

基盤の地盤特性が異なる河川堤防の高水位の 継続作用による漏水とパイピングの進行特性

WATER LEAK - PIPING BEHAVIORS OF RIVER LEVEES
WITH DIFFERENT FOUNDATION GROUND PROPERTIES
UNDER LONG DURATION OF HIGH WATER LEVEL

齊藤啓¹・前田健一²・泉典洋³・李兆卿⁴

Hiroshi SAITO, Kenichi MAEDA, Norihiro IZUMI and Zhaoqing LI

¹正会員 日本工営株式会社 流域・都市事業部 (〒102-0083東京都千代田区麹町4-2)

²正会員 工博 名古屋工業大学教授 高度防災工学センター (〒466-8555名古屋市昭和区御器所町)

³正会員 工博 北海道大学教授 環境フィールド工学専攻 (〒060-8628札幌市北区北十三条西8丁目)

⁴学生会員 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻 (〒466-8555名古屋市昭和区御器所町)

A river levee of the Yabe River was breached due to piping failure induced by prolonged high water levels following heavy rains in Northern Kyushu in 2012. The piping failure was caused by water infiltration into the highly permeable sand and gravel foundation under the clay levee body. However, some levees with similar foundations were deformed but did not fail. This study used models to investigate the influences of the soil-stratum conditions on the properties of pore water pressure propagation and water leakage and the piping failure behavior. The test results revealed that the piping could not be viewed as a single homogeneous foundation ground with leakage of clean water, according to Darcy's law. Rather, the piping failure progressed with a large water leakage including sand in a two-layer foundation ground consisting of gravel below fine sand, even under a low hydraulic gradient. We propose a new criterion for piping based on the foundation ground strata configuration, average hydraulic gradient, and flow velocity.

Key Words : piping, hydraulic gradient, critical velocity

1. はじめに

平成24年に九州北部で発生した梅雨前線に伴う豪雨により矢部川本川で18カ所の被災が発生し、矢部川右岸7.3k地点で堤防が決壊し付近に甚大な被害を及ぼした¹⁾。破堤箇所付近では氾濫危険水位を5時間以上超過し、水位が下がり始めたところで決壊する、いわゆるパイピングによる被災であった。被災の要因としてまず決壊箇所の土質構成に着目すると、図-1のように堤体は粘性土で構成され、その下の基盤層に透水性の高い砂層が分布しており、この砂層を通じパイピングが

発生したと報告されている。また高水位が長時間作用したことにより堤防が進行的に弱体化したことも被災の要因として考えられる。一方、同河川延長上でも堤体の下に砂層の分布や旧河道と交差する箇所があり、決壊した7.3k地点以外に11カ所で基盤漏水が確認されている。

しかし、このような被災の程度を分ける条件については十分に整理されておらず、実際に超過洪水が起きた場合同様の決壊事例がどこでも起こり得る状況である。そのため、出水時の被災程度を判別できる地盤や、外力としての水理条件を明確にすることは今後の河川堤防強化に重要と考える。

これまでに、破堤した矢部川堤防断面を模擬した実験を実施してきた²⁾(図-2)。実験では堤体下の基盤条件を豊浦砂で堆積させた砂質単一層基盤と、上層に珪砂7号下層に珪砂2号を堆積させた細砂-砂礫互層基盤の2つについて行った。その結果、単一層基盤では堤内側から澄んだ漏水があるだけでパイピングは進行せず、堤体ですべりも生じなかった。一方、互層基盤では堤内側から濁った漏水が発生、堤体のすべりも複

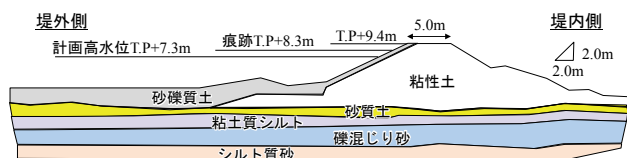


図-1 2012年矢部川破堤箇所の近傍断面、矢部川堤防調査委員会報告書を参考¹⁾

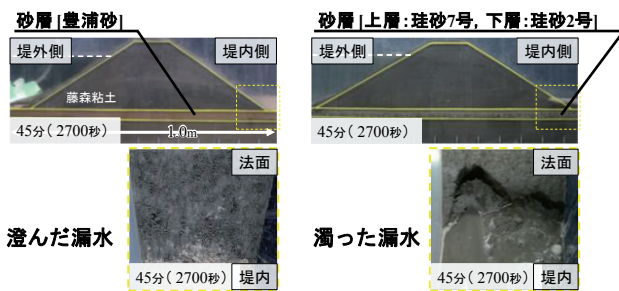


図-2 堤体底部に砂礫層を有する場合のパイピング実験

合してパイピングが進行する様子が観察された。実際の堤防においても噴砂が発生する箇所には細砂層と透水層の互層の存在が報告されている³⁾。

堤体の変状まで考慮すると堤体材料や形状等によって現象が複雑になると考え、本研究では久楽⁴⁾の実験を参考に矢板で堤体を拘束することで堤体直下の水平流れに着目した実験を行い、基盤層構造がパイピングに及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

図-3に実験装置の概略図を、表-1に実験条件を示す。実験は全14ケース行い、その内case1-1, 2-1, 2-2, 2-3について検討する。基盤層は水中落下で堆積させ、相対密度が70%程度になるように締め固めた。堤体部分は含水比20%の藤森粘土をアクリルの仕切り板で挟み、十分締め固め変状を拘束し、現象の単純化をはかった。図-4に実験で使用した試料の粒度分布及び透水係数を示す。透水係数に関して、藤ノ森粘土及び珪砂4, 7号については変水位透水試験、珪砂2号については定水位透水試験により求めた。

間隙水圧計は土槽奥行中央に設置し、1から8は土槽底面に固定、9から16は下砂層に埋め込むようにそれぞれ水中で設置した。堤防断面及び堤内側でビデオ撮影を行い現象の観察を行った。また、堤内側の漏水流量について重量計を用い計測を行っている。

実験の手順は次の通りである。

- 1) 模型地盤作製後堤外側で水位を1cmとし、間隙水圧の変化がなくなるまで維持する。
- 2) 間隙水圧計を0にリセットする（実験中は水圧の増分を計測する）。
- 3) 実験開始の1分後に水位を5cm/minの速度で上昇させ、基盤層からの水位6cmで30分維持する。この水位は矢部川破堤時の平均動水勾配を参考に決定した。
- 4) 破壊しない場合、更に水位を5cm/minの速度で上昇させ10分維持する（破壊するまで繰り返す）。

パイピングの定義は様々⁵⁾あるが、本稿ではパイピング孔が堤外側の地表に達した時点とする。

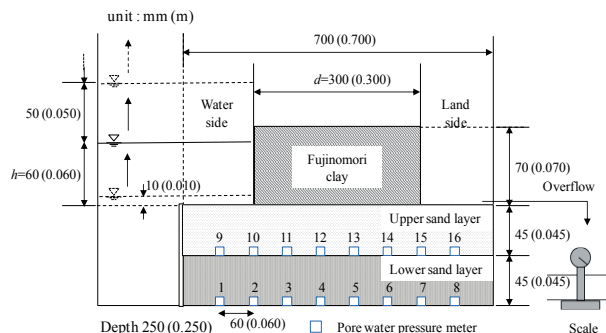


図-3 実験装置の概要

表-1 実験ケース一覧（[平均動水勾配] = h/d ）

	case	基盤上層	基盤下層
単一層	case1-1, 2, 3	珪砂7号	
互層	case2-1	珪砂7号(0.045)	珪砂2号(0.045)
	case2-2	珪砂7号(0.045)	珪砂4号(0.045)
	case2-3	珪砂7号(0.045)	珪砂2号(0.045)
	case2-4, 5, 6	珪砂7号(0.020)	珪砂2号(0.070)
	case2-7, 8	珪砂7号(0.020)	珪砂2号(0.045)
	case2-9	珪砂7号(0.020)	珪砂4号(0.070)
	case2-10	珪砂7号(0.020)	珪砂4号(0.045)
	case2-11	珪砂7号(0.020)	珪砂2号(0.070)

() 内は層厚(m), 下線は本稿で検討したケース

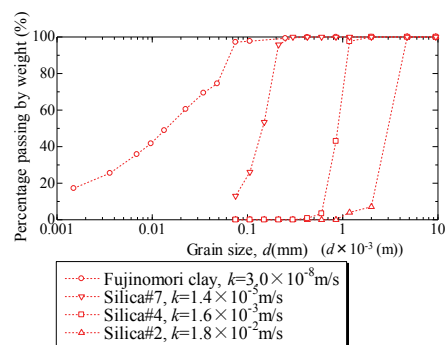


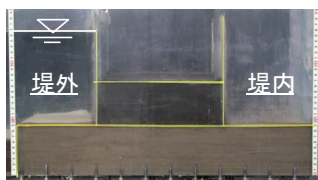
図-4 実験試料の粒度分布

3. 実験結果及び考察

(1) 空洞化の進行及びパイピングの様子

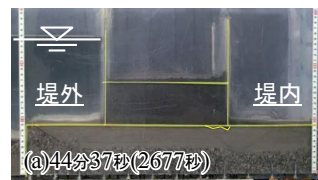
図-5に実験時におけるcase1-1（単一層）とcase2-3（互層）の様子を示す。矢部川の破堤箇所近傍の堤外側では、基盤砂層が礫層に被覆され河川水が基盤砂層に浸透しやすい地層状態にあったと考えられた。case2-3ではこれを単純化して、透水性の高い砂礫層に流入しやすいように基盤下層を河川水に露出させた。

実験では法尻付近にできた空洞が堤外側へ見かけ上移動・伝播していくような様子が見られた(写真(a)→(b))。 (b)の時点で空洞内に噴砂が発生しており、内部では複雑な流れが生じていると思われる。現象の進

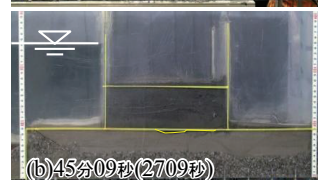


(a) case1-1 (単一層)

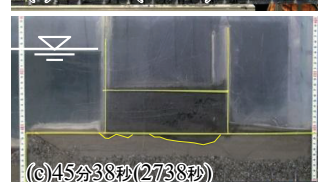
これ以上水位を上昇させても砂層を通してパイピングは生じない。
堤内側から染み出るようにして漏水。



堤内側法尻付近から堤体土の流出が活発化し小さな空洞を確認。



法尻付近の空洞が堤外側に伝播。
空洞内に噴砂が発生。
空洞の拡大。



堤外側法先が陥没。河川水が上の砂層を勢いよく押し流す。



パイピング孔が堤内側とつながる。

(b) case2-3 (互層)

図-5 パイピング発生時の様子

行過程をみると、空洞内の上流で洗掘によって流された土砂が、空洞の浸透の下流側（堤内側）を閉塞した。これが繰り返されることで空洞は大きくなり、写真(c)時点で堤外側基盤層が陥没した。その後空洞は繋がり、堤体直下にできたパイピング孔を勢いよく河川水が流れ込み破壊した。case2-1やcase2-2においても、撮影側でパイピングが進行する様子は見られなかったがおよそ同様の破壊であったと考えられる。

(2) 間隙水圧分布

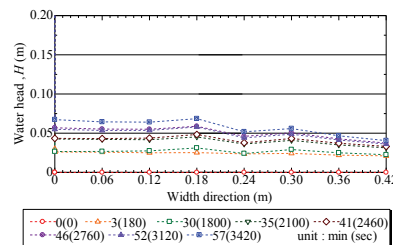
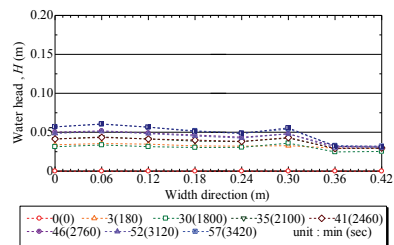
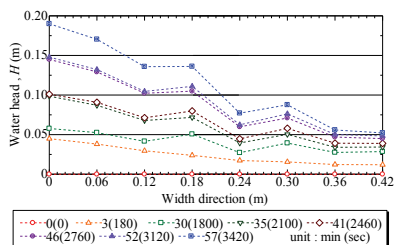
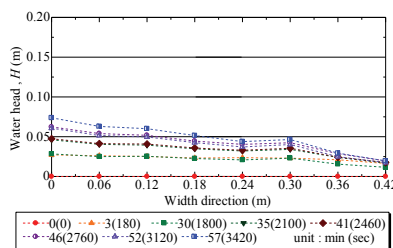
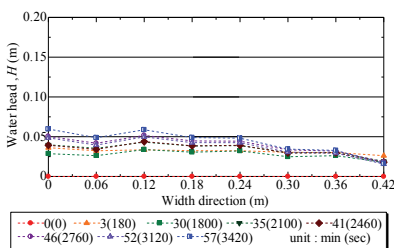
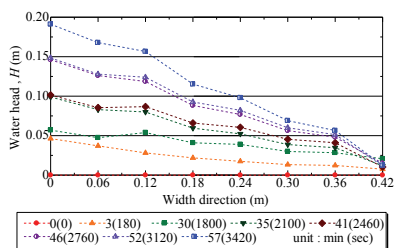
図-6に各ケースにおける間隙水圧分布を示す。

基盤が珪砂7号のみからなるcase1-1から見ると、水位上昇に伴い基盤内の間隙水圧が全体的に増加していることがわかる。またその分布形状は堤外から堤内に向かいおよそ直線的に減少しており、基盤層全体で一様なダルシー則に従った浸透流が発生していると考えられる。

異なる試料の互層からなるcase2-1やcase2-2を見ると、水位上昇に関わらず間隙水圧があまり増加しないことがわかる。またcase2-1とcase2-2を比較するとcase2-2の方の間隙水圧がわずかに大きかった。case2-2では基盤下層の透水性が珪砂2号より小さい珪砂4号で構成されており、case2-1に比べ間隙水圧の消散が小さくなったと考えられる。

(3) 局所的な水平・鉛直動水勾配

図-7、図-8に実験時計測した間隙水圧から求めた水平・鉛直動水勾配を示す。局所動水勾配に関しては計測器間の圧力差を計測器間距離で除すことで求めた。水平に関しては堤外から堤内への向きを、鉛直に関しては上向きを正とする。拘束した堤体の幅は0.3mなので、水位



外水位 0min(0sec):0.01m, 3,30min(180, 1800sec):0.06m, 35,41min(2100, 2460sec):0.11m, 45,52min(2700, 3120sec):0.16m, 57min(3420sec):0.21m

(a) case1-1

(b) case2-1

(c) case2-2

図-6 間隙水圧分布 (上: 基盤上層No. 9-16, 下: 基盤下層No. 1-8)

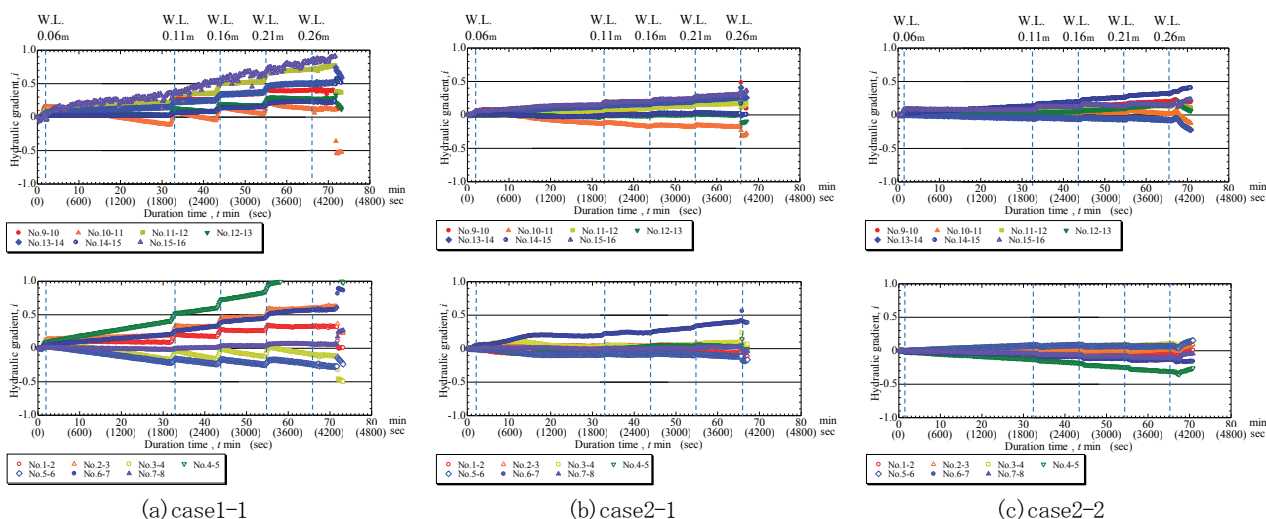


図-7 間隙水圧より算出した水平動水勾配 [局所動水勾配] = [水頭差] / [計測間距離]

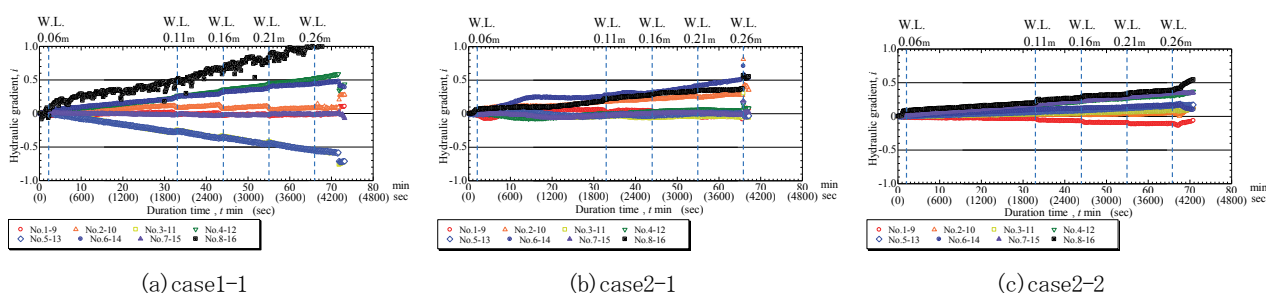


図-8 間隙水圧より算出した鉛直動水勾配 [局所動水勾配] = [水頭差] / [計測間距離]

(W.L.) が 0.11m, 0.16m, 0.26m のとき、平均動水勾配はそれぞれ約 0.37, 0.53, 0.87 となる。

case1-1 では、水位の上昇に伴い水平、鉛直ともに動水勾配が増加している様子が見られた (図-7, 8(a))。このように動水勾配が上昇する理由としては、水位上昇による位置水頭の増加分を砂層内で圧力水頭として受け持つためと考えられる。一方、case2-1 (図(b)) 及び case2-2 (図(c)) では、水位が上昇しても砂層内の水平、鉛直動水勾配に大きな変化は見られず、局所動水勾配の最大値が 0.4 程度であり、基盤内で水圧が消散していると考えられる。現在、パイピング照査で限界動水勾配が 0.5 であることを考えると、外力特性だけでなく、基盤の砂礫層の分布特性などを考慮することが必要と思われる。

(4) 堤内側の噴砂と間隙水圧

図-9 に case2-2 における間隙水圧の経時変化を示す (図-7, 8(c) に対応)。実験開始から 33 分後に水位上昇を始めたため間隙水圧もそれに合わせて増加していることがわかる。その後 33 分 56 秒頃に間隙水圧が急激に減少する。この時の堤内側の様子を見ると、図-10 にあるような直径 10mm、高さ 1~5mm 程度の噴砂が発生したタイミングと一致した。このような噴砂は case1-1 のような単一層基盤で見られず、互層基盤においてのみ観察された現象であり、噴砂の発生が基盤内の間隙水

圧消散に影響しているものと考えられる。また噴砂は堤体から遠い箇所が発生し、その後、水位上昇に伴い噴砂の数が増え、堤体に近づく様子が見られた。このような噴砂状態の変化は、間隙水の流れが集積したパイピング孔内では洗掘と堆積が繰り返され、噴砂箇所で砂が堆積し始めると、流速の低下によって洗掘が進まず、比較的水頭の高い堤体近傍に噴砂箇所が遷移したためと考えられる。以上から、漏水 (噴砂) の特性を押さえることが水防活動をする上で重要になると思われる。

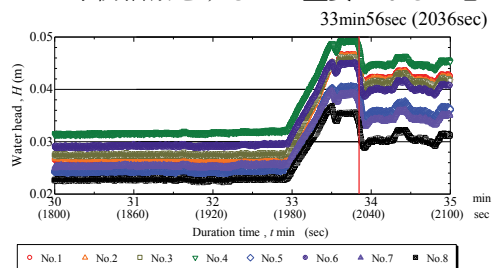


図-9 case2-2における間隙水圧の経時変化

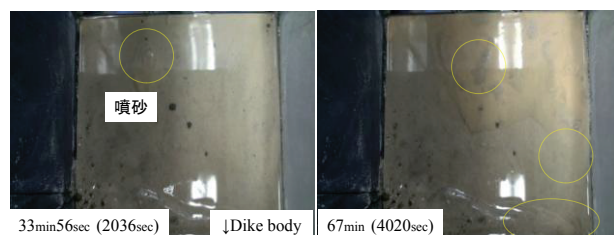


図-10 case2-2における堤内側で観察された噴砂の様子

(5) 堤内側漏水量

図-11に堤内側で観測される漏水流量の経時変化を示す。

単一層のcase1-1から見ると、実験開始から57分頃まで堤内側で漏水はほとんど見られなかった。その漏水挙動は堤内側基盤全体から染み出ており流量も最大で $6\text{cm}^3/\text{s}$ 程度であった。

下層が珪砂2号の互層であるcase2-1では河川水位の増加に伴い流量が増加していることがわかる。堤内側の漏水挙動を見ても、水位が 0.06m の時点で既に噴砂が確認されており単一層よりも局所的に漏水していた。

下層が珪砂4号の互層であるcase2-2の漏水流量はcase1-1とcase2-1の中間程度であったが、堤内側の漏水挙動を見ると水位が 11cm になった時点で直径 10mm 程度の噴砂が見られ、その後は水位上昇に伴い噴砂の数も増え、その大きさも大きくなった。

以上の結果から、基盤条件により漏水流量や噴砂の有無などの漏水挙動が異なることがわかった。次に漏水時の流速に着目し、従来からある粒径-限界流速関係図と比較する。

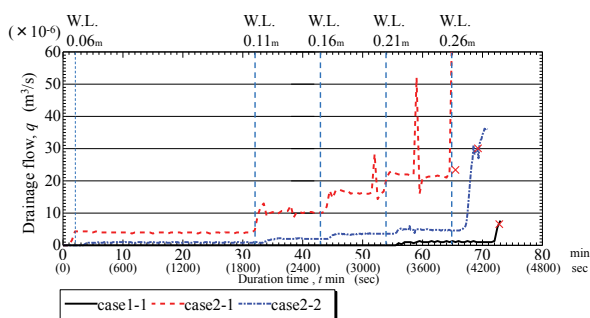


図-11 堤内側漏水流量の経時変化

(6) 基盤層内の粒径と限界流速

図-12では、限界実流速と粒径との関係³⁾を示し、本稿では水平流れに着目した久楽らの結果と比較した。また、今回比較するにあたり以下のように仮定した。

- ・実験時の流速としてパイピング直前の流量から砂層全断面を透水すると仮定し、見かけの流速を算出する。
- ・case2-1, 2については上・下層の透水性が著しく異なるため透水性の大きい下層のみ透水すると仮定する。

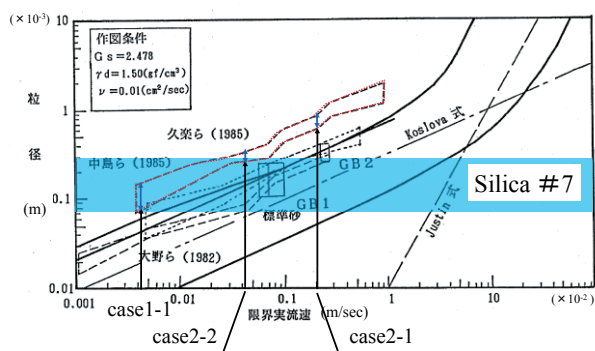
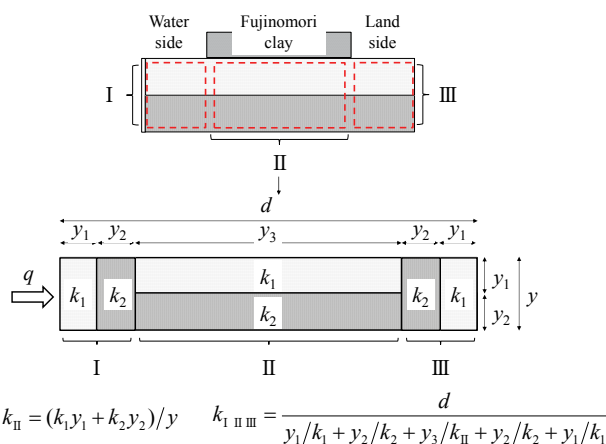


図-12 粒径-限界流速関係 (長瀬 (1987年) に加筆)

図-12より単一層のcase1-1では、基盤を構成する珪砂7号を移動可能な流速が発生していないことがわかる。一方互層であるcase2-1や2-2では珪砂7号の移動に十分な流速が出ており、この結果から互層基盤では流速に起因して空洞化が進行しパイピングが発生したと考える。更に互層では堤内側基盤において噴砂が確認されており、仮に噴砂高が 1mm の場合ベルヌーイの定理を用いて地表面の局所流速を求めると 0.14m/s となる。久楽らは限界流速として漏水全体から平均的に求めているが噴砂のような局所的な流速に対しても限界流速として整理する必要があると思われる。

(7) 基盤層全体の理論透水係数と実測される漏水流量から求めた見かけの透水係数

模型実験の基盤層を一次元浸透と考え、図-13のように水平、鉛直の透水層からなる基盤を仮定し理論透水係数を算出した⁶⁾。全14ケースについて理論透水係数と、実験においてパイピング発生直前の漏水流量から求められる実透水係数との比較を行った結果が図-14である。図-14では全14ケースを基盤が単一層か互層かで分類を行っている。単一層の結果を見ると比較的理論透水係数と実透水係数が一致することがわかる。一方互層の場合理論透水係数よりも実透水係数の方が2倍以上大きくなることがわかった。



k_{II} : 領域IIの透水係数, k_{III} : 基盤層全体の透水係数

図-13 模型基盤を一次元の浸透モデルに置き換えた図

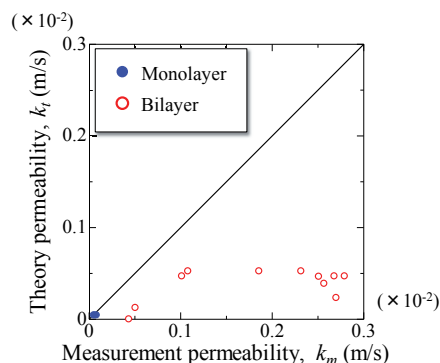


図-14 理論的に求めた透水係数と漏水流量から求められる見かけの透水係数との比較

互層地盤における理論透水係数はダルシー則が成り立つと仮定したものであり、図-14の結果から単一層ではダルシー則が成り立ち、互層では成り立たない可能性がある。今後浸透流解析を行い実験における間隙水圧分布や漏水量等と比較をすることでパイピングにおけるダルシー則の適用範囲について検討する。

(8) 限界動水勾配-限界流速からみたパイピング条件

図-15に全14ケースにおけるパイピング発生時（破壊時）の河川水位、最短浸透路長から求めた平均動水勾配と、漏水流量から求めた平均流速の関係図を示す。従来の照査方法は限界動水勾配によるものだけだったが、これに限界流速の軸を加えることで2つのアプローチからパイピングを照査できる。図-15で示した関係図は、出水時の河川水位と漏水箇所の流量から作成できると考えるが、それらのデータを集め整理した実測値の結果の理論的な裏付けが必要と考える。

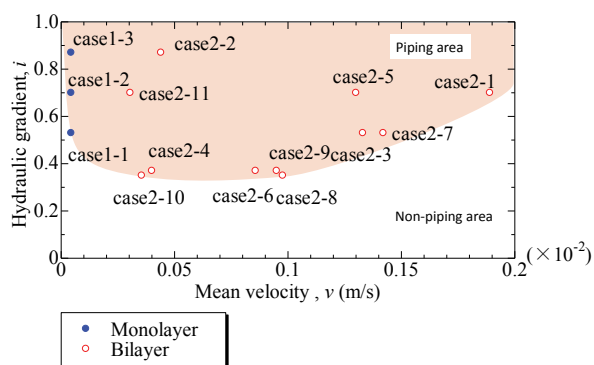


図-15 パイピング発生時の平均動水勾配-平均流速関係図

(9) 噴砂、空洞化の進行、パイピング発生に関する考察

図-16に模型実験の結果を踏まえた噴砂、空洞化の進行の発生機構に関する概念図を示す。

図-16(a)の噴砂の発生は、被覆土層（実験では基盤上層）の重量と揚圧力の関係により決まり、ダルシー則に従うと考えるが、噴砂の発生以降は、(4)の結果より基盤内の水圧が消散し、その後水位が上昇しても水圧が増加しないことからダルシー則に従う透水が発生していない可能性がある。

図-16(b)に示すように空洞化の進行は土粒子重量と

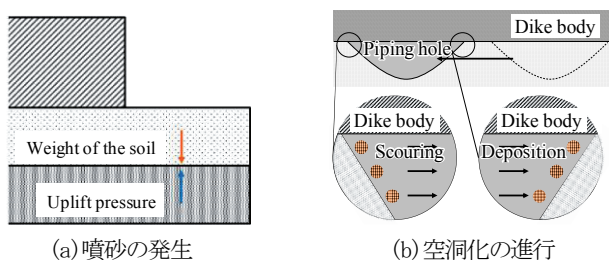


図-16 噴砂の発生及び空洞化の進行に関する概念図

パイピング孔内の流速との関係により決まると考える。パイピング孔内の流速については、多孔質流れを想定したダルシー則は適用できないと考える。空洞化の進行を考える上では別の物理法則が支配的と考えられ、どの法則を適用すべきかを今後検討する。

4. まとめ

河川堤防における基盤透水層構造がパイピングに及ぼす影響について模型実験により検討を行った。その結果、基盤層構造により基盤内部の水圧（局所動水勾配）や漏水挙動が異なることを定量的に明らかにした。また実験時に漏水流量から求められる透水係数とダルシー則に基づく理論値を比較したところ、互層の場合、理論値よりも大きな値となった。この結果から互層における基盤浸透ではダルシー則に従っていない可能性があり、それに代わる物理法則について今後検討を進める。調査においては基盤の砂礫層の分布に注意し、照査では出水時の漏水特性（漏水位置、漏水間隔を含む）をデータとして蓄積し動水勾配と流速の関係を整理した指標を使うことでパイピングに対する安全性評価が可能になると考える。また、大変形解析が可能な数値計算法⁷⁾を改良し、照査に適用可能な手法の提案を行う。

謝辞：本研究の成果は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)23360203および平成24年度国土交通省河川技術開発制度地域課題研究で得られたものである。末筆ながら深謝の意を示します。

参考文献

- 1) 矢部川堤防調査委員会：矢部川堤防調査委員会報告書，2013。
- 2) 齊藤啓，前田健一，今瀬達也，伊藤嘉，若狭愛：高水位の継続作用が河川堤防の安定性に及ぼす影響，第49回地盤工学研究発表会，pp. 979-980，2014。
- 3) 長瀬迪夫：浸透破壊に関する考え方と破壊発生条件（その2），応用地質年報No. 15，pp. 4，1993。
- 4) 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。
- 5) 長瀬迪夫：浸透破壊に関する考え方と破壊発生条件，応用地質年報No. 9，pp. 43-124，1987。
- 6) 石原研而：第2版土質力学，丸善株式会社，pp. 72-74，2001。
- 7) 前田健一，今瀬達也，伊藤嘉，齊藤啓：内部侵食による土の不安定化を考慮した河川堤防の浸透破壊解析法の提案，河川技術論文集，Vol. 19，pp. 39-44，2013. 6。

(2015. 4. 3受付)