

## 特集

# 粘り強い河川堤防 —浸透流と越水への複合対策に関する考察—

田中規夫<sup>1</sup>

## Resilient Levee: Discussion on Compound Countermeasures for Overflow and Infiltration

Norio TANAKA<sup>1</sup>

### Abstract

Further resilient levees than the crisis management-type levee with strengthened levee crest and toe-side levee slope are under development for overflow and infiltration. Before a levee breach, scoured region by a nappe flow from levee crest and overhang structures by the eddies in the scoured region usually appeared, and the block collapsing of the overhang levee can progress the erosion of the levee to further river side. Paying attention to the scouring phenomena, two countermeasures for infiltration and overflow are proposed. One is to extend the levee crest to inland side for increasing time before breaching under the occurrence of several block collapse, and the second is to extend levee crest to the location where generated nappe flow after slope erosion can directly hit the drain for reducing scoured depth.

キーワード：洗掘，法肩，法尻，天端幅，ドレーン

Key words: scour, levee shoulder, levee toe, width of levee crest, drain

### 1. はじめに

2011年の東日本大震災の津波被害を受けて、海岸堤防では防災規模のレベル1を超える津波に対しても粘り強い堤防の必要性が議論され、研究開発が行われてきた（諏訪ら，2018）。河川堤防における越水対策強化という観点では、それよりも10年以上前、1988年頃から2003年頃にかけて堤防表面をシートやブロックで覆うアーマー・レビー

やフロンティア堤防が試験的に実施されたが、維持管理やコストの面で全国展開には至らなかった（三好ら，2022）。中川（2011）は、矢板やコンクリート壁等を堤体内にいて補強したハイブリッド堤防も含め、堤防強化手法の工学的、技術的評価が不十分な状況を踏まえ、地盤工学分野と水工学分野の複合研究領域としての堤防を補強する研究の必要性をと考えた。2015年の関東・東北豪雨

<sup>1</sup> 埼玉大学大学院理工学研究科  
Graduate School of Science and Engineering, Saitama University

による常総水害を受け、上下流バランス等の観点で河道や堤防の整備がすぐにはできない区間等で、堤防天端のアスファルト舗装や裏法尻のブロック被覆によって堤体の侵食や崩壊の進行を遅らせる危機管理型ハード対策が導入された。導入後の令和元年東日本台風による洪水で、全国で142箇所の河川堤防が決壊（うち86%は越水が主要因）したことで、危機管理型ハード対策は機能したものの弱点もありそうなことから、その上を行く対策研究（三好ら，2022）が盛んにおこなわれつつある。

浸透流に対しては、河川堤体内の浸透に関しては堤体内の浸潤面を下げるのが有効であり、その工法としては、1)平均動水勾配を減少させるための断面拡大工法（法勾配を緩くすることですべり破壊に対する安全性の増加も期待できる。川表側は難透水性材料、川裏側は透水性材料で構成）、2)浸透水が集まりやすい裏法尻に透水性の高い礫などの材料を設置して排水するドレーン工法、3)難透水性の被覆材料を表法面に設置（腹付け）し、高水位時の浸透を抑制する表法面被覆工法（降雨浸透も含め抑制する場合は全面被覆工法）が用いられている。築堤年代ごとに盛土材が異なる大河川の堤防では粘性土・砂質土が入り交じる複雑な構造となっており、堤体内にある透水性の高い層を浸透した雨水・河川水が川裏から噴出する現象が生じる場合があり、首都圏氾濫区域堤防強化対策として確実性・耐久性の観点から1)の対策である7割堤防の築造が進められており、すべり破壊やパイピング破壊に対する安全度向上が図られている。

堤体基盤からの漏水に関しては、川表側法尻部における遮水壁の導入や堤体揚圧力の上昇抑制や堤内地盤の行き止まり層や薄い被覆土層で発生する盤膨れ防止のために、浸透圧力を軽減するリリーフウェル工法など、浸透流対策が実施される。一方で、越水と浸透の複合現象については、決壊地点には浸透痕跡などが残りづらいため、浸透対策を越水時の危機管理にも役立てるという視点での対策は遅れている。被災後の堤防調査委員会などでは、越水痕跡が確認できた場合には「越水が主要因」とされ、決壊地点で残存した両側堤防の

噴砂痕跡の確認や土質調査に基づく解析をもとに「浸透が決壊の要因になった可能性は低い」と推定される場合が多いが、解析結果によっては「浸透の影響は排除できない」とされる場合もある。浸透状態が越水破壊にどのような影響を及ぼすのかについては奥田ら（2014）の研究はあるものの、実現象における解明は遅れている。

本稿では越水・浸透破壊のメカニズムを整理し、それぞれの対策工の現状と筆者らの既往研究を踏まえた上で、浸透流と越水の複合現象としての危機管理対策の方向性を考察することとする。

## 2. 越水破壊現象と対策

土堤からの越水には大きく4箇所（堤防天端、法肩、法尻、堤内地盤）の侵食起点となる弱点がある。堤防天端が侵食されやすい場合は、砂を材料とした堤防の越流実験（奥田，2014）で示されるように川裏側の水面勾配変化点が侵食とともに川表側に移動し、堤外側に達した時点で天端高さが急激に低下（図1(a)）し、堤防破壊が一気に生じる。そのため、堤防天端をアスファルト舗装などで保護することは決壊までの時間を遅らせる点で大きな意味をもつ。堤防天端と法面の耐侵食力が高い場合、川裏側の弱点となるのは勾配変化点付近であり、遠心力の影響を受けてピエゾ水頭が大きく変化する箇所、すなわち、流水が法面から離れやすい法肩や地面をたたきつける法尻付近になる。法肩では勾配変化が急（水平から60度以上）になると底面に沿ったシート流れではなく落下流へと変化（Dissanayaka et al., 2022）し、直ぐ下流側の法面をたたき流れになる。越流開始前において天端から法肩付近の勾配変化が落下流を発生させるほど急ではなくても、川裏側が少しでも侵食されると法面に沿ったシート流れが維持しづらくなる。そして、小規模な落下流が形成され、法面に衝突した流れがジャンプして下流側法面に再び衝突するような多段階の落下流が発生し洗掘が発達する（図1(c)）。堤体裏法面の耐侵食力が堤内地盤よりも相対的に高い場合はもう1つの弱点でもある堤内地盤からの侵食が上流方向に進行していく。堤内側地盤が固い場合は法面上の侵食

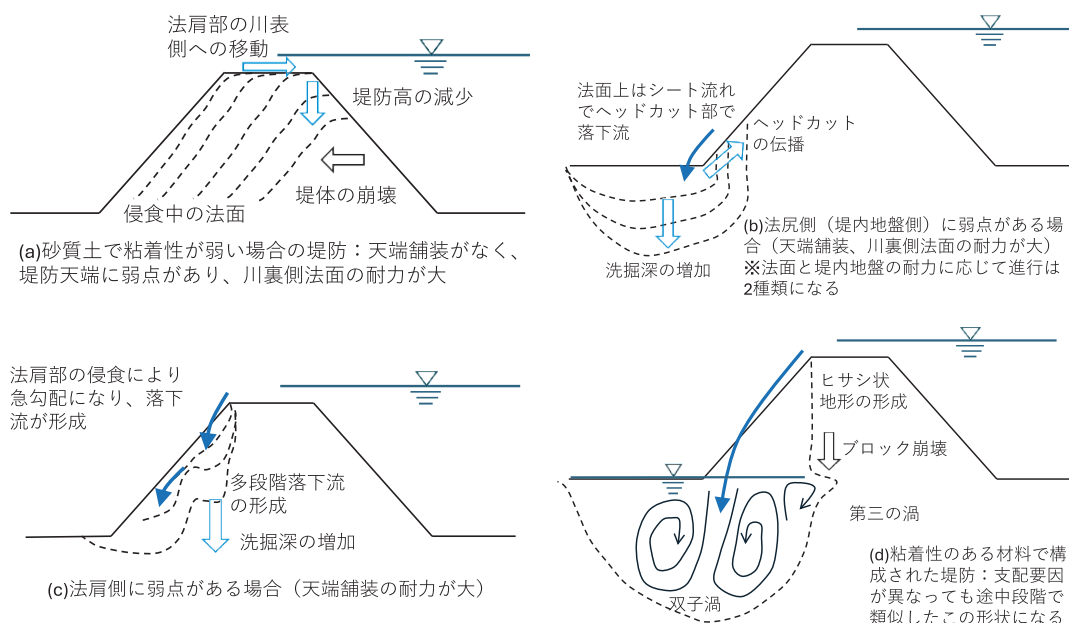


図1 弱点に応じた堤防の崩壊形態と堤防決壊前に形成される落下流・洗掘領域

(a) 天端が弱点、(b) 堤内地盤または川裏側法肩が弱点、(c) 法肩が弱点、(d) 落下流・洗掘域・ヒサシ状地形

溝先端部のヘッドカットが上流に伝播していく（図1 (b)）。洗掘が進むと法尻から堤体内部にくい込んだ範囲に洗掘域が形成され、堤体の川裏側の一部はヒサシ状態になる（図1 (d)）。洗掘域には双子渦が形成され、これが徐々に深くなり、同時に堤体側にくい込むように洗掘が進行し、ヒサシが形成される。ヒサシの崩壊により落下流の形成位置が上流に移動し、それに伴い洗掘域も上流側へと進行していく（海野瀬ら，2021）。実現象では、こうした法尻付近の法面や堤内地盤の耐侵食力の大小によって生じる法尻側からの現象と法肩側からの現象が複合的に発生する。天端崩壊は川裏部が侵食された後のヒサシ状に残った堤体部分の不安定性によるもので堤体材料の強度が重要である。

Sherzai et al. (2025) は、堤体 (L) と堤体基盤部 (F) の強度特性（耐侵食性が相対的に大、小をそれぞれ M、S）を変化させた越水実験を行い、L のほうが F よりも耐侵食性が大きい場合 (LM-FS) は、法尻側から洗掘領域が発達すること、L のほうが F よりも洗掘されやすい材料の場合 (LS-FM)

は、法肩側からの洗掘が発達することを示した上で、時間進行に差はあるものの、図1 (d) の形状になることを示した。また、基盤が固い場合 (LS-FM) は洗掘領域が LS-FS より浅いが上流側への侵食で堤体の崩壊が速いこと、LM-FS は洗掘深は深いがブロック崩壊が起きづらいことを示した。

天端保護工と法尻補強工を用いた危機管理型ハード対策としての堤防構造は、図1 で示す4つの弱点（天端、法肩、法尻、堤内地盤）の天端、法尻、堤内地盤からの洗掘を軽減するものであるが、法肩や堤内地盤（対策工のさらに堤内側）という弱点が残ったままである。そのため、法肩から法尻保護工までの区間の洗掘によって、または、法尻下流部の堤内地盤の大規模洗掘によって法尻保護工が破壊され、天端からの大規模な落下流が形成されて、天端崩壊モード（図1 (d)）に移行する可能性がある。そのため、川裏側法面すべてを被覆するタイプの表面被覆型構造の検討が進んでおり、表面ブロックまたは蛇籠タイプの被覆を施し、その下部を吸出し防止剤でカバーする方法（国土交通省，2023）や、両法肩の堤防内部に矢

板壁を設け、両者をタイロッドで連結する二重式矢板構造等（国土交通省，2022）の技術検討や、その破壊挙動が調べられている（河野ら，2024）。

### 3. 浸透流現象と対策

水防災意識再構築ビジョン（社会資本整備審議会，2015）において、決壊までの時間を少しでも引き延ばせる堤防構造の工夫に取り組むこととされ、様々な研究開発が推進されつつある。小俣（2016）は歴史的な経緯の中で土堤原則・形状規定で築造されてきた既存の河川堤防に対して、堤防強化工法で超過洪水に対して決壊に至らない構造とすることは困難であるという前提の下で、重要な課題として堤防強化工法のあり方をまとめており、その中の1つに越水に対する強化工法が浸透による破壊現象にマイナスの影響を及ぼさないことが重要であるとしている。

堤体内浸透に関して、粘り強い河川堤防の構造検討に係る技術資料（案）（国土交通省，2023）では、砂質土堤体の場合にはドレーン工を設置することを基本とし、粘土分が少なく塑性があまりない粘性土の場合にも、すべりによる変状対策としてドレーン工を設置するのが良いとされる。ドレーン工の長さは堤防高  $h$  の半分  $0.5h$  が推奨されており、ドレーン工設計マニュアル（国土交通省，2013）ではドレーン工の長さは平均動水勾配  $H/D$ （ $H$ ：堤内地盤との水位差、 $D$ ：ドレーン上流端までの浸透長）をパイピングが生じない0.3未満となるように設計し、ドレーン内から速やかに水をだすこととされる。浸透流が流れやすくなって吸い出されることを避けるためである。技術資料（案）（国土交通省，2023）やドレーン工設計マニュアル（国土交通省，2013）より、2-3割堤防ではドレーンの長さは川裏側の法肩下部の位置（真下）までは達しない。これが越水対策を兼ねられるかについては4で記述する。

通常の基盤漏水対策は川表側に遮水矢板、裏法堤内地盤にウェルドレーンやトレンチ、高水敷に浸透路長を伸ばし平均動水勾配を小さくするプランケット、裏法堤脚部の基礎地盤に施工されるリリーフウェルなどがある。遮水矢板は透水層が厚

い場合や礫層などの場合に効果や施工上の問題があり、ドレーン工は目詰まりなどに対する開削補修・更新が必要であり、リリーフウェルは盤膨れ対策としては有効であるが、動水勾配が大きな状態で水を出すことによる基盤の流動化が生じないようにする必要がある。長期的な維持管理面も含めると、それぞれ課題が残されている。

### 4. 浸透流対策を兼ねた越水破壊対策に関する考察

2つの視点での越水対策について考察する。1つ目は川裏側法面を緩勾配にして、浸透長を長くとり動水勾配を小さくする工法（図2（a））の代替案である。天端舗装がされている場合は、図1（b）か（c）の形で洗掘が進行する。法尻からの洗掘が卓越する場合には、法面を緩い勾配にすることで法肩到達まで時間がかかる。一方で、時間経過とともに図1（c）の洗掘モードが発生した場合、川表近くでの洗掘が進行する。また、天端舗装に亀裂などがあって揚力などで天端舗装がはがれてしまった場合には、図1（a）の破壊モードが現れる。これについては緩勾配にしたメリットを生かすことはできない。一方、図2（b）の場合には、2-3割堤防で起きている現象を複数回繰り返さない限り、堤防決壊に至らない。天端舗装がはがれて図1（a）のモードになった場合にも、天端が長い川表に到達するまでの時間は大幅に増大する。難点は、図2（b）は図2（a）に比べて川裏側法面の堤防工事に必要な土の量が約2倍になることである。そこで、例えば5割堤防で図2（b）の場合と、7割堤防で図2（a）の場合での優劣比較が必要になるが、用地取得が困難な場所においては天端を長くするという選択肢もあると考えられる。

2つ目はドレーンを活用する方法である。2-3割堤防にドレーン工の設計指針でドレーンを構築した場合に、越水で川裏側法面が洗掘された後には図3（a）のようにドレーンの川表側に着水し、洗掘が進行する。これを図3（b）のように法肩をドレーンの先端まで天端を伸ばすと、ドレーンに直接落下流が衝突して減勢工の役割を果たすことが期待できる。Ali et al. (2024) の水理実験では、

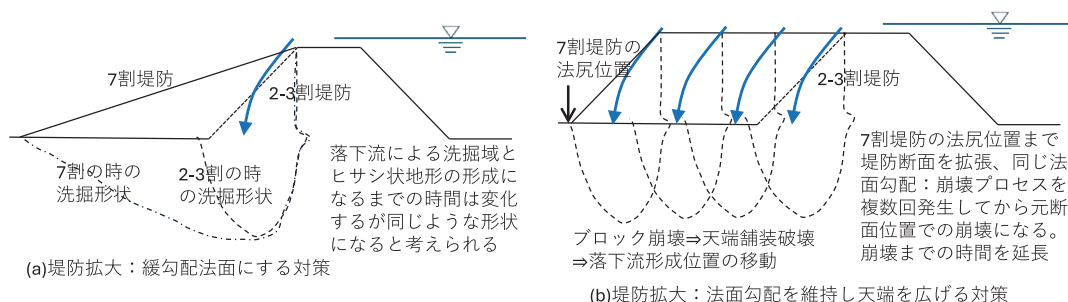


図2 浸透流対策の断面拡大方法と生じる破壊現象の違い

(a) 7割堤防に拡大する場合, (b) 7割堤防の敷地を使って天端幅も拡大した場合

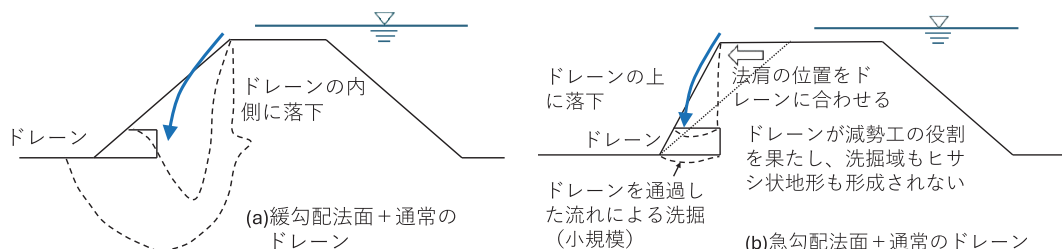


図3 浸透流対策と越水対策の重ね合わせ

(a) 考慮しない場合, (b) 落下流の着水位置をドレーンに合わせた場合 (Ali et al., 2024 をもとに作成)

図3 (b)の状態では洗掘が安定し、ヒサシ状の堤体は形成されず、洗掘破壊が上流に進行しないことを確認した。2-3割勾配の堤防をさらに急にする場合は、法面を安定させるための処理も必要になるが、浸透流対策としてドレーンを採用する場合には、法肩をドレーンに合わせることは一考に値する。

## 5. おわりに

越水破壊、浸透破壊の弱点箇所を整理した上で、それぞれの対策工の現状と課題を整理した。まず、堤防天端の舗装は越水侵食の起点となる点を川表側に近づけないこと、堤防高を低下させないことで非常に重要な役割を果たすことを示した。舗装等で天端を維持した状態で決壊前に現れる堤体形状として洗掘領域と堤体上流方向への侵食によるヒサシ状地形があり、そのヒサシのブロック崩壊が洗掘領域を上流側に前進させて決壊につながる。この洗掘領域に注目すると、浸透と越水への複合

対策の可能性として、1)ブロック崩壊が複数回生じて川表側に到達しづらい構造として堤防天端を拡張すること、2)浸透流対策の弱点は法尻付近にあることを踏まえ、法肩部を堤内側に延伸してドレーン工に落下流をあてること、が重要であることを示した。天端拡張に伴う工事費の増大や法面処理の工夫等、解決すべき課題はあると考えられるが、こうした視点も重要である。

## 参考文献

- Ali, L., K. Sekine and N. Tanaka: Evaluating the effectiveness of seepage countermeasures and retrofitting strategies for mitigating nappe flow-induced reverse flow and erosion for overtopping flow from a levee, *Geosciences*, 14(9), 233, 2024.
- Dissanayaka, K. D. C. R., N. Tanaka and M. K. Hasan: Effect of orientation and vegetation over the embankment crest for energy reduction at downstream, *Geosciences*, 12(10), 354, 2022.
- 海野瀬綾乃・田中規夫・五十嵐善哉・小野瀬涼太・



- 黄旭：堤防からの落下流特性に着目した実験と侵食破壊モデルによる堤防天端強化の有効性評価, 土木学会論文集 B1 (水工学), 77 (2), I\_361-I\_366, 2021.
- 河野努・三好朋宏・福島雅紀・瀬崎智之：実大模型実験による二重式鋼矢板構造を有する堤防の越水破壊挙動の検討, 河川技術論文集, 30, 167-172, 2024.
- 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室：粘り強い河川堤防の構造検討に係る技術資料 (案), 2023, <https://www.nilim.go.jp/lab/fbg/download/gijutsusiryo.pdf>
- 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室・国立研究開発法人土木研究所地質・地盤研究グループ (土質・振動)：粘り強い河川堤防の技術開発に当たっての参考資料【自立型】, 2022, [https://www.nilim.go.jp/lab/fbg/download/sanko\\_jiritsu.pdf](https://www.nilim.go.jp/lab/fbg/download/sanko_jiritsu.pdf)
- 国土交通省水管理・国土保全局治水課：ドレーン工設計マニュアル, 2013, [https://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/pdf/dorenkou\\_manual.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/pdf/dorenkou_manual.pdf)
- 三好朋宏・笹岡信吾・西嶋貴彦・福島雅紀：危機管理型ハード対策を上回る効果を有する粘り強い堤防の開発, 国総研レポート, 2022.
- 中川一：超過外力にどう備えるか～河川堤防研究のすすめ～, 自然災害科学, Vol.30, No.2, pp.167-168, 2011.
- 小侯篤：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, 2016, [https://www.pwrc.or.jp/thesis\\_shouroku/thesis\\_pdf/1608-P044-051\\_omata.pdf](https://www.pwrc.or.jp/thesis_shouroku/thesis_pdf/1608-P044-051_omata.pdf)
- 社会資本整備審議会：大規模氾濫に対する減災のための治水対策のあり方について～社会意識の変革による「水防災意識社会」の再構築に向けて～, 2015, [https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinkai/daikibohanran/pdf/1512\\_02\\_toushinhonbun.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinkai/daikibohanran/pdf/1512_02_toushinhonbun.pdf)
- Sherzai, J. H., N. Tanaka, Y. Igarashi and R. Onose: Effects of soil characteristics on levee erosion and the behavior of twin eddies in a scoured hole generated by nappe flow. International Journal of Civil Engineering, 1-19, 2025.
- 諏訪義雄・加藤史訓・竹下哲也・鳩貝聡・姫野一樹：津波越流に対する海岸堤防の粘り強い構造の要点, 国総研資料 第1035号 (ISSN1346-7328), 2018.
- 奥田敏昭：河川堤防の越流侵食のメカニズムに関する研究, 博士論文 (京都大学), 2014, <https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/192128/1/dkogr04106.pdf>
- 奥田敏昭・中川一・水谷英朗・川池健司・張浩：堤体飽和度に着目した堤防の越流侵食のメカニズムに関する研究, 自然災害科学, Vol.33, No.1, pp.29-41, 2014.

(投稿受理：2025年 6 月 27 日)

## 要 旨

天端, 法尻側法面を強化した危機管理型ハード対策としての堤防よりも越水や浸透に対してさらに粘り強い堤防構造の開発が行われている。決壊前の堤体は, 天端からの落下流による洗掘領域と洗掘域内の渦による堤体上流方向への侵食によるヒサシ状地形が形成され, ヒサシ状地形のブロック崩壊が洗掘領域を河川側に前進させ決壊につながることを示した。この洗掘現象に注目し, 浸透と越水への複合対策として2つ提案した。1つ目はブロック崩壊が複数回生じても川表側に到達しづらい構造として堤防天端を拡張すること, 2つ目は川裏側法面が侵食されたときに発生する落下流が直接ドレーン工に当たるようにしてエネルギー減衰をさせて洗掘そのものを抑えること, である。