

発電停止を必要としない沈砂池土砂排除用渦動排砂管に関する研究

STUDY OF SAND FLASHING VORTEX TUBE FOR THE SAND BASIN NEEDLESS STOPPING GENERATION

熊谷 洋¹, 小田桐悦郎²
Yo KUMAGAI, Etsuro ODAKIRI

¹正会員 工修 東北電力株式会社 送変電建設センター (旧研究開発センター土木研究G)
〒 980-0811 仙台市青葉区一番町3丁目7番23号明治生命仙台ビル7F
² 東北電力株式会社 研究開発センター土木研究G
〒 980-0841 仙台市青葉区中山7丁目2番1号

A sand basin installed in the hydroelectric plant is designed so as to be able to settle sand beyond a grain size so that degradation of discharge ability of the water channel and abrasion of water pressured pipe and turbine can be restrained. However, performance of the power plant is lowered when sand flowing in a sedimentation basin is beyond the designed value because of frequent sand removal works. Instead of the conventional work using sand removal gate, we propose here a vortex tube method with which electric generation operation is not interrupted during sand removal work, showing some related design methods.

Key Words: Sand basin, Vortex tube, and Hydro power plant, Sand flash

1. まえがき

一般に流れ込み式水力発電所には, 取水口下流に沈砂池が設けられ, 導水路・水槽・水車等への土砂流入を防止している。

沈砂池は, 取水口から水路内に流入する土砂量を推定し, 沈砂池内で任意の粒径以上の土砂が沈降・滞留・排除できるよう計画され, 導水路の通水能力の低下や水圧鉄管・水車の摩耗等を防止する仕組みとなっているが, 沈砂池内への流入土砂が計画値を超える場合には, 設備の機能維持のための排砂作業頻度が高くなり, 発電所の設備利用率を低下させることとなる。

本研究では, 従来の排砂門による排砂作業に替わる方法として, 排砂作業のために発電停止を必要としないシステムである親水路付渦動排砂管を提案し, 親水路付渦動排砂管の設計手法の提案を行った。

親水路付渦動排砂管は, 管の一部にある幅の狭いスリットから土砂濃度の高い底面付近の水を取水し, これをスリットからの流入に伴って生ずるらせん流¹⁾と管軸方向すなわち親水路からの流れにより生ずる壁面噴流およびらせん流を利用して土砂を排出するものである。親水路付渦動排砂管の排砂原理を図-1に示す。

親水路付渦動排砂管は図-1で示す通り, スリット管と親水路の大きく2つに分けられる。親水路は, 形状的にスリット管に対して斜め上方に立ち上げかつ偏心して取り付けられるのが特徴である。親水路管径は, スリット管内で壁面噴流およびらせん流の発生を促すため, スリット

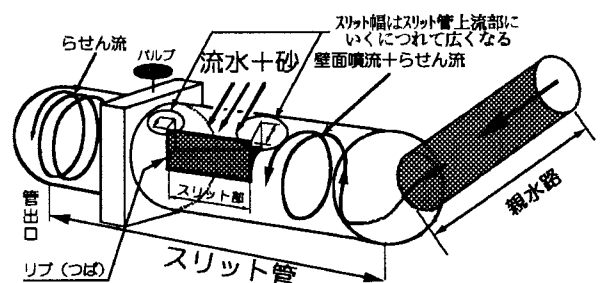


図-1 親水路付渦動排砂管の概略図

2. 親水路付渦動排砂管の原理

管よりも細くなっている。スリット管は、スリット全体から一様に水を流入させるため、スリット幅がスリット管上流部にいくほど広がっている²⁾。また、らせん流の発達を促進するため、スリット管に図-1で示す通りリブを取り付けている。親水路はスリット管より管径を細く、スリット管に対して偏心して取り付けられている。

また、親水路付渦動排砂管は、主に発電所沈砂池や取水口前面に設けられることを前提にするため、親水路付渦動排砂管の最適形状を検討する場合、1)管の入口に砂れきがつまらない、2)流入した土砂が管内に堆積せず十分輸送される、3)排砂効率が良い、を考慮する必要がある。

3. 水理模型実験

(1) 実験装置

今回の水理模型実験は、花山発電所沈砂池内に設置している親水路付渦動排砂管に対するもの⁴⁾であり、模型縮尺は1/2とした。渦動排砂管の流れは、重力と慣性力に支配されることから、フルードの相似則を用いた3次元模型により行った。原型と模型諸量の縮尺比を表-1に示す。実験装置の概略図を図-2に示す。図-3に親水路付渦動排砂管の概略を示す。レイノルズ数は約 1.0×10^5 であり、管路内の流れは十分に乱流状態である。

(2) 実験条件

実験条件は、表-2に示す通りである。なお、スリット管の管径は5cm、水位条件は、90cmから150cmとした。排砂試験で使用する土砂は2mmふるいを通過したものを用いた。

(3) 実験方法

親水路付渦動排砂管の全流量および親水路からの流入量は、水位条件90cmから150cmの間の約10cmピッチで測定を実施した。水位は、図-2に示す通りスリット管中心位置から水面までの距離とする。出口バルブを全開にした状態でそれぞれの水位に対応するべく流量をスリット部水槽に流入させ、水位変動が落ちついた時点でマンメータを用いて水位を測定する。流量は電磁流量計により測定した。

排砂確認試験も実施した。2mmふるいを通過した土砂を用い、渦動排砂管内部に砂が管径の半分までの高さに堆積し、さらにスリット管の天端からスリット管全体にわたり砂を約10cmの厚さで堆積させた状態から土砂の排砂の可否に関する試験を行った。排砂試験の状況はビデオカメラを用いて記録した。

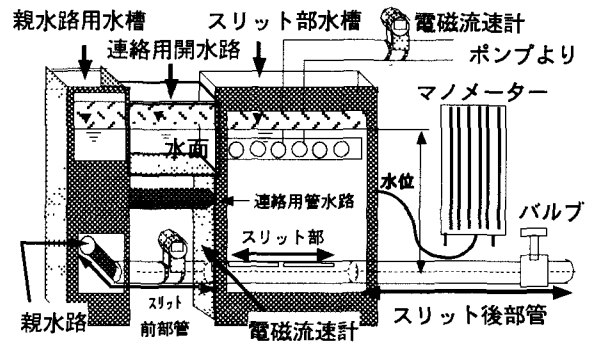


図-2 実験装置概略図

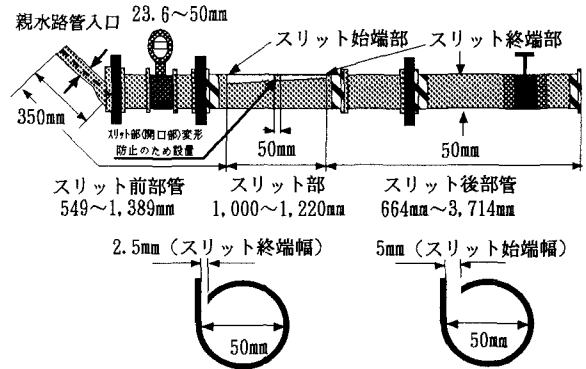


図-3 横から見た渦動排砂管の概略図

表-1 原型と模型諸量の縮尺比

	縮尺比
長さ L	$K_L = L_p / L_m = 2$
流速 V	$K_V = V_p / V_m = K_L (1/2) = 1.414$
流量 Q	$K_Q = Q_p / Q_m = K_L (5/2) = 5.657$
粒径 d	$K_d = d_p / d_m = 2$
時間 t	$K_t = t_p / t_m = K_L (1/2) = 1.414$

表-2 実験条件

実験ケース	スリット長	測定項目	親水路管径(mm)	スリット前部管長 L1(m)	スリット後部管長 L2(m)
Case-1	1.0m	親水路流量	23.6, 28.1,	1.389	0.664
		全流量	36.1, 42.1, 50		
Case-2	1.22m	親水路流量	23.6, 28.1,	1.351	0.482
		全流量	36.1, 42.1, 50		
Case-3	1.0m	親水路流量	23.6, 28.1,	0.587	2.168
		全流量	36.1, 42.1, 50		
Case-4	1.22m	親水路流量	23.6, 28.1,	0.549	1.986
		全流量	36.1, 42.1, 50		

4. 流量係数および掃流力係数の考え方

今回、水理模型実験から親水路流量および親水路付渦動排砂管の全流量を電磁流速計を用いて測定したが、これらの結果から親水路付渦動排砂管の流量係数および掃流力などの物理量を求める方法について述べる。親水路付渦動排砂管から流出する全流量 Q_{total} 、親水路流量 Q_{oya} 、スリットからの流量 Q_{slit} は、オリフィスの流量を求める式と同様に、式(1)、式(2)、式(3)で表すことができる。

$$Q_{total} = C_{total} \times a_{total} \times \sqrt{2gH} \quad (1)$$

$$Q_{oya} = C_{oya} \times a_{oya} \times \sqrt{2gH} \quad (2)$$

$$Q_{\text{slit}} = (C_{\text{total}} \times a_{\text{total}} - C_{\text{oya}} \times a_{\text{oya}}) \times \sqrt{2gH} \quad (3)$$

H: 総落差 (水面～スリット管出口中心), C_{oya} : 親水路流量係数, C_{total} : 全流量流量係数, a_{oya} : 親水路管径断面積, a_{total} : スリット後部管径断面積

親水路流入口から親水路とスリット管との接合部付近まで, すなわち親水路の動水勾配を求める。マンニングの式より動水勾配は式(4)で表される。

$$I = n^2 \times R^{-\frac{4}{3}} \times v^2 \quad (4)$$

n: 親水路の粗度係数(n=0.01), R: 親水路の径深, v: 親水路管内平均流速

親水路内平均流速は, 径深を用いて式(5)となる。

$$v = \frac{Q_{\text{oya}}}{a_{\text{oya}}} = \frac{Q_{\text{oya}}}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{Q_{\text{oya}}}{4\pi \left(\frac{D}{4}\right)^2} = \frac{Q_{\text{oya}}}{4\pi R^2} \quad (5)$$

D: 親水路管径, 径深 $R=D/4$ (円管の場合)

式(4), 式(5)から動水勾配 I が求められる。

$$I = \frac{n^2 Q_{\text{oya}}^2}{16\pi^2 R^{\frac{16}{3}}} \quad (6)$$

親水路の掃流力は式(7)で表される。

$$\tau = \rho g R I = \rho g R \frac{n^2 Q_{\text{oya}}^2}{16\pi^2 R^{\frac{16}{3}}} = \frac{\rho g n^2 Q_{\text{oya}}^2}{16\pi^2 R^{\frac{13}{3}}} \quad (7)$$

式(2)を式(7)に代入し, 整理すると式(8)になる。

$$\tau = \frac{\rho g n^2}{16\pi^2 R^{\frac{13}{3}}} (C_{\text{oya}} \times a_{\text{oya}} \sqrt{2gh})^2 = \frac{2\rho g^2 n^2 C_{\text{oya}}^2 a_{\text{oya}}^2}{16\pi^2 R^{\frac{13}{3}}} H \quad (8)$$

式(8)は, 親水路から流入する水流により生ずる掃流力を表す。親水路の掃流力の比例係数を掃流力係数と定義し, 掃流力係数 C' と置いて式(8)を整理すると, 式(9)で表される。式(9)より, 親水路の掃流力は, 水深 H に比例することがわかる。

$$\tau = \frac{2\rho g^2 n^2 C_{\text{oya}}^2 a_{\text{oya}}^2}{16\pi^2 R^{\frac{13}{3}}} H = CH \left(C' = \frac{2\rho g^2 n^2 C_{\text{oya}}^2 a_{\text{oya}}^2}{16\pi^2 R^{\frac{13}{3}}} \right) \quad (9)$$

5. 実験結果

(1) H - Q 特性

スリット開口部の断面積および親水路管径が一定の場合, 親水路付渦動排砂管から流出する水の量は重力に支配されるためオリフィス同様, 流量は水深の1/2乗に比例する。図-4, 図-5に全流量および親水路流量のH-Q特性を示す。L1はスリット前部管長, L2はスリット

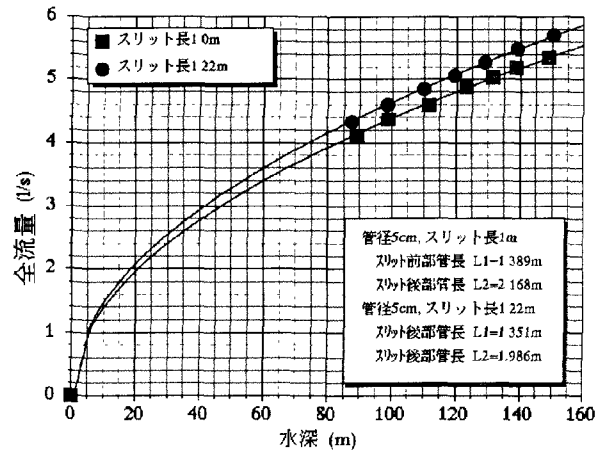


図-4 H-Q特性 (全流量)

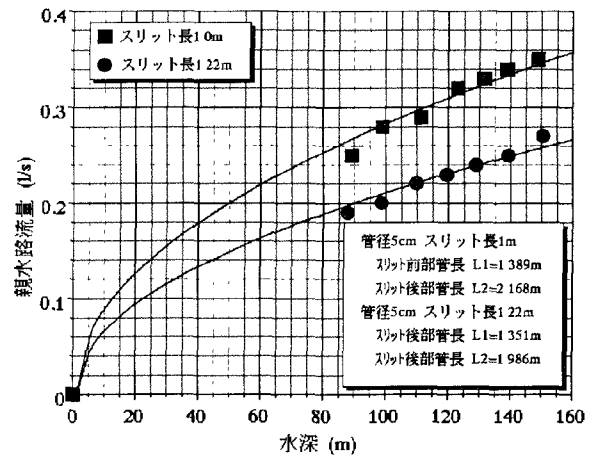


図-5 H-Q特性 (親水路流量)

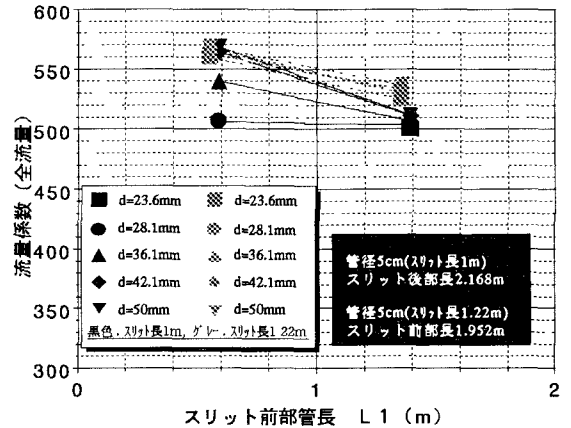


図-6 スリット前部管長の影響

ト後部管長である。全流量および親水路流量とともに, 流量が水深の1/2乗に比例していることがわかる。

(2) 流量係数へのスリット前部管長の影響

今回の水理模型実験でスリット前部管長が短いケースは, 電磁流量計を設置不可能であったため, 全流量でスリット前部管長の影響評価を実施した。

図-6にスリット長1m, 1.22mの場合におけるスリット前部管長の影響を示す。スリット前部管長が短くなると全流量流量係数が増加する。しかし, スリット長が1mで親水路管径が28.1mmの場合スリット前部管長短縮に伴う全流量

係数の増加はあまり見られなかった。

(3) 流量係数へのスリット後部管長影響

図-7にスリット後部管長の違いによる全流量の流量係数、図-8にスリット後部管長の違いによる親水路流量の流量係数を示す。全流量の流量係数は、スリット後部管長が0.664mから3.714mに増加するにつれてほぼ線形的に減少する。親水路の流量係数は、スリット後部管長が0.664mと3.714mを比較した場合、スリット後部管長3.714mの流量係数はスリット後部管長が0.664mの流量係数と比べて約2割小さい程度である。したがって、スリット後部管長は、親水路流量係数に与える影響は小さいと考えられる。

(4) 流量係数への親水路管径影響

図-9に親水路管径の違いによる親水路流量の流量係数を示す。親水路の流量係数は、親水路管径28.1mmの場合、最大になることがわかる。

(5) 掃流力へのスリット後部管長影響

スリット後部管長の影響の検討を、式(9)で定義した掃流力係数で説明を行う。図-10に示す通り、スリット後部管長が短いほど掃流力係数は大きくなり、スリット後部管長が短くなるほど掃流力係数の増加する割合が大きくなることわかる。

(6) 掃流力への親水路管径およびスリット長の影響

図-11にスリット長1m、スリット管径5cmの場合の親水路入口部管径とスリット後部管長ごとの掃流力係数の関係を示す。図-11より、全てのスリット後部管長において親水路管径が28.1mmの場合に掃流力係数が最大になった。したがって、親水路管径28.1mmの場合、排砂効率が最大であることがわかる。

図-11に管径5cmの場合のスリット長と掃流力係数との関係を併せて示す。スリット長が2割増加すると、図-8より親水路流量係数は約2割減少する。式(9)より掃流力係数は親水路流量係数の2乗に比例することから、掃流力係数は約4割減少する。このことから、スリット長は、親水路鉛直立ち上げ部とスリット管の接合部掃流力に与える影響が極めて大きく、親水路付渦動排砂管の性能を決定する要因になると考えられる。

(7) 排砂機能確認

表-3に排砂試験結果を示す。排砂試験の結果、親水路管径28.1mmの場合、最も効率よく排砂可能であった。理由は次の通りである。

a. 親水路管径28.1mmの場合と比較して親水路管径とスリット管径の比率が大きくなると親水路側からの流入

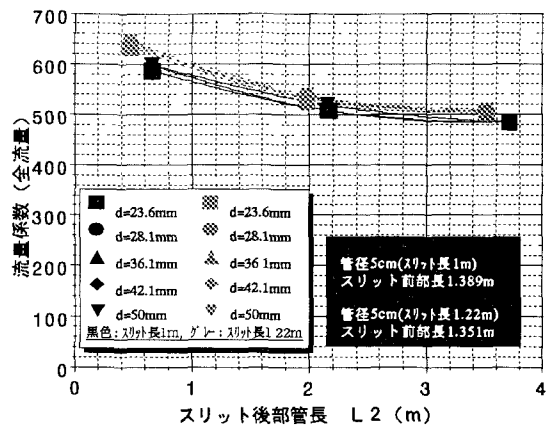


図-7 スリット後部管長と流量係数（全流量）

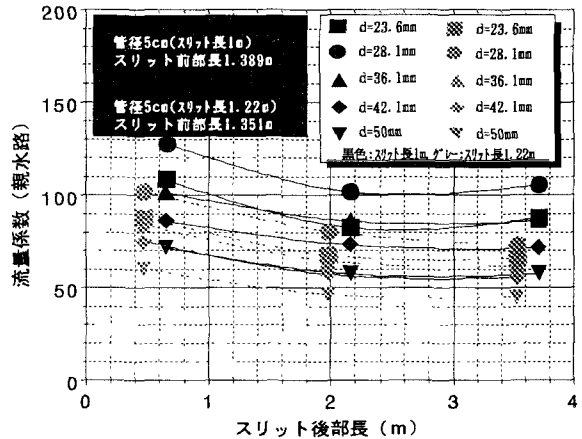


図-8 スリット後部管長と流量係数（親水路）

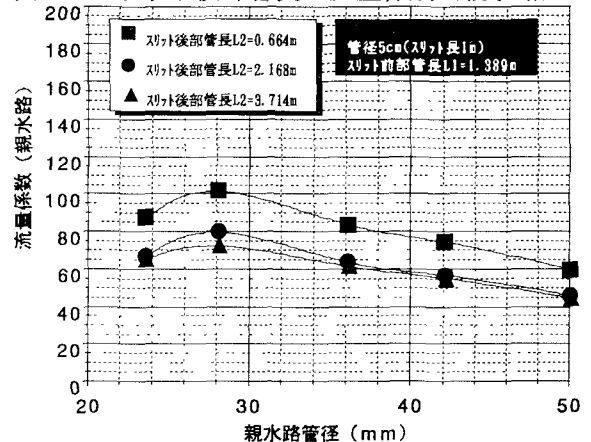


図-9 親水路管径と流量係数（親水路）

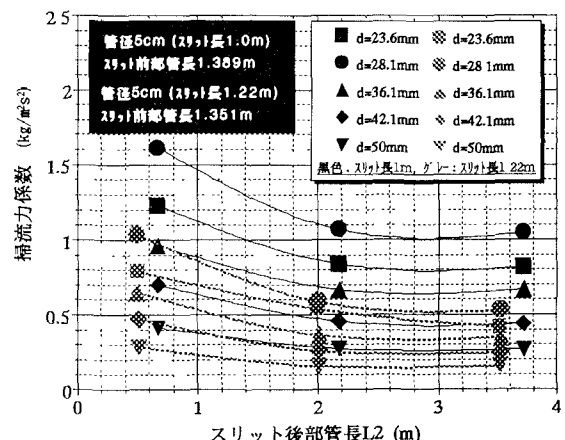


図-10 スリット後部管長と掃流力係数

によるらせん流の形成ができないが、親水路管径 28.1mm の場合、うまくらせん流が形成されている。
 b. 親水路管径 28.1mm の場合、図-9、図-11 より流量係数および掃流力係数の値が最大になる。すなわち、らせん流の生成がピークに達していると考えられる。

また、スリット長を 1.22m の場合、どの親水路管径に対しても完全に土砂を排砂することはできなかった。

これは、スリット 1.22m の場合、スリット始端部から 20cm までの間において十分な水の流入が行われなため、その区間においてらせん流の発達が十分でなく、土砂を排砂するのに十分な掃流力が得られていない状態であると考えられる。

例として表-3 で灰色部分で示される箇所に関して掃流力を計算した。スリット始端部における掃流力は式(9) から算出される。計算結果は以下の通りである。限界掃流力はシールズの式から算出した。実験で使用した土砂粒径 2mm の場合、限界掃流力 τ_c は $0.99(\text{kg}/\text{ms}^2)$ である。

a) スリット長 1 m :

($n=0.01$, 親水路流量係数は図-9 より 101)

$$\tau = \frac{2 \times 1000 \times 9.8^2 \times 0.01^2 \times 101^2 \times (0.0281^2 \times \pi/4)^2}{16 \times \pi^2 \times \left(\frac{0.0281}{4}\right)^{\frac{1.8}{3}}} \times 1.35$$

$$\approx 1.4(\text{kg}/\text{ms}^2) > 0.99(\text{kg}/\text{ms}^2) = \tau_c \longrightarrow \text{排砂する}$$

b) スリット長 1.22 m :

($n=0.01$, 親水路流量係数は図-9 より 80)

$$\tau = \frac{2 \times 1000 \times 9.8^2 \times 0.01^2 \times 80^2 \times (0.0281^2 \times \pi/4)^2}{16 \times \pi^2 \times \left(\frac{0.0281}{4}\right)^{\frac{1.8}{3}}} \times 1.35$$

$$\approx 0.75(\text{kg}/\text{ms}^2) < 0.99(\text{kg}/\text{ms}^2) = \tau_c \longrightarrow \text{排砂しない}$$

以上の結果からも排砂しないことが明らかである。

6. 実験結果のまとめ

親水路付渦動排砂管の水理模型実験結果をまとめると、以下の通りとなる。表-4 に水深などの諸元が各流量に与える影響の一覧を示す。

(1) 全流量は水深の 1/2 乗に比例し、全流量の流量係数は、スリット後部管が増加するにつれて減少する。

(2) 親水路の流量係数は、スリット後部管長の影響をほとんど受けない。

(3) 親水路の流量係数は、親水路管径が 28.1mm の場合最大となる。

(4) スリット長が親水路の流量係数に与える影響は大きい。

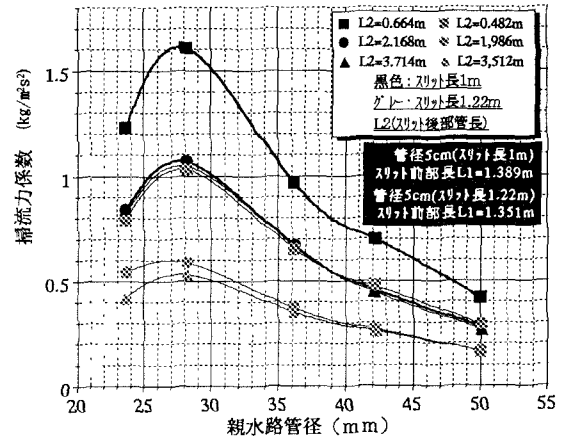


図-11 親水路管径とスリット後部管長と掃流力係数

表-3 排砂試験結果

排砂状況	スリット長 1 m				スリット長 1.22 m			
	スリット後部管長 2.188 m				スリット後部管長 1.988 m			
	スリット始端部	親水路内	スリット始端部	親水路内	スリット始端部	親水路内	スリット始端部	親水路内
23.6	○	○	○	×	△	×	△	×
28.1	○	○	○	○	△	×	△	×
36.1	○	○	○	△	△	×	△	×
42.1	○	○	○	△	△	×	△	×
50	○	○	○	△	△	×	△	×

表-4 各項目の影響

	親水路流量	スリット流量	全流量 (全体流量)
水深	1/2 乗に比例	1/2 乗に比例	1/2 乗に比例
親水路管径	比例 (流量係数は $d=28.1\text{mm}$ で最大)	一定	一定
スリット前部管長	反比例	一定	一定
スリット長	反比例	比例	比例
スリット後部管長	反比例	反比例	反比例

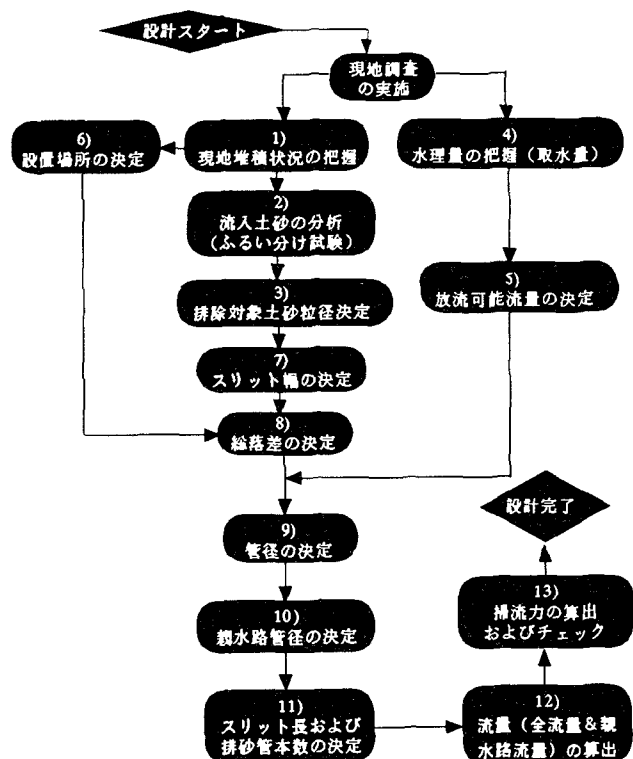


図-12 渦動排砂管設計フロー

- (5)掃流力は、水深に比例して大きくなり、スリット後部管長が短いほど大きくなる。
- (6)親水路管径 28.1mm で排砂効率が最大である。
- (7)親水路付渦動排砂管を設計する場合、可能な限りスリット前部管長を短くする必要がある。
- (8)親水路付渦動排砂管の性能を発揮できる限界のスリット長は 1m である。
- (9)排砂機能確認試験を行った結果、スリット長 1m、親水路管径 28.1mm の場合、親水路付渦動排砂管の機能を完全に満足したが、スリット長 1.22m の場合、いずれのケースも親水路管径に対して排砂管の機能を満足しない。

7. 設計フロー

実験結果から、親水路付渦動排砂管の各諸元の決定方法は、以下に示すとおりである。図-12に親水路付渦動排砂管形状の決定までのフロー³⁾を示す。

(1)現地堆積状況の把握

現地堆積状況の把握は、排砂管の設置場所を決定する際に利用するので、発電停止した後の排砂作業前に行う。その時に行う事は、1)土砂堆積状況観察(沈砂池および取水口上流部の様子を含む)、2)土砂採取の2つである。

(2)流入土砂の分析(ふるい分け試験)

土砂採取を行った後にふるい分け試験を行い、流入土砂の粒度分析を行い、累加重量百分率、 d_{50} 、 d_{65} 、細骨材の比重および吸水率を算出する。また、流入土砂の比重も算出する。

(3)排除対象土砂粒径の決定

対象土砂粒径は、現地堆積状況および採取した土砂の累加重量百分率から判断する。土砂が大量に堆積している地点を対象に排除対象土砂粒径を算定する。

(4)使用水量の把握

沈砂池の使用水量、河川維持流量の大小により、排砂管1本あたりの放流可能流量を決定するので、使用水量の値は必ず把握する。

(5)放流可能流量の設定

排砂管一本あたりの放流可能流量は、発電に支障のない範囲で設定する。使用水量の3%～5%程度に設定すれば良いと考えられる。

(6)設置場所の決定

設置場所は現地堆積状況から判断して決定する。

(7)スリット幅の決定

スリット始端幅とスリット終端幅の比は、スリット始端幅:スリット終端幅 = 2:1⁴⁾とする。

沈砂池内部に木の葉および木の枝が流入する可能

性を有する場合、目詰まり防止の観点からスリット始端幅は 20mm 以上、終端幅は 10mm 以上とする。

(8)総落差の決定

総落差Hの算定方法は、沈砂池内の水面高さから渦動排砂管出口部の管断面中心高さの差とする。

(9)管径の決定

スリット管径は、放流可能流量(使用水量の3%～5%程度)と総落差から決定する。

(10)親水路管径の決定

親水路管径は、スリット管径の60%とする。なお、塩化ビニール管や鉄管の管径のサイズが計算で求めたサイズと一致しない場合、計算で求めた親水路管径に最も近いサイズを使用する。

(11)スリット長および排砂管本数の決定

スリット長は、現地観察の状況把握結果から土砂排除を行いたい幅を算出し、それをスリット長とするが、沈砂池の幅が広く、1本の渦動排砂管でまかないきれない場合、複数本の渦動排砂管を配置する。

(12)流量(全流量&親水路流量)の算出

全流量および親水路流量は、図-7,8から流量係数を求め、式(1)、式(2)に代入して算出する。

(13)掃流力の算出およびチェック

スリット始端部掃流力は、(12)で算出された流量係数の値を式(9)に代入して算出し、その値を限界掃流力と比較し掃流力をチェックする。

8. あとがき

現在、当社管内において渦動排砂管を設置した地点の運用状況は、パトロール時のみの排砂作業では、急な出水により大量の土砂が沈砂池内に流入した場合、渦動排砂管の機能が低下する事態に陥る場合がある。そのため、土砂流入を検知した時点で自動でバルブを開閉するシステムなど、渦動排砂管機能低下を防止するシステムを考案する必要がある。

9. 参考文献

- 1)吉良八郎: ダムの堆砂とその防除, 森北出版, 1982.9
- 2)荒木正夫: スリット管の水理に関する一考察, 土木学会誌, 41-3, PP107-112, 1956
- 3)熊谷洋: 沈砂池排砂機構に関する研究, 東北電力(株)研究開発センター報告No.98004, 1998.7
- 4)佐々木牧夫: 沈砂池排砂方法の検討に関する研究, 東北電力(株)技術研究所報告(依頼研究報告) No92001, 1992.

(1998.9.30受付)