

河床洗掘に対する河川堤防の 安全性評価手法に関する研究

EVALUATION METHOD FOR BED-SCOUR RESISTANCE OF REVTMENTS ON RIVER LEVEES

武内慶了¹・福島雅紀²・山下武宣³

Yoshinori TAKEUCHI, Masaki FUKUSHIMA and Takenori YAMASHITA

¹正会員 工修 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 研究官
(〒305-0804 つくば市旭1)

²正会員 博(工) (独)土木研究所河川・ダム水理チーム 主任研究員 (〒305-8516 つくば市南原1-6)

³正会員 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 室長 (〒305-0804 つくば市旭1)

Mostly, levee with revetment fails caused by bed scour. It is fundamental to conduct an efficient-and-effective maintenance for countermeasure. In this study, we implemented a probabilistic assessment of scour, and proposed new-resistant criteria, produced by data sets from actual river instead of experiments. We applied and evaluated the criteria to a damaged river..

Key Words : bed scour, revetment, river levees, stochastic evaluation, river maintenance

1. はじめに

我が国の直轄河川において、堤防の整備が進み、現在では堤防必要延長の約60%が計画断面堤防として機能している。このように量的な整備が進められる中で、質的強化対策を実施する必要性が指摘され、地震、浸透、侵食に対して河川堤防が持つ耐力を評価するための各種詳細点検が実施されてきた¹⁾。地震に対する堤防の安全性評価については、平成7年1月に発生した阪神・淡路大震災を契機として、点検や補修を行うなどの対策が講じられてきている。浸透については平成18年3月現在、対象区間の約58%において点検が終了している。しかしながら、侵食に対する詳細点検については、現時点で20河川程度での試行にとどまっているのが現状である¹⁾。

侵食に対する堤防の安全性については、いくつかの報告がこれまでになされてきている。堤防の被災形態としては、大きく分けて①河床洗掘による被災、②すりつけ部からの被災、③法覆工の流出による被災、④天端工及び天端保護工の流出、⑤背面土砂の吸出し、などが代表的である²⁾。被災事例の分析に関しては、以下のような報告がなされている。川越・山本・諏訪³⁾は、平成元年度に発生した一級河川河道内災害に関する資料を用い、河岸侵食を除き、低水護岸や根固め工の被災が全体の約76%を占めることを示した。高橋・中山・佐古³⁾は、平

成10年災害における護岸被災の分析を行い、被災形態別では河床洗掘が全体の61%を占めていることを示した。さらに、被災箇所と被災形態の両者が明らかなものについて調べた結果、低水護岸及び堤防護岸の被災のうち河床洗掘によるものはそれぞれ85%、73%を占めることを示した。

このような背景から、河床洗掘に関し、非常に多くの現象解明論的研究や堤防の安全性を保つための対策的研究がなされてきた。例えば、須賀⁴⁾は、湾曲水路における河床のせん断力分布に関する資料をもとに、実河川の湾曲部の洗掘について考察を行い、二次流の成長による河床せん断力の増加と湾曲部の洗掘深の傾向が一致することを示し、洗掘深と幾何的形狀である曲率半径・川幅比の間に密接な関係があることを示した。池田⁵⁾は、湾曲部における動的平衡横断河床形狀を表す式を理論的に導き、実験値と比較することにより、湾曲部外岸側で発生する最大洗掘深が定量的に把握できることを示した。直線河道における河床洗掘に関しては、砂州の移動が活発な場において、砂州波高・平均水深比と川幅・平均水深比の関係を整理し、砂州波高と平均水深から最深河床高を算出する方法が提案されている⁶⁾。石井・板倉・黒木¹⁰⁾は、実験により護岸前面に発生する水衝部の局所流とその洗掘過程を観測し、局所洗掘孔の最大洗掘深と形狀の測定を行い、護岸勾配効果を定量化した。中谷・福

岡・西村・大東¹¹⁾は実験により、粗度が急変する護岸下流部において、水面が急勾配になることにより流速が増加し洗掘が生じることを明らかにし、数値計算によってその現象が説明できることを示した。福岡・小俣・加村・平生・岡田¹²⁾は複断面蛇行河道において、相対水深0.30を閾値として河床横断形状が異なり、それより小さな水深では単断面的蛇行流れが、大きな水深では複断面的蛇行流れが現れることを示すとともに、河床の最大洗掘深は低水路満杯流量規模で外岸側に生じることを示した。内田・福岡・福島¹³⁾は、実験結果から河床洗掘に伴う根固め工の変形・沈下量の算定法を提案した。また、数値計算による再現を試み、定量的には課題を残すものの、根固め工沈下の進行過程や沈下状況の特徴を説明できることを示した。ここでは、多くの研究成果のうち、数例の知見を挙げたが、個々の河床洗掘現象に特化したものが多く、河道全体を包括的に捉えた研究成果は少ないようである。

平成18年7月に「安全・安心が持続可能な河川管理のあり方について(提言)²⁾」が出された。この提言によれば、限られた予算と人員・体制のもとで河川管理水準の向上を図る必要がある。①河道や施設の状態点検及び対策実施、②維持管理目標の明確化、③維持管理内容の明確化、④維持管理基準の整備、⑤見つける(診る)技術の開発、⑥維持管理技術の高度化など、効果的・効率的な維持管理の実施が緊急の課題である。このことから、現在試行段階に留まっている河川堤防の侵食に対する詳細点検を全国的に実施し、河道全体を包括的に捉えた効果的・効率的な維持管理の実施に向け、その成果を積極的に活用することが重要である。そこで著者らは、護岸被災の代表的要因である河床洗掘現象を対象とし、まず現行の点検手法の問題・課題について調べた。次に河床洗掘量について確率的評価を行い、河床洗掘に対する堤防の耐力評価手法を提案した。さらに、被災を受けた実河川を対象として、その適用性を確認した。

2. 既往の評価手法の適用性と課題

侵食に対する河川堤防の点検手法について、既往の手法⁴⁾の概要を図-1に示す。まず、対象とする区間全てにおいて、概略点検を実施し、詳細に点検が必要となる区間を抽出する。得られた区間を細分化し、護岸工種ごとに代表断面を設定する。次に堤防に対する外力を算出する。外力には2種類あり、1つは工種近傍に発生する代表流速 V_0 である。また、出水に伴い河床が変動するが、最深河床高 Z_0 も外力の1つとして設定する。設定された外力と各工種が持つ耐力との大小関係により、対策実施を判断するものである。本研究で対象とする河床洗掘現象に限れば、推定される最深河床高が基礎高より低い値を取れば、対策が必要と判断される。ここで、外力の1つである推定最深河床高の設定方法について考察を加える。

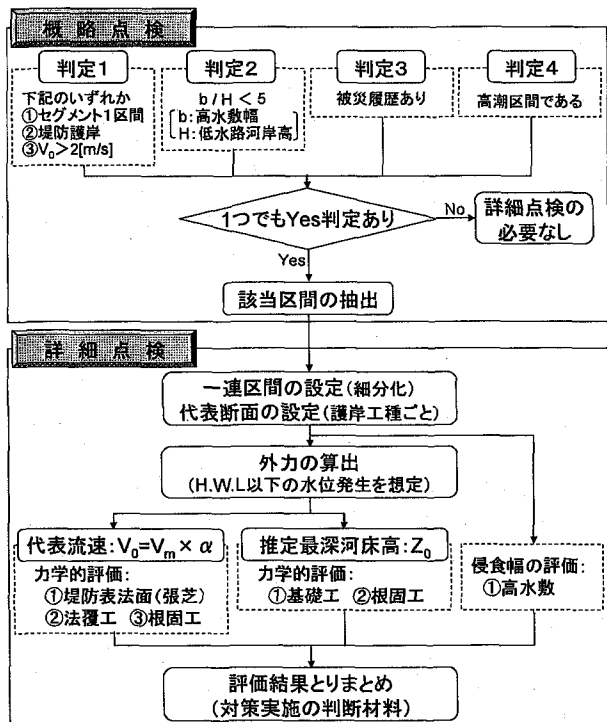


図-1 侵食に対する河川堤防の詳細点検概略フロー(現行)

既往の手法^{4,5)}によれば、①経年的な河床変動データからの評価、②既往研究成果からの評価、③数値計算による評価、④移動床水理模型実験による評価などから推定最深河床高を設定することとしている。また、①の方法は、過去の被災状況や河床材料及び岩の露出状況といった河床変動要因を把握するのに有効であるが、計画規模相当の洪水を経験していない場合や洪水後の埋め戻し現象によって、必ずしも洪水時の最深河床高を把握できていないこともあるため、②の方法による評価と合わせて最深河床高を評価することが望ましいとされている。③の方法については近年、数値計算技術が大幅に向上してきているものの、更なる精度向上に向けた研究が数多くなされており、また④の方法については、流れと河床変動の相似律が必ずしも一致せず、洗掘量といった定量的評価には課題を有する。これらのことから、本研究では②の方法について取り上げることとする。

河床洗掘による護岸の被災を対象とし、一例として実際に詳細点検を実施した河川(以下「A川」と呼ぶ)における成果とその適合性を確認した。図-2に既往の手法によって得られた点検成果を、図-3に平成18年7月に発生した大規模出水(1/50確率相当)において、河床洗掘により護岸が被災した箇所の既往点検結果を内訳で示している。図-2に示すとおり、A川では、既往の手法により、左右岸合わせて106.6kmにわたり詳細点検を実施した。結果、基礎工が非安全と判定される区間は全体の52.9%であった。一方、平成18年7月出水において、河床洗掘に伴い5箇所の護岸基礎部が被災した。既に実施された詳細点検結果では、被災箇所のうち80%において基

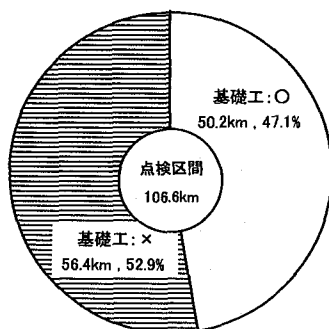


図-2 既往の手法による護岸基礎工の安全性照査結果

A川における、河床洗掘に対する護岸基礎工の安全性照査結果のみを記述している。総延長の52.9%の区間において、基礎工が非安全と判断される結果となった。

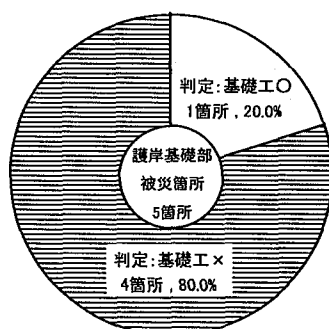


図-3 護岸基礎部の被災箇所における既往点検結果の内訳

被災箇所のうち80%において、基礎工が非安全と判定されている。図-2において多くの区間で対策が必要と判断されていることを踏まえ、現状の堤防等河川構造物への対策実施優先度を把握するための基礎資料として、その有効性が十分に確保されるとは限らない。

礎工が非安全と判定されていた(図-3)。既往の手法では、一般的に計画高水位相当の水位発生時の外力を用いて堤防の耐力を評価している。これは、計画上最も危険側の現象を対象としており、各工種を設計する際には優れた方法であるが、計画の達成に向け、段階的な改修を進めている河川が数多く存在する現状を踏まえれば、1つの河川において、非常に多くの区間で対策が必要と判断される可能性がある。このような場合、効果的・効率的な維持管理の観点から、現状の堤防等河川構造物への対策実施優先度を把握するための基礎資料として、その有効性が十分に確保されるとは限らない。

3. 新たな手法の提案とその概念

これまでに述べたように、効果的・効率的な維持管理の観点から、現状の堤防等河川構造物への対策実施優先度を把握するための基礎資料を整備していくことは重要である。ここで、確率年を用い、最深河床高を評価する新たな方法(以下「本手法」と呼ぶ)を考え、その概念

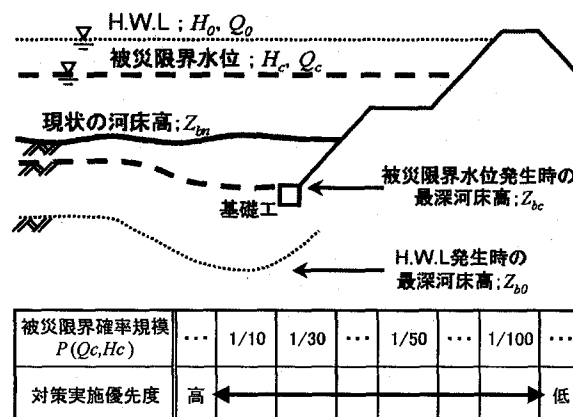


図-4 新たな手法の概念

従来の方法は、計画高水位(H.W.L.)相当の水位発生時の推定最深河床高と、基礎工天端高の大小関係を比較するものであった。これに対し本手法では、被災が生じる最深河床高を定義し、その高さが基礎工天端高以下となる場合の水位及び流量を確率評価する。得られた確率年に基づく対策実施の優先度を設定する。

を図-4に示す。従来の方法は、計画高水位相当の水位発生時の最深河床高を推定し、基礎工に比べ低く位置する場合、基礎工への対策が必要と判断している。これに対し、本手法では、最深河床の横断方向発生位置が護岸近傍に生じる可能性を確率評価した上で、その最深河床高が基礎工天端高以下となる場合の水位及び流量を確率評価するものである。つまり、被災が生じる最深河床高を独立変数に、その河床高を生じせしめる流量発生時の水位の確率年を従属変数にとり、被災を受ける確率年をもって対策実施の優先度を段階的に設定するものである。なお、本手法では、従来と同様に河道平面形状を湾曲部と直線部に分け、従来から活用されてきた河道平面形状と砂州高の関係に関する知見を基本としていることを付け加える。

4. 湾曲部外岸側における基礎工安全性の評価

(1) 評価方法

湾曲部外岸側における最深河床高の推定には、池田による方法^{8),14)}を用いた(図-5)。図中、横軸に川幅-曲率半径比 B/r_c を、縦軸に最大水深-平均水深比 h_{max}/h_a が示されている。照査箇所の河道平面形状より横軸の値を設定し、パラメータAに応じて湾曲部外岸側に発生する最大水深 h_{max} を算出する。得られた最大水深と平均水深の関係から、推定最深河床高 $Z_{b_{deep}}$ を算出した。平均河床高を Z_{bm} とすれば、 $Z_{b_{deep}}$ は、式(1)で表される。

$$Z_{b_{deep}} = Z_{bm} + h_a - h_{max} \quad (1)$$

本研究では、図-4に示したように、非安全と判定する河床高 Z_{bc} を、基礎工天端高と等しいものとして扱っており、 $Z_{b_{deep}} \leq Z_{bc}$ を与える平均水位 $Z_{bm} + h_a$ を求めた。そ

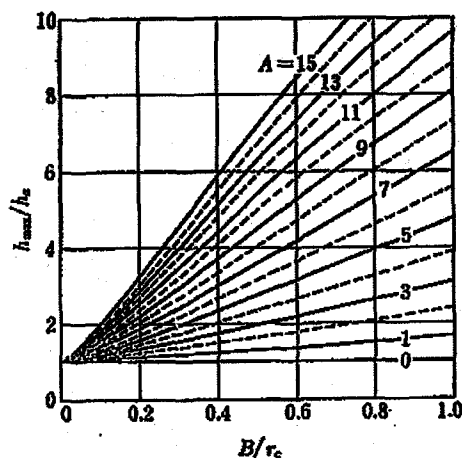


図-5 湾曲部外岸側における推定最深河床高の算出方法^{9),14)}

のときの流量 Q_c を、A川における水位-流量関係より求め、一般極値分布を用いて確率評価した。また、パラメータ A については、須賀⁷⁾により実河川における値が見積もられているが、平均値は $A=2.89$ であったが、本研究では簡単のため $A=3.0$ とした。なお、根固め工が設置されている場合は、その敷設幅から2mを除いた長さが、安息角に相当する 30° の角度で洗掘に追従するものとして扱った。

(2) 実河川における評価及び適用性

A川において護岸基礎工が存在する湾曲部外岸側を抽出し、本手法による評価を行った。対象とした湾曲部外岸側は72箇所であり、そのうち平成18年7月出水（1/50確率相当）により被災した湾曲部外岸側は2箇所であった。全照査箇所の評価結果を図-6に、被災した2箇所について、本手法による評価結果の内訳を図-7に示す。本研究で対象とした既往出水規模（1/50確率）以下において、本手法により被災すると判定されたのは24箇所であり、照査箇所全体の33%であった（図-6）。このうち、実際に被災した2箇所における評価結果は、被災確率規模 $P_c=1/2$ 、 $1/30$ であった（図-7）。これらの結果より、本手法における事前予測の段階では、注意すべき区間及び対策実施を考えるべき区間は湾曲部外岸側全体の3割程度となることがわかった。さらに、被災実績箇所は、対象とする出水以下の確率規模で被災が生じる評価となっており、実現象を定性的に捉えていることが伺える。しかしながら、効果的・効率的な維持管理のための基礎資料としては、十分な精度を有しているとは言えない。被災確率規模 $P_c \leq 1/50$ と判定された箇所のうち、実際に被災しなかった箇所の原因としては、①支川合流等により固定化した砂州が基礎工を覆うように存在している、②河道が急拡から急縮に向かいながら湾曲しているため、流れの剥離域に土砂が堆積している、③基礎工付近に洪積砂利層が存在し、河床洗掘が生じにくくなっている、などが考えられる。今後、本手法の精度向上のためには、これらを考慮した評価方法の検討が必要である。

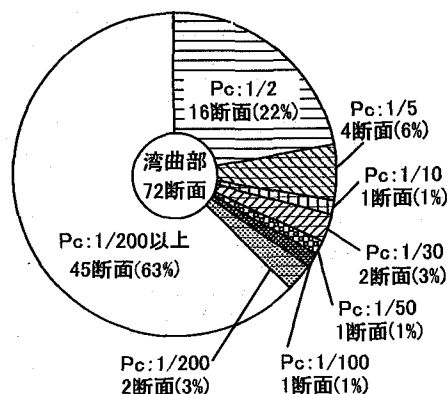


図-6 湾曲部外岸側における被災確率規模 P_c の評価結果

被災確率規模が、対象とした既往出水規模（1/50確率）以下となる箇所は全体の約33%となった。

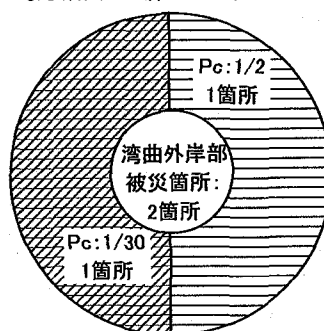


図-7 本手法で得られた湾曲部外岸側被災箇所の P_c

被災実績箇所は、対象とする出水以下の確率規模で被災が生じる評価となっており、図-6と合わせ、本手法は実現象を定性的に捉えていることが伺える。

5. 直線部(単列砂州)における基礎工安全性評価

(1) 評価方法

直線部における最深河床高の推定には、山本による方法^{9),15)}を基本とした。まず航空写真により、単列砂州及び複列砂州の発生領域を区分した。単列砂州の発生箇所については、定期横断測量成果を用い、砂州の移動が顕著であるか、あるいは固定化されているかの区別を次項に示す方法で行った。次にA川における既往出水の痕跡水位、定期横断測量成果を用いて、山本の方法に示されたパラメータである川幅-平均水深比 B/h_a 及び砂州波高-平均水深比 h_s/h_a の関係を調べた。最深河床部が河岸際に発生すると判断される箇所を抽出し、得られた関係を用いて砂州波高 h_s を算出し、式(2)、(3)に従い推定最深河床高 Zb_{deep} を求めた。

$$h_{max.s} = h_a + \alpha \cdot h_s \quad (2)$$

$$Zb_{deep} = Zb_m + h_a - h_{max.s} \quad (3)$$

ここに、 $h_{max.s}$: 最大洗掘部の水深、 α : 砂州波高と最大洗掘部の洗掘深 $\Delta Z (=h_{max.s}-h_a)$ の関係を表す係数である。 $Zb_{deep} \leq Zb_c$ を与える平均水位 Zb_m+h_a 及びそのときの流量 Q_c の確率評価方法については、湾曲部外岸側の評価と同様である。直線部における評価については、砂州の移

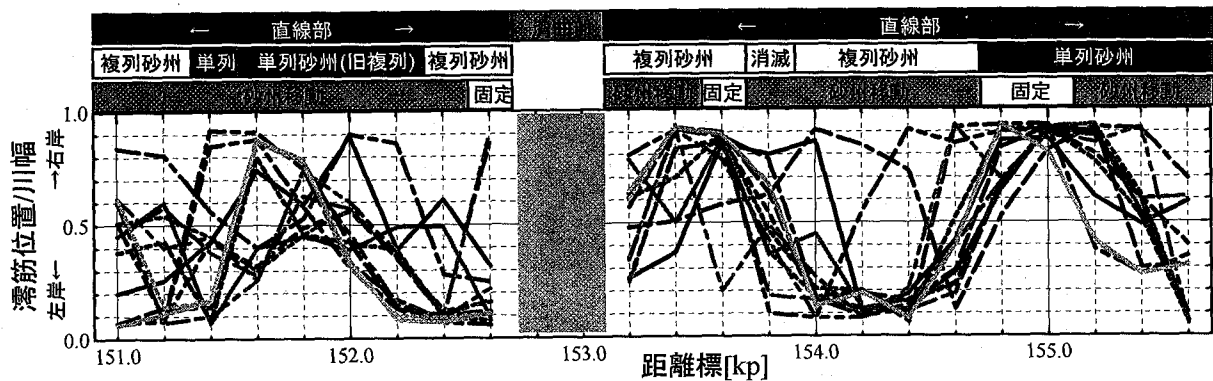


図-8 最深河床位置の変動縦断面図（一例）

長期間にわたり、最深河床発生位置がほぼ固定化されている区間と、大きく変動する区間が存在することがわかる。各断面における最深河床発生位置について、平均及び標準偏差を求めた。信頼区間（95%）に河岸際が含まれる箇所は、全調査箇所（44箇所）のうち、9箇所であった。

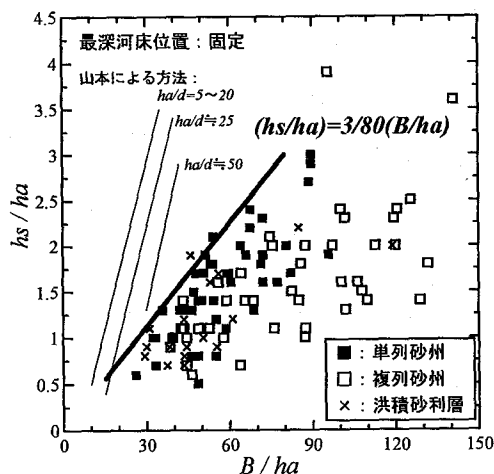


図-9 単列砂州発生領域における B/h_a と h_s/h_a の関係
(A)川、最深河床固定区間

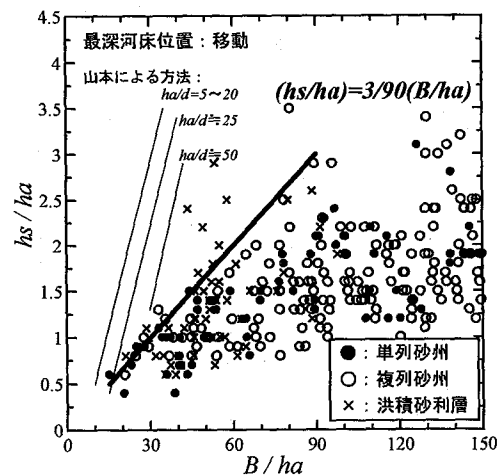


図-10 単列砂州発生領域における B/h_a と h_s/h_a の関係
(A)川、最深河床移動区間

最深河床位置の標準偏差 $\sigma=0.1$ を閾値として、その変動が顕著な箇所と固定化されている箇所に分割した。それぞれにおいて得られた h_s/h_a の最大値を包絡させるように近似線を求めた結果、その傾きは山本による方法に比べ緩やかなものになった。この理由として近年、A)川において砂州形状が経年的に変化し、 h_s/h_a が小さくなっていることが考えられる。

動状況により区分された単列砂州発生領域を対象とした。

(2) 単列砂州発生域における砂州移動特性の分類と 溝筋の横断方向移動量の評価

経年的に取得された定期横断測量データを用い、最深河床位置の変動縦断面図の一例を図-8に示す。これより、長期間にわたり、最深河床発生位置がほぼ固定化されている区間と、大きく変動する区間が存在することがわかる。河床洗掘による護岸被災現象を対象とする場合、まず最深河床が護岸近傍へ移動し得る箇所を抽出する必要がある。そこで、各箇所における最深河床発生位置について、平均値及び標準偏差を求めた。次に、左右の河岸際に信頼区間（95%）の範囲内となるか調べた。本手法で対象とした直線区間44箇所のうち、信頼区間の範囲内であったもの、つまり最深河床が河岸際に寄る可能性があるとして判断されたものは9箇所となった（図-11）。

(3) A)川における最大洗掘深評価図の作成

近年に発生した6度の大きな出水を対象とし、 B/h_a と h_s/h_a の関係を調べた。砂州波高 h_s は測量結果から算出し、平均水深 h_a は各出水の痕跡水位と測量成果から得られる平均河床高の差より求め、川幅 B は h_a 発生時の水面幅とした。最大洗掘深評価図の作成にあたり、まず、図-8から得られる最深河床位置の標準偏差 σ を求めた。 $\sigma=0.1$ を閾値とし、大小関係により最深河床位置の変動が顕著な箇所と固定化されている箇所に区別した。次に、それぞれにおける単列砂州に着目し、得られた h_s/h_a の最大値を包絡させるように近似線を求めた。なお、河床に洪積砂利層が露出している区間は、洗掘を受けにくいことが考えられるため、対象から除外した。また、 $B/h_a < 90$ となる領域は、複列砂州が十分に発達している領域と判断されるため、単列砂州発生領域から除外した。結果を図-9及び図-10に示す。この図から求められた2つのパラメータの関係を以下に示す。

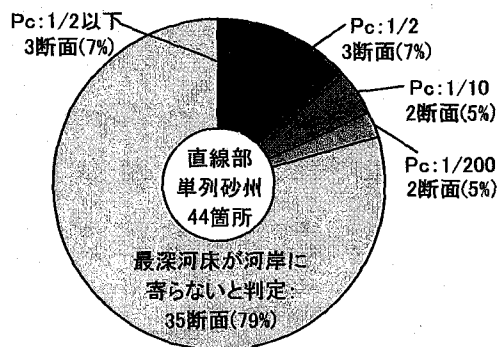


図-11 直線部(単列砂州発生箇所)における被災確率規模Pcの評価結果

$$\text{最深河床固定区間: } (h_s/h_a) = 3/80 \cdot (B/h_a) \quad (4)$$

$$\text{最深河床移動区間: } (h_s/h_a) = 3/90 \cdot (B/h_a) \quad (5)$$

山本による方法に比べ、その傾きが小さくなっていることがわかった。この理由として近年、A川において砂州形状が経年的に変化し、 h_s/h_a が小さくなってきていることが考えられる。また、式(2)中の係数 α について、移動区間では $\alpha=0.82$ 、固定区間では $\alpha=0.91$ となった。従来この値は0.8とされてきた^{9),15)}。本研究では、平均水深の大きさによって砂州波高 h_s が変化することを前提としており、平均年最大流量に対応する水深によって砂州波高が変化するものとしている従来の方法と異なる。

(4) 実河川における評価及び適用性

前述の方法により、単列砂州が存在する直線部について、被災確率を評価した。結果を図-11に示す。対象とした既往出水規模(1/50確率)以下において、本手法により被災すると判定されたのは8箇所であり、照査箇所全体の18%であった。しかしながら、単列砂州が存在する直線部において、この出水で実際に被災した箇所がなかったため、評価結果の適用性を確認できなかった。被災確率規模 $P_c \leq 1/50$ と判定された箇所のうち、実際に被災しなかった箇所の原因としては、①確率上、最深河床が河岸際に寄ると判断される箇所のうち、判定の初期河床最深部が既に基礎工天端高より低かったこと、② B/h_a が大きい箇所であり、この値に従属する形で h_s/h_a が大きくなったことなど、評価手法によるものが考えられる。このような課題を解決すべく、精度向上に向けた更なる研究は十分に必要ではあるものの、出水前に注意すべき箇所及び対策を実施すべき箇所がある程度限定されるという点で、維持管理のための基礎資料として、その有効性を期待し得る。

5. おわりに

本研究では、護岸被災の代表的要因である河床洗掘現象を対象に、その量を確率評価し、堤防の耐力評価手法を提案した。しかし、現状では1河川での適用性を確認したにすぎず、ここで得られた多くの課題の解決に加え、

複列砂州発生場における評価手法の確立も必要となる。また他の河川においても適用性を確認し、新たに得られる課題を解決することで、さらなる評価の精度向上に努める必要がある。

本手法の概念は、効果的・効率的な維持管理の観点から、堤防等河川構造物への対策実施優先度を考える際の基礎資料として有効であると考えられる。これに加え、河川構造物が持つ耐力評価の実施頻度を上げ、常に最新の情報を把握し続けることも非常に重要である。

参考文献

- 1) 山下武宣：河川堤防の詳細点検および技術の最新の動向，土木技術，第62巻3号，pp.52-56，2007。
- 2) 安全・安心が持続可能な河川管理のあり方検討委員会：安全・安心が持続可能な河川管理のあり方について(提言)，2006。
- 3) 高橋定雄・中山修・佐古俊介：護岸の力学設計法の適用性(平成10年災害を例として)，河川技術に関する論文集，第6巻，pp.45-48，2000。
- 4) (財)国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き，JICE資料，第102002号，2002。
- 5) (財)国土技術研究センター編：護岸の力学設計法，山海堂，1999。
- 6) 川越達郎・山本晃一・諏訪義雄：護岸・根固工の被災に関する事例研究，土木学会年次学術講演会，Vol.47(II)，pp.516-517，1992。
- 7) 須賀堯三：河川のわん曲部における洗掘について，土木技術資料，5-4，pp.14-22，1963。
- 8) 池田駿介：移動床河川の弯曲部における二次流と動的横断平衡河床について，土木学会論文報告集，第229号，pp.55-65，1974。
- 9) 建設省土木研究所：河道特性論，土木研究所資料，第2662号，pp.232-252，1988。
- 10) 石井千万太郎・板倉忠興・黒木幹男：河道水衝部の局所流と洗掘に及ぼす護岸こう配効果に関する実験的研究，水工学論文集，第39巻，pp.741-746，1995。
- 11) 中谷弘志・福岡捷二・西村達也・大東道郎：護岸下流の流れと河床変動，土木学会年次学術講演会，Vol.49(II)，pp.512-513，1994。
- 12) 福岡捷二・小俣篤・加村大輔・平生昭二・岡田将二：複断面蛇行河道における洪水流と河床変動，土木学会論文集，No.621/II-47，pp.11-22，1999。
- 13) 内田龍彦・福岡捷二・福島琢二：河床の洗掘による根固め工の変形特性に関する研究，河川技術論文集，第8巻，pp.237-242，2002。
- 14) (社)全国防災協会：美しい山河を守る災害復旧基本方針，pp.参考I-15，2006。
- 15) 山本晃一：沖積河川学，山海堂，pp.458-462，1994。

(2007.4.5受付)