

水圧鉄管の振動防止に向けた検討と設計への反映

広島大学大学院 フェロー ○中村 秀治
電力中央研究所 正 山本 広祐

1. はじめに

水力発電所の水車や吸出管に水圧変動が発生し、その周波数が水圧鉄管の固有振動数に近くなると管胴部が共振して顕著な振動を生じることがある。近年、水車回転数は高まる傾向にあり、水圧鉄管は以前より軽量化しているため、水車回転数と水圧鉄管の一次固有振動数が接近し、周方向モード次数 $n = 2$ (図1) で振動する事例が幾つか観察されている。従来の水門鉄管技術基準¹⁾における振動防止規定が、必ずしも周方向モード次数 $n = 2$ に注目し重点的に対応していない現状に鑑み、(社)水門鉄管協会では「水圧鉄管の振動防止に関する研究委員会（平成12年6月～平成14年9月）」を設置して対策を検討したので、その成果の概要と、設計への反映に関する一試案について述べる。

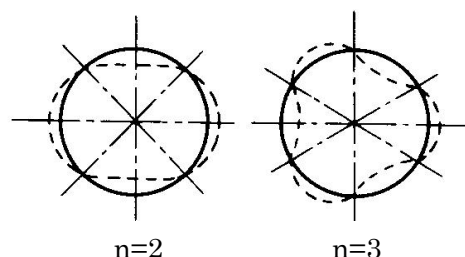


図1 周方向モード次数に対する断面変形

2. 水圧鉄管における振動発生の実態

最近30年間（1970年以降）に設置あるいは更新された鉄管の形状パラメータ、および振動の事例調査をアンケートにより行い、11電力会社および6公営電力の総計99発電所のデータを収集して分析することができた。その結果、振動発生件数は少ないが、発生した場合、 $n = 2$ のモードであり、形状パラメータが図2に示す領域に集中していること、および周方向スチフナーの効果は顕著でないことなどが明らかになった。

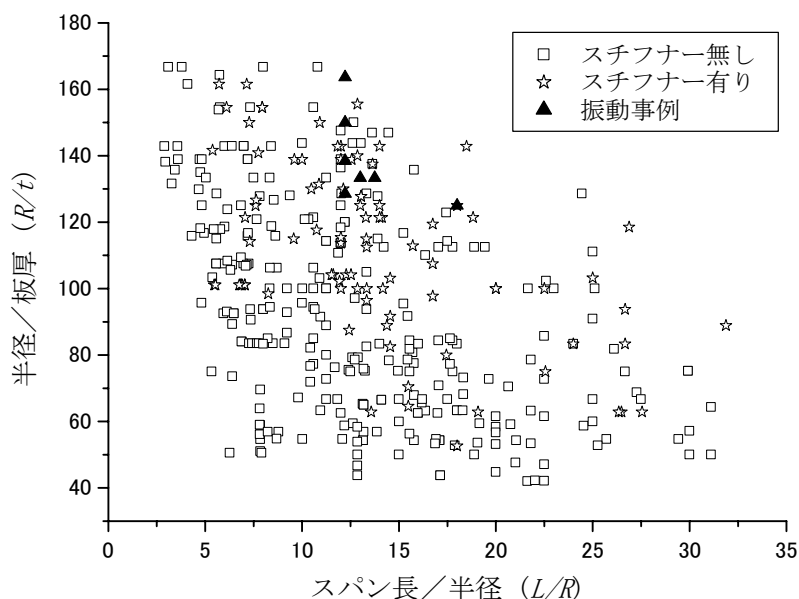


図2 実態調査した鉄管の形状パラメータ範囲

3. 振動数に関する解析的、実験的検討

実在する水圧鉄管の形状パラメータ範囲を特定した上で、軸対称要素を用い流体連成振動のパラメータ解析を行った(図3)。同時に、振動実験(図4)を行って $n = 2$, $n = 3$ の振動の発生と固有振動解析の精度を確認した。さらに $n = 2$ に対する周方向スチフナーの効果の程度を確認して固有振動数算定式を提案した。

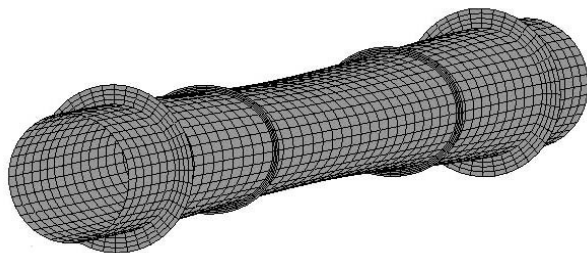


図3 数値解析モデルと $n = 2$ の振動モード

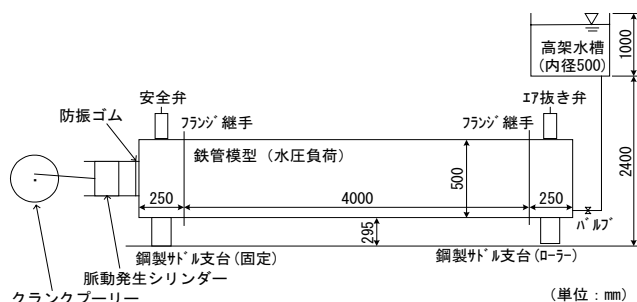


図4 模型実験概念図 (1/4 縮尺)

キーワード 水圧鉄管, 維持管理, 実態調査, 数値解析, 振動実験

連絡先 〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1, Phone & Fax. 0824-24-7531

4. 振動数算定法に関する検討結果の設計への反映

水門鉄管技術基準¹⁾（（社）水門鉄管協会発行）は、昭和 35 年の初版発行以来、昭和 43 年、48 年、56 年、平成 5 年の改訂を経て今日に至っている。国の定めた電気事業法の中で確認規定として位置づけられており、法令が性能規定化される中で、実務者および設計・製作者らの技術的拠り所として活用されてきている。

水圧鉄管の振動は、水車の特性や水路全体の状況等に大きく依存し、鉄管の形状のみに依存するわけではないため、設計段階でその発生を正確に予測することは難しい。このため、現行の水門鉄管技術基準の水圧鉄管・鉄鋼構造物編に「第 21 条 振動に対する考慮」および「第 98 条 振動の軽減」という関連条項が設けられ、前者が設計時の振動防止に対する配慮を、後者は振動が生じた場合の対策について規定している。

従って、本検討結果の設計への反映は第 21 条に対する見直しの形が一試案として考えられる。その要点は、過去の振動事例調査および実験的、解析的検討結果から、水圧鉄管に生じる共振現象で最も留意すべきは周方向モード次数 $n = 2$ 、軸方向モード次数 $k = 1$ であり、この振動に対する注意を喚起すること、適切な振動数算定式を提示し、周方向スチフナーの防振特性を示すことである。表 1 に周方向モード次数毎に分けて、固有振動数算定式と固定間隔の取り方について示す。

表 1 水圧鉄管の固有振動数算定式と固定間隔の取り方

モード次数 n : 周方向 k : 軸方向	固有振動数算定式	周方向スチフナーがある場合の 固定間隔の取り方
$n = 1$ $k = 1$	・リングガーダー間をスパン長とした単純梁としての振動数が、$n = 2$ の振動数よりも十分高ければ算定の必要はない。 ・算定する必要がある場合、水圧鉄管全体を連続梁として振動解析して、当該箇所の振動数を求める。	・周方向スチフナーは無視し、リングガーダー間を固定間隔とする。
$n = 2$ $k = 1$	(参考文献 2) に示した算定式) $f_2 = \sqrt{\frac{E}{\gamma}} \sqrt{3.77 \frac{tR}{L^4} + 0.142 \frac{t^3}{R^5} + 0.837 \frac{P}{ER^2}}$	・周方向スチフナーによる補剛効果を踏まえて、管胴部板厚を等価板厚に置き直した上で、リングガーダー間を固定間隔とする。
$n = 3$ $k = 1$	(参考文献 2) に示した算定式) $f_3 = \sqrt{\frac{E}{\gamma}} \sqrt{1.09 \frac{tR}{L^4} + 1.78 \frac{t^3}{R^5} + 3.82 \frac{P}{ER^2}}$	・通常、水圧鉄管に設置される程度の剛性を有する周方向スチフナーであれば、基本的に十分剛と見なし得る。したがって、リングガーダーと周方向スチフナー間、あるいは周方向スチフナー同士の間を固定間隔とする。
$n \geq 4$ $k = 1$	(現行の水門鉄管技術基準における振動数算定式) $f = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{E}{\gamma}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{n^2}{n^2 + 1} \varepsilon}} \sqrt{\frac{n^2}{n^2 + 1}}$ $\sqrt{\frac{\alpha^4}{(n^2 + \alpha^2)^2} + \beta \frac{(n^2 - 1)^2}{1 - \nu^2} + \frac{RP}{Et} (n^2 - 1)}$	

注 1) $k = 2$ の場合には固定間隔を 1/2 にとればよいが、實際上、振動数が上がるため計算する必要はない。
注 2) f_2, f_3 および f に関する記号については、以下の数値を用いる。
 E : 鋼の弾性係数 [$206\text{ kN/mm}^2 \rightarrow 2.06 \times 10^8 \text{ kg/mm} \cdot \text{sec}^2$], γ : 鋼の密度 [$7.85 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$], ν : 鋼のポアソン比,
 t : 鉄管板厚 [mm], L : 鉄管のスパン長 [mm], R : 板厚中心までの半径 [mm], P : 内圧 [MPa],

$\sqrt{\frac{E}{\gamma}}$: $= 0.512 \times 10^7$ [mm/sec], $\alpha = k\pi R/L$, $\beta = t^2/12R^2$, ε : (水の密度/鋼の密度) $\cdot \frac{R}{t} \cdot \frac{1}{n}$

参考文献 1)（社）水門鉄管協会：水門鉄管技術基準，初版(1960)，第 2 回改訂版(1973)，第 3 回改訂版(1981)，第 4 回改訂版(1993) 2) 中村秀治・山本広祐：既設水圧鉄管の振動事例と固有振動数算定式の提案，土木学会論文集，No. 710/I-60，2002. 7.