

# 固有振動数に着目した樋門の性能評価手法に関する実験的研究

## EXPERIMENTAL RESEARCH ABOUT THE PERFORMANCE EVALUATION METHOD FOR SLICEWAYS USING THEIR NATURAL FREQUENCY

大瀧 諭\*・小原 大輔\*\*・伊藤 繁美\*\*\*  
Satoshi OTAKI, Daisuke OHARA and Shigemi ITO

It is an important issue for efficient maintenance to evaluate the deformation of river structures. In this study, we focus on the natural frequency as a performance evaluation index of the sluiceways. We verified whether it is possible to grasp the state of deformation of the existing two sluiceways (A and B) by measuring the natural frequency of the gateposts.

At the A sluiceway, an impact vibration test was applied to verify the change in the natural frequency before and after damage to the gatepost, and at the B sluiceway, microtremor measurement was applied to verify the change in the natural frequency due to the change in earth pressure around the sluiceway and the change in the natural frequency before and after cutting the internal reinforcing bar of the gatepost. In view of the results of this study and trends in other fields, it was found that the natural frequency can be used as a performance evaluation index for sluiceways.

**Keywords** : *Natural frequency, sluiceways, performance evaluation, microtremor measurement, Impact vibration test*

### 1. はじめに

河川構造物の変状を適切に評価し、使用可能性に関する性能評価指標を構築する事や現在の機能低下状況を把握する事は、効率的に維持管理を行う上で重要な課題である。鉄道橋梁等では固有振動数による健全度評価が実施されるが、河川構造物では筆者らの知る限り、評価事例は見当たらない。そこで本研究では、樋門に求められる機能とそれが喪失するメカニズムを想定したうえで、樋門の性能評価指標として固有振動数に着目し、既存の樋門に対し現地実験を行い、計測にて門柱部の固有振動数とその変化の捕捉が可能か検証した。さらに、固有振動数に着目した樋門の維持管理・モニタリング手法としての適用性や展望等を報告する。

### 2. 樋門の維持管理上の課題と着目する評価指標

#### (1) 樋門の維持管理上の課題

樋門は堤防内を函渠で横断して設けられる制水施設であり、洪水時または高潮時においてゲートを全閉することで堤防としての機能を発揮するものである。

樋門は函渠と堤体の接触面に沿うルーフィング等によって堤防の弱部となり易く、万一機能を喪失すると氾濫被害が発

生し、社会経済に甚大な影響を及ぼすこととなる。通常、常時は待機状態となっているが、出水時には確実に止水機能が発揮されるための適切な点検、維持管理が必要である。

樋門は直轄管理区間だけでも約 8,400 基あり、河川管理施設の約 6 割が設置後 40 年を経過して老朽化が進行している<sup>1)</sup>。樋門の点検は「樋門等構造物周辺堤防詳細点検要領<sup>2)</sup>」にあるとおり、10年に1回以上の詳細点検(外観調査、函内調査等)を実施する規定となっている。よって普段は周辺堤防の目視点検によって機能低下を判断することになるが、変状が堤防の抜け上がりや陥没によって顕在化したときには、すでに相応の機能低下(水みちの発生、堤防の緩み等)が生じ、措置が必要な状況になっている可能性が高い。つまり機能低下が進行している構造物はどれか、変状が視認されるまで把握できない状況となっている。よって現状の機能低下の度合いを定量的に評価し、早期に詳細点検や維持補修が必要かを判断可能となる「性能評価指標」の確立が求められている。

#### (2) 樋門変状のメカニズムと着目する評価指標

表-1は樋門の機能と変状の関係を示したものである。樋門に要求される機能は止水(逆流防止)および排水(もしくは取水)機能であり、その機能の低下は周辺堤防からの漏水や堤防損壊、函体の漏水、ゲートの開閉不全等により顕在化する。

\* コンサルティング事業統括本部 河川水資源事業部 河川部

\*\* コンサルティング事業統括本部 地球環境事業部 地質部

\*\*\* コンサルティング事業統括本部 四国支店

表-1 樋門変状のメカニズム<sup>3)</sup>

機能	機能低下の状態	変状
・止水（逆流防止）機能	・周辺堤防からの漏水	・堤防のクラック、緩み、取付護岸のクラック ・函体底板下等の空洞化
	・周辺堤防の損壊	・函体等の破損 ・継手の破断
	・ゲートの開閉不全	・門柱等の変形、破損
・取水・排水機能	・函体の漏水	・函体の破損 ・継手の破断
	・流下能力不足	・函体内の土砂堆積 ・函体の過大な沈下

これら機能低下を誘発する変状として周辺堤防のクラック、ゆるみ、函体底板下等の空洞化、門柱・堰柱等部位の変形、破損が挙げられる。

本研究ではこれらの変状を数値的に評価可能となる性能評価指標として「固有振動数」に着目した。

一般的に固有振動数は次式で与えられる。

$$f = \frac{\lambda^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (1)$$

- ここに、f(Hz) : 固有振動数
- λ : 係数
- L(m) : 軸長(固定端とみなせる基部からの構造物の高さ)
- E(N/m<sup>2</sup>) : 弾性係数
- I(m<sup>4</sup>) : 断面2次モーメント
- ρ(N/m<sup>3</sup>) : 単位体積重量
- A(m<sup>2</sup>) : 断面積

固有振動数は樋門施設と周辺堤防を含む地上、地中の劣化状況が値に反映されるものと想定される。例えば断面欠損により、断面2次モーメント(I)が低下することで固有振動数も低下する。また、函渠周辺の空洞化や土圧の緩みにより、堤防と函渠が同一の挙動とならないために、振動する軸長 L が長くなることによっても固有振動数は低下する。そのため可視部に変状が認められない状態で固有振動数が減少した場合は何らかの劣化事象が地中部で発生していると考えることが出来る。

河川を横断する鉄道施設では、不可視部となる河床洗堀を念頭に、運行時の安全性と走行性能に着目した施設管理の観点から、健全な橋脚の固有振動数の実測値が収集されている。収集されたデータは 1,000 基以上であり、統計解析により基礎形式別に橋脚高さ、土被り、桁重量などを要因として分析され、固有振動数の標準値が作成されている<sup>4)</sup>。よって同様に樋門の固有振動数を性能評価指標として用いることが可能と実証されれば、膨大な施設数に対し、洪水や地震被災後の非常時も含め、総合的に見て機能低下している施設

の見落としを回避する一次スクリーニングの手段として有効に活用できる可能性がある。本研究は固有振動数によって樋門の性能を評価可能か、現地実験を通じて検証したものである。

### 3. 調査研究方法

研究調査対象は、既存の2樋門(A樋門、B樋門)であり、A樋門には衝撃振動試験、B樋門には常時微動測定をそれぞれ適用し、固有振動数を推定した。

#### (1) 衝撃振動試験によるA樋門の調査研究方法

A樋門は1961年に竣工され、鉄筋コンクリート造、鋼製ローラゲートを有する。形状は、有効高 2.9m×純径間 4.0m×1門である。当樋門は調査の2015年当時に新設工事が開始されており、対象樋門は撤去される前の既設樋門であった。これに段階的に損傷を与えて、その都度、衝撃振動試験を行うことで、以下の2点を検証するものとした。

- ・固有振動数計測(樋門)への衝撃振動試験の適用性
- ・樋門損傷(有効断面積低下)時の固有振動数の変化

#### 1) 調査方法

衝撃振動を測定する振動計は、門柱の片面の上端、中間、下端ならびに断面が異なる柱基部より下方の合計4箇所を設置した。重錘により門柱の上端、中間、下端を水流直角方向に打撃した(図-2参照)。

使用した重錘は重量が30kgで、打撃を行う際に構造物に損傷を与えないよう緩衝材として外面にゴムを巻いている(図-1参照)。使用したセンサー((公財)鉄道総合技術研究所開発の橋梁下部工・土留め健全度評価システム「IMPACT IV」)は加速度、速度、変位の測定が可能で、測定は全て速度モードで行った。

測定した波形は原位置にて波形の良否判定をしながら良好な波形5~10波を収録した。固有振動数を推定する解析(フーリエ解析)を行うにあたり、バラツキをならすため、取得した5~10の振動波形を時系列上で重ね合わせたスタッキング処理を行った。



図-1 使用した重錘

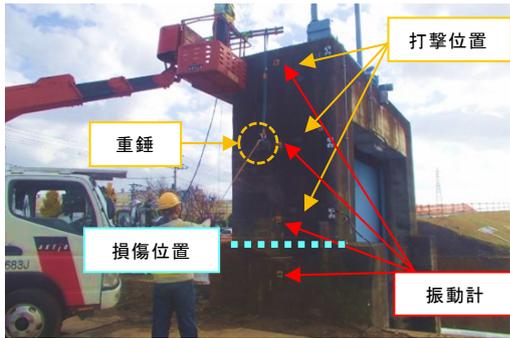


図-2 調査計測位置

損傷は表-2のとおり4段階を与えた。門柱の固有振動数への影響が大きいと想定される門柱基部に損傷を与えた。はつり深5cmと18cmは、鉄筋より表面のひび割れが鉄筋背面に進行する現象を再現している。鉄筋切断は鉄筋腐食が進行し鉄筋が機能喪失しRC構造が成立しない状態を再現している。

## 2) 解析方法

現地測定後のデータは、下記の手順により固有値振動数および振動モードを決定した。

処理①: 各測定点とも、応答波形を重ね合わせ、この重ね合わせ波形についてフーリエスペクトルと位相差スペクトルを算定する。

処理②: 構造物の固有振動数は、天端、柱中間、柱下端各々のフーリエスペクトルおよび位相差スペクトルを用いて総合的に判断し、決定した。

## (2) 常時微動測定によるB樋門の調査研究方法

B 樋門は 1943 年に竣工され、鉄筋コンクリート造、鋼製スライドゲートを有する。形状は、有効高 3.3m×純径間 2.2m×1 門である。当樋管は調査当時に撤去工が着手されており、撤去前を含む、撤去工の各ステージ(表-3 参照)において、常時微動計測と解析を行うことで、以下の 3 点を検証するものとした。

- 固有振動数計測(樋門)への常時微動計測の適用性
- 土圧(堤防)の拘束効果による、樋門の固有振動数の変化
- 樋門損傷(有効断面積低下)時の固有振動数の変化

### 1) 調査方法

調査は門柱天端および門柱基部に常時微動計を 2 セット設置し、同時に微動計測を行った。使用した装置は、汎用的なセンサー機器として、サーボ型速度計(株東京測振製 VSE-15D、計 6 台(2 式(水平 2 方向+鉛直 1 方向))、計測システム(株東京測振製 SPC-52、1 台)である。微動計設置位置と設置状況を図-3 に示す。撤去前を含む、撤去工の各ス

テージにおいて、表-3の通り、計4回の測定を実施した。測定については、日中は撤去工が行われていることから、工事終了後の夜間(20時以降)に測定を行った。

表-2 損傷の段階





図-3 調査計測位置と使用した常時微動計

各測定は、水流方向、水流直角方向の水平 2 成分と鉛直成分の計 3 成分として、計測計 1 時間程度とした。サンプリング周波数は 200Hz である。

第 4 回測定では門柱部の 1 面をはつり、内部鉄筋コンクリートを切断した。鉄筋切断は A 樋門と同様、鉄筋腐食が進行し鉄筋が機能喪失し RC 構造が成立しない状態を再現している。

2) 解析方法

現地測定後のデータは、下記する計算処理を行い、卓越振動数を把握した。

処理①: 計測各 1 時間の波形記録において、車両等のノイズの影響が無いと思われる微動レベルが小さい時間帯を 3 時間帯ずつ目視にて抽出した。このとき、1 時間帯あたり 81.92 秒とした。

処理②: 抽出した時間帯に対し、FFT 解析を実施した。この時、Parzen ウィンドウにてバンド幅を 0.05Hz として、スペクトルの平滑化を行った。

処理③: 伝達関数として、基礎のスペクトルと、天端のスペクトルの比を求めた。その比のピークから卓越振動数とした。スペクトル比が 1 以上であれば、天端地点で振動増幅、1 未満であれば減衰、1 であれば同等と評価され、増幅する卓越振動数は構造物の固有振動数と考えられる。

4. 調査研究結果

(1) 衝撃振動試験を適用した A 樋門の調査結果

1) 固有振動数

構造物の固有振動数は現地にて収録した応答波形をフーリエ解析 (FFT 解析) し、得られた速度振幅スペクトルと位相差スペクトルから決定した。固有振動数は振幅のピーク付近

表-3 常時微動測定の様式

測定	状況	目的
第1回測定	開削工事前 (管理橋や天端の機側盤等撤去後) 	常時微動測定を用いた河川構造物の固有振動数推定の適用性
第2回測定	主に下流側および樋門背後の堤防開削の実施後 	土圧 (堤防) の拘束効果による、河川構造物の固有振動数の変化
第3回測定	上下流側および樋門背後の堤防開削実施後 	土圧 (堤防) の拘束効果による、河川構造物の固有振動数の変化
第4回測定	河川構造物 (門柱) に損傷を与えた後 (門柱基礎部の片側 1 面のはつりと鉄筋切断)  	損傷を受けた河川構造物の固有振動数の変化

で、位相差スペクトルが 0°または 180°付近を示す振動数とした。天端打撃のケースにおいて、健全時は、全体系の固有振動数が 9.521Hz (図-4 の青色)、門柱操作台からなるラーメン部材の固有振動数が 29.541 Hz (図-4 の赤色)であった。

18cm はつり後、全体系の固有振動数が 9.521Hz (図-5 の青色)、門柱操作台からなるラーメン部材の固有振動数が 29.053Hz (図-5 の紫色)であった。ラーメン部材を表す 29Hz 付近の固有振動数が、29.541Hz (図-4 の赤色)から 29.053Hz (図-5 の紫色)へ低下した。

2) 振動モード

振動モード図は、構造物がその振動数で振動している際の、測点での変位(振幅)であり、上端に設置した測点の振幅を 1.0 とした時の比で相対的に整理した。

表-4 に示すとおり、天端打撃の固有振動数が 9.521Hz の振動モード図は、折れ点が見られず、柱部材および基礎部材(ボックス部)の構造物全体が一体として挙動をしているため全体系の固有振動数と考えた(本論文では記載していないが別の樋門において現地観測結果と全体系としてモデル化した固有値解析結果がほぼ一致することを確認している)。他方、天端打撃の固有振動数が 29.053Hz~29.541Hz では上端の振幅量が中間、下端より大きく、柱部材のみが片持ち梁のように揺れている振動モードであった。18cm はつり後、29.541Hz から 29.053Hz に振動数が低下した時点において、振動モードは、はつり箇所近傍にて折れるモードを示した。このため、この固有振動数は部材系の固有振動数と考える。

表-4 固有振動数と振動モード(天端打撃の場合)

ケース	固有振動数(Hz)	
	全体系	部材系
① 健全時	9.521 	29.541 
② 5 cm はつり後	9.521 	29.541 
③ 18 cm はつり後	9.521 	29.053 
④ 鉄筋切断後	9.521 	29.053 

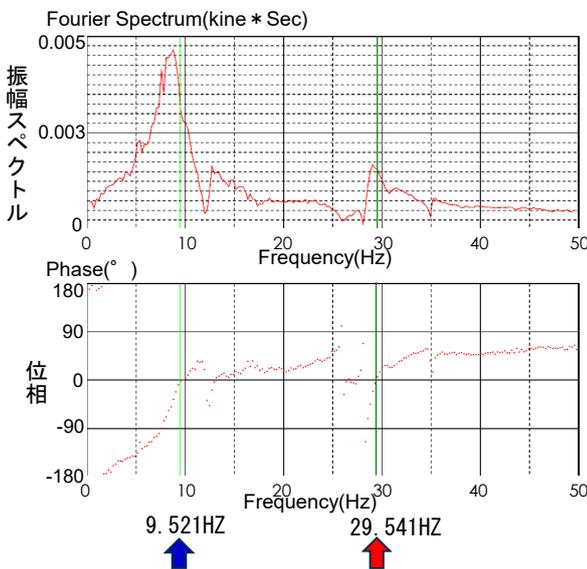


図-4 スペクトル図(健全時の門柱上端センサー)

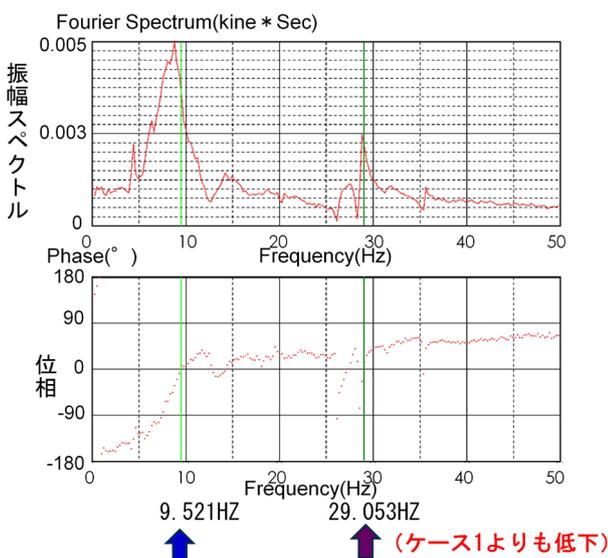


図-5 スペクトル図(18cm はつり後の門柱上端センサー)

(2) 常時微動測定を適用した B 樋門の調査結果

各測定における常時微動波形のフーリエ解析を行い、伝達関数を計算した。さらに、伝達関数における 3 時間帯の相加平均値として各回の卓越振動数を決定した。その結果、水流直角方向および水流方向の卓越振動数は表-5 のとおりである。各計測回で再現性を有したことから、卓越振動数は当門柱の固有振動数であると評価した。一方、鉛直方向については明瞭なピークを呈しなかったため、以降の検討では対象外とした。

次に、水流直角方向を例に、各測定回の伝達関数を図-6 に示す。水流直角方向においては、各計測回を通じて、卓越振動数は徐々に低振動数に移行する傾向を明瞭に示した。水流方向も同様な傾向であった。

各計測回における固有振動数の変化を図-7 に、固有振動数の変化率を表-6 にまとめた。周辺土圧が無くなった状態、すなわち、第 3 回と第 1 回目の比較として、6%程度の固有振動数の低下が認められた。また、第 4 回目と第 1 回目の比較、すなわち、初期状態から堤防土圧と鉄筋切断を経た状態で、最大 17%超の固有振動数の低下が認められた。鉄筋切断前後の変化としては、最大 11%超の低下であった。水流直角方向において、固有振動数の低下率が大きいのが、これは、水流直角方向で断面欠損となる 1 面をはつたことが原因と考えられる。

表-5 常時微動計測による卓越振動数

方向	測定	卓越振動数(Hz)	伝達関数
水流	第 1 回	7.74	25.53
	第 2 回	7.26	22.71
	第 3 回	7.15	21.11
	第 4 回	6.81	25.97
水流直角	第 1 回	12.54	21.16
	第 2 回	12.46	19.78
	第 3 回	11.68	20.40
	第 4 回	10.39	17.47

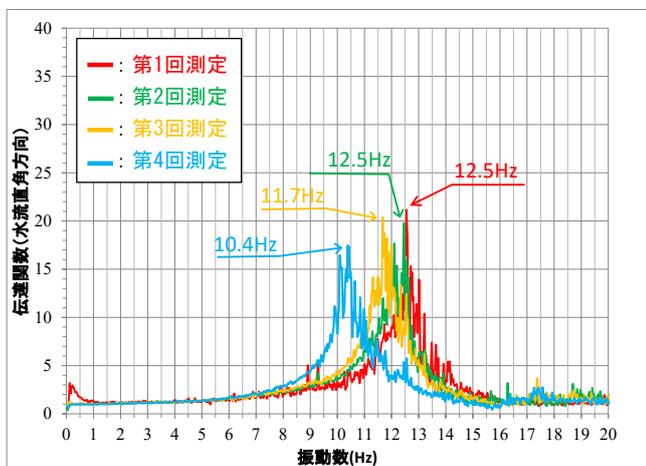


図-6 伝達関数(水流直角方向)

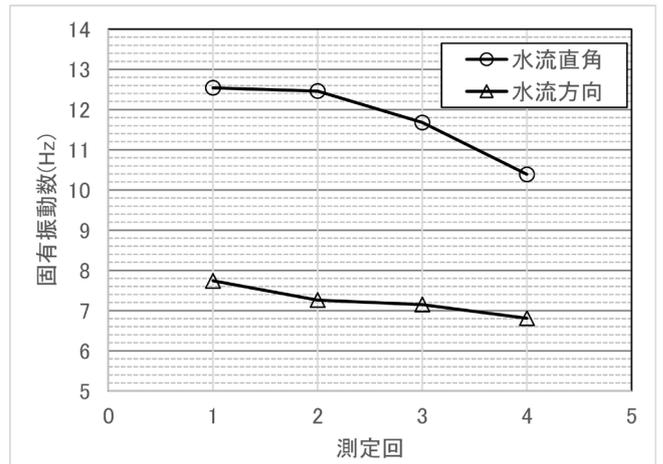


図-7 固有振動数の変化

表-6 固有振動数の変化率

測定	水流方向	水流直角方向
第 2 回/第 1 回	-6.27%	-1.80%
第 3 回/第 1 回	-5.76%	-6.40%
第 4 回/第 1 回	-11.77%	-17.30%
第 4 回/第 3 回	-6.38%	-11.64%

以上より、B 樋門においては、①水流直角方向および水流方向ともに、再現性のある振動数が卓越することから、この卓越振動数が門柱の固有振動数と推定された。②土圧(堤防)の拘束効果として、門柱の固有振動数を高振動数へ移行させる効果があるものと推定された。

③構造物が損傷を受けることにより、門柱の固有振動数が低振動数へと移行することが分かった。

5. 考察

(1) 固有振動数に着目した指標の適用性と適用限界

1) 固有振動数に着目した指標の適用性

A 樋門において、複数箇所にセンサーを設置した衝撃振動試験を適用することにより、固有振動数と振動モードを把握することができた。鉄筋コンクリート断面のひび割れの部材劣化の各段階に見立てた損傷を与えて、29.541Hz から 29.053Hz への約 0.5Hz の固有振動数の低下を確認した。衝撃振動試験の分解能は 0.01Hz(計測システムメーカーのヒアリングによる値)であるため、損傷を与えることで生じた 0.5Hz の低下は有意な差であると考えられる。そのため、固有振動数により、構造物の部材劣化に起因する変状を把握できると考える。

さらに、A 樋門では、振動モード図の分析により、柱部材系と全体系での 2 つの固有振動数を確認できた。とりわけ全体系の固有振動数を計測できたことは、目視では確認できない地中の基礎の状態を、固有振動数により把握できる可能性があることを示唆している。老朽化した杭基礎形式の河川構造物においては、基礎底面における洗掘やパイピング現象などにより杭頭部が空洞化する現象が懸念される。そのような疑い

がある構造物に対して衝撃振動試験を実施し、同じような構造形式で健全な構造物の振動試験の結果と比較し、固有振動数や振動モードに差異が生じているかどうか今後知見を積み重ねていくことが望まれる。

B 樋門においても、各計測回において 0.1Hz 程度以上の変化が認められることから、周波数分解能 0.01Hz に比して、有意な差が現れたと考える。本調査における堤防土圧の撤去や鉄筋切断は、構造物の終局状態に至るような変化を想定したものであるが、固有振動数の変化により、構造物の維持管理上の課題である変状と機能低下を示す状態を把握できることが期待される結果と考えている。

構造物の健全度評価指標として、先駆けて固有振動数を取り入れた鉄道分野においては、固有振動数の低下率から、躯体の剛性や地盤の強度低下の程度が推定できるとされており、洪水による橋脚基礎洗掘といった、地中や水中の見えない箇所、かつ大きな損傷のスクリーニングを主対象として適用されている<sup>4)</sup>。さらに、鉄道橋脚の土被り厚と固有振動数には、土圧拘束効果とみられる正の相関が認められ、橋脚洗堀を対象として被災直後の固有振動数の低下と補強工直後の固有振動数の上昇が報告されている<sup>4)</sup>。本調査結果および他分野の動向を鑑みると、樋門の固有振動数を性能評価指標として活用でき、現地実装することは可能であると考えられる。特に、膨大な施設数に対し、洪水や地震被災後の非常時も含め、総合的に見て機能低下している施設の見落としを回避する一次スクリーニングの手段として有効活用することが期待される。ひいては、施設の管理省力化にも寄与できる可能性がある。

## 2) 固有振動数に着目した指標の適用限界

A 樋門では試験前は、部材に少しずつ損傷を与えることで固有振動数も少しずつ変化するものと予想していた。しかし、A 樋門の天端打撃では、健全時と 5cm はつり後で固有振動数が同じで、5cm はつり後から 18cm はつり後で約 0.5Hz の低下があり、18cm はつり後と鉄筋切断後で固有振動数が同じというように固有振動数は小さな変状を精妙に反映しなかった。この原因は、A 樋門の縦横比が小さいマッシブな形状であるためと考える。そのため、A 樋門のようにマッシブな樋門に対しては、小さな断面欠損は固有振動数の変化をもたらさない可能性があるため、地中の大きな部材欠損が生じるといった不可視部の大きな変化を見逃さないスクリーニングとしての用途に適用する必要がある。また本調査においては、周辺地盤の空洞の規模や状態、損傷状態を検知できるかにおいては、定量的な分析にはまだ至っていない。撤去予定の樋門に対し、人工的な空洞を作成し測定を行うことや、段階的に損傷を与えたときの固有振動数の変化を測定するなど、実験で実証することも重要と考える。

## (2) 樋門の性能評価手法に関する今後の展望や課題

### 1) 性能評価手法確立のための事例蓄積

上述した通り直轄管理区間のみでも約 8,400 基ある樋門の性能を評価し、不可視部の空洞化等も含め、劣化が進行している構造物を極力簡易な計測とモニタリングにて抽出ための手法として本研究成果が活用されることを期待する。

本調査研究では、衝撃振動試験および常時微動測定を適用し、樋門の固有振動数を推定した。一方で、鉄道構造物における維持管理の効率性向上等を目的として、ドップラーレーザーを照射し、対象構造物の固有振動数を推定することが実施されている<sup>5)</sup>。紙面の都合上割愛するが、著者らの研究結果では、より簡易に固有振動数を計測すべく、樋門に対しドップラーレーザーを適用した結果、常時微動測定と調和的な固有振動数を推定できることを確認している。ただし、事例数としては数事例に留まるため、今後、検証事例を蓄積し、評価手法の妥当性を検証する必要があると考えている。今回報告した 2 手法については、構造物にセンサーを接触させて測定する方法であり、現地状況により、測定効率が下がる場合が想定される。そのため、測定の迅速性を踏まえ、離れた場所から非接触で測定できるドップラーレーザーの適用を想定する必要がある。様々な現地条件においても、樋門の固有振動数を測定できることが、本研究で提案する性能評価法を現地実装する上で重要である。

### 2) 性能劣化シミュレーションとの比較・検証

樋門の変状の程度が固有振動数の低下に及ぼす影響を設計段階でシミュレーションしておくことが重要である。性能劣化シミュレーションとして、塑性ヒンジ発生箇所とクラック深さの組み合わせによったシミュレーションや不可視部における地盤の緩みや函体空洞発生をモデル化したシミュレーションを行い、土圧の拘束や荷重条件の変更による解析値と計測結果の相違を詳細に把握することが今後の課題である。また、今後の知見の集積が必要であるが、シミュレーションによる固有振動数と施工時に計測された固有振動数の比から、樋門の施工精度の妥当性評価に活用できる可能性があると考えられる。

## 6. おわりに

本調査研究では、既存の 2 樋門に対し、衝撃振動試験および常時微動測定を適用し、固有振動数に着目した性能評価手法に関する実験的研究を実施した。その結果、樋門の性能評価指標として固有振動数が活用できるという成果を得た。今後の展望や課題を踏まえ、当該手法が新たな河川管理手法の一手法となれば幸いである。

謝辞：本調査研究は流域水管理研究所およびパシフィックコンサルタンツ株式会社と共同で実施したものであり、対象樋門の河川管理者ならびに樋門の撤去工事業者の関係各位

に、現地測定にあたり、多大な協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 齋藤博之:これからの河川管理、河川構造物管理研究セミナー、2018
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局治水課:樋門等構造物周辺堤防詳細点検要領、2012
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局:堤防等河川管理施設及び河道の点検・評価要領、2019
- 4) 西村昭彦:衝撃振動試験による構造物の健全度評価、2015
- 5) 上半文昭:構造物診断用非接触振動測定システム「Uドップラー」の開発、鉄道総研報告、Vol.21、No.12、pp.17-22、2007