

近年の河川堤防被害状況と堤防強化技術

に へい やす お
二 瓶 泰 雄†

近年、豪雨による災害が各地で頻発しており、今後もこの傾向がより激化することが予想されている。堤防は、河川と住民が住むエリアの境界に位置しており、洪水氾濫に対する最後の砦という重要な役割を担うが、毎年各地で決壊事例が報告されている。本報では、河川堤防の概要や設計上の考え方、堤防決壊メカニズムについて取りまとめる。また、最近の決壊事例としては、2015年関東・東北豪雨による鬼怒川の堤防決壊を紹介する。最後に、堤防強化技術の現状について説明する。

キーワード：河川堤防、決壊、洪水

1. はじめに

河川の治水対策は、住民の生命や資産を守るために、河川水を安全に流下させ洪水を防御するもの（防災）や氾濫しても被害を最小化させるもの（減災）である。治水対策を含む河川整備基本方針や河川整備計画では、河川流域に降った雨水をどのように河川や流域に配分をするかが示されており、基本的には雨水を「どこで貯め、河川内でどの程度流すか」ということを定める。貯める施設としては、河川ではダムや遊水地、調節池、流域では防災調整池、雨水浸透マス、透水性舗装などが挙げられる。河川水をより多く流すためには、河川の断面積を広げることが基本であり、掘削や浚渫、分水路・放水路、堤防建設・改修などが主に行われる。

このように河川堤防は治水対策の一施設である一方、河川と住民の住んでいるエリアの境界部に立地する堤防は洪水氾濫に対する“最後の砦”という極めて重要な役割がある。近年、短時間豪雨の頻発や巨大台風の来襲により、河川洪水氾濫が国内外で数多く発生している。特に、河川堤防が決壊すると、大量の河川水が氾濫し、甚大な被害となる¹⁾。そのため河川堤防の強化や適正な維持管理が重要であることは論を待たない。

本報では、河川堤防の特徴や最近の決壊事例、堤防強化技術について取りまとめる。具体的には、①河川堤防の成り立ちや堤防設計の考え方、決壊メカニズム、②過去の被災事例として2015年関東・東北豪雨による鬼怒川決壊、③一般的な堤防強化技術、につい

て以下に記述する。

2. 河川堤防について

2.1 河川堤防の特徴

河川堤防に関する特徴は、中島²⁾と小俣³⁾を参考にして、以下に示すとおりである。

- ①歴史的構造物：堤防は災害や河川改修のたびに嵩上げ・腹付けされ、長い歴史の中で順次改築されてきた構造物である。堤防は、古くは縄文時代後期から作られたとの記録が残っている²⁾。
- ②堤防内部の材料が不明かつ不均一：築堤の材料や工法は時代により異なるため、堤体や基礎地盤の材料は不均一であり、内部における材料分布は不明である。
- ③半自然物：洪水氾濫によって河川の両側には土砂が堆積し、周囲より高い自然堤防が形成される。この自然堤防を利用している堤防や洪水防御施設は、かなり古くから作られている。また、堤防は、河川の自然の作用で作られた基礎地盤の上に作られるものである、このように堤防は人工物と自然物がミックスしたものである。
- ④長大な線的構造物：我が国における堤防総延長は、一級河川では国管理が約13 000 km、都道府県・政令市管理が約41 000 km、二級河川では約19 000 kmに及ぶ長大な線的構造物である⁴⁾。一方、堤防が決壊する際の縦断方向の幅は数十～数百mと河川長と比べて非常に短い。そのため、「千丈の堤も蟻の一穴から」ということわざもあるように、局所的な安全性が線的構造物である堤防全体の安全性に影響を与える。
- ⑤水際の構造物：鉄道や道路の盛土構造物と異な

† 東京理科大学：〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641



図1 堤防の改修状況と堤体土質の不均一性（江戸川左岸・中島樋管）

り、河川堤防は河川水と接する水際に立地する盛土構造物である。そのため、河川水や雨水が堤防内に浸透し飽和すると、堤体土の強度が低下することが知られている。

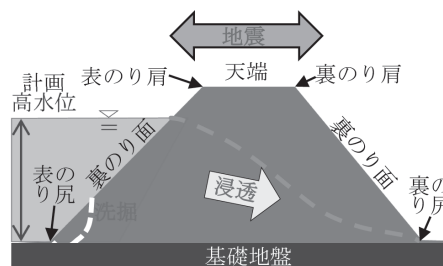
図1は、堤防の上部を開削した時の様子を写したものである。このように、堤体内部の土質は均一でなく、シルトや微細砂が複雑に混在している様子が伺える。また、図中には、3つの築堤年代も書かれているが、M44年以降（図中太実線）と比べて、S24年以降では堤防高さを大きく（嵩上げ）すると共に、裏のり面（川裏）側に幅を大きく（拡幅）している。

2.2 河川堤防の設計上の考え方

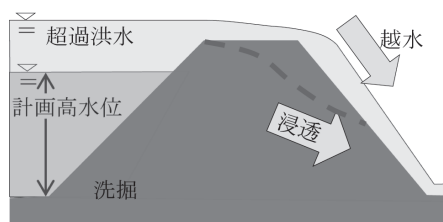
河川堤防は、図2(a)に示すように、「計画高水位以下の水位の流水の通常作用（浸透、洗掘）に対して安全な構造」であるように設計される^{5), 6)}。この計画高水位とは、河川の計画上の流量（計画高水流量）が、河川改修後の河道断面（計画断面）を流下する時の水位であり、設計上の基準水位となっている。また、地震に対しては、「平時時の地震の作用に対して、地震により壊れても浸水による二次災害を起こさない」ことを原則としている⁵⁾。

堤防は土のみで作るという「土堤の原則」が築堤の基本となっている。この理由としては、主として、以下の6つが挙げられる⁶⁾。

- ①材料の取得が容易である。
- ②工事費用が比較的安価になる。
- ③コンクリート等よりも土の方の材料の劣化が起きにくく、長期間にわたる使用に適している。
- ④基礎地盤が古くからの河川の作用でできているため、長期にわたる堤防の不同沈下が起きやすいが、その修復が容易である。同様に、洪水や地震により被災した場合も復旧は容易である。
- ⑤嵩上げや拡幅などの堤防の改築も容易である。
- ⑥豊かな自然環境を有し、良好な景観や生活環境を創出している。



(a) 現行の堤防設計における外力



(b) 今後必要となる外力

図2 河川堤防に作用する外力の取り扱い

一方、堤防の決壊要因⁷⁾としては、図3に示すように、越水が8割を超えており、洗掘は11%、浸透は5%となっている。この割合はどのような事例を対象とするかで変化するが、越水が顕著であることに変化はない。我が国の河川は大陸の河川と比べて短く、急勾配であるため、洪水の継続時間が長くても数日と非常に短い。そのため、海外の大陸河川と比べて、浸

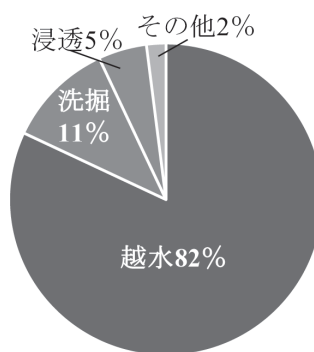


図3 堤防決壊要因⁷⁾

透による決壊の割合は少ない。前述したように、短時間記録的豪雨の発生頻度の増加や台風の巨大化により、計画洪水位を超える洪水（超過洪水）が、全国各地で頻発している。このため、今後は、図2（b）に示すように、計画洪水位を超える洪水（超過洪水）による越水や長時間の浸透という外力に対しても、粘り強く壊れにくい堤防の強化技術が必要となる。

2.3 堤防決壊メカニズム

堤防決壊メカニズムに関する模式図を外力別にまとめたものを図4に示す。ここでは、越水、洗掘、浸透による決壊過程の一例を図示しているが、必ずこのような過程をたどるわけではなく、堤体土質や堤体形状により変化することに注意されたい。また、浸透としては、裏のり面側ののりすべりを対象とし、パイピングによる決壊過程は表示していない。まず、越水に関しては（同図（a））、越流水が裏のり面を流下し、裏のり尻部に向けて流速が増加するため、裏のり尻部付近から侵食が開始する。侵食面は徐々に拡大し、裏のり肩まで到達する。その後、天端下の堤体土がひさし状に侵食され、重みに耐えきれなくなり、天端の一部（図中右側の斜線部分）が崩落する。このような侵

食と天端崩落を繰り返して、侵食面が表のり肩に到達し決壊する。

洗掘については（同図（b））、主流方向の河川流（図面に向かって垂直方向）により、表のり面側が洗掘・侵食される。このような状況は湾曲部の外岸側などのような流れの水衝部などにおいて見られる。表のり面の洗掘が進行すると、その侵食面は徐々に進行する。その後、表のり面が不安定となり、のりすべりが発生する。これらの過程を繰り返して決壊となる。

浸透に関しては（同図（c））、河川水位の上昇により、河川水が堤体内に表のり面側から浸透する。降雨により、雨水が堤体上部から浸透する。これにより、浸潤面が裏のり面に向けて進行する。この状況が継続すると、浸潤面が裏のり面に到達すると共に、上昇する。これに伴って、堤体土の飽和状態の範囲が広がり、不安定化した裏のり面でのりすべりが起こる。その後、侵食面が表のり面側に進行すると、動水勾配が増加するため、上記の現象がより発生しやすくなり、結果として、決壊に至る。

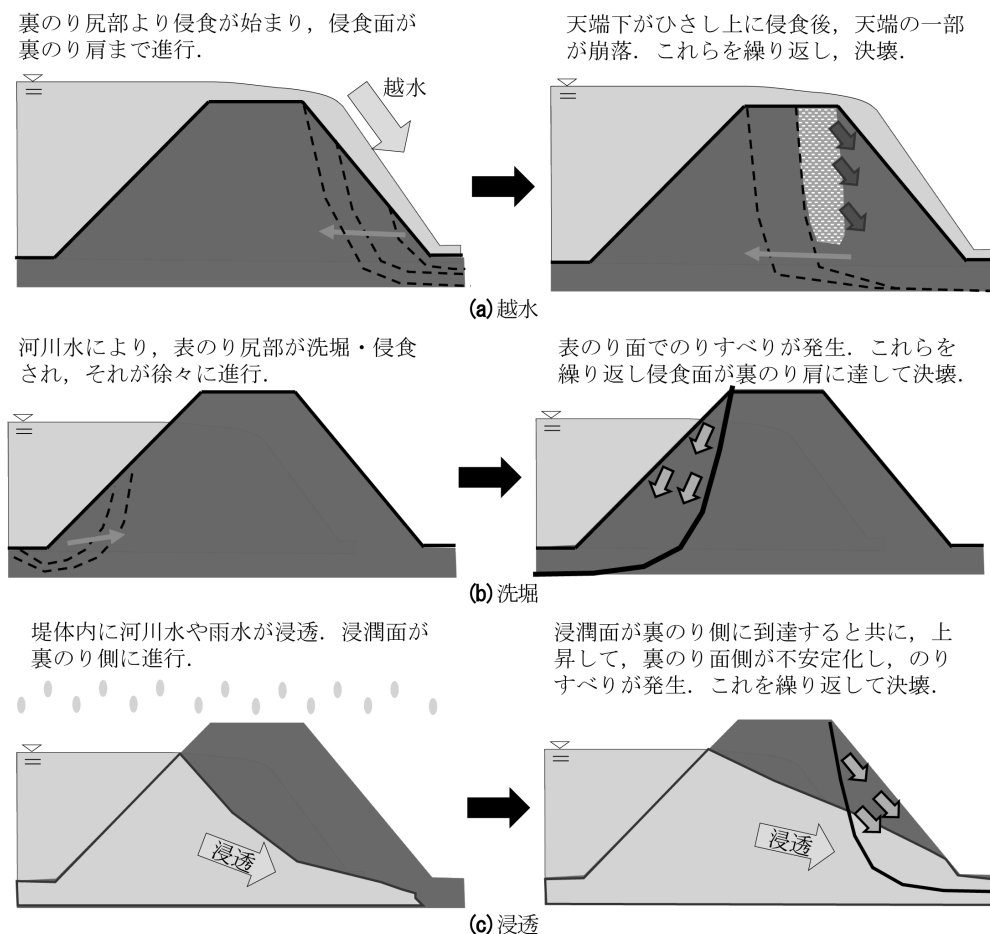


図4 要因別決壊メカニズム

3. 最近の決壊事例

堤防決壊の事例としては、H27年（2015年）関東・東北豪雨時の利根川水系鬼怒川⁸⁾やH28年（2016年）北海道豪雨時の石狩川水系空知川⁹⁾における決壊は、越水を主要因とする。一方、浸透を主因とする堤防決壊がH24年（2012年）九州北部豪雨時の福岡県・矢部川で発生し、この時は計画高水位（H.W.L）を5時間も超えていた¹⁰⁾。以下では、鬼怒川の決壊事例について述べる。

2015年関東・東北豪雨では、鬼怒川流域に線状降水帯が発生し、同年9月9日からの雨量が上流域の日光市などでは600mmを越える豪雨となった。そのため、9月10日には鬼怒川下流域で水位が大きく上昇し、12時50分頃に鬼怒川21k左岸地点（茨城県常総市三坂町地先）にて決壊が発生した。図5は決壊時における斜め航空写真を示す。これは9月10日15時07分に撮影されたものであり、決壊後2時間強経過後の写真である。このように、決壊地点から堤内地側に氾濫流が流れ込んでいる様子が分かる。また、氾濫流は概ね堤防を垂直に横切る流向となっている。氾濫流は広域に広がり、常総市の1/3に相当する40km²も浸水した。また、浸水が引くのに約10日間もか

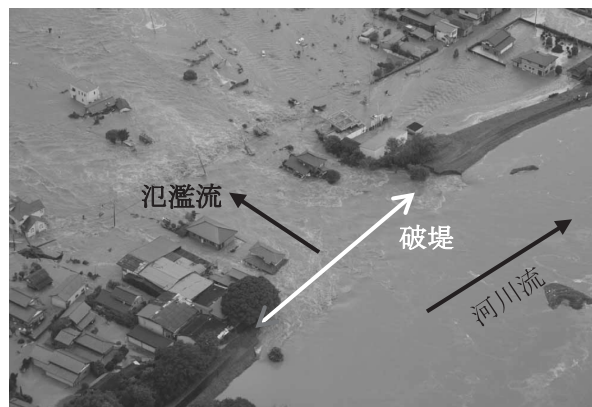


図5 決壊時の斜め航空写真（9月10日15:07撮影、国交省関東地方整備局提供⁸⁾）

かったこと、かつ、自衛隊などに救助された人が4300人と非常に多いことが特徴であった。このように、平地における堤防決壊により、甚大な被害が生じた。

決壊状況を詳細に説明するために、堤防上より撮影された堤防決壊前後の写真を図6に示す。このように、当日11:11には既に越水が生じており、天端から裏のり面を流れ下る様子が伺える。それから約50分後の12:00の時点では、越水の範囲が縦断方向に広がると共に、表のり面側の植生の水没範囲も広がっており、水位が上昇していることが分かる。また、図中の



図6 H27年関東・東北豪雨時における鬼怒川決壊前後の様子（国交省関東地方整備局⁸⁾）

黒矢印のように、二股に分かれた形で越水が生じていた。ほぼ同時刻の 12:04 では、越水が生じていたところの一部で、裏のり尻部で窪んでいる部分が見られ、そこに越流水が周囲から集まっている様子が伺える。これは、裏のり尻部付近において侵食が発生・進行中であるものと考えられる。この部分は主に砂質土であり、粘性土よりも侵食されやすい堤体土質であった。そこから約 45 分後の 12:50 ごろに決壊した。その後の 13:27 では、堤防の決壊幅が広がり、かつ、水位が低下したことが分かる。また、写真手前側を見ると、表のり面側の堤体土や天端を舗装しているアスファルト部分は残っているものの、裏のり面側の堤体土が大きく侵食されている様子が伺える。

このように、越水は約 2 時間程度生じて、その後、決壊した。この時の越流水深は 20 cm である。また、堤防防決壊の拡幅状況としては、破堤開始当初 (12:50) は約 20 m であったが、その後の 13:36 時点では約 80 m に広がり、最終的には 17 時半ごろに破堤幅は 200 m に達した。

4. 堤防強化技術

4.1 一般的な補強工法

現況の河川堤防の強化技術の代表例を図 7 に示す。ここでは、浸透・越水・地震対策に対する工法をそれぞれ明示する。まず、浸透対策には堤体内の浸潤面を下げる必要があるとあり、その工法としては断面拡大工法、ドレーン工法、表のり面被覆工法が挙げられる¹¹⁾。断面拡大工法は、堤体断面を表・裏のり面側に拡大することで、平均的な動水勾配（浸潤面の傾きに相当）を減少させる。合わせて、のり面の勾配を緩くすることで、浸透によるのりすべりやパイピングに対する安全性を増加させる。この際に用いる堤体材料としては、表のり面では粘性土等の難透水性材料、裏のり面では砂質土などの透水性材料を用いることが推奨される。これは、表のり面では、河川水からの浸透を極力防ぎ、かつ、裏のり面では堤体内に浸透した水を排水するためである。ドレーン工法に関しては、浸透水が一番集まりやすい裏のり尻に透水性の高い材料（礫など）を設置して、浸透水を速やかに排水する。表のり面被覆工法については、難透水性の被覆材料を表のり面に設置することで、表のり面からの浸透を抑制する、これらの工法は、浸潤面を低下させ浸透に対する安全性を増加させている。これらの工法のうち断面拡大工法は最も代表的な工法であり、長い期間にわたり嵩上げ・拡幅を繰り返してきた築堤の歴史に合致している。そのため、浸透対策を考えるとときは、断面拡大工法が基本であり、現在、首都圏氾濫区域の堤防

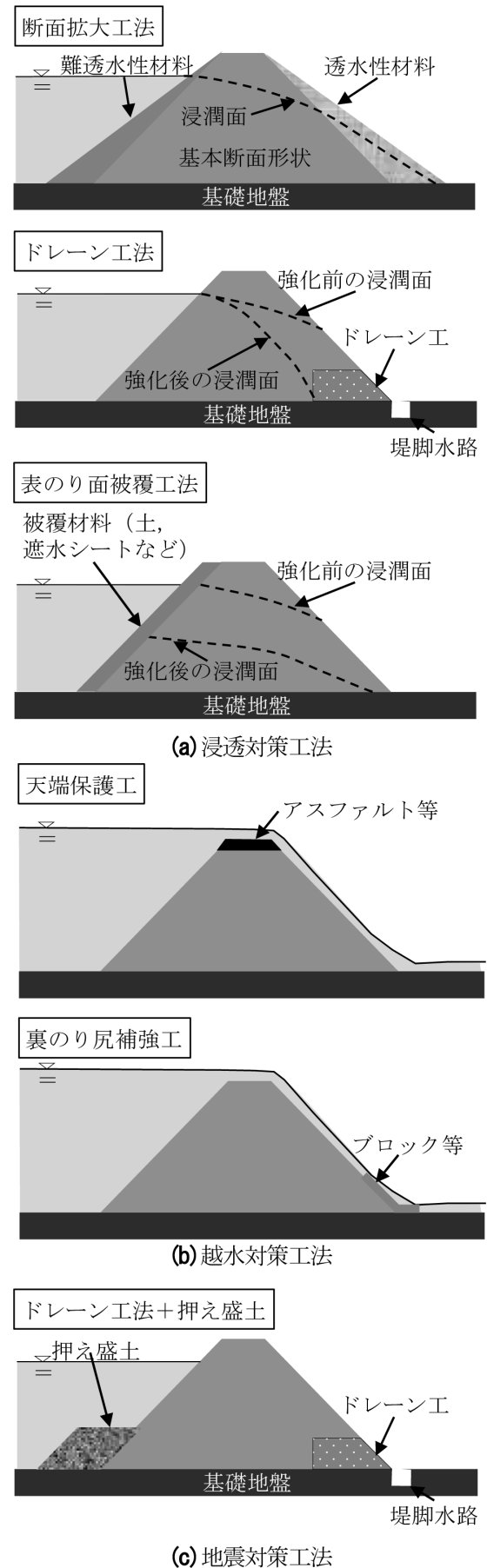


図 7 一般的な堤防強化技術の代表例

強化対策として、裏のり面勾配を通常2～3割のところを7割に拡大する整備が進められている¹²⁾。なお、浸透安全性確保に必要な堤体断面確保が難しい場合に、ドレーン工法や表のり面被覆工法等が適用される。

次に越水対策として、堤体土が越流水に晒されると侵食が顕著となるので、堤体表面を何らかの材料でカバーする必要がある。その中で、コストをかけない簡易的なものとして、天端と裏のり尻の補強工法が挙げられる¹³⁾。アスファルトなどで天端を保護することで、裏のり肩部から表のり肩にかけた天端崩落の進行を遅らせることが可能となる。また、越流水の流速が最大となる裏のり尻部をブロック等で保護することにより、のり尻部の深掘れを抑制し、裏のり面全体の侵食の進行を遅らすことができる。これらの補強工法により、決壊までの時間を少しでも引き延ばすことが可能である。ただし、その他の工法も含めて、越水に対して完全に決壊を防ぐことは難しいことに留意された。

さらに地震対策としては、基礎地盤や堤体内の液状化を抑制する必要がある。近年クローズアップされてきた堤体の液状化プロセスの一つとしては、軟弱な地盤(粘性土)上にできた砂質土の堤体がある場合、浸透などにより滞留した水が堤体内の残ると地震動により液状化が発生し、堤体の亀裂や天端沈下などが発生する。そのため、地震前の堤体内水位を低下させるためやのり尻安定化のためにドレーン工法の設置が有効である。のり尻安定化には、他には押え盛土も有用である¹⁴⁾。

4.2 著者らの取り組み

我が国では、土堤の原則に従い、土のみを堤体材料とし、断面拡大工法により堤防を補強する「均一型堤防」が一般に多い²⁾。土堤の原則は施工面やコスト面、維持管理面に優れ、半自然物である堤防には合理的と考えられるが、土堤のみでは越水により容易に侵食・崩壊してしまう。そのため、海外の築堤事例のように、土以外の様々な人工材料も用いた「複合型堤防」^{2), 15)}が堤防の耐越水性・耐浸透性・耐震性強化に大きく寄与するものと期待される。

そこで、著者らは、耐越水性・耐浸透性・耐震性を兼ね備えた新しい複合型堤防^{16)～18)}を開発している。これは、浸透対策であるドレーン工法と越水・地震対策に有用なジオシンセティクス(GRS)補強土工法¹⁹⁾を融合したものである。具体的には、図8に示すように、裏のり面に層状ドレーン工を敷設しつつ、堤体表面をカバーする被覆工とドレーン工を、ジオグリッドを介して堤体土と一体化する、という薄層ド

レーン強化堤防(Laminar Drain Reinforced Levee, LDR堤防)である¹⁶⁾。ここでは、透水性の高い碎石をドレーン材として巻込んでジオグリッドを敷設し、堤体材料とドレーン材の間にフィルターとして不織布を設けた。これにより、以下の効果が期待できる。

- ①越水時の侵食を防止するための被覆工と堤体土の間に、砂利によるドレーン(排水)層を設け、裏のり面を排水・排気構造とする。この排水構造により堤体内の浸潤面を低下させると共に、被覆工の安定化を図る。
- ②ドレーン層と被覆工を堤体土内に敷設されたジオグリッドにより一体化して、それらの流出を抑制する。
- ③堤体土とドレーン層の間にフィルター材として設置した不織布により、堤体材料の吸出し防止効果が向上する。

LDR堤防の性能を調べるために、大型水路を用いた越水・浸透実験や、地震・洪水の複合災害用実験水路を用いて検証実験を行っている。紙面の都合上、その結果は省略するが、詳細は倉上ら^{16)～18)}を参照されたい。

5. おわりに

本報では、河川堤防の概要や設計上の考え方、最近の決壊事例、堤防強化技術について取りまとめた。2.でも記述したように、河川堤防は半自然物であり、歴史的構造物であるなど、一般的な社会インフラ施設と異なる部分が多々存在する。一方で、我が国では河川氾濫域に人口の50%、資産の75%が集中していると言われ、一度堤防が決壊すると甚大な被害が発生する。そのため、堤防ならではの特殊な状況を把握しつつ、洪水被害を最小限に食い止める工夫がこれまでも行われているが、今後も継続していく必要がある。特に、今後懸念される洪水外力の増大や、地震・洪水の同時期発生などへの適応策を、河川堤防を含めた河川整備として検討することが重要となる。また、リスク管理の観点から、堤防決壊リスクやそれに伴う洪水氾濫被害リスクの精緻な評価技術の開発と社会実装が求められており、今後の大きな課題である。

謝辞

本研究におけるLDR堤防の技術開発は、科学研究費補助金・基盤研究(A)(研究代表者：二瓶泰雄)によって実施された。また、国交省関東地方整備局江戸川河川事務所には、堤防開削状況の視察の機会を設けて頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します

参 考 文 献

- 1) 二瓶泰雄：近年の水害の変遷と洪水氾濫調査・解析・越流対策，基礎工，43-6，pp.41-44（2015）
- 2) 中島秀雄：図説 河川堤防，pp.1-232，技報堂出版（2003）
- 3) 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）
- 4) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課：堤防等河川管理施設の点検結果評価要領 参考資料，http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kasen/pdf/08_teibou_tenkenkekka_sankou.pdf.
- 5) （社）日本河川協会編：改訂新版建設省河川砂防技術基準（案）同解説 設計編 [I]，pp.3-30（1997）
- 6) （財）国土技術研究センター編：改定 解説・河川管理施設等構造令，pp.103-164，技法堂出版（2000）
- 7) 吉川勝秀（編著）：河川堤防学 新しい河川工学，pp.1-278，技報堂出版（2008）
- 8) 鬼怒川堤防調査委員会：鬼怒川堤防調査委員会報告書，http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000643703.pdf.
- 9) 空知川堤防調査委員会：空知川堤防調査委員会報告書.
- 10) 矢部川堤防調査委員会：矢部川堤防調査委員会報告書，http://www.qsr.mlit.go.jp/chikugo/site_files/file/torikumi/01-plan_course/tyosa/saisyuhoukokusyo.pdf.
- 11) （独法）土木研究所 地質・地盤研究グループ土質・振動チーム：河川堤防の浸透に対する照査・設計のポイント，pp.1-66（2013）
- 12) 国土交通省関東地方整備局：第4回事業評価監視委員会資料：利根川・江戸川直轄河川改修事業（2014）
- 13) 国土交通省水管理・国土保全局：水防災意識社会 再構築 ビジョン，<http://www.mlit.go.jp/river/mizubousaivision/pdf/vision.pdf>.
- 14) （国研）土木研究所 地質・地盤研究グループ土質・振動チーム：河川堤防の液状化対策の手引き，土木研究所資料，4332，pp.1-174（2016）
- 15) Ciria : The International Levee Handbook, pp.1-1332（2013）
- 16) 倉上由貴，二瓶泰雄，森田麻友，菊池喜昭：耐越水性・耐浸透性を兼ね備えた薄層ドレーン強化堤防の提案，ジオシンセティックス論文集，31，pp.191-198（2016）
- 17) 倉上由貴，浅野友里，篠原麻太郎，二瓶泰雄，成島一輝，町田陽子，桜庭拓也，菊池喜昭：ドレーン工の配置条件による堤体内の浸潤面・浸透安定性の変化，土木学会論文集 B1（水工学），73-4，pp. I_1333-I_1338（2017）
- 18) 倉上由貴，二瓶泰雄，安井智哉，桜庭拓也，佐藤佑太，入江美月：地震・洪水複合災害用実験水路を用いた浸透条件下の堤防の耐震性に関する基礎的研究，土木学会論文集 B1（水工学），74（2018）（印刷中）
- 19) Tatsuoka, F., M. Tateyama, T. Uchimura and J. Koseki: Geosynthetic-reinforced soil retaining walls as important permanent structures, 1996-1997 Mercer Lecture, *Geosynthetic International*, 4-2, pp.81-136（1997）