

博士論文

河川堤防の被災特性を踏まえた設計及び維持管理に関する研究

A Study of the Design and Maintenance of River Levees Based on Damage Characteristics

2024年9月

佐古 俊介

山口大学大学院創成科学研究科

目次

1. 序論	1-1
1.1. 概要	1-1
1.2. 論文の構成と各章の概要	1-1
2. 我が国の堤防の歴史と設計	2-1
2.1. 河川堤防の歴史	2-1
2.1.1. 明治以前の河川堤防.....	2-1
2.1.2. 明治以降の河川堤防.....	2-1
2.2. 河川堤防の特徴	2-1
2.2.1. 複雑な基礎地盤構造と土質構造.....	2-1
2.2.2. 土質の不均質性.....	2-1
2.2.3. 線状構造物.....	2-1
2.3. 河川堤防の設計基準の変遷	2-1
2.3.1. 設計基準の変遷の概要.....	2-1
2.3.2. 形状規程.....	2-1
2.4. 現在の設計基準の考え方	2-1
2.4.1. 性能規定の導入の経緯.....	2-1
2.4.2. 安全性照査と質的整備.....	2-1
2.4.3. 現在の堤防設計.....	2-1
2.4.4. 堤防に求められる機能と設計に反映すべき事項.....	2-1
2.5. 河川堤防の維持管理基準の変遷	2-1
2.5.1. 堤防の維持管理に関する基準類の概要.....	2-1
2.5.2. 河川堤防の点検・評価.....	2-1
2.6. まとめ	2-1
2.6.1. 河川堤防の特徴.....	2-1
2.6.2. 河川堤防の設計の変遷.....	2-1
2.6.3. 堤防の維持管理.....	2-1
3. 堤防の被災の分析	3-1
3.1. 堤防の被災プロセスと代表的被災事例	3-1
3.1.1. 堤防被災の代表的事例.....	3-1
3.1.2. 越水による被災プロセス.....	3-1
3.1.3. 浸透による被災プロセス.....	3-1
3.1.4. 侵食による被災プロセス.....	3-1
3.1.5. 地震による被災プロセス.....	3-1

3.1.6.	樋管周りの被災プロセス	3-1
3.2.	利根川の堤防被災（堤体とパイピング）	3-1
3.2.1.	被災の概要	3-1
3.2.2.	被災箇所の調査	3-1
3.2.3.	被災のメカニズム推定	3-23
3.3.	江の川の堤防被災（パイピング）	3-23
3.3.1.	被災の概要	3-23
3.3.2.	被災箇所の調査	3-23
3.3.3.	解析結果	3-23
3.3.4.	被災のメカニズム推定	3-23
3.4.	まとめ	3-23
4.	堤防の維持管理・観測	4-1
4.1.	はじめに	4-1
4.2.	堤防管理において必要とされる情報	4-1
4.2.1.	必要とされる情報	4-1
4.2.2.	各変状項目の補修や監視に求められる時空間スケールの整理	4-1
4.3.	現状の堤防管理と課題	4-1
4.3.1.	現状の堤防管理	4-1
4.3.2.	現状の堤防管理における課題	4-1
4.3.3.	計測技術を用いた堤防管理・観測の必要性	4-1
4.4.	計測技術の河川堤防管理への活用	4-1
4.4.1.	河川堤防の管理に活用される計測技術の概要	4-1
4.4.2.	点検項目に対して活用が想定される計測技術	4-1
4.5.	堤防の維持管理における計測技術の活用	4-1
4.5.1.	堤体内水位計を活用した事例	4-1
4.5.2.	人工衛星 SAR を用いた堤防観測	4-1
4.6.	まとめ	4-1
5.	被災事例の分析を踏まえた堤防の設計と維持管理の高度化	5-1
5.1.	堤防の設計	5-1
5.1.1.	浸透に対する堤防の設計の現状と課題	5-1
5.1.2.	実河川における被災分析から得られた成果	5-1
5.2.	計測・測量技術を用いた堤防の予防保全的な管理のあり方	5-1
5.2.1.	堤防の維持管理の現状と課題	5-1
5.2.2.	実河川における観測から得られた成果	5-1
5.3.	設計と維持管理の高度化	5-1

6. 結論6-1

1. 序論

1.1. 概要

(1) 背景

河川堤防は、住民の生命と資産を洪水から防御する極めて重要な防災構造物であるが、その多くは、古くから逐次強化を重ねてきた長い治水の歴史の産物であり、その構造は主に実際に発生した被災などの経験に基づいて定められてきたもので、構造物の破壊過程を定量的に検討して設計されてきているものではなかった。そのような堤防に対して、近年は、堤防に求められる機能について明確にした上で、それぞれの機能毎の堤防の安全性を照査する方法、すなわち設計法が確立され、所要の安全性が確保されていない区間に対して堤防強化が図られるようになってきた。

一方で、我が国の堤防で用いられている設計法については、十分に確立された技術的知見であるとは必ずしも言えず、未解明な部分が残されていることから、モニタリングを並行して実施することにより堤防の安全性の向上を図ることが重要であるとされている¹⁾。

堤防の設計法は、「河川砂防技術基準 設計編（平成 9 年（1999 年）5 月策定，令和元年（2019 年）7 月改定 国土交通省水管理・国土保全局）」（以下、「設計編」）に、堤防の維持管理法は、「河川砂防技術基準 維持管理編（河川編）（平成 23 年（2011 年）5 月策定，令和 3 年（2021 年）10 月改定 国土交通省水管理・国土保全局）」（以下、「維持管理編」）に、それぞれ標準的な方法が示されているが、「設計編」においては、「（中略）実現象を踏まえた堤防の破壊及び変形メカニズムを反映した解析手法等，更なる研究や技術開発に取り組み，それらによる知見の蓄積を踏まえ，設計及び強化に当たって活用可能な技術を積極的に取り込んでいくことが望ましい。」²⁾ことが推奨されており，被災等における実現象を踏まえて堤防の設計方法の高度化を図っていくことの必要性が示されている。また，「維持管理編」においては，点検方法として「河道及び河川管理施設の点検は，（中略）徒歩等による目視その他適切な方法により実施するものとする。」³⁾とされる一方で，堤防等河川管理施設の点検における新たな計測技術の試行や開発，活用が例示されるとともに，技術開発の必要性が示されている。

(2) 目的

堤防の設計を適切におこなうためには，堤防の浸透上問題となる土質構造をより正確に把握し，調査や照査を行う堤防断面を正確に把握することが，一手法として考えられるが，そのためには調査にかかるコストが増大する等の課題がある。そこで，本研究では，浸透上問題となる土質構造のより効率的・効果的な把握に繋がる知見を得ることを目的に，浸透を原因として被災した利根川と江の川の実際の被災事例の分析を行った。

また，目視点検以外の新技術によって，堤防の効率的な維持管理手法を行うことを目的として，今後活用が期待される計測技術（堤体内水位計，衛星 SAR）を用いて実際の被災箇所等に対する計測を行い，堤防の変状把握に計測技術を活用することの可能性について研究を行った。

最後に，上述の研究を踏まえ，堤防の設計や維持管理を高度化するにあたり，被災事例を用いることの重要性和今後の展望について示した。

1.2. 論文の構成と各章の概要

本論文の構成と各章の概要について以下に示す。

構成としては、2章で我が国の堤防の歴史と、設計や維持管理技術の概要についてまとめ、3章で実際の被災事例を用いた被災原因の分析、4章で実際の被災箇所に対する計測技術の活用について示し、これらを取りまとめて、5章で、被災事例の分析を踏まえた堤防の設計と維持管理の高度化について論じた。

まず、2章 我が国の堤防の歴史と設計では、我が国の堤防の歴史と、設計や維持管理の技術の変遷についてまとめた。

我が国の堤防は古くより、経験した洪水に対して安全な形状を定めることで設計を行ってきていることから、本論文では、明治以前と、欧米の近代技術の導入を図った明治以降に時代を区分し、堤防形状（法勾配、天端幅、余裕高）の視点から堤防の変遷についてまとめた。また、形状を定めることで築堤してきた河川堤防の特徴として、土質構造が複雑であること、それが故に構造物としての不均質性、線状構造物であること等を特徴として有していることについて示した。

また、そのような特徴をもつ構造物の設計法について、国から発出された技術基準類を対象として、「河川管理施設等構造令（昭和51年（1976年）政令199号）」で示された形状規定から「設計編」の性能規定化までの設計方法の変遷についてまとめた。

同様に、堤防の供用後の維持管理方法についても国から発出された技術基準類を対象として、維持管理基準の変遷について取りまとめた。

3章 堤防の被災の分析では、堤防の被災事例と一般的なメカニズム、具体事例に基づく被災原因の分析についてまとめた。

まず、我が国の代表的な堤防被災事例について収集し、被災原因を越水、浸透、侵食、地震、樋門・樋管周辺の4つに分類、それぞれの一般的な被災プロセスについて述べた。

このうち、特に浸透被災に着目し、利根川の被災事例と江の川の被災事例を対象として、被災の概要（被災状況、外力、築堤履歴、地形等）について収集整理するとともに、被災箇所の土質調査結果をもとに、飽和不飽和浸透流解析と円弧すべり解析等を用いて被災メカニズムについて推定、被災原因についての分析を行った。

4章 堤防の維持管理・観測では、計測機器を用いた堤防の維持管理、観測についてまとめた。

堤防の維持管理において必要とされる、浸透、侵食に対する堤防変状の観測について、観測が必要とされる変状項目を時空間的に分類・整理するとともに、現状の堤防管理における課題について、平常時と緊急時に分けて抽出した。

さらに、それらの変状を観測するにあたって活用が期待される最新の計測・測量技術について示し、そのうち、現状は目視点検を行っている浸透に対する堤防の観測に着目して、堤体内水位計、人工衛星 SAR を実堤防の被災箇所等に活用、結果を分析し、実河川における堤防の点検・管理技術への、計測機器の活用の可能性について述べた。

5章 被災事例の分析を踏まえた堤防の設計と維持管理の高度化では、被災事例の分析が、堤防の設計と維持管理の高度化を行う上で重要であることについてまとめた。

堤防に求められる機能のうち浸透機能に着目し、現状の堤防の設計手法と維持管理手法の課題について示した上で、被災の原因分析から、弱点箇所の抽出や堤防のモデル化において、今後設計の精度を上げる上で活用すべき有効な知見が得られることや、被災箇所等に対する計測機器を用いた観測の試行から、計測機器で堤体の変状観測が行える可能性があること、その結果を予防保全的な堤防管理に活用できる可能性があることを考察した。その上で、被災箇所の分析や観測を続けことが、設計や維持管理の技術の高度化に繋がることを示した。

最後に 6 章、結論で、本研究で得られた成果を総括し、被災の分析結果を堤防設計や維持管理に反映することの重要性、今後の展望について示した。

第 1 章 参考文献

- 1) 国土交通省河川局治水課：河川堤防設計指針，平成 14 年 7 月
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局：河川砂防技術技術基準 設計編，令和元年（2019 年）7 月，
第 1 章 河川構造物の設計 第 2 節 堤防，pp6
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局：河川砂防技術技術基準 維持管理編，令和 3 年 10 月，p40

2. 我が国の堤防の歴史と設計

2.1. 河川堤防の歴史

2.1.1. 明治以前の河川堤防

(1) 古代から中世の堤防

日本の河川技術の端緒は、紀元前 300 年頃に中国大陸や朝鮮半島から伝わった水稲耕作の展開と深く結びついている。水稲耕作では水を有効に利用する技術が不可欠であり、そのためには人間が河川に対して能動的に働きかける技術、河川を処理する技術が必要となったものである。

我が国の最初の堤防は、4 世紀に仁徳天皇の詔により淀川左岸に築造した茨田堤（まんだのつつみ）と言われている。茨田堤は、日本書紀によると、仁徳天皇 11 年(323)、天皇の詔により、北の河の澇（こみ、淀川分流からの氾濫）を防ぐために築いたとある¹⁾。茨田堤の工事は、当時の淀川とその分流（古川）に沿って、左岸側（南側）に堤防を築いた大工事であり、大阪府門真市の京阪本線大和田駅近くの堤根神社付近では現在もその姿を見ることができる。

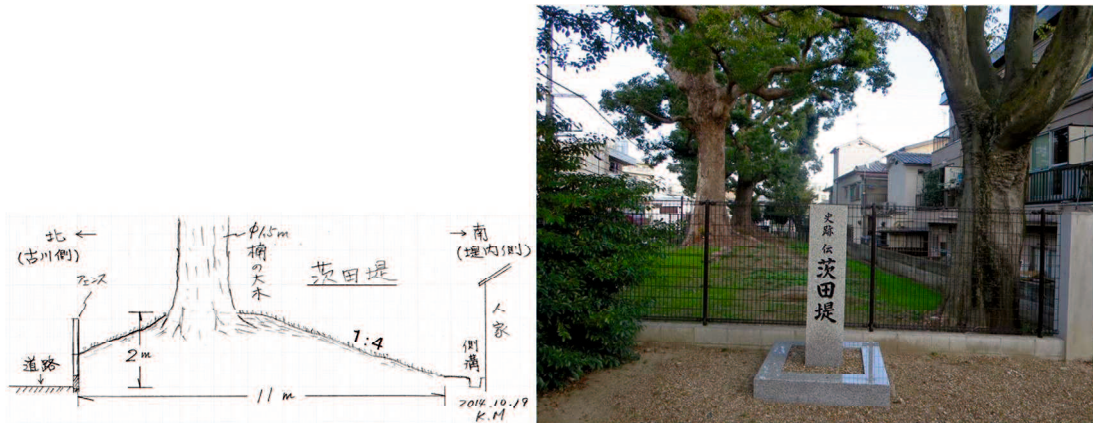


図 2.1.1 茨田堤

その後、我国最初の治水に関する制令とされるのが、大宝元年（701 年）に文武天皇により発布された大宝律令であり、そこには営繕令として堤防の維持管理や補修等に係る制度、費用負担として以下のような記述がある（養老 2 年（718）の養老律令によるものであるが、後の元正天皇が発布した養老律令の営繕令は、大宝律令の内容と同じものされている。なお、大宝律令の原文はほとんど現存しない）。²⁾

- ・ 大河川の堤防は国司、郡司が巡視（管理）すること。
- ・ 修築が必要な場合は、秋の収穫後に施工すること。
- ・ 修理の仕事量の大小を計算して、堤防付近に住む人から遠くに住む人の順に動員すること。
- ・ 大規模な破堤が生じた場合は、時期を問わず直ちに修築すること、もし、500 人以上の人夫を要するときは報告すること。しかし、もっと急を要する場合は軍団の兵を用いることを許す。使役する日数は 5 日以内と定める。
- ・ 堤防の内外および上に、榎、柳、雑木を植栽し、堤防を強くし、堰利用に使用すること。

その後、公地公民制が弱体化し、土地の私有が復活して荘園が発達するとともに、用水も国家管理から離れるようになり、大規模な治水工事は衰退して地先単位の洪水防御が中心となる。その代表的なものが「畑囲堤」である。

(2) 鎌倉から戦国期の堤防

応仁の乱(1467～1477)を契機として鎌倉幕府の統制力が弱まると、戦国大名が台頭し、自領の支配力を強めるようになり、灌漑や治水施設の整備も戦国大名に委ねられることとなった³⁾。当時の河川工事の目的は治水・利水、軍事(自国の防衛ライン)、運輸であり、流量という概念は確立しておらず、堤防高は既往洪水の水位を参考に決定した。

戦国大名の代表的な治水工事を表 2.1.1 に示すが、木曾川左岸の「御囲堤」、緑川(熊本県)の「清正堤」に代表されるように、片岸の堤防等、被害の軽減化を図るための差別化が実施されていた他、扇状地河川(急流河川)では越水より侵食による破堤被害が多かったため、領国内の河川の特性に応じた固有の河岸侵食防止工が発達した。甲州の牛類(地方凡例録, 1794)、肥後の切石積みを用いた水制や堤防が代表的なものとされている。

表 2.1.1 戦国大名の代表的な治水工事

戦国大名	対象河川等	河川技術
武田信玄	釜無川等	・可動の付替, 合流点の固定 ・信玄堤, 霞堤 ・水制, 石張り, 蛇籠, 竹木植栽
北条氏	荒川等	・熊谷堤, 箕田堤
豊臣秀吉	宇治川	・可動の付替等
加藤清正	菊池川, 緑川, 白川等	・放水路, 河口締切り, 可動の直線化, 遊水池 ・清正堤(連続堤), 大名塘, 海岸堤防 ・石造り水制 ・井樋, 水門

(3) 江戸時代

江戸時代に入り、幕藩体制が確立した後の河川改修工事は、軍事を目的としたものは抑制され、主として土地生産力の増大を目的とする治水、利水工事、ならびに舟運路の確保を目的とする工事が実施されるようになる。この頃には、日本の総人口は 3,000 万人近くに達しており、また幕藩体制の土台が農業(農地, 農民)であったことから氾濫平野の開発は急速に進み、17 世紀中頃までは、大河川の中下流域での治水・利水工事は大きく進んだ。一方で、これらの工事は氾濫域の人口集中を招き、結果洪水被害が頻発、その対応が藩の財政を圧迫するようになる。

徳川吉宗による享保の改革(1720～1730)では、緊縮財政政策のもと、過大な川除工事(河川工事)を行わないよう技術や積算の標準化、体系化が行われ、これが「幕府法(布令)」あるいは「地方書」等として整備された。

堤防に関しては、江戸時代の河除け工事(河川工事)の主な図書であった地方竹馬集(1689年)、地方凡例録(1794年)、堤防溝瀆志等^{4), 5)}に形状が示されており、表 2.1.2 にまとめるが、堤防ののり勾配は 18 世紀初頭(正徳期)までと、享保期(吉宗の時代)、および寛政年間以降では異なり、新しい時期ほど急な勾配となっている。のり勾配が急になっていった主

な原因は幕府財政の逼迫であったとされ⁴⁾、特に寛政期に入ると幕府の緊縮政策はより厳しいものとなり、寛政の改革(松平定信)により堤防断面は益々縮小されることになった。

表 2.1.2 江戸時代の堤防のり勾配の変遷

時 期	定 法		備 考	出 典
	表のり	裏のり		
～正徳期	1:1.5	1:2.0	・表 1:1.0, 裏 1:1.5 の例もある. ・小川では今少し急 ・石堤, 砂堤などは, 表 1:1.2, 裏 1:1.3 の例もある	地方竹馬集 (元禄 2 年 (1968))
享保期～	1:1.0	1:1.3	・大きな堤防では, 表 1:1.2, 裏 1:1.4 ~1:1.5	地方凡例録 (寛政 6 年 (1794))
寛政 ～幕末	土堤 1:1.0 砂堤 1:1.5 石堤 1:0.5		・堤防を丈夫にするには, 土堤 1:1.2~1:1.3, 砂堤 1:1.7~1:1.8, 石堤 1:1.0 であるが, 坪数が多くなるので大体定法	

2.1.2. 明治以降の河川堤防

(1) 明治期から大正期

明治 3 年(1870), 民部省土木司から「治水策要領」なる建策が提出された。

技術的内容では, 治水術の要点として, 川を浚渫する, 堤防を修築する, 渠を開く, 砂州を疎開する, 土砂を防止する, の 5 点を挙げ, 堤防については水揚, 細竹を植え, 堤脚での耕作を禁じ, また裏のり面にはスギの類を植え, その成長を待つて治河要に用いるとしている。

一方, 明治新政府は, 欧米の近代技術の導入を図り, 河川ではオランダから河川技術者を雇い入れる。その代表的な技術者がファン・ドールン(滞在期間: 明治 5~13 年, 1872~1880)とヨハネス・デレーケ(同: 明治 6~36 年, 1873~1903 頃)である。

ファン・ドールンは, 来日直後の明治 6 年(1873), 「治水総論」をまとめ, オランダ技術者が日本において行う河川改修の考え方や技術手段の概要を提示した。「治水総論」の主な内容は, ①河道の平面計画, ②平面形状の制御, ③高水敷の幅, ④堤防の形状等に関することである。

明治中期までの河川改修工事は地方費によっていたが, 高水工事が本格的になると地方単独では支えきれず, 明治 23 年(1890)には治水事業の促進と国家負担増しを求める建議がなされ, 明治 29 年(1896)に河川法が制定された。明治 30 年(1897)には, 砂防法と森林法も制定され, ここに治山・治水に関する法令が整備された。この河川法は, ①適用河川, ②管理主体, ③直轄事業, ④費用負担等を内容とするが, 治水に重点が置かれていた⁶⁾ ことが大きな特徴である。

河川法の制定後, 政府は 10 河川(利根川, 庄川, 九頭竜川, 遠賀川, 淀川, 信濃川, 吉野川, 高梁川, 筑後川, 渡良瀬川)の直轄化⁷⁾に踏み切り, フランス留学から帰国した沖野忠雄を中心として, それぞれ改修計画が策定され²⁾, 全国の河川改修が国家予算のもとで始まった。河道計画の技術的な内容等はそれ以前と大きくは変わっていないが, 改修計画の特徴を整理すると次のとおりである。

- ・日本人技術者の手で策定された計画

- ・治水第一主義の計画
- ・近代技術観に立脚した計画
- ・新たな建設素材、機械を導入した計画

なお、この時期、北海道では第一期拓殖計画の根幹事業として石狩川の改修に着手している（明治 43 年，1910）。

その後、明治 43 年 8 月の台風により生じた洪水は、東海から関東、東北地方に明治期最大の被害をもたらした。このため、翌年には臨時治水調査会が設置され、全国河川の治水計画を確立することになる。ここで直轄河川事業の対象河川は 65 河川と大幅に増えたが、財政上の理由から一期を 20 河川、二期を 45 河川に分け、二期は一期の進捗をみて着手することとした⁸⁾。このようにして高水事業の全国展開が始まった（第一次治水計画）。

大正時代に入ると、土木技術者は著しく増大し、大正 3 年（1914）に土木学会が創立された。また、大正 11 年（1922）、内務省に水理試験所が設けられ、水理的な調査研究が精力的に進められた。

大正時代の河川技術の特徴は、河川工学書が出現したことである。これは、明治時代に欧米の科学技術を学んだ技術者、あるいは大学の教官が、自身の技術の実践も含めて著したもので、長崎敏音の「河工学」（大正元年，1912）、岡崎文吉の「治水」（大正 4 年，1915）、君島八郎の「河海工学第三篇川工」（大正 10 年，1921）に代表される。

明治期から大正期にかけての堤防の断面諸元について整理を行った。

裏のり勾配については、「治水総論」で、堤体材料が良質な粘土の場合には 1 : 1.5、その他のものについては 1 : 2 より急にしないこととしており、後者の根拠として植物の生育条件を挙げている。表のり勾配については 1 : 2.5 より緩くすべきとしており、その理由として水勢に抵抗するため記述されている。草の生育を妨げる、暴風時の動揺によって地面が崩れるとの理由で堤防上に大きな木を植えないとしているのは、幕藩体制下に培われた日本の技術と同様である⁹⁾。

一方、大正期の岡崎文吉の「治水」では、大河川と小河川で標準的な勾配を示し、砂等の材料の場合は 1 : 4.0 以上の緩勾配とすること、石材やコンクリートの法腹工を用いる場合は 1 : 1.5~1 : 1.0 の急勾配としてもよいとしており、堤防材料のほか、河川の規模や護岸条件により法勾配の設定を細分している。

次に天端幅については、「治水総論」では堤体材料の土質と道路として利用するか否かを天端幅の決定要因と考えている。前者はおそらく河川水の浸透を念頭に置いていると考えられる。

一方、大正期の岡崎文吉の「治水」では、通例では 1.8m で十分であるが、洪水時に堤内地が湛水した場合、堤防保護のために必要となる材料の運搬は堤防の上で行われることから 3.6m 以上となるとあり、水防活動時の天端幅の必要性に言及している。

また、余裕高については、オランダの技術者ファン・ドールンは、「治水総論」で堤防の高さは高水位より 0.6~0.9m 高くすることとしている。その理由としては単に予防のためとしているのみで、余裕高そのもの（数値）の根拠等は不明である。なお、デレーケはおよそ 30 年間にわたって日本に滞在し、関わった河川改修としては、淀川、桂川、宇治川、木曾川下

流，常願寺川等があるが，常願寺川の改修計画では，急流河川の水位評価の難しさを考慮して堤防余裕高を 1.8m（暫定は 0.9m），天端幅を 7.2～18m と大きくしていることが際立っている。

一方，大正期の岡崎文吉の「治水」では，余裕高は一般的には 0.3m，重要箇所は 0.6～1.2m とし，水衝部は 0.3m 増高することを提案している。また，山間部では中下流より大きく取って 1.2m 以上とするとしており，これは急流であることを想定しているものと考えられる。提案されている数値の根拠，あるいは余裕高を必要とする理由については明確な記述はないが，水衝部あるいは上下流といった河道の特性や，河川の重要度を考慮して余裕高を設定している。

これらを取りまとめると，表 2.1.3 に示すとおりである。

表 2.1.3 「治水総論」の堤防断面諸元

堤防形状		ファン・ドールン 「治水総論」 明治 6 年(1873)		岡崎文吉 「治水」 大正元年(1915)	
		堤防形状	考慮事項	堤防形状	考慮事項
のり勾配	表のり	1:2.5	外力による侵食を踏まえ，堤体土質を考慮	1:2.5～1:4.0 平均 1:3.0（大河川） 1:2.0～1:3.0 平均 1:2.5（小河川） 1:4.0 以上（砂質土等土質劣） 1:1.5～1:2.0（石材法覆工必要） 1:1.0（コンクリート法覆工必要）	外力による侵食を踏まえ，堤体土質と護岸の有無を考慮
	裏のり	1:1.5（良質粘性土） 1:2.0 以上（その他）	植生を考慮，堤体材料により変更	1:2.0（普通） 1:1.5（良質土） 1:2.5～1:4.0（砂質土等土質劣）	洪水時の裏のりすべりを踏まえ，堤体土質を考慮
天端幅		4.8～6m	道路と兼用の有無で変更	1.8～3.6m	水防活動時の天端幅の必要性に言及
堤防高 (余裕高)		高水位+0.6m～0.9m		0.3～1.2m 一般:0.3m 重要箇所:0.9～1.2m (水衝部+0.3m) 山間部:1.2m 以上	0.3m を標準として，重要度や河川特性（水衝部，山間部）により変更

(2) 昭和初期（戦前）

昭和 5 年（1930），日本はアメリカから始まった世界的な恐慌に巻き込まれる。いわゆる昭和恐慌である。大正 10 年（1921）の第二次治水計画，その後の第三次治水計画は，昭和 9 年（1934），昭和 10 年（1935）と引き続いた大水害，ならびに昭和 12 年（1937）からの日中戦争により破綻をきたし，昭和 16 年（1941）以降の戦時体制のもと，河川に対する投資は実質的に急減し，河川は荒廃に向かった。

昭和初期（戦前）の堤防の断面諸元について整理を行った。

のり勾配については，福田次吉の「河川工学」（昭和 8 年，1933）でも，裏法については 1:2.0～1:2.5 であり，築堤土が良質の場合は 1:1.5 の場合もあり，砂質が多い場合は 1:3～1:5 としている。表法については 1:2～1:3 が最も多いとしている。水流に接する箇所は法勾配が緩いほうがよいが，石張等を施工する場合は法長が増すため 1:2 程度とするほうが経済的であるとしており，コスト面を考慮しているのが特徴的である。

宮本（1936）は、裏のりについては 1:1.5~1:2.5、表のりについては 1:2~1:3 を標準的な値として提案しているものの、土質が不良で、堤防高が高く、洪水の継続時間が長く、護岸が施されていない場合には、より緩い勾配とすることを求めている。

天端幅については、福田次吉の「河川工学」（昭和 8 年，1933）では、天端は道路に兼用することがあるため相当の幅が必要であること、特に水防を行うには十分の幅がある方がよいとしており、一般に 2.5~8m であるとしている。

宮本（1936）も、天端幅の決定要因として道路兼用と水防活動のし易さを挙げており、普通で 4~8m としている。

余裕高については、福田次吉の「河川工学」（昭和 8 年，1933）には余裕高の標準的な値が示されている。一般的には 1.5m とするが、重要箇所では 1.8m，中小河川では 0.9~1.2m（稀に 0.6m）と比較的大きな値を提案する。福田も河川の重要度を考慮している。

宮本武之輔の「治水工学」（昭和 11 年，1936）には、余裕高の必要理由について、

- ・ 越水による破堤の防止
- ・ 将来における高水位の上昇に備えるもの

との記述があり、初めて具体的な概念規定を提示した。また、流量に応じた余裕高の標準的な値（2,000m³/s 以上の河川は 1.5m）を示すとともに、特別な急流河川については大きな余裕高（1.8~2.0m）をとるとしている。中小河川については、0.9~1.2m が標準と考えられており、全体としては計画流量と河床勾配に対応した標準値を提案したものとなっている。

流量に対応して余裕高を決めるという考え方は、その後の「建設省河川砂防技術基準」（昭和 33 年，1958）あるいは「河川管理施設等構造令」（昭和 51 年，1976）にも受け継がれる。

表 2.1.4 は、戦前の代表的な河川技術書のうち、堤防に関する考え方について整理したものであるが、福田は河川の重要度や規模に応じて定性的に高さを決定していたが、富永は流量に応じた余裕高を提案している。また福田のものには余盛に関する記述がある。のり勾配については、福田と宮本は表のりを緩く、裏のりを急とすることとしており、これは明治時代から受け継がれた技術といえる。

表 2.1.4 戦前の代表的な河川技術書の堤防断面の考え方

堤防形状		福田次吉 「河川工学」 昭和 8 年(1933)	宮本武之輔 「河川工学」 昭和 11 年(1936)	富永正義 「河川」 昭和 17 年(1942)
のり勾配	表のり	1:2~1:3 特別な場合：1:3~1:5	1:2~1:3 特別な場合：1:4~1:6	1:2.0
	裏のり	1:1.5~1:2.5 特別な場合：1:3~1:5	同左	直轄：1:2，1:3 中小河川：1:1.5~2
天端幅		一般のもの:6~7m 重要なもの:8m 小河川:3~5m	普通:4~8m 特殊:10~15m 小河川:3m 内外	流量大，勾配急 8m 以上 普通の大河川 6~7m
堤防高 (余裕高)		相当な箇所:1.5m 重要な箇所:1.8m 小河川:0.9m~1.2m 希に 0.6m	(流量) 2000m ³ /s 以上:1.5m 特別な急流河川: 1.8m~2.0m 小河川:0.9m~1.2m 希に:0.6m	(流量) 300m ³ /s 以下:1.0m 2000m ³ /s まで:1.2m 2000m ³ /s 以上:1.5m 流量極めて大，水面勾配極めて急:2.0m
余盛		堤防高の 1/8~1/12		

(3) 昭和 20 年以降（戦後）

昭和 20 年（1945）に敗戦を迎え、内務省は建設省となった（昭和 22 年，1947）. 昭和 24 年（1949）には「水防法」が制定され（昭和 30 年，33 年に大幅改正），昭和 26 年（1951）には公共土木施設災害復旧事業費国庫負担法が成立する. 戦後の昭和 20 年（1945）から 34 年（1959）にかけての 15 年間は，台風や前線豪雨により大規模な水害が毎年のように発生しており，このような動きは戦後相次いで生じた大水害に関係したものである. 特に昭和 22 年のカスリーン台風による関東地方を中心とした未曾有の水害は，第一次治水計画（明治改修計画）とそれに続く増補計画の見直しの契機となり，昭和 24 年，治水調査会によって利根川を含む 10 大河川の多目的ダムを含む新たな治水計画が策定された.

河川技術上は昭和 33 年（1958）の「河川砂防技術基準」が制定され，その中で堤防の形状に関して原則条件を次のように記述している.

- ・ 浸潤線が裏のり内側におさまる
- ・ 表のり，裏のりの勾配は，材料の種類に応じ十分安定を保ち得る勾配とする
- ・ 基礎地盤に生ずるせん断応力が土砂のせん断抵抗力を超えないようなのり勾配とする
- ・ 堤体または地盤を通った浸透水の流速あるいは水圧が粒子を流出しない程度小さくする

表 2.1.5 「河川砂防技術基準」(昭和 33 年，1958)の堤防の断面形状に関する記述内容

項目	記述内容
余裕高	流量に応じ，0.6～1.5m
天端幅	直轄河川：4～8m，中小河川：3～5m
のり勾配	1:2～1:3
小段	<p>のり面の決壊や崩落の防止，漏水防止，基礎の安定ならびに水防のため必要に応じ小段を設ける.</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 表小段は計画高水位が地盤上 4～5m 程度以上となる場合，表のり面の決壊を防止し堤脚の安定を図るため（河積の許す場合） ・ 裏小段は浸潤線を考慮して決定するが，水防の観点から幅は 3～4m ・ 河幅の広い遊水池などでは，波除け防止のため計画高水位近くに幅 3～10m 程度の表小段を設ける. ・ 堤防が著しく高い場合は，第 2，第 3 小段を設けるのが適切. ・ 犬走りは官民有地の境界を明確にし，のり面の保護を図るもので，地盤より 0.5m の高さ，幅 1～3m 程度とする.

昭和 30 年頃から，日本経済は高度経済成長期に入り，河川の洪水対策は施設規模を大きくすることに重点が置かれるようになる. 河道を拡幅し，堤防を高くし，断面を大きくし，連続した堤防を築くことで高水を出るだけ河道内にとどめ堤内地に氾濫させないようにし，流水を速やかに海に排水する方針で事業が推進された.

このころの，河川技術に関わる大きな出来事は，①「河川法」の大改正，②「河川管理施設等構造令」の制定，③「建設省河川砂防技術基準」の改訂である.

新しい「河川法」は昭和 39 年（1964）に成立した。そこでは河川管理者は、当該河川の河川工事の実施について基本となる事項を定める、すなわち「工事実施基本計画」の策定を義務付けたことが大きな特徴である。同時に建設省内には河川審議会が設けられ、「工事実施基本計画」の策定にあたっては河川審議会の意見を聴取することとした。

昭和 51 年（1976）には「河川法」の要請に応じて「河川管理施設等構造令」が制定され、河川構造物の標準化が図られた。これは昭和 40 年（1965）から検討が行われていたもので、堤防についても断面形状等が規定され、以後「構造令断面」と称されるようになる。

昭和 20 年以降（戦後）の堤防の断面諸元について整理を行った。

法勾配については、昭和 33 年に制定された「河川砂防技術基準」では、法勾配について普通 1 : 2.0 ~ 1 : 3.0 であるとしつつ、堤防および基礎地盤の土質、浸透水による影響を考慮し、土質力学的安定計算により検定を行うことが望ましいとしており、堤防の質的整備に言及している。

昭和 53 年（1978）、河川管理施設等構造令研究会による『解説・河川管理施設等構造令』によれば、堤防の法勾配は 1 : 2.0 以上の緩勾配でなければならないとし、法勾配の上限値を設けない表現としている。

天端幅については、昭和 33 年に制定された「河川砂防技術基準」では、天端幅について水防作業のほか、堤体の安定、築堤作業における土運搬を考慮するとしており、標準で直轄河川 : 4 ~ 8m、中小河川 : 3 ~ 5m 程度としている。現行の「河川管理施設等構造令」ではこれらに加え、常時の河川巡視に供することを付加している。

余裕高については、昭和 33 年に制定された「河川砂防技術基準」では、余裕高を計画高水流量に応じて決定することが明記された。同基準では、余裕高を計画に対する安全率的なものとした上で、余裕高を必要とする理由を、

- ① 洪水が自然現象に起因し、かつ計算の仮定や方法は完全ではないので、河積には余裕が必要である
- ② 河川は予想以上に堆積を起こすこともあり、これに対する余裕として必要である

とした。そこでは「余裕高は計画に対する余裕である」ことを明言しており、この点が昭和 51 年（1976）制定される『河川管理施設等構造令』と大きく異なる。

昭和 53 年（1978）、河川管理施設等構造令研究会による『解説・河川管理施設等構造令』によれば、堤防が余裕高を必要とする理由を、

- ① 洪水時のうねり、波浪、跳水等による一時的な水位上昇に対し、然るべき余裕が必要
- ② 洪水時の巡視・水防の安全確保、流木等流下物への対応等、種々の要素をカバーするためにも然るべき高さの余裕が必要

とし、「余裕高は堤防の構造上必要とされる高さの余裕であり、計画上の余裕は含まれない」ことを明確にし、余裕高に対する概念規定の大きな変更がなされた。

ただし、それ以前に論じられていた水位上昇要因に関しては、「計画上予想すべき河床変動による水位上昇、湾曲部の水位上昇、水理計算の誤差等は、計画高水位を決定するときに考察されるべきもの」であるとしている。

2.2. 河川堤防の特徴

堤防は河川の洪水に伴う土砂の堆積作用や侵食作用によって自然に形成された基礎地盤上に対して人工的な盛土を行うことにより形成されており、複雑な基礎地盤を持つ。さらに、盛土の多くは、古くから逐次強化を重ねてきた長い治水の歴史の産物であることから、堤体も複雑である。以下に、堤防の特徴と課題について述べる。

2.2.1. 複雑な基礎地盤構造と土質構造

堤防は、長い治水の歴史の中で、嵩上げや拡幅を繰り返してきているのが一般的であるため、その内部構造は極めて複雑である。

以下に、利根川左岸 122.5k の积水水門の改築に伴って堤防断面を開削した例を示すが、もともと自然堤防としてあった粘性土の盛土部 (①) に対して、昭和 22 年以前に粘性土で嵩上げと裏腹付け (②) がなされており、昭和 22 年のカスリーン台風による堤防決壊を受けて立てられた利根川改修改定計画や、それを引き継いで立てられた昭和 40 年の工事実施基本計画により砂質土や粘性土で全体に嵩上げ拡幅 (③) されている。その後、利根川水系工事実施基本計画改定により、さらに嵩上げと拡幅 (④) がなされて、現在の堤防の姿になっている様子が見て取れる。

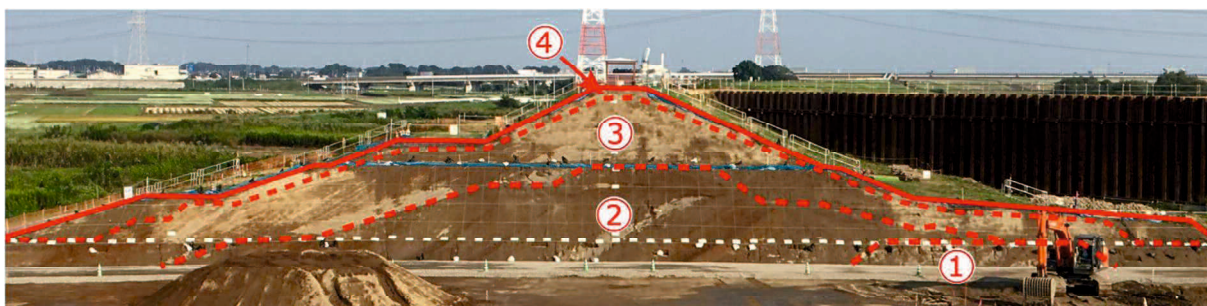


写真 2.2.1 利根川 左岸 125.5K 积水水門新設に伴う開削

また、基礎地盤の地形は、山地、丘陵、台地、扇状地、氾濫平野等の様々な地形に分類され、洪水による河川の氾濫を受けて形成された低地の地形は多用である。以下に治水地形分類図の一例を示すが、堤防法線が位置する地形は、氾濫平野や旧河道、落掘、自然堤防等多用であることが分かる。特に、旧河道や過去の堤防の決壊箇所が洗掘されてできる落掘は、治水上の要注意地形と呼ばれ、これを模式的に示したものが図 2.2.1 である。

透水性地盤において裏のり尻下に粘性土等の難透水層が分布していると、いわゆる行止り地盤を形成し、基礎地盤への浸透水は堤体内に上昇して浸潤面を押し上げ、漏水やすべり破壊が発生しやすくなる。また、裏のり尻近傍の難透水層が薄い場合には、基礎地盤からの漏水やパイピング破壊が発生しやすい。

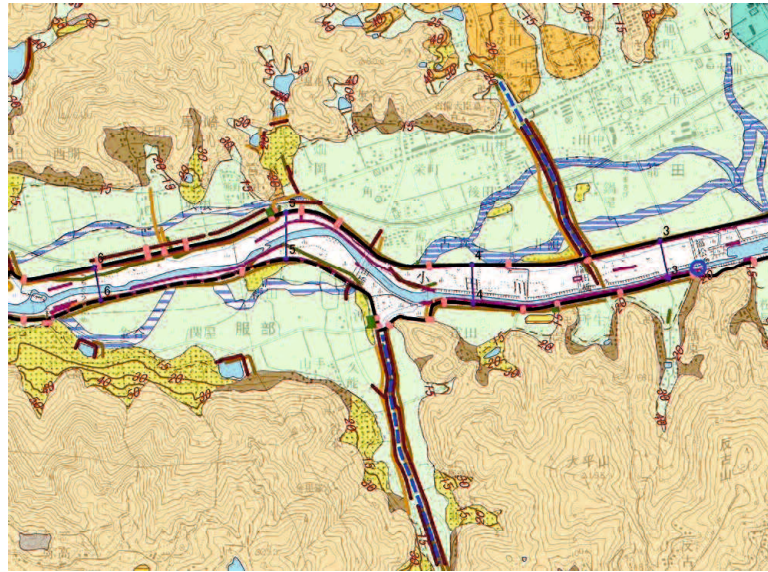


図 2.2.1 治水地形分類図の例

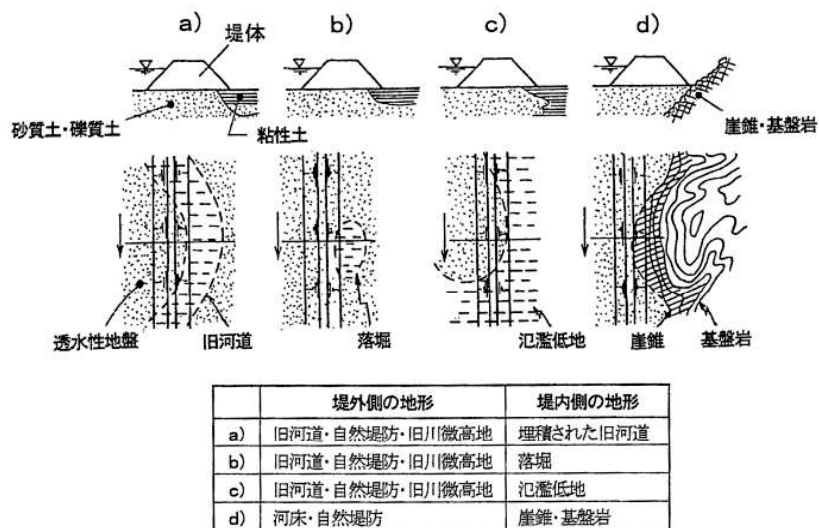


図 2.2.2 浸透が問題となる基礎地盤の土質構成の例¹⁰⁾

2.2.2. 土質の不均質性

河川堤防のもう一つの大きな特徴は、その多くが長い治水の歴史を経て形成されてきたことから、堤体そのものは、洪水による災害を蒙るたびに従来からある堤防を活用して嵩上げや拡幅等の補強が繰返され、現在に至ったものが多く、材料そのものは河道の浚渫土や高水敷の掘削土等の現地発生材料を主体としてきた。したがって、土質（築堤材料）や施工法（締固め方法等）は、その時代の技術力あるいは経済力を反映して様々であり、それぞれ工事が行われた各時代における土工技術を用いて築造されている。明治から大正期においては、モッコによる人力（淀川、利根川等では蒸気機関車など）によって盛土がなされ、その後、大正期から昭和期前半にかけては、トロッコや蒸気機関車からの高撒き、浚渫土砂を直接堤防敷に排出することにより盛土がなされている。また、現在の築堤工事では、ローラーなどの締固め機械による転圧で締固めを行い、締固め度を管理するとともに、段切りによって腹付け盛土の活着を図る施工方法がとられている。

表 2.2.1 各時代における堤防築造法

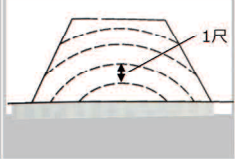


	明治～大正初期	大正～昭和初期	現在
まき出し方法	モッコによる人力 (淀川、利根川等では蒸気機関車など)	・トロッコや蒸気機関車からの高撒き ・浚渫土砂を直接堤防敷に排出	・ブルドーザ ・ダンプトラック等
まき出し(敷ならし)厚さ	1尺(約30cm)	・トロッコ 0.8～1.0m ・小型機関車 1.2～1.5m ・大型機関車 2.0～2.7m	35～45cm (締固め後は30cm以下)
築造法			
締固め	厚さ5寸から1尺(約30cm)ごとに小蛸と足による千本づき	・機関車で撒き出した場合は突固めを要しない ・土羽打ちで法面を締め固める ・水締め	ブルドーザやローラ、ダンパで転圧

図 2.2.2 は堤防開削調査により明らかになった堤体の土質構成の複雑さを示す堤体の一例を示したものである¹⁰⁾。また、図 2.2.3 は、開削調査によって明らかになった既設堤防の土質分類とその工学的な性質を整理した事例であり¹⁰⁾、この図から築堤材料は多くの土質分類の土を含むことや、同一土質分類の土でも工学的な性質に大きなバラツキがあることがわかる¹³⁾。締固め度については、近年の規定では平均で 90%となっているが¹⁴⁾、同図をみるとこれを大きく下回る事例も少なくない。締固め度は、図 2.1.4 に例示するように土の透水性や強さと深く関係し、同一の土質であっても締固め度が 10%違えば透水係数は 1 オーダー程度異なり、また土の強さも大幅に変化することが確認されている^{15) 16)}。

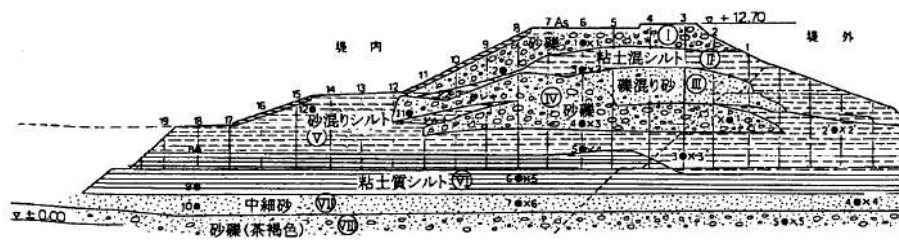
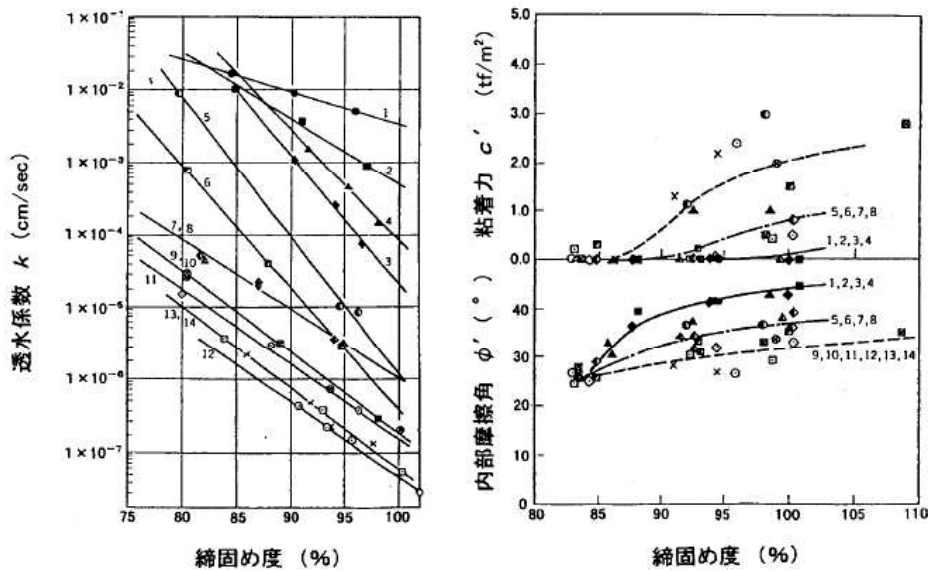


図 2.2.2 堤防開削調査により明らかにされた堤体の土質構造の例¹⁰⁾

表 2.2.2 既設堤防の土質性状¹⁰⁾

	含水比	間隙率	湿潤密度	乾燥密度	飽和度	締固め度	透水係数
	w (%)	n (%)	ρ_t (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	S_r (%)	Cr (%)	k_s (cm/sec)
(GW)きれいな礫	20 40 60 80 100	20 40 60 80 100	1.2 1.4 1.6 1.8 2.0	0.6 1.0 1.4 1.8 2.2	20 40 60 80 100	60 70 80 90 100	10 ⁻⁶ 10 ⁻⁵ 10 ⁻⁴ 10 ⁻³ 10 ⁻²
(GP)粒度の悪い礫							
粒 (G-M)シルト混り礫							
土 (G-C)粘土混り礫							
(GM)シルト質礫							
(SP)粒度の悪い砂							
砂 (SM)シルト混り砂							
粒 (S-C)粘土混り砂							
土 (SM)シルト質砂							
(SC)粘土質砂							
(ML)シルト(低塑性)							
細 (MH)シルト(高塑性)							
粒 (CL)粘質土							
土 (CH)粘土							
(VH)火山灰質粘土							



番号が小さいほど細粒分が少ない。

図 2.2.3 土の締め固め度と工学的性質 (左: 透水係数との関係 右: 土質定数との関係)¹⁰⁾

このように、歴史的な経緯の中で、河川堤防は土質(分類)の多様さに加え、工学的にみても極めて複雑で不均質な状態にあり、さらにそのような堤体土質の情報そのものが限られることも一つの特徴といえることができる。したがって、安全性照査等の技術的な検討のみならず、出水経験といった過去の経緯等を踏まえた経験的な判断も、河川堤防の設計においては重要な要素となる¹⁰⁾。

2.2.3. 線状構造物

堤防は一連の長大な区間の中で小さな穴ひとつでも破堤するといわれるように、局所的な安全性が一連の堤防全体の安全性を規定していることも特徴の一つである。通常、堤防は、高さ、天端幅、のり勾配など堤防の基本的な断面形状を、河道特性や洪水氾濫区域が同一、または類似する区間で同一とするよう築堤されるが、基礎地盤地形・土質構造および堤体土質構造においては異なる土質構造を有する堤防断面が直列に配置されており、局所的に土質上の弱点箇所

があった場合、構造物全体の安全性が毀損されることとなる。また、一連区間の中には堤防を横断して作られる樋門等の構造物が多数存在しており、堤防の安全性評価をより複雑にしている。

樋門等の堤防横断構造物の堤防では、コンクリート等の剛体構造と土の堤防が接する部分に浸透水が集中しやすい、あるいは空隙やゆるみが形成されやすく、この空隙等が連続することにより堤防の表のりから裏のりにかけて水ミチが生じると、浸透に対する弱点箇所となる。特に軟弱地盤上に樋門が設置されている場合、杭による沈下対策を行っている場合が多く、樋門等の周辺堤防が沈下して樋門箇所堤防が抜け上がったような形態を呈する、いわゆる、抜け上がりが生じやすい。この結果、樋門の床板や周辺に空洞ができ、これが拡大して水ミチになることにより、浸透に対する弱点箇所となることも多いことから、現在は函体を柔構造にして杭を用いないことによる対策が行われている。

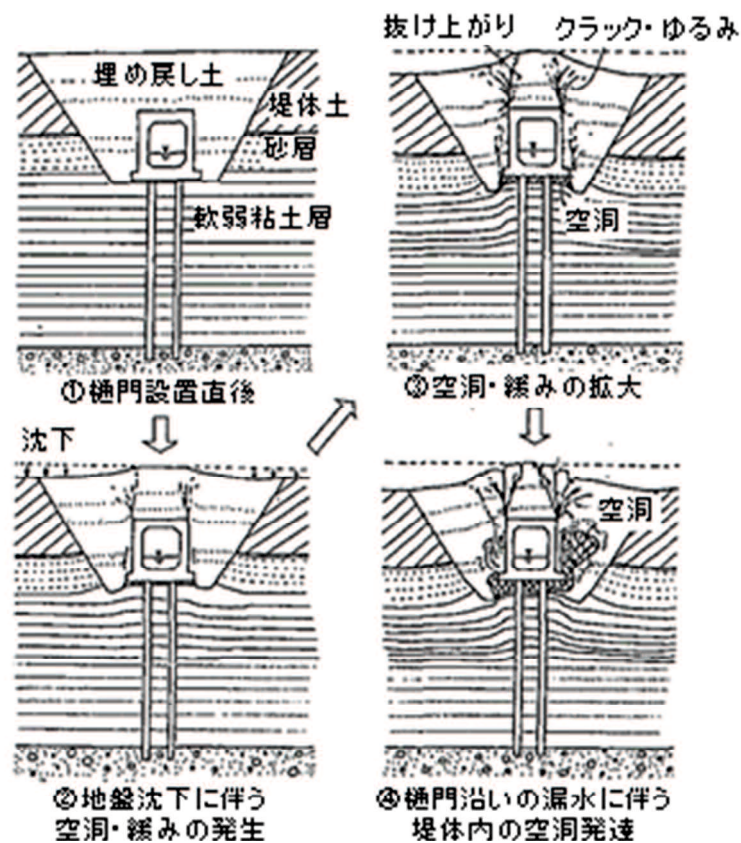


図 2.2.4 樋門周りの空洞の発生過程¹¹⁾

2.3. 河川堤防の設計基準の変遷

2.3.1. 設計基準の変遷の概要

河川法第 13 条第 2 項の規定により、河川管理施設または許可工作物（河川管理者の許可を受けて設置される橋や利水ダム・堰等の工作物）のうち、ダム、堤防その他の主要なものの構造について河川管理上必要とされる技術的基準は政令で定めるものとされている。これを受けて、河川管理施設等構造令（昭和 51 年（1976 年）政令 199 号）で河川管理施設または許可工作物の技術的基準が規定されており、堤防の設計については、この中で規定された材質と形状に基づき設計されている。

平成 9 年（1997 年）に策定された「河川砂防技術基準」は、計画編、調査編、設計編、維持管理編から構成されており、堤防に関しては、計画高水流量を流下させるために必要となる河道の平面形状を定めることから、堤防法線に関することが計画編、堤防新設時と既設堤防の安全照査時に必要となる土質調査等の方法に関することが調査編、堤防設計の基本的考え方が設計編にそれぞれ定められている。

平成 14 年（2002 年）に策定された「河川堤防設計指針」¹⁸⁾においては、これまでの河川管理施設等構造令で規定された材料と形状を基本としつつも、工学的な堤防の設計法の導入が図られ、過去の被災事例に基づき、耐浸透機能、耐侵食機能、耐震機能の各機能に対する安全性照査を行うことが位置づけられた。また、「河川砂防技術基準」と「河川堤防設計指針」を補完する技術資料として、具体的な照査方法等を取りまとめたものとして、財団法人国土技術研究センターより刊行された、「河川堤防の構造検討の手引き」¹⁰⁾が挙げられる。

2.3.2. 形状規程

河川管理施設等構造令第 18 条では、「堤防は、護岸、水制その他これに類する施設と一体として、計画高水位（高潮区間にあつては、計画高潮位）以下の水位の流水の通常的作用に対して安全な構造とするものとする。」と堤防に求められる機能が規定されているが、これらの機能を確保するため、河川管理施設等構造令では、堤防の形状について計画高水流量に応じた天端幅と余裕高、および法勾配によって最低限の寸法が規定されている。

河川管理施設等構造令第 20 条では、堤防の高さは、計画高水流量に応じ、計画高水位に表 2.3.1 の値を加えた値以上とするものとされている。これは、堤防は土堤原則であるため、一般的には越水に対して極めて弱い構造物であり、計画工水流量以下の流水を越流させないように、洪水時の風浪、うねり、跳水等による一時的な水位上昇や、巡視や水防活動を実施する場合の安全の確保、流木等流下物への対応等種々の要素をカバーするために設けられる余裕高である。

表 2.3.1 堤防の余裕高¹²⁾

計画高水位流量 (m ³ /s)	200 未満	200 以上 500 未満	500 以上 2,000 未満	2,000 以上 5,000 未満	5,000 以上 10,000 未満	10,000 以上
余裕高(m)	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	2.0

河川管理施設等構造令第21条では、堤防の天端幅は、計画高水流量に応じ、表2.3.2に掲げる値以上とするものとされている。堤防の天端は、浸透水に対して必要な堤防断面幅を確保するほか、常時の河川巡視または洪水時の水防活動等のためにもしかるべき幅が必要である。

表 2.3.2 堤防の天端幅¹²⁾

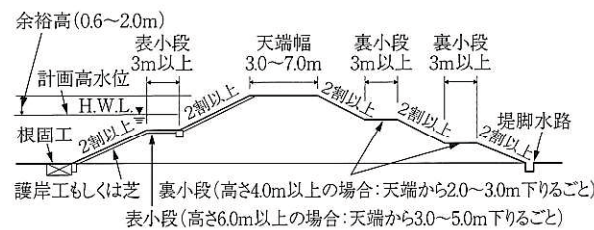
計画高水位流量 (m ³ /s)	500 未満	500 以上 2,000 未満	2,000 以上 5,000 未満	5,000 以上 10,000 未満	10,000 以上
天端幅(m)	3	4	5	6	7

盛土による堤防の法勾配は、河川管理施設等構造令第22条により、胸壁や護岸で保護される部分を除き、50%以下（2割以上）とするものとされている。また、堤防の法面は降雨および流水等による法崩れまたは洗掘に対して安全となるよう、芝等によって覆うことで保護するものとされている。

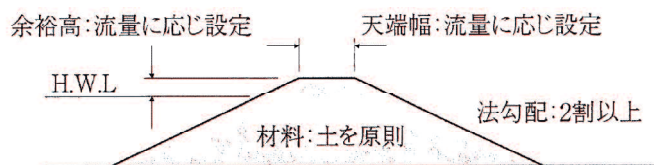
堤防ののり勾配は、特に大河川においては、堤防又は地盤の土質条件、洪水の継続時間等河川の特성에依りて決定されるべきで、構造令に適合するという理由だけで2割勾配を採用するという事にはならない、とされている¹²⁾。築堤履歴が複雑である場合が多く、堤防の土質構造が明確でないことが多いこと、洪水の継続時間等の外力については過去の洪水実績を参考に検討している面もあるため、過去の被災の経験等を踏まえて法勾配を緩くする等の配慮がなされていることが多い。

さらに、河川管理施設等構造令第23条では、堤防の安定を図るため必要がある場合においては、法面の中腹に3m以上の幅の小段を設けることとされている。しかし、小段は雨水の堤体への浸透をむしろ助長する場合があります、浸透面から見ると緩やかな勾配の一枚法とした方が有利であること、除草等の維持管理面や堤防のり面の利用面からも緩やかな勾配が望まれること等を考慮し、「河川堤防設計指針」においては、堤防法面は表法、裏法ともに原則としてのり勾配が3割より緩い勾配とし、一枚法の台形断面とすることを原則としている¹⁸⁾。

河川管理施設等構造令で規定している最低限の堤防断面形状と、河川堤防設計指針における基本断面形状を模式的に示すと図2.3.1のようになる。



(a) 河川堤防の標準的構造



(b) 小段を無くした河川堤の標準的構造

図 2.3.1 構造令に規定する堤防断面形状¹⁷⁾

2.4. 現在の設計基準の考え方

2.4.1. 性能規定の導入の経緯

形状規定方式による堤防の設計は、簡便で極めて効率的であり、長年の経験を踏まえたものであることから、堤防整備の基本として十分な役割を果たしてきたことは間違いのないところである。しかしながら、一方で堤防の洪水に対する安全性を評価することが難しいことも事実である。既往の被災事例をみても、計画高水位以下の洪水により漏水など構造上の課題となる現象が数多く発生しており、現在の堤防が必ずしも防災構造物としての安全性について十分な信頼性を有するとはいえない。そのため、計画的な補強対策が必要であり、その必要性や優先度、さらには対策工法を検討するためには、堤防の設計においても一般の構造物の設計法と同様、外力と耐力の比較を基本とする設計法（安全性照査法）を導入することが求められた。

河川堤防の性能規定による設計法に関する研究は、昭和30年（1955年）前後から、当時の建設省土木研究所の山村・久楽た例えば^{19),20)}を中心に研究が進められていたが、昭和51年（1976年）9月の長良川安八地区における決壊が大きな契機となった。この時の決壊時の河川水位のピークは計画高水位以下であったこと、多量の降雨と長時間にわたる高水位であったことから、浸透に起因するものとされており²¹⁾、この決壊を機に財団法人国土技術研究センターにおいて、学識者と河川管理者を構成員とする堤防研究会が設置され、堤防の浸透に対する強化対策方法に関する各種の検討が進められた。

例えば、昭和61年から平成2年にかけて実施された江戸川実物大堤防浸透実験¹⁹⁾では、引き堤した堤防と旧堤防との間に高さ7mの堤体を二つ築堤し、湛水による浸潤線の形成過程や降雨の影響、ドレーン工の効果等について観測を行っており、堤防の浸潤線発達に降雨の関与が大きいこと、ならびに浸透対策としてのドレーン工の効果等について貴重な知見が得られている²²⁾。



写真 2.4.1 江戸川の堤防実験

2.4.2. 安全性照査と質的整備

河川堤防設計指針における堤防設計の基本的な流れを図 2.3.2 に示す。

まず堤防整備区間を対象として河道特性や洪水氾濫区域が同一、または類似する区間（以下「一連区間」という。）を設定し、一連区間において高さ、天端幅、のり勾配など堤防の基本的な断面形状（以下「基本断面形状」という。）を構造令などから定める。次に、堤防構造の検討を行うため、堤防に求められる機能毎に堤防の耐力の条件（基礎地盤の状況など）を調査して一連区間を細分する。その細分区間における堤防構造を検討するため、細分区間毎に代表断面を設定する。また、外力ならびに堤防の耐力の条件（堤体の土質強度等）となる諸量を把握するために、堤防の機能に応じて適切な調査を実施する。

以上の結果を用いて堤防構造の検討を行う。構造の検討は、基本断面形状をもとに仮設定した代表断面の堤防構造を対象として、機能毎に適切な手法を用いて安全性を照査する。ここで、照査の結果が照査基準を満足しない場合には、強化工法を検討して堤防構造を再設定し、その安全性を確認する。令和元年7月に、「河川砂防技術技術基準 設計編」の堤防に係る部分が改定²⁰⁾されたが、検討の流れについてはこの考え方を踏襲している。

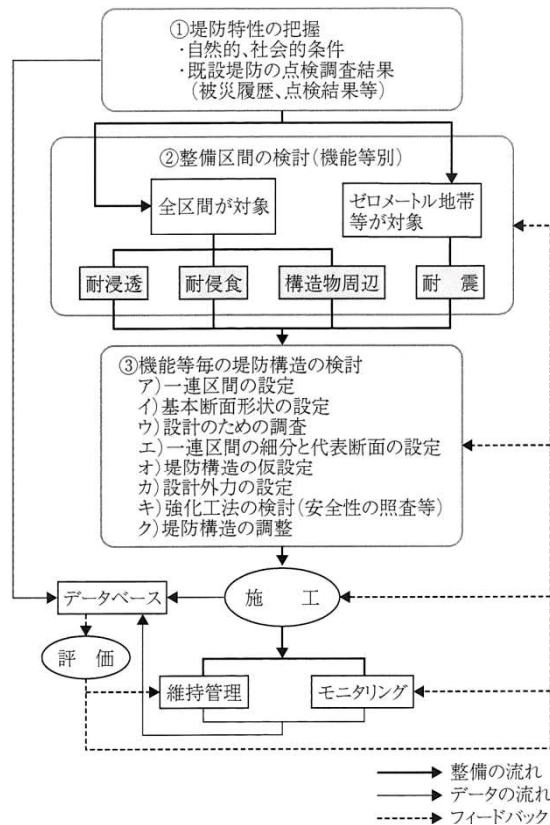


図 2.3.2 堤防設計の流れ¹⁸⁾

工学的手法を基本とする堤防の安全性照査では、堤防に求められる機能に応じて、安全性の照査手法の適用、照査外力の設定、照査基準の設定をそれぞれ行うことが定められているが、安全性照査の手法については以下の手法を標準とし、これらの手法の適用に必要とされる照査外力、照査基準を設定することとしている¹⁰⁾。

① 耐浸透機能

- ・ 照査外力：照査外水位（計画高水位）と照査降雨を設定
- ・ 照査手法：非定常浸透流計算及び円弧滑り安定計算
- ・ 照査基準：すべりに関しては、目標とする安全率、パイピングに関しては力学的な限界状態を確認

② 耐侵食機能

- ・ 照査外力：代表流速
- ・ 照査手法：設計外力とする洪水による堤防のり面及び高水敷の侵食限界の判別（既設護岸のある場合には設計外力とする洪水による護岸の破壊限界の判別）
- ・ 照査基準：
 - 堤防表のり面およびのり尻の直接侵食は、表面侵食耐力>代表流速から評価される侵食外力
 - 主流路（低水路等）からの側方侵食、洗掘については、高水敷幅>照査対象時間で侵食される高水敷の幅

③ 耐震性能

- ・ 照査外力：レベル2地震動（レベル1地震動に対しても同じ性能を求めている）
- ・ 照査手法：堤防の変形を数値解析により算定
- ・ 照査基準：沈下後の堤防高が、照査外水位を下回らないことを確認

堤防は上記の安全性照査による設計方法が定められる前は、河川管理施設等構造令で定められた堤防断面を確保していれば完成堤防、高さが足りなければ暫定堤防、高さや幅が足りなければ暫々定堤防としており、一般的にこれを量的整備と称している。堤防整備率（堤防必要区間延長に対する計画堤防の断面が確保された堤防の延長の割合）は、令和5年（2023年）3月時点で70.7%となっている。

一方で、安全性照査による設計手法が定められて以降は、河川管理施設等構造令で規定している最低限の堤防断面形状を満たした上で、上記の機能や性能を満たすことが要求されることとなり、これを一般的には質的整備と称しているが、現在までに浸透機能に対しては、点検対象延長約1万kmのうち約4割が浸透に対する安全性を満たしていないという結果となっている。また、耐震性能に対しては、現在も安全性照査が進行中であるが、直轄管理河川の堤防のレベル2地震動に対する耐震点検については、照査対象延長約1,500kmの概ねが完了しており、東南海・南海地震等の大規模地震によって津波が遡上することが想定される区間等において、地震による堤防沈下後の堤防高さが平常時の河川水位より低くなると想定される区間は、液状化対策が実施されているところである。

2.4.3. 現在の堤防設計

令和元年7月に、「河川砂防技術技術基準 設計編」の堤防に係る部分が改定²³⁾されたが、この部分改定では、堤防設計の実務が変わるわけではないが、性能規定化に向けた動きとして、堤防に求められる機能と設計に反映すべき事項が示されることとなった。なお、先に示した「河

川堤防設計指針」は、河川砂防技術基準に取り込まれたことを受け、廃止された。この部分改定における堤防設計の基本的考え方について以下に示す。

堤防は、洪水による被害を経験するたびに嵩上げ及び拡幅等を繰り返して築造されてきたことや、土質構造が複雑で不確実性を内在する中、構造令では堤防の断面形状の最低基準を河川の規模（流量）等に応じて規定する、いわば形状規定方式を基本としてきた。これは、断面形状を既往の被災経験と実績をもとに設定することが合理的であると考えられてきたことや、場所によって堤防の断面が異なると民心安定上好ましくないという理由からと考えられる。

形状規定方式に基づく堤防の設計は、簡便で極めて効率的で、長年の経験を踏まえたものであり、堤防整備の基本として十分な役割を果たしてきたところであるが、形状規定方式に基づく堤防の設計手法においても、のりすべり等安全上問題となる現象が数多く発生していることから、堤防の安全性について所要の性能を満足するかどうかを確認する手法として限界を有していることも事実である。そこで、「河川砂防技術基準 設計編」の部分改定でも、堤防の断面形状については、平成 14 年の「河川堤防設計指針」で示されてきた考えを踏襲しつつ、堤防の設計においても一般の構造物の設計法と同様、外力と耐力の比較を基本とする設計法（安全性照査法）を導入する方法がとられた。

一方で、堤防設計にも性能規定化に向けた動きを入れる必要があるとの議論から、土堤原則と形状規定の前に、堤防に求められる機能と設計に反映すべき事項が示される形となった。

2.4.4. 堤防に求められる機能と設計に反映すべき事項

(1) 堤防に求められる機能

我が国は沖積河川の氾濫原に人口・資産が集中しており、堤防は、人命と財産を洪水及び高潮から防御する極めて重要な河川構造物である。このような堤防に対しては、河川管理施設等構造令の解説において、護岸、水制その他これらに類する施設と一体として、河道計画で定められた計画高水位（高潮区間においては計画高潮位）以下の水位の流水の通常的作用による侵食や浸透に対して安全となる構造とすることが定められており、また、流水による堤防への浸透を規定する条件として、降雨の浸透によって形成される堤体内の土壌水分あるいは堤体内の浸潤面の状況を考慮する必要があることが示されている。

令和元年 7 月に、「河川砂防技術基準 設計編」の堤防に係る部分の改定²⁰⁾において、堤防に求められる機能は、以下と定められている。

- ・ 常時の自重による沈下及びすべり破壊等に対する安全性
- ・ 計画高水位（高潮区間においては計画高潮位）以下の水位の流水の通常的作用による侵食及び浸透並びに降雨による浸透に対する安全性、水圧作用時の安定性
- ・ 地震に対する安全性
- ・ 波浪に対する安全性

堤防には、計画高水位（高潮区間においては計画高潮位）以下の水位の流水の通常的作用及び降雨による浸透や侵食に対して安全であることに加えて、常時においては、堤防の築造や嵩上げ及び腹付けに伴う堤防の自重増加による基礎地盤の沈下、変形及びすべり破壊等に対して安全であることが求められ、地震時においては、堤防に変形又は沈下が生じた場合においても、河川の流水の河川外への越流を防止する機能を有することが求められる。加えて、地震時には

津波が発生する可能性があり，津波来襲時に計画津波の遡上により流水の河川外への越流を防止する機能を有することが求められている。

(2) 設計に求められる事項

堤防は長い歴史の中で順次嵩上げ及び拡幅等を実施してきたこと，時代によって築堤材料や施工法が異なることや，基礎地盤自体が古い時代の河川の作用によって形成された地盤であることから，堤体や基礎地盤の強度が不均一で極めて複雑であること，連続した長大構造物であること等の特徴を有しているため，令和元年7月「河川砂防技術技術基準 設計編」では以下を設計において求めている。

- ・ 不同沈下に対する修復の容易性
- ・ 堤体，及び基礎地盤との一体性，及びなじみ
- ・ 嵩上げ及び拡幅等の機能増強の容易性
- ・ 損傷した場合の復旧の容易性
- ・ 構造物の耐久性
- ・ 基礎地盤及び堤体の構造及び性状に係る調査精度に起因する不確実性
- ・ 基礎地盤及び堤体の不均質性に起因する不確実性

堤防は長大構造物であり不同沈下が起きやすいことから，不同沈下に対する修復が容易であること，基礎地盤と堤体，拡幅等行った場合の旧堤と新堤並びに堤体内に設置する横断工作物と基礎地盤及び堤体との一体性及びなじみが必要であること，必要に応じて堤防を強化する場合があるため，嵩上げ及び拡幅等の機能増強が容易であること並びに洪水や地震に遭遇して堤防が損傷した場合に復旧が容易であり所要工期が短いこと等を踏まえて，設計することが求められる。なお，堤体内に堤体材料とは異なる材料や工作物が含まれると，その境界に水ミチが発生しやすくなり堤防の弱部となる可能性があるため，堤体材料とは異なる材料や工作物を設置する場合は堤防の安全性や河川管理上，最低限必要と認められるものに限られるべきであるとしている。また，堤防は局所的な安全性が一連の堤防全体の安全性を規定する長大構造物である。新設の堤防では堤体材料を適切に選定することができるが，既設の堤防はその歴史的な経緯から堤体材料の強度が不均一である。さらに，新設・既設に関わらず，基礎地盤自体は極めて複雑であり，これらの性状を地質構成の連続性を含めて詳細に把握することは困難であるため，基礎地盤や堤体の構造及び性状の調査精度が必ずしも高くない。そのため，基礎地盤及び堤体の不均質性の影響が大きいこと等の実情を踏まえて，設計することが求めている。

また，構造物一般に求められる事項については，設計にあたって考慮すべき事項として，以下を求めている。

- ・ 環境及び景観との調和
- ・ 構造物の耐久性
- ・ 維持管理の容易性
- ・ 施工性
- ・ 事業実施による地域への影響
- ・ 経済性
- ・ 公衆の利用

河川は多様性に富んだ自然環境を有しており、堤防自体が自然環境の一部を形成するとともに、地域の中においても良好な生活環境の形成に重要な役割を担うことから、環境及び景観との調和が求めている。また、材料や構造物そのものの劣化がしにくく耐久性が必要であること、限られた人員と費用で長大な延長を持つ堤防の安全性を確保することから維持管理が容易であること及び材料の確保の容易さや施工がし易いことが求められるとともに、築堤等により沿川地域の社会基盤を大きく改変すること等、事業実施による地域への影響を考える必要があること、維持管理も含めた経済性が良いこと並びに「川の 365 日」を意識した健康づくりやふれあい及び交流の場として公衆の利用が求められること等についても設計に当たって考慮することを求めている。

2.5. 河川堤防の維持管理基準の変遷

2.5.1. 堤防の維持管理に関する基準類の概要

河川堤防を含む河川管理施設の維持管理は、河川管理施設等の状態確認や、不法占用・不法投棄等を日常的に把握することを目的に行われる巡視と、河川管理施設の治水上の機能について、観察・計測等により、異常箇所が発見及び変状箇所の監視等することを目的として実施される点検がある²⁴⁾。

点検については、昭和 39（1964）年に定められた「河川法」の下、国土交通省水管理・国土保全局長通達である「河川砂防技術基準維持管理編」、これを補完する国土交通省水管理・国土保全局河川環境課長通達である「堤防等河川管理施設及び河道の点検・評価要領」、河川堤防設計指針」を保管する「河川堤防モニタリング技術ガイドライン」が、堤防の維持管理に関する基準類として定められている。

また、巡視については、「河川法施行令」に河川管理施設等の機能の維持又は修繕に関する技術的基準その他必要な事項として、巡視・点検について規定することが定められており、国土交通省河川局水政課河川利用企画調整官および河川環境課河川保全企画室長により各地方整備局に作成が指示されている「河川巡視規定例」などに基づいて行われている。

(1) 河川法の概要

「河川法」では、昭和 39（1964）年時点では、維持・修繕の技術的基準に関する規定がなく、長年河川管理者の判断の下に堤防を含む河川管理施設の維持管理が行われてきたが、平成 25（2013）年 6 月の河川法の改正により、第 15 条二に河川管理者又は許可工作物の管理者は河川管理施設又は許可工作物を良好な状態に保つように点検を含めて維持・修繕すべきことが明確に示された²⁵⁾。また、その河川法の改正に合わせて「河川法施行令」では、重要な河川管理施設等にあつては、1 年に 1 回以上の適切な頻度で目視等による方法で点検を実施し、異状があることを把握したときは、効率的な維持および修繕が図られるよう必要な措置を講ずることが定められた²⁶⁾。

(2) 河川砂防技術基準維持管理編の概要

「河川砂防技術基準維持管理編」は、河川管理を一定の水準で維持していくために、平成 23（2011）年 5 月に国土交通省水管理・国土保全局長通達として策定された。技術基準維持管理編は、これまで直轄河川で行われてきた河川の維持管理の実態を踏まえながら、維持管理に係る技術的な基準を定めたものであり、河川維持管理に関する計画、河川維持管理の目標、河

川の状態把握,維持管理対策および水防等のための対策について定めている。堤防については,出水期前・台風期,出水後,地震後に区分し,出水期前・台風期は徒歩を中心とする目視により,あるいは計測機器等を使用して,点検を行うことが規定されている²⁶⁾。

(3) 堤防等河川管理施設及び河道の点検・評価要領の概要

「堤防等河川管理施設及び河道の点検・評価要領」は,河川砂防技術基準維持管理編に基づき,具体的な点検の時期や点検事項について定めたものであり,平成 24 (2012) 年 5 月に水管理・国土保全局河川環境課長通知として発出された。その度数回の改定を経て,現在,令和 5 年 (2023) 年 3 月のものが最新のものである。

点検は,河道が所要の流下能力を確保していること,河川堤防等の河川管理施設が所要の機能を確保していること,の 2 項目を確保することを目的として,発見・観察すべき変状や変化やその評価方法,補修や修繕の必要性の判断基準等について書かれている。点検は毎年の出水期前および台風期前,出水後に担当職員の徒歩による目視を主体として実施されている²⁷⁾。

なお,都道府県に対しては「中小河川の堤防等河川管理施設及び河道の点検要領」が平成 26 (2014) 年 3 月に策定(平成 29 年 3 月最終改正)され,技術的参考資料として発出されている。

(4) 河川堤防モニタリング技術ガイドラインの概要

平成 14 年 7 月に発出された「河川堤防設計指針」では,堤防の機能維持のためにモニタリングに関して定められているが,「河川堤防モニタリング技術ガイドライン」は,これを保管するための技術資料として,平成 16 年 (2004) 6 月に発出されたものである。

河川堤防の浸透作用及び侵食作用に対する安全性・信頼性を維持し,高めていくために必要となるモニタリングの標準的内容についてとりまとめられたもので,目視点検の他,必要に応じて計測機器によるモニタリングも行い,堤防強化技術の効果を検証することが定められている²⁸⁾。なお,目視モニタリングについては,「堤防等河川管理施設及び河道の点検・評価要領」に標準的内容が定められていることから,計測機器によるモニタリングの部分のみが活用されている。

(5) 河川巡視規定例の概要

河川巡視規定例(以下,巡視規定例)は,平常時に河川管理の一環として定期的・計画的に河川を巡回し,その異状および変化等を発見し,概括的に把握するために必要な事項を定めたものであり,平成 23 年 5 月に河川局水政課河川利用企画調整官・河川環境課河川保全企画室長通達事務連絡として発出された。なお,この事務連絡の発出により,「河川巡視規定例について」平成 17 年 3 月事務連絡と,「河川巡視規定例同解説」平成 17 年 3 月事務連絡は廃止されている。

河川巡視は,車上巡視を主とする「一般巡視」と,徒歩による巡視や水上巡視を含めて場所・目的を絞った「目的別巡視」からなるが,河川区域等における違法行為の発見や報告,河川管理施設や許可工作物の維持管理状況の把握,河川の空間利用や自然環境に関する情報収集を目的として実施するものである。河川管理施設や許可工作物の維持管理状況の把握としては,河岸,河道内の堆砂,河口閉塞,樹木群,河川堤防,護岸・根固め,堰・水門等について目視により変状の把握を行っている。

2.5.2. 河川堤防の点検・評価

(1) 点検の対象となる堤防

堤防の点検は、具体的には「堤防等河川管理施設及び河道の点検・評価要領」に基づき実施されている。本要領で対象としている堤防は、河川管理施設等構造令第 19 条に規定される盛土により築造される堤防の他、構造令規則第 14 条第一号に規定される第 1 種側帯、土堤をコンクリート又はこれに類するもので三面張にした高潮堤防や、自立式構造タイプ、土堤に胸壁構造を有するタイプの特殊堤、陸閘である。

点検の時期は、定期的実施する点検と、出水後点検があり、定期的実施する点検は、河川毎に設定される出水期前と、地域毎に設定される台風期に実施される。

また、出水後点検は、河川ごとに予め設定した出水規模を上回る出水があった場合に実施することとしており、基準とする出水規模は、氾濫注意水位を超える出水を基本として、河道特性や既往の被災履歴等も考慮して設定される。また、高潮区間では顕著な高潮の発生時に設定される。

なお、出水中の状態把握は、河川巡視規定に基づき河川巡視により実施することとなっている。

(2) 点検の手法

「堤防等河川管理施設及び河道の点検・評価要領」では、点検の手段としては、目視点検を基本とし必要に応じて、スケール等による計測を実施することとしている。また、沈下等、目視点検で確認された変状が進行する可能性があるもののうち、計測することで進行を評価できる変状については、スケール等を用いた計測による定点観測を実施することとしている。また、点検結果は、データベースとして記録に残すこととしており、国管理区間については、河川維河川巡視や点検の結果や河川管理施設等の補修履歴等を一元管理する RiMaDIS（維持管理業務を支援するデータベースシステム）に専用の端末を用いて記録することとされている。

(3) 堤防の点検項目

盛土により築造される堤防の決壊は、主に洪水時の流水の作用によるものであるが、洪水時の降雨による法肩や法面における雨水の流れの集中が法崩れを生じさせること、堤体内に雨水が浸透することによって滑りが生じることなども要因としてあげられる。また、植生及び動物の活動によっても損傷する。これらの堤防の決壊につながる可能性のある変状を点検することとしている。

点検項目としては、のり面、小段、天端、裏のり尻部、堤脚水路の個所毎に分けて、目視で確認できる外形的な変状を主体とした項目が定められており、堤防決壊の予兆として生じる亀裂や陥没、沈下、はらみだし、漏水や浸潤状体等の他、直接的な予兆ではないが、芝のはがれや植生の異常、モグラ等の小動物の穴、樹木の侵入等の堤防の損傷についても点検事項となっている。

表 2.3.3 堤防の点検項目

箇所	出水期前、台風期の点検事項
法面 ・ 小段	<ul style="list-style-type: none"> ・ 亀裂、陥没、はらみだし、法崩れ、寺勾配化、侵食等はないか。 ・ 張芝のはがれ等、堤防植生、表土の状態に異常はないか。 ・ 雨水排水上の問題となっているような、小段の逆勾配箇所や局所的に低い箇所がないか。 ・ 法面・小段に不陸はないか。 ・ モグラ等の小動物の穴が集中することによって、堤体内に空洞を生じていないか。 ・ 樹木の侵入、拡大は生じていないか。 ・ 坂路・階段取り付け部の路面排水の集中に伴う洗掘、侵食がないか。
天端	<ul style="list-style-type: none"> ・ 堤防天端及び法肩に亀裂、陥没、不陸、沈下等の変状はないか。 ・ 天端肩部が侵食されているところはないか。
裏法尻部	<ul style="list-style-type: none"> ・ 堤脚付近の排水不良に伴う浸潤状態はないか。 ・ しぼり水でいつも浸潤状態のところはないか。 ・ 法尻付近の漏水、噴砂はないか。 ・ 堤脚保護工の変形はないか。 ・ 局所的に湿性を好む植生種が群生していないか。 ・ ドレーン工の日詰まり、あるいは濁水の排水が生じていないか。
堤脚水路	<ul style="list-style-type: none"> ・ 堤脚水路の継目からの漏水・噴砂がないか。 ・ 堤脚水路の閉塞がないか。

2.6. まとめ

2.6.1. 河川堤防の特徴

江戸期から現代までに営々と続く河川堤防の築堤の歴史を踏まえると、堤防は土を材料としており、その構造の特徴としては、

- ・複雑な基礎地盤構造と土質構造を有すること
- ・土質の不均質性を有すること

とまとめることができる。また、その他の河川構造物との違いとして、

- ・線状構造物であること

が特徴として挙げられる。以下、それぞれについてまとめる。

(1) 複雑な基礎地盤構造と土質構造

堤防は、長い治水の歴史の中で、嵩上げや拡幅を繰り返してきているのが一般的であるため、その内部構造は極めて複雑である。また、基礎地盤の地形は、山地、丘陵、台地、扇状地、氾濫平野等の様々な地形に分類され、洪水による河川の氾濫を受けて形成された低地の地形は多用であり、特に旧河道や落掘は、浸透に対しての弱点箇所として認識されている。

(2) 土質の不均質性

前述の通り、堤防の大きな特徴は、その多くが長い治水の歴史を経て形成されてきたことから、それぞれ工事が行われた各時代における土工技術を用いて築造されており、土質（築堤材料）や施工法（締固め方法等）が様々である。

このため、土質（分類）の多様さに加え、工学的にみても極めて複雑で不均質な状態にあり、さらにそのような堤体土質の情報そのものが限られることも一つの特徴といえることができる。したがって、安全性照査等の技術的な検討のみならず、出水経験といった過去の経緯等を踏まえた経験的な判断も、河川堤防の設計においては重要な要素となる。

(3) 線状構造物

堤防は延長の長い線的構造物であるため、河道特性や洪水氾濫区域が同一、または類似する区間において高さ、天端幅、のり勾配など堤防の基本的な断面形状は同一に作られている。しかし、前述したように堤体、基礎地盤共に複雑な土質性状であり、異なる土質構造を有する堤防断面が直列に配置されていることから、局所的な土質上の弱点箇所が存在した場合、それが構造物全体の安全性を支配することとなる。また、一連区間の中には堤防を横断して作られる樋門等の構造物が多数存在しており、堤防の安全性評価をより複雑にしている。

上記の特徴を踏まえると、河川堤防の堤体や基礎地盤の構造は複雑であり、堤防土質構造を完全に把握することは困難である。

2.6.2. 河川堤防の設計の変遷

河川堤防の築堤の歴史や、構造物としての特徴を踏まえて、河川構造物の標準化が図られた「河川管理施設等構造令」制定（昭和 51 年(1976)）以降の堤防の設計の歴史についてまとめる以下通りである。

(1) 河川管理施設等構造令による設計

昭和 51 年（1976 年）に策定された「河川管理施設等構造令」では、堤防の材質と、必要となる形状が定められており、それに基づいた設計がなされた。形状としては、「計画高水位（高潮区間にあつては、計画高潮位）以下の水位の流水の通常的作用に対して安全な構造とする」ために必要な、天端幅と余裕高、および法勾配の最低限の寸法が規定され、材質としては、歴史的に河川堤防の築堤は盛土で行われてきたことから土を原則とすることを規定した。この形状規定と土堤原則による設計法は、量的な堤防整備が十分でなかった時代においては極めて効率的であり、長年の経験を踏まえたものであったことから、堤防整備の基本として十分な役割を果たしてきた。

(2) 堤防設計指針による設計

形状規定と土堤原則は効率的な堤防整備を行うには適していた一方で、堤防の洪水に対する安全性を評価することが難しいことも事実であったことから、平成 9 年（1995 年）に「河川砂防技術基準」が、平成 14 年（2002 年）に「堤防設計指針」が策定され、これまでの河川管理施設等構造令で規定された材料と形状を基本としつつも、工学的な堤防の設計法の導入が図られ、過去の被災事例に基づき、耐浸透機能、耐侵食機能、耐震機能の各機能に対する安全性照査を行うことが位置づけられた。

その後、堤防設計にも性能規定化に向けた動きを入れる必要があるとの議論から、堤防に求められる機能と設計に反映すべき事項が示される形となった。

令和元年（2019 年）7 月に、「河川砂防技術基準 設計編」の堤防に係る部分が改定され、実務上の堤防設計方法は従来と同様であるが、土堤原則と形状規定の前に、堤防に求められる機能と設計に反映すべき事項を示し、性能規定による堤防設計の形となった。

経験に基づく形状規定から、工学的設計である性能規定に移行をしつつあるものの、今なお決壊や被災が生じている現状を鑑みると、現状の技術でも「堤防の弱部の合理的な評価、及び洪水に対する堤防の縦横断的な安全性の評価を的確に実施する」ことは困難な状況にある。

2.6.3. 堤防の維持管理

堤防の維持管理についてまとめると、以下の通りである。

河川堤防を含む河川管理施設の維持管理は、国土交通省水管理・国土保全局長通達である「河川砂防技術基準維持管理編」（平成 23 年（2011 年））において、堤防については、出水期前・台風期、出水後、地震後に区分し、出水期前・台風期は徒歩を中心とする目視により、あるいは計測機器等を使用して点検を行うことが規定され、さらにこれを補完する国土交通省水管理・国土保全局河川環境課長通達である「堤防等河川管理施設及び河道の点検・評価要領」（平成 24 年（2012 年））で具体的なモニタリングの方法が定められている。

「堤防等河川管理施設及び河道の点検・評価要領」では、点検の手段としては、目視点検を基本とし必要に応じて、スケール等による計測を実施することとしている。点検項目としては、のり面、小段、天端、裏のり尻部、堤脚水路の個所毎に分けて、目視で確認できる外形的な変状を主体とした項目が定められている。

維持管理においては、堤防に生じる変形を目視で確認している現状にあることから、定性的で点検員の主観に基づく判断となり、危険度の判定に熟練が必要である。一方で公共事業の予算は減額の流れにあり、またそれに伴い人員不足が問題となりつつある。

第2章 参考文献

- 1) 宇治谷 孟：全現代語訳 日本書紀，講談社学術文庫，1988.
- 2) 間宮 清：河川堤防の温故知新一堤防への想いー，(一財)国土技術研究センター堤防委員会，2014，
http://www.jice.or.jp/cms/kokudo/pdf/reports/committee/embankment/20141107_01.pdf
- 3) 山本晃一：河川堤の技術史，山海堂，p.11，1999.
- 4) 山本晃一：河道計画の技術史，山海堂，p.86，1999.
- 5) 中島秀雄：河川堤防技術の変遷，河川，1月号，2004.
- 6) 山本晃一：河道計画の技術史，山海堂，p.133，1999.
- 7) 山本三郎：河川法全面改正に至る近代河川事業に関する歴史的研究(一財)，国土技術研究センター，p.44-71，1987
- 8) 山本晃一：河道計画の技術史，山海堂，p.160，1999.
- 9) 間宮 清：ファン・ドールン治水総論 現代語訳，応用地質株式会社，1995.
- 1 0) 河川堤防の構造検討の手引き，(一財)国土技術研究センター，2002.
- 1 1) 中山 修・金石 勝也・勝山 明雄：連通試験法を適用した樋門周辺堤防の漏水危険度の検討，河川技術に関する論文集 第6巻，土木学会水理委員会河川部会，2000.6
- 1 2) 社団法人 日本河川協会：改訂 解説・河川管理施設等構造令 財団法人国土技術研究センター編，平成11年11月
- 1 3) 建設省関東地方建設局：利根川百年誌，1987
- 1 4) 河川土工マニュアル：(一財)国土技術研究センター
- 1 5) 国土交通省北海道開発局資料
- 1 6) 長田 仁，中山 修：河川堤防 3. 河川堤防の機能・構造，地盤工学会誌，vol.61，No.11/12，p.56，2013
- 1 7) 地盤工学会：河川堤防の調査検討から維持管理まで，pp7，2020.3
- 1 8) 堤防設計指針：国土交通省河川局治水課，2007.
- 1 9) 山村和也・久楽勝行：堤防への浸透と堤体の安定性，土木研究所報告，No.145，1972.
- 2 0) 久楽勝行・山本晃一：堤防の設計，河川，3月号，1991.
- 2 1) 地盤工学会：河川堤防の調査検討から維持管理まで，pp10，2020.3
- 2 2) Nakayama, O., Sako, S., Abe, T. and Mamiya, K. : Destructive test of a river levee (seepage and overtopping), International Seminar Stability and Breaching of Embankment Dams, Oslo, Norway, 2004.
- 2 3) 河川砂防技術技術基準 設計編：国土交通省河川局治水課，2019.
- 2 4) 国土交通省水管理国土保全局：河川・ダム管理における新技術導入について，令和4年3月，
https://www.digital.go.jp/assets/contents/node/basic_page/field_ref_resources/5222e6ad-2bb3-4600-963f-8629b5137cc5/20220310_meeting_administrative_research_working_group_outline_01.pdf

- 25) 水防法及び河川法の一部を改正する法律案について，国土交通省 HP，平成 25 年 4 月 5 日，https://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03_hh_000626.html
- 26) 国土交通省河川局治水課：河川砂防技術基準 維持管理編（河川編），2011.
- 27) 国土交通省河川局河川環境課：堤防等河川管理施設及び河道の点検・評価要領，2019.
- 28) 国立研究開発法人土木研究所：河川堤防における堤体内水位観測システム（打ち込み式水位観測井），土研新技術ショーケース 2020，
https://www.pwri.go.jp/jpn/results/tec-info/siryou/2020/tokyosc/pdf/SC2020_tokyo38.pdf

3. 堤防の被災の分析

3.1. 堤防の被災プロセスと代表的被災事例

3.1.1. 堤防被災の代表的事例

河川堤防の致命的な被害は決壊であり、最近では令和元年（2019）の東日本台風により全国で 142 箇所が決壊したことが記憶に新しく、原因としては越水による決壊と考えられている。また、侵食によるものや浸透によるものも多くを占め、数は少ないものの樋管周りの水ミチが原因の決壊もある。侵食が原因の決壊だと、例えば古くは昭和 49 年（1974）の多摩川、浸透が原因の決壊だと昭和 51 年（1976）の長良川や平成 24 年（2012）の矢部川、樋管周りの決壊だと昭和 56 年（1981）および 61 年（1986）の小貝川における破堤はその代表的な事例である。戦後の決壊の主な事例を表 3.1.1 に示す。

表 3.1.1 戦後の主な堤防決壊事例

発生年	出水原因	代表的被災河川
1947（昭和 22）	カスリーン	利根川
1974（昭和 49）	台風 16 号	多摩川
1976（昭和 51）	台風 17 号	長良川
1976（昭和 56）	台風 15 号	小貝川
1981（昭和 61）	台風 10 号	小貝川
1998（平成 10）	豪雨・台風 5 号	阿武隈川支川（荒川）
2000（平成 12）	東海豪雨	庄内川派川（新川）
2004（平成 16）	新潟・福島豪雨	五十嵐川，刈谷田川
2004（平成 16）	福井豪雨	足羽川
2004（平成 16）	台風 23 号	円山川
2012（平成 24）	九州北部豪雨	矢部川
2015（平成 27）	関東・東北豪雨	鬼怒川，渋井川
2018（平成 30）	7 月豪雨	小田川
2019（令和元）	台風 19 号	吉田川，阿武隈川，那珂川，久慈川，荒川支川（越辺川，都幾川），千曲川
2020（令和 2）	7 月豪雨	球磨川

破堤の多くは水位が堤防高を上回り生ずる越水に起因するもので、ここ数年の決壊事例として挙げられている令和元年（2019）の東日本台風による多数の決壊や、令和 2 年（2020）の 7 月豪雨による球磨川の決壊等、温暖化に伴う雨の降り方等の変化により計画を上回る洪水により数多くの決壊が発生している。一方、昭和 51 年（1976）9 月の長良川安八地区における決壊や、平成 24 年（2012）7 月の矢部川の決壊は、多量の降雨と長時間にわたる高水位のもとでの浸透に起因するものとされており、決壊時の河川水位のピークは計画高水位以下であった。また、昭和 49 年（1974）9 月の多摩川狛江地区における破堤は、堰の周辺の迂回流による侵

食に起因するものである。小貝川の高須地区（昭和 56 年（1981）8 月）および豊田地区（昭和 61 年（1986）8 月）における破堤は、樋門周辺の堤体が弱体化していたことに起因するものとされ、破堤時の河川水位は計画高水位以下かこれを僅かに上回る程度であった。

また、平成 24 年（2012）の矢部川や平成 27 年（2015）の鬼怒川、平成 30 年（2018）の小田川等が記憶に新しいところであるが、決壊には至らなくとも、漏水や侵食による堤防の被害は各地で毎年のように発生しており、これらのなかには水防活動が功を奏して破堤を免れた事例も存在する。やや古いデータとなるが、図 3.1.1 は昭和 60 年（1985）～平成 2 年（1990）の間の堤防被害の発生数を示したものであるが¹⁾、僅か 6 年間をとっても 771 件に上っていることがわかる。これによると、被害の形態としては漏水やのり崩れといった比較的軽微なものが 95%程度を占める。

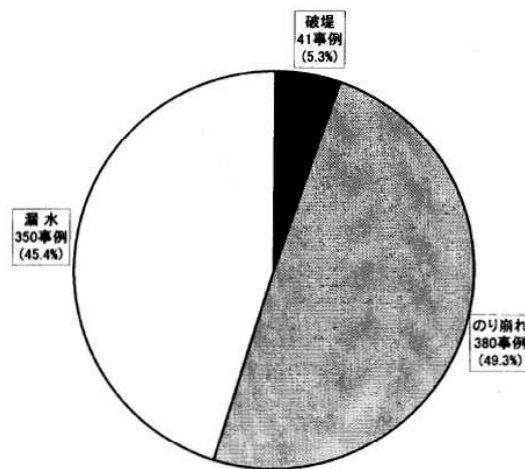
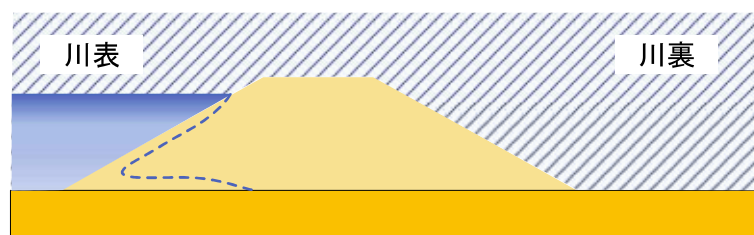


図 3.1.1 河川堤防の被害の形態と発生数

3.1.2. 越水による被災プロセス

土でできた堤防は、洪水が堤防高を上回ると容易に越水破堤を生じ、また計画高水位以下の洪水であっても浸透や侵食に起因して堤防が被災し、破堤に至る場合がある。

起因する堤防の被害は、洪水によって河川水が上昇し、時間の経過とともに、越流水の作用により川裏法尻の洗掘や天端の侵食が進行し、堤防断面が徐々に減少、さらに川裏法尻部の洗掘が進み、又はその途中で川表側からの水圧に耐えきれず堤防が決壊するもので、そこでは降雨の浸透による堤体表層部の脆弱化も深く関係しているものと推察される。



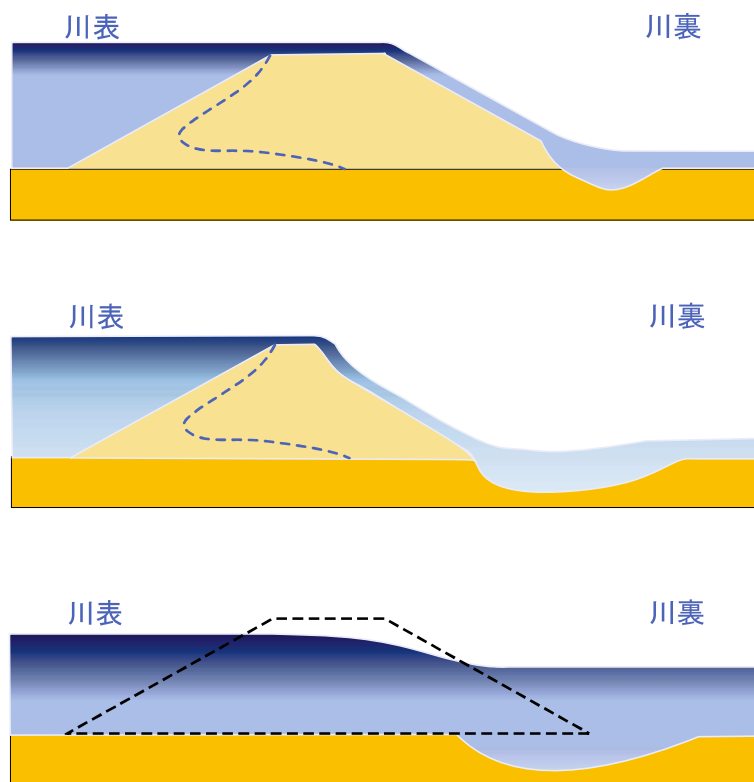


図 3.1.2 越水による決壊のプロセス

写真 3.1.1 は越水中の状況を示す事例で，当該箇所ではその後に破堤に至っている．



写真 3.1.1 越水による決壊の事例²⁾

3.1.3. 浸透による被災プロセス

浸透による堤防の被害は，洪水時の河川水あるいは降雨が堤体および基礎地盤に浸透することによって間隙水圧が上昇し，堤体の見かけの強度が低下する（のりすべり等），あるいは土粒

子が移動する（パイピング等）ことにより生起するもので、降雨は堤体の表層部を脆弱化させることのほかに、堤体の飽和度を増加させ、浸潤面の発達を助長させる原因ともなっている。

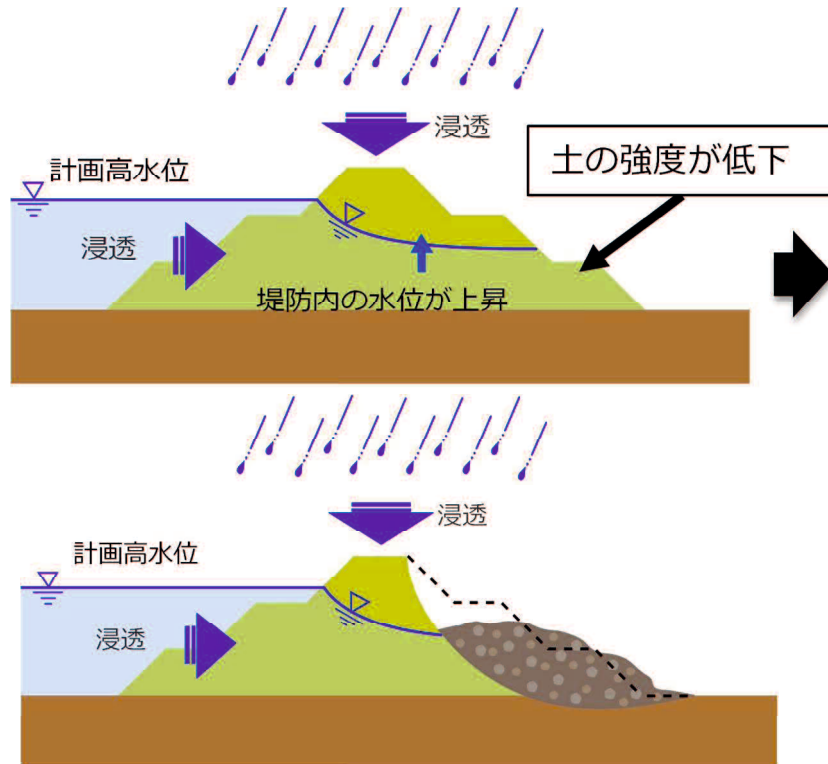


図 3.1.3 堤体浸透の決壊プロセス

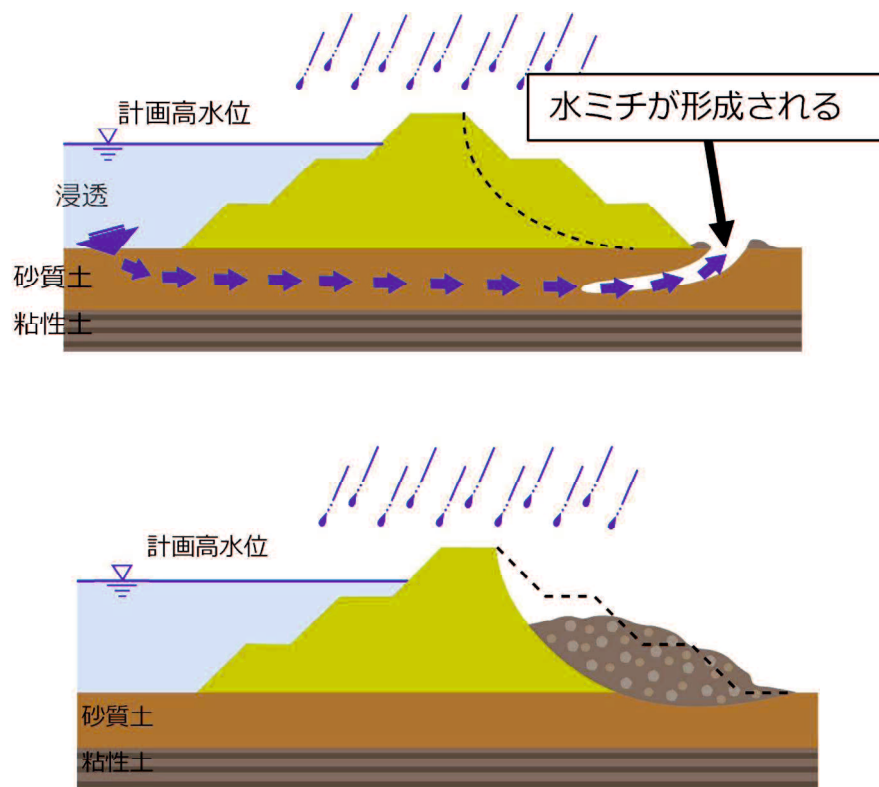


図 3.1.4 基礎地盤浸透の決壊プロセス

写真 3.1.2 は浸透により生じた裏のりのすべり破壊（パイピング）の事例である。

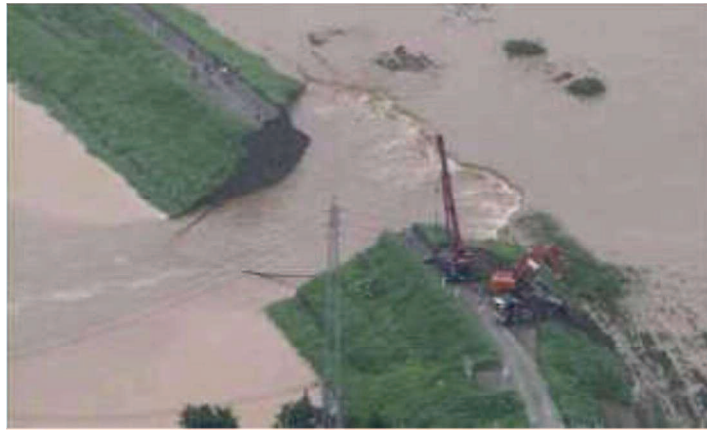


写真 3.1.2 浸透による決壊の事例³⁾

3.1.4. 侵食による被災プロセス

侵食に起因する堤防の被害は、洪水時の流水により堤体表面が侵食、あるいは堤体法尻部が洗掘され、堤体を構成する土粒子が移動することにより崩壊・決壊する直接侵食によるものと、洪水流が徐々に高水敷を削り、最終的に堤体や堤脚部を削ることで崩壊・決壊する側方侵食によるものがある。

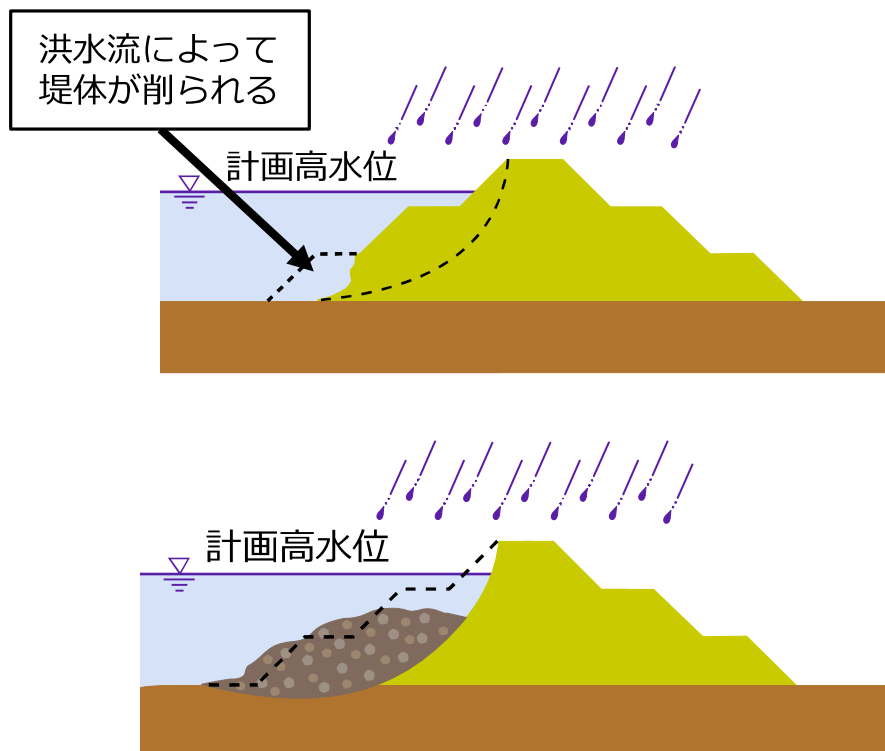


図 3.1.5 直接侵食による決壊のプロセス

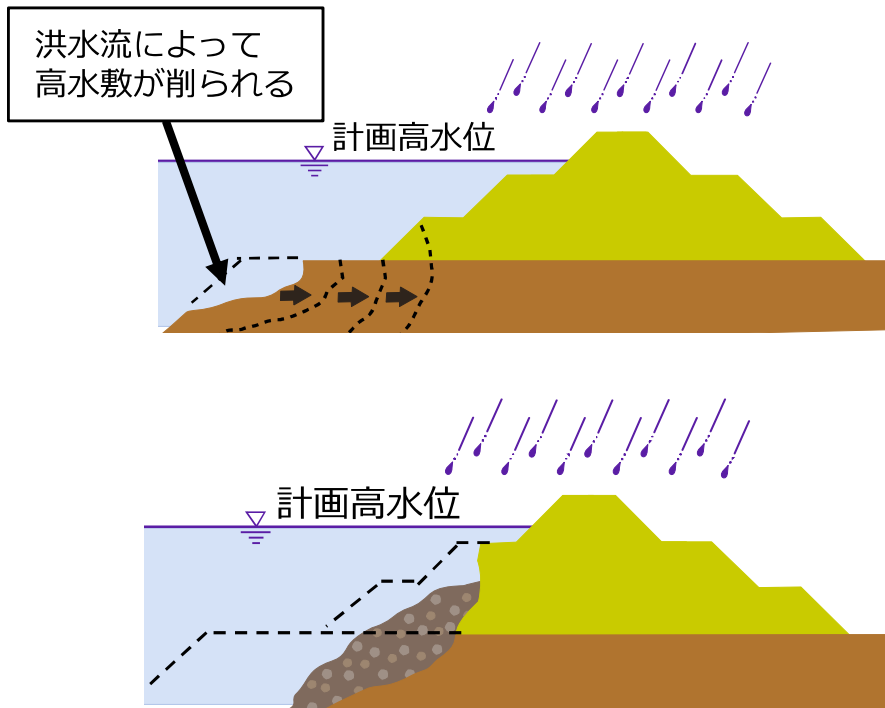


図 3.1.6 側方侵食による決壊のプロセス

写真 3.1.3 は侵食による堤防の被災事例を示したもので、危うく決壊を免れたものである。



写真 3.1.3 侵食による被災の事例

3.1.5. 地震による被災プロセス

大地震時には基礎地盤や堤体の下部に分布する液状化層で液状化が生ずることによって堤防が大きく沈下、変形する被害が見られ、このような場合には、ゼロメートル地帯等では常時の河川水が堤内地に溢れ出し、二次災害（浸水災害）を生起することも想定される。

基礎地盤の液状化による被災は、基礎地盤の軟弱な砂層が地震動によって支持力を失い、堤体が沈下する。このとき、堤体に鉛直方向や水平方向の変形が生じ、天端の陥没や亀裂、噴砂等が発生するものである。

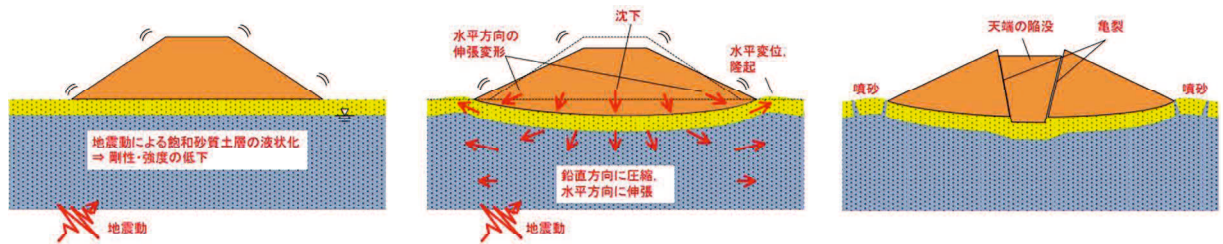


図 3.1.7 基礎地盤の液状化による被災のプロセス⁴⁾

堤体の液状化による被災は、基礎地盤の軟弱な粘性土層の圧密沈下によってめり込んだ堤体下部の飽和砂質土層が地震動によって強度低下し、堤体の亀裂や陥没、法面のはらみだし等が生じるものである。

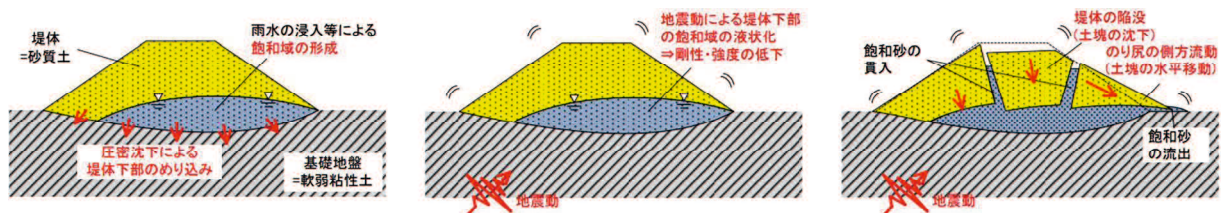


図 3.1.8 堤体の液状化による被災のプロセス⁴⁾

写真 3.1.4 は地震により堤防が沈下、変形した事例を示したもので、基礎地盤の液状化により堤防全体が大きく沈下している状況を確認することができる。



写真 3.1.4 地震による被災の事例

3.1.6. 樋管周りの被災プロセス

樋門等の堤防横断構造物の堤防では、コンクリート等の剛体構造と土の堤防が接する部分に浸透水が集中しやすい、あるいは空隙やゆるみが形成されやすいことから、洪水時にそれらが原因となって大漏水を生じ、破堤に至った事例も少なくない。

樋管周りの被災は、杭で支えられている樋門等構造物の周辺堤防が沈下，これに伴い堤防と構造物との間に空洞が形成され，表から裏に抜ける水ミチへと発達するというプロセスをたどって，最悪の場合決壊に至る

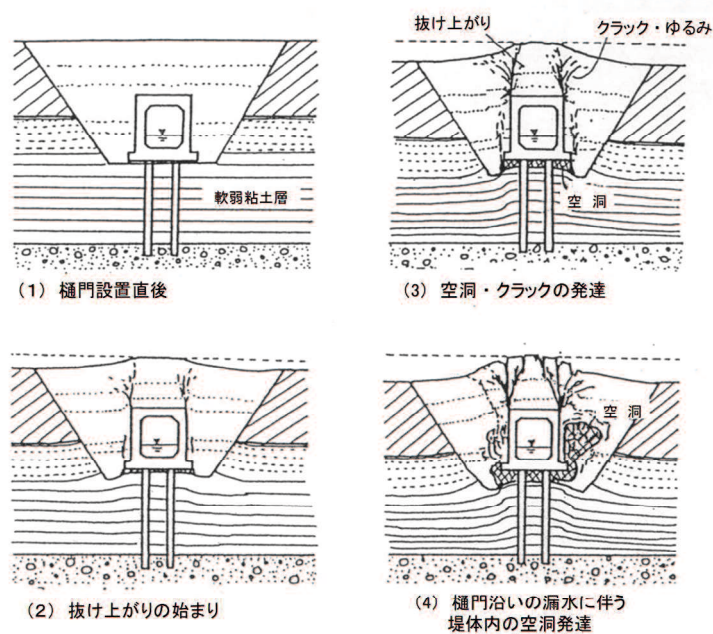


図 3.1.9 樋管周りの空洞や緩みの発生プロセス⁵⁾

写真 3.1.5 は樋門周辺が弱点となって決壊に至った昭和 56 (1981) 年の小貝川高須樋門周辺の事例である。



図 3.1.5 樋管周りの被災の事例

3.2. 利根川の堤防被災（堤体とパイピング）

3.2.1. 被災の概要

(1) 被災の概要

利根川は、その源を群馬県利根郡みなかみ町の大水上山（標高 1,831m）に発し、途中、渡良瀬川、鬼怒川、小貝川等の支川を合わせ、千葉県銚子市で太平洋に注ぐ、幹川流路延長 322km、流域面積 16,840km²の一級河川である。

その流域は、茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県、千葉県及び東京都の 1 都 5 県にまたがり、首都圏を擁した関東平野を流域として抱え、流域内人口は日本の総人口の約 10 分の 1 にあたる約 1,309 万人に達している。

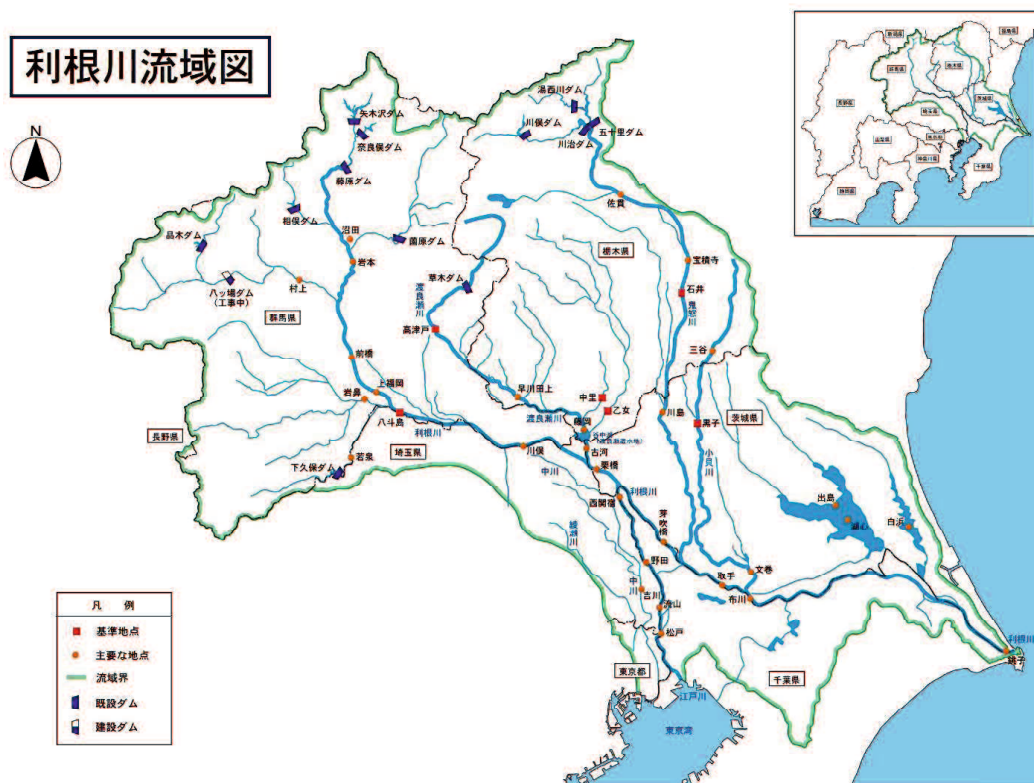


図 3.2.1 利根川の流域⁶⁾

(2) 被災時外力

近年の主な洪水としては、平成 13 年、平成 27 年、令和元年のものが挙げられる。

平成 13 年 9 月洪水では、台風 15 号による出水に伴い、利根川上流の 7 観測所で警戒水位を大きく上回る水位を観測しており、このときは、首都圏氾濫区域である利根川右岸の埼玉県加須市大越地先で、堤体および基礎地盤において漏水が発生している。この漏水については、大きな被害には至らなかったものの、重要水防箇所以外の箇所で発生したこと、計画高水位には達しない水位で発生したこと等が重視され、これがきっかけとなって利根川の断面拡大工法による堤防強化が実施されるにいたっている。

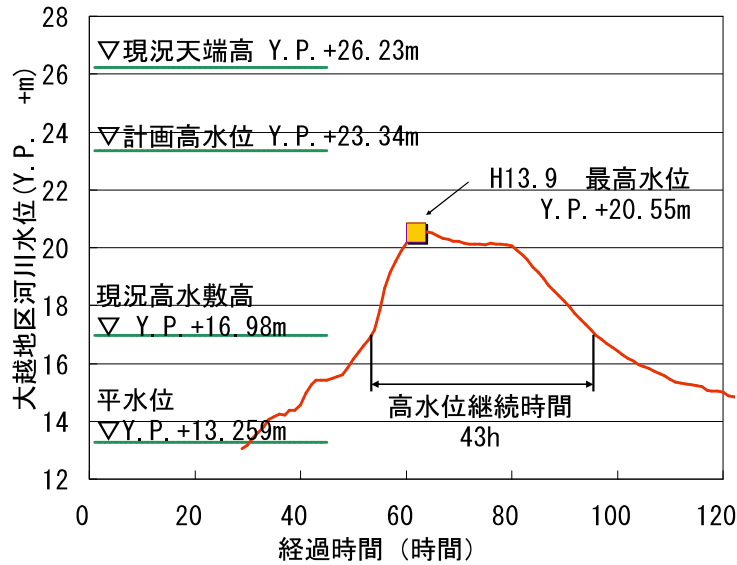


図 3.2.2 平成 13 年 9 月台風 15 号における河川水位 ⁷⁾

(3) 築堤履歴

利根川上流部の一般的な築堤履歴を図 3.2.3 に示す。これによると、利根川堤防は、明治 33 年の改修計画から昭和 14 年の増補計画、昭和 24 年の改修改定計画、改修昭和 55 年新改修改訂計画まで大きくは 4 回の改修計画による整備とそれ以降、広域地盤沈下対策の嵩上げも行われており、堤防の土質構造は非常に複雑である。

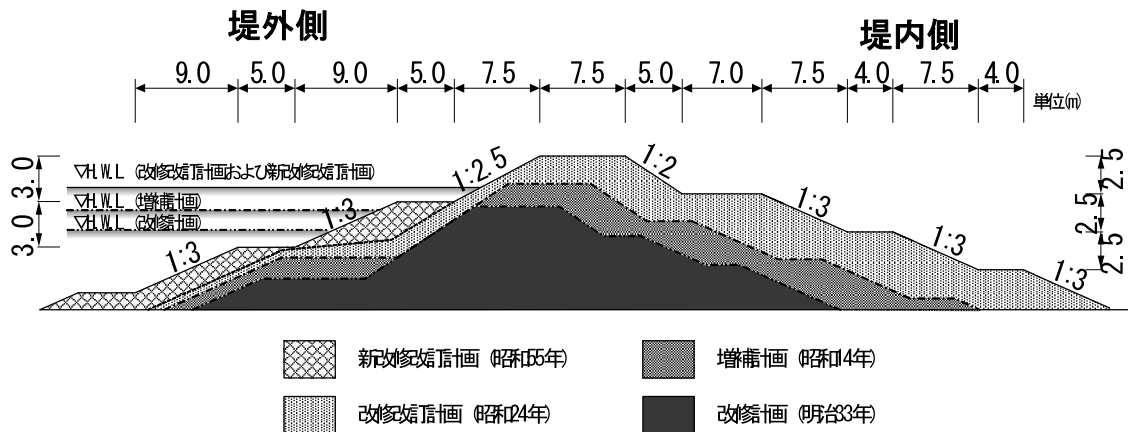


図 3.2.3 利根川上流部堤防の一般的な土質構造 ⁷⁾

(4) 被災箇所

平成 13 年 (2001 年) 9 月に埼玉県加須市大越地先の利根川右岸 139k 付近の河川堤防において、透水性の堤体と基礎地盤に起因する大規模な漏水と噴砂が発生した (写真 3.2.1)。現地の堤防は、堤高約 12m、敷幅約 100m と、我が国で有数の規模の河川堤防であり、仮に決壊した場合、その氾濫水が埼玉県を流下し東京都まで達するため、首都圏が壊滅的な被害を受ける恐れがある。そこで、この箇所を含む利根川上流の右岸堤防については、「首都圏氾濫区

域堤防強化対策」として、堤防の浸透に対する安全性を確保するために、堤防裏のり勾配を3割から7割にする断面拡大工法による堤防強化対策を実施された。

漏水箇所では、堤内地で2箇所の噴砂を伴う基盤漏水と堤内側小段からの堤体漏水が発生した。漏水箇所と堤防の位置関係を図3.2.4および図3.2.5に、漏水状況を写真3.2.1に示す。



写真3.2.1 被災の状況²⁾ (左 図3.2.4中、写真①の箇所、右 図3.2.4中、写真②の箇所)

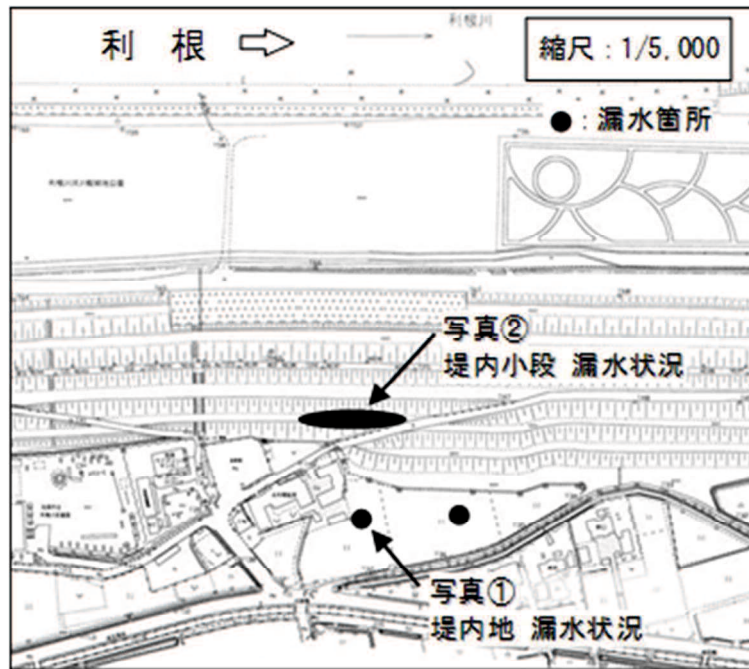


図3.2.4 被災の状況と被災位置平面図⁷⁾

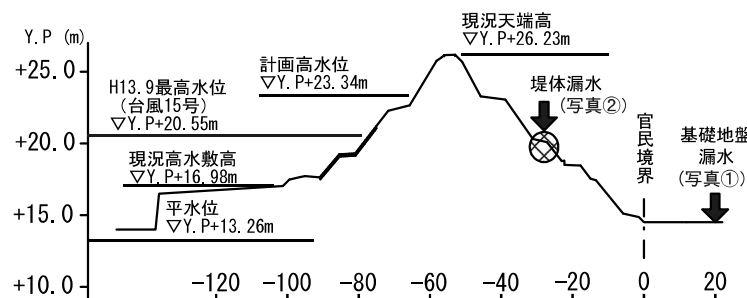


図3.2.5 漏水箇所断面図⁷⁾

(5) 被災箇所 の地形

被災箇所 の地形について、旧地形図(明治 17 年 (1884))と現在の地形図(平成 13 年 (2001))をもとに、漏水箇所 付近の堤防法線 の変化を整理した。これによる、漏水箇所 は明治 33 年 (1900) 改修計画策定以前に存在した旧堤と現在の堤防の法線が斜めに交差する位置に相当し、堤体内における旧堤の位置が上下流方向で異なる状況にあることが推察された。

また、地元の古老の話によれば、対象箇所 付近は以前から、大きな洪水があると度々堤内地で漏水が発生していたことがわかり、もともと基盤漏水が発生しやすい地盤条件にあったことがわかった。



図 3.2.6 明治 17 年当時の堤防と現在の堤防の比較⁷⁾

3.2.2. 被災箇所 の調査

(1) ボーリング試験結果

堤体の横断方向に 3 箇所以上のボーリング調査が実施されているのは、138.0k, 139.0k, 140.0k の 3 断面である。いずれも堤防詳細調査における検討断面である。また被災断面は、139.0k-40m であり、これを図 3.2.8~図 3.2.11 に示した。また、併せて堤体の土質特性については 138.0k, 139.0k, 140.0k の 3 断面で把握されている。

これらの調査結果から考察される堤体の土質構成は、砂質土が堤外から堤内に向かって連続していると考えられるところや、堤体中央部が砂質土であり、粘性土で表面が覆われていると考えられるところがあるなど、複雑である。しかしながら、表層に粘性土が用いられていることから、雨や外水の浸透には比較的強い堤防ではないかと考えられる。

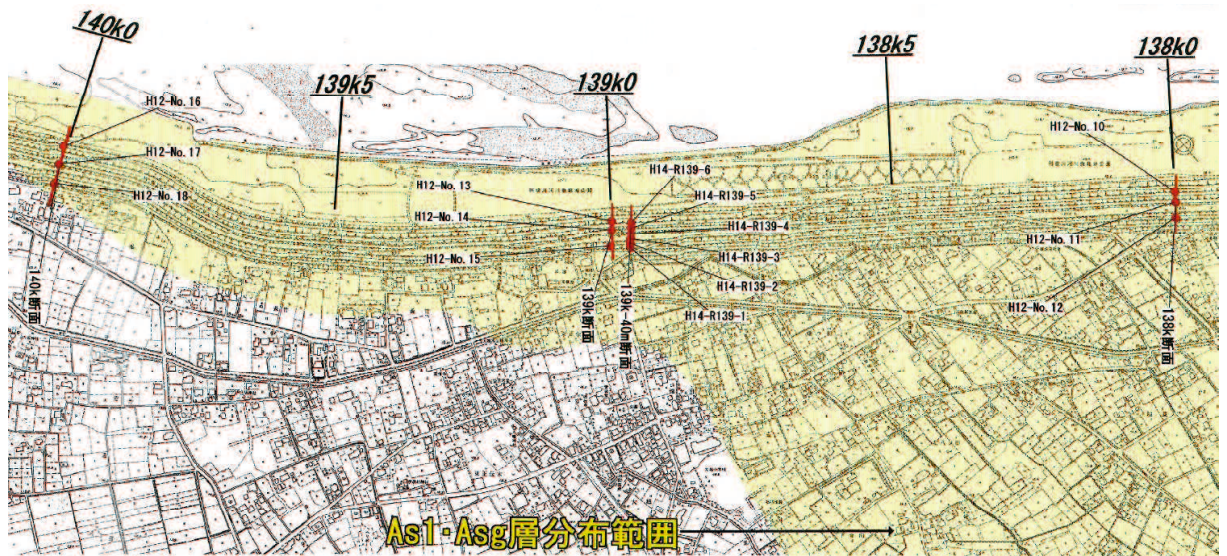


図 3.2.7 ボーリング調査箇所

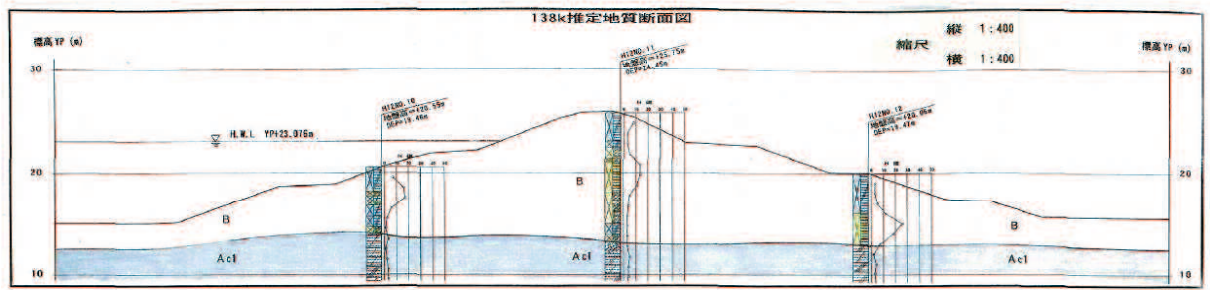


図 3.2.8 138.0k ボーリング調査結果

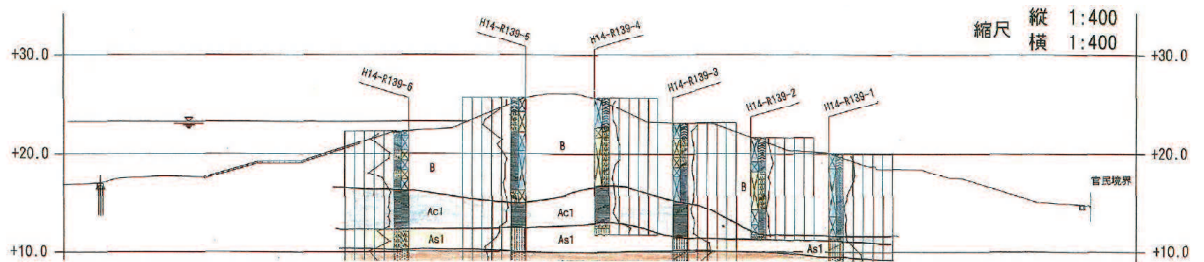


図 3.2.9 139.0k-40m 被災箇所ボーリング調査結果

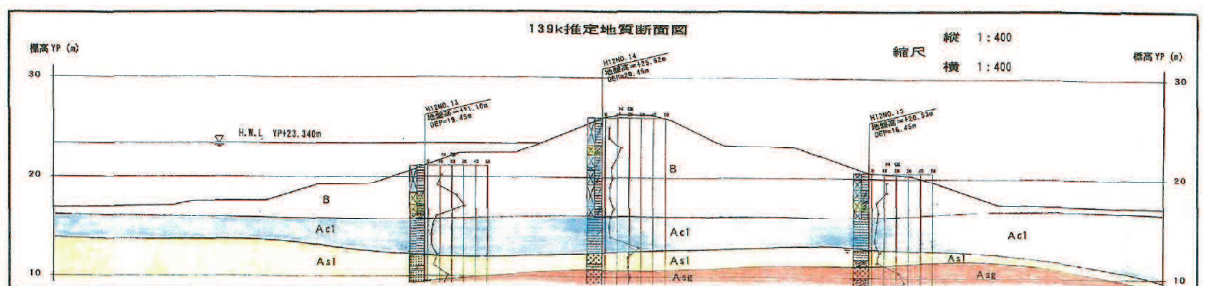


図 3.2.10 139.0k ボーリング調査結果

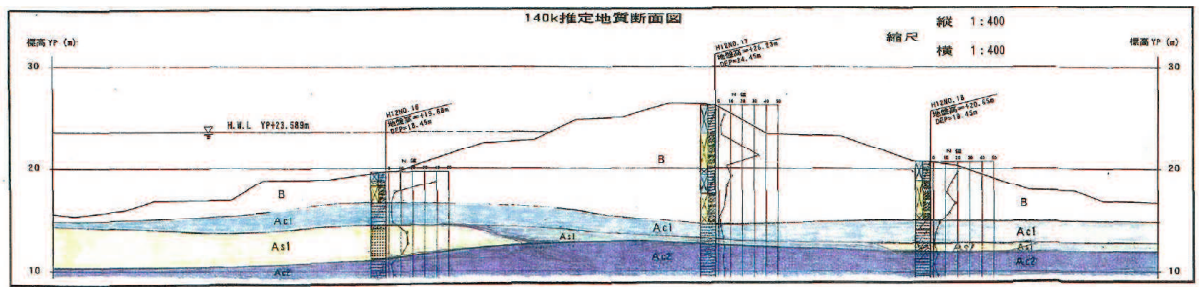


図 3.2.11 140.0k ボーリング調査結果

基礎地盤の土質構成は、従来は図 3.2.8～図 3.2.11 で示した、堤防のボーリング調査結果をもとに作成していたが、ここでは、浸透が問題となる基礎地盤の土質構成を把握することを目的として、堤内地側の既存ボーリング調査結果も活用して、基礎地盤堤防縦断方向について堤防のり尻部及び堤体のり尻から約250m 堤内側で、堤防横断方向については、139.5k, 139.0k, 138.5k の各断面で堤体のり尻から約 500m 付近までの地質断面図を作成し、図 3.2.12～図 3.2.14 に示した。

これらから基礎地盤性状を推定すると、河道部から堤内側にかけて薄い粘性土(Ac1)の下位に透水層(As1・Asg)が分布する。そして、被災断面に位置する 139k 付近より上流側では、その層厚が堤体付近では比較的厚く、堤体から遠ざかるに従って急激に層厚が薄くなる。

被災断面である 139.0k 付近の堤防横断方向の基礎地盤の土質構造について地質断面図を作成すると、いわゆる「行き止まり型」の土質構造を呈することが明らかになっている。一方、下流側では、透水層はやや薄いものの堤内地側 500m 付近まで、ほぼ水平に分布している（図 3.2.16 参照）

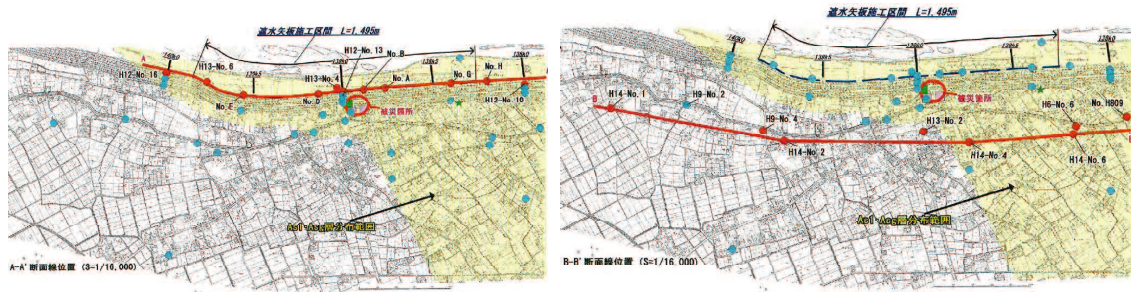


図 3.2.12 基礎地盤土質縦断図の作成位置 (左 : A-A'断面 右 : B-B'断面)

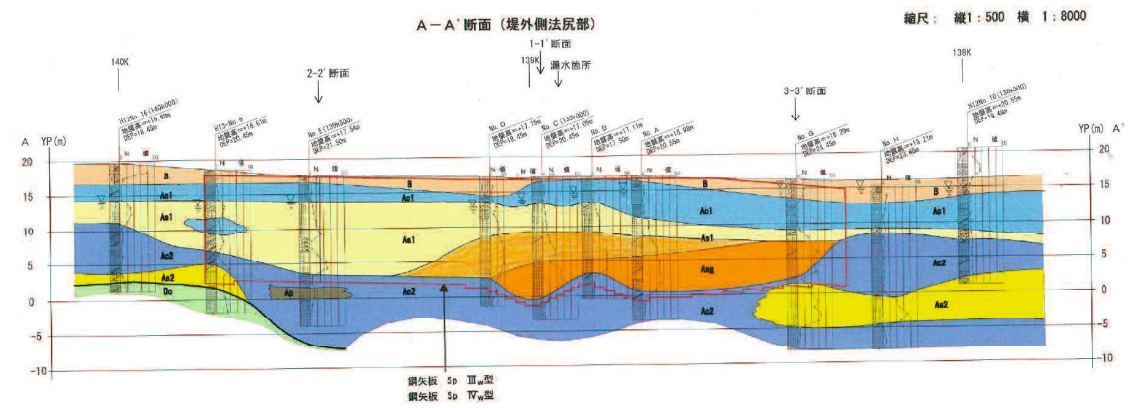


図 3.2.13 A-A'断面の基礎地盤土質縦断図

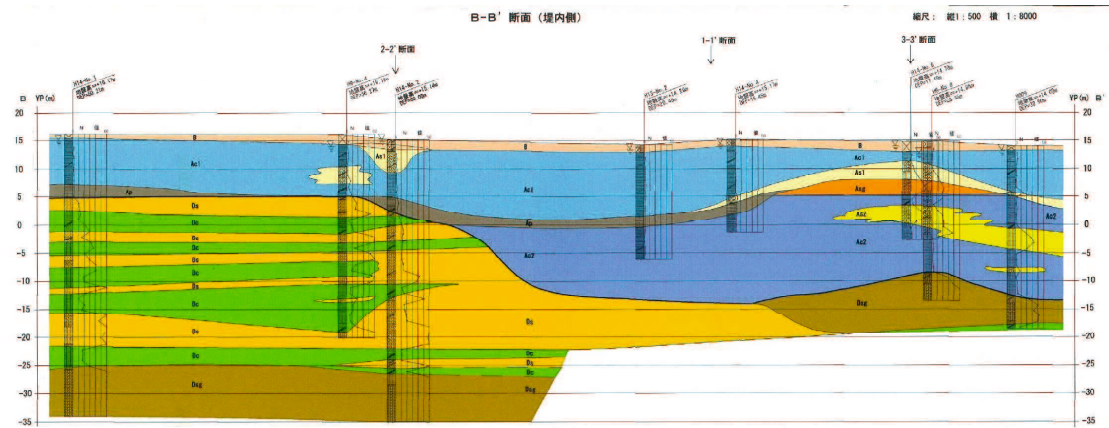


図 3.2.14 B-B'断面の基礎地盤土質縦断図



図 3. 2. 15 被災断面基礎地盤土質縦断図の作成位置

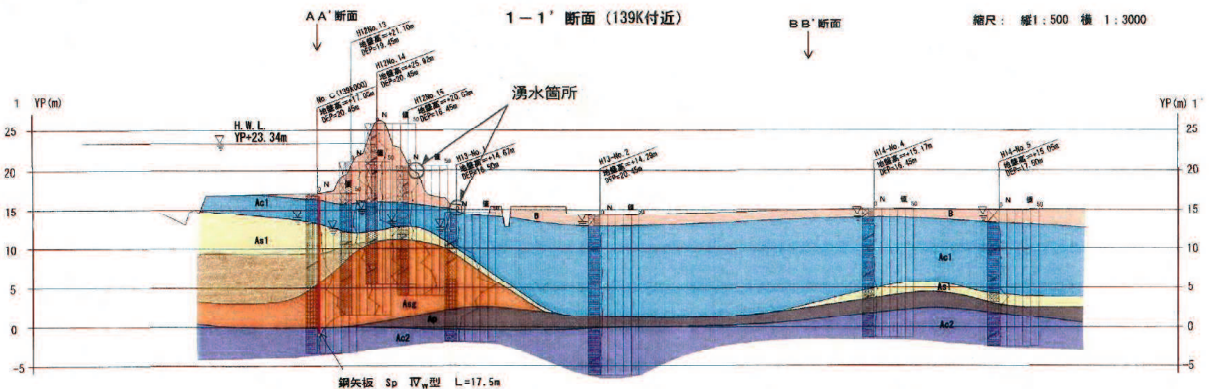


図 3. 2. 16 被災断面基礎地盤土質縦断図の作成位置

(2) 開削調査結果

1) 基礎地盤漏水箇所の開削調査結果

被災箇所のうち、噴砂を伴う基礎地盤漏水箇所を対象に深度 1.6m 付近までトレンチ調査を実施した。上流側の基盤漏水箇所は、直径 40cm 程度の噴砂孔が深部より伸び、直径 1.0m 程度のドーム上の空洞を通り、側面から新たな直径 10cm の噴砂孔が地表面まで繋がっていた。地表面付近は、割れ目が発達し、その割れ目には、噴砂が充填されていた。一方、下流側の基盤漏水箇所では、直径 20cm 程度の噴砂孔が深部より伸び、深度 0.45m 付近まで繋がりが、その上位は網目状のクラックを通り地表面に達していた。そして、クラックには、噴砂が充填されていた。また、深部から繋がる噴砂孔には、その途中で 2 箇所直径 50～60cm 程度のこぶ状の空洞が確認された。



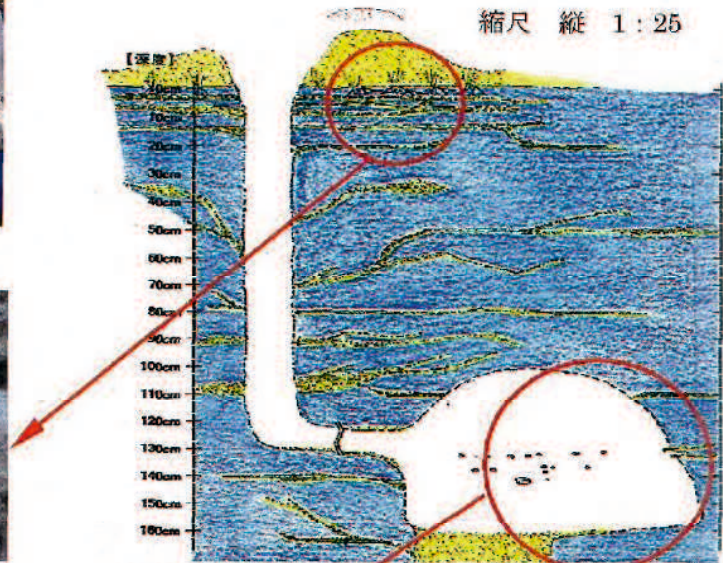
湧水箇所の地表状況



地表部の砂の介在状況

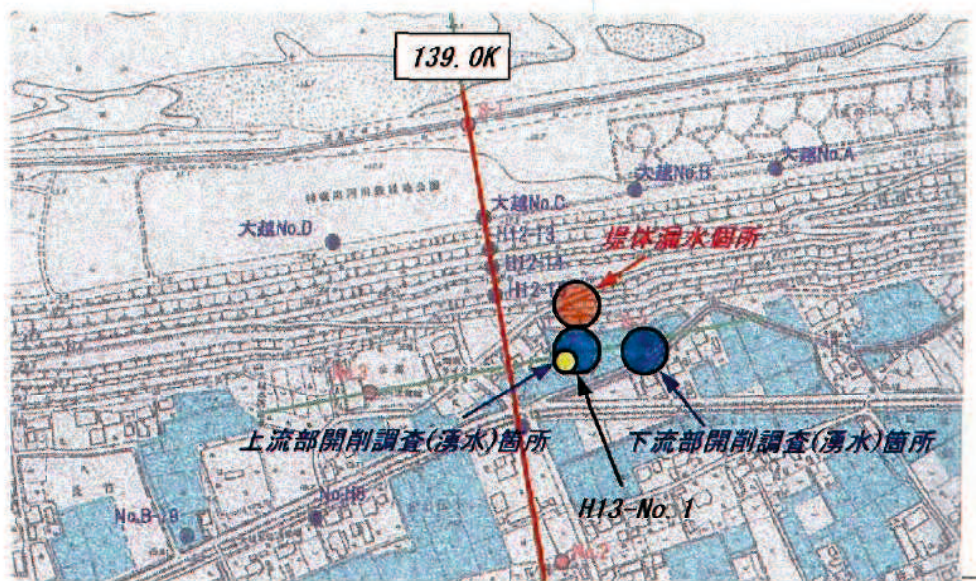


空洞状況



地表面には、1箇所の大きな噴砂が見られ、その噴砂を対象に開削調査を行った。開削調査の結果をスケッチ図として示した。
 噴砂は、深部から直径約40cmの噴砂孔より噴いたと考えられる。この噴砂孔の上部には直径約1m程度の大きな空洞が確認された。そして、その空洞より横に直径約10cm程度の横穴が約60cmの長さで伸び、その穴は方向を変え地表面まで繋がっている。
 また、地表面より浅部20cm程度の間は、割れ目が発達しており、その割れ目には砂が介在している。また、噴砂孔の周辺部に見られる小さな噴砂は、この砂が噴出したものと考えられる。

上流側の湧水箇所の開削断面スケッチ



開削調査位置平面図

図 3.2.17 上流側基盤漏水箇所のトレンチ調査

2) 堤体の部分開削調査

被災箇所においては、旧堤と現在の堤防の法線が斜めに交差する位置に相当していることから、堤防裏のり尻から裏のり小段付近にかけて部分的な開削調査を実施した。その結果、被災箇所の堤防においては、様々な地質が混在している状況であった。

- ① 開削調査の結果、全体に不均質な堤防である。堤体材料は、各築堤年次により異なり、被災断面では、改修計画（明治 33 年（1900））の堤体の周辺部及び改修改訂計画（昭和 24 年（1949））の堤体材料は砂質土を主体とし、他の築堤年次の築堤材料は粘性土で構成される。（図 3.2.18 参照）
- ② 上流側第 2 段階目と 3 段階の開削面に改修計画（明治 33 年（1900））以前の旧堤防と思われる堤体土が確認された。旧堤防と考えられる堤体の高さは、下流側の旧堰堤跡の高さと比較しても、 妥当な高さである。（図 3.2.19～図 3.2.20 参照）
- ③ 旧堤防は、開削面に現れた形状より、のり尻の道路に沿う方向にあると考えられる。（図 3.2.21 参照）
- ④ 改修改訂計画（昭和 24 年（1949））の築堤盛土は、特に不均質で、湊深工事の配管のフランジが確認されたほか、菓子袋等ゴミが混在している。
- ⑤ 堤体の湧水箇所は、下部は粘性土を主体とする盛土、上位は不均質に砂を湿る礫湿りロームで覆われている。そして、その間に、かつての工事用道路と推察される空隙の多いローム質砂礫が厚さ 0.6m、幅 5m でほぼ水平に分布している。

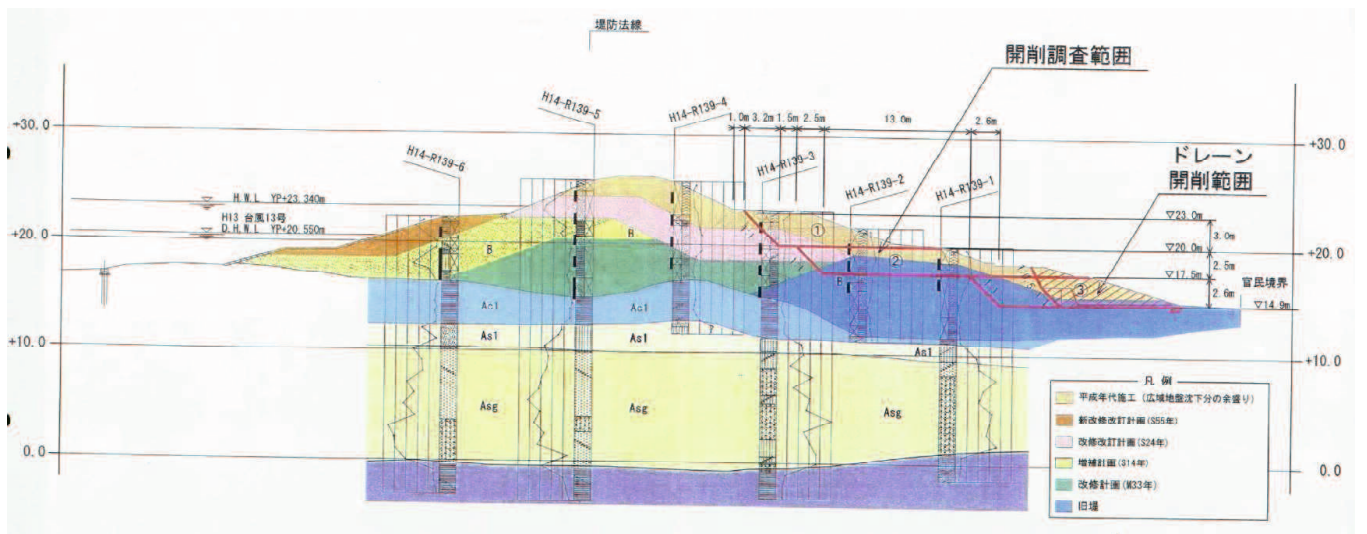


図 3.2.18 堤防の開削調査箇所断面図

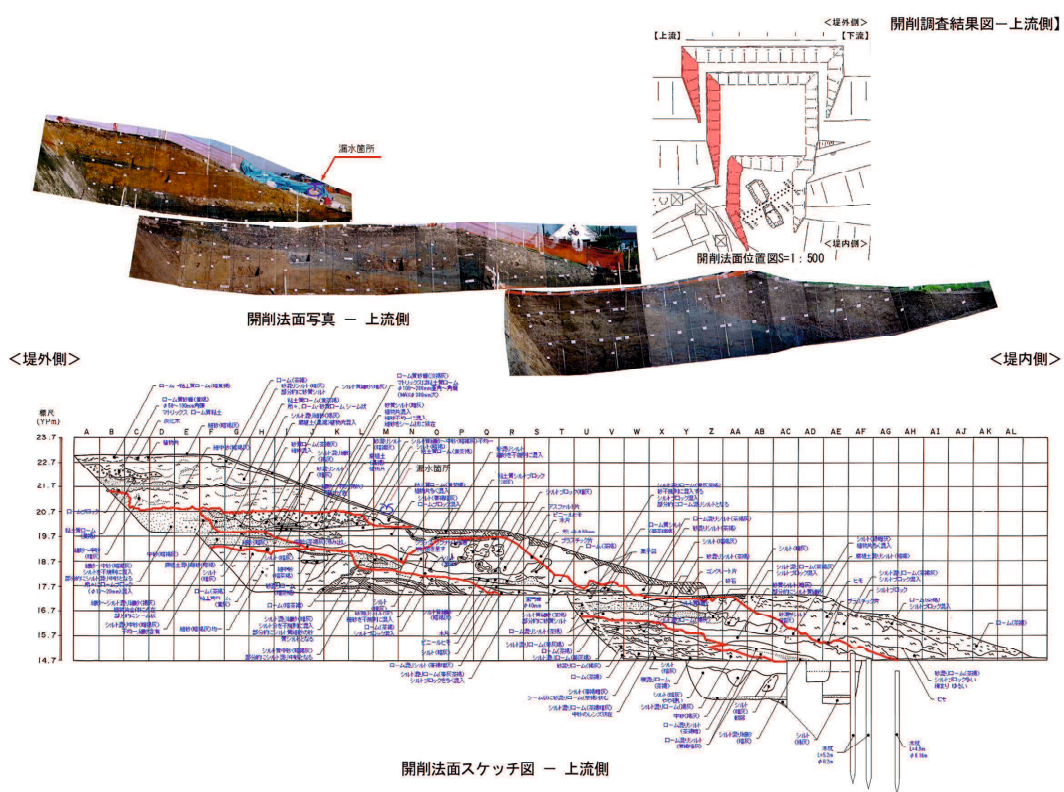


図 3.2.19 堤防の上流側開削断面図

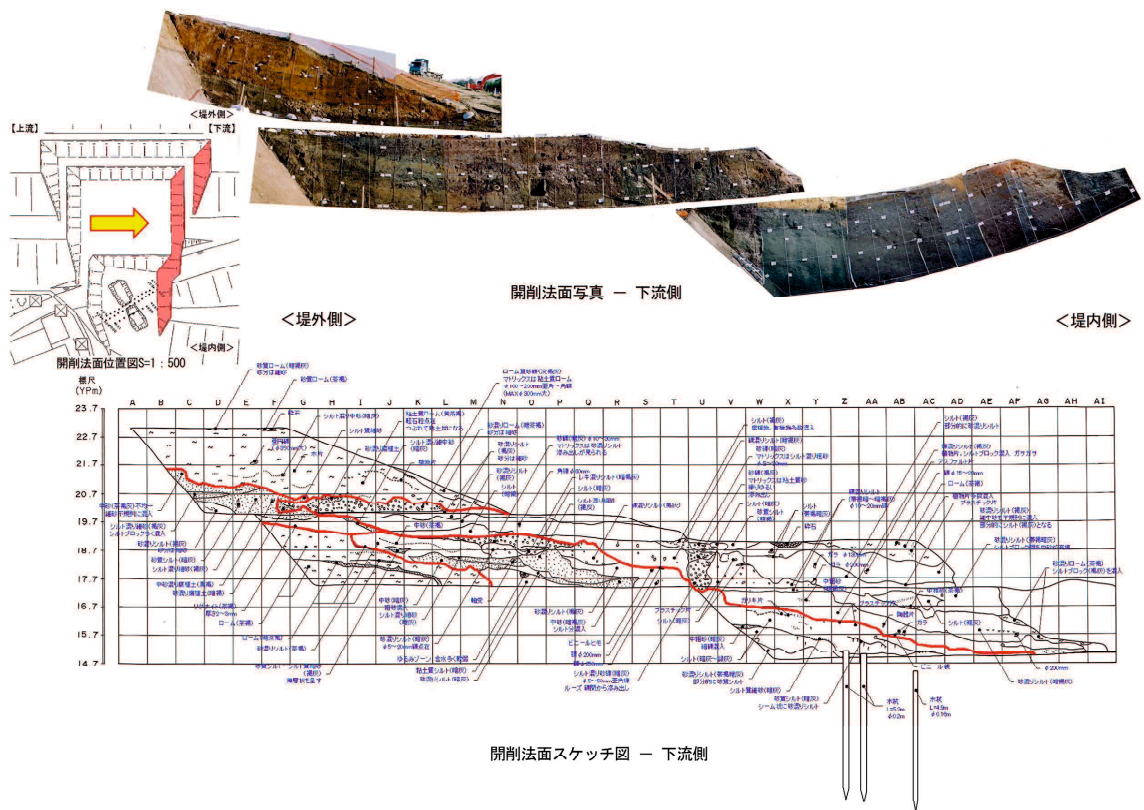


図 3.2.20 堤防の下流側開削断面図

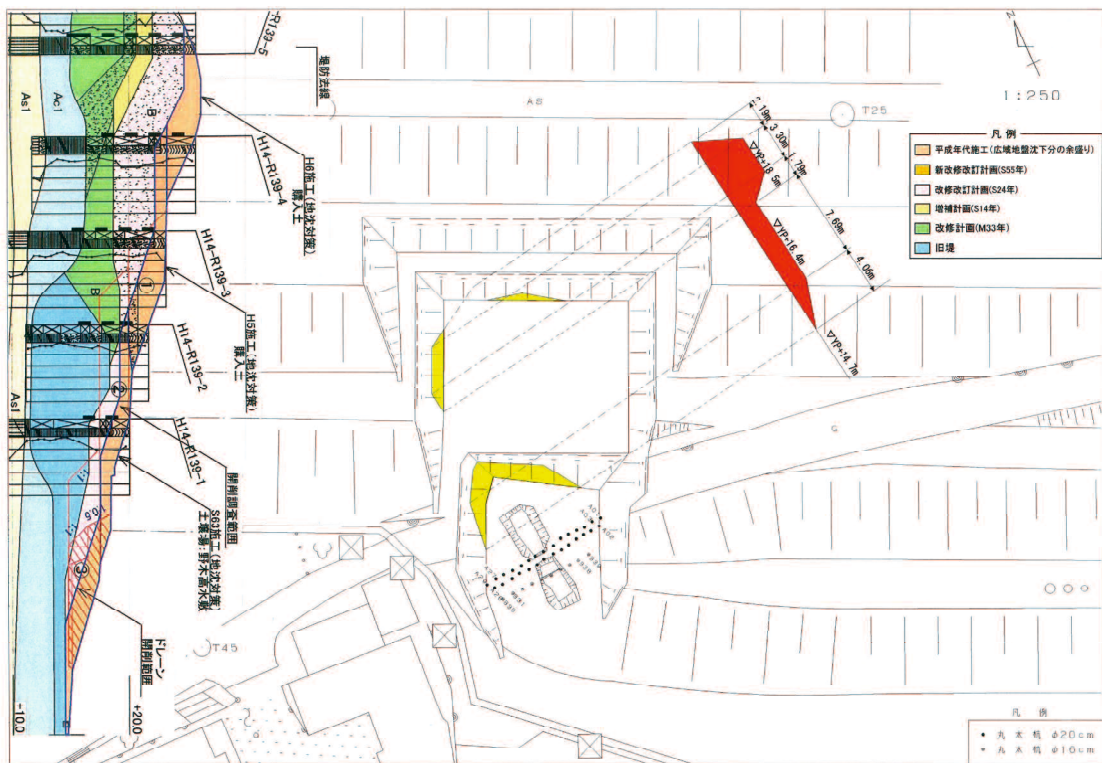


図 3.2.21 開削調査による旧堤防推定図

(3) 堤防土質構造

過去の文献調査やボーリング調査結果，開削調査結果より被災箇所の堤防断面について推定を行った。

被災断面では，改修計画(明治 33 年 (1900))の堤体の周辺部及び改修改訂計画 (昭和 24 年 (1949))の堤体材料は砂質土を主体とし，他の築堤年次の築堤材料は粘性土で構成される。被災箇所の堤防の構造は，堤内側に，改修計画(明治 33 年)以前の旧堤防があり，その堤外側に，この改修計画の堤防が築堤された。その際，旧堤防との間は，凹地になるため，埋められたと考えられる。そして，堤頂部に増補計画(昭和 14 年 (1939))の嵩上げ，改修改訂計画(昭和 24 年 (1949))の堤体断面の拡大，新改修改訂計画(昭和 55 年 (1980))の堤外側の小段の拡幅，そして，広域地盤沈下対策の平成年代施工 (一部，昭和 63 年度 (1988) 施工)が行われたと推察される。なお，増補計画 (昭和 14 年 (1939))の築堤は，堤内側に旧堤防の盛土があるため，この断面では堤頂部のみの嵩上げになったと考えられる。(図

3.2.22 参照)

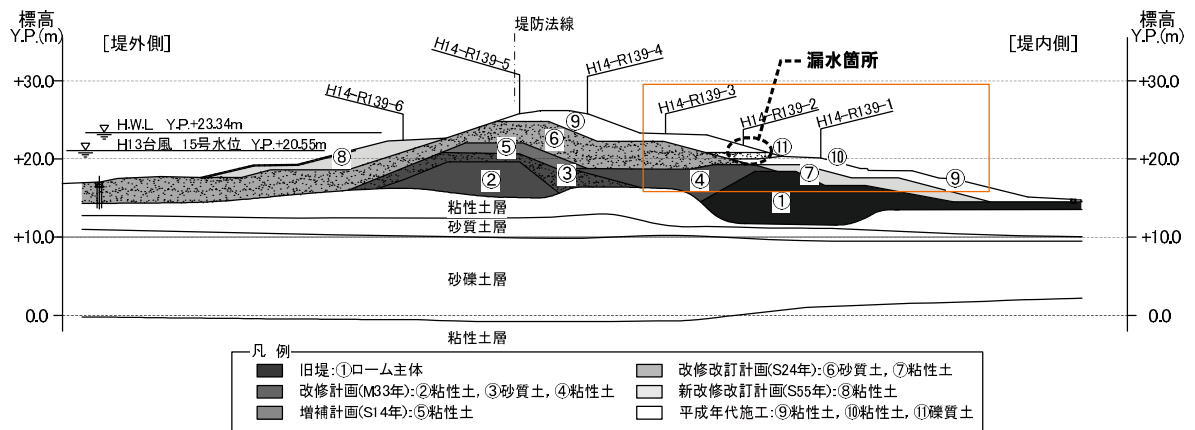


図 3.2.22 被災箇所の堤防の土質構造⁷⁾

また，基礎地盤の土質構造については，基礎地盤に分布する透水層は，堤外側から堤内側に連続して分布するものの，堤内側に向かって次第に層厚が薄くなって消滅する，いわゆる“行き止まり型”の土質構造を呈している。その上位には粘性土を主体とする被覆土層が 5m 弱の厚さで分布しているが，その内部は空隙やクラックが多く不均質な状態にあった。

3.2.3. 被災のメカニズム推定

(1) 堤体漏水

過去の文献調査やボーリング調査結果、開削調査結果より堤体漏水箇所の被災メカニズムについて推定を行った。

過去の文献調査と開削調査結果からは、粘性土を主体とする旧堤（明治33年（1900））の堤体の周辺部に、砂質土主体の改修改訂計画（昭和24年（1949））の堤体が表腹付けされ、他の嵩上げを行った築堤年次の築堤材料は粘性土で構成されていることが分かる。

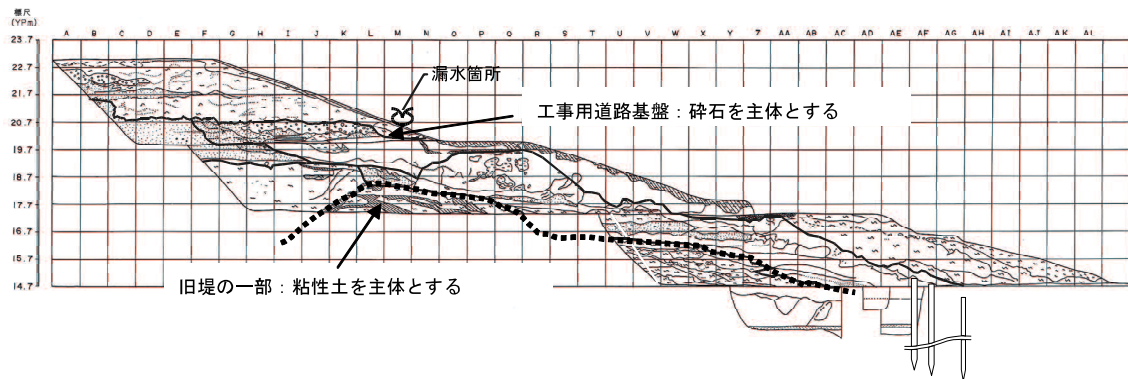


図 3.2.23 堤内側のり面の開削調査結果⁷⁾

さらに堤体漏水箇所の地形を見ると、新旧地形図の堤防法線形の重ね合わせより明治33年改修計画策定以前に存在した旧堤と現在の堤防の法線が斜めに交差する位置に相当し、堤体内における旧堤の位置が上下流方向で異なる状況にあることが推察され、このことは漏水箇所付近では裏のり尻に旧堤があることを裏付けている。

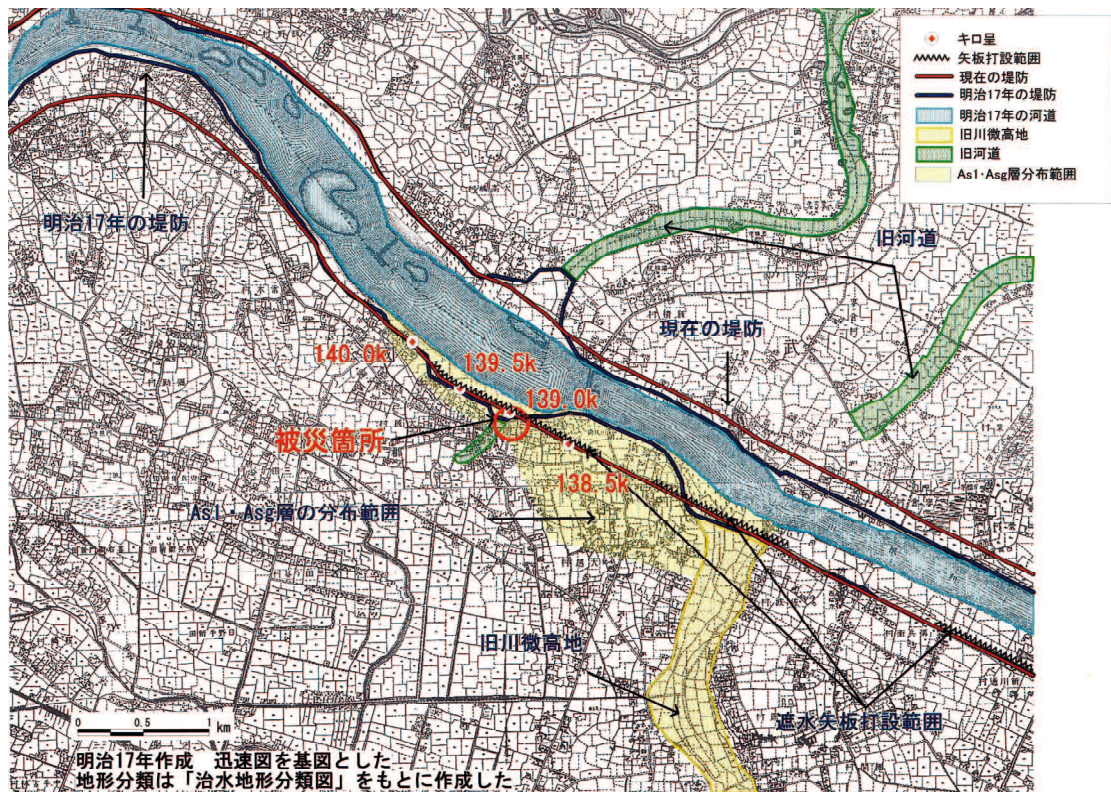


図 3.2.24 過去の地形図との組み合わせ

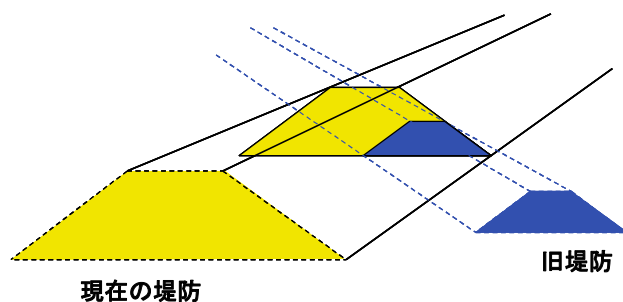


図 3. 2. 25 現堤と旧堤の交差部における断面構造模式図

これらの調査結果より,堤体漏水箇所は明治 33 年 (1900) 以前の旧堤とその後に築造された新堤が交差する場所に合致し,粘性土を主体とする旧堤が堤内側のり尻付近に出現するという土質構造の特徴があり, 堤体内に浸透した降雨か河川水が旧堤で堰上げられ (図中①), 嵩上げ, 拡幅により施工した旧堤上部の比較的透水性が高い土が分布する小段付近において漏水が発生 (図中②) したものと考えられた.

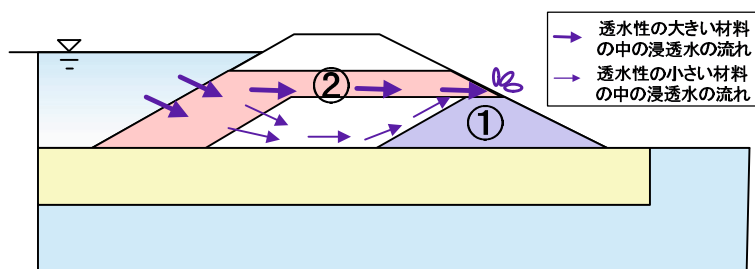


図 3. 2. 26 堤体漏水のメカニズム

(2) 基礎地盤漏水

堤体漏水と同様に, 過去の文献調査やボーリング調査結果, 開削調査結果より堤体漏水箇所の被災メカニズムについて推定を行った. 被災箇所のボーリング調査結果によると, 基礎地盤に分布する透水層は, 堤外側から堤内側に連続して分布するものの, 堤内側に向かって次第に層厚が薄くなって消滅する, いわゆる“行き止まり型”の土質構造を呈している.

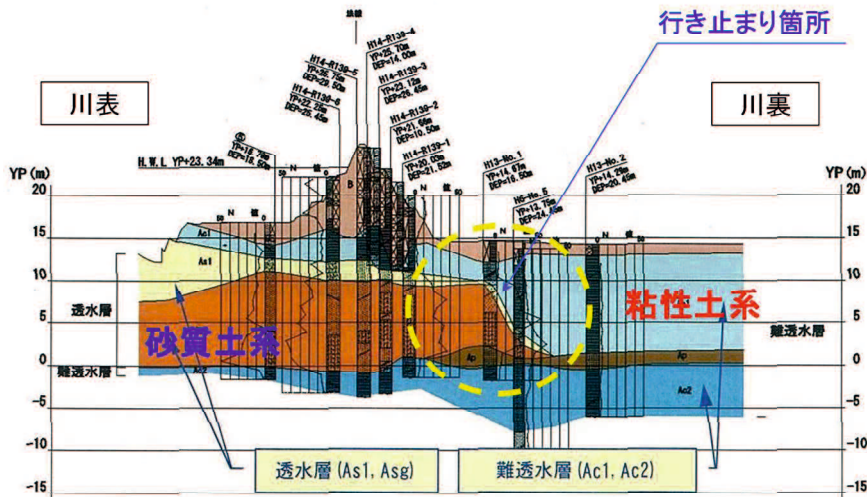


図 3. 2. 27 被災箇所地質断面図⁷⁾

被災箇所周辺部のボーリング調査結果によると、被災箇所付近の透水層の分布状況は、被災箇所上流側から被災箇所にかけて狭く、下流側にかけて序々に広がっていく土質構造を持っていることが分かっており、このことは、被災箇所周辺の基礎地盤構造は行き止まり型地盤を形成していることを裏付けている。

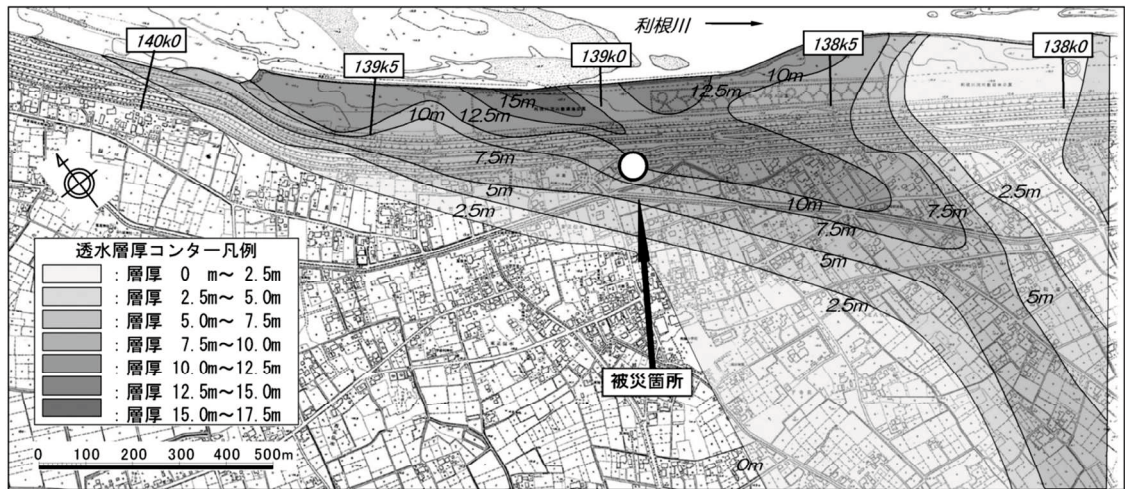


図 3. 2. 28 被災箇所透水層の平面分布⁷⁾

これらのことから、基礎地盤の土質構造からみて透水層内の水圧が堤内地側で上昇しやすい条件下にあったこと、そのため“行き止まり型”の土質構造となり、堤内地において被覆土層の下面に高い水圧が作用することで被覆土層を通して水が砂とともに湧出したものと考えられる。

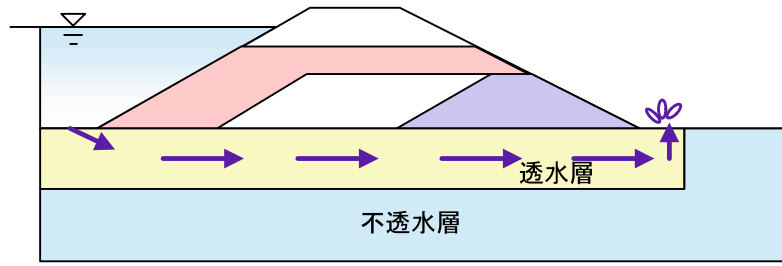


図 3.2.29 基礎地盤漏水のメカニズム

3.3. 江の川の堤防被災（パイピング）

3.3.1. 被災の概要

(1) 被災の概要

江の川は、流域面積 1,981km²、直轄管理区間延長 164.2km の一級河川である。平成 30 年（2018）7 月豪雨の影響により、総雨量としては、被災箇所近傍の川本雨量観測所において、7/5 0:00 から 7/9 23:00 までで計 221mm という猛烈な雨が降り、水位は計画高水位を一部上回る記録的な洪水が発生し、江の川右岸下原地先 15.0k~16.0k 区間と、江の川右岸鹿賀地区 27.8k~29.0k の 2 箇所において、堤体のり崩れや基礎地盤からの噴砂等の被災が発生した。

特に鹿賀地区においては、平成 30 年（2018）7 月 7 日に 28.4k~29.0k では延長約 11m（天端道路亀裂を含むと 15.2m）、27.8k~28.4k では延長約 10m の大規模なり崩れが発生した。

(2) 被災時外力

1) 降雨

図 3.3.1 に示した被災時の降雨としては、被災箇所近傍の川本雨量観測所において、総雨量として 221mm、時間雨量の最大値で 30mm を記録している。

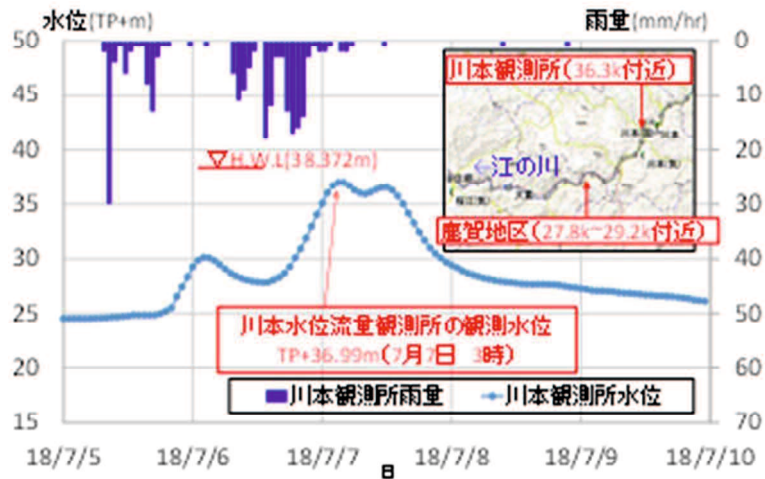


図 3.3.1 川本観測所における降雨・水位波形⁸⁾

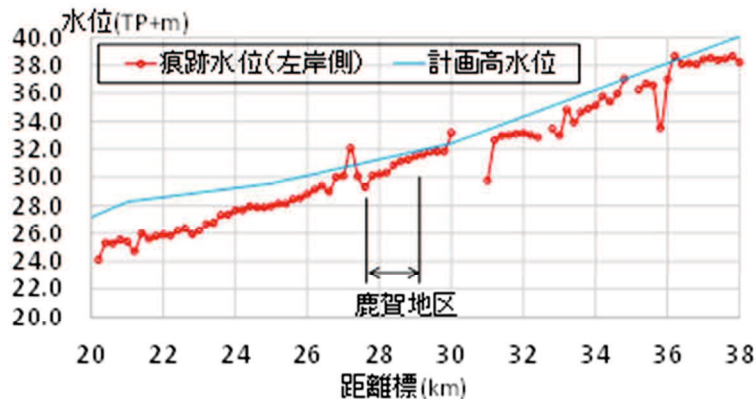


図 3.3.2 出水時の鹿賀地区付近の痕跡水位⁸⁾

2) 水位

被災時の水位としては、計画高水位を一部上回る箇所がある等、記録的なものであったが、図-2 に示した鹿賀地区における水位は、計画高水位から 0.4m~1.0m 下の水位まで上昇している。

また、当地区は洪水時に内水が発生しており、被災箇所近傍の鹿賀第 1 排水樋門と鹿賀第 2 排水樋門の内水位観測結果（図 3.3.3）によると最高内水位が約 T.P.25.0m となり、外水位との差は 7.0m 程度あったと推定される。

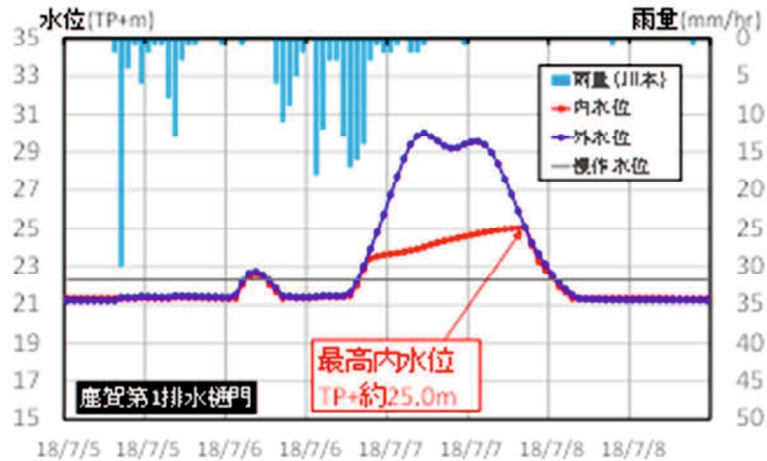


図 3.3.3(a) 内外水位差観測結果鹿賀第一排水樋門⁸⁾

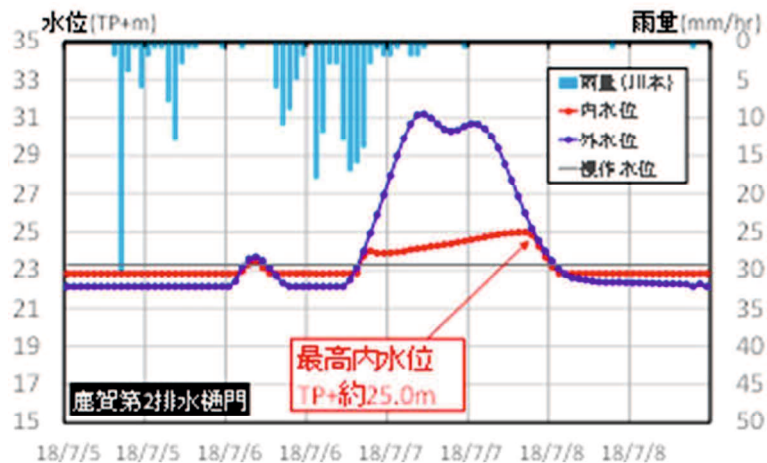


図 3.3.3(b) 内外水位差観測結果鹿賀第二排水樋門⁸⁾

(3) 築堤履歴

被災箇所における築堤履歴について堤防台帳をもとに整理を行った。その結果、当地区の堤防は昭和 61 年（1986）から平成 7 年（1995）にかけて築堤されており、28.75k（上流側）においては昭和 61 年（1986）から昭和 63 年（1988）にかけて、今の堤防の小段付近まで堤体を施工し、併せてのり尻付近に採石による置換工が施工されている。その後平成 2 年（1990）から平成 3 年（1991）にかけて計画高水位まで盛土を施工し、現在の堤防となっている（図 3.3.4）。

一方 28.0k (下流側) においては昭和 63 年 (1988) から平成 6 年 (1994) にかけて、今の堤防の小段付近まで堤体を施工し、こちらは置換工は施工されていない。その後平成 3 年 (1991) から平成 7 年 (1995) にかけて計画高水位まで礫質土を用いて盛土を施工し、現在の堤防となっている (図 3.3.5)。

なお、両堤防とも平成 28 年 (2016) に危機管理型ハード対策として超過洪水対応として天端舗装と裏のり尻部に補強ブロックが設置されている。

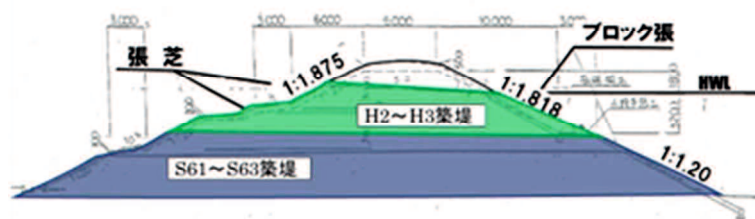


図 3.3.4 28.75k の築堤履歴⁸⁾

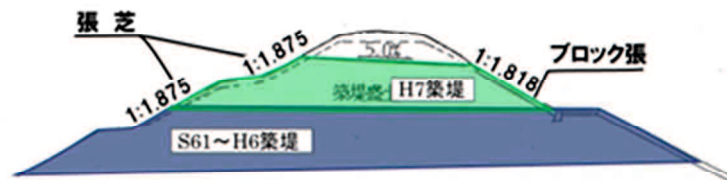


図 3.3.5 28.0k の築堤履歴⁸⁾

(4) 被災箇所 の地形

図 3.3.6 に示した江の川右岸鹿賀地区における治水地形分類図によると、堤防は微高地 (自然堤防) 上に築造されており、特に旧河道や落堀等の治水上の要注意地形は確認できない。

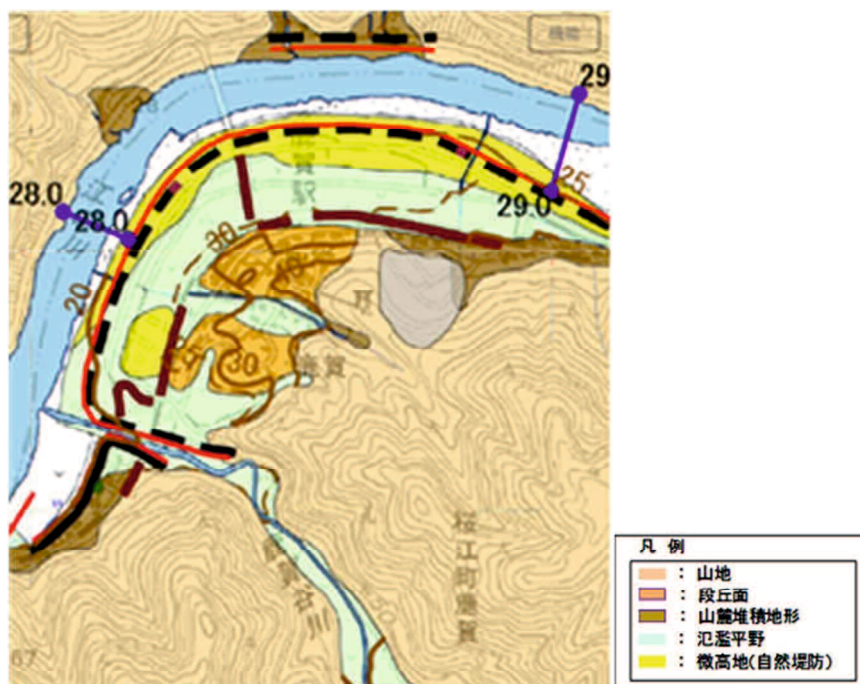


図 3.3.6 被災箇所付近の治水地形分類図⁹⁾

(5) 被災箇所

江の川右岸鹿賀地区における被災箇所としては、28.4k~29.0k（上流側）と 27.8k~28.4k（下流側）に大別される。被災状況を図 3.3.7 及び図 3.3.8 に示した。

28.4k~29.0k(上流側)の被災箇所としては、下流から 28.8k+80m 付近の小段部に延長 16m、最大幅 150mm のクラック (写真[1]) と 3 箇所ののり面崩壊、28.8k 付近の小段部に延長 3m、最大幅 30mm のクラックとのり尻部に設置された置換工の碎石が基礎地盤材料の砂とともに噴出 (写真 [2])、28.8k+40m 付近の小段部とのり面に延長 12m、最大幅 11cm のクラック、28.8k+110m 付近に小段部のクラックとのり面崩壊 (延長 1.6m、幅 0.4m、深さ 0.2m)、28.8k+150m 付近にのり面崩壊 (延長 2.0m、幅 2.4m、深さ 1.0m) がみついている (写真 [3])。さらに、28.7k~28.9k の堤内地の耕作地においては、のり尻部の噴砂 (写真[4]) が点在している。

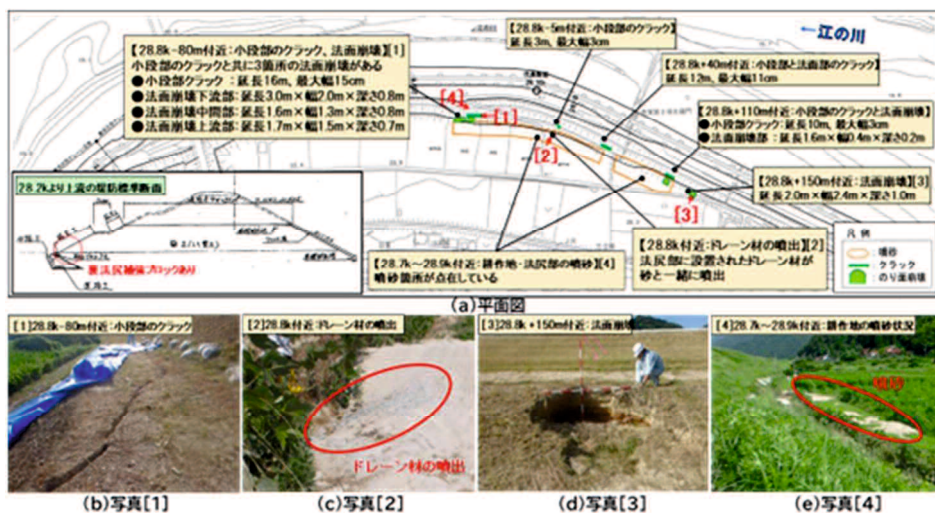


図 3.3.7 28.4k~29.0k（上流側）の被災状況⁸⁾

また、27.8k~28.4k（下流側）の被災箇所としては、下流から 27.8k~28.2k にかけての堤内地に噴砂箇所 (写真[1], [2]) が点在し、28.0k+80m 付近の小段部に延長 13m、最大幅 50mm のクラックと裏のり尻補強ブロック部の天端から通路まで噴砂が堆積 (写真[3]) している。加えて、28.2k 付近の堤内地に噴砂 (写真[4])、28.0k+180m と 200m 付近に裏のり尻部ののり崩れ (写真[5]) がみついている。

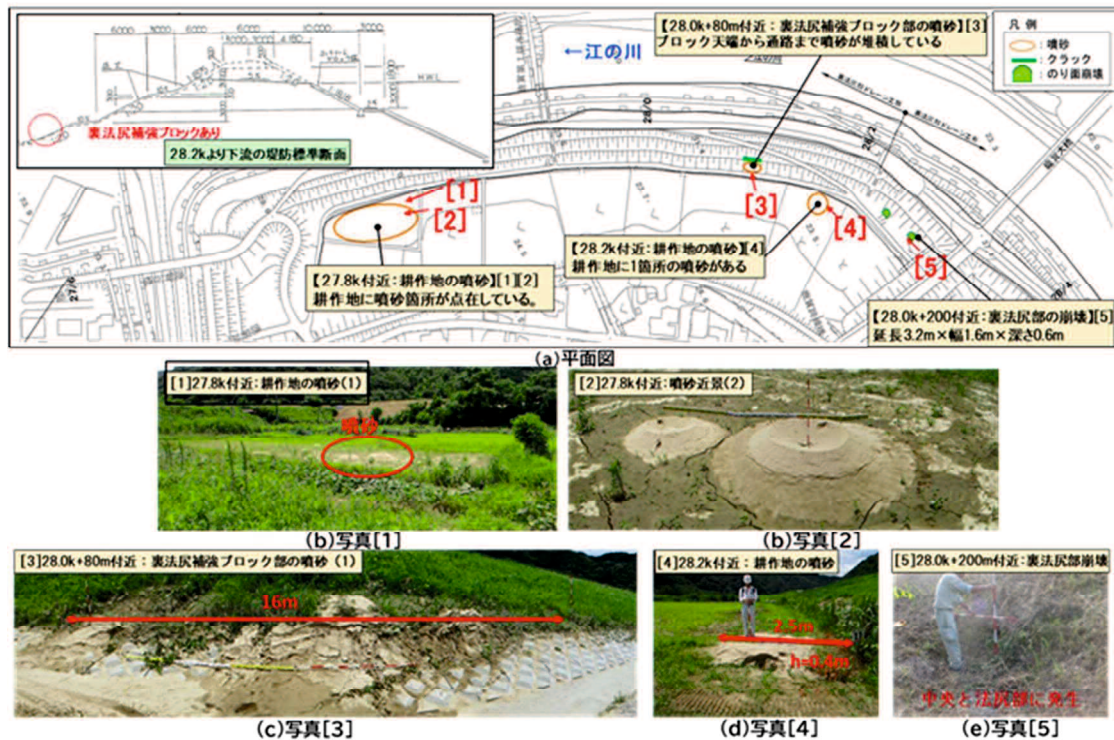


図 3.3.8 27.8k~28.4k（下流側）の被災状況⁸⁾

3.3.2. 被災箇所の調査

(1) ボーリング調査結果

被災箇所の調査については、鹿賀地区 2 箇所の被災箇所のうち上流側（左岸 28.4k~29.0k）の噴砂量が多かったため、代表断面を左岸 28.75k としてその周辺について調査を実施した（図 3.3.9）。調査については、代表断面やや下流（左岸 28.6k+98m）における既往のボーリング調査結果を補完する形で、代表断面（左岸 28.75k）でトレンチ調査とスウェーデン式サウンディング試験を実施した。

平成 19 年（2007）に浸透に対する安全性照査が実施されており、そのときに裏のり、表のり、裏のり肩付近の 3 本のボーリング調査が実施されている（図 3.3.10）。

既往ボーリング調査で確認された堤体の土層構造は、上位より、玉石混じり砂礫の Bg 層、砂と粘性土の互層で褐色の Bsc1 層、同じく砂・粘土互層で黒灰色の Bsc2 層からなる。また、基礎地盤の土層構造は、地表面より、砂質土（礫混じり砂～シルト質砂）の Ums 層、砂礫～礫混じり砂の Us-g 層、礫質土～玉石混じり砂礫の Usg 層、砂質土の Ucs 層から粘性土の Ucc 層に遷移する層、砂である Lss 層から砂礫である Lsg 層に遷移する層からなる。河川水上昇時において、河川水の水压は、主に Us-g 層および Usg 層から川裏側に伝播すると考えられる。

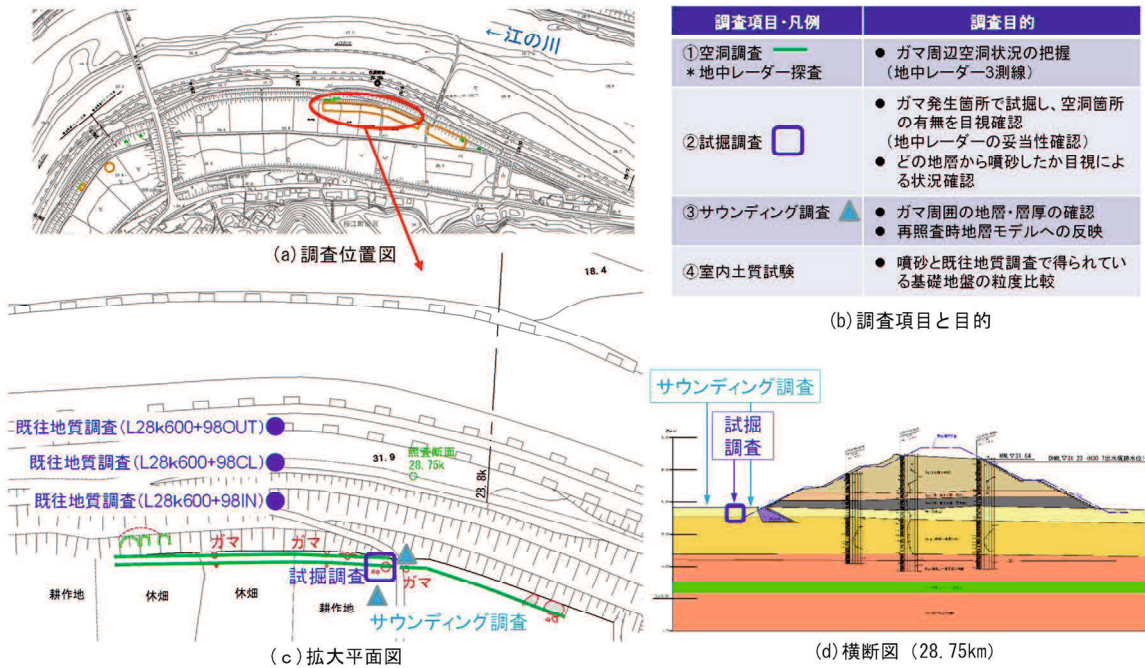


図 3.3.9 27.8k~28.4k (下流側) の調査箇所⁸⁾

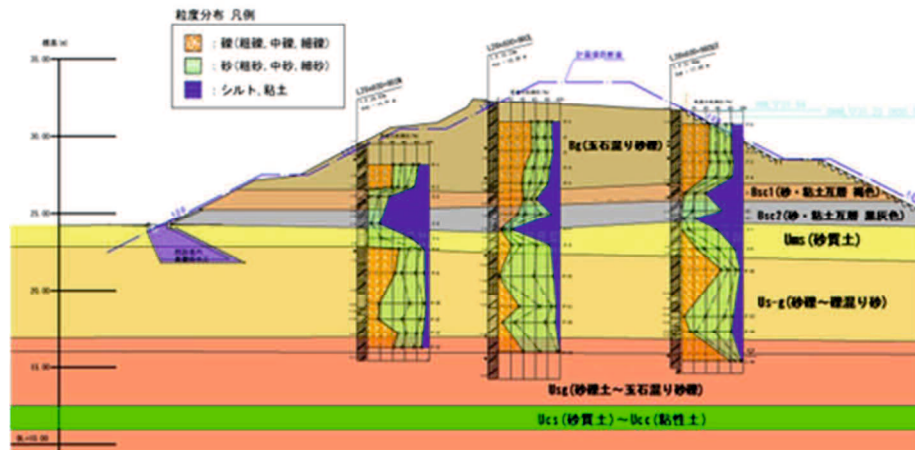


図 3.3.10 28.75k のボーリング調査結果と粒度分布試験結果⁸⁾

(2) トレンチ調査結果

川裏側のり尻部における堤防縦断方向のトレンチ調査（試掘調査）を実施し、トレンチの掘削面の観察を行った。図 3.3.11 に調査結果を示した。基礎地盤は、地表面に堆積した噴砂に覆われたシルト質砂、その下位には淡灰色の砂が分布している。スウェーデン式サウンディング試験の結果、Nsw が 150 を上回る深度が既往ボーリング調査で確認された Ums 層の下端深度と概ね一致していることから、のり尻付近の Ums 層の層厚は既往地質断面図と概ね一致している。

なお、トレンチの鉛直方向掘削面において、シルト質砂層（Ums 層）内に淡灰色の細砂がポケット状に分布している状況が確認されたことから、シルト質砂の下位に分布する Ums 層内の淡灰色の細砂が地表に繋がっていると考えられる。

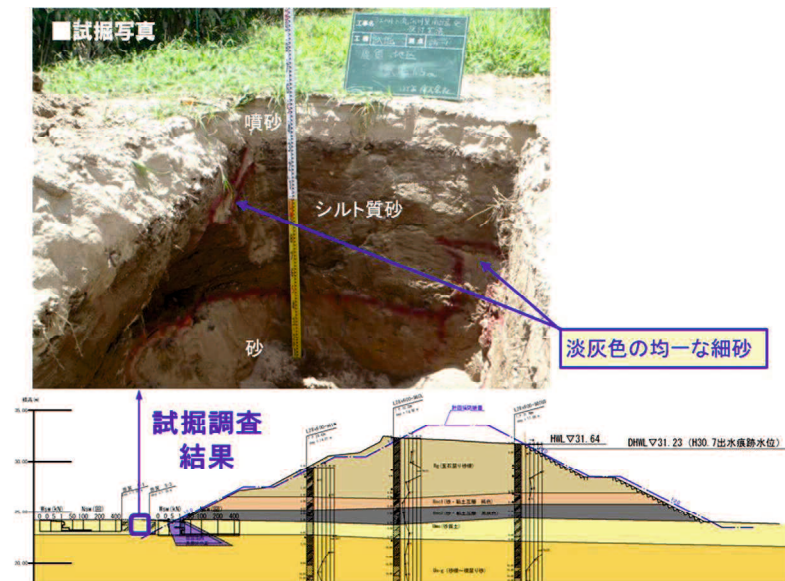


図 3.3.11 28.75k のトレンチ調査結果⁸⁾

(3) 粒度分布試験結果

既往ボーリング調査において実施された粒度試験の結果を整理し、噴砂の粒度分布との比較を行った（図 3.3.12）。

その結果は概ねボーリング結果を裏付けるものではあった。噴砂の粒径加積曲線と一致する粒径加積曲線の土層はなかったが、基礎地盤の地表面付近に分布する Ums 層の粒径加積曲線が噴砂に近い傾向を示している。また、堤体下位に分布する Bsc2 層については堤体表のり～天端付近にかけてと裏のり尻付近とでは粒度分布の傾向が異なり、堤体表のり～天端付近は、細粒分が 50%以下の砂質土であるが、裏のり尻付近の堤体では細粒分を 50%以上含む粘性土であることが確認された。

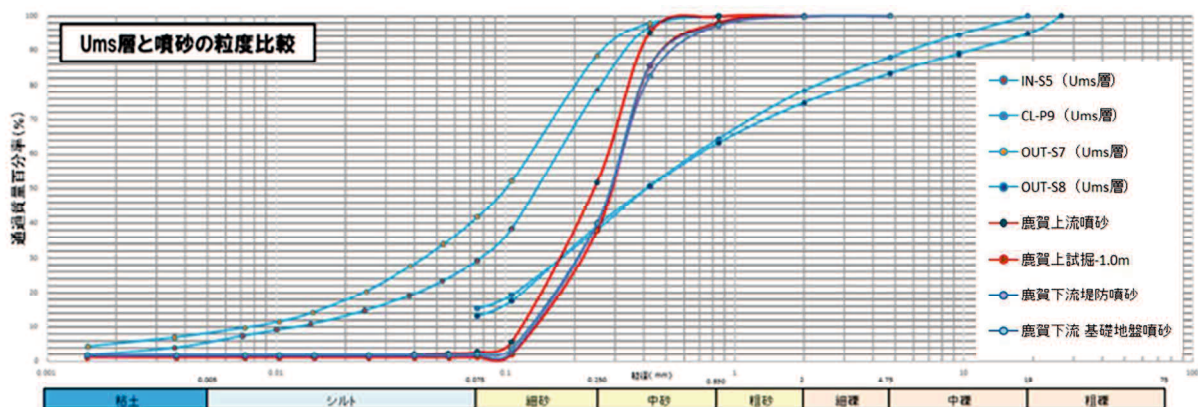


図 3.3.12 Ums 層と噴砂の粒度分布の比較⁸⁾

(4) 堤防土質構造

前述のように、鹿賀地区の左岸 28.75k の堤防は、昭和 61 年 (1986) から昭和 63 年 (1988) にかけて、小段部付近まで砂・粘土 (Bsc1 層) による築堤、平成 2 年 (1990) から平成 3 年

(1991) にかけて、小段付近から HWL まで玉石混じり砂礫 (Bg 層) による築堤がなされており、これが現在の堤防の主な構造をなしている。

基礎地盤は、礫混じり砂～シルト質砂の Ums 層の下位に砂礫～礫混じり砂である Us-g 層が分布している (図 3.3.13)。

対策工としては、昭和 61 年 (1986) の最初の築堤時に裏のり尻部基礎地盤に置換工が施工されている。また、平成 2 年 (1990) から平成 3 年 (1991) にかけての築堤時に、川表側の護岸ブロック敷設に合わせて遮水シートが設置されている。

なお、平成 28 年 (2016) に危機管理型ハード対策として川裏のり尻ブロックと天端舗装が施工されている。

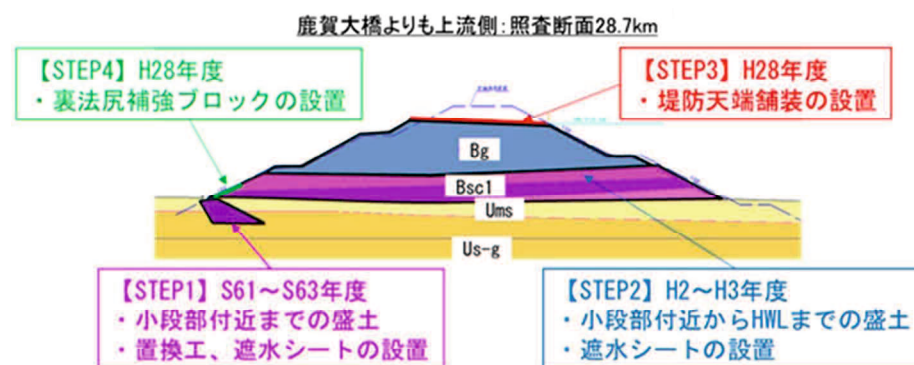


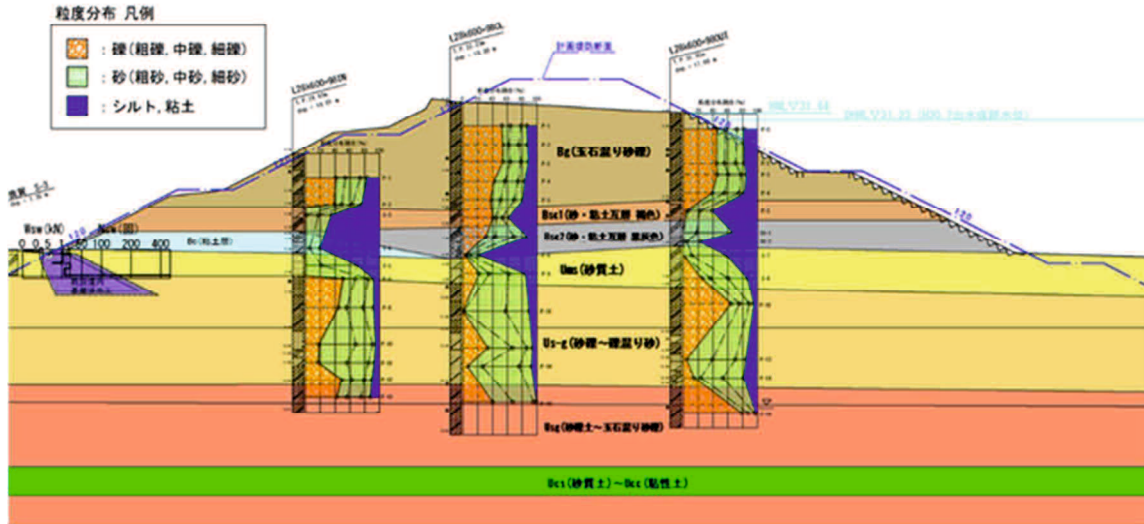
図 3.3.13 28.75k の堤防土質構造⁸⁾

3.3.3. 解析結果

河川水位上昇時における浸透に対する安全性照査を行うため、ボーリング調査結果、サウンディング調査結果に基づき、鹿賀地区の左岸 28.75k の堤防のモデル化を行った。その際、堤体下部における Bsc 層については工事資料において砂質土および礫質土を材料として用いた記録があるため、砂質土として取り扱い、強度定数は粘着力を見込まず、内部摩擦角で設定した。一方、堤体川裏側のり尻付近 Bsc2 層においては粒度分布から粘土・シルト分を 50%以上含んでいることから、Bsc2 層の川裏側は、局所的な粘性土層としてモデル化を行った (図 3.3.14)。

照査における外力については、被災した平成 30 年 (2018) 7 月洪水実績とした。降雨については 36.3k 付近の川本観測所における実績雨量、河川水位については、同じく川本観測所における観測水位でのピーク水位を痕跡水位へ平行移動した水位波形を作成し、外力として用いた。

河川水位上昇時における浸透に対する安全性照査の結果を図 3.3.15 に示す。堤体の危機管理型ハード対策である川裏のり尻ブロック上端の水平方向の局所動水勾配 (ih) は 0.49 でほぼパイピングが発生する動水勾配となった。一方、堤体のり尻基礎地盤の置換工の上面における鉛直方向の局所動水勾配 (iv) は 1.31 となった。また、堤内地の鉛直方向の局所動水勾配 (iv) は 0.91, G/W は 0.99 であった。なお、堤体裏のりすべりに対する安全率 Fs は 2.64 であった。



地層記号	土質定数						
	単位体積重量 (kN/m ³)	飽和透水係数 (cm/sec)	不飽和浸透特性		比貯留係数 (1/m)	粘着力 (kN/m ²)	内部摩擦角 (°)
			$\theta - \phi$	$\theta - kr$			
Bg	20.0	4.13.E-03	(b)	(a)	1.00.E-04	27.3	36.2
Bsc1	19.0	1.00.E-05	(a)	(a)	1.00.E-03	95.0	0.0
Bsc2	19.3	1.00.E-05	(a)	(a)	1.00.E-03	117.4	0.0
Ums	18.4	1.26.E-04	(c)	(b)	1.00.E-04	40.8	26.4
Us-g	20.0	8.59.E-03	(b)	(b)	1.00.E-04	0.0	33.6
Usr	21.0	3.10.E-02	(b)	(b)	1.00.E-04	0.0	36.5
Ucs	21.0	3.10.E-02	(b)	(b)	1.00.E-04	0.0	36.5
Lss~Lsg	21.0	3.10.E-02	(b)	(b)	1.00.E-04	0.0	36.5
天端舗装		1.00.E-02					
遮水シート		2.00.E-06					
裏法房補強ブロック		1.00.E-06					
ドレーン		1.00.E-02					
基礎コンクリート		1.00.E-06					
水路		1.00.E-06					

図 3.3.14 江の川左岸 28.75k における堤防のモデル化 (上: 地層断面図 下: 土質定数) ⁸⁾

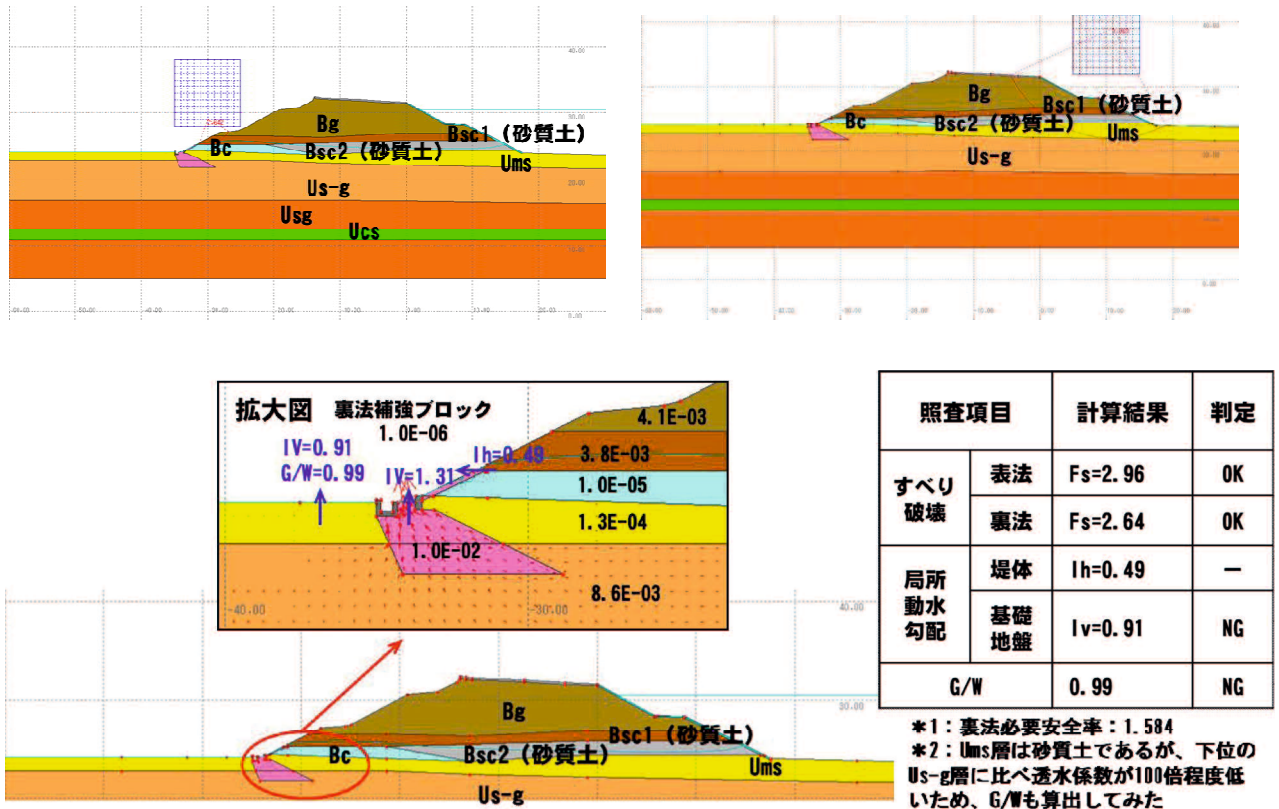


図 3.3.15 江の川左岸 28.75k における解析結果⁸⁾

3.3.4. 被災のメカニズム推定

調査, および解析結果をもとにした鹿賀地区 27.85k 付近における被災メカニズムについて以下に示す。

(1) 堤内地の噴砂

鹿賀地区 27.85k 付近における目視調査によると, 27.85k 中心に前後約 50m の範囲で堤内地や置換工が施工されているのり尻付近に噴砂が点在している。

また, 噴砂孔付近の Ums 層に相当する層のトレンチ調査では, 表層に 80cm 程度のシルト質砂層が分布し, その下位に砂質土層が分布することが確認されている。ここでは空洞等は確認されていないものの, 上部のシルト質砂層の間に細砂の部分的な分布が確認され, 一部では砂脈状に分布している (図 3.3.16)。これらの細砂は, シルト質砂層の下部に分布が確認された砂質土層と同じ土質である。

一方, 図 3.3.16 に示すボーリング調査結果を用いて被災箇所をモデル化した解析結果によると, 堤内地側は $G/W=0.99$ で, 堤防設計指針において求められるパイピングに対する照査基準 $G/W \geq 1.0$ とほぼ同じ値を示していること, のり尻側は置換工による排水の影響もあり $i_v=1.31$ で, パイピングに対する照査基準 $i \leq 0.5$ を大きく上回る結果となったことから, 基礎地盤パイピングが生じる危険性が高いことが裏付けられる結果となっている。

これらのことから, 堤内地とのり尻付近の噴砂は, Us-g 層のうち下部に堆積する基礎地盤砂礫層を浸透した河川水が間隙水圧の上昇を招き, 上部に堆積するシルト質砂層を突き破り, 噴砂が発生したものであると考えられる。特にのり尻側の局所動水勾配はパイピングが発生する

$i=0.5$ を大きく上回る結果となっていることから、噴砂に加えて置換工の採石が共に噴出したものと推察される。

なお、図 3.3.12 に示すように、トレンチ調査箇所付近の噴砂と Ums 層の粒度試験の結果を比較すると、Ums 層と被災箇所噴砂の粒度分布が、ほぼ同様の粒度曲線となっていることが分かる。このことから、被災箇所噴砂は Ums 層由来であることが推定される。なお、被災箇所の噴砂の粒度分布がやや均質になるのは、噴砂の段階で分級作用が進むために、粒径が揃う傾向があるためと考えられる。

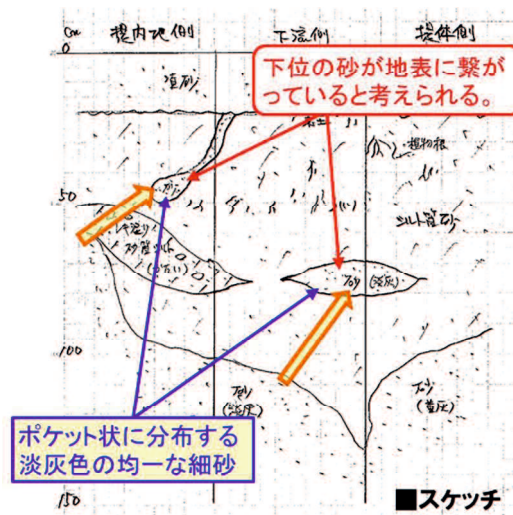


図 3.3.16 トレンチのスケッチ⁸⁾

(2) 裏のり尻補強ブロック付近の噴砂

裏のり尻補強ブロックは、Bsc2 層の裏のり側を覆うように配置されており、噴砂は補強ブロック上端から発生している。Bsc2 層ののり尻付近は粒度分布試験の結果、シルト・粘土分を 50%以上含んでいることが確認されていることから、粘性土に近い透水性を持つと考えられる。

また、Bsc2 層の上部に位置する Bsc1 層は砂質土系の材料であるため、堤体に浸透した降雨や河川水は Bsc2 層上部に溜まり、裏のり尻に向かって排水されることとなる。

一方で、解析結果によると、補強ブロック上端部付近の局所動水勾配 (i_h) は 0.49 でほぼパイピングが発生する動水勾配となり、この部分から噴砂が生じる危険性が高いことが裏付けられる結果となっている。

これらのことから、裏のり尻補強ブロック付近の噴砂は、堤体下部の砂質土系の材料で構成された Bsc1 層と、のり尻付近に局所的に介在する粘性土系の材料で構成された Bsc2 層の間を通った堤体内浸透水が、裏のり尻補強ブロックでせき止められ、ブロックの天端付近で排水されることにより発生したものと推察される。

(3) 小段のクラック

小段部のクラックは、解析結果によると裏のり安全率が $F_s=5.16$ と高く堤体の浸潤線上昇に伴う土質強度の低下によるものではないと考えられる。出水に伴い基礎地盤の Ums 層や Usg 層の間隙水圧が上昇し、裏のり尻や堤内地で噴砂を生じることで空洞が発生し、それに伴い支持力が低下することによってのり崩れを生じた可能性が高い。

3.4. まとめ

本章では、戦後日本における代表的な堤防の被災事例とその原因について述べ、特に浸透被災の事例として利根川と江の川の2箇所を取り上げて、それぞれの破堤原因の分析結果について示した。

(1) 代表的な堤防の被災事例とメカニズム

戦後の破堤事例について収集し、その原因について大別すると、越水によるもの、浸透によるもの、侵食によるもの、地震によるもの、樋管周りによるものに大別され、それぞれの破壊プロセスについてまとめた。

(2) 利根川における堤防の被災原因分析

利根川右岸 139kp (大越地区) の堤防の浸透被災について、目視による被災状況や、ボーリング調査等の土質調査、開削調査と併せて、飽和不飽和浸透流解析や円弧すべり解析を行った結果、被災メカニズムについて以下の推定を行った。

- 被災原因については、一般的には被災断面に対して断面二次元的に分析を行う例が多いが、本事例では、過去の地形の変遷や開削調査結果、被災箇所周辺だけではなく、堤内地広範にわたるボーリング結果の収集と、そこから得られる行き止まり型土質構造の把握を行うことで、三次元的な視点からも分析を実施した。
- 堤体漏水については開削調査結果から、粘性土を主体とする旧堤 (改修計画 (明治 33 年 (1900))) の堤体の周辺部に、砂質土主体の改修改訂計画 (昭和 24 年 (1949))) の堤体が表腹付けされ、他の嵩上げを行った築堤年次の築堤材料は粘性土で構成されていることが確認された。また、新旧地形図の堤防法線形を重ね合わせることで、堤体漏水箇所は旧堤と新堤が交差する場所で生じていることが明らかとなり、堤体漏水箇所は粘性土を主体とする旧堤が堤内側のり尻付近に出現するという土質構造の特徴があることが分かった。そのため、堤体内に浸透した降雨か河川水が旧堤で堰上げられ、嵩上げ、拡幅により施工した旧堤上部の比較的透水性が高い土が分布する小段付近において漏水が発生したものと考えられた。これらのことから、堤体の土質で浸透上問題となる土質条件箇所を抽出するには、過去の地形図を重ね合わせることが有効であることが明らかとなった。
- 基礎地盤の噴砂については、被災箇所とその周辺のボーリング調査結果により、堤防敷幅内の横断面では、基礎地盤に分布する透水層は、堤外側から堤内側に連続して分布するものの、堤内地のボーリング調査結果を加えて基礎地盤土質構造を推定すると、堤内側に向かって次第に層厚が薄くなって消滅する、いわゆる“行き止まり型”の土質構造を呈しており、平面的にも被災箇所上流側から被災箇所にかけて、序々に透水層の広がり狭まる“行き止まり型”の土質構造を持っていることが明らかとなった。そのため、透水層内の水圧が堤内地側で上昇しやすくなり、堤内地において被覆土層の下面に高い水圧が作用することで被覆土層を突き破って水が砂とともに湧出し噴砂が発生したものと考えられた。これらのことから、基礎地盤の土質で浸透上問題となる土質条件箇所を抽出するには、堤防断面内だけではなく、堤内地側の既設ボーリング調査結果等も活用して“行き止まり型”地盤を抽出することが有効であることが明らかとなった。

(3) 江の川における被災原因分析

江の川左岸 27.8kp～29.2kp（鹿賀地区）の堤防の浸透被災について、目視による被災状況や、ボーリング調査、トレンチ調査等の土質調査と併せて、飽和不飽和浸透流解析や円弧すべり解析結果を行った結果、被災メカニズムについて以下の推定を行った。

- ・ 堤内地とのり尻付近の噴砂については、解析結果によると、堤内地側は $G/W=0.99$ でパイピングを発生する判断基準である $G/W \geq 1.0$ とほぼ同じ値を示していること、のり尻側の局所動水勾配は、置換工による排水の影響もありパイピングが発生する $i=0.5$ を大きく上回る結果となっていることから、基礎地盤パイピングが生じる危険性が高いことが裏付けられる結果を得られた。また、噴砂孔付近の U_{sg} に相当する層のトレンチ調査で、上部のシルト層の間に、シルト層の下部に分布が確認された砂質土層と同じ土質の細砂の部分的な分布が確認され、一部では砂脈状に分布していたこと、噴砂の粒度試験と U_{sg} 層の粒度試験の結果の比較より、噴砂は U_{sg} 層のものであることが明らかとなったことから、噴砂は基礎地盤のパイピングによる被災であることが裏付けられた。そのため、堤内地とのり尻付近の噴砂については、 U_{sg} 層のうち下部に堆積する基礎地盤砂礫層を浸透した河川水が間隙水圧の上昇を招き、上部に堆積するシルト層を突き破った結果発生したものであると考えられ、難透水性の厚みのある被覆土層のある箇所でも、パイピング被災が生じる可能性があることが明らかとなった。
- ・ 裏のり尻補強ブロック上端から発生した噴砂については、解析結果によると、補強ブロック上端部付近の局所動水勾配 (i_h) は 0.49 とほぼパイピングが発生する動水勾配となり、この部分から噴砂が生じる危険性が高いことが裏付けられる結果を得られた。このことから、堤体に浸透した降雨や河川水が、粘性土に近い透水性を持つ B_{sc2} 層上部に溜まり、 B_{sc2} 層の上部に位置する砂質土系の材料である B_{sc1} 層から裏のり尻に向かって排水されることに伴い堤体からの噴砂が発生したと考えられた。
- ・ 小段部のクラックについては、解析結果によると裏のり安全率が $F_s=5.16$ と高いことから出水に伴う基礎地盤の間隙水圧の上昇に伴い、裏のり尻や堤内地で噴砂を生じることによって空洞が発生し、その結果支持力が低下することによってのり崩れを生じた可能性が高いと考えられた。このことから、堤体の安全性が確保できていても、基礎地盤で安全性が確保できていない場合、堤防ののり崩れが発生する可能性があることが明らかとなった。

第3章 参考文献

- 1) (社)日本河川協会、建設省河川局監修：今後の河川整備はいかにあるべきか (Report of the River Council 安全で美しい水系の創造), 1991
- 2) 那珂川・久慈川堤防調査委員会：那珂川・久慈川堤防調査委員会報告書, 令和2年3月, pp3-1
- 3) 矢部川堤防調査委員会：矢部川堤防調査委員会報告書, 平成25年3月, pp2-10
- 4) 河川堤防耐震対策緊急検討委員会：東日本大震災を踏まえた今後の河川堤防の耐震対策の進め方について報告書, 平成23年9月, pp10-11
- 5) 中山 修・金石 勝也・勝山 明雄：連通試験法を適用した樋門周辺堤防の漏水危険度の検討, 河川技術に関する論文集 第6巻, 土木学会水理委員会河川部会, 2000.6
- 6) 国土交通省利根川ダム統合管理事務所ホームページ
<https://www.ktr.mlit.go.jp/tonedamu/tonedamu00061.html>
- 7) 佐藤宏明、中山修、佐古俊介：利根川堤防で発生した漏水に関する調査事例, 河川技術論文集 第11巻, 土木学会水理委員会河川部会, 2005.6
- 8) 佐古俊介、倉田大輔、森啓年、中川翔太、大堀文彦、陰山健太郎、平成30年7月西日本豪雨災害における江の川堤防被災、土木学会論文集 B1 (水工学) 特集 (平成30年西日本豪雨災害特別企画)、2019年75巻1号
- 9) 国土地理院地図：国土地理院ホームページ, <https://www.gsi.go.jp/top.html>

4. 堤防の維持管理・観測

4.1. はじめに

河川堤防は、洪水・高潮による水災害防御の根幹的施設として古くから整備が進められてきており、安全で安心な社会や地域づくりを進めていくにあたっての重要な社会基盤施設の一つである。

河川堤防に求められる機能としては、耐浸透性や耐侵食性、耐震性等が挙げられており、特に浸透や侵食に対しては、降雨と河川水を外力とした堤防のすべりやパイピング、堤防侵食に対する点検や強化対策が行われてきているところである。

一方で、河川堤防の浸透、侵食に対する点検・管理は、「堤防等河川管理施設及び河道の点検要領（令和5年（2023）3月）」（以下、「点検要領」）に基づき、徒歩による目視点検を主体として、堤防全体の外観上の変状を網羅的に発見することとなっている。

しかし、目視点検によりこれらの変状を発見するには、長手方向に延長があること、除草頻度によっては変状が発見しにくくなること、点検要員の確保が今後難しくなること等から困難である。さらに、降雨時や夜間等の条件が重なると、目視による変状の発見はさらに困難なこととなる。

このような状況を踏まえると、河川堤防の点検・管理を行うにあたっては、従来の目視点検に加え、堤防決壊の前兆となる軽微な変状を適切な時期に検知する観測手法を技術開発し、維持管理並びに危機管理の高度化・効率化に資することが喫緊の課題である。

本章は、浸透、侵食に対する堤防点検・管理において、観測が必要とされる変状項目を時空間的に分類・整理した上で、それらの変状を観測するにあたって活用が期待される最新の計測・測量技術について示し、その上で実河川における計測結果の活用と分析、堤防の点検・管理技術への活用の可能性について述べる。

4.2. 堤防管理において必要とされる情報

4.2.1. 必要とされる情報

河川が有するべき治水上の機能としては、①河道が所要の流下能力を確保していること、②堤防等の河川管理施設が所要の機能を確保していること、の2項目とされており、その機能を確保するために行う点検として、「点検要領」において点検の実施、結果の評価、あるいは堤防の補修等の対策の適切な判断の前提となる変状、変化を発見、観察するための標準的な方法について示されている。

特に、土堤においては、出水期前、台風期の点検と、各河川で設定された出水規模、主に、氾濫注意水位（警戒水位）以上を越える出水後に分けて、徒歩を基本として目視点検を行うこととなっており、点検項目については、これまでの経験等から、浸透現象や侵食現象による堤体破壊現象を分類・整理し、点検項目の抽出を行っている。

土堤における主な点検項目を表4.2.1に示す。

表 4.2.1 主な土堤の点検項目¹⁾

項目	箇所	点検事項
土堤	法・面 小・段	亀裂、陥没、はらみだし、法崩れ、寺勾配化、侵食等はないか（あるいは前回点検時よりも進行していないか）
		張芝のはがれ等、堤防植生、表土の状態に異常はないか（あるいは前回点検時よりも進行していないか）
		雨水排水上の問題となっているような、小段の逆勾配箇所や局所的に低い箇所がないか
		不陸はないか
		泥濁化しているような箇所はないか
		モグラ等の小動物の穴が集中することによって、堤体内に空洞を生じていないか
		モグラ等の小動物の穴が集中していた箇所に陥没等を生じていないか
		樹木の侵入、拡大は生じていないか
		坂路・階段取り付け部の路面排水の集中に伴う洗堀、侵食はないか
		堤防天端及び法肩に亀裂、陥没、不陸、沈下等の変状はないか（あるいは前回点検時よりも進行していないか）
	天 端	天端肩部が侵食されているところはないか（あるいは前回点検時よりも進行していないか）
		堤脚付近の排水不良に伴う浸潤状態はないか
	裏法尻部	堤脚付近の堤体土が軟弱化し、流動化の恐れはないか
		しぼり水でいつも浸潤状態のところはないか
		法尻付近の漏水、噴砂はないか
		堤脚保護工の変形はないか（あるいは前回点検時よりも進行していないか）
		局部的に湿性を好む植生種が群生していないか
		ドレーン工の目詰まり、あるいは濁水の排水が生じていないか
	堤脚水路	堤脚水路の継目からの漏水・噴砂はないか
		堤脚水路の閉塞はないか

4.2.2. 各変状項目の補修や監視に求められる時空間スケールの整理

これらの点検項目については、変状の進行速度や補修や監視等を行う時間的なスケールが異なると考えられるため、年、月、時間の3つに分けて以下のような視点で整理を行った。

- ・ 年単位：緊急の補修が求められる変状ではなく、また、監視を行う場合でも変状の進行速度が遅いことから年単位で見ることが適切と考えられるもの。植生に関するものや、堤体の小規模な亀裂やはらみ出し等の変状、のり肩部の侵食等がこれに当たる。
- ・ 月単位：出水毎に変状が進行し、補修についてある程度の緊急性がある、また、監視についても月単位（もしくは出水毎）で見ることが適切と考えられるもの。堤体の亀裂やはらみ出し等の変状、のり尻の噴砂跡等がこれに当たる。
- ・ 時間単位：緊急の補修等が求められる、また、時間単位（リアルタイム）で監視を行うことが適切と考えられるもの。出水後の堤体の亀裂やはらみ出し等の変状、のり尻の噴砂等がこれに当たる。

また、一方で、変状を補足するために適切な空間スケールも異なることから、変状補足を全体像として捕らえるか、局所的に捕らえるかで項目を遠景・遠近景・近景の3つに整理した。

- ・ km 単位：定性的（相対的）、広域的に変状の有無や大きさをとらえることが適切と考えられるもの。広域的な天端の沈下や、植生に関するもの等がこれに当たる。
- ・ 100m 単位：定性的（相対的）・定量的の両面で、ある程度広域的に変状をとらえることが適切と考えられるもの。堤体の亀裂やはらみ出し等の変状や、のり肩部の侵食、ドレーンの目詰まりや濁水排水、護岸等の変状がこれに当たる。
- ・ 1～10m 単位：主に定量的、局所的に変状の変状をとらえることが適切と考えられるもの。堤脚保護工の変形や堤脚水路の閉塞、樹木の貫入の他、100m 単位よりも狭い範囲で生じる堤体の亀裂やはらみ出し等の変状、のり尻の噴砂・漏水・浸潤等がこれにあたる。

以上を図で整理すると、図 4.2.1 のようになる²⁾。

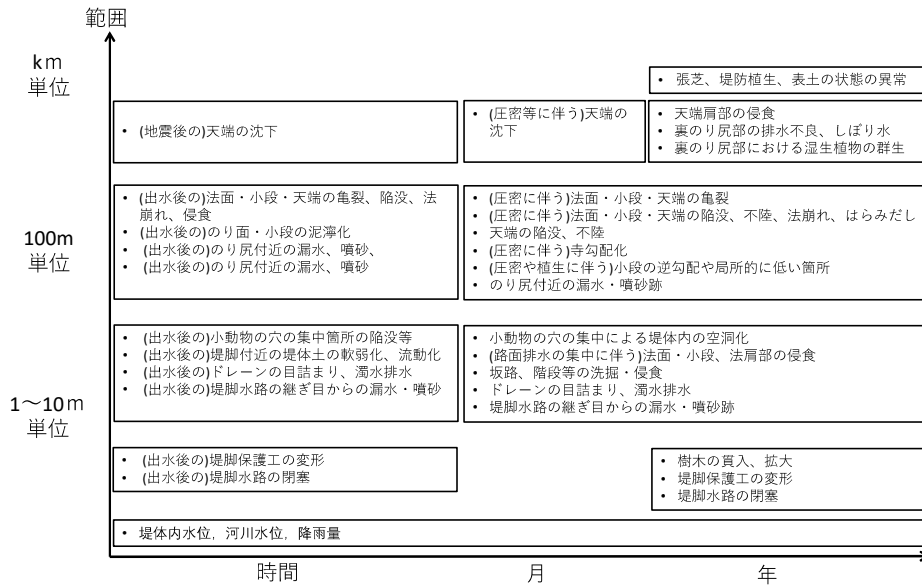


図 4. 2. 1 点検項目の時空間スケール²⁾に加筆

4. 3. 現状の堤防管理と課題

4. 3. 1. 現状の堤防管理

土堤の点検は、出水期前及び台風期、出水後に徒歩で目視点検を実施することを基本としており、必要に応じてスケール等による計測を適切に行うと共に、写真撮影による記録を実施することとされている。一方で、最も変状を発生しやすいのは出水中であり、その時期に点検を行う必要性は高いが、人員の配置や安全等を考えると現実的ではないこと等から定められていない。

4. 3. 2. 現状の堤防管理における課題

土堤の点検においては、各点検の時期において、それぞれ求められる精度や、点検実施に際して想定される問題点等が異なると考えられるため、以下に整理を行った。

平常時の堤防管理は、現状の出水期前及び台風期の点検がこれにあたりと考えられる。平常時の点検であるため、小規模の変状の発見や、植生等のように経年的な変化を監視することが主体になるものと考えられ、前回点検時の状態との比較が求められる。

リアルタイムで変化が進むものではないため、監視の時間的な間隔は密である必要が無い一方で、その変化は目に見えるようなものでないため、目視主体の手法だと見落としを生じる可能性が高い。また、相対的な比較の視点が必要になる場合、広範囲を同時に監視するような必要性もあると考えられる。

これらの微細な変状や変化は熟練技術者でなければ気づかないものも多く、委託等に頼らざるを得ない場合は監視水準の維持が難しいのが実態と考えられる。

緊急時の堤防管理は、現状の出水後の点検や、出水中の点検がこれにあたる。緊急時の点検であるため、大規模の変状の発見のように変化が著しい項目を監視することが主体になるものと考えられ、リアルタイムでの監視が求められる。

監視の時間的な間隔は密である必要がある一方で、夜間や豪雨時等の視界が良好でない場合や、同時多発的に変状が発生した場合、限られた人員で目視点検の体制をとる以上は見落とす可能性も否定できない。

さらに、災害時には現地への到達も困難であることが想定される。

4.3.3. 計測技術を用いた堤防管理・観測の必要性

計測技術を用いた堤防管理・観測については、「河川堤防モニタリング技術ガイドライン（案）（平成16年（2004）6月）」に、洪水に対する安全性が相対的に低い要注意箇所²⁾の把握技術の高度化や、堤防強化を実施する箇所を的確に把握することを目的として実施する他、堤防の浸透に対するドレーン等による質的強化対策を実施した箇所を対象に、堤防質的強化対策の効果検証のために実施することが定められている²⁾。

要注意箇所の把握の高度化に関しては、原則として目視点検によることとするものの、必要に応じて計測機器による観測も試行することが定められており、また、強化対策技術の検証を目的として、堤体内水位を水位計により把握することや、当該箇所の雨量や河川水位を把握することにより行われている。

前述したように堤防の点検・管理では、平常時は堤体の微細で緩やかな変化に対する長期間広範囲に継続的な監視や、緊急時は出水時の急激な変化に対して、任意の時間から高い頻度での継続的に監視が求められる等、その目的が異なることから、従来の目視点検のみでは困難が伴う監視が要求される場合がある。

これらより、堤防の点検・管理の目的に応じて、最適な計測技術を活用することにより、監視水準の維持・向上や監視の効率化を図ることが望まれているところである。

4.4. 計測技術の河川堤防管理への活用

4.4.1. 河川堤防の管理に活用される計測技術の概要

河川堤防の管理に活用される計測技術としては、堤防に対して直接計測機器を設置して変状等を計測する接触型と、間接的に変状を把握する非接触型に大別することができるが、以下に機器の概要を示す。

接触型の計測技術としては、水圧式水位計や光ファイバセンサが挙げられる。水圧式水位計は、所定の深度まで削孔したボーリング孔中に硬質塩化ビニル管を立て込み、観測対象層にストレーナを設置、自記式水位系を設置するものである。水位計は定期的(1~2ヶ月に1回程度)データ回収し、異常の有無を確認するとともに、年1回程度はベアラ等を用いて観測井の洗浄を行う。

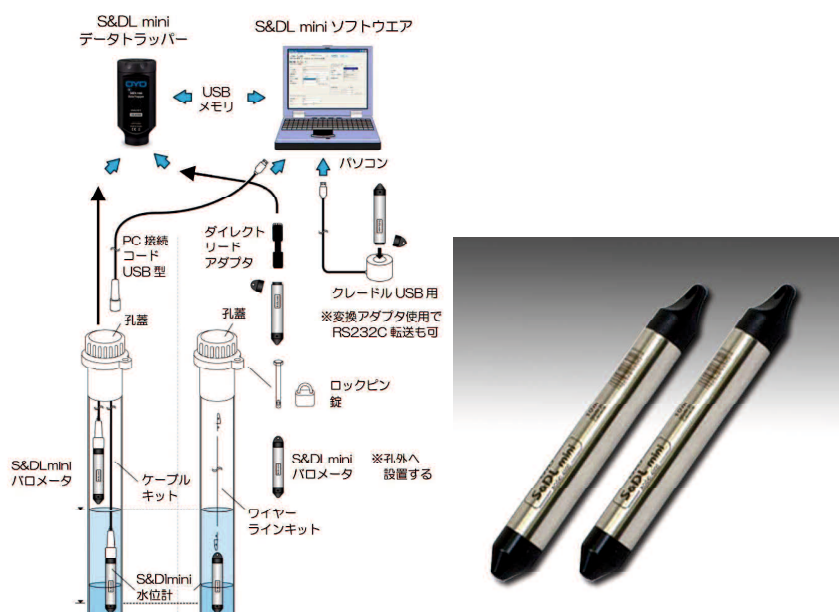


図 4.4.1 観測孔と自記式水位計の例³⁾

光ファイバセンサは、堤防に変状が発生するとセンサ保護材が土塊とともに移動・変形し、隣接箇所と屈折が生じる原理を利用し、堤防の変状の有無を計測する。計測頻度は、変状をリアルタイムに捕らえることが可能であり、計測範囲はセンサの設置範囲に依存する。



図 4.4.2 光ファイバの例²⁾

非接触型の計測技術としては、人工衛星 SAR や航空機レーザー測量、MMS（モービルマッピングシステム）、UAV 搭載カメラが挙げられる。

人工衛星 SAR は、人工衛星に搭載した SAR（合成開口レーダ）を用いて広範囲に地盤高の計測を行うことができる。合成開口レーダは、電磁波を対象物に向けて発射し、その反射波を測定することで対象物までの距離を把握する計測装置である。人工衛星による計測は、他の計測機器と比べて広範囲の情報を一度に入手することができ、その計測頻度と解像度は、陸域観測技術衛星 2 号「ALOS-2」の場合、1～2 日に 1 回観測し、その解像度は 1～3m に達する。

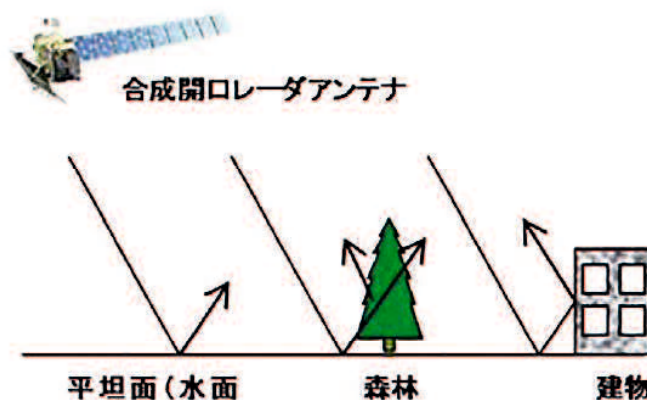


図 4.4.3 合成開口レーダーからのマイクロ波が地物で反射されるイメージ図²⁾

航空機レーザー測量は、航空機に搭載したレーザー測距装置からレーザー光を発射して地表から反射して戻ってくる時間差を調べて距離を計測する。計測精度は、飛行高度に依存するが、高さの精度は± 15cm 程度、水平方向の位置精度は、概ね 1m 程度とされている。計測頻度は、航空機が飛行可能な条件に依存する。

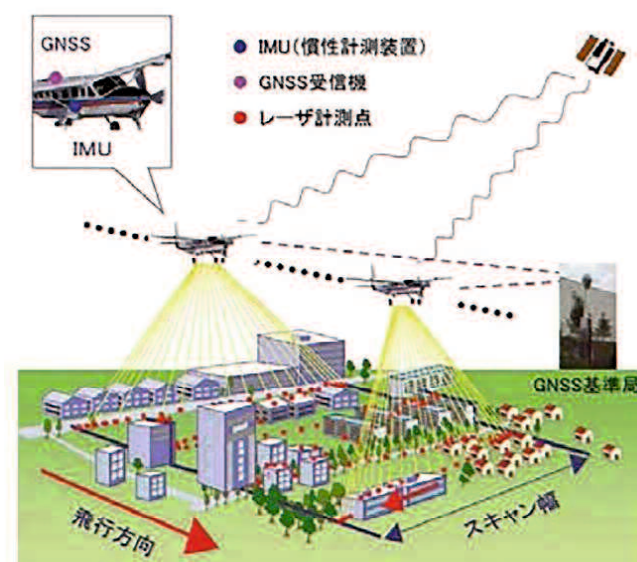


図 4.4.4 航空レーザー測量の計測イメージ⁴⁾

MMS は、車両の天板上にレーザースキャナー等の車両移動量計測装置を装着し、計測及び補正を行うことにより、通常走行を行いながら車両周辺の高精度な 3次元座標データと画像デ

ータが取得できる車載型移動計測システムである。近年、MMS は、河川堤防の維持管理手法の高度化に向けた先行的な技術として提案されている。計測頻度は、計測対象までの距離に依存するが、10m 離れた地点での分解能は 1cm とされる。また、計測頻度は、堤防天端の走行可能性に依存する。



図 4.4.5 MMS による堤防での計測イメージ⁵⁾

UAV 搭載カメラは、UAV に搭載したカメラによる写真測量である。MMS が堤防天端から計測するのに対し、UAV 搭載カメラは上空から撮影できるため、樹木等による死角が生じない可能性があり、堤防天端のみならず法面等の形状を把握することが可能と考えられる。また、UAV で取得した画像データから SfM (Structure from Motion) ソフトを利用し点群の標高データを生成することが可能である。SfM とは、異なる方向から撮影した複数の写真から、カメラと対象物の 3 次元形状を復元する手法であり、UAV と SfM を用いた測量は近年多く実施されている。UAV 搭載カメラによる計測はその手軽さや迅速性から急速に普及し、その顕れとして、効率的・高精度な施工を実現するための要領案「空中写真測量（無人航機）を用いた出来高管理要領（土工編）（案）」が、平成 29 年（2017）3 月、国土交通省より示された。計測精度は、飛行高度に依存するが、対地高度 50m では、誤差は 5 cm 以内に入るとされている。計測頻度は、飛行条件により、その飛行継続時間は UAV のバッテリーに依存する。



図 4.4.6 UAV 搭載カメラと SfM による堤防 3 次元モデルデータ作成イメージ²⁾

4.4.2. 点検項目に対して活用が想定される計測技術

観測項目に対して、点検項目の時空間スケールに対する、計測技術の活用の方向性の整理を行う。まず、時間スケールでの監視タイプの分類を表 4.4.1 のように短期特定範囲型、中長期特定範囲型、長期広範囲型、変状原因監視型に分類し、点検項目との関係を図 4.4.7 に図示した。

表 4.4.1 監視タイプの分類

タイプ	監視内容
短期特定範囲型	出水時に堤防の決壊等の大規模な変状が想定される等、緊急性の高い状況における短期的(数時間～数日の間隔)な監視
中長期特定範囲型	緊急的では無いが変状となりうる中長期的(数日～数ヶ月の間隔)な監視
長期広範囲型	広範囲について監視が必要とされる緩やかな変状に対する長期(数ヶ月～数年の間隔)な監視
変状原因型	変状の外力となる洪水位や降雨量、変状の原因となり得る堤体内水位等を短期的(数時間～数日の間隔)な監視で長期にわたって監視

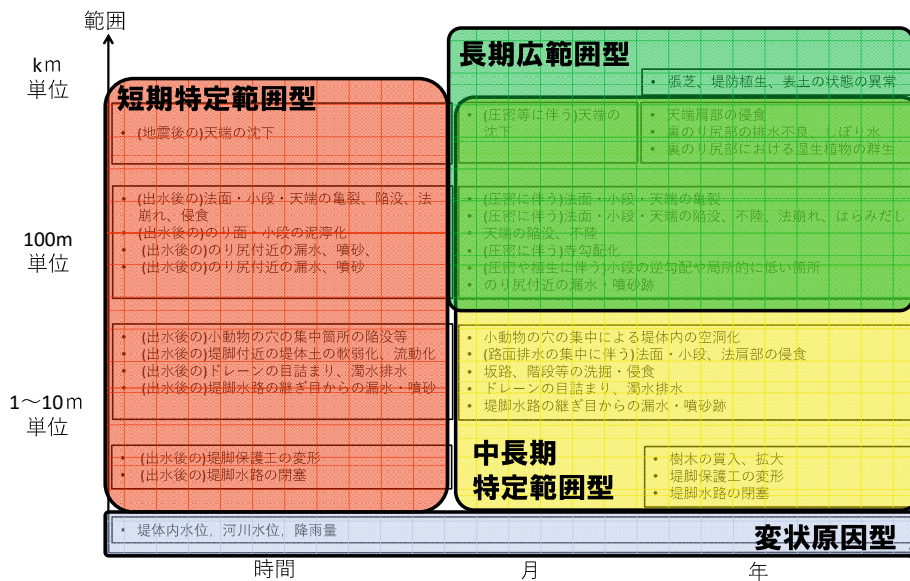


図 4.4.7 監視タイプと点検項目の関係

各計測技術の特徴や実際の運用を想定し、監視タイプに適する計測技術を検討すると、概ね図 4.4.8 のようになるものと考えられる。

出水後の法面の亀裂、陥没などの致命的な変状に係る短期特定範囲型には、密な時間間隔で変形を捕らえることができ、夜間や豪雨時等の視界が良好でない場合でも監視が可能な接触型センサ類である光ファイバ等が適応すると考えられ、法面の亀裂や法面侵食等の要監視に係る中長期特定範囲型には、降雨や出水の都度、定性的(相対的)・定量的の両面で、ある程度広域的に変状をとらえることが可能な航空機レーザー測量、MMS、UAV 搭載カメラが適応すると考えられる。また、広範囲な沈下や、これまで定性的にしか捕らえられてこなかった堤防植生、

表土の状態の異常等，長期的に緩やかな変化に係る長期的広範囲型や，中長期特定範囲型の堤体の変状に関する項目は，定量的・広域的に変状の有無や大きさをとらえることが適する人工衛星 SAR が適応するものと考えられる．なお，現状の技術では，非接触型の計測技術を用いる場合，植生の死角により，法面，小段のはらみ出しや局所的に低い堤防の監視ができない場合や，天候の問題により監視が出来ない場合等が課題となっているが，これらについては，別途，各計測技術の高度化や計測技術の組合せにより課題解決のための技術開発が別途行われている．また，監視タイプの中で樹木の貫入，拡大等のように計測技術の適応性が低いと考えられるエリアについては，これまでどおり，目視による点検が必要であると考えられる．

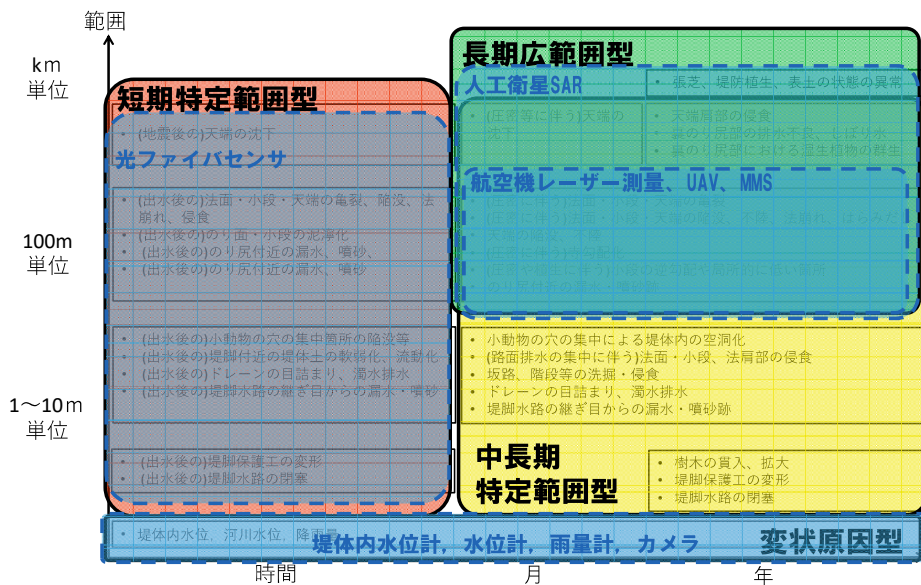


図 4.4.8 監視タイプに適する計測技術

このように，点検（又は監視）項目毎の要求される監視の精度と計測技術の特徴及び実質的な運用性等とを合わせることにより，堤防の点検・管理について，適切な手法により監視水準の高度化や監視の効率化が図られるものと考えられる．

本章の実例において取り上げた，水圧式水位計は，降雨浸透を観測することにより，短期的な時空間スケールで発生するのり尻の噴砂等の局所的な変状や，中長期の時間スケールにおいて発生する，のり尻等からの漏水や，浸潤状態，のきっかけとなる堤体内水位の変化をとらえることが可能な計測技術に該当すると考えられる．

4.5. 堤防の維持管理における計測技術の活用

4.5.1. 堤体内水位計を活用した事例

平成13年(2001)9月に埼玉県加須市大越地先の利根川右岸の河川堤防において、透水性の堤体と基礎地盤に起因する大規模な漏水と噴砂が発生した。これをきっかけに、現地の堤防では強化がおこなわれているが、当該箇所での堤防の規模は、堤高約12m、敷幅約100mと、我が国で有数の規模の河川堤防であること、仮に決壊した場合、その氾濫水が埼玉県を流下し東京都まで達するため、首都圏が壊滅的な被害を受ける恐れがあり、我が国の治水上重要な堤防であること、断面拡大による強化を行った効果を確認する必要があること等の目的で、堤体と基礎地盤の浸潤線の観測が、「河川堤防モニタリング技術ガイドライン(案)」(国土交通省事務連絡平成16年(2004)3月)⁶⁾に基づき行われている。

観測は2015年より2021年までの7年以上の長期にわたり実施されている。わが国においてはこのような大規模な堤防に対する長期の観測事例は少なく、さらに、その間、平成27年(2015)9月関東・東北豪雨による洪水や令和元年(2019)東日本台風による洪水を経験していることから、堤防の浸透状況を分析するにあたって極めて貴重なデータであると言える。

ここでは、河川堤防を対象に、2015年から2021年までの堤体3箇所と基礎地盤3箇所の計6箇所の水位観測結果を用いて、堤体や基礎地盤の浸潤線上昇に与える河川水位や降雨の影響について分析することで浸透状況を把握、堤防の浸透に対する予防保全の可能性について考察を行ったものである。具体的には、断面拡大工法により国内最大級の大きさを持つ利根川本川の堤防に対して7年という長期にわたり堤体内水位観測が実施されている右岸122.5k断面を対象に、堤体と基礎地盤の水位観測結果を用いて、降雨や洪水の浸透特性について考察するとともに、特に大規模な出水となった、2019年の洪水時の観測結果に着目して堤体への浸透現象について分析を行った。

(1) 対象となる堤防の特徴

対象としている、利根川上流部の一般的な築堤履歴を図4.5.1に示す。これによると、利根川堤防は、明治から昭和まで、4回の拡幅や嵩上げが行われており、堤防の土質構造は非常に複雑である。

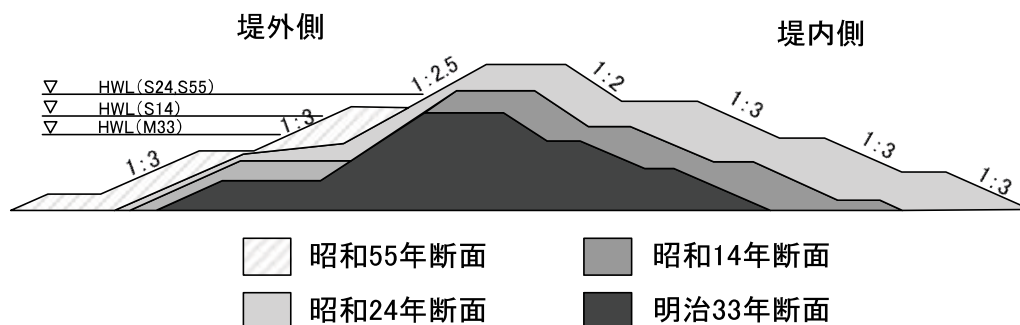


図4.5.1 利根川上流部堤防の一般的な土質構造

また、近年の主な洪水としては、平成13年(2001)、平成27年(2015)、令和元年(2019)のものが挙げられる。

平成 13 年（2001）9 月洪水では，台風 15 号による出水に伴い，利根川上流の 7 観測所で警戒水位を大きく上回る水位を観測しており，このときは，首都圏氾濫区域である利根川右岸の埼玉県加須市大越地先で，堤体および基礎地盤において漏水が発生している．この漏水については，大きな被害には至らなかったものの，重要水防箇所以外の箇所で発生したこと，計画高水位には達しない水位で発生したこと等が重視され，これがきっかけとなって利根川の断面拡大工法による堤防強化が実施されるに至っている．

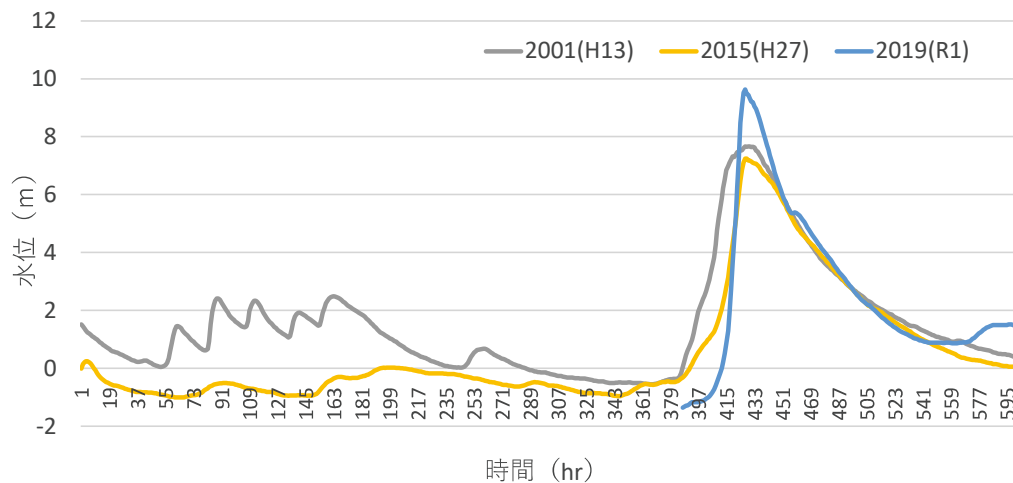


図 5.5.2 栗橋水位観測所における主要洪水の河川水位

(2) 観測方法

1) 観測断面

今回対象とする観測断面は，利根川右岸 122.5k で，裏のり断面拡大工法による堤防強化が実施された箇所である．堤体土質構造は，観測箇所近傍の 150m 上流の堤防詳細点検結果によると，比高が 10m，堤体土質構造は粘性土主体の旧堤（Bc）に対して粘性土で表のりと裏のりに腹付け（B）がされており，基礎地盤は川表側に層厚 3.6m 程度の N=5 前後の軟弱な粘性土主体の Ac1 層，川裏側に関東ローム主体の Lm 層（透水係数は $k=5.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ ， $k=1.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ ）が分布し，その下に厚い透水層（Ds1 層，Ds2 層）が分布している．治水地形分類上は氾濫平野である．

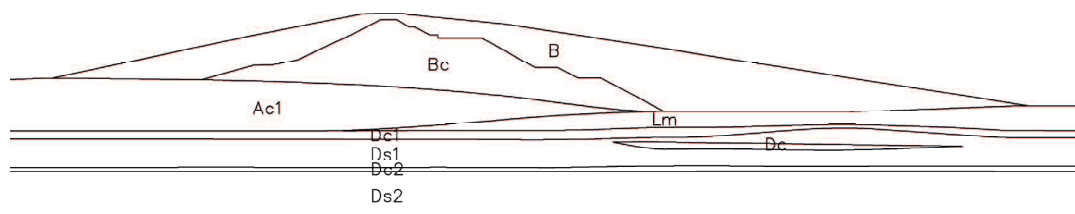


図 4.5.3 利根川右岸 122.5k の堤防土質構造

2) 観測方法

観測は堤体と基礎地盤の堤体内水位の計測を実施しており、位置は旧堤第2小段直下旧堤内、旧堤防のり尻付近、7割堤防断面断面拡幅部の3側線3箇所に対して観測井を設置し、水圧式水位計を用いて、降雨や河川水の浸透による飽和領域を把握している。また、基礎地盤の堤体内水位は、堤体水位観測位置直近、3側線3箇所に対して堤体水位観測孔とは別に観測孔を設置しているが、基礎地盤表層は関東ロームが分布しているため、その直下の砂質土透水層を対象として観測を実施している。

観測井はボーリング孔を活用して設置しており、所定の深度まで削孔したボーリング孔中に硬質塩化ビニル管を立て込み、観測対象層にストレーナを設置している。観測には自記式水位計を用いており、水位計は定期的(1~2ヶ月に1回程度)データ回収し、異常の有無を確認するとともに、年1回程度はベアラ等を用いて観測井の洗浄を行っている。

また、旧堤と裏腹付け部の境界の標高10m付近(基礎地盤表面)に土壤水分計を配置している。

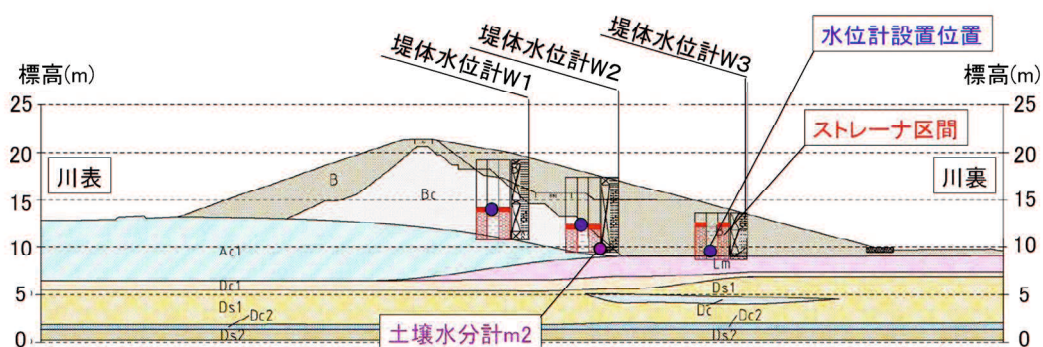


図 4.5.4 堤体の観測機器設置位置

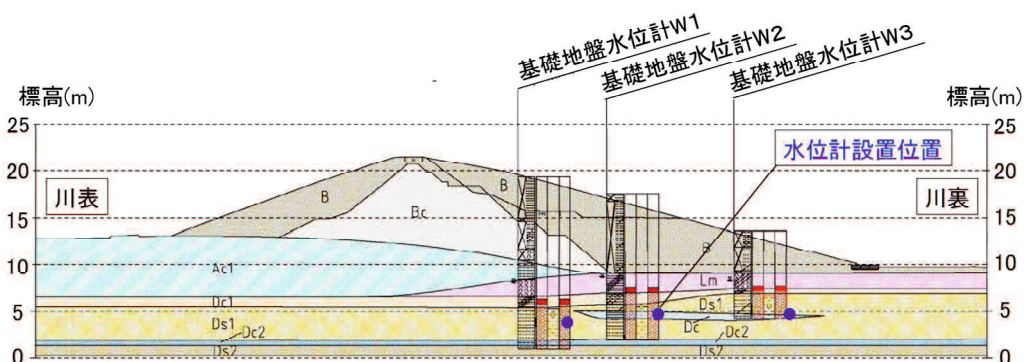


図 4.5.5 基礎地盤の観測機器設置位置

3) 水位観測結果

a) 水位観測結果の概説

水位観測は、堤体の水位観測については、天端側から W1～W3 の 3 測線で実施しており、対象とした観測期間は平成 27 年（2015）2 月 17 日より、W1 は平成 31 年（2020）1 月 9 日、W2 は令和 2 年（2020）5 月 2 日、W3 は令和 4 年（2022）2 月 22 日までである。途中、機器の電池切れによる中断期間等あるものの、これまで約 7 年間のデータを蓄積している。また、平成 30 年（2018）6 月 15 日に、旧堤と裏腹付け部の境界に土壤水分計 R122.5k-m2 を設置している。

基礎地盤の水位観測については、天端側から W1～W3 の 3 測線で実施しており、対象とした観測期間は平成 27 年（2015）2 月 17 日より、令和 4 年（2022）2 月 22 日までとしている。

観測期間中に、主な洪水として、平成 27 年（2015）9 月関東・東北豪雨や、令和元年（2019）東日本台風による水位上昇を経験している。

b) 堤体の水位観測結果

堤体の水位観測結果からは以下が見て取れる。

W1, W2 の堤体内水位は観測期間通じて反応を示さない。一方、W3 の堤体内水位は 2019 年 10 月に反応を示している。これは、令和元年東日本台風によるものであり、この時の W3 の水位は概ね河川水位を上回っていることから、水位計の設置深度まで堤体内水位が上昇していると考えられる。

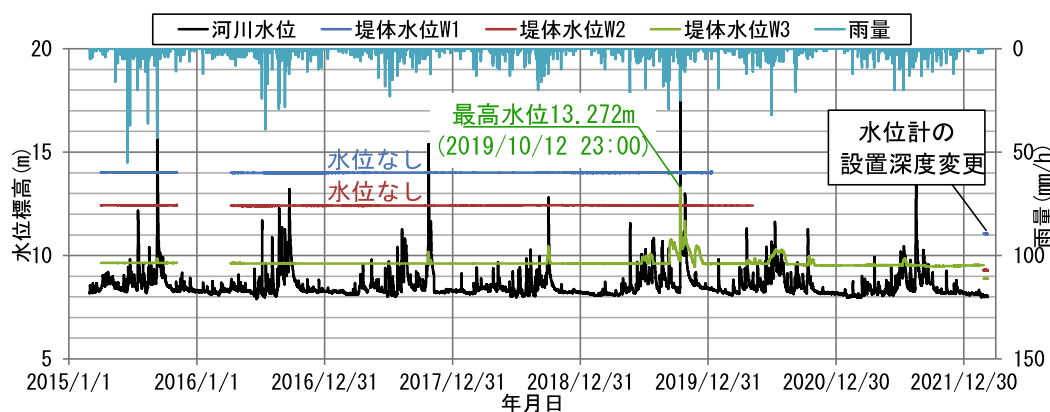


図 4.5.6 堤体水位観測結果

水位計 W2 があるのり面中央付近かつ W3 と同一深度に設置されている土壤水分計において、飽和度の変化を確認した（図 4.5.7）。観測期間において、飽和度 100%が確認されたのは、令和元年東日本台風が上陸した時であり、この時、堤体内水位計 W2 の水位は上昇しておらず、基礎地盤水位計 W2 の水位は土壤水分計の設置標高付近まで上昇していた。これは、のり面中央付近では、基礎地盤からの浸透により土壤水分計の設置深度にて飽和度 100%となっているが、河川水による浸透がないため、水位計の設置深度までは堤体内水

位が上昇していない（井戸枯れしている）ことが原因であると考えられる。このため、堤体内水位計 W3 付近では河川水は浸透していないものと推定される。

最も河川水位が上昇した 2019 年 10 月の令和元年東日本台風時を見る（図 4.5.8）と、川表側の W1, W2 水位計が反応を示さない一方で、川裏の W3 水位計が反応を示している。W3 の堤体内水位上昇が河川水によるものだと仮定すると、W1, W2 水位計についても反応を示すことが想定されること、W3 水位計は降雨量の増大と呼応している。このことから、W3 の水位上昇の原因は降雨によるものであることが推定される。

また、W3 の水位変動を踏まえると、のり面中段～のり尻の Lm 層上端以浅に堤体内水位があったと推測される。

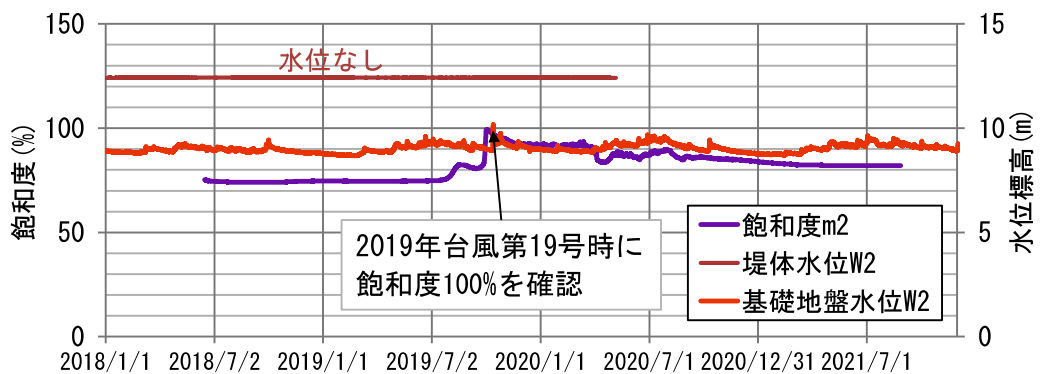


図 4.5.7 土壌水分計の観測結果

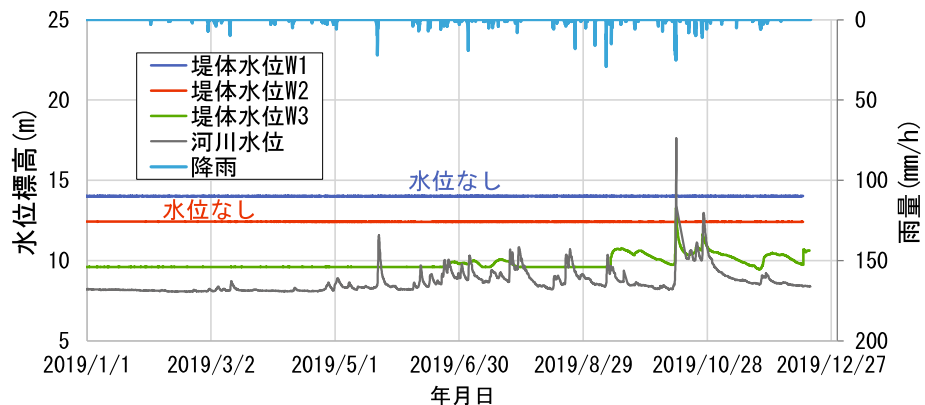


図 4.5.8 2019 年の堤体水位観測結果

c) 基礎地盤の水位観測結果

基礎地盤の水位観測結果からは以下が見て取れる。

河川水位が高くない非出水期には観測水位が河川水位を上回っており、河川水位の変動による影響は小さいと考えられるが、急激な河川水位の上昇により観測水位も上昇するという現象が確認できる。

降雨量の増加によっても 水位変動が生じていると考えられるが、非出水期における観測結果を見ても、河川水位による影響と比較すると変動は緩慢で変動幅も小さい。

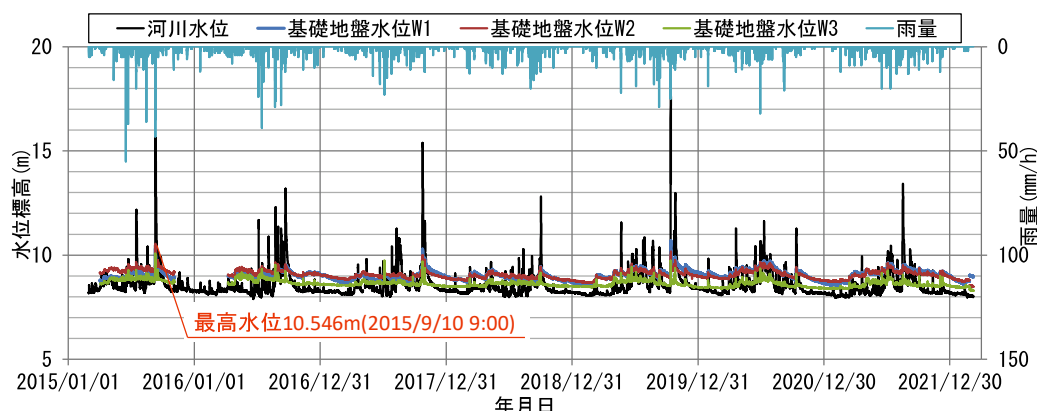


図 4.5.9 基礎地盤水位観測結果

4) 観測結果を用いた解析結果の検証

a) 既存の堤体土質構造モデルによる解析結果

観測断面の堤体内水位予測を行うための、堤防土質構造のモデル化にあたっては、水位観測断面から 150m 上流 (122.65k) の既存の堤防詳細点検時に実施したボーリング調査結果を基に、平成 26 年実施の水位観測孔設置の際に確認した地層構成を反映した。浸透流解析に用いた堤防土質構造を図 4.5.3、土質定数を表 4.5.1 に示す。堤体は粘性土主体で透水係数 $k=5.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 、基礎地盤は川表側に粘性土主体の Ac1 層、川裏側に関東ローム主体の Lm 層 (透水係数は $k=5.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$, $k=1.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$)、その下は粘性土と砂質土の互層のモデルである。土質強度は既存の詳細点検 (122.65k) に基づき設定し、不飽和透水特性は「河川堤防の構造検討の手引き (平成 14 年 (2002) 7 月, 一般財団法人国土技術研究センター)」(以下、「手引き」) に基づき設定を行った。

表 4.5.1 土質定数一覧

区分	地層			透水係数 $k(\text{cm/s})$	比貯留係数 (m^{-1})
	地層名	記号	土質		
堤体	旧堤盛土	Bc	粘性土	$5.0\text{E-}05$	$1.0\text{E-}03$
	腹付盛土	B	粘性土	$5.0\text{E-}05$	$1.0\text{E-}03$
基礎地盤	沖積粘性土	Ac1	粘性土	$5.0\text{E-}05$	$1.0\text{E-}03$
	ローム	Lm	粘性土	$1.0\text{E-}05$	$1.0\text{E-}03$
	洪積粘性土	Dc1	粘性土	$1.0\text{E-}05$	$1.0\text{E-}03$
	洪積砂質土	Ds1	砂質土	$6.5\text{E-}03$	$1.0\text{E-}04$
	洪積粘性土	Dc2	粘性土	$1.0\text{E-}05$	$1.0\text{E-}03$
	洪積砂質土	Ds2	砂質土	$2.0\text{E-}02$	$1.0\text{E-}04$

また、堤防土質構造モデルの分割要素は、堤体の鉛直方向に対しては、「手引き」にしたがって堤防高の 1/10 以上（堤防高が低い川表で 1/14，川裏で 1/25），水平方向は堤防敷幅の 1/116，川裏法尻の基礎地盤の鉛直方向は地表から 0.1m，0.15m，0.45m に設定した。

作成した堤防土質構造モデルを用いて、水位計が反応を示した、2019 年 10 月の令和元年東日本台風時の観測結果を対象として、飽和不飽和浸透流解析結果と堤体内水位の観測結果を比較した。解析にあたっての降雨については、観測断面近傍の観測所（栗橋観測所）における実績雨量，河川水位については、観測断面の上下流の水位観測所（利根関宿と北関宿）の値を距離で案分して設定した水位波形を作成し、外力として用いた。地下水位については、「手引き」にしたがって堤内地盤高-0.5m で与えた。堤体側の観測孔である W1 の結果を図 4.5.10、のり尻側の観測孔である W3 の結果を図 4.5.11 に示す。堤体内水位については、2019 年 5 月以降に着目すると、W1 水位計の解析水位は、実測水位を最大 1m 程度上回る結果となっている。また、W3 水位計の解析結果は、対象期間全般に、実測水位を最大 1m から 3m 程度上回る結果となっている。

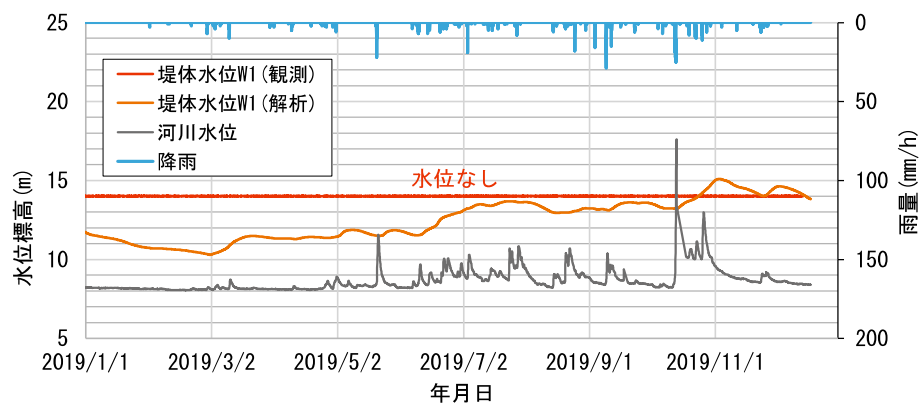


図 4.5.10 2019 年の W1 堤体水位観測結果

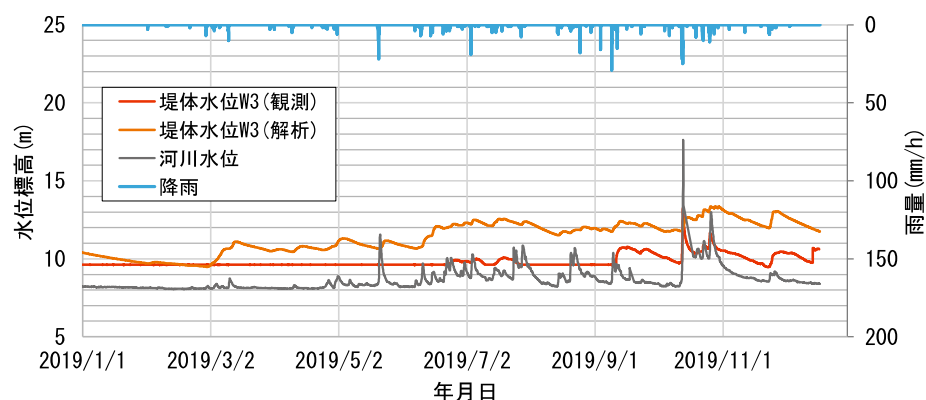


図 4.5.11 2019 年の W3 堤体水位観測結果

b) 堤防モデルの変更

堤体の水位上昇については、透水係数のモデル化が大きく影響することから、堤防土質モデルのうち透水係数について、新たな調査や既存の土質試験結果等を用いた見直しを行うことで、堤防モデルの変更を行った。まず、堤体水位観測結果のうち、水位変動の確認

された W3 に着目すると、10 月の出水時には河川水位との連動も見られるが、その他では基本的に河川水位とは異なる水位変動がみられた。このため、観測水位の上昇要因には降雨の依存性が高いものと考察した。

次に、降雨浸透に大きく影響する、堤体の透水係数のモデル化について変更を行った。モデルは堤体表面と内部に分けて変更を行うものとし、堤体内部については、室内透水試験を実施し、築堤履歴を考慮して堤体構造を旧堤部分 (B) と腹付け部分 (Bc) に分けて、それぞれ B は $3.50 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 、Bc は $9.50 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ と設定した。堤体表面については原位置透水試験の実施により、透水係数を $k=3.50 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ から $k=5.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ に変更した。

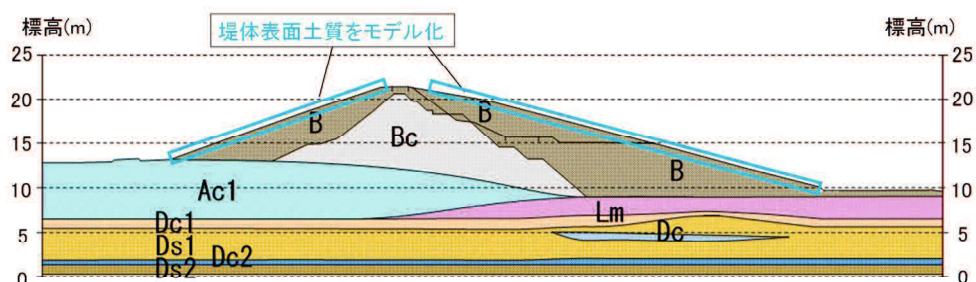


図 4.5.12 変更した堤防土質構造モデル

表 4.5.2 変更土質定数一覧

区分	地層			透水係数 k (cm/s)	比貯留係数 (m^{-1})	変更内容
	地層名	記号	土質			
堤体	旧堤盛土	Bc	粘性土	9.5E-07	1.0E-03	室内透水試験
	腹付盛土	B	粘性土	3.5E-07	1.0E-03	室内透水試験
	表層0.5m	B'	粘性土	5.0E-04	1.0E-03	原位置透水試験
基礎地盤	沖積粘性土	Ac1	粘性土	5.0E-05	1.0E-03	—
	ローム	Lm	粘性土	1.0E-05	1.0E-03	—
	洪積粘性土	Dc1	粘性土	1.0E-05	1.0E-03	—
	洪積砂質土	Ds1	砂質土	6.5E-03	1.0E-04	—
	洪積粘性土	Dc2	粘性土	1.0E-05	1.0E-03	—
	洪積砂質土	Ds2	砂質土	2.0E-02	1.0E-04	—

c) 変更モデルによる解析結果の検証

変更した堤防土質構造モデルを用いた解析の実施にあたり、降雨、河川水位、地下水位については、既存の堤体土質構造モデルによる解析と同じ条件を用いた。

河川水位上昇時における浸透に対する安全性照査の結果を図 4.5.13 に示す。これによると、過度な堤体内水位の上昇は抑えることができた一方で、解析値全般に観測値より低い堤体内水位となった。

河川堤防の浸透に対する安全性の照査において特に重要なものの一つは波形面積であることから⁸⁾、観測水位の再現性については、水位変動を捉えられた 9 月 10 日 21 時～12 月 15 日 24 時までの期間の水位計設置標高 TP+9.62m より上位の水位グラフの面積に着目して比較した。その結果、観測水位の $1,653 \text{m} \cdot \text{hr}$ に対して、当初モデルは $6,514 \text{m} \cdot \text{hr}$ と

4,861m・hr もの乖離があったが、の変更したモデルでは 75m・hr と 1,578m・hr の差まで改善した。これらの結果より、堤体表面や堤体内の透水係数を適切にモデル化することが、降雨浸透の適切な再現につながり、結果、堤体内水位の再現に大きく影響することが示された。

一方で、2019年10月12日23時の観測水位ピーク TP+14.74m に対して、当初モデルでは水位ピークが10月26日3時の TP+12.66m であったが、変更したモデルでは水位ピークが10月16日13時の TP+9.93m となり、水位波形の再現にはまだ課題が残る。

これらの結果より、堤体表面や堤体内の透水係数を適切にモデル化することが、降雨浸透の適切な再現につながり、結果、堤体内水位の再現に大きく影響することが示された。

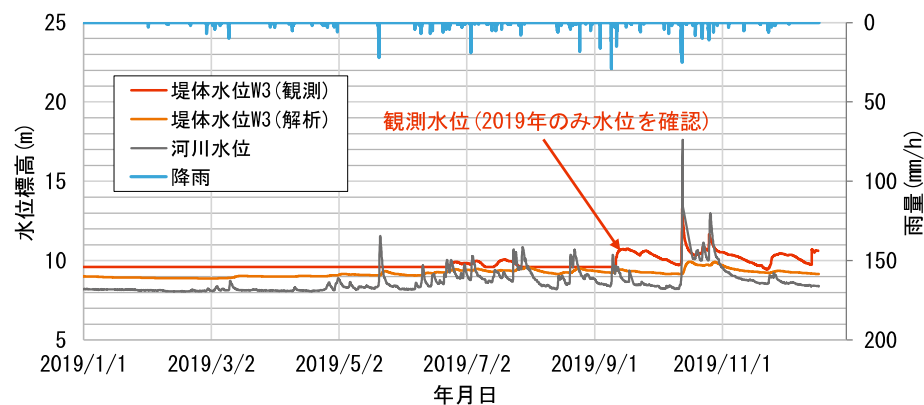


図 4.5.13 W3 観測孔の堤体内水位観測結果と解析結果の比較

5) 降雨が堤体の水位上昇に与える影響分析

a) 分析の概要

「手引き」によると、堤防の安全性照査では、堤体への降雨浸透過程を再現しつつ、その後の河川水位上昇も踏まえて堤体内水位を算出し、堤体の力学的安定性を照査する。そのため、降雨浸透は浸透に対する堤体の力学的安定性の評価をする上で重要な指標となる。これまでも、安全側の設計論である「手引き」の降雨浸透量については様々な議論が行われており、降雨浸透の適切な与え方について検討されている⁷⁾。堤体内水位の観測結果より、水位上昇要因が降雨によるものであると推定されたことから、ここでは、今回の堤体水位観測結果を用いて、降雨量、降雨パターンと、堤体内水位上昇量の関係について分析を行った。

降雨量と降雨パターン設定にあたり、W3 の水位上昇開始 24 時間前までの累加雨量を「事前降雨」、水位上昇し続ける期間の累加雨量を「本降雨」として、それらを加算したものを「総降雨量」とした。また、W3 水位上昇時点の初期水位は W3 水位計の設置標高を起点として、設置標高と同じであれば初期水位なし、水位が設置標高よりも上の場合初期水位有りとした。

水位上昇量は、W3 観測孔において、10 時間以上継続して水位上昇している場合の初期水位と水位上昇終了時の水位の差分とした。

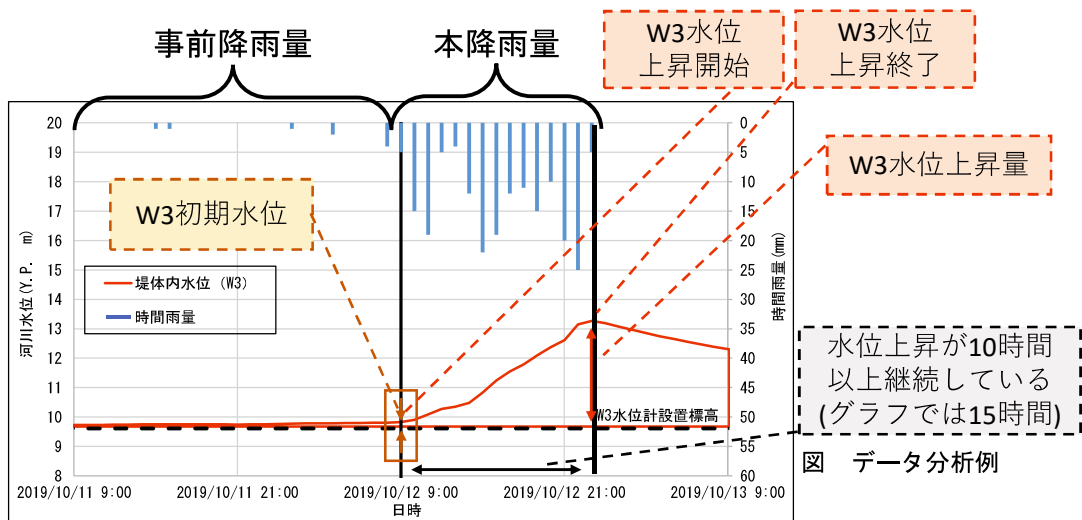


図 4.5.14 降雨量と水位観測結果の分析方法

降雨量と降雨パターンとしては、降雨については“本降雨”が卓越しているもの、“本降雨”と“事前降雨”が組み合わさっているもの、“事前降雨”が卓越しているものの3ケースに加えて、降雨が観測されていないものに分けた。初期水位については、設置標高と同じであれば初期水位なし、水位が設置標高よりも0.1m以上0.5m未満、0.5m以上1.0m未満、1.0m以上の4ケースに分け、計13ケースに分けて、水位上昇量との関係について整理した。

表 4.4.3 降雨量と初期水位の組み合わせケース

ケース	降雨パターン		初期水位 (基礎地盤水位)			
	事前降雨	本降雨	H<0.1m (初期水位無し)	0.1m≦H<0.5m	0.5m≦H<1.0m	H≧1.0m
黒			○			
青		○		○	○	○
緑	○	○		○	○	○
赤	○			○	○	○

b) 降雨量と水位上昇

降雨量と水位上昇量の関係についてバブルチャートとして図 4.5.15 に示す。ここで、図 4.5.15 において、W3 の初期水位についてはバブルの大きさ、降雨パターンについてはバブルの色で表現した。初期水位と降雨パターンに着目して、以下を述べる。

初期水位がない場合は、総降雨量 27mm において約 1m の水位上昇を確認した 1 ケースを除いて、総降雨量が 200mm を超えても水位上昇が確認されなかった。初期水位がある場合は、総降雨量が大きいほど水位上昇する傾向にあることを確認した。これは、不飽和浸

透特性の観点から、初期水位がある場合、堤体内水位計 W3 付近の堤体が湿潤化または飽和しているため、降雨が浸透しやすく堤体内水位の上昇に寄与しやすいためであると考えられる。「手引き」では、河川堤防の浸透に対する安全性照査の1つとして、洪水時の川裏のりすべりの安全性照査をすることとなっているが、のりすべりにおいて、堤防のり尻の水位上昇は、堤体の安定性を損なう原因の1つである。そのため、この分析によって、堤防のり尻にて初期水位がある状態では、外力が降雨のみであっても、堤体の安定性が低下する可能性があることを示すことができた。なお、総降雨量 213mm のケースについては、初期水位が水位計設置標高+0.1m~0.5m であり比較的低いですが、水位が 3.464m も上昇した。これは、降雨量が多いことにより、初期水位の傾向とは異なる水位上昇が発生したと考えられるが、力学的な考察まで至っていない。

降雨パターンにおいては、本降雨が主体の降雨パターン、事前降雨+本降雨のパターン、事前降雨主体の降雨パターンの順で水位上昇しやすい傾向を確認した。

近い総降雨量である、53、64、70mm の総降雨量の3ケースに着目すると、本降雨が大半を占める総降雨量 64mm の水位上昇量が 1.016m であり、総降雨量 53mm、70mm のケースよりも高かった。これは、これは、初期水位の有無の考察と同様、堤体内水位計 W3 付近の堤体が湿潤化または飽和している状況下で、集中して降雨が発生することが、水位上昇を加速させる可能性が考えられたが、これについては、今後、観測データの追加や、降雨強度や水位上昇速度を加味した考察を行う必要がある。なお、グラフにおいて初期水位が無く、降雨量 27mm 程度で水位上昇が約 1m 上昇しているプロットがあるが、ここについては、雨量計設置地点では降雨が観測されず、一方で観測断面では降雨が観測されていることが確認された⁸⁾ ため、降雨量が大きく乖離しているところであり、本来はより大量の事前降雨量である可能性があるため、このデータは特異値として考えた。

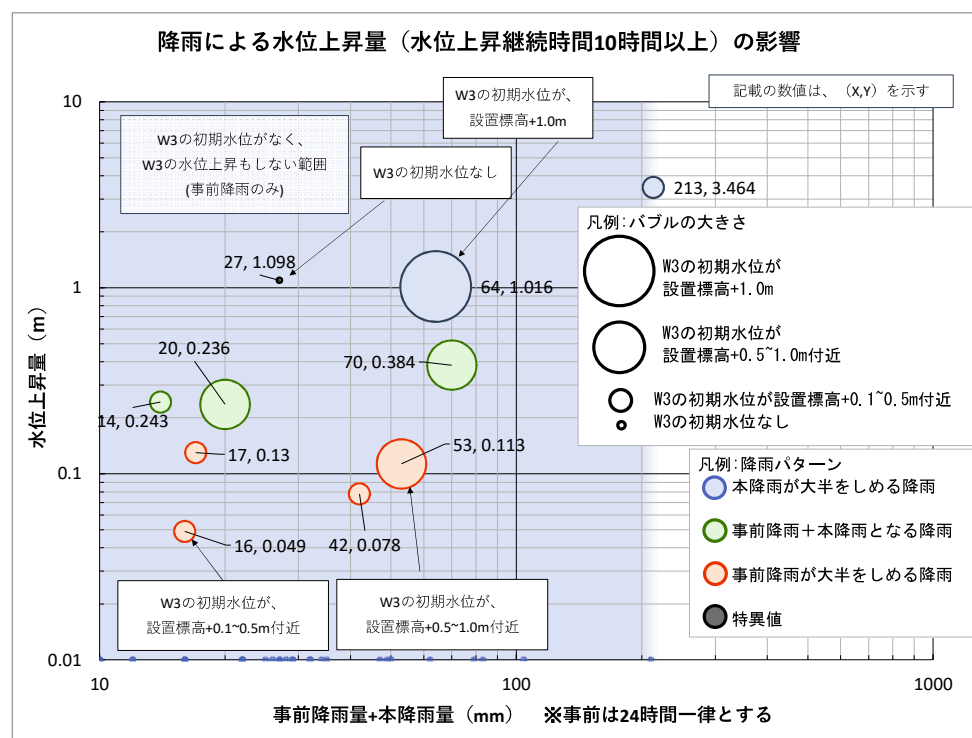


図 4.5.15 降雨量と水位観測結果の分析結果

6) 堤体内水位計の堤防維持管理への活用

- ・ 国内最大級の大きさを持つ利根川本川の堤防に対して 7 年という長期にわたり堤体内水位観測が実施されている右岸 122.5k 断面を対象に、堤体と基礎地盤の水位観測結果を用いて、降雨や洪水の浸透特性について分析するとともに、計測機器を用いた予防保全的な堤防管理の可能性について考察を行った。
- ・ 堤体の水位観測結果より、最もり尻側の水位計 (W3) 以外の水位計 (W1, W2) では、堤体内水位が観測されなかった。また、土壤水分計の観測結果においても、飽和度 100%となるのは堤体中央の W2 水位計の設置標高付近までであった。このことから、洪水の浸透水は堤体中央部にほとんど達しておらず、W3 の水位上昇要因は降雨によるものであると推定された。
- ・ 基礎地盤の水位観測結果より、出水期は基礎地盤水位と洪水とが良く連動していることが確認された。一方、降雨の増加に対しても基礎地盤水位は変動が生じていると考えられるが、非出水期における観測結果を見ても、河川水位による影響と比較すると変動は緩慢で変動幅も小さいことから、基礎地盤水位は洪水により規定されるものが主体であると推定された。
- ・ 河川水位が最も上昇した洪水の一つである 2019 年 10 月の令和元年東日本台風時の観測結果を用いて、「手引き」に基づいて設定したモデルと、降雨浸透に着目して堤防表層の透水係数や内部の透水係数の設定方法を変更したモデルの 2 つで、飽和不飽和浸透流解析を用いて堤体内水位の観測結果を検証した。その結果、後者のモデルによる解析結果では、水位ピークの再現については課題が残るものの、解析値が堤体内水位波形に概ね一致することが確認され、堤体表面や堤体内の透水係数を適切にモデル化することにより、堤体内水位を再現できる可能性があることが示された。
- ・ 堤体内の水位上昇要因が降雨によるものが主体であるとの推定に基づき、降雨が堤体の水位上昇に与える影響について分析するために、降雨パターンと初期水位に着目して、降雨量と堤体内水位上昇量の関係について分析を行った。その結果、初期水位がある状態では、総降雨量が大きいほど堤体内の水位が上昇する傾向があり、外力が降雨のみであっても、堤体の安定性が低下する可能性があること、本降雨が主体のパターン、事前降雨+本降雨のパターン、事前降雨主体のパターンの順で水位上昇しやすいことから、本降雨が堤体の水位上昇に与える影響が大きく、堤体の安定性に影響がある可能性があることが推定された。
- ・ これらのことにより、浸透に対する堤体の力学的安定性の評価をする上で重要な指標となる堤体内水位は水圧式水位計を用いて観測することが可能であること、降雨量や降雨パターンによっては、堤体の水位上昇に大きく影響することが示された。
- ・ 今回対象とした堤防では、大断面の堤防であることや、粘性土系の材料主体の堤体であることから、河川水位の影響よりも降雨が水位上昇に与える影響が大きく出たことも考えられる。今回得られた降雨パターンや降雨量が堤体内水位に与える影響を一般化していくために、今回対象堤防と同様の土質構造を有する他の堤体で、同様の結果が得られ

- るか確認することや、他の砂質土主体の堤体における降雨や洪水の浸透特性を分析すること等、堤体内水位観測を実施している堤防を対象に、継続した分析を行う必要がある。
- また、分析対象とした堤防について、円弧すべり安定計算等を併せて行うことで、堤体すべりが発生する限界状態の堤体内水位を推定し、被災発生の水位の閾値を明確にすると、水圧式水位計による堤体内水位の観測による予防保全的な堤防管理に繋がると考えられる。

4.5.2. 人工衛星 SAR を用いた堤防観測

のり面すべりやパイピングによる空洞等の堤防の変状は、洪水時の浸透作用により、堤体が不安定化することで発生するものである。この場合、それらの変形が堤体表面に現れると考えられている。このような変形の程度を出水後早期に把握することや、日々の河川管理において変形量の変化を把握しておくことは、堤防の安全性を向上させることで極めて重要なことである。

現在、堤防変状をレーダー測量等の技術を用いてとらえる技術は、MMS や UAV 等を活用したものが、一部実用化されつつある⁹⁾。また、岡村ら¹⁰⁾や山中・岡村¹¹⁾は、実河川の堤防において、パイピングの緩み領域をミニラムサウンディングを用いて特定し、さらに、同じ調査地点において LP 又は SfM で取得した DEM から堤体表面の小さな凹凸とパイピングの位置関係が良く一致することを確認している。

一方、人工衛星 SAR による干渉解析技術を堤防に用いると地表面の変動量を mm 単位で計測することができるため、長大な延長の堤防の変状状況を一度に見ることができる特徴を利用して、出水後早期に堤防に生じた変状をより広範囲で把握する可能性を持っている。今回これを用いて江の川パイピング被災箇所における出水前後の人工衛星 SAR 観測データを用いて堤体表面の変形量について解析を行い、堤防変状箇所の発見の可否について確認を行うとともに、今後の河川管理における人工衛星 SAR 技術の応用の可能性について検討を行った。

(1) 対象とした堤防災の特徴

江の川は、流域面積 1,981km²、直轄管理区間延長 164.2km の一級河川である。平成 30 年(2018) 7 月豪雨の影響により、総雨量としては、被災箇所近傍の川本雨量観測所において、7/5 0:00 から 7/9 23:00 までで計 221mm という猛烈な雨が降り、水位は計画高水位を一部上回る記録的な洪水が発生し、江の川右岸下原地先 15.0k~16.0k 区間と、江の川右岸鹿賀地区 27.8k~29.0k の 2 箇所において、堤体のり崩れや基礎地盤からの噴砂等の被災が発生した。

特に鹿賀地区においては、平成 30 年(2018) 7 月 7 日に 28.4k~29.0k では延長約 11m (天端道路亀裂を含むと 15.2m)、27.8k~28.4k では延長約 10m の大規模なりのり崩れが発生した。

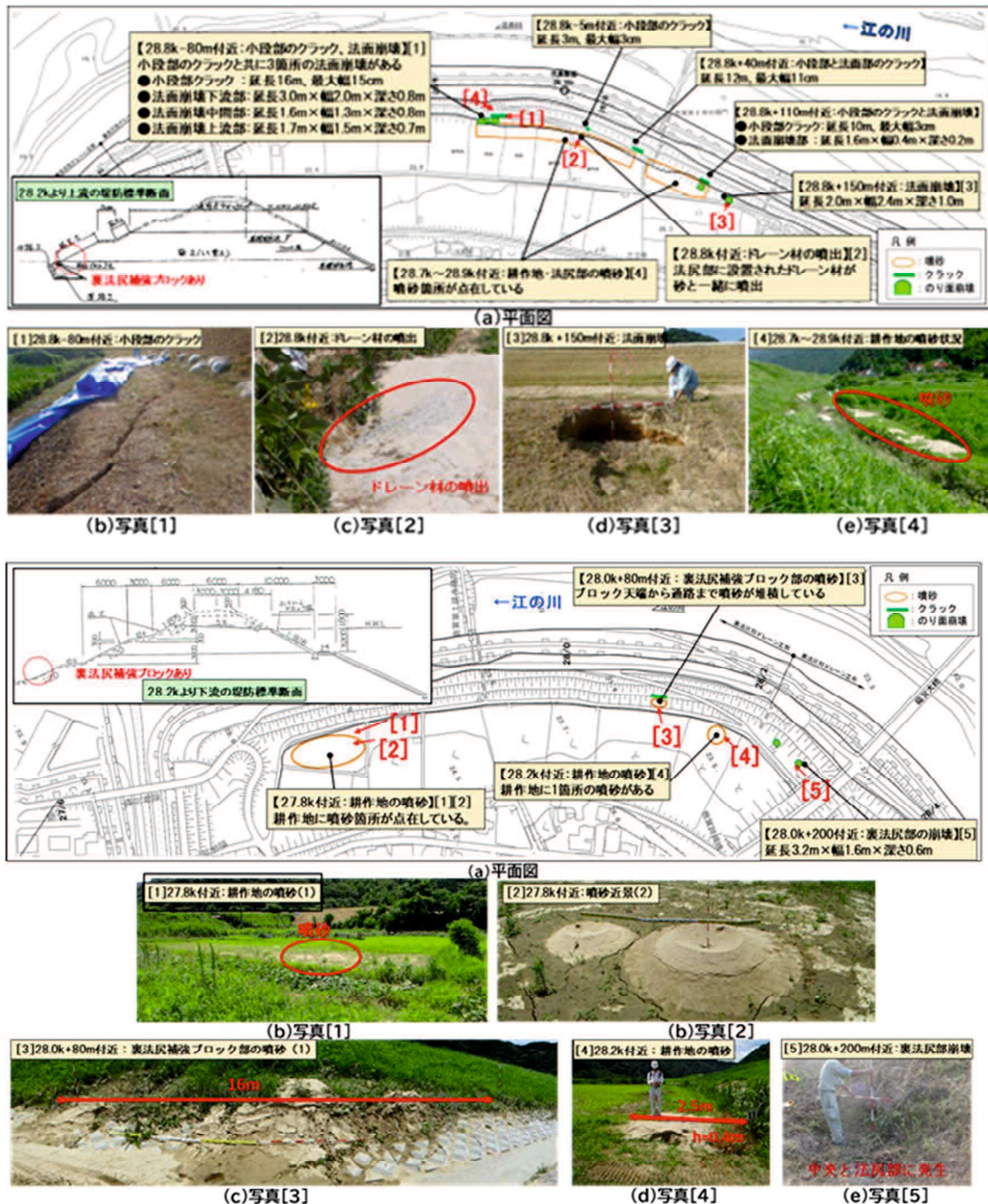


図 4.5.16 被災の状況 (上が 28.4k~29.0k (上流側), 下が 27.8k~28.4k (下流側))¹²⁾

(2) 人工衛星 SAR 技術の概要

人工衛星 SAR は、マイクロ波を地表面に向かって斜めに発射し、地表面からの反射波を観測することで地上の情報を取得する能動型センサ (合成開口レーダー (SAR)) を搭載した人工衛星による地表面観測技術である。レーダーで観測する場合、分解能を向上させるために、レーダーのアンテナの指向性を絞って照射する必要があるが、指向性を高めるためにはアンテナを大きくする必要がある。そこで飛行体 (人工衛星や飛行機など) が移動しながらマイクロ波を送受信して、仮想的にアンテナを合成する技術が合成開口レーダーである¹³⁾。この電波

を受信するアンテナのことを開口と呼ぶ。マイクロ波が発射されて戻って来るまでの時間を測定することで、地表面までの距離を測定できる。

人工衛星 SAR の特徴は大きく 3 つある。

- ・ 雲を通過する波長の電磁波であるマイクロ波を用いるため、広域を天候に左右されずに計測ができる。
- ・ 自らが放射したマイクロ波を観測するため、夜間の計測も可能である。
- ・ 人工衛星は地球の軌道上を一定周期で周回しており、国内だと概ね半日以内で観測が行え、洪水発生直後の計測が可能である。(本研究で用いる ALOS-2 はおよそ 12 時間に一度の頻度で日本上空を通過している。

この SAR で観測した画像を 2 つ用いて差分干渉処理を行うことで、地形の変動量を求める技術が干渉合成開口レーダー (InSAR) であり、2 回の同一軌道で航行した人工衛星から送受信したマイクロ波を干渉によって位相差を抽出し、mm 単位での地表面の変動の測定が可能とされている。

InSAR では、X バンド(波長約 3cm)、C バンド(波長約 6cm)、L バンド(波長約 24cm) の 3 種類のマイクロ波の波長が良く用いられる。波長の短い電磁波ほど地表面変動の検出の分解能は高くなるが、C バンドや X バンドでは植生がある場合、樹木の上の方の葉でマイクロ波が反射してしまい地表面まで届かない。これに対し、波長の長い L バンドのマイクロ波は枝や葉を透過し、幹や地表面で反射するため、植生の影響を受けにくい。

本研究では、堤防周辺の堤内地も含めた地表面の変形を観測する必要があることから L バンドを持つ ALOS-2 を用いた。

InSAR 解析処理において、対象とする地表面変動の前後 2 つの RAW データ(反射強度、位相を情報として含んだデータ)が必要である。2 つある RAW データの一方のデータをマスター画像、もう一方のデータをスレーブ画像という。マスター画像は解析処理を行う際の基準とする画像のことを指し(ここでは地表面変動前とする)、スレーブ画像は基準に対して変動量を測定する画像(ここでは地表面変動後とする)を指す。次に、SLC をピクセルレベルで重ね合わせるにより初期干渉画像を作成する。初期干渉画像は軌道や地形の凹凸による渦(軌道渦と干渉渦と呼ばれる)が残っているため、軌道渦は 2 つの SAR アンテナ間の位置関係である基線値を推定することにより除去し、地形渦は DEM データを用いて除去する。これにより地表の変動誤差(差分干渉画像)を作成するが、位相差分は多くのノイズを含むため、これを除去するフィルター処理を行う。その後、InSAR で得られる位相は 0 度から 360 度の値しかとれず、そのままでは変位の絶対値を得ることができないため、変位量を絶対値に戻す(これを位相アンラップ処理という)。さらに、位相アンラップ処理で得られた変動画像はレーダー座標で表示されていることから、実際の地表の座標系に変換を行い、最終的に必要である InSAR によって計測された地表面の変動量とする。図 4.5.17 に InSAR の解析手順を示す¹⁶⁾。

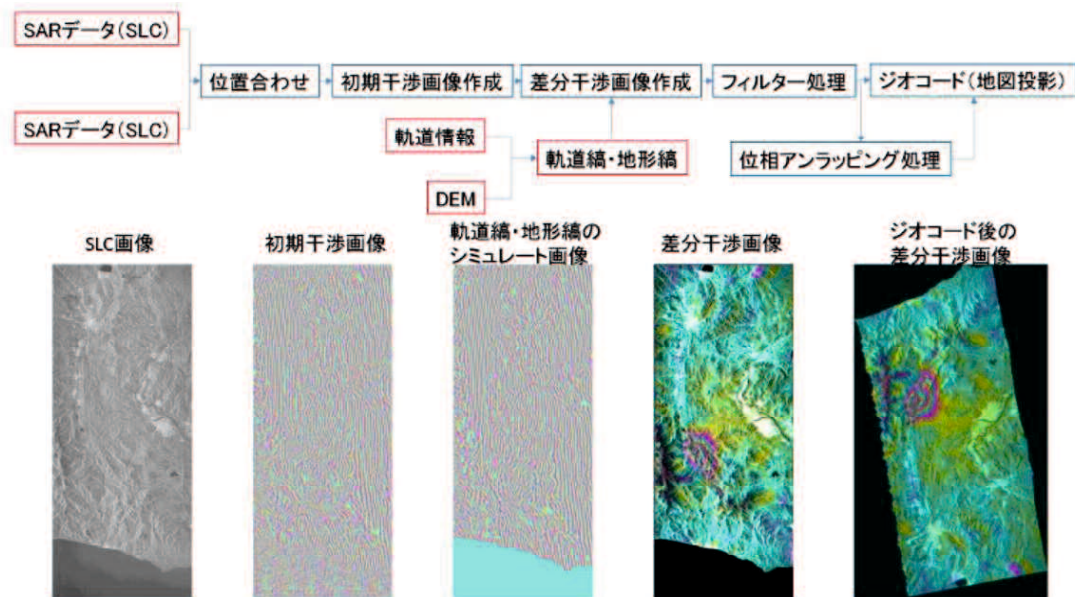


図 4.5.17 一般的な SAR 干渉画像の作成手順¹⁴⁾

(3) 被災箇所への適用

人工衛星 SAR を河川管理に用いるにあたっては、すべりやパイピングの際生じると考えられる地表面の変動をとらえられることが重要であるため、今回、江の川の平成 30 年 7 月豪雨による被災箇所における地表面の変動を人工衛星 SAR でとらえることが可能か解析を行った。対象箇所は 3 章で被災原因の解析を行った、江の川左岸 27.8kp～29.2kp（鹿賀地区）対象として SAR 干渉解析を行うこととした。

RAW データは、2014 年 10 月 1 日から 2018 年 8 月 29 日までのデータを用い、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構が開発した干渉 SAR 時系列解析ツールである ANTIS を使用し、InSAR 画像を作成した。このデータは宇宙航空研究開発機構によって打ち上げられた人工衛星「だいち 2 号」(ALOS-2, Advanced Land Observing Satellite-2)に搭載されている PALSAR-2(Phased Array type L-band Synthetic Aperture Rader-2)によって観測されたものであり、解像度は 1 ピクセル 3m×3m の画像を用いて作成した。

また DEM データは、国土地理院ホームページ内の基盤地図情報ダウンロードサービス¹⁵⁾からダウンロードできる DEM データを用いた。

解析の結果の例を図 4.5.18 に示している。この事例では、解析条件は閾値 0.90 とし、解析時期は 2014 年 10 月 1 日から 2018 年 8 月 29 日までの地表面の経時変化を対象とし、解析範囲は青枠の範囲内、つまり堤内地、堤防、堤外地含めて実施した。寒色系（青色）が沈んでいる箇所、暖色系（赤色）が浮き上がっている箇所を示す。図中に示す赤枠は主な噴砂箇所、青線は亀裂箇所を示した。この結果、沈下や隆起の箇所は変状箇所とは関係なくランダムに出現しており、標準的な手法で解析を行ってもパイピングに伴う噴砂や堤体の陥没やすべりを観測することは困難であると考えられた。

SAR 干渉解析を行うにあたっては、解析対象によっては、より適切なパラメータセットを選択し、時系列解析（再解析）を行うことでより良い結果が得られる場合がある。再解析にあ

たつては、閾値と解析範囲と解析時期の3つが重要なパラメータであるため、これらを変更することにより変状箇所の可視化の可能性について検討を行った。

SAR 干渉解析における閾値は、地表面の変動状況の可視化に大きな影響を与える指標とされており、地表面の変動量のモデル推定値と電波の観測データとの非相関度合いを示すものである。

SAR 干渉解析における地表面の変動量は、正負の変動量がランダムに分布しているが、これらが全て地表変動を表しているとは考え難く、誤差であると考えるのが自然である。得られた変動量が全て誤差であると仮定すると、誤差は正規分布に従うことから、 $\mu \pm 3\sigma$ を超える変動量は誤差である確率は1%未満ということになる。SAR 干渉解析では、この標準偏差を用いた閾値の設定を行っており、閾値が小さい値ほど、地表面の変動量と電波の反射状況の相関関係の誤差を許容する解析となるため、地表面の変動を示す解析値（以下、プロットという）は多くなるが、地表面の相対的な変動の信頼度は低くなる。

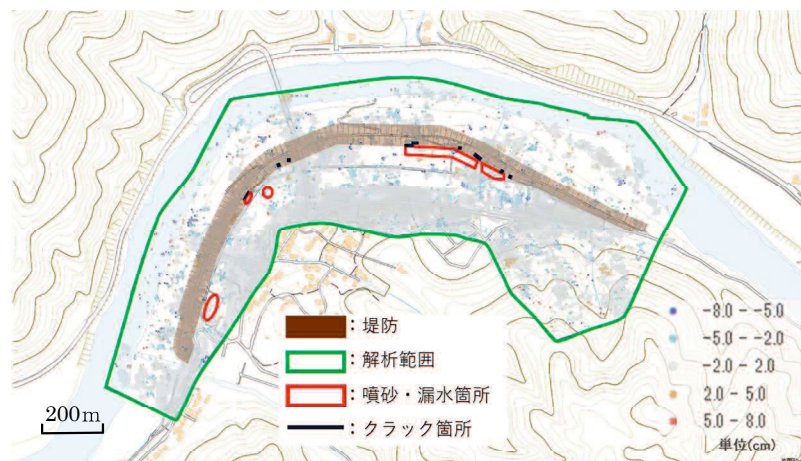


図 4.5.18 江の川鹿賀地区における人工衛星 SAR の解析結果(閾値 0.70 の例)

SAR 干渉解析の解析範囲は、解析対象を含む広範囲に設定することで長大な延長の堤防及び周辺の変状状況を一度に確認することができるメリットがある一方で、解析は範囲内すべてのデータを対象としてフィルタリングによる前処理を行うため、解析範囲内に含まれる植生や樹木の変化、耕作による地表面の変化の影響等が含まれることとなり、地表面の相対的な変動を正確に把握しにくくなる。そのため、解析範囲は解析対象の形状を踏まえ、極力限定的とすることが望ましい。

最後に、SAR 画像の解析手法は、2 回以上の SAR 観測において受信マイクロ波の位相より変位量を計測する SAR 干渉解析において、時間方向に拡張し、経年的な微小変化量を計測する時系列干渉解析と特定の 2 つの時期を比較する 2 時期干渉解析がある。江の川の被災箇所を対象とした SAR 干渉解析では、時系列干渉解析と 2 時期干渉解析の比較を実施した。

(4) 閾値を変化させたケース

閾値を変化させて解析を行った結果について、0.10 刻みで図 4.5.19～図 4.5.21 に示す。解析結果によると、堤内地、堤外地堤防で様々な変状がプロットされるものの、変状位置との相関は見られない。また、閾値を大きくするほど誤差を許容しない解析となるため、変動を示す

地表面の変動を示すプロットは少なくなるものの地表面の相対的な変動の信頼性は高くなるが、被災箇所での地表面変動量の明瞭な違いは可視化できなかった。

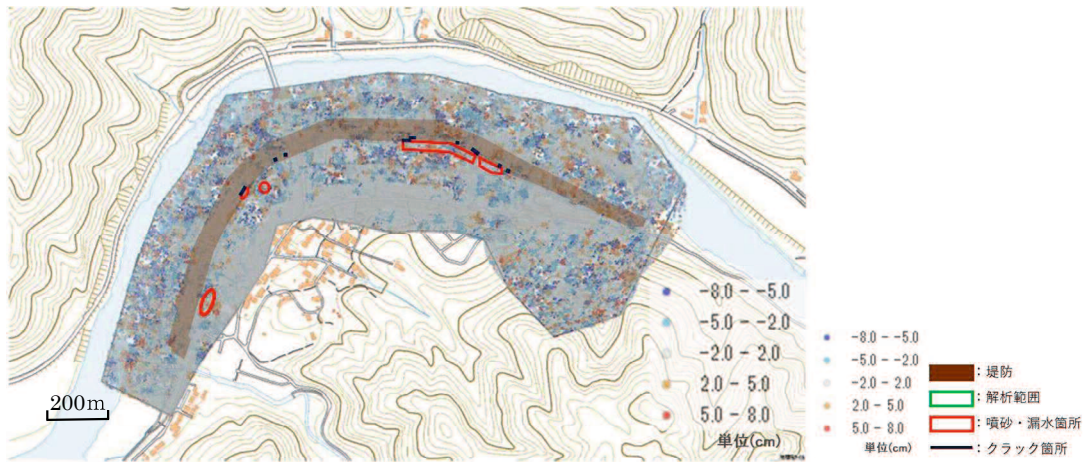


図 4.5.19 閾値 0.70

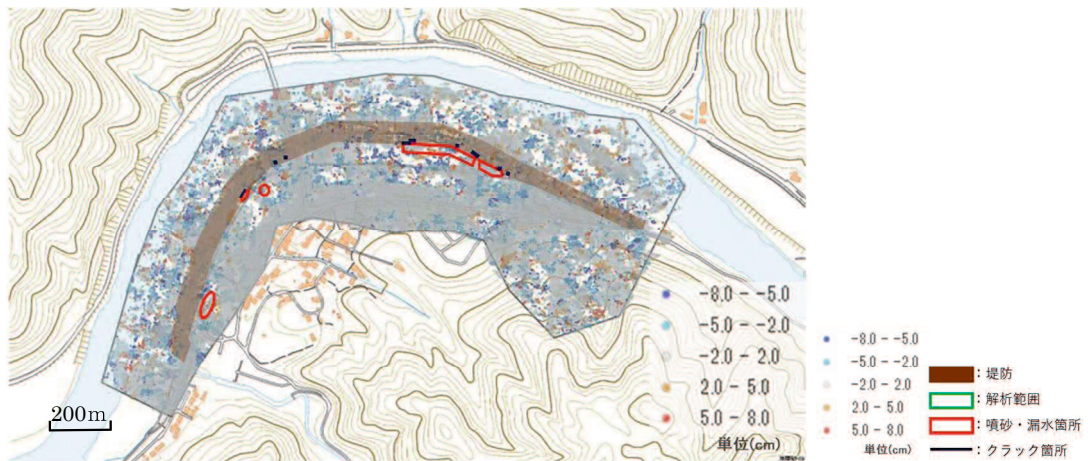


図 4.5.20 閾値 0.80

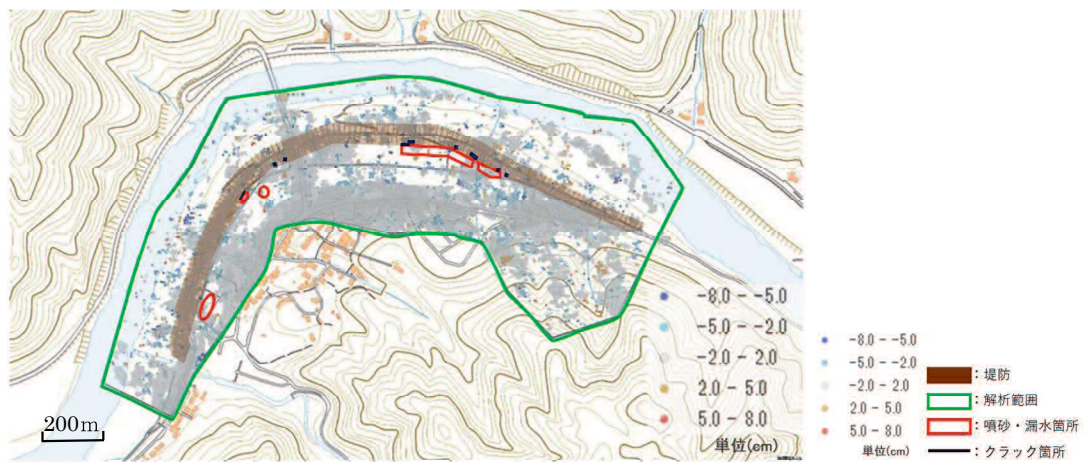


図 4.5.21 閾値 0.90

(5) 解析範囲を変化させたケース

解析範囲を変更したケースについては、被災箇所周辺に絞った場合と堤防のみの場合と鹿賀地区全体で設定して行った。なお、閾値については人工衛星 SAR の解析で一般的に用いられている閾値 0.90 を用いた。

解析範囲を堤体の範囲(緑枠内)で設定した場合と、被災箇所周辺に絞った場合の比較を行った。まず、堤体付近を対象範囲として設定した場合(図 4.4.22)は、顕著な変状が堤体に出ていない箇所でも、地表面の変動を示すプロットがランダムに生じている。一方で、被災箇所周辺に絞った解析(図 4.5.23)に関しては、噴砂・漏水に伴う堤体のクラックが発生している箇所、プロットの集中が見られた。また、噴砂・漏水に伴う堤体のクラックがある場合、堤体の陥没が予想されるが、プロットは図 4.5.23 の左側は隆起が卓越したり、逆に図 4.5.23 の右側は沈降が卓越したりしており、現象とは異なる解析結果となった。

プロットの集中度合いと変状の関係を見ると、は図 4.5.23 の緑枠内のプロットの集中している箇所、クラックが生じている。地盤のプロットは隆起・沈降の傾向が合致していないものの、解析範囲をしぼると、堤体の変状部分の抽出の可能性があることが考えられる。

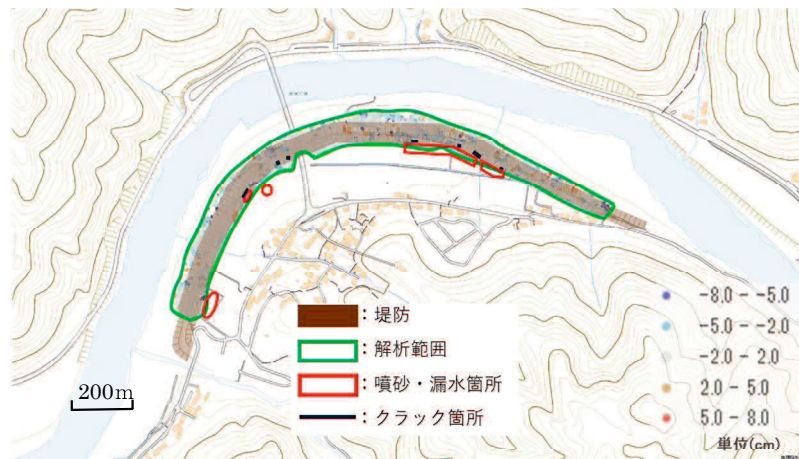


図 4.5.22 堤防周辺の範囲における解析結果

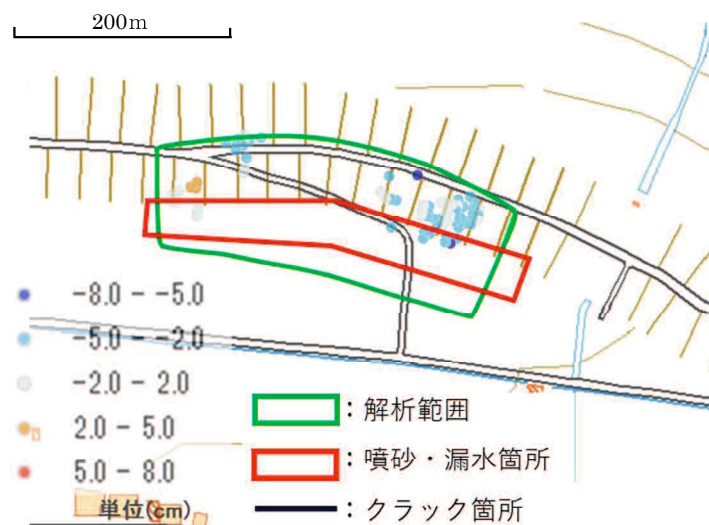


図 4.5.23 被災箇所周辺の範囲における解析結果

(6) 解析時期を変化させたケース

今回対象とした鹿賀地区の人工衛星 SAR データは、被災前のデータは複数時期あるのに対し、平成 30 年（2018）7 月 7 日の被災後のデータは 1 時期のみであった。

解析対象時期全ての地表面変動量データを用いた時系列解析の結果を図 4.4.24、被災前後の地表面変動量の差分を用いた 2 時期解析の結果を図 4.4.25 に示す。噴砂・漏水やクラックといった被災箇所と、周辺のプロットの色（隆起と沈降）について見てみると、時系列解析と 2 時期解析における被災箇所での地表面変動量の明瞭な違いは確認されなかった。したがって、解析対象時期全てのデータを用いた場合も、2 つの時期の差分を取った場合も被災箇所での地表面変動量の明瞭な違いは可視化できなかった。

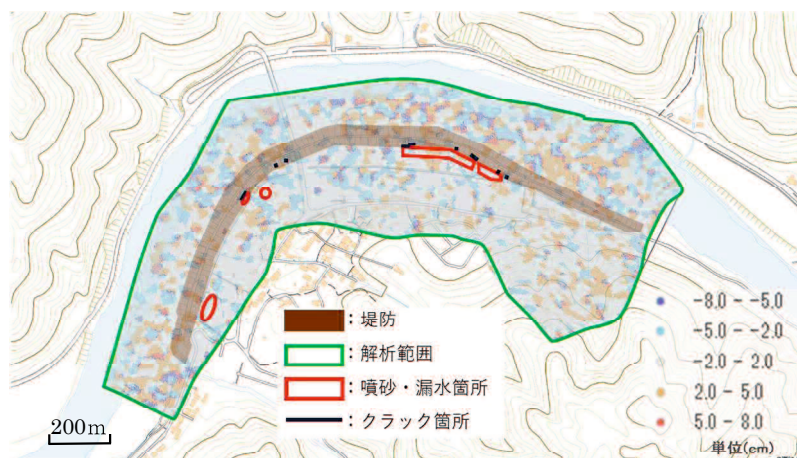


図 4.4.24 2018.3.17～2018.7.21 の解析結果

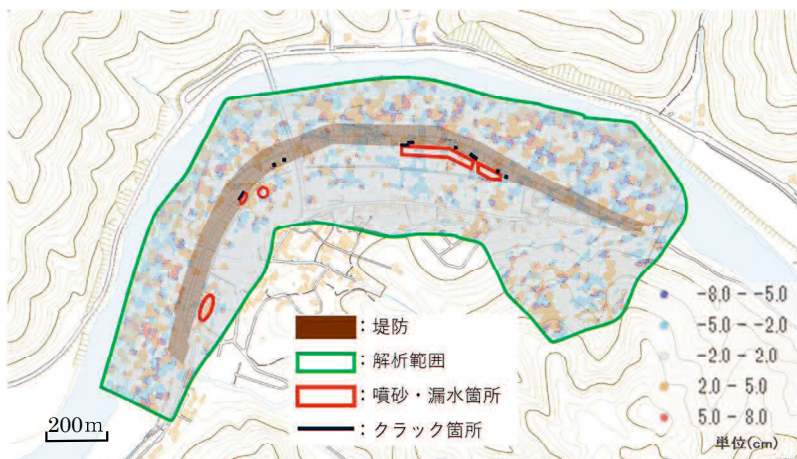


図 4.4.25 2018.6.20～2018.8.29 の解析結果

(7) 堤体内水位計の堤防維持管理への活用

今回の結果は、人工衛星 SAR の特徴である、より広範囲な観測から堤防の変状を検知するという点で十分な成果を得ることはできなかった。この原因として、解析は範囲内すべてのデータを対象として行うことから、堤内地の耕作地等の影響が除去されず相対的な変動が検知しにくかったことが考えられる。

一方で、解析範囲が狭い場合は、プロットの集中箇所と変状箇所が概ね一致していることから、地表面の変状原因が同様の箇所で範囲を切り分けて、つまり、地形や土地利用等が同様の箇所（田畑の利用等で変動量が大きいと考えられる堤内地と、出水で侵食等の変状の大きい高水敷、植生程度の変動しかない堤体等）を分けて解析を行うと、精度の向上を図ることができる可能性があり、人工衛星 SAR を用いた堤防変状の検知による、事後保全的な堤防管理に繋がると考えられる。

4.6. まとめ

以下に、水圧式水位計と人工衛星 SAR の実河川への適用における結果と、堤防管理への応用や、今後の活用の方向性についてまとめた。

(1) 水圧式水位計

国内最大級の大きさを持つ利根川本川の堤防に対して 7 年という長期にわたり堤体内水位観測が実施されている右岸 122.5k 断面を対象に、堤体と基礎地盤の水位観測結果を用いて、降雨や洪水の浸透特性について分析するとともに、計測機器を用いた予防保全的な堤防管理の可能性について考察を行った。

その結果、浸透に対する堤体の力学的安定性の評価をする上で重要な指標となる堤体内水位は水圧式水位計を用いて観測することが可能であること、降雨量や降雨パターンが、堤体の水位上昇に大きく影響することが示された。

今後、同様の観測を、今回対象堤防と同様の土質構造を有する他の堤体で確認を行うことや、他の砂質土主体の堤体における降雨や洪水の浸透特性の分析を行うことで、降雨と堤体内水位上昇の特徴を一般化し、さらに、分析対象とした堤防について、円弧すべり安定計算等を併せて行うことで、堤体すべりが発生する限界状態の堤体内水位を推定し、被災発生の水位の閾値を明確にすると、水圧式水位計による堤体内水位の観測による予防保全的な堤防管理に繋がる可能性があることを示した。

(2) 人工衛星 SAR

江の川左岸 27.8kp~29.2kp（鹿賀地区）において、堤体の変状による地表面の変化を人工衛星 SAR を用いて把握することを目的として、閾値、解析範囲、解析時期を変更して解析を行った。その結果、閾値と解析時期を変化させた場合では、堤防の変状箇所で地表面の変化を明瞭に確認することができなかったが、地形や土地利用等が同様で、変状原因が同様となる箇所に切り分ける等、解析範囲を限定することにより、堤体の変状箇所で地表面の変化が確認された場合もあった。今後、洪水時の堤体の変状を生じた箇所を中心に、洪水前後のデータを収集、地形や土地利用の変化と併せて解析範囲を細かく切り分けて解析を行うと、精度の向上を図ることができる可能性があり、人工衛星 SAR を用いた堤防変状の検知による、事後保全的な堤防管理に繋がると考えられる。

(3) 計測技術を堤防の維持管理に用いることの可能性

計測技術を用いた堤防の維持管理については、水圧式水位計は、降雨浸透を観測することにより、短期的な時空間スケールで発生するのり尻ののり滑りや、中長期の時間スケールにおいて発生する、のり尻等からの漏水や浸潤状態のきっかけとなる堤体内水位の変化をとらえる計測技術としての可能性があることを示した。

また、人工衛星 SAR については、実被災における変状の分析結果を用いて、夜間や豪雨時等の視界が良好でない場合でも、長期、広範囲に法面の亀裂、陥没などの堤防の安全性に関わる致命的な変状の監視に適応する可能性があることを示した。

このように、点検（又は監視）項目毎の要求される監視の精度と計測技術の特徴及び実質的な運用性等とを合わせることにより、堤防の点検・管理について、適切な手法により監視水準の高度化や監視の効率化が図られるものと考えられる。

第4章 参考文献

- 1) 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及び河道の点検要領（令和5年3月，pp. 14
- 2) 佐古俊介，田村喜昭：河川堤防管理における計測技術の活用，（一財）国土技術研究センター JICE REPORT No.32, 2016.6
- 3) 応用地質株式会社：MODEL-4800 S&DLmini 取扱説明書，2020.8
- 4) 国土地理院：航空レーザ測量の仕組み http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser_senmon.html
- 5) 足立哲也：移動計測車両（MMS）による計測技術の河川管理業務への活用について，平成28年度近畿地方整備局研究発表会 論文集，2016年6月27日
<https://www.kkr.mlit.go.jp/plan/happyou/theses/2016/pdf05/09.pdf>
- 6) 国土交通省事務連絡：河川堤防モニタリング技術ガイドライン（案），平成16年3月
- 7) 新清晃，西村聡，藤澤和謙，竹下祐二，河井克之，佐古俊介，森啓年，山添誠隆，太田雅之：河川堤防への降雨浸透と浸潤状態予測に関する一斉解析からの知見，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol.75/No.4, pp.398-414, 2019.
- 8) 日本気象協会：過去天気，雨雲レーダー，<https://tenki.jp/past/2019/09/10/radar/3/14/>
- 9) 中村賢人，福島雅紀，諏訪義雄：堤防表面の変状把握における UAV レーザー測量の適用限界，河川技術論文集，第24巻，pp. 565-570, 2018.6.
- 10) 岡村未対，今村衛，陣内尚子，小野耕平，山本卓男，鎌田卓：堤体表面沈下分布と貫入試験によるパイピング緩み領域の把握，河川技術論文集，第24巻，pp. 529-534, 2018.6.
- 11) 山中大智，岡村未対：陥没孔周辺の堤体表面の動態観測，第6回河川堤防技術シンポジウム論文集，pp. 41-44, 2018.12
- 12) 佐古俊介，倉田大輔，森啓年，中川翔太，大堀文彦，陰山健太郎，平成30年7月西日本豪雨災害における江の川堤防被災、土木学会論文集 B1（水工学） 特集（平成30年西日本豪雨災害特別企画）、2019年75巻1号
- 13) 大内和夫：合成開口レーダーの基礎[第2版]
- 14) 国土地理院ホームページ：SAR 干渉画像の作成手順と見方，
https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_procedure.html
- 15) 国土地理院ホームページ：基盤地図情報ダウンロードサービス，
<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>

5. 被災事例の分析を踏まえた堤防の設計と維持管理の高度化

5.1. 堤防の設計

5.1.1. 浸透に対する堤防の設計の現状と課題

(1) 設計の現状

堤防の設計に用いられる手法は、河川砂防技術基準（設計編）（国土交通省水管理・国土保全局 令和元年（2019）7月）（以下、「技術基準」）や、河川堤防の構造検討の手引き（改訂版）（（一財）国土技術研究センター 平成24（2012）年2月）（以下、「手引き」）に基づき行われることが多く、この手法は大きくは調査のフェーズと設計のフェーズに大別される。

調査のフェーズでは、堤防状況の調査として、対象となる堤防において、堤防の断面諸元、築堤の履歴や既存の土質調査結果、被災履歴や既設対策工の有無について調査を行う。特に、築堤履歴に関する調査は、既設堤防の堤体内部の構造を把握するために欠かせないもので、工事記録、堤防台帳、堤防開削調査資料等をもとに、築堤の年次、拡築（嵩上げ、拡幅）の経緯等を調査する。

次に、被災時の外力として、被災箇所近傍の観測所の水位観測結果や雨量観測結果を調査し、その上で、適切な土質調査を実施し、その成果を基本に築堤履歴等を考慮して堤防の形状および土質構成のモデルを作成する。

設計のフェーズとしては、ボーリングを主体とした土質調査や、その際サンプリングした材料を用いて土質試験等を行うが、ボーリング調査については、調査のフェーズで調べた、築堤の履歴や既存の土質調査結果、治水地形分類図による堤防の置かれた場の特徴等を勘案した上で、堤防の規模（高さや敷幅）や堤体ならびに基礎地盤の土質構成の複雑さを考慮しつつ行う必要がある。調査の密度としては、①堤防天端中央付近、②裏のり面の中央付近、③表のり面の中央付近の3箇所程度が必要であるとされている¹⁾。

これらの調査結果に基づき、堤体および基礎地盤からなる堤防を適切にモデル化した上で、洪水と降雨外力を設定、作成した堤防モデルを対象に浸透流計算ならびに安定計算を行って、浸透に対する照査項目ごとに照査値（安全率等）を算出し、算出結果を「技術基準」に示される照査基準と照合することになる。

(2) 設計の課題

堤防の設計においては、堤防の堤体内部の構造を適切に把握し、モデル化をすることが重要となるが、河川堤防の多くが長い歴史を経て生み出されたもので、堤体あるいは基礎地盤の土質やその構成が極めて複雑かつ不明確な場合が多いことを考えると、土質調査に基づくモデル化の精度には自ずと限界がある¹⁾。

堤防の内部構造の把握においては、築堤記録や堤防台帳、堤防開削調査資料、治水地形分類図等をもとに、築堤の年次、拡築の経緯、築堤材料や締固め方法等の施工法、治水上の要注意地形等を把握しておくことが望ましいとされており¹⁾、これらの資料をもとに、築堤の年次、拡築（嵩上げ、拡幅）の経緯等を調査し、浸透に対して条件の厳しい箇所を選定した上で（図5.1.3 ①）、最低3本のボーリング調査を行う（図5.1.3 ②）¹⁾ 必要があるが、「手引き」や「技術基準」では、浸透に対して条件の厳しい堤体や基礎地盤等の土質構造の例として、以下のような例が示されている。

- 堤体の土質で浸透上問題となる土質条件を整理すると、a)大部分が透水性の大きい土質で構成され、かつ裏法尻付近の難透水性の土質が分布する構造や、b)粘性土を主体に構成される堤体で、表のりから裏のりにかけて連続的に透水性の大きい土質が挟まれている構造、c)中央部の難透水性の土質を透水性の大きい土質が被覆し、かつ難透水性の土質の上面が計画高水位に達してない構造が挙げられる¹⁾。

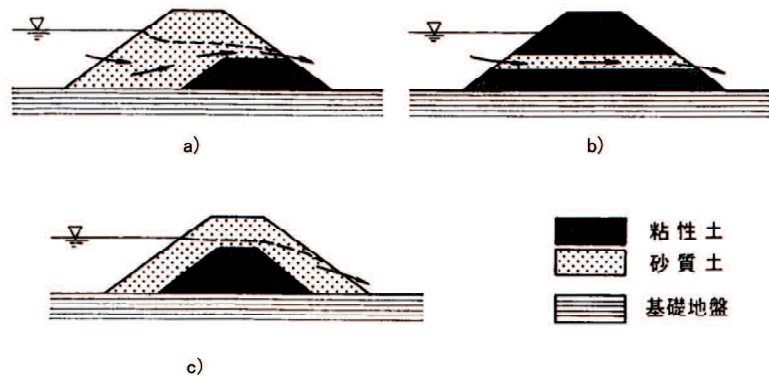
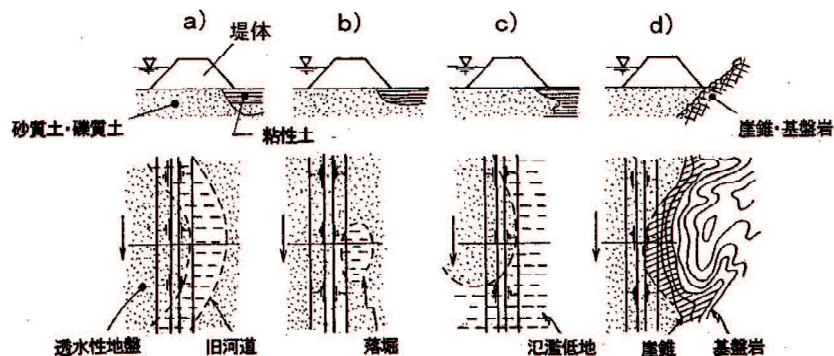


図 5.1.1 浸透が問題となる堤体の土質構成¹⁾

- 基礎地盤の土質で浸透上問題となる土質条件を整理すると、透水性地盤において裏のり尻下に粘性土等の難透水層が分布しており、いわゆる行き止り地盤を形成し、基礎地盤の浸透水が難透水層で行き止まり、堤体内へ上昇することで堤体内の浸潤面を押し上げ、漏水又はすべり破壊が発生しやすくなる構造や、裏のり尻近傍の難透水層が薄く、基礎地盤からの漏水やパイピング破壊が発生しやすくなる構造が挙げられる^{1) 2)}。



	堤外側の地形	堤内側の地形
a)	旧河道・自然堤防・旧川微高地	埋積された旧河道
b)	旧河道・自然堤防・旧川微高地	落堀
c)	旧河道・自然堤防・旧川微高地	氾濫低地
d)	河床・自然堤防	崖錐・基盤岩

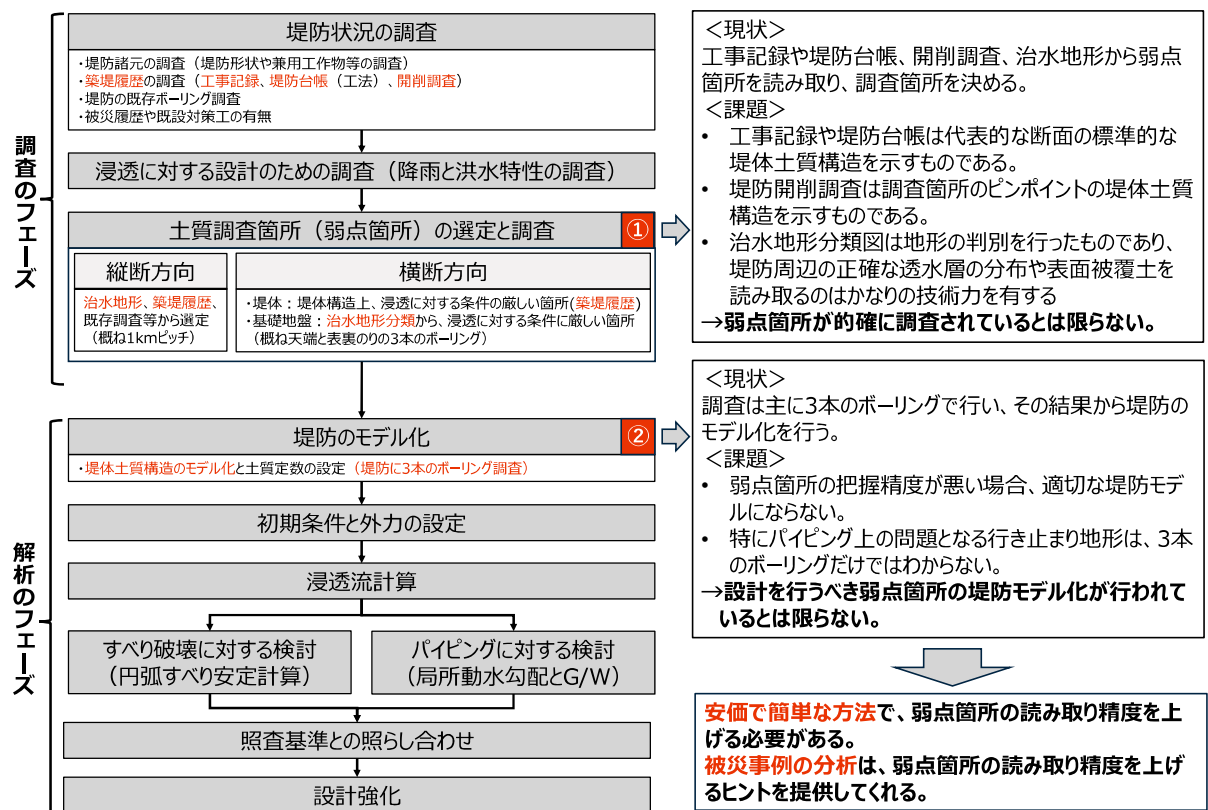
図 5.1.2 行き止まり地盤の例²⁾

しかし、浸透に対して条件の厳しい堤体や基礎地盤等の土質構造の把握において、従来はボーリング調査を密に行うことや、築堤記録や堤防台帳、堤防開削調査の活用を行っているが、

ボーリング調査を密にするにはコストが増大すること、築堤記録や堤防台帳は代表的な断面の標準的な堤体土質構造を示すものであり、堤防開削調査も調査箇所のピンポイントの堤体土質構造を示すものである等の課題があることから、設計を行う当該箇所の土質構造を必ずしも適切に示しているとは限らない。

また、治水地形分類図についても、平成19年(2007)以降の改定作業により精度は大きく向上しているが、設計で対象とする箇所の堤防周辺の透水層の分布や基礎地盤上面の難透水層である表面被覆土層を示しきれていないと言いきれない。

浸透に対する堤防の設計のフローとともに、設計の各フェーズにおける現状と課題について図5.1.3に示す。



・ 図 5.1.3 堤防設計における現状と課題

5.1.2. 実河川における被災分析から得られた成果

3章では、利根川と江の川の2箇所の被災事例を分析することにより、堤防の弱部の的確な把握に必要な新たな知見として、過去の地形図を用いた堤防法線の変遷の調査結果を加えた築堤履歴の精度の向上や、土質調査範囲を堤防周辺に広げた基礎地盤の透水層の分布精度の向上等が必要であることを明らかにした。以下にそれぞれの河川毎に得られた知見をとりまとめる。

(1) 利根川の被災事例分析から得られた知見

- ・ 堤体漏水箇所は旧堤と新堤が交差する場所に合致し、粘性土を主体とする旧堤が堤内側のり尻付近に出現するという土質構造の特徴があったことにより、堤体内に浸透した降雨か河川水が旧堤で堰上げられ、嵩上げ、拡幅により施工した旧堤上部の比較的透水性が高い土が分布する小段付近において漏水が発生したものと結論づけた。このような場所を把握するには、明治期の地形図である「陸軍迅速測図」と現在の地形図を重ね合わせることが有効であることが裏付けられた。
- ・ 基礎地盤漏水箇所は、断面二次元的には、基礎地盤に分布する透水層は、堤外側から堤内側に連続して分布するものの、堤内側に向かって次第に層厚が薄くなって消滅する、いわゆる“行き止まり型”の土質構造を呈しており、平面的にも被災箇所上流側から被災箇所が、下流側に比較して透水層の広がり狭い土質構造を持っていることで行き止まり型地盤が形成されていたと結論づけた。このような場所を把握するには、堤防断面の3箇所のボーリングだけではなく、堤内地も含めた対象地点周辺のボーリング結果を用いることが有効であることが裏付けられた。

(2) 江の川における被災原因分析

- ・ 噴砂箇所は、シルト質の表面被覆土層を有する構造であるが、堤内地とのり尻付近の噴砂については、堤内地側は $G/W=0.99$ でパイピングを発生する判断基準である $G/W \geq 1.0$ とほぼ同じ値を示していること、のり尻側の局所動水勾配は、置換工による排水の影響もありパイピングが発生する $i=0.5$ を大きく上回る結果となっていることから、基礎地盤パイピングが生じる危険性を断面二次元的な解析で明らかにしている。
- ・ さらに、噴砂孔付近のシルト質の表面被覆土層である U_{sg} に相当する層のトレンチ調査では、上部のシルト層の間に、シルト層の下部に分布が確認された砂質土層と同じ土質の細砂の部分的な分布が確認され、一部では砂脈状に分布していたこと、噴砂の粒度試験と U_{sg} 層の粒度試験の結果の比較より、噴砂は U_{sg} 層のものであることが明らかとなり、パイピングが生じていたことが裏付けられた。
- ・ これらより、例えば過去に噴砂が生じたような箇所において、堤防断面のボーリングで比較的厚みのあるシルト質の表面被覆土層が確認された場合、直ちにパイピングに対する危険性は低いと判断するのではなく、トレンチ掘削等を併せて行うことでパイピングに対する弱点箇所か否か判断することも必要である。

5.2. 計測・測量技術を用いた堤防の予防保全的な管理のあり方

5.2.1. 堤防の維持管理の現状と課題

(1) 維持管理の現状

堤防の維持管理については、従来はすべりや噴砂等の大きな被災に至る前に生じる小さな変状、すなわち浸透被災の要因を、目視点検を行うことで発見し、必要に応じて対処を行う事後保全的な措置を行っている³⁾。

表 5.2.1 主な土堤の観測項目（再掲）

箇所	点検項目
法面 小段	法面・小段の亀裂、陥没、はらみだし、法崩れの有無
	寺勾配化、法面侵食等の有無
	堤防植生、表土の状態の異常
	小段の逆勾配箇所や局所的に低い箇所の有無
	法面・小段の不陸
	法面・小段の泥濘化
	小動物の穴の集中
	坂路・階段の路面排水の集中に伴う洗堀、侵食の有無
	樹木の貫入・拡大
天端	亀裂、陥没、不陸等の変状の有無
	天端肩部の侵食
裏法尻部	堤脚付近の浸潤状態
	法尻付近の漏水、噴砂
	堤脚保護工の変形
	湿性を好む植生種が群生
	ドレーン工の目詰まり、濁水の排水発生

(2) 維持管理の課題

目視点検は、平常時の点検としては、出水期前及び台風期の点検として実施しており、亀裂や陥没、はらみだし等の小規模の変状の発見や、植生等のように経年的な変化を監視することが主体になる。リアルタイムで変化が進むものではないため、監視の時間的な間隔は密である必要が無い一方で、変状は微細な変化であることから熟練技術者でなければ気づかないものも多く、目視主体の手法だと見落としを生じる可能性が高い。また、相対的な比較の視点が必要になる場合、広範囲を同時に監視するような必要性もあると考えられる。

また、出水後の点検や、出水中の点検としても目視点検を実施しているが、大規模の変状の発見のように変化が著しい項目を発見することが主体になるものと考えられ、夜間や豪雨時等の視界が良好でない場合や、同時多発的に変状が発生した場合、限られた人員で目視点検の体制をとる以上は見落とす可能性も否定できない。

上述のように、河川堤防の点検・管理を行うにあたっては、従来の目視点検だけでは十分ではなく、堤防決壊の前兆となる軽微な変状を適切な時期に検知する観測手法を技術開発し、維持管理並びに危機管理の高度化・効率化に資することが喫緊の課題である。

表 5.2.2 現状の維持管理における課題

	平常時の堤防管理	緊急時の堤防管理
点検時期	<ul style="list-style-type: none"> ・ 出水期前点検 ・ 台風期の点検 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 出水後の点検 ・ 出水中（安全性の面から実施されていない）
主な点検事項	<ul style="list-style-type: none"> ・ 小規模な変状の経年的な変化の監視が主体 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 大規模の変状のように変化が著しい項目の監視が主体
求められる技術	<ul style="list-style-type: none"> ・ 前回点検時の状態との比較が求められる ・ 広範囲を同時に監視する必要がある 	<ul style="list-style-type: none"> ・ リアルタイムでの変化の監視が求められる ・ 場所を絞り、時間間隔も密である必要がある。
課題	<ul style="list-style-type: none"> ・ 微細な変状や変化は熟練技術者でなければ気づかないものも多く、委託等に頼らざるを得ない場合は監視水準の維持が難しい 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 夜間や豪雨時等の視界が良好でない場合や、同時多発的に変状が発生に対応する必要がある ・ 災害時には現地への到達も困難であることも想定される

5.2.2. 実河川における観測から得られた成果

4章では、浸透被災における予防保全的な堤防の管理に計測機器を用いた観測を行う方法を確立することを目的として、利根川での長期堤体内水位観測結果を用いて、堤体内水位計を用いた浸透による漏水、噴砂等の変状のきっかけとなる堤体内水位観測の分析を行った。また、もう一つの予防保全的な堤防の管理を行う方法として、江の川では人工衛星 SAR を用いて、浸透被災として生じる亀裂や噴砂、はらみだし等の堤防表面の外形的变化の分析を行った。

以下にそれぞれの河川毎に得られた知見をとりまとめる。

(1) 堤体内水位計を用いた観測

- ・ 国内最大級の大きさを持つ利根川右岸 122.5k 断面において、のり尻等からの漏水や、浸潤状態のきっかけとなる河川水や降雨による堤体内水位の変化を、水位計を用いて把握することを目的として、7年という長期にわたる観測を行った。
- ・ 河川水位が最も上昇した洪水の一つである 2019 年 10 月の令和元年東日本台風時の堤体内水位の観測結果と、観測結果に応じた適切な堤防モデルの改良を行って浸透流解析を行った結果の比較により、水位ピークの再現には課題は残るものの比較的精度良く堤体内水位の再現を行うことができたことから、堤体内水位を観測することにより、堤体内水位の変化を把握することができる可能性があることが明らかとなった。
- ・ 最ものり尻の水位計における今回の堤体水位観測結果を用いて、降雨が堤体の水位上昇に与える影響について分析するために、降雨量、降雨パターンや初期水位と、堤体内水位上昇量の関係について整理を行った。その結果、相対的ではあるが、初期水位

と降雨パターン、堤体内水位上昇量の関係について把握できたことから、水圧水位計を用いた堤体内水位の把握により、堤防の予防保全的な安全性管理を行うことのできる可能性があることが明らかとなった。

- ・ 堤体内水位の把握を堤防の予防保全的な安全性管理に繋げていくためには、今回対象堤防と同様の土質構造を有する他の堤体で確認や、他の砂質土主体の堤体における降雨や洪水の浸透特性の分析等を引き続き行い、すべりや漏水等の被災現象と堤体内水位との関係を明らかにすることで被災発生水位の閾値を明確にすると、水圧式水位計による堤体内水位の観測による予防保全的な堤防管理に繋がる可能性があることを示した。

(2) 人工衛星 SAR を用いた観測

- ・ 江の川左岸 27.8kp～29.2kp（鹿賀地区）において、平成 30 年 7 月豪雨によるパイピング被災を対象に、堤体の変状による地表面の変化を把握することを目的として、被災の発生前後の人工衛星 SAR データを用いた閾値、解析範囲、解析時期を変更しての解析を行った。
- ・ その結果、閾値と解析時期を変化させた場合では、堤防の変状箇所で地表面の変化を明瞭に確認することができなかったが、地形や土地利用等が同様で、変状原因が同様となる箇所に切り分けて解析を行う等範囲を限定することにより、堤体の変状箇所での地表面の変化が確認された場合もあった。
- ・ 今後、洪水時の堤体の変状を生じた箇所を中心に、洪水前後のデータを収集、地形や土地利用の変化と併せて解析範囲を細かく切り分けて解析する等、精度向上を図る必要はあるが、長大な延長を持つ堤防について、決壊に至る前の浸透被災として生じる亀裂や噴砂、はらみだし等の堤防表面の外形上の微細な変状を、一度に広範囲に把握することで、事後保全的な堤防管理に用いることの可能性の一つを示したものであると言える。

5.3. 設計と維持管理の高度化

5.1.2 では、堤防の弱点箇所の把握に過去の地形図を重ね合わせが有効であることや、堤防断面の3箇所ボーリングだけでなく、その周辺のボーリング結果を用いることが有効であること、従来はあまり着目されていなかったシルト質の被覆土層でも、パイピングが生じる可能性があることから、堤防断面のボーリングのみでパイピングに対する危険性は低いと判断すべきではないことを示したが、これらは、被災事例を分析することで得られた、今後設計の精度を上げる上で活用すべき知見である。

また、5.2.2 では、堤防の浸透に対する安全性において重要な指標となる堤体内水位の変化を、水圧式水位計を用いて把握することができる可能性があることや、水位観測の結果、本降雨が堤体の水位上昇に与える影響が大きく、堤体の安定性に影響がある可能性があることから、堤体内水位観測を堤防の予防保全的管理に用いることができる可能性があること、人工衛星 SAR は浸透による浸透被災の兆候である早期の堤防変状の定量的把握ができる可能性があり、予防保全的な堤防管理に用いることの可能性があることは、被災箇所に対して計測機器での堤防観測の試行をすることにより得られた知見である。

2章でも示したが、堤防の土質構造を正確に把握する適切な手法がないことや、堤防内部の複雑な浸透水の流れを正確に把握することが困難であること等、未だ力学的に未解明な部分が残されており、技術的な判断を経験に依存せざるを得ない部分も多いなど、堤防の設計や維持管理を行っていくにあたっては、様々な不確実性が内在している中で実施せざるを得ない状況である。したがって、今後、堤防の弱部をより一層的確に把握し、設計法の精度の向上を図り、予防保全的な維持管理を行うにあたっては、現状の設計方法や維持管理法方法を土台としつつ、被災事例を丁寧に分析し、内在する様々な不確実性の解消につながる知見を抽出し、設計に反映するサイクルと、被災箇所等に対して計測機器を用いた試行を行い、試行からの計測機器による観測上の課題を抽出、目視による維持管理法から計測機器による維持管理法への転換を図っていくことサイクルの両輪で安全性をさらに高めていくことが、設計や維持管理の技術の高度化につながるることとなる。設計と維持管理の高度化のスキームについて以下に図示する。

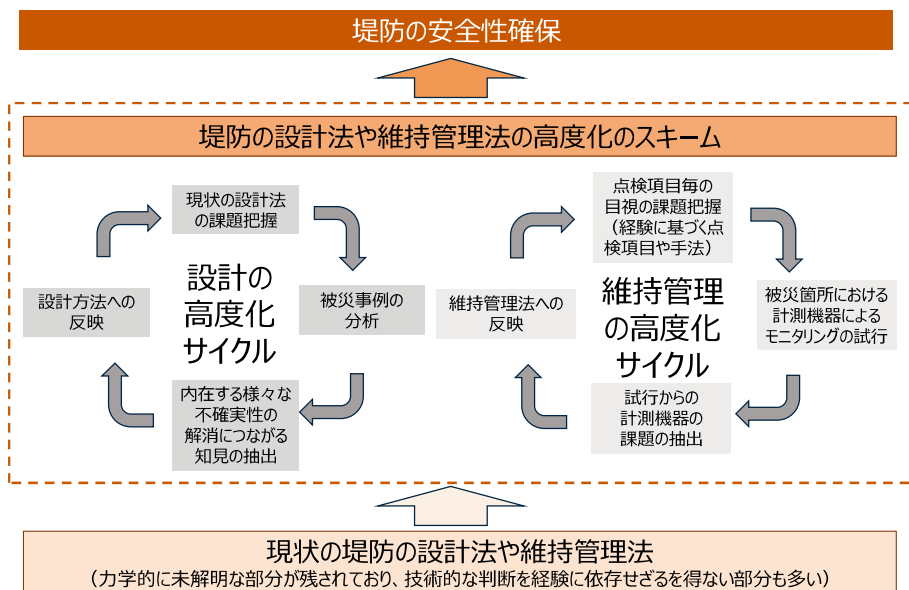


図 5.3.1 設計と維持管理の高度化のスキーム

第5章 参考文献

- 1) (一財)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），平成24年2月
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局：河川砂防技術基準（設計編），令和元年7月
- 3) 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及び河道の点検・評価要領，令和5年3月

6. 結論

本研究で得られた成果を総括し、被災特性を堤防設計や維持管理に反映することの重要性、今後の展望について示す。

(1) 我が国の堤防の歴史と設計

本研究では、河川堤防の歴史について、形状規定から性能規定までの流れについて示し、形状規定の歴史として、明治以前と、欧米の近代技術の導入を図った明治以降に時代を区分し、堤防形状（法勾配、天端幅、余裕高）の視点からまとめ、形状自体は大きくは変わっていないことについて示した。

また、性能規定化の流れとしては、河川構造物の標準化が図られた「河川管理施設等構造令」制定（昭和 51 年(1976 年)）以降の堤防の設計の歴史についてまとめ、河川管理施設等構造令で規定された材料と形状を基本としつつも、工学的な堤防の設計法の導入が図られ、過去の被災事例に基づき、耐浸透機能、耐侵食機能、耐震機能の各機能に対する安全性照査を行うことが位置づけられた、平成 9 年（1995 年）に「河川砂防技術基準」と、平成 14 年（2002 年）の「堤防設計指針」の策定が性能規定化へのターニングポイントであり、その後、堤防に求められる機能と設計に反映すべき事項を示し、性能規定による堤防設計の形となった令和元年（2019 年）7 月の「河川砂防技術基準 設計編」の改定に繋がっていることを示した。

一方、河川堤防を含む河川管理施設の維持管理は、昭和 39（1964）年に定められた「河川法」以降の堤防の維持管理の歴史についてまとめ、「河川法」では、河川管理施設又は許可工作物を良好な状態に保つように点検を含めて維持・修繕すべきことが示され、「河川法施工令」で重要な河川管理施設等において、1 年に 1 回以上の適切な頻度での目視等による点検の実施と、効率的な維持および修繕が図られるよう必要な措置を講ずることが定められたことを示した。また、具体的な堤防の点検手法については、「河川砂防技術基準維持管理編」（平成 23 年（2011 年））や補完技術資料である「堤防等河川管理施設及び河道の点検・評価要領」（令和 5 年（2023 年）3 月）において、出水期前・台風期、出水後、地震後に区分し、目視を主体とした点検を行うことが規定されたことを示した。

(2) 堤防の浸透被災の分析

本研究では、戦後日本における代表的な堤防の被災事例とその原因に分類すると、越水によるもの、浸透によるもの、侵食によるもの、地震によるもの、樋管周りによるものに大別されることを示した。

その中で、特に浸透被災の事例として利根川と江の川の 2 箇所を取り上げて、現在の堤防設計で用いられている解析手法である、「河川堤防の構造検討の手引き」の手法を応用した分析を行うことにより、堤体や基礎地盤漏水の被災メカニズムや噴砂の発生メカニズムについて明らかにした。

利根川は、堤体漏水と基礎地盤漏水が生じたが、堤体漏水については、既往文献と開削調査により築堤履歴を明確にした上で新旧地形図の堤防法線形の重ね合わせを行い、堤体漏水箇所の地形は旧堤と新堤が交差し、裏のり尻に粘性土を主体とする旧堤が出現するという土質構造の特徴を有することを明らかにした。その結果、堤体内に浸透した降雨か河川水が旧堤で堰上げられ、小段付近において漏水が発生したものと結論づけた。

基礎地盤漏水については、被災箇所と周辺堤内地の既往ボーリング調査結果の活用により、横断面的には堤内側に向かって次第に透水層厚が薄くなって消滅する、いわゆる“行き止まり型”の土質構造の特徴を有すること、平面的には被災箇所上流側の透水層の分布が下流側に比較して狭い土質構造の特徴を有することを明らかにし、被災箇所付近で被覆土層の下面に高い水圧が作用することで被覆土層を通して水が砂とともに湧出したものと結論づけた。

江の川は、飽和不飽和浸透流解析や円弧すべり解析結果を実施することで、被災原因の分析を実施し、浸透流解析による局所動水勾配と G/W の解析結果より、基礎地盤パイピングが生じる危険性が高いことを推定し、併せて噴砂孔付近のトレンチ調査（表面被覆土層の詳細な観察）と噴砂の粒度試験より、噴砂は表面被覆土層（難透水層）下の透水層のものであることを明らかとし、基礎地盤のパイピングによる被災であることを裏付けた。

(3) 堤防の維持管理・観測

現状の河川堤防の浸透、侵食に対する点検・管理手法である、「堤防等河川管理施設及び河道の点検要領（令和 5 年（2023 年）3 月）」では、平常時の目視点検主体の堤防管理は、見落としを生じる可能性が高いこと、微細な変状の経年的変化を広域で把握するには熟練技術者でなければ気づかないものも多く、監視水準の維持が難しいこと、さらに、出水時や出水中の緊急時の堤防管理は、リアルタイムでの監視が求められるが、夜間や豪雨時等の視界が良好でない場合や、同時多発的に変状が発生した場合、見落とす可能性も否定できないことが課題であることを示し、その対応策として計測技術の活用が必要であることを示した。

また、本研究では、計測技術の活用の事例として、利根川での長期堤体内水位観測結果を用いて、堤体内水位計を用いた浸透による漏水、噴砂等の変状のきっかけとなる堤体内水位観測の分析結果についてまとめた。また、もう一つの予防保全的な堤防の管理を行う方法として、江の川で人工衛星 SAR を用いて、浸透被災として生じる亀裂や噴砂、はらみだし等の堤防表面の外形的变化の分析結果についてまとめた。

利根川については、国内最大級の大きさを持つ利根川右岸 122.5k 断面において、中長期の時間スケールにおいて発生する、のり尻等からの漏水や、浸潤状態のきっかけとなる降雨による堤体内水位の変化を水圧式水位計を用いて把握することを目的として、7 年という長期にわたる観測結果を分析した。その結果、堤体表面や堤体内の透水係数を適切にモデル化し、降雨浸透を適切に把握することが、堤体内水位の適切な再現につながることで、一方で、水位ピークの再現については、観測水位と解析水位でまだ差が出る等の課題が残ることを示した。

また、今回の堤体水位観測結果を用いて、降雨量、降雨パターンや初期水位と、堤体内水位上昇量の関係について整理を行い、初期水位や降雨パターンが水位上昇に与える影響が大きくなることを示し、これらの外力等と堤体内浸潤線の形成過程、堤体漏水や噴砂の有無等の被災事例と併せた分析が進めば、変状を生じる堤体内水位高や、そこに到達するまでの降雨や洪水位の閾値等を明らかにすることにより、予防保全的な堤防管理に用いることの可能性があることを示した。

江の川では、左岸 27.8kp～29.2kp（鹿賀地区）において、平成 30 年 7 月豪雨によるパイピング被災を対象に、堤体の変状による地表面の変化を人工衛星 SAR を用いて把握すること

を目的として、被災の発生前後の人工衛星 SAR データを用いた閾値、解析範囲、解析時期を変更しての解析を行った。

その結果、閾値と解析時期を変化させた場合では、堤防の変状箇所では地表面の変化を明瞭に確認することができなかったが、地形や土地利用等が同様で、変状原因が同様となる箇所に切り分ける等、解析範囲を限定することにより、堤防の変状箇所では地表面の変化を確認できる場合があった。今後、地形や土地利用の変化と併せて解析範囲を細かく切り分けて分析、堤防の変状状況と洪水前の地表面の変化の関係について把握することで、人工衛星 SAR による広域の堤防の破堤危険度の把握による事後保全的な堤防管理に繋がる可能性があることを示した。

(4) 被災特性を踏まえた堤防の設計や維持管理の高度化

現行の河川堤防の設計基準である、河川砂防技術基準（設計編）（国土交通省水管理・国土保全局 令和元年（2019年）7月）や、河川堤防の構造検討の手引き（改訂版）（（一財）国土技術研究センター 平成24年（2012年）2月）では、堤防の浸透上問題となる土質構造を把握するために、ボーリング調査を密に行うことや、築堤記録や堤防台帳、堤防開削調査、治水地形分類図の活用を行うこととしている。

しかし、堤防構造を把握するために、ボーリング調査を密にするにはコストが増大すること、築堤記録や堤防台帳は標準断面を示すものであること、堤防開削調査は設計を実施したい箇所と異なる場所の場合、堤防土質構造を把握するには適切ではない等の課題があることから、本研究では、被災事例の分析結果を用いて、これとは別の手段について検討し、新旧地形図の重ね合わせを行うことで、旧堤防と現堤防が交差する箇所を把握し、堤防の浸透上問題となる土質構造を抽出、土質調査断面を設定することや、モデル化を行うことが設計において有用であることを示した。

また、基礎地盤の土質で浸透上問題となる土質条件として、従来は治水地形分類図を用いて把握している行き止り地盤について、被災特性の分析結果を用いて、精度をさらに向上させる視点から、堤内地における既存のボーリング調査結果等を幅広く活用し、基礎地盤透水層の分布範囲と深さを把握、土質調査断面を設定することや、モデル化を行うことが、設計において有用であることを示した。

今後、現状の設計方法や維持管理方法を土台としつつ、被災事例の丁寧な分析や、被災箇所等を対象とした目視以外の手法による点検の試行により、堤防の弱部把握やモデル化の精度向上、計測機器による堤防変状の把握を行い、設計と維持管理の高度化の両輪で設計と維持管理の高度化を行っていく必要があることを示した。

(5) 堤防設計や維持管理の今後の展望

本研究は、河川堤防の被災事例を踏まえた、設計及び維持管理方法の高度化について研究を行ったものである。

堤防は、長い歴史の中で順次拡張されてできてきた構造物であり、時代によって築堤材料や施工法が異なるため、堤防の強度が不均一であり、しかもその分布が不明であること、基礎地盤自体が古い時代の河川的作用によって形成された地盤であり、極めて複雑であるため、基礎

地盤及び堤体内の複雑な浸透水の流れを正確に把握することは困難であること等から、堤防の安全性能の照査においては様々な不確実性が内在せざるを得ない状況である。

このような堤防の設計方法を高度化していくにあたっては、被災事例を分析し、堤体や基礎地盤の土質構造の特徴について把握し、それに基づき堤防の弱点箇所の特徴について把握していくことや、実現象を踏まえた堤防の破壊及び変形メカニズムを反映した解析手法等の研究や技術開発に継続的に取り組んでいくことが重要であり、本研究の利根川や江の川の被災事例の分析による土質構造の効率的・効果的な把握は、高度化のための一手法であると言える。今後も、被災事例の分析による知見の蓄積を踏まえ、設計に活用可能な技術を積極的に取り込んでいくことが、設計方法の高度化にあたり推進すべきことである。

また、堤防は延長の長い線状の形態を有し、歴史的な経緯を経て構築されてきた構造物であることから、堤防の防災構造物としての信頼性を維持し高めていくためには、堤防の保持すべき個々の機能に着目した観測が不可欠である。一方で、厳しい財政状況の下で、より一層のコスト削減の取り組みや地域の実情に即した柔軟な対応等が求められていることから、堤防の観測を、管理技術を保有する管理経験者が徒歩等の手段により目視等で行っていくことには限界があるのも事実である。したがって、洪水時の、夜間や豪雨時等の視界が良好でない場合や、同時多発的に変状が発生した場合でも見落としなく堤防に生じる変状を監視することや、平時から微細な変状の変化を広範囲同時に監視する方法として、計測技術を活用した堤防監視方法の技術開発を行うことは非常に重要である。本研究の利根川や江の川における各種計測技術の活用による被災前後の変状等の変化の分析は、堤防の維持管理の効率的・効果的のための一手法であると言え、今後も、洪水時の変状等が予想される箇所等に対して計測機器等の設置や継続的な観測を実施し、被災事例を用いた出水前後の比較、分析を行うことにより、計測機器による堤防変状の観測方法の技術開発を行っていくことが、堤防維持管理技術の高度化にあたって今後も推進すべきことである。