

増水時に弱点となる橋脚を見つける

佐溝 昌彦
防災技術研究部
(地盤防災 主任研究員)

輿水 聡
同
(同 副主任研究員)



さみぞ まさひこ こしみず さとる

はじめに

日本の河川では梅雨や台風による豪雨や雪どけに伴って増水し、時としてこれを原因とする災害（河川災害）が発生します。鉄道においても、橋梁、護岸が被災することがあります。特に橋梁では、川を流れる水の影響で橋桁を支える橋脚の周りの地盤が掘られることで、橋脚が傾いたり、沈んだり、あるいは倒れたりする場合があります（図1）。こうした災害は、旅客の安全を脅かすだけでなく経済的にも大きな打撃を受けます。

このような災害を防ぐためには、線区にある数多くの橋梁の中から、災害の発生が懸念される箇所を選び出して、個別の諸条件に応じた措置を随時講じる必要があります。ここでは、河川増水時における橋梁の災害のうち、橋脚周りで発生する洗掘による災害に着目し、増水時に被害が発生する恐れのある橋脚を客観的かつ合理的に選び出す方法について紹介します。

洗掘とは

河川では増水すると、水位が増すだけでなく流れの速さが増します。こうした流れの中に橋脚などの構造物があると、その周りでは構造物が流れを遮ることでも複雑な流れ方になります（図2）。こうした流れによって、構造物の足元の土砂を巻き上げ、その周りだけが掘られる現象が起こります。こうした現象を「洗掘（せんくつ）」といいます。洗掘は、流れの速さや土砂の粒の大きさ、橋脚の形や大きさなどが影響し、それら



図1 橋脚が倒壊した河川災害の例

要因が複雑に絡み合っ起こる現象です。また、増水した川面の下（水中）で起こっていることや水位が下がると埋め戻されてしまうため、未だに不明な点が多い現象の一つです。

洗掘被害を防ぐ

鉄道では、洗掘による橋脚の被害や事故を未然に防ぐために、橋脚の周りの河床にコンクリート製のブロックや石を敷いて洗掘を起りにくくする工事や鉄板やコンクリートの壁で橋脚の周りを覆って橋脚の安定性を増すための工事を行っています。また、橋梁付近の川の水位に応じて列車の運行を中止したり徐行させたりする「運転規制」という措置も併せて行われています。さらに、こうした対策を効果的に行うために、構造物の状態やその変化を確認して措置の要否を判断する作業を定期的実施しています。この作業を「検査」といいます。この検査は、大まかに構造物の状態を把握する概略検査（全般検査）と、必要に応じて実施する詳細な検査（個別検査）とに分けられます。

検査で大切なこと

これらの検査で大切なことは、構造物の健全性（丈夫さ

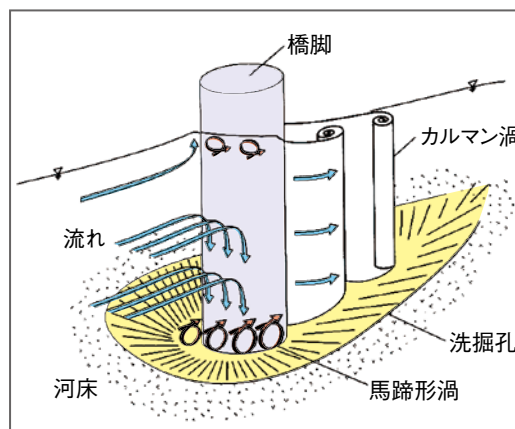


図2 橋脚周りの洗掘形状と流れのイメージ¹⁾

の度合い)を的確に評価することはもちろん、いかに災害の発生が懸念される橋脚を合理的に選ぶかという点にあります。なぜなら、全般検査段階で抽出から漏れた場合は詳細な検査の対象とならない場合があり、本来注視しなければならない橋脚を見逃す恐れがあるためです。一般に検査は、構造物を保守管理する部署の現場技術者が実施しています。特に洗掘に関する検査では経験豊かな現場技術者の判断に委ねられてきましたが、最近では経験豊かな現場技術者が減りつつあります。また、過去には洗掘に対して弱点となる橋脚を選ぶ手法はいくつか提案されてきましたが、現場に定着したとはいえません。そのため、増水時に洗掘被害を受けやすい(増水時に弱点となる)橋脚を全般検査と個別検査を通じて客観的・合理的に選べ、かつ現場技術者が容易に使える方法の開発が求められています。

増水時に弱点となる橋脚を見つける手法

そこで、増水時に弱点となる橋脚を見つけるための手法として、被害の受けやすさを評価するための採点表とその採点表を使う際の手助けと理解を深めるための適用マニュアルを作成しました。採点表の作成に際しては、過去の被災事例から被災橋脚と河川の特徴を整理し、洗掘災害との関係の強さや調査の作業性を考慮して評価項目を定めました。また、評価項目ごとの配点は主に統計的な手法やこれまでの経験から洗掘現象との関係の強さを勘案して決めました。

採点表には、全般検査で用いる一次抽出のためのものと、個別検査で用いる詳細な評価のためのものの2種類あります。これら2つの採点表の関係とこの手法における一連の評価作業の流れを図3に示します。

作業は、まず全般検査で管理する全橋脚を対象に一次抽出用の採点表による評価を行い、洗掘被害の発生の恐れがあるか否かで、より詳細な検査である個別検査の実施の要否を判定します。その結果、詳細な検査が必要とされたも

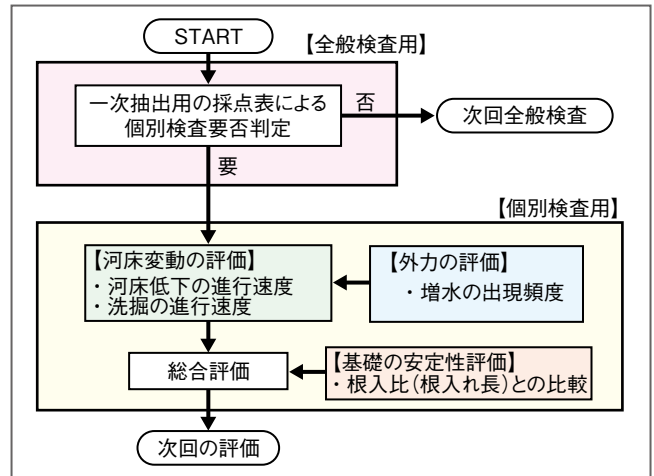


図3 増水時に弱点となる橋脚抽出手法のフロー

のを対象に、個別検査用の採点表を用いた評価を行います。個別検査では、採点表により求めた河床変動速度と現状の根入比(基礎底面までの地盤深さと橋脚幅の比)との比較から将来の基礎の状態を推定した上で、被害の受けやすさを評価判定します。

全般検査用の一次抽出のための採点表

一次抽出のための採点表^{2),3)}が目指したのは、河川の高度な専門知識を要せず、精緻な調査も行うことなく、評価が可能であることです。この採点表は、①洗掘のおそれのある橋梁を漏れなく抽出すること、②目視を中心とした簡易な調査で評価を可能とすること、③洗掘発生のおそれの程度を順位付けられること、ができます。

一次抽出のための採点表の開発に際しては、国鉄時代に収集された108件の被災事例⁴⁾とJRになって発生した被災事例を基に被災した橋梁の特徴を整理しました。その結果、洗掘災害が発生した橋脚の特徴は、①河川改修による河道環境の変化、②経年的な河床全体の低下、③河川(流路)に対する橋脚の位置、④防護工の変状や構造上の不備、⑤基礎の岩着判定の誤認、⑥扇状地形での多発、などが抽出されました(図4)。また、洗掘に関係が大きい要因には、



図4 洗掘被災事例からみた特徴的な例

洗掘深さの予測式などに取り上げられている、①河床材料の粒径、②河床勾配、③流速(流量)、④橋脚幅などがあります。このうち、時々刻々変動するものを除くとともに全般検査での適用を考慮し、特定するための作業が非常に煩雑なもの(河床勾配や河床材料の粒径)は、これらと相関があると思われる周辺地形や河床材料で便宜的に代表させることとしました。

検討の結果、一次抽出のための採点表では①河川の環境条件、②橋脚の構造条件、③防護条件、に大別される10

個の評価項目を選び、各項目の区分ごとに点数付けされています(表1)。採点表を用いた評価は、橋脚ごとに行い、すべての評価項目に対して該当する区分を選択し、その合計点が対象橋脚の評価点となります。この評価点が低いほど洗掘を受けやすい、いわゆる洗掘に対して弱点となる橋脚と判断します。また、表中の「◆」の印は、その項目に該当するだけで洗掘に対して注意が必要な状況であることを表しています。このような場合は、採点表の合計点にかかわらず弱点となる橋脚とすることとしました。

なお、この採点表では主に目視による調査での評価を想定しているため、採点表の適用マニュアルでは写真や図を多用して、見た目で判断できるようにしています。

図5は、一次抽出のための採点表により、77の橋脚の評価を行った際の評価点の頻度分布を示しています。一番左側は「◆」に該当した橋脚を表しています。この図で濃いピンク色で示した橋脚は、洗掘災害の専門家がこの採点表によらず、過去の経験や専門知識を用いて要注意橋脚と判断した橋脚です。それらの評価点が110点を下回っていることから、詳細調査が必要と判断する点数の閾値は、110点を下回るものとした。

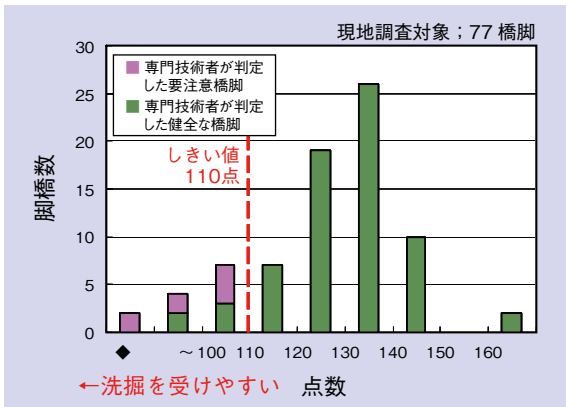


図5 一次抽出用の採点表の試行結果

表1 弱点橋脚の一次抽出用の採点表

評価項目		区分	点数	
河川の環境条件	地形	平野	10	
		谷底平野	10	
		扇状地 山間地	0 5	
	河川幅の狭窄	無	15	
		有	0	
	河床材料	砂	10	
礫		0		
露岩・巨礫		10		
全体河床の低下	有	0		
無	10			
橋りょう(橋脚)の構造条件	河川の湾曲に対する橋脚の位置	直線および曲線内側	15	
		曲線外側	0	
	河川数に対する橋脚の位置	流水中	5	
		陸地(護岸なし)	10	
		陸地(護岸なし、流路隣接)	0	
	陸地(整備護岸)	25		
		陸地(整備護岸、流路隣接)	15	
	下流方落差	高さ	なし	20
			~1m	5
			1m~2m	0
形式		2m~	◆	
		コンクリート	—	
変状	変状有り	◆		
施工範囲	河川幅の一部のみ	◆		
	シートパイル等	—		
根入比	直接・杭	根入比1.5を満点、0を0点とする傾斜配点	50	
	ケーソン	根入比3.5を満点、1.0を0点とする傾斜配点	—	
根入れ長の変化	1.5m以上の増減がある	◆		
基礎底面の岩着	岩着と思われる	15		
	岩着	30		
基礎構造形式	直接基礎・木杭	—		
	杭基礎 ケーソン	—		

評価項目		区分	点数	
防護条件	かご	なし	0	
		不明	0	
		変状有	0	
	ブロック	変状	変状無	5
			変状不明	0
		連結	変状無	20
			変状中・一部流出・乱積み	5
			変状大・流出	◆
	はかま	根入れ	変状不明	0
			連結	5
		変状	河床>はかま上面	20
			はかま下面<河床≤はかま上面	10
	張コンクリート	敷設範囲	河床≤はかま下面	◆
			周辺全面	40
			2D以上(D:橋脚躯体幅)	20
シートパイル	根入れ	2D未満(D:橋脚躯体幅)	0	
		河床>基礎底面	20	
	変状	河床≤基礎底面	◆	
変状有り	◆			
変状不明	0			

特記事項	点数
河川改修	—
環境変化	—
河川の流向と橋脚の向き	—
河口部の特殊な条件	—
被災歴	—
隣接橋りょうの存在	—
その他	—

※各項目の該当する点数を合計し、合計点の少ない橋梁ほど洗掘に対する要注意橋梁と判断する
 ※◆印はその項目に該当する橋梁は合計点に拘わらず要注意橋梁とする
 ※張コンクリートは橋脚周りに部分的に施工されたものを含む
 ※—印は、直接評価に加えないが、調査しておくことが望ましい項目

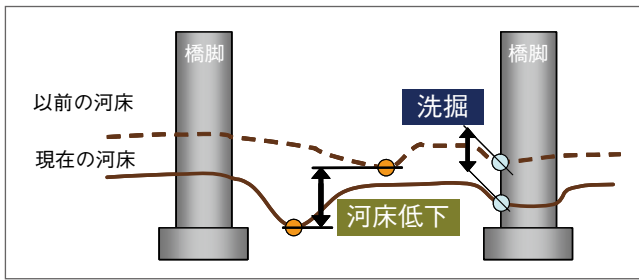


図6 洗掘と河床低下のイメージ

個別検査における抽出手法

本来洗掘は河川条件や構造条件が複雑に絡み合って発生するものであり、その評価には河川条件などの詳細な情報を必要とします。一方で橋脚基礎の健全性を評価する手法は衝撃振動試験などいくつかありますが、必ずしも河川増水時の評価や将来の状態を評価するものではありません。また、河川増水時の橋梁被害は、急激な河床高さの変動(河床変動)が主な原因です。この河床変動は、橋脚周りで起こる「洗掘」と、構造物の有無に関係なく河川特性によって河道全体で起こる「河床低下」とに分けられ(図6)、それらが複合して発生し、それぞれ影響する要因が異なります。そこで、個別検査用の抽出手法は、詳細な調査と専門的な知識に基づき、洗掘と河床低下を考慮した「河床変動量」を推定し、将来の基礎の状態を予測して健全性を評価する手法としました。

手法の開発に際しては、河川の出水履歴や橋梁の検査記録などの資料収集を行うとともに橋梁と河川工作物の実態や河川環境の変化を確認するための現地調査を63の橋梁を対象に行いました。調査で得られたデータを基に、統計解析により洗掘への影響に対する各種要因の重み付けを決定しました。その結果から、表2に示す評価項目によって洗掘速度(cm/年)や河床低下速度(cm/年)をそれぞれ推定する採点表を作成しました。

これらの採点表は評価項目ごとに該当する区分の点数と基本点を合計することで、各々の進行速度(cm/年)を求めることができます。なお進行速度は正の値が河床の低下を表し、負の値が上昇を表しています。

さらに、河床変動速度は「洗掘」と「河床低下」それぞれの進行速度の和として求めます。個別検査での評価では、実測した現在の根入比を基に、河床変動速度と基準根入比との関係から求められる余裕期間を求め、その余裕期間が短いものほど洗掘被害を受けやすい橋脚(増水時に弱点となる橋脚)と判断します(図7)。また、余裕期間は検査のたびに測る根入比に応じて見直します。なお、基準根入比は橋脚の状況に応じて任意に設定することとしています。

表2 個別検査用採点表の評価項目と点数の例

評価項目	洗掘	河床低下				
河床材料の平均粒径	○	○	流域面積 S (km ²)	点数		
流域面積(S)	○	○			S ≤ 50	-11.7
曲率半径/川幅比	○	○			50 < S ≤ 200	1.6
河川幅の狭窄の有無	○	○			200 < S ≤ 1000	5.1
河積阻害率	○	○			1000 < S	22.5
河床縦断勾配(G)	○	○	河床縦断勾配 G	点数		
射流・常流	○	○			G ≤ 1/400	-5.3
平均年最大流量を超える流量の出現回数	○	○			1/400 < G ≤ 100	-2.8
砂州の有無	○	○			100 < G	8.8
砂州の移動の有無		○				
分合流の有無		○				
低水護岸の有無		○				
近傍での河川工事や他橋りょうの有無		○				

※各項目の○印は、洗掘及び河床低下について、それぞれの進行速度を推定するときに評価する項目

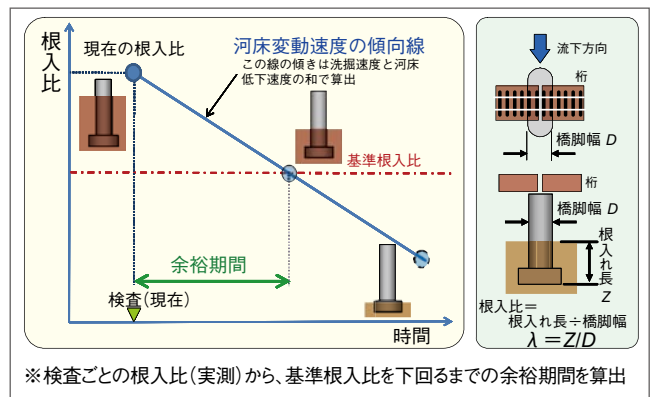


図7 河床変動速度予測後の評価イメージ

おわりに

河川増水時における洗掘に対して弱点となる橋脚を選ぶことを目的とする、全般検査用の採点表と個別検査用の採点表からなる抽出手法を紹介しました。この手法は現場技術者が容易に使えることを目指しており、橋脚の洗掘に対する評価に一定のルールを示したものです。今後、事業者による試行の結果などを参考に、必要であれば維持管理の実務に適した見直しを図っていく予定です。[RRR]

文献

- 1) 土木学会関西支部編：川のなんでも小事典，講談社，p.104, 2004.3
- 2) 佐溝昌彦，村石尚，中村貴史：洗掘を受けやすい橋りょうを抽出するための採点表(案)，日本鉄道施設協会誌，第43巻，第11号，2005.11
- 3) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編基礎構造物・抗土圧構造物)，pp.99-108, 2007.1
- 4) 村上 温：鉄道橋の洪水時被災機構と安全管理に関する研究，鉄道技術研究所報告，1986.1