

実流速による河川堤防基礎地盤の水みち進行判定の試算

ESTIMATION FOR DETERMINING CHANNEL PROGRESSION IN FOUNDATION GROUND OF RIVER LEVEES BY ACTUAL VELOCITY

笹岡 信吾¹・上野 俊幸²・福島 雅紀³・諏訪 義雄⁴・
栗原 朋之⁵・坂本 淳一⁵・神原 隆則⁵
Shingo SASAOKA, Toshiyuki UENO, Masaki FUKUSHIMA, Yoshio SUWA,
Tomoyuki KURIHARA, Junichi SAKAMOTO and Takanori KAMBARA

¹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 応用地質株式会社 流域・水資源事業部 (〒331-8688 さいたま市北区土呂町2-61-5,
元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 工博 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)

⁴正会員 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)

⁵正会員 中央開発株式会社 東京支社 (〒169-8612 新宿区西早稲田3-13-5)

River levees built on permeable foundation ground have risk of levee breach accompany with piping development, so it is important to have reliable evaluation detecting progression from a sand boil to a levee breach. In this study, we used a model experiment to evaluate channel development, and as a precondition of the foundation ground, a water channel was likely to develop in the horizontal direction. Using a seepage analysis which modeled channel development in foundation, we were able to reproduce reduction of the pore pressure accompany with channel progression in the foundation. Occurrence and discontinuation of channels showed the possibility of being evaluated by comparing the actual velocity calculated with the elements equivalent to the deformation size at the boundary between foundation and levee body with the critical velocity.

Key Words : river levee, piping development, model experiment, seepage analysis, actual velocity

1. はじめに

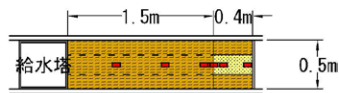
平成24年7月に発生した矢部川右岸7k300の堤防決壊では、河川水の基礎地盤への浸透によって川裏法尻部より堤体直下の砂質土層に噴砂を伴う空洞が徐々に進行し、堤防陥没による河川水の越流が生じて決壊に至ったと報告されている¹⁾。この前兆現象とみられる漏水や噴砂は出水の度に様々な河川で発見されており、ここからパイピングが発達して堤防決壊に至るメカニズムの解明が急がれている。

既往研究では、基礎地盤が透水性の異なる複層構造で、かつ上層に対して下層の透水性が高い場合（以下「複層地盤」と称す）にパイピングによる堤防決壊の危険性が高いことがわかってきた。これは河川水が透水性の高い

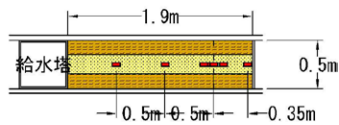
下層を介して川裏側基礎地盤に作用するメカニズムである。小高ら²⁾は、砂層基礎地盤に過剰間隙水圧が作用する状態になると、せん断強度が低下して基礎地盤を巻き込むすべり破壊が進行することを明らかにした。また、西村ら³⁾は、砂層の下位に透水性の高い礫層がある複層地盤において、上層の層厚が薄いことや上下層で透水性の差が大きいこと、堤内側が行止り構造であること等の条件で、堤体と基礎地盤の境界においてパイピングが発達しやすいことを明らかにした。下層の透水性が高い複層地盤では上層が被覆土となって川裏法尻部では鉛直方向上向きの浸透が卓越することから、初期変状についてはG/W（上層の重量と下層の揚圧力の比）である程度の説明ができる。

一方、基礎地盤が単一層である場合（以下「単層地盤」と称す）や、複層地盤であっても上層に対して下層

平面図 (堤体表示)



(堤体非表示)



断面図 (中央の位置)

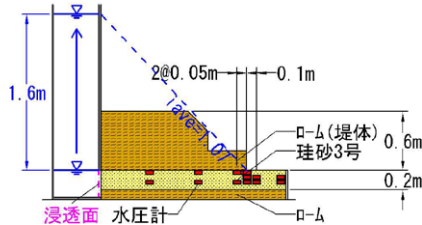


図-1 堤防法尻部抽出模型

の透水性が低い場合は、川裏側基礎地盤の間隙水圧が高まりにくいことからパイピングは発生しづらい。しかしながら、基礎地盤の間隙水圧が高まる条件が揃えば、単層地盤でもパイピングが発生するものと考えられる。上野ら⁴⁾は、単層地盤に対して法尻部抽出模型を用いて大きな水圧作用条件下でパイピング現象を再現した。そこでは水平方向の浸透が卓越し、前述の複層地盤とは異なるパイピング発生形態であることや局所動水勾配による説明が困難であることを示した。

本論文では、単層地盤における法尻部抽出模型実験に基づいて、実流速からパイピング発生の判定を試みた。また、全断面縮小模型実験では、透水層の平面分布範囲を川裏側に向けて狭めることで集水効果を働かせ、水平方向の浸透が卓越する地盤構造でもパイピングが発達することを再現し、そこでは水みちが内部に入るに従って局所動水勾配(流速)が小さくなってゆき、パイピングが停止することも確認できた。これらのパイピングの進行と停止について、上記の実流速によるパイピング進行の判定を試みた。

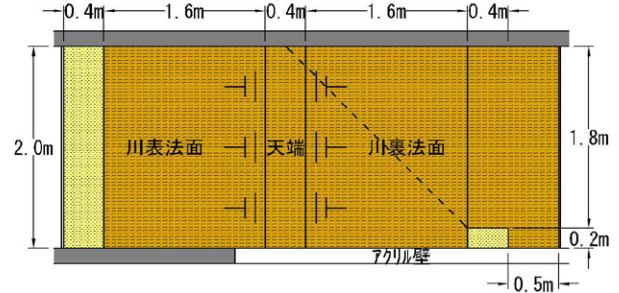
2. 実験概要

(1) 堤防模型及び使用材料

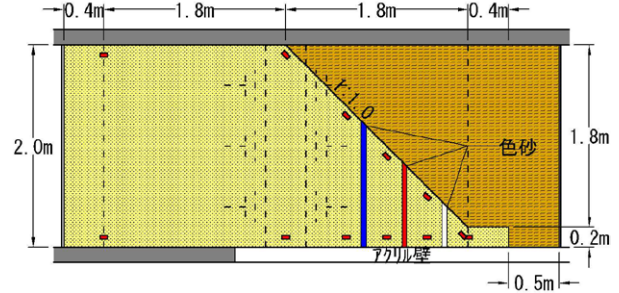
堤防模型は、図-1に示す堤防法尻部抽出模型と図-2に示す堤防全断面縮小模型の2種類である。また、使用材料の土質条件一覧表を表-1に示し、粒径加積曲線を図-3に示した。ロームは平均粒径が $D_{50}=0.01\text{mm}$ の粘性土で、透水性が非常に低い。珪砂3号は粒径が $0.4\sim 2\text{mm}$ の範囲を主体とする $D_{50}=1.09\text{mm}$ の砂で、透水係数は $k=9.1\times 10^{-4}\text{m/s}$ である。砕石C-40は $D_{50}=5.64\text{mm}$ の礫質土であるが、 $F_c=13.1\%$ であるため透水性は珪砂3号よりも低い $k=3.2\times 10^{-4}\text{m/s}$ である。

堤防法尻部抽出模型は、深さ 0.9m 、奥行 0.5m の水路内に厚さ 0.2m の透水性基礎地盤として珪砂3号

平面図 (堤体表示)



(堤体非表示)



断面図 (手前から0.1mの位置)

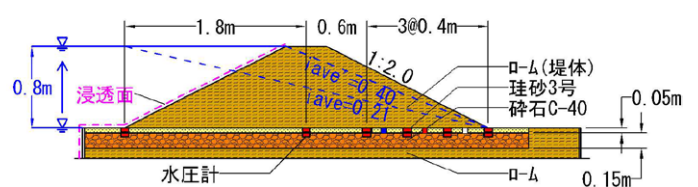


図-2 堤防全断面縮小模型

表-1 土質条件一覧表

区分	土質	土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	乾燥密度 ρ_d g/cm ³	湿潤密度 ρ_t g/cm ³	飽和密度 ρ_{sat} g/cm ³	間隙比 e	50% 粒径 D_{50} mm	20% 粒径 D_{20} mm	透水係数 k m/s
堤体	ローム	2.75	0.63	1.32	1.40	3.36	0.01	-	$2.0\text{E-}8$
基礎地盤	珪砂3号	2.66	1.35	1.48	1.84	0.97	1.09	0.80	$9.1\text{E-}4$
	砕石C-40	2.72	2.11	2.18	2.33	0.29	5.64	0.21	$3.2\text{E-}4$

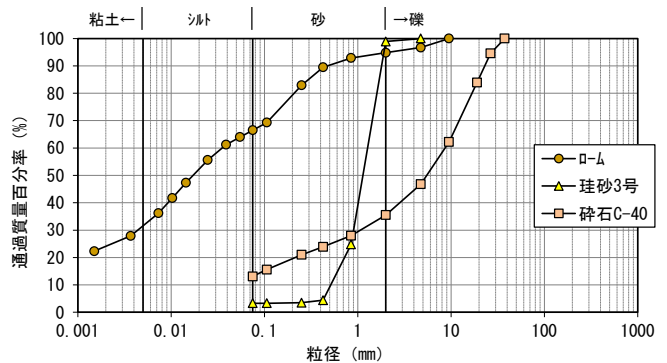


図-3 粒径加積曲線

($D_{50}=1.09\text{mm}$) を敷き均し、その上にロームで高さ 0.6m 、敷幅 1.5m の難透水性の堤体法尻部を作製したものである。堤体模型は法尻部が泥濘化しやすいため、厚さ 0.2m の矩形として良く締め固めた。また、外水位を上げると揚圧力で堤体が持ち上がるため、押えとして約 1m 分の盛土高に相当する土嚢を上に乗せた。基礎地盤に高い間隙水圧が作用する状況を作り出すために、浸透水は川表側の基礎地盤に直接供給されるようにスリットを介

して給水塔とつながる構造とした。基礎地盤は、川裏法尻から0.4m堤内側のところで行止り構造とした。

堤防全断面縮小模型は、深さ1m、奥行2mの水路内に厚さ0.2mの透水性基礎地盤として上層0.05mに珪砂3号 ($D_{50}=1.09\text{mm}$) と下層0.15mに砕石C-40 ($D_{50}=5.64\text{mm}$) を敷き均し、その上にロームで高さ0.8mの難透水性の堤体を作製したものである。堤体形状は、天端幅0.4m、法勾配1:2.0で、敷幅は3.6mである。基礎地盤は複層構造であるが、上層に対して下層の透水性が低い組合せのため、基礎地盤の浸透は上層が主体で、川裏法尻部では水平方向の動水勾配が卓越する。よって、珪砂3号の単層地盤と類似した模型と考えている。前述のとおり、単層地盤ではパイピングが発生しづらいことから、透水層を川裏側に向けて平面的に狭めることで、川裏法尻部の間隙水圧を高める工夫をした。河川水の堤防模型への浸透面は、川表法面に加えて基礎地盤の上面と端部の鉛直面とした。

(2) 水位条件

基礎地盤を飽和させるため、初期水位は基礎地盤上面（以下、GL）に設定し、基礎地盤のGL-0.07mに設置したマンメータで飽和を確認した。

堤防法尻部抽出模型実験では、外水位を0.05m/minの速度で上昇させ、水位0.50mごとにマンメータで間隙水圧の変化が収束した（1分間で変化がない）ことを目視確認して次のステップに進めた。外水位を敷幅で除して求められる平均動水勾配（以下、 i_{ave} ）は、1ステップごとに $i_{ave}=0.33$ ずつ増え、最終的に外水位1.6mまで上昇させたので $i_{ave}=1.07$ まで外力を作用させたことになる。

堤防全断面縮小模型実験では、外水位を0.02m/minの速度で設定水位GL+0.80mまで上昇させ、その後は一定水位を保つようにコントロールした。設定水位での平均動水勾配は $i_{ave}=0.21$ となる。参考値として、この時の川表法面上の水面位置と川裏法尻を結んだ直線勾配は $i_{ave}'=0.40$ となる。堤体が難透水性のロームであるため、平均動水勾配としては前者の $i_{ave}=0.21$ で整理する。

(3) 計測方法

実験中は、外観観察及び間隙水圧の計測を行った。

外観観察は目視及びカメラ撮影により行い、主に川裏法尻部周辺の堤体・基礎地盤の動態に着目した。堤防全断面縮小模型では、実験後の開削調査を見据えて基礎地盤上層の川裏法尻から0.2、0.6、1.0mの所に堤防縦断方向に色砂を配置し、土砂移動範囲を判別しやすくした。

間隙水圧計は川裏法尻部や集水効果が見込まれる部分に密に配置し、計測間隔は1秒とした。

3. 堤防法尻部抽出模型実験

(1) 実験結果

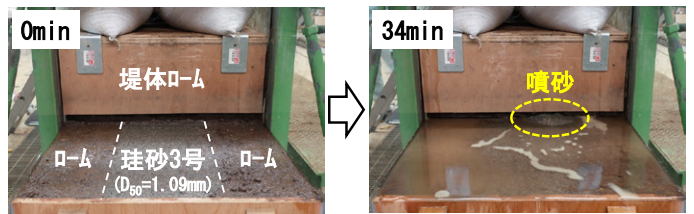


図-4 パイピング発生時の様子（縦断方向川裏側）

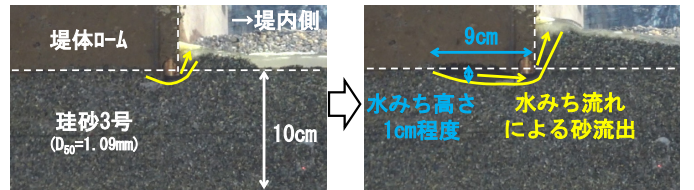


図-5 パイピング発達の様子（断面方向※別実験）

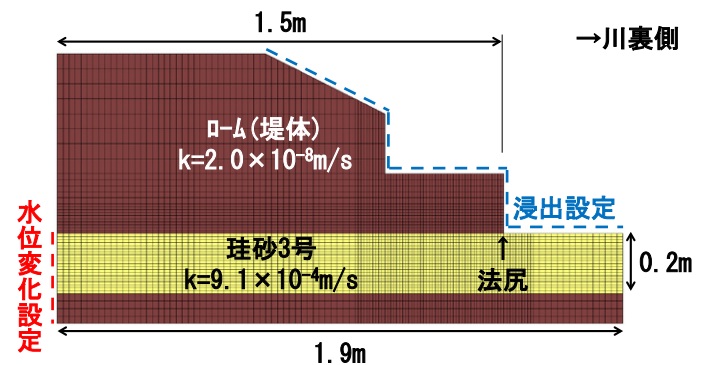


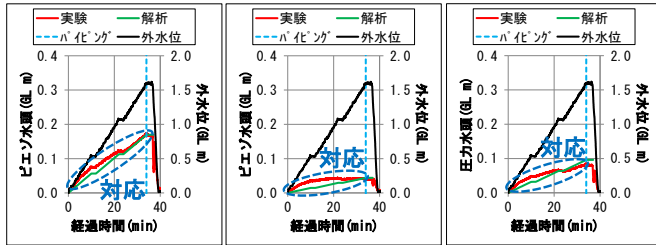
図-6 二次元解析メッシュ図

本実験では、一定速度で外水位を上昇させて34minでGL+1.6m付近 ($i_{ave}=1.061$) に到達したところで、図-4の様に堤体と珪砂3号 ($D_{50}=1.09\text{mm}$) の境界でパイピングが発生した。本実験ではガラス面の影響を除去するために珪砂3号とガラス面の間にロームを配置していたため、同様の地盤条件でガラス面沿いのパイピング発達を確認した様子を図-5（別実験）に示す。そこでは珪砂3号の砂粒が川裏側に水平移動して法尻部で噴砂となり、川裏法尻から川表側に向かって高さ約1cmの水みちが発達する様子が観察された。

(2) 浸透流解析による再現

実験における高密度の計測は、計測機器の数や大きさにより限界がある。このため、断面二次元の飽和・不飽和浸透流解析でピエゾ水頭を再現したモデルを作製し、パイピング判定の検討をすることとした。図-6に示す解析メッシュ図では、水みち規模を考慮して法尻部は1cm幅のメッシュに細分した。解析パラメータは河川堤防の構造検討の手引き⁹⁾（以下「手引き」と称す）に準じて設定した。図-7にはピエゾ水頭の再現結果を示す。34minのパイピング発生までは解析値が実験値に対応する結果を得た。

図-8には34minのパイピング発生時のピエゾ水頭コンター図を示す。パイピングが発達した堤体直下の珪砂3号の上部では、水平方向の浸透が卓越している。



(a) 法尻より川表側0.1m (b) 法尻 (c) 法尻より0.1m下方

図-7 解析によるピエゾ水頭の再現結果

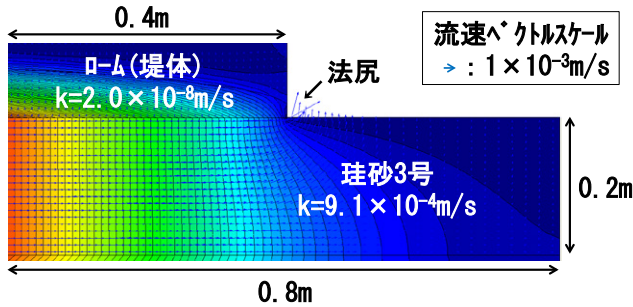


図-8 パイピング発生時 (34min) のピエゾ水頭コンター図

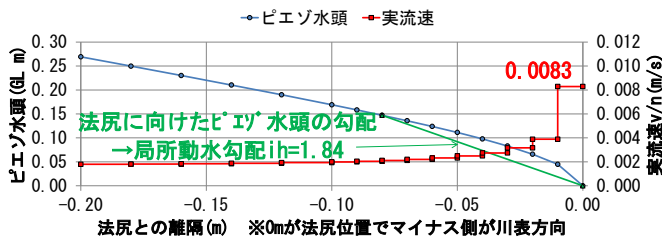


図-9 パイピング発生時 (34min) のピエゾ水頭分布の整理

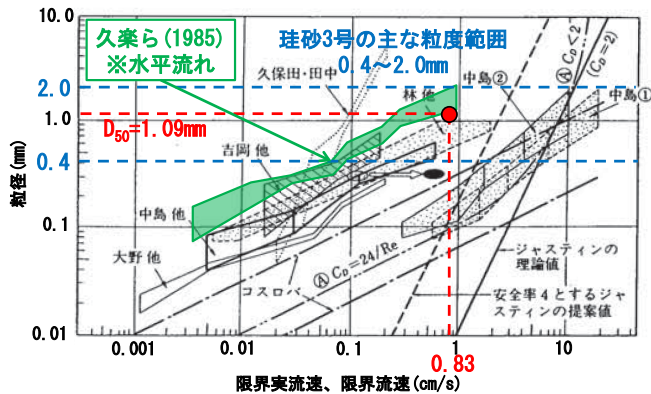


図-10 粒径と限界流速の関係図 (手引き⁵⁾に加筆)

(3) 局所動水勾配と実流速

図-9にはパイピングが発生した34minの堤体と珪砂3号の境界部のピエゾ水頭分布に着目し、法尻から川表側に0.2mの範囲で局所動水勾配と実流速を計算した。実流速は、動水勾配と透水係数を乗じたダルシー流速 v を間隙率 $n (=e/(1+e))$ で除して算出した。ピエゾ水頭は法尻部に向けて徐々に低下幅が大きくなるため、法尻に近づくほど動水勾配と実流速が大きくなることわかる。水平方向の局所動水勾配は、法尻から0.2mの位置でも1を超えており、手引き⁵⁾p.66に準じた堤防高の1/10 (堤防高

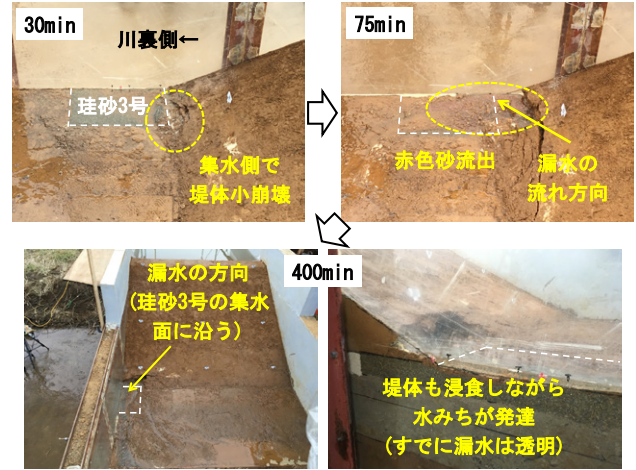


図-11 実験状況

0.8mを想定) の8cm幅では $h_p=1.84$ と非常に大きい。

実流速も法尻に近づくほど大きくなり、水みち高さと同等の1cm幅で算出した実流速の水平成分は $v/n=0.0083\text{m/s}$ (0.83cm/s) であった。この実流速を手引き⁵⁾p.163に示される粒径と限界流速の関係図に整理して図-10に示す。同図には、水平流れが卓越する場合を対象とした久保ら⁹⁾の実験結果を追記した。珪砂3号 (粒度範囲0.4~2.0mm) の平均粒径 $D_{50}=1.09\text{mm}$ で整理すると、久保らの実験の下限値に対応していることがわかる。

限界流速の適用には、流れの方向の違いや実験結果のバラつき、代表粒径の設定などの課題があるが、本実験の再現解析におけるパイピングの判定では、局所動水勾配に比べて限界流速の方が整合性が高かった。

4. 堤防全断面縮小模型実験

(1) 実験結果

本実験では、40minかけて天端高 (GL+0.8m) まで外水位を上昇させた後に、720min (12hr) 保持してパイピングの発達状況を観察した。

実験開始とともに堤内地の基礎地盤 (珪砂3号) 露出部で漏水が起きた。その後の実験の状況を図-11に示す。まず、水位の上昇とともに漏水量は増加し、30min (水位GL+0.6m) で基礎地盤露出部の集水側直上の堤体法尻部に小崩壊がみられ、そこから徐々に水みちが発達した。水位一定となった後の75minには、法尻から0.6mの位置に配置した赤色砂が流出した (法尻から0.2mの位置の白色砂の流出は目視できなかった)。この間の漏水状況から、集水面に沿って水みちが発達している様にてとれた。その後は水みち内で堤体が崩壊した影響で濁水が流出したり、崩壊した堤体土や流出した珪砂3号が水みちを塞いで高まった水圧で勢いよく土砂が流れ出たりしながら水みちが発達していった。図-12に示す漏水量は120min頃には一定となり、その後は目立った濁水や土砂流出はなかったことから、ここで水みちの進行が停止したものと推測される。その後720minまで濁りのない漏水

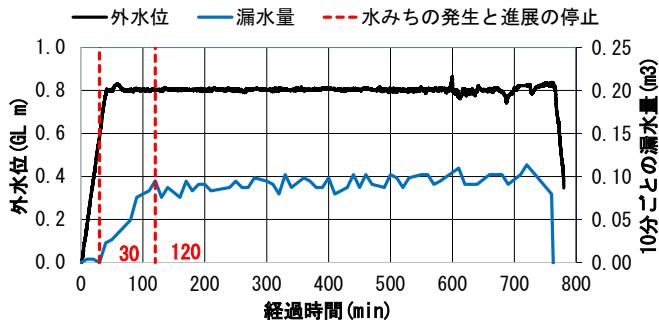


図-12 漏水量の経時変化

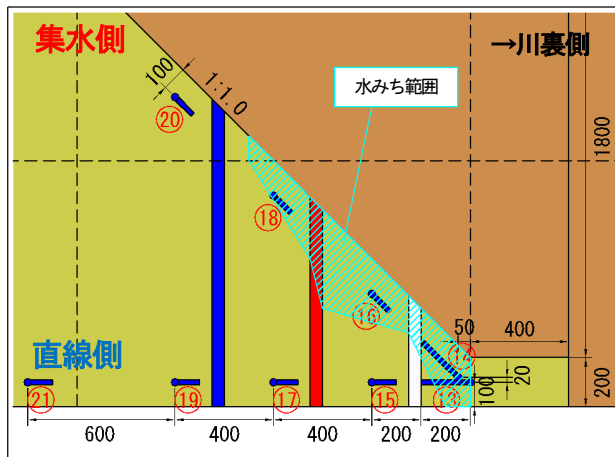


図-13 開削調査から推定した基礎地盤上面の水みち範囲

のみで状態に変化がないことを確認して実験を終了した。

実験後は開削調査を行い、水みちの範囲を追跡した。開削作業は、段階的に堤防縦断方向の断面観察と堤体を剥ぎ取った基礎地盤上面観察を繰り返して進め、図-13に示す水みち範囲を推定した。実験時の推測と同様に集水面に沿って水みちが発達したことが伺える。水みち発達に伴って水みち先端から川表までの距離は短くなる一方で、水みちの広がりとともに進展が停止したことを踏まえると、集水効果が水みちの進展に影響することが推察される。なお、川裏法尻付近の堤体の侵食が進んだところを除くと、水みちの高さは堤防法尻部抽出模型実験と同様に1cm程度であった。

図-14に直線側と集水側の珪砂3号内 (GL-0.02m) のピエゾ水頭の分布を示した。ここからも基礎地盤が集水形状となる堤防天端中央から川裏側に向かってピエゾ水頭は高まり、特に集水側で顕著となることがわかる。

(2) 浸透流解析による再現

本実験では、基礎地盤の幅を川裏側に向かって狭めることで集水効果が働いている。このため、飽和・不飽和浸透流解析は三次元モデルで行った。図-15に示す解析メッシュ図では、水みち規模を考慮して法尻部は1cm幅のメッシュに細分した。解析に用いたパラメータは手引き⁵⁾に準じて設定した。

図-16(a)及び(b)にピエゾ水頭の再現結果を示す。水みちが発生するまでを想定したモデルでは、直線側と集水側ともに30minの初期変状が発生するまでの解析値が

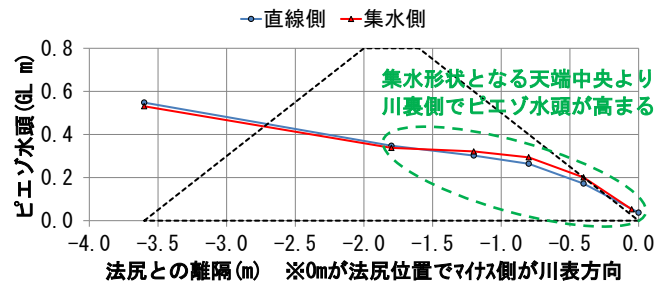


図-14 ピエゾ水頭の比較

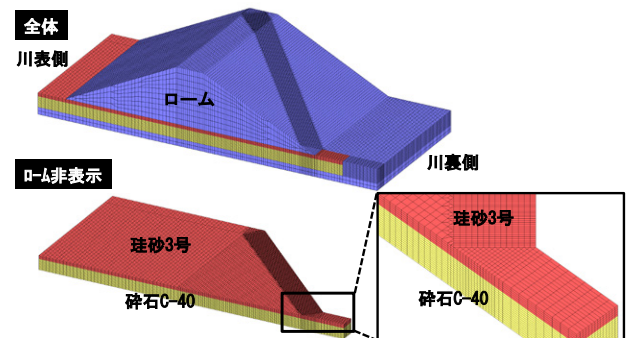
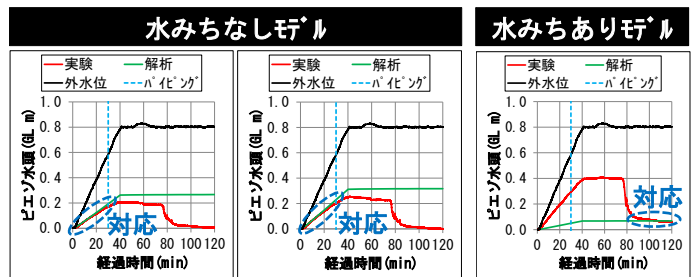


図-15 三次元解析メッシュ図



(a) 直線側法尻0.4m (b) 集水側法尻0.4m (c) 集水側法尻0.8m

図-16 解析によるピエゾ水頭の再現結果

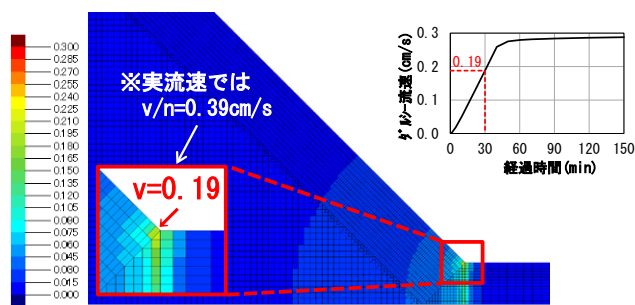
実験値と対応した。

さらに本実験ではパイピングが停止した現象について解釈するため、堤体と基礎地盤の境界に発達した水みちのモデル化を試みた。水みちのモデル化は、水みち部に100倍の透水係数を設定した場合と、水みち部を浸出点に設定した場合の2ケースを比較し、水みち発達後のピエゾ水頭の再現状況から前者を選定した。なお、水みちの透水係数を100倍としたのは、ドレーンと同等と考えてドレーン工設計マニュアル⁷⁾の少ない損失水頭で排水する目安より引用したものである。図-16(c)が水みち部に100倍の透水係数を設定したもので、水みち到達後に低下した実験値に解析値が対応した。以上より解析モデルの妥当性が伺える。

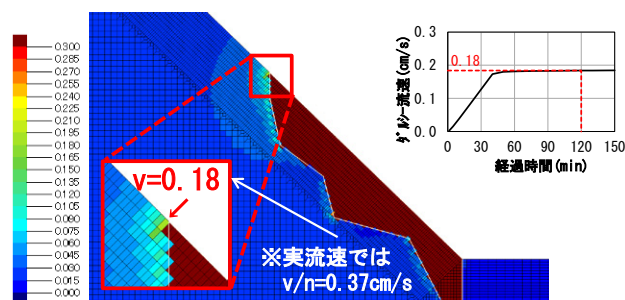
(3) 実流速と限界流速

本実験では、水みちの発生と進展の停止を確認できた。このため、それぞれの状態で基礎地盤の珪砂3号のピエゾ水頭を整理し、局所動水勾配と実流速を整理した。

図-17にはパイピング発生時と停止時の基礎地盤上面にあたる珪砂3号のダルシー流速コンター図を示す。いずれも集水側の端部で最大流速を示しており、30minの



(a) 水みちなしモデル (30minのパイピング発生時)



(b) 水みちありモデル (120minのパイピング停止後)

図-17 基礎地盤 (珪砂3号) 上面のダルシー流速

パイピング発生時には法尻直下で $v=0.19\text{cm/s}$ 、120minのパイピング停止時は水みち縁辺部で $v=0.18\text{cm/s}$ であった。

これを間隙率 $n (=e/(1+e))$ で除して実流速とすると、パイピング発生時は $v/n=0.39\text{cm/s}$ 、パイピング停止時は $v/n=0.37\text{cm/s}$ となる。代表粒径を珪砂3号の平均粒径 $D_{50}=1.09\text{mm}$ とすると、図-18より久楽ら⁹⁾の実験値と同等の粒径と限界流速の関係にあることがわかる。なお、堤防法尻抽出実験で整理した実流速 $v/n=0.83\text{cm/s}$ の方が大きな値となったが、堤体法尻形状が矩形で法尻直下の基礎地盤に作用する土被りが大きく、土粒子の移動に対して拘束力が働いた可能性がある。

図-19には水みちの位置を0m (水みち発生前)、0.25m (白色砂まで進行)、0.65m (赤色砂まで進行)、0.90 (最終形状)の4段階としたモデルで、水位GL+0.8mの定常計算による水みち縁辺部の最大実流速を整理した。水みちの進行とともに水みち先端部の実流速が低下し、最終形状でパイピング発生時の実流速 $v=0.39\text{cm/s}$ を下回って収束したものと考えられる。

5. おわりに

本論文では、水平流れが卓越する地盤条件での水みち進行判定を試みた。

まず、水平流れが卓越する地盤条件では、局所動水勾配の適用が難しくG/Wも適用できなかったが、水みち規模を考慮した実流速の算定によって、パイピングの評価ができる可能性を示した。

次に、堤防全断面縮小模型実験では、上層に対して下層の透水性が高い地盤構成でなくても、透水層が川裏側に狭まることで集水効果が働いて基礎地盤の間隙水圧が

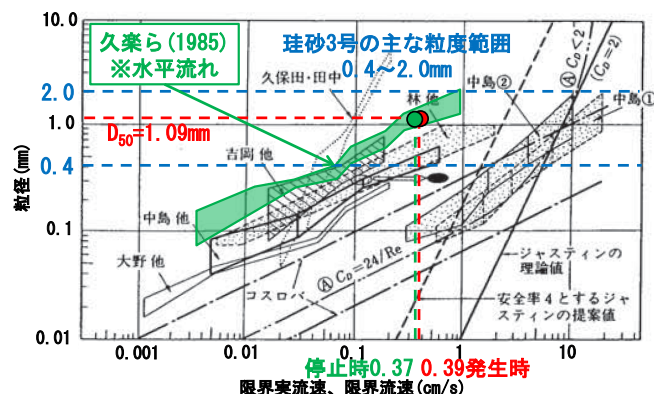


図-18 粒径と限界流速の関係図 (手引き⁵⁾に加筆)

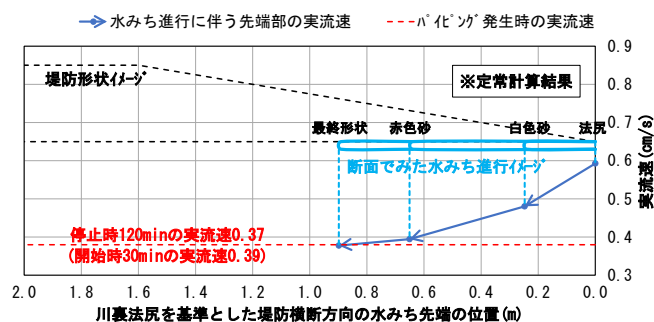


図-19 水みち進行と流速低下の関係

高まり、現実的な外水位の範囲でもパイピングが発生することを確認した。本実験では水みちの進行に伴って集水効果が薄れてパイピングが停止したものと考えられるが、水みちを高い透水性を与えて模擬した浸透流解析を実施することで、パイピングの進行と停止を再現できた。噴砂等の被災箇所においては、堤防の安全性評価や対策優先度の検討において、このような評価手法が有効であると期待される。

謝辞：本研究の遂行にあたり、透水性基礎地盤に起因する河川堤防の変形に関する技術研究開発における意見交換会に関わる関係者の方々より多くのご助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

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) 小高猛司，李圭太，崔瑛，森智彦，森三史郎，林愛美：浸透に伴う基礎地盤の弱体化に起因する堤防法すべり崩壊に関する考察，第5回河川堤防技術シンポジウム論文集，pp.55-58，2017。
- 3) 西村征哉，前田健一，櫛山総平，高辻理人，泉典洋：透水性基礎地盤を有する河川堤防のパイピング条件に基づく点検フローの提案，第5回河川堤防技術シンポジウム論文集，pp.13-16，2017。
- 4) 上野俊幸，笹岡信吾，中村賢人，福島雅紀，諏訪義雄：模型実験に基づくパイピング発生パターンと局所動水勾配の関係，第5回河川堤防技術シンポジウム論文集，pp.63-66，2017。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 国土交通省：ドレーン工設計マニュアル，p.11，2013。(2018.4.3受付)