

# 振動波形から基礎の状態を探る



**佐名川 太亮**  
Taisuke Sanagawa  
構造物技術研究部  
基礎・土構造研究室  
主任研究員



**小松 灯**  
Akari Komatsu  
構造物技術研究部  
基礎・土構造研究室  
研究員



**中島 進**  
Susumu Nakajima  
構造物技術研究部  
基礎・土構造研究室長

## はじめに

物体を伝わる振動である波は、物体の状態によって変化することが知られています。この特性を活用し、橋りょう基礎の維持管理における試験法のひとつとして、衝撃振動試験を鉄道総研では過去に開発しました。

本稿では、衝撃振動試験の概要を紹介するとともに、現在開発している衝撃振動試験を応用した新たな評価手法について紹介します。

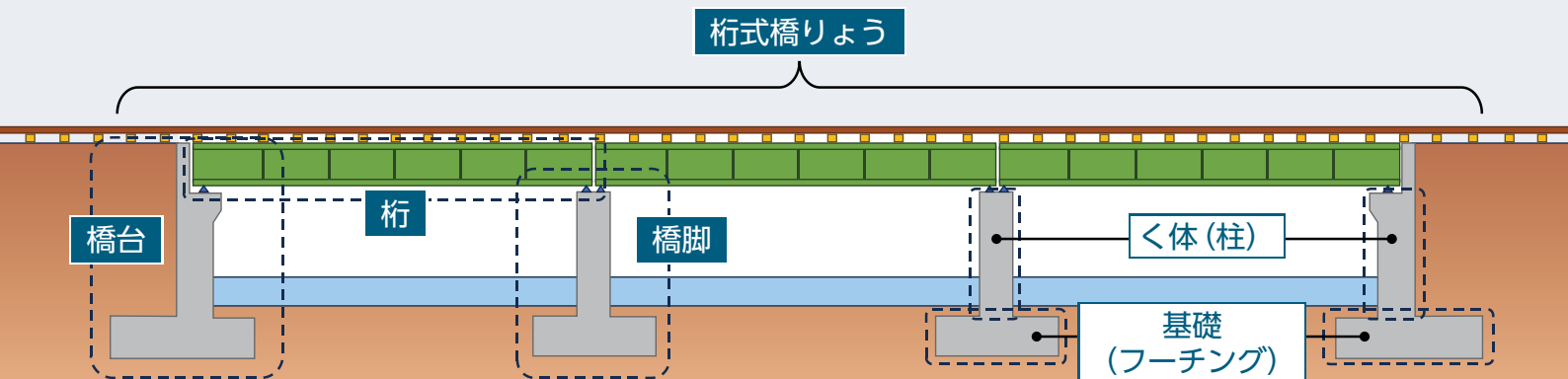
## 衝撃振動試験の概要

橋りょうの一部を構成する橋脚は地中に基礎を有し、橋桁を支える役割を担います(図1)。

河川に架かる橋りょうでは、増水などの影響によってひとたび橋脚に沈下や傾斜が生じると、修復することが非常に困難となるため、適切な維持管理や対策を行うことが重要です。鉄道構造物の維持管理における検査手法としては目視が最も基本となりますが、基礎は通常地中に設置されるため、直接的な目視による検査を行うことは容易ではありません。そこで鉄道総研では、重錘による打撃によって生じる波(振動波形)の特性から基礎の状態を把握することができる、衝撃振動試験を開発し、健全度評価や災害復旧などに活用してきました。

衝撃振動試験における具体的な作業の流れを

図1 橋りょう概要図



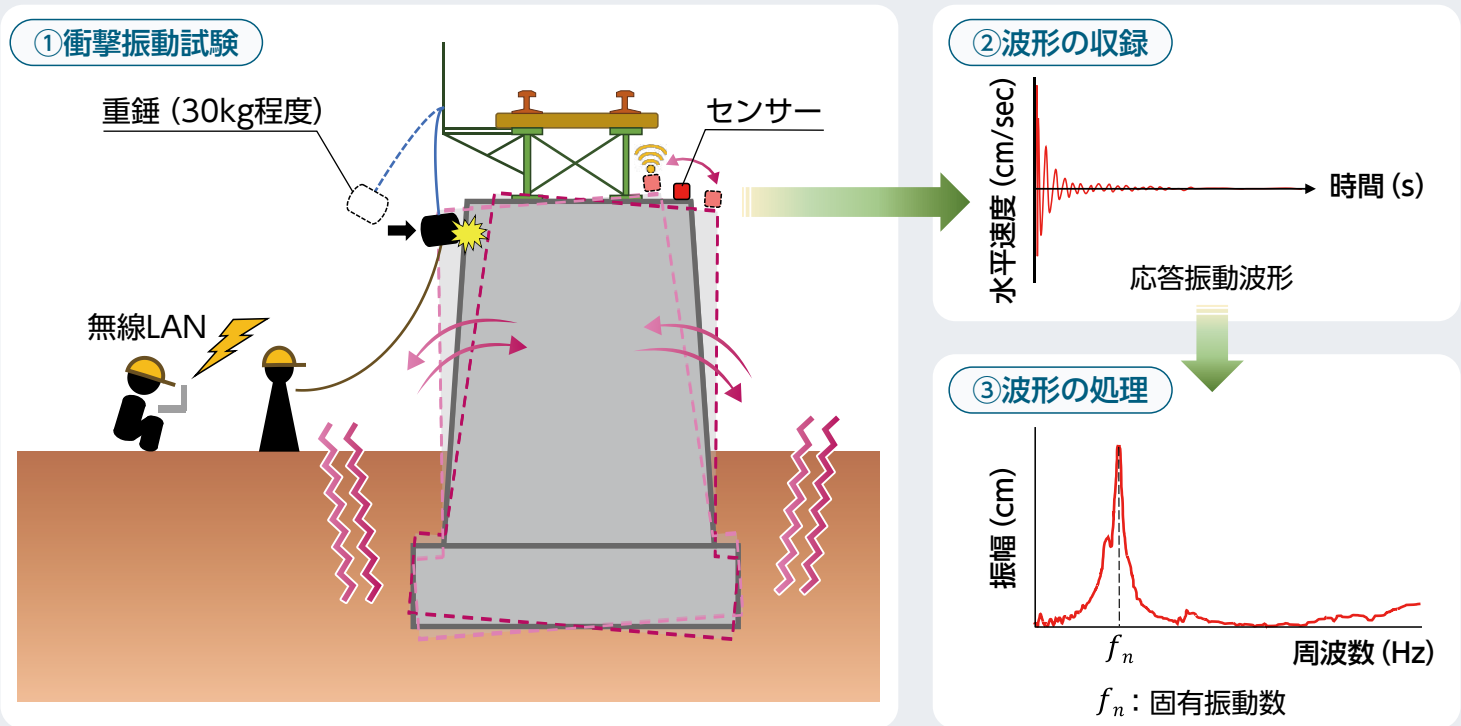


図2 衝撃振動試験の流れ

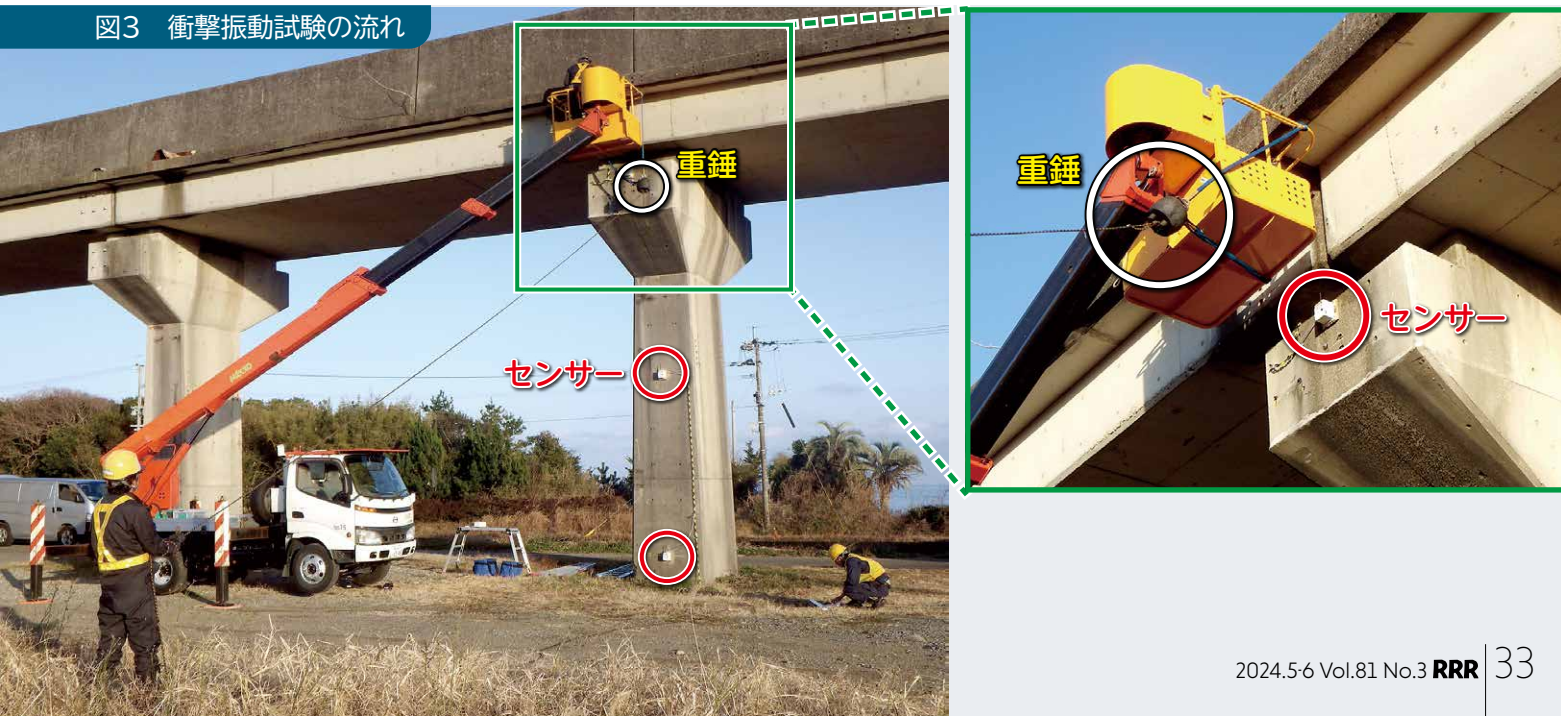
図2に、作業の様子を図3に示します。衝撃振動試験は、作業性や列車密度などに大きく左右されるものの1日で数基の橋脚に対して実施することができ、変状の発見や補強対策工の効果の確認において多数の実績があります。橋脚にセンサーを設置し、橋脚の天端付近に設置した重錘により橋軸直角方向に衝撃力を与え、その際の橋脚の振動波形を計測することで、固有振動数<sup>①</sup>を同定することができます。打撃に用い

る重錘は作業性を考慮して、一般的に30kg程度のものを用います。数回～10回程度重錘による打撃を行い、センサーによって計測された振動波形を重ね合わせることで、ノイズなどの影響を除去したきれいな振動波形を得ることができます。

**① 固有振動数**

構造物などがもつ固有の振動数の値で、質量や部材・地盤の剛性などによって決定されます。

図3 衝撃振動試験の流れ



固有振動数： $f_n$ (Hz)  
=1秒間に揺れる回数

理論式

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{ML^3}}$$

モデル図

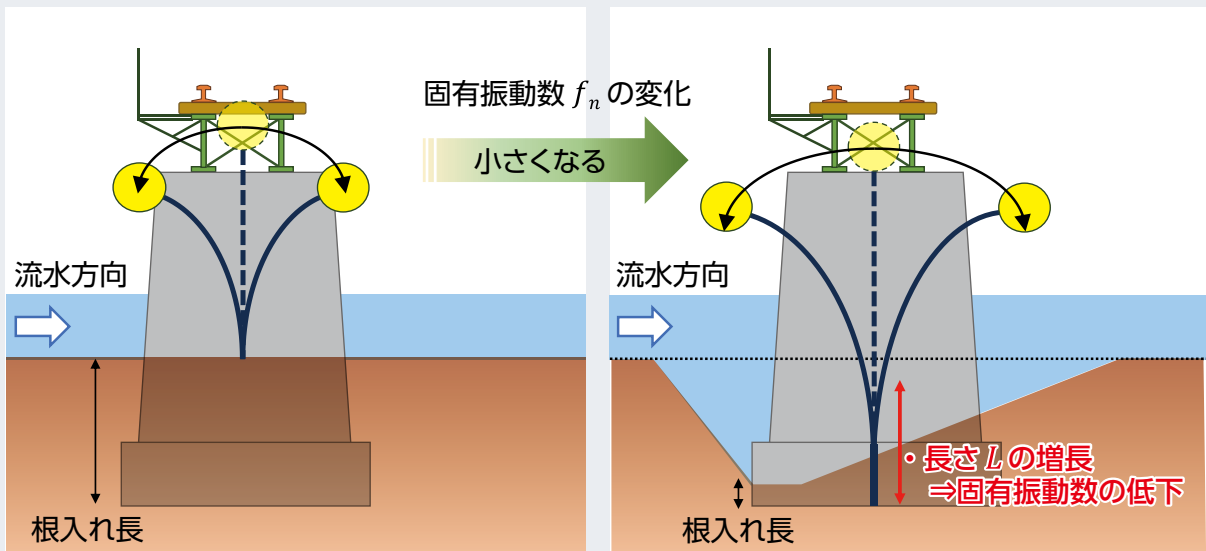
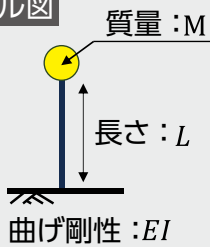


図4 根入れ長の低下による固有振動数の変化概念図

なお、衝撃振動試験は旧式の橋脚や高架橋を対象とした試験となります。背面に土を背負っている橋台や著しく背の低い橋脚など、振動しにくい条件の構造物においては、重錘の打撃によって有意な振動が発生しないため、衝撃振動試験による状態の評価が困難な場合が多いことに注意が必要です。

### 振動波形を用いた健全度判定の方法

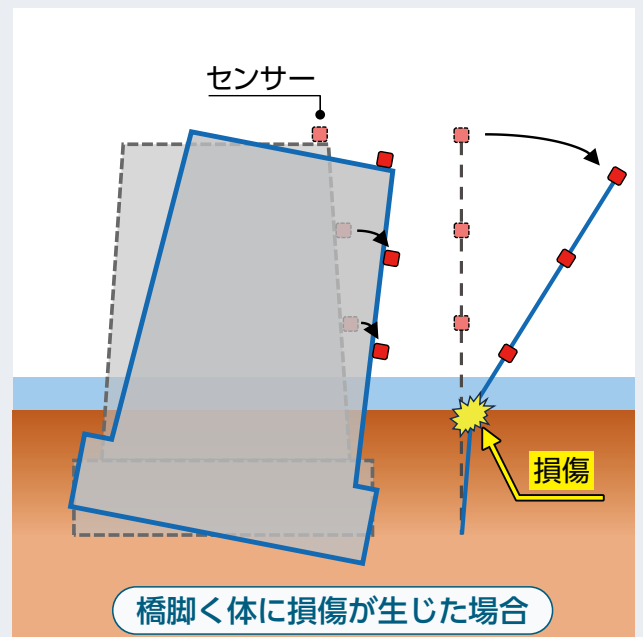
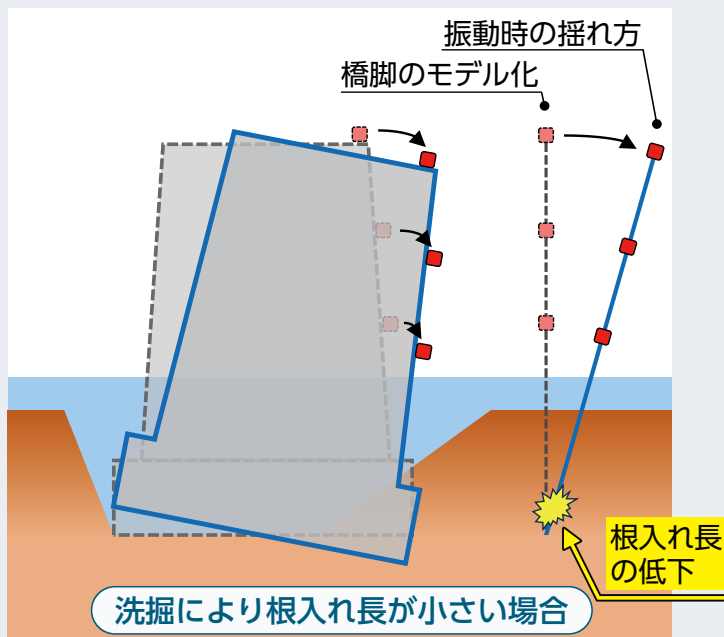
重錘の打撃により得られた振動波形の処理を

行うことで、橋脚の固有振動数を同定することができます。この固有振動数の値は、基礎の構造形式のほかに、地盤や橋脚などの状態から決まります。例えば、図4に示すように、洗掘<sup>※</sup>などにより基礎の根入れ長が低下した場合や橋

#### ※ 洗掘

橋脚基礎の前面において阻害された河川の流れが下降流となり、河床付近に渦が発生することで川底に堆積した土砂が巻き上げられ、橋脚基礎周りの河床材料が流失する現象。

図5 揺れ方の違いによる状態変化箇所の推測の例



脚く体に損傷が生じた場合には、固有振動数は低下します。そのため、実際の橋りょうにおける試験において固有振動数の低下が確認された場合には、地盤や橋脚に何らかの変状が生じている可能性が高いことを意味します。また、センサーを橋脚の天端部、中間部、下端部というように3か所に配置し、揺れ方を把握することで、状態の変化が発生している箇所を推測することもできます(図5)。

橋脚模型周辺を試験的に掘削し根入れ長が小さくなった場合の固有振動数の変化を図6に示します。橋脚周辺の地盤を掘削するにしたいが橋脚の固定度が低下し、固有振動数が低下しました。

なお、実橋りょうで衝撃振動試験を実施した場合には、図7に示すように、複数の卓越振動数が確認されることが大半です。これは、桁や電柱など、橋脚が支持する構造物の固有振動数が現れた結果です。このように複数の卓越振動数が確認された場合には、橋脚以外の桁や電柱などの構造物にセンサーを設置し、それぞれに対して衝撃振動試験を実施することで、各々の固有振動数を把握し、橋脚の固有振動数を選定することが望ましいです。

維持管理実務における健全度判断法としては、簡易法として、固有振動数の低下割合(判定指標 $\kappa$ =実測固有振動数÷過去の固有振動数)を利用した判定方法が整理されています。表1に示すように、低下割合に対応した判定ランクが経験的に整理

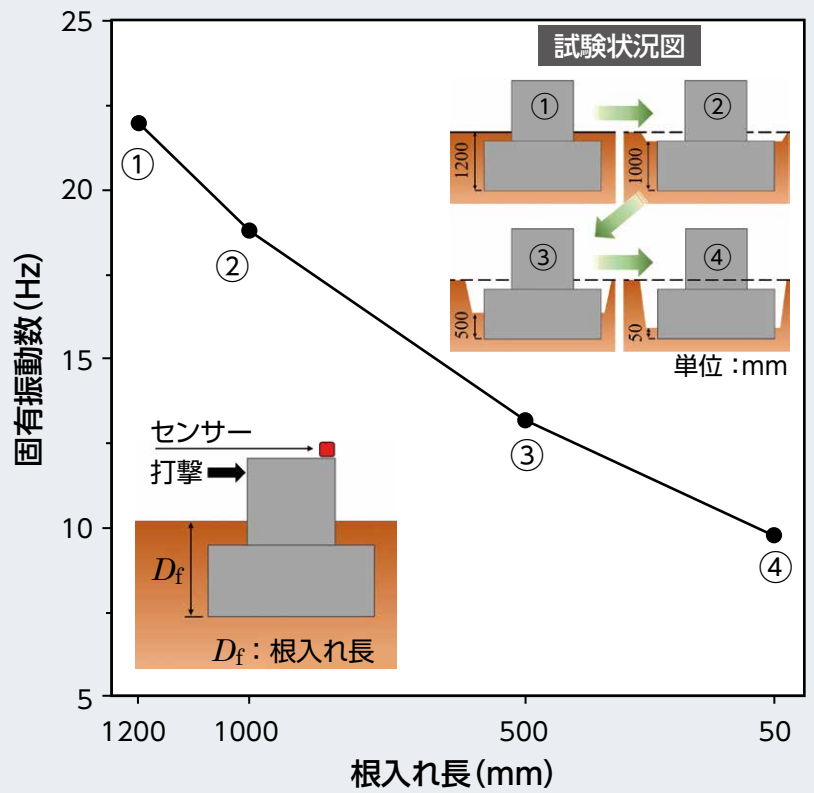


図6 固有振動数の変化図

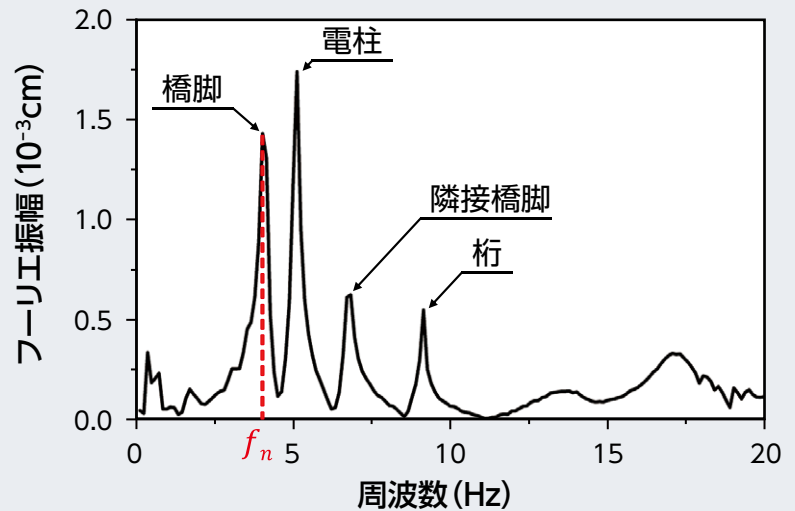


図7 実橋りょうでの衝撃振動試験結果

表1 固有振動数による判定指標 $\kappa$ の判定区分

| 判定指標 $\kappa$             | 判定区分     | 処置  |
|---------------------------|----------|---|
| $\kappa \leq 0.70$        | $\alpha$ | ( $\alpha 1$ ) 異常時外力に対して危険な変状がある。他の調査結果を参照し、補修、補強を考慮する。 |
| $0.70 < \kappa \leq 0.85$ |          | ( $\alpha 2$ ) 固有振動数の低下など進行性の把握を行う。                     |
| $0.85 < \kappa \leq 1.00$ | $\beta$  | 現状では問題は少ない。   |
| $1.00 < \kappa$           | $\gamma$ | 現状では変状は生じていないと考えられる。                                    |

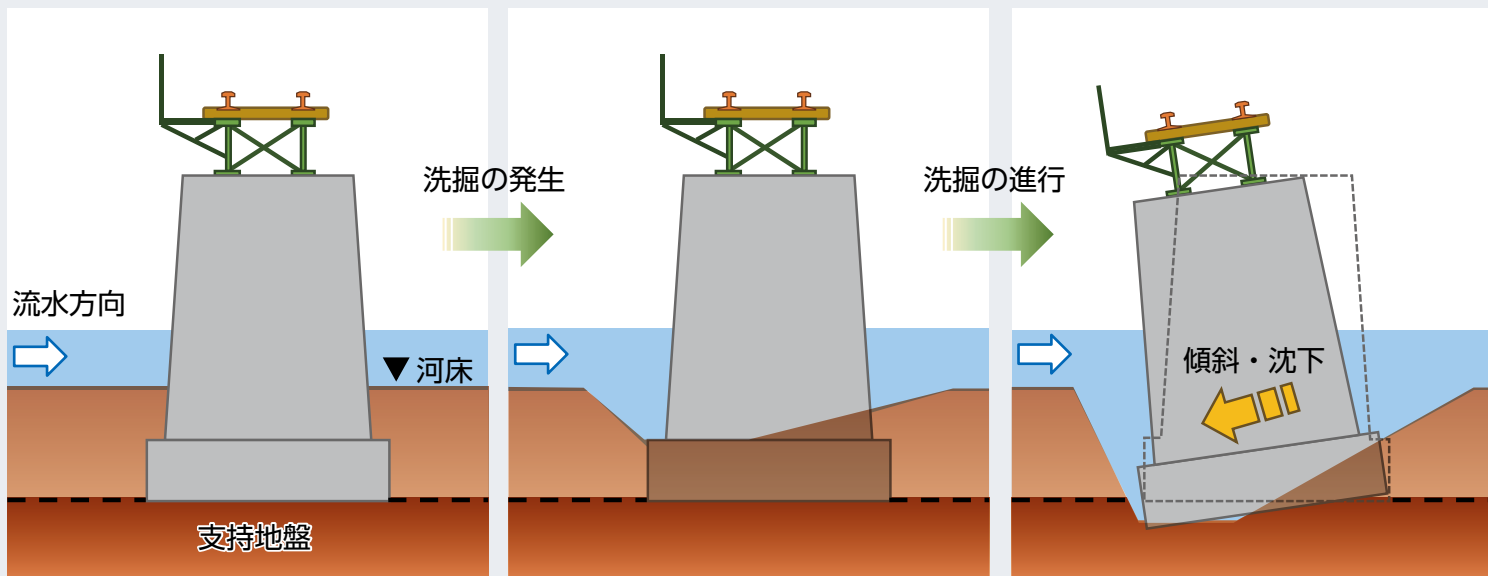


図8 洗掘被災までの概要図

されており、このランクを参考にして基礎の健全度を診断することができます。ただし、固有振動数から判定できるのはあくまで試験時の状態であり、今後の増水などによる影響を予測できるものではありません。そのため、橋りょうとしての最終的な健全度判定は、衝撃振動試験結果にくわえて、目視調査などで把握される周辺環境の変化なども考慮して行う必要があります。

### 鉛直振動波形を用いた 新たな評価手法の開発

近年の降雨量の増加により、洗掘によって河川橋りょう橋脚が被災する事例が増えつつあります。洗掘の範囲が基礎底面に達し橋脚直下の土砂が流失すると、地盤が橋りょうの自重を支え切れず橋脚に沈下・傾斜が発生します(図8参照)。再供用可否や補強要否を判断するにあたり、沈下・傾斜が発生した橋脚の支持性状を評価するためには、支持地盤が流失した範囲を

把握する必要があります。その範囲の把握を直接的に評価するためには橋脚周囲の水を取り除く必要があります、多くの時間や費用が必要でした。

そこで、簡易的な評価手法として衝撃振動試験を応用した評価手法を開発しました。評価手法の概要を図9に示します。通常、橋脚での衝撃振動試験では、水平方向の応答を計測するセンサーを配置しますが、本手法では橋脚天端の両端に鉛直方向の応答を計測するセンサーを配置し、重錘による水平打撃時の橋脚の回転挙動を計測します。この回転挙動から橋脚基礎の回転中心を推測することで、洗掘による支持地盤の流失範囲を推定することができます。橋脚模型や実橋脚を用いた検証実験により、本手法の妥当性を検証した結果、5%程度の精度で流失範囲を推定できることが明らかになりました(図10)。この手法は、すでに洗掘の影響により沈下・傾斜が生じた橋脚の診断にも試験的に採用されており、迅速な復旧方針の策定に活用されました。

## おわりに

本稿では、「波」を活用した鉄道橋りょうにおける維持管理の手法のひとつである衝撃振動試験について概説しました。また、衝撃振動試験を応用した、支持地盤の流出範囲を推定する新たな評価手法を紹介しました。これまで洗掘被災した橋脚の基礎底面下の状態を把握することは容易ではありませんでしたが、今回ご紹介した衝撃振動試験の拡張によって、簡易的ではありますが振動波形から基礎底面下の状態を評価することが可能となります。洗掘による橋りょうの被害が発生した場合において、本試験法および本評価手法が復旧法策定の迅速化の一助になれば幸いです。 **RRR**

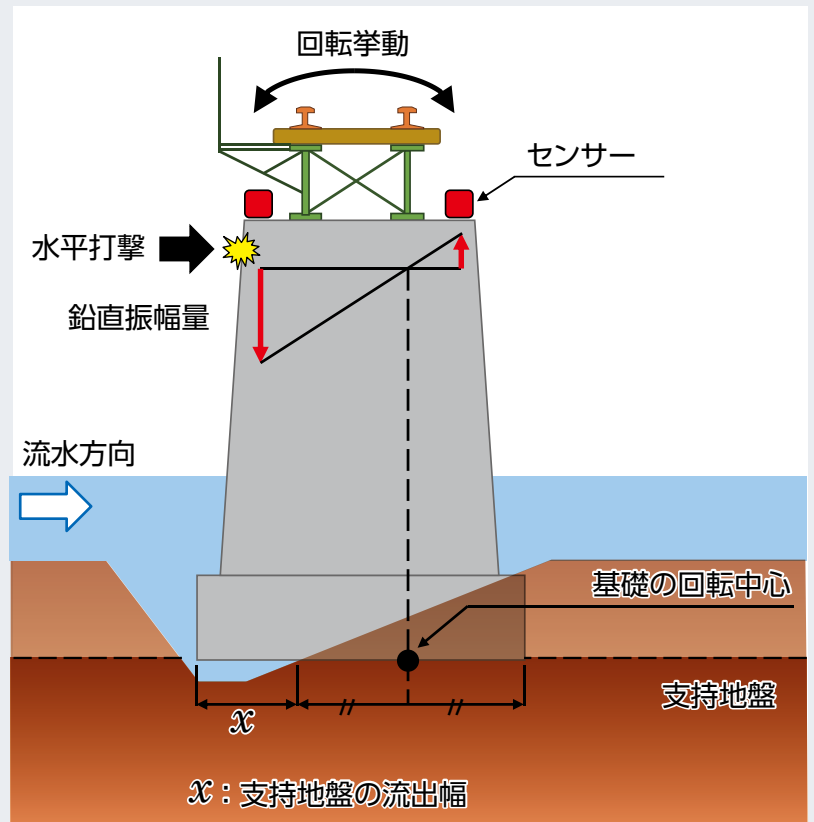


図9 支持地盤の流出幅を評価する手法の概要図

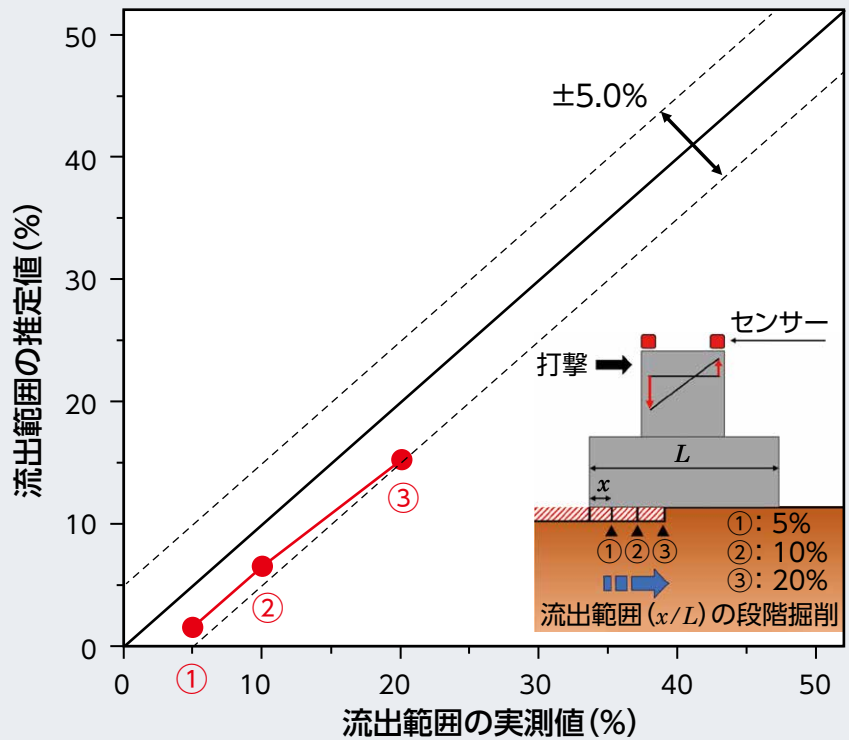


図10 評価手法の検証結果

## 文献

- 1) 西村昭彦, 中野聡: 衝撃振動試験による構造物の振動特性の把握, 第19回地震工学研究発表会, pp.481-484, 1987
- 2) 国土交通省鉄道局監修, 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・抗土圧構造物, 丸善出版, 2007
- 3) 小松灯, 中島進, 萩谷俊吾, 横山大智: 衝撃振動試験法による洗掘進行度と鉛直振動の相関分析, 土木学会第78回年次学術講演会, III-409, 2023