

被災から学ぶ堤防技術

Improvement of Levee Design Technology based on Learning from Levee Damage

調査第一部 上席主任研究員 佐古 俊介

河川堤防は、長い歴史の中で拡張や補修が行われてきた長大な土構造物であり、時代によって築堤材料や施工方法が異なること、また、自然に形成された多様な地盤上に築造される構造物であることから、堤防の土質構造は複雑であり不均一性を有する構造物であると言える。

このような特徴を有する堤防の設計は、従来断面形状を河川の規模に応じて規定する形状規定方式を基本としていたが、2002 年より形状に加え、外力と耐力の照査を基本とする設計法を導入した。

一方で、堤防の不安定化、変形メカニズムについては、水理学、土質工学上の観点から全てが解明されているわけではなく、堤防の安全性について評価する際の条件設定は、高度な技術的判断を必要としている。このため、被災事例や洪水時に堤防に現れる各種変状等の発生原因を解明し、その知見を照査手法へフィードバックすることにより、設計法の完成度を高めていくことが重要である。

本稿は、洪水時に堤防において発見された被災のメカニズムを解明し、そこから得られた技術的知見を堤防の設計法にフィードバックした事例について紹介するものである。

Key Words: 河川堤防、安全性照査手法、モニタリング、被災

1. はじめに

河川堤防（以下「堤防」という。）は、住民の生命と財産を洪水から防御する極めて重要な構造物である。

現在の堤防の多くは、自然に形成された地盤の上に様々な土質材料を用いて嵩上げ・拡張を行いながら構築されてきたことから、基礎地盤は多岐にわたるとともに、堤体に用いられた土質材料や締固め密度等は施工時期や施工方法により異なり、土質構造は極めて複雑である。

このように不均一性を多く内包する堤防の安全性は、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た断面形状（余裕高、天端幅、のり勾配等）と護岸、水制等の整備並びに水防活動により確保されてきた¹⁾。

しかしながら、既往の被災事例から考えても、定められた断面形状による堤防が、防災構造物としての安全性について十分な信頼性を有しているとは言い切れず、なおも計画的な補強対策が求められている。そのため、補強の必要性や優先度、対策工法の検討のために外力と耐力の照査を基本とする設計法を導入することが求められ、「河川堤防設計指針」（2002 年 7 月 12 日付国河治第 87 号河川局治水課長通達。以下「指針」という。）が作成された。「指針」では、堤防の整備にあたって、従前から行われてきた堤防形状の確保に併せて、堤防に求められる

機能、具体的には、①耐浸透機能（浸透に耐える機能）、②耐侵食機能（侵食に耐える機能）、③耐震機能（地震に耐える機能）の 3 機能に対して所要の安全性を確保することとしている。つまり、洪水や地震といった外力に対して、堤防の力学的な安全性の照査を実施し、所要の安全水準を満たさない堤防については、必要な強化対策を実施することとしている²⁾。

堤防の不安定化、変形メカニズムについては、水理学、土質工学上の観点から全てが解明されているわけではなく、「指針」に示す堤防の設計法（安全性照査手法）は、長手方向の弱点箇所の選定や、安全性照査計算を実施するにあたっての堤防のモデル化等を行う際に、工学的割り切りをもって判断している部分も多い。したがって「指針」の設計法による安全性照査と併せて、モニタリングによる検証を行うことが重要である。

堤防の安全性を向上していくためには、被災や洪水時に堤防に現れる各種変状のモニタリング結果をもとに、対策の必要性や工法選定はもとより、それらが発生した原因を解明し、設計法そのものにフィードバックすることが非常に重要となる。

上述の背景のもと、本稿は、洪水時に堤防で発生した被災について、現場での各種調査を通じて被災のメカニズムを解明し、そこから得られた技術的知見を「指針」へフィードバックした事例について紹介する。

2. 浸透に対する安全性照査

(1) 安全性照査手法が定められる前の堤防設計

堤防は、前述したように堤体と基礎地盤が複雑で不均一であること、小さな穴一つでも破堤するといわれるように、局部的な安全性が一連の堤防全体の安全性を規定することなどの構造的な特徴を有している。

堤防を整備するにあたっては、我が国で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た断面形状（余裕高、天端幅、のり勾配等）を最低基準として河川の規模（流量）に応じて規定している形状規定方式を基本としていた。

形状規定は長い治水の歴史の中で決まってきたものであり、基準としては簡便で効率的であることもあって一定の役割を果たしてきたところであるが、形状が完成した断面の堤防においてもなお、漏水等の被災を生じていることもあり、形状規定のみでは防災構造物としての安全性を十分発揮させることができるとは言い切れない。そのため、堤防延長が長く、効率的に計画的補修を行う必要性が高いためものさしが必要となったことから、外力と耐力の照査を基本とする設計法を導入することが求められた。

(2) 安全性照査手法

2002年7月の「指針」により導入された堤防の安全性照査手法は、堤防に求められる3つの機能（耐浸透機能、耐侵食機能、耐震機能）に対して所要の安全性を確保することを目的として、洪水や地震といった外力に対する、堤防の裏のりすべりなどに対する安全率を求めるものである。照査の結果、所要の安全水準を満たさない堤防については、必要な強化対策を実施することになっているが、これまでの形状主義を否定したわけではない。堤防の整備にあたっては、経験に基づいて安全とされる形状まではまず確保することを前提とし、その上で照査により安全性が確保されないと評価された場合は、必要な対策工を実施することとしている。以下では浸透に対する安全性照査手法を例にとって概要を述べる。

a) 一連区間の細分と代表断面の設定

堤防は、長い線状構造物である。このような構造物の安全性照査にあたっては、まず、河道特性や洪水氾濫区域が同一、または類似する区間（これを一連区間という。）を設定する。さらに堤防の高さ等の形状、背後地の状況、堤体や基礎地盤の土質、築堤年代、旧川跡や落堀等の微地形、破堤やのり滑りといった被災履歴等により、浸透面において同様の特徴を持つ区間に一連区間の細分（これを細分区間という。）を行う。

さらに、この細分区間において、浸透に対して最も厳しい条件であると思われる箇所、例えば被災履歴のある箇所や治水地形上のウィークポイントを照査断面として

選定し、この断面をもって細分区間の安全性を代表させる。

したがって、安全性照査を実施する断面は、細分区間内で最も浸透に対して弱いと思われる断面である。

b) 堤防のモデル化

安全性照査を実施する断面は、天端中央、表・裏のり面中央の3本のボーリング調査に加え、必要に応じ築堤履歴や旧川跡や落堀等の治水地形も勘案し、それらのデータをもとに堤防・基礎地盤の土質構造のモデル化を行う。

さらに、ボーリング時に採取した土質資料の物理試験や透水試験、三軸圧縮試験等の土質試験結果をもとに、堤防の土質構造に応じた強度定数等を設定し、安全性照査に用いる堤防モデルとする。

c) 安全性照査手法

安全性照査はすべりとパイピングの2項目に対してチェックを行う。すべりに対しては非定常飽和・不飽和浸透流計算と円弧すべり法により安全率を算出する。照査外力は、外水位（河川水）と降雨であり、これらは計画規模のものを与える。

安全性の判定は、以下に示すように滑り破壊に対しては目標とする安全率を、パイピング破壊に関しては力学的限界状態を設定する。

表-1 浸透に対する堤防の照査基準⁴⁾

項目	部位	照査基準
すべり破壊(浸透破壊)に対する安全性	裏のり	$F_s \geq 1.2 \times \alpha_1 \times \alpha_2$ F_s : すべり破壊に対する安全率 α_1 : 築堤履歴の複雑さに対する割増係数 築堤履歴が複雑な場合 $\alpha_1 = 1.2$ 築堤履歴が単純な場合 $\alpha_1 = 1.1$ 新設堤防の場合 $\alpha_1 = 1.0$ α_2 : 基礎地盤の複雑さに対する割増係数 被災履歴あるいは要注意地形がある場合 $\alpha_2 = 1.1$ 被災履歴あるいは要注意地形がない場合 $\alpha_2 = 1.0$
	表のり	$F_s \geq 1.0$ F_s : すべり破壊に対する安全率
パイピング破壊(浸透破壊)に対する安全性	被覆土なし	$i < 0.5$ i : 裏のり所近傍の基礎地盤の局所動水勾配の最大値
	被覆土あり	$G/W > 1.0$ G : 被覆土層の重量 W : 被覆土層基底面に作用する揚圧力

(3) 直轄河川における安全性照査結果

我が国の国管理河川の堤防延長は、約 10,000km あり、2010年度までに安全性照査を完了させる予定である。現段階（2007年12月末現在）は、約 6,500km の安全性照査を完了しており、そのうち約 2,400km（37%）について堤防の浸透に対する安全性が不足しているとされている。

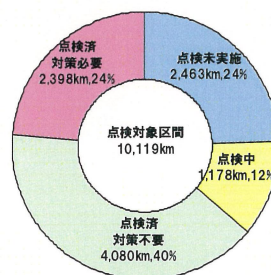


図-1 浸透に対する堤防点検の実施状況

3. 洪水時の堤防被災メカニズムの解明

河川堤防は、その安全性を確認するにあたり、ダム等にみられる試験湛水が困難なため、設計法の完成度を高めていくためには、大規模洪水時に堤防に実際に現れる各種症状を把握し、その発生メカニズムを解明、得られた知見を設計法にフィードバックしていくことが重要である。以下に、大規模洪水が最近発生した河川のうち、被災メカニズムの解明を行った代表的事例を紹介する。

(1) 利根川の事例

a) 被災の概要

2001年9月、台風15号の影響により、8日夕方から降り続いた豪雨は11日夜までに利根川上流域平均雨量で246mmに達した。この降雨により、利根川は増水し、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た。この結果、利根川右岸139kで噴砂を伴う基礎地盤漏水が2箇所で発生、また、堤体漏水が発生した。

被災箇所近傍の水位観測所と降雨観測所における河川水位と降雨を図-2に、被災状況を図-3に示す。

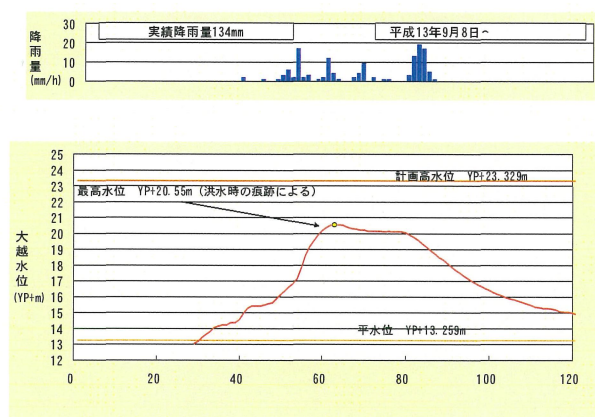


図-2 利根川の被災時における河川水位と降雨（大越地点）

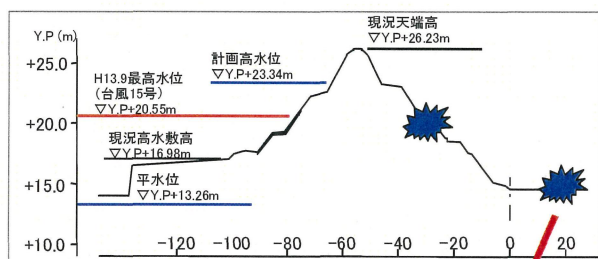


図-3 利根川における被災状況

b) 調査内容と結果の概要

被災箇所は、堤体土質や基礎地盤土質の概略調査から、浸透に対して相対的安全性が低いと認識されていた区間だったが、要注意地形や被災履歴がある箇所ではなく、他と比較して特に危険な箇所と認識しておらず、安全性照査が実施されていなかった。そこで、被災原因の解明のために、以下の4点からより詳細な調査を実施した。

- ① 過去と現在の地形図を重ね合わせることで、堤防法線の変遷を推定。
- ② 天端、表のり中央、裏のり中央の既存ボーリングに加え、旧堤交差付近に重点をおいた、新たな追加のボーリング調査や開削調査による堤防の土質構造を確認。
- ③ 裏のり尻付近のボーリングによる基礎地盤の連続性の確認。
- ④ ボーリング孔のトレンチ掘削と噴砂の鉱物組成調査、漏水の水質調査による噴砂・漏水供給源を確認。

まず、過去の地形図と現地形図を重ね合わせたところ、被災箇所は1884年に存在した旧堤防と、現在の堤防の交差部にあたることが分かった(図-4)。旧堤防の入り方と、その土質によっては、裏のり尻付近に浸透水の行き止まり構造を作ることになり、これが堤体漏水の一要因になっているのではないか、ということが推定された。

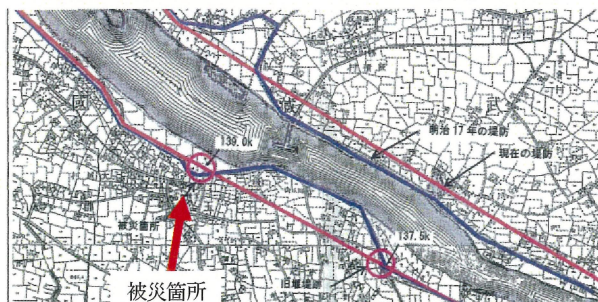


図-4 旧堤防（赤線）と現堤防（青線）の重ね合わせ図

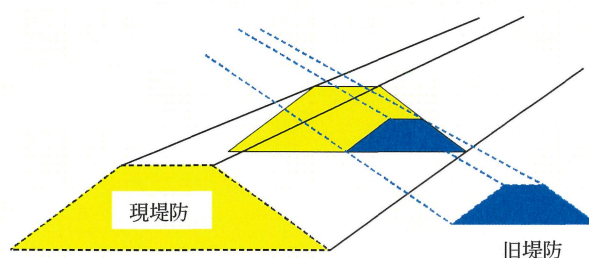


図-5 現堤と旧堤の交差部における断面構造模式図

また、ボーリング調査や開削調査の実施により、以下のことが確認された。

- ・ 地形図からの読みとりどおり、堤防ののり尻付近に旧堤防が存在することが確認され、土質は粘性土であることが分かった(図-6①)。
- ・ 1949年計画による大規模築堤時には、工事記録によると比較的透水性の大きい砂質土である河床の浚渫土砂による築堤がなされた箇所が多い。これが川表から川裏に連続して分布していることが分かった。

(図-6②)

- また、開削調査ではこの築堤部分から水のシミだしが確認され、さらに、この築堤材料はN値も低く、砂分含有量も多く、浸透に対し弱い材料であることが明らかになった(図-7)。
- のり尻から離れた堤内地においてボーリング調査を実施した結果、基礎地盤は、堤外側から堤内側に連続して分布する透水層が「行き止まり型」構造になっていることが明らかになった(図-8)。

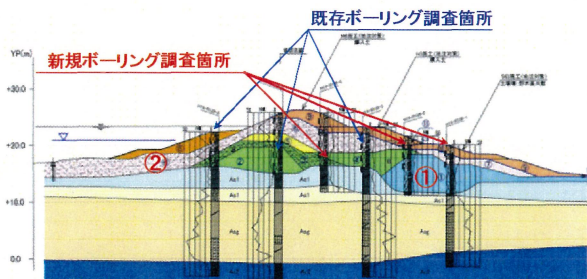


図-6 被災断面における堤防土質構造

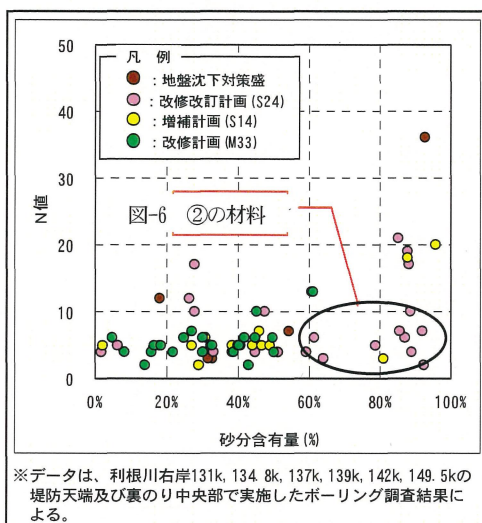


図-7 被災断面堤体材料の砂分含有率とN値

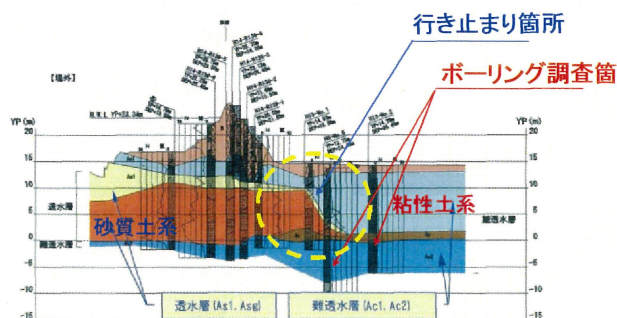


図-8 被災断面の基礎地盤土質構造

c) 被災メカニズムの考察

以上の結果から、堤体漏水及び基礎地盤漏水のメカニズムとして以下が推定された。

① 堤体漏水のメカニズム

- 粘性土の旧堤と新堤の交差部であり、堤体の中に行き止まり構造を内包している。
 - 1949年計画による浚渫築堤(締め固めをしておらず、透水性が高い)が、川表から川裏に連続している。
- したがって、堤体内に浸透した水は粘性土の旧堤防によってせき上げられて漏水を発生すると同時に、浚渫築堤による透水性の高い材料を通ってきた浸透水も裏のりで漏水する、その両方の原因により堤体漏水が生じたと推定される。

② 基礎地盤漏水のメカニズム

- 基礎地盤は、堤外側から堤内側に連続して分布する透水層が「行き止まり型」構造になっている。
- したがって、川側から供給された水が基礎地盤の透水層を通り、粘性土の行き止まり地盤でせき上げられて噴砂を伴う漏水が発生したと推定される。

利根川堤防の他の区間において、①、②と同様の土質構造を持つ箇所を抽出し、被災の有無を調べたところ、約8割の箇所で土質構造と被災の有無に相関が見られた。

(2) 斐伊川の事例

a) 被災の概要

2006年7月の梅雨前線に伴う豪雨の影響により、7/16～7/19にかけて降り続いた豪雨は、11日夜までに斐伊川本川流域の総降雨量で378mmに達した。これにより、斐伊川本川堤防では堤防からの漏水や、のり面の陥没、護岸の崩壊等、14箇所では被災が発生した。特に本川右岸7.5k(今在家地先)では、堤体ののり尻から細砂を含む濁水の噴出を伴う漏水、および堤体裏のり面に陥没が発見された。

被災箇所近傍の水位観測所(灘分)と降雨観測所(平田)における河川水位と降雨を図-9に、被災の概要写真を図-10に示す。

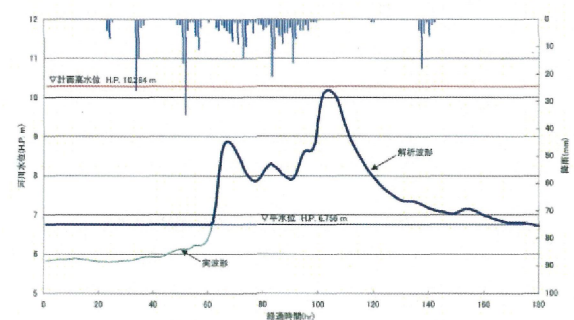


図-9 被災箇所付近の河川水位と降雨

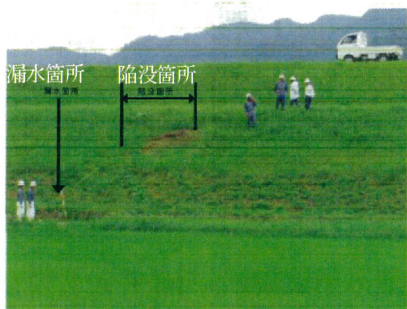


図-10 被災の状況

被災箇所の堤体は砂質土、基礎地盤は砂質土主体として一部粘性土層が介在している。また、のり尻直近に農業用排水路が存在している。(図-11)

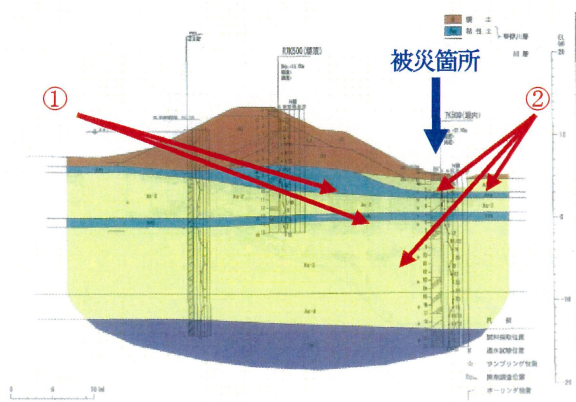


図-11 被災断面における堤防土質構造
(①が粘性土、②砂質土)

b) 調査内容と結果の概要

被災の生じた原因についてのり尻部の堤体及び基礎地盤の土質構造が影響しているものと推測し、以下の2点からより詳細な調査を実施した。

- ① 開削調査による裏のり尻付近基礎地盤の砂質土層の連続性の確認
- ② 堤脚水路（農業用排水路）が堤防の安全性に与える影響確認

開削調査の結果、のり尻付近の基礎地盤は砂質土層 ($k=2 \times 10^{-3}$) (As1)、その下に堤体直下から延びる粘性土層 ($k=1 \times 10^{-5}$) (Ac1) が連続して存在した。また、堤体は砂質土を主体とする堤体材料 ($k=1 \times 10^{-2} \sim 4 \times 10^{-3}$) (Bs) であり、裏のり面下部からのり尻に碎石層 (Dr) が存在していることが分かった。なお、1989年以前へのり尻は亀甲ドレーン付近にあり、その後堤脚水路が造られ、現在の構造となったことが分かった。(図-12)

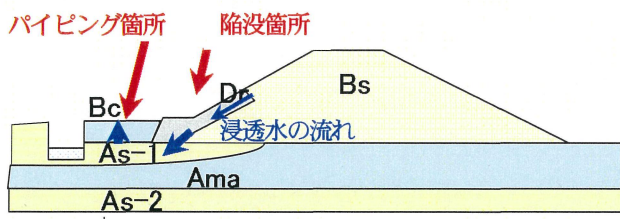


図-12 被災メカニズム模式図

この堤脚水路が堤防の安全性に与える影響について確認を行うために、堤脚水路の有無による堤体内の浸透流の流れの違いについて解析を行った。

その結果、外水位ピーク時において、パイピング発生箇所では、水路施工前は全水頭が地表面以下であるが、水路施工後は水路の壁が浸透水をせき止めるため、全水頭が50cm～80cm程度増加していると推定された。

このことは、水路の施工によってのり尻付近の水圧が高まっていることを示している。さらに、この水頭時のG/W (G:基礎地盤不透水性被覆層の重量、W:全水頭)は1以下となり、パイピングを発生する条件を満たしていることが分かった。

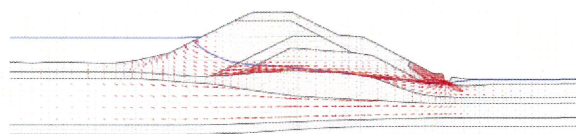


図-13 水路設置前の流速ベクトル図

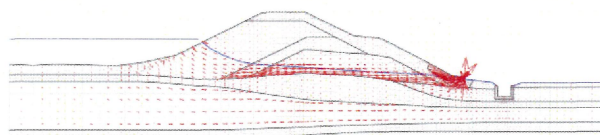


図-14 水路設置後の流速ベクトル図

また、パイピング発生後を想定した計算（地盤に穴をあけた計算）においても、水路施工前の全水頭に比較して20cm程度高いことが確認された。このことは、ピーク水位が長引けば、パイピングはさらに続くことを指しており、高水位継続時間によってはさらに堤体が危険になることが想定される。

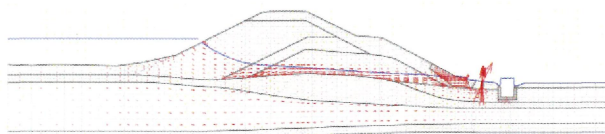


図-15 パイピング発生後の流速ベクトル図

c) 被災メカニズムの考察

以上の結果から、堤体漏水のメカニズムとして以下が推定された。

- ・ 堤脚水路によって基礎地盤の砂層はせき止め構造となっていた。
- ・ 亀甲ドレーンで引っ張られた浸透水は、砂質土層を通り、堤脚水路でせき上げられる。

- ・ その結果、旧のり尻部から水路（堤脚水路）間に盛土した粘性土層（Bc）下部の圧力が高まり Bc 層を突き破りパイピングが生じる。
- ・ 堤体の砂質土はパイピングに連動して移動し、亀甲ドレーン下に空洞化が生じ、陥没を生じた。

4. 得られた知見の安全性照査手法への反映

(1) 安全性照査実施断面選定の観点から

安全性照査実施断面として選定される、浸透に対して最も厳しい条件を有する箇所（箇所）の正確な選定は、高度な技術的判断が必要なことから、従来の「指針」では、工学的割り切りとして、堤体土質が砂質土等の浸透に対して弱い材料でできている箇所や、旧河道、落堀等の治水地形上の弱点箇所等の浸透に対して最も厳しい条件を持つと推定される箇所を選定することとしている。

今回の利根川の被災メカニズムの検証したことにより、従来から言われている基礎地盤中が行き止まり地盤を形成している治水地形上の弱点箇所や、比較的透水性の大きい河床の浚渫土砂による築堤がなされた浸透に対して弱い材料でできている箇所は、浸透に対して厳しい条件を持つと再確認できたことに加え、堤体内部に行き止まり構造を有するような、旧堤防と現在の堤防の交差部にあたる箇所も、浸透に対して厳しい条件を持つ箇所であることが明らかになった。

したがって、「指針」へのフィードバック事項としては、今後の安全性照査実施断面の選定条件として上記条件を追加すること、そのような箇所の抽出にあたっては、旧地形図と現地形図の重ね合わせを行うこと、の2点について追記することとした。

(2) 堤体の安全性照査の観点から

「指針」では、浸透に対する安全性照査に用いる堤防のモデルを作成する際に、最低3本のボーリングと土質調査の結果とともに、築堤履歴を十分勘案し、適切に照査モデルに反映することを求めている。

前述の利根川の被災メカニズムの検証から、旧堤防と現堤防の交差部で旧堤防の入り方と土質によっては、裏のり尻付近に浸透水の行き止まり構造を作ることになり、堤体漏水が発生し易いこと、また、比較的透水性の大きい河床の浚渫土砂が、川おもてから川裏にかけて存在する場合は堤体漏水が発生し易いことが明らかになった。

したがって「指針」へのフィードバック事項としては、モデル化にあたって、旧堤防と現在の堤防の交差部は念入りにボーリング調査等を行い、上記のような堤体構造を照査モデルに十分反映すること、河床の浚渫土砂を利用している堤防は、材料の連続性、定数設定に特に留意し、照査モデルに適切に反映させること、の2点について追記することとした。

(3) 基礎地盤の安全性照査の観点から

従来の「指針」で、のり尻直近の水路等の構造物のモデル化については特に取り扱っていない。これは、2Hルール（堤防に接近して構造物を設ける場合には、堤防の法尻から堤防高の2倍以上離さなければならない）が原則¹⁾のためである。

しかし、今回の斐伊川の被災メカニズムの検証から、のり尻付近に新たに堤脚水路を設置されているような場合、特に砂層主体の堤防では水路のコンクリート壁が、あたかも人工的に行き止まり地盤を形成したことにつながり、パイピング危険箇所となる場合があることが明らかになった。

したがって、「指針」へのフィードバック事項としては、堤脚水路等の構造物が堤防直近にある場合は、直下の基礎地盤の連続性に留意し照査モデルに十分反映させること、やむを得ず堤脚水路等の構造物をのり尻付近に新たに設ける場合は、人工的に行き止まり地盤を作らないように設置深さや構造（排水構造等）に留意することの2点について追記することとした。

5. 堤防のさらなる信頼性確保のための取り組み

我が国においては、堤防の信頼性確保のための取り組みとして、2002年7月の「指針」の発刊以降、河川堤防における補強の必要性や優先度、対策工法の検討のために外力と耐力の照査を基本とする設計法を導入して、力学的な安全性の照査を実施してきているところである。

しかし、堤防の信頼性を維持し高めていくためには、「指針」の照査手法で工学的割り切りをもって判断している部分は PDCA サイクルを用いて技術をスパイラルアップしていくことが不可欠である。

今回報告した、洪水時のモニタリングにより発見された変状についてメカニズムを解明し、指針に反映していくことは、正しく PDCA サイクルの一環であり、非常に有意義なことであると考えられる。

今後も引き続き、不均一性を有する堤防の信頼性の向上していくために、洪水時に実堤防で生じている事象を把握し、そのメカニズムを分析する取り組みを行っていく予定であり、この取り組みは、今後の我が国の堤防技術開発における重要テーマとして認識されている。

参考文献

- 1) 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、社団法人 日本河川協会、2000。
- 2) 改訂新版 建設省河川砂防技術基準(案) 同解説 設計編Ⅰ、社団法人 日本河川協会、山海堂、1997、
- 3) 河川堤防設計指針、国土交通省河川局治水課、2002、
- 4) 河川堤防構造検討の手引き、財団法人 国土技術研究センター、2002