

第5章 予測手法の適用例

ートンネル式放流設備減勢工における発生音の予測ー

本章では、天ヶ瀬ダムに新たに設けられるトンネル式放流設備の減勢工の計画形状を対象として、前章までに検討した手法によってトンネル出口における観測音の推定を行い、減勢工を地下構造とすることによる発生音の低減効果について評価する。

5.1 検討の背景

天ヶ瀬ダムは、昭和39年に淀川水系宇治川に建設された洪水調節・水道用水の供給および発電を目的としたアーチ式コンクリートダムであり、図-5.1及び写真-5.1に示すように空中放流式の2基のコンジットおよび4基の越流頂ゲートからなる放流設備を有している。その後、昭和34年に起こった15号台風により、淀川沿岸に多大な被害が生じたため、昭和46年に「淀川水系工事实施基本計画」が改定され、当ダムの運用法の変更が計画された。これによって、当ダムには、既設の放流設備に加えて、新たに700m³/sの放流能力を持つ放流設備が必要となった。この新たな放流設備の建設は、「天ヶ瀬ダム再開発事業」として計画され、現在、地質調査や構造物の設計が行われているところである。

一方、本ダムでは、建設後、コンジットからの放流時に超低周波音が発生し、近隣の住居等において窓が振動するなどの問題が生じた。そのため、数回にわたって、放流量と発生音の関係、発生音の周波数特性、音源位置等についての詳細な調査が実施された^{1),2)}。しかし、発生音そのものを低減する方法は見出せず、対策として、窓のサッシ化等の防音工事が実施されたが、抜本的な解決となっていないため、現在でも、発生音そのものを低減することが望まれている。なお、写真-5.2に放流状況を示している。



写真-5.1 天ヶ瀬ダムの現況

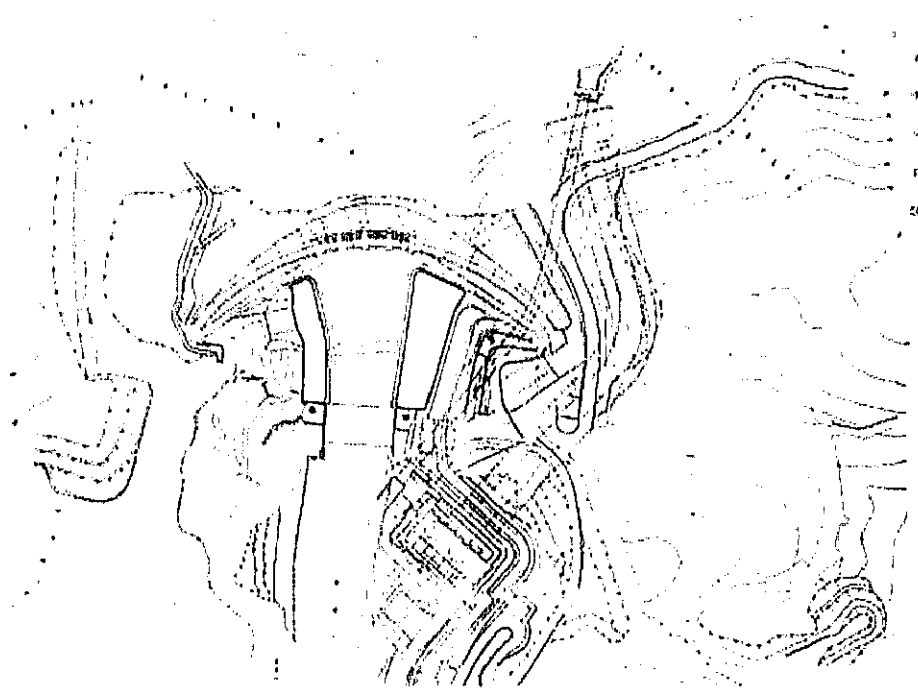


図-5.1a 天ヶ瀬ダム平面図

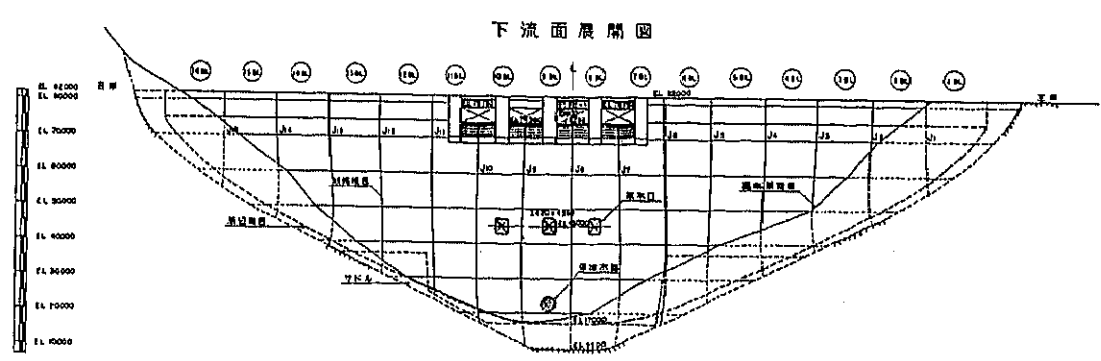


図-5.1b 天ヶ瀬ダム下流面図

天ヶ瀬ダムは琵琶湖から流れ出る宇治川に設けられた洪水調節を目的のひとつとした多目的ダムである。宇治川沿岸における洪水防禦は、琵琶湖上流域の流出を琵琶湖で、琵琶湖下流域の流出を天ヶ瀬ダムで、それぞれ流量調節することにより行われる。そのため、天ヶ瀬ダムでは、出水時に大きな流量が通過するとともに、その後、洪水を貯留した琵琶湖が次の出水に備えて放流する中規模な流量が通過する。琵琶湖の洪水調節容量が非常に大きいため、この中規模な放流は、最大2週間にも及ぶ計画となっている。



写真-5.2 天ヶ瀬ダム放流状況

こうした洪水後の放流は、長期に亘るうえに、天候の回復後も続くので、超低周波音が発生した場合は大きな問題となる。既設のコンジットを含む全ての放流設備を用いて放流している場合には不可能であるが、流量が比較的小さい場合には新設の放流設備のみによる放流が可能である。したがって、新たに設ける放流設備において発生音を抑制することができれば、従来用いてきたコンジットに替わって新設の放流設備を用いることにより、抜本的な発生音対策が可能となる。

新設される放流施設は、最大放流量 $700\text{m}^3/\text{s}$ の大規模施設である。重力式ダムでは既設のダム堤体に穴を開けて放流設備を新設する事例が見られるが、アーチ式ダムではこのような方法は構造上困難である。そのため、新たな放流設備は、ダムを迂回して地山内にトンネル構造として設けることとしているが、前述した放流時の発生音の低減対策の他、景観上の観点、河道との取り合い等施設の配置等の理由から、減勢工部も含めてトンネル構造とすることが計画されている。

そのため、放流時の発生音の音源となる減勢工を地下構造とすることで低周波音をどの程度低減することができるか、発生音の周波数特性がどのように変化するか等について、定量的に評価することが必要となった。

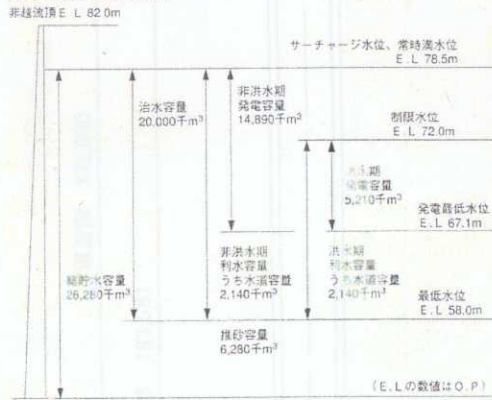
5.2 天ヶ瀬ダムに新設されるトンネル式放流設備の概要

アーチ式ダムでは、既設のダム堤体に新たに放流設備を設けることが構造上困難であることから、放流能力を増強するための新規放流施設は地山内に設けるトンネル式放流設備で計画されている。本施設は、最大放流量 $700\text{m}^3/\text{s}$ の大規模施設であり、減勢工部も含めて、トンネル構造としている。図-5.2 及び図-5.3 に模式図を示した。

●トンネル式放流設備平面図（予定）



●貯水池容量配分図



●トンネル式放流設備断面図（予定）

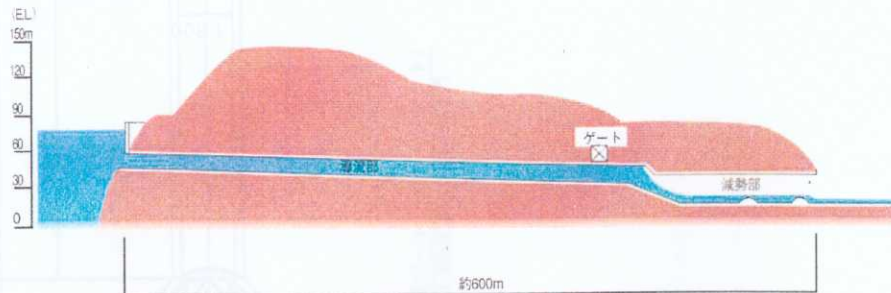


図-5.3 トンネル式放流設備模式図

新規に設けられる放流設備は、流入部、圧力管路部、ゲート部、放流管部および減勢工部からなる。これらの一連の放流設備の水理的な検討が柏井らによって行われており、「土木研究所資料第 3623 号天ヶ瀬ダム水理模型実験」（平成 11 年 3 月水工水資源研究室）³⁾に詳細な検討結果が示されている。ここでは、これらの検討により求められたトンネル式放流設備減勢工の最終形状についてのみ示した（図-5.4～9）。本報告の検討対象である減勢工は、図-5.8 に示したように水平水叩き上に跳水を発生させる「副ダムを有する水平水叩き式減勢工」の形式が採られており、二次減勢工までをトンネル内に設ける構造となっている。水理的には、長期に亘る放流が計画されていることから十分安定した減勢状況が得られること、また、トンネル内であることから上部の空断面が十分に確保され、断面の閉塞が生じないこと等に留意して形状が定められている。

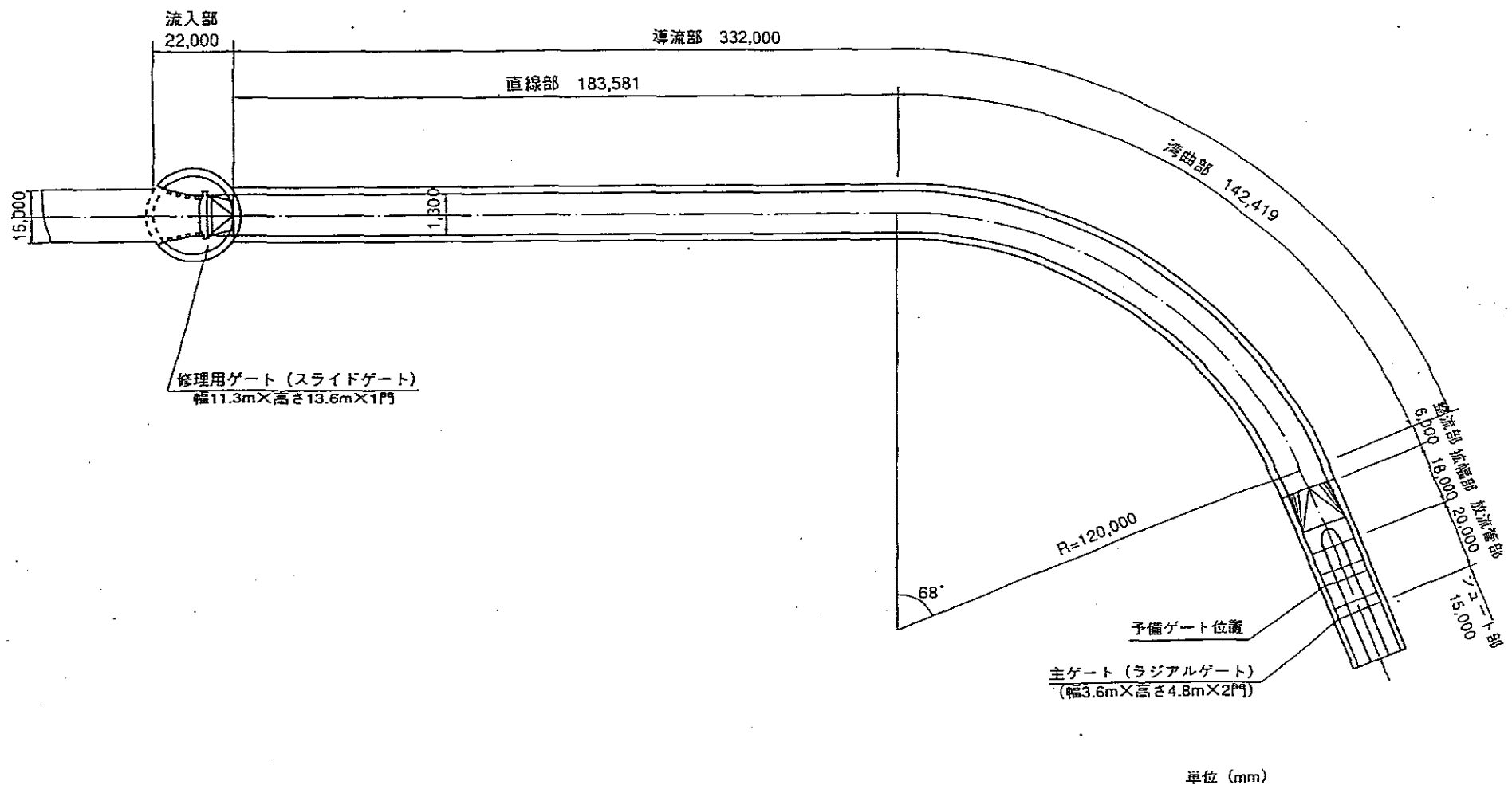
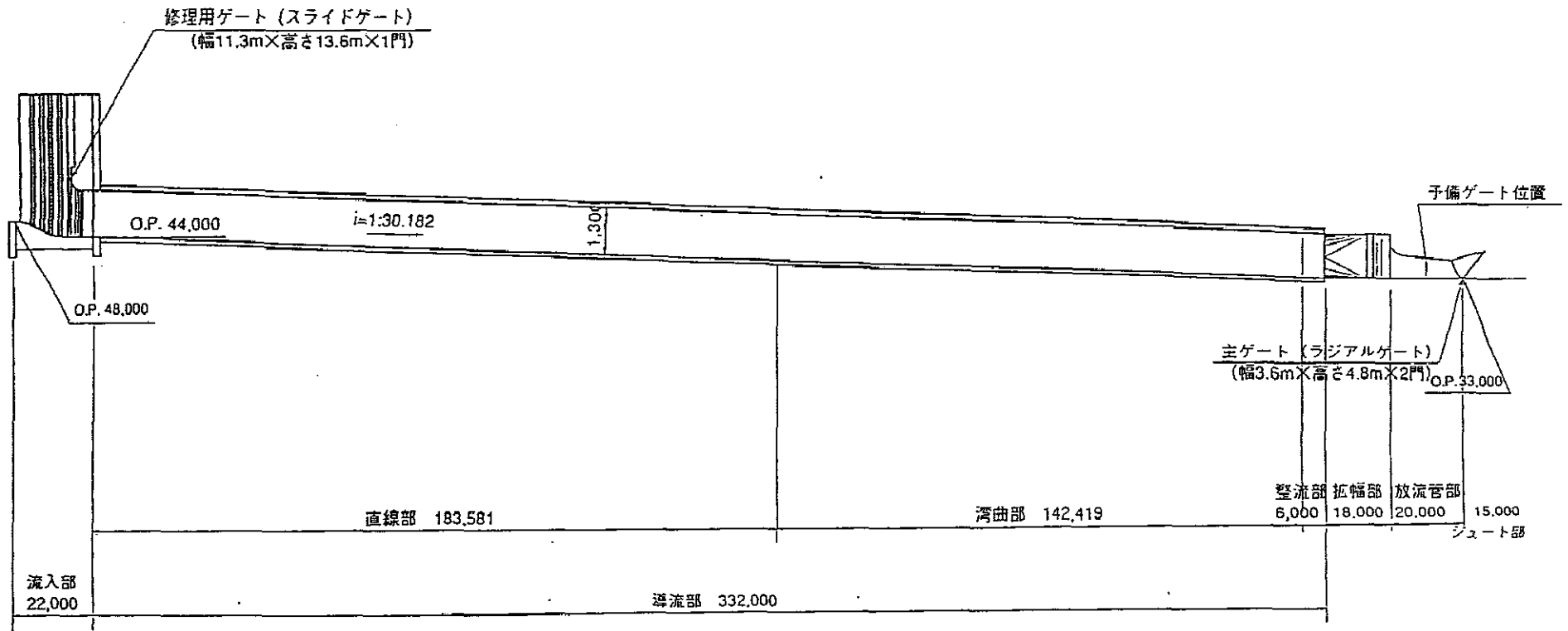
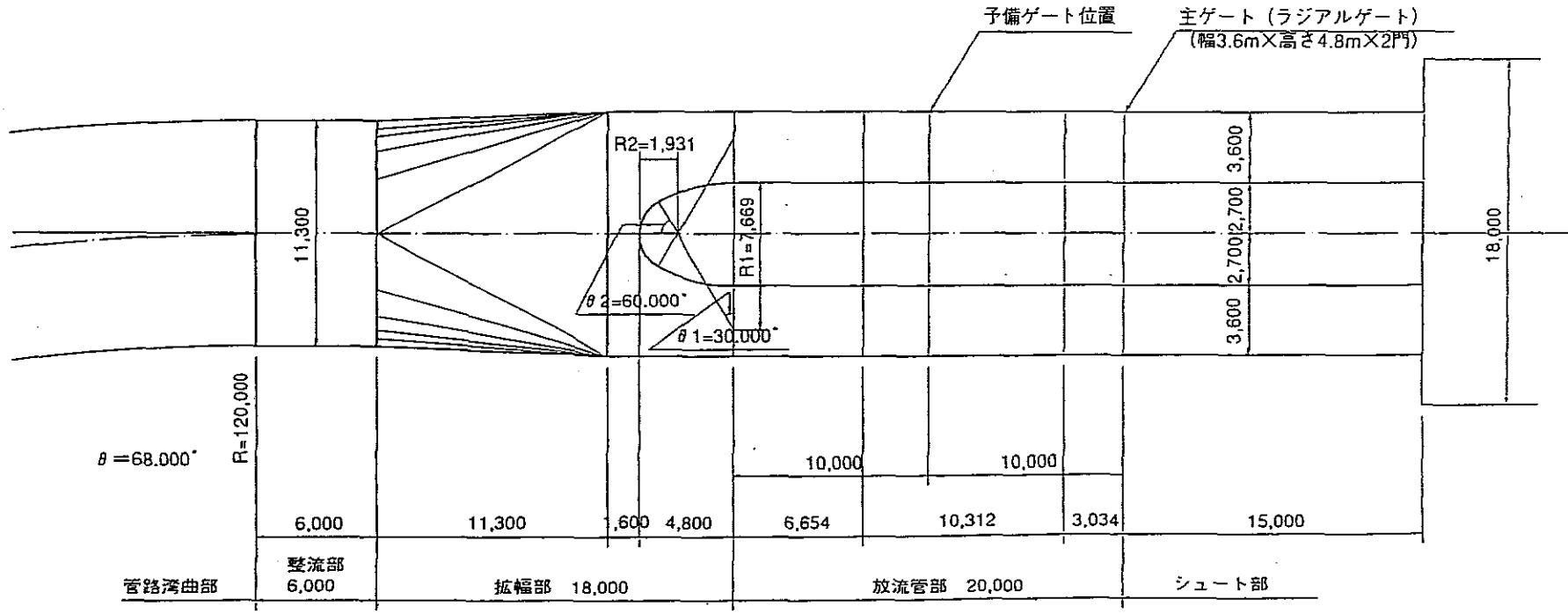


図-5.4 放流設備平面図



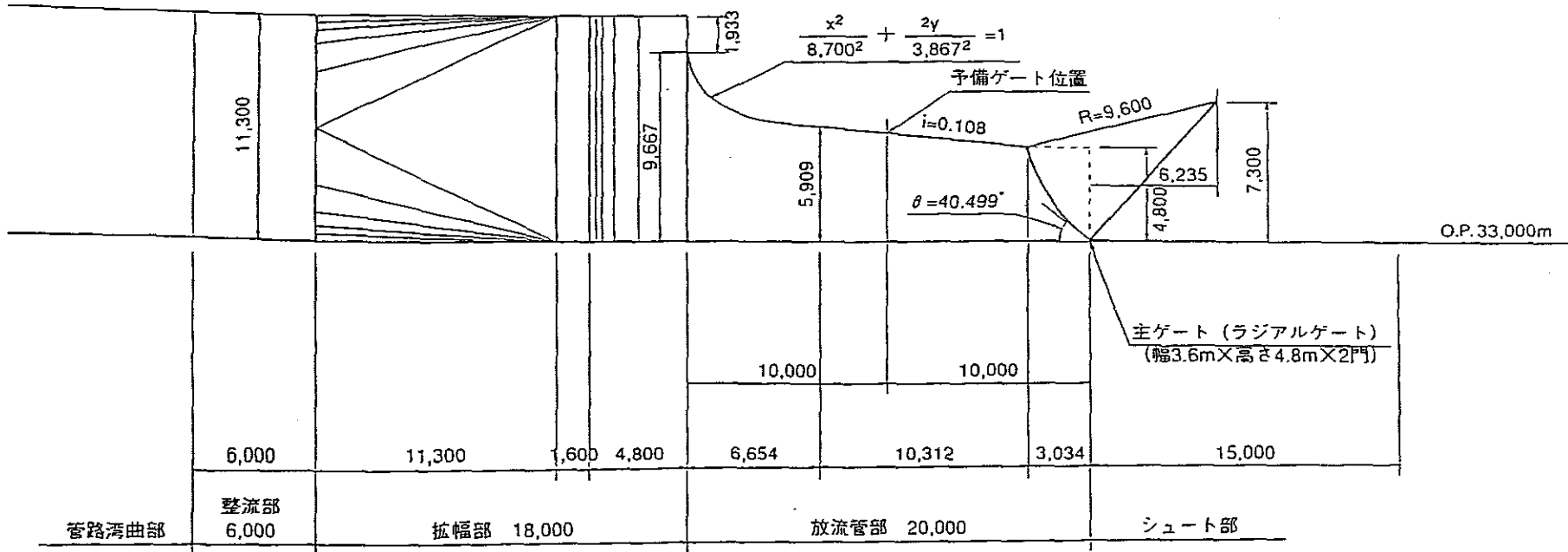
単位 (mm)

図-5.5 放流設備縦断面図



単位 (mm)

図-5.6 放流管部平面図



単位 (mm)

図-5.7 放流管部縦断図

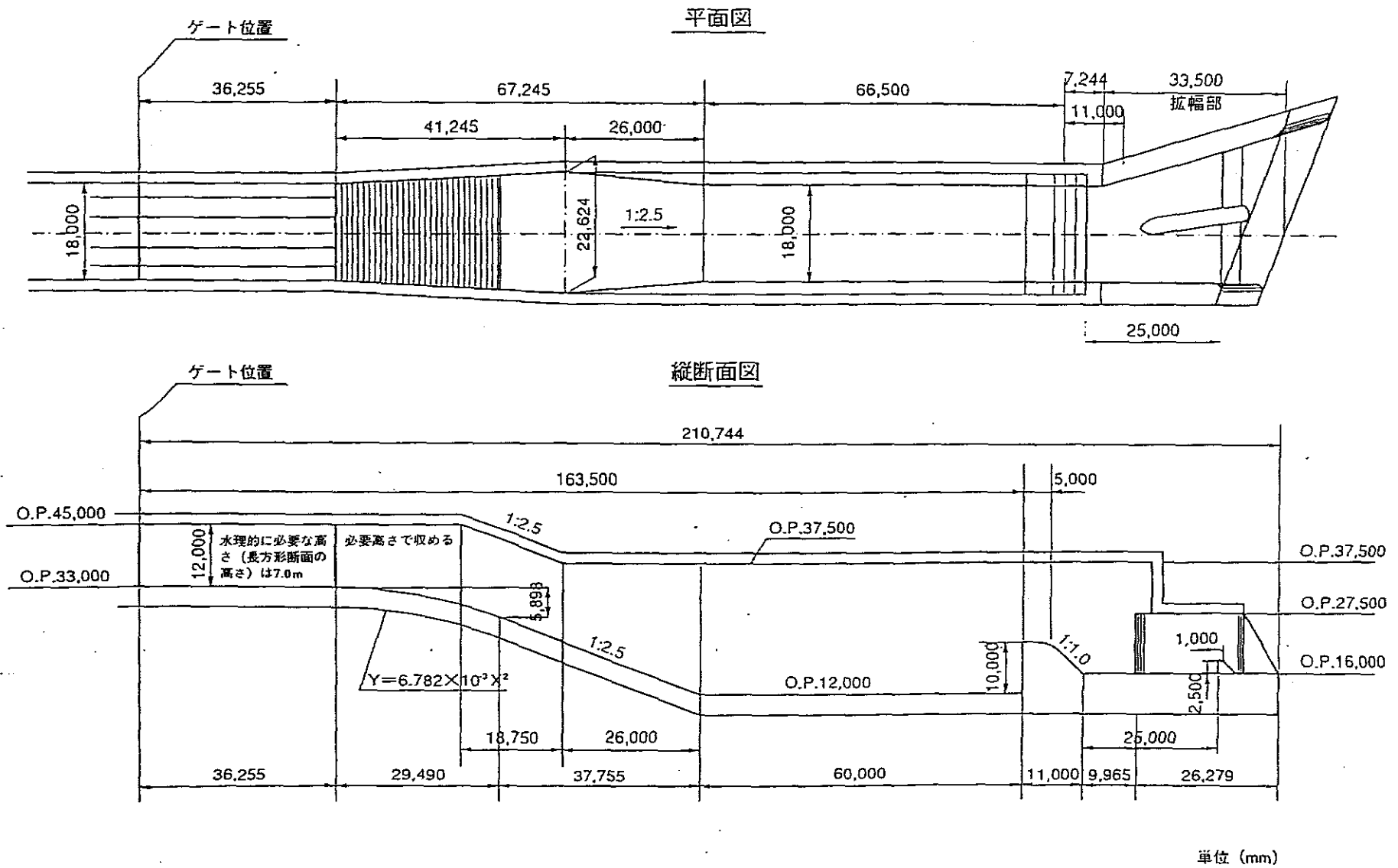
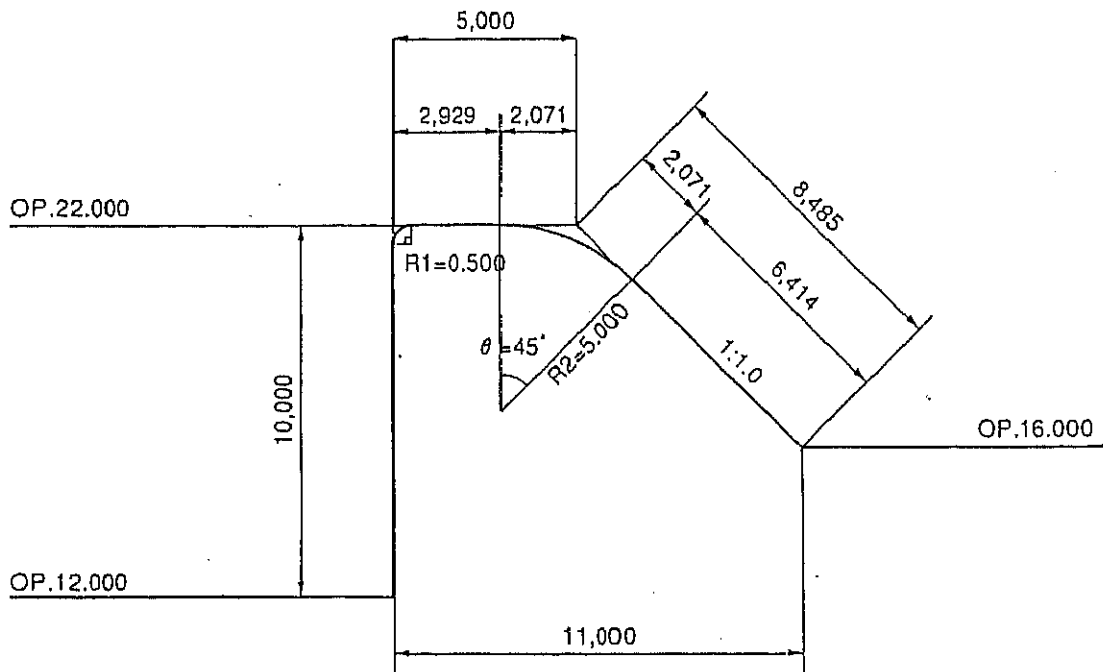
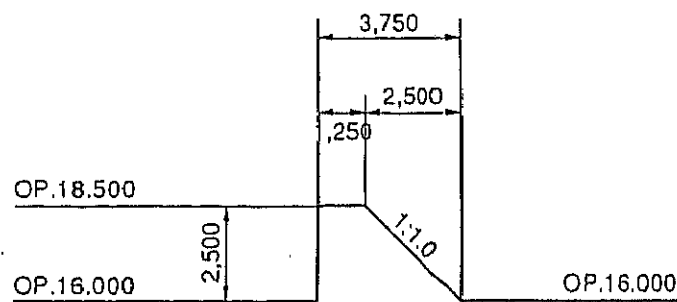


図-5.8 減勢工部形状図

副ダム詳細図



シル詳細図



単位 (mm)

図-5.9 副ダムおよびシル詳細図

5.3 模型実験

5.3.1 実験模型および放流条件

図-5.10 に実験に用いた模型を、図-5.11 に音圧の測定位置を示した。縮尺は 1/15.3 である。(ただし、周波数特性の換算の際には 1/16 縮尺として扱っている。) また、表-5.1 に実験を行った流量、流速および水位条件を示した。これらの放流条件は、当施設の設計対象流量 (700m³/s) および水位とは異なっているが、これまでの検討結果より、音源や観測音の周波数特性 (オーバーオール値で除した無次元パワースペクトル) および伝達率については、大きく水力条件が異ならない限りほぼ一定の値を示すことが判明している。したがって、原型値の推定のうち周波数特性および伝達率についてはこれらの放流条件から得られる値を用いることとし、音圧の絶対値、すなわち音響出力の推定に必要な流入エネルギーの算定に際しては原型の設計放流条件を用いることとした。

表-5.1 模型および原型における水理量の対応表

		流量 Q m ³	水路幅 B m	線流量 q m ³ /m	実流量 q' m ³ /(0.2m)	流速 v m/s	水位(O.P.) H m
設計流量	原型	700	22.6	31.0		26.2	67.2
	実験	0.764	1.48	7.39	0.104	6.7	
実験流量	原型	480	22.6	21.2		27.8	72.6
	模型	0.524	1.48	0.355	0.071	7.1	
実験流量	原型	419	22.6	18.6		25.9	66.1
	模型	0.458	1.48	0.31	0.062	6.6	
実験流量	原型	345	22.6	15.3		22.6	56.2
	模型	0.377	1.48	0.26	0.051	5.8	

注) 1. 実験流量とは実際に実験を行った流量およびその原型への換算値を示したものである。

2. 実流量 q' は実際の模型における流量 (模型の水路幅は 20cm) を示したものである。

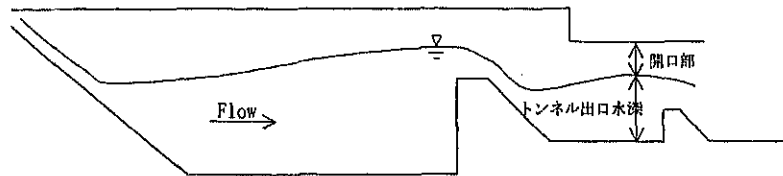
下流水位は、トンネル出口付近における空き断面の高さが平均水位時で 0.12、0.22、0.33 m (原型値で 1.8、3.4、5.0m) となるように模型下流の水位調節板を調整した。実験時の各流量における水深および空き断面高さを表-4.2 に示した。

また、本章で用いた模型形状と第 4 章で用いた模型形状の差は副ダム下流だけであり、跳水始端部における発生音については、第 4 章の実験結果をそのまま用いることとした。表-5.1 の流量条件に対応する音源についての実験は、表-3.1 に示した実験ケース 3-4-a~c である。

表-5.2 トンネル出口水位計測結果

流量 (m ³ /s)	開口部	トンネル出口水深(m)		開口部高さ(m)	
		最高	平均	最高	平均
0.070	小	0.69	0.63	0.06	0.12
	中	0.53	0.53	0.22	0.22
	大	0.42	0.42	0.33	0.33
0.060	小	0.68	0.63	0.07	0.12
	中	0.61	0.54	0.14	0.21
	大	0.51	0.42	0.24	0.33
0.050	小	0.65	0.62	0.10	0.13
	中	0.58	0.54	0.17	0.21
	大	0.43	0.40	0.32	0.35

注)測定位置は以下のとおり



なお、実験は幅方向には一様な形状を仮定して2次元模型を用いているが、実際のトンネル式放流設備の減勢工形状は図-5.8 に示すように幅方向にも異なった馬蹄形断面となっている。したがって、減勢工の幅方向の共鳴や馬蹄形をしていることの影響も完全に再現するためには3次元模型による実験が必要である。しかし、これまでの検討から明らかなようにトンネル内における音の伝播特性は流下方向の共鳴が卓越して現れているため、ここでは2次元模型による検討とした。

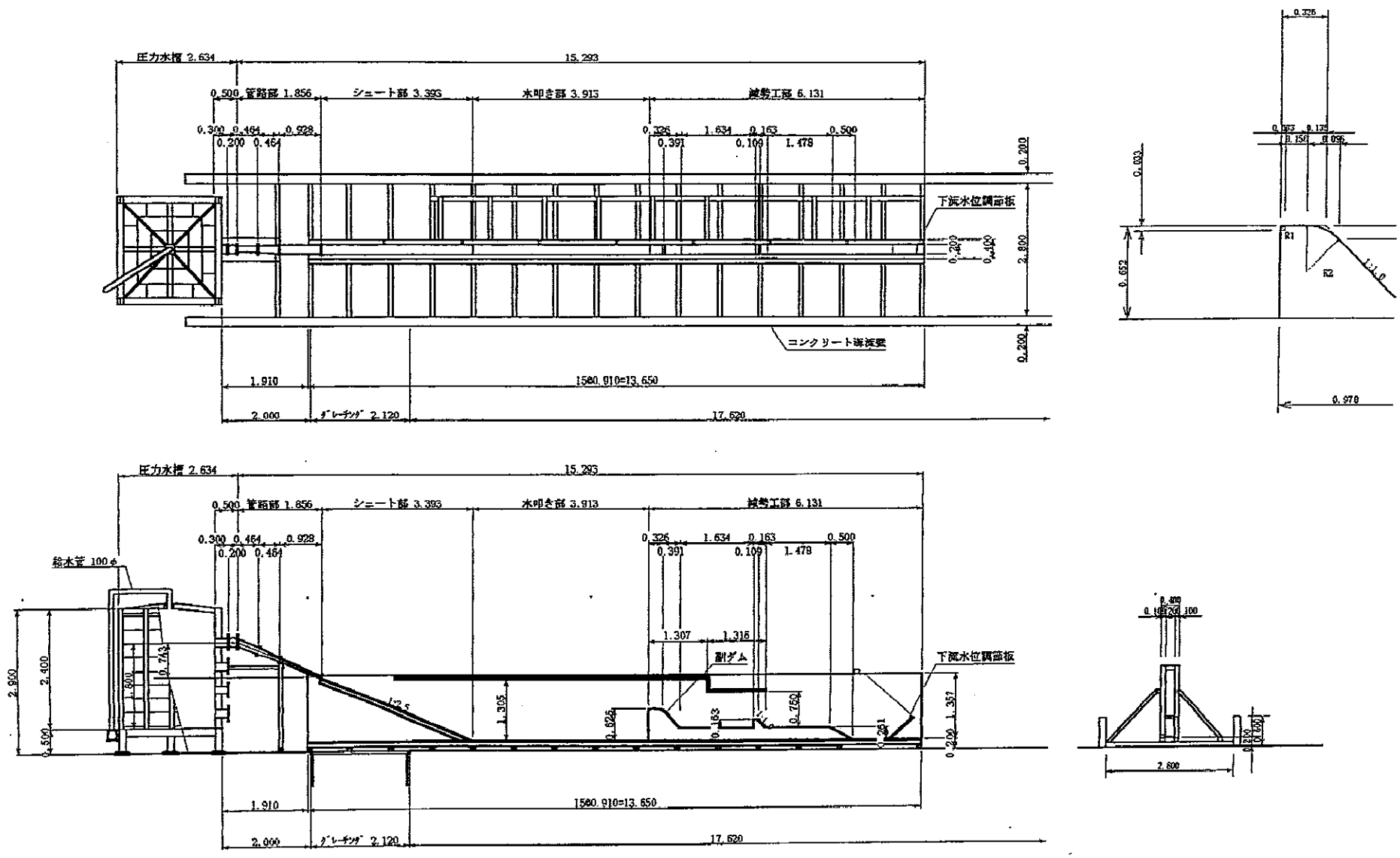
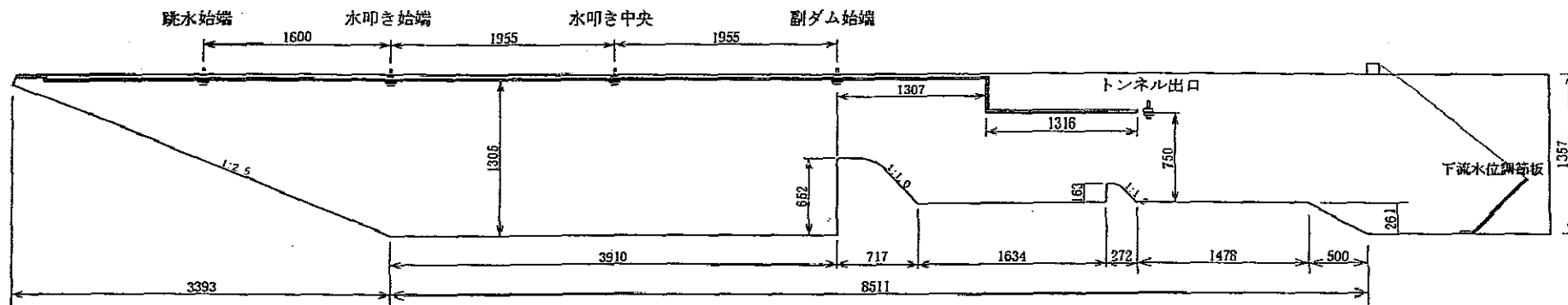


図-5.10 天ヶ瀬ダムトンネル式放流設備減勢工再現実験模型



音圧測定位置

図- 5.11 音圧測定位置図

5.3.2 実験結果

トンネル出口およびトンネル内始端部直上における音圧のオーバーオール値を表-5.3 に、周波数特性を図-5.12~17 に示す。図は、いずれも上段がパワースペクトル密度を下段がオーバーオール値で無次元化した値を示している。

表-5.3 模型実験音圧測定結果

流量 (m ³ /s)	開口部	開口部 高さ(m)	音圧 (Pa)		音圧レベル (dB)	
			跳水始端	トンネル出口	跳水始端	トンネル出口
0.071	小	0.12	11.698	0.811	115.3	92.2
	中	0.22	11.590	1.008	115.3	94.0
	大	0.33	12.316	1.164	115.8	95.3
0.062	小	0.12	8.309	0.663	112.4	90.4
	中	0.21	8.902	0.822	113.0	92.3
	大	0.33	8.977	1.017	113.0	94.1
0.051	小	0.13	5.089	0.482	108.1	87.6
	中	0.21	5.617	0.588	109.0	89.4
	大	0.35	6.046	0.787	109.6	91.9

まず、表-5.3 および図-5.12~14 に示すトンネル出口における測定値について見ると、音圧の絶対値は空き断面の大きさによって多少変化し、空き断面が小さいほど、すなわち水位が高いほど小さくなるのがわかる。無次元化した周波数特性は水位に依らずほぼ同一の分布を示しており、空き断面の減少による低減傾向は全周波数帯に渡っていることがわかる。図-5.15 は、空き断面を一定とした場合の流量に対する音圧の変化を示したものである。流量の増加とともに音圧は大きくなる傾向を示しているが、その分布形状はほぼ同一である。すなわち、第4章における検討と同様、トンネル出口における観測音の周波数特性は水理的な条件に依らずほぼ一定となることが確認された。したがって、以降の実機値の推定は、図-5.12 に示した模型流量 0.071m³/s のトンネル出口測定音の周波数特性を用いて行うものとする。

次に、図-5.16 に示すトンネル内跳水始端直上における測定値を見ると、周波数特性および音圧の絶対値は出口の空き断面の大きさにはほとんど影響されていないことがわかる。一方、図-5.17 に示した空き断面を一定とした場合の流量に対する音圧の変化を見ると、トンネル出口と同様に流量の増加とともに音圧は大きくなる傾向を示しており、その分布形状はほぼ同一である。なお、このトンネル内の測定音は、跳水始端部における発生音、すなわち、第4章で検討を行った天井を設けない場合の音とは異なり、トンネル内における共鳴を含んだ音である。

なお、第3章において検討したように、跳水始端部における発生音の周波数特性は流量条件に依らず一定となっている。

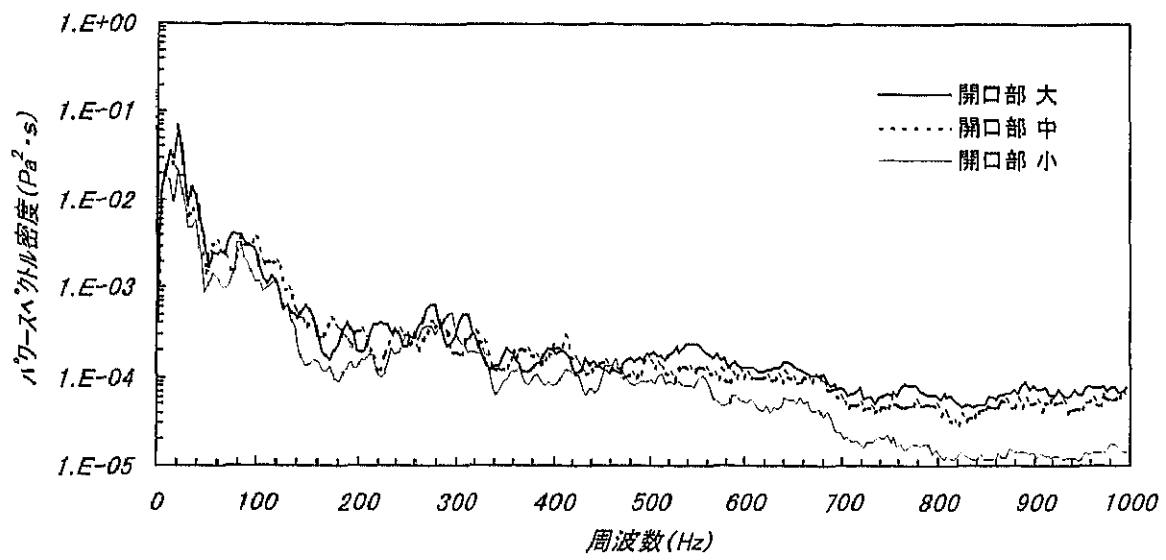


図-5.12a トンネル出口観測音のパワースペクトル (模型値) 流量:0.071m³/s

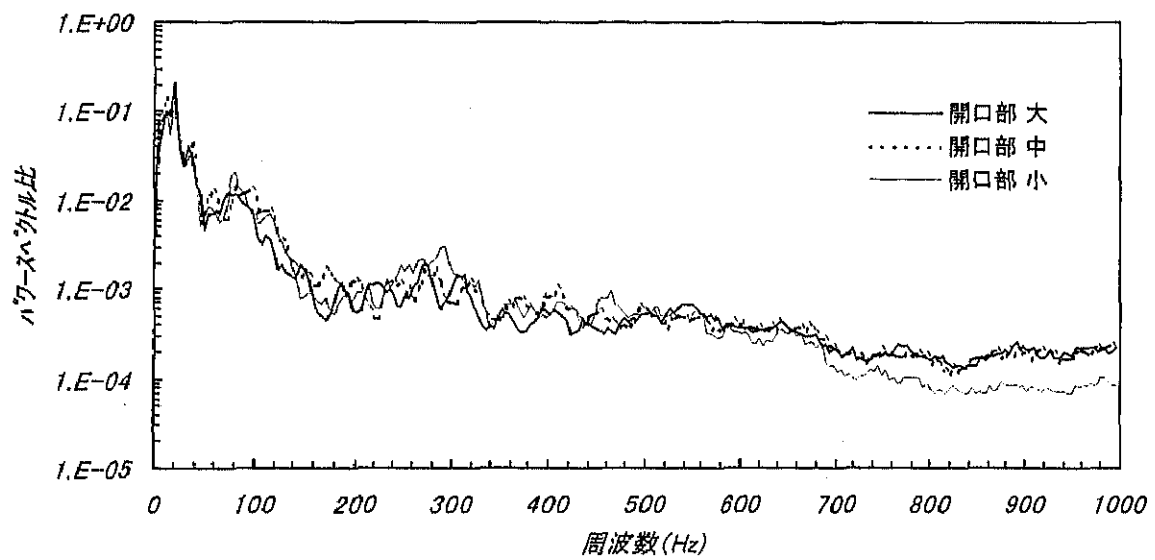


図-5.12b トンネル出口観測音のパワースペクトル (模型値) 流量:0.071m³/s

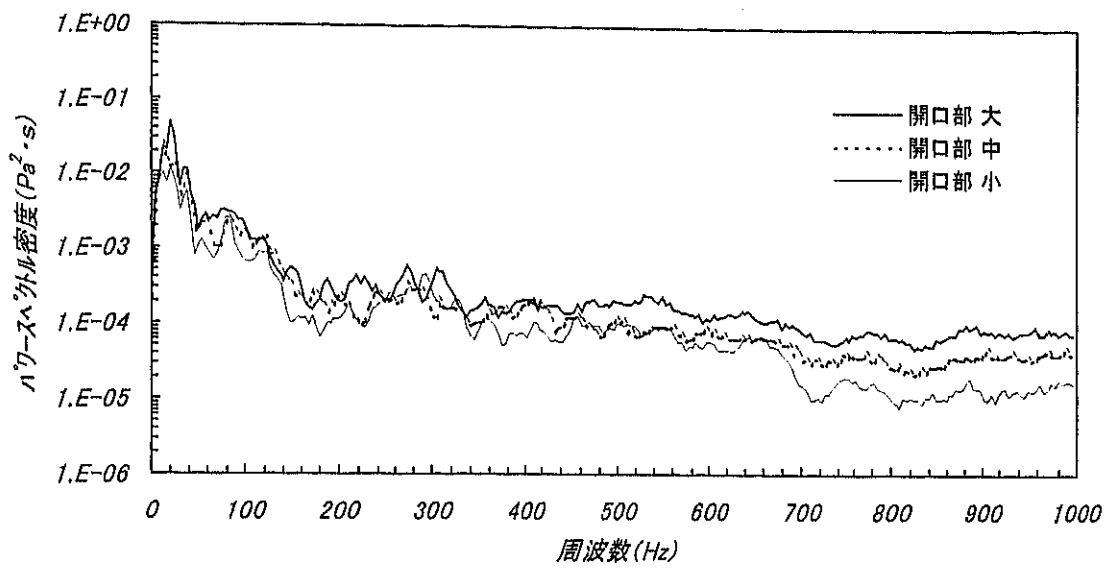


図-5.13a トンネル出口観測音のパワースペクトル (模型値) 流量:0.06m³/s

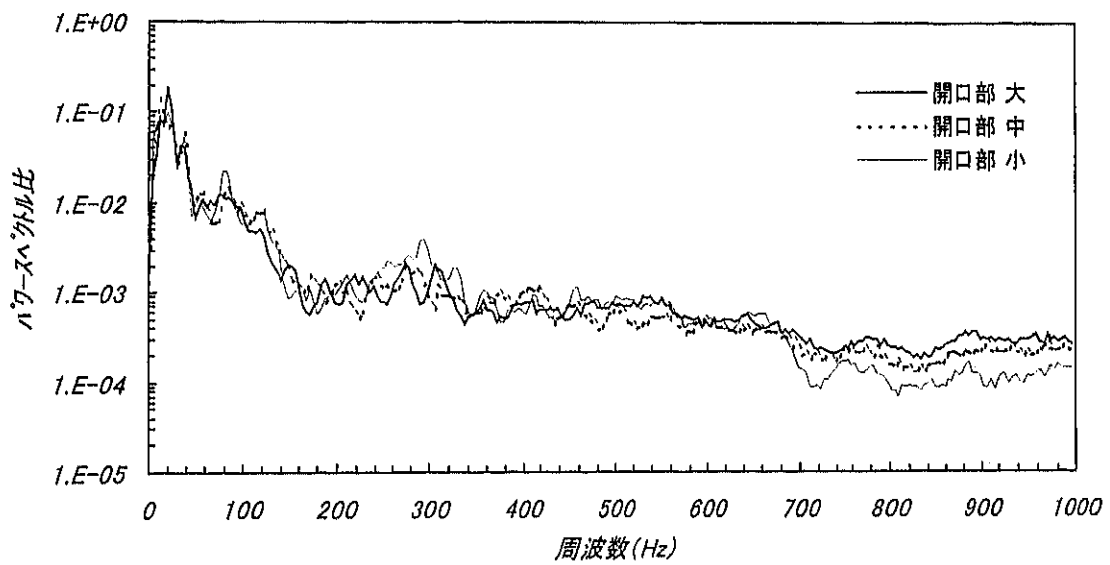


図-5.13b トンネル出口観測音のパワースペクトル (模型値) 流量:0.06m³/s

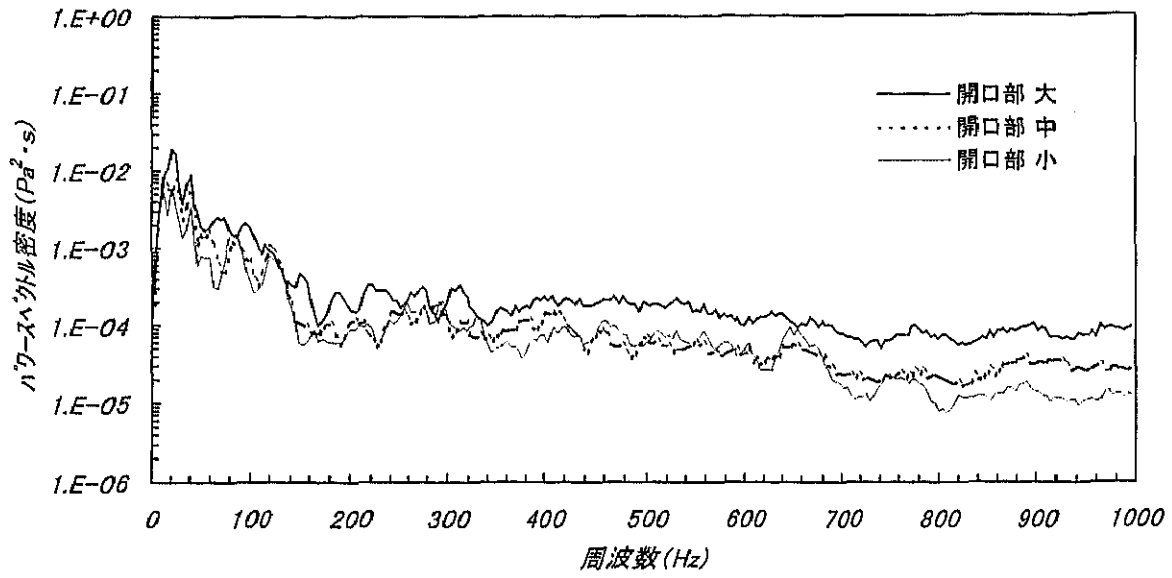


図-5.14a トンネル出口観測音のパワースペクトル (模型値) 流量:0.05m³/s

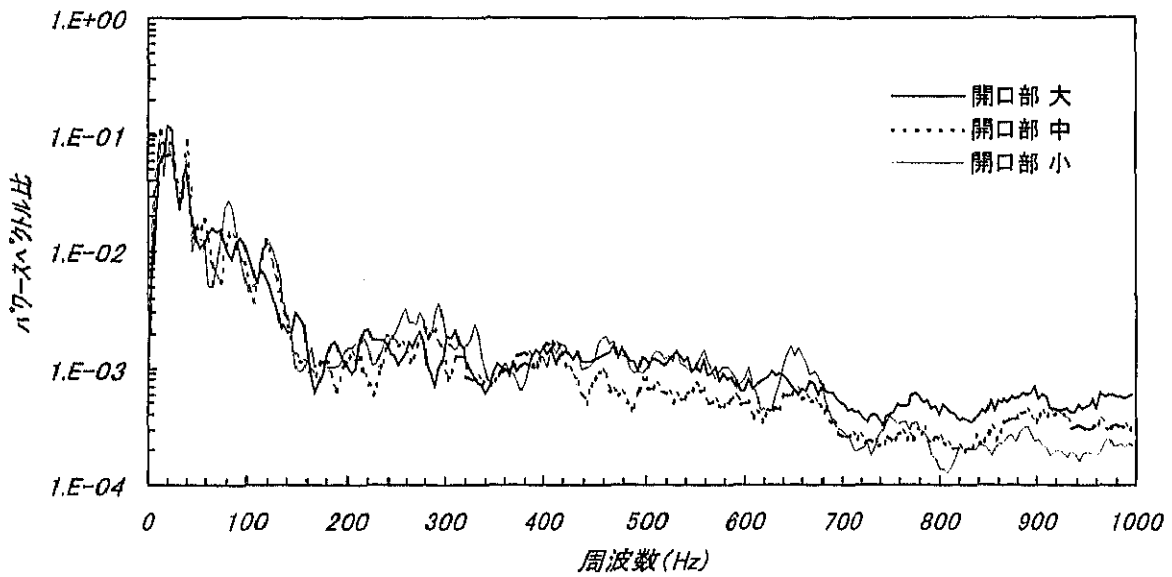


図-5.14b トンネル出口観測音のパワースペクトル (模型値) 流量:0.05m³/s

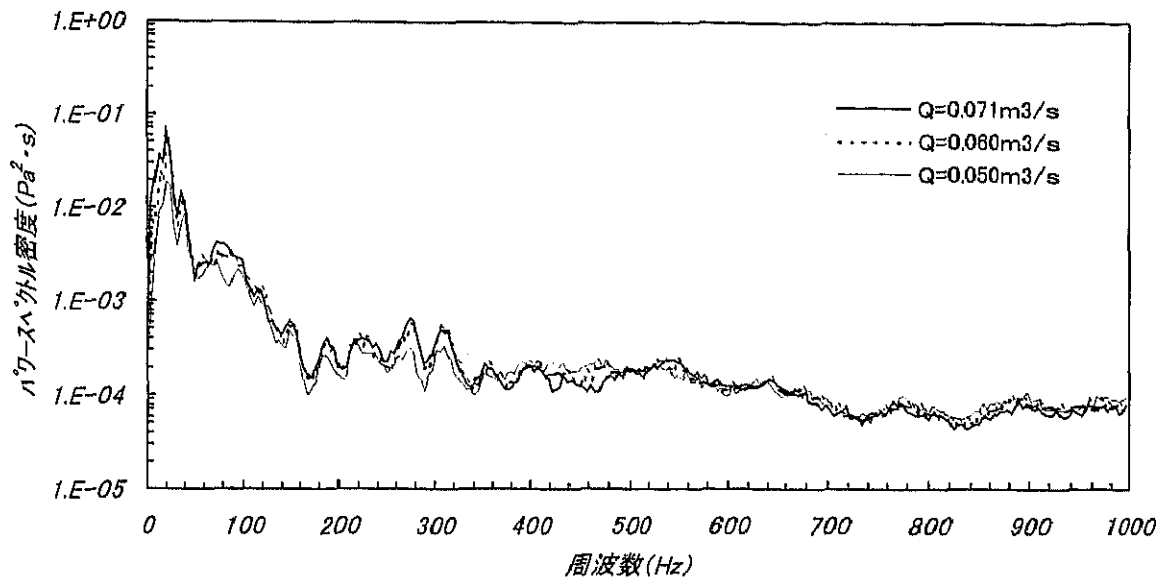


図-5.15a トンネル出口観測音のパワースペクトル（模型値） 開口部大

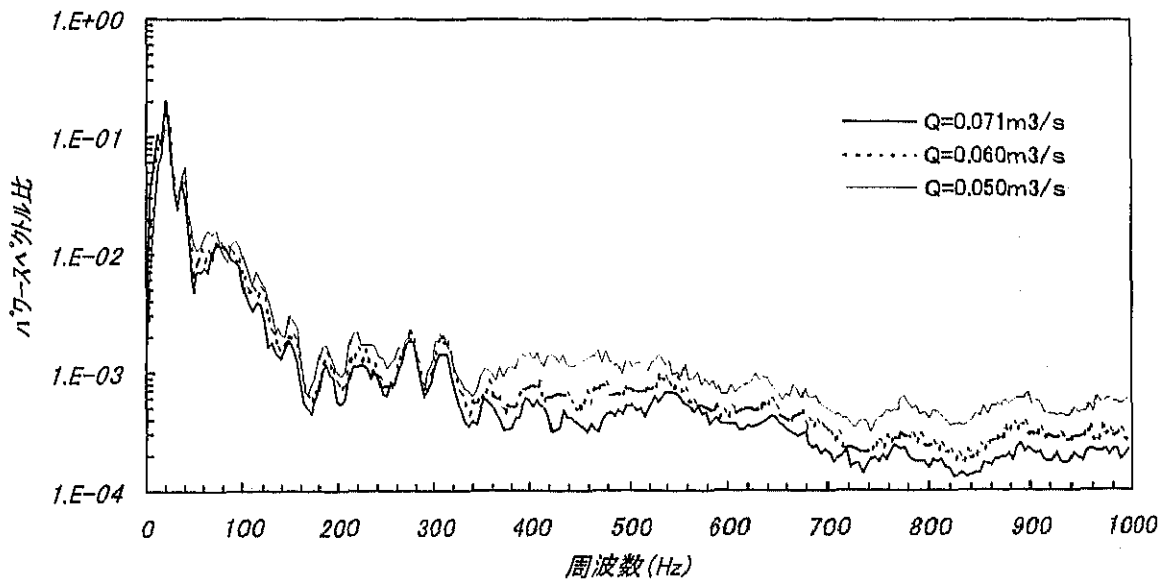


図-5.15b トンネル出口観測音のパワースペクトル（模型値） 開口部大

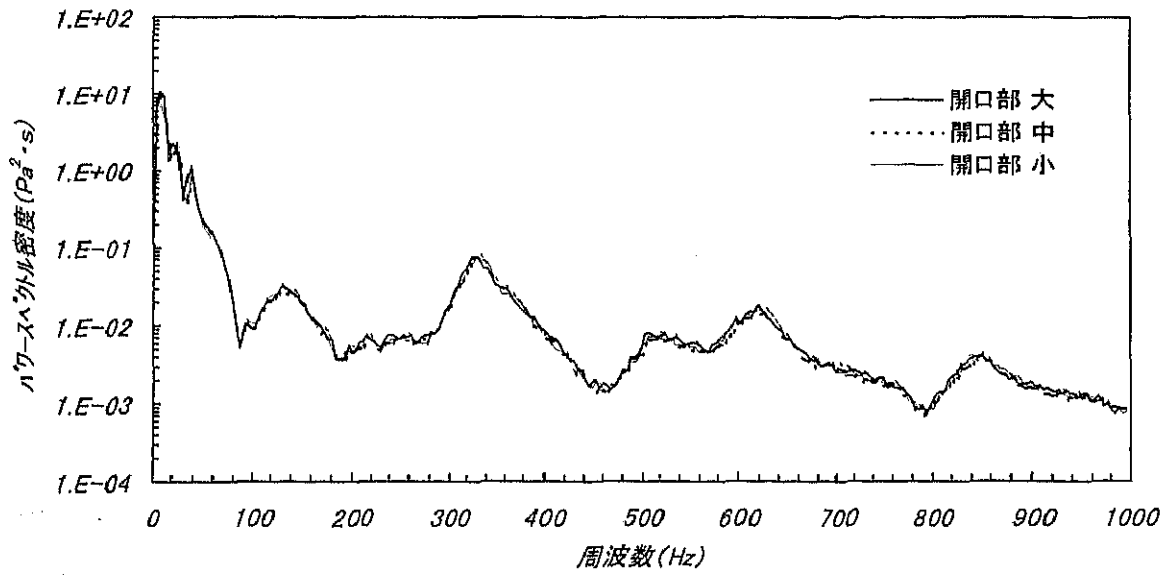


図-5.16a トンネル内部跳水始端直上音のパワースペクトル (模型値)

流量:0.071m³/s

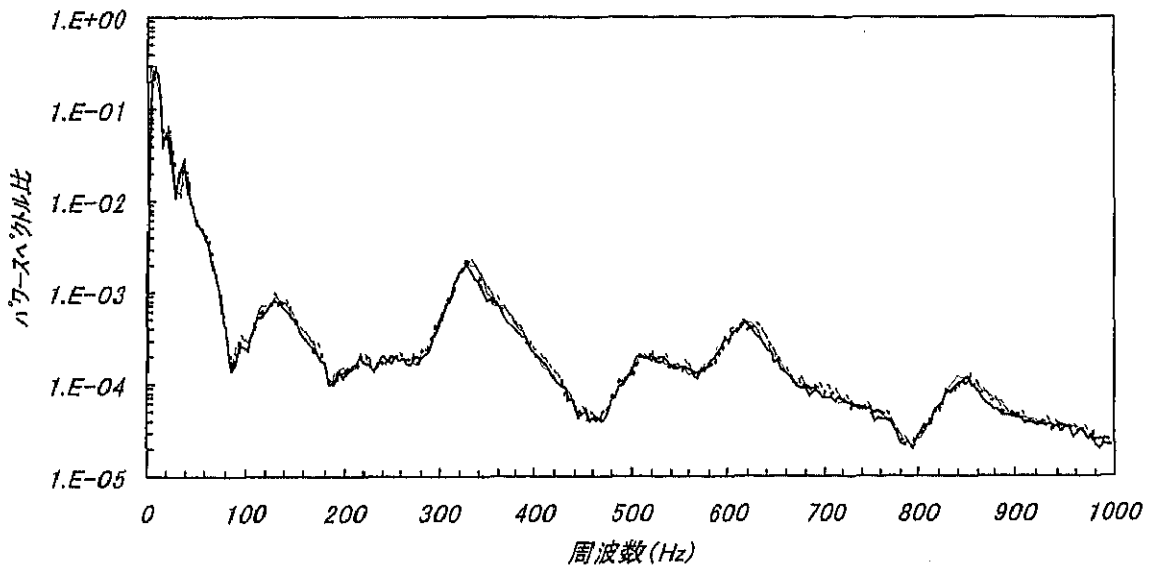


図-5.16b トンネル内部跳水始端直上音のパワースペクトル (模型値)

流量:0.071m³/s

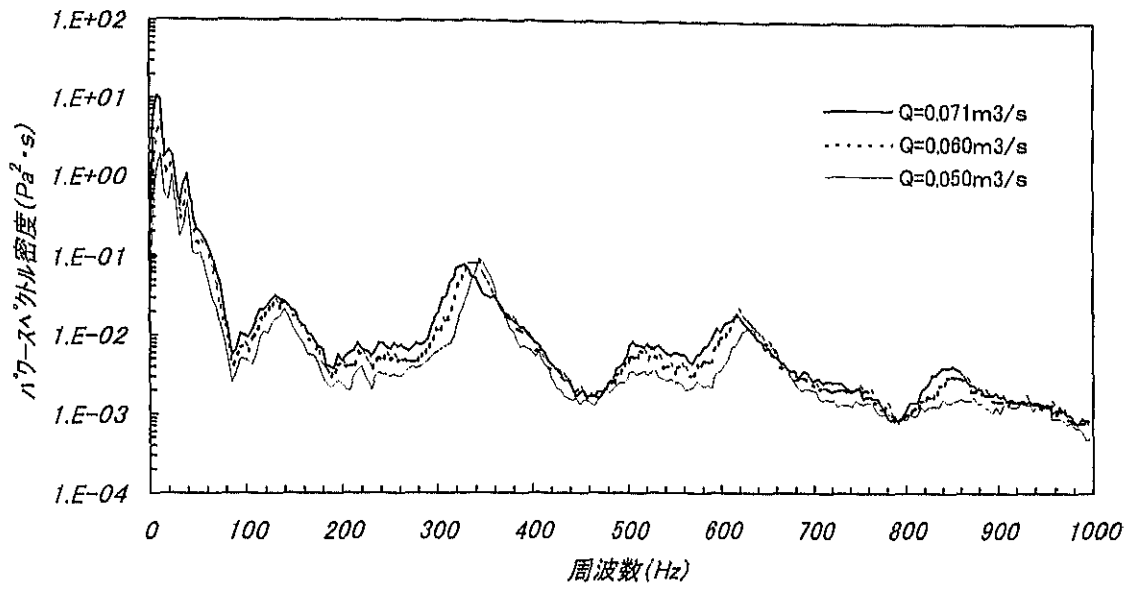


図-5.17a トンネル内部跳水始端直上音のパワースペクトル (模型値)

開口部大

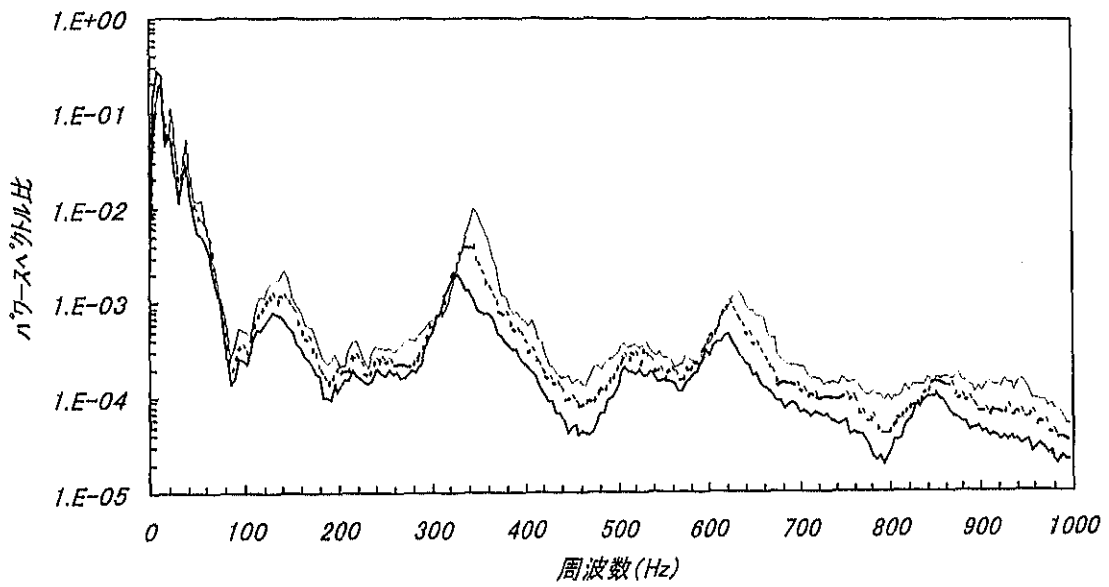


図-5.17b トンネル内部跳水始端直上音のパワースペクトル (模型値)

開口部大

5.4 跳水始端部における発生音の推定

発生音の推定は、まず、以下に示す施設の設計対象の放流条件について行う。

水位：発電最低水位 O.P 67.7m

流量：700m³/s

5.4.1 音響出力の推定

(1) 流入エネルギー

単位幅当たり流入エネルギーフラックスは次式で与えられる。

$$e = \frac{\rho_w q v^2}{2} \quad (5-1)$$

ここに

$$\rho_w = 1.0 \times 10^3 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$q = Q/B = 700 \text{ (m}^3/\text{s)} / 22.6 \text{ (m)} = 31.0 \text{ (m}^3/\text{s} \cdot \text{m)}$$

$$v = a \sqrt{2g(H_r - H_i)} = 0.9 \times \sqrt{2 \times 9.8 \times (67.1 - 24)} = 26.2 \text{ (m/s)}$$

a ：流量係数、 H_r ：貯水位、 H_i ：水脈の減勢池への着水標高

したがって

$$e = 1.06 \times 10^7 \text{ (J/s} \cdot \text{m)}$$

(2) 音響出力

跳水始端部における発生音の音響出力と流入エネルギーとの関係は次式で与えられる。

$$w = \alpha \cdot e \quad (5-2)$$

変換効率としては、実験では 5.0×10^{-6} 程度となっているので、これに若干の安全を見込んで

$$\alpha = 7.0 \times 10^{-6}$$

とする。なお、この値は A ダムにおける実測の変換効率の最大値でもある。これを用いて音響出力は以下のとおり計算される。

$$w = 7.0 \times 10^{-6} \times 1.06 \times 10^7 \text{ (J/s} \cdot \text{m)} = 74.2 \text{ (J/s} \cdot \text{m)}$$

また、実験上の測定位置および伝達率が始端直上 1.0m で求められているので、この地点における音の強さ I に換算する必要がある。無限線音源を仮定すると、音源から r (m) 離れた地点における音の強さと音源出力の関係は次式で与えられる。

$$w = 2\pi r I = 2\pi r \frac{p^2}{\rho_a c_a} \quad (5-3)$$

ここに

$r = 1(m) \times 15.3 = 15.3(m)$: 音源からの距離

$\rho_a = 1.205(kg/m^3)$: 空気の密度

$c_a = 343(m/s)$: 空気中の音速

したがって

$$I = \frac{W}{2\pi r} = \frac{74.2}{2 \times 3.14159 \times 15.3} = 0.772(J/s/m^2)$$

音圧で表すと

$$p = \sqrt{I\rho_a c_a} = \sqrt{0.772 \times 1.205 \times 343} = 17.9(Pa) \quad (5-4)$$

音圧レベルで表すと

$$L_p = 20 \log_{10}(p/p_e) = 20 \times \log_{10}\{17.8/(2 \times 10^{-5})\} = 119(dB) \quad (5-5)$$

5.4.2 発生音の周波数特性

次に、発生音の周波数特性を求める。模型実験により得られた跳水始端部発生音の周波数特性を図-5.18a に、オーバーオール値で無次元したパワースペクトルを図-5.18b に示した。前章での検討結果より、以下に示す式による実機値への換算が可能である。

$$\frac{f_p}{f_m} = \frac{1}{n} \quad (5-6)$$

図-5.18b に示す周波数特性を実機における周波数特性に換算した結果を図-5.19 に示した。これと(5-4)式で得られた音圧のオーバーオール値を用いて原型における跳水始端部発生音のパワースペクトル密度を求めると図-5.20 となる。

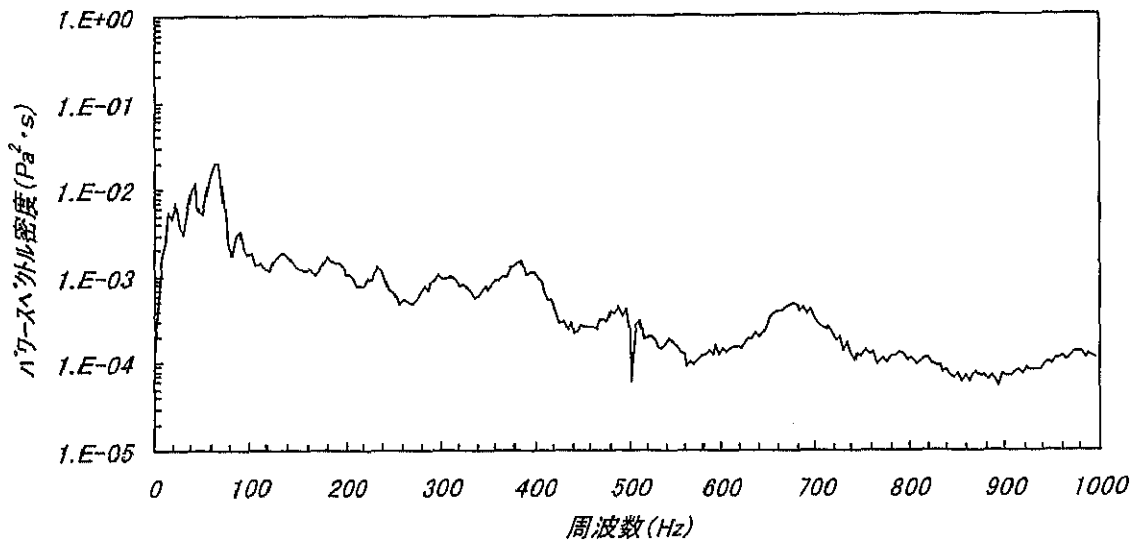


図-5.18a 跳水始端部発生音のパワースペクトル (模型値)

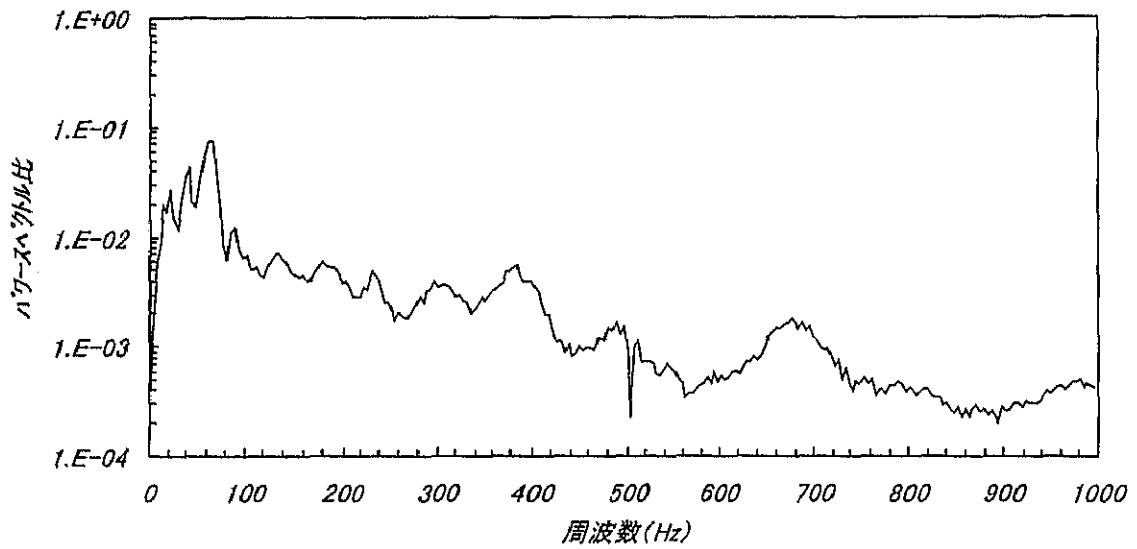


図-5.18b 跳水始端部発生音のパワースペクトル (模型値)

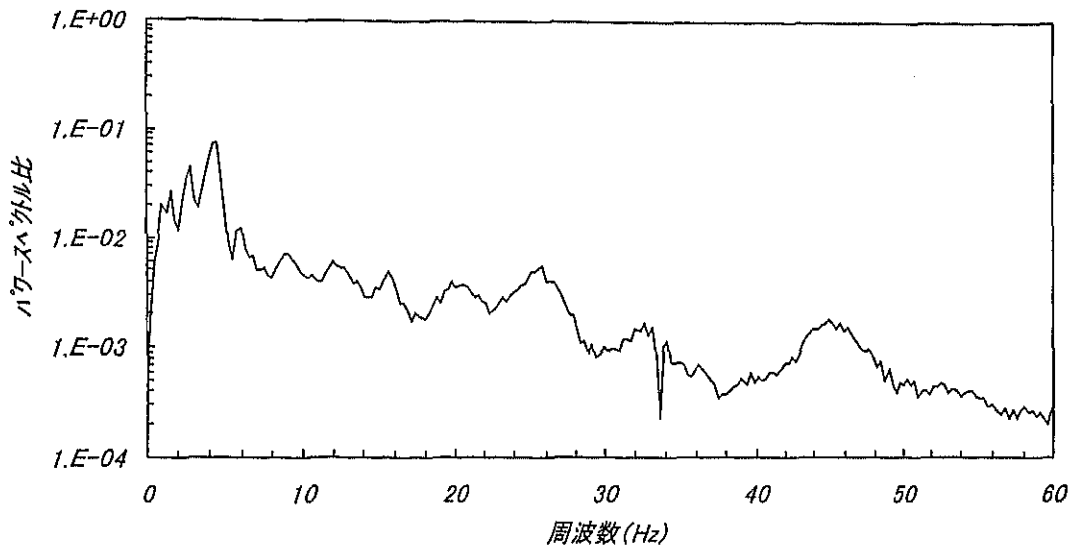


図-5.19 跳水始端部発生音のパワースペクトル (実機換算値)

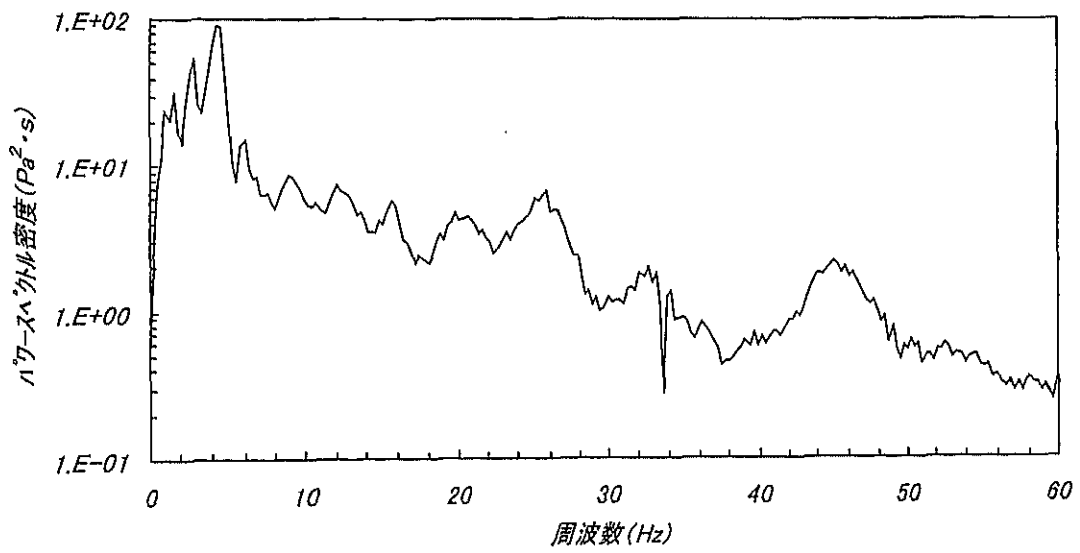


図-5.20 音跳水始端部発生音のパワースペクトル (実機換算値)

5.5 トンネル式減勢工としての発生音の推定

5.5.1 伝播特性の推定

図-5.3a に示した観測音のパワースペクトル密度を図-5.18a に示した跳水始端部発生音のパワースペクトル密度で周波数毎に除すれば図-5.21 に示す伝達率が得られる。この模型における伝達率を(5-6)式を用いて実機の伝達率に換算すると図-5.22 が得られる。なお、低周波数帯(原型値で4 Hz 以下の範囲)では伝達率が10~30 と非常に大きな値となっている。

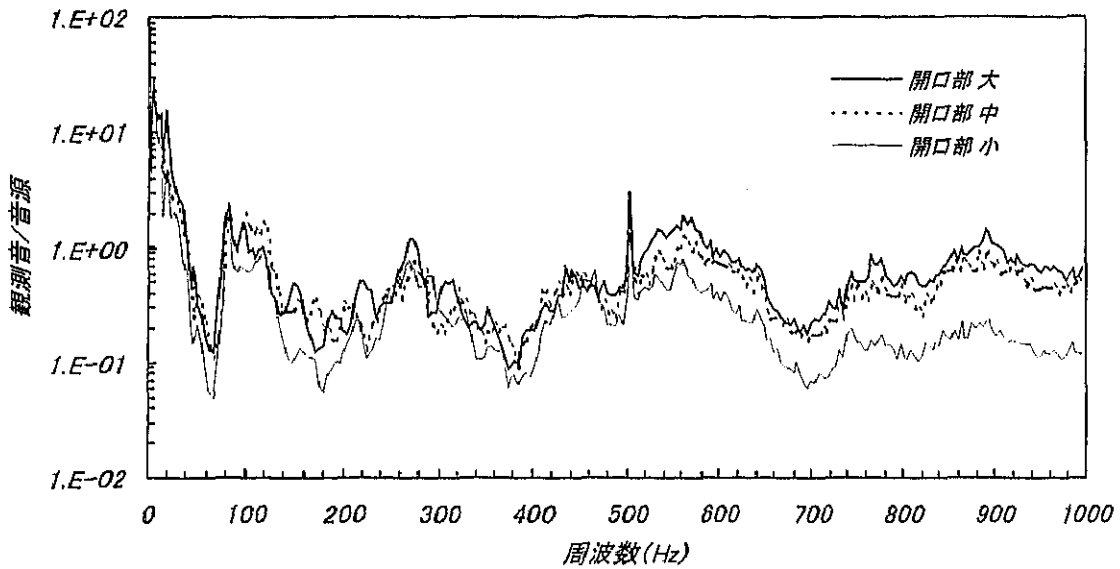


図-5.21 伝達率の周波数分布(模型値)

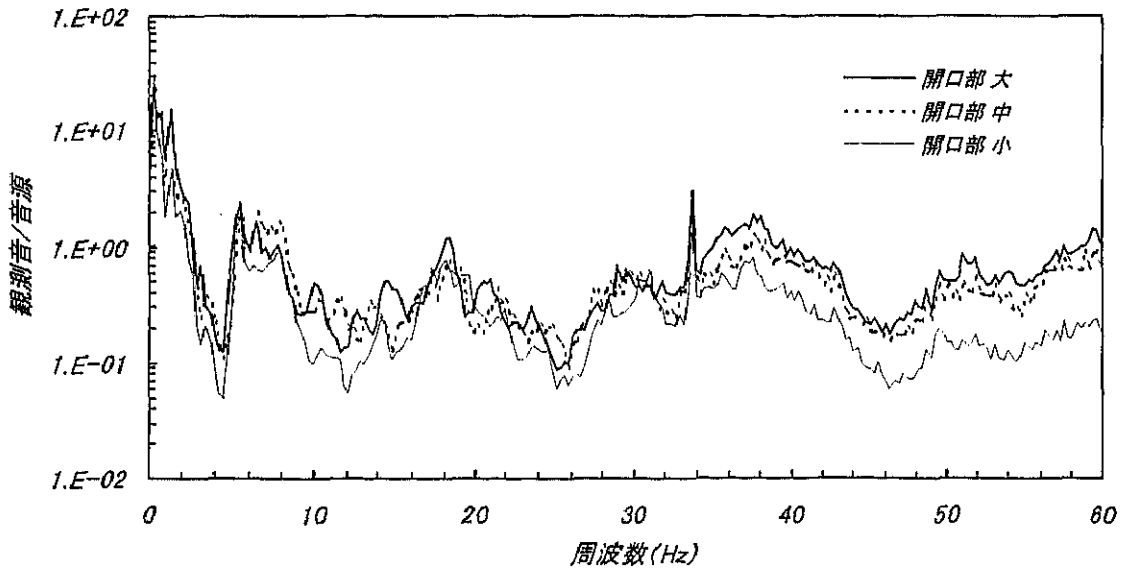


図-5.22 伝達率の周波数分布(実機換算値)

いま、トンネル内における伝播特性が非線形性を持たない、すなわち、ある周波数の音を考えた場合、伝播時にその音が減衰することはあっても、他の周波数の音に変化することはない、とすれば、各周波数成分とも始端部において発生する音響エネルギー（音響出力）を超えたエネルギーがトンネル出口から放出することはあり得ない。したがって、伝達率には取り得る最大値が存在する。

始端部発生音における着目する周波数成分の単位幅当たりの音響エネルギーは(5-3)式と同様に次式で与えられる。

$$w_i = 2\pi r I_i \quad (5-7)$$

ここに

w_i : 単位幅当たりの音響出力 [w/m]

I_i : 音源から r m 離れた位置における音の強さ [w/m²]

一方、トンネル出口を通して外部に放出される単位幅当たりの音響エネルギーはトンネル出口における音の強さに空き断面の高さを乗じて以下のように求めることができる。

$$w_{out} = h_a I_{out} \quad (5-8)$$

ここに

w_{out} : トンネル出口から放出される単位幅当たりの音響出力 [w/m]

I_{out} : トンネル出口で測定した音の強さ [w/m²]、 h_a : 空き断面高さ

始端部において発生する音響エネルギーとトンネル出口から放出される音響エネルギーの比を求めると次式となるが、この値は1を超えることできない。

$$\frac{W_{out}}{W_i} = \frac{h_a I_{out}}{2\pi r I_i} = \frac{0.33}{2\pi \cdot 1} \cdot \frac{I_{out}}{I_i} = 0.05d(f) \leq 1 \quad (5-9)$$

ここに

$d(f)$: 周波数 f の伝達率

空き断面高さ $h_a = 0.33m$ とした。

よって

$$d(f) \leq 20 \quad (5-10)$$

となり、取り得る伝達率の最大値は20程度となる。実験における伝達率の各周波数成分をみると、卓越周波数については10~30程度の値となっている。したがって、始端部に発生した音響エネルギーのうちトンネルの共鳴周波数と一致する周波数成分は、ほぼ全てがトンネル出口まで達しているものと考えられる。

5.5.2 トンネル出口における観測音の推定

トンネル出口における観測音は、図-5.20 に示した実機における跳水始端部発生音のパワースペクトル密度に図-5.22 の伝達率を乗じることにより求めることができる。図-5.23a に推定されるトンネル出口付近の観測音を示す。推定された音圧のパワースペクトル密度は、5 Hz 以下の超低周波領域に卓越周波数を持ち、オーバーオール値は表-5.4 に示すように 20~10Pa (115~120dB) 程度である。

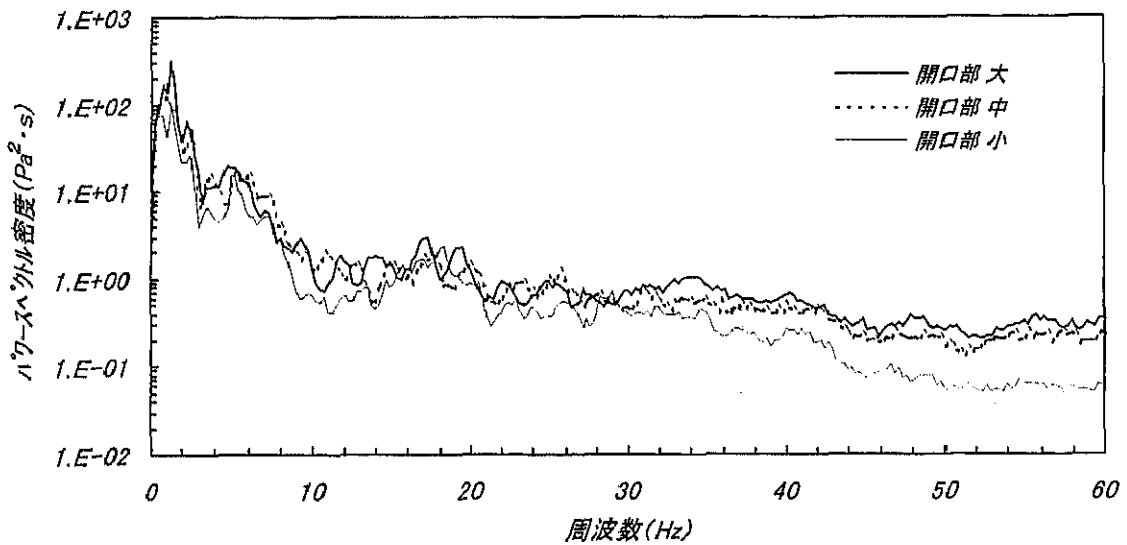


図-5.23a トンネル出口観測音のパワースペクトル (実機換算値)

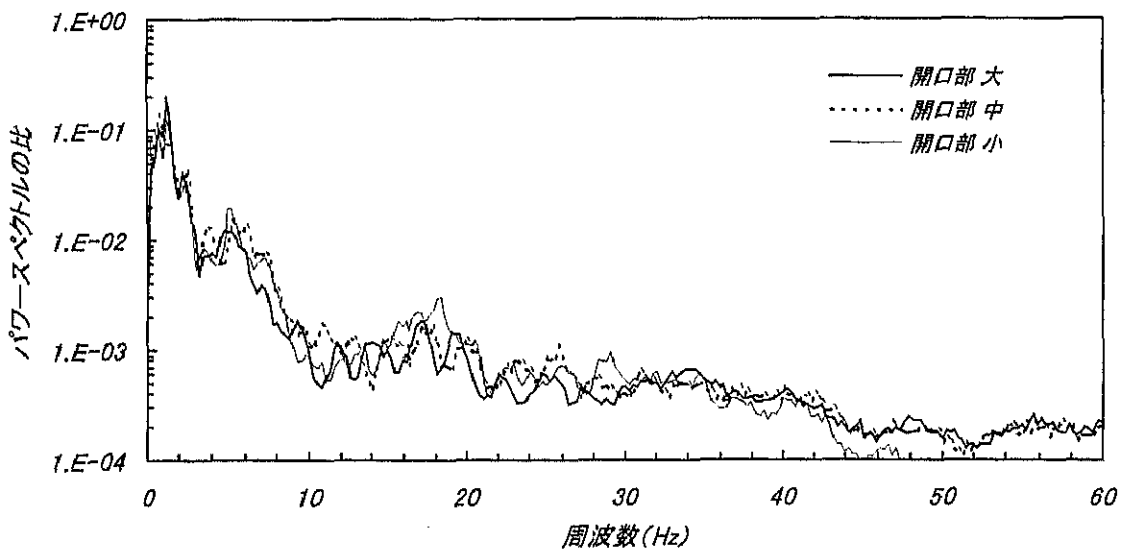


図-5.23b トンネル出口観測音のパワースペクトル (実機換算値)

表-5.5 トンネル出口における観測音のオーバーオール値

空き断面高さ(m)	5.0	3.4	1.8
音圧 (Pa)	19.6	17.0	13.7
音圧レベル(dB)	119.8	118.6	116.7

15Hz 以下の超低周波帯の詳細を確認するために図-5.24 に 1/3 オクターブ分析結果を示した。これによれば 1~2 Hz 付近に卓越周波数を持つ周波数分布となっている。また、図-5.25 に始端部における発生音（図-5.20 に示した実機値を 1/3 オクターブ分析で表現したもの）との比較を示した。減勢工をトンネル式とすることにより卓越周波数がより低周波側に移行していることがわかる。

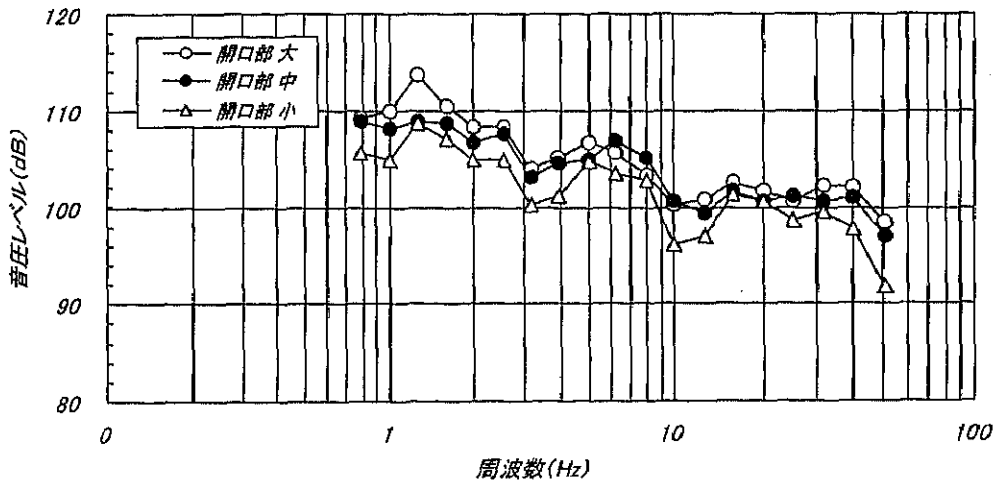


図-5.24 トンネル出口観測音の 1/3 オクターブ分析（実機換算値）

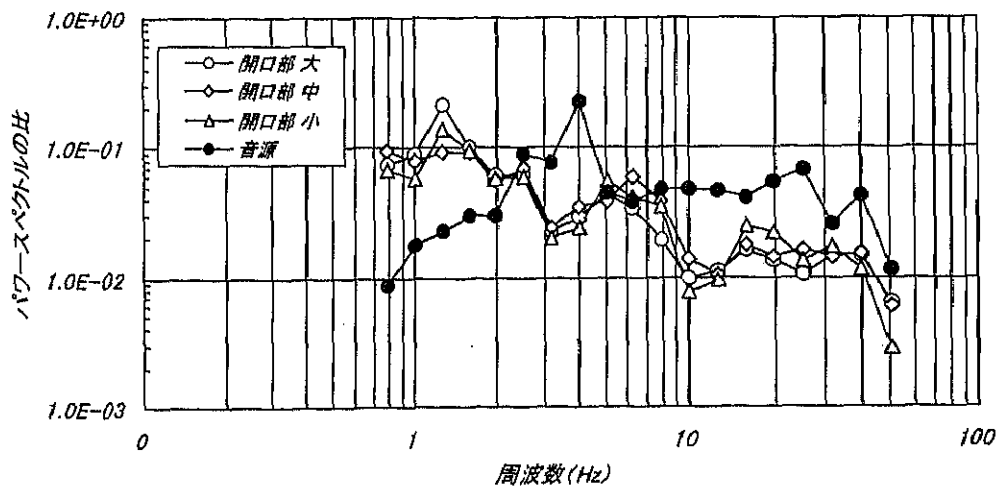


図-5.25 トンネル出口観測音と音源の比較（実機換算値）

以上は設計対象流量時における推定音であるが、これまでの議論から明らかなように(5-4)式で与えられる音圧(Pa)のオーバーオール値とトンネル出口における推定音圧(Pa)のオーバーオール値(表-5.4に示した値)は、流量や水位条件などを変化させた場合についても、同じ伝達率を用いて計算すれば次式に示すように比例関係になる。

$$p_{ob} = \varepsilon \cdot p_s \quad (5-11)$$

ここに p_{ob} : トンネル出口の観測音圧実効値 [Pa]

p_s : (5-4)式より計算される跳水始端部直上の音圧実効値 [Pa]

ε : オーバーオール値の伝達率

この比例定数 ε を求めると表-5.5 となる。この比例乗数は周波数の重み付けを行って求めたオーバーオール値の伝達率に相当する。したがって、任意の流量条件に対して跳水始端部の発生音圧のオーバーオール値を求めれば、この伝達率を乗じることによりトンネル出口における音圧(Pa)のオーバーオール値を推定することができる。

表-5.5 音源音圧とトンネル出口観測音圧の比(伝達率 ε)

空き断面高さ(m)	5.0	3.4	1.8
伝達率 ε	1.10	0.952	0.766

(5-4)式および(5-6)式を用いればトンネル出口の観測音圧 p_{ob} は次式で表すことができる。

$$p_{ob} = \varepsilon \sqrt{\frac{\alpha \rho_w \rho_a Q a^2 c g (H_r - 24)}{2 \times 15.3 \times \pi B}} \quad [\text{Pa}] \quad (5-12)$$

ここに

ε : 伝達率、 α : 変換効率、 ρ_w : 水の密度 [kg/m³]、 ρ_a : 空気の密度 [kg/m³]

Q : 流量 [m³/s]、 a : 貯水位から着水までの間の損失係数 (≈ 0.9)、 c : 音速 [m/s]、

g : 重力加速度 [m/s²]、 H_r : 貯水位 [m]、 B : 減勢池幅

これを用いて天ヶ瀬ダム貯水水位を最低水位、発電最低水位および制限水位とした場合の流量とトンネル出口観測音圧レベルの関係を求めると図-5.26となる。

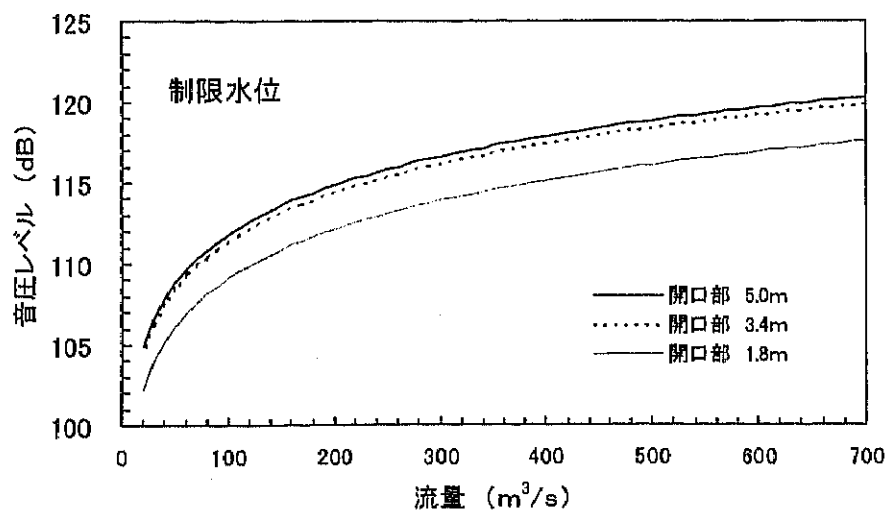
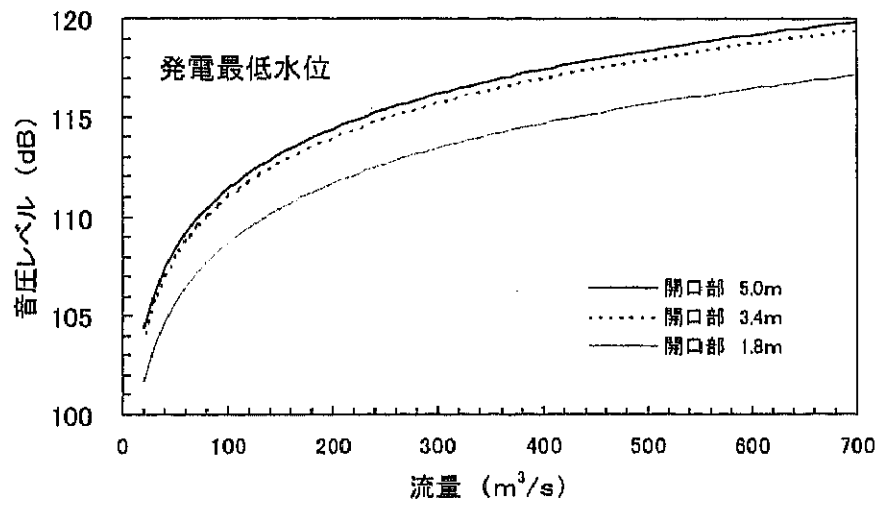
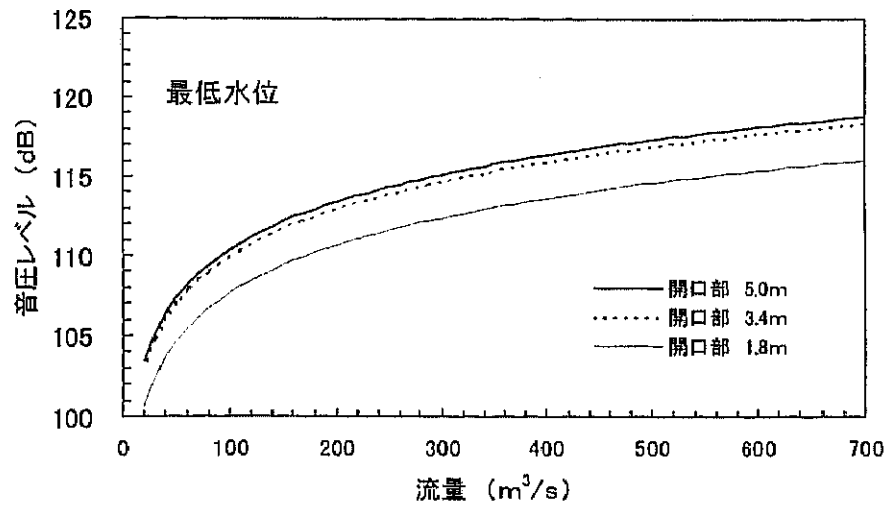


図-5.26 流量とトンネル出口部の音圧レベルの関係

5.5.3 トンネル式放流設備としての音響出力

前節で推定した値はトンネル出口部において観測される音圧である。トンネルから離れた任意の位置における音圧を推定するためにはトンネル式放流設備としての音響出力を知る必要がある。(5-12)式で得られる音圧と音の強さ(単位面積を通過する音のエネルギー)の関係は次式で与えられる。

$$I = \frac{P_{ob}^2}{\rho_a c_a} \quad [\text{w/m}^2] \quad (5-13)$$

したがって、トンネル式放流設備全体からトンネル外部に放出される音のエネルギー(音響出力)は、上記の音の強さ I にトンネル出口の空き断面の面積 S を乗じて求めることができる。

$$W = SI = Bh_a \frac{P_{ob}^2}{\rho_a c_a} \quad [\text{w}] \quad (5-14)$$

ここに、 h :空き断面の高さ、 B :減勢工幅

(5-13)式より設計対象流量(発電最低水位、700m³/s)時の音響出力を計算すると表-5.5となる。なお、始端部における音響出力は(5-3)式で計算したように74.2w/mであるから、減勢工全体の跳水始端部からの出力はこれに減勢工幅22.6mを乗じて1,676w(152dB)である。これは減勢工をトンネル構造としない場合の音響出力を示していると考えられる。したがって、天ヶ瀬ダムの減勢工はトンネル式とすることによって発生する音のエネルギーを10~20dB(エネルギーの絶対値では2~7%にまで)低減することができていることになる。なお、これは、音源の音響出力そのものが小さくなっているわけではなく、トンネル構造とすることにより、外部への音響エネルギーの放出量が減少していることを示している。したがって、トンネル内はより大きな音圧となっているが、このエネルギーは外部に放出されることなく、トンネル内で熱エネルギーとして消費されていると考えられる。

表-5.5 トンネル式減勢工から放出される音響出力

空き断面高さ(m)	5.0	3.4	1.8
音響出力(w)	105.5	65.0	20.2
音響出力レベル(dB)	140	138	133
低減率	6.3%(12dB)	3.9%(14dB)	1.2%(19dB)

得られた音響出力から、任意の地点における音圧を求めるためにはトンネル出口からの伝播特性を知る必要があり、精度のよい予測を行うためには音響実験あるいは数値シミュレーションが必要である。ここでは、参考までにトンネル出口に点音源があると仮定し、音が1/4球状に広がるものとしてトンネル出口から距離 R だけ離れた位置における音圧を求めておくに留める。この場合の音の強さと音響出力の関係は、空気中における音の減衰を無視すれば次式で与えられる。

$$I_R = \frac{W}{\pi R^2} \quad [\text{w/m}^2] \quad (5-14)$$

ここに、 I_R ：トンネルから m 離れた位置における音の強さ $[\text{w/m}^2]$ 、

R ：トンネル出口からの距離

音圧実効値で表せば

$$p_R = \sqrt{\frac{Bh_a p_{ob}^2}{\pi R^2}} \quad [\text{Pa}] \quad (5-15)$$

ここに、 p_R ：トンネルから m 離れた位置における音圧レベル $[\text{dB}]$

図-5.27 は、トンネル出口から 10、100 および 300m 離れた位置における発電最低水位時の各流量時の音圧レベルを計算したものである。周波数特性は、流量や水位の条件にかかわらずほぼ図-5.25 となるものと考えられる。

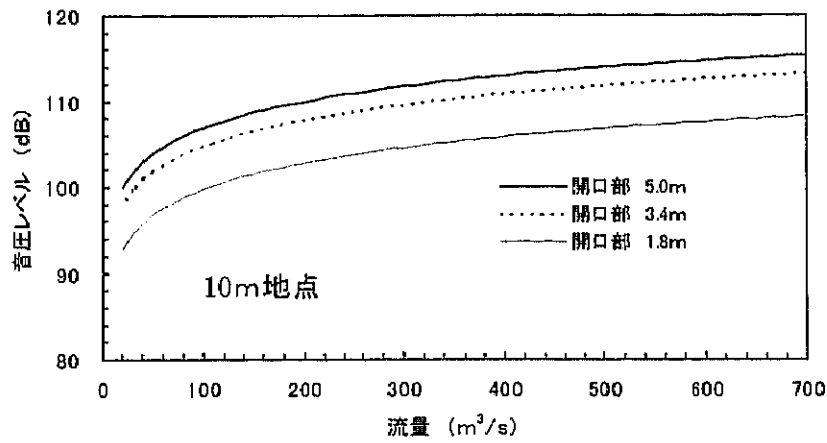


図-4.27a トンネル出口部から離れた位置の音圧レベル
(発電最低水位時)

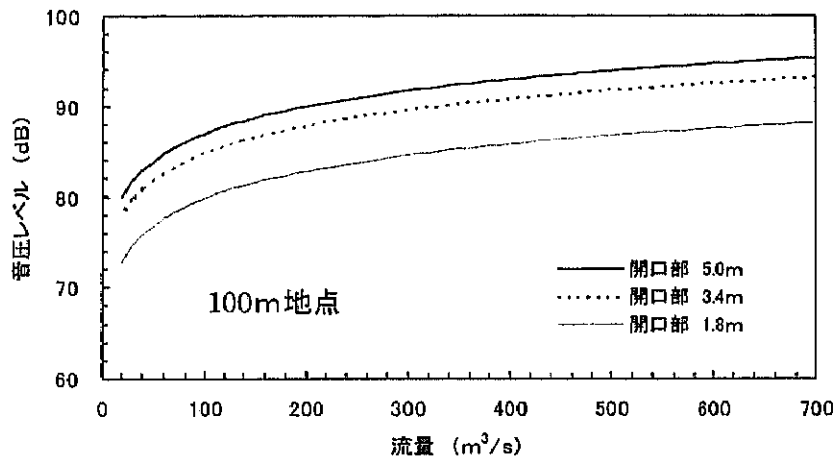


図-4.27b トンネル出口部から離れた位置の音圧レベル
(発電最低水位時)

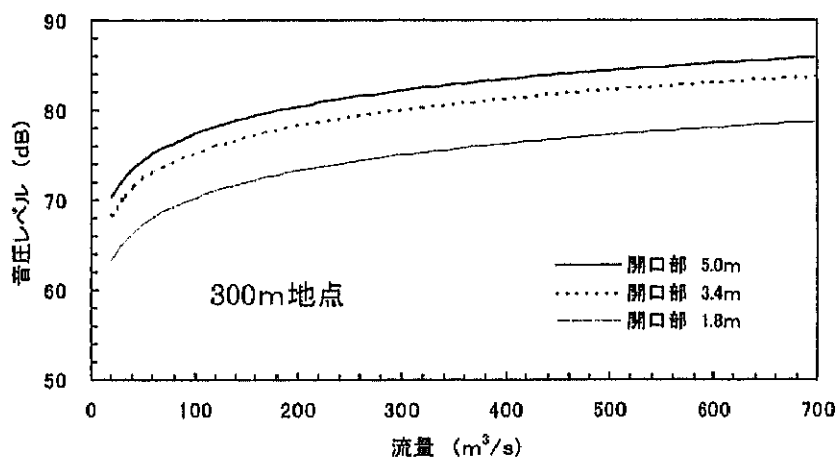


図-5.27 トンネル出口部から離れた位置の音圧レベル
(発電最低水位)

5.6 まとめ

天ヶ瀬ダムに新たに設けられるトンネル式放流設備の減勢工の計画形状を対象として、第2章および第3章において提案した発生音の予測手法を適用し、トンネル出口における観測音の推定を行い、減勢工を地下構造とすることによる発生音の低減効果についての評価を行った。得られた結果をまとめると以下のとおりである。

1) 放流条件と発生音圧の関係

放流時にトンネル出口において観測される音圧 p_{ob} は次式で表すことができる。

$$p_{ob} = \varepsilon \sqrt{\frac{\alpha \rho_w \rho_a Q c'^2 c g (H_r - 24)}{2 \times 15.3 \times \pi B}} \quad [\text{Pa}] \quad (5-16)$$

ここに

ε :伝達率、 α :変換効率、 ρ_w :水の密度 [kg/m³]、 ρ_a :空気の密度 [kg/m³]
 Q :流量 [m³/s]、 c' :貯水位から着水までの間の損失係数 (≒0.9)、 c :音速 [m/s]、
 g :重力加速度 [m/s²]、 H_r :貯水位 [m]、 B :減勢池幅

また、模型実験結果から

$$\alpha = 7.0 \times 10^{-6}$$

ε についてはトンネル出口部の空き断面の高さによって異なり、次表で与えられる。

表-5.6 音源音圧とトンネル出口観測音圧の比(伝達率 ε)

空き断面高さ (m)	5.0	3.4	1.8
伝達率 ε	1.10	0.952	0.766

2) 設計対象流量時における発生音の推定

これから天ヶ瀬ダムの設計対象の流量条件(水位:発電最低水位 0.P 67.7m、流量:700m³/s)時のトンネル出口における観測音圧を求めると次表となる。また、周波数特性は、図-5.26に示したとおりである。

表-5.7 トンネル出口における観測音のオーバーオール値

空き断面高さ (m)	5.0	3.4	1.8
音圧 (Pa)	19.6	17.0	13.7
音圧レベル (dB)	119.8	118.6	116.7

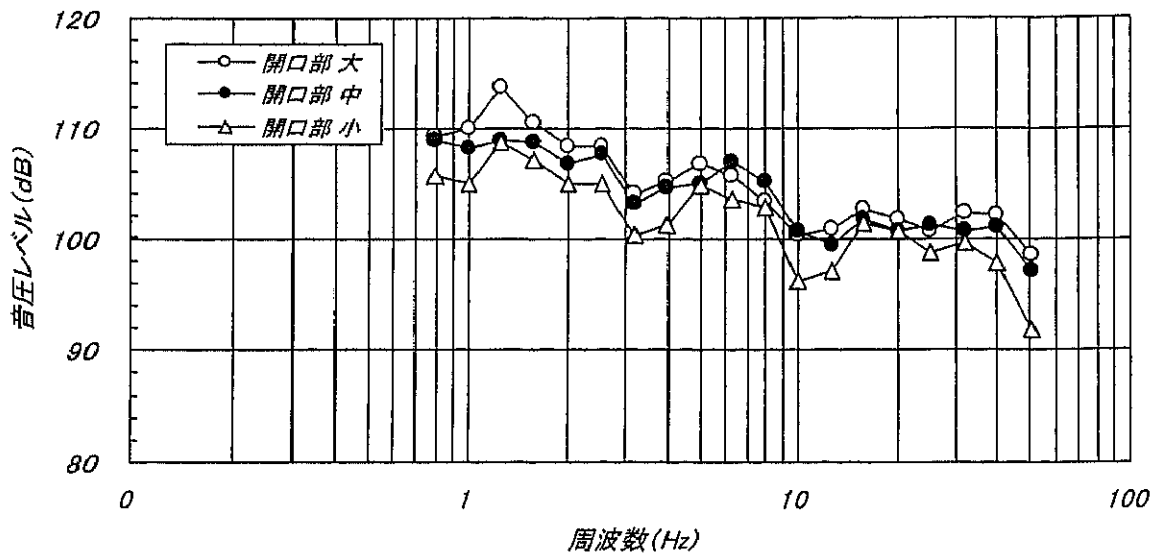


図-5.26 トンネル出口観測音の1/3オクターブ分析（実機換算値）

3) 発生音の低減効果

同流量条件におけるトンネル式放流設備全体としての音響出力は次表のとおりである。一方、トンネル構造としない場合の音響出力は 1,676w (152dB) である。したがって、施設をトンネル式とすることにより、発生する音のエネルギーは 10~20dB (エネルギーの絶対値では 2~7%にまで) 低減されている。

表-5.7 トンネル式減勢工から放出される音響出力

空き断面高さ(m)	5.0	3.4	1.8
音響出力(w)	105.5	65.0	20.2
音響出力レベル(dB)	140	138	133
低減率	6.3% (12dB)	3.9%(14dB)	1.2%(19dB)

なお、本章で対象としたのは発生音源の推定手法である。したがって、音源であるダムから実際に被害の生じる家屋等までの音の伝播については別途検討が必要である。これについては、低周波音が減衰しにくい特性を持っていることから、通常は(5-14)式のように音の拡散のみを考慮すれば任意の地点の音圧レベルを求めることができるが、渓谷等共鳴を生じるような特殊な地形である場合には音響実験や数値シミュレーション等による解析が必要となる。