

河川の機能評価による脆弱箇所の抽出と 維持管理目標の設定に関する検討

STUDY ON THE METHOD OF EVALUATING VULNERABILITY AND CONFIGRATING FUNCTIONAL OBJECTIVES FOR RIVER MAINTENANCE

安原 達¹・関 克己²・小澤 淳真³・新清 晃⁴・高松 宏行⁵

Tatsushi YASUHARA, Katsumi SEKI, Atsumasa OZAWA, Akira SHINSEI and Hiroyuki TAKAMATSU

¹正会員 国土交通省 総合政策局 公共事業企画調整課 (〒100-8918 東京都千代田区霞ヶ関2-1-3)

²正会員 (公財)河川財団 (〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町11-9)

³(公財)河川財団 河川総合研究所 (〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町11-9)

⁴正会員 応用地質 (株) エンジニアリング本部 (〒331-0812 さいたま市北区宮原町1-66-2)

⁵正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 国土保全事業本部 (〒101-8462 千代田区神田錦町3-22)

For responding to urgent river flood and levee disaster, it is essential for river administrator to comprehend the vulnerable place beforehand. We study the practicable method to extract that for overtopping, piping, sliding by integrating ready-made methods of verification used for planning and designing. Overtopping, piping and sliding are principally caused by precipitation and water level on-site. So we describe the measure of analyzing with several scenario, and evaluating vulnerability by simulating water surface profile and the piping-and-sliding characteristic curve. In addition, we point out that these methods can configure functional objectives quantitatively.

Key Words : Maintenance, Vulnerability, Functional objectives, Overtopping, Piping, Sliding

1. はじめに

平成27年9月関東・東北豪雨の経験を機に、水防活動や避難誘導における課題が指摘されている。水防活動は水防法の改正により活動の対象が広がる中で、様々な浸水事象の全ての区間、箇所を悉皆に対応するのは高齢化等の課題を抱える水防団には困難となっている。また、大水害では広域避難が必要とされタイムライン等の施策が検討されているが、様々な被災シナリオ全てについて関係機関に計画づくりを求めるのは現実的ではない。

また、河川は、洪水によって最も脆弱な箇所が被災するものとされる。砂州の移動や樹木の繁茂等の状態が常に変化する河川の維持管理では、相対的な脆弱箇所を把握し、それによる被災シナリオを理解しておくことが重要である。しかし、河川の被災は外力との関係ではほぼ確実に決定論的に決まるものと、可能性があり確率論的に決まるものがあり、多くは可能性のある事象である(表-1)。現状では、被災の可能性のある脆弱な箇所を抽出することになるが、その脆弱な箇所の定義や抽出方法は実務において明確になっていない。

このため本論文は、対象とする外力に対して脆弱な箇所を抽出するための分析フレームを確立することを目的として、分析フレームに求められる要件やその手法について検討を行った。また、このフレームにおける外力と脆弱箇所の整理から、河川維持管理計画における目標設定にも応用できるものと考え、検討を行った。

この検討は、河川堤防の構造や河道の状態が管理区間内で一様でなく、河川の水面形は砂州、樹木繁茂による堰上げ等によって縦断的に変化していることから、これらの相対関係により脆弱な区間が縦断的に分布し、水位計算や性能照査の手法を応用することで脆弱な区間を評価できるとの考え方に基いている。また、この検討で

表-1 予測の確実性と河川管理上の対応

予測の確実性	河川管理上の対応
ほぼ確実な事象 (決定論的)	・入念な点検 ・維持修繕や改修による要因の除去や補強対策 ・被災を前提として避難誘導や応急復旧の準備
可能性のある事象 (確率論的)	・網羅的な点検 ・重点的な洪水時状態監視により被災予兆の早期発見と水防活動による被災防止

は、河川の維持管理目標となる外力を定量的に設定することを目的としているため、河川の計画や設計、水防における外力の設定方法や解析手法の考え方と整合を図り、これらの解析手法を応用してフレームを構成することとした。よって、河川の維持管理において確保すべき河道流下断面、耐浸透、耐侵食、耐震機能^りのうち、このようなアプローチによって脆弱な区間の抽出や維持管理目標の設定が有効と考えられる河道流下断面、耐浸透機能について検討を行った。

2. フレームの基本的な考え方

洪水による堤防の被災は、流れの場の特性値である水位や流速のほか、堤防の浸潤要因となる堤防地点における降雨との因果関係として図-1のとおり整理することができる。

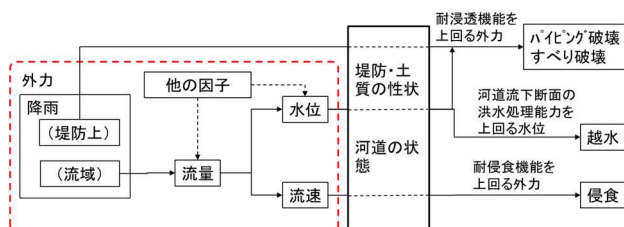


図-1 外力と被災の関係

これに対し、堤防の被災予測の困難性は、図-2のとおり堤防に対する外力と堤防の持つ耐力の評価値に対して実際の外力と耐力は不均質でばらつきがあるためでありばらつきの要因は表-2に示すものが挙げられる。

田端^ら²⁾は、パイピング・すべりを対象として、土質性状のばらつきから破壊確率を算出する手法を示している。

一方、須賀^ら³⁾や服部^ら⁴⁾は、越流破壊に対し、過去の堤防の被災事例から越流水深との関係からそれぞれ60cm、50cmを超える水深では破堤しなかった事例がないことを示している。

これらの研究は、パイピング・すべりによる堤防の被災が外力に対し確率論的な事象として扱わざるを得ず、越水による堤防の被災は越流水深に対し決定論的に扱うことができる領域があることを意味している。これらの相違は、表-1に示すように河川管理上の対応において大きな相違があるうえ、予測の確実性の高い外力条件が明らかになることは、河川管理上の新たな対応スキームが位置づけられることにもなることから、両者の相違を明らかにしておくことが重要である。

一方、堤防の設計では、外力や耐力のばらつきを構造

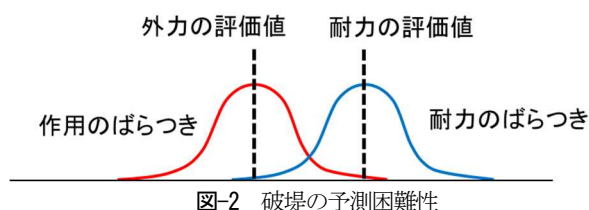


図-2 破堤の予測困難性

表-2 ばらつきの要因

	作用		耐力	
		ばらつきの要因		ばらつきの要因
越水	水位	風浪、うねり、跳水等	HWL、天端高	堤防天端の形状(凹凸等)
侵食	流速	流れの乱流構造	設計流速	法面の状況(植生等)
浸透・すべり	水位	風浪、うねり、跳水等	(すべり)安全率 (浸透)局所動水勾配	(堤防の性状)不均質、変状の存在
	雨量	不均一		

上の余裕や照査における安全率を設けることによって信頼性を確保している。つまり、構造の余裕が十分でない場合や照査の基準を満足しない場合には表-1における「可能性がある」ものと評価できる。

よって、越水については計算による予測水位と天端高-余裕高を比較することによって、パイピングやすべりについては外力による照査値と設計に用いられる照査基準を比較することによって、被災の「可能性のある」区間を抽出することになる。

このうち、パイピング・すべりの照査は計画や設計が対象とする外力を用いて行われてきたため、表-3に示すとおり、維持管理が対象とする堤防地点の雨量と水位、流速の外力の組み合わせによって照査を行うことで、脆弱区間を抽出するのが分析フレームの基本的な考え方である。また、このようなフレームによる分析を通じて得られる外力値を河川維持管理計画の定量的な目標とできると考えるものである。

本検討では、河川の維持管理では堤防に生じうる水位シナリオを適切に考慮する必要があるとの理由から、河川計画等で用いられる不等流計算法ではなく、水位の時間変化や越水に伴う水位変化を把握することのできる非定常流計算法を用いる。また、パイピングについては非定常浸透流計算（堤内地に難透水性の被覆土層がある場合には被覆土層底面に作用する揚圧力（W）の計算）を、すべりについては円弧滑り安定計算を用い⁵⁾⁶⁾。これらをまとめると図-3のとおりとなる。

ここで、堤防地点の水位と降雨量の組み合わせ（外力のシナリオ）は両者を独立なものとし、まず、越水に対する検討について、表-4に示す水位に影響を与える要因を考慮し、越水に対する脆弱箇所の範囲（最初に出現する、最大の範囲）の感度分析を行う。

続いて、パイピング・すべりに対する検討については、それらの照査において洪水時のピーク水位と雨量の

表-3 設計と維持管理における照査の相違

設計	入力 水位 雨量 設計上の 外力を規定 出力 堤防 OUT SAFE 構造諸元の 確定
維持管理	入力 ①水位、雨量 ②水位、雨量 ③水位、雨量 想定すべき外力 出力 堤防 ① ② ③ 河川管理上の対応

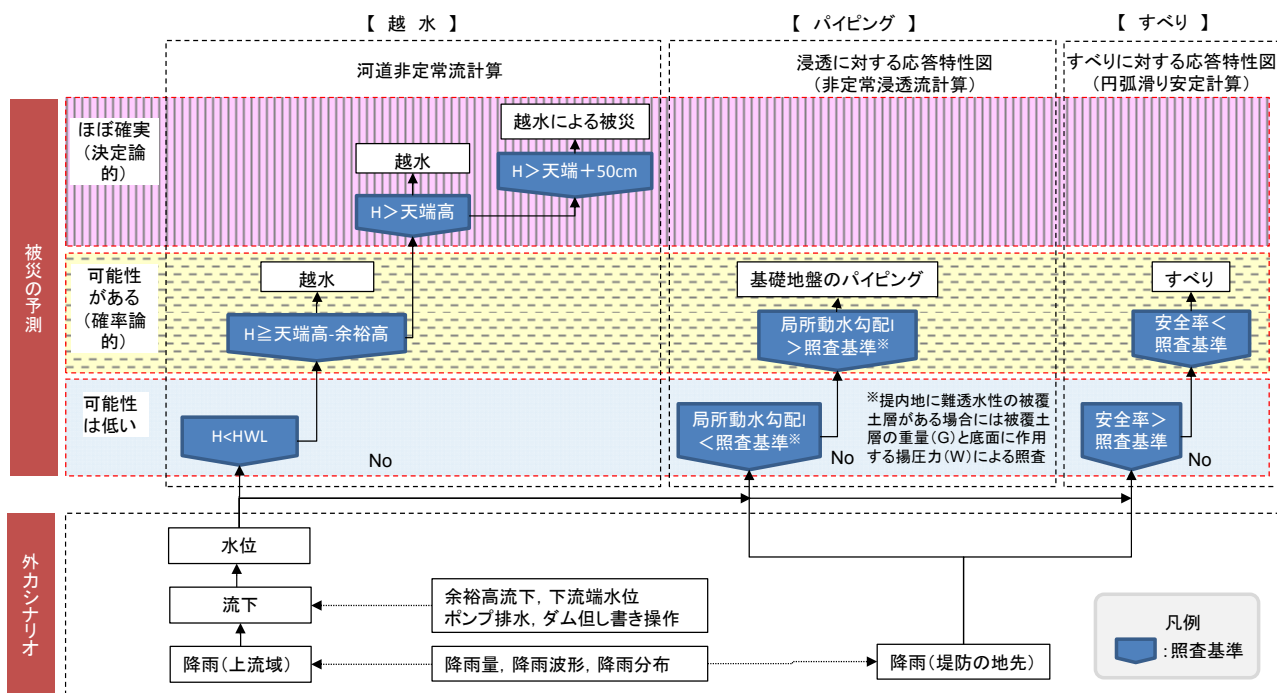


図-3 外力シナリオに基づく脆弱個所の分析フレーム

組み合わせについてのトライアル計算により作成される
応答特性図を用いて評価する。

表-4 水位に影響を与える要因

- ・降雨量・波形 (洪水継続時間, 洪水到達時間)
- ・降雨分布 (本・支川流入量)
- ・ダム操作
- ・排水機による排水
- ・分派堰における分派量
- ・潮位や本川水位等の下流端条件
- ・上流における余裕高による流下 (越水しても破堤しない)
- ・上流における水防活動 (土のう積み等)

3. 脆弱区間抽出のケースステディ

モデル河川を対象において、このフレームに基づき分析を行った。モデル河川は直轄河川管理区間が約40kmの河川で、上流区間は河床勾配1/140程度のセグメント1の谷底部、下流区間は平野の河床勾配1/2000程度のセグメント2-2の区間であり、計画高水流量は最下流部で約5,000m³/sである。また、検討に用いたハイドログラフは、過去の実績洪水のピーク流量引き伸ばしによって得たものである。

(1) 越水についての感度分析

本河川は表-4における支川からの流入やポンプ排水による水位への影響は支配的でなく、上流端からの流量による水位への影響が支配的であり、その結果を述べる。河道非定常流計算による最高水位の縦断形状を示したのが図-4である。中流部は天端高やHWLに対して比較的水位が低く、下流部に至って水位が上昇して流下しており、13k地点が水面形の凸部を形成するネック地点となっている。これは、13kの上流付近で支川が合流しており、付近に河道内樹木が存在することが理由である。続いて、流量規模の変化によって水位の照査基準である天端高-余裕高、天端高、天端+50cmを超える距離標箇所を図-5に示す。ここで13kのネック地点は本河川の基準地点の流量の規模によっても変わらず、3,500m³/sあたりから天端高-余裕高相当水位に到達する箇所が生じ、5,300m³/sを超えると13k付近で越流する区間が発生し、6,000m³/sに至ると13k付近における越流水深は50cmを越え、被災がほぼ確実と判定される区間が発生する。

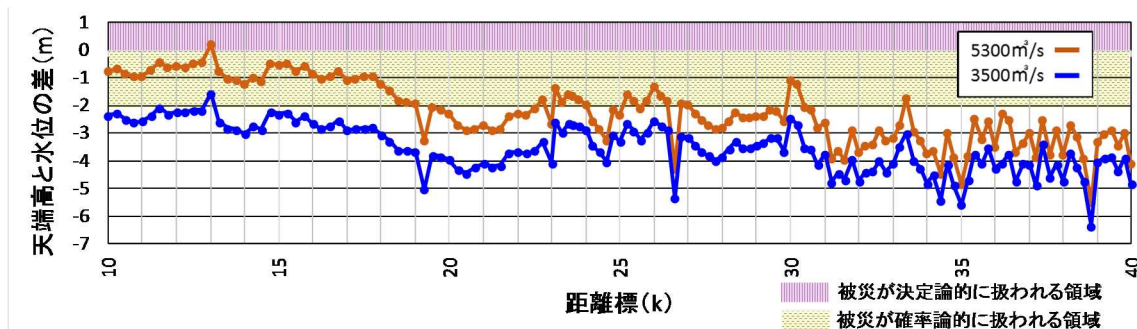


図-4 基準地点における流量規模と水面形の関係

これらにおいて河川管理上の対応が変化することから、基準地点の流量の3,500m³/sと5,300m³/s、6,000m³/sを水位シナリオとすることができる。

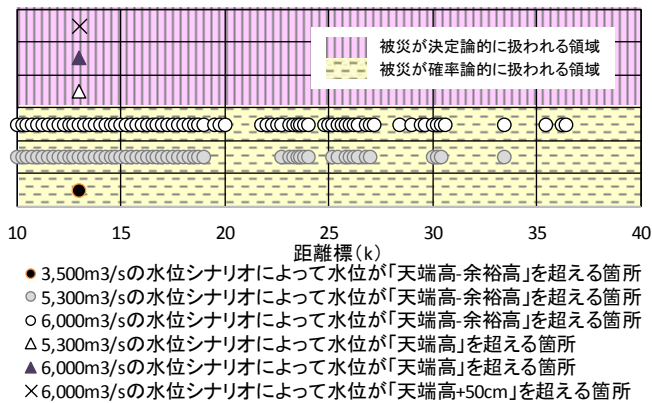


図-5 シナリオ毎の水位超過箇所

(2) 水位と雨量によるパイピング・すべりの応答特性

パイピング・すべりについては、下流部と中流部、上流部の表-5に示す3地点を対象断面として検討を行った。(1)で選定した水位シナリオによって得られた堤防地点のハイドログラフを用い、図-6のとおり水位がピークに到達するまでの洪水時間降雨量を雨量強度10mm/hによる洪水時間時間を変化させて与え、非定常浸透流計算及び円弧滑り安定計算を行う。洪水時間降雨量とピーク水位の組み合わせによってパイピング、すべりの応答が異なることから、図-7のとおり、検討断面、照査項目毎に洪水時間降雨量とピーク水位の組み合わせに対し、左のグラフは照査値を、右のグラフは照査基準を満

表-5 対象断面の堤防断面諸元

断面	土質		透水係数 ²⁾ k(m/s)
	堤体	基礎地盤 ¹⁾	
L14.25k	砂質土	砂質土	4×10^{-5}
L22.25k	砂質土	粘性土	9×10^{-6}
R37.20k	礫質土	礫質土	1×10^{-4}

1) 堤体直下の土質を指す 2) 堤体の透水係数を指す

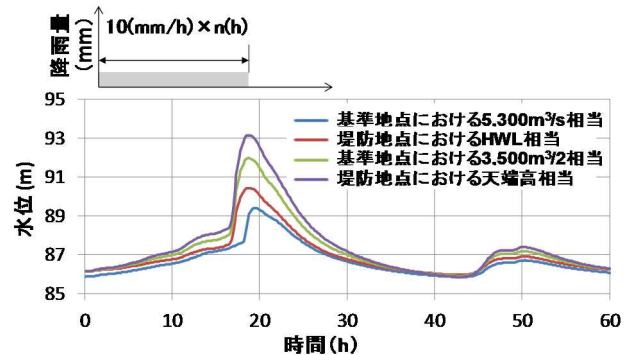
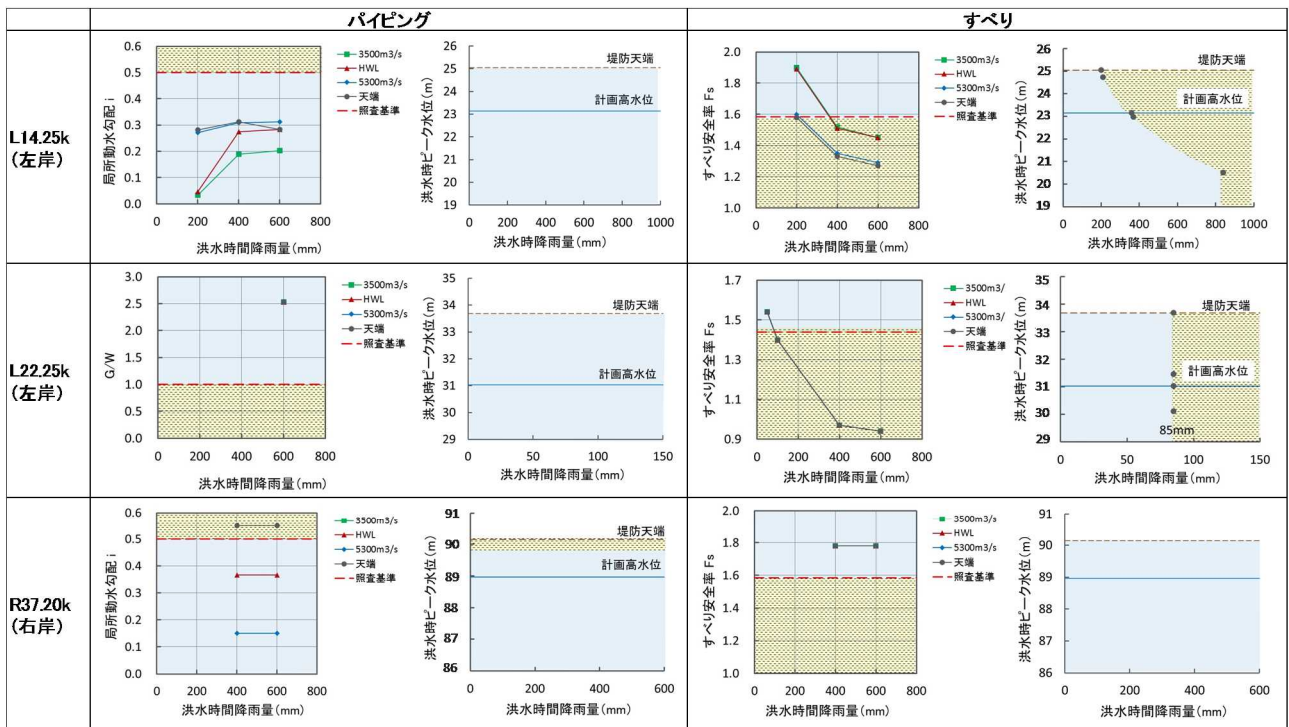


図-6 感度分析に用いたハイドロ・ハイトグラフ

足する組み合わせ領域を示している。これらの応答特性は以下の通りである。

a) L14.25k

堤体材料が砂質土層であり透水係数が砂質土として一般的な 1×10^{-5} m/secオーダーを有している断面である。すべりに関しては、水位と降雨量の間に逆比例関係にあり、1mの水位変化によって降雨量による耐性が約100mm程度も異なる特性を持つ。また、840mmを超えると河川の水位に関わりなく照査基準を下回る。パイピングに関しては降雨量が200～400mmの場合は降雨の増大と共に局所動水勾配は増加するものの、400mm以上では局所動水勾配はほとんど変化せず、最終的には照査



被災が確率論的に扱われる領域 被災の可能性が低いと扱われる領域

図-7 パイピング・すべりの検討対象断面における水位と降雨量の組み合わせによる応答特性

基準を満足する。よって、浸透した降雨が排水され易い特性を持っている。

b) L22.25k

堤体材料は砂質土であるが、透水係数は $1 \times 10^{-6} \text{m/sec}$ オーダーでやや小さい。すべりに関しては、外水位に関係なく降雨が多いほど安全率が低下する。パイピングに関しては、堤内地に被覆土層が分布するためG/Wによる評価となるが、降雨量が600mmでもG/W=2.5程度が得られ照査基準を満足する。

c) R37.20k

堤体材料の透水係数が $1 \times 10^{-4} \text{m/sec}$ オーダーと極めて高い透水性を有している断面である。

すべりに関しては、外水位および降雨に関係なく安定する。これは堤体材料が礫質土層でありせん断抵抗が大きいこと、堤防形状の影響で堤体内の水位が変化する法尻部での安全率より、小段より上部の堤体内の水位に関与しない部分の安全率が低く求まることが影響している（図-8）。なお、すべりに対する安全性の照査では堤体内の水位以下の部分を含む円弧で評価することが一般的であるが、維持管理では堤防断面内で最も安全率が低くなる状態を把握する必要があるため、堤防断面すべての安全率を評価した。パイピングに関しては、降雨に関係なく水位のみによって局所動水勾配が変化し、水位がHWLを超え天端に至ると照査基準を満足しなくなる。

これらの結果から、堤防の形状や土質、基礎地盤の土質性状によって堤防地点の洪水時のピーク水位と洪水時

間降雨量に対して応答が全く異なることが理解でき、堤防の性状と水位、降雨量を対比して捉えることの重要性が示唆される。

また、堤防地点の洪水時のピーク水位と洪水時間降雨量の組み合わせ次第ではL14.25kとL22.25kはすべり、R47.3kはパイピングによって被災の可能性のある状態となり、その状態はL14.25kのすべりに対しては水位と洪水時間降雨量、L22.25kのすべりに対しては洪水時間降雨量、L37.2kのパイピングに対しては水位に依存する結果となっている。つまり、堤防のパイピング・すべりに対して脆弱な区間を抽出する際には、洪水時ピーク水位と洪水時間降雨量を指標にできることを示している。

よって、堤防断面毎にこの応答特性図を作成しておき、河川全体の感度分析から得られる水位シナリオに基づく堤防地点の水位に加え、堤防地点の洪水時間降雨量を与えることでパイピング・すべりに対して被災の可能性のある箇所を抽出できる。

このような考え方にに基づき、分析の結果をシナリオ別、断面別にまとめたのが図-9である。ここで、堤防地点の雨量は、同川付近のアメダスデータを用いて流量の年超過確率とあわせて設定している。

この整理から、堤防の断面毎の越水、パイピング、すべりによる被災の可能性のある脆弱な区間を、流量とそれに堤防地点の基づく水位、洪水時間降雨量による外力シナリオのもので地点別に読み取ることができる。

また、河道非定常流計算結果は時間別に脆弱な区間を整理することができるため、例えば図-10に示すように越水に対する脆弱区間の時間的な推移をダイアグラム形式でまとめ、パイピング・すべりによる脆弱な区間を重ね合わせて整理することができる。このような表現はタイムラインの検討等の事象を時間的に把握するための基礎資料になると考える。

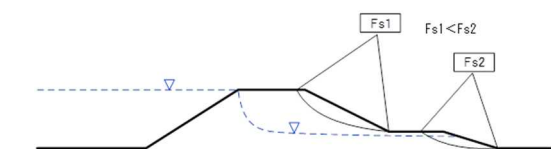


図-8 R37.20kの説明図

		L13	L14.25	L22.25	R37.20
	HWL	22.24	23.14	31.03	88.96
	天端高	23.99	25.75	33.74	91.14
シナリオ① 3,500m ³ /s (基準地点) (概ね50年に1度) 堤防地点の降雨量: 10mm/h × 20h → 200mm	水位	22.43	22.97	30.11	86.41
	〔越水〕	HWL程度による流下となり、越水または越水に伴う被災のおそれ	※越水のおそれは低い	※越水のおそれは低い	※越水のおそれは低い
(概ね50年に1度) 堤防地点の降雨量: 10mm/h × 20h → 200mm	〔すべり・浸透〕		※すべりや浸透のおそれは低い	(85mm程度) 水位に関わらず堤防法面がすべりを起こすおそれ	※すべりや浸透のおそれは低い
シナリオ② 5,300m ³ /s (基準地点) (概ね150年に1度) 堤防地点の降雨量: 10mm/h × 35h → 350mm	水位	24.22	24.72	31.46	87.43
	〔越水〕	天端満杯程度の流下となり、越水の可能性が高く、越水に伴う被災のおそれ	HWL程度による流下となり、越水または越水に伴う被災のおそれ	※越水のおそれは低い	※越水のおそれは低い
(概ね150年に1度) 堤防地点の降雨量: 10mm/h × 35h → 350mm	〔すべり・浸透〕		(360mm程度) 堤防法面がすべりを起こすおそれ	(85mm程度) 水位に関わらず堤防法面がすべりを起こすおそれ	※すべりや浸透のおそれは低い
シナリオ③ 6,000m ³ /s (基準地点) (概ね200年に1度) 堤防地点の降雨量: 10mm/h × 40h → 400mm	水位	24.53	25.13	31.93	87.83
	〔越水〕	水位は天端を50cm以上超える流下となり、堤防が被災する可能性が高い	HWL程度による流下となり、越水または越水に伴う被災のおそれ	※越水のおそれは低い	※越水のおそれは低い
(概ね200年に1度) 堤防地点の降雨量: 10mm/h × 40h → 400mm	〔すべり・浸透〕		(360mm程度) 堤防法面がすべりを起こすおそれ	(85mm程度) 水位に関わらず堤防法面がすべりを起こすおそれ	※すべりや浸透のおそれは低い
特記事項					h=89.8mに到達するとパイピングの恐れ

図-9 外力シナリオ別の脆弱な区間の評価結果

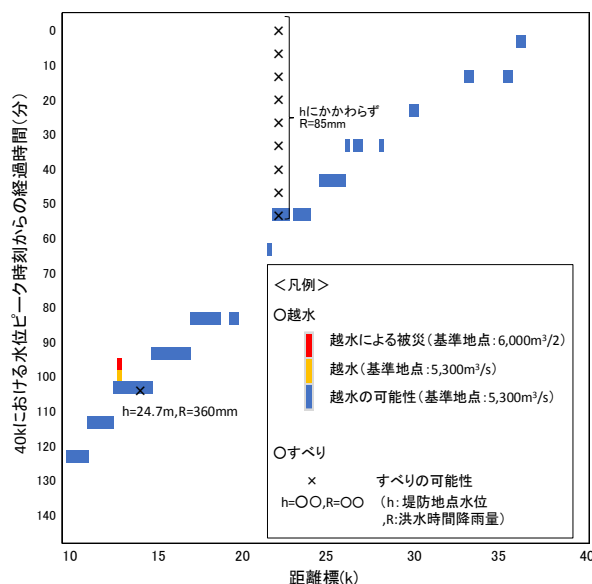


図-10 脆弱な区間の時間推移

4. 維持管理目標の設定

河川砂防技術基準 維持管理編（河川編）では、河川維持管理計画における維持管理目標を「河道及び河川管理施設を維持管理すべき水準」と定義し、河道については河道流下断面に係る目標設定を、堤防については施設の機能維持に係る目標設定をすることとされている。

このような目標設定を定量的に行うためには、河道については断面積や流下能力を目標として考えることができるが、パイピング・すべりについては、設計外力による詳細点検結果を拠り所にするしかなく、ここで検討した応答特性図を用いれば、破壊の可能性を与える外力を得ることができ、ピーク水位と洪水時間降雨量を用いて定量的に設定できる。その際、図-11のように応答特性図において、設計における水位の基準である計画高水位以下の照査基準を満足する領域を維持管理すべき水準とすることが考えられる。

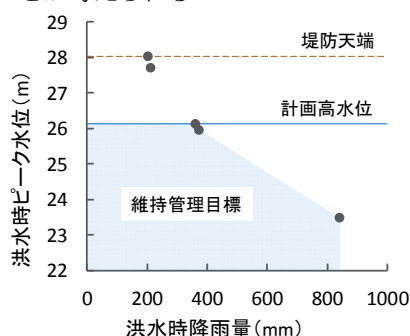


図-11 L14. 25kにおけるすべりに対する維持管理目標

また、河川全体のシナリオに沿って設定する場合には、図-9における水位計算においてHWLを超える箇所が発生するシナリオ①に相当する $3,500\text{m}^3/\text{s}$ を河道流下断面に係る目標として捉え、その水面形に基づく堤防地点の水位に対応して照査基準を満足する洪水時間降雨量を堤防地点毎に目標値として設定することも考えられる。

いずれにせよ、堤防の機能維持に係る目標は、前述のとおり堤防の形状や土質、基礎地盤の土質性状が断面毎に大きく異なることが考えられ、管理区間全体で一つの目標値を定量的に設定するのは難しいと考えられる。

5. まとめ

本検討で得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 堤防の脆弱さを予測の確実性によって「ほぼ確実」と「可能性のある」に区分することの河川管理上の意義を整理するとともに、これらにおける水位計算や照査の位置づけを整理した。
- 2) 洪水時のピーク水位と洪水時間降雨量による応答特性図を作成することによって、両者の変化や組み合わせによる感度を把握できることを示した。
- 3) 越水の感度分析とパイピング・すべりの応答特性図から堤防に生じる主要な外力シナリオを設定し、脆弱な箇所とその維持管理上の対応についての分析フレームの考え方を示した。
- 4) 河川維持管理計画における維持管理目標を定量的に設定する手法について考察を行った。

河川管理の特性は、決定論的に扱われる事象は限られており、大半は可能性があるという確率論的な事象であることにある。このため、本稿では、河川管理の高度化・効率化を目標に、外力と耐力（被災）の考え方の基に、越水についての感度分析等により、確率的に発生する事象を、より決定論的に扱うための検討を行い、維持管理目標を定量的に設定する手法に関し考察を行った。このような考え方に基づく議論や研究は限られており、今後さらに対象や分析の考え方を広げ、新たな管理のスキームを構築していく必要がある。

謝辞：本検討の機会とケースステディのデータを提供していただいた国土交通本省、地方整備局並びに河川事務所の皆様に厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 国土交通省 河川砂防技術基準 維持管理編（河川編）
- 2) 田端幸輔・福岡捷二・瀬崎智之：超過洪水時における堤防破堤確率評価手法に関する研究 土木学会論文集B1（水工学）Vol.71, No.4, I_1273-I_1278, 2015
- 3) 須賀堯三・石川忠晴・葛西敏彦：流水による堤防の破壊特性 その3 第25回水理講演会論文集 1981年2月
- 4) 服部泰士・二瓶泰雄・大槻順朗・八木澤順治：実測データベースに基づく河川堤防の越流決壊・破損条件の検討 土木学会論文集B1（水工学）Vol.71, No.4, I_1285-I_1290, 2015
- 5) 河川堤防設計指針 国土交通省河川局治水課
- 6) 財団法人 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) JICE資料第111002号 平成24年2月

(2016. 4. 4受付)