

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

中島 進* 阿部 慶太*
獅子目 修一** 篠田 昌弘***

**Evaluation of Soundness of Railway Revetment using the Topographical Conditions
and the Results of Vibration Test**

Susumu NAKAJIMA Keita ABE
Shuichi SHISHIME Masahiro SHINODA

Evaluation methodology of soundness of railway revetment is discussed in this report. It was found out from the field investigation of the railway revetment that significant damage of the revetment was mostly caused by the scoring of the revetment foundation. Therefore, a series of percussion and vibration test were conducted on existing railway revetments, which were subjected to the damage of scoring, so as to examine their applicability as the inspection method of scoring. The test results show that the changes of vibration characteristics can be used as an index to detect the scoring progression. In additions to the above, such topographical conditions as would seriously affect the occurrence of scoring, were extracted based on the results of the additional field survey on the damaged revetment.

キーワード：護岸，健全度診断，維持管理，振動試験，危険箇所抽出

1. はじめに

本報では、鉄道土木構造物のうち、特に河川沿いに構築された土留め構造物（以下、護岸と称する）を対象とした健全度診断について述べる。

護岸を含む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^{例えは1)}に規定されている。一般的に護岸の全般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り健全度 A と判断された護岸に対する個別検査では、主に入念な目視により検査が実施される。護岸に多く生じる変状としては、基礎の洗掘や水位変動による背面地盤の吸出しなどが考えられるが、これらの変状は、その規模が比較的大きくならない限り簡単な目視のみによって抽出することは困難である。一方で、護岸は線状構造物であるために、全線にわたり個別検査相当の入念な目視や、洗掘調査を実施することは検査者の負担の観点から現実的ではない。

一方で、国内の鉄道分野において護岸に関する系統的な研究が行われた例はなく、構造形式、変状形態を把握したうえで、効率的に危険箇所を抽出し、危険箇所について

詳細な調査を行う健全度診断法を確立する必要があった。

以上を背景として、本研究では鉄道沿線の既設護岸について、見逃しを避けながら効率的に健全度診断を行う方法を提案することを目的として研究を行った。そのために、まず鉄道護岸の実態が不明であることから、鉄道事業者の協力を得た実態調査と、文献による変状調査を実施した。それにより、既設鉄道護岸の構造形式を把握するとともに、既設護岸に生じている変状の実態と顕著な被害の原因となる変状形態を把握した。次に、実態調査で把握した変状が生じやすい地形要因を分析し、簡易な危険箇所抽出法を提案した。

そして、机上で検討可能な地形条件による危険箇所抽出法と、個別の護岸に対する現地試験による診断法を組み合わせて、線状構造物であり、かつ目視のみでは変状の把握が困難な護岸に対する健全度診断法を提案した。

2. 鉄道護岸の実態把握

鉄道沿線の護岸については、構造形式や被害事例について系統的な調査が行われたことはなく、その詳細が不明である。そこで、筆者らは鉄道事業者の維持管理記録から鉄道護岸の実態把握を、被害事例の文献調査から災害時における護岸の被害実態を調査した。

* 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室

** 株式会社ジェイアール総研エンジニアリング

*** 防衛大学校

特集：防災技術

2.1 護岸の実態調査

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、鉄道事業者より提供を受けた維持管理記録等の資料（全 209 データ）に基づき、実態調査を行った。

構造形式と延長距離について整理を行った結果を図 1 に示す。延長距離の割合は、石積・ブロック積壁で 55.0%、コンクリート壁で 4.3%であった。以上の結果、今回の調査範囲では、護岸の構造形式別の延長距離は、石積・ブロック積形式が半数以上を占めていることが確認できた。

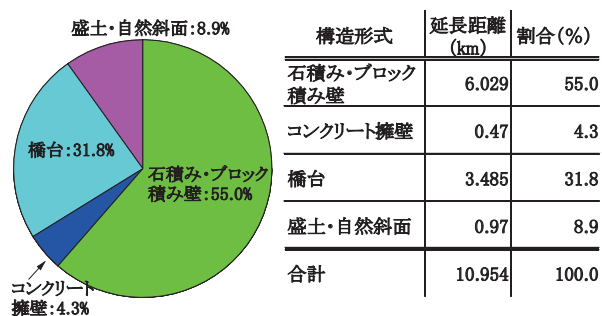


図 1 鉄道護岸の構造形式と延長距離に関する調査結果

2.2 護岸の変状調査

2.2.1 構造物の維持管理記録による変状把握

維持管理記録を活用して、既設護岸に生じている変状を整理した。対象としたのは、鉄道事業者から情報提供を受けた全 209 データのうち変状に関する記録があった 25 データである。この結果を図 2 に示す。石積壁およびブロック積壁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%の順となっている。通常の土留め擁壁に関する実態調査²⁾では、洗掘は 1.0%程度の割合であるのに対して、既設護岸においては洗掘の変状が生じている例が多い事が確認された。

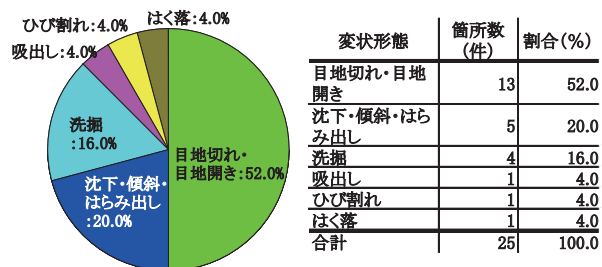


図 2 既設鉄道護岸に生じている変状の分類

2.2.2 文献調査による変状把握

上記のように、既設護岸に生じている変状形態について分析した結果、洗掘、吸い出しが通常の土留め擁壁と比較して多い事が確認された。以下では、災害時の被害原因について分析する。既往の文献^{例えば³⁾}により、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 3 に示す。

被害状態を整理すると、崩壊に至ったものが 58.1%であった。その他、崩壊には至らなくとも洗掘により変状したものが 32.3%であった。また、崩壊に至った事例の原因を分析すると、豪雨、増水により流出したものが 22.8%、洗掘に起因するものが 26.2%であった。この他、波浪、越波による破壊も 9.1%であった。以上の事から、洗掘は、崩壊要因の約 5 割、崩壊に至らないまでも変状した要因の約 3 割を占めている。

前述の通り、護岸はその特性から豪雨時や高波時などに洗掘の作用を受けやすく、洗掘は水面以深を調査しない限り、その有無を把握する事が困難である。このため、豪雨などの災害前に徐々に洗掘が進行し、豪雨時に基礎下の洗掘が急激に進展した結果として、図 2、図 3 に示した様な実態となったと考えられる。以上の事から、洗掘の進展を検知する事が護岸の維持管理上で、重要であることが把握できた。

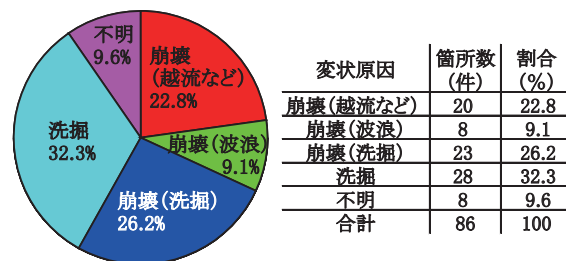


図 3 被害原因に関する文献調査結果

3. 振動試験による健全度診断

3.1 衝撃振動試験と起振器試験

前述の護岸の被災メカニズムを考慮すると、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ことが重要となる。そのための検査法として、本研究では衝撃振動試験と起振器試験の適用性を検証した。

3.1.1 衝撃振動試験

衝撃振動試験は、橋梁下部構造物の健全度診断に活用される試験法で、図 4 に示す様に、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る試験法である。衝撃振動試験は西村ら³⁾によって提案され、橋梁下部構造物の健全度診断に活用されている。

橋梁下部構造物の場合には、測定した固有振動数の値を、建設直後の初期値や健全な構造物が有すべき標準値と比較することで、健全度診断が行われる。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⁴⁾、その適用性が拡大しつつある。

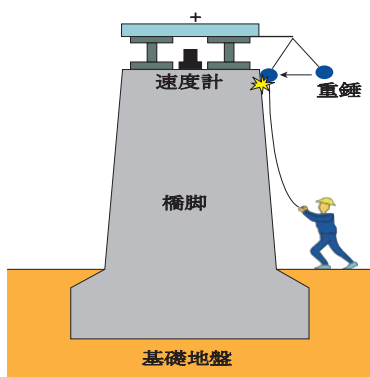


図4 橋脚の衝撃振動試験実施状況

名称	中型起振器
最大加振力 (N)	490
最大変位 (mm)	150
最大速度 (cm/s)	100
最大加速度 (m/s ²)	152.9
周波数範囲 (Hz)	0.1~1000
総重量(kg)	48

図5 中型起振器の概要

表1 試験ケースのまとめ

護岸名称	試験Case	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	3.3	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

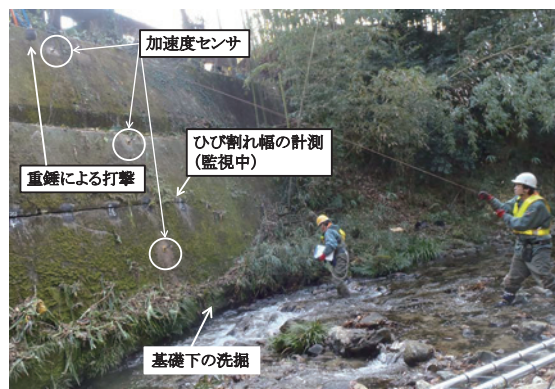


図6 A護岸の概要

3.1.2 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等の応答特性を求める方法である。起振器試験に用いる起振器とその概要を図5に示す。本研究で使用した中型起振器は重量が約50kgであり、性能上0.1Hz～1000Hzまでの周波数範囲で加振できる⁵⁾。起振器は設置方向に応じて水平・鉛直量方向に加振が可能であるが、本検討では水平方向加振の結果について報告する。

3.2 振動試験の実施結果

3.2.1 試験箇所の概要

衝撃振動試験、起振器試験の護岸の健全度診断に対する適用性を検証する事を目的として、洗掘の被害を受けた護岸に対して現地試験を実施した。

表1に試験対象とした護岸の概要をまとめる。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ある。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た。対策前の試験は、基礎下が洗掘を受けていた状態で実施し、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対策後の試験を実施した。図6にA護岸の概要を示す。

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あり、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

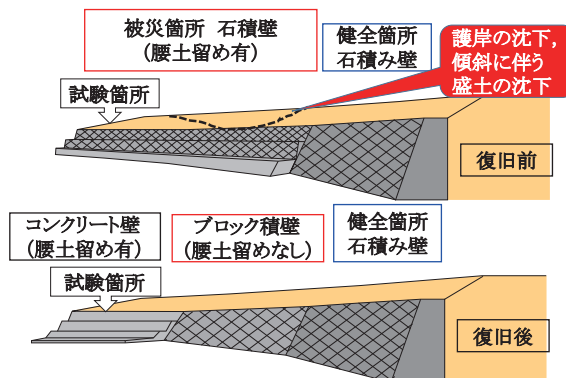


図7 B護岸の概要

を実施した。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た。図7にB護岸の概要を示す。

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ある。

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、被害後に石積み壁前面に防護コンクリートが打設された。図8にD護岸の概要を示す。

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である。

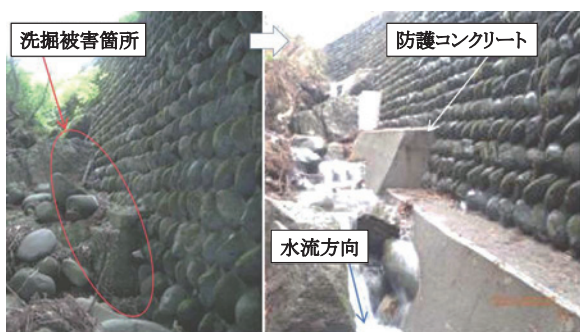


図8 D護岸の概要

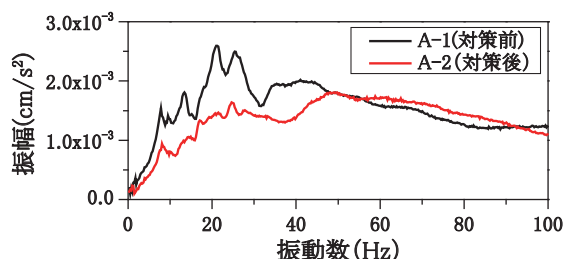


図9 A護岸の対策前後における衝撃振動試験結果

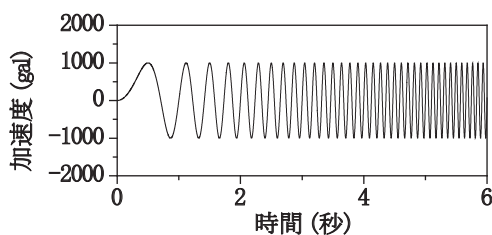


図10 起振器試験における入力加速度の時刻歴 (0～6秒の抜粋)

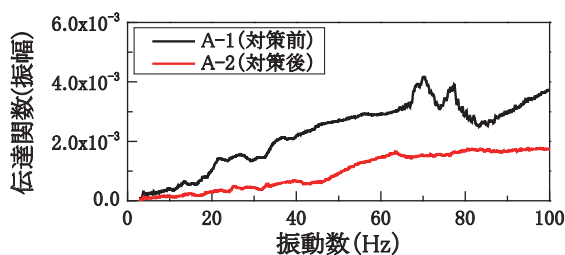


図11 A護岸の対策前後における起振器試験結果

3.2.2 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護岸の試験結果をまとめる。

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た。図9に対策前後の衝撃振動試験結果を示す。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る。

起振器試験では、護岸天端に起振器を固定し、水平方向に200Hzまでスイープ加振を行った際の応答を加速度計で計測した。スイープ加振は振幅1000gal、スイープ速度3Hz/秒である。なお、加速度計の設置位置は衝撃振動試験と同様である。起振器試験の入力加速度の時刻歴を図10に示す。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事が可能なため、衝撃振動試験とは異なり、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する。これにより、入力誤差の影響を排除した評価が可能な点が、起振器試験の特徴の一つである。

起振器試験による応答加速度の伝達関数の比較を図11に示す。対策前と比較すると、対策後には低振動数帯域の伝達関数(振幅)が全体的に低下する傾向が確認された。

3.2.3 スペクトル面積 SA による健全度診断

衝撃振動試験や起振器試験等の振動試験により、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た。護岸の洗掘の有無を把握できる事が分かったが、健全度診断を行うためには診断指標を提案する必要がある。

衝撃振動試験による橋梁下部構造物の健全度診断においては、固有振動数を健全度診断指標として初期状態からの低下度や、固有振動数の標準値と実測値とを対比する事によって行われる。これは、橋梁下部構造物は桁重量が卓越するため一質点系でモデル化でき、振動モードの同定が容易なためである。これに対して、護岸のように背面地盤の拘束の影響が顕著な構造物では、振動モードが複雑で、固有振動数を指標とした健全度診断が困難な事が分かっている。

そこで、筆者らは図12に概念を示すようなスペクトル面積 SA を指標とした健全度診断法に関する検討を進めている。ここで、護岸の変状に伴い SA 値が増大するメカニズムは図13により理解できる。図13では、護岸が支持地盤と背面地盤に支持される梁要素として簡易にモデル化されている。ここで、護岸の洗掘が生じると基礎の地盤ばねによる拘束が減少あるいは喪失した結果として、構造物の卓越振動数帯域が低振動数側に移行するとともに、入力に対する応答が増大するため、振幅も増大する。

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にまとめる。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た。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い。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

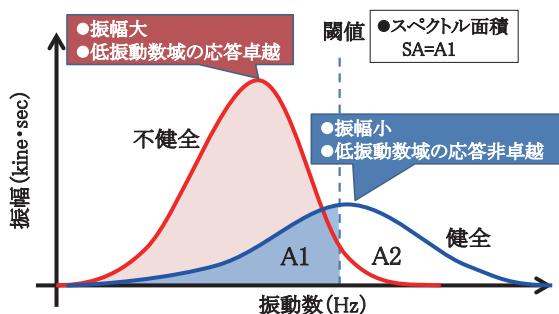


図 12 スペクトル面積 SA の概念図

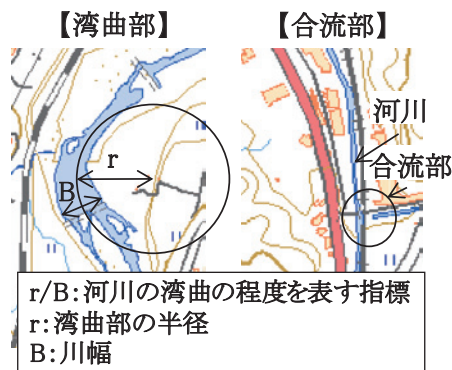


図 15 着目した地形要因の概念図

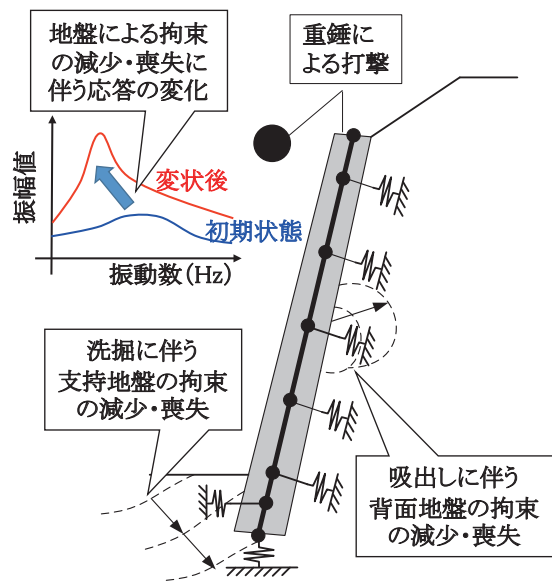


図 13 護岸の変状に伴う振動特性変化の概念図

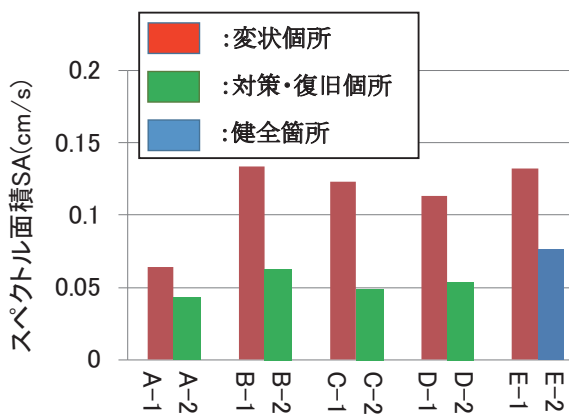


図 14 スペクトル面積 SA の比較結果

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事で、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事が出来る。

4. 地形条件を活用した危険箇所抽出法

災害前後の振動試験結果よりスペクトル面積 SA を指

標として比較する事で、護岸の洗掘の有無を判定できる事が確認できた。そのためには、近傍の健全な護岸との比較や災害前の計測結果との比較が必要である。

一方で、護岸は線状構造物であり、鉄道沿線の護岸全てについて振動試験を実施し災害前の初期値を把握する事は現実的では無い。このために、豪雨時等に護岸の洗掘が生じる可能性が高く、鉄道運行に与える影響が高いと考えられる箇所を抽出し、優先度の高い箇所から振動試験を実施し、初期状態を把握する方法が効率的である。

護岸において洗掘が生じる危険度は、河川流水の作用と護岸の位置関係に依存するため、潜在的に変状が発生しやすい場所があると考えられる。

そこで、既往の文献や鉄道事業者より提供を受けた、河川護岸における被害事例 71 データについて整理を行い、被害要因の分析を行った。本検討では、鉄道構造物等維持管理標準・同解説を参考にして河川の地形要因として、①河川の湾曲部、②合流部、③河川の狭窄部に着目した。図 15 に着目した地形要因の概念図を、図 16 に地形要因で被害事例を分類した結果を示す。狭窄部単独で変状が生じた箇所は無かったものの、上記の 3 条件に当てはまる現場が被害全体の約 80% を占めていた。また、これに当てはまらない箇所では、直線部において特に河床低下の影響が著しいと考えられる箇所で護岸が洗掘により被害を受ける事例があった。

また、湾曲部についても攻撃地形（曲線の外側部分）で被害を受ける事例が極めて多く、今回の事例分析では河川の流れの外側に位置する被害事例が湾曲箇所での被害事例のうち 92% を占めていた。これらの結果は、前述した地形要因と湾曲の程度および河川との位置関係を指標として、護岸の危険箇所の大部分を抽出可能であることを示唆している。

実務的には、これらの地形要因に加えて、例えば軌道と護岸天端の離隔距離等、鉄道運行に与える影響度を合わせて危険箇所を抽出し、振動試験実施箇所を選定する事が妥当であろうと考えられる。

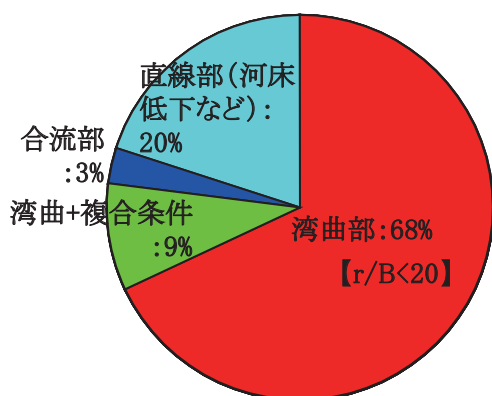


図 16 被災した護岸の地形要因による分類

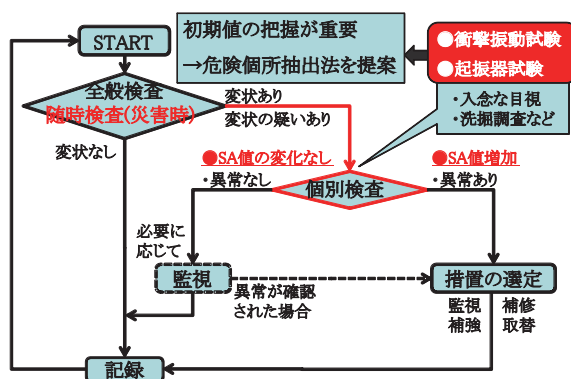


図 17 地形要因と振動試験結果を活用した護岸の健全度診断・維持管理法

5. 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

5.1 提案する健全度診断法

以上の検討に基づき、地形条件と振動試験結果を活用した護岸の健全度診断・維持管理の考え方を図 17 に示す。護岸の大規模な変状を引き起こす基礎下の洗掘については、進行性の把握が重要であるものの、目視による検査が困難である。このため、通常は全般検査や随時検査で変状が確認された後に、個別検査により措置を選定する。

検査時に変状が確認されれば事前の措置が可能となるが、豪雨が変状確認前に発生した場合には、洗掘により護岸が大きな被害を受ける可能性がある。このため、事前に目視によらず洗掘の進行性を把握する手段として、衝撃振動試験、起振器試験などの振動試験が活用できる。対象護岸の振動試験を事前に実施し、豪雨後等に再度試験を実施した結果を、事前試験の結果と対比する事で洗

掘の進行を把握する事が可能である。

一方で、線状構造物である護岸について、事前の振動試験を実施するのは実務上困難である。このため、地形条件や鉄道運行に対する影響度などを指標として、事前に試験を実施すべき危険箇所を抽出するのが効率的である。本報の分析により、地形条件としては河川の湾曲程度、護岸の位置、河川合流の有無、川幅の狭窄の有無などを指標として危険箇所を抽出することの有効性が確認された。また、鉄道運行に対する影響度については、護岸と軌道との離隔等が指標として考えられる。

5.2 今後の課題

本検討では、洗掘による護岸の変状を未然に防止するための健全度診断法として、地形条件と振動試験結果を活用した手法を提案した。振動試験による診断は、現状では豪雨前の試験結果などと比較することが必要となる。今後は、洗掘程度と護岸の安定性が振動試験結果に及ぼす影響の定量化が望まれる。

6. おわりに

線状構造物であり全線にわたり詳細な調査を行う事が困難な護岸について、地形条件や護岸の変状が鉄道運行に与える影響を指標として危険箇所を抽出し、振動試験結果から護岸の健全度を診断する手法を提案した。

今後、診断法の高度化のため、鉄道事業者の皆様のご協力を頂きながら、更なる検討を進めたい。

文 献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物維持管理標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物
- 2) 篠田昌弘, 中島進, 阿部慶太：鉄道もたれ壁の安定性に係る健全度診断法の開発, 土木学会論文集 C, Vol.68, No.2, pp.433-450, 2012
- 3) 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
- 4) 石田健治：羽越線村上～間島間高波による護岸倒壊と復旧, 日本鉄道施設協会誌, Vol.39, pp.454-456, 2001
- 5) 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・もたれ壁の健全度診断に関する研究, 土木学会論文集 C, Vol.71, No.4, pp.254-271, 2015