

平成29年度

河川用ゲート設備の点検・診断手法に
関する調査試験

平成30年 3月

国土交通省 関東地方整備局
関東技術事務所

要 旨

河川用ゲート設備は、高度成長期以降急速に整備が進んだことにより、今後設備の老朽化による維持管理コストの増大が懸念されているため、維持管理の合理化・効率化が求められている。そして、この実現には、設備の劣化状況を的確に把握し、状態に合わせた保全を行う「状態監視保全」が有効である。

状態監視保全には、対象となる設備の状態を定量的に把握する設備診断技術が必要であるが、一般的な設備診断技術は稼働時間が多い常用系設備で適用されていることに対して河川用ゲート設備は待機系設備であることから、一般的な設備診断技術で十分とはいえない。

そこで本調査では、河川用ゲート設備の故障実績を解析し、監視対象機器及び状態監視項目の抽出、多様な診断技術の試行・検証を通じて、現場への普及に資する診断技術の選定と評価基準の検討等を行った。本報告は、平成 27 年度から平成 29 年度に実施した本調査の成果についてまとめたものである。

河川用ゲート設備の点検・診断手法に 関する調査試験

目 次

1.	まえがき	1
2.	調査内容	1
2. 1	平成27年度における調査内容	1
2. 2	平成28年度における調査内容	2
2. 3	平成29年度における調査内容	2
3.	調査結果	2
3. 1	故障情報の整理・分析	2
3. 2	ゲート設備の新たな状態監視技術の調査	8
3. 3	適用性の評価	9
3. 4	新たな診断技術の検討	12
3. 5	ゲート設備における「診断技術」のとりまとめ	23
3. 6	診断技術の評価基準の検討	27
3. 7	精密診断マニュアル（素案）の作成	32
3. 8	電動機不具合検証	33
3. 9	精密診断マニュアル（試行案）の作成	40
4.	今後の課題及び方針	41

河川用ゲート設備の点検・診断手法に関する調査試験

1. まえがき

河川用ゲート設備（以下「ゲート設備」という。）は、水門・樋門・樋管における逆流防止・水流制御などを行うことで国民の生命・財産を守る重要な社会資本であるが、河川ポンプ設備と同様に高度成長期以降急速に整備され、今後老朽化施設の増大が想定されている。

国土交通省では、平成20年度より「河川用ゲート設備点検・整備・更新検討マニュアル(案)」の運用を開始し、設備の整備・更新の優先度決定プロセスの合理化を図ってきた。しかし、設備の健全度をより効果的に把握する必要性が高まっている現状に鑑み、平成26年度に当該マニュアルを状態監視保全の推進を主たる目的とした「河川用ゲート設備点検・整備・更新マニュアル(案)」として改定し、平成27年度より運用している。

しかし、ゲート設備は稼働する時間が少ない待機系設備が多く、稼働する部分の速度も低いことなどから、常用系設備の診断技術では一般的な振動解析等も実施されておらず、状態監視保全を行うための（計測データによる）傾向管理及び診断手法は確立されていないのが実態である。

本調査は、①河川用ゲート設備の故障傾向の分析（リスク分析）、②対応策としての状態監視項目の抽出、③新たな診断技術による精密診断マニュアル（試行案）のとりまとめを行うものである。

2. 調査内容

2. 1 平成27年度における調査内容

平成27年度は、ゲート設備の故障実績に基づくデータ整理・解析、現行の点検手法の枠を超えた新たな診断技術の調査、有効と考えられる一部技術についてのトライアル試験を行った。

①故障情報の整理・分析

構成設備・機器の故障傾向を把握することを目的として、河川用ゲート設備748件の故障情報を収集し、「装置名称」「機器名称」「発生時の状態」「故障モード」「故障原因」「故障の程度」等に区分して整理した。

②ゲート設備の新たな状態監視技術の調査

ゲート設備の点検・診断において標準的に使用されていない新たな状態監視技術を対象として、どの機器にどのような技術が適用できそうか、幅広く調査を行った。

③適用性の評価

前項にて幅広く収集した点検・診断に適用可能と考えられる技術について、適用できるゲート設備の構成機器を明確にし、実際のゲート設備にて試行を実施し、ゲート設備への適用性について評価し、以下の6技術を抽出した。

- ・温度分布（赤外線サーモグラフィ）
- ・漏洩電流（漏電測定器）
- ・鋼材厚さ（超音波厚さ計）
- ・潤滑油性状（簡易潤滑油診断器）
- ・金属摩耗（グリッド鉄粉濃度計）
- ・電氣的不具合（高調波診断器）

2. 2 平成28年度における調査内容

平成28年度は、過年度調査により抽出された技術について、関東地整管内3箇所ゲート設備を対象に試行を拡大して有効性の検証を行った。また、これらの技術について、ゲート設備の構成機器に対する適用性と有効性に関するアンケートを点検業者及びゲートメーカーを対象に実施し課題を明確にした。

①ゲート設備における「診断技術」のとりまとめ

ゲート設備の構成要素毎に試行する6技術を下記の区分に分類し、前項の試行結果に基づいて、診断に適用可能な技術としての有効性を考察した。

- ・扉体、戸当り：超音波厚さ計
- ・開閉装置：赤外線サーモグラフィ、漏電測定器、簡易潤滑油診断器、グリス鉄粉濃度計
- ・機側操作盤：漏電測定器、赤外線サーモグラフィ、高調波診断器

また、考察においては以下の事項を考慮した。

- ・機器に関する測定環境、使用方法等の特性
- ・判定基準・しきい値の考え方

2. 3 平成29年度における調査内容

平成29年度は、民間プラントの診断において一般的に用いられている振動解析と、過年度の調査及び試行結果より有効と判断した技術について、健全度評価における精密診断として活用できる評価指標をとりまとめるため、文献調査、メーカーヒアリング及び電動機を用いた不具合検証を実施した。その結果を基に、現場で活用するための「河川用ゲート設備精密診断マニュアル（試行案）」（以下「精密診断マニュアル（試行案）」という）を作成した。

①診断技術の評価基準の設定

振動、漏電、温度の測定結果に対する診断基準について、各機器の製造メーカーへのヒアリングや文献等の調査を実施し、各種基準及びその他の指標を参考として設定した。

②電動機不具合検証

実際にゲート設備で使用されていた電動機を用いて複数の不具合を人為的に発生させ、その際に計測した温度、漏電、振動について正常時との違いを検証し、文献調査等の調査結果と併せて評価基準設定や不具合診断の参考とした。

③精密診断マニュアル（試行案）の作成

上記①及び②の結果を踏まえ精密診断マニュアル（試行案）を作成した。精密診断マニュアル（試行案）の作成にあたり、ゲートメーカー及びゲート点検業者に対して現場適用性等についてヒアリング（アンケート調査）を実施し、その結果を反映させた。

3. 調査結果及び考察

3. 1 故障情報の整理・分析

①故障情報の整理

構成設備・機器の故障傾向を把握することを目的として、故障情報を収集した結果、河川用ゲート設備分748件の有意な情報を得た。収集した範囲を以下に示す。

(1) 調査対象

直轄施設を主たる調査対象としたが、一部地方公共団体あるいは独立行政法人の管理施設を含む。

(2) 対象期間

期限に制約を設けずに収集を行ったところ 1967 年～2013 年に発生した故障データを収集できた。ただし、この期間に発生した故障全数ではない。

(3) 整理方法

当該情報の整理は、「装置名称」「機器名称」「発生時の状態」「故障モード」「故障原因」「故障の程度」等に区分して整理した。表-1 に集計イメージを示す。

表-1 故障情報集計事例(イメージ)

事例所名	種類	設備大区分	設備細区分	設備名	号機番	設置年	扉体形式	開閉装置形式	故障発生年月日	故障装置名称	故障機器名称	故障機器・部品詳細名称	故障現象	故障発生状況	故障モード	故障原因	故障の程度	故障影響	故障対策	使用年
〇〇河川事務所	〇	堤	堤・排水社	〇〇排水ゲート	-	1998	ゴム扉	その他	2003/7/20	その他	電源部	-	発動し、回転しなかった制動ゲートが原因となり不具合が発生した。原因は、送電電圧の不安定により、電流が不安定となりモーター作動したためである。	運転中	18: 動作不良	99: その他	重故障	突発	調査	6
〇〇河川事務所	〇	堤	堤・排水扉	〇〇扉	-	1980	シールドローラゲート	ワイヤロープワイシテ	2004/9/7	開閉装置	その他	アンカボルト	構内内の転向シブ要素が回転した。転向は、転向シブ要素を固定するアンカボルトの設計不良によるものである。また、ゲート操作時に過負荷アラームが鳴いたが、保安確認・異常物の除去を行わずに操作したことも直接の原因である。	運転中	01: 破損・損傷・破断	08: 設計の誤り	重故障	突発	部品取替	15
〇〇河川事務所	〇	開門	格間	〇〇格間	-	不明	ローラゲート	手動	2004/9/29	戸当り・支索部	戸当り・ガイド	戸当り	操作中に扉体上部のゲート主部ガイドより、扉体用ガイドローラが外れて扉体から脱落した。脱落した原因は、ゲート主部ガイドにストッパーが取り付けられていなかったことが主原因である。	運転中	06: ゆるみ、はずれ	08: 設計の誤り	重故障	突発	修繕(改造)	-
〇〇河川事務所	〇	開門	開門	〇〇水門開門部	-	1963	不明	不明	1988/12/1	開閉装置	減速・動力伝達部	軸突	カムドレニオンチャフの軸受け部に傷がある	不明	01: 破損・損傷・破断	99: 不明	不明	不明	不明	28
〇〇河川事務所	〇	水門・樋門	樋門・樋管	〇〇樋管	-	不明	不明	不明	-	操作制御装置	電気部品	電磁開閉器	海面上より電磁開閉器、リレーが故障	不明	10: 過熱・焼損・焼付	04: 過負荷、雷害	重故障	突発	不明	-
〇〇河川事務所	〇	水門・樋門	樋門・樋管	〇〇樋管	-	不明	不明	不明	-	操作制御装置	電気部品	リレー	海面上より電磁開閉器、リレーが故障	不明	10: 過熱・焼損・焼付	04: 過負荷、雷害	重故障	突発	不明	-
〇〇河川事務所	〇	水門・樋門	水門	〇〇水門	-	1981	不明	不明	-	開閉装置	減速・動力伝達部	軸突	雨天突入によりフレーム軸用ベアリングに異音及びセルシアン受信機等が故障	不明	05: 腐食	10: 不適切な管理	不明	不明	不明	-

②故障情報の分析

故障情報データを基に、「故障装置別故障件数」「故障形態別故障件数」を集計し、故障装置別に「故障機器別故障割合」「故障モード別故障割合」「故障原因別故障割合」等を分析した。なお、故障モードとは、故障原因そのものではなく、故障原因からもたらされる不具合事象の分類であり、故障とその原因の間にある不具合事象である。この関係は、図-1 のようになる。

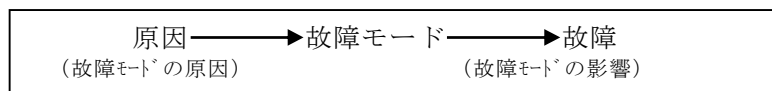
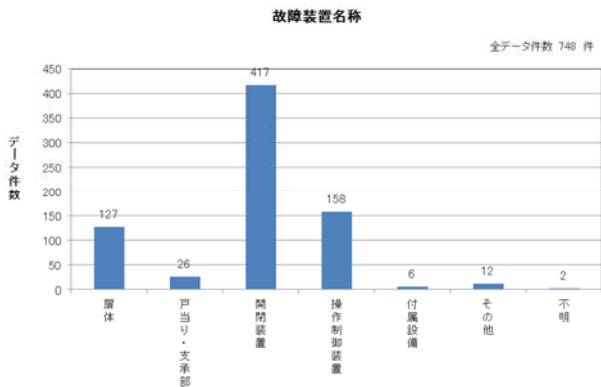


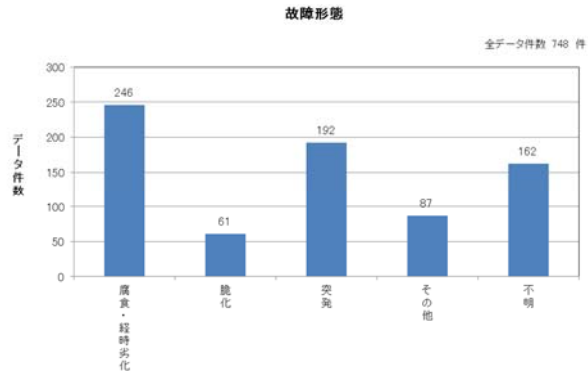
図-1 原因、故障モード、故障の関係

「故障装置別故障件数」は図-2 に示すとおりであり、「開閉装置」の故障件数が最も多く、次いで「操作制御設備」、「扉体」の順に多い結果となった。開閉装置の故障が多い理由は、構成機器・部品が多く、回転・摺動を繰り返す機器が多いことなどが挙げられる。

「故障形態別故障件数」は図-3 に示すとおりであり、「腐食・経時劣化」が 246 件で最も多い。「腐食・経時劣化」に対しては、状態監視を継続的に行うことで不具合の兆候を把握することが可能と思われることから、状態監視は有効な維持管理手法になり得ると考えられる。次いで、「突発」が 192 件で多くの割合を占めている。突発的に発生する故障の原因では、想定外の外力によって故障した事例が 43 件、電気部品等の故障 42 件、設計・施工に改善の余地があった事例が 36 件、水質などの使用環境に依存する故障が 35 件等であり、基本的にこれらは仕様の変更あるいは管理体制によってカバーしていくものである。以下に部品毎の分析結果について述べる。



図－２ 故障装置別故障件数



図－３ 故障形態別故障件数

(1) 開閉装置の分析結果

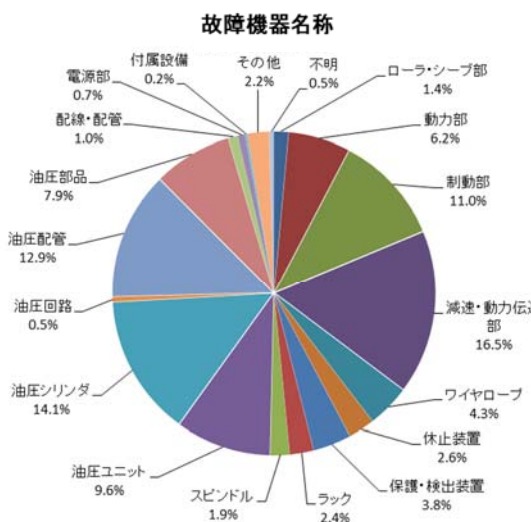
開閉装置の故障について、「故障機器別」「故障モード別」「故障原因別」に区分し分析した結果を図－４～図－６に示す。

「故障機器別故障割合」(図－４)では、「減速・動力伝達部」が最も多く、次いで「油圧シリンダ」「油圧配管」「油圧ユニット」及び「制動部」の順となっている。いずれもワイヤーロープウインチ式と油圧シリンダ式の構成機器で、ラック式やスピンドル式に比べて部品点数が多く構造が複雑なため故障が多いと考えられる。

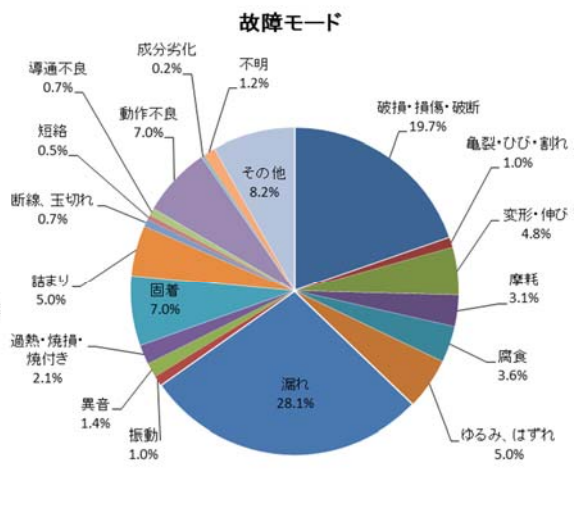
「故障モード別故障割合」(図－５)では、「漏れ」が最も多く、次いで「破損・損傷・破断」となっており、油圧機器の故障が多いことと整合する。

「故障原因別故障割合」(図－６)では、「経年劣化」が最も多く、次いで「使用環境・水質・高温高湿・異物混入」となっている。開閉装置の故障は老朽化がその主たる要因になっていることが分かる。

なお、開閉装置については、図－４及び図－６から故障箇所や故障原因が多岐にわたっていることが見て取れるため、状態監視を行う際にも幅広い診断技術が求められると考える。

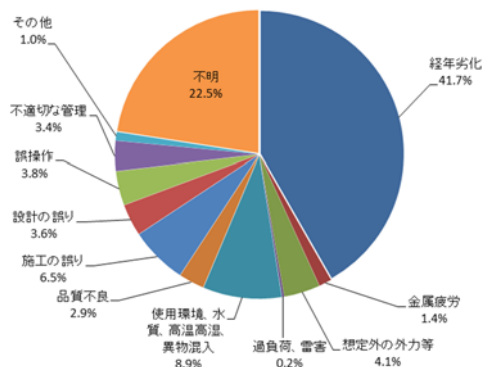


図－４ 故障機器別故障割合 (開閉装置)



図－５ 故障モード別故障割合 (開閉装置)

故障原因



図－6 故障原因別故障割合（開閉装置）

(2) 操作制御装置の分析結果

操作制御装置の故障について、「故障機器別」「故障モード別」「故障原因別」に区分し分析した結果を図－7～図－9に示す。

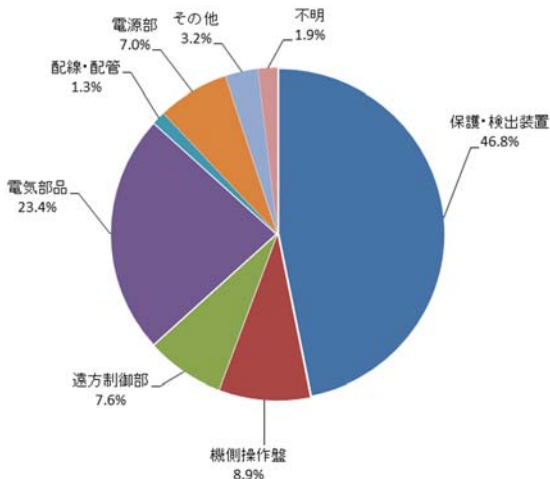
「故障機器別故障割合」（図－7）を示した図であり、「保護・検出装置」が最も多く、次いで「電気部品」となっている。「保護・検出装置」ではリミットスイッチ及び水位計、電気部品ではリレー類及びタイマーで主に故障が発生している。なお、これらの機器については、比較的簡単に現場で交換可能かつ低コストなため、状態監視で不具合を検知するよりも予備品を確保し不具合発生時に迅速に交換できる管理体制とすることが現実的であるとする。

「故障モード別故障割合」（図－8）では、「過熱・焼損・焼付き」が最も多く、次いで「導通不良」となっている。

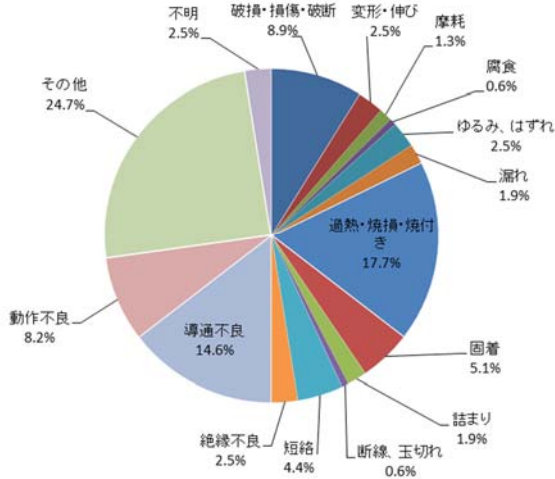
「故障原因別故障割合」（図－9）では、「経年劣化」が最も多く、次いで「過負荷・雷害」となっている。

なお、操作制御装置については、経年劣化に伴う「過熱・焼損・焼付き」「導通不良」が多いため、電動機や配線経路の漏電、機器自体の劣化を把握できる診断技術があれば有効であるとする。

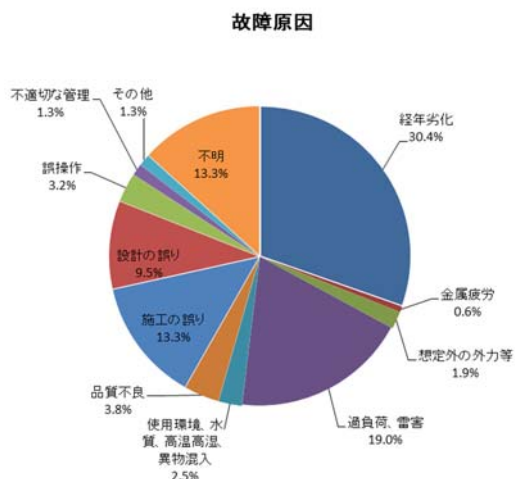
故障機器名称



故障モード



図－7 故障機器別故障割合（操作制御装置） 図－8 故障モード別故障割合（操作制御装置）



図－9 故障原因別故障割合（操作制御装置）

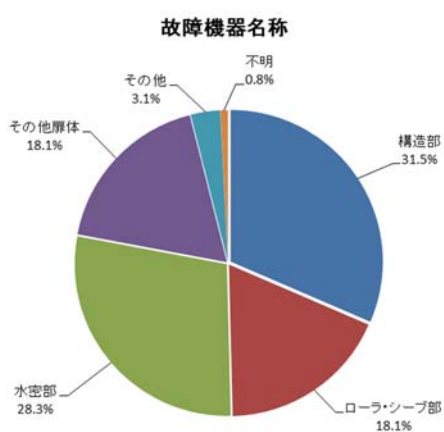
(3) 扉体の分析結果

扉体の故障について、「故障機器別」「故障モード別」「故障原因別」に区分し分析した結果を図－10～図－12に示す。

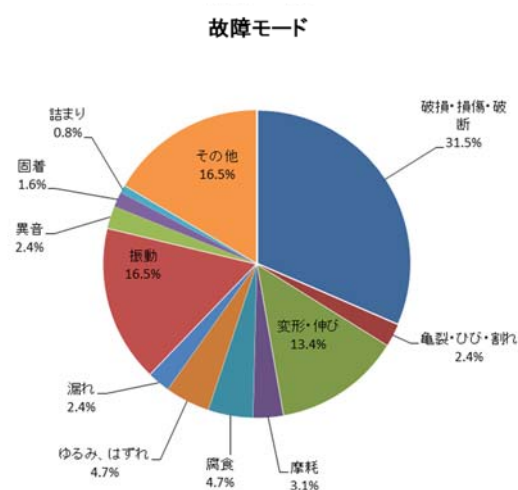
「故障機器別故障割合」（図－10）では、「構造部」と「水密部」の占める割合が大きい。

「故障モード別故障割合」（図－11）では、「破損・損傷・破断」が最も多く、次いで「振動」「変形・伸び」となっており、構造系の故障が多いことがわかる。

「故障原因別故障割合」（図－12）では、「設計の誤り」が最も多く、次いで「経年劣化」「想定外の外力等」及び「使用環境・水質・高温高湿・異物混入」となっている。故障原因の一つである「経年劣化」に着目し、特に板厚、塗膜厚など目視では困難な劣化を評価できる診断技術に注目するべきと考える。



図－10 故障機器別故障割合（扉体）



図－11 故障モード別故障割合（扉体）

故障原因

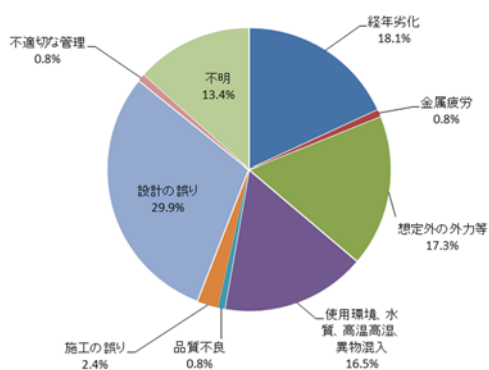


図-12 故障原因別故障割合 (扉体)

③故障情報分析結果から得られた有効と考える状態監視技術

故障情報分析結果から、経時劣化型故障に適用可能な状態監視技術を機器毎に整理した。特に有効な状態監視技術について、表-2に示している。状態監視の補足となり得る有効な状態監視技術については、表-3に示している。また、整理した状態監視技術が既存の点検項目に存在するか確認を行った。

表-2 経時劣化型故障に適用可能な状態監視技術

故障機器	故障が頻発している機器・部品	適用可能な状態監視技術	既存の点検項目 ^(注)
扉体	水密ゴム	・水密ゴムの硬度の測定	×
	構造部	・構造部にかかる応力の測定	×
		・構造部の板厚の測定	○
		・構造部の変形量・たわみ量の測定	×
		・構造部の腐食電位の測定	△
戸当り・支承部	戸当り	・戸当りの板厚の測定	×
開閉装置	ブレーキ	・ブレーキライニングの厚さ測定	○
	減速機	・歯当りの状態監視 (開放歯車の場合)	○
		・バックラッシの状態監視 (開放歯車の場合)	○
		・フェグラフィ法による潤滑油の金属粉等混入の分析	×
		・潤滑油の性状分析	△
	油圧シリンダ	・油圧シリンダの作動油の性状分析	○
	ワイヤロープ	・ワイヤロープにかかる応力の測定	×
		・ワイヤロープの変形量の測定	×
		・ワイヤロープの変形状態の監視	×
		・ワイヤロープの素線切れの監視	○
電動機	・運転時に発生する振動の測定	△	
	・運転時に発生する温度の測定	○	
油圧シリンダ	・作動油の性状分析	△	
操作制御装置	開度計	・絶縁状態の監視	○

表－3 状態監視の補足となり得る状態監視技術

故障機器	故障が頻発している機器・部品	適用可能な状態監視技術	既存の点検項目 ^(注)
扉体	構造部	・構造部の腐食環境の状態測定	×
		・運転時に発生する振動の測定	×
		・運転時に発生する音の測定	×
		・構造部の塗装劣化状態の監視	△
	ローラ	・ローラの回転の確認	○
戸当り・支承部	戸当り	・戸当りの腐食環境の状態測定	×
開閉装置	油圧シリンダ	・油圧シリンダからの漏油の測定	○
		・油圧シリンダの腐食環境の状態測定	×
		・油圧シリンダの内部圧力の測定	×
	油圧配管	・油圧配管からの漏油の測定	×
		・油圧ポンプ作動時の油圧配管の内部圧力の測定	×
	油圧ユニット	・油圧配管の腐食環境の状態測定	×
		・油圧配管の腐食環境の状態測定	×
	チェック弁 (油圧弁類)	・弁の腐食環境の状態測定	×
	自動倒伏装置	・自動倒伏装置の腐食環境の状態測定	×
ワイヤロープ	・ワイヤロープの腐食環境の状態測定	×	
電動機	・運転時に発生する音の測定	×	

注)【凡例】○：ゲート点検・整備要領（案）（一般社団法人ダム・堰施設技術協会 H17年1月）に記載がある

△：機械設備管理指針（独立行政法人水資源機構 H20年10月）に記載がある

×：既存の点検項目に記載がない

なお、「適用可能な状態監視技術」とは、民間で開発された技術のカテゴリとして示しており複数の固有技術を含む。また、各技術と既存の点検項目との関係も示している。

3. 2 ゲート設備の新たな状態監視技術の調査

①新たな診断技術の調査

現状のゲート設備点検技術の枠を超えて、診断の精度及びコストの優れる技術を見いだすことを目的に、下記の4つの方法で調査を行い、135件の技術を収集した。

- ・ゲートメーカー・検査会社等へのヒアリング調査 : 6件
- ・プラントメンテナンスショー（国内最大の関連展示会）における調査 : 80件
- ・インターネットによる調査 : 49件
- ・公益社団法人日本プラントメンテナンス協会へのヒアリング調査 : 1件（※）

※「プラントメンテナンス協会へのヒアリング調査」の1件の技術は、プラントメンテナンスショーにおける調査技術80件のうちの1件と同じ技術である。

②新たな診断技術の整理

135件の診断に適用可能と考えられる技術について、対象機器毎に何に注目した技術かを整理したものを、以下の表－4に示す。

表－４ 対象機器毎の着目項目別技術数

対象機器	何に着目した技術か	件数	対象機器	何に着目した技術か	件数	
扉体・戸当り	鋼構造物の硬さ	8	開閉装置	AE(弾性波)	3	
	鋼構造物のサンプル調査	1		ショックパルス	5	
	鋼構造物の損傷・割れ	8		対象機器の温度分布	2	
	鋼構造物のひずみ	1		軸受の損傷・割れ	1	
	鋼構造物の腐食電位	1		電流の高調波	3	
	鋼構造物の変位	5		稼働音	6	
	鋼構造物の応力	4		運転データ(振動その他)	4	
	鋭敏化	1		油圧シリンダ内部圧力	3	
	板厚・減肉	15		漏油	8	
	腐食状態	4		ワイヤーロープの劣化	5	
	塗装劣化	5		歯車のバックラッシ	3	
	ゴム硬度	3		状態監視技術以外	3	
	水中部の状況	1		操作制御装置	絶縁劣化	3
	ローラの回転具合	1			漏洩電流	4
開閉装置	振動	11	高圧ケーブルの部分放電	1		
	潤滑油劣化	11	電線ケーブルの損傷・割れ	1		

3. 3 適用性の評価

①適用性の高い状態監視技術

前項でまとめた状態監視技術を２段階で選抜し、適用性が高いと考えられるものだけに絞り込んだ。

一次選定では、監視対象、監視方法、測定性能、機器仕様の観点で有効性を評価し、二次選定では各技術を保有する関連メーカー及び検査会社等へのヒアリング結果に基づく適用性の評価を実施して、技術の絞り込みを行った。

二次選定での評価項目は以下の通りである。

- ・経済性（コスト）
- ・信頼性
- ・操作性
- ・効果の度合い
- ・ヒアリングで得た課題

評価の結果、特に適用性が高いと考えられる状態監視技術を表－５に示す。

表－５ 適用性の高い状態監視技術

No	診断技術名	想定診断対象機器	技術概要		
			何を測定するか	何が分かるのか	その他特徴
1	軸受診断技術	開閉装置 【軸受部(転がり軸受)】	物体の亀裂・破壊・摩耗・摺動等に伴って放出される弾性波(AE:アコースティックエミッション)	低速～高速回転の転がり軸受について、摩耗及び亀裂等の診断が可能	・AEセンサを用いてAEを捕捉 ・低速回転軸を含む広範な軸受け診断が可能
2	赤外線サーモグラフィ計測技術	開閉装置 【電動機・減速機等】	測定対象物から放出される赤外線	対象機器の温度分布を面的に視覚化できる。解析ソフトと併用することで、定量的な温度分析が可能	・解析ソフトと併用することで、計測時の設定パラメータの確認・修正や温度ヒストグラムの作成等が可能
3	超音波厚さ計測技術	扉体・戸当り 【鋼板及び塗膜】	鋼板の板厚及び塗膜の厚さ	鋼板の板厚及び塗膜の厚さを同時に3層まで測定可能	・塗膜を剥がさずに母材の厚みの測定が可能
4	潤滑油・グリス診断技術	開閉装置 【開閉装置・ローラ等の軸受に使用されるグリス/潤滑油】	潤滑油・グリスの鉄粉濃度	鉄粉濃度により、回転機械の軸受や歯車等の摩耗状態を簡易診断することが可能	・磁気バランス式電磁誘導法を採用し高感度であるため、初期摩耗状態の把握が可能 ・グリス/潤滑油それぞれの専用機器を用いて、少量のサンプルにより鉄粉濃度を検知し、鉄粉濃度基準値より診断実施
5		開閉装置 【開閉装置の潤滑油/油圧作動油等】	オイルに含まれる不純物による光の減衰率	オイル汚濁(ゴミ・水分)を瞬時に測定することが可能	・サンプリングは必要なく、プローブをオイルに浸すだけで測定可能
6		開閉装置 【開閉装置・ローラ等の軸受に使用されるグリス】	グリスの鉄粉濃度	鉄粉濃度を測定することで、超低速(10rpm以下)～低速域(100rpm)の転がり軸受の劣化状態を診断することが可能	・測定対象機器のグリスを本体に挿入し、初期のグリス中の鉄粉濃度と比較することにより異常を診断 ・鉄粉によるリアクタンス(誘導抵抗:交流回路における電圧と電流の比)の変化を周波数とみなし、その周波数の変化から鉄粉濃度を算出
7	開閉装置 【開閉装置の潤滑油/油圧作動油等】	オイルの静電容量及び通電能力	実績データベースよりオイルの劣化状態を診断可能	・高周波電流(AC)を印加し、オイルの電気を溜めることができる能力(静電容量)と通電できる能力(導電率)を測定・分析 ・センサ部を油面等に直接当てて測定し、測定結果をセンサに接続した診断器により、簡易的に劣化状態を評価	
8	高調波診断技術	開閉装置 【電動機とその負荷側機器】	電流の高調波	対象設備機器の絶縁劣化や異常振動、軸受損傷等の不具合を、非接触かつ活線状態で検知・診断することが可能	・高調波を、非接触かつ活線状態で測定可能 ・対象物から離れた場所での測定が可能
9	漏電測定技術	制御操作機器・開閉装置 【機側操作盤二次側の機器】	漏れ電流のうち機器に悪影響を及ぼすIgr電流	漏れ電流の有無及び漏れ箇所の特定が可能	・測定に際しては、特別な準備が不要かつ活線状態で測定することが可能 ・基準電圧を非接地でとれるため、雨天等の影響を受けず、測定値が安定

②適用性の高い状態監視技術に対する点検業者等へのヒアリング結果

表－５に示した適用性の高いと考えた状態監視技術について、ゲートメーカー及びゲート点検業者へのヒアリング(アンケート調査)を実施した。

適用性に対する評価を順位付けした結果、上位3件は次の技術であった。

- ・超音波厚さ計測技術(表－５のNo.3)
- ・漏電測定技術(表－５のNo.9)
- ・潤滑油診断技術(表－５のNo.5)

これらの技術は、現状の点検項目に採用できる技術であることから、有効性及び実作業のイメージを認識しやすいため、適用性が高くなったものと推察される。

ただし、ゲート設備に適用した場合のコストと有効性を具体的に示さないと十分な評価はできないと考えている点検業者が多いことから、今後の試行によってこれらを示していく必要がある。

③ゲート設備を用いた適用性検証

表－５に示した適用性の高いと考えた状態監視技術のうち、「簡易」かつ「低コスト」で実施可能な技術を選定し、関東地整管内の河川用ゲート設備(E39水門)において適用性の検証を実施した。

(1) 選定技術

- 1) 軸受診断技術(表－５のNo.1) AE波を用いた固有1技術を抽出
- 2) 赤外線サーモグラフィ計測技術(表－５のNo.2) 固有1技術を抽出
- 3) 漏電測定技術(表－５のNo.9) 固有1技術を抽出
- 4) 高調波診断技術(表－５のNo.8) 固有1技術を抽出

(2) 検証対象施設

施設概要：支川の合流部に設置されている比較的稼働頻度が高い逆流防止の水門

設備形式：鋼製ローラゲート

寸法：径間 20.0m×全扉高 8.9m

門数：2門

扉体構造：プレートゲータ構造

開閉装置：電動ワイヤーロープウインチ式（1M1D）

主・予備電動機、サイクロ減速機

建設年度：1979年

(3) 検証結果

1) 軸受診断技術

計測機器については、簡単なボタン設定のみで機器を取り扱え、またAEセンサ部がマグネットであることから、磁性体の機器においては測定位置の固定も容易であり、非常に簡単に診断が可能である。

しかし、本機器は転がり軸受には非常に有効な手段だと考えられるが、ドラム部分に採用されているすべり軸受に適用したところ、弾性波が減衰してしまい測定が困難であることが分かった。

河川用ゲート設備では、ドラムギアや中間ギア等のように軸受部にかかる荷重が大きいため、すべり軸受が広く使用されている。したがって、本機器は、河川用ゲート設備においては適用可能範囲が狭いことから、現時点で適用は難しいと判断した。

2) 赤外線サーモグラフィ計測技術

ゲート設備の点検では、棒温度計やレーザポイント式温度計にて位置決めした1点の温度を計測する手法が殆どである。本技術は、非常に簡単な操作で温度変化を確実に捉え、また機器に発生している温度を面的に視覚化できる技術である。画像で捉えた範囲の温度全般をデータとして同時に保存でき、後にパソコン画面で管理できる点が現状の温度測定とは異なる。

開閉装置の電動機・減速機に適用したところ、ゲートの開閉に伴う温度変化を構成部品毎に把握することができ、詳細な分析が可能であったことから、適用が可能な技術であると考えられる。

一方、計測結果（温度）の精度が、事前に設定するパラメータ（放射率、反射温度、対象物までの距離、湿度等）に大きく影響されることが分かった。製作メーカーへ確認したところ、被計測物の「放射率」の設定が測定精度に特に大きく影響することが分かった。さらに、赤外線サーモグラフィの温度計測自体にも計測誤差（対象物からの距離に応じて±2℃又は±4℃）がある。したがって、実際の現場での測定においては、アルコールや水銀等の接触式温度計の測定も併用し赤外線サーモグラフィの計測結果と確認し、場合によっては調整が必要であると考えられる。

3) 漏電測定技術

河川用ゲート設備の点検においては、一般的に電源を遮断（停電）し電路と大地間の絶縁抵抗値を測定しているが、湿度・温度、電路の静電容量、計測器の印加電圧などが影響因子として結果に現れることが知られている。ゲート設備の絶縁抵抗値では季節的な周期で

変動するデータも多い。漏電遮断器は、電路と大地間の零相電流を検知して動作するが、零相電流は対地の静電容量によって決まる I_{gc} と対地間の抵抗成分に対する I_{gr} のベクトル合成値であり、本技術は活線状態において I_{gr} を計測できる技術である。

適用性の検証の結果、計測設備の I_{gr} はいずれの電動機主回路において 3mA 程度であった。計測器製作メーカーの見解では、現状では漏洩電流は充分小さいと判定された。

平成 25 年 7 月 20 日改訂の「自家用電気工作物保安管理規定」に「絶縁抵抗測定が困難な場合には、電路の使用電圧の区分に応じ、それぞれ漏洩電流を測定し、漏れ電流 1mA 以下であることを確認する」とされているため、異常を判断するためのしきい値については充分検討していく必要がある。

計測機器の操作は非常に簡単であり、また活線状態で漏洩電流を測定できるため測定対象となる設備に特別な準備が不要であることから、有効な技術であると考えられる。ただし、端子台等を付属のクリップで挟み、電圧波形を入力する必要があり、接続対象箇所によっては不可能あるいは接続しても保持力が弱いためクリップが外れてしまうことがあった。また、漏洩電流を計測する付属のクランプで既設ケーブル等をはさむことが困難な箇所もあった。測定機器について、より使いやすくするために機器本体の改良が必要である。

4) 高調波診断技術

計測そのものは比較的簡単であるが、解析に要する理論は計測機器メーカーの実績と経験に基づくものであり、主成分となる高調波の次数・位相・寄与率などを総合的に判断するため専門の検査機関に依頼する必要がある。

適用性の検証の結果、開閉装置の電動機はエアギャップの不均一が発生しているとの診断を得た。本電動機は設置後 37 年を経過しており、上記事象が発生している可能性は充分考えられることから、今後の管理を行うにあたり注意を要するべきであると判断した。

本技術は、専門技術者が行う必要があり、コスト面では専門技術者の派遣期間で費用が決定するため、計測箇所がまとまっていれば 1 箇所当たりのコストが低下する。短期間で様々な箇所の不具合検知が可能であるため、河川用ゲート設備への適用が可能であると判断できる。

(4) 考察

実際のゲート設備を用いた適用性の検証結果から、3 技術はゲート設備の診断に適用できる可能性が高いと考えられるが、今回の評価のみでは有効だと言い切ることは難しい。特に劣化状態の検知精度についての評価が不十分であることから、今後は劣化が事前に分かっている設備もしくは模擬的に劣化設備を用意して試験を行い、実際の劣化状態と計測結果を比較し検証することが必要である。

3. 4 新たな診断技術の検討

前項において抽出した診断に適用可能な技術について、関東地整管内の河川用ゲート設備 3 設備において試行し、河川用ゲート設備に対する有効性の検証を実施した。

① 検証対象施設（各施設の供用年数は平成 28 年度現在）

・ W 4 7 水門	： 供用年数	4 5 年
	設備形式	鋼製ローラゲート
	扉体構造	プレートガーダ構造 材質 SMA400A

	寸法	純径間 20.000m × 有効高 10.300m
	開閉装置	ワイヤーロープウィンチ式 (2M2D)
	電動機	常用電動機 (7.5kW 6P 50Hz) 2台
・ A J 5 9 樋門 :	供用年数	43年
	設備形式	鋼製ローラゲート
	扉体構造	プレートガーダ構造 材質 SS400 (推定)
	寸法	純径間 8.000m × 有効高 4.500m
	開閉装置	ワイヤーロープウィンチ式 (1M2D)
	電動機	常用電動機 (5.5kW 6P 50Hz) 1台
・ A J 8 樋門 :	供用年数	25年
	設備形式	鋼製ローラゲート
	扉体構造	プレートガーダ構造 材質 SUS304
	寸法	純径間 5.400m × 有効高 4.100m
	開閉装置	ワイヤーロープウィンチ式 (1M2D)
	電動機	常用電動機 (1.5kW 6P 50Hz) 1台

②現地検証

上記の3設備に対して、表-5に示す技術のうち6技術(温度分布計測、漏洩電流計測、板厚計測、潤滑油汚濁度計測、グリス鉄粉濃度計測、高調波診断)を試行した。試行技術の概要と試行結果について下記に示す。なお、試行は管理運転時に実施した。

(1)温度分布(赤外線サーモグラフィ)

温度分布計測で使用した赤外線サーモグラフィは、測定箇所の画像範囲において、機器が発する赤外線を面的に捉え温度分布を可視化できる技術である。本調査では、機器の摺動や電気的な発熱を測定し、異常の検出に対する適用性を評価・試行するものであり、ゲート開閉装置の電動機、切換装置、減速機で検証した。



写真-1 赤外線サーモグラフィ



写真-2 赤外線サーモグラフィ



写真-3 表面温度計測定状況

測定状況

なお、測定精度の確認のため赤外線サーモグラフィによる温度測定とあわせて、表面温度計(熱電対方式)による測定も実施した。さらに、サーモグラフィも2機種(以後「A」及び「B」と称する)を用いて、測定器による違いについても確認を行った。「A」「B」双方の基本的な仕様は以下のとおりである。

【「A」及び「B」の特性】

- ・測定範囲：-20℃～350℃

- ・温度分解能：0.1℃以下
- ・測定精度：±2℃又は±2%

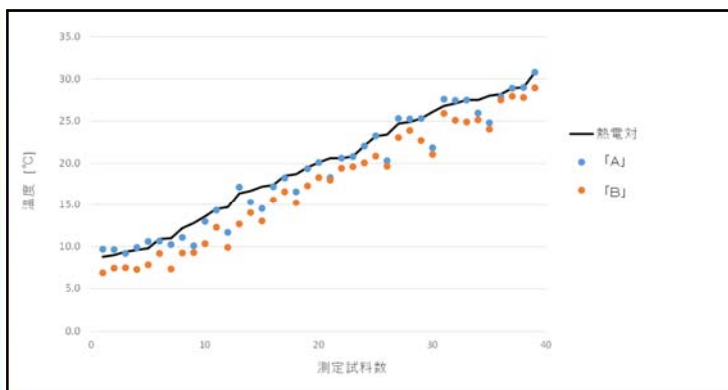
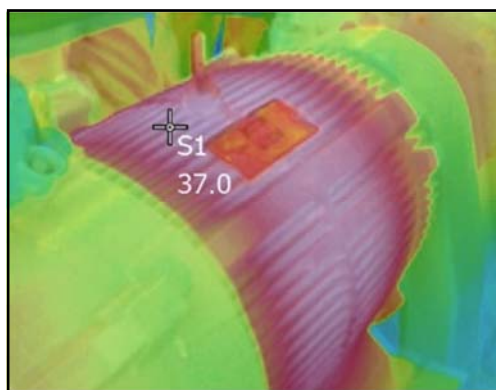


図-13 サーモグラフィによる測定結果(電動機)

図-14 サーモグラフィ及び熱電対の計測温度差

平成27年度の調査より、被計測対象の放射率あるいは直射日光などの現場条件に精度が左右されることが分かっているため、各機種とも計測箇所を合わせ、また、機種規定の設定を行った上で実施した。試行結果の概要は次のとおりである。

- ・いずれの機種も温度分布を「面」で把握することができ、測定後の解析においては、任意点の温度も個別に把握することができた。
- ・表示色濃度設定を変更できるので、電動機など表面温度に対する管理基準値が設定されている場合、それに合わせて変更でき、全体的な色彩から漏れなく機器の温度分布を把握することができた。
- ・図-14に示すとおり、2機種の赤外線サーモグラフィによる測定温度結果と、接触式の表面温度計による測定温度結果を比較したところ、10～30℃の常温範囲においては、サーモグラフィによる計測値がほぼ2～3℃程度の範囲に収まった。

(2)漏洩電流(漏電測定器)

漏洩電流とは、電路の静電容量に起因する本来危険な成分ではない電流(以後「 I_{gc} 」という)と、抵抗成分によって発熱や発火など故障原因となる電流(以後「 I_{gr} 」という)のベクトル合力(以後「 I_o 」とする)である。本検証で使用した漏電測定器は、漏洩電流「 I_o 」のうち、機器に影響を及ぼす抵抗漏洩電流成分「 I_{gr} 」のみを検出できる技術を使用しており、ゲート機側操作盤から電動機までの電気系統における漏洩電流量を活線状態で測定することができる。携帯用漏電計測器は複数社で販売しているが、計測技術は各社競っている状況であり、特徴が異なる。

常用系設備のモニタリング技術において、抵抗漏洩電流成分「 I_{gr} 」の計測方法は主に I_{or} 方式と I_{gr} 方式に区別できる。 I_{or} 方式は、ZCTによって計測する電流値と電源電圧の位相を考慮し計算で求めるのに対し、 I_{gr} 方式は、回路に低周波の電圧を印加し、当該電圧に基づく漏洩電流を検出する。一般的に、 I_{gr} 方式は精度が高いがモニタリング設備も高価であると言われている。しかし近年、回路に電圧を印加しなくても I_{gr} を I_o から演算で求めることができる携帯機器(以後「C」とする)が開発されているため、本試行においては、 I_{gr} 検出方式の「C」を主体として I_{or} 方式の携帯機器(以後「D」とする)を併用し、①ゲート設備の稼働時に絶縁状態を表す漏洩電流を検出できるか、②診断に採用できるか、を視点に評価を行うものとした。以下に試行機器の基本的な仕様を示す。

【「C」 (Igr 方式) の特性】

- ・電源：単相 2 線 100V 及び 3 線 200V、 三相 3 線 200V
(トランスを用いて 400V 計測可)
- ・漏洩電流量：Io において最大 300mA

【「D」 (Ior 方式) の特性】

- ・電源：単相 2 線及び 3 線、三相 3 線において最大 500V
- ・漏洩電流量：Io において最大 400mA

基本的に、ゲート機側操作盤内の主幹遮断器直下、電動機配線用遮断器直下の 2 ヶ所において、「停止状態」「閉操作」「開操作」の各状態における漏洩電流を測定するものとした。



写真-4 漏電測定器の例

写真-5 漏電測定状況 1

写真-6 漏電測定状況 2

「C」を用いた測定結果を表-6～9に示す。

表-6 W47 水門左岸開閉装置系統 漏電測定結果

測定タイミング/ 測定箇所		測定箇所① 動力電源主幹直下 のケーブル	測定箇所② 電動機用配線遮断器 のケーブル
停止状態(閉操作前)	Igr	0.00mA	-
	Io	0.00mA	
	絶縁抵抗	10MΩ	
閉操作時	Igr	1.66mA	0.18mA
	Io	1.53mA	1.63mA
	絶縁抵抗	0.117MΩ	1.093MΩ
開操作時	Igr	1.25mA	0.66mA
	Io	1.16mA	2.65mA
	絶縁抵抗	0.153MΩ	0.291MΩ
停止状態(開操作後)	Igr	0.00mA	-
	Io	0.00mA	
	絶縁抵抗	10MΩ	

表-7 W47 水門右岸開閉装置系統 漏電測定結果

測定タイミング/ 測定箇所		測定箇所① 動力電源主幹直下 のケーブル	測定箇所② 電動機用配線遮断器 のケーブル
閉操作時	Igr	左岸側と共通	0.92mA
	Io		1.85mA
	絶縁抵抗		0.215MΩ
開操作時	Igr		0.62mA
	Io		1.52mA
	絶縁抵抗		0.304MΩ

表－8 AJ59 排水樋管 漏電測定結果

測定タイミング/ 測定箇所	測定箇所① 動力電源主幹直下 のケーブル ^(注1)	測定箇所② 電動機用配線用遮断器のケーブル	
		遮断器の上側	遮断器の下側
停止状態(閉操作前)	Igr	4.82mA	-
	Io	5.97mA	
	絶縁抵抗	0.04MΩ	
閉操作時	Igr	5.25mA	1.75mA
	Io	6.78mA	2.57mA
	絶縁抵抗	0.036MΩ	0.112MΩ
開操作時	Igr	5.02mA	1.75mA
	Io	6.33mA	2.40mA
	絶縁抵抗	0.039MΩ	0.113MΩ
停止状態(開操作後)	Igr	4.56mA	-
	Io	5.77mA	
	絶縁抵抗	0.043MΩ	

表－9 AJ8 排水樋管 No1 号扉体 漏電測定結果

測定タイミング/ 測定箇所	測定箇所① 動力電源主幹直下 のケーブル ^(注1)	測定箇所②
		電動機用配線用遮断器直下 のケーブル ^(注2)
停止状態(閉操作前)	Igr	-
	Io	
	絶縁抵抗	
閉操作時	Igr	0.40mA
	Io	0.76mA
	絶縁抵抗	0.47MΩ
開操作時	Igr	0.00mA(0.03mA以下)
	Io	0.00mA(0.03mA以下)
	絶縁抵抗	10MΩ
停止状態(開操作後)	Igr	-
	Io	
	絶縁抵抗	

「C」による試行結果の概要は以下のとおりである。

- ・いずれのケースでも Io 計測用クランプが装着できれば、mA 単位での Io 及び Igr 計測が可能であった。
- ・ゲート停止状態においても、AJ59 及び AJ8 においては Io 及び Igr が計測されているので、主電動機以外の回路に起因する電流である可能性がある。
- ・開閉操作時における Igr 値は、供用年数が長い W47 及び AJ59 が AJ8 より大きい傾向が認められる。
- ・管理運転時においては、開操作が閉操作より主回路の電流値が高くなるが、漏洩電流値は逆の場合もあり、相関は認められない。
- ・Igr > Io となるケースがある。(表－6 参照)
- ・計測時において、指示値はかなり敏感に変動する。

また、「D」と計測値を比較した結果を表－10～11 に示す。「D」は、機種毎にクランプ径が決まっているため、現場によってはケーブルを挟めず計測できない箇所があった。

表-10 W47 水門左岸開閉装置系統 漏電測定結果（「C」「D」比較）

測定タイミング/ 測定箇所		測定箇所① 動力電源主幹直下 のケーブル		測定箇所② 電動機用配線遮断器 のケーブル	
		「C」	「D」	「C」	「D」
閉操作時	Igr/Ior	1.66mA	0.92mA	0.92mA	0.30mA
	Io	1.53mA	1.40mA	1.85mA	1.30mA
	絶縁抵抗	0.117MΩ	—	0.215MΩ	—
開操作時	Igr/Ior	1.25mA	1.10mA	0.62mA	0.75mA
	Io	1.16mA	1.85mA	1.52mA	1.53mA
	絶縁抵抗	0.153MΩ	—	0.304MΩ	—

表-11 AJ59 排水樋管 漏電測定結果（「C」「D」比較）

測定タイミング/ 測定箇所		測定箇所① 動力電源主幹直下 のケーブル		測定箇所② 電動機用配線遮断器 のケーブル	
		「C」	「D」	「C」	「D」
停止状態(開操作前)	Igr/Ior	4.36mA	3.84mA	—	—
	Io	5.46mA	4.78mA		
	絶縁抵抗	0.045MΩ	—		
開操作時	Igr/Ior	4.82mA	3.57mA	0.31mA	1.21mA
	Io	5.80mA	4.76mA	0.64mA	1.84mA
	絶縁抵抗	0.040MΩ	—	0.679MΩ	—
閉操作時	Igr/Ior	4.75mA	3.63mA	0.00mA	0.67mA
	Io	5.85mA	4.84mA	0.00mA	1.07mA
	絶縁抵抗	0.040MΩ	—	10MΩ	—
停止状態(閉操作後)	Igr/Ior	4.09mA	4.04mA	—	—
	Io	5.18mA	5.42mA		
	絶縁抵抗	0.048MΩ	—		

2機種と比較については次のことが言える。

- ・Ioの計測値は、概ね1mA程度以内の差異に収まっている。
- ・AJ59においては、「D」においても閉操作時の方が開操作時よりIo及びIorが大きい。
- ・「D」においては、全ての計測結果でIor<Ioである。

（「C」は、W47水門の測定箇所①においてIgr>Ioとなっている）

(3) 鋼材・塗膜厚さ（超音波厚さ計）

鋼材や塗膜の厚さ計測に使用した超音波厚さ計は、検体に探触子から超音波を当て、境界面（塗膜と板、板と空気など）からの反射波を検出することで厚さを計測するものである。ゲート設備の主要構造体の板厚が計測できれば設計値と比較した強度評価が可能となり、また塗膜厚が計測できれば目視状況と合わせて塗り替え時期の評価が可能となる。一般的な計測機器は主に鋼材の板厚のみもしくは塗膜厚のみを計測する機種が多いが、平成27年度の技術調査により、1台で板厚と塗膜厚を同時に計測できる機種が複数存在することが分かっている。このような機種では、塗膜を傷つけずに板厚の計測ができるメリットがある。

本年度は、下記の仕様を有する超音波厚さ計（以後「E」とする）を用いてゲート設備の扉体主桁の測定を行い、適用性を評価した。

【「E」の特性】

- ・探触子：二振動子型（周波数5MHz）
- ・測定範囲：1.0mm～37.0mm ・分解能：0.01mm
- ・測定精度：板厚±0.05mm（当該機器校正後実績値）
塗膜厚±0.025mm（メーカー公称値）
- ・使用温度：-10℃～50℃



写真-7 超音波厚さ計の例



写真-8 板厚測定状況

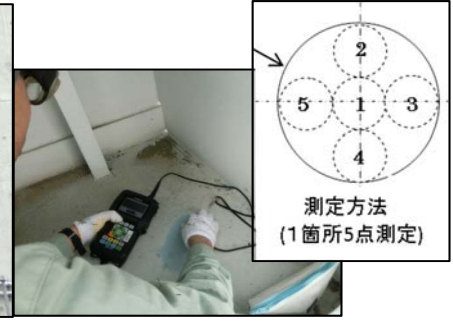


写真-9 板厚測定状況

試行では、ゲート扉体主桁のウェブとフランジの板厚を複数点測定した。各測定箇所においては、φ30mmの範囲で5点実測しその平均値を求めた。3施設を代表してAJ59の結果を表-12に示す。

別途、実績のある類似技術である超音波厚さ計（塗膜厚+板厚の総厚を計測するもので精度は板厚の±5%+0.01mm、以後「F」とする）および電磁・渦電流兼用膜厚計（精度は塗膜厚の±2%、以後「G」とする）で塗膜厚を計測し、その差（母材の板厚を示す）を比較した。その結果を表-13に示す。本検証においても、各測点において5点実測しており、その平均値を「F」及び「G」欄に記載している。検証値となる「E」欄については、表-12平均値欄から引用した数値である。また、「測定精度最大幅」は、使用した機器の測定精度を足し合わせた数値であり、理論的には「G」の計測値と、「F」及び「G」を使用して算出した計測値の差はこの値を超えないことになる。

表-12 AJ59 樋管 板厚・塗膜厚測定結果

測定点		設計厚	実測値					平均値	減少量	腐食代	
			①	②	③	④	⑤				
主桁	左岸ウェブ	母材板厚(mm)	9.00	8.93	8.97	8.75	9.05	8.75	8.89	0.11	0.50
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.18	0.13	0.21	0.18	0.16	0.17	0.18	—
	中央ウェブ	母材板厚(mm)	9.00	8.75	8.75	8.74	8.73	8.76	8.75	0.25	0.50
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.16	0.17	0.16	0.16	0.18	0.17	0.19	—
	右岸ウェブ	母材板厚(mm)	9.00	8.93	8.93	8.62	8.92	8.77	8.83	0.17	0.50
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.15	0.16	0.25	0.15	0.20	0.18	0.17	—
	左岸フランジ	母材板厚(mm)	25.00	24.99	24.69	24.63	24.66	25.00	24.79	0.21	0.50
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.16	0.18	0.17	0.28	0.21	0.20	0.16	—
	中央フランジ	母材板厚(mm)	25.00	25.10	25.17	24.76	25.12	24.72	24.97	0.03	0.50
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.35	0.24	0.18	0.17	0.16	0.22	0.14	—
	右岸フランジ	母材板厚(mm)	25.00	24.74	24.73	24.75	24.73	24.72	24.73	0.27	0.50
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.13	0.17	0.19	0.18	0.16	0.17	0.19	—

表-13 AJ59 樋管 試行結果比較

測定点		設計厚	「E」	「F」及び「G」	差分	測定精度 最大幅	判定	
主桁	下段左岸 ウェブ	母材板厚(mm)	9.00	8.89	8.80	0.09	0.10	OK
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.17	0.22	-0.05	0.03	NG
	下段中央 ウェブ	母材板厚(mm)	9.00	8.75	8.83	-0.09	0.10	OK
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.17	0.22	-0.06	0.03	NG
	下段右岸 ウェブ	母材板厚(mm)	9.00	8.83	8.98	-0.15	0.10	NG
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.18	0.24	-0.06	0.03	NG
	下段左岸 フランジ	母材板厚(mm)	25.00	24.79	24.98	-0.18	0.19	OK
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.20	0.24	-0.04	0.03	NG
	下段中央 フランジ	母材板厚(mm)	25.00	24.97	24.97	0.00	0.19	OK
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.22	0.18	0.04	0.03	NG
	下段右岸 フランジ	母材板厚(mm)	25.00	24.73	25.08	-0.34	0.19	NG
		塗膜厚さ(mm)	0.355	0.17	0.24	-0.07	0.03	NG

表-12 より、「E」の計測結果については、以下のとおりである。なお、塗装の設計厚は、基礎データがないため、「機械工事塗装要領（案）平成22年4月」に基づいて推定している。

- ・板厚計測値は、各箇所における5点のデータを比較すると、0.45mm以内の階差に収まっている。階差の最小値は、0.03mmであり、余裕厚の0.5mmよりいずれも小さい。
- ・ウェブとフランジの板厚比は2.5倍以上あるが、計測値のばらつきとの因果関係は明確には認められない。
- ・塗膜厚計測値は、各箇所における5点のデータを比較すると、0.02~0.19mmの階差がある。これは、想定した設計厚0.355mmの5.6~53.5%に該当し、小さいとは言えない。

また、表-13における「F」又は「G」との比較結果は次のとおりである。

- ・板厚を計測した6箇所のうち、4箇所は理論上の誤差範囲に収まったが、2箇所は超過している。（超過した場合は判定欄に「NG」、範囲内の場合は「OK」を記載）
最も大きく差が出た箇所は、下段右岸側フランジ部で、「E」が0.34mm薄くなっている。
- ・塗膜厚については、6箇所のうち5箇所において、膜厚計測に特化した機能を有する「G」の計測値に比べ「E」の計測値が薄くなっており、最大0.07mmの差がある。その他の施設における塗膜厚計測値においても同様の傾向であった。

(4) 潤滑油汚濁度診断（簡易潤滑油診断器）

潤滑油汚濁度診断に使用した簡易潤滑油診断器は、採油をしなくても潤滑油給油口などからセンサを挿入することによって潤滑油の透過度を検出し汚濁度を診断するものである。測定原理は、光の透過度から潤滑油の汚濁度を測定するものである。測定方法は、潤滑油にプローブを浸し、プローブの発光部より投射された光が油中を進み、発光部と対面する鏡で反射して受光部に入る光の透過度より潤滑油の汚濁度を判断するものである。判定基準は計測器メーカーが独自に定めており表-14に示す。

表-14 簡易潤滑油診断器判定基準

判定	判定基準（透過度）
GOOD	0～29
CAUTION	30～49
BAD	50 以上

本技術は、直接的に設備診断を行う技術ではないが、不純物が機械要素の劣化に起因することもあるため、同潤滑油の分析フェログラフィも実施し、双方の結果について比較を行った。



写真-10 簡易潤滑油診断器



写真-11 潤滑油診断状況



写真-12 潤滑油診断状況

試行では、ゲート開閉装置の減速機の潤滑油を診断した。対象機器の給油口部分に診断器プローブを差込み診断した。3施設の測定結果を表-15に示す。

表-15 簡易潤滑油診断器による診断結果

対象設備		運転前	運転後
W47 水門	右岸	BAD (59)	GOOD (21)
	左岸	GOOD (19)	GOOD (22)
AJ59 樋管		BAD (56)	BAD (66)
AJ8 樋管		GOOD (20)	BAD (51)



写真-13 フェログラフィ用に採油した潤滑油

※()内の数字は透過度

W47 水門右岸の運転前では「BAD」であったが、運転後「GOOD」に変化している。逆に AJ8 樋管では、運転前に「GOOD」であったものが運転後は「BAD」に変化した。写真-13 は、フェログラフィに供するために採油した3施設の潤滑油である。採油した施設毎に潤滑油の色が異なることが見てとれる。計測した透過度と潤滑油の目視状況を比較すると、運転後のデータと定性的相関がある。

運転後に「BAD」評価となった AJ59 樋管と AJ8 樋管の潤滑油について、分析フェログラフィによって評価した結果、双方とも正常摩耗粒子が多く含まれてはいるが、軸受のフレーキングやギアのピッチングで発生するといわれる $15 \mu\text{m}$ 以上のシビア粒子は確認されず、「異状なし」と判定された。また「GOOD」と判定された W47 水門の分析フェログラフィ結果も異常はなかった。3施設の診断においては、簡易潤滑油診断の汚損度合いと分析フェログラフィの結果に直接的な関係は見られなかった。

(5) 金属摩耗（グリス鉄粉濃度計）

ドラム部などの低速回転ギア・ピニオンはグリスで潤滑されているが、ピッチングなどの異常摩耗による鉄粉がグリスに含まれる可能性がある。グリス鉄粉濃度計はグリス内の鉄粉濃度を計測するものであり、産業用機械の維持管理では一般化している。測定手法の異なる複数の機種が販売されているが、試行に適用したグリス鉄粉濃度計は、鉄粉を含むグリス中のコイルリアクタンスが変化することに着目し、周波数を検出することで鉄粉濃度を測定するタイプである。採取した少量のグリスのサンプルを測定機器に挿入し、センサ部とグリスが接触することにより、簡易にグリスの鉄粉濃度を測定する。

本技術においては、軸受に関して計測器メーカーの定める判定基準があり、「1.0wt%以上」で「注意」、「1.5wt%以上」で「保全推奨」とされている。



写真-14 グリス鉄粉濃度計



写真-15 グリス鉄粉濃度診断



写真-16 診断対象ドラムギア

試行では、ゲート開閉装置のドラムギア、中間ギア等の開放歯車のグリスを診断した。

表-16 鉄粉濃度診断結果

対象設備	左岸 (ドラムギア)	左岸 (中間ギア)	右岸 (ドラムギア)
W47 水門	経過観察 (0.5wt%)	経過観察 (0.4wt%)	経過観察 (0.3wt%)
AJ59 樋管	経過観察 (0.8wt%)	—	経過観察 (0.8wt%)
AJ8 樋管	詳細診断を検討 (1.9wt%)	—	詳細診断を検討 (2.7wt%)

3施設のうちでは、AJ8 樋管のグリスの鉄粉濃度がメーカー判定基準の「保全推奨」段階にあるが、対象が軸受ではなくギアであることに鑑み、「詳細診断を検討」と標記した。

(6) 高調波診断器

高調波診断器は、電流より発生する高調波を測定することで、測定する電源ケーブルにつながる機器（主に電動機）の電氣的な不具合および負荷側の機械的不具合を診断するものである。高調波は電流の基本周波数の整数倍の周波数であり、設備機器に劣化や異常が起こると熱・音・振動と同時に電流に高調波が発生する。この高調波を測定・数値化し分析することで、設備機器の異常である絶縁劣化や異常振動、軸受損傷等を非接触かつ活線状態で検知・診断することが可能な技術である。過去の実績を蓄積し分析・検証することから確立された経験的な診断技術であり、専門技術者による計測と解析が必要となる。



写真-17 高調波診断器



写真-18 高調波診断状況



写真-19 高調波診断状況

試行では、ゲート運転時に診断器センサを機側操作盤内の主電動機電源ケーブルに近接させることで、当該電源ケーブルとつながっている電動機の状態を診断した。

当該技術の判定基準は、実績に基づく帰納的指標であるためその考え方を表-17に示す。判定指標は、ストレス診断と総合的な劣化診断（知的劣化診断）であり、各々A～Cの5段階で判定する。ストレス診断は、高調波の出方などから劣化率を求めた判定であり、劣化診断は、劣化率に合わせて関連する不具合事象を総合的に考慮した判定指標である。従って、ストレス診断結果と劣化診断結果（知的劣化診断）は一致するとは限らない。

表-17 高調波診断の判定基準

判定レベル	判定内容		劣化率
A	ストレス診断：正常	劣化していない	40%以下
	劣化診断：正常		
B1	ストレス診断：軽度なストレス	約1年は運転に支障なし	40~60%
	劣化診断：軽度な劣化		
B2	ストレス診断：中度なストレス	約6ヶ月は運転に支障はないが、傾向管理が必要	60~80%
	劣化診断：中度な劣化		
B3	ストレス診断：重度なストレス	約3ヶ月の運転は可能だが、部品交換や修理の準備が必要	80~90%
	劣化診断：重度な劣化		
C	ストレス診断：不良	異常状態	90%以上
	劣化診断：不良		

診断結果を表-18～19に示す。

表-18 ストレス診断による判定結果

施設名 電動機の場所 異常箇所又は種別 操作状態	W47水門				AJ59樋管		AJ8樋管	
	左岸側		右岸側		—		—	
	閉	開	閉	開	閉	開	閉	開
回転軸・軸受・据付	B1	B1	B1	B1	A	A	A	A
巻き線の絶縁、振動	B1	B1	A	B1	B1	A	B1	A
軸受・ハウジングの損傷	B1	B1	B1	B1	A	A	A	A
エアギャップ不均一・振動	B1	B1	A	B1	B2	B1	B2	B1
継手異常、軸アンバランス（負荷側）	B1	B1	B1	B1	A	B2	B1	A
軸受損傷、異物付着（負荷側）	B1	B1	B3	B1	B1	B1	B1	B1
回転軸異常、バルブ摩耗（負荷側）	B1	B1	B3	B1	A	A	A	B1
歯車・ベルト系損傷（負荷側）	B1	B1	B3	B1	A	A	A	B1

表-19 劣化診断（知的劣化診断）による判定結果

施設名 電動機の場所 異常箇所又は種別 操作状態	W47水門				AJ59樋管		AJ8樋管	
	左岸側		右岸側		—		—	
	閉	開	閉	開	閉	開	閉	開
回転軸・軸受・据付	B2	B1	B2	B1	B1	A	B1	B1
巻き線の絶縁、振動	B1	B1	A	B1	B2	A	B2	A
軸受・ハウジングの損傷	B2	B2	B1	B2	B2	B1	B1	B3
エアギャップ不均一・振動	B1	B2	A	B2	B3	B3	B3	B3
継手異常、軸アンバランス（負荷側）	B2	B1	B1	B1	A	B2	B1	A
軸受損傷、異物付着（負荷側）	B1	B1	B3	B1	B1	B1	B1	B1
回転軸異常、バルブ摩耗（負荷側）	B1	B1	B3	B1	A	B1	B1	B1
歯車・ベルト系損傷（負荷側）	B1	B1	B2	B1	A	B1	B1	B1

今回の試行では、各設備にて B2 及び B3 の判定箇所があった。劣化診断においては、AJ59 樋管と AJ8 樋管において、開操作、閉操作の双方で「エアギャップ不均一・振動」項目が B3 判定となっており、診断実施業者より「回転子と固定子間及び巻線等に埃等の堆積が考えられるため、エアブロー等によるクリーニングを推奨する」とのコメントを得ている。

3. 5 ゲート設備における「診断技術」のとりまとめ

①温度分布（赤外線サーモグラフィ）

原理的に日照の影響を受けるため、操作室環境及び計測時の天候に合わせて計測器のキャリブレーションが精度確保のために必要である。図-14 に示すとおり、計測値は数度の誤差が起こりえるため、表面温度分布の評価及び傾向管理（短期的には、停止状態から運転後に至るまでの温度変化、長期的には年点検時など同条件における温度分布の変化）を主体とした診断が有効であると考えられる。高温となる箇所を特定できることから、具体的な劣化箇所の特定も可能であり、振動測定等の他の診断結果とつきあわせることでより具体的な診断を行っていくべきである。

特にゲート設備においては、電動機及び減速機が発熱対象として想定される。現状では、メーカによる温度の管理基準値以外に評価指標がないため、これらに異常傾向が発生したときの温度分布の特徴について試験等を通じて今後把握する必要がある。試験の実施にあたっては、

試験方法について電動機メーカーあるいは診断に関する専門技術者と意見交換を行うとともに、結果に関する評価を実施して判断指標を定めていく必要がある。

②漏洩電流（漏電測定器）

漏洩電流については、「電気設備の技術基準の解釈」（平成 28 年 経済産業省発行）第 58 条解説において、技術基準に定める低圧電路の絶縁抵抗値 $0.1\text{M}\Omega$ の根拠として「低圧電路に 1mA 程度の漏れ電流（対地電圧 100V 回路において絶縁抵抗値 $0.1\text{M}\Omega$ は漏れ電流値 1mA に相当する。）があっても人体に対する感電の危険はなく、この程度の漏れ電流では、仮にこれが 1 箇所集中したとしても過去の経験に照らして火災の発生のおそれはない」という記載があるだけである。しかし、絶縁抵抗測定は非通電状態で行われるものであり、また、漏洩電流の測定においては、通電状態で行ううえ測定方法もいろいろなものが開発されている段階であることなどから、 1mA という値を状態監視保全のしきい値とすることは慎重に検討しなければならない。

計測技術「C」の専門技術者に、漏洩電流値（ I_{gr} 値）が 1mA を超える場合の機器の状態について確認したところ、次のような回答を得た。

- ・ I_{gr} 値が 1mA を超えるような漏洩電流が対象の機器から検出されたとしても、早急に取替・更新が必要な状態（機器が故障している状態や著しく劣化した状態）とは断言できない
- ・ 過去の実績では、 10mA を超える漏洩電流値が検出された場合に、機器が故障・著しく劣化していることが多い

以上より、当面本技術を適用する場合の暫定指標として、次のとおり考え方をまとめた。

表-20 暫定指標の考え方

漏洩電流（ I_{gr} ）の測定値	判断内容	参考基準
$10\text{mA} < I_{gr} (I_{or})$	保全措置要す（×又は△1）	機器メーカー実績
$1\text{mA} < I_{gr} (I_{or}) \leq 10\text{mA}$	機器が劣化傾向にある（△2又は△3）	機器メーカー実績
$I_{gr} (I_{or}) \leq 1\text{mA}$	健全な状態（○）	電気設備技術基準

「C」の I_{gr} と「D」の I_{or} では計測原理が異なるため、特に 3 相 3 線式負荷及び電路の評価では一致しない可能性が高い。よって、 I_{or} については参考値としている。「C」においては、静電容量による見かけの漏洩電流成分を抵抗成分による漏洩電流 I_{gr} の算出に使用していないため、W47 水門の計測値で見られたように $I_{gr} > I_{or}$ というケースがあり得る。表-20 に示す暫定指標は、メーカー見解を参考として設定したものであるため、継続的に漏洩電流の測定を行う中で、計測対象となる機器の整備や修繕結果などと照らし合わせながら、閾値の改訂を行って精度を高めていく必要がある。

赤外線サーモグラフィと同様に漏電計測技術においても、電動機を対象として劣化要因と漏洩電流の関係を試験等で把握することができれば診断の有効性がさらに明確になる。

本技術適用の要件としては、基本的な電気機器への技術的理解がまず必要である。さらに「C」については、電圧位相取得時の感電や短絡を避けなければならない。しかし、測定方法そのものは非常に簡易であり、現場で即時かつ通電状態で機器の状態を確認できるという観点からも有効な技術であると考えられる。

③鋼材・塗膜厚さ（超音波厚さ計）

超音波厚さ計は、原理的に計測対象物の音速によって測定値が異なる。母材となる SS 材及びオーステナイト系ステンレス材については音速の指標があるが、塗膜については、下塗りから

上塗りまで材料が様々であり、なおかつ各塗膜材に対してオーソライズされた音速データがない。従って、母材の鋼材部分については、音速の設定により計測精度が高まるが、塗膜厚の精度を高めるためには、各塗膜に対するキャリブレーションが必要となる。

具体的には、電磁式あるいは渦電流式の膜厚計を用いて一部の塗装で数値を合わせるように超音波式厚さ計の音速設定を行う等の方法がある。同じ塗装系の扉体を計測する場合は、塗膜にて1回キャリブレーションを行えばそのまま各所の測定を実施できる。

ただし、塗膜の劣化評価は目視による判定が重要であり、塗膜厚は診断の参考として考慮すべき数値である。本技術の優位性は、塗膜を剥離せずに母材の板厚を計測できることにある。

また、本試行結果より、計測箇所塗膜に不陸があるとプローブが安定して密着せず計測値が全般的に安定しにくかった。しかし、母材の板厚を強度評価に用いることを想定すれば、余裕厚以下の精度があれば十分であり、測定結果と設計値との対比において減肉量が余裕厚を下回る箇所が多数確認された場合、施設設計時の技術基準と現行技術基準の相違にも配慮して強度計算を実施し、扉体の健全度を評価することが必要である。

超音波を用いた板厚測定は、従来から実施されている診断手法でもあり、複数社が塗膜を含めた厚さ計測を可能とする機種を販売している。塗膜厚に関する一般的な配慮事項が明確になれば適用できる機種も選定することが可能となる。

④潤滑油及びグリスによる診断

(1)潤滑油汚濁度

試行結果としては、診断基準がメーカー独自の基準であり、潤滑油の正常・異常を簡易的に判定できるが、本技術単独では機器の診断技術として活用することは難しい。メーカー等の意見にあるように、本機器の実際の運用としては、点検技術あるいは診断補助技術として位置付け、①潤滑油の定期的な性状確認および傾向管理による潤滑油の更油時期の予測、②他診断技術との組み合わせによる診断、に活用できると考えられる

AJ59 樋管及びAJ8 樋管では、サイクロ減速機内での異常摩耗等機械的な不具合は発生していないものの、潤滑油の劣化が進行している可能性が高いため、更油を行うことで機器の長寿命化に資することができ、また分析フェログラフィなどを実施する場合の信頼性を向上させることができる。なお、計測タイミングは、フェログラフィにおける採油と同様に、潤滑油が十分に攪拌され不純物が均一化される機器の運転後に実施することが適切である。

(2)グリス鉄粉濃度計

本検証において、「詳細診断を検討する」と判定したAJ8 樋管（2号門扉）のドラムギアについて、近年のバックラッシュの傾向を確認した。その結果を図-15に示す。

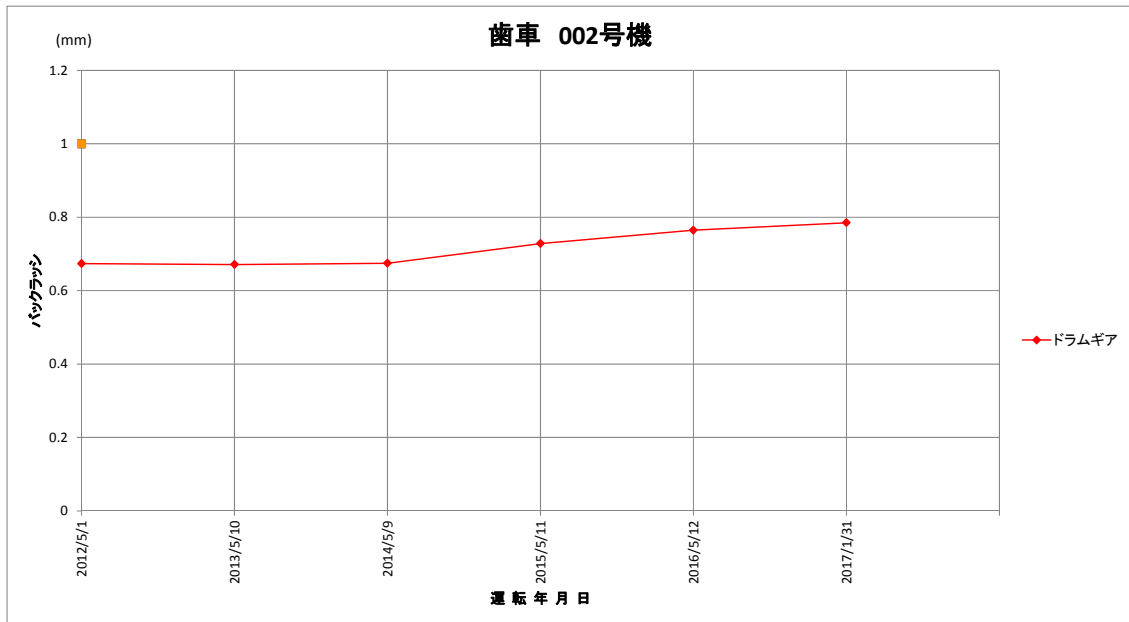


図-15 AJ8 樋管 2号門扉のドラムギアバックラッシ

この3年間で約0.1mmバックラッシが増加している。この事例では、今後測定面を定めたバックラッシの傾向管理を継続するとともに、年点検時の歯面グリス交換において歯面全般に異常がないか十分に確認していく必要がある。

近年の故障実績において、短時間のうちにピニオンギアが摩耗して使用不能となった事例がある。一般的に、ドラムギアに対してピニオンギアは硬度が高い材質を採用することとされているが、潤滑不良が発生すれば短時間のうちに歯面は損傷を受ける。歯面や軸受など鉄鋼部品が摩耗すれば鉄粉がグリスに混入する可能性は高い。本技術によって正常状態にあるグリスの鉄粉濃度を測定しておき、定期的に測定した鉄粉濃度を時系列で傾向管理することで、他の傾向管理項目と合わせて必要となる保全タイミングを判断するための補助的な指標として活用できる。本技術も点検技術あるいは診断補助技術として位置付けることが可能な技術である。

⑤高調波診断器

高調波診断は専門検査機関に実施を依頼する必要があるが、比較的簡易に実施可能で、かつ短期間で様々な箇所の不具合検知が可能であるため、河川用ゲートへの適用は可能であり、予防保全として有効な技術である。専門検査機関にヒアリングを行ったところ、現状の高調波による劣化診断結果にて提示している故障対策は、様々な機器を想定した最大公約数のものであり、基本的には提示した故障対策から設備状況等を考慮した対策をユーザーに判断・選択してもらうことを想定しているとのことである。このため、ゲート設備に特化した原因及び故障対策項目の絞り込みを行うためには、予め診断時に対策項目等の絞り込みを行う等の対応が必要であり、これにはゲート設備に対する知見が必要となる。

本技術の試行にあわせて振動計測も実施し、高調波診断技術と振動の診断結果について検証を実施した。今回試行を行った3設備の電動機の振動解析結果を図-16に示す。高調波診断で診断された「エアギャップ不均一」が生じた場合、振動診断では、電源周波数（関東圏は50Hz）の2倍や電源周波数とスロット数の積などの周波数成分が顕著に表れるといわれている。

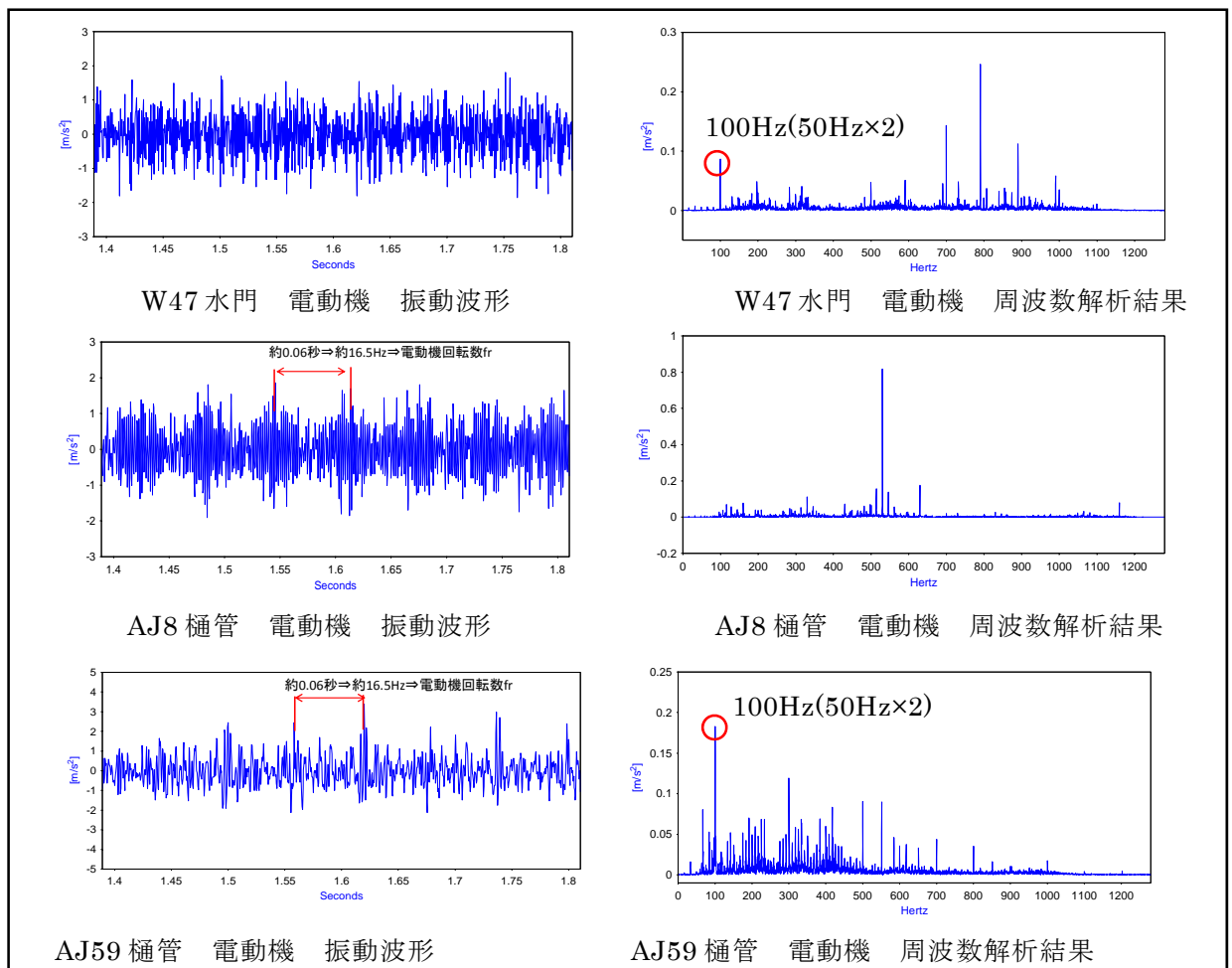


図-16 電動機 振動波形及び周波数解析結果

W47 水門や AJ59 樋管では、100Hz の周波数が顕著に発生し、その高調波も認められることから、「エアギャップ不均一」と同様の見解を示すことができるが、AJ8 樋管については、100Hz の周波数が発生しておらず、明確な結果を得ることができなかった。ただし、AJ8 樋管の振動波形においては、電動機回転数と同じ周期で振幅が脈動しており、回転子側を含め何らかの異常シグナルであることも考えられる。また、AJ59 樋管の振動波形では、電動機の回転数に合わせて周期的なピークを認めることができることから、回転軸の異常シグナルである可能性もある。当該技術のみで診断を実施していくためには、高調波診断結果とこのような一般的振動解析結果との比較を行い、実績を積み上げることで、ゲート設備に対する知見を積む必要がある。

高調波診断は、実績に基づく帰納的な診断手法であり、電動機の負荷側も判定対象となることから、老朽化が進む設備において劣化している箇所を抽出するスクリーニングに適した技術であり、異常傾向が認められた要素について振動法や漏電計測などによる精密診断を採用するなどの活用方法が有効である。

3. 6 診断技術の評価基準の検討

前項で有効な技術とした「漏洩電流計測」、「温度分布計測」及び排水機場で当事務所が試行を行っている「振動測定」について、ゲート設備診断を目的とした評価基準の検討を実施した。

①振動計測

(1)メーカーヒアリング

点検整備標準要領（案）では、振動計測を「速度 RMS 値（速度実効値）」により計測することとされている。また振動は、点検だけでなく一般的に劣化箇所の特定期間や程度を把握する精密診断にも活用されていることが知られている。本調査では、振動による精密診断が民間プラントではどのように行われているか把握するため、電動機メーカー（3社）及び電動機修理業者（1社）にヒアリングを行い、実際に現場で行われている振動計測及び診断手法について確認した。その結果、ほぼ ISO10816 等の規格に従い評価が行われていることが分かったが、評価基準等についてはメーカーのノウハウによる場合が多く、当該事項の詳細を聞き取りすることはできなかった。

(2) 文献等の調査

振動計測に関する文献調査は、日本機械学会の振動関連の ISO 規格の動向として、現状振動関連の評価基準値となっている ISO 10816-1 がすでに改正され、ISO 20816-1 が設定されており、今後新たな評価基準として採用できる可能性があることを確認した。

表-21 ISO10816-1(1995)振動評価(2017 廃止)

表-22 ISO20816-1(2017)振動評価

mm/s (rms)	ゾーン境界値					ゾーン境界値 振動速度 mm/s(rms)			
	クラス I	クラス II	クラス III	クラス IV					
0.28	A	A	A	A	0.28	A/B 境界 0.71~4.5	B/C境界 1.8~9.3	C/D境界 4.5~14.7	0.28
0.45					0.45				
0.71					0.71				
1.12					1.12				
1.8	B	B	B	B	1.8	A/B 境界 0.71~4.5	B/C境界 1.8~9.3	C/D境界 4.5~14.7	1.8
2.8					2.8				
4.5	D	D	D	D	4.5	A/B 境界 0.71~4.5	B/C境界 1.8~9.3	C/D境界 4.5~14.7	4.5
7.1					7.1				
11.2					11.2				
14.7					14.7				
18	D	D	D	D	18	A/B 境界 0.71~4.5	B/C境界 1.8~9.3	C/D境界 4.5~14.7	18
28					28				
45					45				

凡例：ISO の解説を以下のとおり要約

- A:新設の機械レベル B:問題なく長期運転可能 C:機械運転は許容 D:損傷を起こす可能性大
- クラス I：完成機の一部として組み込まれたエンジン・電動機(15kW 以下の汎用電動機等)
- クラス II：特別な基礎を持たない中型機械(15kW~75kW の電動機)及び堅固な基礎に据え付けられたエンジン又は機械(300kW 以下)
- クラス III：大型原動機及び大型機械で比較的高い剛性をもつ重い基礎上に据え付けられたもの
- クラス IV：大型原動機及び大型機械で比較的柔らかい剛性をもつ基礎上に据え付けられたもの
(出力 10MW 以上のターボ発電機セット及びガスタービン等)

(3) 各種基準調査

振動計測に関する各種基準等については、公的規格等を調査のうえ下記 4 点を確認して評価基準の設定に反映させるものとした。

- ・ゲート点検・整備要領（案）（社団法人ダム・堰施設技術協会 平成 17 年 1 月）
- ・ISO 20816-1:2016 (ISO) (ISO10816 を受けて 2017 年に制定 表-2 参照)

・ JIS B 0906（日本規格協会）

・ 河川用ゲート設備点検・整備・更新マニュアル（案）（国土交通省 平成27年3月）

(4) 評価基準値の設定

振動計測における評価基準値は、上記 3.1.1～3.1.3 の調査結果より、以下のとおり設定した。

表-23 振動診断の評価基準値

評価方法	評価基準値
絶対値による評価	ISO 10816-1 に基づき、速度 rms 値による評価基準値を軸受と減速機・電動機に分けて下表のとおりとした。
傾向管理による評価 (相対評価)	河川用ゲート設備点検・整備・更新マニュアル（案）より、管理基準値（注意値：初期値の 2.5 倍、予防保全値：初期値の 6.3 倍）を基準として準用する。

表-24 軸受の診断評価

評価	速度 rms 値による傾向管理	速度 rms 値 (mm/s)	時間領域波形における特徴	周波数領域波形又はのエンベロップの特徴	異音の有無・温度※6
×	予防保全値以上	(7.1 以上)※1	(異常発生周波数に一致するピークがある)	(異常発生周波数が確認できる)	はっきりとした異音又は軸受部温度が高い
△1	予防保全値以上	(4.5 以上)	異常発生周波数に一致するピークがある	(異常発生周波数が確認できる)	(異音又は軸受部温度が高い)
△1	予防保全値以上	4.5 以上※2	異常発生周波数に一致するピークがない	—	(異音又は軸受部温度が高い) 他の構成部品の健全度を疑う
△2	予防保全値以上	1.8 以上 4.5 未満※3	異常発生周波数に一致するピークがない	—	(異音又は軸受部温度が高い) 他の構成部品の健全度を疑う
△2	注意値以上	(1.8 以上)	異常発生周波数に一致するピークがある	(異常発生周波数が確認できる)	温度異常なし 異音なし
△3	注意値以上	0.71 未満※4	異常発生周波数に一致するピークがある	(異常発生周波数が確認できる)	温度異常なし 異音なし
△3	注意値以上	1.8 未満※4	異常発生周波数に一致するピークがない	—	温度異常なし 異音なし
△3	注意値未満	(1.8 未満)※5	異常発生周波数に一致するピークがある	(異常発生周波数が確認できる)	温度異常なし 異音なし
○	注意値未満	(1.8 未満)	異常発生周波数に一致するピークがない	—	温度異常なし 異音なし

【凡例】

△1：点検、精密診断、総合診断等の結果、設備・装置・機器・部品の機能に支障が生じる可能性があり、予防保全の観点から早急に措置（整備・更新・取替）を行うべき状態

△2：点検、精密診断、総合診断等の結果、設備・装置・機器・部品の機能に支障が生じていないが、2～3年以内に措置（整備・更新・取替）を行うことが望ましい状態

△3：点検の結果、設備・装置・機器・部品の機能に支障が生じていないが状態の経過観察が必要な状態

※1：はっきりとした異音あるいは高い温度が確認されれば故障とみなす。また、速度 rms 値として示す 7.1mm/s は、従来の ISO10186-1 においては、15kW を超え 75kW クラス異常値に匹敵するものであり、一般的なゲート設備においてこのレベルを超えれば故障とみなす。

※2：点検時の傾向管理の結果予防保全値を超え、かつ実際の測路 rms 値も 4.5mm/s を超えている場合、精密診断の結果軸受を特定する傾向が把握できなくても予防保全を計画する。また、他の構成部品の異常の有無についても調査する。

※3：点検時の傾向管理の結果予防保全値を超え、かつ実際の速度 rms 値が ISO10816-1 のゾーン C の範囲にある場合、長期の連続使用は難しいと評価し、△2 とする。

※4：点検時の傾向管理の結果が注意値以上」であっても速度の実測値が 0.71mm/s 未満の場合、あるいは軸受の異常を特定する傾向を把握できない場合でも実測値が 1.8mm/s 未満の場合は、異音や温度等の明確な異常がない限り経過観察とする。

※5：信頼性による標準年数により精密診断を実施した場合で、傾向管理上は注意値を下回っていても、軸受の劣化を示す兆候が確認できた場合は、経過観察とする。

※6：温度異常は、温度分布計測（赤外線サーモグラフィ）を参照のこと。

表-25 歯車及び電動機の診断評価

評価	速度 rms 値による傾向管理	速度 rms 値 (mm/s)	時間領域波形における特徴	周波数領域波形又はのエンベロープの特徴	異音の有無・温度※6
×	予防保全値以上	(7.1 以上)※1	(異常を示す波形が確認できる)	(異常発生周波数が確認できる)	はっきりとした異音又はケーシング温度が高い
△1	予防保全値以上	(4.5 以上)	(異常を示す波形が確認できる)	異常発生周波数が確認できる	(異音又はケーシング温度が高い)
△1	予防保全値以上	4.5 以上※2	—	異常発生周波数が確認できない	(異音又はケーシング温度が高い)
△2	予防保全値以上	1.8 以上 4.5 未満※3	—	異常発生周波数が確認できない	(異音又はケーシング温度が高い)
△2	注意値以上	(1.8 以上)	(異常を示す波形が確認できる)	異常発生周波数が確認できる	温度異常なし 異音なし
△3	注意値以上	0.71 未満※4	(異常を示す波形が確認できる)	異常発生周波数が確認できる	温度異常なし 異音なし
△3	注意値以上	1.8 未満※4	—	(異常発生周波数が確認できない)	温度異常なし 異音なし
△3	注意値未満	(1.8 未満)※5	(異常を示す波形が確認できる)	異常発生周波数が確認できる	温度異常なし 異音なし
○	注意値未満	(1.8 未満)	—	(異常発生周波数が確認できない)	温度異常なし 異音なし

【凡例】

△1：点検、精密診断、総合診断等の結果、設備・装置・機器・部品の機能に支障が生じる可能性があり、予防保全の観点から早急に措置（整備・更新・取替）を行うべき状態

△2：点検、精密診断、総合診断等の結果、設備・装置・機器・部品の機能に支障が生じていないが、2～3年以内に措置（整備・更新・取替）を行うことが望ましい状態

△3：点検の結果、設備・装置・機器・部品の機能に支障が生じていないが状態の経過観察が必要な状態

※1～※6の判断については、軸受に準ずる。ただし、減速機がサイクロ減速機（商品名）である場合は本表は適用せず、専門技術者がメーカーと協議し、別途判断指標を設けるものとする。

②漏洩電流計測

(1) メーカーヒアリング

機器や人体に影響のある実際の漏洩電流 I_{gr} を計測する手法は、自家用電気工作物保安管理規定によれば、電源周波数とは異なる微弱電圧を印加し接地ラインにも工夫をして計測する必要があったが、近年では計測器を用いて通常の運転時に簡易に計測できる技術が開発されている。本調査では、当該技術に関する評価基準の検討にあたり、計測器メーカー（6社）にヒアリングを実施した。

ヒアリングの結果、もっとも多い回答としては、保安規定に定めのある絶縁抵抗値より逆算した1mA以下だが、根拠としているのは、感電等による人体への影響であり、機器の劣化等ではなかった。その他の意見として、経験上、10mAが一つの目安になるとの回答があり、これは機器の故障事例によるものである。

(2) 文献等の調査

漏洩電流計測に関する文献調査は、下記4点を確認した。

- ・H28 河川用ゲート設備の点検・診断手法検討業務 報告書
- ・電気設備の技術基準の解釈の解説
- ・低圧電路地絡保護指針
- ・ベクトル理論による I_{gr} 検出方式の信頼性

(3) 各種基準調査

漏洩電流計測に関する各種基準は、下記2点を確認し、「電気設備の技術基準の解釈」では、1mAを評価基準としていた。この基準は、絶縁抵抗を参照した逆数であることが分かった。

- ・電気設備の技術基準の解釈 経済産業省 平成28年5月
- ・家庭用及びこれに類する電気機器の安全 IEC-J60335-1

(4) 評価基準値の設定

漏洩電流計測における評価基準値は、上記2.2.1～2.2.3の調査結果より以下のとおり設定した。

表-26 漏洩電流計測の評価基準値

評価基準値	判断内容	評価
$10\text{mA} < I_{gr}(I_{or})$	機器の故障、著しい劣化が予想される。	△1
$1\text{mA} < I_{gr}(I_{or}) \leq 10\text{mA}$	機器の劣化が予想される。	△2
$I_{gr}(I_{or}) \leq 1\text{mA}$	健全な状態と判断される。	○

③温度分布計測（赤外線サーモグラフィ）

(1) メーカーヒアリング

評価基準の検討にあたっては、電動機メーカー（3社）及び電動機修理業者（1社）にヒアリングを実施した。

ヒアリングの結果、モータの仕様や運転状況により、温度上昇値は変化するため、指標を定めるのは困難との回答が多かった。その他、IEC規格より、周辺温度+40℃以内という基準があった。

(2) 文献等の調査

温度分布計測（赤外線サーモグラフィ）に関する文献調査では、下記3点を確認した。下記の図書では、特に定量的な指標等はなかった。

- ・非破壊検査技術シリーズ 赤外線サーモグラフィ試験Ⅰ 2011
- ・非破壊検査技術シリーズ 赤外線サーモグラフィ試験Ⅱ 2012
- ・赤外線サーモグラフィによる電気設備診断技術ハンドブック

(3) 各種基準調査

温度分布計測（赤外線サーモグラフィ）に関する各種基準は、下記2点を確認した。

- ・ゲート点検・整備要領（案）（社団法人 ダム・堰施設技術協会平成17年1月）
- ・河川用ゲート設備点検・整備標準要領（案）（国土交通省 総合政策局）

(4) 評価基準値の設定

温度分布計測における評価基準値は、上記3.3.1～3.3.3の調査結果より以下のとおり設定したが、劣化傾向を把握することが困難であるため、試行案では、振動計測値が注意値を超過し、異常箇所を特定できなかった場合等に、適用する補助技術とした。

表-27 温度分布計測（赤外線サーモグラフィ）の評価基準値

評価方法	評価基準値
絶対値による評価	規格・基準から引用した温度を用いる。よって、暫定的な上昇温度の基準として、電動機40℃、減速機50℃、切替装置50℃とする。
傾向管理による評価 （相対評価）	温度上昇値の正常値に対する標準偏差により、対象機器の異常を診断する（注意値：正常値+2σ、予防保全値：正常値+3σ）。

表-28 温度分布変化による評価

評価方法	評価基準値
温度分布変化による評価	温度分布計測結果内での不均一、経年的な温度分布変化、別個体同仕様との温度分布の差により異常を診断する。

3.7 精密診断マニュアル（素案）の作成

①精密診断マニュアル（素案）作成

試行を実施した技術について、精密診断マニュアル（素案）を作成した。

素案は、下記の骨子（項目立て）に準じて、技術毎に整理・取りまとめを行った。

- ・総則（目的、適用範囲、測定・診断フロー）
- ・当該技術による診断
- ・測定の対象
- ・測定（測定箇所、測定のタイミング）
- ・測定条件（性能要件、測定の留意事項）
- ・判定基準
- ・報告書
- ・技術的課題

②診断技術に関するヒアリング

診断技術を現場に適用していくにあたり、河川用ゲート設備点検・整備・更新マニュアル(案)等の「精密診断」の考え方を踏まえた診断技術の選定とその標準化が重要となるため、実際に現場で精密診断を実施すると想定される点検業者及びゲートメーカー（10社）に対し、目的別にヒアリング（アンケート調査）を実施した。

③課題と対応方針

本業務にて作成した診断マニュアル（素案）については、点検業者及びゲートメーカー等からの意見聴取結果を考え合せ、精密診断として技術的な知見をブラッシュアップするとともに、今後も試行を通じて現場における適用方法および評価・判断手法を明確にしていく必要がある。

以下に今後の課題について要点を示す。

1) 不具合（故障）事象に対する判断指標の明確化

本年度試行した技術のうち、赤外線サーモグラフィと漏電測定については、定量的計測は可能であるが判定指標が明確ではないため、「診断技術」として認知されにくいことがわかった。また、これまでゲート設備で適用実績がなかったことから、判断指標については長期的課題となるが、短期的に実現可能な方法として、開閉装置の主要機器である電動機を対象とし、不具合事象を模擬的に再現できる装置を用いた試験を行い、正常時と異常時の違いを明確にするなどの方法が考えられる。

なお、現場においては、老朽化した施設を主体として試行を継続し、診断データを蓄積していく。

2) 点検結果に基づく診断実施フローの検討

供用年数及び年点検・月点検等の結果（定性的評価、計測データの傾向管理等）に基づく精密診断実施のフロー、対象機器に対する適用技術の選定を明確に行えるよう検討を進める。

3) 診断マニュアル（案）の作成

前2項の取組を行った上で、点検業者等の専門技術者が実施することのできる内容のマニュアル（案）を作成する必要がある。

3. 8 電動機不具合検証

①不具合検証技術

本検証は、振動計測、漏洩電流計測、温度分布計測（赤外線サーモグラフィ）に関して、老朽化した開閉装置の電動機を使用し、人為的に不具合を発生させたときの測定値の確認と、マニュアルとして定めておくべき技術的事項の検証を行った。

②検証内容

実際のゲート設備にて使用していた開閉装置の電動機2台で検証した。ただし、使用する電動機は、検証前に内部を分解し確認した結果、運転機能に影響を与える大きな不具合は発生していないことが判明したため、人為的に不具合を作り出し、電動機の性能試験に使用している誘導電動機特性試験装置(以下「試験装置」という)により、下記①～⑥の手順で振動計測、漏洩電流計測、温度分布計測を実施した。

① 搬出した状態で運転する

- ・劣化試験の比較材料となるデータを計測するため、供試体となる電動機をそのまま試験装置にて無負荷運転させ、振動・漏洩電流・温度分布を確認する。

② 電路の絶縁低下を再現：電動機端子の内1相を接地させた状態で運転する

- ・T相の配線ラインに抵抗を接続したうえで接地されることで漏電状態を作成し、運転中の各データ（振動・漏電・温度分布）を計測する。

③ 電動機内部の軸受損傷を再現：軸受部品に傷を付けた状態で運転する

- ・電動機内部軸受の外輪及び保持器&玉にドリルで傷を付け、軸受が損傷した状態を作成し、運転中の各データ（振動・漏電・温度分布）を計測する。

④ 電氣的不平衡を再現：電動機の固定子の1つを通電させない状態で運転する

- ・固定子の1相を通電させないことにより、電氣的不平衡状態を作りだし、運転中の各データ（振動・漏電・温度分布）を計測する。

⑤ 過負荷を再現：電動機付属のブレーキをかけた状態で運転する

- ・電動機内蔵の電磁ブレーキを物理的に締めて、電動機の過負荷状態を作成し、運転中の各データ（振動・漏電・温度分布）を計測する。

⑥ 部分的なショート再現：巻き線と他の巻き線と短絡させた状態で運転する

- ・コイルの巻き線に傷を付け、さらに当該部分を一部人為的に他相と短絡させた状態を作成し、運転中の各データ（振動・漏電・温度分布）を計測する。

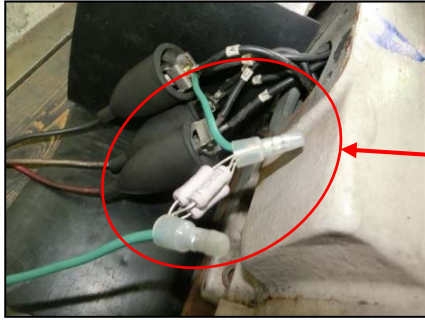


工場搬入

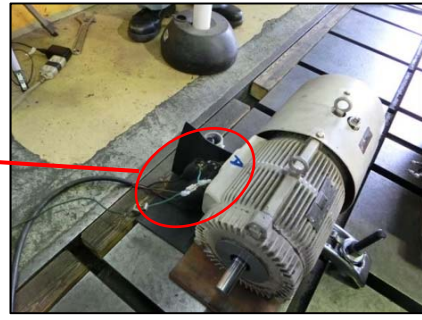


電動機分解（内部確認）

写真-20 電動機の内部確認状況



抵抗器取付 (T相)



抵抗器取付

写真-21 漏洩電流状況

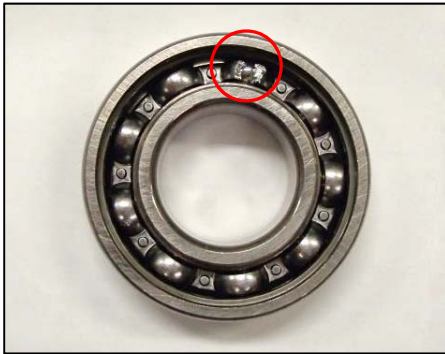
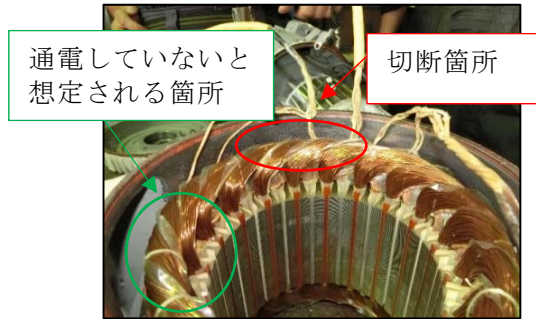


写真-22 電動機軸受への不具合(損傷)状況

写真左：玉及び保持器(電動機A) 写真右：外輪(電動機B)



切断するケーブルの取出し

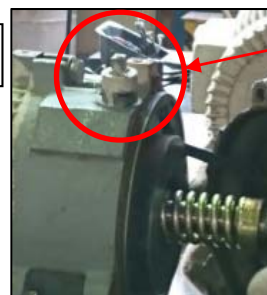


固定子につながるケーブルを切断

写真-23 固定子を通電させない(不平衡)状況



ブレーキ部



調整ねじ

写真-24 電磁ブレーキをかける(過負荷)ための調整作業



導線を巻き線に固定



線間を導線で結合

写真-25 隣同士の巻線を通電させ短絡状態

③実験結果

(1) 振動計測

振動計測は、写真-26 に示す計測機器を用いて、①～⑥の検証を行った結果、次のことを確認した。



振動計測器

(出典：リオン株式会社 HP)



振動（加速度）計測状況



センサ設置状況

写真-26 振動計測状況

- ・搬出した状態（無負荷）では、周波数が 16.6Hz であり、回転周波数 15.5Hz に近い値を示した。

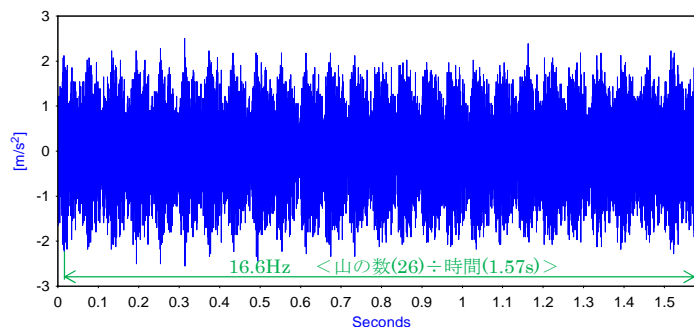


図-17 搬出した状態の振動波形（不具合作成前）

- ・電動機端子の1つを接地させた場合（漏電状態）は初期状態に対して、波形の変化は見られず速度 rms 値の変化も確認できなかった。
- ・軸受（出力側）の外輪に傷をつけた場合は、発生周波数が 59Hz を示し、理論上の発生周波数 55.5Hz とほぼ一致した。また、外輪傷の特徴として波形のピークが周期的に発生することが確認できた。

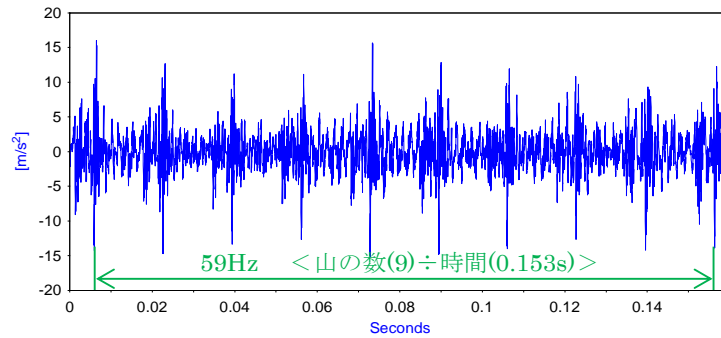


図-18 軸受の外輪に傷をつけた場合の振動波形

- ・速度 rms 値は、初期値に対して 1.8 倍以上を示すこともわかった。軸受に外輪傷を有する電動機は、早急に取替を判断する必要がある、この検証結果から、採用した計測機器と評価基準値により、再現された不具合を捉えることができています。
- ・軸受（出力側）の玉及び保持器に傷をつけた場合は、発生周波数が 6.6Hz を示し理論周波数 6.17Hz とほぼ一致した。速度 rms 値は、初期値に対して外輪傷と同様に 1.8 倍以上を示すことが確認できた。

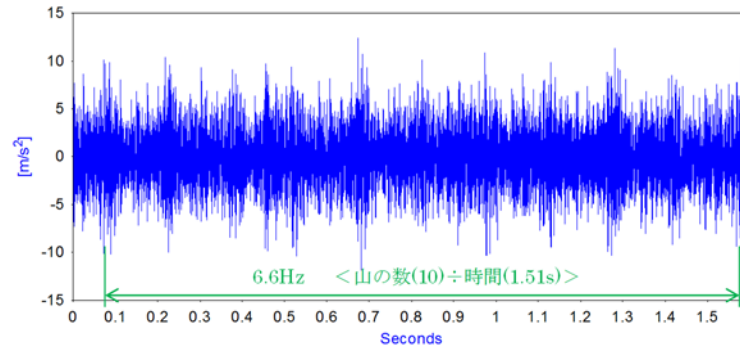


図-19 軸受の内輪・玉に傷をつけた場合の振動波形

- ・電動機の固定子の 1 つを通電させない場合は、電源周波数の 2 倍である 100Hz の周波数ピークが発生することから、電動機の電氣的不平衡の特性を確認できた。また、速度 rms 値は、初期値に対して外輪傷と同様に 1.8 倍以上を示すことが確認できた。

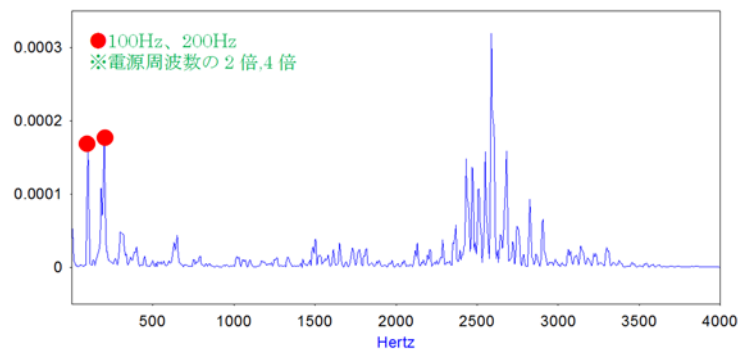


図-20 電氣的不平衡発生時の周波数解析波形

- ・電動機に負荷をかけた状態では、速度 rms 値が初期値の 13 倍程度の大きな値を示した。この原因は、電磁ブレーキのパッドが摺れて制動力に偏りが生じていたことで、最も大きな振動が発生していたと推察される。また、速度 rms 値が「×：予防保全値以上（7.1 以上）」と評価され、即時に取替するような状態を示した。ただし、ブレーキによる過負荷においては、運転を継続することによってパッドが摩耗し、振動が低下することも確認されている。ブレーキについて考察すれば、その他の診断技術と合わせた評価が必要である。

- ・巻線を短絡させた場合は、軸受の玉及び保持器に傷をつけた電動機を用いて検証したことが影響し、振動波形の明確な変化を確認することができなかった。ただし、振動加速度で周波数解析をした結果、電源周波数の発生はなかったが、100Hz（電源周波数の2倍）周期で周波数が確認できた。また、振動速度で周波数解析してみたところ、100Hz及び200Hz（電源周波数の2倍及びその高調波）と100Hz周期の周波数が確認できた。これは、短絡時に発生する周波数（電源周波数の2倍及びその高調波）であり、本検証でその特徴が確認できた。

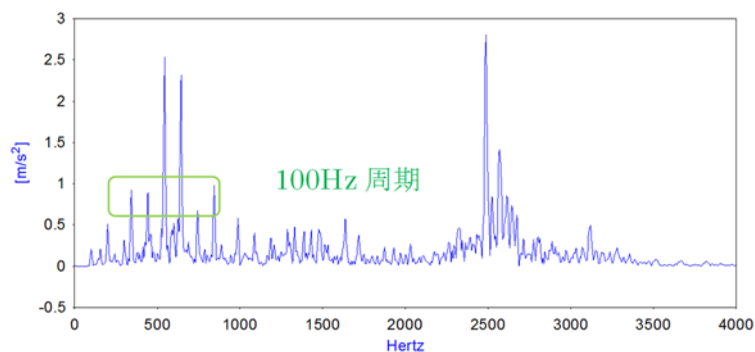


図-21 短絡させた状態での周波数解析波形（加速度）

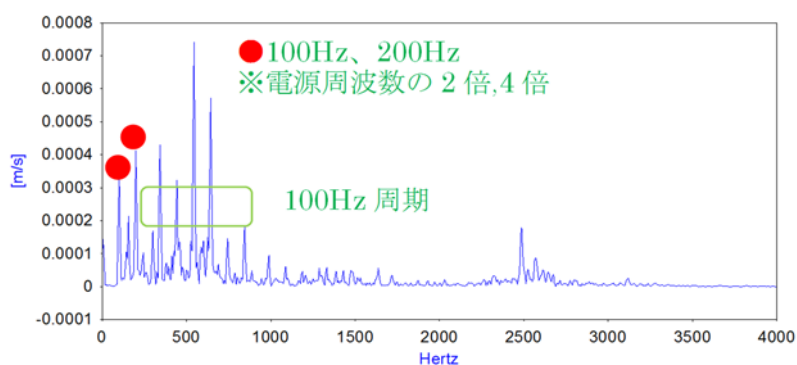


図-22 短絡させた状態での周波数解析波形（速度）

(2) 漏洩電流計測

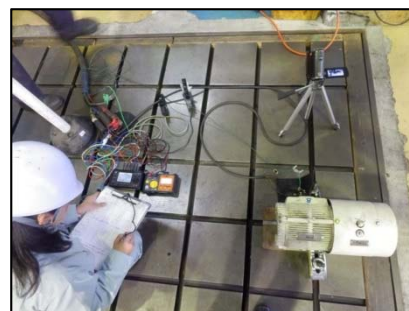
漏洩電流計測は、写真-27に示す2種類の計測機器を用いて、漏洩電流を1.25mA、2.5mA、5mA、10mAの4ケースで検証した結果、漏洩電流を計測することはできた。



漏洩電流計測器
(関東技術保有 機器A)



漏洩電流計測器
(位相補正機能有り 機器B)



計測状況

写真-27 漏洩電流計測状況

ただし、その他の検証では漏洩電流が発生していないため、その他の不具合を漏洩電流計で確認することはできなかった。なお、本検証では、試験装置の漏電遮断器がトリップする

可能性があることから安全面を考慮し、10mA以上の漏洩電流を再現させることは実施しなかった。

この検証結果から、漏洩電流について、予め設定した評価基準値（計測器メーカー設定）の妥当性を確認することができなかったが、漏洩電流値については確認することができたため、本技術の有効性は確認できた。このような検証結果は今後の現場で活用できるデータであると考えられたため、マニュアル（試行案）に掲載することにした。

今回漏洩電流計測を行った際、検証当初に関東技術事務所保有の漏洩電流計測器で計測した際に計測値と理論値で乖離が発生した。測定器の仕様と現地条件を確認した結果、漏洩電流計測器はΔ結線方式に対応した機器であり、今回使用した試験装置がY結線であったため乖離が生じたことが判明した。このことから、漏洩電流計測を実施する場合は結線方式の把握が必要であることがわかった。

表-29 漏洩電流計測結果

抵抗値／測定項目		理論値	機器 A	機器 A (補正)	機器 B
200kΩ	Igr	230V/200kΩ = 1.15mA	1.07 mA	1.51 mA	1.52 mA
100kΩ	Igr	230V/100kΩ = 2.3mA	1.6 mA	2.92 mA	2.837 mA
50kΩ	Igr	230V/50kΩ = 4.6mA	2.66 mA	5.67 mA	5.477 mA
25kΩ	Igr	230V/25kΩ = 9.2mA	5.02 mA	11.17 mA	10.603 mA

(3) 温度分布計測

温度分布計測は写真-28に示す計測機器を用いて検証を行った結果、次に示すことが確認できた。



赤外線サーモグラフィ
(出展：キーサイト・テクノロジー
ジーカタログ)



温度分布計測状況



温度計測状況

写真-28 温度分布計測状況

- ・漏電状態、軸受損傷状態及び電氣的不平衡状態で運転しても、本検証では異常な温度上昇又は温度分布を確認することはできなかった。
- ・電動機に負荷をかけた場合では、40℃以上の上昇温度を確認することができ、また不具合箇所であるブレーキ部が高温であることが明確に出現したことから、評価基準値の妥当性を確認することができた。

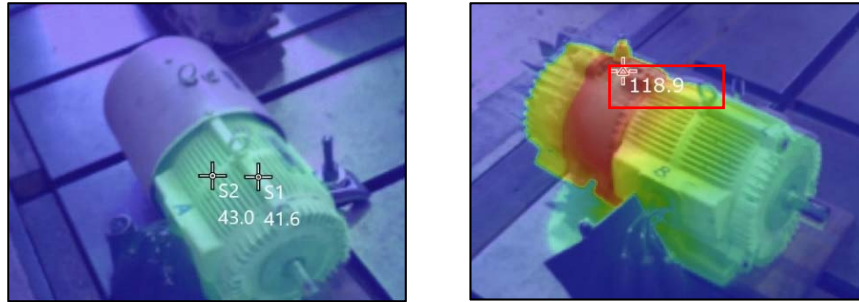


写真-29 温度分布の変化状況（ブレーキを強制的にかけた状態）

また、巻線を人為的に他相と短絡させた状態でも、写真-30 に示すように高温部が確認でき、温度分布の偏りを当該計測機器で確認することができた。検証後に電動機を分解した結果、温度分布の高温部と巻線の焼損部が一致していることから不具合部位の特定にも有効的と考えられる。

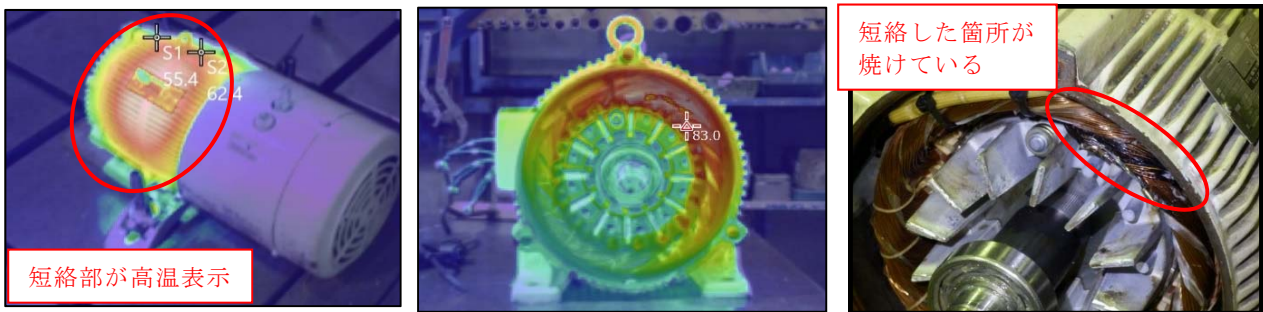


写真-30 巻線の2相間を短絡させた際の温度分布とその状況写真
この結果も今後の精密診断で参考になるため、マニュアル（試行案）に掲載するものとした。

3. 9 精密診断マニュアル（試行案）の作成

これまでの検証で診断技術として有効性が高い技術（振動・漏洩電流・板厚・温度分布）について、河川用ゲート設備精密診断マニュアル（試行案）を作成した。このマニュアルの中に、今回の検証内容及び結果を不具合診断を行う上での参考として盛り込んだ。

①メーカー等へのヒアリング

診断技術を現場に適用していくにあたり、河川用ゲート設備点検・整備・更新マニュアル（案）等の「精密診断」の考え方を踏まえた診断技術の選定とその標準化が重要であるため、実際に現場で精密診断を実施することが想定されるゲートメーカー（6社）及び点検業者（3社）の計9社に対し、以下のヒアリング（アンケート調査）を実施し、その結果についてマニュアル（試行案）に反映をした。

(1) これらの4技術が精密診断として実施可能かどうか

- ・メーカーからは「ある程度は対応可能」とする回答が多い反面、実際に現場で作業を行う点検業者に限定すると対応不可とする意見が多い。
- ・点検業者が対応不可とする意見の例としては、「データの積み重ねが無く、診断ができない。」、「計測可能だが、判断材料が確定していないので対応できない。」などである。

(2) 精密診断マニュアル（試行案）の内容について

- ・全体としては、「不足なし」と「判らない」に分かれたが、点検業者に限定すると、「不明な箇所が多い」とする回答が多い。

- ・不明な箇所が多いとする意見として、「判断材料を明確にする必要がある」としている。

(3) その他の意見

- ・マニュアル施行に際し、実地検証・講習会等の場を設けることを希望する。

4. 今後の課題及び方針

本業務にて作成した精密診断マニュアル（試行案）は、文献調査、メーカーヒアリング、設備管理者への意見照会及び評価基準値に関する検証実験結果等を考え合せてまとめたが、技術面及び業務としていくつか課題がある。

①診断精度の向上

本調査にて、実際のゲート設備でも検証を行ってきたが検証実績としては少なく、アンケートにおいても「判断材料を明確にする必要がある」と指摘されていることから、今後もゲート設備にてデータの収集及び解析を行い、診断実績を積み重ね診断精度の向上を図る必要がある。また、実績を積み重ねながら、精密診断マニュアルのブラッシュアップを行い、よりわかりやすい精密診断マニュアルへと改訂していく。

②精密診断に関する講習会等の計画・実施

取りまとめた精密診断マニュアル（試行案）に対するゲートメーカーからのヒアリング結果を踏まえ、採用されている診断技術の使用（計測や解析方法）に関する講習会等を開催し、診断技術に関する理解度を広め、機械設備の維持管理に役立てるような普及方策が必要である。

③適用技術の拡大

本業務では、振動、漏洩電流、板厚に関する精密診断手法の検討を行ったが、民間のメンテナンスの現場では、現状の河川ゲート設備に適用されている点検手法以外の技術も活用されていることが考えられる。

今後更なる維持管理の高度化、省力化を見据え、継続的な技術調査及び適用の検討を実施するとともに、精密診断マニュアルに記載した診断技術も含め、故障と診断技術の体系的な整理が必要であり、将来的に複数の技術を組み合わせた精密診断手法の確立が望まれる。

担当課 施設技術課