



## 河川ポンプ設備の状態監視における主軸振動解析診断事例

溝江 哲也

国土交通省関東地方整備局  
関東技術事務所施設技術課

### 1. はじめに

河川ポンプ設備は、浸水被害から我々の生命・財産を守る社会インフラであり、普段休止にありながら必要時に確実な稼働が要求される待機系設備である。このため、設備の維持管理は非常に重要で、万全な保全が必要となる。河川ポンプ設備に採用される保全方式を図1に示す。

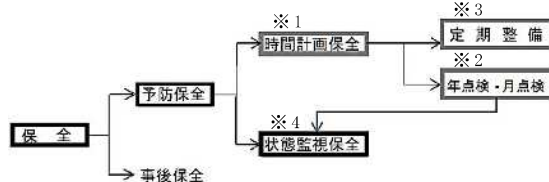


図1 河川ポンプ設備の保全方式

河川ポンプ設備の維持管理では「予防保全」のうち「時間計画保全（図1※1）」を採用している。これは、年点検・月点検（図1※2）と定期整備（図1※3）を実施する方式である。この方式の各点検時に劣化状況の目視確認が出来ないポンプ本体内部や水中にある軸受等の保全は、定期整備で対応をしている。故障を未然に防ぐという目的があるため設備内部の劣化状態によらず整備を実施するので、経済的に不利なケースがある。また、整備時期に応じた適切な予算確保も必要である。河川ポンプ設備においては、今後

20年で約8割が設置後40年超えとなり、老朽化の進行による故障頻度上昇の懸念がある一方、整備予算は縮減されるなど相反する状況が続いている。

このような状況下でこのまま従来どおりの「時間計画保全」に頼っていると、予想外に劣化が進んだ故障を見逃すリスクも高まる。このため、戦略的に少ない予算で効果的な維持管理を実施していくことが求められ、その具体的対策として設備の劣化状態を正確に診断し、的確な整備時期を判断する状態監視技術による「状態監視保全（図1※4）」が重要となっている。

そこで、回転体内部の劣化の有無を見極めることに有効な状態監視技術の1つに渦電流式変位計による振動を解析する診断技術があるが、この技術は、民間の常用系プラントでは活用が進んでいるものの、待機系設備である河川ポンプ設備では普及していなかった。しかし、平成22年度に独立行政法人土木研究所によって待機系設備の河川用ポンプ設備においても、主軸、水中軸受、羽根車の劣化診断に対する適用性が示されたことから、関東技術事務所では平成25年度より関東地方整備局管内の河川ポンプ設備を対象に、本技術による有効性の確認及び診

断精度の更なる向上のため、測定（事例データの蓄積）・診断を鋭意継続実施中である。

今後、本技術を、河川ポンプ設備に本格的に普及させることができれば、これまでの目視や稼働データを見て、時間計画保全の補助的な検討材料としていた状態監視から、設備の状態により整備時期を判断する「状態監視保全」の適用範囲の拡大が可能となる。また、劣化の進む設備の早期対処や不急な定期整備の回避を行うことによって、社会資本の整備計画にメリハリをつけることも可能となり、設備の保全に必要な維持管理費の予算削減にも繋がると考えている。

本稿では、関東地方整備局管内の河川ポンプ設備に対して実施した、渦電流式変位計を用いた主軸振動解析の診断事例について紹介する。

## 2. 振動測定による診断方法

### ①年点検等で実施する診断方法と課題

従来から年点検等で行われているのは、ポンプ等のケーシング部の振動を加速度計により測定する方法である（写真1）。



写真1 加速度計による測定方法例

この方法は、測定した加速度データを計器の内部で変位データに変換するもので、容易に測定でき広く普及している。

測定した数値は、ポンプメーカーが設定した閾値を睨みながらグラフ化してデータの経年変化を観察することにより、設備の異常等を推定する。これは通常、簡易診断と言われる手法である。この手法には2つの課題がある。1つは、河川ポンプ設備の主軸の回転周波数は2～10Hz程度までの低速回転が殆どであり、加速度計の測定に適する1,000Hz以上の周波数に比べ、低い適用範囲であること。2つ目は、ポンプ本体のケーシングを介しているので、主軸、水中軸受及び羽根車の挙動を示す主軸自体の振動を測定していないことである。この方法だけでは、設備内部の劣化傾向を完全に把握することは困難であり、測定値が閾値を超えなくても、既に故障状態に進んでいることもあり得る。

そこで、主軸の異常、水中軸受の摩耗及び羽根車の劣化の状況を把握するためには、回転に伴う主軸の変位を直接測定し、なおかつその変位量の時間領域波形（振動波形）から振動の周波数分布（周波数領域波形）に変換（高速フーリエ変換）して詳細に解析する診断方法の選択が必要であるため、関東技術事務所ではこの渦電流式変位計を用いた測定・診断を選択した。

### ②渦電流式変位計による振動測定

測定に使用する機器は、センサ設置架台（マイクロゲージ+マグネットスタンド）、渦電流式変位計、データロガー、振動波形表示装置で構成（ユニット）される。図2に機器構成と接続方法の事例を示す。

振動波形表示装置は、測定波形をリアルタイムに把握し、ノイズの有無やセンサ設置架台（マグネットスタンド）の振動による「ずれ」の有無等を確認できる

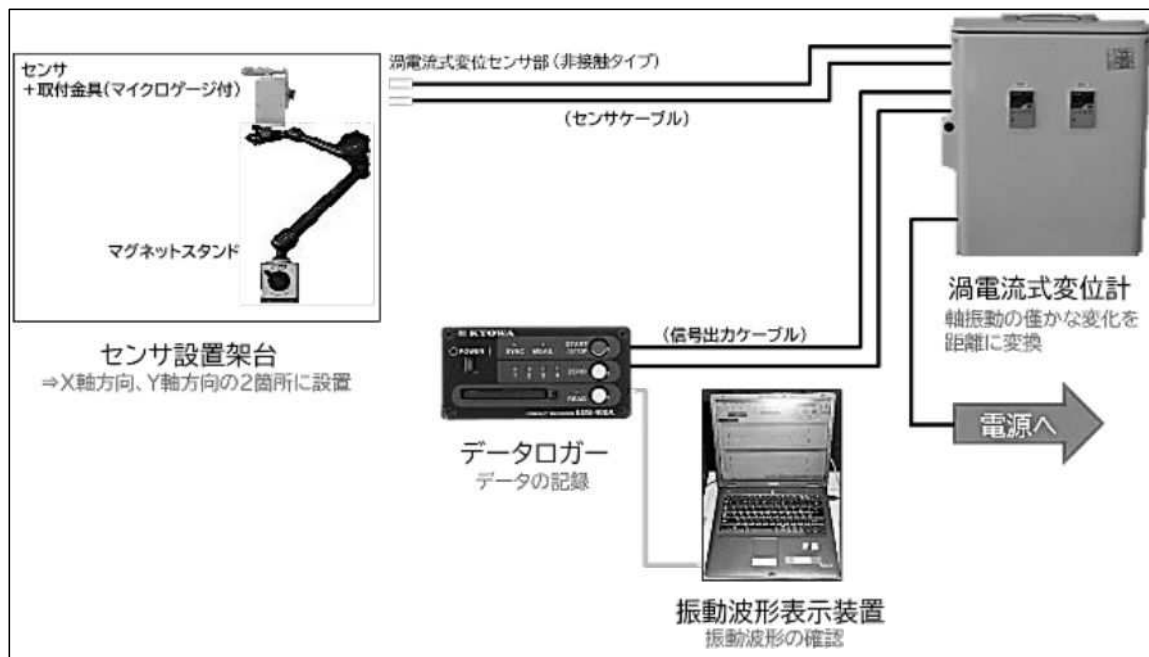


図2 「渦電流式変位計測定装置（ユニット）」機器構成図と接続方法の事例

ようにした。本装置は、パソコンと市販アプリケーションを用いて安価に組み上げている。図2に示すとおり持ち運びが可能な様に可搬式ユニットとしていることから、河川ポンプ設備がある各排水機場に装置を持ち込んで測定し、得られたデータを持ち帰って解析をしている。

次に、渦電流式変位計の原理および特徴を、それぞれ表1及び表2に示す。

表1 渦電流式変位計の原理

| 渦電流式変位計 |                                                                                                                            |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 原理      | <p>センサー内のコイルに高周波電流を流すことにより、高周波磁束が発生する。この磁界内に測定対象物（金属）を置くと、対象物表面に渦電流が発生する。この渦電流が、コイルと測定対象物との距離が近いほど大きくなる性質を利用して変位を計測する。</p> |
|         |                                                                                                                            |

表2 渦電流式変位計の特徴

|    |                                                                                                                                        |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 長所 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・構造が簡単で堅牢、特徴が安定しているため信頼性が高い</li> </ul>                                                          |
| 短所 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・移設する毎に、設備運転前に校正作業を行う必要があるため、準備時間を要する(30分程度)</li> <li>・主軸周りのスペースが狭い場所では、センサーの取り付けは困難</li> </ul> |

この渦電流式変位計は非接触で振動を測定することが可能であり、加速度計と大きく異なる。

渦電流式変位計を用いた場合の測定位置と設置状況を図3、写真2に示す。測定は、主ポンプ主軸が露出している箇所で行い、平面的な主軸の動きを把握するため2つのセンサを用い2軸測定（設置角90°）を行う。

渦電流式変位計による測定は原則として河川ポンプ設備の管理運転時に実施している。センサの特性は主軸の材質により変化するので材質毎の校正が必要となる。校正作業は本来、変位計を現場で設置する際毎に行うのが良いが、1設備当たり約30分程度の準備時間を要している。特に主軸周りのスペースが狭い場合などは変位計設置や校正作業に手間取り、管理運転作業へ影響を与えかねない。

このため関東技術事務所では、管内ポンプ設備の主軸材質を調査し、90%以上がJIS規格によるSUS403及びS45Cであることが解ったため、両材質の部材を校

正用試料とした簡易校正装置を作成している。測定現場に行く前に、この装置で事前に校正作業を済ませることで、現場での準備時間が1設備当たり約10分の短縮が可能となっている。

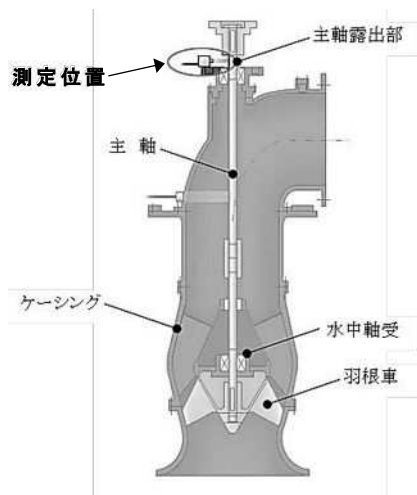


図3 測定位置



写真2 渦電流式変位計の設置（設置角90°）

### ③渦電流式変位計を用いた診断方法

本稿で紹介する渦電流式変位計を用いた診断方法は、振動波形及びその周波数分布を解析することにより、設備異常の把握とともに異常箇所と劣化程度の推定を可能とするものである。

ポンプ等の回転機械においては、主軸のアンバランスや、羽根車の摩耗、軸受のゆるみ等によって、さまざまな振動が発生するため、これらの性質を利用した振動解析手法となる。発生周波数と発生原因の関係は、民間の常用系設備に採用

されている指標を基に、独立行政法人土木研究所が、主ポンプの異常兆候(原因)と発生周波数の関係について、表3のとおり示した。

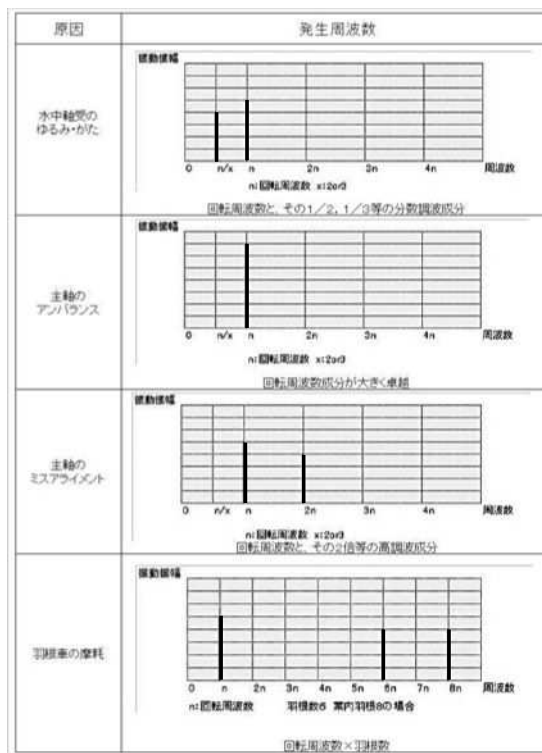


表3 主ポンプの異常兆候（原因）と発生周波数

以下、異常兆候（原因）毎の発生周波数の特徴について簡単に解説する。

設備の異常箇所と劣化程度の推定の際は、これらの特徴等を参考にしている。

#### 1)水中軸受の「ゆるみ・がた」

ゆるみ・がたがある場合は、回転周波数成分（ $n$ ）と、その分数調波成分（基本周波数の分数倍にあたる周波数のこと。）が卓越する。

#### 2)主軸のアンバランス

アンバランスがある場合は、回転周波数成分（ $n$ ）が大きく卓越する。アンバランスによる変位量は、回転数の増加とともに増加する傾向がある。また、主軸の曲がりがある場合も、回転周波数成分（ $n$ ）が大き

く卓越する（変位量は運転開始時から大きい。）。

### 3) 主軸のミスアライメント

ミスアライメント（主軸継ぎ手部における「芯ずれ」、「面開き」、「芯ぶれ」、「面ぶれ」の総称。）がある場合は、回転周波数成分（ $n$ ）と、その高調波成分（基本周波数の整数倍にあたる周波数のこと。）が大きく卓越する。

### 4) 羽根車の摩耗

河川ポンプ設備の実績では、回転周波数成分（ $n$ ）と羽根車の枚数（羽根数）の積（羽根数を $z$ として $z \cdot n$ 成分という。）が大きく現れる傾向がある（ただし、常用系プラントで多く用いられる渦巻ポンプでは、羽根車が正常な状態ほど当該周波数が大きくなるとされている。）。

## 3. データ解析及び診断結果と考察

次に、渦電流式変位計を用いて振動測定を実施した関東地方整備局管内の排水機場のうち、定期整備のため分解整備を行って整備前整備後に振動測定を実施しているA排水機場ポンプ設備の振動解析診断事例について紹介する。この施設の設備概要を表4に示す。また、図4に排水ポンプ設備の構造断面図、測定位置を示す。

表4 対象設備の概要

| 施設名   | 形式   | 吐出力<br>( $\text{m}^3/\text{s}^3$ ) | 口径<br>(mm) | 回転数<br>rpm<br>(Hz) | 羽根車の枚数 |
|-------|------|------------------------------------|------------|--------------------|--------|
| A排水機場 | 立軸斜流 | 10                                 | 2,000      | 164<br>(2.73)      | 5      |

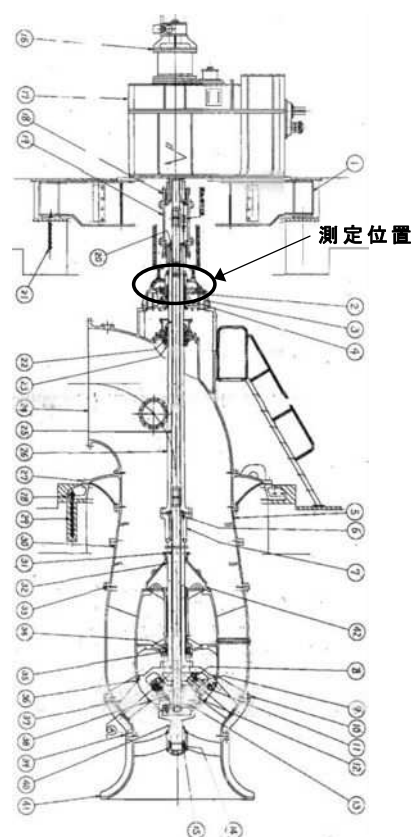


図4 A排水機場の排水ポンプ設備構造断面図

A排水機場は、標準的な規模と形式のポンプであり、同様のポンプ設備は多いことから、振動による状態監視技術の有効性確認等を行う上で適しているといえる。

このA排水機場で振動測定し得られたデータを解析した結果と、その結果を基に設備状態を診断した結果について解説する。比較するため、分解整備前に測定したデータと分解整備後に測定したデータについて検証を行った。

### ①整備前と整備後の解析結果

測定データを解析した結果として、整備前及び整備後の振動波形（時間領域波形）を図5、図6に、整備前及び整備後の周波数領域波形を図7、図8に示す。

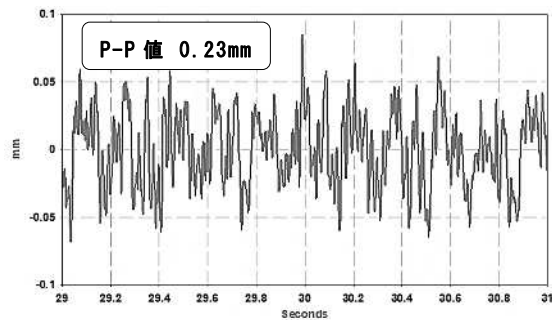


図5 振動波形（整備前）

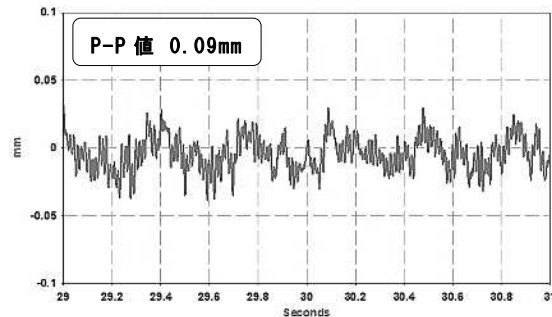


図6 振動波形（整備後）

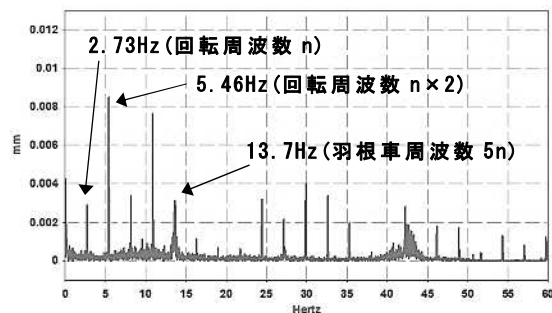


図7 周波数領域波形（整備前）

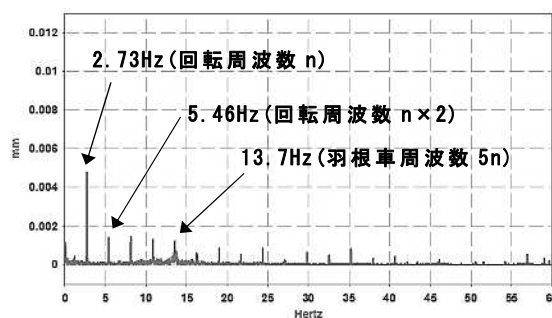


図8 周波数領域波形（整備後）

## ②整備前と整備後の診断結果と考察

この結果から、当該設備の状態を次のとおり推定した。

### 【整備前の傾向と診断結果】

整備前の傾向として、振動波形（時間領域波形）（図5）を見ると、P－P値（両振幅。Peak to Peakの略。）が、

主軸のアンバランス発生有無の目安としている0.2mmを若干超えており（0.23mm）、また周波数領域波形（図7）を見ると、回転周波数成分（ $n=2.73\text{Hz}$ ）の突出が見られることから、主軸周りに何らかのアンバランスが存在していると推定した。

次に、周波数領域波形（図7）を見ると、回転周波数の倍数成分のうち、2倍成分（ $2n=5.46\text{Hz}$ ）及び羽根車周波数成分（ $5n=13.7\text{Hz}$ ）の突出が見られることから、主軸のミスアライメント（主軸継ぎ手部における「芯ずれ」など）及び羽根車に何らかの異常があると推定した。

### 【整備後の傾向と診断結果】

整備後の傾向として、振動波形（時間領域波形）（図6）を見ると、P－P値が0.09mmとなっており、整備前より振幅が小さく、正弦波に近くなっている。しかし、周波数領域波形（図8）を見ると、回転周波数成分（ $n=2.73\text{Hz}$ ）の突出が依然見られ（整備前よりも若干増加している。）、まだ主軸のアンバランス傾向が見られた。この原因は不明であるが、P－P値が大きい（0.09mm）（図6）ので、異常な兆候は見られないと判断した。

この傾向については、今後も引き続き測定を実施し、注視していく。

次に、周波数領域波形（図8）を見ると、回転周波数の倍数成分のうち、2倍成分（ $2n=5.46\text{Hz}$ ）及び羽根車周波数成分（ $5n=13.7\text{Hz}$ ）の突出がほぼ無くなっている。よって、主軸のミスアライメント及び羽根車異常については異常な兆候は見られないと判断した。

### 【整備前診断結果と整備結果の照合】

分解整備を行った結果、羽根車ブレード及び軸キーに腐食が見られ、主軸のアンバランスも確認された。整備時に腐食の補修（軸キーは交換）とバランス修正を実施している。腐食状況を写真3、写真4に示す。



写真3 羽根車ブレードの腐食状況（先端）



写真4 羽根車ブレードの腐食状況（表面）

この整備結果は、整備前の診断と実際の不具合事象との因果関係があることを示している。

なお、これまでの斜流ポンプにおける診断事例では、羽根車の整備（腐食や欠損部の補修、バランス調整等）前後で測定値を比較すると、振動波形（時間領域波形）のP-P値は小さくなり、回転周波数の倍数成分（特に羽根車周波数成分）も低下するケースが多い。A排水機場もこの関係が見られ、羽根車の整備効果が確認された。

また、主軸のミスアライメントにつ

いては、分解整備を行った結果、ポンプ側主軸と減速機側主軸の継ぎ手部に、機能に影響が無い程度の若干の芯ずれ、面ぶれが確認された。整備時に修正を実施している。修正前後の芯ずれ、面ぶれの測定結果を表5に、測点を図9に示す。

表5 芯ずれ、面ぶれの測定結果  
(単位: 1/100mm)

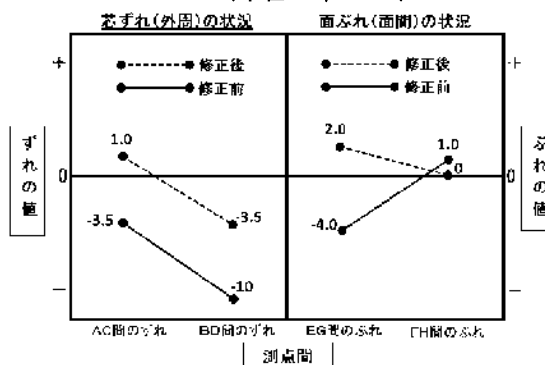


図9 芯ずれ（左図）・面ぶれ（右図）測点

整備前（修正前）の状態は芯ずれ、面ぶれのいずれの値も0点（芯ずれ、面ぶれが無い状態）から離れぎみで、ずれ及びぶれの傾向があることがわかる。（表5）。また、整備後（修正後）の状態はずれ及びぶれの値が0点に近づいており、整備効果が確認された（表5）。

なお、この整備結果も、整備前の診断と実際の不具合事象との因果関係があることを示している。

#### 4. 終わりに

上述のとおり、本稿で紹介した診断事例はあくまでも1例であり、関東地方整備局管内全ての河川ポンプ設備について、整備前の診断と分解整備の結果明確となる不具合事象との因果関係の検証結果を得ているわけではない。

その理由として、河川ポンプ設備は待機系設備であり、運転が低頻度で不具合が発生する頻度も低いこと、さらに予算上の制約もあり、設備の機能に大きな影響が見られない限り大規模な整備が実施されにくいことから、整備結果のデータを得にくいといった諸事情がある。

そのため、今後も継続して測定を実施し更に多くのデータを蓄積し検証を行うとともに、診断の精度も高めていく必要がある。

関東技術事務所では、渦電流式変位計を用いた診断方法は、河川ポンプ設備の合理的な維持管理に有効な手段であると考えている。今後も独立行政法人土木研究所及び管理事務所等関係各所の協力を得ながら取り組みを行っていく所存である。

#### 「参考文献」

(1) 国土交通省関東地方整備局関東技術事務所：ポンプ設備状態監視における渦電流式変位計の導入について

【関東技術事務所HP＞事務所の取り組み＞技術的な取り組み＞技術的な取組例＞調査・試験成果発表論文の紹介 平成26年度】

(2) 国土交通省関東地方整備局関東技術事務所：河川用ポンプ設備の渦電流式変位計による主軸振動解析（待機系設備への適用性）

【関東技術事務所HP＞事務所の取り組み＞技術的な取り組み＞技術的な取組例＞調査・試験成果発表論文の紹介 平成27年度】