

「粘り強い河川堤防」の技術開発 ～自立型の設計法について～



河川政策グループ
研究員
石川 直樹

河川政策グループ
副総括（首席研究員）
佐古 俊介



河川政策グループ
主任研究員
味方 圭哉

河川政策グループ
研究員
竹下 和輝



1 はじめに

令和元年東日本台風による多数の堤防決壊を受けて、国土交通省では、現況の施設能力を上回る洪水に対する減災効果の発揮を目的とした、越水に対して「粘り強い河川堤防」（以下、「粘り強い河川堤防」という）の技術的検討を行っているところである。「粘り強い河川堤防」は、治水計画自体の見直しを含め、流域内での安全バランスをどう実現するかという、流域治水を次のステージに引き上げる重要な要素であり、一般財団法人国土技術研究センター（以下、JICE という）では、「粘り強い河川堤防」に必要な性能の具体化や、構造物としての設計法や維持管理法の構築に向けて、関係業界団体や学識者等との連携を図り、共働で研究・開発を行ってきた。

本報告では、「粘り強い河川堤防」の性能の具体化や定義に関する既往の検討成果の概要を述べるとともに、「粘り強い河川堤防」のうち特に設計法が確立していない「自立型」の設計のうち、既存の堤防の性能を毀損しない設計法の構築について、JICE の自主研究成果を報告するものである。

2 「粘り強い河川堤防」に関する既往の検討

2.1 「粘り強い河川堤防」検討の背景

平成 30 年 7 月豪雨（西日本豪雨）や令和元年東日本台風（台風第 19 号）など、激甚な被害をもたらす水災害の発生を受け、2020 年 7 月の社会資本整備審議会の答申「気候変動を踏まえた水災害対策のあり方」¹⁾ や、2021 年 3 月に閣議決定された「特定都市河川浸水被害対策法等の一部を改正する法律」（通称「流域治水関連法」）により、「流域治水」の本格的実践に向けた取り組みが進められている。「流域治水」は、現況の施設能力を上回る洪水が発生することを前提として、「氾濫をできるだけ防ぐ・減らすための対策」、「被害対象を減少させるための対策」、「被害の軽減、早期復旧・復興のための対策」を組み

合わせ、総合的かつ多層的な水災害対策を実施するもの²⁾ である。「氾濫をできるだけ防ぐ・減らすための対策」には、河川区域における対策として「粘り強い堤防」を目指した堤防強化等も含まれる。「粘り強い河川堤防」は、越水しても決壊しない堤防ではなく、現況の施設能力を上回る洪水に対し、避難のための時間を確保するなど、被害をできるだけ軽減するため、越水した場合でも決壊しにくく、堤防が決壊するまでの時間を少しでも長くするなどの減災効果の発揮を目的とするものである。国土交通省では、「河川堤防の強化に関する技術検討会」（以下、「技術検討会」という）において、近年の越水事例における越流水深や越流時間、堤防の被災状況、避難にかかる時間の研究、過去の越水に対する堤防強化の検討における越流水深・越流時間等の研究などを踏まえ、技術開発目標（評価の目安）は、『越流水深 30cm の外力に対して、越流時間 3 時間』とし、その間は越水に対する性能を維持する構造とすることを定め³⁾、技術開発公募により、本格的な河川堤防の強化対策の実施に向けた取り組みが進められている。

2.2 「粘り強い河川堤防」の定義

「技術検討会」では、「粘り強い河川堤防」の目的を「越水が生じた場合でも、避難のための時間を確保する、浸水面積を減少させるなどにより、被害をできるだけ軽減すること」と定めた³⁾。その上で、「粘り強い河川堤防」の実現にあたっては、「河川砂防技術基準（設計編）」に定められた既存の堤防の性能である「堤防に求められる基本的な機能」（耐侵食性能や耐浸透性能、耐震性能等）と「設計に反映すべき事項、考慮すべき事項」（一体性及びなじみ、修復等の容易性等）を毀損せず、越水に対する性能を付加する必要がある（図 1）とした³⁾。

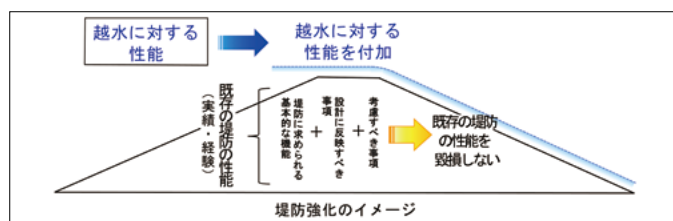


図 1 堤防強化のイメージ³⁾

2.3 技術開発の対象とする構造

技術開発の対象とする構造には、以下に示す表面被覆型と自立型、その他構造の3タイプが挙げられる³⁾。

表面被覆型

計画高水位以下の通常の流水の作用に対する堤防機能は土堤により確保し、越水に対しては土堤表面にシートやコンクリートブロックを設置することにより性能を発揮するもの。

自立型

盛土の部分がなくとも自立部が自立し、その全部若しくは主要な部分がコンクリート、鋼矢板若しくはこれらに準ずるものによる構造で、計画高水位以下の水位の流水の通常の作用に対する堤防機能及び越水に対する性能を発揮するもの。

その他構造

コア部分のみで自立はしないが、周辺の盛土（堤防）との複合体として計画高水位以下の水位の流水の通常の作用に対する堤防機能を発揮するものを想定する。様々な構造が想定されることから、現状では基本的な機能や設計に反映すべき事項、考慮すべき事項への照査方法の規定がない。

3

自立型の設計に向けた、既存の自立式特殊堤の設計法及び被災事例調査

3.1 自立型における「粘り強い河川堤防」設計の課題

2.1 で前述したとおり、「粘り強い河川堤防」では、越水に対する性能を付加することにより、既存の堤防の性能（「堤防に求められる基本的な機能」と「設計に反映すべき事項、考慮すべき事項」）を毀損しないことを確認する必要がある。それぞれの構造タイプにおける設計法は以下の通りである。

表面被覆型は土堤を被覆することで越水に対する性能を付加する構造であり、その設計法は「粘り強い河川堤防の構造検討に係る技術資料（案）」⁴⁾を用いることで、コンクリートブロック等を用いた「粘り強い河川堤防」の設計が可能である。また、既存の堤防の性能を毀損していないことについての確認は、「河川砂防技術基準（設計編）」に基づき土堤の設計法を用いることで可能である。

自立型における「越水に対する性能」については、「粘り強い河川堤防の技術開発に当たっての参考資料（自立型）」⁵⁾（以下、「参考資料」という）を用いることで設計することが可能である。一方、既存の堤防の性能に対する設計については「技術検討会」において、自立式特殊堤の確認方法と同じとされている³⁾。しかし、自立式特殊堤については、河川砂防技術基準（設計編）の特殊堤の安全性能において「耐震性能照査以外は、個別に適切な照査事項と照査方法を用いる」とされている⁶⁾ことから、標準的な設計法がないことが課題であった。これは特殊堤が、河川管理施設等構造令に規定する「土地利用の状況その他の特別の事情によりやむを得ないと認められる場合」において設けられるものであり、河川砂防技術基準（設計編）においても「自立式構造の特殊堤は特例中の特例と考えるべき」とされている⁶⁾ためと考えられる。

そこで、JICE では自主研究において、主要な自立式特殊堤の設計法の実態について調査を行った上で、自立式特殊堤の設計法について検討を行った。

3.2 自立式特殊堤の設計事例の実態調査

自立式特殊堤は、都市河川の高潮区間等において限定的に設けられているが、設計を行った直近の事例として、国管理河川では北海道開発局や四国地方整備局の設計事例、地方自治体では東京都や大阪府における設計事例を収集した。これらの事例では、自立式特殊堤本体の安定性を確保するために「道路橋示方書・同解説」や「道路土工―擁壁工指針」、「河川構造物の耐震性能照査指針（案）・同解説」に基づき設計が行われていた。なお、道路構造物の技術基準類では見込んでいない外力として河川水の影響が挙げられるが、これについては計画高水位に相当する水位を静水圧として見込むことで設計が行われていた。また、基礎地盤の浸透に対しては、レインの式を用いた設計が行われていた。自立式矢板特殊堤については、仮設構造物のマニュアルである「鋼矢板二重式仮締切設計マニュアル」⁷⁾に基づく設計が行われていた。

これら既存の基準類を準用して設計、築造された自立式特殊堤において被災等が生じていないかを確認するために、国管理河川を対象とし、自立式特殊堤の被災事例について収集・分析を行った。

3.3 自立式特殊堤の被災事例の実態調査

国管理河川を対象として、自立式特殊堤の施工事例 63 件を収集した。自立式特殊堤本体の材料にコンクリートを用いる場合に採用実績が多い構造としては、コンクリート擁壁式特殊堤のL型、逆T型、重力式等がある（図2）。

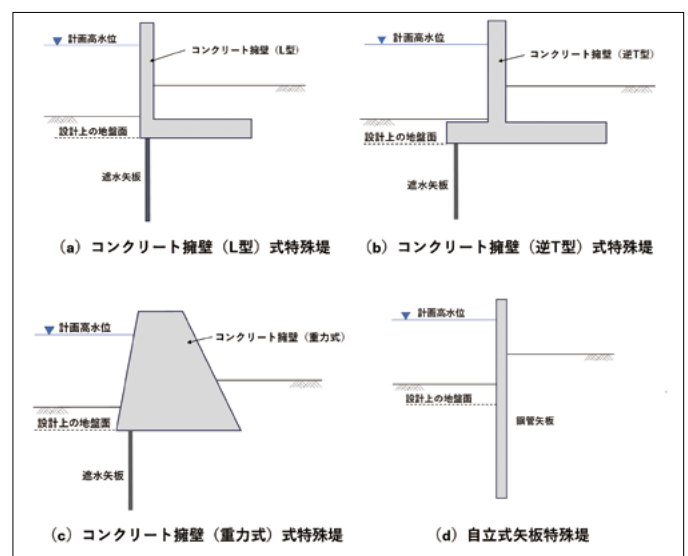


図2 自立式特殊堤の構造の例

収集事例の一部では、基礎地盤のパイピングによる被災や、構造物の境目で生じる段差やズレが見受けられたものの、自立式特殊堤本体が破壊される、あるいは大きく傾くような、「堤

防に求められる基本的な機能」や「設計に反映すべき事項、考慮すべき事項」を毀損するような被災は発生していないことが確認された。このため、自立型についても既存の基準類を準用した設計法により設計されていれば、大きな被災を生じることはないと考えた。

4 「粘り強い河川堤防」(自立型) の設計法の構築

4.1 自立型に求められる機能に対する照査項目

自立型の標準的な設計法の確立にあたっては、まず土堤が有している既存の堤防の性能を満たす必要があることから、「河川砂防技術基準（設計編）」に従い、計画高水位以下の流水が河川外に流出することを防止するために必要な高さを確保した上で、設計の対象とする状況と作用に応じた照査項目を設定し、設計を行う。自立型の設計に必要な照査項目については、「河川砂防技術基準（設計編）」に示されている「機能と設計に反映すべき事項」に基づき、「基本的な機能（常時、洪水時、高潮時、風浪時、その他（津波時等））」を設定した。

また、堤防材料が土であることで有していた「設計に反映すべき事項（修復の容易性やなじみ等）」についても、土以外の材料を用いることを前提に、設計における考え方について整理した（表 1）。

表 1 自立式特殊堤の設計における考え方

	項目	自立式特殊堤の設計における考え方
堤防に求められる基本的な機能	常時における安全性	・応力度照査等による部材の安全性を確保する ・特殊堤本体の安定性（滑動、転倒、支持、全体安定）を確保する ・特殊堤の高さを確保する
	洪水時の安全性（耐浸透性能）	・応力度照査等による部材の安全性を確保する ・特殊堤本体の安定性（滑動、転倒、支持、全体安定）を確保する ・特殊堤本体等の河川水に含まれる砂礫等による摩擦に対する安全性を確保する
	洪水時の安全性（耐浸透性能）	・応力度照査等による部材の安全性を確保する ・特殊堤本体の安定性（滑動、転倒、支持、全体安定）を確保する ・レインの加重クリープ比によるバイピングに対する安全性を確保する
	耐震性能	・レベル1地震動に対する健全性を確保する ・レベル2地震動に対する機能保持、機能回復を確保する
	波浪等に対する安全性	・必要な高さ、構造を設定する ・応力度照査等による部材の安全性を確保する ・特殊堤本体の安定性（滑動、転倒、支持、全体安定）を確保する
設計に反映すべき事項	不同沈下に対する修復の容易性	・良質な支持層への支持等、不同沈下を生じさせない構造とする ・実際に生じる多少の不同沈下に対しては、一定間隔での目地を設置する
	堤体及び基礎地盤との一体性及びなじみ	・レインの加重クリープ比により設計した連土工を設置し、特殊堤本体と基礎地盤との境界でバイピングを生じさせない構造とする。 （数は少ないが、我が国の自立式特殊堤の漏水・噴砂等の被災事例は、レインの式を満足していないためであることが確認されているため）
	嵩上げ及び拡幅等の機能増強の容易性	・嵩上げ等の計画がある場合には、事前対応と将来の対応の総合比較を行い、事前対応が有利と判断される場合には事前対応を行う（一般に、土堤と異なり自立式特殊堤は将来の対応が難しいため、将来の荷重増加を考慮した設計とする）
	損傷した場合の復旧の容易性	・損傷しないよう常時、洪水時、地震時、高潮時等に求められる安全性を確保する ・不同沈下に対する修復の容易性と同一考え方とする ・レベル2地震動に対する機能回復を確保する
	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	・自立式特殊堤本体は、適切な材料を用いることで、堤体に係る不確実性は、設計において反映されるとみなす ・基礎地盤に対しては、自立式特殊堤本体の安定性や基礎地盤等を含む全体の安定性に対しては、安全率を考慮することで対応する ・また、レインの加重クリープ比等の実績を踏まえた評価方法を採用する
考慮すべき事項	環境及び景観との調和	・環境及び景観と調和する構造（緑化、意匠等の工夫）
	構造物の耐久性	・十分な耐用年数の品質の材料の使用、構造細目、施工 ・実績が多く、補修や更新の容易な構造
	維持管理の容易性	・実績が多く、点検と補修の容易な構造（目視可能な箇所は点検・補修が容易な構造、不可視箇所では十分な安全性・耐久性を有する構造）
	施工性	・一般的に施工可能な構造
	事業実施による地域への影響	・用地取得、地下水阻害等の影響を考慮した構造
考慮すべき事項	経済性及び公共の利用	・施工時の経済性に加え、長期間機能を維持するための点検、補修、更新等を含めた経済性を考慮した構造 ・公共の利用に配慮した構造

4.2 安全性能の照査方法

（1）河川の状況と作用・荷重の考え方

自立型の安全性能の照査において対象とする河川の状況としては、常時、洪水時、高潮時、風浪時、地震時、その他（津波時等）を想定し、設計の対象とする作用と荷重は、河川の状況に応じて整理した（表 2）。設計においては、これらの作用・荷重を適切に組み合わせて設計を行う。

表 2 設計において対象とする河川の状況、作用・荷重

河川の状況	作用・荷重	河川水位
常時	自重（死荷重）、載荷重、土圧、水圧、揚圧力、負の周面摩擦力の影響、風荷重、雪荷重等	通常想定される水位
洪水時	自重（死荷重）、載荷重、土圧、水圧、揚圧力、負の周面摩擦力の影響、風荷重、河川水及び降雨の浸透の影響、侵食の影響、土砂流による摩擦等	天端水位（浸透・侵食に関しては計画高水位）
高潮時	自重（死荷重）、載荷重、土圧、水圧、揚圧力、負の周面摩擦力の影響、風荷重、波力等	天端水位（浸透・侵食に関しては計画高潮位）
風浪時	自重（死荷重）、載荷重、土圧、水圧、揚圧力、負の周面摩擦力の影響、風荷重、波力、越波等	天端水位、想定される水位
地震時	自重（死荷重）、地震動、載荷重、水圧、揚圧力、負の周面摩擦力の影響、地震の影響（構造物の重量に起因する慣性力、地震時土圧、地震時動水圧、液化化の影響）、雪荷重等	通常想定される水位
その他	津波による波力、セシシュによる影響、施工時荷重、流木の衝突荷重、自動車・船の衝突荷重等	津波に対しては計画津波水位

なお、荷重の中にある水圧のうち堤内側の水圧については、想定する水位に対する静水圧として算出することが基本となるが、基礎地盤の浸透の影響を無視できない砂質土地盤等の場合には、浸透の影響を考慮し、最短となる浸透路長に沿って動水勾配が一定となる水圧分布とするものとした。

堤外側の水圧については、常時は河川水位を平水位として考えれば良いが、洪水時の水圧には、定常的に作用する水圧と一時的（瞬間的）に作用する水圧の 2 種類がある。洪水時の水位の平均が計画高水位だった場合には、風浪やうねりにより一時的に計画高水位を上回る時間もある。部材の安全性や本体の安定性にとつては、瞬間的であっても大きな力が作用することが致命的になりうるが、現象の発生により長い時間が必要な浸透にとつては、定常的に作用する水圧の方が問題である。このため、照査項目に応じて水圧を使い分けるものとした。

また、洪水時には、内外水位差が構造物の安全性、安定性に大きな影響を及ぼす。内外水位差が大きくなる時点には、河川水位がピークの時点と、堤内地が内水等で浸水している間に河川水位が急低下した時点の 2 種類がある。このため、河川水位のピーク時と水位急低下時の 2 種類の水圧を用いて洪水時の安全性能を照査するものとした（表 3）。

表 3 洪水時の安全性能の照査に用いる水位

洪水時の時点	照査項目	河川水位	堤内地の水位
河川水位ピーク時	部材の安全性 本体の安定性	天端高さ	平常時の地下水位
	耐浸透性 耐侵食性	計画高水位	平常時の地下水位
河川水位急低下時	部材の安全性 本体の安定性 耐浸透性 耐侵食性	平水位	地表面 （浸水が想定される場合には、浸水を考慮した高さ）

(2) 安全性能の照査

常時、洪水時の自立型の安全性能の照査については、「河川砂防技術基準（設計編）」や「道路橋示方書・同解説」、「道路土工―擁壁工指針」、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」等の、これまでの経験及び実績から妥当とみなせる方法又は論理的な妥当性を有する方法等、適切な知見に基づく設計法を用いるものとした。

部材の安全性については、河川の状況に応じた水圧、土圧等の荷重の組み合わせに対するコンクリート部材や鋼材の安全性の照査として、断面力は弾性理論により算出し、部材に発生する応力度が許容応力度を超えないことを照査するものとした。また、本体の安定性については、コンクリート擁壁式特殊堤が直接基礎の場合は、滑動、転倒、支持に対する安定性を照査し、杭基礎の場合は、上記に加えて杭の鉛直方向（支持力）、水平方向（変位）、部材の安全性の3種類の安定性を照査するものとした。

自立式矢板特殊堤は、矢板壁背面の地盤高が計画河床高よりも高い場合を考えると、矢板壁背面には堤内地の土質や地下水位に応じた主動土圧と水圧が、矢板壁前面には計画河床高以深の土質や河川水位に応じた受働土圧と水圧が作用する。これらが等しくなる深さを仮想地盤面とし、これより上では主動土圧、受働土圧、水圧が水平力として壁体に作用し、仮想地盤面から下では地盤のばね反力が生じるものとした（図3）。

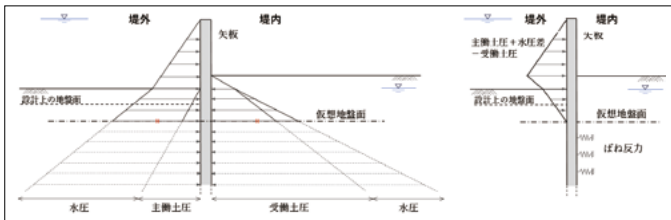


図3 矢板壁に作用する水平力と仮想地盤面の模式図

基礎地盤を含む全体の安定性については、コンクリート擁壁式特殊堤が直接基礎の場合は全体に対する安定性を、杭基礎の場合は側方移動に対する安定性を照査するものとした。

自立式矢板特殊堤は、矢板壁下端より下側の基礎地盤に軟弱な土層が存在する場合に、すべり破壊に対する安定性を照査する。なお、洪水時における機能（耐浸透）としてのパイピングに対する安全性については、被災事例の調査に鑑み、レインの式で照査を行うことで安全性を満足するとみなすものとした。

また、洪水時における機能（耐侵食）は、洗掘に対する安全性が挙げられるが、これは自立型の設置高さを計画河床高に応じて設定することや、矢板の安定性が確保される程度の根入れが行われていれば安全性を満足するとみなすものとした。また、本体の摩耗に対する安全性については、コンクリート擁壁式特殊堤の場合には必要に応じて鉄筋のかぶりを増やすなど、表面の防護等を行うことで安全性を満足するとみなすものとした。

地震時の自立型の安全性能の照査については、「耐震性能照査指針（Ⅲ、自立式構造の特殊堤編）」に従うものとした。

5 おわりに

本研究の成果をまとめると以下の通りである。

○「粘り強い河川堤防」の技術開発のうち、特に設計法が確立されていなかった自立型の「堤防に求められる基本的な機能」と「設計に反映すべき事項、考慮すべき事項」の設計における考え方を整理した。

○設計の対象とする河川の状況、作用・荷重について整理した。このうち、水圧の設定については、風浪やうねりによる一時的（瞬間的）な水位上昇や、堤内地の浸水についても考慮し、照査項目に応じた河川水位と堤内水位を設定することを提案した。

また、今後の課題としては以下の通りである。

○整理を行った自立型の設計法のマニュアル化と、現場における適用性の確認。

○自立型に用いるコンクリートや鋼材等の耐久性や、維持管理も考慮した信頼性の確保と、それらを踏まえた経済性の確認。

JICE では、これらの検討成果を踏まえ、構造令をはじめとする法令や基準、マニュアル類の整備を通じた施策提言を行うていくために、今後も学識者、行政関係者をメンバーとする研究会で継続的な検討を行い、「粘り強い河川堤防」の設計法の検討を進める所存である。

参考文献

- 1) 国土交通省社会資本整備審議会：「気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について」
https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouikikai/kikouhendou_suigai/pdf/03_honbun.pdf
- 2) 国土交通省 水管理・国土保全局：流域治水の基本的な考え方 https://www.mlit.go.jp/river/kasen/suisin/pdf/01_kangaekata.pdf
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局：河川堤防の強化に関する技術検討会 第1回（令和4年5月20日）資料2
https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/teibou-kentoukai/dai01kai/pdf/kentou.pdf
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室、国立研究開発法人土木研究所 地質・地盤研究グループ（土質・振動）：粘り強い河川堤防の構造検討に係る技術資料（案）、令和4年12月
<https://www.nilim.go.jp/lab/fbg/download/gijutsusiryo.pdf>
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室、国立研究開発法人土木研究所 地質・地盤研究グループ（土質・振動）：粘り強い河川堤防の技術開発に当たっての参考資料（自立型）、令和4年12月
https://www.nilim.go.jp/lab/fbg/download/sanko_jiritsu.pdf
- 6) 国土交通省：河川砂防技術基準（設計編）、令和元年7月
- 7) 財団法人国土技術研究センター編集：鋼矢板二重式仮締切設計マニュアル、山海堂、平成13年5月
<https://www.jice.or.jp/cms/kokudo/pdf/tech/material/gouyaban.pdf>

謝辞

検討にあたっては、国土交通省 水管理・国土保全局 治水課、国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室、土木研究所 つくば中央研究所 地質・地盤研究グループ、堤防研究会の委員等から協力を得た。ここに感謝の意を表する。