高水時のパイピング進展による堤体変形挙動の 遠心模型実験

DEFORMATION OF LEVEES DUE TO PROGRESSION OF BACKWARD EROSION PIPING

今村衛¹・岡村未対²・露口祐輔³ Mamoru IMAMURA, Mitsu OKAMURA and Yusuke TSUYUGUCHI

1正会員 工修 鹿島建設 土木設計本部(〒107-8502 東京都港区赤坂六丁目5-30)
2正会員 工博 愛媛大学教授 大学院理工学研究科(〒790-8577 愛媛県松山市文京町三番)
3学生会員 愛媛大学 大学院理工学研究科(〒790-8577 愛媛県松山市文京町三番)

River levees occasionally breach during flooding in the mechanics of the backward erosion piping below levees. Current inspection methods cannot detect the progress of pipes until it manifests itself at the exterior surface. There is a strong need for non-destructive techniques that can identify internal damage. Okamura et al. (2017) found that characteristic deformation appeared on the surface of levees just above pipes. In this study centrifuge tests were conducted to simulate backward erosion piping to precisely observe subsidence of levee surface to better understand the relationship between piping holes and small trough on the surface. It was found that the area of surface subsidence extended according to the progression of piping holes towards riverside, confirming the area to be the good indicator of location and progression of piping. The width and depth of the area were closely correlated with strength of levee soil and depth of piping.

Key Words : Backward erosion piping, levee, subsidence, centrifuge test

1. はじめに

河川堤防の高水による破壊形態の一つとして,パイピ ング破壊がある.パイピングによる破堤事例は,わが国 では2012年の矢部川堤防など数事例が知られているのみ である.しかしながら,高水継続時間の長い欧米や中国 の河川では,主な破堤原因の一つとなっており,明治期 以降に整備を進めてきたわが国の河川堤防も,高水や降 雨の繰り返し作用により劣化が進み,今後は増加するこ とが予想される.

河川堤防のパイピングは、上昇した外水圧による堤内 側法尻付近の噴砂をきっかけとし、堤体あるいは基礎地 盤内の土が徐々に噴砂孔から排出されることによってパ イプ状の空洞が川表側に向かって進展してゆく.パイプ が貫通し外水に到達すると大量の水がパイプ内を流れパ イプを急速に拡大し、支持力を失った堤体が沈下や崩壊 して破堤に至るものと考えられる¹⁾. このようなパイピ ングの定性的な説明は古くからなされているものの^{(例えば ²⁾,パイピングの発生条件(地盤の層構成,土の特性, 堤体や地盤の幾何条件,外水位など)やパイプ進展の詳 細なメカニズムには不明な点が多く残されており,また 噴砂が発生した後のパイプ部位置と長さ,進展速度や破}

堤までの時間の予測は未だできず,これらは最新の研究 課題となっている^(例えば3),4). 実際の堤防管理において,パイピング関して問題とな る次の2つの課題が挙げられる.すなわち,①長い延長 を有する河川堤防の中から精度よく危険個所を特定する ことが望ましい.堤防やその基礎地盤の土質構成が非常 に不均質・複雑であるのに対し,数百m~1km程度毎の ボーリング調査による極めて疎な情報を基に点検が行わ れており,危険個所を特定することが現状では困難であ る.②高水により漏水や噴砂などの変状が毎年多数発生 している.そのような場合,パイプ部が川表側に進展し

ていれば早急な対策が必要であり、進展度に応じた対策 の優先度を判断するのが合理的である. しかしながら, 現在はパイプ部を特定するための確立した調査技術が無 く、堤体のパイピング健全度を把握できない、このよう な課題に対し、近年、堤体表面の微小な変位分布からパ イピング部の特定と規模の評価を行う方法の研究が行わ れている. 高水時には浸透により堤体土の含水・応力状 態が変化し、それに応じて堤体にひずみが生じる.また、 内部から土が流出するなど構造体としての安定性が変化 すれば,堤体は変形し,状態や不安定化に応じた特有の 変形パターンが堤体表面に現れるはずである. これまで 計測されていない小さなレベルの表面変位を知ることに より、堤防の内部構造や力学特性が不明であっても、堤 体の状態と危険度をある程度評価できる可能性がある. 岡村ら5)は噴砂や漏水が生じた実堤防において、パイピ ングに特有の沈下パターンが堤体表面に現れることを明 らかにするとともに、パイピングやトンネル掘削による 地中からの十砂損失と地表面に現れる沈下分布の関係を モデル化し、表面変位パターンと変形量から地中のパイ ピング孔の位置と規模を評価する方法を提案した. この 評価法が実用化できれば上記課題に対処できだけでなく, 将来は高水中に短い時間間隔で堤防表面形状を計測しそ の変化を解析することで、リアルタイムでパイピング進 展度を評価できるようになることが期待できる.

この技術に関しては、これまで現地調査や模型実験に より、高水後の堤体表面の沈下形状を計測してパイピン グ部進展との関係が調べられてきたが、高水中の堤体挙 動を調べた例はない.また、堤体表面には様々な大きさ の凹凸がある中で、パイピングに関係のある凹部、すな わち得られた表面形状データの中から抽出すべき凹部の サイズも明らかになっていない.そこで本研究では、実 物の応力状態を縮尺模型内に再現することのできる遠心 模型実験装置を用い、一様な砂地盤上の堤防のパイピン グ実験を行い、パイピングの進展に伴う堤体表面沈下の 変化を詳細に調べた.

2. 高水中のパイプ進展による法面形状の変化

(1) 実験方法

実験模型を図-1に示す.模型は剛土槽(幅43cm,奥行 12cm,高さ22.7cm)内に東北硅砂6号(D₁₀=0.12mm, D₅₀=0.22mm,D₈₀=0.35mm,最大・最小間隙比=0.886・ 0.544)を相対密度が60%となるよう空中落下させて層厚 6cm,幅38cmの基礎地盤を作製し,その上に高さ7cmの 堤体を設置したものである.堤体は,Caselではファイ ンサンド(D₁₀=0.004mm,D₅₀=0.06mm)とカオリン粘土 (塑性指数IP=23)を乾燥重量比3:7で混合し含水比を 30%に調整した試料を,Case2ではカオリン粘土を含水 比35%に調整したものを別途モールド内で締固めて作製



し土槽内の基礎地盤上に設置した.湿潤密度は2.32 g/cm³(Casel)及び2.15g/cm³(Case2)である.本実験 では堤体直下の基礎地盤表面にパイプ部が形成されるの で,堤体を基礎地盤上で締固めることによる基礎地盤へ の影響を避けるため,このような方法で模型を作製した. 堤体土の応力-ひずみ曲線(一軸試験)を図-2に示す.

模型を遠心模型実験装置に搭載し、40Gの遠心加速度 場で模型地盤にゆっくりと注水して地盤を飽和した後に 外水位を上昇させた.本論文では全て模型スケールで示 すが、図-1中のカッコ内には原型の寸法も示してある. 外水位(基礎地盤表面を基準)の時刻歴を図-3に示す. 外水位は段階的に上昇させ、途中何度か高水を中断して ゼロに戻し、堤体表面の高さをレーザープロファイラー (LP)でスキャンし、基礎地盤及び堤体表面全体の数 値標高モデル(DEM)を取得した.LPでの計測間隔は 水平方向に0.3mm、高さの測定精度は5µmである.また、 実験終了後には堤体を除去して基礎地盤表面を露出させ、 パイプ部の形状を計測しDEMを取得した.

実験は強度の異なる粘性土堤体の2ケースを実施した (表-1,図-2). 直轄河川堤防の土質試験結果⁶⁾によると, 多くの堤防で堤体土のUU試験から得られた強度は概ね 15kPaから70kPaの範囲にある.この強度範囲をある程度 カバーするように,本実験では一軸試験で得られる堤体 土の強度をCaselで14.5kPa, Case2で54kPaとした.基礎 地盤と堤体土の飽和透水係数はそれぞれ1×10⁴m/sと7×

表-1 実験条件

	基礎地盤	堤体強度	終了時のパイプ
Case 1	硅砂6号,	54kPa	貫通
Case 2	Dr=60%	14.5kPa	非貫通

10⁸m/s(Case1), 2×10⁸m/s(Case2) であり, 堤体は実験 中ほぼ不透水状態であった.

(2) 実験結果

外水位の時刻歴を図-3に示す. Caselでは初めに約4cm の外水位を5分間継続し一旦排水した。 ②から④回目の 高水では外水位を5.5cmとしてそれぞれ約2分間,30秒間, 3分間の高水を与えたところ、実験開始から約600秒の時 点(④回目)で法尻から噴砂が発生した.その後,⑤回 目では4.2cm、⑥回目では3.6cmの外水位で噴砂が拡大し、 ⑦回目では3.3cmでパイピングが川表側に貫通した. こ のように噴砂発生後には、洪水を繰り返すたびに前回よ りも低い水位で噴砂が成長し、すなわちパイピングが進 展した. これはCase2でも同様であり(図-3(b)), 噴砂 が発生した時点の水位5.3cmよりも低い水位でパイプが 進展した.本実験のように、噴砂発生後はより低い水位 でパイピングが進展する場合と、より高い水位を与えな ければパイピングが進展しない場合があることが報告さ れているが7,その条件やメカニズムは明らかになって いない.

図-3の矢印はLPでの計測時点である. Caselの堤体及び基礎地盤表面高さの変化量のコンターを図-4に示す.

ここでは噴砂が発生する直前のt=480sでの堤体及び堤 内側地表面高さ基準とし、④回目の高水後(t=640s), ⑤回目(t=750s),⑥回目(t=800s)および⑦回目の高 水後(貫通後, t=820s)の4時点について示した.図-4(a)で裏法尻に小さな噴砂が発生し(図の灰色部は高さ が0.5mm以上増加した領域),この時点で噴砂脇の法尻 から裏法面の中央部付近まで伸びる沈下領域が見られる. ⑤回目後(図-4(b))には噴砂が大きくなり、堤体表面の 沈下領域は天端に及び深さも増している. さらに貫通直 前の⑥回目後には(図-4(c))表面の沈下領域は裏法面の 中央付近にまで達しており、⑦回目の高水開始から数秒 後に貫通して堤体が大きく沈下した(図-4(d)). この ように堤体表面の沈下領域の進展は、パイピング部の進 展と密接に関係し、パイプ部の貫通及び破堤切迫度の良 い指標となることがわかる.実験終了後に堤体を丁寧に 除去し撮影した基礎地盤表面の写真を図-5に、また高さ のコンターを図-6に示す.堤体を除去した際に、パイプ 部では堤体底部に砂が付着していないため、パイプ部を 容易に特定できた.パイピング部は堤体表面の沈下部の 位置と一致している. ただし、パイピング部の形状は、 先端ほど細くなる既往の研究")8)における観察結果や貫通 前に実験を終了したCase2(図-7)とは異なっている. これは、貫通したことで大量の水が流れたためである.



高さの変化(Case 1)



図-8 堤体を取り除いた後の基礎地盤表面高さ(Case 2)

Case2の堤体撤去後の基礎地盤表面の写真と高さを図-7,図-8に示す.Case2では土槽壁面近くで噴砂が生じ,そこからパイプが壁面近くを法尻から50mmほど進展し,その後カーブして法尻から約90mmの天端直下まで達したところで実験を終了したことがわかる.パイプ部の幅は裏法尻で15mmと最も広く,先端に行くほど狭くなっている.

Case2でのパイプ部の深さは最大で約3mmである.こ れは貫通したCase1でも最大約3mmであり、貫通して大 きな流量が流れても、パイプの幅は増加するが深さは大 きくは変わっていない.また、バイプ部直上の堤体が沈 下していることから、水の流れるパイプ部の内空高さは さらに小さく、薄く横に広い断面形状となっていること がわかる.



図-9 法面の沈下量と堤体を取り除いた後の基礎地盤表面高さ (Case 1, 法尻から20mmの縦断面)

3. 法面凹部形状とパイピング部の関係

実験後に堤体を撤去し計測した基礎地盤表面のパイプ 部の形状と,堤体表面沈下分布との関係を調べ,それに 基づき表面形状変化を基にしたパイピング部進展度評価 法を改良する.

(1) 法面の沈下形状

図-6に実線で示すように、法尻から10mm毎に縦断方 向に測線を設定し、基礎地盤表面のDEMからパイピン グ部の断面形状を抽出した.また堤体表面沈下量も同様 に測線を設定し縦断形状を抽出した.図-9に一例として Case1の法尻から20mmの位置での断面形状を示す.基礎 地盤表面は、堤体を撤去する際、パイプ部は堤体と接触 していないため乱れないが、それ以外の部分では堤体底 面に基礎地盤の砂が付着したため多少の乱れは避けられ なかった.図より、パイプ部の幅は約30mmで最大深さ は約2mm、パイプ部直上に現れた法面凹部の幅は約 70mmと広くなり、深さは1mmとパイプ部より浅くなっ ていることがわかる.

法面凹部の面積とパイプ部面積の比を裏法尻からの距離に対してプロットしたのが図-10である。何れのケースでも裏法尻のパイプ出口付近では面積比は1に近く, 先端に向かうにつれて減少する傾向がみられる。この傾向は特にCase2で顕著であり、幅が小さくなったパイプ 部先端付近では直上の凹部の沈下面積はわずかである。 パイプ部上の堤体土をパイプ部に架かる単純梁に置き



図-10 沈下面積比の堤体横断方向分布

換えて考えると、堤体の強度・剛性が大きく、またパイ プ部から法面までの高さが大きいほど面積比や法面での 沈下量は小さく、逆にパイプ幅が大きい程大きくなるも のと考えられる.貫通しパイプ幅が広がったCaselでは、 堤体強度が大きいにもかかわらず全体的に堤体強度の小 さなCase2よりも面積比は大きい.堤体の強度がある程 度大きい場合でも、図-9に示したようにパイプ幅が 30mm(原形スケールで1.2m)以上あれば堤体表面に はっきりとした凹部形状が現れることがわかる.

(2) 法面凹部の形状とパイピング部の関係

岡村ら⁹はパイピングによって砂質土堤体表面に現れ る凹部の形状を模型実験により調べ,パイプ部の幅で正 規化した土被り厚と地表面沈下領域の広さとに強い相関 関係があることを見出し,表面形状からパイプ部の位置 と幅を推定する方法を提案している.そこでは,図-11 に示すようにパイプ部の幅をB,土の流出による損失部 の高さをH,直上の堤体表面からパイプ部までの深さを Dとし,ガウス曲線分布で近似した地表面沈下分布の変 曲点距離をxiとして,xi/BとD/Bの関係が図-12のように 示されている.岡村らの砂堤防直下のパイピング実験で は、この関係が式(1)で表わされ、係数Aは4.6である.

$$D/B = A(2x_i/B - 0.8)$$
 (1)

本実験での各測線における実験終了時の堤体表面凹部の形状をガウス曲線で近似し、最大沈下量と変曲点距離 x_iを求めた.パイプ部から直上の法面表面までの高さと パイプ部幅の比D/B を無次元化した地表面沈下幅(2x_i /B)に対して図-12にプロットした.パイプ部は図-11の ような矩形ではないが、ここではBをパイプ部の全幅 (図-9(b)の例だと30mm)とした.多少のばらつきはあ るが、地表面沈下幅は深さとともに直線的に増加してお り、その傾き(係数A)は堤体土強度が大きい方が緩く、 表面の沈下がより広い範囲におよぶことがわかる.また 強度が14.5kPaと小さな粘性土堤体の場合には、係数Aは 粘着力の無い砂質土と同等かやや小さい.このような傾



図-11 地下の体積欠損による地表沈下の模式図



図-12 無次元化した表面凹部幅とパイプ部までの深さの関係

向は、シールドトンネル直上の地表面に現れる凹部を同様に調べたPeck¹⁰⁾やMairら¹¹⁾の結果と良く対応したものとなっている.

堤体表面には様々な幅の凸凹が存在し得る. 実際の堤 体表面形状のDEMからパイピング部に関係のある凹部 を抽出するためには、抽出すべき凹部の幅を知っておく 必要がある.パイプ部幅B,法面からパイプ部までの深 さDと凹部変曲点間の幅(2x)の関係を図-13に示す。 パイプ幅Bが数cmと小さく、深さDも1mの法尻付近では 2xiは約30cm以上であり、Dが3mとなると砂堤体の場合 でも2xiは約0.7m以上となる(砂堤体の係数Aが最も大き く2xiが小さくなる).実際の堤体直下に形成されるパイ プの幅は未だ不明であり、また本研究で行った遠心模型 実験のパイプ部と実物の対応関係も明らかでないため、 Bについては今後更なる検討が必要である. しかしなが ら、パイピングにより堤体表面に現れる凹部の幅は、パ イプ部の上には噴砂口のごく近傍を除けば厚さ数十cm 以上の土が存在すると考えると、少なくとも数十cm以 上であると考えて良い.

本文の序章でも述べたが、パイピング進展の詳細なメ カニズムは未だ解明されておらず、実験の相似則も明ら かでない.したがって、40Gの遠心加速度場で行った本 研究の実験で観察されたパイプは、対応する原型堤防の 場合に40倍の幅や深さになるとは限らない.これについ



図-13 堤体表面凹部の幅とパイプ部の幅,パイプ部までの 深さの関係

ては今後の研究が必要である.一方,パイプが生じた場 合にそれによって生じる堤体の変形については遠心模型 実験の相似則は明確である.地盤内にある大きさの空洞 (パイプ部)が生じ,それが一方向に進展していく場合, その直上の堤体表面に特有の形状の凹部が生じることは 正確にモデル化できているものと考えられる.

4. まとめ

本研究では、高水時に法尻部の噴砂に端を発し、堤外 側に向かって進展してゆくパイピングを模擬した遠心模 型実験を行い、そこで堤体法面に生じる小さいながら特 徴的な形状の沈下を観察した.その結果、以下のことが 明らかになった.

- 本実験では、噴砂が発生した後により低い外水位で パイピングが進展し、パイプ部先端が天端直下に達 した後は短時間で表法尻まで達し貫通した。
- パイプ部の直上の法面が沈下し、その縦断方向形状 はガウス曲線状をなす.堤体表面の沈下領域の進展 を観察することによってパイピングの進展度、すな わち先端位置がわかる.ただし、パイプの先端付近 ではパイプの幅が小さいため、堤体表面の沈下量は わずかとなる.
- 堤体の強度が非常に大きい場合には、パイピングが 発生しても表面に沈下が現れないことも考えられる

が、堤体土が本実験で用いた一軸強度54kPaの粘性土 や砂質土の場合には沈下が現れ、実際の堤防の多く の場合に堤体表面沈下領域がパイピング位置の良い 指標となる.

実際の堤体表面DEMからパイピング部に関係のある
凹部を抽出する場合,堤体表面に存在する数十cm以上の幅を持つ凹部のみをパイピングに関係のあるものと考えてよい.

参考文献

- International Commission on Large Dams (ICOLD): Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations, Bulletin 164, Paris, 2013.
- 2) Terzaghi, K.: Theoretical soil mechanics, John Wiley & Sons, 1943.
- 3) Wang, D., Fu, X., Jie, Y., Dong, W. and ,Hu, D. Simulation of pipe progression in a levee foundation with coupled seepage and pipe flow domains, Soils and Foudnations, 54(5), 974-984, 2014.
- Vandenboer, K., Van Beek, V.M. and Bezuijen, A. Pipe depth measurement in small-scale backward erosion piping experiments, 25th Meeting of the European Working Group on Internal Erosion, 2017.
- 5) 岡村未対, 今村衛, 陣内尚子, 小野耕平, 山本卓夫, 鎌田 卓:堤体表面沈下分布と貫入試験によるパイピング緩み領域 の把握, 河川技術論文集, 第24巻, pp. 529-534, 2018.
- 6) 国総研河川研究室:河川堤防の土質試験結果情報, http://www.nilim.go.jp/lab/fbg/download/geo_download/geo_down load.html
- Van Beek, V.M., Benzuijen, A., Sellmeijer, J.B. and Barends, F.B.J. Initiation of backward erosion piping in uniform sands, *Geotechnique* 64(12), 927-941, 2014.
- 8) 露口祐輔, 岡村未対:第65回地盤工学研究発表会, 投稿中
- (9) 岡村未対,平尾優太郎,前田健一:パイピングにより堤体表 面に現れる沈下分布の特徴,河川技術論文集,第23巻, pp.399-404,2017.
- Peck, R. B.: Deep excavations and tunneling in soft ground, *Proc.* 7th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engrng., 225-290, 1969.
- Mair, R.J., Taylor, R.N. and Bracegirdile, A.: Subsurface settlement profiles above tunnels in clays, *Geotechnique*, 43(2), pp. 315-320, 1993.

(2020.4.2受付)