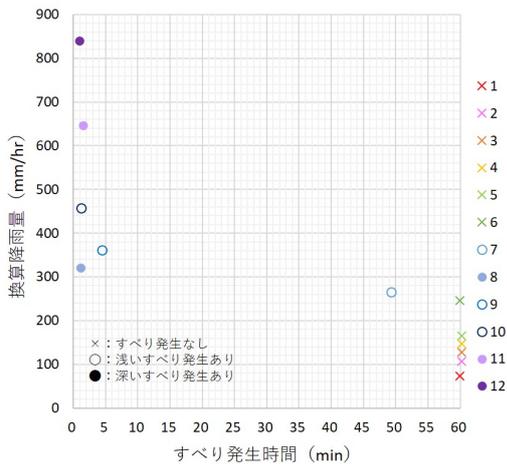


図-10 すべり発生時間と換算降雨量の関係

は法肩から法面にかけてガリー侵食の発生を確認した。また、ケース8と10では法肩付近に小規模なガリー侵食が発生していた。しかし、本研究の実験では流水による侵食量は少ないため、直接的に影響はほとんどなかったと考えられる。しかし、相似則を考えると表流水の流速は実際の堤防ではより速くなり、法面の土粒子を流出させる可能性も十分ある。本研究の実験模型の大きさでは、ガリー侵食の影響を把握することは困難であった。

## 5. 結論

### (1) 結果

本研究では模型実験を行うことにより、実験Aでは降雨のみでのすべりへの影響を、実験Bでは雨水集中によるすべりへの影響をそれぞれ把握した。本研究で示した条件下において得られた結論を以下に示す。

- 降雨のみによるすべりへの影響について、すべりが発生する可能性が低く、たとえ発生しても法尻での浅いすべりになることが確認された。
- 雨水集中によるすべりへの影響について、すべりの発生の有無及びその規模の大きさは、換算降雨量の影響を受けることが明らかになった。また、換算降雨量が一定量を超えると比較的早いすべり発生時間となることが分かった。

以上より、河川水位が上がっていない場合に河川堤防で発生する深いすべりは、天端舗装からの縦断方向の雨水集中が主な要因であり、その程度により変形の規模や発生時間も変化することが示唆された。

### (2) 雨水集中による被災防止

天端舗装からの雨水集中による被災の防止のためには、従来の拌み勾配もしくは片勾配といった横断面の

路面勾配のみでなく、縦断方向も考慮した排水の設計も重要であることが示唆された。一方、序論で述べたように、河川堤防の特性を考慮すると川表側への排水設備の設置は困難である。そこで、川裏側への路面勾配の設定、川裏側の法肩への排水溝やアスカーブ等の縦断方向の排水設備の設置が現実的である。あわせて、縦断方向に集水した雨水を法尻に落とすための縦排水設備についても、裏法面の階段等に併設し堤脚水路へ流入させる工夫が考えられる。

### (3) 今後の課題

本研究では、河川堤防の天端舗装からの雨水集中に伴う堤体の変形状況を把握するため、かなり単純化した条件で実験を行った。実際の河川堤防では植生や被覆土層の存在しているケースがほとんどである。このような河川堤防で雨水集中により発生するすべりを把握する為には、植生と被覆土層がすべりへ与える影響も考慮する必要がある。

今後、河川堤防の被覆土層や植生、排水施設を再現した模型で実験を行い、それらのすべりへの影響を把握することが課題である。あわせて、浸透流解析やすべり解析により定量的に雨水集中の影響を把握することも課題として挙げられる。

謝辞： 本研究はJSPS 科研費JP17K06555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) 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> (2018.4 確認)
- 2) 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, 2015.8 [http://www.qsr.mlit.go.jp/chikugo/newsttopics\\_files/home.pdf](http://www.qsr.mlit.go.jp/chikugo/newsttopics_files/home.pdf) (2018.4 確認)
- 3) 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 レポート第31号, pp.8-11, 2017
- 4) 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, 1974.2
- 5) 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, 2015.12
- 6) 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, 2017.9
- 7) 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), 2012.2
- 8) 吉田昭治：飽和浸透流の相似率と模型実験則について, 農業土木研究別冊, 1963 巻5号, pp.1-9, 1963

(2018. 4. 3受付)