

1. はじめに

ゴム引布製起伏堰は、図1に示すように、ゴム引布製の袋体を河床および法面に固定し、袋体内部に空気か水も注入膨張させ、各種取水堰や潮止堰等に用いるものである。日本では、昭和40年に初施行以来、本堰の特長(倒伏の確実性と容易性、維持管理の容易性と経済性、施工の容易性、工期短縮、経済性等)により、現在まで北海道から九州にわたって約650件の施工例を数える。

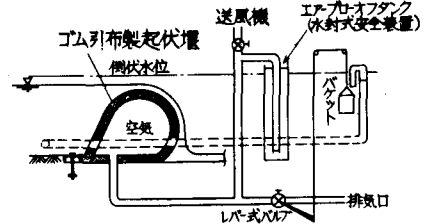


図1 空気膨張式堰の断面図

本堰の越流時の振動は、英国の Anwar^{*1} が最初に報告しているが、この報告もモデル実験を行な、たところ越流水深が大きく、内圧が低い程振動が起きやすいという定性的なものであった。現在では「ゴム引布製起伏堰の改良に関する研究」^{*2}等、一般堰の使用条件(内圧/堰高 ≥ 2)では、非振動領域は空気膨張式の場合越流水深が堰高の20%以下、水膨張式の場合越流水深が堰高の50%以下である事が判り、技術基準案にも盛り込まれ、堰の使用条件は、一応確立されている。しかし、本堰の大河川・大流量河川への適用や流量制御・上流水位制御等への適用も考えると振動領域・振動の大きさも定量的に把握し、振動防止策の検討が必要である。今回、振動領域・振動の大きさをモデル実験で求め、その防止策の検討を行なうとともに、堰振動の数学モデルを導出し、モデル実験結果と対比させたので報告する。

2. 越流振動のモデル実験

1) モデル実験について、

モデル実験は、長さ25m・巾4m・深さ0.8mの矩形水路に、堰高20cm・堰長4mのゴム引布製モデル堰を取付け上下流水深・内圧も種々変え、内圧・束力の変動を計測し堰の振動をみた。実験に際しては、上流への流入量・下流水深も一定にし、堰唇内圧(以後内圧とする)を高圧から低圧へ変化させ所定内圧および堰振動の開始・停止等の内圧で、流入量・上下流水深・堰高・内圧・束力等を測定した。

2) モデル則について、

モデルを考えるにあたって、越流時に作用する力は、1) nappeの慣性力・重力、2) 上流水の慣性力・重力 3) 堰(膜)の弾性力とした。(なお水の粘性力の項は、慣性力・重力に比し微小ゆえ省略した。)以上の各力より π number を導出し、モデル実験では Froude number, Strouhal number を用いた。

3) モデル実験結果について、

実験結果は、図2,3に空気膨張式、水膨張式の振動領域として示す。本図より明らかに、内圧が小さく、越流水深が大きくなり、振動しやすい事が判り、空気膨張式より水膨張式の方が振動しにくい。ただし水膨張式の特徴として、高内圧高越流で非常に大きく振動が現われる。振動の状況は、Anwar が指摘した膜面振動と堰振動の両現象があり、堰全長にわたって一様な振動と堰唇の中央が

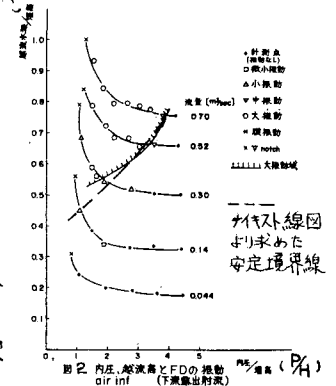


図2 内圧・越流水深とFDの振動 (空気注入時)

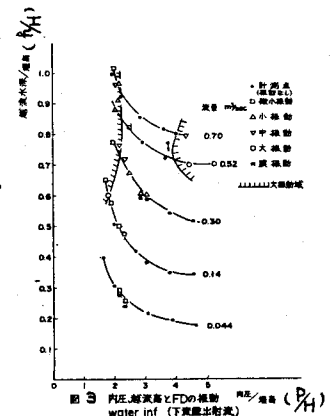


図3 内圧・越流水深とFDの振動 (水注入時)

小振動で左右が大振動の場合（左右で位相差なしの場合や位相差πの場合がある。）等の振動がみられた。また特微的現象として実験条件設定直後は振動がなく徐々に大きくなり定常振動を示すものや、振動状態でどの程度が大きくなったり小さくなったりする、うなり現象を示すものもみられた。

3. 越流振動の数学モデルの導出とモデル実験結果との比較

越流振動は、2の振動状況観察および図4に示す、rodと水きりで nappe も堰膜から完全に剥離させると、いかに上流水を乱しても振動が起きないことから考え、nappe の乱れも励振源とし、振動系自体の影響を受け limit cycle となる自励振動と推測できる。数学モデルの導出にあたり、これは、軸方向に一樣な流れ方向の振動と考えれば簡易な数値は線形とした。また堰下流形状は円形であり、水平力の変動に対する堰の変化は、図5に示すように、dam topの水平変動が、垂直変動および堰下流面の水平・垂直変動に比して大きいゆえに堰振動は、又軸方向のみを考える。振動時の外力は、nappeの（堰膜から剥離しない）堰体に及ぼす遠心力の又軸方向成分の平衡状態からの変位分であり、振動方程式は、

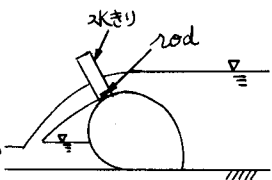


図4 nappeの剥離

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + kx(t) = \Delta F(t) = F_1(t) - F_0(t) \quad (1)$$

で表わされる。F₁, F₀, ΔF は各々下式で示される。

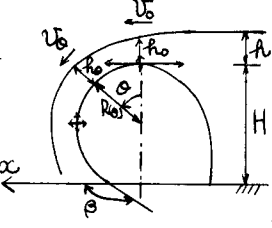


図5 堰変動と座標系

$$F_0(t) = \int_0^\beta \rho h(\theta) \cdot \frac{V_0^2}{R(\theta)} \cdot \sin\theta \cdot R(\theta) \cdot d\theta \quad (2)$$

$$V_0(\theta) = \sqrt{V_0^2(t-t_0) + 2g\{H-R(\cos\theta - \cos\beta)\}}$$

$$F_1(t) = \int_0^\beta \rho h(\theta) \cdot \frac{V_0^2}{R(\theta)} \cdot \sin\theta \cdot R(\theta) \cdot d\theta \quad (3)$$

$$V_0(\theta) = \sqrt{\{V_0^2(t-t_0) + \dot{x}^2(t-t_0)\} + 2g\{H-R(\cos\theta - \cos\beta)\}}$$

$$\Delta F = \frac{1}{3} \rho (1 - \cos\beta) H \sqrt{2gH} \alpha \left(\frac{4}{3} + \alpha \right) \dot{x}(t-\tau) = C_0 \dot{x}(t-\tau) \quad (4)$$

よ、振動方程式(1)は、

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + kx(t) = C_0 \dot{x}(t-\tau) \quad (5)$$

となり、時間遅れ(τ: dam topの流水が膜面を流下し、堰に遠心力を働かせるまでに要する時間)の項を含んでおり、ナイキストの安定判別法を用いて、漸近安定か否かの判別ができる。漸近安定の条件は、C₀/C < 1 であり、C, C₀に前述の値を代入し、

表示とそのdimension (軸方向単位長)	
x	堰の水平変位(頂) (m)
m	堰の質量(含付加質量) (kg/m)
C	粘性減衰係数, $\frac{kg}{m \cdot s}$ $C = 2\rho H \alpha m$
k	ばね定数 (kg/m)
k'	減衰定数
ρ	水密度 = 1000 kg/m ³
α	越流水深/堰高 = h/H
g	gravity = 9.8 m/s ²
H	膜材料 modulus $\frac{kg}{m \cdot 100\%}$
L	膜周長 (m)
F ₁	nappeの遠心力(変動状態) kg/s ²
F ₀	nappeの遠心力(平衡状態) kg/s ²

$$\frac{C_0}{C} = \frac{\frac{1}{3} \rho (1 - \cos\beta) H \sqrt{2gH} \alpha \left(\frac{4}{3} + \alpha \right)}{2 \rho H \alpha m} = \frac{\frac{1}{3} \rho (1 - \cos\beta) H \sqrt{2gH} \alpha \left(\frac{4}{3} + \alpha \right)}{2 \rho H \sqrt{\frac{H g}{L}} \cdot m} \quad (6)$$

となる。本式より、堰の越流振動については、「1) 越流水深(α)が大きければ振動しやすくなる。2) 内圧が高ければ、膜張力も大きく、膜材料 modulus(H) が大きくなり振動しにくく。」と言えモデル実験結果と定性的に合致する。時間遅れ(τ = T₀ = π/2; 遠心力はθ = π/2で最大のため)を考えモデル諸量を用いナイキスト線図より安定条件を求めると図2に併記する境界線を得、実験結果と合致する。

以上より堰越流振動モデルは導出できたと考える。なおモデル実験振動数と膜材 Modulus の関係、付加質量を図6に示す。

参考文献

- *1. Anwar H.O. "Inflatable dams", Pr ASCE (HY3) may '87
- *2. 「ゴム引布製起伏堰の改良に関する研究」 S53, 日本河川協会
- *3. 「技術基準案」 S53, 「
- *4. 高橋利衛: 「自動制御の数学」 木4社 '61 etc

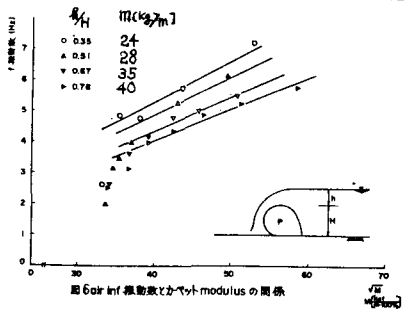


図6 堰振動数と膜材 modulus の関係