

実河川の河岸被災の要因分析と予測

Factor Analysis and Prediction of River Bank Damage

山本莊輔* 石井千万太郎** 南部嘉孝***

By Sousuke YAMAMOTO, Chimaturo ISHII and Yositaka NANBU

Actual conditions of bank damage in some rivers of Tohoku district of the past decade were investigated. It was found that the nondimensional tractive force of flow and the ratio of high water channel width to radius of channel curvature, the ratio of low water channel width to distance of talweg from the channel bank are major factors determining the occurrence of river bank damage.

In order to make models to predict the location and type, scale of river bank damage multi-variable analysis (Quantification II) was carried out using some of these variables and a composed variables as factor variables. Among the obtained models, the model to predict location of river bank damage was highly evaluated by field data.

key words : river bank damage, factor analysis, multi-variable analysis(Quantification II), prediction model

1. まえがき

現在、護岸の施工計画を策定するには「解説・河川施設等構造令」「建設省河川砂防技術基準(案)計画編」「東北地方建設局設計施工マニュアル(案)」を用いているが、これらは抽象的な記述のみであり、具体的な計画を策定するには、実際かなりの実務経験をもった技術者の見識が必要となる。これは、洪水による河道内河岸の被災要因が単一でないためその被災メカニズムは明確になっていないのが現状であり、設計指針の作成を困難にしているとも言える。

このような現状を踏まえて低水路河岸の維持管理はもとより今後の河道計画や多自然型川づくりの推進に対処するため、簡易的に河岸の危険性が評価できる河岸被災予測モデルの構築を検討したものである。

モデル構築にあたっては過去に発生した被災状況を整理し、河岸被災を被った河川における被災状況、被災箇所の河道形状、外力等の調査を行い、それらを基に実災害から判断される被災要因を抽出し、抽出された被災要因要素を統計解析することにより被災の有無の判別式を作成したものである。

* 建設省 東北地方建設局 秋田工事事務所長

(〒010 秋田市山王一丁目10-29)

** 正会員 工博 秋田大学助教授 鉱山学部土木環境工学科

(〒010 秋田市手形学園町1番1号)

*** 正会員 (株)日本建設コンサルタント 技術1部 課長

(〒141 東京都品川区東五反田5丁目2番4号)

2. 河岸被災実態調査

東北地方12水系1級河川における直轄管理区間内で、昭和56年から平成2年までの過去10年間に生じた1,039箇所の被災実態について①被災状況（被災箇所、被災の工種、延長）・②河道特性（湾曲、河床高、河床勾配・河床材料）・③水理特性（最高水位・ピーク流量）についてアンケートによる実態調査を実施した。各工種別の被災発生箇所数は図-1に示すとおり天然河岸が約6割、低水護岸が約2割、根固めが約0.5割の順となっている。

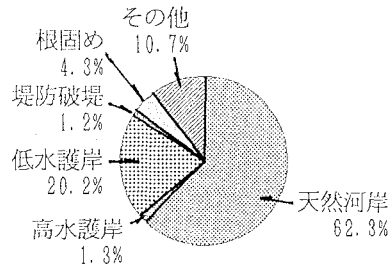


図-1 工種別被災発生箇所数

河岸被災実態調査から把握できる河岸災箇所の特徴としては、次のことがあげられる。

- ①各セグメント¹⁾の存在率と河岸被災の発生頻度は同程度である。
 - ②河岸被災箇所は湾曲部外岸に多い。
 - ③水位が高水敷以上になった場合に河岸被災が発生しやすい。
- なおセグメントは本来河床勾配、河床材料、川幅に着目し大まかに見て各項目が一定となっている区間を同一セグメントとするものであるが本検討では河床勾配のみに着目し、表-1のとおりとした。

表-1 セグメント一覧表

セグメント区分	河床勾配
セグメント1	1/400以上
セグメント2-1	1/400～1/2000
セグメント2-2	1/2000～1/4000
セグメント3	1/4000以下

3. 河岸の被災要因の分析

3-1 被災要因となり得る外力要素

被災要因となりえる外力要素と被災件数の関係について調べてみると、被災原因となり得る外力は洪水時の水理量（一次的外力）、水理量から把握される外力（二次的外力）、被災箇所付近の条件（周辺条件）があり各項目別に次のような要素があると考えられる。

- 一次的外力 流量（Q）、水位（H）、流速（v）、水位変化率(dh/dt)
- 二次的外力 掃流力（τ）、動水圧（P）
- 周辺条件 河幅（B）、勾配（I）、湾曲度（r）、粒径（d）、洗掘深（Δh）

3-2 実態から抽出される河岸被災要因

前述の外力要素に着目して、1洪水で河岸被災が多く発生している河川及び洪水（5水系で全被災箇所数152箇所）を抽出し、河床勾配、曲率半径、流速、掃流力、局所洗掘深、滞筋までの距離、上昇勾配、下降勾配、警戒水位の継続時間、中規模河床波の有無、湾曲の有無といった河岸被災特性項目について被災件数との関係を調べた。

また、被災した箇所のみでの調査だけでは、被災に与える影響外力要素が、どのようなものなのか判断しかねるものもあるので、被災箇所が多かった雄物川を対象にランダムに抽出（2Kmピッチ）し、被災しなかった箇所との対比により河岸の被災要因を調べた。

この結果から図-2、図-3が示すように①～③のことがわかる。

- ①滞筋までの距離が近くなる程河岸発生件数が増加しているので滞筋までの距離は河岸被災の要因の一つである。
- ②湾曲があると河岸被災が発生しやすいといえることから湾曲の有無は河岸被災の要因の一つといえる。
- ③その他の外力要素については、河岸の被災要因となり得る顕著な特性を示さなかった。

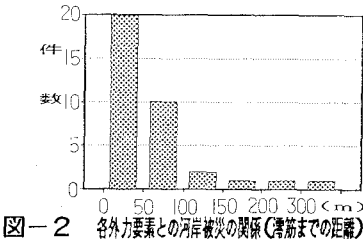


図-2 各外力要素との河岸被災の関係(滞筋までの距離)

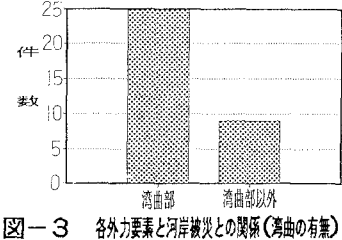


図-3 各外力要素と河岸被災との関係(湾曲の有無)

4. 被災予測モデルの作成

4. 1 被災要因の設定

前述の①～③により滞筋までの距離、湾曲の有無を河岸の被災要因とし、さらに無次元掃流力（水理的外力と場所的抵抗力との比）及び外力規模（洪水波形特性と河道形状）を被災要因の一つと仮定して再検討した。

また、湾曲の有無についてはその指標が抽象的であるので滞筋の線形から計測した曲率半径を堤間幅で除した比曲率半径と水当たり角度で表すこととした。

以上から河岸の被災要因として次の6要素を設定し、河岸被災への影響度を検討した。要素の設定にあたっては極力無次元化を行い、数値が大きくなる程河岸への危険性が高くなるようにした。

$$A: \text{無次元掃流力} \{ (g \cdot H \cdot l) / (s \cdot g \cdot d) \} \quad (1)$$

$$B: \text{外力規模} \{ (t \cdot H \cdot t_0) \times (l \cdot r / B) \} \quad (2)$$

$$C: \text{堤間幅/曲率半径} \{ B / r \} \quad (3)$$

$$D: A \times C \quad (4)$$

$$E: \text{低水路幅/滞筋距離} \{ b / L \} \quad (5)$$

$$F: E \times \sin(\text{水当たり角度}) \quad (6)$$

ただし、 g :重力加速度、 l :現況河床勾配、 s :水中比重、 d :河床材料平均粒径、 H :平均河床高からの水深、 t :洪水継続時間（水位が高水数高以上になっている時間）、 t_0 :水位が最高水位から高水数高になるまでの時間、 B :堤間幅、 b :低水路幅、 r :曲率半径、 L :対象河岸から滞筋までの距離

これらの各要素について算定を行った。

4. 2 被災要因の指標化

設定した各被災要因要素と河岸被災との関係を調べるために表-2に示した各指標でランク分けを行った。

各要素に対する各ランク指標の分割は人為的配慮が加わらないようにするため、各要素のデータ範囲を考慮し極力等間隔で設定した。

表-2 ランク別指標一覧表

ランク	A 無次元掃流力	B 外力規模	C 堤間幅/曲率半径	D 無次元掃流力×堤間幅/曲率半径	E 低水路幅/滞筋距離	F 低水路幅/滞筋距離×sin(水当たり角)
1	$A \leq 0.06$	$B \leq 0.005$	$C=0$	$D=0$	$E \leq 2.0$	$F=0$
2	$0.06 < A \leq 0.1$	$0.05 < B \leq 0.01$	$0 < C \leq 0.1$	$0 < D \leq 0.01$	$2.0 < E \leq 10$	$0 < F \leq 5$
3	$0.1 < A \leq 0.5$	$0.01 < B$	$0.1 < C \leq 0.5$	$0.01 < D \leq 0.1$	$10 < E$	$5 < F \leq 10$
4	$0.5 < A$		$0.5 < C$	$0.1 < D$		$10 < F$

4. 3 被災実態と指標化要因との関係

被災箇所での河床勾配（境界は1/500とした）により緩流河川区間と急流河川区間とに分類し、各河岸工程（天然河岸と低水護岸）において先に設定した各指標化要因についてランク別に被災実態との関係を調べた。

この結果から緩流河川区間においては「無次元掃流力」「無次元掃流力×堤間幅/曲率半径」「低水路幅/滞筋までの距離」の3要素が図-4、図-5、図-6からも河岸被災と関係があるものと考えられる。急流河川区間はデータ数も少なく明確なことは把握できなかった。

この結果から河岸被災の指標化要因は次の3つであると考えられる

- ①無次元掃流力
- ②無次元掃流力×堤間幅/曲率半径
- ③低水路幅/滞筋までの距離

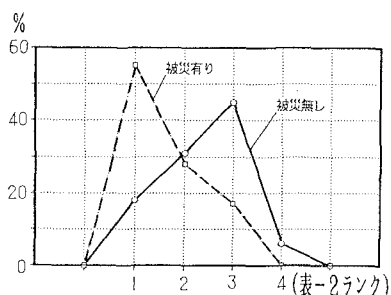


図-4被災要因分布図(A)

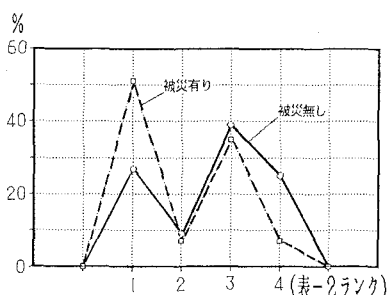


図-5被災要因分布図(D)

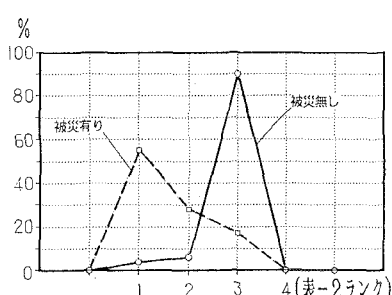


図-6被災要因分布図(E)

4. 4河岸被災の定量的分析

(a) 定量化モデル(数量化Ⅱ類)

抽出された指標化要因(表-2のA、D、E)を用いて被災件数が多くまた被災有り、被災無しデータのそろっている雄物川についてのデータを用いて数量化Ⅱ類により多変量解析を行い、河岸被災の定量的分析を行った。その結果(7)式の判別式を得た。

ただし、低水護岸についての被災内容と被災規模についてはデータ数が少ない(総数が数個である)ことから分析不能であった。分析結果から被災の有無については表-3に示すとおり天然河岸0.68と相関係数が高く分析データ数も多いことから比較的精度の高いものといえる。被災内容、被災規模、低水護岸の被災の有無については相関係数が低いこと及びデータ数が少ないことからあまり精度の高いものとはいえない。

表-3 種別相関係数表

種 別	相関係数	分析データ数
天然河岸	被災有無	0.68
	被災内容	0.43
	被災規模	0.41
低水護岸	被災有無	0.67

よって、本調査ではデータ数多く相関係数が高い天然河岸の有無についてのみの判別式を掲載する。

当該モデルの検討にあたりセグメント1及びセグメント3のデータは含まれていないため、前記セグメントでの当該モデルの使用はさける必要がある。(東北地方1級河川においてセグメント1及びセグメント3の存在率は低い)

定量化モデル(判別式): 雄物川データによる

[判別式]

被災の有無《天然河岸》

$$F = \left\{ \begin{array}{l} 0.39274A_1 \\ 0.10712A_2 \\ -0.36843A_3 \\ -1.59997A_4 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} 0.30824D_1 \\ -0.48450D_2 \\ -0.17872D_3 \\ -0.08647D_4 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} 1.01084E_1 \\ 0.73177E_2 \\ -0.70006E_3 \end{array} \right\} \quad (7)$$

$F < 0.1067$: 被災有り
 $0.1067 \leq F$: 被災無し

4. 5モデルの検証及び汎用度

(a) モデルの検証(雄物川)

定量化モデルの精度について確認するため、定量化モデル(判別式)にモデル作成時に用いた雄物川における指標化要因データを代入し、判別された結果と実災害とを比較することにより検証を行った。その結果は表-4(①)のとおりであり、高い精度をもっていることがわかる。

表-4 数量化モデル検証結果

番号	モデル	検証データ	総データ数	正解数	正解率
①	定量化モデル (雄物川データによる)	雄物川	62	55	88.7%
②	定量化モデル (雄物川データによる)	阿武隈川	40	34	85.0%
③	最適モデル (雄物川・阿武隈川データによる)	雄物川 阿武隈川	102	94	92.2%

(b) 他河川への適用(阿武隈川)

提案した(7)式の定量化モデル(判別式)の汎用性と精度を確認するため、他河川(阿武隈川とした)の諸元をもとに設定した指標化要因データを(7)式のモデルに代入し、その判別結果を調べた。また、データはすべてセグメント2に属したものである。汎用性を調べた結果は表-4(②)のとおりであり、正解率85.0%と精度の高い結果であると言える。

5. 最適モデル(予測モデル)の提案

ここまで判別モデルについての精度及び汎用性について確認し、判別モデルの妥当性を調べた。その結果はすでに述べたようにほぼ妥当であったことからここでは、データ数を増やしてより信頼度を向上させることを目的とし、阿武隈川データも含めて、再度数量化Ⅱ類により多変量解析を行い(8)式を得た。モデル解析時のデータを用いて検証した結果表-4(③)に示すように92.2%、と高い正解率が得られ、ここで提案した(8)式のモデルの妥当性が認められた。

なお、本報告では検証結果において正解率の高い天然河岸の被災の有無についての判別式のみを掲載する。

表-5 各要因要素のランク分け表

ランク	A 無次元掃流力	D 無次元掃流力× 堤間幅/曲率半径	E 低水路幅/滞筋距離
1	$A \leq 0.06$	$D = 0$	$E \leq 2.0$
2	$0.06 < A \leq 0.1$	$0 < D \leq 0.01$	$2.0 < E \leq 10$
3	$0.1 < A \leq 0.5$	$0.01 < D \leq 0.1$	$10 < E$
4	$0.5 < A$	$0.1 < D$	

[判別式]

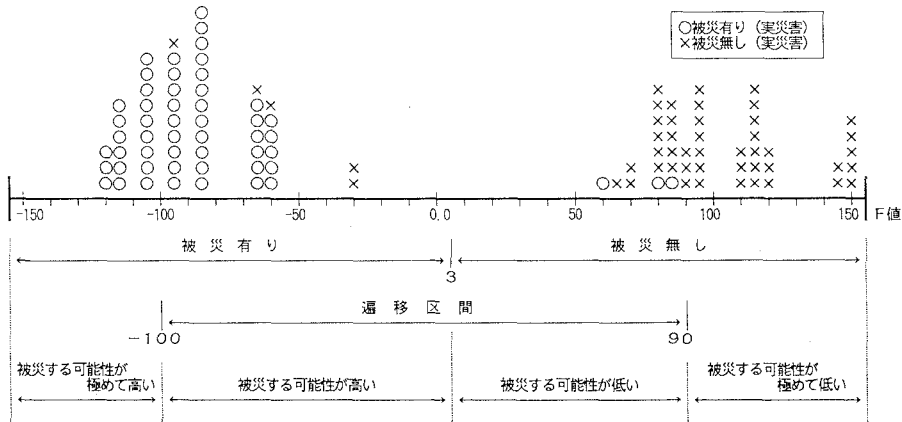
被災の有無《天然河岸》

$$F = \begin{bmatrix} A \\ 38 \\ 3 \\ -18 \\ -31 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D \\ 16 \\ -39 \\ -16 \\ -5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E \\ 100 \\ 95 \\ -84 \end{bmatrix} \quad \left. \begin{array}{l} \text{ランク1の場合} \\ \text{ランク2の場合} \\ \text{ランク3の場合} \\ \text{ランク4の場合} \end{array} \right\} (8)$$

$F < 3$ の場合被災有り
 $3 \leq F$ の場合被災無し

なお、数量化Ⅱ類の解析においては被災の有無の判定を対象とした解析を行っており、検証計算におけるモデルの判別結果は高い精度で実災害を表現しているといえる。しかし、図-7に示すように100%の再現ではなく、実用化に向けてモデルにおける判別境界を(8)'のように細分化を行った。

$F < -100$	の場合は「被災する可能性が極めて高い」	} (8)'
$-100 \leq F < 3$	の場合は「被災する可能性は高い」	
$3 \leq F < 90$	の場合は「被災する可能性は低い」	
$90 \leq F$	の場合は「被災する可能性が極めて低い」	



図一七 実災害と判別結果の比較図

6. まとめ

本調査では東北地方1級河川を対象に河岸被災の実態から被災要因として考えられる外力要素を抽出し、それらの要素をもとに河岸被災を定量的に予測することを目的とし、統計解析を行った。本調査により把握できた河岸被災要因を以下に列挙する。

- ・各セグメント（縦断断面のみに着目した区分）における河岸被災の発生頻度は同程度である。
- ・河岸被災箇所は湾曲部外岸に多い。
- ・洪水水位が高水敷高程度以上になった場合に河岸被災が発生しやすい。
- ・滞筋が河岸から低水路幅の1割以内にある場合に被災が多く発生している。

これらの河岸被災実態から把握した河岸被災要因要素をもとに統計解析を行い、河岸被災について定量的に判別できるモデルを提案し、検証及び他河川への適用等を試みる程度の精度をもった予測モデルを提案できた。ただし、ここで示した河岸の被災予測モデルはあくまで被災実態をを整理し、河道被災を被った河川における被災状況、被災箇所の河道形状、外力等の調査から被災要因を抽出し、抽出された被災要因要素を統計解析により提案したもので、物理的に外力や抵抗力を計算し作成したものではないので適用にあたっては以下のことに留意する必要がある。

- ①本モデルは簡略的に河岸の危険性が評価できることを目的に提案されたため、河道全川にわたり概略的な護岸の整備範囲を策定するには有効であるが、局所的な護岸整備範囲の検討には適用できない。
 - ②被災実態事例は一級河川の直轄区間が対象であり、モデルは河床勾配が1/400～1/4000の範囲のデータからの作成であり、扇状地河川やデルタ河川への適用はできない。
- 今後は、扇状地河川（セグメント1）、デルタ河川（セグメント3）にできる河川災害モデルの検討、精度の高い被災内容、被災規模等予測モデルの検討、大洪水（計画出水規模程度）時の災害の予測精度の確認等の検討が課題となる。

なお、本検討にあたっては東北地方建設局秋田工事事務所、北上下流工事事務所、湯沢工事事務所、福島工事事務所からなるワーキング・グループで調査を行ったものである。

参考文献

- 1) 山本晃一：河道特性論，土木研究所資料，第2662号，pp.51-54，1988。