

II-61

高速湾曲水路の設計に関する実験的研究

北海道電力(株)総合研究所 正員 峯田 稔
北電興業(株)事業部 正員 高橋 昌之

1. はじめに

水力発電所の水槽余水路は、一般に急勾配であることから、流れは高速射流となり、その平面配置はできる限り直線的な経路が望ましいとされている。このため、既設の水力発電所における余水路の多くは、水槽から河川へ直線的に配置され、その放水口は放水路放水口とは別であることが多い。

近年の河川をとりまく周辺環境の変化により、北海道電力では、下流河川の安全性について再度検討を行い、既に4箇所の発電所において既設余水路のルートを変更し、放水路と余水路の放水口を一本化する改造工事を実施している。

今後、さらに数箇所余水路の改造計画が立案されている。既設余水路のルートを変更する場合に、余水路に水平曲線部を挿入するケースが多く考えられる。このため、この曲線形状が、余水路の水理現象に及ぼす影響について把握する必要性が生じてきた。

また、近年の余水路改造工事においては、オープンカット方式の施工方法が採用されることが多くなっており、このことは水平曲線部に作用する動水圧が設計において重要な値となると考えられる。

本研究は、余水路に水平曲線部を挿入するにあたり問題となる、①通気を確保するための限界曲率半径、②余水路側壁に作用する動水圧、について実験により求めたものである。

2. 水理模型実験

2.1 実験装置

図-1は実験装置の概要である。

模型は、ポンプに直結させて途中に設けたバルブとゲートで余水路の水理条件である水深 h 、流量 Q 、流速 V を変えた。

余水路は、水深調節ゲート、給気孔を有する幌型断面の直線水路、曲率半径を変えた曲線部、空気孔 a を有する矩型断面の10%勾配水路、空気孔 b を有する立抗、ならびに水深調節工を有する受水槽で構成されている。

流量は、余水路上流に設けた電磁流量計により計量し、水路模型は流れを観察できるように透明なアクリル製とした。

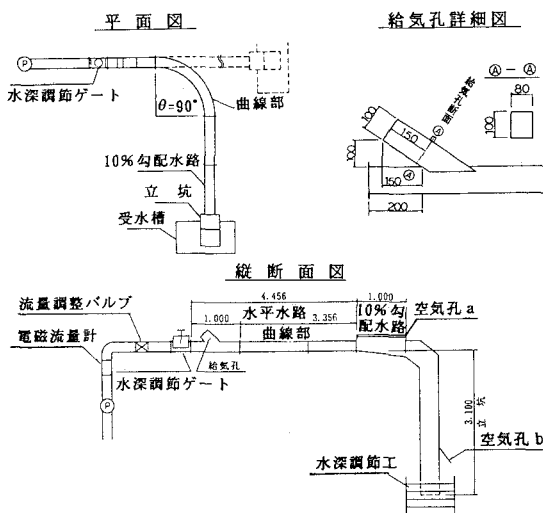


図-1 模型配置

2.2 実験条件および実験方法

(1) 水平水路形状

実験の対象となる水路は、巾 $B=10$ cm、高さ $H=10$ cm、半径 $r=5$ cmの上部半円下部矩形断面で、表-1に示す直線水路、ならびに5種類(曲率半径 $R=10, 25, 62.5, 100, 150$ cm)の曲線水路である。なお、これらの実験規模は既設の余水路に対して約1/20に相当する。

Experimental Study on Design of High-Velocity Bending Waterway

by Minoru MINETA and Masayuki TAKAHASHI

また、曲線部の水路延長は曲率半径によって異なるため、曲線部以降に接続される直線水路の長さを変化させ、全タイプにおける水平余水路の水路延長を4.456mで一定としている。

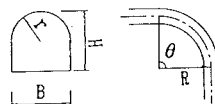
(2) 流入条件

実験に用いた流入条件は表-2に示すように、流速 $V_w=150、300、450、600\text{cm/s}$ の4ケースと全断面に占める流積の割合（流積比 A_w/A_o ）0.2、0.3、0.4、0.5、0.6の5ケースを組み合わせ、合計20ケースとした。

なお、流速と流積比は曲線部始点（直線水路も同位置となる場所；水位調節ゲート出口より1,105mm）での値であり、所定の流速と流積比になるよう水位調節ゲートで設定した。また、実験流速をフルードの相似則に基づき、模型縮尺1/20として原型流速に換算すると $V_{wp}=6.7\sim26.8\text{m/s}$ の範囲である。

表-1 水平水路形状

TYPE	曲率半径 R (cm)	R/B	両曲角 θ (度)	断面形状	断面寸法 H, B, SR (cm)	縦断勾配 (度)
0	直線	—	—	概型	H=10 B=10 r=5	0
1	150	15	90			
2	100	10				
3	62.5	6.25				
4	25	2.5				
5	10	1				



(3) 下流条件

余水路に連行される空気量は、流速や流積比等が同一条件であっても余水路の縦断勾配や下流に設置された減勢工の種類などによって大きく変化することが知られている。

このため、水平水路の下流端には、高さ3.1mの立坑を接続するとともに、その上部に空気孔 a (1,000×100mm) を設け、その開閉によって空気の強制的な連行も可能な構造とした。

なお、立坑の末端は、受水槽の水位調節工によって水没可能となっている。これらの条件を組み合わせ、表-3に示す3種類の下流条件を設定した。

表-3 下流条件

下流条件	空気孔 a	空気孔 b	水路末端	測定内容
1	開放	開放	開放	水平水路自体の空気連行量
2	閉鎖	開放	開放	立坑による強制的な空気連行量
3	閉鎖	開閉交互	水没	通気断面閉塞の有無（空気孔bの開閉にともなう流況の変化）

表-2 流入条件

流積比 A_w/A_o	流速 V_w (cm/s)	流量 Q_w (l/s)
0.2	150	2.68
	300	5.36
	450	8.03
	600	10.71
0.3	150	4.02
	300	8.03
	450	12.05
	600	16.07
0.4	150	5.36
	300	10.71
	450	16.07
	600	21.42
0.5	150	6.70
	300	13.39
	450	20.09
	600	26.78
0.6	150	8.03
	300	16.07
	450	24.10
	600	32.14

(4) 実験条件

- 水深：水深は、曲線部始点（直接水路は同位置となる場所）において、所定の水深となるように水深調節ゲートから曲線部始点までの区間を不等流計算し、水深調節ゲートにて調節した。
- 流量：流量は、水路模型の上流において、電磁流量計により計量した。
- 流速：流速は、流量を曲線部始点での流積で除して求めた平均流速である。

(5) 測定項目および方法

- 流況：流況観察は目視を主体に行い、必要に応じて写真、ビデオを用いた。また、水平水路側壁沿いの水深の測定はスケールを用い、測定間隔は10cmとした。
- 給気量：給気量の算定は、給気孔（H=10cm、B=8cm）入口に設置した熱線式風速計により風速を測定し、これに給気孔断面積を乗じて求めた。風速の測定は一断面あたり20測点とし、一測点あ

たり30秒間測定した300個のデータの平均値である。

- c. 水 圧：水圧は、曲線区間を延長方向10cm間隔（TYPE4, 5については5cm間隔）、高さ方向を外壁沿いに2cm間隔（5点）で1mmの穴をあけ、マノメータにより測定した平均圧力値である。

3. 実験結果と考察

3.1 限界曲率半径

(1) 曲線部の流況

各タイプの下流条件1における内外壁の水深変化を測定し、同時に流況を観察した。

観測結果をまとめると以下のとおりである。

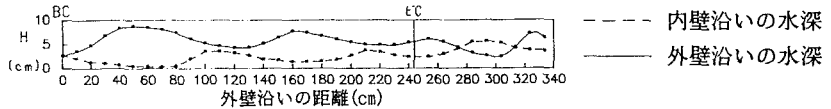


図-2 TYPE1の流況 ($A_w/A_0=0.3$, $V_w=300\text{cm/s}$)

- ① 図-2に示すように外壁沿いの水深が、天端に達しない流れでは水深のピークをくり返す周期的な流れとなっている。
- ② 直線水路では、流速が速いほど水面が白濁している。この白濁している部分は、水面から飛び出す水滴と水中に取り込まれた気泡が混在する水と空気が入り混じった混合層である。この混合層は流速の増加に伴って厚みが増すことが目視により観察された。
- ③ 曲線水路の場合も直線水路同様に、混合層は流速が速くなるほど厚くなっている。また、同一流入条件であれば、曲率半径 R が小さいほど厚く、 $R \leq 25\text{cm}$ の流速 450cm/s 以上の流れでは、水流の上部に自由表面を持った流れから水路内全体が白濁している混合層の噴霧流状態に変化することが観察された。
- ④ $V_w=150\text{cm/s}$, $A_w/A_0=0.5$, 0.6 の時の各タイプの流れでは、図-3に示すように水路の途中で水深が天端に達する満管となる部分があることが観察された。これらの流れは、不等流計算結果からも水路の途中で射流から常流へと変化する流れである。このため、水路の設計においては好ましくないと判断し後述の図-5にその範囲を示した。

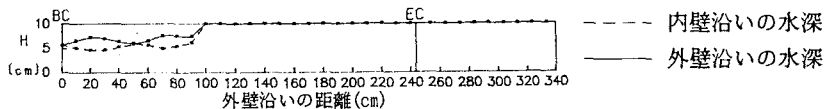


図-3 TYPE1の流況 ($A_w/A_0=0.6$, $V_w=150\text{cm/s}$)

(2) 風速値

下流条件3において、給気孔の中心で風速値の変動を計測した一例を図-4に示す。

各タイプとも風速値は空気孔bの開放時に大きく、閉鎖時に小さい。

また、空気孔bの開閉による風速値の差は、曲率半径が小さいほど小さくなっており、TYPE5においては風速値にほとんど差がみられない。これは、曲率半径の減少に伴って曲線部の通気能力によって通気が支配される、通気の限界状態に達していると考えられる。

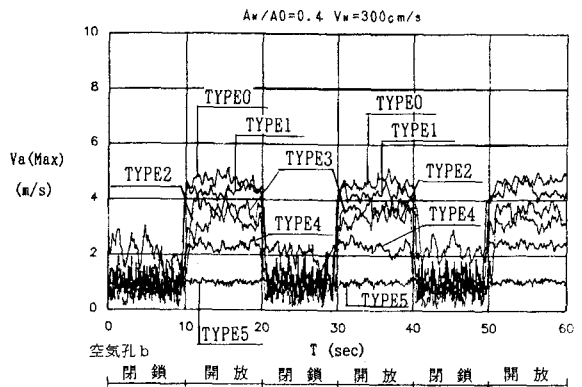


図-4 $A_w/A_0=0.4$ における風速値（下流条件3）

この通気の限界状態では、空気の流れが曲線部での通気能力に支配されるため、下流立坑により連行される空気量が通気能力量以上になると必要な空気が供給されない状態となることが考えられる。この時、曲線部下流水路は負圧になっている可能性があるが、流れが噴霧流状態となって天端にまで水滴が達していたため、今回は測定できなかった。

(3) 限界曲率半径

以上の流速、風速等の測定結果を踏まえ、 $V_w=150\sim600\text{cm/s}$ 、 $A_w/A_0=0.2\sim0.6$ 、 $F_r=2.1\sim14.3$ の範囲の流入条件で、3.1m以下の立坑に接続される高速湾曲水路の流況を

- ① 3.1(2)で示した下流条件3の風速値の変動から、曲線部以降の通気が曲線部により支配される通気の限界の発生の有無
- ② 3.1(1)③に示した水路内の流れが噴霧流となることの有無
- ③ 3.1(1)④に示した、水路内で流れが満管になることの有無

によって分類し、曲率半径と水路巾の比と、流積比との関係を示したものが図-5である。上記流入条件での高速湾曲水路の設計においては、良好の範囲で設計することを提案する。なお、本実験でのレイノルズ数の範囲は $R_e=2.49\times10^5\sim2.08\times10^4$ である。（ $\nu=0.0131$ ）

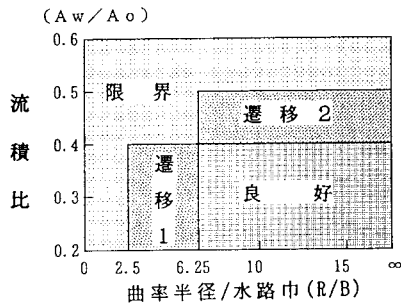


図-5 曲線部の通気状況

良好；流れは良好である。
遷移 1；通気能力は限界に達していないが、流速が450cm/s以上になると噴霧流状態になる。
遷移 2；流れは、流速が300～450cm/secの範囲のみ良好で、それ未満では水路の途中で満管となり、それ以上では通気能力の限界に達する。
限界；通気能力が限界に達している。

4. 外壁に作用する圧力

線形の違いによる外壁に作用する圧力を調べるため、各タイプにおける曲線区間の外壁に作用する全圧力（静水压＋動水压）を表-4に示す流入条件で測定した。一例を図-6に示す。

同一流入条件（ $A_w/A_0=0.4$ 、 $V_w=600\text{cm/s}$ ）における各タイプの水路外壁に作用する最大圧力は、曲率半径が小さいほど大きく、集中的に作用していることが観測された。最大圧力（水頭）を突入水流の全エネルギー（水頭）で除した γ （ $A_w/A_0=0.4$ ）を R/B との関係で表すと図-7のとおりとなる。また、その最大圧力の作用位置を湾曲角 θ で（°）表し、 R/B との関係で示すと図-8のとおりとなる。

TYPE4（ $R=25\text{cm}$ ）、 $V_w=600\text{cm/s}$ における各流積比の圧力分布を測定した結果、流下方向における最大圧力の作用位置はほぼ一定であり、高さ方

表-4 外壁に作用する圧力測定ケース

TYPE	A_w/A_0	V (cm/s)				下流条件
		150	300	450	600	
0 (直線)	0.4					1
1 ($R=150\text{cm}$)						
2 ($R=100\text{cm}$)						
3 ($R=62.5\text{cm}$)						
4 ($R=25\text{cm}$)	0.2					
	0.3					
	0.4	○	○	○	○	
	0.5					
	0.6					
5 ($R=10\text{cm}$)	0.4					

○測定したケース

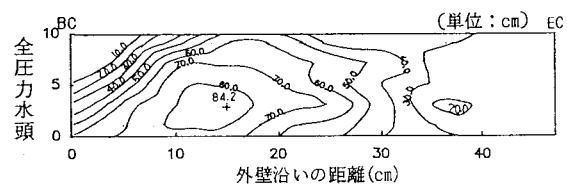


図-6 TYPE4 $A_w/A_0=0.4$ 、 $V_w=600\text{cm/s}$ における外壁に作用する圧力分布

向でも $A_w/A_o < 0.5$ では、その作用位置に変化がないが、 $A_w/A_o \geq 0.5$ では流積比が大きくなるほど上方であった。図-9は各流積比の γ を流積比が0.4の時の γ ($A_w/A_o=0.4$) で除した係数 a と流積比との関係を表したものである。 $A_w/A_o \geq 0.5$ で a が増加するのは、最大圧力が上半円部分に作用しているためと考えられる。

TYPE4 ($R=25\text{cm}$)、 $A_w/A_o=0.4$ における各流速の圧力分布図を測定した結果、外壁に作用する圧力は、流速の増加に伴って大きく、集中的に作用しているが、その作用位置は、流速による変化がほとんどないことが観測された。 γ と流速との関係は図-10のとおりであり、 γ は突入の流速に関係なくほぼ一定と考えられる。

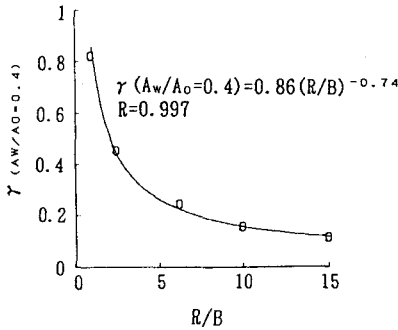


図-7 $A_w/A_o=0.4$ 、 $V_w=600\text{cm/s}$ における
 R/B と γ ($A_w/A_o=0.4$) の関係

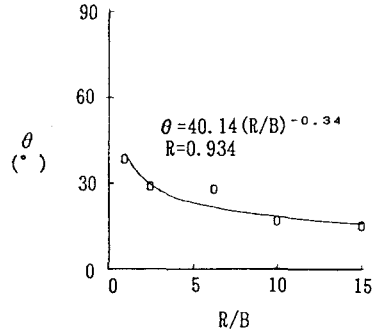


図-8 $A_w/A_o=0.4$ 、 $V_w=600\text{cm/s}$ における
 R/B と θ の関係

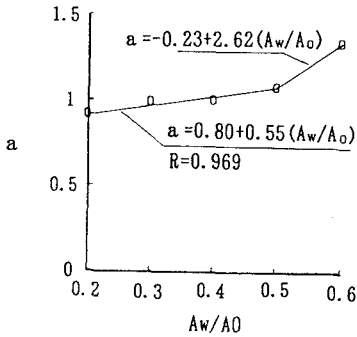


図-9 $V_w=600\text{cm/s}$ における
流積比と係数 a の関係

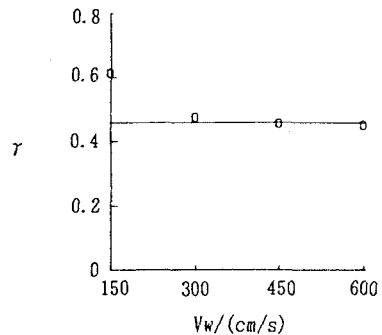


図-10 TYPE4、 $A_w/A_o=0.4$ における
流速と γ の関係

以上の結果から、水路外壁に作用する γ (最大圧力を全エネルギーで除した値) は、次式で表される。

$$\gamma = a \cdot \gamma (A_w/A_o=0.4) \quad \cdots \cdots 1\text{式})$$

ただし

$A_w/A_o < 0.5$ の場合

$$a = 0.80 + 0.55 (A_w/A_o)$$

$A_w/A_o \geq 0.5$ の場合

$$a = -0.23 + 2.62 (A_w/A_o)$$

$$\gamma (A_w/A_o=0.4) = 0.86 (R/B)^{-0.74}$$

ここに γ : 最大圧力値/流入全エネルギー ($\frac{U^2}{2g} + h_o$)

U : 曲線部に突入する水流の流速
 h_0 : " 水深
 a : A_w/A_0 による補正係数
 $\gamma (A_w/A_0=0.4)$: $A_w/A_0=0.4$ の時の最大圧力値/全エネルギー

また、最大圧力の作用位置 θ (湾曲角; °) は、次式で表される。

$$\theta = 40.14 (R/B)^{-0.34} \dots\dots\dots 2\text{式}$$

このように、曲線部の線形が $R/B \geq 1$ 、流積比 $A_w/A_0 \leq 0.6$ の範囲以内において、水路の外壁に作用する最大圧力およびその作用位置を算定することが可能であるが、実際の構造物においては、これに若干の余裕を加えて設計するのが望ましいであろう。

5. まとめ

発電所の余水路を対象として、水平曲線部を挿入した場合の通気性および水路の外壁に作用する動水圧について、水理実験を行い検討してきた。実験結果の成果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 流速 $V_w=150 \sim 600 \text{ cm/s}$ 、流積比 $A_w/A_0=0.2 \sim 0.6$ 、フルード数 $F_r=2.1 \sim 14.3$ の範囲の流入条件で、3.1m以下の立坑に接続される高速湾曲水路の設計においては、通気が保たれる曲率半径の範囲を図-5に示す。
- (2) 余水路断面が今回の実験模型と相似形の場合、上記流入条件で曲率半径と水路巾の比が1以上の時、曲線部側壁に作用する最大圧力とその作用位置について1、2式の実験式を得た。

6. 謝辞

本研究の実施にあたり、終始ご指導をいただいた電力中央研究所水理部構造水理研究室主任研究員福原華一氏に厚くお礼申し上げます。

7. 参考文献

- 1) 高須 修二、中沢 顕司、村岡 敬子、金子 徹：ダム放流管における空気連行流の発達過程，土木技術資料29-8，P.45-50，1987.
- 2) 竹沢 隆一：尾添発電所余水路実験，電力土木，No183，P.31-40，1983.
- 3) 芦田 和男、高橋 保、新井 宗之：土石流の調節制御に関する研究(2)－流路湾曲部における土石流の流動，京大防災研究所年報，第24号B-2，P.251-263，1981.