

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

MODEL EXPERIMENTS FOR THE FAILURE OF A RIVER LEVEE CAUSED BY RAIN FROM THE CREST PAVEMENT CONSIDERING THE ROOTSTOCK OF VEGETATION

中川翔太¹・山本周平²・森啓年³・佐古俊介⁴・下川大介⁴

Shota NAKAGAWA, Shuhei YAMAMOTO, Hirotoshi MORI, Shunsuke SAKO and Daisuke SHIMOKAWA

¹ 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)

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

³ 正会員 博士 (工学) 山口大学大学院創成科学研究科

⁴ 正会員 山口大学大学院創成科学研究科

Recent heavy rainfall causes the slips of a river levee in several of sites in Japan. The reason for these slips are said to be the rainwater drainage from its crest pavement. This research focused on the mechanism of these slips with the effect of vegetation rootstock. Model experiments were conducted to observe the mechanism. It has been clarified from the results that if the amount of rootstock in the unit volume of surface soil is high, the possibility of slip become low. On the contrary, the tendency of slip become higher in case that the depth of surface soil with rootstock is deep.

Key words : river levee, seepage, rainfall, slip, rootstock

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. 2018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267回であった. 1976~2018年で10年間あたり約20.5回の割合で増加している¹⁾.

こうした状況に対し, 2015年の鬼怒川堤防の決壊を受けて堤防決壊までの時間を引き延ばす危機管理ハード型対策が打ち出された. この施策の一部として河川堤防の天端約1800kmにわたりアスファルト舗装(以下, 「天端舗装」)等を行うこととなった²⁾. さらに近年, 浸透へ対する対策としても有効なことから天端舗装が推奨され, 増加している. しかし, 天端舗装の排水施設の施工はほとんど行われておらず, 雨水の排水不良が発生しやすい箇所が増加している. 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の設置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堤防天端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³⁾. この原因は天端舗装に伴い, 堤防縦断方向の局所的に低い



図-1 被災状況(筑後川, 2015年8月)

箇所雨水排水が集中し, それらがのり面に流出することによって発生したのではないかと考えられている(以下, 「排水集中」とする).

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2007年から2016年に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⁴⁾.

河川堤防の降雨や天端舗装からの排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, 植生の根茎を考慮した河川堤防の排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にしている.

具体的には、法面表層に根茎を再現した河川堤防の小型模型を作成し、一定の排水集中を与え、根茎の量と層厚を変化させた実験を行い、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、河川堤防の植生管理のあり方について考察した。

(3) 既往研究

森・倉田らは、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⁵⁾。この研究より、降雨のみでは、深いすべりが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。

根茎を有する斜面の安定問題については多くの研究がなされている⁶⁾が、本研究は、堤防のり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、実験を用いて定量的に示したところに新規性、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では根茎の量によるすべりへの影響を、実験Bでは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。

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為、実験で使ったまさ土と馴染みが良く、施工しやすい材料として一般的な径0.2mmの綿糸を用いた。

(2) 実験模型

実験Aで用いた実験模型を図-2に、実験Bで用いた実験模型を図-3に示す。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、堤体の法面表層15mm及び30mmに被覆土層（宇部まさ土に綿糸を混合したもの）を、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、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⁷⁾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排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り降雨浸透が助長される。また、今回の堤体は平成27年に被災のあった筑後川堤防を参考に決定しており、その表層の透水係数は $1.66 \times 10^{-5}(\text{m/s})$ と実験模型と同じオーダーである。

実験模型の作成は、基礎地盤、旧堤、嵩上げ部、

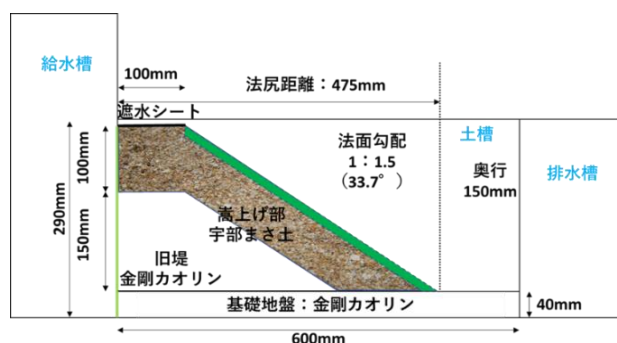


図-2 実験模型（実験A）

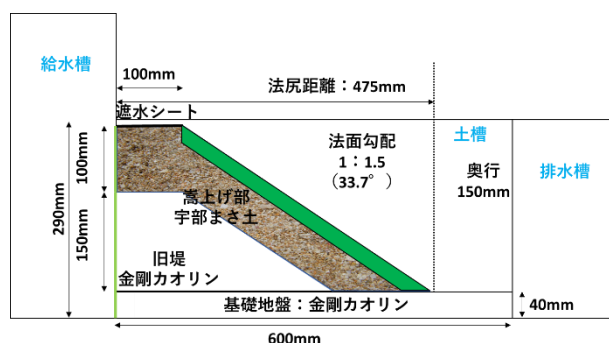


図-3 実験模型（実験B）

表-1 土質試験結果

試料名		宇部まさ土	金剛力オリン
施工時含水比	w(%)	10	30
最適含水比	w _{opt} (%)	10.4	-
乾燥密度	$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	1.551	1.438
最大乾燥密度	$\rho_{dmax}(\text{g/cm}^3)$	1.975	-
締固め度	D _c (%)	78.5	-
透水係数	k(m/s)	6.60×10^{-5}	1.00×10^{-8}
粘着力	c' (kN/m ²)	0.2	-
内部摩擦角	Φ' (°)	29.6	-

表-2 根茎の変化による土質試験結果

	根茎量(g/cm ³)		
	0	1.121×10^{-3}	2.241×10^{-3}
透水係数 k(m/s)	6.601×10^{-5}	1.112×10^{-4}	2.073×10^{-4}
粘着力 c'(kPa)	0.2	0.5	0.8
内部摩擦角 Φ' (°)	29.6	32.7	34.8

被覆土層の順で作成した。実験模型の各部位は乾燥密度 ρ_d で管理を行い、各部位において試料を各層10から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、78.5%と緩い堤体を再現した。また、堤体と被覆土層のなじみを高めるために、堤体の表面を乱してから被覆土層の施工を行った。

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 1204, A-b法)、土の透水係数(JIS A 1218, 定水位)、土の三軸圧縮試験(JGS0523, CUB試験)を実施した。結果を表-2に示す。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⁸⁾の値を用いた。なお、根茎量は、単位体積当たりの被覆土層に混入させた綿糸の重量で示した。

(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排水集中の給水槽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地の湛水を防ぐ為に排水条件とした。

降雨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により与えた。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、排水集中は、天端舗装からの排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により与えた。これも、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. 根茎の量による影響（実験A）

(1) 実験ケース

実験Aでは被覆土層の層厚15mmに対して根茎の量を変化させ、すべりへの影響について把握した。ケース一覧を表-3に示す。実験Aの外力条件は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。なお、排水集中実施中も72mm/hrの降雨は継続した。排水集中は天端面の20倍の72mm/hrの範囲の降雨が1か所に集中したと想定し行った。

すべりの規模はすべり起点位置を用いて評価した。すべり起点位置は、すべり発生時の法尻からの水平距離として定義した（図-5）。法尻を起点とし、法肩をすべり起点位置375mmとした。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天端道路の舗装はアスファルトで行われており、法肩

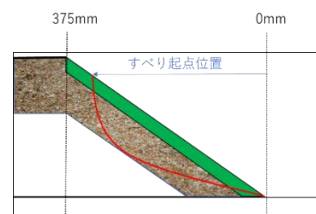


図-4 すべり起点位置概念図

表-3 ケース（実験A）

ケース番号	根茎量(g/cm ³)
A-0	0
A-1	4.52×10 ⁻⁴
A-2	6.78×10 ⁻⁴
A-3	9.04×10 ⁻⁴
A-4	1.36×10 ⁻³

からすべりが発生する被災が多い為である。また、ここでは、崩壊後、安定しそれ以上すべりが発生しない状態ですべり起点位置を測定した。

(2) 実験結果

実験Aでは5ケース中、根茎量が多い2ケースではすべりが発生しなかったが、比較的少ないもしくは含まれていない3ケースではすべりが発生した。

実験状況を以下に述べる。なお、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。

a) ケースA-0（図-5）

排水集中開始後37秒で天端から100mm地点でガリー侵食が発生し、1分13秒後に法肩より深いすべりが発生した。その後は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100mm、幅は150mmであった。すべり起点位置は375mmであった。

b) ケースA-1（図-6）

ケースA-1では、排水集中開始後に7秒後に細粒分が法尻に流れ出し、18秒後にガリー侵食が起き、22秒後にガリー侵食の範囲が拡大した。その後法尻から浅いすべりが発生し、実験模型が安定したので実験終了とした。ガリー侵食の深さは40mm、幅は70mmであった。すべり起点位置は375mmであった。

c) ケースA-2（図-7）

ケースA-2では、水集中開始後に11秒でガリー侵食が起きた。その後1分35秒で法面にみずみちが拡大していき、4分56秒で法肩からすべりが発生した。その後は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100mm、幅は150mmであった。すべり起点位置は375mmであった。

d) ケースA-3（図-8）

ケースA-3では、排水集中開始後26秒で細粒分が法尻へ流れ出し、1分46秒で法面中心にガリー侵食ができた。しかし、その後は実験模型に目立った変化は確認されずに60分が経過した為、実験終了とした。

e) ケースA-4（図-9）

ケースA-4では、排水集中開始後25秒で天端から

50mm地点でガリー侵食が発生し、45秒後に法面表面の細粒分が流れだした。しかし、その後は実験模型に目立った変化は確認されずに60分が経過した為、実験終了とした。



図-5 ケースA-0 (実験終了時)



図-6 ケースA-1 (実験終了時)

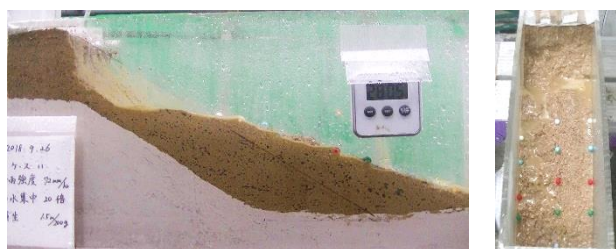


図-7 ケースA-2 (実験終了時)



図-8 ケースA-3 (実験終了時)

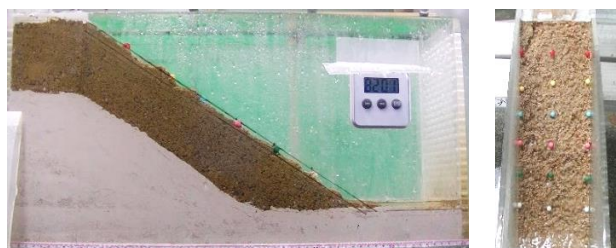


図-9 ケースA-4 (実験終了時)

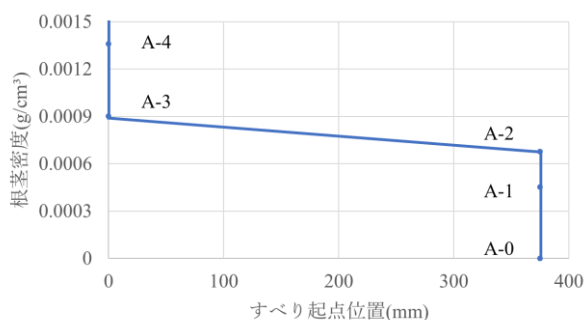


図-10 すべり起点位置と根茎量の関係

(3) 考察

図-10 に実験 A における全ケースのすべり起点位置と根茎量の関係を示した。実験 A の根茎の量の変化による堤防への影響については、根茎量が多いほどすべりが発生する可能性が低いことが分かった。

すべりが発生しなかった 2 ケースにおいては、排水集中による影響は少なく、法面にほとんど変化が発生せずに実験終了となった。これは、被覆土層に根茎を有していることで土粒子間上の緊張力が高まり、堤体表面のせん断強度が上がったためと考えられる。根茎を考慮した三軸圧縮試験においても、表-2 よりせん断強度が上がっている事がわかり、このことを裏付けている。

一方、すべりが発生したケースについては、根茎を有しているが、せん断強度の増加の程度が大きいものではない為、排水集中によって堤体への浸透量が増加し、堤体内の間隙水圧の上昇に伴い、有効応力が低下したことによりすべりが発生したと考えられる。

4. 根茎の深さによる影響 (実験B)

(1) 実験ケース

実験Bは図-3のように、被覆土層における根茎の深さを15mmから30mmに変化させた。被覆土層の深さの変化以外は実験Aの模型と同様とした。また、外力条件についても実験Aと同様であり、混入させる根茎量を変化させ、表-4に示す4ケースを行った。

表-4 ケース (実験B)

ケース番号	根茎量(g/cm ³)
B-0	0
B-1	4.52×10^{-4}
B-2	9.04×10^{-4}
B-3	1.36×10^{-3}

(2) 実験結果

実験Bでは4ケース中、全ケースですべりが発生した。

実験状況を以下に述べる。なお、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。

a) ケースB-0

実験A-0の実験結果と同様のため省略する。

b) ケースB-1 (図-11)

排水集中開始後に15秒で細粒分が法尻へ流れ出し、21秒で天端から50mm地点でガリー侵食を生じ、1分4秒で天端から320mm地点、1分41秒では天端から200mm地点ですべりが発生している。その後、2分32秒で法肩からすべりが発生した。すべりの深さは90mm、幅は150mmであった。すべり起点位置は375mmであった。

c) ケースB-2 (図-12)

排水集中開始後に1分45秒に天端から300mm地点ですべりが発生し、2分31秒で天端から250mm地点ですべりがさらに拡大した。その後、3分33秒後に天端から100mm地点ですべりが拡大し、7分8秒で法肩に至った。すべり発生時間は、7分8秒、すべりの深さは30mm、幅は150mmであった。すべり起点位置は375mmであった。

d) ケースB-3 (図-13)

排水集中開始後2分37秒後に天端から250mm地点ですべりが発生し、3分4秒で天端から200mm地点、4分1秒で天端から150mm地点、4分57秒で天端から100mm地点でそれぞれすべりが拡大していった。その後、5分40秒で法肩に至った。すべり発生時間は、5分40秒、すべりの深さは70mm、幅は150mmであった。すべり起点位置は375mmであった。

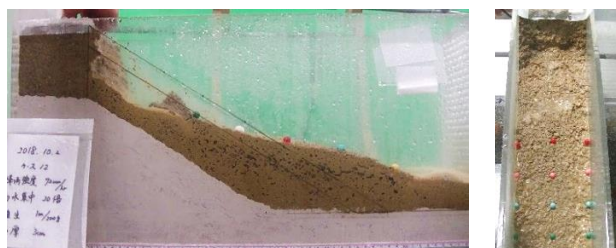


図-11 ケースB-1 (実験終了時)

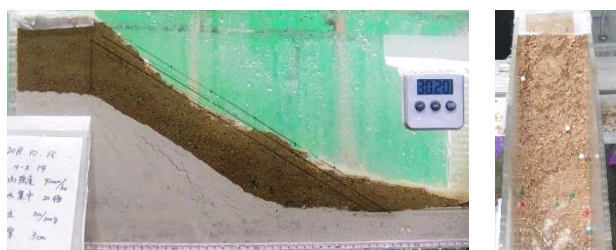


図-12 ケースB-2 (実験終了時)

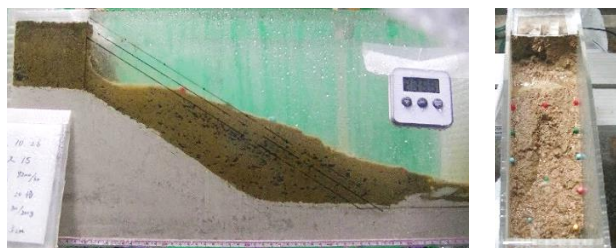


図-13 ケースB-3 (実験終了時)

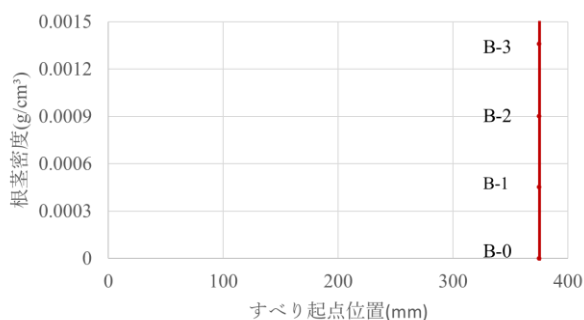


図-14 すべり起点位置と根茎量の関係

(3) 考察

実験Bにおいては実験Aより被覆土層の層厚を厚くした。図-14に実験Bにおける全ケースのすべり起点位置と根茎量の関係を示した。全4ケースですべりが発生した。

実験Aではすべりが発生しない根茎量でも、実験Bではすべりが発生している。図-15、図-16の連続写真に示すように、実験Aは深いすべりが卓越していたと比較し、実験Bでは被覆土層が少しずつブロック状に滑動していく浅いすべりが発生しており、実験Aと実験Bではすべりの発生メカニズムが異なることがうかがえる。

そこで被覆土層と根茎を有していない堤体のせん断強度と透水性の面からその要因を考察する。実験Aの考察で述べたように、根茎量の増大とともに被覆土層のせん断強度は上昇する。実験Bは実験Aと比較して、被覆土層の根茎が深く存在していることから、せん断強度が高い領域が多い。一方、根茎量の増大とともに被覆土層の透水性も上昇することから、降雨や排水集中により短時間で飽和状態に至り、その重量が増加する。せん断強度と同様に、実験Bは実験Aと比較して、被覆土層が短時間で飽和し、重量が増加する領域が多いと言える。また、実験Bにおいて、被覆土層と根茎を有していない堤体との境界または根茎を有していない堤体内ですべりが起きている。根茎を有していない堤体は表-2に示すように、粘着力、内部摩擦角が被覆土層よりも低い。この領域はすべりに対する抵抗力が低いことで、透水性の高い被覆土層が厚い実験Bで、すべりが発生しやすくなったと考えられる。

それらから、実験Bでは実験Aと異なり、被覆土層のせん断強度の上昇に伴う抵抗力と比較して、飽和による重量の増加による滑動力が根茎を有していない堤体を上回ったことにより、すべりが発生したと考えられる。その際のすべりの発生メカニズムとして、実験Aは堤体も含めて発生する円弧すべり、実験Bは被覆土層のみに発生する表層すべりが卓越していることがうかがえる。



図-15 実験Aの典型的なすべり（左から順に実験開始, すべり開始, 実験終了時）



図-16 実験Bの典型的なすべり（左から順に実験開始, すべり開始, 実験終了時）

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では根茎の量によるすべりへの影響を、実験Bでは根茎の深さ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。

- ・根茎量によるすべりへの影響として、多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。
 - ・根茎の深さのすべりへの影響では、深くなると被覆土層のせん断強度の上昇に伴う抵抗力と比較して、透水性の上昇による降雨や排水集中による被覆土層の重量の増加による滑動力が根茎を有していない堤体の抵抗力を上回ったことにより、それらの境界等ですべりが発生しやすくなる。
- 以上から、植生管理においては根茎の量と深さの両方を管理していくことが重要であることが示唆された。

(2) 今後の課題

本研究では綿糸を植生として実験模型に用いたが、実際の堤防における植生の根茎の状態との対応は不明な点が多い。実際の河川堤防では一般的には芝で植生管理した方が良いといわれているが、植生にも様々な種類があり、根茎量や深さも多種多様である。

その為、実際の堤防の被災と本実験の関係を把握することが今後の課題である。

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年12月18日閲覧)
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局：水防災意識社会再構築ビジョン, 2015, 12
- 3) 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,
http://www.qsr.mlit.go.jp/chikugo/newstopics_files/home.pdf
(2018.4 確認)
- 4) 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
- 5) 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, 第24巻, 2018年
- 6) 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, 第20巻, 2014年
- 7) 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
- 8) 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引（改訂版）, 2012

(2019. 4. 2受付)