

漏水に着目したパイピング破壊に対する基礎地盤構造の耐力特性 The proof strength properties of foundation ground structure against piping focus on water leakage

澤村直毅¹, 前田健一², 一瀬守³, 大桑有美⁴

- 1 名古屋工業大学大学院・社会工学系プログラム・E-mail address n.sawamura.970@stn.nitech.ac.jp
- 2 名古屋工業大学教授 高度防災工学センター
- 3 名古屋工業大学大学院・社会工学系プログラム
- 4 名古屋工業大学・社会工学科

概 要

パイピングの危険性が高い基礎地盤特性については定性的に明らかにされてきた。しかし、多様な基礎地盤特性や外水位条件下で、パイピングによって破堤に至る指標は未だ確立されていない。そこで、本研究では外水位の高さに対する堤内側での漏水量に着目して模型実験を実施し、基礎地盤特性による違いを補正した漏水量とパイピング進展度の関係からパイピング破壊に対する基礎地盤の耐力を定量的に把握することを検討した。その結果、基礎地盤構造によって破壊挙動が異なること、および漏水開始時からパイピング破壊に至るまでの累積漏水量には限界範囲が存在することが分かった。また、その限界範囲について複層地盤は単一層地盤よりも10倍程度大きく、それは基礎地盤の弱体化に起因していることが示された。今後は、模型実験や数値解析から漏水量の限界値の存在を明らかにし、実堤防にも適応できる定量的な指標の一つとして確立することを目標としている。

キーワード：河川堤防、パイピング、単一層地盤、漏水量、耐力

1. はじめに

近年、河川水が透水性基礎地盤に浸透することで、堤内において漏水や噴砂が発生する被災事例が増加している¹⁾。また、今後も気候変動に伴い豪雨の強度増加や長期化によって、高水位の外力が河川堤防に長時間作用することで堤内地での漏水や噴砂の発生・継続を助長し、パイピング破壊に至る危険性は高まっていくと考えられる。さらに、いつ、どこで発生し、どの程度危険であるかを予め判別することは困難であり、今後の浸透に対する効率的・効果的な水防活動や河川堤防強化のためにもパイピングの照査精度を向上させることは急務である。

河川堤防におけるパイピングの兆候である噴砂の発生条件については定性的に把握できるようになってきた²⁾³⁾。しかし、様々な基礎地盤特性や水位条件下でのパイピングによる破堤条件やその指標に関する研究は続いている。

そのような中、福岡ら⁴⁾⁵⁾によって堤防脆弱性指標 t^* および堤防基礎漏水指標 tb^* と呼ばれる無次元量が検討され実河川に応用されている。堤防脆弱性指標 t^* は浸透流の支配方程式である Richards の式を無次元化し、浸透流を支配する力学指標から導かれており、この値によって漏水、崩壊、決壊のどのレベルの現象が生じるかを判別することがで

きる。つまり、浸透による破壊形態の判別方法であり、基礎地盤内の水や土粒子が移動することによって生じるパイピング破壊は対象外としている。また、堤防基礎漏水指標 tb^* についても同様の考え方から導かれた漏水・噴砂に対する指標であり、被害箇所の推定が可能となることが示唆されている。これらの無次元量は土の特性を表す透水係数や空隙率等のパラメータの組み合わせによる構成式であるため、あらゆる基礎地盤特性について適応可能であると考えられる。

本論文では、上記の視点を鑑み、水の移動に対する土粒子の移動、すなわち堤内側での漏水量に対するパイピング進展の観点から、漏水発生時からパイピング破壊に至るまでの基礎地盤の損傷状態を観察し、パイピング破壊の危険度を定量的に把握することを試みた。基礎地盤は複雑な構造体であるが、単一層地盤に立ち戻り、基礎地盤材料を変えて模型実験を実施し、検討した。

2. 実験概要

図1に簡易パイピング実験模型の概略図を、表1に実験ケースを示す。基礎地盤について、単一層構造では珪砂2号、4号、5号、6号、7号を、複層構造では上層に珪砂7

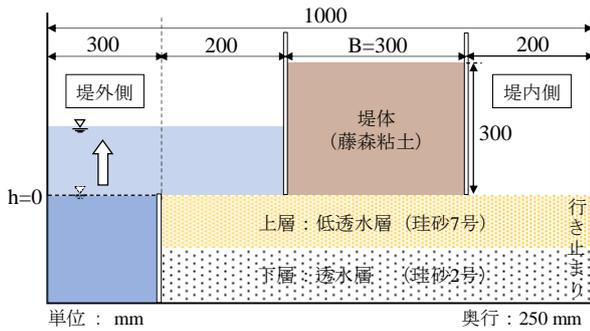


図1 実験模型概略図

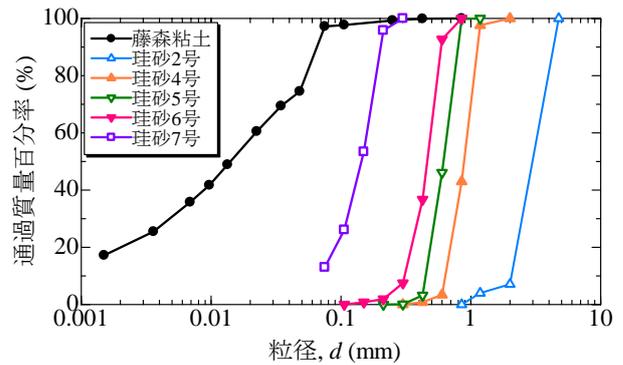


図2 粒度分布

表1 実験ケース一覧

case名	層構造	基礎地盤材料		層厚		透水係数		合成した透水係数 (m/s)
		上層	下層	上層 (mm)	下層 (mm)	上層 (m/s)	下層 (m/s)	
case1	単一層	珪砂2号	-	90	0	1.80×10^{-2}	-	1.80×10^{-2}
case2	単一層	珪砂4号	-	90	0	1.10×10^{-3}	-	1.10×10^{-3}
case3	単一層	珪砂5号	-	90	0	7.50×10^{-4}	-	7.50×10^{-4}
case4	単一層	珪砂6号	-	90	0	1.40×10^{-4}	-	1.40×10^{-4}
case5	単一層	珪砂7号	-	90	0	1.40×10^{-5}	-	1.40×10^{-5}
case6	複層	珪砂7号	珪砂2号	20	70	1.40×10^{-5}	1.80×10^{-2}	1.66×10^{-4}
case7	複層	珪砂7号	珪砂2号	45	45	1.40×10^{-5}	1.80×10^{-2}	7.42×10^{-5}
case8	複層	珪砂7号	珪砂2号	70	20	1.40×10^{-5}	1.80×10^{-2}	4.76×10^{-5}

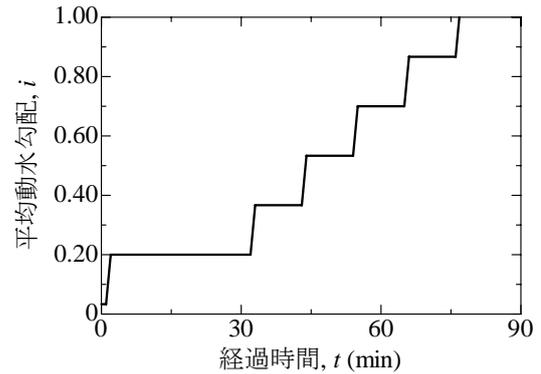


図3 水位条件

号, 下層に珪砂2号を用いて水中落下法で堆積させた。その後, 相対密度が70%程度となるように締め固めた。堤体については藤森粘土を使用し, 含水比20%で作成した。ただし, 堤体をアクリル板で拘束し, 堤体の変状によるパイピング進展への影響を無視している。各材料の透水係数は, 珪砂2号 $k_2=1.80 \times 10^{-2}$ (m/s), 珪砂4号 $k_4=1.10 \times 10^{-3}$ (m/s), 珪砂5号 $k_5=7.50 \times 10^{-4}$ (m/s), 珪砂6号 $k_6=1.40 \times 10^{-4}$ (m/s), 珪砂7号 $k_7=1.40 \times 10^{-5}$ (m/s), 藤森粘土 $k_c=3.00 \times 10^{-8}$ (m/s)である。また, 図2に各材料の粒度分布を, 図3に水位条件である平均動水勾配*i*(水位差を堤体敷幅で除した量)の経時変化を示す。行き止まり境界については, すべてのケースに設置し, 裏法尻から堤内側へ200 mm離れた位置とした。本実験ケースでは, 層構造(単一層あるいは複層), 層厚比(全層厚に対する上層厚の割合), 基礎地盤材料(粒径あるいは透水係数)の異なる条件下で実施し, 堤内側での漏水流量を計測した。実験は, パイピング破壊が生じた場合に終了とした。

3. 実験結果と考察

3.1 単一層地盤の結果と考察

まず, 単一層地盤におけるパイピング現象のメカニズムを把握するため, パイピング進展度および漏水流量, 累積漏水量の挙動に着目し, パイピング破壊に対する基礎地盤の耐力について検討した。ここで, 基礎地盤の耐力について, パイピング破壊に至るまでの外力である平均動水勾配の継続時間と定義した。

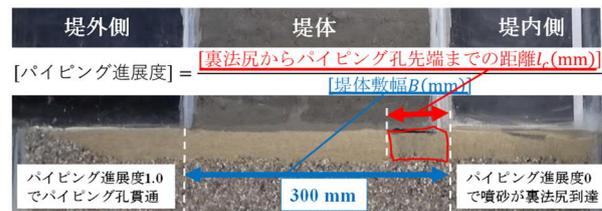


図4 パイピング進展度の定義

(1) パイピング進展度の挙動

パイピング進展度とは, 裏法尻からパイピング孔先端部までの距離 l_p を堤体敷幅 $B=300$ mmで除すことで定義される(図4参照), 堤体下でどの程度パイピング孔が進展しているかを定量的に示す指標である。なお, パイピング進展度0は噴砂に伴う土粒子の流出によって裏法尻にゆるみが発生したことを, パイピング進展度1.0はパイピング孔が貫通したことを意味している。図5に各ケースのパイピング進展度の経時変化を示す。どのケースにおいてもパイピング孔が貫通する直前まではパイピング孔の進展はほとんど見られなかった。しかし, 貫通の際は超過外力に耐え切れなくなった堤体と基礎地盤に隙間が生まれ, 堤外側から水が一気に流れ込むことで, 基礎地盤全体が押し流されるようにして破堤に至った。また, パイピング破壊のタイミングについては, case1($k_2=1.80 \times 10^{-2}$ m/s)およびcase5($k_7=1.40 \times 10^{-5}$ m/s)に対して, case3($k_5=7.50 \times 10^{-4}$ m/s)およびcase4($k_6=1.40 \times 10^{-4}$ m/s)の方が20分程度早く破堤した。そして, 破堤時の平均動水勾配はcase1($k_2=1.80 \times 10^{-2}$ m/s)およびcase5($k_7=1.40 \times 10^{-5}$ m/s)では1.00程度, case3

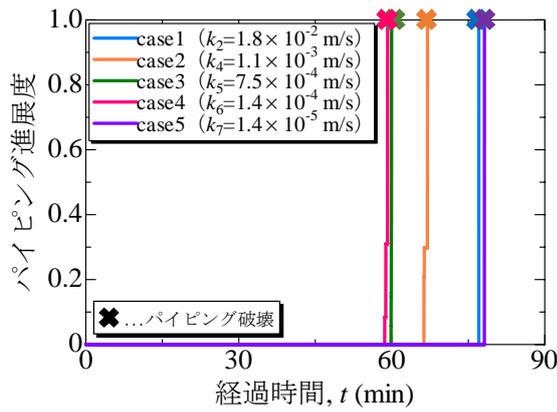


図5 パイピング進展度の経時変化 (単一層)

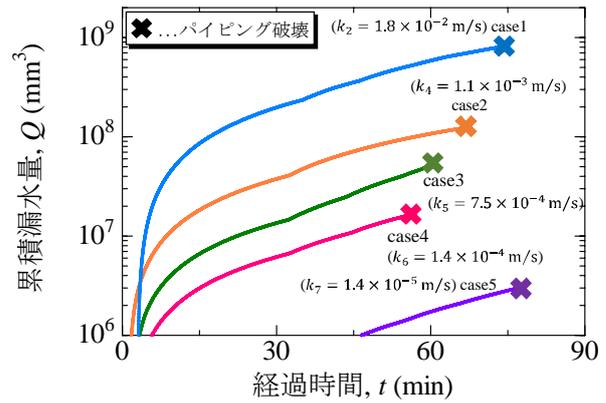


図7 累積漏水量の経時変化 (単一層)

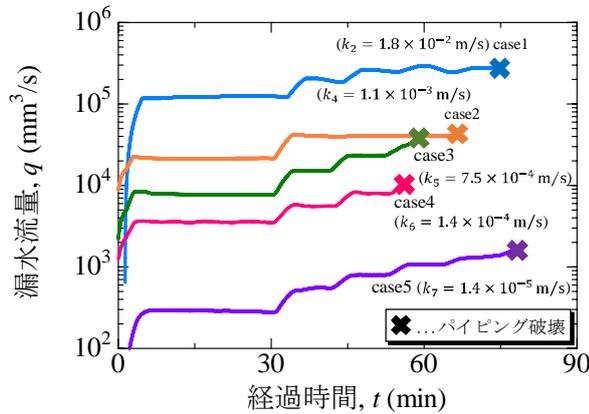


図6 漏水流量の経時変化 (単一層)

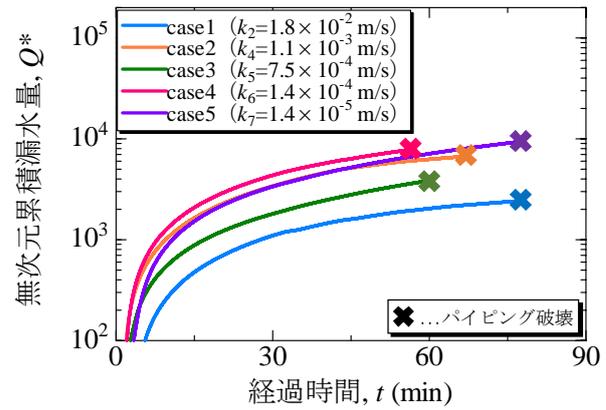


図8 無次元累積漏水量の経時変化 (単一層)

($k_5=7.50 \times 10^{-4}$ m/s) および case4 ($k_6=1.40 \times 10^{-4}$ m/s) では 0.70 程度であった。これより、基礎地盤全体の透水性が極端に高いあるいは低い場合でのパイピング破壊に対する耐力よりも透水性が中間的な値 ($k=1.40 \sim 7.50 \times 10^{-4}$ m/s 程度) である場合でのパイピング破壊に対する耐力の方が低くなることが確認できる。つまり、基礎地盤全体の透水性が中間的な値である方がパイピング破壊の危険性が高いことが分かった。

(2) 漏水流量の挙動

図6に各ケースの漏水流量の経時変化を示す。ここで、漏水流量とは、1秒間当たりの堤内側から流出する水の体積を意味する。図3での各ケースの水位変化と比較すると、全体の傾向として平均動水勾配が大きくなるにつれ、漏水流量が増加し、その挙動は水位条件と同形状を示していることが分かる。また、基礎地盤の透水係数が大きいほど漏水流量は大きくなる傾向を示すことも確認できる。つまり、漏水流量は基礎地盤の状態を直接的に表していると言える。また、図5と比較すると漏水流量が極端に大きい(case1)あるいは小さい(case5)値を示す場合にはパイピング孔の貫通が起こりにくいことが分かった。漏水流量が極端に大きい(case1)場合については、間隙が大きく水が通り抜けるため、漏水流量が極端に小さい(case5)場合については、土粒子を移動させるだけの流速に到達していないためだ

と考えられる。

(3) 累積漏水量の挙動

前項より、漏水流量は基礎地盤の状態に直結していることが確認できた。つまり、パイピング破壊は堤内側からの漏水量が限界値に達することで引き起こされている可能性がある。そこで、実験開始からパイピング破壊までの累積漏水量を算出し、その経時変化を図7に示した。各ケースにおいて透水係数が異なるため、最大で3オーダー程度の大きな違いが出ていると思われる。

(4) 無次元累積漏水量の挙動

福岡らの無次元指標⁴⁾による検討の方向性に倣い、累積漏水量について透水係数および平均動水勾配による違いを補正するため、(1)式に示すように経時漏水流量 q を各ケースの透水係数 k および平均動水勾配 i 、堤内側面積 A で除したのち、実験開始からパイピング孔貫通までの時間積分をした。その無次元量を無次元累積漏水量と定義し、経時変化を図8に示した。

$$Q^* = \int \frac{q}{kiA} dt \quad (1)$$

図8において無次元累積漏水量はすべてのケースで $2.0 \sim 9.0 \times 10^3$ の範囲に分布した。これより、無次元累積漏水量には収束範囲が存在し、そこに到達した際にパイピング破壊が生じていると考えられ、単一層地盤ではその範囲が

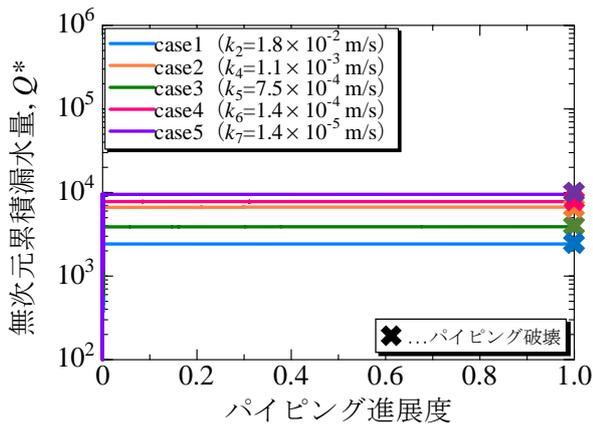


図9 パイピング進展度と無次元累積漏水量（単一層）

2.0~9.0×10³であることが明確になった。

(5) パイピング進展度と無次元累積漏水量の挙動

基礎地盤の損傷具合を見るため、無次元累積漏水量に対するパイピング進展度を図9に示す。これより、噴砂が裏法尻に到達するタイミングおよびパイピング孔が貫通するタイミングのどちらの場合も無次元累積漏水量が2.0~9.0×10³の範囲に分布していることが分かる。つまり、この範囲がパイピングに対する単一層地盤の限界範囲であることが分かった。

3.2 単一層地盤と複層地盤の比較

前節でのパイピング進展度、漏水流量、累積漏水量、無次元累積漏水量の各量について複層地盤の実験ケース(case6~8)においても算出し、単一層地盤と比較しながら基礎地盤の耐力について検討した。ただし、基礎地盤の耐力についても同様、パイピング破壊に至るまでの外力である平均動水勾配の継続時間と定義している。

(1) パイピング進展度の挙動

図10に各ケースのパイピング進展度の経時変化を示す。突発的に破堤に至った単一層地盤とは異なり、複層地盤では、パイピング孔が徐々に進展し破堤に至る様子が見られる。このメカニズムとして、まず下層が透水層であるため水が浸透しやすくなり、行き止まり付近で漏水・噴砂が生じる。そして、それによる基礎地盤の緩み領域が堤体側に近づく。つまり、下層が高透水性である場合、基礎地盤内に浸透する漏水流量が増加し、その量が低透水層である上層から抜け出そうとするため、それに伴う砂粒子の流出量が増加する。このことは、単一層地盤は瞬間的な破壊挙動である一方で、複層地盤は基礎地盤が徐々に弱体化し、破壊に至るといった疲労破壊のような挙動であることを示唆しており、層構造による破壊挙動の違いが明確になった。また、パイピング破壊時の平均動水勾配について、case6~8（複層地盤）のすべてのケースで実験開始67分時点での0.87であり、case2 ($k_4=1.10 \times 10^{-3}$ m/s)と同様の値であった。つまり、本実験での複層地盤(case6~8)は単一層地

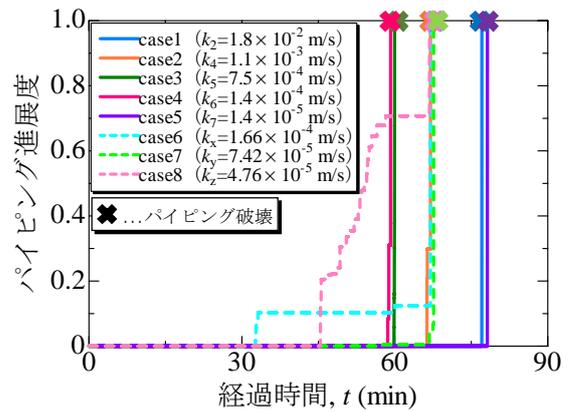


図10 パイピング進展度の経時変化（全ケース）

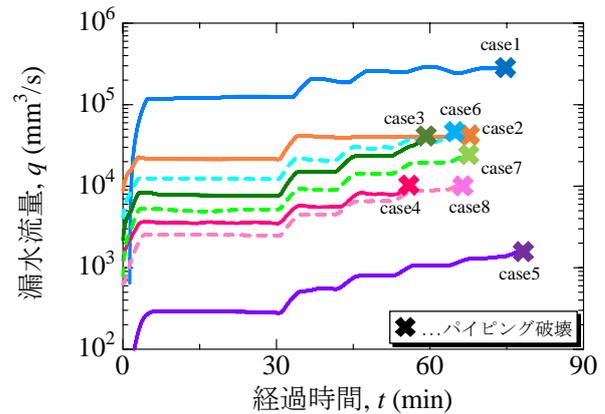


図11 漏水流量の経時変化（全ケース）

盤において透水係数が極端に大きい(case1)あるいは小さい(case5)場合よりも基礎地盤の耐力は大きく、透水係数が中間的な値の場合(case3, 4)よりも耐力は小さいことが分かった。また、既報⁹⁾では基礎地盤の層厚比が小さいほどパイピング破壊の危険性が高いことが示されているが、今回、それらの違いについてパイピング破壊時の平均動水勾配からは確認できなかった。この理由として、超過外力が考えられる。本実験では外水位の増加幅が大きく、一度で平均動水勾配が0.16程度増加するように設定した。複層地盤では徐々に弱体化する挙動を示すため、外水位の増加幅を小さく設定し段階を踏むことで、層厚比による耐力の差異が表れると考えている。

(2) 漏水流量の挙動

図11に各ケースの漏水流量の経時変化を示す。複層地盤においても単一層地盤と同様に、平均動水勾配が大きくなるにつれ、漏水流量が増加し、その挙動は水位条件と同形状を示していることが分かる。また、透水層である下層厚の割合が増加するにつれて、漏水流量が全体的に大きい値を示している。つまり、複層構造における層厚比は漏水流量に影響することが確認できる。また、パイピング破壊のタイミングが同程度であったcase2 ($k_4=1.10 \times 10^{-3}$ m/s)とcase6~8（複層地盤）比較すると、すべてのケースで漏水流量については小さい値を示した。

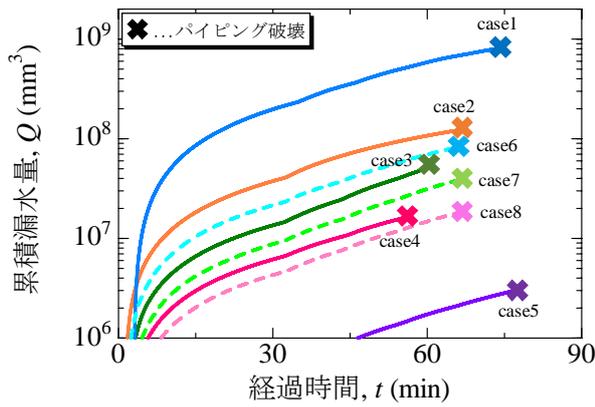


図 12 累積漏水量の経時変化 (全ケース)

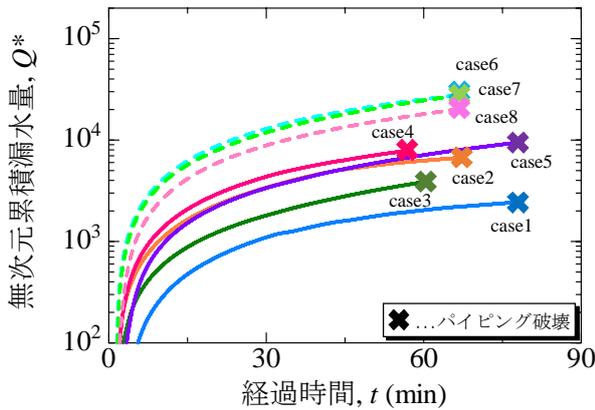


図 13 無次元累積漏水量の経時変化 (全ケース)

(3) 累積漏水量の挙動

図 12 に実験開始からパイピング破壊までの累積漏水量の経時変化を示した。透水層の割合が大きいほど累積漏水量も大きくなっていることが分かる。これは、図 11 において透水層の割合の増加に伴い漏水流量が大きくなっていることに合致している。

(4) 無次元累積漏水量の挙動

単一層地盤の場合と同様に無次元累積漏水量の経時変化を図 13 に示した。ただし、透水係数については模型実験の基礎地盤を 1 次元浸透と考え、図 14 のように水平、鉛直の地盤を仮定し、合成透水係数を算出した⁸⁾。case6～8 (複層地盤) における合成透水係数を表 1 に示した。case6 では $k_x=1.66 \times 10^{-4}$ m/s であり、case4 ($k_6=1.40 \times 10^{-4}$ m/s) の場合と同程度である。すなわち、珪砂 7 号 (上層, $k_7=1.40 \times 10^{-5}$ m/s) と珪砂 2 号 (下層, $k_2=1.80 \times 10^{-2}$ m/s) からなる複層地盤の層厚比 (全層厚に対する上層厚の割合) が 0.22 (=20 mm/90 mm) の場合は、珪砂 6 号 ($k_6=1.40 \times 10^{-4}$ m/s) の単一層地盤と同程度の透水能力となることを示唆している。しかし、図 13 において case4 ($k_6=1.40 \times 10^{-4}$ m/s) に対し、case6 ($k_x=1.66 \times 10^{-4}$ m/s) では、1 オーダー程度大きいことが分かる。この理由として、先にも述べたように単一層地盤と複層地盤では、破壊挙動が異なることが考え

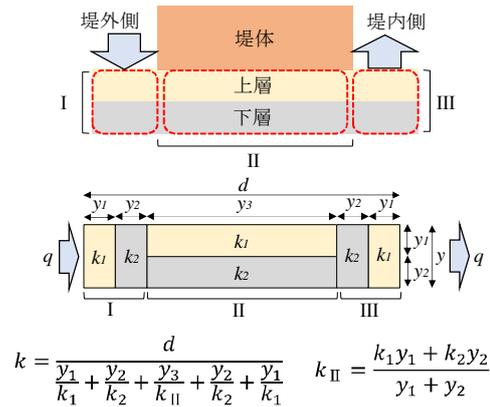


図 14 合成透水係数の算出方法

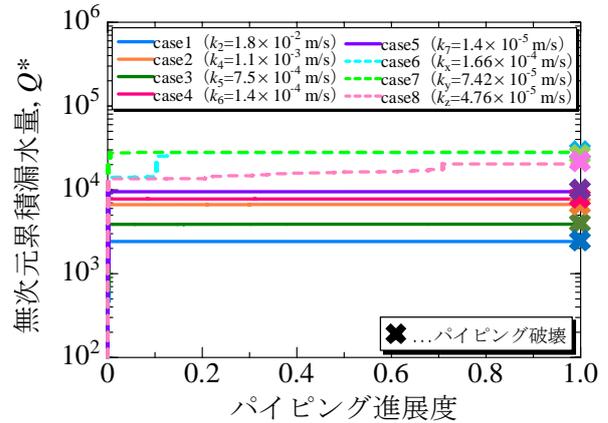


図 15 パイピング進展度と無次元累積漏水量 (全ケース)

られる。複層地盤では、基礎地盤が徐々に弱体化し、破壊に至るという疲労破壊のような挙動であった。つまり、複層地盤では下層からの水の浸透に伴い、上層の砂粒子が抜けることで間隙が大きくなり、透水性が高くなったため元の透水能力以上に漏水したと考えられる。したがって、図 14 のような水平、鉛直の地盤を仮定し算出した合成透水係数では、ずれが生じると考えられる。また、複層地盤の上層 20mm における透水係数は-5 乗オーダー、下層 70mm は-2 乗オーダー、そしてその合成透水係数は-4 乗オーダーであることから、このモデルでは上層である低透水層の基礎地盤特性の方がより支配的になると考えられる。つまり、上層の透水係数を大きく見積もることで層構造による無次元累積漏水量の差を小さくし、一致させることが可能であると考えられる。

(5) パイピング進展度と無次元累積漏水量の挙動

図 15 に無次元累積漏水量に対するパイピング進展度を示す。単一層地盤では、噴砂が裏法尻に到達するタイミングおよびパイピング孔が貫通するタイミングについて無次元累積漏水量が $2.0 \sim 9.0 \times 10^3$ の範囲に分布している。一方、複層地盤では噴砂が裏法尻に到達するタイミングは $1.5 \sim 2.0 \times 10^4$ 、パイピング孔が貫通するタイミングは $2.0 \sim 3.0 \times 10^4$ の範囲に分布し、収束範囲が被害レベルごとに異なることが分かる。また、複層地盤における破壊挙動よ

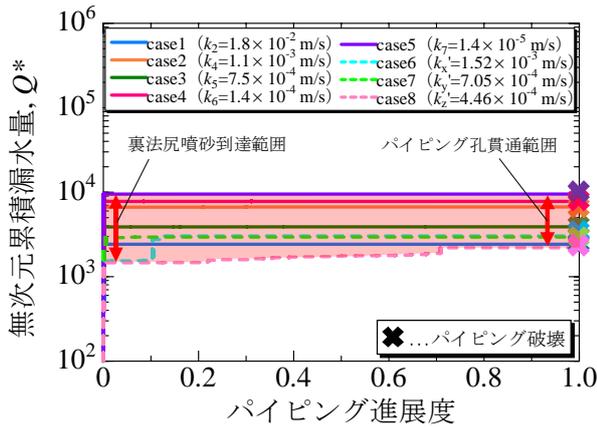


図 16 パイピング進展度と無次元累積漏水量（複層補正）

り合成透水係数の算出が不適切であると考えられるため、複層地盤は単一層地盤に対して 1 オーダー程度収束範囲が大きいことが分かる。つまり、より支配的である上層の透水係数を 10 倍大きく見積もることで層構造による無次元累積漏水量の差を小さくし、収束範囲を一致させることができると考えられる。本実験ケースでは、8 種類の基礎地盤構造のみの規則性にすぎないが、実際の基礎地盤はより複雑であり、今後あらゆる基礎地盤特性を考慮し耐力を評価するためには、この収束範囲を一致させることは重要であると考えられる。

(6) 層構造による無次元累積漏水量の差異の補正

前項より無次元累積漏水量の値について、複層地盤では単一層地盤に対して 1 オーダー程度大きくなっていること、および上層である低透水層の基礎地盤特性の方がより支配的になることが分かった。この差を補正するため、上層の透水係数を 10 倍、すなわち珪砂 7 号の透水係数 ($k_7=1.40 \times 10^{-5}$ m/s) を $k'_7=1.40 \times 10^{-4}$ m/s に置き換えて、同様の式 (図 14 参照) で再度算出した。図 16 に層構造による差異を補正した無次元累積漏水量に対するパイピング進展度を示す。これより、層構造によらず、無次元累積漏水量は $2.0 \sim 9.0 \times 10^3$ の範囲に収束することが分かった。つまり、実際には上層である低透水層の透水性が下層である透水層の影響で 10 倍程度に大きくなっており、それは

パイピング孔が進展することで基礎地盤のパイピング破壊に対する耐力が 1/10 倍程度に弱体化していることを意味すると考えられる。

4. まとめ

本研究では、河川堤防における基礎地盤の損傷からパイピング破壊の危険度を把握するために、基礎地盤構造および材料を変えて簡易模型実験を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 単一層地盤では、突発的な破壊モードであるのに対し、複層地盤では徐々に弱体化し疲労するような破壊モードであり、明確に異なることが分かった。そして、層構造によらず堤内側での漏水流量は基礎地盤への透水による損傷状態を直接的に表すことも分かった。これは河水が浸透し堤体下での漏水と砂の流亡によって基礎地盤が損傷することに起因しているためである。
- 2) 基礎地盤構造および材料特性による違いを補正した無次元累積漏水量には、噴砂が裏法尻に到達する、およびパイピング破壊に至る限界範囲が存在することが分かった。単一層地盤では、どちらの被害レベルも同様の範囲であったが、複層地盤では被害ごとに異なる範囲を示した。
- 3) 複層構造における基礎地盤弱体化を考慮する場合、上層である低透水層の透水能力が支配的であり、この透水係数を 10 倍と見積もることで、無次元累積漏水量の限界範囲は単一層地盤のものと一致することが分かった。

今後は、様々な基礎地盤特性や水位条件下での模型実験や数値解析から無次元累積漏水量の限界範囲の存在を明らかにし、複雑な実堤防にも統一して適応できる定量的な指標の確立を目指す。

謝辞：本研究の成果は、国土交通省・河川砂防技術研究開発制度平成 29 年度国総研からの委託研究、科学技術研究費（研究課題 19H00786）の援助を受けたものである。末筆ながら深謝の意を示します。

参 考 文 献

- 1) 前田健一, 岡村未対, 石原雅規, 新清晃, 上野俊幸, 西村征哉, 高辻理人, 品川俊介, 笹岡信吾: 北川で繰返し発生した噴砂による堤内・裏法尻箇所のゆるみ調査, 河川技術論文集, 第 25 巻, pp535-540, 2019.
- 2) 高辻理人, 前田健一, 牧洋平, 伊神友裕, 泉典洋: 堤内外の基礎地盤特性が河川堤防のパイピング破壊, 河川技術論文集, 第 26 巻, pp467-472, 2020.
- 3) 西村征哉, 前田健一, 高辻理人, 牧洋平, 泉典洋: 実堤防の調査結果に基づいた河川堤防のパイピング危険度の力学的点検フローの提案, 河川技術論文集, 第 25 巻, pp499-504, 2019.
- 4) 福岡捷二, 田端幸輔: 浸透流を支配する力学指標と堤防浸透破壊の力学的相似条件—浸透流ナンバー-SFn と堤防脆弱性指標 t^* , 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74, No.5, I_1435-I_1440, 2018.
- 5) 佐藤豊, 福岡捷二: 堤防基盤脆弱性指標 t^* と地形, 土質構成に基づく堤防のり先での漏水形態の推定法, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.77, No.2, I_121-I_126, 2021.
- 6) 西村征哉, 前田健一, 櫛山総平, 高辻理人, 泉典洋: 河川堤防のパイピング危険度の力学的簡易点検フローと漏水対策型水防工法の効果発揮条件, 河川技術論文集, 第 24 巻, pp613-618, 2018.
- 7) 齊藤啓, 前田健一, 泉典洋: 基盤漏水に伴う噴砂及びパイピング進行条件の検討, 河川技術論文集, 第 22 巻, pp251-256, 2016.
- 8) 齊藤啓, 前田健一, 泉典洋, 李兆卿: 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, 河川技術論文集, 第 21 巻, pp349-354, 2015.