

落下流により発生する低周波音の低減対策工の提案

THE PROPOSAL OF METHOD TO REDUCE SOUND OF LOW FREQUENCY OCCURRED BY WATERFALL

関谷 明¹・最上谷吉則¹・寺井和弘¹・峯岸雄一²
高木強治³・後藤眞宏³・長嶺拓夫⁴

Akira SEKIYA, Yoshinori MOGAMIYA, Kazuhiro TERAJ and Yuichi MINEGISHI
Kyouji TAKAKI, Masahiro GOTO and Takuo NAGAMINE

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 ライト工業 設計計画グループ(〒102-8236 東京都千代田区九段北 4-2-35)

³ 正会員 農研機構 農村工学研究所 施設資源部(〒305-8609 茨城県つくば市観音台 2-1-6)

⁴ 正会員 埼玉大学 理工学研究科(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区 下大久保 2554)

Weir waterfall generates sound of low frequency. In the conventional method, spoiler baffles are used at the levee crown to reduce the sound. However, this method is not effective for a low height weir. Recently, the surrounding space of small channel has become living space. Due to this trend, a new method to reduce the low frequency sound needs to be developed for residents near the area. The main objective of this research was to develop the method by organizing the characteristics of low frequency sound. In the research, the relationships between sounds and depths of different shape weirs were investigated. As the result, it was found that low frequency sound generated by weir waterfall was caused by the vibration of water film. In more detail, the sound source was the water film vibration near the discharge point. Considering this fact, the new method to reduce the vibration has been developed.

In this method, a gutter is installed on the downstream side at the levee crown to make water merge into some small sections flowing through weir. As the result, the low frequency sound is reduced to the level of 10dB or less. In the field test, the method also achieved a similar successful result.

Key Words : *Falling water sound, Low frequency sound, Water curtain*

1. はじめに

堰からの越流が落下流となる場合、越流水脈が水膜振動する。この水膜の振動は、低い周波数帯の音（低周波音）が卓越する。

近年、市街化が進み、頭首工や農業用水路の周辺が生活空間になってきている。このため、農業用水路等の近隣住民から、低周波音に対する苦情が寄せられ、社会問題となってきた。

水膜振動が低周波音を発生することは、古くから知られており、多くの研究がなされている^{1)・2)・3)・4)}。その結果、水膜振動はケルビン・ヘルムホルツの不安定現象が水膜下の空洞等と相互に関連して発生するとして理解されている。しかし、水膜振動により発生する低周波音とその対策については、検討事例が少ない^{5)・6)・7)・8)}。このため、低周波騒音を低減する水膜振動の抑制工法の開発が望まれている。本研究は、堰やゲートで低周波音の発生要因とな

る水膜振動の発生特性を整理するとともに、低減工法の開発を目的とした。

2. 研究概要

(1) 研究内容

本研究では、落下流による発生する低周波音の特性として①越流水深と低周波音の関係、②低周波音と水膜振動の関係を整理し、③水膜振動の分類を行い、従来技術で解決できない越流水深の低い条件で発生する低周波音の抑制が可能となる④対策工の開発を行った。

(2) 実験条件

実験は、以下の条件で実施した。

・実験施設：

防音室：吸音材グラスウールの室内

実験水路：落差 2.0m, 幅 1.77m の堰

・計測位置：高さ：床板から 1.2m 地点

(図-1 参照)

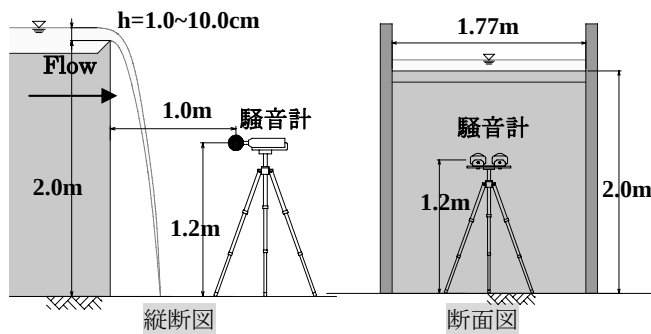


図-1 堰の形状と計測位置

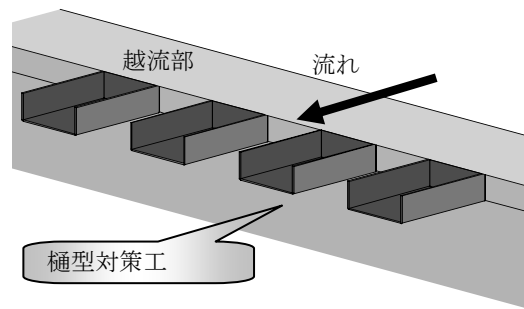


図-2 堰型の形状

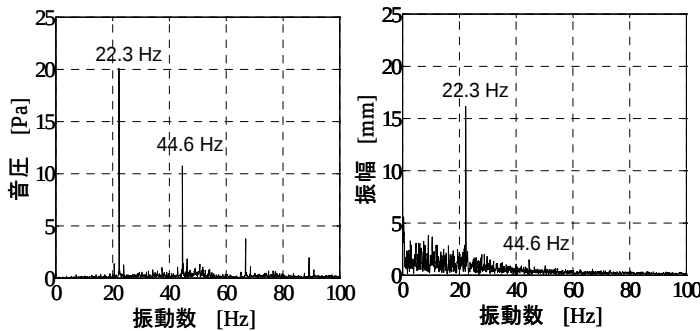


図-3 周波数と音圧レベルの関係と水膜の振動周波

- ・計測位置 : 堰下流 1.0m地点
- ・計測時間 : 60 秒/1 回
- ・対象周波数 : 1Hz~125000Hz
- ・水理条件 : 越流水深 : 2cm~10cm
(1cm ピッチ)
- ・解析方法 : 1/3 オクターブバンドレベル
音圧レベル ; A 特性値 ; G 特性値

(3) 実験装置

本検討では、図-1 に示す防音室に設置した実規模の堰の模型を用い室内実験による検討を行った。

3. 対策工の考え方

対策工は、図-2 に示すように堰の天端、下流側に樋型の突起を設けるものである。

機能は、落下時に発生する水膜を分断し、水束とすることで振動発生を防止するものである。

4. 低周波音の特性

(1) 低周波音の発生要因

落下水の発生音圧と水膜振動の関係を高速カメラと騒音計により調査した。結果、図-3 に示すように水膜の卓越振動数が 22.3Hz となり、音圧の卓越振動数も 22.3Hz と 2 者が合致することがわかる。これより、低周波音の発生要因が水膜の振動であると証明できた。

(2) 各周波数での越流水深と音圧レベルの関係

水膜振動とは一つ発生要因で構成されるのか、また水膜振動を構成する周波数 (Hz) については

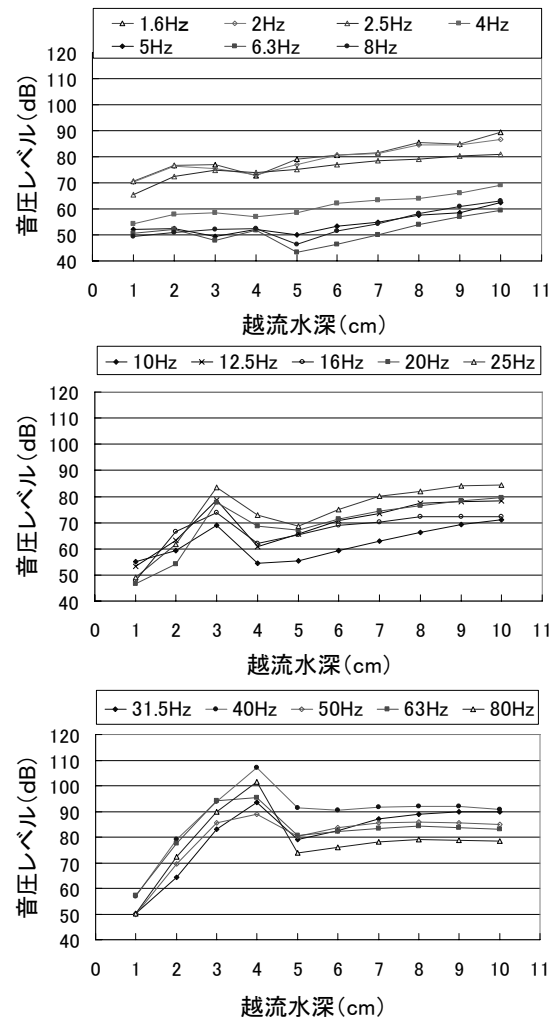


図-4 各周波数の音圧レベルの傾向

不明である。つまり、全ての周波数帯が同じ越流水深で同じ傾向を示すのではなく、周波数毎に別の傾向を示し、その合計として越流水深と音圧の関係が成立しているものと考え、周波数別に越流水深と音圧レベルの関係を調査した。

結果、図-4 (中) に示すように越流水深 3cm で音圧レベルがピークを示す周波数帯と越流水深 4cm (図-4(下)) でピーク値を示す周波数帯、ピークを示さず流入エネルギーにほぼ比例する音圧レベルを示す周波数帯に分類できる。

これより、水膜振動は、10~80Hz が卓越する現象で、10~25Hz の振動と 31.5~80Hz の振動の発

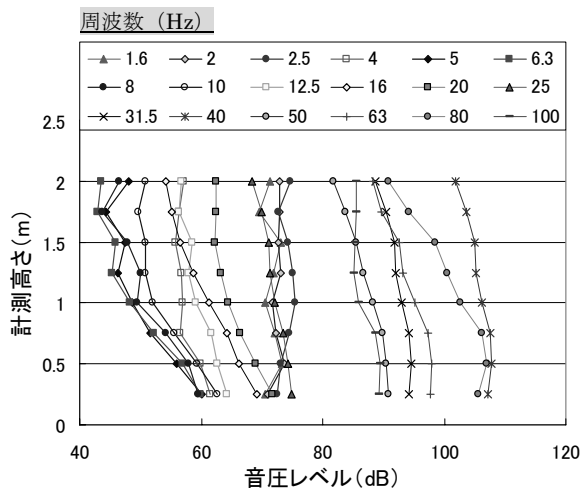


図-5 音圧レベルの水膜に沿った鉛直分布

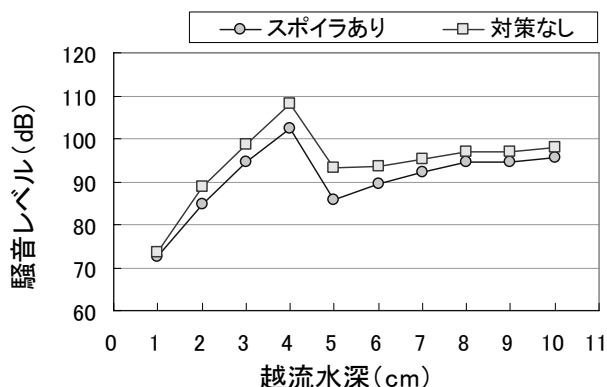


図-6 越流水深と音圧レベルの関係

生要因は異なるのではないかと予測できた。

(3) 音源の発生位置

水膜振動は、10～80Hz が卓越する現象で、10～25Hz の振動と 31.5～80Hz の振動の発生要因は異なるのではないかと予測したが、発生要因が異なれば、音の発生位置も周波数により異なると考えられる。そこで、各周波数帯のトータルの音圧レベルが最大値を示す越流水深 4 cm 時を対象に鉛直方向の音圧を調査した。

結果、図-5 に示すように、鉛直方向で周波数毎に以下の傾向を示すことが確認できた。

- ・4Hz 以下は、鉛直方向での音圧の差が小さく、膜全体から音が発生している。
- ・5～8Hz では、床板近傍において明らかに音圧レベルが高くなることより、音源点が床板近傍と考えられた。
- ・10～25Hz の範囲も床板近傍において音圧レベルが高くなるが、5～8Hz ほど顕著ではない。
- ・31.5～80Hz については、床板上 0.5～1.0m の範囲内の音圧レベルが高くなる傾向を示す。

これより、周波数帯によりピークを示す位置が異なることより、水膜の振動が複数の形態で構成されていると予測できた。

(4) 落下流の水膜の形状と分類

水膜振動の発生要因は、落下水膜背面が閉空間となり、大気圧との差が生じるとされている。従

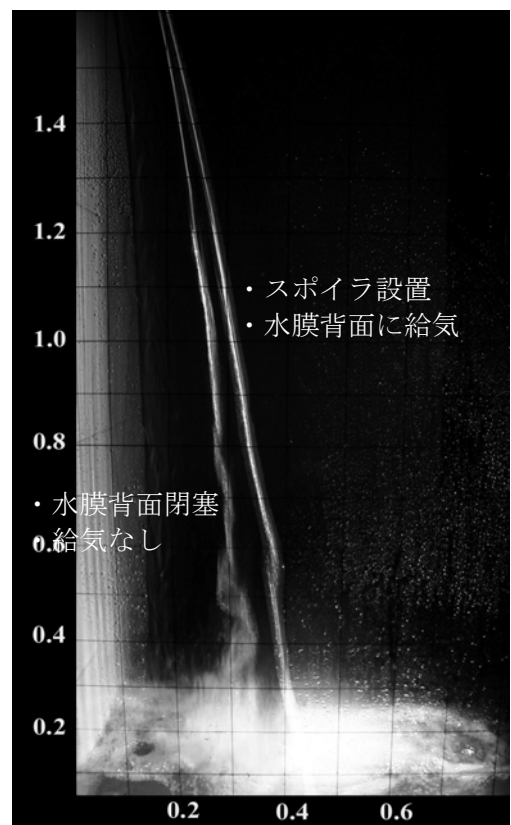


写真-1 水膜の形状

って、対策としては、堰の天端に突起を設置し、水膜を部分的に分断する方法（スポイラ）が一般的にとられている。しかし、現地においてスポイラを設置しても、低周波音の発生を抑制できないケースがみられている。

ここでは、水膜背面が閉空間となる（対策をしない場合）とスポイラを設置して、水膜背面を開放した場合の 2 タイプを対象に横方向の水膜の形状を調査した。つまり、水膜の発生要因が一つであれば、スポイラを設置した場合、落下水の振動がなくなることになるが、要因が複数ある場合は、消滅する振動と残留する振動がでると考えた。結果、以下のことが明確になった。

- ・水膜の振動は、大きく①長周期の水膜全体の振動と②水膜の下方の振動、③床板近傍の周期の短い振動の 3 つにより構成されている様子が伺えた。
- ・スポイラが無い場合に比べ、スポイラを設置し、水背面を開放した場合、写真-1 に示すように①水膜全体長周期の振動が抑制され、外側に広がる傾向を示す。
- ・水膜の下端での振動は、抑制されず、振動が残る。

ここで、スポイラの有無での騒音レベルを比較したものを図-6 に示す。これより、以下のことが確認できる。

- ・スポイラを設置し、水膜背面に給気した場合騒音レベルは越流水深 2cm～10cm までほぼ均等に低下する傾向を示し、4cm で卓越した騒

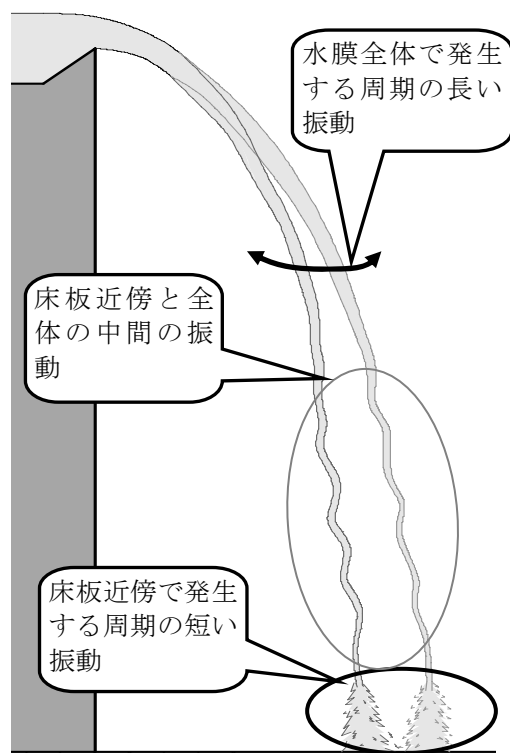


図-7 水膜の形状分類

音レベルを完全には消去できない。

- ・スポイラによる低減効果がある周波数は約 25Hz 以下と予測できた。

つまり、給気により抑制できる振動は、31.5Hz 以下であると同時に水膜全体の振動数は 31.5Hz 以下と判断でき、水膜下面の振動数は、31.5Hz 以上と考えられた。

(5) 水膜振動の発生要因

これより、水膜振動は、二つ以上の発生要因で構成されており、発生位置と周波数は以下であると予測できた。

- ・水膜全体の振動は、25Hz 以下で、水膜背面が閉空間となるため発生する。
- ・音源点は、床板近傍となる。
- ・水膜下方の振動は、31.5～80Hz 程度であり、床板上 50～100cm が音源となる。
- ・水膜下端での振動があり、周波数は上記に比べ高い。

以上より、水膜振動による低周波音の発生要因は、①従来から想定される水膜背面の圧力差により発生する水膜全体の振動と②水膜下面と③落下点近傍の振動の3つと考えられ、その発生要因は別のものであるため、スポイラ等の一つの対策のみでは、解決できなかったのではないかと考えられた。

具体的に想定すると、低い越流水深でピークを示す周波数帯の音の発生要因は、②、③の水膜下面と落下点近傍の振動が支配的であり、越流水深に比例する周波数帯の発生要因は、落下点の破裂音と①水膜全体の振動に起因する。また、①水膜

全体の振動は、従来から想定される水膜背面の圧力差により発生するものであり、②③は、膜の形成により発生すると予測できた。(図-7 参照)

5. 対策工

(1) 樋型の検討結果

①樋型の基本諸元

側壁高さ：10 cm ; 対象の越流水深 10 cm が横越流しないで、確実に流下できる高さとした。

- ・縦断長：30 cm

隔壁の天端より 10 cm 下のラインで、越流水深 10 cm が到達し、かつ落下流が水路流になる長さとした。

- ・対策工の幅と設置間隔

一定 ; いずれも最終的に落下流が形成されるため、水膜が発生しにくい落下流の幅は、対策工の有無にかかわらず一定であると考えた。

②樋型の検討ケースの設定

樋型の検討は、縦断方向長さを 0.3m、鉛直方向の高さを 0.1m に固定し、樋の幅と設置間隔をパラメータとして、最適な設置間隔について検討した。なお、樋の幅と設置間隔は、形成される水膜の幅が水膜振動を支配するため、同一とした。

樋型対策工の設置状況を図-8 に示す。

③検討結果

対策工の効果として低周波音が卓越する越流水深 4 cm 時のパワースペクトルを図-9 に示す。また、可聴音騒音レベル (A 特性値) と低周波騒音レベル (G 特性値) を図-10、図-11 に示す。これより、以下のことが明らかになった。

- ・可聴音 (A 特性値) は、図-10 に示すように樋型対策工設置による効果はない。
- ・低周波音 (G 特性値) は、図-11 に示すように樋型対策工の設置により、越流水深 2 cm 以上では、10dB 以上の騒音低減効果があることがわかる。
- ・特に、対策なしの場合に低周波音が卓越する越流水深 2～4 cm においては、樋型対策工により 20～30dB の低減効果があることがわかる。対策工の幅 (設置間隔) について越流水深 2～4 cm で比較すると、幅が 30 cm と 25 cm では、約 4dB 程度の差がみられるが、25 cm と 20 cm では、差がみられないことがわかる。

6. 現地実証試験

(1) 実証試験の概要

- ・対象施設：福島県喜多方市の諏訪頭首工土砂吐ゲート (図-12 に堰の形状を示す。)

- ・水理条件：越流水深 2～7 cm

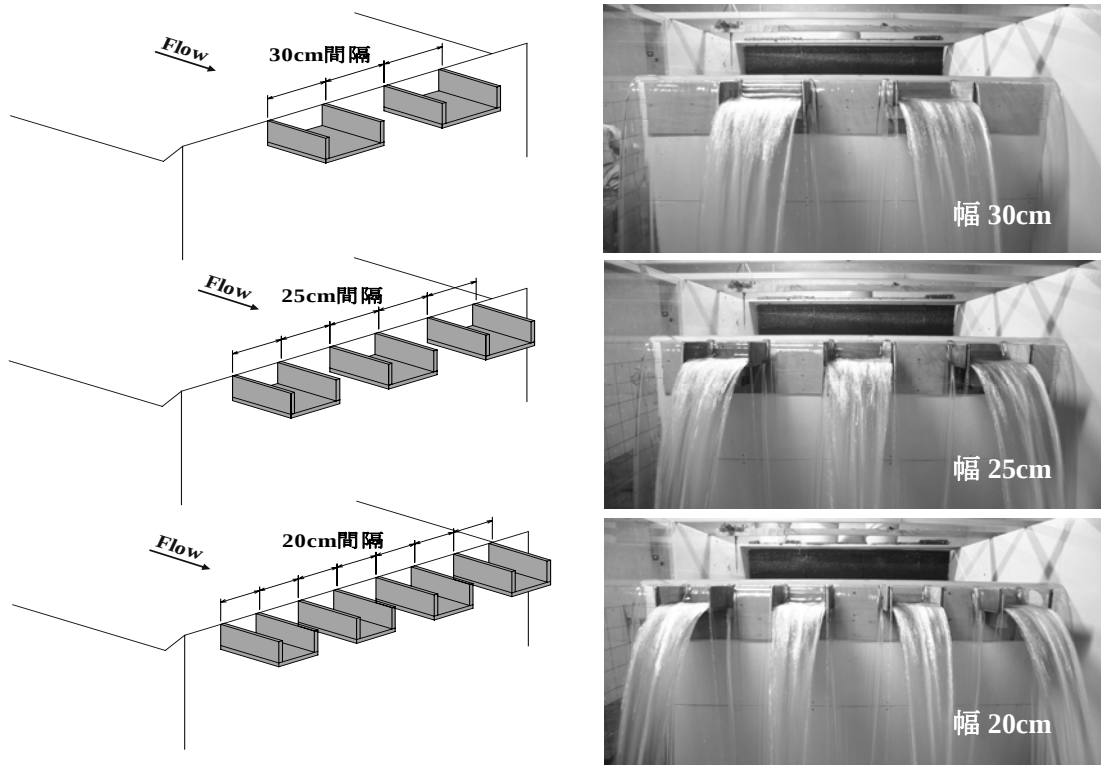


図-8 樋型の検討ケース

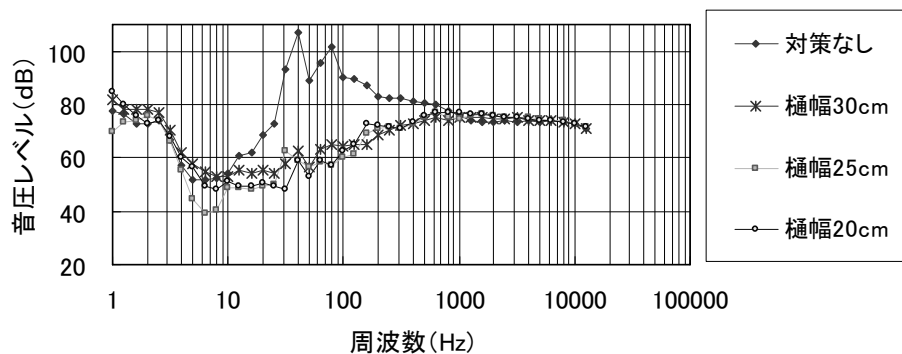


図-9 越流水深 4 cm でのパワースペクトルの比較

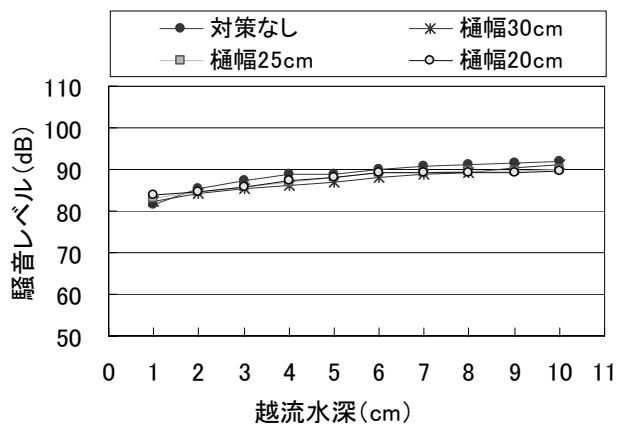


図-10 A 特性値の比較

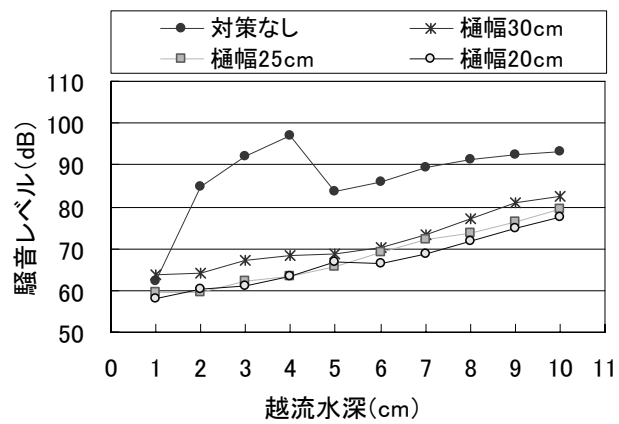


図-11 G 特性値の比較

(2) 結果

現況では、図-13、14 に示すように越流水深 4 cm で低周波音がピーク値を示し、約 95dB となる。

(現地実証試験時の状況を写真-2 に示す。) 樋型設置では、約 20dB、傾斜板でも 10~15dB の低減効果を確認でき、堰幅が延長した場合、ユニット数を増やすことで対応可能と判断した。

7. まとめ

- 1) 低周波音圧レベルは、越流水深（流入エネルギー）に比例せず、越流水深が浅い条件で騒音レベルが卓越すること、水膜の振動は、膜全体の振動と落下点近傍の振動等の数パターンで構成され、それぞれ卓越する振動数が異なることを明らかにした。
- 2) 従来工法のスポイラは、膜全体の振動は抑制できるが、落下点近傍の振動は抑制できないこと、また、越流水深が低い場合に卓越して発生する低周波音は抑制できないことを確認した。これより、低い水深での発生音は、落下点近傍の振動と予測できた。
- 3) 対策工は、樋型の突起を堰天端の下流面に設け、落下流が水束となるものとした。
- 4) 実験より、越流水深 2~14 cm では 10dB 以上、特に 2~4 cm では 20~30dB の低周波音の低減効果を得られる形状諸元を設定した。現地実証試験の結果、越流水深 4 cm で低周波音が最大値約 95dB を示したが、対策工設置後、約 70dB となる約 25dB の低減効果が確認できた。

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 Vol123・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，水工学論文集第 34 巻，pp. 259-264，1990. 2
- 5) 関谷明，峯岸雄一，後藤真宏，高木強治，長嶺拓夫，落下流により発生する水膜振動の特性，第 64 回土木学会年次講演会公演概要集，2009. 9
- 6) 関谷明，宮田司，高田保彦，田代洋一：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 Vol112，pp. 205-210，2006. 9
- 7) 後藤真宏，浪平篤，小林宏康，常住直人，関谷明，ゲートの越流水の低周波音とスポイラによる低減効果について，農村工学研究所技報，207 号，pp. 139-147，2008. 3
- 8) 関谷明，宮田司，岩佐隆広，用水路の堰における水膜振動防止法の提案，第 63 回土木学会年次講演会公演概要集，2008. 9

(2010. 4. 8 受付)

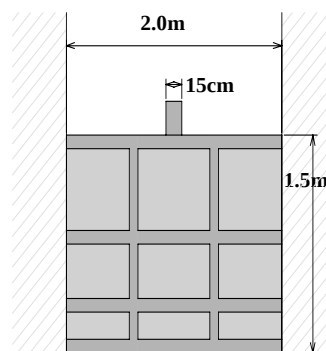


図-12 土砂吐ゲート

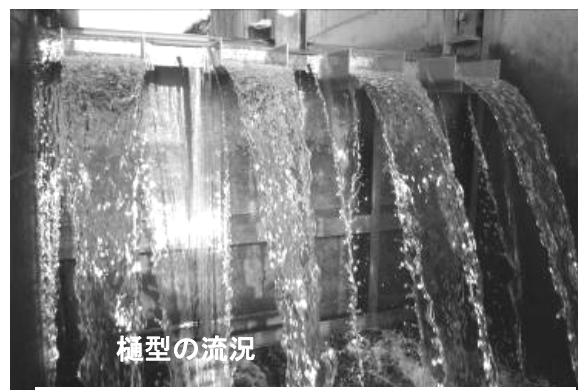


写真-2 現地実証試験の流況

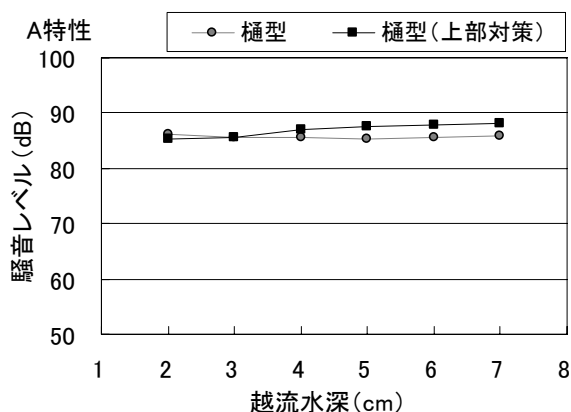


図-13 現地 A 特性値の効果

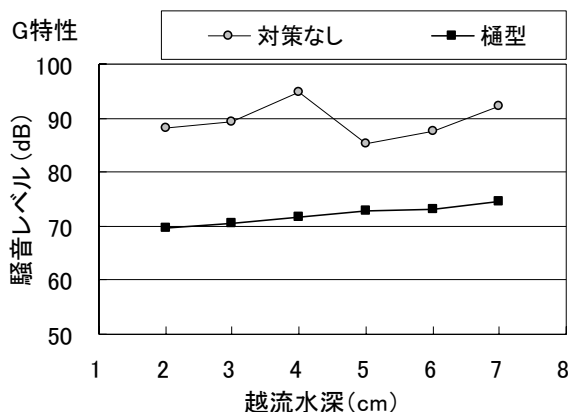


図-14 現地 G 特性値の効果