三次元浸透流の局所化に着目した 異なる基礎地盤特性の堤防の噴砂動態・パイピング挙動

Sand boiling dynamics and piping behavior of river levee with different foundation ground characteristics focusing on localization on 3D permeation flow

西村柾哉¹,前田健一²,櫛山総平³,高辻理人⁴,泉典洋⁵

- 1 名古屋工業大学大学院・社会工学専攻・E-mail address 29415077@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·社会工学専攻
- 4 名古屋工業大学・都市社会工学科
- 5 北海道大学教授・環境フィールド工学専攻

概 要

河川堤防を模擬した模型実験から堤防の基礎地盤構造によって噴砂等の浸透破壊の挙動が異なることが明 らかになってきた。そこで、本稿では三次元飽和・不飽和浸透 FEM 解析を実施し、基礎地盤への浸透に着 目した模型実験結果との比較から解析の適用範囲を明らかにし、その妥当性を検討した。その上で、実験 では検討が難しい、基礎地盤の透水層構造、法尻から行き止まり境界までの距離、堤内地の不陸(高低差)、 噴砂孔の位置、間隔(噴砂の干渉)をそれぞれ定量的に比較し浸透破壊に対する安定性評価を行った。そ の結果、単一層と複層で圧力伝播の様子が大きく異なり、複層では法尻から離れた行き止まり境界付近で も噴砂が発生する可能性があることが示された。さらに、複層では単一層に比べて行き止まり境界と堤内 地の不陸の影響が大きいことが分かった。また、噴砂動態及びパイピング破壊の進展特性は経時的に変化 することも分かった。

キーワード:河川堤防,パイピング,浸透流

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,噴砂が発生する被災事例が増加している。 また,平成24年に矢部川堤防が決壊した事例のように高 水位の外力が長時間にわたって作用し漏水,噴砂が長時間 継続した場合,基礎地盤でのパイピングが進展し堤防の決 壊に至る危険性がある。そこで,パイピングの進展によっ て河川堤防が損傷したり決壊したりする危険性の高い水 理一地盤条件を力学的に把握し,それに基づく重点監視箇 所を抽出するための重要指標を見出すことは今後の河川 管理には不可欠な課題である。

既往の模型実験から河川堤防のパイピングのメカニズ ムは堤体—基礎地盤の地盤特性により大きく異なり特に 堤体の強度が高く基礎地盤が透水層の上に不透水層が被 覆している複層構造の場合,パイピング破壊の危険度が高 いことが明らかになった¹⁾²⁾。そして,模型実験の結果を 基に上記のような堤体—基礎地盤の地盤条件でのパイピ ング機構を「噴砂の発生」,「空洞の進展」,「空洞の貫通」 の3段階に分けて図1のようなパイピングフローチャート ²⁾を作成した。また、「噴砂の発生」は被覆土層厚と基礎地 盤内の揚圧力が、「空洞の進展」はパイプ内の流速と土粒 子径が、「空洞の貫通」は限界動水勾配がそれぞれの段階 での現象を支配する主要因であると推定している。



図1 パイピングフローチャート

本稿ではなるべく単純化した条件下で基礎的な考察の ために三次元飽和・不飽和浸透 FEM 解析を実施し,基礎 地盤への浸透に着目した簡易実験結果との比較から解析 の適用範囲を明らかにし,その妥当性を検討した。その上 で,実験では検討が難しい,基礎地盤の透水層構造,法尻 から行き止まり境界までの距離,堤内地の不陸(高低差), 噴砂孔の位置,間隔(噴砂の干渉)について,パイピング フローチャートの各段階での支配的要因に着目しながら 孔内及び周辺で局所化した流れの速度と水圧に及ぼす影 響を調べた。

2. 解析結果の適用性の検討

2.1 解析概要

図2に解析モデルの概要図を示し、図3に入力した外力 波形の平均動水勾配の経時変化を示す。堤体は粘土を使用 し基礎地盤は硅砂7号単一層,上層硅砂7号下層硅砂2号 の複層,河川水が下層に直接流入するよう露出した複層の 3ケースについて解析を行った。堤内側の基礎地盤の右端 (図2参照)は浸透流が浸出しないよう設定し,いわゆる 行き止まり境界になっている。また,解析モデルと同様の スケールの模型を用いて解析と同じ水位,地盤条件で実験 を行った。なお模型実験では図2のように基礎地盤底部の 土層奥行中央に間隙水圧計を設置した。各材料の透水係数 は模型実験と比較するため粘土 k=3.00×10⁻⁸(m/s), 硅砂7 号 k=1.40×10⁻⁵(m/s), 硅砂2号 k=1.80×10⁻²(m/s)に設定した。 模型実験で用いた材料の粒度分布は図4に示す。

2.2 模型実験との比較

浸透流解析では堤体,基礎地盤の変状に伴う幾何学的非 線形性や土の状態変化に伴う透水係数の変化などが考慮 されていないため,模型実験の結果と解析結果を比較し解 析結果の適用範囲を明らかにする必要がある。そこで,図 2 に示した位置の間隙水圧の実験値と解析値を,模型実験 での噴砂の発生前後で比較した。表1に比較する模型実験 の噴砂の発生及びパイピングが発生した時の時刻と平均 動水勾配を示す。図5に各ケースの圧力水頭の実験値と解 析値を示す。なお各ケースで噴砂,パイピングする時刻が 異なるため比較する時刻は図5に示す方法で決定した。

図5より単一層の場合,噴砂の発生前後ともに実験値と 解析値は非常に近い値を示している。しかし,複層の2ケ ースでは噴砂の発生前は比較的近い値を示しているが噴 砂の発生後は実験値が解析値よりも顕著に低い圧力にな っている。模型実験において単一層のケースは噴砂などの 変状が小さく突発的に破堤するのに対し,複層のケースは 早い段階で噴砂が発生し破堤に至るまで徐々に変状が拡 大することが確認されており,模型実験での変状の大きさ が実験値と解析値のずれを増大させることが分かった。以 上から,複層で噴砂が発生し始める平均動水勾配 i=0.20 までは高い精度で解析結果が適応可能であると言える。



圭砂 7		単一層	複層 (露出なし)	複層(露出あり)
<i>、</i> た。	噴砂の発生	t=68min (<i>i</i> =0.87)	t=4.6min (<i>i</i> =0.20)	t=1.6min (<i>i</i> =0.20)
	パイピング	t=78min (<i>i</i> =0.87)	t=59min (<i>i</i> =0.70)	t=47min (<i>i</i> =0.53)



図5 実験と解析の間隙水圧分布の比較

3. 基礎地盤構造の影響

パイピング発生に影響を及ぼす要因として基礎地盤の 「層構造」,「行き止まり境界」,「透水層の河床への露出」 が重要であることが模型実験などから明らかになってい る。そこで,これら3つの要素を同時に変化させ基礎地盤 内の圧力伝播や過剰間隙水圧の上昇を比較することで,そ れぞれの要素のパイピング発生に対する影響を定量的に 検討した。

解析を実施したケースの解析条件の一覧は表 2 に示す。 解析モデルは図 2 を基本とし基礎地盤の上層と下層の層 厚比 Lr,裏法尻から行き止まり境界までの距離 d,下層の 露出の有無を変化させた。層厚比 Lrは上層の硅砂 7 号の 層厚 Luと全層厚 Lの比で Lr=Lu/Lで表される(単一層の場 合 Lr=1.0)。なお全層厚 Lは 9cm に固定し上層の厚さ Luのみ変化させた。外力条件は解析結果の適用範囲を考慮し, 平均動水勾配 i=0.20, 0.10, 0.05の 3 種類の条件で一定 に保った状態を想定し、定常解析を行った。

表 2 解析条件一覧				
平均動水勾配 i	層厚比 Lr	行き止まり境界	下層の河床	
		までの距離 <i>d</i> (cm)	への露出	
0.20	0.22	5	あり	
0.10	0.50	10	なし	
0.05	0.78	20	※単一層は	
	1.0(単一層)	40	なし	
		100		

表 2 解析条件一覧

3.1 圧力分布の比較

平均動水勾配 i=0.20, 行き止まり境界までの距離 d=20cm のケースの単一層および複層(層厚比 L=0.5)の 露出ありと露出なしの3ケースの圧力水頭分布を図6に示 す。単一層は堤外から堤内に行くにつれて基礎地盤の圧力 水頭が減衰しているが,複層では下層の圧力水頭の減衰が 小さく堤内まで高い圧力が維持されている。さらに下層の 透水層が堤外に露出しているケースでは行き止まり境界 まで非常に高い圧力が伝播していることが分かる。基礎地 盤が複層構造で特に透水層が堤外に露出している場合,法 尻から離れた行き止まり境界まで,堤内の広い範囲で噴砂 が発生しやすい条件であると言える。この結果は模型実験 の噴砂動態の観察結果とも一致している。



図6 層構造が異なる透水性基礎地盤の圧力水頭分布

3.2 噴砂の発生条件 (G/W) による検討

噴砂は浸透水圧が上載荷重を超えて地表面に噴出する 現象であり,被覆土層重量と基礎地盤内の揚圧力(G/W) により決まる。被覆土層である硅砂 7 号の土粒子密度 G_s=2.65g/cm³,間隙比 e=0.90 より被覆土層重量は式(1)とな る。

$$G = \gamma' L_u = \frac{G_s - 1}{1 + e} L_u \approx 0.86 L_u \tag{1}$$

G:被覆土層重量 Y':水中単位体積重量 Lu:被覆土層層厚

揚圧力 W は裏法尻直下の透水性基礎地盤底面における 飽和状態(河川水位 0cm)からの過剰間隙水圧の圧力水頭 とする。各ケースにおける G/W の値の一覧を図7に示す。 平均動水勾配 i=0.20 における行き止まり境界までの距離 d と G/W の関係を図8に示す。

被覆土層が薄く,行き止まり境界までの距離が短いほど G/Wの値が小さくなっていることが分かる。図7より平均 動水勾配 i=0.05 では全ケースで G/Wの値が1以上で噴砂



図7 各ケースの G/W の一覧



図 8 行き止まり境界までの距離 d と G/W の関係 (i=0.20) 左図;露出あり 右図;露出なし

は発生しないが, i=0.10では全35ケース中5ケースで噴砂の発生条件を満たしている。さらに一級河川などの HWLに相当する i=0.20になると全35ケース中,13ケー スで噴砂の発生条件を満たしている。噴砂が発生・継続す ることで堤体直下に空洞が形成され局所的に動水勾配が 上昇しパイピング破壊のリスクが加速的に増加するため, 長時間噴砂を継続させることは危険である。早期に噴砂が 発生すると考えられる i=0.10 で噴砂の発生条件を満たし た5ケースについては,事前の対策が有効であると考える。 i=0.20 で新たに噴砂の発生条件を満たした8ケースにつ いては重要監視箇所に指定し出水時に水防工法による対 処を行うなど,危険度を数値化することで危険度に応じた 適切な対策方法を提案できると考える。

また,透水層が河床へ露出しているケースは露出してい ないケースに対し*G/Wの*値が平均で2/3程度に減少するた め危険度が約1.5倍になることが分かった。一方で単一層

(層厚比 L=1.0) については G/W の最小値が 9.44 であり 噴砂が発生する可能性は非常に低いことが分かる。また, 複層構造であっても被覆土層が厚い層厚比 L_r=0.78 のケ ースも G/W の最小値が 1.37 で 1 未満には至らなかった。 以上から,噴砂の発生条件を満たすには基礎地盤が透水層 の上に不透水層が被覆している複層構造であり,さらに被 覆土層厚が薄いことが重要で上記のような非常に限られ た条件では単一層の 10 倍以上のリスクがあることが分か った。

3.3 行き止まり境界の影響範囲

図9は平均動水勾配 i=0.20 における裏法尻から行き止まり境界までの距離 d と裏法尻直下の透水性基礎地盤の 底面の過剰間隙水圧の圧力水頭の関係である。



図よりいずれの基礎地盤でも行き止まり境界までの距離が短いほど高い圧力が伝播していることが分かる。また、 単一層のケースでは行き止まり境界に位置による圧力水 頭の変化は小さいが複層のケースは *d*=40cm を境に急激 に圧力水頭の変化が顕著になり行き止まりの影響を強く 受けていることが分かる。よって、行き止まり境界の影響 は単一層に比べて複層構造の方が強く、基礎地盤が複層構 造になっている場合は堤内側基礎地盤の行き止まりの有 無及び法尻から行き止まり境界までの距離がパイピング 破壊に対する重要指標の一つであると考える。また、行き 止まりの影響が強い複層構造においても d=40cm より d が 大きくなっても法尻直下の圧力にはほとんど影響が見ら れず,この解析モデルにおける行き止まり境界の影響範囲 は 40cm 程度といえる。この距離は堤体幅の約 1.3 倍の長 さである。

4. 堤内地の不陸の影響

漏水,噴砂などの浸透破壊を助長する要因の一つとして 堤内地の不陸(高低差)が考えられる。そこで,図2の解 析モデルの d=20cm で,単一層及び複層(層厚比 L,=0.50, 下層の露出なし)の2ケースについて,解析モデル奥行中 央の堤内側法尻地表面に縦横1cmの正方形の低地を作成 し,高低差を変化させた場合の低地部分の浸透流速を比較 した。外力条件は堤外に地表面から6cmの水位を一様に 作用させ,堤内は平地の地表面を水位に設定し,平均動水 勾配が0.20で定常解析を実施した。また,メッシュサイ ズの感度分析も実施し、メッシュサイズの影響は充分小さ いことを確認している。

図10に高低差と低地部分の流速の関係を示す。図11に 複層のケースの解析モデル奥行中央の断面の流速ベクト ル図を示す。図10より単一層は低地部分の流速は最大で 平地の1.37倍しか増加せず不陸の影響はほとんど受けて いないが、複層では低地の深度が3.6cmで流速が平地の 3.09倍に増加し、下層まで達する4.5cmでは平地の81.9 倍に跳ね上がっている。よって、複層は単一層に比べて不 陸の影響を強く受けていると言える。また、図11より不 陸箇所の高低差が大きくなるにつれて不陸箇所の流速が 増加する一方で行き止まり付近の流速は低下しているこ とが分かる。周囲の浸透流が不陸箇所に集中することで流 れの局所化が起き、急激に流速が増加したと考えられる。





図11 堤内地の不陸箇所における流速

5. 噴砂孔の集水性

前章で流れの局所化によって浸透流速は増加し, さらに 不陸が下層に貫通し鉛直パイプが形成されることで通常 の約80倍の流速が発生することが分かった。そこで、こ の下層に貫通したパイプを噴砂孔のモデルと捉えパイプ に発生する流速と漏水流量を比較することで噴砂孔の三 次元的集水性, 噴砂の発生位置, 噴砂の発生間隔 (噴砂の 干渉)について検討を行った。図 12 に解析モデルの概要 図を示す。堤体は粘土を使用し基礎地盤は上層硅砂7号下 層硅砂2号の複層で作成し,解析モデルの中心部分の堤内 側法尻に噴砂孔を模擬した縦横1cm深さ4.5cmの鉛直パイ プを設置した。外力条件として堤外に地表面から 6cm の 水位を一様に作用させ,堤内は平地の地表面を水位に設定 し平均動水勾配が 0.20 で定常解析を実施した。また、噴 砂孔のモデル化による検討はパイピングフローチャート における第2段階に相当するため流速,流量に着目して検 討を行った。



図12 堤内地の不陸箇所における流速

5.1 噴砂孔の三次元的集水性の検討

図12における解析モデルの幅1を0,1,5,10,20,30, 40cm の 7 ケースに変化させた場合の噴砂孔底面の流速, 漏水流量を比較することで,透水性基礎地盤の縦断方向の 広がりが浸透破壊の進展にどのように影響するか検討し た。図 13 は解析モデルの幅 / と噴砂孔底面の漏水流量の 関係である。図 14 は *l*=40cm のケースの基礎地盤内の流速 ベクトルを図12の矢印①の方向から見た断面図である。



流速の関係



図14 流速ベクトル図(堤内・ 断面図;図12の視点①)

図 13 より解析モデルの幅が大きいほど流速が増加して いることが分かる。また、図14では透水性の高い下層の 硅砂 2 号の層において浸透流が噴砂孔へ集中している様 子が顕著に確認でき、下層の透水層において噴砂孔は広範 囲にわたって集水性を発揮していることが分かった。よっ て,解析モデルの幅が大きいほどより広い範囲の浸透流が 噴砂孔に集中し流速が増加したと考えられる。以上より, 堤体の直下に透水性基礎地盤が広く分布している方が浸 透破壊の危険性が高いと考えられる。また, I=40cm(三次 元)のケースの流速は l=0cm(二次元)のケースの約 14 倍で あり非常に顕著な差が生じていることから, 噴砂の発生な どで堤防の断面が一様でなくなった場合の浸透メカニズ ムの整理は二次元よりも三次元での検討が適切であると 考える。また図 13 のグラフから 1 の増加に従い流速が収 束している様子が確認でき, 噴砂孔の集水範囲には限界値 が存在することが推察できる。

第1章で述べたようにパイピングフローチャートの第2 段階 「空洞の進展」はパイプ内の流速と土粒子の粒径が支 配的な要因であると考えている。そこで、本解析で得られ た複層の低地部分の流速を, 粒径と限界流速の関係と比較 した結果を図 15 に示す。 図 15 には透水係数, 単粒子の 沈降速度や浮き上がりの限界流速も示しており, 珪砂7号 の平均粒径 D50 は 0.15mm である。不陸がない場合はいず れの限界流速も超えないが、不陸が下層まで到達しパイプ 孔状となると約80倍の流速が発生し、久楽らの限界流速 の10倍以上となることから、地表面から下層へ貫通する 鉛直パイプが形成されることで噴砂が発生し得る流速が 発生することが示された。ただし、 久楽らの実験は単一層 の結果であり複層への適用性は今後検討を要する。また, 三次元的集水性を考慮することでさらに流速が1.8 倍にな るが,浸透流解析の流速は単粒子の限界流速までは達して いない。本解析では土粒子は移動しないが、実際は、噴砂 孔周辺の局所的な動水勾配によって土要素が液状化状態 となって流動したり、粒子が流出したりしてより速い流れ となる可能性があり、今後検討を進める。



5.2 噴砂の発生位置の検討

噴砂孔のモデルは三次元で検討することが重要である と明らかになった。そこで、最も幅の広い*1*=40cmの解析 モデルを用いて、解析モデル内で噴砂孔の位置をA(中心)、 B(三等分点)、C(端部)の3ケースに変化させ噴砂の発生位 置と流速、漏水流量の関係を検討した。図16に噴砂孔の 設置位置の概略図を示す。なお図16は解析モデルを図12 矢印②の方向から見た平面図である。また、表3に各ケー スの噴砂孔底面の流速、漏水流量を示す。

流速,漏水流量の大小関係は C(端部)<B(三等分点)< A(中心)となった。前節で述べたように噴砂孔には集水可 能な範囲が存在すると仮定すれば,最も効率的に集水でき る解析モデルの中心に噴砂孔を設置したケースで流速,漏 水流量が最大になった結果は妥当であると言える。よって, 透水性基礎地盤が縦断方向に広く分布している場合,分布 範囲の中心が危険箇所の一つであると言える。



図 16 噴砂孔の位置(堤内・平面図; 図 12 の視点②)

表3 噴砂孔の位置と流速	,漏水流量
--------------	-------

噴砂孔の位置	A(中心)	B(三等分点)	C(端部)
流速(cm/s)	0.188	0.186	0.170
漏水流量(cm ³ /s)	0.190	0.185	0.161

5.3 噴砂の発生間隔の検討

2016年に被災した常呂川の現地調査において噴砂は密集して発生することが確認されている。そこで、2箇所で 噴砂が同時に発生した場合の噴砂孔同士の影響を検討す るため、全幅が80cmの解析モデルを用いて、解析モデル の中心を境に左右対称に噴砂孔を2つ設置し、2つの噴砂 の間隔をa(近い)、b(中程度)、c(遠い)の3ケースに変化さ せ、それぞれの噴砂孔底面の流速、漏水流量を比較した。 図17に噴砂孔の設置位置の概略図を示す。なお図17は解 析モデルを図12の矢印②の方向から見た平面図である。 また表4に各ケースの流速、漏水流量を示す。

表4より噴砂孔同士の間隔が近いほど流速,漏水流量が 減少していることが分かる。噴砂孔の間隔が近いほど,そ れぞれの噴砂孔の集水範囲が重複し,集水可能な範囲が減 少するため流速,漏水流量が減少したと考えられる。つま り噴砂が密集して発生した場合,それぞれの噴砂孔の流速, 漏水流量が低下するため,噴砂の継続は難しくなると言え る。裏返すと噴砂孔の集水範囲が重複・干渉しないでより 多くの流量が確保でき,噴砂孔がより高い流速を確保でき る箇所で噴砂が進展し,局所的な浸透破壊が発達すると考 えられる。また,前節においては透水層の縦断方向の分布 範囲の中心(a部)で流速,漏水流量が最大であったが本 節では端部(c部)で最大になった。よって,噴砂の発生 に伴って噴砂動態や破壊の進展特性が変化する可能性が あると考えられる。



図 17 噴砂孔の位置(堤内・平面図; 図 12 の視点②)

表4 噴砂孔の間隔と流速,漏水流量

噴砂孔の間隔	a(近い)	b(中程度)	c(遠い)
流速(cm/s)	0.127	0.141	0.149
漏水流量(cm³/s)	0.126	0.139	0.148

6. まとめ

三次元浸透流解析により単一層と複層で圧力伝播の様 子が大きく異なり, 複層では法尻から離れた行き止まり境 界付近でも噴砂が発生する可能性があることが示された。 さらに, 複層では単一層に比べて行き止まり境界と堤内地 の不陸の影響が大きいことが分かった。堤防の性能評価に おいて堤体の力学特性把握に偏るのではなく, 堤内地の地 形や基礎地盤の層構造などの大まかな地盤条件がパイピ ング破壊の重要指標になると考える。これらの指標は, 近 年発達した測量技術や簡易ボーリングなどによって比較 的簡単に入手し易い情報である。

また,噴砂の干渉の検討から,噴砂の発生に伴って噴砂 動態が変化する可能性があることも示され,噴砂の継続的 な監視と被災履歴の記録が破壊危険度の高い箇所の抽出 に有益な情報となることも分かった。今後は,土の流動状 態を考慮した限界流速の検討が必要である。

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 27 年度国総研からの委託研究によるものである。 末筆ながら深謝の意を示します。

参考文献

- 櫛山総平,前田健一,齊藤啓,李兆卿:透水性基盤の層構
 造による噴砂口動態およびパイピング進行性への影響,第
 51回地盤工学研究発表会,pp.1093-1094,2016.
- 西村柾哉,前田健一,櫛山総平,泉典洋,齊藤啓:異なる 基礎地盤特性の堤防の噴砂動態・パイピング挙動と漏水対 策型水防工法の効果,河川技術論文集,第23巻,pp.381-386, 2017.
- 齋藤啓,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, pp.251-256,2016.