

河川水位による浸透外力に着目した堤防基礎地盤のパイピング破壊リスクに関する研究

九州大学大学院 学 ○小井手宏行
正 石藏良平 F 安福規之
正 アデル・アロウイシー

1. はじめに

近年、河川水が透水性基礎地盤に浸透することで、堤内側において漏水や噴砂が生じるパイピング破壊の被害が増加している。また、短時間豪雨や長期間の雨といった降雨形態の変化により、基礎地盤に高水位の外力が作用することで河川水の浸透が助長され、パイピング破壊にまで至る危険性が今後高まる可能性が考えられる。パイピング破壊の評価指標として、複層構造基礎地盤の影響（基礎地盤が透水層の上に難透水層が被覆）や行き止まり境界の影響等が検討されているが¹⁾、被災時の早急な対応や避難時間の確保を行うためには、パイピング発生時期を把握することが重要である。そこで、本研究では2次元飽和・不飽和浸透流 FEM 解析を用いて、複層構造基礎地盤の透水係数比と各層厚を変化させ、河川水位の変動に伴う間隙水圧の経時変化を把握し、噴砂発生時期に着目したパイピング破壊リスク評価を目指した。

2. 解析概要

今回の解析において、降雨浸透は無視し河川水の浸透のみを考慮し、不飽和浸透流解析として2次元 FEM 解析を実施した。

解析モデルは一級河川を想定し、筑後川標準断面や河川管理施設等構造令等を参考に設定した²⁾ (図-1)。また、表-1 に示す解析に用いた土質定数は河川堤防の構造検討の手引きを参考に設定した³⁾。堤体は粘土を使用し、基礎地盤は複層構造とし、被覆層厚 L_a を1mとし、透水層厚 L_b を3通り変化させた。土質材料の透水係数は粘土 $k_c=3\times10^{-8}$ (m/s)、被覆層 $k_a=1\times10^{-5}$ (m/s)、透水層 $k_b=1\times10^{-1}\sim1\times10^{-3}$ (m/s)の3通り変化させた。多雨期を想定し、初期地下水位は地表面から-0.5mに設定した³⁾。

外力条件は堤外側に地表面から天端高まで河川水位を上昇させた。今回、河川水位は平均動水勾配($i=\Delta h/B$)で表す。 Δh は堤防裏法尻の高さを基準とした時の河川水位の変化量とする。ハイドログラフは天端までの到達時間を5時間ごとに変えた上昇速度($d(\Delta h/B)/dt$)12通りとした(図-2)。解析時間は60時間とし、非定常流解析を行った。解析ケースを表-2に示す。

3. 浸透流解析結果

パイピング破壊リスク評価は G/W を用いた。 G/W は被覆層の重量 G と基盤内の揚圧力 W の比で表され、 $G/W<1$ となるとパイピング破壊が生じる危険性がある。 G/W 評価対象地点は堤内側の最も土被り圧が小さくなる点 X とする(図-1)。代表値として $k_b/k_a=100$, $L_a=1\text{m}$, $L_b=1\text{m}$ の条件での、 G/W の経時変化を図-3に示す。図-3を見ると、河川水位の変動に対応して G/W の値が小さくなり、 G/W が1を下回っているのが分かる。各河

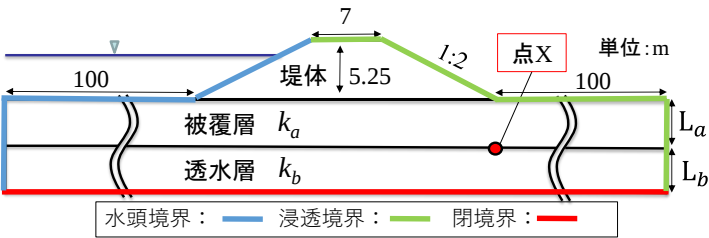


図-1 解析堤防モデル²⁾

表-1 土質定数³⁾

	被覆層	透水層	堤体
γ_t (kN/m ³)	17	19	17
γ_{sat} (kN/m ³)	17	20	18
間隙比	1.357	0.833	1.357
透水係数 k_a (m/s)	(1.0×10^{-5})	k_b	1.0×10^{-8}
土の分類	粘土	砂	粘土

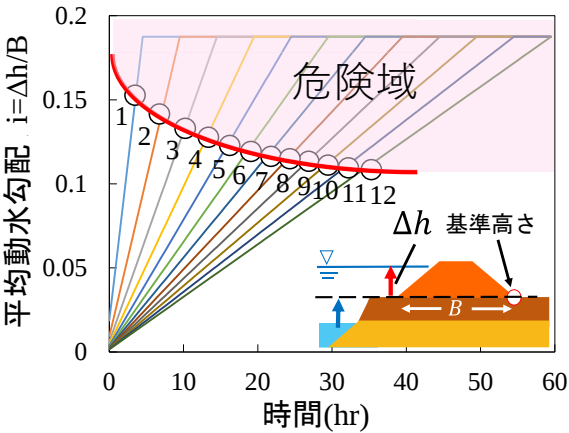


図-2 ハイドログラフとリスク評価指標イメージ

表-2 解析ケース

透水係数比 k_b/k_a	透水層厚 L_b (m)	河川水位 $[d(\Delta h/B)/dt]$ (1/hr)	ケース数
100 1000 10000	1 2 4	1~12 [0.038~0.0031]	
3通り	3通り	12通り	108通り

川水位の上昇速度によって同水位($i=0.1$)でも G/W の値は異なり、差が生じている。そこで、各河川水位の $G/W=1$ となる時間とその時の i の点をハイドログラフにプロットし、線で結ぶ。その線を境界とし、その線を超えるとパイピング破壊の危険性があるという評価指標を作成する。図-2 にイメージ図を示す。その値を各解析ケースでまとめたグラフを図-4 に示す。図-4 の各ハイドログラフを比較すると $G/W=1$ となる点を結ぶと緩やかな曲線になっており、透水係数比と透水層厚の条件が変わると曲線の傾向も変わっている。まず、図-4 の透水係数比に着目すると透水係数比が 1000 以上の場合、透水層厚が異なってもプロットの点が同様であり、透水層厚の影響は小さいことが分かる。また、透水係数比 1000 と 10000 を比較しても、同程度の値をとることから透水係数比が 1000 以上である場合は、河川水位の変動が同じであれば $G/W=1$ となる時間に差はほとんど生じないと考えられる。次に透水層厚だが、透水係数比 1000 以上では影響が小さかったので、透水係数比 100 に着目する。透水層厚が 2m 以上では、値は同様であることから、透水係数比 100 の場合は透水層厚の影響は 2m 以内では大きいと考える。透水層厚の影響が限定的になったのは、水の通り道が透水層上部に集中したことが原因だと考える。

図-4 の適用性を確認するために実際の基礎地盤のパイピング被災事例である平成 24 年 7 月九州北部豪雨での矢部川の河川水位を記録から簡易的に読み取り⁴⁾、(i)に変換し検証した。矢部川右岸 7.3k の被災堤防付近の透水係数比は 200 程度、被覆層厚は約 0.7m、透水層厚は約 0.8m であったため⁴⁾、その値に近い透水係数比 100・透水層厚 1m の解析結果と比較検証したグラフを図-5 に示す。加えて、同条件でハイドログラフのみを実際の矢部川で観測された記録を用いて解析を行い、 $G/W=1$ となった時間もプロットした。図-5 を見ると、矢部川水位での解析結果と実際の決壊時間も危険域に収まり、定性的にはあるが、本研究におけるパイピング破壊に対するリスク評価の適用性を確認した。

4. まとめ

河川水位(i)の変動・透水係数比・透水層厚を変えた浸透流解析を行い、パイピング破壊の安全率 G/W が 1 となる時間を把握することで、パイピング破壊の危険度が上昇する時間の把握を試みた。水位変動の上昇速度が異なると、同水位での G/W の値も異なることから水位変動の上昇速度の違いを危険度評価に反映することは重要であると示唆された。透水係数比・透水層厚を変えた条件での水位変動の違いによる $G/W=1$ となる時間を各ハイドログラフにプロットし結ぶと、緩やかな曲線を描いた。定性的にはあるが、被災事例をもとに、この境界を超えると危険度が高まるという評価指標の適用性を確認した。今後、他の被災事例を用いた指標の適用性検証と被覆層の条件も変えた解析を行い、基礎地盤条件の影響範囲を明らかにしていく。

【謝辞】本研究の一部は、科学研究費 (20H00266) の助成によって行われた。ここに記して謝意を表する。

【参考文献】1) 西村征哉, 前田健一, 櫛山総平, 高辻理人, 泉典洋: 河川堤防のパイピング危険度の力学的簡易点検フローと漏水対策型防水工法の効果発揮条件, 河川技術論文集第 24 巻, pp.613-618, 2018. 2) 建設省: 河川管理施設等構造令, 1976. 3) 国土技術研究センター: 河川堤防構造検討の手引き, 2012. 4) 矢部川調査委員会: 矢部川堤防調査委員会報告書, 2013.

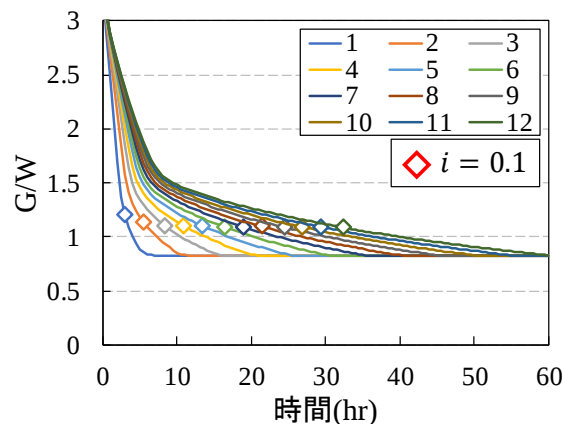


図-3 点 X での G/W の経時変化

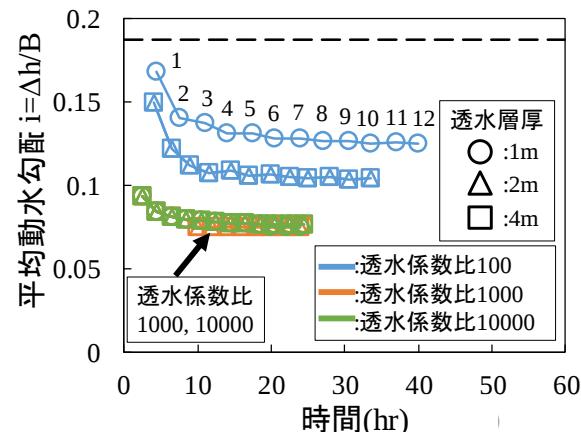


図-4 パイピング破壊の危険性がある境界線

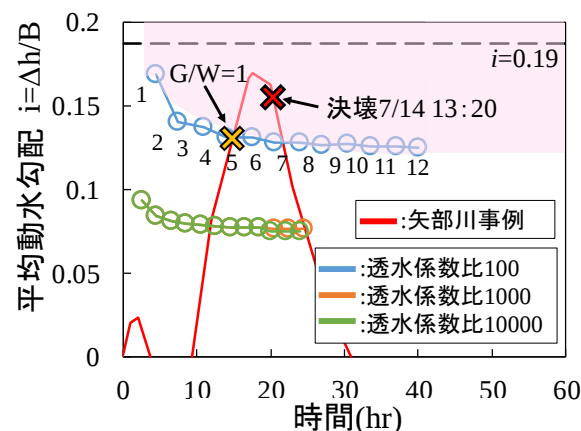


図-5 リスク評価指標の事例検証 (矢部川)⁴⁾