

河川堤防の調査・研究分野に期待すること—これからと100年後と

堤防脆弱性指標，力学的相似則，水害リスク

中央大学研究開発機構 福岡 捷二

1. まえがき

河川堤防は洪水時に河川水（外水）が堤内地へ流れ出すことを防ぐ最も重要な河川施設である。洪水時の堤防の安全性確保は、我が国の社会、経済の安定な発展、氾濫から人々の生活を守るうえで極めて重要な社会資本であり、自然条件や経済社会、人々の生活スタイルは変化するが、水災害から守る堤防の役割は変わらない。流域における人々の生活の変化も取り込んだ河川堤防の絶え間ない技術の発展が求められる。本報告では、このような背景の下で、今後の河川堤防の地盤工学分野、水工学分野の調査・研究に期待することを述べてみたい。

2. 河川堤防の役割と使命

わが国の国土面積の93%は河川流域からなっており、また洪水氾濫によって形成された国土の10%に人口の約50%、資産の約75%が存在していることから、わが国は、洪水および洪水氾濫と共存する社会である。自然の外力である洪水流が発生すると、洪水の勢いは、もはや人為で抑えることが出来ない。堤防の決壊による氾濫が生じると、氾濫は広域に及び、著しい被害が発生する。このことは、同じ盛り土構造物でも河川堤防と道路ではその管理に大きな違いがある。このため、洪水中の堤防は、変状が生じないように維持管理がおこなわれて来た。このような厳しい条件にさらされる河川堤防の今日の計画、設計、維持管理の考え方が、報文¹⁾に示されているので参考にされたい。

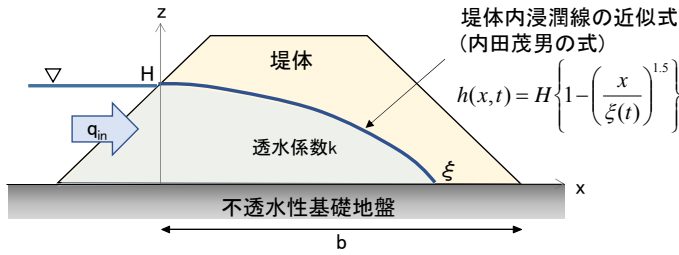
3. これまでの堤防研究—評価出来るようになったことと出来ないこと

河川堤防は土で出来ていることや、河川行政の伝統的な考えから、堤防の調査研究は、長年にわたって土質力学、地盤工学分野が中心となって進めて来た。堤防の浸透機構、破壊機構を模型実験等で系統的に調べ、河川堤防の設計や管理のための技術指針が作られ活用されてきた。この間、河川工学・水工学分野は河道内の流れと洪水災害軽減に関心があり、

堤防技術への関与は相対的に小さかった。

河川堤防の設計、施工、管理には、堤防土の力学特性、構造物の応力とひずみの関係、土中の間隙中の水の挙動、さらにはそれらの相互の力学関係に基づく科学的考え方が重要であることは論をまたない。地盤工学分野からの堤防研究は、堤防内部の土質構造と堤防の変位、変形、破壊機構に注目し、近年では精緻な有限要素法解析や堤防模型実験に基づく技術検討が行われている。実堤防における締固め度、含水比、材料のバラつきなどによる盛り土材料の強度に対する影響など分からない点が多く、また精緻な数値解析に回答を与えるデータが乏しいことなどもあって、この延長上で堤防研究の回答が得られるかどうか分からない面がある。一方において、河川堤防が有する実務上の要請から、粗々でもよいから河川堤防の危険箇所を判定する指標等の必要性が強く求められて来た。そのような背景の中で、地盤工学と河川工学分野が一体となって堤防技術を検討することになり、着実に調査研究の方向性が見えてきた。

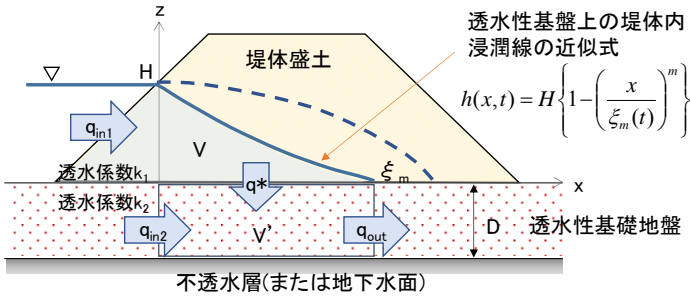
このようないろいろな考え方がある中で、堤防は土で出来た縦断的に長い構造物であり、土質的な弱点が局所的にあったとしても、構造物としてはかなりの抵抗力があることを認めて堤防の破壊危険性の検討が必要でないかとの考えに基づく検討が行われている。実務における河川堤防の安全性照査、設計のために、堤防縦断方向に収集された土質ボーリングデータを活用し、水理的な方法で堤防の破壊を推定する、すなわち、堤体内の流れはダルシー則に従うポテンシャル場であり、まず間隙の流れを考える単純な浸透流に立ち戻って検討することも地盤工学分野と水工学分野の協働の一つの表れとなっている。その結果、間隙水の移動に着目した浸透流解析は、洪水時の堤防の破壊危険発生確率や堤防脆弱性指標等に基づく堤防弱点箇所の推定につながり、河川現場でも適用されるようになってきた。図-1に示す堤防脆弱性指標は、河川で実際に起こった破堤や法崩れ等についてはかなりの精度で説明でき、堤防模型実験の結果も現地堤防と同様に説明できるようになってきた³⁾ (図-2)。



堤体直下が不透水層である場合の堤防脆弱性指標:

$$t^* = \frac{8 H k t'}{3 \lambda b^2}$$

H: 河川水位, k: 堤体透水係数, 洪水継続時間 t' ,
 λ : 空隙率, b: 水際から裏法先までの水平距離.



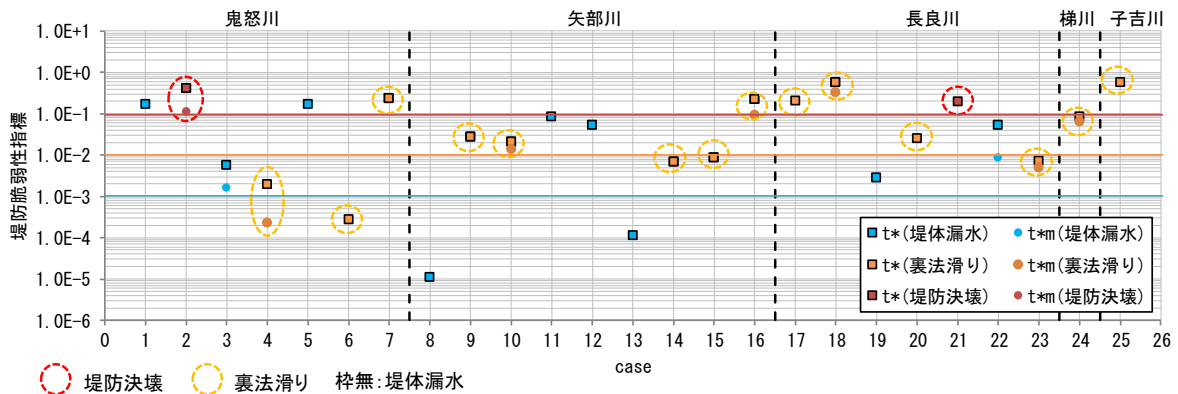
基礎地盤の透水性を考慮した堤防脆弱性指標:

$$t_m^* = \frac{2(m+1) m k_1 H - m(2m-1) k_2 D}{2m-1} \frac{H t'}{m H + (m+1) D \lambda b^2}$$

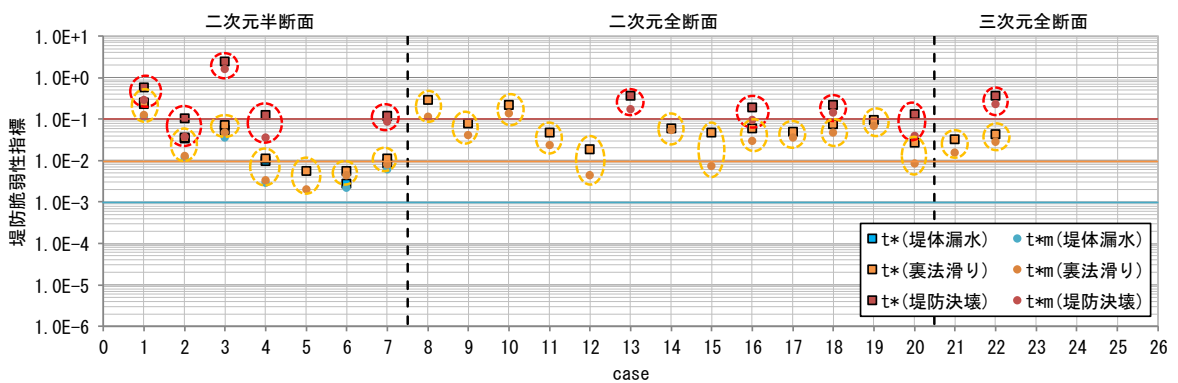
k_1 : 堤体透水係数, k_2 : 基盤の透水係数,
D: 透水性基盤の層厚(または堤体直下から地下水面までの深さ)
m: k_2/k_1 とD/Hの関係より以下の表より求まる堤体内浸潤線の形状を決めるパラメータ

D/H	k_2/k_1 0	0.1	0.5	1	2	5	10	20
0	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
0.1	1.500	1.500	1.500	1.500	1.426	1.060	0.858	0.711
0.5	1.500	1.500	1.472	1.075	0.823	0.660	0.588	0.545
1	1.500	1.500	1.118	0.860	0.700	0.591	0.546	0.524
2	1.500	1.384	0.866	0.710	0.614	0.547	0.524	0.510
5	1.500	1.014	0.671	0.592	0.549	0.519	0.509	0.504
10	1.500	0.821	0.591	0.548	0.524	0.509	0.504	0.501
20	1.500	0.691	0.548	0.524	0.510	0.504	0.501	0.501

図-1 堤防脆弱性指標



(a) 現地堤防



(b) 堤防模型

図-2 現地堤防及び堤防模型の堤防脆弱性指

このことは、堤防脆弱性指標は現地堤防と模型堤防の破壊機構の力学的相似条件を与える唯一の無次元量であると判断され³⁾、この無次元指標の有効性は高く、長年にわたる堤防研究が到達した成果の一つであると言える。しかし、どこで大規模破壊、局部破壊が起こるかとなると、指標の予測精度は不十分であり、検討事例を増やし、精度の向上を図る必要がある。

パイピング破壊については、模型実験等によって現象の理解は進んできたが、間隙の増大、空洞化、局部崩壊へと進展する機構の理解が堤体の浸透破壊に比して不十分である。パイピングを起こしている砂の移動がキーであり、これを引き起こす水の流れとの関係について、地盤工学、水工学の両面から徹底的に検討し解明をすることがパイピング破壊問題解決の道筋であると考えられる。

4. 堤防研究のこれから

河川の洪水時の水面形の観測が重要視され、洪水時のダム群、河道の水量の時空間分布が分かるようになってきたことは、河川流域の治水のあり方にこれまでとは異なる展望を与えてきた⁴⁾。流域全体の効果的な治水を考えるとときには、河道も洪水を貯留させながら流すことにより、流下能力の小さいところに負担をかけない治水が可能になる。しかし、その時には、現況よりも洪水水位は高くなり、洪水継続時間は長くなり堤防への影響は大きくなる。当然、堤防の信頼性が不確かなまま、水位、継続時間等を変える方法は、地域住民の理解を得ることは難しい可能性が高い。重要なことは、堤防技術が進歩し、治水安全度に関する堤防のポテンシャルが上がると、治水行政は今よりもっと、河川流域全体を捉え、広がりを持った治水、環境行政の展開が可能になるであろう。

河川堤防に関わる地盤工学分野で蓄積されてきた基礎技術、数値解析技術は、脆弱性指標などと共に、堤防破壊の予測精度向上に生かされなければならない。成果を活かす一つの方法は、堤防脆弱性指標を用いて推定した破壊危険性の高い個所について、集中的に堤防および基礎地盤調査を行い、より信頼度の高い堤防、基礎地盤の情報を得て、解析精度の向上につなげ、また、現地堤防との相似性の高い模型堤防を用いた系統的な実験により、より詳細な破壊機構を理解することは、同様に重要となる。堤防や基礎地盤の検討や解析に必要なデータの収集は、調査研究の基本である。

堤防破壊危険個所の対策に当たっては、今後、破

壊危険発生確率や脆弱性指標に基づく検討と危険箇所への対策の効果評価が行われ、堤防の安全性の技術向上をもたらすことが期待される。時代に合わせた新しい堤防の技術基準を作るための不断の努力がなされなければならない。

5. 50年から100年後の堤防研究

今後、気候変動や我が国の経済社会の変化に対して、流域の水害リスクの軽減のための治水方策と河川管理のあり方は変わらざるを得ないであろう。堤防の整備は進むが、洪水災害をもたらす外力には上限がないので破堤の危険性は常に存在する。計画レベルを超える超過洪水に対する治水対応は、洪水中にいつ、どこで、どのように堤防が損傷、破壊をするかの予測技術が出来なければならないが、浸透による破堤危険個所については、現在の技術の延長上でおおよそ推定できるようになると想定される。しかし、パイピング破壊については、堤防の基礎地盤が洪水氾濫によって出来たものであることから、氾濫地形の成り立ちと地質構造、現況河道周辺の旧河道の分布と土質構造、陸域からの地下水流と河川からの浸透流の堤防付近の重畳作用による高い地下水位の発生等、現地での目的を持った調査が特に重要になる。地盤工学、水工学のみならず関係する分野と一緒に検討していくべき重要な課題である。

土で出来た堤防は、堤防天端の越流による破堤を免れることが難しい。越流破堤は天端の高さの違いから生じる越流水深が大きくなる区間から起こる危険性が高いので、堤防天端の越流水深を出来るだけ一様になるような河道の作り方、堤防天端高が検討され、実行されることも重要な課題になるであろう。土堤防は、浸透破壊、越流破壊さらには地震破壊に対しても安定性があることが重要で、堤防幅を広く、大きな堤防にすることを常に心がける大切である。また、堤防の破壊に対し、早く堤防を締切り、氾濫被害を小さくするための技術開発は、土木技術の総力を挙げて検討されるべきであろう。

気候変動等に伴う洪水外力の増大は、河川流域の水害リスクの増大となり、治水政策の変更につながる可能性が高い。それは、流域における治水施設の有効な使い方、安全性確保と密接に関係する。現在、洪水水位が計画高水位を超えると堤防は破堤する可能性が高いという考え方で河川管理が行われている。破壊しにくい堤防の構造は、地域社会における土地利用や人間活動と密接に関係し、流域水害リスク軽減のための非常に重要な要素である。今後の堤防の研究は、流域の水害リスク軽減、豊かな地域づくり

「流域総合河川計画」に基づく流域治水と水害リスク検討手順

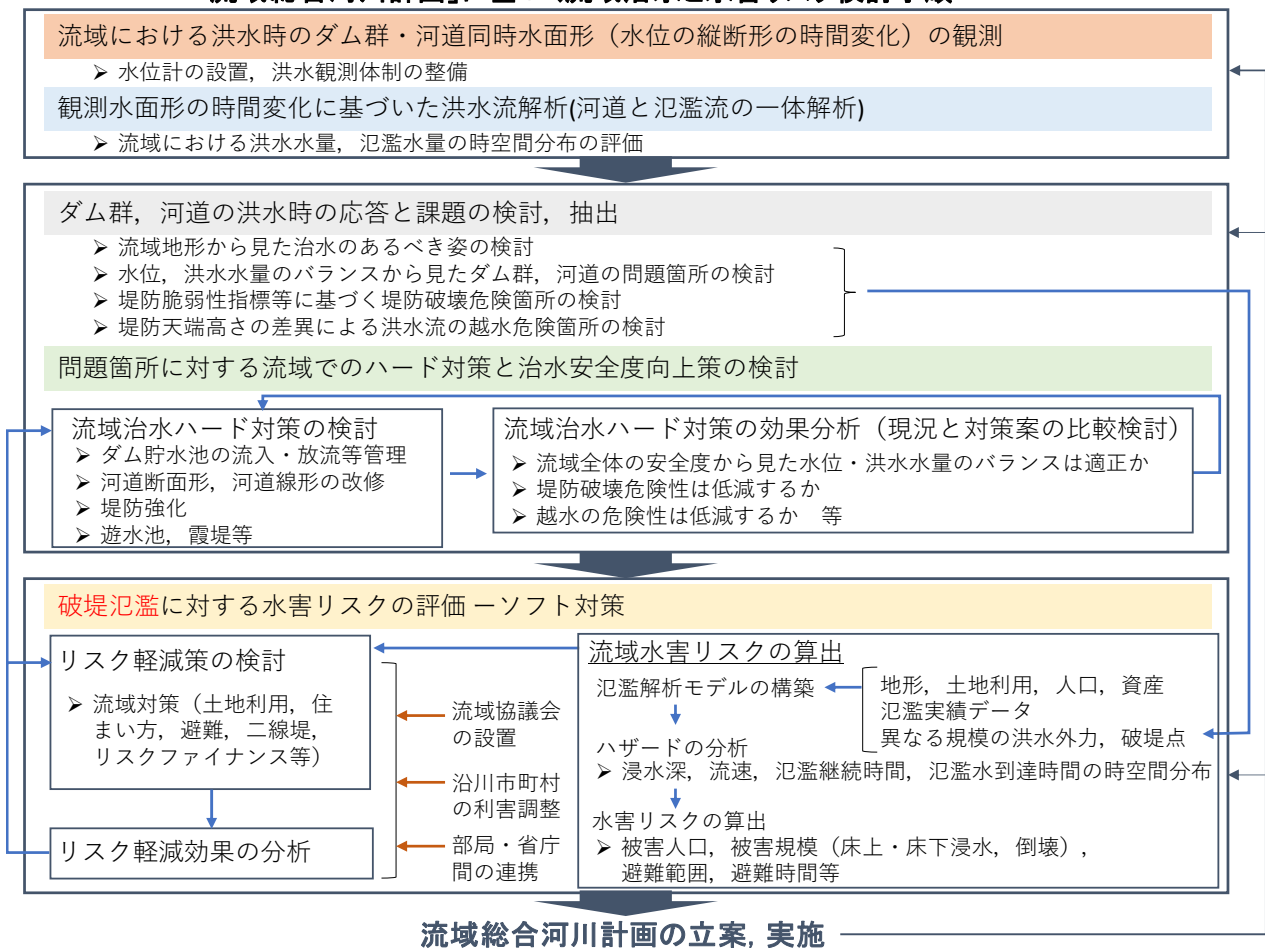


図-3 流域総合河川計画の考え方

という具体的視点で議論されなければならないであろう。長い延長を有する堤防がどこで，どのような破壊形態をとるのかわからなければ，流域リスクの確かな検討が出来ない。私達は，このことを流域住民に分かり易く説明することが求められるであろう。

図-3 は，河川，ダム等の治水施設と流域，地域が一体となって水害リスクを軽減することの必要性を示したもので，私の主張する流域総合河川計画の考え方である⁵⁾。100年後には，河川流域の水害リスクをできるだけ小さく保つうえで，最も重要な施設は堤防であり，水災害が起こっても回復が容易な流域のあり方を含めて，地域づくり，まちづくりに地盤工学分野も，水工学分野も積極的に貢献することが期待される時代になるであろう。

参考文献

1) 小俣 篤：河川堤防の安全確保の考え方を踏まえた堤

防強化工法のあり方について，土木技術資料，58-8，pp. 44-51，2016。

- 田端幸輔，福岡捷二：大規模洪水時における堤防の浸透，裏のり滑りによる破壊確率の評価法に関する研究，第2回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム，委員会報告・講演概要集，pp. 55-58，2015。
- 田端幸輔，福岡捷二：堤防破壊確率と堤防脆弱性指標に基づいた堤防危険個所の推定法，第3回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム，講演概要集，pp. 60-63，2016。
- 福岡捷二：洪水水面形観測情報の広域的・統合的活用による流域治水の考え方の構築に向けて，河川技術論文集，第23巻，pp. 387-392，2017。
- 福岡捷二：基調講演，都市の水害リスクの軽減に向けて，No.121，日本不動産学会誌，pp.5-10，vol31，No.2，2017。