

河川堤防の法すべりの進行性を考慮したフラジリティカーブの算出

土木研究所 正会員 ○石原 雅規
土木研究所 正会員 佐々木 哲也

1. はじめに

洪水時に河川堤防に発生した法すべりから決壊に至る場合がある。代表的な事例が1976年長良川（安八町）で発生した決壊である。HWLには至らないものの4日間にわたり高い河川水位が続き、降雨と河川水の浸透によりすべりが発生した。杭打ち等の水防活動にもかかわらず変状の進行を留めることはできず、決壊に至った。この決壊では、1次すべり、2次すべりがあったと報告¹⁾されている。

また、法すべりの進行が途中で留まり、決壊を免れたと考えられる事例も多数確認されている。決壊に至る危険性を評価する上では、このような進行性を考慮し、決壊に至るかどうかをより直接的に評価することが重要であると考えられる。

しかし、現状の河川堤防の洪水時の浸透に対する安全性能照査では、河川水位と降雨の外力を与えた飽和・不飽和非定常浸透流解析から求められた最も高い堤体内水位の元で得られた円弧すべり安全率の最小値が使われており²⁾、進行性は考慮されておらず、必ずしも決壊を直接的に評価しているわけではない。

河川堤防の破壊確率の検討は、実河川を対象とした事例³⁾が報告されているが、現状の照査方法（進行性を考慮しない）が用いられている。そこで、本報では、法すべりの進行性を考慮した方法を用いた破壊確率の試算結果を報告する。

2. 法すべりの進行性を考慮した方法

筆者らが提案した手法⁴⁾であり、図1のフローに示すように、堤体内水位を与えた修正フェレニウス法による円弧すべり計算を行い、その安全率が1.0以下の場合には、その範囲が崩壊したものとして強度定数を低減する。円弧すべり計算と強度定数の低減を繰り返し、崩壊範囲が拡大しなくなったら終了となる。堤体内水位の上昇によって崩壊範囲が急拡大するという実験で確認された傾向が再現可能であり、円弧すべり計算をベースにしているため計算負荷が小さく、破壊確率の計算に向いている。崩壊範囲に設定する低減した強度定数は、大型浸透模型実験の崩壊した土砂の安定勾配から算出したものである。

3. 破壊確率の算出方法

本報における破壊確率は、図2のフローに従って実施した1万回の試行結果のうち、破壊に達した試行回数の割合である。簡単のため、台形の堤体のみ（図4に示す高さ6m×法勾配1.5割、2.0割、3.0割）をモデル化し、図3に示す降雨と河川水位の外力を与えた。河川水位の最高水位を0mか

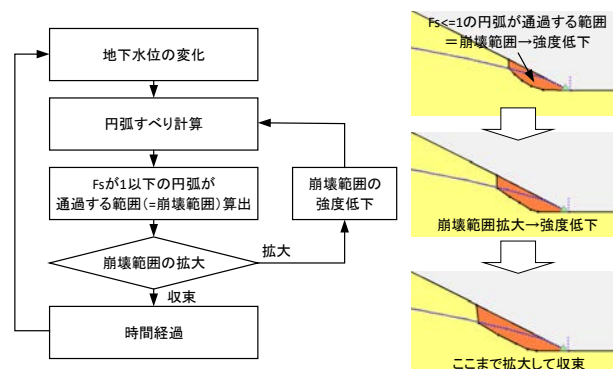


図1 円弧すべり計算により法すべりの進行性を考慮する方法

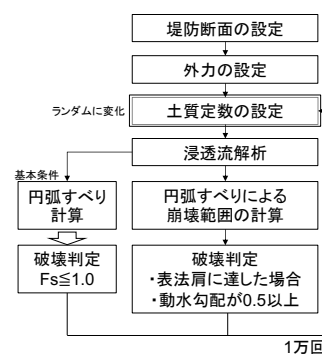


図2 破壊確率の算出フロー

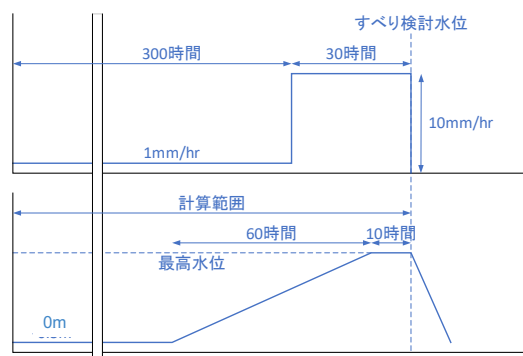


図3 降雨と河川水位の設定

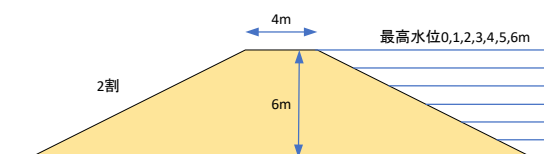


図4 堤防形状と河川水位

キーワード 河川堤防、法すべり、破壊確率、進行性

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1—6 (国研) 土木研究所 地質・地盤研究グループ TEL029-879-6771

ら 6m（堤防天端高さ）までの 7 段階で設定した。浸透流解析と円弧すべり計算に用いた土の透水係数、強度定数（内部摩擦角と粘着力）の確率分布は、国総研で公開している「河川堤防の土質試験結果情報（2013.6）」から設定した。外力の特性から、多くの条件で 10mm/hr の降雨が終わる時点において、最も堤体内水位が高くなることから、全ての試行でこの時点の堤体内水位を用いて、円弧すべり計算を行った。

崩壊範囲が表法肩に達しているか、あるいは、残存堤防（最初の堤防形状から崩壊範囲を除いた範囲）の平均動水勾配の最大値が 0.5 以上かによって、破壊に達したかを判定した。本報で用いた進行性を考慮した円弧すべり計算を長良川の決壊に適用したところ、崩壊範囲が天端の途中まで拡大して止まってしまった。本計算では崩壊範囲の強度定数を低減するだけで、崩壊範囲の土砂は元の位置にある状態で計算を行う。崩壊土砂には押さえ効果があり、この効果を過大に見込んだ方法となっており、川裏法肩から川表側に崩壊範囲が実際よりも広がりにくいという特性があると考えられる。そこで、崩壊範囲が表法肩に達したかだけでなく、動水勾配による判定も加えることとし、動水勾配の閾値 0.5 を長良川の計算上の残存堤防の平均動水勾配の最大値から設定した。

4. フラジリティカーブ

図4～6に上記の計算の結果から得られたフラジリティカーブを示す。円弧すべり安全率の最小値を用いた方法（図5）では、河川水位が 0m（降雨だけ）でも 3 割以上の破壊確率があり、河川水位が 6m でも 5 割程度であるから、河川水位の影響が小さい。一方で、進行性を考慮した方法（図5の赤線）では、河川水位が 4m までは破壊確率が小さな値で大きく変化しないが、それ以上の河川水位（5m, 6m）で急激に増加している。法勾配が 1.5 割（図6の紫線）では、より低い水位から破壊確率が上昇し始め、4m 以上では極めて高い破壊確率となり、法勾配が急な場合に危険性が著しく増大することを表している。逆に、3.0 割（図7の緑線）では河川水位 5m まではほぼ破壊確率 0 に留まっている。このように円弧すべり安全率の最小値を用いた結果と進行性を考慮し崩壊範囲を算出する方法を用いた結果が大幅に異なることから、破壊確率を求める方法の選択が重要であることが確認できた。また、進行性を考慮し崩壊範囲を用いた結果からは、HWL より上の堤防高さである余裕高さを設ける意義や法勾配を緩勾配化する意義もよく理解できる。

5. まとめ

河川堤防の浸透による法すべりの進行性を考慮し崩壊範囲を算出する方法を用いて、フラジリティカーブを求めた。現状の安全性能照査に用いられる円弧すべり安全率の最小値から求めたカーブと大幅に異なるカーブが得られ、手法の選定が重要であることが確認できた。また、進行性を考慮し崩壊範囲を算出する方法では、余裕高さを設ける意義や法勾配を緩勾配化する意義もよく理解できるが、破壊基準の設定や破壊確率が高いことなど課題は多い。

参考文献 1) 土木研究所, 中部地方整備局：長良川破堤に関する検討報告書, 1980. 2) 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き（改訂版）, JICE 資料, No.111002, 2012, 3) 田端幸輔ら：超過洪水時における堤防破堤確率評価手法に関する研究, 土木学会論文集 B1, Vol.71, No.4, 2015, 4) 石原雅規ら：浸透による堤防のり尻からの崩壊の円弧すべり計算を用いた評価法の提案, 河川技術論文集, Vol.24, 2018.

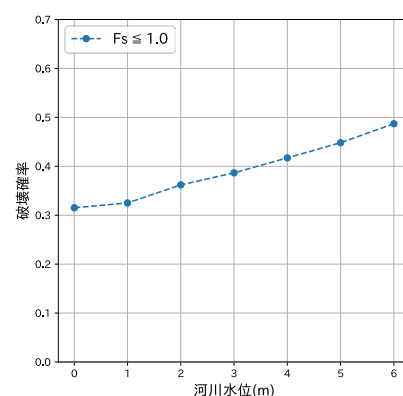


図5 円弧すべり安全率の最小値を用いたフラジリティカーブ（法勾配 2.0 割）

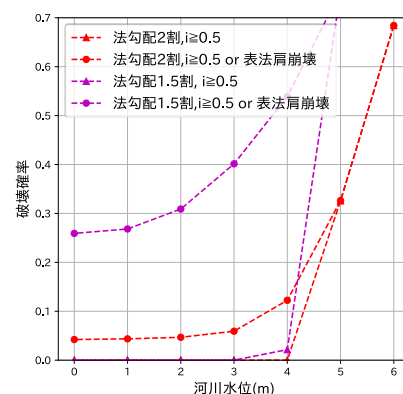


図6 進行性を考慮し崩壊範囲を算出する方法を用いたフラジリティカーブ（法勾配 2.0 割, 1.5 割）

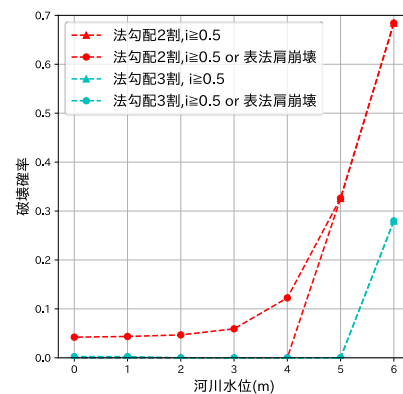


図7 進行性を考慮し崩壊範囲を算出する方法を用いたフラジリティカーブ（法勾配 2.0 割, 3.0 割）