河川堤防のドレーン工法のフィルター部の 健全性に関する模型実験および数値解析 MODEL EXPERIMENTS AND NUMERICAL ANALYSIS ABOUT THE SOUNDNESS OF THE DRAIN METHOD OF RIVER LEVEES

宮 翔太¹・森 啓年²・栗栖直之³・中川翔太¹・倉田大輔¹ Shota MIYA, Hirotoshi MORI, Naoyuki KURISU, Shota NAKAGAWA and Daisuke KURATA

1山口大学大学院創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)
2正会員 山口大学大学院創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)
3前山口大学工学部 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

Model experiments of a river levee were conducted to examine the effect of the drain method by the soundness of its filter. The results of experiments show that the drain method makes a major improvement on the stability of the levee even when its filter is deteriorated. However, the effect of the drain method has been also affected by soundness of the filter. The clogging or damage to its filter causes the deformation of a levee toe. These results insist the possibility to monitor the soundness of the drain method by the deformation around the toe.

Key Words : river levee, drain method, model experiment, seepage analysis, circular slip analysis

1. 序論

(1) 研究背景

我が国において,集中豪雨や台風による豪雨が 年々増加している.アメダスの観測によると,最近 10年間の1時間降水量50mm以上の平均年間発生回数 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,1997~2019年は約1.4倍に増加している¹⁾. このような豪雨の増加により,洪水が発生し,河川 堤防が被災するという事例が,子吉川(2013年), 小田川・重信川(2018年),那珂川・阿武隈川 (2019年)など近年全国各地で発生している.

洪水による河川堤防の被災の種類には大きく分け て,浸透破壊,侵食破壊,越流破壊がある.そのう ち浸透破壊は,水位の上昇により堤体内や基礎地盤 に河川水が浸透することで,すべりやパイピング破



図-1 2018年7月小田川における堤防のすべり

壊を引き起こすものであり、現在も対策の必要な区間が多く存在している.また、実際に洪水時には前述の子吉川や重信川、小田川において浸透破壊によるものと推察されるすべりが発生している(図-1). 今後も浸透破壊を防止する対策を早急に実施することが求められている.

河川堤防の浸透破壊の対策の一つとして,多くの 区間に用いられているのがドレーン工法である.ド レーン工法は、河川堤防の法尻部に砕石などによる ドレーン部を構築し、河川堤防の中に浸透する水位 を低下させてすべりに対する安全性を向上させるも のである(図-2).その際、河川堤防を構築する土 砂がドレーン部へ流出することを防ぐため、ドレー ン部と堤体の境界部に不織布などの土木用シートに よるフィルター部を設置するのが一般的な構造と なっている.





図-3 実験模型A



表-1 土質試験結果

一方,「ドレーン工設計マニュアル(改訂版)」 (国土交通省,平成25年6月)²)においては,フィル ター部に「目詰まりが発生して機能が低下する可能 性も否定できない」として,「長期の安定性を確保 することに十分に留意することが必要」と述べてい る.しかし,フィルター部の長期の使用による目詰 まりや施工時の損傷のドレーン工法の対策効果への 影響については,未だ不明な点が多いのが現状であ る.また,一度設置したフィルター部の状態を把握 することは困難で,その手段は確立されておらず, 技術的な課題となっている.

(2) 研究目的

本研究は、フィルター部の経年劣化や損傷によっ てドレーン工法の対策効果がどのように変化するか 把握することを目的に実施する.また、簡易にフィ ルター部の健全性を診断する手法の開発を目標に、 出水時にフィルター部の状態と河川堤防の法尻に生 じる表面変形の関係について、基礎的な検討を行 う.

具体的には,模型実験によりドレーン工法のフィ ルター部の健全性と対策効果及び法尻の表面変形を



図-4 実験模型Bおよびドレーン工法諸元

把握する.あわせて、すべりの発生について浸透流 解析及び円弧すべり解析を用いた数値解析により定 量的に再現を試みる.

2. 実験方法

(1) 実験模型

模型実験では、ドレーン工法のフィルター部の状態により河川堤防の安定性がどのように変化するか評価するため、無対策の実験模型A(図-3)、フィルター部の条件を変化させたドレーン工法を設置した実験模型B(図-4)の2種類の実験模型を用いた.

いずれの実験模型も堤体,基礎地盤から成り立っ ている.堤体は珪砂7号,基礎地盤はまさ土で作成 した.このような実験模型を採用した理由は,珪砂 のような単一粒径で構成された河川堤防は不安定で, すべりが発生しやすく,ドレーン工法の対策効果の 差が明確に出ると考えられるためである.また,基 礎地盤に関しては,水が浸透しても膨張せず,本実 験で計測する法尻の表面変形に対して影響が少ない まさ土を用いた.堤体の法面勾配については,ド レーン工の対策効果の差が明確になるように,中川 ら³⁾の実験模型を参考に1.5割勾配とした.

実験模型Bに設置しているドレーン工法の諸元は 「ドレーン工設計マニュアル(改訂版)」 に基づ いて決定した.ドレーン部は珪砂2号,フィルター 部には厚さ0.09mmの透水性が高い土木用シート (織布)を用いた.

実験模型の作成は、いずれの実験模型も基礎地盤、 堤体の順に作成した.実験模型の各部位は使用した 土量と実験模型各部位の体積から算出した乾燥密度 ρ_a で管理を行った.なお、各部位で指定した乾燥密 度 ρ_a や締固め度等の土質条件を表-1に、粒径加積曲 線を図-5に示した.また、各試料は施工性を考慮し 施工時含水比を珪砂7号、まさ土、ドレーン工に用 いた珪砂2号すべて10%にした上で、必要量の材料 を数回に分けて締固めることで、指定した乾燥密度 となるように作成した.

(2) 実験ケース

前述の実験模型を用いて,表-2に示す4ケースの 実験を実施した.実験1は対策なしのケースで実験2



図-8 実験3 左:変形開始時(960秒),右:終了時 図-9 実験4 左:変形開始時(600秒),右:終了時

表−2 実験ケース

ケース	条件			
実験1	対策なし			
実験2	ドレーン工 (健全)			
実験3	ドレーン工(目詰まり)			
実験4	ドレーン工(フィルター部無し)			

~4のドレーン工法を設置したケースとの比較に使用した.実験2~4は、ドレーン工法のフィルター部の状態を健全、経年劣化による目詰まり、損傷によるフィルター部無しの状態をそれぞれ再現した.

目詰まりが発生したフィルター部は、フィルター 部の織布とドレーン部の珪砂2号の間に、難透水性 の厚さ0.01mmのポリ塩化ビリニデン製のシートを 設置することで再現した.また、フィルター部無し については、フィルター部の織布を設置せず、堤体 を構成する珪砂7号とドレーン部の珪砂2号が接して いる状態とした.

(3) 実験操作方法

いずれのケースにおいても、初期水位を基礎地盤 表層位置として、実験を開始した.その後、目視で 10mm/minで水位を上昇させていき120mm上昇させ たところで水位を固定した.最高水位は、「ドレー ン工設計マニュアル(改訂版)」に定められてい る堤体内の平均動水勾配が0.3を超えないように設 定した.

(4) 観測・計測方法

水位を上昇させた後のすべりの発生と法尻の表面 変形を,目視と記録用ビデオカメラに加え,レーザ 変位センサで観察した.

レーザ変位センサは、対象物にレーザを照射し距離を測定するもので、本実験では、模型表層変位を 計測するため、模型上方から鉛直下方向に照射した. 測定する点の数は、最大で15点まで可能であり、法 尻を中心に、各点の間隔5mmごとに堤体側に7点、 堤内地側に7点に1秒ごとに変形を測定した.その精 度は、50µmとなっている.なお、レーザ変位セン サの原理として、湛水している箇所の変形量は水面 の影響を受けるため、正確ではないことに留意が必 要である.

いずれのケースも、すべりが発生した時点、また は実験開始から7,200秒(120分)経過した時点で実 験終了とした.

3. 実験結果

(1) ビデオカメラ・目視による観測

実験1~4の変形開始時と実験終了時の状態をそれ ぞれ図-6~9に示す.

実験1では、実験開始後540秒あたりで法尻に表面 変形が見られた.4つのケースの中では最も法尻に おける表面変形が早く生じた.720秒を過ぎるあた りから、堤内地側へ堤体を構成する珪砂7号が流出 し、およそ1,200秒でそれ以上のすべりが発生しな かったため実験終了とした.

実験2では、実験開始後7,200秒が過ぎても法尻に 目視で確認できるような変化は起きず、実験終了と した.およそ660秒でドレーン工法より排水が開始 され、7,200秒になっても継続的に排水が行われ、 法尻には目視可能な表面変形は見られなかった.

実験3では、実験開始後960秒あたりからドレーン 工法が堤内地側に押し出されるような挙動を示した. これは、ドレーン工法のフィルター部が目詰まりし、 排水機能が低下することでドレーン工法付近の浸潤 線が上昇し、それに伴い間隙水圧が上昇したと考え られる.また、排水機能の低下により、ドレーン工 法と堤体の境界から漏水が生じた.7,200秒経過し ても堤体のすべりまでは至らなかったため実験終了 とした.

実験4は実験開始後600秒あたりから法尻の表面に 変形が見られた.フィルター部が無いためドレーン 部の中に堤体を構成する珪砂7号が入り込み,法面 が沈下する挙動が観察された.ドレーン工法を設置 した中では最も早く法尻の表面変形が発生したが, 7,200秒経過しても堤体のすべりまでは至らなかっ たため実験終了とした.

(2) レーザ変位センサ

実験1~4のレーザ変位センサによる計測結果を図 -10~12に示す.



実験開始後540秒(図-10)は実験1に法尻が前に

押し出されるすべり発生の前兆が計測された.他の ケースには表面変形は見られなかった.

次に実験1が終了した1,200秒の計測結果(図-11) では、実験1はすべりが発生し、実験3及び実験4に 法尻に表面変形が生じ始めた.実験3はドレーン工 法が堤内地にやや押し出されていることがわかる. また、実験4はドレーン工法とその上の法面ととも に表面変形が発生している.なお、いずれのケース も堤内地は湛水しているため、堤内地側の計測値は 正確ではない.

最後にすべての実験が終了した7,200秒の計測結 果(図-12)では、実験3及び4の法尻の表面変形が さらに増加していることが分かる.一方、実験2で は実験終了まで目立った表面変形は生じなかった. 実験3は、法尻の変形は実験4より小さかったものの ドレーン工法付近に表面変形が顕著に表れ、ドレー ン工法が堤内地側に押し出されていることが計測さ れた.また、実験4は、法尻付近の表面変形が実験1 を除く3つのケースの中で最も大きく、すべり発生 の前兆が計測されたが、すべりには至らなかった. なお、この計測結果についても、堤内地は湛水して いるため、堤内地側の計測値は正確ではない.

(3) 考察

以上の実験結果から,無対策の実験1のみすべり が生じ,他3つのケースではすべりは生じなかった. フィルター部の健全性に関わらずドレーン工法の設



置により、河川堤防の安全性が向上することが明ら かになった.フィルター部に目詰まりが発生した実 験3においても、大きなせん断抵抗力と高い密度の 材料に法尻付近を置き換えたことにより、表面変形 が抑制されることを確認した、

また,フィルター部の健全性が損なわれた実験3, 4では、すべりは生じなかったものの法尻付近の表 面変形が観察された.これより、出水時の法尻付近 の表層変位を測定することで、フィルター部の健全 性を把握できる可能性があることが分かった.

4. 解析方法

(1) 解析方法

本研究の数値解析は、①堤体内の浸透流解析、② 堤体法面の円弧すべり解析の2つの解析手法から構成されている。河川堤防の安全性照査や設計において一般的に用いられる手法と同様に、浸透流解析により各時間における浸潤線を計算し、円弧すべり解析の際にその浸透流解析の計算結果を用い、すべりに対する安全率を求めた。

①浸透流解析

浸透流解析は,非定常飽和不飽和浸透流解析 Dtransu-2D ELを用いて行い,平面ひずみ条件で解析 を行った.非定常の飽和不飽和浸透流の基本式は式 (1)のとおりである.

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

ここに,

- x:堤防横断面の水平方向の軸[m]
- z:堤防横断面の鉛直方向の軸[m]
- k:透水係数[m/hr]
- h: 圧力水頭[m]
- C:比水分容量
- α:1の場合飽和領域,0の場合不飽和領域
- S_c:比貯留係数[1/m]
- t:時間[hr]



図-13 解析モデル(実験模型A)

		,
試料名	珪砂7号	まさ土
透水係数(m/s)	2.4×10 ⁻⁴	3.6×10 ⁻⁵
有効間隙率	0.2	0.1
比貯留係数	0.0001	0.0001
不飽和特性	砂質土	砂質土
湿潤単位体積重量(g/cm³)	14.4	14.0
飽和単位体積重量(g/cm³)	17.9	17.6
粘着力(kN/m²)	0.1	
内部摩擦角(°)	30.3	

	表-3	各試料の物性値(堤体,	基礎地盤)
--	-----	-------------	-------

②円弧すべり解析

円弧すべり解析は,前述の浸透流解析によって得られた浸潤線の中から最も危険なものを抽出し,式 (2)の修正フェレニウス式によってすべりに対する最 小安全率を算出した.その結果,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.

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

ここに,

F_s:安全率 *u*:すべり面の間隙水圧[kPa] *W*:分割片の重量[kN/m] *c*:すべり面に沿う土の粘着力[kPa] *l*:円弧の長さ[m] *φ*:すべり面に沿う土の内部摩擦角[°] *b*:分割片の幅[m]

(2) 解析モデル

解析モデルを図-13,14に示した.解析モデルの スケールは実験模型と同様とした.堤体の法面に浸 出点の指示,堤体の給水槽側の節点に水位として圧 力水頭の境界条件を与えた.模型実験と同様に初期 水頭は基礎地盤高と同じ135mmとし,水位上昇条件 として10mm/minを与え,120mm上げたところで水 位を固定した.

次に解析に用いた珪砂7号およびまさ土の土質条件を表-3,ドレーン工法(珪砂2号)の土質条件を 表-4に示す.湿潤単位体積重量と飽和単位体積重量 は模型作成時の含水比,乾燥密度より算出した.

透水係数については土の透水試験(定水位,JISA 1218),粘着力と内部摩擦角については土の三軸圧 縮試験(CUB条件,JGS 0523)を行って設定した.ま



図-14 解析モデル(実験模型B)

表-4 ドレーン工法の土質条件				
試料名	ドレーン工(珪砂2号)			
有効間隙率	0.2(実験3のみ0.1)			
比貯留係数	0.0001(実験3のみ0.001)			
不飽和特性	砂質土(実験3のみ粘性土)			
湿潤単位体積重量(g/cm³)	15.8			
飽和単位体積重量(g/cm³)	18.8			
粘着力(kN/m²)	1.0			
内部摩擦角(°)	40			

表−5 実験毎のドレーン工の透水係数

	実験2	実験3	実験4	
透水係数(m/s)	1.04×10 ⁻²	1.00×10 ⁻⁸	1.00×10-5	

た,有効間隙率,比貯留係数に関しては「河川堤防 の構造検討の手引き(改訂版)」⁴に基づいて設定 し,ドレーン工(珪砂2号)の粘着力,内部摩擦角に関 しては「ドレーン工設計マニュアル(改訂版)」に 基づき設定した.

(3) 解析ケース

解析は実験ケースと同様に,表-2に示す4ケース について実施した.ドレーン工に関してはフィル ター部の状態を健全,経年劣化による目詰まり,損 傷によるフィルター部無しの状態の比較を行うため 透水係数を表-5の様に変化させた.ドレーン工の透 水係数は,健全な状態は珪砂2号の透水係数を,目 詰まりの状態は「河川堤防の構造検討の手引き(改 訂版)」における粘性土の透水係数1.0×10⁸(m/s)を 用いた.また,フィルター部無しの状態はドレーン 部の中に堤体を構成する珪砂7号が入り込んだ実験 状況を踏まえ,健全と目詰まりの中間程度の透水係 数をパラメトリックスタディにより設定した.

5. 解析結果

(1) 浸透流解析結果

各実験の終了時の浸透流解析結果として図-15に 圧力水頭分布と浸潤線を示した.

実験1,3,4の結果は浸潤線が堤体の法面表層に 現れているのに対して,実験2の場合はドレーン工 法の排水効果により浸潤線が法面付近で大きく低下 していることが分かる.



(2) 円弧すべり解析結果

前述の浸透流解析の結果を用いた各実験の終了時の円弧すべり解析結果として図-16にすべり円弧と最小安全率を示した.

その結果,実験1は1.0を切りすべりが生じる結果 となった.実験2~4は1.0以上とすべりは生じない 結果となった.フィルター部が健全な実験2が最も 安全率が高く,フィルター部の健全性が損なわれた 実験3,4では低い安全率を示したが1.0を下回らな かった.

(3) 考察

以上の解析結果から、無対策の実験1のみ最小安 全率が1.0を下回り、他の3つのケースでは1.0以上と なった.フィルター部が健全な実験2の場合が最も 安全率が高く、フィルター部の健全性が損なわれた 実験3,4では、より低い安全率を示した.これは模 型実験の結果ともよく対応している.

数値解析からもフィルター部の健全性に関わらず, ドレーン工法の設置により,河川堤防の安全性が向 上するが,フィルター部の健全性が損なわれること によりその対策効果は低下することが示された.

6. まとめ

以上の実験および解析の結果から,以下の成果が 得られた.

①模型実験

無対策の実験1のみすべりが生じ,他3つのケース ではすべりは生じなかった.また,フィルター部の 健全性が損なわれた実験3,4では,すべりは生じな かったものの法尻の表面変形が観察された.

②数值解析

無対策の実験1のみ最小安全率が1.0を下回り,他 の3つのケースでは1.0以上となった.フィルター部 が健全な実験2の場合が最も安全率が高く,フィル ター部の健全性が損なわれた実験3,4ではより低い 安全率を示した.これは,模型実験の結果ともよく 対応している.

以上の結果から、ドレーン工法はフィルター部の 健全性によりその対策効果が異なり、それが法尻付 近の表面変形の差として顕在化することが明らかと なった.また、実験では、対策の有無によってすべ りの発生に差が出たことから、ドレーン工法はフィ ルター部の状態に関わらず対策効果を持つことが確 認された.

これより、出水時の法尻付近の表面変形を把握す ることにより、非破壊でドレーン工法のフィルター 部の健全性を把握し、維持管理に資する可能性が示 唆された.

謝辞:本研究は公財)能村膜構造技術振興財団助成金を 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,

https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html (2020.3閲覧)

- 2) 国土交通省水管理:国土保全局治水課:ドレーン工設 計マニュアル, 2017
- 3) 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, VoL25, pp.511-516, 2019
- 4) 財団法人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年

(2020.4.2受付)