

水圧鉄管の模型振動実験に基づく振動特性評価

電力中央研究所 正会員 ○山本 広祐
広島大学工学部 F会員 中村 秀治

1. まえがき

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。そのため、設計段階において水車の回転数と水圧鉄管の一次固有振動数が近接しないよう留意する必要があるが、近年でも周方向モード次数2で振動する事例が観察されている。著者らは、現行の水門鉄管技術基準¹⁾における水圧鉄管の固有振動数算定式が、低次の断面振動モードに対して十分な精度の解を与えない現状に鑑み、有限要素解析に基づく数値解析的検討により新たな固有振動数算定式を提案した²⁾。今後、提案式の信頼性を高め、実務に直接活用できるようにするためには、先に行った数値解析的検討を実験的に検証する必要があると考え、水圧鉄管の模型振動実験を行った。本論では、模型振動実験結果と振動特性の評価ならびに有限要素解析結果との対比について概説する。

2. 模型振動実験の概要

製作した水圧鉄管模型（縮尺 1/4 程度）は実際の連続梁構造から 1 スパン分を取り出したもので、概要は図-1 に示す通りである。鉄管模型は炭素鋼製（JIS G3131 SPHC）の円筒構造で内径 0.5m、板厚 2.3mm、スパン長 4m（中間スチフナー無し）、両端にフランジが設けてあり、鋼製支台にボルトで接合される。支台の一端は反力床に剛に固定され、これに周期的な水圧変動（圧力脈動）を発生させる装置が連結してある。もう一方の支台は上下方向変位のみ拘束されており、ローラー支持を模擬しているが、この支台には一定内圧を負荷するための加圧ポンプが連結されている。鉄管模型の形状比を 1970 年以降に建設・更新された水圧鉄管約 100 地点ならびに過去に振動被害事例が確認された地点と比較すると図-2 の通りである。

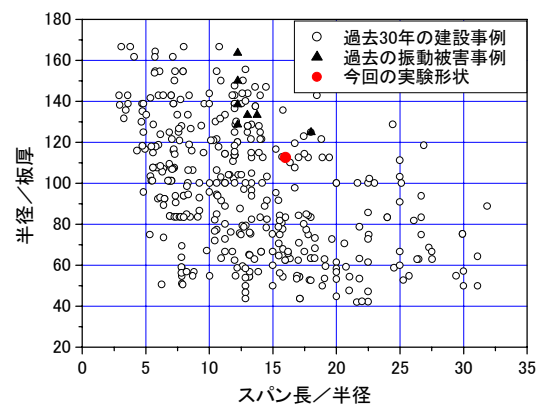
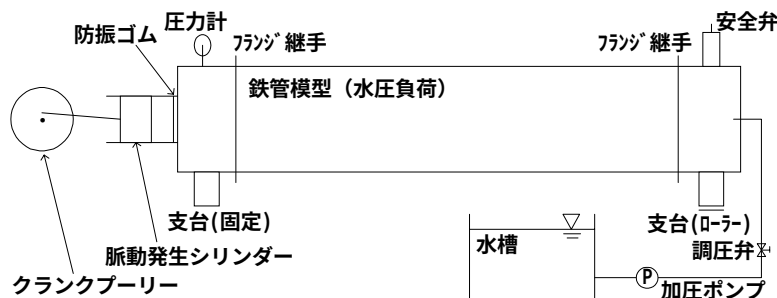


図-1 水圧鉄管模型（縮尺 1/4 程度）の概要

図-2 1970 年以降に建設された鉄管の形状比

一連の試験では、a)充水・加圧試験、b)打振試験：プラスチックハンマーでフランジを打振、c)スウィープ試験：0～45Hz の範囲で圧力脈動の振動数を増加、d)モード測定試験：応答が大きくなる振動数に固定して振動モードを測定、を実施した．試験時の計測項目は、水圧 2 箇所（各支台 1 箇所）、加速度 12 箇所、変位 5 箇所、ひずみ 8 箇所×2 成分であり、加速度・変位・ひずみについては 5 つの計測断面に配置した．

3. 模型振動実験結果および振動特性

図-3 に打振試験における応答加速度の周波数分析結果を示す。図-3 より、22Hz、26Hz、37Hz 付近に卓越振動数が見られ、最も応答が大きい 26Hz は体積変動を伴わない梁モードと推察された。図-4 にスイープ試験（内圧 $p=0.05\text{MPa}$ ）における応答ひずみの周波数分析結果を示す。図-4 より、23Hz、38Hz 付近に卓越

キーワード 水圧鉄管、圧力脈動、断面振動、固有振動数、共振

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 Tel (0471) 82-1181 Fax (0471) 82-5934

振動数が見られたため、これらの周波数帯について鉄管模型の管軸方向たわみおよび一断面における周方向ひずみの分布形状を調べた結果、23Hz は周方向モード次数 $n=2$ 、軸方向モード次数 $k=1$ の振動形状（図-5）、38Hz は $n=3$ 、 $k=1$ の振動形状（図-6）であった。ちなみにひずみ振幅の最大値（両振幅）は、各々 145μ （ 225° 位置）、 73μ （ 270° 位置）であった。26Hz 付近にある梁モードは断面変化を伴わないため応答ひずみとしては識別できないが、応答加速度・応答変位の周波数分析より判定が可能である。なお、実際の水圧鉄管は連続梁構造であることから、梁モードの振動数は大幅に高くなるはずであり、設計上留意すべき振動モードは $n=2$ 、 $k=1$ および $n=3$ 、 $k=1$ と考えて差し支えないものと判断された。

4. 有限要素解析結果との比較

鉄管模型のフランジ間を対象に薄肉軸対称シェル要素を用いた静的有限要素解析を行った。内部流体の影響を考慮した流体連成解析を行い、固有振動数を求めるものである。メッシュ分割は、予備検討の結果から半径方向 20 分割、長手方向 40 分割とした。境界条件、負荷した内圧については実験条件を想定した。なお、鉄管模型は密閉構造となっているため、解析モデルの両端に仮想的な剛蓋を設置した場合と何も置かない場合について検討した。

表-1 に実験結果と有限要素解析結果との比較を示すが、今回行った検討範囲内では両者がほぼ対応していた。

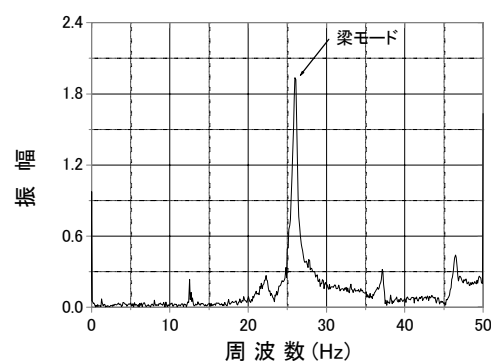


図-3 鉄管頂部応答加速度の周波数分析（打振試験の結果より）

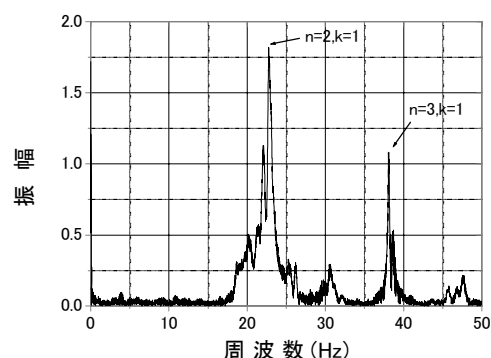


図-4 周方向ひずみの周波数分析（スウィープ試験の結果より）

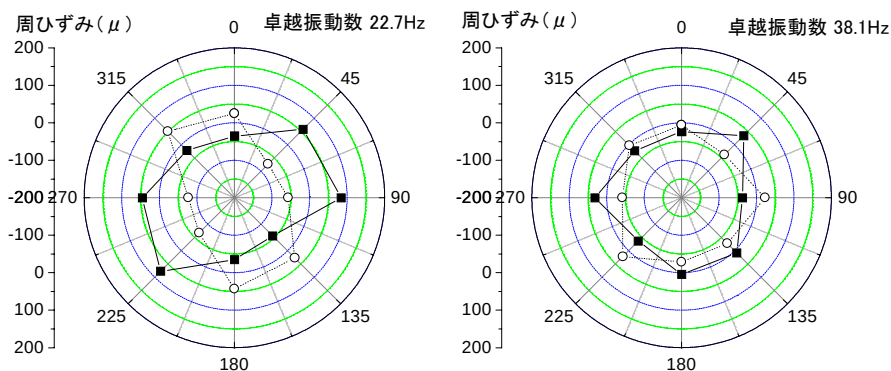


図-5 周方向ひずみの分布 ($n=2$)

図-6 周方向ひずみの分布 ($n=3$)

表-1 実験結果と解析結果の比較

n	k	端部蓋 (境界条件)	解析結果 (Hz)	実験結果 (Hz)
2	1	無し	20.8	22.7
		有り	26.5	
3	1	無し	35.6	38.1
		有り	36.8	

5. まとめ

縮尺 1/4 程度の水圧鉄管模型を製作し、これに周期的な水圧変動を加えて試験を行った結果、 $n=2$ 、 $k=1$ および $n=3$ 、 $k=1$ の振動モードが先行して発現することを確認した。その時の卓越振動数帯は、有限要素解析結果にほぼ整合していた。このことから、著者らが先に提案した数値解析の検討に基づく水圧鉄管の固有振動数算定式は妥当な解を与えるものと考えられる。今後、鉄管板厚が異なる試験ケースの実施を検討しており、提案式の有効性を十分検証した上で水門鉄管技術基準の見直しに反映する予定である。

謝 辞 本研究は（社）水門鉄管協会の「水圧鉄管の振動防止に関する研究委員会」（平成 12、13 年度）の一部として検討したものであり、ご協力を頂いた委員各位に謝意を表します。

参考文献 1) 水門鉄管協会：水門鉄管技術基準 水圧鉄管・鉄鋼構造物編（第 4 回改訂版），1993。

2) 中村・山本：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 I（掲載予定）