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

IDENTIFICATION OF PIPING ZONE BY SURFACE TOPOGRAPH AND PENETRATION RESISTANCE

岡村未対1・今村衛2・陣内尚子3・小野耕平4・山本卓男4・鎌田卓6

Mitsu OKAMURA, Mamoru IMAMURA, Naoko JIN-NOUCHI, Kohei ONO, Takuo YAMAMOTO and Suguru KAMATA

¹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3番)
²学生員 愛媛大学 大学院理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)
³正会員 愛媛大学大学院理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)
⁴正会員 工博 愛媛大学助教 大学院理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)
⁵国土交通省四国地方整備局河川部 (〒760-8554 香川県高松市サンポート3番33号)
⁶国土交通省四国地方整備局那賀川河川事務所 (〒774-0011 徳島県阿南市領家町室の内390)

River levees suffer occasionally from failure during flooding in the form of internal erosion of soils within or below the levees. It is invisible to current methods of inspection until it manifests itself at the exterior surface. Therefore, there is strong needs to develop non-destructive techniques that can identify internal damage. Okamura et al. (2017) found characteristic deformation appeared on surface of levees just above the piping zone and established a method of estimating the size and location of the piping zone within or below the levees. In this study this method was applied to two levees, Nakagawa and Ushirogawa, where significant sand ejecta appeared at the levee toes during recent flooding events. In addition, closely spaced mini-ram sounding were conducted to identify the locations in more direct way where the soil loosened possibly by piping. The penetration test results were compared with the location estimated from the surface topography to verify the validity of the method.

Key Words : river levee, flooding, piping, in-situ penetration test

1. はじめに

わが国の河川堤防の高水による破堤事例を見ると,外 水の越流をきっかけとする破堤が大半を占めているが, 越水せずに,あるいは計画高水位以下の外水位で堤体が 被災し決壊に至ることもある.それらの主なメカニズム が裏法の滑り,堤体や基礎地盤のパイピング,ならびに 表法の流水による浸食・洗掘である.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が,欧米や中国の河川では, 主な破堤原因の一つとなっている.堤体や基盤に比較的 透水性の高い土が存在すると,堤体土や基礎地盤で経時 的に内部侵食が進行しパイピングによる破堤の危険性が 高まる.大陸の河川では高水継続時間が長く、堤体の内 部侵食による堤防の経年劣化が進んでいるためパイピン グの事例が多いと考えられるが、明治期以降に整備を進 めてきたわが国の河川堤防も、高水や降雨の履歴作用に より劣化が進み、今後はパイピングの事例が増加するこ とが予想される.

河川堤防のパイピングは、上昇した外水の水圧による 堤内側法尻付近の漏水や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進展し、パイプが貫 通すると同時に流れる大量の水がパイプを急速に拡大し、 それにより安定を失った堤体沈下や崩壊して破堤に至る ものと考えられる¹⁾ (図-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),パイプ部位置と大きさ, 進展速度と破堤までの時間の予測は未だできず,最新の 研究課題となっている^{例えば3)}.



図-1 パイピングの模式図²⁾.

パイピングに関して、実際の堤防管理上問題となる次 の2つの課題が挙げられる.すなわち、

① 危険個所の事前予測: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抽出し,必要な対 策を講じることが必要である.直轄河川では,堤防の 詳細点検が実施され,G/Wや局所動水勾配を指標とし た危険度判定が行われている.しかしながら,堤防や その基礎地盤が非常に複雑で不均質な内部構造を持つ ものであるのに対し,数百m~lkm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い ること,及び用いられている指標とその閾値が必ずし も合理的でないこと,という問題がある.

② 噴砂発生地点における堤体健全度の確認:高 水により漏水や噴砂などの変状がしばしば発生してい る.そのような場合,パイプ部が川表側に大きく進展 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. 噴砂など発生した堤体の試掘調査が行われることもあ るが,堤体をある程度開削するために容易ではない. 物理探査が有望な方法とも考えられるが,パイピング 部は薄い空洞であり(パイピング部の厚さは数mmか らcmのオーダーであるとの報告もある^{例えば4)}),それ を特定することは現在の技術では困難である⁵.

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. 近年、様々な 測定・解析技術が急速に発展しており、堤体表面の高さ を短時間に面的にcmオーダーで測定することが現実的と なってきた、このような背景より、堤体表面の微少な変 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. 岡村⁶ら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変形パターンが堤 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土砂損失と地表面に 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 ①②の課題に対処できるものとして期待できるが、それ には評価法の妥当性とて適用範囲を十分に検証する必要 がある.

そこで本研究では、まずは課題②に関して、現場での パイピング部特定のための調査法の開発を試みる.この 調査法を用い、那賀川及び後川における近年噴砂が発生 した地点でパイピング部を特定する.また、これらの堤 防において表面形状から特定したパイピング部と比較す ることにより、評価法の妥当性を検証することを目的と する.

2. 高密度貫入試験によるパイピング部の特定

堤体や基礎地盤内に生じるパイピング部について,面 的な広がりを明らかにした例はほとんどない.また,そ の厚さは、薄い場合にはmmからcmオーダーである⁵⁾.こ のようなパイピング部を特定するために、本研究では次 のような試験を実施した.まず,試験方法は地盤の抵抗 を直接測定する貫入試験による.水平方向にはなるべく 高密度で実施することとし、今回は最小で50cmと非常に 狭い間隔とした.また、パイピング部では貫入抵抗がゼ ロになると考えられるので、貫入ロッド周面摩擦の影響 を排除して先端抵抗のみが計測でき、また薄層も検知で きるものとした.

(1) 試験方法:中型動的コーン貫入試験

用いた試験方法はミニラムサウンディングである.ハ ンマー質量は30kg,落下高さ35cm,一打撃あたりの単位 面積エネルギーは98kJ/m²である.この試験法では直径 18.3mm(断面積1052mm²),先端角90°のコーンを打撃 貫入し20cmの貫入毎の打撃回数Ndm値とロッドを回転さ せて測定する周面摩擦によるトルクMvより,周面摩擦 力の影響を除いた先端抵抗値Ndを求めるものである.

$$N_d = N_{dm} - \beta M_v \tag{1}$$

ここで β (=0.139) は補正係数である.なお、ミニラムの 貫入エネルギーは標準貫入試験の1/2であることから、 N_d値と標準貫入試験N値との間にはN=N_d/2なる関係があ る.本研究ではできるだけ薄い弱層を特定するため、一 打撃毎の貫入量d(cm)を計測し、次式により一打撃毎の N_dI値も算定した.

$$N_{d1} = 20/d - \beta M_v \tag{2}$$

本研究では約18mmと直径の小さなコーンを用いて一打 撃毎の計測を行うことにより、1、2cm程度の厚さの緩 み層を捉えることを意図した.

(2) 調査個所と地盤

近年の出水により漏水や噴砂が発生し、その後堤体の 補修が行われていない堤防を対象箇所として、那賀川左 岸堤防と後川右岸堤防を選定した.

(a) 那賀川左岸

那賀川では,近年では平成15年,16年,17年,23年, 26年,27年に漏水などの変状が発生した.その中で,最 近の平成26年,27年の出水にて,噴砂が発生した左岸 13.4kの楠根下流地区(堤高約6.7m)を調査対象とした. 楠根下流地点のオルソ画像を貫入試験位置,噴砂・漏水 箇所と共に図-2に示す.顕著な噴砂のあった地点近くに 法尻から天端に向かって3測線(Aa,Ab,Ac)と漏水の みで噴砂は軽微であった地点付近の1測線(Ba)を設定 し,合計47地点で貫入試験を行った.

この地点での堤防と基礎地盤の横断面を図-3に示す. 堤体は砂礫(レキ分含有率が20~60%,細粒分含有率は 5~20%)でN値は2~15とやや緩い.基礎地盤表面には 1.5~2.5mの砂層(As1層)が,その下には10m程度の厚 いレキ層(Ag1層)が堆積しており,薄い表層と透水性 の高い層からなる典型的なパイピングを生じやすい二層 構造の基礎地盤となっている.貫入深度はパイピングが 発生する可能性の高いAs1層とその下のAg1層にある程 度入ったところまでとした.







図-3 那賀川左岸13.4kでの堤防と基礎地盤の横断図.

(b) 後川右岸

後川では平成28年の出水により、右岸6.4kから6.6kの およそ200m区間で噴砂が発生した.この区間の下流側, 6.4kから6.5kの100m区間(堤高約5.7m)を調査対象とし た.貫入試験位置と噴砂箇所を図-4に示す.堤体底面面 から約2mまでは粘土質砂礫や砂質粘土の層が分布し, その下に基礎地盤の砂礫層が堆積している.ここでも, 砂礫層上部の透水性の低い土が内部侵食されてパイピン グが生じることが想定される層構成である.噴砂は堤内 側水田内の①~⑦の位置で発生し、特に②③では噴砂口 の数、噴砂量ともに多かった.そこで貫入試験は法尻か ら天端に向かって4測線を設定し、②③付近を中心とし た合計29地点で行った.



図-4 後川右岸6.4k付近での噴砂,貫入試験実施位置と堤内側 堤防横断図.

(3) 貫入試験結果と特定した緩み域

(a) 那賀川左岸

Aa, Ab, Acの3側線では直下にパイピングによる緩み域が存在することが想定されたため,水平方向に



図-5 那賀川左岸13.4k付近, Aa測線での貫入試験結果

50cm間隔(一部では1m間隔)と狭い間隔の高密度貫入 試験を行った. Aa側線における貫入試験結果を図-5に 示す.まず,堤体は表面から深さとともに増加し堤体底 面ではN=15程度(N値で7-8)であった.砂質土や砂 礫土の堤防ではN値が10程度のものがしばしばみられる が、良く締固めた砂質土盛土と比べるとN値が小さい. 図中の「Aa」は測線を、その後の数字は10cm単位の測 線上の水平距離である. 図中には通常の20cm毎のNd値 を実線で、一打撃毎の詳細なNul値を×印で示してある. 堤体直下のAsl層では、上流側のAa+40からAs+30の3地 点においてNdl値がゼロとなる深度はないが、As+25では As1層の上面近くにゼロの点が2点見られる. 限られた深 度ではあるが、As+15、Aa+10およびAa-05にもこのよう にNal値がゼロを示す深度が存在する.また,As+05と Aa+00では砂層の半分以上の深度においてNal値がゼロと なっている. Nat値がゼロとなることは、自然堆積した 細粒分の少ない砂質土で見られない.また、Nat値がゼ ロか否かでは、土の強度に非常に大きな違いがある. そ こで、本研究ではNul値がゼロの深度を貫入試験から特 定された緩み域とする.

図-6は貫入試験から緩み域が特定された位置を示した ものである. 噴砂地点から川側に向かって緩み領域が進 展し, Ac測線上で2つに分岐してAb測線まで達してい ることがわかる. このようにパイピング部が分岐しなが ら脈状に進展することは模型実験でも観察されている⁴.

本研究では位置打撃毎の貫入量を測定し、そこから N_{dl}を求めて緩みあるいはパイピング部を特定したが、 このような計測は実務では一般的ではない.通常行われ



図-6 貫入試験から特定された緩み域と表面形状から推定した 緩み域の比較(那賀川左岸13.4k付近)

る20cm貫入毎の抵抗値であるNd値でみると、今回特定した緩み部ではNd値はおよそ0~2の範囲にあった.

(b) 後川右岸

後川の貫入試験では、一打撃毎の貫入量の測定ができ なかったため、通常の20cm毎の打撃回数Nd値を示す. 図-7はC測線の上流側貫入地点(C54-C67)におけるNd 値の深度分布である.地点番号の数字はm単位の測線上 の水平距離である.パイピング部やゆるみ域が発生する ことが考えられる粘土質砂礫や砂質粘土の層において、 端部のB-41以外の個所、すなわちB-44からB63では境界 付近でNd値が2以下に急減しており、パイピングによる 緩みが発生した可能性がある.図-8は貫入試験から緩み 域が特定された位置を示したものである.②③の噴砂地 点付近とそこから川側に向かう領域に緩み領域が発生し ており、緩み領域はC測線までで、D測線には達してい ないことがわかる.





図-8 貫入試験から特定された緩み域と表面形状から推定した 緩み域の比較(後川右岸6.4k付近).

3. 堤体表面形状を基にしたパイピング部の推定 と貫入試験結果による検証

パイピング部の発達によって堤体や基礎地盤中から土 砂が排出されると、直上の堤体表面には正規分布形状の 沈下がパイピング部に沿って連続的に生じる.沈下量は 数cm程度と小さいことが多いが、このような堤体表面 の変形分布からパイピングの規模と位置を推定する方法 が提案されている⁹. そこで、本研究では貫入試験を実 施した那賀川及び後川堤防において堤体表面形状を測定 してDEM (Degiral Elevation Model)を構築し、パイピン グ部の推定を行った.

(1) パイピングに特徴的な沈下を呈する平面位置

那賀川ではUAVに搭載したレーザープロファイラー (LP)を用い、また後川では堤体表面を複数の方向から撮影した写真からSfM (Structure from Motion)ソフトウエアで画像処理することによりDEMを構築した.なお、除草後の堤体表面DEMをLPとSfMで作成し比較し たところ、2つのDEMで標高差が2cm以下で一致し、こ れら方法の違いによらず精度の良いデータが得られるこ とを別途確認している.

両地点において、パイピングに特徴的な表面変形を呈 する箇所を次のようにして抽出した.特徴的な形状とは、 縦断方向の沈下分布が正規分布状であり、沈下部が天端 方向に連続し、かつ堤体表面からパイピング部までの深 さが増加するに従って幅が広く沈下量は小さくなってゆ くものである.以下、後川を例にその手順を説明する. 図-9に示すように堤体縦断方向に幾つかの測線を設け、 測線上の標高分布を抽出する(後川では測線1~6の6測 線).図-10は抽出した測線における堤体表面の凹凸で ある.この堤防区間では、縦断方向の堤防法線わずかに 曲がっており、その影響を取り除くためパイピングとは 関係のないと考えられる波長30m以上の凹凸をFFTハイ パスフィルターで除去してある.



図-9 後川右6.4k付近の縦断側線上の堤体表面高さの分布.



図-10 後川右6.4k付近の縦断側線上の堤体表面高さの分布.

横軸の水平縦断距離で10m, 24m, 36m, 60mおよび 83m付近の5か所に正規分布状の沈下形状が確認できる. この沈下は法尻から天端に向かって連続し,かつ天端に 向かうにつれて沈下量は徐々に小さく,幅は広くなって おり,パイピングに特有の形状である.これら以外の個 所でも凹凸が見られるが,横断方向の連続性が無いなど, パイピングに特徴的な沈下だとは認められない.

特徴的な沈下が見られた5か所は、何れも噴砂が生じ た位置と一致し、また噴砂が生じていない36m~60m区間 および80m~110m区間には特徴的な凹部が無いことから、 これら5か所はパイピングによって生じた堤体表面沈下 であると考えられる.抽出した箇所の表面沈下形状を正 規分布曲線で近似し、沈下量の最大値と変曲点の距離か ら岡村らの方法⁶⁰によってパイピング部を推定した.**図**-6(那賀川)と**図-9**(後川)の赤い実線部が表面形状か ら推定したパイピング部である.那賀川のA区間では法 尻の噴砂部からパイピング部が川側に向かって、途中で 2つに分岐している様子がわかる.この推定されたパピ ング部は高密度貫入試験で特定された緩み位置とほぼ一 致している.また、B区間では上流側におよそ3mずれて いるが、ゆるみが特定された地点近傍で特徴的な表面形 状が見られた.

今回は高水後に計測した表面形状を基にパイピング部の抽出を行ったが、この表面形状には高水による沈下だけでなく、高水前にすでに何らかの原因で存在した沈下も含まれている.高水前のDEMデータを取得しておき、高水前後の標高差から高水による沈下のみを抽出すれば、パイピング部の推定精度が向上するものと考えられる.

(2) パイピングの深度

表面形状からパイピング部を推定するにあたり、パイピン グ部断面の高さHあるいは縦横比H/Bを仮定する必要があ る.表面から推定されるパイピング部の水平位置はほとんど 影響を受けないが、深さはHの値によってある程度異なる. 後川の水平縦断距離10mと60mの地点(図-9のA区間とB区 間)において推定したパイピング部の深さを図-11に示す. パイピング部の高さは少なくとも地表面の凹部中心部の最 大の深さSmaxよりも大きいことから、本研究ではH=Smaxとし た.また、A区間で推定された深さはパイピング生じた 砂質シルト〜シルト質レキ層の深度と良く対応している が、B区間では深度を過大に価している.この方法で推 定される深度はHの仮定に加え、表層の土質の影響も受 け、粘着力が大きい程表面凹部の幅が大きくなる⁶特徴 がある.深度の推定精度向上は今後の課題である.

4. 結論

噴砂が発生した河川堤防において、パイピング部ある いはパイピングによる緩み領域を特定できればパイピン グの進展度が評価できる.そのためこれまで種々の方法 を用いた調査が行われてきたが、特定することはできな かった.本研究では高密度のミニラムサウンディングで 一打撃ずつの先端抵抗Nd1値を求める方法を考案し、近 年の高水により顕著な噴砂が発生した堤防に適用した. その結果、先端抵抗値がゼロとなるパイピング部が特定



図-11 表面形状から推定したパイピング位置と貫入試験から 特定した緩み域の比較(後川A.B区間の鉛直断面)

でき、パイピングの進展状況を明らかにすることができ た.また、同じ調査地点において、LPまたはSfMで取得 したDEMから堤体表面の小さな凹凸の分布を解析し、そ こから堤体内部のパイピング部の位置と規模を推定した. 得られたパイピング部の位置は、平面的には高密度貫入 試験で特定したパイピング部とよく一致した.また、こ の方法で仮定するパイピング部断面形状により、深度方 向の推定位置は貫入試験で特定した深度と異なることも あることがわかった.

ミニラムサウンディングによる方法は、狭い間隔で行 い適切に周面摩擦の影響を除去できれば、より信頼性の 高い方法である。一方、表面形状に基づく方法は、広域 の調査に適するが、堤体の強度が高い場合には堤体表面 に変状が現れないこともあるため、今後は適用範囲を明 確にしてゆく必要がある.

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,坂本淳一,新清晃:平成27年9月関東・東北豪雨 による関東地方災害調査報告書4.4節,土木学会・地盤工学 会合同調査団関東グループ,2016.
- 6) 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.