

ダムの放流時に発生する超低周波音の低減対策

COUNTERMEASURE AGAINST ULTRA-LOW FREQUENCY SOUND GENERATED BY DAM DISCHARGE

関谷 明¹・廣瀬秀樹¹
新川良治²・餅原保夫²・藤川紘邦²
Akira SEKIYA, Hideki HIROSE

Ryouji SHINKAWA, Yasuo MOCHIHARA and Hirokuni HUIKAWA

¹ 正会員 建設技術研究所 水理センター (〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪 1047-27)

² 正会員 近畿地方整備局 淀川ダム統合管理事務所 (〒573-0166 大阪府枚方市山田池北町 10-1)

Ultra-low frequency sound could be generated by fall flow which is discharged from dam. In order to reduce ultra-low frequency sound, which can be neither be insulated nor absorbed unlike audible sound, countermeasure to control sources is indispensable. In Amagase Dam, which has 3 conduit gates, has a problem of ultra-low frequency sound generated by fall flow during the flood control operation.

This study proposed adjustment of discharge ratio of 3 gates as countermeasure, focusing on unit width discharge and form of water flow from 3 conduit gates. This report presents the outcome of this study because the effectiveness of the countermeasure is confirmed by the site observation in the Dam.

Key Words : Ultra-low frequency sound, Dam noise, Countermeasure against Ultra-low frequency sound, Vibration of water flow, Hydraulic and sound test

1. はじめに

ダムの放流形態が落下流の場合、低周波音（80Hz以下の周波数帯）が発生する。この中で超低周波音（20Hz以下）は、建具のがたつき等を発生させるため、ダム周辺住民から対策を要望されているケースがみられる。

低周波音は、可聴音と違い防音壁のような音の伝播過程における遮音、吸音対策ができないため、音源近傍での対策が不可欠となる。

落下流により発生する低周波音は、落下点で流入エネルギーが音響エネルギーに変換され発生するものと落下水脈が主たる要因と考えられ、単位幅流量と落下水脈の形態に支配されると考えられる。

これに対し、落下水自体の振動（水膜振動）については竹林、角等^{1), 2), 3), 4)}や関谷等^{5), 6), 7), 8)}が研究を行っているが、ダムの放流施設の場合、施設の規模が大きい事等により、具体的なハードの対策の実施事例は多くない。

天ヶ瀬ダムは、3門のコンジットゲートで構成され、落下流が形成される施設であり、低周波音低減を求められている施設である。

これより、本報告では、天ヶ瀬ダムを対象に超低周波音の低減対策を行った事例を報告する。

天ヶ瀬ダムでは、既往調査の結果⁹⁾、同一流量を2門で放流した場合と3門で放流した場合で低周波音

に差が生じることが明確になっている。このことは、単位幅流量（3門での流量比率が1:1:1が最少値）のみならず、3門からの放流水が形成する水脈の形態が支配要因となると予測できた。

これより、対策として3門の放流比率を変化させることで単位幅流量と水脈の形態が変化し、超低周波音の低減が図れると考えた。

検討では、現地実験により、低減が必要となる対象周波数を設定し、模型実験により、対象周波数の低減効果の高い放流比率を流量毎に設定した。次に実験で設定した放流比率で現地運用を行い、効果検証を行った。

2. 天ヶ瀬ダムの概要

天ヶ瀬ダムは、昭和39年竣工の多目的ダムで、計画高水流量 1360m³/s を 900m³/s に調節し、宇治川の氾濫防止を目的とした施設である。

構造は、重力式アーチダムで3門のコンジットゲート（1門の最大放流量 350m³/s（幅 3.42m×高さ 4.56m：スライドゲート：人為操作可能））と4門のクレストゲート（放流能力 680m³/s）で構成される¹⁰⁾。図-1に運用時の貯水位を示す¹⁰⁾。

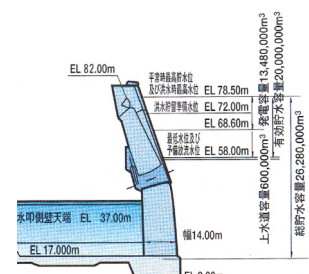


図-1 天ヶ瀬ダム概要図

3. 検討概要

(1) 検討の流れ

本研究では、天ヶ瀬ダムを縮尺模型で再現し、音響（水理）実験を行い、低周波音低減効果が高くなる3門あるゲートからの放流量の比率を選定した。次に、現地で出水の際、選定した放流比率で運用し、低周波音の低減効果の検証を行った。実運用時の貯水位と放流量は、実験での水理条件と異なったため、現地の水理条件を再度実験で再現し、実験の現地への再現性が得られることを検証した。

(2) 実験概要

a) 実験模型の規模

実験模型の再現範囲は、ダム本体から副ダムまでとした。模型縮尺は水の粘性、実験施設の流量条件より1/50とした。コンジットゲートについても3次元模型で再現した。模型写真を図-2に示す。

b) 現地と模型での音の相似

実験で再現される音の周波数は、模型縮尺に応じ相似が成立する。模型縮尺が1/nの場合、波長（m）は模型で現地の1/n倍となるが、音速は、現地と模型で同じ値となる。これより、周波数（＝波長/音速）は、模型でn倍となる¹¹⁾。

音圧レベルは、音源が複数あるため、周波数毎、同一の縮尺倍率で現地換算ができない。しかし、模型上で得られた音圧レベルの差は、(1)式に示すように縮尺倍率Xが不明でも、音圧レベルが対数値のため模型の差に縮尺Xが影響せず、現地と同一となる。つまり、実験上での相対的な音圧レベルの差を調査することで、効果予測が可能となる^{12),13)}。

$$\Delta L = Lr_1 - Lr_2 = 10 \log(XLm_1/XLm_2) \quad (1)$$

ΔL ：音圧レベルの低減量（dB）

Lr_1 ：現地の対策前の音圧レベル（dB）

Lr_2 ：現地の対策後の音圧レベル（dB）

Lm_1 ：模型の対策前の音の強さ（W/m²）

Lm_2 ：模型の対策後の音の強さ（W/m²）

X：縮率

c) 検討条件

①放流量の設定

既往調査（H18, H19, H22, H23の計測データ）で得られたコンジット放流量とダム直下で計測した音圧レベルの関係を整理すると図-3に示すものとなり、放流量の増加に伴い、音圧レベルも増加傾向を

示す。一方、約500m³/s以上放流した際に建具のがたつきが発生したという報告がある。

②貯水位の設定

貯水位と低周波音圧レベルの関係は、以下の条件で実験を行った結果、図-4に示すものとなり、洪水時最高水位EL78.5mが最も超低周波音圧レベルが高くなる。これより、放流比率の検討では、貯水位をEL78.5mとした。

・放流量 700m³/s；放流比率 1：1：1

・貯水位 EL68.5m～EL78.5m

現地計測結果の検証実験では、現地での運用時の貯水位EL68.7mを模型で再現した。

③3門の放流量の比率の設定

3門の放流量の比率は、落下水脈をずらすことを目的としたため、左右の放流量は同一流量とし、左右の放流比率1に対し、中央の放流量の比率を0～2まで0.25ピッチで変化させた。全放流量に対し、3門の放流量と3門の放流量の比率は、表1に示すものとした。



図-2 実験模型写真（EL.78.5 1：1：1放流）

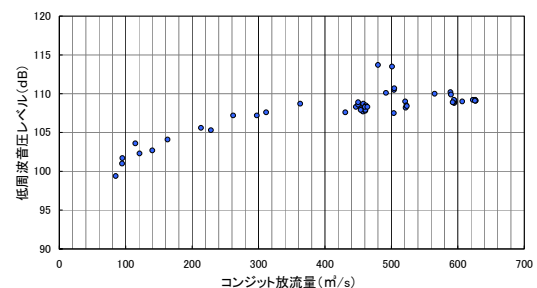


図-3 現地での放流量と低周波音圧レベルの関係

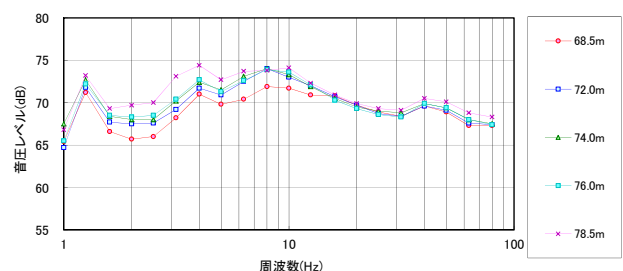


図-4 貯水位と音圧レベルの関係

表-1 実験で対象とした放流比率

貯水位	放流比率			放流量400m ³ /s			放流量500m ³ /s			放流量600m ³ /s			放流量700m ³ /s		
	左岸	中央	右岸	左岸	中央	右岸	左岸	中央	右岸	左岸	中央	右岸	左岸	中央	右岸
EL.78.5m	1	0	1	200.0	0.0	200.0	250.0	0.0	250.0	300.0	0.0	300.0	350.0	0.0	350.0
	1	0.25	1	177.8	44.4	177.8	222.2	55.6	222.2	266.7	66.7	266.7	311.1	77.8	311.1
	1	0.5	1	160.0	80.0	160.0	200.0	100.0	200.0	240.0	120.0	240.0	280.0	140.0	280.0
	1	0.75	1	145.5	109.1	145.5	181.8	136.4	181.8	218.2	163.6	218.2	254.5	190.9	254.5
	1	1	1	133.3	133.3	133.3	166.7	166.7	166.7	200.0	200.0	200.0	233.3	233.3	233.3
	1	1.25	1	123.1	153.8	123.1	153.8	192.3	153.8	184.6	230.8	184.6	215.4	269.2	215.4
	1	1.5	1	114.3	171.4	114.3	142.9	214.3	142.9	171.4	257.1	171.4	200.0	300.0	200.0
	1	1.75	1	106.7	186.7	106.7	133.3	233.3	133.3	160.0	280.0	160.0	186.7	326.7	186.7
	1	2	1	100.0	200.0	100.0	125.0	250.0	125.0	150.0	300.0	150.0	175.0	350.0	175.0

④対象周波数の設定

天ヶ瀬ダム下流地域を対象に「トラック積載型の低周波音発生装置（小林理学研究所所有）」¹⁴⁾を用いた各住宅の建具のがたつき閾値を調査した。結果、図-5 に示す環境省のがたつき参照値¹⁵⁾に対し、6.3Hz が特に低い値を示した。

一方、ダムからの放流時に発生する周波数特性は、図-6 に示すように 10Hz 以下ではほぼ一定値（若干、6.3Hz が高い値）、10Hz 以上で低下傾向を示す。

これより、低減させる対象周波数は、5～10Hz とし、特に、6.3Hz に着目した。

d) 計測方法

実験計測地点は、縦断方向で減勢工の位置の水路中央とし、高さは、側壁高+1.2m 地点（現地値）とした。

計測機材は、低周波騒音計（リオン NA18）と精密騒音計（リオン NA28）を用いた。

(3) 現地調査の概要

現地調査は、平成 27 年 6 月 15 日と 7 月 19 日の出水時に実施した。対象に図-7 に示すダム直下と河道左岸で最もダムに近い住宅の前で音圧レベルを調査した。

調査時の水理条件は、以下のとおりである。

- ・貯水位 68.7m；放流量 406.5m³/s
放流比率 1：1：1
- ・貯水位 68.7m；放流量 663m³/s
放流比率 2：1：2

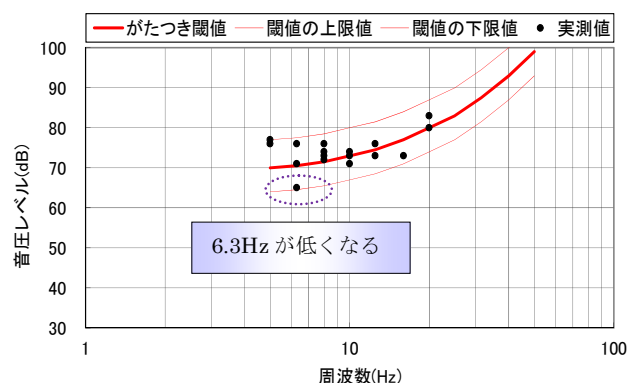


図-5 天ヶ瀬ダム下流住宅のがたつき閾値

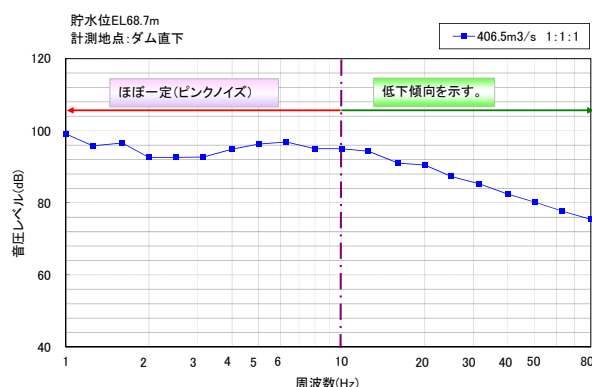


図-6 天ヶ瀬ダム直下での周波数特性

4. 実験での放流比率と周波数特性の関係

(1) 実験での放流比率と周波数特性の傾向

400m³/s～700m³/s 放流時の周波数特性を 1/3 オクターブバンドレベルで示したものが、図-8～11 に示すものとなる。これより、5～10Hz の低周波音圧レベルをみた場合、通常放流（比率 1：1：1）に対し、以下の関係が明確になった。

- ・中央比率 1.0 以下の場合：音圧レベル低下傾向。
- ・中央比率 1.0 以上の場合：音圧レベル上昇傾向。

※上記の中央比率は、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である。

(2) 放流比率と 6.3Hz の音圧レベルの関係

6.3Hz に着目し、各放流比率での 6.3Hz の音圧レベルを示したものが図-12 となる。図の横軸は、左右岸放流ゲートの放流比率 1 に対しての中央ゲートの放流比率を示したものである。

これより、6.3Hz については、通常放流（1：1：1）に対し、以下の放流比率で高い低減効果（約 1dB）が得られた。

- ・400m³/s 1：0.5：1 → 低減量 Δ1.0dB
- ・500m³/s 1：0.5：1 → 低減量 Δ0.7dB
- ・600m³/s 1：0.5：1 → 低減量 Δ1.0dB
- ・700m³/s 1：0.5：1 → 低減量 Δ1.1dB

また、図-13 に示すように流量約 100m³/s に相当する音圧レベルの低減効果となる。



図-7 現地調査地点

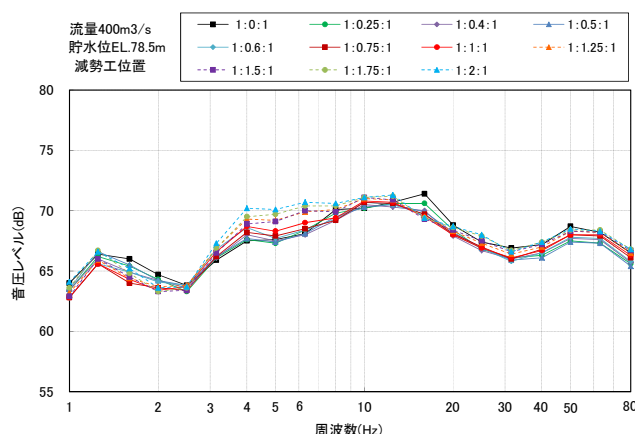


図-8 400m³/s 放流時の周波数特性

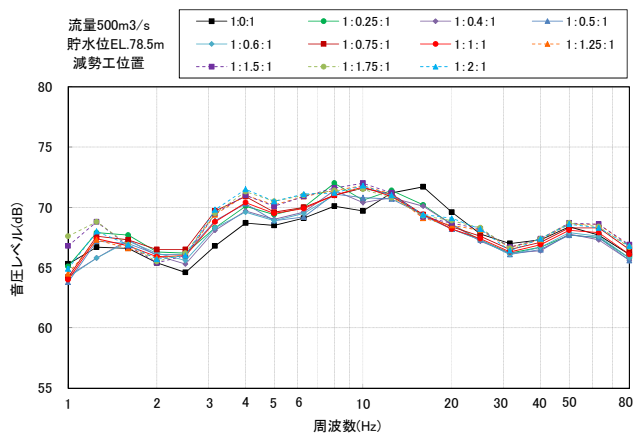


図-9 500m³/s 放流時の周波数特性

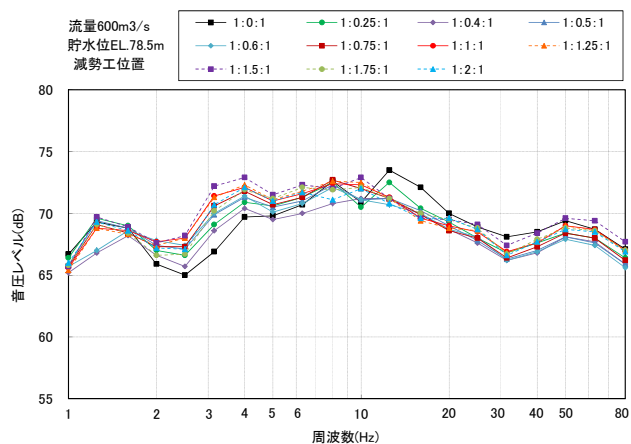


図-10 600m³/s 放流時の周波数特性

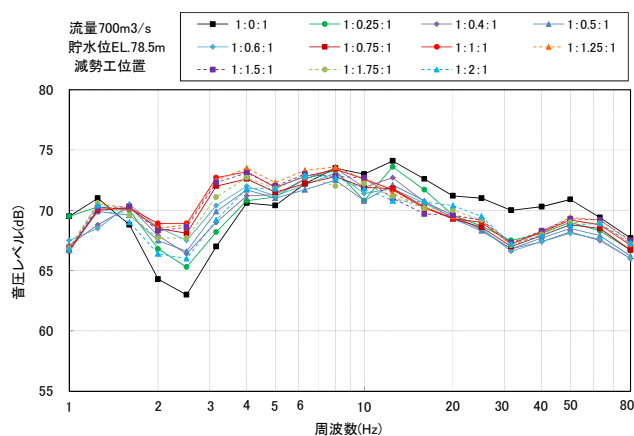


図-11 700m³/s 放流時の周波数特性

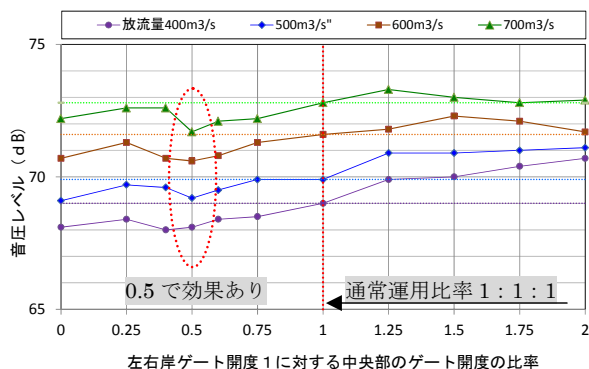


図-12 6.3Hz の放流比率と音圧レベルの関係

(3) 放流比率を変化させた場合の周波数特性

3 門の放流比率を 1 : 0.5 : 1 とした場合, 通常放流 (1 : 1 : 1) と比較すると周波数特性は, 図-14~17 となり, 5~10Hz の範囲で音圧レベルが低下した。

(4) 流況比較

各放流量において放流水脈の状況を通常放流 (1 : 1 : 1) と比較すると, 水脈の落下点がずれることにより, 落下途中で形成される 3 門からの水脈の合体部分が分離されることが確認できた。

図-18 に 700m³/s 放流時の通常運用 (1 : 1 : 1), 図-19 に放流比率 1 : 0.5 : 1 の放流写真を示す。

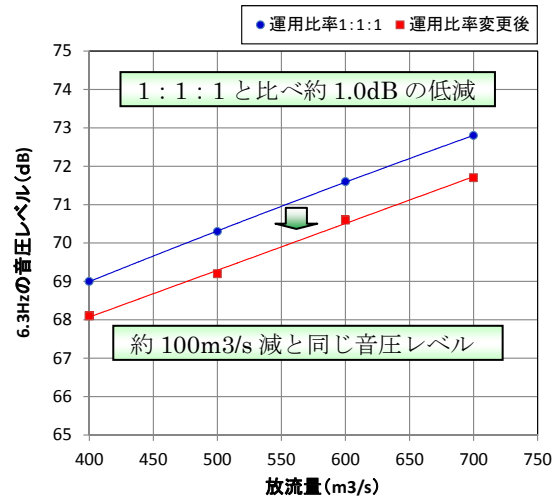


図-13 放流量と 6.3Hz の音圧レベルの関係

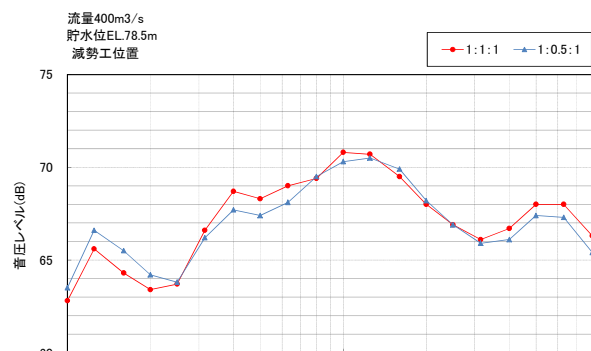


図-14 400m³/s 時の周波数特性の比較

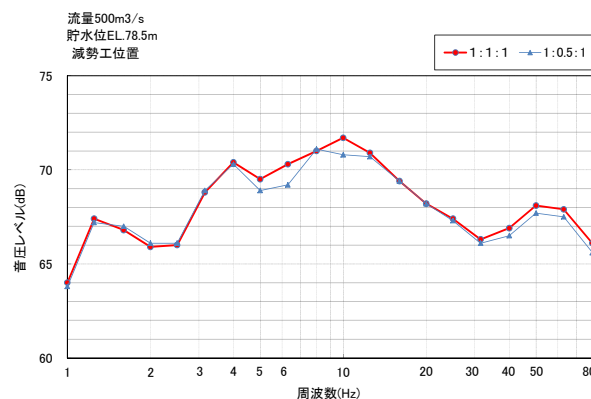


図-15 500m³/s 時の周波数特性の比較

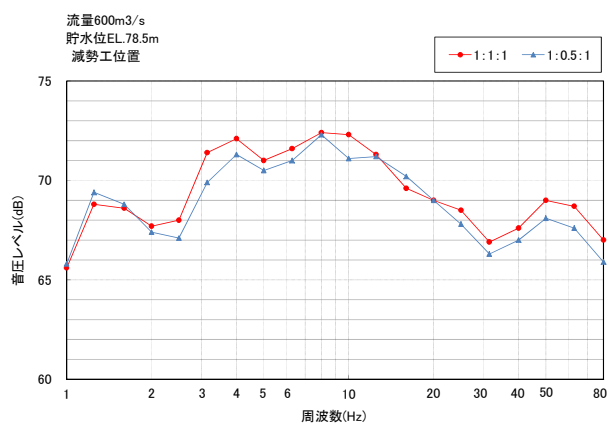


図-16 600m³/s 時の周波数特性の比較

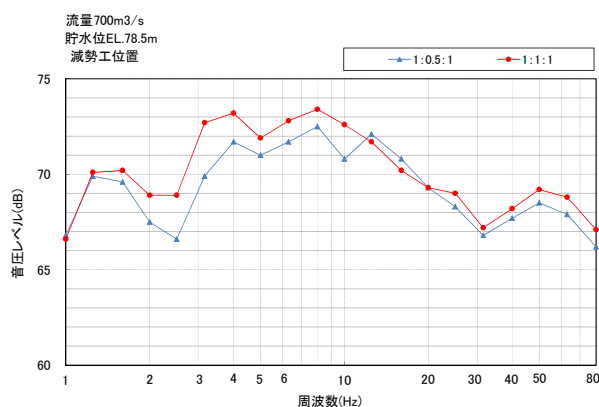


図-17 700m³/s 時の周波数特性の比較



図-18 700m³/s 時 通常放流 (1.0 : 1.0 : 1.0)



図-19 700m³/s 時 放流比率 (1.0 : 0.5 : 1.0)

5. 放流比率を変化させた現地検証実験

平成 27 年 6 月 15 日と 7 月 19 日の出水時に低周波音調査が実施された。放流条件は、以下である。

- ・平成 27 年 6 月 15 日
貯水位 68.7m ; 放流量 406.5m³/s
放流比率 1 : 1 : 1
- ・平成 27 年 7 月 19 日
貯水位 68.7m ; 放流量 663m³/s
放流比率 2 : 1 : 2

2 条件での現地計測結果の比較したものを

図-20, 21 に示す。

これより、663m³/s を放流比率 1 : 0.5 : 1 で放流した場合、約 6 割の流量となる 407m³/s を 1 : 1 : 1 の放流比率で放流した場合と比較すると、計測地点に関係なく、がたつきを支配する 5~10Hz の値がほぼ同等の音圧レベルを示すことが確認できた。

また、両日とも、住民からがたつきの発生等の苦情はないことより、放流比率を変更することで音圧レベルの低減に高い効果を示すことがわかる。

6. 現地条件での模型実験の再検証

(1) 超低周波音の低減量の比較

最初の実験は、貯水位 78.5m、流量 400~700m³/s の実験であるため、現地と同一の貯水位と流量条件で周波数特性を再調査した。結果は、図-22 に示すものとなる。これより、がたつきを支配する周波数 5~10Hz についてみると、流量 663m³/s と 406.5m³/s での流量差が 260m³/s あるにも係わらず、ほぼ同程度の音圧レベルを示し、放流比率による低周波音低減効果があることが検証できた。

(2) 模型実験の検証

現地と模型で得られた音圧レベルの差を比較したものを図-23 に示す。これより、がたつきを支配する周波数 5~10Hz についてみると、現地（平均値）と実験値でほぼ同程度の音圧レベルの差を示した。

これより、水理模型実験が現地での低周波音発生を再現できることが確認できた。

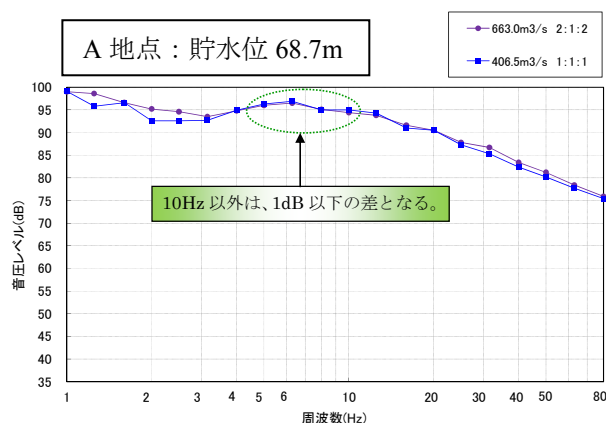


図-20 現地調査でのダム直下の音圧レベルの比較

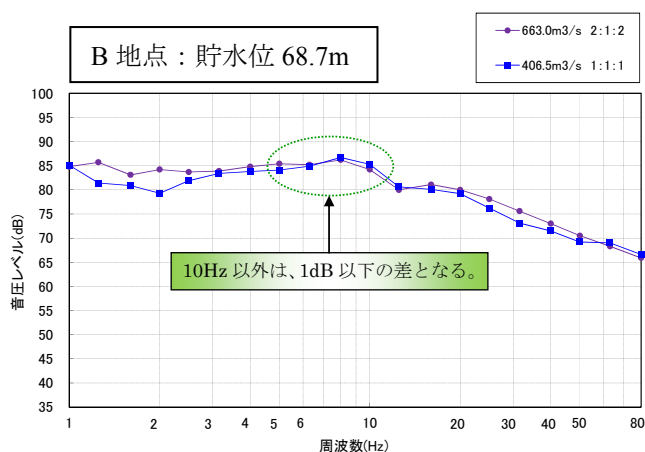


図-21 現地調査でのダム下流の音圧レベルの比較

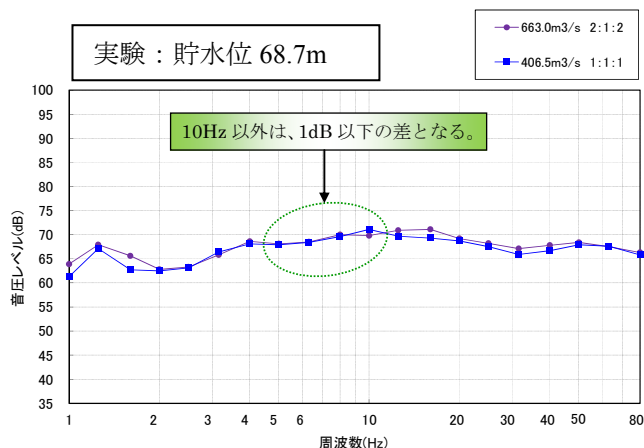


図-22 検証実験での音圧レベルの比較

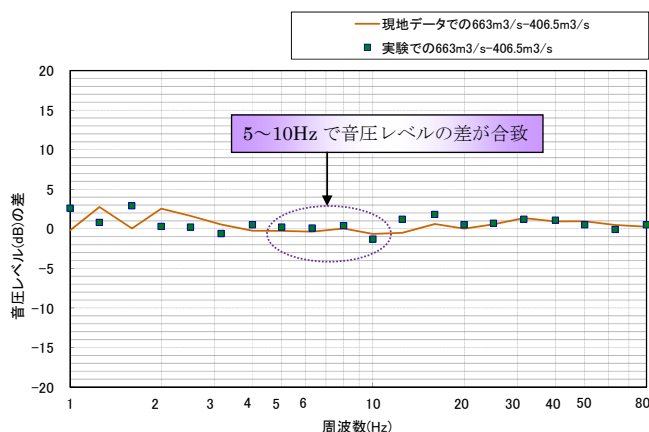


図-23 現地と実験の音圧レベルの差の比較

8. まとめと課題

以上の検討をまとめると以下となる。

- ①通常の3門同一流量の放流を行った場合、落下流が落下途中で合体する。
一方、放流比率を変えることで落下点に差が生じ、落下流が合体せず、5~10Hzの音圧レベルも低下する。
- ②放流比率は、1:0:1~1:2:1まで変化した結果、1:0.5:1の比率が最も5~10Hzの音圧レベルの低下効果が高くなる。

③天ヶ瀬ダム下流地域住宅のがたつき閾値は、5~8Hzが卓越して低い値を示す。

④現地において放流量約650m³/sを1:0.5:1の放流比率で運用した場合と約400m³/sを通常運用(1:1:1)した場合の5~10Hzの音圧レベルがほぼ同じ値となり、約250m³/s放流量に相当する低減効果が得られた。

⑤貯水位も含め、現地運用時と同じ水理条件で、再度、実験を行った結果、5~10Hzの音圧レベルの低減量が現地と実験で同じ値を示し、実験の現地再現性が確保できていることを検証した。

以上より、3門の放流比率を変化させることで超低周波音(特に5~10Hz)の音圧レベルの低減をはかれることが明らかになった。

主たる要因としては、3門の放流水脈が合体し、水膜に近い形態を形成するのに対し、比率を変えることで水脈落下点がずれ、放流水脈が分離することが考えられた。

ここで、両サイドの比率を1とし、中央の比率を1以上とした場合も上記同様に水脈落下点は異なるが、中央の流量負担が大きくなることで単位幅流量が増加するため、落下点での音圧レベルが高くなるためと考えられた。

参考文献

- 1) 竹林征三, 角哲也, 箱石憲昭: 堰などからの放流に伴う低周波空気振動の発生機構, ダム技術 No.71, pp.372-375, 1992.
- 2) 竹林征三, 角哲也, 箱石憲昭: 堰等からの放流に伴う低周波空気振動対策, ダム技術 No.82, pp.386-403, 1993.
- 3) 竹林征三: ダム・堰と低周波空気振動, 騒音制御 VO 1 23・No.5, pp.324-328, 1999.
- 4) 角哲也, 中島康夫: 水膜振動の三次元特性と音圧レベルの推定に関する研究
- 5) 関谷明, 宮田司, 他: 低落差の堰における落下水騒音の特性と対策, 河川技術論文集 Vol12, 2006.9
- 6) 関谷明, 他: 落下流により発生する低周波音の低減対策工の提案, 河川技術論文集 Vol16, 2010.6
- 7) 長嶺拓夫, 関谷明他: 越流時に発生する低周波振動防止法の提案, 日本機械学会論文集. C 編, 2011.6
- 8) 関谷明, 他: 水膜振動・低周波音抑制工法, ARIC 情報第107号, 2012.10
- 9) 国土交通省近畿地方整備局淀川ダム統合管理事務所: 天ヶ瀬ダム低周波音対策概略計画業務報告書, 2014.11
- 10) 国土交通省近畿地方整備局淀川ダム統合管理事務所: 天ヶ瀬ダム事業概要 (パンフレット)
- 11) 桜井力, 他: 水理模型実験における跳水発生音と模型縮尺, 土木技術資料 40-3, 1998.
- 12) 守田栄: 新版騒音と騒音防止, オーム社, 1991.
- 13) 日本音響材料協会: 騒音・振動対策ハンドブック, 技報堂出版, 1993.
- 14) 小林理学研究所: 屋外で超低周波音を放射できる可搬型装置の開発, 小林理研ニュース No125, 2014.7.
- 15) 落合博明, 田矢晃一: 低周波音による建具のがたつき始める音圧レベルについて, 騒音制御 Vol26/No2, pp.120-128, 2002.

(2016.4.4 受付)