# 大型模型実験に基づく河川堤防における パイピング発達過程の考察

CONSIDERATION OF PIPING DEVELOPMENT PROCESS IN RIVER LEVEE BASED ON LARGE SCALE MODEL EXPERIMENT

笹岡信吾1・上野俊幸2・森 啓年3・中村賢人2・福島雅紀4・諏訪義雄2 Shingo SASAOKA, Toshiyuki UENO, Hirotoshi MORI, Kento NAKAMURA, Masaki FUKUSHIMA and Yoshio SUWA

<sup>1</sup>非会員 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)
<sup>2</sup>正会員 国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究部河川研究室
<sup>3</sup>正会員 元国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室(山口大学大学院創成科学研究科)

4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

The river levee of the Yabe River was breached in July 2012. It is assumed that a sandy soil layer under the levee body was eroded internally, which caused piping led to the settlement of the levee crest. On the other hand, although under the similar ground conditions, only the minor sand boil were observed at the several river levees. In this study, large scale model experiments were carried out to observe the piping of river levee under in a permeable foundation ground. The development process of piping by the soil layers of foundation ground and levee body is proposed based on the results.

Key Words : river levee, piping, large scale model experiment

# 1. はじめに

平成24年7月の矢部川堤防決壊では、堤体直下の砂質 土層が川裏法尻部から流出して空洞化が進み、堤体の陥 没とともに越流水によって決壊に至ったとされている. 一方、類似した地盤条件であっても、局所的な漏水・噴 砂の発生に留まる箇所もみられた.

基礎地盤の砂が流出して空洞が進行するパイピングの 発達過程は未だ不明な点が多く、決壊へつながる可能性 が高い箇所を抽出するためには、その過程の定量的評価 が必要である.

櫛山ら<sup>1</sup>は,基礎地盤を上層と下層に分けた複層構造 として,上層と下層の透水係数を変えた複数の実験より, 地盤条件や水位条件の組み合わせによる漏水・噴砂の動 態の相違点を整理し,パイピングの進行度は基礎地盤の 層構造ごとに異なることを示した.また,林ら<sup>21</sup>は,堤 体土質を変えるとともに,基礎地盤の上層と下層の透水 係数を変えた複数の実験により,いずれも法尻付近の基 礎地盤に高い動水勾配が作用すると,透水性の大きく異 なる境界で水みちが形成され,堤体の安定性に大きく影 響を及ぼすことを示した.また,齋藤ら<sup>31</sup>はパイピング による水みちが進行する過程で生じる,水みち内の流速 について、大型実験と小型実験では相似性を満足しない ことが述べられている.

本論文では、これらを参考に、河川水位の上昇に起因 する間隙水圧を透水層に加える実物大模型実験を実施し、 パイピングによる変状が連鎖的に進み、堤体が崩壊する 過程をこれまでより詳細に確認できたことを踏まえ、パ イピングの発達と決壊に至るプロセスを整理した.

# 2. 実験概要

基礎地盤の構成の違いがパイピングによる水みちの形 成の進行に与える影響を確認するため、基礎地盤を上層 と下層に分けた複層構造として透水層の粒径及び厚さや 川表側浸透面の条件を変えて実験を4ケース実施した. ケース1,2においては基礎地盤上層に下層より透水性の 低い材料を用いた複層の場合と基礎地盤上層に不透水層 を設置し下層に透水層を設置した場合について、変状の 進行状況の違いを確認した.ケース3,4においては堤体 の崩壊がパイピングによる噴砂、空洞化、堤体の崩壊と いった変状連鎖にどのように影響するのか確認した.ま た、ケース1,2は基礎地盤における透水層の幅を0.3m、 ケース3,4は透水層の幅を水路全幅とし、透水層の縦断 方向の幅がパイピング発生に与える影響を確認した.

## (1) 実験模型

各ケースの模型横断及び平面形状を図-1に示す.4 ケース共,堤体は高さ2.6m,法勾配1:2.0とした.また, 堤体材料は火山灰質粘性土(関東ローム)を用いた. ケース1及び2の基礎地盤における透水層の幅は上層及び 下層ともに0.3mとした.ケース3及び4は水路幅ほぼ一杯 まで平面的に一様な土層構造とした.堤体は層厚0.30m 毎に転圧し,締固め度Dc=90%を目標として施工した. 基礎地盤の透水層は水締めで施工した.

# a) ケース1

ケース1は、厚さ0.30mの珪砂6号(D<sub>50</sub>=0.33mm)を上 層、厚さ0.30mの珪砂1号(D<sub>50</sub>=1.09mm)を下層に設置 した.また、基礎地盤の透水層は行き止まり状となり、 川裏法尻から川裏側~0.3mまでの土層構造とした.

#### b) ケース2

ケース2は、基礎地盤下層の透水層が厚さ0.3mの難透 水層(関東ローム)に被覆された土層構造とし、透水層 は厚さ0.30mの珪砂1号とした.透水層は行き止まり状と なり、川裏法尻から川裏側へ0.3mまでの土層構造とした. c) ケース3

ケース3は、厚さ0.15mの珪砂6号( $D_{50}$ =0.33mm)を上層、厚さ0.45mの珪砂1号( $D_{50}$ =2.90mm)を下層に設置した.また、透水層は行き止まり状となり、川裏法尻から川裏側へ1.6mまでの土層構造とした.

## d) ケース4

ケース4は、基礎地盤の透水層を地表面に露出させた 土層構造とし、2種類の珪砂を用いた複層地盤とした. 厚さ0.30mの珪砂6号( $D_{50}$ =0.25mm)を上層、厚さ0.30m の珪砂3号( $D_{50}$ =1.09mm)を下層に設置した.基礎地盤 の透水層は川裏法尻から川裏側へ4mまでで行き止まり となる土層構造とした.

なお、ケース1~3の基礎地盤上層には、川裏法尻から 0.6m間隔で色砂を全幅に0.1m幅で設置し、土砂動態を観 察できるようにしている、ケース4は0.08m幅で色砂を設 置している.

また,ケース4の基礎地盤上層に用いた珪砂6号 (D<sub>50</sub>=0.25mm)のみ,ケース1~3で用いた珪砂と粒径 が異なる.

#### (2) 水位条件

水位の初期条件を基礎地盤上面とするため,実験開始 前に外水位を基礎地盤上面にあわせた位置で12時間以上 保持し,間隙水圧計により飽和状態を確認した.

外水位は圧力式自記水位計にて常時確認し、上昇速度 を一定に保ち、設定水位である基礎地盤から2.4mに至っ た際には給水ポンプ等を用いて外水位を一定に保った. 各ケースともに、毎分0.02mの速度で水位を上昇させた. なお、ケース1、2は実験開始から420分で外水位を基礎 地盤上端まで下げ、そのまま一定水位を保ち、900分後 に実験再開し、再度毎分0.02mの速度で基礎地盤上端か ら2.4mまで上昇させた.なお、基礎地盤への浸透面とし



図-1 実験模型断面図及び平面図

て、ケース1~3は基礎地盤の透水層に直接水が浸透する よう、川表側の基礎地盤境界に横スリット状に開口した 浸入面を設けている.

## (3) 計測方法

透水層の水圧は、間隙水圧計を設置して2秒間隔で計 測した.また外水位及び透水層より漏水した流量を測る ため、ケース1~3については圧力式自記水位計を設置し、 2秒間隔で測定し、ケース4についてはサーボ式水位計を 設置し10秒間隔で測定した.図-1に設置状況を示す.

堤体内及び基礎地盤には、3軸成分の加速度及び水圧 の計測が可能な小型モーションロガーを設置し計測した. 間隙水圧計およびモーションロガー共に、透水層と難透 水層(堤体もしくは被覆土層)の境界面から0.02m低い 位置に設置しており、基礎地盤上層と下層で対になるよ う設置している.

あわせて、ケース3、4については、川裏法尻付近に水

路側壁に沿ってアクリルボックスを設置し,堤体境界及 び基礎地盤の各層について観察できるようカメラを設置 した.

## 3. 実験結果

## (1) ケース1

# a) 実験結果概要

基礎地盤上層の間隙水圧の状況を図-2,平面的位置は 同一となる基礎地盤上層と下層に設置した水圧計間の動 水勾配を整理した状況を図-3に示す.実験開始45分後に 川裏法尻に亀裂が発生したが、基礎地盤表層からの微量 な漏水のみで変状はみられなかった.実験開始後121分 で亀裂は拡大し、基礎地盤表層からの漏水は増加し、法 尻直下に設置していた色砂が流出し始めた. 実験開始か ら130分後、川裏法尻部から1.2m川表側に設置している 基礎地盤上層の水圧計(A05)において,間隙水圧が外 水位の2割程度まで上昇していたが、川裏法尻からの漏 水量が増え、色砂が流出したあと低下した. 同センサー の加速度においても同時刻から反応を示しており、少な くとも川裏法尻から川表側へ1.2mの範囲の基礎地盤上層 における硅砂が流動していたことが分かる.またこの時, 位置の鉛直方向の局所動水勾配は急激に上昇していた. これは水みちが計器に接近してきたためと思われる.実 験開始後212分から320分にかけて川裏法尻から1.2mの位 置に設置した色砂が断続的に流出したが、川裏法尻の崩 壊は限定的であった.このとき、水圧計(A05)では断 続的に間隙水圧が上下したものの、他の一連の水圧計 A02~A04については一時的に間隙水圧が下がった後, 上昇している.これは、川裏法尻の噴砂に起因し、一時 的に間隙水圧の低下があったが、その後、基礎地盤上層 が流出しなくなり再び間隙水圧が上昇したためと考えら れる.また、図-3の同時刻付近では、同位置における色 砂の流出後,限界動水勾配となる0.8近辺まで上昇した 後,実験中断までその値を維持しており,A05付近で噴 砂が継続的に生じていた可能性がある.しかし目視確認 では実験中断まで目立った変状はみられなかった.

実験再開後,実験開始から845分後には川裏法尻から 漏水が発生,実験開始から1149分から1168分後には裏法 尻から濁った漏水が見られはじめ漏水量が増加した.こ のとき,圧力計A02~A03における圧力水頭が急激に低 下するとともに,加速度計の加速度が反応しており,同 位置の基礎地盤上層の珪砂が流出し始めたと考えられる. またこの時,A02における鉛直方向の局所動水勾配は急 激に上昇しており,水みちがその近辺まで発達している ことを示していた.その後,同計器においては徐々に間 隙水圧が回復していくが,実験開始から1406分後,川表 法面において,川表法尻より約3.0m付近で大きな気泡が 発生し,一瞬間隙水圧が高まった.その後断続的に少量 の気泡が発生していた.実験開始から1449分後,気泡発 生箇所である川表法面において陥没が発生し,陥没孔か



ら勢いよく流入した外水は大量の濁った漏水となって川 裏法尻から流出した.その際,川裏法尻の崩壊範囲は広 がらなかったが,天端が若干沈下したため決壊と判断し 実験を終えた.

## b) 実験後の開削調査

実験後に堤体内の空洞形状を測定した(図-4).川裏 法面中腹において,空洞は川裏法尻から3.58mで最大径 1.149mとなり,川表法面の陥没箇所までつながっていた. 川表法尻より2.9mより川裏側については基礎地盤上層及 び下層の硅砂が全て流出しており,川表法面の陥没箇所 から水流が直接作用したことが推察される.また,川表 法尻から2.0m付近においては基礎地盤上層の硅砂が抜け 出していることを観察した.しかしこれが,パイピング の進行によるものか,水流の作用によるものかは水圧計 などを川表側に設置していなかったため不明である.

#### (2) ケース2

## a) 実験結果概要

実験開始から80分まで特段変化がなかったが、川裏法 尻付近の基礎地盤が徐々に盛り上がる盤ぶくれが発生し た.98分には川裏法尻から漏水が発生し、基礎地盤下層 に設置しているB02~B06の各計器における間隙水圧は 漏水が発生すると同時に反応し、特に川裏法尻に設置し ているB06についてはその後実験を中断するまで間隙水 圧は上がらなかった.その後、当初漏水の発生した位置 からの漏水は止まり、川裏法尻から1.5mほど離れた箇所 から再び漏水が発生し、その後特段大きな変状はなかっ た.B02~B05の各計器においては、その後実験を中断 するまで徐々に間隙水圧が上昇したが、基礎地盤下層の 硅砂が流出することはなかった.また、実験再開後にお いても漏水は継続的に生じてはいるものの濁った漏水は 見られず、特段の変化は発生しなかった.また加速度に おいても変化は見られなかった.

#### b) 実験後開削調査

実験後,開削を実施ししたが,漏水発生箇所はふさ がっており,また基礎地盤上層のローム,下層の硅砂1 号(D<sub>50</sub>=2.90mm)においても特段の変化は見られな かった.

# (3) ケース3

#### a) 実験結果概要

ケース3における間隙水圧の状況を図-5に示すととも に、アクリルボックス内部より撮影した基礎地盤の挙動 を図-6に示す.実験開始直後から堤内側の基礎地盤表層 から漏水が確認され、実験開始後20分経過したころから 基礎地盤上層の硅砂が流出し、川裏法尻に設置した色砂 が流出した、また同時に川裏法尻に縦断亀裂が発生し、 時間経過とともに徐々に亀裂幅は大きくなり漏水量が増 加した. その後, 堤体法尻のローム土塊が間隙水圧によ り持ち上がるとともに流出し、同時に基礎地盤上層の珪 砂が大量に流出し始めた. このときの水圧計C06, C07 における間隙水圧は、直前まで徐々に増加傾向を示して いたが、ローム土塊流出と同時に一瞬減少した.また、 実験開始より55分後には堤体と基礎地盤上層の境界にパ イピングによる水みちが川裏法尻から川表側に1.2mほど 発達した、水みちの発達とともに基礎地盤上層において 噴砂が発生し、基礎地盤の有効応力が低下し、浸透圧に より基礎地盤上層のまとまった範囲が川裏側へ大きく動 いていることが確認された(図-6).このとき直近の水 圧計A03において、同時刻付近で緩やかな間隙水圧の減 少が見られた. 60分後には川裏法尻が全体的に崩壊し, 基礎地盤表層からの漏水はさらに増加し、堤体を構成す るロームの土塊が流出し始めた. その後, 実験開始100 分後には、水路側壁付近から急激に漏水量が増え、103 分に決壊に至った.堤体天端は決壊時,垂直に大きく沈 下し、決壊前に沈下はほとんど発生していなかった.





#### b) 実験後開削調査

実験後、崩壊した堤体土の一部を撤去して透水層の状況を確認した.決壊箇所付近では激しい水流により決壊前の基礎地盤状況が確認できないため、決壊箇所から3.0m縦断方向にずれた位置において横断的な開削を行った(図-7).基礎地盤上層における水みちの進行を確認すると、川表法肩付近となる川裏法尻より6.0mまで水みちの進行が見られ、同位置に設置していた色砂の流出が見られた.川裏法尻より5.2mまでは基礎地盤上層は全て流出している.特に川裏法尻から4.2mまでの範囲は基礎地盤下層の珪砂を押し出すように堤体が斜め下に沈下しているとともに、沈下した堤体土塊の中に基礎地盤上層の珪砂が亀裂内に侵入している様子が確認された.また、川裏法尻より4.2mから5.2mの範囲においては堤体が0.1m程度沈下しているとともに0.05mほどの空洞が観察された.それより川表側では変化が見られなかった.



図-7 開削によるパイピング進行状況の確認

# (4) ケース4

# a) 実験結果概要

ケース4における基礎地盤の間隙水圧について、経時 変化を縦断方向の中心位置で比較した(図-8).外水位 上昇に伴い実験開始直後より、堤内側の基礎地盤表層透 水層露出部からの漏水がみられ、実験開始より85分で川 裏法尻に設置した色砂が流出した.間隙水圧においては 川裏法尻から川表側に0.4mの位置に設置した水圧計A22 は外水位の1割程度、さらに法尻から2.6mの位置に設置 した水圧計A28においても3割程度の上昇量となってい た.実験開始から90分後、法尻付近に設置した水圧計 A22, A23の圧力水頭が下がっている. これは85分後に 川裏法尻の色砂が流出した後、川裏法尻の縦断亀裂が発 生し、そのために間隙水圧が一時的に減少したものと思 われる. その後, 川裏法尻部に縦断亀裂が発生した. 時 間の経過とともに縦断亀裂範囲が川裏法尻から川表方向 へ広がっていき、766分後には法尻から1.5m程度の範囲 の大規模な法面の崩壊が発生した.この際、水圧計の A22, A23, A28において間隙水圧がその直後に急激に 上昇している. 同時刻のアクリルボックス内のカメラか らは基礎地盤上層の珪砂が、法面の崩壊により押し出さ れるように流出する様子が観察された. これは間隙水圧 の上昇とともに基礎地盤の有効応力が低下し、土塊が斜 め下方向へ移動したものである. その後も川裏法面の小 規模な崩壊が断続的に続いたが、実験開始から25時間が 経過しても天端が沈下するような崩壊はみられなかった. (5) 各実験におけるパイピングの発達過程

図-9に4ケースの実験の特徴を示す.ケース2以外は, 実験開始直後より基礎地盤から漏水が発生し、外水位の 上昇とともに川裏法尻部では噴砂が発生した.その後, パイピングが発達して堤体下部の水みちが発達したが, 堤体法面の崩壊にとどまり,決壊にまで至らないケース 4と基礎地盤の水みちが発達し決壊にまで至るケース1, 3があった.

決壊に至らなかったケース4でも基礎地盤上層におい て噴砂が発生したことから、この時に透水性の高い基礎 地盤下層の間隙水圧の上昇によって、川裏法尻周辺の基 礎地盤上層の有効応力が失われた状態であったと推察さ れる.この影響により、支持力が低下した堤体の崩壊・



図-9 変状連鎖の進行状況の違い

沈下や間隙水圧による側方移動が発生したと考えられる. 一方で、この堤体の崩壊等によって、基礎地盤に水みち が発達しにくい状況となり、さらに崩壊した堤体土が川 裏法尻に堆積することで浸透水による揚圧力に対するカ ウンターとなり、パイピングの進行が抑制されたと考え られる.ケース2では初期には基礎地盤下層に非常に高 い間隙水圧が発生したが、盤ぶくれに伴いロームに亀裂 ができて漏水が発生すると、すぐに間隙水圧は低下した. ロームによる被覆構造が破壊された後では、基礎地盤下 層が単層構造となって川裏法尻部で珪砂1号

(D<sub>50</sub>=2.90mm)を押し流すほどの流速も出なくなり, 土砂流出や堤体の変状に進行しなかったと考えられる.

決壊に至ったケース1,3では、川裏法尻部において、 堤体土が間隙水圧により持ち上がる様子や、基礎地盤 上層において噴砂が発生し、細砂層上部で砂粒子の移 動が生じ、水みちが発達する様子を観察することがで

| 実験  | フェーズ                                |                          |                                   |                               |
|-----|-------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| ケース | Ι                                   | П                        | Ш                                 | IV                            |
| 1   | 漏水 ────── · 裏法尻 ────<br>の崩壊         | ★ 水みち(空洞)の -<br>形成・堤体土流出 | →水みち(空洞)の <sup></sup><br>発達・堤体土侵食 | 水みち(空洞)の貫通・→ 決壊<br>堤体土侵食拡大    |
| 2   | 盤ぶくれ → 盤ぶくれ → 漏水(下層の<br>箇所の亀裂 圧力低下) |                          |                                   |                               |
| 3   | 漏水 ───── 噴砂 ────                    | ▶ 水みち(空洞)の -<br>形成・堤体土流出 | → 堤体土の変形 ―――                      | ◆ 裏法面の亀裂・漏水 → 決壊<br>堤体土の崩壊(大) |
| 4   | 漏水 ────→ 軽微な噴砂 ────<br>▲            |                          | →→ 堤体土の変形<br>(法尻揚圧カく上載荷重)         |                               |

#### 図-10 パイピングによる変状連鎖

きた.ケース4と異なり,堤体の粘着力が高く,崩壊・ 沈下が発生しなかったことが,パイピングが発達した要 因の一つと考えられる.

今回確認した変状連鎖について、変状のきっかけとなる、堤体川裏法尻の崩壊、盤ぶくれ、漏水・噴砂といった現象をフェーズI、水みちの進行をフェーズII、堤体の変形と水みちの進行・停止の相互作用をフェーズIII、水みち内流れや越流水等の高流速による堤体侵食をフェーズIVとすると、図-9のI~IVのように整理できる. どのケースも堤体亀裂の発生や盤ぶくれ、噴砂といった現象は変状の初期に発生するがその後の水みちの発達や堤体土の崩壊といった現象は基礎地盤や堤体土質の条件等によって発生の有無やその進行速度が異なると考えられる.

## 4. おわりに

実験結果より、パイピングによる変状連鎖についてフ ローにまとめると図-10となる.実験により確認された パイピングによる水みちの発達から堤体の変形,決壊に 至る過程も踏まえて、パイピングによる変状連鎖過程を 考察した.これは、パイピングの発達による一連の現象 をフローにまとめ、盤ぶくれ、漏水、噴砂や堤体変形か ら堤防決壊までのつながりを整理したものである.今後、 水みちの進行や堤体土の崩壊に進展するのか、途中で変 状が止まるのか、変状が進むのであればその速度はどの くらいかを定量的に評価する手法の開発が必要である.

特に、変状や変形を許容する照査を目指すのであれば、 漏水・噴砂の発生(フェーズI)から水みちの発達 (フェーズII),堤体の変形と水みちの発達・停止の相 互作用(フェーズIII),空洞や亀裂内の流れや越流水の 高流速による堤体の侵食(フェーズIV)までの決壊・破 堤に至る時間の評価が不可欠となる。各フェーズのシ ミュレーションに必要とされる技術分野も、浸透流解析、 土砂水理、堤体変形解析、水理・河川工学と幅広く、そ れらを連成させることが必要となる。

現在の河川堤防における浸透に対する照査においては, 噴砂発生の有無を判断し,対策を実施しているが,パイ ピングが継続して進行し決壊にまで至るのか,堤体の崩 壊により進行が止まる,または遅くなるのかの判別が行 えれば,優先的に対策を実施する必要がある箇所を選別 でき,効率的な堤防強化につながると思われる.

今後は、パイピングによる水みちの発達、堤体の変形、 決壊・破堤に至る過程には基礎地盤だけでなく堤体土質 も関係すると考えられることから、さらに実験を実施し、 定量的な評価手法を含めて堤防決壊メカニズムの解明に つなげたい.

謝辞:本研究を遂行する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 交換会に携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

- 櫛山総平,前田健一,齊藤啓,西村柾哉,李兆卿,泉典洋:漏水・噴砂の動態に着目した河川堤防のパイピングの進行性に及ぼす地盤条件と水位条件,河川堤防技術シンポジウム講演概要集,第4回, pp.9-12, 2016.
- 2)林愛実、森三史郎、小高猛司、崔瑛、李圭太:高透水性基礎 地盤を有する河川堤防の浸透破壊に関する模型実験に関す る模型実験、土木学会第71回年次学術講演会、2016.
- 3) 齋藤啓,前田健一,泉典洋,李兆卿,櫛山総平:基盤条件着 目したパイピングの進行特性及び相似則に関する一考察,河 川堤防技術シンポジウム講演概要集,第3回, pp.52-55, 2015.
- 4) 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:小型モーションロガーを用いた透水性基礎地盤 に起因する河川堤防の進行性破壊の計測,第50回地盤工学研 究発表会,2015.
- 5) 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,pp.361-366, 2015.
- 6) 崔瑛,小高猛司,李圭太:高透水性基礎地盤の基盤漏水に起因する堤体の進行性破壊に関する模型実験,第70回土木学会年次学術講演会,2015.
- 7) 上野俊幸, 笹岡信吾, 諏訪義雄, 森啓年, 倉田大輔, 下川大 輔:堤防全断面縮小模型を用いた透水性基礎地盤上の河川堤 防の進行性破壊に関する実験,河川堤防技術シンポジウム講 演概要集,第4回, pp.9-12, 2016.

(2017.4.3受付)