

河川堤防に関するJICEの取り組み



佐古俊介

調査第一部
上席主任研究員

1. はじめに

河川堤防は、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・拡幅を行いながら構築されてきたことから、基礎地盤は複雑で、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）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ており、さらに、平成14年以降は、上記の形状に加え、河川工学、土質工学の知見を取り入れ、堤防に求められる機能（耐浸透、耐侵食、耐震）に応じて外力と耐力を評価する照査手法が導入されると共に、平常時と洪水時のモニタリングを実施し、PDCAサイクルにより信頼性の高い安全性を確保しようとする施策がとられている。

JICEでは、堤防の破堤現象のメカニズム解明、設計手法や強化対策工法、モニタリング手法の検討といった、堤防の安全性の確保に関する調査研究を設立当初より継続的に実施しており、多くの知見が蓄積されている。これらの結果のうち広く社会に普及が必要なものについては、「河川堤防構造検討の手引き」、「目視点検によるモニタリングに関する技術資料」、「河川堤防の地震時変形量の解析手法」など、当センターホームページを通じて広報につとめている。

本稿では、洪水、地震に対する堤防の安全性確保に係る、最近のJICEの取り組みについて報告するものである。

2. 洪水に対する安全性確保の取り組み

2.1 概要

従来、河川堤防の洪水に対する安全性は、堤防の断面形状（余裕高、天端幅、のり勾配）、過去の被災履歴、河川巡視や出水期点検結果等に基づき「重要水防箇所評定基準」により評価し、水防上の重要度としてランク区分してきた。

しかしながら、形状がほぼ完成した堤防においても漏水や侵食等の被災が発生している事例もあることから、河川堤防は、形状のみでは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、さらに効率的かつ計画的な補強が必要である。

上述の背景のもと、JICEでは、以下で紹介する堤防の概略・詳細点検手法や、モニタリング手法についての検討といった、信頼性の高い、堤防の安全性確保に関する調査研究を実施しており、これらは、現状堤防の洪水に対する安全性の評価、補強の必要性や優先度判定、補強手法の選定と規模の検討等に用いられている。

2.2 堤防の設計手法の検討の取り組み

堤防の浸透に対する安全性は、堤体と基礎地盤の土質条件、および洪水特性から決まる外力条件に支配される。

H8の「河川堤防の浸透に対する安全性の概略点検について（河川局治水課）」では、定性的ながら堤防の危険度を相対的に評価する手法が標準化された。

点検項目は堤防諸元、土質、平均動水勾配、高水位継続時間、要注意地形、築堤年次、被災履歴、対策履歴等であり、このうち、堤防を構成する要因（土質、要注意地形、築堤年次）、外力（平均動水勾配、高水位継続時間）、被災履歴の3点を考慮して、A～Dの4段階に堤防の相対的危険度評価が可能となっている。

また、H14の「河川堤防設計指針（河川局治水課）」（以下、「指針」）において、浸透、侵食、地震の面から、堤防に求められる機能に応じて必要な安全率等を設定し、はじめて堤防の定量的な安全度評価を行うことができるようになった（浸透はH9より試行）。浸透に関する詳細点検を例にとると、概略点検及びボーリング結果等をもとに堤防の土質構成が同様と考える区間に細分（細分区間）し、この区間を代表する断面（照査対象断面）を対象に

洪水時のすべり破壊に対する安全性、

洪水時の基礎地盤のパイピング破壊に対する安全性の2項目について実施することとしている。

JICEにおいてH14に発刊されている「河川堤防の構

造検討の手引き」(以下、「手引き」)では、「指針」を補完すべく、非定常飽和・不飽和浸透流計算および円弧すべり法による安定計算による照査手法について示している。外力は、洪水防御計画で想定している降雨量及び河川水位波形を非定常で与える。具体的には、細分区間の中で浸透に対して最も厳しい条件を有する力所を照査対象断面とし、この断面について実施した堤防の横断測量及び土質調査(ボーリング、土質試験等)、周辺堤防の開削調査などの結果を基に、堤防形状と堤体・基礎地盤の土質構造をモデル化し、土質構造に応じた透水係数、強度定数等を設定する。このようにモデル化した堤防に外力を与え、浸透流計算により堤体の浸潤線の発達及びのり尻部に生じる水頭を推定する。また、浸透流計算により得られた浸潤線の中から、堤体の裏のり、表のりのすべりに対して最も危険な浸潤線の状態で円弧すべりによる安定計算を実施することとしている。

浸透に対する堤防の安全性の照査基準は表-1に示すとおりである。ここで、築堤履歴の複雑な場合とは築堤開始年代が古く、かつ築堤が数度にわたり行われている場合や履歴が不明な場合のことであり、要注意地形とは旧河道、落堀跡などの堤防の不安定化につながる基礎地盤の微地形のことをいう。

直轄河川においてはH18年12月時点で約6500kmの点検を完了し、2400km(37%)が安全性不足であることが分かっている。

表-1 浸透に対する堤防の安全性の照査基準

項目	部位	照査基準
すべり破壊(浸潤破壊)に対する安全性	裏のり	$F_s = 1.2 \times i_1 \times i_2$ F_s ; すべり破壊に対する安全率 i_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 $i_1 = 1.2$ 築堤履歴が単純な場合 $i_1 = 1.1$ 新設堤防の場合 $i_1 = 1.0$ i_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 $i_2 = 1.1$ 被災履歴あるいは要注意地形がない場合 $i_2 = 1.0$
	表のり	$F_s = 1.0$ 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 ; 裏のり尻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

2.3 モニタリング手法に対する取り組み

洪水に対する堤防の信頼性を維持し高めていくためには、相対的に安全性が低い区間を抽出し、背後地の状況等を考慮して重要度の高い区間から詳細点検を実施し、所要の安全性を満たさない箇所については堤防の強化対策を実施していくことが効率的であるが、これだけで100%の安全性を確保できるわけではない。蟻の一穴で破堤したといわれるように、延長の長い河川堤防は、長い治水の歴史の中で逐次高上げ、拡幅を積み重ね現在に至っており、現在の調査手法、照査手法では抽出することが極めて困難な局所的な弱点が、一連の堤防全体の安全性を左右している場合がある。このような特徴を有する河川堤防にあっては、局所的な部分も含めてモニタリングにより堤防の状況を監視しておくことは極めて重要である。

H16の「河川堤防モニタリング技術ガイドライン(案)(河川局治水課)」(以下、「ガイドライン」)では、洪水に対する安全性・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な内容についてとりまとめており、定期的に目視を主体としたモニタリングを実施し、現場で生じている現象を記録、集積して堤防管理に役立つ方法と、計測機器により定められた箇所の物理現象を連続的にモニタリングする方法について記述しているが、以下では目視を主体としたモニタリングの内容について概説する。

堤防の破壊は、洪水中に急激に生ずる場合もあるが、洪水中や洪水直後はもちろんのこと、平常時においても見られる小さな変状が進行していく場合もある。このため、「ガイドライン」では、平常時と堤防の変状が顕著に現れる洪水中、洪水直後の各時期に分けて、これまでの浸透現象による堤体破壊現象を分類・整理し、深刻な破壊現象につながると推定される変状等を中心として、特に重要となるモニタリング項目を設定している。

また、目視モニタリングは、1度実施すればおしまいという性質のものではなく、定期的且つ洪水等の大きな外力が堤防に作用するたびに実施し、結果を集積することによって堤防の弱点箇所抽出の精度を高め、信頼性の高い堤

防管理に資する他、モニタリングにより発見された変状と概略・詳細点検の結果の比較・検証を行うことによって、点検手法の改善を行い、堤防技術の質を高めていく等の目的で実施するものである。そのため、JICEでは、「目視点検によるモニタリングに関する技術資料」を発刊し、「ガイドライン」を解説するとともに、モニタリング結果を堤防の形状や土質、築堤履歴や要注意地形等といった情報と併せてとりまとめ、その都度更新できるようにとりまとめておくべき項目と様式について示している。

3. 地震に対する安全性確保の取り組み

3.1 概要

河川では、計画の対象としているような洪水と地震が同時生起することが希であること、過去の地震で被災した堤防の緊急復旧が比較的容易であったこと等から、特別な場合を除き地震を考慮した河川堤防の設計を実施していなかったが、13年前に発生した兵庫県南部地震での淀川堤防の被災を契機に、河川堤防の耐震点検と耐震強化が導入されるようになった。

JICEでは、平成7年に策定された「河川堤防耐震点検マニュアル(河川局治水課)」、平成19年に策定された「河川構造物の耐震性能照査指針(案)・同解説、共通編・堤防編(河川局治水課)」での河川堤防の耐震診断、照査の方法等について行政支援を行っている。

また、平成14年には、液状化を主要因とする土構造物の地震後の残留変形量を評価できる5つの解析手法をとりあげ、これらを河川堤防に適用する場合の考え方、各種法の特性・適用性等を紹介した「河川堤防の地震時変形量の解析手法(JICE)」を発刊している。

3.2 L2地震動に係る耐震点検における取り組み

平成7年1月に発生した兵庫県南部地震以降、ゼロメートル地帯に位置する河川堤防では耐震強化を推進してきた。この中で、堤防の地震による被害の程度を予測する手法(耐震点検手法)としては、円弧すべり法が用いられて

いる。この方法は基礎地盤の液状化によるせん断強さの低下や地震時慣性力の作用などを取り込んでいるが、得られる結果は安全率であり、堤防の被害程度、すなわち沈下量を直接に予測するものではなかった。

平成19年に策定された「河川構造物の耐震性能照査指針(案)・同解説」は、平成13年に土木学会が策定した「土木構造物の耐震設計ガイドライン」及び平成14年に国土交通省が策定した「土木・建築にかかる設計の基本」を受け、対象地点において現在から将来にわたって最大級の強さを持つ地震動レベルであるL2地震動に対する河川堤防を含む河川構造物の耐震性能について規定している。

以下では、上記指針で規定する河川堤防の耐震性能、対象地震動、照査方法等について示す。

(1) 確保すべき耐震性

堤防の耐震性能は、地震により堤防に変形、沈下が生じた場合においても、平水時等の河川水が越水しない程度の高さが確保できる機能としており、基本的考え方は前述した河川堤防耐震点検マニュアルと同様である。なお、平常時の最高水位は、朔望平均満潮位及び波浪の影響を考慮するものとし、津波の遡上が予想される場合には津波高についても考慮することとしている。具体的な最高水位設定方法はJICEホームページに掲載されている。

(2) 対象地震動

対象地震動は、対象地点において現在から将来にわたって最大級の強さを持つ地震動レベルであり、プレート境界型の大規模な地震を想定したレベル2-1地震動と内陸直下型地震を想定したレベル2-2地震動の2種類を考慮している。具体的には、図4に示す標準加速度応答スペクトルに基づいて地盤種別に応じて地盤面に与えるものとしている。但し、各種情報により対象地点における地震動を的確に推定できる場合には、この結果に基づいて設定できる。

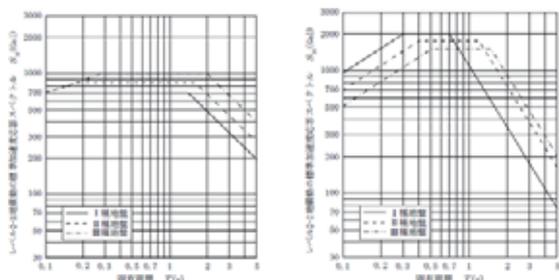


図-1 L2地震動の標準加速度応答スペクトル

(3) 照査方法

耐震性能の照査に用いる照査方法は、液状化に伴う土層の物性の変化を考慮し、堤防の変化を静的に算定できる方法を用いることを基本としている。現場では有限要素法を用いた自重変形解析法、流体力学に基づく永久変形解析法を用いている事例が多い。

4. 堤防委員会の創設

このように、JICEでは、堤防の信頼性向上と安全性の確保に関する調査研究を継続的に実施しており、これまでも河川堤防に係る技術情報の蓄積と発信を行ってきた。

現在、当センターホームページを通じて以下の刊行物を公開している。

表-2 当センターホームページにて公開されている技術資料一覧

技術資料名	発刊年月
河川堤防の構造検討の手引き	平成14年7月
目視点検によるモニタリングに関する技術資料	平成16年3月
中小河川における堤防点検・対策の手引き(案)	平成16年11月
ドレーン工設計マニュアル	平成10年3月
河川堤防の地震時変形量の解析手法	平成14年2月
河川土工マニュアル	平成5年8月
河川土工マニュアル参考資料(H18版)	平成19年7月
堤防決壊部緊急復旧工法マニュアル	平成元年6月
鋼矢板二重式仮締切設計マニュアル	平成13年5月

JICEでは今年度、さらなる技術情報の蓄積と、強固な人的ネットワークの形成を通して、治水の根幹施設である堤防について、技術的に社会に貢献する組織となるべく、JICE独自の常設委員会を立ち上げた。本委員会は、堤防に係る技術課題と課題解決に向けた方策等について継続的に議論し検討を行うことを目的としており、委員は堤防全般のオピニオンリーダーや、若手研究者、技術者で構成されている。

表-3 堤防委員会メンバー

浅岡 顯	名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻	教授
今岡 亮司	(財)日本建設情報総合センター	技師長
宇野 尚雄	岐阜大学	名誉教授
岡 二三生	京都大学工学研究科社会基盤工学専攻	教授
風間 基樹	東北大学大学院工学研究科土木工学専攻	教授
佐々木 康	(財)国土技術研究センター	顧問
杉井 俊夫	中部大学工学部都市建設工学科	教授
竹下 祐二	岡山大学大学院環境学研究科	准教授
辻本 哲郎	名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻	教授
東畑 郁生	東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻	教授
中島 秀雄	中島秀雄技術事務所	
西垣 誠	岡山大学大学院環境学研究科	教授
服部 敦	国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部水資源研究室	主任研究官
本城 勇介	岐阜大学工学部社会基盤工学科	教授
三木 博史	(株)三木地盤環境工学研究所	所長
森 啓年	独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ土質・振動チーム	主任研究員
山田 正	中央大学理工学部土木工学科	教授
山本 晃一	(財)河川環境管理財団	河川環境総合研究所長

(五十音順)

5. おわりに

河川堤防に100%の安全性を求めることは難しく、より100%に近づけるための取り組みが重要である。そのために、JICEでは今後も集積されるデータの分析や、実洪水時の症状を加味した評価・改善等、継続的な取り組みを行っていく予定である。