

透水性基礎地盤に起因する 河川堤防の被災過程と浸透流解析結果の分析

REPRESENTATION OF PROCESS BY SEEPAGE ANALYSIS FOR THE FAILURE OF RIVER LEVEE BY PERMEABLE FOUNDATION GROUND

森 啓年¹・下川大介²・倉田大輔³・福原直樹⁴・服部 敦⁵
Hirotoshi MORI, Daisuke SHIMOKAWA, Daisuke KURATA,
Naoki FUKUHARA and Atsushi HATTORI

¹正会員 博士（工学） 国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室（〒305-0804 茨城県つくば市旭1）

²正会員 工修 国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室

³正会員 国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室

⁴正会員 工修 国土技術政策総合研究所企画部国際研究推進室（前河川研究部河川研究室）

⁵正会員 博士（工学） 国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室

Model experiments were carried out to observe the progressive failure of river levee caused by permeable foundation ground. This paper aims to represent the process of the experiments by seepage analysis. The result indicates that local hydraulic gradient or the weight balance of covered soil layer against pore-water pressure shows good performance as an indicator for river levee failure. In addition to that, it suggests that the evaluation of pore-pressure after the failure or deformation by weakening of levee toe is important to represent the whole process of progressive failure until breach.

Key Words: river levee, progressive failure, piping, model experiment, seepage analysis

1. 序論

(1) 背景

砂質土や礫質土などの透水性の基礎地盤（以下、透水性基礎地盤）に起因する噴砂や堤体のすべりの発生により、河川堤防（以下、堤防）の決壊や変形が生じる被災が発生している。平成24年7月には、計画高水位を長時間超過する出水が継続し、九州の矢部川の堤防が進行的な噴砂の発生により決壊した。この原因となった地盤条件として、基礎地盤に難透水性で挟まれた薄い砂質土層が分布したためと推定されている。また、平成25年7月には計画高水位を超える既往最大の水位を観測した梯川と、計画高水位には及ばなかったが長時間の高水を観測した子吉川において、堤防の基礎地盤の噴砂と堤体の裏法肩に至るすべりの複合した被災が発生した。これらの被災においては、薄い難透水性の被覆土層の下に砂質土層が存在し、さらにその下には礫質土層が存在する地盤条件であったことが明らかになっている。

これまで国土交通省では、このような堤防の被災の発生を防止するため、河川堤防設計指針¹⁾に基づき堤防の安全性を照査し、必要に応じて対策を行ってきた。

具体的には、透水性基礎地盤に起因する噴砂や盤ぶくれについては、飽和不飽和非常浸透流解析（以下、浸透流解析）を用いて安全性照査を実施し、川表遮水工法などの対策設計を実施している。また、同様に堤体のすべりについても浸透流解析により求めた浸潤線を外力として、修正フェレニウス法による円弧すべり解析を実施することにより安全性を評価し、ドレーン工法などの対策設計を行ってきた。その結果、国が管理する堤防のおよそ40%が対策が必要と評価されている²⁾。

そのような中、矢部川のように浸透による被災が発生し、一度の出水で堤防決壊に至るような堤防の弱点箇所の外力及び地盤条件を明らかにし、優先的に堤防強化を実施する区間を適切に抽出することで、効率的に堤防の治水安全性を向上することが求められている。

(2) 目的

本研究は、基礎地盤に起因する噴砂及び盤ぶくれ対策の実施が必要と評価された区間について、対策実施の優先度を評価する技術的枠組みを提案することを目的に実施する。具体的には、模型実験において観測された現象と、

1. 浸透流解析による局所動水勾配や被覆土層の重量

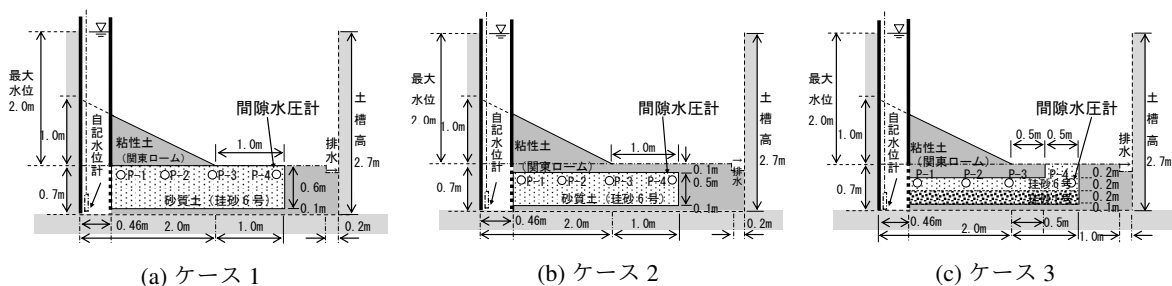


図-1 実験模型

と作用する揚圧力の比（以下、揚圧力）との関係

2. 円弧すべり解析による安全率との関係

を分析する。なお、模型実験としては倉田ら³⁾によるものを使用し、解析手法については堤防の安全性照査に一般的に用いられているものを用いた⁴⁾。

(3) 既往研究

噴砂の発生条件に関する研究は古くから行われてきた。その条件として、大きく三つの考え方がある。一つ目は、土粒子が動き出す限界流速により噴砂現象を定量的に評価しようとする考え方である。これらは、古くはJustinによる限界流速、その後の久楽ら⁵⁾、杉井ら⁶⁾による研究があり、土粒子の粒径と限界流速の関係が整理されている。二つ目は、上向きの浸透力によって土中の有効応力が次第に減少してゼロになるような限界動水勾配を求めることにより定量的に説明しようとするものである。これは、Terzaghiによる限界動水勾配があり、その後、河川堤防の分野では建設省土木研究所⁷⁾⁸⁾により、被災事例の分析等から「動水勾配が0.5程度を越えないよう処置をしておくのが安全」としており、現在の堤防の安全性照査においても、浸透流解析による法尻部の局所動水勾配によりその安全性を評価している。最後は、被災事例の分析により、水位差と浸透経路長の比と、土質毎に経験的に求めたクリープ比を比較するもので、Blighの方法⁹⁾やLaneの方法¹⁰⁾がこれに該当する。

前述の矢部川の被災を契機として、近年河川堤防に対象を絞って新たな研究が実施されている。齋藤ら¹¹⁾は模型実験により、粒度分布、土層構造の面から噴砂の進行性を分析し、流速と動水勾配の両方が重要であることを示唆した。また、藤澤¹²⁾は噴砂が発生した後の土の定量的なモデルを構築し、実験によりその有効性を確認している。さらに、崔ら¹³⁾は透水性基礎地盤からの浸透水により、堤防の法尻部の土粒子の骨格が破壊される現象が生じ、それが拡大することにより堤体の変形が発生することを実験により確認した。

しかし、本研究のように、基礎地盤に起因する進行的な被災の発生過程を実験により観測し、その過程を浸透流解析や円弧すべり解析の結果と比較した研究は

ほとんどない。

2. 解析手法

(1) 模型実験概要

模型実験は、透水性基礎地盤の分布状況を変えた図-1に示す3ケースで実施した。ケース1（図-1a）は透水性基礎地盤を地表面に露出させた地盤条件、ケース2（図-1b）は透水性基礎地盤が難透水層に被覆された地盤条件、ケース3（図-1c）は透水性基礎地盤をケース1,2と同一の層とより高い透水性を持つ層の二層構造とし、さらに透水性基礎地盤を被覆する難透水層を他のケースより厚くするとともに、透水性基礎地盤の一部を地表面に露出させた地盤条件とした。なお、透水性基礎地盤は珪砂6号（粒径0.07～0.6mm）、珪砂1号（粒径1.7～4.8mm）、堤体は関東ロームを用いて作成した。

これらの実験模型に対して、実験開始前に模型底面からケース1は0.7m、ケース2は0.6m、ケース3は0.5mに水位を保持し、24時間以上放置することにより、透水性基礎地盤を飽和させた。その後、一定速度（ケース1,2は0.01m/分、ケース3は0.02m/分）で水槽内の水位を上昇させ、経時的に間隙水圧、堤体及び基礎地盤表層の変形を観測した。

実験の結果を図-2から図-4に示す。図-2aから図-4aは間隙水圧計の測定結果を示しており、横軸は実験開始後の経過時間、縦軸は実験における圧力水頭の測定値を示している。図-2bから図-4bは図-2aから図-4aに示す各段階における変状の進行過程を示している。

図-2に示すようにケース1は、透水層露出部（以下、露出部）からの漏水がみられ、堤体の法尻部が膿んだような状態となった後、縦断亀裂が発生した（図-2b①）。水位がさらに上昇すると、縦断亀裂からの漏水量が増加し（図-2b②）、最終的に法尻部が水圧による側方流動し（図-2b③）、それに伴い堤防に大変形が生じた（図-2b大変形）。

次に、図-3に示すケース2の結果として、初めに基礎地盤の被覆土の盤ぶくれやそれに伴う漏水がみられ、その後ケース1と同様に堤体の法尻部が膿んだような状態となった後、縦断亀裂が発生した（図-3b①）。そ

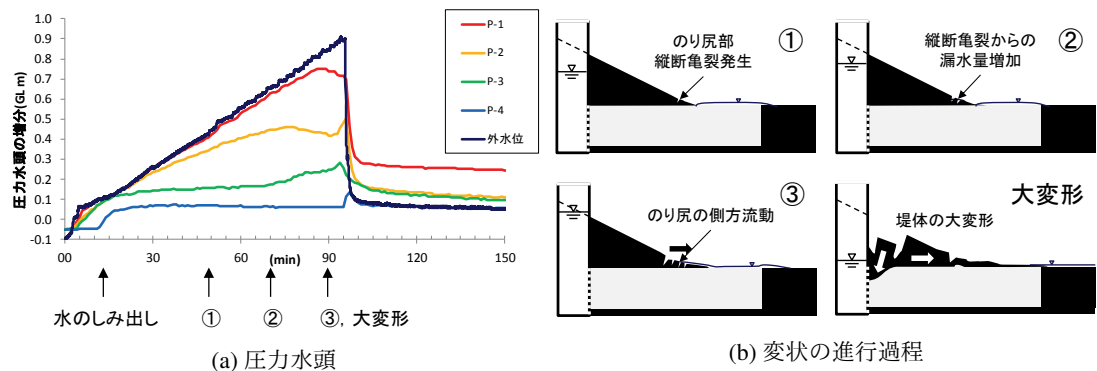


図-2 実験結果：ケース 1

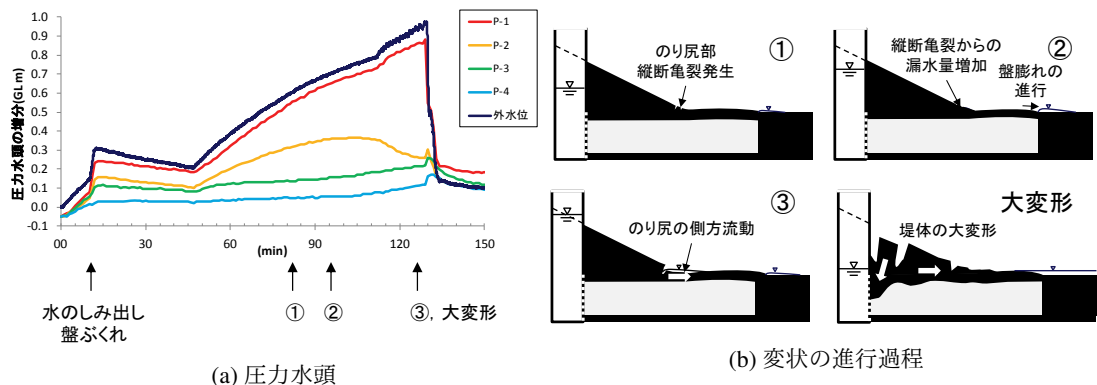


図-3 実験結果：ケース 2

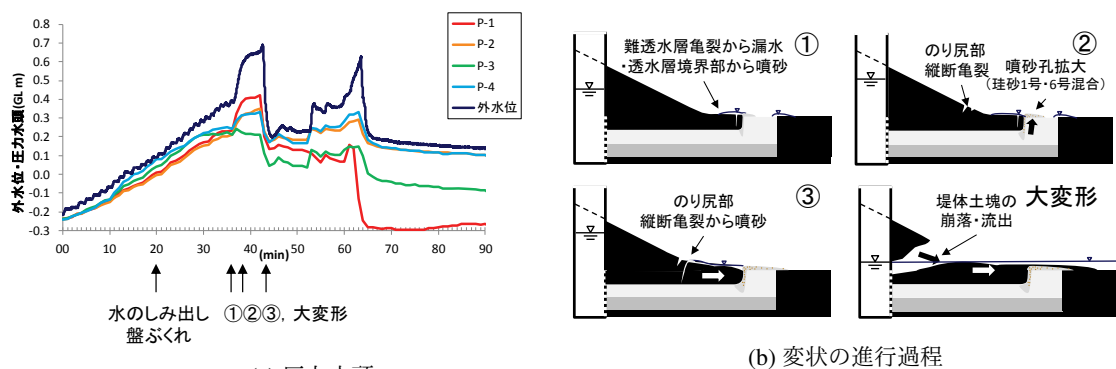


図-4 実験結果：ケース 3

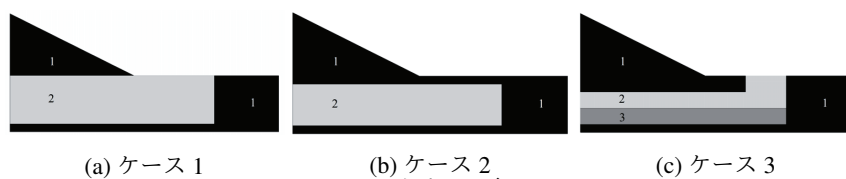


図-5 解析モデル

の後、縦断亀裂からの漏水量が増加とともに盤ぶくれも進行し（図-3b ①）、法尻部が水圧によって側方流動し（図-3b ③）、それに伴い堤防に大変形が生じた（図-3b 大変形）。

最後に、ケース 3 の結果を図-4 に示す。初めに被覆土層の難透水部分の盤ぶくれと透水層露出部からの漏水がみられた。水位が上昇すると露出部と被覆土の境界部から漏水と噴砂が発生した（図-4b ①）。その後、透水層露出部から大量の漏水とそれに伴って珪砂 1 号と珪砂 6 号の混合物による噴砂が発生し、噴砂の発生位

置は露出部と被覆土の境界部分に沿って拡大し、露出部の多くの部分で生じた（図-4b ②）。最終的に、法尻部に生じた縦断亀裂から漏水および噴砂が発生し（図-4b ③）、それに伴い堤体が陥没、流出する様子が観察された（図-4b 大変形）。

(2) 浸透流解析

前節に示した実験の局所動水勾配と揚圧力を評価するため、浸透流解析を実施した。浸透流解析は Dtransu-2D EL を用い、図-5 に示す実験模型をモデル化して実施し

表-1 材料物性

材料番号	土質	透水係数 (m/s)	湿潤単位体積重量 (kN/m ³)	飽和単位体積重量 (kN/m ³)	粘着力 (kPa)	内部摩擦角 (度)
1	関東ローム	3.13×10^{-7}	17.2	18.9	42.8	0.0
2	珪砂 6 号	1.55×10^{-4}	18.1	19.9	0.0	34.2
3	珪砂 1 号	2.25×10^{-2}	19.7	21.7	0.0	31.8

た．透水係数は，土の粒度試験結果（JIS A 1204:2009）の結果を用いて，Creager の式により透水係数を換算し，表-1 に示すように設定した．また，見かけの体積含水率と比透水係数の関係（ $\theta - Kr$ ）や見かけの体積含水率と負の圧力水頭の関係（ $\theta - \Psi$ ）といった不飽和特性など，その他のパラメータについては，珪砂 1 号は礫質土，珪砂 6 号は砂質土，関東ロームは粘性土として，河川堤防の構造検討の手引き⁴⁾に基づき設定した．これらの解析モデルに，実験において観測した外水位を与え，浸透流解析を実施した．

(3) 円弧すべり解析

実験における堤体のすべりに対する安全率を評価するために，浸透流解析と同様に図-5 に示す実験模型をモデル化して円弧すべり解析を実施した．円弧すべり解析に用いた土質条件は，表-1 に示す通りである．河川堤防の土質試験結果情報¹⁴⁾をもとに，礫質土，砂質土及び粘性土の湿潤単位体積重量，粘着力 c 及び内部摩擦角 ϕ の平均値（サンプル数：礫質土 $n = 606$ ，砂質土 $n = 1996$ ，粘性土 $n = 7729$ ）を用いて解析を実施した．

3. 解析結果

(1) 浸透流解析

浸透流解析の結果を図-6 から図-8 に示す．グラフは鉛直方向及び水平方向の局所動水勾配（基準値 $i = 0.5$ ）もしくは揚圧力（基準値 $G/W = 1.0$ ）の計算結果を示しており，横軸は実験開始後の経過時間（分），縦軸（左側）は水平方向の局所動水勾配もしくは揚圧力を示している．なお，模型実験の各ケースの法尻部の地盤条件を考慮して，図-6 は法尻部の鉛直方向及び水平方向の局所動水勾配，図-7 と図-8 は法尻部の揚圧力で浸透流解析による解析値と実験での観測値を整理している．なお，実験での観測値と比較出来るよう，ケース 1 の鉛直方向の局所動水勾配については図-1a に示す表層から 0.05m の深さに設置した間隙水圧計 P-3 と表層の間の動水勾配，水平方向の局所動水勾配については図-1a に示す表層から 0.05m の深さに設置した間隙水圧計 P-2 と P-3 の間の動水勾配とした．また，ケース 2 及びケース 3 の揚圧力についても観測値と比較出来るよう図-1b と図-1c に示す被覆土層底部から 0.05m の深さに設置した

間隙水圧計 P-3 の圧力水頭と被覆土層に加えて透水層厚さ 0.05m 分の重量の比により算出した．

図-6 のケース 1 の結果として，まず鉛直方向の局所動水勾配に着目する．実験において水のしみ出しが発生した段階の鉛直方向の局所動水勾配は解析値で 0.25 と安定，観測値で 2.5 と不安定の結果であった．続けて外力を上昇させると，法尻部の縦断亀裂が発生した段階（図-6a ①）で，解析値では 1.0，観測値では 4.1 となり，いずれも不安定の結果となった．縦断亀裂部から漏水量が増加した時点で（図-6a ②），解析値では 1.4，観測値では 4.3 の結果となった．さらなる外力の上昇に伴い，解析値では 1.8，観測値では 5.7 を示すとき，法尻部が水圧により側方流動し（図-6a ③），堤防が大変形を起こした．なお，水のしみ出しが発生した実験の初期から，解析値と観測値には大きな差が生じている．観測値は限界動水勾配を超過し透水層の安定が保てないほど大きいため，観測精度などその原因については確認中である．

一方，ケース 1 の水平方向の局所動水勾配であるが，実験において水のしみ出しが発生した段階は解析値，観測値ともに 0.1 といずれも安定の結果であった．続けて外力を上昇させると，法尻部の縦断亀裂が発生した段階（図-6b ①）で，解析値，観測値ともに 0.3 となった．縦断亀裂部から漏水量が増加した時点で（図-6b ②），解析値，観測値ともに 0.4 と引き続き安定との結果となった．さらなる外力の上昇に伴い，解析値では 0.5，観測値では 0.3 を示すとき，法尻部が水圧により側方流動し（図-6b ③），堤防が大変形を起こした．なお，縦断亀裂から漏水量が増加した時点以降，水平方向の局所動水勾配は解析値と比較して観測値が小さくなる傾向がある．これは，縦断亀裂から流出する浸透水により P-2 の間隙水圧が減少，漏水量の増加に伴う P-3 の位置の水位増加により，水平方向の局所動水勾配が緩和したためと考えられる．

次に図-7 のケース 2 では，実験において水のしみ出し及び盤ぶくれが発生した段階の揚圧力は解析値及び観測値ともに 1.0 と安定と評価された．続けて外力を上昇させると，法尻部の縦断亀裂が発生した段階で，解析値では 0.5，観測値では 0.9 となり（図-7 ①），不安定と評価された．縦断亀裂部から漏水量が増加した時点で，解析値では 0.4，観測値では 0.8 の結果となった

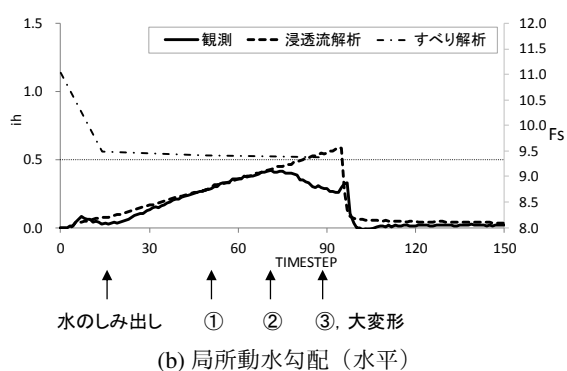
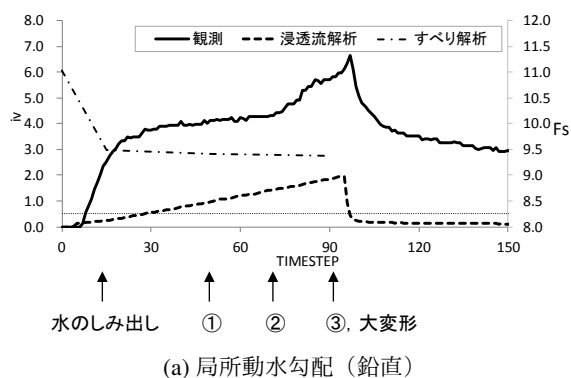


図-6 解析結果：ケース 1

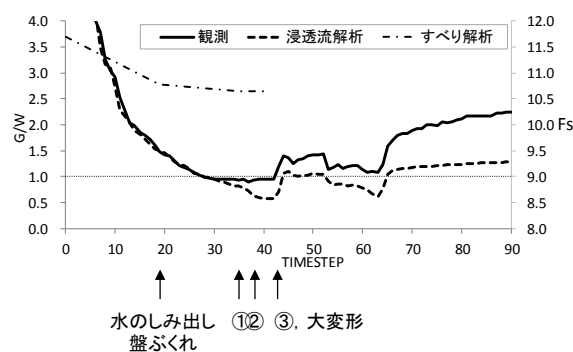
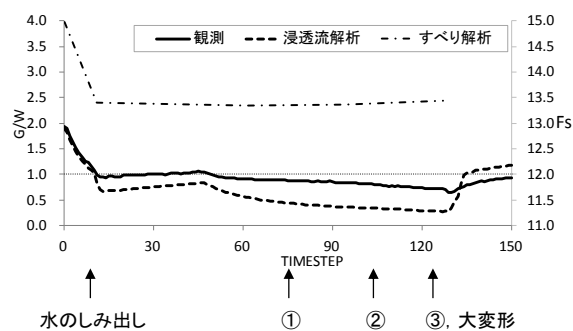
(図-7 ②). さらなる外力の上昇に伴い、解析値では 0.3、観測値では 0.7 を示すとき、法尻部が水圧により側方流動し（図-7 ③）、堤防が大変形を起こした。なお、水のしみ出し及び盤ぶくれが発生した時点以降、揚圧力は解析値と比較して観測値が大きくなる傾向がある。これは、盤ぶくれ部分と周辺地盤の境界に発生した亀裂から浸透水が流出し P-3 の間隙水圧が減少したことにより、揚圧力が緩和したためと考えられる。

最後に図-8 のケース 3 では、実験において水のしみ出し及び盤ぶくれが発生した段階の揚圧力は解析値、観測値ともに 1.5 と安定と評価された。続けて外力を上昇させると、露出部の被覆土の境界部から漏水と噴砂が発生した時点で（図-8 ①）、解析値では 0.8、観測値では 1.0 となり、不安定と評価された。透水層露出部から大量の漏水とそれに伴って珪砂 1 号と珪砂 6 号の混合物による噴砂が発生し、噴砂の発生位置は透水層と難透水層の境界部分に沿って拡大し、露出部の多くの部分で生じた時点で（図-8 ②）、解析値では 0.5、観測値では 1.0 の結果となった。さらなる外力の上昇に伴い、解析値では 0.5、観測値では 1.0 を示すとき、法尻部に生じた縦断亀裂から漏水および噴砂が発生し、堤防が大変形を起こした（図-8 ③）。なお、噴砂が発生した時点以降、揚圧力は解析値と比較して観測値が大きくなる傾向がある。これは、噴砂の発生により P-3 の間隙水圧が減少し、揚圧力が緩和したためと考えられる。ケース 2 と異なり、盤ぶくれが発生した時点で、揚圧力は解析値と比較して観測値が大きくならなかった理由として、高い透水性を持つ底部からの浸透水の供給が十分存在したためと考えられる。

(2) 円弧すべり解析

円弧すべり結果を前節の浸透流解析結果とあわせて図-6 から図-8 に示す。グラフは安全率の計算結果を示しており、横軸は実験開始後の経過時間（分）、縦軸（右側）は安全率 F_s を示している。

ケース 1 からケース 3 とともに外水位の上昇とともに、安全率は低下する傾向がある。ケース 1 では、いずれの変



状の段階でも安全率が 9.0 より下回ることにはなかった。また、ケース 2 においても、同様に安全率が 13.0 を下回ることにはなかった。最後にケース 3 であるが、これについても安全率が 10.0 を下回ることがなかった。

ここで、ケース 1 及びケース 2 において発生した法尻部に縦断亀裂を円弧すべり解析を用いて評価を試みる。縦断亀裂が発生した時点の外力を用いて、円弧すべりが実験で観測された法尻部に生じる場合、ケース 1 及びケース 2 とともに関東ロームの粘着力 c が 0.12 kPa まで低下、もしくは砂質土の様に粘着力 c をゼロにし ϕ 材として扱う必要があることがわかった。

(3) 考察

実験で観測された現象と局所動水勾配、揚圧力、安全率との関係を考察する。まず、ケース 1 の解析値で

は鉛直方向の局所動水勾配が基準値の 0.5 に達する時点は、漏水発生後で、法尻部の縦断亀裂発生前である。また、水平方向の局所動水勾配が基準値の 0.5 に達する時点は、縦断亀裂からの漏水量が増加した後で、法尻の側方流動が発生する前である。次に、揚圧力が基準値の 1.0 まで低下する時点は、ケース 2 の解析値では漏水と盤ぶくれが発生する時点であり、ケース 3 の解析値では漏水と盤ぶくれの発生後で、露出部の被覆土の境界部から漏水と噴砂が発生する前である。最後に、安全率が 1.0 となる時点であるが、すべてのケースについて 1.0 を切ることはなかった。以上の結果から、いずれのケースも大変形に至る前に鉛直方向の局所動水勾配もしくは揚圧力のいずれかの解析値が不安定と評価されている。

一方、局所動水勾配及び揚圧力について変形発生後に実測値と解析値が乖離する傾向が見られた。具体的には、観測値自体の精度確認が必要なケース 1 の鉛直方向の局所動水勾配を除き、ケース 1 の水平方向の局所動水勾配、ケース 2 及びケース 3 の揚圧力がそれに該当する。これは、浸透流解析では考慮されない堤体及び基礎地盤の変形の発生、特に亀裂の発生とそれに伴う水みちの出現により、間隙水圧分布が変化したためと考えられる。今後、堤防が大変形するまでの過程を考慮する上では、変形に伴う間隙水圧の変化について、定量的に評価することが必要である。

さらに、ケース 1 及びケース 2 において、堤体の法尻部が透水性基礎地盤からの浸透水により飽和し、亀裂や側方流動が発生し、大変形に至る様子が観測された。これらの現象は、浸透流解析の照査対象となっている鉛直方向及び水平方向の局所動水勾配や揚圧力で評価している現象と異なるものである。また、円弧すべり解析で説明することも、非現実的に低い土質強度を想定する必要がある。今後、透水性基礎地盤に起因する堤防被災の進行過程を議論する際に、このような被災メカニズムについても定量的な評価が必要があると考えられる。

4. 結論

本研究の結果、以下の事項が明らかになった。

1. 浸透流解析における局所動水勾配及び揚圧力のいずれかの解析値は、透水性基礎地盤に起因する大变状に至る前の時点において不安定と評価している。一方、円弧すべり解析における安全率を用いて、実験において観測された透水性基礎地盤に起因する変状の発生を評価することは困難であった。
2. 変形の進行に伴う漏水等の発生により、局所動水勾配及び揚圧力は解析値と比較して実測値が低く

なる傾向があった。大変形まで定量的に評価するためには、変形を伴う間隙水圧の変化を評価できるモデルの構築が必要である。

3. 被覆土層がないもしくは薄い地盤条件で法尻部の亀裂や側方流動を伴う変形が、大変形に進行する様子が観測された。このような現象は円弧すべり解析による評価が困難であるため、定量的な評価ができるモデルの構築が必要である。

なお、実際の堤防に作用する外力は堤防の形状に応じることから、堤防の大きさにより外力条件は上限がある。大変形の発生する地盤条件及び外力条件を把握すれば、それらをもとに優先的に補強すべき弱点箇所が明らかにできると考える。引き続き、実験及び解析、さらに現場の事象から検討を深めたい。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局治水課: 河川堤防設計指針, 平成 14 年 7 月 12 日, 最終改正 平成 19 年 3 月 23 日。
- 2) 独立行政法人土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム: 河川堤防の浸透に対する照査・設計のポイント, 2014. <http://www.pwri.go.jp/team/smd/pdf/syousasekkei%20point1407.pdf> (2015.4 確認)
- 3) 倉田大輔, 福原直樹, 森啓年, 服部敦, 吉田直人, 石原雅規, 佐々木哲也: 透水性基礎地盤に起因する河川堤防の進行性破壊に関する模型実験, 河川技術論文集, 第 21 巻, 投稿中
- 4) 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), JICE 資料第 111002 号, 2012。
- 5) 久楽勝行, 吉岡淳, 佐藤正博: 水平方向浸透流下における砂地盤のパイピングについて, 第 20 回土質工学研究発表会, pp.1483-1484, 1985。
- 6) 杉井俊夫, 佐藤健, 宇野尚雄, 山田謹吾: 浸透破壊の発生プロセスと土の非均質性, 土と基礎, Vol.37-6, pp.17-22, 1989。
- 7) 建設省土木研究所土質研究室: 河川堤防の土質学的研究, 土木研究所資料第 688 号, p99, 1971。
- 8) 建設省土木研究所材料施工部土質研究室: 堤防基礎地盤のパイピング破壊に関する模型実験, 土木研究所資料第 3399 号, 1996。
- 9) Bligh, W.P.: Dams, Barrages, and Weirs on Porous Foundations, Engineering News, pp.708-712, 1910。
- 10) Lane, E.W.: Security from Underseepage - Masonry Dams on Earth Foundations, Transactions, ASCE, Vol.100, pp.1235-1351, 1935。
- 11) 齊藤啓, 前田健一, 李兆卿, 山口敦志: 透水性基盤のパイピングとすべりに着目した河川堤防の安定性, 第 2 回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム, pp.23-26, 2015。
- 12) 藤澤和謙, 村上章: 鉛直上向きに生じる浸透破壊後の浸透流速と土粒子速度の予測理論, 地盤工学ジャーナル, Vol. 9, No.4, p.511-520, 2014。
- 13) 崔瑛, 小高猛司, 李圭太: 透水性基礎地盤のパイピングに起因する堤体崩壊に関する模型実験, 第 70 回土木学会年次学術講演会 (投稿中)
- 14) 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室: 河川堤防の土質試験結果情報, http://www.nilim.go.jp/lab/fbg/download/geo_download/geo_download.html (2015.4 確認)

(2015. 4. 3受付)