

河川堤防の性能設計

Performance Based Design of River Levee

杉 田 秀 樹 (すぎた ひでき)

土木研究所 耐震研究グループ (振動) 上席研究員

1. はじめに

河川堤防は、土構造物のなかでも最も古い歴史を有する構造物の一つである。河川堤防は、古来より堤防背後地域の住民の生命や資産を洪水から防御する極めて重要な使命を担っており、河川管理施設等構造令によれば「計画高水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」ことが構造の原則とされている。本小文においては、河川堤防を調査・計画・設計・施工・維持管理する際の技術基準である「建設省河川砂防技術基準（案）同解説」¹⁾、および同基準案を補足する「河川堤防設計指針」²⁾等をひも解き、河川堤防の設計に関する経緯と基本的考え方について概説する。

2. 河川堤防の設計の経緯および現状

全国の河川堤防の大部分は、古くから逐次強化を重ねてきた治水事業の歴史の産物である。河川堤防の構造は洪水や地震等の多様かつ頻繁な災害事例に基づき経験工学的に定められてきた側面が大きく、破壊・変形過程の分析に基づき構造検討がなされるようになったのは、昭和33年の建設省河川砂防技術基準（案）の策定以降であると言えよう。同基準案は、災害経験や技術の進歩に伴って改訂が重ねられ、現在に至っている。

河川管理施設等構造令も初期においては、堤防の構造の原則は定めているものの、設計に関しては断面形状（余裕高、天端幅、法面勾配等）の必要最低限の基準を河川規模（流量）等に応じて定めているだけであり、いわば形状規定型設計を基本としていた。一般の土木構造物のように、構造物の耐力と外力を比較して構造形状を定める設計法が河川堤防で久しく実施されなかった理由は、例えば以下のとおりである。すなわち、堤防の建設年代によって築堤材料や施工法が異なるため土質材料の強度が不均一であり土質材料の分布も不透明であること、堤防基礎地盤が古い時代の河川的作用によって形成された地盤で極めて複雑であること、洪水に伴い堤防が被災した場合には堤体や基礎地盤が破壊されてしまい被災原因の解明が困難であること、「破堤も蟻の一穴から」と言われるように局所的な不具合が一連の堤防全体の安全性を左右する場合もあること、水防活動と一体となって堤防の安全性が確保されていること等である。このため、ある断面形状を定めて堤防を整備し、洪水や地震等に遭遇して堤防の安全性が損なわれると、改修時に堤防を拡

築して安全性を高めるといった手順を繰り返すことにより、長い時間をかけて安全性の向上が図られてきた。

上記のような形状規定型設計は、簡便かつ効率的であり、堤防整備の基本として十分な役割を果たしてきたことは間違いない。しかしながら、洪水や地震等の外力に対する安全性を客観的に評価しているとは言い難いことも事実である。河川堤防に安全性を付与するためには計画的な補強対策が必要であり、対策の必要性・優先度・対策方法を客観的に判断するためには、一般の土木構造物と同様に、耐力と外力の比較（安全性照査）を基本とする設計法を導入する必要がある。このため、平成9年には基準案において、堤防の断面形状については従来の考え方を踏襲した構造細目（適合みなし規定）を残しつつ、堤防の安全性を確保する上で基本となる耐浸透性能および耐侵食性能について、照査外力、照査法、および目標性能に応じた照査基準が規定された。また従来は、堤防に対する耐震設計はなされていなかったが、平成9年の改訂において、中規模地震相当の地震荷重に対する耐震設計が初めて導入された。さらに、東海地震、東南海・南海地震、首都圏直下地震等の大規模地震の可能性が指摘されていることを踏まえ、平成19年に「河川構造物の耐震性能照査指針（案）同解説」³⁾が作成され、大規模地震を想定した性能照査法が規定された。

3. 河川堤防の設計の基本的考え方

建設省河川砂防技術基準（案）を補足する河川堤防設計指針では、設計の基本的考え方として、「堤防の安全性を確保するためには、堤防に要求される性能を明確にした上で各々の性能毎に安全性を照査し、所要の安全性が確保されていないと判断される堤防区間について強化を図る」旨が述べられている。一方、洪水や地震による堤防の変形メカニズムはすべて解明されているわけではなく、同設計指針で採用された性能照査法も今後更なる成熟が必要であるため、常時からモニタリングを並行して実施することにより、災害時の水防活動とあいまって堤防の安全性を確保することが重要である。

同設計指針に基づき堤防の質的整備を行う際の堤防強化工法については、別途作成された「河川堤防質的整備技術ガイドライン（案）」⁴⁾を参照されたい。また、浸透作用や侵食作用に対して堤防の安全性を維持するためのモニタリングについては、別途作成された「河川堤防モニタリング技術ガイドライン（案）」⁵⁾を参照されたい。

堤防の安全性確保のために必要とされる性能としては、前述したように、耐浸透性能、耐侵食性能、耐震性能を考慮する。耐浸透性能は、洪水時の降雨および河川水の浸透により堤防（堤体および基礎地盤）が不安定化することを防止できる性能であり、全堤防区間で必要とされる。耐侵食性能は、洪水時の流水の侵食作用により堤防が不安定化あるいは流出することを防止できる性能であり、耐浸透性能と同様に全堤防区間で必要とされる。一方で耐震性能は、地震動の作用により堤防天端が沈下した場合に、河川水の越流による堤内地の浸水被害を防止できる性能である。一般には洪水と地震が同時生起する可能性は小さく、また、堤防の復旧は比較的容易であることから、耐震性能を要求する堤防区間は、平常時の最高水位が堤内地盤高と比較して高い地域（ゼロメートル地帯）等で堤内地の浸水被害の可能性のある区間である。

なお、樋門等の堤防横断構造物の周辺においても上記の性能を確保する必要がある。特に、函体底板周辺の空洞化や堤体の緩みに伴う漏水等の浸透問題については個別に十分な点検を行い、周辺の堤防と同水準の性能が確保されるように管理しなければならない。

4. 河川堤防の性能照査

耐浸透性能の照査⁶⁾においては、照査外力として照査外水位と照査降雨を設定する。照査外水位としては計画高水位（当面の整備目標として設定する洪水時の水位が定められている場合にはその水位）とし、照査降雨としては計画規模の洪水時の降雨（当面の整備目標として設定する洪水が定められている場合にはその時の降雨）とする。照査手法としては円弧すべり安定解析および非常浸透流解析を標準として用いることができ、各々滑り破壊に対する安全性および基礎地盤のバイピング破壊に対する安全性を照査する。

耐侵食性能の照査⁶⁾においては、照査外力として代表流速を設定する。代表流速としては、計画高水位（当面の整備目標とする洪水時の水位が定められている場合にはその水位）以下の水位時において、最も速い平均流速に湾曲等による補正係数を乗じて算出する。照査手法は、設計外力とする洪水による堤防法面および高水敷の侵食限界の判別によることを標準とし、堤防法面および法尻の直接侵食、および主流路（低水路等）からの側方侵食や洗掘が照査基準を満足することを照査する。

耐震性能の照査⁷⁾においては、照査外水位および地震の影響を設定する。照査外水位は、地震と洪水が同時に発生する可能性が低いことを考慮して平常時の最高水位とする（河口部付近では津波および波浪の影響を考慮する）。地震の影響は、既往の災害事例に基づき、堤防基礎地盤の液状化を考慮する。耐震性能の照査に用いる地震動は、対象地点において現在から将来にわたって考え得る最大級の強さを持つ地震動（レベル2地震動）を考慮する。照査手法としては、液状化した土層の剛性低下に伴う堤防の変形を静的有限要素法により解析する方

法や、液状化した土層を粘性流体と仮定して地盤の流体的な変形を解析する方法を用いることができ、地震後の堤防高が照査外水位を下回らないことを照査する。

5. おわりに

性能規定型設計は、構造物の性能を分かりやすく説明でき、新工法や新技術の導入を促進できる点で、他の土木構造物と同様、河川堤防についても望ましいことである。ただし、河川堤防に要求される性能は本来、安全性、経済性、使用性、環境性など多様⁸⁾であるが、現状の設計指針では定量的な照査が可能な性能として安全性（なかでも耐浸透性能、耐侵食性能、耐震性能）を対象にしていること、また、性能照査法自体が一層の成熟に向けた技術開発が必要であることを忘れてはならない。さらに、本文で述べたとおり、河川堤防は長い歴史を経て構造形状が定められてきた経緯があり、経験に裏打ちされたノウハウや構造細目を適みなし規定として上手に性能規定型設計に活かすための工夫も重要である。

全国には国が管理する直轄堤防が約13 000 km、国以外が管理する堤防がさらに数万 km 存在している。河川堤防の性能を確保する上では、これら既設堤防の診断や強化が大きな課題である。河川堤防では、長い歴史ゆえ、築堤材料や基礎地盤の情報が十分でない場合も多いため、経済的で高精度な弱点箇所の抽出技術や、費用対効果の大きい堤防強化工法の技術開発が不可欠である。また、長大な堤防延長の診断・強化には相応の年月を要することを踏まえると、常時・洪水時のモニタリング、常時の維持管理と水防、災害後の緊急対応を含めた総合的な危機管理を通じて、性能を確保する視点も重要である。

最後に、本小文の執筆に際しては、国土交通省河川局治水課吉田大課長補佐、土木研究所土質チーム小橋秀俊 上席研究員、齊藤由紀子研究員から情報提供および助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 建設省河川局監修：建設省河川砂防技術基準（案）同解説，山海堂，1997.
- 2) 国土交通省河川局治水課：河川堤防設計指針，2002，2007改訂.
- 3) 国土交通省河川局治水課：河川構造物の耐震性能照査指針（案）同解説，2007.
- 4) 国土交通省河川局治水課：河川堤防質的整備技術ガイドライン（案），2004.
- 5) 国土交通省河川局治水課：河川堤防モニタリング技術ガイドライン（案），2004.
- 6) 三木博史：最近の水害の特徴と河川堤防の質的整備の課題，平成17年度土木研究所講演会講演集，土木研究所資料，No. 3979，2005.
- 7) 杉田秀樹：河川構造物の耐震設計の歴史・現状・展望，基礎工，Vol. 35，No. 2，2007.
- 8) 土木学会包括設計コード策定基礎調査委員会：性能設計概念に基づいた構造物設計コード作成のための原則・指針と用語，2003.

（原稿受理 2008.2.7）