

噴砂丘形成による洪水時の堤防基礎地盤でのパイピング進展抑制に関する解析的研究

建設技術研究所 正会員 ○鈴木 海里
東京工業大学大学院 正会員 高橋 章浩

1. はじめに

パイピングは高水時に河川堤防下にある透水層で発生する内部侵食過程である。侵食された土粒子は地表に運ばれ、裏法尻付近に火山のクレーターに似た円錐台形を形成し堆積する¹⁾。本研究では、この堆積した砂を噴砂丘と呼ぶ。パイピングのきっかけとなる噴砂や漏水の現象は全国の河川で報告されている。一方、その多くは決壊などの致命的な崩壊に至らず終息しており、パイピングの発生から決壊に至るまでの詳細なメカニズムについては未解明な点が多く残されている²⁾。洪水時に噴砂や漏水が確認された場合、漏水口に土のうを積んで水を溜め、河川水位と漏水口の水位差を小さくすることで噴砂等を抑え、堤防の決壊を防止する月の輪工法がある³⁾。パイピングによって形成された噴砂丘も同様の機能を持ち、パイピングの進展を抑制する可能性があると考えられる。以上より、噴砂丘がパイピングの進展に及ぼす影響を調べることを目的に浸透流解析を行った。

2. 浸透流解析

(1) 浸透流解析の概説

本研究では、噴砂丘のパイピング進展への影響を検討する。平成28年8月、常呂川において北海道豪雨によって噴砂丘が確認されたが、堤防は致命的な崩壊に至らなかったケースを参考に解析を行った。図1に示すモデルを設定し、Plaxis 2Dを用いた解析を行った。Robbinsら⁴⁾は、パイピングの進展はパイプ先端付近の水平方向の局所動水勾配によって制御されている可能性がある⁵⁾と示唆した。そのため、図1に示すパイプ先端を評価位置として局所動水勾配を把握した。

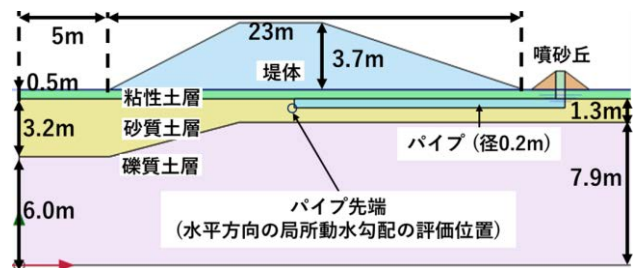


図1 モデルの概要図

(2) 解析条件

既往研究⁶⁾で行われたボーリング調査から、堤体、基礎地盤、パイプの土質定数を設定した(表1)。パイプの条件について、噴砂丘は砂質土と同程度の粒度特性を示したことから、図1に示す位置にパイプを設定した。本来であればパイプ内には水が流れ、浸透流解析とは別に内部のパイプ流計算が必要であるが、本解析ではパイプの透水係数を大きくすることで水みちを模擬した。既往研究⁶⁾を用いて、パイプ径によって異なるが基礎地盤の透水係数の約8-200倍に変更して解析を行った。

表1 使用した土質定数

区分	内部摩擦角 ϕ (°)	透水係数 k (m/h)
堤体	29.0	0.0036
粘性土	37.0	0.00036
砂質土	37.0	0.036
礫質土	43.0	0.36
パイプ	37.0	-
噴砂丘	37.0	-

噴砂丘の条件について、噴砂丘の中央部分から水と土粒子は排出されるため、噴砂丘の上底までパイプが続く条件を設定した(図1)。パイプの直径及び長さを仮定し、そのパイプの体積分の砂が全て排出されるとした。排出された砂は、噴砂丘の中心から同心円状に堆積すると仮定し、噴砂丘の形状を決定した。事例の噴砂丘が底角 10.3° で堆積したため、底角を固定し噴砂丘の直径及び高さを決定した。噴砂丘の形状による比較を行うために、内部摩擦角(37°)で堆積するケース及び、噴砂丘が無いケースも検討した。本研究の目的である噴砂丘によるパイピングの進展抑制の検討のために、噴砂丘内の水位が重要であると考えられる。2次元モデルで3次元の噴砂丘内浸透流をモデル化するため、流量が等価となるように噴砂丘の大きさによって透水係数を変更した。

キーワード パイピング, 噴砂丘, 堤防, 局所動水勾配

連絡先 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-M1-3 e-mail: kairi.suzuki@gmail.com

(3) 解析ケース

表 2 に解析ケースを示す。噴砂丘の有無及び形状による影響について検討した。ケース表記について、各パイプ長の後に噴砂丘の底角を表記する。L10-A10.3 の噴砂丘は、常呂川の事例で確認されたものと同じの大きさを形成するケースである。

3. 解析結果と考察

Robbins ら⁴⁾は、パイプが進行する際のパイプ先端の水平方向の局所動水勾配は 0.35-0.43 と示した。これを参考に、本研究ではこの範囲をパイプが進展するか否かの閾値として採用する。また、水平方向の局所動水勾配だけでなく、図 3 に示す位置での水頭分布も算出した。

噴砂丘が高い方がパイプ先端での水平方向の局所動水勾配は小さくなった (図 2)。図 3 に噴砂丘形状の異なるケースの水頭分布を示す。3 ケース全てで基礎地盤内及びパイプ内の透水係数は同値であり、基礎地盤とパイプの境界付近以外では水頭分布は同傾向を示す。従って、噴砂丘の有無及び形状から決まる堤内外の水位差がパイプ先端での水頭変化に直結する。その結果、噴砂丘の高さが異なるとパイプ先端での水頭分布の傾きは噴砂丘高さに応じて変化し、噴砂丘が低いほどパイプ先端での局所動水勾配が大きくなることが説明できる。

図 4 に異なるパイプ長でのパイプ先端局所動水勾配を示す。事例では、L10-A10.3 で設定した程度の大きさの噴砂丘が確認され、この条件での局所動水勾配はパイプ進展に閾値 (0.35-0.43) に近いことから、この段階でパイピングの進展が止まったと判断できる。パイプが長くなるにつれて局所動水勾配が小さくなっている理由として、噴砂丘の高さによる水位差の違いが考えられる。パイプの進展によって噴砂丘が拡大すると川裏側の水頭が大きくなり内外の水頭差が小さくなる。これが、事例においてパイピングの進展が収束した理由であると考えられる。

4. 結論

本研究では、パイピングで形成される噴砂丘の存在が既往研究では考慮されていないことから、噴砂丘によるパイピング進展への影響を調べることを目的に浸透流解析を行った。その結果、噴砂丘の有無及び形状は、パイプ先端の水平方向の局所動水勾配に影響し、噴砂丘によって外水位との水位差が小さくなることで局所動水勾配が抑制されることが確認された。

参考文献

- 1) Michela Marchi, Maria Fernanda Garcia Martinez, Guido Gottardi, Laura Tonni : Field measurements on a large natural sand boil along the river Po, Italy, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, Vol.54, 2021.
- 2) 岡村未対: 堤体表面形状変化に基づく河川堤防のパイピング進行度評価, AI・データサイエンス論文集, 1 巻 J1 号, pp.429-436, 2020.
- 3) 一般財団法人北海道河川財団: 水防工法テキスト, 2020.
- 4) Bryant A. Robbins, Vera M. van Beek, Jamie F. López-Soto, Axel M. Montalvo-Bartolomei, John Murphy : A novel laboratory test for backward erosion piping, International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, Vol.18, no.5, pp.266-279, 2018.
- 5) 常呂川堤防調査委員会: 常呂川堤防調査委員会報告書, 2017.
- 6) 田中秀岳, 笹岡信吾, 下津隆介, 福島雅紀: 河川堤防基礎地盤におけるパイピング進行評価の検討, 第 6 回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.29-32, 2018.

表 2 解析ケース

No.	パイプ長 (m)	噴砂丘の高さ (m)
L10-A10.3	10	0.20
L10-A37	10	0.49
L10-A0	10	0
L5-A10.3	5	0.16
L15-A10.3	15	0.23

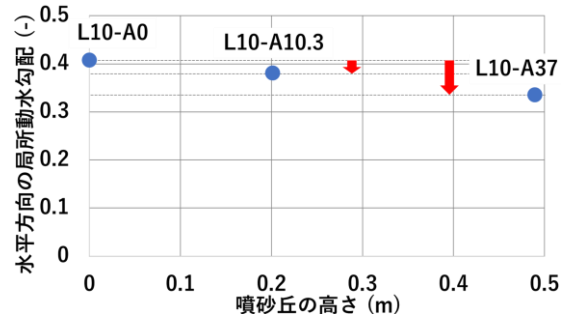


図 2 噴砂丘の高さの違いによる影響

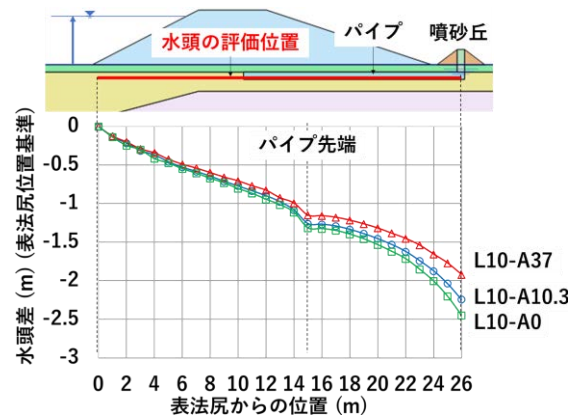


図 3 噴砂丘形状の異なるケースの水頭分布

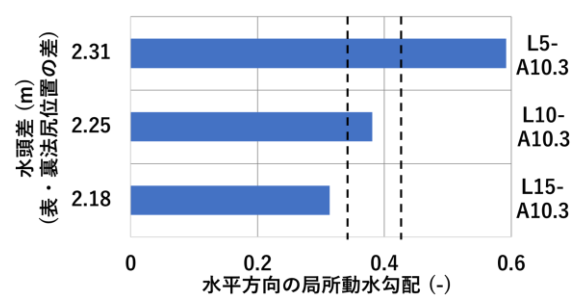


図 4 異なるパイプ長でのパイプ先端局所動水勾配