

天ヶ瀬ダムゲート放流に伴う 低周波音対策について

霜田 晴行¹・唐松 雅司²

近畿地方整備局 淀川ダム統合管理事務所 管理課 (〒573-0166大阪府枚方市山田池北町10番1号) .

近畿地方整備局 淀川ダム統合管理事務所 管理課 (〒573-0166大阪府枚方市山田池北町10番1号) .

天ヶ瀬ダムは1964年に完成したアーチ式の多目的ダムであり、人口約19万人の宇治市中心部から2kmあまりという箇所に位置している。ダム上流には琵琶湖があり瀬田川洗堰の放流により洪水後等の琵琶湖水位低減のため、ゲート放流を長期間行うことが多いというダム操作上の特徴がある。

建設後、ダム下流の左岸地区から主ゲート放流時に発生する低周波音に関する苦情に対応した経緯があるが、近年になって、右岸地区からも低周波音による建物振動等の苦情が寄せられるようになり、2006年より当該地区を対象に低周波音の調査を行っている。

本論文では、これまで蓄積した調査結果を分析し、天ヶ瀬ダムの放流に伴い発生する低周波音の特性について整理するとともに、具体的な低周波音の低減対策として、ハード、ソフトの両面より検討した結果について報告するものである。

キーワード ダム放流, 低周波音, 放流パターン

1. はじめに

天ヶ瀬ダムは、淀川水系宇治川に1964年に完成した淀川水系で最も古いアーチ式の多目的ダムであるが、京都府宇治市中心部から2kmあまりの都市型ダムであるという立地条件や、上流琵琶湖・瀬田川洗堰の後期放流により洪水後等の主ゲートからの放流が長期間に及ぶことが多いというダム操作上の特徴がある。

ダムのゲート放流時に低周波音が発生していることが確認されており、管理開始直後5年頃より左岸地区から苦情が寄せられ、最近になって右岸地区からも苦情が寄せられるようになり、2006年以降低周波音の調査を行っている。

本論文では、既往資料を整理し、音源の予測、放流量と音圧レベルの関係及び距離減衰傾向等の天ヶ瀬ダムにおいて発生する低周波音の特性を明確にした。次に、天ヶ瀬ダムを縮尺模型で再現し、水理模型実験により具体的な低周波音の低減対策としてハード、ソフトの両面より検討し、有効と判断できる案を選定した。

2. 天ヶ瀬ダムで発生する低周波音の特性

既往資料を整理し、天ヶ瀬ダムで発生する低周波音の特性を分析した。

(1) 音源の予測

既往資料(2012.2天ヶ瀬ダム低周波音測定調査業務)において、減勢池の左右岸沿いに下流に向かって音圧レベルが計測され、音圧レベルは、距離減衰を示さず、ほ

ぼ一定の値を示す結果が得られている。これより、音源のタイプは、面音源と予測できた。

加振源は、水脈の落下点及び落下水脈の振動の他、減勢池内の水面変動を含めた副ダムまでの減勢地内全域と仮定し、副ダムまでの長さを短くすることで、卓越周波数に変化があるかどうかを調査した。結果、図-1に示すように副ダムを仕切ることによって音圧レベルが低下することが確認できた。

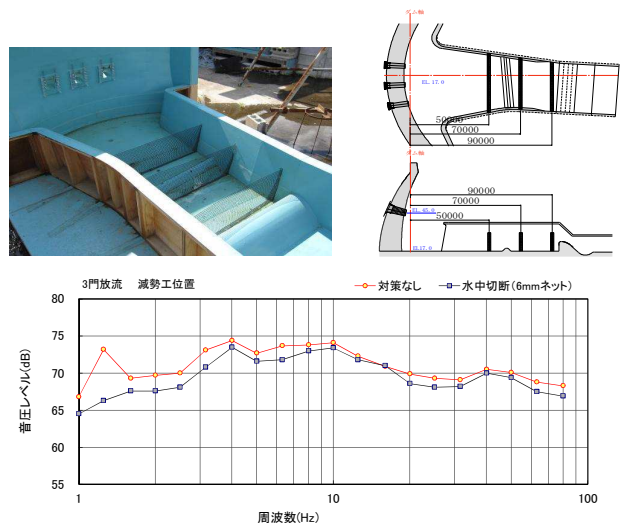


図-1 対策: 水中切断(6mmネット) 3門放流 計測位置: 減勢工位置 ｽﾌﾟﾙ外図.

以上より、低周波音が発生する加振源は、図-2に示す3点と考えられた。

- ・落下点
落下に伴う運動エネルギーが減勢地に入流する際、流速が減勢し、位置エネルギーの他に音と熱のエネルギーへの変換。
- ・減勢池の水面変動または共鳴
減勢池全体の水面変動、または共鳴。
- ・落下水脈の振動
3か所から放出される水脈の振動。

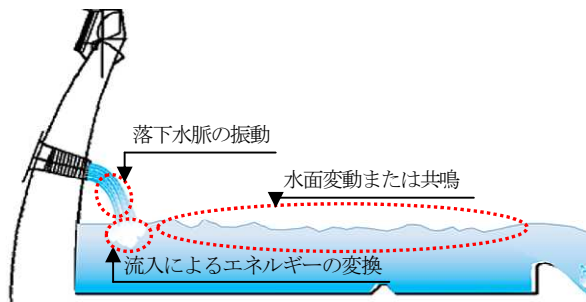


図-2 想定される低周波音の発生位置図

(2) 放流量と低周波音圧レベルの関係

過去4年の放流量と音圧レベルの関係は、図-3となる。この放流量と音圧レベルの関係を、流入エネルギーと音響エネルギーに変換すると図4に示すものとなり、測定できた放流量の範囲では比例関係が成立し、放流量と低周波音圧レベルの関係は、1対1の関係が成立することが確認できた。

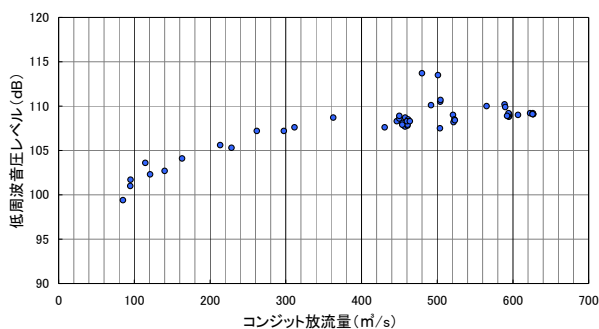


図-3 放流量と音圧レベルの関係

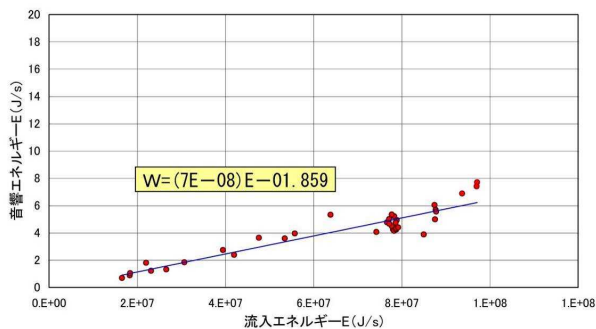


図-4 流入エネルギーと音響エネルギーの関係

(3) 周波数特性

ダムの減勢池（音源近傍）で調査した低周波音を1/3オクターブバンドで整理すると、図-5に示すものとなる。放流量約100m³/s時：10～16Hz、約200m³/s時：6.3～12.5Hz、約500m³/s時：5～8Hzが卓越することが確認できた。

これより、天ヶ瀬ダムで発生する低周波音の周波数特性は、放流量の増加に伴い、卓越周波数が低い周波数帯に移行し、かつ音圧レベルも高くなる傾向を示すものと考えられる。

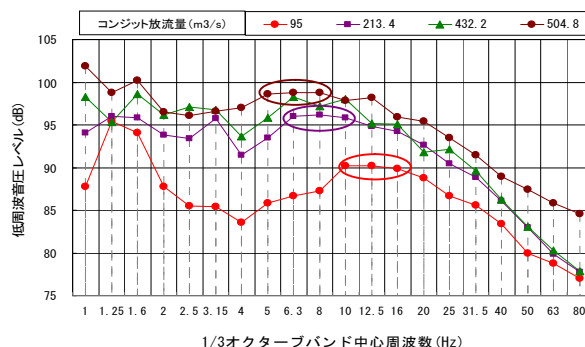


図-5 音源近傍での周波数特性

(4) 距離減衰の傾向

既往調査データより、音源タイプを面音源とし、音源からの距離と音圧レベルの関係を整理すると距離と音圧レベルの関係（放流量520 m³/s）は、図-6に示すように、理論上の距離減衰線（青線）とほぼ合致し、距離減衰は、理論上おり球体状に拡散し、音圧レベルの減衰は対数（ $-20\text{Log}(\text{距離})$ ）となることが確認できた。

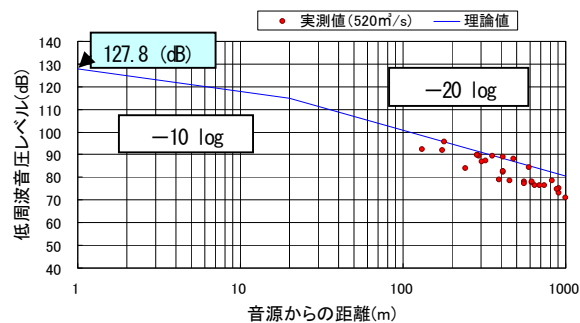


図-6 コンジット放流量520m³/s時の距離減衰特性

(5) ゲート操作による低周波音発生の違い

2010年・2011年に同一条件下で主ゲートの運用を3門運用、2門運用の場合での周波数特性を比較したものは図-7・図-8に示すものとなり、音圧レベルでみた場合、3門運用・2門運用での差はみられないのに対し、周波数特性については、4～10Hzの周波数帯のみ2～3dBほど2門運用時の音圧レベルが低減することが確認できた。

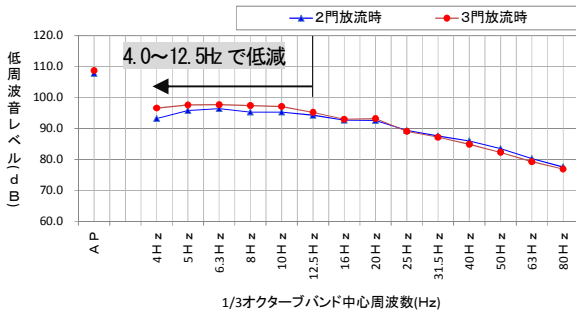


図-7 2010年実施の現地調査分析結果

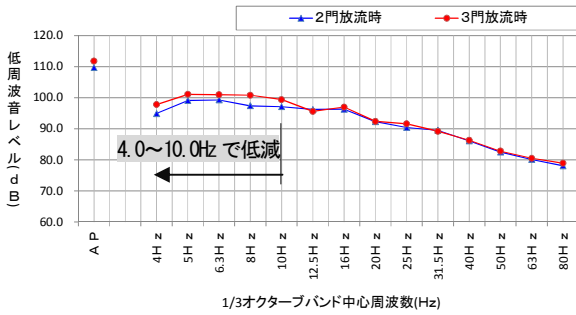


図-8 2011年度実施の現地調査分析結果

(6) がたつき閾値

既往検討より、天ヶ瀬ダム下流の住宅の建具のがたつき閾値は、図-9に示すものとなる。

これより、環境省のがたつき参照値との比較も含め、天ヶ瀬ダム下流地域で重要となる周波数は、超低周波音の中でも特に6.3Hzが重要となる。

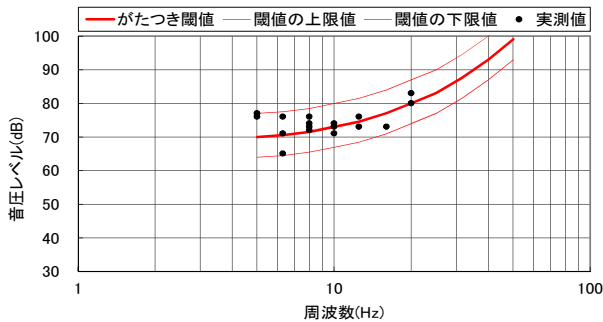


図-9 がたつき閾値

3. 対策工の考え方と対策案

天ヶ瀬ダムの音響特性を踏まえ、低周波音対策を行うに際し、加振源毎に考え方を整理すると以下となる。

①落下流の流入地点で発生する音

落下流により発生する流入エネルギーが支配的であるため、音響エネルギーへの変換効率を下げ、卓越周波数を変化させることが基本となる。従って、対策は、減勢池内の流れ場を変化させるものとなる。(水理的対策)

②減勢池内の共鳴により発生する音

減勢池内の共鳴は、減勢池内の水面変動と側壁間の空洞部の構造に支配されるもので、物理的に音響エネルギーを下げる、または、周波数帯を移行させることと発生した音を防止する方法が基本となる。従って、対策は、音響的に空気振動を抑制、移行させるか物理的に防止する方法となる。(音響的対策)

③水脈振動により発生する音

水脈の振動により発生する音は、水脈の形状に支配されるため、水脈の形状を変化させ、卓越周波数を変化させることが基本となる。

以上を踏まえ、具体的な対策案は以下の考え方で設定した。

(1) ゲート出口部でのハード対策

基本的に、流入エネルギーに起因する音圧レベルは低減することができない。しかし、貯水位の上昇に伴い音圧レベルが高くなる要因は、流入エネルギー(初速)のみならず落水脈の形状も一因と考えられる。落水脈の形状は、水膜振動のように落水脈が振動し、落下時のエネルギー変換に伴う音とは別の音が発生するものと考えられる。一つの仮説ではあるが、連行空気量が音圧レベルの支配要因と想定すると、水脈の空気との接触面積も関連があると考えられるため、落水脈の形状が極めて重要となる。

そこで、図-10に示す落水脈の膜状の分散を収束(空気との接触面積を減らす)する対策とした。

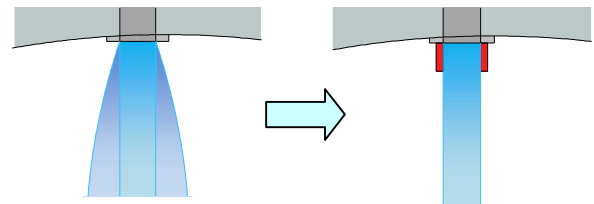


図-10 対策の考え方のイメージ図
(分散を抑制し、水束とする案)

(2) 減勢施設周辺でのハード対策

音源(加振源)の音を直接低減させるものではなく、減勢施設周辺で発生した周波数に対し逆位相の周波数を発生させ、相殺することにより音圧レベルを低減させるものである。対象周波数の1/4の長さのブランチ管(空洞)を設ける案とした。

(3) 減勢池内でのハード対策

流速減勢に影響を与えない対策として、ヘルムホルツ共鳴でみられるように落下流の背面の体積が低周波音の発生要因と考え、体積を減少させることで卓越周波数を高くすることを想定した。

(4) ゲート運用方法によるソフト対策

3門の放流比率を変化させる。

4. 検討方法

天ヶ瀬ダムを縮尺1/50の模型で再現し、音響（水理）実験により検討を行った。

本実験の相似として周波数は、模型の 1/50 倍となる。音圧レベルは、音源が複数あるため縮尺倍率が不明となり、現地換算ができないが、音圧レベルが対数値のため対策の有無における相対的な差は、模型と現地が同一となることに着目し検討を進めた。

5. ハードの対策

(1) ゲート出口部に壁を設ける案

ゲート出口部に流水の分散を抑制する壁となるウイングを設ける案について検討した結果、図-11に示すように6.3Hzを含め、超低周波音の低減効果が得られた。

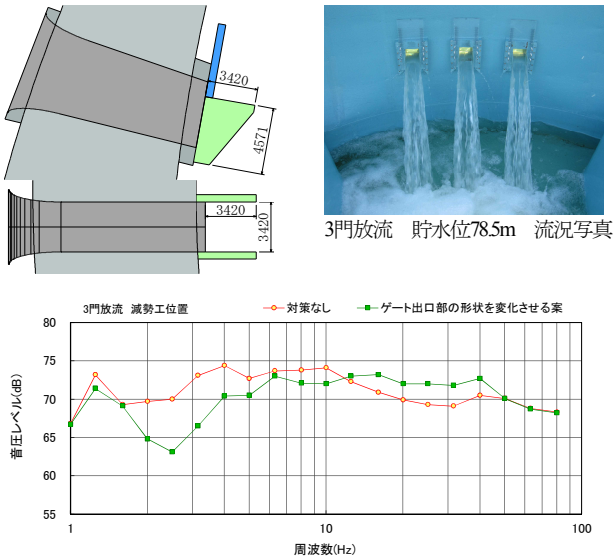


図-11 出口部にウイングを設置する案

(2) ゲート出口部にスロープを設ける案

中央ゲート出口のみにスロープを設け、落下水脈をずらし、水膜の合体を抑制する案について検討した結果、図-12に示すように6.3Hzについては低減効果が得られるが、落下流が拡散し、流況も安定しない。

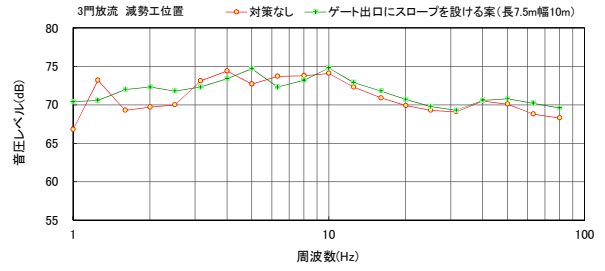
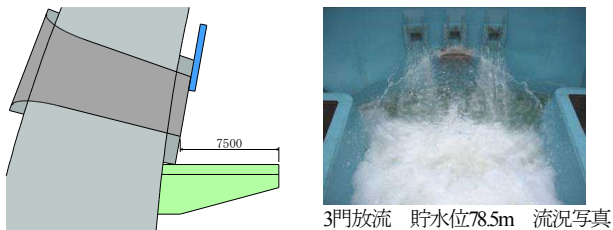


図-12 ゲート出口部にスロープを設ける案

(3) 減勢地周辺にブランチ管を設置する案

減勢池周辺に対象周波数の逆位相を発生させるブランチ管を設置する案について検討した結果、図-13に示すように5Hz, 6.3Hzで効果が得られた。

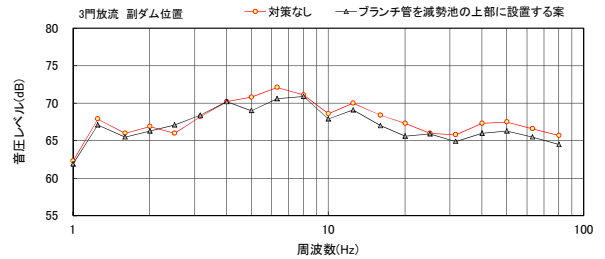
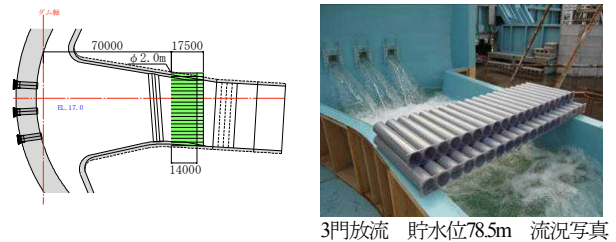


図-13 減勢地周辺にブランチ管を設置する案

(4) 減勢池内の落下水脈背面の体積を変化させる案

減勢池内の落下水脈背面の体積を縮小し、ヘルムホルツ共鳴を抑制する対策について検討した結果、図-14に示すように効果がないことが明確になった。

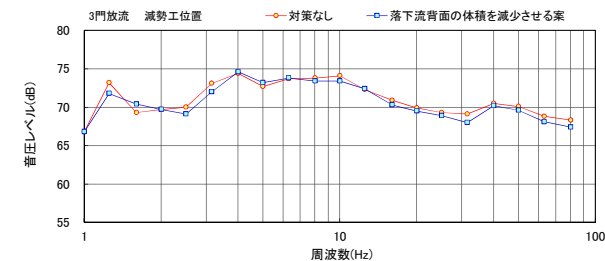
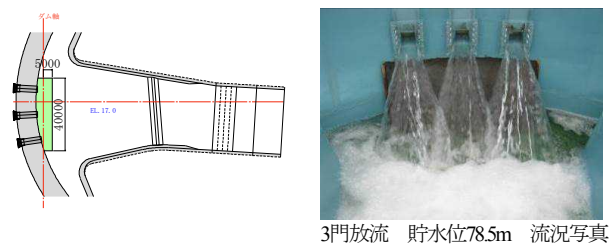


図-14 減勢池内の落下水脈背面の体積を変化させる案

(5) 最適なハード対策案

出口部で分散し広がる落下流を水束に集約し、放流することで低周波音が抑制できる。方法論としては、ゲートにウィングを設置し、分散を制御する方法が効果的である。

ブランチ管については、流れ方向に逆向きに設置した場合効果的であるが、流れに直角に設置した場合、効果は低下する。

落下流背面の体積を減少させる方法は、明確な効果がない。

以上より、ゲート出口部に流水の分散を抑制する壁となるウイングを設ける案と流れ方向に逆向き（減勢池内）にブランチ管を設ける方法が有効であると考えられるが、ダム堤体への応力や費用面の課題が残る。

6. ソフトの対策

(1) 検討結果

放流比率は、現地調査の結果、3門放流と2門放流の比較において2門放流の方が低周波音の低減効果が高いことが現地調査結果より明らかになっている。以上を踏まえ、3門の両サイド2門の放流量は同じ量を放流することを基本とし、表-1に示す放流比率について検討した。

結果、3門設けてある主ゲートの放流比率を変化させ、発生する周波数特性を調査した。対象とする放流量毎の調査の結果、3門の放流量を一定（放流比率1:1:1）とした場合を基準に、6.3Hzの音圧レベルを比較した。図-15から図-18に対象とする放流量毎の放流比率と音圧レベルの関係を示す。全ての放流量で左右岸ゲートの放流比率1に対し、中央ゲートの放流比率が1以下の場合、音圧レベルは低下し、逆に1以上で音圧レベルが高くなる傾向が確認できた。

表-1 対象とする放流比率

貯水位	放流比率		
	左岸	中央	右岸
EL.78.5m	1	0	1
	1	0.25	1
	1	0.5	1
	1	0.75	1
	1	1	1
	1	1.25	1
	1	1.5	1
	1	1.75	1
	1	2	1

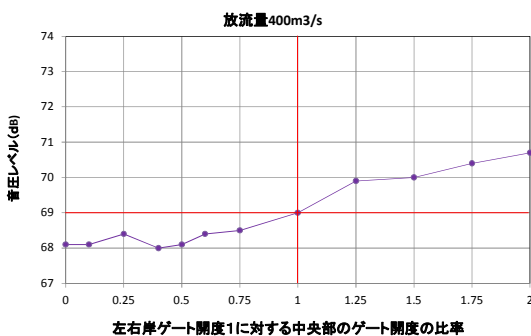


図-15 放流比率と音圧レベルの関係 (400m³/s)

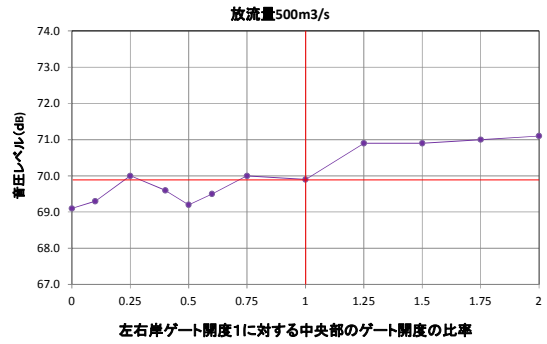


図-16 放流比率と音圧レベルの関係 (500m³/s)

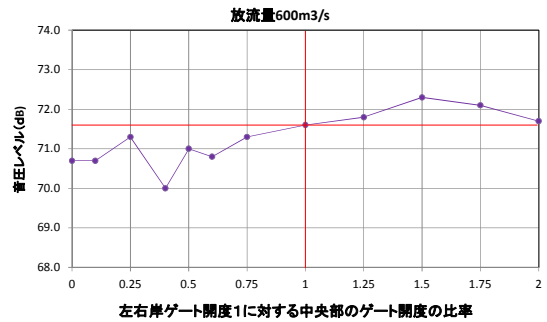


図-17 放流比率と音圧レベルの関係 (600m³/s)

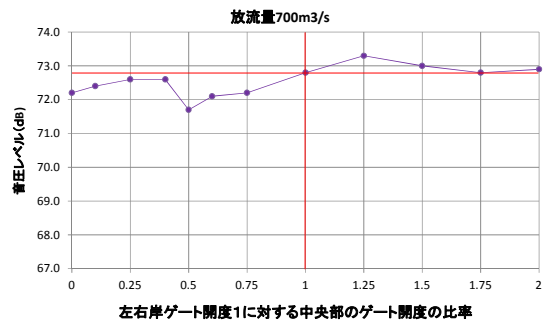


図-18 放流比率と音圧レベルの関係 (700m³/s)

効果が確認できた放流比率1:0:1から1:1:1までを対象に6.3Hzの音圧レベルを比較した。各流量で表-2の放流比率が最適と考えられる。

表-2 対象とする放流比率

放流量	放流比率
400m³/s	1 : 0.4 : 1 (2.5 : 1 : 2.5)
500m³/s	1 : 0 : 1 (2門放流)
600m³/s	1 : 0.4 : 1 (2.5 : 1 : 2.5)
700m³/s	1 : 0.5 : 1 (2 : 1 : 2)

図-19に現状の1:1:1の音圧レベルと表-2で設定した放流比率での6.3Hz音圧レベルを比較したものを示す。これより、1/3オクターブバンドレベルで1dB程度の低減が得られることがわかる。

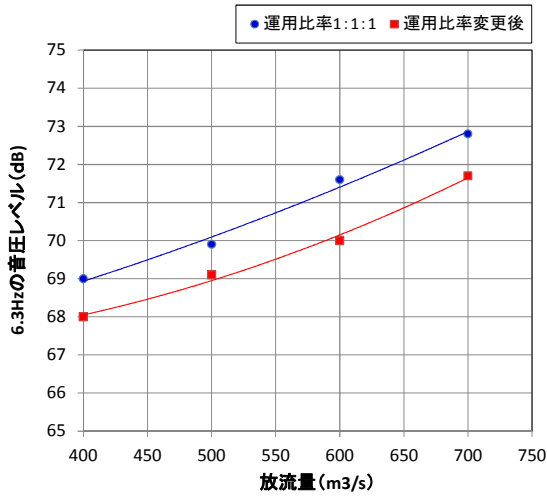


図-19 放流量と6.3Hz音圧レベルの関係

(2) ゲート運用方法の設定

6.3Hzに着目した場合、400m³/sから760m³/sの放流量における3門のゲートの最適放流比率は表-3に示すとおりとなる。低周波音の低減と具体的な操作を考えた場合、放流量毎に微調整は非現実的なため具体的な3門の放流量は、放流比率1:0.5:1 (2:1:2) が低周波音抑制として最適と考えられる。

表-3 放流量別の最適な放流比率の関係

放流量 (m³/s)	放流比率			放流量		
	左岸ゲート	中央ゲート	右岸ゲート	左岸ゲート	中央ゲート	右岸ゲート
400	1	0.4	1	167	67	167
410	1	0.4	1	171	68	171
420	1	0.4	1	175	70	175
430	1	0.4	1	179	72	179
440	1	0.4	1	183	73	183
450	1	0.4	1	188	75	188
460	1	0	1	230	0	230
470	1	0	1	235	0	235
480	1	0	1	240	0	240
490	1	0	1	245	0	245
500	1	0	1	250	0	250
510	1	0	1	255	0	255
520	1	0	1	260	0	260
530	1	0	1	265	0	265
540	1	0	1	270	0	270
550	1	0	1	275	0	275
560	1	0.4	1	233	93	233
570	1	0.4	1	238	95	238
580	1	0.4	1	242	97	242
590	1	0.4	1	246	98	246
600	1	0.4	1	250	100	250
610	1	0.4	1	254	102	254
620	1	0.4	1	258	103	258
630	1	0.4	1	263	105	263
640	1	0.4	1	267	107	267
650	1	0.4	1	271	108	271
660	1	0.5	1	264	132	264
670	1	0.5	1	268	134	268
680	1	0.5	1	272	136	272
690	1	0.5	1	276	138	276
700	1	0.5	1	280	140	280
710	1	0.5	1	284	142	284
720	1	0.5	1	288	144	288
730	1	0.5	1	292	146	292
740	1	0.5	1	296	148	296
750	1	0.5	1	300	150	300
760	1	0.5	1	304	152	304

7. まとめ

(1) ハード対策

水理模型実験において、ゲート出口部、減勢施設周辺、減勢池内の加振源毎にハード対策の検討を行った結果、以下の事項が確認された。

- ゲート出口部で分散し広がる落下流を水束に集約し、放流することで低周波音が抑制できる。
- 中央の出口部にスロープを設置し、3門から放流される落下流を分離させる方法は、スロープ部で落下流の形態が水膜に近い状態を呈するため不適である。
- ブランチ管については、流れ方向に逆向きに設置した場合効果的である。
- 落下流背面の体積を減少させる方法は、明確な効果がない。

(2) ソフト対策（放流量別運用方法）

水理模型実験において、3門設けてある主ゲートの放流比率を変化させ、発生する周波数特性を調査した結果、以下の事項が確認された。

- 対象放流量(400m³/s, 500m³/s, 600m³/s, 700m³/s) 全てで左右岸放流ゲートの放流比率1に対し、中央ゲートの放流比率が1以下の場合、音圧レベルは低下し、逆に1以上で音圧レベルが高くなる傾向が確認できた。
- 効果が確認できた放流比率1:0:1から1:1:1までを対象に6.3Hzの音圧レベルを比較した結果、各放流量で放流比率1:0:1から1:0.5:1が最適と考えられる。
- 低周波音として5~10Hzの低減と具体的な操作を考えた場合、放流量毎に微調整は非現実的なため具体的な3門の放流量は、放流比率1:0.5:1 (2:1:2) が低周波音抑制として最適と考えられる。

7. おわりに

今回の検証では、ゲート出口部に流水の分散を抑制する壁となるウイングを設ける方法と流れ方向に逆向き（減勢池内）にブランチ管を設ける方法により、ハード対策で低周波音を抑制できること。さらに、ソフト対策として、400m³/sから700m³/sの放流量の場合、主ゲートの3門放流のパターンの変更（1:1:1⇒1:0.5:1）といった運用面で低周波レベルが低減することが水理模型実験より確認された。

今回の調査結果をもとに、3門放流のパターンの変更（1:1:1⇒1:0.5:1）時のデータを蓄積し、引き続き、主ゲートの放流量、放流パターンと低周波音レベルの関係性について検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 関谷明, 他: ダムの放流時に発生する超低周波音の低減対策, 河川技術論文集 Vol122, 2016. 6