

ダムゲートの放流範囲拡大へ向けた検証 ～実証実験をふまえた室生ダムからの提案～

藤田 正樹¹

¹独立行政法人水資源機構 木津川ダム総合管理所 機械課 (〒518-0413 三重県名張市下比奈知2811-2)

クレストラジアルゲート（以下、クレストゲート）の流水による振動を考慮した動的安定設計に関しては、各所で調査研究されているが、未だ解明されていない部分があり、国内外でのクレストゲート崩壊事故がフラッター現象に起因するとの学説もある。

室生ダムでは過去に放流試験を行い、放流時の振動について安全性を確認しているが、新たな知見に基づき微小開度放流時の自励振動に係る安全性を再確認し、さらなるダム管理運用の信頼性を向上させるため、平成 23 年 12 月にゲート振動の専門家である大阪電気通信大学・石井教授、及び足利工業大学・阿南准教授と共同で、室生ダム 2 号クレストゲートをフィールド提供して、振動調査・解析を実施したところである。その結果、室生ダムクレストゲートは、いかなる水位・開度においても動的安定性が高いことが再確認され、ゲート放流範囲を広げることの確証を得た。

キーワード：クレストラジアルゲート、フラッター現象、微小開度放流、振動特性、放流範囲拡大

1. はじめに

室生ダムは堤高 63.5m、堤頂長 175.0m、堤体積約 15.3 万 m³、総貯水容量 1,690 万 m³ の重力式コンクリートダムで、洪水調節・不特定かんがい・上水道用水を事業目的とする多目的ダムであり、昭和 49 年より管理を行い、現在まで約 39 年が経過している。

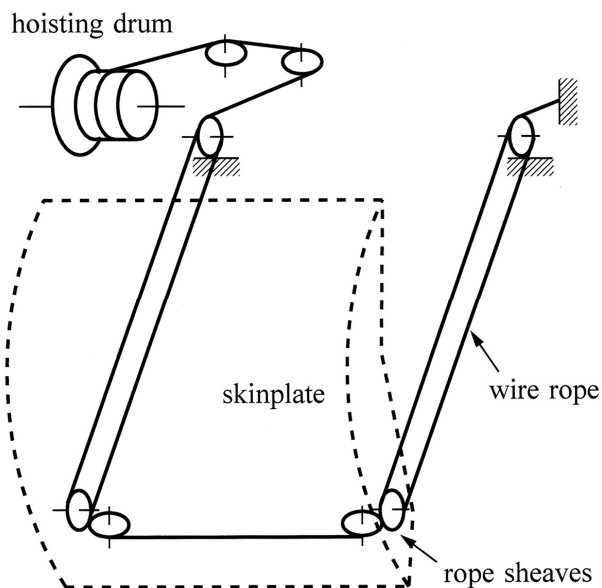


図-1 室生ダムクレストゲートの簡易構造図

クレストゲートは一般的に「非常用洪水吐き設備」と呼ばれ、計画以上の流入があった場合に放流する設備であるが、室生ダムでは洪水調節を常時行うための「常用洪水吐き設備」として位置づけられている。すなわち、室生ダムの洪水調節用の設備はクレストゲートのみであり、本設備の代替設備は設置されておらず、極めて重要なゲートであるといえる。（図-1）

本稿では、室生ダムクレストゲートが持つ振動特性、動的安定性の解析結果と、放流範囲拡大の観点から微小開度での放流実績について報告するものである。

2. クレストゲートのフラッター現象

(1) フラッター現象の過去の事例

クレストゲートの放流時の振動による崩壊事故は、過去に於いて国内では昭和 42 年に和知ダム（昭和 42 年完成）で、国外ではアメリカで平成 7 年にフォルソンダム（昭和 30 年完成）で起きている（写真-1）。その原因は、放流中の異常振動がひとりでに増幅したフラッター現象によるものとされている。また、和知ダムの事例では、この現象により脚柱の座屈が発生し、フォルソンダムではボルトが破断しゲート崩壊へ繋がったものとされている。

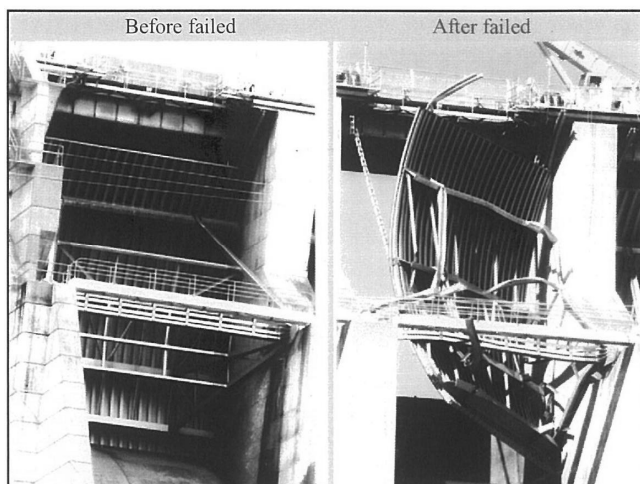


写真-1 フォルソンダムゲート崩壊状況

(2) クレストゲートのフラッター現象

ゲートの固有振動数（物には全て、そのもの自身がつ固有の振動数がありこれを「固有振動数」と呼ぶ。）には、水流方向の（上下流方向）の曲げ固有振動数と、トラニオン軸周りの上下方向（天地方向）の剛体固有振動数がある。この水流方向の固有振動数は上流水位と共に変化し、ある領域で上下方向の固有振動数に近づくとある。このときに、まさしく共振に近い状態で強烈なフラッター現象が発生する事が石井教授らの研究で報告されている。

ちなみに、この上下方向の振動は平常時には水密ゴムに働く摩擦力で抑えられているが、片吊り状態からの解放、ゲートトラニオン部の回転摩擦の急激な変動、外的要因（流木の衝突や動水圧変化など）による起振によって、強烈なフラッター現象が突然発生する。

室生ダムでは平成10年に実放流試験を行い¹⁾、特定水位（EL288.87m）での微小開度放流に伴う、自励振動に対する安全性をペトリカット曲線により確認しているが、フラッター現象に係る解析・調査が行われておらず、今回、石井教授らの研究成果を実機で確認したものである。

3. 室生ダムでの実験と動的安定性について

(1) 固有振動数の計測方法

固有振動数を知るためには一般的に「ハンマー打撃による加振法」が用いられるが、水圧が作用しているゲートでは、この方法で正確な計測データを得る事は困難である。そこで、石井教授は、阿南准教授らと共に「鋼棒切断加振法」を考案し、ゲートの固有振動数を正確に計測することに成功している。

(2) 鋼棒切断加振法²⁾

クレストゲート下端とダム越流部との間に取り付けた

鋼棒（Φ3～5）を、ゲートを開けることによって切断し、その衝撃によりゲート全体を効率的に加振する方法である（写真-2）。このときに起きる微小な減衰振動をゲート上の各部に設置した高感度加速度センサーで計測し、データ分析を行うことで、ゲートの流水中での固有振動特性を正確に把握することができる。さらに、その振動特性を用いることによってゲートの動的安定性が簡単に判定できるため、国内外でその有効性を確認しているところである。

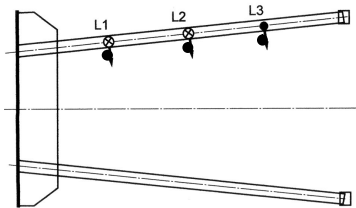
今回使用した計測機器の一覧は表-1のとおりである。また、具体的な実験方法は次の通りである。ゲート下端に切断する鋼棒に作用する荷重をロードセルで計測し、振動加速度応答をサーボ型加速度計で計測した。測定は24個の加速度計を使用し、スキムプレート上の13点と脚柱上での3点で行い、各測定点で主要な方向の振動加速度応答を計測した。測定点を図-2に●で示し、測定した振動方向を矢印で示している。測定点には(c)図A～G、D1～D7、(a、b)図L1、L2、L3の記号をつけている。スキムプレート上の全ての測定点で流水方向（上下流方向）の振動を測定した。D1、D3、D7、Gの4点では上下方向（天地方向）の振動も計測した。また、D6と脚柱上では左右方向（スパン方向）の振動も計測した。さらにL1、L2では上下方向（天地方向）の振動も計測した。スキムプレートの両サイドには開度計を取り付け、鋼棒切断時の正確なゲート開度を計測した。加速度計および開度計は、強力なマグネットブロックを用いてゲートに取り付けた。計測したデータは2台のデジタルデータレコーダーでA/D変換を行った後、2台のノートパソコンに記録すると同時にFFTアナライザーで主要なデータをリアルタイムに分析した。



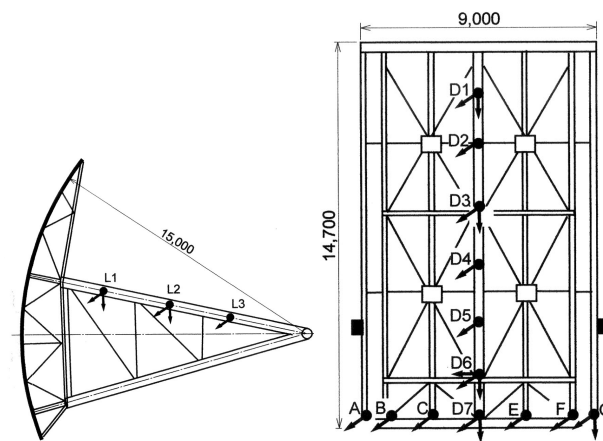
写真-2 鋼棒切断加振法の装置設置状況

表-1 使用機器一覧表

計測機器	メーカー	型番	数量
デジタルレコーダー	TEAC	LX-10	2
ノートパソコン	TOSHIBA	Dynabook	2
FFTアナライザー	A&D	AD3525	1
サーボ型加速度計	Rion	LS-20C	11
サーボ型加速度計	Rion	LS-10C	13
動ひずみ計	KYOWA	DTP05MDS	1
開度計	KYOWA	—	2
サーボ型加速度計専用アンプ	Rion	LF-20	8
サーボ型加速度計専用同軸ケーブル	Rion	EC-40D	24
ロードセル	KYOWA	—	1
ひずみゲージ	KYOWA	—	4
ブリッジボックス	KYOWA	—	2



(a) ゲート上面



(b) ゲート側面

(c) ゲート下流面

図-2 計測機器の配置図

(3) 室生ダムクレストゲートの固有振動

室生ダムでの固有振動数測定のための現地確認試験を、平成23年12月16日に行った。この時の室生ダム貯水位は、EL293.69m（クレストゲート敷高より11.19m）で、クレストゲート天端水位 EL297.20m（クレストゲート敷高より14.7m）の約76%の水深であった。

鋼棒切断加振法により得られたデータを解析した結果、水流方向（上下流方向）においては、周波数が8.63Hzと13.63Hzで卓越した成分が確認され、これが本ゲートの固有振動であることが確認された（図-3）。なお、20Hz～50Hz間にも高い振動数は確認されているが、高い振動数の場合はスキンプレートに複数の節が生じ、トラニオンピン周りを振動させるような慣性効果が発生しな

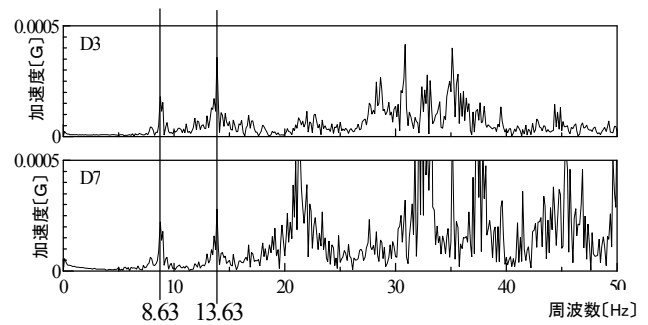


図-3 流水方向の固有振動

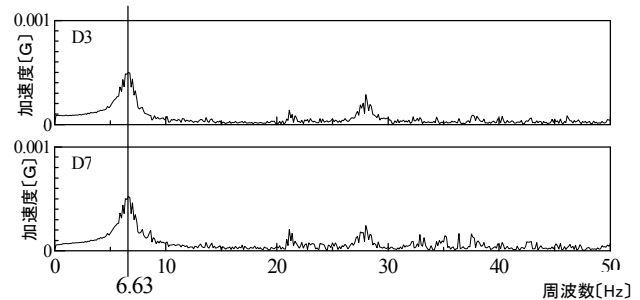


図-4 上下方向の固有振動

いため問題としない。

また、上下方向（天地方向）では、周波数が6.63Hzで卓越した成分が確認された（図-4）。以上の通り、室生ダムでは水流方向において2種類の固有振動数が確認された。なお、図-3, 4は縦軸に加速度（G）、横軸に周波数（Hz）をとり、それぞれ計測点D3（ゲートの中央上部）とD7（ゲート中央下部）の計測値を示す。

(4) 室生ダムクレストゲートの振動モード

ゲートの固有振動数は、①トラニオンピン周りの上下方向の固有振動数と、②スキンプレートの流水方向の固有振動数があり、①はワイヤロープのバネ作用による有効バネ定数により、②はスキンプレートの質量とトラス構造の脚柱のバネ定数により決まる。

本ゲートの場合、図-3、図-4の結果から、各固有振動の固有振動モードを分析し、振幅の最大と最小をそれぞれ示したものが図-5～7である。なお、振動の様子を分かりやすくするため、振幅は拡大して表示しており、●と■で振動の幅を示している。また○、□も同様に振動の幅を示しているが、計測機器を設置していないため推測値となる。

図-5は、6.63Hzでゲート全体がトラニオンピン周りに回転する固有振動モードで、モードMzとする。(a)図がゲートの中央断面における振動の様子であり、ゲート全体がトラニオンピン周りに剛体的に回転していることがよく分かる。(b)図がゲート下端部における水平面内の振動の様子で、スキンプレート下端は流水方向へのたわみは少ないが、左右方向（スパン方向）に大きく振動していることが分かる。これは、ゲートが上下に振

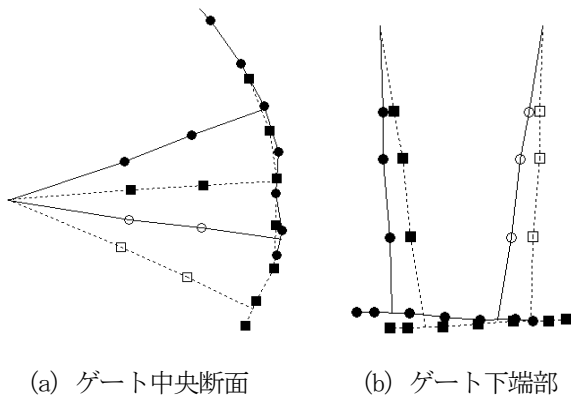


図-5 上下方向の固有振動モード Mz (周波数 6.63Hz)
最大で 2.96mm 変位

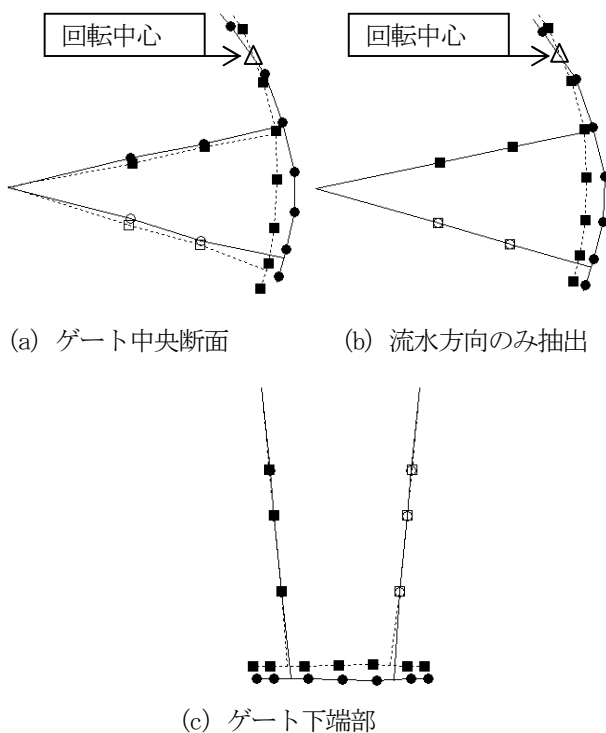


図-6 流水方向の固有振動モード Mx1 (周波数 8.63Hz)
最大で 0.69mm 変位

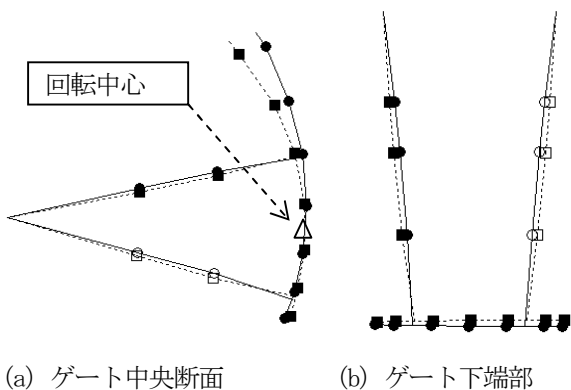


図-7 流水方向の固有振動モード Mx2
(周波数 13.63Hz) 最大で 0.87mm 変位

動している際に、スキンプレート下部の水平方向にあるワイヤロープが引っぱられたためと思われる。

図-6は、8.63Hzでスキンプレートが流水方向に低次の曲げ振動をする固有振動モードで、モード Mx1 とする。(a) 図を見ると、スキンプレートが流水方向に振動しているだけではなく、トラニオンピン周りにも振動している様子が分かる。これは、スキンプレートが流水方向に曲げられたことに伴い、脚柱が線形的にトラニオンピン周りに曲げられている。スキンプレートの流水方向の振動は低次の曲げ振動であるため、回転的な振動と捉えることができる。その回転高さを求めるため、流水方向振動だけを抽出した結果が (b) 図である。回転中心は、●で示した測定点の上から1つ目と2つ目の間にあり、ゲート下端からの高さに置き換えると11.95mである。(c) 図には、ゲート下端部の振動を示しており、スキンプレート下端が一様に振動していることが解る。

図-7 は、スキンプレートが流水方向に低次の曲げ振動をする 13.63Hz の固有振動モードで、モード Mx2 とする。(a) 図を見ると、スキンプレートが流水方向に振動している様子が分かる。また、モード Mx1 の場合と同様に、トラニオンピン周りにも振動はしているものの、その量はごく僅かである。これはモード Mx1 に比べて回転中心の位置が低く、スキンプレートが流水方向に曲げられたことによる効果も小さいため、効率的な連成が生じないことを表している。回転中心は、測定点の上から4つ目と5つ目の間にあり、ゲート下端からの高さに置き換えると 4.64m である。(b) 図のゲート下端部の振動は、微小の振幅で、水流方向に一様に振動していることが解る。

(5) 室生ダムクレストゲートの減衰比

ゲートの動的安定性を判断する上で、それぞれの固有振動モードの減衰比を特定しておくことが非常に重要である。減衰比は、半値幅法（ハーフパワー法）を用いて各固有振動から求めると、上下方向の固有振動 Mz で 0.012、流水方向の固有振動 Mx1 で 0.014、Mx2 で 0.003 という結果になり表-2 に整理した。

表-2 各モードにおける減衰比

モード名	周波数	振動モード	回転中心高さ	減衰比
Mz	6.63 Hz		—	0.012
Mx1	8.63 Hz		11.95 m	0.014
Mx2	13.63 Hz		4.64 m	0.003

(6) 室生ダムクレストゲートの動的安定性

ゲートの動的安定性を確認するためには、水流方向の（上下流方向）の曲げ固有振動数（ M_x ）と、トラニオン軸周りの上下方向（天地方向）の剛体固有振動数（ M_z ）の2種類の振動数比（ γ_{nw} ）に着目する必要がある。表-3で流水方向の曲げ振動 M_{x1} 、 M_{x2} とトラニオン軸周りの上下振動 M_z のそれぞれの振動数比（ γ_{nw} ）を求め、図-8に実験時の水位における動的安定図（実線：縦軸に減衰比（ ζ ）、横軸に振動数比（ γ_{nw} ））を示した。

また、最も条件が悪いとされるダム水位が高く、固有振動数が低くなる設計水位の振動数比を表-4に示す。なお、水位変動による影響はスキムプレートの流水方向曲げ振動 M_x のみに関係するため、トラニオンピン周りの剛体振動 M_z は実験時と同じとなる。設計水位の流水方向曲げ振動については、実験時の水中振動数比から空中での振動数を計算により求めた。

石井教授らの研究によれば、この振動数の比率（ γ_{nw} ）が1より低く、極めて1に近づく場合に、フラッター現象が発生し易い状況となる。そのときの動的不安定特性を示したものが図-8での実線の内側（不安定領域）に当たる。縦軸がその動的不安定を抑えるために必要な減衰比（ ζ ）を示しており、横軸は振動数比（ γ_{nw} ）である。

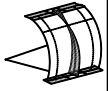
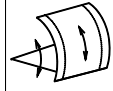
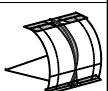
室生ダムクレストゲートの振動数比（ γ_{nw} ）は、表-3の通り 8.63Hz（ M_{x1} ）の場合が 1.30、13.63Hz（ M_{x2} ）の場合は 2.06 であった。いずれも 1.0 より十分大きく、減衰比 0.012 のデータ点を図-8にプロットしているように、動的不安定は発生しないと判断できる。また、動的に強安定の状態である。

さらに、条件が最も厳しい設計水位時においても、 M_{x1} と M_z の振動数比（ γ_{nw} ）は表-4の通り 1.17 であり実験時より 1.0 に近づくものの、依然として動的に安全であることが理論解析により証明されている。

以上のことから、室生ダムのクレストゲートは「全ての水深において動的に安定である」という結果が得られた。

仮に動的な不安定が確認された場合は、「ワイヤロープのバネ定数を低くし、トラニオンピン周りの周波数を低くする」等の対策を講じることで、振動数比（ γ_{nw} ）を1以上にし、ゲートの動的安定を比較的簡単に確保できる。なお、この対策は扉体の剛性を増加させる方法や扉体のリプレースより、はるかに安価で対応できる。

表-3 実験時の水位（11.19m）における振動数比

スキムプレートの流水方向曲げ振動			ゲート全体のトラニオンピンまわり剛体振動		振動数比
M_{x1}		8.63 Hz	M_z		1.30
M_{x2}		13.63 Hz			2.06

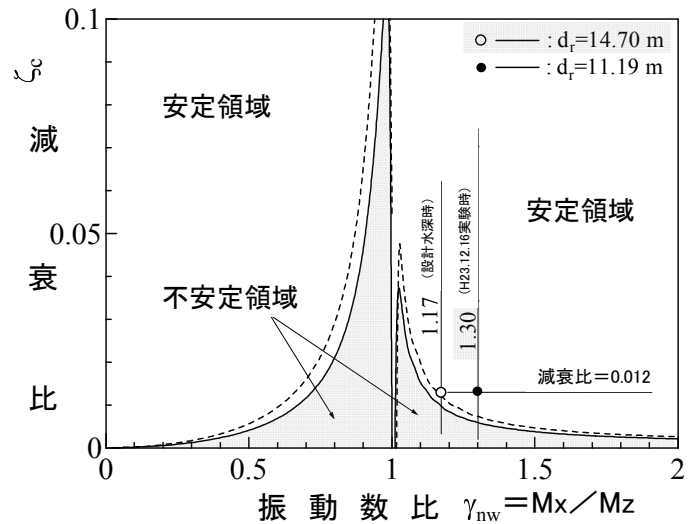
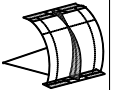
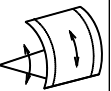
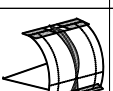


図-8 実験時の水位における動的安定図

表-4 設計水位（14.70m）における振動数比

スキムプレートの流水方向曲げ振動			ゲート全体のトラニオンピンまわり剛体振動		振動数比
M_{x1}		7.77Hz	M_z		1.17
M_{x2}		8.00Hz			1.21

4. 室生ダムクレストゲートの運用幅の拡張

(1) 室生ダム運用面の課題

室生ダムの放流設備としては、クレストゲートの他に利水放流設備としてホロージェットバルブが1基設置されており、さらには、利水放流バルブの直上流から分岐して管理用発電も行っている。これらの設備が整備や故障により使用出来ない期間は、下流河川の維持流量を確保するためにクレストゲートからの代替放流が必要となるが、室生ダムで決められている最小開度放流（15 cm）では必要量以上の放流を行うこととなる。その結果、実証実験までの間は以下の対応を実施する必要があり苦慮しているところであった。

- 代替放流された水は減勢池に一端貯留し、副ダムから下流に一定量を放流することから、減勢池の水位低下を確認しながら、補給操作を一日4～5回程度行う必要がある。
- 上記作業は昼夜問わず実施することから、深夜操作も行う必要がある。
- 副ダムには直径 1m の穴が1つ開いているが、この径では下流への放流量が多くなるため、放流量を減少させるための流量調整板と呼ばれる鋼板をその都度、設置・撤去して対応する必要がある。（図-9 参照）

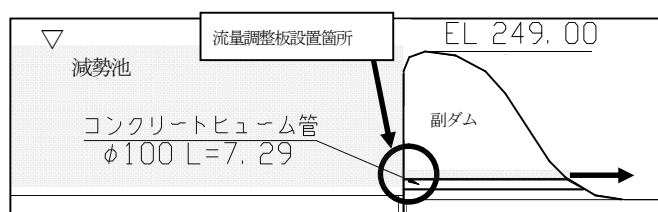


図-9 室生ダム減勢工縦断図

以上のことから、室生ダムクレストゲートは利水放流設備、または発電設備の代替放流機能を有することが確認され、緊急時の対応に対する手段がふえることで、弾力的な運用が期待できる。

5. 結論

(2) 微小開度放流の運用幅の拡張

クレストゲートに限らず、放流設備には操作可能な最小開度が設定されており、基本的にその開度以下での放流は行っていないのが現状である。そういった中で、室生ダムクレストゲートでも従来から最小開度は15cmと定められており、それ以下での通常の運用は行っていない。

微小開度放流時には、ゲート下端リップ部での流れのはく離・再付着等による比較的高い周波数の自励振動を問題にする場合が多い。これについては、2章(2)で述べたように実放流試験を実施することで安全性を確認しているところである。さらには、いかなる開度においてもフラッター現象が発生しないkとが、今回の解析結果から示されている。それらを受けて、平成24年3月に利水放流設備の整備による代替放流のため、試験的にゲート開度を2cmに設定して放流を実施した。フラッター現象はもちろん、ゲート下端リップ部ではく離等による振動も全く確認されず慣例により定められた最小開度以下での放流であっても、何ら支障がないことが確認できた。

今回の手法はラジアルゲートの本質的な動的不安定性を判別する簡易で有効なものであり、室生ダムと同様な目的を持つ他ダムのクレストラジアルゲートにおいても設備の安全性を確認し、運用幅を拡張することが望まれる。

謝辞：今回、この論文を作成するにあたり、多大なるご尽力をいただいた石井教授、阿南准教授をはじめ、関係する全ての方々に、心より感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 室生ダムラジアルゲート振動調査報告書 平成10年2月 株式会社 田原製作所
- 2) 室生ダムラジアルゲートの振動特性に関する調査報告書 平成24年2月23日 大阪電気通信大学 工学部機械工学科 教授・石井徳章、足利工業大学 工学部創生工学科 准教授・阿南景子