線分布(層流境界層)および $1/7$ 乗則(乱流境界層)を仮定し, 運動量方程式を用いて解を求めた。円筒壁を考えたことにより s/b の影響が加わり, β/ω は Re 数, s/b および a/b のかん数として求まり, 抵抗モーメント係数は β/ω , Re 数のかん数として求まった。結果は Zumbusch および木谷博士の実験とよく一致する。 s/b が変化すると β/ω は変化するが, 抵抗モーメントは余り変化しないことが注目される。

注:—

- (1) 昭和 25 年 4 月 8 日 第 27 期定時総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 27 年 4 月 12 日。
- (2) 正員, 東京大学生産技術研究所。
- (3) 正員, 横浜国立大学工学部。
- (4) Th. von Kármán, Z. A. M. M., Bd. 1, S. 233 (1921)。
- (5) F. Schultz-Grunow, Z. A. M. M., Bd. 15, Ht. 4, S. 191 (1935)。
- (6) 木谷, 火兵学会誌, 23 巻 2 号 (昭 4-7)。
- (7) 本圖は, 木谷, 機械学会誌, 43 巻 275 号, 53 ページ (昭 15-2) による。

532.595

振動弁による流体柱の励振 (第 2 報)⁽¹⁾

藤井 澄二⁽²⁾ 喜山 宜志明⁽³⁾

Excitation of Vibration of a Fluid Column by a Fluttering Valve (2nd Report)

by Sumiji FUJII and Gishiaki KIYAMA

In the first report one of the authors mentioned that a selfinduced vibration of a fluid column can be generated in a pipeline to the end of which a fluttering valve supported by a spring is installed, and that the period of the vibration can be either longer or shorter than the natural period of the pipe according to the characteristics of the system. In the present paper, vibrations based on the natural one of the water column are studied, and those vibrations can be step-wise waves having periods $T=2n/c$ ($n=2, 3, 4, \dots$), which show, as a special case, a rectangular wave having a period $T=4/c$ for $n=2$. For $n=2$ the maximum pressure is twice as high as the mean pressure, while for $n>3$ it increases with n . Further, step-wise waves can be generated even when the mean pressure is higher than the valve-closing pressure, if only the initial disturbance is sufficiently strong.

1. まえがき

前報において, 筆者の一人は, 管路に取り付けられ弾性的に支持された振動弁によつて, 管路内の流体柱に自励振動を発生せしめ得ること, この振動は弁その他の条件いかんにより, 管路の固有振動に近いものと弁の固有振動に近いものとを起し得ることを示した⁽¹⁾。この報告では, 主として管路の固有振動が問題となる場合について調べ, この場合でも発生する周期が $T=4/l/c$ で与えられる基本振動の長方形波の外, さらに周期の長い $T=2n/l/c$ ($n=2, 3, 4, \dots$) の階段波をも発生し得ること, この前者の場合には発生する最大水圧は平均水圧のほぼ 2 倍であるが, 後者の場合には段数に従つてかなり大きくなり得ること, および後者の場合においては平均圧力が弁全閉圧力よりも高い場合も初期かく乱のいかんにより持続振動を発生し得ることなどを示した。

2. 弁の特性

第 1 図

第 1 図のように, 上流に向つて開きかつ弾性的に支持された弁を考える。管内弁端の静水頭を h [m], 弁の受圧面積を f [m²], 弁をささえるばねの剛性を k [kg/m], $h=0$ に対する弁と弁座とのすきま (初期すきま) を δ_m [m], h に対するすきまを δ [m], 液の比重量を γ [kg/m³] とすれば

$$\delta = \delta_m - \frac{\gamma f}{k} h \quad \dots\dots\dots (1)$$

となる。弁が全閉すなわち $\delta=0$ となる水頭を h_c とすれば

$$h_c = \frac{k \delta_m}{\gamma f} \quad \dots\dots\dots (2)$$

弁座の周の長さを S [m] とすれば, 弁の開口面積 a [m²] は

$$a = S \delta \quad \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。したがつて流量係数を C_v とすれば流出量 Q [m³/s] は

$$Q = C_v \cdot a \sqrt{2gh} = C_v \cdot S \cdot \delta_m (1 - h/h_c) \sqrt{2gh} \quad \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。これに対応する管内の弁端の流速 v は管の断面積を $F[m^2]$ として

$$v = Q/F = C_v \cdot S \cdot \delta_m (1 - h/h_c) \sqrt{2gh}/F \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。ここで圧力 $h=0$ のときの弁開度のまま、水圧のみ h_c まで上げたときの流速を v_{cm} とすれば

$$v_{cm} = C_v \cdot S \cdot \delta_m \sqrt{2gh_c}/F \quad \dots\dots\dots (6)$$

これより $h/h_c = p$ において

$$v = v_{cm}(1-p)p^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

を得る。さらに $c[m/s]$ を圧力波の伝達速度として $u = cv/(gh_c)$ なる無次元量で v をおきかえれば

$$u = u_{cm}(1-p)p^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

管路に起る長い波長の振動に対しては、この u_{cm} で弁の性質の相似関係が与えられる。ここに

$$\begin{aligned} u_{cm} &= \frac{cv_{cm}}{gh_c} = \frac{c \cdot C_v \cdot S \cdot \delta_m \cdot \sqrt{2gh_c}}{g \cdot h_c \cdot F} \\ &= \frac{\sqrt{2} \cdot c \cdot C_v \cdot S \cdot \delta_m}{F \cdot \sqrt{g \cdot k \delta_m}} = \frac{c \cdot C_v \cdot S}{F} \sqrt{\frac{2\gamma f \delta_m}{kg}} \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

で与えられる量である。

ただし(8)では $p > 1$ に対しては $u=0$ とする。

(8)で与えられる p と u との関係は第2図に示すように $p=1/3$ で u が極

大値 $u_{max} = \frac{2}{3\sqrt{3}} u_{cm} \approx 0.385 u_{cm}$ を示すような曲線となる。

第2図

3. 波動の計算

管内の波動方程式の一般解は、上述の圧力を代表する無次元量 p および速度を代表する無次元量 u を利用して

$$p = \psi_1(t-x/c) + \psi_2(t+x/c) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$u = \psi_1(t-x/c) - \psi_2(t+x/c) \quad \dots\dots\dots (11)$$

で与えられる。

いま第3図に示すような管路を考え、水槽端を $x=-l$ 、弁端を $x=0$ とすれば、上式の ψ_1 は管路を右に進む波、 ψ_2 は左に進む波を示す。

第3図

さらに第4図のごとく互に直交する p 軸、 u 軸を有する平面を考えると、これら2軸に45°で交る互に直交する2軸は $\sqrt{2}\psi_1$ 軸および $\sqrt{2}\psi_2$ 軸に対応する。したがってこの上にさきに得た弁端の pu 曲線お

第4図

図中の番号順に ψ および p, u の変化を追跡することができる。この間時間は波が管路を通過する時間が単位となつているから、容易に知ることができる。

4. 計算の結果の説明

筆者の一人が別の報告で示したように⁽³⁾、この種の振動は管路の抵抗が小さい場合 $1/3 < p < 1$ (ここに $p_0 = h_0/h_c$, h_0 は管内の平均水頭) すなわち $\frac{1}{3}h_c < h_0 < h_c$ の範囲で起り、平均水圧 h_0 がそれよりも高ければ弁は座に密着してかく乱が小さければ全然発生せず、 h_0 が $\frac{1}{3}h_c$ よりも低ければ弁および管路の減衰の度合に従いある圧力範囲で高い振動数の振動を発生し得るものである。しかしこの報告においては、弁の慣性を無視し、一応 $\frac{1}{3}h_c$ 以下で起る高い振動数の振動については考えないこととする。

さて弁端における平均水圧が $\frac{1}{3}h_c$ より大きい範囲にあるときには、平均水圧、管路の抵抗および u_{cm} の値に応じて、種々の型の振動が発生し得る。

まず $\frac{1}{2} < p_0 < 1$, $u_{max} < 0.5 \sim 1$ の u_{max} が比較的小さい範囲(弁としては比較的剛なばねでさえ初期の弁開度の小さい場合に相当する)では振動は振幅の小さい間はほぼ指数かん数的に成長し、振幅が大きくなると次第に成長の度合を減じ、減衰作用がなければついに振幅 p_0 (最高圧力 $2p_0$) なる長方形波となつて定常振動を続ける。この場合の基本周期は波動が管路を2往復する時間に等しい。

第5図

($T=4l/c$) すなわち一方閉管の固有振動周期に一致する。管路の抵抗を無視した場合のこれに対応する作図例を第5図に示す。

p_0 が $1/3$ に近い範囲では、まさに $u_{\max}$ が小さい場合には、上述の場合よりもやや振幅の小さい持続振動を生ずる。

$u_{\max} > 0.5 \sim 1.0$ の $u_{\max}$ の大きい範囲では（弁としては比較的やわらかいばねで開度の大きいことを意味する）周期が $2nl/c$ ($n=3, 4, 5, \dots$) の階段波がつくられる。この n は $u_{\max}$ の大きいほど、また p_0 の小さいほど ($1/3$ に近いほど) 大きくなる。したがって p_0 を一定に保つて $u_{\max}$ を大きくしてゆくと次第に階段の数を増して周期が伸び、また $u_{\max}$ を一定にして（すなわち管路および弁の状態を一定にして） p_0 を 1 から $1/3$ まで下げて行くと周期は階段的に長くなる。またひとつの波では階段の始めの方はその圧力の差が小さいが、終りに近づくに従って段の差が大きくなる。波の最高圧の部分には段数が多くなるほど高くなり $2p_0$ を越えてはるかに高いものとなり得る。

第 6 図

階段波の場合の作図例を第 6 図に示す。これらの階段波の示す振動は、いわゆる流体柱の高次の固有振動、

すなわち周期の短いものではなく、周期の長いものであることは注意を要する。

第 7 図

階段波の場合においては $h_0 > h_c$ であつても、 $u_{\max}$ が相当大きければ、初期かく乱の大きい場合には安定な階段波の持続振動を発生し得る。この一例を第 7 図に示す。この場合には平衡状態は微少かく乱に対し

第 8 図

ては安定である。

5. 実験

実験は第 8 図のような装置で行つた。圧力水槽に給水弁を通じて十分給水した後、給水弁を閉じて給気弁を開き、圧力水槽内の圧力を必要なだけ高め、その後放気弁を適当な開度を開いて所要の圧力に保つた。振動管路は $1/2''$ ガス管の長さ 44.12 m のものを用い、末端に圧力計光学的指圧計および振動弁を取付けた。弁端圧力計にはゲージロックを入れ、実験の時にはこれを閉じて弁端容量の影響を避けるようにした。振動弁はきのこ弁状のものを 2 枚の板ばねでささえ、その一方のばねの支点を移動させることによつて初期弁すきまを変え得るようにした。実験結果からすると $2l/c = 0.07\text{ s}$ である。

記録にあたつてはまずオシログラフ紙に大気圧線と水槽圧力線とを入れ、これによつて圧力の読取りができるようにした。第 9 図において、各図の下側の線は大気圧を、中央の線は水槽圧力を示している。それから弁を所要の開度を開いて発振を起させた。

第 9 図 a は $T=4l/c$ の基準波の発振過程を、b はその定常状態の波形を示す。これらの図によつて、まず振幅が指数関数的に成長し始め、次第に飽和して、ついには長方形波に近い波形となること、定常波の最高圧力は管路の抵抗のためやや下つてはいるが、ほぼ平均圧力の 2 倍に等しいことなどがわかる。

第 9 図 c はほぼ弁の固有振動に相当する。管路の固

第 9 図

有振動数よりはるかに高い振動の発生している状態を示す。

第 9 図 d は階段波の発生過程を示す。作図でもわかるように、階段波が発生するときには a のような緩徐な成長過程はなく、すぐに階段波に移行する。

第 9 図 e, f, g はそれぞれ 3, 4, 5 段の階段波を示す。いずれもはじめの方の段はゆるやかで次第に段の差を増し、かつ最高圧力および周期は段数の増加と共に増加することがわかる。

第9図は弁振させておいてゲージ、コックを開いた場合を示す。この場合は圧力計によつて管端に容量が与えられるために、周期が延びると共に波形が非常にまるまつたものになっている。

6. む す び

以上によつて、弁前後の圧力差が増すと共に弁を通過する流量が減少するように弾性支持された弁を抵抗の少ない管路に取り付け流体を流してやると、その管路に成長的あるいは持続的水槌を生じ、弁端平均圧力が弁が全閉になる圧力の1/3より高く、かつ弁の運動が水圧の変化に遅れなく従うと考えられる程度であれば、発生する振動は長方形波あるいは階段波に近いものであり、その最高圧力および周期は長方形波ではそれぞれ平均圧力および波が管路を1往復するに要する時間のほぼ2倍、階段波では両者とも段数に従つて増えることがわかつた。

なおこれらの振動は、初期すきまがきわめて小さくかつ支持が弾性的にかなり剛であつても、管路の抵抗も同様に小さい場合にはひとりでも成長し得るものであることは注意しなければならない。逆に初期開度のあまり大きい場合、あるいは側路から相当の漏水がある場合などにはきわめて発生しにくいことは、理論的にも実験的にも認めらる。

以上のことから、仕切弁がその弁座との間にすきまを生じた場合、ばねで良く水圧とつり合わされたニードル弁の小開度の場合などにおいては、このような危険な振動を起す可能性が明らかに存在するが、そのほか水圧等でつり合わされた場合においても、同様の

い危険が存在することを指摘しておかねばならない。これらの弁においては、水圧の過度のつり合わせおよびリンク系統のガタはできるだけさけるべきものと考えられる。

なお弁の運動に対してはかなり大きいクーロン摩擦が働いているときには、振動はある程度の大きいかく乱が与えられてはじめて発生しはじめる。したがつて同じ条件の下にあつても、初期かく乱のいかんによつて発振しないことがある。

前に述べたように、この型の振動を静めるには、仕切弁では側弁の開放、ペルトン水車のニードル弁に対しては水圧調節器の開放はその開度がわりあい小さくてもきわめて有効で、事故が発生した場合に手動でそれらの操作をしてやることできれば振動は止められ得る。

終りにこれらの研究に対して助言を与えられた Prof. J. P. Den Hartog, 機械学会水車研究部会の諸氏, 日発水車研究会の諸氏, 振動弁の設計および製作を担当された宮坂三吉氏, 戸瀧滋氏, 唐見敏則氏および実験を援助された明石透氏の各位に対して深く感謝する次第である。

なおこの研究は一部文部省科学研究費によつて行われたものである。

注:—

- (1) 昭和26年11月19日 長崎大牟田地方臨時大会講演會において講演, 原稿受付 昭和27年1月31日。
- (2) 正員, 東京大学工学部。
- (3) 東京大学工学部。
- (4) 藤井, 機械学会論文集, 18巻66号。
- (5) 藤井, 機械の研究, 1巻11号(1949)。

532.542

ある種の管路網内の逆流について⁽¹⁾

沖 巖⁽²⁾ 川口 毅⁽³⁾ 水口 保⁽⁴⁾

On the Contra-flow Occurring in Some Types of Pipe Nets

by Iwao OKI, Takeshi KAWAGUCHI and Tamotsu MIZUGUCHI

Among the six types of simple pipe nets which we have previously treated, Type A₃ (Fig. 1) has a peculiar characteristics; the flow in pipe line II may take a normal or reverse direction, according to the value of Reynolds number in the inflow pipe line and the length ratio l_1/d of pipe line I. We discovered these phenomena at first by experiments on a pipe net made of 10 mm glass tube (Fig. 6).

Then we carried out another series of experiments on a wooden air-duct with a cross section of 8 cm square (Fig. 8), and could thereby determine the velocities of contra-flow in pipe line II. These have been compared with the results obtained by computations using the equations established by ourselves.

1. 緒 論

既述論文⁽⁵⁾に記載した一様な内径の管路からなる簡

単な管路網の内て殊に逆流現象の著しい A₃ 型管路網について詳しく述べる。

A₃ 型管路網(第1図)では管路 I の長さ l_1 と内径 d