

## 水理構造物の振動事例

巻 幡 敏 秋

水理構造物の振動は、基本的には水理現象に起因するものが支配的であり、その事例としては (1) 扉間、空気弁フロート弁座および微小開度などの小間隙流れ、(2) 主・副ゲート操作に伴う干渉流れ、(3) 流れの剥離に伴う渦流出などが考えられる。また構造系に対する振動現象としては (A) 1 自由度系の強制振動に属するもの、(B) 2 自由度系の連成フラッター振動、(C) 管路系に発生する気柱振動 (水撃作用) などがある。

ここで取り上げた振動事例は、過去に経験した多くの事象を可能な限り詳細に紹介し、今後の設計や運用面に対する留意すべき点について記述する。

キーワード：ダム、水理構造物、放水路、ゲート、減勢槽、水理現象、振動

### 1. はじめに

過去に経験した水理構造物の振動事象で流れ、即ち、水理現象に起因する事例として、(1) 扉間、空気弁フロート弁座および微小開度などの小間隙流れ、(2) 主・副ゲート操作に伴う干渉流れ、(3) 流れの剥離に伴う渦流出などが考えられる。これらの水理現象は、基礎方程式であるナビエ・ストークスの式から誘導される相似則のストローハル数  $St$ 、フルード数  $Fr$ 、レイノルズ数  $Re$  等に規制される。

次に振動現象は、通常、水理現象から誘発される 1 自由度系の強制力に対する応答現象として捉えられるが、ゲート形式によっては 2 自由度系の連成フラッター振動も起こり得る。応答現象を考える場合に特に留意する点は、(i) 付加水の質量効果 (一般的に固有振動数が低下する傾向にある)、(ii) 付加水の減衰効果 (流体からの負減衰による発振あるいは発散振動への移行) である。

まず、水理現象の (1) に属する事例は、A および C 河口堰調節ゲート、S ダム排砂ゲート、Y 堰洪水吐ゲート、(2) に属する事例は、T ダム主・副ゲート、J ダム (外国) 余水吐ゲート、O 発電所取水口ゲート<sup>1)</sup>、(3) に属する事例は、N ダム充水管弁、H ダム副ゲート空気弁である。これらの事例から生じる振動には、(A) に属するような構造物に対する強制振動として現れるが、中には (B) および (C) に属する事例には、管路系のサージ現象や気柱振動 (水撃作用) であって、管路系の長さや水の音速に関連する現象と

して現れる。特に、(C) に属するもので管路系に発生する水撃圧は極めて厳しいものとなり、管路系およびそれに設置されるゲート・弁体などに及ぼす影響については十分な注意が必要である<sup>2)</sup>。

次に、ゲートおよび弁体などの振動現象は、水中にあるため (i) 質量および (ii) 減衰の効果を考慮しなければならない。両者ともゲートの振動モードおよび接水状態に影響される事象である。(i) の質量と (ii) の減衰効果で自由表面に接する面およびシェル構造内に囲まれた水域については自由表面波の形成による影響も加味する必要があり、特に、シェル構造内に囲まれた水域での自由表面波の挙動は自励振動系へ移行する可能性も考えられる。また、一般ゲートにおける上下・前後水平振動あるいはセンターゲートにおける前後水平・回転振動については、前後水平の水中振動数および空中の上下と回転振動数との比がある値 (1 付近) になると 2 自由度系のフラッター振動を誘発する可能性があるため、特に、注意する必要がある。(ii) の減衰効果は、振動の持続あるいは発散振動への移行をもたらす危険な要素であり、扉間漏水などの小間隙流れで、特に顕著となる。

以下に、水理構造物の振動に関する過去の事例を可能な限り紹介しながら、今後の設計や運用面に対する注意点などについて記述する。

## 2. 振動事例

### (1) 1 自由度系の振動

#### (a) 扉間および微小開度などの小間隙流れ<sup>3), 4)</sup>

扉間および微小開度などの小間隙流れは、「Short-tube effect」と呼ばれ、水理的に不安定な現象を伴いゲート振動の原因の1つとされている。その1つに扉間での流れがあり、通常、調節ゲートの上段扉と下段扉間の漏水と言われるもので、漏水に伴う振動現象は、上段扉の下端が背水位によって没水する場合に発生する。調節ゲートについては、下段扉の頂部に水密構造が設置される関係から扉間漏水の上流側に流れを規制する領域が存在し、上段扉あるいは下段扉が振動すると扉間漏水域の流れが変動し、図-1に示すように振動速度  $dy/dt$ 、振動変位  $y$  に依存する流体力が求められる<sup>3)</sup>。

扉間漏水によって振動した事例は、A および C 河口堰の調節ゲートである。C 河口堰の調節ゲートは、ローラ間約 45m の長径間の上・下段扉から構成される形式のものである。調節ゲートによる水位管理は越流操作によってなされており、越流水深が小さい領域で水脈による振動事例が過去にも多く報告されている。しかし、ここで取り上げた事例は、運用後数年ほど経過し扉間漏水が確認され、特に上段扉の下端が水没する下流水位条件で、ゲート操作と共に非越流時から振動が発生し、越流時でも越流水深に無関係で非越流時と同質の振動 (1.5 ~ 1.7Hz) が発生する振動であった。

図-2に示すように非越流時からわずかの越流水深時に至る状況での振動が極めて大きく、越流水深が大きくなるにつれて振動がなくなる傾向にある。

次に、止水部が小間隙の上流側にあつて、充滿しながらの間隙流れは、扉間漏水以外でも副ゲートのボンネット内部での流れ、ゲート戸溝部での流れなどがあり、扉間漏水の場合と同様な振動現象の発生の原因になることもあるので、留意する必要がある。

更に微小開度での小間隙流れがあり、すべてのゲートの操作中あるいは微小放流時に通過する領域である。微小開度の流れ場を図-3に示しているが、ゲートが振動変位  $y$ 、振動速度  $dy/dt$  で振動した場合の

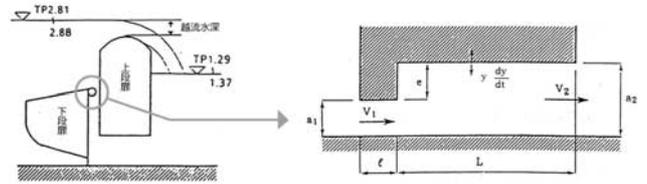


図-1 扉間漏水流れ、 $l/L \ll 1, \left[ \frac{a_2}{a_1} > 1 \right]$

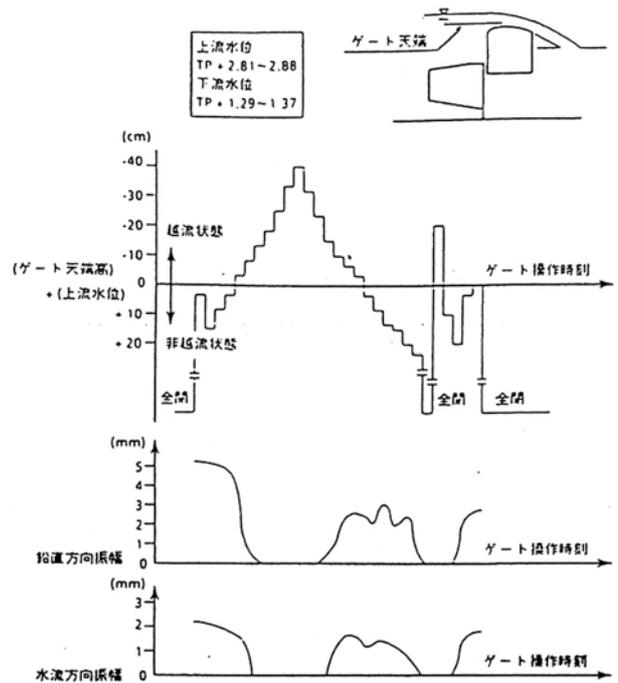


図-2 調節ゲートの振動

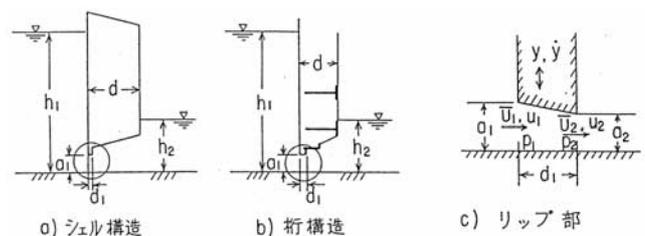


図-3 微小開度の流れ

非定常な流体力が誘導される<sup>4)</sup>。

この種の振動事例は、ほぼリップ底面のフラット部の厚さに相当する微小開度で発生し、ここで論じている現象に対応していた。微小開度に対する振動防止のための限界開度  $a_c$  の試案として、以下のように設定してみる。

シェル構造型式の限界開度	上流側スキムプレート	上下方向振動: $a_c \approx 1.0d_1$ 前後水平方向振動: $a_c \approx 1.5d_1$
	下流側スキムプレート	上下方向振動: $a_c \approx$ 限界値なし 前後水平方向振動: $a_c \approx 1.5d_1$
桁構造型式の限界開度	上流側スキムプレート	上下方向振動: $a_c \approx 1.0d_1$ 前後水平方向振動: $a_c \approx 1.5d_1$

ゲートの振動防止あるいは回避という観点から詳細な検討がなされる必要があるが、とりあえず、上記の危険開度（限界値）以下は、できるだけ避けた操作・運用法を採用されることが賢明であろう。上記の限界開度に対する検証データとして、Y堰の洪水吐ゲートでの実機（潜り流出条件）で計測された結果によれば、 $a/d_1 < 0.8$ （前後水平方向の振動あり）、 $a/d_1 > 1.0$ （振動なし）であり、上記で提示した限界開度  $a_c \approx 1.5d_1$  は妥当のように考えられる。

(b) 主・副ゲート操作に伴う干渉流れ<sup>1.5-8)</sup>

主・副ゲート操作に伴う干渉流れの振動事例は、Tダムの副（予備）ゲートの流水遮断試験時（1965.8実施）に発生した事象で、わが国では初めてで最後の振動事例である。この試験は、ダム湛水後に、通常実施されるゲートの性能・安全性確認のためのものであったが、副（予備）ゲートの流水遮断試験が特別に追加されたものである。Tダムの副（予備）ゲートは、ダム堤体上にあるガントリークレーンで吊上げ、吊下しされる形式のものである。流水遮断試験は、ガントリークレーンで放流予定の主ゲート位置に副（予備）ゲートを運び、セットして閉操作によって実施された。流水遮断試験は、主ゲート開度 2/5（一定）、副（予備）ゲート開度を全開から全閉にする試験であり、副（予備）ゲート開度が主ゲート開度の約 75% 程度（副：30%，主：40%）に達したときに①主ゲート下流側の水脈が乱れ飛沫の発生・飛散化が著しく太陽光線が遮断され下流側放水路が暗くなる、②給気量の増大と気圧低下が生じ、③機側操作室の出入口鋼製扉（内開き）ヒンジ部の損傷、④副（予備）ゲートのダウン・プル力の増大とガントリークレーンの揺れ、⑤主ゲート振動とダム堤体の振動など、今までに経験したことない振動現象が発生した。副（予備）ゲートの流水遮断試験は、急遽主ゲートの閉操作によって中止したが、この種の試験がダムや水理構造物に対していかに危険な試験であったかが検証された。

Tダムと同様な振動事例がJダム（外国）の余水吐ゲートでも発生した。両ダムともほぼ同質の水理現象が発生したことになり、主・副ゲート操作に伴う干渉流れが振動事象を引き起こしていることを示唆している。主・副ゲート操作に伴う干渉流れは、フルード数  $F_r = V/\sqrt{gL}$ 、 $V$ ：流速、 $L$ ：代表長さ、 $g$ ：重力加速度に規制される流れの跳水現象の解析から評価できることも明らかにされた<sup>7)</sup>。

(2) 2自由度系の連成フラッター振動<sup>9)</sup>

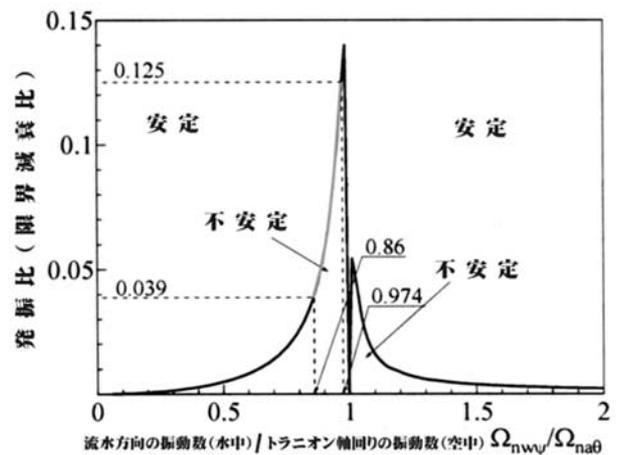
Wダムテンターゲート（約 37 トン）の崩壊事故は、

連成フラッターの発散振動であることがFEM振動解析から明らかにされた。この事例は、今から約 40 年前に発生した竣工直前の事故（1967.7）であり、当時の事故原因調査報告書によれば、構造的な強度不足により静的に脚柱が座屈崩壊したものと結論づけられている。しかし、事故ゲート（第 3 号）以外の他の 3 門は、静水圧下では崩壊していないし、事故後第 1 号ゲートを閉じた水圧・放流試験でも何らの事故は発生していない。

事故ゲート（第 3 号）の操作記録によれば、事故当日開度 30cm から全閉操作時に一瞬のうちに破壊事故が発生したことが記載されている。

これに類似した事例として外国の例では、Wダム事故の約 28 年後（1995.7）に米国カリフォルニア州フォルソンダムにおいて約 87 トンのテンターゲートの事故がある。Wダムテンターゲートについての解析結果を図—4 に示すが、扉体（スキンプレート・脚柱含む全体系）の流水方向の水中振動数  $\Omega_{nw\psi}$ 、トラニオン軸回り空中固有振動数  $\Omega_{na\theta}$  との比  $\Omega_{nw\psi}/\Omega_{na\theta}$  は 0.86 ~ 0.97 になり、比  $\Omega_{nw\psi}/\Omega_{na\theta} < 1$  は強い動的不安定範囲にあり、流水方向の発散振動が発現する可能性のあることを示唆している。

なお、比  $\Omega_{nw\psi}/\Omega_{na\theta} > 1$  の範囲はトラニオン軸回り振動が主体となる発散振動域である。この解析結果から、事故に至った原因は 2 自由度系の連成フラッター振動であると結論される。



図—4 テンターゲートの動的安定判定図

3. おわりに

水理構造物の振動として、幾つかの事例を紹介したが、ゲート振動は主として水理現象に起因する事象であって、1 自由度系の振動に属するものである。しか

し、テンターゲートにおける振動は、ゲート振動としては特異な2自由度系の連成フラッター振動が発生する可能性のあることが示された。この種の振動は発散振動であるためゲートに対しては極めて危険な現象であることに留意されたい。

最後に、過去に経験した事例について多くを紹介したが、なお十分でないところもあったものと思われる。読者諸賢の寛大なる叱正を伏してお願いする次第である。

JCM/A

#### 【参考文献】

- 1) 巻幡：「取水口ゲートの遮断に伴う放流水の水理特性」, 水門鉄管 [140] (1984.9)
- 2) 巻幡・改田・伊埴・田窪・神藤：「充水管および空気の吐口の流流不安定現象」, 第34回ダム技術講演討論会テキスト (2002.2)
- 3) 巻幡・大倉：「ゲート小間隙部の流れと振動現象」, ダム工学 [22] (1996.7)

- 4) 巻幡：「水門扉の振動に及ぼす微小開度の影響について」, 水門鉄管 [137] (1983.12)
- 5) 巻幡：「ダム放水路流れの不安定現象について」, 土木学会第25回年次学術講演全国大会 (1970.10)
- 6) 巻幡・有馬・柏原：「主・副ゲートを有する放水路の水理特性」, 水門鉄管 [102] (1977.1)
- 7) 巻幡：「主・副ゲートを有する放水路流れの不安定現象について」, 水門鉄管 [150] (1987.3)
- 8) 出口・重永：「ナイジェリア国電力局 (NEPA) ジェバダム余水吐ゲート」, 水門鉄管 [151] (1987.7)
- 9) 石井・阿南・巻幡・奥・大原：「我国におけるテンターゲートの崩壊事故」, 土木学会構造工学論文集 53A (2007.3)

#### 【筆者紹介】

巻幡 敏秋 (まきはた としあき)  
工学博士  
元 Hitz 日立造船株式会社 理事  
株式会社 エスメル テクノ



## 建設機械施工安全技術指針 指針本文とその解説(改訂版)

### ◆「指針本文とその解説」目次

#### 第I編 総論

- 第1章：目的
- 第2章：適用範囲
- 第3章：安全対策の基本事項
- 第4章：安全関係法令

#### 第II編 共通事項

- 第5章：現地調査
- 第6章：施工計画
- 第7章：現場管理
- 第8章：建設機械の一般管理
- 第9章：建設機械の搬送
- 第10章：賃貸機械等の使用

#### 第III編 各種作業

- 第11章：掘削工, 積込工
- 第12章：運搬工
- 第13章：締固工
- 第14章：仮締切工, 土留・支保工
- 第15章：基礎工, 地盤改良工
- 第16章：クレーン工, リフト工等

第17章：コンクリート工

第18章：構造物取壊し工

第19章：舗装工

第20章：トンネル工

第21章：シールド掘進工, 推進工

第22章：道路維持修繕工

第23章：橋梁工

● A5版 / 330頁

● 定 価

非会員：3,360円 (本体3,200円)

会 員：2,800円 (本体2,667円)

※学校及び官公庁関係者は会員扱いとさせていただきます。

※送料は会員・非会員とも

沖縄県以外 450円

沖縄県 1,050円

※なお送料について、複数又は他の発刊本と同時申込みの場合は別途とさせていただきます。

● 発刊 平成18年2月

### 社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 (機械振興会館)

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>