

空気膨張式ゴム堰における振動

The Oscilation of Rubber Dam

株式会社ブリヂストン 正会員 齊藤秀明

東洋大学工学部 正会員 荻原国宏

株式会社ブリヂストン

村松建夫

1. はじめに

近年、ゴム堰（ラバーダム）が急速に普及しつつあり、ゴム堰の大型化の一方で、高越流下での使用ニーズが高まってきている。このような情勢下のなかで、一般的に高越流時には、空気膨張式ゴム堰は、水膨張式に比べて振動を起こしやすいと考えられている。この為、ゴム引布製起伏堰技術基準（二次案）においても越流水深の標準値は、空気膨張式（振動防止対策なし）では $0.2H$ （ H ：堰高）以下、水膨張式では $0.5H$ 以下と規定している。しかし空気膨張式は、水膨張式に比べて、袋体が小さい、操作設備が安価、配管が小口径、起伏時間が短い、メンテナンスが容易等々、多くの利点を有しているため、非常に需要が高く、最近の施工実績の約95%が空気膨張式である。そこで今回、空気膨張式ゴム堰の振動防止対策を検討し、フィン（ディフレクター）構造で、高越流時の振動を従来の水膨張式と同レベルあるいはそれ以下に低減させることをめざした。以下振動のメカニズムとフィンの効果について、実験結果を中心に報告する。

2. モデル実験〔1〕

図1に示す、2タイプ（A：フィンなしタイプ、（従来タイプ）、B：フィン付タイプ）について以下に示すモデル実験を実施した。

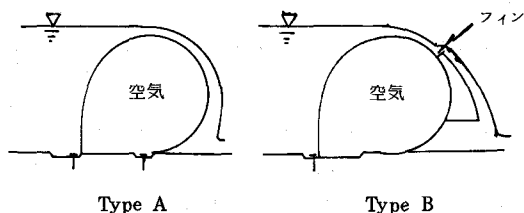


Fig. 1

(1) このモデル実験は、空気膨張式ゴム堰をフルード側に従って、縮小したモデルを使用して実施した。モデルの基準堰高は20cmである。

(2) 実験水槽は、図2に示した、長さ11.0m、幅3.0m、高さ1.5mの回流水槽である。

(3) 実験方法としては、 H_u/H （上流水位／堰高）を、1.0～1.8迄上げて、それぞれの条件における振動の大きさを、加速度計、圧力計、張力計によって測定した。また下流水位（ H_d ）については、 H_d/H を0.0～1.5の範囲で変化させ、この影響を見た。図3に加速度計の測定方向と位置を示した。

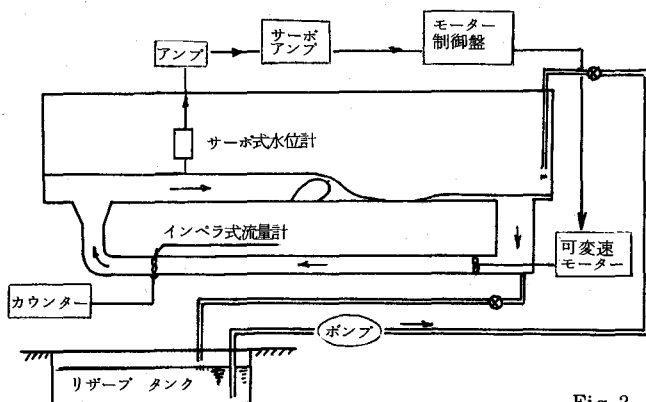


Fig. 2

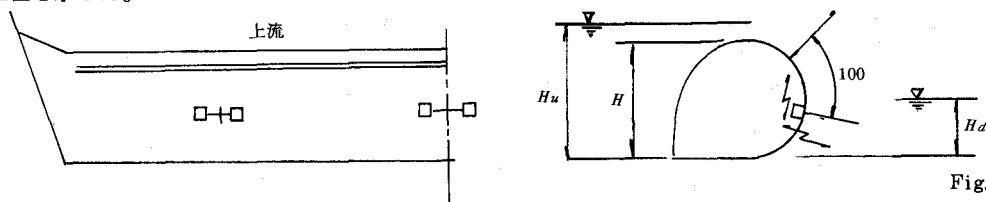


Fig. 3

(4) 図4に、上流水位と振動（堰径方向の加速度）の關係の代表的な例として、下流側射流、各種内圧時における、両タイプの結果を示す。フィンなしタイプでは上流水位が増加するに従って振動が大きくなって来るが、フィン付きタイプでは空気の通気が充分確保されているため、水脈はフィン部から完全に離れエアークャンバーを形成しており（以後完全水脈と呼ぶ）振動はきわめて小さい。越流が増すと、完全にエアークャンバーがなくなるが（不完全水脈と呼ぶ）特に振動が急激に大きくなるようなことはない。またこの範囲の内圧では、特に内圧による影響は見られなかった。

(5) 図5は、側壁取付高さを変え通気を悪くして $P_0/H_0=1$ 、下流側射流の条件における各タイプの結果を示すグラフである。フィン長2.5%（フィン長/堰高×100）で、しかも空気が入りにくい状況下においては、 $H_u/H \div 1.5$ 付近で、不完全水脈になり始め、この完全水脈と不完全水脈の遷移領域において、大きな振動を発生する。しかしこの領域において、通気を確保するか、フィン長を10%にすると、このような現象は起きない。

(6) 図6は、下流水深の影響を示す。この結果から、ある程度下流水深の影響はでているが、実用上問題にならない。

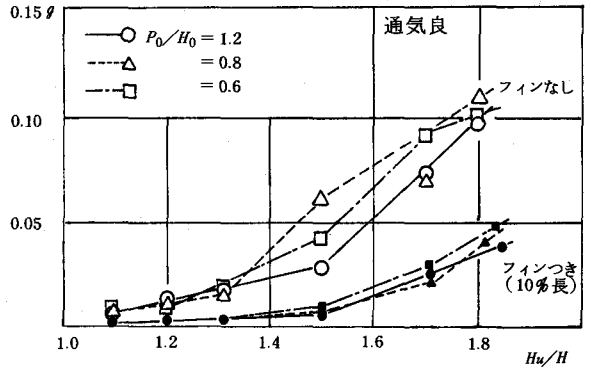
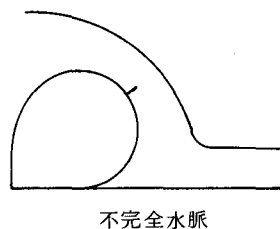
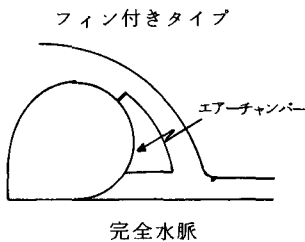


Fig. 4

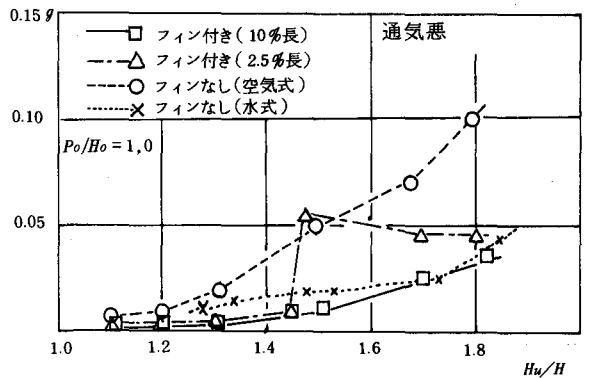


Fig. 5

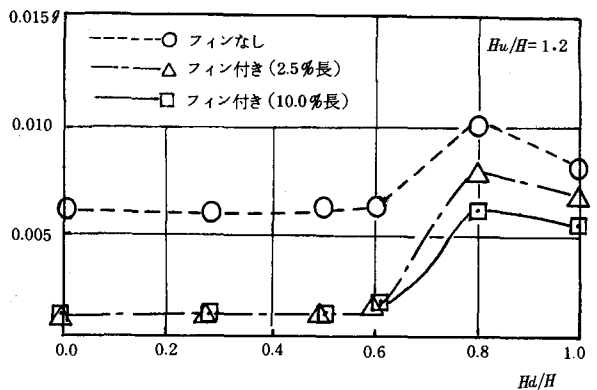


Fig. 6

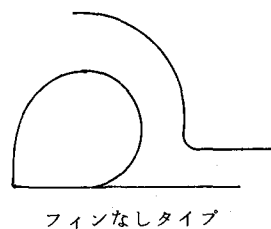


Fig. 7

3. モデル実験〔2〕

振動のメカニズムとフィンの効果のメカニズムを解明する為、図に示すような二次元モデルを用いて、流れの状態の観察、ゴム堰表面の圧力分布の測定を行なった。使用したモデルは堰高10cm、巾16cmのプラスチック製固定型モデルである。また図11に示すような振動モデルを作成して、振動の形態を観察した。

(1) タフト及びコンデンスミルクによって流れの状態、渦、剝離点の位置等について観察したところ、渦に関しては双方ともに、越流が大きくなると、乱れが大きくなるが、図に示したごとく、特に顕著な差は見られなかった。また剝離点については、フィン付きとフィンなしタイプでは明らかに異なり、フィン付きタイプはフィンのすぐ上流側で安定して剝離しているのに対して、フィンなしでは堰下流面にて剝離しており、この位置の変動は越流が増加するほど大きくなっていた。ただしフィンの短いタイプにおいて、完全水脈と不完全水脈との遷移領域では、流れが再び付着するような現象が見られた。



Fig. 8 フィンなしタイプ

(2) 堰下流における、静圧分布をマンメーターによって図11の方法によって測定した。起流が低い場合、フィン付きではフィン下流側で大気圧になっており特に問題となるような現象はみられなかった。起流が増加してフィン付きで、完全水脈から不完全水脈となる、 $H_u/H \approx 1.5$ においては、図12のグラフに見られるように、フィンなしタイプでは、流速が速くなることから遠心力も大きくなり向心力として、水脈が剝離しないかぎり必然的に負圧力が働き始めている。また0.5S以後での圧力は不安定で変動している。

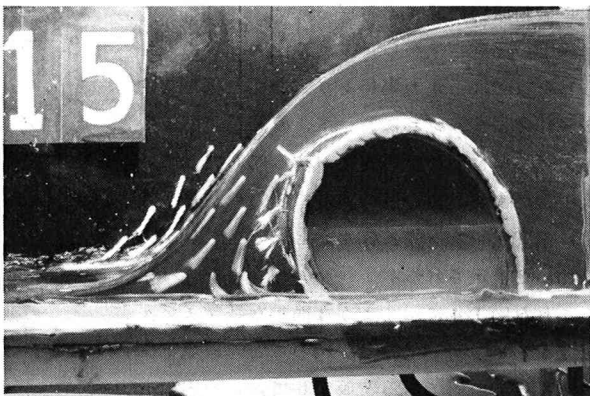


Fig. 9 フィン付きタイプ

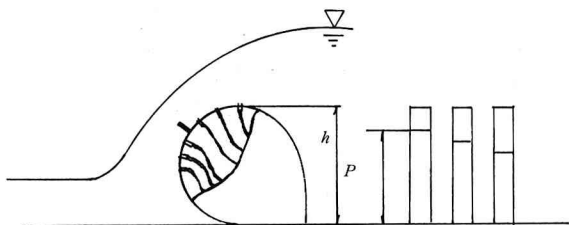


Fig. 10

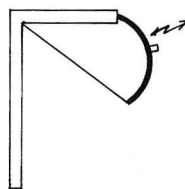


Fig. 11

一方、フィン付きタイプにおいても、この遷移領域においては、フィンなしタイプと同様、負圧になるとともに、ここでの圧力は不安定で、変動している。ただしフィンの長いタイプでは負圧にはなるが、圧力は安定している。また短いフィン（2.5 %フィン）タイプでも、空気を水切り棒等によって、通気させると、当然圧力は、0.5 Sより下流側は大気圧以上で安定する。

さらに越流を増加させて、 $Hu/H = 1.6$ になると、フィン付きタイプは安定してくるのに対して、フィンなしタイプは増々不安定になっている。

(3) 模型を振動部のみを拡大して、図 11 に示すような、曲面を有する弾性モデルを作製して実験したところ、Froude モデルと同様な結果が得られ、やはりフィンを長くすると振動は止まった。

4. 振動原因に関する考察

以上の実験結果から、振動の原因として考えられることは、重力場にあり、曲面形状を有する弾性体に沿う流れにおいて、流速が速くなると、この弾性面に遠心力に対する向心力として負圧力が働く、この遠心力と負圧力の関係が非常に不安定である為に、水脈とゴム堰が自励振動すると推定される。

これを図 14 に示すような簡単な数学モデルを仮定して説明してみる。図のごとく、堰下流は、半径 r の円であると仮定して、この円の一部について、堰が径方向に dr/dt で移動した時の運動方程式をたてた。

$$m \cdot \frac{d^2 r}{dt^2} + C \cdot \frac{dr}{dt} + K \cdot dr = F \quad (1)$$

ここで加振力に相当する外力 F は、堰の一部が移動する前後における遠心力の差に相当して、式(2)のごとく示される。

$$F = \rho_w \cdot \frac{2v \cdot v'}{(r + h/2)} h \Delta S \quad (2)$$

v' は、堰の径方向移動速度によって加速された流速であり、 $v' = a \cdot dr/dt$ で示されると仮定する。(2)式と、 v' の値を(1)式に代入すると、この運動方程式は、(3)式のようになる。

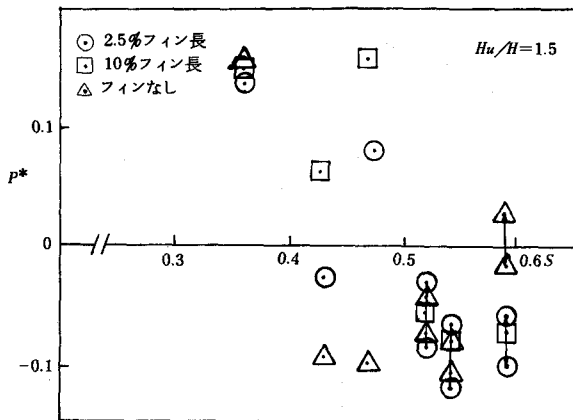


Fig. 12 静圧分布

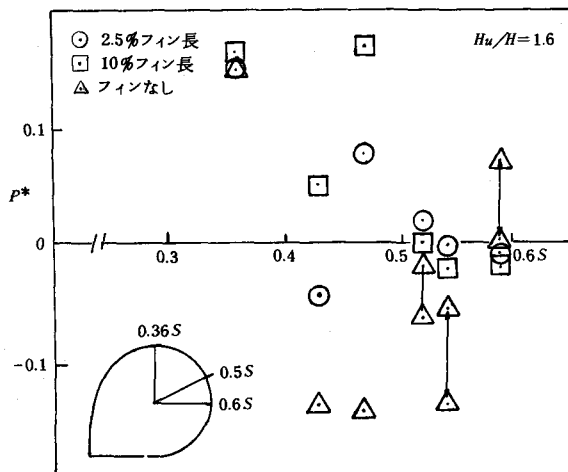


Fig. 13 静圧分布

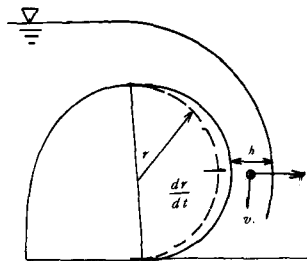


Fig. 14

$$m \cdot \frac{d^2 r}{dt^2} + (C - 2 \rho_w \cdot \frac{\alpha \cdot v \cdot h}{(R + 1/2 \cdot h)} \triangle S) \cdot \frac{dr}{dt} - K dr = 0 \quad (3)$$

(m : 堰体質量, $C = \eta \cdot C_c$, η : 減衰常数, C_c : 限界減衰係数 ($2\sqrt{m \cdot K}$, $K = E/r$)
 E : 堰体バネ常数)

この結果、左辺第2項が負になると、いわゆる負の減衰力が働く為に自励振動が発生する。従って、先の推定と同様に、流速 v が速くなるほどこの系が不安定になることを示している。また(3)式は、堰体の質量が大きいほど、あるいは剛性が高いほど振動しにくいことを示している。

以上概念的ではあるが、振動のメカニズムが分かってきたことから、推定に基づいて実験結果を分析する。

- (1) 越流が低い時は、流速が遅い為、水脈が円運動していても振動は小さい。
- (2) フィン付きは、フィン上流側で水脈が剥離している為、円運動せず振動はしにくい。
- (3) しかしこのタイプで、完全水脈と不完全水脈との遷移領域で、通気が悪い場合はフィン上流側で一旦剥離した水脈が再び負圧力により、円運動する為振動する。ただしこの領域で通気を良くすると水脈は再付着しない為、振動は小さい。
- (4) フィンの長さを長くすると、負圧力よりも慣性力が大きくなる為に、通気が悪くても円運動をせず振動しにくい。

5. モデル実験【3】

以下に示したように、モデルの縮尺率をあげて、遷移領域において空気が入り易い構造（側壁部取付高さを高くする方法）と、通気は悪いが、フィンの長さの長い構造（フィン長さ＝7.5φ）の両タイプについて実験を実施した結果、両タイプとも振動レベルは小さく、遷移領域における大きな振動は見られなかった。

- (1) モデル① 堰高30cm×巾3.0m（フィン長、7.5φ、22.5φ）
- (2) モデル② 堰高40cm×巾3.0m（フィン長、10.0φ、30.0φ）

6. 水脈振動

フィン付きタイプにおいて、比較的低越流でエアークッションが形成された完全水脈でも振動を起こすことがある。この振動は鋼製ゲートについて報告されている水脈振動と同じ現象と考えられる。水脈振動は内圧、上・下流水深等の条件がごく限られた範囲内でのみ発生する振動であり、上述の高越流時の振動とは区別して述べる。水脈振動の発生条件としては次式が報告されている。

$$f \cdot T = n + \delta \quad (4)$$

(f : 振動周波数, T : 水脈落下時間, $n = 1, 2, \dots$, $\delta = 1/4$)

図15にモデル実験における水脈振動の様子を示す。水脈振動は、写真に示すような振動をしており、この時上式をほぼ満足している。

このような振動の防止対策としては、フィンに一定の間隔で、凹凸をつけることによって、落下時間の位相をずらして、抑制することができる。凹凸フィンの効果は、実機のゴム堰（堰高1.0m）においても、その効果が確認されている。



Fig 15 水脈振動



Fig 16 凹凸フィンの効果

7. おわりに

- (1) 二次元モデル実験及び簡単な数学モデルを仮定することにより、ゴム堰の振動を説明することができた。
- (2) フィン構造を採用し、適切な設計を行うことにより、従来最も振動しにくいといわれていた水膨張式ゴム堰のレベルと同等もしくはそれ以下に振動を低減できることを示した。ここで適切な設計とは、

ア. 側壁部取付高さを高くする等の手段によって、完全水脈と不完全水脈との遷移領域において充分通気を行う。

イ. フィン長さを充分長くする（堰高の7.5%以上）ことによって流れの再付着を防止する。

ウ. フィンを凹凸にすることにより、水脈振動を防止する。

などの方法があり、堰に要求される使用条件等によりこれらの方法を選択あるいは組合せることが好ましいと考えている。

参考文献

- 1) Anwar H. O. 「Inflatable dams」 Pr ASCE
- 2) 「ゴム引布製起伏堰技術基準（二次案） 建設省河川局治水課監修 1983.
- 3) 丸山一郎：ゴム引布製起伏堰の越流時の振動について、土木学会第36回年講 1981.
- 4) 本間 仁，荻原国宏：フラップゲートの振動についての理論解析，土木学会論文報告集 第238号，1975年6月.