

地下に設けられる跳水式減勢工の発生音特性

SOUND CHARACTERISTICS GENERATED IN UNDERGROUND HYDRAULIC JUMP TYPE ENERGY DISSIPATER

桜井 力¹・柏井 条介²・櫻井 寿之³

Tsutomu SAKURAI, Josuke KASIWAI and Tosiya SAKURAI

¹ 正会員 工修 建設省土木研究所ダム部水工水資源研究室 主任研究員 (〒305-0804 つくば市旭 1)

² 正会員 建設省土木研究所ダム部水工水資源研究室 室長 (〒305-0804 つくば市旭 1)

³ 正会員 工修 建設省土木研究所ダム部水工水資源研究室 研究員 (〒305-0804 つくば市旭 1) .

We used a hydraulic model test to study the mechanism that creates sound when a hydraulic jump-type energy dissipater is set underground. The test was performed using four types of models with different sizes and similar in shape and the factors ruling the generation of sound was studied. We evaluated the characteristics of the frequencies and the relation between acoustic power and hydraulic conditions. We also assessed the characteristics of sound circulation in an underground space and found that it can be explained by way of air column resonance. In addition, we made a basic study of the effectiveness of an acoustic filter in reducing resonance.

Key Words : *energy dissipator , hydraulic jump, sound, hydraulic model test, air column resonance, acoustic filter*

1. はじめに

ダム放流時には人間には聞こえにくい超低周波成分が卓越した音が発生することが現地観測結果等から知られている。この超低周波音が大きい場合や長期に渡る場合に周辺の建物や建物内の建具を振動させる等の問題を引き起こす場合がある。

一方、ダムに設けられる減勢工形式としては水平水叩き上に跳水を発生させる「水平水叩き式減勢工」が我が国で最も一般的に用いられているが、跳水音の発生メカニズム、流量等の水理学的条件との関係についての系統だった検討は行われていないのが現状である。

また、再開発事業においてダム堤体に新たな放流設備を設けることが構造上困難な場合や環境上の配慮から減勢工を含む洪水吐きを地下構造物とする計画事例が見られるようになっている。このような場合には、単に跳水時の発生音のみならず、共鳴現象等地下閉空間における音の伝播挙動も問題となる可能性がある。

以上の状況に鑑み、地下構造の洪水吐きを念頭に、幾何学的に相似で大きさの異なる4種類の模型を用いた実験を行い、跳水時の発生音の基本的な性質および地下空間内での伝播特性を検討するとともに、低周波音低減対策についての基礎的な検討を行ったのでここに報告する。

なお、洪水吐きの検討では、その流れが3次元的な急変流であること、個々のダムにおいてそれぞれの地形・地質条件や放流条件に応じて設計される極めて個性の強い構造物であることから、模型実験による検討が行われているが、その際には重力の影響が卓越することからフルードの相似則による模型実験値の原型実験値への換算がなされる。本報告においても、流れの相似則としてフルード相似を考え、フルード相似による模型実験を行うことを前提として以下の検討を行っている。

2. 実験概要

図-1 に実験模型の概要を、表-1 に実験条件の一覧を示した。模型形状は、跳水を利用した減勢工としては最も一般的な「副ダムを有した跳水型減勢工」を地下に設けた構造とし、減勢工部分のみの抽出模型とした。また、模型は幾何学的に相似な4種類の大きさとしたが、現象の2次元性を仮定し、幅方向の寸法は全模型とも20cmとした。(便宜上、2番目の大きさの縮尺模型を標準(1倍)とし、他を1/2倍、1.5倍および2倍模型と呼ぶ。)また、発生音を直接測定することを目的として天井を設けずに上方を開放したケースについての実験も行った。放流条件は、表-1 に示したとおり9種類を基本とし、各縮尺模型の水理条件

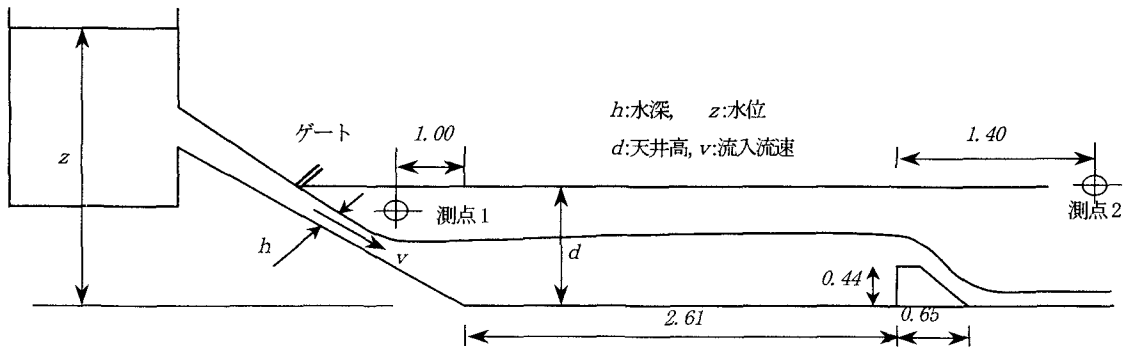


図-1 実験模型の概要

注)1/1 倍模型の寸法を示した。(単位: m)

表-1 実験条件一覧

模型 縮尺 1/n	天井 高さ d cm	流入条件					実験 No.
		水位 Z m	水脈厚 h cm	流量 Q l/s	流速 v m/s	フルード数 Fr	
1/2	天井なしと 43.5	1.50	1.29	9.7	3.76	10.6	1-1-a, b
		1.25	1.15	8.1	3.52	10.5	1-2-a, b
		1.00	1.03	6.2	3.01	9.5	1-3-a, b
		1.50	1.57	13.3	4.24	10.8	1-4-a, b
		1.25	1.48	11.0	3.72	9.8	1-5-a, b
		1.00	1.30	8.3	3.19	8.9	1-6-a, b
		1.50	2.33	20.1	4.31	9.0	1-7-a, b
		1.25	2.14	15.7	3.67	8.0	1-8-a, b
1/1	天井なしと 87.0	1.00	1.87	11.9	3.18	7.4	1-9-a, b
		3.00	2.44	28.0	5.74	11.7	2-1-a, b
		2.50	2.31	23.5	5.09	10.7	2-2-a, b
		2.00	2.00	18.2	4.55	10.3	2-3-a, b
		3.00	3.44	37.8	5.49	9.5	2-4-a, b
		2.50	3.03	31.4	5.18	9.5	2-5-a, b
		2.00	2.53	23.8	4.70	9.4	2-6-a, b
		3.00	4.76	54.6	5.74	8.4	2-7-a, b
3/2	天井なしと 130.5	2.50	4.36	45.0	5.16	7.9	2-8-a, b
		2.00	3.65	33.8	4.63	7.7	2-9-a, b
		4.50	3.39	51.5	7.60	13.2	3-1-a, b
		3.75	3.22	43.3	6.72	12.0	3-2-a, b
		3.00	2.86	33.5	5.86	11.1	3-3-a, b
		4.50	4.89	69.4	7.10	10.3	3-4-a, b
		3.75	4.36	57.6	6.61	10.1	3-5-a, b
		3.00	3.79	43.8	5.78	9.5	3-6-a, b
2/1	天井なしと 174.0	4.50	6.84	100.4	7.34	9.0	3-7-a, b
		3.75	6.30	82.6	6.56	8.3	3-8-a, b
		3.00	5.63	62.1	5.52	7.4	3-9-a, b
		6.00	4.68	78.8	8.42	12.4	4-1-a, b
		5.00	4.12	66.2	8.03	12.6	4-2-a, b
		4.00	3.68	50.6	6.88	11.4	4-3-a, b
		6.00	6.00	107.4	8.95	11.7	4-4-a, b
		5.00	5.58	89.4	8.01	10.8	4-5-a, b
		4.00	4.85	67.2	6.93	10.0	4-6-a, b
		6.00	9.76	156	7.99	8.2	4-7-a, b
		5.00	9.09	128.4	7.06	7.5	4-8-a, b
		4.00	7.48	94.5	6.32	7.4	4-9-a, b

注.) 実験No. では天井なしをa, 天井ありをbとする。

がフルード相似となるように設定した。跳水の形態や流れの特性は跳水前の流入フルード数によって異なるが、今回の放流条件でのフルード数は7～12程度である。これらは、安定した「定常跳水」と跳水内部における激しい渦動のために波動が下流に伝播する「強跳水」の2種の跳水形態を含む範囲で、通常、減勢工設計において目標とされる跳水形態である。

音の測定位置は、図-1 に示すように、天井があるケースでは副ダム直下の測点2、天井がないケースで

は音源位置と想定された跳水始端部直上の測点1 (1/2倍模型は除く。) および測点2である。測定は、1～1000Hz においてひずみのない測定が可能な周波数レスポンスを持つ低周波音レベル計を用いて行った。記録したデータはサンプルレート 2000Hz でAD変換し、音圧実効値を求めるとともにFFT解析を行い、パワースペクトルを求めた。

また、同様の放流量条件をバイパス水路に流し、ポンプ運転音等の暗騒音測定を行い、実験結果の補正を行った。

3. 跳水音の発生位置

前述の条件での実験に先立って、跳水音の発生位置を特定するために、1倍模型の天井を設置しないケース(実験 no. 2-8-a)で跳水始端付近から副ダム直下の間で連続的に音圧レベルの測定を行った。測定結果および測定時の水面形を図-2 に示す。音圧レベルは、跳水始端部で最大を示し、流下方向に向かって減衰する傾向を示した。図中の実線は、最大音圧レベルが記録された跳水始端部に幅方向に分布する線音源があるとして各地点の音圧レベルを計算したものであるが、これはほぼ測定値に一致している。したがって、跳水音は始端部の狭い領域からの発生音が支配的であり、音源としてはほぼ線音源とみなせると考えられる。

このことから、本報告で取り上げる地下構造減勢工から発生する音の系を、図-3 のように単純化して取り扱うこととする。図中の観察音とは地下式減勢工の系全体としての発生音であり、実験上は測点2での測定音である。

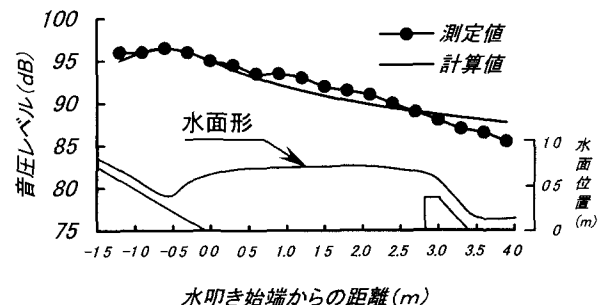


図-2 測定位置と水面形・音圧レベルの関係

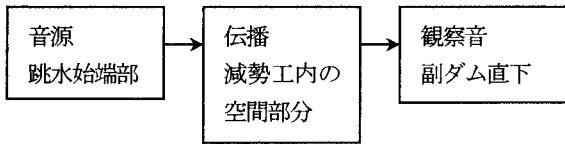


図-3 地下式減勢工における発生音の系

4. 音源の特性

(1) 周波数特性

図-4 に 1 倍および 2 倍模型の天井なしの 9 ケースにおける測点 1 での測定音のパワースペクトルおよびパワースペクトルをオーバーオール値で無次元化したものを示した。両模型とも低周波帯に卓越周波数を持ち、無次元されたパワースペクトルは模型スケールが同一であれば流量条件に依らずほぼ一致する。1/2 倍および 2/3 倍模型も同様の傾向を示しており、縮尺が同一である場合、放流条件に依らない固有の周波数特性を持つことがわかる。

写真-1 に示すように、跳水には始端部から大量の空気が混入し、これによって生じた気泡は流れと浮力によって移動し、水面に達して消散する。跳水音はこの空気混入が大きく関係していると推定できる。始端部における気泡発生は①高速の流入水脈に連行された空気による気柱の形成、②表面張力による気泡の分離、によると考えられる。森ら¹⁾は、鉄球の水面への落下実験から、気泡が水面から離脱する際には、Minnaert²⁾が理論的に求めた次式の気泡の膨張・収縮振動（0 次モードの振動）の周波数: f の音が発生するとしている。

$$f = \frac{1}{\pi R} \sqrt{\frac{3\gamma p_0}{\rho_w} - \frac{4\sigma}{\rho_w R}} \quad (1)$$

ここに R : 気泡の直径、 γ : 比熱比、 p_0 : 大気圧、

ρ_w : 水の密度、 σ : 表面張力

これによって発生する音の周波数と気泡径の関係を図-5 に示す。目視による観察によれば、気泡は、数 mm から数 cm 程度であり、様々な径がランダムに存在する。したがって、この気泡振動音は、数 100Hz 以上の高周波数帯の全域にわたって発生する雑音源となっていると考えられる。

また、跳水始端部における流況は、近似的に圧力勾配のある場への二次元噴流拡散現象と考えることができる。流入した高流速の水脈によるポテンシャルコアは減勢工の水平部付近まで伸び、周辺に乱れの大きい領域を形成する。図-6 は、1.5 倍模型において流入部付近および水平部始端付近でのコア近傍の流速変動を測定したものである。低周波数が多いほぼ雑音と呼べる周波数分布となるが、流下方向成分は水平部始端付近では低周波成分は減少し、高周波成分が増加しているのに対して、水深方向成分は全周波数領域に渡っ

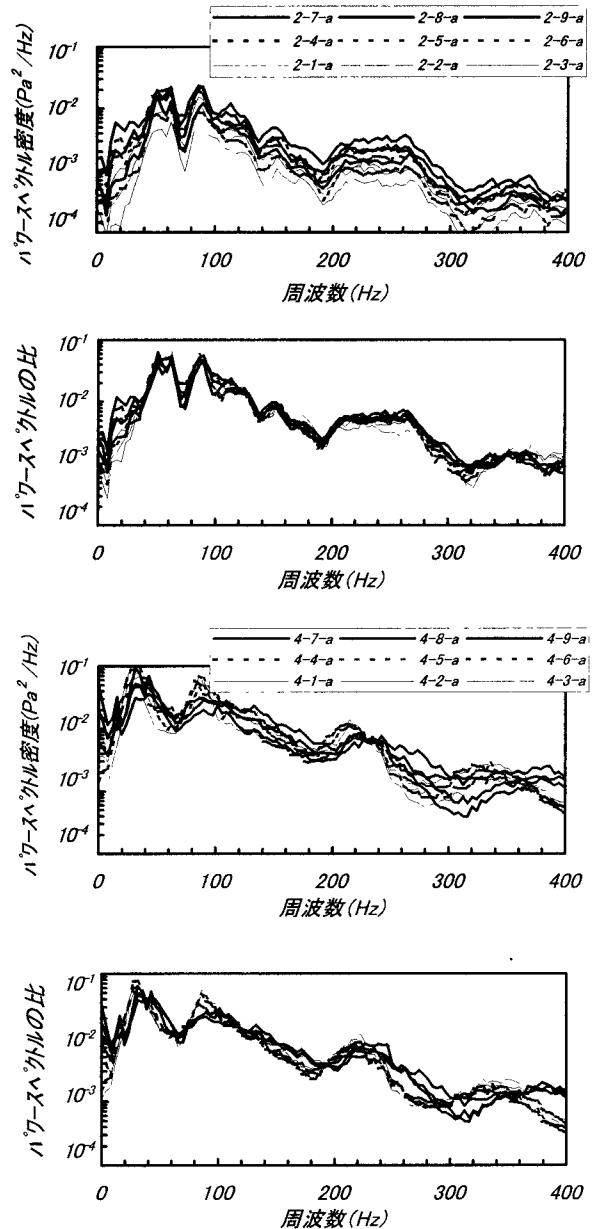


図-4 音源のパワースペクトル分布

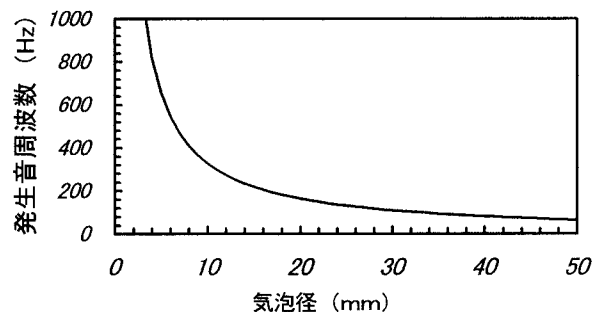


図-5 気泡の振動周波数

て減少している。

空気噴流ではこのようなコア周辺の速度変動に起因して、流下方向の場所により異なる様々な周波数の音が発生することが知られている³⁾。水の場合も同様の現象が生じ得ると考えられるが、実際には空気連行が生じないように完全に水中で放流を行うと音はほと

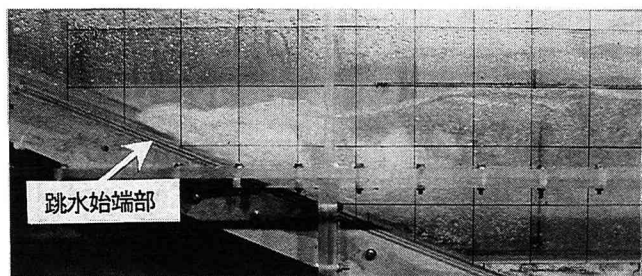


写真-1 跳水始端部の流況

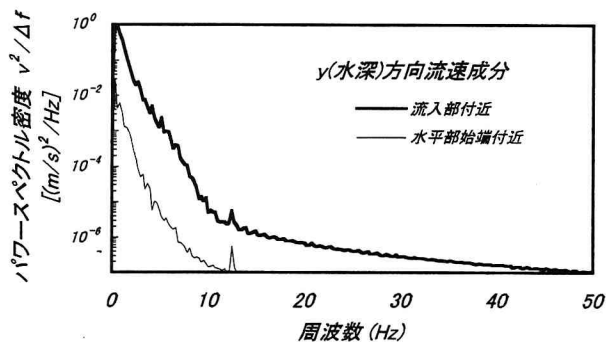
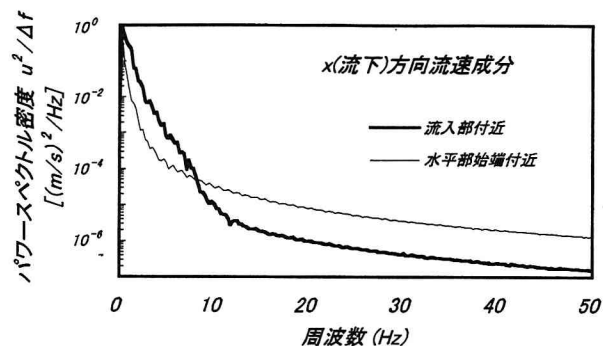


図-6 ポテンシャルコア近傍の流速変動

んど生じない。これは、水そのものに生じる音が小さいこと、空気との境界面での減衰が激しいことなどが考えられる。跳水には、写真-1 に示すように始端部に気泡が非常に多い領域が存在し、この領域における流速変動が低周波音の発生、伝播に大きく寄与していると推測される。これは、前述の検討で、跳水の音が始端部の狭い領域から発生し、線音源とみなせたことも符合する。

図-4には明確ではないものの卓越周波数が存在し、模型スケールが大きいほどその周波数は小さくなる。パワースペクトルが流量条件によらず一定の形状をとることから、天井をはずしても水槽の空間部において何らかの共鳴が生じていることが考えられる。しかし、狭い範囲の流量条件であり、流速変動の測定では現れていないものの、流れそのものにある種の共振現象が生じている可能性も否定できない。

(2) 音源出力

跳水音が始端部における流速変動や空気混入に伴うものとすれば、音源出力は流入水脈の運動エネルギーや流速に大きく依存するものと考えられる⁴⁾。始端部を線音源とみなせば、測点1での音圧実効値から音源

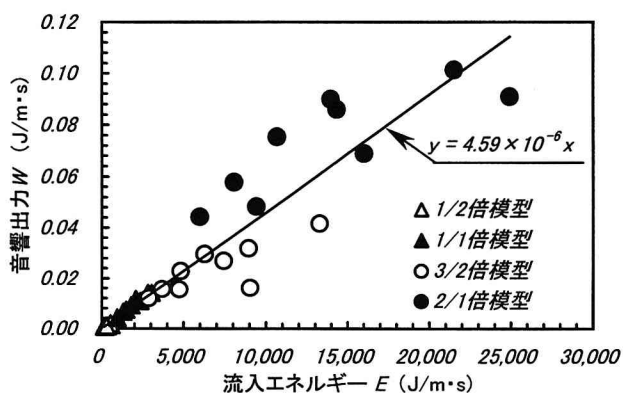


図-7 跳水の発生音と流入エネルギーの関係

の単位長さ当たりの出力は次式で求めることができる。

$$W = 2\pi r I = 2\pi r \frac{p^2}{\rho_a c} \quad (2)$$

ここに W : 単位幅当たり音源出力 [W/m]、 c : 音速 [m/s]

I : 音の強さ [W/m^2]、 p : 音圧実効値 [Pa]

r : 音源と測点の距離 [m]、 ρ_a : 空気の密度 [kg/m^3]

一方、単位時間単位幅当たりの流入エネルギーは次式で与えられる。

$$E = \frac{\rho_w q V^2}{2} \quad (3)$$

ここに E : 単位幅単位時間当たり流入エネルギー [$J/s/m$]

q : 単位幅流量 [$m^3/s/m$]、 V : 流入流速 [m/s]

図-7に、全実験ケースの音源出力と流入エネルギーとの関係を示す。これらは、ばらつきはあるものの、模型縮尺に依らず、また、フルード数の異なる流況を含むにもかかわらず次式に示される一定の比例関係を持つことがわかる。

$$W = \alpha E \quad (4)$$

この比例定数 α は跳水における流れのエネルギーから音のエネルギーへの変換効率と考えられ、通常の洪水吐きの対象流量条件下では、縮尺や流況に依らない減勢工形状固有の値を持つと解釈できる。本減勢工形状では、流入エネルギーの約 $5 \times 10^{-3}\%$ が音のエネルギーに変換される結果となっている。

5. 伝播特性

図-8に天井を設けた場合の各模型縮尺の測点2における測定音のパワースペクトルの例(実験 no. 1-7-b, 2-7-b, 3-7-b, 4-7-b)を示した。得られたパワースペクトルは、図-4に示した音源とは異なった分布形状となっており、跳水始端で発生した音が、水面と天井にはさまれた細長い空間を伝播してくる際に何らかの共鳴現象を起こしているものと考えられる。

測定音は模型スケールが大きいほど低い卓越周波数を持っているが、前述のように音源も既に何らかの周波数特性を持っているので、ここでは各周波数毎に発生音がどのように増幅あるいは減衰して地下空間を伝播しているかを明確にするために、以下に定義する伝

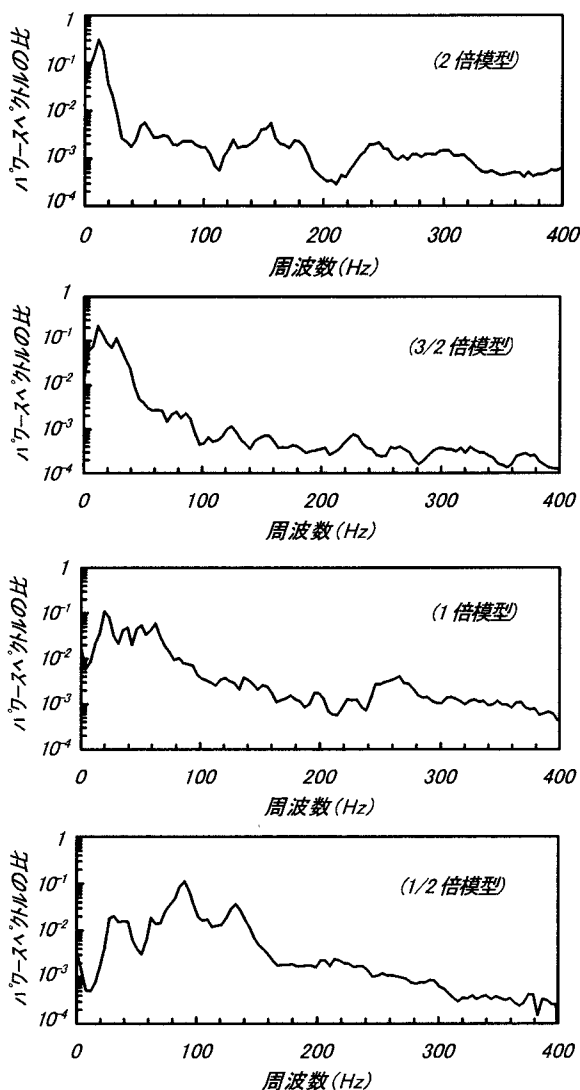


図-9 観測音パワースペクトルの比較

達関数を求めてみる。

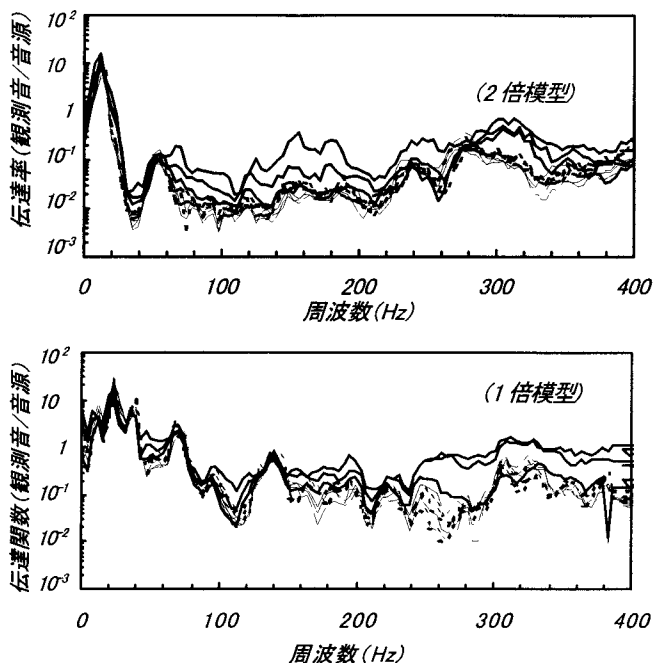
伝達関数

=観測音/音源

=天井を設けた場合の測点2の測定音

／天井を設けない場合の測点1の測定音 (5)

図-9に1倍および2倍模型の9ケースにおける伝達関数を示した。両模型とも低周波数帯に明確な卓越周波数帯を持ち、no. 2-7, 2-8, 4-7, 4-8で高周波数帯にやや相違が見られるものの、流況に依らず関数形はほぼ一致する。これは、伝達関数が水面と天井にはさまれた空間形状にほぼ依存し、模型形状のスケールごとに一意的に決まることを示している。高周波数帯において相違を生じている数ケースは、いずれも副ダム下流面において流れの剥離が生じており、これに起因する新たな音加わっているものと考えられる。図-10に得られた卓越周波数と模型スケールの関係を示した。計算値は、空間部分を上流側を閉、下流側を開とした上下流方向の気柱の0～2次モード共鳴周波数を示したものである⁵⁾。測定値は0次の計算値とほぼ一致し、



注) 凡例は図4に同じ

図-9 伝達関数のパワースペクトル分布

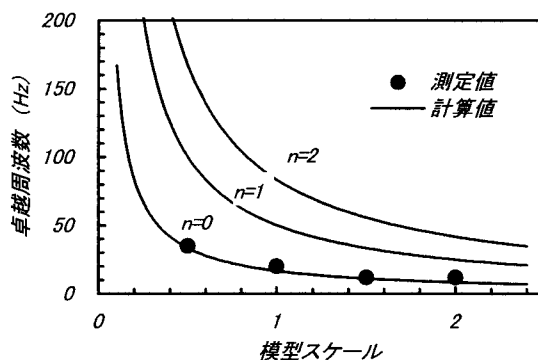


図-10 模型スケールと卓越周波数

跳水発生音は地下空間内を伝播する際に気柱共鳴を生じているものと考えることができる。

6. 低周波低減対策

前述のように、ダムによる放流音が問題になるのは低周波帯の音がほとんどである。これは、放流音が低周波帯の卓越した周波数特性を持っているのに加えて、低周波音が減衰しにくく、遠方まで伝播し易い特性を持っているためである。前節の検討で地下空間内の共鳴現象が明らかとなったので、この低周波数帯の共鳴音を低減させるための音響フィルターの適用性を検討する。

音響フィルターは一定の周波数のみを通過させるもので、一定の周波数以下を通過させる low-pass filter、一定の周波数以上を通過させる high-pass filter、特定周波数帯を通過させる band pass filter が Stewart によって提案されている⁶⁾。このうち、high-pass filter は音の伝播する主管に枝管を一定間隔で配置する構造(図-11)で cut-off 周波数(フィルタ

—を通過可能な周波数) は次式で与えられる。

$$f_c = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{k_2}{4V_1} \left(1 + \frac{4k_1}{k_2} \right)} \quad (6)$$

ここに

c : 音速, k_1 : 音響伝導率 (S_1/L_1),

k_2 : 枝間音響伝導率 ($S_2/(L'+0.8a)$), V_1 : 主管容積 ($L_1 \cdot S_1$)

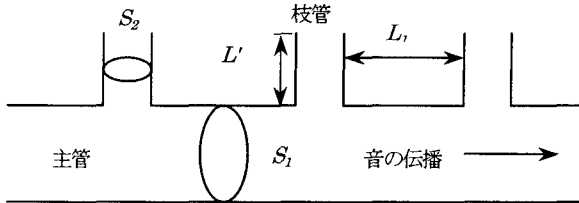


図-11 high-pass filter 模式図

図-12 に(6)式を 1.5 倍模型に適用した計算結果を示した。枝管として天井にスリットを設けることとし、枝管長は 0 とした。横軸は天井長さ L で無次元化したスリット間隔である。図-13 は測点 2 における観測音パワースペクトルのスリット設置による変化の実験結果を示したものである。低周波数帯が選択的に低減しており、スリットが式(6)で計算される high-pass filter としての効果を果たしていることがわかる。図-14 は、これらの実験結果から 60Hz 以下の低周波数帯の音圧レベルを求めたものであるが、スリットを設けない場合と比較して 10dB (音圧実効値では 60%) 程度の低減となっている。

実用上は天井に複数の給気管を設置することによって対処可能と考えられるが、今後は、現実の構造物を想定した実験・解析により(6)式の適用性および低減量を評価する必要がある。

7. 結論

以上をまとめると以下のとおりである。

- 1) 跳水の発生音は、始端部からの発生音が支配的であり、音源は幅方向へ分布する線音源とみなせる。
- 2) 音源のパワースペクトルは、一定の模型形状・縮尺に対して、流況に依らない固有の形状を持つ。
- 3) 音源出力は流入エネルギーに比例し、その比例定数すなわち音のエネルギーへの変換効率は、流況および模型スケールに依らず、減勢工形状によってほぼ決まる。
- 3) 跳水始端部で発生した音は、地下空間内伝播時に共鳴を生じ、その卓越周波数は気柱共鳴周波数に一致する。
- 4) 減勢工天井に給気管を模したスリットを設置することにより低周波数帯の共鳴音を低減することが可能である。

以上の結果は、今回の模型形状および水理条件の範

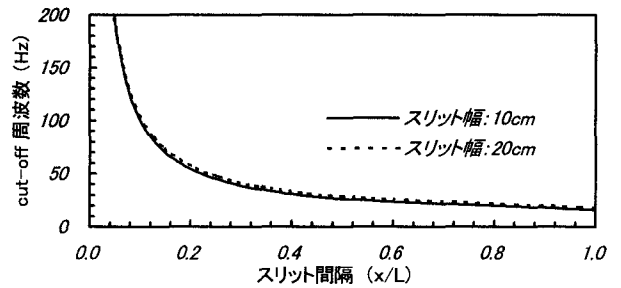


図-12 スリット間隔と cut-off 周波数

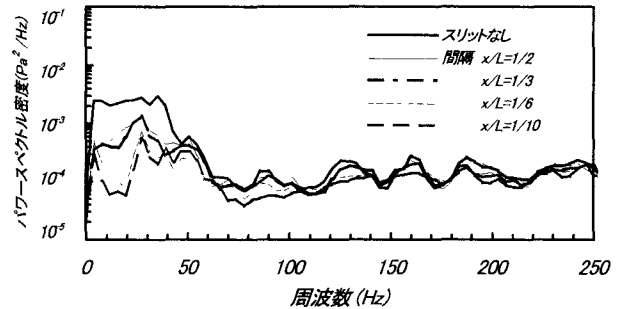


図-13 スリットによるパワースペクトルの変化

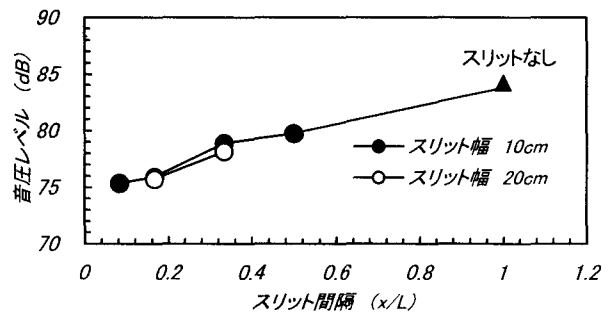


図-14 スリット間隔と低周波数帯の低減量

囲において成立するものである。今後さらにデータの蓄積を行い、実験・解析手法を確立し、実際の構造物の設計手法へ反映させていく予定である。

本研究にあたり、小山工業高等専門学校の久保助教授に貴重な助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 森靖夫, 水上雅人, 武士保健: 剛球または水滴の水面への落下および水流により発生する音の研究, 機械学会論文集(B編), 第53巻, 487号, pp. 903-909, 1987
- 2) Minnarert, M.: Philos. Mag., 16, pp. 235-248, 1933
- 3) 例えば, 谷一郎編: 流体力学の進歩, 丸善, pp. 221-262, 1980
- 4) 泉完: 跳水型落差工の斜面上における減勢音特性, 農業土木学会誌, 第63巻, 第5号, pp. 507-512, 1988
- 5) 例えば, 五十嵐寿一編: 音響と振動, 共立出版, pp. 88-90, 1968
- 6) Stewart, G.W.: Acoustic Wave Filters, Physical Review, Vol. XX, No.6, pp.528-551, 1922

(1998. 9. 30 受付)