

I-93 レーザー式変位計を利用した水圧鉄管の振動測定と対策工の検討

北海道電力株式会社 正員 小野寺 収
 北海道電力株式会社 遠藤 義彦
 室蘭工業大学 正員 岸 徳光

1. はじめに

水力発電所の水圧鉄管において、水車の回転数、水車ランナーの羽根枚数や吸出管内の水の旋回流などの原因で発生した水圧変動による振動数が、鉄管の低次固有振動数に近似する場合には、鉄管が共振状態となり顕著な振動が発生する。このような場合には、鉄管の疲労や応力腐食等の恐れがあるため、振動防止対策が必要となる。

水圧鉄管の維持管理のため適時実施する振動測定には、従来加速度計を用いているが、加速度計による測定では高周波成分が卓越するため、最も重要な低周波数領域の振動状態、振動モードを的確に把握することを困難にしている。一方、近年レーザーを構造物の変位測定に応用する技術が開発され、比較的振動数領域の高い構造物の振動測定も可能となっている。

本研究では、水圧鉄管の振動測定にレーザー式変位計を応用し、鉄管の卓越振動数と振動モードの特定を行い、前述の水圧変動との関係を明らかにするとともに、鉄管の振動防止対策に関する検討を行ったので報告する。

2. 振動測定の概要

2.1 水圧鉄管の概要

振動測定は、日常点検で振動が認められたA発電所（最大出力6,500KW）の水圧鉄管をモデルとして実施した。A発電所水圧鉄管の諸元は表-1に、また概要図は図-1に示すとおりである。機械式振動計を用いた簡易調査では、第2固定台から上流側において、最大片振幅約1mm、振動数約8Hzの振動が確認されている。

表-1 水圧鉄管の諸元

最大静水頭	72.894 m
最大水撃圧水頭	29.158 m
最大設計水頭	102.052 m
鉄管延長	198.281m × 1条
管内径	φ 2.30~1.50 m
管胴厚	9~14 mm
材質	SM41
最大使用水量	11.13 m³/S
製造年月	昭和31年10月

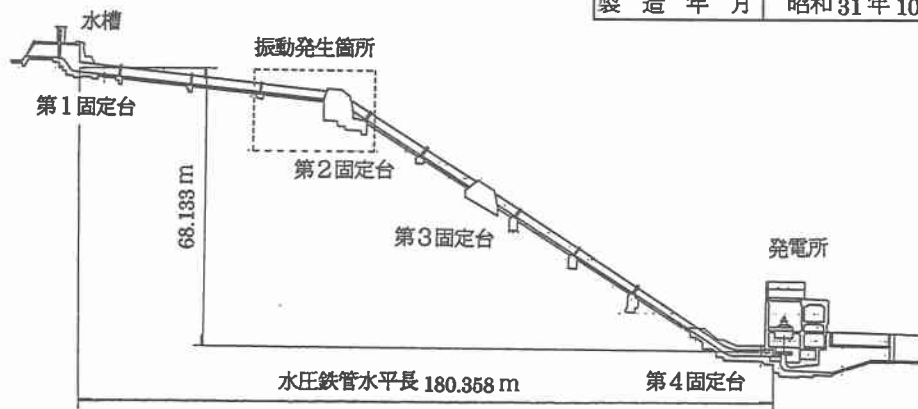


図-1 水圧鉄管概要図

Measurement of penstock vibration by using laser type displacement devices and a consideration on its vibration prevention

by Osamu ONODERA, Yoshihiko ENDO and Norimitsu KISHI

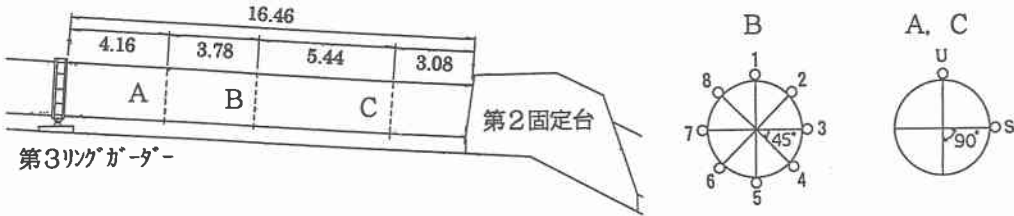
2. 2 測定方法

測定は、振動の発生区間である第3リングガード～第2固定台間（以下測定区間という）において測定断面を3断面設定し、レーザー式変位計を使用して静的測定と動的測定に分けて実施した。静的測定は、鉄管内空虚時と充水時にそれぞれ行い、充水荷重による変位を把握した。動的測定は、静的測定の充水状態の変位を初期値として、発電所運転時の半径方向振動変位を測定した。

レーザー式変位計の仕様は表－2に、また鉄管の測定位置は図－2に示すとおりである。レーザー式変位計は、測定区間の中央断面に8点、中央断面と各支持点との中間部2断面に各2点の計12点を設置した。

表－2 レーザー式変位計の仕様

測定基準距離	100mm
測定範囲	±40mm
光源	半導体レーザー（波長 780nm）
スポット径	1.0×2.0mm
分解能	40 μm
応答性	18Hz
使用周囲温度	0～+50℃
使用周囲湿度	35%～85%RH
センサー重量	約 165g



図－2 振動測定位置図

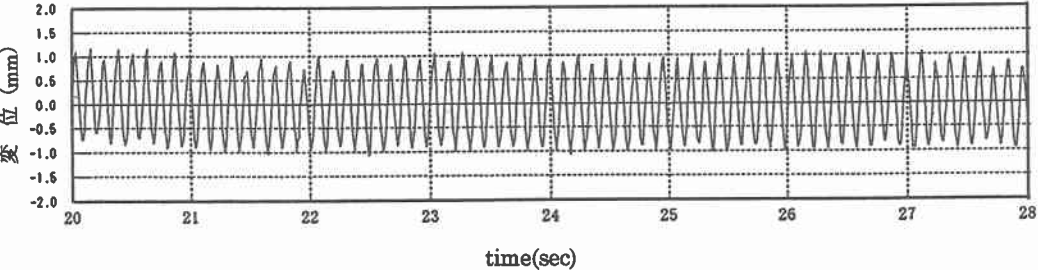
レーザー式変位計は、非接触型であるセンサー本体を鉄管の振動や風等の影響を受けない不動点に設置する必要があるため、風雨からの防護を目的とした足場をシートで覆った内側に、これと独立した足場を設けてセンサーを固定した。

動的測定の実施回数は、延べ13日間で計88回にわたり、1回あたりの測定時間を10分間としてタイマーによる自動計測を行った。

3. 測定結果

記録された全88回のデータから、最大変位を示したデータ時間帯を選別し、この時間帯における12点の測定データをA/D変換した。

12点中で最大の変位を記録した中央断面の天端における変位波形およびそのフーリエスペクトルを、それぞれ図－3、図－4に示す。図より、最大変位振幅は1.1mmを示し、卓越振動数が8.3Hz前後であることがわかる。



図－3 振動変位波形

また、この時の断面方向および管軸方向の振動モードは、それぞれ図-5、図-6のように示される。図より、断面方向については3次、管軸方向については1次のモードで振動していることがわかる。

測定された鉄管の卓越振動数が水車回転数500rpm=8.33Hzと一致することから、鉄管に励起されている振動は、水車の回転による水圧変動と鉄管の低次固有振動が共振に近い状態になったため発生したものと推察される。

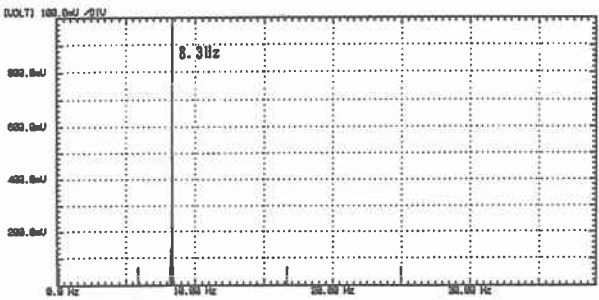


図-4 変位波形のフーリエ変換

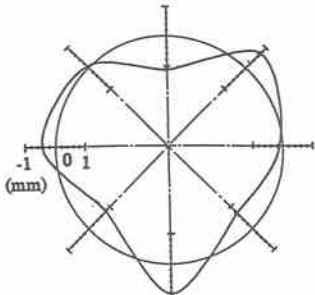


図-5 断面方向振動モード（A断面の変位）

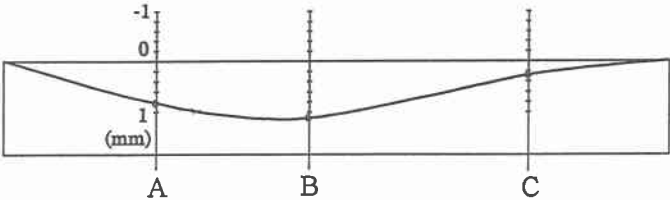


図-6 管軸方向振動モード（天端測点の変位）

一方、水圧鉄管の固有振動数算定式として知られる鬼頭の式は、次式のように示される。^{1) 2)}

$$f = \frac{1}{2\pi r_m} \left[\frac{Eg}{\rho_m} \cdot \frac{n^2}{1+n^2} \right]^{1/2} \cdot \left[1 + \frac{n^2}{1+n^2} \cdot \varepsilon \right]^{-1/2} \cdot \left[\frac{\alpha^4}{(n^2 + \alpha^2)^2} + \frac{t^2 (n^2 - 1)^2}{12 r_m^2 (1 - \nu^2)} + \frac{P r_m}{E t} (n^2 - 1) \right]^{1/2}$$

- ここに f : 水圧鉄管の固有振動数 (s^{-1})
- E : 鋼の弾性係数 ($2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$)
- ν : 鋼のポアソン比 (=0.3)
- ρ_m : 鋼の密度 ($7.85 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$)
- r_m : 板厚の中心までの半径 (cm)
- t : 板厚 (cm)
- g : 重力加速度 (=980cm/s²)

- P : 内圧 (kg/cm^2)
- ε : (水の密度/鋼の密度) $\cdot (r_m/t) / n$
- n : 円周方向振動モード次数
- k : 管軸方向振動モード次数
- α : $(2k+1) \pi r_m / 2L$ ~ 両端固定の場合
- L : 管の径間 (cm)

上式に測定区間の鉄管諸元 ($P=0.879 \text{ kg/cm}^2$, $r_m=115.45 \text{ cm}$, $t=0.9 \text{ cm}$, $L=1646 \text{ cm}$) を代入して測定区間の固有振動数の分布図を求めると、図-7のようになる。図より、測定結果得られた振動モード次数 ($n=3$, $k=1$) に対する固有振動数は、 $f=8.41 \text{ Hz}$ として得られる。

この値は、測定された鉄管の卓越振動数8.33Hzと類似なものであり、実測結果の妥当性は解析的にも説明されたものと考えられる。

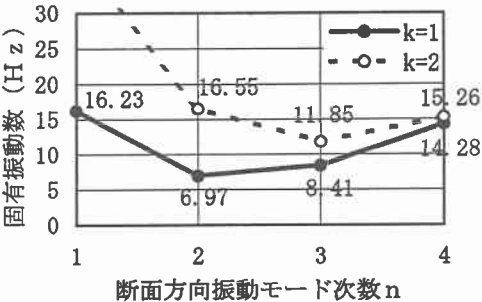


図-7 各振動モードに対する固有振動数

4. 対策工の検討

振動振幅を軽減する最も確実な方法は、振動の発生原因を除去することである。しかし本水圧鉄管の場合は、振動の発生が水車の回転に起因しており、発生原因の除去には水車の改造という大規模な対策を要することから、このような対策は困難である。そこで本研究では、鉄管の境界条件を変え、振動モードを変えることによって、鉄管の低次固有振動数を水車によって発生する振動数から遠ざけ、振動を軽減させる方法を検討することとした。

具体的方法としては、防振スティフナーを設置して断面方向振動を拘束し、管軸方向に節を形成させる方法と、測定区間の中間部に小支台を設置して振動の全体的な管軸方向の径間長を短かくする方法が考えられる。

防振スティフナー設置の場合は、スティフナー設置部を節として管軸方向振動モード次数 $k=2$ とすることで、前述の鬼頭の式により固有振動数の評価が可能である。一方、小支台設置の場合には、管軸方向の径間長を短かくすることができるものの、厳密には小支台により拘束されている部分以外（例えば天端など）の変形が可能であることより、鬼頭の式による固有振動数の評価は必ずしも適切ではないものと判断される。

以上より、スティフナー設置に関しては鬼頭の式を用い、小支台設置に関してはシェル要素を用いた3次元有限要素法（LS-DYNA3D）により、それぞれ効果を評価することとした。

4. 1 防振スティフナーの効果

鬼頭の式において、 $k=2$ として防振スティフナー設置後の固有振動数を計算すると、図-7に示したとおり $f=11.85\text{ Hz}$ が得られ、水車回転数 8.33 Hz に対し 1.42 倍となった。

よって防振スティフナー設置により、鉄管の振動は効果的に低減されるものと考えられる。

4. 2 小支台の効果

小支台設置による振動軽減に関する効果を検討するため、図-8に示す小支台を想定し、図-9に示すシェル要素解析モデルにより解析を行った。なお解析モデルは、構造物の対称性を考慮して半断面とした。解析ケースは、現状（小支台なし）および対策後（中間部に小支台を設置）の2ケースとし、それぞれのケースについて、自由振動状態における振動周波数と実測された断面方向振動モード次数 $n=3$ に対応する分布の振動荷重を載荷させた場合の振動応答を求め、比較することで、小支台設置の効果を把握した。

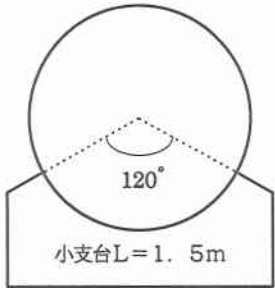


図-8 小支台の概要

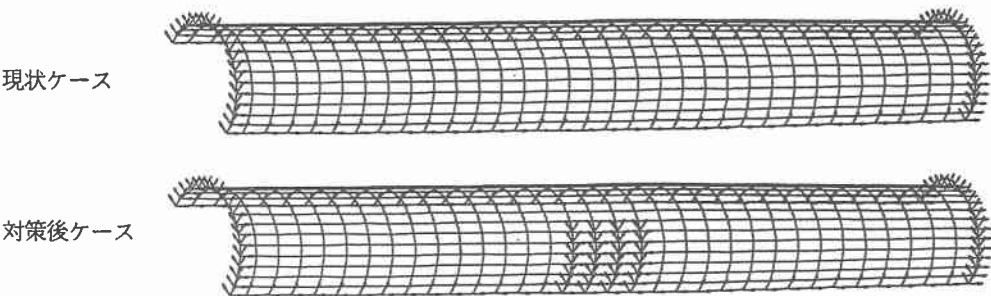


図-9 振動応答解析モデル

(1) 固有振動数

図-8に示した解析モデルに対し、 $n=3$ に対応する分布荷重を短時間（3ms）入力し、除荷後の自由振動状態における振動周波数をもって固有振動数とした。ただし鉄管内部の流体は静止流体と仮定し³⁾、その質量は現状ケースの固有振動数が測定値である 8.33 Hz と等しくなる質量（鉄管内空質量に対する仮想

質量割合)を求めて、鉄管に付加させた。

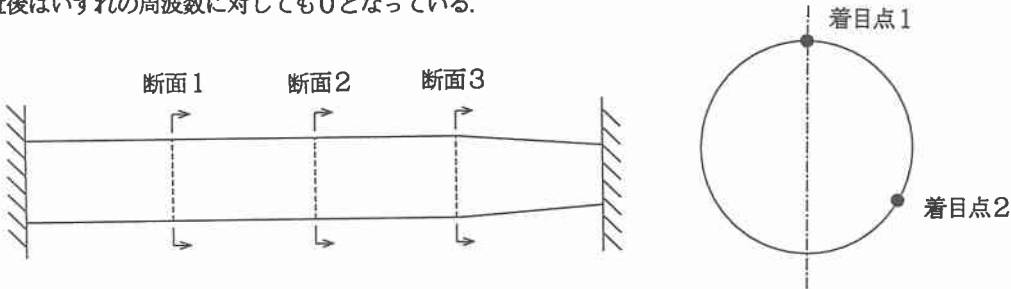
解析結果は、表－３に示すとおり、仮想質量付加割合は0.125。小支台設置後の固有振動数は11.3 Hzとなり、水車回転数8.33 Hzに対し1.36倍となった。

(2) 応答変位

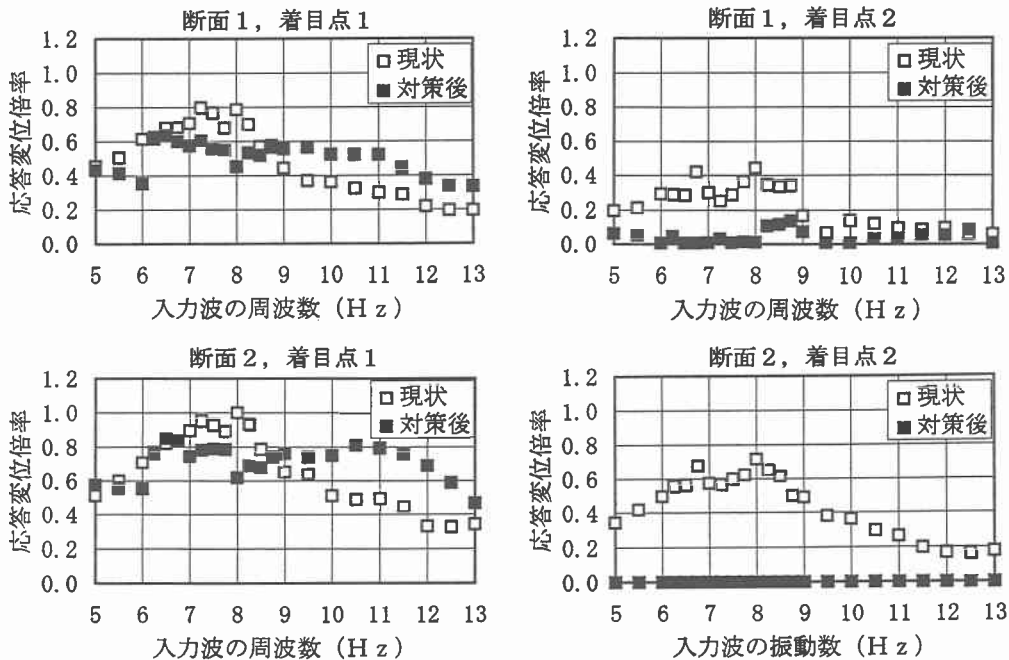
振動の低減効果を数値的に評価するために、作用分布荷重の周波数を5～13 Hzまで変化させて、図－10に示す3断面×2点の計6点の変位に関する周波数応答関数を求めた。解析の結果は、図－11に示すとおりである。現状ケースにおいて最大変位が得られたのは、振動荷重8 Hzを入力した時の断面2の天端であり、各図の応答変位は、この最大変位を1として無次元化した値(応答変位倍率)で表している。

図より、小支台設置前の応答値は、いずれの断面・着目点においても鉄管の固有振動数8.3 Hzに近い8 Hz近傍で大きくなる傾向を示している。小支台設置後における8 Hz近傍の応答値は、各断面とも着目点1(天端)で約40%減少し、また着目点2(天端から120°)では振動がほとんど解消される結果となっている。

なお、断面2の着目点2における応答変位は、対策工である小支台の肩部に位置しているため、小支台設置後はいずれの周波数に対しても0となっている。



図－10 解析の着目点



図－11 対策前後の応答変位の比較

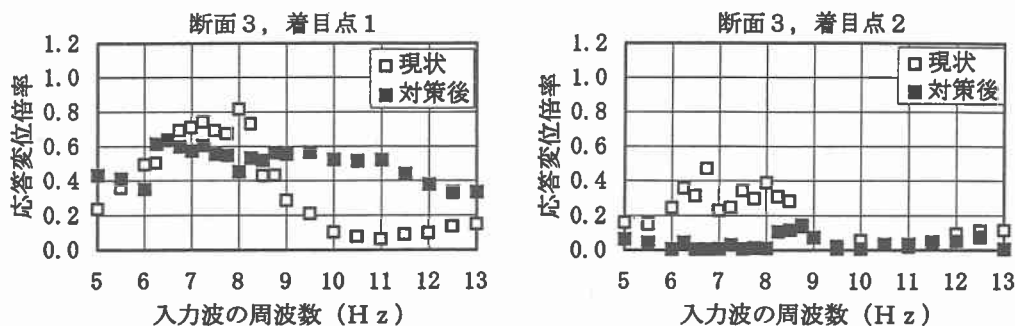


図-11 (つづき) 対策前後の応答変位の比較

5. まとめ

以上の結果を要約すると、以下のとおりである。

- ・市販のレーザー変位計を水圧鉄管の振動測定に適用した結果、振動変位、振動周波数および振動モードを的確に把握することができた。
- ・A発電所水圧鉄管の振動特性として、最大変位1.1mm、振動周波数8.3 Hz、円周方向振動モード次数 $n=3$ 、管軸方向振動モード次数 $k=1$ が得られた。
- ・測定された振動周波数は、固有振動数の計算値および水車の回転数と一致し、振動の原因は水車回転数との共振であることが明らかとなった。
- ・測定により得られた振動特性値を用いてFEM動的解析による対策工の検討を行った結果、小支台の設置により水圧鉄管の固有振動数が増加し、変位応答関数の算定により振動変位が低減することが確認できた。

6. あとがき

レーザー変位計は、従来の接触型の加速度計と異なりセンサー本体の振動特性を考慮する必要がなく、直接振動変位を測定できるなどの利点を有しており、水圧鉄管の振動測定には有効な手段であることが確認できた。

A発電所水圧鉄管は、今回の調査および解析の結果をもとに対策工を施工し、その効果を検証するための再調査を実施中である。結果については、別の機会に発表したい。

参考文献

- 1) 水門鉄管技術基準 水圧鉄管・鉄鋼構造物編, (社)水門鉄管協会, pp39-41, 1994
- 2) 発電用水力設備の技術基準と官庁手続き, (社)電力土木技術協会, pp242-244, 1990
- 3) 白木万博・本間敏秋, 高山弘美, 鬼頭史城: 水圧鉄管の振動特性, 水門鉄管, No.126, pp23, 1981