

II-34 水力発電所余水路改造工事に伴う水理模型実験と現場計測

北海道電力株式会社 正員 小山 俊
 同上 正員 横 辻 宰
 同上 正員 平井 祐次郎
 北電興業株式会社 正員 青山 信幸

1. はじめに

水力発電所の水槽余水路は急勾配の斜面に設けられることが多く、流れは高速射流となるため一般的には出来得る限り直線的に配置するのが望ましいとされている。

北海道電力㈱は既設発電所の余水路に新たな減勢工を設けて余水路と本水路の放水口を一本化する改造工事を実施している。

既設発電所の放水口一本化は、余水路ルートを変更するために水平曲線挿入するケースが多く、平成4年度に水平曲線単独の水理的知見をとりまとめている。

減勢工には「衝撃型」「立坑型」「跳水型」の3形式あり、平成8年度に改造工事が実施されたI発電所は、流量・落差・地形条件等から立坑型が採用された。

図-1に示す立坑型は、連結する余水路と立坑が屈曲するので縦断曲線挿入するケースが多く、高速射流が水路を閉塞する場合には通気が確保されずに圧力変動が生じるため、余水路の流況を十分把握したうえで適切な線形を選定する必要がある。

本研究は、平成4年度の成果を基にI発電所余水路の線形を考慮した水理模型実験を行って流況を予測し、改造後の有水試験時に現場計測を行うことにより、主として通気特性に関する模型実験の妥当性を評価したものである。

余水路改造計画図を図-2に示す。

2. 水理模型実験

2.1 実験設備・実験装置

実験設備および実験装置の概要は図-3に示すとおりであり、主なものは高架水槽・給水管・電磁流量計・余水路模型・減勢工模型・連絡水路模型である。

余水路・減勢工・連絡水路は流況が観察できるよう透明アクリル製とした。

模型への給水は、地下水槽から自給式ポンプで高架水槽へポンプアップし、計量後導水することとした。

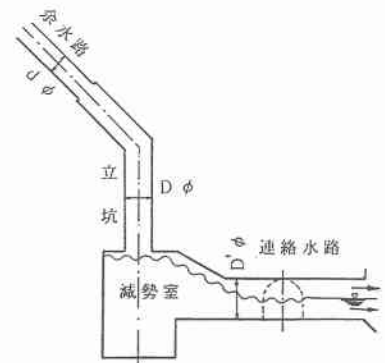


図-1 立坑型減勢工

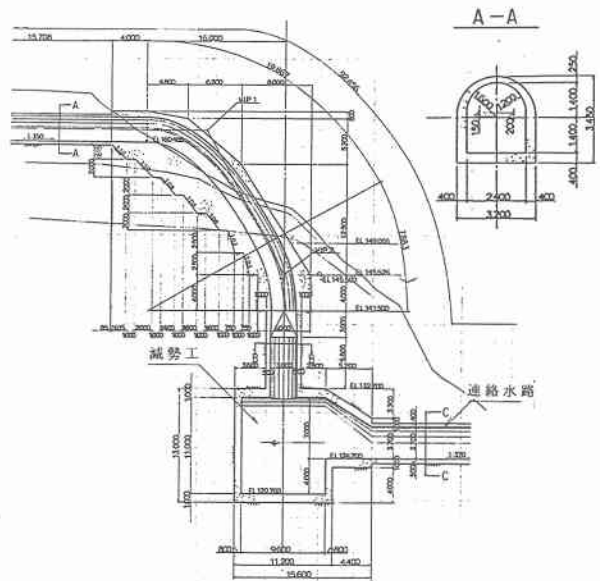
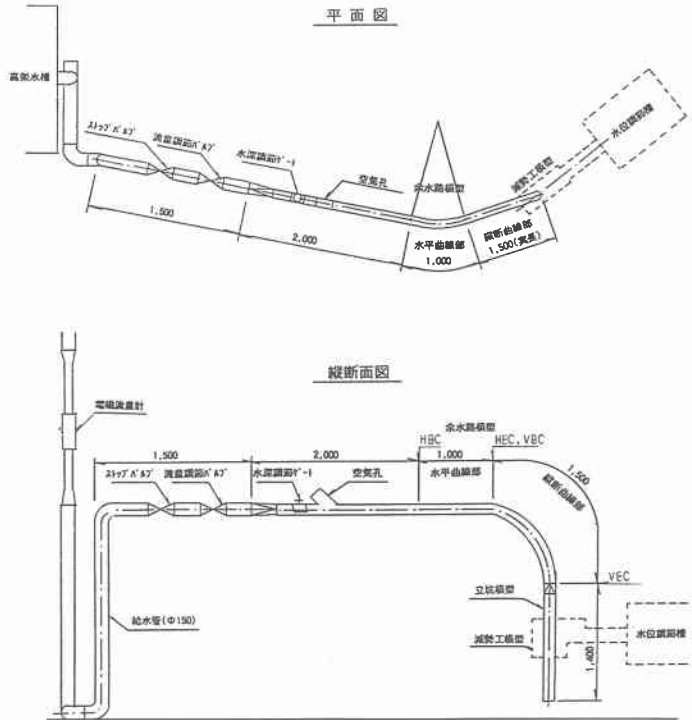


図-2 余水路改造計画図

2.2 測定方法

- ・流量：水路模型の上流において電磁流量計により測定
- ・流況：目視観察を主とし、必要に応じてVTRにて記録
- ・連行空気量：空気孔に設置した熱線式風速計により風速を測定し、これに断面積(高さ9cm×幅9cm)を乗じて算出
- ・空気圧：模型に8mmの穴を開け、U字管マノメータにより測定
- ・水圧：模型に1mmの穴を開け、マノメータにより測定



3. I 発電所対象実験と現場計測

3.1 模型縮尺と相似則

模型縮尺は模型上の水路幅が10cmになるように1/24とし、相似則はFroudeの相似則を適用した。

模型と実物の関係は以下のとおりである。

$$\text{長さ：} L_m/L_p = 1/n = 1/24$$

$$\text{流速：} v_m/v_p = 1/n^{1/2} = 1/4.9$$

$$\text{流量：} Q_m/Q_p = 1/n^{5/2} = 1/2,822$$

(添字のmは模型、pは実物を示す)

なお、実験結果の数値は実物換算値を示す。

図－3 水理模型実験装置概要図

3.2 実験方法

(1) 模型断面形状

I 発電所の余水路の断面形状は、上部半円下部矩形で水路高は幅の約1.17倍である。本来、水理模型実験では対象断面の相似形を用いるべきであるが、I 発電所余水路改造計画の諸条件を考慮し余水路の水平曲線部において水面形を計算した結果、水流が旋回しないと予測されたため、通気に関しては流速と空間面積および流速を合わせることで、実験結果を実物に適用可能であると判断し、本実験には汎用性の高い水路高と幅が同一な模型を用いることとした。

(2) 余水路の通気状況

立坑型減勢工を採用した余水路の連行空気量は、他の発電所の現場計測などで設計流量の2.5～4倍となっている。しかし、一般的にトンネル内の高流速による連行空気量は、Froudeの相似則を用いた縮尺模型実験を行うと実物より小さくなり、実物と模型の通気状況が異なるため、本実験は模型上の連行空気量が設計流量の2.5～4倍となるように、立坑長さを24m(実物換算値)延長した。

(3) 実験条件

余水路における水理条件は表－1に示すとおりであり、流量は最大使用水量(設計流量 $Q_0 = 27.5 \text{ m}^3/\text{s}$)を基準に25、50、75、100、125%の5ケース、流積を考慮する目的で粗度係数を0.015、0.017、0.019の3ケースとした。

水理条件の設定は、水深を水平曲線部始点(HBC)において水深調節ゲートにて調節し、流速は流量をHBCでの流積で除して求めた平均流速とした。

表-1 水理条件

流量 Qw (m³/s)	流速 vw (m/s)	水深 h (m)	断面積 A0 (m²)	流積 Aw (m²)	流積比 Aw/A0	粗度係数 R/n (m)	標準偏差 n	
6.875 (25%)	3.658	0.783	6.102	1.879	0.31	30.000	0.015	
13.750 (50%)	5.514	1.039		2.494	0.41			
20.625 (75%)	6.959	1.235		2.964	0.49			
27.500 (100%) 設計流量	8.052	1.423		3.415	0.56		0.017	
	6.748	1.698		4.075	0.67			0.019
	5.133	2.269		5.358	0.88			
34.375 (125%)	8.907	1.608	3.859	0.63	0.015			

3.3 実験結果

各流量および粗度を考慮して流積を大きくした風速(模型値)を表-2に示す。

空気孔の風速は流量が75%で最大を示し、

4.48m/sである。[σ/風速]は流量の増加に伴って増加することから、設計流量を超えると通気に悪影響を与えるが、その変動率からはプライミング現象には至っていないものと考えられる。

設計流量においてコンクリート劣化による粗度係数増大を考慮して流積を大きくした場合、n=0.019時(HBCにおけるAw/A0=0.88)に緩勾配部において音を伴った脈動流が発生し、風速変動は周期的に[σ/風速]=0.335とn=0.015時の約3倍となった。

各粗度における水平曲線部の空気圧を表-3に示す。

n=0.015、0.017時の空気圧は変動も無く小さいことから、空間が狭いながらも通気が確保されていると判断されるが、n=0.019時は0.14kgf/cm²の負圧が発生して次の瞬間にはほぼ大気圧に転じ、風速と共に大きく変動していることから、プライミング現象が発生していると判断される。

これらのことから、余水路ではある程度の空間を必要とするため、水路の粗度に大きく影響を受けて流積が増大する緩勾配部のコンクリート劣化状況を点検・検証することが必要である。

各流量の空気連行量を表-4に示す。

本実験で立坑長を実機より延長したことによって得られた連行空気量は、流量が50%以上で設計流量の2.7~3.3倍(推定値:2.5~4倍)であり、推定値が妥当であるならば、模型は実物とほぼ同じ通気状況を再現できていると考えられる。

3.4 現場計測結果

I発電所余水路改造工事は平成8年12月に終了し、有水試験時に現地計測を実施した。計測項目は余水路水平曲線部始点および連絡水路出口における水深・風速などである。

余水路内の水深は、側壁コンクリートに量水標を貼り付け、ライト・ワイパー付きのビデオカメラを遠隔操作することにより撮影し、風速はプロベラ式風速計によって測定した。

計測結果を図-4~10に示す。

水深(図-4)は実測値が実験値の約65%と小さく、実験で想定した粗度係数が過大で実験より実物の方が通気空間は十分に確保できていた。測定された水深から粗度係数を逆算すると、0.01程度となった。

風速(図-5)も流量が10m³/sを越えると実測値が実験値の55%となった。一般に水路に多量の空気を連行した場合、風速が流速を超えると波が生じ通気に悪影響を与えるため、風速比(図-6)が実験より小さい実物は、通気状況が良いと考えられる。

表-2 各流量・粗度係数による風速

流量	粗度 n	平均風速 (m/s)	標準偏差σ (m/s)	σ/平均風速
25%	0.015	0.994	0.076	0.076
50%		3.642	0.158	0.043
75%		4.478	0.221	0.049
100%		4.219	0.475	0.113
125%		3.583	0.453	0.126
100%	0.017	4.228	0.225	0.053
100%	0.019	2.299	0.769	0.335

表-3 各粗度係数による空気圧

流量Qw (m³/s)	粗度係数 n	プライミング 現象の発生	圧力(kgf/cm²)		差圧 (kgf/cm²)
			下限ビーク	上限ビーク	
27.500 (100%)	0.015	無	-0.010	-0.005	0.005
	0.017	無	-0.010	-0.010	0.000
	0.019	有	-0.144	0.000	0.144

表-4 各流量による連行空気量

流量Qw (m³/s)	給気量Qa (m³/s)	Qa/Qw	Qa/Q0*
6.875 (25%)	19.39	2.82	0.70
13.750 (50%)	73.23	5.33	2.66
20.625 (75%)	90.83	4.40	3.30
27.500 (100%)	83.84	3.05	3.05
34.375 (125%)	72.90	2.12	2.65

* Q0: 設計流量

風速の変動(図-10)は小さく、 $[\sigma/\text{風速}]$ (図-7)は0.03と実験におけるプライミング発生時 $[\sigma/\text{風速}] = 0.335$ の1/10以下であり、実物ではプライミング現象が発生していないと考えられる。

連行空気量(図-8)も、流量が $10\text{m}^3/\text{s}$ を越えると実測値が実験値の70%と小さくなった。

また、実物の空気量比(図-9)が1.8~2.5倍と、想定した2.7~3.3倍より下回ったのは、水槽に上屋があり空気を吸いにくい条件であったためと考えられる。

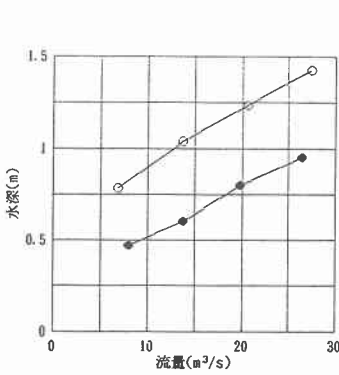


図-4 余水路内の水深

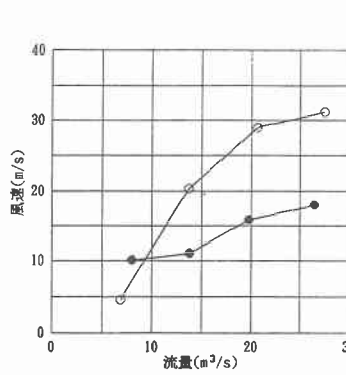


図-5 余水路内の風速

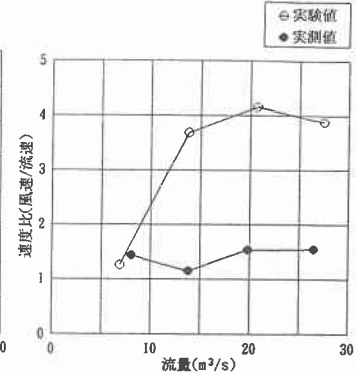


図-6 余水路内の速度比

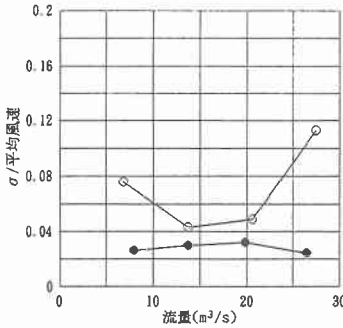


図-7 $\sigma/\text{平均風速}$ (余水路)

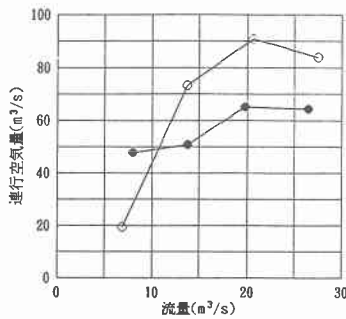


図-8 連行空気量(連絡水路)

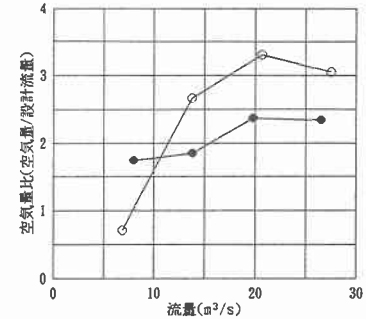


図-9 空気量比(連絡水路)

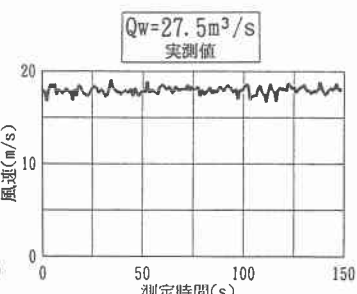
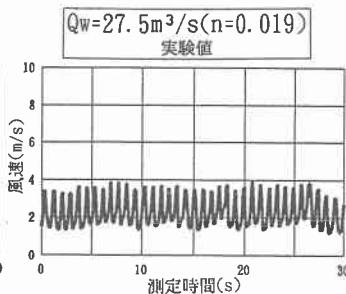
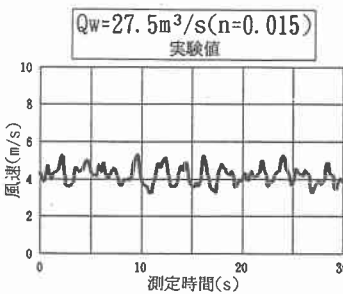


図-10 風速の変動

4. 余水路線形実験

I 発電所の余水路をモデルとして余水路線形および水理条件と通気の関係と比較した。

4.1 実験条件

余水路形状は水路幅と高さが同一の上部半円下部矩形とし、水平曲線の曲率半径(R_H)を10B、12.5B、18.75B (Bは水路幅)の3ケースおよび縦断曲線形状を[放物線+単曲線]と単曲線(5B)の2ケースとした。

水理条件は流積比 A_w/A_0 が0.3、0.4、0.5、0.6の4ケース、流速を縦断曲線形状が[放物線+単曲線]の場合に140、180、220cm/sの3ケース、単曲線の場合に150、300、450cm/sの3ケースとした。これらの条件をFroudeの相似則に基づいて模型縮尺を1/20とした場合の実物換算値は、流速が6.3~20.1m/s、流量は6.8~43.1m³/sに相当する。

下流条件は立坑長を12.5B、18.5Bの2ケースおよび立坑長が12.5Bの場合に減勢工を設置して、下流水深を連絡水路敷から減勢工の天端まで上昇させた。

4.2 実験結果

(1) 連行空気量

高速射流水路の連行空気量(Q_a)を求める式は多数あるが、いずれも余水路のみの条件等で求められ、連行空気量が一定となるため、水理条件・実験条件が Q_a とどのような関係になっているか整理した。

縦断曲線部に[放物線+単曲線]を用いて下流条件を変化させた場合、立坑長が長くなると Q_a は増加した。

各下流条件の中で Q_a が最大を示したのは、立坑長が18.5B、 $R_H=10B$ 、 $v_w=180\text{cm/s}$ 、 $A_w/A_0=0.4$ のケースで、 $Q_a=36,788\text{cm}^3/\text{s}(5.7Q_w)$ となった。

また、減勢工の設置、下流水位上昇による排気口の面積減少など、排気に対して障害が増すと Q_a は減少することから、 Q_a が下流条件に大きく影響を受けることが確認できた。したがって、以降の実験では減勢工を設置せずに立坑長18.5Bにおける通気状況を測定することとした。

(2) 風速と通気

縦断曲線部において流水の飛び出し等で断面が閉塞されるとプライミング現象が生じ、余水路内の圧力が変動する。余水路内への空気連行は余水路内と大気との差圧によるもので、余水路内の圧力変動は空気孔における風速変動となる。全条件において、空気孔風速の標準偏差 σ を風速で除した風速変動値は0.1以下であり、I 発電所対象実験におけるプライミング発生時($\sigma/\text{風速}=0.335$)の1/3以下と、変動は小さかった。

これらのことから、全条件において通気が確保されていると考えられる。

(3) 縦断曲線部(単曲線)に作用する圧力

高流速を対象として縦断曲線部に単曲線を用いる場合、水路に大きな推力が作用する。管路流であれば推力を計算することは可能であるが、管内を旋回する高速射流の場合には、作用圧力はその水面形に支配されるため、縦断曲線部の水圧を測定した。

測定結果から、縦断曲線部(単曲線)の最大水圧を水平曲線部始点の速度水頭で除した圧力係数は、 A_w/A_0 の増加、 v_w の減少に伴って増加し、 $v_w=300\text{cm/s}$ 以上になると0.13~0.26程度となった。

5. まとめ

I 発電所の水理模型実験と現場計測で得られた結果は以下のとおりである。

- ・余水路コンクリートが想定していたよりも劣化していなかったために、実測した水深は実験値の約65%となった。この水深から逆算して粗度係数を算出すると、0.01程度となった。
- ・余水路への連行空気量は、水槽上層などにより吸気しずらく、実測値が実験値の約55%となった。この連行空気量は、設計流量の1.8~2.5倍と実験値の約50%である。
- ・実物においても、プライミング現象は発生しなかった。

I 発電所対象の実験結果は、実測値から判断すると通気を確保する観点からは安全側となっており、実験が妥当だったことを裏付けている。

I 発電所をモデルとした余水路線形実験から得られた結果の概要は、以下のとおりである。

- ・全ての条件において、水流の跳ね返りによる閉塞は見られなかった。
- ・落差が大きくなると、連行空気量は増加する。
- ・水平曲線の曲率半径が小さいと、連行空気量・水路に作用する推力は大きくなるが、圧力の変動は小さくなる。
- ・縦断曲線に放物線を挿入すると、対象流速を越えた場合に圧力の変動が大きくなる。
- ・流積が大きくなると、圧力の変動が大きくなる。
- ・流速が大きくなると、水路に作用する推力は大きくなるが、圧力の変動は小さくなる。

以上の結果から、今回設定した条件下においては流水による閉塞は生じずプライミング現象のような圧力変動は発生しないので、アンカーブロックに作用する推力に問題が無ければ、改造余水路ルートを地形に添う形状とすることも可能と考えられる。

6. 今後の課題

地形、地質等の制約で縦断部始点と終点の高低差を十分にとれない地点で、縦断部に対象流速の放物線を用いると、比較的流速が大きい場合には立坑突入角が大きくなり、通気に支障を来すことが予測される。このため、今後は任意の地点に適用できる線形条件の確立を目指し、以下に示す項目について検討を行う予定である。

- ・縦断曲線の曲率半径が5B以下における通気の限界
- ・上流空気孔の面積の違い(通気条件)による通気特性

参考文献

- 1) 福原華一：水力発電所余水路立坑型減勢工の水理設計法，電力中央研究所研究報告 No. U88018, 1988
- 2) 峯田稔，高橋昌之：高速湾曲水路の設計に関する実験的研究，土木学会北海道支部論文報告集，pp. 560-565, 1994
- 3) 竹沢隆一：尾添発電所余水路実験，電力土木No.183, pp. 31-40, 1991
- 4) 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)，京都大学防災研究所年報，第24号 B-2, pp. 251-263, 1979
- 5) 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, pp. 437-442, 1987