

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

出水から護岸を守る

河川沿いの鉄道沿線に構築された護岸については、目視により健全度診断が行われています。しかし、護岸の変状は目視で抽出することが困難な場合も多いのが実態です。そこで、護岸の実態調査を行い洗掘による変状が多いことを明らかにするとともに、橋りょう下部構造物の検査法として活用されている衝撃振動試験の適用性を検証しました。その結果、衝撃振動試験で得られる護岸の振動特性の変化を指標として洗掘の進行を検知できることを確認したので、その内容について紹介します。



中島 進
Susumu Nakajima
構造物技術研究部
基礎・土構造研究室
副主任研究員
【専門分野】地盤工学



阿部 慶太
Keita Abe
構造物技術研究部
基礎・土構造研究室
副主任研究員
【専門分野】地盤工学



獅子目 修一
Shuichi Shishime
(株) ジェイアール総研
エンジニアリング
【専門分野】構造力学

護岸

護岸は図1に示すように河川の流水などの作用から、土構造物のり面を防護するために設けられる構造物で、豪雨時に変状が著しく進行し鉄道運行の支障となる場合があります。ここで対象とする河川護岸の場合、復旧に際して関係機関との協議が必要になる場合も多く、本復旧に時間を要することも少なくありません。このため、適切な維持管理により変状をできるだけ早期に検知し、変状に対する措置を行って健全な状態を保つことが、豪雨時の出水などから護岸を守る上で重要です。

鉄道構造物等維持管理標準

護岸を含む鉄道土木構造物の維持管理の基本的な考え方は鉄道構造物等維

持管理標準¹⁾(以下、維持管理標準という)により規定されています。一般的に護岸の検査は目視で行われ、変状が確認された、あるいは変状の疑いがある構造物に対しては、主に入念な目視により検査が行なわれます。維持管理標準では、構造物ごとに目視による検査のポイントが示されていますが、護岸の変状に関する記載は十分ではありません。

鉄道護岸の実態と変状

そこで、鉄道護岸の構造形式や実際に生じている変状を把握するために、鉄道事業者よりご提供をいただいた維持管理記録などの資料に基づく実態調査を行いました。構造形式と延長距離に関する整理結果を図2に示します。

延長距離の割合は、石積み・ブロック積み壁が55.0%、コンクリート擁壁が4.3%程度であり、今回の調査範囲では、護岸の構造形式および延長距離は、図3に例を示す石積み・ブロック積み壁形式が半数以上を占めていることが確認できます。

また、図4は維持管理記録から把握した石積み・ブロック積み壁形式の既

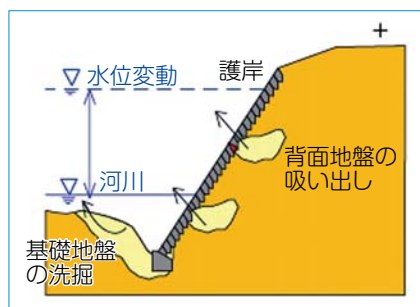


図1 護岸の模式図

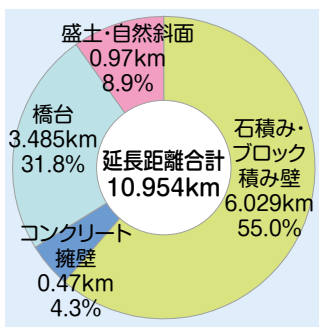


図2 鉄道護岸の構造形式と延長距離

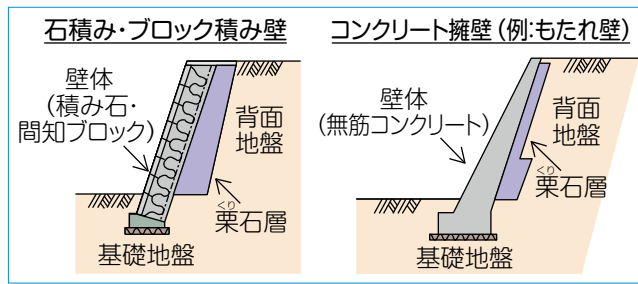


図3 石積み・ブロック積み壁とコンクリート形式の護岸構造の例

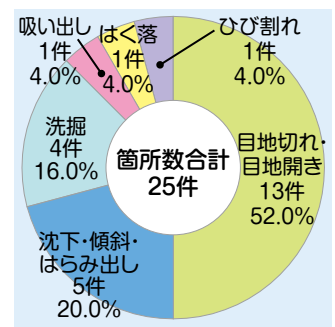


図4 既設鉄道護岸に生じている変状の分類

設護岸に生じている変状の分類結果です。また、図5には変状の例を示しています。護岸に生じている変状は、目地切れ・目地開きが52.0%、沈下・傾斜・はらみ出しが20.0%、次いで洗掘が16.0%の順となっています。通常の土留め擁壁に関する実態調査では、図1に例を示すような基礎地盤の洗掘は1.0%程度の割合しか占めておらず、既設護岸では洗掘の占める割合が高いことが確認されました。

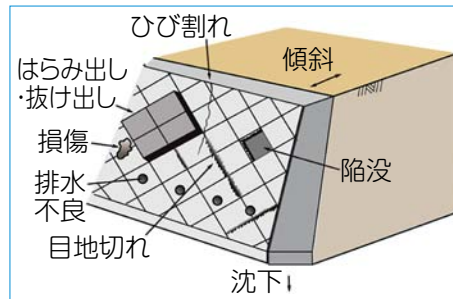


図5 石積み・ブロック積み壁形式の護岸に生じる変状の例

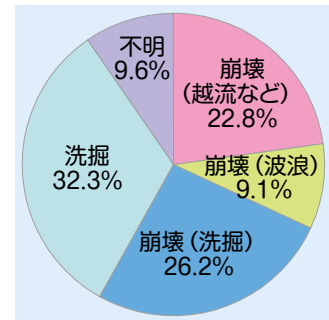


図6 災害時における鉄道護岸の被害

災害時における鉄道護岸の被害

既設護岸に生じている変状形態を分析した結果、洗掘、吸い出しが通常の土留め擁壁と比較して多いことが確認されました。さらに、過去に起きた護岸の被害事例86事例について分析を行った結果を図6に示します。

被害状態を整理すると、崩壊に至っていたものが58.1%でした。そのほか、崩壊には至らなくとも洗掘により変状したものが32.3%ありました。さらに、崩壊に至った事例の原因を分析すると、洗掘に起因するものが26.2%に達していました。以上のことから、洗掘は、崩壊要因の約5割、崩壊に至らないまでも洗掘により変状したもので約3割を占めています。

護岸では豪雨時や高波時などに洗掘が進行しますが、水面以深を調査しない限り、洗掘発生の有無や変状の進行を把握することは困難です。このため、供用期間中に徐々に洗掘が進行した後、さらなる豪雨時に基礎下の洗掘が

急激に進展する事例が多く、図2、図4に示したような実態となったと考えられます。以上から、洗掘の進展を検知することが護岸の維持管理上で、重要であることが把握できました。

振動試験による健全度診断

洗掘現象を非破壊で検知し、さらにその変状の進行性を把握するための検査法として、ここでは衝撃振動試験と起振器試験の適用性について紹介します。

衝撃振動試験

衝撃振動試験は、橋りょう下部構造物の健全度診断に活用される試験法で、橋脚などの天端を重錘（一般的には30kg）で打撃し、自由振動を励起した上で構造物の応答をセンサーで計測し、周波数解析を行って得られる固有振動数の値で構造物の健全度を診断す

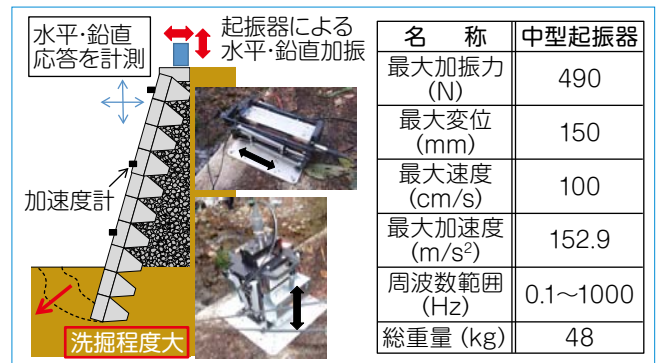


図7 起振器試験の概要

る試験法²⁾です。これまで、橋りょう下部構造物の健全度診断に活用されてきましたが、近年では、衝撃振動試験を用いて土留め構造物の健全度を診断する検討もなされており³⁾、その適用性が拡大しつつあります。後に示す図8には護岸に対する衝撃振動試験の実施状況を示しています。

起振器試験

起振器試験は、構造物に対して起振器の起振力で強制的に振動させ、構造物の固有振動数などの応答特性を評価する試験法です。起振器試験に用いる起振器とその概要を図7に示します。

表1 試験ケースのまとめ

護岸名称	試験ケース	構造形式	高さ(m)	状態
A 護岸	A-1	もたれ壁	6.3	洗掘・ひび割れ
	A-2	もたれ壁	6.3	A-1 対策後 (根固めコンクリート工)
B 護岸	B-1	石積み壁	5.1	洗掘, 背面地盤沈下
	B-2	重力式擁壁	5.1	B-1 復旧後 (重力式擁壁)
C 護岸	C-1	石積み壁	2.3	洗掘崩壊箇所 (C-1) 近傍
	C-2	重力式擁壁	2.3	洗掘崩壊後, 復旧 (重力式擁壁)
D 護岸	D-1	石積み壁	2.9	洗掘箇所 (D-2) 近傍
	D-2	石積み壁	2.9	洗掘変状後, 根固めコンクリート工施工
E 護岸	E-1	石積み壁	3.1	洗掘変状箇所
	E-2	石積み壁	4.1	E-1 近傍健全箇所

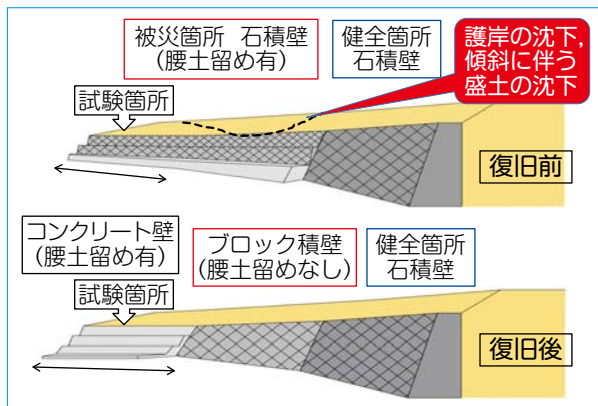


図9 B護岸の概要



図8 衝撃振動試験の実施状況

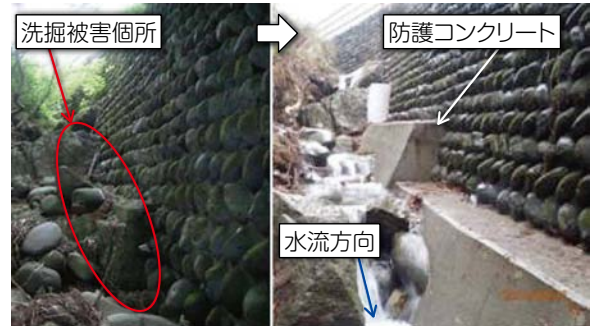


図10 D護岸の概要

本記事で使用例を紹介する中型起振器は重量が約50kgであり、0.1Hz～1000Hzまでの周波数範囲で加振が可能です⁴⁾。起振器は設置方向に応じて水平・鉛直両方向に加振が可能ですが、本検討では水平方向加振の結果について報告します。

実構造物での検証適用

衝撃振動試験、起振器試験を護岸の健全度診断に対する適用性を検証することを目的として、洗掘の被害を受けた護岸に対して現地試験を実施しました。表1に試験対象とした護岸の概要をまとめます。

A護岸は河川の湾曲部に構築されたもたれ壁形式の護岸で、当該護岸では、衝撃振動試験、起振器試験を対策前後に実施しました。対策前の試験は、基礎下が洗掘を受けていた状態で、対策後の試験は洗掘対策として基礎下への充填も含む根固めコンクリートが施工された後に試験を実施しました。図8にA護岸における衝撃振動試験の実

施状況を示します。

B護岸は豪雨による洗掘に起因してすべり破壊が生じた石積み壁式の護岸で、復旧工事により、コンクリート壁およびブロック積み壁にて再構築されました。当該護岸では、復旧工事の前後に衝撃振動試験および起振器試験を実施しました。図9に復旧前後の模式図を示すように、コンクリート壁は既存の石積み壁を抱き込むように構築されていました。

C護岸は、貯水池からの越流を河川へ導流する水路と河川の合流部において空積み形式の護岸が倒壊した箇所であり、被害箇所前面に矢板を打設した上で、コンクリートの重力式護岸として復旧を行った箇所です。

D護岸は、山岳部における排水経路沿いに構築された石積み形式の護岸であり、豪雨時に石積み壁の基礎が洗掘を受けた箇所で、被害後に石積み壁前面に防護コンクリートが打設されました。図10にD護岸の概要を示します。

E護岸は豪雨による河川の増水に伴

い石積み壁の護岸が洗掘された箇所であり、洗掘の影響を受けた箇所と下流側にあり健全な石積み護岸との比較が可能な現場となっています。

試験結果

以下では、A護岸に対する試験概要について述べたのちに、A～E護岸の試験結果についてまとめます。

衝撃振動試験では、護岸の壁面上部、中間部、下部に加速度計を設置し、護岸天端付近を30kgの重錘で打撃し、その後の自由振動中の応答速度を計測し、計測結果を周波数解析することで対策前後の振動特性を分析します。図11に対策前後の衝撃振動試験結果を示します。対策前後ともに複数のピーク振幅値が確認される一方で、対策後には、40Hz未満の低振動数帯域の振幅値が全体的に減少している傾向が確認できます。

起振器試験では、護岸天端に起振器を固定し、水平方向の正弦波加振の周波数(振幅±1000gal)を3Hzから

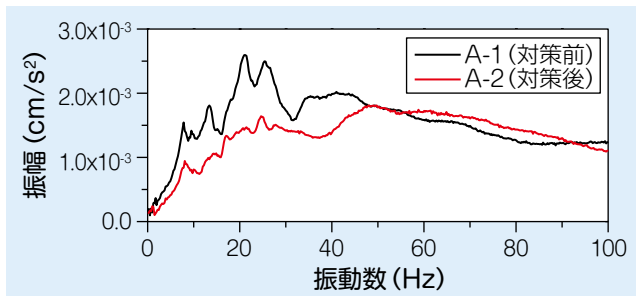


図11 A護岸の対策前後における衝撃振動試験結果

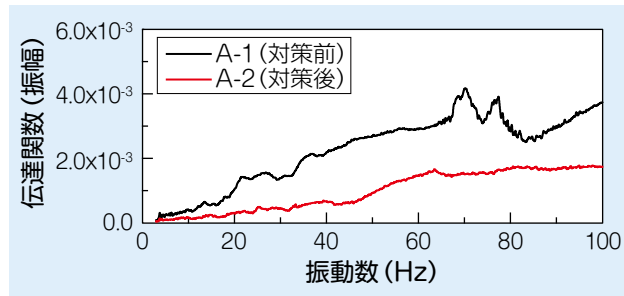


図12 A護岸の対策前後における起振器試験結果

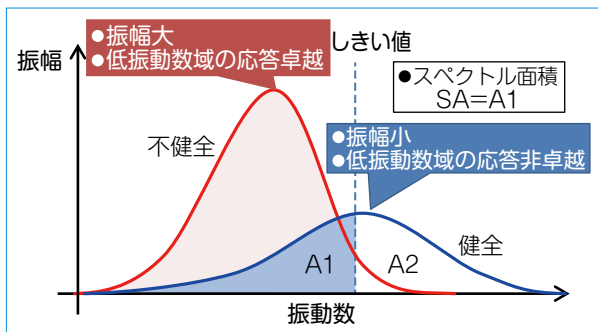


図13 スペクトル面積SAの概念図

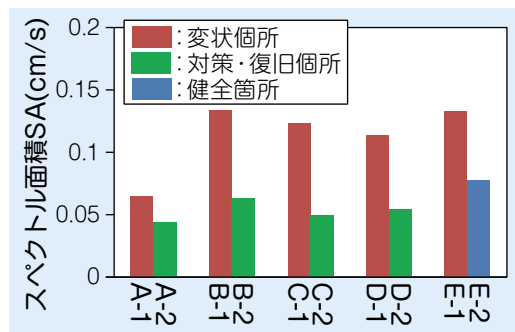


図14 スペクトル面積SAの比較結果

200Hzまで3Hz/秒で変化させて加振を行った際の応答を加速度計で計測しました。起振器試験では入力を機械的に制御し、入力加速度を計測することが可能なため、構造物の応答を入力加速度で正規化した伝達関数として結果を評価します。

起振器試験による応答加速度の伝達関数の比較を図12に示します。対策前と比較すると、対策後は低振動数帯域の伝達関数（振幅）が全体的に低下している傾向が明らかです。

スペクトル面積による診断

衝撃振動試験や起振器試験などの振動試験により、洗掘による変状が顕著な護岸では低振動数帯域での応答が卓越する傾向が確認されました。

そこで、図13に概念を示すように振動試験で得られる振幅スペクトルの振幅値と振動数で囲まれる範囲を積分した値であるスペクトル面積SAを指標とした健全度診断法に関する検討を進めています。

表1に示した各試験ケースにおけるスペクトル面積の算定結果を図14

にまとめます。スペクトル面積は衝撃振動試験における計測結果で、3～40Hzの周波数帯域を対象として算定しています。対策・復旧後や健全な状態で計測したSAと比較すると、洗掘による変状が生じた状態で計測したSAの値は明らかに大きくなっています。このことから、健全な状態におけるSA値を計測しておくことで、河川増水後などに再度振動試験を実施し、初期状態の値と相対比較することで、河川水位以深の洗掘調査などを実施しなくても、洗掘が進展しているかどうかを診断することが可能です。

おわりに

近年の豪雨で護岸基礎の洗掘が進行した結果、護岸に大きな変状が生じ、鉄道の安全・安定輸送に影響を与える事例が多く確認されています。ここでは、通常は河川水位以深で進行する洗掘を検知する手法として、衝撃振動試験や起振器試験の有用性を紹介しました。また、地形要因により洗掘危険箇所を抽出する方法⁵⁾も提案しています。これらを組み合わせて、危険箇所を

効率的に抽出し、振動特性をあらかじめ把握しておくことで、洗掘の進行を把握し、必要に応じて措置を行うことが可能になると考えています。引き続き、出水による被害から構造物を守るための研究開発を進めてまいります。

RRR

文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：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、丸善、2007
- 2) 西村昭彦、棚村史郎：既設橋梁橋脚の健全度判定法に関する研究、鉄道総研報告、Vol.3, No.8, pp.41-49, 1989
- 3) 中島進、篠田昌弘、阿部慶太：振動特性を利用した既設石積み壁・もたれ壁の健全度診断に関する研究、土木学会論文集C（地圏工学）、Vol.71, No.4, pp.254-271, 2015
- 4) 篠田昌弘、真井哲生、江原季映、中島進、阿部慶太、藤田圭一、土屋宗典：小型起振器と光ファイバセンサを用いた鉄道橋梁下部構造物の振動計測、土木学会論文集A1（構造・地震工学）、Vol.69, No.1, pp.40-56, 2013
- 5) 中島進、阿部慶太、獅子目修一、篠田昌弘：地形条件と振動試験結果を活用した鉄道護岸の健全度診断、鉄道総研報告、Vol.30, No.3, pp.23-28, 2016