学位論文題名

管路内開水路における空気連行特性に関する研究

学位論文内容の要旨

本論文は、余水路の設計に関する重要な課題の一つである管路内開水路の射流の流れに連行される空気の連行特性について研究を行ったものである。

流れ込み式水力発電所では、ダム式のような取水口ゲート操作による発電用水の取水量制御は頻繁ではない。従って発電機の緊急停止時には、人為的にゲート操作をするまでは緊急停止する前の流量を取水していることになる。このような時のゲート操作を遠隔でできる発電所は少なく、ゲート操作員が直接取水口でゲート操作をしている。流れ込み式発電所は市街地から離れていることが多いことから、移動にかなりの時間を要する。また、発電所取水口から放水口までの区間は、河川流量の一部が発電用水に使用されることから減水区間となっており、河川流量の増加が人為的な場合には河川法によりその上限値が定められている。このようなことから、発電機緊急停止から取水口ゲート全閉まで多くの時間を要し、場合によっては4時間以上になることもある。

発電機停止から取水口ゲート全閉までの間における発電用水の安全な処理の1つとして発電機水車を迂回する余水路を別に設ける方法がある。余水路は、地形および地質構造等を考慮して、水平部と鉛直部を組み合わせで作られ、通常、上部半円下部矩形の管路で、水流は管路内の開水路となるように設計される。

第1編では模型実験と現地計測を実施し、余水路内の空気連行特性に関する検討を行った。

水流は、大きな位置エネルギーを持つことから高速流となる。このような水流が水平部と鉛直部を結ぶ屈曲部では、単純な線形として施工費を少なくする等の理由から、水流が鉛直管に衝突して跳ね返る構造となっている。このため流れの一部が水平管に逆流することで鉛直管の通気断面の閉塞が生じやすくなる。鉛直管閉塞は、管内を水流によって連行される空気流を遮断する。この結果、間欠的に空気流が遮断されることになり、脈動流を誘発する。

連行空気量は、余水路内で発生する最大の流速に依存し、通常、鉛直部で最大流速が生じる。このため、水平部では流速よりも空気速度(以下、風速)の方が大きくなり、通気断面内の圧力変化が生じ、この場合にも脈動流を誘発する。

脈動流は、振動による構造物の耐久性の問題、および騒音による環境への問題へと繋がっていく。従って余水路の設計には、まず通気断面を確保することが重要である。加えて、連行空気量を精度良く推定することも必要になってくる。

同じ様な流況となる構造物としてダム放流管があるが、余水路の場合は複雑な水路線形となることが多く、流況や連行空気量をダム放流管の考えに当てはめて精度良く予測することはできない。

本論文では、余水路のうち鉛直管閉塞となる線形について、既往の実験結果を参考に水平曲線と組み合わせて鉛直曲線を水流が余水路断面方向に旋回しながら落下させることにより、余水路中心部で通気断面を確保する新しい試みを行った。模型実験によって水理量を変化させ、連行空気量と鉛直曲線の水面形を測定し解析した。また、模型実験と現地計測の結果から、連行空気量の特性を検討した。

第2編では、水力発電所余水路系のうち、特に鉛直管減勢工内を落下する流れに主眼をおいた計算法の開発を行った。この鉛直管内流れは、自由落下する水流とこれに連行される空気流が混合する気液混相流である。余水路系の鉛直管には落差100mに達するものもあり、対象としている気液混相流は相似則がまだ確立されていないことから、水路設計では模型実験を用いて実規模の現象を予測しているのが現状である。

このようなことから、数値解析の適用を行った。自由落下する流れに対しては、構造格子や非構造格子を用いた差分法や有限要素法などのEuler型に比べて、計算点を追跡するLagrange型が有効と考えられる。更に、複雑な混相状態とその変形の大きさを考えて、これらの表現に優れている粒子法を採用することにした。本研究では、越塚の方法(MPS法)を参考に新しい粒子法の開発を行った。

越塚モデルは通常の圧力勾配重視型である。しかし、鉛直管自由落下流では重力と気液間の相互干渉が主要素となり、通常の管・開水路流に比べて圧力勾配の役割は小さい。この点を考慮して新しい考え方を導入するが、余水路系は管・開水路流も含むので、圧力勾配流にもできる限り対応させる必要がある。越塚モデルは、ある粒子から一定距離内の全粒子がその粒子に圧力作用を及ぼすいわば遠隔モデルで、ある面積内の粒子数が一定になるようにPoisson方程式を解いて圧力分布を定めている。

これに対して本モデルは近接した粒子(二次元の場合、4~6個)からのみ斥力を受ける近接モデルである。このモデルでは斥力の作用により数値上粒子間距離が大きくなり、真空に対応する状態が生ずることがある。この状態は実流体では周辺流体の作用により阻止されるので、この作用をモデル化した引力モデルの導入が考えられる。

粒子はある地点の流れを代表するもので、ある半径をもった円(二次元の場合)とする。これらの粒子群の間にも流体が満たされているが、流れの計算は粒子についてのみ行う。本論文では、引力モデルを用いず斥力モデルのみを用いた計算モデルを二次元流れに適用し、実際の水理現象を説明できる結果を得た。

これらの知見は、今後の最適な余水路設計の提案、さらにはダム放流管など気液二相流の解析に極めて有用な資料を与えるものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 板 倉 忠 興
副 査 教 授 佐 伯 浩
副 査 教 授 藤 田 睦 博
副 査 助 教 授 黒 木 幹 男

学位論文題名

管路内開水路における空気連行特性に関する研究

本論文は、流れ込み式水力発電所余水路の設計に関する重要な課題の一つである管路内開水路の射流に連行される空気について、模型実験と現場計測からその特性を求め、新しい計算手法を提案して実際の現象を予測するモデルの開発を行ったものである。

第1編は、模型実験と現地計測による余水路内の空気連行特性に関する研究である。

流れ込み式水力発電所では発電機が緊急停止すると発電所とは別ルートで発電用水を下流へ流すが、この時多量の空気を連行する。余水路内の通気断面が確保されていない場合や必要以上に連行空気量が多いと水流は脈動し、余水路ならびにその周辺への振動や騒音の原因となる。余水路内のような気液二相流は相似則が成り立たないため、新たな計算手法の開発が必要である。

新しい計算手法を提案するため、本編では模型実験と現場計測を行い、連行空気量の特性を調べている。高速流となる余水路下流端付近の凸となる鉛直曲線では通気断面を塞ぐことが予想されたことから、今回対象にした余水路線形は鉛直曲線の上流の水平曲線と組み合わせて、水平曲線で水流を旋回させ鉛直曲線で水路断面に通気断面を確保する新しい試みを行っている。

これらの結果、余水路内の水流が脈動を生じないで安定に流下していることを確認している。また連行空気量は水平部流速、流量、水平部流積比ならびに水平曲線曲率半径との関係は認められなかったが、凸となる鉛直曲線の水面形の違いにより傾向が異なることを模型実験で導き、現場計測でも同じ傾向になることを得ている。

第2編は、近接モデルを使った粒子型数値計算法の開発に関する研究である。

数値解析には、構造格子や非構造格子を有する差分法や有限要素法などの Euler 型と、計算点を追跡する Lagrange 型がある。気液二相流では水面の変化を把握することが重要であり、Euler 型では水面の計算格子の変更が必要となる。また Lagrange 型として越塚のモデルがあるが、連続条件を満たすために圧力に関する Poisson 方程式を陰的に解いていること、水面の定義が曖昧なことなど、気液二相流に適用するには問題点がある。また越塚モデルは圧力勾配重視型であり、余水路鉛直管のように重力と気液境界面の相互干渉が主要素となる流れ場には、適用が難しい。

今回これらの問題点を解決するために、連続式が不要で、陽的に解くことのできる Lagrange 型の新しい計算手法として、Navier - Stokes 式によらず、斥力を用いたモデルを試みている。

このモデルは、近接する粒子からのみ斥力を受ける近接モデルである。2つの近接する粒子に作用する力から基本式を導き、基本式を無次元化することにより、パラメータの性質を調べている。このモデルを単相流として二次元開水路流、気液二相流として鉛直管落下流で計算しており、概ね実現象を説明できている。またこのモデルは今後、様々な流れ場に適用できるものと期待できる。

これら本研究の成果は、今後の最適な余水路設計の提案、さらにはダム放流管など気液二相流の解析に極めて有用な資料を与えるものである。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。