

II-207

鉛直落下水膜の振動特性

三菱重工業（株）横浜研究所 正員 大久保 精二
建設省 土木研究所 正員 角 哲也

1.はじめに 越流型ゲートや砂防ダム等において、越流水膜の振動現象が生じることがある。これに伴いゲート振動が発生したり、低周波騒音問題が起り、しばしば問題となっている。従来より、この水膜振動現象の解明を試みた研究がなされて来たが、振動機構が水膜、水膜の背後空洞、ゲート形状等の水膜放出部特性などが複雑に絡み合ったものとなっているために、実機で発生する現象のすべてを十分に説明するものにはなっていない。そこで本報文では、振動の発生源と増幅機構について、関与するパラメータを独立して取り扱えるように鉛直落下型の水膜モデルを用い、水膜厚、落下速度、空洞容積、落下高等の条件に対して発生する水膜振動の周波数およびそのレベルの関係について考察を加えている。

2.水膜振動機構

振動機構の発生源として次の可能性が存在する。

(1)放出部の乱れ 放出部に流速に応じたエッジと水流のせん断渦、あるいは放出部自体の振動が水膜全体に伝播している。

(2)落下音圧(衝撃) 落下音圧により水膜が直接加振されるものであるが、落下音の周波数成分はランダム

であり、後述の水膜又は空洞の固有値による選択共振

がないと周期的な加振力には成り得ない。一方、落下衝撃が放出部自体の振動を引き起こす場合がある。

次に、振動の増幅機構として次の事項が考えられる。

(A)水膜の固有値 水膜に固有値(固有振動数)があり、上記の発生源の周波数と一致した場合、水膜の振動はその振幅を増大する。その他の周波数の場合は減衰の方が強く振動として継続しない。ただし水膜が固有値で振れようとする力は弱く、放出部自体(ゲート等)の振動の起振力が大きければその周波数成分が卓越する。

(B)空洞の固有値 水膜と背後の壁面で構成される空洞は次のような固有値(固有振動数)を有する。

①気柱振動—空洞内に生ずる定在波の固有振動数

②空洞振動—水膜のマスと空気のパネ効果で決定される固有振動数

これらの増幅機構は、発生源の周波数と必ずしも一致しなくても、ランダムなノイズの中から選択共振して自動的に水膜振動へ返って行くと考えられる。以上の振動機構をブロック図にしたものが図-1である。

(C)水膜の不安定性 これは増幅機構と言うより、水膜振動の発生限界を導くもので、密度差を持つ二層流体が相対速度を持って接する場合の境界面の不安定性が水膜振動になると考えるもので、W.Hagertyが扱った例がある。これは、(1)、(2)の発生源が存在したとしても、水膜振動に発展するかどうかを分けるもので、表面張力や水膜と空気との相対速度により決定される。

3.鉛直落下水膜の振動実験 実験には、図-2に示す模型を使用し、実験条件は次の各ケースとした。

(1)水膜厚(スリット幅); 5、10、15、20、40mm (2)落下高; 500~1500mm (2)水膜背後空洞容積; 0.12~0.96m³、給気 (4)落下初速; 2~4m/s (5)入口形状; 3形状(エッジと上流側にガイド取り付けしたもの)

計測は、微差圧計により空洞内の圧力変動、超音波距離センサにより水膜振動、また低周波レベル計により水膜下流約1.0mの位置の音圧レベルをそれぞれ測定し、周波数分析器により卓越周波数とレベルを求めた。またストロボスコープにより水膜振動波形を停止させて、その同期周波数も参考資料としている。

4.鉛直落下水膜の振動特性 図-3に落下高さによる空洞圧力変動の周波数特性を示す。図中の実線は、Schwartzの $K+1/4$ 則(落下高の間に $K+1/4$ 波長存在する、 K は整数)を、また破線は次式で計算される水膜と空洞のマス・パネ系の固有振動数を示している。

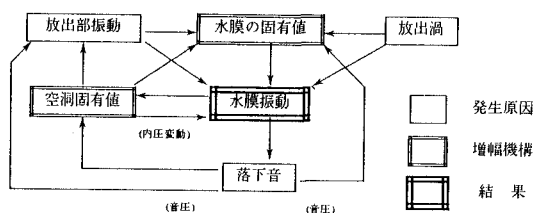


図-1 水膜振動機構 ブロック図

$$f = C / (2\pi) \sqrt{(\rho_a S_w) / (V \rho_w h)}$$

(1)

ここに、 C ；空気中の音速、 ρ_a ；空気密度、 ρ_w ；水の密度、 V ；空洞の容積、 S_w ；水膜の面積、 h ；水膜の厚さ

丸印の大きさはレベルを示しているが、多くのピークが発生しており、これは落下面を水面にしたため、床板で落下高を調節すればモードは限定される。卓越周波数は落下高に依存せずにはば一定値であり、Schwartz則よりも空洞固有値の傾向に対応している。ただし模型背面を開放して完全に給気すると $K=6$ 前後のSchwartz則に従うことが確認された。

図-4は水膜厚を変化させた場合の落下高、周波数特性を示している。空洞固有値との傾向は一致しているものの、周波数そのものは $d=10\text{mm}$ を除いて値が異なっており、この範囲では空洞固有値による振動とは考えられない。

また、図-5は落下高を変えないで背後空洞の容積を変化させたもので、ある程度空洞が大きくなると周波数は一定値となり空洞を給気した場合と大差なくなってくる。空洞固有値とのずれはこの場合も明らかであり、水膜と空洞のマス・バネ系の振動とは別の現象と考えられる。

次に、図-6に落下初速を変化させた場合の周波数変化を示すが、流速の増大に従って振動数は落下高内の波数を一定に保つように増加する。そしてある限界値に到達すると振動数は急に上昇するが、この限界値は流速小→大の過程と流速大→小の過程では若干異なっており、振動状態の履歴を持つようである。図中には、次式で示される水膜の不安定限界による限界振動数 f_c を合わせて示すが、水膜振動がSchwartz則を満たしながら f_c に沿うように生じていることは非常に興味深い。

$$f_c = \rho_a V_0 (V_0 - V')^2 / (2\pi T) \quad (2)$$

ここに、 ρ_a ；空気密度、 V_0 ；水膜の流速、 V' ；空気流速（風速 $=0$ ） T ；水の表面張力

一方、入口形状の影響については明確な差は認められず、放出部でのせん断渦が水膜振動を支配しているとは考えられない。

5.おわりに 水膜振動には、従来より薄膜の振動と

厚膜の振動が存在して、それぞれの支配パラメータが異なるのではないかとされているが、その意味では、今回の実験は薄膜振動の領域を取り扱ったものと言える。すなわち、振動は完全に給気しても停止せずに水膜の固有値、特に水膜の流速に大きく依存する現象と考えられる。一方、越流ゲートからの水脈などは、初速は小さく、徐々に加速する流れであるため、仮に流速が大きなパラメータとすれば現象はさらに複雑になると考えられ、今回の結果をいかに適用するかは十分に検討する必要がある。

[参考文献]1)Hagerty, W.W. et al. ; "Study of the Stability of Plane Fluid Sheets", Jour. of Applied Mechanics, Dec., 1955 2)Schwartz, H.I. ; "Nappe Oscillation", J.Hyd.Div. ASCE, 90, 1964 3)Kolkman, P.A. ; "Instability of a Vertical Water-Curtain Closing an Air-Chamber", Flow Induced Structural Vibration 17-33, IUTAM = IAHR Symposium, 1972

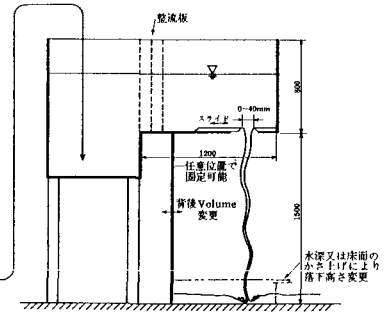


図-2 実験装置 概要

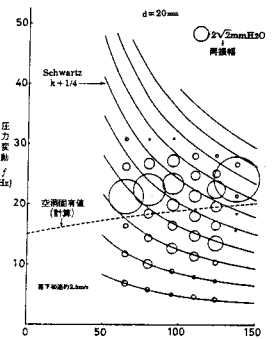


図-3 落下高の影響

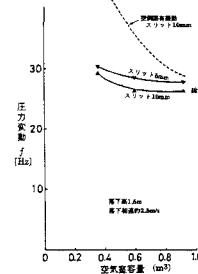


図-5 空洞体積の影響

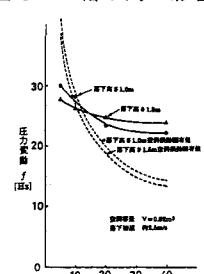


図-4 水膜厚の影響

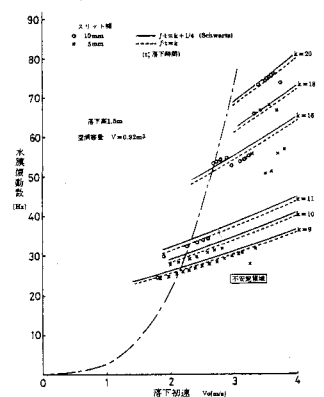


図-6 落下初速の影響