きわめてよく一致した。乱流では $\lambda=0.27 Re^{-0.25}$ の理論線よりも多少大きく、本実験に合う実験式を求めると、 $\lambda=0.26 Re^{-0.24}$ となる。

(2) ラビリンスパッキンでは流路の形を幾何学的に相似にすれば λ はレイノルズ数のみの関数となることを実験的に確かめた。

(3) すきまのみを変えた場合はこの実験の範囲では層流、乱流ともに すきま の大きいほど λ は増加している。

(4) すきまと みぞ幅 とピッチが一定の場合には層流では みぞ の深さは λ に影響しない。しかし乱流では みぞ があまり深い場合よりもむしろ みぞ幅 のほぼ 1/4 の比較的浅い深さにおいて λ は最大値を示す。この深さはレイノルズ数およびピッチと歯幅との割合 b/p にはほとんど無関係のようである。

(5) λ は層流においては みぞ のない方が みぞ のある場合よりも大きい。Schneckenberg は層流の

場合抵抗を生ずるのは すきま の部分のみであると言っているが、本実験によるとそれ ($\lambda=48/Re \cdot b/p$) よりも大きい値を示し、また $\lambda-Re$ 線の傾きは二重管の層流の場合よりもゆるくなる。次に乱流の場合は みぞ があると二重管の場合よりも λ の値は大きく、しかも みぞ と すきま の寸法割合を適当にするとその値を最大にすることが出来る。また遷移のレイノルズ数は二重管よりも みぞ のある場合がはるかに小さい。

文 献

- (1) R. Winkel, *Z. f. Angew. Math. u. Mech.*, Bd. 3, S. 251~257, (1923).
- (2) E. Schneckenberg, *Z. f. Angew. Math. u. Mech.*, Bd. 11, S. 27~40, (1931).
- (3) K. Trutnovsky, *Forshung*, Bd. 8, S. 131~143, (1937).
- (4) 小茂島, 機械学会論文集, 21 卷 108 号, 608~613 ページ (昭 30).

621.224-225.14:532.595

水車吸出し管の振動に関する研究 (第 3 報)*

村 上 光 清**

On Vibrations of the Draft Tube of Water Turbines (3rd Report)

by Mitsuakiyo MURAKAMI

A strong periodical vibration will be observed, when the tangential component of velocity of the water flowing through the draft tube of a water turbine increases to a certain limit.

It was ascertained by experiment that the frequencies and amplitudes of vibration changed under various conditions. The results may be summarized as follows:

- (1) The water tank, which is placed just below the discharge end of the draft tube, and the tube itself vibrate with the same frequencies but with a phase difference of π .
- (2) The frequencies decrease when the length of the tube is increased.
- (3) The frequencies depend chiefly on the dimension of the discharge end of the tube and decrease when the dimension is increased.
- (4) If the vertical tube is bent having a small curvature, at about the middle of the pipe, the frequencies of the vibration depend on the vertical part of the pipe.
- (5) A solid core placed concentrically inside the draft tube will prevent the vibration, if the diameter of the core is larger than the diameter of the vortex core of the water.

1. 序 言

水車吸出し管内を流れる水の旋回成分がある限度以上になると、管内の水に強い規則的な周期の振動が発生する⁽¹⁾。ここではこの振動の状態が管の形状、長さ、その他の条件でいかに変るかを調べ、あわせて振

動の防止方法も検討した。この振動では管と下部の水受け水そうとは完全に同じ振動数で、位相が 180° 違って振れていることが確かめられた。しかし管軸方向(垂直方向)の振動にはこのようなことがなく、明りょうな周期も認められなかった。

2. 実験装置とその方法

実験装置の詳細はすでに報告したが⁽²⁾概略を第 1 図

* 昭和 31 年 4 月 2 日 第 33 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 31 年 5 月 29 日。

** 正員、名古屋大学工学部。

に示す。Aは案内羽根、Bは吸出し管、Cは水受け水そうである。管および水そうの振動振幅はだいたい0.15 mm以下であるから光学的方法で拡大記録した。振動数の測定はオシロ装置によるとともに第1報で述べたフレーム型振動計⁽³⁾を用いた。

3. 実験結果と考察

(a) 管と水受け水そうの振動 一般に案内羽根から吸出し管へ流入する水は管軸に対称であれば、管を横に押すような力はほとんど作用しないはずである。しかし水の旋回成分を増すと、案内羽根からの水が吸出し管軸に対して少しでも非対称成分をもっていれば、この非対称性が增加する傾向にあり⁽⁴⁾、渦しんの偏心による旋回性振動が激しく起きると考えられる。垂直管で管長一定であれば、この振動は管出口の状態に大きく支配される。そこで第2図のような偏心

第2図

渦を考えると、渦しんに作用する力 X は管の単位長さについて、 x 方向に

$$X = \pi \rho \Gamma^2 \frac{2\varepsilon}{\sqrt{(R^2 + a^2 - \varepsilon^2)^2 - 4a^2 R^2}} \quad (1)$$

である⁽⁵⁾。ここで案内羽根出口半径を R_0 、その水の周速度を $V_{\theta 0}$ とすれば $\Gamma = V_{\theta 0} R_0$ である。また管に作用する力は $-x$ 方向に上の X と同じ大きさである。したがって管を振動させるに必要な運動量と同じ大きさで反対向き（振動の位相が 180° ずれている）の運動量が管から流出する水に与えられることになる。この二つの運動量を合成すると互にその作用が打ち消される。第3図(a)は案内羽根角 θ が 10° 、上端の直径が 104 mm、下端の直径が 240 mm、拡大角が約 8.5° 、長さが 1000 mm の垂直円すい管で流量が 15.7 l/s の場合の水平振動波形で、管と水そうの位相が 180° ずれているのが見られる。第3図(b)は上下振動の波形であるが第3図(a)のような現象もなく、規則的な振動もあまり見られない。管長を 1900 mm にして吸出し高さを増し、管の形状を円筒および

(a)

(b)

第3図

円すい形にしてもやはり規則的な上下振動は認められなかった。この場合円すい管では出口直径が 385 mm で振動数は円筒管の場合の約 $1/15$ に低下し振動強度も非常に弱くなるが、このような振動数変化や強度に関しては別に報告する。

(b) 垂直管の場合の振動の性質 吸出し管の形を変えると振動数が変化することは先の報告で少しふれた。ここではさらに詳しくこれについて調べた。

(i) 管の長さについて 直径が 104 mm の円筒管で羽根角 θ が 10° と 20° の場合、管長を 120 mm から 2300 mm まで変えて振動数変化を求めたものが第4図である。横軸は最短の管長 120 mm (l_0) に対する他の管長 (l) の比 λ および管長 l で、縦軸は管

第4図

長 120 mm のときの振動数 N_0 に対する他の管長のときの振動数 N の比 q_0 である。振動数は管が長くなると減少するがその割合は θ によって違っている。円すい管のときには管長とともに管端の直径が変化するので以上のような割合を正確に調べることはできない。内丸、鬼頭氏によれば⁽⁶⁾吸出し管の振動数 n は近似的に次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} n &= \omega [1 + 0.522 \mu a] \\ \text{または } n &= \omega p \quad p = 1 + 0.522 \mu a \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし $\mu = \pi/H$, $\omega =$ 渦しんの角速度,
 $a =$ 渦しんの半径, $H =$ 渦しんの長さである。この式によると水の粘性などに関係なく渦しんの長さ, すなわち管の長さが増すと n が減少する。いまその程度を調べて見る。第 4 図の場合には渦しんと管の半径比は計算⁽⁷⁾により $\theta = 10^\circ$ では 0.68, $\theta = 20^\circ$ では 0.54 になるから, 渦しんの半径 a はそれぞれ 35.4 mm および 28.2 mm である。実験に使用した管長に相当する H に対し (2) 式から p および n (流量 18 l/s のとき) を求めた結果を図の表に示してある。実測の q_0 に対応する計算値 q を図では点線で表わしてある。このように管長による振動数の変化の実測値は (2) 式で予想されるのとは相当違った傾向をもち, 水の粘性などによる他の影響が相当強いことが知られる。

(ii) 管の途中における断面変化について 第 5 図のように補助管を組み合わせて管の途中断面に変化を与え, 出口の直径を再び入口直径に等しくして振動数変化を測定した結果の一例は第 6 図である。図のように振動数は管の途中断面の変化にはほとんど関係せず, 正しく流量に比例する。

(iii) 管末端の寸法について 振動数は一定管長

$D=104, D_1=188, D_2=59$
 $L=120, L_1=L_2=290, L_3=160, L_4=164,$
 $L_5=619, L_6=1680$

第 5 図

第 6 図

第 7 図

では出口の寸法に大きく関係する。その一例を第 7 図に示す。横軸は直径 $D_0=104$ mm に対する出口の直径 D の比, 縦軸は $D_0=104$ mm, $L=850$ mm の直管の振動数 n_0 に対する他の D の振動数 n の比である。振動数は管長にも関係するからできるだけその長さを一定にして管端の直径の寸法だけを変えるようにした。図で E は管長 $L=984$ mm の円すい管で $L=850$ mm とは相当違っているが参考のため示してある。図のように管端直径の大小に応じて振動数は減少, 増大する。B は C よりわずかに管長が長い振動数は少し高く振動状態も安定しているが, C は不安定である。比較的長い円筒管の末端に広がり角の大きい短い円すい管を取り付けると, これを付けない管と同じ振動数をもち振動状態が不安定になることがある。この場合円すい管内の流れは管壁で はく離を起している。以上の管端直径の変化による振動数の変化は計算から推定される⁽⁸⁾。

(c) 水平管の場合 垂直管を途中で水平に曲げると, その曲率半径や曲りの角度により振動状態が変化するのでそれについて調べた。

(i) 水平管部分の形状と長さについて 曲りの半径がある程度以下であれば振動数は水平部分の長さや形状には関係しない。一例として羽根角 $\theta=10^\circ$, 直径 $D=104$ mm の円筒管で曲率半径 $R=100$ mm のときの実験結果を第 8 図に示す。横軸は水平管長 l で縦軸は管長 175 mm の垂直管の振動数 n_0 に対する水平管の振動数 n の比である。エルボの先端に取り付ける水平管長を増しても振動数はほとんど変わらない。図で △印は水平管端に第 5 図の装置を用いてその直径を 188 mm に拡大したもの, □印は直径を 59 mm に減少したものでその寸法は振動数にほとんど無関係である。水平管部分では水は著しく旋回成分を減じ管

第 8 図

軸方向の速度は全断面にわたってほぼ一定である(第10図)。管をL型に曲げると垂直管の場合より振動の強さは弱くなる。

(ii) 垂直管を水平方向に曲げるときの角度について 管をL型に曲げる場合、振動状態はその曲り角にも関係する。そこで曲率半径 100 mm のエルボを用いて垂直管を 0° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90° に曲げて振動数変化を調べたのが第9図である。横軸は曲り角の、縦軸は管長 550 mm の垂直管の振動数 n_0 に対する各 α のときの振動数 n の比である。管長の

第 9 図

差による振動数変化をなくするため管の全長をできるだけ一定にしてある。曲り角 α を 0 から 60 に増すと振動数は減少し、 $\alpha=60^\circ$ では管長 2300 mm の垂直管とほとんど同じ振動数を取る。この理由は曲りのため管出口の旋回速度が減ずるためと考えられる。 $\alpha=75^\circ$ では振動数は急に上昇して $\alpha=90^\circ$, すなわち正確なる水平管の場合と同じ値になり、振動数は垂直管の部分だけに関係し水平管部には無関係になる。このように α が 60° と 75° で振動状態が急変するがその限界の α は曲りの半径、管壁の精粗、羽根角などに関係すると考えられる。 α が 0° から 60° までは管端を水中に沈めないと管内に空気が吸い込まれて垂直管中心部に負圧ができないので振動も発生しない。 α を 75° 以上にすると管端を空中に出していても空気を吸わないから振動が起きる。 α が 60° , 75° , 90° の場合に対し、曲げられた後の水平部分(長さ 430 mm)の中央断面の速度分布を第10図に示す。図には比較のために管長 1000 mm の垂直管で、上端から 250 mm のところの速度分布を示してある。横軸は管半径 52 mm に対する測定点の半径距離の比、

第 10 図

縦軸は平均軸流速度 V_0 に対する測定点の軸流速度 V_z の比である。 α が 60° でも垂直管に比べて軸流速度は相当均一になっているが管中心近くで 0 に減ずるところがある。 $\alpha=75^\circ$ ではさらにこの速度が均一化され中心でも 0 にはならない。 $\alpha=90^\circ$ ではこの速度は旋回成分をもたない流れ状態と非常に近い分布を取り管軸で最大になっている。なお管の曲りによる偏流はこの場合それほど大きくなかった。

(iii) 管を水平に曲げる場合の曲率について 全長一定の管を曲げるとき、その曲率半径により振動数変る。第11図は曲率半径と振動数との関係である。横軸は曲率半径 R および管直径 D に対する R

第 11 図

を、縦軸は $R=\infty$ (垂直管) に対して各 R のときの振動数の比を取ってある。 R が 277 mm では $R=\infty$, すなわち垂直管のときとほとんど同じ振動数である。この場合には管を 90° 曲げても R が割合大きいので渦しんが管端まで存続し、管端を水中に沈めないと振動は起きない。 R が 100 mm では既述のように振動数は垂直管部分にのみ関係する。 R が 0 すなわち管が急激に曲げられる場合も R が 100 mm のときと全く同じ振動数を示す。この場合 R のある値で振動状態が急変すると考えられるが、その値は羽根角 θ その他の条件で異なる。

(d) 振動の防止について

(i) 固体の しん を設ける方法 振動は渦しんによって起されるから管軸と同心に渦しんよりも大き

な寸法の固体の しん を置けば振動が阻止される。管内に発生する渦しんの寸法は吸出し管に流入する流れの条件と管の直径とを知らば理論的に推定しうる。一例として第 2 報⁽⁹⁾で述べた羽根角 20° の案内羽根を直径 104 mm の吸出し管に用いると、計算から渦しんの直径は 56.4 mm (管径の 0.54 倍) になる。これよりも少し大きい直径 59.5 mm (1.06 倍) の固体の しん を第 12 図 A のように吸出し管と同心に置けば振動はほとんど生じない。しかし 56.4 mm よりも小さい直径 32 mm (0.57 倍) の固体の しん を置けば振動

第 12 図

は弱くはなるが起きる。その場合振動数は しん を設けないときよりも約 20% 減少するが、これは固体の しん による流体摩擦のためと考えられる。円すい管では渦しんの直径は管の拡大とともに増すがこの直径以上の固体の しん を置けば振動は止まる。したがって適当に設計されたムーディの拡散吸出し管などは振動防止上からも非常に有効であろう。垂直管では主として下端が振動の発生を支配するから、第 12 図 B のように渦しんより大きい直径の固体しんを管の下部に置けば振動は発生しない。吸出し管を L 型に曲げた場合、振動を防止するには、曲りの曲率半径が比較的大きければ管の末端に、曲率半径が比較的小さければ垂直管下部に、固体の しん を設けるとよい。

(ii) まわり止めを設ける方法 薄い鉄板を十字に 2 枚合わせた短いまわり止めを (i) の固体の しん と同じ位置に置けば振動は止まる。水の旋回運動を十分に止めうるものであれば、まわり止めは管端でなくても案内羽根出口の直下や垂直管の途中に置いても振動は止まる。この点は短い固体の しん とは違う。

(iii) 管端に当て板を設ける方法 管を L 型に曲げる場合曲りの曲率半径が割合小さいと、水平部分の端に (ii) のまわり止めなどを取り付けても振動は止まらない。この場合水平管内の水は垂直管内部の うず の旋回振動と同じ周期で偏心の うず に従って水平方向に振動しながら流れている。これはちょうどクラ

第 13 図

ンクとピストンの関係運動に似ている。管端に直径 315 mm の当て板を第 13 図 (a) のように取り付けたと水はこの板に沿って全周に一樣に流れ出る。したがって水平管内で水が軸方向に振動していても管が水から受ける振動的な反作用は相殺されて振れない。この場合でも管内の水の振動自体は止められたわけでないから、管内に振動があればそれは応じた内力が管に発生する。第 13 図 (b) のように垂直管端にこれを取り付けても管の振動が止まらないが上下方向の不規則な振れは非常に減ぜられる。しかしこの当て板 I, II の距離を 40 mm から 12 mm にまで近づけると管の上下動だけでなく水平振動もほとんどなくなる。垂直管下部に当て板とまわり止めを設けると管の動きは完全になくなる。

4. 結 論

偏心渦による旋回振動では吸出し管とその下に置かれた水そうとは同じ振動数で振れ、位相が 180° ずれている。垂直管長が増すとこの振動数は減ずるが、主としてこれは水の粘性によると考えられる。垂直管で管長が一定であれば、管の途中の断面の直径を変えても振動数はほとんど変らないが管端の直径の大きさにより変る。この直径の大、小に応じて振動数は減少、増大する。管を曲げて L 型管にすると、その曲率半径がある値より大きいと振動数は管の全体に関係するが、この半径がある値より小さいと垂直管の部分だけで定まり、水平管部分には関係しない。振動を防止するには渦しんの直径より大きい固体しんを管と同心に管の全長にわたって置くか、振動を支配する管の部分だけに置けばよい。またこの しん の代りにまわり止めを用いても同じである。

本研究に御指導を賜った生源寺先生、故下山先生に心からの謝意を表するとともに、古屋先生はじめ水力実験室の各位の有益なる御教示に感謝いたします。

文 献

- (1) (2) (3) 筆者，機械学会論文集，18 卷 73 号 (昭 27)，21 卷 101 号 (昭 30)。
- (4) (5) (8) (9) 筆者，機械学会論文集，21 卷 101 号 (昭 30)。
- (6) S. Uchimaru & S. Kitō, *Journal of the Faculty of Engineering, Tokyo Imperial University*, Vol. XVIII, No. 8, Feb. 1930.
- (7) K. Shōgenji & Y. Shimoyama, *Journal of Faculty of Engineering, Kyushū Imperial University*, Sept. 1933.